

机电装备失效研究的内涵及其科学问题探讨*

钟群鹏

(北京航空航天大学材料科学与工程学院 北京 100083)

傅国如

张 峥 骆红云

(北京航空工程技术研究中心) (北京航空航天大学)

摘要: 简要介绍了失效研究领域的相关名词、概念和内容。对失效对象、失效现象和失效环境等与失效有关的 5 大类、16 项、共 52 种失效信息进行了归纳总结,并指出了通过这些信息来建立诊断失效模式、原因和机理的失效诊断系统的途径。针对失效研究领域,失效诊断方面存在的断口、裂纹诊断技术和方法,综合诊断技术和方法,定量诊断技术和方法,概率诊断、模糊诊断和智能诊断的技术和方法,环境诊断技术和方法,失效抗力(材料性能)指标体系和表征技术,失效动力(载荷或应力)的计算、测试和反推技术和方法,失效模拟的技术和方法,失效预测方面存在的技术和方法,以及失效预防方面存在的技术和方法等 10 大类科学问题,从理论和实践两方面进行了探讨,并指出了需要进一步研究的方向。最后指出了该领域今后的发展趋势。

关键词: 机电装备 失效研究 内涵 科学问题

中图分类号: TB303 TG142

0 前言

尽管科学技术已经取得了巨大进步,但产品的失效仍经常发生。即使是科技高度发达的美国,在 1997 年 9 月不到两个星期的时间内,就发生了 6 起军用飞机坠毁事故^[1];在 1986 年和 2002 年先后发生了挑战者号和哥伦比亚号两起航天飞机爆炸事故。客观地说,任何一种产品,只要使用就存在失效的可能。即使先进的航天飞机、运载火箭等代表人类最高科技水平的产品(系统)也不可能保证绝对不发生事故;相反,它们的失效事故从来就没有间断过^[2]。由于失效是人的主观认识与客观事物相互脱离的结果,人的认识是有限的,而客观世界是无限的,因此,失效的发生是绝对的,而安全则是相对的。但每当失效发生时,人们还是会提出疑问:为什么这些凝聚了人类科技精华的产品在正常使用中常常会发生失效事故?由已经过充分试验和使用检验的材料制成的零部件为什么还会失效?为了预防事故的发生,在每次失效事件发生后,均进行了针对性的失效研究,对失效的模式、原因和机理进行诊断,进而进行失效控制预测与预防。而事实上,失效不但经常没有得到有效的预防,而且往往无法进行事先的预测,致使悲剧性的事故重复发生,这

其中到底又存在什么样的、目前还不了解的科学问题?如何解决这些问题?这是广大工程技术人员非常关心、苦苦思索的问题。为此,有必要在介绍失效研究的名词、概念与内容的基础上,探讨其中存在的科学问题,指出未来的发展趋势。

1 失效研究的名词、概念与内涵

(1) 失效及失效研究的内涵。机电元器件(或零件)、设备、装置或系统统称为机电产品。机电产品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。产品是否失效,主要是在使用(包括检验)中考察。在失效研究中,针对具体失效事件的技术活动一般可分为三个层次:失效诊断、失效预测和失效预防。其中失效诊断是失效研究的核心,失效预测、预防则是失效研究的目的。失效诊断是失效发生以后的研究,预测、预防则是事故前的决策^[3~9]。

(2) 失效分析、事故分析、废品分析和状态诊断。失效分析是对进入商品流通领域后发生故障的分析;对导致产品无法修复的严重失效的分析也称为事故分析;对进入商品流通领域前发生的质量问题的分析则称为废品分析。失效分析、事故分析和废品分析均是指事后的分析,三种分析所采用的方法有时基本相同。状态诊断则是对可能的主要失效模式、原因和机理事先在线、适时、动态的诊断。

(3) 失效模式、原因和机理诊断。失效研究的

* 纪念《机械工程学报》创刊 50 周年——“机械工程技术的历史、进展与展望”主题征文。国家重点基础研究发展规划项目(G1999065010)。20030718 收到初稿,20030819 收到修改稿

首要任务之一就是失效诊断。失效诊断是失效研究的基础,其准确与否决定了失效研究的成功与否。失效诊断的目的是要诊断出失效的模式、原因和机理,从而为采取预防措施指明方向和提供依据。失效模式是指失效的表现形式,一般可理解为失效的类型。失效模式诊断是失效研究首当其冲的重要问题,具有“定向”的意义。失效模式常可分为一级失效模式、二级失效模式、三级失效模式等,一般要求诊断到“二级”甚至“三级”。失效模式诊断得越具体、越准确,对失效原因诊断的准确性和预防措施制定的针对性和有效性就越有指导价值。失效模式诊断一般从现场残骸分析(失效件断口、裂纹、痕迹和变形等)、零件制造工艺、显微组织和力学性能分析、结构和受力分析、工况和使用环境分析和失效模拟等方面入手,其中首断件(肇事件)的残骸是最重要的分析诊断依据,残骸分析常常是使用得最多、最好的一种诊断技术;失效原因是指酿成失效事故的直接关键因素。失效原因也可分为一级、二级和三级。一级失效原因一般指酿成该失效事故的首要失效件(肇事件)失效的直接关键因素处于投入使用过程中的哪个阶段或工序(如设计原因、制造原因、使用原因和环境原因等);二级失效原因是指一级失效原因中的直接关键因素。失效原因的诊断是失效研究的核心和关键。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,是对失效性质认识的理论升华和提高。失效机理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、动力学和事故链,即失效内在的必然性和固有的规律性。

(4) 失效分析、预测和预防。失效分析是分析诊断失效的模式、原因和机理,研究采取补救、预测和预防措施的技术活动和管理活动。失效预测可以分为安全状况预测、剩余寿命预测和累积失效概率(可靠度)预测等三个层次的内容。失效预防则应包括失效的工程预防、失效(或安全)法规或标准的制定或修改,以及失效(或安全)案例库、知识库和专家系统的建立和应用。

(5) 失效学。研究机电产品失效的诊断、预测和预防理论、技术和方法的交叉、综合的分支学科。失效学是一门正在发展的新兴学科,由失效诊断学、失效预测学和失效预防学三部分组成。失效学的实践基础是对大量的失效事故模式、原因和机理的定性、定量的分析诊断和随后行之有效的预测预防的工程实践经验的积累和规律理论的总结;失效学的技术和方法基础是现代检测仪器、可靠性技术与工程方法和逻辑推理学等;失效学的理论基础是

近代材料学、力学和化学对断裂失效、腐蚀失效、磨损失效及其混合型的失效模式和机理的深入研究。

2 失效信息与失效模式、原因和机理的诊断系统

与失效有关的失效对象、失效现象和失效环境统称为失效信息。表中初步列出了 5 大类、16 项、共 52 种失效信息。每一种失效信息都是失效的一个特征或反映影响失效的一个因素或条件;综合几种失效信息可以诊断出失效的模式,进而推理出失效的原因和机理。反之,也可认为一特定的失效模式、原因和机理归纳总结出一些相应的失效信息(特征)。因此,可以建立通过失效事件本身反映出来的失效信息来诊断失效模式、原因和机理的失效诊断系统,帮助人们进行失效研究。

3 失效研究中的科学问题探讨

(1) 失效的断口、裂纹诊断技术和方法。断口、裂纹诊断是断裂模式、原因和机理诊断的基础,是失效研究中应用得最多、最好的一种诊断技术。断口诊断一般结合断口附近的宏观变形、痕迹特征、裂纹走向,断口上的颜色变化、形貌特征、断裂源位置等宏观信息和微观形貌特征、微区成分,特别是断裂源区的微观特征、微区成分等微观信息来进行的。裂纹诊断一般是结合裂纹的起源位置和扩展方向、与应力方向的关系、与接触介质的关系和裂纹的分布和数量、形貌等宏观信息,以及裂纹与显微组织、晶面晶向的关系和走向等微观信息来进行的。只有将各种宏、微观失效信息综合起来,才能诊断出准确的失效模式、原因和机理,因此,不可偏废任一方面,否则将“一叶障目”。

随着科学技术的发展,构件的设计和工况越来越复杂,使得失效模式越来越偏离典型的、单因素作用的失效模式,而表现出复杂的、多因素作用的、不同模式之间过渡态的非典型失效模式,给失效诊断提出了挑战。虽然以往的研究已给出了典型失效模式的断口、裂纹特征判据^[10-21],但对这些非典型的、过渡态的失效模式的判据还缺乏研究。因此需要系统研究断口、裂纹宏微观特征随材料性质、应力大小、加载速度、零件大小、缺口情况和环境等因素的变化规律,并总结出相关失效模式、原因和机理的有效特征判据。

(2) 失效的综合诊断技术和方法。失效诊断涉及残骸分析、痕迹分析、断口分析、裂纹分析、材

表 失效信息与失效模式、原因和机理的诊断系统

| 项目信息 | 失效信息名称 | | | 主要失效模式和特征 | | | | | | |
|------|-------------|---|-------------------|---|--|--|--|--|--|--|
| 裂纹信息 | 裂纹起源位置和扩展方向 | 宏观 | 与零件应力、焊缝的关系 | ①在应力集中处(R 处) ②在焊缝区 ③在非应力集中区 | | | | | | |
| | | | 与接触介质的关系 | ①在介质接触的表面 ②在点蚀(磨蚀)坑处 ③与接触介质无关 | | | | | | |
| | | | 与主正应力或主切应力方向的关系 | ①与主正应力方向垂直 ②与主切应力方向平行 ③与主正应力、主切应力方向无关 | | | | | | |
| | | 微观 | 与显微组织的关系 | ①在夹杂物处 ②在某一相组织处 ③与显微组织无关 | | | | | | |
| | | | 与晶粒或相边界的关系 | ①在晶粒边界或相界处 ②在晶内或相内 ③既在晶界也在晶内处 | | | | | | |
| | | | 与晶面晶向的关系 | ①在某一特定的晶面或晶向 ②非特定的晶面、晶向 ③混合情况 | | | | | | |
| | 裂纹分布和形状 | 宏观 | 按点、线分布情况 | ①以点放射分布 ②沿线分布 ③不规则分布 | | | | | | |
| | | | 数量和伸直情况 | ①单条、“平直”状 ②分叉或台阶或锯齿状 ③网状或龟裂形貌 | | | | | | |
| | | | 啮合和间隙情况 | ①啮合好、间隙小、裂尖尖锐 ②啮合差、间隙大、裂尖圆钝 | | | | | | |
| | | 微观 | 与“裂纹起源和扩展方向”的微观相同 | | | | | | | |
| 断口信息 | 断口的形貌和特征 | 宏观 | 断口附近的残留塑性变形 | ①塑性变形大、断口凹凸不平 ②塑性变形小、断口比较平直 | | | | | | |
| | | | 断口的颜色 | ①断口为本体材料的本色 ②断口上有氧化或腐蚀产物的颜色 | | | | | | |
| | | | 断口的形貌特征 | ①纤维状(鹅毛绒状) ②结晶状(颗粒状) ③放射状(人字纹) ④贝壳状(弧线状) | | | | | | |
| | | 微观 | 断口的形貌特征 | ①韧窝(撕裂棱、微孔等) ②解理(河流、扇形、台阶舌头等) ③沿晶(岩石、冰糖块等) ④条带(辉纹、“轮胎”痕迹等) ⑤“鸡爪状”形貌 ⑥腐蚀产物(氧化物、腐蚀产物、泥纹等) ⑦其他形貌 | | | | | | |
| 腐蚀信息 | 材料和腐蚀特征形貌 | 材料与腐蚀介质 | | ①碳钢及合金钢在 HCl、碱、硝酸盐、HNO ₃ 、海岸大气、工业大气、H ₂ S、H ₂ SO ₄ +HNO ₃ 等中 ②铬不锈钢在 NaCl、氧化物、氟化物、溴化物、碘化物、HCl、海岸大气、工业大气、水及蒸气、H ₂ S 等中 ③奥氏体不锈钢在氟化物、氯化物、碱、海岸大气等中 ④奥氏体不锈钢在碱、FeCl ₂ 、FeCl ₃ 、H ₂ SO ₄ 等中 ⑤材料上有腐蚀性的介质 | | | | | | |
| | | 腐蚀形貌特征 | | ①腐蚀产物附着、剥离 ②表面颜色发暗、敲击声音频率降低 ③腐蚀坑 | | | | | | |
| 应力信息 | 应力性质 | ①静载荷($\sigma \geq \sigma_b$ 或 $k_1 \geq k_{lc}$) ②交变载荷($\sigma \geq \sigma_{-1}$) ③冲击载荷($a \geq a_c$ 或 $k_1 \geq k_{id}$) | | | | | | | | |

料分析、应力分析、工艺分析、环境分析和失效模拟等多个方面,在失效研究中,特别是对重要失效事故的分析和预防的决策,仅仅只有单项的分析诊断是不够的,必须采用综合诊断技术和方法。综合分析的要点是在初步分析诊断出失效模式、原因和机理的基础上,进行必要的失效模拟试验、加速试验或工程试验,以进一步证实初步诊断的正确性;同时对预防措施进行检验,对存在的问题进行进一步的分析和研究,最后得出公正、准确和科学的失效诊断和预测的结论。随着失效分析技术的发展和机电产品的结构、功能和使用环境的复杂化,越来越多的失效研究工作者在具体的失效研究中,已发现综合诊断技术和方法是十分重要的,自觉或不自觉地加以了应用^[10-21],使失效诊断技术和方法得到了很大的提高和发展。但这方面的理论研究和实践还需要系统化和进一步深入,特别是针对不同失效模式的综合诊断的内容、技术和方法还需要从理论上和实践上进行研究,在实践中加以检验。

(3) 失效的定量诊断技术和方法。失效模式诊断可分为定性诊断和定量诊断。定性诊断是整个失效模式诊断的基础和前提,定量诊断则是失效模式诊断的深入和发展。定性诊断主要用于一级失效模式和典型失效模式的诊断。当失效件的断口宏、微观特征形貌不典型时,即失效模式为过渡的、多因素作用的、非典型的二级、三级失效模式时,诊断困难,这是失效模式诊断的难点。如高、低周疲劳的区别诊断,振动疲劳与常规高周疲劳的区别诊断,腐蚀疲劳与应力腐蚀疲劳的区别诊断等。当失效件尺寸较大时,由于失效件与试件尺寸上的差异,使其断口特征发生变化,并产生一定的尺寸效应,从而难以依据典型试验件的断口特征来对失效件的失效模式进行准确判断;断口的宏观特征与微观特征有时还不统一,如何诊断其失效模式还有一定的争议。定量诊断是解决这些问题的有效方法之一。但目前的断口失效模式诊断主要还是依据个人的经验或根据已有的断口、裂纹、金相图谱^[16,19,20]为依据的定性诊断。但是这些图谱、案例多数是“特征诊断”式的,它们只能说明特定材料、特定状态、特定环境下的断裂断口的特征形貌,因此,只能作为定性诊断的参照对比特征。可以认为,目前的失效模式诊断在整体上还处于定性分析的阶段。而定量诊断虽然已有一些研究^[22-24],但还处于探索阶段,不论在理论上还是在实践中,均需要进一步的深入和发展。

(4) 失效的概率诊断、模糊诊断和智能诊断的技术和方法。由于影响或控制失效的各种因素具有

不确定性,包括材料性能的分散性、构件受力的不确定性、构件尺寸的随机性、环境因素的不确定性、内部缺陷的随机分布等,失效具有偶然性和随机性;同时失效又具有必然性,存在设计缺陷、选材不当、工艺缺陷等问题的构件发生失效有时是不可避免的。因此构件的失效是由偶然性和必然性协同控制的,必然性反映规律,偶然性反映差异。差异造成的随机涨落在总体上服从某些统计规律。因此,失效模式、原因和机理的诊断可以、也应该采用概率诊断或模糊诊断的技术和方法。这方面的研究已经开始了探索^[25,26],如参考文献^[25]介绍了断裂失效的概率诊断和评估方法。但从整体上来说,这方面的工作还需要进行系统的深入研究和发展的。计算机人工智能诊断系统在近年来得到了大的发展^[27,28],有望在不久的将来初步建立一个可供查询、诊断、预测的智能系统,供失效研究人员使用。

(5) 失效的环境诊断技术和方法。构件在服役过程中一般都离不开环境的作用,因此,失效一般都有环境作用的痕迹特征,如颜色变化、光洁度变化、有腐蚀的产物和形貌特征等。环境有时还对裂纹、断口的走向等产生影响,如裂纹分叉、沿晶界扩展、断口具有沿晶特征、核桃纹特征等。通过观察断口、裂纹的形貌特征可以确定环境作用的类型,通过对腐蚀产物、附着物的成分分析,则可确定具体作用的环境介质。环境失效的类型主要有:纯腐蚀、磨蚀、应力腐蚀、腐蚀疲劳和氢脆等。在环境失效诊断中,还要综合考虑使用的环境条件、材料的环境敏感性、构件的受力特点和结构特点等因素。在确定以上条件后,一般可以预测到失效是否具有环境失效的可能性。在这方面尚需进行系统的、深入的研究。

(6) 失效抗力(材料性能)指标体系和表征技术和方法。按照应力—强度干涉模型^[29],影响构件失效的关键因素之一是制造构件所用材料在使用条件下的抗力。反映材料抗力的指标是材料的力学性能。客观地说,没有在任何使用条件下各项性能都优异的“万能材料”,而只有在特定条件下、某些方面优异的材料。因此,就必须明确哪些性能指标是材料与使用条件和寿命有关的关键指标,从而为设计选材提供依据。显然,影响材料失效的性能指标是与失效的模式、原因和机理相关的。以二级断裂模式为例,延性断裂的主要影响性能指标为材料的强度(σ_s 、 $\sigma_{0.2}$);脆性断裂的影响指标是材料的冲击韧度、断裂韧度;疲劳断裂的影响指标是疲劳强度、裂纹扩展速率和疲劳门槛值等。从可靠性、定寿角度,还需要材料使用性能的统计规律^[30-32]。因

此不同的失效模式有对应的关键(重要)性能指标。我国对材料的适航性基本没有要求,更没有数据统计值要求,新材料往往在初期使用时数据少,只有研究试验数据,缺乏工程应用数据,应在使用中积累数据,调整设计,对材料进行工程化完善。

材料性能表征技术虽然已有一套完整的体系和国家、企业标准,并得到了广泛认同,但这些表征量大多反映的是材料的整体性能或宏观性能,而对裂纹萌生和扩展来说,起主要作用的是材料的微区性能。因此,诊断失效的原因时,希望知道失效部位微区的准确性能。因为无法准确测定或预测出失效部位的关键性能,只有对失效附近或相似部位测得的性能作为分析的参考。因此,针对失效微区部位的材料性能表征技术和方法是一个值得深入研究的重要问题。

(7) 失效动力(载荷或应力)的计算、测试和反推技术和方法。失效是动力(应力)和材料抗力(强度)相互作用的结果。准确掌握失效的应力,对诊断失效原因,采取针对性预防措施有重要作用。一般的确定应力方法有设计阶段的有限元计算、光弹性(光塑性)应力测试和失效后的断口应力反推。

有限元计算尽管在设计中发挥了重要作用,但在解决失效事件的应力问题时往往显得不够。存在的主要问题首先是采用的工作载荷常常不准确。计算时一般只是按设计值来考虑,而实际工作载荷与设计载荷一般均有相当的差别,有时甚至差别很大,且实际载荷还有一定的随机性和不确定性,即与瞬态工况有关。以航空发动机涡轮叶片为例,对给定热应力场的计算一般是不成功的。主要有以下 5 个方面的原因^[33]: ①瞬态温度载荷与历过程有关,而历过程几乎在发动机的每次工作过程中均有差异,无法确切知道。②热应力场计算的基本方程取决于热转换系数,而热转换系数的计算和测量都很困难。③对非线性材料特性的模拟困难,裂纹尖端区的非线性材料特性对所需进行的断裂力学计算的影响尚不清楚。④大部分材料呈现出循环硬化、软化或蠕变松弛现象,严重影响最终应力的分布和大小。⑤残余应力的影响。对这些问题目前还没有好的解决办法。其次是边界条件的确定不准确。在实际构件中,因公差控制的差异,使得一些随机因素累积而产生异常大的附加载荷,如果还采用设计时的理想边界条件是不可能准确分析实际受力大小的,特别是当共振等现象存在时,由于振动应力的无法计算和测试,更使得由这些因素引起的附加载荷难以确定,从而使应力计算不准确,误差很大,导致断裂模式诊断错误。

为了验证计算结果,需进行应力测试。目前应用得最多的测试方法是光弹性试验和光塑性试验^[34]。在三维光弹性力学中,影响测试准确性的最大问题是泊松比对冻结应力法精度的影响,简称“P 影响”^[35],核心是相关树脂材料冻结应力时的泊松比(0.47~0.50)远大于实际结构材料的泊松比(钢为 0.25~0.33),而三维应力分布是与泊松比有关的。有时这种影响可以导致很大的误差。在光塑性法中,模型材料性能的影响比“P 影响”复杂得多,不仅要求模型材料和原型材料的泊松比相同,而且要求他们的应力-应变曲线也相同。同时还要求光塑性材料满足其他多种性能的要求。因此,在一般情况下,用光塑性法所测得模型体的应力经几何、载荷相似还原,得到的仍不是原型结构的真实应力^[36-39]。

通过失效件的断口分析反推失效应力状态(包括应力类型、方向、大小)是最准确的,因为断口记录了断裂过程的全部信息。参考文献^[40]研究表明,理论上从断口特征反推失效应力是可能的,也是最客观、准确的。目前这是大家正在尝试的热点问题,但还主要局限于试验件的反推^[41,42],对真实失效件的反推还没有取得长足进展,需进一步深入研究。

(8) 失效的预测技术和方法。失效预测包括安全评估、寿命预测和可靠性预测。比较成熟的安全评估方法有断裂及塑性失效评定法和疲劳失效评定法^[43-53]。缺陷成因的模式诊断是整个安全评估的基础和前提,具有“定向”的作用。由于对缺陷成因的模式诊断主要依靠人对结构状况的经验判断,缺乏有效的、定量的、直接的方法,往往无法准确预测其失效模式。因此,在安全评估中,常采用排除法来确定安全性,即确定缺陷或裂纹处于各种失效模式所允许的安全范围内而排除各种失效模式发生的可能性后,才能确定所含缺陷在保证期内是安全的。平面缺陷的断裂失效安全评估技术和方法是通过国际通用的失效评定图技术实现的。失效评定图是考虑了“性能、应力和缺陷”三者交互作用后的一种安全评定技术,零件的评定点落在安全图形之内时认为安全,落在图形之外认为不安全。在安全评定中,当失效模式无法预先确定时,从不同失效模式的材料性能、应力状态和缺陷三要素之间交互作用观点出发的失效评定图的综合评定参量 K_r 、 L_r 的定量估算是整个诊断安全评定的技术关键。其本质是如何估算二次应力和裂尖塑性变形对应力强度因子和塑性极限载荷值的定量影响问题。以上安全评估技术和方法在压力容器上得到了很好的应用。

但对其他构件的安全状况评估技术和方法还没有系统的研究和应用。

机械零部件的失效模式有多种类型^[29], 只有与时间有关的失效模式(如疲劳、蠕变和腐蚀等)才有寿命预测问题。从原理上, 寿命预测技术和方法可分为 3 类^[7]: ①基于物理模型的寿命预测技术和方法。②基于力学的寿命预测技术和方法。③基于系统工程的寿命预测技术和方法。3 类寿命预测技术间互有联系, 又分别可分为确定型和概率型的技术和方法。疲劳寿命预测是寿命预测领域中研究得最多的。参考文献[54]为疲劳寿命预测提供了较系统、全面的技术和方法。但是, 对疲劳寿命预测的可靠性、复杂情况, 如蠕变疲劳、复杂循环载荷和混合机制下的疲劳寿命预测的成功经验还不多。近年来, 基于腐蚀损伤控制的日历寿命研究, 特别是飞机的日历寿命研究正处于研究的热点^[55-59], 并已有成功的工程应用实例。但由于影响腐蚀的因素多且复杂, 至今没有一套公认的、可预测复杂环境条件下金属构件腐蚀损伤日历寿命的计算模型和确定方法。目前虽然在疲劳剩余寿命预测方面进行了大量的实践和研究, 并取得了一些进展, 但对复杂条件下材料或构件的退化规律和寿命, 如蠕变疲劳、应力腐蚀寿命, 以及这些情况下的损伤微观机制、表征参量、退化方程和宏观寿命预测方法的可靠性等还需要进行全面、系统和深入的研究。

(9) 失效的模拟技术和方法。对重要失效事件的失效研究或有争议的失效问题, 一般均要进行失效模拟试验。目的是检验失效原因和机理诊断是否准确, 采取的预防措施是否有效; 模拟成功与否的标准是失效模式是否再现; 模拟的关键是确定的边界条件是否准确。常用的模拟技术有计算机仿真、试验器上试验以及服役条件下的检验。在真实条件下的模拟是最准确的, 但对有些情况会造成重大的损失, 而无法采用。计算机仿真最经济、效率高, 易模拟多种条件, 应用前景广泛; 但不可避免地要对一些边界条件进行简化, 模型的设计也与分析人员的认识及当时的技术水平有关, 与实际情况的差异相对较大, 使得模拟的准确性相对较差。试验器模拟的优缺点介于两者之间, 可根据具体情况选用。

(10) 失效的预防技术和方法。预防失效的再次发生是失效研究的最终目的。失效预防一般应针对失效原因来进行。失效均是“应力、性能、缺陷和环境”交互作用的结果, 因此, 预防失效也要针对这四方面来采取措施。即通过改进设计降低构件所承受的应力水平; 改进工艺提高材料的性能, 或

选用性能相对较高的其他材料; 改进工艺, 把缺陷控制在可接受的范围; 控制使用环境, 或采取防护措施, 将有害环境隔离, 或选用对使用环境不敏感的材料等措施来预防失效。具体采用何种预防技术和方法, 需要根据具体失效件的特点、使用条件、服役数量、客户可接受的程度以及经济性等综合考虑。总之, 只要有效, 可预防失效再次发生, 采取哪种预防措施都是可以的。

4 失效研究的发展趋势

失效研究已经从一种简单实用的事故分析技术发展为了或正在发展为一门分支学科——失效学, 并已得到了各行各业的高度重视, 建立了一批具有一定水平、设备先进的研究结构, 储备了一批高技术人才。作为一门分支学科, “失效学”的发展将具有以下特点。

(1) 从各行业工程化研究发展到跨行业、跨学科的理论化、基础化和综合化的研究。

(2) 从失效机理的定性研究发展到利用各种物理数学模型和现代试验技术的定量分析研究。

(3) 从一般断口分析发展到无损检测、失效诊断、安全评定、寿命预测、事故预防、寿命控制和定寿、延寿全过程的研究。

(4) 以经验为主, 逐步形成一套自己的理论体系。

(5) 建立失效分析预测预防数据库和专家系统, 并在实践中应用和检验。

(6) 以事后的失效分析为主, 向事前的安全评定、剩余寿命预测和可靠性预测等失效预测为主发展, 并提出失效余度的概念。

(7) 由失效的工程预防技术发展为抗失效设计准则技术和方法。

5 结论

失效分析预测预防是从失败入手着眼于成功和发展, 是从过去入手着眼于未来和进步的科学技术领域。如今, 高科技的发展已成为国民经济和国防科技发展的关键和依托, 高科技的发展也依赖高科技发展中的失效分析预测和预防, 因此, 高科技的发展更需要失效研究的进一步发展。

参 考 文 献

- 1 吴学仁, 陶春虎, 张栋, 等. 失效分析的历史发展与航空装备失效分析的展望. 全国第二届航空装备失效

- 分析会议论文集, 1997
- 2 张宗美, 翟彬, 张国瑞. 航天故障手册. 北京: 宇航出版社, 1994
 - 3 钟群鹏, 田永江. 失效分析基础. 北京: 机械工业出版社, 1989
 - 4 钟群鹏, 张峥, 武淮生, 等. 失败(失效)是成功(安全)之母——试论机电装备失效分析预测预防. 中国机械工程, 2000, 11(1): 70~72
 - 5 钟群鹏, 武淮生, 张峥, 等. 机电装备的失效分析、安全评定和无损检测. 中国工程科学, 1999, 1(1): 43~48
 - 6 钟群鹏, 王仁智, 陈玉民, 等. 机电装备失效分析预测预防进展——失效学体系的形成和发展(一). 理化检验——物理分册, 1999, 35(2): 76~79
 - 7 钟群鹏, 王仁智, 陈玉民, 等. 机电装备失效分析预测预防进展——失效学体系的形成和发展(二). 理化检验——物理分册, 1999, 35(3): 114~118
 - 8 钟群鹏, 张峥, 田永江. 机械装备失效分析诊断技术. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(5): 497~502
 - 9 英国中央电力局. 焊接结构缺陷验收方法指南. 英国 BSI PD6493, 1991
 - 10 张栋, 钟培道, 陶春虎. 机械失效的实用分析. 北京: 国防工业出版社, 1997
 - 11 吴连生. 失效分析技术. 成都: 四川科学技术出版社, 1985
 - 12 胡世炎. 机械失效分析手册. 成都: 四川科学技术出版社, 1999
 - 13 上海交通大学. 金属的断口分析. 北京: 国防工业出版社, 1976
 - 14 Metal Handbook. Fractography and Atlas of Fractographs. 8th ed. ASM, 1974
 - 15 Charlie R Brooks, Ashok Choudhury. Metallurgical Failure Analysis. McGraw-Hill, 1993
 - 16 American Society for Metals. Metal Handbook. 9th ed. Vol.12. Fractography. Park Ohio, 1985
 - 17 Metal Handbook. 9th ed. Vol.11. Failure Analysis and Prevention. American Society for Metals, Park Ohio, 1980
 - 18 Nishida S I, Failure Analysis in Engineering Applications, 1989
 - 19 [法国]亨利 G, [联邦德国]豪斯特曼 D. 宏观断口学及显微断口学. 曾祥华译. 北京: 机械工业出版社, 1990
 - 20 航空航天工业部航空准备失效分析中心. 金属材料断口分析及图谱. 北京: 科学出版社, 1991
 - 21 陶春虎, 钟培道, 王仁智, 等. 航空发动机转动部件的失效与预防. 北京: 国防工业出版社, 2000
 - 22 钟群鹏, 张峥. 金属疲劳宏观断口的物理数学模型和定量反推分析. 第三次全国机电装备失效分析预测预防战略研讨会. 北京: 1998
 - 23 Yan H, Tao C H, Chen Y. Quantitative analysis on initial fatigue quality by fractography and its application on failure analysis. In: Proceedings of the seventh inter. Fatigue Congress, Beijing, P. R. China, 1999: 2419
 - 24 李想, 张栋, 傅国如. 疲劳失效件断口定量初探. 全国第二届航空装备失效分析会议论文集, 1997
 - 25 钟群鹏, 金星, 洪延姬, 等. 断裂失效的概率分析和评估基础. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000
 - 26 洪延姬, 金星, 钟群鹏. 恒幅载荷 16MnR 钢疲劳裂纹扩展统计特性分析. 机械强度, 2002, 24(3): 420~422
 - 27 孙景乐, 魏邦明. 疲劳断口图像数字特征提取与失效分析. 全国首届航空装备失效分析会议论文集, 1994.10
 - 28 习年生, 刘新灵, 陶春虎, 等. 失效分析及其辅助系统的特点与计算机实现. 全国第三届航空航天装备失效分析会议论文集, 2000
 - 29 (日)盐见弘著. 失效物理基础. 杨家铿, 江擎孚, 关成勋译. 北京: 科学出版社, 1982
 - 30 冯维熹. 关于民机材料适航性问题的讨论. 航空标准化与质量, 2002(5): 42~45
 - 31 航空航天材料咨询研究组. 航空航天材料咨询报告. 北京: 国防工业出版社, 1999
 - 32 钟培道. 我国航空材料的现状、问题与发展思路. 航空科学技术, 2001(04): 13~16
 - 33 张宝诚, 刘孝安. 航空发动机可靠性和经济性. 北京: 国防工业出版社, 1998
 - 34 天津大学材料力学教研室. 光弹性法原理及测试技术. 北京: 科学出版社, 1982
 - 35 光测力学发展前景讨论会——会议纪要. 实验力学, 1988, 3(2): 210~204
 - 36 付宝连, 谭文锋. 光弹性力学的分区相似藕联势能原理及有限元法. 工程力学, 1998, 15(4): 25~33
 - 37 付宝连. 三维光弹性理论的新进展. 现代力学与科技进步(庆祝中国力学学会成立 40 周年), 1997, 2(8): 832~835
 - 38 付宝连. 塑性力学变形理论相似非藕联变分原理和广义变分原理. 东北重型机械学院学报, 1997, 21(2): 156~161
 - 39 付宝连, 刘建军. 塑性力学相似非藕联系统的模拟变分原理. 机械工程学报, 1998, 34(6): 73~79
 - 40 张峥, 张海英, 田永江, 等. 叶片疲劳应力幅的断口特征形貌判断. 中国机械工程, 2001, 12(3): 337~339
 - 41 钟群鹏. 金属断口宏观特征形态与力学参量之间的定量关系. 兵器材料与力学, 1984(1): 2
 - 42 谢明立, 习年生, 陶春虎. 疲劳应力的断口反推研究.

航空材料学报, 2000, 20(3): 44~47

- 43 钟群鹏, 武淮生, 田永江, 等. 我国压力容器安全评定技术的现状和发展. 中国机械工程, 1997, 8(5): 95~100
- 44 武淮生. 结构完整性概率 R6 评定方法的研究: [博士学位论文]. 北京: 北京航空航天大学研究生院, 1996
- 45 左尚志. 在用压力管道可靠性安全评估及安全等级评定技术研究: [博士学位论文]. 北京: 北京航空航天大学, 1999
- 46 Flaw Evaluation Procedures and Acceptance Criteria for Austenitic Piping. New York: The ASME, 1995
- 47 Flaw Evaluation Procedures and Acceptance Criteria for Austenitic Piping. New York: The ASME, 1995.
- 48 Kanninen M F. Instability Predictions for Circumferentially Cracked Type 304 Stainless Steel Pipes under Dynamic Loading. [s.l.]: EPRI NP-2347
- 49 Hasegawa K. Consideration of allowable flaw size for pressurized pipes. Nuclear Engineering and Design, 1985, 87: 307~311
- 50 Wilkowski G M, Eiber R J. Evaluation of tensile failure of girth weld repair grooves in pipes subjected to offshore laying stresses. J. Energy Res. Tech., 1981, 103: 48~55
- 51 带裂纹构件安全评定规程——手册. 李培宁译, 1991
- 52 压力容器缺陷评定规程编写组. 压力容器评定规程. 1984
- 53 含缺陷压力容器缺陷评定编写组. 含缺陷压力容器评定. 1985
- 54 郑修麟. 金属疲劳的定量理论. 西安: 西北工业大学出版社, 1994
- 55 张栋. 确定飞机机体日历寿命的方法. 航空学报, 1999, 20(6): 558~561
- 56 张栋. 确定飞机日历寿命用的当量环境谱研究. 航空学报, 2000, 21(2): 128~133
- 57 张栋. 飞机结构件在当量环境谱下的加速腐蚀试验和日历寿命估算方法. 航空学报, 2000, 21(3): 558~561
- 58 张福泽. 金属机件腐蚀损伤日历寿命的计算模型和确定方法. 航空学报, 1999, 20(1): 75~79
- 59 陈群志, 刘文斑, 陈志伟, 等. 腐蚀环境下飞机结构日历寿命研究现状与关键技术问题. 中国安全科学学报, 2000, 10(3): 42~47

CONTENTS AND SCIENTIFIC PROBLEMS DISCUSSING OF FAILURE RESEARCH OF THE ELECTROMECHANICAL EQUIPMENT

Zhong Qunpeng

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

Fu Guoru

(Beijing Aeronautical Technology Research Center)

Zhang Zheng Luo Hongyun

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

Abstract: The concepts and contents of failure research are proposed. The failure information, which included failure objects, failure phenomena and failure environment, could be concluded into five kinds, sixteen classes, and fifty-two species. It could be used to establish failure diagnosis system to diagnose failure mode, reasons and mechanism. It includes failure diagnose, failure forecast and failure prevention in failure research. There are eight problem in failure diagnose. These problems are diagnosing technology and way of fractures and cracks, synthesis diagnosing technology and way of failure, quantify diagnosing technology and way of failure, probability, faintness and brainpower diagnosing technology and way of failure, environment diagnosing technology and way of failure, material capability system and token technology, counting testing and illation of stress technology and way, simulating technology and way of failure. There are prediction and prevention problems in failure prediction and failure prevention fields. These ten problems are investigated from theory and practice in detail. In last, the evaluative trend of failure research is pointed out.

Key words: Electromechanical equipment Failure research

Contents Scientific problems

作者简介: 钟群鹏, 男, 1934 年生, 北京航空航天大学学术委员会主任, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士。现任国家安全生产专家组专家、专业组组长, 中国机械工程学会副理事长、常务理事、学术委员会主任, 《机械工程学报》编委会主任。主要从事材料科学和工程、机电装备的失效分析预测和预防、材料环境行为及其控制等方面的教学和科研, 主持或参加了 500 余次机电装备重大失效事故的分析、诊断和预防决策, 承担多项国家“973”项目、国防预研项目、国家科委项目等重大课题。曾获国家级、部委级奖励 10 余项, 出版专著和发表论文 100 余篇(部)。