

自然环境超高加速光老化试验系统研制

杨万均^{1,2,3}, 崔兵兵⁴, 陈星昊^{1,2}, 杨华明^{1,2,3}, 罗丹^{1,2}, 阿旺旦增^{1,2,3}

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.国防科技工业自然环境试验研究中心, 重庆 400039;
3.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;
4. 重庆大学 光电工程学院, 重庆 400044)

摘要: **目的** 设计一种能够高效强化太阳紫外光辐射强度的自然环境加速试验设备, 在自然环境环境中, 用于高分子材料及制品、零部件的耐光老化高加速试验与快速评估。**方法** 自然环境超高加速光老化试验系统研制主要采用模块化设计思路, 基于3个太阳辐射强化原理, 开展紫外反射镜开发, 设计系统总体结构、试验主机、太阳能供电分系统和控制分系统等, 对主机结构进行有限元强度和变形量分析, 开发以PLC为核心的控制系统和以触摸屏及计算机为媒介的人机交互软件。**结果** 研制的自然环境超高加速光老化试验系统采用太阳能清洁能源供电, 实现了40倍以上的太阳紫外辐射强化。**结论** 研制的自然环境超高加速光老化试验系统加工与制造难度小, 加速倍率高, 环境友好, 使用效费比高, 更适用于户外装备用高分子材料及制品的耐光老化评估。

关键词: 自然环境加速试验; 超高加速光老化; 试验系统; 跟踪太阳; 太阳紫外辐射强化; 反射聚能

中图分类号: U467.5+25

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)07-0168-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.07.021

Development of Ultra-accelerated UV Aging Test System under Natural Environment

YANG Wan-jun^{1,2,3}, CUI Bing-bing⁴, CHEN Xing-hao^{1,2}, YANG Hua-ming^{1,2,3}, LUO Dan^{1,2}, A WANG Dan-zeng^{1,2,3}

(1. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China; 2. Natural Environmental Test and Research Center of Science, Chongqing 400039, China; 3. Lhasa National Observation & Research Station of Materials Corrosion in Atmospheric Environment in Tibet, Lhasa 850100, China; 4. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: Solar ultraviolet radiation is one of the main factors that cause the aging and performance degradation of outdoor polymer materials and products. The work aims to design an accelerated test equipment under natural environment that can effectively enhance the intensity of solar ultraviolet radiation and can be used for the high accelerated test and rapid evaluation of the light aging resistance of polymer materials, products and parts. The development of the ultra-accelerated UV aging test system under natural environment mainly adopted the modular design idea. Based on three principles of solar radiation enhancement the development of the ultraviolet reflector was carried out and the overall structure of the system, the test host, the solar power supply subsystem and the control subsystem were designed. The finite element strength and deformation of the host structure were analyzed, and the control system with PLC as the core and the human-computer interaction software with touch screen

收稿日期: 2022-10-30; 修订日期: 2022-12-22

Received: 2022-10-30; Revised: 2022-12-22

作者简介: 杨万均(1971—), 男, 硕士。

Biography: YANG Wan-jun (1971-), Male, Master.

引文格式: 杨万均, 崔兵兵, 陈星昊, 等. 自然环境超高加速光老化试验系统研制[J]. 装备环境工程, 2023, 20(7): 168-174.

YANG Wan-jun, CUI Bing-bing, CHEN Xing-hao, et al. Development of Ultra-accelerated UV Aging Test System under Natural Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(7): 168-174.

screen and computer as the media was developed. The ultra-accelerated UV aging test system under natural environment was powered by solar energy, which realized more than 40 times of solar ultraviolet radiation enhancement. The test system developed in this work has the advantages of high acceleration rate, environmental friendliness and high efficiency cost ratio, and is more suitable for the evaluation of UV aging resistance of polymer materials and products for outdoor equipment.

KEY WORDS: accelerated test under natural environment; ultra-accelerated UV aging test; test system; solar tracking; solar ultraviolet radiation enhancement; reflected energy accumulation

当太阳光照射到材料及制品表面时, 光波会被反射或吸收, 吸收的光能量传递给受照射的分子。根据降解原理, 一个分子如果吸收到足够多的能量, 将会发生分子结构的改变, 即一个分子吸收的能量一旦超过其键能, 便会产生降解, 出现光老化。这也是高分子链的键合力在具有较高能量的短波长紫外光作用下会出现断链, 化合物出现分解的原因之一^[1-3]。在自然环境中, 太阳辐射的热效应和光化学效应均会对产品性能造成一定的影响, 如非金属材料结构强度和弹性发生变化, 密封完整性破坏, 黏合剂胶黏的表面层压材料(如雷达波吸收材料)起泡、脱落和分层, 非金属材料的变色、粉化、开裂等一系列环境效应^[4-8]。大量研究表明, 高分子材料制品的光老化与太阳辐射累计量有着密切关系, 在不改变老化机理的情况下, 通过强化光辐射能量可以更快掌握其光老化效应^[9-10]。

近年来, 高耐候塑料及制品、耐候涂层、树脂基复合材料等高分子材料在军事和民用产品中应用越来越广泛, 虽然这些材料及制品通过添加光稳定剂、抗氧化剂、消光剂、紫外线吸收剂、优化制备工艺等方法, 大大提升了其耐候性和耐光性。但是, 高分子材料的本身性质决定了其在使役环境下仍然会受到环境的影响, 只不过这一老化过程会比通用高分子材料缓慢很多^[10-11]。这些材料及制品的环境适应性考核中, 现有的自然环境试验技术和方法、自然环境加速试验技术和方法很难在较短的时间内给出一个有效的环境适应性评估结果, 而实验室加速试验方法尚不能全面模拟自然环境下的环境应力^[12], 这就迫切需要具有更高加速倍率的自然环境加速试验技术和装置研发, 以满足高耐候材料及制品的研制单位和使用单位开展其环境适应性评价要求^[13]。

本文提供了一种新型环保的自然环境加速试验系统, 利用多平面镜反射聚能、太阳轨迹双轴跟踪和太阳光谱选择性反射技术, 对太阳辐射紫外光进行超高倍率强化, 使试验样品既承受自然环境介质综合作用, 又受到高强度的紫外辐射, 能更加真实地模拟受试产品在此类环境下的环境效应, 更快地反映出这类材料的光老化特性^[14]。

1 自然环境超高加速光老化的基本原理

1.1 太阳轨迹跟踪^[13-17]

自然环境超高加速光老化其核心便是在自然环境中, 利用一定的物理原理对太阳辐射进行强化, 照射材料及制品, 实现光老化速率的提升。因此, 加深对太阳的了解更有利于对太阳辐射的利用。太阳是位于太阳系中心的一个燃烧的恒星, 地球围绕太阳在一个椭圆轨道上运行, 太阳位于这个椭圆轨道的一个焦点上。在远日点, 地球离太阳的距离为 1.521×10^8 km; 在近日点, 地球离太阳的距离为 1.471×10^8 km, 地球轨道所在的平面就是黄道面, 地球围绕太阳运行 1 周是 1 a, 地球自转 1 周是 1 d, 地球的运行轨迹如图 1 所示。

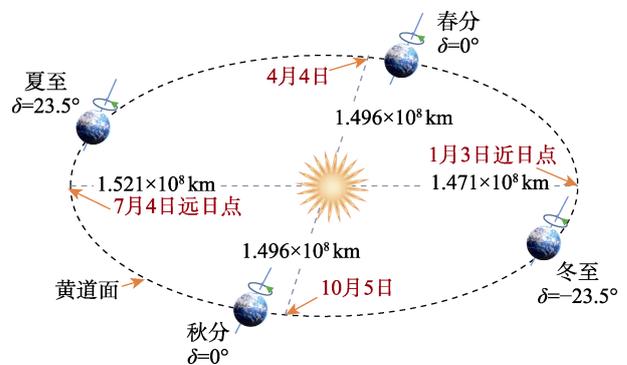


图1 地球围绕太阳的运动轨迹
Fig.1 Trajectory of the Earth around the Sun

当太阳光照射到地面时, 可以将光线看作是一束平行光。根据几何原理, 平行光直射到物体表面时, 光斑最小, 即单位面积接受的辐照量最大, 因此本文研制自然环境超高加速光老化系统用的第一个原理便是太阳轨迹跟踪强化。

以地球为参考面, 太阳的运行轨迹可以用太阳高度角和方位角进行表示, 即满足以下模型:

$$\begin{cases} \sin h = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \tau \\ \cos A = (\sin h \sin \varphi - \sin \delta) \cos h \cos \varphi \end{cases} \quad (1)$$

式中: h 为太阳高度角; δ 为太阳赤纬角; φ 为当地的地理纬度; A 为太阳方位角; τ 为当时的太阳

时角, $\tau = \left(S + \frac{F}{60} - 12 \right) \times 15^\circ$ 其中, S 为太阳时的小时, F 为太阳时的分。

从式 (1) 可知, 只要知道安装地点的经纬度和标准时间, 便可计算获得太阳的实时位置, 实现精确跟踪。

1.2 反射聚能强化^[18-20]

在自然环境加速试验领域, 反射聚能强化是国内外最常采用的一种太阳辐射强化方式, 反射聚能强化便是利用菲涅尔 (Fresnel) 反射原理, 在抛物线的切线方向安装多片平面反射镜。工作时, 平面镜的位置使太阳光的入射角接近法线角度, 每面平面镜反射的太阳光同时照射到样品安装靶板, 实现反射聚能强化。反射聚能强化原理如图 2 所示。

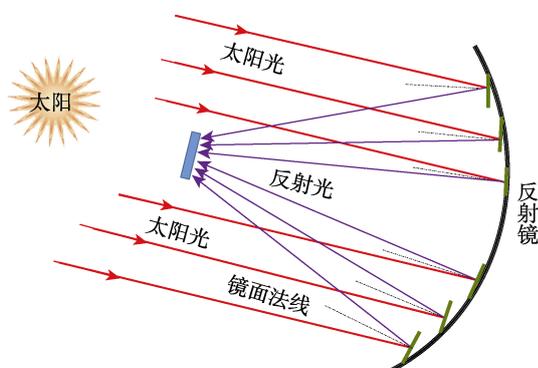


图 2 太阳光反射聚能强化原理
Fig.2 Principle of solar reflection and energy accumulation

1.3 太阳光谱选择性反射^[21-22]

高分子材料的分子吸收光辐射能量的大小是否超过其键强度, 决定了其化学键是否会断裂, 分子结构是否会出现改变和永久损伤。世界气象组织 (WMO) 公布的太阳常数值为 $1\ 368\ \text{W}/\text{m}^2$, 由于大气臭氧层的阻挡, 到达地球表面的太阳光谱中紫外光主要是 $290\sim 400\ \text{nm}$ 。这一波段虽然只占太阳辐射能量的 7%, 但单光子能量高, 是造成高分子材料断链的主要光谱。同时, 为了避免高倍率太阳辐射强化产生的极高温度对受试样品造成意外损伤, 本系统主要利用太阳辐射的紫外光部分, 采用高透镀膜玻璃平面镜, 太阳光照射到该平面镜上, 紫外部分被反射到样品靶板区域, 而可见和红外大部分被透射, 实现太阳光选择性反射, 原理如图 3 所示。

2 系统布局与总体设计

由于自然环境加速试验装置是一种户外工作设备, 需要户外长期可靠工作, 在环境严酷下, 必须兼

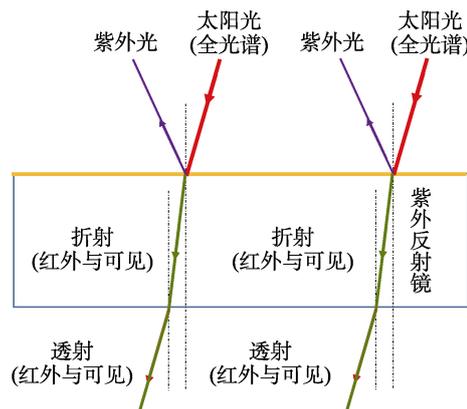


图 3 太阳光谱选择性反射
Fig.3 Selective reflection of solar spectrum

顾较好维修性和较高的自动化水平。本文基于自然环境超高加速光老化的基本原理, 通过机械结构设计、强度仿真, 确定了系统的外形结构, 整个系统的研制涉及总体结构、水平跟踪、俯仰跟踪、旋转驱动机械结构、鼓风降温、喷淋加湿、样品安装靶板及支架设计、镜床、太阳能供电分系统、防护工艺、安全等多个模块和部件^[23]。

本文设计的自然环境超高加速光老化试验系统主要由 3 部分构成, 分别为试验主机、太阳能供电分系统和具有人机交互功能的控制分系统。试验主机主要用于开展超高加速光老化试验; 太阳能供电分系统采用多块组网方式为户外主机和环境数据采集分系统提供清洁能源; 控制软件包括安装于主机上的现场控制器和安装于实验室中的远程监控计算机, 主要用于整个系统的人机交互控制、温度/太阳辐射等环境数据及试验数据的采集。自然环境超高加速光老化试验系统的总体结构布局如图 4 所示。

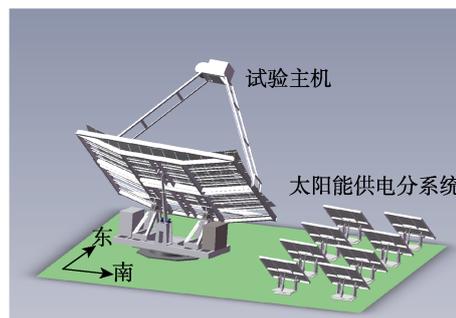


图 4 自然环境超高加速光老化试验系统总体结构布局
Fig.4 Layout of for overall structure of ultra-accelerated UV aging test device under natural environment

3 试验系统主机设计

3.1 机械结构设计

试验系统主机是自然环境超高加速光老化试验系统的核心部分, 根据太阳辐射的强化原理和技术要

求,设计的试验主机长约 4 m,宽约 3.2 m,高约 3.8 m,安装占地面积约 13 m²。试验主机由转动支座、太阳反射部装和样品试验组件构成。

转动支座通过俯仰和水平的二维旋转,实现主机的太阳高度角和方位角跟踪。转动支座由底板、承力框架、回转支承、大行程电动缸等零部件装配而成;反射镜和安装支架等构成太阳光反射部装,安装于转动支座上,由转动支座带动实现水平和俯仰旋转;样品试验组件与反射镜安装支架采用螺纹的刚性连接,样品安装靶板中心与反射镜安装支架中心在一条直线上,使得跟踪状态下,太阳光均能反射至样品靶板。设计的转动支座三维结构如图 5 所示。

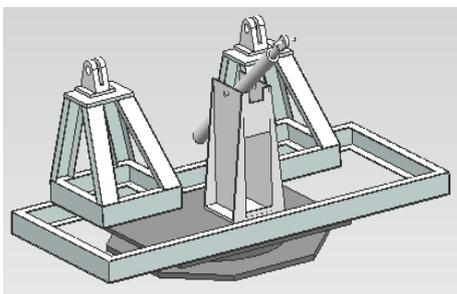


图 5 主机转动支座三维结构
Fig.5 Structure of host rotating support

转动支座既需要承受一定的轴向载荷、径向载荷,还需要承受较大的倾覆力矩,属于典型的承力结构,采用 316L 不锈钢和 6061 铝合金型材或板材加工而成。主机的水平旋转体选择了在工程机械、船舶设备中广泛应用的单排交叉滚柱式回转支承。该型回转支承由 2 个座圈组成,直径为 $\phi 200$ mm,结构紧凑,质量轻,制造精度高,装配间隙小。配合涡轮蜗杆箱,能自锁,转动精度为 $0.001^{\circ}\sim 0.05^{\circ}$,承力大于 20 kN,能自锁,满足水平转动的精度要求。俯仰转动驱动采用推力为 10 kN、行程为 1.5 m 的大推力、大行程电动缸,配合伺服电机,俯仰转动速度在 $0\sim 60$ ($^{\circ}$)/min 可根据转动角度调速。太阳光反射部装的反射镜安装支架(镜床)与样品试验组件为了便于运输和安装,结构主体均采用 6061 铝合金型材焊接成小型构件,然后采用螺接的方式现场组装,其三维结构如图 6 所示。



图 6 反射部装与样品试验组件三维结构
Fig.6 3D structures of reflector and sample test assembly

平面反射镜作为本试验系统的核心零件,90 度平面反射镜采用万向支座固定于安装支架上,选择耐高温和耐腐蚀的基体材料超硼化硅玻璃,将基体材料进行相应的研磨与抛光等镀膜预处理,使其达到相应的技术要求。设计最优化的耐腐蚀结构,利用真空镀膜技术将镀膜材料(TiO_2 和 SiO_2 等)分 32 层镀在基体材料上,制成环境适应性优良的低(频)透高(频)反紫外反射镜,厚度小于 0.05 mm。最后,在真空炉中镀一层氟化物防水防污膜,厚度为 0.001~0.01 mm。研制完成的反射镜反射光谱曲线如图 7 所示,300~400 nm 紫外区平均反射率大于 90%,而 400 nm 以上波段反射率小于 13.8%^[16]。

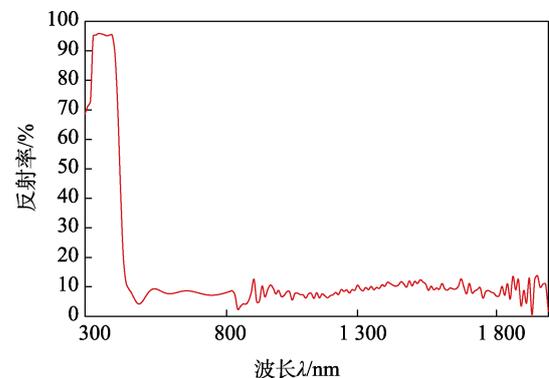


图 7 反射镜反射光谱曲线
Fig.7 Reflected spectrum curve of reflector

3.2 强度与变形仿真分析

自然环境超高加速光老化试验系统属于户外使用的自然加速试验设备,抗风能力是一个重要参数,设计试验主机最大迎风面可达到 12.8 m²,防止 8 级大风下出现结构损坏。采用 ANSYS Workbench 软件对自然环境超高加速光老化试验系统主机结构强度进行了有限元分析(FEA),将反射镜安装支架调整至垂直 90°,以最大迎风面工况检验该装置在 8 级横风(取 20 m/s)下的抗风能力。此仿真计算不考虑镜片及其连接结构,将镜面上的风压直接施加于镜架上,分析装置主体架构的强度与刚度。

将 20 m/s 风速与受风面积换算成作用应力,约为 6 000 N,直接作用于镜架主体结构,最大等效应力出现在电动推杆插销处,约为 102 MPa,仍远低于设计的屈服强度 280 MPa,其余各部分皆处于良好的低应力状态,可见其强度满足抗风要求。

由于样品靶板支臂较长,约为 3.4 m,为了防止变形造成反射光斑偏移,仿真分析了镜床在 90°垂直状态下 X 和 Y 方向(如图 8 所示)上的变形量,试样架按 25 kg 的重物计。结果显示,顶端样品靶板处 Y 向最大变形量达到 19.1 mm 以上。通过更换槽铝选型和增设加强筋,有效地减小了顶端样品靶板处的变形量。在风力作用下,横向位移较小,X 和 Y 方向上

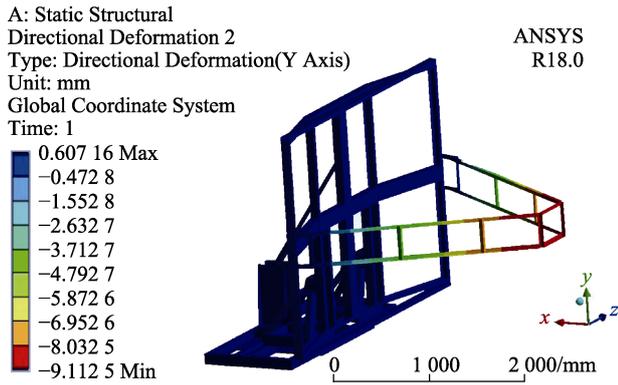


图8 顶端Y向变形仿真结果
Fig.8 Simulation results of Y-direction deformation of device top

的变形量控制在 10 mm 以下。

4 太阳能供电分系统设计

太阳能供电系统包含有太阳能电池阵列、蓄电池组、直流控制器、直流-交流逆变器等。太阳能电池阵列将太阳能转换为电能，通过控制器存储到蓄电池组中。太阳能供电分系统控制器以脉冲方式开关光伏组件的输入，利用最大功率点跟踪（MPPT）技术控制光伏电池以最大功率输出运行。当蓄电池趋于充满时，随着端电压的逐渐升高，脉冲的频率或占空比发生变化，使导通时间缩短，充电电流逐渐趋于 0。当蓄电池电压由充满点开始下降时，充电电流又会逐渐

增大，通过这种充电过程可以形成完整的充电状态，有效地防止过充。同时，本次设计中利用 PMW 控制器来实现 MPPT 功能，控制器为双向的 DC/DC 变换器，既可以工作于放电状态，也可工作于充电状态。

太阳能电池阵列由 16 块太阳能电池板组成，每块电池板尺寸为 1 010 mm×990 mm。太阳能电池板采用单晶硅太阳能电池组件。单晶硅太阳能电池组件具有使用寿命长、衰减小、可靠性高的特点。背板采用原产 EVA、TPT 等材料封装，抗老化能力强，面板采用高透低铁钢化玻璃封装，机械强度高，透光率大于 91%。单块太阳能电池板的功率为 160 W，电压为 36 V，共计 16 块，因此电池板总功率可达 2 560 W，满足试验装置最大功率的要求。

5 控制分系统及软件设计

控制分系统是由现场控制器、远程监控计算机及光纤通信网络等硬件和数据采集与存储、计算与控制及人机交互等软件构成。现场控制器采用具有以太网模块的 PLC 和触摸屏搭建，如图 9 所示。PLC 读取温度（含黑板或黑标温度）、太阳辐射（含紫外、红外和总辐射）、卫星授时、水平/俯仰编码器数据，根据式（1）计算太阳实时的方位角和高度角。根据偏差驱动水平和俯仰跟踪，并按照相应的试验要求或试验程序进行鼓风降温或喷淋加湿。触摸屏用于现场人机交互和试验参数设置，远程计算机采用光纤与 PLC 通信，实时监控并读取装置状态。

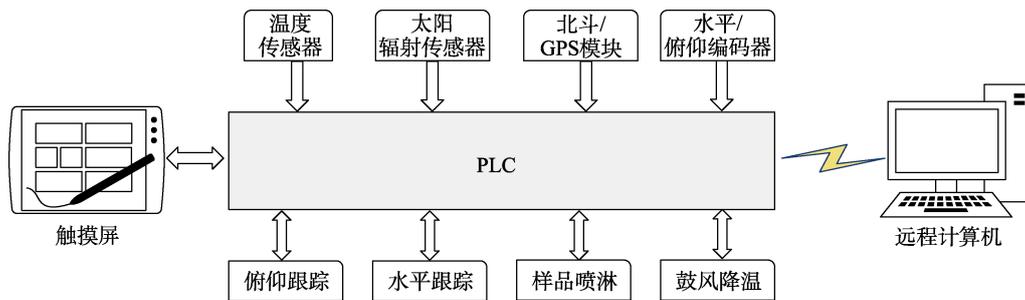


图9 控制器组成
Fig.9 Diagram of controller composition

采用梯形图编制 PLC 控制程序，采用 C++ 高级语言，编写出了计算机远程监控软件和人机交互界面，将计算机与现场 PLC 逻辑控制程序进行了无缝链接，实现了现场和远程的复合监控，为试验开展和装置状态监控提供了便利。数据管理使用的 SQL Server 数据库实现，数据库连接时，调用 AfxOleInit 函数进行相关函数模块的初始化。初始化函数完成后，使用_ConnectionPtr 类中的 CreateInstance 方法设置 ADO 的连接方式，使用_ConnectionPtr 类中的 ConnectionTimeout 方法设置响应超时的时间阈值。按照固定格式设置字符串，该字符串中包含待连接的

数据库信息、连接数据库的用户与密码。调用 _ConnectionPtr 类中的 Open 方法即可与目标数据库建立连接，无论连接成功或失败都会使用 AfxMessageBox 函数弹出对话框，以此提示数据库连接的结果。本系统的数据库中有用户管理、日报、月报、温湿度、辐射量分钟累计、辐射量小时累计和辐射量日累计以及系统状态等数据报表。

6 太阳紫外辐射强化倍率计算

本文研制的自然环境超高加速光老化试验系统，

采用式(2)计算太阳紫外辐射强化倍率。

$$A = \rho \sum_{i=1}^N \cos \beta_i \cos \theta_i \quad (2)$$

式中: A 为靶板处太阳紫外辐射强化倍率; N 为系统采用的平面反射镜数量, 本系统 $N=90$; ρ 为平面反射镜紫外反射率, %; β_i 为第 i 片平面反射镜与镜床平面的侧向倾角, ($^\circ$); θ_i 为第 i 片平面反射镜与镜床平面的高低倾角, ($^\circ$)。

从反射部装的三维结构可以看出, 反射镜被分割成4个互相对称的区域, 每个区域3列6排共18块镜片, 2条对称中心轴线共18块, 合计90块反射镜。安装完成后, 测得一个区域6排的反射镜高低倾角分别为 46.8° 、 41.6° 、 35.4° 、 28.1° 、 19.6° 、 10.1° , 3列的侧向倾角为 37.9° 、 28.1° 、 16.1° 。由此可知, 一个区域内, 反射镜的角度分别为 $(46.8^\circ, 37.9^\circ)$ 、 $(41.6^\circ, 37.9^\circ)$ 、 \dots 、 $(19.6, 16.1)$ 、 $(10.1, 16.1)$, 中心排侧倾角为 0° , 中心列的高低倾角为 0° 。考虑到实际使用过程中反射镜的反射率的衰减, 反射镜反射率 ρ 取 $80\% \sim 90\%$ 。代入式(2), 可得太阳紫外辐射强化倍率为 $48.6 \sim 54.6$ 倍。

7 结语

自然环境超高加速光老化试验系统的研制, 切合了长寿命产品的研制需求和环试技术的发展方向, 着力为武器装备和长寿命产品的环境效应评价和寿命评估提供一种既环保、又快速、试验结果还接近真实的试验评价手段。自然环境超高加速光老化试验系统在户外装备设计选材, 高分子材料、太阳能电池板等产品环境适应性评价、耐久性评估、防护工艺改进等方面具有很好的应用前景^[24-26]。

参考文献:

- [1] IBRAHIM S, OTHMAN N, MOHD NOR Z, et al. Preliminary Study on Photochemical Degradation of Natural Rubber Latex[J]. *Macromolecular Symposia*, 2017, 371(1): 22-26.
- [2] 肖敏, 赵全成, 杨华明, 等. 硅橡胶自然环境加速试验方法与自然环境试验方法等效性研究[J]. *装备环境工程*, 2020, 17(11): 71-78.
XIAO Min, ZHAO Quan-cheng, YANG Hua-ming, et al. Equivalence between Natural Environmental Accelerated Test Methods and Natural Environmental Test Methods of Silicone Rubber[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2020, 17(11): 71-78.
- [3] 于良, 于祝明. 高分子材料老化机理与防治措施分析[J]. *化工管理*, 2021(18): 100-101.
YU Liang, YU Zhu-ming. Analysis on Aging Mechanism and Control Measures of Polymer Materials[J]. *Chemical Enterprise Management*, 2021(18): 100-101.
- [4] 王艳艳, 陈亮, 胡伟. 聚碳酸酯在不同试验方式下的光老化行为研究[J]. *装备环境工程*, 2016, 13(2): 71-76.
WANG Yan-yan, CHEN Liang, HU Wei. Photo-Oxidation Aging Behaviors of Polycarbonate under Various Test Conditions[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2016, 13(2): 71-76.
- [5] 胡行俊. 紫外光与合成材料的光老化[J]. *合成材料老化与应用*, 2006, 35(2): 10-13.
HU Xing-jun. UV-Irradiation and Photo-Aging of Synthetic Materials[J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2006, 35(2): 10-13.
- [6] 胡灏弋, 何郁嵩, 吕亚栋. 天然橡胶光/热氧老化及抗老化性能研究进展[J]. *合成橡胶工业*, 2022, 45(5): 423-429.
HU Hao-yi, HE Yu-song, LÜ Ya-dong. Research Progress on Photo-Oxidative and Thermal-Oxidative Aging and Aging Resistance of Natural Rubber[J]. *China Synthetic Rubber Industry*, 2022, 45(5): 423-429.
- [7] BOCCHINI S, DI BLASIO A, FRACHE A. Influence of MWNT on Polypropylene and Polyethylene Photooxidation[J]. *Macromolecular Symposia*, 2011, 301(1): 16-22.
- [8] GJB 150.7A, 军用装备实验室环境试验方法 第七部分: 太阳辐射试验[S].
GJB 150.7A, Laboratory Environment Test Methods for Military Material—Part 7: Solar Radiation Test[S].
- [9] KANN Y, BILLINGHAM N C. Chemiluminescence is Shedding Light on Degradation and Stabilisation of Plasticised Poly(vinyl chloride)[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2004, 85(3): 957-966.
- [10] 王德, 张泰峰, 杨晓华, 等. 自然曝晒与加速老化试验下航空涂层失光率的当量关系研究[J]. *装备环境工程*, 2020, 17(5): 82-86.
WANG De, ZHANG Tai-feng, YANG Xiao-hua, et al. Equivalent Relationship of Aviation Coatings Gloss Loss between Natural Exposure and Accelerated Aging Test[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2020, 17(5): 82-86.
- [11] 杨勇洲, 姚方刚, 王晓鸥, 等. 光伏组件背板用氟塑料薄膜耐老化性能研究[J]. *电源技术*, 2022, 46(1): 94-97.
YANG Yong-zhou, YAO Fang-gang, WANG Xiao-ou, et al. Study on Aging Resistance of Fluoroplastic Film for PV Module Backplane[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2022, 46(1): 94-97.
- [12] 杨小奎, 张伦武, 张世艳, 等. 塑料大气环境老化预测模型研究[J]. *装备环境工程*, 2019, 16(3): 30-36.
YANG Xiao-kui, ZHANG Lun-wu, ZHANG Shi-yan, et al. Aging Prediction Model of Plastic Exposed in Atmosphere Environments[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, 16(3): 30-36.
- [13] 杨万均, 罗丹, 陈星昊, 等. 高效集热自然环境加速试验设备设计[J]. *装备环境工程*, 2022, 19(4): 132-137.
YANG Wan-jun, LUO Dan, CHEN Xing-hao, et al. Design of Accelerated Test in Natural Environment Equipment for High-Efficiency Solar Thermal Collector[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2022, 19(4):

- 132-137.
- [14] 吴护林, 杨万均, 张伦武, 等. 一种强化光热效应的自然环境加速试验装置及其使用方法: CN109580465A[P]. 2019-04-05.
WU Hu-lin, YANG Wan-jun, ZHANG Lun-wu, et al. Natural Environment Acceleration Test Device for Strengthening Photothermal Effect, and Use Method Thereof: CN109580465A[P]. 2019-04-05.
- [15] 申政, 吕建, 杨洪兴, 等. 太阳辐射接受面最佳倾角的计算与分析[J]. 天津城市建设学院学报, 2009, 15(1): 61-64.
SHEN Zheng, LÜ Jian, YANG Hong-xing, et al. Investigation on Optimum Tilt Angles of Solar Radiation Absorbing Surfaces[J]. Journal of Tianjin Institute of Urban Construction, 2009, 15(1): 61-64.
- [16] 杨金焕, 毛家俊, 陈中华. 不同方位倾斜面上太阳辐射量及最佳倾角的计算[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(7): 1032-1036.
YANG Jin-huan, MAO Jia-jun, CHEN Zhong-hua. Calculation of Solar Radiation on Variously Oriented Tilted Surface and Optimum Tilt Angle[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2002, 36(7): 1032-1036.
- [17] 李迪凡, 杨晓然, 刘聪, 等. 加速自然环境试验装置中太阳跟踪系统研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(3): 56-58.
LI Di-fan, YANG Xiao-ran, LIU Cong, et al. Study of Sun Tracking System for Natural Accelerated Environmental Test Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(3): 56-58.
- [18] 赵立华, 唐其环. 太阳辐射试验标准中的太阳光谱分布[J]. 装备环境工程, 2017, 14(12): 65-70.
ZHAO Li-hua, TANG Qi-huan. Solar Spectral Distribution in Solar Radiation Test Standard[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(12): 65-70.
- [19] 孔德新, 郑小兵, 吴浩宇, 等. 太阳绝对辐照度测量系统中的太阳跟踪系统设计与性能测试[J]. 大气与环境光学学报, 2010, 5(5): 390-398.
KONG De-xin, ZHENG Xiao-bing, WU Hao-yu, et al. Design and Test of Sun-Tracking System in the Observation System of Solar Irradiance[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2010, 5(5): 390-398.
- [20] MOUSAZADEH H, KEYHANI A, JAVADI A, et al. A Review of Principle and Sun-Tracking Methods for Maximizing Solar Systems Output[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(8): 1800-1818.
- [21] 姚春龙, 王银河, 张辉. 近紫外冷反射镜的镀制研究[J]. 真空, 2007, 44(3): 9-11.
YAO Chun-long, WANG Yin-he, ZHANG Hui. Coating Technique for near UV Cold-Mirror Reflector[J]. Vacuum, 2007, 44(3): 9-11.
- [22] 高潮, 郭永彩, 杨文祥, 陈思宇, 张栋莉. 紫外光平面反射镜及其应用以及制备方法: CN111897039A[P]. 2021-07-27.
GAO Chao, GUO Yong-cai, YANG Wen-xiang, et al. Ultraviolet Light Plane Reflecting Mirror, Application and Preparation Method Thereof: CN111897039A[P]. 2021-07-27.
- [23] 曾文波, 张晓东, 王受和, 等. 太阳跟踪聚光高加速老化试验系统特性研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(8): 12-15.
ZENG Wen-bo, ZHANG Xiao-dong, WANG Shou-he, et al. Characteristics of Highly Accelerated Weathering Test System with Sun Tracking Concentrated Device[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(8): 12-15.
- [24] 时宇, 曾湘安, 洪志浩, 等. 太阳跟踪聚光加速老化试验在塑料耐候性领域的应用[J]. 环境技术, 2021, 39(6): 70-77.
SHI Yu, ZENG Xiang-an, HONG Zhi-hao, et al. The Application of Sunlight Tracking and Concentrating Accelerated Weathering Test in Weatherability Evaluation of Plastics[J]. Environmental Technology, 2021, 39(6): 70-77.
- [25] HAILLANT O. Accelerated Weathering Testing Principles to Estimate the Service Life of Organic PV Modules[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, 95(5): 1284-1292.
- [26] 朱晓岗, 沈灿军, 刘毅. 光伏产品综合环境老化试验方法研究[J]. 信息技术与标准化, 2020(9): 59-62.
ZHU Xiao-gang, SHEN Can-jun, LIU Yi. Research of Comprehensive Environmental Sequence Aging Test for Photovoltaic Products[J]. Information Technology & Standardization, 2020(9): 59-62.

责任编辑: 刘世忠