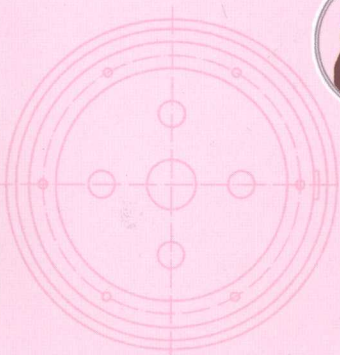
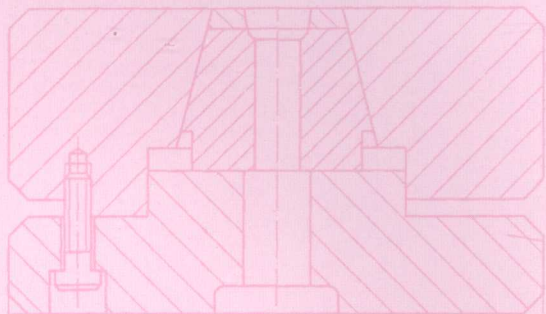


全国高等教育规划教材

机械设计制造类专业

模具 失效与维护

陈志刚 编著



免费提供
电子教案



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书主要内容有：模具失效的基础知识，影响模具失效的基本因素，模具的选材及热处理，模具表面处理技术以及常用模具失效分析实例。全书各部分内容都紧紧围绕着模具失效和维护展开，并在每一章中都融入大量的能反映新材料、新工艺、新技术的实例，力求做到理论与实践的完美结合。

本书是高等院校模具设计与制造专业以及全国高等教育自学考试模具设计与制造专业的推荐教材，也可作为模具工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

模具失效与维护/陈志刚编著. —北京：机械工业出版社，2008.6

ISBN 978-7-111-24205-5

I. 模… II. 陈… III. 模具-失效分析-高等学校：技术学校-教材 IV. TG76

中国版本图书馆CIP数据核字 (2008) 第084835号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑：赵丽欣 版式设计：霍永明 责任校对：张晓蓉

封面设计：子时文化 责任印制：洪汉军

北京振兴源印务有限公司印刷厂印刷

2008 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 14.75 印张 · 362 千字

0001 - 5000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-24205-5

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
销售服务热线电话：(010) 68326294

购书热线电话：(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：(010) 88379753 88379739

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是根据模具设计与制造专业教学大纲的要求编写的,可作为模具设计与制造、塑性成形工艺及设备、材料成形及控制工程等专业的本科、专科教材,也可供模具工程技术人员参考使用。

本书共分5章:第1章介绍了模具失效的基础知识,对模具失效的种类、形式进行了分析,并给出了模具材料的抗失效性能指标;第2章介绍了影响模具失效的基本因素,其中包括模具结构、工作条件、模具材料、模具制造等;第3章介绍了模具的选材及热处理,重点介绍了冷作模具、热作模具、塑料模具、粉末烧结模具材料的选材及热处理;第4章介绍了模具表面处理技术,主要包括化学热处理技术、涂镀技术、气相沉积技术及其他表面处理技术;第5章主要对7种常用模具寿命进行了具体分析。

鉴于编者水平有限,书中难免存在错误和遗漏,敬请读者批评指正。

编者

目 录

前言	2.2.3 模具的使用与维护	50
绪论	2.3 模具材料对失效的影响	53
0.1 失效与失效学	2.3.1 模具材料的选用原则及影响	53
0.2 模具失效分析的意义	2.3.2 模具材料的性能	54
0.3 本课程的性质、任务、学习方法和最终目的	2.3.3 模具使用性能的选择	59
第1章 模具失效的基础知识	2.3.4 模具钢冶金质量的影响	59
1.1 模具失效和失效分析	2.4 模具制造对失效的影响	60
1.1.1 模具失效与模具损伤	2.4.1 模具毛坯的锻造	60
1.1.2 模具失效的分类	2.4.2 模具的热处理缺陷	64
1.1.3 模具失效分析	2.4.3 模具的冷加工对失效的影响	78
1.2 模具的工作条件及失效形式	2.5 思考题	81
1.2.1 冷作模具的工作条件及失效形式	第3章 模具的选材及热处理	83
1.2.2 热作模具的工作条件及失效形式	3.1 冷作模具的选材及热处理	83
1.2.3 塑料模具的工作条件及失效形式	3.1.1 冷冲裁模材料及热处理	83
1.3 模具材料的抗失效性能指标	3.1.2 冷挤压模材料及热处理	92
1.3.1 材料抵抗过量变形失效的性能指标	3.1.3 冷镦模材料及热处理	94
1.3.2 材料抵抗断裂失效的性能指标	3.1.4 冷拉深模材料及热处理	98
1.3.3 材料抵抗表面损伤失效的性能指标	3.2 热作模具的选材及热处理	100
1.3.4 以多种形式失效的模具对材料性能的要求	3.2.1 锤锻模材料及热处理	101
1.4 思考题	3.2.2 机锻模、热挤压模材料及热处理	104
第2章 影响模具失效的基本因素	3.2.3 热切边模材料及热处理	107
2.1 模具结构设计对失效的影响	3.2.4 压铸模材料及热处理	108
2.1.1 模具的几何形状	3.2.5 新型热作模具钢	110
2.1.2 模具的结构形式	3.3 塑料模具的选材及热处理	113
2.2 模具工作条件对失效的影响	3.3.1 对塑料模具材料的性能要求	113
2.2.1 成形件的材质和成形温度	3.3.2 塑料模用钢	114
2.2.2 设备特性	3.3.3 塑料模的热处理特点	116
	3.3.4 新型塑料模具钢	117
	3.4 粉末烧结模具材料	124
	3.4.1 钴结硬质合金	124
	3.4.2 钢结硬质合金	126
	3.4.3 金属陶瓷	129
	3.4.4 粉末高速钢	130

3.5 思考题	130	5.2.3 拉深模粘结瘤	216
第4章 模具表面处理技术	131	5.2.4 影响拉深模寿命的主要因素 ...	217
4.1 概述	131	5.2.5 提高拉深模寿命的措施	217
4.2 模具表面的化学热处理技术	135	5.3 锤锻模	218
4.2.1 渗碳	135	5.3.1 锤锻模的工作特点	218
4.2.2 渗氮	141	5.3.2 锤锻模的主要失效形式	219
4.2.3 碳氮共渗和氮碳共渗	143	5.3.3 影响锤锻模寿命的主要因素 ...	219
4.2.4 渗硼	150	5.3.4 提高锤锻模寿命的主要措施 ...	220
4.2.5 渗金属	158	5.4 冷锻模	221
4.2.6 多元共渗应用实例	160	5.4.1 轴承滚柱冷锻凹模的工作 条件	221
4.3 模具表面的涂镀技术	168	5.4.2 轴承滚柱冷锻凹模的服役寿命 和失效形式	221
4.3.1 电镀	168	5.4.3 轴承滚柱冷锻凹模失效分析 ...	221
4.3.2 电刷镀	177	5.4.4 影响轴承滚柱冷锻凹模寿命的 因素及改进措施	222
4.3.3 化学镀	183	5.5 热挤压模	223
4.3.4 热浸镀	190	5.5.1 热穿孔冲头的工作条件	223
4.4 模具表面的气相沉积技术	191	5.5.2 冲头的工作寿命及失效形式 ...	223
4.4.1 化学气相沉积	191	5.5.3 冲头结构的改进及效果	223
4.4.2 物理气相沉积	194	5.5.4 失效分析结论	224
4.5 模具表面的其他处理技术	198	5.6 塑料压注模	225
4.5.1 热喷涂	198	5.6.1 模具的工作条件和加工工艺 ...	225
4.5.2 激光表面处理	200	5.6.2 模具的服役寿命及失效形式 ...	226
4.5.3 电子束表面处理	203	5.6.3 模具失效分析	226
4.5.4 离子注入	204	5.6.4 防止模具早期失效的措施及 效果	226
4.5.5 火焰淬火	207	5.7 压铸模	227
4.6 思考题	210	5.7.1 压铸模型芯的工作条件及失 效形式	227
第5章 模具失效分析实例	212	5.7.2 模具的服役寿命及失效形式 ...	228
5.1 冲裁模	212	5.7.3 模具失效分析	228
5.1.1 冲裁模的工作特点	212	5.7.4 解决和防止模具热疲劳龟裂的 措施	228
5.1.2 冲裁模的主要失效形式及影响 因素	213		
5.1.3 提高冲裁模寿命的措施	214		
5.1.4 冲裁模材料的选用	215		
5.2 拉深模	215		
5.2.1 拉深模的工作特点	215		
5.2.2 拉深模的主要失效形式	216		

绪 论

模具寿命的高低是衡量模具质量的重要指标之一。它不仅影响产品质量，而且还影响生产率和成本。随着模具工业的发展，高质量、高性能、高效率模具的大量应用，模具的寿命已引起世人的关注。在工业产品飞速发展带动模具工业快速发展的今天，从模具发展的总趋势可以看出，无论是模具的大型化、复杂化还是高精度、高效率，都依赖于模具寿命的提高。提高模具的寿命其实就是延缓模具的失效。失效分析是对事物认识的一个复杂过程，通过多学科交叉分析，找到模具失效的原因和解决的措施，从而达到提高模具寿命的最终目的。

0.1 失效与失效学

机械产品种类繁多，规格不一，功能千差万别。衡量机械产品的标准是多方面的，如功能、寿命、大小、重量、外观、安全性和经济性等，其中功能是最主要的，因为衡量产品质量的优劣，首先要看它能否很好地实现规定的功能。在工程实践中，由于种种原因，产品丧失其原有功能的现象经常发生。按照通常的说法，将“产品丧失其规定功能的现象”称之为失效。机械产品的失效大致可分为三种类型：①完全丧失其规定的功能；②部分丧失其规定的功能，虽仍能工作，但已不能圆满地完成规定的任务；③严重损伤，再不能安全地继续工作，此时应及时调换或修补。机械产品的失效形式主要有过量的变形、断裂和表面损伤等。

产品失效的后果是引发事故，甚至重大的或灾难性的事故，造成危害，甚至生命财产的巨大损失。这方面的统计数字是非常惊人的。据统计，1998年美国因腐蚀失效带来的经济损失高达2760亿美元，占美国GDP的3%以上。世界航空业因腐蚀原因造成的民航飞机的破坏占总破坏量的40%~60%，其中不乏因腐蚀失效造成的航空事故。

失效不仅会给人们带来巨大的直接经济损失，同时也会造成惊人的间接经济损失。所谓间接经济损失，主要包括：①由于失效迫使企业停产或减产所造成的损失；②引起其他企业停产或减产的损失；③影响企业的信誉和市场竞争能力所造成的损失。例如，某大型化工企业因贮罐失效停产一天损失30万元，这样停产一个月就造成900万元的损失，建造一个新贮罐又需80万元。再如某钢铁厂轧机的人字齿轮轴失效，修复轧机并不需巨款，而停产期间造成的间接经济损失却高达400余万元。

为了防止失效现象的重复发生，提高机械产品质量，早在20世纪初，人们就开始对零构件的失效现象进行比较系统的分析研究，后来随着工程力学、材料科学及交叉学科的发展和电子光学仪器测试技术的进步，在对大量工程失效现象的行为规律与机理研究的基础上，逐渐形成了一门新的分支学科，即失效学，也称为失效分析。失效学是研究机械装备的失效诊断、失效预测和失效预防的理论、技术和方法及其工程应用的一门学科。

0.2 模具失效分析的意义

引起模具失效的因素是复杂的，大致可归纳为两个方面，即材料方面的因素和环境方面的因素。前者为内因，包括材料品质及加工工艺方面的各种因素；后者为外因，包括受载条件、时间、温度及环境介质等因素。任何模具的失效都是在材料或零件的强度(韧性)与应力因素和环境条件不相适应的条件下发生的。失效总是从模具对服役条件最不适应的环节开始的，而且失效模具的残骸上必然会保留有失效过程的信息。通过对失效残骸的研究，可查明模具失效的机理和过程，并对失效的原因做出判断，从而可有针对性地采取改进和预防措施，避免同类失效的再发生，达到改进模具质量、延长使用寿命、提高服役安全性和可靠性的目的。

图 0-1 所示为失效分析与模具设计和制造之间的关系。从图中可以看出，失效分析在模具生产中的作用是非常重要的，其涉及众多的生产信息和影响因素。通过将失效分析的结果向模具设计、制造、使用和维修等部门进行信息反馈，并进而提出改进措施用于加工生产，是今后防止同类失效产生的最直接、最有效的途径。

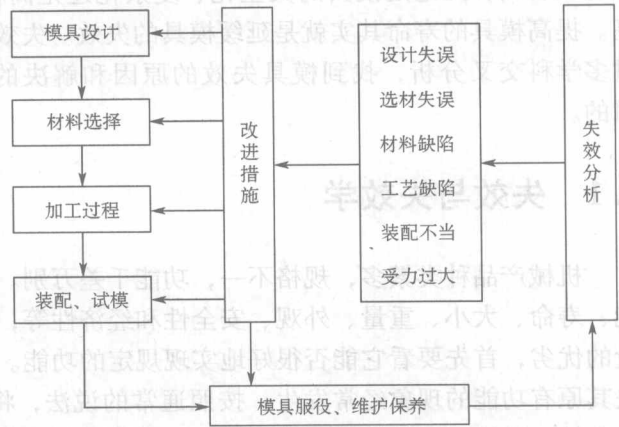


图 0-1 失效分析与模具设计和制造之间的关系

0.3 本课程的性质、任务、学习方法和最终目的

《模具失效与寿命》是模具设计与制造专业的一门专业课程。本课程的任务是使学生了解模具寿命与失效的关系及其与工业生产的联系；了解模具结构、模具工作条件、模具材料性能和模具制造等因素对模具寿命的影响；掌握分析模具失效的方法，培养解决问题的能力，为合理的模具设计与模具加工奠定必备的基本理论知识，从而达到提高模具寿命的目的。

本课程学习的具体要求是：

- ① 熟悉模具失效与寿命中名词术语的概念和定义。
- ② 了解模具失效的形式，掌握对不同模具失效形式分析与判断的方法和模具材料抗失效性能指标及应用。
- ③ 认识提高模具寿命的重要性，掌握有关因素对模具寿命的影响和影响模具失效的基本因素，并能正确应用这些规律指导模具的设计与制造。
- ④ 具有正确选择模具材料和模具热处理工艺的能力和将所学知识用于模具设计、模具加工、模具使用和管理的能力。

《模具失效与寿命》课程学习的最终目的是为了提高模具的使用寿命，而提高模具寿命的两大途径：一是“防患于未然”，即通过模具设计、材料选用和各加工工艺等的合理选择，使模具获得较高的使用寿命；二是“亡羊补牢”，即通过对已失效模具的分析，找出原因和解决方法，使模具不再发生同样的失效，进而提高模具的寿命。

模具失效与寿命课程学习，首先应明确模具失效的概念，模具失效是指模具在使用过程中，由于各种原因，导致模具的几何形状、尺寸精度、表面质量、力学性能等发生不可逆的变化，从而使模具无法继续正常工作。模具失效的原因多种多样，如材料缺陷、设计不合理、制造误差、使用不当、维护保养不到位等。模具失效的后果也很严重，轻则影响产品质量，重则造成设备损坏、人员伤亡等。因此，模具失效与寿命课程的学习，对于提高模具的使用寿命，降低生产成本，提高产品质量，具有重要的意义。

模具失效与寿命 1.1

模具失效与寿命 1.1.1

模具失效是指模具在使用过程中，由于各种原因，导致模具的几何形状、尺寸精度、表面质量、力学性能等发生不可逆的变化，从而使模具无法继续正常工作。模具失效的原因多种多样，如材料缺陷、设计不合理、制造误差、使用不当、维护保养不到位等。模具失效的后果也很严重，轻则影响产品质量，重则造成设备损坏、人员伤亡等。因此，模具失效与寿命课程的学习，对于提高模具的使用寿命，降低生产成本，提高产品质量，具有重要的意义。

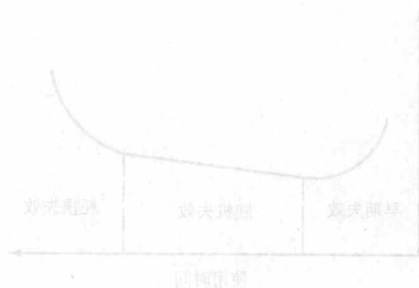


Figure 1-1: Mold wear and mold life curve

Figure 1-1 shows the relationship between mold wear and mold life. The curve starts at the origin, rises steeply in the initial stage, then levels off in the middle stage, and finally rises sharply again in the final stage. This indicates that mold wear is not a linear process, but rather a process that changes over time. In the initial stage, mold wear is rapid, and in the final stage, mold wear is also rapid, but in the middle stage, mold wear is relatively slow. Therefore, when designing a mold, it is necessary to consider the mold's life cycle and take measures to reduce mold wear in the initial and final stages.

第1章 模具失效的基础知识

研究模具的失效问题就必须熟悉各种模具的工作条件和失效形式，进而学习运用失效分析的基本知识来判断模具失效的性质、分析失效的原因，最终从各个方面提出预防失效或推迟失效的防护措施。

在防止模具失效的各种因素中，模具材料抵抗失效的性能指标是最直接、最重要的因素。根据模具的失效形式，对模具材料提出合理的性能指标，是模具设计和选材的依据，也为正确制定模具制造工艺指明了方向。

1.1 模具失效和失效分析

1.1.1 模具失效与模具损伤

任何模具零件都有其一定的功能。它们在服役过程中，或完成规定的运动，或按要求做功，或传递一定的力和能。当模具零件在服役中产生了过量变形、断裂破坏、表面损坏等现象后，将丧失其原有的功能，达不到预期的要求，或变得不安全可靠，以致不能继续正常地服役，这些现象统称为模具失效。广义上讲，模具失效是指一套模具完全不能再用，生产中一般指模具的主要工作零件不能再用。如热挤压冲头被镦粗变形，冷冲裁模刃口崩刃或过度磨损，型腔损坏、变形等。

模具失效一般有一个发展过程。如断裂失效可能就经历了零件表面产生缺陷、萌生微裂纹、裂纹扩展直至断裂的发展过程。

模具在制造和使用中产生了某些缺陷，如表面轻度磨损、微裂纹等，但还没有丧失规定的功能而仍可继续服役，那么，这些缺陷就称为模具的损伤。显然，损伤可成为破断的裂源，损伤的积累也可导致失效。

同类模具在服役中发生故障或失效时，所经历的使用时间或周次（称为使用寿命）有长有短。大量的统计结果表明，它们失效的几率和使用时间之间有着一定的关系。这种关系规律可用寿命特性曲线来形象地表示，如图 1-1 所示。按照该曲线的形状特征，可将失效过程分为早期失效、随机失效和耗损失效三个阶段。

模具未达到一定工业技术水平公认的使用寿命就不能服役时，称为模具的早期失效，也叫做非正常失效。早期失效发生在模具的使用初期，主要是由于模具设计和制造上的缺陷一经使用就显露出来，进而诱发失效。这一阶段的失效几率甚高，但随着使用时间的延长而迅速减低，如图 1-1 曲线第一阶段所示。如果在模具交付使用前，对之进行可

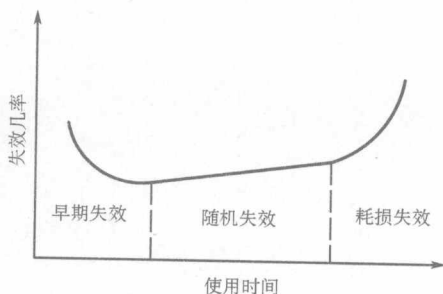


图 1-1 寿命特性曲线

靠性试验或短时间的试用,就能及时发现隐患,并进行补救或剔除,从而避免在正常服役时造成损失。

模具经过使用初期的考验而未发生失效,就进入了随机失效阶段。在理想的情况下,未达到正常寿命的模具不应该发生失效现象。但由于环境的偶然变化,操作者的人为差错,或者因管理不善而造成的某些损伤,仍可能导致失效。这种失效的发生几率很低,且随着使用时间的延长其增长也很缓慢,呈随机分布,如图 1-1 曲线第二阶段所示。这一阶段是模具工作的最佳时期,对模具的正确使用和精心维护是防止模具发生随机失效的主要措施。

模具经过了长期使用,由于损伤的大量积累,致使发生失效的几率急剧增加,如图 1-1 曲线第三阶段所示,从而进入耗损失效阶段,即到了模具寿命的终止期。在模具使用过程中,经常性的维护、保养,可延迟耗损失效期的到来。

1.1.2 模具失效的分类

按照研究失效的目的不同,常用的失效分类方法有两种:一是按经济法观点分类,目的是明确失效造成损失的法律责任和经济损失;二是按失效形式及失效机理分类,目的是找出失效原因,并提出防护措施,以防止或推迟同一形式的失效现象重复发生。

1.1.2.1 按经济法观点对失效分类,可将失效分为四种情况

1. 正常耗损失效 模具的使用时间已到寿命终止期,属正常失效,应由产品使用者自己负责。但若产品制造者提供的使用说明书没有对使用寿命等做出明确规定,则制造者也要承担一定责任。
2. 产品缺陷失效 属于产品质量问题,应由产品制造者承担责任。
3. 误用失效 属于使用不当造成的失效,应由产品使用者承担责任。但若产品制造者提供的使用说明书没有对有关操作做出明确规定,则制造者也要承担责任。
4. 受累性失效 属于其他原因或自然灾害等不可抗拒的因素所导致的失效。

1.1.2.2 按失效形式及失效机理分类,大致可分为以下三类

1. 过量变形 包括过量弹性变形、韧性断裂和脆性断裂。
2. 断裂 包括疲劳断裂、蠕变断裂和应力腐蚀断裂。
3. 表面损伤 包括磨损、接触疲劳和腐蚀。

1.1.3 模具失效分析

判断失效性质,分析失效原因,研究预防失效的措施等一系列的技术活动,称为失效分析。其主要目的是避免或减少同类失效现象的重复发生,延长模具的使用寿命,提高经济效益和社会效益。

1.1.3.1 失效分析的任务

失效分析的任务就是判断失效性质、分析失效原因和提出防护措施。判断失效性质的主要依据是:失效的形貌特征,失效件的应力状态,失效材料的实际强度,失效的环境因素等。

模具失效原因的分析和防护措施的提出,可以从以下几个方面入手:

1. 合理选材 根据模具的工作条件和失效形式,提出相应的评价材料性能的指标,并由此选用合适的模具材料及热处理工艺,以满足使用要求。

2. 合理结构设计 模具结构的设计,应尽量使各部分均匀受载,使应力流线均匀分布并平滑过渡,减小应力集中,强化薄弱环节。

3. 合理加工与装配 模具的加工与装配应选择合理的工艺方案,正确按照技术要求和工艺规程实施,注意加工表面质量,减少可能造成的应力集中。

4. 合理使用与保养 按照操作规程对模具正确安装、合理使用并加强维护保养,减少环境损伤失效和随机失效。

5. 严格质量控制 控制模具材料的冶金质量及锻造、冷加工和热处理质量,防止或减少制造中的内外缺陷,从而防止或减少早期失效。

6. 表面强化 在对模具整体进行强韧化的同时,采取各种方法对模具工作表面进行强化和改性,是很有效的防护措施,能明显提高模具的服役寿命。

1.1.3.2 失效分析的方法和步骤

模具失效的形式不同,失效分析的方法和步骤也不尽相同。现以较典型的失效形式——断裂为例简要说明。

1. 现场调查和模具断裂件的处理 失效事故的现场调查,主要包括保护事故现场、察看断裂的形式和部位、询问操作情况和失效过程等工作。在调查过程中,应注意收集齐全所有的断裂碎块,以便确定主断口和进行断口分析。

在收集断裂碎块时,应注意保护断口的洁净和新鲜。对于洁净的断口,应立即放入干燥器内进行保护;对有油泥污染的断口,应依次用汽油、丙酮(或三氯甲烷、苯等)、无水乙醇清洗断口,并用热风吹干后放入干燥器内;对于附有腐蚀产物的断口,可暂不清除腐蚀产物而直接放入干燥器内。

2. 模具制造工艺和服役历史的调查及质量检验 对模具制造工艺历史的调查,主要通过翻阅有关技术资料、检测报告,取样检查同批原材料,询问制造者等方式进行,要核实制造中的各个环节是否符合有关标准规定和设计、工艺的技术要求。调查的内容一般为:材质状况、锻造质量、切削加工和磨削加工质量、电火花成形加工和线切割加工质量、热处理和表面处理质量、装配质量等。

为了进一步了解模具的内在质量,一般可进行无损探伤、化学成分分析、力学性能测定及组织鉴定等。

对模具服役历史的调查,主要是查阅模具运行记录、调整及维修记录,了解锻压设备及被加工坯料的状况,询问操作者有关模具的使用条件和使用状况,是否按规程操作及有无异常现象等。

3. 模具工作条件和断裂状况分析 模具的工作条件主要包括受力状况和温度、介质等工作环境状况。受力状况主要包括:载荷性质,如静载荷、冲击载荷、循环载荷等;载荷类型,如拉伸、压缩、扭转、弯曲等;应力情况,如应力的分布、最大应力的位置及部位、应力集中状况、断裂部位的应力状态和应力大小等。工作环境状况主要包括工作温度的高低,工作温度的变化幅度及其所引起的热应力大小,介质种类、含量及腐蚀性等。

模具的断裂状况主要包括断裂处的塑性变形程度,断口的取向、位置、表面状况,以及断口和模具结构的关系等。通过断口状况分析,可初步确定断裂的性质和类型。

当模具断裂为多个碎块时,应找出最早断裂的主断口。其方法是:将各碎块按照模具原来的形状拼合在一起,并察看其密合程度,密合最差、裂隙最大的断口为最早断裂的主断

口。通过肉眼观察或用量具测量断口处的塑性变形量,就可初步确定是韧性断裂还是脆性断裂。

根据主断口的取向,可以分析模具断裂的载荷类型和实际应力状态。例如,脆性断口总是与最大正应力作用的方向垂直,齐平的韧性断口总是与最大切应力作用的方向平行等。而当断裂起源于模具外形结构的缺口或应力集中处时,则说明缺口效应和应力集中对断裂的影响作用很大。

另外,根据断口氧化色的不同,可大致分析模具工作温度的高低;根据断口有无腐蚀产物,可确定模具的工作介质有无腐蚀性。

4. 断口分析 断口分析就是对断口的宏观形貌和微观形貌进行分析。分析的结果能为进一步确定断裂的性质、类型和原因提供重要依据。

断口的宏观分析是用肉眼、放大镜或低倍立体显微镜分析断口的形貌。它用来判定:断裂的性质,即快速断裂、疲劳断裂或应力腐蚀断裂;断裂的类型,如快速断裂是韧断还是脆断,裂源的位置和断裂的走向如何;疲劳断裂时的应力大小、应力集中程度和疲劳寿命。

断口的微观分析是用高倍扫描电子显微镜或透射电子显微镜分析断口的微观形貌。它是宏观断口分析的深化和必要补充。它用于分析:微观断裂的性质,即微观韧断或微观脆断;微观断裂的机理,显微组织对断裂的影响等。此外,它还可用于估算疲劳裂纹宏观扩展速率和疲劳寿命。

对于应力腐蚀断裂,其断口往往附着有腐蚀产物。为避免腐蚀产物对断口分析的干扰,应先对断口上的腐蚀产物进行成分和相结构分析,然后用化学或电化学方法清除之,之后再断口分析。

当模具中存在材料缺陷和加工缺陷时,往往在缺陷处产生裂纹并扩展。故应分析裂源和断裂路径与各类缺陷的关系,以确定缺陷对断裂的影响。常见的缺陷有非金属夹杂物、碳化物偏聚、表面微裂纹、过热、过烧、回火不充分等。可选取断裂碎块,在裂源和断裂扩展区处,分别以垂直于断口的截面制备金相试样,用光学或电子显微镜观察断口处的缺陷和显微组织。

5. 断裂原因的判定 断裂失效分析的目标是要找出断裂的原因。而要得出正确的结论,就要对上述各项分析的结果、数据和信息进行综合的推理分析,并借助各学科的知识 and 经验进行系统的研究。

首先,根据模具断裂状况的分析和断口分析的结果,综合判定模具断裂的性质和类型,并由此列出所有可能的断裂原因。可能的断裂原因一般包括设计不合理,选材不当,材质不良,各种加工和热处理缺陷,操作使用不当和安装、维护不良等方面。

然后,再根据模具的工作条件、制造工艺及服役历史、质量检验结论和现场使用状况等,进行逻辑推理、综合分析、相互印证,在可能的断裂原因中,逐一排除被证明不可能的原因,最终判定引起断裂失效的主要原因。必要时,还可以进行失效重现性试验或模拟试验,以证明所判定的断裂原因正确与否。

6. 提出防护措施 根据判定的断裂原因,有针对性地提出防护措施,以避免或减少这种断裂失效现象重复发生。

应该指出,同一模具可能有几种损伤形式出现,而最终先导致模具失效的形式可能是其

中的一种(如脆性断裂)。当我们采取相应的措施(如提高材料的强韧性)防止了这种形式的失效以后,则另一种失效形式(如磨损)又可能成为主要矛盾,又需要我们采取另外的措施去解决第二、第三种形式失效的问题。

1.2 模具的工作条件及失效形式

模具的种类很多,按照用途的不同,大致可分为六大类:冷冲压模、热锻压模、压力铸造模、塑料模、玻璃压模和粉料压制模等。在机械、电机、电子、仪表等工业部门中,使用最广的是各种冷冲压模、热锻压模、压力铸造模和塑料模。

每套模具都由许多零件组成,其中对模具的质量和寿命起决定作用的是工作零件。因而通常主要研究模具工作零件的工作条件和失效形式等问题。模具(本书中通常专指模具工作零件)的损伤和失效形式,主要有塑性变形、磨损、断裂和冷热疲劳等。除了冷热疲劳主要出现于热作模具外,其余几种失效形式在各种模具上均可能出现。

模具在服役中以何种形式失效,取决于多种因素,而首要的外界因素是模具的工作条件。尽管一批相同的模具也不可能全部以同一形式失效,但通过了解这一批模具中各种失效形式所占的比例,以及每种失效形式的平均寿命,就可以分析判定这一批模具的主要失效形式和失效原因。显然,不同种类的模具,由于其工作条件不同,它们在服役中发生失效的形式和特点也各不相同。

1.2.1 冷作模具的工作条件及失效形式

典型的冷作模具有冷冲裁模、冷拉深模、冷挤压模和冷镦锻模。各种冷作模具的工作都是在常温下对被加工材料施加压力,使其产生分离或变形,从而获得一定形状、尺寸和性能的零件。不同种类的冷作模具,其具体工作条件不同,它们的失效形式又各有不同的特点。

1.2.1.1 冷冲裁模

1. 冷冲裁模的工作条件 冷冲裁模用于冷冲压加工的分离工序,主要是使各种板料冲切成形。图1-2是简单冲裁模工作示意图。冲裁模的主要工作部位是凸模(冲头)、凹模的刃口,它们对板料施加压力,使板料弹性变形、塑性变形,直至被剪裂。

图1-3所示为冷冲裁过程的三个阶段。在板料弹性变形阶段,冲头端面的中央部位与板料脱离接触,压力集中于刃口附近的狭小范围内,使刃口上的单位面积压力增大。在板料塑性变形和剪裂阶段,冲头切入板料,板料挤入凹模洞口,使模具刃口的端面和侧面产生挤压和摩擦。因此,模具在工作过程中刃口受到的力主要有正压力、侧压力、摩擦力和弯曲力等。

2. 模具寿命与受力大小、板料厚度的关系 模具刃口受力的大小与板料的厚度和硬度有关。冲头的压力通常大于凹模,尤其是在厚板上冲制小孔时,冲头的单位压力很大。设冲头工作部分的直径为 d ,板料厚度为 t ,则比值 d/t 越小,冲头受力越大,其寿命就越低。图1-4表示出比值 d/t 与模具寿命的关系。

3. 冷冲裁模的失效形式 模具刃口在压力和摩擦力的作用下,最常见的失效形式是磨损。其中,冲头的受力较大,且在一次冲裁过程中经受两次摩擦(冲入和退出各一次),因

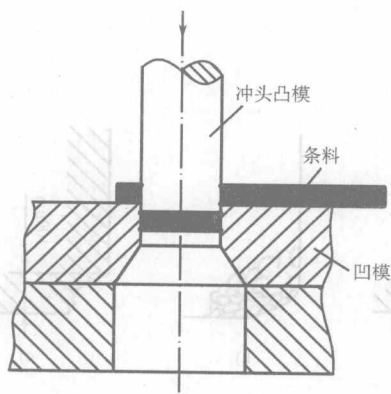


图 1-2 冷冲裁工作示意图

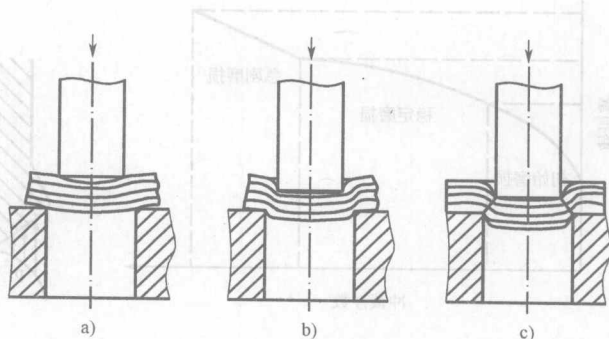


图 1-3 冷冲裁过程示意图

a) 弹性变形阶段 b) 塑性变形阶段 c) 剪裂阶段

而冲头的磨损较快。磨损使刃口变钝，棱角变圆，甚至产生表面剥落，从而使冲裁件毛刺增大，尺寸超差。这时，必须对模具刃口进行修磨才能继续使用。两次刃磨之间模具服役的时间或冲裁次数，称为一次刃磨寿命。模具经多次刃磨后终因尺寸超差而最终失效，其服役总时间或冲裁总次数，称为最终寿命。

由于被冲板料的厚度对模具负荷的影响较大，故常把冲裁模分为薄板冲裁模($t \leq 1.5\text{mm}$)和厚板冲裁模($t > 1.5\text{mm}$)。薄板冲裁模受力较小，其失效的主要形式是磨损。厚板冲裁模受力较大，其失效形式除了磨损外，还可能发生局部断裂(崩刃)，如图 1-5 所示。而当比值 d/t 较小时，还会引起冲头的宏观塑性变形或折断。

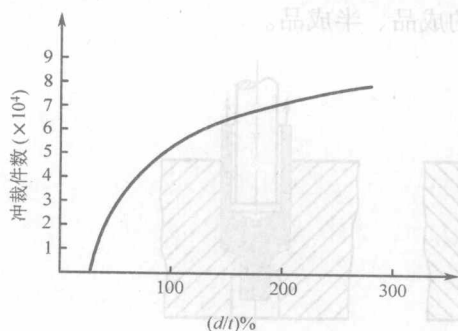


图 1-4 冲头寿命与直径、板料厚度的关系

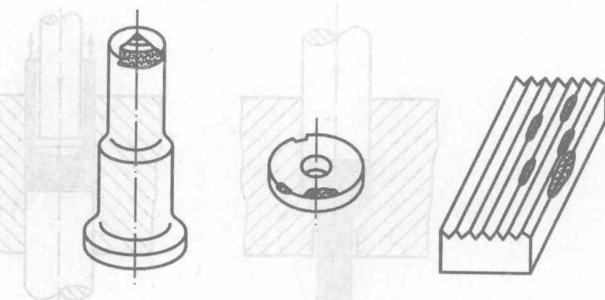


图 1-5 冷冲裁崩刃、局部断裂示意图

4. 模具刃口的损伤过程 模具在服役中的磨损过程，可分为初期磨损、稳定磨损和急剧磨损三个阶段，如图 1-6 所示。对应于每个阶段，模具刃口的损伤过程如图 1-7 所示。

在模具服役初期，刃口锋利，与板料接触面积小，单位面积压力大，易造成刃口局部塑变，如图 1-6a 所示。故初期磨损阶段的磨损速度较大。刃口磨损至一定程度，单位面积压力减轻，且刃口表面塑变强化，不再继续塑变，如图 1-6b 所示。这时刃口的磨损主要由坯料的摩擦引起，磨损速度变缓，即进入稳定磨损阶段。模具服役相当长的时间后，刃口因经受多次冲裁而趋于疲劳，局部表面开始剥落，如图 1-6c 所示，即进入急剧磨损阶段。这时，会因冲裁件不合格而导致模具失效。

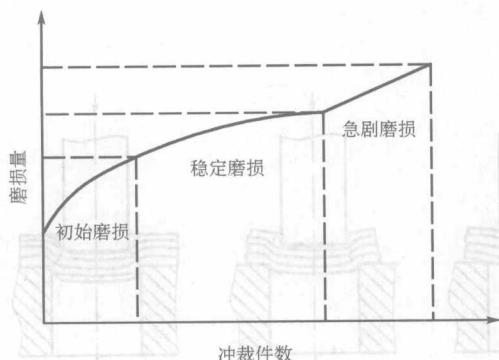


图 1-6 冷冲裁模磨损过程的三个阶段

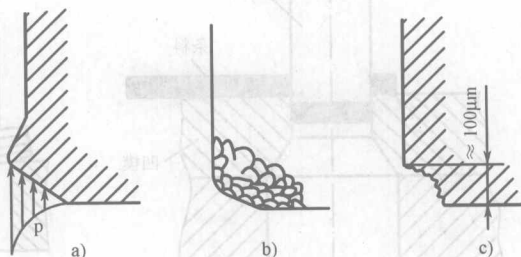


图 1-7 冷冲裁模刃口损伤过程示意图

a) 局部塑变 b) 摩擦磨损 c) 疲劳损坏

影响模具磨损的主要因素有：模具材料和被加工材料的成分、组织及性能，模具和坯料的表面状态及粗糙度，模具的工作条件如冲裁力、冲裁速度、工作温度及润滑条件等。

1.2.1.2 冷挤压模和冷镦模

冷挤压模和冷镦模都是使金属坯料(一般非板料)在模具型腔内冷变形成形的模具。金属坯料的冷变形成形需要强大的压力或冲击力，使冷固态金属在型腔内塑变流动并充满型腔。因而，这类模具要承受很大的机械载荷和摩擦作用。

1. 冷挤压模 按照被挤压金属流动方向与凸模运动方向之间的关系，冷挤压可分为正挤压、反挤压和复合挤压三种，如图 1-8 所示。由图可知，不论哪种挤压工艺，其挤压模具的工作零件都是凸模(冲头)和凹模。在模具的作用下，金属沿凸、凹模间隙或凹模模口流动，使原来的坯料成形为薄壁空心件或横截面较小的成品、半成品。

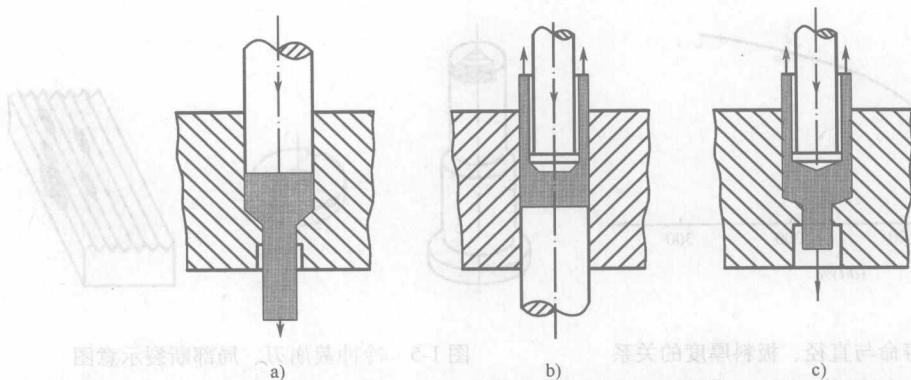


图 1-8 冷挤压工艺分类示意图

a) 正挤压 b) 反挤压 c) 复合挤压

以挤压活塞销的正、反复合挤压工艺为例，如图 1-9 所示。挤压在 1600kN 压力机上进行。挤压时，上冲头向下运动，下冲头固定不动，被挤压坯料沿轴向在冲头与凹模的间隙中流动，最后形成中间带连皮的管状活塞销。挤压时，冲头(尤其是上冲头)承受很大的三向压应力。如果坯料是抗拉强度为 400MPa 的低碳钢，则冲头承受的最大名义压应力可达 2500MPa。在冲头的尺寸过渡处，实际应力水平更高。而在脱模时，冲头又承受挤压件对其

作用的摩擦阻力所引起的拉应力。此外,由于坯料端面不平整、冲头与凹模间隙不均匀和中心线不一致等因素,还会使冲头在挤压时承受很大的偏载或横向弯曲载荷。在这些应力作用下,冲头的失效形式可能有塑性变形、折断、疲劳断裂和纵向开裂等,如图 1-9 所示。

简单的冷挤压凹模(如挤压活塞销的凹模)的受力状况可以看作是内壁承受均压、外壁不受约束的厚壁圆筒。经力学分析及公式推导得出,此时凹模内壁的应力最大,且处于二向应力状态。如果采用抗拉强度较低的脆性材料制造凹模,则在最大拉应力的作用下易发生胀裂;而采用抗压强度较低的韧性材料制造凹模,则在最大压应力的作用下易发生塑性变形。这两种失效形式如图 1-10 所示。

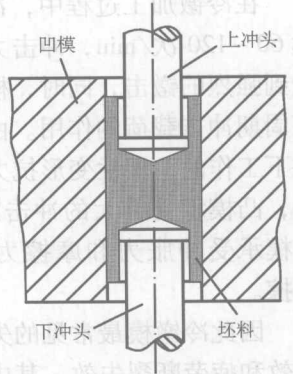


图 1-9 冷挤压活塞销示意图

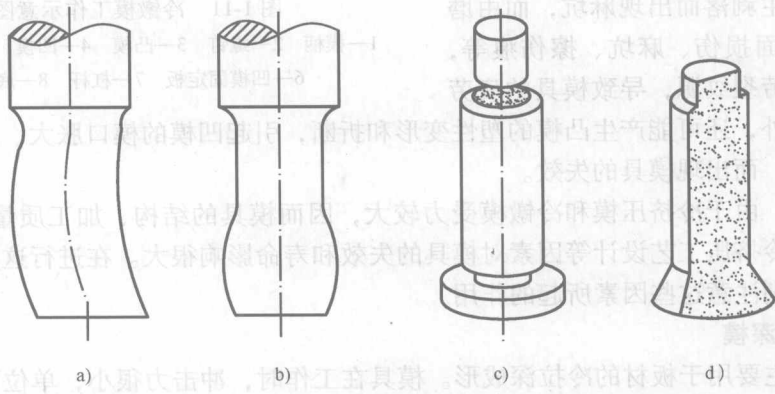


图 1-10 冲头的塑性变形和整体断裂
a) 弯曲 b) 墩粗 c) 折断 d) 劈裂

如果凹模型腔结构比较复杂,存在有截面尺寸变化、沟槽或台阶时,则由于应力集中和应力状态的变化,或更增大脆性开裂倾向,或更易引起棱角倒塌等塑性变形失效。

外壁不受外力的整体凹模,在进行多次挤压的工作条件下,其内壁承受的压力是脉动变化的,因而模壁中的应力是脉动循环应力。如果凹模外面有预应力镶套,则不论凹模工作与否,模壁中经常存在着切向压应力。这样,在内壁脉动压应力的周期作用下,模壁中的切向应力往往是拉压交变循环应力。因而,整体凹模和未经纵向分割的凹模模芯,均可因循环应力的多次作用而发生疲劳开裂。当模具负荷较重时,坯料变形、摩擦生热可使型腔表面的瞬时温度达到 200 ~ 300℃,由此造成的循环热应力将加速疲劳裂纹的萌生。

冷挤压凸模和凹模,都要经受坯料塑变流动的剧烈摩擦,从而产生磨粒磨损和粘着磨损。模具工作表面的磨损损伤将导致应力集中,在拉应力作用下有可能成为裂纹源。模具表面温度升高可导致材料表层软化或屈服强度降低,从而加速磨损失效过程。

2. 冷墩模 冷墩模是在冲击力的作用下,凸模使金属棒料在凹模型腔内墩粗成形的冷作模具。主要用来加工各种形状的螺钉、铆钉、螺栓和螺母等的毛坯。图 1-11 是冷墩模的工作示意图。模具的上模是由凸模和模柄通过螺钉紧固而构成,下模是由凹模及凹模固定套和凹模固定板组成。当工件墩压成形后,由下模的杠杆通过推出机构将零件从凹模中顶出。