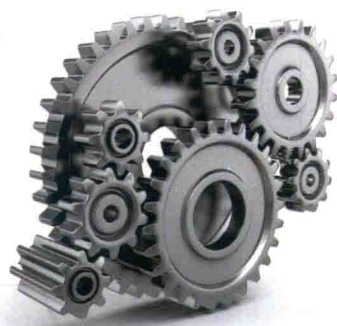


失效分析 与案例



Failure Analysis and Cases

杨建军 等编著

失效分析的技术基础

失效分析思路与程序

各种失效形式的分析

25个失效分析案例

失效分析与案例

杨建军 刘瑞峰 张伟东 李树梅 阎 平 编著
蔡 红 张瑞君 高建国 刘素芬 姚淑萍



机械工业出版社

本书对金属构件失效分析技术进行了系统的归纳,从失效分析基本概念与技术、失效分析思路与程序、断裂失效分析和环境作用下的失效分析等方面进行了重点介绍,可以帮助失效分析人员准确地理解和掌握失效的机理。本书还列举了 25 个来自于实际工作中的金属构件失效分析案例,从设计不当、材料冶金缺陷、制造工艺缺陷、装配使用和维护不当、环境因素五个方面,对失效原因进行了深入浅出的论述,这样更利于读者尽快掌握失效分析方法,并应用于实践中。

本书主要适用于从事失效分析的技术人员,以及与产品失效有关的设计、工艺、质量管理、售后服务、检验等部门的技术人员和管理人员使用,也可供相关专业在校师生参考,并可作为金属构件失效分析专业技术人员的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

失效分析与案例/杨建军等编著. —北京:机械工业出版社, 2018. 1
ISBN 978-7-111-58642-5

I. ①失… II. ①杨… III. ①金属材料-失效分析-案例 IV. ①TG115

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 300411 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:陈保华

责任编辑:陈保华 安桂芳

责任校对:王明欣 陈 越 封面设计:马精明

责任印制:常天培

唐山三艺印务有限公司印刷

2018 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·17.25 印张·347 千字

0001—3500 册

标准书号:ISBN 978-7-111-58642-5

定价:49.00 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

读者购书热线:010-68326294

机工微博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

策划编辑:010-88379734

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

前言

机械装备由于受到许多无法避免的因素影响，会出现各种各样的失效或故障，从而降低或丧失其预定的功能，金属构件失效是机械装备失效或故障的最主要原因之一。对失效的金属构件进行失效分析，是装备故障原因查找及质量问题归零的重要技术手段，是有效提高装备质量与可靠性的重要技术支撑，对提升装备的质量和全寿命管理具有重要意义。

失效分析是工业生产领域极为重要的一门学科，是产品科研试验、工艺改进、质量保证的重要组成部分，是提高产品质量的有效方法和重要工具，广泛应用于机械、航空、航天、电子、国防等领域，在国内外获得了普遍的重视和快速的发展。失效分析是从结果推断失效原因的过程，往往是一果多因，因而失效分析需要正确的分析思路和程序，它可以帮助分析人员快速、准确地查明失效的原因和机理。失效过程是一个十分复杂的过程，特别是机械装备结构种类繁多，结构一般比较复杂，系统内部之间、系统之间铰链耦合性强，金属构件工作条件恶劣、复杂，失效后疑点较多，分析难度也大，这就要求失效分析人员具有一定深度的理论知识且知识面要广，同时还应具有丰富的实践经验。金属构件失效分析是以金属材料学为基础，集断裂特征分析、力学分析、结构分析、材料抗力分析以及可靠性分析为一体，是一门交叉、边缘、综合的新兴学科，失效分析技术属于跨学科技术。

本书是针对从事机械装备失效分析及研制、生产、使用的技术人员，以及与产品失效有关的设计、工艺、质量管理、售后服务、检验等部门的工程技术人员和管理人员而编写的，对维修保障人员也有一定的参考价值。本书主要由失效分析一般知识的介绍、分析思路与程序、断裂与裂纹分析、环境导致的失效以及失效分析案例的剖析等部分组成。编者根据自身的实践经验，对金属构件失效分析技术进行了系统的归纳，列举了大量来自于实际工作中的失效分析案例，力求做到实用、理论与实践相结合，达到提高技术人员分析能力和技术水平的目的。

本书由内蒙古金属构件失效分析工程技术中心组织编写。本书编者都是常年从事失效分析工作的技术人员，有着丰富的理论知识与实践经验，参与了多项失效分析标准的编写工作。本书曾作为兵器行业失效分析技术培训教材，并取得了良好的

效果。本书第1、2章由姚淑萍、张瑞君、刘瑞峰编著，第3章由刘素芬、张伟东编著，第4章由阎平、杨建军、刘瑞峰编著，第5章由蔡红、高建国、杨建军编著，第6章由李树梅、张伟东编著，全书由杨建军、张伟东统稿与审定。

在本书编写过程中得到了中国兵器工业标准化研究所丁昆研究员、刘卫军高级工程师、内蒙古第一机械集团有限公司李玉海研究员级高级工程师的指导与帮助，同时得到了内蒙古自治区科技厅、内蒙古第一机械集团有限公司与机械工业出版社的大力支持，在此深表谢意。本书引用和参考了有关论著、教材、论文等资料，在此向相关作者和专家致以衷心的感谢。

由于编者的水平和认识有限，难免有不当之处，恳请大家批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 失效分析的意义	1
1.2 失效分析的发展阶段	4
1.2.1 古代失效分析阶段	4
1.2.2 近代失效分析阶段	5
1.2.3 现代失效分析阶段	5
参考文献	6
第 2 章 失效分析基本概念与技术	7
2.1 失效分析基本概念	7
2.1.1 相关术语	7
2.1.2 失效分析学科简介	8
2.1.3 失效分析的内容	10
2.1.4 失效分析的基本要求	10
2.2 失效分析基本技术	11
2.2.1 断口分析技术	11
2.2.2 常规化学成分分析技术	13
2.2.3 力学性能检测技术	15
2.2.4 金相显微镜分析技术	15
2.2.5 无损检测技术	16
2.2.6 其他分析技术	17
2.3 失效分析技术应用	17
2.3.1 失效分析的必要性	17
2.3.2 失效分析结果应用	18
参考文献	21

第3章 失效分析思路与程序	22
3.1 失效类型	22
3.1.1 畸变失效	22
3.1.2 断裂失效	22
3.1.3 磨损失效	24
3.1.4 腐蚀失效	25
3.2 失效分析思路	25
3.2.1 概述	25
3.2.2 失效分析的基本原则	25
3.2.3 失效分析的基本方法	29
3.2.4 相关性分析思路	31
3.2.5 系统工程分析思路	32
3.3 失效分析程序	35
3.3.1 失效分析目的要求	36
3.3.2 失效信息的调查与收集	36
3.3.3 初步确定肇事失效件	40
3.3.4 确定具体分析思路和工作程序	41
3.3.5 取样和检测	41
3.3.6 失效分析结论	50
3.3.7 失效事故预防	50
3.3.8 失效分析报告	50
3.3.9 失效分析资料的归档与利用	51
参考文献	51
第4章 断裂失效分析	52
4.1 断口分析	52
4.1.1 概述	52
4.1.2 断口分析常用仪器介绍	59
4.1.3 断口分析技术	64
4.1.4 断裂与断口的分类	72
4.1.5 韧性断口的特征和诊断	75
4.1.6 脆性断口的特征和诊断	84
4.1.7 疲劳断口的特征和诊断	97
4.1.8 断裂失效模式	112
4.1.9 断裂失效微观特征描述	112
4.2 裂纹分析	112
4.2.1 概述	112

4.2.2 裂纹的分类	113
4.2.3 裂纹的检测与分析	114
4.2.4 工艺性裂纹	121
参考文献	127
第5章 环境作用下的失效分析	128
5.1 摩擦环境作用下的失效分析	128
5.1.1 概述	128
5.1.2 磨损失效分析方法	130
5.1.3 磨损失效的分类及其破坏形式	132
5.1.4 滑动磨损	132
5.1.5 滚动磨损	136
5.1.6 振动磨损	139
5.1.7 磨粒磨损	140
5.1.8 流体磨损	142
5.1.9 黏着磨损	147
5.1.10 疲劳磨损	149
5.2 腐蚀环境作用下的失效分析	152
5.2.1 概述	152
5.2.2 腐蚀环境作用机理	153
5.2.3 腐蚀失效的分类及其破坏形式	159
5.2.4 均匀腐蚀	161
5.2.5 点腐蚀	162
5.2.6 缝隙腐蚀	166
5.2.7 晶间腐蚀	167
5.2.8 应力腐蚀	171
5.2.9 腐蚀疲劳	175
5.2.10 氢腐蚀	176
5.3 高温环境作用下的失效分析	177
5.3.1 概述	177
5.3.2 高温失效机理	178
5.3.3 高温破坏的失效特征	195
5.3.4 高温破坏失效的条件及失效过程	200
5.3.5 高温破坏的预防措施	204
参考文献	208
第6章 失效分析案例	209
6.1 设计不当引起的失效	209

6.1.1	概述	209
6.1.2	常见的设计不合理因素	209
6.1.3	设计不当引起的失效案例	210
6.2	材料冶金缺陷引起的失效	215
6.2.1	概述	215
6.2.2	常见的材料冶金缺陷	215
6.2.3	材料冶金缺陷引起的失效案例	216
6.3	制造工艺缺陷引起的失效	225
6.3.1	概述	225
6.3.2	铸造缺陷与失效	225
6.3.3	锻造缺陷与失效	230
6.3.4	焊接缺陷与失效	236
6.3.5	热处理缺陷与失效	243
6.3.6	机械加工缺陷与失效	251
6.4	装配使用和维护不当引起的失效	255
6.4.1	概述	255
6.4.2	装配使用和维护不当	255
6.4.3	装配使用和维护不当引起的失效案例	255
6.5	环境因素引起的失效	261
6.5.1	概述	261
6.5.2	环境因素引起的失效类型	261
6.5.3	环境因素引起的失效案例	262
	参考文献	267

第1章

绪 论

1.1 失效分析的意义

各种机械零件及构件都具有一定的功能,如承受某种载荷、传递能量,完成某种规定动作等。当机械零件丧失它应有的功能或发生损伤破坏时,则称该零件失效。例如,一台机床失去加工精度,一架飞机在空中失事,汽车、轮船、火车发生故障不能正常行驶等都是失效。失效分析的任务就是找出失效的主要原因,并据以制订改进措施,以防止同类失效再度发生。通过对各种各样失效事故的分析 and 研究,人们逐渐认识到了失效分析工作的重要性,失效分析对提高产品质量有着重要的指导作用。目前,越来越多的国家和企业已经把失效分析作为一项重要的学科和研究内容。

20 世纪 50 年代以来,随着微电子技术的异军突起,电子光学、断口学、痕迹学、表面科学、金相学、电子显微学等迅猛发展,产品失效的物理、化学过程,已从微观角度阐明失效的本质、规律和原因。基于此,失效分析逐渐走上了较为系统、综合、理论化的新阶段,并在国民经济和技术中发挥着日益重要的作用,已为世人所瞩目,其重要意义如下:

1) 失效分析是全面质量管理中必不可少的重要环节。任何一次失效,都可以看成是产品在服役条件下所做的一次最真实、最可靠的科学试验结果。通过失效分析,判断失效的模式,找出失效的原因和影响因素,也就找到了薄弱环节所在,从而改进有关部门的工作,提高产品质量。因此,它是对设计、制造及维修工作的最终最有效的检验。失效分析是检验、评定产品缺陷安全度的最佳依据。同时,它就像一面镜子,不断反映产品所固有的以及质量控制中的薄弱环节。

2) 失效分析是可靠性工程的技术基础之一。可靠性是产品的关键性指标,而可靠性技术是质量保证的核心。从宏观统计入手的可靠性分析,虽然可以得到产品可靠性的各种特征参数及宏观规律,但不能回答产品是怎样失效以及为什么失效。它主要是处理故障和寿命问题的,并从开发、设计阶段防止缺陷、进行可靠性设计

和预测。可靠性分析的前提之一就是确认产品是否失效,分析产品失效类型、失效模式和机理。因此,可靠性分析离开失效分析将寸步难行,失效分析的成果和信息是可靠性分析必不可少的基础。

3) 失效分析是安全工程的重要技术保证之一。安全工程是一个系统工程,故安全工作环节多、涉及面广。失效分析是其中的一项关键性工作。例如,机械原因引起的严重车辆事故发生后,失效分析的作用尤为突出。首先一个问题是同类型车辆是否停止使用,接下来要不要普查,要不要返修,如何返修等一系列难题摆在面前。安全工程以事故为主要研究对象,美国空军在20世纪60年代提出了安全系统工程学。众所周知,许多事故是由于产品失效引起的。安全系统工程的主要内容包括安全分析、安全评估和安全措施。失效分析可以找出薄弱环节,查明不安全因素,发现事故隐患,预测由失效引起的危险,提供优化的安全措施。因此,它是安全工程强有力的技术保证之一。

4) 失效分析是维修工程的理论基础和指导依据。产品维修要解决的基本矛盾是良好与失效。维护主要是预防失效,保持产品应有的功能;而维修主要是排除失效,即恢复对产品所规定的功能。人类正是在长期与失效做斗争并分析其后果的实践中,才逐步形成了科学的维护规程,发展了先进的修理技术,提出了以可靠性为中心的维修思想,实质上是依据产品本身的固有可靠性特性和产品使用可靠性,结合产品的失效规律和机理,采用科学的分析方法,仅做必要的维修工作。在维修工作中,根据故障检修的结果,确认产品失效的性质、程度和后果,从而采用不同的修理方式。综上所述,在涉及全面质量管理、可靠性、安全、维修四大工程中,失效分析具有不可替代的、举足轻重的地位和作用。

5) 失效分析可产生巨大的经济效益和社会效益。通过失效分析可以避免同类事故的再次发生,保障人民的生命财产安全,保证正常的生产、生活和训练。因此,从某种意义上讲,失效分析可输出生产力和战斗力。

失效分析作为强大动力推动了科学技术的进步。在长期、大量的失效分析基础上,不断发现新的失效模式和机理,摩擦学、腐蚀学、疲劳学、断裂力学、损伤力学、断口学、电子显微学、痕迹学、电接触、表面科学等一大批工程学科得以迅猛发展。新技术、新工艺、新材料、新的诊断、测试和监控手段得以广泛的推广和应用。

失效分析反馈到相关部门,促进了产品质量的提高,大量宝贵的失效分析成果和信息是设计、制造部门开发新产品的最好营养品。失效分析在全面质量管理中是一个重要环节,特别在源流管理中,起到早期警戒的作用,以便尽早采取对策。

统计表明,在产品的不同发展阶段,由于质量缺陷带来的经济损失是以数量级的变化而增大的。因此,设计人员不但要积累大量成功的设计原型,更不能忘记那些用血的代价换来的惨痛失败(失效)的教训(各种失效模式、设计禁忌、防错设计等),尽全力把产品的潜在缺陷消灭在设计过程中。

《中华人民共和国产品质量法》有关条文中规定,因产品存在缺陷造成受害人财产损失的,侵害人应当恢复原状或者折价赔偿。受害人因此遭受其他重大损失的,侵害人应当赔偿损失。因产品存在缺陷造成人身、财产损害的消费者,可以向产品生产者索赔,也可向产品销售者索赔。失效分析在加强社会监督,保护消费者合法权益方面可以并且必将发挥更大的作用。

下面以泰坦尼克号沉船事故为例,说明失效分析工作的重要性和意义。

泰坦尼克号是 20 世纪初世界上最大的豪华游轮,它长 260m、宽 28m、高 51m、吨位 46328t,可载客 3000 多人,当时总耗资 750 万英镑,泰坦尼克号全貌如图 1-1 所示。船体结构的设计采用了双壳层和十六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。它的处女航是在 1912 年 4 月 10 日从英国南安普顿出发前往纽约的,航速为 22 节(1 节=1.852km/h),但 4 月 14 日晚 11:40 在北大西洋与一块漂浮的大冰山相撞,由于船体左侧六个前仓壳体破裂进水,2 小时 47 分钟后沉没,船体沉没时断裂状况模拟图如图 1-2 所示。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。

在对泰坦尼克号船板备用件进行相关检测后,发现有大量的 MnS 夹杂物,其金相组织如图 1-3 所示,其纵、横向韧脆转变温度分别为 32℃、56℃,而当时的水温是-2℃。可以推定,泰坦尼克号与冰山相撞时的失效特征是脆性断裂模式,船板的冲击断口为典型的脆性断口,如图 1-4 所示,这是因为船板和铆钉中都含有大量的 MnS 夹杂物,有害元素 P 超标以及航速偏快。船板在冰山的持续碰撞下,在夹杂物、铆钉等应力集中处引发了许多裂纹,这些裂纹随后发生快速疲劳扩展并彼此连接成大裂纹,最终导致船板的整体裂开。



图 1-1 泰坦尼克号全貌



图 1-2 船体沉没时断裂状况模拟图

因此,泰坦尼克号的失效是由于船板和铆钉的断裂韧度低、冰山的撞击力和航速本身过快等相互作用下发生的低应力脆性断裂所引起的。故以后选用了耐低温材料作为船体制造材料,现代船板材料的冲击断口为韧性断口,如图 1-5 所示,并且

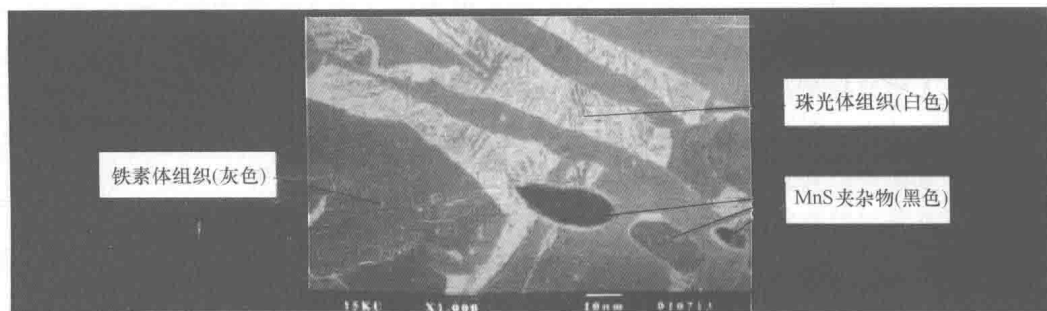


图 1-3 船板金相组织

严格控制其夹杂物含量以及驾驶航速，从而杜绝了类似事故的发生。

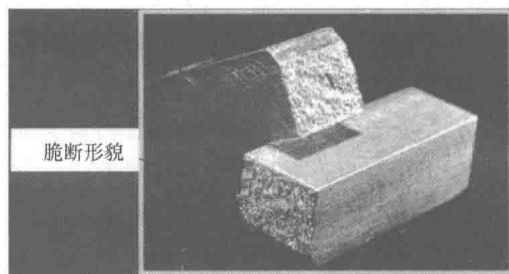


图 1-4 船板的冲击断口

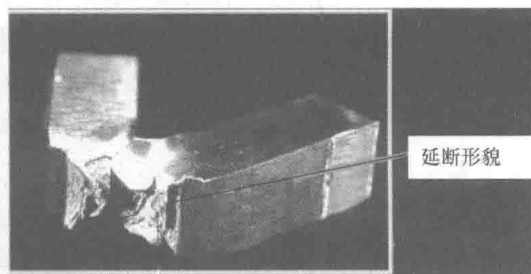


图 1-5 现代船板冲击断口

产品或装备失效分析的意义不仅在于失效性质的判断和失效原因的明确，而更重要的还在于为积极预防重复失效找到有效的途径。通过失效分析，找到造成产品或装备失效的真正原因，从而建立结构设计、材料选择与使用、加工制造、装配调整、使用与保养方面主要的失效抗力指标与措施，特别是确定这种失效抗力指标随材料成分、组织和状态变化的规律，运用金属学、材料强度学、工程力学等方面的研究成果，提出增强失效抗力的改进措施。既能提高产品或装备承载能力和使用寿命，又可做到充分发挥产品或装备的使用潜力，使材尽其用，这是产品或装备失效分析、预测预防研究的重要目的与内容。

1.2 失效分析的发展阶段

失效分析的发展历程，大致经历了三个阶段：基于简单手工业背景的古代理失效分析阶段，以大机器工业为基础的近代失效分析阶段和以现代化科学技术、系统理论为指导的现代失效分析阶段。

1.2.1 古代失效分析阶段

人类学会使用工具开始制造产品时，失效就与其伴随而生。由于远古时代的生

产力较为落后,产品简陋,不可能也没有必要对产品失效的原因进行分析,其常用办法就是更换。虽然失效与产品相伴随,但失效分析并不是随产品的出现而出现的。

目前所能考证的有史料记载的最早有关产品质量的法律文件,是公元前 225 年由巴比伦国王汉谟拉比撰写的。该法律大典第一次在人类历史上,明确规定对制造有缺陷产品的工匠进行严厉制裁。然而由于生产力落后,商品往往供不应求,罗马法律便肯定了商品出门概不退换的总原则。购买者只能通过世代相传的零星的、分散的、宏观的经验去判断。失效分析作为仲裁事故和提高产品质量的技术手段,则是随着两百年前的工业革命开始的。因此,可将公元前 225 年到世界工业革命前看作失效分析的第一阶段,即古代失效分析阶段。

1.2.2 近代失效分析阶段

失效分析受到真正重视是从以蒸汽动力和大机器生产为代表的世界工业革命开始的。这个时期由于生产大发展,金属制品向大型、复杂、多功能开拓,但当时人们并没有掌握材料在各种环境中使用的性能,以及设计、制造、使用中可能出现的失效现象。锅炉爆炸、车轴断裂、桥梁倒塌、船舶断裂等事故在当时频繁出现,给人类带来了前所未有的灾难,因此急需研究失效产生和控制的方法,以便控制和预防事故的发生。英国于 1862 年建立了世界上第一个蒸汽锅炉监察局,把失效分析作为仲裁事故的法律手段和提高产品质量的技术手段;夏比(Charpy)发明了摆锤冲击试验机,用以检验金属材料的韧性;韦勒(Wohler)通过对 1852—1870 年期间火车轮轴断裂失效的分析研究,揭示出金属的“疲劳”现象,并研制出世界上第一台疲劳试验机;20 世纪 20 年代,格里菲斯(Griffith)通过对大量脆性断裂事故的研究,提出了金属材料的脆断理论。20 世纪 40 年代发生的北极星导弹爆炸事故、第二次世界大战期间的“自由轮”脆性断裂事故,大大推动了人们对带裂纹体在低应力下断裂的研究,从而在 20 世纪 50 年代中后期产生了断裂力学这一新兴学科。但限于当时的分析手段主要是材料的宏观检验及倍率不高的光学金相观测,因此未能从微观上揭示失效的物理和化学本质,断裂力学仍未能在工程材料中很好的应用。这一问题的解决也只是在电子显微学及其他相关学科,得到高速发展后才成为可能。故将工业革命到 20 世纪 50 年代末称为近代失效分析阶段。

1.2.3 现代失效分析阶段

20 世纪 50 年代以后,随着电子工业的兴起,首先在电子产品领域里将失效分析成果应用于产品可靠性设计,它以数理统计为基础,使得失效分析进入了一个新阶段。同时,由于科学技术发展突飞猛进,作为失效分析基础学科的材料科学与力学的迅猛发展,断口观察仪器的长足进步,特别是分辨率高、倍数大、景深长的扫描电子显微镜(简称扫描电镜)的问世,为失效分析技术向纵深发展创造了条件,

使失效微观机制的研究成为可能。随后,大量现代物理测试技术的应用,如电子探针 X 射线、X 射线及紫外线光电子能谱分析、俄歇电子能谱分析等,促使失效分析登上了新的台阶。

随着科学技术和制造水平的不断进步,尤其是断裂力学、损伤力学、产品可靠性及损伤容限设计思想的应用和发展,使得产品的可靠性越来越高,产品失效引起的恶性事故数量相对减少,但危害影响越来越大,产品失效的原因很少是由于某一特定因素所致,均呈现复杂的多因素特征,这就需要从设计、力学、材料、制造工艺及使用等方面进行系统的综合性分析,也就需要有从事设计、力学、材料等各方面的研究人员共同参与,其解决办法是从降低零件所受外力与提高零件所具有的抗力两方面入手,以达到提高产品使用可靠性的目的。20 世纪 80 年代中后期开始,失效分析逐渐形成一门专门学科,而不再是材料科学技术的一个附属部分,其主要特点就是集断裂特征分析、力学分析、结构分析、材料抗力分析及可靠性分析为一体。

从 20 世纪 50 年代末起的失效分析发展阶段即现代失效分析阶段,这一阶段已经走过半个多世纪,并取得了巨大的成就。

参 考 文 献

- [1] 杨川,高国庆,崔国栋.金属零部件失效分析基础 [M].北京:国防工业出版社,2014.
- [2] 涂铭旌,鄢文彬.机械零件失效分析与预防 [M].北京:高等教育出版社,1993.
- [3] 张栋,钟培道,陶春虎,等.失效分析 [M].北京:国防工业出版社,2013.

第2章

失效分析基本概念与技术

2.1 失效分析基本概念

2.1.1 相关术语

1. 失效

产品及其零件在使用过程中，由于应力、时间、温度、环境介质及操作失误等因素的作用，丧失其规定功能和原有功能退化以致不能正常使用的现象称为失效。这种产品及其零件除了早期适应性运行及晚期损耗达到设计寿命的正常失效外，在运行期间，产品及其零件在何时、以何种方式发生失效是随机事件，无法完全预料。

失效可能发生于三种情况：完全不能工作；性能劣化已不能达到原有指标；失去安全工作能力。

2. 失效分析

对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的过程称为失效分析。

失效总是首先从某些零件的最薄弱环节开始的，而且在失效的部位保留着失效过程中的信息。通过对失效件的分析，明确失效类型，找出失效原因，采取改进和预防措施，防止类似的失效在设计寿命内再次发生，从而使产品质量得以提高，这就是失效分析的目的。从技术上和经济上都没有必要要求装备永不失效，失效分析的目的不在于制造具有无限使用寿命的产品，而是确保产品在规定的寿命期限内不发生早期失效，或者把失效限制在规定范围内，并对失效的过程进行监控、预警，以便采取紧急措施。

3. 缺陷

产品未能满足相关技术标准规定的要求称为该产品存在缺陷；产品质量控制中的“缺陷”是指影响使用功能、寿命与可靠性，表现为“连续性”“均匀性”与

“致密性”受到破坏的区域。

4. 故障

产品不能执行规定功能的状态称为故障，通常指功能故障。失效与故障的含义有所不同。

5. 事故

产品由于故障、失效、使用操作失误及环境因素等，而导致重大经济损失和人员伤亡等不良后果的现象称为事故。

6. 缺陷、失效及事故的关系

缺陷、失效及事故分析与预防是一项技术性与社会性均很强的工作，是人类认识客观世界的一个重要窗口。随着制造业的发展和科学技术的进步，该项工作的意义愈显重要。

缺陷是因，失效是果；失效是因，事故是果。缺陷是失效的原因之一，失效是事故的原因之一。产品出现失效的原因可以归纳为零件缺陷、使用过失、环境因素和正常损耗四类。国内外的统计数据表明，四类因素的趋势是：零件缺陷—使用过失—环境因素—正常损耗，由大到小。这种统计数据的具体比例随产品的类型、质量等级和使用条件的不同而有所不同。在由零件缺陷导致的失效统计分析中，因设计失误导致的失效居首位，其次是材料缺陷和制造工艺缺陷。

2.1.2 失效分析学科简介

1. 失效分析的主要分支学科

(1) 断口学 断口是产品或试样在使用和试验过程中发生断裂（或形成裂纹后打断）所形成的断面。断口的形貌特征记录了材料在载荷和环境作用下不可逆变形，以及裂纹萌生和扩展直至断裂的全过程。断口学就是通过定性和定量分析来识别这些特征，并将这些特征与发生损伤乃至最终失效的过程联系起来，从而找出与失效相关的内在或外在原因的科学技术。

目前，虽然断口学已得到很大的发展，但仍存在一些问题，如断口分析基本上是以定性为主，定量分析手段不完善；另外，由于科技的发展使得新材料不断涌现，也使得新材料的断口特征及其在特殊环境下的断裂行为与其断口特征内在联系，一直是一个亟待研究的课题。

断裂、腐蚀、磨损和变形是机械装备构件最主要的失效，而断裂是危害性最大的一种。

(2) 痕迹学 痕迹是一个含义丰富、历史悠久、应用甚多的概念。痕迹学广泛应用于考古研究和刑事侦探，在刑事检查中首先发展起来的是指纹痕迹分析法。

痕迹是环境作用于系统，在系统表面留下的标记；痕迹分析就是对这些标记进行诊断鉴别。痕迹学就是通过定性和定量分析来识别这些“标记”及其演变特征，找出其变化的过程和原因，为事故和失效分析提供线索和证据。