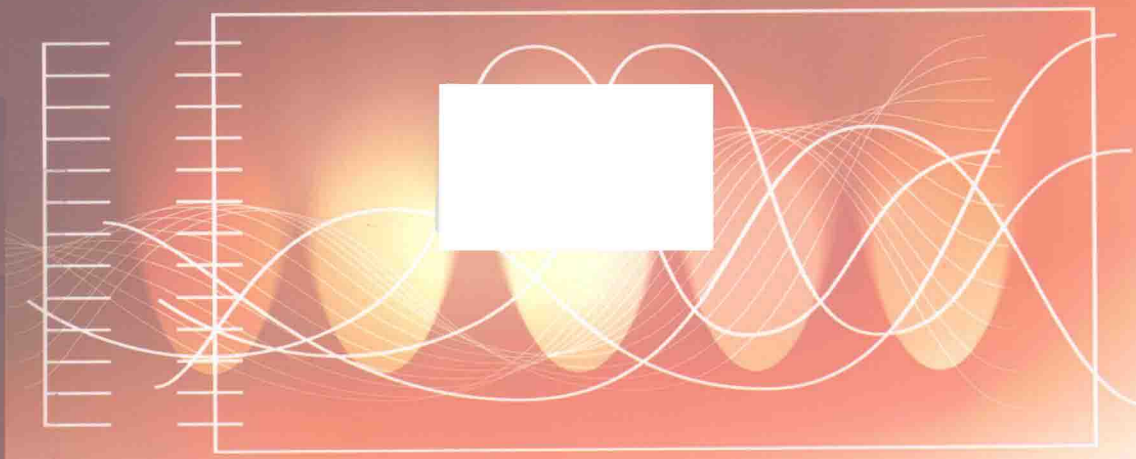
装备失效分析技术

Equipment Failure Analysis Technology

刘贵民 杜 军 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

需要全本请访问 www.ertongbook.com

装备失效分析技术

刘贵民　杜 军　编著

国防工业出版社

·北京·

内容简介

本书系统介绍了装备失效分析的理论和技术。第1章主要介绍失效分析的意义、基本要求及发展历程。第2章介绍失效分析的基本程序、思路及基本方法，以及常用失效分析技术。第3、4、5、6章分别介绍断裂失效、腐蚀失效、磨损失效和变形失效的原理和技术。第7、8章分别是再制造装备、电子元器件的失效分析。第9章介绍了代表性的装备失效分析案例，可以穿插在其他章节中进行学习和比较。

本书可作为机械、电子装备、安全工程等相关专业的本科和研究生专业学习教材；同时可供从事失效分析工作的科研人员、检测人员以及处理失效事故的管理人员作为参考书。

图书在版编目(CIP)数据

装备失效分析技术/刘贵民，杜军编著. —北京：国防工业出版社，2012.5

ISBN 978-7-118-07998-2

Ⅰ.①装... Ⅱ.①刘...②杜... Ⅲ.①武器装备－失效分析 Ⅳ.①E237

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第059061号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 **印张** 19¼ **字数** 344千字

2012年5月第1版第1次印刷 **印数** 1—4000册 **定价** 48.00元

(本书如有印装错误，我社负责调换)

国防书店：(010)88540777 发行邮购：(010)88540776

发行传真：(010)88540755 发行业务：(010)88540717

前　言

我国的失效分析工作从20世纪70年代进入一个新时期，无论是组织管理、实际的分析操作技术、理论研究及普及教育都取得了很大的进步和提高，一些机构也相继出版了一些有关的书籍。21世纪以来，我国的装备制造业、再制造业得到迅速发展，失效分析也有了很大发展。本书在全面介绍失效分析基础理论基础上，力求反映失效分析技术和理论的最新发展，将再制造装备的失效分析及电子元器件失效分析的相关内容纳入到书中。

全书共分为9章。第1章是对失效分析技术的概括性介绍，主要包括失效及失效分析的定义，失效分析的意义、基本要求及发展历程。第2章介绍失效分析原理和方法，包括失效分析的基本程序、思路及基本方法，以及常用失效分析技术。第3章介绍断裂失效，包括断裂失效形式及其判断、线弹性断裂力学和弹塑性断裂力学的内容。第4章是腐蚀失效，介绍腐蚀学的基本知识、电化学腐蚀热力学、反应动力学，以及腐蚀失效形式、腐蚀失效实验。第5章是有关磨损失效的内容，主要介绍摩擦学基础知识，以及磨料失效、粘着磨损、冲蚀磨损、微动磨损、腐蚀磨损、疲劳磨损等常见磨损失效基本形式，并对摩擦与润滑进行了介绍。第6章对弹性变形失效、塑性变形失效以及高温作用下的变形失效等变形失效的相关知识进行了介绍。第7章介绍再制造装备的失效及寿命预测，首先对再制造工程技术进行了介绍，然后介绍了再制造装备的失效形式，最后介绍了再制造装备失效分析和寿命预测技术。第8章的内容是电子元器件的失效分析，包括3方面的内容：电子元器件的失效机理，电子元器件的失效分析技术，以及电子元器件失效分析技术的工程应用。第9章主要是代表性的装备失效分析案例介绍。

本书可作为机械、电子装备、安全工程等相关专业的本科和研究生专业教

材;同时可供从事失效分析工作的科研人员、检测人员以及处理失效事故的管理人员作为参考书。

本书的第1~6章由刘贵民编写,郑晓辉校对;第7~9章由杜军编写,刘贵民校对;全书由刘贵民进行统稿。

借该书出版之际,对国防科技重点实验室基金项目(914OC85020111OC85)和国家自然科学青年基金项目(51102283)的支持,以及书中引用的文献资料的作者及出版机构表示感谢。

由于时间仓促,难免存在缺点及错误,敬请各位读者批评指正。

作 者

2011 年 12 月

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目　录

第1章　概论 …… 1
1.1　失效 …… 1
1.2　失效分析 …… 1
1.2.1　失效带来的损失 …… 2
1.2.2　失效分析的目的及意义 …… 3
1.3　失效分析的发展 …… 5
1.3.1　失效分析发展的3个阶段 …… 5
1.3.2　国内外失效分析状况 …… 6
1.4　失效分析学科简介 …… 8
1.4.1　失效分析的基本类别 …… 8
1.4.2　失效分析的主要分支学科 …… 8
1.4.3　失效分析与相关学科的关系 …… 9
1.4.4　现代失效分析的发展方向 …… 10
1.5　失效的基本模式 …… 12
1.6　引起失效的主要原因 …… 13
1.7　失效分析的基本要求 …… 14
第2章　失效分析原理和方法 …… 16
2.1　失效分析的基本程序 …… 16
2.1.1　明确失效分析的目的要求 …… 16
2.1.2　调查现场及收集背景资料 …… 17
2.1.3　失效件的保护 …… 18
2.1.4　失效件的观察、检测和试验 …… 19
2.1.5　确定失效原因并提出改进措施 …… 20
2.2　失效分析的思路及基本方法 …… 21
2.2.1　失效分析思路的方向性及基本原则 …… 21
2.2.2　失效分析思路简介 …… 23
2.2.3　失效分析常用的逻辑推理方法 …… 26

2.3 失效分析常用技术 …… 27
2.3.1 痕迹分析 …… 28
2.3.2 断口分析技术 …… 30
2.3.3 裂纹分析技术 …… 32
2.3.4 模拟试验 …… 36
第3章 断裂失效 …… 37
3.1 断裂失效形式及其判断 …… 37
3.1.1 断裂失效的分类 …… 37
3.1.2 韧性断裂 …… 39
3.1.3 脆性断裂 …… 45
3.1.4 疲劳断裂 …… 53
3.2 线弹性断裂力学 …… 70
3.2.1 Griffith 断裂理论 …… 71
3.2.2 修正的 Griffith 断裂理论 …… 72
3.2.3 应力强度理论 …… 73
3.3 弹塑性断裂力学 …… 78
3.3.1 裂纹尖端塑性变形 …… 79
3.3.2 裂纹张开位移理论 …… 81
3.3.3 *J* 积分理论 …… 83
第4章 腐蚀失效 …… 84
4.1 腐蚀学基本知识 …… 84
4.1.1 基本概念 …… 84
4.1.2 金属腐蚀的分类 …… 85
4.1.3 金属腐蚀程度的表示方法 …… 86
4.2 电化学腐蚀热力学 …… 88
4.2.1 腐蚀电池 …… 88
4.2.2 金属电化学腐蚀倾向的判断 …… 93
4.2.3 电位 - pH 图 …… 97
4.3 电化学腐蚀反应动力学 …… 102
4.3.1 极化现象与极化曲线 …… 102
4.3.2 腐蚀速度与极化的关系 …… 104
4.3.3 极化现象的分类 …… 105
4.3.4 腐蚀电池的混合电位 …… 106
4.3.5 活化极化控制下的腐蚀动力学方程式 …… 109

4.3.6 浓差极化控制下的腐蚀动力学方程式 …… 115
4.4 腐蚀失效形式 …… 118
4.4.1 均匀腐蚀 …… 118
4.4.2 小孔腐蚀 …… 119
4.4.3 缝隙腐蚀 …… 120
4.4.4 晶间腐蚀 …… 121
4.4.5 电偶腐蚀 …… 121
4.4.6 选择性腐蚀 …… 122
4.5 腐蚀失效实验 …… 122
第5章 磨损失效 …… 124
5.1 摩擦学基础知识 …… 124
5.1.1 摩擦的概念和分类 …… 124
5.1.2 摩擦理论 …… 125
5.1.3 影响摩擦因数的因素 …… 135
5.1.4 固体的摩擦热 …… 139
5.2 磨损失效基本形式 …… 143
5.2.1 磨料失效 …… 144
5.2.2 粘着磨损 …… 148
5.2.3 冲蚀磨损 …… 151
5.2.4 微动磨损 …… 155
5.2.5 腐蚀磨损 …… 160
5.2.6 疲劳磨损 …… 164
5.2.7 提高耐磨性的途径 …… 165
5.3 摩擦与润滑 …… 166
5.3.1 干摩擦 …… 166
5.3.2 边界摩擦 …… 168
5.3.3 流体润滑 …… 172
第6章 变形失效 …… 174
6.1 弹性变形失效 …… 174
6.2 塑性变形失效 …… 176
6.2.1 塑性变形 …… 176
6.2.2 塑性变形的特点 …… 176
6.2.3 塑性变形失效 …… 177
6.2.4 塑性变形失效的原因及预防措施 …… 178

6.3 高温作用下的变形失效 …… 179
6.3.1 蠕变变形失效 …… 179
6.3.2 应力松弛变形失效 …… 181
第7章 再制造装备的失效及寿命预测 …… 183
7.1 再制造工程技术简介 …… 183
7.1.1 表面改性技术 …… 183
7.1.2 表面覆镀技术 …… 188
7.1.3 表面渗镀技术 …… 190
7.1.4 材料制备与成形一体化技术 …… 193
7.2 再制造装备的失效形式 …… 194
7.2.1 装备再制造前、后的差异 …… 194
7.2.2 再制造引入残余应力的影响 …… 195
7.2.3 再制造涂覆层的影响 …… 196
7.2.4 疲劳破坏 …… 197
7.2.5 磨损破坏 …… 198
7.2.6 腐蚀破坏 …… 198
7.2.7 应力腐蚀失效或开裂 …… 198
7.2.8 高温破坏 …… 198
7.3 再制造装备失效分析技术和寿命预测 …… 199
7.3.1 再制造涂层的加速磨损寿命预测 …… 199
7.3.2 再制造装备失效分析的无损检测技术 …… 204
第8章 电子元器件的失效分析 …… 209
8.1 电子元器件的失效机理 …… 210
8.1.1 电子元器件失效模式的定义 …… 210
8.1.2 主要失效形式 …… 210
8.1.3 主要失效机理 …… 211
8.1.4 失效分析流程 …… 214
8.1.5 常见电子元器件失效原因和常见故障 …… 215
8.1.6 电子元器件可靠性指标 …… 220
8.2 电子元器件失效分析工具与技术 …… 221
8.2.1 电子元器件失效分析常用技术 …… 221
8.2.2 系统工程分析方法 …… 227
8.3 电子元器件失效分析技术的工程应用 …… 228
8.3.1 电子元器件中焊点的失效分析 …… 228

8.3.2 电子封装物的失效分析 …… 232
8.3.3 MD2864A－30/B 失效分析 …… 233
8.3.4 CD4069UB 的失效分析 …… 234
8.3.5 电子元器件外引线断腿失效分析 …… 235
第 9 章 装备失效分析案例 …… 238
9.1 某重载车辆侧减速器主动齿轮接触疲劳失效分析 …… 238
9.1.1 背景介绍 …… 238
9.1.2 断口分析 …… 239
9.1.3 化学成分检验 …… 240
9.1.4 显微组织分析 …… 240
9.1.5 硬度检验 …… 242
9.1.6 结论 …… 243
9.2 轮式车辆变速箱换挡拨叉断裂失效分析 …… 243
9.2.1 背景 …… 243
9.2.2 宏观形貌分析 …… 243
9.2.3 有限元模拟分析 …… 244
9.2.4 结论 …… 248
9.3 某重型车辆减振器摩擦片失效分析 …… 248
9.3.1 摩擦减振器工作状况 …… 248
9.3.2 摩擦片失效特征 …… 250
9.3.3 失效机理及材料改进 …… 251
9.3.4 结论 …… 253
9.4 高强铝合金腐蚀失效分析 …… 254
9.4.1 2A12CZ 铝合金腐蚀 …… 254
9.4.2 7N01 铝合金车体水箱横梁断裂失效分析 …… 260
9.5 某型号军用手枪枪管断裂失效分析 …… 265
9.5.1 断口形貌分析 …… 265
9.5.2 断口析出物结构分析 …… 267
9.5.3 失效机理分析和模拟验证试验 …… 268
9.5.4 综合分析和改进措施 …… 269
9.6 热循环作用下圆筒基体热障涂层的失效过程分析 …… 270
9.6.1 背景 …… 270
9.6.2 热循环试验 …… 271
9.6.3 有限元模拟分析热障涂层失效 …… 272

9.6.4 声发射技术分析热障涂层失效 …… 278
9.7 高速电弧喷涂 3Cr13 涂层不同工作环境下失效模式分析 …… 281
9.7.1 干摩擦条件下 3Cr13 涂层的失效分析 …… 282
9.7.2 含磨粒润滑条件下涂层失效分析 …… 286
9.7.3 不同载荷条件下涂层失效分析 …… 288
9.8 某重型车辆变速箱断齿及箱体断裂失效分析 …… 290
9.8.1 背景介绍 …… 290
9.8.2 断齿和齿顶宏观形貌 …… 291
9.8.3 微观形貌分析 …… 291
9.8.4 金相分析 …… 293
9.8.5 硬度分析 …… 294
9.8.6 结论 …… 295
参考文献 …… 296

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第1章 概 论

1.1 失 效

装备及其构件在使用过程中，由于应力、时间、温度和环境介质及操作失误等因素的作用，失去其原有功能或原有功能退化以致不能正常使用的现象时有发生。这种丧失其规定功能或原有功能退化以致不能正常使用的现象称为失效。装备及其构件除了早期适应性运行及晚期耗损达到设计寿命的正常失效外，在运行期间，装备及其构件在何时、以何种方式发生失效是随机事件，无法完全预料。

装备及其构件的失效存在着各种不同的情况。例如，汽轮机在运转中突然发生叶片断裂而停止运转，这种完全失去原有功能的现象毫无疑问是失效；但有时装备是局部失去功能，或性能劣化，如航海陀螺仪中的轴承经长期使用后由于轴承发生磨损出现噪声或降低了精度，这时虽然尚未完全不能使用，但因失去精度，可认为也已经失效；有时装备整体功能并无明显变化，但其中某个零件部分或完全失去功能，此时虽然在一般情况下还能正常工作，但在某些特殊情况下就可能导致重大事故，这种失去安全工作能力的情况也属于失效，如锅炉和压力容器的安全阀失灵、火车的紧急制动失灵等。所以，失效可能发生于3种情况：①完全不能工作者；②性能劣化已不能达到原有指标者；③失去安全工作能力者。

1.2 失 效 分 析

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机械，而是确保装备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之内，并对失效的过

程进行监测、预警，以便采取紧急措施。

1.2.1 失效带来的损失

失效分析的主要目的是要找出引起失效的原因，从而采取有效措施，使同样的失效不再重复发生。因为失效不仅带来极大的经济损失，而且还造成人身伤亡。这方面的实例很多。

1944 年 10 月 20 日，美国东俄亥俄州煤气公司液化天然气储藏基地，一台直径 21m，高 12.8m 的圆筒形储罐由于壳体破裂而喷出气体和液体，随后爆炸起火，20 min 后，一台内径为 17.4 m 的球罐因受热倒塌而爆炸，造成 128 人死亡，当时经济损失达 680 万美元。

1979 年 9 月 7 日，我国某电化厂氯气车间由于贮罐泄露导致液氯爆炸，使 10t 氯液外溢扩散，波及范围达 7.35 平方公里，死亡 59 人，779 人中毒，直接经济损失超过 63 万元。

1979 年 12 月 18 日，中国某地一煤气公司的液化气厂发生一起恶性爆炸事故。一台直径 9.2m，容积 400m^3 的球形液化气储罐突然爆裂，从长 13.5m、宽 0.5 m 的裂缝喷出液化石油气，遇明火而爆炸燃烧，引起附近 3 个 400m^3 的球形储罐和一个 50m^3 卧式储罐以及 25 m 以外仓库中的 5000 个民用液化气瓶先后爆炸起火。大火燃烧了 19 h，共烧掉液化石油气超过 700t，烧毁机动车 15 辆以及罐区全部建筑，死亡 33 人，受伤 53 人，当时直接经济损失达 650 万元。

1984 年 12 月 3 日凌晨，印度博帕尔市的美国联合碳化物公司所属的一家化工厂，由于储罐管路破裂，泄出大量毒气，造成 375 人死亡，2000 人重伤。该市 50 万居民中有 20 万受到毒气侵害，2 万人需要住院治疗。有关方面要求美国公司赔偿 150 亿美元的损失费。

1999 年 1 月 4 日，重庆綦江虹桥，由于拱架钢管焊接部位以及连接桥梁、桥面与钢拱架的拉索、铆片、铆具均严重锈蚀，导致桥体垮塌，造成 40 多名群众死亡，数名群众受伤的惨剧。

2004 年 4 月 15 日，位于重庆主城区的某化工厂，由于氯冷凝器的列管出现穿孔，发生氯气泄漏和三氯化氮爆炸事件，波及附近 600 米的居民区，造成 7 人死亡，3 人中伤，中毒群众几百人。

军用装备的失效有时也会引起重大事故的发生。

2000 年 8 月 21 日，军用 684Ⅱ型交通艇在广东某海域进行航行试验时，由于法兰度不足造成螺栓脱落，导致主机与齿轮箱连接的联轴节严重损坏，曲轴、凸轮轴、主机相继损坏，船艇被迫返厂维修。

2001 年 11 月 8 日，由 EQ2102 型军用底盘改装的 12 台轮式坦克修理工程

车，在3000km的道路试验中，发现有11台工程车的分动箱壳体由于疲劳产生开裂。

军用装备的失效，不但会造成经济损失，威胁士兵的生命安全，同时，如果失效发生在战场上，既会影响军队战斗力，贻误战机，更会导致重大的军事事故。

失效带来人员伤亡和直接巨大的经济损失，同时，失效也会造成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的损失；影响企业的信誉和市场竞争力所造成的损失；等等。

例如，某大型石化厂，在全厂最高大的脱碳塔旁边，有一个小小的底部液体加热再沸器，其作用是把脱碳塔底部的溶液引出并用蒸汽加热，使温度升高2℃，以便溶液再达沸点温度。这个再沸器管子经常损坏，损坏后要全厂停工修理，更换管束费用虽然不算高，但一次停工就需10天~20天，停一天损失20多万，间接损失比直接损失大得多。

由于设备失效引起企业及与其相关的其他企业停产而造成的损失，往往难于精确计算，实际的损失可能比估算的数字还要大。

1.2.2 失效分析的目的及意义

1. 促进科学技术的发展

失效分析是对事物认识的一个复杂过程，通过多学科交叉分析，找到失效的原因，不仅可以防止同样的失效再次发生，而且能进一步完善装备的功能，并促进与之相关的各项工作的改进。

例如，19世纪中期，铁路运输频繁出现车轴的断裂。通过对大量断轴进行失效分析和试验研究工作，找到了原因：金属构件在交变应力的作用下，即使该应力远远低于金属材料的拉伸强度，经过一定的循环积累，也会发生断裂，这就是“疲劳”。此后经物理学家、冶金学家、机械工程师反复、深入、系统地研究，使疲劳断裂成为金属材料强度学中的一个重要领域。用疲劳的机理可以解释很多失效现象，研制出抗疲劳性能良好的金属材料、结构和成形工艺。

又如，第二次世界大战期间，美国2500艘全焊接结构“自由轮”发生了一千多次破坏事故，其中238艘完全报废，19艘沉没，有24艘船舶甲板完全断裂。事故大多发生在美国—冰岛—英国这条北大西洋航线上，这里气温多在零度以下。原因是碳钢和低合金钢有一个脆性转变温度，尽管这些钢材在常温下有良好的韧性，但在低于室温的某一温度就会变脆（对缺口极为敏感），使钢材变脆的温度称为脆性转变温度。某些常用钢材的低温韧性转变特性可以很好地解释美国的“自由轮”、钢制桥梁、压力容器、管道等在低温下工作的脆性失效，促使

研制出在低温下有良好性能的材料。现在已制造出在接近绝对零度的超低温下工作的装备和构件。

对各种失效机理的认识都是通过对装备构件发生的各种失效进行分析，提高了对客观规律的认识。失效、认识（失效分析）、提高、再失效、再认识、再提高，由此促进了科学技术的发展。

2. 提高装备及其构件的质量

对装备构件的失效分析是提高质量的有力措施。装备构件的质量往往通过各种试验检测进行考核，但试验室内再好的模拟试验也不可能做到与装备构件服役条件完全相同。任何一次失效都可视为在实际使用条件下对装备构件质量检查所做的科学试验，失效越是意想不到，越能给人们意想不到的启示，引导分析复杂多变的过程及影响因素下装备构件质量的偏差，找出被忽略的质量问题。由此从设计、材料、制造等各方面进行改进，便可提高装备及其构件的质量。

日本的机械产品一度曾以质量低劣闻名于世，但是目前日本产品的质量在世界范围内已占有明显的优势，这与他们重视质量、重视失效分析是分不开的。例如，马路上行驶的丰田皇冠、顶级凌志，堪称“精致豪华”，这是日本在30多年前就着手系统地分析世界各国汽车构件失效情况，着重研究失效原因及改进措施的结果。

从大量化工及石油化工装置构件的失效分析总结出很多的经验，其中“金属材料的高质量”是预防失效的首要要求。例如，20世纪20年代，奥氏体不锈钢在很多介质中发生晶间腐蚀失效，通过失效分析提出晶间腐蚀的贫铬理论、选择性腐蚀理论及沉淀相腐蚀理论等，为避免有害的碳化铬在晶界沉淀，降碳、加稳定的碳化物形成元素及杂质含量低的奥氏体不锈钢相继问世，使奥氏体不锈钢构件的晶间腐蚀失效率大大降低；又如，石油的含硫量越来越高，压力容器及管道大量的湿 H_2S 环境开裂失效问题逐渐引起世人关注，通过广泛深入地调查研究分析，认为碳钢及低合金钢在湿 H_2S 环境中的开裂问题与钢材的强度有关，与材料的化学成分、显微组织，尤其冶金质量影响有关，因此目前世界各国在开发高纯度及满意显微组织的湿 H_2S 环境专用钢，如法国在压力容器结构规范CODAP—1990中，除了规定限制钢材碳当量及焊缝热影响区的硬度，还提出要求：为降低夹杂，应限制S含量，使 $S \leqslant 0.002\%$，如能达到0.001%则更好；为改善显微组织，应限制 $P \leqslant 0.008\%$，以防止磷的偏析引起开裂。

3. 具有高经济效益、社会效益和军事效益

装备及构件失效带来直接及间接的经济损失，进行失效分析找出失效原因及防止措施，使同样的失效不再发生，这无疑就减少了损失，并带来了经济效益。还有它提高了装备构件质量，使用寿命增加、维修费用降低及高的产品质量信誉

等都带来了经济效益。失效分析能分清责任,为仲裁和执法提供依据。失效分析揭示了规章、制度、法规及标准的不足,为其修改提供依据。科学技术是生产力,失效分析有力地推动了科学技术的发展,在这个方面失效分析给整个社会带来的经济效益、社会效益和军事效益是难以估计的。

例如,1990 年,某型号反坦克炮钨合金脱壳穿甲弹在强度试验中,发现部分弹丸在膛内断裂,经综合分析,断裂原因是由于弹丸尾部强度不够。后来承制单位将弹丸尾部的盐浴处理改为真空热处理,提高了弹丸强度,有效防止了事故的再次发生。再如,2002 年 8 月,部队反馈国产某式手枪击针在训练中相继出现批量性断裂,经失效分析属空枪击发过多导致的疲劳断裂,而在手枪设计上只考虑了实弹射击的击针强度,忽略了部队训练的空枪击发,因此制造厂和使用部队按 4:1 共同负担了翻修和改进费用,圆满解决了存在的质量问题。

1.3 失效分析的发展

1.3.1 失效分析发展的 3 个阶段

一般把失效分析的发展历史分为 3 个阶段:失效分析的初级阶段、近代失效分析阶段及现代失效分析阶段。

第一次世界工业革命前是失效分析的初级阶段,这个时期是简单的手工生产时期,金属制品规模小且数量少,其失效不会引起重视,失效分析基本上处于现象描述和经验阶段。

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态、设计、制造及使用中可能出现的失效现象。当时,锅炉爆炸、车轴断裂、桥梁倒塌、船舶断裂等事故频繁出现,给人类带来了前所未有的灾难。失效的频繁出现引起了极大重视,促使了失效分析技术的发展。此阶段最可喜的是各种失效形式的发现及规律的总结,并促使了断裂力学这一新学科的诞生。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本质;断裂力学仍未能在工程材料断裂中很好地应用。此为失效分析的第二阶段,此阶段一直延至 20 世纪 50 年代末,又称为近代失效分析阶段。

20 世纪 50 年代以后,随着电子行业的兴起,出现了微观观测仪器,特别是分辨率高、放大倍率大、景深长的透射及扫描电子显微镜的问世,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

显微分析、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。失效分析现处在第三阶段的历史发展时期，即现代失效分析阶段，这一阶段已经走过近半个世纪，并取得了巨大的成就。

电子显微分析使失效细节观察成为可能，促使断口学及痕迹学的完善，并成为失效分析最重要的科学技术。断裂力学在失效分析诊断中起了重大作用，揭示含裂纹体的裂纹扩展规律，并推进失效预测预防工作的进展，目前，断裂力学已成为研究含裂纹的工程结构件变形及裂纹扩展的重要分支学科。失效分析集断裂特征分析、力学分析、结构分析、材料抗力分析及可靠性分析为一体，已发展成为跨学科的、综合的和相对独立的专门学科，不再是材料科学技术的附属。

1.3.2 国内外失效分析状况

1. 中国的失效分析状况

中国的失效分析工作从 20 世纪 70 年代进入到快速发展时期，无论是组织管理、实际分析操作技术、理论研究及普及教育都取得了很大的进步和提高。

我国的失效分析工作主要由中央部委的失效分析研究中心、企业的理化实验室及高校相关的试验研究中心进行。重大的失效事故由国家直接主持领导，在全国调配相关学科专家组成攻关小组或失效分析小组，在规定的时间内解决重大技术关键问题；一些比较简单、涉及面较窄的失效分析任务，有时由失效装备单位委托失效分析专家来承担。

中国机械工程学会及中国科协所属的有关工程技术学会为促进失效分析学科的发展做出了很大贡献。1980 年，中国机械工程学会在材料专业分会内成立了失效分析委员会，组织失效分析全国性的学术活动，并于 1980 年开始组织召开全国机械装备失效分析会议；1992 年开始，由中国科协委托中国机械工程学会失效分析委员会主持，全国 20 多个工程学会开始共同举办全国机电装备失效分析预测预防战略研讨会。目前，这些会议已举办多届，全面报道了中国机械装备失效及失效分析的状况、失效分析的技术水平、理论研究的广度及深度。中国机械工程学会失效分析委员会在全国建立失效分析网点，建立失效分析专家库。另外，我国的很多工程技术刊物开辟失效分析专栏，及时报道各种工程装备及构件的失效分析案例；2006 年，由南昌航空大学和北京航空材料研究院共同主办，开始出版发行杂志《失效分析与预防》。通过会议交流、印发论文集及杂志发行，大大推动了中国失效分析工作的发展。中国现代的失效分析虽然起步较晚，但与美、英、日、德、前苏联等先进国家相比，差距正日益缩小。

2. 美国的失效分析状况

美国无论在国防高新技术部门还是在工业部门均开展了失效分析工作。在

需要全本请访问 www.ertongbook.com