

普通高等教育“十三五”规划教材



Mold Materials

模具材料

第②版

高为国 © 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材

模具材料



第2版

主 编 高为国

副主编 楼 易 郭明康

参 编 郝晨声 翟红雁 林文松 马红萍

主 审 刘舜尧



机 械 工 业 出 版 社

本书是由普通高等教育应用型本科材料成形及控制工程专业（模具方向）规划教材编审委员会组织编写的系列教材之一。全书共七章，内容包括模具失效与使用寿命、模具材料概述、冷作模具材料及热处理、热作模具材料及热处理、塑料模具材料及热处理、其他模具材料及热处理以及模具表面处理技术。全书力求理论联系实际，系统介绍各类模具的失效及使用寿命、常用模具材料的专业知识和热处理工艺、模具的常用表面处理技术等内容，突出国内外模具方面的新材料、新工艺、新技术。本书内容丰富，实用性强，反映了近年来国内外在模具方面的最新研究成果和主要发展方向。

本书可作为普通高等教育应用型本科材料成形及控制工程专业（模具方向）的教材，也可供从事模具设计、制造、热处理等工作的有关工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

模具材料/高为国主编. —2版. —北京：机械工业出版社，2017.10
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-111-57197-1

I. ①模… II. ①高… III. ①模具-工程材料-高等学校-教材 IV.
①TG76

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 146458 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：冯春生 责任编辑：冯春生 章承林

责任校对：樊钟英 封面设计：张 静

责任印制：李 昂

北京昌宝彩色印刷有限公司印刷

2017 年 9 月第 2 版第 1 次印刷

184mm×260mm·9 印张·217 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-57197-1

定价：25.00 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

服务咨询热线：010-88379833

读者购书热线：010-88379649

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

金书网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

第2版前言

本书是普通高等教育应用型本科材料成形及控制工程专业（模具方向）规划教材，是根据本专业的人才培养定位和“模具材料”课程的教学基本要求编写的。自本书第1版出版以来，由于其内容编排合理，文字叙述简洁，图表选用适当，紧密联系实际，有较强的实用性，深受广大师生和工程技术类读者的欢迎。但随着教育教学改革的不断深入和模具材料的不断发展，原书中的部分内容也需要进行更新与完善。因此，在广泛收集各类使用意见和建议的基础上，特邀请部分专家和相关编者进行了本次修订工作。

本次修订的主要内容有：根据相关国家标准，进一步规范了相关概念、名词术语、材料分类等方面的描述，修改和完善了模具材料的牌号表示方法、性能指标要求及其典型应用，调整并优化了书中文字与图表之间的对应关系，修改并更新了图表中的相关信息，规范了模具材料相关性能指标的代表符号及其单位，删减或合并了前后章节中具有重复倾向的相关内容，增补了附录部分。其他部分的文字叙述只在原书内容的基础上进行了局部的调整与完善，并保留了原书的内容结构与编写风格。

本书的编写人员有：湖南工程学院高为国（绪论、第一章）、浙江科技学院马红萍（第二章）、江汉大学郭明康（第三章）、浙江科技学院楼易（第四章）、黑龙江工程学院郝晨声（第五章）、上海工程技术大学林文松（第六章）、北华航天工业学院翟红雁（第七章）。全书由高为国担任主编，楼易、郭明康担任副主编，中南大学刘舜尧教授担任主审。

在本书的修订过程中，借鉴了国内部分普通高等院校的教学改革经验，参考了部分国内外的相关教材、学术著作和文献资料，得到了众多应用型本科院校教师的大力支持与帮助，在此特向相关人员和单位表示衷心的感谢！

由于编者的实践经验和编写水平有限，书中不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

第1版前言

本书是根据2003年1月普通高等教育应用型本科材料成形及控制工程专业（模具方向）规划教材编审委员会上海教材研讨会所拟订的大纲编写的。本书可作为普通高等教育应用型本科材料成形及控制工程专业的教材，也可供从事模具设计、制造、热处理等工作的有关工程技术人员参考。

随着我国模具工业的迅速发展，对模具的需求量日益扩大，对模具质量、使用寿命的要求也越来越高。合理地选择模具材料、制订正确的热处理工艺、选取适当的表面处理方法、研究和开发新型模具材料等都是十分必要的。而作为普通高等教育应用型本科材料成形及控制工程专业（模具方向），更应该注意理论与实际的结合，加强工程实践能力的培养。随着模具材料和热处理工艺的发展，涌现出了许多新材料、新工艺、新技术，独立设置“模具材料”课程，既符合目前普通高等教育应用型本科材料成形及控制工程专业的教学需要，又充分体现了对普通高等教育应用型本科教学内容“厚基础、宽口径、重应用”的实际要求。

本书共分为七章，分别介绍了模具失效与使用寿命、模具材料概述、冷作模具材料及热处理、热作模具材料及热处理、塑料模具材料及热处理、其他模具材料及热处理以及模具表面处理技术等内容。书中所含内容丰富，文字表达通俗易懂，深入浅出，实用性强，集中反映了近年来国内外模具材料、热处理工艺及表面处理技术方面的研究和应用成果。

参加本书编写的有湖南工程学院高为国（绪论、第一章）、浙江科技学院马红萍（第二章）、江汉大学郭明康（第三章）、浙江科技学院楼易（第四章）、黑龙江工程学院郝晨声（第五章）、上海工程技术大学林文松（第六章）、北华航天工业学院翟红雁（第七章）。全书由高为国担任主编，楼易、郭明康担任副主编，中南大学刘舜尧教授担任主审。

本书是普通高等教育应用型本科材料成形及控制工程专业“模具材料”课程的规划教材，在编写过程中充分吸收了国内多所高等院校近年来的教学经验，得到了众多兄弟院校的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢。

由于作者的编写水平和实践经验有限，书中缺点和不当之处在所难免，敬请有关专家和广大读者批评指正。

编 者

目 录

第 2 版前言	
第 1 版前言	
绪论	1
第一章 模具失效与使用寿命	3
第一节 模具的失效分析	3
第二节 典型模具的服役条件及失效形式	11
第三节 模具的使用寿命及其影响因素	16
习题与思考题	20
第二章 模具材料概述	21
第一节 模具材料的分类	21
第二节 模具材料的性能、选用与发展	23
习题与思考题	35
第三章 冷作模具材料及热处理	36
第一节 冷作模具材料的主要性能要求	36
第二节 冷作模具材料及热处理	40
第三节 冷作模具材料及热处理工艺的选用	
实例	52
习题与思考题	55
第四章 热作模具材料及热处理	56
第一节 热作模具材料的主要性能要求	56
第二节 热作模具材料及热处理	57
第三节 热作模具材料及热处理工艺的选用	
实例	71
习题与思考题	76
第五章 塑料模具材料及热处理	77
第一节 塑料模具材料的主要性能要求	77
第二节 塑料模具材料及热处理	81
第三节 塑料模具材料及热处理工艺的选用	
实例	90
习题与思考题	96
第六章 其他模具材料及热处理	97
第一节 玻璃模具材料及热处理	97
第二节 陶瓷模具材料及热处理	105
习题与思考题	107
第七章 模具表面处理技术	108
第一节 模具表面处理技术概述	108
第二节 模具表面的化学热处理技术	109
第三节 模具表面的涂镀技术	115
第四节 模具表面的气相沉积技术	121
第五节 模具表面的其他处理技术	125
习题与思考题	130
附录	131
附录 A 国内外（地区）常用模具钢牌号	
对照表	131
附录 B 国内市场常用的进口模具钢	132
附录 C 国内外 K 类和 G 类硬质合金牌号	
对照表	137
参考文献	138

绪 论

一、模具材料的作用和地位

模具是材料成形加工中的重要工艺装备，是机械、电子、轻工、国防等工业生产的重要基础之一。利用模具可以实现少、无切削加工，从而提高生产效率、降低成本。由于模具成形具有高产、优质、低耗等特点，因而其应用十分广泛。其中，模具成形占飞机、汽车、拖拉机、机电产品成形加工的 60%~70%，占家电产品、塑料制品成形加工的 80%~90%。

随着模具工业的迅速发展，对模具的使用寿命、加工精度等提出了更高的要求。模具材料性能的好坏和使用寿命的长短，将直接影响加工产品的质量和生产的经济效益。而模具材料的种类、热处理工艺、表面处理技术是影响模具使用寿命极其重要的因素，所以世界各国都在不断地采用研究和开发新型模具材料、改进模具的热处理工艺、选用适当的表面处理技术、合理地设计模具结构、加强对模具的维护等措施，来稳定和提高模具的使用寿命，防止模具的早期失效。

模具材料的使用性能将直接影响模具的质量和使用寿命。模具材料的工艺性能将主要影响模具加工的难易程度、加工质量和生产成本。为此，应合理选择模具材料，改进热处理工艺和表面处理工艺，大力推广模具生产中的新材料、新工艺和新技术。

二、模具材料的应用与发展

在新中国成立以来的 60 多年中，我国的模具工业发展迅速，现已成为独立的工业体系，特别是 1989 年国务院在《当前产业政策要点的决定》中将模具列为“机械工业技术改造序列的第一位”以来，在模具材料的研制与开发、模具的热处理工艺、模具的表面处理技术等各方面都取得了巨大的成就。目前，我国的模具钢产量已跃居世界前列，基本满足了模具制造业的需要，已逐步发展成为国民经济中重要的基础工业。

在冷作模具钢方面开发出了一批性能优良的新钢种，如 6Cr4W3Mo2VNb（65Nb）、6CrNiMnSiMoV（GD）、7Cr7Mo2V2Si（LD）、9Cr6W3Mo2V2（GM）、Cr8MoWV3Si（ER5）钢等。这些模具钢具有较高的强韧性、耐磨性以及良好的综合工艺性能，可用于冷挤压模、冷镦模、冷冲模、切边模等冷作模具，并使其使用寿命成倍提高。

在热作模具钢方面，结合我国矿产资源研制和开发了 3Cr3Mo3W2V（HM1）、3Cr3Mo3VNb（HM3）、5Cr2W5Mo4V（RM2）、4Cr3Mo3W4VNb（GR）、4Cr5MoSiV1（H13）、4Cr3Mo2NiVNbB（HD）、5Cr4Mo3SiMnVAl（012Al）、6Cr4Mo3Ni2WV（CG2）钢等。这些钢具有高的热稳定性、高温强度、耐磨性及抗热疲劳性，常用于制造热挤压模、热锻模、热冲压模、热镦模、压铸模等，其使用寿命比 5CrNiMo 和 5CrMnMo 钢提高数倍。

在塑料模具钢研究方面，科技人员相继开发了 Y55CrNiMnMoV（SM1）、Y20CrNi3AlMnMo（SM2）、5CrNiMnMoSCa、06Ni6CrMoVTiAl（06Ni）、25CrNi3MoAl、0Cr16Ni4Cu3Nb（PCR）、

10Ni3MnMoCuAl (PMS) 钢等。这些钢具有适当的强韧性, 热处理工艺简单, 变形小, 易于切削加工, 常用于挤塑模、压塑模、注射模、吹塑模等模具的生产。

用于制造模具的普通硬质合金和钢结硬质合金材料正在走向成熟, 目前已在冷冲裁模、拉丝模、冷镦模、无磁模等模具上广泛应用。与传统模具材料相比, 其使用寿命大幅度提高。如采用钢结硬质合金制造的 M12 冷镦模, 使用寿命在 100 万次以上; 采用普通硬质合金材料制造的硅钢片高速冷冲裁模, 使用寿命可达上亿次。

在模具的表面处理技术上也有了很大的发展, 除了有传统的渗碳、渗氮、氮碳共渗、渗硫、渗硼、渗金属等工艺被广泛使用外, 还发展了气相沉积技术、热喷涂技术、激光表面处理技术、离子注入技术、电子束表面处理技术等, 有效地提高了模具的性能和使用寿命。

虽然我国的模具材料和模具表面处理技术有了较大发展, 但与发达国家相比仍存在着一定的差距, 模具材料的生产和使用水平还有待进一步提高。

我国模具材料及其处理技术的发展前景十分广阔。应积极开发和引进高性能的新型模具材料, 增加模具钢材的品种、规格, 形成符合我国资源情况的系列化和标准化的模具材料, 以满足不同模具的使用性能和寿命的要求; 重视模具的设计、选材、加工、处理、检验等全过程控制, 不断降低生产成本, 提高经济效益; 加强对模具的新技术、新材料、新工艺的研究, 发展模具的成套加工精密设备, 提高模具生产的整体水平。

三、本课程的性质、教学目标和基本要求

模具材料是普通高等教育应用型本科材料成形及控制工程专业(模具方向)的一门专业课程, 虽然学生已经学过一些工程材料方面的知识, 对材料及热处理、材料成形加工等有了初步的了解, 但缺少对模具选材、加工等综合分析方法的训练, 缺少模具新材料、新工艺、新技术方面的知识, 与模具设计、制造工艺之间的联系不够紧密; 同时, 由于模具材料种类繁多, 性能各异, 模具的使用性能和使用寿命都与合理选择模具材料、确定合适的热处理工艺、采用适当的表面处理技术等密切相关。因此, 编写该教材的目的, 就在于使学生能够较全面地了解各种模具材料的性能、热处理工艺、表面处理技术, 并且根据模具的具体服役条件、模具结构合理地选择模具材料, 正确地制订模具的生产工艺, 从而提高模具的使用寿命, 降低生产成本, 提高产品的经济效益。

通过本课程的学习, 希望学生能达到如下基本要求:

- 1) 了解常见模具的失效分析方法。
- 2) 熟悉常用的模具材料、热处理工艺及模具的表面处理技术。
- 3) 明确模具材料、热处理工艺及表面处理技术与模具使用性能、使用寿命、生产成本、经济效益之间的关系。
- 4) 掌握常用的冷作模具材料、热作模具材料、塑料模具材料以及其他模具材料的牌号、主要成分、性能特点、工艺特点、主要用途等, 并能合理地选择模具材料及热处理方法。
- 5) 熟悉各类常见的模具表面处理工艺, 并能进行合理选用。

本课程的理论性和实践性都很强, 而钢的热处理原理与工艺、合金钢等知识是其重要的理论基础。因此, 在学习本课程时, 应紧密结合以上两部分内容进行深入学习。其次, 还应注意实践知识的学习, 尽可能多地参观一些模具的生产和使用厂家, 增加专业感性认识。同时将模具材料与其他相关的专业课程结合起来, 认真分析模具的生产工艺、设计方法、失效形式及原因等, 以便更好地学好本课程。

模具失效与使用寿命

模具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（如刃磨、抛磨等）使其重新服役的现象。模具失效既有达到预定寿命的正常失效，也有远低于预定寿命的非正常失效（早期失效）。正常失效比较安全，而非正常失效则不然，常常造成人身或设备的恶性事故，并造成经济上的损失，因此应尽量加以避免。通过对模具失效进行分析，找出模具失效的具体原因，则可以采取相应的措施加以改进，以提高模具的使用寿命。

模具使用寿命（也称为模具正常寿命）是指模具在正常失效前生产出合格产品的数目，若其在使用过程中经过多次修模，则模具的使用寿命为首次寿命与各次修模寿命的总和。模具寿命是在一定时期内模具材料性能、模具设计与制造、模具热处理工艺、模具使用与维护等各项指标的综合体现，在一定程度上反映了一个国家或地区的冶金、机械制造等工业水平。

第一节 模具的失效分析

模具的失效分析是指对已经失效的模具进行失效过程的分析，并研究和分析模具失效的原因以及影响模具失效过程的各种因素。模具的失效分析结果可以为优化模具结构设计、正确制订模具制造工艺、合理选用模具材料、改进模具热处理工艺以及研发模具的新材料、新技术、新工艺等提供数据型基础依据。

要研究模具的失效问题，就要了解各类模具的服役条件和失效形式，以便分析其失效原因，合理地选择模具材料，改进模具的设计、加工和热处理工艺，提出预防或推迟失效的措施，不断提高模具的使用寿命。

一、模具的损伤与失效

模具在服役中产生过量塑性变形、表面损伤、开裂与断裂、冷热疲劳、腐蚀等损伤破坏后，将会失去原有功能，以致不能正常服役，这些现象均称为失效。如冷冲裁模刃口的过度磨损或崩刃，热挤压冲头的墩粗变形，热锻模出现冷热疲劳裂纹等均属于失效。

模具的失效一般都存在一个变化过程，如断裂失效就可能经历表面产生缺陷、形成表面微裂纹、裂纹扩展、最后断裂的变化过程。模具在使用过程中，出现变形、微裂纹、腐蚀等现象但没有立即丧失服役能力的现象称为模具损伤。模具在工作时，不同部位承受不同的作用力和不同的温度变化，可能同时出现多种不同的损伤形式，各种损伤形式之间又会相互渗透、相互促进、不断累积。例如，磨损沟痕可能成为疲劳裂纹的萌生源，加快疲劳裂纹的萌生速度，若磨损沟痕深而尖，则其本身可能成为一次断裂的起裂点；在模具表面出现冷热疲劳裂纹后，表面粗糙度严重恶化，会进一步加剧模具的磨损；此外，在冷热疲劳裂纹的底

部,会由于应力集中的出现而加速机械疲劳裂纹的萌生,加速疲劳断裂。显然,损伤是模具破坏的起源,损伤的累积可导致模具的失效。

模具失效一般可分为**非正常失效**(也称早期失效)和**正常失效**两类。模具未达到一定工业技术水平公认的使用寿命而产生的失效称为非正常失效。非正常失效一般发生在模具使用的初期,主要是由模具设计和制造过程中产生的缺陷引起的,失效出现的概率很高,且随着模具使用期限的延长而迅速降低。

在模具使用一定期限后,由缓慢塑性变形、均匀磨损或疲劳破坏而出现的失效称为正常失效。模具经过使用初期的考验后即进入正常的使用阶段。在理想的情况下,模具未达到正常使用寿命就不会发生失效。但由于工作条件的变化、操作者的使用水平不同、管理者的失误等原因而造成的某些损伤,也将导致模具的失效,但这种失效的概率很低。在模具经过了长期使用后,由于使用损伤的大量累积,致使模具发生失效,即达到了模具的使用寿命极限。在模具的使用过程中,注意做好经常性的检查、维护和保养工作,可有效地推迟正常失效的到来,有助于提高模具的使用寿命。

二、模具失效的分类

模具失效是模具在使用过程中所出现的一种正常现象,但由于人们研究模具失效的目的不同,对模具失效的分类方法也有所不同,除了前面已经提到的非正常失效和正常失效以外,还有以下常见的分类方法。

(1) **过量变形失效** 主要包括过量弹性变形失效、过量塑性变形(如局部塌陷、局部墩粗、型腔胀大等)失效、蠕变超限等。

(2) **表面损伤失效** 主要包括表面磨损(如黏着磨损、磨料磨损、氧化磨损、疲劳磨损等)失效、表面腐蚀(如点腐蚀、晶间腐蚀、冲刷腐蚀、应力腐蚀等)失效、接触疲劳失效等。

(3) **断裂失效** 主要有塑性断裂失效、脆性断裂失效、疲劳断裂失效、蠕变断裂失效、应力腐蚀断裂失效等。

三、模具的失效机理分析

实际生产中使用的模具种类繁多,工作状态差别很大,损伤形式和损伤部位各不相同,因而失效机理也有差别。

(一) 磨损失效

由于模具表面的相对运动,而使模具的接触表面逐渐失去物质的现象称为磨损。模具在工作中会与坯料的成形表面相接触,产生相对运动而造成磨损,当这种磨损使模具的尺寸发生变化或使模具表面的状态发生改变而使其不能正常工作时,则称为**磨损失效**,一般包括**正常磨损失效**和**非正常磨损失效**两种。

正常磨损失效是指模具的工作部位与零件材料之间产生的均匀摩擦磨损,而使模具工作部位的形状、尺寸、精度等发生变化所形成的失效;非正常磨损失效是指在局部外力或环境因素作用下,模具工作部位与零件材料之间发生咬合,引起模具工作部位的形状、尺寸、精度等发生突变而导致的失效。

磨损有很多种类型,按磨损机理不同可分为磨粒磨损、黏着磨损、疲劳磨损、气蚀和冲

蚀磨损、腐蚀磨损等。

1. 磨粒磨损

工件表面的硬凸出物和外来硬质颗粒在加工时刮擦模具表面，引起模具表面材料脱落的现象称为磨粒磨损。磨粒磨损的机理如图 1-1 所示。

当磨粒与工件和模具表面相接触时，作用在磨粒上的作用力可分为与模具表面平行和垂直的两个分力，垂直分力使磨粒压入金属表面，平行分力使磨粒与金属表面产生相对切向运动，从而构成了一个完整的磨粒磨损过程。采用模具成形时，通常模具硬度比工件高，则磨粒首先被压入工件内，当模具与工件产生相对运动时刮擦模具，从模具表面切下细小的碎片，形成磨粒磨损。当模具表面存在凹坑、沟槽等缺陷时，磨粒可能会嵌在其中或黏结在模具的表面上随模具一起运动，磨粒将会耕犁或犁皱工件表面，影响工件的加工质量。

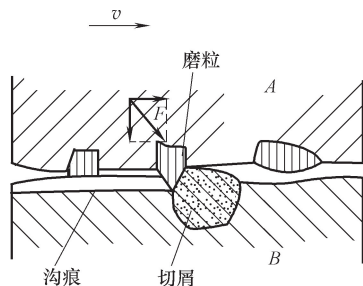


图 1-1 磨粒磨损的机理

影响磨粒磨损的因素主要有磨粒的形状和大小、磨粒硬度与模具材料硬度的比值、模具与工件的表面压力、工件厚度等。磨粒的外形越尖，则磨损量越大；磨粒的尺寸越大，模具的磨损量越大，但当磨粒的尺寸达到一定数值后，磨损量则会稳定在一定的范围内；磨粒硬度与模具材料硬度的比值小于 1 时，磨损量较小，比值增加到 1 以上时，磨损量急剧增加，而后逐渐保持在一定的范围内；随着模具与工件表面压力的增加，磨损量会不断增加，当压力达到一定数值后，由于磨粒的尖角变钝而使磨损量的增加得以减缓；工件厚度越大，磨粒嵌入工件的深度越深，对模具的磨损量减小。

通过上面的分析可知，提高模具材料的硬度，可以提高抵抗磨粒嵌入的能力，有利于减少模具的磨损量；对模具进行表面耐磨处理可以在保证模具具有一定韧性的条件下，提高其耐磨损性能；在模具的使用过程中，及时清理模具和工件表面上的磨粒，可以减少磨粒侵入的概率，能有效地减少模具的磨损。

2. 黏着磨损

由于模具与工件表面的凹凸不平，使其在相对运动中造成黏着点发生断裂而使模具材料产生剥落的现象称为黏着磨损。黏着磨损的机理如图 1-2 所示。

由于模具和工件表面存在一定的不平度，其中只有少数微观凸起的部分相接触，峰顶承受的压力很大（有时会高达 5000MPa），因而导致模具局部表面的塑性变形，并且由于塑性变形和摩擦而产生很高的热量，破坏了模具材料表层的润滑膜和氧化膜，造成新鲜模具材料表面的暴露，而与工件材料产生原子之间的相互吸引和相互渗透，造成材料之间的局部黏着。随着模具和工件之间相对运动的进行和接触部分的迅速冷却，峰顶金属相当于进行了一次局部淬火处理，黏着部分的金属强度与硬度迅速提高，形成淬火裂纹，并在运动中造成撕裂和最后剥落，形成黏着磨损。

影响黏着磨损的主要因素有材料性质、材料硬度、表面压力等。根据金属的强度理论可知，塑性材料的破坏取决于切应力，脆性材料的破坏取决于正应力，而在表面接触中，最大正应力作用在表面上，最大切应力出现在离表面一定深度处。因而可知，材料的塑性越高，则黏着磨损越严重。相同的金属或者互溶性大的金属形成摩擦副时，黏着效应明显，易产生黏着磨损。从材料的组织结构来看，具有多相组织的金属材料，由于其强化效果因而比单相

金属材料具有更高的抗黏着磨损能力。模具材料与工件材料的硬度越接近,磨损越严重。随着表面压力的增大,黏着磨损量将不断增加,但达到某一范围后会逐渐趋缓。

通过以上讨论可知,选择与工件材料互溶性小的模具材料,可减少两材料之间的溶解性,降低黏着磨损量;合理选用润滑剂,形成润滑油膜,可以防止或减少两金属表面的直接接触,有效地提高其抗黏着磨损能力;采用多种表面热处理方法,改变金属摩擦表面的互溶性质和组织结构,尽量避免同种类金属相互摩擦,可降低黏着磨损。

3. 疲劳磨损

在循环应力作用下,两接触面相互运动时产生表层金属疲劳剥落的现象称为疲劳磨损。在模具和工件的相对运动中,会承受一定的作用力,模具的表面和亚表面存在多变的接触压力和切应力,这些应力反复作用一定的周期后,模具表面就会产生局部的塑性变形和冷加工硬化现象。在那些相对薄弱的地方,会由于应力集中而形成裂纹源,并在外力的作用下扩展,当裂纹扩展到金属表面或与纵向裂纹相交时,便形成磨损剥落。

影响疲劳磨损的因素主要有材料的冶金质量、材料硬度、表面粗糙度等。钢中的气体含量,非金属夹杂物的类型、大小、形状和分布等,都是影响疲劳磨损的重要因素,特别是脆性较大和带有棱角的非金属夹杂物的存在,破坏了基体的连续性,在循环应力的作用下,会在夹杂物的尖角处形成应力集中,并因塑性变形引起冷加工硬化而形成疲劳裂纹。材料硬度的影响比较特殊,一般情况下硬度提高,可以增加模具表面的抗疲劳能力,但硬度过高时又会加快疲劳裂纹的扩展,加速疲劳磨损。材料的表面粗糙,会使接触应力作用在较小的面积上,形成很大的接触应力,加速疲劳磨损,因此减小模具表面粗糙度值可以提高模具的抗磨损能力。

为了更好地提高模具的抗疲劳能力,应选择合适的润滑剂,用以润滑模具与工件的表面,避免或减少模具与工件材料之间的直接接触,降低接触应力,减少疲劳磨损量。另外,可以在常温状态下,通过对模具表面进行喷丸、滚压等表面技术处理,使模具的工作表面因受压变形而产生一定的残余压应力,有利于提高模具的抗疲劳磨损能力。

4. 其他磨损

除上述几种主要的磨损形式外,还有**气蚀磨损**、**冲蚀磨损**、**腐蚀磨损**等。

(1) 气蚀磨损 由于金属表面的气泡发生破裂,产生瞬间的高温和冲击作用,使模具表面形成微小麻点和凹坑的现象称为气蚀磨损。

当模具表面与液体相接触并产生相对运动时,在其表面上形成的气泡会流到高压区,当气泡承受的压力超过其内部压力时,便会发生破裂,并在瞬间产生极大的高温和冲击力,作用在模具的局部表面上,经过多次反复作用后,会在模具的近表面处形成疲劳裂纹,扩展后

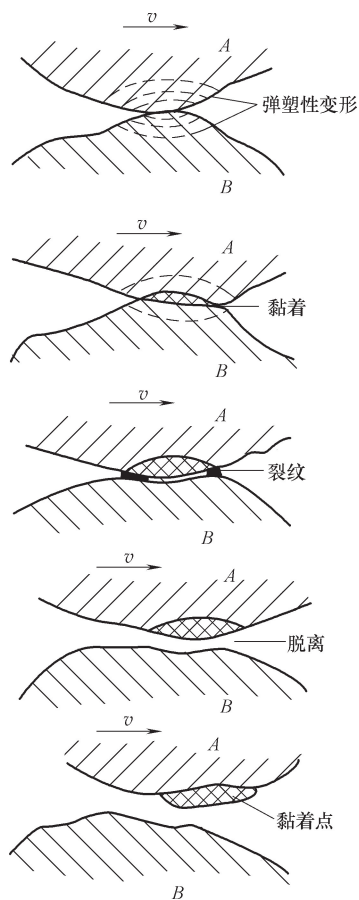


图 1-2 黏着磨损的机理

会导致局部金属脱离模具表面或汽化,形成泡沫海绵状空穴,即气蚀磨损。

(2) 冲蚀磨损 固体和液体的微小颗粒以高速冲击的形式反复落到模具的表面上,使模具表面的局部材料受到损失而形成麻点或凹坑的现象称为冲蚀磨损。

高速冲击模具表面的液体微粒,落下时会产生很高的应力,一般会超过金属材料的屈服强度或强度极限,使模具表面材料发生局部塑性变形或局部断裂。那些速度不高的液体微粒进行反复冲击后,也会使模具表面出现疲劳裂纹,因而形成麻点和凹坑,导致冲蚀磨损的出现。冲蚀磨损的机理如图 1-3 所示。

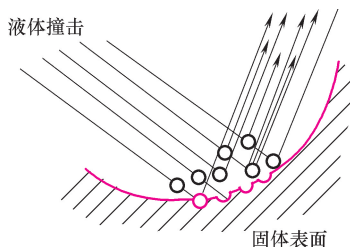


图 1-3 冲蚀磨损的机理

(3) 腐蚀磨损 在工作过程中,模具表面与其周围的环境介质发生化学或电化学反应,以及模具与工件之间的摩擦作用而引起模具表层材料脱落的现象称为腐蚀磨损。

当模具材料与工件材料在一定的环境中产生摩擦时,金属材料便与环境介质产生化学或电化学反应,并形成反应物。在随后的模具与工件之间的相对运动中被磨掉,即形成了腐蚀磨损。

腐蚀磨损经常会发生在潮湿或高温的环境中,特别是在有酸、碱、盐等介质存在的特殊条件下更容易发生。腐蚀磨损的常见形式一般为氧化腐蚀磨损和特殊介质腐蚀磨损。由此可见,模具材料的性质、工作环境介质、温度、湿度等都是影响腐蚀磨损的重要因素。可以通过正确地选用模具材料、合理地改善工作环境等措施来提高模具的耐腐蚀磨损性能。

(二) 断裂失效

模具在工作中出现较大裂纹或部分分离而丧失正常服役能力的现象称为**断裂失效**。模具断裂通常表现为产生局部碎块或整个模具断成几个部分,模具断裂形式如图 1-4 所示。**对于模具来说,断裂是最严重的失效形式**。断裂失效有很多种分类方法,**按照断裂的性质可分为脆性断裂和韧性断裂;按照断裂路径可分为沿晶断裂、穿晶断裂、混晶断裂;按照断裂机理可分为一次性断裂和疲劳断裂等**。由于模具材料多为中、高强度钢,塑性相对较差,断裂时没有或仅有少量的塑性变形产生,因而经常表现为脆性断裂。

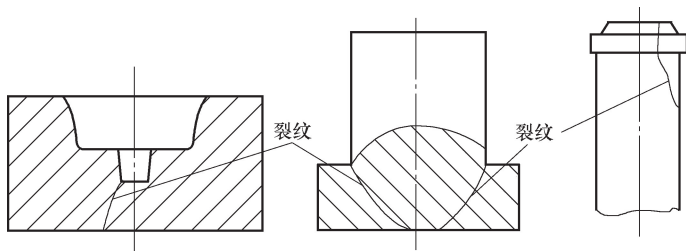


图 1-4 模具断裂形式

1. 一次性断裂

模具在承受很大变形力或在冲击载荷的作用下,产生裂纹并迅速扩展所形成的脆性断裂称为一次性断裂。一次性断裂的断口呈结晶状,根据裂纹扩展路径的走向不同,可将其分为沿晶断裂和穿晶断裂两种。

(1) 沿晶断裂 是指裂纹沿晶界扩展而造成材料脆性断裂的现象。一般情况下晶界处的

键合力高于晶内，只有在晶界被弱化时才会产生沿晶断裂。造成晶界弱化的基本原因有两个，一是材料的性质，二是环境介质或高温的促进作用。晶界是易形成析出相的地方，晶界上的析出相是不连续的，通常呈块状、球状、棒状或树枝状分布，在析出相周围存在微孔，这些微孔在力的作用下经扩展、连通而形成裂纹；杂质元素的原子经常存在于晶界上，会降低晶界的键合能，当晶界上的杂质元素含量达到某一数值时，便会引起沿晶断裂。

一般来说，晶界强度与晶内强度都随温度发生变化，如图 1-5 所示。在某一温度时，晶界强度与晶内强度相等，这一温度称为等强温度。材料温度高于等强温度时易产生沿晶断裂，材料温度低于等强温度时易产生穿晶断裂。

(2) 穿晶断裂 是指因拉应力作用而引起的沿特定晶面的断裂，也称为解理断裂。当模具材料的韧性较差、存在表面缺陷、承受高的冲击载荷时，易产生穿晶断裂。

材料在应力作用下产生局部变形时，某一滑移面上的位错源开始启动，形成一系列的位错，并在切向应力的作用下沿滑移面的某一晶向移动，当遇到晶界、孪晶界、第二相时，便发生位错堆积，引起应力集中，并导致裂纹的萌生。位错堆积示意图如图 1-6 所示。

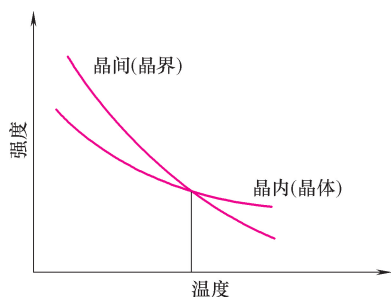


图 1-5 晶界强度、晶内强度与温度的关系

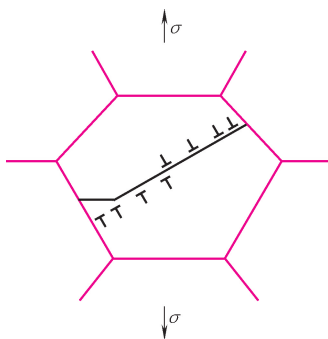


图 1-6 位错堆积示意图

应该指出，材料温度较高时，原子的能量高、活动能力强，位错源容易被启动而释放位错。因此，位错堆积后产生的应力集中，易被临近位错源的启动而松弛或抵消，不易产生穿晶裂纹。在低温下，原子的能量低、活动能力弱，位错堆积后产生的应力集中，难以通过临近位错源的启动而松弛或抵消，易形成穿晶断裂。

2. 疲劳断裂

疲劳断裂是指模具在较低的循环载荷作用下，工作一段时间后，由裂纹缓慢扩展，最后发生断裂的现象。疲劳裂纹总是在应力最高、强度最弱的部位上形成，模具的疲劳裂纹萌生于外表面或次表面，但其形成方式各有不同。当模具内部受力不均匀时，就会在局部范围内出现较大的应力集中，在循环载荷的作用下，裂纹便会在应力集中处最先出现，而在裂纹的前沿形成尖锐的缺口，造成新的应力集中区，并在以后的模具工作过程中，使裂纹不断扩展直到模具发生破坏。

(1) 裂纹的萌生 疲劳裂纹常常在表面不均匀处、晶界、夹杂物和第二相处形成。

模具上的尺寸过渡处、加工刀痕、磨损沟痕等易产生应力集中，在循环应力作用下易产生滑移变形，而出现的变形台阶极易成为疲劳裂纹源。高温下金属材料的晶界强度低于晶内强度，在循环应力作用下，晶界将首先产生变形而形成位错堆积，造成晶界处的应力集中，当应力超过材料的强度极限时，便在晶界处产生开裂形成微裂纹。若在模具材料内存在夹杂

物和第二相,则在循环应力作用下,易在其与基体的界面处产生脱开现象,形成疲劳裂纹。

(2) **裂纹的扩展** 在循环应力的作用下,已形成的裂纹便沿着主滑移面向模具材料内部扩展,此时与拉应力轴呈约 45° 的角度,当遇到晶界时其裂纹扩展位向会稍有改变;当扩展的裂纹遇到夹杂物或第二相等障碍物时,就会转向与拉应力轴相垂直的方向扩展。

影响模具断裂失效的因素主要是模具结构和模具材料。一方面,由于模具成形结构工艺性的要求,在模具零件上会存在截面突变、凹槽、尖角、圆角半径等,正是由于这些部位容易产生应力集中,形成裂纹并导致断裂失效,所以,适当增大模具零件中的圆角半径、减小凹模深度、减少尖角数量、尽量避免截面突变等,均能减少模具零件中的应力集中,降低断裂失效倾向。另一方面,模具材料的冶金质量和加工质量也对模具的断裂失效有较大影响,模具材料的断裂韧度越高,越有利于防止裂纹的萌生及扩展,从而减少模具的断裂失效。

(三) 塑性变形失效

模具在使用过程中,由于产生塑性变形使其几何形状或尺寸发生改变而不能通过修复继续服役的现象称为**塑性变形失效**。塑性变形失效的主要形式有塌陷、墩粗、弯曲等,如图1-7所示。

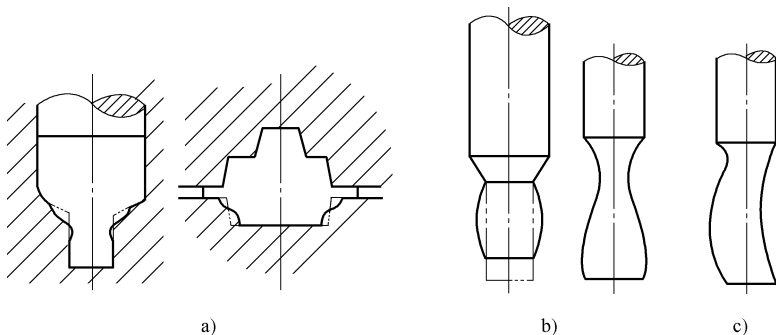


图 1-7 模具塑性变形失效的常见形式

a) 塌陷 b) 墩粗 c) 弯曲

模具在工作时一般要承受很大的不均匀应力,当模具的某些部位所承受的应力超过其工作温度下模具材料的屈服强度时,就会产生塑性变形而造成模具的失效。在不同温度下工作的模具是否会产生塑性变形失效,主要取决于不同温度下模具材料的强度。在室温下工作的模具是否会产生塑性变形失效,主要取决于模具所承受的载荷与室温屈服强度;而在高温下工作的模具是否会产生塑性变形失效,主要取决于模具的工作温度和模具材料的高温强度。

由于模具的受力情况复杂,工作条件苛刻,在使用过程中可能同时出现多种损伤形式,而且各种损伤交互作用,最后形成了一种主要的失效形式。例如,磨损沟痕可能成为裂纹的发源地,由磨损形成的裂纹在应力作用下发生扩展就会产生断裂;模具产生局部磨损后,便会使其承载能力下降,将造成另一部分承受过大的应力而产生塑性变形;局部塑性变形会改变模具零件之间的正常配合关系,均匀的承载状况被打破,将会造成模具的不均匀磨损,也可能由于应力集中的出现而产生裂纹,造成模具的过早断裂。

四、模具的失效分析过程

模具失效的形成原因有很多,但其主要原因可归纳为结构设计不合理、材料质量不佳、

热处理工艺不当、加工工艺不合理、使用维护不妥等方面。根据有关调查资料显示,模具失效的主要原因所占比例大致为:结构设计不合理占3.3%,材料质量不佳占17.8%,热处理工艺不当占52%,加工工艺不合理占8.9%,使用维护不妥占10.2%。

为了提高模具的使用寿命,应对已失效的模具进行分析。了解模具的主要失效形式,寻找其失效的具体原因和主要影响因素,掌握各种失效形式所占的比例以及各种失效模具的使用寿命,并从理论上加以分析与综合,以便为合理地选择模具材料、优化模具结构设计、正确制订模具制造工艺以及为新型模具材料的研制和新工艺的开发等提供指导性数据,并且可据此预测模具在特定工作条件下的使用寿命。

(一) 模具失效分析的主要任务

模具失效分析的任务就是要正确判断模具失效的性质、分析模具失效的原因、提出防止模具失效的具体措施。模具失效性质的判断主要依据失效模具的形貌特征、应力状态、材料强度和因素等,而模具失效原因的分析 and 防止模具失效措施的提出,主要从以下几个方面考虑。

(1) **合理选择模具材料** 根据模具的实际工作条件和可能出现的失效形式,提出相应模具材料的各项性能指标,并由此选择合适的模具材料、热处理工艺和表面处理工艺,以满足模具的使用性能要求。

(2) **合理设计模具结构** 在设计模具结构时,应力求使模具各部分受载均匀,使应力流线分布均匀,并尽量平滑过渡,减少应力集中分布,强化模具上的薄弱环节。

(3) **保证加工和装配质量** 应选择合理的模具加工与装配工艺方案,保证模具的表面加工质量,尽量减少造成应力集中的可能性,达到模具的设计性能要求。

(4) **严格模具的质量控制** 做到严格控制模具材料的冶金质量、锻造质量、冷加工质量和热处理质量,尽量减少模具加工制作过程中的各种内外缺陷,有效防止和减少模具的非正常失效,提高模具的使用寿命。

(5) **进行模具的表面强化** 在对模具进行整体强化的同时,还应采取各种手段对模具的表面进行强化和改性,使模具的表面得到有效的保护,提高模具的使用寿命。

(6) **合理地使用、维护和保养模具** 应严格按照操作规程正确地安装模具,使用中注意正确的使用方法,并在使用后加强对模具的维护和保养,防止模具的过早失效。

(二) 模具失效分析的方法和步骤

由于模具的材料种类、结构形状、尺寸大小、受载情况、失效形式等各不相同,则模具的失效分析方法也各不相同。**模具失效分析的一般方法与步骤为:**

(1) **现场调查与处理** 进行模具失效的现场调查,主要包括对模具现场的保护、观察模具失效的形式与部位、了解生产设备的使用状况和加工工艺、询问具体操作情况和模具失效过程、统计模具的使用寿命、收集并保存失效的模具等,以供失效分析用。若模具为断裂失效,应注意收集齐全模具的所有断裂碎块,以便进行断口分析。在收集模具的断裂碎块时,要保证断口的洁净和新鲜。

(2) **模具材料、制造工艺和工作情况调查** 采用化学成分分析、力学性能测定、金相组织分析、无损检测等方法,复查模具材料的化学成分和冶金质量。通过查阅有关技术资料和检测报告、检查同批原材料、询问生产人员等方式,详细了解模具的材质状况、锻造质量、机械加工质量、热处理和表面处理质量、装配质量等情况,核实各个环节是否符合有关