

总主编 曹茂盛 刘世参 毛大立
总主审 吴 林 翟玉春 王富耻

材料科学与工程系列教材(三)

刘瑞堂 编

机械零件失效分析

哈尔滨工业大学出版社

材料科学与工程系列教材(三)

总主编 曹茂盛 刘世参 毛大立

总主审 吴 林 翟玉春 王富耻

机械零件失效分析

刘瑞堂 编

哈尔滨工业大学出版社

哈 尔 滨

内 容 提 要

本书阐述机械零件失效的规律与机理和失效分析的理论与实践,系统地介绍了机械零件的各种失效形式、失效原因及失效分析的思维方法和技术。前3章讲述失效分析的基本知识和常见失效形式的规律、失效判据及诊断技术;第4章介绍失效分析的思路和处理问题的程序、方法;第5章介绍裂纹和断口分析技术,阐明了各种常见裂纹和断口的宏观与微观形态特征及分析方法;第6,7,8章讨论了材料冶金因素、设计与选材失误引起的失效,以及各种加工工艺缺陷的产生与鉴别方法和这些缺陷引起的失效及失效分析技术。书中列举了丰富的实际零件失效分析实例,深入浅出。

本书可作为高等学校材料类和机械类各专业的教学参考书,同时也可供从事机械产品的可靠性、失效分析和质量管理工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械零件失效分析/刘瑞堂编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2003.9

ISBN 7-5603-1920-3

I.机… II.刘… III.机械元件-失效分析-高等学校-教材 IV.TH13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 069854 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区教化街 21 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
印 刷 黑龙江省教育厅印刷厂
开 本 787×1092 1/16 印张 17.75 字数 443 千字
版 次 2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 7-5603-1920-3/TB·39
印 数 1~3 000
定 价 23.00 元

前 言

机械产品失效分析是一门关于研究机械产品质量的综合性技术学科,主要研究失效的规律与机理。机械零件的失效是在特定的工作条件下,当其所具备的失效抗力指标不能满足工作条件的要求时发生的。导致零件失效的本质原因可能是材料本身的失效抗力不足,也可能是零件存在与设计或制造等过程有关的缺陷。产品的早期失效往往是产品质量低劣或质量管理不善及科学技术水平不高的直接反映。失效发生后能否尽快作出正确的判断,确定失效原因,制定防止失效的措施,则是衡量有关科技人员技术水平的重要标志。加入 WTO 后,我国的产品将参与国际市场的竞争,于是提高产品质量成为提高竞争力的关键因素。失效分析则是定量评定产品质量的重要基础,也是保证产品可靠性的重要手段。近年来,在不断高涨的“与国际接轨”的形势下,人们的质量意识不断强化,各工业部门对开展失效分析、提高产品质量以及强化质量管理的需求越来越强烈。

本书系统阐述机械零件各种失效形式的特征、判据、鉴别技术,以及零件在设计选材中的失误和冷、热加工工艺及装配等过程中产生的缺陷所引起的失效及失效分析技术。这些知识不但对高等学校材料科学与工程和机械工程等专业的学生来说是必须掌握,而且对相关专业领域的工程技术人员及生产管理人员也具有十分重要参考价值。希望本书能对普及失效分析的知识、提高失效分析的技术水平和培养该领域的人才,发挥一定作用。

本书的特点是强调理论与实践相结合,每一部分内容都结合典型零件的失效分析实例进行介绍,以便于读者掌握失效分析的逻辑思维方法和开展实际失效分析的具体做法。另外,为了表述方便,书中用 $w\%$ 表示质量分数,用 $\varphi\%$ 表示体积分数,用 $x\%$ 表示摩尔分数。

在本书编写过程中,主要参考了涂铭旌等的《机械零件失效分析与预防》、陈南平等《机械零件失效分析》、刘民治等的《失效分析的思路与诊断》、陈伯蠡的《焊接工程缺欠分析与对策》和美国金属学会编的《金属手册》(第 10 卷,第 8 版)等书籍,并引用了其中的部分内容,在这里向这些文献的作者致以深切的感谢。

由于编者水平所限,书中疏漏在所难免,望读者批评指出。

编 者

2003 年 8 月

目 录

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 失效与失效学	(1)
1.2 失效分析的意义	(2)
1.3 失效分析与机械产品可靠性的关系	(5)
第 2 章 机械零件失效形式及诊断	(9)
2.1 失效分类及诊断	(9)
2.2 机械零件失效原因概述	(10)
第 3 章 常见失效形式及特征和诊断	(18)
3.1 过量弹性变形失效	(18)
3.2 屈服失效	(19)
3.3 塑性断裂失效	(20)
3.4 脆性断裂失效	(21)
3.5 疲劳断裂失效	(24)
3.6 腐蚀失效	(37)
3.7 应力腐蚀失效	(47)
3.8 氢脆失效	(54)
3.9 腐蚀疲劳失效	(57)
3.10 磨损失效	(59)
3.11 蠕变失效	(69)
第 4 章 失效分析的思路与方法	(71)
4.1 失效分析的常规思路	(71)
4.2 失效分析的系统工程思路与方法	(74)
4.3 失效分析的程序和步骤	(79)
4.4 失效分析的基本实验技术	(83)
第 5 章 裂纹与断口分析	(86)
5.1 裂纹与断口	(86)
5.2 裂纹分析	(86)
5.3 断口分析	(92)
第 6 章 材料因素引起的失效	(114)
6.1 材料因素引起失效的原因分析思路	(114)
6.2 材料成分与失效	(115)
6.3 杂质元素偏聚与晶界脆化失效	(120)
6.4 非金属夹杂物与失效	(125)
6.5 材料的显微组织与失效	(133)

第 7 章 设计阶段的失误与失效·····	(140)
7.1 机械设计与失效概述·····	(140)
7.2 零件结构与失效·····	(146)
7.3 减小应力集中的措施·····	(153)
7.4 零件材料选择与失效·····	(156)
第 8 章 工艺因素引起的失效·····	(173)
8.1 概 述·····	(173)
8.2 铸造缺陷与失效·····	(173)
8.3 锻造缺陷与失效·····	(178)
8.4 热处理缺陷与失效·····	(204)
8.5 焊接缺欠与失效·····	(215)
8.6 表面形变强化工艺与失效·····	(244)
8.7 机械加工缺陷与失效·····	(256)
8.8 装配中的失误与失效·····	(264)
附录 CVDA—84《压力容器缺陷评定规范》摘要·····	(271)
主要参考文献·····	(278)

第1章 绪论

1.1 失效与失效学

机械产品种类繁多,规格不一,功能千差万别。衡量机械产品的标准是多方面的,如功能、寿命、大小、重量、外观、安全性和经济性等,其中功能是最主要的,因为衡量产品质量的优劣,首先要看它能否很好地实现规定的功能。在工程实践中,由于种种原因,产品丧失其原有功能的现象经常发生。按照通常的说法,将“产品丧失其规定功能的现象”称之为失效。机械产品的失效大致可分为三种类型:①完全丧失其规定的功能;②部分丧失其规定的功能,虽仍能工作,但已不能圆满地完成规定的任务;③严重损伤,再不能安全地继续工作,此时应及时调换或修补。机械产品的失效形式主要有过量的变形、断裂和表面损伤等。

产品失效的后果是引发事故,甚至重大的或灾难性的事故,造成危害,甚至生命财产的巨大损失。这方面的统计数字是非常惊人的。例如,据美国1982年统计,因机械零件断裂、腐蚀和磨损失效,每年造成的经济损失达3400亿美元,其中断裂失效造成的损失约为1190亿美元。1980年3月27日,北海的石油钻探船 Alexander Kielland 号,由于连接五条立柱的水平横梁发生腐蚀疲劳断裂而完全倾覆,损失达几千万美元。在我国,机械零部件失效率也很高,由此造成的损失也是惊人的。1979年9月7日,我国某工厂氯气车间的液氯瓶爆炸,使10t氯液外溢扩散,波及范围达7.35 km²,致使59人死亡,779人中毒,直接经济损失达63万元。1979年12月18日,我国某地煤气公司液化气厂发生了一起恶性爆炸事故,一台直径9.2 m、容积400 m³的球形液化气贮罐突然爆裂,从长13.5 m、宽0.75 m的裂缝喷出的液化石油气,遇明火而爆炸燃烧,引起附近三个400 m³的球罐和一个50 m³的卧式贮罐以及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700 t,烧毁机动车15辆以及罐区全部建筑,死亡33人,受伤53人,直接损失达650万元。1972年10月,一辆由齐齐哈尔开往富拉尔基的公共客车,行驶至嫩江大桥时因过小坑受到震动,前轴突然折断,致使客车坠入江中,造成28人死亡。1982年3月12日,一列火车在运行中由于车轮发生崩裂而引起列车倾覆。1979年5月30日,某发电厂2号机组在运行过程中突然发生剧烈振动和声响,经检查发现转轮上10个叶片全部断裂并脱落,叶片、叶轴碎裂成500多块。两台机组修复费用为110万元,因停机3年少发电1.2亿度。

从上述事例可以看出,失效不仅会给人们带来巨大的直接经济损失,同时也会造成惊人的间接经济损失。所谓间接经济损失,主要包括:①由于失效迫使企业停产或减产所造成的损失;②引起其他企业停产或减产的损失;③影响企业的信誉和市场竞争能力所造成的损失。例如,某大型化工企业因贮罐失效停产一天损失30万元,这样停产一个月就造

成 900 万元的损失,建造一个新贮罐又需 80 万元。再如某钢铁厂轧机的人字齿轮轴失效,修复轧机并不需巨款,而停产期间造成的间接经济损失却高达 400 余万元。据有关部门统计,我国 1973 ~ 1976 年期间运行的 209 台汽轮发电机中,仅叶片断裂失效就达 350 余起,按每次增加检修期 10 天计算,每年要少发电 10 亿多度。又如前苏联科学院亚库茨克分院在与我国东北毗邻的西伯利亚地区进行的低温脆断问题的调查表明,1960 年冬季亚库茨克地区仅汽车车架、悬挂部件等的脆断,使运输能力减少约 1 900 万 t·km,相当于 1 万辆汽车的运输量,损失达 200 万卢布。

为了防止失效现象的重复发生,提高机械产品质量,早在 20 世纪初,人们就开始对零构件的失效现象进行比较系统的分析研究,后来随着工程力学、材料科学及交叉学科的发展和电子光学仪器测试技术的进步,在对大量工程失效现象的行为规律与机理研究的基础上,逐渐形成了一门新的分支学科,即失效学,也称为失效分析。失效学是研究机械装备的失效诊断、失效预测和失效预防的理论、技术和方法及其工程应用的一门学科。近代材料科学与工程、工程力学和疲劳学科等对断裂、腐蚀和磨损的深入研究,积累了相当丰富的具有创新意义的观点、见解和物理模型,为失效学的形成奠定了理论基础;现代检测仪器、仪表科学的迅猛发展,检测技术的不断提高,特别是断口、裂纹和痕迹分析等技术体系的建立、发展和完善,为失效学的形成和发展奠定了技术基础;数理统计学科的完善,模糊数学的突起,可靠性工程的发展与应用,以及电子计算机的广泛普及,为失效学的完善奠定了方法基础。上述三者的融会贯通,使失效学得以逐步建立、发展和完善,成为一门相对独立的和综合性的新兴学科。

1.2 失效分析的意义

引起失效的因素是复杂的,大致可归纳为两个方面,即材料方面的因素和环境方面的因素。前者为内因,包括材料品质及加工工艺方面的各种因素;后者为外因,包括受载条件、时间、温度及环境介质等因素。任何产品的失效都是在材料或零件的强度(韧性)与应力因素和环境条件不相适应的条件下发生的。失效总是从产品对服役条件最不适应的环节开始的,而且失效产品或零件的残骸上必然会保留有失效过程的信息。通过对失效残骸的研究,可查明失效的机理和过程,并对失效的原因作出判断,从而可有针对性地采取改进和预防措施,避免同类失效的再发生,达到改进产品质量、延长使用寿命、提高服役安全性和可靠性的目的。正是通过失效分析,揭示了失效的本质,找到了失效的原因,提出了防止措施和改进办法,才为工业发展扫清了障碍,同时也促进了相关学科和工程自身的发展。下面简单介绍失效分析推动科学技术发展和产品质量提高的一些实例。

1.2.1 失效分析促进科学技术发展

工业革命时期,蒸汽动力的采用,极大地促进了铁路运输业的发展。到 19 世纪中期,连续发生了多起因火车轴断裂引起的列车出轨事故。观察发现,断轴上的裂纹几乎都是从轮座内缘尖角处开始的。1852 ~ 1869 年间,在机车厂工作的工程师 Wohler 针对火车轴断裂的特点,设计了旋转弯曲疲劳试验机,进行了大量循环应力下的疲劳试验。正是这些疲劳试验,确立了 $S-N$ 曲线和疲劳极限的概念,并在此基础上提出了机械零件抗疲劳设

计的经典方法。也正是这些疲劳试验,奠定了近代疲劳研究的基础。

1954年1月10日和4月8日有两架英国彗星号喷气客机相继在爱尔兰和那不勒斯附近的地中海失事。之后,对事故进行了详尽的调查和周密的试验。为了模拟机身在飞行中所承受的载荷,将一架正在服役的彗星号飞机机身装在液压槽中周期打压,模拟飞行时的载荷(从0到 56.88 kN/m^2 ,相当于从地面上升到12 000 m高度),同时在机翼上施加相当于上、下阵风的载荷。该飞机在试验前已经历了1 230次飞行,在加压槽中又经历了1 830次模拟飞行,总飞行次数达3 060次(相当于9 000飞行小时)。此时,压力舱突然破坏,裂纹从应急出口门框下后角处发生,起源于一个铆钉孔处。与此同时,又从海底打捞出失事飞机残骸,与试验飞机进行对照分析。综合多方面的试验和分析结果,最后得出结论:事故是由疲劳失效引起的。事后根据失效分析结果,对薄弱环节进行了加强。此后,该型机未再出现过类似失事现象。这是一次空前规模的失效分析,正是这次失效分析揭开了疲劳研究的新篇章。

在大型焊接结构断裂失效中,船舶的断裂颇受瞩目。二战期间,美国建造的4 694艘焊接船只,到20世纪50年代初,已有1 289艘发生了不同程度的失效,其中238艘因断成两截或严重损坏而报废,19艘沉没。战争结束后,美国海军实验室对船舶失效原因开展了大量研究。研究人员认识到造成船体破坏的重要原因是钢的缺口敏感性,并且注意到大多数断裂是在气温较低的情况下发生的。但当时美国船舶技术标准中没有规定对船体钢缺口敏感性和低温韧性的要求。研究还得到船体钢的脆性转变温度判据,建立了焊接船只断裂控制指南。这些研究成果为防止船舶失效起到了非常重要的作用,有些技术规则在其他工业部门也得到广泛应用。

宇航和导弹事业的高速发展,要求进一步减轻重量,促使在这些结构中应用高强度和超高强度材料,但由此而导致了大量低应力脆断事故的发生。1950年“北极星”导弹所用的固体燃料发动机壳体的爆炸事故就是其中的典型事例。该发动机壳体采用屈服强度为1 400 MPa的D6AC钢制造,其常规力学性能指标都符合规范要求,但在试发射试验时爆炸,爆炸时的应力水平远低于设计许用应力。对残骸的检查发现,断裂是由深度为0.1~1 mm的裂纹引起的,裂纹源为焊裂、咬边、夹杂或晶界开裂等既存缺陷。对此类事故的失效分析大大推动了超高强度材料的发展。也是由于对含有既存裂纹的裂纹体力学行为的研究,导致了断裂力学——一门新的边缘学科的产生。

现代大型化工设备中的大量不锈钢零部件的断裂失效,曾引起多方面的关注。失效分析表明,这些断裂是在腐蚀性环境和拉应力的联合作用下发生的,称为应力腐蚀开裂。对应力腐蚀失效规律和机理的研究,促进了人们对应力腐蚀的认识。这期间一个重要的事件是,1965~1966年间,美国在执行登月计划时,用Ti-6Al-4V钛合金制成的 N_2O_4 压力容器曾发生多次应力腐蚀破裂,这曾被认为是宇航技术中的严重问题。此外,锅炉钢的碱脆,黄铜弹壳的季裂,镁合金飞机构件在存放期间的开裂,应用于核反应堆冷却系统的奥氏体不锈钢的开裂等,都是由应力腐蚀造成的。正是对上述这些事故所进行的失效分析与预防,推动了应力腐蚀研究的进程。

把失效分析所得到的材料冶金质量方面的信息反馈到冶金工业部门,可促进现有材料的改进和新材料的研制。例如,高寒地区使用的工程机械和矿山机械,因其经常发生低温脆断而提出的降低脆性转变温度的要求促进了低温用钢的研制。海洋平台采用厚截面

钢板建造,经常在焊接热影响区发生层状撕裂,失效分析发现,这与钢中硫化物夹杂有关,并确定了层状撕裂规律与硫化物分布的关系,由此发展了一类Z向钢。石油天然气管道曾发生过多脆性开裂,裂纹长达十几公里,经长期探索发展了低碳针状铁素体和微珠光体类型的高强高韧钢。机械工业中常用的齿轮类零件,其主要失效形式是接触疲劳,表现为表面麻点和硬化层剥落等,为了使硬度合理分布,发展了一系列控制淬透性的渗碳钢。矿山和煤炭等工业部门的破碎和采掘机械,其最常见的失效形式是磨损,为了提高此类零构件的耐磨性,发展了一系列耐磨钢和耐磨铸铁。

此外,失效分析也促进了铸、锻、焊、热处理等工艺的改进和技术水平的提高。

1.2.2 失效分析促进产品质量提高

任何机械产品都应该保证在其寿命期内的服役功能和安全可靠性,并且技术先进、价格低廉。为此,机械产品必须遵循一套完整的生产和科学质量管理规程,即从产品设计开始,经选材、冷热加工到零件检验和装配等生产过程,最终制成质量合格的机械产品。在上述过程的每一个环节中的缺陷,都将对产品质量有影响并可能构成产品服役中失效的原因。如果产品在服役过程中发生故障,便应进行失效分析,通过失效分析,找出失效原因,提出防止失效的措施,然后将信息反馈到有关部门,使其进一步完善生产或科学管理规程,以提高产品的质量、可靠性和耐久性。这是一个完整的循环过程,如图1.1所示。

由图可见,失效分析在机械产品生产中的地位是相当重要的。由失效分析结果向产品设计、制造、使用 and 维修及管理等部门反馈的信息,是制定防止同类失效措施最直接和有效的依据。

(1)向设计部门反馈,可改进产品设计,完善技术规范。

大量失效分析表明,在很多情况下,只要在结构设计方面作少量的改进,就会避免恶性和早期断裂事故,因此比改进材料和工艺的作用更大、更经济。但也有时为克服某种失效,要求对机械零件的结构设计方案做较大的变动,甚至制定新的设计规范。如引进的30万吨合成氨成套设备,在运行投产后,汽轮机转子叶片不断发生疲劳断裂。国内组织专家进行断裂分析,认为主要是叶片根部结构设计不合理,于是将原来的棕树形叶根改为叉形叶根,从此,叶片没有再发生过断裂事故。

(2)向制造部门反馈,可改进生产工艺,创制和推广新工艺。

在后面的章节里,我们将看到大量由于工艺的不合理而造成机械失效的实例。通过失效分析,则可以判断制造工艺、质量标准及其控制方法的不合理性,同时提出克服零件失效的工艺措施。

对某一失效案例的分析,有时能促进工艺的变革。而工艺是与材料、结构密切相关的。有时新工艺的采用,又可能造成新的失效类型。例如,用焊接代替铆接后,船舶和桥梁都发生过

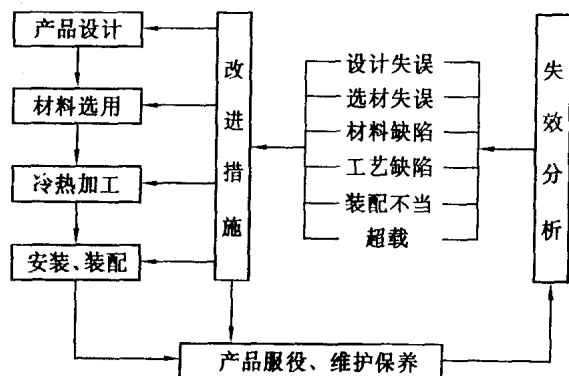


图 1.1 失效分析与产品设计、制造之间的关系

多起断裂事故,在某种意义上正是这些事故促使了焊接工艺和焊接材料的改进和发展。

(3)向材料部门反馈,可合理化选材,开发和研制新材料。

20 世纪二三十年代,由于机械的大型化和高参数化,造成了许多用普通碳钢制造的零部件因强度或韧性不足而失效,这就促进了对合金钢的研究,及其在内燃机、汽车、锅炉、汽轮机上广泛应用。随着机械工业的发展,人们通过机械零件的失效研究,对合金结构钢的化学成分及金相组织进行了调整,同时又研究出许多高性能的、适合于复杂工况条件的新钢种,促进了新材料的发展。

应当着重指出,在国内机械零件失效分析的案例中,有些机械零件失效主要是由于选材不当而造成的;但是有些事例说明,即使选用了 A3 钢、45 钢,假若能采用合理的热处理工艺,也能够防止某些零件的断裂事故。因此,对于机械设计来说,除了应有合理的零件结构设计之外,还必须正确选材、合理用材。

(4)向用户反馈,可健全和完善使用、维修制度。

通过失效分析,可以判明机器的使用、维修对失效事故是否应负责任,判明操作规程和有关参数限额的合理性,指导安全操作规程的修订。通过失效分析,还可以提供一些原则,以便制定延长机器设备寿命的措施。

上述四个方面的分析表明,正确的失效分析是解决零件失效、提高机器承载能力和使用寿命的先导及基础环节。失效分析的目的不仅在于对失效原因的分析 and 判断,而更重要的还在于为积极预防失效找到有效的途径。为了提高机械产品在国内外市场的竞争能力,可以说,失效分析及失效预防技术是重要的基础技术之一。这就是失效分析的目的和任务。

1.3 失效分析与机械产品可靠性的关系

从失效分析角度谈产品的可靠性,是指使用的可靠性,它既包括了在设计和制造中所保持的产品的固有可靠性,也包括了使用、维修后所体现出来的可靠性。由此看出,产品的可靠性是相对于失效而言的概念,并包含有时间的因素,反映着产品质量的时间效应。

可靠性技术一般分为三个领域:①可靠性工程,主要是系统(这里指产品)可靠性分析、系统可靠性设计和评价;②可靠性分析,包括可靠性试验、失效分析与防止;③可靠性数学。

产品的可靠度是产品在规定的条件下和规定的时间内满意地完成规定功能的概率。这个经典定义着重表达了四个方面的含义,即功能、时间、使用条件和满意地完成规定功能的概率。所谓“概率”是表示一个事件发生或不发生的可能性,取值在 0~1 之间。言外之意,这个定义还包含着“在规定的条件和规定的时间内不能满意地完成规定功能的概率”,这就是发生失效的概率(称为“失效概率”或“不可靠度”),也取值于 0~1 之间。由此可见,产品的“可靠性”是一个相对于其“失效”而言的概念,产品的可靠度与其失效概率是“互补”的关系。设可靠度为 R ,失效概率为 F ,则

$$R + F = 1$$

由于产品的各种性能是随时间而变化的,产品的可靠度和失效概率都是时间的函数,所以上式一般写为

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (1.1)$$

大多数机械产品和电子产品都是由许多零部件组成的系统,每一个零部件都有各自的可靠度。设机械系统(或电子系统)由 N 个零部件组成,它们的可靠度分别为 $R_1, R_2, \dots, R_N$, 则系统的总可靠度为:

$$R_S = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdots R_N \quad (1.2)$$

这个关系称为“可靠性的乘法规律”(The Product Rule of Reliability),它说明,系统越复杂,导致失效的因素就越多,因而越难以保证其可靠性。

为了评价产品的可靠性,除了上述的可靠度 $R(t)$ 和失效概率 $F(t)$ 两个定量指标外,还可以用其他的定量特征指标评价,其中主要的列于表 1.1 中。

表 1.1 产品可靠性的几个主要特征指标

特征指标	说 明
可靠度 $R(t)$	系统或部件在规定时间内、规定工作条件下不发生失效的概率
失效概率 $F(t)$	$R(t) = 1 - F(t)$ $F(t)$ 又称“不可靠度”
失效密度函数 $f(t)$	失效概率 $F(t)$ 的时间微分 $f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}$ 即系统或部件在下一时间增量 dt 内发生失效的概率
失效率 $\lambda(t)$	系统或部件在可能发生失效的某一段时间(通常为处于工作状态的时间)内发生失效的次数
危险率 $Z(t)$	单位时间内产品失效数与同一时间内未失效数之比 $Z(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{1 - \int_0^t f(t) dt}$ 对于指数分布而言, $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$, 则 $Z(t) = \lambda = \text{常数}$
$R(t)$ 、 $F(t)$ 及 $f(t)$ 、与 $Z(t)$ 的关系	$R(t) = \exp\left\{-\int_0^t Z(t) dt\right\}$ $F(t) = 1 - \exp\left\{-\int_0^t Z(t) dt\right\}$ $f(t) = Z(t) \exp\left\{-\int_0^t Z(t) dt\right\}$
平均寿命 1. 平均有效 时间 MTTF 2. 平均失效 间隔时间 MTBF	对不可修复的产品而言,平均寿命为它在失效前的平均有效时间 (MTTF = Mean Time to Failure),有时包括贮存时间 对可修复的产品而言,平均寿命为它在两次相邻失效之间的平均工作时间 (MTBF = Mean Time between Failure),又称“平均无故障工作时间” 当 $\lambda(t) = \lambda(\text{常数})$ 时, $MTBF = \frac{1}{\lambda}$

续表 1.1

特征指标	说 明
有效度或称有效利用率	(1) 瞬时有有效度 $A(t)$: 产品直至某一预定时间 t 还能维持其规定功能的概率 (2) 固有有效度 A: 在长时间内使用的平均有效度 $A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$ 其中, MTTR 为平均修理时间 (Mean Time to Repair), 即产品失效后直至修复之间的时间
边界条件	产品各项可靠性特征指标的数值都是在特定条件下观察产品失效行为时测定的。如果条件不同, 它们的数值也随之改变。因此在给定可靠性特征指标数值时, 均需附加说明它们的边界条件, 主要有: (1) 产品的类型、结构尺寸、材料; (2) 负载条件, 包括功能负载和环境负载; (3) 失效判据; (4) 可靠性特征值的测定方法; (5) 这些特征的有效期限

表 1.1 所列的几个主要的可靠性特征指标都是以时间 t 为随机变量的统计分布函数, 可具有许多种分布形式: 指数分布、正态分布、威布尔分布等。这些特征指标的计算和确定, 对于简单系统和单纯失效因素来说, 是比较简单的; 但对复杂系统和复杂失效因素来说, 则往往会变得极为复杂。它们的计算和确定也已有现成方法。这里需着重指出的是: 这些可靠性特征指标都是建立在以往观察各种产品失效直接或间接获得的经验与知识基础上的, 它们可以用来推断新产品将来在某些使用条件下发生失效的可能性(概率)。由于失效常常是在服役中产品的某种质量发生变化的反映, 而产品的可靠性是相对于失效而言的概念, 并含有时间的因素, 所以人们称各种可靠性特征指标为“用时间尺度来描述的质量的指标”, 反映着在使用条件下产品质量的时间效应 (Effect of Time), 以区别于产品在交货时的“出厂质量状态”。举例来说, 电视机出厂交货试看时, 图像清晰、音质优美, 这就是它出厂时的固有质量。然而, 这种质量能保持多少小时? 平均使用多少小时之后需要更换显像管或其他零部件才能恢复这种质量呢? 在某种使用条件下显像管发生爆炸的概率有多大? 诸如此类的含有时间因素的质量问题则属于可靠性范畴。由此可见, 产品的可靠性是依附于产品某些固有质量、特别是功能质量上的, 它不能脱离质量而独立存在, 必须用技术措施来保持和提高产品的固有质量。由于可靠性是相对于失效而言的概念, 所以针对失效原因采取技术改进措施, 更是提高产品可靠性的根本途径。产品失效的原因不仅寓于产品本身的质量之中, 而且还存在于使用的工况条件和环境因素之中, 所以, 对于要求可靠性高的产品, 在技术上和管理上就要更多地考虑它的使用条件和环境因素, 采取更多、更严格的措施来保证产品的某些质量指标, 才能达到要求的高可靠度。失效分析的积极作用在于找出机械失效的原因, 并提出预防失效的措施。

由此可见, 失效分析是可靠性技术中的一个重要环节。事实上, 早在 1936 ~ 1945 年间, 美国质量管理学会 (American Society for Quality Control, ASQC) 在开展“失效废品检验规划” (Salvage Inspection Program) 时, 就号召美国企业重视产品的失效分析, 要求把失效分析纳入质量管理体系。欧、美许多企业一时竞相效仿, 开展失效分析, 蔚为风尚, 有的甚至愿意高价向用户买回失效产品的残骸进行分析。他们开展失效分析的结果, 不仅提高

了原有产品的质量,而且从失效分析中发现的许多新现象产生了新启示,发展了许多新产品和新技术,获得了巨大的经济利益,尝到了失效分析的甜头。特别是他们那种认真从事产品失效分析的负责作风,使用户产生了极大的信任感,不仅未因产品失效而丧失声誉,反而赢得了更大的信誉,扩大了产品的市场占有率。

在我国,机械工业是解放后才逐步建起来的。从仿制到20世纪60年代自行设计和制造这一历史阶段,除对安全性要求很高的航空、航天部门重视失效分析工作外,一般机械产品的失效分析还未引起人们的重视。尤其十年动乱期间,质量管理体系遭到严重破坏,产品质量大幅度下降,机械装备失效事故频频发生,到70年代才引起许多技术部门的注意。80年代以后,老一代科学家亲自领导和组织召开了多次全国性的失效分析学术会议,逐步形成了一支失效分析专家队伍。

本书以“机械零件失效分析”为主题展开讨论。由于失效分析是一门综合性技术学科,涉及材料学、力学、摩擦学、腐蚀学及机械制造工艺学等多方面知识,所以本书从失效分析的角度对这些知识进行了较全面的阐述,为读者在系统掌握材料科学知识的基础上综合学习其他学科的基本知识,学会失效分析的基本思路和方法并能开展失效分析研究工作打下良好的基础。

第 2 章 机械零件失效形式及诊断

2.1 失效分类及诊断

2.1.1 失效形式的分类

零件的失效形式即失效的表现形式,可理解为失效的类型,也称为失效模式(Failure Mode)。零件在一种或几种物理的和(或)化学的因素的作用下,逐渐地发生尺寸、形状、状态或性能上的变化,并以特定的表现形式丧失其预定的功能。这里所指的特定的表现形式即失效形式或失效类型。显然,不同的物理和(或)化学过程对应着不同的失效形式。反之,具有相同失效形式的零件的失效,是相同物理和(或)化学因素作用的结果。零件的失效受多种因素影响,其失效形式也很复杂。为了揭示同类失效形式的本质,比较和鉴别各类失效形式,对各种失效形式进行科学的分类是必要的。按失效的宏观特征,可将零件失效分为变形失效、断裂失效和表面损伤失效三大类型。按失效性质和具体特征,每一类型还可以包括几个小类,如图 2.1 所示。

2.1.2 失效形式的诊断

失效形式诊断是开展失效分析的重要的也是首要的工作,它决定着失效分析继续工作的方向。图 2.1 列出的失效形式,常可分为一级、二级甚至三级失效形式。如图 2.1 中,断裂作为一级失效形式,疲劳断裂则视为二级失效形式。按应力高低,疲劳失效又可分为低周疲劳失效、高周疲劳失效以及高低周复合疲劳失效等三级疲劳失效形式。按应力来源,可将疲劳断裂失效分为机械疲劳失效和热疲劳失效等三级疲劳失效形式。在机械疲劳失效中,又可有弯曲疲劳失效、扭转疲劳失效、拉-压疲劳失效和接触疲劳失效等四级疲劳失效形式。

一般说来,对某种特定的失效形式的诊断,特别是对典型的一级失效形式的诊断并不困难,只要根据单一的诊断判据,如宏观断口特征,就可以得出一级失效形式诊断的结论。但对于二级或三级甚至四级失效形式的诊断则需要选用适当的技术和方法进行一定的定量分析。例如,对断裂失效形式的诊断应依据:① 残骸分析:根据残骸的轨迹、断口的宏观性质、断口的变形顺序等,首先寻找初始破坏件(肇事件),然后对初始破坏件的断口性质、裂纹走向、变形情况、痕迹来源、力学性能、显微组织、工艺过程、热处理状态等进行逐项的和综合的分析。② 应力分析:包括应力的来源、性质和大小的分析和估算,特别是对初始破坏件的结构及受力的分析和计算、工况和环境分析,并与断口的定性和定量分析相对照进行综合分析。③ 失效模拟:对主要的失效形式和主要的控制参量在实验室或现场进行模拟试验,并对模拟失效的断口与实际肇事件的断口进行对比分析。

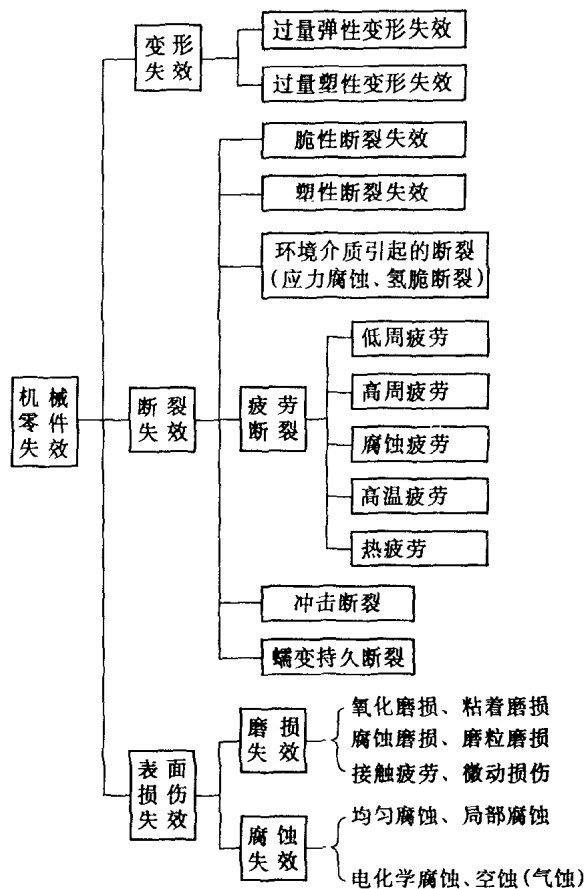


图 2.1 机械零件失效形式分类

又如磨损失效的二级失效形式包括磨粒磨损失效、粘着磨损失效、疲劳磨损失效、氧化磨损失效、腐蚀磨损失效和微动磨损失效等六类。其中每一类又可有若干个三级磨损失效形式。磨损失效形式的诊断一般依据:① 磨损表面的形貌和次表面组织和性能的变化;② 磨屑形貌、磨屑成分和组织的变化;③ 磨损系统中各参量的关系和变化等。但是,由于磨损是一种伴随着摩擦的存在而存在的摩擦面材料逐渐丧失、迁移或变形的过程,虽然一般认为有摩擦就有磨损,但磨损并不等于磨损失效。由磨损到磨损失效是一个由量变到质变的过程,对于不同的机械,这个由量变到质变转化的分界点是不一样的。因此,进行磨损失效形式的诊断,必须首先根据零件性质具体确定磨损失效的失效点。

2.2 机械零件失效原因概述

引起零件失效的因素是多方面的,概括地讲,可分为服役条件、材料因素、设计与工艺因素以及使用和维修等几个主要方面。

2.2.1 零件的服役条件

零件的服役条件包括受力状况和工作环境。

(一) 受力状况

零件的失效通常是由于其所承受的载荷超过了零件在当时状态下的极限承载能力的结果。零件的受力状况包括:载荷类型、载荷性质,以及载荷在零件中引起的应力状态。

1. 载荷类型

作用在零件上的载荷,可以划分为 5 种基本类型:

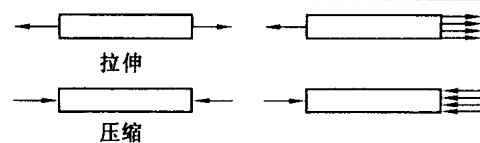
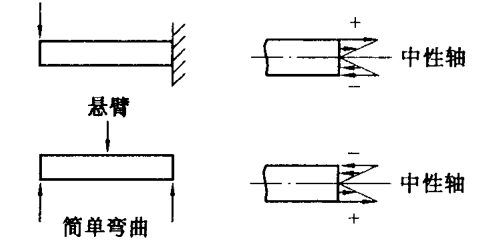
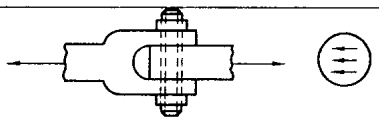
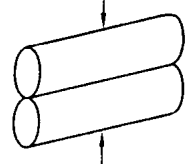
(1) 轴向载荷 —— 力作用在零件的轴线上,大小相等,方向相反,包括轴向拉伸和轴向压缩(表 2.1(a)) 载荷。例如,受拉的绳索、受拉伸或压缩的杆件等等。

在轴向载荷作用下,应力沿横截面的分布是均匀的。零件上主应力与最大切应力的关系为

$$\frac{\text{主应力}(\sigma)}{\text{最大切应力}(\tau)} = 2$$

(2) 弯曲载荷 —— 垂直于零件轴线的载荷(有时还包括力偶),它使零件产生弯曲变形。例如,齿轮轮齿的根部、汽车的钢板弹簧等,工作中承受弯曲载荷(表 2.1(b))。

表 2.1 载荷基本类型

应力分布情况		载荷类型
(a)		轴向载荷
(b)		弯曲载荷
(c)		扭转载荷
(d)		剪切载荷
(e)		接触载荷