

机械产品失效分析丛书

JIXIECHANPIN
SHIXIAOFENXI

● 基础——I

机械产品失效分析 与质量管理

● 中国机械工程学会材料学会主编

● 机械工业出版社



机械产品失效分析丛书

(基础-1)

机械产品失效分析 与质量管理

中国机械工程学会材料学会 主编

庹 鹏、栗 滋、吴廉亿 编著



机械工业出版社

加强质量管理,生产出价格低廉、质量优良并具有竞争能力的机械产品是企业成败的关键。但是,许多企业的质量管理活动没有收到预期的效果,重要原因之一就在于对质量管理与失效分析的关系缺少应有的认识,为此,本书通过事例系统地介绍失效分析的意义、目的、内容、分析方法、分析程序以及顺利开展失效分析的条件;介绍失效分析与质量管理和可靠性工程的关系;介绍失效分析在国内外的组织形式。本书可供经营管理、质量管理人员,机械产品的设计、生产、试验、维修、使用人员;专职和兼职失效分析人员及大专院校有关专业的师生参考。

机械产品失效分析丛书

(基础—1)

机械产品失效分析与质量管理

中国机械工程学会材料学会 主编

虞 鹏、栗 滋、吴廉亿 编著

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

通县曙光印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850×1168 1/32·印张 $4\frac{7}{8}$ ·字数124千字

1986年4月北京第一版·1986年4月北京第一次印刷

印数0,001—6,120 定价1.50元

统一书号:15033·6501

前 言

机械产品失效分析是一门新的跨学科的综合性的技术，在一些国家中已将它作为一门新的独立学科加以研究和发展。这是因为尽管人们所掌握的机械设计、材料、工艺、管理等的知识不断地丰富与深化，所运用的技术手段不断地更新与完善，但机械产品的失效事故仍经常发生，一些重大的失效事件往往会导致生命和财产的巨大损失。所以必须系统地研究机件的失效类型、鉴别失效类型的技术、预测及监控失效的方法，改进与预防失效的措施等。这方面的知识不仅对专业失效分析工作者是不可缺少的，而且对于设计工程师、材料和工艺工程师以及生产管理人员，也是十分必要的。只有对产品一切可能的失效形式，其发生的条件、控制与预防等有深刻的理解，才可望在创造优质产品方面获得成功。

为了在我国开展失效分析工作，中国机械工程学会委托材料学会于1980年在北京召开了第一次全国机械产品失效分析学术会议。随后，中国机械工程学会材料学会组织过多次全国性的失效分析学术会议。为了广泛开展失效分析工作，普及失效分析的基本知识，提高失效分析的技术水平，扩大失效分析队伍，进一步促进失效分析工作在机械工业中的深入发展，使失效分析工作在国民经济的发展中发挥更大的作用，材料学会决定组织编写这套《机械产品失效分析》丛书，并责成材料学会编辑出版委员会负责组织丛书的编写工作。

丛书共分三大部分：第一部分为失效分析的基础知识，第二部分为常用机械零件的失效分析，第三部分为工艺失效分析。

ABA35/06

丛书编写的特点是讲求实用性，强调综合分析，引导读者如何正确地进行失效分析工作。因此用较多的篇幅介绍近期的应用实例，反应我国失效分析的技术水平，主要成果和经验，同时适当引入国外先进经验以资借鉴。

在丛书编写过程中，中国机械工程学会秘书长许绍高、中国机械工程学会出版编辑委员会主任陈元直给予了极大的关注和指导。在此对参加丛书编写人员所在单位的领导对本丛书编写所给予的大力支持表示感谢。

这套丛书是供从事机械产品的设计、制造、使用、维修具有中专以上程度的工程技术人员及技术管理人员使用，也可供科研人员和大专院校师生参考，并可作为组织失效分析训练班的教材使用。

由于编著者水平有限，缺点错误之处在所难免，望各界读者批评指正，以便进一步修改补充。

中国机械工程学会材料学会

1985

中国机械工程学会材料学会

机械产品失效分析丛书编委会成员

主任委员：王仁智

副主任委员：钟群鹏

委员(按姓氏笔划序)

王仁智 方婉莹 刘民治 陈玉民 陈南平 张绪江
赵 坚 钟群鹏 唐汝钧 涂铭旌 虞 鹏 栗 滋
顾问：周惠久 张协和 陶正跃

目 录

第一章 概论.....	(1)
第一节 机械产品的失效与失效分析.....	(1)
第二节 失效分析的意义.....	(7)
一 失效分析是促进科学技术发展的重要动力.....	(7)
二 失效分析是提高产品质量的重要手段.....	(9)
三 失效分析能带来巨大的经济效益.....	(12)
第二章 失效分析的内容.....	(14)
第一节 失效和失效分析的分类.....	(14)
一 失效的分类.....	(14)
二 失效分析的分类.....	(18)
三 失效分析与废品分析.....	(25)
第二节 失效模式概述.....	(26)
第三节 失效模式分析与统计分析.....	(29)
第四节 失效分析的程序.....	(31)
第五节 失效分析中应注意的几个问题.....	(40)
第六节 各种失效模式的特征及其判断.....	(43)
一 力和(或)温度引起的弹性变形失效.....	(43)
二 屈服失效.....	(45)
三 塑性断裂失效.....	(48)
四 脆性断裂失效.....	(51)
五 疲劳断裂失效.....	(53)
六 腐蚀失效.....	(59)
七 磨损失效.....	(65)
八 蠕变失效.....	(69)

九 其他失效模式简介	(72)
第三章 失效分析所需的条件	(75)
第一节 企业领导者的重视	(75)
第二节 失效分析的人材培养	(77)
一 失效分析工程师应具有素质	(77)
二 失效分析的组织领导人员	(80)
三 其他的失效分析人员	(81)
四 失效分析人员的学习	(82)
第三节 失效分析所需的仪器设备	(86)
一 仪器设备概述	(86)
二 几种常用的仪器	(90)
第四章 机械产品失效分析与质量管理及可靠性工程的关系	(105)
第一节 失效分析是质量管理的重要环节	(105)
一 质量与失效	(105)
二 质量管理与失效分析	(111)
第二节 失效分析是可靠性工程的技术基础	(115)
一 可靠性与失效率	(115)
二 可靠性工程与失效分析	(120)
第三节 国外失效分析的组织形式	(125)
一 日本企业中的失效分析组织形式	(127)
二 苏联企业中的失效分析组织形式	(131)
三 德意志联邦共和国阿尔安兹技术中心(AZT)	(132)
四 两种失效分析组织形式的比较	(134)
五 为提高产品质量进行失效分析的组织形式	(136)
第四节 我国的失效分析组织形式	(138)
一 各部门失效分析的组织形式	(138)
二 国家对失效分析工作的管理	(143)
参考文献	(144)

第一章 概 论

第一节 机械产品的失效与失效分析

随着科学技术的飞速发展,机械产品的品种、数量不断增加,各种产品尽管千差万别,却都有一个共同的属性——具有某种规定的功能。例如,汽车的功能是载重和运输;机床的功能是制造零件;钟表的功能则是计时;……。衡量某产品的优劣,是根据它能否很好地实现规定的功能。由于种种原因,机械产品失去其原有功能的现象时有发生,按照国际通用的定义,“产品丧失其规定功能的现象称为失效”^①。机械产品究竟在何时,以何种方式发生失效,这是随机事件,人们无法完全预料。

根据产品丧失功能的程度,产品的失效存在各种不同情况。例如,汽车因发动机连杆断裂而不能启动,这种完全失去原有功能的现象毫无疑问是失效;但有时机械产品只是局部的失去功能,或性能劣化,如车床主轴因机件磨损而使其跳动量增大,当超过某一规定数值时,虽然车床并未完全失去切削功能,但却失去其应有的加工精度,对此也应认为该车床已经失效;除此以外,有时产品的整体功能并无任何变化,但其中某个部件或零件已部

① 与失效有关的几个技术术语的概念

① 故障 虽然故障与失效两词的含意有某些差别,但在实际中往往混用,本丛书统一用“失效”一词。

② 事故 事故与失效有时紧密相关,但却又是不同的两个概念。事故强调后果,即造成的损失和危害;而失效强调的是机械产品本身的功能状态。例如,汽车制动器失灵是失效,由此而造成的交通事故则属事故。

③ 不合格品 不合格品是指经检验不符合技术规范、标准或图纸要求的零件或产品。漏检的不合格品装到产品上可能导致产品的失效。不合格品与失效件在分析方法和处理原则上有很多共同之处。所以广义的失效应包括不合格品。

分或全部失去功能，此时虽然在一般情况下机器还能正常工作，但在某些特殊情况下就可能导致重大事故，这种使机器失去安全工作能力的情况也属于失效，例如锅炉的安全阀和火车的紧急制动器失灵等。

综上所述，机械产品的失效可归纳为以下三种情况：

1. 完全不能工作者；
2. 性能劣化，超过规定的失效判据者；
3. 失去安全工作能力者。

机械产品的失效是经常发生的，某些失效还往往带来灾难性的破坏，给生命财产造成巨大的损失，这在国内外工业发展史上是屡见不鲜的。例如：

1944年10月20日，美国东俄亥俄州煤气公司液化天然气贮藏基地，一台直径21.3m，高12.8m的圆筒形贮罐由于在1/3至1/2的高度处破裂而喷出气体和液体，接着爆炸起火。20min后，一台内径为17.4m的球罐因受热倒塌而爆炸。由此造成128人死亡，损失达680万美元的严重事件⁽⁴⁾。

1979年9月7日，我国某电化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9.2m，容积400m³的球形液化气贮罐突然爆裂，从长13.5m、宽0.75m的裂缝喷出液化石油气。因遇明火而爆炸燃烧，引起附近三个400m³的球形贮罐和一个50m³的卧式贮罐以及25m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19h，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，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人死亡的重大事故。

1982年3月12日，一列货车在运行中由于车轮发生崩裂而引起列车颠覆。

1979年5月30日，某水电厂2号机组在运转过程中突然发生剧烈震动和声响，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，因停机三年少发电1.2亿度。

1976年3月10日，北海油田一座浮动钻井平台在风速150km/h的情况下，由于发动机失效造成6人死亡，失效总损失达7000多万元。

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。

1984年12月3日凌晨，在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20万受到毒气的侵害，其中两万人需要住院治疗。有关方面要求美国公司赔偿150亿美元的损失费。

从以上事例可以看到，失效不仅会给人们带来直接巨大的经济损失，同时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：

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，建造一个贮罐又需80万元，这样停产一个月就遭到900万元的损失。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，而停产造成的间接经济损失却高达400余万元。

据我国有关部门统计，1973~1975年期间运行的209台汽轮

发电机中，仅叶片断裂失效就有 350 起，按每次增加检修期10天计算，每年要少发电10亿度。

小型合成氨厂所用合成氨冷凝器，每台售价约7000元，但爆炸引起的设备破坏及停产而造成的经济损失往往可达数万甚至数十万元。

必须指出，由于机械产品失效引起本企业及与其有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。

对于那些能给生命财产带来巨大损失的重大失效事件，往往能引起人们对它的重视，但是对于那些量大面广的机械产品中经常出现的失效，并由此导致某些不准修复的小毛病，人们往往习以为常，不能给以足够的重视。孰不知这些频繁出现的小失效，同样会给国民经济造成很大的损失。如我国东北冬季时间长达5~6个月，挖掘机的最低温度 -35°C ~ -50°C 下工作时，其斗柄、齿轮、齿条、回转主轴、方轴、连接筒等重要零件，冻土挖掘机的驱动轮轴，推土机的转向离合器等，经常发生断裂失效。另外，井下矿车的插销，汽车和拖拉机的板簧，矿用自翻车的摇枕车架、挂钩销子等，这类零件的断裂失效也是屡见不鲜的。由于这类零件的失效，会使生产经常停顿，生产进度和节奏遭到破坏，机器利用效率降低。为此，各部门均需建立庞大的机修车间以应付失效件的修理。这种类型的失效，虽然一次所造成的损失不大，但是由于其频度高、数量大，因而总的损失却相当可观。如我国某露天矿矿车，仅挂钩和挂钩销的失效一项，每年的损失总额竟高达40~50万元。

又如苏联科学院亚库茨克分院对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由于汽车车架、悬挂部件等的脆断，使运输能力减少约1900万 t·km，相当于1万辆汽车的运输量，损失达200万卢布。(9)

由于机械产品的失效常给人们带来极大的威胁，迫使人们与

失效进行顽强的斗争。从某种意义上讲,机械产品从低级向高级的演变过程就是与失效不断做斗争,并从中取得经验教训的过程。

任何产品失效都是由于产品中的零件或部件的强度(包括机械强度、抗化学腐蚀强度等)因素与应力(包括机械应力、残余应力等)因素和环境(介质和温度等)因素不相适应所致。失效总是首先从产品中,最不适应的环节开始,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。通过对失效残骸的分析,明确失效模式,找出失效原因,采取改进和预防措施,防止同类失效的再发生,从而使产品的质量得以提高,或由此获得改型的新品种,这就是失效分析的目的。失效分析是与失效作斗争的有效方法。当然无论从技术的观点,还是从经济的观点,都没有必要要求产品“永不失效”,失效分析的目的不在于创出具有“无限使用寿命”的产品,而是确保机械产品在给定的寿命期限内,不发生早期失效,或者把产品的失效限制在预先规定的范围之内。

总之失效分析就是分析引起机械产品失效的原因,并提出对策,以防止其再发生的技术活动和管理活动。失效分析应包括以下几方面:

表1-1 失效原因层次表

失 效 现 象	失 效 原 因
汽车不能开动 发动机损坏 曲轴断裂 曲轴疲劳断裂	发动机损坏 曲轴断裂 疲劳 硬度不合格 热处理温度偏低 测温仪表故障 管理混乱

1. 分析引起产品失效的原因是失效分析的核心。分析者面临的是丧失功能的机械产品,它可能是一堆破碎的机器残骸,或

许只是一个断裂的零件。这些失效产品的残骸就是赖以进行失效分析的客观依据,因为有关失效过程的信息,“记录”在残骸上。只要人们掌握科学的方法,使用必要的仪器设备,对失效现场及生产工艺进行多方面的调查研究,并运用自己的知识和经验,就可能迅速而准确地找到产品失效的原因,并采取有效的措施。

从表 1-1 可以看出,失效原因是相对于某一具体对象的失效现象而存在的。任何一个系统,均由若干个子系统所组成,而它本身又是更大系统的组成部分。由于系统是有层次的,因此失效原因也具有多层次的性质。

譬如将发动机视为一个系统,而发动机本身又是汽车这个更大系统的组成部分,对于一辆失效的汽车,发动机损坏、曲轴断裂、疲劳等其中的每一项都是上一个层次的失效原因,同时又是下一个层次的失效现象。此外,失效原因本身也具有不同的层次,如硬度不合格、热处理温度偏低、测温仪表故障、管理混乱等,后一个层次的原因是更本质的原因。各层次失效原因的分析均属失效分析的范畴,失效分析需要进行到那一层次的深度,则要根据实际的需要和可能来确定。

2. 失效分析的目的在于提出对策,以防止同类失效事件重演。所谓对策是指在工程上可能采取并确有效果的改进和补救措施。失效分析工作者一方面必须十分重视满足工程的需要,另一方面在实施改革时还必须照顾到经济效益。

3. 失效分析不仅是技术活动,也是管理活动。失效分析是技术活动这是人所共知的,也是本丛书所要阐述的基本内容;但是还必须强调它也是管理活动。一方面引起失效的原因可能来自研究、设计、生产、使用、维修等技术环节,但也可能出自管理方面的不当。据日本质量管理的统计资料报导,由于管理不当造成的失效约占总失效数的70%。另一方面,一个复杂而重大的失效分析往往需要组织各路专家协同工作才能完成,以便尽快寻求导致失效的原因,并采取工程上可行的有效措施。只有管理活动

与技术活动紧密结合，才能顺利完成任务，这时组织管理工作往往起着关键的作用。

第二节 失效分析的意义

一、失效分析是促进科学技术发展的重要动力

自蒸汽机为生产提供了动力来源之后，各种机器如雨后春笋般涌现出来。随着现代化工业的出现，生产力得到飞速发展，失效分析起着重要的推动作用。

十九世纪中叶，铁路运输这一新型的交通工具给人们的生产和生活带来了巨大的变化。但是不断出现的车轴断裂事件，曾严重危害着人们的生命安全，以致有的铁路局长和工程师因此被判成杀人罪。当时所掌握的计算方法和材料科学知识还不能理解车轴断裂的原因。然而科学家和工程师们对此给予了极大的关注，通过对大量断轴的失效分析和试验研究工作，认识到：一个金属杆在交变应力的作用下，即使该应力远低于金属的抗拉强度，经过一定的循环积累之后也会发生断裂。1839年彭西列特(J.V. Poncelet)首先使用了“疲劳”(Fatigue)这个词来说明其断裂的性质⁽³⁾。此后又经过物理学家、冶金学家、机械工程师反复、深入、系统的研究，使疲劳断裂成为金属材料强度学中的一个重要领域。现代的科学和技术关于金属材料疲劳断裂的机理有了较完整的理论，研制出各种抗疲劳性能良好的金属材料品种，发展了各种改善零件疲劳性能的工艺措施和设计规范，积累了大量数据资料。失效分析工作大大促进了这些工作的开展。使得人们有可能设计和生产出各种现代的安全可靠的高速运载工具^(47, 50, 51)。

第二次世界大战中，美国建造了5000艘全焊接“自由轮”。在使用中发生了1000多次脆性破裂事故，其中有328艘“自由轮”完全报废。除“自由轮”外，压力容器、桥梁、贮罐、管道等也多次发生脆性断裂事件^(5~8, 12~15, 17)。这些事件引起了政府部门和科学家、工程师的极大重视，美国有关部门组织全国力量进行

失效分析和研究。通过对船用钢板的失效分析奠定了钢的低温脆断的基本理论。它告诉我们，低碳钢和低合金钢在室温下尽管有良好的韧性，但在低于室温的某一温度下就会变脆。使钢材变脆的这个温度称做脆性转变温度。这个认识对本世纪初发生的铁桥塌断的原因（如比利时的Hasslt铁桥和Herethls铁桥、德国Rudersdorf铁桥和加拿大Duplessis铁桥），给予了科学的解释。根据低温脆性理论人们研制了在低温下具有良好性能的各种材料，制定了各种设计规范和试验规范。现在人们已能制造出在接近绝对零度的超低温下工作的各种机械设备。

空战使人们认识到飞机速度是取得制空权的重要因素。随着喷气技术的发展，飞机设计师和工程师们致力于超音速飞机的研制。但是人们起初不理解飞机何以在接近音速时机身会发生剧烈震动，甚至发生解体，这就是有名的“音障”问题。经过对飞机解体的失效分析之后，认识到剧烈的震动，是由于产生出的巨大冲击波所致。克服了“音障”之后，不仅航空技术发生了飞跃，也有力地促进了超音速空气动力学的发展。

本世纪四十年代，一个重要人物因一架英国皇家空军的飞机失事而死亡。事后，我国著名冶金学家李薰等人经过一年多的调查研究，揭开了在这之前无人知晓的奥秘，第一个向学术界提出了金属的氢脆失效问题⁽¹⁸⁾。

五十年代美国先后发生了数起电站设备的飞裂事故，引起了人们的震惊。只是在对这些事故进行了大量的失效分析之后，才对钢中氢及夹杂的有害作用有了充分的认识。为了大幅度地降低钢中氢含量及夹杂数量，发展了碱性电炉和真空冶炼技术，从而导致冶炼技术发展上的飞跃。

宇航和导弹事业的飞速发展，要求进一步减轻结构重量，迫使在结构中使用高强度和超高强度材料，但是接踵而来的是大量的低应力脆断事故的发生。“北极星”导弹所用固体发动机壳体的爆炸就是其中的典型事例。正是对于这些脆断事故的研究，促

使了著名的边缘学科——断裂力学的建立^[10,11,16]。

现代的大型化工设备大量的不锈钢件的断裂失效，又引起各方面的关注。失效分析表明，具有一定成分和组织状态的金属合金，在一定的腐蚀介质和拉应力的共同作用下，历经一定的时间就会产生脆性断裂。这种现象称做应力腐蚀失效。显然，人们对金属合金出现的应力腐蚀断裂机理的认识，也是对结构件做失效分析的结果^[53,55]。

此外，摩擦学、腐蚀学、材料强度学、冶金学、表面科学、电子断口学等学科的创立和发展无不与机械产品的失效和失效分析有密切的关系^[44,45,52,54]。

上述事实充分表明，人们在与失效的斗争中发展了科学技术、开拓了新的科学技术领域、提高了产品质量并开发了新产品。失效虽给人类带来危害和损失，但通过人们的努力加倍地索回了补偿。任何机械产品的失效，首先是人们对客观事物的规律认识不够(或没有认识)的反映，人们通过失效分析去发现和认识这些新的问题。可以把积累的丰富知识运用到新发展的产品中去，但新产品又会在研制和服役过程中出现新的失效形式。这就迫使人们去再认识和再求得解决。失效、认识(失效分析)、提高、再失效、再认识、再提高，由此使科学技术不断地发展，这就是失效分析在科学技术发展史上所起到的作用^[46,48,49,56]。

二、失效分析是提高产品质量的重要手段

任何一次失效都可视为机械产品在实际使用条件下所做的科学试验结果。众所周知，试验室中的产品试验，如可靠性试验或检验性试验，只能针对预先设定的某一项或多项因素的影响规律，获得明确的或定量的结论。但是产品的真实工作条件却更为复杂和多变(如载荷谱、温度场、环境条件以及其它的人为因素等)。试验室内再好的模拟试验，也不可能做到与产品的服役条件完全相同。此外，机械产品的内在质量，也会因设计上的公差、工艺参数的波动、材质成分的偏差以及装配的差异互有差