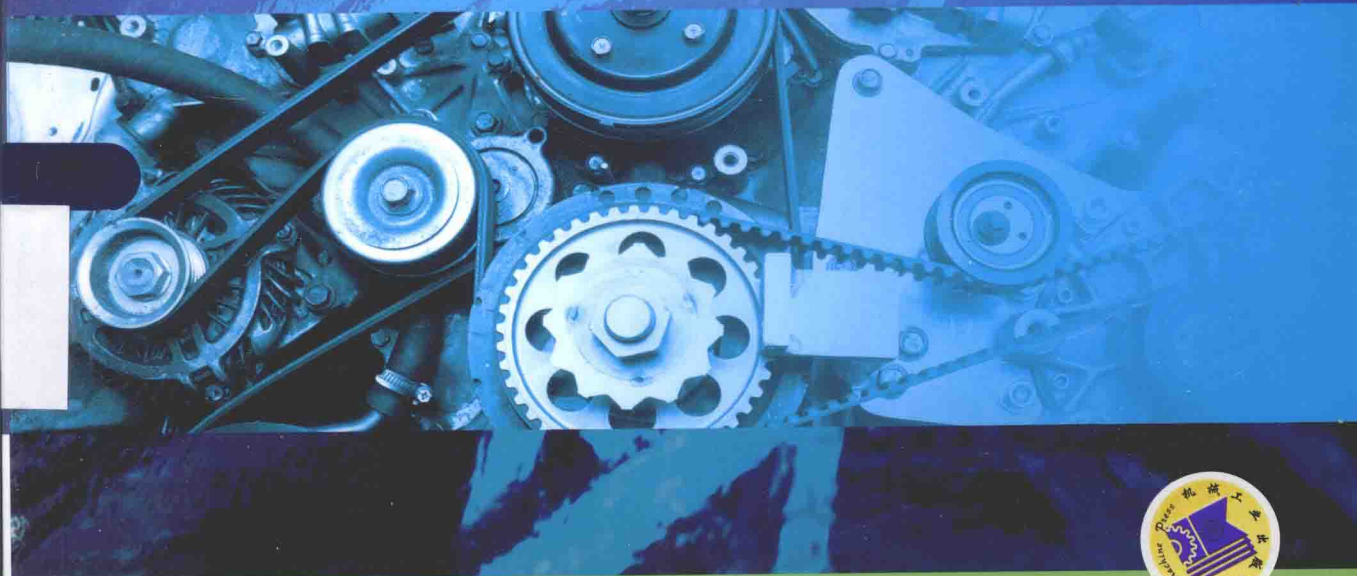


机械装备缺陷、 失效及事故的 分析与预防

段莉萍 刘卫军 钟培道 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

机械装备缺陷、失效及事故的分析与预防

段莉萍 刘卫军 钟培道 刘子瑜 徐劲松 编著



机械工业出版社

本书系统地介绍了机械装备的缺陷、失效及事故形成机制、表现形式、分析判定技术及预防改进措施。主要包括：概论、缺陷分析与预防综述、材料缺陷的分析与预防、制造工艺缺陷的分析与预防、失效分析与预防综述、断裂失效分析与预防、环境因素作用下的失效分析、转动件的失效分析与预防、事故调查分析与预防综述、人为与机械因素引发的事故分析、完善安全生产体系遏制特别重大事故、失效分析的思路与方法、失效分析在安全生产和质量控制及司法鉴定中的作用。本书将机械装备的缺陷、失效及事故三者联系起来进行系统、综合而深入的分析与论述，具有独创性、系统性、综合性与实用性。

本书可供机械装备制造行业的科技人员、失效分析工作者阅读使用，也可供相关的管理人员参考，还可作为机械装备制造、失效分析等相关专业在校师生的教材。

图书在版编目（CIP）数据

机械装备缺陷、失效及事故的分析与预防/段莉萍等编著. —北京：机械工业出版社，2015.9

ISBN 978-7-111-51325-4

I. ①机… II. ①段… III. ①机械元件-失效分析 IV. ①TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 202819 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 臧弋心 崔滋恩

版式设计：霍永明 责任校对：张 薇

封面设计：马精明 责任印制：李 洋

北京机工印刷厂印刷（三河市南杨庄国丰装订厂装订）

2015 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·29.25 印张·724 千字

0 001—3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-51325-4

定价：89.00 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

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

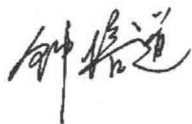
序

机械装备，尤其是大型运载装备和武器装备，在使用过程中如果由于存在缺陷或出现失效而引发事故，轻则会造成重大经济损失，重则会酿成机毁人亡的灾难性事故，甚至会危及社会的繁荣与安定。对机械装备在设计、制造、使用与维修过程中存在的缺陷、出现的失效及发生的事故进行系统、综合与深入的分析研究显得十分重要：一是找出存在的缺陷、出现失效及发生事故的原因，从而有针对性地采取改进与预防措施，及时解决问题；二是将分析研究的结果反馈给机械装备的设计、制造与使用方，为提高和发展机械装备制造科学技术提供借鉴。

在过去的几十年中，国内外的专家、学者对机械装备的缺陷、失效和事故进行了大量的分析研究，出版了有关“缺陷分析”“失效分析”和“事故调查”的专著，促进了机械装备科学技术的发展。

机械装备的缺陷、失效与事故之间存在着一定的内在联系。缺陷是引起失效的因素之一，失效是导致事故的诱因之一。本书在国内外首次将缺陷、失效及事故三者联系起来，进行系统、综合而又深入的分析研究，论述了缺陷、失效及事故的基础知识、基本理论、分析方法与手段，具有系统性、综合性、全面性、基础性和实用性等特点，是一本非常适合机械制造行业科技人员使用的工具书，也可供主管机械制造质量和安全生产的企业主管和政府部门借鉴参考。

本书的出版发行，对提高我国机械装备的制造质量和使用安全将起到积极的推动作用。



前 言

安全就是无事故。生产安全是保证经济建设持续顺利发展和维持社会稳定与和谐的基本条件之一。机械装备一旦发生事故，轻则导致重大经济损失，重则酿成机毁人亡的灾难性事故。古今中外，许多灾难性事故就是由于机械装备存在缺陷或出现失效所致。因此，对机械装备进行有效的质量控制，防止由于存在缺陷或出现失效而引发事故，是当今世界各国共同关注的重大课题。本书在国内外首次对这一课题进行了系统而深入的分析研究与探讨。

本书主要涉及如下内容：对机械装备在生产制造与使用维修过程中存在缺陷的类别、检测控制及预防措施进行了分析与探讨；对机械装备在使用过程中出现的各类失效的特征、原因与机理、分析方法与手段以及预防措施进行了全面、系统与深入的论述，并介绍了关键部件（如叶片、轮盘、轴、齿轮及轴承等）的失效特点、原因及预防措施；对引发机械装备事故的三大要素（人、机、环）分别进行了论述；介绍了事故调查分析的程序与要求，剖析了近年国内发生的特别重大的典型事故，总结归纳出应吸取的教训与得到的启迪；论述了失效分析的思路与方法；阐述了失效分析在安全生产、质量控制与司法鉴定中的作用与地位。

本书对机械装备的缺陷、失效及事故形成机制、表现形式、分析判定技术及预防改进措施等，进行了深入的分析研究、探讨、归纳与综合，具有独创性、系统性、综合性与实用性等特点。本书可供机械装备制造行业的科技人员、失效分析工作者阅读使用，也可供相关的管理人员参考，还可作为机械装备制造、失效分析等相关专业在校师生的教材。

本书由中国兵器工业集团第五二研究所的段莉萍、刘子瑜，中国兵器工业标准化研究所的刘卫军，北京航空材料研究院的钟培道、徐劲松编著，由钟培道统稿与审定。

在本书编写出版过程中得到了中国兵器工业集团第五二研究所、中国兵器工业标准化研究所与机械工业出版社的大力支持，也得到了各方专家学者的指导与帮助，在此深表谢意。

由于机械装备的缺陷、失效及事故分析与预防是一项涉及面广，科学性、实践性及社会性均很强的工作，限于我们的水平和资源的局限，书中难免有不当之处，恳请大家批评指正。

最后希望本书的出版发行能对提高我国机械装备的制造质量和促进安全生产起到积极的推动作用。

作 者

目 录

序

前言

第 1 章 概论	1	3.7 钛合金的常见缺陷	23
1.1 引言	1	3.8 铝合金的常见缺陷	23
1.2 机械装备缺陷、失效及事故的工程概念	2	第 4 章 制造工艺缺陷的分析与预防	25
1.3 机械装备缺陷、失效及事故分析与预防的主要内容	2	4.1 工艺缺陷的分析思路	25
1.4 缺陷、失效及事故分析与预防的作用与意义	2	4.2 锻压工艺缺陷分析与预防	25
1.5 缺陷、失效及事故之间的内在联系	4	4.2.1 锻压工艺简介	25
第 2 章 缺陷分析与预防	6	4.2.2 结构钢锻件常见缺陷分析与预防	27
2.1 缺陷的来源与分类	6	4.2.3 不锈钢锻件常见缺陷分析与预防	36
2.2 缺陷的检测与控制	6	4.2.4 高温合金锻件常见缺陷分析与预防	39
2.3 缺陷与失效	7	4.2.5 铝合金锻件常见缺陷分析与预防	42
2.3.1 缺陷的危害	7	4.2.6 镁合金锻件常见缺陷分析与预防	46
2.3.2 缺陷与失效	7	4.2.7 铜合金锻件常见缺陷分析与预防	48
2.4 由缺陷导致零件失效的典型案例分析	8	4.2.8 钛合金锻件常见缺陷分析与预防	50
2.4.1 材料缺陷导致机械工件失效的典型案例分析	8	4.2.9 大锻件常见缺陷分析与预防	54
2.4.2 铸造缺陷导致机械工件失效的典型案例分析	10	4.3 铸造工艺缺陷分析与预防	58
2.4.3 锻压缺陷导致机械工件失效的典型案例分析	12	4.3.1 铸造工艺简介	58
2.4.4 热处理缺陷导致机械工件失效的典型案例分析	13	4.3.2 钢铸件常见缺陷分析与预防	59
2.4.5 焊接缺陷导致机械工件失效的典型案例分析	15	4.3.3 高温合金铸件常见缺陷	63
2.4.6 机械加工缺陷导致机械工件失效的 4 个典型案例	15	4.3.4 钛合金铸件常见缺陷	65
第 3 章 材料缺陷的分析与预防	18	4.3.5 铝合金和镁合金铸件常见缺陷	67
3.1 成分缺陷	18	4.3.6 铜合金铸件常见缺陷	72
3.2 夹杂物缺陷	18	4.3.7 铸造涡轮叶片常见缺陷	74
3.3 组织结构缺陷	19	4.4 热处理工艺缺陷分析与预防	80
3.4 材料缺陷的分析思路	20	4.4.1 金属工件主要热处理工艺	80
3.5 结构钢与不锈钢的常见缺陷	21	4.4.2 金属材料热处理后的组织与性能	82
3.6 高温合金的常见缺陷	22	4.4.3 金属工件热处理工艺缺陷及分类	84
		4.5 焊接工艺缺陷	96
		4.5.1 金属工件的焊接工艺	96

4.5.2 焊接缺陷分类	98	6.6.5 疲劳断裂失效原因分析	141
4.5.3 常见焊接缺陷	98	6.6.6 零件疲劳寿命的估算	143
4.6 机械加工工艺缺陷分析与预防	102	6.7 低周疲劳断裂	148
4.6.1 切削加工缺陷	102	6.7.1 低周疲劳的概念	148
4.6.2 磨削加工缺陷	103	6.7.2 低周疲劳断裂的表现形式	149
第5章 失效分析与预防综述	105	6.7.3 低周疲劳断裂特征与分析判据	150
5.1 失效分析的基本概念与内涵	105	6.8 断裂模式、起源和扩展途径分析	150
5.1.1 机械装备失效的分类与后果	105	6.8.1 断裂性质(模式)分析	150
5.1.2 失效分析的定义	105	6.8.2 断裂源区的分析判断	151
5.1.3 失效分析的主要内容	106	6.8.3 断裂扩展方向的分析判别	152
5.1.4 失效分析的功能	106	6.9 断裂失效原因分析	152
5.2 机械装备的失效模式与原因	107	6.9.1 断裂失效原因分析的前提条件	152
5.3 失效分析程序	108	6.9.2 断裂失效原因分析要点	153
5.4 失效分析的具体步骤与要求	109	6.9.3 断裂失效原因分析的深度与 广度	154
5.5 失效分析的基本技术与手段	111	第7章 环境因素作用下的失效分析	156
5.6 失效分析所需条件	113	7.1 影响机械装备失效的环境因素	156
5.7 失效分析应遵循的原则与注意事项	114	7.2 应力腐蚀断裂失效分析	157
第6章 断裂失效分析与预防	117	7.2.1 应力腐蚀断裂的条件与特征	157
6.1 断裂失效的概念与内容	117	7.2.2 应力腐蚀断裂的基本规律	159
6.2 断裂分析的力学基础	120	7.2.3 预防应力腐蚀断裂失效的措施	162
6.2.1 断裂韧度的基本概念	120	7.2.4 应力腐蚀断裂失效案例分析	162
6.2.2 裂纹前端的应力和应变分析	121	7.3 腐蚀疲劳断裂失效	163
6.2.3 裂纹前端屈服区的大小及修正 系数	122	7.3.1 引起腐蚀疲劳断裂失效的因素	163
6.3 裂纹分析	123	7.3.2 腐蚀疲劳裂纹的萌生机制	164
6.3.1 裂纹分析方法	123	7.3.3 腐蚀疲劳裂纹的扩展机制	164
6.3.2 主裂纹及裂纹源的判断	123	7.3.4 腐蚀疲劳的断裂特征	166
6.4 断口分析	124	7.3.5 腐蚀疲劳断裂失效的分析判据	169
6.4.1 裂纹打开与断口的清洗技术	124	7.4 氢脆	170
6.4.2 断口宏观分析	125	7.4.1 氢脆的表现形式	170
6.4.3 断口微观分析	126	7.4.2 氢脆的敏感性	170
6.5 断裂的微观机理与典型形貌	127	7.4.3 氢脆的机理	171
6.5.1 穿晶切窝断裂	127	7.5 液态金属致脆	171
6.5.2 滑移分离	128	7.5.1 概述	171
6.5.3 解理断裂	129	7.5.2 液态金属致脆案例分析——涡轮 叶片 Bi-Sn 致脆分析	174
6.5.4 准解理断裂	131	7.6 辐照脆化	178
6.5.5 沿晶断裂	131	7.7 高温疲劳断裂失效分析	179
6.5.6 蠕变断裂	132	7.7.1 材料在高温下的疲劳行为	180
6.6 疲劳断裂	133	7.7.2 高温疲劳裂纹的扩展	188
6.6.1 基本概念	133	7.8 其他环境因素引起的失效	192
6.6.2 疲劳断裂机理与微观形貌	135	7.9 提高机械装备抗环境失效能力的 对策	194
6.6.3 疲劳断裂失效分析	139		
6.6.4 引起疲劳断裂的载荷类型	140		

第 8 章 转动件的失效分析与预防	196
8.1 转动件的功能与失效特征	196
8.2 发动机转动件共模失效原因剖析	198
8.2.1 应力与强度	198
8.2.2 影响共模失效的因素	199
8.3 预防发动机转动件共模失效的对策与措施	200
8.3.1 改进转动件的结构设计	200
8.3.2 完善材料工程与零件制造工艺	201
8.4 叶片的失效分析与预防	202
8.4.1 转子叶片的功能及结构特点	202
8.4.2 转子叶片的工作条件	204
8.4.3 转子叶片的主要失效模式	210
8.4.4 转子叶片的失效分析与诊断技术	231
8.4.5 预防叶片失效的主要技术措施	235
8.5 压气机盘和涡轮盘的失效分析与预防	237
8.5.1 压气机盘与涡轮盘的结构特征	237
8.5.2 轮盘的承载及载荷谱	238
8.5.3 轮盘的振动	243
8.5.4 轮盘的失效模式	248
8.5.5 预防轮盘失效的技术措施	261
8.6 轴的失效分析与预防	264
8.6.1 轴的结构特点与工作条件	264
8.6.2 轴的受力分析	265
8.6.3 轴的失效类型及其特征	269
8.6.4 轴件失效原因分析	275
8.6.5 预防轴件失效的主要技术措施	277
8.7 齿轮的失效分析与预防	277
8.7.1 齿轮传动的类型与工作环境	277
8.7.2 齿轮的受力分析	281
8.7.3 齿轮的振动	283
8.7.4 齿轮失效的基本模式	289
8.7.5 预防齿轮失效的技术措施	299
8.7.6 齿轮失效的分析判断	303
8.8 轴承的失效分析与预防	308
8.8.1 滚动轴承的结构特点及分类	308
8.8.2 滚动轴承的受力分析和工作条件	310
8.8.3 滚动轴承失效的基本模式及其影响因素	314
8.8.4 滚动轴承失效的分析与判断	327
8.8.5 滚动轴承的动态监控和光谱分析技术	335
8.8.6 提高滚动轴承使用可靠性的技术措施	336
8.9 提高转动构件抗疲劳性能与寿命的技术措施	338
8.9.1 表层硬化技术	338
8.9.2 精密热处理技术	338
8.9.3 表层组织再造改性技术	339
8.9.4 长效防护技术	340
8.9.5 抗疲劳制造加工技术	340
第 9 章 事故调查分析与预防综述	342
9.1 事故的类别、等级与调查	342
9.1.1 事故的分类与分级	342
9.1.2 2010 年以来, 国内发生的特别重大事故简介	342
9.1.3 事故教训与启迪	346
9.2 事故调查的特点与原则	346
9.2.1 事故调查的特点	346
9.2.2 事故调查应坚持的原则	347
9.3 事故调查的程序与要求	349
9.3.1 事故报告	349
9.3.2 事故调查	350
9.4 事故调查报告典型案例	354
9.4.1 河南航空有限公司黑龙江伊春“8·24”特别重大飞机坠毁事故调查报告	354
9.4.2 京珠高速河南信阳“7·22”特别重大卧铺客车燃烧事故调查报告	359
第 10 章 人为差错与机械因素引发的事故分析	365
10.1 人为差错引发的事故	365
10.1.1 人为差错的分类	365
10.1.2 人为差错的危害	367
10.1.3 人为差错的特点与产生原因	367
10.1.4 防止人为差错的措施	368
10.2 机械因素引发的事故	370
10.2.1 机械因素引发事故的表征	370
10.2.2 由机械零部件失效引发事故的统计分析	371
10.2.3 事故残骸的收集与分析	371

第 11 章 完善安全生产体系遏制特别**重大事故** 385**11.1 特别重大典型事故剖析** 385**11.1.1 一起由插头插错引发的特别重大
空难事故分析** 385**11.1.2 北京东方化工厂“6·27”特大
燃爆事故分析** 388**11.1.3 伊尔 18-222 号飞机空难事故
原因分析** 391**11.1.4 强五 135 号机雷击事故分析** 396**11.1.5 甬温线“7·23”特别重大铁路
交通事故分析** 399**11.1.6 Д30KY-154 发动机非包容爆裂
事故分析** 402**11.2 启迪与教训** 408**11.3 完善安全生产管理体系,从根本上
遏制特别重大事故** 409**11.3.1 管理体系不健全是引发事故的
根本原因** 409**11.3.2 管理体系缺陷的表现形式** 409**11.3.3 预防事故要以安全管理为
中心** 410**第 12 章 失效分析的思路与方法** 412**12.1 概述** 412**12.2 失效分析的思路** 413**12.2.1 过程性与相关性分析思路** 413**12.2.2 失效树分析思路** 415**12.3 失效分析的科学方法** 417**12.3.1 观察** 417**12.3.2 科学试验** 418**12.3.3 分析方法简介** 419**12.4 分析思路与方法的应用实例** 423**12.4.1 过程性与相关性分析思路的
应用实例** 423**12.4.2 失效树分析思路的应用实例** 425**第 13 章 失效分析在安全生产、质量****控制及司法鉴定中的作用** 431**13.1 失效分析与安全生产** 431**13.2 失效分析与质量控制** 432**13.2.1 质量特性** 432**13.2.2 产品的质量与失效** 433**13.2.3 产品的质量与失效分析** 435**13.2.4 失效分析与质量控制的组织
形式** 438**13.2.5 归纳** 439**13.3 失效分析与司法鉴定** 439**13.3.1 产品失效的责任** 439**13.3.2 司法活动中关于失效分析的
规定** 439**13.3.3 司法鉴定中失效分析应注意的
事项** 441**13.3.4 司法活动中失效分析存在的
问题** 442**13.3.5 司法鉴定中失效分析的发展
趋势** 443**附录** 446**附录 A 生产安全事故报告和调查处理
条例** 446**附录 B 国防科研生产安全事故报告和
调查处理办法** 451**参考文献** 457

第1章 概 论

1.1 引言

机械装备（在交付使用前一般称作产品）包括民用与军用两大类，主要有：地面运行的火车、汽车、坦克、装甲车、拖拉机、收割机、起重机、挖掘机及枪炮等；天上飞行的导弹、卫星和飞机等；海上航行的船舶、舰艇及潜艇等；发电用的汽轮机、核发电机及风力发电机等；机械制造用的冶炼机械、锻压机械及切削加工机械等。

机械装备不仅是国民经济的支柱，而且是现代社会运行的物质基础；机械装备的制造能力与水平是国家硬实力与科学技术水平的体现，也是衡量一个国家国际地位与市场竞争力的重要标准；机械装备的质量关系到人民的生命安全和国民经济的发展。

机械装备大到飞机，小到洗衣机等家用电器都是由诸如梁、轴、轴承、齿轮、弹簧、紧固件、工模具等众多机械零部件加工装配而成的。使用安全性（可靠性）、使用功能及使用寿命是衡量机械装备质量的三大要素。机械装备的零部件，尤其是关键零部件，在运行中一旦出现断裂失效，轻则会导致经济损失，重则会酿成机毁人亡的灾难性事故。古今中外，许多灾难性事故就是由于机械装备零部件失效所酿成的。

1963年4月10日，美国“长尾鲨”核潜艇出海试航，从304.8m沉入2133.6m深的海底。由于一根反应堆冷却管破裂失效，大量海水涌入将潜艇截为两半，艇上129名官兵全部丧生，这是世界潜艇史上最大的一起悲剧。

1984年12月3日，印度博帕尔化工厂，由于管路破裂失效导致异氰酸甲酯毒气外泄，致使3150人死亡，5万多人失明，约15万人需要接受治疗。这是人类历史上最惨重的工业事故。

1986年1月28日，美国挑战者航天飞机以3倍声速冲向太空，75s后因密封圈失效爆炸，7名宇航员遇难，这是人类航天史上最大的悲剧。

1986年4月26日，原苏联切尔诺贝利核电站4号机组因高温石墨与空气接触起火发生爆炸，超过8t的强辐射物质倾泻而出，使超过15万km²的土地受到污染，320多万人遭受核辐射侵害，31人死亡，上万人由于放射性物质的长期影响而丧命或重伤。

1994年6月6日，中国民航一架图-154客机因控制电路维修安装失误，致使飞机起飞不久就解体坠毁，机上160人全部遇难。

2004年1月3日，埃及闪亮航空公司的一架波音737客机因机械故障与操作失误坠入红海，机上148人全部罹难。

2011年7月23日，由北京开往福州的D301次列车与由杭州开往福州的D3115次列车，因列控中心设备存在严重设计缺陷而发生追尾，造成40人死亡，191人受伤。

机械装备在设计、制造、使用与维修的全过程中，存在着众多复杂的影响因素，现代科学技术还难以完全避免出现某些缺陷、失效乃至事故。本书对机械装备存在的缺陷、出现的

失效及酿成的事故，如何及时地进行科学而严谨的分析研究，找出其原因，提出相应的改进与预防措施进行了探讨。

1.2 机械装备缺陷、失效及事故的工程概念

工程上广义的“缺陷 (Defect)”是指产品未能满足相关技术标准规定的要求；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。这里所述“连续性”“均匀性”与“致密性”属工程范畴，不属微观晶体学范畴。

机械装备及其构件丧失其规定功能的现象称为失效 (Failure)。失效与故障的含义有所不同，故障 (Fault) 是指机械装备或构件达不到规定功能但通过修理能恢复其功能的现象。

机械装备事故 (Accident) 是指机械装备由于故障、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。

1.3 机械装备缺陷、失效及事故分析与预防的主要内容

对机械装备存在的缺陷、出现的失效及发生的事故均要进行深入的分析研究，其主要内容如下：

1) 找出肇事零部件 (首先失效零部件)。对于出现的事故，在确定事故是由机械装备失效所致的前提下，首先要找出引起事故的肇事零部件 (首先失效零部件)。

2) 分析判明缺陷的类别、失效零部件的失效模式及事故的性质。

3) 分析研究产生缺陷、出现失效及酿成事故的确切原因与机理。

4) 制订相应的预防与改进措施，防止同类缺陷、失效及事故再次出现。主要有：①研究改进材料与制造工艺，审核缺陷的检测标准与方法，提高零部件的失效抗力。②合理选材，改进结构设计，降低零部件的使用应力。③加强对原材料采购、加工制造和产品检验交付全过程的质量管理与控制。④对同型号机械装备进行寿命预测与可靠性评估。

1.4 缺陷、失效及事故分析与预防的作用与意义

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。随着机械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，其作用与意义归纳起来，有以下几个方面。

1. “分析”工作能为机械装备的安全性提供技术支撑

“分析”的直接功能是找出缺陷、失效及事故的原因，为采取预防与改进措施提供依据。这不仅可以降低经济损失，更重要的是可以减少人员伤亡事故的发生。由于能及时、准确地找出机械装备的薄弱环节，查出安全隐患，提出安全措施，从而能够为机械装备的安全性提供技术保证。

安全生产是人类为其生存与发展向大自然索取和创造物质财富的基本前提，它具有综合性、长期性、艰巨性和严峻性等特点，必须坚持“安全第一，预防为主”的方针，加强安

全生产法制建设和执法力度,落实安全生产责任制。失效分析是安全生产得以顺利进行的保障技术之一,对出现的缺陷、失效与事故进行认真分析,可以提高机械装备的安全性。为此,首先要充分利用现代科学技术,对机械装备的设计、制造、使用与维护全过程的各个环节进行安全监管,提高机械装备的本质安全度,遏制重特大事故的发生。

2. “分析”工作能促进科学技术的进步与发展

缺陷、失效及事故分析具有多学科性,客观实践表明它已在广泛的领域内推动着科学技术的进步与发展,如氢脆的发现与预防、低熔点金属致脆的发现与预防、断裂力学、疲劳学、应力腐蚀学、振动学、新产品的开发与创新等。这方面的事例很多,在此不做详细论述。

3. “分析”工作是指导机械装备维修的技术基础与依据

对机械装备进行维修的目的是保持其规定功能,预防其失效。通过分析可形成科学的维修理论、维修规范与方法,能提高维修工作的质量与效益。

4. “分析”工作是机械装备质量控制的重要环节,是可靠性工程的技术基础

当代控制机械装备的全面质量管理和可靠性工程都将“分析”工作列为基础内容之一。前者通过分析实现对机械装备设计、制造和使用全过程的质量控制;后者通过分析以提高机械装备的使用可靠性。

机械装备功能的保持与丧失标志着质量的好与坏。决定质量的各项因素也是决定可靠性的因素,如设计机械装备时,未经严密的科学论证或对生活条件未完全掌握,所用材料与零部件的质量不符合标准要求,加工工艺规范不当或控制不严等。这些往往会成为机械装备出现缺陷、失效乃至事故的潜在因素。“产品缺陷”引起的失效,是质量低劣的表征与最终反映。现代质量管理除了要求对机械装备在使用过程中出现的失效与事故进行深入的分析(事后分析)外,还要进行事前分析,即安全预测与可靠性评估。

通过“分析”可以找出机械装备质量控制的薄弱环节,使生产企业知道从哪些方面去调整、增强或改进质量控制。同时,严密的质量控制可提供完整的、可追踪的质量文件。这些对及时准确地分析缺陷、失效及事故的原因无疑是至关重要的。

5. “分析”工作是制定与修改机械产品标准的重要依据

产品的真实质量特性(即产品的适用性)是指在使用过程中所表现出来的性能、寿命、可靠性与经济性。但真实质量特性无法在产品投入使用前进行测量与定量分析,为了使产品具有良好的真实质量特性,必须制定出产品的各种质量控制标准,作为产品的真实质量特性。若产品的标准(代用质量特性)制定得合理,就能在一定程度上保证产品的真实质量。也就是说,当产品符合标准时,意味着在实际使用中能经得住考验。因此,标准是对产品质量进行预先控制的重要手段。如果产品质量不符合标准规定,则往往会导致产品失效。而在失效分析过程中,一般又都以各类标准与规范作为判定产品质量和失效原因的主要技术依据。以材料力学性能指标为例,若所分析的失效件力学性能不符合标准规定值,则有两种可能:一是所用材料质量不符合标准要求;二是现行标准规定值不合理。如果是第二种情况,则需对现行标准进行修改。在机械装备生产与使用过程中,通过“分析”而对现行标准或规范进行修订的事例不少。

例1:某燃气轮机转子叶片在使用中多次出现腐蚀疲劳断裂失效而引发多起重大事故。通过失效分析得出,该叶片表面首先遭受腐蚀损伤(沿晶应力腐蚀开裂),在腐蚀损伤处萌

生疲劳裂纹而后断裂失效。导致叶片表面腐蚀损伤的主要原因是所用材料标准与热处理工艺规范不合理。为此,对该叶片所用材料标准及热处理工艺规范做了相应修订,从而彻底排除了这一严重失效事件。

例2:某机载装备的承力构件是用高强度钢制作的,在使用过程中曾出现多起氢脆断裂失效事件,酿成人员伤亡和经济损失的特别重大事故。通过失效分析发现,造成氢脆断裂失效的主要原因是该构件在电镀之后除氢工艺不合理。据此,将原来的除氢工艺规范进行修改,从而解决了这一受到国务院高度关注的重大失效事件。

“分析”能使标准化工作更好地为产品质量服务,“分析”的结论只有变为标准或规范之后,才能有效地控制产品质量,才能防止同类失效事件的再次出现,才能推动科学技术的进步。

6. “分析”工作是司法鉴定的重要手段

当产品在有效期或在使用寿命内出现失效而导致经济损失或人员伤亡事故时,产品的设计方、制造方及使用与维修方往往就责任产生纠纷,而“分析”工作能对这些纠纷的仲裁与司法判决提供依据。因此,做好司法活动中的“分析”工作,保证分析结论的客观性、科学性和准确性,对维护司法公正具有重要意义。

7. “分析”工作具有巨大的经济效益与社会效益

通过对缺陷、失效及事故的分析可为机械产品的设计、制造和使用维修提供可靠的技术依据,从而降低缺陷、失效及事故发生的概率。这对提高经济效益、保证安全和维持社会稳定均具有重大意义。

在市场经济条件下,产品的竞争力除价格外,最为重要的是产品质量。目前,国际市场流行“问题产品召回制”,一方面表明企业对产品质量的重视,以维护企业的形象与市场竞争能力,另一方面是对用户负责,避免再次发生失效事件而造成不良影响。

由机械装备失效造成的经济损失是十分巨大的,据美国20世纪90年代统计,仅机械零部件断裂、腐蚀与磨损三类失效所造成的年均经济损失就高达3600亿美元。我国没有这方面的统计资料,但仅从某些个例也可看出问题的严重性。如某发动机一级压气机叶片腐蚀疲劳断裂失效,引发五起重大事故,先后更换4905台发动机的一级压气机叶片,直接经济损失高达5亿元。

机械装备一旦发生重大事故,往往会成为社会关注的焦点,会影响社会的稳定。要想减轻或消除这种不良影响,关键在于准确地查明事故原因,及时向社会公布,并采取切实有效的改进与预防措施,杜绝同类事故的再次发生。

1.5 缺陷、失效及事故之间的内在联系

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。

机械装备出现失效的原因可归纳为零件缺陷、使用过失、环境因素和正常耗损四类。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→正常耗损,由大到小。这种统计数据的具体比例随机械装备的类型、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。

机械装备发生事故的原因可归纳为人为差错、机械故障（失效）和环境条件三要素。统计分析表明，由机械故障（失效）引发的事故占 20% 左右。即使是质量控制很严的航空装备，由机械零件失效引起的空难事故也占 15% 左右。

由此可见，如何预防机械装备由“缺陷”引起零部件失效，由“失效”导致事故，仍是当今世界各国普遍关注的重大课题。

第2章 缺陷分析与预防

2.1 缺陷的来源与分类

1. 缺陷的来源

机械装备从设计图样到制品，要经历一系列工艺流程。以变形金属材料制品为例，首先要按所定化学成分进行冶炼，脱氧浇注成锭，再将铸锭锻轧成棒材、板材、管材及丝材等，而后再经锻造、冲压、焊接、热处理、机械加工、表面处理及组装等工艺流程，制造成符合要求的零部件。在这一系列的工艺流程中，存在着众多复杂因素，极有可能形成某种缺陷。如果这些缺陷未被检测发现，或检测手段落后而发现不了，或者技术标准不合理等，都有可能使带有缺陷的零部件装机使用，从而成为导致其失效的潜在因素。

2. 缺陷的分类

缺陷一般分为三类：设计缺陷、材料缺陷和制造工艺缺陷。设计缺陷形成的原因及影响因素极其复杂，而且在机械装备定型投入使用之前，要对设计方案进行评审，在此，对设计缺陷不做论述。本书仅对材料缺陷和制造工艺缺陷加以分析讨论。

2.2 缺陷的检测与控制

1. 缺陷检测的内容

要对机械零部件在生产制造过程中形成缺陷的类型、性质与原因进行准确的分析判断，除了充分使用常规的检测方法与手段外，还要运用反映当代技术水平的检测方法与仪器。

缺陷的检测方法有外部检测与内部检测。外部检测一般为非破坏性检测，通常采用肉眼或低倍放大镜，必要时也可采用无损检测仪器，主要检测零件表面有无缺陷，是什么性质的缺陷；内部检验一般采用破坏性检验手段，如低倍检验、断口检验、高倍组织检验、化学成分分析和力学性能测试等，有时也采用X射线透射检测等非破坏性手段，主要检查零部件内部缺陷、化学成分及力学性能等是否符合技术标准要求。

2. 缺陷的检测手段

(1) 成分检测 对零部件缺陷的检测，首先要确认零部件所用材料的化学成分是否合格（包括成分的宏观分布和微区分布）。化学成分的检测方法有如下一些：

1) 化学分析法。

2) 仪器分析法，包括：原子光谱分析仪、电子探针分析仪、离子探针分析仪、俄歇电子能谱仪及X射线检测仪等。

3) 火花鉴别法。

(2) 光学仪器检测 使用放大镜、体视显微镜、金相显微镜、三维视频显微镜等光学仪器，检测零部件表面、金相试样及断口上存在缺陷的类型、性质、大小与数量等。

(3) 电子显微镜检测 用扫描电镜检测零部件表面和断口上存在缺陷的类型、形状、大小与成分。

(4) 无损检测 用涡流、液体渗透、磁粉、超声和射线等无损检测手段,检测零部件表面或内部是否存在缺陷及缺陷的类型、大小与分布等。

上述检测方法均有专用技术规范与程序。在实际工作中,要选用哪些检测方法与何种检测手段,要根据零部件类别与要求来确定。

3. 缺陷的控制

根据零部件的用途,按相应的技术标准,对缺陷的类别、大小及数量加以控制。

2.3 缺陷与失效

2.3.1 缺陷的危害

1. 影响零件使用可靠性

缺陷对零件使用可靠性的影响与零件的应力状态有关。当零件的应力状态较均匀,且呈周期循环时,缺陷对零件硬度的影响很大。尤其是在缺陷方向垂直于最大拉伸应力方向的情况下,会过早地导致疲劳断裂失效。

2. 降低零件的力学性能

缺陷会降低零件的力学性能,其降低程度取决于缺陷尺寸、缺陷与最大应力的方向以及材料对应力集中的敏感程度。

3. 造成应力集中

缺陷会造成应力集中,越尖锐的缺陷,其尖端处的应力集中越严重,缺陷尖端处往往会最先开裂。

4. 促进氢脆与应力腐蚀

有些材料的内部缺陷会促进氢的吸附而诱发氢脆断裂失效;有的表面缺陷则会降低材料的抗腐蚀能力,加速表面腐蚀损伤和诱发应力腐蚀失效。

为了正确地评定各类缺陷对零件使用可靠度的影响,一方面需使用各种检测方法,发现缺陷的性质、大小、方位;另一方面要确定零件有缺陷处的应力分布状况及变化规律。

2.3.2 缺陷与失效

在失效件上往往可以找到这种或那种材料缺陷与工艺缺陷。分析这些缺陷与失效之间的关系是一件十分复杂的工作,应对失效现象和失效件的使用状况进行综合分析,大致有以下三种情况。

1. 失效与缺陷无关

失效件上虽有原材料或工艺缺陷,但缺陷不处在失效的起始或扩展部位上,则表明这些缺陷与失效无直接关系。

2. 缺陷间接引起失效

失效分析中,如果在失效部位发现缺陷,或者失效起源于缺陷处,这说明失效与缺陷有关。但是,缺陷在失效的起始及整个发展过程中究竟起多大的作用,需要从两方面来进行分

析。首先应考虑构件选材及外形设计是否正确,构件的组织 and 性能能否满足受力状况和使用环境的要求;其次要对缺陷的性质及分布情况进行分析,进而判断缺陷在该构件失效中所起作用的大小。

如果缺陷在失效中只是次要因素,那么缺陷只是间接引起失效,缺陷的存在并不是构件失效的主导因素,缺陷的存在只是促进失效发生或者缩短服役时间。引起失效的主要原因可能是设计、选材、工作应力、使用环境等其他因素。

3. 缺陷直接造成失效

各种缺陷对产品功能的影响程度不仅取决于缺陷的性质、类别、几何形状、尺寸大小、分布和所处的位置,也取决于材料的力学、物理和化学性能,还取决于产品承受的工作应力大小、分布和环境因素等。缺陷安全度的分析是运用无损检测、应力分析、环境因素分析和断裂力学分析等手段,尤其要参考失效分析积累的经验与知识,去判断缺陷对产品功能产生影响的程度。

通过原材料或工艺过程中各项质量检验,绝大部分有不允许存在缺陷的构件已经剔除后判废。但是,也会有极个别构件可能由于检验方法或测试手段的限制,或者质量控制标准不严等因素,使带有能直接造成失效缺陷的材料装机使用。

能直接导致构件失效的缺陷,一般具有下列特点:

- 1) 构件的材料、组织或几何形状对该缺陷的敏感性高,危害作用明显。
- 2) 缺陷的性质比较严重或分布情况比较集中。
- 3) 缺陷处在构件受力或环境条件(化学介质、温度等)恶劣的部位。
- 4) 缺陷的隐蔽性较大,一般的质量检验方法不易发现。

2.4 由缺陷导致零件失效的典型案例分析

下面用材料及各类工艺缺陷导致机械零件失效的案例,来说明缺陷的危害及检测控制缺陷的重要性。

2.4.1 材料缺陷导致机械工件失效的典型案例分析

1. 某中型载货汽车转向节因硼化物沿晶界析出而失效

该中型货车投入运营后,行驶 5 万 km 时,因通过一较深水坑,前轮受冲击作用,致使左转向节脆断。断口呈结晶状,无塑性变形痕迹,属典型的脆性断裂。该转向节采用 40MnB 钢制造,化学分析表明,其中 $w(\text{B})$ 较高,达 0.005% (标准规定 $w(\text{B})$ 应为 0.001% ~ 0.0035%)。组织主要为回火索氏体和网状铁素体,还发现有大量网状硼化物析出,并沿晶界分布。力学性能试验表明其强度、刚度均符合要求,但冲击韧度很低,仅为 29J/cm²,因此认为该转向节材料含硼量超标,组织中沿晶界析出硼化物(脆性相),导致材料冲击韧度降低是造成失效的主要原因。

2. 汽车差速器偏心螺栓原材料冶金缺陷而失效

汽车差速器偏心螺栓是差速器的关键工件,其质量直接关系到汽车行驶的安全。某汽车厂曾在差速器装配时,大量发生偏心螺栓断裂,不得已使 11 万件螺栓报废。该螺栓系由直径 12mm 的 ML35 钢经冷拔、退火、冷锻并缩杆成形、车削偏心、滚螺纹以及调质处理等工