

国内外动态自然环境试验技术发展现状

朱玉琴^{1,2}, 陈源^{1,2}, 张燕¹, 文邦伟^{1,2}

(1. 西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2. 环境效应与防护重庆市重点实验室, 重庆 400039)

摘要: 针对常规静态自然环境试验, 明确给出了动态自然环境试验的定义及分类, 在此基础上详细阐述了国内外海上动态和陆上动态两方面的自然环境试验技术发展现状, 目前国外已取得丰硕研究成果, 国内处于起步探索阶段。通过国内外对比分析, 提出了我国今后在动态自然环境试验技术发展方面的对策建议。

关键词: 动态自然环境技术; 海上动态; 陆上动态

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.06.016

中图分类号: TJ01 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)06-0093-07

Current Status of Dynamic Natural Environmental Test Techniques at Home and Abroad

ZHU Yu-qin^{1,2}, CHEN Yuan^{1,2}, ZHANG Yan¹, WEN Bang-wei^{1,2}

(1. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China;

2. Chongqing Key Laboratory for Environmental Effect and Protection, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The definition and types of dynamic natural environmental test were put forward and the current status of shipboard dynamic and vehicle dynamic natural environmental test techniques were expatiated. Currently foreign countries have achieved fruitful research results, however, China is still in the initial stage of exploration. Through comparative analysis in China and foreign countries, the countermeasures and suggestions of dynamic natural environmental test techniques in our country in the future were proposed.

KEY WORDS: dynamic natural environmental test techniques; shipboard dynamic; vehicle dynamic

美国的军事理念是着眼全球, 在全世界范围内同时打赢两场战争, 这就要求装备需要在世界各个地方之间进行转运、贮存、使用, 这必然会遭遇跨地域、跨国域、跨海域复杂环境因素的作用和影响, 为此国外开展了大量的动态自然环境^[1-7]。国内在装备(产品)的环境适应性研究方面, 针对静态自然环境试验与实验室加速试验已开展了大量的基础研究^[8-15], 并取得

了丰硕的研究成果, 但针对动态自然环境试验, 目前才逐步开始试验, 取得了部分阶段性成果。

1 定义及分类

动态自然环境试验是为了模拟装备(产品)实际使用状态, 借助船舶、车辆等移动平台, 通过在1种或几种

收稿日期: 2015-06-13; 修订日期: 2015-07-08

Received: 2015-06-13; Revised: 2015-07-08

作者简介: 朱玉琴(1983—), 女, 青海西宁人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为环境试验与评价。

Biography: ZHU Yu-qing(1983—), Female, from Xining, Qinghai, Master, Engineer, Research focus: environmental testing and evaluation.

自然环境条件下运行,利用环境条件变化,加速考核其对产品及材料、工艺、构件性能的影响,从而开展的环境适应性试验与研究。动态自然环境试验相对于静态自然环境试验,针对装备需要在世界各个地方之间进行转运、贮存、使用,会遭遇跨地域、跨国域、跨海域的复杂环境因素的作用和影响更加贴近。根据平台类型不同,动态自然环境试验主要分为海上动态自然环境试验和陆上动态自然环境试验两类。

2 国外技术发展现状

2.1 海上动态自然环境试验

2.1.1 水面舰艇环境

水面舰艇常年在海上游弋,且海域宽广,常跨越多个气候带,不断遭受海浪、盐雾、海水飞溅及飞机引擎排放物等的侵袭,针对水面舰艇飞行甲板表面凝结的水蒸气成分及酸碱度分析结果,水蒸气中含有硫离子,且pH呈酸性,这意味着水上舰艇既具有海洋环境又具有工业环境^[16]。

2.1.2 试验材料

在试验中,多种材料被用于评估,包括第一代铝锂合金,20世纪50年代用于RA-5C舰载机的2020合金、现役的F/A-18大黄蜂战机的铝锂合金,同时也包含新一代的铝锂合金,如2090和8090。目前开展过的试验材料包括:17-4PH不锈钢、4130钢、1420&1421铝锂合金、2090&8090铝锂合金、7075-T6/T651/T7351铝合金、2024-T3铝合金、7249-T76铝合金、2124厚板-T851/T351铝合金、7075挤压件铝合金、7178薄板-T6铝合金、俄制合金等。其中一类试样尺寸为75 mm × 150 mm^[17-19]。

2.1.3 试样放置

试样用塑料螺钉固定在支架上,如图1所示。支架与地面成45°角安装,并被焊接在飞行甲板上面2.1~2.4 m高的雷达工作台上。根据特殊要求,其中一些水上舰艇,试验支架被安装在飞行甲板上方的3.6~4.2 m高处,如图2所示^[20]。

2.1.4 水面舰艇上的暴露试验

样品搭载完成便由执行任务的水面舰艇开往各个海域开展相关试验,各水面舰艇的试验地域和持续时间如下^[16,21]。

1) 水面舰艇从美国弗吉尼亚州出发,开往印度洋海域,之后返回,为期1年。

2) 核动力水上舰艇7—12月部署在地中海,第二

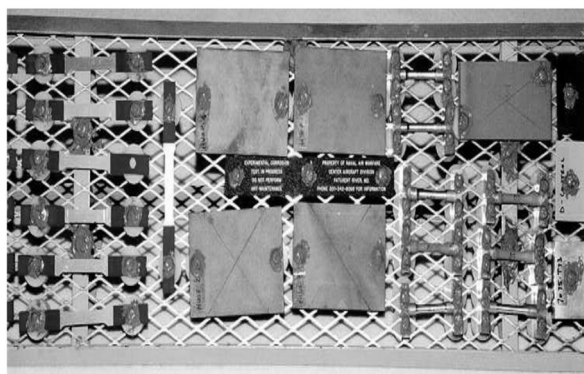


图1 试验架与试样安装

Fig.1 Shipboard rack for test and installation of the test sample

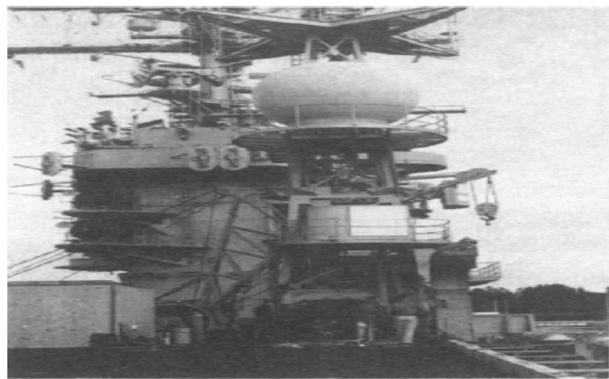


图2 试验支架的安装位置

Fig.2 The location of the rack on the aircraft carrier

年7—12月部署在印度洋,未进行中间检查,历时10个月后水上舰艇返回后取走试样。

3) 肯尼迪号:部署在地中海历时8个月,4个月之后检查试样,8个月后返回并取走试样。

4) 星座号:部署在西太平洋和印度洋,时间为2—10月,未进行中间检查,历时8个月后取走试样。

5) 尼米兹号:部署在西太平洋和印度洋,试验时间为5年。

6) 游骑兵号:部署在西太平洋及波斯湾,试验时间为4个月。

2.1.5 加速试验

为了与自然环境暴露试验数据进行对比,同时也开展了实验室加速试验。实验室加速试验采用的是二氧化硫盐雾试验,按照ASTM盐雾/二氧化硫试验的实施细则进行(如ASTMG85 A4)^[22]。试验在质量分数为5%的氯化钠盐雾中进行,同时通SO₂气体,采用每天喷4次,每次1 h(每隔6 h喷1次)。盐雾箱暴露区温度保持为35℃,样品按底部支撑45°角进行摆放。

试验实施时间为4周,如若腐蚀严酷时间会大大缩短。

2.1.6 样品结果检测

试验结束后对试样进行检测,检测性能包括剥离腐蚀程度 (ASTM G34-79)^[23]、力学性能 (极限抗拉强度、屈服强度、伸长率)等,7075-T6的剥离腐蚀情况如图3所示,腐蚀评级结果如图4所示。

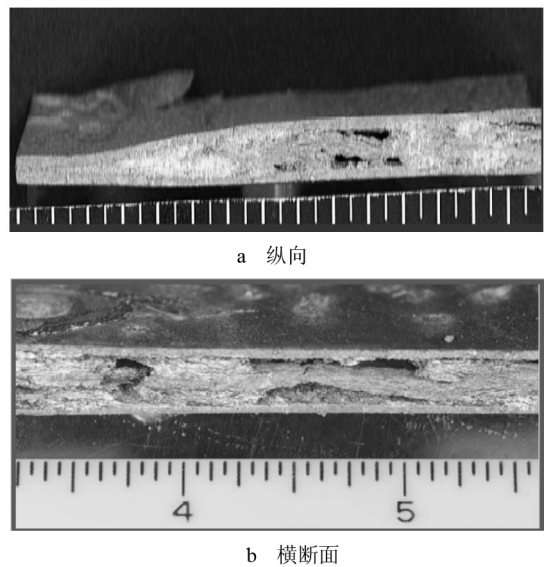


图3 铝合金 7075-T6剥离腐蚀
Fig.3 Exfoliation corrosion of aluminum 7075-T6

Material	Thickness(cm)	Plane	Rating
707i-T651 Plate	2.5	T/10	EA
7075-T43 Plate	2.5	T/2	ED
7075 RRA Plate	2.5	T/10	EA
7150-T651 Plate	1.2	T/2	EA
7150-T7E95	1.2	T/2	EA
7150-T7651	1.2	T/2	EA
2020-T651	2.5	T/10	EA
2090-T8E41 Plate	1.2	T/2	EA
8090-T8 Plate	5.06	T/10	EA
CW67 Plate	0.6	T/2	EA
CW67 Plate	2.54	T/2	EA
CW78 Plate	1.2	T/2	EA
7064-B1 Plate	1.2	T/10	EA
2519 (Plate)	1.2	T/2	EA
2519 (Plate)	1.2	T/10	EA

* Less than EA

图4 尼米兹号上暴露5年后的腐蚀评级
Fig.4 Exfoliation rating of aluminum alloys exposed on the USS Nimitz (Five-Year Span)

2.1.7 对比分析

1) 二氧化硫盐雾试验能够贴切地模拟水面舰艇环境。通过对试验结果对比分析,二氧化硫盐雾粒子能够较好地模拟航空材料在水面舰艇上的腐蚀行

为。7075-T6, 2024-T3, 7249-T76 三种铝合金实验室加速试验和船上暴露后极限抗拉强度和延伸率的比较如图5所示。

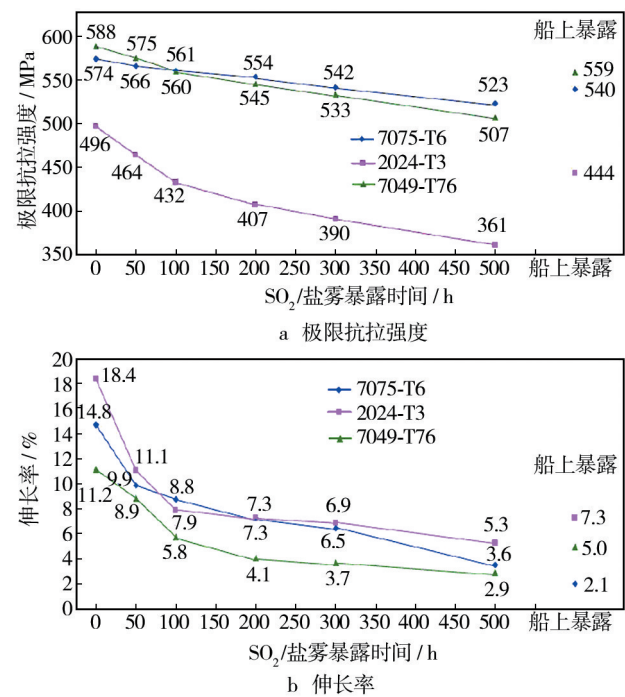


图5 实验室加速试验与船上暴露试验结果比较
Fig.5 Comparison of results of accelerated laboratory tests and shipboard exposure tests

2) 水面舰艇甲板测试项目显示,水面舰艇环境比海岸和工业环境更为严酷。2124-T6 铝板在水面舰艇、海滨和工业条件下暴露5年的腐蚀程度比较如图6所示。2124-T6 铝板在水面舰艇环境仅0.5年腐蚀就已达严重程度,表明水面舰艇环境非常严酷。

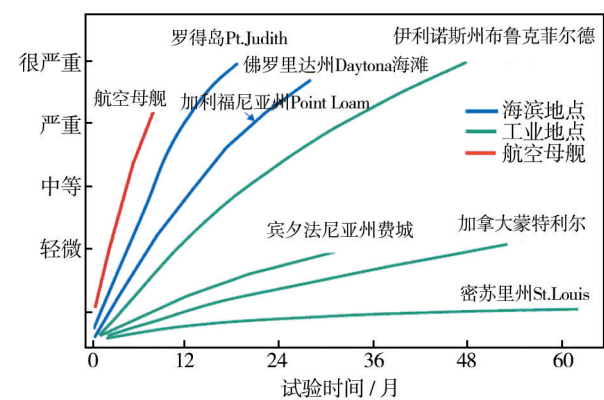


图6 水上舰艇、沿海及工业环境腐蚀性对比分析
Fig.6 Comparison of corrosion on shipboard, along the coast and in industrial environment

2.2 陆上动态自然环境试验

1) 维也纳环境试验中心车辆动态试验。维也纳环境试验中心可开展温度、湿度、风速、淋雨、降雪、太阳辐射等气候模拟,该中心除可进行常规的静态试验外,还可模拟车辆运行进行动态试验。如风洞中车辆在双波滚动试验台上模拟运行时,伴随着风、雪及冰的施加,可测量车辆转向架的主要部件在恶劣环境条件下的失效情况^[24]。

2) 储油罐底外边缘板的动态试验。研究人员进行了油罐外边缘板在混凝土基座上相对位移变化的测试,继而开展了罐底外边缘板动态试验。在白天太阳辐射下,由于钢基与混凝土基的导热系数相差很大,两者之间形成温度差,这种温差导致的热膨胀使得罐底板在基座上沿水平方向发生位移。如在冬季,油罐负载时,静液压作用使得罐体沿水平方向向外扩张,而边缘板与罐底连接,无法向外扩张而产生塑性变形,卸载后边缘板无法完全恢复原状而向上翘起,上翘变形的罐底边缘板造成罐底边缘板与基座之间缝隙扩大^[25]。

3) 美国装甲车辆动态试验。美国为弄清海军陆战队车辆经历的腐蚀环境,以及影响延期贮存可能的情况,开展了车辆状况跟踪研究,包括车辆停放—训练—停放三阶段的实际状态,以再现车辆真实的腐蚀环境和量化车辆的腐蚀效应。

3 国内技术发展现状

3.1 海上动态自然环境试验

选择厦门或南京港发往美洲或非洲单程航行距离在3000 km以上的定线货运船舶作为海洋移动平台,试验中定期采集试验船舶《航海日志》上的有关数据信息,包括气象海况数据(干湿球气温、海水温度、风向/风级、波浪等级)、航行纪录(航向、实测航速、计程仪读数、天气现象)、经纬度、昼夜航程、昼夜平均航速、航行时间、累计实际航程、日出/日落时间等相关数据;定期对返港材料进行腐蚀性能测试,包括涂层试样的光泽、色差、厚度及裸材试样的腐蚀形貌与力学性能等相关数据。研究掌握环境动态变化规律及材料性能退化规律,同时与我国典型海洋大气环境及该环境下材料的腐蚀性能进行对比分析,以此得到常规静态试验与动态试验之间的关联性^[26—27]。

3.2 陆上动态自然环境试验

1) 定线班车动态试验。选择重庆开往广州单程行驶距离在1000 km以上的国内长途定线班车作为陆上移动平台,试验中通过行驶线路上主要县市的气象台/站采集环境因素,包括温度、湿度、降雨、风速等数据;定期对返回重庆的材料进行腐蚀性能测试,包括涂层试样的光泽、色差、厚度及裸材试样的腐蚀形貌与力学性能等相关数据。研究掌握环境动态变化规律及材料性能退化规律,同时与我国典型工业大气环境及该环境下材料的腐蚀性能进行对比分析,以此得到常规静态试验与动态试验之间的关联性。

2) 德尔福高原发动机标定试验。德尔福开展“三高”试验的地点有:海南岛、重庆及新疆吐鲁番(夏季高温标定)、内蒙古加格达奇市及黑龙江黑河(冬季高寒标定)、云南中甸、青海昆仑山口、西藏及四川川西(高原标定)。标定试验主要是在符合测试条件的路段上,使发动机负荷状态和驾驶员操作模式形成不同组合来完成整个试验。在试验的整个过程中,用安装在发动机不同部位的多种传感器与安装了特殊分析软件的便携式电脑相配合,在车辆本身的电控单元(ECU)的协助下,对发动机的转速、进排气工况、车速、水温、燃烧、油耗等众多相关参数进行全程数据采集^[28]。

3) 发电车空调组运行试验。为了摸清在环境温度较高时,发电车空调机组制冷系统中的高压继电器动作保护的原因,研究人员对KLP5.0, KLP4.7和KTC-2027等三种型号空调机组进行了动态试验^[29],见表1。结果表明,空调机组安装在发电车上的工作环境温度比外温高0.51~11.6℃。从试验数据与车速的对应关系看,空调机组冷凝器的进风温度与车速有关,车速越高,进风温度也越高。当车速较低或静止时,冷凝器进风温度就接近外温。另外,进风温度还与空调机组距热源的远近有关,距离越近,进风温度

表1 三种型号空调机组不同运行路线下的温度

Table 1 The temperature of three types of air conditioner sets in different routes

空调机组	行驶方向——深圳		行驶方向——广州	
	平均外温/℃	冷凝器进风平均温度/℃	平均外温/℃	冷凝器进风平均温度/℃
KLP5.0型	30.6	29.6	29.51	36.47
KLP4.7型	31.9	36.79	30.48	37.35
KTC-2027型	30.24	30.75	29.8	41.40

越高,所受的影响也越大。

4 对策建议

1) 加大力度研究动态自然环境试验方法及技术,形成GJB××《移动平台动态自然环境试验方法》标准草案。目前已形成有关大气自然环境下户外、棚下和库内的试验方法,及有关海水自然环境下表层海水、海水长尺和深海海水的试验方法,以上均属常规试验方法。针对动态自然环境试验方法和技术研究尚处于初始阶段,只形成了企业标准,无法指导武器装备开展此类试验。为此,建议加大力度研究动态自然环境试验方法及技术,根据船舶/车辆等移动平台动态试验研究,对形成的试验方法进行反复验证,与此同时,积极开展该方法的标准预先研究工作,尽早形成针对装备(产品)的GJB××《移动平台动态自然环境试验方法》标准草案,指导相关试验的开展^[30]。该标准草案内容建议主要包括以下几个部分:试验目的、试验要求(过程要求和安全性要求)、试验场所、试验装置、试验样品、试验程序、试验时间、过程检查及结果分析等。

2) 加强实验室试验与动态自然环境试验的对比试验。目前,考察材料、部组件及装备(产品)耐候性的试验方法主要集中在自然环境试验、实验室试验等两种主要试验方法,并通过不断对比研究两种试验方法下的材料腐蚀率和腐蚀程度等物理量,得到加速性和模拟性关系。“十二五”开展的移动平台动态自然环境试验也仅局限于与各大典型气候环境下的静态自然环境试验进行对比,而未开展动态自然环境试验与实验室试验之间的对比研究,两种试验方式相对于静态自然环境试验均具有一定的加速性,为此建议下一步加强实验室试验与动态自然环境试验的对比试验。对比试验主要从以下两方面进行:一是从试验环境条件的模拟出发,根据装备(产品)进行的动态自然环境剖面,编制动态环境谱,进而编制加速试验谱,以此谱为基础开展实验室加速试验;二是从加速性和模拟性角度出发,寻找两者之间的定量关系,为不同试验方法相关性研究奠定基础。

3) 加强陆上装备动态自然环境试验。我国幅员辽阔,东西部海拔落差大,气候类型多样,陆军及航空装备都可能遇到在不同类型气候区域长期使用和停放的问题,因而陆上动态自然环境适应性问题较为突出。美军在车辆尾部与车牌相交的位置安装试样,以确保试样暴露于与车架相同的环境,且不妨碍军事行

动。我国可以仿照美军的方式对装备及材料在我国不同地域的环境适应性进行研究。加强陆上动态自然环境试验,首先应做好三方面的工作:一是对典型装备(产品)及搭载的移动平台进行分门别类,按以往作战场所进行主活动区域初步划分;二是对移动平台途径路线作好规划,线路所经历气候区域应具有环境条件差异特征,并能够利用相关手段对其环境因素条件进行监测及分析;三是结合环境条件分析装备(产品)的环境适应性。

4) 加大在动态自然环境试验方面的人力和物力投入。动态自然环境试验刚刚起步,其技术方法的不成熟导致无法对装备(产品)耐候性进行有效指导,其经济效益和军事效益不明显。在人员吸引方面相比常规成熟试验方法有所欠缺,另外从事该项工作的人还很少,但工作内容较多,故需要增大该项工作的人员投入,并对人员进行培训学习。同时,动态自然环境试验通常涉及的幅员较广,需要协调各地域的部门收集各种数据和投入相应设备实时记录相应数据,需要一定的物力投入。

参考文献:

- [1] EUI W Lee, ABOURIALY N, KOZOL J. Aircraft Carrier Exposure Testing of Aircraft Materials[R]. NAWCADPAX/TR-2004.
- [2] JOSEPH Kozol, EDWIN Tankins. Aircraft Carrier Exposure Tests of Cast Magnesium Alloys[R]. NAWCADWAA-93015-60. Warminster, PA: Naval Air Warfare Center Aircraft Division, 1993.
- [3] 许翔,张众杰,凤蕴,等. 汽车环境适应性试验综述[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1): 61—65.
XU Xiang, ZHANG Zhong-jie, FENG Yun, et al. Review of Automobile Environmental Worthiness Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(1): 61—65.
- [4] 文邦伟,李颖,张燕. 美军装甲铝合金表面防护体系海洋大气环境试验[J]. 装备环境工程, 2013, 10(3): 66—71.
WEN Bang-wei, LI Ying, ZHANG Yan. Marine Exposure Test of Aluminum Armor Alloys Surface Protection System of U. S. Army[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(3): 66—71.
- [5] 陈川,王俊,黄海军,等. 我国东南沿海与欧洲沿海风电机组服役环境条件的差异性分析[J]. 装备环境工程, 2013, 10(5): 22—26.
CHEN Chuan, WANG Jun, HUANG Hai-jun, et al. Discrepant Analysis between Service Conditions of Offshore Wind Turbine in Southeast China Coast and Europe Coast[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(5): 22—26.

- [6] 张涛,周漪,刘静.汽车整车在典型环境下大气暴露试验结果分析[J].装备环境工程,2013,10(6):50—55.
ZHANG Tao,ZHOU Yi,LIU Jing. Analysis of Complete Vehicle Atmosphere Exposure Test Results in Typical Environments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6):50—55.
- [7] EUI Lee, WILLIAM E Frazier. Materials for the Carrier Environment[R]. Materials by Design Workshop Georgia Institute of Technology, 2004.
- [8] 汪学华.自然环境试验技术[M].北京:航空工业出版社,2003.
WANG Xue-hua. Natural Environmental Test Technologies [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003.
- [9] 宣卫芳.装备与自然环境试验[M].北京:航空工业出版社,2011.
XUAN Wei-fang. Equipment and Natural Environmental Test [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003.
- [10] GIB 150A—2009,军用装备实验室环境试验法[S].
GIB 150A—2009, Laboratory Environmental Test Methods for Military Materiel[S].
- [11] 肖敏,周漪,杨万均.典型环境中三种自然环境加速试验方法的环境强化效果分析[J].装备环境工程,2014,11(2),26—31.
XIAO Min,ZHOU Yi,Yang Wan-jun. Analysis on Enhanced Environmental Effect of Three Different National Environmental Accelerated Test Methods in Typical Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(2):26—31.
- [12] 杨万均.某军用雷达环境适应性研究[D].重庆:重庆大学,2004.
YANG Wan-jun. Research on The Environmental Worthiness of A Military Rader[D]. Chongqing : Chongqing University, 2004.
- [13] 许翔,刘瑞林,董素荣,等.轮式车辆高原环境适应性评价研究[J].装备环境工程,2014,11(4):82—87.
XU Xiang, LIU Rui-lin, DONG Su-rong, et al. Fuzzy Comprehensive Evaluation on Plateau Environmental Adaptability of Wheeled Vehicles[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4):82—87.
- [14] 许翔,刘瑞林,董素荣,等.轮式车辆高原环境模拟试验技术发展现状综述[J].装备环境工程,2012,9(6):63—66.
XU Xiang, LIU Rui-lin, DONG Su-rong, et al. On Development of Vehicle Simulated Plateau Environmental Test Technology[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(6): 863—66.
- [15] 刘瑞林.柴油机高原环境适应性研究[M].北京:北京理工大学出版社,2013.
LIU Rui-lin. Research on Plateau Environmental Adaptability of Diesel Engine[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2013.
- [16] KETCHAM S J. 铝合金在航空母舰上的暴露试验[Z].
KETCHAM S J. Shipboard Exposure Testing of Aluminum Alloy[Z].
- [17] JANKOWSKY E J, Shipboard Exposure Testing—USS America [R]. NADC-82101-60.AD A119756, Warminster, Pennsylvania 18974 20 August 1982.
- [18] TANKINS E, KOZOL J, LEE E. Shipboard Exposure Testing of Aircraft Materials Aboard USS Ranger, NAWCADWAR-94019-60[R]. Warminster, PA: Naval Air Warfare Center Aircraft Division, 1994.
- [19] 文邦伟,龚维强,朱蕾,等.航母舰载机用高强、高韧、耐蚀不锈钢[J].装备环境工程,2007,4(6):82—85.
WEN Bang-wei, GONG Wei-qiang, ZHU Lei, et al. High Strength, High Toughness Stainless Steel for Carrier-Borne Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4(6):82—85.
- [20] TANKINS E, KOZOL J, LEE E. Shipboard Exposure Testing of Aircraft Materials[R]. ADA330980, 1994.
- [21] EUI Lee, WILLIAM E Frazier. Aerospace Materials Division Naval Air Systems Command[R]. Materials by Design Workshop Georgia Institute of Technology, 2004:26—28.
- [22] ASTM G85, Standard Practice for Modified Salt Spray (Fog) Testing[S].
- [23] ASTM G34, Standard Test Method for Exfoliation Corrosion Susceptibility in 2XXX and 7XXX Series Aluminum Alloys (EXCO Test) [S].
- [24] 池耀田.城轨车辆的试验设施[J].环境技术,2011(5):6—11.
CHI Yao-tian. Testing Facilities for Mass Transit Vehicle[J]. Environmental Testing, 2011(5):6—11.
- [25] 杨厚源.储油罐底外边缘板的腐蚀与防护[J].油气储运,2008,27(9):42—47.
YANG Hou-yuan. Corrosion and Protection of outer edge plank with oil tank[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2008, 27(9):42—47.
- [26] 陈亚丽.舰载机材料的特殊要求与选择特点[J].国际航空,2011(11):31—36.
CHEN Ya-li. Selecting Suitable Materials for Carrier-based Aircraft[J]. International Aviation, 2011(11):31—36.
- [27] 曲晓燕,邓力.舰载武器海洋环境适应性分析[J].舰船电子工程,2011,31(4):138—143.
QU Xiao-yan, DENG Li. Analysis of the Environmental Worthiness of Shipboard Weapons in Marine Environment[J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(4):138—143.
- [28] 翟勤.德尔福高原发动机标定试验采访记[J].汽车与配件,2006(38):26—27.
ZHAI Qin. Plateau Engine Calibrate Test News of De Er Fu[J].

Vehicle and Fitting, 2006 (38): 26—27.

- [29] 谈越明. 发电车空调机组运用试验总结与分析[J]. 铁道车辆, 1997, 35(11): 39—42.
- TAN Yue-ming. Summarize and Analysis on Using Test of Air conditioner sets in generator car[J]. Railway Vehicle, 1997, 35 (11): 39—42.
- [30] 洪东跑, 赵宇, 马小兵. 利用变环境试验数据的可靠性综合评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(9): 1153—1155.
- HONG Dong-pao, ZHAO Yu, MA Xiao-bing. Integrated Reliability Assessment Using Varied Environment Test Data[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(9): 1153—1155.
-
- (上接第 83 页)
- 7.62-mm APM2 Projectile against the Edge of a Metallic Target[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25: 423—437.
- [6] 孙计军, 张洵安. 大质量刚体亚临界速横冲钢板带数值模拟[J]. 郑州大学学报(工学版), 2007, 28(02): 105—109.
- SUN Ji-jun, ZHANG Xun-an. Numerical Simulation of Encastred Steel Belt Impacted Transversely by a Rigid Mass with Hypo-critical Velocity[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2007, 28(02): 105—109.
- [7] 甘云丹, 宋力, 杨黎明. 弹性体涂覆钢板抗冲击性能的数值模拟[J]. 兵工学报, 2009, 30(S2): 15—18.
- GAN Yun-dan, SONG Li, YANG Li-ming. Numerical Simulation for Anti-blast Performances of Steel Plate Coated with Elastomer[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(S2): 15—18.
- [8] 李成, 马志垒, 王永涛. 冲击荷载下防弹钢板三维损伤分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2010, 31(04): 85—88.
- LI Cheng, MA Zhi-lei, WANG Yong-tao. Three-dimensional Damage Analysis of Bullet-proof Steel Plate under Impact Loading[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2010, 31(04): 85—88.
- [9] LUCY L B. A Numerical Approach to the Testing of the Fission Hypothesis[J]. Astron. 1977, 82: 1013.
- [10] GINGOLD R A, MONAGHAN J J. Smoothed Particle Hydrodynamics: Theory and Application to Non-spherical Stars[J]. Mon Not R Astr Soc, 1977, 181: 375—389.
- [11] LIBERSKY L D, PETSCHKE A G, CARNEY T C, et al. High Strain Lagrangian Hydrodynamics[J]. Comput Phys, 1991, 109: 67—75.
- [12] SWEGLE J W, HICKS D L, ATTAWAY S W. Smoothed Particle Hydrodynamics Stability Analysis[J]. Journal of Computational Physics, 1995, 116: 123—134.
- [13] RANGLES P W, LIBERSKY L D. Smoothed Particle Hydrodynamics: Some Recent Improvements and Applications[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1996, 139: 375—408.
- [14] 牛宝良, 程家军. 某冲击响应谱试验超差现象及其原因分析[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1): 26—28.
- NIU Bao-liang, CHENG Jia-jun. Out of Tolerance Phenomena and Cause Analysis of a SRS Shock Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(1): 26—28.
- [15] 刘亚超, 宣兆龙, 程泽. 弹药集装单元动力学试验研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1): 49—52.
- LIU Ya-chao, XUAN Zhao-long, CHENG Ze. Research on Dynamic Test of Ammunition Packaging Unit[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(1): 49—52.
- [16] 饶进军, 黄锦辉, 冯俊兴. 可空投系留平台空投跌落冲击响应研究[J]. 包装工程, 2014, 35(21): 20—24.
- RAO Jin-jun, HUANG Jin-hui, FENG Jun-xing. Airdropped Impact Effect of Airdropped Tethered Balloon Platform[J]. packaging engineering, 2014, 35(21): 20—24.
- [17] 徐金中, 汤文辉. 高速碰撞SPH方法模拟中的初始光滑长度和粒子间距[J]. 计算物理, 2009, 26(4): 548—552.
- XU Jin-zhong, TANG Wen-hui. Initial Smoothing Length and Space between Particles in SPH Method for Numerical Simulation of High-speed Impacts[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2009, 26(4): 548—552.
- [18] 张志春, 强洪夫, 傅学金, 等. 基于SPH-FEM转换算法的7.62 mm步枪弹冲击30CrMnSiA钢板的数值计算[J]. 计算物理, 2012, 29(01): 73—81.
- ZHANG Zhi-chun, QIANG Hong-fu, FU Xue-jin, et al. A 7.62 mm Rifle Bullet Impacting on a 30CrMnSiA Steel Target Plate: SPH-FEM Conversion Algorithm[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2012, 29(01): 73—81.