

高职高专模具专业规划教材

模具材料及 强化处理

李书常 李明珠 主编



本书是根据“模具设计与制造专业教学计划”中模具材料及其热处理、表面处理的有关内容要求编写的规划教材。书中内容按照模具制造业及锻造、热处理、表面处理行业的需要,将模具材料和锻造、热处理、表面处理技术等相结合,重点介绍了模具材料的性能、模具材料的选择、模具钢锻造、模具热处理及模具表面处理基础知识和先进模具材料及热处理技术,还介绍了模具失效分析以及模具质量检验的知识。

本书可供高职高专院校模具设计与制造、材料加工等专业学生使用,也适用于中等职业技术学校模具专业学生,同时还可供在职模具技术人员自学和技术工人的培训使用。

图书在版编目(CIP)数据

模具材料及强化处理/李书常,李明珠主编. —北京:机械工业出版社,2010
ISBN 978-7-111-30023-6

I. ①模… II. ①李…②李… III. ①模具-材料-强化(金属学) IV. ①TG76

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第038574号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:孔劲 责任编辑:孔劲

版式设计:霍永明 责任校对:姚培新

封面设计:姚毅 责任印制:杨曦

北京京丰印刷厂印刷

2010年5月第1版·第1次印刷

169mm×239mm·17.75印张·353千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-30023-6

定价:28.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是参照“模具设计与制造专业教学计划”中模具材料及其热处理、表面处理的有关内容要求编写的规划教材。本书主要供高职高专院校模具设计与制造专业、材料加工与控制工程专业学生使用，也适用于模具类中等专业学校，以及在职模具技术人员和工人的培训。

本书由长期从事模具材料及其热处理和表面处理的专家和坚守一线教学的优秀教师共同编写，从模具材料使用方面的生产实际需要出发，增加了很多实用性强的知识内容，并积极配合目前全国各地模具设计与制造专业课改的要求，旨在推进项目化教学。通过学习可以使学生们尽快地掌握模具材料及锻造、热处理、表面处理的基础知识。本书还编入了模具材料应用领域的最新成果。因此，该书是一本突出实用、与实践相结合的课本，也是探索专业课改、项目化教学的一次尝试。

本书由宝鸡市模具专业学会李书常，陕西工业职业技术学院李明珠主编。参加编写的还有陕西工业职业技术学院姚永红，辽宁省交通高等专科学校吕野楠、韩海玲，陕西国防工业职业技术学院的程晓宇、赵峰，宝鸡职业技术学院的周有源。

在编写过程中，我们还征求了以下一些学校老师的意见，包括湖南生物机电职业技术学院张秀玲、河北机电职业技术学院胡占军、福建工程学院林永南、江西应用技术职业学院谢颖、承德石油高等专科学校李传军、大连职业技术学院田春霞、江苏信息职业技术学院甘辉、武汉职业技术学院张四新、重庆工业职业技术学院虞学军、浙江机电职业技术学院来建良、沈阳铁路机械学校宣振宇、湖南工业职业技术学院王艳、辽宁机电职业技术学院彭雁、长春市机械工业学校李玉青、华北机电学校王振光、西安理工大学高等技术学院刘航和李宏林、四川工程职业技术学院武友德、无锡职业技术学院曹秀中、大连市轻工业学校赵秀娟、包头职业技术学院窦君英和单小根等老师。他们中的许多老师对该书的大纲等提出了宝贵意见，尤其是陕西国防工业职业技术学院的王晓梅老师提出了很具体的修改意见。在此一并致谢！

近年来，新型模具材料层出不穷，因为国家、行业、企业的差异，对同一材料的称呼也有所不同。为了帮助学生更好地区别材料型号，我们整理出了简单的常用模具材料缩写代号一览表。

为了更好地保证内容的完整性、科学性、实用性，满足项目化教学的要求，在编写过程中参阅了很多有关教材、著作和文献资料，结合专业课程需要，进行了合理选择和编写，在此对所选用资料的原文作者表示衷心的感谢。

由于我们水平有限，难免出现错误和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 模具材料及热处理基础	1
1.1 模具及模具材料的分类	1
1.2 模具材料的性能要求	4
1.3 模具材料的选用	10
1.4 模具的常规热处理	11
1.5 模具的失效分析及实例	16
1.6 模具材料及强化处理质量检验	24
复习思考题	28
第2章 冷作模具材料	29
2.1 冷作模具工作条件、失效形式及性能要求	29
2.2 冷作模具材料成分	32
2.3 冷作模具材料特性及用途	35
2.4 冷作模具材料的选用	80
2.5 冷作模具的锻造技术	109
2.6 冷作模具的热处理	113
复习思考题	126
第3章 热作模具材料	127
3.1 热作模具工作条件及影响模具寿命的因素	127
3.2 热作模具材料的性能要求及成分	129
3.3 热作模具材料的分类及选择	132
3.4 热作模具的热处理	140
3.5 其他热作模具材料	166
3.6 热作模具热处理典型实例	168
复习思考题	170
第4章 塑料模具材料	172
4.1 塑料模具的分类、工作条件及失效形式	172
4.2 塑料模具材料的性能与要求	175
4.3 塑料模具材料选用	184
4.4 塑料模具材料的热处理	199
4.5 塑料模具的热处理	203
4.6 常用塑料模具钢的用途	218

复习思考题	221
第 5 章 模具的表面处理	222
5.1 模具的表面处理技术	222
5.2 模具的化学热处理	224
5.3 模具的表面改性与涂层技术	246
5.4 模具的表面淬火	259
5.5 模具的其他表面处理技术	263
附录 常用模具材料缩写代号一览表	274
参考文献	276

第1章 模具材料及热处理基础

1.1 模具及模具材料的分类

模具是一种高效率的制造业装备,各种金属、塑料、橡胶、陶瓷、玻璃等制件的生产都离不开模具。模具作为机械、电子、汽车、通信、家电、航空等领域诸多工业产品的基础工艺装备,它涉及机械设计制造、塑性加工、铸造、金属材料及其热处理、高分子材料、金属物理、凝固理论、粉末冶金、塑料、橡胶、玻璃等诸多学科、领域和行业。因此,模具的分类方法也很多。

1.1.1 模具的分类

1. 按模具所加工材料的再结晶温度分类

(1) 冷变形模具 变形过程在再结晶温度下进行,产生加工硬化,使塑性变形抗力增大,模具承受的载荷增加。它分为冷冲压、冷挤压、冷镦、冷拔模具等。冷变形制件的精度、表面质量、生产率、力学性能均可提高,材料利用率也高。

(2) 热变形模具 在模具加工坯料时,变形发生在再结晶温度以上,加工硬化和再结晶软化两种过程同时存在,因为在成形的同时可以消除加工硬化,所以,塑性变形抗力较小,模具承载相应减轻。但需承受较高的工作温度。该类模具主要包括热锻、热镦、热挤压、热冲压以及压铸模具等。

(3) 变形模具 在被加工件变形过程中同时存在冷、热变形,工作温度比冷变形温度高,降低了塑性变形抗力,减少了模具的工作载荷,但又低于再结晶温度,使制件保留了加工硬化,有较高的力学性能。

2. 按模具用途分类

模具按用途可分为锻造模具、冲压模具、挤压模具、拉拔模具、压铸模具、塑料模具、橡皮模具、陶瓷模具、玻璃模具和其他模具等。

(1) 冷作模具 包括冷冲压模、冷挤压模、冷镦模、拉深模、弯曲模、拉丝模、滚丝模、冲孔模、落料模、弯曲模、冲裁模、翻边模、整形模等。

(2) 热作模具 包括热锻模、热精锻模、热挤压模、热冲裁模、压铸模等。

(3) 塑料模具

1) 按成型方式可分为:热固性塑料模和热塑性塑料模。

按模具在压机上的固定方式,热固性塑料模又可分为:移动式模具、固定式模

具；按塑料成型方式，热固性塑料模可分为：压塑模、传递模、注射模。

热塑性塑料模包括注射成型模、挤出成型模、压延成型模等。

2) 按用途可分为：吹气模、压缩成型模、转移成型模（集成电路制件）、挤压成型模、热成型模、旋转成型模等。

3) 按加料室的形式可分为：敞开式模具、半封闭式模具、封闭式模具。

4) 按模具的分型面可分为：垂直分型面模具和水平分型面模具。

3. 按模具制造综合分类

根据成形材料、成形工艺和成形设备的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、玻璃制件用模具、橡胶制件成型模具、陶瓷模具和经济模具，见表 1-1。

表 1-1 模具类型综合分类表

序号	模具类型	模具品种	成形工艺性质及使用对象
1	冲压模具	冲裁模（无或少废料冲裁、整修、光洁冲裁、深孔冲裁、精冲模等）、弯曲模具、拉深模具、压缩模、单工序模具（冲裁、弯曲、拉深、成形等）、复合冲模、级进冲模、汽车覆盖件冲模、组合冲模、电机硅钢片冲模等	板材冲压成形工艺
2	塑料成型模具	压塑模具、挤塑模具、注射模具（立式、卧式、角式注射模具）；热固性塑料注射模具、挤出成型模具（管材、薄膜扁平机头）等）、发泡成型模具、低泡注射成型模具、吹塑成型模具等	塑料制件成型工艺（热固性和热塑性模塑料）
3	压铸模	热室压铸机用压铸模，立式冷室压铸机用压铸模，卧式冷室压铸机用压铸模，全立式压铸机用压铸模，非铁金属（锌、铝、铜、镁合金）压铸模、钢铁材料压铸模等	非铁金属与钢铁材料压力铸造成形工艺
4	锻造成形模具	模锻和大型压力机用锻模、螺旋压力机用锻模、平锻机锻模、辊锻模等；各种紧固件冷锻模、挤压模具、拉丝模具、液态锻造用模具等	金属零件成形，采用锻压、挤压工艺
5	铸造用金属模具	各种金属零件铸造时采用的金属模、型砂型模、壳型模、失蜡模、压力铸造模、金属型铸模等	金属浇铸成形工艺
6	粉末冶金模具	成形模；手动模：实体单向压制、实体双向压制手动模；实体浮动压模；机动模：大型截面实体浮动压模、极掌单向压模、套类双向压模、套类浮动压模；整形模；手动模；径向整形模、带外台阶套类全整形模、带球面件整形模等 机动模：无台阶实体件自动整形模、轴套拉杆式半自动整形模、轴套通过式自动整形模、轴套全整形自动模、带外台阶与带外球面轴套全整形自动模等	粉末制件压坯的压制成形工艺。模具电加工设备用于铜基、铁基粉末制件；机械零件、模具材料与制件易热处理零件等
7	玻璃制件用模具	吹-吹法成形瓶罐模具、压-吹法成形瓶罐模具、玻璃器皿用模具等	玻璃制件成形工艺

(续)

序号	模具类型	模具品种	成形工艺性质及使用对象
8	橡皮成形模具	橡胶制件的压胶模、挤胶模、注射模；橡胶轮胎模；“O”形密封圈橡皮模等	橡胶压制成形工艺
9	陶瓷模具	各种陶瓷器皿等制件用的成形金属模具	陶瓷制件成形工艺
10	经济模具 (简易模具)	低熔点合金成形模具、薄板冲模、叠层冲模、硅橡皮模、环氧树脂模、陶瓷型精铸模、叠层型腔塑料模、快速电铸成形模等	适用多品种少批量工业产品用模具，有很高经济价值

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，为了方便模具材料的选用，按照模具工作的条件来分类较为合适。据此，将以上十大类模具分为如下三类，即：

- 1) 冷作模具：包括冷冲压模、冷挤压模、冷锻模、拉丝模等。
- 2) 热作模具：包括热锻模、热精锻模、热挤压模、压铸模等。
- 3) 成型模具：包括塑料模、橡皮模、陶瓷模、玻璃模、粉末冶金模等。

本书主要按照上述三类模具论述它们的选材和热处理。

4. 按行业不同分类

模具按行业不同可分为机械模具、电子模具、通信模具、航空模具、IT 模具等。如国内的 IT 模具主要种类有：

1) 电脑周边模具，例如：NB 笔记本电脑、散热器、U 盘、连接器、端子模具等。

2) 办公设备/耗材模具，例如：打印机、复印机、传真机、投影机、验钞机模具等。

3) 多媒体数码产品模具，例如：DSC 数位相机、音响/功放、PDA、MP3、MP4 模具等。

4) 光电通信产品模具，例如：扬声器、受话器、CRT 电视机、LCD 液晶外壳、遥控器、游戏机、手机模具等。

5) 网络产品模具，例如：商业收款 POS 机、网络交换机、路由器、网络存储器件、UPS 电源、稳压器、服务器、中继器、调制解调器模具等。

6) 半导体模具，例如：引线框架、电子封装、屏蔽盖及其他半导体微电子材料模具等。

7) IT 行业礼品模具，例如：精工名表、电子时计、旅行插头、U 盘手腕带、可锻铸铁胸章模具等。

1.1.2 模具材料的分类

模具的用途很广，各种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、不锈钢耐热钢，直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、粉末高合金模具钢以及铜合金、铝合金、锌合金、增强塑料等，见表 1-2。

表 1-2 模具材料的分类

金属材料	钢铁	铸铁	普通灰铸铁	
			球墨铸铁	
			合金铸铁	
		钢	工具钢	非合金工具钢
				合金工具钢—模具钢
			工具钢以外的其他类别钢（如结构钢、不锈钢、耐热钢、轴承钢、特殊性能钢）	
		耐热合金	—	
		粉末冶金工具材料	硬质合金	
	钢结硬质合金			
	粉末高速钢			
	粉末冶金金刚石（烧结金刚石聚晶体）			
	非铁金属	易熔合金（低熔点合金）	—	
锌合金		—		
铜合金		—		
超塑合金		—		
非金属材料	无机非金属材料	陶瓷	—	
	有机高分子材料	橡胶	—	
		树脂基复合材料	—	

由于各类模具用钢往往需要经过锻造、热处理和表面处理进行强化，对保证和提高模具寿命具有至关重要的作用，并且是所有模具材料中的关键技术，所以本书主要讨论各种冷作、热作和成型工艺的模具用钢。

1.2 模具材料的性能要求

通常根据模具制造生产条件和模具使用工作条件的需要，并根据模具材料的基本性能和相关因素，来选择适合模具需要的、经济上合理、技术上先进的模具材料。对于一种模具，如果单纯从材料的基本性能考虑，可能几种模具材料都能符合要求，但这往往是片面的，只有综合考虑模具的使用寿命、模具制造难易程度、模具制造费用以及分摊到加工每一个工件的模具费用等多种因素，进行综合分析评价，才能得出符合客观实际的正确结论。

1. 模具材料的冶金质量

冶金质量对模具材料的性能有很大的影响,只有具有良好的冶金质量,才能充分发挥模具材料的各种性能。冶金质量一般包括:冶炼质量,轧制、锻造工艺性能,热处理和精加工性能等。

模具材料一般用量不大,品种规格很多,为了便于市场采购和备料,应该考虑材料的通用性,除了特殊要求以外,尽可能采用大量的通用型模具材料。这是因为通用型模具材料应用起来技术比较成熟。选用高质量、高性能、高精度的模具钢精料和制件,高效率、高速度、低成本的生产高质量的模具,已经成为当前工业发达国家模具制造业的主要发展趋势。

2. 模具材料的力学性能

模具材料的力学性能是零件设计和选材时的主要依据。外加载荷性质不同(例如拉伸、压缩、扭转、冲击、循环载荷等),对金属材料要求的力学性能也会不同。常规的力学性能指标包括:强度、塑性、弹性、刚度、硬度、冲击韧度、多次冲击抗力和疲劳极限等。

(1) 强度 强度是指钢在服役过程中,抵抗变形和断裂的能力。对于模具来说则是整个成型面或各个部位在服役过程中抵抗拉伸力、压缩力、弯曲力、扭转力或综合力的能力。所以强度也分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度等。各种强度之间具有一定的联系,模具在使用中一般以抗拉强度作为最基本的强度指标。

对于模具钢,特别是含碳量高的冷作模具钢,因为塑性很差,一般不用抗拉强度而是以抗弯强度作为实用指标。弯曲试验产生的应力状态与许多模具工作表面产生的应力状态极相似,能比较精确地反映出材料的成分及组织因素对性能的影响。抗弯试验甚至对极脆的材料也能反映出一定的塑性。

在力-伸长曲线图上有一个特殊点,当拉力到达这一点时,试棒在拉力不增加或有所下降情况下发生明显伸长变形,这种现象称为屈服。这时的应力称为这种材料的屈服点。而当外力去除后不能恢复并被保留下来的这部分变形,称为塑性变形。屈服点是衡量模具钢塑性变形抗力的指标,也是最常用的强度指标。模具材料要求具有高的屈服强度,模具产生塑性变形,就意味着失效。

(2) 硬度 硬度是指金属表面局部体积内抵抗外物压入而引起的塑性变形的抗力。硬度值越高表明金属抵抗塑性变形的能力越强,金属产生塑性变形越困难。钢的硬度是模具钢的主要技术指标,为了保持模具形状尺寸稳定不变,模具在高应力的作用时,必须具有足够高的硬度。冷作模具钢一般应将硬度保持在 60HRC 左右,热作模具钢根据其工作条件,一般要求硬度保持在 40~55HRC。对于同一钢种而言,在一定的硬度值范围,硬度与变形抗力成正比;但具有同一硬度值而成分及组织不同的钢种之间,其塑性变形抗力可能有明显的差别。

钢的硬度与化学成分和金相组织具有密切关系,通过热处理,可以获得很宽的

硬度变化范围。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。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, 因此, 可用来制作硬度要求不同的冷作或热作模具。

硬度试验方法简单易行, 又无损于工件。实际常使用的硬度试验方法有: 布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度三种。三种硬度试验值有大致的换算关系。

1) 布氏硬度 (HBW)。布氏硬度是用载荷为 F 的力把直径 D 的钢球压入金属表面, 并保持一定的时间, 测量金属表面上的压痕直径 d , 据此计算出压痕面积 A_B , 求出每单位面积所受力, 用作金属的硬度值, 称为布氏硬度。布氏硬度的使用上限是 650HBW, 适用于测定退火、正火、调质钢、铸铁及非铁金属的硬度。

2) 洛氏硬度 (HRA、HRC)。洛氏硬度是模具生产中最常用的硬度测量方法, 因为操作简便、迅速, 可以直接读出硬度值, 不损伤工件表面, 可测量的硬度范围较宽。但洛氏硬度也有一些缺点, 如因压痕小, 对材料有偏析及组织不均匀的情况, 测量结果分离度大, 再现性较差。洛氏硬度 (HR) 也是用压痕的方式试验硬度。它是用测量凹陷深度来表示硬度值。洛氏硬度试验用的压头分硬质和软质两种。硬质压头是顶角为 120° 的金刚石圆锥体, 适用于淬火钢等硬的材料。HRA 硬度有效范围是 $>70\text{HRA}$, 适用于硬质合金、表面淬火层及渗碳层; HRC 硬度有效范围是 20 ~ 68HRC (相当于 230 ~ 700HBW、650 ~ 700HBW 超出了布氏硬度的使用上限), 适用于淬火钢及调质钢。

3) 洛氏硬度 (HRB)。洛氏硬度 (HRB) 的测量采用直径 1.588mm (1/16in) 的钢球, 适用于退火钢、非铁金属等, 硬度有效范围是 25 ~ 100HRB (相当于 60 ~ 230HBW)。

4) 维氏硬度 (HV)。维氏硬度也是利用压痕面积上单位应力作为硬度值计量。维氏硬度所使用的压头是锥面夹角为 136° 的金刚石四方锥体。试验时, 在载荷 F 的作用下, 在试样试验面上压出一个正方形压痕。测量压痕两对角线的平均长度 d , 借以计算压痕面积 A_v , 以 F/A_v 的数值表示试样的硬度。维氏硬度有一个连续一致的标度; 试验载荷可任意选择, 所得的硬度值相同。试验时加载的压力小, 压入深度浅, 对工件损伤小。特别适用于测量工件的表面淬硬层及经过表面化学处理的硬度, 并且比布氏、洛氏硬度测量精确。但是维氏硬度的试验操作较麻烦, 一般多用于实验室及科研方面, 在生产上尽量少使用。

(3) 耐磨性 模具在工作时, 表面往往与工件产生多次反复强烈摩擦, 这样便要求制作模具的材料能承受机械磨损, 即使在承受重载荷和高速摩擦时, 也不至于和加工工件的表面之间产生粘附、焊合, 致使工件表面擦伤, 使模具仍能保持其尺寸精度和表面粗糙度。

决定模具使用寿命最重要的因素往往是模具材料的耐磨性。模具在工作中承受相当大的压应力和摩擦力, 要求模具能够在强烈摩擦状况下仍保持其尺寸精度。为

了改善模具钢的耐磨性,就要既保持模具钢具有高的硬度,又要保证钢中碳化物或其他硬化相的组成、形态和分布比较合理。对于重载、高速磨损条件下服役的模具,要求模具钢表面既能形成薄而致密粘附性好的氧化膜,保持润滑作用,减少模具和工件之间产生粘咬、焊合等熔融磨损,又能减少模具表面由于氧化造成氧化磨损。

耐磨性可采用模拟的试验方法,测出相对的耐磨指数 c ,作为表征不同化学成分及组织状态下的耐磨性水平的参数。以呈现规定毛刺高度前的寿命,反映各种钢的耐磨水平;试验是以 Cr12MoV 钢为基准 ($c = 1$) 进行对比,反映模具钢在磨粒磨损条件下的耐磨性水平。

冷作模具的常见磨损形式包括磨粒磨损、粘着磨损、腐蚀磨损与疲劳磨损。

(4) 热硬性 在高温状态下工作的热作模具,要求保持其组织和性能的稳定性,从而保持足够高的硬度,这种性能称为热硬性。热硬性反映了材料保持其硬度和组织稳定性,抵抗软化的能力,是热作模具钢和部分重载荷冷作模具钢的重要性能指标。碳素工具钢、低合金工具钢通常能在 $180 \sim 250^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内保持该性能,铬钼热作模具钢一般在 $550 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内保持这种性能。钢的热硬性主要取决于钢的化学成分和所采取的热处理工艺。

(5) 塑性 淬硬后模具钢的塑性较差,尤其是冷变形模具钢,在很小的塑性变形时即发生脆断。衡量模具钢塑性好坏,通常采用断后伸长率和断面收缩率两个指标表示。

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

断面收缩率是指拉伸试棒经拉伸变形和拉断以后,断裂部分截面的缩小量与原始截面之比,以 ψ 表示。塑性材料拉断以后有明显的缩颈,所以 ψ 值较大。而脆性材料拉断后,截面几乎没有缩小,即没有缩颈产生, ψ 值很小,说明塑性很差。

(6) 韧性 韧性是模具钢的一个重要性能指标,韧性决定了材料在冲击试验力作用下对破裂的抗断能力。材料的韧性越高,脆断的危险性越小,热疲劳强度也越高。对于衡量模具脆断倾向,冲击韧度试验具有重要意义。

模具钢的化学成分、晶粒度、纯净度、碳化物和夹杂物等的数量、形态、尺寸大小及分布情况,以及模具钢的热处理制度和热处理后得到的金相组织等因素,都对钢的韧性带来很大的影响。特别是钢的纯净度和热加工变形情况对于其横向韧性的影响更为明显,钢的韧性、强度和耐磨性往往是相互矛盾的,通过合理地选择钢的化学成分并且采用合理的精炼、热加工和热处理工艺,可以使模具材料的耐磨性、强度和韧性达到最佳的配合。

冲击韧度是指冲击试样缺口处截面积上的冲击吸收功,而冲击吸收功是指规定形状和尺寸的试样在冲击试验力一次作用下折断时所吸收的功。冲击试验有夏比 U 形缺口冲击试验(试样开成 U 形缺口)、夏比 V 形缺口冲击试验(试样开成 V 形

缺口) 以及艾式冲击试验。

影响冲击韧度的因素很多, 不同材质的模具钢冲击韧度相差很大, 即使同一种材料, 因组织状态不同、晶粒大小不同、内应力状态不同冲击韧度也不相同。通常是晶粒越粗大, 碳化物偏析越严重(带状、网状等), 马氏体组织越粗大等都会促使钢材变脆。一般情况是温度越高冲击韧度值越高, 而有的钢常温下韧性很好, 当温度下降到 $-20 \sim -40^{\circ}\text{C}$ 时会变成脆性钢。

由于很多模具是在不同工作条件下疲劳断裂的, 常规的冲击韧度不能全面地反映模具钢的断裂性能, 因而, 小能量多次冲击断裂功或多次断裂寿命和疲劳寿命等试验技术正在被采用。

(7) 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 4h, 硬度降到 45HRC 时的最高加热温度表示。这种方法与材料的原始硬度有关。在有些资料中, 将达到预定强度级别的钢加热, 保温 2h, 使硬度降到一般热锻模失效硬度 35HRC 的最高加热温度定为该钢稳定性指标。对于因耐热性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。

(8) 抗热疲劳能力 热作模具钢在服役条件下除了承受载荷的周期性变化之外, 还受到高温及周期性的急冷急热的作用, 因此, 评价热作模具钢的断裂抗力应重视材料的热机械疲劳断裂性能。热机械疲劳是一种综合性能的指标, 它包括热疲劳性能、机械疲劳裂纹扩展速率和断裂韧度三个方面。

热疲劳性能反映材料在热疲劳裂纹萌生之前的工作寿命, 抗热疲劳性能高的材料, 萌生热疲劳裂纹的热循环次数较多; 机械疲劳裂纹扩展速率反映材料在热疲劳裂纹萌生之后, 在锻压力的作用下裂纹向内部扩展时, 每一应力循环的扩展量; 断裂韧度反映材料对已存在的裂纹发生失稳扩展的抗力。断裂韧度高的材料, 其裂纹如要发生失稳扩展, 必须在裂纹尖端具有足够高的应力强度因子, 也就是必须有较大的裂纹长度。在应力恒定的前提下, 在一种模具中已经存在一条疲劳裂纹, 如果模具材料的断裂韧度值较高, 则裂纹必须扩展得更深, 才能发生失稳扩展。

因此, 抗热疲劳性能决定了疲劳裂纹萌生前的那部分寿命; 而裂纹扩展速率和断裂韧度, 可以决定当裂纹萌生后发生亚临界扩展的那部分寿命。因此, 热作模具如要获得高的寿命, 模具材料应具备高的抗热疲劳性能、低的裂纹扩展速率和高的断裂韧度值。

抗热疲劳性能的指标既可以用萌生热疲劳裂纹的热循环次数表示, 也可以用经过一定的热循环后所出现的疲劳裂纹的条数及平均的深度或长度来衡量。

(9) 高温磨损与抗氧化性能 高温磨损是热作模具主要失效形式之一, 正常情况下, 绝大多数锤锻模及压力机模具都因磨损而失效。抗热磨损是对热作模具使用性能的要求, 是多种高温力学性能的综合体现。现在国内已有单位在自制的热磨

损机上进行模具热磨损试验,收到较理想的试验效果。

实践表明,模具材料抗氧化性能的优劣,对模具使用寿命影响很大。因氧化会加剧模具工作过程中的磨损,导致模具型腔尺寸超差而报废。氧化还会使模具表面产生腐蚀沟,成为热疲劳裂纹起源,加剧模具热疲劳裂纹的萌生与扩展。因此,要求模具具备一定的抗氧化性能。

(10) 断裂抗力 除常规力学性能,如冲击韧度、抗压强度、抗弯强度等一次性断裂抗力指标外,小能量多次冲击断裂抗力更符合冷作模具实际使用状态性能,作为模具材料性能指标还包括抗压疲劳强度、接触疲劳强度等。这种疲劳断裂抗力指标是由在一定循环应力下测得的断裂循环次数,或在一定循环次数下导致断裂的载荷来表征的。

(11) 抗咬合能力 咬合抗力实际就是发生“冷焊”时的抵抗力。该性能对于模具材料较为重要。试验时通常在干摩擦条件下,把被试验的模具钢试样与具有咬合倾向的材料(如奥氏体钢)进行恒速对偶摩擦运动,以一定的速度逐渐增大载荷,此时,转矩也相应增大,该载荷称为“咬合临界载荷”,临界载荷越高,标志着咬合抗力越强。

(12) 抗软化能力 抗软化能力表征了模具在承载时,因钢的温度升高对硬度、耐磨性的抵抗能力。

(13) 抗压屈服强度和抗压弯曲强度 模具在使用过程中经常受到强度较高的压力和弯曲力的作用,因此要求模具材料应具有一定的抗压强度和抗弯强度。在很多情况下,进行抗压试验和抗弯试验的条件接近于模具的实际工作条件,例如:所测得的模具钢的抗压屈服强度与冲头工作时所表现出来的变形抗力较为吻合。抗弯试验的优点是应变量的绝对值大,能较灵敏地反映出不同钢种之间以及在不同热处理和组织状态下变形抗力的差别。

3. 模具材料的工艺性能

模具的制造一般都要经过锻造、切削加工、热处理等几道工序。为保证模具的制造质量,降低生产成本,其材料应具有良好的可锻性、可加工性、淬硬性、淬透性及可磨削性;还应具有低的氧化、脱碳敏感性和淬火变形开裂倾向。

(1) 可加工性 是指模具材料的可加工性能,包括:切削、磨削、抛光、冷挤压、冷拉等工艺性,良好的可加工性能是选用模具钢的重要条件之一。

(2) 可磨削性 砂轮相对损耗小,无烧伤极限磨削用量大,对砂轮质量及冷却条件不敏感,不易发生磨伤及磨削裂纹。

(3) 可锻性 指金属材料在压力加工时,能改变形状而不产生裂纹的性能。它包括在热态或冷态下能够进行锤锻、轧制、拉伸、挤压等加工。可锻性的好坏主要与金属材料的化学成分有关。具有较低的热锻变形抗力,塑性好,锻造温度范围宽,锻裂、冷裂及析出网状碳化物倾向低。

(4) 退火工艺性 球化退火温度范围宽,退火硬度低且波动范围小,球化率高。

(5) 淬火温度范围和淬火变形 要求模具钢具有较宽的淬火温度范围,以及较小的淬火变形。其中淬火变形开裂倾向是指常规淬火体积变化小,形状翘曲、畸变轻微,异常变形倾向低。常规淬火开裂敏感性低,对淬火温度及工件形状不敏感。

(6) 淬透性和淬硬性 淬硬性取决于钢的含碳量,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。大部分要求高硬度的冷作模具,对淬硬性要求较高;而大部分热作模具和塑料模具,对于硬度的要求则相对较低,往往很注重淬透性;特别是对于一些大截面深型腔模具,为了使模具的心部也得到良好的组织和均匀的硬度,需要选用淬透性好的模具钢。

(7) 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,就会改变模具的表面形状和性能,影响模具的硬度、耐磨性和使用寿命,导致模具早期失效。通过真空热处理等特殊热处理工艺,可避免氧化、脱碳。

(8) 耐回火性 指钢随回火温度升高,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征钢在高温下的组织稳定性程度,表征模具在高温下的变形抗力。

1.3 模具材料的选用

1.3.1 模具选材原则

应根据模具生产条件和工作状况,选择适合模具需要的、经济上合理、性能指标满足要求的材料。有时几种模具材料都能符合要求,需要对模具使用寿命的长短,模具加工制造的难易,模具生产的成本等因素,进行全面综合评判,才能选择出合适的模具材料。一般来说,还必须考虑模具材料的耐磨性、韧性、硬度、热硬性及加工性。

1. 满足工作条件要求

(1) 耐磨性 坯料在模具型腔中塑性变形时,沿型腔表面既流动又滑动,使型腔表面与坯料间产生剧烈的摩擦,从而导致模具因磨损而失效。所以材料的耐磨性是模具最基本、最重要的性能之一。要求模具寿命长,其耐磨性一定要高。在长期的工作条件下,保持其尺寸的精度和表面粗糙度,不致早期磨损失效。

硬度是影响耐磨性的主要因素。一般情况下,模具零件的硬度越高,磨损量越小,耐磨性也越好。另外,耐磨性还与材料自身有关。

(2) 强韧性 模具的工作条件大多十分恶劣,有些常承受较大的冲击载荷,

从而导致脆性断裂。为防止模具零件在工作时突然脆断，模具要具有较高的强度和韧性。

对于冷作模具钢，防止早期开裂形成断裂损坏，韧性是一个重要的性能指标。在保持模具材料高强度的同时，尽可能提高材料的韧性，达到高强韧性。模具的韧性主要取决于材料的含碳量、晶粒度及组织状态。

(3) 疲劳断裂性能 模具工作过程中，在循环应力的长期作用下，往往导致疲劳断裂。其形式有小能量多次冲击疲劳断裂、拉伸疲劳断裂、接触疲劳断裂及弯曲疲劳断裂。

模具的疲劳断裂性能主要取决于其强度、韧性、硬度，以及材料中夹杂物的含量。

(4) 高温性能 当模具的工作温度较高时，会使硬度和强度下降，导致模具早期磨损或产生塑性变形而失效。因此，模具材料应具有较高的耐回火性，以保证模具在工作温度下，具有较高的硬度和强度。

(5) 耐冷热疲劳性能 有些模具在工作过程中处于反复加热和冷却的状态，使型腔表面受拉、压交变应力的作用，引起表面龟裂和剥落，增大摩擦力，阻碍塑性变形，降低了尺寸精度，从而导致模具失效。冷热疲劳是热作模具失效的主要形式之一，热作模具应具有较高的耐冷热疲劳性能。

(6) 耐蚀性 有些塑料模在工作时，由于塑料中存在氯、氟等元素，受热后分解析出 HCl、HF 等强侵蚀性气体，侵蚀模具型腔表面，加大其表面粗糙度，加剧磨损失效。

2. 满足工艺性能要求

在选择模具材料时，必须考虑材料的工艺性能，包括可锻性、可磨削性、可加工性、退火工艺性等。（详见 1.2，模具材料的工艺性能）。

3. 满足经济性要求

在模具选材时，必须考虑经济性这一原则，尽可能地降低制造成本。因此，在满足使用性能的前提下，首先选用价格较低的材料，能用碳钢就不用合金钢，能用国产材料就不用进口材料。

另外，在选材时还应考虑市场的生产和供应情况，所选钢种应尽量少而集中，易购买。

1.4 模具的常规热处理

模具的常规热处理就是将钢在固态下施以不同的加热、保温和冷却，以改变其内部组织结构，获得所需性能的一种加工工艺。在常规热处理工艺中，钢加热的目的是获得奥氏体组织，因此习惯上把钢从室温组织加热到奥氏体状态的过程称为钢的奥氏体化。其最基本的类型根据加热和冷却方法不同，包括有退火、正火、