

机械失效的 实用分析

JIXIE SHIXIAO DE SHIYONG FENXI

张栋 等 编著



机械失效的实用分析

张 栋 钟培道 陶春虎 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

DW39/17
图书在版编目(CIP)数据

机械失效的实用分析/张栋等编著. —北京:国防工业出版社, 1997. 2

ISBN 7-118-01630-6

I. 机… II. 张… III. 失效分析 IV. TB114.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 07935 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 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经营

*

开本 850×1168 1/32 印张 10 3/4 281 千字

1997 年 2 月第 1 版 1997 年 2 月北京第 1 次印刷

印数: 1—3 000 册 定价: 14.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

序 言

在人类历史的发展长河中,人们对产品失效的认识可以追溯到远古时代。可以说,人类的生产实践就是人们不断与产品失效作斗争的历史,而失效分析也长期作为零星、分散、宏观的经验世代相传。产品的失效真正给人类带来严重的危害,则可以认为是 100 多年前的工业革命开始的。当蒸汽动力和大机器生产给人类社会带来巨大进步的同时,也给人类带来了前所未闻的灾难性事故。

1862 年,英国建立了世界上第一个蒸汽锅炉监察局,把失效分析作为法律仲裁事故和提高产品质量的技术手段。随后,在工业化国家中,对失效产品进行分析的各种机构相继出现,然而失效分析作为学科分支则是近半个世纪的事情。

材料科学的兴起,先进测试技术的应用以及近代物理、化学等的全面发展,使得人们能够从微观方面阐明产品失效的本质、规律和原因。在此基础上,失效分析走上系统、综合、理论化的新阶段。近半个世纪所积累的失效分析知识与技术是千百倍于人类前期有关知识的总和。但是这种知识并未就此终结,它必然随着人类生产实践和科技的进步而发展。虽然由于科技的发展,产品在设计、生产、使用与维修上的技术改进,使得产品的可靠性日益提高。然而,失效事件并不会最终消失。而且,产品的自动化程度愈高,技术愈密集,一旦出现失效,造成的损失就愈严重。因此失效分析将随着科技的高速发展显得更为重要。同时,科技的飞速发展也必将促进和推动失效分析学科的进步。

作为失效分析方面的专著,本书全面系统地介绍了机械失效分析的工程概念及实用分析技术,并阐述失效分析的科学思路 and 程序。该书将失效分析的理论 and 实践紧密结合,结构严谨、概念简明准确、分析技术实用有效、分析思路灵活科学,同时作者还略去

了详尽的理论阐述和公式推导,避免了与已出版的同类著作在内容上的大量重复,具有很强的理论与实用价值。

本书的出版将对我国的失效分析与预防研究工作的发展起进一步的推动作用,愿我们在正确认识失效并积极预防和纠正失效的过程中,将产品的质量控制与科学技术工作不断推向前进!

中国科学院院士 教授

颜鸣皋

前 言

机械产品,尤其是大型运载装备的失效,不仅造成巨大的经济损失与人员伤亡,还会对社会的繁荣和稳定产生重大的影响,因此对机械产品失效进行研究,从而达到预测和预防产品失效的目的,已成为广大工程技术人员关注的重大课题。为此,我们编著了这本《机械失效的实用分析》,旨在介绍机械失效分析的工程概念及实用分析技术,并阐述失效分析的科学思路和程序。该书在由空军装备技术部主办,来自空军装备技术部、中国航空工业总公司、中国航天工业总公司等部门 50 多名失效分析人员参加的《飞行事故调查与失效分析》培训班上进行过试讲,并征求了中国航空工业总公司第二届失效分析人员资格鉴定委员会委员们的意见。大家对本书的内容进行了充分的肯定,并提出一些宝贵的意见。在此基础上,我们对部分内容进行了修改与充实,以适应从事失效分析的科技人员、与失效分析相关专业的高年级学生及硕士、博士研究生以及从事机械设计、材料研究、断裂力学、可靠性分析、机械维修等方面的教师和工程科技人员的需要。该书也将作为中国航空工业总公司和空军装备技术部失效分析人员的培训教材。

全书共分为八章,第一、六、八章由空军第一研究所张栋高工编写,第三章由北京航空材料研究所钟培道高工编写,第四、五章由北京航空材料研究所陶春虎博士编写,第七章由北京航空材料研究所许风和高工和陶春虎博士编写,第二章由张栋、钟培道和陶春虎合写。全书由北京航空材料研究所王峙南研究员审定。

本书的编著与出版得到了中国航空工业总公司材料、热工艺及理化检测发展中心、空军飞行事故和失效分析中心以及中国航空工业总公司失效分析中心的指导与大力支持,在此表示深切的谢意。同时衷心感谢中科院院士颜鸣皋教授为本书作序,并感谢国

防工业出版社以及为本书出版提供帮助的同志们。

由于失效分析是一项科学性、实践性、时间性及社会性均很强的工作,所涉及的领域极其广泛,受工作和认识的局限,本书难免有不妥之处,希望读者提出宝贵意见。

编 者

内 容 简 介

本书全面系统介绍了机械失效分析的工程概念及实用分析技术,并阐述失效分析的科学思路和程序。

全书共分八章,第一章第二章分别为概论和失效分析技术,第三章至第七章为断裂失效分析、环境介质作用下的失效分析、磨损失效分析、痕迹分析、非金属构件的失效分析,第八章介绍失效分析的思路和程序。

本书将失效分析的理论和实践紧密结合,概念简明准确,分析技术实用有效,具有很强的理论与实用价值。

本书可作为从事失效分析的科技人员,与失效分析相关专业的大学生、研究生,以及从事机械设计、修理、断裂力学、材料、可靠性分析等方面研究的教师和工程技术人员参考。

目 录

第一章 概论	1
1.1 前言	1
1.2 失效和失效分析	2
1.3 失效分析的主要工作内容	5
1.4 失效分析在工程中的作用和地位	6
1.5 机械失效的分类.....	10
1.6 失效分析的分类.....	13
1.7 失效分析工作者的主要任务.....	13
1.8 对失效分析人员的要求.....	14
第二章 失效分析技术	15
2.1 感官检查诊断技术.....	15
2.2 痕迹分析技术.....	21
2.3 断口和裂纹分析技术.....	24
2.4 化学成分分析技术.....	41
2.5 性能测试技术.....	46
2.6 无损检验技术.....	48
2.7 宏观残余应力测试.....	50
2.8 选用失效分析检测技术的原则.....	53
参考文献	58
第三章 断裂失效分析	59
3.1 金属断裂的基本概念.....	59
3.2 金属断裂的主要类型与机理.....	77
3.3 疲劳断裂失效分析	111
3.4 沿晶断裂失效分析	138
3.5 金属的裂纹分析	141

3.6 断裂性质(模式)、起源及扩展路径的分析判别·····	152
3.7 断裂失效原因的分析·····	156
参考文献·····	161
第四章 环境介质作用下的失效分析·····	162
4.1 腐蚀的分类及其破坏形式·····	162
4.2 金属表面腐蚀损伤分析与判断·····	164
4.3 应力腐蚀断裂的分析与判断·····	174
4.4 氢致破断失效的分析和判断·····	182
4.5 液态金属致脆·····	191
参考文献·····	195
第五章 磨损失效分析·····	196
5.1 粘着磨损·····	197
5.2 磨粒磨损·····	201
5.3 疲劳磨损·····	204
5.4 腐蚀磨损·····	207
5.5 磨损失效分析方法·····	214
参考文献·····	216
第六章 痕迹分析·····	217
6.1 机械的表面特征·····	218
6.2 机械失效中的痕迹分类·····	221
6.3 机械接触痕迹·····	226
6.4 电接触损伤·····	240
6.5 热损伤痕迹·····	250
6.6 轮胎痕迹·····	253
6.7 爆炸事故的痕迹鉴定·····	257
参考文献·····	264
第七章 非金属构件的失效分析·····	265
7.1 非金属材料的基本特性·····	265
7.2 非金属构件断口的成象显示技术·····	267
7.3 非金属构件失效的基本类型·····	269

7.4	直接加载下的瞬时断裂	270
7.5	疲劳断裂与蠕变断裂	275
7.6	环境应力开裂	278
7.7	磨损磨耗	279
7.8	非金属断口形貌	280
7.9	高分子材料及构件的老化	285
	参考文献	290
第八章	失效分析思路 and 程序	291
8.1	什么是失效分析思路	291
8.2	失效分析思路的作用和意义	292
8.3	机械失效过程及其原因的一些特点	293
8.4	思考途径的方向问题——指导思想	296
8.5	几种典型的失效分析思路	299
8.6	几种常用的推理思考方法	304
8.7	失效分析的一般程序(基本程序)和要点	315
8.8	机械事故检查中肇事失效件的判断方法	324
	参考文献	332

第一章 概 论

1.1 前言

公元前 2025 年,巴比伦国王汉莫拉比汇编了一部法律大典,对制造有缺陷产品的工匠严厉治罪。随着生产的发展,商品往往供不应求,罗马法律便肯定了商品出门概不退换的总原则,于是买主只好自己当心。但工业革命的到来打破了传统观念,从 19 世纪中叶开始,法律又开始制裁产品事故的责任者。

正如人有生老病死一样,产品也有失效的时候。工业的发展、技术的进步,正是人们不断与产品失效作斗争的历史,这在航空和航天事业的发展史中表现尤为突出。即便航天飞机这么先进的运载工具,如美国的价值 12 亿美元的“挑战者”号航天飞机,在 1986 年 1 月 28 日第 11 次升空时突然爆炸,使七名宇航员遇难,这一惨痛的悲剧再次告诫人们,忽视产品失效问题,将带来灾难性的恶果。

近十年来,工程界越来越关注产品失效问题,可以毫不夸张地说,几乎每一个工程技术人员,都可能面临产品失效的严峻考验。“质量第一,永远第一”将成为工程界永恒的事业。

我国民法通则第 22 条规定:“因产品质量不合格造成他人财产、人身损害的,产品制造者、销售者应当依法承担民事责任。”

1986 年 4 月 5 日,国务院颁发了《工业产品质量责任条例》,规定:“限时使用的产品应注明失效时间”。“产品的主要零部件、元器件失效,不能按期修复的应负责更换合格品”。该条例首次出现于我国法律文件有着重大的意义。

1.2 失效和失效分析

产品失效的概念由来已久,但各国对产品失效下定义却是本世纪中叶的事。

1.2.1 失效的定义

国家标准 GB3187—82 中定义:

“失效(故障)——产品丧失规定的功能。对可修复产品通常也称故障。”

1. 产品

按经济学的定义是:企业进行生产活动所创造的、符合于原定生产目的和用途的直接生产成果,物质产品按其完成程度可分为成品、半成品和在制品。它包括任何元件、器件、设备或系统,可以表示产品的总体、样品等。总之其确切含义在使用这一词时应加以说明。但废品不能算产品。在可靠性和失效分析领域内,如不加说明,产品一般指成品。

2. 可修复产品

当产品丧失规定功能时,按规定的程序和方法进行维修后,可恢复规定功能的产品。即故障后可以修复的产品。

一个产品是否可以修复,是一个历史的相对的概念,受多方面因素的制约。一看技术上是否可能;二看经济上是否值得;三看时间上是否允许。例如电阻、电容、电子管、日光灯管、铆钉、垫片等,一般归于不可修复产品;而起落架、油泵、机床等,只要符合规定的技术条件,一般属于可修复产品,但是当超出规定的修理深度时,又变成不可修复产品。拿机翼大梁螺栓孔裂纹来讲,当裂纹太深时,就变成不可修复产品。因此,不妨说产品处于“可修状态”或“不可修状态”。

对一个复杂的设备或系统来讲,其中某些零件失效后是不可修复的(如轮胎爆破),但对系统来说(如飞机)却是可修复的,比如

把这些失效的零件更换即可。

3. 功能

功能是指人或物所必须完成的事项。对人而言,就是职能,要求他所起的作用。对物,是指它的功用、用途。凡回答“这是干什么用的?”或“这是干什么所必须的”问题的答案就是功能。但是不同产品的功能是五花八门的。

4. 规定的功能

规定的功能是指国家有关法规、质量标准以及合同规定的对产品适用、安全和其它特性的要求。它既是产品质量的核心,又是产品是否失效的判据。因此,产品是否失效,主要是在使用(包括检验)过程中考察。一般来说,规定的功能与规定的条件相对应。

5. 丧失

一般理解为产品原有规定的功能在商品流通或使用过程中失去了(或消失了),也就是说,产品的规定功能有一个从有到无的过程。

丧失,可能是暂时的、间断的或永久性的;可能是部分的、全部的;丧失可能快也可能慢;而丧失规定的功能,经过修理后有可能恢复,也可能无法恢复。不论上述哪种情况,都在丧失规定功能之列,即均处于失效状态。

也可能有这样的情况,产品一开始就不具备规定的功能。因此,这里建议采用“不具备”来代替“丧失”。

从上面的讨论中可以看出,失效强调的是产品所处的功能状态,失效产品从某种意义上讲也是潜在的不合格产品(虽然出厂时已贴上了合格的标签)。而故障强调的是产品失效以后可以修复(但不是自然恢复),或者说,故障是产品处于可修复的失效状态。

失效后修复的产品变成了修理品,它也是一种产品,一般来说,它应当具备原产品所规定的功能,但根据具体情况,在原来所规定的内容和条件方面都可能有些变化,总之,也存在一个修理品的产品质量问题。

航空产品严重失效时会引起事故,但多数飞行事故并不是机

械失效造成的。据 1977~1986 年空军严重飞行事故统计结果来看(见表 1-1),大多是操纵不当引起的事故(占 56.1%),但机械失效造成的事故决不可低估(占 20.2%)。

表 1-1 1977~1986 年空军严重飞行事故统计表

事故原因	操纵	制造	维护	翻修	指挥等	不明
百分比/%	56.1	12.8	4.7	2.7	18.1	5.6

1.2.2 失效分析的定义

失效分析——判断失效产品的失效模式,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。

我们知道,失效与可靠是相对立而又紧密联系的一个矛盾体的两个方面,可靠相对失效而言,失效又意味着不可靠。因此,失效即不可靠。

可靠性是产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力。当用概率定量描述这种能力时,称为可靠度。

既然可靠相对失效而言,所以可靠性相对失效性而言,则可靠度(概率)相对失效度(概率)而言,并且有如下关系:

$$\text{可靠度 } R(t) + \text{失效度 } F(t) = 1$$

因此,失效度即不可靠度,而失效性即不可靠性。同样,可靠分析相对失效分析而言,可靠性(度)分析相对失效性(度)分析而言。通过上述对比可以看出,失效分析和失效性(度)分析不是一个概念。

失效分析是以逐个失效产品(或将要失效的产品)及其相关的失效过程为分析对象,并以查找某个失效产品的机理和原因为主要目标;而失效性(度)分析以某一种产品(或系统)群体为分析对象,以评估其失效的可能性或获得其失效概率为主要目标。因此,失效分析的思路和方法也就与失效性(度)分析的思路和方法不一样。

失效分析的对象是失效产品(或将要失效的产品)及其相关的失效过程,因此,它是一种全过程全方位的分析。由于航空产品的

多样化和复杂性,特别是加上人、机、环境的交互作用,而活动空间范围又那么大,因此航空产品的失效分析面临着艰巨的任务。失效分析吸收各学科之长,取其精华,综合分析,它采用一切可能利用的先进仪器、设备、技术来解决最复杂的失效问题。

1.3 失效分析的主要工作内容

失效分析的主要内容包括:

- ①调查(包括确认是否失效、取证、普查等);
- ②判断失效模式;
- ③查找失效原因(包括与产品失效相关的管理因素);
- ④探讨失效机理及其与失效模式的关系(过程的因果关系);
- ⑤失效后果(影响和危险性)分析;
- ⑥合理制定失效判据(必要时才进行);
- ⑦失效的数理统计分析(必要并有条件时才进行);
- ⑧模拟再现和失效预测(必要并有条件时才进行);
- ⑨明确产品失效责任(必要时才进行);
- ⑩提出防止再失效的对策(失效分析成果的反馈和响应),注意新的失效因子。

失效模式是指失效的外在宏观表现形式和过程规律。

失效机理是指失效的物理、化学变化本质和微观过程可以追溯到原子、分子尺度和结构的变化,但与此相对的是它迟早也要表现出一系列宏观(外在的)的性能、性质变化和联系。机械失效,乃是一种物质的运动,并表现为一定的形态,故而必然会和一定的客体物发生相互作用,这一作用的结果必然要引起原客体物结构和能量的变化,改变客体物的形态,产生一定的反映特征。这种反映特征,就是失效分析中信息源的最主要的物质基础。至于信息量的多少,是由客观事物本身决定的。

失效分析的信息,是能客观反映失效——这一机械的失效运动形式的起始、发展、变化和完成的全过程,以及导致这一失效运

动的内、外原因和条件等等,通过与失效事件有关的各种途径传出,经过失效分析人员运用各种必要的、可能的调查手段、检验手段、科学技术手段(借助科学仪器)等接收,产生回溯反馈,就能较完整地在认识上再现失效的全过程。失效事件中的信息量,是由每个具体的失效过程所决定的,而接收这种失效信息多少,则取决于失效分析人员的专业水平和失效分析科学技术水平。

1.4 失效分析在工程中的作用和地位

实际上失效伴随产品已有几千年的历史,刻在一根 8 尺高的闪绿岩石柱上的汉莫拉比法典就是证明。但是失效分析长期以来作为零星、分散、宏观的经验世代相传。18 世纪伟大的工业革命,在给人类带来科技进步的同时,也给人类带来一系列前所未闻的灾难性事故(如使用了蒸汽机,每年锅炉爆炸带来成千人的死亡),失效分析已成为时代的要求。

显微镜的发明,材料科学的兴起,以及近代物理、化学等的全面发展,失效分析开始进入微观世界。特别是本世纪中叶以来,微电子技术的异军突起(电子光学、断口学、痕迹学、表面科学、电子金相学等迅猛发展),产品失效的物理、化学机理,已从微观方面阐明失效的本质、规律和原因。在此基础上,失效分析走上系统、综合、理论化的新阶段。

失效分析作为一门新兴学科是从 60 年代兴起的,在国民经济和技术进步中发挥着日益重要的作用,已为世人所注目。

1.4.1 失效分析是全面质量管理中必不可少的重要环节

任何一次失效,都可以看成是产品在服役条件下所做的一次最真实、最可靠的科学试验的结果。通过失效分析,判断失效的模式,找出失效的原因和影响因素(相关因素),也就找到了薄弱环节所在,从而改进有关部门的工作,提高产品质量。因此,它是对设计、制造,也包括对维修工作在内的最终最有效的检验。