

列车表面涂层光老化试验加速因子建模研究

宿兴涛¹, 陈凯锋²

(1.北京应用气象研究所, 北京 100029;

2.中国船舶重工集团公司第七二五研究所厦门分部, 福建 厦门 361101)

摘要: **目的** 建立客观、定量的列车表面防护涂层实验室模拟紫外辐射当量对自然太阳紫外辐射的加速因子计算模型。**方法** 以兰新高铁为例, 设计一种建模方案, 主要步骤包括选取建模列车站点、确定站点气象地理区划、计算站点环境变量影响距离、建立站点太阳辐射环境谱, 分别建立二级气象地理区划、一级气象地理区划和全线太阳辐射环境谱, 最后, 建立加速因子模型。**结果** 基于 NASA Surface Meteorology and Solar Energy (SSE) 地面太阳辐射数据, 结合实验室条件, 计算了兰新高铁表面防护涂层紫外光老化试验的加速因子, 约为 9.5。**结论** 上述实验室光老化试验加速因子建模思路, 解决了列车这种跨越大范围区域的装备光老化试验加速因子的计算问题, 简单实用, 可推广至飞机、轮船、汽车等相似装备表面涂层以及金属等其他材料的紫外光暴露试验评价。

关键词: 列车; 涂层; 光老化; 加速因子

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.06.007

中图分类号: TB37

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)06-0039-05

Accelerating Factor Modeling of Ultraviolet Radiation Aging Test of Train Surface Coating

SU Xing-tao¹, CHEN Kai-feng²

(1. Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029, China; 2. Xiamen Branch of Luoyang Ship Material Research Institute, Xiamen 361101, China)

ABSTRACT: The work aims to establish an objective and quantitative calculation model for the accelerating factor in simulated ultraviolet radiation test of train surface coating in the laboratory. Taking the Lanzhou-Wulumuqi High-speed Railway as an example, a modeling scheme was designed. The main steps included the following: selecting modeling train stations, determining site meteorological geographic divisions, calculating the impacting distance of site environmental variables, establishing site solar radiation environmental spectrum and setting up the solar radiation environmental spectrum due to first-level meteorological geographic division, second-level meteorological geographic division and full-scale railway respectively. Finally, an accelerating factor model was established. Based on NASA Surface Meteorology and Solar Energy (SSE) ground solar radiation data and laboratory conditions, the accelerating factor in the ultraviolet radiation aging test of the train surface coating of the Lanzhou-Wulumuqi High-speed Railway was calculated to be about 9.5. The problem of calculating the accelerating factor of the ultraviolet radiation aging test of the equipment across a large area is solved due to above-mentioned modeling scheme of ultraviolet radiation aging test. It is simple and practical and can be extended to the surface coating of similar equipment such as air-

收稿日期: 2020-01-10; 修订日期: 2020-02-15

Received: 2020-01-10; Revised: 2020-02-15

作者简介: 宿兴涛 (1984—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为大气环境仿真。

Biography: SU Xing-tao (1984—), Male, Doctor, Engineer, Research focus: atmospheric environment simulation.

planes, ships and automobiles, and evaluation of UV exposure test of other materials such as metals.

KEY WORDS: train; coating; ultraviolet radiation aging; accelerating factor

目前,利用有机涂层防腐是普遍应用的防腐技术。在大气环境中,有机涂层受环境因素影响,发生老化,是引起涂层失效的主要因素之一,可造成大量资源消耗和严重的经济损失,甚至酿成恶性事故,给设备和生命财产安全带来威胁。用于涂层评价的气候环境试验包括自然环境试验和实验室模拟加速环境试验。自然环境试验相对可靠,但是试验周期长、耗资大、可控性差,难以满足产品研制、试验和快速评价的需求。实验室模拟加速试验具有试验周期短、重现性好的优点^[1],能对涂层体系进行快速有效的评价,是目前广泛应用的气候环境试验技术。

阳光是有机涂层实验室加速试验设计中必须考虑的环境变量。到达地面的太阳光所含紫外线能量一般介于 314~419 kJ/mol 之间,而大部分聚合物的化学键离解能一般为 200~500 kJ/mol^[2]。可见,紫外线具有破坏有机涂层化学键的能量,可引发涂层的自动氧化反应,从而造成老化分解。因此,对涂层的光老化研究主要集中在紫外光老化研究。一般情况下,将自然环境下紫外辐射总量与光老化加速试验箱光辐射能量进行对比,即可得到实验室加速试验的加速因子。国内关于光老化试验加速因子建模研究方面开展过一些工作。叶美琪等^[3]根据厦门海域大气海洋环境条件,通过研究实验室紫外辐射灯模拟的紫外辐射当量与实际太阳紫外辐射的关系,建立了厦门地区实验室加速试验的倍率模型。苏艳等^[4]在江津地区湿热环境下开展跟踪太阳反射聚能自然加速试验与朝南 45°角自然暴露试验,计算了高日辐射季节的加速因子。王艳艳等^[5]采用金属卤素灯对聚苯乙烯进行实验室光源暴露试验,研究了相对于敦煌环境试验站户外自然暴露试验的加速因子。闫杰等^[6]在拉萨试验站研究了涂层太阳跟踪反射聚光户外加速试验相对于自然暴露试验的加速因子。何德洪等^[7]在江津地区对丙烯酸涂料开展的黑箱加速大气暴露试验和朝南 45°角大气暴露试验结果表明,黑箱在该地区夏季使用与朝南 45°角大气暴露试验相关性良好,并得出加速倍率在 3 倍左右。张勇等^[8]采用腐蚀程度对比方法,将有机涂层加速腐蚀试验与自然曝晒试验进行对比分析,证实了研究采用的加速试验环境谱模拟性好,并具有约 2 个周期当量自然曝晒 1 a 的相关性。朱玉琴等^[9]对美国阿特拉斯研发的紫外加速试验系统(UAWS)的跟踪研究表明,在美国佛罗里达朝南 45°方向,UAWS 的紫外强化倍率约为 63 倍。

在进行列车这种具有大范围运行区间的装备表面涂层光老化试验加速因子建模方面,以上研究还存

在一些不足之处:加速因子的研究仅是针对某一特定地区^[3-9];自然环境下太阳辐射数据来源于经验公式,相对于观测数据准确性不足^[3];加速因子来自于与自然环境试验或自然环境加速试验的对比,工程上实施难度大、周期长、花费高^[4-8]。针对上述情况,文中提出一种涂层紫外光老化试验加速因子的计算方法,旨在解决列车这种跨越大范围区域装备的表面防护涂层紫外光老化试验加速因子的计算问题。

1 方案设计

为客观、定量地建立针对列车表面防护涂层的实验室紫外辐射灯对太阳光中紫外辐射的加速因子模型,以兰新高铁为例,设计了如下技术方案。主要步骤包括:选取建模列车站点;确定站点气象地理区划;计算站点环境变量影响距离;建立站点太阳辐射环境谱;建立二级气象地理区划(以下简称二级区划)太阳辐射环境谱;建立一级气象地理区划(以下简称一级区划)太阳辐射环境谱;建立兰新高铁全线太阳辐射环境谱;建立加速因子模型。

文中太阳辐射数据采用美国国家航空航天局(NASA) Surface meteorology and Solar Energy(SSE)数据库资料,关于该资料的详细介绍见参考文献^[10]。

1.1 选取建模列车站点

兰新高铁横跨甘肃、青海和新疆 3 省(自治区),全长 1777 km,其中新疆段正线全长 710 km,甘肃段全长 799 km,青海段全长约 268 km。根据兰新高铁途经站点地理位置,选取兰州、西宁、门源、张掖、高台、酒泉、哈密、吐鲁番和乌鲁木齐 9 站作为参与建模的列车站点。

1.2 确定站点气象地理区划

根据《中国气象地理区划手册》^[11],兰新高铁全线均位于全国一级区划——西北地区以内。进一步细化,位于西北地区中部和西北地区西部两个二级区划内,并且大致以酒泉为界,酒泉以西部分(包括酒泉、哈密、吐鲁番和乌鲁木齐 4 站)位于西北地区西部区划内,以东部分(包括兰州、西宁、门源、张掖和高台 5 站)位于西北地区中部区划内。

1.3 计算站点环境变量影响距离

采用公式(1)确定列车站点环境变量在所处二级区划内的影响距离:

$$X_m = \begin{cases} S_{m,m+1} \times 50\%, m=1 \text{ 或 } m \text{ 站位于二级区划边界} \\ \text{但和 } m+1 \text{ 站属于同一个二级区划} \\ S_{m-1,m} \times 50\%, m=N \text{ 或 } m \text{ 站位于二级区划边} \\ \text{界但和 } m-1 \text{ 站属于同一个二级区划} \\ A_m + S_{m,m+1} \times 50\%, m \neq 1, m \neq N, \text{ 且 } m-1 \text{ 站} \\ \text{和 } m \text{ 站位于不同二级区划} \\ B_m + S_{m-1,m} \times 50\%, m \neq 1, m \neq N, \text{ 且 } m \text{ 站} \\ \text{和 } m+1 \text{ 站位于不同二级区划} \\ S_{m-1,m} \times 50\% + S_{m,m+1} \times 50\%, m \neq 1, m \neq N, \text{ 且} \\ m-1 \text{ 站、} m \text{ 站和 } m+1 \text{ 站位于相同二级区划} \end{cases} \quad (1)$$

式中： X_m 表示列车站点环境变量在所处二级区划内的影响距离； m 表示沿列车运行方向自始发站开始经过的站点序号，1 为始发站， N 为终点站； $S_{m,m+1}$ 表示 m 站和 $m+1$ 站之间距离，同理 $S_{m-1,m}$ 表示 $m-1$ 站和 m 站之间距离； A_m 表示位于 $m-1$ 站和 m 站之

间的二级区划边界与 m 站的距离； B_m 表示位于 $m+1$ 站和 m 站之间的二级区划边界与 m 站的距离。

根据兰新线站点里程表，9 个站点之间，兰州-西宁、西宁-门源、门源-张掖、张掖-高台、高台-酒泉、酒泉-哈密、哈密-吐鲁番、吐鲁番-乌鲁木齐的距离分别为 188、98、199、71、120、571、372、158 km。由于酒泉位于西北地区西部和西北地区中部两个二级区划边界上，在两个二级区划内分别计算其影响距离。由式（1）计算酒泉在西北地区中部和西北地区西部的影响距离分别为 60、285.5 km，兰州、西宁、门源、张掖、高台、哈密、吐鲁番和乌鲁木齐其他 8 个站点的影响距离分别为 94、143、148.5、135、95.5、471.5、265、79 km。

1.4 建立站点太阳辐射环境谱

利用 NASA SSE 地面太阳辐射资料，统计兰州等 9 站月平均地面太阳辐射分布，如图 1 所示。

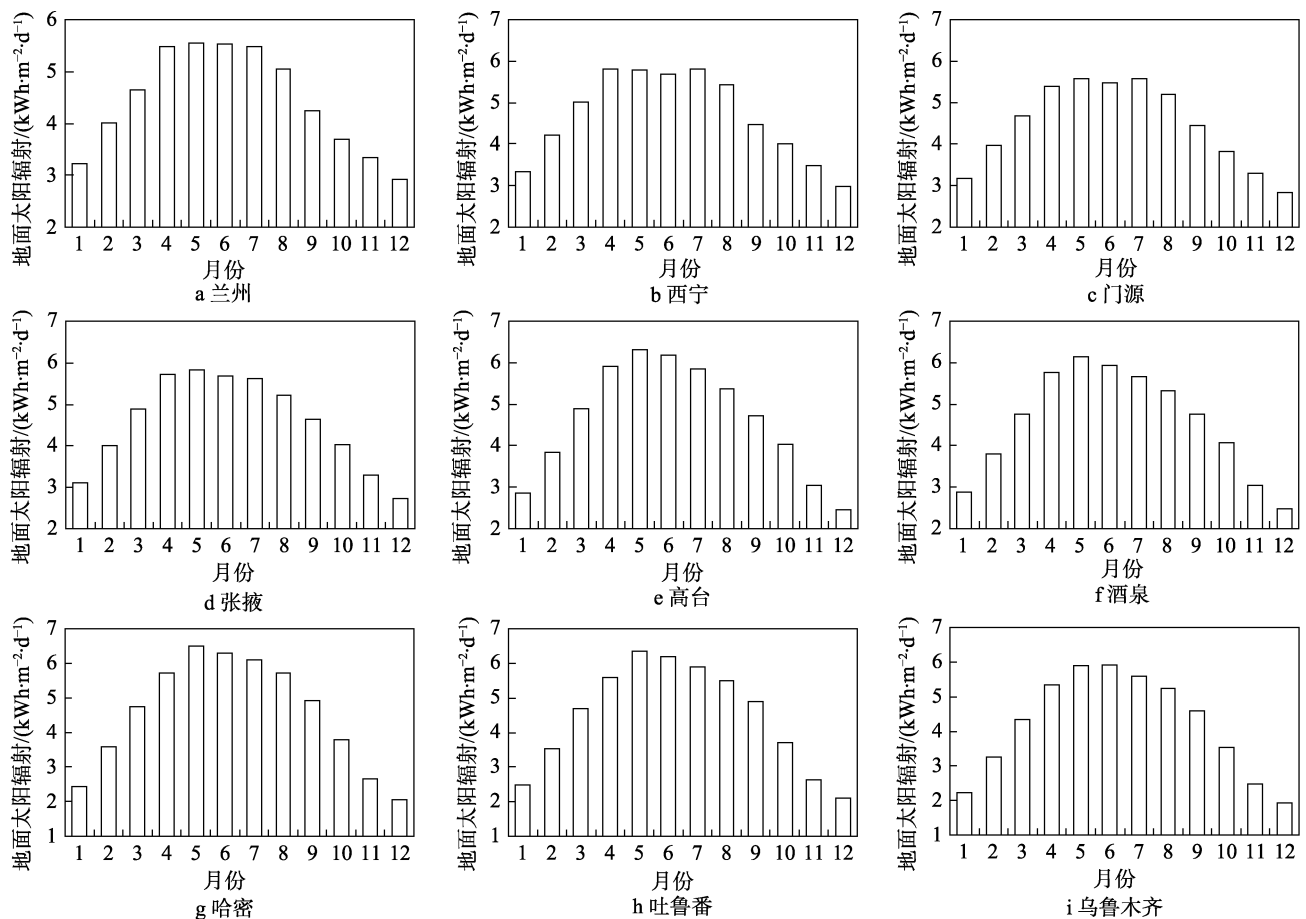


图 1 站点月平均地面太阳辐射

Fig.1 Monthly average ground solar radiation of the station: a) Lanzhou; b) Xining; c) Menyuan; d) Zhangye; e) Gaotai; f) Jiuquan; g) Hami; h) Tulufan; i) Wulumuqi

1.5 建立二级区划太阳辐射环境谱

根据 1.3 节信息，可得到兰新线全线位于二级区

划西北地区中部和西北地区西部内列车运行区间的长度分别为 676、1101 km。计算二级区划内列车运行区间的月平均地面太阳辐射环境谱，具体为：

$$U = \frac{\sum_{m=P}^{m=Q} (W_m \times X_m)}{\sum_{m=P}^{m=Q} X_m} \quad (2)$$

式中: U 为二级区划内列车运行区间的月平均地面太阳辐射; W_m 为 m 站的地面太阳辐射; m 在此二级区划内的取值范围为 $P \leq m \leq Q$, $P \geq 1$, $Q \leq N$ 。

根据站点月平均地面太阳辐射数据和站点环境变量影响距离, 由式(2)计算得到西北地区中部和西北地区西部两个二级区划的月平均地面太阳辐射环境谱, 如图2所示。

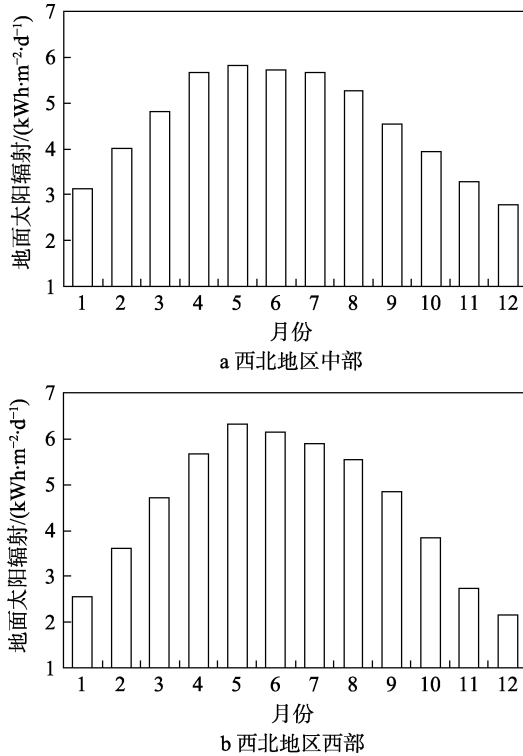


图2 二级区划内列车运行区间的月平均地面太阳辐射

Fig.2 Monthly average ground solar radiation of train operation section in the secondary division: a) central part of northwest China; b) west of northwest China

1.6 建立一级区划太阳辐射环境谱

由式(3)计算一级区划内列车运行区间的月平均地面太阳辐射环境谱:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{i=H} (U_i \times Y_i)}{\sum_{i=1}^{i=H} Y_i} \quad (3)$$

式中: E 为一级区划内列车运行区间的月平均地面太阳辐射; H 表示在此一级区划内的二级区划数量; U_i 为在此一级区划内第 i 个二级区划的地面太阳辐射; Y_i 表示在第 i 个二级区划内列车运行区间的长度。

根据二级区划内列车运行区间长度和二级区划内月平均地面太阳辐射数据, 由式(3)得到一级区划西北地区内列车运行区间月平均地面太阳辐射环境谱, 如图3所示。

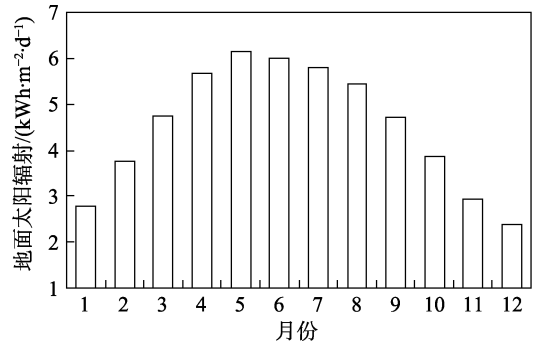


图3 一级区划的月平均地面太阳辐射

Fig.3 Monthly mean ground solar radiation in the first division

1.7 建立全线太阳辐射环境谱

由式(4)计算列车总运行区间的月平均地面太阳辐射环境谱:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^{j=G} (E_j \times Z_j)}{\sum_{j=1}^{j=G} Z_j} \quad (4)$$

式中: R 为列车总运行区间的月平均地面太阳辐射; G 表示在列车运行区间内一级区划数量; E_j 为第 j 个一级区划内列车运行区间的地面太阳辐射; Z_j 表示第 j 个一级区划内列车运行区间的长度。

兰新高线全线均位于一级区划西北地区以内, 因此兰新高铁总运行区间月平均地面太阳辐射环境谱与一级区划西北地区内列车运行区间月平均地面太阳辐射环境谱相同。另外, 根据一级区划内列车运行区间长度和一级区划内列车运行区间月平均地面太阳辐射, 由式(4)也可计算得到列车总运行区间的月平均地面太阳辐射环境谱。

根据月平均地面太阳辐射, 计算列车总运行区间的年平均地面太阳辐射和地面太阳紫外辐射:

$$R_{\text{mean}} = \frac{\sum_{k=1}^{k=12} R_k}{12} \quad (5)$$

$$UV_{\text{mean}} = R_{\text{mean}} \times \eta \quad (6)$$

式中: R_{mean} 为列车总运行区间的年平均地面太阳辐射; R_k 表示 k 月列车总运行区间的地面太阳辐射; UV_{mean} 为列车总运行区间的年平均地面太阳紫外辐射; η 为紫外辐射占太阳总辐射比例, 取为 7%^[3]。

根据列车总运行区间的月平均地面太阳辐射, 由式(5)得到兰新高线年平均地面太阳辐射为 1650 kWh/m², 即 5940 MJ/m²。由式(6)可得兰新高线年平均地面太阳辐射中紫外辐射为 415.8 MJ/m²。

1.8 建立加速因子模型

根据实验室紫外光老化试验条件计算加速因子:

$$F = t_1/t_2 \quad (7)$$

式中: F 为加速因子; t_1 为涂层自然环境试验时间; t_2 为涂层在实验室条件下达到与自然环境试验接

受相同剂量太阳紫外辐射所需时间。

实验室紫外光老化试验采用 UVB-313 灯, 在 310 nm 波长辐照度为 0.66 W/m^2 , 转换为模拟 250~400 nm 紫外波段总辐照度的转换系数为 47.91。在加速试验箱内, 一个方向上设置 4 盏灯, 其每天产生的紫外辐射为 $10.93 \text{ MJ/(m}^2 \cdot \text{d)}$ 。在紫外加速试验箱内产生相当于兰新高铁全线 1 年的紫外辐射量需要的时间为 38.04 d。由式 (7) 得到加速因子为 9.5。

2 结语

为客观、定量地建立针对列车表面涂层的实验室紫外辐射灯对太阳光中紫外辐射的加速因子, 文中以兰新高铁为例, 提供了一种建模思路。主要步骤包括: 选取建模列车站点、确定站点气象地理区划、计算站点环境变量影响距离、建立站点太阳辐射环境谱; 分别建立二级气象地理区划、一级气象地理区划和全线太阳辐射环境谱; 最后, 建立加速因子模型。采用上述建模方案, 基于 NASA Surface Meteorology and Solar Energy (SSE) 地面太阳辐射数据, 计算了兰新高线实验室紫外光老化试验的加速因子。文中提供的加速因子建模思路, 解决了列车这种跨越大范围区域的装备光老化试验加速因子的计算问题, 简单实用, 可推广至飞机、轮船、汽车等相似装备表面涂层以及金属等其他材料的紫外光暴露试验评价。

参考文献:

- [1] 张洪斌, 闫杰, 王斗辉, 等. 大气暴露试验和模拟加速试验相关性研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2013, 31(s1): 317-321.
ZHANG Hong-bin, YAN Jie, WANG Dou-hui, et al. Correlation of Atmospheric Exposure Test and Simulated Accelerated Test[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2013, 31(s1): 317-321.
- [2] 李慧艳, 方月华, 肖葵, 等. 干热大气环境中涂层材料失效行为研究进展[J]. 科技导报, 2012, 30(34): 76-79.
LI Hui-yan, FANG Yue-hua, XIAO Kui, et al. Progress of Failure Behavior of Coatings in Hot and Dry Atmosphere Environment[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(34): 76-79.
- [3] 叶美琪, 王晶晶, 李鲲, 等. 厦门海域紫外光照强度的加速试验模型及紫外辐射加速因子[C]// 2008 材料腐蚀与控制学术研讨会论文集. 青岛: 中国腐蚀与防护学会, 2008.
YE Mei-qi, WANG Jing-jing, LI Kun, et al. Accelerated Test Model and Accelerated Factor of Ultraviolet Radiation in Xiamen Sea Area[C]// 2008 Symposium on Corrosion and Control of Materials. Qingdao: Chinese Society for Corrosion and Protection, 2008.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 闫杰, 刘丽红, 肖杰. 太阳跟踪反射聚光户外加速试验研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(6): 96-99.
YAN Jie, LIU Li-hong, XIAO Jie. Study on Outdoor Accelerated Weathering Test Using Sun Tracking Reflector Concentrated Device[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(6): 96-99.
- [7] 何德洪, 肖敏, 周漪, 等. 黑箱加速大气暴露试验热强化效应和相关性研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(2): 43-47.
HE De-hong, XIAO Min, ZHOU Yi, et al. Research on Heat Intensifying Effect and Correlativity of Black Box Atmospheric Accelerated Exposure Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(2): 43-47.
- [8] 张勇, 丁文勇, 陈跃良, 等. 有机涂层户外曝晒与加速试验对比研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(2): 14-17.
ZHANG Yong, DING Wen-yong, CHEN Yue-liang, et al. Comparison Study on Outdoor Exposure and Accelerated Tests of Organic Coatings[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(2): 14-17.
- [9] 朱玉琴, 杨华明, 杨晓然, 等. 美国阿特拉斯户外紫外加速试验系统跟踪研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(3): 111-115.
ZHU Yu-qin, YANG Hua-ming, YANG Xiao-ran, et al. Tracking Studying on ATLAS's UV-Accelerated Weathering System[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(3): 111-115.
- [10] 胡小韦. 太阳辐射气象站实测数据与 NASA 数据对比分析[J]. 西北水电, 2016(3): 75-78.
HU Xiao-wei. Comparison and Analysis on Data of Solar Radiation from Meteorological Station and NASA[J]. Northwest Water Power, 2016(3): 75-78.
- [11] 中国气象局预测减灾司, 中国气象局国家气象中心. 中国气象地理区划手册[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
Prediction and Mitigation Division of China Meteorological Administration, National Meteorological Centre of China Meteorological Administration. China Meteorological Geographical Division Manual[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006.