

飞机结构腐蚀监测技术现状及发展趋势

于海蛟, 王逾涯, 陈群志

(北京航空工程技术中心, 北京 100076)

摘要: 简要介绍了腐蚀监测技术的分类, 阐述了飞机结构腐蚀监测几种常用技术的工作原理, 从技术角度分析了其优缺点, 重点介绍了新型腐蚀监测系统的研发及其应用现状, 根据我国飞机使用特点与工程实际情况, 阐明了腐蚀监测技术的发展及主要应用方向。

关键词: 腐蚀; 维护; 腐蚀监测

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2014.06.012

中图分类号: TG174.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)06-0070-09

Progress and Prospect of Corrosion Monitoring Techniques of Aircraft Structure

YU Hai-jiao, WANG Yu-ya, CHEN Qun-zhi

(Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: The classification of corrosion monitoring techniques was briefly introduced, the operating principles of the frequently used corrosion monitoring technique of aircraft structure were described, the advantages and disadvantages of each technique were presented, and the R&D and application state of the new-type corrosion monitoring systems were highlighted. Finally, the future development and prospects of the corrosion monitoring techniques were discussed on the basis of service characteristics and engineering practices of Chinese aircrafts.

KEY WORDS: corrosion; maintenance; corrosion monitoring

腐蚀是飞机结构的一种主要损伤形式, 达到一定程度后会诱发事故, 严重情况下甚至导致机毁人亡。从寿命期成本看, 由腐蚀带来的逐年增加的维护费用也是影响飞机经济使用的主要因素。2001年, 美国空军军用飞机腐蚀带来的损失超过了10亿

美元, 其中一些机型的机体结构腐蚀带来的直接经济损失超过20万美元; 2007/2008年度, 仅海军和海军陆战队的飞机腐蚀维护费用就约为30亿美元。我国军用和民用飞机也普遍存在不同程度的腐蚀和老化问题, 导致有些机种的出勤率降低, 维修工作量

收稿日期: 2014-10-25; 修订日期: 2014-11-04

Received: 2014-10-25; Revised: 2014-11-04

作者简介: 于海蛟(1982—), 女, 内蒙古人, 博士, 工程师, 主要从事飞机结构日历寿命、疲劳寿命、以及飞机结构的腐蚀与防护等方面的研究。

Biography: YU Hai-jiao(1982—), Female, from Inner Mongolia, Ph. D., Engineer, Research focus: calendar life and fatigue life of aircraft structure, and corrosion and protection of airframe.

通讯作者: 王逾涯(1974—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为结构材料腐蚀与防护, 寿命预测。

Corresponding author: WANG Yu-ya(1974—), Male, Ph. D., Senior engineer, Research focus: structural material corrosion and protection, life prediction.

及其费用大幅度增加^[1]。腐蚀问题已成为当前乃至今后制约各国飞机正常使用的一个重要因素^[2]。

研究表明,一方面,腐蚀只能有效抑制而无法根本消除;另一方面,腐蚀是随着飞机服役年限增加而日益增加的问题,特别是超出了原定日历寿命时更是如此。为了提高飞机的安全性和可靠性,飞机服役期间的腐蚀检查和监测变得尤为重要^[3]。飞机结构的腐蚀是一个长期而复杂的过程,腐蚀介质的类型、温度、湿度、离子浓度、应力状态等都会对腐蚀过程有影响,因而腐蚀检查和监测也不只是关注一两个指标就能够解决的问题^[4]。传统的检测方法如目测法、取样法、无损检测等往往存在检测指标单一、可靠性较差、可能引入意外损伤等问题。特别是对于隐蔽、狭小、不易到达的结构,这些传统方法的局限性更大,甚至完全不适用。目前可用的检查方法往往要耗费大量的人力和物力,同时,检查不及时往往会贻误腐蚀修理最佳时机^[5]。因此,如果能够发展一种可靠的可以早期发现腐蚀的传感检测系统,诊断飞机结构内部隐藏部位由于腐蚀引起的“病变”、提早预防,既可以避免重大事故的发生,又可以显著改善工作效率、降低维护费用、延长飞机日历寿命^[6]。由此可见,腐蚀监测技术的发展已成为腐蚀控制、预防重大事故发生的前提和技术基础。

飞机结构腐蚀监测的主要内容及目的可归纳为以下9个方面:检测结构是否遭受严重腐蚀;判断腐蚀损伤的程度、位置和腐蚀形态;初步分析腐蚀的类型和原因;监测腐蚀控制方法的使用效果(如选材、工艺防腐);对腐蚀产生的系统隐患进行预警;判断是否需要采取工艺措施进行防腐;确定防腐的基本措施;评价被监测结构的使用状态,并预测其使用寿命;协助制定结构监测维修计划;指导结构设计改进。显然,飞机结构腐蚀监测是能否真正实现飞机健康状态监控一项不可或缺的技术,对于改进结构防腐设计、改善或提高安全性、提前预警、延长维修间隔和使用寿命、降低维修费用和使用维护人力与成本等具有重要作用。

1 腐蚀监测技术的分类

腐蚀监测技术是由实验室腐蚀试验方法和设备的无损检测技术发展而来的。所谓腐蚀监测,就是利用各种仪器工具和分析方法,确定结构材料在腐

蚀环境中的腐蚀速度,及时为工程技术人员反馈结构腐蚀信息,从而采取有效措施抑制或减缓腐蚀,避免腐蚀事故的发生^[7]。采用传感器来监测腐蚀是迄今为止最好的选择,它可以较早地发现结构腐蚀,很大程度上避免不必要的损失。

以前,腐蚀传感器多被应用于石油传输系统等大型固定装置,例如管道和离岸结构^[8]。与航空领域需求相比,这些应用通常对传感器质量、服役环境、灵敏度和材料等并无较高要求。近年来,腐蚀管理战略的发展大大推进了腐蚀传感器的航空应用研究。此外,商业环境的变化以及制备方法和数据记录的新发展使制造航空腐蚀传感器在技术上成为可能。

用于飞机结构的腐蚀监测技术与用在其他领域的具有相似之处,但飞机的结构特点和环境的特殊性对其提出了更高要求。例如,就飞机铝合金结构而言,常用的表面防腐工艺是:先在铝合金表面进行阳极化处理或者表面覆盖含铬底漆转变层,再喷涂底漆,最后喷面漆。对于每天在严酷环境中服役的机体结构来说,飞行和起降过程中的冲击损伤、维护过程中工具和褪漆剂造成的损伤以及高温循环和疲劳等都会使漆层退化开裂。在面漆和底漆相继开裂之后,表面处理层遭到破坏,铝合金基底就直接暴露在腐蚀环境中。飞机结构用腐蚀传感器大多基于此腐蚀过程进行研发。

飞机结构用腐蚀传感技术的种类很多,每种技术的成熟度也不尽相同。按腐蚀结果是否可以直接获得可以分为直接监测和间接监测两种。可直接得到一个腐蚀结果(如腐蚀失重、腐蚀电流等)的腐蚀监测称为直接监测,否则为间接监测。直接监测技术包括线性极化法、电阻探针法、电化学阻抗谱、电化学噪声法、直流法和电化学生物传感等方法;间接监测技术包括光学传感、声发射、pH值法以及腐蚀指示油漆等方法。

2 直接监测技术的工作原理及技术特性

直接监测的方法往往只适合局部区域的监测,除非使用多个传感器,否则不适用于大面积监测。

2.1 线性极化法

线性极化(Linear Polarization Resistance, LPR)

法也称为极化阻抗技术,其腐蚀监测的原理是电化学 Stern & Geary 定律,即在腐蚀电位附近电流的变化和电位变化之间成线性关系^[15],其斜率与腐蚀速率成反比:

$$i_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p} \quad (1)$$

式中: B 为极化常数,由金属材料 and 介质决定; R_p 为极化电阻, $R_p = \Delta E / \Delta i$ 。

当电流通过电极时引起电极电位移动的现象称为电极的极化。阳极电极电位从原来的正电位向升高方向变化,阴极电极电位从原来的负电位向降低方向变化。变化结果使腐蚀原电池两极之间的电位差减小,腐蚀电流亦相应减小。电极极化作用对氧化反应、还原反应或对腐蚀电流的阻碍力与电阻具有相同量纲,称之为极化阻抗;其值越大,腐蚀电流越小。根据给腐蚀系统输入的电流脉冲是否稳定,极化法又可分为直流极化法和交流极化法。

线性极化法在快速测定金属瞬时腐蚀速度方面独具优势,在实验室和现场快速测定腐蚀速度时是一种简单可行的方法,但其不适合在导电性差的介质中应用。当被监测结构表面有致密的氧化膜或钝化膜或腐蚀产物时,将产生假电容,引起较大误差,甚至无法测量。

美国 Analatom 公司在线性极化法的基础上开发了微线性极化(μLPR)腐蚀传感器。微线性极化传感器由 2 个以 150 μm 间距梳状交叉排列的微加工电极组成,其工程图及实物照片如图 1 所示。Brown 等人^[10]还对微线性极化阻抗传感器进行了试验验证,认为它是高价值结构(如飞行器)远程腐蚀监控可行和经济的候选传感器。

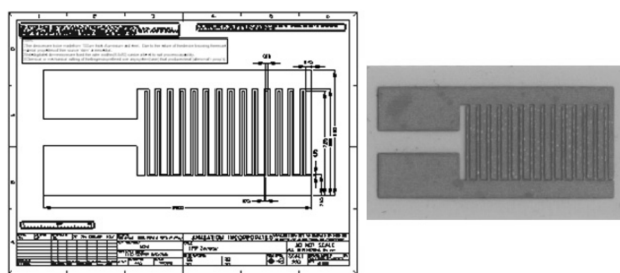


图 1 薄膜 μLPR 腐蚀传感器

Fig.1 Thin film μLPR sensor

美国海军(USN)开发的腐蚀监测仪使用的就是这种传感器。如图 2 所示,该检测仪又小又轻。

传感器元件是一个安装在柔性 Kapton 基底上的金/钼栅格,电子元件封存在硅橡胶中。该监测仪的特性在于配有无线下载系统,不用打开飞机面板即可轻易获取监测数据。

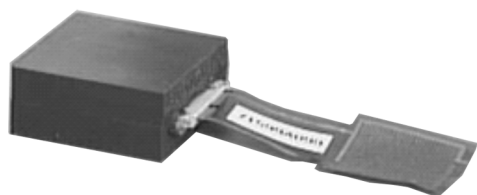


图 2 美国海军腐蚀监测仪

Fig.2 US Navy corrosion monitor

为获取飞机结构腐蚀薄弱区域的环境腐蚀数据,澳大利亚防务科学和技术组织(DSTO)正在推进多项在飞机上安装腐蚀监控设备的计划。至今,已经有多种腐蚀监控装置安装在澳大利亚皇家空军 P-3C, F-111, 波音 707 飞机上和澳大利亚皇家海军海鹰直升机上。澳大利亚防务科学和技术组织开发的监测系统使用的是与美国海军相似的直流型微线性极化传感器。该监测系统不仅可以指示腐蚀的发生,还可以指示腐蚀发生的时机,即指示飞机飞行期间和飞行后易导致腐蚀的阶段、位置和任务类型。澳大利亚防务科学和技术组织将最初开发的系统安装在澳大利亚皇家空军(RAAF)的 P-3C 和 F-111 飞机上;而澳大利亚皇家海军(RAN)的海鹰直升机上安装的则是 4 个如图 2 所示的由美国海军研发的更小更先进的腐蚀监控单元,安装位置如图 3 所示。澳大利亚皇家空军也计划在其 F/A-18 和 C-130 飞机上安装该监测系统。澳大利亚皇家空军波音 707 上安装的是一个自发结构整体监测系统(ASIMS)。



图 3 澳大利亚皇家海军海鹰直升机上的腐蚀控制仪

Fig.3 Corrosion monitors on RAN Seahawk helicopter

该监测系统是由澳大利亚防务科学和技术组织、澳大利亚公益科学与工业研究组织(CSIRO)、波音飞机公司(美国)、波音澳大利亚有限公司和澳大利亚皇家空军的一个合作项目的产物。项目由波音和澳大利亚皇家空军进行投资,由澳大利亚防务科学和技术组织负责调试安装,澳大利亚皇家空军提供后勤支持^[11]。

2.2 电阻探针法

电阻探针(Electrical Resistance, ER)腐蚀监测仪通过测量金属试件腐蚀时电阻值的变化计算金属在介质中的腐蚀速度^[12]。当金属元件遭受腐蚀时,金属横截面积会减小,电阻相应增加。通过计算电阻增加与金属损耗的关系可换算出金属的腐蚀速度(金属损耗作为时间的函数,定义为腐蚀速度)及腐蚀深度。

电阻探针技术可用于在线监测均匀腐蚀和冲刷腐蚀,其优点为:在线监测技术可对飞机结构的腐蚀状况进行连续监测,能准确反映飞机服役各阶段飞机结构的腐蚀率及变化;不受介质导电率的影响,适用于各种不同的介质,可用于绝大部分工作环境中,包括气相、液相、固相和流动颗粒等,其使用温度仅受制作材料的限制;与样片法不同,不需要从腐蚀介质中取出试样,也不必去除腐蚀产物;快速、灵敏、方便,可以监控腐蚀速度较大飞机结构的腐蚀。

电阻探针法的缺点是试样加工要求严格。灵敏度与试样的横截面有关,试样越细、越薄,则灵敏度越高;若腐蚀产物是导电体(如硫化物),则会造成测试结果误差较大;介质的电阻率过低也会带来一定误差;对于低腐蚀速度体系的测量所需时间较长,且不能测定局部腐蚀特征;监测非均匀腐蚀有较大误差,所测腐蚀速度随不均匀程度的加重而偏离。

2.3 电化学阻抗谱

电化学阻抗谱法(Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)是电阻法转化而来的一项技术。其原理是在传感器中埋设一个线圈,通过其感抗的变化来反映敏感元件厚度的减少^[13]。具有高磁导率强度的敏感元件强化了线圈周围磁场,因此敏感元件厚度的变化将影响线圈的感抗。

该方法是一种暂态电化学技术,属于交流信号测量的范畴。具有测量速度快,对研究对象表面状

态干扰小等特点。它用小幅度交流信号扰动电解池,并观察体系在稳态时对抗扰动的跟随情况,同时测量电极的交流阻抗,进而计算电极的电化学参数。Vera Cruz 等人^[14]应用交流阻抗法对不锈钢在干湿交替环境下的腐蚀进行研究,发现交流阻抗法监测金属腐蚀过程可以不受电极表面电流分布不均匀的影响,而且交流阻抗谱可以清楚地反映出钝化、孔蚀和再钝化过程,甚至可以探测到孔蚀的产生和成长。

自从 Bard 于 1982 年首次将电化学阻抗光谱法引入导电高分子的研究领域以来,许多学者应用其对各类导电高分子体系进行了广泛的研究,证实该技术对高阻电解液及许多其他介质条件有较大可靠性。目前,电化学阻抗光谱也可用于评价涂层的破坏,现已有便携装备。该体系将涂层、基底和电解液看成是一个交流回路进行建模,每个回路元素的电阻和电容由观察到的阻抗变化推算得出,推算值指示出涂层的状态。

电化学阻抗光谱法的优点在于:应用频率范围广($10^{-2} \sim 10^5$ Hz);响应时间短(几分钟)^[15];适用范围广(绝大部分会发生腐蚀的介质),可直接测量结构的腐蚀速率和潮湿程度,可探测不可见腐蚀;可以建立腐蚀体系模型,基于模型给出预测;可获得实时数据。其缺点在于:监测区域小,不足 0.0929 m^2 ;局部监测需要腐蚀区域的信息;耗材电极的价格较高。

2.4 电化学噪声法

电化学噪声(Electrochemical Noise, EN)是指电化学动力系统中电化学状态参量(如电极电位)的随机非平衡波动现象^[16]。这种噪声产生于电化学系统的本身,而不是来源于控制仪器的噪音或其他的外来干扰。1968 年, Iverson^[17]首次记录了腐蚀金属电极的电位波动现象,此后,电化学噪声技术作为一门新兴的试验手段在腐蚀与防护科学领域得到了长足发展。电化学噪声技术是一种原位无损监测技术,在测量过程中无需对被测电极施加可能改变电极腐蚀过程的外界扰动。该技术无需预先建立被测体系的电极过程模型,此外,无需满足阻纳的 3 个基本条件,而且可以实现远距离监测。

电化学噪声技术可以监测诸如均匀腐蚀、孔蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀开裂等多种类型的局部腐

蚀^[18],并且能够判断金属腐蚀的类型。Hladky 等人^[19]的研究指出,孔蚀和缝隙腐蚀的电位噪声有明显区别:孔蚀是连续发生的,而缝隙腐蚀是在一定频率下周期性发生的;缝隙腐蚀优先于孔蚀,一旦缝隙腐蚀开始,孔蚀即停止。迄今为止,它的产生机理仍不够完全清楚,处理方法仍存在欠缺。因此,寻求更先进的数据解析方法已成为当前电化学噪声技术的一个关键问题。电化学噪声技术未来的研究方向主要为结合微观世界的最新研究成果来分析电化学噪声的产生机理,以及结合非线性数学理论(如分形理论)来描述电化学噪声的特征。

为帮助维护人员在早期发现腐蚀,美国 Impact 科技公司在电化学腐蚀传感器的基础上开发出 CorrSem 腐蚀监测系统,在实现对腐蚀环境参数进行跟踪的同时,还能对腐蚀行为进行监测,如图 4 所示。该系统可用在陆基和海基的多种飞机上。

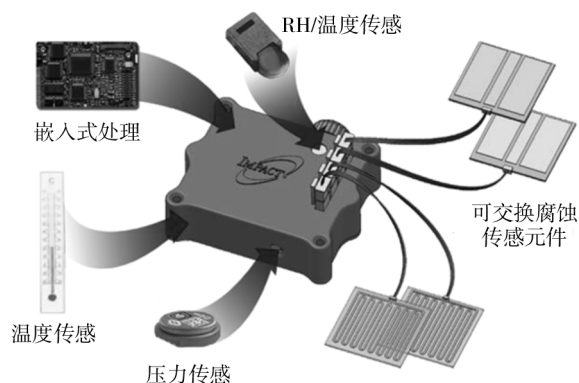


图 4 CorrSem 腐蚀监测系统

Fig. 4 CorrSem corrosion monitor system

CorrSem 腐蚀监测系统利用电化学和环境传感元件进行数据的收集、处理、分析和存储。它为腐蚀传感器供电,在传感器信号中实时抽取关键数据并存储。所用的腐蚀传感技术包括电阻探针法、电化学噪声法和电化学阻抗法。

2.5 直流法

直流法的原理是:利用不同金属制成的分离电极,产生的直流电流或电压可反映腐蚀和环境的变化^[20]。直流法的环境传感器经过与被监测结构相同的喷漆和加工工艺,保证其对环境和污染物的响应与被监测结构是相同的。腐蚀环境传感器对腐蚀环境的响应可反映被监测结构的腐蚀情况。例如,

电流传感器可通过监测其自身电阻的变化来指示腐蚀传感器的潮湿时间或其中金属元素的腐蚀。该类传感器具备体积小、质量轻、成本小、易于安装、寿命长等优点,但其输出需要进行校准,特别是对于复杂的漆层结构监测更需谨慎。

2002 年,在美国空军的支持下,Battelle 公司将直流电腐蚀传感器在 C141 飞机上进行第一次测试安装。获得成功后,又在 F16, F15, KC135 和 C130 等飞机上推广应用。在早期,所有传感器只能安装在飞机的内部结构上。随着其安全性的改进发展,传感器也可安装于固定翼飞机的外表面,而且也在旋翼飞机如 H60, CH47 和 OH58 的外表面上得到应用。传感器材料对环境的腐蚀产生响应,并与被监测材料关联。这种响应被转化为电信号,反映累积腐蚀损伤。意大利空军也已将薄膜 Au-Cd 直流电传感器成功用于监测通路不可达结构和内部结构的腐蚀,以及密封剂和涂层的老化失效。

2.6 电化学生物传感

生物诱导腐蚀又称为生物腐蚀,可用电化学传感器进行监测。电化学生物传感器(Electrochemical Biological sensors)由生物体成分(酶、抗原、抗体、激素等)或生物体本身(细胞、细胞器、组织等)作为敏感元件,以电极(固体电极、离子选择性电极、气敏电极等)作为转换元件,以电势或电流为特征检测信号,是生物传感器的一类。该传感器的优点是电极制作简便、使用寿命长、重复性好、灵敏度高、成本低、能耗少、易携带、不破坏测试样品、不受溶液颜色影响、易于实现微型化等。其缺点是寿命有限且不适合长期暴露^[21]。

近十年来,电化学生物传感器的研究工作取得了巨大进步,其性能和种类也得到了很大发展。其检测对象从单糖、氨基酸、酶等发展到更为复杂的多糖、蛋白质、核酸等多种生物大分子。目前大部分研究仍围绕着在传统的电极上研究化学修饰电极。国外的 Michael 等人^[22]最近研制出了可以同时测量多种生物的电极微阵列。Arkhypova 等人^[23]研制的集成生物传感器,对水体中有毒金属和杀虫剂的检出限达到 $10 \mu\text{mol/L}$ 。我国的一些研究组也研制出了可对多种病毒进行测定的芯片。

目前该类传感器在飞机结构上还未得到应用,但是由于其敏感元件为生物体成分,在经常发生微

生物腐蚀的整体燃油箱及附近区域的腐蚀监测上应当有良好的应用前景。

3 间接监测技术的工作原理及技术特性

3.1 光学传感

光学传感器(Optical sensors)技术是目前应用得较为广泛的飞机腐蚀监测技术。其原理是:将具有布拉格光栅的光学纤维表面涂覆电化学活性物质,活性物质可在腐蚀反应发生时产生颜色变化。这种传感器可以埋入密封剂中,且可对结构上较长的范围进行检测。

光纤腐蚀传感器是光纤传感技术与腐蚀监测相结合的产物,它具有诸多传统检测方法所不具备的优点,如体积小、质量轻、易弯曲、抗电磁干扰、耐腐蚀、抗辐射、集信息传输与传感于一体、可进行内部结构的多点监控、可进行远距离探测、特别适合于隐蔽部位以及人无法观察到和触及的危险区域的腐蚀监测等。这种传感器不仅可以安全方便地设置在腐蚀容易发生的部位(尤其是隐蔽、狭小的关键部位),而且对外界环境的变化敏感、能实现绝对测量、稳定性好、可以安全可靠地传输腐蚀信息,达到实时、无损的在线监测,从而使得飞机结构的腐蚀情况评估更为科学合理。此外,由于飞机结构监测涉及的被监测结构元件数量多、几何分布广、监测传感器的需求数量大,而光纤传感器具有径细质轻,且能在一根光纤上实现复用的优点,可以大大减少附加重量和布线需求,因而成为飞机结构监测中应用最多的一种传感器。其存在的问题是缺乏长期稳定性和易于受污染。

目前,光纤腐蚀传感器根据工作原理也分为很多种:基于倏逝波的、探测透射光功率的金属包层光纤腐蚀传感器,基于光纤光栅的金属腐蚀传感器,基于荧光光谱的金属腐蚀传感器,基于对腐蚀产物探测的传感器,基于湿度和 pH 值监测的传感器和基于 Cl 离子监测的传感器等。

近年来,越来越多的研究者开始关注光纤传感技术。Rutherford 等^[24]提出用物理气相沉积法将 Al 沉积在光纤芯上构成光纤腐蚀传感器。黎学明等^[25]和 Li 等^[26]分别报导了在敏感区的光纤芯上电镀 Fe-C 合金膜和 Ag/Fe-C 合金膜得到光纤腐蚀传

感器的研究。Abderrahmane 等^[27]和 Benounis 等^[28]分别通过在光纤上沉积 Ni-P 和无电镀沉积 Cu 膜的方法得到了性能优良的腐蚀传感器。董飒英等分别在光纤芯上热蒸镀 Al 膜^[29]和物理蒸镀 Fe/电镀不锈钢膜^[30],得到的光纤传感器性能优良。在 Wright 实验室资助的项目中,波音空间防务集团研究了 3 种探测和监控隐藏腐蚀的先进方法,其中一种就是光纤腐蚀传感器。周期性监测的传感器指示飞机特殊部位腐蚀的出现及其严重程度^[31]。

Mendozat 等人^[32]针对光纤传感器在飞机上的应用开展了两方面研究:一方面,光纤传感器对水或 pH 值的改变都很敏感,会为维护人员及时指示出搭接接头和其他无法接触的关键部位是否有水出现;另一方面,传感器也可精确指示出水汽渗透是在什么部位发生的。在典型应用中,将传感器纤维埋在沿飞机结构腹板的搭接接头中,或安装在机翼上。

3.2 声发射技术

声发射(Acoustic Emission, AE)是固体变形或破坏时产生的声音作为弹性波放出来的现象^[33],该弹性波可由声发射传感器探测到。声发射传感器的检测元件除特殊情况外都用 PZT(钛酸铅锆)。PZT 等压电材料具有加力后产生电荷的特性,金属表面传播的声发射波传到声发射传感器内的 PZT 上,转换为电信号输出。小的变形或微小裂纹的发生和发展都伴随声发射的发生。故通过该方法可探测到人所不能感知的危险信号,可预知和发现材料或构造物的缺陷或破损。目前,在腐蚀监测领域,该技术广泛用于检测腐蚀扩展和应力腐蚀开裂。

声发射检测法类似于以超声波范围(约 100 kHz ~ 10 MHz)信号为对象的超声波探伤法,但是从材料缺陷本身发出的动能来检测这一点却与其他无损检测方法不同,具有以下优点:轻便,可遥控实时监测腐蚀破坏的扩展;使用多个声发射传感器可对腐蚀破坏位置进行定位;可对运转中的设备进行诊断,能实现永久性记录。

其缺点是:探头必须良好地耦合在被检物表面,要求位置适当;检测结果不直观;适用范围窄,目前只适用于应力腐蚀和腐蚀疲劳裂纹扩展的监测;对试验系统及环境噪声干扰很敏感,对于高塑性材料还会因其声发射信号幅度小而影响检测灵敏度等。

3.3 pH 传感器

基于离子浓度的 pH 传感器(pH sensors),其工作原理主要是检测被测结构的 H^+ 浓度并转换成相应的可用输出信号^[34]。根据 H^+ 浓度的变化,可判断腐蚀的发生以及腐蚀程度。pH 传感器通常由化学部分和信号传输部分构成。

这种传感器比传统的腐蚀传感器适应力更强,可适应长期的潮湿环境,寿命更持久,可以长期监测环境情况,当到达腐蚀阈值时发出预警。因此,其对安全结构的监控更有效,但 pH 传感器在使用前必须进行校准,且校准时间较长。

3.4 腐蚀指示漆

腐蚀指示漆(Corrosion-indicating Paint)通过改变颜色或荧光特性来反映腐蚀带来的化学变化。这些化学变化可以是监测部位 pH 值的改变,也可以是氧化或金属阳离子配位等。腐蚀指示漆是俄亥俄州立大学的研究人员 Frankel 等人专门为飞机损伤早期预警系统研制的。与其他腐蚀监测手段相比,腐蚀指示漆不仅可以显示隐藏腐蚀,而且具有灵敏度高、价格低廉的优势。其他传感器只能监测到所探测区域的情况,而喷涂在整个飞机结构上的腐蚀指示漆可以指示飞机上很多潜在腐蚀关键部位的腐蚀。目前,腐蚀指示漆还处于研发阶段。

除以上几种技术之外,还有一些适用范围相对较窄的直接监测腐蚀的方法,如无法用于实时在线分析的腐蚀样片法(Corrosion Coupons)、超声波测厚法(Ultrasonic Wall Thickness Measurements, UT)和尚需完善的基于微机电系统(Microelectromechanical Systems, MEMS)的方法^[35]等。

4 腐蚀监测系统的发展趋势

4.1 各种腐蚀监测技术的协同作用

在现实使用过程中,每种腐蚀监测技术都有其自身的特性,适合于监测某一种或几种类型的腐蚀。采用单一的腐蚀监测方法往往不能满足要求,通常需要同时采用多种方法才能获得较为准确可靠的腐蚀监测信息。例如,电阻探针腐蚀监测数据通常需用腐蚀样片法数据进行校正,以防止由于探头污染

等因素造成的数据偏差。同样,没有一种传感器可以监测和评价所有接头、紧固件和材料上所有种类和形式的腐蚀。因此,飞机结构腐蚀需要综合采用多种技术协同进行监测。多种方法相互补充,可使监测数据更为准确。

另外,腐蚀产物分析也十分重要,可以反映出腐蚀发生的主要原因和腐蚀状况,与腐蚀监测数据相关联后,可用于预测可能发生的腐蚀及腐蚀程度。

4.2 传感器的进一步发展和优化配置

腐蚀传感器用于在线监测飞机结构腐蚀是可行的,但机载腐蚀传感器完全取代地面检查,实现远距离监测系统的大规模应用和支付还需要长远发展。有待进一步深入研究的关键性问题包括:如何进一步优化传感器的性能,包括提高精度、稳定性、频带宽、电磁相容性;如何降低器件的尺寸、质量以及能耗;如何实现传感元件与被监测结构的集成;如何实现传感器和与其配套的信号处理器件的微型化等。

原位传感器在腐蚀监测上的应用可极大减少对传统检测方法的需求。相较而言,腐蚀传感器的造价较高,监测费用也是需要考虑的因素。过于频繁地采用高成本的腐蚀监测方法,其费用是相当大的。例如,连续性在线腐蚀监测费用比周期性腐蚀监测费用高,因此应多采用后一种方法,且在允许的情况下尽量降低监测频率。同时,腐蚀传感器大多只用于腐蚀难以测量的部位,在腐蚀可以直接明确测量的部位,简单的指示器即可胜任。为了提高结构腐蚀监测的精度、降低其成本,在实际应用中还应进一步考虑传感器优化配置的问题。例如,如何根据被监测结构的特点和要求,在经济性、质量和成本等条件的约束下,合理选择传感器类型,确定传感器的最优数目和最优布局。对于寿命较长的结构而言,研究传感器的可靠性如何对整个监测系统的可靠性产生影响等。在此基础上,为进一步降低维护成本和促进腐蚀监测传感器的广泛应用,在降低其成本方面的努力也是十分必要的。

4.3 腐蚀监测系统的集成化、智能化和网络化

未来腐蚀防护发展的主流趋势是腐蚀监测系统的集成化、智能化和网络化,主要体现在以下 3 个方面。

1) 腐蚀监测系统的集成化是提高腐蚀监测精

度的必然要求,而智能化是微处理器与仪器一体化的实现,它不仅要能测试、输出监测信号,还可以对监测进行存储、提取、加工、处理,满足动态的、快速的、多参数的各种测量和数据处理的需要。

2) 随着数据库、网络技术的发展,监测系统也向着实时在线的智能化发展,可随时将现场数据传送到监控室,建立数据库,实现网络化管理和腐蚀监测数据的信息共享。

3) 随着信息技术及工业现场总线技术的发展和广泛应用,腐蚀监测仪器由单一的便携式工作模式向多点、实时、在线、连续的工作模式转变将成为飞机结构腐蚀监测技术发展的必然趋势。

5 结语

与传统无损检测相比,腐蚀监测技术可以随时提供腐蚀信息,且免除手动测试,保证了测试结果的一致性和可靠性。同样,腐蚀传感器也可用于飞机整个服役期间对其他参数的监测工作。在飞机结构上安装多功能微传感器系统,可提供对腐蚀过程更好的了解和控制。

由于国内的飞机结构腐蚀监测技术研发起步较晚,还未得到应用。随着飞机逐渐步入老龄化、腐蚀方面的问题日益突出,对及时发现和有效控制飞机结构腐蚀方面的要求也会越来越迫切,应当及早着手进行腐蚀监测技术的研究、开发和应用。在前人探索的基础上,可先在技术较为成熟的线性极化技术、电阻探针技术、电化学阻抗光谱技术、电化学噪声技术和光学传感器技术等方面开展腐蚀监测系统的研制工作和应用研究。当前需要重点研究的内容主要包括以下3个方面。

1) 开展传感系统的材料性能指标、传感器构件性能指标等方面的实验测试与表征,获得较为完整的基础数据。

2) 深入开展腐蚀传感系统在实际飞机结构上的应用研究,解决可用性、与结构的相容性及耐久性等方面的问题。

3) 加强腐蚀传感系统在典型结构模拟件上的考核验证。在此基础上,在实际飞机结构上获得领先应用和推广。

这不仅可解决腐蚀监测系统在飞机结构实际应用中的关键技术难题,而且从根本上提高其可靠性、

耐久性(使用寿命),从而提高其技术成熟度,推动其进入实际应用阶段。期待经过高效而长足的发展,腐蚀监测传感系统能够在国内军机和民机上得到大规模应用,在提前警示预告、改善飞行安全、降低维护费用、提高飞机可用率和延长飞机寿命等方面发挥重要作用,为我国防安全和航空业发展提供有力保障。

参考文献:

- [1] 曾凡阳,刘元海,丁玉洁. 海洋环境下军用飞机腐蚀及其系统控制工程[J]. 装备环境工程,2013,10(6): 77—81.
ZENG Fan-yang, LIU Yuan-hai, DING Yu-jie. Research on Corrosion and System Engineering Control Technology of Military Aircraft Marine Environment [J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6): 77—81.
- [2] 陈群志,房振乾,康献海. 军用飞机外场腐蚀防护方法研究[J]. 装备环境工程,2011,8(2): 72—77.
CHEN Qun-zhi, FANG Zhen-qian, KANG Xian-hai. Methods for Military Aircraft Field Corrosion Prevention and Control [J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(2): 72—77.
- [3] 王印旭,初凤红. 光纤金属腐蚀传感器研究及应用进展[J]. 全面腐蚀控制,2010,24(9): 7—11.
WANG Yin-xu, CHU Feng-hong. Reviews on Research Progress and Application of Optical Fiber Metal Corrosion Sensors [J]. Total Corrosion Control, 2010, 24(9): 7—11.
- [4] 王瑞峰,王国才,苏维国,等. 航空铝合金材料大气腐蚀环境因子灰色关联分析[J]. 装备环境工程,2013,10(3): 6—31.
WANG Rui-feng, WANG Guo-cai, SU Wei-guo, et al. Application of Grey Relational Analysis to Environmental Factors of Atmospheric Corrosion of Aerospace Aluminum Alloys [J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(3): 26—31.
- [5] 李旭东,朱武峰,穆志韬,等. LD2 铝合金腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程,2013,10(1): 8—12.
LI Xu-dong, ZHU Wu-feng, MU Zhi-tao, et al. Corrosion Behavior Investigation of LD2 Aluminum Alloy [J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(1): 8—12.
- [6] 雒娅楠. 碳钢光纤腐蚀传感器的敏感膜制备及传感特性研究[D]. 天津:天津大学,2003.
LUO Ya-nan. Preparation of Carbon Steel Fiber Optics Corrosion Sensors and Their Sensing Performance [D].

- Tianjin: Tianjin University, 2003.
- [7] MURALIDHARAN S, SARASWATHY V, BERCHMANS L J, et al. Nickel Ferrite (NiFe_2O_4): A Possible Candidate Material as Reference Electrode for Corrosion Monitoring of Steel in Concrete Environments [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010, 145(1): 225—231.
- [8] GHOLIZADEH A R, KHALAFI H. Corrosion Monitoring and Determination of Aluminum Fuel Clad of Tehran Research Reactor (TRR) [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2010, 52(2): 225—258.
- [9] CUEVAS-ARTEAGA C, URUCHURTU-CHAVARÍN J, PORCAYO-CALDERON J, et al. Study of Molten Salt Corrosion of HK-40m Alloy Applying Linear Polarization Resistance and Conventional Weight Loss Techniques [J]. *Corrosion Science*, 2004, 46(11): 2663—2679.
- [10] BROWN D, DARR D, MORSE J, et al. Real-time Corrosion Monitoring of Aircraft Structures with Prognostic Applications [C]//Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society. 2012.
- [11] TRATHEN P N. Structural Health Monitoring for Corrosion on Military Aircraft [R]. Institute of Materials Engineering Australasia Ltd, 2009.
- [12] LI S Y, JUNG S W, PARK K W, et al. Kinetic Study on Corrosion of Steel in Soil Environments Using Electrical Resistance Sensor Technique [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2007, 103(1): 9—13.
- [13] OSKUIE A A, SHAHRABI T, SHAHRIARI A, et al. Electrochemical Impedance Spectroscopy Analysis of X70 Pipeline Steel Stress Corrosion Cracking in High pH Carbonate Solution [J]. *Corrosion Science*, 2012, 61: 111—122.
- [14] VERA CRUZ R P, NISHIKATA A, TSURU T. AC Impedance Monitoring of Pitting Corrosion of Stainless Steel Under a Wet Dry Cyclic Condition in Chloride Containing Environment [J]. *Corrosion Science*, 1996, 38(8): 1397—1406.
- [15] STONER B R, PIASCIK J R, BROWN B, et al. A Novel Array Chip to Monitor in Situ Composite Degradation Using Electrochemical Impedance Spectroscopy [J]. *Dental Materials*, 2011, 27(8): 811—817.
- [16] BERTOCCI U, HUET F. Noise Analysis Applied to Electrochemical Systems [J]. *Corrosion (Houston)*, 1995, 51(2): 131—144.
- [17] IVERSON W P. Transient voltage changes produced in corroding metals and alloys [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1968, 115: 617—618.
- [18] ROBERGE P R, BEAUDOIN R, SASTRI V S. Electrochemical Noise Measurements for Field Applications [J]. *Corrosion Science*, 1989, 29(10): 1231—1233.
- [19] HLADKY K, DAWSON J L. The Measurement of Corrosion Using Electrochemical 1/f Noise [J]. *Corrosion Science*, 1982, 22(3): 231—237.
- [20] NEI L, COMPTON R G. An Improved Clark-type Galvanic Sensor for Dissolved Oxygen [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 1996, 30(2): 83—87.
- [21] ISMAIL A H, SCHÄFER C, HEISS A, et al. An Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Assay Measuring the Calcification Inhibition Capacity in Biological Fluids [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2011, 26(12): 4702—4707.
- [22] WILSON M S, NIE W Y. Electrochemical Multianalyte Immunoassays Using an Array-based Sensor [J]. *Analytical Chemistry*, 2006, 78(8): 2507—2513.
- [23] 卢基林, 庞代文. 生物电化学简介 [J]. *大学化学*, 1998, 13(2): 30—35.
- LU Ji-lin, PANG Dai-wen. Introduction of Bioelectrochemistry [J]. *General Chemistry*, 1998, 13(2): 30—35.
- [24] RUTHERFORD P, IKEGAMI R, SHRADER J, et al. Novel NDE Fibre-optic Corrosion Sensor [C]//SPIE. 1996.
- [25] 黎学明, 张胜涛, 黄宗卿, 等. 钢筋腐蚀监测的光纤传感技术 [J]. *腐蚀科学与防护技术*, 1999, 11(3): 169—173.
- LI Xue-ming, ZHANG Sheng-tao, HUANG Zong-qing, et al. Fiber Optics Sensing Technique for Monitoring Corrosion Steel in Reinforced Concrete [J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 1999, 11(3): 169—173.
- [26] LI X M, CHEN W M, HUANG Z Q. Fiber Optic Corrosion Sensor Fabricated by Electrochemical Method [C]//SPIE. 1998.
- [27] ABDERRAHMANE S, HIMOUR A, KHERRAT R, et al. An Optical Fibre Corrosion Sensor with an Electroless Deposit of Ni-P [J]. *Sensors and Actuators B*, 2001, 75(1/2): 1—4.
- [28] BENOUNIS M, JAFFREZIC-RENAULT N. Elaboration of an Optical Fibre Corrosion Sensor for Aircraft Applications [J]. *Sensors and Actuators B*, 2004, 100(1/2): 1—8.
- [29] DONG S Y, LIAO Y B, TIAN Q. Sensing of Corrosion on Aluminum Surfaces by Use of Metallic Optical Fiber [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(30): 6334—6337.
- [30] DONG S Y, LIAO Y B, TIAN Q, et al. Study on Different Preparing Methods of the Metallized Fiber Core for Optical Fiber Corrosion Sensor [C]//SPIE. 2005.

- cal Chemical and Performance Properties for YTF-1 Aircraft Water Displacing Corrosion Preventive Compound with Hard Film[J]. Material Engineering, 2009(8): 26—29.
- [8] BMS3-35, Heavy Duty Corrosion Inhibiting Compounds [S].
- [9] MIL-DTL-85054C, Corrosion Preventive Compound Clear Armguards [S].
- [10] 陈群志, 孙祚东, 韩恩厚, 等. 典型飞机结构加速腐蚀试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2004, 1(2): 13—17.
- CHEN Qun-zhi, SUN Zuo-dong, HAN En-hou, et al. Study on Accelerated Corrosion Test Methods of Typical Aircraft Structure [J]. Equipment Environmental Engineering, 2004, 1(2): 13—17.
- [11] 王艳艳, 舒畅, 李超. 自然环境谱转化为加速试验环境谱的方法[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 34—38.
- WANG Yan-yan, SHU Chang, LI Chao. Method for Conversion of Natural Environmental Spectra to Accelerated Test Environmental Spectra [J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1): 34—38.
- [12] 苏景新, 白云, 关庆丰, 等. 飞机蒙皮结构表面涂层失效的电化学阻抗分析[J]. 中国腐蚀防护与防护学报, 2013, 33(2): 251—256.
- SU Jing-xin, BAI Yun, GUAN Qing-feng, et al. Electrochemical Impedance Spectroscopy Analysis of Failure of Aircraft Surface Coating [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2013, 33(2): 251—256.
- [13] 陈群志, 程宗辉, 席慧智. 飞机铝合金结构连接部位的腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(6): 334—335.
- CHEN Qun-zhi, CHENG Zong-hui, XI Hui-zhi, Corrosion Behavior on joint section of aircraft Aluminium Alloy Structure [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2013, 33(2): 251—256.
- [14] 刘文琰, 李玉海, 陈群志, 等. 飞机结构腐蚀部位涂层加速试验环境谱研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(1): 109—112.
- LIU Wen-ting, LI Yu-hai, CHEN Qun-zhi, et al. Accelerated Corrosion Environmental Spectrums for Testing Surface Coatings of Critical Areas of Flight Aircraft Structures [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(1): 109—112.
- [15] 刘文琰, 李玉海, 陈群志, 等. 飞机结构日历寿命体系评定技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2004.
- LIU Wen-ting, LI Yu-hai, CHEN Qun-zhi, et al. Technology for Calendar Life System Assessment of Aircraft Structure [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2004.

(上接第 78 页)

- [31] BOSSI R, CRISWELL T, IKEGAMI R, et al. Novel Methods for Aircraft Corrosion Monitoring [C]//SPIE, 1995.
- [32] MENDOZAT E A, KHALILT A N, SUNT Z, et al. Nondestructive Evaluation of Aging Aircraft, Airports, Aerospace Hardware, and Materials [C]//SPIE, 1995.
- [33] ASSOULI B, SRHIRI A, IDRISSE H. Characterization and Control of Selective Corrosion of α , β' -Brass by Acoustic Emission [J]. NDT International, 2003, 36(2): 117—126.
- [34] TOMOHIRO G, MASASHI N, TOMONORI T, et al. In Situ Health Monitoring of Corrosion Resistant Polymers Exposed to Alkaline Solutions Using pH Indicators [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2006, 119(1): 27—32.
- [35] HAUTEFEUILLE M, O'FLYNN B, PETERS F, et al. Miniaturised Multi-MEMS Sensor Development [J]. Microelectronics Reliability, 2009, 49: 621—626.

(上接第 89 页)

- LI Jin-gui. Corrosion Control Design Manual [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [15] 曹楚南. 腐蚀电化学原理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- CAO Chu-nan. Principles of Electrochemistry of Corrosion [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [16] 李金桂. 腐蚀控制系统工程学概论 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- LI Jin-gui. An Introduction to System Engineering Science for Corrosion Control [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [17] 陈群志, 康献海, 刘健光, 等. 军用飞机腐蚀防护与日历寿命研究 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(4): 1—6.
- CHEN Qun-zhi, KANG Xian-hai, LIU Jian-guang, et al. Discussion About Military Aircraft Anti-corrosion and Calendar Life Research [J]. China Surface Engineering, 2010, 23(4): 1—6.