

模具材料及热处理

编 著 李 奇

主 审 张岐生 钱泉森

 **北京理工大学出版社**

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书针对当前模具企业使用模具钢主要是模具企业常用的部分新型模具钢与部分进口模具钢的情况,介绍了常用模具钢的材料性能、热加工性能与热处理工艺性能。另外还系统地介绍了模具的表面强化处理技术。

本书内容较新,资料丰富,应用性较强,适应高职和中专模具专业的教学要求。

本书主要供高等院校、成人高校模具设计与制造专业的学生使用,也可供材料热处理专业以及模具设计与制造专业的技术人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

模具材料及热处理/李奇主编. —北京:北京理工大学出版社, 2007. 8
ISBN 978—7—5640—1270—0

I. 模… II. 李… III. ①模具—材料—高等学校—教材②模具—热处理—高等学校—教材 IV. TG162.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 124761 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / [http:// www. bitpress. com. cn](http://www.bitpress.com.cn)

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京国马印刷厂

开 本 / 787 毫米×960 毫米 1/16

印 张 / 13.5

字 数 / 278 千字

版 次 / 2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

印 数 / 1~6000 册

定 价 / 22.80 元

责任校对 / 陈玉梅

责任印制 / 李绍英

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前 言

本书是根据高等院校模具设计与制造专业教学计划和模具材料及表面处理课程教学大纲编写的规划教材,主要供高等院校成人高校模具专业学生使用,也可供材料热处理专业以及模具设计与制造专业的技术人员参考。

世界工业经济和科学技术的发展带动了模具制造业的发展。目前模具工业已成为现代工业发展的基础,60%~90%的工业产品都需要使用模具进行加工,许多新产品的开发和生产在很大程度上都依赖模具,特别是汽车、电子电气、机械、建材和塑料等行业。模具作为一种高附加值和技术密集型产品,其技术水平的高低已成为衡量一个企业、一个国家制造业水平的重要标志之一。

在模具的设计制造中能否合理地选用模具材料是模具制造成功的关键问题,模具材料是模具制造业的物质基础和技术基础,其中模具钢是传统的模具材料,其品种、规格、质量对模具的性能、使用寿命和模具制造周期起着决定性作用。但是长期以来,许多模具生产企业对模具材料选用不够重视,对模具新材料了解不多,这是我国模具的使用寿命普遍较低的重要原因之一。

为了提高模具专业的水平,使模具专业的毕业生初步掌握模具材料和热处理技术,促进模具新材料、新工艺、新技术的广泛应用,作者参阅了许多有关教材、著作和文献资料,结合专业要求和现在模具工业材料应用状况,进行了合理地选择,编写了本书。

全书共分为五章。第1章介绍模具材料与热处理的基本概念;第2章介绍冷作模具钢及热处理;第3章介绍塑料模具钢及热处理;第4章介绍热作模具用钢及热处理;第5章介绍模具表面强化处理技术。

本书从实用的角度出发,按照模具材料的分类标准,系统、简明地介绍了传统的模具材料和目前使用效果良好且用量较大的新型模具材料;重点对冷作模具和塑料模具的工作条件、失效形式、性能要求、材料选用、工艺路线、热处理技术特点等环节作了详细地介绍。本书内容较为先进、实用,资料性较强。每章还附有一定数量的复习思考题,以供学生复习、巩固、提高之用。考虑到冷作与塑料模具的重要性及部分高职院校讲授该课程的学时情况,本书的重点为第1、2、3章,第4、5章可视情况安排。

本书由李奇编写;张岐生教授与钱泉森教授任主审。

由于作者的编写水平和实践经验有限,书中不当之处在所难免,敬请有关专家和读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 模具材料与热处理概述	1
1.1 模具及模具材料分类	1
1.1.1 模具分类	1
1.1.2 模具材料分类	2
1.2 模具钢的生产加工工艺	2
1.2.1 模具钢的冶金生产工艺	2
1.2.2 模具钢的热加工工艺	4
1.3 模具钢的性能与质量检验	7
1.3.1 模具钢的常规力学性能要求	7
1.3.2 模具钢的工艺性能要求	11
1.4 模具钢的常规热处理概述	13
1.5 模具钢进厂检验	16
1.5.1 宏观检验	16
1.5.2 显微组织检验	18
1.6 模具材料的应用及发展	19
1.6.1 国外模具材料的应用及发展	19
1.6.2 我国模具材料的应用及发展	23
思考题	29
第 2 章 冷作模具钢及热处理	30
2.1 冷作模具钢的性能要求及分类	30
2.1.1 冷作模具的性能要求	30
2.1.2 冷作模具钢的工艺性能要求	31
2.1.3 冷作模具钢的分类	32
2.2 冷作模具钢性能介绍	33
2.2.1 低淬透性冷作模具钢	33
2.2.2 低变形冷作模具钢	38
2.2.3 高耐磨微变形冷作模具钢	42
2.2.4 高强度高耐磨冷作模具钢	48
2.2.5 抗冲击冷作模具钢	50
2.2.6 高强韧性冷作模具钢	55

2.2.7	高耐磨高强韧性冷作模具钢	64
2.2.8	特殊用途冷作模具钢	68
2.2.9	硬质合金	72
2.3	冷作模具钢的选用	75
2.3.1	冷作模具钢的选用原则	75
2.3.2	常用冷作模具钢的选用	76
2.4	冷作模具钢的锻造与基本热处理技术	82
2.4.1	冷作模具钢的锻造	82
2.4.2	冷作模具的基本热处理技术	84
2.5	冷作模具热处理实例	90
	思考题	96
第3章	塑料模具钢及热处理	97
3.1	塑料模具钢的性能要求及分类	97
3.1.1	塑料模具的工作条件	97
3.1.2	塑料模具常见的失效形式	98
3.1.3	塑料模具钢的性能要求	99
3.1.4	塑料模具钢的分类	100
3.2	塑料模具钢的性能介绍	101
3.2.1	碳素型塑料模具钢	102
3.2.2	渗碳型塑料模具钢	105
3.2.3	调质型塑料模具钢	110
3.2.4	淬硬型塑料模具钢	111
3.2.5	预硬型塑料模具钢	113
3.2.6	耐蚀型塑料模具钢	117
3.2.7	时效硬化型塑料模具钢	122
3.3	塑料模具钢的选用	127
3.4	塑料模具热处理实例	129
	思考题	130
第4章	热作模具钢及热处理	132
4.1	热作模具钢性能要求	132
4.1.1	热作模具钢的使用性能要求	132
4.1.2	热作模具钢的成分特点	133
4.1.3	热作模具钢的分类	133
4.2	热作模具钢及热处理规范	134

4.2.1 热锻模用钢（高韧性、低合金）	134
4.2.2 热挤压模用钢（高热强热、中合金）	139
4.2.3 压铸模用钢（高热强热、中合金）	146
4.2.4 热冲裁模用钢（高耐磨、低合金高碳）	150
4.3 热作模具热处理实例	151
思考题	154
第5章 模具表面强化处理技术	155
5.1 模具表面化学热处理强化	157
5.1.1 模具零件的渗碳	158
5.1.2 模具零件的渗氮	161
5.1.3 碳氮共渗与氮碳共渗	165
5.1.4 渗硫及硫氮共渗	167
5.1.5 渗硼处理	167
5.1.6 渗金属	168
5.2 模具表面涂覆处理技术	172
5.2.1 金属电镀	172
5.2.2 电刷镀	173
5.2.3 化学镀	175
5.2.4 热浸镀	176
5.2.5 气相沉积	177
5.3 表面加工强化处理	181
5.3.1 火焰表面加热淬火	181
5.3.2 电解液表面加热淬火	182
5.3.3 高频表面加热淬火	183
5.3.4 激光表面强化	184
5.3.5 电子束表面强化	186
5.3.6 离子表面强化（注入合金化）	186
5.3.7 喷丸表面强化	187
5.3.8 电火花表面强化	188
思考题	190
附录	191
参考文献	207

第1章

模具材料与热处理概述

1.1 模具及模具材料分类

在现代工业生产中，模具是重要的工艺装备之一，它在铸造、锻造、冲压、塑料、橡胶、玻璃、粉末冶金以及陶瓷制品等生产行业中得到了广泛应用。由于模具的工作条件差别很大，所以制造模具的材料范围很广，从一般的碳素结构钢、碳素工具钢、合金结构钢、合金工具钢、弹簧钢、高速工具钢和不锈钢耐热钢，到适应特殊模具需要的硬质合金、钢结硬质合金、高温合金、难熔合金、马氏体时效钢、粉末高速钢、粉末高合金模具钢、铜合金、铝合金以及增强塑料等。

模具材料是模具的制造基础。合理选择模具材料，正确实施热处理工艺是保证模具寿命，提高模具质量和使用效能的关键技术。尤其是在难成形材料不断涌现、成形工件形状日益复杂化、精度要求愈来愈高的情况下，模具对材料的使用性能和热处理工艺提出了更加严格和苛刻的要求。

模具材料的选用和热处理质量与模具的使用效果、使用寿命有极大的关系。

1.1.1 模具分类

模具的分类方法很多，根据成形材料、成形工艺和成形设备不同可综合分为十大类，即冲压模具、塑料成型模具、压铸模、锻造成形模具、铸造用金属模具、粉末冶金模具、玻璃制品用模具、橡胶制品成型模具、陶瓷模具和经济模具。这种分类方法虽然较为严密，但与模具材料的选用缺乏联系。为了便于模具材料的选用，按照模具的工作条件来分类较为合理。据此，将以上十大类模具又分为如下三大类。

- (1) 冷作模具：包括冷冲压模、冷挤压模、冷镦模、拉丝模等。
- (2) 热作模具：包括热锻模、热精锻模、热挤压模、压铸模、热冲裁模等。
- (3) 成型模具：包括塑料模、橡胶模、陶瓷模、玻璃模、粉末冶金模等。

由于冷冲压模与塑料模使用广泛，在生产现场的使用比例占 80% 以上，因此本书将主要介绍冷冲压模与塑料模的选材和热处理。

1.1.2 模具材料分类

模具材料按模具类别的不同可分为冷作模具材料、热作模具材料、塑料模具材料以及其他模具材料，如图 1-1 所示；按材料的类别，可分为钢铁材料、非铁金属材料和非金属材料。由于在模具制造中主要采用的是模具钢，因此本书仅介绍模具钢的知识。

模具钢的成分、性能及用途各不相同。按其合金元素含量的不同，一般把模具钢分为碳素工具钢、低合金模具钢、中合金模具钢和高合金模具钢；按用途不同分为冷作模具钢、热作模具钢和塑料模具钢等；其他还有按性能分类的。但通常先按用途分为三大类，再按模具钢的合金元素与特点分成小类，如图 1-2 所示。



图 1-1 模具材料分类

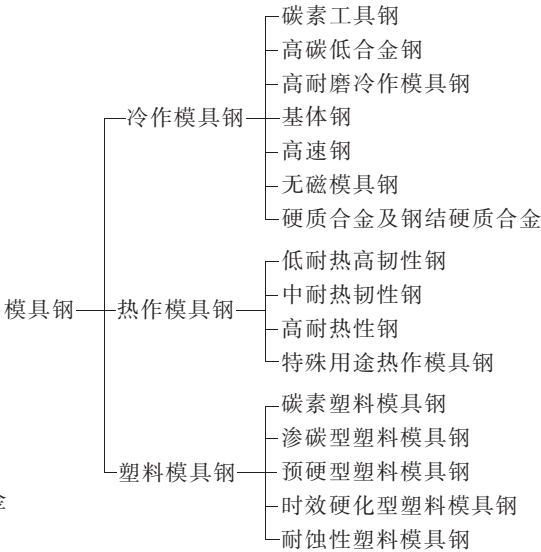


图 1-2 模具钢分类

1.2 模具钢的生产加工工艺

1.2.1 模具钢的冶金生产工艺

模具钢的冶炼主要有平炉、电弧炉、真空感应炉、电渣重熔及炉外真空处理等几种方法。目前，我国模具钢的生产主要采用电弧炉冶炼。随着炉外处理技术的发展，炉外处理生

产的模具钢数量将会越来越多。

1. 电炉冶炼

电炉炼钢的钢水化学成分容易控制，因而钢材质量好，可冶炼高级优质特殊钢材。最常用的有电弧炉和感应炉两种，但约 90% 的模具钢是用电弧炉冶炼的，所以电炉炼钢一般即指电弧炉炼钢。电弧炉炼钢的基本原理是利用石墨电极与废钢或钢液之间产生电弧，用电弧热进行熔炼，工厂中常用的是三相交流电弧炉。

2. 电渣重熔

电渣重熔生产的模具钢，其内部组织均匀，等向性能好，碳化物分布均匀细小，提高了模具钢材的质量。

电渣重熔用自耗电极是由电炉冶炼的，电极可以是锻造的，也可以是铸态的。熔炼之前，在结晶器底盘上放同一钢种的底垫，然后放入碎钢屑和混合好的固态熔剂。熔炼开始，形成熔池后，电极以一定速度上升，熔化的钢液由下而上不断凝固。在熔渣的保护下，钢液被精炼，进行去硫及排除金属夹杂物的反应过程。

熔渣的性能和用量对重熔钢的质量有重要影响，熔渣一般采用 $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 渣系。

重熔钢锭获取从表面到中心的柱状组织，由于顺序结晶，结晶组织均匀致密，消除了缩孔和疏松缺陷。重熔钢只需较小的锻造比（2~3）即能破碎铸态组织或细化组织，重熔钢锭表面无缺陷且光滑，无须表面加工即可改锻或轧制。

表 1-1 为 4Cr5MoSiV1 重熔钢和电炉钢锻材性能的比较，可以看出，经重熔钢的等向性能优异。实际应用表明，重熔钢模块在较小吨位的锤锻模上应用，与锻制的模块比较，寿命相当。但因重熔钢模块节约了锻造费用，故使用重熔钢模块经济效益较好。

表 1-1 4Cr5MoSiV1 电渣重熔和电炉钢锻材性能的比较

冶炼方式	方 向	抗拉强度 σ_b/MPa	断后伸长率 $\delta_5/\%$	断面收缩率 $\psi/\%$	V 形缺口冲击韧度 $\alpha_K/(\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$
电渣重熔	横向	1 620	4.15	2.75	4.0
	纵向	1 660	3.75	3.00	5.1
	横向/纵向	0.98	0.90 ^①	0.92	0.78
电炉钢锻材	横向	1 540	7.64	30.1	2.75
	纵向	1 610	12.7	50.1	4.63
	横向/纵向	0.96	0.60	0.60	0.60

注：① 为纵向/横向之值。

3. 炉外精炼

随着工业技术的发展，对模具钢的质量要求越来越高，因而国外对模具钢，特别是大截面模具钢多采用炉外精炼工艺。此工艺的特点是将钢液从炉内移至炉外另一个装置中继续完成去氢、脱硫以及去夹杂等工序，进行合金成分的调整和均匀化，改善缺口冲击韧度和横向

性能，缩短炉内精炼时间。

常用的炉外精炼方法有真空炉外处理及喷射冶金等技术。

1.2.2 模具钢的热加工工艺

1. 钢锭锻轧

经不同方法冶炼的模具钢浇注成所需钢锭，经过锻造或轧制生产出所需要的毛坯。钢锭锻轧的目的是：

- (1) 将钢锭加工成使用单位所要求的模具毛坯形状、尺寸或锻轧成各种规格的圆钢。
- (2) 破坏钢锭的铸态组织，焊合内部疏松、裂纹、气孔及其他缺陷。
- (3) 提高钢锭的致密性。
- (4) 破碎共晶碳化物、改善非金属夹杂物及碳化物的形态及分布均匀性。
- (5) 提高钢锭的等向性能。

2. 钢坯改锻

目前我国模块标准化程度很低，虽已有标准 JB/T 5900—1991《通用锻制模块毛坯尺寸及计重方法》，但生产企业按此标准供应的很少，绝大部分仍供应圆钢。由于模具钢含碳量及合金量很高，经钢厂锻轧后，钢坯中共晶碳化物不均匀度仍较大，偏析严重。使用单位从冶金厂购进的钢材首先应检验共晶碳化物的分布，如果不均匀度大于 3 级，则应进行改锻。最好采取多向锻拔，以便击碎碳化物并改善锻件的方向效应。

3. 锻轧工艺

表 1-2 为常用合金模具钢的锻造工艺。锻轧工艺的关键是锻造温度范围的选择，包括加热温度、始锻温度和终锻温度。提高始锻温度，有利于钢锭内部孔隙缺陷的焊合，成分均匀性好；但会使晶粒变粗，影响模具钢的力学性能。终锻温度低会导致锻件心部形成十字裂纹，但终锻温度高也会使晶粒继续长大而形成粗晶。

表 1-2 常用合金模具钢的热加工参数

钢 种	加热温度/℃		始锻温度/℃		终锻温度/℃		冷却方式	
	钢 锭	钢 坯	钢 锭	钢 坯	钢 锭	钢 坯	钢 锭	钢 坯
9SiCr	1 150~1 210	1 100~1 150	1 100~1 150	1 050~1 100	800~880	800~850	缓冷	缓冷
9Cr2	1 170~1 200	1 120~1 180	1 130~1 150	1 100~1 130	≥850	≥850	} 缓冷	} 缓冷
5CrW2Si	1 180~1 200	1 150~1 180	1 150~1 170	1 120~1 150	≥850	≥800		
Cr12	1 140~1 160	1 120~1 140	1 100~1 120	1 080~1 100	900~920	880~920		
Cr12MoV	1 100~1 180	1 050~1 160	1 050~1 120	1 000~1 060	850~900	850~900		
Cr6WV	1 100~1 160	1 060~1 120	1 050~1 120	1 000~1 080	850~900	850~900		
9Mn2V	1 140~1 180	1 080~1 120	1 100~1 150	1 050~1 100	800~850	800~850	} 空冷或缓冷	} 空冷或缓冷
MnCrWV	1 130~1 180	1 120~1 150	1 080~1 130	1 080~1 100	≥800	≥800		
CrWMn	1 150~1 200	1 100~1 150	1 100~1 150	1 050~1 100	800~880	800~850		
6W6Mo5Cr4V	1 100~1 180	1 100~1 140	1 100~1 150	1 050~1 100	≥900	≥850	缓冷	缓冷

续表

钢 种	加热温度/℃		始锻温度/℃		终锻温度/℃		冷却方式	
	钢 锭	钢 坯	钢 锭	钢 坯	钢 锭	钢 坯	钢 锭	钢 坯
Cr2Mn2SiWMoV	1 140~1 160	1 120~1 140	1 040~1 060	1 020~1 040	≥900	≥850	缓冷	缓冷
5CrMnMo	1 140~1 180	1 100~1 150	1 100~1 150	1 050~1 100	800~880	800~850		
5CrNiMo	1 140~1 180	1 100~1 150	1 100~1 150	1 050~1 100	800~850	800~850		
4CrMnSiMoV	1 160~1 180	1 100~1 150	1 100~1 150	1 050~1 100	≥850	≥850		
3Cr2W8V	1 150~1 200	1 130~1 160	1 100~1 150	1 080~1 120	850~900	850~900		
4Cr5MoVSi	1 140~1 180	1 120~1 150	1 100~1 150	1 070~1 100	≥900	850~900		
4Cr5MoV1Si	1 140~1 180	1 120~1 150	1 100~1 150	1 070~1 100	850~900	850~900		
5Cr4Mo2W2VSi	1 150~1 180	1 130~1 160	1 100~1 140	1 080~1 100	≥900	≥850		
4Cr3Mo3W2V	1 170~1 200	1 150~1 180	1 100~1 150	1 050~1 100	≥900	≥850		
W18Cr4V	1 220~1 240	1 180~1 220	1 120~1 140	1 120~1 140	≥950	≥950		
W6Mo5Cr4V2	1 180~1 190	1 140~1 150	1 080~1 100	1 040~1 080	≥950	≥900		

此外，消除疏松、枝状晶和碳化物等缺陷必须要保证一定的锻造比。锻造比的确定与模具类型有关。在热作模具钢中，为改善等向性能，一般规定锻造比大于 4；对高合金莱氏体冷作模具钢，要改善碳化物的大小及分布均匀，需要更大的锻造比；随着钢锭尺寸的增大，锻造比还应该加大。

4. 锻轧工艺应用

Cr12 型冷模钢的塑性很差，共晶碳化物的分布对使用性能影响极大。通常，为进一步降低共晶碳化物级别，冶金厂供给的模具坯料需经使用单位多次反复墩拔改锻后才能使用。如某模具配件厂用 Cr12 钢作冲模，毛坯尺寸 90 mm，不经锻造而由轧材直接加工成模具应用，共晶碳化物为 5 级以上，模具的使用寿命只有几件到几十件，最高仅 3 000 件，均以崩刃、纵向开裂或碎裂等形式脆性失效。后采用 60 mm 较小尺寸坯料，经锻粗到 90 mm 作冲模，共晶碳化物为 3~4 级，且碳化物分布均匀，模具的使用寿命达 8 000 件以上。

5. 锻造缺陷及预防

模具钢锻造中产生的主要缺陷是裂纹和开裂。裂纹的形式多种多样，形成裂纹的原因也是多方面的。一种原因是冶金缺陷造成的，如缩孔、偏析、折叠、气泡以及夹杂等；另一种原因是由于锻造工艺不当造成的。模具钢，尤其是高碳、高合金模具钢，变形抗力大、塑性差、导热性低、锻造温度范围窄以及淬透性高等都给锻造增加了难度。因此，对模具钢的锻轧工艺必须严格掌握，锻造后应缓冷并及时退火。

因锻造工艺不当而发生的问题及防止措施如下。

1) 由于加热不当而引起的锻造开裂

(1) 加热温度过高或不均匀，造成锻件整体或局部过热过烧使晶粒粗化、晶界氧化或熔化，造成锻件碎裂或表面龟裂。

(2) 升温速度过快, 造成锻件表面与内部温差过大, 从而产生很大热应力, 引起锻件开裂。

(3) 加热温度偏低或保温时间太短, 造成内、外温差大, 从而产生较大热应力, 导致心部开裂或因变形抗力大、塑性下降导致锻件棱角或平面上出现横向开裂。

防止措施: 严格执行锻造加热规范, 防止过热、过烧。对高合金模具钢锻坯, 装入时炉温不能太高, 最好冷炉装入或至少炉温 $\leq 700^{\circ}\text{C}$ 时装入, 或先在炉门口烘烤, 保温一段时间, 逐步将坯料推入炉内的加热区。锻件在燃油、气、煤的反射炉中正确的加热方法是必须使锻件与火口保持一定距离, 不能让火焰直接喷射在锻件上, 并经常翻动锻件, 保持锻件温度均匀, 防止局部过热。对已发现有过热或短时过烧的锻件, 应马上从炉内拉出空冷, 待温度稍低些再进行锻造。

2) 由于锻打变形不当而引起的裂纹

若锤击力过猛, 一次变形量过大, 变形速度过快, 锻件表层与心部变形量相差过大, 使内部拉应力增加, 则易在内部或前后端面产生十字裂纹。若变形大且过猛, 会造成锻件心部温升产生过热而开裂。

锻打时应掌握轻、重、轻三段原则, 即先、后轻打, 中间可重打。拔长时应掌握每次压下量在 $10\% \sim 20\%$ 范围内, 不能过大或过小。墩粗时, 应防止侧面形成过大的鼓形或歪斜。

3) 终锻温度不当影响锻件质量

终锻温度, 特别是最后一火的停锻温度高低将直接影响到模具锻坯的质量。终锻温度过高, 在锻件冷却过程中晶粒会继续长大, 因而降低钢的力学性能。如高速钢模具, 若终锻温度高于 950°C , 易造成粗晶组织, 在末火变形量较小时, 易出现蔡状断口, 产生裂纹。而对于中碳高合金热模钢, 如 $3\text{Cr}2\text{W}8\text{V}$ 等过高的停锻温度会使其析出的碳化物呈链状、带状或网状分布, 使力学性能显著下降。若停锻温度过低, 在低温塑性差的情况下, 锤击力过猛会使锻件当即锻裂, 过低的停锻温度, 也会产生较大的残余应力而导致锻件开裂。

终锻温度一般应稍高于 $\text{Ar}3$ 或 $\text{Ar}1$ 的温度, 以保证锻造在塑性和应力状态均较均匀的单相区进行。

4) 锻后冷却不当对锻件质量的影响

某些冷作模具钢, 如 $\text{Cr}12$ 型及 LD 钢等, 由于合金含量高, 淬透性好, 自高温空冷即可发生马氏体转变, 在内应力及变形残余应力的共同作用下, 锻后若不缓冷常易发生纵向开裂。对这类模具钢锻后必须缓冷, 如砂冷、灰冷、炉冷或锻后及时退火。

某些模具钢既有冷裂倾向, 又易析出网状碳化物。如 CrWMn 、 $3\text{Cr}2\text{W}8\text{V}$ 、 GR 钢等。若锻后缓冷, 虽避免了开裂倾向, 但却可能析出呈链状、网状或带状严重的碳化物, 不仅影响到模具使用寿命, 而且也可能直接产生裂纹。对这类钢在停锻温度至 650°C 左右应空冷或风冷, 而在 650°C 以下时必须缓冷。

5) 锻后出现白点（发裂）

主要发生在中碳低合金大截面模块（如 5CrNiMo 钢等），有时也发生在低碳中合金时效钢。主要原因是钢中含氢量过多，又由于锻后在低温（150~250℃）冷速过快，在钢中发生脆性破裂而形成白点（发裂）。白点的存在，降低了钢的力学性能，并可能发生淬火开裂等破坏事故。

防止白点产生的关键是减少钢中含氢量，在炼钢、浇注及钢锭扩散退火时予以解决。但对这类钢锻造后必须缓冷到 100℃ 以下或室温才可，如果已发现白点产生，则应增加锻造比，由大截面改锻成小截面，设法使发纹锻合，否则白点钢应予以判废。

1.3 模具钢的性能与质量检验

1.3.1 模具钢的常规力学性能要求

模具钢的性能是由模具钢的成分和热处理后的组织所决定的。模具钢的基本组织是由马氏体基体以及在基体上分布着的碳化物和金属间化合物等构成。

模具钢的性能应该满足某种模具完成额定工作量所具备的性能，但因各类模具服役条件及所完成的额定工作量指标均不相同，故对模具性能要求也不同。又因为不同钢的化学成分和组织对各种性能的影响不同，即使同一牌号的钢也不可能同时获得各种性能的最佳值，一般某些性能的改善会损失其他的性能。因而，模具工作者常根据模具工作条件及工作定额要求选用模具钢及最佳处理工艺，使之达到主要性能最优，而其他性能损失最小的目的。

对各类模具钢提出的性能要求主要包括硬度、强度、塑性和韧性等。

1. 强度

强度是表征材料变形抗力和断裂抗力的性能指标。

评价冷作模具钢塑性变形抗力的指标主要是常温下的屈服点 σ_s 或屈服强度 $\sigma_{0.2}$ ，评价热作模具材料塑性变形抗力的指标应为高温屈服点或高温屈服强度。为了确保模具在使用过程中不会发生过量塑性变形失效，模具材料的屈服点必须大于模具的工作应力。热作模具的加工对象是高温软化状态的坯料，故所受的工作应力要比冷作模具的工作应力小得多。但热作模具与高温坯料接触的部分会受热而软化，因此，模具的表面层须有足够的高温强度。

反映冷作模具材料的断裂抗力指标是室温下的抗拉强度、抗压强度和抗弯强度等。但这些指标仅反映模具的表面或内部不存在任何裂纹时的静载断裂抗力。热作模具的断裂失效，不完全由于模具材料抗拉强度不足所致，大多数热作模具在发生断裂之前，由于冷热疲劳出现许多表面裂纹。许多热作模具的断裂，属于表面热疲劳裂纹扩展所造成的断裂。因此，在考虑热作模具的断裂抗力时，还应包括断裂韧度的因素。

影响强度的因素较多。钢的含碳量与合金元素含量、晶粒大小、金相组织、碳化物的类

型、形状、大小及分布、残余奥氏体量、内应力状态等都对强度有显著影响。

2. 硬度

硬度表征了钢对变形和接触应力的抗力。测硬度的试样很容易制备，车间、试验室都有硬度计，因此，硬度是很容易测定的一种性能。由于硬度与强度也有一定关系，因此可通过硬度强度换算关系得到材料硬度值。按硬度范围划定的模具类别，如高硬度（52~60HRC）一般用于冷作模具，中等硬度（40~52HRC）一般用于热作模具。

钢的硬度与成分和组织均有关系，通过热处理，硬度可以在很宽范围内改变。如新型模具钢 012Al 和 CG-2 采用低温回火处理后硬度为 60~62HRC，采用高温回火处理后硬度为 50~52HRC，可用来制作硬度要求不同的冷、热作模具。因而这类模具钢可称为冷作、热作兼用型模具钢。

模具钢中除马氏体外，还存在更高硬度的其他相，如碳化物和金属间化合物等。表 1-3 为常见碳化物及合金相的硬度值。

表 1-3 常见碳化物及各种合金相的硬度值

相	硬度 HV
铁素体	约 100
马氏体: $w_C 0.2\%$	约 530
$w_C 0.4\%$	约 560
$w_C 0.6\%$	约 920
$w_C 0.8\%$	约 980
渗碳体 (Fe_3C)	850~1 100
氮化物	1 000~3 000
金属间化合物	500

模具钢的硬度主要取决于马氏体中溶解的含碳量（或含氮量），马氏体中的含碳量取决于奥氏体化温度和时间。当温度和时间增加时，马氏体中的含碳量增多，马氏体硬度会增加，但淬火加热温度过高会使奥氏体晶粒粗大，淬火后残留奥氏体量增多，又会导致硬度下降。因此，为选择最佳淬火温度，通常要先作出该钢的淬火温度—晶粒度—硬度关系曲线。

马氏体中的含碳量在一定程度上与钢的合金化程度有关，尤其当回火时表现更明显。随回火温度的增高，马氏体中的含碳量会减少，由于弥散的合金碳化物析出及残留奥氏体向马氏体的转变，因此当钢中合金含量越高时，所发生的二次硬化效应越明显，硬化峰值越高。

常用硬度测量方法有以下几种：

（1）洛氏硬度（HR）。是最常用的一种硬度测量法，测量简便、迅速，数值可以从表盘上直接读出。洛氏硬度常用 3 种刻度，即 HRC、HRA 和 HRB。三种刻度所用压头、试验力及适用范围见表 1-4。

表 1-4 洛氏硬度试验规范

硬度符号	硬度头规格	试验力/N	应用范围
HRC	120°金刚石圆锥	1 471	20~70
HRA	120°金刚石圆锥	588.4	20~88
HRB	φ1.588 mm 钢球	980.6	20~100

(2) 布氏硬度 (HB)。用淬火钢球作硬度头, 加上一定试验力压入工件表面, 试验力卸掉以后测量压痕直径大小, 再查表或计算, 便得出相应的布氏硬度值。

布氏硬度测试主要用于退火、正火、调质等模具钢的硬度测定。

(3) 维氏硬度 (HV)。采用的压头是具有正方形底面的金刚石角锥体, 锥体相对两面间的夹角为 136° , 硬度值等于试验力与压痕表面积之比值。此法可以测试任何金属材料的硬度, 但最常用于测定显微硬度, 即金属内部不同组织的硬度。

三种硬度大致有如下的关系: $HRC \approx 1/10HB$, $HV \approx HB$ (当 $<400HBS$ 时)。

3. 耐磨性

冷作模具材料的耐磨性指标可采用常温下的磨损量或相对耐磨性来表示。热作模具的型腔表面由于高温而软化, 同时还要经受高温氧化腐蚀和脱落下的氧化铁屑的研磨, 因此热作模具的磨损属于热磨损, 需要特殊的热磨损试验方法才能测出其热磨损抗力。

在模具中常遇到的磨损形式有磨料磨损、粘着磨损、氧化磨损和疲劳磨损等。不同的磨损形式影响模具材料耐磨性的因素各不相同。

在磨料磨损的条件下, 影响耐磨性的主要因素有硬度和组织。当冲击载荷较小时, 耐磨性与硬度成正比关系, 即可以用硬度来判断钢的耐磨性好坏; 当冲击负荷较大时, 耐磨性还受强度和韧性的影响, 此时, 表面硬度不是越高越好, 而是存在着一个合适的硬度范围, 硬度超过一定值后, 耐磨性反而下降。钢的基体组织中, 铁素体耐磨性最差, 马氏体耐磨性较好, 下贝氏体耐磨性最好。对于淬火回火钢, 一般认为, 在含有少量残余奥氏体的回火马氏体基体上均匀分布着细小碳化物组织, 其耐磨性为最好。在冲击力较大的情况下, 细晶马氏体由于强韧性高, 因而耐磨性较好。钢中碳化物的性质、数量和分布状态对耐磨性也有显著影响。特殊合金碳化物其硬度和耐磨性要高于合金渗碳体和普通渗碳体, 碳化物数量增多并与基体结合牢固时, 耐磨性增加。但碳化物过于粗大或基体中呈不均匀分布, 则会使耐磨性下降。淬火钢的耐磨性一般随其含碳量的增加而提高, 这一方面是由于马氏体硬度的增加, 另一方面是来自于未溶碳化物数量的增加。

对于粘着磨损的情况, 影响材料耐磨性的因素也比较复杂。一般脆性材料和高熔点材料的抗粘着能力较高。减小材料的摩擦因数可以提高耐粘着磨损性。提高材料的硬度有助于减小摩擦因数, 试验表明: 材料硬度在 $550 \sim 750HV$ 范围 (且最好 $>700HV$) 对于抗粘着磨损较合适。采用一定的表面处理 (如渗硫、氮碳共渗等) 可以在金属材料表面形成一层与基体金属不同的化合物层或非金属层, 降低了摩擦因数, 可有效地减轻粘着磨损。当钢的组织

为细致的下贝氏体或回火马氏体加均匀分布的细小合金碳化物时，耐粘着磨损性较好，而过多的残余奥氏体被认为是不利的因素。

氧化磨损是最广泛存在的磨损类型，同时也是各类磨损中磨损速率最小的一种。氧化磨损速率主要取决于金属表层的扩散速度、所形成氧化膜的性质和氧化膜与基体金属的结合强度。致密、非脆性且不易剥落的氧化膜能显著提高磨损抗力，提高金属表层硬度，增加表层塑性变形抗力，从而减轻氧化磨损。

钢的耐疲劳磨损性，在很大程度上决定于冶金质量。钢中存在疏松、气孔、白点和非金属夹杂等缺陷都可能成为疲劳裂纹源。在炼钢过程中应用真空脱氧、电渣重熔和真空熔炼等方法可以大大减少气孔和夹杂物，从而提高钢的耐疲劳磨损性。

4. 塑性

断裂前金属材料产生永久变形的能力称为塑性。模具钢塑性较差，尤其是冷变形模具钢，在很小的塑性变形时即发生脆断。模具材料塑性的好坏，通常用断后伸长率和断面收缩率两个指标来衡量。

断后伸长率是指拉伸试样拉断后长度增加的相对百分数，以 δ 表示。断后伸长率数值越大，表明钢材塑性越好。热作模具钢的塑性明显高于冷作模具钢。

断面收缩率是指拉伸试样经拉伸变形和拉断后，断面部分截面的缩小量与原始截面之比，以 ψ 表示。塑性材料拉断后有明显的缩颈，所以 ψ 值较大。而脆性材料拉断后几乎没有缩小，即没有缩颈产生，其 ψ 值很小，说明脆性材料的塑性较差。

5. 韧性

韧性是材料在冲击载荷作用下抵抗产生裂纹的一个特性，反映了模具的脆断抗力，常用冲击韧度 α_K 来评定。

对于受强烈冲击载荷的模具，如冷作模具的冲头、锤用热锻模具、冷锻模具和热锻模具等，考虑模具材料的韧性是十分重要的，它是模具钢的一个重要性能指标。材料的韧性越高，脆断危险性越小，热疲劳强度也越高。

冷作模具材料因多在高硬度状态下使用，在此状态下 α_K 值很小，很难相互比较，因而常根据静弯曲挠度的大小，比较其韧性的高低。工作时承受巨大冲击载荷的模具，须把冲击韧度作为一项重要的性能指标。如通常要求锤锻模具用钢的 α_K 值不应低于 30 J/cm^2 ，而压力机模具用钢的冲击韧度可低于锤锻模用钢。对于某些热作模具材料和高强度冷作模具钢，有时还需考虑其断裂韧度。

模具材料的化学成分、晶粒度、碳化物以及夹杂物的组成、数量、形貌、尺寸和分布情况，金相组织以及微观偏析等都会对材料的韧性带来影响。模具材料的韧性往往和耐磨性、硬度是互相矛盾的。因此，根据模具的具体工作情况选择合理的模具材料，并采用合理的精炼、热加工和热处理、表面强化工艺使模具材料得到耐磨性和韧性等综合性能。

为了提高钢的韧性，必须采取合理的锻造及热处理工艺。锻造时应使碳化物尽量打碎，

并减少或消除碳化物偏析，热处理淬火时应防止晶粒过于长大，冷却速度不要过高，以防产生内应力。模具使用前或使用过程中应采取一些措施减少内应力。

6. 抗热性能

冷作模具在强烈摩擦时，局部的温升有时甚至可达 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上（冷挤压模）。而热作模具对加热到高温的固体或液体材料进行加工时，模具的温升更高，例如锤锻模可达 $500\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，热挤模达 $800\sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，压铸模达 $300\sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于经常受到高温作用，因此要求模具材料有一定的抗热性能，尤其是热作模具，这是它的主要性能之一。抗热性能包括以下几个方面。

（1）热稳定性。热稳定性表示钢在受热过程中保持金相组织和性能的稳定能力。通常钢的热稳定性用回火保温 4 h ，硬度降到 45HRC 时最高加热温度表示。这种方法与材料的原始硬度有关。对于因耐热不足而堆积塌陷失效的热作模具，可以根据热稳定性预测模具的寿命水平。

（2）耐回火性。耐回火性指随回火温度升高，模具材料的强度和硬度下降快慢的程度，也称回火抗力或抗回火软化能力。通常以钢的回火温度—硬度曲线来表示，硬度下降慢则表示耐回火性高或回火抗力大。耐回火性也是与回火时组织变化相联系的，它与钢的热稳定性共同表示钢在高温下的组织稳定性程度，表示模具在高温下的变形抗力。

7. 耐蚀性

部分塑料模和压铸模在工作时受到被加工材料的腐蚀，会加剧型腔表面磨损，所以这些模具材料应具有相应的耐腐蚀性。合金化或进行表面处理是提高模具钢耐腐蚀性的主要方法。

1.3.2 模具钢的工艺性能要求

在模具的总成本中，特别是小型精密复杂模具，模具钢的费用往往只占总成本的 $10\%\sim 20\%$ ，有时甚至低于 10% ，而机械加工、热加工、表面处理、装配和管理等费用要占总成本的 80% 以上。所以模具钢的加工工艺性能就成为影响模具成本的一个重要因素，也是提高模具质量和使用寿命的关键所在。经常遇到的加工工艺性能有以下几种。

1. 冷加工工艺性能

冷加工工艺性能包括切削、磨削、抛光、冷挤压和冷拉等工艺性能。模具制品有时对表面质量、表面粗糙度和抛光性能要求很高，这就要求钢材的质量更高，模具钢杂质少、组织均匀以及无纤维方向，并采取一些措施，改善钢的工艺性能，降低模具的制造费用。

为了改善模具钢的可加工性和磨削性，在模具钢精炼的后期应对钢液进行变性处理，通过加入变性剂（如 Si 、 Ca 和稀土元素等），形成富钙硫化物或稀土硫化物，使硫化物球化，抑制硫对钢的力学性能的不利影响，保留和发挥其对钢的可加工性和磨削性的有利影响，使易切削模具钢得到进一步发展。

有些模具钢,如高钒高速钢、高钒高合金模具钢,其磨削性很差、磨削比很低,不便于磨削加工。近年来改用粉末冶金生产,可以使钢中的碳化物细小、均匀,完全消除了普通工艺生产的高钒模具钢中的大颗粒碳化物,不但使这类钢的磨削性大为改善,而且改善了钢的塑性、韧性等性能。

有些模具要求很低的表面粗糙度,如要求镜面抛光的塑料模具和一些冷作模具,就要采用抛光性能很好的模具材料。这类钢种往往要求采用电渣重熔或真空电弧重熔等工艺进行精炼,得到高纯净度的钢材,以适应镜面抛光的要求。

为了简化工艺,提高模具的制造效率,对批量生产的模具,可以采用冷挤压工艺压制型腔,即用淬硬的凸模将模具的型腔直接压制出来。这就要求模具材料具有良好的冷变形性能,如塑料模具中的低碳低硅钢就具有良好的冷变形性能。

2. 热加工工艺性能

热加工包括锻造、铸造以及焊接等。热加工工艺性能包括热塑性和热加工温度范围等。根据模具的不同制造工艺可提出不同的加工性能要求,这些性能受到模具钢的化学成分、冶金质量、组织状态等因素的影响。在生产过程中必须严格控制热加工的工艺参数。

(1) 可锻性。锻造不仅减少了模具钢的机械加工余量、节约钢材,而且改善了模具钢内部组织缺陷,如碳化物偏析等,所以锻造质量的好坏直接影响模具的质量。

(2) 铸造工艺性能。为了简化生产工艺,近年来国内外致力于发展采用铸造工艺生产出接近模具形状的铸造毛坯。如我国已经研究采用铸造工艺生产一些冷作模具、热作模具和玻璃成形模具,并相应地发展了一些铸造模具用钢。对这类材料,要求具有良好的铸造工艺性能,如流动性和收缩率等。

(3) 焊接性。有些模具要求在工作条件最苛刻部分堆焊上特种耐磨和耐蚀材料,有些模具力求在使用过程中采用堆焊工艺进行修复后能够重新使用,对这些模具就要求选用焊接性好的模具材料,以简化焊接工艺。焊接性好可以避免焊前预热和焊后处理工艺。为了更好地适应焊接工艺的需要,相应地发展了一批焊接性良好的模具材料。

3. 热处理工艺性能

热处理工艺性能实际上也是一种热加工工艺性能。在模具失效的案例中,热处理不当造成的失效占总失效的40%左右。热处理工艺性能的好坏对模具的质量有较大影响,它要求材料热处理后有足够的淬硬性和淬透性,而且变形小、淬火温度范围宽、过热敏感性小、脱碳敏感性低等。

(1) 淬硬性和淬透性。淬硬性主要取决于钢的含碳量,淬透性主要取决于钢的化学成分、合金元素含量和淬火前的组织状态。对于大部分要求高硬度的冷作模具,对淬硬性要求较高;对于大部分热作模具和塑料模具,对硬度的要求并不太高,往往更多地考虑其淬透性,特别是一些大截面、深型腔模具,为了使模具的心部能得到良好的组织和均匀的硬度,就要选用淬透性好的模具钢;另外对于形状复杂、要求精度高又容易产生热处理变形的模

具,为了减少其热处理变形,往往采用冷却能力弱的淬火介质(如油冷、空冷、加压淬火或盐浴等温淬火等),这就需要采用淬透性较好的模具材料,以得到满意的淬火硬度和淬硬层深度。

(2) 淬火变形和开裂倾向。淬火变形和开裂是热处理三大难题中的两个,可见其重要性。

模具在热处理时要求其变形程度要小,特别是一些形状复杂的精密模具,淬火后难以修整,更要求淬火、回火后的变形程度小,一般选用微变形模具钢。

模具零件淬火开裂倾向与模具材料成分、原始组织状态、工件几何形状以及热处理工艺有很大的关系,这将在以后各章的一些案例中详细论述。

(3) 氧化脱碳敏感性。模具在加热过程中,如果产生氧化、脱碳现象,就会改变模具的形状和性能,影响模具的硬度、耐磨性和使用寿命,导致模具早期失效。

有些 Mo 含量高的模具钢,由于容易氧化、脱碳,在一段时间内限制了其推广应用,直到热处理工艺装备发展以后,采用特种热处理工艺,如真空热处理、可控气氛热处理、盐浴热处理等,才有效防止了氧化、脱碳,使这类模具钢顺利得到推广应用。

1.4 模具钢的常规热处理概述

模具钢的常规热处理工艺主要包括:退火、淬火和回火。

1. 退火

退火是将模具加热到钢的临界温度以上 $20 \sim 30^{\circ}\text{C}$,保温一定时间后缓冷,获得接近平衡状态的组织,退火组织一般是铁素体基体上分布碳化物,如图 1-3 所示。退火的目的是消除应力,降低硬度,使毛坯易于冷加工成形、使钢的成分均匀化、晶粒细化,为最终热处理做组织准备。

模具钢几种常见退火工艺如下:

(1) 扩散退火:将钢锭或钢坯加热到 $1\,000^{\circ}\text{C}$ 以上,并较长时间保温,使钢中元素进行扩散,使之均匀分布并消除偏析,从而提高钢的质量,此工序通常在钢厂进行。

(2) 完全退火:将钢加热到 A_{c3} 以上 $30 \sim 50^{\circ}\text{C}$,使其完全奥氏体化,然后随炉缓慢冷却,以获得接近平衡的组织。模具钢完全退火的目的是为后续热处理做组织准备,是一种预备处理工艺。除此之外,完全退火也可达到改善钢的切削加工性能的目的。

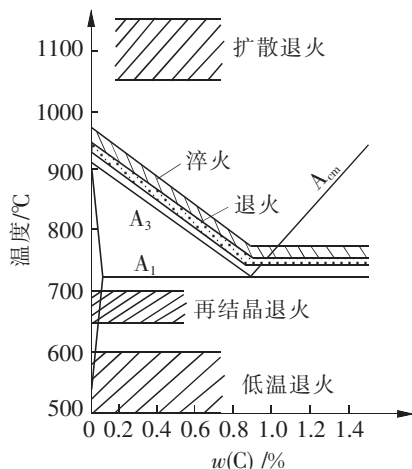


图 1-3 碳钢退火的分类和温度范围

(3) 等温退火：这是模具钢经常采用的一种退火工艺，其特点是奥氏体化以后不是随炉冷却，而是迅速降到适当温度保温，使奥氏体在这个温度下进行等温转变，形成珠光体及碳化物。对于合金模具钢，特别是在大批量生产条件下，采用等温退火不但方便、易行，缩短生产周期，而且过冷奥氏体等温转变所形成的组织也比较均匀；而在连续冷却转变时，会形成不均匀的组织。应用这种方法时，对该钢的等温转变温度要掌握，并要求准确控制等温温度。

等温退火的示意图如图 1-4 所示。

(4) 球化退火：球化退火是模具钢中应用最普遍的退火工艺，采用此工艺可使片层状珠光体变成粒状珠光体。通常是在等温冷却过程中，钢在加热时残留下来的细颗粒碳化物作为晶核，使珠光体转变时新生成的碳化物围绕晶核长大成球状。如果模具钢中存在大块碳化物或网状碳化物时，必须先进行正火加以改善或消除才能进行球化退火。由于粒状珠光体硬度比片层状珠光体低，因而改善了模具切削加工性能。

球化退火的质量由碳化物的形状和颗粒大小进行评定，而球化效果好坏的关键是加热温度。温度过高，碳化物会全部溶入奥氏体，钢经缓冷会获得片状珠光体；温度过低，原片层状珠光体部分保留，冷却后也不能获得好的球状珠光体组织。冷却速度对退火后的组织和硬度也有影响。

(5) 去除应力退火：一般温度在 $600\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，目的是消除冷加工或粗加工产生的应力，主要是为后续加工或后续处理创造适当条件。

2. 淬火

淬火是将钢加热到 Ac_3 或 Ac_1 点以上的某一温度并保温一定时间，然后进行以适当速度冷却获得马氏体组织或贝氏体组织的热处理。模具钢淬火温度均较高，主要是使合金元素尽可能多地溶解。而当回火时，处于过饱和状态的马氏体会析出弥散、细小、均匀分布的碳化物，达到所需的性能及耐磨性。淬火是模具最终热处理的重要工艺，其关键是控制加热速度、淬火温度、保温时间、冷却速度。

1) 淬火加热

(1) 淬火加热速度：加热时升温太慢，工件容易氧化、脱碳、生产效率低、成本高；但若升温太快，模具表面和中心会产生温差。温差越大，热应力越大，因而产生变形和开裂的可能性也越大。

(2) 淬火加热温度：淬火加热温度是淬火的关键。对模具钢不仅要使钢奥氏体化，还要考虑合金碳化物的溶解。原则上，在能够保证适当奥氏体晶粒度的情况下，淬火加热温度应适当提高。对每种钢都要预先作出淬火温度与硬度和晶粒度的关系曲线，由曲线综合考虑选

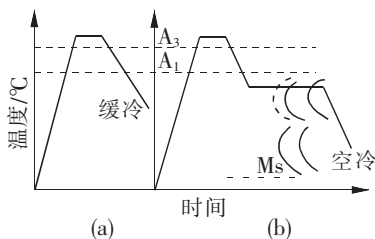


图 1-4 退火过程示意图

(a) 完全退火；(b) 等温退火

择淬火温度。

(3) 淬火加热时间：模具钢中合金元素含量较高，导热性差，而且模具形状复杂，因而应保温较长时间，但也要防止保温时间会长会加剧模具的脱碳和氧化。通常，对每种模具钢淬火时加热系数可从有关手册查出，并计算出适当的加热保温时间。

淬火加热可以在盐浴炉或在箱式电阻炉内进行，有时甚至用油炉、煤气炉、反射炉加热。但不管用哪种方式加热，都必须考虑加热速度（热传导形式不同）及解决脱碳、氧化、变形和开裂等问题。模具钢淬火加热最好采用盐浴炉加热，并对盐浴炉经常脱氧捞渣，升温时最好采用2级甚至3级分级预热。

2) 淬火冷却

淬火介质及冷却方式、冷却速度的选择主要取决于钢的化学成分、模具尺寸大小及其形状。

(1) 淬火介质：模具淬火冷却可以在水、油或空气中进行。选择淬火介质主要考虑模具的化学成分、尺寸大小和形状。在保证模具淬透的条件下，为减小热处理应力，应尽量选择较缓和的冷却介质；为获得较大的奥氏体过冷度，使转变后的马氏体细小，在保证不发生变形及开裂的前提下，应尽量选择较激烈的冷却介质。由于碳素工具钢淬透性较低，油淬难以淬透，而水淬又易于开裂，故通常采用双介质淬火，即所谓水淬油冷方式；而对于合金模具钢则采用油冷淬火。

(2) 喷射淬火：主要用于模具的局部淬火，即将模具放入喷射装置中，在细小密集的高压水流或高压雾流强力喷射下冷却，其优点是欲淬硬部位冷却迅速而均匀，而且可以在一定范围内调整冷却速度。如滚子或钢球冷镦凹模，大多采用喷射淬火工艺。

(3) 分级和等温淬火：模具在具有一定温度的介质中冷却，使奥氏体在恒定温度下转变为马氏体或贝氏体。主要应用于尺寸较小、形状较复杂的模具。优点是减小淬火过程中产生的热应力和组织应力，获得比较均匀的淬火组织。但经此工艺处理的模具，存在较多的残余奥氏体，在随后回火时应予以注意。

3) 深冷处理

对于马氏体转变温度较低及残余奥氏体较多的模具钢，为了保证硬度、耐磨性及尺寸稳定性可以采用深冷处理。常用温度是 -75°C 左右，介质是干冰加酒精。深冷处理实际上是淬火工艺的继续，深冷处理后应立即进行回火。

4) 淬火缺陷及其解决方法

模具钢淬火最常出现的问题是开裂、变形、软点、过热、过烧和未淬硬等。其解决办法如下。

(1) 开裂及变形：降低加热速度；减小各部位的温差；防止表面脱碳；淬火后各部位要均匀冷却；模具垂直淬入介质；入油要先厚部位后薄部位；选用合适的夹具；控制出油温度等。

(2) 硬度不足：提高加热温度，保证碳化物充分溶入奥氏体；淬火介质的选择及温度要控制好。

(3) 软点：模具淬入冷却介质后要往复运动或使介质充分搅动。

(4) 过热：控制加热温度不要过高，如已过热，则可先行退火或正火再二次淬火。

(5) 氧化脱碳：盐浴炉经常脱氧捞渣，如已脱碳应将脱碳层磨除。

3. 回火

回火是将已淬火的模具钢加热到低于临界温度 A_{c1} ，保温一定时间后，以适当的速度冷却，达到所需要的综合力学性能的工艺。不同温度回火，获得的组织及性能各不相同。按回火加热温度的不同，回火工艺可以分为低温回火 ($t \leq 250\text{ }^{\circ}\text{C}$)、中温回火 ($t = 350 \sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$)、高温回火 ($t > 500\text{ }^{\circ}\text{C}$)。模具钢常用的是低温回火和高温回火。

(1) 低温回火：冷作模具一般在 $150 \sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围回火，其目的是获得尽量高的硬度，并通过回火消除淬火应力，获得一定韧性。

(2) 高温回火：热作模具一般在 $500 \sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围回火，其目的是获得尽量高的强度和良好韧性，并在使用温度具有稳定的组织和性能。

对于高合金模具钢，为了保证组织的稳定性，使组织尽量达到完全转变，一般要进行二次回火，有时还要进行更多次数的回火。对高合金模具钢进行多次回火是由于淬火后有较多残余奥氏体。当一次回火后，残余奥氏体分解转变为马氏体（相当于淬火马氏体），因未进行回火，故韧性很低。如果不再回火，则使用过程中将会成为裂纹源。只有再次回火，才能使一次回火转变产物。经过回火，使整个组织均匀并避免因脆性相的存在引起的开裂。在实际操作中，应注意一次回火后必须冷到室温后才能进行二次回火。

某些高合金钢回火后因合金碳化物的析出可能会发生二次硬化现象，即在回火温度硬度曲线上出现峰值。然而，在硬度峰值处往往韧性最低，所以选择回火温度时一般应选在稍高于二次硬度峰值的温度回火，以保证模具的韧性。

对于可能产生回火脆性的模具钢，回火保温后最好油冷，可防止钢的脆化。回火后在油中快速冷却也可以提高回火炉的效率，缩短回火处理时间。

1.5 模具钢进厂检验

1.5.1 宏观检验

模具钢的宏观检验是用肉眼或在不大于 10 倍的放大镜下检查钢材表面或断面，以确定钢材组织缺陷及质量的方法。宏观检验的方法分酸浸检验及断口检验两种方法。

1. 酸浸检验

酸浸检验是常用的、最简单的宏观质量检验方法。酸浸法分热酸浸法和冷酸浸法，热酸

浸法可以检查钢中的偏析、疏松、枝晶、白点和发纹等。

酸浸法取样部位应有代表性，所取试样必须是钢锭中缺陷最严重的部位，钢锭头、尾部是宏观缺陷比较集中的位置。对一般要求的模具可在头部冒口附近取样，质量要求高时，应该在头部和尾部同时取样。

模具的工作部位一般都在钢材中心，因此对钢材中心的致密度要求较高，对中心疏松都要认真检验，并有较严格的规定。对尺寸较大的模具，还应检查枝状晶组织。

用酸浸法显示的常见宏观缺陷见表 1-5 所示。

表 1-5 钢中的常见宏观缺陷

缺陷名称	形成原因	宏观特征
偏析	浇注凝固过程中，由于选择结晶和扩散作用引起某些元素的聚集，造成化学成分不均匀。根据分布的不同位置可分为锭型、中心和点状偏析等	在酸浸试样上，当偏析是易蚀物质或气体夹杂聚集时，呈颜色深暗、形状不规则，略行凹陷、底部平坦并有很多密集微孔斑点。如为抗蚀元素聚集，则呈颜色浅淡、形状不规则、比较光滑的微凸斑点
疏松	钢在凝固过程中由于低熔点物质最后凝固收缩和放出气体产生空隙，而在热加工过程中未能焊合。根据其分布情况，可分为中心和一般疏松两类	在横向热酸浸面上，孔隙呈不规则的多边形、底部尖窄的凹坑，这种凹坑通常多出现在偏析斑点之内。严重时，有连成海绵状的趋势
夹杂	外来金属夹杂：在浇注过程中，金属条、块、片落入锭模中或冶炼末期加入的铁合金未熔化	在浸蚀片上，多呈边缘清晰、颜色与周围显著不同的几何形状
	外来非金属夹杂：在浇注过程中，没有来得及浮出的熔渣或剥落到钢液中的炉衬和浇注系统内壁的耐火材料	较大的非金属夹杂物很好辨认，而较小的夹杂腐蚀后剥落，留下细小的呈圆形的小孔
	翻皮：底注钢锭浇注过程中的表面上半凝固的薄膜卷入钢液中去	在酸浸试样上，颜色与周围不同，形状不规则的弯曲狭长条带，周边常有氧化物夹杂和气孔存在
缩孔	钢锭或铸件浇注时，心部的液体由于最后冷却时体积收缩未能得到补充，在铸锭头部或铸件中形成宏观孔穴	在横向酸浸试样上缩孔位于中心部位，其周围常是偏析、夹杂或疏松密集的地方。有时在浸蚀前就可看到洞穴或缝隙，浸蚀后孔穴部分变暗，呈不规则折皱的孔洞
气泡	钢锭浇注过程中所产生和放出的气体造成的缺陷	在横向试样上，呈与表面大致垂直的裂缝，附近略有氧化和脱碳现象。在表面以下的位置存在称为皮下气泡，较深的皮下气泡称为针孔。在锻轧过程中，这些未氧化也未焊合的气孔被延伸成细管状，横截面上呈孤立的小针孔。在横截面上类似于排列规律的点状偏析，但颜色较深者为内部蜂窝气泡

续表

缺陷名称	形成原因	宏观特征
白点	一般认为是氢和组织应力的作用，钢中的偏析和夹杂也有一定的影响，属于裂缝的一种	在横向热酸浸试样上，呈细短裂缝。在纵向断口上则是粗晶状的银亮白点
裂缝	轴心晶间裂缝：当枝状组织较严重时，大尺寸钢坯沿枝状组织主、枝干间产生裂缝	在横截面上，轴心位置沿晶间开裂，呈蛛网状，严重时呈放射状开裂
	内裂：由于锻轧工艺不当而产生的开裂	
折叠	钢材或钢锭的表面斑疤凹凸不平及尖端的棱角，在锻轧中叠附在钢材上，或由于孔型设计或操作不当生成耳子，在继续轧制时叠合而成	在横向热酸浸试样上，与钢的表面呈斜交的裂缝，附近有较严重的脱碳，缝内常夹有氧化物鳞屑

2. 断口检验

断口检验也是一种重要的宏观分析手段，可以提供某些损坏的直观证据，从而发现钢材本身和模具制造中的问题。非金属夹杂物、内裂、气泡、缩孔及疏松也可以利用断口进行检验。

按 GB1299—1985《合金工具钢技术条件》标准中规定：热轧和锻制钢材，表面不得有肉眼可见的裂缝、折叠、结疤和夹杂。如有上述缺陷必须清除，深度在公差之半范围内的其他轻微表面缺陷可不清除；冷拉钢材表面应洁净、光滑，不应有裂纹、折叠、结疤、夹杂和氧化皮。经热处理的冷拉钢材表面允许有氧化色或轻微氧化层；交货状态钢材的断口组织应均匀、晶粒细致，不得有肉眼可见的缩孔、夹杂、分层、裂纹、气泡和白点。根据需方要求，经供需双方协议并于合同中注明，交货状态钢材可检验酸浸低倍组织。在酸浸低倍试片上不得有肉眼可见的缩孔、夹杂、分层、裂纹、气泡及白点。中心疏松及锭型偏析按本标准第4级别图评定，其合格级别按双方协议。检验酸浸低倍组织的钢材，不再做断口检验。

1.5.2 显微组织检验

显微组织检验是控制模具钢质量必要手段之一。通过在光学显微镜或其他显微镜下观察钢材组织，根据有关标准和规定判断质量和生产工艺是否合格或完善，并分析产生某些缺陷的原因。

金相检验取样应有一定代表性。取横截面试样主要观察从边缘到中心的组织变化，表面缺陷如脱碳、氧化、过烧、折叠、晶粒度大小的测定等；取纵向试样主要观察非金属夹杂物，晶粒变形程度，带状组织等。

按 GB1299—1985《合金工具钢技术条件》，对退火状态交货的 9SiCr、CrWMn 等钢材应检验珠光体组织及网状碳化物，并按标准中的评级图予以评定及控制；对热压力加工用钢不必检验珠光体组织及网状碳化物。对退火状态交货的 Cr12、Cr12MoV、Cr12Mo1V1 (D2)、6W6Mo5Cr4V 和 6Cr4W3Mo2VNb 钢应检验共晶碳化物不均匀度，并按标准中的级别图予

以评级及控制。对热轧和锻制钢材应检验脱碳层，表 1-6 为总脱碳层允许深度，经供需双方协议可按工组供应。对冷拉钢材单边脱碳层不能大于公称尺寸的 1.5%（含硅钢不大于其公称尺寸的 2%），银亮钢表面不允许有脱碳层，扁钢及截面尺寸大于 150 mm 的钢材总脱碳层按供需双方协议执行。

表 1-6 总脱碳层允许深度

钢材截面尺寸/mm	总脱碳层深度/mm	
	I 组	II 组
5~150	$<0.25\%+1\%D$	$<0.20\%+2\%D^{①}$
注：① D 为钢材截面公称尺寸。		

根据需方要求，对合金工具钢可增加非金属夹杂、晶粒度和淬透性等项目的检验，具体试验方法、试样个数、评级标准以及合格级别等均按供需双方协议执行。

1.6 模具材料的应用及发展

1.6.1 国外模具材料的应用及发展

世界工业经济和科学技术的发展带动了模具制造业的发展。目前国外工业发达国家，模具制造业发展很快，已经成为一个专门的生产行业，并逐步实行标准化、专业化、商品化，模具已经是一种高技术密集型产品。激烈的市场竞争加快了产品的更新换代，同时也加快了模具材料生产技术的发展。

1. 国外模具材料产量的发展

模具材料主要是模具钢，模具钢的产量近 20 年增长很快，领先于其他钢种。据日本通产省调查统计的资料，日本从 1978—1997 年钢的年产量一直维持在 1 亿吨左右，而合金工具钢的年产量，却从 1978 年 6.79 万吨上升到 1997 年的 12.672 6 万吨，上升了将近 1 倍。

2. 国外模具钢钢种的发展

目前随着模具制造业的不断发展，对模具钢从冶金质量、数量、性能上要求不断提高，在国外出现高合金、高质、优化、低级材料强化及扩充材料领域等趋向。模具材料由低级向高级发展，发展的趋向是碳素工具钢+低合金工具钢→高合金工具钢，并相继出现了一系列的新型模具材料。模具标准钢号的合金化程度也日趋提高，例如美国 15 种热作模具钢合金元素全部大于 5%；而合金元素大于 10% 的有 10 种，用量占 80%。

目前各国使用量较大的模具钢集中在 10 多种通用型模具钢上，现将三类模具钢的发展状况概述如下。

1) 冷作模具钢

国外通用型冷作模具钢的代表钢种有低合金模具钢 01 (9CrWMn)、中合金模具钢

A2 (Cr5Mo1V)和高碳高铬模具钢 D3 (Cr12)、D2 (Cr12Mo1V1) 等。

为了满足冷作模具的特殊要求, 各国都发展了一批新型的模具钢, 主要有:

(1) 高韧性、高耐磨性模具钢。比较有代表的钢号有美国钒合金钢公司早期发表的 VascoDie (8Cr8Mo2VSi) 钢、日本大同特殊钢公司的 DC53 (Cr8Mo2VSi) 钢等, 其 C、Cr 含量均低于 Cr12 型模具钢, 增加了 Mo、V 合金的含量, 钢中形成大量 MC 型高弥散度碳化物, 其耐磨性不低于或优于 Cr12Mo1V1 钢, 韧性和抗回火软化能力则高于 Cr12 型钢。分别用于冷挤压模具、冷冲模具及高强度螺栓的滚螺纹模具, 都取得了良好的使用效果。

(2) 低合金空淬微变形钢。代表性钢号有美国 ASTM 标准钢号 A4 (Mn2CrMo)、A6 (7Mn2CrMo), 日本大同特殊钢公司的 GOA, 日本日立金属公司的 ACD37 钢等。这类钢的特点是合金含量最低 (质量分数 $\leq 5\%$), 淬透性、淬硬性好, 淬火变形小, 工艺性好, 价格低, 主要用于制造精密复杂模具。

(3) 火焰淬火模具钢。20 世纪 70 年代, 国外开始发展一些适应火焰淬火工艺需要的冷作模具钢。由于采取氧-乙炔喷嘴进行局部加热空冷淬火, 难以严格地控制和测定温度, 因此要求这类钢淬火温度宽、淬透性好。火焰局部淬火的工艺简便, 可以缩短模具制造周期、节约能源、降低制造费用, 已经广泛地用于制造剪切、下料、冲压、冷锻等冷作模具, 特别是大型镶块模具。

代表性的钢号有日本爱知制钢公司 SX5 (Cr8MoV) 钢、SX105V (7CrSiMnMoV), 日本山阳特殊公司的 QF3, 日本大同特殊钢公司的 GO5, 日本日立金属公司的 HMD1、HMD5 等钢, 在生产使用中取得了良好的效果。

(4) 粉末冶金冷作模具材料。

采用粉末冶金工艺生产的高碳高合金模具材料, 由于钢液雾化形成的微细钢粉凝固很快, 可以完全避免一般工艺生产的高碳高合金冷作模具钢在浇注后缓慢凝固, 产生粗大碳化物和偏析等缺陷。如高碳高铬型冷作模具钢和高速钢采用粉末冶金工艺生产后, 碳化物晶粒度减小到 $1\ \mu\text{m}$ 左右, 可以完全消除一般工艺生产的莱氏体钢中晶粒度达几十微米的大颗粒碳化物和网状碳化物。因此, 粉末冶金模具钢磨削性能好、韧性好、等向性好、热处理工艺性能好。

由于粉末冶金模具钢具有较好的特性, 近 20 年来在国外发展较快, 代表性的钢号有美国的 CPM10V、德国的 320CrVMo13.5 等。这些钢含有大量弥散度高、硬度高的 MC 型碳化物, 其耐磨性能介于硬质合金和高合金冷作模具钢之间。由于韧性好, 因此制成的模具寿命可以与硬质合金模具相似; 由于工艺性能好, 因此适于制造形状比较复杂、工作条件苛刻的长寿命模具, 其使用寿命可比模具钢模具提高几倍到几十倍。

2) 热作模具钢

热作模具钢要求钢在模具的较高工作温度下具有良好强度、硬度、耐磨性、抗冷热疲劳性能、抗氧化性和抗特殊介质的腐蚀性能, 用于制造锻压、压铸、热挤压、热锻及高温超

塑成形用模具。

国外通用的热作模具钢有三种类型：即低合金热作模具钢，如 55NiCrMoV6 和 56NiCrMoV7 等；中合金热作模具钢，如 H13 (4Cr5MoSiV1) 和 H11 (4Cr5MoSiV)；钨系、钼系热作模具钢，如 H21 (3Cr2W8V)、H10 (4Cr3Mo3SiV) 等。

为了热作模具发展的需要，国外相继开发出一些新型热作模具钢，主要可分为以下几种类型：

(1) 高淬透性特大型锻压模具钢。代表性的钢号有国际标准 ISO 中的 40NiCrMoV7，法国 NF 标准中的 40NCD16 等，适于制造模块截面较大的大型锻压模具，其淬透性能高于通用型锻压模具钢。

(2) 高热强性模具钢。由于热作模具的工作温度不断提高，工作条件苛刻，传统的高热强性模具钢如 H21 (3Cr2W8V) 钢不能适应要求，国外陆续研制开发了不少新型热作模具钢，其代表钢号有以下几种类型：

① 中合金高热强性热作模具钢。该类钢一般是在 H13 (4Cr5MoSiV1) 的基础上增加 W、Mo、Co、Nb 等元素，提高其高温性能。如美国的 H10A (3Cr3Mo3Co3V) 钢，瑞典的 QR080 (3CrMo2VMn) 钢，该类钢与 3Cr2W8V 钢比较具有更高的高温强度和抗回火软化能力，在生产中使用效果良好。

② 沉淀硬化型热作模具钢。代表性的钢号有日本日立金属公司的 YHD3、YHD26、YHD28 和日本大同特殊钢公司的 DH76 (2Cr3Ni3V) 等。这类钢的含碳量很低，一般质量分数在 0.2% 左右，而且含有一些沉淀硬化的合金元素如 V、Nb、Ni、Al 等。模具淬火后采用较低温度回火 ($\approx 400^\circ\text{C}$)，硬度为 40HRC 左右。由于含碳量低，中温回火后的组织为板条状低碳马氏体，具有良好的韧性、切削性。模具在使用过程中与高温工件接触的工作表面，被工件加热到钢的沉淀硬化温度 ($500\sim 600^\circ\text{C}$)，由于合金碳化物和金属间化合物的析出，模具工作表面的硬度可以上升到 45~48HRC，型腔表面的耐磨性提高而模具心部仍保持原有的组织和高韧性，从而提高了模具的使用寿命。

③ 低碳高速钢和基体钢。低碳高速钢的代表钢号有美国 ASTM 标准钢号 H42 (6W6Mo5Cr4V2)、H26 (5W18Cr4V)、H25 (3Cr4W15V) 等，该类钢将高速钢的含碳量降至质量分数 0.3%~0.6%，在降低部分热硬性和耐磨性的情况下改善其韧性和抗热疲劳性能。基体钢的代表钢号有美国钒合金钢公司的 Vasco MA (5Cr4W3Mo2V) 等，其化学成分相当于淬火后的高速钢基体组织成分，所以淬火后过剩碳化物的数量少、细小均匀，使钢的韧性和抗冷热疲劳性能进一步得到改善。低碳高速钢和基体钢的综合性能较好，既可以用于热作模具材料，也可以用于制造高性能的冷作模具。

④ 奥氏体型热作模具钢。日本大同特殊钢公司的 5Mn15Ni5Cr8Mo2V2 钢是为适应工作温度达 $700\sim 800^\circ\text{C}$ 的热作模具的需要，而研发的奥氏体型热作模具钢。这类钢经固溶时效处理后，在 $700\sim 800^\circ\text{C}$ 仍能保持较好的强度，可以用于制造高温工作条件下的模具。

(3) 高温热作模具材料。

一些新的热加工技术的发展,如利用被加工材料在高温下的超塑性,进行等温锻造的锻压模具,模具要加热到被加工材料的超塑性温度(800~1 050℃)对材料进行锻压,因此,必须采用铁基高温合金、镍基高温合金和难熔合金作高温热作模具材料。

美国常用的钼基难熔合金 T2M、T2C、MHC 在 1 000℃以上的高温下仍具有较高的热强性,但必须在真空或保护气氛下使用。

日本日立金属公司近年来研制出一种镍基铸造合金 Nimowal,专门用于镍基高温合金材料等温锻造模具,在 1 050℃下的高温强度可以与钼基难熔合金相近,而且抗氧化性良好,可作为在大气下对高性能镍基高温合金进行等温锻造的模具材料。

3) 塑料模具钢

塑料制品的生产发展极为迅速,塑料模具用钢也取得了迅速发展。国际上一些工业发达国家塑料模具的产值已经上升到模具行业产值的第 1 位,塑料模具钢也迅速发展成一个专用钢系列。如美国 ASTM 标准中的 P 系列包括 7 个钢号,其他国家的一些特殊钢生产企业也发展了各自的塑料模具钢系列,如日本大同特殊钢公司的塑料模具钢系列包括 13 个钢号,日本日立金属公司则有 15 个钢号,日本大岗的 NAK 系列也有 4~5 个钢号。

国外新型塑料模具钢的发展趋势主要有以下几个方面。

(1) 易切削、抛光性好的塑料模具钢。美国的 412、422、M-250、M-300;日本的 YAG、HPM38、MASCI;英国的 EAB、SS3、PMS-30;瑞典的 STAVAX-13 等这类模具钢的杂质少、组织微细均匀、无纤维方向性,制模后型腔的表面质量高。

(2) 预硬型塑料模具钢。代表钢号有美国的 P20、1321、4240、445;瑞典的 718 钢;日本的 PDS、NAK55、PSL、IMAX;德国的 MOVTREX-A (2312) 等。该类模具钢应用较广,以预硬化处理后的钢块供货,硬度达 23~48HRC,加工型腔后不再处理,无变形,可缩短模具制造周期。

(3) 时效硬化型塑料模具钢。一般含碳量较低,钢中加入 Ni、Al、Ti、Cu、Mo 等元素,模具坯料先经固溶后,在低硬度下进行加工,成形后进行时效处理,由于金属间化合物的析出,使模具硬度提高到 40~50HRC,以满足使用要求。由于时效温度低,变形小而且具有规律,适于制造形状复杂、精度高、超镜面以及大型塑料模具。

(4) 整体淬硬型塑料模具钢。国外一般都是借用高耐磨性冷作模具钢和热作模具钢。如美国的 A2 (CrSMo1V) 钢、D3 (Cr12) 钢和 D2 (Cr12Mo1V1) 钢等冷作模具钢和 H13 (4Cr5MoSiV1) 钢等热作模具钢。

(5) 耐蚀型塑料模具钢。有些塑料制品如聚氯乙烯、氟塑料、阻燃塑料等,在加工过程中对模具具有腐蚀作用,一般采用马氏体不锈钢和沉淀硬化型不锈钢。代表性的钢号有国际标准 ISO 中的 110CrMo17,瑞典 ASSAB 公司的 STAVAX (4Cr13) 等。

(6) 无磁塑料模具钢。为了适应磁性塑料制品的生产,国外发展了一些无磁塑料模具

钢, 将奥氏体型模具钢通过时效硬化处理得到要求的硬度强度和低的磁导率。代表性的钢号有日本大同特殊钢公司的 NAK301 和日本日立金属公司的 HPM75 钢等。

3. 国外模具材料的发展展望

国外模具制造业正在向通用化、标准化、系列化、高效率、短制造周期发展, CAD 和 CAM 的应用日益普及。为了满足模具制造业发展的需要, 模具材料向多品种、精细化、制品化的方向迅速发展。

随着模具工作条件的日益苛刻, 对模具的质量, 特别是对钢的纯净度、等向性的水平提出了更高的要求。为此, 国外普遍采用电炉+炉外精炼工艺生产纯净度高的模具钢。对于大截面锻压模块和大型的钢材规定采用真空处理; 对于纯净度要求更高的模具钢, 大部分采用电渣重熔, 以进一步提高钢的纯净度、致密度、等向性和均匀性, 减少偏析。因此, 模具钢的质量有了较大提高。

为了增强竞争力, 适应经济全球化的发展趋势, 国外模具钢的生产从分散趋向于集中, 并有多家公司进行跨国合并。为了更好地竞争, 这些公司都建成了完善的、技术先进的模具钢生产线和模具钢科学研究基地, 形成了几个世界著名的工模具生产和科研中心, 以便跟上模具工业的迅速发展。

1.6.2 我国模具材料的应用及发展

我国的模具生产发展较快, 在一定程度上满足了加工业对模具的需要。模具工业逐渐发展成为国民经济的基础工业, 国家把模具制造列为机电工业发展序列的第 2 位, 这给振兴模具工业创造了较好的条件。

模具制造的首要问题是模具材料, 建国以来我国模具钢生产技术发展较快, 从无到有, 从仿制到自主开发, 目前我国模具钢的产量已跃居世界前列。经过几次钢种整顿的标准修订, 在国家标准 GB/T 1299—2000《合金工具钢》中包含了 37 个钢种, 基本上形成了我国自己的模具钢系列。

近年来, 随着模具工业的发展, 我国自行开发了一些新型模具材料, 同时在模具钢的生产技术、品种质量、工艺装备、科技开发及材料应用等方面都取得了较大的发展。现将 3 类模具钢钢种的发展状况简述如下。

1. 冷作模具钢的应用及发展

目前我国常用的冷作模具钢仍是低合金钢 (CrWMn) 和高碳高铬工具钢 (Cr12、Cr12MoV) 这些旧的钢号。CrWMn 钢有适当的淬透性和耐磨性, 但在热加工和热处理过程中仍存在问题。高碳高铬工具钢虽然有较高的硬度和较高的耐磨性, 但其碳化物偏析较严重, 易导致方向性变形和强韧性降低, 如果碳化物偏析过于严重易造成模具热处理后断裂。为了提高这类钢的强韧性, 除了在工艺上进行改进外, 我国又开发了一些新的冷作模具钢。

1) 低合金冷作模具钢

在中小工厂，简单模具可选择高碳钢（如 T8A、T10A 钢等）制造，但高碳钢淬透性差、淬火变形大、耐磨性低，强韧性和耐回火性都较差，因此不能制造形状复杂、精度要求高、承载力较大的工模具。

为适应工模具性能需要而发展起来的高碳低合金钢是在碳素工具钢的基础上，加入适当的合金元素，如 Cr、Ni、Mn、Mo、Ti、W、Si 等冶炼而成的。常用的模具钢有 CrWMn、9SiCr、9Mn2V、GCr15 等。合金元素的加入提高了钢的淬透性，油冷代替水冷降低了模具的变形和开裂的倾向。马氏体在回火时不易分解，分解后析出的碳化物也不易聚集长大，低温回火后有较高的强韧性和耐磨性，模具使用寿命较碳素工具钢有了较大的提高。但这类钢在热加工后应严格控制冷却速度，并需要采用适当的热处理工艺，否则容易形成网状碳化物。

近年来，我国又研制了一些新型低合金冷作模具钢，这类钢的主要特点是工艺性好、淬火温度低、热处理畸变小、强韧性好，并且有适当的耐磨性，如 GD（6CrNiMnSiMoV）钢、CH-1（7CrSiMnMoV）钢、DS（6CrNiWMoV）钢等。GD 钢中加入少量 Ni、Si 既强化了基体又提高了低温回火抗力，Mo 和 V 的加入可细化晶粒，用于制造易崩刃、断裂的模具，有较高的使用寿命。CH-1 钢的成分与日本的 SX105V 钢相同，是一种火焰淬火钢，常用于制造汽车等生产线上用的模具零件。火焰淬火时，加热模具刃口切料面，硬化层下有一个高韧性的基体做衬垫，从而使模具获得较高的使用寿命。DS 钢是一种抗冲击冷作模具钢，其韧性显著优于常用的高韧性刀片用工量钢。

2) 韧性较高的高碳高合金耐磨冷作模具钢

高碳高合金耐磨冷作模具钢常用的有 Cr12、Cr12MoV 钢等，它们都是莱氏体钢，其组织中有大量共晶碳化物，淬火后有大量残留奥氏体，热处理后变形小、耐磨性高、承载力大，长期以来在国内大、中型冷作模具中得到广泛应用。虽然 Cr12、Cr12MoV 钢耐磨性好，但其韧性差，并且常常因碳化物偏析引起热处理后断裂。为了克服这个缺点，国内进行了大量的研究工作。一方面引进国际通用的高碳高铬工具钢 D2（Cr12Mo1V1）钢，D2 钢的碳化物偏析较 Cr12MoV 钢略有改善，强度和韧性略有提高；另一方面不断研究开发新的钢种。

为了改善 Cr12 型冷作模具钢的碳化物偏析，提高韧性并进一步提高钢的耐磨性，我国冶金工业研究人员做了大量的研究工作，开发了不少新的钢种，如 LD（7Cr7Mo2V2Si）钢、GM（9Cr6W3Mo2V2）钢和 ER5（Cr8MoWV3Si）钢等。在这些钢中适当降低了 C 和 Cr 的含量以改善碳化和偏析，增加了 W、Mo 和 V 的含量以增加二次硬化的能力和提高耐磨性。与 Cr12 型冷作模具钢相比，这类模具钢的碳化物偏析有所改善，有较高的韧性，这类模具钢比 Cr12 型冷作模具钢有更好的耐磨性，因而制造的冷作模具有更长的使用寿命，更适合在高速冲床和多工位冲床上使用。

3) 基体钢

基体钢一般指其成分与高速钢、淬火组织中基体化学成分相同的钢。我国研制了一些基体钢,如 65Nb (6Cr4W3Mo2VNb) 钢、012Al (5Cr4Mo3SiMnVAl) 钢、CG-2 (6Cr4Mo3Ni2WV) 钢、LMI (65W8Cr4VTi) 钢、LM2 (65Cr5Mo3W2VSiTi) 钢、5Cr4Mo2W2VSi 钢以及 RM2 (5Cr4W5Mo2V) 钢等。这些基体钢的主要特点是其含碳量稍高于高速钢基体的含碳量,以增加一次碳化量和提高耐磨性,一些钢还加入少量的强碳化物形成元素 Nb 和 Ti,以形成比较稳定的碳化物,阻止淬火加热时晶粒的长大并改善钢的工艺性能。这类钢淬火后过剩碳化物数量少、细小均匀,使钢的韧性和抗冷热疲劳性能进一步得到改善。

这类基体钢已广泛地应用于制造冷挤压、厚板冷冲和冷锻等模具,特别适于制造难变形材料用的大型复杂模具,还可以用作黑色金属的热挤压模具,是一类冷热兼用的较好的模具钢。

4) 钢结硬质合金

20 世纪 60 年代我国已开始研究钢结硬质合金。由于具有优良的耐磨性,钢结硬质合金已经在较大范围内应用于高耐磨的冷作模具,代表性的牌号有以 TiC 为硬质相的 GT35、R5、D1、T1 等和以 WC 为硬质相的 TLMW50、GW50、GJW50 等。与硬质合金比较,钢结硬质合金可以切削锻造、焊接和热处理,具有韧性和综合力学性能较好、成本较低等特点。

钢结硬质合金已用于制造冷锻模、挤压模、拉深模、冲裁模、拉丝模和热锻模等,使用寿命比模具钢模具寿命提高几倍到几十倍。

2. 热作模具钢的应用及发展

我国通用型热作模具钢原来主要是 5CrNiMo、5CrMnMo 钢和 3Cr2W8V 钢 3 个钢号。5CrNiMo 钢主要用于做大中型锻模,其淬透性不够高,性能也不能满足大截面锻模的要求。3Cr2W8V 钢广泛用于制造黑色和有色金属热挤压模及 Cu、Al 合金的压铸模,这类模具钢的热稳定性高,使用温度达 650 °C,但钨系热作模具钢导热性低、冷热疲劳性差。我国在 20 世纪 80 年代初,引进了国外通用的铬系热作模具钢 H13 (4Cr5MoSiV1) 钢。H13 钢有良好的冷热疲劳性,在使用温度不超过 600 °C 时代替了 3Cr2W8V 钢,模具使用寿命有大幅度提高。因此, H13 钢迅速得到了推广使用,其产量超过了 3Cr2W8V 钢。

为了适应压力加工新工艺、新设备对模具钢在强韧性和热稳定性方面更高的要求,我国研制了不少新型热作模具钢,主要有以下 4 类。

1) 锤锻模具钢 (又称高韧性热作模具钢)

此类模具钢中碳的质量分数一般在 0.5% 左右,合金元素总质量分数在 3% 左右。传统性的热作模具钢如 5CrMnMo 钢、5CrNiMo 钢等,其淬透性不能满足大截面锤锻模的要求,使用温度不能超过 500 °C。为解决此问题,通过对国内外锻模钢的分析、对比和研究,研发了合金含量提高的高淬透性热锻模具钢: 3Cr2MoWVNi 钢、45Cr2NiMoVSi 钢、5Cr2NiMoVSi

钢,这3类钢均是在5CrNiMo钢的基础上适当降低含碳量,提高了Cr和Mo的含量并加入适量的V和Si,提高了钢的淬透性。钢在回火时由于析出 M_2C 和MC型碳化物而呈现二次硬化,其热稳定性比5CrNiMo钢高出150%以上。45Cr2NiMoVSi钢的C和Si的含量较5Cr2NiMoVSi钢稍有降低,更适宜于做锤锻模。这类钢用于制造4000吨以上机械压力机锻模和3吨以上锤锻模,使用寿命比5CrNiMo和5CrNiMoV钢提高0.5~1.5倍。3Cr2MoWVN钢也是我国开发的一种热锻模用钢,有较长的使用寿命。

2) 热挤压模具钢(又称高热强模具钢)

热挤压模具钢一般用于热挤压模、压型模、压铸模等模具。由于模具和高温工件长时间接触,使模具本身温度升高,易造成模具型腔(凹模)塌陷、磨损、表面氧化和热疲劳,因此要求模具钢有较高的高温强度、硬度和热稳定性,良好的耐磨性和抗氧化性能,较高的抗热疲劳性能和断裂韧性。

传统的热作模具钢如3Cr2W8V钢,其中W的质量分数在8%左右,辅以适当的V,具有明显的二次硬化效果,热硬性、热强性和回火耐性都较高。钢中低的含碳量能够保证模具具有一定的韧性和良好的导热性能,适当的含碳量能够保证钢的淬透性,提高模具表面的抗氧化性能又不至于形成太多的碳化物,能在600~650℃中长期使用,因此在热作模具生产中得到了广泛的应用。但是高钨钢有脱碳倾向,模具磨损较快,粘模严重,易出现模具早期疲劳裂纹,再加上炼钢时的不慎,3Cr2W8V钢中元素偏析严重,共晶碳化物数量增加,易造成模具脆裂报废。

新工艺的发展使一些热作模具钢的工作温度不断提高,传统的3Cr2W8V型高合金热作模具钢已不能适应要求,因此,根据模具不同用途引进和研发了新的热作模具钢种。

20世纪80年代国内引进并推广使用的H13(4Cr5MoSiV1)钢,是国内外广泛应用的热作模具钢,在使用温度不超过600℃时,有良好的冷热疲劳性能,综合力学性能较好,用于热挤压模和铝合金压铸模有比较高的使用寿命,目前国内其年产量和使用量已居热作模具的首位。但H13钢有较大的尺寸效应,国外采用炉外精炼、高温扩散退火、等向锻造工艺以改善其尺寸效应、减少Cr和Mo的成分偏析,国内多采用电渣重熔等工艺。在引进国外钢种的同时,国内又研制了许多韧性好、热稳性高的热挤压用热作模具钢,主要可分为下列几种类型:

(1) 中合金高热强性热作模具钢。该类模具钢一般是在国外钼系4Cr3Mo3SiV(H10)钢和铬系4Cr5MoSiV1(H13)钢的基础上发展起来的,并在合金化方面有一定特色。如我国开发的HM1(3Cr3Mo3W2V)钢、TM(4Cr3Mo2WVMn)钢、012Al(5Cr4Mo3SiMnVAl)钢、Y4(4Cr3Mo2MnVNB)钢、Y10(4Cr5Mo2MnVSi)钢、HD(4Cr3Mo2NiVNB)钢和CH75(4Cr3Mo2VSi)钢等,这些钢在保持较好的强韧条件下,具有高的稳定性,分别用来制造热挤压模、精锻模和有色金属压铸模等,有良好的使用效果。

(2) 沉淀硬化型热作模具钢。这类模具钢的含碳量较低,一般质量分数在0.2%左右,

如我国研制的 PH (2Cr3Mo2NiVSi) 钢是典型的析出硬化型热作模具钢,其特点是制造的模具在淬火和采用较低温度回火 ($\leq 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) 后硬度为 40HRC,组织为板条状马氏体,具有良好的韧性和可加工性,加工后可直接使用,在使用过程中模具表面受热,析出碳化物,导致二次硬化,硬度可达 45~48HRC,而心部组织未发生转变,此类热作模具钢同时具有表层所需的高温强度和心部的高韧性,从而提高了模具的使用寿命。

(3) 低碳高速钢和基体钢。20 世纪 70 年代以来,我国发展的低碳高速钢和基体钢,有效地解决了高速钢的碳化物分布不均匀和韧性差等问题,其抗弯强度和冲击韧度都比高速工具钢有明显提高,如我国研制的 6W6Mo5Cr4V 钢、6Cr4W3Mo2VNb 钢、65W8Cr4VTi 钢和 5Cr4W5Mo2V 钢等由于综合性能好,既可以用于热作模具材料,也可以用于制造高性能的冷作模具。

(4) 奥氏体型热作模具钢。是近年来为了适应工作温度达 $700\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热作模具的需要,满足耐蚀、抗氧化要求而发展起来的。这类模具钢一般都含有较高的 Ni、Mn 等奥氏体形成元素,同时也加入了一定量的 C、N、Cr 等使奥氏体变得更加稳定。因此该类模具钢在任何状态下均能保持奥氏体组织,其中 Cr14Ni25Co2V 钢和 4Cr14Ni14W2Mo 钢属于铬镍系奥氏体耐热钢,而 5Mn15Cr8Ni5Mo3V 钢和 7Mn10Cr8Ni10Mo3V 钢为高锰系奥氏体钢。奥氏体钢在固溶时效后在 $700\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 仍保持较高的强度,可用于制造高温工作条件下的模具,但是这类模具钢的导热性差、热膨胀系数大,降低了钢的热疲劳性能,不适于制造强水冷的模具。

3. 塑料模具钢

我国塑料成型模具产值已占模具工业总产值的首位,相对应的塑料模具钢的用量已占全部模具用钢量的 50% 以上。我国过去无专用的塑料模具用钢,一般塑料模具用正火的 45 钢或 40Cr 钢经调质后制造,因而模具硬度低、耐磨性差,表面粗糙度值高,加工出来的塑料产品外观质量较差,而且模具使用寿命低;精密塑料模具及硬度高的塑料模具采用 CrWMn 和 Cr12MoV 等合金工具钢制造,不仅机械加工性能差,而且难于加工复杂的型腔,更无法解决热处理变形问题。

近年来,我国在引进国外塑料模具钢的同时,自行研制和开发了一批新型塑料模具专用钢,这类钢大致可分为以下 4 类。

1) 预硬型塑料模具钢

这类模具钢在钢厂经过充分锻打后制成模块,预先热处理至要求的硬度,一般调质到 30~35HRC 后供使用单位制造模具,P20 (3Cr2Mo) 钢、718 (3Cr2NiMo) 钢是国际上使用最广泛的预硬型塑料模具钢,目前已列入国家标准 GB/T 1299—2000 《合金工具钢》,在我国得到较为广泛的应用,使模具的加工质量和寿命有所提高。

2) 易切削预硬钢

为了改善预硬型塑料模具钢的被切削性,往往在预硬钢中加入易切削元素如 S、Pb、Ca

等。我国研制了一些含硫易切削预硬型塑料模具钢如 8Cr2S (8Cr2MnWMoVS) 钢、SM1 (Y55CrNiMnMoVS) 钢和 S-Ca 复合易切削预硬型塑料模具钢 5NiSCa (5CrNiMnMoVSCa) 钢, 可使钢在高硬度下的可加工性得到显著改善。但 S 系易切削钢的各向异性较大, 在截面增大时硫化物的偏析比较严重。5NiSCa 钢采用了 S-Ca 复合易切削和喷射冶金技术, 改善了硫化物的形态、分布和各向异性, 在大截面中硫化物的分布仍比较均匀。5NiSCa 钢有高的淬透性和镜面抛光性, 模具硬度为 35~45HRC, 可顺利地进行各种加工。易切削预硬型塑料模具钢主要用于制造较长使用寿命、形状复杂以及尺寸精度高的大、中型塑料制品用模具。

3) 时效硬化型塑料模具钢

对于形状复杂、精密、要求有较长使用寿命的塑料模具, 为了避免其在淬火热处理过程中产生变形, 我国近年来研制了一系列时效硬化钢, 有 25CrNi3MoAl、PMS (1Ni3Mn2CuAlMo)、SM2 (20CrNi3AlMnMo) 和 06Ni (06Ni6CrMoVTiAl) 等钢。这些模具钢在固溶处理后硬度很低 (一般 ≤ 30 HRC), 可以很容易地进行切削加工, 加工完成后再进行低温时效硬化处理, 获得要求的综合力学性能和耐磨性。由于时效处理变形很小, 时效处理后不需再进行切削加工即可得到精度很高的模具成品, 使用寿命高于预硬型塑料模具钢。

4) 冷挤压成形塑料模具钢

一些复杂的塑料模具型腔采用冷挤压的方法, 在淬硬的制品上直接压制出来, 省去型腔的切削加工, 这对于成批生产的模具是一种十分经济的加工方法。模具加工后经过渗碳、淬火、低温回火后, 具有高硬度、高耐磨性的表面和韧性良好的心部组织, 可以制造各种要求耐磨性和良好心部韧性的模具。

这类模具钢的含碳量很低, 一般质量分数为 0.1%~0.2%, 硬度低, 以保证在正常温度下具有高塑性和低的变形抗力, 以便进行型腔的冷挤压。我国一般采用低碳钢和低碳合金钢, 如 15、20、20Cr、12CrNi2、12CrNi3、20Cr2Ni4 和 20CrMnTi 等钢, 我国研究的 U 钢即为专用的冷挤压成型塑料模具钢, 其化学成分 (质量分数) 为: $w(C) \leq 0.08\%$, $w(Mn) \leq 0.30\%$, $w(Si) \leq 0.20\%$, $w(Cr) \approx 3.50\%$, $w(Ni) = 0.50\%$, $w(Mo) \approx 0.40\%$, $w(V) = 0.12\%$ 。冷挤压成形后, 经渗碳淬火和低温回火, 表面硬度为 58~62HRC, 心部硬度为 28HRC, 模具耐磨性好, 无塌陷及表面剥落现象, 可用于制造形状复杂和受载荷较高的塑料成型模具。

5) 非调质塑料模具钢

这种模具钢不经调质处理, 锻、轧后即可达到预硬硬度, 有利于节约能源、降低生产成本、缩短生产周期。我国开发的这类钢为中碳锰硼系空冷贝氏体钢, 可用于制造塑料模具和橡胶模具。如近年来发展的 3Cr2MnMoVS 钢, 在空冷条件下, 100 mm 厚的截面上硬度可以达到 40HRC 左右; 非调质塑料模具钢 2Mn2CrVTiSCaRE (FT) 钢中加入了 S、Ca、Re 作为易切削元素, 比 S-Ca 复合系易切削塑料模具钢有更好的切削性能。低碳 Mn、Mo、V、B 系非调质、贝氏体型大截面塑料模具钢 (B30), 钢中加入 S、Ca 作为易切削元素, 工业

试生产截面 400 mm 厚板坯热轧后空冷, 硬度沿截面分布较均匀。随着工作的进一步深入, 这类模具钢可能会在一定的范围内作为预硬钢得到推广应用。

6) 耐蚀型塑料模具钢

塑料制品以化学性腐蚀塑料为原材料时, 模具需具有防腐蚀性能和较好的耐磨性, 常采用马氏体不锈钢和沉淀硬化型不锈钢制造, 常用的钢种有 3Cr13、4Cr13 (420)、9Cr18 和 0Cr17Ni4CuNb 等。PCR (0Cr16Ni4Cu3Nb) 钢是我国自行开发的一种耐蚀塑料模具钢, 有较好的综合力学性能和良好的抗蚀性。

4. 我国模具材料发展展望

我国模具钢生产技术的发展十分迅速, 模具钢产量已居世界前列, 形成了自己的模具钢系列, 建成了不少先进的生产工艺装备。从 20 世纪 70 年代以来, 国内陆续推广了炉外精炼、电渣重熔等工艺技术, 一些特殊钢企业采用新工艺、新技术生产的某些模具钢, 产品质量与国外钢的质量水平相当。但是总的看来, 我国模具钢的生产技术和产品质量等与先进国家相比还存在着很大差距, 很多制造大型、精密、长使用寿命模具的钢材仍需从国外进口。因此, 我国模具钢工业尚需不断开拓创新, 扩大模具钢的品种规格, 积极推广应用性能较好的通用型模具钢, 如 CrSMo1V、Cr12Mo1V1、4CrSMoSiV1 等, 并推广一些性能较好的新型模具钢, 如 CH-1、LD、HD 等, 结合模具工业的发展, 形成我国新的模具钢系列, 以满足高性能、长寿命的模具生产的需要, 加速发展步伐, 努力提高我国模具技术水平。

思考题

1. 模具及模具材料一般可以分哪几类?
2. 评价冷作模具材料塑性变形抗力指标有哪些? 这些指标能否用于评价热作模具材料的塑性变形抗力? 为什么?
3. 反映冷作模具材料断裂抗力的指标有哪些? 影响这些指标的主要因素是什么?
4. 磨损类型主要有哪些? 简述在各类磨损过程中影响其耐磨性的主要因素。
5. 什么是耐热性? 什么是冷热疲劳抗力? 两者有什么关系?

第2章

冷作模具钢及热处理

冷作模具是指在常温下完成对金属或非金属材料进行塑性变形的模具，主要有冷冲裁模、冷挤压模和拉深模等。模具在使用中会受到压缩、拉伸、弯曲、冲击、摩擦等机械力的作用，因此对模具钢的要求较高。

2.1 冷作模具钢的性能要求及分类

冷作模具种类多，形状结构差异性大，工作条件和性能要求不一，对模具钢要求较高，因此以下介绍冷作模具钢的性能要求。

2.1.1 冷作模具的性能要求

1. 模具的耐磨性

冷作模具在工作时，表面与坯料之间会产生许多次摩擦，模具必须在这种情况下仍能保持较低的表面粗糙度值和较高的尺寸精度，以防早期失效。

由于模具材料的硬度和组织是影响模具耐磨性能的重要因素，因此为了提高冷作模具的抗磨性能，通常要求模具硬度高于加工件硬度 30%~50%，材料的组织为回火马氏体或下贝氏体，其上分布均匀、细小的粒状碳化物。要达此目的，模具钢中碳的质量分数一般都在 0.60% 以上。

2. 模具的韧性

模具材料的韧性，要根据模具工作条件来决定。对于受强烈冲击载荷的模具，如冷作模具的凸模和冷镦模具等，因受冲击载荷较大，需要高的韧性；对于一般工作条件下的冷作模具，通常受到的是小能量多次冲击载荷的作用，模具的失效形式是疲劳断裂，因此模具不必具有过高的冲击韧度值。

3. 模具的强度

模具的强度是指模具零件在工作过程中抵抗变形和断裂的能力。强度指标是冷作模具设

计和材料选择的重要依据,主要包括:拉伸屈服点和压缩屈服点等。屈服点是衡量模具零件塑性变形抗力的指标,也是最常用的强度指标。为了获得高的强度,在模具制造过程中应选择合适的模具材料,并通过适当的热处理工艺来达到其要求。

4. 模具的抗疲劳性能

冷作模具通常是在交变载荷的作用下发生疲劳破坏的,因此为了提高模具的使用寿命,需要有较高的抗疲劳性能。导致模具疲劳失效的因素有钢中带状和网状碳化物、粗大晶粒;模具表面有微小刀痕、凹槽及截面尺寸变化过大和表面脱碳等。

5. 模具的抗咬合性

当冲压材料与模具表面接触时,在高压摩擦下润滑油膜被破坏,此时被冲压件金属“冷焊”在模具型腔表面形成金属瘤,从而在成形工件表面划出道痕。咬合抗力就是对发生“冷焊”的抵抗力。影响咬合抗力的主要因素是成形材料的性质,如镍基合金、奥氏体不锈钢和精密合金等有较强的咬合倾向。模具材料及润滑条件也对抗咬合性有较大的影响。

2.1.2 冷作模具钢的工艺性能要求

根据模具生产厂家统计,在模具制造中模具的工艺性能是影响模具成本的一个重要因素,特别是小型精密复杂模具,模具材料费用占总成本的10%~20%,而机械加工、热处理、装配和管理费用等要占总成本的80%以上。冷作模具的工艺性能要求有可锻性、可加工性、可磨削性和热处理工艺性能等。

1. 可锻性

锻造不仅减少了模具材料的机械加工余量,节约钢材,而且改善了模具材料的内部缺陷,如碳化物偏析、减少有害杂质、改善钢的组织状态等。

为了获得良好的锻造质量,对可锻性的要求是:热锻变形抗力低、塑性好、锻造温度范围宽、锻裂、冷裂及析出网状碳化物的倾向性小。

2. 可加工性

对可加工性的要求是:切削力小、切削量大、刀具磨损小以及加工后模具表面光洁。冷作模具钢主要属于过共析钢和莱氏体钢,在大多数冷作模具钢切削加工工艺都比较困难,为了获得良好的切削加工性,需要对冷作模具钢进行正确的热处理,对于表面质量要求较高的模具可选用含S和Ca等元素的易切削模具钢。

3. 可磨削性

为了保证模具具有较好的表面粗糙度和尺寸精度,大部分模具必须经过磨削加工。对可磨削性的要求是:对砂轮质量及冷却条件不敏感,不易发生磨伤和磨裂。改善模具钢的可磨削性,可以通过在炼钢过程中加入变质剂(如Si、Ca和稀土元素等)。

有些模具材料(如高钒高速钢和高钒高合金钢)的可磨削性很差,磨削比很低,不便于磨削加工。近年来改用粉末冶金生产这些材料,可以使钢中的碳化物细小、均匀,完全消除

了普通工艺生产的高钒模具钢中的大颗粒碳化物，不但使这类模具钢的可磨削性大为改善，而且改善了钢的塑性、韧性等性能，使之能在模具制造中推广应用。

4. 热处理工艺性能

热处理工艺性能主要包括：淬透性、淬硬性、耐回火性、过热敏感性、氧化脱碳倾向、淬火变形和开裂倾向等。

(1) 淬透性和淬硬性。淬透性主要取决于钢的化学成分、合金元素含量和淬火前的组织状态。淬透性好的模具钢淬火时采用较缓和的冷却介质，就可以获得较深的硬化层。对于形状复杂的小型模具，采用高淬透性的模具钢制造，可以减少模具的变形和开裂；对于大截面、深型腔模具，选用高淬透性模具钢制造，淬火后心部也能得到良好的组织和硬度。

淬硬性主要取决于钢的含碳量，所以对要求耐磨性高的冷作模具，一般选用高碳钢制造。

(2) 耐回火性。耐回火性是在回火过程中随着温度的升高，钢抵抗硬度下降的能力。回火温度相同，硬度下降少的钢耐回火性好。耐回火性越高，钢的热硬性越高，在相同的硬度下，其韧性也较好。一般对于受到强烈挤压和摩擦的冷作模具，也要求模具材料具有较高的耐回火性。

(3) 过热敏感性。模具在加热过程中，出现过热现象，会得到粗大的马氏体，降低模具的韧性，增加模具早期断裂的危险，所以要求冷作模具钢有过热倾向。

(4) 氧化脱碳倾向。模具在加热过程中如果发生氧化脱碳现象，就会改变模具的形状和性能，严重降低模具的硬度、耐磨性和使用寿命，使模具早期失效，所以要求冷作模具钢的氧化脱碳倾向要小。对于容易发生氧化、脱碳的含钼量较高的模具钢，宜采用真空热处理、可控气氛热处理、盐浴热处理等，以避免模具钢氧化脱碳。

(5) 淬火变形和开裂倾向。模具钢淬火变形、开裂倾向与材料成分及原始组织状态、工件几何尺寸及形状、热处理工艺方法及参数等都有很大关系，模具设计选材时必须加以考虑。特别是一些形状复杂的精密模具，淬火后难以修整，这就要求材料淬火、回火后的变形程度要小，一般应选择微变形钢。

2.1.3 冷作模具钢的分类

冷作模具一直是应用广泛的一类模具，其产值占模具产值的 1/3 左右，采用的材料也很广泛，从各种碳素工具钢、合金工具钢、高速工具钢、基体钢、硬质合金、钢结硬质合金、粉末高速工具钢和粉末高合金模具钢，直到结构钢、锌合金和增强塑料等。常用的冷作模具钢的分类见表 2-1。

表 2-1 冷作模具钢分类

类 别	钢 号
低淬透性冷作模具钢	T7A、T8A、T10A、T12A、8MnSi、Cr2、9Cr2、Cr06、W、GCr15、V、CrW5
低变形冷作模具钢	CrWMn、9Mn2V、9CrWMn、9Mn2、MnCrWV、SiMnMo
高耐磨微变形冷作模具钢	Cr12、Cr12MoV、Cr12Mo1V1、Cr5Mo1V、Cr4W2MoV、Cr12Mn2SiWMoV、Cr6WV、Cr6W3Mo2.5V2.5
高强度高耐磨冷作模具钢	W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2、W12Mo3Cr4V3N
抗冲击冷作模具钢	4CrW2Si、5CrW2Si、6CrW2Si、9CrSi、60Si2Mn、5CrMnMo、5CrNiMo、5SiMnMoV
高强韧性冷作模具钢	6W6Mo5Cr4V、6Cr4W3Mo2VNb（65Nb）、7Cr7Mo2V2Si（LD）、7CrSiMnMoV（CH-1）、6CrNiSiMnMoV（GD）、8Cr2MnWMoVS
高耐磨、高韧性冷作模具钢	9Cr6W3Mo2V2（GM）、Cr8MoWV3Si（ER5）
特殊用途冷作模具钢	9Cr18、Cr18MoV、Cr14Mo、Cr14Mo4、1Cr18Ni9Ti、5Cr21Mn9Ni4W、7Mn15Cr2Al3V2WMo

2.2 冷作模具钢性能介绍

根据表 2-1 的冷作模具钢分类，本节分别对低淬透性冷作模具钢、低变形冷作模具钢、高耐磨微变形冷作模具钢、高强度高耐磨冷作模具钢、抗冲击冷作模具钢、高强韧性冷作模具钢、高耐磨高韧性冷作模具钢以及特殊用途冷作模具钢的性能及基本热处理工艺进行介绍。

2.2.1 低淬透性冷作模具钢

低淬透性冷作模具钢中，使用最多的是碳素工具钢和 GCr15 轴承钢。表 2-2 是几种典型碳素工具钢和 GCr15 轴承钢的成分和相对性能。

表 2-2 典型碳素工具钢与 GCr15 钢的成分和相对性能

钢号	化学成分/（w，%）				性能相对顺序 ^①			
	C	Mn	Si	Cr	淬透性	韧性	耐磨性	淬火工艺性
T7A	0.7	0.3	0.3	—	1	5	1	1
T8A	0.8	0.3	0.3	—	4	4	2	3
T10A	1.0	0.3	0.3	—	3	2	3	4
T12A	1.18	0.3	0.3	—	2	1	4	2
GCr15	1.0	0.3	0.25	1.45	5	3	5	5
注：①顺序 1→5，表示性能由低→高。								

碳素工具钢中碳的质量分数在 0.7%~1.3% 范围内，价格便宜，原材料来源方便，加工性能良好，淬火温度低，热处理后具有较高的表面硬度和较好的耐磨性，适宜制造尺寸较小、形状简单、负荷较轻、生产批量不大的冷作模具，其中 T10A 钢是性能较好、应用最广的代表性钢种，常用来制作小型切边模、落料模以及小型的拉深模具。缺点是淬透性低，淬火温度范围窄，淬火变形大，较大的模具不能淬透，而且表面淬硬层和中心部分之间的硬度值相差很大，容易使模具在淬火时开裂，因此很少用来制造精度要求高、形状复杂、承载力较大的冷作模具。

1. T8、T8A 钢

T8 钢淬火加热时容易过热，变形也大，塑性及强度也比较低，不宜制造承受较大冲击的工具；但价格便宜、材料来源广、热处理温度低，热处理后有较高的硬度及耐磨性，因此多用来制造切削刃口在工作时不变热的工具、形状简单的冷作模具（如冲模等）及热固性塑料压缩模等。

1) 热加工

T8 钢锻造工艺规范见表 2-3。

表 2-3 T8 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
钢锭	1 100~1 150	1 050~1 100	750~850	空冷
钢坯	1 050~1 100	1 020~1 080	750~800	空冷

2) 预备热处理

(1) 锻后等温退火：加热温度为 740~760 ℃，保温 1~2 h；等温温度为 650~680 ℃，保温 1~2 h；炉冷至 550 ℃ 以下出炉空冷，硬度≤187HBS。

(2) 锻后退火：加热温度为 690~710 ℃，保温 4~5 h，炉冷至 550 ℃ 以下出炉空冷（或炉冷），硬度≤187HBS。

(3) 正火：加热温度为 760~780 ℃，空冷，硬度为 241~302HBS。目的是为细化晶粒，消除网状碳化物。

(4) 高温回火：加热温度为 650~700 ℃，保温 2~3 h，炉冷或空冷，硬度≤187HBS。高温回火用于消除冷变形后的冷作硬化及淬火前切削加工的内应力。

3) 淬火及回火

表 2-4 为推荐的淬火工艺规范。表 2-5 为回火温度与硬度的关系。

表 2-4 推荐的淬火工艺规范

方案	加热温度 /℃	冷却方式				硬度 HRC
		介质	温度/℃	延续	冷却至 20 ℃	
I	750~800	水	20~40	到 200~250 ℃	油冷	62~64
II		5%食盐水	20~40	到 200~250 ℃	油冷	62~65
III		5%~10%碱水溶液	20~40	到 200~250 ℃	油冷	62~64
IV	800~820	锭子油或变压器油	20~40	至 20~40 ℃	—	60~63
V		熔融硝盐	170~200	3~5 min	空冷	60~63
VI		熔碱中加 4%~6%水	170~200	3~5 min	空冷	60~63

回火温度为 160~180 ℃，硬度为 58~62HRC。

表 2-5 回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	100	150	200	300	400	500	550	600
硬度 HRC	62	60.5	60	53	44	38	31	27
注：保温 2 h。								

2. T10、T10A 钢

T10、T10A 钢是工模具行业应用最多的碳素工具钢。T10 钢在淬火加热时（温度达 800 ℃）不致过热，淬火后钢中有未溶的过剩碳化物，所以具有比 T8 钢、T8A 钢高的耐磨性，但淬火变形收缩明显。该钢价格便宜、热处理温度低，热处理后有较高的硬度及耐磨性，但其淬透性差，常规淬火后硬化层浅，通常只有 1.5~5 mm。一般采取 220~250 ℃回火时综合性能较好，适合制作形状简单的冷作模具和塑料成型模具。

1) 热加工

T10 钢锻造工艺规范见表 2-6。

表 2-6 T10 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
钢锭	1 100~1 150	1 050~1 100	750~850	空冷
钢坯	1 050~1 100	1 020~1 080	750~800	空冷

2) 预备热处理

(1) 锻后退火：加热温度为 750~770 ℃，保温 1~2 h，炉冷至 550 ℃以下出炉空冷，退火后硬度≤197HBS。

(2) 锻后等温退火：加热温度为 750~770 ℃，保温 1~2 h；等温温度 680~700 ℃，保温 1~2 h，炉冷至 550 ℃以下出炉空冷，硬度≤197HBS。

(3) 高温回火（再结晶退火）：加热温度为 650~700 ℃，保温 2~3 h，空冷（或炉冷），硬度≤197HBS。

(4) 正火：加热温度为 800～850 ℃，空冷，硬度为 255～321HBS。目的是为细化过热钢的晶粒和消除网状渗碳体。

(5) 调质处理：加热温度为 780～800 ℃，油冷；回火温度为 640～680 ℃，炉冷或空冷，硬度为 183～207HBS。目的为提高在退火状态硬度低于 183HBS 钢材的切削加工性，以改善加工后表面粗糙度。

3) 淬火及回火

(1) 推荐的淬火工艺规范见表 2-7。

表 2-7 推荐的淬火工艺规范

方案	加热温度 /℃	冷 却 方 式				硬度 HRC
		冷却介质	介质温度/℃	延续	冷却至 20 ℃	
I	770～790	水	20～40	至 200～250 ℃	油冷	62～64
II		5%食盐水溶液	20～40	至 200～250 ℃	油冷	62～65
III		5%～10%碱水溶液	20～40	至 200～250 ℃	油冷	62～64
IV	790～810	锭子油或变压器油	20～40	至 20～40	—	62～64
V		熔融硝酸盐	150～180	3～5 min	空冷	62～64
VI		熔碱中加 4%～6%水	150～180	3～5 min	空冷	62～64

(2) 对于小型精密模具可采用等温淬火工艺。等温淬火：加热温度为 780～800 ℃，等温温度 250～280 ℃，5 min 后空冷，硬度为 53.5～55HRC。

实践证明采用等温淬火后，模具的韧性得到改善，使用寿命得到提高。

(3) 冷处理：在淬火后 1 h 内进行冷处理；温度－50 ℃，硬度增加 1～2HRC，用于高精密工件尺寸稳定化。

(4) 回火：T10 钢回火温度与硬度的关系见表 2-8。

表 2-8 T10 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	100	150	200	250	300	350	400	500	600
硬度 HRC	63	62	61	58	54	50.5	47	38.5	28
注：保温 2 h。									

3. GCr15 钢

GCr15 钢是专用的轴承钢之一，但也常用来制造冷作模具，如落料模、冷挤压模和成型模等。

该钢具有过共析成分，与碳素工具钢相比添加了一定量的 Cr，因此其淬透性、硬度和耐磨性都比碳素工具钢高，接触疲劳强度也高。该类钢在淬火、回火时尺寸变化不大。由于合金元素的加入提高了钢的淬透性，因而油冷淬火可以代替水冷淬火，淬火应力小，降低了模具变形和开裂的倾向。马氏体在回火时不易分解，分解后的碳化物也不易集聚长大，耐回

火性有所上升。低温回火后的工模具有较高的强韧性和耐磨性，使用寿命可大幅度提高。由于具备这些特点，在模具制造上多用于制造拉丝模和冷墩模等模具。

1) 热加工

GCr15 钢锻造工艺规范见表 2-9。

表 2-9 GCr15 钢锻造工艺规范 ℃

项目	加热温度	始锻温度	终锻温度	冷却
钢锭	1 150~1 200	1 100~1 150	800~880	先空冷至 700℃后坑冷
钢坯	1 080~1 120	1 050~1 100	800~850	先空冷至 700℃后坑冷

2) 预备热处理

(1) 锻后等温退火：缓慢加热至 770~790℃，保温 1~2 h，炉冷到 680~700℃，保温 3~4 h 后炉冷到 550℃以下出炉空冷，硬度为 187~229HBS。

(2) 高温回火：加热温度为 600~700℃，保温 2~3 h，炉冷或空冷，硬度为 187~229HBS。主要用于消除淬火前切削加工应力。

(3) 正火：加热温度为 930~950℃，空冷，硬度为 302~388HBS。用于细化过热钢的晶粒和消除网状碳化物。

(4) 调质处理：淬火温度为 840~860℃，油冷；回火温度为 660~680℃，炉冷或空冷，硬度为 197~217HBS。

3) 淬火及回火

回火温度与硬度的关系见表 2-10。

表 2-10 回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	未回火	200	300	400	500	550	600	650
硬度 HRC	62	61	56	49	40	36	31	28
注：830℃油淬，回火 2 h。								

(1) 淬火：加热温度为 830~850℃，油冷，硬度为 62~65HRC。

(2) 回火：加热温度为 150~190℃，硬度为 58~62HRC。

(3) 等温淬火：加热温度为 830~950℃，240~300℃等温淬火。回火温度为 180~200℃，硬度为 58~62HRC。

(4) 碳化物超细化处理：固溶温度为 1 050℃，淬入 300~350℃的等温槽中进行等温处理，使之获得下贝氏体组织。回火温度为 720℃左右，回火时间为 2 h，但硬度偏高加工困难。可以改用短时等温球化工艺，720℃加热 1 h，再升温到 780℃保温 1 h，然后冷却到 720℃再保温 1 h，最后炉冷到 500℃出炉。固溶—等温球化后，可以获得超细化的球状碳化物。

为了节能省时，模具钢适于用锻造余热等温淬火工艺代替固溶热处理。

2.2.2 低变形冷作模具钢

低变形冷作模具钢是在碳素工具钢基础上加入少量合金元素而发展起来的。通常加入的合金元素有 Cr、Mn、Si、W 和 V 等。其主要作用是提高淬透性，减小淬火变形开裂倾向，形成特殊碳化物，细化晶粒，提高回火稳定性。因此这类模具钢的强韧性、耐磨性、热硬性都比碳素工具钢高，使用寿命也较碳素工具钢长。

表 2-11 为低变形冷作模具钢的化学成分及基本特点，其中 CrWMn、9Mn2V 是典型钢种。

表 2-11 低变形冷作模具的化学成分及基本特点

钢号	化学成分/ (w,%)					基 本 特 点
	C	Mn	Cr	W	V	
MnCrWV	1.0	1.2	0.6	0.6	0.2	综合性能优良、各国通用
CrWMn	1.0	1.0	1.0	1.4	—	耐磨性较好、易出现材质缺陷
9CrWMn	0.9	1.0	0.6	0.6	—	韧性、塑性较好、耐磨性较低
9Mn2V	0.9	1.8	—	—	0.2	淬火变形小、韧性、淬透性偏低
9Mn2	0.9	1.8	—	—	—	过热敏感性强、易于加工、变形小
SiMnMo	1.5	1.2	Si1.0	Mo0.4	—	耐磨性、抗咬合性好、强韧性低

1. CrWMn 钢

CrWMn 钢具有高淬透性，由于 W 形成碳化物，这种钢在淬火和低温回火后具有比 Cr2 钢和 9SiCr 钢更多的过剩碳化物、更高的硬度及耐磨性，此外 W 还有助于保存细小晶粒，从而使钢获得较好的韧性。所以 CrWMn 钢制成的刀具的崩刃现象较少，并能较好地保持刀刃形状和尺寸。但是 CrWMn 钢对网状碳化物比较敏感，这种网状碳化物的存在使工具刃部有剥落的危险，从而缩短工模具的使用寿命。因此有网状碳化物的钢，必须根据其严重程度进行锻压、退火和淬火，并建议采用碳化物超细化处理工艺。

CrWMn 钢的耐磨性、热硬性、强韧性均优于碳素工具钢，是使用较为广泛的冷作模具钢。主要用于制造变形小、形状较复杂的轻载冲裁模（冲裁板厚小于 2 mm），轻载拉延、弯曲和翻边模等。

1) 热加工

CrWMn 钢锻造工艺规范见表 2-12。

表 2-12 CrWMn 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
钢锭	1 150~1 200	1 100~1 150	800~880	先空冷，然后缓冷
钢坯	1 100~1 150	1 050~1 100	800~850	先空冷，然后缓冷

注：为了降低或减轻网状碳化物的形成，锻造后尽快快地冷至 650~700℃，然后缓冷（坑冷、砂冷或炉冷）。

2) 预备热处理

(1) 锻后退火：加热温度为 $770\sim 790\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，保温 $1\sim 2\text{ h}$ ，炉冷至 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下出炉空冷，硬度为 $207\sim 255\text{HBS}$ 。

(2) 锻后等温退火：加热温度为 $770\sim 790\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，保温 $1\sim 2\text{ h}$ ；等温温度为 $680\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，保温 $1\sim 2\text{ h}$ ，炉冷至 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下出炉空冷，硬度为 $207\sim 255\text{HBS}$ 。

(3) 高温回火：加热温度为 $600\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，炉冷或空冷，硬度为 $207\sim 255\text{HBS}$ 。目的是用于消除冷变形加工硬化（或称为再结晶退火）；消除切削加工内应力。二次淬火的模具亦需先经高温回火。

(4) 正火：加热温度为 $970\sim 990\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，空冷，硬度为 $388\sim 514\text{HBS}$ 。目的是用于细化过热钢的晶粒和消除网状碳化物。

(5) 调质处理：加热温度为 $840\sim 860\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，油冷；回火温度为 $660\sim 680\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，保温 $2\sim 3\text{ h}$ ，炉冷或空冷，硬度为 $207\sim 255\text{HBS}$ 。目的是用于降低切削加工后的表面粗糙度值。

3) 淬火及回火

(1) 推荐的淬火工艺规范见表 2-13。

表 2-13 推荐的淬火工艺规范

方案	淬火温度 / $^{\circ}\text{C}$	冷却方式				硬度 HRC
		介质	温度/ $^{\circ}\text{C}$	延续	冷却到 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$	
I	$820\sim 840$	油	$20\sim 40$	至油温	空冷	$63\sim 65$
II		油	$90\sim 140$	至 $150\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$	空冷	$63\sim 65$
III	$830\sim 850$	熔融硝酸盐或碱	$150\sim 160$	$3\sim 5\text{ min}$	空冷	$62\sim 64$

注：1. 方案 II 和 III 用于形状复杂，要求变形小的工件。
2. 直径和厚度大于 50 mm 的工件，淬火温度可提高至 $850\sim 870\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 冷处理见表 2-14。

表 2-14 冷处理

淬火方案	冷却温度/ $^{\circ}\text{C}$	用途	硬度增量 HRC
I ~ III	-70	高精度工模具尺寸稳定化	$0\sim 1$

(3) 回火：回火温度为 $170\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，硬度为 $60\sim 62\text{HRC}$ 。

(4) 回火温度与硬度的关系见表 2-15。

表 2-15 回火温度与硬度的关系

回火温度/ $^{\circ}\text{C}$	150	200	250	300	350	400	450	500	600
硬度 HRC	62	61	58	56	53.5	52.5	50	47	39

注： $830\text{ }^{\circ}\text{C}$ 油冷，回火 2 h 。

(5) CrWMn 钢的双细化热处理。固溶（淬火）温度为 1 050 ℃，热油冷却或 300 ℃左右等温处理，回火温度为 700~720 ℃，最终热处理的淬火温度比常规淬火工艺低 20~40 ℃。超细化处理——低温淬火后，可获得超细化的碳化物和被细化了的晶粒，称为双细化工艺。这项工艺已在模具制造业中得到广泛应用，使模具的使用寿命成倍提高，解决了长期困扰模具行业的脆裂和崩刃的难题。

2. 9Mn2V 钢

9Mn2V 钢是利用我国丰富的锰、钒资源研制出来的不含 Cr 的冷作模具钢，其中 Mn 的质量分数高达 1.70%~2.00%，主要是为了提高钢的淬透性。9Mn2V 钢是一种综合力学性能优于碳素工具钢的低合金工具钢，具有较高的硬度和耐磨性，淬火变形较小，淬透性很好。由于钢中含有一定量的 V，细化了晶粒，减小了钢的过热敏感性，碳化物较细小且分布较均匀。

9Mn2V 钢碳化物细小均匀，冷加工工艺性、热加工工艺性都较好，但淬透性、淬硬性、耐回火性和强度稍低于 CrWMn 钢，并且有明显的低温回火脆性。9Mn2V 钢适于制造各种精密量具、样板，也用于制造一般要求、尺寸比较小（厚度小于 4 mm）的冲模、冷压模、雕刻模、落料模等模具。刃磨寿命稳定在 2~3.5 万次水平，比碱浴淬火的 T10A 钢提高 50%~150%。

1) 热加工

9Mn2V 钢锻造工艺规范见表 2-16。

表 2-16 9Mn2V 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 140~1 180	1 100~1 150	800~850	坑冷或热砂缓冷
钢坯	1 080~1 120	1 050~1 100	800~850	坑冷或热砂缓冷

2) 预备热处理

(1) 锻后一般退火：加热温度为 750~770 ℃，保温 2~8 h，炉冷至 500 ℃以下出炉空冷，硬度≤229HBS。

(2) 锻后等温退火：加热温度为 760~780 ℃，保温 3 h；等温温度为 680~700 ℃，保温 4~5 h，炉冷至 500 ℃以下出炉空冷，硬度≤229HBS。

3) 淬火及回火

硬度与回火温度的关系见表 2-17。

表 2-17 硬度与回火温度的关系

回火温度/℃	未回火	100	200	250	300	350	400	500	600
硬度 HRC	62	61.5	60	58	55	52	48	40	32
注：790 ℃油淬，回火 2 h。									

- (1) 淬火：加热温度为 780~820 ℃，油冷，硬度 $\geq$ 62HRC。
 (2) 回火：加热温度为 150~200 ℃，保温 2~3 h，硬度为 60~62HRC。

3. 9CrWMn 钢

9CrWMn 钢和 CrWMn 钢是化学成分相近、性能相似的低合金冷作模具钢。由于这类钢含有 0.90%左右的 Mn、1.00%左右的 Cr 和 1.00%左右的 W，其淬透性比 Cr15 钢高。由于 W 形成碳化物，因此这种钢在淬火和低温回火后具有比 Cr2 钢和 9SiCr 钢更多的过剩碳化物和更高的硬度和耐磨性。W 还能细化晶粒，从而使钢获得较好的韧性并能减小过热敏感性。该类钢在 800 ℃淬火时，抗弯强度和韧性最高；约在 300 ℃回火时，冲击韧度值最低，因此 9CrWMn 钢应避免在 300 ℃左右回火。9CrWMn 钢对形成网状碳化物比较敏感，这种网状碳化物的存在会使模具刃部产生剥落的危险，从而降低模具使用寿命。因此对含有网状碳化物的钢应进行合理锻造，并推荐采用碳化物超细化处理具等。

9CrWMn 钢通常用于制造截面不大而形状复杂的冷冲模、各种量规和量具等。

1) 热加工

9CrWMn 钢的锻造工艺规范见表 2-18。

表 2-18 9CrWMn 钢的锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 150~1 200	1 100~1 150	$\geq$ 850	缓冷
钢坯	1 100~1 150	1 050~1 100	$\geq$ 850	缓冷

2) 预备热处理

锻后等温退火：加热温度为 780~800 ℃，保温 2~3 h；等温温度为 670~720 ℃，保温 2~3 h，炉冷至 550 ℃以下出炉空冷，硬度为 197~241HBS。

3) 淬火及回火

表 2-19 为回火温度与硬度的关系。

表 2-19 回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	100	200	300	400	500	550	600	650
硬度 HRC	62	60	56	52	47	43	39	35

注：830 ℃油淬，回火保温 2 h。

(1) 淬火：加热温度为 820~840 ℃，油冷，硬度为 64~66HRC。

(2) 回火：回火温度为 160~180 ℃，硬度 $\geq$ 61HRC。

(3) 9CrWMn 钢的双细化工艺：

①固溶淬火温度为 1 050 ℃，热油冷却或 300 ℃左右等温处理，回火温度为 700~720 ℃；

②最终热处理淬火温度为 800~820 ℃（应比常规淬火温度低 20~40 ℃）。

(4) 等温淬火。加热温度为 820~840 ℃，等温温度为 260~300 ℃，等温时间 $\leq$ 1 h。等

温淬火后，基体组织为马氏体＋残留奥氏体＋剩余碳化物，上面分布着质量分数约为 50％的下贝氏体针状组织。适量的下贝氏体分布在高强度的马氏体的基体上，可以提高材料的强韧性。实践表明：手表零件冲压模关键零件采用等温淬火工艺后，使用寿命可得到大幅度提高。若先采用碳化物超细化处理，待模具加工好以后再进行等温淬火，模具可以获得最佳使用寿命。

2.2.3 高耐磨微变形冷作模具钢

高耐磨微变形冷作模具钢一般是高碳高铬钢，是一种高合金冷作模具钢，应用量最多最广泛。自 20 世纪 70 年代开始用于冷作模具，现已成为重载冲头的基本材料。代表钢号有：Cr12、Cr12MoV、Cr12Mo1V1、Cr12W、Cr12V、Cr4W2MoV、Cr5Mo1V、Cr6WV、LD（7Cr7Mo2V2Si）、ER5（Cr8MoWV3Si）和 GM（9Cr6W3Mo2V2）等。这类钢大部分是莱氏体钢，组织中有大量共晶碳化物，淬火后有大量共晶碳化物存在，同时含有大量残留奥氏体，因此热处理后变形小、耐磨性高、承载力大，经常用于制造在高耐磨、微变形、高负荷条件下工作的冷加工用模具。但是由于高碳高铬莱氏体钢中有大量共晶碳化物分布不均匀，因此该类钢韧性较差，易出现崩刃、脆裂现象。

新研制的耐磨钢（如 LD、ER5 和 GM 钢），因含多种碳化物形成元素，使碳化物弥散均匀分布，其耐磨性、强韧性、加工性能均优于传统的莱氏体钢，属高强韧性、高耐磨性冷作模具钢。应用这类钢提高了模具的使用寿命，值得进一步推广。

表 2－20 为高耐磨微变形冷作模具钢的化学成分及基本特点。

表 2－20 高耐磨微变形冷作模具钢的化学成分及基本特点

钢号	化学成分/（w，％）							基 本 特 点
	C	Mn	Si	Cr	W	Mo	V	
Cr12MoV	1.5	—	—	12	—	0.5	0.2	综合性能好、适应性广泛
Cr12	2.2	—	—	12	—	—	—	高耐磨性、高抗压性
Cr6WV	1.0	—	—	6.0	1.3	—	0.6	高强度、变形均匀
Cr4W2MoV	1.2	—	0.5	3.8	2.2	1.0	1.0	高耐磨、高热稳定性
Cr2Mn2SiWMoV	1.0	2.0	0.8	2.5	1.0	0.6	0.2	低温淬火、变形均匀
Cr12Mo1V1（D2）	1.57	0.31	0.23	11.71	—	1.02	0.96	高耐磨、高强度

1. Cr12 钢

Cr12 钢是一种应用广泛的冷作模具钢，在热处理专业化厂对外加工的冷作模具钢中，Cr12 钢要占 30％以上。该类模具钢属高碳高铬类型的莱氏体钢，碳的质量分数高达 2％以上，所以冲击韧度较差、易脆裂，而且容易形成不均匀的共晶碳化物。Cr12 钢中存在大量 Cr 元素，主要形成（Cr·Pe）₇C₃ 型化合物，而渗碳体型碳化物极少。淬火加热时碳化物大量溶入奥氏体中，淬火后得到高硬度马氏体，回火时马氏体析出大量弥散分布的碳化物。由于其硬度很高，因而提高了钢的耐磨性。Cr 又使等温转变曲线右移，从而增加了钢的淬透

性。马氏体相变点低，淬火后模具钢中有大量的残留奥氏体，减少了模具淬火时的变形量。由于 Cr12 钢具有高硬度和良好的耐磨性，所以冷作模具广泛用来制造形状复杂的重载冷作模具，如切边模、落料模、拉丝模和搓丝模等。由于该类钢脆断倾向性大，将逐渐被其他新钢种替代，相应使用范围正在缩小。

1) 热加工

Cr12 钢锻造工艺规范见表 2-21。

表 2-21 Cr12 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 140~1 160	1 100~1 120	900~920	缓冷
钢坯	1 120~1 140	1 080~1 100	880~920	缓冷

(1) Cr12 钢锻造及改锻的必要性。Cr12 型高碳高铬冷作模具钢结晶过程中析出的碳化物极其稳定，以常规热处理方法无法细化。在较大规格钢材中残留有明显的带状或网状碳化物，而且钢材规格越大，碳化物不均匀度越严重。碳化物严重偏析，不仅易产生淬火变形及开裂，而且会使热处理后的力学性能变坏，尤其是横向性能下降更多，严重影响模具使用寿命。因此对 Cr12 型莱氏体钢，必须进行锻造以改善碳化物的不均匀性，保证模具的强度、韧性及使用寿命。

锻造不仅使钢中的碳化物分布均匀、强韧性提高，而且在模具中形成合理的流线排列，促使各方向淬火变形趋向一致。因此，模具钢钢材，特别是精密模具和重载模具的毛坯，必须进行合理的改锻，这不仅关系到制造加工的效率 and 热处理的质量，而且可以显著提高模具的使用寿命。

(2) 锻造工艺与实际操作。锻造实际操作时一定要严格按照锻造工艺规范，其关键在于毛坯加热温度及保温时间。温度低、时间短、透烧不足或变形抗力太大，会产生锻件内裂或裂纹；而加热温度过高，会使毛坯过热或过烧，导致锻打碎裂而报废；保温时间长，会造成晶粒长大及表面严重脱碳。加热时要先预热，再逐渐升温，注意工件放置的位置要适当，且应注意翻料，以使加热均匀。

锻打时坚持多向锻拔，反复锻粗、拔长，将网状碳化物和共晶碳化物打碎，消除碳化物的不均匀性。锻后应注意缓冷并及时退火。

2) 预备热处理

(1) 锻后一般退火：加热温度为 850~870℃，保温 4~5 h，炉冷至 500℃以下出炉空冷，退火后硬度 $\leq 229\text{HBS}$ ，组织为粒状珠光体+碳化物。

(2) 锻后等温退火：加热温度为 830~850℃，保温 2~3 h；炉冷至 720~740℃，保温 3~4 h，炉冷至 550℃以下出炉空冷，退火后硬度 $\leq 269\text{HBS}$ ，组织为粒状珠光体+碳化物。

3) 淬火及回火

(1) 推荐的淬火规范：淬火温度为 950~980℃，油冷，硬度 $\geq 60\text{HRC}$ 。淬火温度与硬度的关系见表 2-22。

表 2-22 淬火温度与硬度的关系

淬火温度/℃	875	900	925	950	975	1 000	1 050	1 100
硬度 HRC	54.5	57	60	62.5	65	66	64	59.5

(2) 推荐回火温度一般为 180~200 ℃，硬度≥60HRC。为了防止电火花线切割裂纹和磨削裂纹，提高 Cr12 钢模具的韧性，建议采取 400 ℃回火。回火后硬度为 54~58HRC。回火脆性区为 275~375 ℃，在回火时应尽量避开回火脆性区。

Cr12 钢回火温度与硬度的关系见表 2-23。

表 2-23 Cr12 钢回火温度与硬度关系

硬度 HRC 回火温度/℃ 淬火	未回火	200	300	400	450	500	550	600	650
955 ℃油淬	65	63	62	60	60	60	59.5	57.1	44
980 ℃油淬	66	62	60	58	57	59	55	50	39
1 010 ℃油淬	64	62	59.5	58	57	58	56	51	40
1 090 ℃油淬	55	53	51	50	50	51.5	53	62	49
注：以上数据根据有关资料摘录，仅供参考。									

回火温度与残留奥氏体量（体积分数）的关系：淬火温度越高，残留奥氏体量越大（975 ℃淬火，残留奥氏体量 29%；1 100 ℃淬火，残留奥氏体量 80%以上），回火温度在 450 ℃以下，残留奥氏体量变化不大；450 ℃以上回火，残留奥氏体量大为减少；500 ℃以上回火，残留奥氏体量最少（550 ℃回火，残留奥氏体量由 80%降到 20%以下）。

(3) 等温淬火。980 ℃加热保温后，在 250~280 ℃温度下的硝酸盐中保温一段时间后空冷，可以获得下贝氏体+马氏体+残留奥氏体+碳化物的混合组织，然后再经过适当温度回火，即可获得满意的性能。等温淬火的最大优点在于不降低工件强度的同时，能大幅度提高模具的韧性，工模具的使用寿命一般可以提高 30%~50%。Cr12 钢采用不同的等温淬火工艺后的效果见表 2-24。

表 2-24 Cr12 钢采用不同热处理工艺的性能对比

热处理工艺	硬度 HRC	冲击韧度 $\alpha_K/(J \cdot cm^{-2})$	残留奥氏体 (体积分数, %)	搓螺纹板的使用寿命 /10 ⁵ 件	磨损量 ^① /mg
980 ℃加热，油淬	66.5	14.1	13.2	4	—
980 ℃加热，180 ℃分级 50 min	65.8	15.8	—	5	—
980 ℃加热，270 ℃等温 3 h	62.5	15.9	—	6	11.9
980 ℃加热，270 ℃等温 4 h	60	17.7	15.02	—	—
980 ℃加热，270 ℃等温 5 h	59	16.8	—	—	—
980 ℃加热，180 ℃预淬火 35 min，270 ℃等温 1 h	64.6	14.6	—	12~15	8.2

续表

热处理工艺	硬度 HRC	冲击韧度 $\alpha_K / (J \cdot cm^{-2})$	残留奥氏体 (体积分数, %)	搓螺纹板 的使用寿命 / 10^5 件	磨损量 ^① / mg
980 ℃加热, 180 ℃预淬火 35 min, 270 ℃等温 2 h	46.2	14.9	18.31	12~28	—
980 ℃加热, 180 ℃预淬火 35 min, 270 ℃等温 3 h	63.8	15.2	—	—	—
注: 所有试样均在 180 ℃回火 2 次, 每次 1.5 h。 磨损试验在 P-2 球盘磨损试验机上进行, 对磨材料为 YT30 硬质合金, 荷重 600g, 转速 400r/min, 干磨损, 用千分之一感量的天平称量。					

4) 固溶双细化工艺

固溶双细化工艺完全利用热处理方法, 使碳化物细化、棱角圆整化, 同时使奥氏体晶粒超细化, 其主要的工艺措施是高温固溶和循环细化。高温固溶, 可以改善碳化物的形态和粒度。循环细化的目的在于使奥氏体晶粒超细化。现将 Cr12 钢固溶双细化工艺简述如下。

(1) 固溶处理: 将模坯或工模具粗加工后高温加热固溶, 加热温度为 1 100~1 150 ℃ (加热过程中预热 2 次), 保温一段时间。

固溶后可以直接淬入热油或等温处理后转变为 BT+M 的复合组织。

回火温度为 750 ℃, 保温 1 h。组织为以细片珠光体为基体的原始组织。

(2) 双细化工艺: 在最终热处理前再增加一次低温淬火。加热温度为 960 ℃, 油冷淬火, 300 ℃左右出油空冷。

经固溶双细化后, Cr12 钢的冲击韧度可以成倍提高, 模具的使用寿命可以翻几番, 工序虽然增加, 单位成本有所上升, 但总的经济效益仍然很高。

2. Cr12Mo1V1 (D2) 钢

D2 钢是国际上应用较广泛的高碳高铬冷作模具钢, 属莱氏体钢, 具有高的淬透性、淬硬性和耐磨性, 高温抗氧化性能好, 淬火和抛光后抗锈蚀能力好, 热处理变形小, 宜制造各种要求高精度、长寿命的冷作模具、刀具和量具, 例如形状复杂的冲孔凹模、冷挤压模、滚螺纹轮、搓螺纹板、冷剪切刀和精密量具等。

1) 热加工

D2 钢锻造工艺规范见表 2-25。

表 2-25 D2 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 120~1 160	1 050~1 090	≥850	高温退火
钢坯	1 120~1 140	1 050~1 070	≥850	高温退火、坑冷或砂冷

2) 预备热处理

(1) 钢锭、钢坯退火工艺：加热温度为 870~890 ℃，保温 2~4 h；炉冷至 550 ℃ 以下出炉空冷。

(2) 钢材等温退火工艺：加热温度为 840~860 ℃，保温 2 h；炉冷至 720~740 ℃，保温 4 h；炉冷至 550 ℃ 以下出炉空冷，退火硬度为 207~255HBS。

3) 淬火及回火

(1) 推荐的淬火工艺规范见表 2-26。

表 2-26 推荐的淬火工艺规范

方案	加热温度/℃			冷却方式	硬度 HRC
	第 1 次预热	第 2 次预热	淬火加热		
I	500~600	820~860	980~1 040	油冷或空冷	60~65
II	500~600	820~860	1 060~1 100	油冷或空冷	60~65

(2) 推荐的回火工艺规范见表 2-27。回火温度对硬度的影响见表 2-28。

表 2-27 推荐的回火工艺规范

淬火方案	回火温度/℃	回火次数/次	硬度 HRC
I	180~230	1	60~64
II	510~540	2	60~64

表 2-28 回火温度对硬度的影响

硬 度 HRC 回火温度/℃ 淬火条件		未 回 火											
			200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
1 010 ℃	空冷	62	60.5	59.5	58.5	58	58	58	58	56	48	42	36.5
	油淬	62.5	61.5	60	58.5	58.5	58.5	58.5	59.5	56	48	42	36.5
1 066 ℃	空冷	63	61.5	60.5	60	59.5	59.5	59.5	60.5	61.5	51	43	40.5
	油淬	63	61.5	60	59.5	59.5	59.5	60	61	62.5	51	44	38
1 121 ℃	空冷	60.5	59.5	58	57.5	57	57	57	59.5	62	51.5	44	40.5
	油淬	60.0	58.0	58.5	56	54	54.5	56.5	58	61	57	44	38

3. Cr6WV 钢

Cr6WV 钢是一类具有较好综合性能的中合金冷作模具钢，淬火后变形小，淬透性良好，具有较好的耐磨性和一定的冲击韧度，由于合金元素和碳含量较低，所以比 Cr12 钢和 Cr12MoV 钢的碳化物分布均匀。

Cr6WV 钢具有广泛的用途，可以制造高强度、要求具有一定耐磨性和能经受一定冲击载荷的模具，如钻套、冷冲模及冲头、切边模、压印模、螺纹滚模、搓螺纹板，以及量块、量规等。

1) 热加工

Cr6WV 钢锻造工艺规范见表 2-29。

表 2-29 Cr6WV 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 100~1 160	1 050~1 120	850~900	缓冷
钢坯	1 060~1 120	1 000~1 080	850~900	缓冷

注：加热温度不宜过高。因钢的导热性差，故必须进行缓慢加热以保证烧透时间。锻后必须缓冷，以免产生裂纹。

2) 预备热处理

(1) 锻后一般退火工艺：加热温度为 830~850 ℃，保温 3~5 h；炉冷至 550 ℃以下出炉空冷，退火后硬度≤229HBS，组织为细粒状珠光体+碳化物。

(2) 锻后等温退火工艺：加热温度为 830~850 ℃，保温 2~4 h；等温温度为 700~720 ℃，保温 2~4 h；炉冷至 550 ℃以下出炉空冷，退火后硬度≤229HBS，组织为细粒状珠光体+碳化物。

3) 淬火及回火

(1) 淬火。推荐的淬火工艺规范见表 2-30。

表 2-30 推荐的淬火工艺规范

方案	加热温度/℃			冷 却 方 式				硬度 HRC
	一次预热	二次预热	淬火加热	介质	温度/℃	延续	冷却至 20 ℃	
I	300~400	800~850	950~970	油	20~60	到 20~60 ℃	空冷	62~64
II	300~400	800~850	990~1 010	硝酸盐、碱	400~450	3~10 min	空冷	62~64

(2) 推荐的回火工艺规范见表 2-31。回火温度与硬度的关系见表 2-32。

表 2-31 推荐的回火工艺规范

方案	加热介质	加热温度/℃	一次回火加热 保温时间/h	回火次数/次	硬度 HRC
I	油、硝酸盐或碱	150~170	2~3	1	62~63
II		190~210			58~60
III	硝酸盐、碱或空气炉	第一次回火 500	2	1	57~58
		第二次回火 190~210	2		57~58

表 2-32 回火温度与硬度的关系

硬 度 HRC	回火温度/℃							
	100	200	300	400	500	550	600	650
淬火								
950 ℃淬火	62	57.5	55	53.5	51	49	48	47
1 010 ℃淬火	63.5	60	57	56	56	56	55.5	53

注：回火 2 h。

2.2.4 高强度高耐磨冷作模具钢

传统的高速钢（W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2）即是此类钢的典型钢种。高速钢具有很高的硬度、抗压强度和耐磨性，采用低温淬火、快速加热淬火等工艺措施可以有效地改善其韧性，因此越来越多地用于制造要求重载荷、高使用寿命的冷作模具。常用的钢号有：W18Cr4V（W18）、W6Mo5Cr4V2（M2）、W12Mo3Cr4V3N（V3N）、W9Mo3Cr4V（W9）以及为提高韧性而研制的降碳降钒高速钢 6W6Mo5Cr4V（6W6），这些高速钢在制造重载荷的冷作模具方面获得了良好的使用效果。

高速钢主要用于重载冲头。如冷挤压冲头、冷镦冲头和中厚钢板冲孔冲头。

1. W18Cr4V 钢

W18Cr4V 钢为钨系高速钢，是莱氏体钢，具有高硬度、高强度、高抗压性、高耐磨性和高热稳定性等特点。对于要求有高热强性的工具和热作模具一般可以选用 W18Cr4V 钢，其热处理范围较宽，淬火不易过热，热处理过程中不易氧化脱碳，磨削加工性能较好。W18Cr4V 钢在 500～600℃时，硬度分别保持在 57～58HRC 及 52～53HRC，对于大多数的被加工材料具有良好的切削性能。

W18Cr4V 钢中有较多的共晶碳化物，虽经轧制但仍呈不均匀分布，大截面钢材的碳化物偏析尤为严重，高温塑性较差，适于制作具有很高的硬度、抗压强度和耐磨性能要求，承受高负荷，加工硬质材料的模具，如重载冲头和冷挤压模具等。

1) 热加工

高速钢中含有大量的 W、Mo、Cr、V 等合金元素，铸造组织中含有大量的莱氏体共晶碳化物，必须经过改锻，在锻造成形过程中要反复镦粗和拔长来改善碳化物的分布，锻造比要求大于 5，才能改善碳化物的分布（其他高速钢与此相同）。W18Cr4V 钢锻造工艺规范见表 2-33。

表 2-33 W18Cr4V 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 220～1 240	1 120～1 140	≥950	砂冷或堆冷
钢坯	1 180～1 220	1 120～1 140	≥950	砂冷或堆冷

2) 预备热处理

高速钢锻后要立即进行球化退火，以降低硬度，便于切削加工，同时使共晶碳化物球粒化，为进一步热处理打下组织基础。

（1）常规球化退火：加热温度为 860～880℃，保温 2 h；缓慢冷却到 500～550℃出炉，退火后硬度≤277HBS。

（2）等温球化退火：加热温度为 860～880℃，保温 2～4 h；炉冷到 740～760℃，保温

4~6 h；炉冷到 500~550 ℃出炉空冷，退火后硬度 $\leq 255\text{HBS}$ 。

3) 淬火及回火

(1) 推荐的淬火工艺规范见表 2-34。

表 2-34 推荐的淬火工艺规范

类型	一次预热/℃	二次预热/℃	淬火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
工具	500~600	840~860	1 260~1 290	油冷或分级淬火	62~64
冷作模具	—	840~860	1 200~1 240	油冷或分级淬火	62~64

(2) 回火温度与硬度的关系见表 2-35。推荐回火温度为 560~580 ℃，回火后硬度 $\geq 62\text{HRC}$ 。高速钢在 560~580 ℃回火，硬度显著提高并达到最高值，即发生所谓“二次硬化”现象。

表 2-35 回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	100	200	300	400	500	550	580	600	650	690
硬度 HRC	65	63	60.5	61	64	65	65.5	65	59	49

注：1 260 ℃油粹，回火 2.5 h。

高速钢必须经 3 次以上回火，主要是因为前 2 次回火冷却过程中残留奥氏体转变成马氏体，必须经再次回火才能消除前次回火时产生的组织应力。

2. W6Mo5Cr4V2 钢

W6Mo5Cr4V2 钢为钨钼系通用高速钢的代表，以 Mo 代替了部分 W，使铸态莱氏体得到细化，轧制后碳化物不均匀程度较轻，粒度也细，因此该钢具有碳化物细小均匀、韧性高以及热塑性好等优点。由于资源与价格的关系，许多国家用 W6Mo5Cr4V2 钢代替 W18Cr4V 钢成为高速钢的主要钢号。W6Mo5Cr4V2 钢的韧性、耐磨性以及热塑性均优于 W18Cr4V 钢，硬度、热硬性和高温硬度与 W18Cr4V 钢相当，因此 W6Mo5Cr4V2 钢除用于制造各种类型的普通工具外，还可以制作大型及热塑性成形刀具；由于强度高、耐磨性好，因而还可以制作高负荷下的耐磨损零件如冷挤压模具，但必须适当降低淬火温度以满足强度及韧性的要求。

W6Mo5Cr4V2 钢高速钢易于氧化脱碳，在热加工及热处理时应加以注意。

1) 热加工

W6Mo5Cr4V2 钢锻造工艺规范见表 2-36。

表 2-36 W6Mo5Cr4V2 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 180~1 190	1 080~1 100	≥ 950	砂冷或堆冷
钢坯	1 140~1 150	1 040~1 080	≥ 900	砂冷或堆冷

2) 预备热处理

W6Mo5Cr4V2 钢易氧化、脱碳，应采用装箱或在保护气氛下退火。

(1) 锻后退火：加热温度为 840～860 ℃，保温 2～4 h；缓慢冷却到 500 ℃以下出炉空冷或炉冷到室温，硬度≤285HBS。

(2) 锻后等温退火：加热温度为 840～860 ℃，保温 2～4 h；炉冷至 740～760 ℃，保温 4～6 h，炉冷到 500 ℃以下出炉空冷，硬度≤255HBS。

3) 淬火及回火

(1) 推荐的淬火工艺规范见表 2-37。

表 2-37 推荐的淬火工艺规范

类型	预热温度/℃	淬火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
工具	800～850	1 200～1 240	油冷	62～64
冷作模具	800～850	1 150～1 200	油冷	62～64

(2) 回火温度和硬度的关系见表 2-38。推荐的回火工艺规范：回火温度为 560 ℃，回火 3 次，硬度为 62～66HRC。与 W18Cr4V 钢一样，W6Mo5Cr4V2 钢也出现回火二次硬化现象，回火硬化峰在 560 ℃左右。

表 2-38 回火温度和硬度的关系

硬度 HRC 回火温度/℃ 淬火条件										
	淬火后	200	300	400	500	525	550	575	600	700
1 180 ℃油淬	66	63	62.7	63	63.5	64.5	64.5	64	62	52.5
1 200 ℃油淬	64	61.5	61.5	62	64	65	65.5	63.5	62.5	53.5
1 220 ℃油淬	65	62.5	62.5	62.5	64.5	65.5	66	64.5	62.5	53.5
1 240 ℃油淬	64	61.5	61.5	62	64.5	66	66.5	66	63	53.5

2.2.5 抗冲击冷作模具钢

本类钢共有 5 个牌号，成分接近合金调质钢，见表 2-39。主要合金元素是 Mn、Si、Cr、W、Mo。由于成分相近，此类钢具有一些共同特点，如碳化物少、组织均匀、淬火组织以板条状马氏体为主，具有高抗弯强度、高冲击疲劳抗力、高韧性和良好的耐磨性。但也有抗压强度低、热稳定性差和淬火变形难以控制等缺陷。下面介绍典型钢种的特性。

表 2-39 抗冲击冷作模具钢的成分及特点

类别	钢号	典型成分 (w,%)						性能及用途
		C	Mn	Si	Cr	W	Mo	
弹簧钢	60Si2Mn	0.6	0.8	2	—	—	—	疲劳强度高, 耐磨性低, 以小型冷锻冲头为主
耐冲击工具钢	4CrW2Si	0.4	—	1.0	1.2	2.2	—	需渗碳, 强韧, 耐磨
	5CrW2Si	0.5	—	0.6	1.2	2.2	—	以重剪刀为主
	6CrW2Si	0.6	—	0.6	1.2	2.4	—	抗压性较高, 以小型模具为主
刀具钢	9SiCr	0.9	0.5	1.4	1.1	—	—	淬硬性好, 以轻剪刀为主

1. 弹簧钢

1) 60Si2Mn 钢

60Si2Mn 钢是一种弹簧专用钢种, 国外同类型的 S5 钢也作为冷作模具钢。60Si2Mn 钢具有高屈服强度、高疲劳极限和优良的塑性等特点, 而且价格低廉, 热处理工艺简单, 用来制造冲击工具、模具。在标准件行业中多用来制造冷锻模冲头、螺母冷锻模具和冷冲孔模具等。60Si2Mn 钢有较高的强韧性和抗回火稳定性, 但耐磨性稍低, 淬透性也不高。因含硅量高, 因此有石墨化倾向, 脱碳敏感性也较高。

(1) 热加工

60Si2Mn 钢锻造工艺规范见表 2-40。

表 2-40 60Si2Mn 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 150~1 200	1 100~1 150	850~950	堆冷
钢坯	1 100~1 150	1 050~1 100	850~900	堆冷

(2) 预备热处理

①常规球化退火不易使钢中的片状珠光体球化, 因此很少使用。

②快速球化退火: 加热温度为 850℃, 油冷淬火; 等温球化温度为 790℃, 保温 25 min; 急冷到 680℃, 保温 1 h; 炉冷到 500℃出炉。可获得球状珠光体。

③正火: 加热温度为 830~860℃, 空冷, 硬度≤254HBS。

④高温回火, 温度为 640~680℃, 空冷。

(3) 淬火及回火

①常规热处理工艺: 淬火温度为 840~870℃, 油冷, 硬度为 60~62HRC。回火温度一般选为 200~350℃, 但必须避开 300℃左右的回火脆性区。回火温度与硬度的关系见表 2-41。

表 2-41 回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	100	200	300 ^①	400	500	550	600	650
硬度 HRC	60	58	56	51	43	38	33	29
注：860℃油淬，回火 2 h。 ①应避免此温度回火。								

②等温淬火工艺：淬火温度为 870℃，等温温度选择 250～350℃，其力学性能见表 2-42。

表 2-42 60Si2Mn 钢淬火及等温淬火后的力学性能

热处理工艺	组织	硬度 HRC	σ_{bb}/MPa	σ_s/MPa	$\alpha_K/(\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$
870℃油淬，250℃回火	回火 M	58	4645	2303	73.5
870℃加热，210℃等温处理	M+A	61	4116	2254	98
870℃加热，250℃等温处理	M+B _下 +A	57	4675	2156	176.4
870℃加热，270℃等温处理	M+B _下 +A	55	4606	1960	274
870℃加热，290℃等温处理	M+B _下 +A	54	4253	1862	372
870℃加热，310℃等温处理	M+B _下 +A	50	4067	1705	401.8
870℃加热，350℃等温处理	M+B _上 +B _下 +A	38	2940	1470	—

2. 耐冲击工具钢

耐冲击工具钢主要有铬钨硅系钢。铬钨硅系有 3 个典型牌号，即 4CrW2Si、5CrW2Si 和 6CrW2Si。按 GB/T 1299—2000 标准，此类钢属于耐冲击工具钢，具有较高强韧性和耐磨性，既可作冷模具用钢，又可作耐冲击风动工具用钢。

铬钨硅系钢应用范围：4CrW2Si 钢渗碳淬火后具有外硬内韧的特点，承载能力及耐磨性均超过低淬透性冷作模具钢，主要用于制造大、中型重载冷镦冲头及精压模；5CrW2Si 钢综合力学性能良好，应用最广，主要制造大、中型重载冷剪刀片和中厚钢板穿孔冲头及风动工具等。6CrW2Si 钢回火抗力、耐磨性稍高于 5CrW2Si 钢，但韧性较差，常用于失效形式为磨损和堆塌的重载冲模、压模。

1) 4CrW2Si 钢

4CrW2Si 是在铬硅钢的基础上加入一定量的 W 而形成的钢种，由于加入 W 有助于淬火时保存比较细的晶粒，因此有可能在回火状态下获得较高的韧性。4CrW2Si 钢还具有一定的淬透性和高温强度，该钢多用于制造在高冲击载荷下操作的工具，如风动工具，冲裁切边复合模、冲模以及冷切用剪刀等冲剪工具以及部分小型热作模具。

(1) 热加工

4CrW2Si 钢锻造工艺规范见表 2-43。

表 2 - 43 4CrW2Si 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 180~1 220	1 150~1 180	≥850	缓冷
钢坯	1 150~1 180	1 100~1 140	≥800	缓冷

(2) 预备热处理

①锻后一般退火工艺：加热温度为 800~820 ℃，保温 3~5 h；炉冷至 550 ℃以下出炉空冷，退火后硬度为 179~217HBS，组织为粒状珠光体+少量碳化物。

②高温回火：加热温度为 710~740 ℃，保温 3~4 h；炉冷或空冷。目的为改善切削加工性能。

(3) 淬火及回火

①推荐的淬火工艺规范：加热温度为 860~900 ℃，油冷，硬度≥53HRC。

②推荐的回火工艺规范见表 2 - 44。4CrW2Si 钢回火硬度与回火温度的关系见表 2 - 45。

表 2 - 44 推荐的回火工艺规范

用途	回火温度/℃	加热介质	冷却介质	硬度 HRC
消除内应力和稳定组织	200~250	油或熔融硝盐	空气	53~58
降低硬度和消除内应力	430~470	空气炉、硝盐或熔融碱	空气	45~50

表 2 - 45 4CrW2Si 钢回火硬度与回火温度关系

回火温度/℃	100	200	300	400	500	550	600
硬度 HRC	54	52	50	46	40	36	32
注：880 ℃油淬，回火 2 h。							

3. 刀具钢

1) 9SiCr 钢

9SiCr 钢中含有 Si 和 Cr，所以具有高的淬透性和淬硬性，并且具有较高的回火稳定性，适于分级淬火和等温淬火。虽然 9SiCr 的淬透性不及 CrWMn 钢，但优于 GCr15 钢。钢中合金元素 Si 起着固溶强化作用，同时使钢的临界点提高，淬火后残留奥氏体量少，回火稳定性也较高，Si 还可细化碳化物，有利于提高耐磨性和塑性变形抗力。9SiCr 钢易于消除网状碳化物且使碳化物细小分布。9SiCr 钢的缺点是易氧化脱碳，淬火加热时应加以注意，采取措施防止氧化脱碳的发生。

9SiCr 钢适于制造薄刀具和形状复杂的轻载冷冲模，如打印模、搓丝板等；也可部分取代 Cr12MoV 和 5CrW2Si 钢用于机械载荷较重的冷作模具，如厚钢板冲剪工具和冷镦模等。

(1) 热加工

9SiCr 钢锻造工艺规范见表 2 - 46。

表 2-46 9SiCr 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 150~1 200	1 100~1 150	800~880	缓冷（砂冷或坑冷）
钢坯	1 100~1 150	1 050~1 100	800~850	缓冷（砂冷或坑冷）

(2) 预备热处理

①锻后退火：加热温度为 790~810 ℃，保温 1~2 h；炉冷至 550 ℃以下出炉空冷，退火后硬度为 197~241HBS。

②锻后等温退火：加热温度为 790~810 ℃，保温 1~2 h；等温温度为 700~720 ℃，炉冷至 550 ℃以下出炉空冷，硬度为 197~241HBS。

③高温回火：加热温度为 600~700 ℃，保温 2~4 h；炉冷或空冷，硬度为 197~241HBS，用于消除冷变形加工硬化。

④正火：加热温度为 900~920 ℃，空冷，硬度为 321~415HBS，用于细化过热钢的晶粒和消除网状碳化物。

⑤调质处理：加热温度为 880~900 ℃，回火温度为 680~700 ℃，保温 2~4 h，炉冷或空冷，硬度为 197~241HBS。

采取锻造余热淬火+高温回火的超细化处理取代等温球化退火工艺，可以获得均匀而细小的点状碳化物，基本上能够消除碳化物偏析和液析；最后经低温淬火，可最终获得双细化的淬火组织，从而可以大幅度提高模具性能。

(3) 淬火及回火

①推荐的淬火工艺规范见表 2-47。

表 2-47 推荐的淬火工艺规范

方案	淬火温度 /℃	冷却方式				硬度 HRC
		介质	温度/℃	延续	冷却到室温	
I	860~880	油	20~40	至油温	空气	62~65
II	860~880	油	80~140	至 150~200 ℃	空气	62~65
III	860~880	熔融的硝酸盐或碱	150~200	3~5 min	空气	61~63
IV	860~880	熔融的硝酸盐或碱	150~200	30~60 min	空气	59~62

注：形状复杂以及要求变形量小的工件，采用方案Ⅲ和Ⅳ。

②冷处理见表 2-48。

表 2-48 冷处理

淬火方案	冷却温度/℃	用途	硬度增量 HRC
I~Ⅲ	-70	高精度工模具尺寸稳定化	0~1

注：冷处理应于淬火后 1 h 内进行。

③回火：回火温度为 160~180 ℃，保温 2 h，硬度为 61~63HRC。回火温度与硬度的

关系见表 2-49。

表 2-49 回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600
硬度 HRC	64	63	62	60	59	58	55	51	47	40
注：870℃油粹，回火 2 h。										

2.2.6 高强韧性冷作模具钢

随着低合金钢、不锈钢和轴承钢冷挤压技术的发展，对冷作模具钢提出了不仅要有高硬度、高耐磨性，而且还要有高韧性的要求。显然，上述的各类模具钢不能满足这些要求。铬钨硅系钢的耐磨性不够，而高铬、中铬钢以及高速钢中碳化物的数量多，韧性不足。为了满足冷挤压工艺发展的需要，目前已研制出多种高强韧性模具钢，如降碳高速钢、基体钢、低合金高强度钢和马氏体时效钢等。表 2-50 为该典型钢种的成分。

表 2-50 高强韧性冷模钢的化学成分

类别	钢号	化学成分/ (w,%)							
		C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	其他
降碳高速钢	6W6Mo5Cr4V (6W6)	0.64	≤0.35	≤0.66	3.7~4.3	6.0~7.0	4.5~5.5	0.7~1.1	0.2Nb
基体钢	6Cr4W3Mo2VNb (65Nb)	0.64	0.26	0.32	4.02	2.96	2.13	0.88	
	7Cr7Mo2V2Si (LD)	0.68~0.78	0.7~1.2	≤0.4	6.5~7.5	—	1.9~2.5	1.7~2.2	
	6Cr4Mo3Ni2WV (CG2)	0.55~0.64	≤0.4	≤0.4	3.8~4.3	0.9~1.3	2.8~3.3	0.9~1.3	1.8~2.2Ni
	5Cr4Mo3SiMnVA1 (012A1)	0.54	0.79	0.89	4.18	—	3.09	1.14	0.4Al
	65W8Cr4VTi (LM1)	0.6~0.7	≤0.6	≤0.4	4.2~4.8	7.5~8.5	—	0.8~1.2	0.1~0.3Ti
	65Cr5Mo3W2VSiTi (LM2)	0.6~0.7	0.8~1.2	≤0.4	4.5~5.2	1.6~2.3	2.8~3.4	1.0~1.4	0.1~0.3Ti
低合金高强度钢	6CrNiSiMnMoV (GD)	0.69	0.81	0.96	1.16	—	0.6		0.9Ni
马氏体时效钢	18Ni	0.04	0.05	—	—	—	4.54		18.09Ni 12.16Co 1.27Ti

一、降碳高速钢

6W6Mo5Cr4V (6W6) 钢又称低碳 M2 钢，是为了提高韧性而研制出来的一种降碳降

钒的低碳高速钢类型的冷作模具钢，相对于 W6Mo5Cr4V2 钢，C 的质量分数降低了 0.21％左右，V 的质量分数降低了 1.05％～1.11％。由于 C 和 V 的含量降低，碳化物的总量减少，使碳化物的不均匀性得到改善，淬火硬化状态的抗弯强度和塑性提高了 30％～50％，冲击韧度提高了 50％～100％，但淬火后硬度减少了 2～3HRC。6W6 钢的淬透性好，有类似于高速钢的高硬度、高耐磨性、高强度和良好的热硬性，而韧性又比高碳高速钢高，通常用于制造冷挤压模具、拉深模具，具有较高的使用寿命。

1) 热加工

6W6 钢锻造工艺规范见表 2－51。

表 2－51 6W6 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 140～1 180	1 100～1 150	≥900	坑冷、热砂缓冷
钢坯	1 100～1 140	1 050～1 100	≥850	坑冷、热砂缓冷

2) 预备热处理

高速钢退火的目的是：降低硬度，以利于切削加工；为淬火作组织准备；消除锻造加工中产生的内应力；另外返修模具如需重新淬火，为避免产生蔡状断口，也必须预先进行退火。高速钢退火的温度不宜过高，否则不仅不能进一步降低硬度，反而会增加钢的氧化和脱碳倾向。

(1) 普通退火：加热温度为 850～860 ℃，保温 2～4 h；炉冷至 550 ℃以下出炉空冷，退火后硬度为 197～229HBS。

(2) 等温退火：加热温度为 850～860 ℃，保温 2～4 h；等温温度为 740～750 ℃，保温 4～6 h，炉冷至 500 ℃以下出炉空冷，硬度为 197～229HBS。

3) 淬火及回火

(1) 推荐的淬火工艺规范见表 2－52。淬火温度、回火温度与硬度的关系见表 2－53、表 2－54。

表 2－52 推荐的淬火工艺规范

预热温度/℃	淬火温度/℃	加热介质	淬火介质	硬度 HRC
830～850	1 180～1 200	熔融盐	油、空气或熔融盐	58 左右

表 2－53 淬火温度与硬度的关系

淬火温度/℃	850	900	950	1 000	1 050	1 100	1 150	1 200	1 250	1 300
硬度 HRC	30	51	54	55	59.5	61	61.5	63.5	64	65

表 2-54 回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	200	300	400	450	500	550	575	600	650	700
硬度 HRC	59	58	58	58	59.5	63	60.5	55	50	40
注：1 200 ℃油淬，回火 3 次，每次 1 h										

(2) 推荐回火温度为 560~580 ℃，回火 3 次，每次 1 h，硬度为 58~63HBS。

二、基体钢

基体钢是指成分与高速钢淬火后的基体组织成分大致相同，而性能有所改善的一类钢，这类钢减少了共晶碳化物，并使其均匀分布，工艺性能好，强韧性明显提高。一般来说，在高速钢的基体成分上添加少量其他元素，适当改变含碳量，以改善性能适应某些要求的钢，也称为基体钢。

高速钢具有较高的强度、硬度、热硬性和耐磨性，但韧性不足（这也是莱氏体钢的普遍缺点）。低合金高碳模具钢虽有较高的韧性和塑性，但强度、热硬性和耐磨性都不及高速钢。理想的模具钢是既具有高速钢的强度、热硬性、耐磨性，又具有低合金模具钢的韧性和塑性，近年来研制的基体钢基本具有这样的特性。

基体钢性能较好，可以广泛应用于制造要求高负荷、高速耐冲击的冷、热变形模具。由于资料缺乏，有些基体钢还没有全面推广应用，在这里只能简单介绍部分基体钢。

1. 6Cr4W3Mo2VNb (65Nb) 钢

65Nb 钢是以 W6Mo5Cr4V2 高速钢为母体，在其淬火基体成分的基础适当增加含碳量，并加入适量铌合金的改型基体钢。它具有高速钢的高硬度和高强度，又因无过剩的碳化物，所以比高速钢具有更高的韧性和疲劳强度。由于 65Nb 钢中加入适量铌，能起到细化晶粒的作用，并能提高韧性和改善工艺性能，因此可以用来制造各类冷作模具，适于制造复杂、大型或加工难变金属的冷挤压模具以及受冲击负荷较大的冷锻模具，模具的使用寿命有明显提高。

65Nb 钢可以取代高速钢或高碳高铬钢，适于制作形状复杂的有色金属挤压模、冷冲模、冷剪模及单位挤压力为 2 500 MPa 左右的黑色金属冷挤压模具。也可用于轴承、标准件，汽车行业中的锻模、冲模及剪切模具，寿命可提高 2~10 倍。

1) 热加工

65Nb 钢锻造工艺规范见表 2-55。

表 2-55 65Nb 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 140~1 180	1 100~1 150	≥900	缓冷（砂冷或坑冷）
钢坯	1 120~1 150	1 080~1 120	850~900	缓冷（砂冷或坑冷）

2) 预备热处理

等温退火工艺：加热温度为 850~870 ℃，保温 3~4 h；炉冷到 730~750 ℃，保温 5~6 h；炉冷到 500 ℃以下出炉空冷，退火后硬度≤241HBS，组织为球状珠光体。

3) 淬火及回火

(1) 推荐的淬火工艺规范见表 2-56。不同淬火温度的影响见表 2-57。

表 2-56 推荐的淬火工艺规范

方案	预热温度/℃	淬火温度/℃	冷却方式			硬度 HRC
			冷却介质	温度/℃	冷却到	
I	840	1 080~1 120	油	20~60	油温或冷却到 150~200 ℃ 后空冷	≥61
II	840	1 180~1 190	油	20~60		≥61
III	840	1 120~1 160	油	20~60		≥61

注：要求耐磨性高的模具可采用方案 II，受挤压力大而要求韧性的模具选用方案 I，一般情况用方案 III。

表 2-57 不同温度淬火后的硬度、晶粒度和残留奥氏体量

淬火温度/℃	1 060	1 080	1 100	1 120	1 140	1 160	1 180	1 200
硬度 HRC	65.1	65.7	65.6	65.5	65.6	66.3	65.7	65
晶粒度/级	—	—	11~12	10~11	9~10	9~10	9	8
残留奥氏体量 (体积分数,%)	—	11	11.3	11.5	12	14	15	27

(2) 回火温度对硬度的影响见表 2-58。推荐的回火工艺规范：回火温度为 540~580 ℃，回火 2 次，每次 1~2 h，硬度≥56HRC。

表 2-58 不同回火温度对硬度的影响

硬度 HRC 回火温度/℃		1 080	1 120	1 160
200		61.3	61.4	61.5
300		28.0	58.5	59.0
400		58.0	59.0	59.5
450		59.4	59.9	60.3
500		60.1	61.4	61.8
520		60.1	62.3	62.6
540		60.2	62.2	62.5
560		58.5	60.4	61.5
580		58.3	60.3	60.5
600		55.5	57.0	58.5

2. 7Cr7Mo2V2Si (LD) 钢

LD 钢是一种不含钨的基体钢。LD 钢的含碳量比 65Nb 钢高，合金元素 V 的含量也较

高,因此在保持强韧性的情况下,其抗压强度、抗弯强度及耐磨性均比 65Nb 钢高;含碳量相当于 Cr12MoV 钢的一半左右,因此其共晶碳化物比 Cr12MoV 钢低得多。Cr 是碳化物形成元素,在钢中主要以 ChC_6 型碳化物存在。钢加热到 $1\ 100\ ^\circ\text{C}$ 以上,Cr 的碳化物大量溶入奥氏体中,提高了钢的淬透性。Mo 也是碳化物形成元素,主要碳化物为 $(\text{Fe},\text{Mo})_6\text{C}$,其作用与 W 相似,既可以提高淬透性,强化回火时的二次硬化效果,也能细化晶粒,同时 Mo 还能降低共晶碳化物的不均匀度。V 能细化晶粒,强烈引起二次硬化的元素,可提高耐回火性,增加耐磨性。加入质量分数 1% 左右的 Si 是为了强化基体,提高回火稳定性。与 Cr12 型冷作模具钢和 W6Mo5Cr4V2 高速钢比较,LD 钢具有更高的强度和韧性,而且有良好的耐磨性,广泛用于制造冷挤、冷镦、冲压和弯曲等冷作模具,其使用寿命比高铬钢、高速钢提高几倍到几十倍。

1) 热加工

LD 钢锻造性能好,宜缓慢加热保证烧透,加热温度不宜过高,应严格控制在 $1\ 150\ ^\circ\text{C}$ 以下,否则容易锻裂,锻后宜缓冷。模具锻造时应反复镦拔 3 次,以保证碳化物完全破碎,并获得均匀分布的碳化物,为以后的热处理创造条件,并有利于模具使用寿命的提高。表 2-59 为 LD 钢锻造工艺规范。

表 2-59 LD 钢锻造工艺规范

加热温度/ $^\circ\text{C}$	始锻温度/ $^\circ\text{C}$	终锻温度/ $^\circ\text{C}$	冷却方式
$1\ 120\sim1\ 130$	$1\ 080\sim1\ 120$	≥ 850	缓冷(坑冷或砂冷)

2) 预备热处理

(1) 锻后一般退火:加热温度为 $840\sim860\ ^\circ\text{C}$,保温 2~3 h;炉冷至 $550\ ^\circ\text{C}$ 以下出炉空冷,硬度 $\leq 220\text{HBS}$ 。

(2) 锻后等温球化退火:加热温度为 $840\sim860\ ^\circ\text{C}$,保温 2~3 h;炉冷至 $700\sim720\ ^\circ\text{C}$,保温 4~6 h;炉冷至 $550\ ^\circ\text{C}$ 以下出炉空冷。退火后硬度 $\leq 220\text{HBS}$,组织为铁素体基体上均匀分布着球状碳化物。

3) 淬火及回火

(1) 淬火:淬火温度为 $1\ 100\sim1\ 150\ ^\circ\text{C}$,油冷或空冷。淬火后约有 34% 的残留奥氏体,所以淬火后变形小。LD 钢淬火温度与硬度、晶粒度、残留奥氏体量的关系见表 2-60。

表 2-60 LD 钢的淬火温度与硬度、晶粒度、残留奥氏体量的关系

淬火温度/ $^\circ\text{C}$	1 050	1 100	1 150	1 210
硬度 HRC	57	60	61	60
晶粒度/级	11~12	10~11	9~10	7~8
残留奥氏体量 (体积分数,%)	14	33	35	34

(2) 回火：为使奥氏体充分转变为马氏体，必须进行高温回火，回火温度一般选择 530～540℃为宜，回火次数 2～3 次，每次回火时间 1～2 h，回火硬度为 58～62HRC。表 2-61 为不同淬火、回火温度后硬度的变化。

表 2-61 不同淬、回火温度后的硬度变化

硬 度 HRC 回火温度/℃ 淬火	400	490	510	530	550	570	590	610
1 100℃油淬	58.6	62.1	62.2	62.3	61.1	59.7	58.3	56.8
1 150℃油淬	60.3	62.2	62.9	63.1	62.1	60.7	58.5	58.2

- (3) 推荐工艺：1 150℃淬火，550℃回火 3 次，强韧性综合指标最佳。
- (4) 低淬低回。生产实践证明：有时为了提高模具的韧性，也可采取“低淬低回”的工艺，淬火温度为 1 050～1 080℃，回火温度为 180～220℃，回火 2 次，硬度为 58～60HRC。适当降低淬火温度，加热过程中让足够的碳和合金元素溶入奥氏体，淬火后获得高硬度马氏体组织和少量的残留奥氏体，降低了热应力。采用低温回火，旨在消除淬火应力，并使其尽量保持淬火状态的尺寸，减少热处理变形。此工艺特点是模具可获得高的硬度和耐磨性，适于制造既能在较大压力下工作，又能承受一定的冲击载荷、形状复杂的冷镦冲头。

4) LD 钢的力学性能

(1) LD 钢与其他莱氏体钢的性能对比见表 2-62。

表 2-62 LD 钢与几种莱氏体钢的性能对比

钢种	抗弯强度 σ_{bb} /MPa	抗压强度 σ_{bc} /MPa	冲击韧度 α_K / (J·cm ⁻²)	挠度 f /mm	硬度 HRC
LD	2 550～3 020	5 080～5 590	94～123	12～16	61
W18Cr4V	3 156～3 254	2 166～2 969	24	—	>63
W6Mo5Cr4V2	2 740	4 500	21	—	61
Cr12	2 260	2 950	19	3～4	61

(2) LD 钢模具与 Cr12MoV 钢模具的使用寿命对比见表 2-63。

表 2-63 LD 钢与 Cr12MoV 钢模具使用寿命对比

钢种	热处理工艺	硬度 HRC	金相组织	平均寿命	失效形式
Cr12MoV	1 040℃加热油淬，240℃回火 2 次，每次 4 h	57～60	回火马氏体+体积分数为 10%未溶碳化物+残留奥氏体	2 000～2 500 件	崩刃、开裂
LD	1 100℃加热油淬，600℃回火 1 h+550℃回火 1 h	58～59	回火马氏体+体积分数为 3%未溶碳化物+残留奥氏全	30 000 件	磨损、疲劳裂纹

三、低合金高强度钢

1. 6CrNiMnSiMoV (GD) 钢

基体钢虽然具有高强韧性和较好的耐磨性，但其合金度大于 1.0%，成本较高；其次，淬火温度区间较窄，一般不能用箱式电阻炉加热淬火，从而限制了该类钢在中小企业的推广使用。GD 钢就是针对基体钢的上述缺陷而研制的一种新钢种。

6CrNiMnSiMoV (GD) 钢属低合金高强韧性冷作模具钢，它的合金化特点是在 CrWMn 的基础上适当降低含碳量，以减少碳化物偏析，同时增加 Ni、Si、Mn，以加强基体的强度和韧性；少量的 Mo 和 V 可以细化晶粒、提高淬透性和耐磨性，增加耐回火性；Cr 的作用主要在于提高淬透性。通过最佳的热处理工艺，可以使 GD 钢获得较多的板条马氏体，碳化物细小而均匀。GD 钢的淬火温度较低，温度区间宽，尤其适合中小企业的热处理条件。它可以替代 CrWMn、9Mn2V 钢和部分取代 Cr12MoV 钢，制造各种异形、细长薄片冷冲凸模，形状复杂的大型凸凹模，中厚板冲裁模及剪刀片和精密淬硬塑料模具等，模具的寿命大幅提高，具有显著的经济效益。

1) 热加工

锻造工艺规范见表 2-64。

表 2-64 GD 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1 080~1 120	1 040~1 060	≥850	缓冷

GD 钢锻造温度区间宽，热塑性好，变形抗力小，可以一火成形。锻后应缓冷，并立即退火。

2) 预备热处理

等温球化退火：GD 钢属空冷微变形模具钢，退火不易软化。推荐采用等温退火工艺，可以取得较好的工艺效果。

3) 淬火及回火

(1) GD 钢最佳热处理工艺：淬火温度为 870~930℃，油冷，硬度为 62~64HRC。回火温度为 175~230℃，硬度为 60~62HRC。

(2) 不同淬火温度淬火后的硬度、残留奥氏体量和晶粒度见表 2-65。

表 2-65 GD 钢淬火后的硬度、残留奥氏体量和晶粒度的关系

淬火温度/℃	840	870	900	930	960	1 000
油冷，硬度 HRC	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0	65.0
晶粒度/级	12	12	10~11	10~11	9~10	6~7
残留奥氏体 (体积分数，%)	11.4	13.5	13.8	16.6	20.2	—

(3) 回火温度对 GD 钢硬度的影响见表 2－66。

表 2－66 回火温度对 GD 钢硬度的影响

硬 度 HRC 回火温度/℃ 淬火温度/℃	810	840	870	900	930	960	1 000
150	62.0	63.0	63.5	64.0	64.0	64.5	64.0
175	61.0	61.5	62.0	62.0	62.5	63.0	63.0
200	59.0	60.0	61.0	61.0	61.0	60.5	61.0
230	59.5	60.0	60.5	60.5	60.0	60.0	60.0
260	59.0	60.0	60.0	59.5	59.5	60.0	60.0
300	59.5	59.5	59.0	58.5	58.0	60.0	59.0
350	59.0	58.5	58.0	57.5	58.0	58.0	58.0
400	57.0	57.0	56.5	56.5	56.5	56.5	57.0

(4) 采用不同热处理工艺后的力学性能见表 2－67。

表 2－67 GD 钢采用不同热处理工艺后的力学性能

性能 淬火、回火	840℃油淬, 200℃回火	870℃油淬			900℃油淬			930℃油淬, 200℃回火	960℃油淬, 200℃回火
		175℃ 回火	200℃ 回火	230℃ 回火	175℃ 回火	200℃ 回火	230℃ 回火		
硬度 HRC	60.0	62.0	61.0	60.0	62.0	61.0	60.0	61.0	60.5
抗弯强度 σ_{bb} /MPa	4 027	3 758	4 054	4 591	3 625	4 338	4 480	4 258	3 589
抗压屈服强度 σ_{sc} /MPa	2 346	2 533	2 467	2 387	2 560	2 493	2 360	2 387	2 333
抗弯屈服强度 σ_{sb} /MPa	3 218	3 093	3 154	3 476	3 026	3 408	3 356	2 861	3 190
冲击韧度 α_K /(J/cm ²)	101	104	131	138	96	148	152	160	53
断裂韧度 K_{IC} /MPa·m ^{1/2}	21.2	20.3	25.4	24.2	—	25.3	—	25.2	23.0
多冲周次 (能级为 3.249J) R10mm 圆弧缺口/×10 ⁴ N	2.136	3.225	3.750	4.305	—	3.876	3.248	3.045	3.275

从以上实验数据可以看出，900℃加热油冷淬火，200℃回火 2 h，可获得最佳的强韧配合，其组织为回火板条马氏体＋回火隐针马氏体＋体积分数为 11%左右的残留奥氏体＋体积分数为 2.7%左右的剩余碳化物。

(5) GD 钢与 CrWMn 钢、Cr12MoV 钢的力学性能对比见表 2－68。

表 2-68 GD 钢与 CrWMn 钢和 Cr12MoV 钢力学性能对比

钢号	热处理工艺	硬度 HRC	抗弯强度 σ_{bb}/MPa	挠度 f/mm	抗压屈服 强度 σ_{sc}/MPa	C 形缺口试样 冲击韧度 $\alpha_K/(\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$	多冲周次 (能级 2.15J/N)
GD	900 °C 油淬, 200 °C 回火	61	4 388	3.06	2 674	149.1	8 895
CrWMn	840 °C 油淬, 200 °C 回火	61	3 777	2.90	2 668	76.5	6 413
Cr12MoV	1 020 °C 油淬, 200 °C 回火	61	2 580	2.30	2 667	44.1	4 105

由表 2-68 可见, GD 钢的强韧性明显高于 CrWMn 和 Cr12MoV 钢。同时进行耐磨试验, 结果表明: GD 钢的耐磨性高于 CrWMn 钢、低于 Cr12MoV 钢。

(6) 等温淬火: 淬火温度为 870 °C, 等温温度为 260 °C, 时间为 1.5 h, 可获得体积分数为 15% 的下贝氏体+马氏体基体; 然后在 180~200 °C 回火 2 h。GD 钢马氏体上分布适量下贝氏体, 能起到抑制裂纹扩展, 提高强韧性的良好效果, 是进一步挖掘材料潜力的有效途径。

四、马氏体时效钢

1. 00Ni18Co8Mo5TiAl [18Ni(250)]、00Ni18Co9Mo5TiAl [18Ni(300)]、00Ni18Co13Mo4TiAl [18Ni(350)] 钢

18Ni(250)、18Ni(300)、18Ni(350) 钢是典型的马氏体时效钢, 钢中含碳量较低, 对时效硬化起作用的合金元素是 Ti、Al、Co、Mo。杂质对马氏体时效硬化钢的性能影响很大, 对屈服强度较高的钢影响效果更明显。这就要求该类钢要经过真空冶炼, 减少杂质、偏析和钢锭中的含气量, 以保证钢有较好的韧性和抗疲劳性能。

在 18Ni 钢中, 碳对钢的强度影响很大, 即使含碳量极少, 也会使马氏体强度显著提高。但在把碳的质量分数增至 0.03% 以后, 又会降低钢的屈服强度。所以马氏体时效钢中碳的质量分数不宜超过 0.03%。

18Ni 钢中的 S 是有害的。S 以硫化物的形式存在于钢内, 并沿热轧方向分布, 导致钢的各向异性, 因此要求尽量降低 18Ni 钢中的含硫量。

18Ni 钢中加入大量的 Ni, 主要作用是保证固溶体淬火后能获得单一的马氏体, 其次 Ni 对 Mo 作用形成时效强化相 Ni_3Mo , 当 Ni 的质量分数超过 10% 时, 还能提高马氏体时效钢的断裂韧度。

18Ni 钢固溶以后形成超低碳马氏体, 硬度为 28~30HRC, 时效处理以后, 由于各种类型的金属间化合物的脱溶析出得到时效硬化, 硬度可以上升到 50HRC, 这类钢在高强度、高韧性的条件下, 仍具有良好的韧性、韧性和高的断裂韧度。同时, 这类钢无冷作硬化, 时效热处理变形小, 焊接性能良好, 表面还可以渗氮处理等。

18Ni 类低碳马氏体时效钢主要用来制造高精度、超镜面、型腔复杂、大截面以及大批量生产的模具，但由于价格昂贵，使应用受到限制。

1) 化学成分

18Ni 钢化学成分见表 2-69。

表 2-69 18Ni 钢化学成分 (质量分数,%)

钢号	C	Ni	Co	Mo	Si	Mn	Ti	Al	P	S
18Ni (250)	≤0.03	17.50~18.50	7.00~8.00	4.25~5.25	≤0.10	≤0.10	0.30~0.50	0.05~0.15	≤0.01	≤0.01
18Ni (300)	≤0.03	18.00~19.00	8.50~9.50	4.60~5.20	≤0.10	≤0.10	0.50~0.80	0.05~0.15	≤0.01	≤0.01
18Ni (350)	≤0.03	17.00~19.00	11.00~12.75	4.00~5.00	≤0.10	≤0.10	1.20~1.45	0.05~0.15	≤0.01	≤0.01

2) 热处理

固溶温度为 815~830 ℃，油冷或空冷（加热时间：盐炉 1 min/mm，空气炉 2~2.5 min/mm），固溶硬度为 28HRC。时效温度为 480 ℃ [18Ni (250)、18Ni (300)]，时效时间 3 h，硬度为 43HRC；时效时间 6 h，硬度为 52HRC。时效温度为 510 ℃ [18Ni (350)]，时效时间 6 h，硬度为 57~60HRC。

3) 渗氮处理

18Ni (300) 钢气体渗氮工艺：渗氮温度为 (455±10) ℃，渗氮时间 24~28 h。

4) 力学性能

18Ni 类钢力学性能见表 2-70。

表 2-70 18Ni 类钢力学性能

钢号	固溶温度 /℃	时效温度 /℃	时效硬度 HRC	σ_b /MPa	σ_a /MPa	δ /%	ψ /%
18Ni (250)	815~830	480±5	50~52	1850	1800	10~12	48~58
18Ni (300)	815~830	480±5	53~54	2060	2010	12	60
18Ni (350)	815~830	510±5	57~60	2490	—	—	—

注：固熔时效后。

2.2.7 高耐磨高强韧性冷作模具钢

高强韧性钢虽然克服了高铬钢、高速钢的脆断倾向，但由于钢中含碳量的减少，其耐磨性不如高铬钢和高速钢。对一些以磨损为主要失效形式的模具，上述钢种仍满足不了要求。为此研制了高耐磨、高韧性的冷作模具钢，其典型钢种及化学成分见表 2-71。

表 2-71 高耐磨、高韧性冷模钢的化学成分

钢号	化学成分/ (w, %)					
	C	Cr	W	Mo	V	Mn
GM	0.86~0.94	5.6~6.4	2.8~3.2	2.0~2.5	1.7~2.2	—
ER5	0.95~1.10	7.0~8.0	0.8~1.2	1.4~1.8	2.2~2.7	0.3~0.6

1. 9Cr6W3Mo2V2 (GM) 钢

GM 钢是一种高硬度冷作模具钢, 是制作精密、耐磨和高使用寿命冷作模具的新钢种, 属莱氏体钢, 其主要性能均优于 Cr12 型钢。与 Cr12MoV 钢相比, GM 钢中 C 及 Cr 含量减少一半, 大大降低了共晶碳化物的不均匀程度。适当增加 W、Mo、V 的含量, 既可提高淬透性能, 又可细化晶粒, 提高基体强度, 强化二次硬化效果。GM 钢的二次硬化能力显著高于 Cr12 型高碳高铬钢, 接近高速钢水平, GM 钢硬化峰值在较宽回火温度范围出现, 具有高的耐回火性。GM 钢在韧性和强度上均优于高碳高铬钢及高速钢, 硬度指标高于基体钢及高碳高铬钢, 在抗粘着磨损上也优于基体钢和高铬钢并与高速钢相近, 抗弯强度和压缩屈服点远高于高铬钢, 其中抗弯强度高出约 70%。

由于 GM 钢各项工艺性能好, 具有最佳的强韧性和耐磨性配合, 同时兼有良好的冷、热加工性和电加工性。因此, 在多工位级进模、高强度螺栓滚丝模和电机转子片复式冲模上已经有很多应用。其使用寿命比 65Nb、Cr12MoV 钢提高 2 倍以上。

1) 热加工

GM 钢锻造工艺规范见表 2-72。

表 2-72 GM 钢锻造工艺规范

项目	预热温度/℃	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	600~800	1 100~1 150	1 060~1 100	850~900	缓冷
钢坯	600~800	1 060~1 100	1 040~1 080	850~900	缓冷

锻造加热一定要缓慢进行以便充分热透, 锻造时严格按照“轻-重-轻”法操作, 严格控制变形, 不许冷锤锻造, 否则易出现角裂或劈头等缺陷。锻后需缓冷并及时回火。

2) 预备热处理

(1) 锻后一般退火工艺: 加热温度为 820~840℃, 保温 2 h; 炉冷至 550℃以下出炉空冷, 退火后硬度 $\leq 241\text{HBS}$ 。

(2) 锻后等温球化退火工艺: 加热温度为 850~870℃, 保温 3 h; 炉冷至 730~750℃, 保温 4~6 h; 炉冷至 500℃以下出炉空冷, 退火硬度为 205~228HBS。

3) 淬火及回火

(1) GM 钢淬火、回火工艺规范见表 2-73。淬火温度对硬度、残留奥氏体量、奥氏体晶粒尺寸的影响见表 2-74。

表 2-73 GM 钢淬火、回火工艺规范

预热温度/℃	淬火温度/℃	冷却	硬度 HRG	回火硬度/℃	回火次数/次	硬度 HRC
800~820	1 080~1 120	油冷	64~66	540~560	2	≥64

表 2-74 淬火温度对硬度、残留奥氏体量和奥氏体晶粒尺寸的影响

淬火温度/℃	1 000	1 040	1 080	1 100	1 120	1 160	1 220	1 260
硬度 HRC	60.5	62	66	64.5	64	62	56	60
残留奥氏体量（体积分数，%）	—	20	20.5	21	28	43	57	—
晶粒尺寸 D/ μm	—	—	—	—	—	1.0	3.0	3.8

(2) 回火温度对 GM 钢硬度的影响见表 2-75。

表 2-75 回火温度对 GM 钢硬度的影响

回火温度/℃	未回火	300	400	450	500	550	600
硬度 HRC	64	58	59.5	61	65	63.5	61
注：1 100 ℃淬火。							

4) 力学性能

GM 钢的力学性能见表 2-76。

表 2-76 GM 钢的力学性能

热处理工艺	σ_{bb}/MPa	$\alpha_K/(\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$	断裂韧度 $K_{Ic}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	σ_{bc}/MPa	硬度 HRC
1 080 ℃油淬，540 ℃ 回火 2 次，每次 1 h	4 308	28.0	20.5	3 300	65.5
1 120 ℃油淬，540 ℃ 回火 2 次，每次 1 h	3 396	22.1	15.5	3 260	66.0

2. Cr8MoWV3Si (ER5) 钢

ER5 钢是美国专利钢种成分的基础上研制的新型冷作模具钢。与基体钢相比，ER5 钢提高了含碳量、含钒量以及 Cr、Mo、W 等碳化物形成元素含量，因而 ER5 钢具有高耐磨性及高韧性，耐磨性比 GM 钢好，强韧性优于 Cr12MoV 钢，且耐磨性远远超过 Cr12MoV 钢。

ER5 钢在冶炼、锻造、热处理、机加工和电加工等方面无特殊要求，生产加工工艺简单可行，材料成本适中，适用于制作大型重载冷镦模、精密冷冲模等。如用 ER5 钢制作的电机硅钢片冲模，总使用寿命达 500 万次；又如，用 ER5 钢制作的大尺寸轴承滚子冷镦模使用寿命达 1 万次以上，超过从日本进口模具保证的使用寿命 5 000 次。

1) 热加工

ER5 钢锻造工艺规范见表 2-77。

表 2-77 ER5 钢锻造成工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 150~1 200	1 100~1 150	≥900	缓冷
钢坯	1 100~1 150	1 080~1 120	≥900	缓冷

2) 预备热处理

等温退火工艺：加热温度为 850~870 ℃，保温 2 h；炉冷至 750~770 ℃，保温 4 h；炉冷至 500 ℃以下出炉空冷，退火后硬度为 200~240HBS。

3) 淬火及回火

(1) 推荐热处理工艺。要求耐磨性高、高强韧性模具：淬火温度为 1 150 ℃，油冷，520~530 ℃回火 3 次，硬度为 62~64HRC。对重载工作条件下的模具：淬火温度为 1 120~1 130 ℃，油冷，550 ℃回火 3 次，硬度为 62~64HRC。

(2) 淬火温度对 ER5 钢晶粒度和硬度的影响见表 2-78、表 2-79。

表 2-78 不同淬火温度下 ER5 钢的硬度、晶粒度

淬火温度/℃	1 000	1 050	1 100	1 120	1 150	1 180
硬度 HRC	56.5	63.0	64.7	63.7	63.6	63.2
晶粒度/级	12	11~12	11	9~10	8~9	8~9

表 2-79 ER5 钢不同淬火温度及 3 次回火（每次 1 h）后的硬度

硬 度 HRC 回火温度/℃ 淬火温度/℃	回火温度/℃					
	500	530	550	570	600	630
1 000	56.5	54.7	53.2	51.2	45.1	37.2
1 050	61	60.0	53.0	56.2	51.2	40.2
1 100	63.2	62.7	60.8	57.8	51.0	44.7
1 120	64.0	65.0	64.0	62.2	57.0	47.7
1 150	63.5	64.0	64.0	62.2	57.4	47.3
1 180	63.3	65.1	64.7	63.8	59.1	49.3

4) 力学性能介绍

(1) 抗拉强度：1 100 ℃淬火，550 ℃回火，具有最高抗拉强度 $\sigma_b=2\,480\text{ MPa}$ 。

(2) 其他性能见表 2-80。

表 2-80 ER5 钢抗压屈服强度、抗弯强度冲击韧度值

性能 \ 回火温度/℃	510	530	550
抗压屈服强度 σ_{sc} /MPa	3 255.6	3 296.7	3 020.4
抗弯强度 σ_{bb} /MPa	3 555.4	3 898.4	4 503.1
冲击韧度 α_K /(J·cm ⁻²)	45.37	38.42	39.20
注：1 120℃油淬。			

2.2.8 特殊用途冷作模具钢

这类钢主要有两类：一类为典型的耐蚀冷作模具钢，如 9Cr18、Cr18MoV、Cr14Mo、Cr14Mo4；另一类为无磁模具钢，如 1Cr18Ni9Ti、5Cr21Mn9Ni4W、7Mn15Cr2A13V2WMo 等。

一、耐蚀冷作模具钢

耐蚀冷作模具钢的成分特点是高碳高铬。淬火后，马氏体中 Cr 的质量分数高达 12% 左右，既具有高的硬度和耐磨性，又具有良好的耐蚀性能。

9Cr18 钢属于高碳高铬马氏体不锈钢，其耐蚀性能较低碳不锈钢差，但它的力学性能，特别是强度、硬度、耐磨性和切削性能显著提高。该钢的热处理一般采用淬火+低温回火，热处理后具有高硬度、高耐磨性和耐腐蚀性能，适宜制造承受高耐磨、高负荷以及在腐蚀介质下工作的塑料模具。该钢为莱氏体钢，容易形成不均匀的碳化物偏析而影响模具的使用寿命，所以在热加工时必须严格控制热加工工艺，注意选择适当的加工比。

1) 热加工

9Cr18 钢锻造工艺规范见表 2-81。

表 2-81 9Cr18 钢锻造工艺规范

装炉炉温	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
冷装炉温≤600℃，热装炉温不限	1 050~1 100	>850	炉冷

应特别注意钢的热加工工艺，最好采用冷装加热（<600℃），加热速度不宜太快，尤其是在 700℃ 以下时，同时，应该控制较高的停锻、轧温度，并严格注意缓冷条件。

2) 预备热处理

(1) 软化退火：加热温度为 800~840℃，炉冷到 500℃ 以下出炉空冷，退火组织为珠光体，硬度≤255HBS。

(2) 完全退火：加热温度 840~860℃，炉冷，硬度≤255HBS。

3) 淬火及回火

淬火温度为 1 030~1 070℃，油冷，硬度≥55HRC，组织为马氏体+碳化物。回火温

度为 200~300 ℃，硬度为 56~56HRC。不同淬火温度后的硬度、残留奥氏体量及冲击韧度见表 2-82。

表 2-82 不同淬火温度后的硬度、残留奥氏体量及冲击韧度

淬火温度/℃	800	900	950	1 000	1 050	1 100	1 150	1 200
硬度 HRC	35	48	52	57	60	53	42	35
残留奥氏体量（质量分数，%）	—	—	1.7	5.2	29.2	93.9	97	99
$\alpha_K/(J \cdot cm^{-2})$	31	17	14	11	10	15	22	26

冷处理对淬火 9Cr18 钢硬度的影响见表 2-83。不同回火温度的硬度、冲击韧度见表 2-84。

表 2-83 冷处理对淬火 9Cr18 钢硬度的影响

淬火温度/℃	硬度 HRC	冷至-75 ℃保持 1 h 后硬度 HRC	回火后硬度 HRC		
			100 ℃	150 ℃	200 ℃
1 000	58	—	58	57	55
1 000	59	59.5	59.5	59	57
1 050	60	61.5	61	61	59
1 100	60.5	62	62	62	60.5

表 2-84 不同回火温度的硬度、冲击韧度

回火温度/℃	淬火后	100	200	300	400	450	500	550	600	650
硬度 HRC	60	60	58	55	56	57	54	47	40	32
$\alpha_K/J \cdot cm^{-2}$	11.5	20	28	29	24	22	21	25	30	—
注：1 050 ℃油淬。										

二、无磁模具钢

无磁模具钢包括奥氏体不锈钢和高锰系奥氏体钢，代表钢号有奥氏体不锈钢：1Cr18Ni9Ti 钢；高锰系奥氏体钢：5Mn15Cr8Ni5Mo3V2 钢、7Mn10Cr8Ni10Mo3V2 钢以及 7Mn15Cr2Al3V2WMo 钢等。

奥氏体不锈钢，具有较高的抗晶间腐蚀性能。这类钢经固溶后呈单相奥氏体组织，因此在强磁中不产生感应，适宜制造无磁模具和要求耐蚀性能的塑料模具。

高锰系奥氏体钢在加热和冷却过程中无相变，始终保持奥氏体组织。由于高锰钢的冷作硬化现象导致切削加工较困难，经过适当地固溶和时效处理后有较好的综合性能。无磁模具钢主要用来制造磁性材料用的无磁模具、无磁轴承及其他要求在强磁场中不产生磁感应的结构零件，还可以用来制造工作应力较高，使用温度超过 700 ℃的热作模具。

1. 1Cr18Ni9Ti 钢

1Cr18Ni9Ti 钢属奥氏体不锈钢耐酸钢。由于钢中含 Ti，使钢具有较高的抗晶间腐蚀性

能，在一些不同浓度、不同温度的有机酸和无机酸中，尤其是在氧化性介质中都具有良好的耐腐蚀性能。这类钢经过热处理（1 050~1 100 ℃，在水中或在空气中淬火）后，呈单相奥氏体组织，因此在强磁场中不产生磁感应，适宜制造无磁模具和要求高耐蚀性能的塑料模具。

1) 热加工

1Cr18Ni9Ti 钢锻造工艺规范见表 2-85。

表 2-85 1Cr18Ni9Ti 钢锻造工艺规范

装炉炉温	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
冷装炉温度≤800 ℃，热装炉不限	1 130~1 180	>850	空冷

由于钢的导热性差，故应均匀加热，锻压时宜选用较大的压下量和高的终锻温度，以便获得较好的力学性能，减小形成裂纹的可能性。

2) 淬火及淬火时效

淬火及淬火时效见表 2-86。硬度变化与时效时间的关系见表 2-87。

表 2-86 1Cr18Ni9Ti 钢淬火和淬火时效

项目	加热温度	冷却方式	组织
淬火	1 100~1 150 ℃	水淬	奥氏体
淬火时效	淬火 1 130~1 160 ℃，时效 800 ℃，10 h 或 700 ℃，20 h	水淬或空冷	奥氏体+碳化物

表 2-87 1Cr18Ni9Ti 钢硬度变化与时效时间

硬 度 HBS 时效处理	时效时间/h 淬 火 后	5	20	50	100	200	500	1 000	2 000	5 000	1×10 ⁴
800 ℃时效	130	151	171	175	174	171	166	160	155	—	—
700 ℃时效	130	142	155	162	169	174	177	177	175	170	162
650 ℃时效	130	137	142	148	153	160	168	175	181	186	183
600 ℃时效	130	134	136	137	138	140	143	148	154	170	183
550 ℃时效	130	133	134	135	136	138	140	143	149	155	170
注：1 150 ℃水淬。											

3) 力学性能及加工性能

1Cr18Ni9Ti 钢的室温力学性能见表 2-88。

表 2-88 1Cr18Ni9Ti 钢的室温力学性能

热处理	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ /%	ψ /%	α_K /(J·cm ⁻²)
1 100~1 150 ℃水淬	550~650	200~350	50~60	60~70	>200
1 130~1 160 ℃水淬，800 ℃时效 10 h	655	310	55.0	75.5	250

冷加工性能：冷变形性能良好，可以进行各种加工，如弯曲、卷边和折叠等，并有良好的深冲性能；切削加工性能：较好，应选用优质刀具加工；焊接性能：焊接性很好，可用各种方法进行焊接，焊后不需进行热处理。

2. 7Mn15Cr2Al3V2WMo (7Mn15) 钢

7Mn15 钢是一种无磁冷作模具钢，在各种状态下都保持稳定的奥氏体组织，具有非常低的导磁系数，高的硬度、强度，较好的耐磨性。由于高锰钢的冷作硬化现象导致切削加工比较困难。采用高温退火工艺，可以改变碳化物的颗粒大小与分布状态，从而明显地改善钢的切削加工性能。采用气体软氮化工艺，可以进一步提高钢的表面硬度，增加耐磨性，显著地提高零件的使用寿命。

7Mn15 钢适于制造无磁模具、无磁轴承及其他要求在强磁场中不产生磁感应的结构零件。此外，由于该钢具有较高的高温强度和硬度，也可以用来制造在 700~800℃ 下使用的热作模具。

1) 热加工

7Mn15 钢锻造工艺规范见表 2-89。

表 2-89 7Mn15 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	加温时间/h	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 150~1 170	≥8	1 100~1 120	≥950	空冷
钢坯	1 140~1 160	≥8	1 080~1 100	≥950	空冷

7Mn15 钢导热性较差，锻造时装炉温度不宜过高，需缓慢升温，保温时间要求足够长，以保证钢中碳化物充分固溶，锻后硬度为 33~35HRC。

2) 预备热处理

高温退火工艺：加热温度为 870~890℃，保温 3~6 h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，退火后硬度为 28~30HRC，组织为细晶粒奥氏体+均匀分布的颗粒状碳化物。

采用高温退火工艺，能改善 7Mn15 钢的切削加工性能。

3) 固溶处理

固溶温度为 1 150~1 180℃，保温时间为盐浴炉 15~20 min/mm，空气炉 30 min/mm，冷却介质为水，固溶硬度为 20~22HRC。金相组织为奥氏体+未溶一次碳化物。

4) 时效处理

不同时效时间后 7Mn15 钢的硬度见表 2-90。

表 2-90 不同时效时间后 7Mn15 钢的硬度

时效时间/h	固溶后	2	4	10	14	18	20
650℃时效，硬度 HRC	20	32	44	46	47	46	48.5
700℃时效，硬度 HRC	20	48.5	48	46	45.5	—	45.5
注：固溶温度为 1 180℃，水淬。							

(1) 时效温度为 650 ℃，时效时间 20 h，硬度为 48HRC。

(2) 时效温度为 700 ℃，时效时间 2 h，硬度为 48.5HRC。

不同状态时 7Mn15 钢的硬度见表 2-91。7Mn15 钢不同温度固溶和时效处理后的力学性能见表 2-92。

表 2-91 不同状态时 7Mn15 钢的硬度

状态	锻造	退火	固溶	时效
硬度 HRC	33~35	28~30	20~22	47~48

表 2-92 7Mn15 钢在不同温度固溶和时效处理后的力学性能

热处理工艺	σ_b /MPa	δ /%	ψ /%	$\alpha_K/(J \cdot cm^{-2})$
1 180 ℃固溶处理	820	61.0	61.5	230
	720	60.0	62.5	240
1 150 ℃固溶处理，700 ℃， 2 h 时效处理	1 370	16.5	34.0	48
	1 370	15.5	35.5	45
	1 380	18.0	35.5	45
1 180 ℃固溶处理，650 ℃， 20 h 时效处理	1 510	4.5	8.5	15
	1 490	4.5	9.5	13

5) 气体氮碳共渗

7Mn15 钢气体氮碳共渗见表 2-93。为了提高模具硬度、耐磨性，可以采用气体氮碳共渗处理。

表 2-93 7Mn15 钢气体氮碳共渗

渗氮温率/℃	渗氮时间/h	渗氮层深度/mm	渗氮层硬度 HV
560~570	4~6	0.03~0.04	950~1 100

2.2.9 硬质合金

硬质合金的种类很多，但制造模具用的硬质合金通常是金属陶瓷硬质合金和钢结硬质合金。

1. 金属陶瓷硬质合金

此类合金是将一些高熔点、高硬度的金属碳化物粉末（如 WC 和 TiC）和黏结剂（Co 和 Ni）混合后，加压成型，再经烧结而成的一种粉末冶金材料。根据金属碳化物种类通常将其分为钨钴类硬质合金和钨钴钛类硬质合金。冷冲模用硬质合金一般是钨钴类。表 2-94 是钨钴类硬质合金的成分与性能。

表 2-94 钨钴类硬质合金的成分与性能

牌号	成分/(w, %)		力学性能					
	WC	Co	硬度 HRA	抗弯强度 σ_{bb}/MPa	抗压强度 σ_{bc}/MPa	弹性模量 E/GPa	冲击韧度 $\alpha_K/(\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
YG8	92	8	89	1 500	4 470	—	2.5	14.4~14.8
YG15	85	15	87	2 000	3 660	540	4.0	13.9~14.2
YG20	80	20	85.6	2 600	3 500	500	4.8	13.4~13.7
YG25	75	25	84.5	2 700	3 300	470	5.5	12.9~13.2

金属陶瓷硬质合金的共性是：具有高的硬度，高的抗压强度和高的耐磨性，脆性大，不能进行锻造及热处理。主要用来制作多工位级进模，大直径拉深凹模的镶块。

2. 钢结硬质合金

钢结硬质合金是以难熔金属碳化物为硬质相，以合金钢为黏结剂，用粉末冶金方法生产的一种新型模具材料，它具有金属陶瓷硬质合金的高硬度、高耐磨，高抗压性，又具有钢的可加工性和热处理性。它的出现填补了工具钢与普通硬质合金的空白。硬质相主要是碳化钨和碳化钛，我国是以 TiC 为硬质相起步，并以 GT35 牌号供应市场。WC 钢结硬质合金是我国 20 世纪 60 年代研制的，牌号为 TLMW50。

第二代 WC 硬质合金是我国 20 世纪 80 年代初研制成功的，简称 DT 合金。它保持了 TLMW50 钢的高硬度、高耐磨性，又较大幅度地提高了强度和韧性，因而能承受较大负荷的冲击，同时还具有较好的抗热裂能力，不易出现崩刃、碎裂等，是较理想的工模具材料之一。

1) DT 合金的力学性能

DT 合金的力学性能见表 2-95。DT 合金与其他钢结硬质合金的性能比较见表 2-96。

表 2-95 DT 合金的力学性能

性 能		低温回火态	等温淬火态
硬度 HRC	退火态	32~36	
	淬硬度	68	
	使用态	62~64	55~62
抗弯强度 σ_{bb}/MPa		2 500~3 600	3 200~3 800
抗压强度 σ_{bc}/MPa		4 000~4 200	2 400~2 800
抗拉强度 σ_b/MPa		1 500~1 600	—
冲击韧性 $\alpha_K/(\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$		15~20	18~25
弹性模量 E/MPa		$(2.7 \sim 2.8) \times 10^5$	
泊松比 ϵ		0.39	
抗热裂性 1 000 °C $\rightleftharpoons$ 水冷		20 次后发生热裂	
密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$		9.70	

表 2-96 DT 合金与其他钢结硬质合金的性能比较

合金牌号	硬质相类型	硬度 HRC		密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	抗弯强度 σ_{bc}/MPa	冲击韧度 $\alpha_K/(J \cdot cm^{-2})$
		加工态	使用态			
DT	WC	32~36	62~64	9.7	2 500~3 600	15~20
TLMW50	WC	35~42	66~68	10.2	2 000	8~10
GT35	TiC	39~46	67~69	6.5	1 400~1 800	6

2) DT 合金的热加工特性

(1) 退火工艺。DT 合金可采用等温球化退火工艺，在 860~880 °C 加热 2~3 h，炉冷，在 700~720 °C 等温 6 h，炉冷至 550 °C 以下出炉空冷。退火硬度小于 36HRC，退火组织为弥散碳化物和粒状珠光体。

(2) 淬火、回火工艺。DT 合金淬火工艺为 800~850 °C 预热 (2 min/mm)，1 000~1 020 °C 加热 (1 min/mm) 油冷，200~650 °C 回火 2 h。随着回火温度升高，DT 合金的强度、硬度逐渐下降，韧性明显升高，但在 600 °C 回火时有高温回火脆性。

DT 合金也可采用在 200~300 °C，等温 30 min 的等温淬火工艺。

(3) 锻造工艺性。DT 合金的可锻性优于其他钢结硬质合金，锻造温度范围较宽，热塑性较好。锻造工艺为：预热 700~800 °C，始锻 1 150~1 200 °C，终锻 880~900 °C。DT 合金在前几火锻打时需反复交替进行镦粗和滚圆，要轻拍快打，每次锻打时变形量应控制在 5% 左右。改锻时，变形量可适当增加到 10%~15%。

3) DT 合金的切削加工性

与普通硬质合金相比，DT 合金在退火软化后具有较好的切削加工性，可进行车、铣、刨、钻、攻螺纹等各种切削加工。DT 合金切削加工的难易，除与坯料退火软化程度有关外，还与切削加工工艺（如切削速度、背吃刀量和刀具几何角度等因素）参数有很大关系。加工 DT 合金时，一般采用较低的切削速度、较大的背吃刀量和中等的进给量。

DT 合金磨削加工时，易烧伤表面或产生网状裂纹。因淬火低温回火后的硬度比退火后的高，所以常在退火状态下将其磨削至最终尺寸或接近最终尺寸，尽量少留磨削余量，以免淬火后磨削遇到困难。对精度要求不高时，可在淬火前磨削至最终尺寸，淬火回火后稍加研磨抛光即可；对精度要求高时，可留少量精磨余量，以减少淬火回火后的磨削困难。磨削时应采用高转速、小磨削量，并供给充足的切削液，以免过热造成模具刃口回火软化或烧伤；但磨削退火状态的工件，最好采用干磨。

DT 合金和普通硬质合金一样可以进行电加工，如电火花加工和线切割加工等。电火花加工时，常用 DT 合金凸模作电极来加工 DT 合金凹模。电火花加工后，模具加工表面往往有几微米非常硬脆且伴有微裂纹的放电硬化层，一般采取二次回火来消除；同时要仔细研磨电火花加工面，以去除残存在放电硬化层中的微裂纹。

用 DT 合金制作模具时，一般都采用组合连接方法。这是因为粉末冶金件不可能压制得很大且为了节约 DT 合金材料同时发挥与其组合连接的钢材的优点。常用的组合连接方法有

镶套、焊接、黏结和机械连接等。

4) DT 合金的应用

DT 合金性能优越,越来越多地用来制造冷镦模具、冷挤压模具、冲裁模具和拉深模具等。使用效果良好。据不完全统计,在定转子冲裁模和落料模方面,DT 合金比 W18Cr4V、Cr12MoV 模具的使用寿命至少提高 6 倍;在民用五金行业的冷镦模、拉深模方面,DT 合金模比 Cr12 模具的使用寿命提高 10~32 倍,从而使成本大幅降低。DT 合金价格比合金钢贵几倍,小批量生产时,经济效益不明显。

2.3 冷作模具钢的选用

冷作模具种类多,形状结构差异性大,工作条件和性能要求不一,使得冷作模具钢的选择变得非常复杂,必须全面综合各种因素才能做到合理选材。

2.3.1 冷作模具钢的选用原则

选择冷作模具钢时,应遵循的基本原则是:首先要满足模具的使用性能要求,兼顾模具钢的工艺性和经济性。在确定模具使用性能时,应从模具结构、工作条件、制品形状及尺寸,加工精度和生产批量等方面加以综合考虑。一般对于形状复杂、尺寸精度要求高的模具,应选用低变形模具钢;承受负荷大的模具,应选用高强度模具钢;承受强烈摩擦和磨损的磨具,应选用高硬度、耐磨性好的模具钢;承受冲击负荷大的模具,应选用韧性高的模具钢。图 2-1 表示以 T10A 钢为基准,按性能要求选用常用冷作模具钢的大致方向。

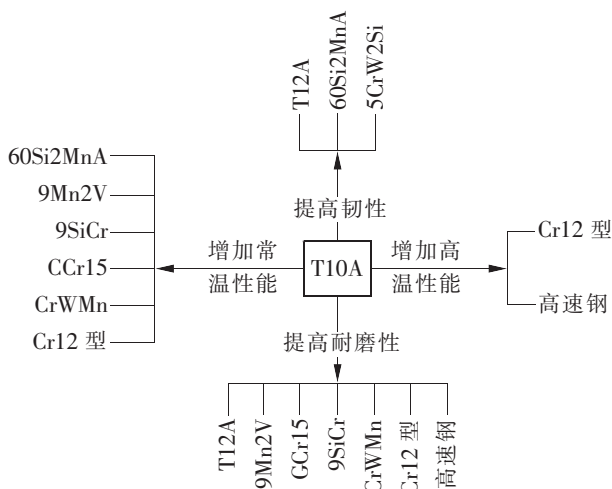


图 2-1 按性能要求选用冷作模具钢的方向

2.3.2 常用冷作模具钢的选用

1. 冷冲裁模具钢的选用

冷冲裁模具钢的选用主要根据产品的形状和尺寸、被冲材料特性、工作载荷大小、失效形式、生产批量和模具成本等因素来决定。

一般形状简单、载荷轻的冲裁模，可尽量采用成本低的碳素工具钢制造，只要热处理工艺适当，完全可以达到使用要求。

形状复杂、尺寸较大、工作载荷较轻且要求热处理变形小的冲裁模，可选用低合金工具钢制造。

对于大、中型模具，制造工艺复杂，加工成本高，材料成本只占模具总成本的 10%~18%，因此选用高耐磨、高淬透性、变形小的高碳中铬钢、高铬钢、高速钢、基体钢以及高强度韧性低合金冷作模具钢制造。

对于大量生产的冷冲裁模，要求使用寿命高，可选用硬质合金、钢结硬质合金来制造。表 2-97 为冷冲裁模的选材举例及工作硬度，以供参考。

表 2-97 冷冲裁模的材料选用举例及工作硬度

模具类型	工作条件	推荐选用的材料牌号		工作硬度 HRC	
		中、小批量生产	大量生产	凸模	凹模
冲裁模	硅钢片冲模	形状简单，冲裁硅钢薄板厚度≤1 mm 的凸、凹模	9Cr6W3Mo2V2；YG15、YG20 或 YG25 硬质合金；钢结硬质合金（另附模套，模套材料可采用中碳钢或 T10A）	60~62	60~64
		形状复杂，冲裁硅钢薄板厚度≤1 mm 的凸、凹模			
	钢板落料、冲孔模	形状简单，冲裁材料厚度≤4 mm 的凸、凹模	9Cr6W3Mo2V2；YG15、YG20 或 YG25 硬质合金；钢结硬质合金（另附模套，模套材料可采用中碳钢或 T10A）	薄板（≤4 mm）：58~60 厚板：≤56	薄板（≤4 mm）：60~62 厚板：≤56
		形状复杂，冲裁材料厚度≤4 mm 的凸、凹模			
		冲裁材料厚度>4 mm，载荷较重的凸、凹模	同上，但模套材料需采用中碳合金钢		

续表

模具类型		工 作 条 件	推荐选用的材料牌号		工作硬度 HRC	
			中、小批量生产	大量生产	凸模	凹模
冲裁模	冲头	轻载荷（冲裁薄板，厚度≤4 mm）	T7A、T10A、 9Mn2V、 6CrNiSiMnMoV		φ<5 mm: 56~62	
		重载荷（冲裁厚板，厚度>4 mm）	W18Vr4V、 W6Mo5Cr4V2、 6W6Mo5Cr4V、基体钢		φ>10 mm: 52~56; 56~60	
	剪刀（切断模）	剪切薄板（厚度≤4 mm）	T10A、T12A、 9Mn2V、GCr15		45~50; 54~58	
		剪切薄板的长剪刀	CrWMn、9CrWMn、 9Mn2V、GCr15、 Cr2Mn2SiWMoV		60~64	
		剪切厚板（厚度>4 mm）	5CrW2Si、Cr4W2MoV、 (Cr12MoV)、 6W6Mo5Cr4V、 5CrNiMnSiMoWV			
	修（切）边模	形状简单的	T10A、T12A、 9Mn2V、 GCr15		56~60	58~62
		形状较复杂的	CrWMn、 9Mn2V、 Cr2Mn2SiWMoV、 基体钢			
注：表中有括号的牌号，不推荐使用，可用 Cr6WV、Cr4W2MoV、GM、GD、ER5 钢代替。						

在选用冷作模具材料时，一定要重视新模具材料的应用。其中：Cr6WV、Cr4W2MoV、Cr2Mn2SiWMoV、GD、LD、GM、ER5、8Cr2MnWMoVS、65Nb 和 7CrSiMnMoV 等替代一些老钢种可以获得良好的效果。表 2 - 98 是新型冷作模具钢在冷冲裁模方面的应用实例。

表 2 - 98 新型冷作模具钢在冷冲裁模方面的应用效果

模具名称	钢 号	平均寿命对比
簧片凹模	Cr12、CrWMn GD	总寿命： 15 万件 60 万件
接触簧片级进模凸模	W6Mo5Cr4V2 GD	总寿命： 0.1 万件 2.5 万件
GB66 光冲模	60Si2Mn LD	总寿命： 1.0~1.2 万件 4.0~7.2 万件

续表

模具名称	钢 号	平均寿命对比
中厚 45 钢板落料模	Cr12MoV、T10A 7CrSiMnMoV	刃磨一次寿命： 600 件 1300 件
转子片复式冲模	Cr12、Cr12MoV GM ER5	总寿命： 20~30 万件 100~120 万件 250~360 万件
印制电路板冲裁模	T10A、CrWMn 8Cr2MnWMoVS	总寿命： 2~5 万件 15~20 万件
高速冲模	W12Cr4Mo2VRE	总寿命： 200~300 万件 (模具费用比 YG20 大大降低)

对于冲裁模辅助零件的材料选择及对热处理的硬度要求见表 2-99。

表 2-99 冲裁模辅助零件的材料选择及热处理的硬度要求

零件名称	选用材料	热处理硬度 HRC
上、下模板	HT200、ZG310—570、Q235	
导柱、导套	T8A、T10A 或 Q235	60~62 (Q235 渗碳淬火)
垫板、定位板、挡板、挡料钉	45	43~47
导板、导正钉	T10A	50~55
侧刃、侧刃挡板	T8A、T10A、CrWMn	58~62
斜楔、滑块	T8A、T10A	58~62
弹簧、簧片	65、65Mn、60Si2Mn	43~47
顶杆、顶料杆(板)	45	43~47
模柄、固定把	Q235	—

2. 冷挤压模具钢的选用

为了提高冷挤压模的使用寿命，保证冷挤压模具有良好的性能，在选材上应注意以下几点：

(1) 碳素工具钢和低合金工具钢淬硬性、强韧性和耐磨性较差，使用中易折断、弯曲和磨损，有时挤压模具会被压成鼓形，只宜作挤压应力较小、批量也不大的正挤压模具。

(2) Cr12 型钢是正挤压模具普遍采用的钢种，但在使用中因韧性低，碳化物偏析严重，其脆断倾向大，因而正逐步被新型冷作模具钢替代。

(3) 高速钢的抗压强度、耐磨性在冷作模具钢中最高，特别适宜制作承受高挤压负荷的反挤压凸模。但高速钢与 Cr12 型钢有同样的问题，即韧性低，易脆断，W18Cr4V 钢更严重。为克服高速钢的缺点，发扬其优点，生产中常用低温淬火来提高钢的断裂抗力。

(4) 降碳高速钢和基体钢用于冷挤压模具效果十分显著，降碳高速钢主要用于冷挤压冲头。但对于大批量生产的模具，这两类钢的耐磨性还有所欠缺。

(5) 对于大批量生产的冷挤压模具，应采用硬质合金。应用最多的是钢结硬质合金，常用来作冷挤压凹模。

表 2-100 为冷挤压模具的材料选用举例及工作硬度要求，以供参考。

表 2-100 冷挤压模具的材料选用举例及工作硬度要求

模具零件名称	工作条件	推荐选用的材料牌号		工作硬度 HRC
		中、小批量生产 (≤5 万件)	大量生产 (>10 或 20 万件)	
冲头 (凸模)	冷挤压紫铜、 软铝或锌合金	60Si2Mn、CrWMn、Cr6WV、 Cr5MoV、Cr4W2MoV、 Cr12MoV、W18Cr4V	Cr4W2MoV (渗氮)、 Cr12MoV (渗氮)、 W6Mo5Cr4V2 (渗氮)、 基体钢 (渗氮)、 钢结硬质合金	60~64
	冷挤压硬铝、 黄铜或钢件	Cr4W2MoV、Cr12MoV、 W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2、 6W6Mo5Cr4V、7CrSiMnMoV、 7Cr7Mo3V2Si、6CrNiSiMnMoV、 基体钢	W6Mo5Cr4V2 (渗氮)、 基体钢 (渗氮)、 钢结硬质合金、 YG15、YG20、YG25	60~64
凹模	冷挤压紫铜、 软铝或锌合金	T10A、9SiCr、9Mn2V、 CrWMn、GCr15、 Cr6WV、Cr5MoV、 Cr4W2MoV	Cr4W2MoV、 Cr12MoV、 W18Cr4V、 钢结硬质合金、 YG15、YG20、YG25	60~64
	冷挤压硬铝、 黄铜或钢件	CrW4Mn、Cr6WV、Cr5MoV、 Cr4W2MoV、Cr12MoV、 6W6Mo5Cr4V、7Cr7Mo3V2Si	Cr4W2MoV (渗氮)、 Cr12MoV (渗氮)、 W18Cr4V 或 6W6Mo5Cr4V (渗氮)、 基体钢 (渗氮)、 钢结硬质合金、YG15、 YG20、YG25	58~60
顶出器 (顶杆)		CrWMn、 Cr6WV、Cr5MoV、 7Cr7Mo3V2Si	Cr4W2MoV、 Cr12MoV、 6W6Mo5Cr4V、 基体钢	58~62
注：钢结硬质合金应外附模套，模套材料可采用中碳钢或中碳合金钢，如 45、50、40Cr 钢等。				

3. 拉深模具钢的选用

拉深模具的耐磨性能好坏与被拉材料的种类、厚度、变形量、润滑方法以及模具的设计和加工精度等因素有关。因此，对这类模具钢的选择，应按照其具体工作条件来决定。对于中、小型模具，可选用质量较好的模具钢；对于大、中型模具，在满足模具使用性能要求的前提下，应尽量采用价格低廉的材料，如球墨铸铁等；对于大批量生产的模具或模具上磨损严重的部位，可采用镶嵌模块式的办法解决，即在合金铸铁模框中镶嵌质量较好的材料作模芯。

为了防黏附，在拉深铝、铜合金和碳素钢时，可对凸模和凹模材料进行渗氮和镀铬。拉深奥氏体不锈钢时，采用铝青铜作凹模材料，对抗黏附性能起到很好的作用。当生产批量较

大、需采用高碳中铬钢或高碳高铬钢作凹模材料时，应进行渗氮和抛光，同样也有防黏附的效果。硬质合金虽然适合于大量生产的模具，但在无润滑情况下，极易发生黏附。

表 2-101 是根据工作条件推荐选用的拉深模具材料及硬度要求，以供参考。

表 2-101 拉深模具的材料选用举例及工作硬度

零件名称	工作条件		推荐选用的材料牌号			工作硬度 HRC
	制品类别	被拉深材料	小量生产 (<1 万件)	中批量生产 (<10 万件)	大量生产 (100 万件)	
凹 模	小 型	铝合金或铜合金	T10A、GCr15、CrWMn、	CrWMn、9CrWMn、Cr6WV、Cr5MoV、	Cr6WV、Cr5MoV、Cr4W2MoV、Cr12MoV	62~64
		深冲用钢	9CrWMn	7CrSiMnMoV		
		奥氏体不锈钢	T10A（镀铬） 铝青铜	铝青铜 Cr6WV（渗氮） Cr5MoV（渗氮）	Cr42MoV（渗氮） Cr12MoV（渗氮）、 YG 类硬质合金、 钢结硬质合金	
	大、中型	铝合金或铜合金	合金铸铁 球墨铸铁	合金铸铁 镶嵌模块： Cr6WV、Cr5MoV、Cr4W2MoV、Cr4W2MoV	镶嵌模块： Cr6WV、Cr5MoV、Cr4W2MoV、Cr12MoV	
		深冲用钢				
		奥氏体不锈钢	合金铸铁 镶嵌模块：铝青铜	镶嵌模块： Cr6WV（渗氮）、Cr4W2MoV（渗氮）、 铝青铜	镶嵌模块： Cr6WV（渗氮）、Cr4W2MoV（渗氮）、 Cr12MoV（渗氮）、 W18Cr4V（渗氮）	
冲头 (凸模)	小 型		T10A、40Cr（渗氮）	T10A、Cr6WV、Cr5MoV	Cr6WV、Cr5MoV、Cr4W2MoV、Cr12MoV	58~62
	大、中型		合金铸铁	CrWMn、9CrWMn	Cr6WV、Cr5MoV、Cr4W2MoV、Cr12MoV	
零件名称	制品类别	被拉深材料	小量生产 (<1 万件)	中批量生产 (<10 万件)	大量生产 (100 万件)	HRC
压边圈	小 型		T10A、CrWMn 9CrWMn	T10A、CrWMn、 9CrWMn	T10A、CrWMn、 9CrWMn	54~58
	大、中型		合金铸铁	合金铸铁	CrWMn、 9CrWMn	
注：1. 冲头材料，除合金铸铁外，最好镀铬。 2. 镶嵌模块材料，镶嵌于经火焰淬火的合金铸铁中。 3. 大、中型制品系指外径及高度 >200 mm 者。 4. 硬质合金模坯外面必须镶模套，模套材料可采用中碳钢或中碳合金钢。						

4. 冷镦模具钢的选用

根据冷镦模具的工作条件及硬化层不能过浅也不能将整个截面淬硬的特点，对这类模具钢的选择应按模具零件不同部位的受力情况、截面大小、硬化层深度要求以及生产批量的大小等因素来决定。

对于轻负荷的小型凹模，大都采用表面具有一定硬化层的整体模块。当要求硬化层深度不大时，可选用 T10A 钢（淬硬层 1.5~2 mm）制造；如要求较深些的硬化层，则可选用低合金工具钢；在这种场合下选用高淬透性钢是不适宜的。对于负荷较重和形状较复杂的凹模，可选用高碳中铬钢或高速钢、基体钢制作的嵌镶模块，这种嵌镶模块可以用压入法或热套法嵌入用韧性较好的材料制成的模套内。产量超过 20 万件时，可以选用钨钴类硬质合金或钢结硬质合金制成的嵌镶模块，这类材料耐磨性高，且公差小，使用寿命长，足以补偿其高的成本费用。

用作冷镦凸模（冷冲头）的材料，应当有良好的减磨性和耐磨性，还要有足够的硬度，以免在受冲击的地方塌陷。当负荷较轻时，大多数采用 T10A 钢或低合金工具钢制造。在模具尺寸较大和重载时，亦应采用和凹模相同的材料制成模块式镶拼模具。

切裁工具必须硬而耐磨，并需要一定的热硬性。顶出杆要有良好的韧性，同时也要耐磨。选择这类辅助件材料，可根据具体情况决定。

表 2-102 是冷镦模具的材料选用举例及工作硬度要求，以供选材时参考。

表 2-102 冷镦模具的材料选用举例及工作硬度要求

模具类型及 零件名称			推荐选用的材料牌号		工作硬度 HRC
			中、小批量生产 (<10 万件)	大量生产 (>20 万件)	
冷 镦 凹 模	开口模整体模块	轻载荷、小尺寸	T10A、MnSi	T10A、MnSi	表面 59~62，心部 40~50
		轻载荷、较大尺寸	CrWMn、GCr15	CrWMn、GCr15	表面>62，心部<55
	整体模块	轻载荷、小尺寸	T10A、MnSi	—	表面 59~62，心部 40~50
		轻载荷、较大尺寸	CrWMn、GCr15	—	表面>62，心部<55
	闭 合 模 嵌镶模块模芯	重载荷、形状复杂的大、中型模具	Cr6WV、Cr4W2MoV	YG15、YG20 或 YG25、GT35、 GJW50、DT	58~62
			(Cr12MoV)、Cr5MoV		58~62
			W18Cr4V、 W6Mo5Cr4V2		>62
			7Cr7Mo3V2Si、基体钢		58~62
	嵌镶模块模套	重载荷、形状复杂的大、中型模具	42CrMo、40CrMnMo 4Cr5W2VSi、 4Cr5MoSiV、 4Cr5MoSiV1	六角螺母冷镦模 T7A、T10A	48~52
				钢球、滚子冷镦模 GC15、CrWMn	

续表

模具类型及 零件名称	工作条件	推荐选用的材料牌号		工作硬度 HRC
		中、小批量生产 (<10 万件)	大量生产 (>20 万件)	
冷镦冲头 (凸模)	轻载荷、小尺寸	T10A、MnSi	—	58~60
	轻载荷、较大尺寸	CrWMn、GCr15		60~61
	重载荷	Cr6WV、Cr4W2MoV	YG15、YG20 YG25、GT35、 GJW50、DT (另附模套)	56~64
		(Cr12MoV)、Cr5MoV		56~64
		W18Cr4V		63~64
		W6Mo5Cr4V2		
		6W6Mo5Cr4V、 7CrSiMnMoV		56~64
7Cr7Mo3V2Si、基体钢	56~64			
切裁工具		T10A、 Cr4W2MoV、 (Cr12MoV)、 W6Mo5Cr4V2	—	切 断 刀 片 60~62 63 64~65 滚 切 刀 61~63 60~61 62~64
顶出杆	冲击负荷较大、要求 韧性高的	6W6Mo5Cr4V2、T7A	—	57~59
	中等冲击负荷要求韧 性和耐磨性都好	9CrWMn、CrWMn		<60
	冲击负荷不大，但要 求高耐磨性的	W6Mo5Cr4V2		62~63
注：有括号的牌号不推荐采用，尽量采用代用钢号。				

2.4 冷作模具钢的锻造与基本热处理技术

在模具材料选定之后，模具钢的锻造和热处理是影响模具使用性能的主要工艺因素，因模具材料的组织将由它们决定。为了满足冷作模具的性能要求，理想的组织应该是在高硬度、高强韧性的基体上均匀弥散分布着圆形细粒状硬质相（一般为碳化物），要获得理想组织，就必须采用合理的锻造和热处理技术。

2.4.1 冷作模具钢的锻造

锻造对于冷作模具的组织影响，主要是提高材料的致密度和均匀性，以及形成合理的流线分布。尤其是通过锻造改善碳化物的不均匀性，这对于高碳高合金钢以及具有类似铸态组织的钢种具有十分重要的意义。从锻造性能上来说，钢结硬质合金是较难改锻的材料，因此，下面介绍这两类材料的锻造（改锻）工艺。

1. 高碳高合金钢的锻造

高碳高合金钢导热性差、塑性低、变形抗力大、锻造温度范围窄（200℃左右），所以，

在锻造的加热和冷却过程中产生内应力的倾向性较大，难于变形，易于过热，易于锻裂。必须遵循以下工艺操作要点：

(1) 锻造加热和冷却要以缓慢而均匀的速度进行。对于尺寸较大的坯料需进行预热，然后再进行加热。加热时要经常翻动，使温度均匀，以减少内应力，锻后在干砂内冷却。

(2) 严格控制锻造温度范围。低于终锻温度时必须立即返炉，温度回升后再锻时应减轻锤击，并力争一火锻成，终锻温度不要高于 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ ，以免锻后晶粒粗化。

(3) 锻造时，所用工具的圆角半径应大些，表面应光洁并进行预热，锤头与锤砧应预热至 $200\sim 300\ ^\circ\text{C}$ 。

(4) 锤击操作应掌握“二轻一重”和两均匀（各部温度均匀、变形均匀）的操作要领，以减少内应力。为确保做到两均匀，锻件应经常翻动和送进，压下量要适中，不要在同一部位重复变形。

(5) 锻件要尽量避免冲孔和扩孔。必须冲、扩孔时，冲头锥度不宜过大。孔不能一次冲通需经中间加热后从反面将孔冲通。

控制高碳高合金钢的锻造质量，还要注意锻造方法的选择。一般来说，对于较小锻件，或心部质量要求不很高的模具锻件（如冲头、滚丝模、圆剪刀等），可采用轴向反复锻拔；对于工作部位在心部的某些模具锻件（如冷锻凹模），可以采用径向反复锻拔；对于内部及外部质量要求很高的锻件（如冷冲模、拉深模），可采用十字锻拔和三向锻拔。锻拔的次数取决于碳化物不均匀的级别和对碳化物不均匀度级别的要求，一般每锻拔 3 次可提高 1~2 级。反复锻拔时的总锻造比是各次锻造比之和，总锻造比一般选取 8~10，反复锻拔时的每次锻造比应为 2 左右，不宜太大。

为了使锻造深透，锻锤吨位应选择得当。吨位过小，变形只在表面进行，锻坯心部质量得不到改善。吨位过大，打击过重，容易锻裂。锻造高碳高合金钢时，锻锤吨位的选择可参考表 2-103。锻造低合金工具钢或碳素工具钢时，锻件的尺寸或质量可加大 1 倍。

表 2-103 锻造高碳高合金钢锻锤吨位的选择

锻锤 吨位 /kg	锻 造 范 围		锻锤 吨位 /kg	锻 造 范 围	
	拔长时坯料直径 或边长/mm	反复锻拔坯 料质量/kg		拔长时坯料直径 或边长/mm	反复锻拔坯 料质量/kg
150	≤ 35	< 1	500	50~85	3~7
250	≤ 40	1~1.5	750	70~120	5~15
300	20~50	1~3	1 000	85~150	10~25
400	35~70	2~5			

2. 钢结硬质合金的锻造

烧结成形后的钢结硬质合金坯料在锻造前需进行球化退火，以消除残余应力，获得球状珠光体以便于锻造的进行。应将退过火的锻坯上的尖角和棱角磨成圆角。

锻锤吨位选择可参考表 2-103。锤头、锤砧、工具和胎模等使用前需经预热。

锻造加热速度不宜过快，保温时间不宜过长，坯料应在炉中经常翻动，确保加热均匀。

钢结硬质合金坯料加热后，需经适当预冷，待其温度降低大约 50℃ 后开始锻造。变形量不宜过大，锻造比一般大于 2，注意采用“二轻一重”的操作要领。终锻温度控制在 900℃ 为宜。

钢结硬质合金锻造的最初 1~3 火，一般是进行镦粗和拔长。拔长宜尽量在 V 形铁砧或胎模中进行，待锻透后再逐步改变坯料的形状和尺寸。

2.4.2 冷作模具的基本热处理技术

实践证明，模具的淬火变形与开裂以及使用过程中的早期开裂，虽然与材料的冶金质量、锻造质量、模具结构及加工有关，但与模具的热处理加工关系更大。根据模具失效原因的分析统计，热处理引起的失效占 5% 以上。因此，在模具材料选定之后，还必须配以正确的热处理，才能保证模具的性能和使用寿命。

1. 冷作模具的制造工艺路线

模具的成型加工和热处理工序安排对模具的质量也有很大影响，在制定与实施热处理工艺时，必须予以考虑。

通常冷作模具的制造工艺路线有以下几种：

- (1) 一般成形冷作模具：锻造→球化退火→机械加工成形→淬火与回火→钳修装配。
- (2) 成形磨削及电加工冷作模具：锻造→球化退火→机械粗加工→淬火与回火→精加工成形（凸模成形磨削，凹模电加工）→钳修装配。
- (3) 复杂冷作模具：锻造→球化退火→机械粗加工→高温回火或调质→机械加工成形→钳工修配。

在热处理工序安排上要注意以下几点：

- (1) 对于位置公差和尺寸公差要求严格的模具，为减少热处理变形，常在机加工之后安排高温回火或调质处理。
- (2) 对于线切割加工模具，由于线切割加工破坏了淬硬层，增加淬硬层脆性和变形开裂的危险性，因而，线切割加工之前的淬回火常采用分级淬火或多次回火和高温回火，以使淬火应力处于最低状态，避免模具线切割时变形、开裂。
- (3) 为使线切割模具尺寸相对稳定，并使表层组织有所改善，工件经线切割后应及时进行再回火，回火温度不高于淬火后的回火温度。

2. 冷作模具的淬火

淬火是冷作模具的最终热处理中最重要的操作，它对模具的使用性能影响极大。主要的工艺问题有以下几个方面：

- (1) 合理选择淬火加热温度。既要使奥氏体中固溶一定的碳和合金元素，以保证淬透性、淬硬性、强度和热硬性，又要有适当的过剩碳化物，以细化晶粒，提高模具的耐磨性并保证模具具有一定的韧性。

(2) 合理选择淬火保温时间。生产中通常采用到温入炉的方式加热，其淬火保温时间是指从仪表指示到给定的淬火温度起，至工件出炉为止所需时间。常用以下经验公式确定：

$$t = \alpha D$$

式中 t ——淬火保温时间 (min 或 s)；

α ——加热系数 ($\text{min} \cdot \text{mm}^{-1}$ 或 $\text{s} \cdot \text{mm}^{-1}$)，表 2-104 为常用钢的加热系数；

D ——工件有效厚度 (mm)。

表 2-104 常用钢的加热系数 $\alpha/(\text{min} \cdot \text{mm}^{-1})$

工件材料	工件直径/mm	<600 °C 箱式电阻炉中预热	750~850 °C 盐浴炉中加热或预热	800~900 °C 箱式或井式电阻炉中加热	1 100~1 300 °C 高温盐浴炉中加热
碳 钢	≤50	—	0.3~0.4	1.0~1.2	—
	>50	—	0.4~0.5	1.2~1.5	
低合金钢	≤50	—	0.45~0.50	1.2~1.5	—
	>50	—	0.50~0.55	1.5~1.8	
高合金钢	—	0.35~0.40	0.30~0.35	—	0.17~0.20
高速钢	—	—	0.30~0.35	—	0.16~0.18

实际热处理时，必须根据具体情况具体分析。例如，有些模具零件要快速加热，短时保温；有些需充分加热与保温。特别是复杂模具更要综合考虑各种影响因素，并通过实验来确定其淬火保温时间。

(3) 合理选择淬火冷却介质。高合金冷作模具钢因淬透性好，可用较缓的冷却介质淬火，如气冷、油冷、盐浴分级淬火等；为了保证碳素工具钢模具和低合金工具钢模具足够的淬硬层深度，同时减少淬火变形和防止开裂，常采用双介质淬火，如水-油淬火、盐水-油淬火、油-空冷淬火、硝酸盐-空冷淬火等。还可以采用一些新型的淬火冷却介质，如三硝水溶液（三种硝酸盐混合的过饱和水溶液）、氯化锌-碱溶液和氯化钙水溶液等，以简化淬火操作，提高淬火质量。

(4) 采用合适的淬火加热保护措施。氧化与脱碳严重降低模具的使用性能，淬火加热时必须采取防护措施。通常防氧化、脱碳的方法有：①装箱保护法。在箱内或沿箱四周填充保护剂，常用的保护剂有木炭、旧的固体渗碳剂和铸铁屑等。②涂料保护法。采用刷涂、浸涂和喷涂等方法把保护涂料涂敷在模具表面，形成致密、均匀、完整的涂层。涂料配比一般为：耐火黏土 10%~30%；玻璃粉 70%~90%，再向每千克涂料的混合料中加水 50~100 g，拌匀后使用。使用时，涂层厚 0.1~1 mm 即可。涂料有商品可购，应用时应注意它们的适用温度和钢种。③包装保护法。国内现用两种方法：一是将模具放入厚度约为 0.1 mm 的不锈钢箔内，并加入一小包专门的保护剂，然后将袋口像信封口一样封好即可加热，淬火时将模具零件由袋内取出淬火；另一种是采用防氧化脱碳薄膜，它的成分是硼酸、玻璃料和橡胶黏结剂，可以折叠，使用时只要将像纸一样的薄膜将工件包住，即可加热。这

种薄膜在 300℃左右就开始熔化变成一层粘稠状的保护膜，淬火时自动脱落，工件淬火后表面呈银白色，保护效果良好。④盐浴加热法。它是模具淬火加热的主要方式之一。具有加热速度快而均匀、不易氧化脱碳的优点。

3. 主要冷作模具的热处理特点

1) 冲裁模热处理特点

冲裁模的工作条件、失效形式、性能要求不同，其热处理特点也不同。

(1) 对于薄板冲裁模，应具有高的精度和耐磨性，在工艺上应保证模具热处理变形小、不开裂和高硬度。通常根据模材类型采用不同的减少变形的热处理方法。典型薄板冲裁模的热处理工艺规范可参考表 2-105。

表 2-105 典型薄板冲裁模的热处理工艺规范

钢材及特点	热处理工艺规范							
碳素工具钢淬透性差、耐磨性低、热处理操作难度大、淬火变形、开裂难以控制	1. 双液淬火工艺							
	钢号	淬火温度 /℃	预冷时间 /(s·mm ⁻¹)	水淬规程	油冷规程	下列硬度的回火温度/℃		
						60~62	58~61	54~58
	T7A	780~820	1~2	质量分数为 5% ~10%的 NaCl 水溶液 1s/mm	100~120℃ 热油	140~160	160~180	210~240
	T8A	760~800				150~170	180~220	220~260
	T10A	770~810				160~180	200~220	240~270
	2. 碱浴淬火工艺 T10A：830℃加热预冷 170℃碱浴冷却 1 min 后油冷硬度为 63~64HRC							
3. 碱水-硝盐复合淬火，工艺 T8A：780~800℃加热，在质量分数为 10%，NaOH 水溶液中冷却 8 s，170℃硝盐中保温 7 min，硬度为 59~62HRC（刃口部分）。								
低变形冷作模具钢 9Mn2V、CrWMn、9CrWMn、Mn-CrWV 等 淬火工艺易操作，淬裂和变形敏感性小、淬透性高、淬火型腔易涨大、尖角处易开裂	1. 低温淬火工艺 CrWMn、MnCrWV 淬火温度取 790~810℃、9Mn2V 淬火温度取 750~770℃							
	2. 恒温预冷工艺 CrWMn 820℃加热保温后，转入 700~720℃炉中保温 30 min 后油冷，硬度为 59~63HRC，160~180℃回火							
	3. 快速加热分级淬火工艺 CrWMn 980℃快速加热后，立即投入 100℃热油中冷却 30 min 后空冷，400℃回火，硬度为 55~58HRC							
	4. 热油等温淬火 9Mn2V 790~800℃加热，130~140℃热油等温 30 min，160~170℃回火 2 h							
	5. 冷油-硝盐复合淬火 CrWMn 650℃预热，800℃加热预冷后入油冷 13 s、180℃硝盐等温 30 min，200℃回火							
	6. 硝盐淬火							
	(1) 马氏体分级淬火（140~180℃硝盐）							
	(2) 马氏体等温淬火（140~160℃硝盐）							
	(3) 贝氏体等温淬火（200~260℃硝盐）							

续表

钢材及特点	热处理工艺规范
Cr12、Cr12MoV 淬透性高, 变形 可以调节、淬火 变形、开裂倾向小	采用贝氏体等温淬火、热浴分级淬火等方法可以减少开裂和变形, 具体工艺可以参照表 2-49

(2) 对于重载冷冲模, 其主要失效形式是崩刃和折断, 因此, 重载冷冲模的特点是保证模具获得高强韧性。在此前提下, 再进一步提高模具的耐磨性。通常采用的强韧化处理方法有细化奥氏体晶粒处理、细化碳化物处理、贝氏体等温淬火处理、循环超细化处理和低温低淬等方法。具体工艺已在冷作模具的强韧化处理中述及。

(3) 对于冷剪刀, 国内主要采用 5CrW2Si、9CrSi、Cr12MoV 钢制造, 由于工作条件差异大, 其工作硬度范围也大, 通常在硬度 42~61HRC 之间。为减小淬火内应力, 提高刀刃抗冲击能力, 一般采用热浴淬火。大型剪刀采用热浴有困难, 可以用间断淬火工艺即加热保温后先油冷至 200~250℃后转为空冷至 80~140℃, 立即进行预回火 (150~200℃), 最后再进行正式回火。

对于成形剪刀, 重载工作时硬度可取 48~53HRC, 中等载荷时可取 54~58HRC。淬火工艺可采用贝氏体等温、马氏体等温或分级淬火。

冷剪刀的常用热处理工艺规范见表 2-106。

表 2-106 冷剪刀的常用热处理工艺规范

钢 号	淬火温度 /℃	预冷时间 (s·mm ⁻¹)	淬火油温度 /℃	回火温度/℃		
				薄 板	中 板	厚 板
				57~60HRC	55~58HRC	52~56HRC
9CrWMn	840~860	2~3	60~100	—	230~260	—
CrWMn MnCrWV	820~840	2~3	60~100	230~250	260~280	—
9CrSi	840~870	2~3	60~100	260~280	300~360	350~400
5CrW2Si 6CrW2Si	920~960	2~3	60~100	—	230~260	280~300
5SiMnMoV	870~900	2~3	60~100	200~240	260~300	320~360
Cr12MoV	1 020~1 040	2~3	60~100	250~270	400~420	—
	940~960			220~240	280~300	—
	910~930			220~240	—	—

(4) 大多数冷冲裁模使用状态为淬火加回火, 模具硬度通常在 60HRC 左右, 这样的硬度使模具获得高使用寿命而又不磨损是不可能的。因此, 为提高冲裁模的耐磨性和使用寿命

命,常进行表面强化处理,主要工艺方法有氮碳共渗、渗硼、盐浴渗钒、渗铌以及 CVD 法等。具体工艺见第 5 章模具的表面处理。

2) 冷挤压模的热处理特点

根据冷挤压模的工作条件和失效形式分析可知,冷挤压模应具有高的硬度、耐磨性、抗压强度、高强韧性、一定的抗耐热疲劳性和足够的回火抗力。为了满足这一性能要求,在材料选定的情况下,必须注意其热处理特点。

(1) 对于易断裂或胀裂、回火抗力和耐磨性要求不高的冷挤压模具,一般常采用常规工艺的下限温度淬火,以便获得尺寸细小的马氏体,再经回火就可以得到高的强韧性。

(2) 高碳高合金钢制冷挤压模具,淬火后残余奥氏体量较多,一般要采用较长时间的回火或多次回火,以便控制和稳定残余奥氏体量,消除应力,提高韧性,稳定尺寸。

(3) 对于以脆性破坏(折断、劈裂或脱帽)为主,韧性不足的冷挤压模具常采用等温淬火工艺,其等温温度常在 $M_s + (20 \sim 50)^\circ\text{C}$ 范围内,经等温淬火后再采用二次回火以减少内应力和脆性,促使残余奥氏体转变为回火马氏体。

(4) 应用表面强化处理。为获得高的表面硬度和表面残余压应力,冷挤压模常采用表面渗氮、氮碳共渗、镀硬铬和渗硼等工艺,如 Cr12MoV 冷挤压凹模经 990°C 盐浴渗硼后,使用寿命可提高数倍。又如,活塞销冷挤压凸模采用 W6Mo5Cr4V2 钢制造,经气体氮碳共渗后使用寿命提高 2 倍以上。其主要原因是采用表面强化处理后增加了模具的耐磨性,而且会增加抗咬合能力,改善了表面应力状态。

(5) 在使用过程中进行低温去应力回火。冷挤压模在使用一段时间后常将模具的成型部位再进行回火,其主要目的是消除使用过程中产生的应力,消除由于挤压载荷交变作用引起的内应力集中和疲劳。表 2-107 是典型冷挤压模的热处理工艺规范。

表 2-107 典型冷挤压模的热处理工艺规范

钢 号	热处理工艺规范
Cr12MoV	1 020~1 030 $^\circ\text{C}$ 加热, 200~220 $^\circ\text{C}$ 硝盐分级淬火+160~180 $^\circ\text{C}$ 2 h 回火 3 次, 硬度为 62~64HRC
W6Mo5Cr4V2	凸模: 1 240 $^\circ\text{C}$ 加热 300 $^\circ\text{C}$ 分级淬火+500 $^\circ\text{C}$ $\times$ 2 h 回火 2 次 凹模: 1 180 $^\circ\text{C}$ 加热 300 $^\circ\text{C}$ 分级淬火+500 $^\circ\text{C}$ $\times$ 2 h 回火 2 次
LD	凸模: 850 $^\circ\text{C}$ 预热, 1 120~1 150 $^\circ\text{C}$ 油淬, 560 $^\circ\text{C}$ $\times$ 1 h 回火 3 次空冷, 硬度为 60~62HRC
65Nb	凹模: 840 $^\circ\text{C}$ 预热, 1 100~1 180 $^\circ\text{C}$ 热油淬+520~580 $^\circ\text{C}$ $\times$ 2 h 回火 2 次

3) 拉深模的热处理特点

拉深模应具有高的硬度,良好的耐磨性和抗黏附性能。为了保证性能要求,在制定和实施热处理工艺时主要注意以下两点:

(1) 要避免模具表面产生氧化脱碳。氧化脱碳会造成模具淬火后硬度不足或出现软点。当表面硬度低于 500HV 以下时,模具表面就会出现拉毛现象。同时还要防止磨削引起二次回火使表面硬度降低。

(2) 为了提高拉深模表面的抗磨损和抗黏附性能, 常对模具进行表面处理, 如渗氮、渗硼、镀硬铬和渗钒等。例如: Cr12 钢制螺母拉深模, 经 980 ℃ 淬火, 200 ℃ 回火后, 使用寿命为 1 000~2 000 件, 后经渗钒及淬回火后, 使用寿命可提高到 1 万件。这主要是因为渗钒以后, 表面硬度可达 2 800~3 200HV, 具有很好的耐磨性、抗黏着性、耐蚀性, 且渗层仍保持良好的韧性。

典型拉深模的热处理工艺规范见表 2-108。

表 2-108 典型拉深模的热处理工艺规范

钢 号	热处理工艺规范
Cr12MoV	1. 1 030 ℃ 淬火+200 ℃ 硝盐分级 5~8 min+160~180 ℃ 回火 3 h 硬度为 62~64HRC 2. 1 050~1 080 ℃ 油淬+500 ℃ ×2 h 回火 3 次+450~480 ℃ 离子渗氮
QT500-7	600~650 ℃ 预热+890 ℃ ±10 ℃ 淬入盐水中冷至 550 ℃ 入油冷至 250 ℃ 入热油 (180~220 ℃) 进行分级淬火+160~180 ℃ 回火 5~7 h
7CrSiMnMoV	890 ℃ 油淬+200 ℃ 回火 2 h, 硬度 60~62HRC

4) 冷镦模热处理特点

根据冷镦模的性能要求, 冷镦模的热处理有如下特点。

(1) 对于碳素工具钢制冷镦凹模, 常采用喷水淬火法。喷水淬火法与整体淬火相比, 韧性高, 硬度均匀, 硬化层沿凹模型腔轮廓均匀分布, 这样可以避免过早开裂。另外, 根据有关资料介绍, 碳素工具钢冷镦模采用片状珠光体组织预处理, 模具寿命可显著提高。例如, T10A 钢制螺栓冷镦工序冲模, 在球化退火和机械加工后再进行一次完全退火处理, 其工艺为 840 ℃ 保温 3 h, 炉冷至 500 ℃ 出炉空冷。退火组织为片状珠光体。模具最终热处理采用 600 ℃ 充分预热, 淬火加热温度为 840 ℃, 在盐浴炉中加热时间为 30 s/mm, 水淬油冷, 水温控制在 20~40 ℃ 之间, 于 200 ℃ 回火 2 h, 硬度为 60~62HRC。与常规工艺相比, 抗压强度提高 1.5 倍, 抗压屈服点提高 2.1 倍, 断裂韧度提高 31%, 而一次冲击韧度值有所下降。模具的平均使用寿命提高 4 倍。

(2) 冷镦模必须充分回火, 回火保温时间应在 2 h 以上, 并进行多次回火, 使其内应力全部释放。整体淬火的合金钢冷镦模更需如此。

(3) 采用中温淬火、中温回火工艺。对于 Cr12MoV 钢制冷镦凹模, 采用 1 030 ℃ 加热淬火和 400 ℃ 中温回火, 可获得最佳的强韧性配合, 冷镦模的断裂抗力明显提高。

(4) 采用快速加热工艺。快速加热可以获得细小的奥氏体晶粒, 不仅能减小淬火变形, 而且可以提高模具的韧性。

(5) 采用表面处理。为了提高冷镦模的耐磨性和抗咬合性, 冷镦模通常进行渗硼。通过渗硼, 模具表面形成硬度高达 1 100HV 以上的硼化层, 模具基体也得到强化, 模具寿命大幅提高。

典型冷镦模的热处理工艺规范见表 2-109。

表 2-109 典型冷镦模的热处理工艺规范

钢 号	热处理工艺规范
T10A	1. 快速加热淬火工艺、快速加热温度为 $960\sim 980\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，喷水淬火形成薄壳硬化状态 2. 粗加工后进行完全退火， $840\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热保温 3 h 后炉冷至 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 出炉空冷。最终热处理为 $830\sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热后水淬油冷 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回火，硬度为 $60\sim 62\text{HRC}$ 3. 两段回火工艺：将原 $240\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回火 2 h 改为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回火 1 h， $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回火 1 h，使用寿命可提高 $50\%\sim 100\%$
60Si2Mn	等温淬火工艺： $870\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热保温后， $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温淬火 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回火，硬度为 $55\sim 57\text{HRC}$
Cr12MoV	1. 优化回火工艺，改 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 3 h 回火为 $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 3~4 h 回水，硬度为 $59\sim 61\text{HRC}$ 2. 中温淬火、中温回火工艺： $1\ 020\sim 1\ 040\text{ }^{\circ}\text{C}$ 淬火， $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回火，硬度为 $54\sim 57\text{HRC}$
W6Mo5Cr4V2	低温淬火工艺： $1\ 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 淬火， $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回火
6Cr4W3Mo2VNb	1. $1\ 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 油淬 + $560\text{ }^{\circ}\text{C} \times 2\text{ h}$ 回火 2. $1\ 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 油淬 + $550\text{ }^{\circ}\text{C} \times 1\text{ h}$ 回火 + $580\text{ }^{\circ}\text{C} \times 1.5\text{ h}$ 回火

2.5 冷作模具热处理实例

1. CrWMn 钢制光栏片上冲模的热处理

光栏片是光学仪器中大量使用的零件，是用 $0.06\sim 0.08\text{ mm}$ 的低合金冷轧钢带冲制而成的。光栏片要求严格控制尺寸精度和 α 夹角的公差，端面粗糙度要低于 $Ra0.8\text{ }\mu\text{m}$ ，因而对光栏片冲模有较高的技术要求。光栏片的上冲模如图 2-2 所示，模具硬度要求为 $61\sim 64\text{HRC}$ ，两个冲针孔之间的夹角 α 为 $125^{\circ}10'\pm 8'$ 。为满足上冲模的技术要求，必须选用合适的钢材和热处理工艺。

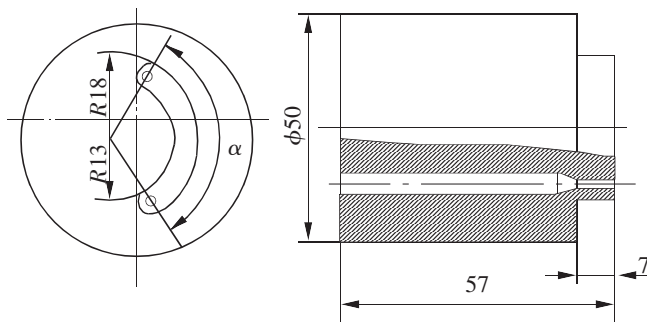


图 2-2 光栏片上冲模简图

光栏片冲模如用碳素工具钢制造, 淬火时易产生变形超差。若选用 Cr12 型钢, 则由于加工困难, 不便于制造。考虑到 CrWMn 钢具有良好的耐磨性和淬透性, 且淬火变形小, 故选用 CrWMn 钢较为合适。

该模具的制造工艺路线为毛坯→球化退火→粗加工→调质→半精加工→去应力退火→精加工→淬火回火→精磨。其中的热处理工艺如下。

(1) 球化退火: $800\text{ }^{\circ}\text{C} \times (3 \sim 4)\text{h}$, 炉冷至 $720\text{ }^{\circ}\text{C}$, $720\text{ }^{\circ}\text{C} \times (2 \sim 3)\text{h}$, 炉冷至 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下出炉空冷。

(2) 调质: $830\text{ }^{\circ}\text{C} \times 15\text{ min}$, 油淬, $700 \sim 720\text{ }^{\circ}\text{C} \times (1 \sim 2)\text{h}$ 回火, 硬度为 $22 \sim 26\text{HRC}$ 。

(3) 去应力退火: $640\text{ }^{\circ}\text{C} \times 4\text{ h}$, 炉冷至低于 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 出炉。

(4) 淬火、回火: 为模具的最终热处理, 其工艺如图 2-3 所示。淬火后硬度为 $61 \sim 64\text{HRC}$, α 角变形 $2^{\circ} \sim 6^{\circ}$, 可达到设计要求。

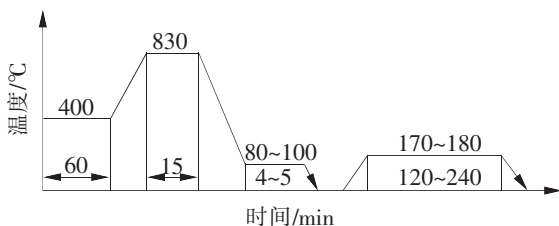


图 2-3 CrWMn 钢光栏片上冲模淬火、回火工艺

模具粗加工后的调质处理可细化组织、改善碳化物的弥散度和分布状态, 提高淬火硬度和耐磨性。按上述工艺处理的冲模, 使用寿命一次可连续冲制 1.2 万片以上, 且冲制的光栏片端面的粗糙度低, 同时可增加模具的修复次数。

2. T10 钢冲裁凹模的热处理

模具尺寸如图 2-4 所示, 硬度要求为 $60 \sim 64\text{HRC}$ 。

该模具是组合凹模, 其中 15 mm 处为配合尺寸, 要求变形小。因孔型多, 尺寸较大, 采用 T10 钢淬火变形开裂可能性较大, 要保证 T10 钢淬火变形小, 常采用碱浴分级淬火。而该模具厚度为 32 mm, 超过了 T10 钢碱淬的临界尺寸, 不能淬透; 若采用水淬油冷, 销钉孔处又易开裂, 现采用预冷后三液淬火, 其工艺曲线如图 2-5 所示。采取的热处理工艺措施有:

(1) 延迟淬火。T10 钢模具淬火过程中, 热应力起主要作用。延迟淬火是减少热应力的措施之一, 其操作方法是模具钢奥氏体化后先空冷, 使其冷却到 $740\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右然后进行淬火。 $740\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左

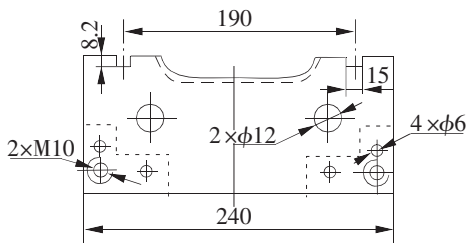


图 2-4 T10 钢组合凹模尺寸

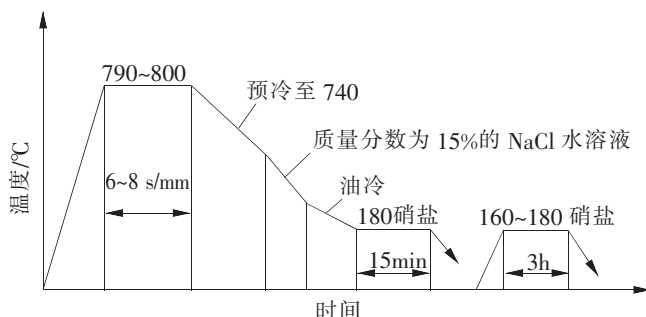


图 2-5 T10 钢组合凹模的淬火工艺曲线

右时，模具呈樱红色，表面挂白盐。

(2) 由于冲裁模要求刃口部位硬度高，其余非工作部位硬度要求不太高，可采用仅使刃口局部淬硬的方法以减小模具淬火后的比体积变化，有利于防止淬火变形。操作时淬火水冷时间按 $0.12 \sim 0.16 \text{ s/mm}$ 计算，比正常水冷时间短 $1/3 \sim 1/2$ 。

(3) 由于模具直角处有 $\phi 6 \text{ mm}$ 销钉孔，此处壁薄，淬火时易淬透开裂。一般来说销钉孔并不要求太硬，淬硬了易产生缩孔，使配合的销钉孔装配时发生困难。采用在两个直角处包扎铁皮，可以减缓包扎处的冷却速度。

(4) 采用石棉绳和耐火泥等将 M10 螺钉孔堵塞， $\phi 12 \text{ mm}$ 的孔存在对减少截面尺寸有利，可均衡冷却速度，用以改变配合面的冷却状态。 $\phi 12 \text{ mm}$ 孔不堵塞，经淬火后变形小，符合公差要求。

3. 65Nb 十字槽光冲模的热处理

高速钢、高碳高铬钢制的十字槽光冲模（见图 2-6）的使用寿命低，其失效形式大部分是冲芯折断。用 60SiMn 钢制的光冲模的使用寿命可达 2 万件（产品材料硬度 80HRB），但仍为断尖失效。生产实践表明，十字槽冲头对强韧性有极高的要求。

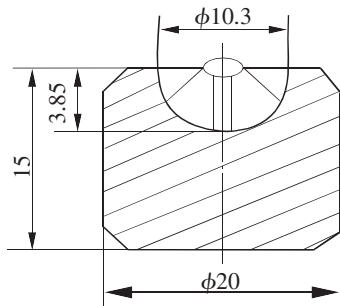


图 2-6 GB18M6 十字槽螺钉光冲模

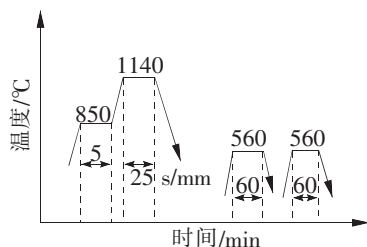


图 2-7 65Nb 钢十字槽光冲模热处理工艺

采用 65Nb 制造的 GB818M6 光冲模, 经低温淬火, 高温 2 次回火 (工艺如图 2-7 所示) 后, 硬度为 59~60HRC, 有很高的强韧性。在 A121 机床上生产 M6 螺钉时, 光冲模平均使用寿命可达 8.4 万件, 最高可达 11.4 万件, 比常规处理的光冲模的使用模寿命可提高 5~6 倍。冲芯的失效形式为疲劳断裂, 最后断裂区为韧窝断口。

4. W6Mo5Cr4V2 钢制冷挤压凹模的热处理

冷挤压凹模的尺寸和形状如图 2-8 所示, 硬度要求为 62~64HRC。

该模具采用成型淬火工艺。淬火前型腔表面粗糙度为 $Ra0.1 \mu m$ 。由于冷挤压模表面粗糙度对模具的使用寿命有较大影响, 它不仅影响金属的流动速度, 又影响脱模, 淬火时必须注意表面粗糙度的保护。为此, 在制定工艺时, 根据冷挤压模的工作特点不应采用过高的淬火温度, 为保证表面粗糙度不受破坏, 应采用 $1180^\circ C$ 淬火。图 2-9 为该模具的最终热处理工艺曲线。若是采用同类钢制作的冷挤压凸模, 应采用 $1230^\circ C$ 淬火。因为 $1180^\circ C$ 淬火会引起强度的不足, 并有镦粗现象, 而且钢的耐磨性也显得偏低。

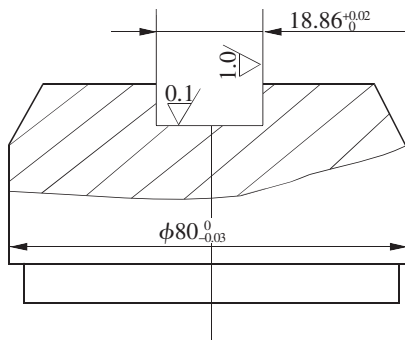


图 2-8 冷挤压凹模简图

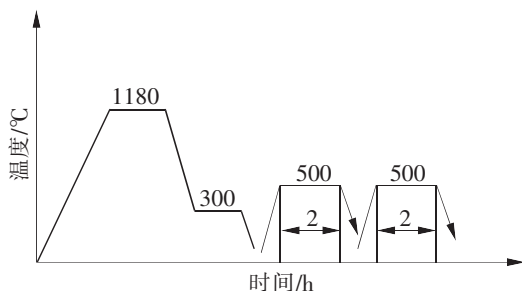


图 2-9 W6Mo5Cr4V2 钢制冷挤压凹模淬、回火工艺

经验表明, 制定冷挤压模热处理工艺时应该考虑模具的耐磨性、强度和韧性之间的关系。对于以折断、开裂为主要失效形式的模具, 应设法采用注重提高韧性而宁可牺牲耐磨性的工艺; 反之, 要提高耐磨性则需提高淬火温度, 但此时要注意表面粗糙度的保护。

5. 大型拉深凹模的热处理

该模具的外形尺寸如图 2-10 所示, 装在 200 t 摩擦压力机上, 将 3 mm 厚平钢板一次拉深成内径 $\phi 314$ mm、内高 283 mm 的球面罐。模具的主要失效形式是凹模模面及 R 处的磨损。因此, 要求模具有较高的强度和良好的耐磨性。

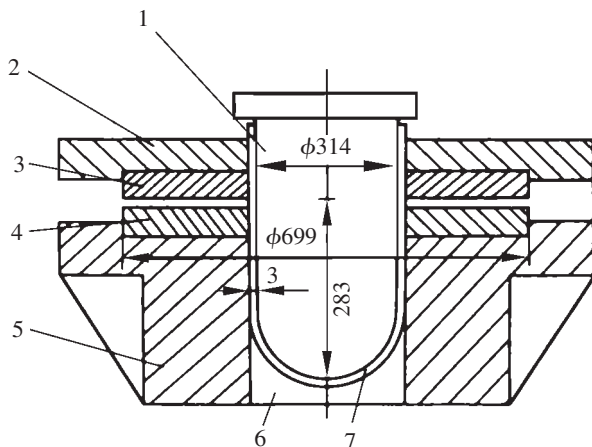


图 2-10 大型拉深凹模的外形尺寸

1—凸模；2—凸模压板座；3—凸模压料板；4—凹模；
5—凹模座；6—退料柱；7—工件

该模具曾采用 Cr12 钢制作，热处理后硬度为 60HRC，但在拉深时发现粘料现象。后改用牌号为 QT500—7 的铸态高强度球墨铸铁制作，经双介质淬火和马氏体分级等温处理（工艺如图 2-11 所示）后，硬度达到 54~58HRC，其使用寿命可达 10~16 万件，比 Cr12 钢制作的模具高 10 倍以上。这是因为经上述工艺处理后，模具具有高的强度和较高的韧性。同时，铸态的球墨铸铁中存在有均匀密布的球状游离态的石墨，可提高润滑性能和耐磨性，从而使模具有很高的使用寿命。

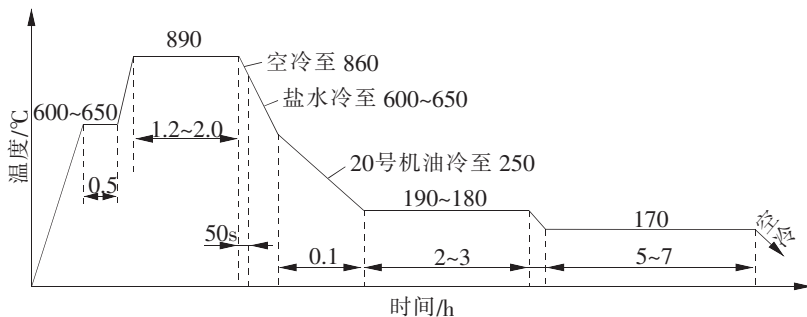


图 2-11 QT500—7 制拉深凹模的热处理工艺

6. 综合实例

表 2-110 给出了冷作模具选材、强韧化处理与使用寿命关系的实例，以供参考。

表 2-110 冷作模具选材、热处理与使用寿命关系的实例

模 具	材料	原热处理工艺	失效方式 与寿命	改进的热处理工艺	失效方式 与寿命
冲头	W18Cr4V	1 260 ℃淬火, 560 ℃ 回火 3 次, 63~65HRC	<2 000 件, 脆断	改用 W9MoCr4V 钢, 1 180 ℃ ~1190 ℃淬火, 550~560 ℃ 回火 2 次, 58~60HRC	1.6 万件
手表零件 冷冲模	CrWMn	常规工艺处理	脆断	670~790 ℃之间循环加 热淬火, 180~200 ℃回火	寿命提高 3~4 倍
轴承保持 架冷冲模	GCr15	球化退火, 840 ℃ 淬火, 150~160 ℃ 回火	2 000 件, 脆断	1 040~1 050 ℃正火, 820 ℃4 次循环加热淬火, 150~160 ℃回火	1.4 万件, 疲劳断裂
冷挤压 冲头	Cr12	球化退火, 980 ℃ 淬火, 280 ℃回头	7 000~8 000 件、脆断、掉块、 崩刃	调质, 980 ℃淬火, 280 ℃ 回头	10 万件
高速钢锯 条冷冲模	W9Mo3Cr4V	球化退火, 1 100 ℃ 淬火, 200 ℃回火, 63~64HRC	3~5 万件, 断裂	锻后余热球化退火, 1 200 ℃ 淬火, 350 ℃和 550 ℃回火 2 次, 61HRC	27 万件
冷挤压 凸模	W18Cr4V W6Mo5Cr4V2 Cr12MoV	常规工艺处理	300~500 件, 脆断	改用基体钢, 常规工艺 处理	5 000 件
冷冲模	Cr12	960 ℃淬火, 200 ℃ 回火, 60~62HRC	4 000~5 000 件, 断裂	改用 W18Cr4V 钢, 1 180 ℃ 淬火, 580 ℃回火 2 次, 60 ~62HRC	>10 万件
十字槽冷 冲模	T10A	常规工艺处理 58 ~60HRC	6 000~7 000 件, 折断	改用 9SiCr 钢, 900 ℃加 热, 270 ℃等温淬火, 57~ 59HRC	>3 万件
冷镦模	①Cr12MoV ②9CrSi	①980 ℃淬火, 低 温回火, 64~67HRC ②870 ℃淬火, 低 温回火, 62~65HRC	①5 000~9 000 件, 崩裂 ②2 000~4 000 件, 崩裂	①1 030 ℃淬火, 200 ℃ 回火, 62HRC ②两次淬火, 两次回头	①1.5~4 万件 ②6 000~1.7 万件, 磨损, 崩裂
精密冷冲 凹模	Cr12	常规工艺处理	淬火变形大, 崩刃, 软塌	改用 8Cr2MnWMoVS 钢, 调质, 气体氮碳共渗	满足使用要求
冷冲槽钢 切断刀片	Cr12	常规工艺处理	2 000~3 000 件	改用 7CrSiMnMoV 钢, 900 ℃淬火, 低温回火, 59~62HRC	5 000~6 000 件
丝杠轧 丝模	Cr12MoV	常规工艺处理	200~300 件, 脆性开裂	高温调质, 1 020 ℃淬火, 400 ℃回火	2 000 件

续表

模 具	材料	原热处理工艺	失效方式 与寿命	改进的热处理工艺	失效方式 与寿命
孔冲	W18Cr4V	常规工艺处理	10 000 件左右, 断裂和磨损	改用 W9Mo3Cr4V 钢, 1 120~1 200 °C 真空淬火, 深冷处理, 540~580 °C 回 火 2 次	> 10 万 件, 磨损
精密冷 冲模	Cr12MoV	常规工艺处理	10 万件, 断裂	改用 GM 钢, 1 120 °C 淬 火, 540 °C 回火 2 次, 64~ 66HRC	300 万次
切边模	9CrSi	58~60HRC	6 000 件, 崩刃 或烧口	改用 GD 钢, 900 °C 淬火, 180 °C 回火, 62HRC	5 万件, 崩刃

思考题

1. 冷作模具钢应具备哪些特性?
2. 比较低淬透性冷作模具钢与低变形冷作模具钢在性能、应用上的区别。
3. 比较 Cr12 型冷作模具钢与高速钢在性能、应用上的区别。
4. 什么是基体钢? 有哪些典型钢种? 与高速钢相比, 其成分、性能特点有什么不同?

应用场合如何?

5. 简述 GD 钢、GM 钢、ER5 钢的成分、性能和应用特点。
6. 7CrSiMnMoV 钢具有哪些特性? 为什么说该钢适用于火焰淬火? 用于何种要求的冷作模具?
7. 从工艺性能和承载能力角度试判断下列钢号属于哪类冷作模具钢:
W6Mo5Cr4V2、Cr4W2MoV、7Cr7Mo2V、2Si、Cr12Mo1V1、5CrW2Si、9Cr18、
9Cr6W3Mo2V2、GCr16CrNiSiMnMoV、7CrSiMnMoV。
8. 比较 DT 钢结硬质合金与 YG 类硬质合金在性能、应用上的区别。
9. 简述铬钨硅系抗冲击冷作模具钢的特性及应用特点。
10. 冲裁模的热处理基本要求有哪些? 其热处理工艺有什么特点?

第3章

塑料模具钢及热处理

近 50 年来,随着石油化学工业的发展世界塑料工业发展比较迅速,塑料已成为工业及民用产品的重要原料。塑料制品的使用日益广泛,对成型塑料制品用的模具品种和数量的需求愈来愈大,许多发达国家塑料模具的产值已居模具总产值的第 1 位。据统计我国塑料模用钢已占全部模具用钢的一半以上。

塑料模具形状复杂,尺寸精度和表面粗糙度值要求很高,因而对模具材料的机械加工性能、镜面抛光研磨性能、图案蚀刻性能、热处理变形和尺寸稳定性都有很高的要求。此外还要求材料具备一定的强韧性、耐磨性、耐蚀性和较好的焊补性能。

过去一般塑料模具用正火的 45 钢或 40Cr 钢经调质处理后制造,因而模具的硬度低、耐磨性和表面粗糙度差,加工出来的塑料产品外观质量差,且模具的使用寿命低。而精密塑料模具及对硬度要求高的塑料模具若采用 CrWMn、Cr12MoV 等合金钢制造,不仅机械加工性能差,而且难于加工形状复杂的型腔,更无法解决一些复杂模具的热处理变形问题。目前,有些关键部件的塑料模具材料仍常常依赖进口的专用塑料模具钢。

有鉴于此,国内对专用塑料模具钢进行了研制,并获得了一定的进展。我国已有自己的专用塑料模具钢系列,并在生产中推广、应用了十多种新型塑料模具钢,初步形成了我国塑料模具钢体系。

3.1 塑料模具钢的性能要求及分类

塑料模具的品种规格多、形状复杂、表面粗糙度值低、制造难度大,因此探讨塑料模具的选材问题需要综合分析塑料模具的工作条件、性能,以提高模具的使用寿命、保证加工质量、降低生产成本。

3.1.1 塑料模具的工作条件

塑料模具的工作条件如表 3-1 所示。

表 3-1 塑料模具的工作条件

工作条件 分类	工作压力 /MPa	工作温度 /℃	摩擦状况	进入型腔时 物料状态	腐蚀状况	特 点
热固性 塑料模具	2 000~8 000	150~250	摩擦磨损较大	固体粉末状态、 预制坯料	有时有腐蚀	受热、受力大、 磨损较大
热塑性 塑料模具	2 000~6 000	150~250	摩擦磨损较 小,当加入某 些固态填充料 时,磨损增大	黏流状态	有时有腐蚀	受热、受力、 磨损较小

塑料模具按成型固化不同可分为热固性和热塑性塑料模具。热固性塑料模具在工作时,塑料为固态粉末料或预制坯料,加入型腔并在一定温度下经热压成型,受力大并受一定冲击,摩擦较大,热机械负荷及磨损较大。热塑性塑料模具是使塑料在黏流状态下通过注射、挤压等方法进入模具型腔加工成型的模具,塑变抗力小,受热、受压、受磨损情况不严重,但当加入固体填充料时,磨损会大大增加。

3.1.2 塑料模具常见的失效形式

1. 磨损及腐蚀

1) 磨损

因热固性塑料中一般是含有一定量固体填充剂,在加热后软化、熔融的塑料中成为“硬质点”,冲入模具型腔后,与模具型腔表面摩擦较大,致使型腔表面拉毛,粗糙度变大;且一旦出现这种现象,会使塑料与型腔之间摩擦加大,使被压制的塑料件表面粗糙度不合格而报废。因此,一经发现模具型腔表面有拉毛现象,应及时卸下抛光。而经过多次抛光后型腔扩大,对尺寸要求严格的塑料件即为超差,模具因此而报废。例如,淬硬的工具钢胶木模具连续压 1.5~2.5 万件之后,模具表面磨损厚度为 0.01 mm。有资料表明,模压 8 万次用玻璃纤维作填料的塑料,其模具型腔的磨损量是普通胶木粉磨损量的 6.5 倍,这说明,玻璃纤维对淬火钢磨损特别明显。因此,当在塑料中加云母粉、石英粉、玻璃纤维等各种无机物作填充剂时,要特别注意模具型腔的磨损问题。

2) 腐蚀

因不少塑料中含有氯、氟等元素,加热至熔融状态后会分解出氯化氢(HCl)或氟化氢(HF)等腐蚀性气体会腐蚀模具型腔表面,这就加大了其表面粗糙度,也加剧了模具型腔的磨损,最终导致模具失效。

2. 塑性变形

模具在持续受热、受压条件下长期工作后,会发生因局部塑性变形而失效的现象。例如,生产中常用的渗碳钢或碳素工具钢制胶木模具在棱角处受负荷最大而产生塑性变形,出

现表面起皱、凹陷、麻点甚至棱角塌歪等；或者分型面变形间隙扩大导致飞边增大而使塑件报废。如果是小型模具在大吨位压力机上超载使用，更容易出现这种失效形式。产生这种失效的主要原因是模具型腔表面的硬化层太薄，且基体的硬度、抗压强度及变形抗力不足；或者是模具自身所用回火温度低，当工作温度超过回火温度且长时间反复升温、降温，发生多次再回火，致使内部组织转变，使模具早期失效。

生产实践证实，碳素工具钢热处理后表面硬度在 52~56HRC；渗碳钢的层深在 0.8 mm 以上时，即可获得足够的变形抗力，能有效地防止模具因塑性变形失效。

3. 断裂

塑料模具一般有多处凹槽、薄边等，易造成应力集中，所以必须有足够韧性。为此，大、中型复杂型腔的模具应优先采用高韧性钢（渗碳钢或热作模具钢），一般不用碳素工具钢。

用高碳合金工具钢制塑料模具，如果回火不充分，也容易发生断裂失效。这是因为模具采用内部加热法保温时，模具内部贴近加热器处温度可达到 250~300℃。有些高碳合金工具钢（例如 9CrMn2Mo 等）制模具淬火后存在较多的残留奥氏体，在回火时未能充分分解，则在使用中有可能继续转变为马氏体，引起局部体积膨胀，在模具内产生较大的组织应力而造成模具开裂。所以在模具的使用温度长期较高时，则不用这类合金工具钢。

3.1.3 塑料模具钢的性能要求

根据对上述各类塑料模具的工作条件和失效形式分析，塑料模具材料应有下列性能要求。

1. 塑料模具钢的使用性能要求

(1) 足够的强度和硬度，以使模具能承受工作时的负荷而不致变形。通常塑料模的硬度在 38~55HRC 范围内。形状简单抛光性能要求高的，工作硬度值可取高些；反之，工作硬度值可取低些。

(2) 良好的耐磨性和耐腐蚀性，以使模具型腔的抛光表面粗糙度和尺寸精度能保持长期使用而不改变。

(3) 足够的韧性，这是保证模具在使用过程中不会过早开裂的重要性能指标。

(4) 较好的耐热性能和尺寸稳定性。要求模具材料有较低的膨胀系数和稳定的组织。塑料模具材料中钢的膨胀系数较小，铍青铜次之，铝合金和锌合金的膨胀系数则较大。

(5) 良好的导热性，以使塑料制件尽快地在模具中冷却成型。

2. 塑料模具钢的工艺性能要求

随着塑料制品种类的增加和质量要求的提高以及塑料制品成型工艺趋向高速化、大型化、精密化和多型腔化，对塑料模具材料还提出了较高的加工工艺性能要求。

(1) 锻造性能：材料的导热性好，在加热过程中容易内外热透。材料塑性好，变形抗力

- 小，锻打时不易出现开裂，可锻性好。
- (2) 机械加工性能：塑料模具型腔的几何形状大多比较复杂，型腔表面质量要求高，难加工部位相当多；因此，模具材料应具有优良的切削加工性能和磨削加工性能。对较高硬度的预硬化塑料模具钢，为了改善其切削加工性能，通常向钢中加入 S、Pb、Ca、Se 等元素，从而得到易切削预硬化钢。
- (3) 焊接性能：塑料模型腔在加工中受到损伤或在使用中被磨损需要修复时，常采用焊补的方法（局部堆焊），因此模具材料要有较好的焊接性能。
- (4) 热处理工艺性能：热处理工艺应简单，材料有足够的淬透性和淬硬性，变形开裂倾向小，工艺质量稳定。
- (5) 镜面抛光性能：塑料制品的表面粗糙度主要取决于模具型腔表面的粗糙度。一般塑料模型腔面的粗糙度 Ra 在 $0.16\sim0.08\ \mu\text{m}$ 之间，粗糙度低于 $Ra\ 0.5\ \mu\text{m}$ 时可呈镜面光泽。尤其是用于制造透明塑料制品的模具，对模具材料的镜面抛光性能要求更高。镜面抛光性能不好的材料，在抛光时会形成针眼、空洞和斑痕等缺陷。模具的镜面抛光性能主要与模具材料的纯洁度、硬度和显微组织等因素有关。硬度高，晶粒细有利于镜面抛光；硬脆的非金属夹杂物、宏观和微观组织的不均匀性，则会降低模具的镜面抛光性能。因此，镜面模具钢大多是经过电渣熔炼、真空熔炼或真空除气的超洁净钢。

3.1.4 塑料模具钢的分类

塑料模具按生产方式可分为注射成型模、挤出成型模、热压成型模等。根据塑料的类型及对成型塑料制品的尺寸、精度、质量、数量的要求，并考虑已有的模具生产条件，可以选用不同类型的塑料模具钢。

我国目前用于塑料模具的钢种可按照钢材特性和使用时的热处理状态分类，见表 3-2。

表 3-2 塑料模具用钢分类

	类 别	主 要 钢 种
1	碳素型	SM45、SM50、SM55
2	渗碳型	20、20Cr、20Mn、12CrNi3A、20CrNiMo、DT1、DT2、0Cr4NiMoV
3	调质型	45、50、55、40Cr、40Mn、4Cr5MoSiV、38CrMoAlA
4	淬硬型	T7A、T8A、T10A、5CrNiMo、9SiCr、9CrWMn、GCr15、3Cr2W8V、Cr12MoV、45Cr2NiMoVSi、6CrNiSiMnMo (GD)
5	预硬型	3Cr2Mo、Y20CrNi3A1MnMo (SM2)、5NiSCa、Y55CrNiMnMoV (SM)、4Cr5MoSiVS、8Cr2MnWMoVS (8CrMn)
6	耐蚀型	3Cr13、2Cr13、Cr16Ni4Cu3Nb (PCR)、1Cr18Ni9、3Cr17Mo、0Cr17Ni4Cu4Nb (74PH)
7	时效硬化型	18Ni140 级、18Ni170 级、18Ni210 级、10Ni3MnCuAl (PMS)、18Ni9Co、06Ni16MoVTiAl、25CrNi3MoAl

从模具制造所要求的工艺性能和模具的使用性能考虑，塑料模具钢与冷作、热作模具钢应有一定的区别，因此近年来，国外已经形成一个专用的塑料模具钢系列，国内也正向这个方向发展。目前已纳入国家标准的塑料模具钢有 2 种：3Cr2Mo 和 3Cr2MnNiMo 钢，纳入行业标准的已有 20 多种（见表 3-3），已在生产中推广应用 10 多种新型塑料模具钢，初步形成了我国塑料模具用钢体系。

表 3-3 现行塑料模具用钢标准及牌号

标 准	类 别	钢 号
JB/T 6057—1992 《塑料模具成型部分 用钢及其热处理 技术条件》	渗碳型	20、20Cr
	淬硬型	45、40Cr、T10A、CrWMn、9SiCr、9Mn2V
	预硬型	5CrNiMnMoVSCa、3Cr2Mo、3Cr2NiMnMo、8Cr2MnWMoVS
	耐蚀性	2Cr13、4Cr13、1Cr18Ni9、3Cr17Mo
YB/T 094—1997 《塑料模具用扁钢》	非合金钢	SM45、SM50、SM55
	合金钢	SM1CrNi3、SM3Cr2Mo、SM3Cr2NiMo、SM4Cr5MoSiV、 SM2CrNi3MoAlS、SM4Cr5MoSiV1、SM2Cr13、 SM3Cr17Mo、SM3Cr13
YB/T 107—1997《塑料 模具用热轧厚钢板》	—	SM45、SM48、SM50、SM53、SM55 SM3Cr2Mo、SM3Cr2NiMo
YB/T 129—1997《塑料 模具钢模块技术条件》	—	SM45、SM50、SM55、SM3CrMo、SM3Cr2NiMo
—	常用钢	12CrNi3A、T8A、5CrW2Si、Cr12MoV、5CrMnMo、5CrNiMo
—	新型用钢	3Cr3Mo3VNb、4Cr2MnNiMo、Y55CrNiMnMoV、 Y20CrNi3AlMnMo、25CrNi3MoAl、10Ni3MnCuAl、 06Ni6CrMoVTiAl、0Cr16Ni4CuNb、18Ni (250)、18Ni (300) 等
CB/T 1299—2000 《合金工具钢》	—	3Cr2Mo、3Cr2MnNiMo

粗略归纳一下，塑料模具钢大概有 50 余种，本章将选择常用和有一定推广价值的塑料模具钢进行简要介绍，以供模具生产厂家在实际模具制造中根据生产条件和模具的工作条件，结合模具材料的基本性能和相关因素，来选择经济合理、技术先进的模具材料。

3.2 塑料模具钢的性能介绍

根据表 3-2 的塑料模具钢分类，本节分别对碳素型塑料模具钢、渗碳型塑料模具钢、调质型塑料模具钢、淬硬型塑料模具钢、预硬型塑料模具钢、耐蚀型塑料模具钢以及时效硬化型塑料模具钢的性能及基本热处理工艺进行介绍。

3.2.1 碳素型塑料模具钢

国外通常利用 C 质量分数为 0.5%~0.6%的碳素钢（如日本的 S55C 钢）作为碳素塑料模具钢。国内对于生产批量不大、没有特殊要求的小型塑料模具，采用价格便宜、来源方便、加工性能好的碳素钢（如 45 钢、50 钢、55 钢、T8 钢、T10 钢）制造。为了保证塑料模具具有较低的表面粗糙度值，对碳素钢的冶金质量提出了一些特殊要求，如钢材的有害杂质含量、低倍组织等。这类钢一般适用于普通热塑性塑料成型模具。本章主要介绍 SM45、SM50 和 SM55 等 3 种碳素塑料模具钢。

1. SM45 钢

SM45 钢属优质碳素塑料模具钢，与普通优质 45 碳素结构钢相比，其钢中的 S 和 P 含量低，钢材纯度好。由于 SM45 钢的淬透性差，制造较大尺寸的塑料模具，一般用热轧、热锻或正火状态，模具硬度低，耐磨性较差；制造小型塑料模具，用调质处理可获得较高的硬度和较好的强韧性。钢中含碳量中等，形状简单的模具一般采用水冷淬火，形状复杂的小型模具水淬容易出现裂纹，一般采用水淬油冷。SM45 钢的优点是价格便宜，切削加工性能好，淬火后具有较高的硬度，调质处理后具有良好的强韧性和一定的耐磨性，被广泛用于制造中、低档的塑料模具。

1) 热加工

SM45 钢锻造工艺规范见表 3-4。

表 3-4 SM45 钢锻造工艺规范

项目	入炉温度/℃	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	≤850	1 150~1 220	1 100~1 160	≥850	坑冷或堆冷
钢坯	≤850	1 130~1 200	1 070~1 150	≥850	坑冷或堆冷

2) 预备热处理

- 锻后退火：加热温度为 820~840 ℃，保温一定时间后炉冷。
- 高温回火（再结晶退火）：加热温度为 680~720 ℃，保温一定时间出炉空冷。
- 正火：加热温度为 830~880 ℃，保温一定时间后空冷。

3) 淬火及回火

推荐的淬火工艺规范：淬火温度为 820~860 ℃，水冷或油冷，硬度≥50HRC。

推荐的回火工艺规范：回火温度为 500~560 ℃，空冷，硬度为 25~33HRC。表 3-5 为回火温度与硬度的关系。

表 3-5 回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	淬火后	200	300	400	500	550	600
硬度 HRC	57	55	50	41	33	26	22

注：840 ℃水淬。

4) 力学性能

SM45 钢不同回火温度的力学性能见表 3-6。

表 3-6 SM45 钢不同回火温度的力学性能

回火温度/℃	硬度 HBS	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	ψ /%	δ /%	$\alpha_K/(J \cdot cm^{-2})$
200	500	1 520	1 450	19	5	30
250	480	1 600	1 480	33	7	35
300	420	1 405	1 305	38	9	45
400	340	1 105	1 010	62	15	126
500	262	870	780	64	21	150
600	205	720	620	68	27	185
650	199	680	580	70	30	200

注：840 ℃水淬，试样直径 10 mm。

2. SM50 钢

SM50 钢属碳素塑料模具钢，其化学成分与高强中碳优质结构钢——50 钢相近，但钢的洁净度更高，含碳量的波动范围更窄，力学性能更稳定。SM50 钢经正火或调质处理后，具有一定的硬度、强度和耐磨性，而且价格便宜，切削加工性能好，适宜制造形状简单的小型塑料模具或精度要求不高、使用寿命不需很长的模具等。但 SM50 钢的焊接性能不好，冷变形性能差。

1) 热加工

SM50 钢锻造工艺规范见表 3-7。

表 3-7 SM50 钢锻造工艺规范

始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1 180~1 200	>800	空冷， $\phi 300$ mm 以上应缓冷

2) 预备热处理

(1) 退火：加热温度为 810~830 ℃，炉冷。

(2) 正火：加热温度为 820~870 ℃，空冷。

3) 淬火及回火

淬火温度为 820~850 ℃，水冷或油冷，硬度 ≥ 50 HRC。回火温度为 200~650 ℃（按需要而定）。表 3-8 为回火温度与硬度的关系。

表 3-8 回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	淬火后	200	300	400	500	550	600
硬度 HRC	58	56	51	42	33	27	23

注：830 ℃水淬。

4) 力学性能

SM50 钢不同回火温度的力学性能见表 3-9。

表 3-9 SM50 钢不同回火温度的力学性能

回火温度/℃	硬度 HBS	σ_b /MPa	σ_s /MPa	ψ /%	δ /%	$\alpha_K/(J \cdot cm^{-2})$
250	505	1 650	1 390	22	6	30
300	495	1 400	1 300	30	7	48
400	390	1 110	1 050	33.5	6.5	105
500	340	780	690	48	7.5	130
550	270	700	590	51	9	150
600	240	590	500	56	11	170
650	—	—	—	60	18	190

注：840 ℃ 水淬，试样直径 10 mm。

3. SM55 钢

SM55 钢属碳素塑料模具钢，其化学成分与高强中碳优质结构钢——55 钢相近，但钢的洁净度更高，含碳量的波动范围更窄，力学性能更稳定。SM55 钢经热处理后具有较高的表面硬度、强度、耐磨性和一定的韧性，一般在正火或调质处理后使用。该钢价格便宜、切削加工性能中等，当硬度为 179~229HBS 时，相对加工性为 50%，但钢的焊接性和冷变形性均低，只适宜制造形状简单的小型塑料模具或精度要求不高、使用寿命不需要很长的塑料模具。

1) 热加工

SM55 钢锻造工艺规范见表 3-10。

表 3-10 SM55 钢锻造工艺规范

始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1 180~1 200	>800	空冷，尺寸>200 mm 时缓冷

2) 预备热处理

- (1) 退火：加热温度为 770~810 ℃，炉冷。
- (2) 高温回火：加热温度为 680~720 ℃，空冷。
- (3) 正火：加热温度 810~860 ℃，空冷。

3) 淬火及回火

淬火温度为：

- (1) 加热温度为 790~830 ℃，水冷，硬度≥55HRC。
- (2) 加热温度为 820~850 ℃，油冷。

回火温度为 400~650 ℃，硬度为 24~45HRC。回火温度与硬度的关系见表 3-11。

表 3-11 SM55 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	淬水后	200	300	400	500	550	600	650
硬度 HRC	58	57	50	45	35	30	24	23
注：820 ℃水淬。								

4) 力学性能

回火温度对 SM55 钢力学性能的影响见表 3-12。

表 3-12 回火温度对 SM55 钢力学性能的影响

回火温度/℃	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	ψ /%	硬度 HRC
200	1 805	—	—	55
300	1 528	—	—	47~48
350	1 564	1 435	41.6	44
400	1 373	1 300	51.2	39~40
500	997	966	—	30~31
注：试样尺寸 $\phi 5$ mm。850 ℃加热，10%的 NaCl 水溶液中淬火。				

不同热处理过程后 SM55 钢的力学性能见表 3-13。

表 3-13 不同热处理过程后 SM55 钢的力学性能

试验状态	性 能								
	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ_5 /%	ψ /%	硬度 HBS	τ_b /MPa	τ_s /MPa	σ_{-1} /MPa	τ_{-1} /MPa
840 ℃退火	690	336	24.0	42	193	243	211	294	154
790 ℃水淬， 650 ℃回火	782	590	22.0	57	227	—	368	386	223

3.2.2 渗碳型塑料模具钢

渗碳型塑料模具钢主要用于冷挤压成型塑料模具，一般要求较低的含碳量，同时钢中加入能提高淬透性而固溶强化铁素体效果又小的合金元素。Cr、Ni 是比较理想的元素，Si 的含量应尽量低。这类钢首先要冷挤压成形，因此其退火态必须有低的硬度、高的塑性和低的变形抗力。成形复杂型腔时，其退火硬度 ≤ 100 HBS；成形浅型腔时，其退火硬度 ≤ 160 HBS。为了提高模具的耐磨性，这类钢在冷挤压成形后一般需进行渗碳和淬火、回火处理，使模具有一定的硬度、强度和耐磨性，表面硬度可以达到 58~62HRC，而心部仍有较好的韧性。

由于模具为冷挤压成形，无须再进行切削加工，故模具制造周期短，便于批量加工，而且精度高。

渗碳型塑料模具钢在国外有专用钢种，如美国的 P1、P2、N、P6 钢，日本的 CH1、CH2、CH41 钢和瑞典的 8416 钢等。国内常用的钢种有 20、20Cr、20CrMnTi、12CrNi3A、20Cr2Ni4A、2CrNi3MoAlS、0Cr4NiMoV (LJ) 钢等。

1. 20 钢

20 钢属于低碳钢，特点是强度低，塑性和韧性较高，切削加工性和焊接性很好。含锰量低的 20 钢的切削加工性比含锰量高的要差些，但可以用正火或冷变形的的方法来改善，冷变形还可以提高钢的强度，而正火可以提高钢的韧性，所以采用冷挤压成形的模具在冷挤压加工前最好先进行正火处理，退火虽然能提高 20 钢的韧性，但由于其缓慢的冷却可能引起游离铁素体在晶粒边界上析出，会严重影响钢的切削加工性与加工后应有的表面粗糙度，因此 20 钢不适宜在退火状态下制造各类零件。

20 钢适宜制作普通的中小型塑料模具。为了提高模具型腔的耐磨性，模具成形后需进行渗碳或碳氮共渗热处理，然后再进行淬火和低温回火，从而保证模具表面具有高硬度、高耐磨性，心部具有很好的韧性。

1) 热加工

20 钢锻造工艺规范见表 3-14。

表 3-14 20 钢锻造工艺规范

始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1 200~1 250	>800	空气中冷却

- (1) 退火：加热温度为 880~900 ℃，保温一定时间炉冷。
- (2) 正火：加热温度为 890~920 ℃，保温一定时间，空冷，硬度 156HBS。
- (3) 高温回火：加热温度为 680~720 ℃，保温一定时间，空冷。

2) 淬火及回火

淬火温度为 860~900 ℃，水冷或油冷。回火温度为 160~180 ℃，空冷。

3) 渗碳淬火

渗碳温度为 900~920 ℃（罐冷）。淬火温度为 780~800 ℃，水冷，硬度 60HRC。回火温度为 160~180 ℃，表面硬度为 58~62HRC，心部硬度为 160~190HBS。

4) 碳氮共渗及淬火

碳氮共渗温度为 840~860 ℃，碳氮共渗后直接淬火。淬火温度为 840~860 ℃，水冷或油冷，硬度≥60HRC。回火温度为 160~180 ℃，表面硬度为 58~62HRC，心部硬度为 160~190HBS。

2. 20Cr 钢

20Cr 钢的强度和淬透性比含碳量相同的碳素钢都有明显提高，油淬到半马氏体硬度的淬透性为 φ20~φ23 mm。20Cr 钢经淬火，低温回火后具有良好的综合力学性能，低温冲击韧度良好，回火脆性不明显。渗碳时钢的晶粒有长大倾向，所以要求二次淬火以提高心部韧性，不宜降温淬火。当正火后硬度为 170~217HBS 时，20Cr 钢的相对切削加工性为 65%，焊接性中等，焊接前要预热到 100~150 ℃，冷变形时塑性中等。该钢适于制造中、小型塑

料模具。为了提高模具型腔的耐磨性，模具成形后需要进行渗碳热处理或碳氮共渗热处理，然后再进行淬火和低温回火，从而保证模具表面具有高硬度、高耐磨性且心部具有很好的韧性。对于使用寿命要求不高的模具，也可以直接进行调质处理。

1) 热加工

20Cr 钢锻造工艺规范见表 3-15。

表 3-15 20Cr 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1 220	1 200	≥ 800	堆 冷

2) 预备热处理

(1) 退火：加热温度为 860~890 ℃，炉冷，硬度 $\leq 179\text{HBS}$ 。

(2) 正火：加热温度为 870~900 ℃，空冷，硬度 $\leq 217\text{HBS}$ 。

(3) 高温回火：加热温度为 700~720 ℃，空冷，硬度 $\leq 179\text{HBS}$ 。

3) 淬火及回火

(1) 淬火：加热温度为 860~880 ℃，油冷或水冷。

(2) 回火：加热温度为 450~480 ℃，硬度 $\leq 250\text{HBS}$ 。

4) 渗碳及淬火

渗碳：加热温度为 900~920 ℃（罐冷）。淬火：一次淬火温度为 860~890 ℃，油冷或水冷；二次淬火温度为 780~820 ℃，油冷或水冷。回火温度为 170~190 ℃，表面硬度为 58~62HRC。

5) 渗碳及表面感应加热淬火

渗碳：加热温度为 900~920 ℃（罐冷）。根据需要感应加热。回火温度为 150~170 ℃，表面硬度为 58~65HRC。

6) 碳氮共渗及淬火

碳氮共渗温度为 840~860 ℃（碳氮共渗后直接淬火），淬火温度为 840~860 ℃，油冷或水冷，硬度 $\geq 60\text{HRC}$ 。回火温度为 160~180 ℃，硬度为 58~62HRC。

7) 力学性能

20Cr 钢不同回火温度的力学性能见表 3-16。

表 3-16 20Cr 钢不同回火温度的力学性能

回火温度/℃	硬度 HRC	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\psi/\%$	$\delta_5/\%$	$\alpha_K/(\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$
未回火	46.5	1 605	1 150	28	9	13
100	46	1 600	1 200	31	9	13
200	45.5	1 530	1 270	37	9	13

续表

回火温度/℃	硬度 HRC	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	ψ /%	δ_5 /%	$\alpha_K/(J \cdot cm^{-2})$
300	44	1 405	1 275	44	9	13.5
400	39	1 250	1 140	54	10.5	20
500	33	1 030	990	64	15	38
600	25	820	795	72	20	50
注：880 ℃水淬，试样直径 10 mm。						

3. 12CrNi3 钢

12CrNi3 钢属于合金渗碳钢，比 12CrNi2 钢有更高的淬透性，可以用来制造比 12CrNi2 钢零件截面尺寸稍大的零件。在淬火、低温或高温回火后，12CrNi3 钢有良好的综合力学性能，当硬度在 260~320HBS 时，相对切削加工性为 60%~70%。另外 12CrNi3 在退火后硬度低、塑性好，既可以采用切削加工的方法制造模具，也可以采用冷挤压成型的方法制造模具。为提高模具型腔的耐磨性，模具成形后需进行渗碳热处理，然后再进行淬火和低温回火，从而保证模具表面具有高硬度、高耐磨性而心部具有很好的韧性。但是 12CrNi3 钢有回火脆性和形成白点的倾向，焊接性中等，一般作渗碳钢用，也可以在调质后使用。12CrNi3 钢适宜制造大、中型塑料模具。

1) 热加工

12CrNi3 钢锻造工艺规范见表 3-17。

表 3-17 12CrNi3 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1 200	1 180	≥850	缓冷

2) 预备热处理

(1) 退火：加热温度为 670~680 ℃，炉冷，退火后硬度≤229HBS。

(2) 正火：加热温度为 880~940 ℃，空冷。

(3) 高温回火：加热温度为 670~680 ℃，空冷，硬度≤229HBS。

3) 淬火及回火

淬火温度为 860 ℃，油冷。回火温度为 200~600 ℃（按需要）。

4) 渗碳及淬火、回火

渗碳温度，为 900~920 ℃（罐冷）。

淬火Ⅰ：加热温度为 860 ℃，油冷。

淬火Ⅱ：加热温度为 760~810 ℃，油冷，硬度≥60HRC。

回火温度为 160~180 ℃，表面硬度为 58~62HRC，心部硬度为 26~40HRC。

5) 碳氮共渗及淬火及回火

碳氮共渗加热温度为 840~860 ℃，出炉后直接油淬，硬度≥60HRC。回火温度为

160~180℃，表面硬度≥58HRC。

6) 力学性能

12CrNi3 钢的各项性能分别见表 3-18、表 3-19、表 3-20。

表 3-18 12CrNi3 钢的疲劳极限

热处理工艺	σ_b /MPa	σ_s /MPa	σ_{-1} /MPa	σ_{-1K} /MPa	τ_{-1} /MPa
940℃渗碳，870℃油淬，200℃回火	1 130	910	460	—	—
940℃渗碳，820℃油淬，500℃回火	745	622	345	—	235
900℃正火，660℃回火、860℃、780℃ 2次油淬，180℃回火	1 215	840	510	260	—

表 3-19 12CrNi3 钢伪渗碳、淬火、回火后的力学性能

热处理工艺		σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ_5 /%	ψ /%	α_K /(J·cm ⁻²)	硬度 HRC
900℃伪渗 碳 6 h，缓冷	850℃加热，180℃ 等温淬火	1 193	1 092	15.2	61.0	147	33~34
		1 173	1 100	14.4	64.0	150	33
		1 155	1 602	14.0	64.0	155	34.5
	830~850℃重加热， 油淬，160℃回火	902	812	16.8	68.9	168	28.5
		1 062	960	14.4	64.0	151	29.2
		1 054	940	14.0	61.0	154	29.5
900℃伪渗 碳 6 h，缓冷	850℃加热，180℃ 等温淬火	1 360	1248	12.8	59.0	124	38.8
		1 338	1220	12.8	59.0	125	37.0
		1 390	1265	13.2	59.0	98	38.0
	760℃重加热，油 淬，160℃回火	1 202	1 082	14.0	64.0	>180	34
		1 155	1 033	13.6	68.9	>180	33
		1 140	1 018	14.0	70.8	>180	33
900℃伪渗 碳 7 h，缓冷	870℃重加热，油 淬，200℃回火	1 130	910	15	59	150	35
	890℃、780℃2次 油淬，200℃回火	1 000	700	18	60	180	31

表 3-20 12CrNi3 钢的高温性能

预备热处理工艺	温度/℃	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%	α_K /(J·cm ⁻²)
880~900℃正火，650℃3 h回火	20	560~590	400~450	26	73	240
	200	525	380	22	72	230
	300	550	380	20	68	250
	400	475	345	20.5	75.5	210
	500	355	310	20.5	83.5	150
	600	205	180	26	86	265

续表

预备热处理工艺	温度/℃	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%	$\alpha_K/(J \cdot cm^{-2})$
890~900℃油淬, 500℃3 h回火	20	815	755	17	68.5	160
	200	810	740	14	61	200
	300	820	740	16	65	150
	400	640	600	17	75	120
	500	500	460	18	75	120

3.2.3 调质型塑料模具钢

1. 40Cr 钢

40Cr 钢是机械制造业中使用最广泛的钢种之一。40Cr 钢的淬透性良好, 水淬时可淬透到 $\phi 28 \sim \phi 60$ mm, 油淬时可淬透到 $\phi 15 \sim \phi 40$ mm。40Cr 钢调质热处理后具有良好的综合力学性能、低温冲击韧度和低的缺口敏感性。该钢的切削加工性一般, 当硬度为 174~229HBS 时, 相对切削加工性为 60%, 40Cr 钢除调质处理外还可以进行渗氮和高频淬火处理, 适于制作中型塑料模具。

1) 热加工

40Cr 钢锻造工艺规范见表 3-21。

表 3-21 40Cr 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1 150~1 200	1 100~1 150	>800	>60 mm 缓冷

2) 预备热处理

(1) 退火: 加热温度为 825~845℃, 保温 2h, 炉冷, 硬度 $\leq$ 207HBS。

(2) 正火: 加热温度为 850~880℃, 保温一定时间, 空冷, 硬度 $\leq$ 250HBS。

(3) 高温回火: 加热温度为 680~700℃, 炉冷至 600℃出炉空冷, 硬度 $\leq$ 207HBS。

3) 淬火及回火

淬火温度为 830~860℃, 油冷, 硬度 $\geq$ 50HRC。回火温度 140~200℃, 空冷, 硬度 $\geq$ 48HRC。

回火温度 400~600℃ (按需要), 硬度 25~43HRC。

4) 力学性能

40Cr 钢不同回火温度的力学性能见表 3-22。

表 3-22 40Cr 钢不同回火温度的力学性能

回火温度/℃	硬度 HRC	σ_b /MPa	σ_s /MPa	ψ /%	δ_5 /%	$\alpha_K/(J \cdot cm^{-2})$
350	45	1 400	1 190	44.5	9.5	41
400	43	1 220	890	53	12	50

续表

回火温度/℃	硬度 HRC	σ_b /MPa	σ_s /MPa	ψ /%	δ_5 /%	α_K /(J·cm ⁻²)
450	38	1 120	820	55	13	60
500	34	1 050	800	57	16.5	75
550	30	950	750	60	18	90
600	25	880	710	62	21	120
650	20	810	650	64	22.5	155
注：840 ℃油淬。						

3.2.4 淬硬型塑料模具钢

对于负荷较大的热固性塑料模具和注射模具除了型腔表面应有高耐磨性之外，还要求模具基体具有较高强度、硬度和韧性，以避免或减少模具在使用中产生塌陷、变形和开裂现象。这类模具可选用淬硬型塑料模具钢来制造。常用的淬硬型塑料模具钢有碳素工具钢（如 T7A、T8A、T10A 钢）、低合金冷作模具钢（如 9SiCr、9CrWMn、GCr15、7CrSiMnMoV 等钢）、Cr12 型钢（如 Cr12MoV 钢）、高速钢（如 W6Mo5Cr4V2 钢）、基体钢和某些热作模具钢等等。这些钢的最终热处理一般是淬火和低温回火（少数采用中温回火或高温回火），热处理后的硬度通常在 45HRC 以上。其中，碳素工具钢仅适于制造尺寸不大、受力较小、形状简单以及变形要求不高的塑料模，利用其淬透性低的特点来制造要求表面耐磨而心部有一定韧性的凹模是十分适宜的；低合金冷作模具钢主要用于制造尺寸较大、形状较复杂和精度较高的塑料模；Cr12MoV 钢适于制造要求高耐磨性的大型、复杂和精密的塑料模；W6Mo5Cr4V2 钢适于制造要求强度高和耐磨性好的塑料模；热作模具钢适合于制造有较高强韧性和一定耐磨性的塑料模具。

另外，6CrNiSiMnMo（GD）钢也是近年新推广使用的一种淬硬型塑料模具钢。由于该钢强韧性高、淬透性和耐磨性好，淬火变形小，成本低，用此钢取代 Cr12MoV 钢或基体钢制造大型、高耐磨、高精度塑料模具，不仅降低了成本，而且提高了塑料模具的使用寿命。

1. Cr12MoV 钢

Cr12MoV 钢较 Cr12 钢含碳量低，且加入适量 Mo 和 V，碳化物不均匀度有所改善。Mo 能减轻碳化物偏析并提高淬透性，V 能细化晶粒增加韧性。Cr12MoV 钢有高淬透性，截面在 400 mm 以下可以完全淬透，在 300~400 ℃仍可保持良好的硬度和耐磨性，较 Cr12 钢有高的韧性，淬火时体积变化量小，又有高的耐磨性和良好的综合力学性能，所以可以制造截面大、形状复杂、经受较大冲击的各种塑料模具。

1) 热加工

Cr12MoV 钢锻造工艺规范见表 3-23。

表 3-23 Cr12MoV 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 100~1 150	1 050~1 100	850~900	缓冷（坑冷或砂冷）
钢坯	1 050~1 100	1 000~1 050	850~900	缓冷（坑冷或砂冷）
注：因 Cr12MoV 钢的熔点较低，故加热温度不宜太高；导热性差，应注意缓慢加热。锻后必须缓冷，以免产生裂纹。可置于预热过的坑中，冷至 400~500 ℃。冷却后可进行退火。				

由于 Cr12MoV 钢属莱氏体钢，钢中碳化物偏析。为了改善碳化物的不均匀性，Cr12MoV 钢和 Cr12 钢一样，必须进行锻造及改锻，其锻造工艺及实际操作与 Cr12 钢相同，详细情况参阅 Cr12 钢介绍。

2) 预备热处理

(1) 锻后退火：加热温度为 850~870 ℃，保温 1~2 h；炉冷至 500 ℃以下出炉空冷，退火后硬度为 207~255HBS，组织为细珠光体+碳化物。

(2) 锻后等温退火：加热温度为 850~870 ℃，保温 1~2 h；炉冷至 720~750 ℃，保温 3~4 h；炉冷至 550 ℃以下出炉空冷；退火后硬度为 207~255HBS，组织为细珠光体+碳化物。

(3) 高温回火：加热温度为 760~790 ℃，保温 2~3 h；炉冷或空冷，硬度为 207~255HBS。

3) 淬火及回火

(1) Cr12MoV 钢推荐淬火工艺规范见表 3-24。

表 3-24 Cr12MoV 钢推荐淬火工艺规范

方案	第 1 次预热 /℃	第 2 次预热 /℃	淬火温度 /℃	冷却方式				硬度 HRC
				介质	介质温度/℃	在介质中冷却	随后	
I	550~600	840~860	950~1 000	油	20~60	至油温	空冷	58~62
II			1 020~1 040	油	20~60	至油温	空冷	62~63
III			1 020~1 040	熔融硝酸盐	400~550	5~10 min	空冷	62~63
IV			1 115~1 130	油	20~60	至油温	空冷	42~50
V			1 115~1 130	熔融硝酸盐	400~450	5~10 min	空冷	42~50
注：1. 方案Ⅳ和Ⅴ用于要求获得热硬性及高耐磨性的模具，例如 450℃以下工作的热冲模等，但其力学性能较差，尺寸变形较大。 2. Ⅰ、Ⅱ方案淬火后组织比例为：碳化物 12%，马氏体 68%~73%，奥氏体 25%~20%。								

(2) 推荐的回火工艺规范见表 3-25。不同加热和冷却条件下的硬度与淬火温度的关系见表 3-26。

表 3-25 推荐的 Cr12MoV 钢回火工艺规范

方案	淬火温度/℃	回火用途	回火温度/℃	介质	硬度 HRC
I	1 020~1 040	消除应力	150~170	油或硝盐	61~63
II		去除应力，降低硬度	200~275	—	57~59
III			400~425		55~57
IV	1 115~1 130	去除应力及形成二次硬化	510~520 ℃多次回火	—	60~61
V			—78 ℃冷处理+ 510~520 ℃一次回火		60~61
IV			—78 ℃冷处理加一次 510~ 520 ℃回火，再一次—78 ℃ 冷处理		61~62

表 3-26 不同加热和冷却条件下的硬度与淬火温度的关系

回火温度/℃	未回火	100	200	300	400	500	550	600	650
硬度 HRC	63	62	61	59	57	59	53	47	40
注：1 030 ℃油淬，回火 2 h。									

(3) 不同加热和冷却条件下的硬度与淬火温度的关系见表 3-27。

表 3-27 不同加热和冷却条件下 Cr12MoV 钢的硬度与淬火温度的关系

硬 度 HRC 加热机冷却条件	淬火温度/℃					
	930	955	980	995	1 010	1 030
在增碳剂中加热，油冷	64	64.6	65	65.1	65	63.5
在空气炉加热，油冷	60.2	61	63	63.5	63.9	63
在空气中加热，空冷	59	60.5	62.5	63.1	63.2	62

(4) Cr12MoV 钢的等温淬火和固溶双细化处理请参阅 Cr12 钢介绍。

3.2.5 预硬型塑料模具钢

有些塑料模具钢在加工成形后进行热处理时变形较大，无法保证模具的精度，因此模具钢以预硬化钢的形式供应市场，这样易于制造高精密的塑料模具且降低生产成本。

所谓预硬型塑料模具钢就是钢厂供货时已预先对模具钢进行了热处理，使之达到了模具使用时的硬度。根据模具工作条件，这个硬度范围变化较大，较低硬度为 25~35HRC，较高硬度为 40~50HRC。在这种硬度条件下，可以把模具加工成形后不再进行热处理而直接使用，从而保证了模具的制造精度。

我国目前使用和新近研制的预硬化型塑料模具钢大多数以中碳钢为基础，适当加入

Cr、Mn、Mo、Ni 和 V 等合金元素制成。为了解决在较高硬度下机械切削加工的困难，在冶炼时适当地向钢中加入 S、Ca、Pb 和 Se 等元素，以便改善钢的切削加工性能，从而冶炼成易切削的预硬化钢，使模具在较高硬度下顺利完成车、钻、刨、铣、镗、磨等加工过程。有些预硬化钢可以在模具加工成形后进行渗氮热处理，在不降低基体硬度的前提下使模具的表面硬度和耐磨性提高。已经列入国家标准的预硬型塑料模具钢仅有 3Cr2Mo 钢和 3Cr2MnNiMo 两种，加上近年来研制、引进的钢种以及一些传统中碳合金钢，预硬型塑料模具钢主要有 3Cr2Mo、3Cr2MnNiMo、40Cr、42CrMo、5CrMnMo、5CrNiMo、5CrNiMnMoVSCa、30CrMnSiN2A、8Cr2MnWMoVS、Y55CrNiMnMoVS 和 25CrNi3A1MnMo 等钢。

预硬化型塑料模具钢虽然在钢厂已进行了最终热处理（淬火、中高温回火），但如果要进行改锻或进一步改变硬度和力学性能，可以重新进行淬火、回火，而且必须在锻造后进行退火热处理。本书在介绍预硬型模具钢时，是按照常规钢材进行热加工和热处理介绍的。

1. 3Cr2Mo（P20）钢

P20 钢是我国引进的美国塑料模具常用钢，这种钢在国际上得到了广泛的应用，其综合力学性能较好、淬透性高，可以使截面尺寸较大的钢材获得较均匀的硬度。P20 钢具有很好的抛光性能，制成模具的表面粗糙度值低。用该钢制造模具时一般先进行调质处理，硬度为 28~35HRC（即预硬化），再经冷加工制成模具后可直接使用，这样既保证了模具的使用性能，又避免了热处理引起模具的变形。因此该钢种适于制造大、中型和精密塑料模具以及低熔点合金（如锡、锌、铅合金）压铸模具等。

1) 热加工

3CrMo 钢锻造工艺规范见表 3-28。

表 3-28 3Cr2Mo 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 180~1 200	1 130~1 150	≥850	坑冷
钢坯	1 120~1 160	1 070~1 100	≥850	砂冷或缓冷

2) 预备热处理

(1) 等温退火：加热温度为 840~860℃，保温 2 h；等温温度 710~730℃，保温 4 h；炉冷至 500℃以下出炉空冷，硬度≤229HBS。

(2) 高温回火：加热温度为 720~740℃，保温 2 h；炉冷至 500℃以下出炉空冷。

3) 淬火及回火

推荐的淬火工艺规范：淬火温度为 850~880℃，油冷，硬度为 50~52HRC。

推荐的回火工艺规范：回火温度为 580~640℃，空冷，硬度为 28~36HRC。

4) 化学热处理

P20 钢经渗碳、渗氮、氮碳共渗或离子渗氮后再抛光, 表面粗糙度值 R_a 可以降低到 $0.03\ \mu\text{m}$ 左右, 模具表面光亮度可以进一步提高, 且模具的使用寿命也将得到很大提高。

2. Y55CrNiMnMoVS (SM 1) 钢

SM1 钢是我国研制的含 S 系易切削塑料模具钢, 其特点是预硬态交货, 预硬硬度为 $35\sim 40\text{HRC}$, 在此硬度下仍具有较好的切削加工性, 模具加工后不再进行热处理, 可直接使用。另外此钢还具有耐蚀性较好和可渗碳等优点。

SM 1 钢中加入 Ni, 起固溶强化作用并增加韧性; 加入 Mn 与 S 形成易切削相 MnS ; 加入 Cr、Mo、V, 增加钢的淬透性, 同时能起强化作用。

目前含硫易切削预硬钢在电子、仪表、塑料、轻工等行业的印制电路板凸凹模、胶木线路板孔模、精密冲压导向板及热固性塑料模具等方面的应用, 已取得了良好的效益。实践证明, SM1 模具钢镜面抛光性能良好, 表面粗糙度值可达 $R_a\ 0.1\ \mu\text{m}$ 以下, 模具的精度较高, 可以取代并已部分取代了从日本和瑞典进口的塑料模具钢。

1) 热加工

SM1 钢锻造工艺规范见表 3-29。

表 3-29 SM1 钢锻造工艺规范

加热温度/ $^{\circ}\text{C}$	始锻温度/ $^{\circ}\text{C}$	终锻温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷却方式
1 150	1 050~1 100	≥ 850	缓冷, 需球化退火

2) 预备热处理

等温球化退火: 加热温度为 $810\ ^{\circ}\text{C}$, 保温 $2\sim 4\ \text{h}$; 等温温度为 $680\ ^{\circ}\text{C}$, 保温 $4\sim 6\ \text{h}$; 炉冷至 $550\ ^{\circ}\text{C}$ 出炉空冷, 退火后硬度 $\leq 235\text{HBS}$ 。

3) 淬火及回火

淬火温度为 $800\sim 860\ ^{\circ}\text{C}$, 油冷, 硬度为 $57\sim 59\text{HRC}$ 。回火温度为 $620\sim 650\ ^{\circ}\text{C}$, 硬度为 40HRC 。

4) 力学性能

SM1 钢 $840\ ^{\circ}\text{C}$ 油淬、 $620\ ^{\circ}\text{C}$ 回火后的力学性能见表 3-30。

表 3-30 SM1 钢 $840\ ^{\circ}\text{C}$ 油淬、 $620\ ^{\circ}\text{C}$ 回火后的力学性能

性能	测试值	性能	测试值
硬度 HRC	$35\sim 40$	磨削应力/ MPa	7.11
σ_b/MPa	1 049~1 176	磨削比	19.43
σ_s/MPa	1 020~1 156	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	0.27
$\delta/\%$	14.5~15.8	抛光阻应力/ MPa	0.84
$\psi/\%$	40.3~53	抛光表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	0.029
$\alpha_K/(\text{J}\cdot\text{cm}^{-2})$	62~67.6		

5) 实际应用

SM1 钢生产工艺简便易行, 性能优越稳定、使用寿命长, 部分模具的使用寿命见表 3-31。

表 3-31 部分模具使用寿命

模具名称	原用材料	寿命	现用材料	寿命
量角器，三角尺模	38CrMoAl	5 万件，报废	SM 1	30 万次，尚完好无损
长命牌牙刷模	45	43 万支，修模	SM 1	259 万支，开始修模
纱管模	CrWMn、45	10 万次，报废	SM 1	40 万次，开始修模
出口玩具模	718、8407	—	SM 1	满足出口要求
出口向阳牌保温瓶模	45	5 万次	SM 1	30 万次，满足出口要求
出口香港环球公司模具	指定用预硬钢	—	SM 1	满足出口要求
电路板冲模	CrWMn	—	SM 1	用户满意

3. 8Cr2MnWMoVS (8Cr2S)、38CrMoAl 钢

8Cr2S 钢属易切削精密塑料模具钢，是为了满足精密塑料模和薄板无间隙精密冲裁模的急需而设计的。其成分设计采用了高碳多元少量合金化原则，以 S 作为易切削元素。8Cr2S 钢作为预硬钢适于制造各种类型的塑料模具，配合精密度较其他合金工具钢模具高 1~2 个数量级，表面粗糙度水平高 1~2 级，使用寿命普遍高 2~3 倍，有的模具使用寿命高十几倍。详细介绍请见第 3 章冷作模具钢高碳低合金钢中 8Cr2S 钢的介绍。

38CrMoAl 钢属超高强度钢，具有高的耐磨性和抗疲劳强度，但淬透性不高，只能淬透 30 mm，冷变形塑性低、焊接性差。38CrMoAl 钢为高级渗氮钢，有很好的渗氮性能和力学强度，渗氮处理后具有高的表面强度，即使过热也难软化，并有高的抗疲劳强度。这种钢在高的渗氮温度保温和缓冷过程中也没有回火脆性，并有良好的耐热性（可达 500 ℃）以及好的耐腐蚀性。

这种钢适宜以预硬状态制造塑料模具（25~40HRC），然后进行渗氮处理，这样既保证了模具基体的综合力学性能又提高了模具表面的耐磨性，而且钢的渗氮层还有良好的抗疲劳强度、抗擦伤能力和抗咬合性，并有一定的耐蚀性。

38CrMoAl 钢适宜制作要求高的耐磨性、抗疲劳强度以及处理后尺寸精确的渗氮零件，一般在调质及渗氮后使用。

1) 热加工

38CrMoAl 钢锻造工艺规范见表 3-32。

表 3-32 38CrMoAl 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1 200	1 180	≥850	>φ75 mm 缓冷

2) 预备热处理

(1) 退火：加热温度为 840~870 ℃，炉冷，硬度≤229HBS。

(2) 正火：加热温度为 930~970 ℃，空冷。

(3) 高温回火：加热温度为 700~720 ℃，空冷，硬度≤229HBS。

3) 淬火及回火

淬火：加热温度为 930~950 °C，油冷，硬度 $\geq$ 55HRC。回火温度为 600~680 °C，硬度为 241~321HBS。回火温度与硬度的关系见表 3-33。

表 3-33 38CrMoAl 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/°C	淬火后	200	300	400	500	550	600	650
硬度 HRC	56	55	51	45	40	35	31	30
注：940 °C 油冷。								

4) 渗氮

渗氮温度为 500~600 °C，表面硬度 $\geq$ 1 000HV。

3.2.6 耐蚀型塑料模具钢

当生产会产生化学腐蚀介质的塑料制品（如聚氯乙烯、氟塑料、阻燃塑料等）时，模具材料必须具有较好的抗腐蚀性能。当塑料制品的产量不大、要求不高时，可以在模具表面采取镀铬保护措施，但大多数情况需采用耐蚀钢制造模具，一般采用中碳或高碳的高铬马氏体不锈钢，如 2Cr13、3Cr13、4Cr13、9Cr18、9Cr18Mo、Cr14MoV、1Cr17Ni2、Cr18MoV 和 3Cr17Mo 等钢。

为了提高耐腐蚀模具钢的加工精度，国内又研制了马氏体时效硬化钢 PCB (0Cr16Ni4Cu3Nb) 和 AFC-77 (1Cr14Co13Mo5V) 钢，这类钢适于制造要求高耐磨、高精度和耐腐蚀的塑料模具，提高了耐腐蚀模具钢的产品质量，延长了模具钢的使用寿命，有关这两种钢的性能已在时效硬化型塑料模具钢中介绍。

在研制新的耐蚀钢的同时，国内又引进和应用了国外耐腐蚀镜面塑料模具钢，例如法国 CLC2316H 钢（同类型钢还有德国 X36CrMo17，材料号 W-Nr1.2316；奥地利百禄公司的 M300、瑞典 ASSABS-136、日本大同 S-STAR 等）是预硬化型的抗腐蚀镜面塑料模具钢。CLC2316H 钢的基本化学成分（质量分数）： $w(C) = 0.40\%$ 、 $w(Si) = 0.35\%$ ， $w(Mn) = 0.50\%$ ， $w(Cr) = 16.00\%$ ， $w(Mo) = 1.03\%$ ， $w(S) \leq 0.005\%$ ， $w(P) \leq 0.03\%$ ，硬度为 30~35HRC。钢经精细冶炼及热处理后，材质纯净，组织细化均匀，具有良好的镜面性。如果要进一步改变其力学性能，可以重新进行淬火、回火处理。

耐腐蚀塑料模具零件的热处理和一般不锈钢制品的热处理基本相同，为了得到模具使用中所要求的综合力学性能和较好的抗蚀性能、耐磨性能，还要经过适宜的淬火、回火处理。下面介绍几种常用的不锈钢。

1. 2Cr13 钢

2Cr13 钢属马氏体型不锈钢，其主要性质与 1Cr13 钢相同，具有较高的韧性和冷变形性能，机械加工性能良好。由于含碳量较 1Cr13 钢高，经热处理后其强度和硬度均比 1Cr13 钢

稍高，具有优良的耐腐蚀性能，较好的韧性，适宜制造承受高负荷并存在腐蚀介质的透明和不锈钢塑料模具。

1) 热加工

2Cr13 钢锻造工艺规范见表 3-34。

表 3-34 2Cr13 钢锻造工艺规范

升温	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
冷装炉≤800℃、850℃ 前应缓慢加热	1 160~1 200	≥850	砂冷或及时退火

2) 预备热处理

(1) 软化退火：加热温度为 750~800℃，炉冷。

(2) 完全退火：加热温度为 860~900℃，炉冷，硬度为 160~187HBS。

3) 淬火及回火

淬火温度为 1 000~1 050℃，油冷或水冷，硬度≥45HRC。回火温度为 660~670℃，空冷，硬度为 20~23HRC。2Cr13 钢回火温度与硬度的关系见表 3-35。

表 3-35 2Cr13 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	淬火后	200	300	400	500	550	600	650
硬度 HRC	47	46	45	44	43	37	30	24

注：1 050℃油淬。

4) 力学性能

2Cr13 钢不同回火温度的力学性能见表 3-36。2Cr13 钢室温力学性能见表 3-37。

表 3-36 2Cr13 钢不同回火温度的力学性能

回火温度/℃	300	400	500	600	700	800
σ_b /MPa	1 580	1 550	1 460	1 150	780	800
σ_s /MPa	1 430	1 390	1 250	900	580	600
ψ /%	10	11	15	22	27	26
δ /%	5	5.5	7.5	14	19	16

注：1 000℃油淬。

表 3-37 2Cr13 钢室温力学性能

热处理工艺	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ_5 /%	ψ /%	$\alpha_K/(J \cdot cm^{-2})$
1 000~1 050℃油淬，660~770℃回火	≥660	≥450	≥16	≥55	≥80
1 000~1 020℃油淬，720~750℃回火	720	520	21	68	65~175
860℃退火	500	250	22	65	90
1 050℃空淬，500℃回火	1250	950	7	45	50

续表

热处理工艺	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ_5 /%	ψ /%	$\alpha_K/(J \cdot cm^{-2})$
1 050 ℃空淬, 600 ℃回火	850	650	10	55	70
1 050 ℃油淬, 660 ℃回火	860	710	19	63.5	130
1 050 ℃油淬, 770 ℃回火	820	700	18	66.5	150

2Cr13 钢冷状态时的拉深、冷冲工艺性良好, 消除应力退火可以采用 730~780 ℃回火, 空冷。2Cr13 钢焊后硬化倾向大, 易产生裂纹。用 Cr202、Cr207 等焊条焊接时, 焊前需经 250~350 ℃预热, 焊后需经 700~730 ℃回火; 用 A107、A207 等焊条焊接时, 可以不进行焊后热处理。

2. 3Cr13 钢

3Cr13 钢属马氏体型不锈钢, 其主要性能与 1Cr13、2Cr13 钢相同, 但因含碳量较 1Cr13 钢和 2Cr13 钢都高, 因此其强度、硬度、淬透性和热强性都较高。

3Cr13 钢在热处理(淬火及回火)后用作强度较高的结构件材料, 适宜制造受到高机械载荷、腐蚀介质作用、在磨损条件下工作的、透明、不透明的塑料制品模具等。

1) 热加工

3Cr13 钢锻造工艺规范见表 3-38。

表 3-38 3Cr13 钢锻造工艺规范

装炉炉温	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
冷装炉炉温≤800 ℃, 热装炉不限	1 100~1 150	≥850	炉冷

3Cr13 钢的导热性差应力较大, 宜先慢速加热到 850 ℃, 然后快速加热到 1 120 ℃; 对锻造后的制品, 应特别注意缓冷, 最好在热砂中或在炉中缓冷; 高温对制品的变形阻力较大, 压下量可小些, 终锻温度应稍高些。

2) 预备热处理

(1) 退火: 加热温度为 750~800 ℃, 炉冷, 硬度≤207HBS。

(2) 完全退火: 加热温度为 860~900 ℃, 炉冷, 硬度≤207HBS。

3) 淬火及回火

淬火温度为 1 020~1 050 ℃, 油冷或空冷, 硬度为 52~54HRC。回火温度为 200~300 ℃, 硬度为 50~52HRC。3Cr13 钢回火温度与硬度的关系见表 3-39。

表 3-39 3Cr13 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	淬火后	200	300	400	500	550	600	650
硬度 HRC	53	52	51	50	49	43	31	27
注: 1 050 ℃油淬。								

3. 0Cr16Ni4Cu3Nb (PCR) 钢

PCR 钢是一种马氏体沉淀硬化不锈钢，因其含碳量低，耐腐蚀性和焊接性都优于马氏体型不锈钢，而接近于奥氏体不锈钢。PCR 钢热处理工艺简单，固溶处理后可获得单一的板条状马氏体组织，硬度为 32～35HRC，具有良好的切削加工性能。该钢加工成形后在 460～480 ℃进行时效处理，由于马氏体基体析出富铜相，使强度和硬度进一步提高，同时获得较好的综合力学性能。PCR 钢经过时效处理以后，工件仅有微量变形，抛光性能好，抛光后可在 300～400 ℃温度下进行 PVD 表面离子镀处理，处理后可获得大于 1 600HV 的表面硬度。因此，PCB 钢适于制造高耐磨、高精度和耐腐蚀的塑料模具，如氟塑料或聚氯乙烯成形模。

1) 热加工

PCR 钢锻造工艺规范见表 3-40。PCR 钢的可锻性与含铜量有关，当 $w(Cu) \leq 3.5\%$ 时可锻性良好，当 $w(Cu) \geq 4.5\%$ 时，锻造易开裂。该钢的锻造温度范围较窄，锻造时要充分热透。

表 3-40 PCR 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1 180～1 120	1 150～1 100	$\geq 1\,000$	空冷或砂冷

2) 固溶处理

固溶温度为 1 050 ℃，空冷，硬度为 32～35HRC。基体组织为低碳马氏体，在此硬度下可进行切削加工。PCR 钢的淬透性很好，在 $\phi 100\text{ mm}$ 断面上硬度分布均匀。

3) 时效处理

时效温度为 420～480 ℃，推荐时效温度 460 ℃，时效后硬度为 42～44HRC。时效后变形率较低，径向 $\Delta D/D_0$ 为 $-0.04\% \sim -0.05\%$ ，轴向 $\Delta L/L_0$ 为 $-0.037\% \sim -0.04\%$ 。

4) 力学性能

PCR 钢时效处理后的力学性能见表 3-41。

表 3-41 PCR 钢时效处理后的力学性能

热处理工艺	σ_b/MPa	σ_s/MPa	σ_{sc}/MPa	$\delta_5/\%$	$\psi/\%$	$\alpha_K/(\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$	硬度 HRC
950 ℃固溶 460 ℃时效	1 324	1 211	—	13	55	50	42
1 000 ℃固溶 460 ℃时效	1 334	1 261	—	13	55	50	43
1 050 ℃固溶 460 ℃时效	1 355	1 273	1 424	13	56	47	43
1 100 ℃固溶 460 ℃时效	1 391	1 298	—	15	45	41	45
1 150 ℃固溶 460 ℃时效	1 428	1 324	—	14	38	28	46

4. 0Cr17Ni4Cu4Nb 钢

0Cr17Ni4Cu4Nb 钢是一种马氏体沉淀硬化不锈钢，是传统的不锈钢。因含碳量低，耐

腐蚀性和焊接性都优于马氏体不锈钢，而接近于奥氏体不锈钢。0Cr17Ni4Cu4Nb 钢热处理工艺简单，固溶处理后可获得单一的板条状马氏体，硬度为 32~34HRC，具有良好的切削加工性能。经 460~480℃时效后，钢的硬度达到 40HRC，硬度和强度皆有所提高，同时可获得综合的力学性能。0Cr17Ni4Cu4Nb 钢主要用于耐腐蚀、高耐磨、高精度的塑料模具。该钢与 PCR 钢基本相近。

1) 热加工

0Cr17Ni4Cu4Nb 钢锻造工艺规范见表 3-42。0Cr17Ni4Cu4Nb 钢锻造温度范围较窄，当 $w(\text{Cu}) \leq 3.5\%$ 时可锻性良好；当 $w(\text{Cu}) \geq 4.5\%$ 时，锻造易开裂，因此加热时必须烧透，锻造时先要轻锤快打，减小变形量；然后重锤，加大变形量。

表 3-42 0Cr17Ni4Cu4Nb 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1 180~1 200	1 100~1 150	$\geq 1\ 000$	空冷或砂冷

2) 预备热处理

锻后硬度较高一般大于 35HRC，需对 0Cr17Ni4Cu4Nb 钢进行软化处理才能进行加工。生产实践中有 3 种方法。

(1) 固溶热处理：加热温度为 1 040℃，油冷，硬度为 28~30HRC。

(2) 高温回火：加热温度为 720~740℃，炉冷或空冷，硬度为 28~32HRC。

(3) 退火：加热温度为 820~840℃，炉冷至 500℃以下出炉空冷，硬度为 28~30HRC。

3) 固溶处理

固溶温度为 1 040℃，水冷，硬度为 32~35HRC。基体组织为低碳马氏体，在此硬度下可进行切削加工。

4) 时效处理

推荐时效温度为 480℃，时效时间为 4 h，硬度为 40HRC。

5) 气体渗氮

加热温度为 510~520℃×48 h，排气 30min， NH_3 流量为 0.4m³/h，炉压为 294~490Pa，渗氮层深度为 0.17 mm，表面硬度为 966HV。

6) 力学性能

0Cr17NiCu4Nb 钢固溶时效后力学性能见表 3-43。

表 3-43 0Cr17Ni4Cu4Nb 钢固溶时效后力学性能

热处理工艺	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ /%	ψ /%	HRC
1 040℃固溶，620℃时效 4 h	931	725	16	50	28
1 040℃固溶，480℃时效 4 h	1 313	1 176	10	40	40
1 040℃固溶，495℃时效 4 h	1 176	1 068	10	44	38

续表

热处理工艺	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ /%	ψ /%	HRC
1 040 ℃固溶，550 ℃时效 4 h	1 068	1 000	12	45	35
1 040 ℃固溶，580 ℃时效 4 h	1 000	862	13	45	31

3.2.7 时效硬化型塑料模具钢

模具经热处理后变形是模具热处理的三大难题之一（变形、开裂、淬硬）。预硬型塑料模具钢解决了模具热处理变形问题，但模具要求硬度高又给模具加工造成困难。在制造模具、尤其是制造复杂、精密、长使用寿命的塑料模具时，如何既保持模具的加工精度，又使模具具有较高硬度，是模具材料选型中面临的一个重要难题。为此发展了一系列的时效硬化型塑料模具钢。模具零件在淬火（固溶）后变软（硬度为 28～34HRC），便于切削加工成形，然后再进行时效硬化，获得所需的综合力学性能。

时效硬化型塑料模具钢有马氏体时效硬化钢和析出（沉淀）硬化钢两大类。马氏体时效硬化钢有高的屈强比、良好的切削加工性和焊接性能、热处理工艺简单等优点。

为了降低材料费用，近年来开发了一类低钴、无钴、低镍的马氏体时效钢，其代表钢种如 06Ni（06Ni6CrMoVTiAl）钢、AFC-77（1Cr14Co13Mo5V）钢；另一类为低合金时效硬化钢，代表钢号如中国自行开发的 25CrNi3MoAl 钢，PMS（1Ni3MnMoCuAl）钢、PCR（0Cr16Ni4Cu3Nb）钢和 SM2（20CrNi3AlMnMo）钢等，另外还有美国的 P2（20CrNi4AlV）钢，日本大同特殊钢公司的 NAK（15Ni3MnMoAlCuS）钢等，这类钢经固溶处理后，硬度为 30HRC 左右，时效处理后，由于金属间化合物 Ni3Al 析出而得到强化，硬度可以上升到 38～42HRC。如再进行渗氮处理，可以使模具表面硬度达到 1 100HV 左右。

时效硬化型塑料模具钢主要用于制造精密、复杂的热塑性塑料制品用模具。

1. 06Ni6CrMoVTiAl（06Ni）钢

06Ni 钢属低镍马氏体时效钢。该种钢的突出特点是固溶处理后变软，切削加工性能好，可进行冷加工，加工成形后再进行时效硬化处理，减少了模具热处理变形，时效后的硬度为 43～48HRC，变形在 0.05%之内，此时具有良好的综合力学性能和一定的耐蚀性能，并可以渗氮、渗铬处理。因合金含量低，其价格比 18Ni 型马氏体时效钢低得多。06Ni 钢的热处理工艺简便，适宜制造高精度的塑料模具和轻有色金属压铸模具等。

1) 热加工

06Ni 钢锻造工艺规范见表 3-44。

表 3-44 06Ni 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 120~1 170	1 070~1 120	≥850	砂冷或灰冷
钢坯	1 100~1 150	1 050~1 100	≥850	空冷或砂冷

2) 预备热处理

软化处理：可采用加热温度为 680 ℃ 的高温回火来进行软化

3) 固溶处理

固溶温度为 850~880 ℃，保温 1~2 h 后，油冷。固溶加热后冷却速度越快，硬度越低。如 820 ℃ 固溶后：空冷硬度为 26~28HRC，油冷硬度为 24~25HRC，水冷硬度为 22~23HRC。表 3-45 为固溶温度对 06Ni 钢硬度的影响

表 3-45 固溶温度对 06Ni 钢硬度的影响

固溶温度/℃	750	780	800	850	900	950	1 000
硬度 HRC	21	22.5	23.5	25	25.5	25.5	25.5

4) 时效处理

推荐时效硬化处理温度为 500~540 ℃，时效时间为 4~8h。时效硬度为 42~45HRC。时效处理后的组织是板条状马氏体+析出的强化相 Ni、Al、TiC 和 TiN。时效温度对 06Ni 钢硬度的影响见表 3-46。

表 3-46 时效温度对 06Ni 钢硬度的影响

时效温度/℃	200	300	350	400	450	475	500	525	550	575	600	650	680	700
硬度 HRC	26	27	28	30	41	44.5	45	44.5	43	39	30	24	22	21
注：850 ℃ 固溶，时效 8 h。														

5) 力学性能

时效温度对力学性能的影响及不同温度下的力学性能分别见表 3-47、表 3-48。

表 3-47 时效温度对 06Ni 钢力学性能的影响

时效温度/℃	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_s /%	ψ /%
480	1 350	1 260	9.5	48
500	1 440	1 400	9.5	50
520	1 420	1 390	10	51
540	1 405	1 380	10	53
560	1 220	1 210	13	55
注：850 ℃ 固溶，时效 6 h。				

表 3 - 48 06Ni 钢不同温度下力学性能

试验温度/℃	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	ψ /%	$\alpha_K/(J \cdot cm^{-2})$
室温	1 478	1 422	9. 3	37. 2	3. 4
200	1 292	1 262	11. 2	54. 2	36. 8
300	1 238	1 197	10. 5	53. 3	41. 7
400	1 153	1 128	13. 7	56. 5	51. 9

2. 1Ni3Mn2CuAlMo (PMS) 钢

PMS 钢是一种低碳的镍铜铝铁合金钢，是新型时效硬化型镜面塑料模具钢，具有优良的镜面加工性能，良好的冷热加工性能、电加工性能和综合力学性能。经固溶处理和时效热处理后，基体为贝氏体+马氏体双相组织，热处理变形小，热处理工艺简便。固溶淬火后的硬度在 30HRC 左右，便于机械加工，在机械加工后进行时效处理，即可获得 40~45HRC 的较高硬度，最后进行抛光处理，模具表面得到镜面光亮度。PMS 钢具有净洁抗蚀性能，图案蚀刻性能绝佳，是理想的光学透明塑料制品的成形模具材料。

PMS 钢含有一定量的 Al，因此特别适于进行表面渗氮和氮碳处理，处理后模具的表面硬度可达 1 000HV 以上，适于制造工程塑料制品的成型模具。PMS 钢一般采用电炉冶炼加电渣重熔，淬透性好，具有良好的综合力学性能，适于制造高镜面光亮度的塑料模具及高外观质量的家用电器塑料模具。

1) 热加工

PMS 钢锻造工艺规范见表 3 - 49。

表 3 - 49 PMS 钢锻造工艺规范

项目	装炉温度/℃	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	<800	1 140~1 180	1 080~1 130	≥900	缓冷
钢坯	<900	1 120~1 160	1 050~1 100	≥850	空冷

锻后空冷或砂冷，不必退火即可进行机械加工。

2) 预备热处理

钢材退火工艺：加热温度为 750~770 ℃，保温 2~4 h；炉冷至 600 ℃出炉空冷。

3) 固溶热处理

固溶温度为 840~900 ℃，一般取 870 ℃，保温 3 h；空冷，固溶硬度为 28~33HRC。固溶处理的目的是为了使合金元素在基体内充分溶解，使固溶体均匀化并达到软化，便于切削加工。表 3 - 50 为固溶温度对硬度的影响。

表 3 - 50 固溶温度对硬度的影响

固溶温度/℃	780	810	840	870	900	940
硬度 HRC	30. 8	32. 4	33. 1	32. 7	33. 1	310

4) 时效处理

时效温度为 500~520 ℃，时效时间为 4~8 h，硬度为 40~43HRC。时效处理是为了保证钢的最终使用性能，通过时效处理得到 40~45HRC 的较高硬度，提高模具的耐磨性。表 3-51 为不同温度时效处理后的硬度。

表 3-51 PMS 钢不同温度时效处理后的硬度

时效温度/℃	280	300	400	450	500	520	550	600
硬度 HRC	32	33	37	40	43	40	35	30
注：870 ℃ 固溶。								

5) 力学性能

不同温度时效钢的力学性能见表 3-52、表 3-53、表 3-54（分别为 PMS 钢的高温力学性能及不同处理状态下的力学性能）。

表 3-52 不同温度时 PMS 钢的力学性能

时效温度/℃	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ /%	ψ /%	$\alpha_k/(J \cdot cm^{-2})$
400	1 044.41	1 128.75	16.2	62.9	49.25
450	1 193.47	1 303.3	14.6	49.7	11.82
510	1 256.23	1 331.74	14.7	47.8	21.67
550	1 103.25	1 167.0	15.7	56.6	37.43
600	835.53	943.4	18.4	64.1	94.56
注：850 ℃ 固溶。					

表 3-53 PMS 钢高温力学性能

试验温度/℃	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ /%	ψ /%
300	905.15	1 019.9	26.0	56.2
400	812.0	870.83	24.0	74.0
500	619.78	659.0	21.6	78.8
注：850 ℃ 固溶后，时效温度 500 ℃，时效时间 2 h。				

表 3-54 PMS 钢不同处理状态的力学性能

热处理工艺	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	ψ /%	硬度 HRC
(850±20) ℃ 淬火，空冷	839.6	1 017.1	15.4	55.1	31.5
(850±20) ℃ 淬火，空冷，510 ℃ 回火	1 026.9	1 300.5	13.3	45.0	43
(850±20) ℃ 淬火，空冷，600 ℃ 软化	699.3	798.4	21.0	60.0	25.3
(850±20) ℃ 淬火，600 ℃ 软化，530 ℃ 回火	991.6	1 095.5	17.3	49.8	39
850 ℃ 固溶，530 ℃ 回火	1 191.6	1 292.7	14.6	52.7	41.8
870 ℃ 固溶，510 ℃ 回火	1 169	1 304	16.0	49.2	43.5

3. 25CrNi3MoAl 钢

25CrNi3MoAl 属低 Ni 无 Co 时效硬化钢，含 Ni 量比 06Ni6CrMoVTiAl 钢更低。该钢为参照国外同类型钢（美国 ASTM P21 钢）的成分，并根据我国冶炼工业的特点及使用企业对性能的要求加以改进而设计的。该钢经 880 ℃ 水淬或空冷后，硬度为 48～50HRC，再经 680 ℃×(4～6)h 回火，硬度为 22～23HRC；加工成形后经时效温度520～540 ℃时效时间为 6～8 h，硬度为 39～42HRC，变形率为 0.04%；若半精加工后去应力回火，变形率减少至－0.02%～－0.01%；时效的同时可进行渗氮，最后经研磨、抛光或光刻花纹后装配使用。

25CrNi3MoAl 钢适于制作变形率要求 0.05%以下，镜面要求高或表面要求光刻花纹工艺的精密塑料模具。该钢经软化处理后，可适应冷挤压模控制模工艺。

1) 固溶及回火

固溶温度为 (880±20) ℃，水淬或空冷，硬度为 48～50HRC。

回火温度为 680 ℃，加热时间为 4～6 h，空冷或水冷，硬度为 22～23HRC。回火后进行机械加工成形，再进行时效处理。25CrNi3MoAl 钢经不同固溶处理后的硬度见表 3－55。

表 3－55 25CrNi3MoAl 钢经不同固溶处理后的硬度

加热温度/℃（保温 30min）	830	880	920	960	1 000
硬度 HRC	50	49	48.5	46.4	45.6

2) 时效处理

时效温度为 520～540 ℃，时效保温时间 6～8 h，空冷，硬度为 39～42HRC。时效后经研磨、抛光或光刻花纹后装配使用。时效变形率大约为－0.039%。

3) 渗氮处理

对需冷挤压成形的塑料模具经固溶、高温回火软化处理后，即可对模具挤压面进行加工、研磨、打光和修整，最后对模具进行真空时效处理或表面渗氮处理后装配使用。

4) 力学性能

25CrNi3MoAl 钢时效处理后的硬度及室温力学性能见表 3－56、表 3－57。

表 3－56 25CrNi3MoAl 钢时效处理后的硬度

时效温度/℃	500	520	540
硬度 HRC	35.5～38	39～41	39～42

表 3－57 25CrNi3MoAl 钢的室温力学性能

性能	硬度 HRC	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ /%	ψ /%	$\alpha_K/(J \cdot cm^{-2})$
测试值	39～42	1 260～1 350	1 170～1 200	13～16.8	55～59	45～52
注：880 ℃固溶，680 ℃回火，540 ℃时效处理 8 h。						

3.3 塑料模具钢的选用

1. 根据塑料制品的生产批量选用模具钢

选用模具钢种类与塑料制品的生产批量大小有关。生产批量小，对模具的耐磨性及使用寿命要求不高，为了降低模具造价，不必选用高级优质模具钢，只选用普通模具钢即可满足使用要求。具体选用见表 3-58。

表 3-58 依据塑料制品的生产批量选用模具钢

塑料制品生产批量（合格件）/万件	选用钢材
10~20	SM45、SM55、40Cr
30	P20、5NiSCa、8CrMn
60	P20、5NiSCa、SM 1
80	P20、8CrMn
120	SM2、PMS
150	PCR、LD2、65Nb
200 以上	65Nb、06Ni7Ti2Cr、06NiCrMoVTiAl、012Al 渗氮、25CrNiMoAl 渗氮

2. 根据塑料制品的种类和质量要求选用模具钢

(1) 对型腔表面要求耐磨性好、心部要求韧性好，但形状并不复杂的塑料注射模具，可选用低碳结构钢和低碳合金结构钢。这类钢在退火状态下塑性很好且硬度低，退火后硬度为 85~135HBS。其变形抗力小，可用冷挤压成形，大大减少了切削加工量。例如，20 钢、20Cr 均属于此类钢。对于大、中型且型腔复杂的模具，可选用 LJ 钢和 12CrNi3A、12CrNi4A 等优质渗碳钢。这类钢经渗碳、淬火、回火处理后，型腔表面有很好的耐磨性，模体又有较高的强度和韧性。

(2) 对聚氯乙烯、氟塑料及阻燃 ABS 塑料制品，所用模具钢必须有较好的抗腐蚀性。因为这些塑料在熔融状态会分解出氯化氢（HCl）、氟化氢（HF）和二氧化硫（SO₂）等气体，对模具型腔有一定腐蚀性。这类模具中的成形件常用耐蚀塑料模具钢，例如 PCR、AFC-77、18Ni 及 4Cr13 等。

(3) 生产以玻璃纤维作增强材料的塑料制品的注射模或压缩模时，要求有高硬度、高耐磨性、高的抗压强度和较高韧性，以防止模具型腔表面被过早磨损损坏，或因模具受高压而发生局部变形，故常用淬硬模具钢制造这类模用。经淬火、回火后可以得到所需的模具性能。例如选用 T8A、T10A、Cr6WV、Cr12、Cr12MoV、9Mn2V、9SiCr、CrWMn、GCr15 等淬硬型模具钢。

(4) 制造透明塑料制品的模具，要求模具钢材有良好的镜面抛光性能和高耐磨性，所以应采用时效硬化型钢制造。例如 18Ni 类、PMS、PCR 钢等也可用预硬型钢，如 P20 系列及

8CrMn、5NiSCa 钢等。

用不同的塑料原料制造大小及形状不同的塑料制品时，应选用不同的塑料模具钢。表 3—59 列出了根据塑料制品的种类选用塑料模具钢的举例，供模具设计选材时参考。

表 3—59 根据塑料制品种类选用模具钢

代表性塑料及制品		模具要求	适用钢材
ABS	电视机壳、音响设备	高强度、耐磨损	SM55、40Cr、P20、SM1、SM2、8CrMn
PP	电扇扇叶、容器		
ABS	汽车仪表盘、化妆品容器	高强度、耐磨损、光刻性	PMS、20CrNi3MoAl
有机玻璃 AS	唱机罩、仪表罩、汽车灯罩	高强度、耐磨损、抛光性	5NiSCa、SM2、PMS、P20
POM PC	工程塑料制件、电动工具外壳、汽车仪表盘	高耐磨性	65Nb、8CrMn、PMS、SM2
酚醛、环氧树脂	齿轮等	高耐磨性	65Nb、8CrMn、06NiTi2Cr、06N6CrMoVTiAl
阻燃 ABS	电视机壳、收录机壳、显像管罩	耐腐蚀	PCR
PVC	电话机、阀门、管件、门把手	强度及耐腐蚀	38CrMoA、PCR
有机玻璃 PS	照相机镜头、放大镜	抛光性的防锈性	PMS、8CrMn、PCR

3. 根据塑料制品的尺寸大小及精度要求选用模具钢

对大型、高精度的注射模具，当塑料制品的生产批量大时，采用预硬化钢制造。由于模具型腔大，模具壁厚加大，因此对钢的淬透性要求高，热处理后要求变形小。预硬型钢材在机械加工前进行预硬处理，机械加工后不再进行热处理，以防止热处理变形。预硬处理的模具钢既有较高的耐磨性，又有较高的强度和韧性。例如 3CrMo、8CrMn、4Cr5MoSiV、P4410、SM1、PMS 等钢都可以选用。

4. 根据塑料制品形状的复杂程度选用模具钢

对于型腔复杂的注射模具，为减少模具热处理后产生变形和裂纹的机会，应选用加工性能好、热处理变形小的模具钢，如 40Cr、3Cr2Mo、4CrSMoSiV、SM2 等钢。如果塑料制品的生产批量小，可以选用经调质处理的 SM45、SM50、SM55 等钢。

5. 塑料模具中其他零件的材料选用

塑料模具上的其他零件（如导柱、导套、衬套、顶杆、拉料杆、各种模板、顶出板、固定支架、型芯以及型腔件等），其抛光性、耐腐蚀性等要求较模具本身的要求低，一般可以选用与模具本身材料相同或性能稍低的常用模具钢材，经过合理的热处理即可。这样既能达到使用要求，又能降低模具成本。

3.4 塑料模具热处理实例

1. 12CrNi3A 钢制对开胶木模的热处理

该模具形状和最终热处理工艺如图 3-1 所示。模具采用 910 °C 恒温渗碳，保温后随炉（气体渗碳）或随箱（固体渗碳）降温到 800~850 °C，取出悬挂或架空摆放，用风扇冷却至室温。对于模膛抛光性要求高的模具也可悬挂于通有压缩氮气的冷却井中冷却。风冷淬火后在 200~250 °C 回火 2~4 h，处理后硬度为 53~56HRC，变形轻微，合面间隙小于 0.05 mm。

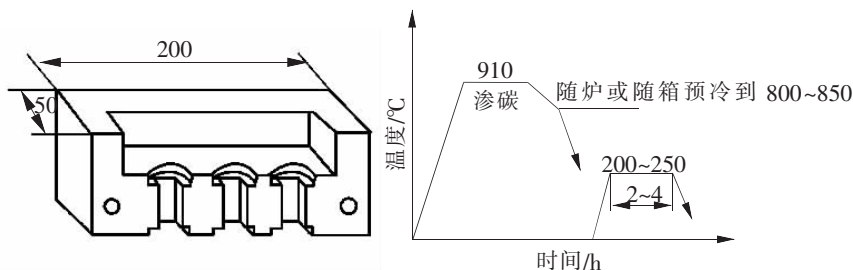


图 3-1 12CrNi3A 钢制胶木模及最终热处理工艺

2. CrWMn 钢模套热浴淬火

该模套形状及热处理工艺曲线如图 3-2 所示。模套经盐浴加热后以高于 M_s 点的温度在硝盐浴中分级淬火，出浴后油冷，然后采用中温回火，回火后的硬度为 51~55HRC，达到要求，尺寸变形控制在允许变形量之内。

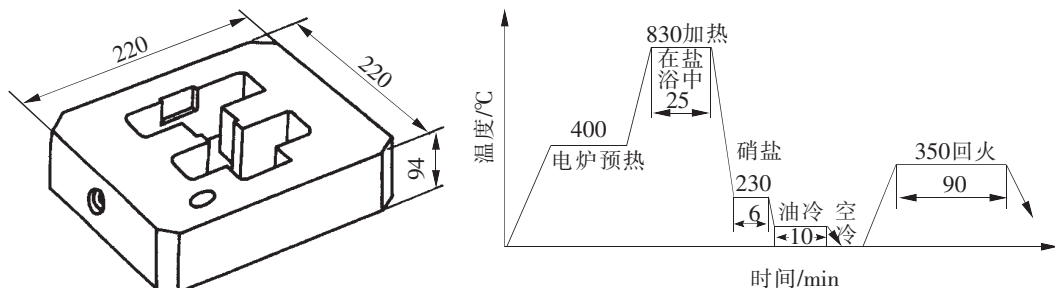


图 3-2 CrWMn 钢模套及热处理工艺曲线

3. 5NiSCa 钢制精密密封橡胶模的热处理

精密密封橡胶模要求尺寸准确，加工工艺性能和抛光性能好，热处理变形小，要有高的硬度、耐磨性和强韧性。选用 5NiSCa 钢制造，均能满足各项要求，使用寿命比 45 钢橡胶压模显著提高。

模坯采用 5NiSCa 圆钢改锻, 改锻工艺为: 预热 $600\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, 加热温度为 $1\ 100\sim 1\ 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, 始锻温度为 $1\ 050\text{ }^{\circ}\text{C}$, 终锻温度大于 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$, 一火锻成, 锻后缓冷。

为改善模坯的切削加工性能以及为淬火作组织准备, 锻后需经等温球化退火, 其工艺为: $760\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热, 保温 2 h, $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温 6 h, 退火硬度不高于 230HBS。预硬化处理采用调质。淬火温度范围宽, 为 $850\sim 920\text{ }^{\circ}\text{C}$, 淬火硬度为 $60\sim 62\text{HRC}$; 根据各种橡胶密封件压模的硬度要求, 回火温度可取 $550\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$, 回火后硬度为 $35\sim 45\text{HRC}$ 。在此硬度条件下, 5NiSCa 钢具有良好的机械加工性能和抛光性能。

4. PMS 钢制磁带内盒模及其热处理

盒式录音磁带内盒模具主要是由瑞典 718 钢或日本 NAK55 钢制作的。在选用 PMS 镜面塑料模具钢制造时, 其成形加工和镜面抛光等性能完全能满足各种精密塑料模具的特殊要求, 而且镜面性能和模具的使用寿命高于 NAK55 钢。

PMS 钢的锻造加热温度为 $1\ 130\sim 1\ 160\text{ }^{\circ}\text{C}$, 始锻温度 $1\ 100\sim 1\ 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, 终锻温度 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$, 锻后缓冷。固溶处理的加热温度为 $840\sim 860\text{ }^{\circ}\text{C}$, 用箱式电炉加热时加热系数为 2.5min/mm , 固溶后空冷至室温, 硬度为 $30\sim 35\text{HRC}$ 在固溶状态下进行机械加工。切削加工可采用常规的加工速度和切削量, 可得到低的表面粗糙度和良好的光亮度, 但由于 PMS 钢的韧性好, 在大进给量和背吃刀量较大时易烧刀。铣削可采用高速钢立铣刀加工, 磨削加工和电加工性能亦较好。模具在加工成形后, 在 $490\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行时效处理, 保温时间 6 h。时效后硬度为 $38\sim 45\text{HRC}$, 变形率小于 0.05% 。录音磁带内盒模具的表面粗糙度 R_a 一般要求低于 $0.05\text{ }\mu\text{m}$ 。

PMS 钢在 40HRC 左右的硬度下, 进行人工研磨抛光后的粗糙度 R_a 为 $0.025\sim 0.012\text{ }\mu\text{m}$, 光亮度比 45 钢有明显提高, 且抛光时间缩短近一半以上。

一般进口模具的使用寿命在 $50\sim 60$ 万次, 用 38CrMoAl 钢 (渗氮) 制作的模具的使用寿命为 20 万次, 而 PMS 镜面塑料模具钢制模具的使用寿命可达到 80 万次。

思考题

1. 各类塑料模的工作条件如何? 塑料模的失效形式主要有哪些?
2. 各类塑料模对所使用的材料应有哪些基本性能要求?
3. 如何评价塑料模的使用寿命? 影响塑料模使用寿命的因素有哪些?
4. 制造塑料模的传统钢种有哪些? 主要存在什么缺陷?
5. 何为预硬型塑料模具钢? 简述其成分、性能及应用特点。
6. 何为时效硬化型塑料模具钢? 简述其性能及应用特点。

7. 选择塑料模材料的依据有哪些？请为下列工作条件下的塑料模选用材料：

- (1) 形状简单，精度要求低、批量不大的塑料模；
- (2) 高耐磨、高精度、型腔复杂的塑料模；
- (3) 大型、复杂、产品批量大的塑料注射模；
- (4) 耐蚀、高精度塑料模具。

8. 塑料模成型零件的热处理应注意什么问题？试述用低碳合金渗碳钢制造的塑料模型腔件的制造工艺路线。

9. 今有一塑料制靠背椅（整体件），工作面要求光洁，无划痕，局部有细花皮纹，年产量 45 万件，试选用模具（型腔件）的钢材品种，并提出热处理工艺路线及其编制理由。

10. 对塑料模进行表面处理的目的是什么？表面处理的方法有哪些？

第4章

热作模具钢及热处理

热作模具主要指用于热变形加工和压力铸造的模具。根据工作条件，热作模具可分为热锻模、热挤压模、压铸模和热冲裁模等几类。

4.1 热作模具钢性能要求

4.1.1 热作模具钢的使用性能要求

热作模具在工作中既有力的作用又有温度的作用，从而使模具的工作条件复杂化，对模具材料的特性要求也更加严格。为了满足热作模具的使用要求，热作模具钢应具备下列基本特性：

(1) 较高的高温强度和良好的韧性。热作模具，尤其是热锻模，工作时会承受很大的冲击力，而且冲击频率很高，如果热作模具钢没有高的强度和良好的韧性，就容易开裂。

(2) 良好的耐磨性能。由于热作模具工作时除受到毛坯变形时产生摩擦磨损之外，还受到高温氧化腐蚀和氧化铁屑的研磨，所以需要热作模具钢有较高的硬度和抗粘附性。

(3) 高的热稳定性。热稳定性是指钢材在高温下可长时间保持其常温力学性能的能力。热作模具工作时，接触的是炽热的金属，甚至是液态金属，所以模具表面的温度很高，一般为 $400\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这就要求热作模具钢在高温下不发生软化，具有高的热稳定性，否则模具就会发生塑性变形，造成堆塌而失效。

(4) 优良的耐热疲劳性。热作模具的工作特点是反复受热受冷，模具一时受热膨胀，一时又冷却收缩，形成很大的热应力，而且这种热应力是方向相反，交替产生。在反复热应力作用下，模具表面会形成网状裂纹（龟裂），这种现象称为热疲劳，模具因热疲劳而过早地断裂，是热作模具失效的主要原因之一。所以热作模具钢必须要有良好的热疲劳性。

(5) 高淬透性。热作模具一般尺寸比较大，热锻模尤其是这样，为了使整个模具截面的力学性能均匀，这就要求热作模具钢有高的淬透性能。

(6) 良好的导热性。为了使模具不致积热过多，导致力学性能下降，要尽可能降低模面温度，减小模具内部的温差，这就要求热作模具钢要有良好的导热性能。

(7) 良好的成形加工工艺性能，以满足加工成形的需要。

4.1.2 热作模具钢的成分特点

热作模具钢的成分与合金调质钢相似，一般碳的质量分数小于 0.5%（个别钢种碳的质量分数可达 0.6%~0.7%），并含有 Cr、Mn、Ni、Si 等合金元素。含碳量低可保证其具有足够的韧性。合金元素的作用是强化铁素体和增加淬透性。为了防止回火脆性，还加入 Mo、W 等元素；为了提高高温强度和热疲劳抗力，需增加相当数量的 Cr、W 及 Si。这些元素提高了相变温度，使模面在交替受热与冷却过程中不致发生相变而发生较大的容积变化，从而提高其抗热疲劳的能力。另外，W、Mo、V 等在回火时以碳化物形式析出而产生二次硬化，使热作模具钢在较高温度下仍保持相当高的硬度，这是热作模具钢正常工作的重要条件之一。

4.1.3 热作模具钢的分类

根据工作温度、性能和用途可将通用热作模具钢分类如下：

(1) 按用途分类：①热锻模用钢；②热挤压模用钢；③压铸模用钢；④热冲裁模用钢。

(2) 按耐热性分：①低耐热钢（350~370℃）；②中耐热钢（550~600℃）；③高耐热钢。

(3) 按特有性能分：①高韧性热作模具钢；②高热强热作模具钢；③高耐磨热作模具钢。

(4) 按合金元素分类可以分为：①钨系热模钢；②铬系热模钢；③铬钼系；④铬钨钼系热模钢。

表 4-1 列出热作模具钢分类，可供选用时参考。由表可以看出，对每一种用途的热模钢，可以有不同性能，不同合金元素含量；而每一种钢号的热模钢，也可以用做几种用途的模具。因此，对热作模具钢作出统一的分类相当困难。

表 4-1 热作模具钢的分类

按用途分	按性能分	按合金元素含量分	钢 号
热锻模用钢	高韧性热作模具钢	低合金热模钢	5CrNiMo、5CrMnMo、4CrMnSiMoV
热剂压模用钢	高热强热作模具钢	中合金热模钢	3Cr2W8V、4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、 4Cr5W2VSi、3Cr3Mo3W2V、4Cr3Mo3SiV、 5Cr4W5Mo2V、5Cr4Mo3SiMnVA1
压铸模用钢	高热强热作模具钢	中合金热模钢	4Cr5MoSiV1、3Cr2W8V
热冲裁模用钢	高耐磨热作模具钢	低合金高碳模具钢	8Cr3

4.2 热作模具钢及热处理规范

4.2.1 热锻模用钢（高韧性、低合金）

热锻模是在高温下通过冲击力或压力使炽热的金属坯料成形的模具，包括锤锻模、压力机锻模、热墩模、精锻模和高速锻模等，其中锤锻模最有代表性。

热锻模用钢主要用于各种尺寸的锤锻模、平锻机锻模、大型压力机锻模等。

热锻模在工作中受到高温、高压、高冲击负荷的作用。模具型腔与高温金属坯料（钢铁坯料 1 000~1 200 ℃）相接触产生强烈地摩擦，使模具本身温度高达 400~600 ℃；锻件取出后模腔还要用水、油或压缩空气进行冷却，如此受到反复加热和冷却，使模具表面产生较大的热应力。锤锻模的失效方式主要是，在交变的热应力作用下，模具表面产生网状或放射状的热疲劳裂纹，以及模腔磨损或严重偏载、工艺性裂纹导致模具开裂。

因此，热锻模应具有较高的高温强度和韧性，良好的耐磨性和耐热疲劳性，由于锤锻模尺寸比较大，还要求锤锻模用钢具有高的淬透性。

这就是热锻模的工作条件，正是这种工作条件，要求这类模具钢应具有下列基本性能：

（1）淬透性高，以保证这种大型模具沿整个截面具有均匀一致的力学性能。

（2）冲击韧度好，热疲劳抗力高，以保证能承受冲击载荷及在急冷急热反复热冲击下，不至于发生龟裂。

（3）导热性好，以保证模具型腔表面的热量尽快传导外散，降低模具的温升，有利于减少热磨损及热疲劳损伤。

（4）较高的抗回火稳定性及高温强度，以减少热塑性变形。

（5）较好的抗氧化性能和加工工艺性能。为满足上述性能，高韧性热作模具钢中不能含有太高的碳及碳化物形成元素，通常碳质量分数 $w(C)$ 在 0.3%~0.5%，为提高淬透性及热强性加入少量铬、钼、钒、镍、锰、硅等，加入少量钼或钨有助于清除高温回火脆性。

常用的热锻模用钢主要有：5CrNiMo、5CrMnMo、4CrMnSiMoV 等钢，此外还有国内近年来研制的新钢种，如 4SiMnMoV、5Cr2NiMoVSi、45Cr2NiMoVSi 等钢。其中 45Cr2NiMoVSi 钢是应用比较成熟的高强韧大截面锤锻模具钢。

1. 5CrMnMo 钢

5CrMnMo 钢是传统的热锻模具钢，钢中加入 Cr 可以提高淬透性、高温强度和抗氧化能力；加入 Mo 主要是为了抑制回火脆性，提高耐回火性。该钢与 5CrNiMo 钢的各种性能类似，是在考虑我国资源情况的基础上，为节约镍而以锰代镍研制的，淬透性稍差，高温工作时的耐热疲劳性也低于 5CrNiMo 钢。5CrMnMo 钢适用于制造要求较高强度和高耐磨性的各种类型锻模（边长 ≤ 400 mm）。要求韧性较高时，可以采用电渣重熔钢。

1) 热加工

5CrMnMo 钢锻造工艺规范见表 4-2。

表 4-2 5CrMnMo 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 140~1 180	1 100~1 150	800~880	缓冷（坑冷或砂冷）
钢坯	1 100~1 150	1 050~1 100	800~850	缓冷（坑冷或砂冷）

2) 预备热处理

(1) 一般退火：加热温度为 760~780℃保温 2~4 h，炉冷至 500℃以下出炉空冷，退火后硬度为 197~241HBS。

(2) 锻后等温退火：加热温度为 850~870℃，保温 2~4 h；炉冷至 680℃，保温 4~6 h，炉冷至 500℃以下出炉空冷，退火后硬度为 197~241HBS。

(3) 锻模翻新退火：加热温度为 720~740℃，保温 2~6 h，炉冷至 500℃以下出炉空冷。

3) 淬火及回火

(1) 推荐的淬火、回火工艺规范分别见表 4-3、表 4-4。回火用途为消除应力，稳定组织和尺寸。常温力学性能与回火温度的关系见表 4-5。

表 4-3 5CrMnMo 钢推荐的淬火工艺规范

淬火温度/℃	冷却方法			硬度 HRC
	介质	温度/℃	冷却	
820~850	油	150~180	至 150~180℃，小型模具空冷，大中型模具立即回火	52~58

表 4-4 5CrMnMo 钢推荐的回火工艺规范

回火部位		加热温度/℃	加热介质	硬度 HRC
模具工作部分	小型锻模	490~510	煤气炉或电炉	41~47
	中型锻模	520~540		38~41
锻模燕尾部分	小型锻模	600~620		35~39
	中型锻模	620~640		34~37
注：一般回火 2 次，每次回火后均需油冷，以防回火脆性的产生。				

表 4-5 5CrMnMo 钢常温力学性能与回火温度的关系

回火温度/℃	200	300	400	450	500	550	600	650
硬度 HRC	57	52	47	44	41	37	34	30
σ_b /MPa	—	—	—	1 630	1 600	1 430	1 260	1 120
α_K /(J·cm ⁻²)	—	—	—	19	20	27	42	30
δ /%	—	—	—	5.5	7.5	9.5	10	11.5
注：840℃油淬								

(2) 高温淬火、回火工艺。高温淬火可以获得细致的板条状马氏体，强韧性较好，但超过 900℃ 加热淬火，冲击韧度等性能开始下降。生产实践证明：高温淬火后模具的使用寿命都有了不同程度的提高。高温淬火温度为 890~900℃，油冷，硬度为 61.5HRC。回火温度为 420~550℃，回火 2 次。

(3) 等温淬火：

① 加热温度为 840~860℃，加热后将模具放于 160~180℃ 硝盐中分级停留，使之发生部分马氏体转变，然后再转入 280~300℃ 硝盐中保温停留 2~3 h。

② 加热温度为 840~860℃，油淬，待模具表面冷到 150~200℃ 时，带温转入等温槽，在 280~300℃ 保温 2~3 h。

采取以上两种淬火方法后，模具钢的组织为马氏体+下贝氏体+残留奥氏体，回火后获得回火下贝氏体组织。这种工艺减少了模具在使用过程中的开裂，提高了模具的使用寿命。

2. 5CrNiMo

5CrNiMo 钢和 5CrMnMo 钢一样都是传统的热锻模具钢，但 5CrNiMo 钢具有良好的韧性，同时具有良好的强度和高耐磨性，室温力学性能与在 500~600℃ 时几乎相同，在加热到 500℃ 时，仍能保持 300HBS 左右的硬度。由于 5CrNiMo 钢中含有 Mo，因而对回火脆性并不敏感，但由于碳化物形成元素含量低，二次硬化效应微弱，所以热稳定性不高。

5CrNiMo 钢具有良好的淬透性。300 mm×400 mm×300 mm 的大块钢料经 820℃ 油淬和 560℃ 回火后，断面各部分的硬度几乎一致。5CrNiMo 钢多用来制造大、中型锻模。

1) 热加工

5CrNiMo 钢锻造工艺规范见表 4-6。

表 4-6 5CrNiMo 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 140~1 180	1 100~1 150	800~880	缓冷（坑冷或砂冷）
钢坯	1 100~1 150	1 050~1 100	800~850	缓冷（坑冷或砂冷）

5CrNiMo 钢在空气中冷却即能淬硬，并易形成白点，因此锻造后应缓慢冷却。对于大型工件必须放到 600℃ 的炉中，待温度一致以后再缓慢冷却到 150~200℃，然后再在空气中冷却。对于较大的工件建议在冷却到 150~200℃ 以后，立即进行回火加热。

2) 预备热处理

(1) 锻后退火：加热温度为 760~780℃，保温 4~6 h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，退火后硬度为 197~241HBS，组织为珠光体+铁素体。

(2) 锻后等温退火：加热温度为 850~870℃，保温 4~6 h；等温温度 680℃，保温 4~6 h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，退火后硬度为 197~241HBS；组织为珠光体+铁素体。

(3) 锻模翻新退火：加热温度为 710~730℃，保温 4~6 h，炉冷至 500℃ 以下出炉空

冷。退火后硬度为 197~241HBS。

3) 淬火及回火

(1) 推荐的淬火工艺规范见表 4-7。

表 4-7 5CrNiMo 钢推荐的淬火工艺规范

淬火温度/℃	冷却方法			硬度 HRC
	介质	介质温度/℃	延续	
830~860	油	20~60	至 150~180℃后立即回火	53~58

(2) 推荐的回火工艺规范见表 4-8。

表 4-8 5CrNiMo 钢推荐的回火工艺规范

方案	回火用途	锻模规格		加热温度/℃	加热设备	硬度 HRC
Ⅰ	消除应力稳定 组织和尺寸	小型		490～510	煤气炉或电炉	44～47
		中型		520～540		38～42
		大型		560～580		34～37
Ⅱ		燕尾	中型	620～640		34～ 37
			小型	640～660		30～35

回火后均需油冷，以防回火脆性的产生，为了消除油冷时产生的应力，可在 160~180℃再回火一次。特别注意 5CrNiMo、5CrMnMo 这两类钢无论淬火还是回火都不能在油中冷到室温，否则容易开裂。表 4-9 为淬火、回火温度对 5CrNiMo 钢冲击韧度的影响。表 4-10 为淬火、回火温度对硬度的影响。

表 4-9 淬火、回火温度对 5CrNiMo 钢冲击韧度的影响

$\alpha_K/(J \cdot cm^{-2})$ 回火温度/℃ 淬火温度/℃		300	350	400	450	500	550	600
840		21	25	29	35	45	56	71
950		19	20	23	25	35	49	62
1 000		13	16	20	23	30	40	54

表 4-10 淬火、回火温度对硬度的影响

硬度 HRC 回火温度/℃ 淬火温度/℃		300	350	400	450	500	550	600
850		52	50	48	45	41	38	32
900		52	50	48	45	41	38	32
950		53	51	49	46	42	39	33
1 000		54	52	50	47	43	40	34

(3) 高温淬火、回火工艺。近年来研究表明：随着淬火温度的提高，5CrNiMo 钢的组织以板条状马氏体为主，而板条状马氏体比针状马氏体具有更高的韧性，同时钢中的碳化物更充分溶解，使钢的一系列性能发生变化，断裂韧度有所提高，抗回火能力和热稳定性也得到提高。淬火温度提高后，能推迟热疲劳裂纹的产生，但超过 900℃ 加热淬火，冲击韧度开始下降。实践证明，高温淬火后模具的使用寿命有不同程度的提高。

高温淬火温度为 890~910℃，油冷，淬火硬度为 61.5HRC。淬火后组织为板条状马氏体 + 体积分数为 9.2% 左右的残留奥氏体，晶粒度为 7~8 级。

回火温度为 420~550℃，回火 2 次，硬度为 38~47HRC。

(4) 等温淬火工艺。热锻模加热油淬，当模具表面温度冷到 150~200℃ 时，即带温转入 280~300℃ 的等温槽，保温 2~3 h。由于淬火时先获得少量马氏体 + 下贝氏体 + 残留奥氏体组织，回火后马氏体转变为下贝氏体组织。该工艺减少了模具的开裂，模具的使用寿命显著提高。例如 5CrNiMo 钢法兰盘模具，普通淬火模具寿命是 8500 件，等温淬火模具寿命为 13 000 件。

3. 4CrMnSiMoV 钢

4CrMnSiMoV 钢是近 20 年来我国在低合金大截面热作模具钢领域发展的钢种之一，是原冶金部标准中推荐使用的 5CrMnSiMoV 钢的改进型。该钢具有较高的强度、耐磨性，良好的冲击韧度、淬透性，并有较高的抗回火性以及好的高温强度和耐热疲劳性能。其高温性能、抗回火稳定性、热疲劳性均比 5CrMnMo、5CrNiMo 钢好，可以用来代替 5CrNiMo 钢。4CrMnSiMoV 钢的冷、热加工性能好，适于制造各种类型的锤锻和压力机锻模。

1) 热加工

4CrMnSiMoV 钢锻造工艺规范见表 4-11。

表 4-11 4CrMnSiMoV 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 160~1 180	1 100~1 150	≥850	缓冷（砂冷或坑冷）
钢坯	1 100~1 150	1 050~1 100	≥850	缓冷（砂冷或坑冷）

2) 预备热处理

等温退火工艺：加热温度为 840~860℃，保温 2~4 h；等温温度为 700~720℃，保温 4~8 h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷。

3) 淬火及回火

(1) 推荐的淬火工艺规范：淬火温度为 860~880℃，油冷，硬度为 56~58HRC。不同温度淬火后的硬度见表 4-12。

表 4-12 4CrMnSiMoV 钢不同温度淬火后的硬度

淬火温度/℃	800	850	860	870	875	885	900
硬度 HRC	46	56	57	58	58	58	57

(2) 推荐的回火工艺规范见表 4-13。硬度与回火温度的关系见表 4-14。

表 4-13 4CrMnSiMoV 钢推荐的回火工艺规范

模具类型	回火温度/℃	回火设备	回火硬度 HRC
小型	520~580	空气炉	43.7~48.7
中型	580~630	空气炉	40.7~43.7
大型	610~650	空气炉	37.8~41.7
特大型	620~660	空气炉	36.9~39.7

表 4-14 4CrMnSiMoV 钢的硬度和回火温度的关系

回火温度/℃	淬火后	300	400	450	500	550	600	650	700
硬度 HRC	56	52	49	48	47	46	42	38	30
注：870℃油淬。									

4) 实际应用

4CrMnSiMoV 钢适用于大、中型锻模，也可用于中小型热锻模具。与 5CrNiMo 钢比较，4CrMnSiMoV 钢模具的使用寿命高，如连杆模、前梁模、齿轮模、突缘节模（深型模）等，均比 5CrNiMo 钢模具寿命提高 0.1~0.8 倍；用于矫正模、弯曲模等比 5CrNiMo 钢模具寿命提高 0.5~2 倍。

4.2.2 热挤压模用钢（高热强热、中合金）

热挤压模的工作条件相当繁重。既承受压缩应力和弯曲应力，脱模时也承受一定的拉应力。另外还受到冲击负荷的作用。模具与炽热金属接触时间较长，使其受热温度比热锻模更高，尤其是用于加工钢铁材料和难熔金属时，工作温度高达 600~800℃。热挤压模的失效形式主要是模腔过量塑性变形、开裂、热疲劳和热磨损。但这类模具的尺寸一般比热锻模小，因此，对于这类模具特别要求具有高的热稳定性，较高的高温强度和足够的韧性，良好的耐热疲劳性和高的耐磨性。

常用的热挤压模具用钢是钨系热作模具钢和铬系热作模具钢，还有铬钼系、钨钼系和铬钼钨系等新型的热作模具钢以及基体钢等。

钨系热作模具钢的代表性钢种为传统的 3Cr2W8V 钢，由于其耐热疲劳性较差，在热挤压模方面的应用将逐渐会减少，但在压铸模方面的应用较多，故在压铸模用钢中对其作详细介绍。

铬系热作模具钢的代表性钢种有 4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1 和 4Cr5W2VSi。前两种相

当于美国的 H11 和 H13 钢，4Cr5W2VSi 则由 4Cr5MoSiV 钢演变而来，由 $w(W)=2\%$ 代替 $w(Mo)=1\%$ 。这 3 种钢碳的质量分数均为 5% 左右，属于中碳中铬钢。

1. 4Cr5MoSiV (H11) 钢

H11 钢是一种空冷硬化的热作模具钢，在中温条件下具有很好的韧性，有较好的热强度、热疲劳性能和一定的耐磨性。在较低的奥氏体化温度条件下空淬，热处理变形小，空淬时产生氧化皮倾向小，而且可以抵抗熔融铝的冲蚀作用。H11 钢通常用于制造加工铝铸件用的压铸模、热挤压模，穿孔用的工具，芯棒、压力机锻模以及塑料模等。此外由于 H11 钢具有好的中温强度，因此亦被用于制造耐 400~500℃ 工作温度的飞机、火箭上的结构件。

1) 加工

H11 钢锻造工艺规范见表 4-15。

表 4-15 H11 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 140~1 180	1 100~1 150	≥900	砂冷或坑冷
钢坯	1 120~1 150	1 070~1 100	850~900	砂冷或坑冷

2) 预备热处理

(1) 锻后退火：工艺加热温度为 860~990℃，保温 2~4 h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，退火后硬度≤229HBS。

(2) 消除应力退火工艺：加热温度为 730~760℃，保温 3~4 h，炉冷或空冷。

3) 淬火及回火

推荐的淬火工艺规范：淬火温度为 1 000~1 030℃，油冷或空冷，硬度为 53~55HRC。

推荐的回火工艺规范：回火温度为 530~580℃，空冷，回火 2 次，硬度为 47~49HRC。

推荐的表面处理规范见表 4-16。淬火、回火温度与硬度的关系分别见表 4-17、表 4-18。

表 4-16 H11 钢推荐的表面处理规范

工艺	温度/℃	时间/h	介质	渗层厚度/mm	表面硬度 HV
渗氮	560	2	KCN50%+NaCN50%	0.04	640~690
渗氮	580	8	天然气+氨	0.25~0.30	830~860
渗氮	540	12~20	氨的分解率 30%~60%	0.15~0.20	550~760

表 4-17 H11 钢硬度与淬火温度的关系（空淬）

淬火温度/℃	950	975	1 000	1 025	1 050	1 075	1 100
硬度 HRC	51	53	54.5	56	58	58.5	57.5

表 4-18 回火温度与硬度关系

回火温度/℃	淬后	100	200	300	400	500	550	600	650	700
硬度 HRC	55.5	55	54	53	53	54	52.5	50	43	30
注：1 030℃空冷淬火。										

4) 力学性能

不同温度回火后的性能见表 4-19。4Cr5MoSiV 钢的高温力学性能见表 4-20。

表-19 不同温度回火后的力学性能

回火温度/℃	500	550	600	650
硬度 HRC	57	54.5	46.5	37
$\alpha_K/(J \cdot cm^{-2})$	20	45	60	66
注：1 000℃油淬。				

表 4-20 4Cr5MoSiV 钢的高温力学性能

温度/℃	室温	200	300	400	450	500	550	600	650
硬度 HRC	51	—	47	44	43	42	38	31	—
σ_b/MPa	1 680	1 600	1 520	1 420	1 400	1 280	1 220	—	—
$\sigma_{0.2}/MPa$	1 490	1 400	1 320	1 200	1 150	1 010	900	620	—
$\psi/\%$	50	52	53	57	62	65	68	—	—
$\delta_5/\%$	11	12	13	14	17	17.5	18	—	—
$\alpha_K/(J \cdot cm^{-2})$	52	62	63	65	64	63	62.5	63	69
注：1 000℃空淬，580℃回火。									

2. 4Cr5MoSiV1 (H13) 钢

4Cr5MoSiV1 钢，即美国钢号 (H13) AISI 是国际上广泛应用的一种空冷硬化热作模具钢，是引进钢种，“八五”期间作为国家的重点推广钢种。与 4Cr5MoSiV 钢相比，H13 钢具有较高的热强度和硬度，在中温条件下具有很好的韧性、热疲劳性能和一定的耐磨性。在较低的奥氏体化温度下空淬，热处理变形小，空淬时产生氧化皮倾向小，可以抵抗熔铝的冲蚀作用。该钢广泛用于制造热挤压模具、芯棒、模锻锤的锤模、锻造压力机模具、精锻机用模具以及铝、铜及其合金的压铸模。

1) 热加工

H13 钢锻造工艺规范见表 4-21。

表 4-21 H13 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 140~1 180	1 100~1 150	850~900	缓冷（砂冷或坑冷）
钢坯	1 120~1 150	1 050~1 100	850~900	缓冷（砂冷或坑冷）

2) 预备热处理

(1) 锻后退火：加热温度为 860~890 ℃，保温 3~4 h，炉冷至 500 ℃ 以下出炉空冷，退火后硬度≤229HBS，组织为球化珠光体+少量碳化物。

(2) 去应力退火：加热温度为 730~760 ℃，保温 3~4 h，炉冷。

3) 淬火及回火

淬火温度与硬度、晶粒度的关系见表 4-22。不同回火温度后室温力学性能见表 4-23。

表 4-22 H13 钢淬火温度与硬度、晶粒度的关系

淬火温度/℃	930	950	980	1 000	1 020	1 040	1 060	1 080	1 100
硬度 HRC	50.3	52	53.5	54.8	56.3	57.8	58.2	59.1	59.1
晶粒度/级	—	11.2	11.1	11.1	11.1	11	10	8	7

表 4-23 H13 钢不同回火温度后室温力学性能

回火温度/℃	淬后	200	400	500	520	550	580	600	650	700
硬度 HRC	56	54	54	55.5	54	52.5	49	45.5	33	28
σ_b /MPa	—	—	2 040	2 100	2 080	1 980	1 780	1 650	1 180	—
ψ /%	—	—	40	34	40	48	53	54	55	—
δ_5 /%	—	—	11	11	11.5	12	12.5	14	18	—
α_K /(J·cm ⁻²)	—	—	40	32	35	50	60	70	100	—
注：1 020 ℃油淬，2 次回火。										

(1) 推荐淬火规范：淬火温度为 1 020~1 050 ℃，油冷或空冷，硬度为 56~58HRC。

(2) 推荐回火规范：回火温度为 560~580 ℃，回火硬度为 47~49HRC。

通常采用 2 次回火，第 2 次回火温度比第 1 次低 20 ℃。

3. 3Cr3Mo3W2V (HM1) 钢

HM1 钢是在对比 3Cr3Mo3V 钢及 3Cr2Mo3Co3V 钢性能及使用寿命后，结合我国资源条件而研制成功的新型热作模具钢，其冷加工、热加工性能良好，淬火温度范围较宽，具有较高的热强性、热疲劳性能，良好的耐磨性和耐回火性等特点，是综合性能优良的高强韧性热作模具钢。HM1 钢适合制造镦锻、压力机锻造、挤压等热作模具，模具的使用寿命较高，是目前国内研制的工艺性能好，使用面广，具有较广应用前景的新钢种之一。

1) 热加工

HM1 钢锻造工艺规范见表 4-24。

表 4-24 HM1 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 170~1 200	1 100~1 150	≥900	缓冷（砂冷或坑冷）
钢坯	1 150~1 180	1 050~1 100	≥850	缓冷（砂冷或坑冷）

2) 预备热处理

锻后等温退火工艺：加热温度为 860~880 ℃，保温 4 h；等温温度为 720~740 ℃，保温 6 h，炉冷至 500 ℃ 以下出炉空冷，硬度≤255HBS。

3) 淬火及回火

(1) 推荐的淬火工艺规范：淬火温度为 1 060~1 130 ℃，油冷，硬度 52~56HRC。表 4-25 为 HM1 钢不同温度淬火后的硬度、晶粒度与残留奥氏体量。

表 4-25 HM1 钢不同温度淬火后的硬度、晶粒度与残留奥氏体量

淬火温度/℃	950	1 050	1 100	1 130	1 160	1 200
硬度 HRC	48	51.5	53	56	57.5	58
晶粒度/级	>10	>10	>10	9~10	8~9	7~8
残留奥氏体量（体积分数，%）	2.5	2.7	2.8	3.0	3.5	4.0

(2) 推荐的回火工艺规范见表 4-26。回火温度与硬度的关系见表 4-27。

表 4-26 HM1 钢推荐的回火工艺规范

回火目的	回火温度/℃	回火介质	回火硬度 HRC
增加耐磨性	640	空气	52~54
提高韧性	680	空气	39~41

表 4-27 HM1 钢回火温度与硬度的关系

硬度 HRC 淬火条件	回火温度/℃	600	620	640	660	680
	1 060 ℃油淬	53	53.5	53.5	45	34
	1 130 ℃油淬	54	55	56	47.5	38.5
注：保温 1 h。						

4) 力学性能

表 4-28 为 HM1 钢的回火稳定性。表 4-29 为 HM1 钢的高温硬度。

表 4-28 HM1 钢的回火稳定性

回火温度/℃	下列保温时间后的硬度 HRC			
	4h	6h	8h	12h
600	500	49.5	48.5	46.5
640	48	46.5	43.5	—
680	39.5	37.5	—	—
注：1. 1 060 ℃淬火。				
2. 在 1 130 ℃淬火后，640 ℃回火时硬度下降至≤40HRC 所需时间：HM1 钢为 8h。				

表 4-29 HM1 钢的高温硬度

高温温度/℃	400	500	600	700	750
高温硬度 HV	460	410	340	210	90
注：1 050℃淬火，600℃回火。					

4. 3Cr3Mo3VNb (HM3) 钢

HM3 钢是参照国外 H10 钢和 3Cr3Mo 系热作模具钢，结合我国资源情况研制而成的新型高强韧性热锻模具钢。其特点是在含碳量较低的情况下加入微量元素 Nb，使钢具有更高的耐回火性、热强性，有明显的回火二次硬化效果。HM3 钢的缺点为有脱碳倾向。生产实践表明：对于耐热钢、不锈钢及高温合金等成形用模具，5CrNiMo 钢、3Cr2W8V 钢和 4Cr5W2VSi 钢都不能满足生产要求，而 HM3 钢则可以使锻模的使用寿命有明显提高。HM3 钢应用于热锻成形凹模、连杆辊锻模、轴承套圈毛坯热挤压凹模、高强钢精锻模、小型机锻模和铝合金压铸模等模具上均有良好的效果。HM3 钢模具寿命比 3Cr2W8V 钢、5CrNiMo 钢及 4Cr5W2VSi 钢等模具寿命提高 2~10 倍，可以有效地克服模具因热磨损、热疲劳、热裂等引起的早期失效。

1) 热加工

HM3 钢锻造规范见表 4-30。

表 4-30 HM3 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 170~1 200	1 120~1 150	≥900	缓冷（坑冷或砂冷）
钢坯	1 150~1 180	1 050~1 100	≥850	缓冷（坑冷或砂冷）

2) 预备热处理

等温退火工艺：加热温度为 850~870℃，保温 2~4 h；等温温度 700~720℃，保温 4~6 h；炉冷到 550℃以下出炉空冷，退火后硬度≤229HBS，组织为均匀细小的点状和粒状珠光体。

3) 淬火及回火

（1）淬火：加热温度为 1 060~1 090℃，油冷，硬度为 47~49HRC。表 4-31 为 HM3 钢淬火温度与硬度及晶粒度的关系。

表 4-31 HM3 钢淬火温度与硬度及晶粒度关系

淬火温度/℃	1 020	1 060	1 080	1 090	1 120
硬度 HRC	47	47.1	48.5	47.9	47.8
晶粒度/级	10	9~10	9	8~9	8~9

（2）推荐的回火工艺规范见表 4-32。不同温度回火后的硬度值和残留奥氏体量见

表4-33。

表 4-32 HM3 钢推荐的回火工艺规范

回火工件	回火温度/℃	回火设备	回火硬度 HRC
锻造变形抗力小的工件	570~600	空气炉	47~49
锻造变形抗力大的工件	600~630	空气炉	42~47

表 4-33 HM3 钢不同温度回火后的硬度值和残留奥氏体量

回火温度/℃		450	500	550	580	600	620	650
回火次数	硬度 HRC	48.5	48.5	49	49	48	45.5	39
	φ (Ar) /%	6.4	6.17	1.58	0.77	0	0	0
二次回火	硬度 HRC	48.5	49.5	49.5	49.5	48	45.5	41.0
	φ (Ar) /%	6.64	3.30	0.69	0.40	0	0	0
注：1. φ (Ar) 表示残留奥氏体的体积分数。 2. 1 080℃淬火。								

4) 力学性能

HM3 钢经 1 080℃加热、油冷淬火后的硬度为 48.5HRC，残留奥氏体的体积分数为 9.2%。由于回火时析出 M₂C、V₄C、NbC 等弥散碳化物以及残留奥氏体的转变，在 550℃左右回火时出现二次硬化峰，峰值稍高于淬火硬度值，但断裂韧度值为低谷值，因此回火宜选择在 550℃以上进行。HM3 钢的常温力学性能和高温力学性能分别见表 4-34、表4-35。

表 4-34 HM3 钢的常温力学性能

淬火温度 /℃	硬度 HRC	回火后硬度 HRC	晶粒度 /级	σ _b /MPa	σ _s /MPa	δ/%	ψ/%	α _K /(J·cm ⁻²)	K _{IC} /(MPa·m ^{1/2})
1 060	47.1	48.1	9~10	1 535	1 352	11	59.8	26.3	36
1 120	47.8	49.7	8~9	1 646	1 433	13	60.7	19	32
注：回火温度 600℃、570℃二次回火。									

表 4-35 HM3 钢高温力学性能

试验温度/℃	室温	450	500	550	600	650
σ _b /MPa	1 600	1 380	1 200	1 100	1 000	750
σ _{0.2} /MPa	—	—	—	800	650	550
ψ/%	59	64	63	62	61	69
δ/%	12	15	11	10	11.5	15
注：1 080℃油淬，600℃回火。						

5. 4Cr3Mo3SiV (H10) 钢

H10 钢是近年来从美国引进的热作模具钢，含碳量的质量分数为 0.4%，Cr 和 Mo 的质量分数均为 3% 左右 H10 钢。含有较多的 Cr、Mo、V 等碳化物形成元素，在较小截面时与 5CrNiMo 钢具有相近的韧性，而在工作温度 500~600℃ 时具有更高的硬度，热强性和耐磨性。H10 钢具有非常好的淬透性及很高的韧性，回火抗力及热稳定性高于 H13 钢，冲击韧度及断裂韧度高于 3Cr2W8V 钢，当回火温度超过 260℃ 时，钢的硬度高于 H13 钢。

H10 钢可以制造热挤压模，热冲模、热锻模及塑压模等模具，主要用于铝合金压铸模。

1) 热加工

H10 钢锻造工艺规范见表 4-36。

表 4-36 H10 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 150~1 180	1 100~1 150	≥900	缓冷（砂冷或坑冷）
钢坯	1 100~1 150	1 050~1 100	≥850	缓冷（砂冷或坑冷）

2) 预备热处理

等温退火：加热温度为 860~900℃，保温 3~4 h；等温温度为 710~730℃，保温 4~6 h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，硬度 ≤229HBS。

3) 淬火及回火

淬火温度为 1 010~1 040℃，油冷或空冷，硬度为 50~55HRC。回火温度为 600~620℃，硬度为 50~55HRC；620~640℃，硬度为 40~50HRC。

4.2.3 压铸模用钢（高热强热、中合金）

压铸模用钢用于制造压力铸造和挤压铸造模具。根据被压铸材料的性质压铸模可分为锌合金压铸模、铝合金压铸模、铜合金压铸模。压铸模工作时与高温的液态金属接触，不仅受热时间长，而且受热的温度比热锻模要高（压铸有色金属时 400~800℃，压铸黑色金属时可达 1 000℃ 以上），同时承受很高的压力（20~120 MPa）；此外还受到反复加热和冷却以及金属液流的高速冲刷而产生磨损和腐蚀。因此，热疲劳开裂、热磨损和热熔蚀是压铸模常见的失效形式。所以对压铸模的性能要求是：较高的耐热性和良好的高温力学性能，优良的耐热疲劳性，高的导热性，良好的抗氧化性和耐蚀性，高的淬透性等。

常用的压铸模用钢以钨系、铬系、铬钼系和铬钨钼系热作模具钢为主，也有一些其他合金工具钢或合金结构钢，用于工作温度较低的压铸模，如 40Cr、30CrMnSi、4CrSi、4CrW2Si、5CrW2Si、5CrNiMo、5CrMnMo、4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、4Cr5W2VSi、3Cr2W8V、3Cr3Mo3W2V 等。其中 3Cr2W8V 钢是制造压铸模的典型钢种，常用于制造浇铸铝合金和铜合金的压铸模；与其性能和用途相类似的还有 3Cr3Mo3W2V 钢。值得指出的是，由于

4Cr5MoSiV1 钢具有良好的韧性、耐热疲劳抗力和抗氧化性，其模具使用寿命高于 3Cr2W8V 钢制压铸模，且这类钢的价格较钨系钢便宜，因此在压铸模上的使用愈来愈多。

1. 3Cr2W8V 钢

3Cr2W8V 钢含碳量虽然不高，但在其他合金元素的共同作用下，共析点左移，因此它是共析或过共析钢。如果冶炼不当，钢锭中的元素偏析就特别严重，共析碳化物的数量会增加，易造成模具脆裂报废。高钨钢有脱碳的倾向，这是模具磨损快、粘模严重以及表面早期出现热疲劳裂纹的原因之一。

但由于 3Cr2W8V 钢抗回火能力较强，仍作为高热强热作模具钢得到广泛应用，可以用来制作高温下高应力，但不受冲击负荷的凸模、凹模，如平锻机上用的凸凹模、镶块、铜合金挤压模、压铸用模具，也可以用来制作同时承受较大压应力、弯应力或拉应力的模具，如反挤压的模具；还可以用来制作高温下受力的热金属切刀等。

1) 热加工

3Cr2W8V 钢锻造工艺规范见表 4-37。

表 4-37 3Cr2W8V 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 150~1 200	1 100~1 150	850~900	先空冷，后坑冷或砂冷
钢坯	1 130~1 160	1 080~1 120	850~900	先空冷，后坑冷或砂冷

锻后要在空气中较快地冷却到 Ac1 以下（约 700℃），随后缓冷（砂冷或炉冷）；如果条件许可，可以进行高温退火。

2) 预备热处理

（1）一般退火：加热温度为 800~820℃，保温 2~4 h，炉冷至 600℃以下出炉空冷，退火后硬度为 207~255HBS，组织为珠光体+碳化物。

（2）等温退火：加热温度为 840~880℃，保温 2~4 h；等温温度 720~740℃，保温 2~4 h，炉冷至 550℃以下出炉空冷，退火后硬度≤241HBS。

3) 淬火及回火

（1）3Cr2W8V 钢推荐淬火工艺规范见表 4-38。

表 4-38 3Cr2W8V 钢推荐淬火工艺规范

淬火温度/℃	冷却介质	温度/℃	延续	冷却到 20℃	硬度 HRC
1 050~1 100	油	20~40	至 150~180℃	空气冷却	49~52

高温淬火：常取 1 140~1 150℃加热奥氏体化，油冷淬火后硬度可高达 55HRC，分级淬火硬度为 47HRC。3Cr2W8V 钢的淬火加热温度提高，马氏体合金化程度也提高，模具热

强性特别好，但韧性稍差，一般用于制造铜合金和铝合金挤压模、压铸模、压型模等受冲击力不太大，而要求有高热强性的模具。

(2) 3Cr2W8V 钢推荐回火工艺规范见表 4－39。硬度与回火温度的关系见表 4－40。

表 4－39 3Cr2W8V 钢推荐回火规范

回火用途	加热温度/℃	加热设备	硬度 HRC
消除应力，稳定组织和尺寸	600～620	电炉	40.2～47.4

表 4－40 3Cr2W8V 钢硬度与回火温度的关系

回火温度/℃ 硬度 HRC 淬火温度/℃	20	500	550	600	650	670	700
1 050	49	46	47	43	35	32	27
1 075	50	47	48	44	36	33	30
1 100	52	48	49	45	40	36	32
1 150	55	49	53	50	45	40	34

(3) 固溶超细化处理。将 3Cr2W8V 钢锻造毛坯在 1 200～1 250 ℃加热固溶，使所有碳化物基本溶入奥氏体，然后淬入热油或沸水中，并立即进行高温回火或短时间等温球化处理。高温回火温度为 720～850 ℃（模坯加工需选温度上限，模具已完成机械加工则选温度下限）。最终热处理可以选用常规热处理工艺，1 100 ℃加热，油冷淬火。

经过以上热处理的 3Cr2W8V 钢模具组织非常细致，未溶碳化物呈点状，碳化物不均匀分布基本消除，模具的使用寿命可成倍提高。

(4) 等温淬火工艺。加热温度为 1 150 ℃，在 350～450 ℃等温后油冷。组织为下贝氏体＋马氏体的混合组织，硬度可达 47HRC 以上。等温淬火后以低温回火为宜，温度340～380 ℃。

等温淬火后获得的贝氏体组织有较高的强韧性，回火稳定性也比常规热处理好得多，抗热冲击性能也较高，模具变形小。模具等温处理后有较高的使用寿命。

4) 力学性能

3Cr2W8V 钢淬火温度与硬度的关系见表 4－41。3Cr2W8V 钢回火温度与力学性能的关系见表 4－42。

表 4－41 3Cr2W8V 钢淬火温度与硬度的关系

淬火温度/℃	950	1 050	1 100	1 150	1 200	1 250
硬度 HRC	44	49	52	55	56	57

表 4-42 3Cr2W8V 钢回火温度与力学性能的关系

回火温度/℃	400	450	500	550	600	650
σ_b /MPa	1 800	1 800	1 800	1 760	1 620	1 270
$\sigma_{0.2}$ /MPa	1 400	1 420	1 450	1 500	1 410	—
ψ /%	36	35.5	35	35.5	38	36
δ_5 /%	18	14	13	12	8	12
注：1 100℃油淬。						

2. 4Cr3Mo2MnVNbB（Y4）钢

Y4 钢是针对铜合金压铸模结合我国矿产资源情况而设计出来的新型热压铸模具钢，接近 3Cr3Mo 类钢，但增加了微量元素 Nb 和 B。与 Y10 钢相比，Y4 钢中的 Cr、Si 含量下降，因此碳化物不均匀性下降，同时以 B 来提高因 Cr、Si 含量减少而降低的淬透性和高温强度。加入微量 Nb，Nb 的碳化物难溶于奥氏体，同时 Nb 的加入还可以提高 M₆C 和 MC 型碳化物的稳定性，因此能细化晶粒，降低过热敏感性，提高热强性和热稳定性。Y4 钢在力学性能上，尤其是冷热疲劳及裂纹扩展速率方面明显优于 3Cr2W8V 钢，是比较理想的铜合金压铸模材料，模具使用寿命有较大的提高。另外 Y4 钢在热挤压模、热锻模的应用方面也取得了明显成效。

1) 热加工

Y4 钢锻造工艺规范见表 4-43。

表 4-43 Y4 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 150~1 200	1 100~1 150	850~900	缓冷
钢坯	1 130~1 160	1 080~1 120	850~900	缓冷

2) 预备热处理

等温退火：加热温度为 840~860℃，保温 2~4 h，等温温度为 680℃，保温 4~6 h，炉冷到 550℃出炉空冷。

3) 淬火及回火

淬火温度为 1 050~1 100℃，油冷，硬度为 58~59HRC。回火温度为 600~630℃，回火时间 2 h，回火 2 次，硬度 44~52HRC。

4) 力学性能

Y4 钢的室温及高温力学性能见表 4-44。

表 4-44 Y4 钢室温及高温力学性能

力学性能 试验温度/℃	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ /%	ψ /%	$\alpha_K/(J \cdot cm^{-2})$
室温	1 455	1 292	12.5	42.2	5.9
300	1 494	1 328	7.8	19.0	12.2
600	978	861	10	15.4	27.3
650	815	719	5.6	7.8	17.5
700	605	534	4.3	11.6	27.5
注：1 100℃油淬，640℃回火 2h。					

4.2.4 热冲裁模用钢（高耐磨、低合金高碳）

在热作模具中热冲裁模的工作温度较低，因此对材料的性能要求也相对放宽。除了应具有高的耐磨性、良好的强韧性以及加工工艺性能外，几乎所有的热作模具钢能满足热冲裁模的工作条件要求。所以在选材时，可着重考虑材料的经济性和生产管理上的方便，推荐使用的钢种有 5CrNiMo、4Cr5MoSiV、4CrSMoSiV1 和 8Cr3 等。其中 8Cr3 钢是使用较多的钢种，它的化学成分为：碳的质量分数为 0.75%~0.85%，硅的质量分数≤0.40%，锰的质量分数≤0.40%，铬的质量分数为 3.20%~3.80%。

8Cr3 钢是在碳素工具钢 T8 的基础上添加一定量的 Cr（质量分数 3.20%~3.80%）。由于 Cr 的存在，8Cr3 钢具有较好的淬透性和一定的室温、高温强度而且形成细小、均匀分布的碳化物。8Cr3 钢通常用于制造热冲裁模、热顶锻模和热弯曲模等模具。

1) 热加工

8Cr3 钢锻造工艺规范见表 4-45。

表 4-45 8Cr3 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1 180~1 200	1 100~1 150	820~900	缓冷
钢坯	1 150~1 180	1 050~1 100	≥800	缓冷

2) 预备热处理

锻后退火工艺：加热温度为 790~810℃，保温 2~6 h，炉冷至 600℃以下出炉空冷，硬度为 207~255HBS，组织为珠光体+碳化物。

3) 淬火及回火

推荐的淬火工艺规范：淬火温度为 850~880℃，油冷，硬度≥55HRC。

推荐的回火工艺规范：回火温度为 480~520℃，硬度为 41~46HRC。

4) 力学性能

8Cr3 钢回火温度与室温力学性能的关系见表 4-46，与高温力学性能的关系见表 4-47。

表 4-46 8Cr3 钢回火温度与室温力学性能的关系

回火温度/℃	300	400	500	520	550	600
硬度 HRC	53	48.5	44.5	43.5	38	29
σ_b /MPa	2 020	1 750	1 360	—	1 200	—
$\sigma_{0.2}$ /MPa	1 830	1 650	1 280	1 200	—	—
$\alpha_K/(J \cdot cm^{-2})$	16	23	33	—	47	—
$\psi/\%$	—	10.5	26	30	37	—
$\delta/\%$	4	7	9	—	10	—
注：870℃油淬。						

表 4-47 回火温度高温力学性能的关系

回火温度/℃	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\alpha_K/(J \cdot cm^{-2})$	$\delta/\%$	$\psi/\%$
200	1 290	1 100	43	8	29
300	1 230	1 070	52	9	29.5
400	1 170	950	43.5	16	46
500	850	650	43	20.5	52
注：870℃油淬，570℃回火					

4.3 热作模具热处理实例

1. 4Cr5MoSiV1 钢制汽车凸轮轴锻模的热处理

某载货汽车发动机凸轮轴锻模尺寸为 950 mm×200 mm×160 mm，对模具型槽的尺寸公差和表面粗糙度等有较高要求，热处理后的硬度要求为 37~41HRC。该锻模在 40MN 机械锻压机上使用，锻件材料为 45 钢，锻造温度为 1 220~1 240℃。

凸轮轴锻模的加工工艺路线为：毛坯→机械加工→热处理→机械加工→仿形铣削加工→加工型槽→修磨→检验。用 5CrNiMo 钢制的凸轮轴锻模的平均使用寿命一般为 8 000 件左右，其主要失效形式是磨损。改用 4Cr5MoSiV1 钢制造后，锻模的平均寿命提高到 1.1 万件，4Cr5MoSiV1 钢制凸轮轴锻模的热处理工艺磨损和热疲劳情况比 5CrNiMo 钢模有显著改善。锻模的热处理工艺如图 4-1 所示。模块在大型高温箱式电阻炉中加热，在油中淬火，冷至 150~200℃时出油。4Cr5MoSiV1 钢制模具在型槽较深时，使用中应特别注意锻前预热，以防止模具早期脆断。

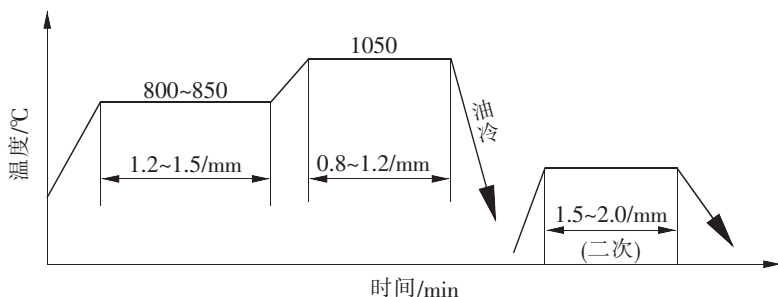


图 4-1 4Cr5MoSiV1 钢制凸轮轴锻模的热处理工艺

2. 3Cr2W8V 钢制大力钳热锻模的淬火不回火处理

3Cr2W8V 钢模具通常在 500~650℃ 的回火脆性区间回火，因为回火愈充分，韧性愈低，在服役初期往往出现脆性开裂。

根据试验证明，3Cr2W8V 钢淬火态的断裂韧度比回火态的断裂韧度高 1 倍；淬火态或低于 400℃ 回火后的冲击韧度高于 500~650℃ 回火的冲击韧度。因此，未经回火的模具或较低温度回火的模具反而不易出现早期脆性开裂。例如，用批 $\phi 60$ mm 的 3Cr2W8V 钢改锻成的 110 mm×110 mm×160 mm 的大力钳模具，经球化退火并按 1 150℃ 加热，吹风冷却，580℃ 回火 3 次的常规工艺处理后，硬度为 45~47HRC，在摩擦压力机上用以压制 $\phi 20$ mm 的 45 钢钳口时，易出现早期脆性开裂。改用 1 150℃ 加热，吹风冷却，不回火的工艺处理后，模具硬度为 44~45HRC，平均使用寿命可达 1 万次以上。

应当指出的是，未经回火的 3Cr2W8V 钢的抗磨损性和耐热疲劳性远低于回火的抗磨损性和耐热疲劳性。所以，对抗磨损性能和耐热疲劳性要求高的热锻模，不能不回火。

3. 3Cr2W8V 钢制压铸模的离子渗氮处理

为提高压铸模的抗蚀性、耐磨性、抗热疲劳和抗粘附性能，可采用离子渗氮的方法。

离子渗氮渗层的硬度分布曲线比较平稳，不易产生剥落和热疲劳。但对形状复杂的压铸模，难以获得均匀的加热和均匀的渗层，因此不宜采用离子渗氮的方法。

离子渗氮前模具的预处理条件对渗层质量和模具的使用寿命有极大的影响。3Cr2W8V 钢制压铸模在渗氮前的预处理状态，以淬火最好，调质次之，退火的效果最差。

经淬火或调质的压铸模在离子渗氮后可极大地提高脱模性和抗粘模能力。

离子渗氮温度以 450~520℃ 为宜，经处理 6~9 h 后，渗氮层可达 0.2~0.3 mm。温度过低，渗层过薄，温度过高，则表层易出现疏松层和降低抗粘模能力。

离子渗氮的渗层厚度以 0.2~0.3 mm 为宜。磨损后的离子渗氮模，经修复和再次离子渗氮后可重新投入使用，从而可极大地提高模具总的使用寿命。

4. 综合实例

表 4-48 给出了热作模具选材、强化处理与使用寿命关系的实例，以供参考。

表 4-48 热作模具的选材、强化处理与使用寿命的关系

模具	材料	原热处理工艺	失效方式与使用寿命	现热处理工艺	失效方式与使用寿命
热冲头	3Cr2W8V 钢	1 050~1 100 °C 淬火, 630 °C 回火 2 次, 45~47HRC	200~350 件, 软化变形和开裂	1 275 °C 加热, 300~320 °C 等温淬火, 46~48HRC	1 500~2 200 件, 不再开裂
热挤压模具	3Cr2W8V 钢	1 050 °C 淬火, 620 °C 回火 2 次, 45~48HRC	1 200 件, 早期开裂	1 200 °C 淬火, 680 °C 回火 2 次, 40~45HRC	3 300 件, 变形和疲劳
热挤压冲头	3Cr2W8V 钢	1 050 °C 淬火, 620 °C 回火	200 件, 开裂	改用 4Cr3Mo2NiVNb 钢, 1 150 °C 淬火, 2 次回火, 39~42HRC	650~700 件
热冲头	3Cr2W8V 钢	1 100 °C 淬火, 600 °C 回火 2 次, 47~51HRC	250 件, 开裂	1 200 °C 淬火, 680 °C 回火, 40~45HRC	500 件, 变形及磨损
精锻伞齿轮模	3Cr2W8V 钢	常规工艺处理	使用寿命低, 开裂	1 150 °C 和 1 050 °C 两次加热淬火, 600 °C 回火 2 次, 45~48HRC	500 件
粗锻伞齿轮模	3Cr2W8V 钢	常规工艺处理	2 000 件, 齿形堆塌	1 150 °C 加热, 400 °C 等温淬火, 660 °C 回火 2 次, 渗氮, 39~42HRC	>5 000 件
半轴摆模	3Cr2W8V 钢	1 075 °C 淬火, 600 °C 回火 3 次, 49~51HRC	1 200 件, 开裂	900 °C 淬火, 600 °C 回火 2 次, 44~46HRC	>4 000 件
锤锻模	5CrMnMo 钢	860~880 °C 淬火, 燕尾油淬空冷, 480 °C 回火, 32~35HRC	2 500 件, 燕尾开裂	880 °C 加热, 450 °C 等温淬火, 480 °C 回火	6 000~10 000 件, 燕尾不再开裂
齿轮毛坯半精锻模	5CrMnMo 钢	840 °C 淬火, 500 °C 回火, 44~47HRC	414 件, 热疲劳	改用 H13 钢	1 780 件, 热磨损
精锻齿轮模具	4CrMoSiV 钢	48HRC	半轴: 715~1 700 件 行星: 2 530~2 400 件	半轴: 改用 5Cr4W5Mo2V 钢, 1 140 °C 淬火, 600~610 °C 回火 2 次 49HRC 行星: 改用 3Cr3Mo3W2V 钢, 1 120 °C 淬火, 550 °C 回火 2 次, 48HRC	1 449~3 427 件 5 349~5 475 件

思考题

1. 归纳热作模具的工作条件及失效形式。
2. 热作模具的失效抗力指标主要有哪些？它与材料性能间的关系如何？
3. 常用锤锻模用钢有哪些？试比较 5CrNiMo 与 45Cr2NiMoVSi 钢的性能特点和应用范围有什么区别？
4. 确定锤锻模材料和工作硬度的依据是什么？
5. 5CrNiMo、5CrMnMo 钢制锤锻模淬、回火时应注意哪些问题？
6. 常用热挤压模具钢有哪些系列？举出各系列的典型钢种，并比较铬钢、铬钼钢和铬钨钼钢在性能、应用上的区别。
7. 有哪些基体钢可用于制作热作模具，其性能特点是什么？
8. 热挤压模的预先热处理方法有哪些？各用于什么场合？
9. 热挤压模对材料性能有哪些要求？其淬回火工艺制定应注意哪些问题？
10. 压铸模与其他热作模具相比，其工作条件对材料的性能要求有什么不同？
11. 比较压铸模用钢 3Cr2W8V 与 4Cr5MoSiV 的性能特点。
12. 选择压铸模材料的主要依据有哪些？
13. 分析 3Cr2W8V 钢制压铸模的热处理工艺特点。
14. 有哪些铜合金可以制造压铸模？与热作模具钢相比有哪些优点？
15. 热作模具钢的强韧化处理工艺方法有哪些？并分析其原理。

第5章

模具表面强化处理技术

合理地选用模具材料并采用恰当的热处理工艺，可以改善模具的使用性能，大幅度地提高模具的使用寿命，获得显著的经济效益。但是模具在使用过程中除因脆断损坏外，大多因表面疲劳或磨损而失效，或因高温氧化以及介质腐蚀而不能继续使用。这是因为模具在承受外力时，通常表面受力形式最复杂（例如弯曲、扭转、冲击、接触应力，以及在这些应力状态下的疲劳强度、滚动或滑动摩擦及介质腐蚀或应力腐蚀），因零件结构及工作条件等因素所产生的应力集中，也大多发生在表面，这就使模具表面比其心部承受更严酷的工作条件，从而导致模具表面的早期破坏。

由于模具表面和心部的性能要求不同，很难通过材料本身的性能或模具整体热处理来实现。采用不同的表面处理技术，则能有效地提高模具表面的耐磨性、耐蚀性、抗咬合、抗氧化、抗热粘着、抗冷热疲劳等性能，同时能使材料心部保持原有的强韧性。因此近年来表面强化处理技术得到越来越广泛的应用。

模具表面强化处理技术不仅能提高模具的表面耐磨性及其他性能，而且能使模具内部保持足够的韧性，这对改善模具的综合性能、节约合金元素、大幅度降低模具制造成本、充分挖掘模具材料的潜力以及更好地利用新材料都是十分有效的。生产实践表明：表面强化处理是提高模具质量，延长其使用寿命的重要措施。如 3Cr2W8V 钢挤压模的平均寿命为每副模生产 3 t 铝合金型材，而经气体氮碳共渗处理后可提高到每副模具生产 6 t 以上铝合金型材。

模具表面强化处理按其原理可分为化学热处理、表面涂覆处理和表面加工处理。表面强化处理的作用及应用见表 5-1。表面强化处理具体分类见表 5-2。对各种表面强化方法的比较见表 5-3。

表 5-1 表面强化处理的作用及应用

处理工艺	作用	应用举例
渗碳	提高硬度（达 62~63HRC）、耐磨性和耐疲劳性	挤压模、穿孔工具等
渗氮	提高硬度、耐磨性、抗粘附性、热硬性、耐疲劳性及抗蚀性（但生产周期长，表面有白色的脆化层）	挤压工具、冷挤模等

续表

处理工艺	作用	应用举例
离子渗氮	可消除表面白色的脆化层, 耐磨性、耐疲劳性和变形均优于氮化	挤压模、挤压工具等
碳氮共渗	比渗碳和渗氮有更高的硬度、耐磨性、耐疲劳性、热硬性和热强性, 且生产周期短	成形模、冷挤模、热挤模和模架等
氮碳共渗	提高硬度 (600HV 以上)、耐磨性、抗粘附性、抗蚀性和耐热疲劳性	冷挤模、拉深模、挤压模穿孔针
渗硼	具有极好的表面硬度、耐磨性、抗粘附性、抗氧化性、热硬性和良好的抗蚀性	拉深模、挤压模
碳氮硼三元共渗	提高硬度、强度、耐磨性、耐疲劳性和抗蚀性	挤压模、冲头针尖
盐浴覆层 (TD 处理)	提高硬度、耐磨性、抗粘附性、耐热疲劳性、抗蚀性及抗氧化性等	挤压模
渗铬	提高硬度、耐磨性、抗粘附性、抗氧化性、抗蚀性	拉深模、挤压模
镀硬铬	降低表面粗糙度, 提高表面硬度、耐疲性及抗蚀性	挤压模、拉深模等
钴基合金堆焊	提高硬度、耐磨性及热硬性	挤压模冲头、芯杆针尖
电火花表面强化	提高硬度、强度、耐磨性、耐疲劳性及抗蚀性	热挤压模、冷挤压模
喷丸处理	提高硬度、强度、耐磨性、耐疲劳性及抗蚀性	热挤模、冲头针尖

表 5-2 表面强化处理具体分类

分类 项目	表面热处理		表面处理		表面加工 强化处理
	化学热处理	表面淬火	表面化学处理	表面覆层处理	
处理方式	将模具加热到一定温度与介质起化学作用, 使其表面按需要渗入一定量的其他元素, 从而改变表层的化学成分、组织和性能	通过一定的热处理方式, 使表面层组织发生变化, 从而获得与心部不同的组织和性能	介质与工件产生化学反应, 在工件表面形成一层与基体不同的非金属材料层	通过物理覆盖、沉积等方式在工件表面覆盖一层与基体不同的金属或化合物	通过一定的加工方式在工件表面上产生加工强化层
处理目的	改变表面层化学成分和组织结构, 以提高表面力学和物化性能	通过改变表层的结构来强化表层	利用表层物质起保护基体和增加美观作用, 并提高表层的物化性能	保护基体和提高表层的力学和理化性能	强化表面层、产生残余应力、消除表面缺陷、降低表面粗糙度

续表

分类 项目	表面热处理		表面处理		表面加工 强化处理
	化学热处理	表面淬火	表面化学处理	表面覆层处理	
对尺寸的影响	处理后基本不增加工件尺寸（热处理变形除外）	处理后基本不增加工件尺寸（热处理变形除外）	尺寸略有增加	尺寸有较大增加	尺寸基本上增大
表层与基层的关系	表面层与基体分界面不明显，有一个较为平缓的过渡层	表面层与基体分界面不明显，有一个较为平缓的过渡层	分界面较为明显，基本上没有明显的过渡层	分界面较为明显，基本上没有明显的过渡层（电火花表面强化除外）	分界面较为明显，基本上没有明显过渡层
常用于模具的表面强化工艺	渗碳、渗氮、碳氮共渗、氮碳共渗、渗铬、渗硼、碳氮硼三元共渗、铬铝硅三元共渗	火焰淬火、感应加热淬火、电解液表面加热淬火	渗氮、渗硫、磷化	堆焊、镀硬铬、碳化钛沉积、电火花表面强化	喷丸

表 5-3 各种表面强化方法比较

方法		耐蚀	耐磨	方法	装饰	耐蚀	耐磨	抗氧化
物理方法	淬火（高频、电解液、火焰）	×	○	热浸镀	△	○	×	×
	加工硬化（喷丸）	×	○	喷镀	△	○	×	×
				熔盐浸镀	△	○	○	○
化学方法	渗碳、渗氮	×	○	涂覆法	○	○	○	○
	渗硼	△	○	物理气相沉积（PVD）	○	○	○	○
	渗硫	×	△	化学气相沉积（CVD）	△	○	○	○
	渗金属	×	○	电镀	○	○	△	×
				化学镀	○	○	×	×
				阳极氧化	○	○	×	×
				电化学处理	○	○	×	×

注：○—有效。

△—一定条件下有效。

×—无效。

5.1 模具表面化学热处理强化

模具表面化学热处理是指将模具零件置于特定的活性介质中加热和保温，使一种或几种

元素渗入模具零件表面，以改变表层的化学成分、组织，使表层具有与心部不同的力学性能或特殊的物理、化学性能的热处理工艺。化学热处理的种类很多，一般都以渗入的元素来命名，根据渗入元素的不同，模具的化学热处理可分为渗碳、渗氮、碳氮共渗、氮碳共渗、渗硫、硫氮共渗、渗硼、碳氮硼三元共渗、硫氮碳三元共渗、渗金属（渗铝、渗铬、渗钒、渗锌或多元金属共渗）等。常用化学热处理方法及作用见表 5-4。

表 5-4 常用化学热处理方法及作用

方 法	渗入元素	作 用
渗碳	C	提高模具的耐磨性、硬度及疲劳强度
渗氮	N	提高模具的耐磨性、硬度、疲劳强度及耐蚀性
碳氮（氮碳）共渗	C、N	提高模具的耐磨性、硬度及疲劳强度
渗硫	S	减摩，提高抗咬合性能
硫氮共渗	S、N	减摩，提高抗咬合性能、耐磨性，改善疲劳性
硫碳氮共渗	S、C、N	减摩，提高抗咬合性、耐磨性，改善疲劳性
渗铝	Al	提高模具抗氧化及抗含硫介质腐蚀的能力
渗铬	Cr	提高模具抗氧化、抗腐蚀能力及耐磨性
渗硼	B	提高模具耐磨性、硬度及抗腐蚀性
渗硅	Si	提高工件抗腐蚀性能
渗锌	Zn	提高工件抗大气腐蚀的能力

5.1.1 模具零件的渗碳

渗碳是目前模具表面热处理中应用最广泛的一种化学热处理方法。其工艺特点是将低碳钢或低碳合金钢模具在增碳的活性介质（渗碳剂）中加热到 850~950℃，保温一定时间，使碳原子渗入表面层，随后淬火并低温回火使模具表层与心部具有不同成分、组织和性能。

模具零件经渗碳后其表面硬度和耐磨性大大提高，同时由于心部和表面的含碳量不同，硬化后的表面获得有利的残余压应力，从而进一步提高渗碳工件的弯曲疲劳强度和接触疲劳强度。根据渗碳介质的物理状态不同，可将渗碳方法分为固体渗碳、气体渗碳、真空渗碳和离子（CD）渗碳等。

1. 固体渗碳

是将工件置于填满木炭和碳酸钡的密封箱内进行（见图 5-1），渗碳剂是木炭和碳酸钡的混合物。其中木炭起渗碳作用，碳酸钡起催渗作用。渗碳温度一般为 900~950℃。在此高温下，木炭与空隙中的氧气反应形成 CO_2 ， CO_2 与 C 反应形成不稳定的 CO，CO 在工件表面分解得到活性碳原子，即可渗入工件表面形成渗碳层。

2. 气体渗碳

采用液体或气体碳氢化合物作为渗碳剂。国内应用最广的气体渗碳方法是滴注式气体渗碳，其方法是將工件置于密封的加热炉中（见图 5-2），滴入煤油、丙酮、甲苯及甲醇等有机液体，这些渗碳剂在炉中形成含有 H_2 、 CH_4 、CO 和少量 CO_2 的渗碳气氛，钢件在高温

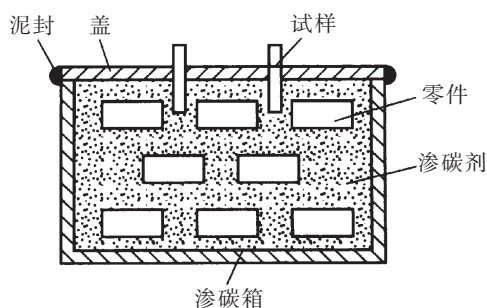


图 5-1 固体渗碳装箱示意

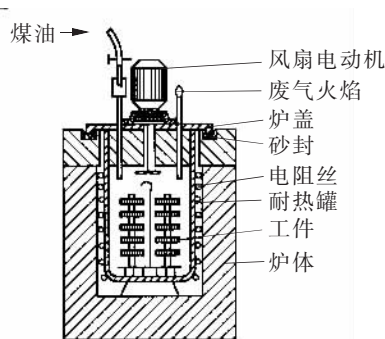


图 5-2 滴注式气体渗碳炉工作示意

下与气体介质发生反应。工件经渗碳后必须进行淬火才能获得高硬度、高耐磨性。渗碳主要用于承受大冲击、高强度、使用硬度为 58~62HRC 的小型模具。

1) 气体渗碳工艺操作

以某厂井式气体渗碳工艺为例，适用于 20Cr、20CrMnTi 等钢制造的模具零件，其渗层深度要求为 1.1~1.3 mm。渗碳剂由煤油直接滴入。渗碳过程由排气、强烈渗碳、扩散及降温 4 个阶段组成，如图 5-3 所示。

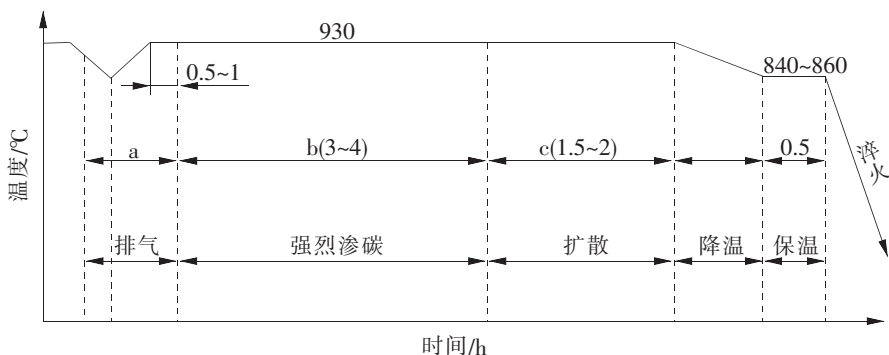


图 5-3 井式气体渗碳工艺

(1) 排气。模具零件入炉后必将引起炉温降低，同时带入大量空气。排气阶段的作用在于恢复炉温到规定的渗碳温度，在此阶段应尽快排除炉内空气。通常采取加大渗碳剂流量以使炉内氧化性气氛迅速减少。排气时间往往在仪表温度达到渗碳要求的温度后尚需延长 30~60 min，以使炉气成分达到要求，并使炉内温度均匀及工件烧透。排气不好会造成渗碳速度慢、质量不合格等缺陷。

(2) 强烈渗碳。排气阶段结束后即进入强烈渗碳阶段。其特点是渗碳剂滴量较多或气氛较浓，使工件表面碳浓度高于最后要求，增大表面的碳浓度梯度，以提高渗碳速度。强烈渗碳时间主要取决于层深要求。

(3) 扩散。渗碳进入扩散阶段是以减少渗碳剂滴量或浓度为标志的。此时炉气渗碳能力降低, 表层过剩的碳继续向内部扩散, 最后达到要求的深度及合适的碳浓度分布。扩散阶段所需时间由中间试棒的渗碳层深度确定。

(4) 降温。对于可直接淬火的零件应随炉冷至适宜的淬火温度(一般在 $840\sim 860\text{ }^{\circ}\text{C}$), 并保温 $15\sim 30\text{ min}$ 使零件内外温度均匀后出炉淬火; 对于需重新加热淬火的零件, 可自渗碳温度出炉入缓冷罐。

2) 气体渗碳操作要点

为了保证渗碳质量, 模具零件在进入渗碳炉前应清除表面污垢、铁锈及油脂等。常用热水或含 Na_2CO 的水溶液作为清洗介质。对锈蚀工件可采用喷砂清理。

零件装在料筐或挂具上, 彼此间应留出 $5\sim 10\text{ mm}$ 的间隙, 以保证渗碳介质能与零件充分接触和循环流通。渗碳炉密封性要好, 并始终保持炉内气压为正压力(一般在 $196.1\sim 588.4\text{ Pa}$)。风扇应始终逆转, 使零件能经常与新鲜气氛接触。排气口要点燃, 以免废气污染空气, 并便于判断炉内工作情况, 有条件的应经常进行炉气分析。

根据生产经验, 用煤油渗碳时炉内气氛成分应控制在下列范围: $w(\text{C}_n\text{H}_{2n+2}) 1.0\%\sim 1.5\%$, $w(\text{C}_n\text{H}_{2n}) \leq 0.6\%$, $w(\text{CO}) 20\%\sim 35\%$, $w(\text{H}_2) 50\%\sim 65\%$, $w(\text{CO}_2) \leq 0.5\%$, $w(\text{O}_2) \leq 0.5\%$, N_2 余量。在这种气氛下对 20CrMnTi 等钢件渗碳后表层含碳量(质量分数)在 $0.8\%\sim 1.0\%$ 之间, 而且炭黑很少。

零件出炉时间根据随炉试样的层深检查结果决定。试样材料应与零件相同。对于不同钢种或层深者不宜同炉渗碳。另外对新渗罐、新的工夹具或久未使用的炉罐应预先渗碳。在正常生产情况下, 停炉再升温生产时也应进行炉腔渗碳。

3) 渗碳零件淬火

渗碳只能改变模具零件表面的化学成分, 而零件表面的最终强化则必须经过适当的热处理。通过热处理使零件的高碳表层获得细小的马氏体、适量的残留奥氏体和弥散分布的粒状碳化物; 零件的心部由低碳马氏体、托氏体、索氏体等组织组成。渗碳后可采用不同的热处理方法: 直接淬火、一次淬火、二次淬火等。

(1) 直接淬火。直接淬火是指工件渗碳后随炉降温或出炉预冷到高于 Ar_1 或 Ar_3 温度($760\sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$), 然后直接淬火的方法, 淬火后在 $150\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回火 $2\sim 3\text{ h}$ 。随炉降温或出炉预冷的目的是为了减少淬火内应力, 从而减小工件的变形。同时, 还使高碳的奥氏体中析出一部分碳化物, 降低奥氏体中的碳浓度, 从而减少淬火后的残留奥氏体, 获得较高的表面硬度。

直接淬火的优点是: 减少加热和冷却的次数、简化操作、生产效率高, 还可减少淬火变形及表面氧化和脱碳倾向。直接淬火适用于 20CrMnTi 等本质细晶粒钢, 不适用于本质粗晶粒钢及渗碳时表面碳浓度高的零件。

(2) 一次淬火。模具零件渗碳后立即出炉或降温到 $860\sim 880\text{ }^{\circ}\text{C}$ 出炉, 在冷却坑内冷却

至室温,然后再重新加热淬火。适用于本质粗晶粒钢零件,不适用于直接淬火零件。

(3) 二次淬火。对本质粗晶粒钢或使用性能要求很高的零件,要采用二次淬火或一次正火加一次淬火,以保证模具零件心部和渗层都达到高的性能要求。第1次淬火(或正火)温度碳钢为 $880\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$,合金钢为 $850\sim 870\text{ }^{\circ}\text{C}$,目的是细化心部组织,并消除表面网状碳化物。第2次淬火温度则根据高碳的表层来决定,一般选择在稍高于 A_{c1} 的温度($770\sim 820\text{ }^{\circ}\text{C}$)。二次淬火,有可能出现较大的淬火缺陷,工艺较复杂,生产周期长,故仅用于对表面层耐磨性、疲劳强度和心部韧性等要求较高的重载荷零件。

3. 真空渗碳

将被处理的模具工件在真空中加热到奥氏体化,并在渗碳气氛中渗碳,然后扩散、淬火。由于渗碳前是在真空状态下加热,模具钢的表面很干净,非常有利于碳原子的吸附和扩散。与气体渗碳相比,真空渗碳的温度高,渗碳时间可明显缩短。

4. CD 渗碳

CD 渗碳法采用含有大量强碳化物形成元素(如 Cr、Ti、Mo、V)的模具钢在渗碳气氛中加热,在碳原子自表面向内部扩散的同时渗层中沉淀出大量弥散合金碳化物,弥散碳化物含量达50%以上,呈细小均匀分布,淬火、回火后可获得很高的硬度和耐磨性。

经 CD 渗碳的模具心部没有像 Cr12 型模具钢和高速钢中出现粗大共晶碳化物和严重的碳化物偏析,因而其心部韧性比 Cr12MoV 钢提高3~5倍。实践表明,CD 渗碳模具的使用寿命大大超过 Cr12 型冷作模具钢和高速钢。

5. 渗碳工艺

渗碳工艺应用于模具表面强化主要体现在两个方面。

1) 应用于低、中碳钢的渗碳

塑料制品模具的形状复杂,表面粗糙度要求高,常用冷挤压反印法来制造模具的型腔。因此,可采用含碳量较低、冷塑性变形性能好的塑料模具钢,如 20、20Cr、12CrNi3A 钢以及美国的 P2、P3、P4、P5 钢等。先将退火状态的模具钢冷挤压反印法成型,再进行渗碳或碳氮共渗处理。

2) 应用于部分热作模具及冷作模具

可提高模具表面的硬度和使用寿命。例如,3Cr2W8V 钢热挤压模具,先渗碳再经 $1140\sim 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 淬火, $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回火2次,表面硬度可达 $58\sim 61\text{HRC}$,使热挤压有色金属及其合金模具的使用寿命提高1.8~3.0倍。

5.1.2 模具零件的渗氮

渗氮(也称为氮化)是将模具零件置入含有活性氮原子的气氛中,加热到一定温度,保温一定时间,使氮原子渗入工件表面形成氮化物的热处理工艺。渗氮的目的是提高工件的表面硬度、耐磨性、疲劳强度及耐蚀性能。渗氮能使模具零件获得比渗碳更高的表面硬度、耐

磨性能、疲劳性能和热硬性。渗氮也可以提高工件的抗腐蚀性能。因为模具在渗氮前一般要进行调质处理，为不影响模具的整体性能，渗氮温度一般不超过调质处理的回火温度，一般为 500~570℃，渗氮后模具零件变形较小。

渗氮方法分为气体渗氮、液体渗氮、固体渗氮、离子渗氮等。常规气体渗氮周期长、生产率低、费用高、对材料要求严格，因而使其在应用上受到一定的限制；液体渗氮温度低、时间短、模具变形小，但盐浴或盐浴反应产物有一定毒性，要考虑盐浴的危害及防止措施。目前有许多新的工艺已经日趋成熟，正在生产中被广泛应用，例如真空渗氮、电解催渗氮等。

为了使渗氮有较好的效果，模具必须选择含有 Al、Cr 和 Mo 元素的钢种，以便渗氮后形成 AlN、CrN 和 Mo₂N，没有这些元素则渗氮层硬度低，不足以提高模具的耐磨性。模具常用钢种有 Cr12、Cr12MoV、3Cr2W8V、38CrMoAl、4Cr5MoSiV、4Cr5W2VSi、5CrMnMo、5CrNiMo 等。

渗氮一般是模具在整个制造过程中的最后一道工序，处理后只需少量的精磨或研磨加工。渗氮前一般要求先进行调质处理，以获得回火索氏体组织。渗氮层具有优良的耐磨性，对冷、热模具都适用。例如 3Cr2W8V 钢压铸模、挤压模等经调质并在 520~540℃ 渗氮后，使用寿命比未经渗氮的模具提高 2~3 倍。

一般渗氮气体采用脱水氨气。下面简要介绍气体渗氮和离子渗氮这两种方法。

1. 气体渗氮

通常在井式炉内进行，方法是把已除油净化的工件放在密封的炉内加热，并通入氨气。氨气在 380℃ 以上就能分解出活性氮原子，活性氮原子被钢表面吸收，形成固溶体和氮化物，氮原子逐渐向里扩散，从而获得一定深度的渗氮层。常用的气体渗氮温度为 550~570℃，渗氮时间取决于所需的渗氮层深度。一般渗氮层深度为 0.4~0.6 mm，渗氮时间 40~70 h，因此气体渗氮的生产周期很长。

1) 渗氮前的准备

在渗氮工件的整个制造过程中，渗氮往往是最后一道工序。为使工件心部具有必要的性能，消除加工应力，减小渗氮过程的变形，以及为获得最好的渗氮层性能作组织准备，模具在渗氮前一般都需要进行预备热处理，即进行调质处理，以获得回火索氏体组织。由于热作模具钢的渗氮仅是提高表面耐磨性，为了不影响模具的整体性能，渗氮温度一般不超过调质处理的回火温度，一般为 500~570℃。

对形状复杂的精密模具，在机械加工后应进行 1~2 次消除应力处理以减少渗氮过程中的变形。处理温度应低于回火温度，以免降低模具硬度。

脱碳层将导致渗氮后脆性增加及硬度不足等缺陷，为此模具在预备热处理前应有足够的加工余量，以保证机械加工时将脱碳层全部去除。

为使渗氮过程顺利进行，模具在装炉前要用汽油或酒精等去油、脱脂，经过清洗后表面

不能有锈蚀及脏物。如果模具某些部位不需渗氮，可用涂料方法防渗。

为了检查渗氮质量可在渗氮罐的适当部位放置与模具同材质，并经过预备热处理的试样，便于检查渗氮层深度、表面硬度和金相组织。

2) 渗氮介质及设备

渗氮用氨气采用工业合成液氨。渗氮可在密封的箱式或井式炉中进行。氨气由液氨瓶经过流量计、干燥箱进入渗氮罐。渗氮罐要求密封，渗氮罐内温度及气流应尽可能均匀。

用氨气分解率测定计测量废气中氮和氢的体积与废气总体积之比，用以表示氨分解的程度。

3) 渗氮工艺参数

渗氮温度一般在 $500\sim 570\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，渗氮时间根据模具渗氮层深度的要求确定。根据经验，渗氮温度为 $510\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，渗层深度 $\leq 0.4\text{ mm}$ ，38CrMoAl 钢的渗氮速率为 $0.01\sim 0.015\text{ mm/h}$ 。从生产实践中不难看出，温度对渗氮层表面硬度及层深的影响显著。温度越低，渗氮层表面硬度越高，渗层越浅，变形量越小；反之温度越高，渗氮层硬度降低，层深增加，变形量增大。同时渗氮后的硬度不仅取决于温度，还与氨的分解率有关。渗氮时间取决于所要求的渗氮深度及渗氮温度。由于渗氮是在较低温度下进行的，渗氮速率很低。与渗碳相比，渗氮层深度浅（一般在 0.5 mm 左右），过深的渗氮层深度需要更长时间的渗氮。

4) 热处理生产中常用的 3 种渗氮方法

(1) 一段渗氮法，又称等温渗氮法。在渗氮过程中渗氮温度和氨分解率保持不变，渗氮温度一般为 $450\sim 530\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。适用于要求高硬度、低变形的浅层渗氮，渗层含氮量分布变化明显。

(2) 二段渗氮法，第 1 阶段采用较低的渗氮温度和较低的氨分解率，使工件表层先形成弥散度高的高硬度合金氮化物层；第 2 阶段再稍稍提高渗氮温度和氨分解率，使氮的扩散速度加快，以便缩短渗氮时间。二段渗氮法处理的工件变形稍大，硬度梯度较平缓，但渗速较快、生产周期较短。

(3) 三段渗氮法是在二段渗氮法的基础上再增加一个低温阶段，可以适当提高氨分解率以减少模具表层的高氮脆性或者采取与第 1 阶段相同的氨分解率以补充模具表面氮含量的消耗。为了减小渗氮层的脆性，在渗氮结束前 $2\sim 3\text{ h}$ 应进行退氮处理，即将氨分解率提高到 90% 以上。

几种模具钢的气体渗氮工艺规范见表 5-5。

表 5-5 常用化学热处理方法及作用

方法	渗入元素	作用
渗碳	C	提高模具的耐磨性、硬度及疲劳强度
渗氮	N	提高模具的耐磨性、硬度、疲劳强度及耐蚀性

续表

方法	渗入元素	作用
碳氮(氮碳)共渗	C、N	提高模具的耐磨性、硬度及疲劳强度
渗硫	S	减磨, 提高抗咬合性能
硫氮共渗	S、N	减磨, 提高抗咬合性能、耐磨性、改善疲劳性
硫碳氮共渗	S、C、N	减磨, 提高抗咬合性能、耐磨性, 改善疲劳性
渗铝	Al	提高模具抗氧化及抗含硫介质腐蚀的能力
渗铬	Cr	提高模具抗氧化抗腐蚀能力及耐磨性
渗硼	B	提高模具耐磨性、硬度及抗腐蚀性
渗硅	Si	提高工件抗腐蚀性能
渗锌	Zn	提高工件抗大气腐蚀的能力

2. 离子渗氮

离子渗氮是在离子渗氮炉中进行的。在一定的真空度下利用工件(阴极)和阳极间产生的辉光放电现象进行的, 所以又称辉光离子渗氮。将工件置于离子渗氮炉(见图 5-4)中的托盘上, 以工件为阴极, 以炉壁为阳极, 通入 400~750 V 的直流电, 氮气被电离成氮和氢的正离子及电子, 这时工件表面形成一层辉光。具有高能量的氮离子以很大速度轰击工件表面, 将动能转变为热能, 使工件表面温度升高到 450~650 ℃; 同时氮离子在阴极上获得电子后, 还原成氮原子而渗入工件表面, 并向内扩散形成渗氮层。

离子渗氮的主要工艺参数有:

(1) 真空度一般为 1.33~13.3 Pa。

(2) 气体压力常用为 266~798 Pa。

(3) 电流密度为 0.5~5 mA/cm²。

(4) 辉光电压: 加热电压为 550~750V, 保温阶段电压应适当比加热电压略低, 通常为 550~

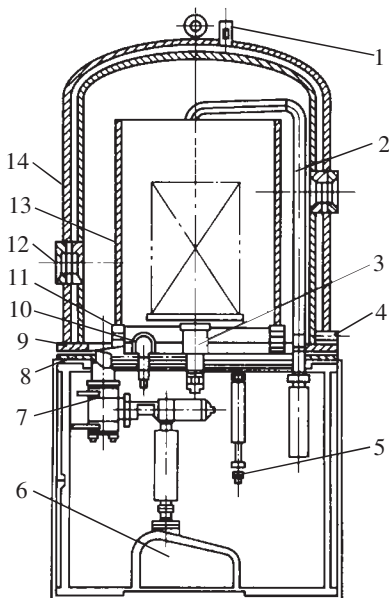


图 5-4 钟罩式离子渗氮炉

1—进水管; 2—进氮管; 3—阴极托盘装置; 4—进水管;
5—电阻真空规管; 6—真空泵; 7—抽气系统; 8—底盘; 9—阳极接线座;
10—屏蔽帽; 11—瓷绝缘子; 12—观察孔; 13—内炉壁阳极; 14—双层炉体

650 V, 形状简单时取 650 V, 形状复杂时取 550 V。

(5) 渗氮温度: 一般取 450~600 °C, 但即使在 400 °C 以下也能进行渗氮处理。

(6) 极间距离: 一般以 30~70 mm 较为合适。

(7) 渗氮时间: 根据渗氮模具材料、渗氮层厚度和硬度选择合适时间。

离子渗氮速度快(获得同样深度的渗层只需气体渗氮时间的 1/4~1/2), 渗层韧性最好、模具变形小, 是目前比较普及的一种渗氮工艺。离子渗氮广泛用于处理热锻模、冷挤压模、压铸模、冷冲模等, 模具使用寿命大大提高。

5.1.3 碳氮共渗与氮碳共渗

模具钢的碳氮共渗是在钢件表层同时渗入碳、氮的热处理过程。但碳氮共渗是以渗碳为主, 而氮碳共渗是以渗氮为主。与单一渗碳相比, 碳氮共渗有许多优点, 主要是提高了模具工件的表面硬度、耐磨性和疲劳极限; 并且由于碳氮共渗温度较渗碳温度低, 因而渗碳过程中奥氏体晶粒较细小, 共渗后一般可直接淬火。其碳氮共渗简化了生产工序, 节约能源并减少了模具的变形。

碳氮共渗根据使用介质物理状况的不同, 可以分为气体碳氮共渗、液体碳氮共渗、固体碳氮共渗 3 类; 根据共渗温度的不同, 又可分为低温 (500~600 °C)、中温 (700~880 °C) 和高温 (900~950 °C) 3 种。其中低温碳氮共渗即目前广泛应用的软氮化法其表层主要以渗氮为主, 用以提高模具零件的表面耐磨性和抗咬合性。中温碳氮共渗, 其目的与渗碳相似, 主要是提高模具零件的表面硬度, 与渗碳相比, 将使零件具有更好的耐磨性和抗疲劳性能。高温碳氮共渗, 以渗碳为主。中温气体碳氮共渗和低温碳氮共渗在我国热处理厂家中应用较广。

1. 气体碳氮共渗

生产中应用较广的是中温气体碳氮共渗, 其共渗的介质是渗碳和渗氮用的混合气体。生产中最常用的方法是在井式气体渗碳炉中滴入煤油(甲苯或丙酮等), 使其热分解出渗碳气体, 同时向炉中通入渗氮用的氨气。在共渗温度下, 煤气与氨气除了单独进行渗碳和渗氮作用外, 它们相互之间还可以发生化学反应产生活性碳、氮原子。此外, 有的工厂采用渗碳富化气(甲烷、丙烷、城市煤气等)+氨、三乙醇胺、丙酮+甲醇+尿素等作为共渗剂。

气体碳氮共渗所用的钢种大多为低碳或中碳的碳钢及合金钢, 中温共渗温度常采用 820~870 °C。气体碳氮共渗的碳、氮含量主要取决于共渗温度。共渗温度越高, 共渗层的含碳量越高, 含氮量越低; 反之, 共渗温度越低, 共渗层的含碳量越低, 含氮量越高。

气体碳氮共渗的主要特点是:

(1) 气体碳氮共渗的力学性能综合了渗碳和渗氮的优点。与渗碳相比表面硬度高、耐磨性好, 同时还具有一定的抗蚀性, 由于共渗层存在残余压应力而提高了钢的疲劳极限; 与渗氮相比, 共渗层深度深, 表面脆性小。

(2) 由于氮的渗入提高了渗层的淬透性, 共渗后可用比渗碳温度低及较缓冷速介质淬火, 减少了模具的变形, 由于奥氏体晶粒比渗碳细, 提高了模具钢的心部韧性。

(3) 气体碳氮共渗速度大于单独渗碳或单独渗氮的速度, 缩短了生产周期。

碳氮共渗适用于基体具有良好韧性, 而表面硬度高、耐磨性好的模具零件, 如塑料模及冲裁模中的凸模及凹模等零件。

2. 氮碳共渗 (软氮化)

生产上把以渗氮为主的气体氮碳共渗工艺称为气体软氮化。常用的共渗介质有氨加醇类液体 (甲醇、乙醇) 以及尿素、甲酰胺和三乙醇胺等, 它们在一定温度下会发生热分解反应, 产生活性氮、碳原子。活性氮、碳原子被工件表面吸收, 通过扩散渗入工件表层, 从而获得以氮为主的氮碳共渗层。气体氮碳共渗的常用温度为 $560\sim 570\text{ }^{\circ}\text{C}$, 共渗时间为 $2\sim 5\text{ h}$ 。图5-5所示为 $3\text{Cr}2\text{W}8\text{V}$ 钢和 $\text{Cr}12\text{MoV}$ 钢模具进行尿素气体低温氮碳共渗的工艺曲线。

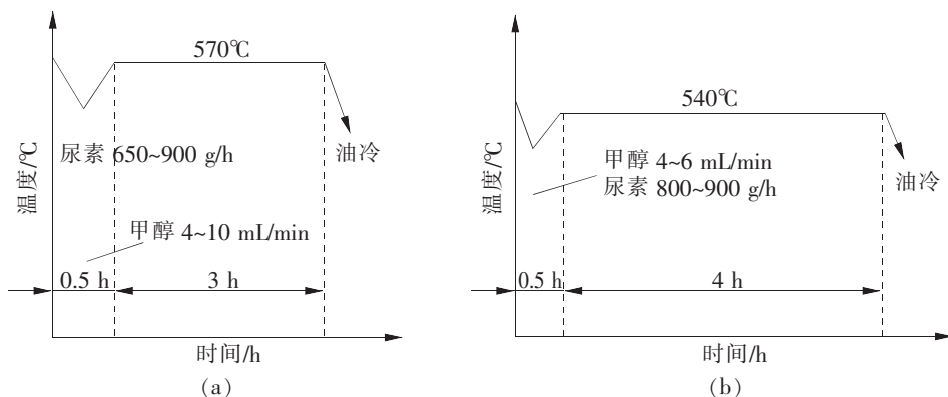


图 5-5 尿素气体低温氮碳共渗工艺曲线

(a) $3\text{Cr}2\text{W}8\text{V}$ 钢; (b) $\text{Cr}12\text{MoV}$ 钢

氮碳共渗不但赋予工件耐磨损、耐疲劳、抗咬合和擦伤的性能, 而且处理时间短、温度低、变形小、不受钢种限制, 适用于碳素钢、合金钢、铸铁及粉末冶金等材料, 可以对模具、量具、刀具以及耐磨零件进行处理, 并获得良好的效果。

气体软氮化的工艺参数是软氮化温度和时间以及渗入介质的活性和加入量, 这些参数同样根据模具的技术要求来选择。软氮化的温度通常为 $530\sim 580\text{ }^{\circ}\text{C}$, 在 $570\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 氮在 α 相中具有最大溶解度。对于如高速钢和高铬模具钢, 为保持工件整体的强度和热硬性, 软氮化温度不能超过其回火温度。软氮化时间在 $1\sim 6\text{ h}$ 范围内。

软氮化后的工件一般采用快冷 (油冷)。快冷不仅使渗氮件表面色泽好, 而且能进一步提高零件的疲劳强度。对变形要求小的工件, 软氮化后应当缓冷。目前, 热处理厂气体软氮化的介质主要是: 50% 氨气 + 50% 吸热型气体。

5.1.4 渗硫及硫氮共渗

1. 渗硫

模具渗硫具有摩擦因数小、耐磨性好、抗咬合性高、抗擦伤力强等特点。渗硫方法可按介质的物理状态分为熔盐渗硫和气体渗硫，目前在生产中应用最多的是低温盐浴电解渗硫，模具淬火后经低温盐浴电解渗硫后仍能保持高硬度，模具变形较小。

2. 硫氮共渗

硫氮共渗是提高模具钢、高速钢、结构钢零件表面耐磨性的一种低温化学热处理工艺，低温硫氮共渗在渗氮炉内进行，渗剂为氨（体积分数为 30%~50%）和硫化氢（体积分数为 0.02%），共渗温度 540~560 °C，共渗时间为 1~3 h。此工艺在模具上使用后模具的使用寿命有明显提高。

5.1.5 渗硼处理

渗硼可以使模具表面获得很高的硬度（1 500~2 000HV），因而能显著地提高模具的表面硬度、耐磨性和耐蚀能力，是一种提高模具使用寿命的有效方法。例如 Cr12MoV 钢制冷镦六角螺母凹模，经一般热处理后使用寿命为 3 000~5 000 件，经渗硼处理后，可提高到 50 000~100 000 件。另外，渗硼层热稳定性好，在 800 °C 以下能保持硬度高，耐腐蚀性能和抗氧化性能较好。

按所用介质的物理状态，渗硼可分为固体渗硼（粉末法）、盐浴渗硼法、膏剂渗硼、气体渗硼和电解渗硼等。

1. 固体渗硼法（粉末法）

把工件埋在含硼的粉末中，并在大气、真空或保护气氛条件下加热至 850~1 050 °C，保温 3~5 h，可获得 0.1~0.3 mm 厚的渗层。

渗硼剂可以用无定形硼、硼铁、硼氟酸钠、碳化硼、无水硼砂等含硼物质配制适量的氧化铝和氯化氢等制成。也可把渗硼剂喷于工件上或制成膏状涂敷在工件表面，然后用感应加热使之在短时间内扩散，获得一定的硼化物渗层。

固体渗硼的设备较为简便，适于处理大型模具。固体渗硼的缺点是：渗硼速度较慢；碳化硼、硼铁粉等价格昂贵；热扩散时间较长，且温度高，渗层浅等。

2. 盐浴渗硼法

这种方法是把工件放在盐浴中扩散渗硼。盐浴成分有不同组合：在无水硼砂中加入碳化硼或硼化铁，在 900~1 000 °C 下保温 1~5 h，得到 0.06~0.35 mm 的渗层；在熔融的硼砂中加入氯化钠、碳酸钠或碳酸钾，在 700~850 °C 下保温 1~4 h，可得到 0.08~1.5 mm 的渗层；在氯化钡及氯化钠中性盐浴中加入硼铁或碳化硼，在 900~1 000 °C 下保温 1~3 h，可得到 0.06~0.25 mm 的渗层；在以价廉的硼砂为主体的盐浴中加入碳化硅或硅化钙等还

原剂，在 900~1 100 ℃下保温 2~6 h，可得到 0.04~1.2 mm 的渗层。

盐浴渗硼法的优点是：可通过调整渗硼盐浴的配比来控制渗硼层的组织结构、深度和硬度；渗层与基体结合较牢，模具表面粗糙度不受影响；工艺温度较低；渗硼速度较固体渗硼法快；设备和操作简便。此法的缺点为盐浴流动性较差，模具表面残盐的清洗较困难。

目前我国大多数工厂采用盐浴渗硼法，采用硼砂加碳化硅的盐浴较多。钢材的化学成分对渗硼厚度有很大的影响，低碳钢的渗硼速度最快，可通过增加钢的含碳量或合金元素的含量，使渗硼速度减慢。钢中含有铬、锰、钒、钨等元素可使渗硼层富硼化合物相对量增多。此外，模具钢渗硼时硼化物呈针状晶体而楔入基体材料中，与基体间保持较广的接触区域，使硼化物不易剥落。但随钢中含碳量和合金元素的增多，不仅使渗硼层减薄，而且硼化物楔入程度也减弱，渗硼层与基体的接触面因而平坦，结合力变差。一般认为含硅的钢不宜用来制作渗硼的模具，原因是渗硼后在渗层与基体的过渡区存在明显的软带区，其硬度低至 200~300HV，使渗层在使用中极易剥落。

模具渗硼处理的缺点是渗层脆性高，淬火时易产生裂纹。因此，最好是渗硼温度与淬火温度相近，渗硼与淬火相结合进行。模具渗硼工艺及使用寿命情况见表 5-6。

表 5-6 模具渗硼工艺及使用寿命情况

模具名称	材料	渗硼工艺参数	使用寿命	备注
中间拉深凹模	CrWMn、9CrWMn	930~950 ℃，3~4 h	70 000~100 000 次	未渗硼的使用寿命为几千件
冷镦六角螺母用凹模	Cr12MoV	950~960 ℃ 6 h	50 000~100 000 件	未渗硼的使用寿命为 3 000~5 000件
落粒拉深凹、凸模	CrWMn 9CrWMn	900~930 ℃ 2~3 h	70 000~100 000 次	未渗硼的使用寿命为几千件
拉深模	T8A	930~950 ℃ 3~5 h	1 000~10 000 件	未渗硼的使用寿命为几十至 1 000 多件
拉深模	T10A	930~950 ℃ 3~5 h	5 000 件后仍可使用	未渗硼的使用寿命仅为几百件
冷镦模	T8A	930~950 ℃ 3~5 h	100 000 件后仍可使用	未渗硼的使用寿命为 3 000~4 000 件；未渗硼的 Cr12 钢使用寿命 3~5 件
冷挤模	W18Cr4V	970~990 ℃ 5 h	4 000 余件还未损坏	原用 Cr12MoV 钢未渗硼使用寿命 500 件左右

5.1.6 渗金属

将模具钢件加热到适当温度，按工艺需要分别在模具钢的表层渗入钒、铬、钛、铌、钽等，使金属元素扩散并渗入钢件表层的化学热处理工艺称为渗金属。

渗入的金属元素与工件表层中的碳结合形成金属碳化物的化合层，如 (Cr、Fe)₇C₃、

VC、NbC、TaC 等,形成的化合层为过渡层。这类渗层的硬度和耐磨性极高(硬度可达 1 800~3 200HV),工艺简便易行,不需复杂设备,已进入工业应用阶段。渗金属工艺适用于高碳钢,渗入元素大多数为 Cr、V、W、Mo、Ta 等碳化物形成元素。为了获得碳化物层,基体材料碳的质量分数必须超过 0.45%。渗金属的方法可分为直接扩散法和覆层扩散法两大类。直接扩散法和其他化学热处理方法一样,也是将模具直接放置于固体、液体或气体的渗金属介质中进行加热扩散,并形成渗层。覆层扩散法是将欲渗的金属用电镀或喷镀(喷涂)、热浸镀等方法覆盖在金属基体的表面,然后加热扩散形成渗层。模具表面的渗金属通常有渗铬、渗矾等。

1. 渗铬

将铬渗入工件表面的化学热处理工艺称为渗铬,其目的是提高工件的耐磨性、耐蚀性和抗氧化性。例如 9CrWMn 钢制铁壳拉深模(板料为 08F),在没有渗铬时只能拉深几百次或 1 000 次就产生拉毛磨损现象,后经渗铬处理,其使用寿命延长到 10 万次;某厂对高碳钢制造的压弯模、拉深模进行固体包装渗铬,其使用寿命超过原来的 3 倍以上。与电镀铬相比,渗铬层更致密、均匀,并且与基体的结合比较牢固,同时渗铬层的耐蚀性、抗氧化性也比镀铬层好。渗铬方法有固体渗铬法、盐浴渗铬法和气体渗铬法等。在模具生产中应用较多的是固体渗铬法中的粉末渗铬法和真空渗铬法。

1) 粉末渗铬法

与固体渗碳法相似,把工件埋放在装有渗铬剂的铁箱中,经严格密封后加热到渗铬温度保温,使活性铬原子渗入工件表面。常用的渗铬剂一般包括铬粉或铬铁粉、氧化铝以及氯化铵等组成。铬粉或铬铁粉是基本组成物,依靠它产生活性铬原子;氧化铝的加入起稀释、填充剩余空间和减少渗铬剂粘结等作用;氯化铵是一种催渗剂,它能促进渗铬反应的进行,在升温时又起排气作用。

铬原子在铁中的扩散速度比碳的扩散速度要慢得多,因此渗铬需要更高的温度和更长的保温时间。固体渗铬法通常采用 1 050~1 100 °C 加热,保温 6~12 h。对于低碳钢可获得 0.05~0.15 mm 的渗铬层,高碳钢可获得 0.02~0.04 mm 的渗铬层。

2) 真空渗铬法

将渗铬的零件埋入装有渗铬剂(渗铬剂与粉末渗铬法相同)的渗碳罐中,再将渗碳罐吊入真空炉内,边抽真空边加热升温。为防止铬粉在加热时氧化,在加热保温阶段自始至终要求炉内真空度保持在 13.33 Pa 以下。真空渗铬的渗层质量高,时间短,渗铬剂消耗少,因而获得广泛应用。图 5-6 为真空渗铬加热设备示意图,主要由加热炉、过滤器、真空泵等组成,过滤器可以防止炉内铬粉抽入真空泵。

模具在渗铬过程中由于在高温下长时间加热,引起基体组织中晶粒剧烈长大,使基体的力学性能降低,特别是高碳模具,其渗铬层很薄,要求强度较高的基体来支持,否则在使用中受力会使基体发生塑性变形,导致渗铬层脆性剥落。因此,渗铬后还需对模具进行热处理

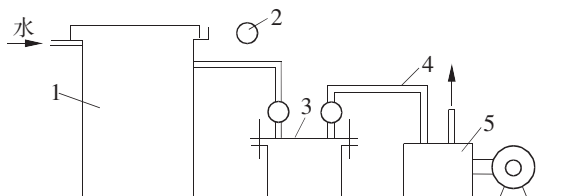


图 5-6 真空渗铬加热设备示意图

1—加热炉；2—真空表；3—过滤器；4—真空橡胶管；5—真空泵

理，其热处理工艺仍按照基体材料的钢号及要求来进行，不必考虑渗铬层的组织，因为渗铬层的组织、硬度和耐磨性基本上不受热处理的影响。

渗铬对在热态工作或承受强烈磨损的模具有显著效果，适用于锤锻模、压铸模、塑料模、拉深模等。

2. 渗钒

渗钒的目的是为了提高工件表面的耐磨性和耐蚀性。其方法是将工件置于能产生活性钒原子的介质中，加热到一定温度并保温，使钒渗入工件表面，并与碳形成碳化物。渗钒的方法有固体粉末渗钒和硼砂盐浴渗钒，目前生产中应用较多的是用硼砂盐浴渗钒。

渗钒层在众多硬化层中具有最高的显微硬度，从而使渗钒层具有非常好的耐磨性。例如：Cr12 钢制作的螺母冷镦模经渗钒后使用寿命可提高 6 倍；GCr15 钢制作的冷挤轴承环凹模渗钒后使用寿命可提高 8 倍。据报道，硼砂盐浴渗钒所获渗层不仅耐磨性好，而且具有较低的摩擦因数和优异的抗粘着性能，因此多用于热挤压模。

3. TD 法渗钒、渗铌和渗铬

以硼砂为基的盐浴渗钒、渗铌、渗铬并形成碳化物的方法又称反应浸镀法（TD 法）。

TD 法是在熔融的硼砂中加入欲渗的元素或合金的粉粒，然后将零件浸入其中，依靠欲渗元素原子向模具零件表面扩散，并与零件基体的碳原子形成金属碳化物覆层以改善零件表层性能的工艺方法。

实践中应用最广的是用在模具表面获得 VC、NbC、Cr₇C₃ 等碳化物型渗层。图 5-7 是 TD 法处理用盐浴炉示意图。

其主要工艺过程是：将脱水硼砂 Na₂B₄O₇（占熔盐总质量分数的 70%~90%）放入耐热钢坩锅中熔融，加入含有欲渗金属的铁合金或其氧化物，再将具有一定含碳量的钢制模具浸入盐浴，在 800~1 200 ℃下保温 1~10 h（时间长短取决于处理温度和涂层厚度），即可得到由渗入金属的碳化物构成的表面层。形成碳化物所需要的碳由被渗钢基体中的碳供给，碳原子不断向外扩散，使碳化物层不断加厚。实用的碳化物层厚度在 5~15 μm 范围内，厚度过大将导致表面含碳量不足，而形成低碳化合物。

这些金属的碳化物具有极高的硬度（如 VC 的硬度约为 3 000HV，NbC 的硬度约为

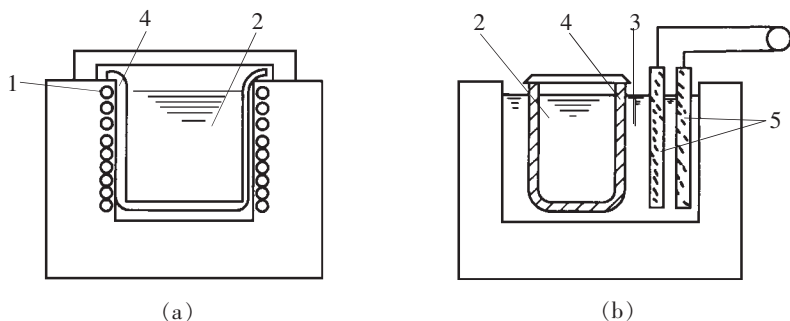


图 5-7 TD 法处理用盐浴炉示意图

(a) 直接加热炉; (b) 间接加热炉

1—电热元件; 2—TD 用盐浴; 3—加热用盐浴; 4—金属坩埚; 5—加热用电极

2 500HV, 在 800 °C 下也能保持硬度在 800HV 以上), 并且它们的摩擦因数较小, 因而其耐磨性明显高于渗氮、渗硼、镀铬及电火花硬化等其他表面处理技术。碳化物层的热稳定性高, 抗热粘着和抗咬合性能优良, 还具有良好的耐蚀性, 能抵抗 Al、Zn 合金液的侵蚀, 铬的碳化物还有优越的抗氧化性。经熔盐浸镀法处理所得到的碳化物层并不降低钢的韧性, 且抗剥落性良好。与其他在表面形成高硬层的工艺相比, TD 法设备简单, 操作方便, 生产能力高, 成本低, 而且还具有以下优点:

- (1) 无论模具形状如何复杂, 都能形成均匀的碳化物被覆层;
- (2) 处理后的表面粗糙度与处理前大致相同;
- (3) 熔盐的使用寿命长;
- (4) 碳化物层磨损后可重新处理, 不需要清除残留的碳化物, 不影响与基体的结合力;
- (5) 母材钢种较广, 可通过淬火使基体强化。

TD 法处理工艺可用于要求高耐磨的各种冷作模具和热作模具。例如, 某凸凹模冲裁加工轴用挡圈, 被加工材料为 65Mn 钢板, 厚 1.5 mm, 原用 Cr12 钢制造的模具易于断裂失效, 平均寿命为 1 000 件, 后改用强韧性高的 65Nb 钢制造, 为提高其耐磨性采用了熔盐渗钒, 结果消除了断裂失效现象, 模具的使用寿命达 8 000 件。

采用 TD 法获得碳化物涂层的工艺也有一定的局限性, 在应用于模具的表面硬化时, 要注意以下几点:

- (1) 处理温度高, 渗层会引起尺寸胀大, 对高精度模具应采取措施, 预防变形;
- (2) 处理前模具必须加工到要求的表面粗糙度, 以保证处理后的表面质量;
- (3) 当载荷过大, 引起模具产生塑性变形时, 会引起碳化物层产生裂纹;
- (4) 薄刃模具在薄刃处供碳不足, 难以形成厚的碳化物层;

(5) 对基体材料的含碳量应合理选择, 在不影响钢的韧性或其他性能的条件下, 应保证能提供足够的碳, 以形成碳化物;

(6) 模具在 500 °C 以上氧化性气氛中长期使用会使 VC、NbC 等碳化物层氧化, 影响其性能。

5.2 模具表面涂覆处理技术

表面涂覆处理是通过物理覆盖、沉积等方式, 在工件表面覆盖上一层与基体不同的金属化合物, 保护模具基体并提高模具表层的力学和理化性能的方法, 不仅可提高其耐蚀性, 而且还可用来提高模具的硬度和耐磨性等。常用的表面涂覆处理技术有镀金属、堆焊、电火花表面强化、化学气相沉积 (CVD)、物理气相沉积 (PVD) 等。

5.2.1 金属电镀

1. 金属电镀的基本工艺过程

基本工艺过程可以用下面的流程来表示: 磨光→抛光→脱脂→水洗→去锈→水洗→电镀→酸洗→碱洗→清洗→出槽。

影响电镀层质量的几个基本因素如下。

(1) 溶液 pH 值。影响氢的放电电位、碱性夹杂物的沉淀或水化物的组成以及添加剂的吸附程度, 但太低或太高的 pH 值都不利于电镀, 必须实验测定。

(2) 电流参数。电流密度太低时, 镀层晶粒大, 电流密度过高, 易形成结瘤和枝状结晶, 甚至烧焦。电流密度的大小与电镀液的组成和主加盐浓度等有关。

(3) 添加剂。包括光亮剂、整平剂、润湿剂等。

2. 常用金属的电镀

1) 电镀铬

镀铬层有良好的耐蚀性。根据镀液成分和工艺条件的不同, 镀铬层的硬度可在 400~1 200HV 内变化。在低于 500 °C 下加热, 对镀铬层的硬度无影响。镀铬层的摩擦因数低, 尤其是干摩擦因数是所有金属中最低的, 因此有很好的耐磨性。镀铬层的种类很多, 主要包括如下几种。

(1) 防护、装饰性镀铬层。厚度为 0.5 μm , 广泛用于汽车、自行车、钟表、日用五金等。

(2) 镀硬铬。硬度高, 摩擦因数低, 耐磨性好, 耐蚀性好且镀层光亮, 与基体结合力较强, 可用作冷作模具和塑料模具的表面防护层, 以改善其表面性能。镀层的厚度达 0.3~0.5 mm, 可用于尺寸超差模具的修复。镀硬铬是在模具上应用较多的表面涂镀工艺。

(3) 松孔镀铬。若采用松孔镀铬会使镀层表面产生许多微细沟槽和小孔以便吸附、储存润滑油, 这种镀层具有良好的减摩性和抗粘着能力。例如, 在 3Cr2W8V 钢制压铸模的型腔表面镀上 0.025 mm 厚的多孔性铬层后, 使用寿命可提高 1 倍左右。

2) 电镀锌

电镀锌工艺简单, 成本低廉。锌层具有良好的抗氧化性能, 即使受到腐蚀, 锌作为阳极能有效地保护钢材。因此, 电镀锌层是工业上应用最为广泛的电镀层, 电镀产品有 50% 是以镀锌出厂的。在比较干燥的空气中, 镀锌层只需 $6 \sim 12 \mu\text{m}$; 而在恶劣条件下需要 $20 \sim 50 \mu\text{m}$ 。实际使用的镀锌层是在铬酸中钝化处理的, 它可以提高防护能力 $5 \sim 8$ 倍。

3) 电镀镍

电镀工业中仅次于电镀锌生产量的产品是电镀镍。镍镀层的硬度因电镀工艺的不同可在 $150 \sim 600\text{HV}$ 之间变化。镍镀层主要用于两个目的:

- (1) 由于孔隙率高, 常作为防护装饰性镀层体系的中间层或底层。
- (2) 作为色彩柔和、不反光的锻面镍。镀镍的主要种类有镀暗镍、镀光亮镍和多层镀镍。

4) 电镀锡

锡具有银白色的外观, 原子价有 $+2$ 价与 $+4$ 价两种。锡具有耐腐蚀、耐变色、无毒、易钎焊、柔软和延展性好等优点, 尤其是因为其耐腐蚀、耐变色和无毒等特点被广泛用作食品容器如易拉罐等保护层。电镀锡占镀锡板的 90% 以上, 其余为热浸镀锡。镀锡电镀液有酸性光亮镀锡和碱性镀锡液两种, 现在广泛应用的是前者。

5.2.2 电刷镀

电刷镀是在可导电工件 (或模具) 表面需要镀覆的部位快速沉积金属镀层的新技术。它与普通电镀的原理相同, 但形式特殊。电刷镀装置与工作原理如图 5-8 所示。

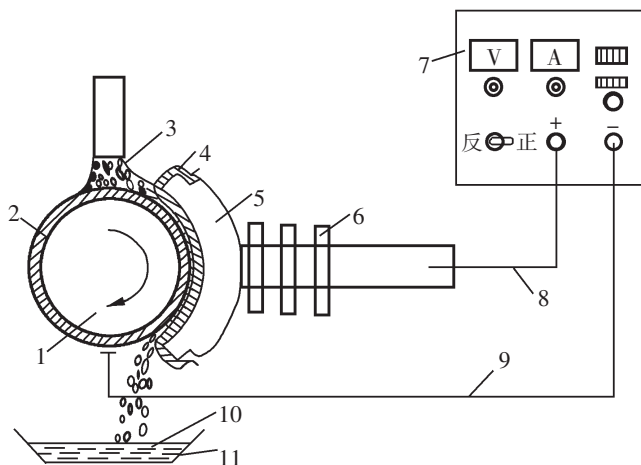


图 5-8 电刷镀装置与工作原理

- 1—工件; 2—镀层; 3—镀液; 4—包套; 5—阳极; 6—导电柄; 7—电刷镀;
8—阳极电源; 9—阴极电源; 10—循环使用溶液; 11—拾液盘

电刷镀时直流电源的负极接工件作为电镀的阴极，正极与镀笔中的不溶性阳极连接。镀笔由高纯度细结构的石墨阳极及前端包裹的涤棉套组成，石墨阳极做成与被镀表面相配合的形状，涤棉套浸满镀液以代替镀槽。施镀过程中，使阳极前端的涤棉套接触工件表面并沿表面相对滑动，镀液不断地添加在涤棉套和工件表面之间，镀液中的金属离子在电场作用下向工件表面迁移，在表面上还原成金属原子并沉积成镀层。

1. 电刷镀的工艺特点

(1) 不受镀件限制。电刷镀工艺灵活，操作方便，不受镀件形状、尺寸、材质和位置的限制。对于复杂型面，凡是镀笔能触及到的地方均可施镀；对于难以拆卸、搬动或难以入槽的大型零件，可以在现场不解体施镀；对于小孔、深孔、沟槽等局部表面以及划痕、凹陷、磨损等局部表面缺陷处也便于施镀。

(2) 镀层质量高。由于镀笔在工件表面不断移动，沉积金属的结晶过程不断地受中断放电和外力作用的干扰，因而获得的镀层组织具有超细晶粒和高密度位错，其硬度、强度较高。同时镀层与基体金属的结合力较强，镀层表面光滑。

(3) 沉积速度快。电刷镀的阴、阳极之间仅有涤棉套的阻隔，距离很近，一般不大于 10 mm。金属离子的迁移距离短，可采用高浓度镀液和大电流密度施镀，而不会产生金属离子的贫乏现象，因而沉积速度快，生产率高。

(4) 适用范围广。一套电刷镀设备可采用多种镀液，刷镀各种单金属镀层、复合镀层等，以满足各种不同的需要。

2. 电刷镀在模具上的应用

鉴于电刷镀的上述特点，使它在模具制造中也有较高的实用价值，可用于模具工作表面的修复、强化和改性。

1) 模具表面修复

某彩色电视机机壳注射模用中碳合金模具钢制造；价格昂贵，工作中不慎落入螺母，合模时造成模具型腔表面局部严重损伤，不能继续使用。原采用焊接修理导致产生裂纹，继而用气、钎焊填补又造成焊层剥离和裂纹扩展，后来采用电刷镀技术，仅一天就将模具修复。其工艺过程如下。

用成型砂轮将裂纹和损伤部位拓宽，使小阳极镀笔能接触到损伤部位底部，以一定工艺对损伤部位表面进行处理。先用特殊镍镀液进行电刷镀，在该处表面形成过渡层，再用快速镀镍液进行电刷镀来填补缺陷，并随时用磨石磨去先高出基体表面的镀层，直至覆盖缺陷部位的整个镀层都高出基体表面 0.05 mm 以上，用细油石蘸煤油打磨镀层，随后用金相砂纸蘸煤油抛磨镀层，使镀层与基体表面平齐并满足表面粗糙度要求。经生产验证，该模具经电刷镀修复后，满足使用要求，并连续使用 2 年以上。

2) 模具表面强化

生产大号塑料盆的注射模，材料为灰铸铁，模具底盘直径为 1 000 mm，合模高度为

400 mm, 重 1.3 t。由于模具型腔表面硬度低, 磨损严重, 表面粗糙度值变大, 致使加工出来的产品增厚加重, 表面质量变差。采用电刷镀技术对模具型腔表面进行强化处理, 先电刷镀碱铜作为过渡层, 再电刷镀镍钴合金作为工作表层, 电刷镀后达到以下效果:

- (1) 模腔表面硬度由 23HRC 提高到 40HRC 左右;
- (2) 表面粗糙度 R_a 由 $6.3 \mu\text{m}$ 减为 $0.8 \mu\text{m}$;
- (3) 模具表面耐磨性提高了 2 倍;
- (4) 塑件制品脱模容易。

该模具经电刷镀后三班生产连续使用 1 年多, 效果良好。

3) 模具表面改性

防海水腐蚀的继电器外壳用厚度 0.8 mm 的锌白铜 (德银) 带料经拉深加工制成, 拉深模寿命为 10 万件, 因粘着磨损失效。采用电刷镀技术在已经磨损的凸模上镀钴以恢复尺寸, 在凹模口部刷镀 0.005~0.01 mm 的钢镀层以减磨, 显著提高了模具的抗粘着磨损能力, 工作寿命达 50 万件。

另外, 在模具上电刷镀耐热镀层和耐蚀镀层, 也都有明显效果。如在热锻模型腔表面电刷镀钴层后再渗硼, 可显著提高冷热疲劳抗力。

电刷镀技术还可以作为制造模具的辅助手段。如应用电刷镀的方法刷镀光滑镀层以降低表面粗糙度值; 利用电刷镀可以修复因加工过量所短缺的尺寸, 挽救模具废品; 利用电刷镀方法还可以在模具上涂写或刻写标记、符号等。

5.2.3 化学镀

化学镀是将工件置于镀液中, 镀液中的金属离子获得从镀液的化学反应中产生的电子, 在工件表面还原沉积形成镀层的过程, 是一个无外加电场的电化学反应过程。

化学镀可获得单一金属镀层、合金镀层、复合镀层和非晶态镀层。与电镀相比, 化学镀的均镀能力好, 仿形性良好, 镀层致密, 设备简单, 操作方便。复杂模具进行化学镀, 还可以避免热处理引起的变形。

1. Ni-P 化学镀

Ni-P 化学镀的基本原理是以次亚磷酸盐为还原剂, 将镍盐还原成镍, 同时使镀层中含有一定的磷, 沉积的镍膜具有自催化性, 可使反应继续进行下去。

化学镀工艺已在多种模具上得到应用, 采用 Ni-P 化学镀强化模具, 既能提高模具表面的硬度和耐磨性, 又能改善模具表面的自润滑性能, 提高模具表面的抗擦伤能力和耐腐蚀性能, 适于冲压模、挤压模、塑料成型模、橡胶成型模。如 45 钢制拉深模, 经化学镀 $10 \mu\text{m}$ 厚的 Ni-P 层后, 模具表面硬度达到 1 000HV 以上, 模具寿命延长 10 倍, 产品表面质量明显提高。

Ni-P 化学镀应用于模具有以下优点。

(1) 能提高模具表面的硬度、耐磨性、抗擦伤和抗咬合能力,脱模容易,并可提高模具的使用寿命。

(2) Ni-P 化学镀层与基体的结合强度高,能够承受一定的切应力,适用于冲压模和挤压模。

(3) Ni-P 合金层具有优良的耐蚀性,对塑料模和橡胶模可以进行表面强化处理。

(4) 沉积层厚度可控制,模具尺寸超差时,可通过化学镀恢复到规定尺寸。

(5) 挤塑模和注射模等形状复杂的模具进行 Ni-P 化学镀,镀层厚度均匀且无变形。

2. 化学镀复合材料

凡是能够化学镀的金属或合金,原则上都能得到其复合材料。研究最多的是化学镀镍及其合金复合材料,其中研究较多的是采用 SiC、 Al_2O_3 和金刚石的复合材料。含 SiC 化学镀复合材料是最常用的复合材料之一。由于 SiC 具有高硬度,从而使复合材料具有良好的耐磨性。实验测试表明, Ni-B-SiC 复合镀层的硬度和耐磨性不仅明显优于 Ni-B 化学镀层,而且远远优于硬铬镀层。经适当处理后,复合镀层的硬度和耐磨性将进一步提高。

5.2.4 热浸镀

热浸镀简称热镀,是将工件浸在熔融的液态金属中,在工件表面发生一系列物理和化学反应,取出冷却后表面形成所需的金属镀层。这种涂敷主要用来提高工件的防护能力,提高模具的使用寿命。

热浸镀用钢、铸铁、铜作为基体材料,其中以钢最为常用。镀层金属的熔点必须低于基体金属,而且通常要低得多。常用的镀层金属是低熔点金属及其合金,如 Sn、Zn、Al、Pb、Al-Sn、Al-Si、Pb-Sn 等。锌是热浸镀层中应用最多的金属。为了提高耐热性能,多种锌合金镀层得到广泛应用。

热浸镀的基本过程为前处理、热浸镀和后处理。按前处理不同,可分为熔剂法和保护气体还原法两大类。目前熔剂法主要用于钢管、钢丝和零件的热浸镀;而保护气体还原法通常用于钢板的热浸镀。

1. 熔剂法

熔剂法工艺流程为:预镀件→碱洗→水洗→酸洗→水洗→熔剂处理→热浸镀→镀后处理→成品。热碱清洗是工件表面脱脂的常用方法,在镀锌前,通常用硫酸或盐酸的水溶液除去工件上的轧皮和锈层。为避免过蚀,常在硫酸和盐酸溶液中加入抑制剂。熔剂处理是为了除去工件上未完全酸洗掉的铁盐和酸洗后又被氧化的氧化皮,清除熔融金属表面的氧化物和降低熔融金属的表面张力,同时使工件与空气隔离而避免重新氧化。熔剂处理有以下两种方法。

(1) 熔融熔剂法(湿法)。是将工件在热浸镀前先通过熔融金属表面的一个专用箱中的熔融熔剂层进行处理,该熔剂是氯化氨或氯化氨与氯化锌的混合物。

(2) 烘干熔剂法(干法)。是将工件在热浸镀前先浸入浓的熔剂(600~800 g/L 氯化锌+60~100 g/L 氯化氨)水溶液中,然后烘干。

热浸镀的工作温度一般是445~465℃。当温度到达480℃或更高时,铁在锌中溶解很快,对工件和锌锅都不利。涂层厚度主要取决于浸镀时间、提取工件的速度和钢铁基体材料。浸镀时间一般为1~5 min,提取工件的速度约为1.5 m/min。

镀后处理主要有两种:一是用离心法或擦拭法去除工件上多余的锌;二是通常对热镀锌后的工件进行水冷,从而抑制金属间化合物合金层的生长。

2. 保护气体还原法

保护气体还原法是现代热镀生产线普遍采用的方法。其特点是将钢材连续退火与热浸镀连在同一生产线上。钢材先通过用煤气或天然气直接加热的微氧化炉,钢材表面的残余油污、乳化液等被火焰烧掉,同时被氧化形成氧化膜,然后进入密闭的通有由氢气和氮气混合而成的还原炉,在辐射管或电阻加热下,使工件表面氧化膜还原为适合于热浸镀的活性海绵铁,同时完成再结晶过程。钢材经还原炉的处理后,在保护气氛中被冷却到一定温度,再进入热浸镀锅。

5.2.5 气相沉积

气相沉积是将含有形成沉积元素的气相物质输送到工件表面,在工件表面形成沉积层的工艺方法称为气相沉积。通常是在工件表面覆盖0.5~1.0 μm的一层过渡族元素(Ti、V、Cr、Zr、W、Mo、Ta、Nb等)与C、N、O和B的化合物。按机理可分为化学气相沉积和物理气相沉积两种。气相沉积技术已广泛应用于模具的表面强化处理,常用的沉积层为TiC、TiN、Ti(C,N)等,具有以下性能特点:

(1) 具有高的硬度(TiC为3 200~4 100HV, TiN为2 450HV),低的摩擦因数和自润滑性;

(2) 具有高的熔点(TiC为3160℃, TiN为2950℃),化学稳定性好以及具有高的抗粘着磨损能力,发生咬合、冷焊的倾向小;

(3) 具有较强的耐腐蚀能力和较高的抗高温氧化能力。

1. 化学气相沉积(CVD)

化学气相沉积是利用气态物质在一定的温度下于固体表面进行化学反应,在表面上生成固态沉积膜的过程,通常称为CVD(Chemical Vapour Deposition)法。

CVD法是通过高温气相反应而生成其化合物的一种气相镀覆。涂层材料可以是氧化物、碳化物、氯化物、硼化物,也可以是Ⅲ-V、Ⅱ-Ⅳ、Ⅳ-VI族的二元或多元化合物。通过基体材料、涂层材料和工艺的选择,可以得到许多特殊结构和特殊功能的涂层。在微电子学工艺、半导体光电技术、太阳能利用、光纤通信、超导技术、复合材料、装饰和防护涂层(耐磨、耐热、耐蚀)等新技术领域得到越来越多的应用。例如Cr12MoV钢制冷冲裁模,用

CVD法沉积 TiN 涂层，其使用寿命提高 2~7 倍；Cr12MoV 钢制冷拉深凸模，用于黄铜弹壳的成型，经 CVD 法沉积 6~8 μm 厚的 TiC 涂层，其寿命高达 100 万次，比镀铬凸模提高 4 倍。

1) CVD 装置

图 5-9 是 CVD 法所用设备的示意图。

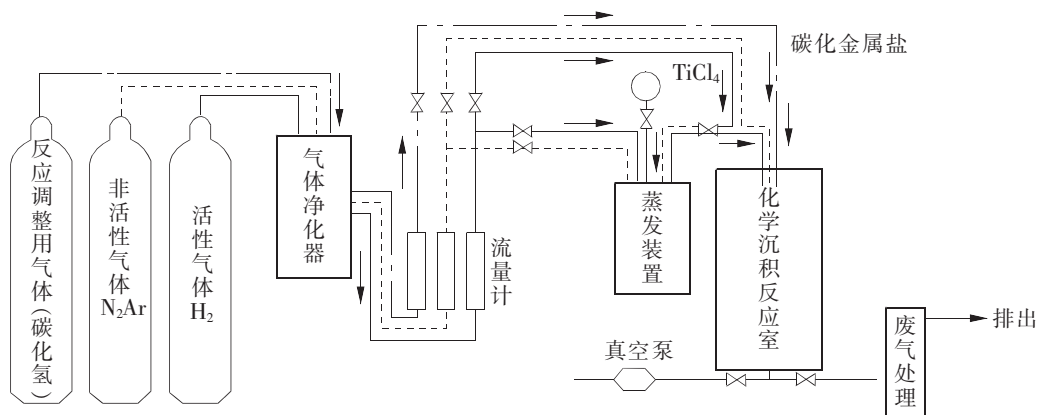


图 5-9 CVD 装置示意

CVD 反应需要获得真空并加热到 900~1 100 $^{\circ}\text{C}$ 。钢件要覆以 TiC 层，将钛以挥发性氯化物（如 TiCl_4 ）的形式与气态或蒸发态的碳氢化合物一道放入反应室内，用氢作为载体气和稀释剂，就会在反应室内的钢件表面上发生反应形成 TiC，沉积在钢件表面。钢件经沉积后，还需要进行热处理，可以在同一反应室内进行。

2) CVD 种类

CVD 技术有多种分类方法。按主要特征进行综合分类，可分为热 CVD、低压 CVD、等离子体 CVD、激光（诱导）CVD、金属有机化合物 CVD 等。

(1) 热化学气相沉积 (TCVD)。

热化学气相沉积是利用高温激活化学反应进行气相生长的方法，常应用于半导体和其他材料。广泛应用的 CVD 技术如金属有机化学气相沉积、氢化物化学气相沉积等都属于这个范围。

(2) 低压化学气相沉积 (LPCVD)。

低压化学气相沉积的压力范围一般在 $1 \times 10^4 \sim 4 \times 10^4 \text{ Pa}$ 之间。由于低压下分子平均自由程增加，因而加快了气态分子的输运过程，反应物质在工件表面的扩散系数增大，使薄膜均匀性得到改善。对于表面扩散动力学控制的外延生长，可增大外延层的均匀性，这在大面积、大规模外延生长中（例如大规模硅器件工艺中的介质膜外延生长）是必要的。但是，对于由质量输送控制的外延生长，上述效应并不明显。低压外延生长对设备要求较高，必须有

精确的压力控制系统,增加了设备成本。低压外延有时是必须采用的手段,如当化学反应对压力敏感时,常压下不易进行的反应,在低压下会变得容易进行。

(3) 等离子体化学气相沉积(PCVD)。

在常规的化学气相沉积中,促使其化学反应的能量来自热能,而等离子体化学气相沉积除热能外,还借助于外部所加电场的作用引起放电,使原料气体成为等离子体状态,变为化学上非常活泼的激发分子、原子、离子和原子团等,促进化学反应的进行,在基体材料表面形成薄膜。等离子体化学气相沉积的特点如下:

①沉积温度低,如CVD沉积TiN膜,传统CVD成膜温度为1 000℃左右,而等离子体化学气相沉积仅为500℃;

②可在不耐高温的材料上沉积成膜;

③由于离子具有溅射清洁基体材料表面和轰击效应,膜与基体材料结合强度高;

④成膜速度快;

⑤由于等离子体的激发,使得难以发生反应而成膜的材料沉积成膜,从而拓宽涂层材料的范围。

3) CVD技术在模具上的应用

(1) CVD技术应用于模具生产的条件。

要使CVD涂层在模具生产中达到规定的指标,必须具备以下一些条件。

①合理选择涂层材料。根据工件的服役条件选择具有相适应的物理、化学性能的涂层材料,有时根据需要可选用一定匹配的多层膜。

②选好基体材料。首先要满足服役条件以及涂层与基体之间的匹配性,如两者的热胀系数、界面能、化学性、冶金性以及两者之间是否会生成脆的或软的中间过渡层等。由于热化学气相沉积的处理温度较高,必须考虑基体材料的耐热性和组织结构的变化情况,因此一般选择硬质合金、高速钢、高碳高铬钢、热模钢等作为基体材料。

③确定合适的涂层厚度。太薄的涂层不能获得最佳的性能和寿命,而太厚的涂层将呈现脆性以及涂层与基体之间结合力变差。通常用的高温CVD涂层厚度范围:TiC为2~8 μm;TiN为5~14 μm;复合涂层为3~15 μm。具体厚度要根据服役条件来选择。

④选用良好的设备和正确的实施工艺。除达到技术性能指标外,力求用微机自动监控全部工艺参数与程序可靠地保证涂层质量和工艺的重现性。

(2) CVD技术在模具生产中的应用实例。

拉深模沉积TiC;拉深模直径27.07 mm±0.02 mm;钢材成分(质量分数): $w(\text{C})$ 2%、 $w(\text{Cr})$ 12%、 $w(\text{W})$ 1%、 $w(\text{Mo})$ 0.5%、 $w(\text{Co})$ 1%。

①预处理。加热至1 030℃退火3 h后加工成型,毛坯尺寸略大于最终尺寸0.2 mm,再将毛坯加热至980℃,用压缩空气冷却,然后在200℃油冷,处理后的硬度为850HV,精加工拉深模直径至最终尺寸27.70 mm,真空脱气,用刚玉糊抛光。

②沉积。混合反应气体为 $H_2 + TiCl_4 + CH_4$ ，温度为 $1\ 000\ ^\circ C$ ，保温 $2.5\ h$ 后将反应罐投入水中冷却至室温，获得 $6\sim 10\ \mu m$ 有光泽的、表面粗糙度值 R_a 为 $1.5\ \mu m$ 的 TiC 涂层。

③后处理。沉积后的拉深模直径为 $27.053\ mm$ ，将它放入丙酮浴中，然后逐步加入干冰，冷却至 $-80\sim -70\ ^\circ C$ ，保持 $1\ h$ ，自冷浴中取出拉深模并慢慢加热至室温。此时直径为 $27.090\ mm$ ，基体硬度为 $900HV$ ，再将模具进一步在 $200\ ^\circ C$ 油浴中回火。冷却至室温后直径为 $27.072\sim 27.075\ mm$ ，符合公差要求，此时的硬度为 $830HV$ 。

2. 物理气相沉积 (PVD)

物理气相沉积是用物理方法把欲涂覆物质沉积在工件表面上形成膜的过程，通常称为 PVD (Physical Vapour Deposition) 法。

在进行 PVD 处理时，工件的加热温度一般都在 $600\ ^\circ C$ 以下，这对于用高速钢、合金模具钢及其他钢材制造的模具都具有重要意义。目前常用的有 3 种物理气相沉积方法，即真空蒸镀、溅射镀膜和离子镀，其中离子镀在模具制造中的应用较广。

离子镀是在真空条件下，利用气体放电使气体或被蒸发物质离子化，在气体离子或蒸发物质离子轰击作用下，把蒸发物质或其反应物蒸镀在工件上。离子镀把辉光放电、等离子技术与真空蒸镀技术结合在一起，不仅明显地提高镀层的各种性能，而且大大扩充了镀膜技术的应用范围。离子镀除兼有真空溅射的优点外，还具有膜层的附着力强、绕射性好、可镀材料广泛等优点。例如，利用离子镀技术可以在金属、塑料、陶瓷、玻璃、纸张等非金属材料上，涂覆具有不同性能的单一镀层、合金镀层、化合物镀层及各种复合镀层，而且沉积速度快（可达 $75\ \mu m/min$ ），镀前清洗工序简单，对环境无污染，因此近年来在国内外得到了迅速的发展。

离子镀的基本原理如图 5-10 所示。借助一种惰性气体的辉光放电使金属或合金蒸气离子化。离子镀包括镀膜材料（如 TiN、TiC）的受热、蒸发、沉积过程。蒸发的镀膜材料原子在经过辉光区时，一小部分发生电离，并在电场的作用下飞向工件，以几千电子伏的能量射到工件表面，可以打入基体几纳米的深度，从而大大提高了涂层的结合力，而未经电离的蒸发材料原子直接在工件上沉积成膜。惰性气体离子与镀膜材料离子在工件表面上发生的溅射，还可以清除工件表面的污染物，从而改善结合力。

若将反应气体导入蒸发空间便可在工件表面沉积金属化合物涂层，这就是反应性离子镀。由于采用等离子活化，工件只需在较低温度甚至在室温下进行镀膜，完全保证零件的尺寸精度和表面粗糙度，因此可以安排在

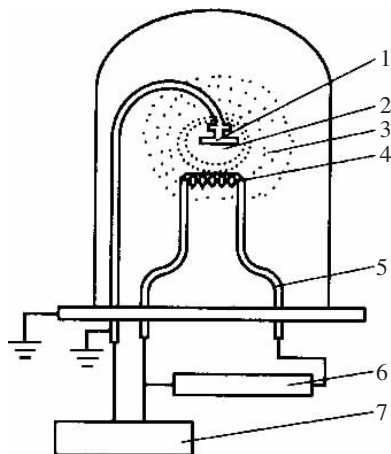


图 5-10 离子镀原理

- 1—工件（阴极）；2—阴极暗部；
3—辉光放电区；4—蒸发灯丝（阳极）；
5—绝缘管；6—灯丝电源；7—高压电源

工件淬火、回火后即最后一道工序进行。如沉积 TiN 或 TiC 时, 基体温度可以在 150~600 °C 范围内选择, 温度高时涂层的硬度高, 与基体的结合力也高。基体温度可根据基体材料及其回火温度选择, 如基体为高速钢, 可选择 560 °C。这样对于经淬火、回火并加工到尺寸的高精度模具, 无须担心基体硬度降低及变形问题。另外, 离子镀的沉积速度较其他气相沉积方法快, 得到 10 μm 厚的 TiC 或 TiN 涂层, 一般只需要几十分钟。

通过 PVD 法在模具上沉积 TiN 或 TiC 镀层, 其性能可以和 CVD 法的镀层相比拟, 且具有以下特征:

(1) 对上、下模都进行了高精度精加工的金属模具表面, 用 PVD 超硬化合物镀层强化是相当有效的;

(2) 对粗糙的模具表面, PVD 镀层效果将丧失;

(3) PVD 镀层对静载荷更有效;

(4) PVD 镀覆前后的精度无变化, 不必再次进行加工;

(5) PVD 镀层具有优越的耐磨性和高的耐蚀性。

例如: 对制造螺钉用的高速钢冲头镀覆 TiN, 其寿命比未镀覆的冲头延长 3~5 倍; 在汽车零部件精密落料模上镀覆 TiN, 当被冲钢板厚度为 1~3 mm 时, 寿命延长 5~6 倍, 但是当钢板厚度增加到 5~8 mm 时, 由于 TiN 层从表层脱落而丧失效果; 塑料模镀覆 TiN, 其耐蚀性可提高 5~6 倍, 而耐磨性同时提高, 使模具寿命延长数倍。

PVD 法同 CVD 法一样能有效地强化模具的使用性能, 提高模具的使用寿命。但是, PVD 法的绕镀性较差, 对深孔、窄槽的模具就难以进行; CVD 法由于沉积温度太高, 使用受到一定的限制; 等离子体化学气相沉积 (PCVD) 由于既保留传统 CVD 的本质, 又具有 PVD 的优点, 克服了 PVD 和 CVD 的局限性, 因此, PCVD 技术在工业上得到了广泛应用, 大幅度地提高了模具的使用寿命。

5.3 表面加工强化处理

表面加工强化处理是通过一定的加工方式, 使模具表面层组织发生变化, 从而获得与心部不同的组织和性能, 通过改变表层组织结构来强化表层。如火焰表面加热淬火、电解液表面加热淬火、高频表面加热淬火、激光表面强化、电子束表面强化、离子束表面硬化、喷丸硬化及电火花表面强化等。

5.3.1 火焰表面加热淬火

火焰表面加热淬火是通过喷嘴将火焰 (通常用氧-乙炔) 喷射到工件表面, 将工件迅速加热到淬火温度, 然后在规定的冷却介质中冷却到室温的热处理工艺。虽然该工艺比高频感应加热淬火落后, 但与感应加热表面淬火相比, 火焰表面加热淬火的设备简单、操作方便,

特别适合大型模具零件和小批量、多品种模具零件的热处理。如汽车车身覆盖件大型拉深模、大型塑料模、大型冲模等模具零件的刃口，此类零件利用火焰表面加热淬火有其独特的优点且能降低生产成本。

我国自行研制的 7CrSiMnMoV (CH-1) 火焰淬火冷作模具钢，可用于模具刃口部位淬火，经氧-乙炔火焰加热到淬火温度，然后空冷即达到淬硬目的，使模具生产制造周期缩短近 10%，价格降低 10%~20%，热处理后节省能源 80% 左右，为模具零件火焰表面加热淬火开辟了新的途径。

我国目前多用手工火焰加热淬火，缺点较多，若能改用机械化自动化程度高的方法，则淬火质量更能保证并进一步提高。

模具火焰加热淬火后能获得最高硬度取决于钢的含碳量及淬火温度和冷却速度等因素。火焰淬火如果是手工操作，则是一种技巧性很强的操作，必须配备合适的工具。冷作模具钢如 CrWMn、Cr12MoV 钢均可进行火焰表面加热淬火且不导致裂纹。球墨铸铁、合金铸铁也可进行火焰加热淬火。

火焰淬火加热时应注意防止过热，避免氧化和晶粒粗大化。淬火后建议在 180~200 °C 进行回火。大型模具零件不便回火，可利用火焰局部加热或自回火。

5.3.2 电解液表面加热淬火

电解液的加热是以直流电为电源在电解液中进行的，适用于表面加热淬火的电解液很多，一般采用（质量分数为 8%~10%） Na_2CO_3 水溶液。

电解液表面加热淬火原理如图 5-11 所示。工件置于电解液中（局部或全部）作为阴极，金属电解槽作为阳极。电路接通后，电解液发生电离，在阳极上放出氧，在阴极上放出氢。氢围绕工件形成气膜，产生很大的电阻，通过的电流转化为热能将工件表面迅速加热到临界点以上温度。电路断开气膜消失，加热的工件在电解液中即实现淬火冷却。此方法使用的设备简单，淬火变形小，适用于形状简单、小工件的批量生产。

电解液温度不能超过 60 °C。温度过高，氢气膜不稳定，影响加热过程，还会加速溶液的蒸发。常用电压为 160~180 V，最高不超过 260 V，电流密度范围 4~10 A/cm²，通常可选用 6 A/cm²。电流密度过大时，加热速度快，淬硬层薄。在加热过程中，应将工件的位置加以固定，否则会造成电流密度的变化，使淬硬层质量恶化。加热时间可通过试验确定。工件在电解液中可采用端部自由加热、端部绝缘加热、回转加热和连续加热等方式。

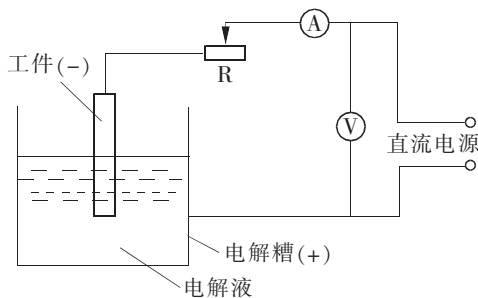


图 5-11 电解液表面加热淬火原理

表 5-7 为 45 钢齿轮的电解液表面加热淬火工艺规范。

表 5-7 45 钢齿轮的电解液表面加热淬火工艺规范

齿轮外径 /mm	浸面深度 /mm	齿轮转速 /(r·min ⁻¹)	电压 /V	电流 /A	加热时间 /min	冷却介质	内孔变形 /mm	表面硬度 HRC
210	11.3	46	260	120	3.0	水	-0.045	50~54
15	10.8	68	240	100	3.0	水	-0.040	51~55
84	4.2	68	240	100	2.5	水	+0.040	51~55
72	4.4	68	240	100	2.0	水	+0.030	51~55
42	4.2	104	220	95	1.5	水	+0.035	50~55

5.3.3 高频表面加热淬火

高频表面加热淬火法是将模具放在由空心铜管绕制的感应器中，然后向感应器通入一定频率的交流电，以产生交变磁场，使工件内产生频率相同的感应电流，使工件表面加热到淬火温度，而心部温度仍接近于室温，随后喷冷却介质或把加热后的工件放入冷却介质中快速冷却，就能达到模具表面加热淬火的目的。

高频表面加热淬火是我国机械行业中较普遍应用的表面淬火方法。高频表面加热淬火对模具的原始组织有一定要求，应预正火或调质处理，以使模具基体有较好的综合力学性能。高频加热表面淬火后的模具需进行低温回火，以降低淬火产生的内应力。

高频表面加热淬火是一种先进的热处理方法，它的特点是加热速度快、淬火组织细、硬度比普通淬火高 2~3HRC，耐磨性提高，表面氧化，脱碳极微。

以极大密度的能量 ($>10^5$ W/cm²) 瞬时供给被处理工件的表面，使其发生相变硬化、熔化快速凝固和表面合金化效果的热处理称高密度能（也称高能密度）加热热处理，也称冲击热处理法，冲击热处理也可以靠高频感应加热方法来实现。高频脉冲感应加热时，发生器容量越大，脉冲加热时间越短，电频越高淬硬层越浅。冲击感应加热时的电频率高达 27.12 MHz，此时的淬硬层深度可达 0.1 mm。当发生器功率为 10 kW 时，可发出 1 MW 功率的脉冲。金属表面停止加热后，靠其未加热部分的热传导来冷却，达到淬硬目的。感应器可用圆形或扁平截面的银丝或铜丝。当脉冲次数在 4 次/s 以下时，无需对感应器通水冷却。

采用高频脉冲加热表面淬火后，模具加热的时间越短淬硬层深度越浅，热处理后变形更小。

高频感应加热向着超高冲击淬火和大功率脉冲感应加热淬火的方向发展，表 5-8 是普通高频感应表面加热淬火、超高频冲击表面感应加热淬火、大功率脉冲表面感应加热淬火的技术特点比较。

表 5-8 3 种表面感应加热淬火技术特点的比较

项 目	普通高频感应表面加热淬火	超高频冲击表面感应加热淬火	大功率脉冲表面感应淬火
频率/kHz	200~300	27.12	300~1 000
功率密度/(W·cm ⁻²)	200	10~30	1~10
最短淬火时间	0.1~5 s	1~500 ms	1~1 000 ms
淬硬层深度/mm	0.2~2.5	0.05~0.5	0.1~1
淬火面积/mm ²	由连续移动决定	10~100 (最大宽度 3 mm)	100~1 000 (最大宽度 10 mm)
感应器电感/ μ H	2~3	10~100	
感应器冷却	通水	单脉冲加热时无须冷却	通水或埋水冷却
淬火	喷水	自冷	埋水或自冷
组织	M	极细 M	细 M
畸变	不可避免	极小	极小
淬火硬度	较电炉加热淬火高	超常硬度	超常硬度
适应范围	大、中型工件	小型、薄工件	中、小型工件

5.3.4 激光表面强化

利用高功率、高密度激光束（一般用 $10^4 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$ ）对金属进行表面处理的方法称为激光热处理。激光热处理分为激光相变硬化（表面淬火、表面非晶化及表面重熔淬火）、激光表面合金化（表面敷层合金化、硬质粒子喷射合金化、气体合金化）等表面改性工程，产生其他表面加热淬火强化达不到的表面成分、组织及性能的改变。

激光热处理为高速加热、高速冷却，获得的组织细密、硬度高、耐磨性能好，淬火部位可获得大于 3 920 MPa 的残余应力，有助于提高疲劳性能。激光热处理通过对光斑尺寸的控制可以进行局部选择性淬火，尤其适合其他热处理方法无法处理的不通孔、沉沟、微区、夹角、圆角和刀具刃部等局部区域的硬化。激光可以远距离传送，容易实现一台激光器供若干工作台同时或单独使用，易于采用计算机对激光热处理工艺过程进行控制和管理，实现生产过程的自动化。此外激光热处理具有耗电低、变形极小，不需冷却介质，速度快、效率高及无工业污染等优点。

激光热处理一般采用功率为千瓦级的连续工作 CO_2 激光，通常的激光热处理实验装置如图 5-12 所示。激光热处理的关键设备是激光器，目前工业中应用最多的是 500 W 级纵向直流放电 CO_2 激光器，其性能如下：额定输出功率 200~800 W，光束直径 $\phi 14 \text{ mm}$ ，发散角小于 2 mrad。

利用激光照射事先经过黑化处理的工件表面，使表面薄层快速加热到相变温度以上（低于熔点），光束移开后通过自激冷却即可实现表面淬火硬化。用于激光表面淬火的功率密度为 $10^3 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$ 。由于加热工件表面温度及穿透深度均与激光照射持续时间的平方根成正比，因此当激光束功率及光斑尺寸确定后，通过改变激光束的扫描速度，就可以控制工件

表面温度与加热层深度。

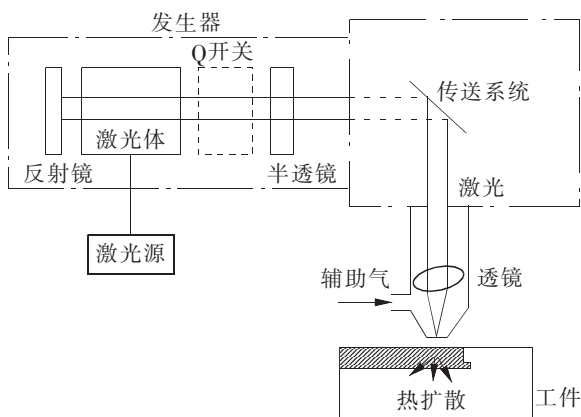


图 5-12 激光热处理装置示意图

激光淬火的基本工艺参数是：激光器的输出功率、光斑尺寸、扫描速度（或工件移动速度）以及材料对光的吸收率等。

激光淬火钢件表层可获得极细的马氏体，合金钢硬化区组织为极细板条或针状马氏体、未溶碳化物及少量残留奥氏体，激光硬化区与基体交界区呈现复杂的多相组织。

激光表面淬火与高频及火焰表面加热淬火相比较，前者受热及冷却区域极小，因而畸变极小、残余应力小，且由于无氧化脱碳作用，淬火表面更加光亮洁净，从而可以在最终精加工工序以后进行。利用激光表面加热淬火可改善模具表面硬度、耐磨性、热稳定性、抗疲劳性和临界断裂韧度等力学性能，是提高模具寿命的有效途径之一。例如 GCr15 钢制轴承保持架冲孔用的冲孔凹模，经常规处理后的使用寿命为 1.12 万次，经激光处理后的寿命达 2.8 万次。GCr15 钢制挤压孔边用的压坡模，经激光处理后，可连续冲压 6 000 件，而按常规热处理工艺处理后，最高使用寿命为 3 000 件。

如果在模具表面涂敷硬质合金粉末，即可实现表面合金化。激光加热的优点是工件无须置于真空。表 5-9 所列为 45 钢和 42CrMo 钢激光加热表面淬火的效果。

表 5-9 45 钢和 42CrMo 钢激光加热表面淬火的效果

钢号	黑化处理	淬硬层深度/mm	淬硬带宽度/mm	硬度 HV	淬硬层组织
45	发蓝处理	0.19~0.20	1.08~1.10	542	细针状马氏体
	磷化	0.22~0.27	1.10~1.23	542	细针状马氏体
	涂磷酸盐	0.25~0.31	1.18~1.35	585	细针状马氏体
42CrMo	发蓝处理	0.35	1.30	642	隐针马氏体
	磷化	0.35	1.53	642	隐针马氏体
	涂磷酸盐	0.35	1.64	642	隐针马氏体

从表 5-9 可以看出,为了提高光能的吸收率,被加工金属表面必须施行黑化处理,最好的黑化方法是磷酸盐法。

5.3.5 电子束表面强化

电子束表面强化是利用高能量密度的电子束加热进行表面淬火的新技术。电子束加热可以达到 $10^6 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$ 的能量密度。图 5-13 所示为电子束表面加热淬火装置示意图。利用电子束亦可实现相变硬化、熔化、凝固和表面合金化。电子束是由阴极(灯丝)发出的电子,通过高电压环形阳极加速,并聚焦成束使电子束流打击金属表面,达到加热的效果。

由于高能量密度的电子束是在极短的时间内打击金属表面,所以使热量在表面逸散的表面温度可以达到相变温度范围。当被加热表面吸收的热量很快地被底层材料吸收而冷却时,就可以完成淬火冷却过程,从而产生有效的自行淬火。

和激光热处理相比,电子束热处理的缺点是模具必须放在真空室内,装卸不方便。但是电子束热处理的加热效率比激光高,不需要激光热处理的“表面黑化”过程,凡激光能对准的表面都可以利用电子束加热。电子束的快速加热,使零件变形极小,无须后续的校正工作,淬火后的金相组织可获得细晶结构。表 5-10 所列为 42CrMo 钢电子束表面淬火的效果。

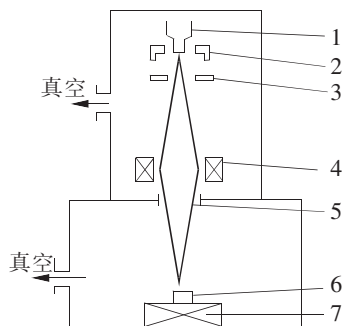


图 5-13 电子束表面加热淬火装置示意图

- 1—阴极；2—聚束极；3—阳极；
4—聚焦丝圈；5—电子束；
6—工件；7—工件驱动机构

表 5-10 42CrMo 钢电子束表面淬火效果

编 号	加速电压 /kV	束流 /mA	聚焦电流 /mA	电子束功 率/kW	淬火带宽 度/mm	淬硬层深 度/mm	淬硬层硬 度 HV	淬硬层组织
1	60	15	500	0.90	2.4	0.35	627	5~6 级细针状马氏体
2	60	16	500	0.96	2.5	0.35	690	隐针马氏体
3	60	18	500	1.08	2.9	0.45	657	隐针马氏体
4	60	20	500	1.20	3.0	0.48	690	5~6 级针状马氏体
5	60	25	500	1.50	3.6	0.80	642	4 级针状马氏体
6	60	30	500	1.80	5.0	1.55	606	2 级针状马氏体

5.3.6 离子表面强化（注入合金化）

将元素的原子、离子化并在电场中获得高能量后强行注入金属材料表层,以形成极薄的近表面合金层,从而改变金属表面的物理或化学性质。离子注入系统的原理示意如图 5-14 所示。

将选定元素的原子(He、N、B、Al、Ti、Cr、Ni、Co、Mo 等)在离子源处电离成离

子,然后将离子在高压电场 ($10\sim 500\text{ kV}$) 加速,依 $E = qV$ 的规律获得高的动能 (q 为离子电荷),并用横向磁场把不同质量的离子偏转不同的角度,选出特定能量和特定质量的离子,通过扫描系统注入金属靶材料表面。整个过程在 $1.3\times 10^{-3}\text{ Pa}$ 的真空中进行。

离子注入深度一般在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下,在此近表面层中注入的金属以高过饱和固溶体、亚稳相、非晶态组织和平衡合金等不同结构形式存在。离子注入金属后可改善其耐磨性、耐蚀性和抗疲劳能力。

离子注入原则上可以任意选择注入元素,不受冶金学限制,它在高真空及低温下进行,不会引起模具畸变,不影响表面粗糙度,可精确控制注入离子的浓度、浓度分布和注入深度。目前离子注入技术不断发展并日趋成熟,离子设备不断完善。离子注入工模具进行表面改性已获得越来越多的应用。

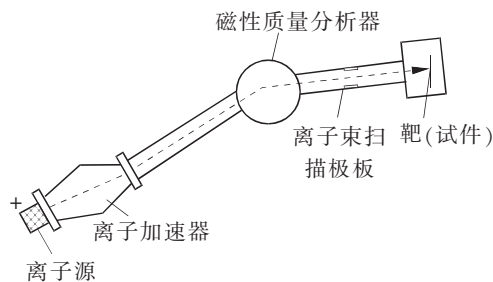


图 5-14 离子注入系统示意图

5.3.7 喷丸表面强化

喷丸处理是一种表面强化技术。喷丸强化是利用大量钢丸（弹丸的直径一般为 $0.3\sim 1.7\text{ mm}$ ）高速打击已成形并热处理后的模具表面,使表面产生冷硬层和残余压应力,可以显著提高模具的疲劳强度,同时可减少模具表面缺陷（如污物及脱碳）,从而提高模具的使用寿命。

对一些模具（如 $3\text{Cr}2\text{W}8\text{V}$ 钢制热作模具）进行喷丸处理后的使用情况表明,喷丸强化有如下的特点:

(1) 由于喷丸在金属表面产生残余压应力和晶格畸变,致使喷丸强化能明显地减缓疲劳裂纹的萌生期或抑制其扩展速度。

(2) 喷丸过程,金属表面的塑料变形和残余应力状态变化及重新分布,给残留奥氏体的转变提供了有利条件,残留奥氏体转变为马氏体,提高了模具表面硬度和抗冲击磨损能力,进而提高模具表层的屈服强度,可以延缓疲劳裂纹萌生期,提高模具的疲劳强度。

(3) 模具喷丸后,由于圆形弹丸的高速反复锤击,削平了刀痕,改善了磨削加工和电加工的表面粗糙度 $0.5\sim 1$ 级,在一定程度上提高了疲劳强度。

$3\text{Cr}2\text{W}8\text{V}$ 钢制活动扳手热锻模经常规处理后,一次刃磨的使用寿命为 $1\text{ }750$ 件左右,经喷丸处理后,使用寿命为 $2\text{ }634$ 件,寿命提高 50% 。 $\text{Cr}12$ 钢制洗衣机定转子落料冲裁模,经淬火、回火后,一次刃磨的使用寿命为 $1.2\sim 3.2$ 万次;经喷丸强化后,一次刃磨的使用寿命为 11.49 万次,寿命提高 $2.5\sim 9.5$ 倍。

5.3.8 电火花表面强化

电火花表面强化是利用工具电极与工件间在气体中产生的火花放电作用，把作为电极的导电材料熔渗进工件表层，形成合金化的表面强化层，改善工件表面的物理及化学性能的方法。

电火花表面强化层的性能主要决定于模具本身和电极材料，通常所用的电极材料有TiC、WC、ZrC、NbC、Cr₃C₂、硬质合金等。电火花强化表面因电极材料的沉积发生有规律的、较小的长大，除此之外，模具没有其他变形，其心部的组织与性能也不发生变化，因此十分适用于模具表面强化处理。

金属电火花表面强化的原理是在工具电极与模具之间接上直流电源或交流电源，由于振动器的作用使电极与模具间的放电间隙频繁变化，工具电极与工件间不断产生火花放电，从而实现金属表面的强化。

电火花强化过程示意图如图5-15所示。当电极与模具之间的距离较大时，电源经电阻即对电容充电，电极在振动器的带动下向模具靠近（见图5-15（a））。当电极与模具之间的间隙接近到某个距离时，间隙中的空气在强电场的作用下电离，产生火花放电（见图5-15（b）），使电极和模具在发生放电部分的金属局部熔化，甚至汽化。电极继续接近模具并与模具接触时，火花放电停止。在接触点流过短路电流，使该处继续加热，由于电极以适当压力压向模具，使熔化的材料互相粘接、扩散而形成合金或新的化合物（见图5-15（c））。电极在振动器的作用下，离开了模具，模具放电部分急剧冷却（见图5-15（d））。经多次放电，并相应地移动电极的位置，在模具表面形成强化层。

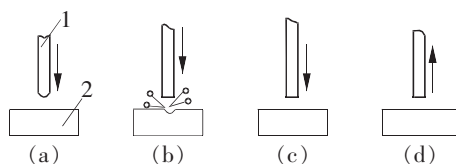


图5-15 电火花表面强化过程示意图

(a) 开始；(b) 工作；(c) 完成；(d) 结束

1—工具电极；2—模具

电火花表面强化过程中发生了物理化学变化，主要包括超高速淬火、渗碳、渗氮、电极材料的转移等。

1) 超高速淬火

电火花放电在模具表面的极小面积上产生高温，使该处的金属熔化和部分汽化，当火花放电在极短的时间内停止后，被加热了的金属会以很快的速度冷却下来。这相当于对模具表面层进行了超高速淬火。

2) 渗氮

在电火花放电通道区域内, 温度很高, 空气中的氮分子呈原子状态, 它和受高温而熔化的金属有关元素合成高硬度的金属氮化物, 如氮化铁、氮化铬等。

3) 渗碳

来自石墨电极或周围介质的碳元素熔解在受热而熔化的铁中, 形成金属的碳化物, 如碳化铁、碳化铬等。

4) 电极材料的转移

在操作压力和火花放电的条件下, 电极材料转移到模具金属熔融表面, 有关金属合金元素 (W、Ti、Cr 等) 迅速扩散到金属的表面层。

电火花表面强化层具有如下特征:

(1) 当采用硬质合金作电极材料时, 硬度可达 $1\ 100\sim1\ 400\text{HV}$ (70HRC 以上) 或更高, 耐热性、耐蚀性和抗疲劳强度都大大提高;

(2) 当使用铬锰、钨铬钴合金、硬质合金作工具电极强化 45 钢时, 其耐磨性比原表层提高 $2\sim2.5$ 倍;

(3) 用石墨作电极材料强化 45 钢, 用食盐水作腐蚀性试验, 其耐腐蚀性提高 90%, 用 WC、CrMn 作电极强化不锈钢时, 耐蚀性提高 $3\sim5$ 倍。

(4) 硬化层厚度为 $0.01\sim0.08\text{ mm}$ 。

钢制模具工作表面的电火花表面强化通常采用硬质合金电极。为了使被强化的表面光洁, 事先必须将模具和电极表面清洗干净, 然后手持振动器, 将电极沿模具工作表面移动, 并保持适当压力, 使火花放电均匀连续。

电火花熔渗合金化层的形成是一个渐进过程, 在每一电规范下, 合金化层厚度出现最大值, 在通常使用的电容范围内, 最佳单位面积涂覆时间为 $6\sim12\text{ min/cm}^2$, 过分延长涂覆时间将出现层厚减薄的趋势, 并使性能恶化。可用直线方程式表示:

$$\tau = 0.02C + 5.55$$

式中 τ ——最佳单位面积涂覆时间;

C ——电容, 单位为 μF 。

如电极为 YG8, 电压 60 V, 频率 250 Hz, 电容 $60\ \mu\text{F}$, 最佳涂覆时间为 6.75 min/cm^2 , 合金化层厚度为 $13\ \mu\text{m}$; 电容 $322\ \mu\text{F}$, 涂覆时间为 11.99 min/cm^2 , 合金化层厚度为 $27\ \mu\text{m}$ 。

为了降低合金化层的热疲劳应力和电火花合金化处理的应力, 可穿插 $1\sim2$ 次 $500\text{ }^\circ\text{C}\times4\text{ h}$ 去应力退火, 这样可获得性能优良、层深较厚的表面合金化层。改换电极材料, 可使合金化层继续增厚, 电极断面尺寸不影响合金化层的厚度。钢中碳的质量分数小于 0.8% 时, 随钢中含碳量增加合金层增厚; 碳的质量分数大于 0.8% 时, 随钢中含碳量增加合金层变薄。

用 YG8、Nb、Ti、Ta 合金化, 工件表面将获得极高的显微硬度值。

电火花合金层比未经电火花合金化处理的模具热疲劳性能提高 3 倍, 抗氧化性能提高

2 倍, 在各种试验介质中的抗蚀性提高 3~15 倍; 表 5-11 所示为 3Cr2W8V 钢电火花合金化层的性能。

表 5-11 3Cr2W8V 钢电火花合金化层性能

处理条件	抗疲劳性能 (出现裂纹的试验周次)	抗氧化性	耐蚀性/(g·cm ⁻²)	
		[平均增重/(g·cm ⁻²)]	20% H ₂ SO ₄ ×16 h	20% NaOH×16 h
3Cr2W8V 未经处理	27~34	2.54×10^{-3}	6.72×10^{-2}	4.66×10^{-5}
经电火花合金化处理 (60 V、140 μF、YG8)	128~132	1.27×10^{-3}	0.422×10^{-2}	0.804×10^{-5}

电火花表面强化在模具上应用效果显著。例如用 YG8 作电极, 对 3Cr2W8V 钢模具进行电火花表面强化处理以后, 模具在各类酸碱中的耐蚀性提高 4~15 倍; 对 Cr12 钢模具刃口部位经电火花表面强化后, 模具的平均使用寿命由 5 万次提高到 20 万次。

思考题

1. 请解释下列名词术语: 化学热处理、渗碳、渗氮、碳氮共渗、氮碳共渗、硼砂浴覆层法 (TD 法)、电镀、电刷镀、气相沉积、化学气相沉积 (CVD)、物理气相沉积 (PVD)。
2. 模具表面强化处理的目的是什么? 目前模具工业生产中用于模具表面加工强化的方法主要有哪些?
3. 碳氮共渗的原理是什么? 碳氮共渗与渗碳相比有哪些特点? 它们两者常用于什么场合?
4. 渗氮的目的是什么? 常用的渗氮方法有哪些?
5. 渗硫有什么作用? 工业上目前常用的渗硫方法有哪些?
6. 模具生产中渗硼方法有哪几种? 渗硼法适用于哪些模具钢及哪几类模具? 使用效果如何?
7. 氮碳共渗与渗氮有何区别? 常用的氮碳共渗方法有哪些? 它适用于哪几类模具及哪些模具钢? 使用效果及前景如何?
8. 硼砂盐浴覆层法的原理是怎样的? 盐浴渗铌具有哪些特点? 盐浴渗铌和渗钒适应于哪几种模具?
9. 电刷镀有何特点? 它与电镀有何区别?
10. 化学镀有何特点? 化学镀的原理是什么? 其涂层有何特点? 它适用哪些种类模具?
11. 气相沉积分为哪几类方法? CVD 法包括哪几个过程? PVD 法有哪些方法, 它们各自的原理是怎样的? CVD 法和 PVD 法分别用于哪些模具的强化处理?

附录

附表 1 国内外常用模具钢钢号对照表

序号	中国 GB	美国 AISI	前苏联 ГОСТ	日本 JIS	德国 DIN	英国 BS	法国 NF
1	20	1 020	20	S20C	X22	En2C	C20
2	20Cr	5120	20X	SC _k 22	20Cr4	En207	18C3
3	12CrNi3	E3310	12XH3A	SNC22H	14NiCr14	655A12	14NC12
4	T7	W1 和 W2	Y7	SK6	C70W1		
5	9Mn2V		9Г2Φ	SKT6	90MnV8	B02	80M8
6	GCr15	L3	IIIХ15		105Cr5	BL3	100C2
7	7CrSiMnMoV			SX105			
8	4Cr13		4X13	SUN420J2	X40Cr13	En56D	240Cr13
9	06Ni6CrMoVTiAl						
10	25CrNi3MoAl						
11	Cr12Mn5Ni4Mo3Al						
12	3Cr2Mo	P20					
13	38CrMoAl		38ХМЮА				
14	40Cr	5140	40X	SCr4H	41Cr4	530A40	38Cr4
15	5CrNiMnMoVSCa						
16	8Cr2MnWMoVS						
17	T10	W1 和 W2	Y10	SKS94	100V1	BW1B	Y2105
18	CrWMn	O7	XBГ	SKS31	105WCr6		
19	Cr5MoV	A2				~BA2	2100CDV5
20	Cr12MoV		X12M				
21	Cr12Mo1V1	D2		SKD11	X165CrMoV12	BD2	Z200C12
22	Cr12	D3	X12	SKD1	X210Cr12	BD3	Z200C12
23	Cr4W2MoV						
24	W6Mo5Cr4V2	M2	P6M5	SKH9	S6-5-2	BM2	285WD06-06
25	W12Cr4Mo3V3N						
26	5CrW2S1	S1	5XB2C	SKS41	45WCrV7		
27	6W6Mo5Cr4V	H42					

续表

序号	中国 GB	美国 AISI	前苏联 ГОСТ	日本 JIS	德国 DIN	英国 BS	法国 NF
28	6Cr4W3Mo2VNb	VIG (ASM) L6	5XГМ 5XHM 5X2MHΦ	SKT5 ~SKT4	~40CrMnMo7 55NiCrMoV6	PLMB/1 (ESC)	60NCDV06-02
29	7Cr7Mo3V2Si						
30	5CrMnMo						
31	5CrNiMo						
32	5Cr2NiMoVSi	H11 H13 ~H11	4X5MΦC 4X5MΦ1C 4X5B2ΦC	SKD6 SKD61	X38CrMoV51 X40CrMoV51	BH11 BH13	Z35CD05
33	4Cr5MoSiV						
34	4Cr5MoSiV1						
35	4Cr5W2SiV	H21 ~H10 H10 ~Vasco MA	3X2B8Φ	SKD5	X30WCrV93 X32CrMoV33	BH21A BH10	Z30WCV9 320CV28
36	3Cr2W8V						
37	3Cr3Mo3W2V						
38	4Cr3Mo3SiV						
39	5Cr4W5Mo2V						
40	8Cr3		8X3				

附表 2 合金工具钢的性能特点和用途

钢 号	性能特点	用途举例
9SiCr	是用途广泛的低合金工具钢, 其淬透性和淬硬性较高, 耐回火性较好, 优于碳素工具钢。适于分级淬火、等温淬火, 热处理时变形小; 因含 Si, 脱碳倾向性较大	可用于制作冷作模具, 如冷冲模、打印模、低压力工作条件下的冷锻模等
8MnSi	其淬透性、韧性和耐磨性均优于碳素工具钢	小尺寸热锻模和冲头、拔丝模、冷冲模等
Cr06	与 Cr2 和 9Cr2 相比, 其含碳量最高, 含 Cr 量最低, 淬火后硬度和耐磨性都很高, 刃口锋利, 但较脆	可制作简单冷作模具
Cr2	淬火后的硬度和耐磨性都很高, 淬火变形不大, 但高温塑性差	可用于冷作模具、拉丝模等
9Cr2	性能与 Cr2 基本相似, 因含碳量稍低, 其韧性较 Cr2 好	主要用作冷冲模及冲头、钢印等
W	淬火后的硬度和耐磨性较碳素工具钢好, 热处理变形小, 水淬不易开裂, 耐回火性较好	可用于冷作模具和工作温度不高、切削速度不大的刀具
4CrW2Si	高温时有较好的强度和硬度, 回火后有较高的冲击韧度	可用于冲裁切边复合模、冲模以及部分小型热作模具, 如中应力热锻模, 受热低的压铸模等
5CrW2Si	性能与 4CrW2Si 相近, 回火后有较高的冲击韧度, 有一定的淬透性和高温力学性能, 热处理时对脱碳、变形和开裂的敏感性不大	用于冷冲裁和切边用凹模, 也用于热剪切模、热锻模、易熔合金的压铸模等
6CrW2Si	与 4CrW2Si 和 5CrW2Si 相比, 具有较高的淬火硬度和一定的高温强度	常用于冲击模具, 也用于制作热作工具, 如热铆的冲头、高温压铸轻合金的顶头、热锻模等
Cr12	应用广泛的冷作模具钢, 具有较高的强度、淬透性和耐磨性, 淬火变形小; 但冲击韧度差, 易脆裂, 易形成不均匀的共晶碳化物, 导热性与高温塑性也较差	常用于制造受冲击载荷小和耐磨性高的冷冲模、冲头、拉丝模等
Cr12Mo1V1	国际上广泛应用的冷作模具钢, 属莱氏体钢。具有高的淬透性、淬硬性和耐磨性; 热处理变形小, 高温抗氧化性能、淬火与抛光后抗蚀性能良好	用于制造各种高精度、长寿命的冷作模具, 如形状复杂的冲孔凹模、冷挤压模等
Cr12MoV	淬透性高, 截面为 300~400 mm 以下的工件可完全淬透, 其淬火、回火后的硬度、强度、韧性均比 Cr12 高, 耐磨性和塑性也较好, 变形小, 但高温塑性差	用于制造截面较大、形状复杂、长寿命的冷作模具, 如各种冲孔凹模, 切边模、拉深模、滚边模、拉丝模等

续表

钢 号	性能特点	用途举例
Cr5Mo1V	相当于美国 A2 钢, 具有良好的空淬性能, 空淬尺寸变形小, 韧性比 9Mn2V、Cr12 均好, 碳化物均匀细小, 耐磨性好	用于制造韧性好、耐磨性高的冷作模具, 如成形模、下料模、冲头、冷冲裁模等
9Mn2V	经济型冷作工具钢, 价格不高而综合力学性能优于碳素工具钢, 具有较高硬度和耐磨性, 淬透性好, 淬火变形小, 过热敏感性低	用于制造尺寸较小的冲模、冷压模、雕刻模、落料模等
CrWMn	用途广泛的微变形钢, 淬透性好, 变形小, 淬火低温回火后有高的硬度、耐磨性和尺寸稳定性, 且韧性较好, 但易形成网状碳化物	用于制造形状复杂、高精度的冷冲模
9CrWMn	性能与 CrWMn 相近, 但由于碳含量稍低, 碳化物偏析比 CrWMn 好, 因而力学性能更好, 但热处理后硬度稍低	用于制造形状复杂、高精度的冷冲模
Cr4W2MoV	新型中合金冷作量量钢, 共晶化合物颗粒细小, 分布均匀, 具有较高的淬透性和淬硬性, 且有较好的综合力学性能、耐磨性和尺寸稳定性	用于制造冷冲模、冷挤压模、落料模、搓螺纹板等
7CrSiMnMoV	火焰淬火冷作模具钢, 具有较好的淬透性, 淬火温度范围宽, 过热敏感性小, 淬火后获得较高的表面硬度、耐磨性和良好的韧性, 热处理变形小	用于大型镶块模具、下料模、冲头、成形模、拉深模、冷冲模、压塑模、陶土模等
6Cr4W3Mo2VNb	基体钢类型高强韧性冷作模具钢, 且有高强度、高硬度, 且韧性好, 又有较高的疲劳强度	用于制造受冲击载荷及形状复杂的冷作模具、冷挤压模具、冷墩模具、冷冲模、冷剪模等
6W6Mo5Cr4V	低碳高速钢类型冷作模具钢, 有较好的淬透性, 并具有高硬度、高耐磨性、高强度和良好的热硬性, 且韧性好	用于制造高冲击载荷下抗磨损的模具、冷挤压模具、拉深模具、冷墩模具、成形模、冷冲模、冲头等
5CrMnMo	不含 Ni 的热作模具钢, 性能与 5CrNiMo 相近, 淬透性稍差; 此钢具有良好的韧性、强度和高耐磨性, 对回火脆性不敏感	有于形状简单的小型锻压模具, 如模锻锤用模块等 (边长 ≤ 400 mm)
5CrNiMo	具有良好的韧性、强度和高耐磨性, 并有良好的淬透性, 在高温下的韧性及耐疲劳性高于 5CrMnMo	国内已广泛用于各种中大型锤模, 但不宜用于制造大型复杂的和工作温度较高的重载荷模具
3Cr2W8V	属莱氏体钢, 在高温下具有较高的硬度, 但其韧性和塑性较差, 淬透性中等, 截面厚度 ≤ 80 mm, 此钢相变温度较高, 耐热疲劳性良好	用于作高温、高应力但不受冲击载荷的凸模、凹模, 如平锻机上的凸凹模、铜合金挤压模、压铸用模具等
5Cr4Mo3SiMnVAI	基体钢类型冷热兼用的新型模具钢, 淬透性和淬硬性均较好, 作为热作模具钢具有较高的高温强度和较优良的耐热性、冷热疲劳性; 作为冷作模具钢, 具有较高的韧性	用于标准件行业和轴承行业的热挤压模, 以及冷墩模, 冷冲凹模, 可以代替 3Cr2W8V、Cr12MoV 使用

续表

钢 号	性能特点	用途举例
3Cr3Mo3W2V	具有良好的冷热加工性能, 较高的热强性、热疲劳性能, 良好的耐磨性和耐回火性, 并有一定的耐冲击抗力, 淬硬性较好	用于锻锻模、精锻模、辊锻模、压力机用模具等热作模具
5Cr4W5Mo2V	新型热作模具钢, 具有较高的热硬性、高温强度和较高的耐磨性、耐回火性及一定的冲击韧度, 可进行一般热处理或等温热处理与化学热处理	常用于制造热挤压模具, 可替代 3Cr2W8V, 也用于制作精锻模、热冲模等
8Cr3	具有较好的淬透性, 一定的室温和高温强度, 形成细小的碳化物且均匀分布, 耐磨性能较好	常用于冲击振动较小、工作温度低于 500℃ 的耐磨损的模具, 如热冲裁模、热切边模、热顶锻模、成形冲模、热弯曲模等
4CrMnSiMoV	具有较高的高温力学性能, 耐热疲劳性能好, 可代替 5CrNiMo	用于制造锤锻模、压力机锻模、校正模、热弯曲模等
4Cr3Mo3SiV	具有较高的淬透性和高温硬度, 以及优良的韧性, 可代替 3Cr2W8V	用于制作热挤压模、热锻模、热冲模等
4Cr5MoSiV1	广泛应用作空冷硬化型热作模具钢, 与 4Cr5MoSiV 钢相比, 此钢具有较高的热强度和硬度, 在中温条件下具有良好的韧性, 热疲劳性能和一定的耐磨性, 并且淬透性高, 热处理变形小	广泛用于热挤压模具与芯棒、模锻锤的锻模、高速精锻用模具镶块、锻造压力机模具, 以及铝合金压铸模等
4Cr5MoSiV	空冷硬化型热作模具钢, 淬透性好, 在中温 ($\approx 600^\circ\text{C}$) 条件下具有较好的热强度、热疲劳性能和一定的耐磨性, 选用较低的淬火温度空淬, 热处理变形小	常用于制造铝合金压铸模、热挤压模、热切边模、锤锻模、压力机锻模、塑料模具, 以及穿孔用工具和芯棒
4Cr5W2VSi	空冷硬化型热作模具钢, 在中温下具有较高的硬度和热强度, 良好的韧性、耐磨性和热疲劳性能	用于锻压模具、热挤压模具与芯棒、冲头、零部件成型用高速锤锻模, 以及铝、锌等轻金属的压铸模等
7Mn15Cr2Al3V2WMo	高 Mn-V 系无磁钢, 此钢在各种状态下都能保持稳定的奥氏体, 具有非常低的磁导率, 高的硬度、强度, 较好的耐磨性, 但切削加工性差	用于制造无磁模具, 也用于制作在 700~800℃ 使用的热作模具
3Cr2Mo	广泛应用的预硬型塑料模具钢, 也称 P20, 综合力学性能良好, 淬透性高, 较大截面的钢材能获得较均匀的硬度, 且具有良好的抛光性能; 经预硬化后, 再经冷加工制造成模具, 可直接使用	用于制造大、中型精密塑料模具, 也用于低熔点合金 (如锡、锌、铝合金) 的压铸模
3Cr2MnNiMo	广泛应用的预硬型塑料模具钢, 该钢具有高的淬透性、良好的抛光性能、电火花加工性能和皮纹加工性能, 经预硬化后, 再经冷加工制造成模具, 可直接使用。该钢是 P20 + Ni 的改良型牌号	用于制造大型、特大型塑料模具和精密的塑料模具, 也用于低熔点合金的压铸模

附表 3 国内研制的模具钢代号说明

代号或简称	牌 号 简 介
65Nb	基体钢类型的高强韧性冷作模具钢，原华中理工大学等单位研制。钢的平均碳质量分数为 0.65%，曾用钢号 65Cr4W3Mo2VNb 表示，故简称 65Nb，以突出其含碳量和含 Nb 量的特点。该钢号已纳标，见 GB/T 1299—2000，6Cr4W3Mo2VNb
6W6	低碳型高速钢用于冷作模具钢，钢铁研究总院、大冶钢厂等单位研制。6W6 钢较常用的 6-5-4-2 高速钢（W6Mo5Cr4V2）的碳、钒含量均低，具有较高的韧性，主要用于钢铁冷挤压模具。该钢号已纳标，见 GB/T 1299—2000，6W6Mo5Cr4V
8Cr2S	易切削精密冷作和塑料模具兼用的新型模具钢，原华中理工大学、首钢特钢公司等单位研制。该钢号采用多元合金化，淬透性好，热处理变形小，合金含量低，经济性良好；提高含硫量以改善切削加工性是其特点。在《冲模用钢及其热处理 技术条件》（JB/T 6058—1992）文件中推荐了该钢号
CH-1	火焰淬火型冷作模具钢，首钢特钢公司研制。CH-1 钢具有较好的淬透性，淬火温度可在 100~150℃ 范围内波动，淬火后都能获得较好的综合力学性能和表面硬度，淬火后工件热处理变形小。该钢号已纳标，见 GB/T 1299—2000，7CrSiMnMoV
ER5	高铬冷作模具钢，上海材料研究所研制。该钢号具有高耐磨性和高冲击韧性
GD	高强韧性低合金冷作模具钢，取“高、低”（Gao、Di）两个汉语拼音字头为其代号，原华中理工大学研制。GD 钢类似于美国（ASTM）的 L6，俄罗斯（ГОСТ）的 7XГ2BMφ 和德国（DIN）的 75CrMoNiW6-7 等，在《冲模用钢及其热处理 技术条件》（JB/T 6058—1992）文件中推荐了该钢号
GM	高耐磨性冷作模具钢，取“高、磨”（Gao、Mo）两个汉语拼音字头为其代号，原华中理工大学研制。GM 钢与 ER5 钢属于同一类型，具有高硬度，接近高速钢，优于高 Cr 钢和基体钢；其冲击韧性优于高速钢和高 Cr 钢
ICS	高耐磨性冷作模具钢，上海钢铁研究所研制。ICS 钢的硬度高、耐磨性好，反印性能优良。适用于翻印模等
LD (LD-1)	高强韧性冷作模具钢，按其用途而取“冷墩”（Leng Dun）两个汉语拼音字头为其代号，上海材料研究所研制。LD 原为系列钢号，分 LD-1，LD-2，…等，但在实际应用中以 LD-1 为最佳，其余未推广应用，故仍用 LD 代号表示。该钢在保持较高韧性的情况下，其抗压强度、抗弯强度、耐磨性等较 65Nb 优，在上述的 JB/T 6058—1992 文件中推荐了该钢号
LD-2	属 LD 系列钢号之一，上海材料研究所研制。该钢是在 LD-1 钢基础上对 Mo 含量稍作提高，为基体钢类型的模具钢，耐磨性好，也用作塑料模具钢
012Al	基体钢类型的热作模具钢，贵阳钢厂研制。该钢中加入 Al，提高了韧性和塑性，其冷热疲劳性能优于 3Cr2W8V 钢。012Al 钢已纳标，见 GB/T 1299—2000，5Cr4W3SiMnVAl
50Nb	热挤压模具钢，原华中理工大学等单位研制。它是同类型 50Si 钢（5Cr4W3Mo2VSi）的改进型，为突出 Nb 的作用而取名。50Nb 钢具有高淬透性和热稳定性，比 3Cr2W8V 的性能更优良
CG-2	热作、冷作兼用的模具钢，上海钢铁研究所研制，贵阳钢厂试生产。该钢具有良好的强韧性、耐磨性和热疲劳抗力大等特点，可代替 3Cr2W8V 钢。CG-2 钢还可以氮碳共渗（软氮化）处理，以强化其性能，提高模具寿命

续表

代号或简称	牌 号 简 介
CH95	具有良好热强性的热作模具钢，上海交通大学机械学院研制。该钢主要用于精锻模具
ER8	空冷硬化热作模具钢，上海材料研究所研制。该钢是在欧洲热销的 QRO80 模具钢基础上改良开发的新型钢种，具有良好的热强性、热硬性、耐磨性以及高的冲击韧度和抗冷热疲劳性，并具有高的抗热振性
GR	具有良好热强性的热作模具钢，上海材料研究所研制。该钢主要用于加工高温合金的热锻压模具，如热镦锻模、热冲模、热挤压模等
HD (HD2)	马氏体热作模具钢，华中理工大学等研制。HD2 钢是 HD 钢的改进型，在保持 HD 钢高强度条件下，进一步提高韧性获得良好的室温与高温力学性能，并具有良好的热稳定性及工艺性能，适用于铜管热挤压的穿孔针
HM-1	高强韧性热作模具钢，北京机电研究所、首钢特钢公司研制。该钢是参照国际标准 ISO4957 的 30CrMo3 钢和英国 BS4659 的 BH10 钢并进行改进的钢种，具有高的强韧性和抗冷热疲劳性，热稳定性好。HM-1 钢已纳标，见 GB/T 1299—2000，3Cr3Mo3W2V
HM-3	高强韧性热作模具钢，北京机电研究研制。该钢是参照美国 (AISI) H10 钢和俄罗斯 (ГОСТ) 3X3M3Φ 钢的改进型钢种，与 HM-1 相类似。HM-3 钢中加入 Nb 起强化作用
JCD	铸造热锻模具钢，吉林工业大学研制。该钢具有良好的综合性能，其抗冷热疲劳性、回火稳定性与热稳定性等均优于 5CrMnMo 钢。适用于热锻模具，不用改锻，材料利用率高。但该钢在文献上介绍的化学成分范围太宽，影响推广
RM2	热挤压模具钢，北京机电研究所第一汽车制造厂研制。该钢可代替 3Cr2W8V 钢，模具寿命可提高数倍。RM2 钢已纳标，见 GB/T 1299—2000，5Cr4W5Mo2V
Y4	主要用于铜合金压铸模具，也可用于中小型压力机模具和热挤压模具等。该钢由上海材料研究所研制，Y 是压铸的“压”(Ya)字的拼音字头，Y4 表示压铸模具钢 4 号。该钢具有高的热强性及热稳定性，并有良好的韧性、导热性及工艺性能
Y10	铝合金压铸模具钢，上海材料研究所研制，Y10 表示压铸模具用钢 10 号。与 3Cr2W8V 钢相比，该钢具有抗冷热疲劳性能好，热处理变形小，抗铝溶损性能好等优点
ZDM2	铸造锻模钢，武汉机械工艺研究所等单位研制。该钢具有良好的淬透性，较高的回火稳定性，较好的抗冷热疲劳性能和耐磨性能；其抗拉强度和断裂韧度较高，但常温冲击韧度较差，当加热到 200℃时， α_K 值明显增加。用于陶瓷型精铸模具
5NiSCa	预硬型易切削塑料模具钢，原华中理工大学等单位研制。该钢应用 S-Ca 复合元素改善切削加工性，有良好的镜面抛光性，适于制造中、大型塑料注射模。预硬化后硬度 35~45HRC。在前述的 JB/T 6058—1992 文件中推荐了该钢号
8CrMn	镜面塑料模具钢，为易切削预硬化钢。该钢热处理工艺简便，淬火时可空冷，调质处理后硬度 33~35HRC，抗拉强度可达 3 000 MPa。用于大型塑料注射模，可以减小模具
B25	体积预硬型塑料模具钢，组织为珠光体+铁素体，上海宝钢研制的专利产品，B 是宝钢的企业代号
B30	预硬型塑料模具钢，组织为贝氏体，上海宝钢研制的专利产品。预硬化后硬度 28~35HRC，还可进行渗氮处理进一步强化，其性能优于同类型的瑞典 718 钢 (ASSAB)

续表

代号或简称	牌 号 简 介
LJ	超低碳型塑料模具钢，原华中理工大学等单位研制。该钢冷挤压成形后再经渗碳、淬火、回火，使模具表面获得高硬度和高耐磨性，而心部强韧性好，用于制造高精度、高镜面、型腔复杂的塑料模具。与 LJ 钢同类型的钢如美国 (AISI) P2、瑞典 8416 钢等
PCR	耐蚀型塑料模钢，上海材料研究所等单位研制。该钢为时效硬化型不锈钢，适用于制作聚氯乙烯及混有阻燃剂的热塑性塑料注射模
PMS	镜面塑料模具钢，上海材料研究所研制。PMS 钢是一种析出硬化型时效钢，具有优良的镜面加工性能、良好的冷热加工性能、电加工性能和综合力学性能。经固溶处理和时效处理后，基体为贝氏体+马氏体双相组织，热处理变形率小。该钢还具有良好的渗氮表面强化性能。适用于制作要求高镜面、高精度的各种塑料模具
P20+Ni	镜面塑料模具钢。该牌号不是我国研制的代号，而是国内市场上流行的俗称，意为美国 P20 钢添加 Ni 元素的改进型牌号，现已纳入我国标准 (GB/T 1299—2000 和 YB/T 094—1997)，其钢号为 3Cr2MnNiMo 或 SM3Cr2NiMo。该钢具有高淬透性，良好的抛光性能、电火花加工性能和皮纹加工性能。适于制作大型镜面塑料模具。国内市场上也有 3Cr2NiMnMo 钢号表示 (其 Cr 和 Mo 含量略有调整) 或以瑞典牌号 718 (ASSAB) 出现，其改进型有 718H、718S 等；德国、日本、奥地利等国也有同类型钢号
SM1	预硬型易切削塑料模具钢，上海钢铁研究所等单位研制，出厂硬度 38~42HRC。该钢具有低粗糙度、高淬透性，用于大型镜面塑料模及模架、精密塑料、橡胶模等
SM2	预硬型易切削塑料模具钢，上海钢铁研究所等单位研制，出厂硬度 38~42HRC。该钢相当于美国 P21 改进型，有一定防腐蚀能力，用于镜面、精密塑料模
WCG	无磁模具钢，上海钢铁研究所等单位研制。该钢无磁性，高强度、耐磨性好，适用于磁性元件的粉末压铸模具及其他无磁模具
HG761	热作模具用高温合金，上海钢铁研究所等单位研制。该合金在 900℃ 时仍有高的强度和抗磨损能力，适用于钢铁压铸模、热挤压模和砂轮成型模具
GT35	钢结硬质合金，具有极高的硬度和耐磨性，用于冷作模具，其使用寿命可比一般模具钢寿命成 10 倍地大幅度提高。与普通硬质合金相比，又具有韧性好、加工工艺性好、生产成本低等特点
TLMW50	钢结硬质合金，其硬度与耐磨性极高，并具有良好的锻造性能和热处理后的淬硬性。和 GT35 相比，其淬火回火状态的硬度略低于 GT35，而其淬火态的抗弯强度和冲击值均高于 GT35

附表 4 国内模具企业常用进口模具钢与国内标准模具钢牌号的比较

产 地	钢 号	类似中国标准的模具钢牌号
冷作模具钢		
美国合金钢	A2	Cr5Mo1V1
美国合金钢	D2	Cr12Mo1V1
美国合金钢	D3	Cr12
日本大同	DC11	Cr12Mo1V1
瑞典一胜百	DF-2	9Mn2V
瑞典一胜百	DF-3	9CrWMn
日本大同	GOA	9CrWMn
德国德威	CSW-2739	Cr12Mo1V1
德国德威	CSW-2510	CrMnV
奥地利百禄	K100	Cr12
奥地利百禄	K110	Cr12Mo1V1
奥地利百禄	K460	MnCrWV
美国合金钢	L3	Cr2/GCr15
美国合金钢	L6	5CrNiMo
美国合金钢	M2	W6Mo5Cr4V2
美国合金钢	O1	MnCrWV
美国合金钢	O2	9Mn2V
韩国	STD11	Cr12Mo1V1
瑞典一胜百	XW-10	Cr5Mo1V1
瑞典一胜百	XW-42	Cr12Mo1V1
韩国	YK30	9Mn
热作模具钢		
瑞典一胜百	8407	4Cr5MoSiV1
日本大同	DH21	4Cr5Mo1V
日本大同	DH2F	4Cr5MoSiVS
日本大同	DH42	4Cr3W2CO2Mo
日本大同	DHA1	4Cr5MoSiV1
日本大同	GFA	5CrNiMo
德国德威	GSW-2344	4Cr5MoSiV1
美国合金钢	H10	4Cr3Mo3SiV
美国合金钢	H11	4Cr5MoSiV1
美国合金钢	H13	4Cr5MoSiV1
美国合金钢	H21	3Cr2W8V
韩国	STD61	4Cr5MoSiV1
奥地利百禄	W302	4Cr5MoSiV1

续表

产 地	钢 号	类似中国标准的模具钢牌号
塑料模具钢		
美国合金钢	420SS	4Cr13
美国合金钢	440C	11Cr17Mo
瑞典一胜百	618HH	3Cr2Mo
瑞典一胜百	716HH	2Cr13Mo
瑞典一胜百	718HH	3Cr2NiMnMo
法国 USINOR	CLC2083	4Cr13
法国 USINOR	CLC2316H	4Cr16Mo
法国 USINOR	CLC2738	3Cr2NiMnMo
法国 USINOR	CLC2738HH	3CrNiMnMo
日本大同	G-STAR	4Cr16Mo
德国德威	GSW-2083	4Cr13
德国德威	GSW-2311	4CrMnMo
德国德威	GSW-2316	4Cr16Mo
德国德威	GSW-2738	3CrNiMnMo
韩国	HEMS-1A	3Cr13
韩国	HP-1A	50Mn
韩国	HP-4A	4CrMnMo
韩国	HP-4MA	3Cr2Mo
奥地利百禄	M202	4Cr2Mo
奥地利百禄	M238	4Cr2NiMo
奥地利百禄	M300	4Cr16Mo
奥地利百禄	M310	4Cr13
美国合金钢	P20	3Cr2Mo
日本	S45C	SM45
日本	S50C	SM50
日本	S55C	SM55
瑞典一胜百	S-136	3Cr13 / 4Cr13
日本大同	S-STAR	3Cr13
其他模具钢		
韩国	HFH-1	7CrSiMnMoV
韩国	STF-4M	5CrNiMo

附表5 国内市场常用的进口模具钢性能情况

进口钢 牌号	产地	牌号简介	近似钢号
A2	美国	空淬中合金冷作模具钢, 美国 AISI/SAE 和 ASTM 标准钢号	中国 Cr5Mo1V (GB), 德国 1.236 3 (W-Nr), 法国 X100CrMoV5 (NF), 日本 SKD12 (JIS) 等
D2	美国	高碳高铬冷作模具钢, 美国 AISI/SAE 和 ASTM 标准钢号	中国 Cr12Mo1V (GB), 德国 1.237 9 (W-Nr), 法国 X160CrMoV12 (NF), 日本 SKD11 (JIS) 等
D3	美国	高碳高铬冷作模具钢, 美国 AISI/SAE 和 ASTM 标准钢号	中国 Cr12 (GB), 德国 1.208 0 (W-Nr), 法国 X200Cr12 (NF), 日本 SKD1 (JIS), 俄罗斯 X12 (FOCT) 等
DC11	日本 大同	高耐磨空淬冷作模具钢	中国 Cr12Mo1V1 (GB), 日本 SKD11 (JIS), 美国 D2 (AISI) 等
DC53	日本 大同	高强度韧性冷作模具钢, 是 DC11 的改进型。高温回火后具有高硬度、高韧性, 线切割性良好。用于精密冷冲压模、拉深模、搓螺纹模、冷冲裁模、冲头等	—
DF-2	瑞典一 胜百	油淬冷作模具钢, 具有良好冲载能力, 热处理变形小。用于小型冲压模、切纸机刀片等	中国 9Mn2V (GB), 美国 02 (AISI) 等
DF-3	瑞典一 胜百	油淬冷作模具钢, 具有良好的刃口保持能力, 淬火变形小。用于薄片冲压模、压花模等	中国 9CrWMn (GB), 德国 1.2510 (W-Nr), 日本 SKS3 (JIS), 美国 01 (AISI) 等
GOA	日本 大同	特殊冷作模具钢, 是 SKS3 (JIS) 的改进型。钢的淬透性高, 耐磨性好, 用于冷冲裁模、成形模、冲头及压花模等	—
GSW-2379	德国 德威	高碳高铬冷作模具钢, 用于制作冷挤压模、冲压模、也用高耐磨性塑料模具	中国 Cr12Mo1V1 (GB), 德国 1.2379 (W-Nr), 美国 D2 (AISI)
K100	奥地利 百禄	高碳高铬冷作模具钢, 该钢具有高的耐磨损性, 优良的耐腐蚀性, 用于不锈钢薄板的切边模、深冲模、冷压成型模等	中国 Cr12 (GB), 德国 1.2080 (W-Nr), 美国 D3 (AISI) 等
K460	奥地利 百禄	高韧性高铬冷作模具钢, 该钢具有良好的强度、硬度和韧性, 用于重载冲压模	中国 Cr12Mo1V1 (GB), 美国 D2 (AISI) 等
M2	奥地利 百禄	油淬冷作模具钢, 该钢具有高的强度, 热处理变形小, 用于金属冲压模具	中国 MnCrWV (旧钢号), 德国 1.251 0 (W-Nr), 美国 D2 (AISI) 等
01	美国	油淬冷作模具钢, 美国 AISI/SAE 和 ASTM 标准钢号	中国 MnCrWV (旧钢号), 德国 1.251 0 (W-Nr), 法国 90MnWCrV5 (NF), 日本 SKS3 (JIS) 等

续表

进口钢 牌号	产地	牌号简介	近似钢号
02	美国	油淬冷作模具钢, 美国 AISI/SAE 和 ASTM 标准钢号	中国 9Mn2V (GB), 德国 1.2842 (W-Nr), 法国 90MnV8 (NF) 等
P18	俄罗斯	用于冷作模具钢的钨系高速钢, 俄罗斯 FOCT 标准钢号	中国 W18Cr4V (GB), 德国 1.335 5 (W-Nr), 法国 HS18-0-1 (NF), 日本 SKH2 (JIS), 美国 T1 (AISI) 等
STD11	韩国	空淬冷作模具钢, 家牌号, 是 D2 的改良型。其特点为高洁净度, 硬度均匀, 高耐磨性, 高强度	中国 Cr12Mo1V1 (GB), 日本 SK-D11 (JIS) 等
XW-10	瑞典一胜百	空淬冷作模具钢。其特点为韧性好, 耐磨性高, 热处理变形小	中国 Cr5Mo1V (GB), 日本 SKD12 (JIS)、美国 A2 (AISI) 等
XW-42	瑞典一胜百	高碳高铬冷作模具钢。具有良好淬透性、高韧性、高耐磨性, 强韧性很好, 并且抗回火稳定性好, 热处理变形小	Cr12Mo1V1 (GB), 美国 D2 (AISI) 等
YK30	日本大同	油淬冷作模具钢。出厂退火硬度 $\leq 217\text{HBS}$, 常用于冷冲压模	日本 SKS93 (JIS), 美国 02 (AISI) 等
8407	瑞典一胜百	通用热作模具钢。用于锤锻模、挤压模、压铸模, 也用于塑料模具	中国 4Cr5MoSiV1 (GB), 美国 H13 (AISI) 等
DH21	日本大同	铝压铸模用钢。出厂退火硬度 $\leq 229\text{HBS}$, 钢的抗热疲劳开裂性能好, 模具使用寿命较高	
DH2F	日本大同	易切削预硬化模具钢, 属 SKD61 改良型。预硬化后硬度为 $37\sim 44\text{HRC}$ 。钢的韧性良好, 用于形状复杂、精密的热作模具, 如铝、锌压铸模、铝热挤压模, 也用于塑料模具	—
DH31S	日本大同	大型压铸模用钢。钢的淬透性高, 抗热疲劳开裂性和抗热熔损性均良好。出厂退火硬度 $\leq 235\text{HBS}$, 用于铝、镁压铸模, 铝热挤压模, 以及热剪切、热冲压模等	—
DH42	日本大同	铜压铸模用钢。出厂退火硬度 $\leq 235\text{HBS}$, 用于铜合金压铸模和热挤压模	—
DHA1	日本大同	通用热作模具钢。钢的淬透性高, 抗高温回火软化性和抗热熔损性均良好, 抗热疲劳性和耐高温冲击性能优良	中国 4Cr、5MoSiV1 (GB), 德国 1.2344 (W-Nr), 日本 SKD61 (JIS), 美国 H13 (AISI)

续表

进口钢 牌号	产地	牌号简介	近似钢号
GSW-2344	德国 德威	通用压铸模用钢, 属 H13 类型。出厂退火硬度 $\leq 210\text{HBS}$, 用于铝、锌合金压铸模等	—
H10	美国	美国 H 系列热作模具钢的标准钢号 (AISI/SAE, ASTM)	4Cr3Mo3SiV (GB), 德国 1.236 5 (W-Nr, 俄罗斯 3X3M3c1 (FOCT) 等
H11	美国	美国 H 系列热作模具钢	中国 4Cr5MoSiV (GB), 德国 1.234 3 (W-Nr.), 法国 X38CrMoV5 (NF), 日本 SKD6 (JIS) 等
H13	美国	美国 H 系列热作模具钢, 在我国广泛应用	中国 4Cr5MoSiV1 (GB), 德国 1.234 4, (W-Nr), 法国 X40CrMoV5 (NF), 日本 SKD61 (JIS), 俄罗斯 4X5McI > C (FOCT) 等
H21	美国	美国 H 系列热作模具钢, 在我国广泛应用	中国 3Cr2W8V (GB), 德国 1.258 1 (W-Nr), 法国 X30WCrV9 (NF), 日本 SKD5 (JIS), 瑞典 2 730 (SS) 等
HDS-1	韩国	热作模具钢, 具有良好的强韧性和抗回火稳定性。出厂退火硬度 $\leq 229\text{HBS}$, 用于压铸模、热挤压模等	是 H13 的改良型
QRO-90	瑞典 一胜百	热作模具钢, 专利钢种。其特点是高温强度高, 导热性好, 耐热冲击和抗热疲劳。用于铝、铜合金压铸模, 及挤压模、热锻模等	—
STD61	韩国	热作模具钢, 具有良好的高温强度和韧性, 用于压铸模、热挤压模、热冲压模等	近似于 H13 型
W302	奥地利 百禄	热作模具钢, 用于铝、锌等合金热挤压模、热冲压模等	近似于 H13 型
420SS	美国	耐蚀塑料模具钢, 美国 AISI 和 ASTM 标准钢号, 属于马氏体型不锈钢	中国 4Cr13 (GB), 德国 X34Cr13 (DIN), 法国 Z40C14 (NF), 俄罗斯 40X13 (FOCT) 等
440C	美国	耐蚀塑料模具钢, 属于马氏体型不锈钢	中国 11Cr17 (GB), 日本 SUS440C (JIS), 俄罗斯 95X18 (FOCT) 等
618	瑞典 一胜百	预硬型塑料模具钢, 在我国广泛应用	相当于我国的 3Cr2Mo (GB) 和美国的 P20 (AISI)
716	瑞典 一胜百	耐蚀塑料模具钢, 属马氏体型不锈钢	日本 SUS420J1 (JIS), 美国 420 (ASTM) 等

续表

进口钢 牌号	产地	牌号简介	近似钢号
718	瑞典 一胜百	镜面塑料模具钢,可预硬化交货。该钢具有高淬透性,良好的抛光性能、电火花加工性能和皮纹加工性能。适于制作大型镜面塑料模具、汽车配件模具、家用电器模具、电子音像产品模具	在我国广泛应用,相当于市场上俗称的 P20+Ni
CLC 2083	法国 USINOR	耐蚀镜面塑料模具钢。该钢具有良好的耐腐蚀性能和力学强度,高的淬透性、耐磨性,并有优良的镜面抛光性。适用于塑料透明部件(如汽车灯具等)和光学产品模具,以及 PVC 等含腐蚀性材料的加工模具	
CLC 2316H	法国 USINOR	耐蚀镜面塑料模具钢。该钢具有优良的耐腐蚀性能,高的力学强度和耐磨性,加工工艺性好,并有优良的镜面抛光性。适用于耐蚀性塑料模具, PV 管件模、型材挤压模,以及要求镜面的塑料模具	
CLC 2738	法国 USINOR	预硬型镜面塑料模具钢。淬透性高,硬度均匀,并有良好的抛光性、电火花加工性能和蚀花(皮纹)加工性能,适于渗氮处理。用于制作大中型镜面塑料模具等	该钢近似瑞典 718 钢
CLC 2738HH	法国 USINOR	高级镜面塑料模具钢。该钢和 CLC2738 的基本化学成分相同,但洁净度更高,硬度更均匀,因此性能更佳,模具寿命长	—
G- STAR	日本 大同	耐蚀型塑料模具钢。该钢可预硬化,出厂硬度 33~37HRC,具有良好的耐蚀性,切削加工性。可与 S-STAR 钢组合成耐蚀塑料模具	—
GSW- 2083	德国 德威	耐蚀型塑料模具钢,具有良好的耐蚀性能,用于制造 PVC 材料的模具等	该钢为 4Cr13 型不锈钢
GSW- 2311	德国 德威	预硬型塑料模具钢,出厂预硬化硬度为 31~34HRC。可进行电火花加工,用于大中型镜面塑料模具	该钢为 P20 类型模具钢
GSW- 2316	德国 德威	耐蚀型塑料模具钢。可预硬化、出厂硬度为 31~34HRC,该钢具有优良的耐蚀性能和镜面抛光性能,用于镜面塑料模具	该钢属马氏体型不锈钢

续表

进口钢 牌号	产地	牌号简介	近似钢号
GSW-2738	德国 德威	镜面塑料模具钢。可预硬化, 出厂硬度为 31~34HRC, 硬度均匀、抛光性能好, 适于制作大中型镜面塑料模具	该钢为 P20+Ni 类型模具钢
HAM-10	韩国	镜面塑料模具钢, 可预硬化、出厂硬度为 37~42HRC, 有优良的镜面抛光性能, 用于塑料透明部件 (如汽车灯具、冰箱蔬菜盒等) 模具	
HEMS-1A	韩国	耐蚀型塑料模具钢。可预硬化, 出厂硬度为 23~33HRC。具有高级镜面抛光性能, 用于彩色显像管玻壳模具、生产 PVC 材料底盘等	该钢为 3Cr13 类型不锈钢
HP-1A	韩国	普通塑料模具钢。该钢具有良好的加工性能, 加工变形小, 用于玩具模具等	
HP-4A	韩国	预硬型塑料模具钢。该钢预硬化硬度为 25~32HRC, 硬度均匀, 加工性能良好, 用于汽车保险杠、电视机后盖等模具	
HP-4MA	韩国	预硬型塑料模具钢。预硬化硬度为 27~34HRC, 硬度均匀、耐磨性好, 用于电视机前壳、电话机、吸尘器壳体、饮水机等模具	该钢属 P20 改良型
M202	奥地利 百禄	预硬型塑料模具钢	该钢属 P20 类型, 但含碳、锰量偏高, 预硬化硬度为 30~34HRC, 可进行电火花加工
M238	奥地利 百禄	镜面塑料模具钢。可预硬化, 出厂硬度为 30~34HRC, 镜面抛光性好, 可进行电火花加工。M238H (Hi-Hard) 为高级镜面塑料模具钢, 其镜面抛光性和皮纹加工性更好	该钢属 P20+Ni 类型, 但碳、锰含量偏高
M300	奥地利 百禄	耐蚀镜面塑料模具钢。具有优良的耐腐蚀性, 高的力学强度和耐磨性, 并有优良的镜面抛光性	该钢属马氏体型不锈钢
M310	奥地利 百禄	耐蚀镜面塑料模具钢。具有优良的耐腐蚀性、耐磨性和镜面抛光性, 用于塑料透明部件及光学产品模具	该钢属 4Cr13 型不锈钢
NAK55、 NAK80	日本 大同	镜面塑料模具钢。这两种钢均可预硬化至硬度 37~43HRC, NAK55 的切削加工性好, NAK80 具有优良的镜面抛光性, 用于高精度镜面模具	—

续表

进口钢 牌号	产地	牌号简介	近似钢号
P20	美国	预硬型塑料模具钢。预硬化硬度一般在 30~42HRC 范围内。适用于形状复杂的大、中型精密模具	中国 3Cr2Mo (GB), 德国 1.2330 (W-Nr.), 法国 35CrMo8 (NF) 等 该钢在我国广泛应用, 已纳入我国国标 (见 GB/T 1299—2000)
PXZ	日本 大同	预硬型塑料模具钢, 出厂硬度为 27~34 HRC。该钢具有良好的切削性和焊补性, 用于大型蚀花模具, 及汽车保险杠、仪表面饰板、家电外壳等模具	
PX4、 PX5	日本 大同	镜面塑料模具钢, 可预硬化至硬度 30~33HRC。用于大型镜面模具、汽车尾灯、前挡板模具、摄像机、家用电器壳体模具等	这两种钢均为美国 P20 改良型
S45C、 S50C、 S55C	日本 JIS	普通塑料模具钢, 常用于模具的非重要结构部件, 如模架等。由于模具用钢的特殊要求, 对这类钢生产工艺要求精料、精炼和真空除气, 钢的碳含量范围缩小, 控制较低的硫、磷含量, 例如在冶标 (YB/T 107—1997) 标准中将碳素塑料模具钢钢号采用 SM45、SM48、SM50、SM53、SM55 等, 以便区别于普通用途的优质碳素结构钢	分别相当于我国优质碳素结构钢 45、50、55 钢
S-136	瑞典— 胜百	耐蚀型塑料模具钢, 耐蚀性好, 淬火、回火后有较高硬度, 抛光性好。用于制造耐腐蚀性和耐磨性要求较高的塑料模具, 如 PVC 材料模具、透明塑料模具等	属中碳高铬型不锈钢
S-STAR	日本 大同	耐蚀镜面塑料模具钢。具有高耐蚀性、高镜面抛光性, 热处理变形小, 用于耐蚀镜面精密模具	该钢属马氏体型不锈钢
SP300	法国 CLI 公司	预硬型塑料模具钢。该钢出厂硬度为 290~320HBS, 具有良好的加工工艺性、抛光性和皮纹加工性, 用于家电和汽车用塑料模具	—
HFH-1	韩国	火焰淬火模具钢。HFH-1 钢有较好的淬透性、良好的韧性和高的耐磨性, 热处理变形小, 用于大型镶块模具的冲压模、剪切下料模, 也用于大动载荷的冷作的模具等	该钢与我国的火焰淬火模具钢 7CrSiMnMoV 在化学成分上有些差别
STF-4M	韩国	锻造用模具钢。具有优良的抗热冲击性能和高的耐磨性, 用于锻造模、热冲压模	该钢属美国 6F2 (AISI) 的改良型

参 考 文 献

- [1] 吴兆祥. 模具材料及表面处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [2] 王家瑛. 模具材料与使用寿命 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [3] 曾珊琪等. 模具寿命与失效 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [4] 张鲁阳. 模具失效与防护 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [5] 赵昌盛. 实用模具材料应用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.