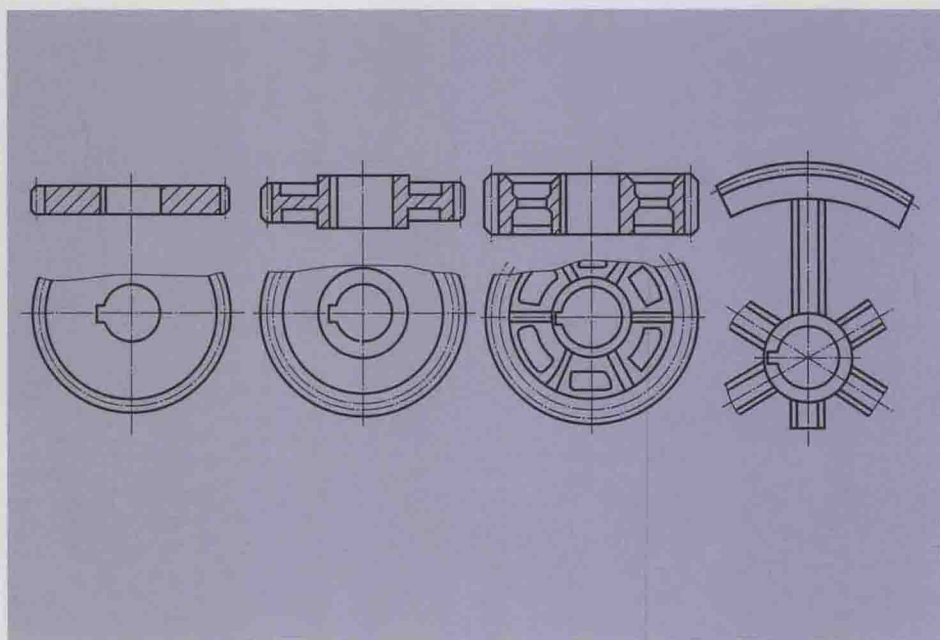


材料科学与工程学科系列教材

失效分析与选材

Failure Analysis and Selecting Materials



编 著 杨瑞成 杨 钊



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

材料科学与工程学科系列教材

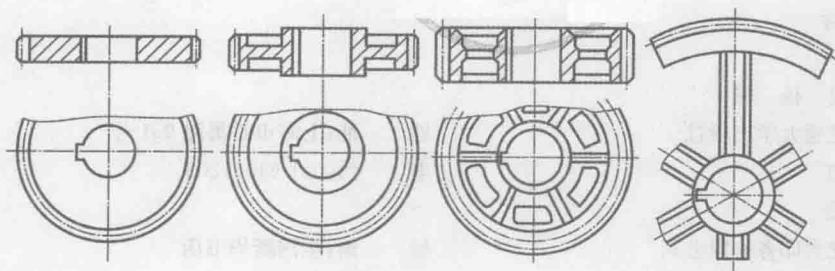
失效分析与选材

Failure Analysis and Selecting Materials

编 著 杨瑞成 杨 钊

参 编 边丽萍 李线绒

冯晓春 张江娜



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书由失效分析及其工程案例和选材基础、选材方法与工程应用两部分组成。主要内容为:失效与失效分析方法,工程零构件主要失效形式,有限元在失效分析中应用,失效分析的工程案例,以及工程设计与制造的选材基础,工程设计中常用选材方法,机械零构件的可靠性与选材,根据力学性能选材,几种工况下的选材及应用。本书将失效分析与选材用材相结合,以更好地体现工程应用性,有助于培养学生的工程意识和解决实际问题的能力。为配合理工院校高级应用型人才培养,本书强化典型案例及分析,各章节含应用实例 13 个以及失效分析的工程案例 16 个,有限元失效分析和零构件可靠性分析实例 7 个,选材用材实例 35 个。

本书适用于金属材料工程、材料类和机械类专业(包括基础班、卓越班)选修课的教材,也可供从事材料、机械设计及制造领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

失效分析与选材/杨瑞成,杨钊编著. —上海:上海交通大学出版社,2014

ISBN 978-7-313-12061-8

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 211158 号

失效分析与选材

编 著:杨瑞成 杨 钊

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:韩建民

印 制:上海交大印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:446 千字

版 次:2014 年 12 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-12061-8/TB

定 价:38.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:18.25

印 次:2014 年 12 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-54742979

前言

失效分析是使机械产品和工程零构件由不完善到完善的必由之路。通过对失效产品,尤其是早期失效的零部件或整机进行综合分析研究,查找原因,并反馈到工程设计—选材—制造工艺中去,不断提高产品质量、工作寿命,最终提高其经济性、综合效益和社会竞争力。失效分析在近代材料科学与工程的发展史上占有极为重要的地位。

近一二十年来,国外失效分析的著作很注重工程性以及案例分析,但由于知识体系、材料牌号等的差异,直接作为教材使用不尽合适。作为金属材料工程专业的专业课、材料类和机械类专业(包括基础班、卓越班)的选修课程,2000年以来国内新出的几本教材就失效分析的基础、原理和例子等都是可取的,但均限于失效分析本身,似乎尚未能将失效分析的内涵和作用充分地展示与发挥出来。

我们认为:作为材料类、机械类等的专业课程,失效分析应该与选材用材紧密相联,前者是后者的主要基础之一,后者也是前者的一个主要目的。这样两方面相结合,可以更好地体现工程性,有助于培养学生的工程意识和解决实际问题的能力。故而,本书主要编著者自十多年前已将“失效分析”课程改造成“失效分析与选材”课程,也已有了一定的教学积淀。近年来在国内的几次教学研讨会上,许多同行都对以上观点很为赞同,并关心何时出书。

本书的主要编著者曾有过多年工厂现场的工作经历,具有失效分析和选材用材工作的积累(部分工作也已纳入,如4.5.4中409L钢排气管弯曲开裂的失效分析;6.2.3中冷挤压冲头的失效分析及性能次序;9.3中12Cr1MoV高温长时效中成分、组织结构和性能的退化;9.4.1中低碳低合金钢的低温性能及加Nb的效果,以及第6章中选材方法的归纳总结,等等);曾应化学工业出版社约稿,编著了《工程设计中的材料选择与应用》(2004年),这本工程技术著作为本教材的编写奠定了比较充分的基础。

本书由失效分析及其工程案例(第1篇,共4章)和选材基础、选材方法与工程应用(第2篇,共5章)两部分组成。其中,第1、2、6、8章为基础内容(必讲),第4、5、9章为选讲(或学生选读)内容;第3、7章(有限元在失效分析中应用、机械零构件的可靠性与选材)为提高内容,是根据上海交通大学出版社责任编辑的提议以及适应现代科技的发展而增加的。以上有关章节的分类安排供参考,请使用本教材的同行老师们根据计划学时及各校情况等进行具体选择。此外,为配合理工科应用型人才的培养,本书强调案例教学,各章节含应用实例13个以及失效分析的工程案例16个,有限元失效分析和零构件可靠性分析实例7个,选材用材实例35个。显然,本书也可供从事材料、机械设计及制造等相关领域的工程技术人员参考。

本书是多校合作的结果,杨瑞成、杨钊为主要编著者;编写人员:边丽萍(第1章)、张江娜(第2章)、冯晓春(第4章)、李线绒(第5章)、杨钊(第3、7章)以及杨瑞成(第6、8、9章以及第4.5.4、4.5.5、4.5.6三小节)。全书由杨瑞成统稿。

基于上述宗旨,本书作为教材也是一种尝试,鉴于视角和水平的原因,文中存在的不足之处,敬请批评、指正!

本书得到“兰州理工大学规划教材建设基金”的资助,特此感谢。

谁言寸草心,报得三春晖。此书也寄托了著者(杨瑞成)别离交大母校30余年来的一丝感恩之心和回报之情。

编著者

2014年4月

目 录

第 1 篇 失效分析及其工程实例

第 1 章 失效与失效分析方法	3
1.1 失效的基本概念	3
1.2 失效原因概述与失效诊断	4
1.3 失效分析的思路与程序	8
1.4 失效分析常用实验技术	12
1.5 失效分析方法	20
1.6 失效分析工作的发展	27
1.7 失效分析与材料科学及工程选材	30
本章小结	33
思考题与习题	33
第 2 章 工程零构件主要失效形式	34
2.1 零构件失效形式概述	34
2.2 过量变形失效	36
2.3 断裂失效	40
2.4 磨损失效	47
2.5 环境作用引起的失效	50
2.6 零件加工缺陷与失效	55
2.7 零件热处理缺陷与失效	68
本章小结	72
思考题与习题	72
第 3 章 有限元分析在零部件失效分析中的应用	73
3.1 材料科学有限元分析的基础知识	73
3.2 有限元法失效分析的基本过程	76
3.3 ANSYS 蠕变失效分析	77
3.4 ANSYS 断裂失效分析	83
本章小结	85
思考题与习题	86

第4章 失效分析的工程案例	87
4.1 材质因素引起的失效	87
4.2 机器零件的失效分析	94
4.3 模具的失效分析	104
4.4 典型易损件的失效分析实例	111
4.5 工程装备失效分析实例	117
本章小结	132
思考题与习题	133

第2篇 选材基础、选材方法与工程应用

第5章 工程设计与制造的选材基础	137
5.1 工程设计中的选材因素	137
5.2 产品的选材	143
5.3 零件制造工艺与设计选材	148
5.4 材料选择的经济性考虑	152
5.5 绿色设计制造与绿色选材	154
本章小结	163
思考题与习题	164

第6章 工程设计中常用选材方法	165
6.1 经验和传统选材	165
6.2 半经验选材	168
6.3 现代选材方法	174
6.4 定量化选材与应用	183
本章小结	193
思考题与习题	193

第7章 机械零构件的可靠性与选材	194
7.1 可靠性概述	194
7.2 可靠性设计原理	195
7.3 机械零构件可靠度计算	197
7.4 疲劳强度的可靠性分析	201
7.5 按可靠度选材	206
7.6 基于 ANSYS 的机械零构件可靠性分析	210
本章小结	216
思考题与习题	216

第 8 章 根据力学性能选材	218
8.1 按刚度选材	218
8.2 按强度选材	222
8.3 按韧性选材	226
8.4 按疲劳强度选材	232
8.5 按综合力学性能选材	238
本章小结	242
思考题与习题	242
第 9 章 几种工况下的选材及应用	244
9.1 摩擦磨损条件下工作零件的选材	244
9.2 腐蚀环境下工作零件的选材	249
9.3 高温用材及选择	253
9.4 低温用材及选择	259
本章小结	268
思考题与习题	269
中英对照的关键词	270
参考文献	282

第 1 篇 失效分析及 其工程实例

第 1 章 失效与失效分析方法

1.1 失效的基本概念

机电产品或其零部件丧失规定功能的现象称为失效,对可修复产品通常也称为故障。具体指:①零件完全破坏,不能正常工作;②严重损伤,继续工作很不安全;③虽能安全工作,但已不能满意地起到预定的作用。只要发生上述三种情况中的任何一种,都认为该零件已经失效。如桥梁因焊接等质量问题突然垮塌,属第一种情况;火车紧急制动失灵,虽不影响火车运行,但在前进方向出现异常情况时,因不能实施紧急有效的制动,影响了行车的安全性,属第二种情况;轴承经长期使用后,由于磨损出现噪音、旋转精度下降,虽然还能继续使用,但已成为隐患,也应视为已经失效,当属第三种情况。

一般而言,承受某种载荷的零部件都会在工作过程中受到损伤,最终失效。实践证明:使用时间的延长,机械零件发生失效的几率(失效率)具有明显的阶段性,即两头高(非稳定阶段,损伤明显),中间低(比较稳定阶段,损伤轻微),形状如图 1-1 所示的浴盆状,故失效率曲线也称为浴盆曲线。

按上述失效率曲线可将失效分为三类:早期失效、随机失效、耗损失效。总体上,早期失效的原因大多是由于设计、材料和制造过程中的错误、失当或存在某种缺陷造成的;随机失效的原因是由于环境的偶然变化、操作时的人为差错或者由于管理不善等因素造成的;耗损失效的原因是产品零部件经较长期使用后过早地进入失效期。

失效分析主要是针对早期失效进行的。进行失效分析的目的就是找出失效尤其是早期失效的原因,并提出相应的改进措施。因此,产品(或零部件)失效分析的重点无疑是产品的早期失效事件、突发性失效事件以及致命的失效事件,因为这些失效事件的分析是事关重大或事关全局的。

金属材料是航空航天、交通运输、能源、化工、冶金等领域重大工程、大型设备设施等的主要用材。在多种载荷和复杂环境的共同作用下,服役的金属零件和大型结构会逐渐产生腐蚀、疲劳、断裂、磨损等各种模式或多模式共存的失效事故,甚至导致灾难事故和重大经济损失。试举历史上国内外典型的失效案例如下:

(1) 1998 年 6 月 3 日上午,由德国汉诺威开往汉堡的高速火车(ICE)在以 200km/h 的速度行驶过程中突然出轨,造成数百人死亡,300 多人受伤。其肇事原因是火车轮箍发生了疲劳

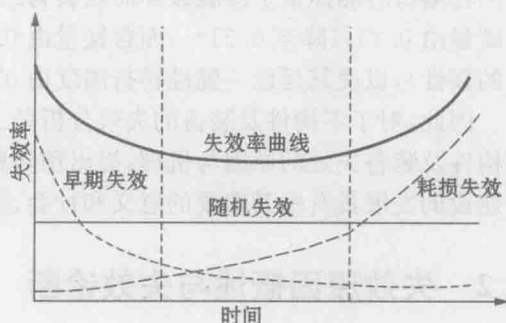


图 1-1 失效率曲线

破损,因而车轮松脱并卡在轮对上,列车继续行进至一处转辙器时最终脱轨,酿成德国有史以来最严重的交通事故。

(2) 1999 年和 2001 年中国西部的重庆和四川两座大桥接连倒塌,倒塌原因都与吊桥上部铆接处水泥灌浆不满导致铆接处缝隙发生严重腐蚀有关。广东某斜拉桥于 1995 年某日清晨,一根钢索上段突然断裂,其断裂原因主要是由于 Cl^- 的腐蚀造成的。根据 2001 年柯伟院士负责的中国工程院咨询项目“中国工业与自然环境腐蚀问题调查与对策”的 Hoar 方法计算得出,我国每年因腐蚀失效造成的直接和间接经济损失总和约为 5 000 亿元。

(3) 在航空史上由于材料失效所造成的空难事件屡见不鲜。1991 年 12 月 29 日,台湾中华航空公司一架波音 747 型全货机于台北起飞后不久发生坠毁,分析其肇事原因为其机翼下的“派龙”中梁固定螺杆断裂,使得两具引擎掉落且拉扯下机翼,导致飞机失速坠落;此后接连发生于 1992 年 3 月的尼日利亚一架波音 707 型货机以及 1992 年 10 月 4 日的以色列航空公司一架波音 747 型货机的坠毁事件,也是因“派龙”固定螺杆断裂造成引擎掉落而引起。这三次类似的空难事件导致 1992 年 10 月 6 日波音公司全球紧急通报,检查 747 型飞机的“派龙”固定螺杆。

(4) 材料失效的著名实例还见于二次世界大战中,盟军自由轮经常于北大西洋寒冬夜晚,停泊在港口时船体由于冷脆破坏而断裂为二。由此教训导致 1956 年后美国造船钢板规格的含碳量由 0.23% 降至 0.21%,而含锰量由 0.75% 增加至 0.95% (即提高其 Mn/C 比、改善钢材的韧性),以使其延性—脆性转折温度由 0°C 降至 -14°C ,基本避免了大型船舶的脆断事故。

因此,对于零构件及装备的失效分析是工程中极为重要的一个方面。通过失效分析明确零构件及装备失效的原因与机理,提出预防和改进措施,这无疑对于人身财产的安全和国民经济建设的发展具有极其重要的意义和社会、经济价值。

1.2 失效原因概述与失效诊断

1.2.1 失效的原因

失效事故的分析研究和原因判断具有相当的复杂性和多重性,经常是一个多重因素交织的系统工程问题。失效原因是指造成失效甚至事故的直接因素。失效原因分为一级失效原因和二级失效原因,甚至于三级失效原因。一级失效原因包括设计原因、制造原因、使用原因、环境原因等。一级失效原因又包含多种二级失效原因。例如,设计原因引起的失效还可以细分为设计准则、结构、选材等二级失效原因。

1) 设计原因

即使是经过仔细构思、周密计算和试验验证的设计,有时也不可避免地存在着设计缺陷。导致失效的设计原因一般包括以下几种:

(1) 设计载荷不准确。主要表现为力学载荷考虑不全,载荷变动分析不够,计算假定中出现误差,致使实际工作载荷超过设计载荷,材料无法承受工作(过)载荷而失效。另外,应力分析中对所用模型的相关简化不合理也是一个主要的方面,同样需要引起重视。例如,在发动机叶片设计时,如果没有考虑其在某一转速下会发生共振,就有可能在叶片使用中发生共振疲劳失效。

(2) 设计结构不合理。主要表现为零件几何形状不当,出现剖面突变或者尖角面,导致这些部位承受较大的应力集中,超过了材料的强度极限,从而过早地萌生裂纹而失效。如轴类件的结构设计合理与否,将直接影响轴的工作能力和轴上零件的工作性能,影响到轴的可靠性和安全性。

(3) 设计选材不当。主要表现在材料性能指标的不足,状态不对或不相容材料相互接触,相匹配零件其材料的膨胀系数相差太大等方面。如果选材不当,不但会影响零件的正常运行,甚至会造成安全事故。例如,山东省某化肥厂合成塔与废热锅炉的连接管突然爆裂断开,大量高压合成气体喷出起火,烧死7名职工。经调查发现,该连接管按规定应采用材质为1Cr18Ni9Ti耐热不锈钢的无缝钢管,但实际是用15CrMo代替,并用普通20号钢弯头与15CrMo钢管焊接。由于合成塔出口温度由210℃提高到280℃,使碳钢弯头内壁造成严重腐蚀,内壁脱碳深达8mm,使其机械强度和冲击韧性大大降低,致使弯头处爆裂。

2) 制造原因

在零件的批量生产中,由于人员的变动、设备的老化、偶然的失误,不可避免地会带来一些制造缺陷,并最终影响到零件的失效。主要表现在材质缺陷或制造工艺缺陷两方面。

(1) 材料缺陷。材料纯度不符合要求。材料纯洁度是评价金属材料中夹杂物含量和分布的质量指标。金属中的夹杂物会破坏金属基体的均匀性和连续性,其形态、性质、含量和分布都会不同程度地影响材料的各项抗失效性能指标。

组织稳定性不好。材料内部的组织稳定性是值得关注的重要问题,长期使用过程中材料的内部显微组织结构会发生变化,将使其力学性能劣化。材料力学性能中的塑性、冲击韧性、缺口敏感性、热疲劳抗力等,都是对组织稳定性较为敏感的性能。

常见的一些材料缺陷类型及对失效的影响可参见4.1节。

(2) 工艺缺陷。金属零部件的制造工艺一般是指铸造、焊接、塑性加工、热处理、机械加工等。无论是哪一种制造工艺,如果操作不当,都可能造成工艺缺陷,进而会产生各种工艺裂纹、造成过高的残余内应力,形成不良的表面质量、不正常的组织状态,使零部件达不到要求。

3) 使用原因

导致材料失效的使用原因,一般表现为超过设计限制的使用和维护不当。现在对这两种原因分别介绍如下:

(1) 超设计限制使用的原因。使用限制是根据材料的强度、一定的安全储备以及零件工况可导致的应力等因素而制定的。如果超过设计使用限制,将会导致零件所承受的应力升高,进而有可能使零件承受的应力超过材料的强度而使零件失效。若存在应力集中、有害的残余应力,这种现象会更加明显。与超限制使用原因有关的失效模式主要包括一次性延性断裂、蠕变断裂等。

(2) 使用维护原因。为保证零件能够正常地工作,防止发生意外的损坏,就需要进行使用期间的维护。如转动部件的润滑油加注、损伤部位的检测与修复等。维护过程一般需要对零件进行拆装,就有可能在重新装配时,造成其状态与原始制造、装配状态(即所谓出厂状态)的不一致,并带来额外的损伤、附加的应力等,从而导致零件的失效。如飞机上的导管在维护安装时,固定卡子没拧紧,致使导管振动,产生疲劳断裂失效。转动部件常见的维护不当现象,包括没有及时加注润滑油、润滑油中含有杂质、零件表面有腐蚀介质、冷却系统中冷却液不足等。

4) 环境原因

零件的服役环境是其能否安全运行、寿命长短的主要因素。因此,环境是造成零件失效的主要原因之一。机械失效中最重要的环境原因包括腐蚀介质作用和温度效应两个方面:

(1) 腐蚀介质原因。腐蚀介质可使材料与环境之间产生有害的化学或电化学反应,引起表面腐蚀损伤或材质脆化,裂纹在损伤处萌生或加速扩展,导致失效。金属零件常见的腐蚀介质引起的失效类型主要有腐蚀疲劳失效、应力腐蚀断裂失效、氢致断裂失效以及低熔点金属浸蚀致脆失效等。

(2) 环境温度原因。环境温度的作用主要是降低材料的强度性能(高温下)或增加材料脆性(低温时)。环境温度导致的失效类型主要有:高温延性断裂失效、高温疲劳失效、蠕变破裂失效和低温致脆失效。温度升高,一般会使材料的屈服强度、断裂强度和弹性模量等与强度、刚度有关的力学性能指标下降,而韧性增加,导致机件发生延性断裂失效、疲劳失效、蠕变破裂失效等。温度降低,材料韧性一般会降低,当温度低至材料的韧性-脆性转变温度以下时,会使材料脆化,导致机件发生低应力脆性断裂失效。

1.2.2 失效的诊断

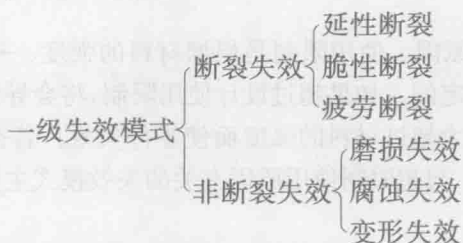
失效诊断是失效分析的三大任务(失效诊断、失效预测、失效预防)之一,也是整个失效分析的基础。失效诊断的理论、技术和方法的核心是思维学、推理法则和方法论。

失效诊断中的五条基本原则是:整体观念原则、立体性原则、从现象到本质的原则、动态性原则和两分法原则;五种具体方法是:相关性方法、抓关键问题的方法、对比的方法、历史的方法和逻辑方法。

失效诊断依其目的、要求和内容深度,可分为三个层次的诊断:失效模式的诊断、失效原因的诊断和失效机理的诊断。

1) 失效模式诊断

失效模式是指失效的外在宏观表现形式和过程规律,一般可理解为失效的方式或类型。失效模式诊断是失效诊断的基础和前提,它对整个失效分析和预防决策来说,具有“定向”的作用。失效模式常可分为一级失效模式、二级失效模式、三级失效模式。其中“一级”失效模式以及相应的一些二级失效模式,一般可分类如下:



失效模式诊断一般需结合失效前的工作参数(工况)、失效后的宏观特征、失效件的断口特征、失效件的表面痕迹、腐蚀和磨损产物的形貌与成分,以及环境因素、制造失效件的材料、模拟试验等方面来进行区别和综合诊断。如:

(1) 断裂失效模式诊断的依据是:残骸分析、断口分析、应力分析、失效模拟。

(2) 磨损失效模式的依据是:被磨损表面的形貌和亚表面层组织与性能的变化,磨屑形貌、磨屑成分及组织结构的变化,磨损系统中各参量的关系和变化等。

(3) 腐蚀失效模式的诊断依据一般是:腐蚀表面形貌的变化,被腐蚀材料的成分、组织和性能的变化,腐蚀产物的成分、组织和结构分析及变化,腐蚀环境和参量分析及变化(包括气氛、介质、温度、应力、电极电位等电化学性能等)。

失效模式的诊断可分为定性诊断和定量诊断两类。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。定性诊断的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断,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。只有根据失效事故的具体情况,合理地选用定性或定量诊断的技术和方法,才能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、适时的诊断。

失效模式诊断一般要求诊断到“二级”甚至“三级”,但越是往下深入,则诊断的难度就越大。失效模式的诊断越具体、越准确就越好,对失效原因诊断的准确性和预防措施制定的针对性就越有指导价值。失效模式诊断的难点在于对过渡的、多因素作用的、非典型的二级及三级失效模式的正确和适时的诊断。例如,就疲劳断裂失效而言,介于韧性断裂和疲劳断裂之间的,以及脆性断裂(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)疲劳断裂失效的诊断;铸造合金疲劳断裂失效的诊断;腐蚀扩展,包括应力腐蚀扩展和腐蚀疲劳扩展的区分诊断等。

2) 失效原因诊断

失效原因的诊断是失效分析和预防措施的核心和关键,它对于失效预防的针对性和有效性是重要的前提和基础。

失效原因的诊断程序一般为:首先进行“一级”和“二级”失效模式的诊断;然后探讨和分析确定是什么原因引起的“二级”失效模式的失效形式,并综合分析全部或主要的失效现象或规律;最后进行失效模拟或失效加速试验,加以验证。

失效原因的诊断一般是在失效模式诊断的基础上进行的。应将失效模式和失效原因相结合,对其失效的特征判据进行研究,以达到正确诊断失效原因的目的。因此,失效原因的诊断在思想方法上也应该与失效模式的诊断一样,从宏观到微观,从定性到定量,从“一级”到“二级”,从诊断(失效-原因)到模拟(原因-失效)。

3) 失效机理诊断

一般来说,一个失效事故是外因和内因共同作用的结果。常把应力、环境(温度、大气等)、事件、缺陷等作为产生失效的外因,而失效的内因——导致发生失效的零件或材料的物理、化学或机械过程等,称为失效的机理。

失效机理的诊断是指对失效的内在本质、必然性和规律性的研究,它是人们对失效性质认识的理论升华和提高。失效的机理学就是内因和外因共同作用而最终导致失效事件发生的热力学、动力学和机构学,即失效内在的必然性和固有的规律性。拿生病来作比喻,失效模式相当于病症,失效原因是生病的原因,而失效机理则相当于病理。因此,失效机理的诊断或研究是十分重要的,而且,只有揭示失效的必然性和规律性,才能真正做到对同类失效事件的有效预防,做到“举一反三”和“亡羊补牢”。可以认为:只有完成失效机理的工作,失效分析才真正达到深入化、完全化、科学化和系统化的境界。

失效机理诊断的基础就是对失效机理的分析与研究。失效机理的研究可以分为宏观失效

机理的研究(即失效的热力学和动力学研究)和微观失效机理的研究(即失效的微观机制理论和模型的研究)。按照研究尺度的大小,微观失效机理的研究又可分为细观尺度、分子尺度和原子尺度的研究。失效机理研究采用的方法可以分为定性的方法和定量的方法,定量的方法又可分为确定型方法和概率型(或模糊型)方法。失效机理研究所采用的模型按所属学科分为理化模型和物理数学模型,并可进一步予以细分。

1.3 失效分析的思路与程序

1.3.1 失效分析的思路

失效分析(诊断)的思路是指在失效诊断过程中,以失效的客观规律为理论依据,把通过调查、观察和实验所获得的失效信息(失效对象、失效现象、失效环境等)分别加以考虑,然后有机地结合起来作为一个整体进行综合分析。即以获取的客观事实为依据,全面应用逻辑推理的方法,来判断失效事件的失效模式,并推断失效原因和失效机理。失效诊断的思路是指导整个失效分析全过程的思维路线。

失效分析是从结果求原因的逆向认识失效本质的过程,具有逆向思维的特征。但就失效分析工作而言,其结果和原因具有双重性,即具有互导性、相互通达性。因此,失效分析既可以从原因着眼,又可以从结果入手,也可以从失效的某个过程入手。如果把失效结果比作是“瓜”,失效过程比作是“藤”,失效系统的起始状态和原因比作是“根”,则失效分析的思路可以概括为以下几种:①顺瓜摸藤:从失效的结果出发,不断由过程的结果推断其原因;②顺藤找根:从失效过程的某个中间状态出发,推断该过程形成的原因,直至过程整个失效的直接原因;③顺根摸藤:从系统的起始状态出发,不断由过程的原因推断其结果;④顺藤摸瓜:以失效过程某个或某些中间状态的现象为原因,推断过程进一步发展的结果,直至失效的结果;⑤综合法:顺瓜摸藤+顺藤找根,顺根摸藤+顺藤摸瓜,顺藤摸瓜+顺藤找根等。

通过上述“瓜”、“藤”、“根”的形象化类比,现介绍失效分析的几种主要思路。

1) “撒大网”逐个排除法

该思路认为任何失效都可以从人(操作人员)、机(系统)、料(材料)、法(制造工艺方法)、环(环境)和管(管理)等6个方面去寻找,可以将失效的所有可能原因列出来,然后逐个排除。显然,该方法工作量极大,看似十分全面、稳妥、可靠,实际是一种带有盲目性的、低层次的分析方法,也较难应用,不到万不得已时,一般都不宜采用。

2) “故障树”分析法

该方法来源于电子设备的可靠性工程研究,以失效结果为第一层,然后逐层列出导致上一层事件发生的可能原因。由于该方法关心的是失效的部位,而不追求失效的机理和过程,因此,不是一种完整的失效诊断思路。

3) “逻辑推理”分析法

逻辑推理是从已知的知识推出未知的知识,从一个或几个已知的判断推出另一个新的判断的思维过程。只要据以推出新判断的前提是真实的,推理前提和结论之间的关系符合思维规律,则得出的结论或判断就一定是真实的、可靠的。显然,逻辑推理的思路可以作为失效分析的基本思路,以真实的失效信息和事实为前提,根据已知的失效规律性知识和已知的判断,

通过严密的、完整的逻辑分析,就可推理出失效的模式、原因和机理。常用的5种逻辑推理方法有归纳推理、演绎推理、类比推理、选择性推理和假设性推理,在失效分析工作中可以视情况进行灵活运用。

工程上常用的失效分析思路有两类。一类是以残骸(失效零构件)为对象;一类是安全系统工程分析法,它以失效系统(设备、装置)为范畴。前者以物理、化学方法为主,着眼于“微观”;后者则以统计数据、图表和逻辑方法为主,立足于“宏观”。这里只介绍残骸分析法、统计图表分析法、文字表格法和逻辑分析法。

(1) 残骸分析法。残骸分析法是从物理、化学的角度对失效零件进行分析的方法。如果认为零件的失效是由于零件广义的“失效抗力”小于广义的“工作应力”的缘故,而“工作应力”则与零件的服役条件有关。因此,失效残骸分析方法总是以服役条件、断口特征(对于断裂零构件)和失效的抗力指标为线索的。零件的服役条件大致可以划分为静载荷、动载荷和环境载荷。以服役条件为线索就是要找到零件的服役条件与失效模式和失效原因之间的内在联系。但是,实践表明,同一服役条件下,可能产生不同的失效模式;同样,同一种失效模式,也可能由不同的服役条件产生。因此,以服役条件为线索进行失效残骸的失效分析,只是一种初步的“入门”方法,它只能起到缩小分析范围的作用。

零构件的“断口”是断裂失效分析的重要依据,它是残骸分析中断裂“信息”的重要来源之一。但是在一般情况下,断口分析必须辅以残骸“失效抗力”的分析,这样才能对断裂的原因得出确切的结论。

(2) 统计图表分析法。统计图表分析法是安全系统工程事故(或失效)危险识别技术中的实用方法之一。

安全系统工程是运用系统工程学的原理和方法,对系统中或生产中的安全问题或失效问题进行定性和定量的分析、评价及预测,并采取综合安全(或预防)措施予以控制,使系统失效的可能性减少到最低限度,从而达到最佳的安全状态。

安全系统工程是安全技术和安全管理的结合。它的基本内容包括:事故成因的理论;事故危险的识别技术;事故危险的评价技术和事故的控制技术等。

(3) 文字表格法。文字表格法是一种常用的失效识别方法之一。它主要包括安全检查表、预计危险分析法、特性因素图法、失效模式影响和致命度分析法。

(4) 失效树分析法。失效树分析法是一种逻辑分析方法。

逻辑分析法包括事件树分析法(简称 ETA)、管理失误和风险树分析法(简称 MORT)和失效树分析法(简称 FTA)等。这里只介绍失效树分析法。

失效树分析法是在系统设计过程中,通过对可能造成系统失效的各种因素(包括软件、硬件、环境、人为因素等)进行分析,画出逻辑框图(即失效树),从而确定系统失效原因的各种可能的组合方式或发生概率,以计算系统失效概率,采取相应的纠正措施,提高系统可靠性的一种设计分析方法。

FTA 法的步骤,因评价对象、分析目的、精细程度等而不同,但一般可按如下的步骤进行:失效树的建造;失效树的定性分析;失效树的定量分析;基本事件的重要度分析。FTA 法是一种图形演绎方法,是失效事件在一定条件下的逻辑推理方法。它可以围绕某些特定的失效状态作层层深入的分析。因而在清晰的失效树图形下,表达了系统的内在联系,并指出元部件失效与系统之间的逻辑关系,找出系统的薄弱环节。