

# 环境试验在新时期装备环境适应性工作中应用

蔡健平, 徐洪武, 王伟, 伍招冲

(中国航天标准化研究所, 北京 100071)

**摘要:** **目的** 研究环境试验在新时期装备环境适应性工作中的应用。**方法** 对各类环境试验的特点进行分析, 研究新时期下环境试验在装备不同层次上应用的方法, 以及环境试验在装备全寿命周期中的应用要求。**结果** 实验室环境试验、自然环境试验、使用环境试验以及虚拟环境试验在试验可信度、效率和可分析性上各有其特点。在装备系统不同层次上和装备全寿命周期中, 实施环境试验的要求和侧重点不同。**结论** 在新时期装备的环境适应性工作中, 需要用系统工程思想建立起综合运用各类环境试验的策略, 在装备各层次统筹各类环境试验, 在装备全寿命周期不同阶段应用不同的环境试验。未来应进一步加强多因素环境试验、虚拟环境试验的技术研究和应用, 强化自然环境试验基础性地位和加速试验在工程中的应用, 以满足新时期装备贴近实战、全面把关、摸清底数、全过程考核评价的需求。

**关键词:** 环境试验; 环境适应性; 综合环境试验; 虚拟环境试验; 服役环境; 装备全寿命周期

**中图分类号:** TJ01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9242(2024)05-0041-09

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2024.05.005

## Application of Environment Tests in Environmental Worthiness of Materiel

CAI Jianping, XU Hongwu, WANG Wei, WU Zhaochong

(China Astronautic Standard Institute, Beijing 100071, China)

**ABSTRACT:** The work aims to investigate the application of environmental tests in environmental worthiness of materiel. The characteristics of different environmental tests were analyzed, the application strategy of environmental tests in different levels of materiel was examined, and the requirement of different environmental tests in life cycle of materiel was studied. It was shown that performances in authenticity, efficiency and analyzability of different environmental tests were different. At different levels of material system and in the life cycle of material, the requirements and emphases of environmental tests were different. During worthiness work of materiel in the new era, it is necessary to establish a strategy for comprehensive application of various environmental tests with the idea of system engineering, coordinate various environmental tests at all levels of materiel, and apply different environmental tests at different phases of materiel life cycle. In the future, the technical research and application of multi-factor environmental test and virtual environment test should be further strengthened, the basic status of natural environment test should be strengthened and the application of test in engineering should be accelerated, so as to meet the materiel needs of being close of actual combat, having comprehensive check, learning the real situation, conducting whole process assessment and evaluation in the new era.

**KEY WORDS:** environmental tests; environmental worthiness; multiple-factor environmental tests; virtual environmental tests; service environment; life cycle of materiel

收稿日期: 2024-04-17; 修订日期: 2024-05-09

Received: 2024-04-17; Revised: 2024-05-09

引文格式: 蔡健平, 徐洪武, 王伟, 等. 环境试验在新时期装备环境适应性工作中应用[J]. 装备环境工程, 2024, 21(5): 41-49.

CAI Jianping, XU Hongwu, WANG Wei, et al. Application of Environment Tests in Environmental Worthiness of Materiel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(5): 41-49.

环境适应性是装备(产品)在其寿命期内预计可能遇到的各种环境作用下,能实现其所有预定功能性能和(或)不被破坏的能力。环境适应性是装备的通用质量特性(可靠性、维修性、安全性、保障性、测试性、环境适应性)之一,通用质量特性包括环境适应性是所有装备共有特性,它贯穿于装备的全寿命周期,覆盖装备的各个层次,具有普适性<sup>[1]</sup>。环境适应性的定义和特点表明,环境适应性是装备共有特性,但是它是通过装备(产品)的专有功能性能以及耐环境破坏特性(如耐久性等)表现出来的,其指标往往用产品功能性能正常或者不损坏的环境要求来表示。

过去,我国在通用质量特性的考核上,主要在较好条件的“标称”条件下进行考核,具体到装备的环境适应性上,其考核往往是通过分析装备的环境剖面,从而确定和表征装备面临的环境和环境适应性<sup>[2-6]</sup>。装备的环境适应性要求中,环境条件往往给出的是一系列简化的验证试验环境条件<sup>[4-5]</sup>,这些验证环境条件往往转化为规定环境条件下的实验室环境试验。在过去的工程实践中,这些实验室环境试验以单因素试验为主,主要反映装备在单因素环境短时间的环境效应,这就导致下列问题:

1) 实验室环境试验并不能充分代表实际服役条件下的多因素复杂环境,更难以考核有累积效应的环境效应。例如我国实验室环境试验标准 GJB 150A 中的 27 个试验方法,只有 2 个称得上“综合环境”试验,且最多仅 4 种环境因素的综合,与实际服役环境有较大差别。

2) 实验室环境试验如 GJB 150A 主要是参考美军标 Mil-STD-810 制订的,并不能全面反映国外综合运用多种试验手段全寿命周期考核装备环境适应性的试验策略。

3) 由于实验室环境试验条件的限制,试验对象以设备级产品为主,在装备级产品上实施较为困难,难以覆盖装备各层次。

4) 实验室环境试验标准以符合性为主,缺乏加严环境应力、探索边界性能和底数的方法。

在新时期下,部队用户对装备的环境适应性提出了贴近实际、全面把关、摸清底数以及全过程考核评价的要求。这极大地改变了装备环境适应性的工作内容和要求,反映到环境试验上,需要根据实际运用需求,突出装备复杂环境适应性考核,突出环境适应性边界的把握,突出全寿命周期的环境适应性工作,突出多种环境试验方式结合对装备环境适应性的评估。因此,以前在规定的条件下特别是实验室环境试验考核的装备环境适应性,难以满足新时期装备实际运用的环境适应性考核要求<sup>[7]</sup>。例如经过实验室环境试验的装备,依然可能暴露非常突出的具有累积损伤环境效应的腐蚀、老化、退化等问题<sup>[8]</sup>。另外,实验室简化的环境条件不能反映许多装备面临的复杂服

役环境所具有的各种环境因素共存、环境影响涌现性、环境因素不确定性和时变性等特点<sup>[9]</sup>。

本文针对当前装备发展的新形势,分析各类环境试验的特点,研究装备在不同层次环境试验的要求,讨论装备全寿命周期中各阶段环境试验的工作重点,提出根据装备研制的不同阶段和装备的不同层次综合运用各类环境试验的策略,以及环境试验技术未来发展的重点,以满足新形势下对装备环境适应性考核全面把关、摸清底数、全过程考核评价的需求。

## 1 各类环境试验的特点分析

### 1.1 环境试验的分类

环境试验可以有多种分类方法<sup>[10]</sup>,在环境工程标准中,一般把环境试验分成实验室试验、自然环境试验和使用环境试验。这里考虑到装备性能试验的习惯以及本文讨论的方便,将环境试验分成内场试验、外场试验和虚拟环境试验。内场试验主要指实验室环境试验,实验室环境试验又可以分成单因素环境试验、多因素环境试验。多因素环境试验包括了同时施加多个环境因素的综合环境试验,以及多个单环境因素试验进行组合的组合环境试验。外场试验主要包括自然环境试验、使用环境试验,使用环境试验又可以分成作战环境试验和在役环境试验,作战环境试验是模拟作战任务时短期的使用环境试验,在役环境试验是在长期服役环境下开展的试验。虚拟环境试验是数字化时代下对环境试验提出的新要求,可分成全数字的环境试验和半实物(或虚实结合)环境试验,这里专门把它列为一类。另外,按照其他分类方法,有一些特殊的环境试验(如加速环境试验)可能与内场环境试验和外场环境试验有交叉,本文后面进行专门讨论,不单独分类。环境试验的分类如图 1 所示。

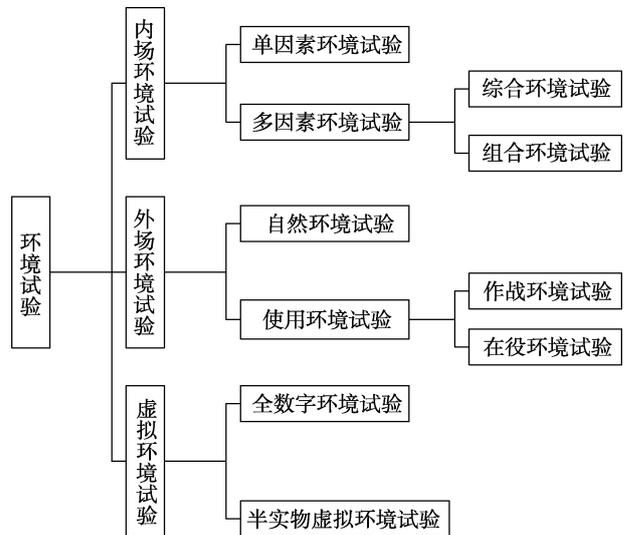


图 1 环境试验分类

Fig.1 Classification of environmental tests

### 1.2 各类环境试验的特点

不同环境试验在试验效率、可控性、可分析性以及试验对服役环境适应性考核的可信性上有很大差别。从反映装备环境适应性的可信性上考虑,使用环境试验特别是在役环境试验所得到的装备环境适应性是最为真实的,其次是自然环境试验。多因素环境试验有一定的可信性,单因素环境试验可考核单因素的部分环境适应性,难以完全反映复杂环境的适应性,而虚拟环境试验的可信性分布范围较宽,其可信性可能最差,也可能高于单因素环境试验,这取决于虚拟环境试验利用实际环境试验数据以及校核的情况。在实际工作中,为了满足装备研制的时间进度、环境适应性验证和环境适应性改进需要,环境试验的效率、可控性和可分析性十分重要。在这方面,虚拟环境试验和单因素环境试验能很好地满足装备研制的需要,多因素环境试验也可以在一定程度上满足,自然环境试验的可信性较高,但是在满足装备快速研制的需求方面较差,使用环境试验在装备研制过程中开展困难,甚至无法进行。不同环境试验在试验效率、可控性和可分析性以及试验可信性的关系如图 2 所示。

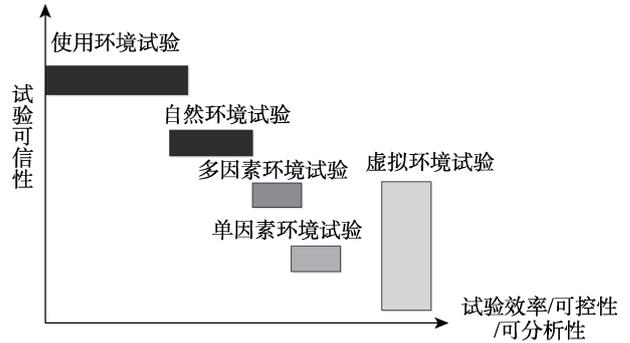


图 2 不同环境试验在试验效率、可控性和可分析性以及环境适应性真实性上的分布  
Fig.2 Plot of reality, efficiency, controllability and analyzability of different environmental tests

形模型,装备的研制过程要对装备需求和技术要求逐级分解和定义,然后再逐级集成验证。由于环境适应性工作是一项系统工程,所以在装备研制系统工程中,环境适应性也是应考虑的因素之一。对于复杂的装备来说,装备可分成装备、系统、分系统及单机和模块等层次。复杂装备研制的系统工程中,在装备不同层次上开展环境适应性要求分解和逐级综合验证的过程如图 3 所示。

## 2 装备各层次产品的环境试验

### 2.1 装备环境适应性要求分解和验证过程

按照 GJB 8113 复杂装备研制系统工程“V”字

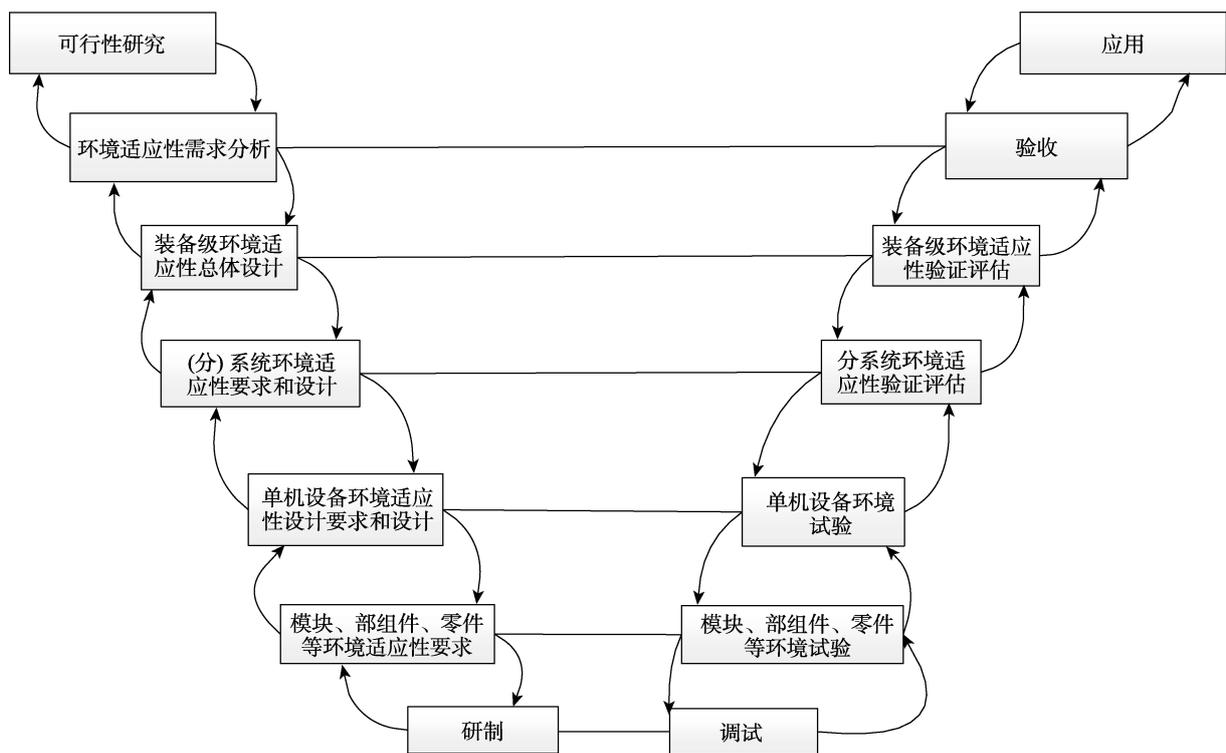


图 3 复杂装备研制系统工程中环境适应性要求分解和综合验证

Fig.3 Analysis and verification of environmental worthiness requirements in complex material development system

的环境数据进行分析，确定其环境适应性要求。装备级的环境适应性要求往往与装备的应用场景直接相关，其环境条件往往具有综合性、复杂性，所以装备级的环境试验往往要求在综合性和典型性的外场环境下进行。对于系统、分系统，由于其环境受到装备整体布局的影响，并且系统、分系统有其特定的工作模式，所以其环境适应性要求和环境条件与装备本身有较大差别。对于单机设备，应根据其在装备中的布置情况及其全寿命周期可能遇到的局部环境条件来确定其环境适应性要求。由于单机设备的研制一般在装备整体研制前期，此时应利用实验室开展充分的实验室环境试验，为系统和分系统的环境适应性提供基础。对于模块、部组件、零件以及新采用的材料、元器件等，要进行有较高环境应力余量和较为彻底的各类环境试验，最好通过技术基础工作研究了解其工作环境边界、破坏环境边界、环境响应性能以及环境损伤机理，为装备研制中正确地选用材料、元器件、零件，保证部组件和模块环境适应性设计余量提供依据，从而为整个装备的环境适应性提供基础。在图3中，装备不同层次产品的环境适应性验证和环境试验是“V”字右翼的逐级综合部分，这种逐级综合关系可以表示为如图4所示的金字塔试验策略验证（Pyramid Test Philosophy, V&V）的关系<sup>[10]</sup>。

### 3 装备全寿命期的环境试验

#### 3.1 装备全寿命期中各个阶段环境试验目的和要求

一般可把装备全寿命周期可以分成方案阶段、工程研制、交付、生产部署和在役使用等阶段<sup>[11]</sup>。从环

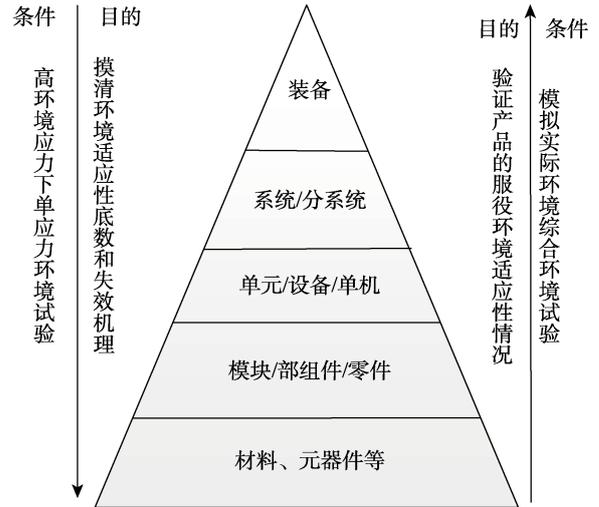


图4 不同层次产品环境试验所形成的金字塔式试验体系  
Fig.4 Pyramid test system of environmental test for different levels of materiel

境试验目的来看，可把装备的全寿命周期分成工程研制阶段、交付阶段、在役使用等阶段。方案阶段环境试验主要对方案进行评估；在工程研制阶段，环境试验主要目的是通过试验对装备的技术状态、生产状态进行验证和固化，这就要求环境试验有较高的试验效率、较好的可重复性以及试验结果应具有可分析性；在交付阶段，环境试验主要是为了摸清并确认装备的服役环境适用性，此时的环境试验要尽量接近实际作战时的环境条件；在在役使用过程中，环境试验则是在在役条件下考核装备环境适应性的长期稳定性，并支撑对装备环境适应性的改进，此时的环境试验条件就是装备在役的环境条件。各个装备全寿命各阶段环境试验的目的和试验要求见表1。

表1 装备全寿命周期各个阶段环境试验目的和要求

Tab.1 Aim and requirement of environmental test during different phases of materiel life cycle

阶段	环境试验目的	环境试验的要求
方案阶段	对方案的可行性进行评估	试验应有极高的试验效率
工程研制阶段	验证并固化装备的相关技术的状态	试验应有较高的试验效率、可控性和可分析性
交付阶段	摸清并确认装备的服役环境适用性	模拟服役环境条件、摸清边界和底数
生产部署	环境适应性生产质量控制	检验装备环境适应性关键参数
在役使用阶段	考核在役环境下装备环境适应性的长期稳定性，并支撑装备的改进	采用在役的实际环境条件

#### 3.2 装备全寿命期中各个阶段的环境试验项目

根据装备实际运用的要求，在装备方案设计阶段，应全面策划环境试验工作，并启动新材料、新工艺、新元器件、新部组件的自然环境试验、环境效应试验等摸底性、研究性试验。考虑到这项工作的基础性和长期性，相关试验研究可持续到交付阶段，必要时可持续到装备在役使用阶段，为装备的维护和延寿

提供支持。在装备的工程研制初期，需要进行虚拟环境试验（或者称为仿真试验），在此基础上进行环境适应性研制试验。在装备的研制后期，开展环境适应性验证试验、环境响应特性调查试验。在交付阶段，开展环境适应性鉴定试验（包括内场试验室环境试验和外场环境试验）和作战环境试验。生产部署阶段主要开展生产过程的例行环境试验。在役使用时，进行在役环境考核。装备各阶段环境试验见表2。

表 2 装备全寿命周期各个阶段环境试验类型  
Tab.2 Environmental test during different phase of materiel life cycle

阶段	环境试验名称	备注
方案阶段	自然环境试验、环境效应试验等摸底性、研究性试验	可能会持续到装备在役使用阶段
工程研制阶段	虚拟环境试验、环境适应性研制试验、环境适应性验证试验、环境响应特性调查试验	
交付阶段	环境适应性鉴定试验、作战环境试验	
生产部署阶段	例行环境试验	
在役使用	在役环境考核	根据需要可补充其他类型试验

从表 2 可以看出, 装备全寿命期中, 环境试验先通过试验验证, 并固化装备技术状态, 再通过模拟作战环境试验来了解装备的环境适应性情况, 最后在长期服役环境中考核和改进装备的环境适应性, 所以装备全寿命期中环境试验的应用是一个从科学原理到实际技术, 从简单单因素试验到复杂多因素试验, 从可控的研制到实际运用、应用的过程, 符合技术和装

备发展的一般规律。因此, 在装备全寿命期中, 开展环境试验时, 要遵循技术和装备发展的一般规律, 统筹各类环境试验, 分阶段逐步摸清装备环境适应性底数, 并使其达到实际运用的水平。交付用户使用前, 可用表 3 的格式检查研制阶段环境试验项目的充分性(包括历史试验数据), 在在役使用中, 要充分利用表 3 给出的试验数据, 为装备的改进和升级提供依据。

表 3 环境试验充分性检查表示例  
Tab.3 Adequacy check example list of environmental test

试验项目	材料、元器件	零件、部组件、模块	单机、设备、单元	系统、分系统	装备
温度					
湿热					
正弦振动					
静载					
冲击					
XXX 自然环境					
XXX 使用条件					
虚拟试验					
...					

## 4 多因素环境试验

服役环境往往是多个环境因素共存的环境, 因此需要充分利用多因素环境试验来更好地模拟实际使用的复杂环境进行试验, 以突出新时期下对装备复杂环境适应性考核。多因素环境试验包括了同时施加多个环境因素的综合环境试验, 以及多个单环境因素试验进行组合的组合环境试验。

在环境工程标准中, 给出了 4 种综合环境试验, 包括温度-高度试验、温度-高度-湿度试验、振声-温度试验和温度-湿度-振动-高度试验。综合环境试验技术一直受到研究者的重视<sup>[12-13]</sup>, 针对特定产品或环境, 可以发展专门的综合环境试验技术<sup>[14-15]</sup>。综合环境试验技术优缺点如下:

- 1) 真实性好。通过模拟多种环境因素共存, 综合环境试验可真实反映产品的环境效应。
- 2) 效率较高。通过同时施加多种环境因素, 综合环境试验可缩短试验时间, 提高试验效率。
- 3) 重复性差。由于多个环境因素共存, 甚至环

境因素之间存在相互作用, 导致控制困难, 试验的重复性差。

4) 结果分析较难。综合环境下产品的环境效应复杂, 可导致试验结果分析困难。

综合环境试验的特点决定了它有一定的适用范围, 它重复性差和分析性差的缺点使其应用于环境适应性研制试验有一定困难, 但是在环境效应试验以及环境适应性鉴定试验方面有一定优势。在装备实际运用要求的背景下, 通过贴近服役环境的综合环境试验, 对装备的环境适应性进行全面把关, 并摸清环境效应底数, 是装备发展的迫切需求。

组合环境试验是在实验室单因素环境试验基础上形成的, 它把多个单因素环境试验按照某种顺序施加到某一试验件上, 对单项环境因素的环境试验是一项改进, 其优缺点为:

- 1) 有一定真实性。按照一定时间顺序施加多种环境因素, 可部分反映产品实际环境中的环境效应。
- 2) 重复性好。由于试验实施时按照单个环境按顺序叠加, 试验的重复性与单因素环境试验类似。

3) 结果分析较容易。组合环境试验较容易确定造成产品环境故障的因素, 试验结果分析较为容易。

4) 效率较低。组合环境试验要求在某一试验件上按照顺序进行多个单因素环境试验, 效率较低。

组合环境试验适用于环境适应性研制试验, 既可以部分反映产品实际环境中的环境效应, 又有较好的重复性和可分析性, 可发现装备环境适应性薄弱环节, 促进产品的设计改进。组合环境试验也可部分用于环境效应试验以及环境适应性鉴定试验因此在装备实际运用要求的背景下, 组合环境试验也有较高价值。未来多因素环境试验技术的发展重点是研究多个环境因素综合和组合的试验设备和试验技术, 以提高其对实际服役复杂环境的模拟性, 支撑装备复杂环境适应性快速试验评价。

## 5 虚拟环境试验

虚拟环境试验是在数字化条件下进行的一类环境试验, 由于虚拟环境试验的试验条件可随意设定和拉偏, 并且有可能在装备级上实施, 因此虚拟环境试验在装备环境适应性全面把关以及摸清底数上有着独特作用。

完整的虚拟环境试验应包括对装备环境仿真和装备环境效应仿真2个部分。对装备环境仿真如对装备的大气环境进行仿真, 包含了对大气的气温、气压、大气密度、空气湿度和风的时空分布, 云、雨、雪、雾的宏观结果及时空分布和演变, 雷暴、台风、暴雨、大气能见度等进行仿真<sup>[16]</sup>, 这类仿真是为了掌握装备服役的实际复杂环境。目前, 在装备研制初期, 基于物理、力学等专业知识, 就某个单项的环境因素对装备的效应进行仿真(如热仿真、力学仿真)来分析环境对装备的效应, 以初步了解环境对装备的效应, 目的是比较不同的设计方案, 并不追求虚拟环境试验的可信度。目前的研究证明<sup>[17-19]</sup>, 虚拟环境效应试验在较低的材料层次或简单产品层次内有一定的可信性。如李相波等<sup>[19]</sup>利用虚拟试验技术对舰船材料进行寿命预测证明是可行的。

装备的实际运用要求对装备的环境适应性进行全面把关并摸清底数, 但是实物试验的成本过高, 并且往往不具备相关的试验条件, 所以对装备系统层次虚拟环境试验提出了迫切需求, 有研究者开展了部分探索性工作<sup>[20-22]</sup>。如考虑到月球环境环境是影响月球车运动性能的一个主要因素, 杨艳春<sup>[22]</sup>研究了一个融合月面环境的仿真工具, 为发展月球车在月面环境适应性虚拟试验提供了支撑。但是如果虚拟环境试验应用于装备系统层次的环境适应性鉴定, 全面回答装备环境适应性水平及环境效应底数, 需要开展下列工作提高虚拟环境试验的可信度:

1) 相关的环境模型、装备模型需要通过校验,

满足相关标准建模与仿真模型校核、验证与确认的要求。

2) 应基于实际环境试验获得装备各组成单元的工作极值、承受极值、环境响应特性和相关环境效应的数据, 支撑装备的虚拟环境试验工作。

3) 通过与实际试验结果进行比对, 对虚拟环境试验结果进行可靠校正。

未来应根据上述条件发展虚拟环境试验, 从而通过虚拟环境试验给出较为可信的装备工作环境条件、破坏极限环境条件, 以及环境对性能、功能的影响曲线等数据, 支撑对装备环境适应性进行全面把关和摸清底数的工作。

## 6 环境试验余量与产品可靠性

环境试验中, 环境因素的强度往往保留一定的余量, 这个余量保证了产品能在一定程度上承受环境因素的波动而不发生故障, 因此合理的环境试验也可以看成可靠性试验的一部分。由于环境试验对装备所有可能经历的环境进行考核, 所以环境试验是只考核“规定条件”的传统可靠性试验的前置性试验。考虑到服役环境的多样性和复杂性, 新形势下环境试验与可靠性试验应更深入地结合, 来确保装备的可靠性。

从确保装备可靠性的角度来看, 环境试验中应选择合适的试验余量。但是过高的环境试验余量会导致“过试验”, 从而造成浪费, 而过低的环境余量会造成设计不足, 可能导致装备实际服役中故障率过高。例如, 一般情况下, 在航天器研制过程中, 组件、部件和设备部分开展环境试验时, 热循环的试验余量为10℃, 冲击的环境试验余量为6dB, 既可保证产品的可靠性, 又不至于过试验。

## 7 自然环境试验与加速环境试验

按照环境试验条件的形成方式, 环境试验又可以分成人造环境试验和自然环境试验。人造环境试验的主要优点是具有可控性, 为确保试验效率和试验结果的可分析性提供了基础, 但是人造环境试验往往不能完全反映出服役环境的复杂性。自然环境试验是在自然条件下进行的环境试验, 具有真实性、基础性、长期性、先导性等特点<sup>[23]</sup>。自然环境试验基础性、长期性的特点, 决定了自然环境试验直接应用于装备研制中存在一定的困难, 但是其真实性、先导性特点决定了自然环境试验对于提高装备环境适应性技术水平具有重要意义。自然环境试验的作用表现为:

1) 自然环境试验获得的自然环境效应数据和知识是开展装备环境适应性技术工作的基础之一。

2) 自然环境试验结果是各类实验室环境试验, 特别是加速环境试验和虚拟环境试验的基础, 所以许

多实验室试验与自然环境试验相关性的研究都把自然环境试验作为基准<sup>[24-28]</sup>。

3) 自然环境试验在考核多因素复杂环境及长期环境效应方面优势明显, 其可信性仅次于使用环境试验。

由于自然环境试验的这些特点, 新形势下应更积极地将自然环境试验数据、获取的知识和技术在装备全寿命周期中进行应用<sup>[29-30]</sup>。根据外军的经验<sup>[31]</sup>, 建议从方案阶段军地双方联合开展自然环境试验工作策划, 并将试验和相关工作持续到在役考核中。

按照试验条件不同, 环境试验又可以分成模拟环境试验和加速环境试验两大类。模拟环境试验是在尽可能重现实际环境条件下进行的一类试验, 它的可信程度较高; 加速环境试验是则是在提高环境应力水平或(和)增加环境应力施加的频度, 使得试验时间短于实际使用时间的一类试验。模拟环境试验较真实地反映装备的环境适应性水平, 一般在环境适应性验证和鉴定中使用; 加速环境试验由于其效费比高, 试验时间短, 国内外对加速环境试验技术已经进行了大量的研究<sup>[32-38]</sup>, 并成为工程中的一项关键技术<sup>[39-40]</sup>。加速试验在具体装备的应用案例表明<sup>[38]</sup>, 加速试验在新时期实际运用环境下, 在装备环境适应性研制、验证和鉴定中有广泛的应用前景。

## 8 结论

1) 为满足新时期装备的环境适应性工作需要, 需要用系统工程思想建立起综合运用各类环境试验的策略, 在装备各层次统筹各类环境试验, 在装备全寿命周期不同阶段应用不同的环境试验。

2) 针对新时期装备复杂环境适应性考核的需求, 需要进一步加强多因素环境试验的研究和应用。

3) 为了对装备环境适应性进行全面把关并摸清底数, 需要进一步研究和发展虚拟环境试验, 发挥其独特作用。

4) 在新时期装备的环境适应性工作中, 需要进一步强化自然环境试验基础性地位, 加强加速试验在工程中的应用。

### 参考文献:

- [1] 祝耀昌, 徐刚. 环境适应性可靠性等通用质量特性之间相互关系的讨论[C]// 2014 年全国装备环境工程发展研讨会. 重庆:《装备环境工程》编辑部, 2014.  
ZHU Y C, XU G. Relationship between Environmental Worthiness, Reliability and Other Universal Quality Characteristics[C]// 2014 Equipment Engineering Developmental Forum. Chongqing: Editorial Office of Equipment Environmental Engineering, 2014.
- [2] 傅耘, 祝耀昌, 陈丹明. 装备环境要求及其确定方法[J]. 装备环境工程, 2008, 5(6): 46-51.  
FU Y, ZHU Y C, CHEN D M. Materiel Environmental Requirements and Their Determination Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(6): 46-51.
- [3] 武月琴, 傅耘. 装备环境适应性表征方法研究[J]. 装备环境工程, 2008, 5(6): 52-55.  
WU Y Q, FU Y. Research on Characterization of Equipment Environmental Worthiness[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(6): 52-55.
- [4] 罗天元. 装备环境适应性的定量化表征技术探讨[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 150-152.  
LUO T Y. Study on Quantitative Characterization Technique of Environmental Worthiness of Equipments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 150-152.
- [5] 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.
- [6] 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(二)[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(2): 119-122.  
ZHU Y C, ZHANG J J. Discussion of Relationships among Environmental Worthiness Requirement, verification Requirement of Environmental Worthiness and Environmental Conditions of Materiel (Part Two)[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(2): 119-122.
- [7] 王成章, 钟勇, 张薇, 等. 航空装备环境适应性试验鉴定工作展望[J]. 装备环境工程, 2023, 20(5): 6-11.  
WANG C Z, ZHONG Y, ZHANG W, et al. Prospect of Environmental Adaptability Test and Appraisal of Aviation Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(5): 6-11.
- [8] 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.
- [9] 装备性能试验编写组. 装备性能试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020: 175.  
Equipment Performance Test Writing Group. Performance Test for Materiel[M]. Beijing: Defense Industry Press, 2020: 175.
- [10] 蔡健平. 装备环境适应性与装备环境工程[M]. 北京: 航空工业出版社, 2019.  
CAI J P. Materiel Environmental Worthiness and Materiel Environmental Engineering[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2019.
- [11] 祝耀昌. 产品环境工程概论[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003.

- ZHU Y C. Introduction to Product Environmental Engineering[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003.
- [12] 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 Y, ZHANG H B, XUE H H, et al. Current Situations and Development Suggestions of Combined Environmental Test in China[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(5): 44-47.
- [13] 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.
- [14] 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 Y, WANG C C, ZHAO Z F, et al. Comprehensive Environmental Test Method for Aviation Equipment in Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(2): 86-90.
- [15] 关伟, 王洪岩. 惯性器件综合环境试验技术发展浅析[J]. 航空维修与工程, 2021(6): 33-34.
- GUAN W, WANG H Y. Development of Composite Environmental Testing Technology for Inertial Devices[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2021(6): 33-34.
- [16] 宣兆龙, 易建政. 装备环境工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- XUAN Z L, YI J Z. Equipment Environmental Engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [17] 卢进军, 李继新, 孙阳, 等. 高原环境下某装甲车辆空气滤清器性能仿真分析与试验[J]. 兵工学报, 2015, 36(8): 1556-1561.
- LU J J, LI J X, SUN Y, et al. The Performance Simulation and Experiment of Air Filter of Armored Vehicle in Plateau Environment[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(8): 1556-1561.
- [18] 李泽仁, 蔡志为, 周璐, 等. 航天器常压高温试验环境中的防护装置热仿真研究[J]. 北华航天工业学院学报, 2020, 30(4): 23-25.
- LI Z R, CAI Z W, ZHOU L, et al. Thermal Simulation Study of Protective Device in Spacecraft at Normal Pressure and High Temperature Test Environment[J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering, 2020, 30(4): 23-25.
- [19] 李相波, 陈光章, 王洪仁, 等. 虚拟试验技术在舰船材料寿命预测中的应用[J]. 装备环境工程, 2006, 3(4): 70-73.
- LI X B, CHEN G Z, WANG H R, et al. Application of Virtual Experiment Technique in Life Prediction of Ship Materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(4): 70-73.
- [20] 陈典斌, 柯宏发, 韩东霏. 仿真技术在装备环境适应性试验与评价中的应用[J]. 中国设备工程, 2017(22): 102-104.
- CHEN D B, KE H F, HAN D F. Application of Simulation Technology in Equipment Environmental Adaptability Test and Evaluation[J]. China Plant Engineering, 2017(22): 102-104.
- [21] 黄望. 数字媒体在舰船虚拟环境试验平台中的应用[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(8): 19-21.
- HUANG Y. Application of Digital Media in Ship Virtual Environment Test Platform[J]. Ship Science and Technology, 2021, 43(8): 19-21.
- [22] 杨艳春. 虚拟环境下月球车仿真试验系统及其若干关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- YANG Y C. Research on Simulation Test System of Lunar Rover in Virtual Environment and Its Key Technologies[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [23] 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.
- [24] 文邦伟, 张伦武, 李继红, 等. 装甲钢自然环境试验与人工加速试验的相关性[J]. 装备环境工程, 2006, 3(3): 97-101.
- WEN B W, ZHANG L W, LI J H, et al. Relativity between Natural and the Artificial Accelerated Environmental Test of Armor Plate[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(3): 97-101.
- [25] 刘成臣, 赵连红, 王浩伟. 飞机表面涂层海洋环境试验与实验室环境试验相关性研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(6): 16-20.
- LIU C C, ZHAO L H, WANG H W. Correlation between Marine Atmospheric Environmental Test and Laboratory Environmental Test of Aircraft Surface Coating[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(6): 16-20.
- [26] 刘成臣, 张洪彬, 赵连红, 等. 印制电路板海洋环境试验与实验室环境试验相关性研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(2): 74-78.
- LIU C C, ZHANG H B, ZHAO L H, et al. Correlation between Marine Environmental Test and Laboratory Environmental Test of Printed Circuit Board[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(2): 74-78.
- [27] 熊俊, 吴德权, 孙茂钧, 等. 三元乙丙橡胶室内外老化行为及相关性分析[J]. 装备环境工程, 2022, 19(4): 138-144.
- XIONG J, WU D Q, SUN M J, et al. Correlation Analysis and the Aging Behaviors of Ethylene-Propylene-Diene Monomer in Xenon Lamp & Atmospheric Environments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(4): 138-144.
- [28] 肖敏, 赵全成, 杨华明, 等. 硅橡胶自然环境加速试验方法与自然环境试验方法等效性研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(11): 71-78.
- XIAO M, ZHAO Q C, YANG H M, et al. Equivalence between Natural Environmental Accelerated Test Methods and Natural Environmental Test Methods of Silicone Rubber[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020,

- 17(11): 71-78.
- [29] 刘艳, 陈江攀, 刘艺, 等. 导弹装备自然环境试验现状及建议[J]. 现代防御技术, 2021, 49(4): 86-90.  
LIU Y, CHEN J P, LIU Y, et al. The Present Situation and Suggestion of Missile Equipment Natural Environmental Test[J]. Modern Defence Technology, 2021, 49(4): 86-90.
- [30] 刘艳, 刘艺, 陈江攀, 等. 导弹自然环境适应性综合评价方法[J]. 现代防御技术, 2021, 49(3): 123-129.  
LIU Y, LIU Y, CHEN J P, et al. Comprehensive Evaluation Method of Missile's Natural Environment Adaptability[J]. Modern Defence Technology, 2021, 49(3): 123-129.
- [31] Secretary of Defense for Acquisition, Technology and Logistics. Corrosion Prevention and Control Planning Guidebook Spiral 3[R]. Department of Defense, 2007.
- [32] 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 Defence Industry Press, 2015.
- [33] 高军, 唐翔. 装备加速试验与快速评价[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.  
GAO J, TANG X. Accelerated Test and Rapid Evaluation of Equipment[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2019.
- [34] 李毓镇, 李庄, 李凌飞, 等. 民机蒙皮材料紫外老化加速环境谱研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(6): 43-48.  
LI Y Z, LI Z, LI L F, et al. Accelerated Environmental Spectrum of Ultraviolet Aging for Civil Aircraft Envelop Material[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(6): 43-48.
- [35] 唐庆云, 刘天娇, 胡毅, 等. 发动机典型寿命敏感件环境谱加速技术研究现状[J]. 装备环境工程, 2023, 20(12): 1-9.  
TANG Q Y, LIU T J, HU Y, et al. Research Status of Environmental Spectrum Acceleration Techniques for Typical Life Sensitive Parts in Engines[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(12): 1-9.
- [36] 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.
- [37] 冷文俊, 崔中雨, 王昕, 等. 低合金高强度钢极地环境加速腐蚀试验谱编制与研究[J]. 材料开发与应用, 2023, 38(3): 31-36.  
LENG W J, CUI Z Y, WANG X, et al. Preparation and Study of Accelerated Corrosion Test Spectrum of Low Alloy High Strength Steel in Polar Environment[J]. Development and Application of Materials, 2023, 38(3): 31-36.
- [38] 陈津虎, 胡彦平, 周芳. 舰载装备值班寿命加速试验方法研究[J]. 强度与环境, 2021, 48(2): 59-63.  
CHEN J H, HU Y P, ZHOU F. Research on Accelerated Life Test Method of Shipboard Equipment on Duty[J]. Structure & Environment Engineering, 2021, 48(2): 59-63.
- [39] 赵保平, 孙建亮, 张韬, 等. 产品定寿与延寿中的几个环境问题[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 21-25.  
ZHAO B P, SUN J L, ZHANG T, et al. Some Problems of Environment Engineering in Life Estimation and Prolongation of Products[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 21-25.
- [40] 陈凯诺, 张福光, 杜光传, 等. 战术导弹贮存延寿工程实践关键问题研究[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(4): 136-139.  
CHEN K N, ZHANG F G, DU G C, et al. Study on the Key Problems of Tactical Missile Storage Life Extension Engineering Practice[J]. Ship Electronic Engineering, 2023, 43(4): 136-139.