

失效分析 应用技术

Application Technology of Failure Analysis

上海材料研究所 王荣 编著

- 失效分析中常用的分析技术和方法
- 失效预防与安全评估
- 司法鉴定和失效分析报告的撰写技巧
- 180多个实际失效分析案例
- 330多幅来源于实际失效分析案例的原图

失效分析应用技术

上海材料研究所 王荣 编著



机械工业出版社

本书全面系统地介绍了失效分析中常用的分析技术和方法, 主要内容
包括失效分析概述、现场勘查技术、宏观分析技术、断口分析技术、金相
分析技术、定量分析技术、X 射线分析技术、电子光学分析技术、痕迹分
析技术、裂纹分析技术、失效诊断技术、失效预防与安全评估、失效分析
在司法鉴定中的应用、失效分析报告的撰写。本书理论和实践结合紧密,
每个章节都对所述及的知识点进行了系统的归纳总结, 有针对性地选用了
180 多个实际分析案例, 用检测结果或图片印证了失效机理, 实用性强。

本书可供失效分析工作者阅读使用, 也可作为企业质量管理人员、司
法机构的技术人员, 以及相关专业的在校师生的教材或参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

失效分析应用技术/王荣编著. —北京: 机械工业出版社, 2019. 2
ISBN 978-7-111-62061-7

I. ①失… II. ①王… III. ①失效分析 IV. ①TB114. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 032089 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

责任校对: 张晓蓉 封面设计: 马精明

责任印制: 张 博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2019 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·19.75 印张·487 千字

0001—2500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-62061-7

定价: 79.00 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

机工官博: weibo.com/cmp1952

策划编辑: 010-88379734

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

序

自从人类发明和使用工具的那一刻起，就存在失效问题了。人们通过对工具使用过程中的磨损、断裂等问题的不断思索和不断改进，才有了从石器时代、青铜器时代到铁器时代的跨越，以至发展到现代人们生活中五花八门的材料和产品。材料和失效问题密切相关，材料的进展促进了产品的升级换代和技术革命，同时，新材料和新工艺也带来了新的失效问题。

失效分析同时又是一门综合性学科，相关门类基础学科是失效分析的基础。传统的金相学和断口学为失效分析提供了强有力的支持，强度与断裂学科的发展为失效分析注入了更深层次的内涵。X射线分析技术和电子光学分析技术让人们认识事物从宏观延伸到微观原子尺度，可以在介观亚晶纳米尺度上对材料进行分析，对失效机理进行更加深入的研究。电子计算机的诞生和发展使各种物相的定性和定量分析变得方便而快捷，数字模拟技术、CT技术以及3D成像技术等使得失效分析变得生动、形象。扫描电子显微镜和能谱仪、波谱仪以及电子背散射衍射探测器集成一体化，使得同时提供样品的形貌、成分和晶体学特征成为可能，实现了综合分析，并极大地缩短了分析时间，丰富了失效分析的内容。

失效分析的研究方法也可以借鉴其他各成熟的学科。失效分析初始阶段的现场勘察内容与中医诊断时的望、闻、问、切非常类同。痕迹分析和产品司法鉴定则更多地吸收了法学的分析思路 and 手段，与刑事侦探活动有很多相通之处。辩证思维法在进行失效分析时也颇为重要。正确理解内因和外因的具体含义及其辩证关系，对失效原因的判断具有直接的指导作用；量变和质变关系揭示了失效过程中的突变现象之本质；偶然性和普遍性原理则可以帮助对失效因素进行更为正确的判断。

由于失效分析在材料科学和工程中的地位越来越重要，提高失效分析人员的自身能力水平就更加迫切，因此上海材料研究所组织编写了《失效分析应用技术》一书。该书内容来源于诸多工程失效分析案例，侧重于实际应用，我们期待该书的出版对广大从事失效分析的工程技术人员、研究人员有所裨益和帮助。



上海材料研究所所长

前 言

失效分析这门技术从 20 世纪中叶诞生至今已得到了迅猛发展，近些年有关失效分析的学术会议和活动更是活跃，涉及的行业和领域也越来越宽，报道失效分析文章的期刊也在不断增加，有不少高等院校也已经把失效分析作为学生的必修课程之一。笔者在多年从事失效分析工作的过程中，深知该项工作的复杂性、紧迫性和重要性。一些国际知名企业因为产品上的某个机械构件失效而在全球范围内实施“召回”；一些新产品在生产过程中因为失效而被迫停产；因机械装备失效引起的人员伤亡往往会导致一个企业破产，甚至会使几代人的命运发生改变。机械构件的失效和人民的生命财产息息相关，公证、科学、真实、快速地进行失效分析在我们的日常生活中越来越显得重要。

本书主要是结合笔者多年的失效分析工作经验，按照实际失效分析的思路和方法分章节编写的。每个章节都把现有的一些失效分析理论做了归类和细化，并将这些理论和实际案例有机地结合起来，尽量让读者能够思路清晰，有的放矢，并合理规划分析项目，把握重点，少走弯路，力争在最短的时间里获得正确的分析结论，并提出正确的预防措施，最后再得到一份结论准确、证据充实、结构合理、思路流畅、布局美观的失效分析报告。书中较多地使用了作者几十年来在失效分析过程中拍摄的图片，目的是能让这门技术更具真实性和科普性，便于读者理解和加深印象，使这项技术能够健康的发展和普及，并更好、更快地服务于社会，造福于人类。

本书整体上有两个主要特点：一是书中的所有图片均为原图，是直接拍摄或绘制的，均来源于具体的失效分析案例；二是理论与实践紧密结合。全书的写作路线也主要是按照常规的失效分析思路和分析过程进行的，在介绍失效机理时，都尽量用一些比较直观的机理图进行说明，并配合一些具体的失效分析案例，其目的就是能让读者一目了然和加深记忆。全书涉及的失效分析案例有 180 多个，涉及的领域有：机械、化工、管线、水电、火电、轨道交通、汽车、矿山机械、港口机械、造船、风能发电、航天、航空、核电、冶金、兵器、机电、制冷设备、压力容器、建筑、油田、模具等。

通过这次阶段性总结，笔者也在查找自己身上的短板，正确认识和业内同仁们的差距，坚持不懈地追寻先进的材料分析技术和分析理念，深入学习和研究各种失效机理，补强自己多方位、多层次观察事物和分析问题的能力，不断扩大自己的知识面，力争在自己有限的剩余工作时间里，为机械装备的失效分析这门技术的发扬光大尽一点微薄之力。

王 荣

目 录

序

前言

第1章 失效分析概述	1
1.1 引言	1
1.2 机械装备的失效与事故	2
1.2.1 失效	2
1.2.2 事故	3
1.2.3 机械失效和事故之间的关系	3
1.2.4 机械事故的分类	4
1.3 机械事故检查中失效件的判断	4
1.3.1 机械事故中的失效件说明	4
1.3.2 机械事故中肇事失效件的判断 方法	5
1.4 失效分析的基本内容	6
1.4.1 失效分析的概念	6
1.4.2 失效分析的过程	6
1.4.3 失效分析的特点	7
1.4.4 失效分析的思路和分析侧重点	7
1.4.5 失效分析的分类和失效模式诊断	8
1.5 失效分析一般遵循的程序	14
1.6 失效分析工作的一般过程与实施	16
参考文献	17

第2章 现场勘查技术	18
2.1 引言	18
2.2 现场勘查与失效分析	18
2.3 现场勘查和失效信息采集	19
2.4 失效分析中的现场勘查	19
2.4.1 现场勘查的任务	19
2.4.2 现场勘查的内容	19
2.4.3 现场勘查技术	20
2.4.4 司法鉴定中的现场勘查技术	22
2.5 事故调查	24
2.5.1 背景资料的收集和选样	24
2.5.2 工作历史	25
2.6 现场勘查技术应用举例	25

2.6.1 CO ₂ 储罐爆炸事故现场勘查 (残骸勘查)	25
2.6.2 化工厂蒸馏塔开裂泄漏失效分析 (环境勘查)	26
2.6.3 塔吊钢丝绳断裂失效分析 (结构勘查)	27
2.6.4 “长庆16”货轮沉江事故分析 (痕迹勘查)	28
2.6.5 钢制天然气管道开裂失效分析 (受力勘查)	30
参考文献	32

第3章 宏观分析技术	33
3.1 引言	33
3.2 宏观分析的特点和作用	33
3.2.1 宏观分析的特点	33
3.2.2 宏观分析的作用	34
3.3 无损检测方法	39
3.3.1 射线检测	39
3.3.2 超声波检测	40
3.3.3 磁粉检测	41
3.3.4 渗透检测	43
3.3.5 涡流检测	43
3.3.6 实用应力分析	44
3.4 漏点检测方法	45
3.4.1 充水检测法	45
3.4.2 充气检测法	45
3.5 宏观分析技术应用举例	46
3.5.1 反映失效件上的重要特征	46
3.5.2 判断主裂纹	47
3.5.3 判断一级失效模式	47
3.5.4 判断失效诱因	50
参考文献	51

第4章 断口分析技术	52
4.1 引言	52

4.2 断口的分类	52	应用	106
4.3 断口的基本形态	55	5.6.2 电子金相技术在失效分析中的 应用	109
4.3.1 韧性断口	55	5.7 金相分析技术在失效分析中的应用 举例	111
4.3.2 脆性断口	58	5.7.1 Q345R 复合钢板的带状缺陷 分析	111
4.3.3 石状断口	61	5.7.2 铸造阀盖断裂失效分析	112
4.3.4 疲劳断口	64	5.7.3 活塞杆断裂失效分析	113
4.4 失效模式及其诊断	66	5.7.4 吊车拉杆断裂失效分析	114
4.4.1 失效模式的概念	66	5.7.5 锻造钢坯开裂失效分析	115
4.4.2 失效模式的诊断	66	参考文献	117
4.5 断口样品的获取	70		
4.5.1 断口的现场取样	70		
4.5.2 断口的保护及清理	70		
4.6 断口的分析手段	73		
4.6.1 断口的宏观分析手段	73		
4.6.2 断口的微观分析手段	73		
4.7 断口的分析方法及技术	75		
4.7.1 断口的宏观分析方法及技术	75		
4.7.2 断口的微观分析方法及技术	78		
4.8 断口分析技术的主要作用	79		
4.8.1 判断二级失效模式	79		
4.8.2 判断断裂源和裂纹扩展方向	80		
4.9 断口分析技术应用举例	81		
参考文献	85		
第5章 金相分析技术	86	第6章 定量分析技术	119
5.1 引言	86	6.1 引言	119
5.2 宏观金相分析技术	86	6.2 化学成分定量分析技术	119
5.2.1 产品质量评定中的宏观金相 分析	87	6.3 力学性能定量分析技术	123
5.2.2 失效分析中的宏观金相分析	88	6.3.1 力学性能不合格的常见原因	123
5.3 微观金相分析技术	91	6.3.2 应用举例	124
5.3.1 光学显微镜及分析技术	91	6.4 物理性能定量分析技术	127
5.3.2 电子显微镜及分析技术	98	6.4.1 表面粗糙度超标导致失效	127
5.3.3 金相试样的制备及分析技术	98	6.4.2 过渡圆弧加工不当导致失效	128
5.4 彩色金相技术	102	6.5 结构与受力分析技术	129
5.4.1 传统的彩色金相技术	102	6.5.1 传统力学计算分析	129
5.4.2 计算机彩色金相技术	102	6.5.2 数字模拟计算分析	129
5.5 现场金相技术	105	6.6 定量分析技术应用举例	130
5.5.1 现场金相分析的特点	105	参考文献	133
5.5.2 现场金相分析的步骤	105		
5.5.3 现场金相分析应用举例	105		
5.6 金相分析技术在失效分析中的应用	106	第7章 X射线分析技术	134
5.6.1 光学金相技术在失效分析中的 应用	106	7.1 引言	134
		7.2 X射线及X射线谱	134
		7.2.1 X射线的产生	134
		7.2.2 X射线谱	134
		7.3 X射线衍射分析的基本理论	136
		7.4 X射线分析技术在失效分析中的 应用	138
		7.4.1 X射线检测	138
		7.4.2 X射线衍射分析技术	139
		参考文献	144
		第8章 电子光学分析技术	145
		8.1 引言	145

8.2 电子衍射分析原理	145	参考文献	178
8.3 透射电子显微镜分析技术	146	第 10 章 裂纹分析技术	179
8.3.1 透射电子显微镜的组成结构	146	10.1 引言	179
8.3.2 透射电子显微镜样品的制备	148	10.2 裂纹的无损检测	179
8.3.3 透射电子显微镜分析技术应用 举例	149	10.2.1 无损检测的方法和应用	179
8.4 背散射电子衍射分析技术	151	10.2.2 无损检测时的注意事项	180
8.4.1 背散射电子	151	10.2.3 无损检测在裂纹分析中的应用 举例	180
8.4.2 电子背散射衍射谱仪分析技术	151	10.3 裂纹产生先后顺序诊断技术	182
8.4.3 电子背散射衍射谱的产生	151	10.4 裂纹的形貌诊断	183
8.4.4 电子背散射衍射谱的分析	152	10.4.1 裂纹的宏观诊断	183
8.4.5 电子背散射衍射谱仪的制样 要求	153	10.4.2 裂纹的微观诊断	187
8.4.6 电子背散射衍射谱仪分析和 特点	153	10.5 裂纹断口分析	189
8.5 二次电子分析技术	153	10.5.1 裂纹的打开与断口切取技术	189
8.5.1 二次电子	153	10.5.2 裂纹的断口分析	190
8.5.2 扫描电子显微镜	154	10.6 裂纹综合诊断	191
8.6 X 射线能量色散谱仪分析技术	155	10.6.1 裂纹的起始位置	191
8.7 俄歇电子谱仪分析技术	158	10.6.2 裂纹的走向	193
8.7.1 俄歇电子	158	10.6.3 裂纹的形成原因和形貌特征	194
8.7.2 俄歇电子谱仪的基本组成	158	参考文献	197
8.7.3 俄歇电子谱仪在材料分析中的 应用	158	第 11 章 失效诊断技术	198
参考文献	158	11.1 失效诊断概述	198
第 9 章 痕迹分析技术	159	11.1.1 失效模式诊断	198
9.1 引言	159	11.1.2 失效原因诊断	198
9.2 痕迹及痕迹分析概述	160	11.1.3 失效机理诊断	199
9.3 痕迹分析的程序	160	11.2 失效诊断的过程及特点	199
9.4 痕迹的发现和显现技术	161	11.3 失效诊断的基本原理	199
9.5 痕迹的提取和保存技术	162	11.3.1 薄弱环节	199
9.6 痕迹的形貌诊断	162	11.3.2 应力集中	201
9.7 痕迹的分析技术	165	11.3.3 表面完整性	202
9.7.1 机械痕迹	165	11.3.4 奥氏体晶粒	204
9.7.2 腐蚀痕迹	170	11.3.5 钢中的遗传现象	208
9.7.3 污染痕迹	172	11.4 机械装备的生命历程	211
9.7.4 分离物痕迹	173	11.5 失效诊断的应用	211
9.7.5 热损伤痕迹	173	11.5.1 原材料缺陷的失效诊断	211
9.7.6 电损伤痕迹	176	11.5.2 设计因素造成的失效诊断	219
9.7.7 与裂纹源有关的痕迹	177	11.5.3 加工过程中的失效诊断	220
9.8 痕迹的模拟再现	177	11.5.4 库存或运输中的失效诊断	239
9.9 痕迹的综合分析	177	11.5.5 装配过程中的失效诊断	241
		11.5.6 服役过程中的失效诊断	241
		参考文献	262

第12章 失效预防与安全评估	264
12.1 失效预防	264
12.1.1 被动预防	264
12.1.2 主动预防	265
12.1.3 失效预防应用举例	265
12.2 安全评估	270
12.2.1 失效风险评价	270
12.2.2 安全评估的方法和程序	270
12.2.3 安全评估应用举例	275
参考文献	280

第13章 失效分析在司法鉴定中的应用	281
13.1 引言	281
13.2 司法鉴定的法律依据	281
13.2.1 中华人民共和国产品质量法	281
13.2.2 全国人民代表大会常务委员会关于 司法鉴定管理问题的决定	281
13.3 司法鉴定程序通则	282
13.4 产品质量鉴定与司法鉴定	285
13.4.1 产品质量鉴定	285
13.4.2 产品质量鉴定申请	286
13.4.3 产品质量鉴定委托书	286
13.4.4 产品质量鉴定的实施	286
13.4.5 产品质量鉴定报告	286
13.4.6 审查和备案	287
13.4.7 产品质量司法鉴定的程序	287

13.5 失效分析与司法鉴定	287
13.5.1 失效分析的司法依据	287
13.5.2 司法鉴定中失效分析的注意 事项	288
13.5.3 司法鉴定中失效分析的发展 趋势	289
13.6 失效分析在司法鉴定中的应用	290
参考文献	294

第14章 失效分析报告的撰写	295
14.1 引言	295
14.2 失效分析报告的写作特点	295
14.2.1 语言特点	295
14.2.2 文体特点	296
14.2.3 思维特点	296
14.3 失效分析报告书写的一般要求	297
14.3.1 失效分析报告的内容要求	297
14.3.2 失效分析报告的格式要求	297
14.3.3 失效分析报告的书写要求	297
14.4 失效分析报告的写作技巧	298
14.5 失效分析报告的基本内容	301
14.6 失效分析报告撰写举例	303
14.6.1 比较简单的失效分析报告	303
14.6.2 比较复杂的失效分析报告	303
参考文献	305

后记	306
----------	-----

失效分析概述

1.1 引言

失效分析是一门新兴、发展中的学科，近些年开始从军工企业普及到普通企业，在提高产品质量，技术开发、改进，产品修复及仲裁失效事故等方面具有很强的实际意义。失效分析具有两个显著的特点：第一是综合性，即它涉及多学科领域和技术门类；第二是实用性，即它有很强的生产应用背景，与国民经济建设有极其密切的关系。失效学的形成和发展主要是在 20 世纪中叶。1974 年美国金属学会在编辑出版《失效分析资料书》（《Source Book in Failure Analysis》）时曾写过这样一段话：“与对一些不太活跃的学科所做的报道相比，关于失效分析的公开发表的论文的数量实在太少了；这一状况难以反映出失效分析在工业和工程中的重要性”。1975 年美国金属学会出版了《金属手册 第 10 卷 失效分析与预防》（《Metals Handbook, Volume 10, Failure Analysis and Prevention》）以后，失效分析活动和研究工作得到了迅猛发展，有关失效分析的专著和论文急剧增加，以致可以与疲劳或断裂学并驾齐驱。我国从 1980 年 12 月首次在北京召开了全国机械装备失效分析年会，后来四年一次，连续召开了 3 次。上海材料研究所已故专家陶正耀先生于 1988 年在《八年来失效分析工作的回顾》中写道：“三次失效分析会议得到了全国各界的高度重视。每次会议征文通知发出后，应征论文如潮水般涌进来，每次都达到 300 篇左右，到会人数总在 350 人上下。会议代表通过充分的交流和相互切磋，为普及我国的失效分析技术、推动失效分析工作进一步展开和提高产品质量起到了十分深远和积极的作用”。2005 年中国机械工程学会理化检验分会和失效分析分会首次在广州联合举办了全国失效分析年会，以后两年一次，至今已连续举办了 7 届，每次参加人数和收集论文数目都呈上升势头。近些年有关失效分析的会议和活动更是活跃，涉及的行业和范围也越来越宽，报道失效分析文章的期刊也在不断增加，有不少高等院校已经把失效分析作为学生的必修课程之一。

机械失效学是一门交叉、边缘、综合型的新兴学科，因此，它与多种学科和技术有关，如图 1-1 所示。基础学科与机械失效学相结合，形成不少边缘学科。例如，机械失效学与物理学交叉诞生了失效物理学；与力学的交叉形成了失效力学和损伤力学；数学与机械失效学相结合，促进了可靠性数学的问世。

机械失效学与许多应用学科、技术有密切的联系。“机械”是失效分析的对象，因此失效分析与机械学的专门知识有关；“材料”是失效的载体，这样失效分析就自然地涉及材料科学和工程领域的各种知识；“环境”是失效发生的条件，所以失效分析就和环境科学知识有关；“检测”是失效分析中信息的获得的重要途径和手段，显然失效分析就离不开宏观和

微观的检测有关的知识；“分析”是失效分析的核心，因此失效分析必将涉及逻辑学和数理统计有关的专门知识；此外，失效分析不仅是一种“技术活动”，而且还是一种“管理活动”，因此，失效分析过程和它的成果反馈又与管理科学的专门知识有关。可以这样说，近代材料科学和工程力学对断裂、腐蚀、磨损及其复合型的失效模式和失效机理的研究，为失效学奠定了理论基础；现代的检测仪器仪表学、断口分析技术，为失效分析奠定了技术基础；数理统计、模糊数学、可靠性工程和电子计算机学科的广泛应用为失效学提供了新的方法途径。以上三个方面的融会贯通，使机械失效学逐渐成为一门相对独立而又十分活跃的应用型学科。

失效分析学的研究领域和研究方法和其他一些学科有相通之处。实际工作中有许多人把从事失效分析工作的专家称为“老中医”，把失效分析过程称为“把脉”，这是说失效分析和医生看病有相似的地方。进一步说，中医看病需要“望、闻、问、切”，就是首先要用眼睛看，用耳朵听，用嘴巴询问，用手指把脉。这些活动都和失效分析过程有相似之处。另外，还有一种说法，就是把从事失效分析的人员比喻成古时的“提刑官”，类似于现在的刑事侦查和法官判案，其中许多方法和技术也都是相通的。

笔者在多年从事失效分析工作的过程中，深知该项工作的复杂性、紧迫性和重要性。一些国际知名企业因为产品上的某个机械构件失效而在全球范围内实施“召回”；一些新产品在生产过程中因为失效而被迫停产；因机械装备失效引起的人员伤亡往往会导致一个企业破产，甚至会使几代人的命运发生改变。许多失效事故涉及较大数额的经济损失，在认定责任方时往往会走司法程序，此时，失效分析又和司法鉴定结合到一起，其分析过程必须符合法律程序。机械构件的失效和人民的生命财产息息相关，公证、科学、真实、快速的失效分析技术在我们的日常生活中越来越显得重要。

1.2 机械装备的失效与事故

1.2.1 失效

失效是指产品丧失其规定的功能，对可修复产品，通常也称为故障。零件由于某种原因，导致其尺寸、形状、材料的组织、性能发生变化而不能圆满地完成指定的功能即为失效。美国金属学会 1975 年出版的《金属手册》中是这样描述失效的：一个零件或部件处于下列三种状态之一的就认为是失效。

1) 当它完全不能工作时。



图 1-1 失效分析学和其他学科之间的关系

2) 仍然可以工作, 但已不能令人满意地完成预期的功能时。

3) 受到严重损伤不能可靠而安全地继续使用, 必须立即从机器上拆下来进行修理或更换时。

失效经常是由多方面原因造成的, 失效的主要来源包括设计、选材、材料缺陷、制造工艺、再加工、组装、检查、试验、质量控制、贮运、工作条件、维修和工作中预先未暴露的过载以及机械的或化学的损伤等许多方面。失效形式各种各样, 装备整体失效的情况比较少, 往往是某个零件先失效而导致整个装备失效, 有时可导致较为严重的后果。

1.2.2 事故

事故是指意外的变故或灾祸 (不含自然灾害), 主要指工程建设、生产活动与交通运输中发生的意外损害或破坏。这些事故可造成物质上的损失或人身伤亡。事故原因是指能引起事故或有这种可能性的各种因素。这些因素是指与事故直接或间接有关的事件或情况。

1.2.3 机械失效和事故之间的关系

失效和事故既有密切联系, 又有重要区别, 失效强调的是机械产品本身的功能状态, 强调产品丧失规定的功能后能否修复, 而事故强调的是后果, 即造成的损失和危害。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。如汽车撞伤了突然横穿马路的行人, 汽车并没有失效; 而产品失效时也不一定发生事故, 如许多汽车或列车上的失效件都是在维护保养或大修期间发现的, 但其并未造成事故。统计表明, 产品失效率要比事故率高 1~2 个数量级。

失效往往只指某一具体的机械构件, 分析对象单一; 事故往往涉及一个系统, 可能会包括较多的机械构件, 甚至包括醉酒、精神失常等非机械因素, 其中任何一个因素都有可能是导致事故的直接原因, 还有可能有多个因素共同作用导致事故的发生。但每一起具体事故的发生和发展有其具体的原因、条件和过程特征。发生事故的场合、时间和损伤程度, 事先无法预测, 具有相当大的偶然性和随机性。就系统的总体而言, 发生一定概率的某种类型事故是难以避免的。纵观历史的大量事实, 只要存在导致事故的必要充分的条件, 事故就必然会发生。

多年的失效分析实践中发现有许多事故都是由一些简单的机械装备 (或构件) 失效引起的, 例如:

1) 2012 年 12 月 31 日, 山西长治市某化工企业发生苯胺泄漏事故, 泄漏总量约为 38.7t, 受到影响的河道长约 80km, 28 个村、2 万多人受到影响, 而引起这起事故的直接原因是一段波纹管破裂。

2) 国内一家核电企业于 2002 年 12 月整套引进国外核燃料装卸设备并投入使用。2011 年初发现有卡死现象。2011 年 10 月 9 日检修时发现装卸料机的驱动蜗轮与内齿轮上的 6 个连接螺栓全部发生了断裂, 自此导致整个核电站停产事故, 企业每天经济损失高达 600 多万元。

3) 2010 年 9 月 22 日, 江苏一家化工企业发生有毒气体泄漏事故, 造成工厂附近的几百名村民中毒住院治疗, 加上企业停产造成的经济损失总共有 1000 多万元, 而引起这起较大事故的原因却是一台富气压缩机中的大、小齿轮断齿失效。

4) 2008年5月10日,上海市长兴岛某造船厂正在吊篮中实施货轮船体无损检测的两名检测人员连同吊兰一起在毫无征兆的情况下突然坠落,造成一人当场死亡,一人严重受伤的事故,而导致这起事故的直接原因是一个连接螺栓发生了延迟性断裂。

5) 2006年8月11日下午,上海磁浮交通发展有限公司由龙阳路车站开往浦东国际机场方向的PV3磁浮列车的M1车厢发生火灾,在开出车站500m左右的临时停车点停车,消防部门赶到后将火势扑灭。这起事故的分析结果是由于蓄电池温度过高(达到1400℃以上),导致蓄电池极板间短路而燃烧。

6) 2005年8月21日,上海市崇明三条巷码头起重过程发生断裂事故,造成韩国进口的发动机底座损坏,船舱损坏,死亡2人,重伤3人,总损失超过1亿元人民币。经过深入细致的失效分析后发现:①起吊使用的卸扣的冶金质量和锻造质量存在问题,不符合相关技术要求;②没有进行适当的热处理,导致力学性能指标降低;③分型面存在补焊现象;④静载荷检验不合格。综合判定卸扣质量不合格是导致事故发生的直接原因。

1.2.4 机械事故的分类

机械事故按其宏观特征大体上可划分为以下几类:

- (1) 爆炸 为能量的瞬间释放的结果,包括物理爆炸和化学爆炸等。
- (2) 起火 包括燃烧起火(固体、液体、气体)、静电起火、累积起火、加热起火或摩擦起火、电器起火等。
- (3) 解体事故 包括飞机解体、船舶解体等。
- (4) 相撞事故 包括车辆相撞、飞机相撞、船舶相撞、其他机械之间的相撞等。
- (5) 泄漏事故 包括气体泄漏、核泄漏、液体泄漏等。
- (6) 毁机事故 包括局部损毁、整机损毁。
- (7) 其他机械事故 机械事故的模式不同,不仅其事故发生的机理和原因不同,而且其过程特征和发展规律也不同,因此,判断机械事故的模式可为寻找事故的起因打下基础。

1.3 机械事故检查中失效件的判断

1.3.1 机械事故中的失效件说明

(1) 肇事失效件 泛指直接导致其他机件失效的机件,特指直接导致机械失效甚至造成机械事故的机件。

(2) 相关失效件(简称相关件) 泛指对其他机件的失效有直接影响的机件,主要是可能对肇事失效件有一定影响的相关件。

(3) 受害失效件(简称受害件) 泛指受其他机械失效的危害而失效的机件,而该机件对其他机件的失效却没有直接的影响。

(4) 直接受害失效件(简称直接受害件) 特指事故发生前(或机械失效前)受肇事的危害而失效的机件。

(5) 被破坏件 特指事故发生时被破坏而失效的机件,例如压力容器爆炸、油箱起火、飞机坠毁时才被破坏的一切机件。

(6) 独立失效件 泛指与其他机械失效件无关的失效机件, 特指事故或机械失效发生之前, 已经失效的机件, 但它对事故的发生或机械的失效并无影响。

(7) 首先断裂件 (简称首断件) 泛指机械中第一个发生断裂失效的机件, 特指事故或机械失效过程中第一个失效件。

(8) 首先失效件 泛指机械中第一个发生失效的机件。

1.3.2 机械事故中肇事失效件的判断方法

1. 事故调查

事故的种类很多, 如地面交通事故、航海事故、飞行事故、火箭发射事故、电站核泄漏事故、压力容器爆炸事故等。发生事故时, 机械不一定失效, 不能在机械失效和机械事故之间画等号。尽管机械失效时也要进行现场调查, 机械失效也有可能引起严重事故, 但纵观各种事故产生的原因, 一般要比机械失效的原因所涉及的面要广、也复杂得多, 另外, 其后果也比较严重。事故调查本身是一个专门学科, 它的研究对象、研究方法和检查技术从总体上看, 与失效分析并不相同, 各自所要解决的任务和要达到的目的也有区别。因此, 既不能在事故和机械失效之间画等号, 也不等在事故调查和失效分析之间画等号。

一般发生事故, 先由事故调查人员做出初步结论, 如果事故是由机械原因所造成, 这时应不失时机地请有关部门的失效分析工作人员介入调查工作, 以便进一步确认事故调查的初步结论, 并为下一步的机械失效分析打下良好的基础。因此, 事故调查人员和失效分析人员之间应建立起最良好的合作关系。

2. 肇事失效件的判断

在各类事故检查中, 把机械发生事故后原机械的所有机件统称为残骸。

本书中失效分析的对象均为残骸, 使用的主要方法也是残骸分析法。飞行事故检查较为复杂, 因为残骸数量巨大 (成千上万), 残骸分布范围广 (有时可达方圆几十公里)。这些都会给事故检查带来很大困难。一般当飞行事故发生时, 事故调查组并不能立即判断事故就是因机械失效造成的, 必须认真仔细地进行现场调查, 如了解气象条件、环境、飞行员操纵、空地对话、记录或录音、导航数据、雷达标图、目击者的反映、航医意见、后勤及机务保障情况等, 初步判断导致事故的各种可能原因。为了在机械事故检查中迅速 (及时)、准确 (可靠) 的找出肇事失效件, 需要有一套正确的分析思路、技术和方法。

下面以飞行事故为主, 重点探讨如何查找肇事失效件。

(1) 残骸分类 在事故检查中, 残骸中可能包括: 非失效件、失效件和被破坏件; 其中失效件包括: 肇事失效件、相关失效件、无关失效件; 而被破坏件是指受害失效件, 又分直接受害失效件和间接受害失效件。

对残骸进行分类时, 必须注意的最重要的事项是在拿动任何一块残骸之前, 必须记录下每块残骸的位置。记录残骸的方式, 通常需要进行广泛详细的拍照, 绘制适当的草图, 收集每块残骸的恰当的测量数据, 最后汇编成表册。

其次, 一定要编制目录清单, 保证出事地点的残片已全部收集在内。例如, 在研究一起飞机失事事故中, 应包括编制一个目录清单, 其中有发动机、襟翼、起落架以及机身和机翼的部件数量。显然, 必须断定飞机坠毁时所有部件是否全都在飞机上。虽然提供一份目录清单是件烦琐的事, 但这份目录清单往往却是极其宝贵的资料。假如由一位有经验的分析人员

来研究一起复杂的飞机失事事件，当他发现残骸中漏掉一块翼尖时，问题很快就解决了。随后发现这块残片坠落在该机航线后面数公里的地面上，该残片提供了一个疲劳断裂的证据，由此说明了坠毁的原因。

残骸分析中遇到的最普通的问题是确定断裂的顺序，以便判断领先断裂的起点或肇事失效件。

(2) 判断机械事故的模式 首先是判断事故的模式类型，这既是事故检查的主要任务之一，也是进行失效分析的必要前提。准确的判断事故类型，可以缩小研究的范围，有利于对其进行更深入的研究。

(3) 断裂件分选 一般事故的发生都和断裂（或开裂）有关。断裂的分选一般遵循以下原则：

- 1) 脆性断裂件与塑性断裂件相比，应以脆性断裂件为先。
- 2) 低应力破坏件与高应力破坏件相比，应以低应力破坏件为先。
- 3) 疲劳破坏件与非疲劳破坏件相比，应以疲劳破坏件为先。
- 4) 腐蚀破坏件与非腐蚀破坏件相比，应以腐蚀破坏件为先。
- 5) 主要承力件与次承力件相比，应以主要承力件为先。
- 6) 重要机件与一般机件相比，应以重要机件为先。

1.4 失效分析的基本内容

1.4.1 失效分析的概念

失效分析是指事后的分析，是判断产品的失效模式，查找产品失效机理和原因，提出预防再失效的对策的技术活动和管理活动。因此，失效分析的主要内容包括：明确分析对象，确定失效模式，研究失效机理，判定失效原因，提出预防措施（包括设计和改进），根据主要内容制订具体失效分析步骤和方法。

1.4.2 失效分析的过程

根据失效分析的定义，一个失效事件分析的全过程一般包括侦测（detection）、诊断（diagnosis）和事后处理（prognosis）三个阶段。即利用各种侦测手段，调查、侦查、测试和记录有关失效的现场、参数和信息；通过诊断，鉴别和确定产品失效的模式、过程、原因、影响因素和机理；经过事后处理即采取补救措施（对服役件）、预防措施（对新生产的产品），并进行其他技术管理的反馈活动，以达到预防、提高和开发的目的。侦测、诊断和事后处理是失效分析的三要素。

广义地说，失效分析的工作内容应包括失效分析的业务工作（即“门诊”工作）、失效分析的研究工作和失效分析的管理及技术反馈工作。

产品失效分析的重点无疑是分析产品的早期失效事件、突发性失效事件以及致使的失效事件，因为这些失效事件的分析事关重大或关系到全局。

失效分析的深度应以其分析的目的和要求不同而异。作为法律依据的失效诊断主要的任务是判定失效的程度、后果和责任方面；作为整顿质量管理的线索和获得可靠性工程的数

据,一般希望确定失效发生的阶段、对策及其他的工程属性;而为了研究和掌握机械产品失效的规律和它的内在本质,这种失效分析则必须着眼于失效模式、机理、影响因素和控制参量的定性乃至定量的研究。因此,失效分析工作者的任务是依据失效分析的不同目的和要求,做出确切而恰当的诊断及对策。

1.4.3 失效分析的特点

一些重大的失效事故及其分析工作有如下特点:

- 1) 发生的突然性和过程的难救援性。
- 2) 损失的严重性和遇难的悲惨性。
- 3) 模式的多样性和原因的复杂性。
- 4) 分析的困难性和研究的探索性。
- 5) 思路的新颖性和技术的学科性。
- 6) 影响的广泛性和成果的重要性。
- 7) 技术范围有多学科交叉综合的性质。要求参加人员应具有宽广的知识面,较强的组织能力和良好的团队协作精神。
- 8) 分析过程有探索侦查的性质。要求参加人员应具有科学的理念和实事求是、客观公正的学风以及孜孜不倦的钻研探索精神。

1.4.4 失效分析的思路和分析侧重点

1. 失效分析的思路

失效分析思路是指导失效分析全过程的思维路线(思考途径)。张栋等提出,失效分析思路是指在思想中以机械失效的规律(即宏观表象特征和微观过程机理)为理论依据,通过调查、观察和试验获得的失效信息(失效对象、失效现象、失效环境统称为失效信息)分别加以考虑,然后有机结合起来作为一个统一整体进行全过程考虑,以获取的客观事实为依据,全面应用逻辑推理综合分析的方法,来判断失效事故的失效模式,并推断失效原因。因此,失效分析思路在整个失效分析过程中一脉相承、前后呼应,自成思考体系,把失效分析的指导思想、推理方法、程序、步骤、技巧等有机地融为一体,从而达到失效分析的根本目的。失效分析的理想目标应当是“模式准确,原因明确,机理清楚,措施得力,模拟再现,举一反三”。实际上失效总是有一个或长或短的变化发展过程,机械失效过程实质上是材料的累积损伤或性能退化过程,以及材料发生物理和化学变化的过程。而整个过程的演变是有条件、有规律的,也就是说有原因的。因此,机械失效的这种客观规律是整个失效分析的理论基础,也是失效分析思路的理论依据。

2. 失效分析的侧重点

1) 按照产品的发展阶段、试制阶段、试生产阶段和定型生产阶段的不同,其失效分析的侧重点和内容也各不相同。

在试制阶段的产品,其失效的原因常常与设计因素有关,因此在这一阶段的失效分析应特别强调与设计人员的密切配合,这样不仅有利于失效原因的正确诊断,而且有利于分析结果的迅速反馈;在试生产阶段的产品,其失效原因多半与工艺因素有关,因此在这一阶段的失效分析应注重与工艺人员相结合;而在定型生产阶段的产品,其失效的原因一般则与管理

因素有关,因此在这一阶段的失效分析着重考查产品的质量控制体系的健全、严密性和散布度,并应将广大的用户和社会上的维修行业纳入到失效分析体系中来。

2) 导致失效的原因往往与该失效产品在其“生命周期”中的节点有关。

一个定型的、大批量生产的产品的低概率或长寿命产品的偶然失效事故的失效原因,往往与工艺或环境中的偶然差错或因素有关;而一个试制品或重复出现的高概率的失效事故的失效原因,常与设计结构因素有关。因此,在失效原因诊断中首先应该确认该失效产品所处的节点和注意失效概率的大小。例如,同一生产厂家使用了不同厂家生产的原材料,其产品出现集中失效现象,这时就要关注原材料的生产和供应问题。

1.4.5 失效分析的分类和失效模式诊断

1. 失效分析分类

失效分析可以按技术观点、质量管理的观点和经济法的观点进行分类。按技术观点进行分类便于对失效进行机理研究、分析诊断和采取预防对策;按质量管理的观点进行分类便于管理和反馈;按经济法的观点进行分类便于事后处理。

本书中将主要讨论按技术观点的分类。

从失效分析的技术观点进行分类主要是按失效模式和失效机理分类。

失效模式是指失效的外在宏观表现形式和规律,一般可理解为失效的性质和类型。失效机理则是引起失效的微观的物理化学变化过程 and 本质。按失效模式和失效机理相结合对失效进行分类就是宏观与微观相结合、由表及里地揭示失效的物理本质和过程,因而它是一种研究的重要分类方法。

2. 失效模式的诊断

失效模式按其所定义的范围、属性和参量,可分为一级失效模式、二级失效模式、三级失效模式等。失效模式的诊断可分为定性诊断和定量诊断。一般来说,定性诊断是模式诊断的基础和前提,定量诊断则是模式诊断的深入和发展;定性诊断的技术和方法主要用于一级失效模式的诊断,而定量诊断技术和方法则主要用于二级或三级失效模式的诊断;定性诊断技术和方法主要是依据失效残骸的分析,特别是肇事件的宏观断口分析的结果进行判定,而定量诊断的技术和方法则需要根据应力分析和失效模拟的结果进行判断。由此可以看出,如何根据失效事故的具体情况,合理地选用定性和定量的技术和方法,并且根据单一的和综合的判据,对失效的一级、二级甚至三级模式进行正确的适时诊断,是失效分析工作者应该认真总结和高的问题。

一般来说,对各种典型的失效模式的诊断,特别是对各种典型的一级失效模式的诊断并不困难。一般只要根据单一的诊断判据(如宏观断口)就可以得出一级失效模式的诊断结论。失效模式诊断的难点在于对过渡的、多因素作用的、非典型的二级、三级失效模式的正确和适时地诊断。例如,单就疲劳断裂失效而言,介于韧性断裂和疲劳断裂之间的、脆性断裂(特别是沿晶脆性断裂)和疲劳断裂之间的低周疲劳断裂失效的诊断;超高强度钢(特别是宏观断口疲劳特征不明显时)的疲劳断裂失效的诊断;铸造合金的疲劳断裂失效的诊断,腐蚀疲劳断裂和疲劳断裂断口之间的区分诊断;腐蚀扩展,包括应力腐蚀扩展和腐蚀疲劳扩展的区分诊断;板材(或板式构件),特别是薄板的低周疲劳诊断等。由于多种原因引起的20多种二级脆性断裂失效模式的区别和正确诊断,还很少有人对其进行系统的研究。