

**Failure Analysis of Metallic Materials**  
**金属材料失效分析**

杨晓洁 杨军 袁国良 编著



化学工业出版社

# Failure Analysis of Metallic Materials 金属材料失效分析

杨晓洁 杨军 袁国良 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

《金属材料失效分析》对一些金属材料失效案例进行了研究分析。简要介绍金属材料失效分析基础知识、失效分析检测技术及方法、金属材料失效分析案例。着重介绍了氨水槽、供热管道、消防水带、混凝土泵车、汽车转向拉杆、燃气输送管道、锅炉管、二沉池齿轮、卫生间淋浴器、风冷热泵冷(热)水机、散热器丝堵、满-液式水源热泵机组、空调等产品的失效形式、断裂形貌、组织结构特点、破损机制和分析手段等;通过对上述产品失效机制的分析和探讨,对相应产品失效程度控制的基本措施和手段提出了建议。

本书可供从事材料失效分析工作、表面工程技术等科研人员、高等院校相关专业的研究人员和师生参考和阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

金属材料失效分析 / 杨晓洁, 杨军, 袁国良编著. —北京:  
化学工业出版社, 2018.10  
ISBN 978-7-122-33243-1

I. ①金… II. ①杨…②杨…③袁… III. ①金属材料-  
失效分析-教材 IV. ①TG115

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第245940号

责任编辑: 王婧 杨菁 李玉晖  
责任校对: 王静

装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)  
印装: 北京新华印刷有限公司  
787mm×1092mm 1/16 印张9<sup>3</sup>/<sub>4</sub> 字数191千字 2019年3月北京第1版第1次印刷

购书咨询: 010-64518888 售后服务: 010-64518899  
网 址: <http://www.cip.com.cn>  
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 80.00元

版权所有 违者必究

# Preface

## 前言

材料失效分析最早来源于机械零件的损坏或失效，是一门交叉、边缘、综合的新兴学科，与很多学科和技术交叉。所谓材料失效就是某些机械构件在复杂的服役环境下，构件的组织、结构的变化引起其尺寸、形状、性能发生变化，进而失去材料本身应有的功能，也可以称之为事故或者故障。失效分析就是利用先进的技术手段对失效零件的组织、结构、表面宏观痕迹、化学成分等方面进行诊断，主要包括观察过程、诊断过程、分析过程、预测或预防过程。失效分析对提高机械产品质量和确保机械构件安全运行发挥越来越大的作用，对高科技的飞快发展具有重要的现实意义。机械装备由于失效引起的损失在中外历史上是惊人的。据不完全统计，我国在近十年期间，农用喷雾器一项，每年因腐蚀报废 1000 万只，损失 2.5 亿元；矿山机械零部件由于早期失效造成的损失每年达 10 亿元。通过失效分析，找出造成机械装备失效的原因，采取改进措施，可防止重大事故的发生，提高产品质量，减少损失，产生相当可观的经济效益。

《金属材料失效分析》内容包括金属材料失效基础知识、失效分析检测技术及方法、金属材料失效分析案例和相关国家标准，主要讲解了多种金属材料失效形式、形貌、特点、破损机制、分析手段；各种失效形式包括机械力破损、腐蚀性破损和高温破损等；介绍了失效特征、失效机制、断口形貌、成分分析手段等。典型案例中主要介绍了钢铁合金、铜及铜合金、铝及铝合金、钛及钛合金等材料的失效分析。

本书是在笔者从事十多年金属材料失效分析基础上，结合该领域科研工作的研究成果而编写的。济南市工程质量与安全生产监督站袁国良工程师编写第 1 ~ 3 章，杨晓洁高级工程师编写第 4 ~ 6 章和第 2 部分的案例 1 ~ 11、13、16、17、20，杨军工程师编写第 2 部分的案例 12、14、15、18、19。全书由杨晓洁统稿。

特别感谢山东大学周英勤老师和吴东亭老师，山东建筑大学袁兴栋副教授，山东省产品质量检验研究院李守泉研究员、马洪涛研究员和崔岩、于晓阳、张勇亭、王振明、李杨，山东建筑大学的研究生王泽力以及其他给予指导和帮助的同仁，在此表示衷心的感谢。山东省产品质量

检验研究院在金属材料构件失效分析领域有较强能力，多年来一直开展相关工作，具备了对金属材料的宏观、微观检测分析能力，能够系统地分析金属材料及机械零部件失效的原因。

谨以此书献给所有帮助、支持我们的社会各界和同行朋友，由于编者水平有限，虽经一再校阅，书中可能仍有疏漏之处，敬请读者提出宝贵意见和建议。

编者

2018年4月

# Contents

## 目录

### 第 1 部分 金属材料失效分析和检测技术

1 概述	002
1.1 材料失效分析的作用	002
1.2 材料失效分析的程序	003
1.3 材料失效分析的发展趋势	005
2 材料失效形式	009
2.1 材料的断裂	009
2.2 材料的磨损	011
2.2.1 黏着磨损	013
2.2.2 磨粒磨损	013
2.2.3 疲劳磨损	015
2.3 材料的腐蚀	015
2.4 材料的变形	016
3 材料失效分析方法	018
3.1 断口分析	018
3.2 断口的准备和清理	019
3.3 断口分析技术	019
3.4 裂纹分析	020
3.5 痕迹分析	020
3.6 产物分析	021
4 检测技术——金相分析	022
4.1 金相显微镜	022
4.1.1 光学显微镜的构造	022

4.1.2 金相显微镜的基本原理和主要性能指标	023
4.2 光学显微镜的使用	026
5 检测技术——硬度分析	029
5.1 洛氏硬度计的构造	029
5.2 洛氏硬度测试法	030
6 检测技术——SEM 分析	032
6.1 扫描电子显微镜的构造	032
6.2 扫描电子显微镜的使用	035

## 第 2 部分 金属材料失效分析案例

案例 1 腐蚀失效	038
某工厂氨水槽在使用过程中发生泄漏	038
案例 2 工艺不合理	043
某工厂供热管道在使用过程中发生开裂	043
案例 3 脆性铁相	049
某企业消防水带接口在使用过程中发生断裂	049
案例 4 上贝氏体	054
某建筑企业混凝土泵车的举升臂发生断裂	054
案例 5 螺纹加工	060
某汽车转向拉杆发生断裂	060
案例 6 铸造冷速过快	065
燃气输送管道断裂的失效分析	065
案例 7 导热不均匀	069
某能源煤化公司锅炉管出现爆管	069
案例 8 组织缺陷	074
某公司二沉池齿轮出现断裂现象	074
案例 9 球状铅相	080
某住户房屋卫生间淋浴器的弯头对丝发生断裂	080

案例 10 枝晶组织	084
某公司娱乐广场使用风冷热泵冷（热）水机组出现铜管开裂	084
案例 11 Fe-Si 杂质相	088
某公司散热器丝堵断裂造成漏水现象	088
案例 12 应力腐蚀	093
某公司满 - 液式水源热泵机组蒸发器发生泄漏	093
案例 13 晶间应力腐蚀	097
某公司空调波纹连接管发生泄漏	097
案例 14 疲劳断裂	102
某公司氮氢气压缩机一级连杆螺栓断裂	102
案例 15 变质处理	106
某公司油罐车放油阀断裂分析	106
案例 16 铅相	110
某公司供暖用螺纹连接球阀发生断裂	110
案例 17 晶间腐蚀	114
某学校教学楼护栏发生断裂	114
案例 18 热处理不当	121
某公司使用的螺栓发生断裂	121
案例 19 配合键失效	124
某农民使用收割机的柴油发动机发生故障	124
案例 20 点蚀	128
某中央空调用钢管出现泄漏	128

## 附录 金属显微组织检验方法



## 第 1 部分

---

# 金属材料失效分析和 检测技术

# 1

## 概述

材料是人类用于生产和制造物品、机械、构件、工具等产品的物质，是人类赖以生存和发展的物质基础，材料的发展史与人类的文明史近似相同。20世纪70年代人们就把材料、信息和能源誉为当代文明的三大支柱，随后的新技术革命，又把材料作为重要的标志。可以说，材料与国家经济建设、文明建设以及人类的生活密切相关。随着材料的多元化发展，国家科技水平的不断提高，以及近些年机械领域一些重大机械事故的发生，材料失效分析在工程应用领域得到了前所未有的关注，部分高等院校还开设了材料失效分析相关课程，以丰富学生的专业知识。

### 1.1 材料失效分析的作用

据有关部门估算，各国每年因失效造成的经济损失约占该国GDP的2%~4%。我国2014年、2015年、2016年的GDP分别是64万亿元、68万亿元、74万亿元，若以4%计，损失值分别高达2.6万亿元（2014年）、2.7万亿元（2015年）、3.0万亿元（2016年）。因而，材料失效分析产生的社会效益也是巨大的。

材料失效分析最早来源于机械零件的损坏或失效，是一门交叉、边缘、综合的新兴学科，与很多种学科和技术交叉，如图1.1所示。学科之间的交叉使材料失效分析学科变得较为复杂，也可以说是许多学科的结合体。材料失效分析学科与其他学科交叉又产生了许多新的学科，例如：机械失效学、失效物理学、失效环境学、失效力学、损伤力学、可靠性数学等。

所谓材料失效就是某些机械构件在复杂的服役环境下，由于构件的组织、结构的变化而引起其尺寸、形状、性能发生变化，进而失去材料本身应有的功能，也可以称之为事故或者故障。通常情况下，我们判断材料是否发生失效，主要根据以下三个条件：

- ① 机械零件本身（尺寸、形状、性能）完全遭到破坏，不能正常工作。
- ② 机械零件本身（尺寸、形状、性能）部分遭到破坏，能够继续工作，但是不能完全满足所有的工作任务。

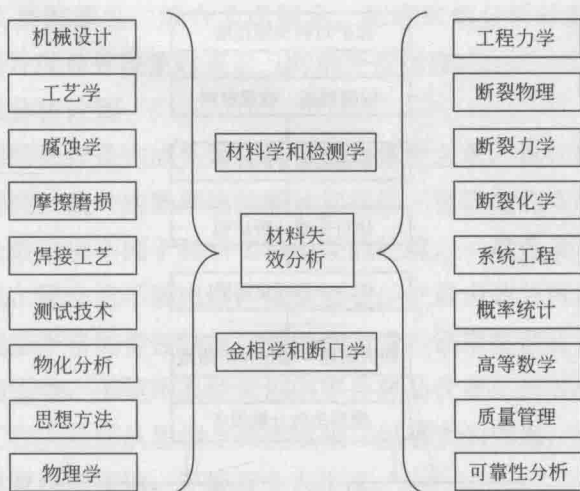


图 1.1 与材料失效分析交叉的知识

③ 机械零件本身（尺寸、形状、性能）严重遭到破坏，能够继续工作，但是工作危险性较大，一般不建议继续工作，需对其进行简单修复。

以上三种情况发生任何一种都可诊断为材料发生了失效。

所谓的失效分析就是利用先进的技术手段对失效零件的组织、结构、表面宏观痕迹、化学成分等方面进行诊断的过程，主要包括观察过程、诊断过程、分析过程、预测或预防过程。失效分析、提高技术、再失效分析、再提高技术，如此循环下去，失效分析对提高机械产品质量和确保机械构件安全运行将发挥越来越大的作用，对高科技的发展具有重要的现实意义。失效分析的作用可以从国家经济、社会生活、工程技术和科技进步等四个方面来着重认识。从国家经济来看，失效分析是不断防止事故重新发生，不断减少经济损失的重要手段，是调节国际、国内各种经济纠纷的重要技术依据。从社会生活来看，科技是第一生产力，安全是保证科技生产的重要武器，失效分析能够有效地促进安全生产，保证经济的可持续发展和社会生活的良好改善。从工程技术来看，失效分析是机械零件维修的重要依据，也是保证机械零件可靠性的重要技术基础，同时，也是提高工程技术手段的重要科学基础。从科技进步来看，失效分析能够客观地认识社会事物的本质，是发展学科新技术、新理论、新方法、新工艺的重要窗口。

## 1.2 材料失效分析的程序

材料失效分析应按照一定的工作程序进行，主要是保证失效分析的有效性。失效分析过程中的具体细节应根据案例的具体情况，详细制定失效分析计划，这样能够更客观、更准确、更有效地完成案例的分析。笔者结合多年的工作经验制定了一个失效分析的程序，供参考，如图 1.2 所示。

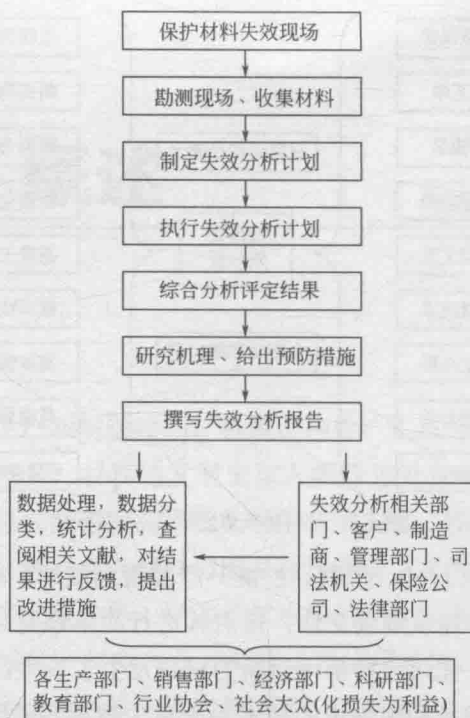


图 1.2 材料失效分析的基本程序

从图 1.2 可以分析得到材料失效分析涉及的部门较多，研究的内容较多，考虑的细节较多。

### (1) 保护材料失效现场

保护材料失效现场是很重要的程序，与刑事案件的现场保护一样，要维持材料失效现场的原状，包括大小、形状、表面痕迹、断口形貌污染度、零件的使用环境等条件。

### (2) 勘测现场、收集材料

这一程序主要是对失效现场的条件进行宏观观察，同时收集背景材料。勘测现场形式主要包括：勘测现场的摄影、录音、录像、绘图和文字描述等。勘测内容一般有失效零件的碎片尺寸、大小、形状，失效零件表面的痕迹、残留物、杂物、断口形状、腐蚀程度、氧化物、变形程度以及散落在失效零件周围的粉末和磨屑，失效零件的部分结构和制造特征，失效零件周围的景物、温度分布、湿度分布、大气环境、水质环境等，有关人员的陈述和佐证等。收集的材料主要是失效零件的类型、制造商、生产日期、出厂批号、安装工艺及地点、操作人员、维修人员、运行记录、操作规程、安全操作等，失效零件的使用说明书、检验记录、维修记录、质量控制记录以及合同，有关的标准、法规以及参考文献等。

### (3) 制定失效分析计划

失效分析计划是完成失效分析工作的依据，是顺利开展失效分析工作的重要保障。通常情况下，失效案例的分析均要制定相应的分析计划，应根据案例的具体情

况，结合多方面人员的意见，综合考虑制定。制定失效分析计划要留有一定的空间，以备个别案例发现意外现象时采取及时的补救措施。

#### (4) 执行失效分析计划

失效分析计划的执行是完成失效分析工作的重中之重，执行的好坏直接决定分析的科学性和合理性，故一定要严格按照计划执行，有详细的实施记录，并随时对记录进行分析。失效分析不同于科研实验结果的处理，一般要求在较短时间内给出合理的结果，所以，需注意不要出错，保证质量；一般失效分析问题都涉及法律问题，所以，应该建立严格的责任制度，谁做谁负责，谁审核谁负责；分析的试样应直接来源于失效的原物，不能用其他来源的零件样品代替；失效分析是认识客观世界的一种活动，工作人员应从思想上高度重视，以事实为依据，以法律为准绳，从客观事实出发，尊重科学规律，不能有个人主义。

#### (5) 综合分析评定结果

失效工作人员一定要对以上各程序结果进行综合分析，要经过多方面的讨论、座谈、研讨，建立自己的逻辑分析图。通常情况下，一个失效分析案例存在多种可能的失效原因，应该努力分清原因，并得到主次之分，同时将讨论、座谈、研讨的工作记录进行存档，以备后用。

#### (6) 研究机理、给出预防措施

研究机理、给出预防措施这个工作是失效分析整个工作中最重要的一个环节。失效分析不仅仅是给出零件失效的原因，更应该给出预防零件失效的措施。这是对相关失效分析研究工作的有效补充，也是预防零件再发生类似故障最直接的方法，甚至是防止重大机械事故的有效措施。

#### (7) 撰写失效分析报告

失效分析报告没有固定的格式，但文字一定要简练、明了、清晰，内容一般包括：题目、背景、分析过程、分析结果、补救措施或建议、附件（规范、标准、原始记录、图片等）、分析人员和审核人员签字、日期。有的报告还包括到现场的人员及签名。

#### (8) 评审、提出、反馈失效分析报告

这阶段工作涉及的部门较多，主要是对失效分析报告的最终评定。在失效分析过程中，若发现新的失效机理或现象，工作人员可以对其进行总结，并在相关学术期刊上进行发表，分享科学结果。

## 1.3 材料失效分析的发展趋势

工业发达国家高度重视航空装备在内的交通安全事故的调查研究工作。

美国建有国家运输安全委员会。早在1967年，美国成立了“机械故障预防中



心(MFPC)”,由原子能委员会、美国国家航空和宇航局(NASA)等长期支持,开展航空和宇航材料与结构的服役失效分析工作。美国的失效分析中心遍布全国各个部门,有政府办的,也有大公司及大学办的。例如,国防尖端部门、原子能及宇航故障分析集中在国家的研究机构中进行;宇航部件的故障分析在肯尼迪空间中心故障分析室进行;阿波罗航天飞机的故障在约翰逊空间中心和马歇尔空间中心进行分析;民用飞机故障在波音公司及洛克威尔公司的失效分析中心进行分析。福特汽车公司、通用电器公司及西屋公司的技术发展部门均承担着各自的失效分析任务。许多大学也承担着失效分析任务。像里海大学、加州大学、华盛顿大学承担着公路和桥梁方面的失效分析工作。有关学会,如美国金属学会、美国机械工程师学会和美国材料与试验学会均开展了大量的失效分析工作。

在德国,失效分析中心主要建在联邦及州立的材料检验中心。原西德的1个州共建了500多个材料检验站,分别承担各自富有专长的失效分析任务。工科大学的材料检验中心,在失效分析技术上处于领先地位。德国联邦材料测试实验室及GKSS研究中心是长期从事材料及结构服役与失效综合研究的世界著名的研究机构。

在日本,国立的失效分析研究机构有金属材料技术研究所、产业安全研究所和原子力研究所等。在企业界,新日铁、日立、三井、三菱等都有研究机构,另外各工科大学都有很强的研究力量。

意大利材料测试国家实验室也是长期从事材料及结构服役与失效综合研究的世界著名的研究机构。

美国出版和再版的《金属手册》中的失效分析卷是一本影响较大的实用工具书。美国出版了杂志《Failure Analysis & Prevention》。从2004年每隔两年召开一次国际工程失效分析会议(International Conferences on Engineering Failure Analysis)。英国定期出版杂志《Engineering Failure Analysis》。

中国在1974年南京召开的材料金相学术讨论会上,第一次设立了失效分析分会场。1980年在北京召开了全国第一次机械装备失效分析经验交流会,收集论文和分析案例300余篇。1984年和1988年分别在杭州和广州召开了第二次和第三次全国失效分析技术会议。1993年6月在桂林召开了第四次全国失效分析会议。1986年成立了中国机械工程学会失效分析分会。1987年召开全国机械装备失效分析评比交流会(后被称为“第一次全国机电装备失效分析预测预防战略研讨会”)。1992年中国机械工程学会失效分析分会联合全国22个一级学会共同组织了“第二次全国机电装备失效分析预测预防战略研讨会”。1998年举办了“第三次全国机电装备失效分析预测预防战略研讨会”。1995年北京航空航天大学与美国金属学会、中国航空学会、中国科协工程联失效分析和预防中心共同举办了“国际失效分析和预防学术会议”(ICFAP95)。2005年中国机械工程学会失效分析分会与理化检验分会一起组织了2005年全国失效分析学术会议。2006年全国失效分析与安全生产高级研讨会在北京召开。2007年中国机械工程学会失效分析分会与理化检验分

会一起组织了2007年全国失效分析学术会议。1994年成立了中国航空学会失效分析专业分会。中国航空学会失效分析专业分会已经组织召开了五届全国失效分析学术会议。编辑出版了多种失效分析专业书籍,例如《金属断口分析》《机械产品失效分析丛书》《机械零件失效分析》《机械失效分析手册》和《失效分析》等。有专门的失效分析期刊,例如《飞行事故和失效分析》(内部资料)和《失效分析与预防》,除此之外还有许多期刊开设了失效分析栏目,例如《金属热处理》《理化检验》(物理分册)等。包括清华大学、北京航空航天大学等30余所大学开设了失效分析课程。

机电装备的失效率代表着一个国家或一个企业机电产品设计或质量水平,也代表工作人员的素质或管理水平。特别是失效发生以后,能否在短期内做出正确的判断、得出解决的办法,代表一个国家或某些科技人员的科学技术水平。失效分析工作在中国起步较晚,对失效分析工作的重视程度低于部分发达国家。

目前国内全面开展失效分析工作的行业很少,涉及的领域有限,仅有数量不多的专业机构在从事失效分析研究和服务工作。失效分析预测预防是从失败入手着眼于成功和发展,是从过去入手着眼于未来和进步的科学技术领域,并且正向失效学这一分支学科方向发展。重视这一分支学科的发展,有意识地运用它已有的成就来分析、解决和攻克相关领域中的失效(失败、故障)问题,是科技发展少走弯路的捷径之一。面对这样一个现状,需要现有的失效分析科技工作者不断宣传失效分析的作用,普及失效分析的基础知识,让越来越多的人了解失效分析、认识到失效分析的重要性,同时失效分析科技工作者和相关研究机构需要加强联合,这样才能扩大失效分析队伍的整体影响。经过大家的共同努力,使失效分析从一个研究方向逐步发展成为一个学科,形成一个完整的体系。失效分析目前还没有得到国家或部门的授权,需要失效分析工作者团结起来,不断努力,扩大影响,争取在不久的将来开展失效分析资格的认证。

目前我国失效分析专家和工程师数量还远远不能满足需要,分析人员的水平和能力参差不齐,因此,迫切需要加强失效分析技术人员的培训。失效分析人员的能力和水平是在工作实践中不断提高的,因此,需要加强失效分析技术人员间的技术交流,这样可以不断提高失效分析人员素质和水平,提高整个行业及国家的失效分析能力和水平。失效分析人员要善于学习,向书本学习,向实践学习,向同行学习,向一切可能共事的人们学习。

发达国家失效分析工作的历史悠久,对失效分析工作的重视和普及程度远高于中国。从事失效分析工作的机构数量多,人员队伍整齐,相应的学会和组织很多。积极参加国际相关学术组织的会议以及重要活动,通过与发达国家的学术交流,学习他们的先进经验,努力扩大加入相应国际组织的数量,有利于提高我国失效分析的能力和水平,逐步缩小与发达国家间在失效分析领域的差距。

随着中国的经济快速发展,特别是制造业的高速发展,中国制造的产品大量出

口到世界各地，同时产品失效的现象也越来越多，迫切需要科学、公正和快速的技术分析报告，以此为依据处理产品索赔和责任纠纷等。因此，在开展失效分析，加强国际交流与合作的同时，在今后要逐步建立与不同国家间的分析结果互认。

失效分析的发展趋势将是：简单的断口分析逐步发展为综合分析；单一服役条件下失效的诊断逐步发展为复杂服役条件下失效的诊断；由定性分析向定量分析过渡；变事后分析为事先分析；从单一模式的安全评定向多参数、全过程的安全评定发展；使失效分析从“手艺”技术向失效学学科体系发展；变失效诊断为失效模式、原因、机理的诊断；从失效预测向剩余寿命、安全状况、可靠性的预测过渡；失效预防向工程预防、抗失效设计、专家系统发展。因此，需要不断引入新的分析手段和分析方法。

随着科学技术的进步，新材料、新工艺和新技术不断应用，会有新的失效模式不断出现，国内研究单位常常忽视了研制阶段的失效分析工作，特别是研究产品可能出现的失效模式和应采取的措施方面资金和技术力量投入少。因此，应该在新材料、新工艺和新技术研发的同时，应该加强失效模式的研究，变被动的事后分析为主动的事先的诊断和预防。



# 2

## 材料失效形式

材料的失效形式（模式）与化学组成、微观结构密切相关。当材料承受外力时，若外加应力超过其临界值，比如屈服强度或抗拉强度，就发生塑性变形而损坏、最终截面分离而断裂。尽管材料失效形态多样，但大致可以分为四种。材料的失效形式如图 2.1 所示，主要为断裂、腐蚀、变形和磨损。占失效比例最大的形式为磨损。

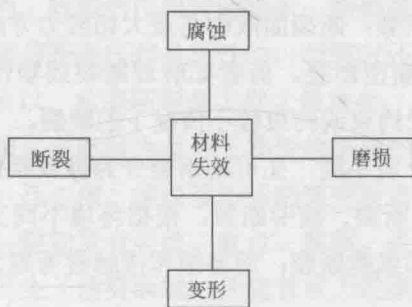


图 2.1 材料失效的形式

### 2.1 材料的断裂

断裂类型根据断裂的分类方法不同而有很多种，它们是依据一些各不相同的特征来分类的。根据金属材料断裂前所产生的宏观塑性变形的大小可将断裂分为韧性断裂与脆性断裂。韧性断裂的特征是断裂前发生明显的宏观塑性变形，脆性断裂在断裂前基本上不发生塑性变形，是一种突然发生的断裂，没有明显征兆，因而危害性很大。通常，脆性断裂前也产生微量塑性变形，一般规定光滑拉伸试样的断面收缩率小于 5% 为脆性断裂；大于 5% 为韧性断裂。可见，金属材料的韧性与脆性是依据一定条件下的塑性变形量来规定的，随着条件的改变，材料的韧性与脆性行为也将随之变化。

多晶体金属断裂时，裂纹扩展的路径可能是不同的。沿晶断裂一般为脆性断裂，而穿晶断裂既可为脆性断裂（低温下的穿晶断裂），也可以是韧性断裂（如室温下的穿晶断裂）。沿晶断裂是晶界上的一薄层连续或不连续脆性第二相、夹杂物，破坏了晶界的连续性所造成的，也可能是杂质元素向晶界偏聚引起的。应力腐蚀、