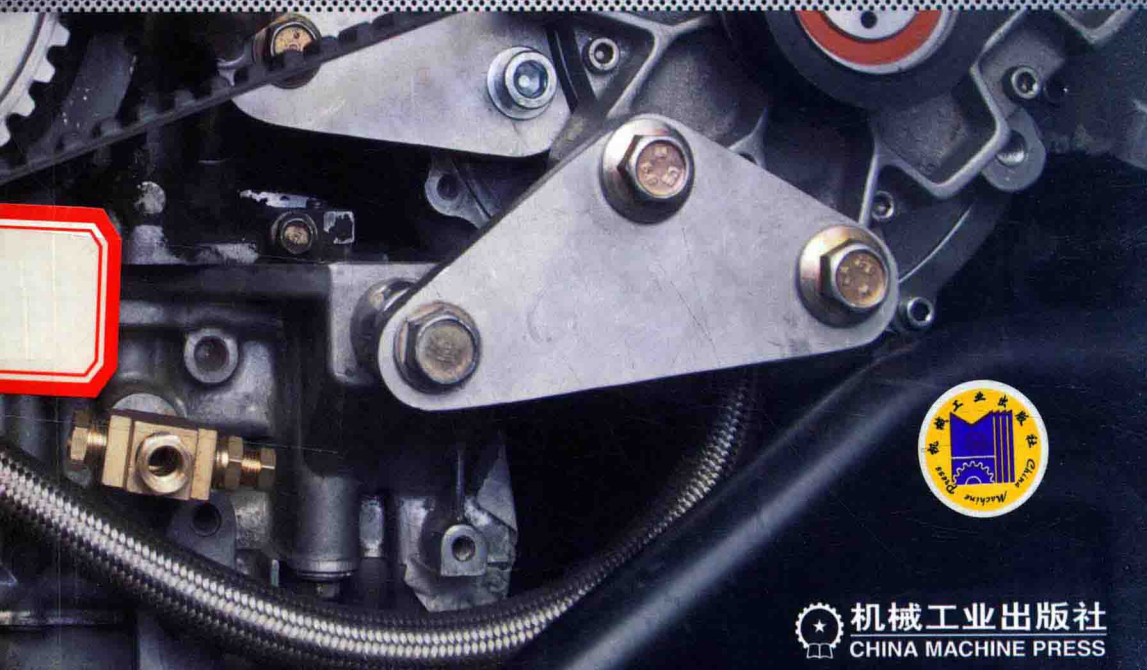


# 机械零部件

## 失效分析典型60例

李平平 陈凯敏 编著

- 中国中车戚墅堰所多年经验，60个现场实际案例，涵盖详尽的失效原因分析
- 内容丰富，覆盖面广，全彩印刷



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 机械零部件失效 分析典型 60 例

李平平 陈凯敏 编著  
徐罗平 庄 军 主审

机械工业出版社

本书提供了 60 个机械零部件的失效分析案例，这些案例多涉及铁路与汽车领域的零部件，大多数为狭义的失效分析范畴，希望对初涉失效分析领域的科技工作者提供一定的帮助。本书首先对作者在失效分析工作中的心得进行总结，随后按照多种零部件的失效原因将全文划分为五个章节，从设计，冶金，冷、热加工，装配，使用，环境等多方面进行阐述。本书案例多采用四步走形式：实例简介、测试分析、失效原因和改进方案，结构上简洁明了，方便读者阅读。

本书主要供初涉失效分析领域的一线科技工作者作为参考，同时可作为高等院校材料专业学生学习的参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

机械零部件失效分析典型 60 例/李平平，陈凯敏编著. —北京：机械工业出版社，2016. 6

ISBN 978-7-111-54136-3

I. ①机… II. ①李…②陈… III. ①机械元件—失效分析 IV. ①TH13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 148077 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：贺 怡 申永刚 责任编辑：贺 怡

版式设计：霍永明 责任校对：陈 越

封面设计：路恩中 责任印制：乔 宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2016 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 14 印张 · 2 插页 · 290 千字

0001—2000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-54136-3

定价：79.00 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](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线：010-68326294

机工官博：[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

010-88379203

金书网：[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面无防伪标均为盗版

教育服务网：[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)



# 序



中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司是中国中车股份有限公司旗下的一级子公司，始建于1959年。50多年来，中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司始终与中国轨道交通装备事业发展同行，致力于轨道交通装备的现代化。公司主要从事轨道交通装备新材料、新工艺、新装备、新技术的研究开发及其科技成果的产业化，是轨道交通装备关键零部件的高科技产业化基地。公司不仅服务于我国干线铁路运输和城市轨道交通的需要，还利用轨道交通装备专有技术向延伸产业发展，已经进入了汽车零部件、工程机械、风力发电等市场领域。中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司试验检测中心创建于1960年，可进行金属、非金属化学分析，金相检验，失效分析，力学性能测试，计量检测，无损检测及试验检测技术和新材料技术的研究。

现在问世的这本图书是在中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司多年从事机械零部件失效分析，积累了丰富资料的基础上，对用宏观检验、金相显微镜、扫描电镜、无损检测等现代化检测手段获得的大量图片、资料进行反复分析研究，认真筛选，并将其分类整理，使之系统化后编著而成的。书中60个失效案例多取自生产第一线，具有典型性，并且对缺陷的类型、特征、产生原因、防治措施都做了较为详细的说明与分析。这对现场工艺的改进、产品质量的提高，具有重要的指导作用。本书也反映了中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司在失效分析方面的研究工作是比较深入的，对科技档案资料的管理水平是很高的。

本书是李平平、陈凯敏及其同事在较短的年限内整理和积累的工作成果，是他们刻苦钻研、勤奋工作的结晶。本书作者求真务实的工作态度，在中车戚墅堰机车车辆工艺研究所青年科技工作者中起到了很好的带头作用。

中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司总工程师

陈 凯





# 前 言



我国的失效分析工作自 20 世纪 70 年代进入了一个快速发展的全新时期，在失效分析、预测及预防知识的普及教育方面，已编辑出版了大量的教材、专著及技术丛书。对培养失效分析专门人才和提高失效分析人员素质起到了一定的作用。作者作为失效分析工作者，将一些典型的案例罗列总结成册，主要目的如下：

1) 失效分析是一门覆盖面很广，综合多个学科的全方位新兴学科。目前，国内院校尚未对相关专业进行系统培养，大多从业人员都是参加工作以后从零开始积累，这样势必造成初学者在较长时期内掌握的仍是较为零散的知识点。作者认为案例教学对于初学者可起到事半功倍的作用，一方面初学者可以快速地了解该行业产品的基本失效类型；另一方面通过对多个案例的学习，初学者在分析方法和分析思路上也必有一个较为全面的认识。

2) 失效分析工作的终极目标是“消除”失效。通常，金属材料机械零部件的生命周期包括：设计，选材，冷、热加工，装配，使用，维修，失效等诸多过程，而每个过程中工作人员考虑问题的角度往往是不同的。因此，产品在流转过程中常存在一些比较容易被忽视的细节，最终导致失效的原因也是多种多样的。那么，通过对产品各种失效类型的总结，并提出预防、改进措施，使设计和维护部门得到警示和借鉴，作为工作的指导或参考，对于今后的设计、工艺改进、加工、维护及使用等众多方面无疑是有巨大帮助的，这也在某种程度上“消除”了失效的再发生。

3) 一份完整的失效分析报告，即是一个小型项目，包括前期策划、信息采集、分析测试、总结并提出预防措施等多个步骤。每份报告的完成，也必将使项目组成员得到一定程度的提升。作者将之前所有的工作总结成册，希望与广大同仁共同探讨，也希望在整理的过程中发现不足并及时改正以期取得更大的进步。

目前，关于失效分析方面的著作越来越多，且大多按产品进行分类，这样有助于工作者对某类产品有较为深入的研究。但作者认为按失效原因进行分类、统计也不失为一种好办法，其原因如下：

1) 失效分析多附属检测机构，对于委托者而言，其大多进行分析的目的在于找出直接的失效原因，以完成责任判定。

2) 金属材料机械零部件产品的制造过程大多较为接近，对于初涉失效分析的工作者，按失效原因统计更容易构建整体框架，形成较为完整的分析思路。

3) 经过长期的失效原因统计，可罗列出问题比例较高的某类原因并进行重点改进，从而将故障率大幅降低。



当然，这种方法也有其不足之处，尤其是对长期从事失效分析工作的人员，可能会造成博而不精的影响。因此，本书主要供入门级人员学习、参考。

本书承蒙中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司总工程师陈笃撰写序言。在案例的编写过程中，得到了中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司李爱东、罗宁、吴建华等前辈的具体指导，卢南雁、潘安霞、梁会雷、王群、任立文、石磊、文超、夏少华、曹渝等同志也提供了许多的帮助，还得到该公司多个部门的大力支持和帮助。四川大学沈保罗教授和重庆义扬机电设备有限公司李志义教授对书稿进行了审阅并提出了许多宝贵的意见，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免会有不妥与错误之处，敬请读者指正。

作 者

# 目 录

序	
前言	
第1章 绪论	1
1.1 失效分析的基础知识	1
1.2 失效分析的思路与方法	1
1.2.1 失效分析思路	1
1.2.2 失效分析方法	2
1.3 失效分析的难点与不足	3
1.4 本书的研究内容与案例结构	5
1.4.1 研究内容	5
1.4.2 案例结构	6
第2章 设计因素为主引起的失效	7
案例1 铝型材模具开裂	7
案例2 楔形块断裂	11
案例3 轴套开裂	14
案例4 活塞杆断裂	17
案例5 花键轴断裂	21
案例6 套圈开裂	24
案例7 电刷盖铝壳对比	28
案例8 中间环开裂	33
案例9 轴承端部螺栓断裂	37
第3章 冶金及材质因素为主引起的失效	42
案例10 花键轴表面磁痕	42
案例11 压溃体开裂	44
案例12 密封环断裂	48
案例13 主动齿轮齿面缺陷	50
案例14 机车齿轮开裂	53
案例15 大型齿轮心部缺陷	55
案例16 从板开裂	59
案例17 闸片托开裂	61



<b>第4章 热加工因素为主引起的失效</b> .....	66
4.1 铸造缺陷为主引起的失效 .....	66
案例 18 铁裙开裂 .....	66
案例 19 悬挂梁开裂 .....	69
案例 20 轴箱体开裂 .....	73
案例 21 销座开裂 .....	76
4.2 锻造缺陷为主引起的失效 .....	80
案例 22 车轴断裂 .....	80
案例 23 牵引杆开裂 .....	83
案例 24 轴承滚柱表面裂纹 .....	86
案例 25 连杆断裂 .....	89
案例 26 毂裂纹 .....	92
4.3 焊接及补焊缺陷为主引起的失效 .....	95
案例 27 摇臂开裂 .....	96
案例 28 碳钢焊板开裂 .....	99
案例 29 转向架开裂 .....	102
案例 30 模具开裂 .....	106
案例 31 悬挂梁开裂 .....	109
案例 32 弯轴表面缺陷 .....	114
4.4 热处理相关的失效 .....	117
案例 33 从动齿轮环油槽裂纹 .....	118
案例 34 棒料开裂 .....	121
案例 35 钩舌盘开裂 .....	124
案例 36 轴承圈表面缺陷 .....	127
案例 37 模具开裂 .....	130
案例 38 车轴断裂 .....	134
案例 39 齿轮轴断裂 .....	137
案例 40 主动齿轮断裂 .....	141
案例 41 尾框和扁销断裂 .....	144
案例 42 缸套淬火缺陷 .....	150
<b>第5章 冷加工及装配因素为主引起的失效</b> .....	154
案例 43 机车轴箱弹簧断裂 .....	154
案例 44 空调风机支架开裂 .....	158
案例 45 杠杆圆销表面缺陷 .....	164
案例 46 垫圈断裂 .....	166
案例 47 压溃体开裂 .....	168
案例 48 从动齿轮断齿 .....	172





案例 49 套管开裂 .....	175
案例 50 螺栓表面缺陷 .....	178
案例 51 从动齿轮齿面缺陷 .....	180
<b>第 6 章 环境及使用因素为主引起的失效 .....</b>	<b>185</b>
案例 52 铝散热器泄漏 .....	185
案例 53 导辊表面缺陷 .....	188
案例 54 齿轮表面缺陷 .....	192
案例 55 气阀杆断裂 .....	196
案例 56 凸轮轴齿轮断齿 .....	198
案例 57 大齿轮端面开裂 .....	201
案例 58 轴承振动报警 .....	204
案例 59 轴承内圈开裂 .....	207
案例 60 螺栓断裂 .....	209
<b>参考文献 .....</b>	<b>213</b>

## 1.1 失效分析的基础知识

失效是指产品丧失规定的功能。

失效的分类方法可谓门类繁多,主要有以下几个方面:①按功能分类;②按材料的损伤机理分类;③按机械失效的时间特征分类;④按机械失效的后果分类。最常见的则为按损伤机理分类,包括断裂、磨损、腐蚀、变形等,其中断裂失效最为主要,危害最大。

失效分析是指判断失效的模式,查找失效原因和机理,提出预防再失效对策的技术活动和管理活动。

失效分析的分类按目的不同通常可分为:①狭义的失效分析,主要目的在于找出引起产品失效的直接原因;②广义的失效分析,除找出直接原因外,还要找出技术管理方面的薄弱环节。

此外,失效分析已从一门综合技术发展成为一门新兴的综合性学科。要进行失效分析,需要深厚的材料学、力学、断口学、痕迹学、裂纹学、金相学、腐蚀科学、摩擦学、数学、设计、装配、使用以及管理等众多方面的知识。并且失效分析与其他学科的结合也将不断地产生新的学科。图 1-1 所示为失效分析的简化模型。

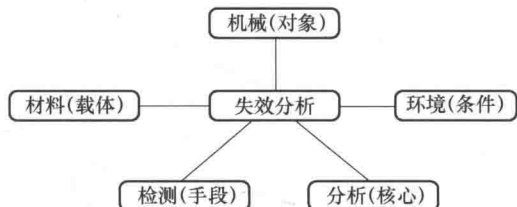


图 1-1 失效分析的简化模型

## 1.2 失效分析的思路与方法

### 1.2.1 失效分析思路

常用的失效分析思路很多,概括起来主要包括以下三种思路:①“撒大网”逐个因素排除的思路,该思路面面俱到,缺点是耗时耗力;②残骸分析法,是从物理、化学的角度对零件进行分析的方法,断口则是残骸分析中断裂信息的重要来源;③失效树



分析法，是一种逻辑分析方法。

作者认为无论哪种失效分析思路，其终极目标都是寻找“源头”。例如开裂件或断裂件，打开断口无疑是最为行之有效的办法，因为从裂纹的形态往往只能判断裂纹的性质，只有将断口打开才能确定其真实的失效原因，譬如夹杂、夹渣等引起的淬火裂纹。

### 1.2.2 失效分析方法

失效分析首先必须遵循先宏观后微观，先无损后解剖，先测试后验证等基本原则。

失效分析方法与中医理论中的望、闻、问、切如出一辙，下面就从这四个方面入手阐述失效分析的常规方法。

“望”涉及宏观和微观两个方面。宏观方面主要使用肉眼观察、照相机、放大镜、体式显微镜等方法，欲达到的目的如下：①判断失效类型，确认失效属于断裂、腐蚀、磨损、变形中的哪一类；②查找缺陷的规律性，尤其批量问题产品，须对缺陷产生的位置、数量，缺陷的形貌、尺寸进行统计、类比；③检查产品结构的合理性，如是否存在尖角、凹槽、粗加工刀痕等应力集中现象及尺寸突变等设计缺陷；④初步确定“失效源”位置，可根据断口和裂纹等综合判定；⑤检查源区及其附近区域是否存在腐蚀、磨损、碰伤等异常现象；⑥根据产品结构和断口形貌大致判断产品承受的载荷类型和载荷大小；⑦对服役过程中与失效件匹配的零部件进行排查。微观方面则主要使用金相显微镜、扫描电子显微镜、透射电子显微镜等方法，欲达到的目的如下：①显微组织分析，包括原材料洁净度、热处理组织、成分偏析、带状、流线、碳化物、异常组织等，还可结合生产工艺确定裂纹性质及其形成的阶段；②微观形貌分析，主要包括表面形貌和断口形貌等；③亚显微结构观察。

“闻”主要涉及成分和物相的检查，包括：①检查失效件化学成分是否满足相关标准要求，牌号是否正确；②对与失效件相关的异物进行能谱分析，并判断其来源；③判断元素以何种形式的物相存在。

“问”即询问、咨询，是背景材料搜集的重要途径，欲达到的目的如下：

(1) 了解失效件的整个制造过程，包括设计，选材，冷、热加工，表面加工，装配和调试等。

(2) 熟悉失效件的工艺历史：①冷加工，包括切削加工、拉压弯扭、研磨、矫直等；②热加工，包括铸造、锻造、热处理、焊接、补焊等；③表面加工，包括电镀、喷涂、喷丸、抛丸、清洗、防锈等。

(3) 获悉失效件服役前的经历，如装配、包装、贮存、运输、安装、调试等。

(4) 收集工作历史过程中的重要信息，尤其以下几方面：①反常载荷；②偶然的过载荷；③循环载荷；④温度、湿度变化；⑤腐蚀介质；⑥载荷类型；⑦与失效件配合的零部件情况等。



(5) 失效信息的收集, 譬如是由于油温、水温过高报警, 还是由于振动报警, 电压、电流跳动, 紧急制动或其他方面, 即如何发现的失效。

“切”可根据有无破坏分两部分。其一为无损检测, 众所周知, 无损检测主要包括磁粉检测、超声检测、射线检测、渗透检测、涡流检测等, 每一种类型的缺陷均有各自最适宜的无损检测方法。其二为破坏性试验, 主要包括: ①力学性能检查; ②原材料低倍检查; ③金相分析(属“望”中微观分析); ④模拟及试验验证; ⑤残余应力测试等。

综上所述, 针对失效件的复杂程度选用适宜的“望”“闻”“问”“切”方法进行综合诊断, 并提出可靠性意见, 即完成失效分析过程。

## 1.3 失效分析的难点与不足

### 1. 脱离现场搞失效分析

失效分析立足于失效背景材料的搜集和对失效样品的分析研究。失效背景材料的内容, 主要是指失效件的加工及制造史; 服役前的各种经历; 工作历史; 失效条件和环境; 反常状态等。对于大多数失效分析技术人员, 尤其是第三方测试机构而言, 往往只能获取失效样品, 而对失效背景材料的搜集则受到限制。这主要是因为: ①失效人员常因时间、地域等条件无法第一时间到达现场, 对失效零件的背景信息仅停留在感性的认识阶段; ②现场操作人员通常没有强烈的现场保护意识, 且某些他们认为无关紧要的信息, 也许恰恰就是导致失效的根本原因; ③委托方或第三者转述的信息常存在遗漏或误导性。

### 2. 脱离工艺评判组织

众所周知, 组织、性能和用途三者之间关系密切, 然而一些送检单位通常只提供材质, 分析者需要对产品进行金相组织判定, 这往往导致评判结果不够准确。譬如低碳钢回火索氏体、等温淬火贝氏体和回火马氏体的鉴别, 回火索氏体一般比较容易区分, 通常表现为保留马氏体位向, 有弥散细小颗粒状碳化物析出等特征; 后两者则需要长期的经验积累, 以及硬度测试甚至扫描电镜形貌辅助才能加以辨别。倘若在了解材质和热处理工艺的条件下, 测试者可结合金相组织形态快速并准确地做出判断。因此, 每一类组织的定性判别须结合材质、工艺、硬度、组织形态、电镜形貌等多方面综合考虑。

### 3. 首断件的判定

某一零件在发生开裂或断裂之后, 往往会导致多个其他零件或同一零件的不同部位先后出现开裂或断裂现象。在这种情况下, 须从众多的开裂或断裂件中准确地找出首断件, 其分析原则如下: ①当各断裂件中既有延性断裂又有脆性断裂时, 一般脆性断裂件发生在前, 延性断裂件发生在后; ②当各断裂件中既存在脆性断裂件又存在疲劳





断裂件时，则疲劳断裂件应为首断件；③当存在两个或两个以上的疲劳断裂件时，低应力疲劳断裂件出现在前，高应力疲劳断裂件出现在后；④当各断裂件均为延性断裂时，则应根据各零件的受力状态、结构特性、断裂的走向、材质与性能等进行综合分析评定，才能找出首断件。

#### 4. 裂纹样的判定

对于断裂件，我们可通过“T型法”“分叉法”“变形法”“氧化颜色法”和“疲劳裂纹长度法”来判断主裂纹及裂纹源的位置。但对于大多数裂纹短小、断口打开困难的试样而言，分析者通常只能通过裂纹的特征判断其类型，譬如淬火裂纹、磨削裂纹、锻造裂纹及锻造折叠等的判别。以淬火裂纹为例，其形成原因是多种多样的，有夹杂、夹渣、疏松等原材料缺陷引发的，有尖角、表面粗糙等应力集中造成的，也有热处理工艺异常导致的，然而通过裂纹形貌，我们只能知其然却不知其所以然。

#### 5. 严重受损的断裂件分析

断口如同一台记录仪，完整地将裂纹萌生、稳态扩展、失稳扩展及瞬时断裂等详细记录了下来。然而，经常由于现场人员的疏忽或环境、介质的作用，使得断口表面发生严重锈蚀或碰伤、磨损等，这对于分析者来说，无疑是致命的缺陷。对于表面锈蚀的断口试样，分析者首先必须结合宏观、微观、能谱等测试手段判断其是否属于某种类型的腐蚀以及腐蚀介质的来源，其次需要采用适宜的方法进行表面清洁处理。对于磨损严重的试样，首先，根据剪切唇、断面粗糙程度或局部贝纹线等残留信息初步判断裂源的大体位置；其次，观察裂源区域是否存在明显的原材料缺陷或结构设计缺陷；最后，结合产品的受力情况、安装结构、工况、使用寿命及材质、组织、性能综合推断零件的失效类型。

#### 6. 对于“无异常试样”的分析

大部分从事失效分析工作不久的人员常常会遇到失效试样“无异常”的现象，经过一番仔细的检查后发现失效件原材料、表面加工质量及热处理工艺均正常，且使用过程中未发生违规操作，最后失效分析报告必然就变成了一份普通的检验报告。其实，每一类零部件的失效必有其深层次的原因，倘若常规检查一切正常，则可考虑其结构设计的合理性，服役过程中外载荷的类型，安装是否存在偏载，以及构件自身残余应力的测试等。目前，对于残余应力的测试多采用 XRD（X 射线衍射），但其只能对表面较浅的范围进行测试，且表面必须是平面。而大多数机械零部件的失效部位多为结构相对较为复杂或应力集中严重的地方，残余应力的测试误差可能会很大。

#### 7. 定量分析与定性分析

21 世纪以前，失效分析基本是千篇一律的定性分析，但这足以解决生产中遇到的现场问题。目前，失效分析工作中常见的定量分析主要有以下几方面：①成分分析，包括化学方法和能谱（半定量分析）等；②物相和残留奥氏体分析，通过 X 射线衍射仪





判断元素的存在形式及残留奥氏体含量；③第二相面积测定；④夹杂物、孔隙率测定；⑤残余应力测定；⑥裂纹长度、瞬断面积、疲劳条带间距等的测定；⑦力学性能测试；⑧通过无损检测，确定缺陷的位置和尺寸等。随着科技的发展，尤其近十几年来，无论生产厂家还是客户都急切地想要知道其产品的使用寿命；或者产品出现裂纹后能否继续使用；或者产品断裂后反推其服役条件，譬如载荷、时间、裂纹萌生条件、应力集中程度等。这需要科技工作者拥有大量的实践经验、理论和计算水平的支撑。因此，如何巧妙地应用定性与定量分析将是以后中长期发展的趋势。

## 8. 模拟

机械制造业中，有人认为我国与国外的差距主要是材料，有人认为是设计，也有人认为是加工和工艺，作者认为设计中模拟的差距不容忽视。时至今日，钢铁材料的冶炼水平已达到空前的高度，无论是夹杂、夹渣、元素偏析等，还是气体含量或者有害微量元素的控制等，都已达到了较高的水平。加工和工艺方面则考虑到结构、成形难易程度、成本等因素而存在一些差异。设计中模拟则存在明显差距，与我国相比，国外的模拟已涉及产品的整个寿命周期，从设计、加工、使用到环境等无一例外，大大降低了产品投入使用后的故障率，即做到了“预防为主”。

## 9. 试验验证

试验验证可选择不同类型的载荷，包括载荷的幅值、加载时间、周期等，还可以模拟一些特定的环境，譬如温度、湿度、气氛等，但其常常只能设置一个或者少数几个可变参数。然而，对于大多数零部件而言，服役往往是在多种类型的载荷（即复合载荷）下进行的，环境一般是在冷、热交变的情况下，同时腐蚀介质可能不止一种，这些在试验验证时通常是满足不了的。

# 1.4 本书的研究内容与案例结构

## 1.4.1 研究内容

本书共举 60 个典型的失效分析案例，大多数为狭义的失效分析范畴。作者根据失效原因将这 60 个案例划分为五个章节，具体内容如下：

第 2 章，设计因素为主引起的失效。目前，机械零部件的设计水平足以避免出现大的设计缺陷，但对于应力集中等较为细微的方面考虑仍有欠缺。本章主要针对尖角、小圆角、表面粗糙度、加工刀痕等引起的应力集中和螺栓的成形等几方面内容进行了举例。

第 3 章，冶金及材质因素引起的失效，冶金属于铸造的范畴，本书中将其单独列为一章。主要涉及以下四个方面的内容：①夹杂、夹渣等冶金缺陷；②微量元素超标；③白口化；④成分不满足技术要求。

第 4 章，热加工因素为主引起的失效，包括铸造、锻造、焊接（含补焊）、热处理



四大部分，本章铸造区别于第二章的冶金部分，偏向于浇注过程。内容详见表 1-1。

表 1-1 热加工因素为主引起的失效

热加工	失效实例
铸造	疏松，气孔，铸造热裂纹
锻造	表面脱碳，锻造裂纹，锻造折叠
(补) 焊接	焊接热裂纹，焊接冷裂纹，熔合不良，淬硬组织
热处理	淬火裂纹（夹杂物，带状偏析，边廓裂纹），回火不足，未调质，热点矫直，碳化物超标，脱碳，加热频率高等

第 5 章，冷加工及装配因素为主引起的失效，主要涉及磨削裂纹、加工硬化、加工余量不足、酸洗氢脆、对中不良、磨加工异常、铰孔缺陷等 7 类案例。

第 6 章，环境及使用因素为主引起的失效，主要涉及腐蚀、冷却不良、润滑不良、镀层压溃、周期性外载荷、配件断裂、电蚀、异常擦伤、螺栓松动等 9 类案例。

## 1.4.2 案例结构

本书对案例的讲解多分为实例简介、测试分析、结论、建议四部分。

(1) 实例简介 主要涉及产品介绍和宏观分析两大部分。其中产品介绍包括名称、材质、用途、制造工艺、失效形式、失效比例、使用环境、载荷情况及使用寿命等，即图 1-1 中所述的材料（载体）、机械（对象）、环境（条件）。宏观分析包括结构分析、断口分析、痕迹分析、残骸分析及部分无损检测等。

实例简介在本书案例中占比较大，主要出于以下两方面考虑：

1) 产品信息的采集，尤其对送检试样（分析人员未到达现场）而言，在信息准确的前提下，结合宏观分析，往往可以初步判断其失效原因。相反，倘若信息采集有误，则可能对后续的分析过程造成倾向性的误导。

2) 宏观分析，一般是用肉眼或放大镜对失效件断口、断裂位置及裂纹等进行分析的方法。近年来，随着微观分析手段的升级更新，越来越多的分析人员热衷于先进设备的使用，以便获得“高档”的图片信息，而忽视了宏观分析。实际上不同分析各有不同的目的和功用，对某些问题而言，宏观分析可以提供非常重要的信息，同时对微观分析有着重要的指导意义，甚至仅进行宏观分析就可以解决问题，达到简单、快速、可靠的目的。这点在部分案例中可得到较好的验证。

(2) 测试分析 即图 1-1 中所述的手段。常用的测试分析包括以下几方面：①无损检测；②原材料检查，包括洁净度、化学成分及低倍检查等；③显微组织分析；④微观形貌分析；⑤能谱分析；⑥力学性能测试等。

(3) 失效原因和改进方案 根据实例简介和测试分析结果，得出导致零部件失效的直接原因，穿插相关知识点加以阐述，并提出相应的预防措施。



## 案例1 铝型材模具开裂

## 1. 实例简介

某厂自主研发设计的铝型材热挤压模具，材质为 H13 钢（4Cr5MoSiV），整体采用分离式的上、下模结构。其中上模为均匀分布的直通四孔结构，主要用于铝材的“分流”，下模则主要用于铝材的“融合”与成形。图 2-1 所示为上模入料端的三维示意图，由图可知：内桥端面加工为平台状，转角处几乎为直角过渡，见图中红色箭头所指处。

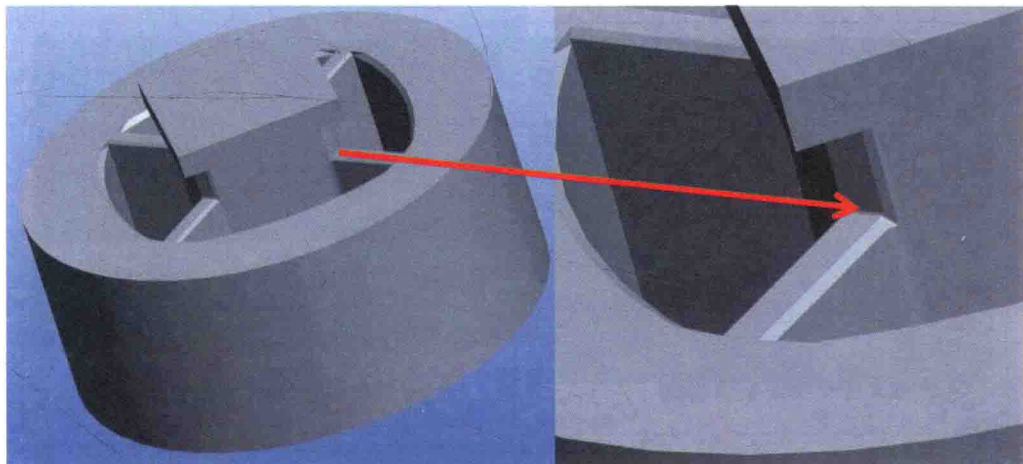


图 2-1 上模入料端三维示意图

模具加工好后首先进行铝型材的试制，试制以一定吨位的铝材和产品的表面成形质量为评判标准。待其试制成功后，再进行型腔表面的渗氮强化处理，继而投入生产。

产品在试制过程中，上模入料端内桥转角处多次发生开裂现象，裂纹形貌如图 2-2 所示：沿转角处约呈  $45^\circ$  向内扩展，外形曲折，两侧耦合性很好，但似有异物充填迹象。遂将开裂部位断口打开（备注：利用三点弯曲方法将其压开，整个过程异常困难）。从图 2-3 可看出断面呈银白色，结合模具工作环境可初步判定：填充物为铝。

## 2. 测试分析

(1) 能谱分析 图 2-4 为断口能谱分析，由图可知断面成分显示为纯 Al，结果与





上述推测相符。此外，微观形貌显示断面呈韧窝状断裂特征，这是因为铝的塑性极好，在拉应力作用下表现为等轴韧窝状塑性断裂特征。



图 2-2 开裂处形貌



图 2-3 断口形貌

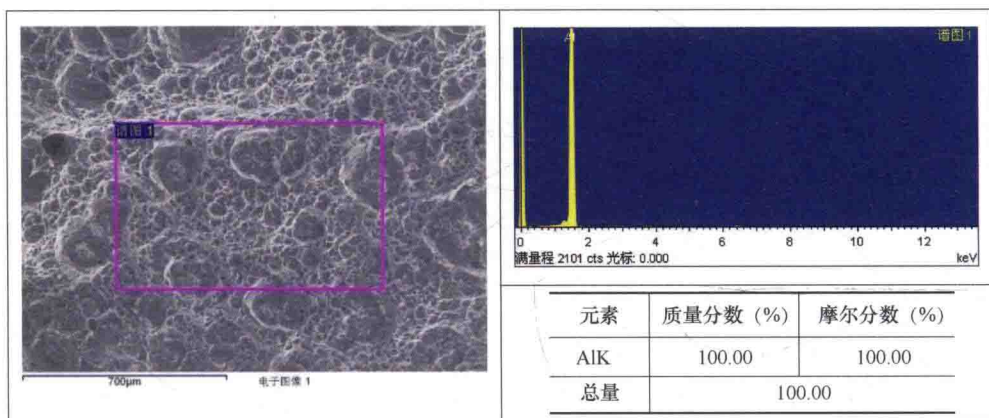


图 2-4 断口能谱分析

(2) 显微组织分析 图 2-5 ~ 图 2-9 所示为开裂处及其附近金相组织，由图可知：①裂纹起裂于内桥转角 R 部位，该处无明显过渡圆角，表面粗糙度值大，局部甚至呈锯齿状；②裂纹内填充有 Al，这点与上述描述相同；③值得提出的是，转角处表面存在脱碳现象，但仅限于①中所述的锯齿状区域，这表明该处工作温度较其余部位高。显微硬度梯度显示总脱碳层深度约为 0.2mm，脱碳区（距离表面 50 $\mu$ m）硬度较心部低约 60HV0.3；④仔细观察发现，脱碳区表层密集分布着垂直于表面的细小裂纹，这是因为脱碳降低了表面的疲劳强度，同时由于表面粗糙造成局部应力集中。因此，在 Al 流体的冲击作用下该处极易萌生疲劳裂纹。对比发现，远离开裂处型腔表面粗糙度值小，组织为回火马氏体 + 回火托氏体，未见脱碳现象，硬度梯度也无下降趋势。