

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

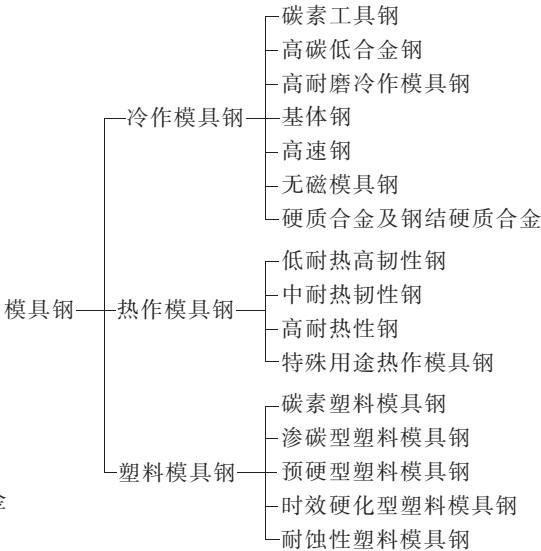


图 1－2 模具钢分类

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, 在未火变形量较小时, 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℃ 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 500～600℃，热挤模达 800～850℃，压铸模达 300～1 000℃。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%～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。