海洋大气模拟环境下电连接器安装防护工艺验证分析

袁猛，张幸，刘元海

（中国特种飞行器研究所 结构腐蚀防护与控制航空科技重点实验室，湖北 荆门 448035）

摘要：目的 研究海洋大气模拟环境下，电连接器不同安装防护工艺方法的环境适应性。**方法** 选取有代表性的电连接器，以不同的安装防护工艺装配在典型结构材料制作的安装板上，在实验室加速腐蚀环境下，验证其不同的防护效果。**结果** 电连接器线缆的不同防护工艺将对电连接器基本电性能造成直接影响，安装板与电连接器接触面的防护工艺不同将对其基体材料的腐蚀程度造成很大差异。**结论** 采用热缩管对连接器线缆进行有效的密封能保护电连接器内部结构，避免腐蚀介质的侵蚀对电性能造成影响，电连接器安装（包括方盘安装和气密螺母安装），应对其安装接触面进行填角密封，且安装板前后两面都需要进行密封。

关键词： 电连接器；海洋环境；安装防护

DOI： 10.7643/ issn.1672-9242.2016.05.022

中图分类号： TJ07；TG174 **文献标识码：** A

文章编号： 1672-9242(2016)05-0134-06

Validation and Analysis of Installation and Protection Technology of Electrical Connector under Simulated Marine Environment

YUAN Meng, ZHANG Xing, LIU Yuan-hai

(Structure Corrosion Protection and Control of Aviation Science and Technology Key Laboratory, China Special Vehicle Research Institute, Jingmen 448035, China)

ABSTRACT: Objective To study the environmental adaptability of different installation and protection technology for electrical connector in the ocean atmosphere simulation environment. **Methods** Some representative electrical connectors were selected and assembled to the mounting plate of the typical structure material with different installation protection technology. The different protective effect in the laboratory accelerated corrosion environment was tested and verified. **Results** Different protection technology of electric connector cable would affect the basic electrical properties of electrical connector directly. The different protection technology of the contact surface between the mounting plate and the electric connector would cause a great difference in the degree of corrosion. **Conclusion** Sealing electrical connector cable with heat shrink tube can protect the internal structure of electrical connector and avoid effect of corrosive medium on electrical properties. In the installation of electrical connector (including installation of square plate and tight nuts), the gap at the edge of the contact surface should be sealed and both the front and rear surfaces of mounting plate should be sealed well.

收稿日期： 2016-05-09；**修订日期：** 2016-05-15

Received： 2016-05-09；**Revised：** 2016-05-15

作者简介： 袁猛（1983—），男，山东菏泽人，硕士，工程师，主要研究方向为飞机结构腐蚀防护与控制。

Biography： YUAN Meng(1983—), Male, from Heze, Shandong, Master, Engineer, Research focus : corrosion protection and control of aircraft structure.

KEY WORDS: electrical connector; marine environment; installation and protection

我国飞机服役环境日趋恶劣，特别是在海洋环境下，飞机将长期遭受潮湿空气、海水和盐雾等环境交互或协同作用的影响，电连接器作为飞机上实现电气功能的重要元器件，对其安装防护工艺也提出了更高的要求[1—3]。电连接器与安装基材的接触位置是腐蚀敏感部位，如不能进行有效的防护，将导致电连接器内部结构和安装基材发生严重腐蚀，影响电连接器正常功能，破坏飞机基体结构，增加飞机维修维护费用，影响飞行安全[4—10]。

目前，国内电连接器生产厂家出厂测试仅通过湿热、盐雾等单一环境测试，且测试时间较短，不能模拟实际装机状态下的综合环境条件，无法验证是否满足海上飞机使用需要[11]。另外，国内相关单位对海洋环境下电连接器配套安装防护工艺验证试验研究较少。基于此，实验室选取两种飞机上常用电连接器类型，安装在 2A12 铝合金制作的模拟安装板上，并配以不同的安装防护工艺（包含线缆密封工艺及安装接触面防护工艺），在海洋大气模拟环境条件下进行实验室加速腐蚀试验，验证其不同工艺的防护效果，考察模拟装机状态的电连接器在海洋大气模拟条件下的环境适应性。

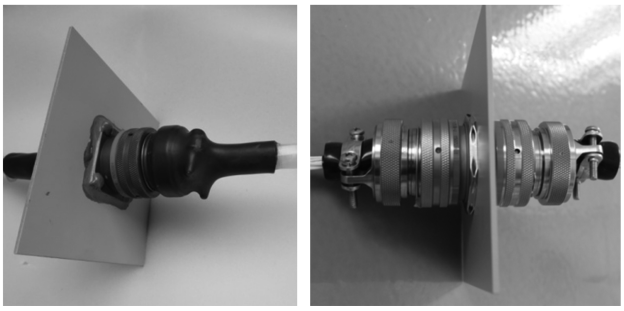
1　试验

1.1　试验件组成

每个试验件均由安装板、电连接器及线缆组成。安装板尺寸为 120 mm×120 mm×2 mm，材料为 2A12 铝合金，铬酸阳极化表面处理后喷涂两遍底漆和一遍面漆。安装前，打磨掉安装板上与电连接器接触区域的漆层与表面处理层。电连接器选用铝合金镀镉及不锈钢镀镍等两种常用航空电连接器。其中铝合金镀镉电连接器为方盘安装（如图 1a 所示），不锈钢镀镍电连接器为气密螺母安装（如图 1b 所示）。为便于电性能测试，每个连接器均选取 8 个相邻接触件孔位安装线缆，其余的接触件孔位安装封严塞。试验件外观如图 1 所示。

1.2　环境谱

借鉴美国海军用于评估、验证海上飞机结构表面防护层体系性能的加速试验环境谱，并考虑电连接器在飞机上安装位置环境特点，参考国内飞机典型模拟件加速试验环境谱编制方法[12—15]，对基本试验环境谱进行适当剪裁，编制了电连接器海洋大气模拟环境加速试验环境谱，如图 2 所示。



a 方盘安装电连接器　　b 气密螺母安装电连接器

图 1　试验件外观示例

Fig.1　Test specimen appearance

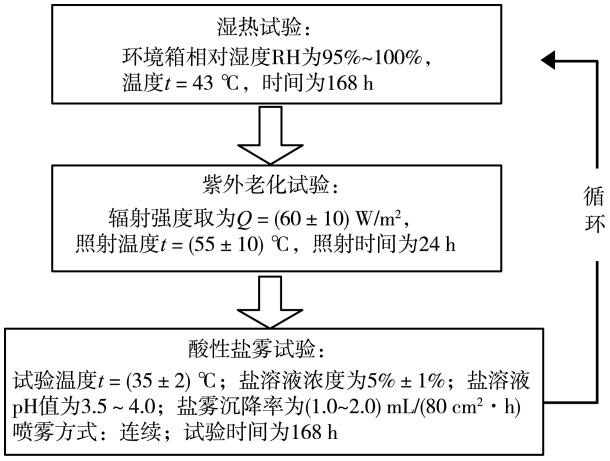


图 2　加速试验环境谱

Fig.2　Accelerated corrosion environment spectrum

1.3　测试条件

试验对电连接器基本电性能的测试包括接触电阻、绝缘电阻、耐电压等 3 个方面，其测试仪器及测试方法见表 1。

表 1　测试仪器和方法

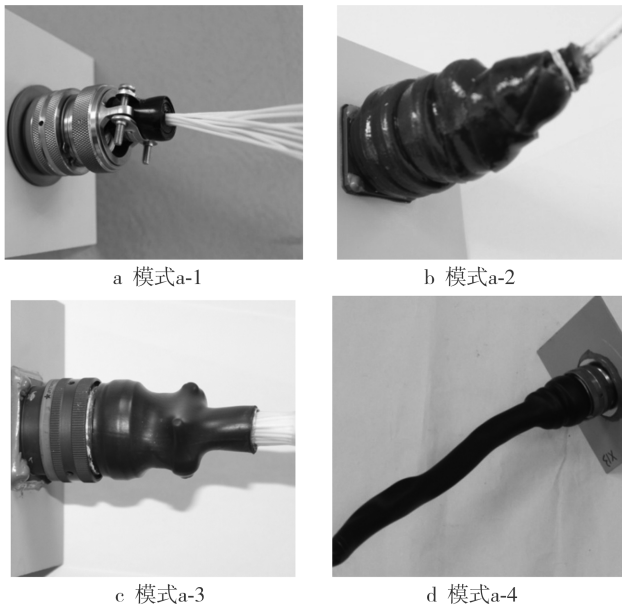
Table 1　Test apparatus and methods

测试项目	测试仪器	测试方法
接触电阻	数字微欧计 ZY9987	GJB 1217A—2009 方法 3004
绝缘电阻	数字兆欧表 CEM DT-6605	GJB 1217A—2009 方法 3003
耐电压	耐电压测试仪 RK2672AM	GJB 1217A—2009 方法 3001

2　结果

2.1　线缆

根据试验件线缆密封防护工艺不同，可分为以下 4 种模式：线缆不做任何防护处理（模式 a-1，如图 3a 所示）；使用聚氨酯薄膜带包裹整个插头、尾部附件和部分线缆（模式 a-2，如图 3b 所示）；使用带胶热缩管包裹整个尾部附件和部分线缆（模式 a-3，如图 3c 所示）；使用带胶热缩管包裹整个尾部附件和全部线缆（模式 a-4，如图 3d 所示）。



a 模式a-1　　b 模式a-2

c 模式a-3　　d 模式a-4

图 3　不同线缆防护模式外观示例

Fig.3　Appearance of different cable protection modes

实验室加速腐蚀试验 3 个循环后，经电性能测试发现，模式 a-4 防护的电连接器的电性能正常，而模式 a-1，a-2，a-3 防护的电连接器，电性能均出现不合格现象。以不合格孔位数量占该模式所有线缆孔位测试总数的比率定义为故障率，对各个模式所有测试数据进行统计分析，结果见表 2。

表 2　电性能故障率统计表

Table 2　Electric performance failure rate statistics

%

模式	接触电阻故障率	绝缘电阻故障率	耐电压故障率
模式 a-1	5.7	25.3	23.0
模式 a-2	2.2	9.3	9.3
模式 a-3	2.5	17.2	16.4
模式 a-4	0	0	0

由统计数据可知，模式 a-4 密封效果较好，能有效地阻止腐蚀介质侵入电连接器内部，其他模式均不能满足防护要求。试验过程中发现，模式 a-2 中聚氨酯薄膜带缠绕太紧容易破损，且遇高温会老化变硬，失去黏性，模式 a-3 中热缩管与线缆接触收口处的含胶量不够，极易产生缝隙。腐蚀介质一旦从这些脱胶的缝隙进入被保护的壳体内部，排出将更加困难，且壳体内部长期存在潮湿环境，使得线缆接线位置及连接器内部结构受到破坏，导致电连接器功能出现故障。

2.2　方盘

铝合金镀镉方盘安装电连接器试验件，包含 4 种安装接触面防护工艺模式：直接安装，安装接触面不做任何处理（模式 b-1）；安装前接触面加垫导电密封垫，安装后缝外不填角（模式 b-2）；直接安装后，安装板与插座法兰接触一面缝隙使用密封剂填角密封，另一面螺纹与安装板缝隙不进行密封（模拟半封闭腔体，模式 b-3）；直接安装后，安装板前后两面接触缝隙均填角密封（模拟全封闭腔体，模式 b-4）。

在安装板上靠近插座边缘位置刮开一小块涂层作为测试点，测试安装板与电连接器之间的接触电阻，其试验前后阻值变化见表 3。

表 3　方盘安装电连接器接触电阻对比

Table 3 Comparison of contact resistivity of electrical connector for square plate installation

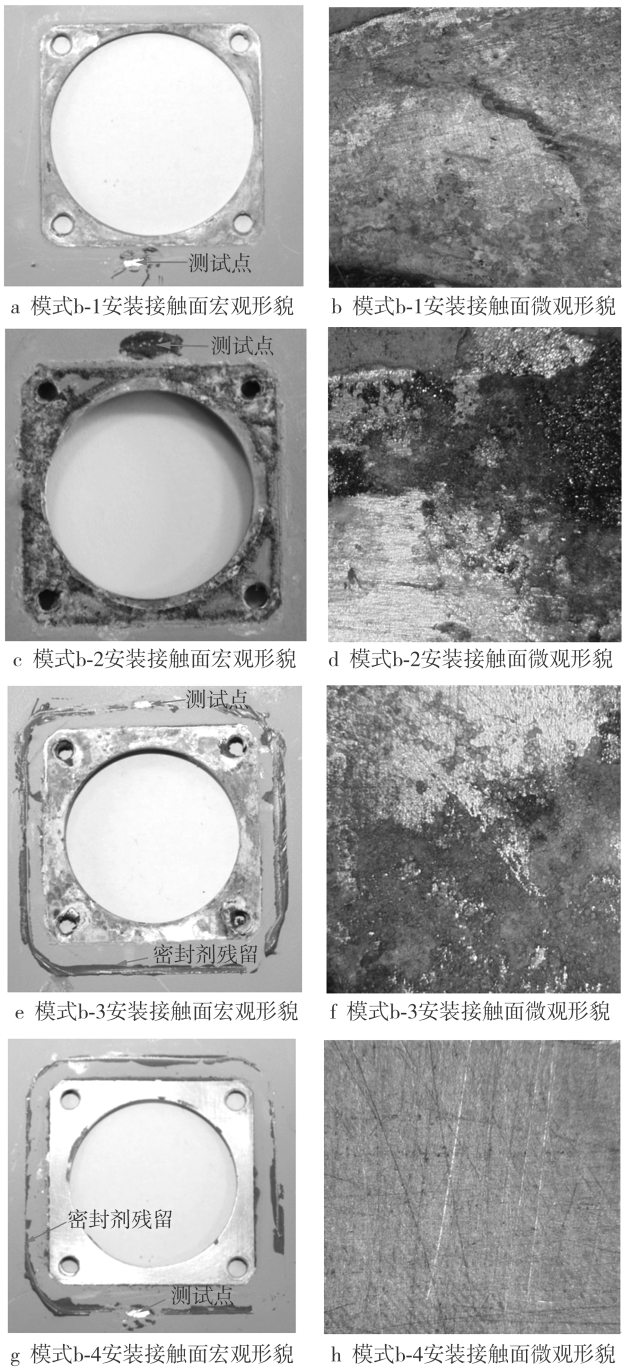
	试验前/ mΩ	试验后/Ω
模式 b-1	18 ~ 45	>20
模式 b-2	20 ~ 38	>20
模式 b-3	10 ~ 43	1.7 ~ 5
模式 b-4	15 ~ 38	0.020 ~ 0.069

注：测试时探针接触力度不同，测试数值会产生波动。

由表 3 不难发现，模式 b-1，b-2，b-3 试验件，试验后接触电阻显著增加。这是由于安装接触面发生腐蚀，腐蚀产物聚集在接触面，影响了电连接器与安装板之间的电连续性。模式 b-4 试验件，接触电阻变化较小，表明该模式防护效果较好，能有效保证电连接器与安装板之间的电连续性。

试验 3 个循环后，方盘安装铝合金镀镉电连接器与安装板接触面腐蚀情况如图 4 所示。通过宏观和微观观察可知，模式 b-1—模式 b-3 试验件，安装板接触面基体金属严重腐蚀，产生大量腐蚀产物，

其中，模式 b-3 试验件，导电密封垫附着大量盐粒且老化变硬，并粘贴在安装板表面，失去正常功能。模式 b-4 试验件，安装板接触面未发生明显腐蚀，其防护效果较好。



a 模式b-1安装接触面宏观形貌　b 模式b-1安装接触面微观形貌
c 模式b-2安装接触面宏观形貌　d 模式b-2安装接触面微观形貌
e 模式b-3安装接触面宏观形貌　f 模式b-3安装接触面微观形貌
g 模式b-4安装接触面宏观形貌　h 模式b-4安装接触面微观形貌

图 4　方盘安装接触面腐蚀状况

Fig.4　Corrosion of contact surface of square plate installation

2.3　气密螺母

不锈钢镀镍气密螺母安装电连接器试验件，包含 3 种安装接触面防护工艺模式：插座凹槽内使用连接器自带非导电密封圈，安装后缝外不填角（模式 c-1）；插座凹槽内使用连接器生产商提供的导电密封圈，安装后缝外不填角（模式 c-2）；插座凹槽内使用连接器生产商提供的导电密封圈，安装后插座法兰与安装板接触缝隙使用密封剂填角密封（模式 c-3）。

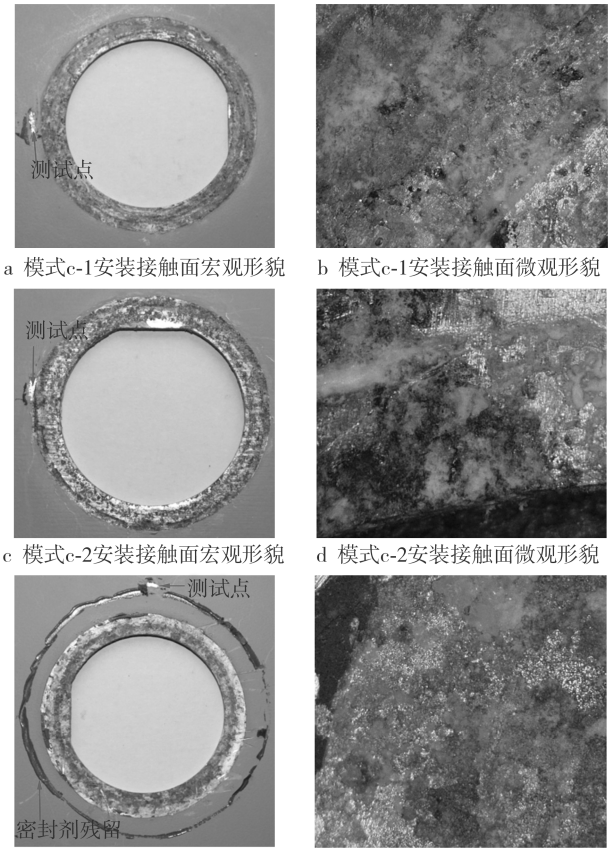
试验 3 个循环后，各模式代表试验件接触电阻变化见表 4，3 种防护模式试验件的接触电阻均显著增大。表明其电连续性遭到破坏，可以推测其安装接触面均发生腐蚀。

表 4　气密螺母安装电连接器接触电阻对比

Table 4 Comparison of contact resistivity of electrical connector for tight nut installation

	试验前/ mΩ	试验后/ Ω
模式 c-1	35 ~ 50	9 ~ 15
模式 c-2	28 ~ 55	>20
模式 c-3	18 ~ 43	1.2 ~ 1.7

试验 3 个循环后，气密螺母安装不锈钢镀镍电连接器与安装板接触面腐蚀情况如图 5 所示。



a 模式c-1安装接触面宏观形貌　b 模式c-1安装接触面微观形貌
c 模式c-2安装接触面宏观形貌　d 模式c-2安装接触面微观形貌
e 模式c-3安装接触面宏观形貌　f 模式c-3安装接触面微观形貌

图 5　气密螺母安装接触面腐蚀状况

Fig.5　Corrosion of contact surface of tight nut mounting

通过宏观和微观观察可知，3 种防护模式的试验件安装板接触面基体金属均发生严重腐蚀，并附

着大量腐蚀产物。其中，模式 c-3 试验件安装接触面沿着密封圈接触位置有较明显分界线，表明腐蚀介质是从安装板背面螺母紧固位置进入安装板开孔缝隙，使安装板接触面产生缝隙腐蚀和电偶腐蚀，而密封圈并不能阻止其腐蚀的扩展。试验表明，对于气密螺母安装电连接器，螺母密封不能有效阻止腐蚀介质侵入安装缝隙，必须对螺母与安装板接触缝隙使用密封剂密封。

3 分析讨论

1）使用带胶热缩管包裹尾部附件及整个线缆，密封效果较好，可以有效阻止腐蚀介质侵入连接器壳体内部。应避免热缩管收口于线缆线束表面，该位置线缆之间存在缝隙，且容易脱胶，一旦密封不好，将更容易聚集腐蚀介质。

2）导电密封垫（电连接器厂商提供）容易吸潮并聚集盐粒，在不进行填角密封的情况下，不推荐使用。

3）气密螺母安装电连接器，仅靠螺母紧固，密封效果较差，且密封圈（包括导电和非导电）不能阻止安装板接触面腐蚀的扩展。

4）电连接器安装（包括方盘安装和气密螺母安装），特别是存在异种金属接触时，推荐对其安装接触面进行填角密封，且安装板前后面都需要进行密封。如果仅对一面进行填角密封，更容易聚集腐蚀介质，使基体材料发生腐蚀，增加维修成本，影响飞机飞行安全。

4 结论

1）带胶热缩管对飞机增重较大，且不易拆卸，后续试验需要进一步研究设计增重较轻，密封效果较好的线缆防护工艺。

2）气密螺母安装电连接器，设计之初太依赖螺母紧固密封效果，没有设计安装板前后两面均密封的防护模式，后续试验将进一步增加此类防护模式。

3）试验中发现导电密封垫裸露在外均发生失效，后续将考虑导电密封垫与填角密封工艺相结合，有望达到较好的防护效果。

参考文献：

[1] 刘元海. 舰载机载成附件环境适应性设计与管理[J]. 装备环境工程, 2015, 12(1): 73—78.
LIU Yuan-hai. Design and Management of Environmental Adaptability for the Shipborne Productions and Accessories[J].Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(1): 73—78.

[2] 孙志华, 汤智慧, 李斌. 海洋环境服役飞机的全面腐蚀控制[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 35—39.
SUN Zhi-hua, TANG Zhi-hui, LI Bin. Comprehensive Corrosion Control of Naval Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 35—39.

[3] 李云双, 曹江利, 姚文清, 等. Au/Ni/Cu 多层薄膜热带海洋气候腐蚀失效机制研究[J]. 表面技术, 2014, 43(6): 43—47.
LI Yun-shuang, CAO Jiang-li, YAO Wen-qing, et al. Study on Corrosion Failure Mechanism of Au/Ni/Cu Multilayer Film in the Tropical Marine Climate[J]. Surface Technology, 2014, 43(6): 43—47.

[4] 王春晖, 蓝启城, 何卫平, 等. 典型连接件防腐密封剂在加速环境下的失效分析[J]. 装备环境工程, 2013, 10(3): 47—50.
WANG Chun-hui, LAN Qi-cheng, HE Wei-ping, et al. Failure Analysis of Typical Adapting Piece Anticorrosion Sealant in Accelerated Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(3): 47—50.

[5] 张丹峰, 谭晓明, 陈跃良. 海洋环境下飞机结构腐蚀疲劳研究现状[J]. 装备环境工程, 2009, 6(2): 5—8.
ZHANG Dan-feng, TAN Xiao-ming, CHEN Yue-liang. Research Progress of Corrosion Fatigue of Aircraft Structure under Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(2): 5—8.

[6] 张幸, 何卫平, 张登. 某型飞机典型连接结构防腐蚀密封改进及验证[J]. 装备环境工程, 2016, 13(1): 24—28.
ZHANG Xing, HE Wei-ping, ZHANG Deng. Improvement and Validation about Anti-corrosion and Sealing of Sealant of Typical Assembly Structure of a Certain Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(1): 24—28.

[7] 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 Jian-jun, CHEN Yue-liang, BIAN Gui-xue, et al. Corrosion of Aircraft Structure Material in Accelerated Simulating Environment and Service Environment[J]. Corrosion and Protection, 2011, 32(11): 900—904.

[8] 孙志华, 汤智慧, 李斌. 海洋环境服役飞机的全面腐蚀控制[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 35—38.
SUN Zhi-hua, TANG Zhi-hui, LI Bin. Selecting Suitable Materials for Carrier-based Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 35—38.

[9] COOKE G. A Study to Determine the Annual Cost of Corrosion Maintenance for Weapons Systems in the USAF[R]. NCI Information Systems, Inc, 1998.

[10] AGARWALA V S. Corrosion Detection and Monitoring-a Review[C]// Proceedings of Corrosion 2000. Houston: NACE International, 2000.

[11] 张令波, 李明, 傅耘. 舰载机环境试验方法发展探讨[J]. 装备环境工程, 2015, 12(6): 100—103.
ZHANG Ling-bo, LI Ming, FU Yun. Development of Environmental Test Methods for Carrier-based Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(6): 100—103.

[12] 刘文廷, 李玉海. 飞机结构日历寿命体系评定技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
LIU Wen-ting, LI Yu-hai. Evaluating Technology for the Calendar Life of Aircraft Structure[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.

[13] 刘文廷, 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.

[14] 李玉海, 刘文廷, 杨旭, 等. 军用飞机结构日历寿命体系评定应用范例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
LI Yu-hai, LIU Wen-ting, YANG Xu, et al. Application Sample of Evaluating the Calendar Life of Military Aircraft Structure [M]. Beijing: China Machine Press, 2004.

[15] 江雪龙, 杨晓华. 加速腐蚀当量加速关系研究方法综述[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 50—58.
JIANG Xue-long, YANG Xiao-hua. Review on the Research Methods of Equivalent Accelerated Relationship in Accelerated Corrosion[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 50—58.