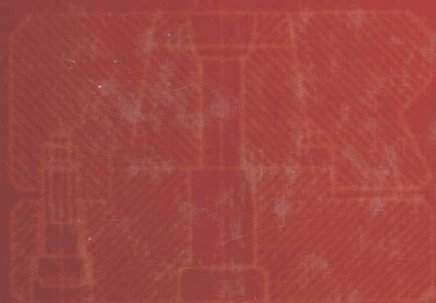


MUJU RECHU
SHIYONG SHOUC

模具 热处理 实用手册

王忠诚 李 杨 尚子民 ● 编著



化学工业出版社

模具热处理 实用手册

王忠诚 李 杨 尚子民 ● 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本手册全面系统地介绍了模具的热处理技术。从模具的锻造过程、预备热处理方式到最后的热处理都进行了详细的阐述,对影响模具使用寿命的众多因素进行具体归类与分析,并提出了科学合理的工艺手段与方法;根据材料的性能与热处理特点,结合具体的模具热处理典型实例,对模具的热处理方法进行了比较与探讨,为提高目前我国模具的热处理工艺与技术水平提供参考。

本手册概念清晰、图文并茂、实用性强,适于热处理工程技术人员、模具设计人员及热处理操作者使用,也可供热处理专业与模具设计专业在校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

模具热处理实用手册/王忠诚,李杨,尚子民编著.

北京:化学工业出版社,2011.4

ISBN 978-7-122-10553-0

I. 模… II. ①王…②李…③尚… III. 模具-
热处理-技术手册 IV. TG162.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第024233号

责任编辑:王清颖

责任校对:宋夏

文字编辑:闫敏

装帧设计:关飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张40 字数1000千字 2011年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:128.00元

版权所有 违者必究

前 言

模具工业为我国的基础工业，模具是工业生产中的重要工业装备，模具制造、热处理技术水平以及使用水平是衡量一个国家工业水平的重要标志，故世界各国均致力于模具的研究与开发。模具以特定的结构与一定的加工方式完成零件的成形处理，从而实现零件的大批量与规范化作业，具有生产效率高、尺寸稳定性高、材料利用率高、表面缺陷低、制造成本低等特点，在汽车、航空、机电、电器、仪表、家电、兵器和日用产品等领域得到了广泛的应用。经模具加工而成形零件的材质众多，从黑色金属、有色金属到非金属（包括塑料、橡胶、玻璃、陶瓷等）材料，它们的性能、结构、尺寸精度、产量等有一定的差异，这对于模具材料的选用、过程加工、热处理等提出了相应的技术要求，因此，如何满足模具的设计与使用寿命指标，已成为评价我国模具热处理工艺人员素质与技术水平的标志。

结合我国的具体模具的性能要求，采用正确和先进的热处理技术与工艺，可以最大限度充分发挥模具材料的潜能，加上使用过程中进行必要的内应力的消除等保护性措施，可确保延长模具的使用寿命，实现模具的高精度与长期工作需要。目前我国模具的制造水平和使用寿命与发达国家相比还有很大的差距，模具的使用寿命只有国外的 $1/5 \sim 1/2$ ，模具的失效因素中，因材料与热处理的原因占了 70% 左右。另外，我国模具行业的设计与热处理人才青黄不接，设备与技术落后，也制约了模具工业的快速发展。因此提高我国模具的设计制造与热处理水平，是当务之急，也是我国模具从生产大国向强国进步的基础，这将有助于推动国民经济的发展。

随着科学技术的飞速发展，我国模具的热处理技术与工艺有了长足的进步，各种先进的热处理设备与工艺得到了较为广泛的应用，真空炉、流态化粒子炉、离子炉、可控气氛炉等已经普及，各种强韧化工艺和表面改性处理技术的推广，大大提高了模具的质量与模具的使用寿命，正缩短着我国与发达国家在模具领域的差距。

国内介绍模具材料的书籍较多，但对于模具的热处理则缺乏从模具选材、锻造、预备热处理、过程加工、最终热处理以及缺陷的预防等提出针对性措施的书籍。本书重点介绍模具的热处理技术与方法，同时介绍国内外传统和研制的模具钢性能与热处理工艺特点，为模具设计与热处理工艺人员等提供有益的参考。

本书按照模具的分类，全面而系统地介绍了模具热处理的工艺与特点，全书共分 13 章，首先讲解模具的分类与材料的性能，模具的加工与预备热处理对于模具的影响，以及模具热处理的基础热处理工艺；其次介绍了冷作模具、热作模具、塑料模具等性能要求与热处理特点及实例，同时将表面处理技术进行了分类与总结；将预防模具早期失效的措施与手段，模具的热处理常见缺陷与对策等作了系统的分析；最后则介绍了模具的热处理新技术、质量过程控制与检测技术，模具热处理设备与特点等；附录部分汇集了国内外常用模具材料的牌号对比与性能，热处理工艺参数及钢的硬度与强度等力学性能换算等。

本书是模具热处理的专业书籍，是作者二十多年在热处理领域辛勤实践的结晶，也是热处理工作者共同的财富，希望为我国模具热处理事业的发展提供有益的帮助，为模具使用寿命的提高提供参考。

本书在编写过程中得到了国内专家与同仁的支持与关注，山东大学齐宝森教授给予了系统的指导与帮助，山东安丘亚星热处理材料有限公司刘建华总经理、济南昌达热工有限公司张学礼总经理、山东远大模具有限公司曹学敏总经理等提供了部分资料与图片，在此表示致意与衷心的感谢。

鉴于作者水平和掌握的技术资料有限，书中难免有不妥之处，敬请广大读者批评指正。

王忠诚

目 录

第 1 章 模具的分类与材料性能	1
1.1 模具材料的分类及选用	1
1.1.1 模具材料的分类	1
1.1.2 模具材料的性能要求和选用原则	4
1.1.3 我国模具钢的发展趋势与要求	5
1.2 模具材料的主要力学性能指标	6
1.2.1 模具材料的常规力学性能	6
1.2.2 模具材料的特殊力学性能	8
1.3 常用模具材料的热处理特性	10
1.3.1 冷作模具钢	10
1.3.2 热作模具钢	12
1.3.3 模具材料的热处理对模具性能的影响	14
第 2 章 预备热处理对模具质量的影响	16
2.1 原始组织对机械加工性能的影响	16
2.1.1 模具钢的原材料冶金质量对模具的影响	16
2.1.2 组织和硬度对于切削加工性的影响	17
2.1.3 原始组织对淬火质量的影响	17
2.1.4 冶金质量的影响	18
2.2 预备热处理工艺方法	18
2.2.1 退火	19
2.2.2 调质处理	22
2.2.3 正火与高温回火	25
2.2.4 挤压毛坯对模具寿命以及最终热处理的影响	27
第 3 章 钢铁材料的热处理原理与基础工艺	30
3.1 钢铁材料的热处理原理	30
3.1.1 奥氏体的形成过程和晶粒度	30
3.1.2 钢的过冷奥氏体转变及其应用	33
3.2 钢的热处理基础工艺	37
3.2.1 钢的退火和正火	37
3.2.2 钢的淬火和回火	40
3.2.3 钢的表面淬火与回火	51
3.2.4 钢的淬火方法和冷却介质的选择	58
3.3 不同类型钢的热处理	67
3.3.1 结构钢的热处理	67
3.3.2 弹簧钢的热处理	69
3.3.3 轴承钢的热处理	71
3.3.4 工具钢的热处理	73
3.3.5 模具钢的热处理	78
3.3.6 量具钢的热处理	79
3.3.7 铸铁的热处理	80
3.4 热处理缺陷分析及对策	86
3.4.1 钢的退火和正火缺陷分析与对策	86
3.4.2 钢的淬火和回火缺陷分析与对策	87
3.5 热处理变形的校直方法	90
第 4 章 冷作模具钢的热处理特点	92
4.1 冷作模具对模具钢的要求	92
4.1.1 冷作模具的材料选择与热处理	92
4.1.2 冷作模具对模具钢的基本要求	94
4.2 新型冷作模具钢的性能与特点	96
4.3 低淬透性冷作模具钢	97
4.4 低变形冷作模具钢（低合金冷作模具钢）	117
4.5 高耐磨微变形冷作模具钢	122
4.6 高强度高耐磨冷作模具钢（高速钢）	139
4.7 抗冲击冷作模具钢	146
4.8 高强韧性冷作模具钢	152
4.9 高耐磨高韧性冷作模具钢	173
4.10 特殊用途冷作模具钢	176
第 5 章 冷作模具热处理	185
5.1 冷作模具的基本热处理工艺	185
5.1.1 冷作模具热处理要点	185
5.1.2 冷作模具的主要热处理工艺	185
5.2 冲裁模的热处理	187
5.2.1 冷冲裁模的工作过程与特点	187
5.2.2 冲裁模的使用寿命与失效方式	188
5.2.3 冲裁模的热处理特点	189
5.2.4 热处理实践	195
5.3 冷剪刀的热处理	202
5.3.1 冷剪刀的工作条件与特点	202
5.3.2 冷剪刀用钢的选择与硬度	202
5.3.3 冷剪刀的热处理工艺特点	203
5.3.4 热处理实践	206

5.4 冷挤压模的热处理	207	6.3.3 模具的真空冷却方式与特点	307
5.4.1 冷挤压模的工作条件与要求	207	6.4 热挤压模具的热处理	308
5.4.2 模具的失效形式与产生原因	209	6.4.1 热挤压模具的工作条件和技术要求	308
5.4.3 冷挤压模具材料的性能与选择	210	6.4.2 热挤压模具的失效形式	309
5.4.4 冷挤压模具的热处理特点	211	6.4.3 模具用钢的选择	310
5.4.5 模具热处理实践	212	6.4.4 热挤压模具的热处理	311
5.4.6 冷挤压件与冷挤压模具缺陷与失效原因分析	217	6.4.5 改进热处理工艺、提高热挤压模具的使用寿命	315
5.5 冷拉延(深)模的热处理	224	6.4.6 挤压金属坯料的技术要求与缺陷分析	318
5.5.1 拉深模的工作条件与失效形式	224	6.4.7 部分挤压模具热处理工艺应用实例	327
5.5.2 拉深模使用寿命	225	6.5 压铸模具的热处理	332
5.5.3 选用材料与热处理特点	226	6.5.1 压铸模的工作条件与性能要求	332
5.5.4 模具热处理实践	228	6.5.2 压铸模具材料的选用	333
5.6 冷镦模的热处理	228	6.5.3 压铸模的热处理工艺	334
5.6.1 工作条件与模具的组成	228	6.5.4 提高压铸模使用寿命的途径	340
5.6.2 冷镦模的失效形式与技术要求	229	6.5.5 锌合金、压铸铜合金、铝、镁合金压铸模的热处理	341
5.6.3 冷镦模的材料选用与热处理特点	229	6.6 热锻模具的热处理	344
5.6.4 冷镦模的热处理实践	231	6.6.1 工作条件与技术要求	344
5.7 冷作模具热处理典型实例	235	6.6.2 热锻模材料的特点	345
5.7.1 电机硅钢片冷冲孔冲裁模的热处理	235	6.6.3 热锻模的热处理	345
5.7.2 CrWMn 钢小型手表冲压模具的低温马氏体强韧化处理	238	6.6.4 提高热锻模的使用寿命的途径	351
5.7.3 W9Mo3Cr4V 钢制 6105Q-20 挺杆冷挤压模具的热处理	239	6.7 热锤锻模具的热处理	353
5.7.4 轴承滚柱冷镦凹模的热处理	242	6.7.1 热锤锻模的工作条件	353
5.7.5 螺纹压制模具的热处理	244	6.7.2 热锤锻模材料的选择与模具失效形式	353
第6章 热作模具钢及其热处理	255	6.7.3 锤锻模的使用与维护修理	357
6.1 热作模具钢的性能要求	255	6.7.4 延长锻模使用寿命的途径和相应的热处理工艺	358
6.1.1 热作模具钢的分类	255	6.8 高速锤锻模具的热处理	359
6.1.2 热作模具的性能要求	256	6.8.1 工作条件与技术要求	359
6.1.3 热作模具钢的选择与应用	258	6.8.2 模具用钢的选择	359
6.2 热作模具钢的热处理特点	262	6.8.3 高速锤锻模的热处理	359
6.2.1 低合金、高韧性热作模具钢(热锻模用钢)	262	6.9 热冲裁模具的热处理	361
6.2.2 中合金、高韧性热作模具钢(热挤压模用钢)	271	6.9.1 工作条件与失效形式	361
6.2.3 高耐热、中韧性钢(压铸模等用钢)	287	6.9.2 模具材料选择	361
6.2.4 高耐磨、高碳模具钢(热冲裁模用钢)	296	6.9.3 热冲裁模的热处理	362
6.2.5 特殊用途热作模具钢	296	6.10 热切边模具与热铆钉模具的热处理	364
6.3 热作模具的热处理工艺	303	6.10.1 工作条件与失效形式	364
6.3.1 热作模具钢的一般热处理工艺	304	6.10.2 模具材料的选择	365
6.3.2 热作模具的真空热处理工艺参数	304	6.10.3 模具的热处理	365
		6.11 热作模具热处理典型实例	367

6.11.1	铝合金压铸模	367	8.2	铸铁模具材料与热处理	439
6.11.2	热挤压模	372	8.2.1	灰口铸铁的性能与热处理	439
6.11.3	气门热挤压(锻)模	373	8.2.2	球墨铸铁的性能与热处理	440
6.11.4	气门嘴热挤压模的热处理	378	8.2.3	蠕墨铸铁的性能与热处理	441
6.11.5	锤锻模	379	8.2.4	合金铸铁的性能与热处理	442
6.11.6	Cr12MoV 钢制切边模的中温淬火 处理	384	8.3	模具用硬质合金与钢结硬质合金的热 处理	444
第7章	塑料模具钢及其热处理	385	8.3.1	硬质合金的热处理	444
7.1	塑料模具对模具钢的性能要求	385	8.3.2	钢结硬质合金的热处理	446
7.1.1	塑料模具的分类	385	8.4	非铁金属及合金模具材料与热处理 ..	449
7.1.2	塑料模具的工作条件	385	第9章	模具的表面处理技术	453
7.1.3	塑料模具的失效形式	386	9.1	概述	453
7.1.4	塑料模具材料的性能要求	388	9.1.1	表面强化处理的类别	453
7.2	塑料模具钢的热处理特点	389	9.1.2	表面强化处理的作用或目的	455
7.3	塑料模具钢的选用	390	9.2	模具表面的化学热处理技术	455
7.3.1	塑料模具用钢的成分、性能 特点	392	9.2.1	渗碳	455
7.3.2	塑料模具用钢的选择原则、性能 与应用特点	417	9.2.2	渗氮	457
7.4	塑料模具的热处理工艺规范	420	9.2.3	碳氮共渗与氮碳共渗	459
7.4.1	塑料模具材料的热处理技术 要求	420	9.2.4	渗硼与渗金属	462
7.4.2	塑料模具的加工流程	422	9.2.5	发黑(发蓝)、磷化和蒸汽处理	465
7.4.3	塑料模具的热处理特点	422	9.3	模具表面的涂镀技术	471
7.4.4	塑料模具的冷却系统	426	9.3.1	电镀	471
7.5	塑料模具的表面处理技术	427	9.3.2	电镀刷	471
7.6	塑料模具热处理实例	427	9.3.3	化学镀	473
7.6.1	5CrNiMnMoVSCa(5NiSCa) 钢制 造精密密封橡胶模和精密热塑性 塑料模的热处理	427	9.3.4	热浸镀	474
7.6.2	Y55CrNiMnMoVS(SM1)、Y2CrNi3Al- MnMoS(SM2) 钢的塑料模具的热 处理	429	9.4	模具表面的气相沉积技术	474
7.6.3	SMRI-86 型合金铸铁制玻璃模具 的热处理	430	9.4.1	化学气相沉积(CVD) 工艺	475
7.6.4	8Cr2MnWMoVS(8Cr2S) 钢制 造电路印刷版冲裁模具	430	9.4.2	物理气相沉积(PVD) 工艺	478
7.6.5	12CrNi3A 钢制对开胶木模的热 处理	431	9.5	模具表面的其他处理技术	480
7.6.6	CrWMn 钢模套热浴淬火	432	9.5.1	热喷涂(堆焊)	480
7.6.7	PMS 钢制磁带内盒的热处理	432	9.5.2	激光表面合金化	482
7.6.8	粉末陶瓷凸模的热处理	433	9.5.3	离子注入	482
7.6.9	线圈架塑料压铸模	434	9.5.4	电火花表面强化	483
第8章	铸钢、铸铁与硬质合金等模 具材料的热处理	436	9.5.5	电子束的表面强化	484
8.1	铸钢模具材料与热处理	436	9.5.6	喷丸表面强化	484
			第10章	预防模具早期失效的措施与 方法	486
			10.1	概述	486
			10.2	模具结构设计合理性的影响	486
			10.2.1	模具的结构	486
			10.2.2	模具的工作间隙	489
			10.2.3	模具的结构刚度	489
			10.2.4	减轻模具的工作载荷	490
			10.2.5	热作模具的结构要点	491
			10.3	模具设计、制造和热处理的注意 事项	491

10.3.1	模具的设计与制造过程	491	13.2	热处理加热过程与加热介质	554
10.3.2	模具热处理的注意事项	496	13.3	模具在加热过程中的氧化脱碳及其 控制方法	555
10.4	模具服役过程中的正确使用与维护 条件	497	13.3.1	氧化的原理	556
10.5	提高模具使用寿命的途径与方法	501	13.3.2	脱碳的原理	556
10.5.1	模具材料与强化措施	501	13.3.3	防止或减少氧化和脱碳的 方法	557
10.5.2	提高模具使用寿命的途径与 手段	513	13.4	热处理的变形与开裂质量缺陷	558
10.5.3	提高模具寿命的措施与方法 实例	515	13.4.1	热处理变形和开裂	558
第 11 章	模具热处理缺陷分析与 对策	520	13.4.2	模具组织和力学性能不合格	572
11.1	模具失效的形式与原因	520	13.4.3	改进工艺减少模具热处理缺陷的 产生	575
11.2	模具热处理的缺陷种类与特点	520	13.5	部分模具钢的不良组织表现形式与 特征	576
11.3	一般模具热处理的缺陷产生原因与 对策	523	13.6	模具钢的热处理质量检验	582
11.3.1	软点	523	13.7	模具热处理用质量检测设备和 仪器	589
11.3.2	淬火裂纹	523	13.7.1	无损探伤检测设备	589
11.3.3	组织不合格	524	13.7.2	硬度检测设备	590
11.3.4	硬度不合格	525	13.7.3	抗拉强度检测设备	596
11.3.5	表面氧化与脱碳	526	13.7.4	其他检测设备	596
11.3.6	表面腐蚀	527	附录 A	模具钢牌号、代号与性能	597
11.3.7	变形或畸变	527	附表 1	常见模具钢国内外牌号对照	597
11.3.8	过热和过烧	530	附表 2	国内外常见(研制的新型)模具 钢的代号与性能特点	598
11.4	减少模具热处理缺陷的基本措施	531	附表 3	部分常见合金工具钢的性能特点 与主要用途	603
11.5	常见表面处理技术缺陷与对策	532	附录 B	模具钢的热处理工艺参数	605
11.5.1	渗碳缺陷分析与对策	532	附表 4	常用塑料模具钢的退火、正火、 固溶处理规范	605
11.5.2	渗氮缺陷分析与对策	534	附表 5	模具钢淬火加热温度、冷却方 式及淬火硬度	606
11.5.3	氮碳与碳氮共渗缺陷分析与对策	536	附表 6	模具钢常见的冷却方式、代号 与应用情况	607
第 12 章	模具热处理新技术的发展和 应用	542	附表 7	常见模具钢回火规范与硬度 关系	608
12.1	概述	542	附表 8	常用碳素工具钢的热处理工艺 规范	609
12.2	真空热处理	542	附表 9	碳素工具钢的淬火冷却方法	609
12.2.1	真空热处理的发展与特点	542	附表 10	常用合金工具钢热处理工艺 规范	609
12.2.2	真空热处理技术的发展趋势	544	附表 11	高速钢模具热处理工艺规范	610
12.3	形变热处理	544	附表 12	部分热作模具钢回火工艺 规范	611
12.3.1	形变热处理的类型与特点	545	附表 13	常用冷作模具钢回火温度与硬度 的关系	611
12.3.2	形变热处理的工艺及应用	548			
12.4	激光热处理	549			
12.5	电子束表面热处理	551			
第 13 章	模具的热处理质量控制与 检测	553			
13.1	概述	553			
13.1.1	分析模具热处理质量的方法	553			
13.1.2	模具热处理质量的控制手段和 方法	553			

附表 14	冷作模具钢的常规加热系数·····	612	附表 19	各种钢的硬度与强度换算 (GB/T 1172—1999) ·····	618
附表 15	常用模具钢气体渗氮和气体氮碳 共渗工艺规范·····	612	附表 20	低碳钢的硬度与强度换算·····	620
附表 16	常用钢的贝氏体等温淬火的等温 温度·····	612	附录 D	其他 ·····	622
附录 C	硬度与强度、性能 ·····	613	附表 21	各种热处理工艺代号及技术条件 的标注方法·····	622
附表 17	金属布氏硬度 (HBW/S) 数值 ···	613	附表 22	金属热加工常用符号与含义····	623
附表 18	压痕对角线长度与维氏硬度值 (HV10) 对照 ·····	614	参考文献	·····	624

第1章 模具的分类与材料性能

模具是以特定的结构形式,通过一定的方式使材料成形的一种工业产品,同时也是成批生产出具有一定形状和尺寸要求的工业产品的一种生产工具。它主要通过所成形材料物理状态的改变来实现物品外形的加工,是用作批量成形加工冲压等制品的精密成形工具。它本身具有零件的外部 and 内部结构与形状,可以实现少、无切削加工,模具加工是一种重要的机械零件加工方法,具有加工效率高、产品质量稳定、制造成本低以及材料利用率高等特点。在现代机械化和工业化的生产中,模具作为十分重要的关键加工部件,在电子、电机、仪器、轻工、冶金、国防、汽车与拖拉机、机床制造、化工机械等领域得到了极为广泛的应用。

模具成形技术所具有的高效率、高一致性是其他成形工艺方法无法比拟的,而模具材料及其先进的制备技术又是完成高质量高寿命模具产品的最基础、最关键和最核心的保证。模具生产的工艺水平及科技含量的高低,已成为衡量一个国家科技与产品制造水平的重要标志,它在很大程度上决定着产品的质量、效益、新产品的开发能力,决定着一个国家制造业的重要标志,以及制造业的国际竞争力。密集性的模具产业,已经成为国民经济的重要支柱,在基础工业中占有极其重要的地位,根据国内和国际模具市场的发展状况,有关专家预测,未来我国的模具行业经过结构调整后,模具的精度将越来越高。

1.1 模具材料的分类及选用

1.1.1 模具材料的分类

模具材料主要是模具钢,一般选用碳素工具钢、合金工具钢、合金结构钢、硬质合金与钢结硬质合金、铸铁、非铁金属等,通常根据工作条件的不同,将模具钢分为冷作模具钢、热作模具钢、塑料模具钢和玻璃模具钢等四类。模具钢的产量在近20年来增长很快,领先于其他钢种,我国国家信息研究中心的统计资料表明,2009年我国合金工具钢的总产量已在100万吨左右,模具钢的产量已位居世界前列。目前中国模具钢的使用情况为:塑料模具钢占50%以上,冷作模具钢为28%左右,其余为热作模具钢。目前各国使用量较大的集中在十几种通用型模具钢上,各工业发达国家都列出了模具钢的本国标准钢号,我国现行的合金工具钢的国家标准为《合金工具钢》(GB/T 1299—2000),共有37个左右的钢号。图1-1分别为模具材料和模具钢的基本分类,供参考。

国内外4类模具和模具材料的发展状况概述如下。

(1) 冷作模具材料 冷作模具使用的材料是应用比较广泛的一类模具钢,主要用于制造冲压、剪切、辊压、冷镦、冷挤压等模具,国外通用的代表性钢种有低合金油淬模具钢 01 (9CrWMnV)、中合金空淬模具钢 A2 (Cr5Mo1V) 和高碳高铬模具钢 D3 (Cr12)、D2 (Cr12Mo1V1)。

我国通用的是20世纪50年代从前苏联引进的CrWMn、Cr12、Cr12MoV三种。1981年我国引进了高碳高铬工具钢D2。为了满足冷作模具的特殊要求,各国有针对性地发展了一些新型的模具钢,主要有如下两种。

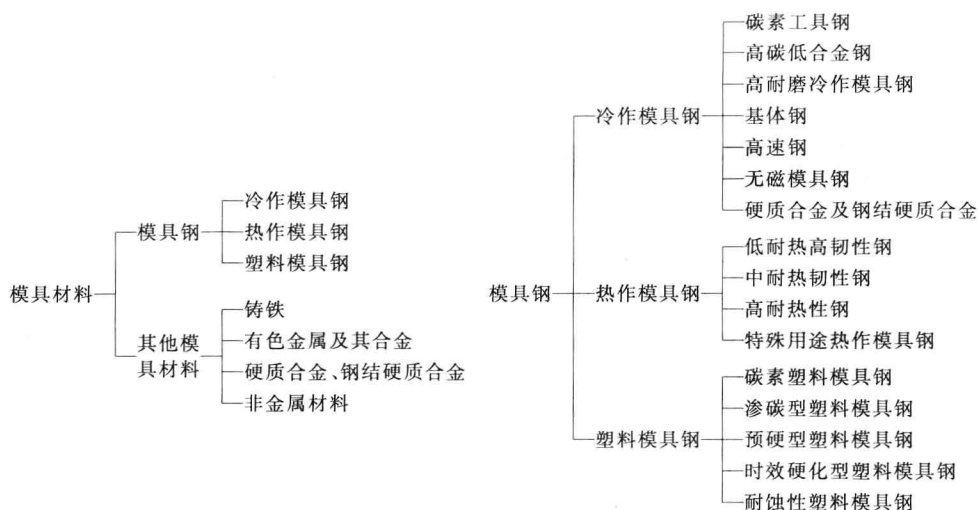


图 1-1 模具材料与模具钢的分类

① 高韧性高耐磨性模具钢 其碳铬含量低于 Cr12 型模具钢，增加了钼、钒合金的数量，钢中形成大量的 MC 型高弥散度碳化物，其耐磨性不低于或优于 Cr12 Mo1V1 钢，韧性和抗回火软化能力高于 Cr12 型钢。比较有代表性的钢号有美国钒合金钢公司早期发表的 Vasco Die，近年来日本山阳特殊钢公司发表的 QCM8，我国自行开发的 LD、GM 钢等，分别用于冷挤压模具、冷冲模具及高强度螺栓的滚丝模具，都取得了良好的使用效果。

② 低合金空淬微变形钢 这类钢的特点是合金含量低 ($\leq 5\%$)，淬透性、淬硬性好，价格低，主要用于精密复杂模具。代表性的钢号有：美国 ASTM 标准钢号 A4、A6，日本大同公司的 G04，我国自行研制的 Cr2Mn2SiWMoV 和 CrMnMoVS^[1]。

另外由于粉末冶金模具具有磨削性、韧性、等向性、热处理工艺性好的特性，近 20 年来在国外发展很快，代表性的钢号有美国的 CPM10V；德国的 320CrVMo13.5，多用于制造形状比较复杂、工作条件苛刻的长寿命模具。

(2) 热作模具材料 热作模具钢用于制造锻压、压铸、热挤压、热镦锻、热切边等模具。国外通用的热作模具钢有以下三种类型：以 55NiCrMoV6 和 56NiCrMoV7 为代表的低合金热作模具钢；以 H13 (4Cr5MoSiV1) 和 H11 (4Cr5MoSiV) 为代表的中合金热作模具钢；以 H10 (3Cr3Mo3VSi)、H21 (3Cr2W8V) 为代表的钨系钼系热作模具钢。我国通用的热作模具钢原来主要是 5CrNiMo、5CrMnMo、3CrW8V 三个牌号，其化学成分很不合理，近 20 年来我国对 H13 (4Cr5MoSiV1) 进行了比较系统的研究和推广工作，成为产量最高和性能最稳定的热作模具钢之一，从目前应用的范围与程度而言，H13 已经超过 3Cr2W8V 钢，使用寿命是后者的几倍到十几倍，因此从某种意义上讲，国内消化和研制的新钢种为模具的高寿命提供了有效的保证。

为了适应热作模具钢的发展需要，国内外相继开发了一些产品，主要可分为以下类型。

① 高淬透性特大型锻压模块用钢 通用型的锻压模块用钢如 5CrNiMo、5CrNiMoV 等，由于淬透性的限制，一般只适用于制造厚度为 300~400mm 的模具，而大型锻压设备模具有时重达几十吨，随着模块面积的增大，要求进一步提高模具材料的淬透性，使模具的心部能够得到较高的、均匀的性能，如 ISO4957 标准中的 4NiCrMoV7，我国新开发的一些淬透性较好的钢号 4Cr2MoVNi、3Cr2NiMoWV 等。

② 高热强性模具钢 新工艺的发展使一些热作模具的工作温度不断提高,工作条件日益苛刻,传统的 3Cr2W8V 型高合金热作模具钢已不能适应要求,国内外陆续研制、开发了不少新型热作模具钢,主要分为四种类型。

a. 中合金高热强性热作模具钢,如 3Cr3Mo3W2V,与 3Cr2W8V 相比,它具有更高的高温强度和抗回火软化能力;

b. 沉淀硬化型热作模具钢,如日本日立金属公司的 YHD13,由于加入了 V、Nb、Ni、Al 等,工作中模具表面由于合金碳化物和金属间化合物的析出,表面硬度可上升到 45~48HRC,模具的心部仍保留原有的组织和高韧性,从而提高了模具的寿命;

c. 低碳高速钢,如我国的 6WMo5Cr4V,将高速钢的碳含量降至 0.3%~0.6%,在牺牲部分红硬性和耐磨性的情况下,改善其韧性和抗冷热疲劳性能;

d. 奥氏体型热作模具钢,如日本大同公司的 5Mn15Ni5Cr8Mo2V。

(3) 塑料成形模具材料 近年来,世界塑料工业得到了高速发展,塑料制品大部分依靠模具成形,不少发达国家塑料模具的产值已居模具产值的第一位,塑料模具钢也迅速发展成一个专用钢系列,如美国的 ASTM 标准中的 P 系列包括 7 个钢号。我国过去无专用塑料模具用钢,近年来在引进国外塑料模具用钢的同时,自行研制和开发了一些新的塑料模具专用钢,如一些含硫易切削预硬塑料模具钢,比如 8Cr2S,据统计我国塑料模具用钢量占全部模具用钢量的 50%以上,国外新型塑料模具钢的主要发展趋势如下。

① 主要发展易切削、抛光性好的塑料模具钢 易切削预硬钢主要是 S 系,也有 S-Se 系、Ca 系,但 Se 价格较贵。这类钢的杂质少、组织均匀、无纤维方向性,制模后型面的表面质量高。

② 预硬化型塑料模具钢 P20 (即 3Cr2Mo) 是国外使用最广泛的预硬塑料模具钢,已列入我国合金工具钢标准,20 世纪 80 年代以来已在我国一些工厂广泛采用。该类钢应用较广,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 一般碳含量较低,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。适宜于制造形状复杂、精度高、超镜面、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 (Cr5Mo1V) 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 耐腐蚀塑料模具钢 有些塑料制品,如聚氯乙烯、氟化塑料、阻燃塑料等压制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 110CM17、瑞典的 ASSAB 公司的 STAVAX (4Cr13) 等。

⑥ 无磁性塑料模具钢 为了适用磁性塑料制品的生产,国外发展了一些无磁性塑料钢,将奥氏体型模具钢通过时效硬化处理得到要求的硬度、强度和低导磁率。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。

(4) 玻璃模具材料 应具有良好的抗氧化性、良好的导热性、耐冷热疲劳性、耐磨性、切削加工性,以及组织致密、均匀、膨胀系数小等优良性能。国内外采用铸铁和不锈钢来制造玻璃模具,常见的材料牌号有:1Cr13、2Cr13、3Cr13、4Cr13、4Cr13Ni,铸铁类有珠光体球墨铸铁、稀土蠕墨铸铁、合金铸铁等。

1.1.2 模具材料的性能要求和选用原则

(1) 性能要求 对于模具材料的性能要求，一般是基于模具工作条件的复杂性、工作温度的不一致性等提出来的，同时充分考虑到模具需要承受高压、冲击、振动、摩擦、弯扭、拉伸载荷等的作用，因此对于模具材料提出了很高的要求，分别介绍如下。

① 良好的硬度和耐磨性 要求冷作模具的硬度在 60HRC 以上，热作模具硬度在 42~55HRC，塑料模具的硬度在 45~60HRC，胶木模的硬度在 45~55HRC，陶土模硬度在 50~62HRC，橡胶模的硬度在 28~35HRC，粉末冶金模的硬度在 60~62HRC，玻璃模具的硬度在 45~55HRC。

② 适宜的强度和韧性 挤压模具需要承受强大的压力，故其材料应满足高强度的要求，而承受猛烈冲击的锤锻模、冷锻模等应具有较好的韧性等，而玻璃模具一直处于高温下，承受较大的摩擦、氧化、腐蚀等作用，要求其具有较高的耐热性、耐蚀性、耐磨性和导热性等。

③ 良好的抗热性和稳定性 考虑到模具工作时经常受到高温作用，其工作温度也是处在不断的变化之中，模具本身的冷热交替要求其具有良好的抗热性能，可确保强度与硬度能满足工作条件的需要。

④ 冷热加工性好 对于需要锻轧、铸造、焊接等热加工操作的模具，要求具有良好的热加工性；而对于要求高质量的表面产品，模具经常进行切削、抛光、研磨等加工操作，故其材料在常温下具有良好的加工性能，这是塑料模具材料的发展趋势。

⑤ 热处理性能好 要求模具热处理变形小、淬火温度宽、过热敏感性小、脱碳倾向小，特别要求具有足够的淬硬性和淬透性，组织的稳定性好。

(2) 模具材料的选用原则和要求 一般而言，模具材料选用的基本原则如下。

① 具有良好的使用性能。其主要包括强度、硬度、塑性和韧性等要求。

② 良好的工艺性能。即材料在满足使用要求的条件下，具有易于加工成形、加工成本低、工序少等特点。

③ 材料供应有保证。资源丰富、规格尽可能少。

④ 经济合理性。要求生产过程简单，生产效率高、成品率高和制造成本低等。

选用模具材料时应根据以上基本原则，同时也应当考虑以下一些具体要求，只有这样才能确保模具的质量与使用寿命。

① 模具的工作条件。包括承受力的大小、速度、工作温度、腐蚀和磨损情况等，模具的受力大则要求材料的强度高，受冲击力大则要求韧性要好，受腐蚀严重则选用耐热钢等。

② 模具的失效形式。包括塑性变形失效、磨损失效、断裂失效等，应根据失效的原因选用有针对性的材料。

③ 模具加工的产品因素。包括产品批量的大小、质量的高低、产品的材质等，对于批量大和质量要求高的产品，应选用材质好和性能高的模具材料，对于产品精度高、表面粗糙度低的产品，则选用切削性能好、抛光性能好的材料等。

④ 模具的结构因素。包括模具的大小、形状、模具的不同组件和不同部件等，对于形状复杂的模具，应选用淬透性好的材料。

⑤ 模具的制造因素。包括模具加工时所采用的加工方法（如锻、铸、焊、切削、抛光等）和加工工艺，应选用与之适应的材料。

⑥ 模具的设计因素。对于大型、复杂模具应采用组合或镶件结构，在刃部、型面以及经常受强烈冲击、磨损、高温的部位，则应采用高性能的材料。

模具材料的性能水平、质量的优劣、使用合理与否等因素,对于模具的制造精度、模具工作时的承载能力、寿命、成品合格率及成本均有密切的关系。因此在设计和制造模具的过程中,在选材方面应综合考虑模具的种类、制件批量、制件材料和制件复杂程度等因素。而对于模具材料本身,则要考虑它的力学性能、耐磨性、耐热性、耐蚀性、热变形、淬透性、机械加工性、价格和供货情况等。目前任何一种材料都难以满足所有的性能要求,故只能根据实际的使用条件,在满足主要性能的情况下来选择模具材料。

冷作模具钢用于制造冷冲压模(冲裁模、弯曲模、拉深模、成形模和压型模)、冷镦模、冷挤压模(搓丝板、滚丝模、滚齿纹模和成形滚牙模)和拉拔模(钢管、圆钢冷拔模)。冷作模具的使用温度较低,一般不超过 300°C ,对模具材料的高温性能没有特殊的要求,但要求在常温下具有高硬度、高强度、高耐磨性、高抗疲劳性、足够的韧性、高淬透性和热处理不变形(或小变形)及淬火、回火时不开裂等性能。

可用的冷作模具钢有上百种,按照钢中碳的含量及合金元素的含量,并结合使用性能可分为高碳工具钢、合金工具钢、轴承钢、高速钢、钢结硬质合金、硬质合金等。

热作模具钢主要用于制造锤锻模、压力机锻模、热挤压模和压铸模,其工作条件有很大的差别。

塑料模具钢适用于制造各种注射成形模、吹气模、压缩成形模、转移成形模、挤压成形模、热成形模以及旋转成形模等,其中注射模应用最为普遍。

1.1.3 我国模具钢的发展趋势与要求

由于历史的原因,20世纪50年代,我国模具用钢全部沿袭国外的钢号,60年代以来我国模具钢生产技术工作发展迅速,形成了我国自己的模具钢系列,总产量已居世界前列,建成不少先进的生产工艺装备,但是模具钢的生产技术、产品质量方面还存在着许多差距,很多制造大型、精密、长寿命模具的钢材仍需国外进口。针对以上问题,展望未来亟待开展以下工作。

① 加速模具钢生产的制品化、精料化和模具钢经销的商品化。我国模具钢的品种规格较少,模具钢生产的制品化、精料化和经销的商品化程度低。80%以上的模具钢仍以黑皮圆棒供货。越来越多的模具制造厂要求在模具设计完成后,模具钢供应厂商能迅速提供所需钢材,减少库存钢材数量,缩短制模周期。但中国钢材生产企业目前尚不适应这一商品市场机制,这是进口模具钢材在中国日益扩大的重要原因。

② 大力推广应用性能优良的新型模具钢,不断完善模具钢钢种系列。我国已开发出性能优异、达到或超过国外同类水平的特色新型模具钢,但这些新钢的推广数量和应用范围不够大,有选择地开发先进模具钢,例如开发粉末冶金模具钢,多元易切削系塑料模具钢,建立玻璃、陶瓷,耐火砖和地砖等成形模具用钢,完善中国的模具钢系列。

③ 进一步提高模具钢的质量。我国某些特殊钢厂已采用炉外精炼、真空冶炼、快锻机和精锻机等生产模具钢,模具钢的冶金质量有大幅度的提高,如D2、P20等,出口产品的质量可以达到国际先进水平。但国外对纯度要求较高的模具钢大部分采用电渣重熔,进一步提高了钢的纯净度、致密度、等向性和均匀性,减少偏析等。我国还需要在这方面进一步开展工作。

④ 加强先进模具热处理技术的推广与应用。模具的可控气氛热处理与真空热处理应进一步得到发展,一些行之有效的模具表面热处理技术,应完善其工艺,加强其推广和应用。应提高装备和工艺材料的制造水平,加强热处理专业厂的建设。

1.2 模具材料的主要力学性能指标

根据模具的工作条件和性能要求，应合理选择模具材料并进行正确的加工与热处理，同时加上正确的使用与维护，才能确保模具获得高的使用寿命。

1.2.1 模具材料的常规力学性能

根据模具的工作条件以及工作定额来选择模具钢与热处理工艺，并力争主要性能达到指标，是模具的设计者必须首先考虑到的问题。通常对于各类模具钢的性能要求主要包括硬度、强度、塑性与韧性等，它们是衡量模具钢的基本参数，对于模具钢的正确使用有重要的参考价值。

(1) 硬度 硬度代表钢对于变形与接触应力的抗力。模具材料硬度的高低对于模具的使用寿命影响很大，是模具设计的重要指标。

考虑到材料的硬度与强度有一定的关系，故通过硬度、强度的换算关系来得到材料的硬度值。作为成形用模具应具有足够高的硬度，才能确保使用性能与寿命。按硬度范围划分：冷作模具的一般硬度较高，在 52~60HRC 范围；热作模具为中等硬度，在 40~52HRC 范围。模具钢的硬度主要决定于钢的化学成分、热处理工艺以及钢的表面处理工艺，即化学成分与组织是决定硬度的关键，也就是模具钢中溶解于马氏体中的含碳量或含氮量。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，马氏体的硬度会增加，但随之而来的是淬火加热温度过高，将导致马氏体晶粒粗大，淬火后的残留奥氏体增多，造成硬度的降低。马氏体的含碳量在一定程度上与钢的合金化程度，尤其是当回火时表现明显，随着回火温度的提高，马氏体中的含碳量减少，但当钢中合金元素含量升高时，将发生二次硬化效应，硬度值提高。选择模具钢的最佳淬火温度，则需要首先分析淬火温度-晶粒度-硬度的具体关系，可通过有关文献获得此关系，为模具的热处理奠定基础。需要注意的是，钢的硬度与其组织结构有关。

模具钢中除了马氏体外，还存在更高硬度的其他相，如碳化物和金属间化合物等，常见碳化物及其各种合金相的硬度值见表 1-1。

表 1-1 常见碳化物及其各种合金相的硬度值^[3]

相	硬度 HV	相	硬度 HV
铁素体	约 100	渗碳体(Fe ₃ C)	850~1100
马氏体: w _C 0.2%	约 530	氮化物	1000~3000
w _C 0.4%	约 560	金属间化合物	500
w _C 0.6%	约 920		
w _C 0.8%	约 980		

模具的硬度高低是根据其具体的工作条件和性能来选择的，硬度越高并非使用寿命就高，一般而言，随着硬度的提高，模具钢的抗压强度、耐磨性和抗咬合能力等指标升高，但与此相反的其他指标，如韧性、冷热疲劳抗力以及可切削加工性等指标下降。实践证明，模具的早期失效大多数是因硬度过高而断裂，少数为硬度过低而变形、压塌和磨损，因此，在一定的工作温度和工作条件下，存在着模具工作硬度的最佳值。

硬度测量的常用方法有以下几种。

① 洛氏硬度 (HR)。这是最常用的一种硬度测量法，具有简便、迅速的特点，可以直接从表盘上读出。洛氏硬度有三种刻度，即 HRC、HRA 和 HRB。三种刻度所用压头、试

验力及适用范围见表 1-2。

表 1-2 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	1471	20~70
HRA	120°金刚石圆锥	588.4	20~88
HRB	φ1.588mm 钢球	980.6	20~100

② 布氏硬度 (HB)。采用淬火钢球作硬度头，加上一定的试验力压入工件表面，试验力卸载以后测量压痕直径大小，再查表或计算，得出的为布氏硬度值。该类硬度测试多用于退火、正火、调质处理等模具钢的硬度测试。

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。此法可检测任何金属材料的硬度，但最常用的为显微硬度，即金属内部不同组织的硬度。

三种硬度的大致关系为： $HRC \approx 1/10HB$ ； $HV \approx HB$ （当硬度小于 400HBS 时）。

需要指出的是，模具的工作硬度与模具材料的种类以及具体的工作条件有关，表 1-3 列出了 T8A 钢制铆钉模的工作硬度和使用寿命的关系，可以看出该模具的最佳硬度值为 51~53HRC。

表 1-3 T8A 钢制铆钉模工作硬度与使用寿命的关系^[4]

工作硬度 HRC	使用寿命	工作硬度 HRC	使用寿命
55~56	几十至几百件崩裂	51~53	>7000 件
53~54	500~700 件崩裂	47~49	3000 件左右

文献指出^[4]，各种模具推荐的工作硬度是反复试验的结果，对于 T10A 钢冷冲模具的冲头而言，在软硅钢片冲孔，其硬度在 60~62HRC 时使用寿命比硬度在 56~58HRC 时提高了 8~10 倍。而 3Cr2W8V 钢制热挤压凹模，硬度在 45~50HRC 时会出现早期的断裂，而硬度在 38~40 范围内，则出现正常的磨损，使用寿命提高 5~8 倍以上。Cr12MoV 钢制六角螺母冷镦冲头，硬度在 52~54HRC 时，避免了冲头的崩裂失效缺陷的发生，使用寿命大幅度提高。可见模具材料硬度的制订与其工作条件、加工零件材质与性能以及失效方式等是密不可分的，应围绕着这几点进行必要的工艺试验，也可借鉴其他类型模具的成功经验，力求获得最佳的硬度范围和组织。

(2) 强度 模具材料的强度是模具在工作过程中抵抗失效的性能，是表征材料变形抗力和断裂抗力的性能指标。一般来讲，冷作模具钢塑性变形抗力的指标，常用的是屈服强度 (σ_s) 和抗拉强度 (σ_b)，是模具设计的重要指标，对于模具而言是整个截面或某个部位在工作过程中抵抗拉伸力、压缩力以及弯曲力、扭转力或综合力的能力。衡量模具材料强度的方法为拉伸试验。

热作模具的塑性变形抗力指标为高温屈服点或高温屈服强度，为确保模具在使用过程中不会发生过量的塑性变形而失效，模具材料的屈服强度必须大于模具的工作应力，即在与高温的坯料接触中仍能保持足够的高温强度，热作模具的断裂失效不仅完全是抗拉强度不够造成的，同时还由于冷热疲劳出现表面裂纹造成，故热作模具应考虑断裂韧性。

冷作模具的断裂抗力指标是指室温下的抗拉强度、抗压强度和抗弯强度等，反映了模具表面或内部不存在任何裂纹时的静载断裂能力，对于高碳钢冷作模具，由于其塑性很差，一般是以抗弯强度作为实用指标，可比较准确地反映材料的成分与组织因素对性能的影响。而压缩条件下变形的冷作模具，则以抗压强度和屈服强度为衡量指标。