

航天导弹装备自然环境试验方法探讨

赵朋飞, 张生鹏, 翟疆, 李宏民

(航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100854)

摘要: 航天导弹型号装备在研制阶段, 一般需要有针对性地开展典型或极端自然环境的投放试验, 以验证和评价导弹武器系统对服役期可能经受自然环境条件的适应性。针对导弹型号自然环境试验的实施过程, 从试验准备、试验实施、试验结束、试验总结、试验数据收集等方面对试验关键环节进行技术或管理方法探讨, 以进一步规范和指导型号自然环境试验工作的开展, 提高试验效率和试验效果。

关键词: 导弹装备; 自然环境试验; 定期检测; 失效分析

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.11.008

中图分类号: TJ760.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2017)11-0037-07

Testing Methods for Space Missile Materiel in Natural-environment

ZHAO Peng-fei, ZHANG Sheng-peng, ZHAI Jiang, LI Hong-min

(Aerospace Science & Industry Corp Defense Technology R&T Center, Beijing 100854, China)

ABSTRACT: Generally, typical or extreme natural-environment drop tests have to be performed specially for space missile materiel in the development stage, in order to validate and evaluate the adaptability level of missile systems which endure the natural-environmental stress probably in service. This paper focused on the process of natural-environment tests of missile model, and discussed techniques and management methods on main procedures, e.g. preparation, performance, completion, summary and data collection of test to further normalize and guide natural-environment test and improve testing efficiency and effect.

KEY WORDS: missile materiel; natural-environment test; periodic examination; failure analysis

根据 GJB 4239—2001《装备环境工作通用要求》工作项目 407^[1], 自然环境试验定义为将装备(产品)长期暴露于自然环境中, 确定自然环境对其影响的试验, 也称为自然环境暴露试验或自然环境投放试验。自然环境试验的特点是环境条件的真实性、环境因子影响的综合性、试验数据的溯源性、试验结果的可靠性。环境适应性是型号产品通用质量特性“七性”保证工作要求之一, 并且在质量特性中处于基础和关键环节。通过科学有效地开展自然环境试验, 可以减少型号由于环境适应性问题而造成的反复维修, 缩短研制周期和降低生产成本, 对于全面提升导弹武器装备环境适应能力, 及确保其在寿命期内满足全天候、多地

域的使用要求, 具有十分重要的意义。

目前, 大气环境实验室模拟试验项目及试验水平已经发展较为完备, 但是仍然无法完全代替自然环境试验, 因为实际存放条件下的多因素耦合作用、瞬时变化及时间效应等特点, 在实验室无法达到精确及真实的模拟。因此, 必须持续不断地开展装备产品的自然环境试验, 验证产品环境防护措施的不足及有效性, 积累产品环境适应性数据, 获取试品的存放自然环境效应及退化失效机理。文中是在当前型号环境适应性保证系列要求的基础上, 对型号试验样品的准确选取、定期检测、失效分析、组织管理等方面提出规范性要求, 试图解决目前存在的试品选取盲目、重复

投放、质量控制不足、检测数据不规范及管理分散、失效分析切入力度不够、改进措施缺乏针对性、试验数据利用程度低等问题,不断提高型号自然环境试验工作的规范程度、质量及效费比。

1 自然环境试验目的和流程

航天导弹装备一般在型号研制的初样阶段尽早统筹安排自然环境试验工作,试验样品通过试验一般应达到以下目的:暴露产品在设计、选材及工艺等方面缺陷和薄弱环节,验证其环境适应性;积累环境适应性数据,为产品环境适应性设计提供依据;获取产品的自然环境退化效应及失效机理,提高改进措施的针对性;验证产品环境防护措施的有效性。型号自然环境试验一般包括试验前准备、投放试验、定期检测、测试结果判定、故障处理、试验撤场、失效分析、试验结果综合评价和试验总结等工作内容,试验流程如图1所示。

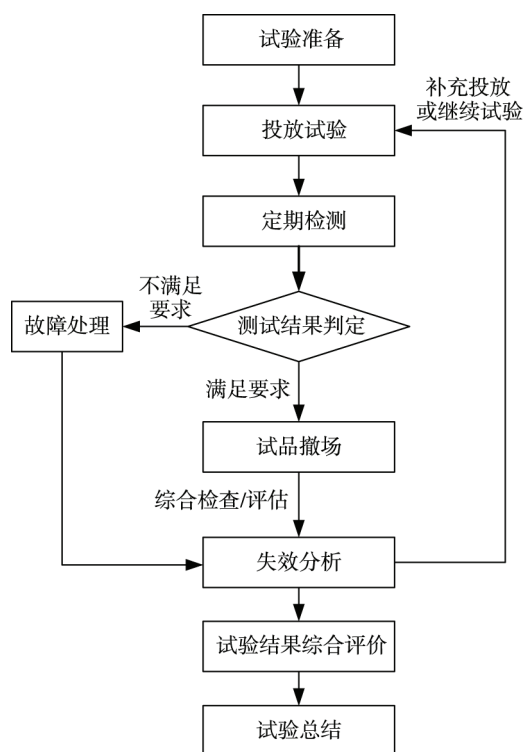


图1 航天导弹装备自然环境试验工作流程

2 试验前准备

2.1 组织分工

为了保证试验质量及试验工作的顺利开展,一般由型号主管部门在试验前组织成立试验工作小组,全面负责自然环境试验过程中的各项技术及管理事项。其中由试验提出单位任组长,试验承担单位任副组长,各试品研制单位及自然环境试验站作为成员参

加,具体任务分工可参考如下。

1) 试验提出单位负责制定试验方案、试验大纲等文件,负责组织试品选取及评审、试验总结及试验资料归档等工作。

2) 试验承担单位负责组织试品投放、定期检测、撤场甄别、失效分析及试验数据收集整理等工作,并对试验各环节进行质量监督。

3) 试品研制单位负责制定试品试验实施细则、试品检测报告等文件,提供试品、试品包装、合格证明及有关试验保障设备,并完成试品定期检测及测试数据分析。

4) 试验站负责提供试品存放地点及货架等,完成环境数据的定期采集和记录,以及试品外观检查和定期维护测试、密封包装检查和更换等工作。

2.2 试验文件编制

试验开展之前,需要依据试验输入材料及产品特点等信息,编制试验方案、试验大纲、试验实施细则等文件,通过审查后用于指导试验各环节工作的具体实施。

1) 确定试验方案。试验方案作为试验开展的总要求及后续工作输入,制定依据一般包括:产品研制总要求或研制任务书中有关贮存地点、环境适应性要求等条款;产品的结构和特点;产品预期使用过程和环境;已有的环境适应性信息。试验方案的内容应包括:试验目的、试验依据、试验类型、试验方法、试验产品的级别、种类与数量、试验判据等,必要时可依据试验方案编制试验计划。

2) 编制试验大纲。试验大纲作为试验实施的具体指导性文件,制定依据一般包括:环境工程有关国军标、行业标准和企业标准等;试验方案;产品技术文件中的环境适应性及检查测试要求。试验大纲的内容应包括:试验性质、试验目的、试验项目及方法、试验对象及其技术状态、试验条件、试验设备、试验程序、试验数据收集及处理、试验报告等。根据型号需要和研制实际,也可由试验承担单位负责编制试验大纲。

3) 制定试验实施细则。试验实施细则是由试品承制单位依据试验大纲规定,针对每件或每类试品的特点制定的具体试验实施方法,一般包括受试产品说明、试验方法及程序、测试设备及仪器、检测项目及方法、故障判据及故障处理、测试结果记录及处理要求、试验结果评定等内容。

2.3 试验样品选取

由于试验样品选取的多少直接关系到自然环境试验的组织规模及经费开支等状况,需要根据导弹武器系统寿命期环境剖面,分析可能遇到的自然环境对

产品的影响,并依据试验方案及试验目的开展试品选取及分析,合理确定试品的种类和数量。目前,参试样品一般由产品承制单位自行确定,这种方法存在明显不足:缺乏有效、统一的选取规范和质量把控,在选取时往往存在较大的随意性和保守性,导致部分类产品过度投放和重复投放,偏离了型号武器系统的研制实际和环境适应性要求。因此,建议试验前从选取原则、选取类型、选取数量等方面对试品的选取要求进行规范。

2.3.1 选取原则

试品在选取时可参考如下原则进行。

1) 三新原则。应优先考虑新材料、新器件和新工艺等相关产品的试验安排。

2) 薄弱环节原则。应重点考虑对自然环境因素敏感及环境适应性薄弱的关键产品安排试验。

3) 环境覆盖原则。应充分考虑产品的耐环境能力、安装部位、暴露情况及寿命期可能遇到的环境条件。

4) 继承/相似性原则。应充分考虑各型号产品之间的继承性及设计、工艺措施的相似性,避免不必要的重复投放和过量投放。

5) 效益最大化原则。应在型号主管部门统一安排下,由试验提出单位组织各成员单位共同制定出优化、组合、高效的试验方案,以利用有限经费获取最大的经济及社会效益。

2.3.2 选取类型

根据导弹武器系统组成及产品特点,一般可将参试样品分为以下三类。

1) I类:按照同一材料和工艺专门制作的试片、紧固件、结构件,可以为平板、管状或其它形状;

2) II类:元器件、部件和组件等产品。

3) III类:设备、整机及导弹。

2.3.3 选取数量

试品的选取数量可参考以下要求进行确定。

1) 试品数量应满足试验目的、检测要求(如破坏性检测、对比检测)及取回分析要求,并考虑经费和系统积累数据(延续试验)的需要。

2) 具有破坏性检测项目的试品,总数量至少为各次检测数量之和。

3) 需要进行对比试验或检测参照的试品,参比试品数量一般不少于3件。

4) 对于I类试品数量,一般至少3件,各向异性材料应在纵向和横向分别取样,大型结构件一般为1~2件;对于II类试品数量,根据产品尺寸、价值、制作难易程度或试验性质确定,一般至少3件;对于III类试品数量,一般至少1件。具体可依据产品类别参考GB/T 14165—2008、QJ 2338A—2002等有关国标和行业标准^[2-3]。

2.4 试品要求

参试样品在确定以后,需要完成投产、出厂验收、包装和运输等过程,一般性要求如下。

1) 试品应按照产品技术要求或有关标准进行合格性检验和必要的预处理,确保试品的符合性。

2) 试品应进行统一标识,可采用铭牌、标牌或条形码等方式,主要内容包括试品类型、投试日期、投试状态、投试单位等。标识应固定在不会对试验造成影响部位,并确保在试验过程中清晰可辨。对于正、反面状态相同的试品,应注明暴露面。

3) 试品研制单位应按GJB 2001—1994等国军标或行业标准的有关规定^[4],明确试品从厂所到试验现场的包装和运输要求。

3 试验实施

3.1 试品投放

试品准备好以后,由试验承担单位负责将试品运送到试验现场,并组织试品承制单位前往试验现场完成试品的投放、必要维护和试验前测试等工作。试验承担单位及试品研制单位应共同对到达试验站的试品进行开箱清点及状态确认,并统一与试验站完成试验前交接。试品试验状态选择应根据实际使用要求和试验目的确定,一般包括裸露/包装状态、气密状态、单独/组合状态、自由/承载状态等。试品存放一般采用支撑物或暴露架对试品进行摆放或悬挂,导弹及弹上设备一般以筒(箱)弹状态或专用包装箱形式存放。

3.2 定期检测

试品投放试验期间,需要对试品进行定期检查和测试,以便及时跟踪和监测试品外观及性能的变化趋势。开展试验测试时一般应遵循以下要求:测试设备及仪器一般由试品研制单位自备,并在计量检定合格有效期内;测试人员一般为试品研制单位人员,并经过培训、考核和持证上岗;应尽量缩短测试时间,检测后应将被试品或系统复原;若现场测试条件不满足时,可将试品携回研制单位进行测试,测试结束后应立即返回试验现场并恢复试验状态,期间不允许对试品进行预防性维修或调整;被测参数应在允许误差范围内,测试不合格的参数应至少重复测试三次;及时填写各项检测记录,完成试品检测报告。

3.2.1 环境因素测量

试品存放环境数据可根据分析周期要求由试验站提供,数据收集格式见表1,通常包括如下特征信息。

1) 大气环境因素:大气温度、相对湿度、太阳辐射、日照时数、气压、风向风速、降水、天气现象等。

2) 大气腐蚀因素:海盐离子、二氧化硫、氨、硫

化氢、氯化氢、二氧化氮、臭氧、雨水组分、降尘等。

3.2.2 试品检测

试品在试验期间应进行定期检测,检测项目一般包括外观检查和性能检测,具体检测内容及适用试品类型见表 2。试品检测周期可参照表 3 确定,一般按照以下要求进行设置:根据试品技术状态、密封状况、存放时间、存放环境等因素确定检测周期,以达到监

测试品外观及性能变化趋势的目的;通常每 3 个月或 6 个月进行一次外观检查及每年进行一次性能测试,具体应根据产品规范(技术条件)的有关规定进行。在试验前、试验中及试验结束时,由试验承担单位组织试品研制单位分别进行初始检测、中间定期检测及最终检测,并将检测结果记录在试验数据库中。应加强试验早期的观察和检测,发现异常数据应立即复查并采取补救措施。

表 1 环境数据收集格式

试验站信息					大气环境因素																																				
序号	试验站	暴露方式	年度	月份	温度			相对湿度			气压			降水量	降水时数	平均风速	最多风向	平均太阳辐射				日照时数	日照百分率	天气现象（天数）																	
					最高	最低	平均	最大	最小	平均	最高	最低	平均					红外光	紫外光	总辐射	45度辐射			雨	雪	雾	露	霜	闪电	积雪	结冰	冰雹	雷暴	大风	沙尘						
大气腐蚀因素																																									
瞬时法			累计法					雨水分析			自然降尘量																														
二氧化硫	臭氧	氯化氢	二氧化氮	硫化氢	三氧化硫	氨	氯离子	pH值	硫酸根离子	氯离子	降尘（水溶性）	降尘（非水溶性）																													

表 2 自然环境试验试品检测项目

序号	检测项目	检测内容	适用试品类型
1	外观检查	试品包装是否完好	II类和III类
		外表面漆层有无剥落、起皱、龟裂或发霉等	I类、II类和III类
		隔热层/涂层有无分层、裂纹、崩块、脱粘、起皱等	I类
		防腐镀层有无明显变化,如镀锌件、镀铜件变暗或长白霜、镀银件变黄等	I类、II类和III类
		非金属材料有无变色、变形及老化等	I类和II类
		电连接器针/孔有无锈蚀、折弯和裂纹	II类和III类
		贮运筒/油缸/管路有无漏气、漏油等	III类
		检查可变形尺寸的参数变化,如弹体挠度变化量、电缆罩几何尺寸等	I类和III类
2	性能检测	电气性能检测:电缆网导通及绝缘检查、单元测试、综合测试等	II类和III类
		力学性能检测:附着力、拉伸强度、剪切强度等	I类
		气密性能检查:对筒弹或箱弹、密封舱段等有密封要求的产品进行	III类
		理化性能检测:导热性能、膨胀系数、线烧蚀率等	I类、II类和III类
		点火性能测试:含有火工品的试品,如燃气发生器、发动机等	III类
		粘接性能测试:借助粘合剂或工艺进行界面连接的结构	I类和II类
		导弹的全弹测试,参照QJ 2794—1996或产品专用技术文件的有关规定进行	III类
		固体火箭发动机测试,参照QJ 2338A—2002规定的检测项目进行	III类

表 3 试品检测周期

序号	试品	检测周期		
		外观检测	性能检测	
1	A类	金属材料、金属涂层	半年或1年	
2		塑料	一般12个检测周期（试验总时间的1/12）	
3		橡胶		
4		有机涂覆层	不大于半年	
试验初期半个月一次，试验中期每月一次，试验后期3个月一次				
5	B类	元器件	每3个月或1年	6个月年或1年
6		部组件	每3个月或1年	1年
7	C类	导弹或筒（箱）弹	每月	1年
8		弹上设备	1年	1年
9		弹上火工品	—	一般为第一次检测在试验时间的一半，以后每2年及 试验结束后进行性能试验
10		地（舰）面设备	一般为1年	

3.3 测试结果判定

试验测试数据主要包括外观检查和功能/性能检测两类。在外观方面，对试品变形、脱漆、锈蚀、长霉、变色、老化、变质、裂纹、分层、剥落、脱焊、泄漏、松动、卡滞、损坏等外观缺陷进行分析和评价，归纳形成的直接原因及防护措施的薄弱环节。对于工艺涂层可参考有关 GB/T 1766—2008、GB/T 6461—2002 等国标或行业标准^[5-6]进行等级评价；在功能/性能方面，充分利用外观分析结果及影响，按照试品功能及性能要求进行工作试验或测试，对比产品技术文件进行性能分析和评价。通常包括以下检测内容：对金属结构件及其材料试品，进行力学性能分析；对非金属件的抗压、抗拉、延伸率、硬度、耐烧蚀、耐冲刷强度及无损探伤（如发动机）情况进行分析；对电子设备及元器件，机械设备及零部件，泵、阀等液压组件的性能参数进行分析；对一次性使用产品，按照功能要求进行工作试验，进行试验结果分析；火工品发火性能分析；密封性能分析；理化性能分析；对有包装要求的试品，进行包装措施的效果分析。

3.4 故障处理

试品出现故障时，应及时分析故障模式及原因，确定故障机理，根据故障判据和试验目的判断试验是否结束，并采取相应的处理措施。一方面，试验以验证产品的环境适应性为目的，出现下列情况之一，该试品试验结束：经检测确认试品丧失规定的功能；试品外观出现缺陷；试品出现性能指标超差。另一方面，试验以暴露缺陷及薄弱环节为目的，按照下列方式处理：经检测确认试品丧失规定的功能，该试品试验结束；试品外观出现轻微缺陷，不影响试品性能时（不进行维修），继续试验；试品出现性能指标超差，且对功能没有影响或影响可以忽略时，经分析确认若有

必要，可继续试验。
由试品故障造成试验结束的，应在采取故障处理及纠正措施后，补投新试品或重投改进后的试品；由选材、设计、工艺、自然环境等因素导致的试品故障，应计入自然环境试验故障；由装卸、运输包装、检查测试等操作不符合技术规程而造成的试品故障，不计入自然环境试验故障。

4 试验结束

4.1 试品撤场

试验结束后，应对试品检测数据进行整理和对比，分析试品外观及性能指标的变化趋势。结合存放环境条件及效应分析，评估试品在存放或使用中可能存在的隐患。若需获得试品外观及性能退化或失效的深层次原因及机理，应进一步开展失效分析试验。

4.2 失效分析

应对试验中发生故障及试验结束判定存在隐患的试品开展失效分析，确定其失效模式、失效原因和失效机理，提出产品设计、选材、工艺及使用维护等方面的改进措施。试品在存放现场出现故障后，在取回实验室开展失效分析前一般按以下要求进行预处理：调查和取证试品现场失效信息，试品移动前拍照，记录失效环境参数；条件允许时现场完成对试品的非破坏性分析和测试；试品转移时应做好适当的密封保护和减振措施，避免引入二次损伤；综合分析失效现象、失效环境及测试结果等信息，初步推理和归纳试品失效模式。

在进行失效分析试验前，试验承担单位应首先根据试品失效信息制定合理的试验分析方案，并依据试品类型及特点选择相应的失效分析方法，具体可参考 GJB 3233—1998、HB 7739—2004 等国军标或行业标

准^[7-8]。其次,应通报试品研制单位,试验须在双方共同确认分析方案后进行。同时,试品承制单位应提供试品的设计要求及性能参数,必要时配合进行相关测试和分析。

失效分析试验结束后,试验承担单位应编写和出具失效分析报告,并履行签署、审批手续。然后将失效分析报告提交至试品承制单位,试品承制单位应对失效分析结论和建议进行处理,并将处理结果上报主管部门进行监督落实。失效分析报告一般包括以下内容:任务的来源;失效背景描述,包括失效件基本信息(名称、型号、技术状态、基本功能等)及失效信息(失效时间、失效地点、失效环境等)等;失效分析方案及分析内容;失效分析过程,可采用照相、摄像及录音等方式记录分析现象和过程,试验过程中的各项检验测试均应有相应的分析报告;综合分析;失效分析结论,确定的失效部位及失效模式,明确的失效原因及失效机理;改进措施及建议;试验结果分

析与评价,对收集的各类试验数据进行综合分析和处理,深入开展失效/故障机理分析,并对产品自然环境适应性进行评价。

4.3 试验数据收集及传递

试验过程中会产生大量有用的基础信息及检测数据,包括环境数据、试品基本信息及材料/工艺特性、试验要求、定期检测数据、失效分析结果及报告、结论及改进建议等信息(见表4)。这些试验数据应由试验承担单位负责收集、整理和分析,并纳入型号专用的自然环境试验数据库中进行统一管理。试验承担单位定期向试验提出单位及各产品研制单位进行数据的传递与共享,为型号产品进行环境适应性评价及选材、选型、改进设计等提供参考和使用建议。同时,在后续型号确定投放试品种类和清单时,可以利用现有环境适应性数据进行调研和查新,在一定程度上可避免试品的盲目选取和过度投放。

表 4 试品检测数据收集格式

试品基本信息												材料及工艺特性					试验要求														
序号	试品名称	试件编号	数量	所属型号	产品分类	技术状态	所属装备及分系统	尺寸	重量	责任单位	生产厂家	生产日期	序号	基本组成	材料成分	制作工艺	主要功能	试验目的	试验设备	投放起始时间	存放总时间	检测周期	投放地点	投放环境	投放包装形式	检测方法	检测地点	检测设备	检测项目及判据		试验结果处理要求
																													外观	求性能	
测试数据							失效数据			结论与建议																					
试验前检测		试验中（后）检测			试验件处理	失效模式	失效原因	失效机理	微观分析报告	环境适应性评价	选用及改进建议																				
外观	性能	检测时间	外观	性能								试品照片																			

4.4 试验结果综合评价

目前,装备环境适应性评价方法主要分为两类。

1)定性分析。评价判据为在自然环境条件下,武器装备能够完成规定的功能、性能且不被破坏。一般采用工程评定方法,评价结果划分分为适应和不适应。

2)定量分析。采用模糊数学的方法,选取主要环境因素及环境指标对导弹武器装备进行环境适应性综合评价。

环境因素多且作用机理复杂,不易操作且定量评

价困难。建议采用定性分析和半定量法,即结合环境应力强度、性能测试等测试数据对装备的环境适应水平进行半定量说明。此外,相关研究人员发展了较多环境适应性评价的具体实践方法,如直接评价法、相似产品法、相关性评价法、试验评价法(包括现场、实验室加速、部队使用、仿真)、长期监测法等,并利用型号装备产品开展了工程应用及案例分析^[9-11]。

试验结束后,试验工作组应按照型号总体环境适应性要求,对收集的各类试验数据采用适当数学方法进行综合分析和处理,结合使用环境类型及产品特征,深入开展环境退化效应及失效(故障)机理分析,

选择合适的评价方法对装备产品自然环境适应性作出评价。

5 试验总结

试验工作组在自然环境试验结束后,应及时对整个试验过程及试验结果进行分析和总结,将试验流程中产生的各类文件及报告汇总形成试验总结报告,主要包括以下内容。

1) 试验依据。列出试验的依据性文件,包括试验大纲(细则)、技术条件以及相关的标准规范。

2) 试验概述。对试验时间、地点、参试单位和人员、试验完成情况等进行概要描述。

3) 参试设备技术状态。说明参试设备和试品的技术状态及在研制过程中所属阶段或批次,试验中所用仪器设备的型号规格及其有效性。

4) 试验过程及试验数据。描述试验步骤、试验现象,汇总、归纳和整理试验的各项结果,以数据、曲线和各种图表的形式清晰表达,对试品试验数据和环境数据进行分析。

5) 试验故障及处理方法。对试验中出现的故障或异常现象进行故障原因和机理分析,并说明采取的解决措施。

6) 试验结果分析。分析和评价试验结果是否满足产品技术文件或试验大纲的要求。

7) 试验结论。根据试验大纲的相关要求,对产品环境适应性作出评价,并对产品的选材、设计、生产和工艺提出改进措施,对产品维护措施和环境防护提出改进意见。

6 结语

文中梳理了航天导弹装备开展自然环境试验的工作流程,重点围绕参试样品这条主线,从试品的选取、测试及分析等方面分析和阐述了试验相关的一些管理方法和工程经验。为进一步规范和指导型号装备自然环境试验的顺利实施,对关注自然环境试验的工程技术和管理人员提供一些参考和帮助。

参考文献:

- [1] GJB 4239—2001, 装备环境工程通用要求[S].
- [2] GB/T 14165—2008, 金属和合金大气腐蚀试验现场试验的一般要求[S].
- [3] QJ 2338A—2002, 固体火箭发动机贮存试验方法[S].
- [4] GJB 2001—1994, 火工品包装、运输、贮存安全要求[S].
- [5] GB/T 1766—2008, 色漆和清漆涂层老化的评级方法[S].
- [6] GB/T 6461—2002, 金属覆盖层腐蚀试验后的电镀试样的评级[S].
- [7] GJB 3233—1998, 半导体集成电路失效分析程序和方法[S].
- [8] HB 7739—2004, 航空金属制件失效分析程序与要求[S].
- [9] 汪学华. 自然环境试验技术 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2003.
- [10] 宣卫芳. 装备与自然环境试验 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2011.
- [11] 杨军锋, 孙敏. 空空导弹温度-高度环境适应性模拟试验方法研究[J]. 环境技术, 2015, 33(5): 43-48.