

提高模具寿命的途径

——选材及热处理

金荣植 编著

- ✓ 充分发挥模具材料性能
- ✓ 合理地选择热处理工艺
- ✓ 丰富的热处理工艺案例
- ✓ 新材料与新技术的应用
- ✓ 提高模具寿命实用指南



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

提高模具寿命的途径—— 选材及热处理

金荣植 编著



机械工业出版社

本书全面地阐述了模具材料及热处理与模具寿命之间的关系,并列举了大量国内外提高模具寿命的成功案例。本书主要内容包括:模具的失效与使用寿命,模具的材料、热处理与使用寿命,冷作模具材料及其热处理,典型冷作模具的热处理,热作模具用钢及其热处理,典型热作模具的热处理,塑料模具钢及其热处理,典型塑料模具的热处理,玻璃模具(材料)及其热处理,大型模具(材料)及其热处理,铸钢、铸铁、粉末冶金模具材料及其热处理,提高模具寿命的途径与方法。本书反映了近年来模具材料、热处理技术在生产应用方面的发展方向,内容系统,案例丰富,实用性强。

本书可供热处理工程技术人员和工人使用,同时对模具设计、制造、使用人员,以及相关专业在校师生也有很高的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

提高模具寿命的途径:选材及热处理/金荣植编著. —北京:机械工业出版社, 2016. 9

ISBN 978-7-111-54607-8

I. ①提… II. ①金… III. ①模具—寿命—研究 IV. ①TG76

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 195523 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:陈保华 责任编辑:陈保华 崔滋恩

责任校对:张晓蓉 封面设计:陈 沛

责任印制:常天培

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2016 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·20.5 印张·499 千字

0 001—2 500 册

标准书号:ISBN 978-7-111-54607-8

定价:69.00 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

服务咨询热线:010-88361066 机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294 机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网:www.golden-book.com

策 划 编 辑:010-88379734 教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

前 言

模具寿命的高低不仅是衡量模具质量的重要指标之一，而且在一定程度上反映了一个地区、一个国家的冶金工业和机械工业水平。目前，我国已成为世界模具制造大国，但还不是强国，我国模具的制造水平和使用寿命与先进国家相比，还有很大的差距，模具质量较低，使用寿命只有先进国家的 $1/5 \sim 1/2$ 。据统计，在我国由于模具寿命低而造成的钢材、工时和能源浪费，以及由此对产品质量影响所带来的损失，每年达数十亿元；并且严重降低了产品生产效率，直接影响企业的经济效益和竞争力。因此，提高模具寿命是模具制造业中亟待解决的问题。

近年来，模具的应用领域不断扩大，随着国家产业政策的调整，航空航天、新能源、IT、医疗器械、高速铁路等行业，对模具的质量、品种、供货期提出了更高、更多、更快的要求，精密、大型、复杂、长寿命已经成为现代模具制造的主题。如何提高模具的加工质量和使用寿命，一直是模具工作者不断探索的课题。大量失效模具分析结果表明，模具材料与热处理对模具寿命的影响占有重要地位。模具材料是模具制造的基础，其品种、规格、质量对模具的性能、使用寿命起着决定性的作用，正确的热处理技术是保证模具获得所需性能和寿命的关键。因此，为了使模具获得良好的使用性能和长的使用寿命，除了合理设计模具结构外，还应选用合适的模具材料与热处理技术。目前，随着新材料的应用及模具制造技术的不断完善，在原有常规的热处理基础上，通过热处理优化模具材料的组织和性能，并相继开发和应用一大批实用、先进的热处理新技术，使模具寿命得到大幅度提高。

模具制造的成本较高，特别是一些精密复杂的冲裁模、塑料模、压铸模等制造成本更高。通过采用先进的模具材料与热处理技术提高模具寿命，可以显著降低模具成本，具有显著的经济效益。改革开放以来，我国十分重视模具材料与热处理技术的发展，国内外先进的模具材料、热处理工艺与装备得到了广泛的应用，各种强韧化工艺和表面强化处理技术得到了推广，从而显著提高了模具的使用寿命。

本书作者根据三十多年在热处理领域所积累的实践经验，并参考国内外有关模具材料与热处理方面的文献资料编写了本书。本书全面介绍了常用模具材料及其热处理与应用，典型模具的选材及热处理技术，以及提高模具寿命的途径与方法。通过合理选材及采用模具新材料，并实施正确和先进的热处理技术，可以充分发挥模具材料的潜力，提高模具使用性能，使模具寿命提高几倍甚至几十倍。

由于作者水平和取材有限，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

作 者

目 录

前 言

第1章 模具的失效与使用寿命 1

- 1.1 模具的主要失效形式 1
- 1.2 模具的失效分析 2
- 1.3 影响模具失效的因素 3
- 1.4 冷作模具的失效形式及原因 3
- 1.5 热作模具的失效形式及原因 5
- 1.6 塑料模具的失效形式及原因 6
- 1.7 模具失效分析实例 7
 - 1.7.1 冷作模具失效分析实例 7
 - 1.7.2 热作模具失效分析实例 8
 - 1.7.3 塑料模具失效分析实例 9
- 1.8 模具寿命及其影响因素 9
 - 1.8.1 模具寿命 9
 - 1.8.2 影响模具寿命的因素 10

第2章 模具的材料、热处理与使用

寿命 17

- 2.1 模具的材料与使用寿命 17
 - 2.1.1 国内外先进冷作模具材料的选择与应用 17
 - 2.1.2 国内外先进热作模具材料的选择与应用 19
 - 2.1.3 国内外先进塑料模具钢的选用 21
- 2.2 模具的热处理与使用寿命 22
- 2.3 模具材料的使用性能和工艺性能要求 24
 - 2.3.1 模具材料的使用性能要求 24
 - 2.3.2 模具材料的工艺性能要求 26
 - 2.3.3 模具钢在冶金质量方面的性能要求 27
 - 2.3.4 对模具用钢的原材料要求 28

第3章 冷作模具材料及其热处理 29

- 3.1 冷作模具的工作条件及失效形式 29
- 3.2 冷作模具钢的性能要求 29
 - 3.2.1 冷作模具钢的使用性能要求 29
 - 3.2.2 冷作模具钢的工艺性能要求 30

- 3.3 冷作模具钢的分类 31
- 3.4 冷作模具钢的选择与应用 31
- 3.5 常用冷作模具钢及其热处理 32
 - 3.5.1 低淬透性冷作模具钢及其热处理 32
 - 3.5.2 低变形冷作模具钢及其热处理 39
 - 3.5.3 高耐磨微变形冷作模具钢及其热处理 42
 - 3.5.4 高强度高耐磨冷作模具钢（高速工具钢）及其热处理 49
 - 3.5.5 抗冲击冷作模具钢及其热处理 53
 - 3.5.6 高强韧性冷作模具钢及其热处理 56
 - 3.5.7 高耐磨高韧性冷作模具钢及其热处理 66
 - 3.5.8 特殊用途冷作模具钢及其热处理 67
 - 3.5.9 硬质合金、钢结硬质合金及其热处理 67

第4章 典型冷作模具的热处理 71

- 4.1 冲裁模具及其热处理 71
 - 4.1.1 冲裁模具的工作条件及性能要求 71
 - 4.1.2 冲裁模具的失效形式与寿命影响因素 72
 - 4.1.3 冲裁模具用钢的选择 72
 - 4.1.4 薄板冲裁模具的热处理 73
 - 4.1.5 厚板冲裁模具的热处理 76
 - 4.1.6 不锈钢板冲裁模具的热处理 79
 - 4.1.7 精密、微型冲裁模具的热处理 80
 - 4.1.8 提高冲裁模具寿命的途径 81
- 4.2 冷剪刀及其热处理 82
 - 4.2.1 冷剪刀用钢的选择 82
 - 4.2.2 不同材料冷剪刀的热处理 83
 - 4.2.3 直剪刀的热处理 84
 - 4.2.4 圆剪刀的热处理 85

4.2.5 成形剪刀的热处理	86	5.4 常用热作模具钢及其热处理	116
4.2.6 提高冷剪刀寿命的热处理实例	87	5.4.1 低合金高韧性热作模具钢及其热处理	116
4.3 冷拉深模具及其热处理	87	5.4.2 中合金高韧性热作模具钢及其热处理	122
4.3.1 冷拉深模具的工作条件、失效形式和性能要求	88	5.4.3 高耐热中韧性热作模具钢及其热处理	129
4.3.2 冷拉深模具用钢的选择	88	5.4.4 高耐磨高碳模具钢及其热处理	133
4.3.3 冷拉深模具的热处理	89	5.4.5 特殊用途热作模具钢及其热处理	134
4.3.4 提高冷拉深模具寿命的途径	90	5.5 热作模具钢的热处理新技术	139
4.4 冷镦模具及其热处理	94	第6章 典型热作模具的热处理	142
4.4.1 冷镦模具的工作条件及失效形式	94	6.1 热锻模具及其热处理	142
4.4.2 冷镦模具材料的选择	94	6.1.1 热锻模具的工作条件及失效形式	142
4.4.3 冷镦模具的热处理	95	6.1.2 热锻模具材料的选用	142
4.4.4 冷镦模具的表面强化处理	97	6.1.3 热锻模具的热处理	143
4.4.5 提高冷镦模具寿命的途径	97	6.1.4 提高热锻模具寿命的途径	145
4.4.6 提高冷镦模具寿命的热处理实例	98	6.2 锤锻模具及其热处理	148
4.5 冷挤压模具及其热处理	98	6.2.1 锤锻模具的工作条件及失效形式	148
4.5.1 冷挤压模具的工作条件及失效形式	98	6.2.2 锤锻模具用钢的性能要求	149
4.5.2 冷挤压模具材料的选择	99	6.2.3 锤锻模具的热处理	150
4.5.3 冷挤压模具的热处理	100	6.2.4 提高锤锻模具寿命的途径	153
4.5.4 提高冷挤压模具寿命的途径	101	6.3 高速锤锻模具及其热处理	154
4.6 螺纹压制模具及其热处理	104	6.3.1 高速锤模具的工作条件及失效形式	155
4.6.1 滚丝模的工作条件、失效形式与性能要求	104	6.3.2 高速锤锻模具用钢的性能要求	155
4.6.2 滚丝模材料的选择	104	6.3.3 高速锤锻模具钢的选用	155
4.6.3 滚丝模的热处理	105	6.3.4 高速锤锻模具的热处理	155
4.6.4 搓丝板的工作条件、失效形式及性能要求	107	6.3.5 提高高速锤锻模具寿命的热处理实例	156
4.6.5 搓丝板的热处理	107	6.4 热挤压模具及其热处理	156
4.6.6 提高螺纹压制模具寿命的热处理实例	109	6.4.1 热挤压模具的工作条件及失效形式	156
4.7 拉丝模及其热处理	109	6.4.2 热挤压模具用钢的性能要求	157
4.7.1 拉丝模的工作条件、失效形式及性能要求	110	6.4.3 热挤压模具材料的选用	157
4.7.2 拉丝模材料的选用	110	6.4.4 热挤压模具的热处理	158
4.7.3 拉丝模的热处理	112	6.4.5 提高热挤压模具寿命的途径	162
4.8 提高冷作模具寿命的热处理实例	112	6.4.6 提高热挤压模具寿命的热处理实例	165
第5章 热作模具用钢及其热处理	114	6.5 热冲裁模具及其热处理	166
5.1 热作模具的工作条件及失效形式	114	6.5.1 热冲裁模具的工作条件与失效	
5.2 热作模具钢的性能要求	114		
5.3 热作模具钢的分类和选用	115		

形式	166	处理	223
6.5.2 热冲裁模具材料的选择	167	8.2.3 预硬型塑料模具钢模具的热	
6.5.3 热冲裁模具的热处理	167	处理	224
6.6 热切边模具及其热处理	168	8.2.4 时效硬化型塑料模具钢模具的热	
6.6.1 热切边模具的工作条件及失效		处理	225
形式	168	8.2.5 耐蚀型塑料模具钢模具的热	
6.6.2 热切边模具材料的选择	168	处理	226
6.6.3 热切边模具的热处理	169	8.2.6 易切削塑料模具钢模具的热	
6.7 热剪切模具及其热处理	171	处理	226
6.7.1 热剪切模具的工作条件与失效		8.2.7 耐磨型模具钢塑料模具的热	
形式	171	处理	227
6.7.2 热剪切模具的热处理	171	8.3 提高塑料模具寿命的热处理实例	228
6.8 压铸模具及其热处理	173	第9章 玻璃模具（材料）及其热	
6.8.1 压铸模具的工作条件及失效		处理	229
形式	173	9.1 玻璃模具的工作条件及失效形式	229
6.8.2 压铸模具材料的选用及热处理	174	9.2 玻璃模具材料的性能要求	229
6.8.3 锌合金压铸模具及其热处理	176	9.3 玻璃模具材料的选择与应用	229
6.8.4 铝、镁合金压铸模具及其热		9.3.1 玻璃模具用钢及其热处理	230
处理	176	9.3.2 玻璃模具用铸铁材料	231
6.8.5 铜合金压铸模具及其热处理	181	9.3.3 玻璃模具用合金	232
6.8.6 钢铁材料压铸模具及其热处理	182	9.4 玻璃模具的热处理	232
6.8.7 提高压铸模具寿命的途径	184	9.5 提高玻璃模具寿命的热处理实例	233
第7章 塑料模具钢及其热处理	189	第10章 大型模具（材料）及其热	
7.1 塑料模具的工作条件与失效形式	189	处理	235
7.2 塑料模具钢的性能要求	190	10.1 大型模具材料及其热处理	235
7.3 塑料模具钢的分类与应用特点	190	10.1.1 铸铁材料及其热处理	235
7.4 塑料模具钢的选择与应用	192	10.1.2 塑料模具钢及其热处理	237
7.5 常用塑料模具钢及其热处理	193	10.1.3 高淬透性热作模具钢及其热	
7.5.1 渗碳型塑料模具钢及其热处理	193	处理	238
7.5.2 预硬型塑料模具钢及其热处理	198	10.1.4 冷作模具钢及其热处理	239
7.5.3 淬硬型塑料模具钢及其热处理	205	10.1.5 火焰淬火钢及其热处理	239
7.5.4 时效硬化型塑料模具钢及其热		10.2 大型模具的热处理技术	239
处理	206	10.2.1 大型模具的强韧化热处理技术	239
7.5.5 耐蚀型塑料模具钢及其热处理	211	10.2.2 大型模具的真空热处理技术	240
7.5.6 无磁型塑料模具钢及其热处理	217	10.2.3 大型模块的水-空交替淬火冷却	
7.5.7 非调质塑料模具钢及其热处理	218	技术（ATQ）	241
7.5.8 非合金塑料模具钢及其热处理	219	10.2.4 大型模具的化学热处理技术	243
第8章 典型塑料模具的热处理	221	10.2.5 大型模具的激光热处理技术	244
8.1 塑料模具的热处理技术要求	221	10.2.6 大型模具的感应淬火技术	245
8.2 典型钢材塑料模具的热处理及实例	222	第11章 铸钢、铸铁、粉末冶金模具	
8.2.1 渗碳型塑料模具钢模具的热		材料及其热处理	246
处理	222	11.1 铸钢模具材料及其热处理	246
8.2.2 淬硬型塑料模具钢模具的热			

11.1.1 常用铸钢模具材料及其性能	246	12.5 模具的钢箔包装保护热处理技术及实例	279
11.1.2 铸钢模具的热处理与应用	247	12.6 模具的表面强化处理技术及实例	279
11.1.3 新型铸造模具用钢及其热处理	248	12.6.1 模具表面强化处理技术的选择	279
11.2 铸铁模具材料及其热处理	250	12.6.2 模具的化学热处理技术及实例	280
11.2.1 灰铸铁及其热处理	250	12.6.3 模具的渗金属技术及实例	287
11.2.2 球墨铸铁及其热处理	251	12.6.4 模具的TD覆层处理技术与应用	289
11.2.3 蠕墨铸铁及其热处理	252	12.6.5 模具的感应淬火技术及实例	290
11.2.4 合金铸铁(特殊性能铸铁)及其热处理	252	12.6.6 模具的火焰淬火技术及实例	290
11.2.5 铸铁模具的热处理实例	254	12.6.7 模具的喷丸强化技术及实例	292
11.3 粉末冶金模具材料及其热处理	255	12.6.8 模具的镀金属技术与应用	293
11.3.1 硬质合金及其应用实例	256	12.6.9 模具的电火花表面强化技术与应用	296
11.3.2 钢结硬质合金及其热处理	258	12.6.10 模具的堆焊技术与应用	297
11.4 铸钢、铸铁及粉末冶金模具的热处理实例	261	12.7 先进的模具表面强化技术及实例	298
第12章 提高模具寿命的途径与方法	263	12.7.1 模具的稀土表面强化技术及实例	298
12.1 提高模具寿命的途径	263	12.7.2 模具的气相沉积技术及实例	300
12.1.1 合理设计模具	263	12.7.3 模具的高能束表面强化技术及实例	303
12.1.2 正确选择模具材料	265	12.7.4 模具的热喷涂技术及实例	308
12.1.3 保证模具的加工质量	265	12.7.5 模具的复合热处理技术及实例	311
12.1.4 合理装配、使用与维护模具	267	参考文献	315
12.2 高强韧模具材料及其应用	268		
12.2.1 高强韧冷作模具钢的应用	268		
12.2.2 高强韧热作模具钢的应用	268		
12.3 模具的强韧化处理技术及实例	269		
12.4 模具的真空热处理技术及实例	274		

模具早期失效,将严重影响模具的使用寿命,并对生产造成影响。对此,应对已失效的模具进行细致的分析,充分掌握导致模具失效的原因及其各种影响因素,找出主要原因,采取相应的措施加以改进,以提高模具的使用寿命。

1.1 模具的主要失效形式

模具性能优劣的最直接的判断依据是模具使用寿命的长短,其也必然反映在模具的失效形式和特点上。为了便于对失效模具分析,需要对模具失效形式进行了解。

(1) 模具的服役 模具经安装调试后,可以正常生产合格的工件,这一过程称为模具的服役。

(2) 模具的损伤 模具在制造过程中可能会产生某些缺陷,或者在服役过程中逐渐出现了某些缺陷,如微裂纹、轻度磨损及变形等,在此状况下模具虽有隐患但仍能继续工作,这种虽有缺陷但未丧失服役能力的状态称为模具的损伤。

在一般情况下,模具出现损伤后不会立即失效,只有当某种损伤形式发展到模具加工出的产品成为废品时,模具才被判为失效。因此,模具失效形式就是使其丧失正常工作能力的某种损伤形式。

(3) 模具的失效 模具的失效是指模具丧失正常的使用功能,不能通过一般的修复方法使其重新服役的现象。模具的失效分为正常失效和早期失效。模具的正常失效是指模具达到预定寿命的失效,模具经大批量生产使用,因缓慢塑性变形或较均匀的磨损或疲劳断裂而不能继续服役;早期失效是指模具低于预定寿命的非正常失效,通常早期失效是指模具在其平均寿命 $1/3$ 以内,甚至更短时间内因过量变形、开裂或断裂、局部严重磨损等原因造成模具完全失效的现象。

(4) 模具失效的基本形式 主要有五种:磨损、塑性变形、疲劳及冷热疲劳、断裂与开裂、腐蚀。冷热疲劳主要发生在热作模具上,其他四种失效形式在冷、热作模具上都可能出现。模具在服役过程中可能同时出现多种损伤形式,各种损伤之间又相互渗透、相互促进、各自发展,最后形成一种主要的失效形式。

(5) 模具常见的失效形式 各类模具常见的失效形式见表 1-1。

表 1-1 各类模具常见的失效形式

模 具 类 别	模 具 名 称	常 见 失 效 形 式
冷作模具	冲裁模	磨损、崩刃、断裂
	冷拉深模	磨损、咬合、划伤

(续)

模具类别	模具名称	常见失效形式
冷作模具	冷锻模	脆断、开裂、磨损
	冷挤压模	开裂、疲劳断裂、塑性变形、磨损
热作模具	热锻模	冷热疲劳、裂纹、磨损、塑性变形
	热挤压模	断裂、磨损、塑性变形、开裂
	热切边模	磨损、崩刃
	热锻模	断裂、磨损、冷热疲劳、塌陷
	压铸模（有色金属材料）	热疲劳、黏着、腐蚀
	压铸模（钢铁材料）	热疲劳、塑性变形、腐蚀
塑料模具	热固性塑料模	磨损、腐蚀、变形、断裂
	热塑性塑料模	塑性变形、断裂、磨损
玻璃模具	—	热疲劳、氧化

1.2 模具的失效分析

模具失效分析是对已经失效的模具进行失效过程分析，以寻找模具失效的原因，为以后模具制造中正确选择模具材料、优化模具结构设计、合理制订模具制造工艺（包括热处理工艺）积累经验，为模具新材料的研制、新工艺技术的开发等提供数据，对提高模具的使用寿命有着十分重要的意义。

模具的制造，通常经过设计、选材、锻造与退火、机械加工和热处理等工艺环节，在每一环节中，如果工艺制订不当或工艺操作不当都会导致模具的早期失效，降低模具寿命。模具在服役过程中可能出现各种失效形式，其失效形式、损坏程度和位置等，均记录了模具在每一工艺环节中的重要信息。观察和分析模具失效部位的宏观形貌特征、显微组织及失效形式，运用金属学、材料物理及断裂力学的理论和方法，揭示模具失效与模具设计、选材、加工工艺之间的关系，从而提出科学合理的改进措施。

在制订提高模具寿命的技术方案及采取技术措施之前，首先必须了解此类模具的主要失效形式，即了解导致模具失效的最常见、最大量的失效形式及其失效原因和主要影响因素。由于同一类模具也会有不同的失效形式，如某些模具可能因发生断裂而失效，另一些模具则可能因塑性变形而失效，这就需要掌握各种失效形式所占的比例以及每种失效模具的使用寿命。

模具失效分析的方法与步骤如下：

1) 生产现场调查与处理。在生产现场了解模具使用情况、设备使用状况、操作规范执行情况、被加工坯料情况等，统计模具的使用寿命与失效形式，并保管好失效模具（保持断口洁净）供分析之用。

2) 模具制造工艺调查。分析复查失效模具材料的化学成分和冶金质量，详细了解模具的锻造、机械加工、热处理及其操作过程，核实各个环节是否符合有关标准、技术要求及操作规程，其中应重点了解热处理及锻造操作过程及质量检验方法等。

3) 对模具进行失效分析。对收集到的已失效模具的损伤形式进行全面分析。其分析内容如下：①失效模具的外观观察；②断口分析；③金相分析；④无损检测；⑤分析判断。找出模具损伤根源，综合判断模具失效原因。

模具失效原因一般包括四个方面：模具本身质量、生产管理制度、操作人员使用模具情

况及模具工作环境。其中最重要的是模具本身质量。模具使用时工作条件往往很复杂,因此其失效形式和原因也是多种多样。但只要掌握了失效分析的方法,充分利用现有技术手段对模具进行综合分析,就能够准确地找出模具失效的原因。

1.3 影响模具失效的因素

模具的使用范围广泛,工作条件和受力状况不同,模具结构、模具材料、模具制造、模具工作条件(包括装配与操作)等是影响模具失效的主要因素。一种模具的失效可能是由多种因素造成的。

(1) 模具结构的影响 模具结构包括模具几何形状,如圆角半径、几何角度(凸模的端面形状、凹模锥度与截面的变化),结构形式(整体式结构、组合结构、预应力镶套结构),模具间隙,结构刚度等。

模具结构的合理性对模具的承载能力有很大的影响。合理的模具结构能使模具工作时受力均匀,不易偏载,应力集中小,不易产生早期失效;而不合理的模具结构可能引起严重的应力集中或高的工作温度,从而恶化模具的工作条件,导致模具早期失效。

(2) 模具材料的影响

1) 模具材料的力学性能指标。模具材料通常应满足模具对塑性变形抗力、断裂韧性、疲劳强度、硬度、耐磨性、冷热疲劳强度等性能的要求。如果不能满足要求,则会导致模具早期失效。例如,在循环载荷下如果模具材料疲劳强度低,经一定应力循环后就可能萌生疲劳裂纹,并逐渐扩展直至模具断裂失效。

2) 模具钢的冶金质量。模具钢的冶金质量对模具的失效形式有很大的影响。钢中的非金属夹杂物、偏析、中心疏松、白点等缺陷,均能降低钢的强韧性、疲劳及冷热疲劳强度,引起模具早期失效,如崩裂、劈裂、折断,以及工作面的凹陷等。

(3) 模具制造工艺的影响 模具制造工艺过程包括锻造、机械加工、热处理等。有些模具加工需经过上述所有工艺处理。每一种工艺的加工质量,均将不同程度地影响模具的损伤过程、失效形式。

若锻造工艺不合理,则达不到打碎晶粒,改善方向性,提高钢的致密度等目的,甚至引发锻造裂纹等缺陷。机械加工如果出现尖角或表面粗糙度值高,留有加工刀痕,将容易在这些部位萌发疲劳裂纹。磨削不当,容易烧伤模具表面或产生磨削裂纹。若热处理不当,则可能引发热处理缺陷:如淬火温度过高,则会引起钢的过热,甚至过烧,模具易发生崩刃或早期断裂;而淬火温度过低,则难以保证有足够的合金元素固溶于基体之中,模具易产生早期变形、塌陷或热疲劳裂纹;淬火冷却速度过快,则易出现淬火裂纹,在模具使用中易产生早期断裂。

(4) 模具工作条件的影响 模具的工作条件与下列因素有关:设备的特性,被加工坯料的材质、形状、精度和温度,模具的冷却及润滑条件,模具的预热与工作应力消除等。这些因素均对模具的失效形式产生影响。

1.4 冷作模具的失效形式及原因

冷作模具主要包括冲裁模、冷挤压模、冷拉深模、冷镦模、拉丝模等。冷作模具的工作条

件是在常温下，主要完成金属及非金属材料的冲裁、弯曲、拉深、镦锻、挤压等工序。冷作模具在工作时，由于被加工材料的变形抗力较大，模具的工作部分承受很大的压力、弯曲力、冲击力和摩擦力等，其刃口或工作表面产生剧烈的摩擦与磨损，其常见的失效形式有磨损、断裂、塑性变形、咬合及多冲疲劳等，见表 1-2。图 1-1 所示为冷作模具常见的失效形式。

表 1-2 冷作模具失效的形式及原因

失效形式	内 容
磨损	冷作模具工作部分与被加工材料之间的摩擦而引起的物质损耗，能使工作部位（刃口、冲头）形状和尺寸发生变化而引起失效，如冲裁模的刃口变钝、冷镦模的工作表面出现沟槽等 磨损失效包括正常磨损失效与非正常磨损失效。对于冲裁模、冷挤压模，在保证不断裂的条件下，工作部分磨损到无法修复的程度属于正常磨损；非正常磨损则是在局部高压作用下，模具工作表面与被加工材料间发生咬合，引起坯料表面形状与尺寸发生突变，或产品表面出现严重划痕等导致失效，如冷拉深模、弯曲模及冷挤压模中容易出现此类缺陷
断裂	冷作模具在使用过程中突然出现裂纹或发生破损而失效，按其损坏情况可分为局部破损（如剥落、崩刃、掉牙等）和整体性破损（如碎裂、断裂、胀裂、劈裂等）。其共同的特点是破损大多数产生在受力最大的工作部位，或是在断面变化的应力集中处 按其断裂过程的特征，可分为脆性断裂和疲劳断裂两种形式。脆性断裂主要是由于模具存在冶金缺陷、工艺缺陷，或因操作不当发生超载造成的；疲劳断裂主要是由于循环应力所致，其常见于各种重载模具，如冷镦模、冷挤压模
塑性变形	冷作模具在使用过程中发生塑性变形，失去原有的几何形状，通常发生在硬度偏低或淬硬层太薄的模具，具体表现为凸模镦粗、弯曲，凹模型腔下沉塌陷、棱角塌陷、模孔胀大等
咬合	当被加工材料与模具工作部位接触时，在高压摩擦下，润滑油膜破裂，发生咬合。此时，被加工件金属“冷焊”到模具型腔表面，导致被加工产品表面出现划伤。咬合失效常见于弯曲、拉深、冷镦、冷挤压等工序
多冲疲劳	冷作模具承受的载荷大都是以一定冲击速度和能量反复作用，其工作状态与小能量多冲疲劳试验相似。由于模具材料硬度高，多冲疲劳寿命多在 1000 ~ 5000 次，而且裂纹萌生期占寿命绝大部分，疲劳源和裂纹扩展区不明显。重载模具，如冷挤压模、冷镦冲头等易发生此类失效

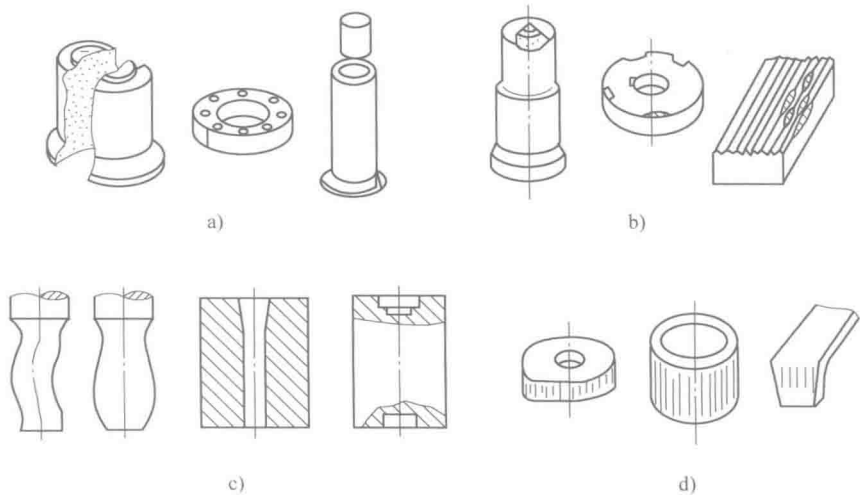


图 1-1 冷作模具常见的失效形式

a) 整体断裂 b) 局部断裂（崩刃） c) 变形（弯曲、镦粗、模孔胀大、型腔下沉） d) 咬合

1.5 热作模具的失效形式及原因

热作模具主要包括热锻模、热冲裁模、热挤压模、压铸模等。热作模具工作时承受很大的冲击载荷、强烈的摩擦，以及剧烈的冷热循环引起的热应力和高温氧化等，常出现变形及塌陷、断裂、热疲劳、热磨损和腐蚀等失效形式，见表 1-3。图 1-2 所示为几种热作模具常见的失效形式。

表 1-3 热作模具的失效形式及原因

失效形式	内 容
变形和塌陷	变形和塌陷是指在高温下毛坯与模具长期接触后，致使模具表面受到不同程度的过度回火而被软化，引起强度降低而发生塑性变形。对于钢铁材料成形模具，当其表面软化后硬度低于 30HRC 时，容易发生变形而引起塌陷。工作载荷大、工作温度高的热挤压模和热锻模凸起部位易产生此类失效
断裂	断裂是指在材料本身承载能力不足以抵抗工作载荷而出现失稳态下的材料开裂，包括脆性断裂、韧性断裂、疲劳断裂和腐蚀断裂。引起早期断裂原因主要有：锻压操作失误，引起模具过载；模具加工质量不佳，降低了承载能力；模具设计不合理，产生应力集中；模具选材不当；模具热处理不当等。热挤压冲头、热锤锻模（燕尾部）及模具凸起部位、根部等易出现断裂失效 疲劳断裂是指在较高循环应力作用下，在模具型腔表面萌生疲劳裂纹并扩展，最后发生失稳扩展造成断裂失效
热疲劳	热疲劳又称冷热疲劳或龟裂，它是指模具工作时，因模具型腔表面存在较大的温差和急冷急热的作用，使模具表面产生较大的热应力，当温度反复变化时这种热应力也随之变化，加上承受较大机械载荷作用，使压铸模、热锻模等易出现热疲劳裂纹，此裂纹属于表面裂纹，一般较浅，在机械应力作用下向内部扩展，最终产生断裂失效
热磨损	热磨损是在机械载荷与热载荷的共同作用下，在型腔表面形成复杂的磨损过程。热作模具的磨损主要以表面疲劳磨损为主，因工况条件的不同，常伴随有黏着磨损和磨料磨损。磨损表面的破坏特征主要有刮伤、沟槽、麻点和剥落等。相对运动剧烈和有凸起部位的模具如热挤压冲头等易产生热磨损失效
腐蚀	腐蚀是热作模具特有的损坏形式。腐蚀包括冲蚀、熔蚀及侵蚀等。压铸模在工作过程中，熔融金属被注入型腔时，被炽热金属液冲刷的模具部位，易发生冲蚀。这是在高温下模具受到液态金属的物理和化学作用，在模具表面产生的腐蚀现象。热锻模腐蚀部位通常在型腔内的局部区域。除了冲蚀外，在液态金属与模具表面直接接触的部位也会产生侵蚀及熔蚀，通常把它们归纳为冲蚀。压铸模比热锻模容易形成冲蚀。受到冲蚀的模具易导致其早期失效

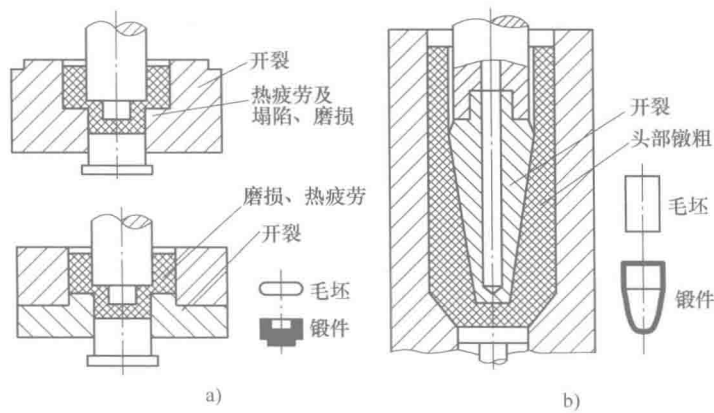


图 1-2 几种热作模具常见的失效形式
a) 热冲压凹模 b) 热冲孔冲头

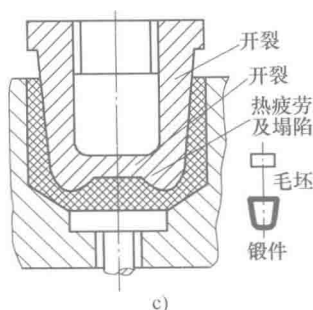


图 1-2 几种热作模具常见的失效形式（续）

c) 热挤压冲头

1.6 塑料模具的失效形式及原因

塑料模具主要包括热固性塑料模具和热塑性塑料模具。前者工作温度一般为 $160 \sim 300^{\circ}\text{C}$ ，承受的工作压力为 $300 \sim 800\text{MPa}$ ，型腔容易产生磨损和腐蚀失效；后者工作温度为 150°C 以下，承受的工作压力为 $300 \sim 600\text{MPa}$ ，磨损没有前者严重，但部分塑料在加热熔融状态下能够分解出腐蚀性气体，对型腔有较大的压力和腐蚀性。塑料模具的主要失效形式有塑性变形、断裂、表面腐蚀、疲劳和热疲劳、表面磨损失效等，见表 1-4。图 1-3 所示为塑料模具型腔的塑性变形失效。

表 1-4 塑料模具的失效形式及原因

失效形式	内 容
塑性变形	塑性变形是指塑料模具在持续受热、受压的作用下，发生局部塑性变形而失效。其原因主要是：所采用模具的材料强度与韧性不足；模具超载使用；模具型腔表面的硬化层过薄，变形抗力不足；模具回火不足；因工作温度高于回火温度而使模具发生软化，从而引起表面起皱、凹陷、麻点、棱角塌陷（堆塌）等
断裂	由于塑料模具形状复杂，存在许多棱角、薄壁等部位，在模具工作时易产生应力集中，当这些部位的应力值超过模具材料的断裂强度时，就会发生断裂失效。另外，合金工具钢制作的塑料模具回火不充分时，使用中也容易发生断裂失效
表面腐蚀	表面腐蚀是由于热固性塑料中的固体填料及一些热塑性塑料中存在氯、氟等元素，受热分解析出 HCl 、 HF 等强腐蚀性气体，侵蚀模具型腔表面，加剧其磨损失效。表面腐蚀会造成模具型腔表面质量下降及尺寸超差，降低模具寿命
表面磨损	热固性塑料对模具表面的严重摩擦，使模具表面产生划伤（拉毛），影响压制件的外观质量，经多次抛光修复后，因型腔尺寸超差而失效；热固性塑料中含有的固体添加剂也会加剧对模具型腔的磨损，不仅使型腔表面的表面粗糙度值迅速升高，而且还会使模具型腔尺寸超差；当模具选用的材料与热处理不合理，塑料模具的型腔表面硬度较低，也会使模具耐磨性变差
疲劳和热疲劳	塑料模具在工作过程中因承受循环的机械载荷作用，使模具的型腔表面承受脉动拉应力作用，从而引起模具的破坏称为疲劳失效；塑料模具在服役过程中还承受循环的热载荷作用，型腔表面在反复的受热和冷却条件下可导致模具型腔应力集中处萌生热疲劳裂纹，再加上模具型腔表面上的脉动拉应力，使热疲劳裂纹向纵深扩展，最终导致模具断裂

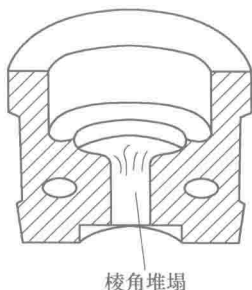


图 1-3 塑料模具型腔的塑性变形失效

1.7 模具失效分析实例

1.7.1 冷作模具失效分析实例

实例 Cr12MoV 钢冲裁模线切割开裂问题分析

(1) 原因分析 某冲裁模用于加工一汽“大众”A4与“捷达”5V踏板机构总成等产品。该冲裁模在线切割加工时，经常发生模具开裂（见图1-4）问题。经过分析，该模具线切割开裂原因主要是：内部存在淬火残余内应力、材料韧性低。当模具体积较大时，模具经热处理后会产生内应力（表面为拉应力，内部为压应力），当两种内应力相互抵消而保持内应力平衡状态时，不易使模具开裂；而模具在线切割加工时，拉应力增大，将破坏其内应力平衡，加上高碳钢模具材料韧性低，则易使模具开裂。统计发现，此种情况多发生在模具厚度超过50mm时。

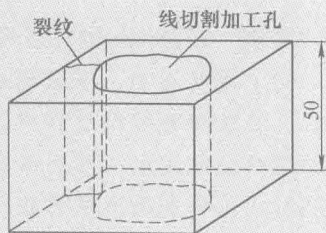


图 1-4 Cr12MoV 钢冲裁模线切割开裂示意

(2) 对策

1) 选用合理的淬火冷却方式。在满足技术要求的前提下，尽量缓慢冷却，如采取风冷、空冷、分级和等温淬火的冷却方式，不要直接用油冷却，从而降低淬火残余内应力。

2) 提高回火温度。为了消除残余内应力，提高材料韧性，在模具材料具有很好的回火稳定性前提下，回火温度控制在360℃以上，宜采用500℃回火。对于Cr12MoV、DC53等具有二次硬化的材料，若回火温度太低，在模具线切割加工前进行磨削加工时，也容易产生磨削裂纹。对此，可将传统冲裁模硬度要求58~62HRC降低为55~58HRC，尤其对大型复杂模具，依据工作载荷大小选取，载荷大的取下限。通过采取以上措施，经磁测应力测试，模具的残余内应力基本消除。

3) 改变加工工艺过程。在模具淬火前预先钻通孔，并用带锯或铣刀将孔连接起来（见图1-5a），即可避免模具在线切割加工时产生畸变和开裂；或者在淬火前预先留出30~50mm厚的刃口（见图1-5b），在热处理时可减少部分应力，则在线切割加工时能够避免模具开裂。

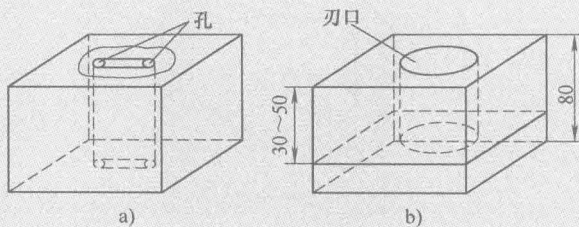


图 1-5 改变加工工艺过程示意

a) 预先钻孔 b) 预先留出刃口

4) 选用合适模具材料。优选模具钢材，如采用电渣重熔 Cr12MoV，或者日本大同公司的 DC53、奥地利百禄的 K340 等。

5) 采用真空热处理工艺。Cr12MoV 钢模具经 $1020^{\circ}\text{C} \times 1.5t^{\ominus}$ min 真空加热后，气冷至 70°C 左右，及时进行回火，回火温度为 $360 \sim 400^{\circ}\text{C}$ ，保温 2h，回火 2 次，出炉风冷至室温。对于大中型模具（截面尺寸 50mm 以上）必须回火 2~3 次。

1.7.2 热作模具失效分析实例

实例 5CrNiMo 钢制摆辗成形模失效分析

(1) 原因分析 某摆辗成形模凸模（见图 1-6），用于设计最大压力为 12500kN 摆辗机上。在该模具服役过程中，主要失效形式有凸模（工作）表面热疲劳和凸模（工作）表面环状波纹变形。模具在生产 300 件产品时，明显可见表面热疲劳；模具在生产 800 件产品时，工作表面出现明显的环状波纹变形。

通过分析发现，生产中为了防止热锻模型腔表面发生高温回火而导致硬度降低，在每加工一件产品后都要进行喷水冷却，这种冷热交替方式，使热锻模型腔表面在交变热应力的作用下产生热疲劳。模具经过一段时间工作后，表面强度降低，最终产生环状波纹变形。

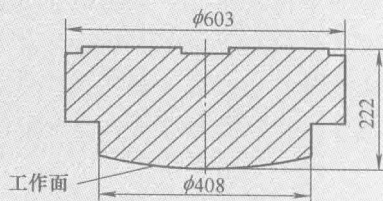


图 1-6 摆辗成形模凸模简图

(2) 对策 通过调整热处理工艺，改善模具组织，提高材料性能。具体改进工艺如下：

1) 淬火前增加正火工序。淬火前增加 910°C 正火工序（见图 1-8），其目的是细化原始组织和碳化物，为下一步降低淬火温度做好组织准备。

2) 亚温淬火。原热处理工艺（见图 1-7）淬火温度为 860°C ，淬火组织以针状马氏体为主，材料的断裂韧性不足，对此采用 770°C 淬火 + 500°C 回火的强化处理工艺（见图 1-8）， 770°C 是 5CrNiMo 钢的临界温度（ A_{c3} ），奥氏体刚形成，晶粒细小，碳含量低，淬火后可得到较多的低碳板条状马氏体，其中有些细小的铁素体，但由于数量少且分布均匀，故对强度影响不大，但却提高了热锻模的韧性。由于晶粒细化，晶界数量增多，使微

$\ominus$ t 为模具有效壁厚，以 mm 计，后同。

裂纹扩展受到较大阻力。

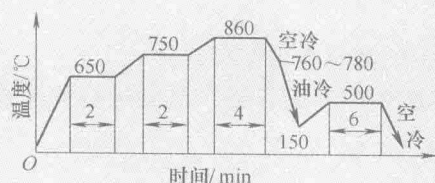


图 1-7 原热处理工艺曲线

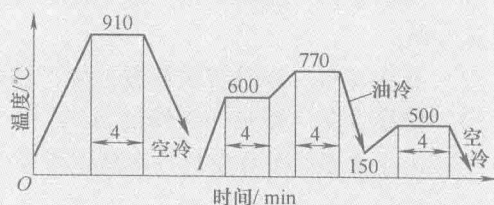


图 1-8 改进热处理工艺曲线

(3) 模具寿命 经上述工艺处理后, 模具寿命显著提高, 平均一副模具已能摆辗 5000 件。

1.7.3 塑料模具失效分析实例

实例 T10A 钢线圈架塑料压注模的失效分析

(1) 工作条件与加工流程 某线圈架塑料压注模 (见图 1-9) 工作压力大于 250MPa, 工作温度高于 200℃。模具材料为 T10A, 其加工流程为: 下料→锻造→球化退火→切削加工→淬火+低温回火→磨削加工→抛光→装配等。模具热处理后的硬度为 60~62HRC。

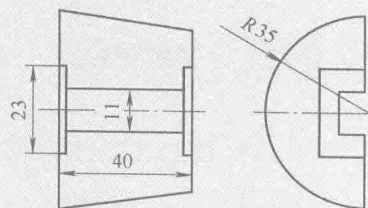


图 1-9 线圈架塑料压注模简图

(2) 失效分析 该模具寿命在 2000 件以下, 其主要的失效形式为型腔表面拉毛 (划伤) 和棱边塌陷等。对失效模具进行硬度检测发现, 型腔表面与棱边处的硬度为 56~58HRC, 表明模具在使用过程中有一定的硬度降低, 其金相组织为回火马氏体+粒状渗碳体+少量残留奥氏体。

通过对模具的硬度降低分析来看, 模具的服役温度高于回火温度 (200℃), 同时也与模具的回火不足有关, 其使模具在服役过程中受热后继续回火, 导致马氏体的分解与残留奥氏体的转变, 在压力作用下产生“相变超塑性”流动, 引起模具型腔表面拉毛与棱边的塌陷。

(3) 对策与效果

1) 适当提高模具的最终回火温度, 如采用 250~270℃回火, 即高于模具的工作温度 (200℃)。同时, 增加回火保温时间。

2) 采用两段回火工艺。在保证模具较高的硬度前提下改善材料的韧性, 采用两段回火工艺: 200℃×1.5h×1次+260℃×1.5h×1次, 模具表面硬度为 56~58HRC, 模具寿命可达 1.8 万件。

1.8 模具寿命及其影响因素

1.8.1 模具寿命

模具寿命是一定期限内模具材料性能、模具设计与制造水平、模具热处理技术以及使用