

环境试验与评价

×飞机半封闭部位局部环境谱当量加速关系研究

张勇, 陈跃良, 樊伟杰, 卞贵学, 王晨光

(海军航空工程学院 青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: 目的 确定局部环境谱当量加速关系。方法 以×型飞机某半封闭关键部位为研究对象, 依据其在机体中所处的位置及服役环境中各气候条件编制局部加速腐蚀试验环境谱, 分别进行实验室周期浸润加速腐蚀和自然环境暴晒。借助涂层宏观、微观形貌检测、色差、光泽度等常规性能检测和电化学极化曲线测试, 对两种不同环境下试验件进行性能测试。结果 实验室周期浸润加速腐蚀 196.6 h, 相当于舰面停放 1 年, 且经过实验室 2 个周期加速腐蚀与自然环境暴晒 2 年的试验件涂层形貌、失光率、色差、电化学性能一致。结论 该局部环境谱当量加速关系准确可靠。

关键词: 局部环境谱; 光泽度; 色差; 极化曲线

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.01.007

中图分类号: TJ01 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2017)01-0024-06

Equivalent Accelerated Relationship of Local Environment Spectrum of Semi-closed Parts of a Plane

ZHANG Yong, CHEN Yue-liang, FAN Wei-jie, BIAN Gui-xue, WANG Chen-guang
(Qingdao Campus of Naval Aeronautical Engineering Academy, Qingdao 266041, China)

ABSTRACT: Objective To determine the equivalent accelerated relationship of local environment spectrum. **Methods** A semi closed key part of an aircraft was researched. Environment spectrum of local accelerated corrosion test was compiled based on its location in the plane and climate conditions of the service environment to carry out laboratory immersion corrosion and environmental exposure respectively: Test pieces of two different environments were tested for performance according to general performance test on macro and micro topography detection, color difference, gloss and other properties. **Results** Accelerated corrosion of cycle immersion in library for 196.6 hours was equivalent to parking on the ship surface for 1 year. The coating morphology, light loss rate, color difference, and electrochemical performance of two cycles of accelerated corrosion in laboratory were consistent with two years of natural exposure. **Conclusion** The equivalent accelerated relationship of the local environmental spectrum is accurate and reliable.

KEY WORDS: local corrosion environment, gloss, color difference, polarization curve

飞机机体结构日历寿命是评价其安全性和可靠性的指标之一, 同时也是确定分级维修周期和编写外场维护大纲的前提和基础^[1]。在飞机设计阶段通常借助环境谱加速腐蚀试验对飞机结构不同部位进行日

历寿命评定, 而腐蚀试验的前提是局部环境谱与试验谱间当量加速关系的确定^[2]。

文中以×型飞机某半封闭关键部位为研究对象, 分别进行实验室环境谱加速腐蚀试验和自然环境暴

收稿日期: 2016-07-01; 修订日期: 2016-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(51075394, 51375490)

者简介: 张勇(1981—), 男, 重庆人, 主要研究方向为材料的腐蚀防护和疲劳可靠性。

晒实验^[3], 通过将环境谱加速腐蚀的试验件与外场天然暴露的试验件性能进行对比分析^[4], 从而对当量加速关系进行修正与验证。这一研究成果对于我国海军 × 型飞机的设计、建造及日历寿命评定具有十分重要的参考意义。

1 实验

1.1 当量加速关系确定原理

飞机金属结构的腐蚀失效本质是发生电化学反应, 而电化学反应过程中电荷的转移与反应产物有着密切的等量关系, 服从法拉第定律, 即:

$$Q = \frac{1}{F} \int_0^t I_c dt \quad (1)$$

式中: F 为法拉第常数; I 为不同环境下的电流; t 为环境作用时间。

对于半封闭部位结构, 在服役环境中实际发生腐蚀的电流为 I_c , 服役时间为 t_c , 腐蚀量为 Q_c 。假设试验室加速环境中腐蚀电流为 I , 试验时间为 t , 腐蚀量为 Q , 依据腐蚀量相等准则 $Q_c=Q$, 则:

$$\frac{1}{F} \int_0^t I_c dt = \frac{1}{F} \int_0^t I dt \quad (2)$$

结合文献[5]中分析认为, 飞机结构材料在地面环境谱的使用年限和对应的加速试验环境谱作用时间范围内, I_c 变化很小, 认为恒定。则:

$$I_c t = I t' \quad (3)$$

由此导出:

$$t = \frac{I_c}{I} t' \quad (4)$$

引入折算系数:

$$\alpha = \frac{I_c}{I} \quad (5)$$

则式(4)可转换成:

$$t = \alpha t' \quad (6)$$

α 即为两种不同环境下腐蚀量相等对应的作用时间的关系, 是用当量折算法建立加速试验环境谱与地面环境谱作用时间之间当量关系的基础。由于服役环境腐蚀电流测量是一项工程量和难度较大的实验工作, 因此目前国际和国内采取的较为可行的方法是测定不同温、湿度下典型金属材料腐蚀电流来建立他们不同组合对应的当量折算系数。以这些通用的折算系数为基础, 建立各种结构材料以及不同的地面环境谱、加速试验谱下的当量折算系数。

实施步骤为: 将每年的地面环境谱作用折算为温度 $t=40$ °C、湿度为 90% 的标准潮湿空气的作用时间 t_1 ; 将每小时的加速环境谱作用折算为温度 $t=40$ °C、湿度为 90% 的标准潮湿空气的作用时间 t_2 ; t_1/t_2 即为当量加速关系 β , 即加速试验环境谱作用 β 小时相当

于地面停放 1 年。

1.2 半封闭部位局部环境谱的编制

根据上述环境谱原理及相应的编制原则^[5-6], 首先确定 × 飞机服役环境中影响飞机结构的因素主要包含以下方面: 舰上烟囱和飞机排出气中的硫、氮氧化物等; 氯化钠、海雾组合形成的 pH 值为 2.4~4.0 的高酸潮湿层; 相对湿度为 70%~100%, 且存在浓度范围为 $2.1 \times 10^{-3} \sim 6.4 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ 的沙粒和尘埃。

考虑到半封闭结构每次降雨后潮湿空气不能马上蒸发掉, 因此, 积留的潮湿空气作用还会延迟一段时间, 延迟时间的长短与每次降雨的轻重程度、雨量大小有关。假设每次雨后潮湿空气的作用时间按每次降雨延迟均延迟 1 h 计算, 总延迟时间为 135 h。雾露作用时间有滞后, 一般结构表面延长 1.5 h, 雾露作用次数为 92 次, 总的延迟时间为 138 h^[7]。服役海域雨谱和雾露谱见表 1 和表 2。

表 1 服役海域雨谱

温度/°C	雨谱/h	延迟时间/h	总作用时间/h
≤20	0	0	0
25	54.05	34.87	88.92
30	122.53	79.05	201.58
35	32.66	21.07	53.73
Σ	209.24	135	344.24

表 2 服役海域雾露谱

温度/°C	雾露谱/h	延迟时间/h	总作用时间/h
≤20	0	0	0
25	83.22	85.59	168.81
30	36.50	37.54	74.04
35	14.46	14.87	29.33
Σ	134.18	138	272.18

根据铝合金的折算系数, 将每年服役环境谱作用折算为温度 $t=40$ °C、湿度为 90% 的标准潮湿空气的作用时间 t_1 。其中铝合金的折算系数见表 3。

表 3 潮湿空气与标准潮湿空气的折算系数

材料	相对湿度/%	$t/$ °C				
		20	25	30	35	40
铝合金	70	0.163 80	0.244 40	0.325 00	0.625 26	0.925 52
	80	0.167 07	0.290 53	0.426 00	0.731 77	1.037 53
	90	0.110 45	0.207 00	0.299 95	0.649 97	1

潮湿空气作用时间的当量折算: $t_a=2508.34$ h。

雾露作用时间的当量折算: 将雾露作用小时数折算为 $t=40$ °C, 相对湿度为 90% 的标准潮湿空气的作

用时间。 $t_b=76.22$ h。

降雨作用时间的当量折算：将降雨作用小时数折算为 $t=40$ °C，相对湿度为 90% 的标准潮湿空气的作用时间。 $t_c=113.8$ h。

南海海域舰面停放环境谱每年相当于标准潮湿空气作用时间为： $t_1=t_a+t_b+t_c=2698.4$ h

将每小时的加速试验环境谱作用折算为温度 $t=40$ °C、湿度为 90% 的标准潮湿空气的作用时间 t_2 。不同浓度 NaCl 溶液浓度与水介质的折算系数见表 4，不同浓度的酸与水介质的折算系数见表 5。

表 4 不同浓度 NaCl 溶液浓度与水介质的折算系数

NaCl 质量分数/%	0.35	0.5	1.72	3.5	7
铝合金系数	0.643	0.612	0.335	0.121	0.0969

表 5 不同浓度酸与水介质的折算系数

硫酸 pH	5.99	4.99	4.69
铝合金系数	0.635	0.348	0.302

由于周期浸润加速腐蚀试验的环境温度是 40 °C，因而周期浸润加速试验谱与标准潮湿空气的当量折算只考虑环境对水介质的折算。

铝合金对质量分数为 3.5% 和 7% 的 NaCl 相对潮湿空气的折算系数分别为 0.121 和 0.0969，采用插值法可得质量分数为 5% 的 NaCl 相对潮湿空气的折算系数 $\alpha_1=0.1094$ ，pH=4 稀硫酸的折算系数 $\alpha_2=0.2183$ 。

周期浸润加速试验环境谱的综合折算系数 α 满足：

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}$$

可以得到 $\alpha=0.07286$ ，即加速腐蚀环境谱作用 1 h 相当于 $t=40$ °C，相对湿度为 90% 的标准潮湿空气作用 13.725 h。

服役环境谱与周期浸润加速谱的当量关系为 $\beta=t_1/t_2=196.6$ ，即周期浸润加速腐蚀 196.6 h，相当于舰面停放 1 年。

1.3 当量加速关系的验证

选取×飞机某框下壁板为研究对象，其主要组成材料为 7B04 铝合金板材，将试验件加工成如图 1 所示搭接件。按照 ASTM G 1—2003 对所有试验件进行充分清洗，对表面进行除油除水后放入干燥器中备用。

按照环境谱编制原则编制实验室加速腐蚀试验环境谱为：

1) 酸性 NaCl 溶液浸泡。通常采用 5% 溶液中加入少量稀 H_2SO_4 ，使 pH 值达到 4.0，以模拟盐雾和酸性气体的作用。

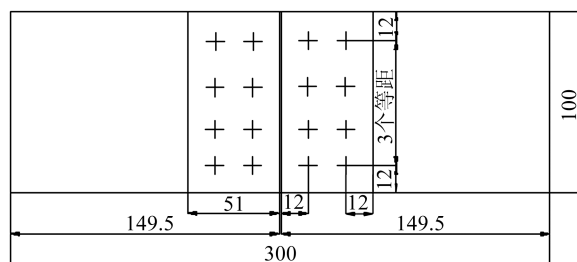


图 1 某框处尾梁下壁板关键部位

2) 温湿环境下表面溶液的烘干过程。通常在 40 °C 左右及 80% 相对湿度下用远红外灯照射烘干试件，以模拟潮湿空气及凝露的作用过程。一个加速周期为 30 min，其中浸泡 7.5 min，烘干 22.5 min。

共进行 2 个周期的加速腐蚀试验，即当量 2 年。加速腐蚀试验过程中，试件水平放置在绝缘的试件搁架上，试件考核面向上直接接受远红外灯照射，为避免环境箱工作环境不均匀对试件的影响，每 12 h 随机交换试件位置一次。

1.4 外场自然环境暴晒

由于×飞机主要服役环境为青岛附近海域某机场，为模拟实际服役环境中气象参数对试验件的影响，选择青岛小麦岛试验站进行天然暴晒试验，试验站位于北纬 36°03'，东经 120°25'，属于典型的北温带湿润型海洋性气候。试验场地距离海岸 10 m，海拔高度为 7 m，试验站安装了自动气象检测系统能够对大气暴晒场的气象数据进行准确记录。从 2012 年 10 月初开始，截止 2014 年 11 月，历时 2 年零 1 个月，经历了 2 年完整的气候条件变化。在投试期间，每月为一个观察周期，进行周期性检测，并对色差、光泽度等参数进行记录。

1.5 涂层常规性能测试

试验过程中对加速腐蚀试验和自然暴晒的试验件分别通过表面宏、微观形貌表征，色差、光泽度测定进行性能分析。

其中宏观照片主要用 Can 50D 数码相机，局部微观形貌采用 KH-7700 体视显微镜；光泽度和色差检测所用的仪器主要有 XGP60 光泽度计：测量范围为 0~199.9 Gs，分度值 0.1 Gs，稳定度 ≤ 0.4 Gs/30 min，示值误差 ≤ 1.0 Gs；HP-200 精密色差仪：有效测量口径（照明口径） $\Phi 8$ mm，标准偏差 ΔE_{ab} 在 0.08 以内。

1.6 电化学试验

除了涂层常规性能测试外，在最终试验结束后，还对带有涂层的样板进行了电化学极化性能测试。电化学试验借助 PARSTAT 4000 电化学工作站进行，电解槽直径为 10 cm，电解液为胶州湾海域清洁天然海

水。测试体系采用经典的三电极体系，其中对电极为铂片电极，参比电极为饱和甘汞电极（SCE），工作电极为带有涂层的试验件^[8]。参数设置：扫描电位区间为-350~600 mV(vs ocp),扫描速度为 0.1669 mV/s。电化学极化曲线测试装置如图 2 所示。

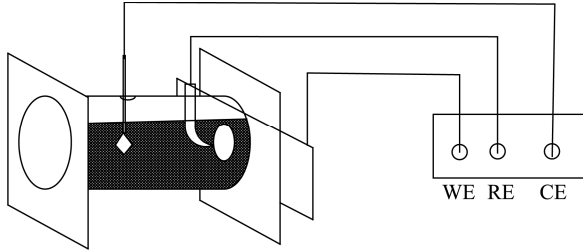


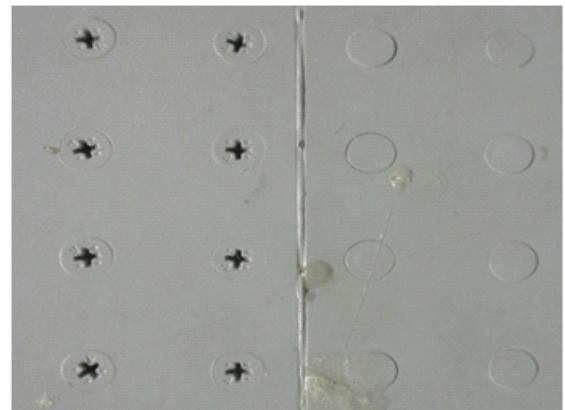
图 2 电化学极化曲线测试装置

2 当量加速关系验证研究

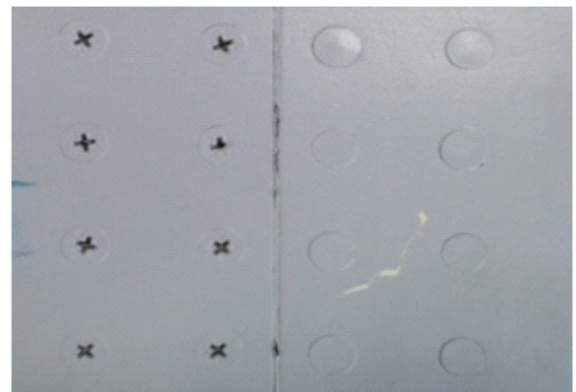
2.1 涂层形貌性能分析

实验室加速试验 2 个周期与外场暴露 2 年后试样外观整体形貌和易腐蚀部位微观形貌如图 3、图 4 所示。

通过对试样的外观形貌对比可知，经过 2 年自然暴露试验的试样（如图 4）均未见明显腐蚀，基体表面涂层完整性较好，未发现明显开裂、起泡、长霉、剥落、生锈、粉化等老化现象，仅在螺孔深处出现黄



a 加速腐蚀试验

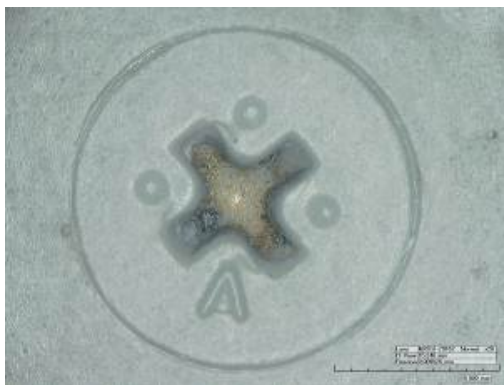


b 自然暴晒试验

图 3 试验后涂层表面形貌



a 加速腐蚀试验



b 自然暴晒试验



图 4 局部显微形貌

色锈蚀痕迹,在铆钉与基体搭接边缘涂层出现轻度裂纹,但并未发现粉化现象。这主要是由于在螺孔、铆钉搭接处等位置涂层相对较为薄弱,即使相同喷涂条件和工艺参数条件下,由于涂料具有一定的流动性,在这些位置的涂层厚度也相对较小^[9]。在海洋环境自然暴晒过程中,表面腐蚀性 Cl 会逐渐渗透进入涂层与基体之间,与周边涂层较厚的位置形成浓度差,受浓度梯度作用则会增大涂层内部横向应力作用,同时由于涂层厚度较小,抗紫外老化和抗雨水冲击作用的性能也相对较弱。因此在这些涂层缺陷位置最先开始发生涂层的老化、基体腐蚀作用。由于 2 年时间相对涂层的整个寿命周期而言,时间较短,因此并未出现更多明显的腐蚀现象。

实验室内加速试验 2 个周期后的试样形貌显示:经过当量 2 年的加速试验,表面涂层同样未见明显腐蚀,且无气泡、粉化、脱落等老化现象。与试验前相比,并无明显变化现象,仅在螺孔、铆钉与基体搭接处出现轻微裂纹或黄色锈斑现象,且腐蚀程度相同。这一规律与自然暴晒试验结果具有一致性。

2.2 色差结果分析

实验室加速试验与外场暴露试验色差结果对比如图 5 所示。

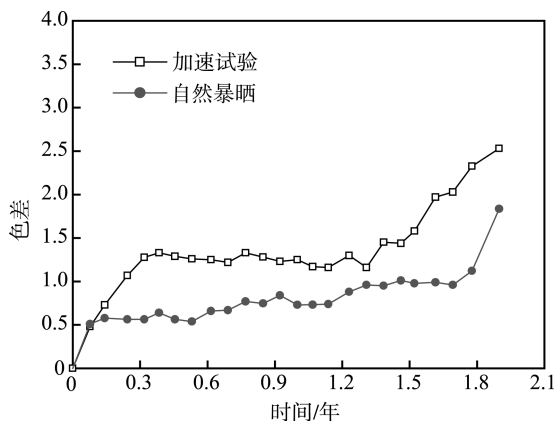


图 5 色差值对比结果

从图 5 可以看出,试验后两种试验件的色差变化趋势相同。随着试验时间的延长,色差值逐渐增大,但变化幅度并不明显,参照 GB/T 1766—2008《色漆和清漆 涂层老化的评级方法》,试验完成后两种试验件色差等级均属于 1 级。实验室内加速试验的试样结果表明,试样在第 2 周期后色差等级为 1 级,与自然暴露试验试样的腐蚀程度相同,均为轻微变色^[10]。此结果表明环境谱加速试验与实际环境暴晒实验结果变化规律一致。

2.3 光泽度结果分析

实验室加速试验与外场暴露试验失光率结果对

比如图 6 所示。

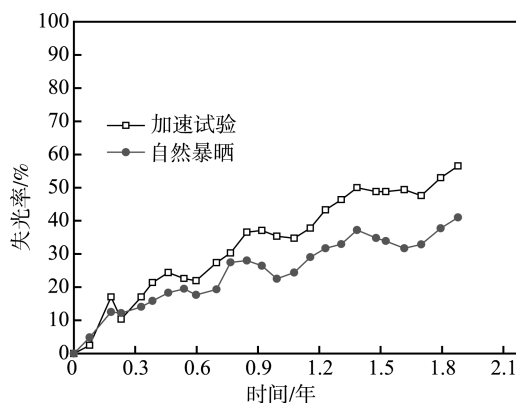


图 6 失光率结果对比

图 6 中失光率结果显示,两个不同环境中试验件的失光率均表现出随着试验时间的延长,失光率逐渐增大的变化趋势。整体变化趋势中仍有部分时间段出现失光率不增反降的变化趋势,这主要是由于反应初期涂层内部出现进一步固化收缩现象,很有可能存在光泽度增加的现象^[11]。实验室内加速腐蚀试验 2 个周期后试样涂层体系失光率接近于 0,表明涂层保光性较好,未出现明显失光现象^[12-14]。这一现象表明该种试样涂层体系保光性较好,未出现明显失光现象,且实验室内加速试验与自然暴晒试验结果具有一致性,同时验证当量加速关系的正确性和可靠性。

2.4 电化学性能分析

经过极化曲线测试,分别得到加速腐蚀和自然暴晒后的试验件的极化曲线如图 7 所示。

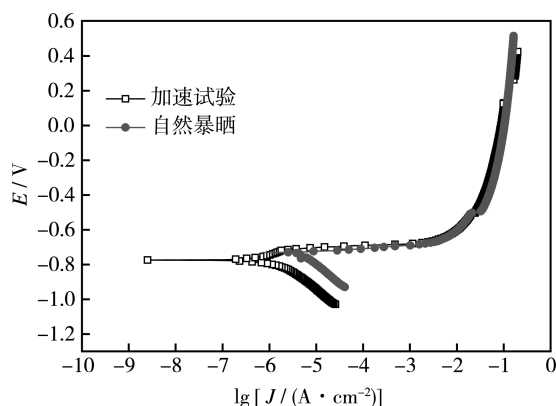


图 7 涂层试件极化曲线

从图 7 中极化曲线可以看出,两种试验件的形状相同,表明发生电化学反应类型相同,两种试验环境下 7B04 铝合金样板的 Tafel 曲线中阴、阳极部分曲线形状和斜率均未发生明显变化,且从曲线特征分析认为,阳极在一定电压范围内为活性溶解、阴极为氧扩散控制的特征也未改变^[13-14]。用 C-view 2.0 软件对极化曲线进行拟合,结果见表 6。

表6 极化曲线拟合结果

试验件	B_a/mV	B_c/mV	$I_o/(A \cdot cm^{-2})$	E_o/V
加速试验	39.276	-218.65	1.9353E-6	-0.787
自然暴晒	38.254	-220.64	2.2254E-5	-0.779

两种不同环境试验件的极化曲线拟合结果表明, 阳极、阴极斜率分别相差 1.0 mV 和 2.0 mV, 两者腐蚀电位相差 8 mV, 腐蚀电流密度仅相差一个数量级。拟合结果表明, 不同试验环境对涂层的影响较小。

3 结论

1) 依据×飞机半封闭结构所处环境气候特点, 编制了×飞机半封闭部位局部环境谱。研究表明, 局部环境谱与试验谱间当量加速关系为: 实验室周期浸润加速腐蚀 196.6 h, 相当于舰面停放 1 年。

2) 分别开展了实验室加速腐蚀试验和自然暴晒试验, 通过对同一部位的试验件色差、失光率等常规性能和电化学性能研究, 表明经过实验室 2 个周期加速腐蚀与自然环境暴晒 2 年的试验件性能变化规律一致, 进一步验证了局部环境谱当量加速关系的准确性和可靠性。

参考文献:

- [1] 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(4): 51—55.
- [2] 周希沅. 飞机结构的当量环境谱与加速试验谱[J]. 航空学报, 1996(5): 102—105.
- [3] 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.
- [4] 杨晓华, 金平. 飞机使用环境谱的编制[J]. 装备环境工程, 2010(6): 99—102.
- [5] 刘文斑, 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(1): 109—112.
- [6] 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.
- [7] XU D, BIRBILIS N, ROMETSCH P. The Effect of Pre-ageing Temperature and Retrogression Heating Rate on the Strength and Corrosion Behavior of AA7150[J]. Corrosion Science, 2012, 54: 17—25.
- [8] CONWAY B E. Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications[M]. Springer Science & Business Media, 2013.
- [9] 辛志东. 某型飞机结构连接件日历寿命研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2013.
- [10] WANG X S, LI X D, YANG H H, et al. Environment-induced Fatigue Cracking Behavior of Aluminum Alloys and Modification Methods[J]. Corrosion Reviews, 2015, 33(3/4): 119—137.
- [11] 邓洪达. 典型大气环境中有机涂层老化行为及其室内外相关性的研究[D]. 北京: 机械科学研究院, 2005.
- [12] ZHANG W, CAI C, PAN F, et al. Fatigue Life Estimation of Existing Bridges under Vehicle and Non-stationary Hurricane Wind[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 133: 135—145.
- [13] 许中林, 李国禄, 董天顺, 等. 等离子喷涂层磨损/接触疲劳失效行为研究现状[J]. 表面技术, 2014, 43(2): 126—133.
- [14] 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.