

环境试验与观测

多因素综合海洋气候环境模拟 加速试验箱研制

杨晓然^{1,2}, 赵方超^{1,3}, 杨小奎¹, 王津梅¹, 向江涛¹

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.西藏拉萨大气环境材料腐蚀国家野外科学观测研究站, 拉萨 850100; 3.弹药贮存环境效应重点实验室, 重庆 400039)

摘要: **目的** 研制一种多因素综合海洋气候环境模拟加速试验箱, 主要用于沿海、海岛和舰面大气使用的工艺、材料和零部件的快速筛选和环境适应性评价。**方法** 通过需求、现状和海洋气候特征分析, 提出气候类型模拟的新思路。通过总体和模块设计、集成制造, 研制多因素综合海洋气候环境模拟加速试验箱, 设计试验谱, 开展试验验证, 考核技术指标的符合性, 并评价相关性和加速性。**结果** 解决了盐雾对光照条件的干扰、盐晶积聚等难题, 研制了同时施加光照、盐雾、温度、湿度和风速 5 因素的多因素综合海洋气候环境模拟加速试验箱, 编制了 5 因素综合海洋气候模拟加速试验谱。**结论** 与万宁站户外暴露试验结果相比, 多因素综合海洋气候环境模拟加速试验技术评价金属腐蚀质量损失、工程塑料拉伸强度、有机涂层光泽色差等关键性能指标变化具有良好的相关性和高的加速性。

关键词: 海洋气候; 模拟加速试验; 试验谱; 氯离子; 干湿循环; 相关性; 加速性

中图分类号: TG172 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2022)10-0141-10

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.10.019

Development of Multifactor Integrated Marine Climate Simulation and Acceleration Test Chamber

YANG Xiao-ran^{1,2}, ZHAO Fang-chao^{1,3}, YANG Xiao-kui¹, WANG Jin-mei¹, XIANG Jiang-tao¹

(1. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China; 2. Tibet Lhasa Material Atmospheric Corrosion Station of National Outdoor Scientific Observation and Research, Lhasa 850100, China; 3. CSGC Key Laboratory of Ammunition Storage Environmental Effects, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: This paper aims to develop a test chamber for multifactor integrated marine climate simulation and acceleration. The chamber is applied to the fast screening and environmental worthiness evaluation of technology, material, and parts in marine atmosphere. Through demand analysis, status analysis, and marine climatic characteristic analysis, a new thought of climatic type simulation was put forward, and the radiation with salt fog, salt crystal accumulation and internal corrosion were

收稿日期: 2021-11-10; 修订日期: 2021-12-10

Received: 2021-11-10; Revised: 2021-12-10

基金项目: 国防技术基础项目 (HDH59030103)

Fund: National Defense Technology Foundation Project (HDH59030103)

作者简介: 杨晓然 (1962—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为环境试验技术、环境适用性评价和电化学分析。

Biography: YANG Xiao-ran (1962—), Male, Senior engineer, Research focus: environmental test technologies, environmental worthiness evaluation and electrochemical analysis.

引文格式: 杨晓然, 赵方超, 杨小奎, 等. 多因素综合海洋气候环境模拟加速试验箱研制[J]. 装备环境工程, 2022, 19(10): 141-150.

YANG Xiao-ran, ZHAO Fang-chao, YANG Xiao-kui, et al. Development of Multifactor Integrated Marine Climate Simulation and Acceleration Test Chamber[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(10): 141-150.

solved simultaneously. Through general design, module design, and integrated manufacturing, the acceleration test chamber for multifactor integrated marine climate simulation was developed, which can apply light radiation, salt fog, temperature, humidity, and wind speed simultaneously. Test spectrum design and verification test was applied to evaluate the conformity to technical index, correlation, and acceleration. Verification result showed that in evaluation of critical parameters changes of materials, such as corrosion weight loss of metal, tensile strength degradation, and color and gloss change of organic coating, the multifactor integrated marine climate simulation and acceleration test technology has good correlation and high acceleration comparing with outdoor exposure test results of Wanning station.

KEY WORDS: marine climate; simulated and accelerated test; test spectrum; chlorine ion; dry and humid circulation; correlation; acceleration

对装备而言,海洋气候环境是最严酷的一种气候环境,装备及材料的失效大多发生在这类环境中^[1-3]。因此,对装备、材料、零部件的海洋环境适应性试验、考核和评价是装备全寿命期保障的迫切需求。为了提高装备在海洋气候环境的适应性、可靠性和耐久性,世界各国广泛开展从材料到整机的海洋气候自然环境试验和模拟加速试验^[4-7]。传统的自然环境试验由于环境条件与实际使用环境条件相近,试验结果可靠,但试验周期长^[8],不能满足装备发展的迫切需要。大气环境效应是多种环境因素的综合效应,现有与海洋气候相关的模拟加速试验技术主要包括盐雾试验技术、光老化试验技术和湿热试验技术等,这些技术由于模拟的环境因素单一,不能真实反映装备(材料)在大气环境条件下的失效模式或规律。例如,GJB 150.11A—2009《军用装备环境试验方法第11部分盐雾试验》明确指出,盐雾试验方法存在6个局限,其中包括“不重现海洋大气环境的影响”。从结果数据分析上体现出单因素试验的相关系数(模拟性)和加速因子(加速性)偏低,因而不能满足装备研发快速发展的需求。为了解释大气环境中各种因素(如温度、湿度、太阳辐射、二氧化硫、氯离子沉降、风速等)对材料腐蚀的影响,国内外开展了大量的基础研究。王海涛等^[9-10]通过灰色模型GM(1,1)建立了大气腐蚀速率预测模型,并用灰色关联分析方法研究了大气腐蚀环境因素的相关性,采用BP神经网络预测了铝合金大气腐蚀,计算了合金元素和环境因素对于铝合金大气腐蚀速率的影响。贾志军等^[11]采用主成分分析法对我国13个大气腐蚀试验站点气候因素的相关性进行了分析,得到了各站点的主要自然环境影响因素,并将13个站点的环境因素大致分为6类。这些研究成果可用于指导环境试验,研究不同环境因素对材料性能的影响。但是,在理解多种环境因素的作用规律,例如腐蚀速率与温度、湿度、辐照度、氯离子沉降率的多因素作用规律函数方面未有涉及。有关多因素作用规律一般采用正交试验方法研究,因而需要应用多因素综合试验装置(多种主要环境因素作为自变量可在一定范围内连续调节)。开展环境效应仿真和虚拟

试验场研究方面,需要大量系统的基础数据支撑。鉴于以往试验往往由于各自目的或者设计缺陷等情况,存在数据不系统或不完整的情况,且一旦欠缺就难以弥补,因而多因素综合试验装置也将是必需的工具和手段。

研究表明,干湿交替和昼夜光辐射交变对材料的性能劣化进程有重要影响。Lyon等^[12]研究表明,干湿交替盐雾试验比连续盐雾试验的相关性更好。鉴于多因素综合试验技术具有较大的优势,第五届欧洲腐蚀会议发表了一种具有气温、相对湿度、干湿频率、湿润剂成分、SO₂含量、风速等6个可控环境因子的间浸式复合试验研究装置^[13]。北京航空材料研究所在国内首先研制了8因子加速试验装置,能够模拟在自然环境条件下干湿交替的过程,且可通入腐蚀性气体,具有光老化及腐蚀老化综合试验条件,已成功应用于18种标准腐蚀试验中^[13-14]。根据装备应用和装备环境工程技术发展需求,西南技术工程研究所研制了同时施加光照、气压、温度、湿度和风速等5种因素的高原高寒气候环境模拟加速试验箱,并已应用于某高原直升机关键部件的延寿试验^[15]。

从装备环境工程和大气腐蚀的角度看,海洋大气对装备、材料、零部件环境效应的主要因素包括高盐雾沉降、高湿度、强辐射和持续高温;从气象和气候的角度看,海洋大气环境还存在上述因素的昼夜和季节循环交变环境特征。根据环境因素聚类分析结果,从技术可行性和实用性的角度出发,笔者认为多因素综合模拟试验装置应根据该类型环境的主要影响因素进行设计。根据需求和现状分析,提出从环境因素模拟提升到环境类型模拟的思路,解决了盐雾和光辐照同时施加、装置内部零部件的腐蚀防护、盐晶积聚等技术难题,研制了同时施加光辐射、盐雾沉降、温度、湿度和风速等5因素及其循环交变的多因素综合海洋气候环境模拟加速试验箱。

加速性和相关性是评价新试验技术优劣的重要指标,国内外在这方面开展了较多研究^[16-19]。模拟加速环境试验技术的主要应用是装备、工艺、材料的快速筛选和环境适应性的快速评价,这就要求其结果与采用

基准方法获得的结果有较高一致性。这种基准应该是该类型的基准自然环境试验场站的户外暴露试验或库内贮存试验。筛选主要依据结果的优劣排序, 因而应采用 Spearman 秩相关系数法, 采用结果优劣排序计算秩差, 进而计算相关系数以评价相关性。鉴于加速因子在试验过程中随试验时间而变化, 因而采用加速转换因子法相对静态的加速因子法更能全面评估加速性。本研究在对装置各项功能和性能指标测试的基础上, 采用 Spearman 秩相关系数法和加速转换因子法对试验箱进行评价。

1 设计

1.1 设计思路

材料的环境腐蚀效应往往从界面产生, 如盐雾试验中样品加快腐蚀是由于样品表面有一层含氯离子的液膜, 并且腐蚀在液膜与样品界面产生。为了实现光化学效应和盐雾腐蚀效应的叠加和协同, 有必要把模拟强化的焦点放在界面, 而不是环境, 采取措施排除或减少盐雾对光的遮挡作用。总体思路是采用综合模拟和界面模拟措施, 以同时提高加速性和相关性为主要目标, 设计综合模拟和强化光照、温度、湿度、氯离子沉降(模拟海洋性气候)及风速的多因素综合热带海洋气候环境模拟加速试验箱。采用自主研发的以表面湿润传感器为核心的智能喷雾系统, 正确检测样品表面干湿程度, 并控制干湿循环。通过事先把腐蚀介质溶解到喷雾液体中, 从而简化试验装置的结构。通过调节溶液成分, 既可综合模拟海洋气候, 也能模拟工业气候或酸性海洋气候等。通过上述因素的调节, 实现氙灯光老化、紫外灯光老化、湿热试验等现有标准试验, 得到一箱多用的效果。

1.2 技术指标的确定

针对海洋气候模拟加速设计了各因素的指标要求, 具体如下:

1) 考虑到不同海拔高度、地域和季节等的紫外成分不同^[20-21], 为了更加真实高效模拟并强化海洋气候环境, 同时也给用户预留更宽的自由调节空间, 提出了氙灯加紫外灯形成复合光源的技术方案, 并且要求其辐照度可调。参照 GJB 150.7A—2009《军用装备环境试验方法 第 7 部分: 太阳辐射试验》对太阳辐射灯的要求, 最大辐照度指标定为 $(1\ 120\pm 47)\text{ W/m}^2$ 。参照 ASTM G154—2001《非金属材料暴露用荧光紫外暴露装置的操作规范》, 提出最大紫外辐照度 $>1.65\text{ W/m}^2@340\text{ nm}$ 的要求。

2) 为了实现光辐射与盐雾的有机结合, 更真实地模拟海洋气候环境, 提出采用空气雾化喷嘴施加盐雾(或酸雾)的方法和要求, 允许使用质量分数高达

5%的 NaCl 为喷雾溶液, 控制方式为连续、周期喷雾和表面湿润传感器控制方式任选, 沉降率为 $1\sim 3\text{ mL}/(80\text{ cm}^2\cdot\text{h})$ (平均值)。

3) 温度控制范围为 $-5\sim 85\text{ }^\circ\text{C}$, 使本试验箱在模拟海洋性气候的同时, 预留足够的余地模拟其他类型的气候环境(比如内陆工业气候)。

4) 相对湿度范围在 20%~98%。

5) 风速范围为 $1\sim 4\text{ m/s}$ (平均值)。

1.3 总体设计

试验箱包括辐照系统、喷雾系统、通风控制系统、空气温度调节系统、总控和通信系统及人机界面, 逻辑框图见图 1。为了实现上述环境的模拟或强化, 拟采用人工光源施加光照。采用智能喷雾氯化钠溶液模拟和强化氯离子沉降和干湿循环。利用人工光源、加热器和冷凝器控制温度和湿度。采用 PLC 为主控单元, 用环境谱控制整个综合模拟和强化过程。总体结构见图 2。

1.4 控制系统设计

本控制系统主要由主控单元、传感器、辐照控制回路、喷淋控制回路、温度控制回路、湿度控制回路、风速控制回路和现场环境参数监控单元构成, 其原理见图 3。控制系统采用 PLC 为主控单元, 采用辐照度传感器、湿润传感器、温度传感器、湿度传感器和黑板温度计的数值, 通过闭环或开环方式与程序数值比较控制对应各执行机构的运行。

1.5 机械设计

本试验箱涉及辐照系统、喷雾系统、通风控制系统、空气温度调节系统等的设计。辐射系统设计水冷氙弧灯+紫外灯的复合光源, 通过可调功率电源实现辐照度的调节, 采用超白玻璃顶盖隔离腐蚀介质, 并实现高透光率。采用高反光铝板制作反光罩, 提高发

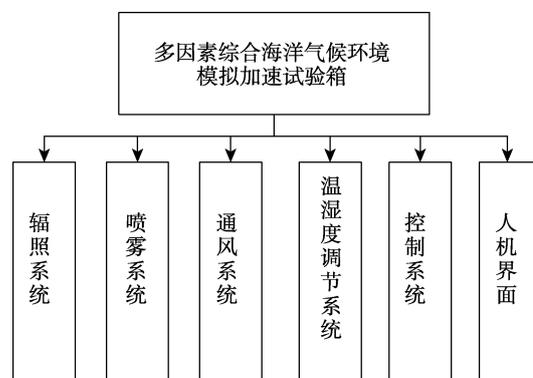


图 1 多因素综合热带海洋气候环境模拟加速试验箱的逻辑框图

Fig.1 Block diagram of multifactor integrated marine climate simulation and acceleration test chamber

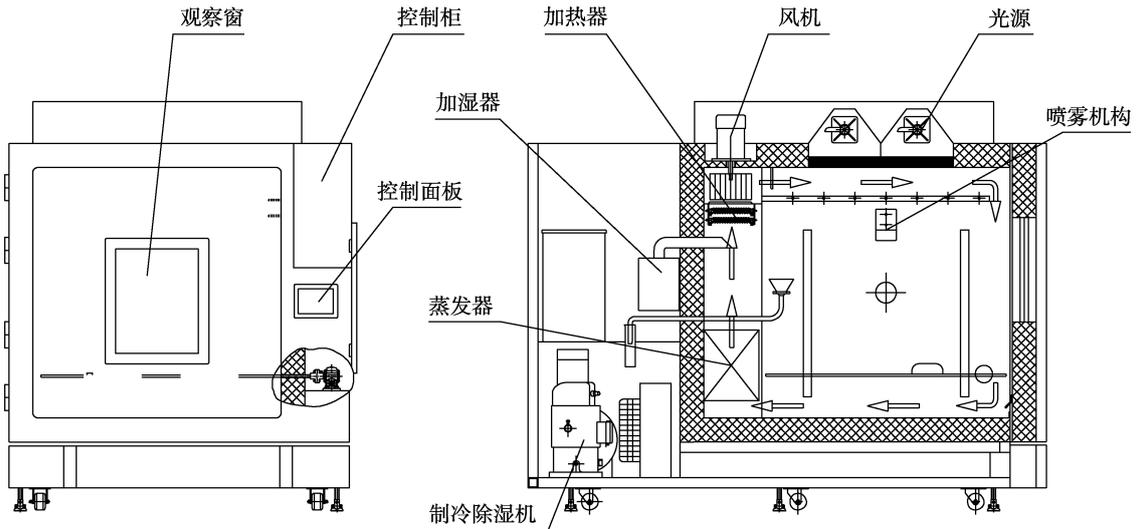


图2 多因素综合海洋气候环境模拟加速试验箱总体结构
 Fig.2 General structure of multifactor integrated marine climate simulation and acceleration test chamber

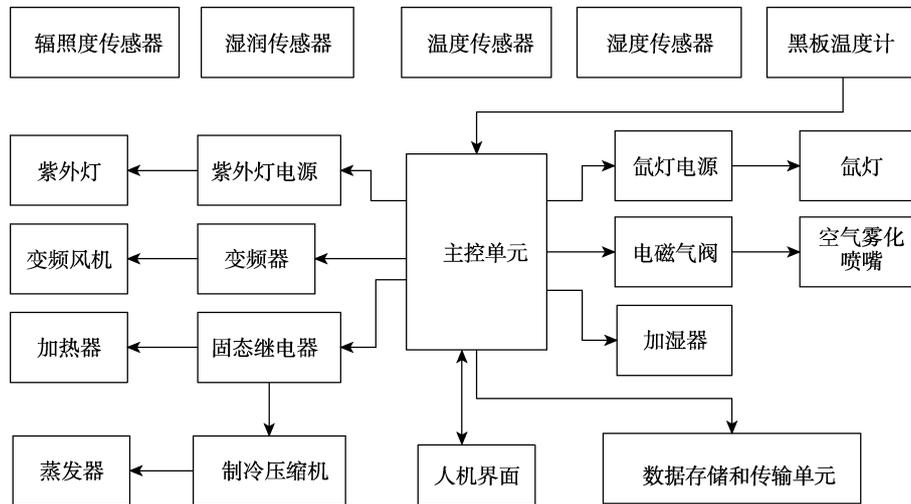


图3 控制系统原理
 Fig.3 Block diagram of control system

光效率，并调节均匀度。喷雾系统与高加速自然环境试验系统喷雾子系统^[22]的主要区别在于，本试验箱采用固定交叉气动喷雾，综合过量喷雾和试验架的摆动设计，保障均匀性。通风控制系统的设计目的不同于传统的光老化、湿热和高低温试验箱，主要区别在于本试验箱设计的通风系统是为了引进风速这一环境因素，而不仅限于维持试验箱内部的温湿度场的均匀性。空气温度调节系统设计与常规温湿度箱类似。

传统的盐雾试验箱在试验过程中产生的盐雾会弥漫在整个试验箱，并在停止喷雾后滞留较长时间，因而如果采用这种方式施加氯离子沉降，将会对光辐射造成严重遮挡。针对这一问题，笔者提出界面强化的理念，即强化样品表面，而不是强化样品所处的整个空间。施加盐雾的结果是使样品表面覆盖一层含氯离子的薄液膜，改用不同于传统盐雾试验箱的方式也

可在样品表面施加薄液膜。本试验箱虽同样采用气动喷雾方式，但施加的液滴直径较传统盐雾试验大，而且采用直接下喷式，在样品表面施加薄液膜的同时，使盐雾滞空时间降低到可以忽略的程度（大约占3.3%），这就解决了盐雾和光辐照同时施加的难题。

由于本试验箱形成高辐射、高盐雾和高温的环境，对材料和零部件的腐蚀问题是真正挑战。通过试验，选用316L不锈钢薄板加工内胆，同时对加热器、蒸发器、变频风机和温湿度传感器等暴露在这一严酷环境条件下的零部件进行选型。由于反复喷雾-干燥会造成盐晶积累，进而阻挡光辐射对样品的作用。经反复论证，提出了2种样品架设计方案，即摆动样品架和旋转样品架设计方案。鉴于本装置将用于试验小型装置和零部件，故采用摆动样品架设计方案，结构如图4所示。这一设计有效解决了盐晶积累问题。

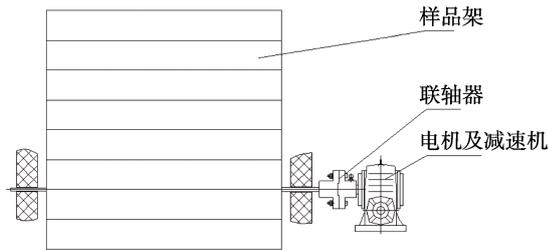


图 4 摆动式样品架结构
Fig.4 Diagram of shaking type sample rack

2 制造

采用 solidworks 进行设计, 同时绘制二维图纸。根据图纸进行多因素综合热带海洋气候模拟加速试验箱制造。机械部分加工程序主要包括框架加工、内外壳体钣金加工、湿润传感器制造、特殊蒸发器定制、特殊灯座制造、制冷压缩机等外购件采购、涂装以及各种非标连接件的加工。控制部分制造主要工作包括元器件采购、软件编制和连接。

完成部件加工和购买后进行总装, 主要包括箱体安装、制冷压缩机、特殊蒸发器、高耐蚀加热器、摆动样品架和复合光源系统的安装, 同时把 PLC 控制程序上载, 然后进行各项功能的调试。制造的多因素综合热带海洋气候模拟加速试验箱如图 5 所示。通过调试, 验证各种功能是否已经实现。同时施加光照和盐雾的功能如图 6 所示。



图 5 多因素综合热带海洋气候模拟加速试验箱
Fig.5 The multifactor integrated marine climate simulation and acceleration test chamber



图 6 同时施加光照和盐雾
Fig.6 Applying light radiation and salt fog simultaneously

3 试验验证

3.1 技术指标验证

3.1.1 辐照度测试

采用水冷氙弧灯+紫外灯, 可单独或同时开启。全辐射和紫外传感器的安装位置如图 7 所示。测试结果见表 1。从表 1 统计得到最大辐照度为 $1\ 119.5\ \text{W}/\text{m}^2$, 符合设计要求。



图 7 全辐射和紫外辐射传感器的安装
Fig.7 Installation of total and ultraviolet radiation sensor

表 1 总辐射辐照度测试结果
Tab.1 Measurement result of total radiation

时间	辐照度/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$
13:54:00	1 118
13:55:00	1 119
13:56:00	1 119
13:57:01	1 120
13:58:01	1 120
13:59:01	1 119
14:00:01	1 120
14:01:01	1 120
14:02:01	1 120
14:03:01	1 120

3.1.2 沉降率测试

沉降率采用直径为 80 mm 的塑料杯进行测试, 面积为 $50\ \text{cm}^2$ 。在试验架平面的四周和中部各安放 1 个杯子, 连续喷雾 30 min, 测量沉降量。测量结果分别为 31、30、30、33、29 mL, 平均值为 $61\ \text{mL}/(50\ \text{cm}^2\cdot\text{h})$, 换算结果为 $98\ \text{mL}/(80\ \text{cm}^2\cdot\text{h})$ 。采用间歇喷雾时, 每 30 min 喷雾 20~55 s, 可使沉降速率落在 $1\sim 3\ \text{mL}/(80\ \text{cm}^2\cdot\text{h})$ 。

3.1.3 温度测试

按照 JJF 1101—2003《环境试验设备温度、湿度校准规范》的规定, 对温度范围、均匀度、波动度及升降温速率进行测试。测试结果见表 2—5。根据表 2—5 计算得到: 空气温度范围为 $-5\sim 85\ ^\circ\text{C}$, 均匀度为 $\pm 1.8\ ^\circ\text{C}$, 波动度为 $\pm 0.4\ ^\circ\text{C}$, 平均升温速率为 $6\ ^\circ\text{C}/\text{min}$, 平均降温速率为 $3\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

表 2 85 °C 温度测试结果
Tab.2 Temperature measurement result at 85 °C

时间	t_{01}	t_{02}	t_{03}	t_{04}	t_{05}	t_{06}	t_{07}	t_{08}	t_{09}	t_{10}
15:16:19	86.8	86.1	85.9	86.5	85.2	85.1	85.9	86.0	86.4	85.5
15:16:49	86.9	86.1	85.9	86.6	85.3	85.1	85.9	86.0	86.5	85.5
15:17:19	86.9	86.2	86.0	86.6	85.3	85.2	86.0	86.1	86.5	85.5
15:17:49	87.0	86.2	86.0	86.7	85.3	85.2	86.0	86.1	86.5	85.6
15:18:19	87.0	86.2	86.1	86.7	85.4	85.2	86.1	86.2	86.6	85.6
15:18:49	87.0	86.2	86.1	86.7	85.4	85.2	86.1	86.2	86.6	85.6
15:19:19	87.0	86.2	86.1	86.7	85.4	85.2	86.1	86.2	86.6	85.6
15:19:49	87.0	86.2	86.1	86.8	85.5	85.2	86.1	86.2	86.6	85.7
15:20:19	87.0	86.2	86.1	86.7	85.5	85.2	86.1	86.2	86.6	85.7
15:20:49	87.0	86.2	86.0	86.7	85.5	85.3	86.1	86.2	86.6	85.7
15:21:19	87.0	86.2	86.0	86.7	85.5	85.3	86.1	86.2	86.6	85.7
15:21:49	87.0	86.2	86.0	86.7	85.5	85.2	86.1	86.2	86.5	85.7
15:22:19	87.0	86.1	86.0	86.7	85.5	85.2	86.1	86.2	86.5	85.7
15:22:49	86.9	86.1	86.0	86.7	85.5	85.2	86.1	86.2	86.5	85.7
15:23:19	86.9	86.1	86.0	86.7	85.4	85.2	86.1	86.1	86.5	85.7
波动度					0.4					
均匀度					1.8					

表 3 -5 °C 温度测试结果
Tab.3 Temperature measurement result at -5 °C

时间	t_{01}	t_{02}	t_{03}	t_{04}	t_{05}	t_{06}	t_{07}	t_{08}	t_{09}	
17:05:45	-3.3	-3.3	-3.2	-3.1	-3.8	-3.3	-3.2	-3.2	-3.1	
17:06:15	-3.3	-3.4	-3.2	-3.1	-3.8	-3.3	-3.2	-3.2	-3.1	
17:06:45	-3.4	-3.4	-3.2	-3.1	-3.8	-3.3	-3.2	-3.2	-3.2	
17:07:15	-3.4	-3.4	-3.2	-3.1	-3.9	-3.3	-3.2	-3.2	-3.2	
17:07:45	-3.4	-3.4	-3.2	-3.1	-3.9	-3.3	-3.2	-3.2	-3.2	
17:08:15	-3.4	-3.4	-3.2	-3.2	-3.9	-3.3	-3.2	-3.3	-3.2	
17:08:45	-3.5	-3.5	-3.3	-3.2	-3.9	-3.4	-3.2	-3.3	-3.2	
17:09:15	-3.4	-3.5	-3.3	-3.2	-3.9	-3.4	-3.3	-3.3	-3.2	
17:09:45	-3.4	-3.4	-3.2	-3.2	-3.9	-3.3	-3.2	-3.2	-3.2	
17:10:15	-3.3	-3.4	-3.2	-3.2	-3.9	-3.3	-3.2	-3.2	-3.2	
17:10:45	-3.3	-3.4	-3.2	-3.2	-3.9	-3.3	-3.2	-3.2	-3.2	
17:11:15	-3.4	-3.4	-3.2	-3.2	-3.9	-3.3	-3.2	-3.2	-3.2	
17:11:45	-3.3	-3.4	-3.2	-3.1	-3.9	-3.3	-3.2	-3.2	-3.2	
17:12:15	-3.3	-3.3	-3.1	-3.1	-3.8	-3.3	-3.1	-3.1	-3.1	
17:12:45	-3.2	-3.3	-3.1	-3.1	-3.8	-3.3	-3.1	-3.1	-3.1	
波动度					0.3					
均匀度					0.7					

表 4 升温速率测试结果
Tab.4 Temperature rising measurement result

时间	温度 PV/°C	温度 SV/°C	时间	温度 PV/°C	温度 SV/°C	时间	温度 PV/°C	温度 SV/°C
13:00:54	-5.0	85	13:06:25	46.2	85	13:11:25	71.7	85
13:01:54	-2.2	85	13:06:55	49.1	85	13:11:55	73.9	85
13:02:24	9.7	85	13:07:25	52.0	85	13:12:25	75.9	85
13:02:54	17.4	85	13:07:55	54.8	85	13:12:55	78.0	85
13:03:24	23.1	85	13:08:25	57.5	85	13:13:25	80.2	85
13:03:54	27.8	85	13:08:55	60.0	85	13:13:55	82.1	85
13:04:24	32.2	85	13:09:25	62.6	85	13:14:25	83.1	85
13:04:55	36.1	85	13:09:55	64.9	85	13:14:55	84.0	85
13:05:25	39.7	85	13:10:25	67.2	85	13:15:25	84.9	85
13:05:55	43.1	85	13:10:55	69.4	85	13:15:56	85.2	85

表 5 降温速率测试
Tab.5 Temperature descending measurement result

时间	温度 PV/°C	温度 SV/°C	时间	温度 PV/°C	温度 SV/°C	时间	温度 PV/°C	温度 SV/°C
10:54:43	85.0	-5	11:05:14	44.2	-5	11:15:14	9.6	-5
10:56:13	83.0	-5	11:06:14	39.9	-5	11:16:15	6.2	-5
10:57:13	81.6	-5	11:07:14	36.5	-5	11:17:15	3.2	-5
10:58:13	77.6	-5	11:08:14	32.5	-5	11:18:15	0.6	-5
10:59:13	73.3	-5	11:09:14	29.0	-5	11:19:15	-2.4	-5
11:00:13	68.6	-5	11:10:14	25.8	-5	11:20:15	-2.7	-5
11:01:13	62.5	-5	11:11:14	22.5	-5	11:21:15	-2.3	-5
11:02:13	57.7	-5	11:12:14	19.5	-5	11:22:15	-3.2	-5
11:03:13	53.0	-5	11:13:14	16.4	-5	11:23:15	-4.4	-5
11:04:13	48.6	-5	11:14:14	13.0	-5	11:24:15	-4.9	-5

3.1.4 湿度测试

按照 JJF 1101—2003《环境试验设备温度、湿度校准规范》规定, 选定 20 °C-50%、20 °C-98%、50 °C-30%和 50 °C-98%为测量点, 采用 20 °C-98%和 50 °C-30%稳定段的湿度数据统计分析控制精度。20 °C-98%和 50 °C-30%稳定段的湿度测量结果见表 6 和表 7。根据表 6 和表 7 计算得到: 湿度范围为 30%~98%, 湿度偏差为±1.3% (湿度>75%时)、±0.7% (湿度≤75%时)。

表 6 20°C-98%稳定段的湿度测试结果
Tab.6 Relative humidity measurement result of 20 °C-98% stable section

时间	RT03/°C	RT04/°C	RH03/%	RH04/%
16:30:16	21.8	21.0	98.1	98.8
16:30:36	21.8	20.9	98.1	99.1
16:30:56	21.7	20.9	98.3	99.2
16:31:16	21.8	20.9	98.2	99.0
16:31:36	21.8	20.9	98.2	99.0
16:31:56	21.8	20.9	98.2	99.0
16:32:16	21.8	20.9	98.2	99.0
16:32:36	21.8	20.9	98.2	99.0
16:32:46	21.8	20.9	98.2	99.0
湿度精度/%	±1.3			

表 7 50 °C-30%稳定段的湿度测试结果
Tab.7 Relative humidity measurement result of 50 °C-30% stable section

时间	RT03/°C	RT04/°C	RH03/%	RH04/%
9:55:37	51.2	50.6	29.6	30.5
9:55:57	51.2	50.6	29.6	30.5
9:56:17	51.2	50.5	29.5	30.5
9:56:37	51.1	50.5	29.5	30.4
9:56:57	51.1	50.5	29.5	30.4
9:57:17	51.1	50.5	29.4	30.4
9:57:37	51.1	50.5	29.4	30.3
9:57:57	51.1	50.5	29.3	30.2
湿度精度/%	±0.7			

3.2 效果验证

3.2.1 试验谱设计

根据热带海洋气候环境特征及效应特点, 提出同时施加和综合强化氯离子沉降、光照、湿度、温度和风速等 5 种主要因素, 更加真实模拟海洋气候环境的方案。通过相对均衡强化上述主要因素, 同时模拟昼夜循环实际情况, 达到保持良好相关性的前提下, 提高加速性。根据不同类型材料对不同因素的敏感性不同, 设计针对金属材料和非金属材料的试验谱。试验谱区分明周期和暗周期, 明周期时间长度为 2 h, 暗周期时间长度为 0.5 h, 1 个明周期和 1 个暗周期构成 1 个试验周期。非金属材料类型的辐照度使用 1 120 W/m², 金属材料类型的辐照度使用 550 W/m², 2 类材料的试验谱如图 8 所示。以本试验谱为核心, 编制了《多因素综合海洋气候环境模拟加速试验方法》企业标准, 规范了试验原理、样品、试验装置、试验条件和试验程序等内容。

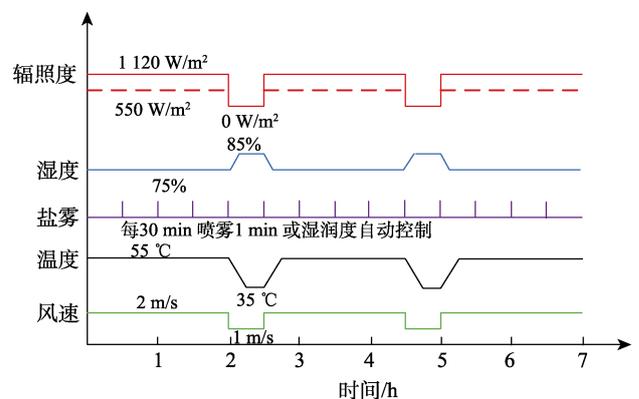


图 8 多因素综合海洋气候环境模拟加速试验谱
Fig.8 The multifactor integrated marine climate simulation and acceleration test spectrum

3.2.2 试验验证

采用本试验箱和试验谱对 ISO 9223 规定的标准

金属样品、塑料样品、涂料样品进行相关性和加速性试验验证。性能变化参数与万宁试验站户外暴露试验数据进行对比分析。标准金属 X 射线光电子能谱腐

蚀产物分析结果见表 8, 结果表明, 同种金属的腐蚀产物的成分和结构基本相同。标准金属腐蚀质量损失和塑料拉伸强度结果见表 9 和表 10。

表 8 X 射线光电子能谱腐蚀产物分析结果
Tab.8 Result of corrosion product analysis by X ray photoelectron energy spectra

样品材料	试验环境	腐蚀产物成分
钢	多因素综合热带海洋气候环境模拟加速试验箱	Fe ₂ O ₃ 、FeO、FeCl ₃
	滨海暴露场	Fe ₂ O ₃ 、FeO、FeCl ₃
	海洋平台	Fe ₂ O ₃ 、FeO、FeCl ₃
铝	多因素综合热带海洋气候环境模拟加速试验箱	Al ₂ O ₃
	滨海暴露场	Al ₂ O ₃
	海洋平台	Al ₂ O ₃
锌	多因素综合热带海洋气候环境模拟加速试验箱	ZnCl ₂ 、ZnO
	滨海暴露场	ZnCl ₂ 、ZnO
	海洋平台	ZnCl ₂ 、ZnO
铜	多因素综合热带海洋气候环境模拟加速试验箱	CuO、CuCl ₂
	滨海暴露场	CuO、CuCl ₂
	海洋平台	CuO、CuCl ₂

表 9 金属和塑料户外暴露试验结果
Tab.9 Outdoor exposure test result of metals and plastics

地点	时间/月	标准金属腐蚀质量损失/g				塑料拉伸强度/MPa		
		钢	铝	锌	铜	PE	PVC	ABS
滨海暴露场	0	0	0	0	0	28.6	17.2	27.3
	1	1.148	0.003	0.054	0.083	26.2	16.9	27.0
	3	2.014	0.010	0.142	0.111	25.8	16.3	24.5
	6	3.836	0.017	0.312	0.321	21.1	16.0	22.7
海洋平台	0	0	0	0	0	28.6	17.2	27.3
	1	2.156	0.006	0.093	0.145	26.4	16.8	26.8
	3	7.136	0.015	0.308	0.213	26.5	16.2	23.0
	6	13.313	0.093	0.637	0.540	19.8	15.6	21.5

表 10 金属和塑料多因素综合热带海洋气候环境模拟加速试验结果
Tab.10 Multifactor integrated marine climate simulation and acceleration test result of metals and plastics

时间/d	标准金属腐蚀质量损失/g				塑料拉伸强度/MPa		
	钢	铝	锌	铜	PE	PVC	ABS
0	0	0	0	0	28.6	17.2	27.3
3	1.722	0.004	0.057	0.044	27.3	17.1	26.7
9	3.021	0.012	0.148	0.058	27.1	16.8	25.5
18	5.754	0.021	0.322	0.171	25.0	16.7	24.6

根据表 9 和表 10 数据, 采用 Spearman 秩相关系数 (R_{rho_s}) 法, 计算秩差和相关系数。计算公式为:

$$R_{rho_s} = 1 - 6 \sum_{i=1}^n d_i^2 / (n^3 - n)$$

式中: d_i 为秩差; n 为参比试样组数。

根据表 9 和表 10 数据, 可以算出标准金属腐蚀质量损失多因素综合热带海洋气候环境模拟加速试验相对滨海暴露场户外暴露试验的秩相关系数为

0.8, 与海洋平台暴露试验的相关系数为 1。塑料拉伸强度下降率相对滨海暴露场和海洋平台户外暴露试验的秩相关系数均为 1。

根据表 9 和表 10 数据, 采用 AF 法算出该多因素综合热带海洋气候环境模拟加速试验相对滨海暴露场户外暴露试验, 钢、铝、铜、和锌的加速比分别为 15.0、12.3、10.0 和 5.3 倍。PE、PVC 和 ABS 等 3 种塑料拉伸强度下降率的加速比分别为 4.3、4.1 和

4.6 倍。采用 ASF, 得出标准金属腐蚀质量损失和塑料拉伸强度下降率相对滨海暴露场户外暴露试验的加速比变化曲线如图 9 图 10 所示。从图 9 和图 10 可以看出, 加速比随试验时间变化。金属腐蚀质量损失, 钢、铝和锌的加速比呈下降趋势, 铜呈上升趋势; 工程塑料拉伸强度下降率, ABS 的加速比呈明显的下降趋势, PE 和 PVC 则变化趋势不明显。

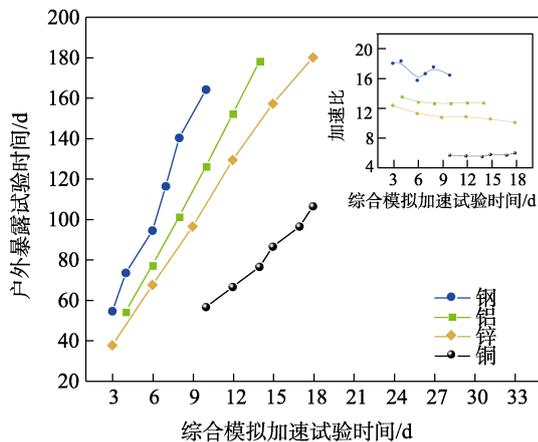


图 9 标准金属腐蚀质量损失的加速比

Fig.9 Acceleration ratio of standard metals weight loss

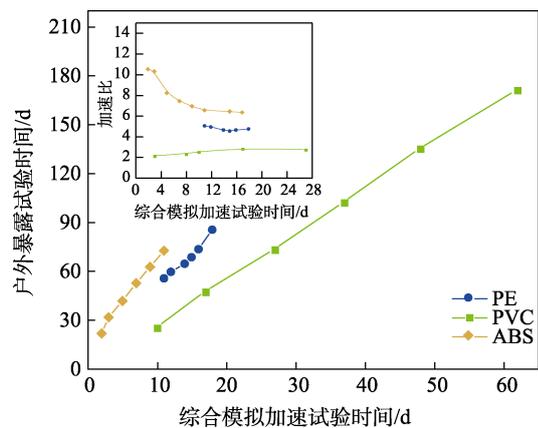


图 10 工程塑料拉伸强度下降率的加速比

Fig.10 Acceleration ratio of engineering plastics tensile strength descent rate

根据色差和光泽测试分析, 环氧富锌底漆+聚氨酯面漆涂层体系、环氧云铁底漆+丙烯酸面漆涂层体系和丙烯酸聚氨酯底漆+聚氨酯面漆涂层体系在万宁站内暴露场户外暴露试验和多因素综合热带海洋气候环境模拟加速试验中的变化趋势和规律基本相同。有机涂层的色差和光泽的秩相关系数均为 1。采用失光评级达到 4 级的时间计算, 上述涂层的加速比分别为 7.5、10 和 8.3 倍。

4 结论

1) 研制了多因素综合热带海洋气候环境模拟加速试验装置, 实现了光照、氯离子沉降、温度、湿度

和风速等 5 种因素的综合模拟和加速。

2) 相对万宁站户外暴露试验, 采用多因素综合海洋气候环境模拟加速试验技术评价金属腐蚀质量损失、工程塑料拉伸强度、有机涂层光泽色差等关键性能指标变化具有良好的相关性和高的加速倍率。

参考文献:

- [1] 骆晨, 李明, 孙志华, 等. 海洋大气环境中飞机的环境损伤和环境适应性[J]. 航空材料学报, 2016, 36(3): 101-107.
LUO Chen, LI Ming, SUN Zhi-hua, et al. Environmental Damage and Environmental Adaptability of the Aircraft in Marine Atmosphere[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(3): 101-107.
- [2] 徐敬明, 胡杰珍, 邓培昌, 等. 风电塔筒材料 Q345D 合金钢在模拟海洋大气环境下的腐蚀规律研究[J]. 材料保护, 2021, 54(3): 64-69.
XU Jing-ming, HU Jie-zhen, DENG Pei-chang, et al. Study on Corrosion Laws of Wind Power Tower Tube Material Q345D Alloy Steel under Simulated Oceanic Atmospheric Environment[J]. Materials Protection, 2021, 54(3): 64-69.
- [3] 刘丽红, 闫杰. 天线罩涂层海洋环境下老化行为研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 175-179.
LIU Li-hong, YAN Jie. Study of the Aging Behaviors of Radome Coatings in Marine Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 175-179.
- [4] 田玉琬, 程学群, 李晓刚. 海洋大气腐蚀的室内模拟加速试验方法研究[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(8): 781-784.
TIAN Yu-wan, CHENG Xue-qun, LI Xiao-gang. A Study of Simulated Indoor Accelerated Testing Method for Marine Atmospheric Corrosion[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(8): 781-784.
- [5] 刘丽红, 胡湘洪. 几种灌封材料西沙热带海洋大气环境效应研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(6): 55-64.
LIU Li-hong, HU Xiang-hong. Marine Environmental Effect of a few Encapsulating Materials in Xisha[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(6): 55-64.
- [6] 朱立群, 李敏伟, 刘慧丛, 等. 高强度钢表面镀锌、镉层加速腐蚀试验研究[J]. 航空学报, 2006, 27(2): 341-346.
ZHU Li-qun, LI Min-wei, LIU Hui-cong, et al. Research of Accelerated Corrosion Test of Zinc, Cadmium Coating on High-Strength Steel[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(2): 341-346.
- [7] 余畅, 周德棕, 陈俊生, 等. 湿热海上风电关键电器部件人工模拟环境试验方法研究[J]. 环境技术, 2017, 35(6): 18-24.
YU Chang, ZHOU De-zong, CHEN Jun-sheng, et al. Research on Artificial Simulation Environment Test Method

- for the Key Electrical Components of Hot and Humid Offshore Wind Power[J]. *Environmental Technology*, 2017, 35(6): 18-24.
- [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 Technology*[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003.
- [9] 王海涛, 韩恩厚, 柯伟. 碳钢、低合金钢大气腐蚀的灰色模型预测及灰色关联分析[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2006, 18(4): 278-280.
WANG Hai-tao, HAN En-hou, KE Wei. Gray Model and Gray Relation Analysis for Atmospheric Corrosion of Carbon Steel and Low Alloy Steel[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2006, 18(4): 278-280.
- [10] 王海涛, 韩恩厚, 柯伟. 基于人工神经网络模型的铝合金大气腐蚀的预测[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2006, 26(5): 272-274.
WANG Hai-tao, HAN En-hou, KE Wei. Predictive Model for Atmospheric Corrosion of Aluminium Alloy by Artificial Neural Network[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2006, 26(5): 272-274.
- [11] 贾志军, 赵泉林, 董超芳, 等. 主成分分析法综合评价我国 13 个大气腐蚀站点的气候因素[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2009, 29(5): 388-393.
JIA Zhi-jun, ZHAO Quan-lin, DONG Chao-fang, et al. Evaluation of Weathering Conditions of 13 Cities in China by Principal Component Analysis[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2009, 29(5): 388-393.
- [12] LYON S B, THOMPSON G E, JOHNSON J B, et al. Accelerated Atmospheric Corrosion Testing Using a Cyclic Wet/Dry Exposure Test: Aluminum, Galvanized Steel, and Steel[J]. *Corrosion*, 1987, 43(12): 719-726.
- [13] 李家柱, 李牧铮, 张军, 等. 人工气候复合加速腐蚀试验机的研究[J]. *环境技术*, 2002, 20(1): 2-8.
LI Jian-zhu, LI Mu-zheng, ZHANG Jun, et al. Development of an Artificial Climatic Complex Accelerated Corrosion Tester and Investigation of Complex Accelerated Corrosion Test Methods[J]. *Environmental Technology*, 2002, 20(1): 2-8.
- [14] 蔡健平, 汤智慧, 张晓云, 孙志华, 刘明, 王永哲, 李牧铮. CET-2000 综合环境试验机及其应用前景[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2004, 16(6): 411-412.
CAI Jian-ping, TANG Zhi-hui, ZHANG Xiao-yun, et al. cet-2000 Comprehensive Environmental Tester and Its Application[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2004, 16(6): 411-412.
- [15] 杨晓然, 彭小明, 杨小奎, 等. 多因素综合高原高寒气候环境模拟加速试验箱研制[J]. *装备环境工程*, 2020, 17(7): 27-33.
YANG Xiao-ran, PENG Xiao-ming, YANG Xiao-kui, et al. Development of Multifactor Integrated Frigid Plateau Climate Simulation and Acceleration Test Chamber[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2020, 17(7): 27-33.
- [16] DRAŽIĆ D M, VAŠČIČ V. The Correlation between Accelerated Laboratory Corrosion Tests and Atmospheric Corrosion Station Tests on Steels[J]. *Corrosion Science*, 1989, 29(10): 1197-1204.
- [17] 牟献良, 田月娥, 汪学华. 碳钢和低合金钢模拟加速试验与大气腐蚀试验的相关性[J]. *环境技术*, 2001, 19(4): 14-17.
MU Xian-liang, TIAN Yue-e, WANG Xue-hua. The Relativity of the Simulated Accelerated Test of Carbon Steel and Low Alloy Steel and Atmospheric Corrosion Test[J]. *Environmental Technology*, 2001, 19(4): 14-17.
- [18] 王艳艳, 宣卫芳, 王一临. 实验室光源暴露试验与户外环境试验相关性研究[J]. *装备环境工程*, 2010, 7(6): 49-52.
WANG Yan-yan, XUAN Wei-fang, WANG Yi-lin. Study of the Relativity between Laboratory Light Sources Exposure Test and Outdoor Exposure Test[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2010, 7(6): 49-52.
- [19] 苏艳, 何德洪, 张伦武, 等. 跟踪太阳反射聚能自然加速试验光热强化效应和相关性研究[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2008, 28(5): 311-315.
SU Yan, HE De-hong, ZHANG Lun-wu, et al. Intensifying Effect and Correlativity of Sun Tracking Energy Concentrated Natural Accelerated Test[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2008, 28(5): 311-315.
- [20] 黄循瑶, 唐其环, 许文清. 敦煌地区太阳紫外辐射占总辐射的百分比[J]. *装备环境工程*, 2018, 15(8): 100-105.
HUANG Xun-yao, TANG Qi-huan, XU Wen-qing. Percentage of Solar Ultraviolet Radiation to Total Radiation in Dunhuang Area[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2018, 15(8): 100-105.
- [21] 魏耀宏, 林振耀. 西昆仑山地区太阳分光辐射分布特征[J]. *高原气象*, 1992, 11(3): 249-258.
WEI Yao-hong, LIN Zhen-yao. Geographic Distribution Characteristics of the Solar Spectral Radiation in the West Kunlun Mountain Region[J]. *Plateau Meteorology*, 1992, 11(3): 249-258.
- [22] 杨晓然, 袁艺, 李迪凡, 等. 高加速自然环境试验系统的研制[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2012, 24(6): 489-493.
YANG Xiao-ran, YUAN Yi, LI Di-fan, et al. Development of Highly Accelerated Natural Environmental Test System[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2012, 24(6): 489-493.

责任编辑: 刘世忠