

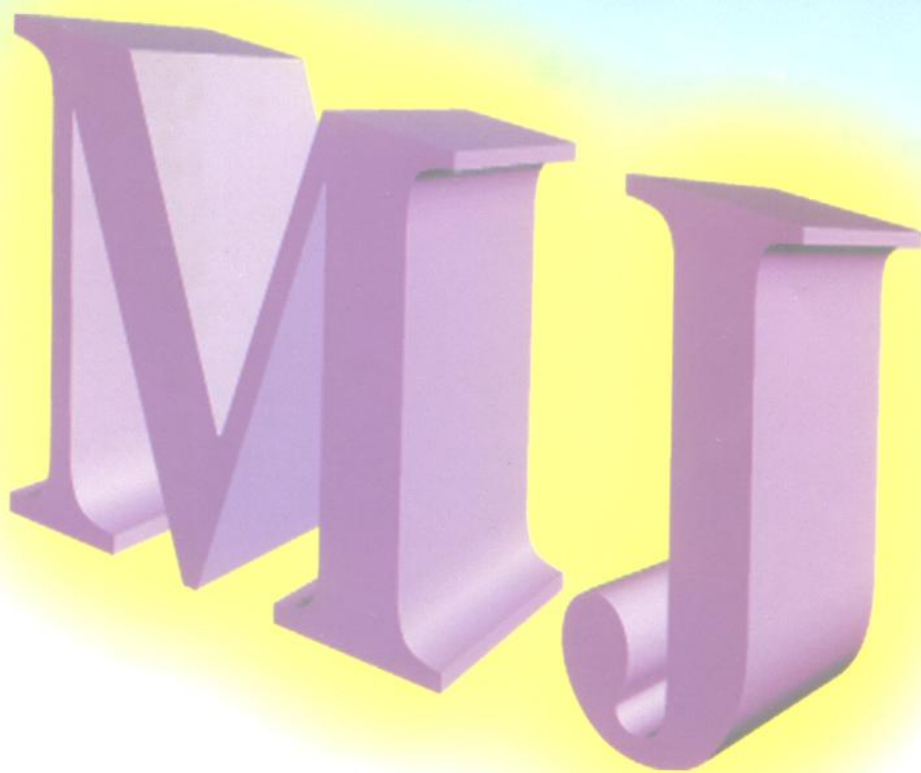


模
具
失
效
与
防
护

普通高等专科学校教育机电类规划教材

模具失效与防护

郑州工业高等专科学校 张鲁阳 主编



机



上

机械工业出版社

TG76
Z18

430261

普通高等专科教育机电类规划教材

模具失效与防护

主 编 张鲁阳
参 编 王毓敏 罗 锋 王逸群 孙中文
三 审 何世禹



00430261



机械工业出版社

本书内容主要包括模具失效的基础知识,影响模具失效的基本因素,模具材料选用及热处理,模具表面防护及修复等,书末还附有模具失效分析实例。全书各部分内容都紧密围绕失效与防护这一对矛盾展开论述,力求理论联系实际,反映国内外新材料、新工艺、新技术。本书是高等专科学校模具设计与制造专业用教材,也可供从事模具工作的工程技术人员参考。

DV84 / 32-14

模 具 失 效 与 防 护

郑州工业高等专科学校 张鲁阳 主编

*

责任编辑:杨 燕 版式设计:霍永明

封面设计:方 芬 责任校对:张莉娟

责任印制:王国光

*

机械工业出版社出版(北京市百万庄大街22号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ · 印张 7.5 · 字数 179 千字

1998年10月第1版第1次印刷

印数 0001—6000 定价:10.50元

*

ISBN 7-111-06232-9/TG. 1205(课)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

前 言

本书是全国高等专科教育机电类专业“九五”规划教材,是由全国高等工程专科学校机械工程类专业教学指导委员会和中国模具工业协会院校委员会确定编写的。

随着我国工业的迅速发展,对模具数量的需求在日益增大,对模具质量的要求也在日益提高。由于冷挤、精冲、精锻等工艺的发展,塑性加工工艺由毛坯生产进入成品加工的领域,使模具的精度不断提高,载荷大幅度增强;由于机械制造用料由普通结构钢扩展到高强度钢和高温合金,材料的变形抗力越来越大,要求模具具有更高的强度、耐磨性、耐热性、抗热疲劳能力等性能;由于塑性加工的自动化设备和自动化生产线的应用及加工速度的增高,对模具的工作寿命提出了更高的要求。在这种形势下,我国用于制造模具所消耗的钢材,就数量而言已经超过某些工业发达国家,但模具的平均使用寿命比国际先进水平尚有较大差距,由此造成人力物力的严重浪费和经济效益的极大损失。因而,研究模具的失效及防护问题,具有重要的现实意义。

目前,涉及模具失效与防护的专著只有寥寥几本,而有关这方面的教材尚属空白。本书的编写是填补这个空白的一种尝试,它旨在为模具设计与制造专业的学生和从事模具工作的工程技术人员提供关于模具失效与防护的较为系统的基础知识,使其能够初步分析常用模具的失效形式及原因,并能从模具的设计、制造、使用等方面,尤其是在模具的选材、热处理及表面强化技术方面,采取合理的防护措施,提高模具设计与制造的水平和质量,从而提高模具的服役寿命,防止其早期失效。

参加本书编写的有郑州工业高等专科学校张鲁阳,成都电子机械高等专科学校王毓敏,华北航天工业学院罗锋、孙中文、贵州航天职工大学王逸群。全书由张鲁阳主编。

模具材料及失效问题专家、哈尔滨工业大学何世禹教授在百忙中担任了本书的主审工作,并对本书的内容结构提出了建设性的意见。

在本书的编写过程中,曾得到中国模具协会院校委员会秘书长孙凤勤、哈尔滨理工大学高传树的支持和帮助,在此表示感谢。

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

张鲁阳

目 录

前言

第一章 模具失效的基础知识 1

第一节 失效和失效分析 1

一、失效与损伤 1

二、失效的分类 2

三、失效分析 2

第二节 模具的工作条件及失效形式 5

一、冷作模具的工作条件及失效形式 5

二、热作模具的工作条件及失效形式 9

三、塑料模具的工作条件及失效形式 14

第三节 模具材料的失效性能指标 16

一、材料抵抗过量变形失效的

性能指标 16

二、材料抵抗断裂失效的性能指标 17

三、材料抵抗表面损伤失效的

性能指标 29

四、以多种形式失效的模具对材料

性能的要求 32

第二章 影响模具失效的基本因素 34

第一节 模具结构设计对失效的影响 34

一、冷作模具结构设计防护措施 34

二、热作模具结构设计防护措施 40

第二节 模具材料对失效的影响 41

一、模具材料的选用原则及影响 41

二、模具材料工作硬度的影响 43

三、模具钢冶金质量的影响 43

第三节 模具毛坯的锻造和预处理对

失效的影响 44

一、模具毛坯的锻造缺陷 44

二、模具毛坯的锻造工艺 45

三、模具毛坯的预备热处理 47

第四节 模具的热处理缺陷对失效

的影响 48

一、模具热处理的一般缺陷 48

二、模具的热处理变形及控制 49

三、模具热处理变形的校正 59

第五节 模具的冷加工对失效的影响 60

一、切削加工的影响 60

二、磨削加工的影响 60

三、电火花加工的影响 61

第六节 模具使用状况对失效的影响 61

一、坯料状况的影响 61

二、锻压设备特性的影响 61

三、模具使用与维护的影响 62

第三章 模具的选材及热处理 63

第一节 冷作模具的选材及热处理 63

一、冷冲裁模材料及热处理 63

二、冷挤压模材料及热处理 69

三、冷镦模材料及热处理 71

四、冷拉深模材料及热处理 75

第二节 热作模具的选材及热处理 78

一、锤锻模材料及热处理 79

二、机锻模、热挤压模材料及热处理 81

三、热切边模材料及热处理 86

四、压铸模材料及热处理 86

第三节 塑料模具的选材及热处理 88

一、对塑料模具材料的性能要求 88

二、塑料模用钢 89

三、塑料模的热处理特点 94

第四章 模具表面的强化、改性

和修复 96

第一节 表面淬火和化学热处理 96

一、表面淬火 96

二、化学热处理 96

第二节 气相沉积 100

一、CVD 处理 100

二、PVD 处理 101

三、气相沉积层的性能及其在模具上

的应用效果 103

第三节 表面镀覆和熔覆 104

一、电镀铬 104

二、化学镀镍磷合金 104

三、电刷镀 105

四、电火花熔覆 107

五、堆焊和热喷焊 107

附录 模具失效分析实例 109

一、轴承滚柱冷镦凹模失效分析 109

二、热穿孔冲头失效分析 111

三、线圈架塑料压注模失效分析 113

参考文献 115

第一章 模具失效的基础知识

要研究模具的失效问题,首先要了解失效和失效分析的基本概念,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。

第一节 失效和失效分析

一、失效与损伤

包括模具零件在内的任何机件,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。机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,这些现象统称为失效。如热挤压冲头被锻粗变形,冷冲裁模刃口崩刃或过度磨损等。

模具或机件的失效一般有一个发展过程。如断裂失效可能就经历了机件表面产生缺陷、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,这些缺陷就称为损伤。显然,损伤可成为破断的根源,损伤的积累也可导致失效。

同类模具或机件,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。

早期失效发生在模具或机件的使用初期,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。如果在模具交付使用前,对之进行可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

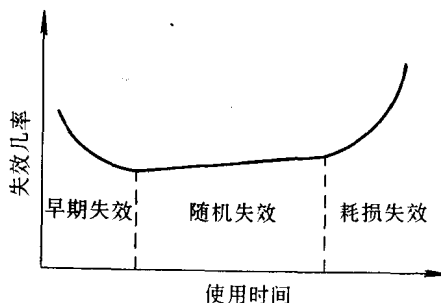


图 1-1 寿命特性曲线

延长其增长也很缓慢,呈随机分布。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,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。

二、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:按经济法观点分类和按失效形式及失效机理分类。

按经济法观点对失效分类,是为了明确失效造成损失的法律责任和经济损失。由此可将失效分为四种情况:

(1) 正常耗损失效 产品(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作出明确规定,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作出明确规定,则制造者也要承担责任。

(4) 受累性失效 属于其它原因或自然灾害等不可抗拒的因素所导致的失效。

按失效形式及失效机理分类是为了找出失效原因,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。各种机械零件(包括模具)的失效形式,大致可分为以下几类:

- | | | |
|----------|---|--------|
| (1) 过量变形 | } | 过量弹性变形 |
| | | 塑性变形 |
| | | 韧性断裂 |
| | | 脆性断裂 |
| (2) 断裂 | } | 疲劳断裂 |
| | | 蠕变断裂 |
| | | 应力腐蚀断裂 |
| | | 磨损 |
| (3) 表面损伤 | } | 接触疲劳 |
| | | 腐蚀 |

三、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,延长产品的使用寿命,提高经济效益和社会效益。

(一) 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。

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。

(二) 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;对有油污污染的断口,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纪录、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;应力的分布、最大应力的位置及部位,应力集中状况等;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,以及断口与模具结构的关系等。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。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,如微孔聚合断裂、解理断裂、晶间断裂或疲劳断裂等;显微组织,如晶粒大小、第二相,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,之后再行断口分析。

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。

第二节 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、玻璃压模和粉末压制模等。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。

每套模具都有许多零件组成,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。

一、冷作模具的工作条件及失效形式

典型的冷作模具具有冷冲裁模、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) 冷冲裁模

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。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1-2表示出这一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。

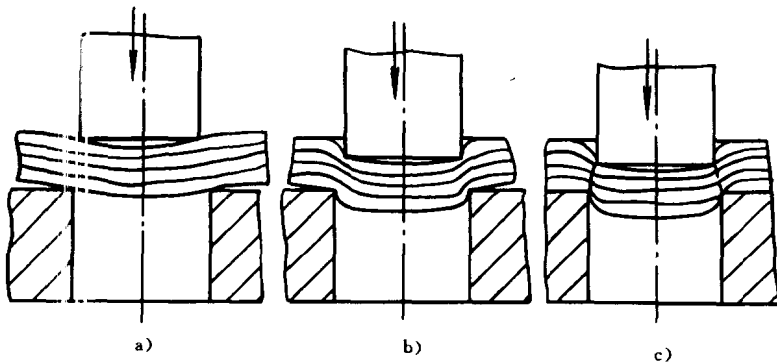


图 1-2 冷冲裁过程示意图

a) 弹性变形阶段 b) 塑性变形阶段 c) 剪裂阶段

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1-3表示出比值 d/t 与模具寿命的关系。

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。

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 1-4 所示。对应于每个阶段,模具刃口的损伤过程如图 1-5 所示。

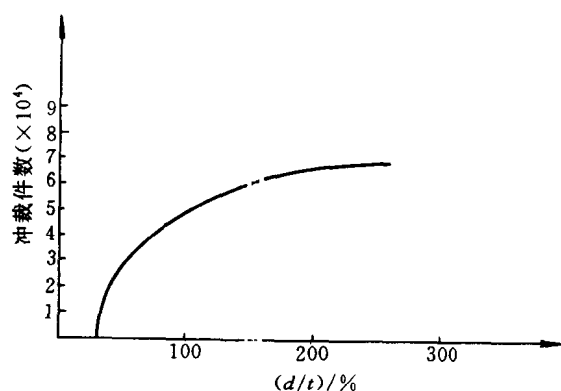


图 1-3 冲头寿命与其直径及板厚的关系

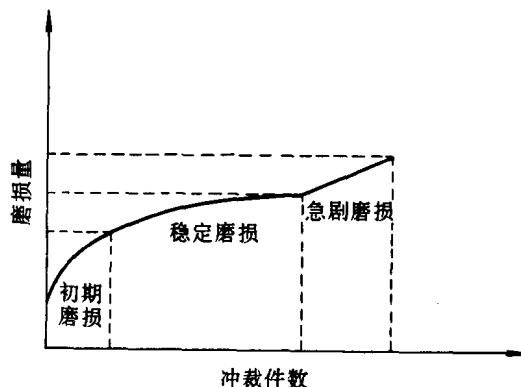


图 1-4 冷冲裁模磨损过程三阶段

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 1-5a 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 1-5b 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 1-5c 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。

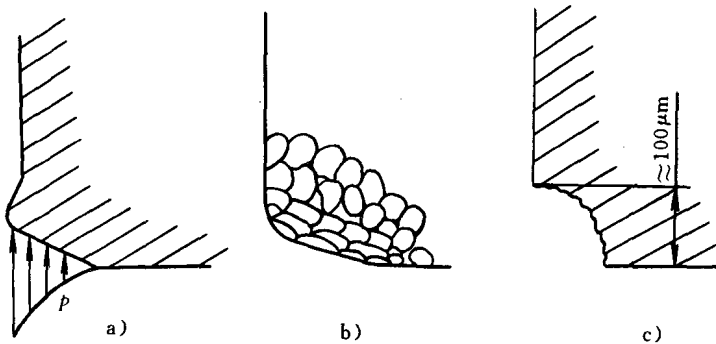


图 1-5 冷冲裁模刃口损伤过程示意图

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。

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 1-6 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。

(二) 冷挤压模和冷镦锻模

冷挤压模和冷镦锻模都是使金属坯料(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 1-7 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。

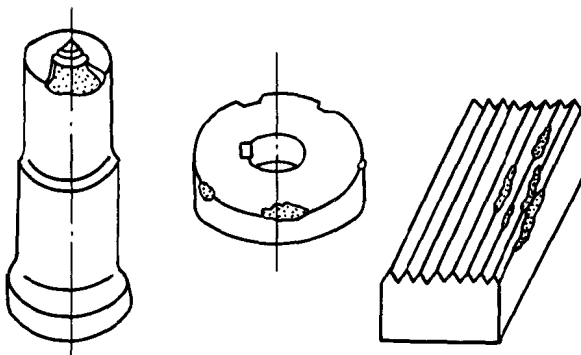


图 1-6 冷作模具局部断裂示意图

以挤压活塞销的正、反复合挤压工艺为例,如图 1-8 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。

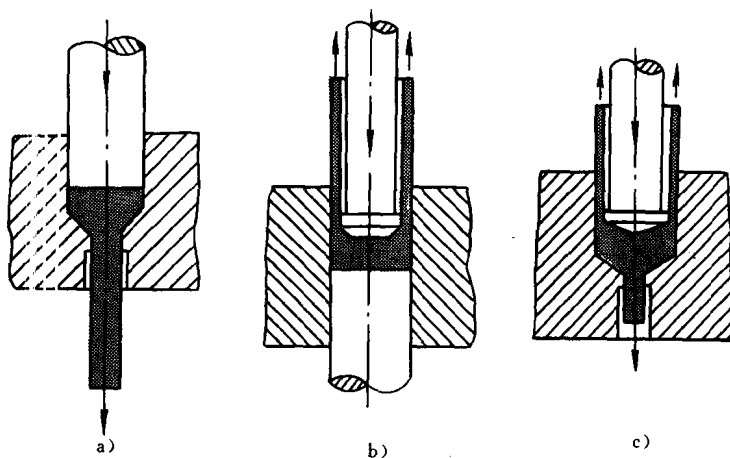


图 1-7 冷挤压工艺分类示意图

a) 正挤压 b) 反挤压 c) 复合挤压

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。设凹模的内圆半径为 a , 外圆半径为 b , 其内壁承受的单位面积压力为 p_1 , 外壁不受力, 即 $p_2=0$ 。则在凹模筒壁内将产生切向拉应力 σ_t 和径向压应力 σ_r , 且它们沿径向不均匀分布, 如图 1-10 所示。在离中心线距离为 r_x ($a < r_x < b$) 的圆柱面上, σ_{tx} 和 σ_{rx} 的值分别为:

$$\sigma_{tx} = p_1 \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r_x^2} \right) \quad (1-1)$$

$$\sigma_{tx} = p_1 \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r_x^2} \right) \quad (1-2)$$

在凹模筒内壁, 拉应力 σ_t 和压应力 σ_r 的数值, 均为最大值, 即

$$\sigma_{tmax} = p_1 \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} \quad (1-3)$$

$$\sigma_{rmax} = -p_1 \text{ (负号表示压应力)} \quad (1-4)$$

可见, 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 σ_{tmax} 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 σ_{rmax} 的作用下易发生塑性变形。这两种失效形式如图 1-11 所示。

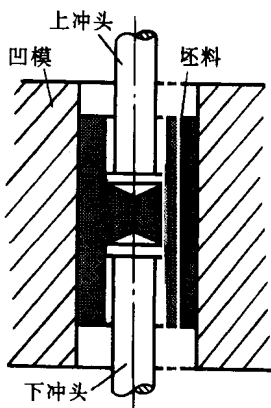


图 1-8 冷挤压活塞销示意图

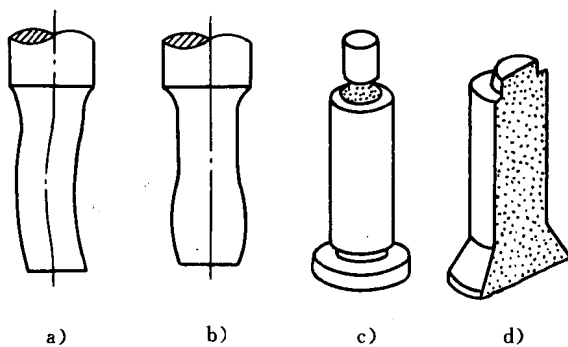


图 1-9 冲头的塑性变形和整体断裂

a) 弯曲 b) 墩粗 c) 折断 d) 劈裂

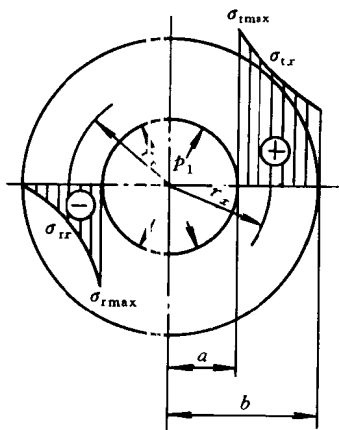


图 1-10 凹模筒壁内的应力分布

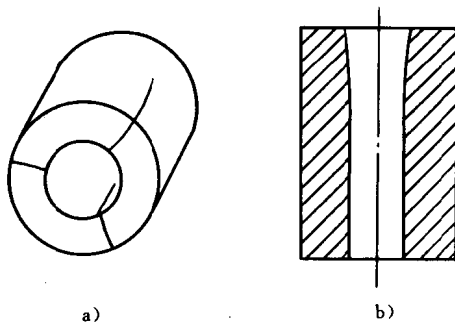


图 1-11 凹模的胀裂和塑性变形

a) 模口胀裂 b) 模口胀大

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 p_1 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,即 $p_2 \neq 0$,则不论凹模工作与否,模壁中经常存在着切向压应力。这样,在脉动载荷 p_1 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 $200 \sim 300^\circ\text{C}$,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氧化或屈服强度降低,从而加速磨损失效过程。

2. 冷锻模 冷锻模冲头与凹模的受力情况和冷挤压模类似。不同的是:冷锻冲头是以冲击力使杆状坯料在凹模型腔内锻粗(或局部锻粗)而成形;冲击频率较高,每分钟约 $60 \sim 120$ 次;冲击力较大,且与坯料的强度、变形量、形状复杂程度、精度要求,以及冷锻机的冲击速度、冲击能量有关。

因而,冷锻冲头和凹模均承受短周期重复作用的冲击载荷,其最常见的失效形式是磨损和疲劳断裂。其磨损的形式,除了磨粒磨损和表面擦伤等静磨损损伤形式外,还易产生冲击磨损,即在冲击力作用的模具(尤其是冲头)表面产生剥落、出现麻坑。由磨损造成的模具表面损伤,如擦伤、沟痕、麻坑等,均可成为裂源,导致冲头和凹模的疲劳断裂。

重载冷锻模承受很大的冲击,冲头上的压应力可超过 2500MPa ,再加工被冷锻材料的硬度不均、坯料的端面不平、冷锻机精度不够或调整不好等原因,还可使冲头产生弯曲应力。这时,冲头的失效形式除了磨损和疲劳外,还可能产生塑性变形和折断。同样,凹模承受很大的冲击性胀力,再加上型腔结构复杂时存在应力集中,其失效形式除了磨损和疲劳外,还可能产生模口胀大、棱角堆塌、腔壁胀裂等。

应该指出,由于冷挤压模和冷锻模受力较大,因而模具的结构、加工质量、润滑条件、维护保养以及冷挤压工艺设计等因素对模具的失效和寿命影响很大。在进行这类模具的失效分析时,应特别注意这些因素所起的作用。

(三) 冷拉深模

冷拉深模主要用于板材的冷拉深成形。模具在工作时,冲击力很小,单位面积的压力也不大,主要是模具型腔表面承受板材变形的剧烈摩擦。因而这种模具的失效形式主要是磨粒磨损和粘着磨损。

在冷拉深过程中,模具工作表面的某些局部负荷较重,摩擦热积累较多,承受挤压力较大。在温度和压力的共同作用下,模腔局部表面可与坯料发生焊合,使小块坯料粘附在模腔表面形成很硬的“小瘤”,即发生了粘模。这些坚硬的“小瘤”将使拉深件表面产生划痕或擦伤,降低其表面质量。这时,必须对模具进行修磨和抛光才能继续使用,以便加工出合格产品。

影响冷拉深模磨损失效和使用寿命的因素很多。被拉深板材的强度、厚度、表面状况、材料的成分和组织,均影响模具载荷的轻重和粘着(咬合)倾向的大小;在冷拉深作业中,润滑条件必不可少,润滑不良或润滑剂的种类不合适则不能有效地防止粘模;模具本身的硬度、耐磨性,型腔的结构、圆角半径和表面粗糙度对其咬合倾向和使用寿命影响也很大。

二、热作模具的工作条件及失效形式

典型的热作模具具有锤锻模、机锻模、热挤压模、热冲裁模和压力铸造模等。各种热作模具既承受机械负荷,又承受热负荷,其失效形式和影响因素更为复杂。不同热作模具的工作条件有

所不同,其失效形式也有各自的特点。

(一) 锤锻模

1. 锤锻模的工作条件 锤锻模是在模锻锤上使用的热成形模具,它在工作过程中的机械负荷主要是冲击力和摩擦作用,热负荷主要是交替受热和冷却。

(1) 模具的受力 锤锻模工作时承受多次冲击载荷,冲击力较大,且与锻锤的吨位有关。模具型腔受坯料变形的反作用,使型腔表面承受很大的压力。受模具型腔结构形状的影响,不同部位将会有不同的应力状态,如某些部位可承受弯曲或多向拉应力的作用。结构形状复杂部位的应力状态一般也比较复杂,其应力分布及大小可采用光弹法测定或采用有限元法计算。

(2) 模具的受热 锤锻模在使用前先要进行预热,在使用中与炽热坯料接触又进一步被加热。另外,坯料变形以及与型腔表面摩擦所产生的热量也有一部分被模具吸收。模具受热后的温升,主要取决于坯料温度的高低和坯料与模具接触时间的长短。同时,还受其它因素的影响,如坯料与模具间的导热能力、模具的冷却或润滑条件、模具工作的频率等。模具型腔受热后的温度可以直接或间接测定,也可以用下面的经验公式估算,即

$$t = 0.38t_1 + 0.62t_2 \quad (1-5)$$

式中 t ——模具型腔受热温度($^{\circ}\text{C}$);

t_1 ——被加工毛坯的温度($^{\circ}\text{C}$);

t_2 ——锤锻模的原始温度($^{\circ}\text{C}$)。

如在锻造钢件时,坯料温度通常在 1000°C 以上,模具型腔表面的温度一般可达到 $500 \sim 600^{\circ}\text{C}$,其中凸起部位等吸热较多,温度可高达 750°C 。

随着模具温度的升高,模具材料的力学性能将发生变化;当模具局部温度超过模具的回火温度时,这些部位将继续回火过程,从而产生组织和性能的变化;模具中温度分布的不均匀性,将会导致出现热应力。所有这些,均影响锤锻模的失效过程和失效形式。

(3) 模具的冷却 为减轻锤锻模的热负荷,控制其温升,通常在模具工作的间歇,对之进行冷却。如每锻压完一个毛坯后,用冷空气、水、油等介质冷却模具型腔;或在型腔表面涂抹润滑剂,既能减摩,又起到冷却作用。

这样,在模具工作过程中,锻模型腔不断地受到加热和冷却的反复作用,即承受交变热负荷,其结果将会引起模具产生热疲劳现象。

(4) 型腔表面摩擦 被锻金属坯料在模具型腔中热塑变流动,将对型腔表面产生摩擦作用。摩擦力的大小与正压力和摩擦表面的状况有关。在坯料能进行热塑变流动的情况下,正压力主要取决于热坯料的塑变强度,模腔表面受热氧化也将影响摩擦和磨损过程。

2. 锤锻模的基本失效形式 锤锻模在上述复杂的工作条件下服役,其失效形式也复杂多样。锤锻模承受机械负荷和热负荷较重的部分是型腔,其基本失效形式有型腔部分的模壁断裂,型腔表面热疲劳、塑性变形、磨损等。锤锻模的燕尾部分承受冲击载荷且有应力集中,因而燕尾开裂也是常见的基本失效形式。

(1) 模具型腔部分的断裂 锤锻模的尺寸较大,它的断裂不仅影响生产,而且危及人身安全,因而是最危险的一种失效形式。按其断裂的性质,它又可分为早期脆性断裂和机械疲劳断裂。

模具的早期脆性断裂是在锤击次数较少时发生的,有的仅锻打几次就出现断裂。模具在很大的冲击载荷作用下,在型腔部分受拉应力较大而又薄弱的部位可能产生裂纹,当裂纹受力扩

展至一定尺寸时,便会发生快速失稳扩展而导致突然断裂。其断口的宏观形貌特征是从断裂源开始,裂纹呈人字花纹向外扩展。

模具的机械疲劳断裂是在模具经受许多次锻击后发生的断裂。由于锤锻模所承受的冲击应力较一般机械零件承受的“静”载交变应力要大得多,故其疲劳断裂的周次远小于一般的高周疲劳,可以认为是较大冲击能量的冲击疲劳。其疲劳破坏的宏观和微观断口也具有一般疲劳断口的特征,但宏观断口上的裂纹扩展区一般较小。

由于锤锻模尺寸较大、载荷较重,因而影响其断裂的因素较多,如:模具结构设计不合理,存在薄弱部位和引起应力集中的结构;模具材料冶金质量不高,大模块又难以锻透,存在有白点、疏松、非金属夹杂物、流线分布不合理等缺陷;热处理质量不良,存在淬火缺陷、内应力、回火硬度偏高及产生回火脆性等。这些因素均可诱发裂纹萌生,并导致早期脆断或机械疲劳断裂。

(2) 型腔表面的热疲劳 所谓“热疲劳”是零件(如热作模具)在循环热应力的反复作用下所产生的疲劳裂纹或破坏。锤锻模的截面尺寸较大,沿截面的温度梯度也大,其型腔表面受急热、急冷的作用而内层的温度变化较小。因而,表层的热胀冷缩受到内层的约束而产生热应力。如型腔表面受热膨胀时,要受内层的约束使表层产生压应力;而当其冷却收缩时,又受内层的约束使表层产生拉应力。如果热应力大于材料在该温度下的屈服点,便会发生压、拉塑性应变。这样,型腔表面在循环热应力的作用下产生循环的塑性应变,经过一定周次,导致表面产生许多细小的裂纹,即热疲劳裂纹。

通常,模具锻压数千次甚至几百次就可能出现热疲劳裂纹。根据热应力的分布和作用方向,热疲劳裂纹可以呈条状、放射状,有的则连成网状,故又称为“龟裂”,如图 1-12 所示。

由于热疲劳裂纹的产生,使型腔表层有了膨胀、收缩的余地,热应力得以松弛,裂纹不会向纵深发展,一般仅数毫米。所以,热疲劳裂纹属于细小浅表裂纹,除了表面质量要求高的精锻模外,普通锻模出现热疲劳裂纹后仍能继续服役。但是,在机械应力的继续作用下,加上继续氧化腐蚀,以及由于坯料的摩擦、挤入所产生的对裂纹的扩张作用,可使裂纹继续向纵深扩展,并可能成为脆断和疲劳断裂的裂纹源。在这种断口的热疲劳开裂部分为氧化物所覆盖,呈深灰色,里面存在脱碳层。

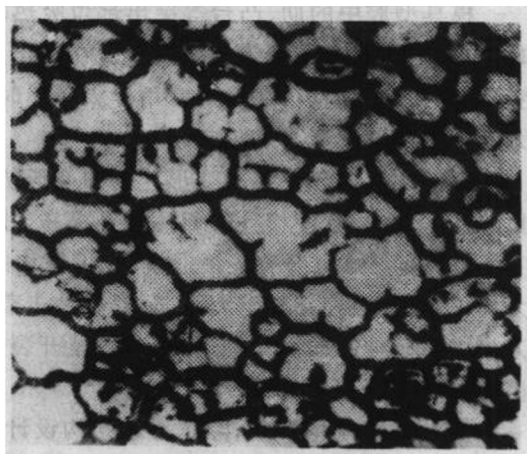


图 1-12 放大镜下的网状热疲劳裂纹

影响模具热疲劳的因素主要是:模具型腔表面的温度变化幅度(即循环温差),模具材料的抗氧化性、导热性和热膨胀系数。显然,循环温差越大,材料的热膨胀系数越大,则循环热应力越大,越易于发生热疲劳。模具型腔表面的致密氧化物层可阻缓继续氧化过程,但氧化层增厚以致破裂后,便露出基体金属并产生侵蚀沟,如图 1-13 所示。沟底的应力集中易使热疲劳裂纹萌生,沟底氧化物的不断产生和聚集,使它在循环热应力作用下起着楔子的作用,大大加速裂纹的扩展。

(3) 型腔表面的磨损 锤锻模在机械负荷和热负荷的作用下,其型腔表面的磨损非常复杂。在多次重复冲击作用下,一方面坯料对型腔表面产生冲击性的接触应力,另一方面坯料塑

变流动对型腔表面产生强烈的摩擦。在热负荷的作用下,型腔表面层可能发生软化,同时表面的氧化也将加剧。

在型腔表面与坯料滑动摩擦较小的部位,由于较大接触应力的重复作用,易使型腔表面产生小块剥落,形成痘状麻坑。热负荷对表面的软化作用及热应力的作用将促进这种疲劳磨损。

在型腔表面受坯料滑动摩擦较大的部位,由于摩擦切应力和热负荷的作用,则易使型腔表面产生氧化磨损和热粘着磨损。这种热粘着磨损,可以认为是在高温和压力作用下,坯料与模具型腔局部表面发生粘合,继而在切应力作用下粘合处破坏,在型腔表面产生擦伤沟槽。型腔表层受热软化,易于在摩擦切应力作用下发生局部的塑变流动,从而促使粘着现象的产生。

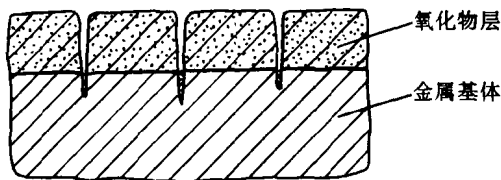


图 1-13 氧化膜破裂侵蚀沟形成示意图

当模具表面形成薄而致密的氧化膜时,可具有润滑和减摩作用,能防止热粘着现象。但在温度较高,所形成的氧化膜厚而疏松时,则由于氧化膜容易破裂、剥落,且氧化物碎片又成为磨粒,将加剧型腔表面的磨损。

对模具磨损影响较大的因素是模具的温度,模具材料的化学成分和硬度,模具型腔的表面状况,以及模具的使用条件等。

(4) 模具型腔的塑性变形 锤锻模的塑性变形常发生在模具型腔中受力大且受热温升高的部位。温度升高使模具材料的屈服强度下降,且当温度高于模具的回火温度时,则进一步使之软化。当软化部位的屈服点低于该部位所承受的应力水平时,就会产生塑性变形。

模具型腔中的肋、凸台等突出部位吸热较多,温度较高,受力也较大,当其软化层深度较大时,便会出现棱角堆塌等塑变现象。在软化层较浅的部位,可在坯料的摩擦作用下发生表层塑变流动。在模具型腔深处,则常用淬火冷却时未得到马氏体,热处理后硬度偏低,以致在较大压力下产生塑性变形,使型腔凹陷。

塑性变形也和坯料的变形速度和变形抗力有关。坯料的塑变抗力大,锤击速度高,均使模具的受力加大,且使模具表面的温升提高,故易于产生塑性变形失效。

(5) 模具燕尾开裂 锤锻模上、下模块的燕尾是安装固定模块的部位,燕尾根部凹槽有应力集中,尤其当存在加工刀痕时,易在冲击载荷的重复作用下,在刀痕处萌生疲劳裂纹,裂纹沿刀痕横向延伸并向纵深扩展,造成燕尾开裂。据有关统计资料介绍,国内有 10%~30% 的锤锻模因燕尾开裂而失效。

为了减少燕尾开裂,除了考虑结构设计、表面粗糙度和模具的安装固定等因素外,还应考虑燕尾部分的硬度和显微组织。硬度过低则对裂纹萌生的抗力低,硬度过高则对裂纹扩展的抗力低,适宜的硬度和组织才能使燕尾有最高的疲劳抗力。

应该指出,锤锻模的上述五种失效形式在同一模具上都可能出现,这是因为模具不同的部位有不同的工作条件,从而导致不同的失效形式。如:坯料相对型腔表面有剧烈流动的部位可产生磨损,压入坯料深处的突出部位可产生热疲劳,应力集中严重的部位可产生疲劳裂纹等。而最终先导致锤锻模不能继续服役的失效形式可能只是其中的一种。

(二) 热挤压模和机锻模

热挤压模和机锻模都是在机械式或液压式压力机上使用的热成形模具。它们的工作条件