

金属材料实验室加速腐蚀环境谱等效加速关系的确定方法

王长凯¹, 张腾¹, 何宇廷¹, 张天宇¹, 王明军², 孙庆³

(1.空军工程大学, 西安 710038; 2.空军装备部驻西安地区第二军事代表室, 西安 710021;
3.空装驻景德镇地区军事代表室, 江西 景德镇 333000)

摘要: **目的** 解决现有实验室加速环境谱等效加速关系确定方法的不足。**方法** 提出一种针对航空金属材料实验室加速腐蚀环境谱与实际大气间等效关系的“双桥连接式”快速确定方法。**结果** 该方法以金属材料在腐蚀环境下的质量损失情况作为腐蚀当量, 通过基于“环境因素加权浓缩”的方法编制实验室加速环境谱、基于“电量(电流)等效桥”获得实际大气环境长年累积腐蚀电量、基于“质量损失等效桥”确定等效加速关系 3 个步骤, 计算获得了实际大气长年监测数据对应的材料累积腐蚀电荷量和腐蚀质量损失大小。通过将金属材料在实际大气下和实验室加速环境下的腐蚀质量损失速率相比, 获得了金属材料的等效加速关系。**结论** 该方法能够有效克服现有研究中由于缺少实地长时间大气暴晒件, 以及当量参数选取不当引入误差, 导致无法获取实验室加速腐蚀环境谱和实际大气环境间等效加速关系(或当量加速关系)的不足, 为金属材料实验室加速腐蚀试验提供了方法支撑。

关键词: 金属材料; 等效加速关系; 加速腐蚀; 海洋大气环境; 腐蚀质量损失; 腐蚀电量

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2023)12-0063-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.12.008

Method for Determining the Equivalent Acceleration Relationship of Accelerated Corrosion Environmental Spectra of Metal Materials

WANG Chang-kai¹, ZHANG Teng¹, HE Yu-ting¹, ZHANG Tian-yu¹, WANG Ming-jun², SUN Qing³

(1. Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. The Second Military Representative Office of the Air Force Equipment Department in Xi'an, Xi'an 710021, China; 3. Air Equipment Military Representative Office in Jingdezhen, Jiangxi Jingdezhen 333000, China)

ABSTRACT: The determination of the equivalent acceleration relationship is an important prerequisite for conducting accelerated corrosion tests in metal materials laboratories. However, the current determination method is greatly limited by experimental conditions and requires a lot of time and labor costs. To address the shortcomings of existing methods for determining the

收稿日期: 2023-10-30; 修订日期: 2023-12-03

Received: 2023-10-30; Revised: 2023-12-03

基金项目: 国家科技重大专项(J2019-I-0016-0015); 国家自然科学基金(52005507, 52175155); 陕西省高校科协青年人才托举计划项目(20230431)

Fund: National Science and Technology Major Special Funding (J2019-I-0016-0015); The National Natural Science Foundation of China (52005507, 52175155); Shaanxi University Science Association Young Talent Support Program Project (20230431)

引文格式: 王长凯, 张腾, 何宇廷, 等. 金属材料实验室加速腐蚀环境谱等效加速关系的确定方法[J]. 装备环境工程, 2023, 20(12): 63-69.
WANG Chang-kai, ZHANG Teng, HE Yu-ting, et al. Method for Determining the Equivalent Acceleration Relationship of Accelerated Corrosion Environmental Spectra of Metal Materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(12): 63-69.

equivalent acceleration relationship of accelerated environmental spectra in laboratories, the work aims to propose a “double bridge connection” rapid determination method for the equivalent relationship between accelerated corrosion environmental spectra in aviation metal materials laboratories and the actual atmosphere. The weight loss of metal materials in corrosive environments was taken as the corrosion equivalent, and laboratory accelerated environmental spectra was compiled based on the method of “weighted concentration of environmental factors”. Based on the “equivalent bridge of electricity (current)”, the actual accumulated corrosion electricity in the atmospheric environment over the years was obtained. Through the three steps of determining the equivalent acceleration relationship based on the “weightlessness equivalent bridge”, the cumulative corrosion charge and corrosion weight loss of materials corresponding to actual atmospheric long-term monitoring data were calculated. By comparing the corrosion weight loss rate of metal materials in actual atmospheric and laboratory accelerated environments, the equivalent acceleration relationship of metal materials was obtained. This method can effectively overcome the shortcomings of existing research in obtaining the equivalent acceleration relationship (or equivalent acceleration relationship) between the laboratory accelerated corrosion environment spectrum and the actual environment due to the lack of on-site long-term atmospheric exposure samples and improper selection of equivalent parameters, providing support for accelerated corrosion test of metal materials in the laboratory.

KEY WORDS: metal materials; equivalent acceleration relationship; accelerated corrosion; marine atmospheric environment; corrosion weightlessness; corrosiveelectric quantity

飞行器工作环境存在多气候、多地域的特征, 尤其在高盐、高湿的海洋大气环境下工作时, 其材料和结构性能易受极端环境腐蚀的影响而发生大幅退化, 进而对飞行器的工作安全造成威胁^[1-4]。金属材料凭借其优异的性能而广泛应用于航空工业领域, 研究金属材料的耐大气腐蚀性能和适海性能具有重要意义^[5-11]。

目前国际上主要通过开展大气暴露试验和实验室加速腐蚀试验 2 种方法来研究金属材料的大气腐蚀损伤情况。由于航空装备的服役年限较长, 导致开展大气暴露试验的周期较长, 需要耗费大量时间和人力成本^[12-14]。因此, 开展实验室加速腐蚀试验得到了更加广泛的应用^[15-22]。为了使实验室加速环境谱作用下测得的材料性能数据能够应用于实际结构和装备的设计制造及寿命控制等工作中, 必须确定加速环境谱与实际大气环境间的等效加速关系。等效加速关系 (或称当量加速关系) 指的是飞机或发动机结构关键部位在地面停放环境和加速试验环境谱下达到相同腐蚀程度时, 地面停放试件 T 对应的加速试验环境谱作用时间 t ^[23]。目前, 关于等效加速关系 (或称当量加速关系) 的确定方法主要有当量折算法、腐蚀程度对比法和疲劳强度对比法。穆志韬等^[24]以腐蚀电流 I_c 作为金属腐蚀的表征参数, 以腐蚀电量作为度量标准, 采用当量折算法建立了 LY12CZ、LC4CS、LY11C 等 3 类不同牌号铝合金的环境加速腐蚀当量折算关系, 同时得到了温度和相对湿度对环境当量折算系数的影响规律, 指出温度的改变对折算系数的影响比湿度的变化显著。刘元海等^[25]基于典型海洋大气环境谱, 编制了由紫外照射和周期浸润 2 个环境块构成的加速试验环境谱, 采用当量折算的方法确定了加速谱与外场暴露环境的当量关系, 提出了多因素耦合时的

当量加速关系计算方法。陈跃良等^[26]将不同温度、湿度、腐蚀介质浓度折算到某一实验室便于实现的条件上, 编制了海军飞机结构关键危险部位的加速环境谱, 利用电化学原理, 以腐蚀电流为当量参数得到等效加速关系。刘文铤等^[27]以 CASS 谱为基础, 提出了适用于飞机结构腐蚀关键部位涂层的加速试验环境谱, 并针对某型飞机腐蚀关键部位, 采用腐蚀程度对比的方法, 对试件表面涂层的腐蚀情况进行了观测, 确定了该加速环境谱与某沿海、湿热地区环境的等效加速关系。该团队同时通过由技术人员目测的方式对比了试件在等效加速环境谱作用和实际大气环境作用下的腐蚀损伤情况, 确定了针对某型战斗机关键危险部位加速试验环境谱与地面谱之间的当量关系^[28]。孙祚东等^[29]通过对比试件最大腐蚀深度, 确定了飞机典型铝合金结构的等效加速关系。贺小帆等^[30]针对腐蚀条件下飞机结构疲劳寿命分析和评定问题, 对疲劳关键件加速腐蚀因子 (等效加速关系) 进行了研究。假定疲劳寿命服从对数正态分布, 随腐蚀试件呈指数变化, 推导得到了加速腐蚀因子的表达式, 以及加速腐蚀因子与腐蚀时间无关的结论。得到了加速腐蚀因子估计量的分布, 对其进行了可靠性分析, 并进行了典型结构模拟试件大气暴露和试验室加速腐蚀因子的可靠性分析。

然而, 采用腐蚀程度对比法和疲劳强度对比法的前提是有用于对比损伤特征值的长时间大气暴晒试件, 对于研发和采用的新材料, 显然难以实现。当量折算法虽然无需大气长期暴晒试验件, 但该方法仍存在以下不足: 一是该方法只适用于金属机体, 不适用于非金属涂层, 对于有良好涂层保护体系的外露腐蚀/疲劳关键部位, 当量折算法只能用于建立关键部位涂

层防护体系失效后的当量加速关系;二是选择材料或结构在实际大气和实验室加速环境下的腐蚀电量作为损伤特征值计算等效关系时,忽略了实验室和实际大气的环境因素,以及腐蚀强度随时间变化呈谱状变化的规律,仅将材料或结构在 2 种环境谱下的腐蚀电流 I_c 看作不随时间变化的常量,这显然与实际条件不符,增大了试验结果与实际情况之间的误差。

基于上述问题,本文针对航空用金属材料,提出了一种“双桥连接式”等效加速关系快速确定方法,通过“电量(电流)等效桥”和“质量损失等效桥”的双重连接,突破了确定等效加速关系必须依赖于长期大气腐蚀数据的限制,快速确定了实验室加速腐蚀环境谱与实际大气环境间的等效加速关系。

1 “双桥连接式”等效加速关系快速确定方法概念及内容

“双桥连接式”等效加速关系快速确定方法的具体内容如图 1 所示。该方法以金属材料在大气环境和实验室加速腐蚀试验作用下的腐蚀质量损失作为腐

蚀当量,可以有效实现在没有大气长期暴晒试验件的前提下,仅通过当地实际大气长年气象监测数据和短期大气环境监测数据,折算得到金属材料在实际大气环境作用下的累积腐蚀电量和腐蚀质量损失情况,最后通过与实验室加速腐蚀试验试件的质量损失情况进行对比,即可得到等效加速关系。其中,“双桥连接式”等效加速关系快速确定方法中的“双桥”指的是“电量(电流)等效桥”和“质量损失等效桥”。

“电量(电流)等效桥”指的是在缺乏实际大气长期暴晒试验件的情况下,以腐蚀电量作为当量参数,一方面,通过大气环境腐蚀检测(ACM)等技术手段测量金属材料在实际大气环境某短期时间(不少于 6 个月)内的腐蚀电量和电流,依据材料的折算系数得到其等效的潮湿大气环境的作用时间。另一方面,通过该地多年的大气监测数据,编制气候环境总谱和化学环境总谱,依据材料的折算系数和当量化原理^[31-34],折算得到所得年份大气数据等效于标准潮湿大气环境的作用时间。最后将所得的 2 个标准潮湿大气环境作用试件相比,通过腐蚀当量相等(腐蚀电量)的原则,获取材料在该地长期暴露下的腐蚀电量。

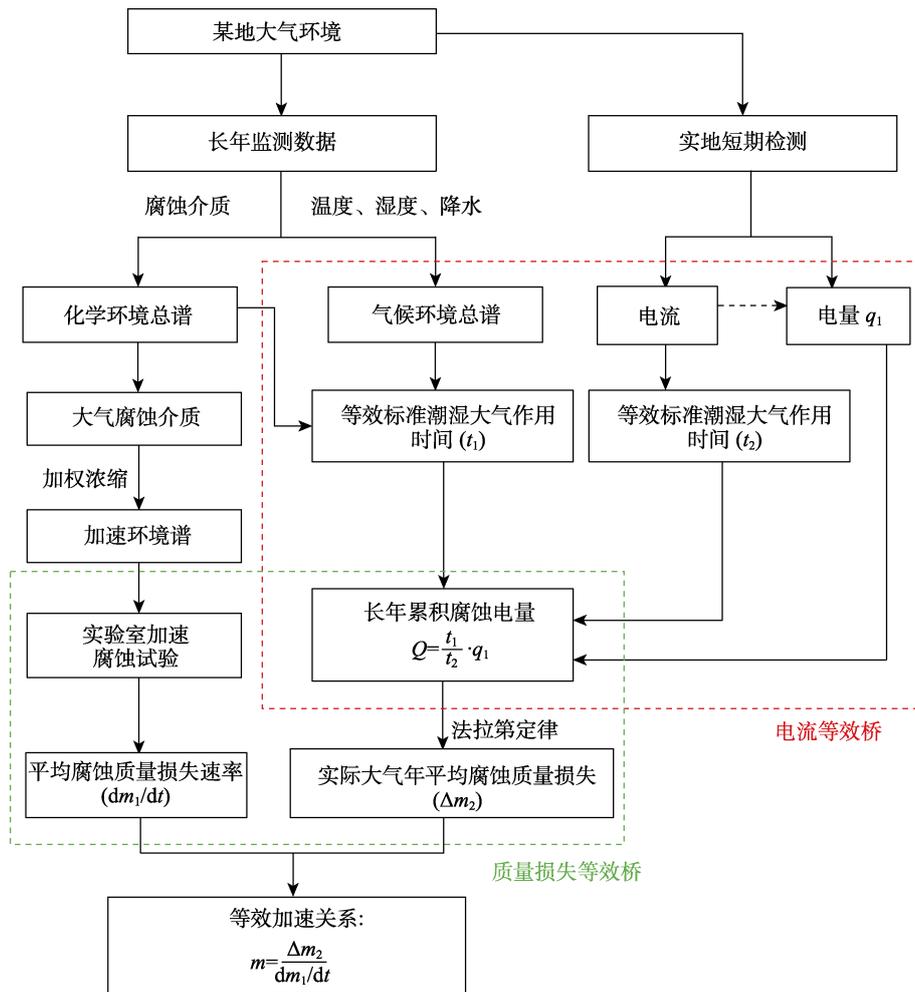


图 1 等效加速关系确定方法

Fig.1 Determination method of equivalent acceleration relationship

“质量损失等效桥”指的是以腐蚀质量损失作为当量参数，一方面，依据相关试验标准，测量实验室加速环境谱作用下材料的腐蚀质量损失变化情况和质量损失规律。另一方面，依据“电量（电流）等效桥”获取材料在该地长期暴露下的腐蚀电量大小，折算得到对应该电量的材料腐蚀质量损失大小。通过腐蚀当量相等（腐蚀质量损失）的原则，获取该实验室加速环境谱与实际大气环境间的等效加速关系。

该等效加速关系快速确定方法主要通过下述 3 个步骤实现：基于“环境因素加权浓缩”的方法编制实验室加速环境谱；基于“电量（电流）等效桥”获得实际大气环境长年累积腐蚀电量；基于“质量损失等效桥”确定等效加速关系。同时需要指出，该方法主要针对金属基体加速腐蚀等效关系的研究，实际大气环境中，光照因素对金属表面有存在影响。文献[7-10]指出，光照对飞行器表面的影响主要是紫外线作用导致的表面涂层老化，对金属材料的影响相对较小。对于表面存在涂层的金属结构，该方法并不适用。

2 基于“环境因素加权浓缩”的方法编制实验室加速环境谱

编制实验室加速环境谱的方法流程如图 2 所示。首先针对飞机或发动机工作的某地区实际大气环境，搜集并整理其长年环境检测数据。监测数据的内容至少包括温度大小及其作用时间、湿度大小及其作用时间、各大气介质成分及其浓度（至少包括硫氧化物、氮氧化物）、降水和雾露的次数和作用时间以及在一年中降水和雾露所占的时间比例、降雨和雾露的 pH 值、Cl⁻ 沉积速率等。为增加该方法确定的等效加速关系结果的可靠性和适用性，所选监测数据的数据量不少于 5 年。依据所得数据编制该地区的气候环境总谱（见表 1）和化学环境总谱（见表 2）^[32]。

依据化学环境总谱中腐蚀介质的成分和含量，分析对金属材料起主要腐蚀作用的介质成分及其在大

气中的存在形式和化学反应产物、浓度。随后，依据加权浓缩的方法，对各腐蚀介质进行浓缩后，获得实验室加速腐蚀溶液^[32]。最后结合周期浸润、盐雾试验等实验室加速腐蚀试验方法，确定模拟飞机或发动机工作地区实际大气环境的实验室加速环境谱。

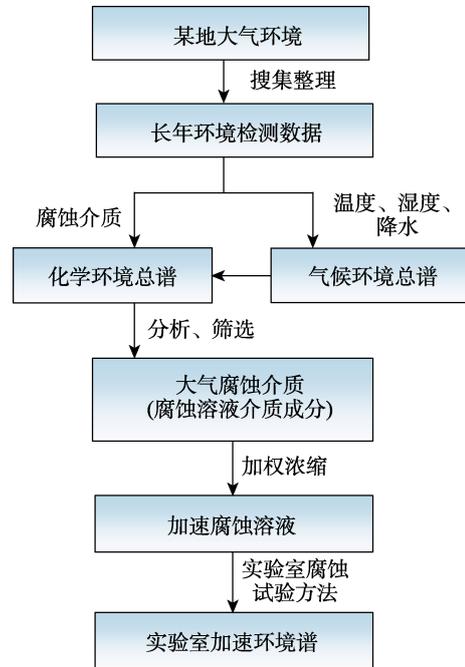


图 2 实验室加速环境谱编制方法流程
Fig.2 Flow chart of laboratory accelerated environmental spectrum preparation method

表 1 气候环境总谱
Tab.1 Total spectrum of climatic environment

	温度区间 1	温度区间 2	.....	温度区间 n
湿度区间 1	作用时间	作用时间	.....	作用时间
湿度区间 2	作用时间	作用时间	.....	作用时间
.....
湿度区间 m	作用时间	作用时间	.....	作用时间
降水	作用时间	作用时间	.....	作用时间
雾露	作用时间	作用时间	.....	作用时间

表 2 化学环境总谱
Tab.2 Total spectrum of chemical environment

类型	降雨		pH	硫氧化物/(mg·m ⁻³)	氮氧化物/(mg·m ⁻³)	Cl ⁻ 沉积速率 /(mg·100 ⁻¹ ·cm ⁻² ·d ⁻¹)
	比例/%	时间/h				
/	/	/	/	/	/	/

3 基于“电量（电流）等效桥”获得实际大气环境长年累积腐蚀电量

“电量（电流）等效桥”的目的在于通过腐蚀当量相等（腐蚀电量）的原则，利用实地大气环境短期监测数据，获取材料在该地长期暴露下的腐蚀电量。其具体方法如图 3 所示。

本步骤首先需要确定金属材料的折算系数。折算

系数（公式 1 所示）分为 2 类，一类指的是材料在某一温度、湿度环境作用下的腐蚀电流与标准潮湿空气作用下腐蚀电流的比值。标准潮湿空气指的是环境温度 40 °C，相对湿度为 90% 的环境。另一类指的是材料在不同浓度盐溶液、酸溶液等的作用下的腐蚀电流与材料在水作用下的腐蚀电流的比值。

$$\alpha = \frac{I_1}{I_2} \tag{1}$$

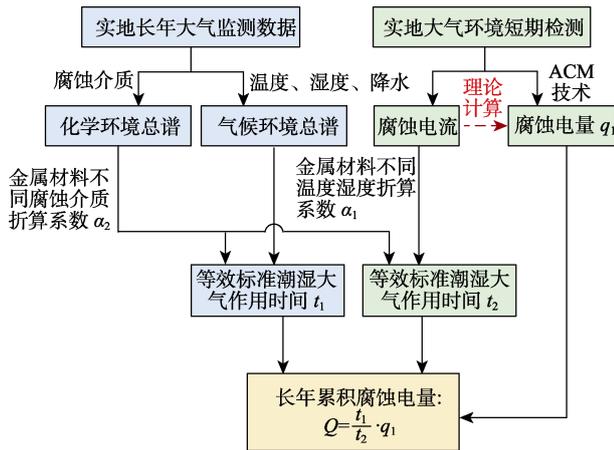


图 3 实际大气环境长年累积腐蚀电量计算流程

Fig.3 Calculation flow chart of long-term cumulative corrosive electric quantity in actual environment

式中: α 为折算系数; I_1 为某一温度、湿度或某一浓度的盐溶液和酸溶液等作用下的腐蚀电流大小; I_2 为标准潮湿空气或水作用下材料的腐蚀电流大小。

依据不同温度、湿度和标准大气环境间的折算系数, 将表 2 气候环境总谱中实际大气长年监测数据中不同温度、湿度环境下实际大气环境的作用时间乘以对应该温度和湿度下材料的折算系数, 得到该长年监测数据中不同温度、湿度环境下实际大气环境的作用时间等效为标准潮湿空气作用的时间 t_{11} 。

将降雨和雾、露看作 90% 标准潮湿空气的作用, 将表 2 气候环境总谱中降雨和雾、露在不同温度下的作用时间看作不同温度, 90%RH 空气下的作用时间。依据不同温度、湿度和标准大气环境间的折算系数, 将表 2 中不同温度下的降水时间乘以对应温度和 90%湿度的折算系数后相加, 得到该长年监测数据中降水作用时间等效为酸性标准潮湿空气作用的时间 t_{12} 。

化学环境总谱中降水的作用时间可以视为在与降雨时具有相同 pH 大小的酸溶液的作用时间。该等效的酸溶液的溶质成分为化学环境总谱中的硫氧化物和氮氧化物溶于水后形成的酸溶液的介质, 例如 SO_2 溶于水后在氧气和水的作用下生成 H_2SO_4 , 因此降水的作用时间可以视为相同 pH 硫酸的作用时间。随后, 依据不同浓度盐溶液、酸溶液等和水之间的折算系数, 将降水等效为标准潮湿空气的作用时间 t_{12} 乘以和降水相同 pH 大小的酸溶液对应的折算系数, 得到该长年监测数据中降水作用时间等效为标准潮湿空气的作用时间 t_{13} 。将 t_{11} 和 t_{13} 相加, 得到实际大气长年监测数据折算到标准潮湿空气中的作用总时间 t_1 。

随后, 通过大气环境腐蚀检测 (ACM) 等技术, 测量材料在实际大气环境下短期 (不少于 1 个月) 暴露的腐蚀电流, 通过电流计算的到累积腐蚀电量 (q_1) 的大小。同时, 检测该时间段内实际大气温度和湿度

的实时大小, 以及降雨的作用次数和每次降雨的持续时间, 并采用相同的方法利用折算系数和检测数据计算实际大气环境短期作用时间等效为标准潮湿空气的作用时间 t_2 。

通过式 (2), 将得到的实际大气长年监测数据折算到标准潮湿空气中的作用总时间 t_1 , 除以实际大气环境短期作用时间等效为标准潮湿空气的作用时间 t_2 , 随后乘以材料在实际大气环境下短期暴露的累积腐蚀电量大小 q_1 , 即可获得实际大气环境长年监测数据对应的材料腐蚀电量大小 Q 。

$$Q = \frac{t_1}{t_2} \cdot q_1 \quad (2)$$

4 基于“质量损失等效桥”确定等效加速关系

“质量损失等效桥”的目的在于利用腐蚀质量损失这一当量参数, 通过将实验室加速腐蚀环境谱作用下金属材料的腐蚀质量损失速率与实际大气作用下的腐蚀质量损失速率进行对比, 进而获得等效加速关系。其具体方法如图 4 所示。

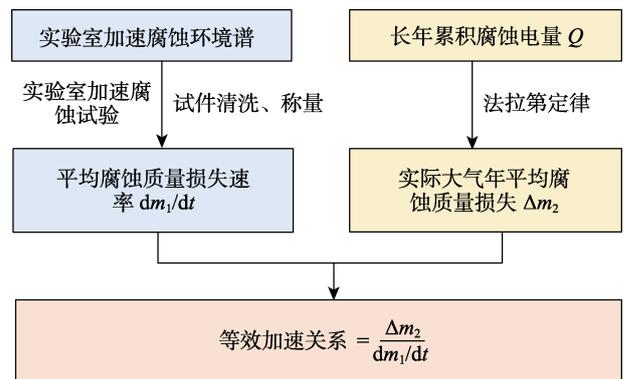


图 4 “质量损失等效桥”方法流程

Fig.4 Flow chart of “weightlessness equivalent bridge” method

首先开展实验室加速腐蚀试验, 腐蚀不同的时间后, 依据 GB/T 16545—2015 《金属和合金的腐蚀腐蚀试样上腐蚀产物的清除》中相关要求, 对材料进行清洗, 以去除附着在试件表面的腐蚀产物和其他杂质, 并采用电子天平测量得到材料去除腐蚀产物后的质量。将去除腐蚀产物后的质量与材料开展加速腐蚀试验之前的质量相减, 得到的质量差值就是材料在该腐蚀时间下的质量损失大小。将不同腐蚀时间下材料的质量损失除以腐蚀时间, 得到材料在实验室加速腐蚀环境谱作用下的平均腐蚀质量损失速率 dm_1/dt 。进行实验室加速腐蚀试验 (盐雾试验、周期浸润试验等) 时, 需要保持试验箱内空气的流动, 以模拟实际大气环境中风的影响。

实际大气长期暴露下的腐蚀电量大小折算得到

对应该电量的材料腐蚀质量损失大小的方法为依据式(3)所示的法拉第定律。将所得质量损失大小除以长期监测数据总时间,可以得到材料在实际大气作用下的年平均质量损失大小 Δm_2 。

$$W = \frac{M}{Fn} \cdot Q \quad (3)$$

式中: W 为试验件溶解的质量; M 为金属的原子质量; n 为金属离子的电荷量; F 为法拉第常数(96 500 C); Q 为腐蚀电量。

将材料在实际大气作用下的年平均质量损失大小 Δm_2 与材料在实验室加速腐蚀环境谱作用下的平均腐蚀质量损失速率 dm/dt 相比,即可得到该实验室加速环境谱与实际大气环境之间的等效加速关系。

5 结语

本文提出了一种针对航空金属材料实验室加速腐蚀环境谱与实际大气间等效关系的“双桥连接式”快速确定方法。包括基于“环境因素加权浓缩”的方法编制实验室加速环境谱,基于“电量(电流)等效桥”获得实际大气环境长年累积腐蚀电量,基于“质量损失等效桥”确定等效加速关系。该方法克服了现存等效加速关系确定方法中需要实际大气长期暴晒试验件的前提,仅通过实际大气长年监测数据和实验室加速腐蚀质量损失试验,以腐蚀质量损失和腐蚀电量为等效参量,便可获得等效加速关系。

参考文献:

- [1] 黄昌龙. 7150 铝合金飞机结构剥蚀机理研究[D]. 西安:西北工业大学, 2011.
HUANG C L. Study on the Denudation Mechanism of 7150 Aluminum Alloy Aircraft Structure[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2011.
- [2] 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 Q Z, KANG X H, LIU J G, et al. Discussion about Military Aircraft Anti-Corrosion and Calendar Life Research[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(4): 1-6.
- [3] 陈群志, 刘文珽, 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[J]. 中国安全科学学报, 2000, 10(3): 42-47.
CHEN Q Z, LIU W T, CHEN Z W, et al. Current Status and Key Techniques of Calendar Life of Aircraft Structure under Corrosive Environment[J]. China Safety Science Journal, 2000, 10(3): 42-47.
- [4] 胡芳友, 王茂才, 温景林. 沿海飞机铝合金结构件腐蚀与防护[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2003, 15(2): 97-100.
HU F Y, WANG M C, WEN J L. Corrosion Analysis of Aluminum Alloys for Aircraft Structural Components and Its Protection[J]. Corrosion Science and Technology Protection, 2003, 15(2): 97-100.
- [5] ZHANG S, ZHANG T, HE Y T, et al. Long-Term Atmospheric Corrosion of Aluminum Alloy 2024-T4 in Coastal Environment: Surface and Sectional Corrosion Behavior[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 789: 460-471.
- [6] ZHANG S, ZHANG T, HE Y T, et al. Long-Term Atmospheric Pre-Corrosion Fatigue Properties of Epoxy Primer-Coated 7075-T6 Aluminum Alloy Structures[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 129: 105225.
- [7] ZHANG T Y, ZHANG T, HE Y T, et al. Probabilistic Model of the Pre-Corrosion Fatigue Life of Epoxy-Coated Aluminum Alloys Based on the Single Point-Group Model of the Maximum Likelihood Method[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 171: 107580.
- [8] ZHANG T Y, ZHANG T, HE Y T, et al. Probabilistic Model of the Fatigue Life of Epoxy-Coated Aluminum Alloys Considering Atmospheric Exposure[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 162: 106899.
- [9] ZHANG T Y, ZHANG T, HE Y T, et al. Corrosion and Aging of Organic Aviation Coatings: A Review[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(4): 1-35.
- [10] ZHANG T Y, ZHANG T, HE Y T, et al. Aging and Corrosion Behavior of Epoxy Primer Coated Aluminum Alloys in UVA, UVA-Neutral and UVA-Acidic Alternating-Immersion Environments[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 130: 105759.
- [11] 贾云柯, 陈晓华, 李坤淑, 等. 高强韧金属材料中微结构的研究和应用[J]. 精密成形工程, 2022, 14(1): 79-94.
JIA Y K, CHEN X H, LI K S, et al. Research and Application of Microstructure in High Strength and Toughness Metallic Materials[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(1): 79-94.
- [12] LI X G, ZHANG D W, LIU Z Y, et al. Materials Science: Share Corrosion Data[J]. Nature, 2015, 527(7579): 441-442.
- [13] WANG B B, WANG Z Y, HAN W, et al. Atmospheric Corrosion of Aluminium Alloy 2024-T3 Exposed to Salt Lake Environment in Western China[J]. Corrosion Science, 2012, 59: 63-70.
- [14] SUN S Q, ZHENG Q F, LI D F, et al. Long-Term Atmospheric Corrosion Behaviour of Aluminium Alloys 2024 and 7075 in Urban, Coastal and Industrial Environments[J]. Corrosion Science, 2009, 51(4): 719-727.
- [15] ZHANG R X, ZHAO W D, ZHANG H, et al. Fatigue Performance Rejuvenation of Corroded 7075-T651 Aluminum Alloy through Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 153: 106463.
- [16] SONG H P, LIU C C, ZHANG H, et al. Experimental Investigation on Damage Evolution in Pre-Corroded Aluminum Alloy 7075-T7651 under Fatigue Loading[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 799: 140206.
- [17] ZHANG C, CHEN Y H, YAO W X. The Use of Fractal Dimensions in the Prediction of Residual Fatigue Life of Pre-Corroded Aluminum Alloy Specimens[J]. Interna-

- tional Journal of Fatigue, 2014, 59: 282-291.
- [18] XU X C, LIU D X, AO N, et al. Effects of Pre-Corrosion on Mechanical Properties of 7B50-T7751 Aluminum Alloy in Sodium Chloride Solution[J]. Materials and Corrosion, 2018, 69(7): 870-880.
- [19] CHEN X, YANG L, DAI H L, et al. Exploring Factors Controlling Pre-Corrosion Fatigue of 316L Austenitic Stainless Steel in Hydrofluoric Acid[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 113: 104556.
- [20] MENAN F, HENAFF G. Influence of Frequency and Exposure to a Saline Solution on the Corrosion Fatigue Crack Growth Behavior of the Aluminum Alloy 2024[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(11/12): 1684-1695.
- [21] MENAN F, HÉNAFF G. Synergistic Action of Fatigue and Corrosion during Crack Growth in the 2024 Aluminum Alloy[J]. Procedia Engineering, 2010, 2(1): 1441-1450.
- [22] ZHANG H W, HE Y T, LIU C, et al. Effect of Interactive Periods to Corrosion-Fatigue Life on LY¹²CZ Alloy[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 66/67/68: 96-101.
- [23] 陈跃良, 卞贵学, 张勇, 等. 飞机结构电偶腐蚀数值模拟[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.
CHEN Y L, BIAN G X, ZHANG Y. Numerical Simulation of Galvanic Corrosion in Aircraft Structures[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020.
- [24] 穆志韬, 柳文林, 于战樵. 飞机服役环境当量加速腐蚀折算方法研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2007, 22(3): 301-304.
MU Z T, LIU W L, YU Z Q. Research on Accelerated Corrosion Equivalent Conversion Method of Aircraft Service Environment[J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2007, 22(3): 301-304.
- [25] 刘元海, 任三元. 典型海洋大气环境当量加速试验环境谱研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(1): 48-52.
LIU Y H, REN S Y. Study on Equivalent Accelerated Corrosion Test Environment Spectrum of Typical Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(1): 48-52.
- [26] 陈跃良, 段成美, 金平, 等. 飞机结构局部环境加速腐蚀当量谱[J]. 南京航空航天大学学报, 1999, 31(3): 338-341.
CHEN Y L, DUAN C M, JIN P, et al. Local Environmental Equivalent Spectrum for Accelerated Corrosion of Aircraft Structure[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1999, 31(3): 338-341.
- [27] 刘文珽, 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 W T, LI Y H, CHEN Q Z, 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.
- [28] 蒋冬滨. 飞机结构关键危险部位加速腐蚀试验环境谱研究[J]. 航空学报, 1998, 19(4): 434-438.
JIANG D B. Study on Accelerated Corrosion Test Environment Spectrum for Critical Area[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1998, 19(4): 434-438.
- [29] 孙祚东. 军用飞机典型铝合金结构腐蚀损伤规律及加速腐蚀试验方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.
SUN Z D. Study on Corrosion Damage of the Typical Aluminum Alloy of Air Force Plane and the Test of Accelerated Corrosion[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005.
- [30] 贺小帆, 刘文珽. 疲劳关键件加速腐蚀因子可靠性分析[J]. 航空学报, 2005, 26(3): 315-319.
HE X F, LIU W T. Reliability Analysis of Accelerated Corrosion Factor for Fatigue Critical Components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(3): 315-319.
- [31] 张福泽, 叶序彬, 宋钧, 等. 飞机日历寿命试验的介质成分确定和加速方法[J]. 航空学报, 2008, 29(4): 873-879.
ZHANG F Z, YE X B, SONG J, et al. Corrosion Medium Composition and Accelerated Corrosion Method of Aircraft Calendar Life Test[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(4): 873-879.
- [32] 杨晓华, 张珂. 宁波地区当量加速环境谱的编制[J]. 装备环境工程, 2010, 7(4): 76-80.
YANG X H, ZHANG D. Compiling of Environmental Spectrum of Equivalent Acceleration in Ningbo[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(4): 76-80.
- [33] 杨晓华, 金平. 飞机使用环境谱的编制[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 99-102.
YANG X H, JIN P. Compile of Aircraft Operation Environment Spectrum[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 99-102.
- [34] 崔常京. 军用飞机地面腐蚀环境谱的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.
CUI C J. Study on the Ground Corrosion Environment Spectrum of Warcraft[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005.

责任编辑: 刘世忠