

环境试验与观测

环境试验与装备环境工程发展历程及相关标准

周堃, 吴护林, 吴德权, 赵方超, 刘聪, 李旭

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: 介绍了环境试验中的自然环境试验、实验室环境试验两大试验方法, 以及以 MIL-STD-810 系列标准为代表的装备环境工程的历史起源与迭代发展历程。按照时间线详细论述了环境试验如何由初步的试验程序集合, 发展为规范完善的试验方法 (MIL-STD-810A), 并逐渐转变为服务用户进行试验实操的指导性文件 (MIL-STD-810D), 最后上升成为系统化管理文件 (MIL-STD-810F) 的演化历程, 从动态的视角评述了该系列标准发展的必然性及历史局限性。针对最新标准 MIL-STD-810H, 详细介绍了其内涵、目的用途、用户对象、环境因素范畴以及使用指导原则。论述指出, 以 MIL-STD-810H 为代表的装备环境工程是一项系统工程, 需要将相关工作纳入装备采办全过程并推行环境工程管理, 才能发挥其效能。通过对比我国 2 个重要标准 GJB 150、GJB 4239 与 MIL-STD-810 系列标准的关系、相同点及本土化后的适用差异, 指明 GJB 4239 等顶层设计标准未来发展需要更多的配套标准支撑。最后指出装备环境工程不仅仅是开展环境试验, 环境试验也不仅仅是把关考核手段; 实验室环境试验不能取代自然环境试验, 若条件允许要让装备经历真实的气候环境作用和慢速环境效应累积过程; 环境试验要注重重复环境效应而非再现环境条件本身, 要根据特定装备全寿命期预计经历的环境条件来剪裁设计, 而非直接简单采用一成不变的菜单式的环境试验。

关键词: 环境试验; 装备环境工程; 发展历程; MIL-STD-810

中图分类号: TJ01

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)03-0146-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.03.017

Development Process and Related Standards of Environmental
Testing and Equipment Environmental Engineering

ZHOU Kun, WU Hulin, WU Dequan, ZHAO Fangchao, LIU Cong, LI Xu

(Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: This paper introduced the historical origination and iterative development processes of natural environment tests, laboratory environment tests, and the equipment environmental engineering which represented by a series standards of MIL-STD-810. It emphatically introduced the evolutionary process of equipment environmental engineering according to the time line: firstly, a set of preliminary test procedures grew into more standardized test methods (MIL-STD-810A), then gradually transformed into guiding documents (MIL-STD-810D) to help users with execution manner, and finally developed into a systematic management document (MIL-STD-810F). On the other hand, their necessity and historical limitations were also reviewed from a dynamic perspective. For the newly formed standard MIL-STD-810H, this paper made a detailed introduction

收稿日期: 2024-11-13; 修订日期: 2024-11-18

Received: 2024-11-13; Revised: 2024-11-18

引文格式: 周堃, 吴护林, 吴德权, 等. 环境试验与装备环境工程发展历程及相关标准[J]. 装备环境工程, 2025, 22(3): 146-151.

ZHOU Kun, WU Hulin, WU Dequan, et al. Development Process and Related Standards of Environmental Testing and Equipment Environmental Engineering[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(3): 146-151.

about its content, application purpose, user community, environmental factor category, and application guidelines. The discussion revealed that the equipment environmental engineering is a systematic engineering, and it is necessary to carry out environmental engineering management by incorporating related works into the whole process of equipment acquisition to release its potential effectiveness. This paper compared domestic standards GJB 150, GJB 4239 and the series standards of MIL-STD-810 in terms of their relationship, similarity and application difference after localization. Results detected that the top-level design standards such as GJB 4239 required more supporting standards for future development. Moreover, the discussion indicated that the equipment environmental engineering is not only about the environmental test, and the environmental test is not only about checking of evaluation methods. Natural environmental testing cannot be replaced by laboratory environmental testing. The equipment should be subject to the real climate and slow accumulation effect of environments if conditions were permitted. And the environmental testing should pay more attention to the recurrence of environmental effects rather than reproducing the environment conditions. Meanwhile, the environmental experiments should be tailored and designed according to the environmental conditions to which each particular equipment would be exposed during their whole lifetime, rather than simply executing the instruction according to the well-regulated environmental testing menu.

KEY WORDS: environmental testing; equipment environmental engineering; development history; MIL-STD-810

环境对装备的影响普遍存在, 严重时会造成灾难性后果^[1-4]。例如 2008 年美军一架 B2 隐形轰炸机在关岛安德森空军基地坠毁, 调查原因为轰炸机的 24 个传感器有 3 个受潮, 导致机上电脑失灵。为避免环境对装备影响造成的巨大损失, 人们最早通过环境试验解决这一问题, 后来为提高装备环境试验的效能, 运用系统工程的理论和方法, 提出了装备环境适应性及装备环境工程^[5]。迄今为止, 环境试验技术发展历史超过 180 年, 装备环境工程发展了 20 余年。

环境试验工作在长期实践过程中, 其方法与定位也在不断发生变化。例如, 很长一段时间里, 环境试验标准 (如 MIL-STD-810A/B/C) 认为边界极值条件下的短时间严酷试验考核, 能保证装备温和环境下长期服役^[6]。这导致环境试验倾向于施加装备寿命期内几乎不会遇到的环境条件, 造成“过试验”。另外, 早期 810A/B/C 标准是一成不变的菜单式标准, 缺少试验量值和程序条件的设计说明^[6]。这类思维局限性某种程度上也延续到现在, 限制了装备环境工程的发展。

另外, 环境试验常常被当做一种产品考核手段, 作为产品验收的决策依据, 而忽视其研制阶段的摸底功能。随着环境工程概念的提出, 环境试验得以贯穿装备全寿命期各阶段。例如研制阶段用于发现设计缺陷, 将环境适应性同装备功能等指标一样, 尽早纳入产品, 减少后期返工设计; 定型阶段用于考核产品转入批生产前, 是否有产品缺陷^[7-8]。

环境试验是装备环境工程中的重要部分, 但不能片面将环境工程等同于把关性质的环境鉴定试验和环境例行试验。许多总师单位在“环境要求”文件中一味参考 GJB 150 提出试验验证项目和试验环境条件, 基本上没有提出环境设计、环境工程管理方面的内容, 因而不完整的。若仅仅为了抽样通过环境试验, 按照环境试验规定的环境应力强度设计

产品, 将造成装备即使通过试验仍然存在故障风险。环境试验与环境工程既有渊源联系又有界面区别, 将两者混为一谈或者有失偏颇, 容易导致环境工程工作进入误区^[8]。

本文梳理了环境试验到装备环境工程转变的历史过程, 详细介绍了装备环境工程各阶段标准的特点、进步点以及存在不足, 强调了如何正确看待环境试验, 如何将环境工程纳入装备全寿命周期管理, 才能更好地发挥装备环境工程效能。

1 环境试验与装备环境工程的起源与发展

根据 GJB 6117—2007《装备环境工程术语》^[9], 环境试验是将装备暴露于特定的环境中, 确定环境对其影响的过程。它包括自然环境试验、实验室环境试验和使用环境试验^[10-11]。

1.1 自然环境试验

有文献记载的自然环境试验始于 1839 年, 一位名叫 R·Mallet 的英国科研人员在河流入海处进行了为期 2 a 的金属样品挂片试验。最早大规模系统开展的自然环境试验是为了提高材料耐大气腐蚀性能^[12-13]。1916 年, 美国材料试验协会 (ASTM) 对 260 种钢开展了 3 种气候类型的自然环境试验, 试验结果表明, Cu 和 Ni 可以显著提高合金钢耐候性。1920 年, 美国钢铁公司对 3 000 余种 3 万件钢试样开展了 4 种气候类型的自然环境试验, 基于试验结果, 在 1933 年成功研制了具有优良耐候性的低合金高强度钢 Corten A, 时至今日仍广泛应用于桥梁、建筑、船舶、车辆等领域。自然环境试验展现出的巨大价值推进其快速发展。试验环境类型由大气向海水、土壤、空间等环境拓展; 试验样品由材料向元器件、部组件、分系统、

整机发展;试验场站向专业化、规模化、全球化发展;试验方法向加速化、标准化、体系化发展^[14-16]。

我国自然环境试验于20世纪50年代中期开始起步,经过近70年的发展取得了长足进步。国家科技部和国防科工局统筹构建了覆盖我国典型自然环境的试验站网体系^[14],强化基础数据资源建设,完善技术体系、能力体系和标准体系,为国防现代化建设和国民经济建设做出了重要贡献。

1.2 实验室环境试验

有文献记载的实验室环境试验始于1914年,美国材料试验协会第17届年会首次提出盐雾试验的概念,目的是获得类似沿海大气的试验条件,以研究金属电镀层的防护性能^[17-19]。1915年,美国亚太拉斯集团(ATLAS)成功研发Solar Determinator,可用于模拟日光对织物的褪色效应。由此可见,实验室环境试验也起源于材料耐候性研究。第二次世界大战期间,德军飞机在低于0℃时无法起飞,这使美国充分认识到冷冻试验的必要性,闻名于世的美国麦金利(McKINLEY)气候实验室应运而生。该实验室于1943年开始论证,1947年建成并投入使用,最初只是针对飞机整机及部件的冷冻试验棚,后几经改造,成为能够开展低温、高温、盐雾、雨水冲刷、雪封、风吹等各种环境试验的大型试验设施。根据美国兰德公司的报告,2006年至2007年,麦金利实验室承接了来自美国三军、英国国防部、空客、波音的34项试验任务,试验对象涉及飞机、车辆和导弹。实验室环境试验的特点是环境条件可控,能够模拟或加速环境对产品的影响,在产品设计研制过程中能够发挥重要作用,因此取得快速发展。试验涉及的环境类型由大气向海水、空间、电磁、平台等环境拓展,试验涉及的环境因素由气候向振动、冲击、噪声等诱发环境因素拓展,试验方法向标准化、体系化、集成化发展,试验用途由检验产品耐候性向检验产品环境适应性、可靠性、安全性等通用质量特性拓展。

我国实验室环境试验起步于共和国成立之初,当时前苏联帮助我国建立了一批军工厂,生产前苏联设计的武器装备,为保证生产质量,一些军工厂开始建立例行实验室,按苏联标准开展环境试验。伴随20世纪80年代的改革开放,我国大量引进美、英、法等发达国家先进的环境试验设备,并参照国外标准开始制定我国的实验室环境试验标准。1997年召开的GJB 150《军用设备环境试验方法》十周年研讨会,明确提出我国要参照美国推行装备环境工程,我国环境试验进入新的发展阶段。

环境试验不一定是加速试验,完整气候环境或使用环境的慢速累积作用最能反映装备实际经历的环境效应。因此,只要经费和时间允许,应将装备尽可能投入贴近实战的自然环境或使用环境中。自然环

境与使用环境试验中发现故障后,可通过实验室环境试验复现并评估故障,进行失效分析与改进。

1.3 装备环境工程

第二次世界大战后,武器装备环境试验得到美军高度重视,相继发布各种军用标准如ISO-7137《机载设备环境条件和试验方法》、MIL-STD-202F《电子元器件环境试验方法》等^[20]。但由于各标准中环境试验要求和程序不一致,给装备的统一试验带来极大困扰。为形成三军和工业部门都能接受的标准环境试验方法和准则,把航空和地面设备环境试验的程序和导则汇集成一个统一的文件,这就是1962年发布的MIL-STD-810《航空和地面设备的环境试验方法》,该标准包含20个试验方法,26个具体试验程序。1964年该标准修订为MIL-STD-810A,此后该标准作为全球公认最好的实验室环境试验方法标准持续修订完善。

直至1983年发布的MIL-STD-810D,标准名称改为《环境试验方法和工程指导》,该标准不仅提供统一的试验方法,而且还指导用户如何运用这些方法,成为一个指导性文件^[20]。810D提出了环境剪裁与环境管理概念,如要制定环境剖面、确定环境设计准则等工作。这些内容使810D相对于810C有了质的飞跃。1995年发布的MIL-STD-810E,标准分为环境工程大纲指南和实验室试验方法两大部分,正式提出“环境工程”的概念。

至2000年发布的MIL-STD-810F《环境工程考虑和实验室试验方法》,提出环境试验包括3个方面的环境,分别为自然环境/实验室环境/使用环境。内容从环境试验扩展到环境工程,从一个指导性文件上升为一个系统的管理性文件,指出环境工程工作必须由3类人员包括项目主任、环境工程专家、设计人员协同完成,项目主任要将环境工程工作纳入装备采办全过程,并推行环境工程管理。810F对810E做了重大修改,强调基于装备寿命期的环境剖面提出环境适应性设计要求,开展环境试验。810F首次全面明确规定环境试验的2个主要目的:在研制阶段寻找装备设计选材、制造包装等方法不足;验收阶段例行试验,验证装备是否满足合同要求。各种环境试验协同配合,才能低成本高成效地保障装备环境适应性。

2019年发布的MIL-STD-810H是该标准的最新版本,包括3个部分。第一部分是环境工程项目指南,包含装备采办项目规划和工程指导原则,用以考虑装备全寿命期环境应力对装备的影响;第二部分是实验室试验方法,包含29个试验方法,79个具体试验程序;第三部分是世界气候区指南,包含全球气候数据汇编和指南纲要。

我国装备环境工程的顶层文件为GJB 4239—2001《装备环境工程通用要求》,明确了装备环境工

程的四大任务: 环境分析、环境适应性设计、环境试验与评价、环境工程管理, 共包含 20 个工作项目^[20-23]。

2 MIL-STD-810H《环境工程考虑和实验室试验》简介

环境工程的诞生及发展, 与 MIL-STD-810 系列标准密不可分。充分掌握并领会 MIL-STD-810 标准的目的、用途、限制等内涵, 是切实做好我国装备环境工程工作的必然要求。MIL-STD-810H 作为该系列标准的最新版本, 依然是国际上最具影响力、最系统全面、最先进有效的环境工程标准。

2.1 主要目的

MIL-STD-810 的诞生是为了解决环境试验有效性的问题。经过 20 年发展, MIL-STD-810D 升级为指导性文件, 说明标准制定者认识到科学运用环境试验是提升其有效性的关键环节。又经过近 20 年发展, 到 MIL-STD-810F 升级为环境工程, 说明只有采用系统工程的方法来策划、管理、实施环境试验工作, 才能切实发挥其效能。最新的 H 版强调, 其重点仍然与 G 版是相同的, 即根据装备全寿命期环境剖面来剪裁设计环境试验, 重在复现环境效应, 而非环境条件。科学应用环境工程方法具有极大的价值, 可以使人们对装备系统设计出的环境适应性和总体耐久性水平更为自信。但是标准也明确指出, 实验室环境试验有其固有的局限性, 利用实验室环境试验结果推断实际使用情况, 必须非常谨慎, 并进行工程判断。许多情况下, 真实环境应力不可能在实验室真实可靠地复现。因此, 用户不能认为某一系统或部件通过了标准中规定的实验室环境试验就能通过自然环境试验。

2.2 主要用户

MIL-STD-810H 专门为美国国防部使用而编制, 针对完全不同又密切联系的 3 类用户, 即项目主任、环境工程专家、设计/试验工程师及设施操作者。项目主任是管理者, 主要任务是在装备采办全过程中选择适当的时机, 确保系统、全面、有效地考虑环境工程工作, 从而保证装备在预定的使用环境中有效且运转正常。环境工程专家是技术支撑, 通过编制寿命期环境剖面、制定经过剪裁的设计准则和试验大纲, 协助军方和装备研制人员开展环境工程工作, 并要在项目主任提出的试验需求与试验者使用的技术程序之间搭建桥梁, 形成良性互动。标准强调环境工程专家来自作战部门、装备研制部门或承包商。设计、试验、评价机构的工程师和操作者是一类人员, 设计工程师进行工程分析, 预测装备对寿命期环境应力的响应; 试验工程师编写可执行的

试验实施计划和说明; 设施操作者按照系统试验计划、评估文件确定的指令、经过剪裁的试验程序和说明进行试验。这 3 类 5 种人员各司其职, 才能确保环境工程工作系统实施。

2.3 涉及的环境因素

MIL-STD-810H 强调不论是单独的还是各种组合的环境因素都会影响装备的使用、运输和贮存。这些因素包括气候因素, 如温度、湿度、太阳辐射、气压、风、沙尘、臭氧等; 与气象有关的大气现象, 如雨、雪、雾、云等; 地表因素, 如斜坡、土壤、植被等; 诱发因素, 如冲击、振动、摇摆等。标准明确要培训环境工程专家, 将这些环境因素综合纳入环境适应性要求、环境适应性设计、环境试验与评价的文件及程序中。

2.4 环境试验的指导原则

MIL-STD-810H 指出, 无论是实验室环境试验、自然环境试验, 还是使用环境试验, 都有其应用价值, 应选择适当的时机开展这些试验, 标准给出了进行这 3 种试验的一些指导原则。对于实验室环境试验, 标准明确应在研制阶段的早期进行, 以对装备进行筛选, 找出环境引起的材料、性能或可靠性降低的问题。对于自然环境试验, 标准明确其目的是确定实际环境对装备的真实影响, 从而系统评估自然环境因素、人为因素、诱发因素综合产生的叠加或抵消效应, 并要利用自然环境试验站和标准试验程序获得可进行对比的试验数据, 开发可供仿真使用的数据库。对于使用环境试验, 标准明确要在尽可能真实的自然环境中进行, 当使用环境试验不能使装备经受实际使用、贮存和运输期间遭遇的环境应力范围时, 可以用研制试验的环境影响数据代替使用环境试验数据。需要特别指出的是, 标准第一部分环境工程项目指南中, 在不同的章节 4 次强调实验室环境试验不能取代自然环境试验。

3 我国相关标准简介

我国首个装备环境试验标准 GJB 150—1986《军用设备环境试验方法》以 MIL-STD-810C 为蓝本制定, 与其基本等效。GJB 150 后来修订为 GJB 150A—2009《军用装备实验室环境试验方法》。

我国首个装备环境工程标准 GJB 4239—2001《装备环境工程通用要求》^[23], 是吸取了 MIL-STD-810F《环境工程考虑和实验室试验方法》第一部分、英国国防标准 DEF STAN 00-35《国防装备环境手册》第一册、北约标准化协议 STANAG 4370《环境试验》附件 1 等内容编写而成^[20-25]。GJB 4239 于 2022 年也重新修订发布。

3.1 GJB 4239 与 MIL-STD-810 对比

GJB 4239 从诞生之初就被寄予厚望,这一点从标准对环境适应性的定义就可见一斑。MIL-STD-810H 对环境适应性 (Environmental Worthiness) 的定义为:装备、分系统或部件在预期环境中实现其全套预定功能的能力^[24]。GJB 4239—2022 对环境适应性的定义为:装备(产品)在其寿命期内可能遇到的各种环境的作用下能实现其所有预定功能和性能和(或)不被破坏的能力^[25]。显然,GJB 4239—2022 相比于 MIL-STD-810H,把适用对象从装备、分系统或部件扩展到了装备(产品),涉及装备各层级产品。GJB 4239—2022 的功能定位是满足装备全寿命期使用环境的要求,高于 MIL-STD-810H 产生实际可行的装备设计和试验方法的功能定位。遗憾的是,GJB 4239 只是顶层标准,贯彻执行该标准所需的系列支撑标准尚有很大差距和很多空白。

3.2 GJB 150 与 MIL-STD-810 对比

如同 GJB 150—1986 与 MIL-STD-810C 基本等效一样,GJB 150A—2009 内容与 MIL-STD-810F 相应部分完全等效。例如 GJB 150.1A《通用要求》与 MIL-STD-810F 第一部分《环境工程工作指南》中“通用实验室试验方法指南”基本等效;24 个试验方法与 MIL-STD-810F 第二部分“试验方法”也基本等效。另外,GJB 150A 保留了原 GJB 150 舰船行业的倾斜/摇摆和风压 2 个试验方法,并新增舰船冲击试验方法^[20]。GJB 150A 是在 GJB 150 的基础上修订的,从引用标准转变为剪裁标准。从标准名称上看,军用设备修订为军用装备,拓宽了标准应用范围。从内容上看,各试验方法都删除了 GJB 150 的“试验条件”,增加了确定试验方法、试验顺序、试验程序和试验条件的剪裁指南,并增加了对试验结果和试验信息的要求^[26]。GJB 150A 强调环境条件的剪裁,要求环境工程专家利用标准中的数据、技术和指导,结合装备自身特点,剪裁确定试验项目、试验顺序、试验条件等,这增加了标准使用的难度^[20-24]。

4 结语

环境试验是一种用途广泛的技术手段,已经在材料耐候性研究、产品环境适应能力提升、装备寿命评估等领域发挥出重要作用。自然环境试验和实验室环境试验各具优势,实验室环境试验不能取代自然环境试验。环境工程是美军为提高环境试验有效性提出并推行的系统工程,其作用是产生实际可行的装备设计和试验方法。MIL-STD-810 是国际上最具影响力、最系统全面、最先进有效的环境工程标准,我国的 GJB 4239 和 GJB 150 参照该标准的不同部分制定,并根据我国需求进行了调整。GJB 4239—2022 承载的使

命任务高于 MIL-STD-810H,但缺少配套标准的支撑。GJB 150A 强调环境条件的剪裁,对标准使用者提出了更高的要求。

参考文献:

- [1] 祝耀昌,常文君,傅耘.武器装备环境适应性与环境工程[J].装备环境工程,2005,2(1):14-19.
ZHU Y C, CHANG W J, FU Y. Environmental Suitability of Weapons and Environmental Engineering[J]. Metal Forming Technology, 2005, 2(1): 14-19.
- [2] KUMAR A, STEPHENSON L D, GERDES G G. Corrosion Related Costs for Military Facilities[J]. Annual Conference and Exposition on Corrosion NACE Expo, 2004, 28(3): 04269.
- [3] 周建龙,李晓刚,程学群,等.深海环境下金属及合金材料腐蚀研究进展[J].腐蚀科学与防护技术,2010,22(1):47-51.
ZHOU J L, LI X G, CHENG X Q, et al. Research Progress on Corrosion of Metallic Materials in Deep Sea Environment[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2010, 22(1): 47-51.
- [4] DUBAU L, CASTANHEIRA L, MAILLARD F, et al. A Review of PEM Fuel Cell Durability: Materials Degradation, Local Heterogeneities of Aging and Possible Mitigation Strategies[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, 2014, 3(6): 540-560.
- [5] 中国人民解放军总装部.装备环境工程通用要求:GJB 4239—2001[S].北京:中国标准出版社,2001.
General Armaments Department of the People's Liberation Army. General Requirements for Materiel Environmental Engineering: GJB 6117—2001[S]. Beijing: China Standard Press, 2001.
- [6] 祝耀昌,傅耘,徐明.国外环境工程发展综述(上)[J].航空标准化与质量,1998(2):41-44.
ZHU Y C, FU Y, XU M. Summary of the Development of Environmental Engineering Abroad (Part 1)[J]. Aviation Standardization and Quality, 1998(2): 41-44.
- [7] 祝耀昌,王欣,郝文涛.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 Y C, WANG X, HAO W T. Design of Environmental Adaptability and Highly Accelerated Life Test[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2002(1): 37-42.
- [8] 祝耀昌,张建军.武器装备环境适应性要求、环境适应性验证要求和环境条件及其相互关系的讨论(一)[J].航天器环境工程,2012,29(1):1-6.
ZHU Y C, ZHANG J J. Relationship among Environmental Adaptability Requirements, verification Requirements of Environmental Adaptability and Environmental Conditions(Part One)[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(1): 1-6.
- [9] 中国人民解放军总装备部.装备环境工程术语:GJB 6117—2007[S].北京:中国标准出版社,2007.

- General Armaments Department of the People's Liberation Army. Materiel Environmental Engineering Terms: GJB 6117—2007[S]. Beijing: China Standard Press, 2007.
- [10] 祝耀昌, 王建刚. 各种环境试验的特点及其应用分析[J]. 航空标准化与质量, 2005(1): 38-42.
- ZHU Y C, WANG J G. Characteristics of Different Types of Environmental Tests and an Analysis of Their Application[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2005(1): 38-42.
- [11] 张菲玥, 王津梅. 装备(产品)环境试验方法之比较[J]. 装备环境工程, 2017, 14(2): 95-98.
- ZHANG F Y, WANG J M. Comparison of Environmental Test Methods for Equipment(Products)[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(2): 95-98.
- [12] 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 J, LIU L H, JI C Y, 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.
- [13] 文邦伟, 胥泽奇. 外军装备环境适应性典型案例[J]. 装备环境工程, 2005, 2(3): 83-87.
- WEN B W, XU Z Q. The Typical Cases of Environmental Worthiness of Foreign Materiel[J]. Metal Forming Technology, 2005, 2(3): 83-87.
- [14] 周堃, 王莞, 杨小奎, 等. 自然环境试验与观测体系化发展综述[C]// OSEC 首届兵器工程大会论文集. 重庆: 重庆理工大学, 2017: 652-655.
- ZHOU K, WANG W, YANG X K, et al. Summary of the Development of Natural Environment Tests and Observation Systemization[C]// Proceedings of OSEC First Arms Engineering Conference. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2017.
- [15] LI X G, GAO J, DONG C, et al. Construction and Application of a National Data-Sharing Service Network of Material Environmental Corrosion[J]. Data Science Journal, 2007, 6: 913-925.
- [16] 朱玉琴, 陈源, 张燕, 等. 国内外动态自然环境试验技术发展现状[J]. 装备环境工程, 2015, 12(6): 93-99.
- ZHU Y Q, CHEN Y, ZHANG Y, et al. Current Status of Dynamic Natural Environmental Test Techniques at Home and Abroad[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(6): 93-99.
- [17] 徐鑫. 简述综合环境试验的发展[J]. 电子质量, 2018(2): 43-46.
- XU X. Describes the Development of Integrated Environmental Test[J]. Electronics Quality, 2018(2): 43-46.
- [18] 汪学华. 自然环境试验技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003.
- WANG X H. Natural Environment Test Technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003.
- [19] KLYATIS L M. 加速可靠性和耐久性试验技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- KLYATIS L M. Accelerated Reliability and Durability Testing Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [20] 祝耀昌, 魏莱, 程丛高. GJB150/150A、GJB4239 和 MIL-STD-810F/G 的特性和相互关系分析[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(3): 243-249.
- ZHU Y C, WEI L, CHENG C G. Characteristics and Relations among GJB150/150A, GJB4239 and MIL-STD-810F/G[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(3): 243-249.
- [21] 祝耀昌, 孙建勇. GJB4239《装备环境工程通用要求》及其应用分析(一)[J]. 航空标准化与质量, 2006(5): 32-37.
- ZHU Y C, SUN J Y. GJB4239 General Requirements for Equipment Environmental Engineering and Its Application Analysis (I)[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2006(5): 32-37.
- [22] 祝耀昌, 王建刚, 张建军. GJB 150A 与 GJB 150 内容对比和分析(一)[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(1): 5-10.
- ZHU Y C, WANG J G, ZHANG J J. A Comparative Study of GJB 150A and GJB 150(Part I)[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2011, 28(1): 5-10.
- [23] 张建军, 傅耘, 徐俊, 等. GJB 4239 问题分析和修订建议[J]. 装备环境工程, 2017, 14(11): 7-15.
- ZHANG J J, FU Y, XU J, et al. Analysis of Shortages and Revised Suggestions for GJB 4239[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(11): 7-15.
- [24] United States Department of Defense. Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests: MIL-STD-810H[S]. Washington: US military Standard Press, 2019.
- [25] 张伦武, 周堃, 赵方超, 等. 装备环境适应性研究进展及展望[J]. 装备环境工程, 2024, 21(5): 1-12.
- ZHANG L W, ZHOU K, ZHAO F C, et al. Research Progress and Prospect of Materiel Environmental Worthiness[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(5): 1-12.
- [26] 高媛寅, 田娜, 李飞. GJB 150A 中舰船适用的实验室环境试验项目分析[J]. 船舶标准化与质量, 2013(3): 54-59.
- GAO Y Y, TIAN N, LI F. Analysis of Laboratory Environment Test Items Suitable for Ships in GJB 150A[J]. Shipbuilding Standardization & Quality, 2013(3): 54-59.