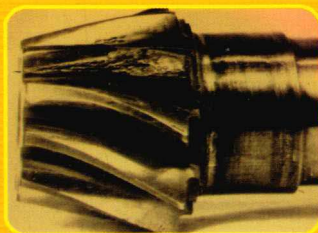




“十三五” 职业教育规划教材

金属材料失效分析 基础与应用

胡美些◎ 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

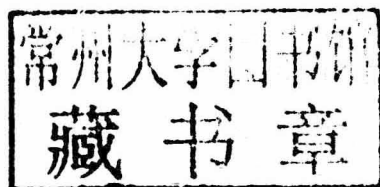


配电子课件

“十三五” 职业教育规划教材

金属材料失效分析基础与应用

主 编 胡美些
副主编 李仕慧 丰洪微
参 编 熊 伟 弋 楠
主 审 王学武 曹 军



机械工业出版社

本书是根据高等职业教育材料类专业的教学计划和“金属材料失效分析”课程教学大纲编写的。全书共分6个单元,内容包括概论、金属零件失效基础知识、断裂失效分析、表面损伤失效分析、金属构件加工缺陷与失效、典型构件失效分析案例。

本书采用最新国家标准,内容深浅适宜,文字通俗易懂,特别注重实用性和应用性,同时突出高等职业教育的特色,是一本高等职业学校材料类专业的规划教材,也可供其他职业院校材料类专业的学生以及工程技术人员使用参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料失效分析基础与应用/胡美些主编. —北京:
机械工业出版社, 2016. 10
“十三五”职业教育规划教材
ISBN 978-7-111-55120-1

I. ①金… II. ①胡… III. ①金属材料-失效分析-
高等职业教育-教材 IV. ①TG14

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第246415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:齐志刚 责任编辑:齐志刚 武晋
责任印制:常天培 责任校对:胡艳萍
北京京丰印刷厂印刷
2017年1月第1版·第1次印刷
184mm×260mm·12印张·290千字
0 001—1 900册
标准书号:ISBN 978-7-111-55120-1
定价:29.00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:010-88379833 机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649 机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

为了进一步贯彻《国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定》的精神，加强职业教育教材建设，满足职业院校深化教学改革对教材建设的要求，机械工业出版社于2008年7月在北京召开了职业教育材料类专业教学研讨及教材建设会议。会上，来自全国十多所院校的骨干教师、专家、企业代表研究讨论了新的职业教育形势下材料类专业的课程体系，本书就是根据会议所确定的材料类专业规划教材之一。

应用失效分析技术可以指导机械产品规划、设计、选材、加工、检验及质量管理等方面的工作；同时失效分析技术又是制订技术规范、科学发展规划、法律仲裁等的重要依据之一。随着现代科学技术的飞跃发展，失效分析已经成为一门综合性学科，在工程上正得到日益广泛的应用和普遍的重视。在这种背景下，对于失效分析人员的培养成为工科类院校的一项重要任务。近年来，我国部分高校相继开设了有关失效分析的课程，但是目前高校对于从事失效分析人员的实践能力的培养仍然达不到社会的需求。因此，编写一本实践性强的教科书就显得尤为重要。

本书内容分为六个单元：第一单元为概论，总体上介绍失效及失效分析；第二单元为金属零件失效基础知识；第三单元为断裂失效分析；第四单元为表面损伤失效分析；第五单元为金属构件加工缺陷与失效；第六单元为典型构件失效分析案例。

本书采用单元、模块化设计，紧密结合职业教育的办学特点和教学目标，强调实践性、应用性和创新性；努力降低理论深度，理论知识坚持以应用为目的，以必需、够用为度；注意内容的精选和创新，既考虑了知识结构的合理性、系统性，又兼顾了职业技术培训的要求；内容力求突出实践应用，重在能力的培养。为便于教学，本书配备了电子教案。

本书由内蒙古机电职业技术学院胡美些（第一、第六单元）、包头轻工职业技术学院李仕慧（第二单元）、渤海船舶职业学院熊伟（第三单元，其中模块五是和弋楠合编的）、陕西工业职业技术学院弋楠（第四单元）、内蒙古机电职业技术学院丰洪微（第五单元）共同编写。本书由胡美些任主编，李仕慧、丰洪微任副主编。渤海船舶职业学院王学武教授、呼和浩特众环（集团）有限责任公司曹军任主审。

在本书的编写过程中，引用或参考了大量已出版的文献和资料，书后难以一一列举，在此向原作者致谢。

由于编者学识水平和收集资料来源有限，书中难免有疏漏和不妥之处，敬请读者不吝赐教，共同商榷（电子邮箱：humeixie@sina.com）。

编 者

目 录

| | |
|-------------------------------|-----|
| 前言 | |
| 第一单元 概论 | 1 |
| 模块一 失效与失效分析 | 1 |
| 模块二 失效分析的意义与任务 | 7 |
| 模块三 失效分析的思路方法和基本程序 | 14 |
| 模块四 失效分析的发展历史、现状与发展趋势 | 24 |
| 综合训练 | 29 |
| 第二单元 金属零件失效基础知识 | 30 |
| 模块一 材料力学性能与失效分析 | 30 |
| 模块二 应力集中与失效分析 | 36 |
| 模块三 残余应力与失效分析 | 43 |
| 模块四 环境作用与失效分析 | 53 |
| 模块五 失效分析常用的检测技术 | 61 |
| 综合训练 | 68 |
| 第三单元 断裂失效分析 | 69 |
| 模块一 金属断裂的分类 | 69 |
| 模块二 断口分析 | 71 |
| 模块三 韧性断裂失效分析 | 80 |
| 模块四 脆性断裂失效分析 | 84 |
| 模块五 疲劳断裂失效分析 | 90 |
| 模块六 蠕变断裂失效分析 | 100 |
| 综合训练 | 103 |
| 第四单元 表面损伤失效分析 | 104 |
| 模块一 磨损失效 | 104 |
| 模块二 腐蚀失效 | 109 |
| 模块三 接触疲劳失效 | 117 |
| 模块四 腐蚀失效分析及预防 | 119 |
| 综合训练 | 121 |
| 第五单元 金属构件加工缺陷与失效 | 122 |
| 模块一 铸造加工缺陷与失效 | 122 |
| 模块二 锻造加工缺陷与失效 | 129 |
| 模块三 焊接缺陷与失效 | 133 |
| 模块四 热处理缺陷与失效 | 138 |
| 模块五 金属零件冷加工缺陷与失效 | 142 |
| 综合训练 | 146 |
| 第六单元 典型构件失效分析案例 | 148 |
| 模块一 齿轮失效分析 | 148 |
| 模块二 轴类失效分析 | 153 |
| 模块三 弹簧失效分析 | 165 |
| 模块四 容器、壳体失效分析 | 171 |
| 模块五 其他构件失效分析 | 176 |
| 参考文献 | 186 |

第一单元 概 论

学习目标

工程上的各类构件在使用过程中都存在一定的磨损、腐蚀、断裂等情况，当构件使用达到一定程度时就会出现失效现象，这时就需要对其进行失效分析。可以说，失效给生产、生活造成了严重的损失，而失效分析则可以有效地避免或减少这种损失，进一步提高构件的质量，节约成本。

本单元主要目标是认识失效及失效分析，了解失效分析的意义与任务，了解失效分析的发展历史、现状与发展趋势，掌握失效分析的思路方法和基本程序。

模块一 失效与失效分析

一、失效及其危害

1. 失效的概念

金属装备中的金属零部件称为金属构件。金属装备及其构件都具有一定的功能，承担各种各样的工作任务，如承受载荷、传递能量、完成某种规定的动作等。金属装备及其构件在使用过程中，由于应力、时间、温度和环境介质和操作失误等因素的作用，失去其原有功能的现象时有发生。这种丧失其规定功能的现象称为失效。

应特别强调的是失效与以下几个概念既有联系又有区别，必须加以正确理解。

(1) 失效和事故 失效与事故是紧密相关的两个范畴，事故强调的是后果，即造成的损失和危害，而失效强调的是机械产品本身的功能状态。失效和事故常常有一定的因果关系，但两者没有必然的联系。

(2) 失效和可靠 失效是可靠的反义词。机电产品的可靠度 $R(t)$ 是指时间 t 内能满足规定功能产品的比率，即 $n(t)/n(0)$ 。其中， $n(t)$ 为时间 t 内满足规定功能产品的数量， $n(0)$ 为产品试验总数量。

(3) 失效件和废品 失效件是指进入商品流通领域后发生故障的零件，而废品则是指进入商品流通领域前发生质量问题的零件。废品分析采用的方法常与失效分析方法一致。

零件失效（即失去其原有功能）包括三种情况：

1) 零件由于断裂、腐蚀、磨损、变形等，完全失去原有功能。

【案例 1-1】 压力容器在运行中突然产生壳体开裂而引起介质外泄或爆破，涡轮机在运转中突然发生叶片断裂而停止运转或使整机遭到破坏，这种完全失去原有功能的现象就是失效。

2) 零件在外部环境作用下，部分地失去其原有功能，虽然能够工作，但不能完成规定功能和既定任务。

【案例 1-2】 换热器流道变形、污垢堵塞使传热系数下降，压缩机气缸内壁腐蚀使排出

气体压力下降，这时虽然换热器和压缩机尚未完全不能使用，也可认为已经失效。

3) 金属装备整体功能并无任何变化，但其中某个构件部分或全部失去功能，虽然装备还能正常工作，但在某些特殊情况下可能导致重大事故，这种失去安全工作能力的情况也属于失效。

【案例 1-3】 锅炉和压力容器的安全阀失灵、火车或汽车的制动失灵等。

2. 失效的分类

失效的分类方法较多且不统一，主要有以下几种分类方法。

(1) 按材料损伤机理分类 根据机械失效过程中材料发生物理、化学变化的本质机理不同和过程特征差异，可以分为四类，分别是变形、断裂、磨损和腐蚀，如图 1-1 所示。图 1-2 所示为一些典型零件失效特征。

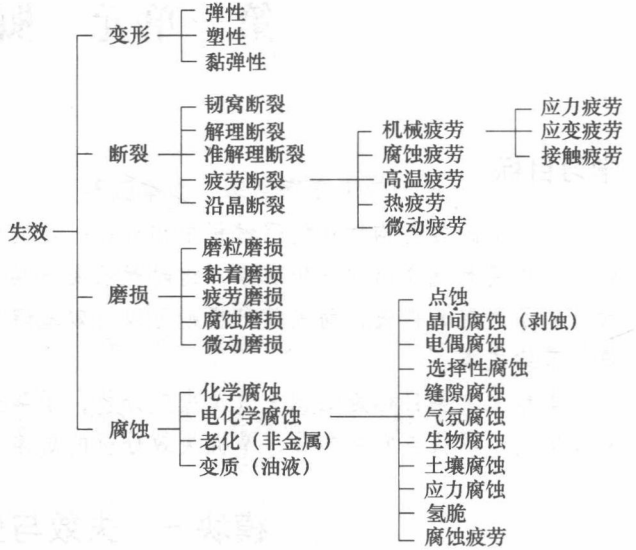
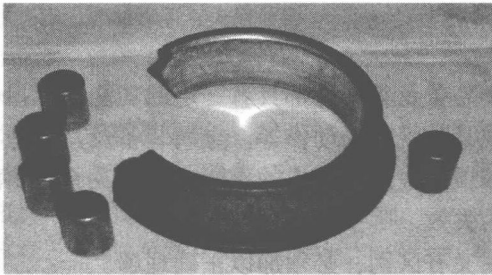
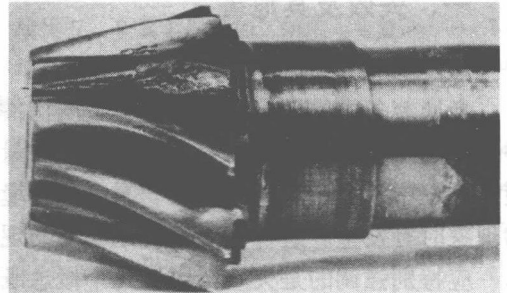


图 1-1 失效分类 (一)



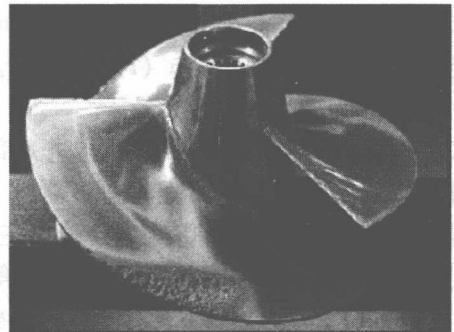
a)



b)



c)



d)

图 1-2 典型零件失效

a) 轴承断裂 b) 齿轮磨损失效 c) 轴的断裂 d) 气蚀损坏叶片形貌

(2) 按机械失效的时间特征分类 可分为早期失效和突发失效, 具体如图 1-3 所示。

(3) 按机械失效的后果分类 结果如图 1-4 所示。

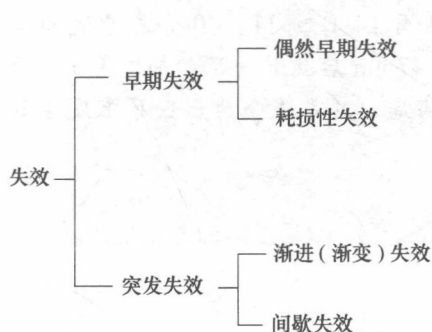


图 1-3 失效分类 (二)

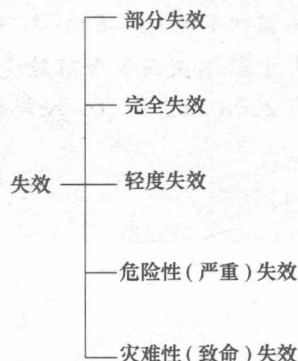


图 1-4 失效分类 (三)

二、失效分析

1. 失效分析的基本概念

对装备及其构件在使用过程中发生各种形式失效现象的特征及规律进行分析研究, 从中找出产生失效的主要原因及防止失效的措施, 称为失效分析。失效分析是一门综合性的质量系统工程, 是一门解决材料、工程结构、系统组元等质量问题的工程学。它的任务是既要揭示装备及其构件功能失效的模式和原因, 弄清失效的机理和规律, 又要找出纠正和预防失效的措施。它相当于材料诊断学, 运用各种分析仪器和方法, 对断口(缺陷)进行综合分析, 查明失效原因并采取措施, 防止同类失效再发生, 一般应包含五项内容: ①判定失效模式(failure mode); ②界定失效缺陷(failure defect); ③鉴定失效机理(failure mechanism); ④确定失效起因(failure cause); ⑤提出解决对策(counter measure)。

1) 失效模式, 是指构件失效后的外观表现形式, 即可观察、可测量的失效的宏观特征, 如脆性断裂、疲劳开裂、接触磨损等。根据构件失效的外观特征, 失效模式应有五种: ①断裂(fracture); ②腐蚀(corrosion); ③磨损(wear); ④畸变(distortion); ⑤衰减(attenuation), 指微观结构随时间、环境等因素渐变劣化。

2) 失效缺陷, 是指导致构件损伤或损坏的实际缺陷, 如裂纹、腐蚀坑、磨损带、分层等。

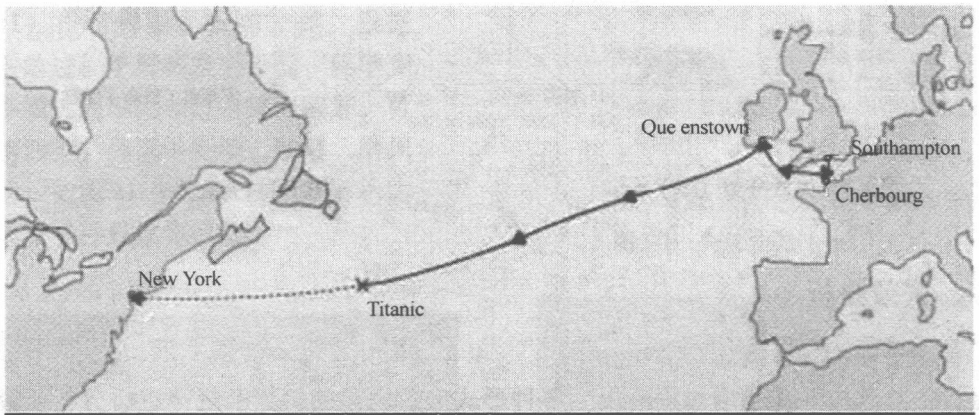
3) 失效机理, 是指致使构件失效所发生的物理、化学变化过程, 即失效的微观机制, 如腐蚀模式下的电偶腐蚀、缝隙腐蚀、晶界腐蚀、点蚀等。

4) 失效起因, 是指促使失效机理起作用的主要因素, 如超载、疲劳载荷、电极电位差、微动摩擦等。

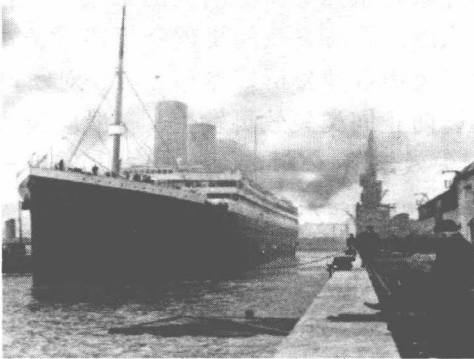
【案例 1-4】 泰坦尼克号轮船的失效模式、机理、缺陷与起因的关系。

泰坦尼克号轮船是 20 世纪初的一艘大型豪华游轮。它长 260m、宽 28m、高 51m、吨位 46328t，可载客 3000 多人，总耗资 7500 万英镑，船体结构的设计采用了双壳层和 16 个相互隔离的水密舱等安全措施，因而当时被认为是一艘“永不沉没”的巨轮。

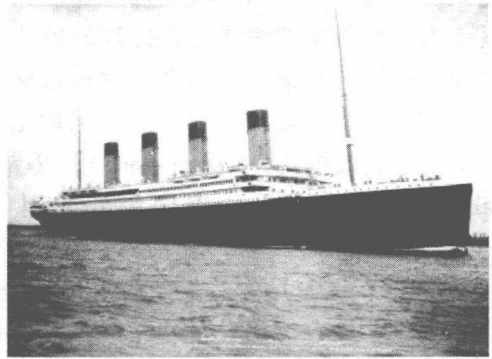
1) 泰坦尼克号轮船沉没过程解析。它的首航是在 1912 年 4 月 10 日从英国南安普顿出发前往美国纽约（图 1-5），航速为 22 节[⊖]，但 4 月 14 日晚 11:40 分在北大西洋与冰山相撞，由于船体左侧 6 个前舱壳体破裂进水，2h 47min 后就沉没了，如图 1-6 所示。当时船上共有 2208 人，仅 705 人获救，1503 人葬身海底，这是迄今为止世界上发生的最大的海事事故。



a)



b)



c)

图 1-5 泰坦尼克号轮船首航

a) 航行路线 b) 出发时 c) 航行中

⊖ 船舶航行速度单位，1 节 = 0.51444m/s。

式)，这一点也可以从泰坦尼克号轮船船板的冲击断口看出，如图 1-7b 所示。船板在冰山的持续碰撞和水流的波动作用下，在夹杂物处引发了许多裂纹（失效缺陷），这些裂纹随后发生了快速疲劳扩展（失效机理），最终导致了船板的断裂。而用现代技术冶炼的钢在受到撞击时可弯成 V 形或断裂时有明显的延性断裂特征，如图 1-7c 所示。因此，泰坦尼克号轮船的失效是由船板和铆钉内大量的 MnS 夹杂物和冰山撞击力的相互作用下发生的疲劳断裂所引起的（失效起因）。

2. 失效分析的基本特点

(1) 失效分析的内在关系 从本质上讲，任何材料的失效过程都会经历从产品到构件、从构件到损伤两个不同阶段，即“六品”“五件”“四化”。正确理解它们的本质含义及内在关系，对开展有效的失效分析是至关重要的。

- 1) 六品（产品），是指制品、成品、半成品、物品、次品、废品。
- 2) 五件（构件），是指零件、部件、组件、元件、器件。
- 3) 四化（损伤），是指劣化（微观）、退化（细观）、脆化（宏观）、老化（外观）。

(2) 失效分析的复杂性 事故的发生一般不是仅由一种因素引起的，常常涉及多种因素的相互作用。

【案例 1-5】 2011 年 7 月 23 日发生在浙江的甬温线高速动车追尾事故，造成 40 人死亡、193 人受伤，这是一起由设备故障、操作不当等多种因素交互作用引起的失效事故。

(3) 失效分析的综合性 产品质量管理一般实行“五要素”法或“六要素”法管理。其中，“五要素”法是指“人、机、料、法、环”（4M1E 分析法）；“六要素”法是指“人、机、料、法、环、测”（5M1E 分析法）。但产品的失效分析更复杂，分析人员不仅需要材料、工艺、结构、力学、控制、检验等专业知识，还要懂得安装、维护、运行、环境等工程知识，同时也要熟悉生产过程涉及的标准、规范、规程，以及包括心理学等在内的一些管理知识。图 1-8 给出了失效分析与其他学科的关系。

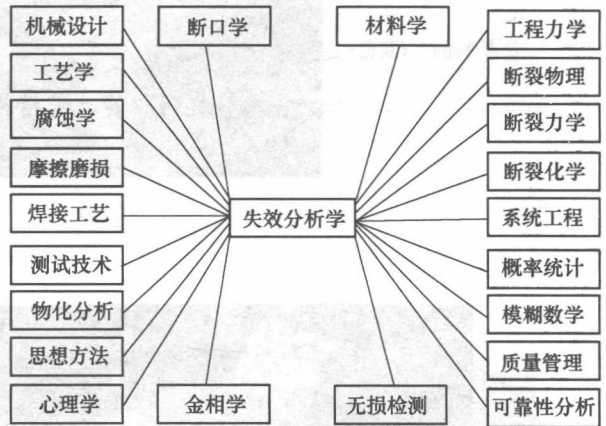


图 1-8 失效分析与其他学科的关系

(4) 失效分析的系统性 从结构完整性考虑，一个构件失效的原因分析，从技术层面上应该涉及八个方面：①设计（design）；②材料（material）；③制造（fabrication）；④安装（installation）；⑤检验（inspection）；⑥操作（operation）；⑦维护（maintenance）；⑧环境（environment），如图 1-9 所示。失效分析一般都是事后分析，而最佳方法应是事前分析。比如，提前对构件可能出现的失效模式和失效影响因素进行分析，并做好防范工作。

【案例 1-6】 传动齿轮的失效分析。

模数为 7mm 的传动齿轮，采用 20CrMnTi 制造，经渗碳淬火并低温回火处理。技术要求是：渗碳层的硬度为 58~63HRC，心部硬度为 32~48HRC，马氏体及残余奥氏体≤4 级，渗碳层深度为 1.3~1.5mm。该齿轮在使用中发生断齿失效，试分析断齿原因。

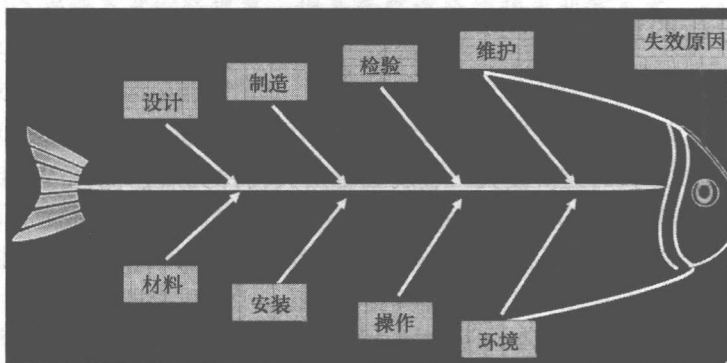


图 1-9 失效分析的鱼骨图

分析一：按技术要求对该齿轮进行常规检查，其结果是：渗碳层硬度为 62HRC，心部硬度为 42 HRC，马氏体及残余奥氏体为 3 级，均符合要求，但渗碳层深度为 1.1mm，不符合技术要求。对于这个齿轮，如果在出厂前发现硬化层深度低于技术要求而判为不合格品，这是无可非议的。但是现在要处理的问题是齿轮为什么发生断齿，故而不能简单地认定是硬化层深度不足而引起的。

分析二：按失效分析的观点，在进行上述常规检查后应做进一步分析。分析表明，断口为宏观脆性断裂（掉下的齿形呈凸透镜状），众多初裂纹源于表面加工缺陷处，经快速扩展后引起断裂，属于过载类型的宏观脆性断裂。根据上述分析，该齿轮断齿失效是由于齿根加工质量不良产生的严重应力集中引起的。其改进措施应是提高齿根的加工质量，减少应力集中及防止过载。实践证明这一分析结论是正确的。

按照分析一的观点，如果增加硬化层的深度至 1.3~1.5mm，虽然符合技术要求，但由于渗碳层的脆性进一步加大，不但解决不了此类断齿问题，而且会增加此类断齿的危险性。

模块二 失效分析的意义与任务

案例引入

【案例 1-7】 1986 年 1 月 28 日，美国“挑战者”号航天飞机升空后仅 73s 就发生爆炸，7 名宇航员全部遇难。航天飞机爆炸后，在国会的压力下，美国成立了总统调查委员会，由原国务卿威廉·皮尔斯·罗杰斯（William P. Rogers）任主席，成立独立的分析专家委员会。总统调查委员会经过 4 个多月的调查，向国会提交了 256 页的分析报告，得出的结果确认“挑战者”号航天飞机爆炸是其右侧固体火箭助推器连接处的 O 形密封圈因设计上的缺陷和气温过低导致失效而引起的。由于橡胶制成的 O 形密封圈失效导致气体泄漏起火，并引燃抗压材料，从而发生灾难性的事故。此后，美国宇航局进行了全面改组，设立了独立的安全性、可靠性和质量保证办公室，对飞行器、发动机、轨道器等部件做了 600 多项改进。历时 2 年 8 个多月后，航天飞机才重新恢复飞行。

一、失效分析的意义

1. 失效分析的社会经济效益

失效分析的巨大社会效益是显而易见的，它主要表现在以下几个方面。

(1) 失效将造成巨大的经济损失 金属装备及其构件失效往往会产生巨大的直接经济损失和惊人的间接经济损失。所谓间接的经济损失，主要包括：由于失效迫使企业停产或减产所造成的损失；引起其他企业停产或减产所造成的损失；影响企业的信誉和市场竞争能力所造成的损失等。

据中华人民共和国化工部对全国 51 个中型合成氨厂的不完全统计，1971—1979 年，共发生受压力容器重大失效事故 260 起，直接损失约达 5493.2 万元；1973—1983 年，全国压力容器发生爆炸事故 13 起，锅炉爆炸事故 957 起。

1982 年美国的统计数据表明，每年由于磨损、腐蚀和断裂失效造成的直接经济损失约达 3600 亿美元；1976 年日本由于腐蚀失效造成的直接经济损失约达 4 万亿日元，占当年国民经济生产总值的 3%；我国机械行业因腐蚀失效造成的直接经济损失约达 300 亿人民币。

【案例 1-8】 1981 年 1 月 11 日，某电厂 200MW 机组除氧器发生爆炸，造成直接经济损失约达 500 万元，但损坏的机组抢修 10 个月，停止发电引起的间接经济损失达几亿元。

1999 年 10 月，某化工企业试生产时阀门爆炸，导致国家级建设项目停产，造成约 600 万元的直接损失。

一台 125MW 发电机组停机一天，其综合损失就约达 24 万元，而这些停机往往是一根过热器或导气管开裂引起的，其成本只有几百元。

某钢厂轧机的人字齿轮轴失效，造成的直接经济损失虽然并不太大，但停产造成的间接经济损失却高达 400 余万元。

小型合成氨厂所用的合成氨冷凝器，每台售价仅 7000 元，但因失效引起的损失可达数万元甚至数十万元。

除此之外，机械产品的失效在造成本企业的损失外，往往还会引起相关企业的停产或减产，其实际损失往往比估算的损失还要大。至于失效引起的人员伤亡事故，更是难以用经济数字来表示的。

(2) 质量低劣、寿命短导致重大经济损失 一些用量大涉及面广的机械产品，由于质量低劣，使用寿命大大缩短，也将造成巨大的经济损失。如齿轮、轴承、弹簧、轴及紧固件，工模具等是机械工业的基础件，它们中一个零件的失效往往并不会造成多大的经济损失，但是由于其用量大、涉及面广而且失效频繁，由此而造成的经济损失才是十分巨大的。

【案例 1-9】 原第二汽车制造厂（现为东风汽车公司）因零件早期失效或其他质量问题，仅于 1986 年向用户支付的零件金额就达 66 万元。

20 世纪 80 年代，我国钢产量仅为日本的 1/3，而高速钢的消耗却为日本的 3 倍，其重要原因之一，就是工模具用钢不合理及工模具寿命低。热挤压用模具的寿命也有类似情况，国内不少厂家自制模具的使用寿命仅为日本进口模具的 1/3。出现这种情况的原因，除了模具的正常磨损等失效外，更多的是工艺原因造成的早期断裂。

当前，多数已经进入应用领域的微机电系统（Microelectro Mechanical Systems, MEMS）器件或者正在研制中的其他微机电系统器件在其所应用的系统中正在或将要发挥非常重要的

作用,虽然 MEMS 器件本身价格便宜,但其失效造成的损失非常巨大,一个明显的例子就是应用于军事上的 MEMS 器件。

(3) 提高设备运行和使用的安全性 一次重大的失效可能导致一场灾难性的事故,通过失效分析,可以避免和预防类似失效,从而提高设备安全性。设备的安全性问题是大问题,从航空航天器到电子仪表,从电站设备到旅游娱乐设施,从大型压力容器到家用液化气罐,都存在失效的可能性。通过失效分析确定失效的可能因素和环节,从而有针对性地采取防范措施,则可起到事半功倍的效果。例如对于一些高压气瓶,通过断裂力学分析知道,要保证气瓶不发生脆性断裂(突发性断裂),必须提高其断裂韧度,通常采用高安全性设计来确定构件尺寸。这样,即使发生开裂,在裂纹穿透瓶壁之前,不发生突然断裂,不至于酿成灾难性事故。

机械产品的失效,不仅造成巨大的、直接的经济损失,而且会造成更大的、间接的经济损失及人员伤亡。重大工程构件的失效是如此,许多量大面广的、往往不被人们注意的小型零件的失效也是如此。但是,无论是哪种类型的失效,通过失效分析,明确失效模式,找出失效原因,采取改正或预防措施,使同类失效不再发生,或者把产品的失效限制在预先规定的范围内,都可挽回巨额的经济损失,并可获得巨大的社会效益。

2. 失效分析有助于提高管理水平和促进产品质量得到提高

有些产品在使用中之所以会失效,常常是由于产品本身有缺陷,而这些缺陷大多数情况下在出厂前是可以由相应的检查手段发现的。但是这些产品由于出厂时漏检或误检而进入市场,这就表明工厂的检验制度不够完善或者检验的技术水平不够高。

产品在使用中发生的早期失效,有相当大的部分是因为产品的质量有问题。通过失效分析,将其失效原因反馈到生产厂家并采取相应措施,将有助于产品质量的不断提高。这一工作是失效分析和预防技术研究的重要目的和内容。

【案例 1-10】 20 世纪 80 年代初期,我国南方某厂新任厂长十分重视产品质量和全面管理,对其生产的减速箱齿轮各个环节进行整顿,以提高质量。然而仍有不少产品在使用中出现质量问题。正如前所述,如果不清楚零件失效的原因而盲目控制产品质量,有时候会出现相反的结果。

有些产品在加工制造中留下了较大的加工刀痕或因热处理工艺控制不当形成不良组织,在以后的服役过程中,断裂源可能就在此处产生,从而导致早期断裂。

【案例 1-11】 某发电厂使用的灰浆泵,在一年内连续出现灰浆泵主轴断裂,最严重时,一根主轴使用时间不到 24h。经分析,主轴均为疲劳断裂,是表面加工刀痕过大引起的。

对用 20CrMo 制成的嘉陵摩托车连杆断裂的失效分析表明,热处理过程中在连杆表面形成粗大的马氏体针状组织是导致其断裂的主要原因。

通过失效分析,切实找出导致构件失效的原因,从而提出相应的有效措施,提高产品的质量和可靠性。

【案例 1-12】 某坦克厂生产的扭力轴,长期存在疲劳寿命不高的质量问题。该厂曾多次改进热处理工艺及滚压强化措施,均未能得到显著效果。后来利用失效分析技术,发现扭力轴疲劳寿命不高的主要原因是钢中存在过量的非金属夹杂物。将此信息反馈到冶金厂,通过提高冶金质量,使扭力轴的疲劳寿命由原来的 10 万次左右提高到 50 万次以上。

某碱厂购进的 40Cr 钢活塞杆在试车时发生断裂,经过对断裂的失效分析,提出了改进

热处理工艺的措施。经改进的活塞杆使用近一年后没有出现任何问题。

在材料的研究过程中，由于钢材中过量氢的存在而引起的氢脆，促进了真空冶炼和真空浇注技术的发展，从而大大提高了钢材的冶金质量。不锈钢的晶间腐蚀断裂，可以通过降低钢中的含碳量或利用加钛和铌来稳定碳的办法予以解决。这些措施的提出正是通过失效分析，发现不锈钢的晶间腐蚀是由于碳化物沿晶界析出引起的。

20 世纪 60 年代初期，日本就对各国生产的汽车，特别是对其关键零部件进行分析并加以比较，为改进本国的产品提供了科学的依据，从而使其产品很快地进入世界先进行列。20 世纪 70 年代，德国拜耳轻金属厂 (BLW) 的精锻齿轮产量就达到了年产 1000 万件的水平，而我国在 20 世纪 60 年代就开始了精锻齿轮的研究，但至今生产水平与德国相比尚有差距，其主要原因之一是模具使用寿命低。统计表明失效的模具中，约有 80% 属于磨损、塌陷等正常失效，而另外的 20% 则属于早期断裂，甚至加工几件到十几件就开裂。通过失效分析，采取合适的材料和工艺，可以有效地提高模具寿命。由于失效分析是对产品在实际使用中的质量与可靠性的客观分析，因此得出的正确结论可用于指导生产和质量管理，将产生改进和革新的效果。企业和管理组织应根据实际情况设立有效的失效分析组织和质量控制体系，图 1-10 所示为美国的一种以工程为基础的可靠性组织形式。

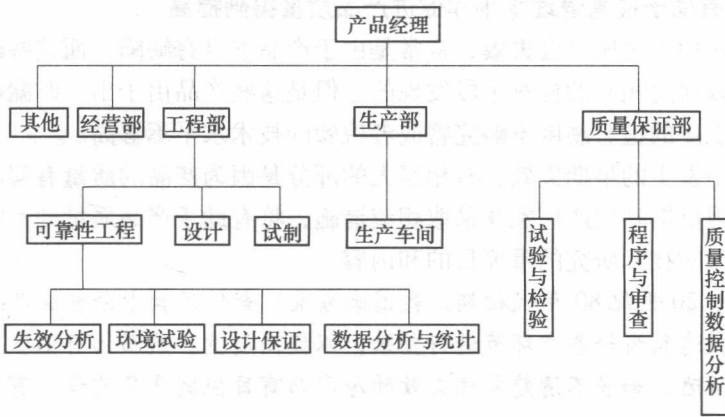


图 1-10 以工程为基础的可靠性组织形式 (美国)

3. 失效分析有助于分清责任和保护用户 (生产者) 利益

对于重大事故必须分清责任。为了防止误判，必须依据失效分析的结论进行处理。

【案例 1-13】 某军工厂一重要产品在锻造时发生成批开裂事故，开始主观地认为是操作工人有意进行破坏并处分了责任人。后经分析表明，锻件开裂是由铜脆引起的，并非人为的破坏，从而避免了误判。又如，某煤矿扒装机减速器上的行星齿轮采用 45 钢制造，齿轮在井下仅使用一个多月就因严重磨损而报废，为了更换该齿轮，须将减速器卸下送到机修厂检修，一般需停产 4~5 天，造成很大损失。经失效分析发现，该齿轮并未按要求进行热处理。

对于进口产品存在的质量问题，及时地进行失效分析，则可向外国厂商进行索赔，以维护国家的利益。

【案例 1-14】 某磷肥厂由国外引进的价值几十万美元的设备,使用不到 9 个月,主机叶片发生撕裂。将此事故通知外商后,外商很快返回了处理意见,认为是操作者违章作业引起的应力腐蚀断裂。该厂在使用中的确存在着 pH 值控制不严的问题,而叶片的外缘部位也确实有应力腐蚀现象,看起来事故的责任应在我方。但进一步分析表明,此叶片断裂的起裂点并不在应力腐蚀区,而发生在叶片的焊缝区,这是由于焊接质量不良(有虚焊点)引起的。依此分析结论与外商再次交涉,外商才承认产品质量有问题,同意赔偿我方损失。

随着我国经济与世界经济的进一步接轨,相信失效分析这一工作的意义会更重大,也会更加引起国内各企业和政府部门的关注和支持。

4. 失效分析是修订产品技术规范及标准的依据

随着科学技术水平的不断提高及生产的不断发展,要求对原有的技术规范及标准做出相应的修订。各种新产品的试制及新材料、新工艺、新技术的引入也必须及时制订相应的规范及标准。这些工作的正确进行,都需依据产品在使用条件下所表现的行为来确定。如果不了解产品服役中是如何失效的,不了解为避免此种失效应采取的相应措施,原有规范和标准的修订及新标准的制订将失去科学依据,这对确保产品质量的不断提高是不利的。

【案例 1-15】 某车辆重载荷齿轮,原来采用固体渗碳处理,其渗碳层的深度、硬度及金相组织等均符合相应的技术要求。但在使用中发现,产品的主要失效形式为齿根的疲劳断裂。为了提高齿根的承载能力,改进了渗碳工艺,并加大了齿轮的模数,齿轮的使用性能得以显著提高。当对产品的性能提出更高要求时,齿轮的主要失效形式为齿面的黏着磨损及麻点剥落。为此,引入了高浓度浅层碳氮共渗表面硬化工艺,齿轮的使用寿命又有大幅度的提高。在老产品的改型及新工艺的引入过程中,对产品的技术规范和标准多次做了修改。由于此项工作始终是以产品在使用条件下所表现的失效行为为基础的,所以确保了产品的性能得以稳定和不断提高。相反,如果旧的规范及标准保持不变,就会对生产的发展起到阻碍作用;但在产品的技术规范和标准变更的过程中,如果不以失效分析工作为基础,也很难达到预期的结果。

5. 失效分析对材料科学与工程的促进作用

失效分析在近代材料科学与工程的发展史上占有极为重要的地位。可以毫不夸张地说,材料科学的发展史实际上是一部失效分析史。材料是用来制造各种产品的,它的突破往往成为技术进步的先导,而产品的失效分析又反过来促进材料的发展。失效分析在整个材料链中的反馈作用可用图 1-11 来表示。

失效分析对材料科学与工程的促进作用,具体表现在以下几个方面。

(1) 材料强度与断裂 强度与断裂学科的产生与发展都是与失效分析紧密相连的。近代对材料学科的发展具有里程碑意义的“疲劳与疲劳极限”“氢脆与应力腐蚀”“断裂力学与断裂韧性”概念的提出都是在失效分析的促进下完成的。

【案例 1-16】 在 19 世纪初叶,火车频繁断轴曾经给工程界造成巨大冲击。长期在铁路部门工作的德国人沃勒(1819—1914)设计了各种疲劳试验机,经过大量试验,提出了疲劳极限的概念并从中获得了 S-N 曲线。100 多年来,人们对各种材料的 S-N 曲线进行了研究,推动了由静强度到疲劳强度设计的进步。1954 年 1 月 10 日和 4 月 8 日,两架英国“彗星”号喷气客机在爱尔巴和那不勒斯相继失事,相关部门对此进行了详尽的调查和周密的试验,首先在一架“彗星”号整机上进行模拟实际飞行时的载荷试验,经过 3057 充压周次

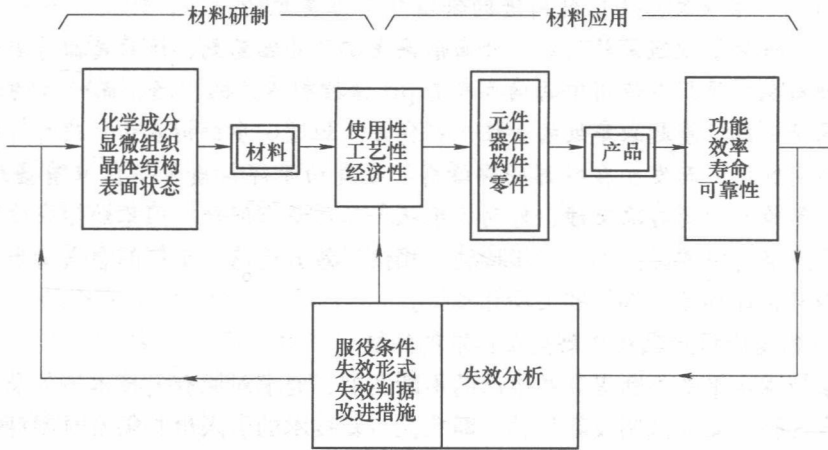


图 1-11 失效分析对材料的反馈作用

(相当于 9000 飞行小时)，压力舱壁突然破坏，裂纹首先出现于应急出口门框下后角一铆钉孔处。之后，又在另一架“彗星”号飞机上进行了实际飞行时的应力测试和所用铝材的疲劳试验。经过与从海底打捞上来的飞机残骸的对比分析，最后得出结论，事故是由疲劳引起的。这次规模空前的失效分析揭开了疲劳研究的新篇章。

在第一次世界大战期间，随着飞机制造业的发展，高强度金属材料相继出现，并用于制造各类重要构件，但随后发生的多次飞机坠毁事件给高强度材料的广泛应用提出了质疑。失效分析发现，飞机坠毁的原因是构件中含有过量氢而引起的脆性断裂。含有过量氢的金属材料，其强度指标并未降低，但材料的脆性大大增加，故称为氢脆。20 世纪 50 年代美国发生多起电站设备断裂事故，也被证实是由氢脆引起的。

从许多大型化工设备中不锈钢件的断裂原因分析发现，具有一定成分和组织状态的合金，在一定的腐蚀介质和拉应力作用下，可能出现有别于单纯介质和单纯拉应力作用下引起的脆性断裂，此种断裂称为应力腐蚀断裂。此后，氢脆和应力腐蚀逐步发展成为材料断裂学科中另一重大领域而被广泛重视。

目前，以断裂力学（损伤力学）和材料的断裂韧度为基础的裂缝体强度理论广泛应用于大型构件的结构设计、强韧性校核、材料选择与剩余寿命估算，成为当代材料科学发展中的重要组成部分。这一学科的建立和发展也与机械失效分析工作有着密切的关系。

对蠕变、弛豫和高温持久强度等的研究也是和各种热力机械，特别是和高参数锅炉、汽轮机及燃气轮机的失效分析与防止紧密联系的。随着超临界、超超临界发电机组的投入使用，这一问题的解决将越来越得到重视。

(2) 材料开发与工程应用 把失效分析所得到的信息反馈给冶金工业，就能促进现有材料的改进和新材料的研制。

【案例 1-17】 在严寒地区使用的工程机械和矿山机械，其金属构件常常会发生低温脆断，由此专门开发了一系列的耐寒钢。

海洋平台构件常在焊接热影响区发生层状撕裂，经过长期研究发现这与钢中的硫化物夹杂物有关，后来研制了一类 Z 向钢。