

失效分析

——基础与应用

孙智 江利 应鹏展 编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



失效分析

——基础与应用

孙智 江利 应鹏展 编著



机械工业出版社

本书主要应用失效分析工程学的观点和方法,系统地介绍了金属构件在使用过程中发生断裂、磨损、腐蚀失效的形貌特征、影响因素、预防措施及具体的分析方法,对于金属构件加工缺陷对失效的影响作了简要而系统的分析。本书着重于各类失效特征的描述和失效分析思路及其方法的运用,强调理论与实践的结合,书中给出了丰富的分析实例。

本书可供从事金属材料研究、金属构件设计、制造、使用、失效分析及质量管理等有关人员使用,也可供高等院校材料科学与工程、机械设计与制造等专业师生参考,并可作为高等院校失效分析有关课程及各类培训班的教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

失效分析:基础与应用/孙智等编著. —北京:机械工业出版社, 2005.1

ISBN 7-111-15854-7

I. 失... II. 孙... III. 失效分析 IV. TB114.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第135080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:陈保华 版式设计:冉晓华 责任校对:张媛

封面设计:张静 责任印制:杨曦

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005年3月第1版·第1次印刷

1000mm×1400mmB5·9.125印张·354千字

0 001—4 000册

定价:26.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68326294

封面无防伪标均为盗版

前 言

金属构件在使用过程中失去其原有的功能，就导致失效。金属构件的失效直接关系到设备与产品的使用寿命及工程安全，一些重大的失效事件还会导致人身伤亡和财产的巨大损失。人们在长期的生产科研实践中认识到，必须系统地研究各类金属构件的失效形式、影响因素、分析的方法和预防的措施，才可望在创造优质产品、增加经济效益以及确保安全方面获得成功，并在这些方面积累了丰富的经验，逐步形成了失效分析工程学的基本体系。

随着现代科学技术的迅猛发展，失效分析作为一门新兴的边缘学科在工程上正得到日益广泛的应用与发展。为了提高金属构件的质量和设备安全可靠，国内外对金属构件的失效现象进行了大量的分析与研究，日益完善了失效分析的基本理论与技术方法。应用失效分析技术，可以指导各类产品的规划、设计、选材、加工、寿命评估、检验及质量管理等工作，同时，失效分析又是制定技术规范、科技发展规划以及法律仲裁的依据。由于产品复杂程度和工作能力的提高以及使用环境的苛刻，金属构件失效分析的工作正向着多因素非线性耦合交互作用的方向发展，失效分析越来越需要多学科、多方面的交叉与综合，需要失效分析知识更广泛的普及，需要更多的人来关注和从事这一方面的研究和工作。

本书是作者根据多年来从事失效分析工作的体会和积累的技术资料，并在多方面支持与协助下编写的。本书的初稿曾作为讲义印刷2次，在中国矿业大学使用5年。全书共分八章，第1和第2章为失效分析的基础知识，第3章为失效分析的基本方法，第4和第5章为断裂失效分析，第6章简要介绍了磨损与腐蚀失效分析，第7章分析了金属构件加工制造缺陷对失效的影响，第8章为构件失效分析的实例。鉴于失效分析工作实践性强、分析思路的重要性等特点，在本书的编写过程中，作者着重于各类失效特征的描述和失效分析思路及其方法的运用，对失效的机理只作简单介绍。

本书由中国矿业大学孙智、江利、应鹏展编著。第1至第5章由孙智执笔，第6章由应鹏展执笔，第7章由江利执笔，第8章由孙智、江利、应鹏展执笔。唐大放、康学勤、任耀建、丁海东、杨锋参加了部分章节和图片的整理工作，徐州美驰车桥有限公司邵承恩提供了部分实物图片。

作者特别感谢中国矿业大学教授朱敦伦先生，正是他的指导和他的著作把作者引领到失效分析这一专业。感谢机械工业出版社的陈保华编辑，是他的辛

勤工作使得本书得以出版。本书引用和参考了许多专家、学者和单位的有关资料、论著，在此向他们致以诚挚的谢意！

本书的出版得到了江苏省、中国矿业大学博士后研究基金和江苏省自然科学基金（BK200403）的资助。

由于作者水平有限，书中缺点错误之处一定不少，敬请各位读者批评指正。

编著者

2004.10

目 录

前言

第 1 章 概论	1
1.1 失效与失效分析	1
1.2 失效分析的意义	4
1.3 失效分析的现状与发展趋势	10
参考文献	15
第 2 章 失效分析基础知识	18
2.1 机械零件失效形式与来源	18
2.2 应力集中与零件失效	23
2.3 残余应力与零件失效	29
2.4 材料的韧性与断裂设计	41
2.5 应力分析与失效分析	45
参考文献	62
第 3 章 失效分析基本方法	65
3.1 失效分析的思路及方法	65
3.2 失效分析的程序及步骤	78
3.3 断口分析	81
参考文献	101
第 4 章 静载荷作用下的断裂失效分析	104
4.1 过载断裂失效分析	104
4.2 材料致脆断裂失效分析	112
4.3 环境致脆断裂失效分析	119
4.4 混合断裂失效分析	138
参考文献	139

第 5 章 疲劳断裂失效分析	142
5.1 疲劳断裂失效的基本形式和特征	142
5.2 疲劳断口形貌及其特征	145
5.3 疲劳断裂失效类型与鉴别	155
5.4 疲劳断裂失效的原因与预防	162
参考文献	166
第 6 章 磨损与腐蚀失效分析	168
6.1 磨损失效分析	168
6.2 腐蚀失效分析	179
参考文献	196
第 7 章 金属构件加工缺陷与失效	198
7.1 铸造加工缺陷与失效	199
7.2 锻造加工缺陷与失效	206
7.3 焊接加工缺陷与失效	212
7.4 热处理缺陷与失效	218
7.5 金属零件冷加工缺陷与失效	224
参考文献	229
第 8 章 实际构件失效分析实例	231
8.1 M5-36-11No.20.5 风机轴断裂分析	231
8.2 矿井提升绞车减速齿轮早期开裂分析	236
8.3 振动压路机驱动桥弧齿准双曲面齿轮的失效分析	241
8.4 电站锅炉联箱导汽管爆管失效分析	246
8.5 供热管道不锈钢波纹管膨胀节失效分析	254
8.6 潜水泵叶轮腐蚀破裂分析	259
8.7 白铜 BFe30-1-1 凝汽器管腐蚀失效分析	265
8.8 IHI 卧式离心机叶片开裂失效分析	270
8.9 3Cr2W8V 钢热挤压模具失效分析	274
8.10 埋地管道金属泄漏分析	280
参考文献	284

第 1 章 概 论

1.1 失效与失效分析

1.1.1 失效

各类机电产品的机械零部件、微电子元件和仪器仪表等以及各种金属及其他材料形成的构件（工程上习惯地统称为零件，以下简称零件）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。当这些零件失去了它应有的功能时，则称该零件失效^[1]。

零件失效即失去其原有功能的含义包括三种情况^[2]：

- (1) 零件由于断裂、腐蚀、磨损、变形等，从而完全丧失其功能。
- (2) 零件在外部环境作用下，部分的失去其原有功能，虽然能够工作，但不能完成规定功能，如由于磨损导致尺寸超差等。
- (3) 零件虽然能够工作，也能完成规定功能，但继续使用时，不能确保安全可靠性。如经过长期高温运行的压力容器及其管道，其内部组织已经发生变化，当达到一定的运行时间，继续使用就存在开裂的可能。

失效在英文中叫做“failure”，意指达不到预期的或需要的功能或不足，按词义可译为“失灵”、“失事”、“故障”、“不足”等^[3,4]。在国内有时俗称“损坏”、“事故”等。上述名词的含义有许多相似之处，常常混用。为防止混乱，在 1980 年 12 月召开的中国机械工程学会机械产品失效分析会议上，我国学者正式确定为“失效”。

应特别指出，“失效”与“事故”是两个不同的概念，必须加以区别。事故是指一种后果，它可以是由于“失效”引起的，也可能是其他原因造成的。

传统的零件失效多指金属零件失效，即由名义上各向同性材料制成的零件失效。随着材料科学的发展，复合材料的应用比重越来越大，在 21 世纪，复合材料将超过金属材料的使用量，从而在材料中占有主导地位^[5]，因此应加强对复合材料失效的研究。复合材料的失效，又称为复合材料破坏，指复合材料在经过某些物理、化学过程后（如载荷作用、材料老化、温度和湿度变化等）发生了形状尺寸、性能的变化而丧失了预定的功能。复合材料是一种各向异性的多相复合体，失效过程要比通常的各向同性材料复杂得多，它涉及到组分材料的性能、复合的方式、工艺条件、界面性能、载荷的性质与环境因素等，不可

能只用一种失效模式来描述复合材料失效。绝大多数情况下是几种失效模式同时存在和发生^[6]。

微电子机械系统 (MEMS) 在近十多年来取得了飞速的发展。当前对于 MEMS 器件的研究已经取得了很大进展, 但就整体而言, 尚未能够实现 MEMS 产品的成功商品化。各种工况下失效问题是 MEMS 商品化的一大障碍^[7]。MEMS 是一门全新的技术, 对于其失效物理机制的了解还很少, 特别是对尺度效应和表面效应影响的认识还很初步。正确认识 MEMS 的失效模式是进行可靠性评估的前提条件。当前, 对 MEMS 器件以及系统的失效研究正逐渐引起人们的极大关注。对于 MEMS 失效的研究, 不但包括宏观机械中所面临的一些问题, 而且还有一些 MEMS 所特有的现象, 需要进一步研究^[8]。

1.1.2 失效分析

失效分析通常是指对失效产品为寻找失效原因和预防措施所进行的一切技术活动, 也就是研究失效现象的特征和规律, 从而找出失效的模式和原因。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产品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^[6,9]。

按照失效分析工作进行时序 (在失效的前后) 和主要目的, 失效分析可分为事前分析、事中分析和事后分析。

事前分析, 主要采用逻辑思维方法 (如故障树分析法、事件时序树分析法和特征—因素图分析法等), 其主要目的是预防失效事件的发生。

事中分析, 主要采用故障诊断与状态监测技术, 用于防止运行中的设备发生故障。

事后分析, 是采用实验检测技术与方法, 找出某个系统或零件失效的原因。

通常所说的失效分析是指的事后分析, 本书介绍的内容也侧重于此。实际上, 事前分析和事中分析必须以事后分析积累的大量统计资料为前提。

失效分析学 (失效学) 是人类长期生产实践的总结, 与其他学科相比, 有两个显著的特点: 一是实用性强, 即它有很强的生产使用背景, 与国民经济建设存在着密切关系; 二是综合性强, 即它涉及广泛的学科领域和技术部门, 图 1-1 给出了失效分析学与其他学科的关系。

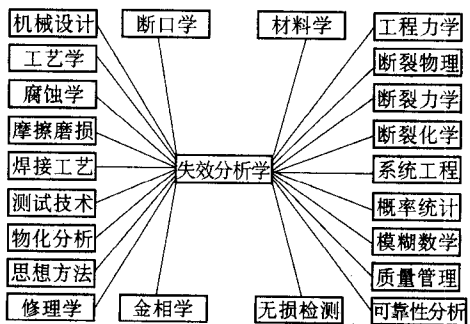


图 1-1 失效分析学与其他学科的关系

应该指出,失效分析与生产现场所进行的废品分析在所涉及的专业知识、采用的思想方法及分析手段等方面,有许多共同之处。但是,二者在分析的对象、分析的目的及判断是非的依据等方面是不同的。

失效分析的对象是在使用中发生失效的产品。这些产品通常是经过出厂检验合格的,即符合技术标准要求的产品(在个别情况下也有漏检的废品)。分析的主要目的是寻找失效的原因。漏检和技术标准不合理都可能是失效的原因,如果属于后者,则应对技术标准进行修改。

废品分析的对象是不符合技术标准的产品及半成品。它所讨论的问题是产品及半成品为什么不符合技术标准的要求。至于产品的技术标准是否正确则不属于废品分析要解决的问题。

在失效分析时应将二者区分开来。例如,在分析某零件发生断裂的原因时,不能简单地根据该产品的某项技术指标不符合标准要求,就作为判断失效依据的依据。这一结论可能正确也可能完全不正确。

例 模数为7的传动齿轮,采用20CrMnTi钢制造,经渗碳淬火并低温回火处理。技术要求是:渗碳层的硬度58~63HRC,心部硬度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。

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42HRC,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,那就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作进一步分析。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。

同样,失效分析所进行的研究工作也不能等同于某一学科某一问题的实验研究和理论分析。失效分析研究工作侧重点在于一个零件所发生的具体失效原因和失效过程,具有很强的工程针对性和适时性;而一般的实验研究目的带有一定的普遍性。普遍性的研究可以作为失效分析的理论基础,而失效分析又可以成为理论研究的出发点,两者既有区别,又相互联系,相互促进。例如,一

个零件发生脆性断裂，初步分析有回火脆性的可能。失效分析的过程就是确定该零件所用材料的回火脆性特点和零件的回火工艺，是否具备回火脆性断裂的特征和条件，同时要考察零件的加工、安装、使用历史，从而得出结论。而同一种材料的回火脆性特性的研究则可以不考虑加工、使用等因素，可以在实验室条件下揭示材料发生回火脆性的本质和条件以及影响因素。

1.2 失效分析的意义

1.2.1 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

据化工部对全国 51 个中型合成氨厂的不完全统计，1971 年到 1979 年，共发生受压容器重大失效事故 260 起，直接损失 5493.2 万元^[10]，1973 年到 1983 年全国压力容器发生爆炸事故 13 起，锅炉爆炸事故 957 起^[11]。

据报导，美国 1982 年的统计表明，每年由于磨损、腐蚀和断裂失效造成的直接经济损失 3600 亿美元；1976 年日本由于腐蚀失效造成的直接经济损失 4 万亿日元，占当年国民经济生产总值的 3%^[12]；原西德每年因摩擦磨损失效而造成的经济损失约 100 亿马克^[13]；我国机械行业因腐蚀失效造成的直接经济损失约 300 亿人民币^[12]，全国估计约高达 2800 亿人民币^[14]。

产品发生失效后，往往造成整机的破坏甚至整个企业的生产停顿，由此将造成更大的间接损失。例如：

1981 年 1 月 11 日某电厂 200MW 机组除氧器发生爆炸，直接经济损失 500 万元，但损坏的机组抢修 10 个月，停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，遭受 600 多万元直接损失。

一台 125MW 发电机组停机一天，其综合损失就达 24 万元，而这些停机往往是一根过热器管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，引起的直接经济损失虽然并不太大，但停产造成的间接损失却高达 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，机械产品的失效除造成本企业的损失外，往往引起相关企业的停产或减产，其实际损失往往比估算的还要大。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

一些量大面广的机械产品，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。

齿轮、轴承、弹簧、轴及紧固件、工模具等是机械工业的基础件。一个具体件的失效，往往并不造成多大的经济损失，但是由于量大、涉及面广且失效频繁，由此而造成的经济损失也是十分巨大的。

例如，第二汽车制造厂曾因零件早期失效或其他质量问题，仅仅 1986 年就向用户支付零件金额达 66 万元^[16]。

20 世纪 80 年代，我国钢产量仅为日本的三分之一，而高速钢的消耗却为日本的三倍^[17]，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三分之一。除了模具的正常磨损等失效外，由于工艺原因造成的早期断裂占了相当大的比例^[18]。

当前，多数已经进入应用领域的 MEMS 器件或者正在研制的其他微机械器件将在其所应用的系统中起着非常重要的作用，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^[19]。

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一个大问题，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。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。容器泄露后，易于发现，不至于酿成灾难性事故（详见本书 2.5 节）。

从上述事例中可以看到，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。重大的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。

1.2.2 失效分析有助于提高管理水平和促进产品质量提高

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

陷在大多数情况下在出厂前是可以通过相应的检查手段予以发现的。但是由于出厂时漏检而进入市场,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。

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,提高质量。然而其生产的产品仍有不少用户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,断裂源就在此处产生,从而导致早期断裂。例如: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,是由于表面加工刀痕过大引起的^[20]。对20CrMo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断裂的主要原因^[21]。

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。如某坦克厂生产的扭力轴,长期存在着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未能得到显著效果。后来利用失效分析技术,发现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^[22]。某碱厂购进的40Cr钢活塞杆在试车时就发生断裂,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^[23]。

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,促使真空冶炼和真空浇注技术的出现,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。这些措施的提出是由于失效分析发现,不锈钢的晶间腐蚀是由于碳化物沿晶界析出引起的。

目前,日本的某些产品在国际市场有很大的竞争力,比如日本的汽车冲击着整个世界市场。其实早在20世纪60年代初期,日本就对各国生产的汽车,特别是关键的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。早在20世纪70年代,德国拜尔轻金属厂(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,但至今生产水平不高,其主要原因之一是模具

使用寿命低。统计表明约有 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 ~ 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，在压铸模中也存在同样的问题^[24,25]。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考察，由此得出的正确结论用以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 1-2 为美国的一种组织形式^[26]。

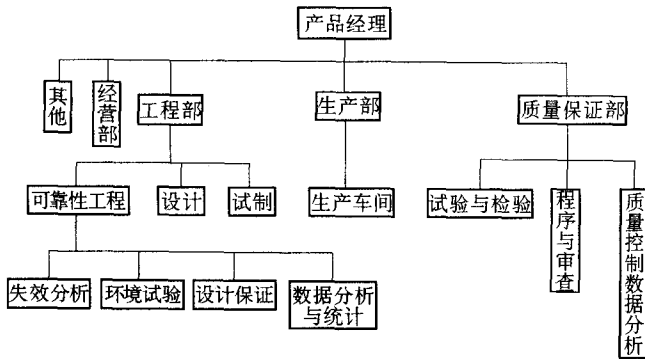


图 1-2 以工程为基础的可靠性组织形式（美国）

1.2.3 失效分析有助于分清责任和保护用户（生产者）利益

对重大事故，必须分清责任。为了防止误判，必须依据失效分析的科学结论进行处理。例如，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进行了处分。后经分析表明，锻件开裂的原因是由铜脆引起的，并非人为的破坏，从而避免了错案。又如，某煤矿扒装机减速器上的行星齿轮采用 45 钢制造，齿轮在井下使用仅 1 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。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，则可向外商进行索赔，以维护国家的利益。例如，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，这是由焊接质量不良（有虚焊点）引起的。依此分析与外商再次交涉，外商才承认产品质量有问题，同意赔偿损失^[27]。随着我国经济与世界经济的进一步接轨，相信这一工作的意义会更大，也会更加引起

国内各企业和政府部门的关注和支持。

1.2.4 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作出相应的修订。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的依据。这对确保产品质量的不断提高是不利的。

例如:某车辆重负荷齿轮,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有相应的技术要求。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,该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粘着磨损及麻点剥落。为此,试制了高浓度浅层碳氮共渗表面硬化工艺,该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,产品的技术规范和标准多次作了修改。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。

1.2.5 失效分析对材料科学与工程促进作用

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”中的作用可用图 1-3 来表示^[28]。

失效分析对材料科学与工程的促进作用,具体表现在材料科学与工程的主要方面和各个学科分支及交叉领域,周惠久院士等^[28]在其“失效分析对材料科学与工程促进作用”一文中作了深入、详细的分析,这里只做简要介绍。

1. 材料强度与断裂

可以说,整个强度与断裂学科的发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”的提出都是在失效分析的促进下完成的。

在 19 世纪初叶,频繁的火车断轴曾经给工程界造成巨大冲击。长期在铁路部门工作的 A. Wöhler (1819 ~ 1914) 设计了各种疲劳实验机,经过大量实验,提

出了疲劳极限的概念并从中获得了 $S-N$ 曲线^[29]，一百多年来，人们对各种材料的 $S-N$ 曲线进行了研究，从而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，有两架英国彗星号喷气客机在爱尔兰和那不勒斯相继失事，以后进行了详尽的调查和周密的试验，在一架彗星号整机上进行模拟实际飞行时的载荷实验，经过 3057 充压周次（相当于 9000 飞行小时），压力舱壁突然破坏，裂纹从应急出口门框下后角处发生，起源于一铆钉孔处。之后又在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实验。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^[30]。这次规模空前的失效分析揭开了疲劳研究的新篇章。

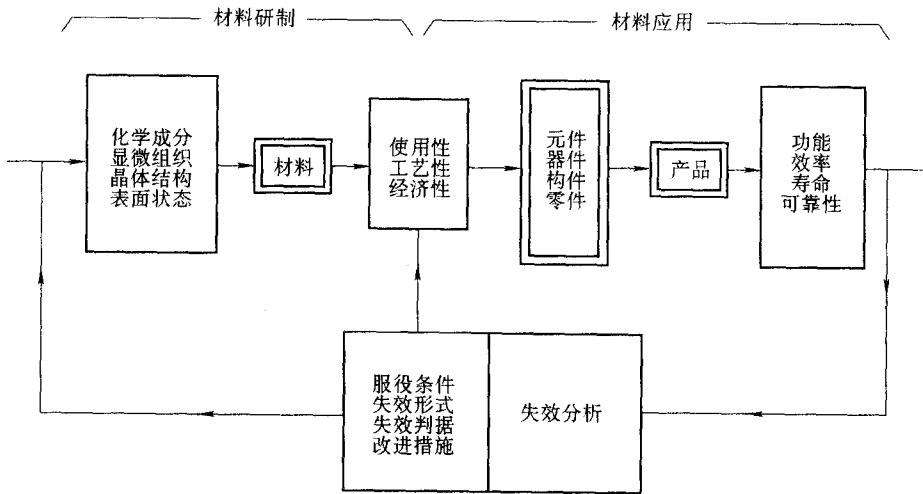


图 1-3 失效分析对材料的反馈

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造成了威胁。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，其强度指标并不降低，但材料的脆性大大增加了，故称为氢脆。这一观点是我国金属学家李薰等人首先提出的。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。

对于许多大型化工设备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，被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^[31]，

因而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，特别是高参数锅炉、汽轮机和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，例如：

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。

在化工设备中经常使用的高铬铁素体不锈钢，对晶间腐蚀很敏感，特别在焊接后尤其严重，经分析，只要把碳、氮含量控制到极低水平，就可以克服这个缺点，由此发展了一类“超低间隙元素”（ELI）的铁素体不锈钢。

大量的失效分析表明，飞机起落架等构件，需要超高强度钢，又要保证足够的韧性，于是发展了改型的 300M 钢，即在 4340 钢中加入适量的 Si 以提高抗回火性，提高了钢的韧性。

对于机械工业中最常用的齿轮类零件，麻点和剥落是主要的失效形式，于是发展了一系列的控制淬透性的渗碳钢，以保证齿轮合理的硬度分布。

对于矿山、煤炭等行业的破碎和采掘机械等，磨损是主要的失效形式，从而发展了一系列的耐磨钢和耐磨铸铁，开发了耐磨焊条和一系列表面抗磨技术。

失效分析极大地促进了铝合金的发展。20 世纪 60 年代初期的 7xxx（Al-Zn-Mg-Cu 系列）高强度铝合金应用很广，如 7075-T6、7079-T6 等，以后在使用中发现其易于产生剥落腐蚀，另外在板厚方向对应力腐蚀敏感，陆续发展了 7075-T76、7178-T76、7175-T736，既保持了较高强度水平，又有较高的抗应力腐蚀性能。

材料中的夹杂、合金元素的分布不良等经常会导致材料失效，这极大地促进了冶金技术、铸造、焊接和热处理工艺的发展。

腐蚀、磨损失效的研究，促进了表面工程这一学科的形成与发展。现在，表面工程技术已经广泛应用于不同的构件和材料，保证了材料的有效使用。

1.3 失效分析的现状与发展趋势

任何机械产品在使用中都有一定的失效概率，而失效的结果往往又是十分