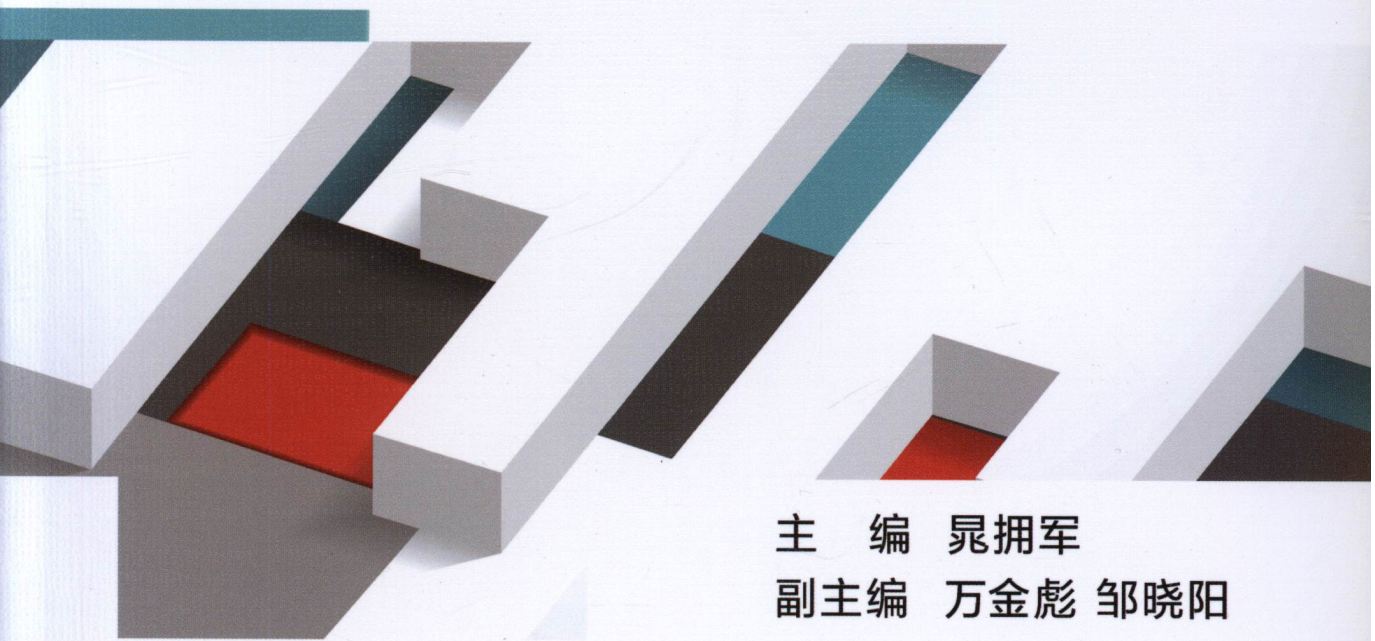




模具材料 及表面强化技术



主 编 晁拥军

副主编 万金彪 邹晓阳



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



模具材料及表面强化技术

主 编 晁拥军

副主编 万金彪 邹晓阳



机械工业出版社

本书重点介绍了模具材料的性能、模具材料的应用、模具钢锻造、模具热处理及模具表面强化处理基础知识、强韧化处理、先进模具材料及热处理技术。本书注重理论与实践相结合,力求缩小教学与实践的距离,旨在解决影响模具使用寿命的选材和处理工艺问题。作者以一种全新教学模式讲解模具材料及表面强化技术,使学生掌握快、理解深、会应用、能解决实际问题,为毕业后能迅速适应工作岗位打好基础。

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

模具材料及表面强化技术/晁拥军主编. —北京:机械工业出版社, 2014. 9

ISBN 978-7-111-47684-9

I. ①模… II. ①晁… III. ①模具—工程材料②模具—金属表面处理
IV. ①TG76

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 188793 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:赵颖喆 责任校对:樊钟英

封面设计:马精明 责任印刷:李 洋

北京玥实印刷有限公司印刷厂印刷

2014 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·15 印张·362 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-47684-9

定价:35.00 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 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

策划编辑电话:(010)88379772

前 言

模具是机械、冶金、电子、轻工、国防等工业部门的重要工艺装备,是保证高效率生产、高产品质量和降低生产成本的重要手段。目前,机械工业约 70% 的零件采用模具成形,一般合金工具钢中模具用钢约占 70% ~ 80%。随着工业技术的迅速发展,广泛采用新的高精度、高效率的模具成形工艺,尤其是冷作模具钢和热作模具钢是在非常苛刻的条件下工作,因此要求工模具材料具有高的强度、高的硬度、冲击韧性、淬透性和好的热稳定性和抗冷热疲劳性能等,即要求具有良好的综合力学性能。

模具材料品种繁多,模具热处理工艺要求高,金相组织要求也很严格,因选材或热处理工艺不当,特别是对整体强化、表面处理、强韧化处理等方法不能很好运用,将导致金相组织不佳,使模具过早失效。因而模具专业的学生以及模具的设计者、生产者及使用者迫切需要一种形成体系、注重理论联系实际、能够系统阐述模具的使用条件、材料选择、毛坯成形及常规热处理、通过表面强化特别是强韧化处理解决模具早期失效的指导性书籍。

本书从发掘材料的性能潜力出发,从表面强化、整体强韧化及复合热处理综合运用角度入手,深入探讨解决模具早期失效的有效途径,理论联系实际,简明扼要,图文并茂,实用性强。全书共分 6 个模块,包括影响工模具寿命的基本因素及毛坯处理、冷作模具钢、热作模具钢、塑料模具钢、模具表面强化处理、模具材料的强韧化处理。为了更好地保证内容的完整性、科学性、实用性,编者在编写过程中参阅了很多有关教材、著作和文献资料,从模具材料使用和加工工艺方面的生产实际需求出发,结合专业课程需要,进行了合理选择和编写。本书采用模块式、任务驱动型教学方式,在整合重组传统的“模具材料及表面处理”课程的基础上,增加强韧化处理部分内容,力求能够解决模具使用寿命问题,缩小教学与实践的距离,适应高职教育教改特点和发展方向。

本书为作者多年从事材料热处理工作和从事专业理论教学中的思考与实践,编写的过程中还得到了刘少光、赵昌盛、尤永龙、黄言态、刘长江等专家、老师的大力支持,同时参考了大量的有关文献资料、图表等,在此一并致以衷心地感谢。由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

晁拥军

于温州职业技术学院

目 录

前言

模块1 影响模具寿命的基本因素

及毛坯处理 1

任务 1.1 模具设计对使用寿命的影响 1

知识点 1.1.1 结构影响 2

知识点 1.1.2 应力集中的影响 3

任务 1.2 模具制造质量对模具寿命的影响 ... 4

知识点 1.2.1 模具锻造与热处理的影响 5

知识点 1.2.2 模具冷加工质量的影响 8

知识点 1.2.3 模具材料的影响 9

知识点 1.2.4 模具使用条件的影响 12

任务 1.3 常用模具的失效形式 13

知识点 1.3.1 冷作模具失效特征 13

知识点 1.3.2 热作模具失效特征 15

任务 1.4 模具毛坯的锻造及软化处理 20

知识点 1.4.1 模具毛坯的锻造 20

知识点 1.4.2 模具冷压毛坯的软化处理 26

复习思考题 28

模块2 冷作模具钢 29

任务 2.1 非合金（碳素）工具钢 30

任务 2.2 低合金工模具钢 34

知识点 2.2.1 CrWMn 钢 34

知识点 2.2.2 GCr15 钢 35

知识点 2.2.3 9Mn2V 钢 37

知识点 2.2.4 9SiCr 钢 38

知识点 2.2.5 60Si2Mn 钢 39

知识点 2.2.6 7CrSiMnMoV 钢 40

知识点 2.2.7 6CrNiMnSiMoV（GD）钢 ... 42

任务 2.3 高碳高铬型微变形冷作模具钢 ... 44

知识点 2.3.1 Cr12 钢 44

知识点 2.3.2 Cr12MoV 钢 46

知识点 2.3.3 Cr12Mo1V1 钢 47

任务 2.4 高速工具钢 49

任务 2.5 基体钢 52

知识点 2.5.1 6Cr4W3Mo2VNB（65Nb）钢 52

知识点 2.5.2 7Cr7Mo3V2Si（LD）钢 54

知识点 2.5.3 5Cr4Mo3SiMnVAl（012Al）钢 56

复习思考题 58

模块3 热作模具钢 59

任务 3.1 低耐热热作模具钢 61

知识点 3.1.1 5CrNiMo 钢 62

知识点 3.1.2 5CrMnMo 钢 64

知识点 3.1.3 4CrMnSiMoV 钢 65

知识点 3.1.4 5Cr2NiMoVSi 钢 66

知识点 3.1.5 8Cr3 钢 66

任务 3.2 中耐热热作模具钢 67

知识点 3.2.1 4Cr5MoSiV（代号 H11）钢 68

知识点 3.2.2 4Cr5MoSiV1（代号 H13）钢 69

知识点 3.2.3 4Cr5W2VSi（代号 W2）钢 70

任务 3.3 高耐热热作模具钢 71

知识点 3.3.1 3Cr2W8V（代号 H21）钢 ... 72

知识点 3.3.2 5Cr4W5Mo2V（代号 RM2）钢 73

知识点 3.3.3 4Cr3Mo2MnVNbB（HD）钢 74

知识点 3.3.4 6Cr4Mo3N12WV（代号 CG-2）钢 75

知识点 3.3.5 4Cr3Mo3W4VNb（代号 GR）钢 77

知识点 3.3.6 3Cr3Mo3W2V（HM1）钢 ... 78

知识点 3.3.7 3Cr3Mo3VNb（HM3）钢 ... 79

知识点 3.3.8 4Cr3Mo2MnVB（ER8）钢 81

复习思考题 83

模块4 塑料模具用钢 85

任务 4.1 非合金塑料模具钢 89

任务 4.2 预硬型塑料模具钢 91

知识点 4.2.1 SM3Cr2Mo（P20）系列 ... 91

任务 4.3 易切削预硬型塑料模具钢	92	知识点 5.3.3 离子注入表面强化	154
知识点 4.3.1 5CrNiMnMoVSCa	93	任务 5.4 气相沉积技术	156
知识点 4.3.2 8Cr2MnWMoVS	94	知识点 5.4.1 物理气相沉积 (PVD) ...	156
任务 4.4 时效硬化型塑料模具钢	96	知识点 5.4.2 化学气相沉积 (CVD) ...	163
知识点 4.4.1 SM2CrNi3MoAl1S (SM2)	96	知识点 5.4.3 气相沉积的应用	167
知识点 4.4.2 SM1Ni3MnCuAl (PMS) ...	97	任务 5.5 热喷涂与热喷焊技术	171
知识点 4.4.3 18Ni 型马氏体时效钢	99	知识点 5.5.1 火焰喷涂	172
任务 4.5 渗碳、淬硬型塑料模具钢	100	知识点 5.5.2 粉末火焰喷焊	176
知识点 4.5.1 SM1CrNi3	101	任务 5.6 电火花表面强化和堆焊	178
知识点 4.5.2 0Cr4NiMoV (LJ) 钢	102	知识点 5.6.1 电火花表面强化	178
知识点 4.5.3 淬硬型塑料模具钢 (SM4Cr5MoSiV、SM4Cr5MoSiV1、 SMCr12Mo1V1)	103	知识点 5.6.2 堆焊	182
任务 4.6 耐腐蚀型塑料模具钢	103	复习思考题	190
知识点 4.6.1 SM2Cr13、SM4Cr13	104	模块 6 模具材料的强韧化处理	191
知识点 4.6.2 SM3Cr17Mo	104	任务 6.1 钢中奥氏体晶粒及自由碳化 物相的超细化处理	192
知识点 4.6.3 0Cr16Ni4Cu3Nb (PCR) 钢	105	知识点 6.1.1 高温快速加热淬火	192
任务 4.7 塑料模具零件的加工路线及 热处理	106	知识点 6.1.2 奥氏体逆相变循环加热 ...	193
知识点 4.7.1 热处理基本要求	106	知识点 6.1.3 两相区交替循环加热	194
知识点 4.7.2 塑料模具的制造工艺 路线	107	知识点 6.1.4 深冷处理	194
知识点 4.7.3 塑料模具的热处理	107	任务 6.2 利用混合组织的性能	195
复习思考题	108	知识点 6.2.1 残留奥氏体加马氏体 (回火马氏体) 组织	195
模块 5 模具表面强化处理	109	知识点 6.2.2 铁素体加马氏体组织	196
任务 5.1 化学热处理	110	知识点 6.2.3 马氏体加贝氏体组织	198
知识点 5.1.1 化学热处理的基本过程 ...	110	任务 6.3 控制马氏体、贝氏体形态的 淬火	199
知识点 5.1.2 化学热处理的分类及 基本性能	111	知识点 6.3.1 等温淬火	199
知识点 5.1.3 渗碳	113	知识点 6.3.2 低碳马氏体组织的应用 ...	201
知识点 5.1.4 碳氮共渗	119	任务 6.4 真空热处理	202
知识点 5.1.5 渗氮	121	任务 6.5 复合热处理技术	203
知识点 5.1.6 氮碳共渗	126	知识点 6.5.1 表面合金化 + 淬火	204
知识点 5.1.7 硫氮共渗	130	知识点 6.5.2 表面硬化 + 回火温度下的 表面化学热处理	205
知识点 5.1.8 渗硼	131	知识点 6.5.3 形变热处理	206
知识点 5.1.9 渗金属	136	任务 6.6 控制冷却的方法	209
任务 5.2 表面淬火	142	知识点 6.6.1 预冷淬火	210
知识点 5.2.1 感应淬火	143	知识点 6.6.2 双介质冷却淬火	210
知识点 5.2.2 火焰淬火	145	知识点 6.6.3 可控延时淬火 (CDQ) 方法	212
任务 5.3 高能量密度表面强化	147	知识点 6.6.4 控时浸淬 (ITQ) 技术 ...	213
知识点 5.3.1 激光加热表面强化	147	知识点 6.6.5 增强淬火方法 (IQM) ...	213
知识点 5.3.2 电子束加热表面处理	152	复习思考题	214
		附录	215
		参考文献	231

模块 1

影响模具寿命的基本因素及毛坯处理

【知识目标】

- * 影响模具寿命的基本因素。
- * 模具的失效形式。
- * 模具毛坯的锻造。

【能力目标】

- * 了解模具的主要失效形式及影响模具寿命的基本因素，能够初步分析模具失效的原因。
- * 初步掌握模具材料、锻造、热处理及机械加工特点，能根据模具的工作条件从设计、制造及使用等方面采取措施，提高模具寿命。
- * 了解模具冷压毛坯的软化处理。

模具是工业生产中不可缺少的重要工艺装备，是降低成本、提高产品质量和适应规模生产的基础和保证。在机电工业中，70%以上的零件采用模具加工；塑料、陶瓷和建材等制品大部分也采用模具成型。所以，国外把模具工业称为“工业发展的基础”、“促进繁荣的动力”，我们称为“百业之母”。但是随着工业技术的发展，模具的工作条件日益苛刻，模具的使用寿命严重地影响着工业生产的发展，因而提高模具的使用寿命受到了广泛的重视和研究；因此，模具制造的相关技术得到了深入研究、广泛应用和迅速发展。通过分析和研究模具使用中失效的原因，然后才能采取相应的有效措施来提高模具的使用寿命，取得良好的经济效益。

影响模具使用寿命的因素很多，包括设计、加工制造、材料的选择、热处理工艺、使用和维护等，对任何一个环节安排不当，都可能严重影响模具的寿命。模具的工作寿命，主要决定于模具在工作时承受的热—机械载荷水平和模具本身的承载能力。

影响模具承载能力的因素很多，除压力加工工艺外，还决定于模具设计、模具材料、模具的冷加工、模具的热加工、模具的工作条件这五个方面的多种因素。

任务 1.1 模具设计对使用寿命的影响

模具的结构对于模具的承载能力和承载水平都有着明显的影响。合理的结构有助于增强模具承载能力，减轻模具承受的热—机械载荷水平，防止冲头与凹模之间的啃伤。

模具设计不仅要结构合理，还应根据模具服役条件和受力状态选择合适的材料，设计合理的热加工工艺，以取得所期望的硬度值。此外，还要对钢材纤维的取向、模具几何形状变化、圆角曲率半径的大小等作周全的考虑，以防止热处理和服役过程中产生裂纹、断裂、塌陷和变形等早期失效。

知识点 1.1.1 结构影响

1. 壁厚设计不合理

图 1-1 所示为开裂的热锻模示意图, 模具材料为 5CrNiMo 钢, 硬度为 50 ~ 52HRC, 由于模腔边缘倾角处曲率半径太小 (R 为 0.5mm), 模壁厚度与型腔深度也不相适应, 模壁强度显得不足, 在倾角处形成应力集中, 在反复应力作用下形成裂纹, 导致模具失效, 仅锻造 200 余件坯件就出现粗大裂纹而失效。采用镶拼的方法或使型腔壁厚为型腔深度的 1.5 倍可以解决早期破裂的问题。

国内外许多试验结果表明, 采用传统间隙的模具, 刃口磨损快、寿命短。适当加大间隙 (由料厚的 7% 加大到 15%), 模具寿命显著增加, 如图 1-2 所示。

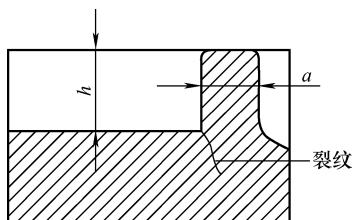


图 1-1 模腔深度与壁厚示意图

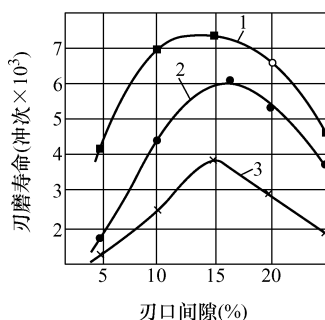


图 1-2 刃口间隙对冲压模寿命的影响

2. 导向结构的影响

可靠的导向结构, 对于避免冲头与凹模间互相啃伤, 极为有效。对于无间隙或小间隙的大中型多型腔冲裁模更为重要。

例如用 T10 工具钢制作的冲裁模, 工作硬度为 55 ~ 59HRC, 在 2mm 厚的 08 钢板上冲裁 M3 螺母, 若无导向结构, 当条料冲至末端时, 常发生冲头冲半孔, 对冲头附加弯曲载荷, 导致发生啃伤和冲头早期折断, 寿命极不稳定。为了防止凹模被啃伤, 曾降低冲头的硬度, 但这样会降低冲头的耐磨性。增加导向板后, 冲头悬臂部分的长度, 由 35mm 缩短到 9mm, 提高了冲头的刚性和引导精度, 从而减轻了啃伤和早期折断现象, 如无导向板的冲头平均寿命为 780 件, 而加导向板的冲头寿命为 38500 件, 使模具寿命大幅度提高。

3. 降低实际承载的影响

对于在接近极限载荷的条件下服役的模具, 降低模具在使用过程中承受的载荷, 避免局部过载, 也是提高模具寿命的重要途径。

在冷锻、冷挤压模的底部无排气孔, 由于残留空气的影响, 使工件棱角、顶端成型不良。如载荷过大, 还可能使模具胀裂。设置排气孔后, 避免了残留空气的影响, 减少了冲压力, 模具寿命可提高 10 ~ 20 倍, 且保证工件成形饱满、棱角清晰, 如图 1-3 所示。对定行程锻压设备 (机械压力机) 使用的模具, 要考

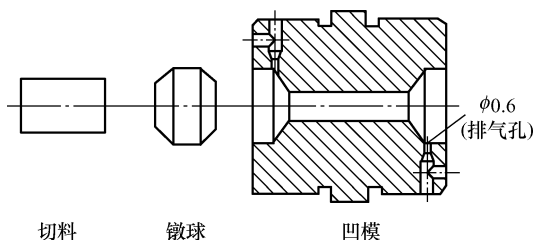


图 1-3 冷锻六角螺母压球模排气孔设置

虑到毛坯可能超重导致过载,因而对闭式挤压模,应当为多余的毛坯料留出飞边空间。

六角螺栓冷镦冲头承受的压应力大于 1960MPa,冲击频率为每分钟 60 次。按原设计图纸加工,冲头根部的应力集中无法避免,使模具处于极限承载状态服役。改进了冲头的形状及尺寸,大大改善了应力状态,结果使冲头的工作应力降低了 20 倍,寿命延长了 9 倍。

模锻锤、高速锻锤主要依靠冲击能使毛坯成形。当工件成形后,还有剩余的冲击能,如果没有足够大的承击面承受和吸收,模具型腔可能因为过载而发生变形或开裂。高速锤锻模由于强烈的冲击载荷而容易发生早期断裂失效。如适当加大模具的承击面,可显著减少早期断裂失效。

图 1-4 所示的热挤压镍-铜-锌合金棒料 3Cr2W8V 钢制垫块,其棱角部分软化变形而早期失效。主要是尖角处应力集中及导热不良引起的,在设计热作模的型腔时,应尽量设法防止局部过热。将棱角改为 $R = 20\text{mm}$ 的圆角后,使用寿命由 95 次上升到 195 次,提高了一倍多。

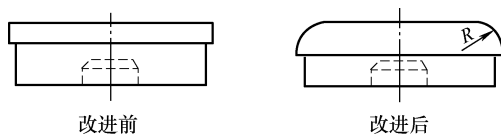


图 1-4 热挤压垫块棱角改圆角

图 1-5 所示为反挤压凸模的几种结构形式,采用图 1-5a、图 1-5b 所示结构时比采用图 1-5c 结构的单位挤压力下降 20%, 模具寿命显著提高,但其顶部斜角也不宜过大,否则易因偏载而导致模具弯曲折断。

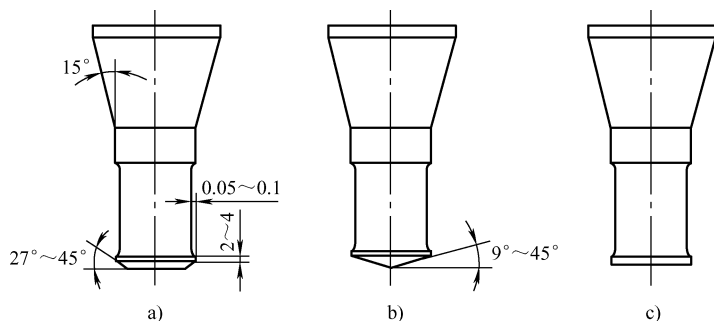


图 1-5 反挤压凸模的几种结构对寿命的影响

知识点 1.1.2 应力集中的影响

模具的截面尺寸变化处,最容易因应力集中而开裂导致早期破坏。因为模具钢在大多数情况下,需要在高强度状态承受载荷,必然对应力集中十分敏感,所以合理安排工模具截面尺寸,对模具的寿命影响颇大。例如,模腔圆角曲率半径的大小导致裂纹的形成,裂纹在反复应力作用下迅速扩展,导致模具开裂,降低模具使用寿命。

模腔大多含有过渡圆角,合理的过渡圆角 R 对模具寿命影响很大。图 1-6 所示为冷挤凹模的金属入口处的形状和内径圆角 R 对模具寿命的影响。由图可见增大圆角半径 R ,可提高模具寿命。热锻模的圆角半径同样对模具寿命影响很大,如模腔外圆角半径 R 由 1mm 增大到 5mm 时,最大比较应力可减少近 40%,显著地提高模具寿命。热锻模的内圆角半径也要合理选择,过小易使模锻工作条件恶化,锻模易于磨损。根据经验,内圆角半径值可按 $r = (2 \sim 3.5) R$ 选取 (R 为外圆角半径) 较为合适。

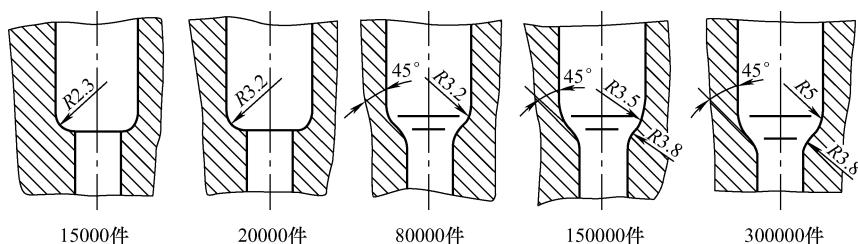


图 1-6 冷挤凹模的金属入口处的形状和内径圆角对寿命的影响

在使用中易于断裂而又无法消除应力集中因素的模具，可预先分割，采用组合或镶块结构。这是克服成型凹模早期断裂失效的一项重要措施。图 1-7 所示的冷挤压顶杆，用 Cr12MoV 钢制作，原寿命仅为 1 千~2 千次，改为组合结构后，消除了应力集中因素，平均寿命提高到 15700 次，最高达到 28300 次。

受力大冲击力高的模具，如冷挤、冷锻、热锻等模具，采用整体式结构时，由于模具表面拉应力的存在，易引起模具局部或整体的开裂现象。如塔形锻造凹模，采用组合式模腔，有效降低了模具表面的拉应力，就可避免开裂现象。图 1-8a 所示为高速工具钢制的 M12 螺栓整体式的冷墩凹模，整体式易出现早期胀裂现象，其寿命约 1 万件。改为图 1-8b 所示的预应力组合式的，由于有效降低了模具受力时的应力梯度，避免了尖角处的应力集中，其寿命达到 6 万件。

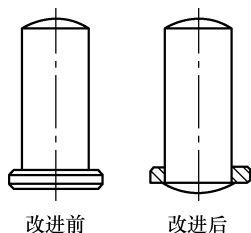


图 1-7 冷挤压顶杆结构改进示意图

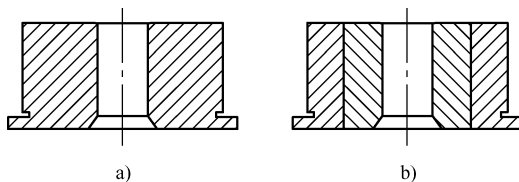


图 1-8 冷墩凹模结构改进示意图

整体式高速锤凸模截面尺寸变化甚大，工作寿命极短。后改为组合结构，大大减弱了应力集中，寿命大幅度提高。整体结构条件的中厚板弯曲凹模，其 V 形槽底部经常由于应力集中而胀裂。后改为对开组合结构，配以通用模架，即可正常服役而不发生早期胀裂失效。

预应力结构可提高冷挤、冷锻凹模的承载能力，充分发挥高耐磨材料的潜力。特别是使用硬质合金制作的模具，如不采用预应力结构，容易发生早期胀裂失效。预应力镶套径向强化可克服径向胀裂，小锥度轴向加压强化既可增强径向断裂抗力又可克服脱底开裂。如用 W6Mo5Cr4V2 钢制作的整体式凹模，寿命仅为 1000~1500 件，当采用镶套式结构后，寿命大幅度提高到 50000~70000 件。

任务 1.2 模具制造质量对模具寿命的影响

模具制造过程的毛坯锻造、预处理、淬火硬化及表面强化等热加工工序，对模具的性能和使用寿命有很大的影响。从模具制造工艺和模具寿命的关系出发，对热加工工艺的要求

为：通过合理安排锻造工艺避免锻造裂纹；通过合理的预处理保证良好的切削性能及冷压加工所需的塑性；通过合理安排热处理工序及操作避免表面脱碳层、淬火裂纹及变形，保证较高的抗热疲劳能力及热强性，保证较高的抗压强度，保证较高的强韧性等。

模具在制造过程中，机械加工复杂，包括车、钳、刨、铣、钻、线切割、电火花、磨、冷压等工序，模具表面加工质量的好坏，对模具的耐磨性、抗咬合能力、断裂抗力等都有显著影响。加工中尺寸、精度、表面质量等稍有失误，就可能造成模具的工作条件发生变化，导致模具早期失效。

知识点 1.2.1 模具锻造与热处理的影响

1. 锻造工艺质量的影响

目前我国模块标准化程度很低，钢材规格也很少，除大、中型锤锻模块由钢厂直接供应外，用户需将所购进的圆钢改锻成所需的模具毛坯，一般外径为 $\phi 40 \sim 70\text{mm}$ 的模具毛坯大多用圆钢改锻而成。以使钢材达到模具毛坯的尺寸及规格，为后续加工做好准备。

在模具制造业中，锻坯的质量对淬火变形及开裂倾向、服役时的断裂抗力，都有明显的影响。模具使用的材料中，尤其是工作部分的材料，较多使用合金钢甚至高合金钢。高合金模具钢中，含有较多的共晶碳化物。在大、中截面钢材中，碳化物偏析严重，如不锻造而直接用于制造模具，易引起异常的淬火变形。在低合金模具钢中，也存在热锻压流线所引起的方向性效应，不合理的流线分布容易引起早期断裂失效。

锻造的另一个目的是改善模具钢的组织 and 性能，如使大块碳化物破碎，获得均匀分布状态；改善模具金属纤维的方向性，使流线合理分布；消除或减少冶金缺陷如焊合气孔、提高钢的致密度等。为了获得优质的锻坯，应选用足够能量的锻锤，以充分的变形量进行多向反复锻打，注意控制锻件流线和型面位置，以及锻后正确的冷却方法。

如冲压模材质为 Cr12，毛坯尺寸 $\phi 90\text{mm}$ ，共晶碳化物大于 5 级，由轧材直接车削加工，使用寿命仅数件至数十件，最高达 3000 件，均以崩刃、纵向开裂或碎裂而失效；后改用 $\phi 60\text{mm}$ 棒料，经锻粗锻制成 $\phi 90\text{mm}$ 坯料，共晶碳化物降为 3 ~ 4 级，分布也较均匀，制成模具后，使用寿命达 8000 件以上。规格为 M10 ~ M12 的搓丝板，如用 Cr12MoV 钢轧材直接切削加工而成，使用寿命不超过 6 万次；如对毛坯进行充分锻造后，其寿命将提高近一倍，达到 10 万次。

模具钢要有严格合理的锻造工艺。首先，加热温度不能过高，要防止过热和过烧。加热速度不能太快，加热要均匀，注意钢料在炉中的位置要适当，有时加热还要翻转棒料，以使其受热均匀。锻打时要轻重掌握适度，打击力过大，变形量太大，易产生裂纹。停锻后的冷却速度也很重要，冷却过快也易开裂。因此，如果锻造工艺不合理，不仅达不到改善模具钢质量和提高其性能的目的，甚至会造成锻造缺陷而恶化钢材质量。

2. 热处理工艺的影响

模具通过热处理从而获得所需的工艺性能和使用性能，保证在正常服役条件下能具有一定的使用寿命。但是，如果热处理工艺不合理或操作不当，将会产生明显缺陷，如变形、开裂或严重影响到模具钢的组织状态，引起模具早期失效，缩短模具寿命。模具热处理包括预备热处理，如球化退火、正火、去应力回火、调质处理等。也包括最终热处理，如淬火、回火、表面强化处理等。

(1) 毛坯预处理工艺的影响 正确的预处理对于提高模具的承载能力和使用寿命起着积极的作用。预备热处理主要目的是获得需要的加工工艺性能及为模具最终热处理做好组织准备,作用是消除毛坯残存的组织缺陷,形成有利于强韧性、冷加工工艺性和减少淬火缺陷的原始组织。热处理关键是加热温度的选择(保证碳化物充分溶解或合金元素充分固溶),冷却方法(冷却速度或等温温度)的选择,保证能获得合适的切削硬度,所析出的碳化物均匀分布。

锻后退火可以去除锻后应力,调整工件加工硬度,当然还可以调整碳化物的形状和分布,退火是否充分对模具钢的断裂抗力影响也很大,需要对退火工艺予以足够重视。预处理后的组织对淬火开裂倾向及变形胀缩趋势,也有很大的影响,经实验预处理后获得调质细珠光体组织的变形倾向远小于片状珠光体组织。

钢中不均匀分布的碳化物对模具的强度、韧性等会造成明显损害。进行锻造工艺处理后,再进行合适的热处理加以改善。如 T8A 钢冲头经碳化物微细化处理后进行低温淬火,可显著减少崩裂,寿命提高 10 倍。Cr2 钢经碳化物微细化处理后,再淬火回火到 59 ~ 60HRC,其无缺口冲击值可比普通处理提高一倍以上,可以使模具寿命提高一至数倍。采用高温固溶处理正火进行消除锻坯中的网状二次碳化物或链状碳化物,可明显提高钢的断裂韧性。细化碳化物后,可使钢的塑性及冲击韧性值提高近一倍。

高速工具钢及高铬钢的共晶碳化物不均匀性,经高温奥氏体化退火后,再进行等温退火,可使大、中截面钢材的碳化物不均匀度,由 8 ~ 9 级变为 6 ~ 7 级,可显著改善小型毛坯中碳化物的分布,特别是促进小颗粒碳化物球化和大块碳化物棱角圆整化,并细化了晶粒,用于冷锻模可提高寿命一倍以上。

奥氏体晶粒超细化预处理可全面改善模具钢的强度、韧性及抗压强度。W6Mo5Cr4V2 钢超细化处理后晶粒度由常规等温处理的 10 级提高到 12 级,抗弯强度提高了近 20%。9SiCr 钢制滚丝模经超细化预处理后,晶粒度从常规处理后的 8 ~ 9 级细化为 13 ~ 14 级,抗弯强度提高 30%,断裂挠度上升 40%,服役寿命提高一倍以上。

(2) 最终热处理工艺的影响 最终热处理的关键是淬火工艺的制定。由于热处理工艺或操作不当,导致模具早期失效的数量约占模具失效总数的 60% 左右。热处理加热温度的高低、保温时间的长短、冷却速度的快慢和炉内气氛等工艺参数的选择不当,都会造成模具淬火开裂或早期失效。模具在热处理过程中应保证加热均匀,冷却均匀,并应防止模具表面产生氧化和脱碳,淬火后应及时、充分回火,以提高模具硬度的均匀性,从而获得良好的耐磨性和高的疲劳抗力或高的冷热疲劳寿命。

淬火温度过高,使奥氏体晶粒长大,大量碳化物溶入基体,淬火后出现粗针马氏体,增加了模具热处理应力,使模具变脆,服役中容易出现开裂、崩刃、折断等问题。如冷作模具镇流器引伸模,由直径为 150mm 的 CrWMn 钢的棒材锻造后加工成形,热处理淬火温度为 840 ~ 850℃ 油冷淬火。当该模具冲压 400 件产品时发生断裂,经调查,由于控温仪表失灵,模具淬火加热温度高达 870℃,淬火后得到粗大马氏体使模具脆性增加,又由于有大量残留奥氏体,使钢材热导率下降,磨加工中容易形成磨削裂纹,致使模具在服役过程中磨削裂纹迅速扩展而导致开裂。

淬火温度过低,则不能保证有足够的合金元素固溶于基体之中,钢的淬透性下降,耐回火性降低,模具硬度降低,降低钢的高温强度、组织稳定性及冷热疲劳抗力,造成模具产生

塌陷、变形和磨损，导致使用寿命降低。

淬火冷却是淬火后能否获得需要的组织性能的决定性因素。如果冷却过快或油温过低均容易出现淬火裂纹，这将会严重缩短疲劳寿命，甚至引发早期断裂，若冷却速度太慢将发生非马氏体型转变，同样会对模具寿命造成不良影响。对于碳素钢和低合金钢，因淬透性较差，必须采用冷却速度较大的油冷或水冷才能获得预期的效果。合金钢的淬透性高，可采用油冷淬火或空冷。对于大型模具，尤其是模壁较厚的部位中心区域冷却速度较慢，往往得不到马氏体组织，或使碳化物或杂质元素沿晶析出或偏聚，形成“黑色晶界”，增加模具脆性，服役中使模具脆性断裂。

模具的硬度影响着模具的强度及耐磨性等，但硬度提高塑性、韧性却往往呈下降趋势。模具发生早期失效，大部分是由于工作硬度过高而损失了韧性而导致早期断裂；少部分是由于工作硬度过低而呈现早期变形或磨损。对于不同的模具，有其自身的最佳强韧性配合问题，应对模具的寿命、失效形式、影响主要因素进行分析后，找出硬度及韧性等方面的最佳配合。

如 T10A 钢冲头在软质硅钢片上冲孔，仅冲几千片就因毛刺过大而失效。如将硬度从 56 ~ 58HRC 提高到 60 ~ 62HRC，则寿命可提高到 2 ~ 3 万次，再继续提高硬度，由于韧性不足容易出现早期断裂，使寿命降低。3Cr2W8V 钢制热挤压模，硬度为 45 ~ 50HRC 时容易出现早期断裂，硬度降到 38 ~ 40HRC 时，不再出现早期断裂，平均寿命明显提高。

最终热处理中的回火也是重要工序，首先模具回火要充分，高合金模具一般要求回火两次以上，这是因为钢中的残留奥氏体是在回火冷却过程中转变为回火马氏体，经两次以上回火可以使残留奥氏体充分转变。否则，将在模具中残留较大的淬火应力，降低模具韧性，容易发生早期断裂。为缩短工时，提高设备利用率，回火时间可适当缩短些。

加热过程中对工件的保护不到位引起的脱碳或过保护造成的表面增碳，都会造成工件的寿命降低。表面过度增碳将使材料的韧性下降，热疲劳抗力降低，增加了崩刃、脆断倾向，使裂纹扩展速度增加。冷作模具表面增碳后，主要出现崩刃、脆断等失效形式。3Cr2W8V、5CrNiMo 钢制作的模具，采用气体渗碳炉或固体渗碳剂保护加热淬火，易造成表面增碳层，厚度为 0.5 ~ 1.0mm，含碳量可达到 0.7% ~ 1.0%，导致早期热疲劳龟裂。

脱碳是模具淬火加热过程中最常见的表面缺陷，加热温度低于 800℃ 的木炭、未充分脱氧的盐浴、未高度净化的分解氨气及氢气，都不能保证模具表面不发生脱碳。脱碳层强度低、耐磨性差、易产生微裂纹，如未经去除，则会降低模具耐磨性及疲劳抗力。3Cr2W8V 钢热冲模，在高温箱式炉内加热淬火时，为了防止氧化脱碳，操作者采用旧固体渗碳剂保护，引起了表面渗碳，淬火前为了清除渗碳剂，在空气中作了短时间停留则又引起表面脱碳，在渗碳层外面形成铁素体组织。冲模在服役过程中，由于表面脱碳，强度降低，使冲头表面产生强烈磨损，而脱碳层下面的增碳层降低了钢的热导率，使模具内外温度梯度加大，增加了热应力和热应变，沟槽处成了热疲劳裂纹的起源，导致冲模早期失效。

4Cr5MoSiV1 是制作大、中型铝合金压铸模的最佳材料，即使脱碳层极薄，也明显损害疲劳抗力。用此材料制作的铝合金压铸模至少压铸上万次后才出现热疲劳裂纹。曾有一套上述模具仅压铸 2000 次就出现了早期热疲劳而失效，对热疲劳裂纹处横截面进行金相分析，发现表面存在 0.1mm 厚的贫碳层，距表面 0.05mm 处硬度为 362HV，0.10mm 处为 386HV，0.15mm 处为 412HV，0.2mm 处为 426HV。

知识点 1.2.2 模具冷加工质量的影响

模具的冷加工质量不但是为了达到必须的形状、尺寸等精度，对模具的寿命也会产生显著的影响。加工过程中如出现尖角或表面粗糙，留有刀痕，将容易在刀痕或尖角处萌发疲劳裂纹，造成模具疲劳失效，所以模具的切削加工应严格保证尺寸过渡处的圆角半径，圆弧与直线相接处应光滑，保证工作部位光滑无痕。不正当的磨削工艺如进给量过大、冷却不足等容易烧伤模具表面或产生磨削裂纹，降低模具的疲劳强度和断裂抗力；模具电加工（包括线切割及电火花成形）能使模具表面产生拉应力及显微裂纹，也易导致模具早期开裂和表面剥落。有时因模块中的内应力，特别是淬火硬化模块的内应力很高，电加工前未采取措施降低内应力，则在电加工进程中由于应力重新分布，易导致模具变形或开裂。

1. 表面损伤层的影响

(1) 磨削烧伤的影响 磨削一般作为工件的精加工亦即最后的加工，由于磨削时的进刀量及冷却等处理不到位，则有可能在工件表面瞬时升温而引起模具烧伤。表面磨削烧伤后对模具寿命有如下的不利影响：降低耐磨性、降低疲劳抗力、降低抗咬合能力、加剧脆断及崩刃倾向。所以磨削烧伤往往是模具制造过程中最常见、影响最大的冷加工缺陷。在磨削过程中，由于模具钢的组织缺陷及磨削工艺条件不当，所形成的表面烧伤有如下几种形式。

由于磨削时进刀量太大且冷却不到位，使工件表面产生较大的切削应力，表面出现与磨削加工方向相垂直为主的网状裂纹。轻微的磨裂用肉眼难以觉察，严重时才可用肉眼观察到。

被磨削表面温度超过相变点，由于是在非常薄的层面上快速冷却，被磨削表面生成白亮层，如图 1-9 所示，具有较高的硬度（65~67HRC），厚度通常小于 50 μm 。低合金钢的白亮层在 200℃ 以上回火时分解；高速工具钢的白亮层在 550℃ 以上回火后分解。

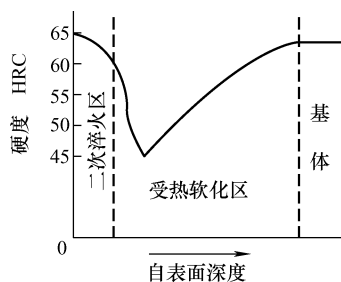


图 1-9 低合金钢表面磨削烧伤影响区

被磨削表面温度没有达到相变点，表面层出现回火或退火现象，使局部硬度降低，导致耐磨性和疲劳性能下降。表面软化层经 5%~10% 硝酸水溶液浸蚀后呈暗灰色。低合金钢的软化层的硬度低于 50HRC，高速工具钢的软化层的硬度低于 60HRC。被磨削表面表面层的温度达到 300℃ 时加工表面将呈现条纹状色彩（黄、紫、蓝等），类似 250~300℃ 阶段回火色。

表面脱碳层也明显加剧合金工具钢和高速工具钢的磨裂和淬裂倾向，模具钢材或锻坯表面通常存在厚度为 0.5~3.0mm 的脱碳层。如在切削加工时未将脱碳层除尽，将在淬火后出现软点或软区，甚至表面硬度普遍偏低。此外，还降低模具的耐磨性、抗咬合能力、抗热疲劳能力和疲劳强度。对此较敏感的常用钢种为 Cr2、CrWMn、W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2 等。

T10A 钢制的冷墩螺钉光冲，其型腔深而陡，使用中常发生早期塌陷失效，寿命小于 4000 次。经分析是由于型腔磨削时进刀深度过大，烧伤软化。后改进磨削工艺，光冲寿命显著提高，稳定在 3 万次以上。

9Cr2 钢制小型冷轧辊（62~64HRC），在使用中常表现为表面早期剥落失效，主要体现在模具表面有约 0.02~0.03mm 的磨削烧伤层，改变磨削工艺增加一次预磨削过程后，解决

了表面磨削烧伤层的问题，寿命显著提高。

(2) 电火花烧伤层的影响 模具加工过程中广泛应用电火花穿孔、线切割、电火花成型等方法。电加工过程中，由于放电产生大量的热，使加工表面温升到熔融状态，剧冷后在加工面上得到白色熔淬层，如图 1-10 所示，具有较高的硬度，其厚度与电火花加工规范有关。不仅硬度会出现异常，而且会产生微裂纹。若表面白色层未经去除或未采取低温回火方法防止微裂纹的扩展，则模具在服役过程中微裂纹就可能成为疲劳源，使模具使用寿命降低。对于承受冲击载荷的模具及重载模具，经电火花加工后应补充回火，以减轻电火花加工层的脆性。

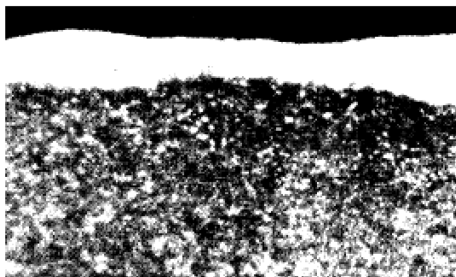


图 1-10 电加工后表面形成的白色熔淬层

2. 模具表面加工质量的影响

模具处于高硬度、高强度状态时，往往也是处于低塑性、低韧性的状态，所以对表面缺陷十分敏感。表面粗糙度的降低，一方面可减少坯料的流动阻力，降低模腔的磨损率，另一方面可减小表面缺陷（如刀痕、电加工熔斑等）和产生裂纹的倾向。表面粗糙度对模具寿命影响很大，试验表明，光洁程度对静弯强度有一定影响，如 W9Cr4V2 钢磨削比铣削时的抗弯强度可提高 25%，抛光可提高 33%。

如用 6Cr3SiV 钢制冷挤压模，表面粗糙度值 Ra 为 $1.6 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 时，其寿命约 3 万件左右；如经精抛光表面粗糙度值 Ra 达 $0.2 \sim 0.1 \mu\text{m}$ ，寿命可提高到 4.5 万 ~ 5 万件。

表面残存的刀痕、尺寸变化处的圆角半径、刻印的标记、锻压引起的夹层、裂纹、撞击伤痕等，如位于应力很大的部位，将成为断裂失效源，促成模具的早期脆断，降低工作寿命，如风动铆钉模在使用中铆合几百个铆钉后头部碎裂。断口呈现疲劳断裂形貌，疲劳源位于印痕处。

3. 加工精度的影响

模具零件工作部位的几何形状，如圆角半径、出模斜度、刃口角度的加工应严格按设计要求进行，在刀具或设备不能实现时，应由人工修磨并严格测量，以保证模具合理的受力状态，有配合尺寸的部位，应保证其公差或进行配磨。5CrNiMo 钢制热锻模的型腔，不应出现尖角。重载锤锻模型腔中的凹槽根部，应保证圆角半径大于 $2 \sim 3 \text{mm}$ 。否则，容易由此导致严重碎裂。

目前，圆滚模及搓丝板普遍采用反滚压法制成，如毛坯软化不充分或工序安排不当，在滚模及丝板的牙尖将残存夹层缺陷。工作时，将在夹层处萌生裂纹而发生早期崩裂失效。模具间隙量及均匀性的调整，增加配合承载面及合模面的接触，保证凸模和凹模受力中心的一致性，这些措施都可提高模具的装配精度，从而提高模具的寿命。

知识点 1.2.3 模具材料的影响

1. 冶金缺陷的影响

根据模具钢中使用环境较复杂的大、中截面钢材的使用经验，模具淬火时出现的工艺缺陷及服役时的承载能力，主要与钢材冶金质量有关。含碳及合金元素较多的模具钢，具有较

强的出现冶金缺陷的倾向。模具材料不仅要具有适应模具工况的优良性能,更重要的是材料本身的质量。例如材料内部存在疏松、夹杂、化学成分偏析、碳化物不均匀等,往往促成模具毛坯的锻造开裂、淬火开裂或在服役中发生脆断,是导致模具早期失效的重要因素。购进的钢材首先要检验共晶碳化物的不均匀度,如果碳化物不均匀度级别大于3级,则钢材力学性能下降,如果未经充分改锻,则因组织不均匀而造成组织应力,热处理时易发生变形及开裂。因此,对这类钢材最好采取多向多次锻拔,以便尽量击碎碳化物和改善锻件金属纤维方向性。模具钢材中存在中心疏松或残余缩孔时,易导致锻裂或在服役中脆断。此类缺陷只有对钢材、模块作切片低倍检验,用热酸浸蚀后方能显现。模具钢的冶金质量,应具备下列条件:

- 1) 成分及性能稳定,材质洁净度高,各种有害元素、气体、非金属夹杂物的含量少。
- 2) 碳化物颗粒分布均匀、细小,无网状碳化物,带状偏析轻微。
- 3) 断口宏观组织细密,无孔洞、疏松、白点等缺陷。

进行模具设计时必须考虑到金属材料的纤维组织的走向,而且还要利用合理的锻造工艺改善金属材料的化学成分和组织的均匀性,注意把模具型腔安排在金属组织最致密而均匀的部位,使模腔部位处于良好的组织状态,以便充分发挥材料的潜力,提高模具的使用寿命。白点是锤锻模块及大截面合金钢材常见的一种冶金缺陷。由于内部存在大量微裂纹,易导致淬火开裂或在服役中脆断,必须以足够大的锻压比改制成小规格钢材。通常截面小于 $\phi 150\text{mm}$ 的已发现有白点缺陷的钢材,经大变形量压力加工后,原有的白点可被焊合。

例如,采用直径为200mm的5CrMnMo钢棒,经热锻粗后加工成泵盖和扇形物两副热锻模具,分别模锻300件和1000件产品后,模腔凸边即出现密集的热裂纹和整个膜腔下陷,经取样热酸浸蚀后发现,模腔部位存在严重的疏松和粗大的枝晶组织,显然模坯经热锻粗也未能改善棒材中心组织的缺陷,导致模具的早期破坏。

当碳化物呈现网状、带状、棱角状、链状等形态时,都将严重损害钢的力学性能,增加淬火变形及开裂的倾向。例如,冲切钢板的凹模,材料是CrWMn钢,由棒材直接加工而成,硬度为62.5HRC,冲切1300只产品后模具即开裂,断口平整呈低周疲劳特征,显微组织中有二次碳化物网。由于有网状碳化物的存在,使模具脆性增加,在冲切过程中易在应力集中部位形成微裂纹。经锻造快冷消除了网状碳化物后,模具使用寿命提高了6倍左右。

2. 模具用钢的影响

表1-1为各种模具钢的性能要求。合理选择模具用钢的基本目的,在于避免模具在服役时出现早期失效,以及在制造时减少废品率。模具用钢的性能水平、材质优劣、使用合理与否等因素,对模具制造的精度、合格品率以及服役时的承载能力、寿命水平,均有密切的关系。

表 1-1 模具钢的性能要求

性 能	冷作模具钢	热作模具钢	塑料模具钢
耐磨性	●	●	●
强度	●	●	●
韧度	○	●	○
硬度	●	○	○