

××飞机滑轨内腔的加速腐蚀试验环境谱制定

樊伟杰¹, 张勇¹, 朱彦海², 杨文飞¹, 孟莉莉², 褚贵文³

(1. 海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041; 2. 中国航空制造技术研究院, 北京 100010;
3. 山东科技大学, 山东 青岛 266590)

摘要: **目的** 对运行环境逐渐复杂的××飞机滑轨内腔进行加速腐蚀试验的研究。考虑到外部环境对滑轨内腔的腐蚀影响, 旨在提出一种适用于江津地区的加速腐蚀试验环境谱, 以更好地模拟实际运行条件下滑轨内腔的腐蚀过程。**方法** 设计江津地区滑轨内腔的加速腐蚀试验环境谱, 以外露部位防护涂层加速腐蚀试验环境参考谱以及相应环境的分析为依据, 根据参考谱的参数制定方法, 针对江津地区的特定环境条件, 设计本环境谱的编制依据。进一步确定湿热、紫外暴露、温度冲击、低气压以及盐雾等参数, 得出系统的××飞机滑轨内腔的加速腐蚀试验环境谱。**结果** 成功形成了系统的××飞机滑轨内腔的加速腐蚀试验环境谱, 综合考虑了江津地区的环境特点, 并参考了外露部位防护涂层加速腐蚀试验环境谱的相关参数, 通过对湿热、紫外暴露、温度冲击、低气压以及盐雾等参数的确定, 能够更准确地模拟滑轨内腔在实际运行条件下的腐蚀过程。**结论** 该环境谱可为飞机制造商和维护人员提供重要的参考, 以评估滑轨内腔的腐蚀情况, 并采取相应的防护措施。通过更准确地模拟实际运行条件下的腐蚀过程, 能够提高飞机结构寿命的预测准确性, 从而保障飞机的安全运行和维护。这项研究对于改进飞机设计、延长使用寿命以及降低维护成本具有重要的实际意义。

关键词: 飞机腐蚀; 加速腐蚀试验; 环境谱; 滑轨; 腐蚀防护; 寿命预测

中图分类号: TG172; V216

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)12-0128-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.12.016

×× Environmental Spectra Development for Accelerated Corrosion Test of the Inner cavity of the Aircraft Slide

FAN Wei-jie^{1*}, ZHANG Yong¹, ZHU Yan-hai², YANG Wen-fei¹, MENG Li-li², CHU Gui-wen³

(1. Qingdao Campus of Naval Aviation University, Shandong Qingdao 266041, China; 2. China Academy of Aviation Manufacturing Technology, Beijing 100010, China; 3. Shandong University of Science and Technology, Shandong Qingdao 266590, China)

ABSTRACT: The work aims to conduct an accelerated corrosion test for the inner cavity of the×× aircraft slide with complex operating environment, and propose an accelerated corrosion test environment spectrum for Jiangjin area based on the corrosion

收稿日期: 2023-08-27; 修订日期: 2023-10-18

Received: 2023-08-27; Revised: 2023-10-18

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(52101392); 山东省青创科技计划(2020KJA014); 山东省自然科学基金青年项目(ZR2020QD081); 山东省自然科学基金面上项目(ZR2020ME130)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (52101392); Universities of Shandong Province of China (2020KJA014); Shandong Natural Science Foundation (ZR2020QD081); Science and Technology Support Plan for Youth Innovation (ZR2020ME130)

引文格式: 樊伟杰, 张勇, 朱彦海, 等. ××飞机滑轨内腔的加速腐蚀试验环境谱制定[J]. 装备环境工程, 2023, 20(12): 128-134.

FAN Wei-jie, ZHANG Yong, ZHU Yan-hai, et al. ×× Environmental Spectra Development for Accelerated Corrosion Test of the Inner cavity of the Aircraft Slide[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(12): 128-134.

effect of external environment on the inner cavity of the slide, so as to better simulate the corrosion process of the inner cavity of the slide under actual operating conditions. An accelerated corrosion test environment spectrum of the inner cavity of the slide in Jiangjin area was designed based on the reference spectrum of the accelerated corrosion test environment spectrum of the protective coating in the exposed part and the analysis of the corresponding environment. According to the parameter formulation method of reference spectrum and the specific environmental conditions in Jiangjin area, the basis for developing this environmental spectrum was designed. Parameters such as humidity and heat, UV exposure, temperature shock, low pressure and salt spray were further determined, and the accelerated corrosion test environment spectrum of the inner cavity of the ×× aircraft slide was obtained. A systematic accelerated corrosion test environment spectrum of the inner cavity of the ×× aircraft slide was successfully formed. Environmental characteristics of Jiangjin area were considered comprehensively, and relevant parameters of the accelerated corrosion test environment spectrum of the exposed protective coating were referred to. By determining parameters such as humidity and heat, UV exposure, temperature shock, low pressure and salt spray, the corrosion process of the inner cavity of the slide could be more accurately simulated under actual operating conditions. This environmental spectrum can provide an important reference for aircraft manufacturers and maintenance personnel to evaluate the corrosion of the inner cavity of the slide and take appropriate protective measures. By accurately simulating the corrosion process under actual operating conditions, the prediction accuracy of aircraft structural life can be improved, so as to ensure the safe operation and maintenance of aircraft. This research has important practical significance for improving aircraft design, extending service life and reducing maintenance costs.

KEY WORDS: ×× aircraft corrosion; accelerated corrosion test; environmental spectrum; slide; corrosion protection; life prediction

随着我国环境的变迁,以及航空装备的发展,××飞机的使用频率逐渐增加,运行环境也逐渐多样化,飞机设备的使用要求也不断提高^[1-3]。××飞机在服役过程中面对多样化的复杂环境^[4-6],极易导致其结构尤其是滑轨内腔部分发生腐蚀破坏,这成为寿命评估中必须考虑的重要因素^[7-9]。飞机滑轨位于机翼和襟翼的连接处,是襟翼动作的主要承担部分。由于滑轨通过摩擦动作,无法在表面进行涂层防护,且出于减重的需求,滑轨必须采用空腔结构。外部海洋大气较容易在滑轨结构面残留,对飞机滑轨造成较为严重的腐蚀。因此,在对××飞机进行寿命评估时,必须考虑腐蚀破坏这一重要因素^[10-12]。然而,由于飞机的服役年限较长,现实腐蚀发生破坏的过程缓慢,且使用条件恶劣,无法在实际使用环境下进行准确的腐蚀试验。由于外场试验的人工成本高,对外场试验的结果也难以准确收集,因此必须采用一种测量周期短、结果误差小的试验评估手段^[13-15]。

在此背景下,Du等^[16]、Pandya等^[17]、刘文琰等^[18]进行了系列实验室加速腐蚀试验,为该问题的解决提供了可行的有效解决方案。其中,刘文琰等^[18]提出了一种以湿热暴露、紫外线照射、热冲击、低温疲劳及盐雾等试验作为基本结构的实验室加速腐蚀谱,采用人造环境条件对现实腐蚀过程进行了模拟加速。Liang等^[19]、Zhang等^[20]、Huang等^[21]通过改变腐蚀介质的浓度、温度以及部分成分,在确保腐蚀机理与实际工况一致的前提下进行了腐蚀试验,并进行了腐蚀谱的编制。牛犇等^[14]则以高原地区作为试验参考环境,特异性分析了高原的主要环境因素,编制了

高原地区机场环境谱,能够揭示腐蚀破坏的行为机理,为腐蚀防护和寿命预测提供依据^[22-23]。吴瑜等^[24]以直升机作为腐蚀环境谱的编制对象,对某直升机结构进行了腐蚀区域划分,为某直升机的腐蚀防护设计改进和腐蚀防护性能评估提供了重要依据。由此,为确保实验室加速腐蚀试验有效性,以及腐蚀机理的统一性,需建立××飞机滑轨内腔的加速腐蚀环境谱^[25-26],包括参考谱和对应的参考环境,以明确滑轨内腔加速腐蚀试验所需的条件和参数。

本研究通过选取经过试验验证的参考谱及对应的参考环境,明确××飞机滑轨内腔加速腐蚀环境谱的构成,将××飞机的使用情况和服役环境参数与参考环境参数进行了类比。在参考谱的基础上,确定了××飞机滑轨内腔的加速腐蚀试验环境谱。通过建立××飞机滑轨内腔的加速腐蚀环境谱,为飞机寿命预测和维护计划提供支持。这一研究方向的发展将有助于确保飞机的可靠运行和安全飞行。

1 加速腐蚀试验环境谱编制依据

1.1 外露部位防护涂层加速腐蚀试验环境谱参考谱

CASS谱为外露部位加速腐蚀试验参考谱(如图1所示),模拟了F-18在亚热带沿海地区的服役环境,以此来进行飞机的环境加速试验。

在CASS谱基础上明确环境块参数,以××系列飞机外露部位加速腐蚀试验环境谱为参考依据^[27](该环

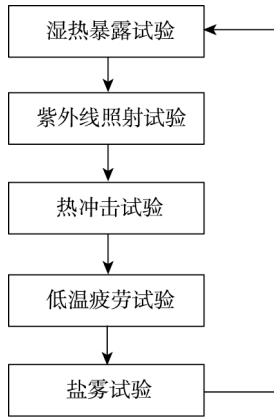


图1 CASS谱及其流程
Fig.1 CASS spectrum and its flowchart

境谱已经用于××系列飞机、××飞机腐蚀关键部位日历寿命评定),如图2所示。该谱作用1个周期对应××飞机外露部位失效关键部位外场使用1a。

1.2 参考环境

××系列飞机停放在内陆机场和沿海机场,典型机场包括温带的青岛地区流亭飞机场、亚热带浙江地区××机场、重庆××机场以及热带的海南××机场。以具有典型代表意义的青岛××机场和海南××机场为例,上述机场的环境见表1~表4。

在××系列飞机日历寿命评定中,背景环境条件综

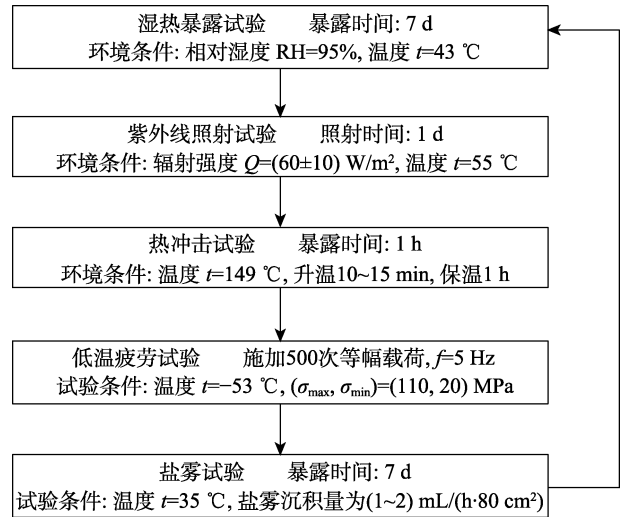


图2 ××飞机外露腐蚀失效关键部位加速试验环境谱
Fig.2 Accelerated test environment spectrum for critical parts of ×× aircraft exposed corrosion failure

合上述机场条件给出,雾和凝露、潮湿空气、盐雾、雨等偏保守地取海南××机场环境,而化学介质则偏保守地取青岛××机场环境,当量关系取值也较为保守。

1.3 ××飞机滑轨内腔加速腐蚀试验环境谱编制环境

1) ××飞机停放机场为江津地区,江津地区环境

表1 青岛××机场地面停放环境谱(年)
Tab.1 Ground parking environment spectrum of Qingdao ×× airport (year)

	雾及凝露	雨	盐雾+工业废气	工业废气	盐雾	潮湿空气
时间比例/%	14.98	7.53	3.5	8.28	10.76	26.61
作用时间/h	1312.5	659.85	306.6	725.75	942.68	2330.71
作用次数	185.43	143.8				
pH值	3~5.6	3~5.6				
SO ₂ 质量浓度/(mg·m ⁻³)		0.058	0.263	0.09	0.73	
NO _x 质量浓度/(mg·m ⁻³)		0.069	0.061	0.049		
飘尘质量浓度/(mg·m ⁻³)			0.39			
降尘质量浓度/(mg·m ⁻³)			18.13			
CO质量浓度/(mg·m ⁻³)			2~3			
Cl ⁻ 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	0.435*	69.88	0.39			0.435*
降雨量/mm		991.62				
盐雾浓度/(mg·m ⁻³)			0.28~0.48		0.48	

注: *单位为 mg/m³。

表2 青岛××机场累积谱
Tab.2 Cumulative spectrum of Qingdao ×× airport

温度/°C	5	10	15	20	25	30	35	次数
累积雨谱	110.2	54.5	61.7	103.3	113.3	5.3		105.8
累积雾露谱	137.6	67.7	83.8	167.9	85.0	2.8	0.6	88.3
湿度谱	RH=70%			121.75	116.05	68.0	2.15	
	RH=80%			286.35	334.45	87.15	0.65	
	RH=90%			402.15	373.75	20.55	0.55	

表 3 海南××机场地面停放环境谱(年)
Tab.3 Ground parking environment spectrum of Hainan ×× airport (year)

	雾及凝露	雨	盐雾	潮湿空气
时间比例/%	18.51	4.90	27.12	39.98
作用时间/h	1 621.8	429.24	2 375.7	3 502.25
作用次数	244.8	157.9		
pH 值	6.52	6.52		
SO ₂ 质量浓度/(mg·m ⁻³)			0.073	
NO _x 质量浓度/(mg·m ⁻³)			0.002 8	
飘尘质量浓度/(mg·m ⁻³)				
降尘质量浓度/(mg·m ⁻³)				
CO 质量浓度/(mg·m ⁻³)				
Cl ⁻ 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	0.27*	0.27		
降雨量/mm		1213.6		
盐雾浓度/(mg·m ⁻³)			0.28	

注: *单位为 mg/m³。

表 4 海南××机场累积谱
Tab.4 Cumulative spectrum of Hainan ×× airport

温度(℃)	5	10	15	20	25	30	35	次数
累积雨谱			3.4	56.9	319.7	49.1		157.9
累积雾露谱	0.3	2.0	61.4	443.4	1 087.1	25.9	1.7	244.8
湿度谱	RH=70%			71.89	158.67	493.61	94.17	
	RH=80%			368.00	401.33	644.22	24.72	
	RH=90%			921.39	2 096.30	599.06	4.28	

谱见表 5 和表 6。江津属于亚热带季风性湿润气候,在我国属于较为严酷的内陆环境。

- 2) 停放条件为室外停放。
- 3) 飞行高度为 9 000~12 000 m。

表 5 江津地区地面环境谱(年)
Tab.5 Ground environment spectrum of Jiangjin area (year)

	雾与凝露	雨	潮湿空气
时间比例/%	10.96	4.1	59.2
作用时间/h	963.6	363.2	5183
作用次数	334	132	
pH 值	4.4	4.4	
Cl ⁻ 质量浓度/(mg·L ⁻¹)		1.994	
降雨量/mm		939	

表 6 江津地区雨、雾露、湿度环境总谱
Tab.6 Environmental spectrum of rain, mist, dew, and humidity in Jiangjin area

温度/℃	20	25	30	35	次数
雨谱/h	203.8	93.6	62.6	3.2	132
雾露谱/h	543.5	249.7	166.8	3.6	334
湿度谱	70%	489	224.7	150.1	0
	80%	1629.8	749.1	500.5	0
	90%	815.1	374.5	250.2	0

- 4) 年飞行小时数为 1 000 h。
- 5) 由于滑轨在整流罩内,不考虑发动机温度对滑轨内腔的影响。
- 6) 滑轨周围温度场按照极限飞行高度 12 000 m 大气温度计算,地面停放期温度按照机场地面温度计算。

2 加速腐蚀试验环境谱制定

根据滑轨部位的结构和局部环境特点,编制加速试验环境谱。借鉴已有研究成果,选取 CASS 环境谱作为编制加速试验环境谱的基准。根据我国江津地区环境特点及××飞机滑轨局部环境对 CASS 谱进行裁剪和修正,即得到滑轨部位的加速试验环境谱。

2.1 湿热试验参数的确定

- 1) 温湿度条件。温度条件取 CASS 谱外露部位加速腐蚀试验环境谱中的温度值,即 $t=43\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。湿度条件取 CASS 谱中的湿度值,即 $\text{RH}=95\%$ 。
- 2) 温湿暴露作用时间。参考××环境谱,潮湿空气作用时间 $T_{\text{c}}=3\text{ }502.25\text{ h}$ 。根据服役环境实地,江津地区潮湿空气作用时间为 $T=5\text{ }183\text{ h}$ 。参考歼-8 外露腐蚀失效关键部位加速环境谱,温湿作用时间为 7 d,从而可计算得到该型飞机温湿暴露环境块的作用时间:

$$t = \frac{T}{T_c} \times 7 = 10 \text{ d}$$

3) 温湿暴露试验谱块环境参数。试验温度为 43 ℃, 试验湿度为 95%; 试验时间为 10 d。

2.2 紫外暴露试验参数的确定

考虑滑轨局部环境, 滑轨在整流罩内部, 该部位不受阳光照射, 故对紫外环境块不予考虑。

2.3 温度冲击试验试验参数的确定

按照 GJB 150.5A—2009《军用装备实验室环境试验方法 第5部分》, 温度冲击试验方法中规定“飞机的飞行暴露于热带环境并可能接受到日照加热, 但几分钟后又暴露在与飞行高度相对应的极端低温环境中”和“宜根据预期的使用情况和极端暴露值的范围确定试验条件”。××飞机的飞行高度一般为 9 000~12 000 m, 对应的大气温度应为 -43.5~-56.5 ℃, 试验温度可取最低温度值 -55 ℃。故该模块选取的环境参数: 温度值为 -55 ℃, 时间为 2 h。在地面停放时, 考虑到夏天日照等作用, 温度最高能到 70 ℃。因此, 该部位承受的温度冲击变化为 -55~70 ℃, 时间为 4 h, 其中 -55 ℃ 保持 2 h, 70 ℃ 保持 2 h。

2.4 低气压试验参数的确定

由于滑轨内腔属于密封状态, 地面气压时密封, 会受到高空低气压的作用。在本试验中, 根据具体结构局部环境细节, 要考虑高空低气压作用。按照 GJB 150.2A—2009《军用装备实验室环境试验方法-第2部分》, 低气压(高度)试验方法中取所要求的试验高度相对应的压力值, 保持这个压力值至少 1 h。××飞机 9 000~12 000 m 的飞行高度对应的大气压力为 30.74~19.33 kPa。在保守考虑的基础上, 该模块选取的环境参数为 19 kPa, 时间为 1 h。

2.5 盐雾试验参数的确定

1) 温度条件。盐雾试验温度参考盐雾试验标准, 取 $t=40$ ℃。

2) 酸性盐雾作用。参考美国海军预警机表面水膜的 pH 值和离子构成, 在 5% NaCl 溶液中添加 H_2SO_4 , 以再现化学因素的作用。××系列飞机服役青岛××的 SO_2 含量很高, 雾与凝露、雨水的 pH 为 3~5.6。××系列飞机加速环境谱中酸性盐雾的 pH 为 4.0~4.5。该型飞机服役地江津地区环境谱中雾与凝露、雨水的 pH 约为 4.4, 可保守认为江津地区和青岛××环境 $[\text{H}^+]$ 总量相一致。故本次盐雾试验环境谱控制溶液 pH 值为 4.0~4.5。

环境中酸性盐雾主要由酸性气体造成, 将江津地区环境谱中和参考谱中的酸性气体总量换成 $[\text{H}^+]$ 的作用总量, 用该型机受到的 $[\text{H}^+]$ 作用总量除以参考环境 $[\text{H}^+]$ 作用总量, 再乘以××外露部位加速环境谱中酸

性盐雾作用时间, 即得到××飞机酸性盐雾作用时间。××受到的主要的化学介质的作用, 确定 SO_2 、HCl 为起主要作用的酸性物质, SO_2 遇水发生反应: $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{SO}_3$ 。

××化学介质取为青岛××机场环境, 青岛地区工业污染, 故取××飞机年 SO_2 作用量取为参考谱中的最大值, 即 0.73 mg/m^3 , 以 1 m^3 所含有的酸性气体质量为计算的统一标准, 则 $[\text{H}^+]$ 质量为: $0.022\ 812\ 5 \text{ mg}$ 。

该机型受到的 $[\text{H}^+]$ 作用总量与参考环境 $[\text{H}^+]$ 作用总量含量为一致。××系列飞机外露部位加速环境谱中酸性盐雾作用时间为 3 d, 则该机型盐雾作用时间为 3 d。

参考××飞机酸性盐雾占盐雾总时间的比例, 将该机型酸性盐雾作用时间占盐雾总时间的比例取为与××飞机相同, 即为 3/7, 则该机型酸性盐雾作用时间为 3 d, 中性盐雾时间为 4 d。

3) 盐雾沉降量。与××飞机外露部位加速腐蚀试验环境谱相同, 为 $(1\sim2) \text{ mL}/(\text{h}\cdot 80 \text{ cm}^2)$ 。

4) 盐雾试验参数。暴露时间为 7 d, 其中中性盐雾 4 d (96 h), 酸性盐雾 3 d (72 h)。盐雾为 5% 的 NaCl 溶液, 盐雾沉降量为 $(1\sim2) \text{ mL}/(\text{h}\cdot 80 \text{ cm}^2)$ 。试验温度为 35 ℃。

2.6 加速腐蚀试验环境谱的确定

综合上述湿热暴露、紫外线照射、热冲击、低气压以及盐雾等试验的参数设定, 得出了××飞机滑轨试验室加速腐蚀试验环境谱, 如图 3 所示。

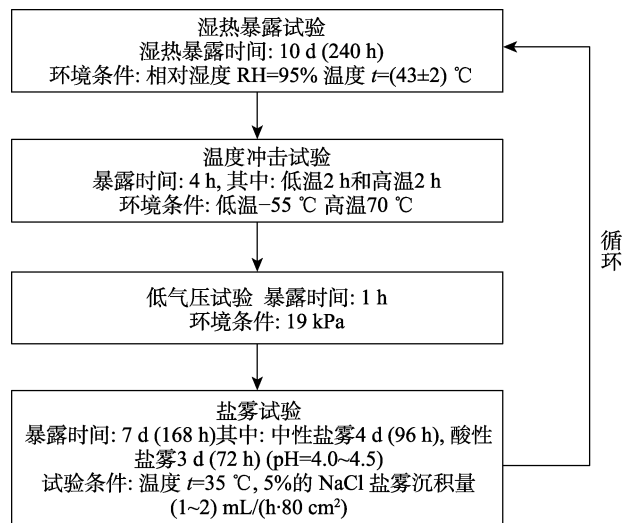


图 3 ××飞机滑轨加速试验环境谱
Fig.3 Accelerated test environment spectrum
of ×× aircraft slide

3 结论

1) 对××飞机已有的关键部位加速腐蚀环境谱进行了分析, 并结合其所在环境与气候条件, 对湿热暴露、紫外线照射、热冲击、低温疲劳以及盐雾等试验

进行了参数化处理,并作为××飞机滑轨内腔的加速腐蚀试验环境谱的编制依据。

2) 通过对特定地区的××飞机滑轨内腔加速腐蚀试验环境谱进行参数确定,分析参考环境内容,确定了参考环境青岛、海南的大气成分。分别对此加速腐蚀试验谱的各项参数(温度、湿度、光照、中性盐雾、酸性盐雾等)进行了确定,系统化归纳了本试验环境谱的所需参数以及具体数值。

3) 结合具体参数,形成了对××飞机滑轨内腔的加速腐蚀试验环境谱,采取湿热暴露试验10 d→温度冲击试验4 h→低气压实验1 d→盐雾试验7 d的测试策略,将其作为防腐设计与性能评估的重要测试准则。此加速腐蚀试验环境谱的编制,缩短了设备的测试周期,且保证了测试精度,降低了测试成本,也在一定程度上揭示了腐蚀破坏的行为机理,对于设备的腐蚀防护和寿命预测具有重要意义。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] JIANG F, HIROHATA M, LIU J, et al. Application of Accelerated Cyclic Test with Synthetic Ocean Water Salt-Deposition Process to the Evaluation on Corrosion Characteristics of Weathering Steel[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2022, 57(3): 280-289.
- [3] 张勇, 陈跃良, 吴剑峰, 等. 后勤装备防腐涂层加速试验环境谱研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(5): 147-151.
ZHANG Y, CHEN Y L, WU J F, et al. Study of Environmental Spectrums of Accelerated Testing of Anti-Corrosion Coatings of Logistics Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(5): 147-151.
- [4] LI R, MIAO C Q, NIE M F, et al. Equivalent Relationship of Accelerated Corrosion and Compilation Method of Environmental Spectrum of Corroded Steel Wires[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2022, 69(4): 387-394.
- [5] 胡建军, 陈跃良, 卞贵学, 等. 飞机结构加速腐蚀与自然腐蚀[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(11): 900-904.
HU J J, CHEN Y L, BIAN G X, et al. Corrosion of Aircraft Structure Material in Accelerated Simulating Environment and Service Environment[J]. Corrosion & Protection, 2011, 32(11): 900-904.
- [6] MALUMBELA G, MOYO P, ALEXANDER M. A Step towards Standardising Accelerated Corrosion Tests on Laboratory Reinforced Concrete Specimens[J]. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 2012, 54: 78-85.
- [7] CUI T F, LIU D X, ZHANG X H, et al. Effect of Thermal Shock Process in Accelerated Environment Spectrum on the Fatigue Life of 7B04-T6 Aluminum Alloy[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed, 2016, 31(5): 1109-1116.
- [8] 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.
- [9] WU H Y, LEI H G, CHEN Y F, et al. Comparison on Corrosion Behaviour and Mechanical Properties of Structural Steel Exposed between Urban Industrial Atmosphere and Laboratory Simulated Environment[J]. Construction and Building Materials, 2019, 211: 228-243.
- [10] 张勇, 陈跃良, 樊伟杰, 等. ×飞机半封闭部位局部环境谱当量加速关系研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(1): 24-29.
ZHANG Y, CHEN Y L, FAN W J, et al. Equivalent Accelerated Relationship of Local Environment Spectrum of Semi-Closed Parts of a Plane[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(1): 24-29.
- [11] SUN B, YE T Y, FENG Q, et al. Accelerated Degradation Test and Predictive Failure Analysis of B10 Copper-Nickel Alloy under Marine Environmental Conditions[J]. Materials, 2015, 8(9): 6029-6042.
- [12] PAN B, JIANG T M, LI X Y, et al. Lifetime Assessment of Aircraft Structural Components in Coastal Environments[J]. Journal of Aircraft, 2010, 47(4): 1409-1412.
- [13] BIALO L, GRODNIOWICZ T, ZABINSKI P. Selected Cyclic Corrosion Tests in Automotive Industry[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2023, 65(4): 1469-1476.
- [14] 牛犇, 刘溅洪. 高原地区机场自然环境谱编制研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(4): 122-127.
NIU B, LIU J H. Compilation of Natural Environment Spectrum of Airport in Plateau Area[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(4): 122-127.
- [15] NAKANO A, OSHIKAWA W, YONEZAWA N. Evaluation of Corrosion Properties of Steel with Zn-30 Mass% Al Thermal-Spray Coating Using Accelerated Atmospheric Exposure Test[J]. MATERIALS TRANSACTIONS, 2021, 62(7): 1001-1008.
- [16] DU C C, QIN M H, WU Z F, et al. High-Throughput Accelerated Corrosion Test of Q450NQR1 Weathering Steel[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2023, 18(5): 100090.
- [17] PANDYA A, SAHA D, SINGH J K, et al. Effect of Environmental Pollution on Corrosion Characteristics of 3003 Aluminium Alloy Exposed in Different Parts of India[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2017, 70(6): 1607-1620.
- [18] 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 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.
- [19] LIANG S, BAI Z H, ZHOU H R, et al. A Study on the Corrosion Correlation between Simulated Accelerated Tests and Enhanced Road Testing of DC06 Cold-Rolled Plate[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023, 32(8): 3452-3464.
- [20] ZHANG S, ZHANG T, HE Y T, et al. Effect of Coastal Atmospheric Corrosion on Fatigue Properties of 2024-T4 Aluminum Alloy Structures[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 802: 511-521.
- [21] HUANG F, ZHU T W, ZHOU X J, et al. Indoor Accelerated Corrosion Kinetics of Weathering Steel and Its Service Life Prediction[J]. Corrosion, 2014, 70(8): 819-827.
- [22] HE X Y, YE L Y, DENG Y L, et al. Effect of the Oxidation Reaction Interface on the Accelerated Corrosion Behaviour of Al-Mg-Si Alloy[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2022, 57(4): 343-354.
- [23] BLAND L G, ZHU Y K, POPE J, et al. Comparison of Corrosion Performance of AA7075 and AA2070 in Various Test Environments[J]. Corrosion, 2019, 75(5): 549-563.
- [24] 吴瑜, 张晓娟. 某型直升机加速腐蚀试验环境谱编制及应用[J]. 直升机技术, 2021(2): 63-68.
- WU Y, ZHANG X J. Compilation and Application of Environment Spectrum for Accelerated Corrosion Test of a Helicopter[J]. Helicopter Technique, 2021(2): 63-68.
- [25] JIAO J C, LIAN Y, LIU Z, et al. Correlation between Laboratory-Accelerated Corrosion and Field Exposure Test for High-Strength Stainless Steels[J]. Materials, 2022, 15(24): 9075.
- [26] KIM K M, KIM G I, SON G H, et al. New Accelerated Corrosion Test Method Simulating Atmospheric Corrosion of Complex Phase Steel Combining Cyclic Corrosion Test and Electrochemically Accelerated Corrosion Test[J]. Materials, 2023, 16(8): 3132.
- [27] 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.

责任编辑: 刘世忠