

航空结构材料环境适应性研究进展及发展方向

骆晨, 刘明, 孙志华, 汤智慧, 陆峰

(中航工业北京航空材料研究院 表面工程研究所, 北京 100095)

摘要: 对航空结构材料环境适应性研究进展进行了综述,其中包括新型航空材料的环境适应性研究和环境-力学因素耦合作用对航空结构材料环境适应性的影响,最后阐述了环境适应性研究的结构化趋势,并指出了航空结构材料环境适应性研究未来将重点关注户内加速试验技术、环境适应性评价技术以及环境适应性数据的深度开发与应用,将各种科学技术和工程实践用于减缓环境对结构材料的损伤,提高装备的耐环境能力。

关键词: 航空装备; 新材料; 力学因素

DOI:10.7643/issn.1672-9242.2014.06.002

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)06-0010-05

Research Progress and Development Trend in Environmental Worthiness of Aeronautical Structural Materials

LUO Chen, LIU Ming, SUN Zhi-hua, TANG Zhi-hui, LU Feng

(Surface Engineering Department, AVIC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

ABSTRACT: Research progress in environmental worthiness of aeronautical structural materials was presented in the paper, including environmental adaptability of new aeronautical materials, co-effect of environmental-mechanical factors on the environmental worthiness of aeronautical structural materials, and the structural trend of environmental testing. Finally, it was pointed out that the future research focus in this field would be indoor accelerated testing techniques, environmental worthiness evaluation methods and application of environmental worthiness data. The aim of environmental worthiness research was to employ technical and engineering methods to retard the environmental effect on the function of aeronautical structural materials.

KEY WORDS: aeronautical equipment; new materials; mechanical factors

收稿日期: 2014-08-12; 修订日期: 2014-10-27

Received : 2014-08-12; Revised: 2014-10-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51201157); 国防科技工业技术基础科研项目(H052013A003)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51201157); National Defense Technology Foundation Project (H052013A003)

作者简介: 骆晨(1984—),男,北京人,博士,工程师,主要从事环境试验与观测、表面防护等方面的研究。

Biography: LUO Chen(1984—), Male, from Beijing, Ph. D., Engineer, Research focus: environmental testing and observation, and surface protection.

通讯作者: 孙志华(1969—),女,河北人,博士,研究员,主要研究方向为飞机环境适应性研究与寿命评价、铝合金防护技术等。

Corresponding author: SUN Zhi-hua(1969—), Male, from Hebei, Ph. D., Researcher, Research focus: aircraft environmental adaptability research and service life evaluation, aluminum alloy protection technology.

航空装备在服役过程中同时受到自然环境和飞行工况诱发环境的作用,并具有跨地域、跨气候工作的特点,因而较其他武器装备更容易发生失效。航空装备故障与事故分析结果表明,材料和结构件等基础装备组成的环境失效是造成装备整体失效的主要因素^[1-2],轻则导致飞机提前返厂检修,重则发生“机毁人亡”的重大事故。

目前,欧美等科技发达国家已经建立了完整的航空结构材料环境适应性数据资源。以数字仿真及虚拟试验技术为标志的新概念和新技术在航空结构材料环境工程领域得到广泛的应用。户内模拟加速试验及相关性研究工作不断取得新成果^[3-4],同时掌握了有效的环境适应性评价方法,航空装备环境工程管理体系愈加完善^[5]。

近年来,我国也开展了大量航空材料、小型元器件的自然环境试验工作。环境鉴定试验也逐步成为型号定型的必须项目,部分型号研制单位开始在设计阶段就开展环境工程工作^[6]。同时,我国形成了国防科技工业局管理的军用自然环境试验站网体系和科技部管理的民用自然环境试验站网体系。

文中介绍了环境航空结构材料环境适应性的主要研究内容,并对航空结构材料环境适应性研究进展进行了综述。其中包括新型航空材料的环境适应性研究和环境-力学因素耦合作用对航空结构材料环境适应性的影响。最后阐述了环境适应性研究的结构化趋势,重点分析了航空结构材料环境适应性研究的发展方向。

1 环境航空结构材料环境适应性的主要研究内容

环境航空结构材料环境适应性研究是指在观测自然环境因素和武器装备平台诱发环境因素的基础上,开展真实环境实验与模拟环境实验,分析航空结构材料的环境损伤演变规律,预计其性能失效趋势,并寻求减缓航空结构材料环境损伤的措施。近年来,航空结构材料环境适应性研究领域在户内加速试验技术、环境适应性评价技术等方面发展迅速,具体内容包括以模拟实际使用条件或重现环境效应为目的,开展单项或多项环境因素、静态或动态环境试验^[7],并应用先进无损检测、化学分析、力学测试以及材料表征技术评价航空结构材料的环境损伤。

2 航空结构材料环境适应性研究进展

2.1 新型航空材料的环境适应性研究

近年来航空装备迅速发展,新型航空材料随之不断涌现。航空装备失效过程十分复杂,但其本质是基础组成材料性能降低的过程。研究新型重点航空材料的环境适应性变化规律,考核它们的耐环境能力,能为航空装备结构的耐久性设计和剩余日历寿命确定提供参考。

作者利用电子探针研究国产第三代铝锂合金 2A97 的局部腐蚀行为,发现氯化钠环境中合金的局部腐蚀萌生于金属间粒子。 θ 相金属间粒子在腐蚀试验中发生铝元素的优先溶解,其周边则形成腐蚀坑。晶间腐蚀的萌生明显晚于金属间粒子的腐蚀,这是由于 θ 相金属间粒子在去合金化后与晶界 T1 相析出物共同作用才能驱动晶间腐蚀的发展。

曼彻斯特大学开展了 AA2099-T8 新型航空铝合金在硼酸铵电解液中的阳极氧化研究。发现合金表面阻挡层阳极氧化膜的生长,伴随着金属间粒子的氧化,氧化膜中充氧空洞的形成和破裂以及氧化膜在破裂位置的愈合。充氧空洞的形成与氧化膜/合金界面铜富集层中富铜纳米粒子的氧化有关,而富铜纳米粒子的氧化过程则取决于合金晶粒取向,所以充氧空洞的密度也与晶粒取向有关。充氧空洞内的高压能使空洞上方氧化膜的破裂,导致氧气释放及合金表面形成微坑。破裂的氧化膜由于局部区域电场集中可能迅速愈合。另外,氧化锂形成过程中的“Pilling-Bedworth 比”相较氧化铝形成过程大幅降低,导致合金/氧化膜界面形成细小空洞,从而阳极氧化膜容易从合金表面脱落^[8-9]。

汤智慧等通过海南户外暴露实验研究了 A100 超高强度钢表面镀铬层的腐蚀性能变化规律,并利用交流阻抗技术表征镀层在不同腐蚀阶段的特征。结果表明,镀层表面存在的显微裂是腐蚀发生、发展过程的主要影响因素,腐蚀导致镀层力学试样抗拉强度降低,断口呈脆性断裂倾向。镀铬层腐蚀是不连续的,腐蚀产物在镀层与基体之间堆积,导致镀层发生应力性开裂和鼓泡。镀铬层在腐蚀前期形成的腐蚀产物可以阻塞表面的显微裂纹,又会延缓腐蚀

介质到达基体表面,具有保护作用^[10]。

刘明等利用失重分析、形貌观察、断面分析和电化学交流阻抗谱等研究了 30CrMnSiA 超高强度钢在北京地区大气腐蚀的动力学规律和腐蚀特征,发现该材料大气腐蚀速率经历了腐蚀初期由快到慢和腐蚀 3 年后由慢到快的过程。其中大气暴露 3 年的样品锈层最致密,对侵蚀性离子的阻挡作用最强,相应腐蚀速率最低。3 年后,30CrMnSiA 样品锈层因为过厚产生内应力而开裂,加速了腐蚀^[11]。

新型航空材料有别于传统材料,具有质轻、高强、显微组织复杂等特点,先进、准确、实时的环境适应性数据采集能力是进行全面、完整自然环境适应性数据积累的基础。国际上材料表征技术发展迅速,以 X 射线层析成像技术、低电压高分辨率 SEM 技术等使快速表征和微观表征能力大幅度提高。在我国这些新技术在材料环境试验与观测领域的应用程度还很低,限制了数据采集能力的提升。

2.2 自然-工况耦合环境效应对航空结构材料的影响

现代军事力量的部署地域和时域不断扩展,任务涉及的气候环境因素(包括温度、湿度、盐雾、气压、沙尘、风、太阳辐射、空间粒子辐射、霉菌等)复杂而严酷,同时装备平台上的诱发环境因素(包括振动、冲击、污染物气氛、电磁波辐射等)使航空装备的任务条件更加恶劣。航空结构材料实际服役环境是自然环境与工况(平台环境)两者的耦合,其真实环境适应性能应通过开展自然-工况耦合环境效应试验获得。

Connolly 等利用计算机辅助微焦 X 射线层析技术研究了高强度钢遭受应力和腐蚀环境双重作用时由局部腐蚀向应力腐蚀开裂的过渡。发现裂纹萌生更多地发生在蚀坑的四周,而非蚀坑的底部,这与对裂纹萌生的传统认识完全不同^[12]。

刘明等设计了一种板条形涂层试样预应变施加方法,并通过原始标定和显微观察的方法定量确定有机涂层应变变量,以此模拟航空涂层防护体系在服役中遭受的应变。将施加了不同应变的板条形有机涂层试样进行户外暴晒,使样品所处条件与实际服役中自然环境因素-力学因素耦合作用情况更为接近^[13]。

蔡健平等建立了模拟海洋大气环境的综合加速试验谱,并采用电化学阻抗技术表征综合加速试验过程中有机防护涂层的老化动力学过程^[14-15]。在此基础上,骆晨等跟踪观察了户内加速试验过程中受到外加应变的航空有机涂层的表面形貌变化,综合研究了航空有机涂层在外加应变和热带海洋大气环境耦合作用下的损伤规律和失效模型。研究发现,外加应变导致有机涂层的防护性能下降,外加拉应变水平越高,有机涂层损伤越严重,防护性能下降越多。进行户内加速试验过程中,受到外加拉应变的涂层防护性能进一步下降,外加拉应变越大,下降越快,如图 1 所示。受外加拉应变的涂层防护性能下降的原因是相应的应力水平超过有机涂层材料的断裂强度,从而在涂层内部形成微裂纹,构成外界溶液到达有机涂层/合金界面的通道。受到外加压应变后,有机涂层的防护性能不发生明显变化。在户内加速试验过程中,受到外加压应变的涂层防护性能缓慢丧失。在不对有机涂层/合金界面构成破坏的情况下,受到外加压应变水平越高,涂层防护性能下降越缓慢^[16-18]。

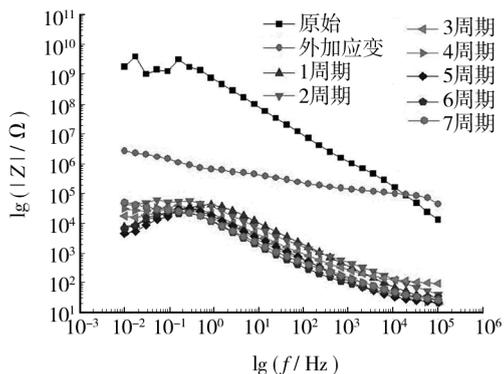


图 1 受到 8.0% 外加拉应变有机涂层试样的电化学阻抗谱 Bode 图^[17]

Fig. 1 EIS Bode diagram of organic coating specimen with 8.0% tensile pre-strain of indoor accelerated testing^[17]

自然-工况耦合环境效应试验能够更真实地反应实际服役状态下航空结构材料的腐蚀(老化)环境,可用于航空装备的可靠性和安全性评估。如何通过现场跟踪试验的方式确定影响航空结构材料损伤和失效的主要因素,以及如何在较短时间内准确重现航空结构材料在实际环境长周期服役后的失效和损伤过程,将是这一领域未来发展的方向。

2.3 航空结构材料环境适应性研究的结构化趋势

航空装备由多种材料和构件按照特定需求进行组合,材料间的配合、整体的几何构型均会对装备的环境适应性造成影响。中航工业科研人员针对某型民用飞机、某型军用直升机、某型飞艇的易腐蚀结构开展了环境适应性研究。

中航工业北京航空材料研究院科研人员根据实际调研确定了某型民用飞机的易腐蚀部位主要为蒙皮、货舱、厨房/卫生间、起落架舱、起落架活塞杆等,之后设计了相应的模拟试验件,并制定 5 个部位的局部环境加速试验谱,开展环境适应性对比验证试验。研究发现蒙皮试验件防护效果最好,加速试验后表面未出现腐蚀现象;厨/卫试验件口盖内表面腐蚀最严重,腐蚀产物大量堆积,型材铆钉连接位置也出现腐蚀损伤,如图 2 所示;货舱试验件和起落架舱试验件表面存在少量有机涂层鼓泡,腐蚀倾向性居中。从而可以得出结论,厨房/卫生间局部区域是某型民用飞机最易发生环境损伤的部位,应实施重点腐蚀控制措施。

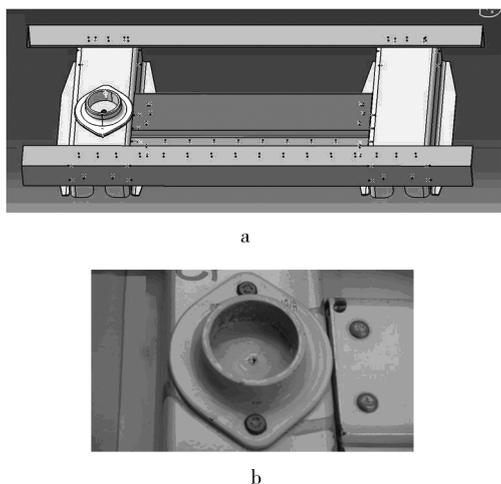


图 2 某型民用飞机厨/卫试验件结构图和户内加速试验后的照片

Fig. 2 Schematic diagram of the "kitchen/toilet" testing structure and photograph after indoor accelerated testing

中航工业特种飞行器研究所通过测量飞艇蒙皮缝线结构在加速试验后的断裂强力,计算得到其断裂强力下降率,评定蒙皮缝线的抗老化性能。研究发现,经过 16 天辐照强度为 0.35 W/m^2 ,温度为 77

℃,相对湿度为 70%,2 h 内照射 1.5 h、喷淋 0.5 h 条件下的光老化试验,飞艇蒙皮缝线结构的断裂强力下降率达 20%。试验 30 天后,缝线出现明显裂纹,断裂强力下降率达 80%,从而确定飞艇蒙皮缝线在试验条件下的有效期为仅为 16 天^[19]。

目前,我国针对航空结构材料的环境试验能力仍主要停留在试片级别样品的环境试验上,构件级别环境试验能力不足。类似于笔者上述报道的构件级别样品环境试验开展得较少,基于构件级样品研究数据的分析也还处于探索阶段,在未来值得环境试验与观测科研人员重点关注。

3 未来研究方向

近年来,各国之间围绕世界海洋资源、极地资源、空间资源分配而展开的斗争越来越频繁,形势愈加严峻,在空天一体、长航时、侦察-打击结合等先进航空理念的推动下,航空装备的服役环境变得更为复杂。因此,积累典型装备平台环境数据,完善新型航空材料的环境适应性数据资源,研究其环境适应性规律;针对在役和在研型号环境工程与试验技术的瓶颈,发展适用于新材料的环境适应性加速试验方法和评价方法;突破自然-工况耦合试验技术,综合性多因素实验室环境模拟试验技术以及结构化、大型化试验对象的环境模拟与加速试验技术,是航空结构材料环境适应性研究面临的迫切任务。

1) 新型航空结构材料的环境适应性数据资源建设。针对各种新型航空装备上的新材料、新工艺等,开展自然环境适应性和平台环境适应性数据的积累,并建立相应的数据库、专家系统、决策支持系统,形成数据共享机制。发展重点包括铝锂合金、先进复合材料、隐身涂层、疲劳关键结构单元、精密运动机构单元等的环境适应性试验、数据积累、规律分析,环境适应性数据的体系、分类、规范化处理。

2) 典型自然和典型装备平台环境数据采集和数据库建立。针对各种新型航空装备的服役环境特点,监视、测量典型气候条件下的自然环境因素数据和典型航空装备平台的环境因素数据,并建立相应的数据库体系。发展重点包括典型气候条件下自然环境和典型航空装备平台环境数据的检测技术、数据处理和分析方法,腐蚀严酷度分类分级研究。

3) 环境试验与评价技术研究。针对新型航空

结构材料,开展环境模拟与加速试验技术、环境腐蚀控制技术、虚拟环境试验技术、自然环境-工况耦合试验技术等研究。发展重点包括环境损伤图像信息的数字化评价技术;航空装备环境损伤的早期发现技术;航空装备环境适应标杆数据的采集技术;结构化、大型化、综合性环境模拟与加速试验技术。

航空结构材料环境适应性研究领域未来的发展重点还应包括针对航空发动机结构材料开展高温、高压特种环境试验技术和方法研究,发展特殊(危险)环境中的腐蚀监测、检测技术;确定贮存环境加速因子,建立典型航空结构材料的贮存环境适应性加速试验方法。

4 结语

航空结构材料环境适应性研究领域的发展趋势为环境适应性基础数据体系日趋完善,环境试验技术朝着大型化、构件化、综合化方向发展,新技术、新原理在环境适应性评价中的应用逐渐深入。未来应当重点关注航空结构材料户内加速试验技术、环境适应性评价技术以及环境适应性数据的深度开发与应用,将各种科学技术和工程实践用于减缓环境对航空结构材料的损伤,提高装备的耐环境能力。

航空结构材料环境适应性研究工作的开展将为下一代航空装备研制生产中开展环境工程工作提供全面支持,形成对新型飞行器、新概念机载设备及机载武器等先进航空装备的有力技术支撑,使国产飞机的环境适应性水平得到显著提升。

参考文献:

[1] 穆志韬,谭晓明,刘志国. 海军现役飞机的腐蚀损伤失效分析及腐蚀防护[J]. 装备环境工程,2009,6(1): 43—48.
 MU Zhi-tao, TAN Xiao-ming, LIU Zhi-guo. Corrosion Damage Failure Law Analysis and Corrosion Control for Naval Aircraft Servicing [J]. Equipment Environmental Engineering,2009,6(1):43—48.

[2] 穆志韬. 海军飞机结构腐蚀损伤规律及使用寿命研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2001.
 MU Zhi-tao. Study on Corrosion Damage Law and Operation Life Span of Naval Aircraft Structure [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2001.

[3] 祝耀昌. 环境适应性设计与高加速寿命试验[J]. 航空

标准化与质量,2002(1):37—42.
 ZHU Yao-chang. Environmental Adaptability Design and Highly Accelerated Life Test[J]. Aviation Standardization and Quality,2002(1):37—42.

[4] 谭晓明,穆志韬,张丹峰,等. 海军飞机结构当量加速腐蚀试验研究[J]. 装备环境工程,2008,5(2):9—11.
 TAN Xiao-ming, MU Zhi-tao, ZHANG Dan-feng, et al. Equipment Accelerated Corrosion Test Study of Navy Aircraft Structure [J]. Equipment Environmental Engineering,2008,5(2):9—11.

[5] 王奎占. 产品在研制生产过程中的环境试验研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2009,27(3):46—49.
 WANG Kui-zhan. Consideration of the Environmental Test in Product Development and Production [J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing,2009,27(3):46—49.

[6] 熊长武. 装备环境适应性设计思想变革与实践[J]. 装备环境工程,2014,11(2):20—25.
 XIONG Chang-wu. Transformation and Practice of Equipment Environment Adaptability Design Ideas [J]. Equipment Environmental Engineering,2014,11(2):20—25.

[7] 蒋祖国. 飞机载荷-环境谱的编制[J]. 航空学报,1994,15(1):76—81.
 JIANG Zu-guo. The Compilation of Aircraft Load-Environment Spectra [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,1994,15(1):76—81.

[8] MA Y, ZHOU X, THOMPSON G E, et al. Anodic Film Growth on Al-Li-Cu Alloy AA2099-T8 [J]. Electrochimica Acta,2012,80:148—159.

[9] ZHOU X, THOMPSON G E, SKELDON P, et al. Novel Environmental-friendly Coatings for Aerospace Alloys [J]. Materials Science Forum,2013,765:693—697.

[10] 汤智慧,刘鹏,王旭东,等. A100 钢镀 Cr 防护技术在海洋环境下的腐蚀行为研究[J]. 材料工程,2011(9): 50—55
 TANG Zhi-hui, LIU Peng, WANG Xu-dong, et al. Corrosion Behaviour of Chromium Plating on A100 Steel in Marine Environment [J]. Journal of Materials Engineering, 2011(9):50—55.

[11] 刘明,汤智慧,蔡健平,等. 30CrMnSiA 高强度钢在北京地区的大气腐蚀研究[J]. 装备环境工程,2010,7(4): 17—21.
 LIU Ming, TANG Zhi-hui, CAI Jian-ping, et al. Study on Atmospheric Corrosion of 30CrMnSiA High Strength Steel in Beijing Area [J]. Equipment Environment Engineering, 2010,7(4):17—21.

havior[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2010, 22(4):363—366.

[10] 郭娟,侯文涛,许立坤,等. 海洋干湿交替环境下电偶腐蚀及其研究方法进展[J]. 装备环境工程, 2012, 9(5):67—69.

GUO Juan, HOU Wen-tao, XU Li-kun, et al. Research Progress of Galvanic Corrosion in Dry and Wet Alternative Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(5):67—69.

[11] 陆峰,钟群鹏,曹春晓. 碳纤维环氧树脂复合材料与金属电偶腐蚀的研究进展[J]. 材料工程, 2003(4):39—43.

LU Feng, ZHONG Qun-peng, CAO Chun-xiao. Progress of Galvanic Corrosion between the Graphite Epoxy Composite Materials and Metals[J]. Journal of Materials Engineering, 2003(4):39—43.

[12] 李君,董超芳,李晓刚. pH值对Q235碳钢与304L不锈钢在典型含硫环境中电偶腐蚀行为的影响[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(1):52—62.

LI Jun, DONG Chao-fang, LI Xiao-gang. Effect of pH Value on the Galvanic Corrosion Behaviour of Q235-304L Couples in Sulfur Environment[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(1):52—62.

[13] 刘红艳,孔德兵. 电偶腐蚀和缝隙腐蚀的发生及预防[J]. 农业装备与车辆工程, 2007(4):61—62.

LIU Hong-yan, KONG De-bing. Occurrence and Prevention of Galvanic Corrosion and Crevice Corrosion[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2007(4):61—62.

[14] 赵晨,陈跃良,刘旭. 湿热条件下飞机聚合物基复合材料界面问题研究进展[J]. 装备环境工程, 2012, 9(5):62—66.

ZHAO Chen, CHEN Yue-liang, LIU Xu. Research Progress of Interface of Polymer Matrix Composites for Aircraft in Hot and Humid Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(5):62—66.

[15] FILLER M R A, LEE S G. The Effect of Graphite-epoxy Composites on the Galvanic Corrosion of Aerospace Alloys[R]. AD-A035029, 1976.

(上接第14页)

[12] CONNOLLY B J, HOMER D A, FOX S J, et al. X-ray Microtomography Studies of Localised Corrosion and Transition to Stress Corrosion Cracking[J]. Materials Science and Technology, 2006, 22(9):1076—1085.

[13] 刘明,蔡健平,孙志华,等. 一种金属有机涂层环境试验中样品预应变的方法:中国, ZL 201210157013.0 [P]. 2012-09-26.

LIU Ming, CAI Jian-ping, SUN Zhi-hua, et al. A Novel Method of Applying Strain on Protective Coatings on Metals; China, ZL 201210157013.0 [P]. 2012-09-26.

[14] 蔡健平,孙志华,崔继红. 有机防护涂层综合加速试验老化动力学模型的建立[J]. 材料保护, 2012, 45(2):8—10.

CAI Jian-ping, SUN Zhi-hua, CUI Ji-hong. Kinetics Model of Comprehensive Accelerated Aging of Organic Protective Coatings[J]. Journal of Materials Protection, 2012, 45(2):8—10.

[15] 蔡健平,刘明,安英辉. 铝合金防护涂层老化动力学研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012, 32(3):256—261.

CAI Jian-ping, LIU Ming, AN Ying-hui. Degradation Kinetics of Protective Coating for Aluminum Alloy[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2012, 32(3):256—261.

[16] 骆晨,蔡健平,陈亚争,等. 外加应变对航空有机涂层防护性能的影响[J]. 材料工程, 2014, (5):1—6.

LUO Chen, CAI Jian-ping, CHEN Ya-zheng, et al. Effect of Applied Strain on the Protective Properties of Aviation Organic Coating[J]. Journal of Materials Engineering, 2014, (5):1—6.

[17] 骆晨,蔡健平,董春蕾,等. 外加应变对航空有机涂层损伤规律的影响[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(5):656—668.

LUO Chen, CAI Jian-ping, DONG Chun-lei, et al. Effect of Pre-strain on the Degradation Behaviour of Aviation Organic Coating[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(5):656—668.

[18] 骆晨,蔡健平,许广兴,等. 航空有机涂层在户内加速试验与户外暴露中的损伤等效关系[J]. 航空学报, 2014, 35(6):1750—1758.

LUO Chen, CAI Jian-ping, XU Guang-xing, et al. Equivalent Degradation of Aviation Organic Coating during Indoor Accelerated Testing and Outdoor Exposure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(6):1750—1758.

[19] 朱辰,邢新侠,蔡舒阳,等. 飞艇蒙皮缝线光老化试验研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(6):56—59.

ZHU Chen, XING Xin-xia, CAI Shu-yang, et al. Research on Airship Envelope Suture by Light Aging Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6):56—59.