

机电装备的 失效分析、安全评定和无损检测

钟群鹏, 武淮生, 张峥, 田永江

(北京航空航天大学, 北京 100083)

[摘要] 从认识论的高度阐明失效、失效分析和预防在人类科学技术发展中的属性、地位和作用。失效分析和预防具有多学科交叉综合的属性, 它的发展依赖于应用学科、应用基础学科、甚至于基础学科的发展, 但又对它们的发展起重要反转作用和影响。因此, 它是科学技术第一生产力中最积极、最活跃的因素之一。从方法论的角度进一步叙述了失效分析与失效预防之间的辩证关系。失效分析是一种事后的逆向思维过程, 它是从异常现象(结果)到因素(模式、原因和机理)的反向科技探索, 而失效预防(安全评定)则是从因素到结果的一种事前的正向思维过程。逆向思维与正向思维协同并用, 事后分析转化为事先分析, 构成科学技术研究活动和科技发展的全过程, 两者不可偏废。综述了失效分析和失效预防(安全评定)的主要内容、技术、方法和它们的发展趋势, 并提出它们与无损检测技术之间的关系。

[关键词] 机电装备; 失效分析; 安全评定; 无损检测

前言

机电装备丧失应有功能称为失效^[1]。分析诊断其失效的模式、原因和机理, 研究采取补救、预测和预防措施和方法的技术活动和管理活动叫做失效分析预测预防, 简称失效分析和预防^[2]。失效分析是一种事后的逆向分析, 即从异常现象(结果)到因素(含模式、原因和机理)的分析; 而失效预防则是一种事前的分析, 即从因素到结果的正向分析^[3]。失效分析要强调适时性、公正性和准确性; 失效预防则要求针对性、可行性和可靠性。将失效分析与安全评定相结合, 即逆向思维与正向思维协同并用, 努力将“事后的分析”逐渐转化为“事前的分析”, 发展一整套完整的理论、技术和方

法, 是广大科技工作者共同的奋斗目标。失效分析和安全评定中各自采用一些不同的技术和方法, 而无损检测则是失效分析和安全评定中共同采用的、不可缺少的基础技术和方法之一。下面就失效分析、安全评定和无损检测三个方面分别加以综述。

1 机电装备的失效分析

1.1 失效分析的作用和地位

失效分析的主要内容是指失效模式分析、失效原因分析和失效机理分析三个层次^[4]。

从认识论看, 失效是人们主观认识与客观事物相互脱离或不相符合的结果, 它发生与否, 是不以人的意志为转移的。失效分析就是按事物发展的规律, 去重新认识事物面目的过程, 它是变失败(失

[收稿日期] 1999-06-23; 修回日期 1999-07-07

[作者简介] 钟群鹏(1934-), 男, 浙江上虞市人, 北京航空航天大学教授, 博士生导师

效)为成功的基本钥匙,是人们认识客观事物的知识源泉。失效分析、改进提高、再失效分析、再改进提高,如此往复循环、螺旋上升、飞跃发展,就是人类科学技术发展的全过程^[5]。因此失效分析是人们自觉或不自觉地不断进行着的基本科技探索和研究思维的基本活动之一。

失效分析对科技发展的具体作用,可以从经济、工程、社会生活和科技发展等方面进行阐述。它在经济上的作用和地位主要反映在:它是防止失效事故再次重复发生、减少经济损失或人员伤亡的必由之路,是对国内外进行经济索赔的科学技术依据,是创建名牌产品的重要途径,是各级领导进行经济决策的重要参考资料;失效分析在工程上的重要作用可以概括为:它是提高机电产品质量和振兴机电工业的有效途径之一,是促进工程技术进步的重要手段和杠杆,是机电产品可靠性工程的基础技术工作,是机电产品维修工作的技术基础和前提条件;失效分析在社会生活中的作用和地位是十分明显的,主要表现在:它是促进安全生产、保护生产力的有效武器,是保证社会安定、生产持续稳定发展的重要条件之一,它还是社会主义制度优越性的重要体现^[2];失效分析在科技发展上的作用和地位也逐渐被人们所认识,它的发展依赖于应用学科、应用基础学科甚至基础学科的发展,但又可以对它们的发展提供重要的“信息”,对它们的发展和进步产生重要的反转作用和影响,因此,失效分析是第一生产力中最积极、最活跃的因素之一。当今,高科技的发展已成为国民经济和国防技术发展的主要关键和制约因素,而高科技的发展更依赖于对高科技的失效分析和预防。因此,高科技的发展不仅不会使失效分析和预防自行“消亡”,反而会进一步得到“强化”,使失效分析和预防本身成为高科技发展中的重要组成部分^[5]。

总之,失效分析是从过去着手,着眼于未来和进步的科技领域;是从失效着手,着眼于成功和发展的科技领域。

1.2 失效分析的主要技术和方法

一个重大失效事故失效分析的基本步骤和采用的主要技术和方法应该是科学的、合理的和有针对性的。

失效分析的基本类型有:功能分析、参数分

析、残骸分析、材料性能分析、力学分析、逻辑分析、系统分析等。

失效分析的主要方法可分为:物理方法、化学方法、力学方法、数学方法、系统工程方法(可靠性分析方法)等。

失效分析中的物理、化学分析的主要技术和方法是:残骸分析、断口分析、裂纹分析、材质分析、应力分析、工艺分析和环境分析等。

事故残骸往往是失效事故分析的主要依据。残骸分析的主要目的是对首先破坏件的确认诊断以及对首先破坏件的分析。

断口分析和裂纹分析是残骸分析中的主要方法。分析断口和裂纹的主要目的是分析断裂(爆炸)的性质(模式)、原因和机理。

在失效分析中还经常涉及材质分析、应力分析、工艺分析和环境分析,以便为断裂(爆炸)模式、原因和机理的分析诊断提供材质、应力、工艺和环境方面的科学依据。

上述单项专门的分析诊断是整个事故分析的基础,但仅仅只有单项的分析诊断是不够的,还必须对整个事故进行综合的分析诊断,综合分析的要点是在初步综合分析诊断失效模式、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,以进一步得到证实,并对预防或补救方法也有所设想,对存疑的问题做进一步的分析和深入的研究,最后得出公正的、准确的和科学的结论。

1.3 失效分析技术的发展趋势

机电装备的失效分析和预测预防越来越显示出它的生命力和潜力。当前,它正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:从考虑材料在简单服役条件下的性能发展到分析材料(构件)在复杂服役条件下损伤演化机制;从失效机理的定性研究发展到利用各种数学物理模型和现代实验技术为基础的定量分析;从一般的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、寿命的控制和定寿、延寿的全过程的研究:从一种简单实用的事故分析技术向一门分支学科——“失效学”方向发展,正处于感性向理性转变的重要时刻。

2 机电装备的安全评定

失效预测是由剩余寿命预测、安全评定和可靠性预测三部分组成, 前两者一般用于构件, 后者则一般用于系统, 因此, 安全评定是失效预测中的重要组成部分^[4]。

安全评定(或安全评估)又称为安全预测。安全评定就是按“合于使用”原则对含缺陷零件进行安全与否的评价。安全评定的三要素是应力、缺陷和材料的力学性能。根据不同的失效模式——静态失效模式或动态失效模式, 大致可以将安全评定技术划分为断裂与塑性破坏安全评定和疲劳安全评定两种。其它失效模式的安全评定基本上是这两种失效模式安全评定技术和方法的扩展和延伸。

2.1 断裂安全评定

断裂安全评定的技术和方法是通过国际通用的失效评定图技术实现的。失效评定图是以英国中央电力局(CEGB)的“双判据”评定法(通常称为R6评定法)为基础, 结合美国通用电气公司(GE)得到的形变塑性理论解, 扩充了R6失效评定图的使用范围, 使之能用于分析应变硬化材料并考虑二次应力(残余应力或热应力), 随后完善发展起来的, 其评定依据是双参数的失效评定图。失效评定图是一个以 K_r ($K_r = K_I/K_{IC}$, K_I 为裂尖附近的应力强度因子, K_{IC} 为材料的断裂韧度值) 为纵坐标, 以 L_r ($L_r = P/P_0$, P 为向零件施加的一次载荷, P_0 为材料的塑性屈服极限载荷) 为横坐标, 以国际通用的失效评定曲线式(1)为界线

$$K_r = (1 - 0.14L_r^2)[0.3 + 0.7\exp(-0.65L_r^6)] \quad (1)$$

并以不同数值的 L_r^{\max} 为截止线围成的一个图形(图1)。实际零件的评定点落在图形之内为安全, 落在范围之外为不安全; 评定点落在纵坐标上或靠近纵坐标为脆性断裂, 落在横坐标上或靠近横坐标为塑性破坏或准塑性破坏。断裂安全评定研究的主要任务是如何计算在各种缺陷类型、大小、分布和各种材料力学性能条件下, 零件的 K_r 、 L_r 值和失效评定图中评定点位置的确定。

2.2 塑性破坏安全评定

塑性破坏评定也适用于凹坑缺陷。压力容器的凹坑缺陷的塑性破坏评定是指采用塑性极限准则对

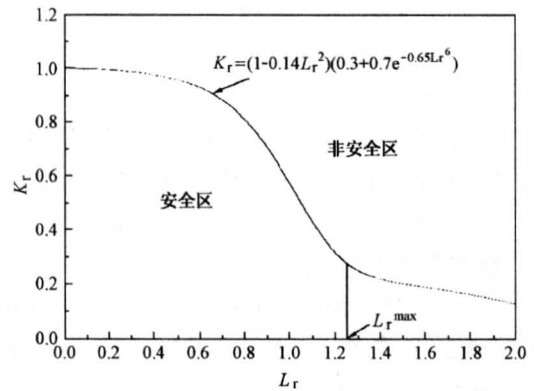


图 1 通用失效评定图

Fig. 1 General failure assessment diagram

凹坑缺陷的安全与否进行评定。它是根据凹坑缺陷的极限载荷图进行的。凹坑缺陷的极限载荷图是以带凹坑的压力容器极限载荷 P_L 与无凹坑的压力容器的极限载荷 P_{L_0} 的比值 P_L/P_{L_0} 为纵坐标, 以凹坑的无量纲的几何参量 G_0 ($G_0 = \frac{C}{T} \frac{A}{\sqrt{RT}}$, A 为凹坑缺陷的半长轴, C 为凹坑的深度, T 为压力容器的壁厚, R 为凹坑所在部位压力容器的平均半径, $\frac{C}{T}$ 表示凹坑缺陷的相对深度, $\frac{A}{\sqrt{RT}}$ 表示凹坑缺陷的相对长度) 为横坐标, 以下列直线作为界线的图形(图2):

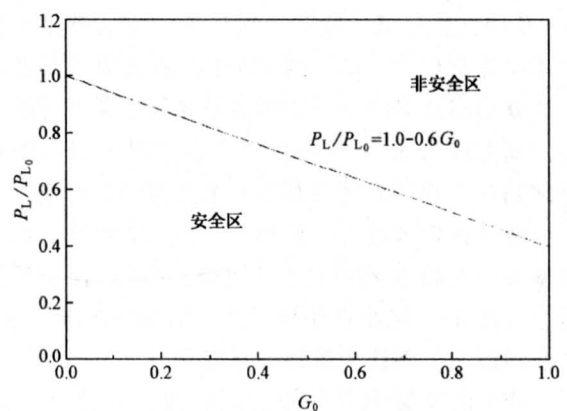


图 2 球壳外壁球形凹坑极限载荷拟合曲线

Fig. 2 Regression curve of limit loads for spherical vessels containing dent defects

对球形容器

$$P_L/P_{L_0} = 1.0 - 0.6G_0 \quad (2)$$

实际的评定点落在图形的范围内为安全，落在范围外为不安全。

凹坑缺陷的塑性破坏评定研究的主要任务是如何计算存在或不存在凹坑的情况下，各种形状的压力容器（或其它零件）的塑性极限载荷问题。

2.3 疲劳安全评定

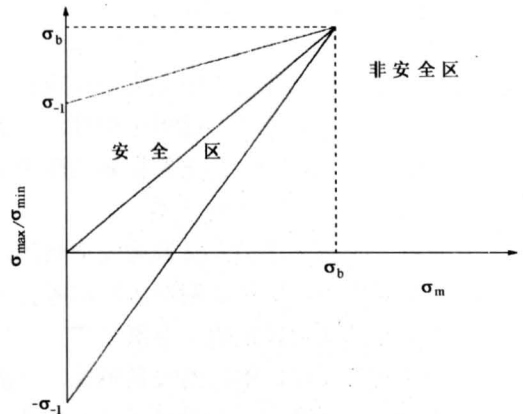
对光滑试件（构件）的疲劳安全评定方法可以按照二级疲劳模式——是应力疲劳还是应变疲劳——来确定。如果是应力疲劳，它的疲劳安全评定可按疲劳极限线图来进行；如果是应变疲劳，则应按 Manson-Coffin 公式计算。

疲劳极限线图分为两种：第一种疲劳极限线图以平均应力 σ_m 为横坐标，最大应力 σ_{max} 及最小应力 σ_{min} 之比为纵坐标，如图 3a 所示。第二种疲劳极限线图是以平均应力 σ_m 为横坐标，以应力幅 σ_a 为纵坐标，以 σ_{-1} 与 σ_b 之间的关系曲线为极限线组成的图形（图 3b）。实际受力的 σ_a 和 σ_m 点在图形范围内为安全，在图形范围外为不安全。可见，光滑试样（构件）疲劳安全评定技术的关键是应力幅和平均应力的计算方法问题。

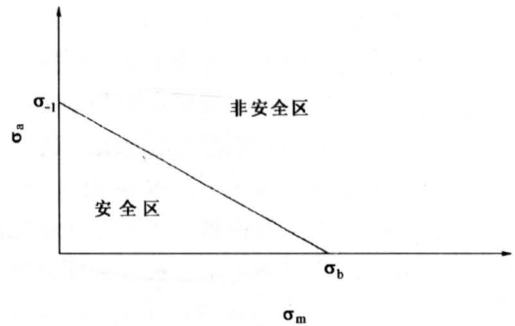
对有缺陷（裂纹）的构件的疲劳评定方法具体可以按简易评定法和断裂力学分析法来进行。

众所周知，如果材料中有夹渣和气孔或有面型缺陷等，其疲劳强度将有所降低，缺陷越严重，其 S-N 曲线就越低。疲劳的简易评定方法就是根据上述原理制定的。英国的 PD6493 的疲劳简易评定方法就是将众多的 S-N 曲线归并为 5 条平行的直线，其方程为 $S^3N = \text{常数}$ 。将不同严重程度的各种缺陷按其疲劳强度归并为 6 个疲劳评定等级，每一个疲劳评定等级有一条相应的 S-N 曲线。如果按施加应力幅 S 和循环数 N 标绘在疲劳评定等级图上（图 4），标绘点如处于该缺陷相应等级的 S-N 曲线以下，则认为该缺陷是安全的。

疲劳的断裂力学分析方法的理论基础是 Paris 公式，即 $da/dN = A (\Delta K)^n$ 。按不同类型的缺陷，先对 Paris 公式积分，求得经一定使用周期的裂纹扩展量，再由材料的断裂韧度，计算出允许裂纹的临界尺寸，这两者（裂纹扩展和临界尺寸）相比，即可判定安全与否，或估算其最大的使用周期数（寿命）。



a) 第一种



b) 第二种

图 3 疲劳极限线图示意图

Fig.3 Schematic diagram of fatigue limit lines

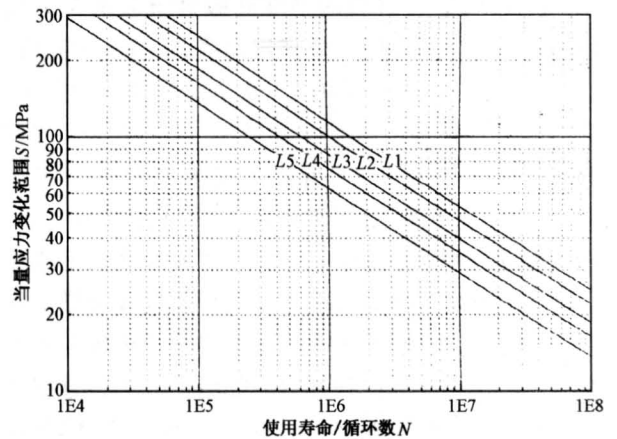


图 4 疲劳评定等级图

Fig.4 Ranking diagram for fatigue assessment

2.4 安全评定技术的现状和发展^[6]

我国在制定和实践“压力容器缺陷评定规范”(CVDA—84)的基础上,在完成“八五”国家科技重点项目“在役锅炉压力容器安全评定与爆炸预防技术研究”之后,于1995年提出了“在役缺陷压力容器安全评定规程”(SAPV—95)(第四稿)(简称“规程”)。这个“规程”是以近代科学技术发展为其理论基础,充分吸收国内外压力容器安全评定技术和规范最新研究成就和发展趋势,积极继承我国CVDA—84规范的精华,密切吸取十多年来在压力容器安全评定工程实践经验和系统综合攻关科研成果的基础上提出来的。它对体积型缺陷的安全评定采用我国首创的凹坑缺陷压力容器塑性极限载荷分析法,在平面缺陷的断裂评定和塑性破坏评定中,采用了三级评定和失效评定图技术及我国独有的处理二次应力工程分析方法和更符合实际的塑性修正因子 ρ ,以及我国研究的裂纹(缺陷)间的弹塑性干涉效应系数 G 等,使得这个“规程”具有90年代国际先进水平。这是我国压力容器安全评定技术和方法的一大进展,对我国压力容器和其它构件的安全可靠使用具有重要的作用。

虽然我国在结构完整性评定技术和方法方面取得了很大的进步和提高,但是我们在以下诸多方面还需要进一步的深入研究:

- (1) 深入研究各类缺陷的起裂、扩展、撕裂、失稳等断裂全过程的安全评定技术体系、有机衔接和合理应用,包括深入研究与裂尖三维约束程度有关的多参量塑性断裂、非匹配焊缝、缺陷等高应变区的断裂分析工程方法和裂纹的非J积分控制扩展的静载断裂评定技术等;
- (2) 深入研究除室温静载断裂失效模式以外的其它断裂失效模式,如蠕变断裂、应力腐蚀断裂、腐蚀疲劳断裂等与环境、介质、时间有关的断裂失效模式的安全评定技术和方法;
- (3) 建立我国独有的、涉及压力容器和压力管道及其它构件的、包括安全评定和安全状况等级划分的安全预测技术体系、方法及其软件。

3 机电装备的无损检测

无损检测是进行失效分析与“合于使用”安全评定的基础技术和共同方法之一。无损检测结果的正确性和缺陷(特别是裂纹的高度)检测的精确度,将直接影响失效分析和安全评定结论的合理性与准确性。失效分析和安全评定对缺陷无损检测的要求,要比常规无损检测更为准确、可靠,所采用的无损检测技术、方法和设备应根据分析和评定的要求和缺陷类型加以合理的选择并确认是有效的,以便提供达到满足精度要求的缺陷类型、数量、尺寸、分布、形状和位置等定量信息。对于检测结果,应根据具体情况作偏于保守的处理。

按缺陷(或裂纹)形成的阶段不同,可以把缺陷(或裂纹)分为制造缺陷和使用后形成的缺陷两类。制造缺陷一般只与设计制造过程、工艺和参数等有关;使用后形成的缺陷一般不仅与设计制造有关,而且主要与使用介质、工艺及历史等因素有关。因此无损检测不仅要给出缺陷的尺寸、数量、分布、位置等定量的数值,而且要鉴别缺陷的性质。鉴于在使用期间形成的缺陷(或裂纹)一般要比制造时存在的缺陷危险得多,因此,在评定时应更加慎重。

在对使用期间形成的缺陷(或裂纹)进行分析时,首先要对缺陷形成的主要原因进行诊断。结构的失效模式与缺陷(或裂纹)形成有密切关系,缺陷成因分析是判断失效或潜在失效模式和选择评定方法的基础,不同的失效模式应采用不同的评定方法进行安全评定。只有首先诊断缺陷成因并确定可能的失效模式,然后才能按可能引起的失效模式分别进行相应的安全评定^[7]。因此无损检测在失效分析和安全评定中具有重要的作用和地位。

从学术观点来看,无损检测已成为一门综合性较强的理论学科,而不像过去那样仅被作为一种技术手段来对待。这是由于它所涉及的领域已不局限于无损检测和试验,还涉及到材料的物理性质、制造工艺、产品设计和断裂力学等多种学科和专业技术领域。因此可称为“无损检测学”,还有人将无损检测学称为“非破坏检查工程学”。为此,从事无损检测工作的技术人员,不仅应具备非破坏试验方面的知识,而且还应具备物理、生产、设计、断

裂力学等方面的知识^[8]。

材料损伤或失效的无损检测与监测是利用材料内部结构的异常变化,缺陷的存在对热、声、光、电、磁等反应的变化或材料与环境界面周围局部环境的变化,来评价结构的异常和缺陷的存在形式以及危害程度。因此,它是材料与结构使用状态的度量,是寿命预测的基础,是寿命控制手段的选择依据。它不仅是目前研究的热点,而且对失效的预防、控制与微缺陷的修复具有重要价值。已发展起来的无损检测方法有射线法、超声法、磁粉法、涡流法、渗透法、阻抗法等等。近年来,随着高技术不断发展,已向着小试样、微量检测方向发展。然而,由于小试样对机械加工或表面状态更敏感,试验过程中温度存在一定的变化,必然要导致数据存在较大分散性。由于失效过程的时间相关性,局部的微量探测通常较难确定损伤状态。但是,通过几种方法的复合与集合应能解决该问题。因此,在这些方面,不仅在基础理论上亟待有所突破,而且也急需相应的技术发展。

参考文献

- [1] Shi Changxu. Talking about failure analysis [P]. Proceedings of international conference on failure analysis and prevention (ICFAP' 95), June 23~26, 1995
- [2] 钟群鹏, 田永江, 张峥, 等. 机械工程学报, 1993, 29 (5): 21~27
- [3] 钟群鹏, 田永江. 失效分析基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1989. 21~22
- [4] 钟群鹏, 王仁智, 陈玉民, 等. 理化检验, 1999, 35 (2): 76~81
- [5] 钟群鹏, 王仁智, 陈玉民, 等. 机电装备的失效分析预测预防与科技发展 [C]. 中国科协首届学术年会论文集. 1999
- [6] 钟群鹏, 李学仁, 武淮生. 中国锅炉压力容器安全, 1997, 13 (2): 4~8, 13 (3): 3~8
- [7] 李学仁, 钟群鹏, 李培宁, 等. 国标含缺陷压力容器安全评定(征求意见稿). 北京, 1999
- [8] 石井勇五郎. 无损检测学 [M]. 吴义, 王东江, 沐志成译. 重庆: 机械工业出版社, 1986. 1~5

Failure Analysis, Safety Assessment, and Nondestructive Testing for Mechanical and Electrical Equipment

Zhong Qunpeng, Wu Huasheng, Zhang Zheng, Tian Yongjiang

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

[Abstract] This paper, from the viewpoint of epistemology, clarifies the position, role, and attributes of failure analysis and prevention in the development of science and technology. The discipline of failure analysis and prevention is multidisciplinary and inter-synthetical. It depends on the development of both applied sciences and pure sciences and has great positive effects on them. So, it is one of the most active factors in the conclusion of "Science and technology are the first productivity." This paper also describes the dialectic relationship between failure analysis and failure prevention methodologically. While failure analysis is a process of converse thinking expost factor, which explores scientifically causes from results, the failure prevention is a process of prior thinking, which predicts results from causes. It is necessary to utilize the both thinking methods simultaneously and convert the afterwards analysis to the prior one for the development of science and technology. Finally, this paper summarizes the main contents, techniques, methodology, and future trends of failure analysis and prevention and the relationship between nondestructive testing and failure analysis and prevention.

[Key words] mechanical and electrical equipment; failure analysis; safety assessment; nondestructive testing