

导弹地面装备自然环境适应性评价方法探讨

何俊, 陶小创, 石高荣

(北京电子工程总体研究所, 北京 100854)

摘要: 分析了地面装备全寿命周期的自然环境剖面、环境因素,探讨了各环境因素的影响效应,并综合运用直接评价法、相似产品法、相关性评价法、试验评价法和长期监测法等评价方法,提出了导弹地面装备所经历的各种自然环境的评价思路 and 具体方法,对各类导弹地面装备的环境适应性评价具有较高的工程应用价值。

关键词: 导弹地面装备; 自然环境; 环境适应性评价; 评价方法

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.01.017

中图分类号: TJ76 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2016)01-0091-07

Discussion on Evaluation Methods of Natural Environmental Worthiness of Missile Surface Equipment

HE Jun, TAO Xiao-chuang, SHI Gao-rong

(Beijing Institute of Electronic Engineering, Beijing 100854, China)

ABSTRACT: Evaluation of environmental worthiness is a major part of environmental engineering of missile surface equipment. In this paper, natural environmental profiles of whole life cycle of missile surface equipment were analyzed, and the environmental effect of various environmental factors was also discussed. Moreover, evaluation approaches and specific methods of various natural environmental factors that the missile surface equipment suffered were suggested by comprehensively considering various evaluation methods such as direct evaluation method, similarity product method, relativity evaluation method, experimental evaluation method, and long term monitoring method. In conclusion, the environmental worthiness of different missile surface equipment can be evaluated by adopting these feasible approaches and methods.

KEY WORDS: missile surface equipment; natural environment; evaluation of environmental worthiness; evaluation method

装备的环境适应性表现为装备的结构和材料对贮存、运输状态自然环境中各种环境因素及其综合长期破坏作用的抵抗能力,以及对使用状态气候和力学环境短时快速破坏作用的抵抗能力。导弹地面装备

在其寿命周期内要经受各种自然环境和诱发环境的影响,在交付用户使用时需对其环境适应性进行全面评价^[1]。因此,环境适应性评价是导弹地面装备定型阶段的一项重要工作项目,是判断装备满足规定环境

收稿日期: 2015-08-26; 修订日期: 2015-09-29

Received: 2015-08-26; Revised: 2015-09-29

作者简介: 何俊(1981—),女,山西稷山人,硕士,工程师,主要从事可靠性与环境工程总体研究工作。

Biography: HE Jun(1981—)Female, from Jishan, Shanxi, Master, Engineer, Research focus: reliability and environmental engineering study.

要求的主要方法和手段。文中主要对导弹地面装备寿命周期内的自然环境因素、影响效应、以及各种自然环境的评价方法等内容进行了探讨。

1 自然环境因素及其影响分析

1.1 环境剖面

导弹地面装备在使用期和寿命期内,要反复经历运输、贮存、训练、检测、机动转移、任务准备、任务实施等阶段,各个阶段存在的各种自然环境因素均对装备产生影响。因此,开展环境适应性评价工作,首先应分析装备经历的各种环境因素及其影响效应^[2]。为了能够充分识别寿命期内装备所经历的主要环境因素,应采用建立环境剖面的形式进行分析,表1给出了导弹地面装备的自然环境剖面。

表1 导弹地面装备自然环境剖面

Table 1 Natural environmental profiles of missile surface equipment

任务阶段	主要自然环境因素
公路运输	低气压、高温、低温、湿度、雨、沙尘、风、太阳辐射等
铁路运输	低气压、高温、低温、湿度、雨、沙尘、太阳辐射等
航空运输	低气压、低温、湿度等
船舶运输	高温、低温、湿度、雨、太阳辐射、霉菌、盐雾等
训练	低气压、高温、低温、湿度、雨、雾、沙尘、风、太阳辐射等
机动转移	低气压、高温、低温、湿度、雨、沙尘、风、太阳辐射等
战备值班	低气压、高温、低温、湿度、霉菌、盐雾、雨、沙尘、风、太阳辐射等
任务准备	低气压、高温、低温、湿度、雨、雾、沙尘、风、太阳辐射等
任务实施	低气压、高温、低温、湿度、雨、雾、沙尘、风、太阳辐射等

1.2 自然环境影响效应

1) 低气压环境对装备的影响主要有:装备的发动机、柴油机输出功率显著下降,导致燃油消耗量增大。有研究表明,平均海拔每升高1 km,车辆发动机最大功率下降10%^[3]。装备柴油发动机的启动性能降低,有些柴油发动机必须进行加温后才能启动,例如,某地面车辆在环境温度20℃时,加温15~30 min,将水温加到70℃以上,发动机才能正常启动^[4]。发热量较大的部组件因热传导性能降低而发生过热^[5],例如,雷达发射机工作中发热量大,在低气压环境中其散热会

受影响。制氮充氮设备空气压缩机的产气量随海拔高度增加会减少。有密封要求的产品密封性能失效。电子产品空气绝缘耐压降低,特别是对雷达设备而言,低气压对其影响尤为显著。一般情况下,在海拔0~5 km范围内,气压每降低12%(相当于海拔增高1 km),电晕电压和外绝缘强度降低8%~13%^[6]。

2) 高温环境对装备的影响主要有:设备过热,使参数发生漂移,元件损坏,低熔点焊锡断裂。特别是大功率电子管,由于散热不良,引起寿命缩短或损坏^[7]。半导体器件受高温影响较大,主要表现在对放大倍数及穿透电流的影响。绝缘材料的绝缘性能降低,温度升高使绝缘电阻显著下降,因而电机、变压器、电容器等绝缘较易击穿。润滑脂黏度下降,易于流失,影响机械的润滑^[8]。构成装备各部分的材料不完全相同,不同材料的线膨胀系数不同,在高温时会发生变形,造成配合关系变化,以致结构被破坏。非金属材料中的易挥发物质挥发将加速其老化和失效。车辆制动性能下降,特别是液压制动的车辆,制动液在高温下可能会产生气阻现象,影响行车安全^[9]。

3) 低温对装备的影响主要为:柴油发电机的启动时间加长。油液黏度增加、流动性降低。例如液晶显示器在低温下容易出现显示不连续等问题;轴承等转动部件摩擦增大,导致电机不易启动,天线、发射装置的随动系统转动困难。电子元器件参数发生漂移,例如闸流管不易启辉,电子管参数改变,导致设备参数不稳定。非金属材料发生硬化和脆化,例如某些非金属密封圈不能适应低温环境,出现老化,密封性能下降,油液泄漏。受约束的玻璃产生静疲劳。

4) 潮湿对装备的影响主要为:高湿环境下车辆装备容易锈蚀,紧固零件锈蚀严重时,出现拆卸困难,影响维修;腐蚀物可使元件卡死,线路容易短路;元器件焊点腐蚀而导致短路或电气性能改变;陶瓷、玻璃等绝缘体表面的绝缘电阻下降;非金属材料的体积膨胀变形、老化变质等。

5) 降雨对导弹地面装备的影响主要为:干扰或破坏无线电通讯,例如,导弹地面装备各车辆之间以及与上级的通讯可能会受降雨影响;限制雷达的有效性;降低光学装置的能见度,例如降低瞄准设备的瞄准性能;雨点的扑击会冲蚀产品表面;若舱体密封性能差,雨水就会浸入装备内部,可引起电气设备失效。

6) 太阳辐射引起的环境效应分为热效应和光化学效应,热效应对装备的影响已在高温环境中进行了分析,光化学效应对装备的影响一般表现为材料性能

劣化、塑料颜色变色、涂层开裂、粉化、起泡、脱落、生锈等。

7) 风对装备的影响主要为:发射架载弹状态不稳,影响瞄准精度;影响雷达天线正常启动和旋转速度;可使装备发生倾覆;引起结构变形或激起结构共振,造成损坏。

8) 砂尘对装备的影响主要为:砂尘环境中装备的光学特性受影响,例如瞄准设备的瞄准精度降低;无线电通讯受干扰;使装备表面磨损和磨蚀,例如砂粒进入发动机,造成机件磨损、油路阻塞,烧坏零部件,使发动机熄火^[10];密封渗漏;电路性能劣化;开口和过滤装置堵塞;活动部件卡住或受阻碍。

9) 雾对装备的影响主要表现为:能见度降低,造成观察、瞄准困难;影响装备机动性能等。

10) 霉菌对装备的影响主要表现为:霉菌造成的侵蚀可导致电气或电子系统的损坏;对光学系统中光的传播能产生负面影响,特别是在光学部件表面敷有由高分子材料构成的膜,例如瞄准系统和发射箱的瞄准镜易受霉菌影响,从而降低瞄准精度;阻塞精密活动部位;使干燥表面变潮湿并伴随性能的下降。

11) 盐雾可能导致装备产生的电气效应有:盐沉积

物会导致电气设备的损坏^[11];产生导电的覆盖层,对绝缘材料及金属造成腐蚀^[11]。物理效应主要有:使天线、转台等机械部件和组件的活动部分阻塞或卡死;舱体、柜体等表面的涂层可能会由于电解作用而发生起泡。

2 自然环境适应性评价方法

2.1 评价方法概述及选用原则

2.1.1 评价方法概述

环境适应性评价方法主要包括直接评价法、相似产品法、相关性评价法、试验评价法和长期监测法^[12],见表2,在研制过程中主要应用以上方法对导弹地面装备进行自然环境适应性评价。其中相似产品法适用于所有自然环境因素,利用该方法时应获得以往相似装备的自然环境数据,在此基础上对新老装备的结构和功能、环境适应性要求、各种环境因素的敏感件、材料及生产工艺、以及服役环境条件等方面进行综合对比。如果新装备中的环境敏感设备与老装备相比进行了设计改进,或者老装备的环境要求低于新装备,则不可采用相似产品法进行评价。因此在下面的

表2 环境适应性评价方法^[13]
Table 2 Evaluation methods of environmental worthiness

评价方法	概念内涵	适用范围
直接评价法	根据环境适应性基础数据评价产品的环境适应性。	适用于评价货架产品的环境适应性,装备设计过程中,经常会根据需要进行选择已知性能的货架产品,这部分产品是否适应装备未来的贮存和服役环境,需要利用已有的环境适应性基数据,结合装备环境适应性要求进行评估。
相似产品法	利用相似装备的服役故障数据、环境试验数据和规律,与新装备进行对比或试验对比,以评定新装备的环境适应性。	适用于继承性较强的装备。
相关性评价法	利用自然环境试验与模拟加速试验之间的相关关系评价样品的环境适应性。	适用于研制过程中已开展了加速试验的产品。
试验评价法	将装备置于典型自然环境、人造环境或使用环境中,考核与验证装备经受这些环境的作用后的性能变化、功能影响,是常用的环境适应性评价方法(包括自然环境试验评价法、实验室环境试验评价法、部队试验评价法和仿真试验评价法等)	自然环境试验评价法适用于受试验平台、装备尺寸、其它客观因素和经费等限制,无法采用实验室环境试验或仿真试验等其它评价方法的环境因素。例如,砂尘、风、雾等环境。 实验室环境试验评价法适用于已模拟实际环境在实验室开展了环境试验的装备。 部队试验评价法适用于使用部队直接对装备在实际使用环境中的作战效能、各项要求达到的程度和部队使用的适用性进行考核。 仿真试验评价法适用于具备环境仿真条件的环境因素,例如,可利用有限元分析软件对温度、风等环境进行仿真。
长期监测法	在装备使用/贮存过程中,对装备进行监测和必要的试验考核,以监测其性能劣化过程,对装备的环境适应性进行系统评价。	适用于研制过程中在短期内无法全面地对产品的环境适应性进行评价的环境因素,例如霉菌、盐雾等。

各种环境因素评价中不再对相似产品法进行阐述。

2.1.2 选用原则

- 1) 对于所有的环境因素,试验评价法和长期监测法是最具有说服力的评价方法,其中试验评价法中的实验室环境试验评价法和仿真试验评价法的试验周期一般较短,可优先采用。
- 2) 自然环境试验评价法、部队试验评价法以及长期监测法的试验周期一般较长,但能够更加真实地反映装备的环境适应水平,因此可根据装备研制的实际情况进行选取。
- 3) 对于相关性评价法,目前对一些非金属材料的

- 模拟加速试验技术较为成熟,对于组成较为复杂的产品而言,其加速模型较难确定,因此使用相关性评价的原则是已经选出某产品中的某种材料为环境适应性短板,然后主要针对该种材料进行加速试验,从而根据试验结果对某产品的环境适应性进行评价。
- 4) 对于继承性较高的产品,由于其在以往研制中已经获得了较多的环境适应性数据,因此应优先考虑采用直接评价法或相似产品法。
- 2.2 自然环境适应性评价
- 各种自然环境的评价方法见表3。

表3 导弹地面装备自然环境的评价方法
Table 3 Evaluation methods of natural environment factors of missile surface equipment

环境因素	评价方法	重点评价对象
低气压	自然环境试验评价法、实验室环境试验评价法、直接评价法、相似产品法	发动机、柴油机、发热量较大的部组件、密封产品等
温度	实验室环境试验评价法、自然环境试验评价法、相似产品法	高温:液压制动的车辆、大功率电子管、半导体器件、绝缘材料、非金属材料等;
湿度	实验室环境试验评价法、自然环境试验评价法、相似产品法	低温:柴油发电机、液晶显示器、轴承、非金属材料等
雨	实验室环境试验评价法、自然环境试验评价法、相似产品法	电子线路、陶瓷、玻璃等绝缘体
太阳辐射	实验室环境试验评价法、相似产品法	无线电通讯、雷达、瞄准设备、舱体等
风	自然环境试验评价法、仿真试验评价法、相似产品法	塑料、橡胶、表面涂层等
沙尘	自然环境试验评价法、实验室环境试验评价法、相似产品法	雷达天线、重心较高的车辆装备等
雾	自然环境试验评价法、相似产品法	瞄准设备、发动机、密封件、活动部件等
霉菌	自然环境试验评价法、实验室环境试验评价法、长期监测法、相似产品法	瞄准设备等
盐雾	自然环境试验评价法、实验室环境试验评价法、长期监测法、相似产品法	电气或电子系统、瞄准设备等光学系统、精密活动部件等 电气设备、绝缘材料、机械活动部件、表面涂层等

2.2.1 低气压

- 装备的低气压环境可采用自然环境试验评价法、实验室环境试验评价法、直接评价法等进行评价。
- 1) 自然环境试验评价法就是通过选择合适的高原地区对装备开展高原试验的方式进行评价,试验中各分系统都应处于工作状态。如果由于各方面因素限制无法采用自然环境试验评价法时,可采用单机实验室环境试验评价法和相似产品法进行评价。
- 2) 利用单机实验室环境试验评价法时,可仅对低气压敏感产品开展实验室试验。
- 3) 直接评价法就是利用高原适应性基础数据,对装备中的低气压敏感设备或部件进行分析,根据2.2.1节所列敏感特性,获得具体产品的高原环境适应数据,从而对装备的高原环境适应性进行评价。

2.2.2 温、湿度环境

装备的温、湿度环境可采用实验室环境试验评价

- 法、自然环境试验评价法等进行评价。
- 1) 目前实验室试验设备具备开展车辆温度和湿度试验的能力,因此导弹地面装备的温度和湿度环境可利用实验室环境试验评价法进行评价,该方法是最直接有效的评价方法。对于车辆在高温下的制动性能还应利用自然环境试验评价。另外往往由于试验经费、项目管理、研制周期等因素影响无法利用实验室环境试验评价法时,可采用单机实验室试验评价法、自然环境试验评价法、相似产品法进行评价。
- 2) 利用单机实验室环境试验评价法时,仅对研制产品和没有温湿度基础数据的产品开展实验室试验,试验后利用试验数据和外购产品的温湿度数据对装备的温湿度适应能力进行评价。
- 3) 自然环境试验评价法就是将装备暴露于极端高温、极端低温、高湿地区的实际环境中,并记录暴露期间的温湿度、故障情况等数据,根据记录结果对装

备的温湿度环境适应性进行评价。

2.2.3 雨

装备的雨环境评价可采用实验室环境试验评价法、自然环境试验评价法。

实验室环境试验评价法是对淋雨环境最直接有效的评价方法,但受制于实验室高度、密闭性等因素,对于天线车、雷达车、发射车等在执行任务过程中需进行俯仰、起竖、旋转动作,需要通讯的装备以及瞄准系统来说,无法在实验室对其工作状态的雨环境适应性进行考核和评价。因而需根据气象预报择机将装备暴露于实际自然环境条件中采用自然环境试验评价法进行考核评价。装备的淋雨指标要求一般为定量的数值,而气象预报一般仅给出降雨等级:小雨、中雨、大雨、暴雨和大暴雨,因此在实际自然环境条件下仅能对装备工作状态雨环境适应性进行半定量化的考核。表4给出了降雨等级与降雨强度的关系,可供参考。

表4 降雨等级与降雨强度换算表^[14]

Table 4 The conversion table of precipitation level and precipitation intensity

降雨等级	降雨强度/(mm·h ⁻¹)	平均雨滴尺寸/mm
小雨	0.25~1.0	0.1~0.5
中雨	1~15	0.5~1
大雨	15~40	1~2
暴雨	40~100	2~5
大暴雨	>100	>5

2.2.4 太阳辐射

太阳辐射的热效应和光化学效应一般都是通过实验室环境试验评价法进行评价。

1) 对装备的热效应评价一般是将其与高温试验结合在一起进行,即在装备的高温试验温度基础上增加一定的裕量在实验室进行试验。周围温度为30~40℃时,若完全暴露于太阳辐射条件下,试件达到的温度可超过60℃^[15]。试验后根据装备在试验中发生的故障情况、测试结果等因素对热效应进行评价。

2) 根据光化学效应的影响效应,装备的该种效应主要是针对材料样片、涂层样片等进行实验室试验,而不对整个装备、设备或组件进行试验。光化学效应试验后根据受试样片表面发生变色、粉化、裂纹、起泡、脱落、生锈等现象的程度^[16],对各种现象进行等级评定,等级评定方法可参照GB/T 1766—2008《色漆和清漆 涂层老化的评级方法》,然后根据使用方与承制方约定的接受等级对装备的光化学效应进行评价。

2.2.5 风

装备的风环境可采用自然环境试验评价法与仿真试验评价法相结合的方式进行评价。

1) 风环境的自然环境试验评价法是根据气象预报择机将装备暴露于实际自然环境中对瞄准精度、雷达天线的启动和旋转性能以及抗倾覆能力进行考核,气象预报一般仅给出风力等级,但装备的抗风能力指标一般为风速,表5给出了风力等级与风速的对应关系,可供参考。试验后根据装备的瞄准精度是否满足要求,旋转部件是否正常启动,旋转速度是否满足要求,是否发生倾覆、结构变形、设备损坏、固定支架断裂等方面对装备的抗风能力进行评价。如果因气候环境等各种因素限制无法在自然环境条件下对抗风能力进行考核,或者装备所经历的实际风速不满足要求时,可通过仿真试验评价法和相似产品法对装备的抗风能力进行评价。

表5 风力等级与风速换算^[18]

Table 5 The conversion table of wind scale and wind speed

风力等级	风的名称	风速/(m·s ⁻¹)	风速/(km·h ⁻¹)
0	无风	0~0.2	小于1
1	软风	0.3~1.5	1~5
2	软风	1.6~3.3	6~11
3	微风	3.4~5.4	12~19
4	和风	5.5~7.9	20~28
5	清劲风	8.0~10.7	29~38
6	强风	10.8~13.8	39~49
7	疾风	13.9~17.1	50~61
8	大风	17.2~20.7	62~74
9	烈风	20.8~24.4	75~88
10	狂风	24.5~28.4	89~102
11	暴风	28.5~32.6	103~117
12	飓风	32.7~36.9	118~133
13	飓风	37.0~41.4	134~149
14	飓风	41.5~46.1	150~166
15	飓风	46.2~50.9	167~183
16	飓风	51.0~56.0	184~201
17	飓风	56.1~61.2	202~220

2) 仿真试验评价法是通过建立装备三维模型,将风载荷谱作为外加载荷作用于装备,通过动力学仿真计算得到装备在静态、工作状态、旋转状态(如雷达车、天线车)和最高时速等工况下发生倾覆、结构变形、支架断裂、旋转部件无法正常启动时的临界风载

荷,然后根据风载荷与风速之间的函数关系得到不同工况下的临界风速^[17],从而可对装备在各种工况下的抗风能力进行评价。

2.2.6 沙尘

装备的沙尘环境可采用自然环境试验评价法与实验室环境试验评价法相结合的方式进行评价。

1) 自然环境试验评价法是对装备的定性评价方法,主要是根据气象预报择机进行,试验后对装备进行功能和性能测试,检查活动结构是否受阻碍、开口/过滤装置是否堵塞、密封结构是否发生渗漏、光学部件等是否正常工作。

2) 实验室环境试验评价法是对沙尘敏感部组件的定量评价方法。受制于试验设备尺寸限制,只能对体积较小设备开展实验室环境试验,因此实验室环境试验评价法主要是针对含有活动结构的设备、开口/过滤装置、密封结构、光学部件等敏感产品。试验时可按规定的砂/尘浓度设定试验条件,试验结果评定可根据试验中和试验后对受试产品的检测结果,也可在试验后将各受试设备或组件集成到整个装备上进行检测,以对装备的沙尘环境适应能力进行全面评价。

2.2.7 雾

装备的雾环境评价可采用自然环境试验评价法。雾环境的自然环境试验评价法是根据气象预报择机将装备暴露于实际自然环境中对瞄准系统的瞄准精度进行考核^[19]。

2.2.8 霉菌、盐雾

装备霉菌和盐雾环境适应性的体现不仅是其在使用环境中正常工作,还体现在其材料、构件等的物理特性长期受环境影响的变化情况,如腐蚀、老化、劣化、性能退化情况。因此,利用自然环境试验和实验室环境试验,再结合装备在实际使用和贮存中的长期监测,对霉菌和盐雾环境适应性进行综合评价,是最为合理的评价方法。

1) 自然环境试验评价法和长期监测法相结合是将装备长期暴露于具有典型气候环境的区域,定期对装备的劣化状态进行监测,该评价方法能够较为真实地反映装备的环境适应性。

2) 利用实验室环境试验评价法时,试验对象可以是整机产品,但是,一方面霉菌和盐雾试验的破坏性较强,试验后可能影响产品使用;另一方面单独投产一套产品开展该类试验成本较高,因此常选用样件进行试验^[20]。选用样件进行试验时应尽量覆盖产品上具有代表性的印制板、结构件、壳体、运动部件、接插件、密封材料、绝缘材料、电缆部件等各类金属件和非金

属件。试验后对试验结果的评定方法为:对于实验室霉菌试验,试验后根据霉菌的颜色、覆盖面积、生长形式和生长密度等生长情况对产品外观进行评级,评级方法可参照 GJB 150A—2009《军用装备实验室环境试验方法》,然后根据使用方与承制方约定的接受等级对装备的霉菌环境适应性进行评价,对于整机产品还需根据试验后测试结果进行评价。对于实验室盐雾试验,试验后根据受试品表面发生腐蚀、失光、变色、起皮剥落等现象的程度,对各种现象进行等级评定,等级评定方法可参照 GB/T 6461—2002《金属基体上金属和其他无机覆盖层 经腐蚀试验后的试样和试件的评级》,然后根据使用方与承制方约定的接受等级对装备的盐雾环境适应性进行评价,对于整机产品还需根据试验后测试结果进行评价。

3 结语

导弹地面装备的自然环境适应性评价是一个非常复杂的过程,是一个将实验室试验、自然环境试验、模拟加速试验、仿真试验与取得的各种数据等信息进行综合分析、判断,并对装备寿命周期内各阶段环境适应性因素做出决策的评估评价过程。为提高装备的环境适应性评价水平和可信度,应重视装备研制过程中以及交付部队后各种自然环境数据的收集、整理和分析,应尽量在系统级产品进行环境试验验证,以对装备的自然环境适应性进行更加合理的评价。

参考文献:

- [1] GJB 4239—2001, 装备环境工程通用要求[S].
GJB 4239—2001, General Requirements for Materiel Environmental Engineering[S].
- [2] 郑卫东,冯东辉. 舰船武器装备环境适应性技术[J]. 舰船科学技术, 2007, 29(1): 56—59.
ZHENG Wei-dong, FENG Dong-hui. Environmental Adaptability Technology of Ship Weapon Equipments[J]. Ship Science and Technology, 2007, 29(1): 56—59.
- [3] 王坚,王保贵,张晨,等. 高原气候环境对装备影响及适应性措施[J]. 环境技术, 2013(6): 25—28.
WANG Jian, WANG Bao-gui, ZHANG Chen, et al. Countermeasures on Influence of Plateau Climate Environment on Equipment and Its Environmental Worthiness[J]. Environmental Technology, 2013(6): 25—28.
- [4] 卢亚辉,张晶,王微. 高原环境对装甲车辆动力系统性能影响机理研究[J]. 环境技术, 2014(4): 62—65.
LU Ya-hui, ZHANG Jing, WANG Wei. Plateau Environment

- Effect Mechanism Research on Armored Vehicle Dynamic System Performance[J]. Environmental Technology, 2014(4): 62—65.
- [5] 于洋. 简谈低气压环境对产品的影响及低气压试验方法标准的应用[J]. 环境技术, 1999(4): 24—25.
YU Yang. The Effect of Low Pressure Environment and the Application of Low Pressure Test Method for the Product[J]. Environmental Technology, 1999(4): 24—25.
- [6] 俞一鸣, 赵广彤. 高原环境对防空武器装备的影响及改进措施[J]. 现代防御技术, 2011, 39(2): 172—175.
YU Yi-ming, ZHAO Guang-tong. Performance of Antiaircraft Weapon Equipment Influenced by Plateau Environment and its Improvement Measures[J]. Modern Defence Technology, 2011, 39(2): 172—175.
- [7] 蔡良续, 龙德中, 宋小燕. 温度环境试验及其标准综述(一) 温度对装备的影响及温度试验的重要性[J]. 环境技术, 2004(4): 93—96.
CAI Liang-xu, LONG De-zhong, SONG Xiao-yan. Review of Temperature Tests and Relevant Standards (Part One) Influence of Temperature on Equipment and Importance of Temperature Tests[J]. Environmental Technology, 2004(4): 93—96.
- [8] 杨森, 李曙林. 环境对军用飞机的影响及适应性对策[J]. 装备制造技术, 2008(2): 49—55.
YANG Sen, LI Shu-lin. Influence of Environment on Military Aircraft and Adaptability Strategy[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2008(2): 49—55.
- [9] 赵世宜, 霍东芳, 任杰, 等. 高温高湿环境对车辆装备的影响及防护对策[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 72—74.
ZHAO Shi-yi, HUO Dong-fang, REN Jie, et al. Influence of High Temperature and Humidity Environment on Vehicle and Its Protection Countermeasures[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(1): 72—74.
- [10] 祝耀昌. 产品环境工程概论[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003.
ZHU Yao-chang. Introduction of Product Environmental Engineering[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003.
- [11] 柳爱利, 寇方勇. 海洋环境对舰载导弹贮存可靠性影响分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2013, 28(3): 285—288.
LIU Ai-li, KOU Fang-yong. Analysis of Storage Reliability of Shipborne Missiles in Marine Environment[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical, 2013, 28(3): 285—288.
- [12] 胥泽奇, 张世艳, 宣卫芳. 装备环境适应性评价[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 54—59.
XU Ze-qi, ZHANG Shi-yan, XUAN Wei-fang. Environmental Worthiness Evaluation of Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(1): 54—59.
- [13] 朱辉. 电子信息装备环境适应性评价探讨[J]. 电讯技术, 2014, 54(2): 212—217.
ZHU Hui. Discussion on Environmental Worthiness Evaluation of Electronic Information Equipment[J]. Telecommunication Engineering, 2014 54(2): 212—217.
- [14] GJB 150, 《军用装备实验室环境试验方法》实施指南[S].
GJB 150, "Environmental Test Methods for Military Equipment" Implementation Guidelines[S].
- [15] GJB 150A—2009, 军用装备实验室环境试验方法[S].
GJB 150A—2009, Laboratory Environmental Test Methods for Military Materiel[S].
- [16] GB/T 1766—2008, 色漆和清漆 涂层老化的评级方法[S].
GB/T 1766—2008, Paint and Varnish—Rating Schemes of Degradation of Coats[S].
- [17] 王宏伟, 赵云峰, 陶帅. 装备全寿命周期环境适应性评价若干问题探讨[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1): 70—72.
WANG Hong-wei, ZHAO Yun-feng, TAO Shuai. On Environmental Worthiness Evaluation during Whole Life Cycle of Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(1): 70—72.
- [18] GB/T 28591—2012, 风力等级[S].
GB/T 28591—2012, Wind Scale[S].
- [19] GJB 3105—97, 战略导弹武器系统性能评定方法[S].
GJB 3105—97, Assessment Methods for Strategic Missile Weapon System Performances [S].
- [20] 王晓慧, 王丽. 武器装备防霉措施和试验技术探讨[J]. 航空标准化与质量, 2003, 2: 38—42.
WANG Xiao hui, WANG Li. Discussion on Measures and Test Technology of Weapon Equipment Mould Prevention[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2003, 2: 38—42.