

海洋大气环境多因素组合/综合试验 及方法现状分析

李茜^{1,2}, 胡涛¹, 孙茂钧¹, 邹锦辉³, 李景育²

(1. 西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2. 海南万宁大气环境材料腐蚀国家野外科学观测研究站, 海南 万宁 571522; 3. 黑龙江北方工具有限公司, 黑龙江 牡丹江 157013)

摘要: 从海洋大气的环境试验能力和环境试验方法 2 方面展开了国内外多环境因素组合/综合的对比分析, 探讨了海洋大气主要环境因素温度、湿度、盐雾、太阳辐射和诱发环境因素振动产生的环境效应及其相互影响, 分别列举了 2、3、4、5 种环境因素耦合环境试验方法与成果。最后, 针对装备海洋大气环境多因素组合/综合试验及方法目前的研究现状, 提出了建议和展望。

关键词: 海洋大气; 多环境因素; 组合/综合; 研究现状

中图分类号: TG172.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)03-0084-07

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2023.03.011

Analysis of Multi-factor Combined/Comprehensive Test and Method in Marine Atmospheric Environment

LI Qian^{1,2}, HU Tao¹, SUN Mao-jun¹, ZOU Jin-hui³, LI Jing-yu²

(1. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China; 2. Wanning National Observation and Research Station for Materials Corrosion, Hainan Wanning 571522, China; 3. Heilongjiang North Tool Co., Ltd., Heilongjiang Mudanjiang 157013, China)

ABSTRACT: A comparative analysis was carried out to the combined/comprehensive test of multiple environmental factors in China and abroad in terms of the test ability and test methods in the marine atmospheric environment. Then, the environmental effects and mutual effects caused by the main environmental factors of the marine atmosphere (temperature, humidity, salt fog, solar radiation and induced environmental factor vibration) were discussed and the coupling environmental test methods and results of two, three, four and five environmental factors were listed. Finally, some suggestions and prospects were put forward according to the current research status of multi-factor combined/comprehensive test and method in marine atmospheric environment of equipment.

KEY WORDS: marine atmosphere; multiple environmental factors; combined/comprehensive; research status

海洋大气环境因素有温度、湿度、盐雾和太阳辐射等多种环境因素, 而某海域大气环境常具有高温、

收稿日期: 2022-08-09; 修订日期: 2022-08-12

Received: 2022-08-09; Revised: 2022-08-12

作者简介: 李茜 (1994—), 女, 硕士。

Biography: LI Qian (1994-), Female, Master.

引文格式: 李茜, 胡涛, 孙茂钧, 等. 海洋大气环境多因素组合/综合试验及方法现状分析[J]. 装备环境工程, 2023, 20(3): 084-091.

LI Qian, HU Tao, SUN Mao-jun, et al. Analysis of Multi-factor Combined/Comprehensive Test and Method in Marine Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(3): 084-091.

高湿、高盐雾和强太阳辐射的特点,在海洋大气环境中长期服役的装备常易出现各种复杂的环境效应,从而引起装备的故障^[1-5]。例如应用于飞机蒙皮带涂层的连接件在光照和温湿共同作用下,表面涂层发生老化,当氯离子穿透涂层表面进入内部,涂层的腐蚀老化扩展到基材,腐蚀程度加剧,在振动因素的协同作用中,使连接处出现松动,甚至加速涂层的脱落。然而现有标准多为单因素或少因素综合环境试验方法,如常见的盐雾试验、湿热试验以及太阳辐射试验方法中,涉及的环境影响因素单一,且综合化程度相对较低,缺乏将服役环境中的多种海洋大气环境主要因素融合在同一试验中的试验方法。在实际使用过程中,通常只能优先选用对装备影响最为敏感的环境因子来进行单因素试验或少因素的组合试验,因而很难准确模拟装备在海洋大气环境下使用的真实复杂环境,导致部分通过了试验考核的装备在外场使用中仍出现性能表现不佳、腐蚀严重、寿命不达标等问题。因此,本文根据海洋大气主要环境因素温度、湿度、盐雾、太阳辐射和诱发环境因素振动的影响,分析装备在海洋大气环境中多因素组合/综合试验及方法现状,实现装备在海洋大气环境中的多种试验程序组合/综合环境试验技术研究,为提升装备“适海性”提供了重要的支撑手段。

1 海洋大气主要环境因素影响及组合分析

1.1 海洋大气主要环境因素影响

海洋大气主要环境因素的组合/综合作用在某种程度上可加速装备的腐蚀效应。某海域大气环境“三高一强”的特点之一是高盐雾,即在高相对湿度的空气中含有 NaCl 盐颗粒或盐形式存在的氯化物,且距离海岸越近,含量越高,其对装备的主要影响为腐蚀生锈。其中,金属材料对盐雾十分敏感,而非金属材料(如橡胶、塑料等)的耐盐雾性相对较好。另外,因 Cl⁻本身具有较强的侵蚀性(即穿透能力),在腐蚀效应过程中,可加重基体结构的腐蚀。高湿度环境在这一过程可溶解更多的氧和其他腐蚀性物质,易于在装备表面形成较厚的液膜。当相对湿度大于金属的腐蚀临界值时,腐蚀效应则变得尤为明显,且腐蚀进程加快。海洋大气的高温环境也可加速装备的腐蚀效应,据不完全统计,由温度引起装备产生的故障约占 40%^[6-7]。影响装备腐蚀行为的另一主要环境因素即太阳辐射,可直接对装备产生热效应和光化学效应,并促进金属表面真菌类的生物活动,有利于腐蚀性盐尘或盐雾颗粒在金属表面的沉积,共同促进腐蚀效应^[8-9]。另外,振动诱发环境因素,可能引起如螺栓、连接等部位的松动、位移运动乃至微裂纹等^[10-11],

在其他几种环境因素的共同作用下,可加速装备的腐蚀效应。

1.2 海洋大气主要环境因素组合分析

海洋大气主要环境因素影响复杂,且组合形式多种多样,针对温度、湿度、盐雾、振动和太阳辐射等 5 种海洋大气主要环境因素,采用不同形式的环境因素组合分析可知,形成环境因素两两组合的形式理论上有 10 种,如图 1 所示;形成环境因素三三组合的形式理论上也有 10 种,如图 2 所示;形成环境因素四四组合的形式理论上也有 5 种,如图 3 所示;形成 5 种环境因素组合的形式理论上也有 1 种,如图 4 所示,共形成海洋大气环境因素组合形式 26 种。若将每种

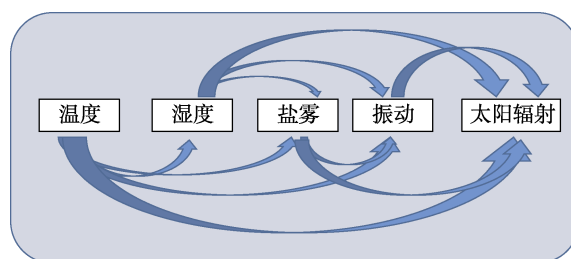


图1 海洋大气主要环境因素两两组合
Fig.1 Combination of any two main environmental factors of marine atmosphere

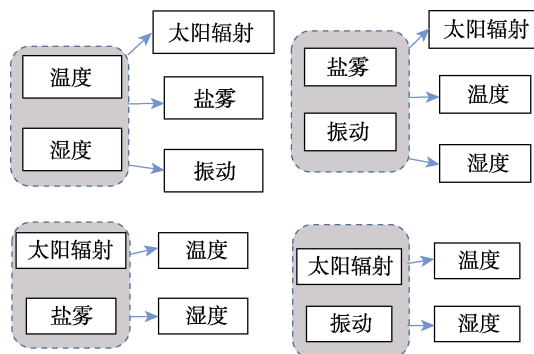


图2 海洋大气主要环境因素三三组合
Fig.2 Combination of any three main environmental factors of marine atmosphere

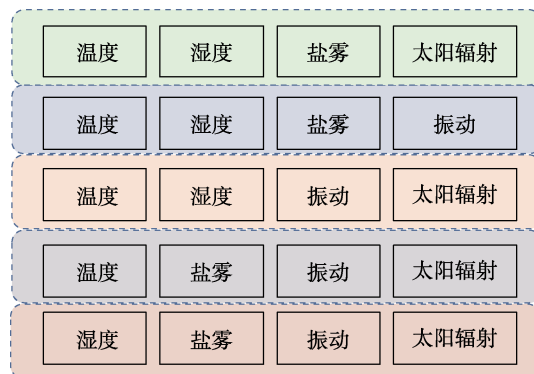


图3 海洋大气主要环境因素四四组合
Fig.3 Combination of any four main environmental factors of marine atmosphere

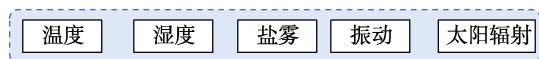


图4 海洋大气主要环境因素五五组合
Fig.4 Combination of any five main environmental factors of marine atmosphere

组合中的环境因素进行逐一排列组合来形成海洋大气环境试验方法中的组合/综合环境试验程序, 这些组合/综合环境试验程序的数目总计将超过 100 种, 且试验方式分门别类, 难以形成统一的试验程序。因此, 根据海洋大气环境因素的主要特点和装备在该种环境下受主要环境因素产生环境叠加效应, 选取适当的剪裁原则, 优先关注 4、5 种环境因素组合或少数 (如常见的温-湿-振 3 种) 环境因素的组合, 实现多环境因素的组合/综合环境试验方法的研究。

2 组合/综合环境试验能力

2.1 国外环境试验能力

国外环境试验的起步较早, 从 19 世纪开始至今, 得到了长足的发展, 展现出较强的环境试验能力。其中, 英国在 19 世纪 40 年代就开始了环境试验的研究, 1905 年美国相继开始了材料试样的大气环境试验^[12]。另外, 受历次战争中暴露出武器装备大量的环境适应性问题影响, 第一次世界大战和第二次世界大战后, 美、英与前苏联等相继在本国和世界其他地区建立了大气环境试验站, 系统地加强了其环境试验能力。其中美国建有世界闻名且公认最大的麦金利实验室, 实验室位于美国佛罗里达坦帕湾, 在 Eglin 空军基地内, 于 1947 年投入使用, 1971 年更名为麦金利实验室。该实验室为大型综合气候环境试验室, 拥有模拟地球上大部分自然环境的能力, 其设施通常不仅可开展常规的单项气候模拟试验, 其大尺寸的空间实验室还可进行大型武器装备的整机气候模拟实验^[13]。如开展美国第四代战斗机 F/A-22 “猛禽” 的大雨冲洗、湿化和风吹等组合/综合环境试验。另外, 1912 年成立的 ATLAS, 由 22 个环境试验站组成的强大站网体系, 不但可以从事自然环境试验, 而且还能进行室内多环境因素的模拟加速试验。总部设在芝加哥, 德国和荷兰等均建有基地。ATLAS 实验室可根据客户需求开展不同类型的气候环境试验, 其模拟环境试验的设备和试验体系均较为完善, 代表了国外先进的综合试验能力。

除美国外, 西方其他国家也很非常重视综合环境试验的发展^[14-15]。同时期, 英国国防部针对环境试验和自身发展的需求, 于 1974 年斥巨资建立了马可尼雷达试验中心。该中心具有温度、湿度、振动、淋雨、盐雾、太阳辐射等多项试验能力^[16]。另外, 日本自 1951 年起, 开始建立战后的武器工业体系, 相继建

立了札幌、新岛等 5 个试验场。可以说国外的组合/综合环境试验能力在历年的发展中逐渐得到了提升和加强。

2.2 国内环境试验能力

国内环境试验研究起始于 20 世纪 80 年代, 晚于国外 1 个多世纪, 并且国内环境试验的发展主要是借鉴美国、日本和前苏联等国外环境工程的研究成果^[17-18]。近年来, 随着我国环境试验的综合发展, 加速模拟试验方法和试验设备都在向多环境因素综合加速腐蚀的方向发展, 以更好地反映装备在真实复杂服役条件下的环境适应性。我国先后建立了以几个岛礁为代表的典型海洋大气自然环境试验站, 以开展装备在海洋大气中的环境试验研究; 另一方面, 受国外试验装置技术的启蒙, 以及国内环境试验发展的迫切需求, 我国已经形成了较为成熟的盐雾试验装置、交变湿热试验装置、太阳辐射试验装置和温-湿-振三综合试验装置以及少因素的综合试验装置。

随着我国向海洋强国的推进, 亟需更贴近实战、更真实有效的综合环境试验手段来尽早暴露装备环境适应性的薄弱环节, 为装备进行高水平的环境适应性质量把关。国内某些研究所和大学陆续开展了三因素或四因素的综合环境试验设备和方法研究^[19], 如航空工业三零一所、三零三所、工信部电子五所和北京航空航天大学等。2004 年, 航空工业三零一所研制了一种 CET2000 型综合环境试验机^[20-21], 该试验机可以控制温度、湿度、雨水、光照、盐雾、振动等 6 个因素, 遗憾的是在后来近 20 年的发展中, 该试验设备暂时还没能得到广泛应用和进一步推广。另外, 我国航空工业强度研究所仿制美国的麦金利试验实验室建造了飞机强度研究所气候环境实验室, 实验室于 2012 年 3 月立项批复, 是我国规模最大、系统组成最复杂、模拟环境因素最多的大型综合气候环境实验室, 具备进行高温、低温、湿度/温度、太阳辐射、淋雨、降雪、冻雾、冻雨/结冰和吹风等典型气候环境的试验能力, 标志着我国装备的室内组合/综合环境试验能力得到了实质性的发展。

3 组合/综合环境试验方法

3.1 国外环境试验方法发展

国外有关海洋大气环境试验的方法主要有美军 810 系列标准、英国 DEF STAN 00-35、ASTM G85 标准等。其中, 针对飞机关键结构, 美国空军制定并应用于 F-18 飞机结构的涂层加速试验环境谱及试验程序, 形成了最早的加速环境试验谱 (CASS 谱)^[22-24], 已成为国内外学者后来制定装备海洋大气环境多因素组合/综合试验及方法借鉴的基础。另外, 根据现有的研究资料显示^[25-26], 国外对于海洋大气环境试验

方法的研究多集中于对海洋大气环境下涂层腐蚀的研究,并形成了一系列标准和非标准的加速腐蚀试验方法,其中涵盖了 ASTM 系列标准,借鉴 ISO 标准形成的 Norsok M-501 标准,在 ASTM 标准基础上更

改形成的 NACE TM0304 标准,以及在标准方法的基础上基于试验本身形成的一些非标准试验方法,其中包括了盐雾试验、太阳辐射试验等多因素环境试验的组合/综合试验方法,见表 1。

表 1 国外海洋大气涂层加速腐蚀试验方法及标准
Tab.1 Accelerated corrosion test methods and standards for marine atmospheric coatings abroad

序号	试验标准/方法	试验项目	相关因数	备注
1	ASTM B117	连续盐雾	0.31	—
2	ASTM G85	盐雾+干燥	0.81	又名 Prohesion 盐雾试验
3	ASTM D5894	盐雾+紫外线/冷凝循环	0.89	Prohesion 盐雾+紫外线/冷凝
4	Norsok M-501	紫外线/冷凝循环+盐雾+冷冻	0.85	借用了 ISO 20340
5	NACE TM0304	盐雾+紫外线/冷凝循环	—	在 ASTM D5894 基础上引入了人工海水
6	非标准循环	Prohesion 盐雾试验+紫外线/冷凝循环+冷冻/解冻循环	—	相关性较好
7	试验 A 和试验 B	试验 A 为 ASTM D5894 标准,试验 B 修改的 ASTM B117	—	试验 B 优于试验 A

自 20 世纪初期以来,根据装备环境试验的发展需求,国外的环境试验标准方法在不断修订完善。以应用最为广泛的美军标 MIL-STD-810F《环境工程考虑和实验室环境试验》为例,该军用标准包括环境工程工作指南和实验室试验方法 2 部分,其中实验室试验方法包括 24 种环境试验方法标准,涵盖了温度、湿度、盐雾、振动、太阳辐射等多种单一环境因素试验方法和少数多种环境因素的试验方法。在环境试验标准的发展中,美军标 MIL-STD-810 问世 60 多年中,经历了 8 次制修订(具体见表 2),从

初始的 60 多页丰富到现在的 800 多页。该标准方法在历年的更新中得到了进一步的完善和发展,这成为国内外环境试验标准的主要参考和借鉴,参照此标准国内形成了 GJB 150 和更新版 GJB 150A 标准^[27-28]。另外,英国国防部标准 DEF STAN 00-35《国防装备环境手册》(第四版),于 2006 年 9 月 18 日颁布,书中第 2 部分“环境试验程序设计和评价方法”和第 3 部分“环境试验方法”均成为各界学者研究环境试验方法的重要依据,促进了国内外环境试验的发展。

表 2 MIL-STD 810 系列标准发展历程
Tab.2 Development of MIL-STD 810 series standards

序号	试验标准	发布时间	备注
1	MIL-STD-810	1960 年	全称《空间及陆用设备环境试验方法》,全书 66 页,包含了 20 个基本试验方法和 26 个试验程序,并编制了详细的通用要求
2	MIL-STD-810A	1964 年	
3	MIL-STD-810B	1967 年	三次修订变化较小,仅仅是针对某些试验条件或方法做小范围的改动
4	MIL-STD-810C	1975 年	
5	MIL-STD-810D	1983 年	更名为《环境试验方法和工程指南》,分别取消和增加了 3 项试验,其主要的两项改动为:引入剪裁概念来增加标准的灵活性;针对试验方法的格式和内容作了重大修改
6	MIL-STD-810E	1989 年	内容变化不大
7	MIL-STD-810F	2001 年	更名为《环境工程考虑与实验室试验的试验方法》,增加了工程项目指南内容,标准的结构变化较大,且内容也得到了修改和扩充
8	MIL-STD-810G	2008 年	在原有版本的基础上作了结构调整,并增加了第三部分世界气候极值,同时还增加了 5 种试验,成为以往修订中变化最大的一次
9	MIL-STD-810H	2019 年	—

3.2 国内环境试验方法发展

在借鉴美国、日本和前苏联等国外环境工程研究的基础上,我国装备的海洋大气环境适应性研究实现了从无到有的发展,其中对于环境试验方法标准的发

展则主要是国外试验方法、标准的引进和沿用^[29]。现阶段国内常用的环境试验标准以国外发达国家的标准为蓝本来进行制修订形成,并没有完全形成由我国独立自主研究的环境试验方法标准。例如较为常用的 GJB 150A 则是根据 810 系列标准翻译而来,基本等

效美军标 MIL-STD-810F《环境试验方法和工程导则》中相应部分;1991年形成的 GJB 1217《电连接器试验方法》,涵盖了温度、湿度、盐雾等试验方法,但该方法也主要是在1977年的美军标 MIL-STD-1344A《电连接器试验方法》的基础上翻译和借鉴形成,2009年修订并形成了 GJB 1217A 版本;GJB 4239《装备环境工程通用要求》的形成也是综合借鉴了 810F、0035 手册和 GJB 450 等为基础的。

研究表明^[30],目前国内已经形成的环境试验方法基本是依托具体的试验对象来建立,与国外相似,均以涂层为对象的研究最为广泛。已有的资料显示^[26],国外环境试验组合/综合试验方法主要有标准和非标准形式,如 ASTM 系列、Norsok M-501、NACE TM0304 标准等。这些标准主要从装备在实际服役过程中的工况和服役中所经历的海洋大气环境因素来进行组合,并根据具体的试验效果开展数据对比后,以此为依据来进行适当的剪裁等,为国内的海洋大气组合/综合环境试验方法的发展提供了借鉴和研究基础。遗憾的是,由于组合/综合试验方法设计的环境因素较多,且在无特定的试验对象和试验目的等情况下,国内学者目前对于该方法的研究并没有形成一套相对系统的理论和方法原则。

4 结语

综上所述,随着我国军事向深海远海的推进,对海洋大气环境下使用的装备提出了更高的要求,且针对长期服役于多海洋环境因素下的装备易产生复杂的环境效应,依然没有形成系统的组合/综合环境试验方法,因此提出了以下展望:

1) 影响装备在海洋大气环境中发生失效和故障的因素较多,基于装备在海洋大气主要环境因素及其组合分析可进一步加强装备环境效应研究。

2) 目前国内外均没有系统的装备在海洋大气环境中多因素组合/综合试验方法,为适应装备在海洋大气复杂环境中的适应性考核,需加强对多种环境因素组合/综合环境试验方法的研究。

3) 国内环境试验及方法的研究较国外晚,且主要以引进和沿用为主,为了适应装备在本国的服役环境,应学习和借鉴国外试验方法和标准的研究成果,同时结合自身特色形成相应的组合/综合环境试验方法。

参考文献:

- [1] 沈剑,丁星星,宋凯强,等.海洋大气环境下装备材料的腐蚀与防护研究进展[J].装备环境工程,2020,17(10):103-109.
SHEN Jian, DING Xing-xing, SONG Kai-qiang, et al. Research Progress on Corrosion and Protection of Equipment Materials in Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(10): 103-109.
- [2] 邱森宝,何利蓉,张少锋,等.复合材料连接件热带海洋大气环境影响效应研究[J].电子产品可靠性与环境试验,2021,39(4):13-18.
QIU Sen-bao, HE Li-rong, ZHANG Shao-feng, et al. Research on the Effects of Tropical Ocean Atmosphere Environment of Composite Material Connectors[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2021, 39(4): 13-18.
- [3] 王琦,王洁.舰载装备环境适应性协同设计方法研究[J].装备环境工程,2010,7(1):64-67.
WANG Qi, WANG Jie. Research on Collaborative Design Method of Environmental Worthiness of Ship-Borne Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(1): 64-67.
- [4] 宣卫芳,胥泽奇,肖敏,等.装备与自然环境试验—基础篇[M].北京:航空工业出版社,2009:23-34.
XUAN Wei-fang, XU Ze-qi, XIAO Min, et al. Equipment and Natural Environment Test—Basic Chapter[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2009: 23-34.
- [5] 宣卫芳.装备与自然环境试验——提高篇[M].北京:航空工业出版社,2011:45-56.
XUAN Wei-fang. Equipment and Natural Environment Test—Improvement[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2011: 45-56.
- [6] 马杰,姚静波,辛朝军.环境温湿度对航天电连接器可靠性的影响[J].机电元件,2014,34(1):28-30.
MA Jie, YAO Jing-bo, XIN Chao-jun. The Effect of Temperature and Humidity on Reliability of Electrical Aerospace Connector[J]. Electromechanical Components, 2014, 34(1): 28-30.
- [7] 李茜,李景育,陈星昊,等.电连接器的概述和研究现状分析[J].环境技术,2021,39(6):115-119.
LI Qian, LI Jing-yu, CHEN Xing-hao, et al. The Overview and Research Status Analysis of Electrical Connectors[J]. Environmental Technology, 2021, 39(6): 115-119.
- [8] 左卫,刘元海.典型海洋环境当量加速试验环境谱研究[J].包装工程,2011,32(23):133-136.
ZUO Wei, LIU Yuan-hai. Research on Equivalent Accelerated Test Environmental Spectrum of Typical Marine Environment[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(23): 133-136.
- [9] 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 Yuan-hai, REN San-yuan. Study on Equivalent Accelerated Corrosion Test Environment Spectrum of Typical Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(1): 48-52.
- [10] 张正平,王宇宏,朱曦全.动力学综合环境试验技术现状和发展[J].装备环境工程,2006,3(4):7-11.
ZHANG Zheng-ping, WANG Yu-hong, ZHU Xi-quan. Current State and Developing Trend of Combined Dynamic

- Environmental Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(4): 7-11.
- [11] 周桐, 张志旭, 任万发, 等. 典型结构振动-加速度综合环境试验研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(5): 50-55.
ZHOU Tong, ZHANG Zhi-xu, REN Wan-fa, et al. Experimental Research on Typical Structure under Vibration-Acceleration Combined Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(5): 50-55.
- [12] 张伦武. 国防大气环境试验站网建设及试验与评价技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
ZHANG Lun-wu. The Study for Construction of National Defense Atmospheric Environmental Test Network and Technology of Environmental Test and Worthiness Evaluation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [13] 文邦伟. 美、日武器装备环境试验设施[J]. 装备环境工程, 2005, 2(1): 89-93.
WEN Bang-wei. The Environmental Test Facilities of Equipment in America and Japan[J]. Metal Forming Technology, 2005, 2(1): 89-93.
- [14] 文邦伟, 李继红, 张伦武. 美军三大自然环境试验中心[J]. 装备环境工程, 2004, 1(1): 87-90.
WEN Bang-wei, LI Ji-hong, ZHANG Lun-wu. The Three Natural Environmental Test Centers of US Army[J]. Equipment Environmental Engineering, 2004, 1(1): 87-90.
- [15] 闫杰, 刘丽红, 纪春阳, 等. 国内外自然大气环境试验的发展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2009, 29(1): 69-75.
YAN Jie, LIU Li-hong, JI Chun-yang, et al. Development of Natural Atmospheric Environmental Test in the World[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2009, 29(1): 69-75.
- [16] 徐冠华. 动力学综合环境试验若干理论及技术问题的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
XU Guan-hua. Research on Some Theoretical and Technical Problems for Dynamic Combined Environmental Testing[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [17] 周阳红生, 王春川, 赵振峰, 等. 航空装备海洋大气综合环境试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(2): 86-90.
ZHOU Yang-hong-sheng, WANG Chun-chuan, ZHAO Zhen-feng, et al. Comprehensive Environmental Test Method for Aviation Equipment in Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(2): 86-90.
- [18] 周阳红生, 张洪彬, 薛海红, 等. 我国综合环境试验现状与发展建议[J]. 装备环境工程, 2018, 15(5): 44-47.
ZHOU Yang-hong-sheng, ZHANG Hong-bin, XUE Hai-hong, et al. Current Situations and Development Suggestions of Combined Environmental Test in China[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(5): 44-47.
- [19] 李迪凡, 景超杰, 李景育, 等. 一种温度、湿度、振动、盐雾四因素动态模拟加速环境试验系统的研制[J]. 环境技术, 2020, 38(5): 201-206.
LI Di-fan, JING Chao-jie, LI Jing-yu, et al. Development of a Four Integrated Dynamic Simulation Accelerated Environmental Test System for Temperature, Humidity, Vibration and Salt Spray[J]. Environmental Technology, 2020, 38(5): 201-206.
- [20] 李家柱, 欧阳汉文, 陈明, 等. CET2000 型综合环境试验机 and 试验方法[J]. 装备环境工程, 2004, 1(3): 52-58.
LI Jia-zhu, OUYANG Han-wen, CHEN Ming, et al. Model CET2000 Complex Environmental Tester and Testing Methods[J]. Equipment Environmental Engineering, 2004, 1(3): 52-58.
- [21] 蔡健平, 汤智慧, 张晓云, 等. CET-2000 综合环境试验机及其应用前景[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(6): 411-412.
CAI Jian-ping, TANG Zhi-hui, ZHANG Xiao-yun, et al. CET-2000 Comprehensive Environmental Tester and Its Application[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2004, 16(6): 411-412.
- [22] MILLER R N, SCHUESSLER R L. Predicting Service Life of Aircraft Coating in Various Environments[J]. Corrosion, 1989(4): 17-21.
- [23] 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 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.
- [24] 陈群志, 程宗辉, 席慧智, 等. 飞机铝合金结构连接部位的腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(6): 334-337.
CHEN Qun-zhi, CHENG Zong-hui, XI Hui-zhi, et al. Corrosion Behavior on Joint Section of Aircraft Aluminum Alloy Structure[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2007, 27(6): 334-337.
- [25] 刘新佳, 郭迅. 舰载机载装备盐雾试验方法研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2020, 38(2): 13-17.
LIU Xin-jia, GUO Xun. Research on the Salt Spray Test Method of Shipboard Airborne Equipments[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2020, 38(2): 13-17.
- [26] 张连飞, 王旭东, 孙冬柏, 等. 国外海洋大气环境下涂层循环加速腐蚀试验方法简介[J]. 材料保护, 2010, 43(6): 84-86.
ZHANG Lian-fei, WANG Xu-dong, SUN Dong-bai, et al. Brief Introduction of Overseas Test Methods for Cyclic Accelerated Corrosion of Coatings in Marine Atmospheric Environment[J]. Materials Protection, 2010, 43(6): 84-86.

- [27] GJB 150A—2009, 军用装备实验室环境试验[S].
GJB 150.9A—2009, Laboratory Environmental Test Methods for Military Materiel Test Methods Part 9: Damp Heat Test[S].
- [28] MIL-STD-810, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests[S].
- [29] 王树荣, 季凡谕. 环境试验技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
WANG Shu-rong, JI Fan-yu. Environmental Test Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.
- [30] 刘成臣, 王浩伟, 杨晓华. 不同材料在海洋大气环境下的加速环境谱研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(2): 18-24.
LIU Cheng-chen, WANG Hao-wei, YANG Xiao-hua. Study of Accelerated Corrosion Test Environment Spectrum of Different Materials in Marine Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(2): 18-24.

责任编辑: 刘世忠