

军工材料环境适应性标杆数据应用探讨

杨小奎^{1,2}, 张伦武^{1,2}, 肖勇^{1,2}, 周堃^{1,2}, 张世艳^{1,2}, 牟献良^{1,2}

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039;

2.重庆市环境腐蚀与防护工程技术研究中心, 重庆 400039)

摘要: 目的 提升军工材料环境适应性预评估准确性和环境适应性基础数据资源的应用水平。方法 按照四同原则“同类型材料、同种试验环境、同种试验方式、相同性能”梳理研究重庆市环境腐蚀与防护工程技术研究中心 30 余年积累的橡胶、塑料、合金钢等军工材料的环境适应性数据。结果 提出了军工材料环境适应性标杆数据的概念, 简述了环境适应性标杆数据的主要作用, 初步构建了环境适应性标杆数据体系框架, 提出了环境适应性标杆数据的 2 种应用方法, 并剖析了 2 种方法的优缺点, 最后列举了环境适应性标杆数据的应用步骤, 并以军工高分子材料环境适应性评估为例进行了说明。结论 军工材料环境适应性标杆数据体系评估同类型军工材料环境适应性水平具有较高的准确度。

关键词: 军工材料; 环境适应性标杆数据; 环境适应性标杆数据体系; 环境适应性评估

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.06.010

中图分类号: TJ04

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2016)06-0052-07

Application of Environmental Suitability Benchmarking Data for Military Materials

YANG Xiao-kui^{1,2}, ZHANG Lun-wu^{1,2}, ZHOU Kun^{1,2}, ZHANG Shi-yan^{1,2}, MOU Xian-liang^{1,2}

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

2.Chongqing Engineering Research Center for Environmental Corrosion and Protection, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: Objective To improve the accuracy of environmental suitability evaluation of military materials, and enhance the application level of basic environmental suitability data resources. **Methods** Environmental suitability data for rubber, plastic, alloy steel and so on, which were accumulated by Chongqing Engineering Research Center for Environmental Corrosion and Protection for near 30 years, were analyzed with the principle of homogeneous military materials, the same test environment, the same test mode and the same performance. **Results** The concept of environmental suitability benchmarking data for military materials was put forward in this paper, and the main function of environmental suitability benchmarking data was described briefly. The framework of environmental suitability benchmarking data system was constructed preliminarily. Two application methods about environmental suitability benchmarking data were brought forward, and the advantages and disadvantages for methods were analyzed. Finally, the application procedure of environmental suitability benchmarking data was listed and clarified with the environmental suitability evaluation of military polymer materials. **Conclusion** Compared with homogeneous military materials, benchmarking data system evaluation

收稿日期: 2016-06-31; 修订日期: 2016-07-30

Received: 2016-06-31; Revised: 2016-07-30

作者简介: 杨小奎 (1982—), 男, 河南濮阳人, 工学硕士, 工程师, 主要研究方向为装备自然环境试验与环境适应性评估。

Biography: YANG Xiao-kui (1982—), Male, from Puyang, Henan, Master, Engineer, Research focus: natural environmental test and environmental worthiness evaluation for Equipment.

possesses superior accuracy in environmental suitability.

KEY WORDS: military materials; benchmarking data of environmental suitability; benchmarking data system of environmental suitability; evaluation of environmental suitability

军工材料是武器装备的基本组成单元,其环境适应性的好坏直接影响武器装备使用性能和作战效能的发挥^[1-4]。例如,美国挑战者号航天飞机因聚硫橡胶密封圈低温失效,导致升空 74 s 后爆炸,机上 7 名宇航员全部遇难,造成直接经济损失高达 14 亿美元。国内外在军工材料环境适应性评估领域开展了大量研究^[5-18],为武器装备研制选材和防护设计等提供了重要数据支撑。随着兵器、航空、船舶等领域的重点型号工程,特别是高新工程的实施,大量新材料不断涌现,并在装备上得到应用。如新型合金钢、铝合金、复合材料、工程塑料、密封材料、特种功能材料等,这些材料及制品在我国典型自然环境下的环境适应性数据系统采集积累刚刚起步,加之型号工程研制周期不断缩短,这些新材料的环境适应性快速准确评估显得尤为迫切,仅用传统的试验和评估思想、手段和方法尚不能完全满足新材料环境适应性快速准确评估的需求。

为了进一步提高材料及制品的环境适应性评估准确性,节省评估时间和成本,提升军工材料环境适应性数据资源工程化应用水平和环境适应性咨询服务能力,文中在对重庆市环境腐蚀与防护工程技术研究中心 30 余年积累的橡胶、塑料、合金钢等军工材料在我国七大气候区、三大海域环境适应性数据按照“同类型材料、同种试验环境、同种试验方式、相同性能”归为一幅图进行充分梳理研究的基础上,结合自然环境试验准确性和实验室环境试验快速性的特点,提出了军工材料环境适应性标杆数据和环境适应性标杆数据体系的概念,研究分析了环境适应性标杆数据的应用方法,并进行了举例说明。

1 环境适应性标杆数据

环境适应性标杆数据指环境试验与观测中得到的,用于辅助评估同类其他材料及制品环境适应性的参比数据或数据群,是环境适应性考核与评估的基准数据与标尺,主要起基准、修正、辅助决策、示范等作用。标杆数据由自然环境适应性标杆数据和实验室环境适应性标杆数据 2 部分构成。

1) 基准(比较)作用。以某一类标杆材料的环境适应性标杆数据为标尺,通过比较同属类型的其他材料,在相同环境中性能变化的相对高低或与之相比的变化百分率,来量化评定这些材料的环境适应性状况,更直观掌握材料之间的性能优劣与差别。此外,利用多类标杆材料的环境适应性标杆数据,可以评估不同地区环境腐蚀与老化的综合严酷程度。

2) 修正作用。在新材料进行环境试验时,可同批投试标杆材料,使得标杆材料与新材料在样品制备、性能检测、数据处理等各个环节始终保持一致。在利用两种材料对比结果进行环境适应性评估时,可将此次投试的标杆材料与已知标杆材料的结果进行对比,发现此次试验期间存在的问题及明显错误,提高数据的准确性。此外,还可以对新材料由于样品尺寸、测试条件与方法、环境因素、投样起始时间等变化而影响数据的波动进行检验和修正。标杆材料和标杆数据,是新材料与已掌握材料的试验结果相互联系的桥梁。

3) 辅助决策作用。环境适应性咨询服务的权威性,离不开标杆材料与标杆数据的有力支撑。标杆数据的广泛应用前景,很大程度上取决于辅助决策功能。根据已知的标杆材料数据,可以评判新材料与新工艺的环境适应性范围;根据标杆材料在多个已知环境中的标杆数据,可推断材料在未知服役环境中的性能变化;根据待评估材料与标杆材料的短期自然环境试验、加速试验对比结果,辅助评估待评估材料在典型环境中的适应能力,节约评估时间。

4) 示范作用。目前环境试验数据资源建设,仍存在材料品种不足、检测性能不够、试验环境较少的问题。如何事半功倍地采集到关键材料在敏感环境中的重要性能数据,是环境工程专业拟解决的重要课题。环境适应性标杆数据体系的建立,将以标杆材料为研究对象,建立标杆数据研究的试验规范,通过不断完善标杆数据体系,形成数据资源扩充的良性发展,以满足装备设计选材和产品防护需要。

2 环境适应性标杆数据体系

按标杆数据应用及数据体系形成要求划分,标

杆数据体系由标杆材料体系、参比性能体系、标杆样品体系、基准环境体系、标准规范体系组成。环境适应性标杆数据体系框架如图1所示。

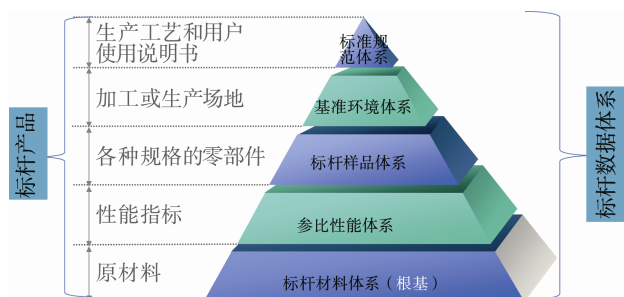


图1 环境适应性标杆数据体系框架

Fig.1 Framework of environmental worthiness benchmarking data system

1) 标杆材料体系。基于材料研制过程中继承与创新的原则，标杆材料是指武器装备中使用量大，通用性强，能够代表某一类材料的结构特点，衍生种类较多，材料成分与加工工艺成熟稳定，在军工行业中应用广泛，且材料品种与牌号为广大技术人员所熟悉的一类材料。标杆材料的集合组成标杆材料体系。

2) 参比性能体系。随环境和试验时间改变呈现出一定敏感性和规律性变化的标杆材料性能组成参比性能体系。

3) 标杆样品体系。标杆样品是为采集材料外观形貌、微观与结构变化、腐蚀速率、力学与电气性能等环境适应性数据而事先制备的不同规格与形状的标准试样。性能测试样、结构样、模拟样等构成了标杆样品体系。

4) 基准环境体系。对标杆材料性能变化具有较为显著影响的试验环境和试验方式构成基准环境体系。

5) 标准规范体系。标杆数据建设与应用所需形成的样品制备方法、试验与检测规程、数据处理规范、评估标准、应用指南等构成标准规范体系。

3 应用方法

3.1 材料刻度尺法

1) 刻度尺法定义。对于A, B, C三种同类军工材料（如均为2系铝合金或均为聚乙烯），若已经获得了A和C的自然环境和实验室环境适应性标杆数据，则需按照标杆材料实验室模拟加速环境

试验方法开展B的实验室模拟加速环境试验。当试验结果显示B的环境适应性介于A和C之间，就可以通过分析在实验室环境试验过程中A, B, C的环境适应性数据变化规律，并结合A和C的自然环境适应性标杆数据定量评定B的自然环境适应性水平区间。

2) 刻度尺法优缺点。刻度尺法优点：刻度尺法基本忽略了标杆数据的可溯源性，不用考虑材料本身的技术状态这一非常难获取的信息，使得标杆数据的应用具有较强的可操作性。刻度尺法缺点：刻度尺法重点强调了标杆数据的成体系性，要求积累的标杆数据具有较强的系统性和规律性。在标杆数据较少或者数据变化杂乱无章的情况下，使用此方法进行预测存在较大风险误差。

3.2 成分分析法

1) 定义。在系统掌握自然环境条件下材料成分及其含量对材料主要性能影响的基础上，通过对比分析已知环境适应能力的标杆材料与同类型待评估材料成分及其含量之间的区别来预测待评估材料的环境适应能力。

2) 成分分析法优缺点。优点：利用此方法预测待评估材料环境适应能力时所需标杆数据不需要成体系（意即不需要多种标杆材料），节约投试材料和试验成本。另外，此方法建立在对材料成分与性能之间关系充分科学的探讨基础上，进行新型橡胶和塑料环境适应能力预测时的准确度较高。缺点：成分分析法强调了标杆数据的可溯源性，其应用前提是对材料中各种成分对材料各种性能在各种环境，特别是自然环境条件下的影响已经掌握得非常清楚，此类信息较为缺乏。

4 应用步骤

在应用军工材料环境适应性标杆数据对新型军工材料进行环境适应能力预评估时，主要分为以下三个步骤进行：

4.1 标杆材料的选择

待评估材料要与标杆材料类型相同，即材料的主要成分或结构相同。例如，预评估尼龙X的环境试验能力，则必须选择尼龙材料作为标杆材料，

而不能选择其他种类的塑料如聚乙烯、聚苯乙烯等作为标杆材料。此外,若有多种同类型标杆材料可以选择时,则需对待评估材料的初始性能进行测试,而后看初始性能介于哪2种标杆材料的初始性能之间,一般就选哪2种标杆材料作为判据。要注意标杆材料初始性能分布的差异性、均匀性。如预评估尼龙材料的初始冲击强度为 8 kJ/m^2 ,有初始冲击强度为2, 5, 6, 9, 10 kJ/m^2 等5种尼龙标杆材料可以选择,根据待评估材料初始性能介于2种标杆材料初始性能之间的原则,可以选择初始冲击强度为 5 kJ/m^2 和 10 kJ/m^2 的尼龙作为标杆材料。在节约成本的情况下,也可选择初始冲击强度为 9 kJ/m^2 的尼龙作为标杆材料。

4.2 对比试验

对比试验分为实验室模拟加速环境试验和户外短期自然环境试验。一般情况下,若标杆材料自然环境和实验室环境适应性标杆数据均已获得,则需按照标杆材料采用的实验室模拟加速试验方法开展待评估材料的实验室模拟加速试验,有条件时可以同时开展待评估材料实验室环境试验与自然环境试验。

1) 实验室环境试验。待评估材料的实验室环境试验方法依据标杆材料实验室环境试验方法而定,主要包括待评估材料标杆样品的制备、设备的选取、参数的选择、性能检测标准和周期的确定等。待评估材料同时开展实验室环境试验与自然环境试验的作用是验证实验室所考核出的材料环境适应性优劣顺序与户外是否相同。如果不同,则需改进实验室模拟加速试验方案,同时开展标杆材料和待评估材料的实验室环境试验。

2) 自然环境试验。待评估材料的自然环境试验方法依据标杆材料自然环境试验方法而定,主要包括待评估材料标杆样品的制备、基准试验环境的选择和试验方式的选取、性能检测标准和周期的确定等。标杆材料和待评估材料同时开展自然环境试验可以检验和修正前期标杆材料体系试验样品由于尺寸、测试条件与方法、环境因素、投样起始时间等变化而引起的数据波动和误差。

4.3 验证试验结果分析

开展待评估材料的实验室模拟加速环境试验

后,将待评估材料的性能下降程度与实验室中标杆材料的性能下降程度作比对,看离(上下)标杆材料的度量距离,并结合户外自然环境试验标杆材料的性能变化曲线合理预测待评估材料的环境适应性水平区间。根据待评估材料自然环境试验实测结果验证所推测的待评估材料性能变化的准确性,分析试验结果的差异,必要时从微观方面探讨二者之间差异性。

实验室模拟加速环境试验的加速倍率不是一成不变的,主要受材质、类型、测试性能指标的影响。因此,解方程的时候需要用到自然环境试验的标杆数据,自然环境适应性标杆数据主要用作矫正实验室模拟环境试验数据与自然环境试验数据的偏差。

5 应用实例

下面以尼龙 B3502-2 拉萨户外暴露 3 年后冲击强度预评估为例,说明军工材料环境适应性标杆数据刻度尺法的应用。

5.1 标杆材料的选择

预评估尼龙 B3502-2 拉萨户外暴露 3 年后冲击强度,现有尼龙 B3702A-2、尼龙 B3702A-3、尼龙 B3502-3 和纳米改性尼龙 66 等 4 种标杆材料可以选择。测量尼龙 B3502-2, B3702A-2, B3702A-3, B3502-3 和纳米改性尼龙 66 的初始冲击强度分别为 7.18, 12.65, 4.69, 15.03, $14.13\text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$,从标杆材料初始性能跨度的差异性和均匀性考虑,选择尼龙 B3702A-2 和尼龙 B3702A-3 为标杆材料。

5.2 对比试验

按照尼龙 B3702A-2 和 B3702A-3 的样品制备方法进行待评估尼龙 B3502-2 样品的制备,并依据 DIN 75220《汽车结构件在模拟日光装置中的老化》进行待评估尼龙 B3502-2 样品的实验室模拟加速老化实验,冲击强度检测标准和周期同尼龙 B3702A-2 和 B3702A-3。性能检测结果见表 1。

表1 尼龙 B3502-2 冲击强度随实验室老化时间的变化
Table 1 Change of impact strength for the nylon B3502-2 with the laboratory aging time

时间/天	B3502-2冲击强度/(kJ·m ⁻²)
0	7.2
2	6.3
4	5.2
8	6.2
14	5.7
21	6.6
28	5.9
35	6.1
45	6.3

将尼龙 B3502-2 同标杆样品尼龙 B3702A-2 和 B3702A-3 的实验室冲击强度检测数据进行对比, 结果如图 2 所示。

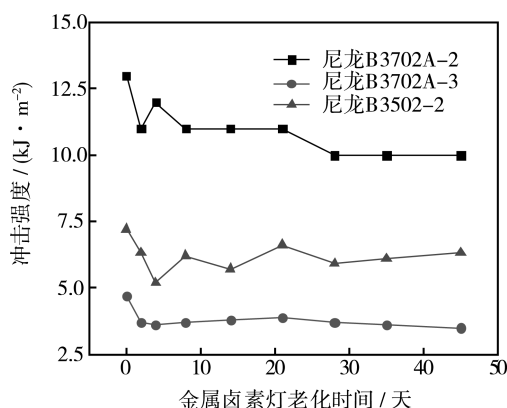


图2 尼龙样品冲击强度随实验室老化时间变化曲线

Fig.2 Change curve of impact strength for the nylon samples with the laboratory aging time

从图 2 中可以看出, 在整个实验室模拟加速实验过程中, 待评估材料尼龙 B3502-2 的冲击强度变化曲线始终界于标杆样品尼龙 B3702A-2 和尼龙 B3702A-3 之间。这时, 可以初步预测尼龙 B3502-2 拉萨户外暴露 3 年后的冲击强度值介于尼龙 B3702A-2 和 B3702A-3 拉萨户外暴露 3 年后的冲击强度值之间。

标杆样品尼龙 B3702A-2 和 B3702A-3 拉萨户外暴露 3 年期间的冲击强度变化值见表 2。

尼龙 B3502-2 在拉萨户外暴露 1 年和标杆样品尼龙 B3702A-2 和 B3702A-3 在拉萨户外暴露 3 年的冲击强度变化曲线如图 3 所示。

表2 标杆尼龙样品冲击强度随拉萨户外暴露时间变化
Table 2 Change of impact strength for the benchmarking nylon samples with the outdoor exposure time in Lhasa

时间/月	B3702A-2冲击强度/(kJ·m ⁻²)	B3702A-3冲击强度/(kJ·m ⁻²)
0	12.65	4.69
1	13.09	4.26
3	11.57	4.15
6	10.98	3.85
9	11.28	4.34
12	11.78	4.48
18	9.7	3.62
24	9.98	4.03
36	8.82	4.31

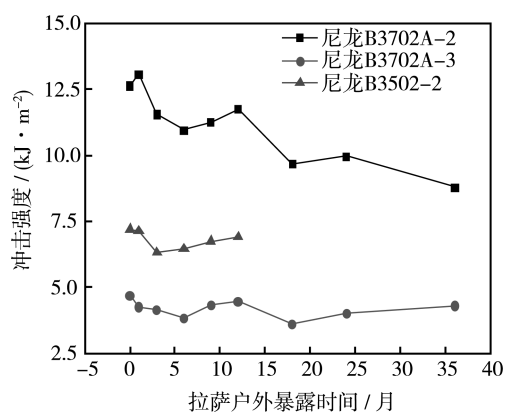


图3 尼龙样品冲击强度随拉萨户外暴露时间变化曲线

Fig.3 Change curve of impact strength for the nylon samples with the atmospheric exposure time in Lhasa

结合图 2、图 3 和表 2 可以推断, 尼龙 B3502-2 拉萨户外暴露 3 年后的冲击强度介于 8.82 kJ/m² 和 4.31 kJ/m² 之间。

5.3 验证试验结果分析

设尼龙 B3502-2 拉萨户外暴露 3 年后的冲击强度预测值为 X , 与尼龙 B3702A-2 相比较得出的值为 X_1 , 与尼龙 B3702A-3 相比较得出的值为 X_2 , 则 $X = (X_1 + X_2) / 2$ 。

根据方程: 实验室标杆材料: 户外标杆材料 = 实验室 X : 户外 X , 得 $X_1 = 5.5566$, $X_2 = 7.758$, 则 $X = 6.6573$ 。与尼龙 B3502-2 拉萨户外暴露 3 年后的冲击强度实测值 6.79 对比, 可以得出判定预测误差为 1.95%。

6 结语

军工材料环境适应性标杆数据体系是评估其

他同类型军工材料环境适应能力的基准和标尺, 环境适应性标杆数据是这把标尺的刻度, 环境适应性标杆数据越系统, 数据种类越丰富, 标尺的刻度就会越密集, 对于其他同类型军工材料环境适应能力的预评估结果就越精确。军工材料环境适应性标杆数据体系的构建是一项长期而又复杂的工作, 体系中所包含的数据需要几年乃至几十年的积累, 这就要求在今后的军工材料环境适应性数据积累过程中需有意识的向标杆数据建设靠拢。通过不断完善军工材料环境适应性标杆数据体系, 形成数据资源扩充的良性发展, 提高环境适应性数据资源的工程化应用水平, 以满足装备环境适应性设计选材和产品防护对其环境适应能力快速准确评估的迫切需要。

参考文献:

- [1] 宣卫芳, 胥泽奇, 肖敏, 等. 装备与自然环境试验·基础篇[M]. 北京: 航空工业出版社, 2009.
XUAN Wei-fang, XU Ze-qi, XIAO Min, et al. Equipment and Natural Environmental Test · Basic Course[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2009.
- [2] 许明, 张伦武. 武器装备环境适应性现状及分析[C]// 装备环境工程研讨会论文集. 北京: 总装备部电子信息基础部技术基础局, 总装备部技术基础管理中心, 2004.
XU Ming, ZHANG Lun-wu. Present Situation and Analysis on Equipment Environmental Worthiness[C]// Proceeding of Equipment Environmental Engineering Seminar. Beijing: GAD Electronic Information Technology Basis of Technology Bureau, GAD Technology Basis Management Center, 2004.
- [3] 丰卫东, 石建军. 东南沿海地区炮兵装备的腐蚀危害及防护对策[J]. 装备环境工程, 2004, 1(5): 78—80.
FENG Wei-dong, SHI Jian-jun. Harmfulness of Corrosion of Artillery Equipment in the Southeast Coastal Area and Countermeasures[J]. Equipment Environmental Engineering, 2004, 1(5): 78—80.
- [4] 廖国栋, 吴国华, 苏少燕, 等. 南海气候特点及对武器装备的影响[C]// 装备环境工程研讨会论文集. 北京: 总装备部电子信息基础部技术基础局, 总装备部技术基础管理中心, 2004.
LIAO Guo-dong, WU Guo-hua, SU Shao-yan, et al. Effects of Southeast Coastal Climate on Weapons[C]// Proceeding of Equipment Environmental Engineering Seminar. Beijing: GAD Electronic Information Technology Basis of Technology Bureau, GAD Technology Basis Management Center, 2004.
- [5] 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 Technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003.
- [6] 宣卫芳, 胥泽奇, 肖敏, 等. 装备与自然环境试验·提高篇[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011.
XUAN Wei-fang, XU Ze-qi, XIAO Min, et al. Equipment and Natural Environmental Test · Advanced Course[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2011.
- [7] 宣卫芳, 杨晓然. 国内外军工材料环境试验现状及发展趋势[J]. 装备环境工程, 2004, 1(4): 16—22.
XUAN Wei-Fang, YANG Xiao-Ran. The Present Situation and Developing Trend of Environmental Test of Military Materials in the World[J]. Equipment Environmental Engineering, 2004, 1(4): 16—22.
- [8] 安百刚, 张学元, 韩恩厚, 等. 铝和铝合金的大气腐蚀研究现状[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(2): 11—15.
AN Bai-gang, ZHANG Xue-yuan, HAN En-hou, et al. Research Situation of Atmospheric Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(2): 11—15.
- [9] MENDOZA A R, CORVO F. Outdoor and Indoor Atmospheric Corrosion of Non-ferrous Metals[J]. Corros Sci, 2000, 42: 1123—1147.
- [10] XIAO Kui, DONG Chao-fang, LI Jiu-qing, et al. Research on Atmospheric Galvanic Corrosion Evaluation of Magnesium Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(2): 201—207.
- [11] 丁国清, 张波. 钢在自然环境中的大气腐蚀研究进展[J]. 装备环境工程, 2010, 7(3): 42—48.
DING Guo-qing, ZHANG Bo. Research Progress of Atmospheric Corrosion of Steels in Natural Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(3): 42—48.
- [12] MENDOZA A R, CORVO F. Outdoor and Indoor Atmospheric Corrosion of Carbon Steel[J]. Corros Sci, 1999, 41(1): 75—86.
- [13] 王荣华, 李晖, 孙岩, 等. 橡胶材料加速老化研究现状及发展趋势[J]. 装备环境工程, 2013, 10(4): 66—70.
WANG Rong-hua, LI Hui, SUN Yan, et al. Research Status and Development Trend of Accelerated Aging of Rubber Materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(4): 66—70.

- [14] 李颖, 肖敏, 杨万均, 等. 某弹药包装筒用改性 ABS 塑料贮存寿命评估研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(3): 5—7.
LI Ying, XIAO Min, YANG Wan-jun, et al. Storage Life Evaluation of Modified ABS Plastic for Ammunition Packaging[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(3): 5—7.
- [15] 张琳, 王振尧, 赵春英, 等. 碳钢和耐候钢在盐雾环境下的腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 1—6.
ZHANG Lin, WANG Zhen-yao, ZHAO Chun-ying, et al. Study on Corrosion Behavior of Carbon Steel and Weathering Steel in Salt Spray Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1): 1—6.
- [16] 马同玲, 党晓勇, 庞明磊. 基于加速老化和自然贮存数据的氟硅橡胶制品贮存寿命预估[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 65—69.
MA Tong-ling, DANG Xiao-yong, PANG Ming-lei. Storage Life Prediction of Fluorine Rubber Products Based on Accelerated Aging and Natural Storage Data[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 65—69.
- [17] 侯健, 张彭辉, 郭为民. 船用铝合金在海洋环境中的腐蚀研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(2): 59—63.
HOU Jian, ZHANG Peng-hui, GUO Wei-min. Study on Corrosion of Aluminum Alloys for Ship Applications in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(2): 59—63.
- [18] 曹公望, 王振尧, 刘雨薇, 等. 碳钢在三种大气环境中的应力腐蚀[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 6—10.
CAO Gong-wang, WANG Zhen-yao, LIU Yu-wei, et al. Stress Corrosion of Carbon Steel in Three Different Atmospheric Environments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(4): 6—10.