

## 环境试验与观测

## 高效集热自然环境加速试验设备设计

杨万均<sup>1,2,3</sup>, 罗丹<sup>1,2</sup>, 陈星昊<sup>1,2,4</sup>, 肖敏<sup>1,2</sup>, 魏小琴<sup>1,2,3</sup>

(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.甘肃敦煌大气环境材料腐蚀国家野外科学观测研究站, 甘肃 敦煌 736202)

**摘要:** **目的** 设计一种能够高效强化太阳辐射热效应的自然环境加速试验设备, 在自然环境中构建具有极端高温和低温循环条件的试验微环境。**方法** 研发高效集热自然环境加速试验设备, 采用模块化设计, 包括试验箱体、跟踪太阳基座和控制与数据记录部件, 试验箱体5面为双层保温结构, 顶部采用2mm厚单层铝合金板材作箱盖, 并涂覆吸热率大于90%的太阳吸热涂料。然后将黑色试验箱安装于跟踪太阳基座上, 采用PLC对跟踪基座和箱体内试验参数进行一体化控制, 使得箱盖始终与太阳光垂直。**结果** 设计完成的自然环境加速试验设备不但能够实现高效的光热强化, 产生更大的昼夜和季节温差, 同时还兼顾了其他环境介质对试验样品的影响。**结论** 研制的高效集热自然环境加速试验设备加工与制造难度小, 能耗低, 使用效费比高, 更适用于户外装备内部产品的耐环境能力评估。

**关键词:** 高效集热; 自然环境加速试验; 跟踪太阳; 黑色箱体; 光热强化

中图分类号: U467.5+25 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2022)04-0132-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.04.020

## Design of Accelerated Test in Natural Environment Equipment for High-efficiency Solar Thermal Collector

YANG Wan-jun<sup>1,2,3</sup>, LUO Dan<sup>1,2</sup>, CHEN Xing-hao<sup>1,2,4</sup>, XIAO Min<sup>1,2</sup>, WEI Xiao-qin<sup>1,2,3</sup>

(1. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China; 2. Natural Environmental Test and Research Center of Science, Chongqing 400039, China; Tibet Lhasa National Field Scientific Observation and Research Station of Atmospheric Environmental Material Corrosion, Lhasa 850100, China; 4. Gansu Dunhuang National Field Scientific Observation and Research Station for Atmospheric Environmental Material Corrosion, Gansu Dunhuang 736202, China)

**ABSTRACT:** High temperature and high low temperature cycle change are easy to cause material aging, product performance degradation and even failure. This paper designs a equipment of accelerated test in natural environment, which can effectively strengthen the solar radiation heat effect, and uses the natural environment stress to construct the test microenvironment with extreme temperature conditions. The equipment consists of a test chamber, a solar tracking base and a contrallan. Five sides of the test chamber are double-layer insulation structure and the top is made of 2mm thick single-layer aluminum alloy plate. The chamber surface is coated with solar heat absorbing coating, and the heat absorption rate is more than 90%. Then the black test

收稿日期: 2021-03-04; 修订日期: 2021-04-19

Received: 2021-03-04; Revised: 2021-04-19

作者简介: 杨万均(1971—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为环境试验技术与评价。

**Biography:** YANG Wan-jun (1971—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: environmental test technology and evaluation.

引文格式: 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.

chamber is installed on the solar tracking base. PLC was used to control the test parameters of the tracking base and the chamber, so that the chamber cover is always vertical to the sunlight. The designed natural acceleration test equipment can not only achieve high-efficiency solar and heat enhancement, but also produce greater temperature difference between day and night and season, and also take into account the influence of other environmental media on the test samples. The developed high-efficiency solar thermal collector natural environment accelerated test equipment is less difficult to process and manufacture, has low energy consumption and high efficiency to cost ratio, and is more suitable for the evaluation of environmental resistance of internal products of outdoor equipment.

**KEY WORDS:** high-efficiency solar thermal collection; accelerated test in natural environment; solar tracking; black chamber; solar thermal enhancement

装备或产品不管是在贮存或使用过程中均会受到实际环境下各种环境因素的影响, 温度常常作为一个主要因素, 会造成装备或产品出现老化和性能降低, 甚至出现早期失效<sup>[1-3]</sup>。例如, 高温加速材料氧化老化、干裂、裂解或软化、融化, 使绝缘材料加速老化, 电性能下降, 接插件密封胶失效, 电解电容等器件寿命降低; 产品在大温差下因热胀冷缩出现变形、结构损伤, 电子产品内部凝露, 导致短路或损坏等现象<sup>[4-5]</sup>。

对于户外贮存或工作的产品, 温度的影响更是不可忽视, 因为太阳辐射热效应将可能造成产品内部温度出现极端高温, 产生大温差或温度冲击, 加速产品的老化速率或失效进程。例如一些户外安装的通信设备, 太阳辐射造成的温升叠加设备工作诱发环境温度升, 设备内部可能达到 70 °C 以上。张涛等<sup>[6]</sup>研究了汽车整车在我国拉萨、万宁等 5 个典型气候特征的大气环境环境下车体和仪表板的温度分布情况, 在万宁暴露的整车, 仪表板温度最高达到了 117 °C。如此严酷的环境条件下, 必然会引起内部材料老化和产品性能劣化加速<sup>[7-9]</sup>。

为了在研制和设计阶段就充分了解装备或产品内装部件在贮存或使用过程中会产生环境效应和失效规律, 急需一种有效的试验手段, 来合理评估其真实的贮存寿命或对环境的敏感性, 找出影响产品贮存性能和环境适应能力的薄弱环节, 并加以改进, 进而提高产品的环境适应性<sup>[10-12]</sup>。针对这一问题, 如果通过实验室的高温试验或温度冲击试验来加以考核, 不但是能源消耗大, 而且对试验设备也极其严苛, 还不能完全反映出产品的实际服役环境剖面。目前, 利用太阳辐射热效应的自然环境加速试验技术主要有黑框和黑箱。其中, 黑框是将样品安装于框体表面, 增加背板温度来加速材料老化; 黑箱是采用黑色箱体模拟户外使用的产品遭受的环境条件, 主要用于机箱内产品的考核, 具有较好的加速性。因此, 本文提供了一种自然环境加速试验方法, 利用双轴跟踪太阳的黑色箱体, 构建一个极端的微环境, 既实现高温和温度的昼夜循环作用, 又使试验样品承受自然环境介质的综合作用, 能更加真实地模拟受试产品

在此类环境下的环境效应, 而且能耗更低, 适合长时间的持续试验。

## 1 太阳辐射热效应高效强化原理

研发高效集热自然环境加速试验设备的目的是通过太阳辐射热效应的高效强化, 构建一个能够模拟户外装备或产品内部的极端微环境。太阳辐射热效应高效强化主要利用了黑色箱体光热转换高和太阳光直射能量大这 2 个基本原理。

太阳光是太阳发射出来的电磁辐射经过地球大气层过滤照射到地球表面的电磁波, 通常称为日光。当太阳光照射到物体上时, 会产生吸收、反射和折射, 反射不同光谱, 会看到不同颜色。如果物体由于对所有光线均不反射, 则物体显示为黑色。根据能量守恒定律, 黑色物体将光能吸收后, 必然会以其他形式展现出来, 即变成热量, 这些热量便可使物体温度升高。因此, 将金属箱体表面涂覆成黑色便是为了更有效地吸收太阳能, 高导热率金属将转化的热能传导至箱体内部, 通过热辐射形式强化温度效应。

另外, 由于太阳离地球约为  $1.5 \times 10^8$  km, 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, 采用跟踪转台使黑色试验箱体吸热面始终与太阳光线垂直, 进一步增大太阳辐射的利用率<sup>[13-14]</sup>。

## 2 高效集热自然环境加速试验设备设计<sup>[15]</sup>

### 2.1 总体设计

高效集热自然环境加速试验设备在开展试验时, 要求能根据试验样品设定最高温度, 箱内温度均匀性在 3 °C 以内, 作为一种需要户外长期可靠工作的装置, 必须兼顾较好的维修性和较高的自动化水平。结合太阳辐射热效应高效强化原理, 设备采用模块化的设计方式。设计的高效集热自然环境加速试验设备主

要由3部分构成,分别为跟踪太阳转台基座部件、试验箱部件(黑色试验箱体)和控制与数据记录部件。其中,跟踪太阳转台基座部件、黑色试验箱体部件构成跟踪太阳高效集热试验设备机械系统,控制与数据记录部件为跟踪太阳高效集热试验设备电气系统。

黑色试验箱部件安装并牢固固定于跟踪太阳转台基座部件上,控制与数据记录部件对试验箱部件和跟踪太阳转台部件进行控制,形成一个有机整体。控制器部件控制跟踪太阳转台部件动作,以实现太阳高度角和方位角的跟踪,使试验箱顶部始终与太阳光线垂直,同时还控制试验箱内、外循环风机的工作状态,记录箱体内部微环境温度和大气环境温度等参数<sup>[5-9]</sup>。高效集热自然环境加速试验设备总体结构如图1所示。

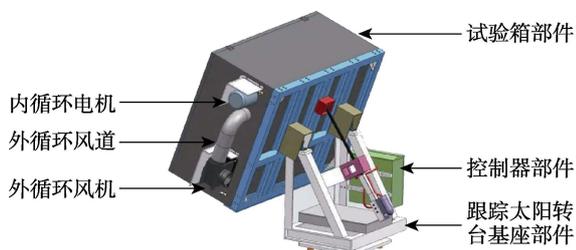


图1 高效集热自然环境加速试验设备总体结构  
Fig.1 Schematic diagram of the overall structure of the accelerated test in natural environment equipment for high-efficiency solar thermal collector

## 2.2 试验箱部件设计

试验箱是本设备的核心部件之一,通过对太阳辐射热效应的强化,内部构建起一个极端的微环境。开展试验时,试验样品安装于试验箱内部,承受极端环境应力,可有效地激发出试验样品的薄弱环节,揭示其在该极端环境下的性能劣化规律。

试验箱部件由箱体、箱盖、内循环组合和外循环组合等部分组成。内循环组合和外循环组合安装于箱体壳体侧面,箱盖通过铰链和气撑安装于箱体顶面,各部分均以箱体壳体作为结构支撑。试验箱结构如图2所示。

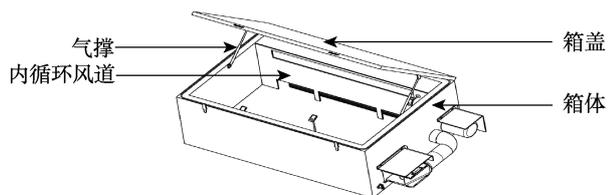


图2 试验箱结构  
Fig.2 Schematic diagram of test chamber structure

箱体四面侧壁和底部采用保温隔热层设计,隔热层厚度为5~10 cm。目前用于隔热层的填充材料主要

有2种,一种是石棉材料,为超细玻璃纤维,即石棉,这种材料性能良好,具有极高的耐热、绝热性能,而且是一种阻燃材料,但是填充过程较为繁琐,操作人员必须佩戴好相应的护具(如口罩、手套等);另一种是硬质聚氨酯发泡,这种材料绝热效果好,质量轻,强度高,可降低箱体金属壁用材厚度,而且施工和安装简单,但是这种材料能够承受的温度范围一般在-40~80℃,在这个温度区间以外,材料将会出现板结,造成隔热效果降低。虽然强化太阳辐射热效应后试验箱体内部温度会超过80℃,甚至更高,但是箱体隔热层内部温度远低于80℃。主要是由于箱体内部采用黑色涂层涂覆,黑色热吸收率高,热发射率也高,使得热能主要集中于箱体内部,而发泡层内温度不会升得过高。因此,本装置箱体主要采用硬质聚氨酯发泡作为保温层。

箱体内部设计的内循环风道,采用具有导向板的下吸上出风路结构,如图3所示。在需要时,使箱体内部空气产生循环,从而使得箱内微环境条件具有较好的均匀性。测试结果表明,通过内循环控制,箱体内部温度均匀性完全可控制在3℃以内,最低可达0.5℃,保证了受试产品的试验环境条件一致。内循环风道内安装风帘风叶,并由安装于箱体外部的内循环电机驱动。由于内循环电机安装在箱体外部,必须保证足够的防护等级,防止因沙尘或淋雨造成电路烧毁,通常可以选用IP65的电机产品。



图3 试验箱内循环风道结构  
Fig.3 Schematic diagram of circulating air duct structure in test chamber

箱盖作为试验箱的关键部件,其作用是将太阳辐射高效地转化为热量,传入试验箱内部,加热箱体内部微环境的空气。因此,箱盖材料将直接关系到本自然加速试验设备的集热效率。作为箱盖材料,必须综合考虑结构强度、耐腐蚀性、加工性和热性能等。其中,热性能包括较低的温升耗能,即吸收同样的热量,温升更高,与箱盖材料比热容和质量有关;较高的传热效果,即高导热系数。几种常用金属材料的比热容和导热系数见表1<sup>[16]</sup>。

从表1中的几种常用金属来看,铝合金从结构强度、可加工性、表面处理后的耐腐蚀性、经济性和热性能综合来看,具有明显优势。虽然其比热容最大,但是由于其密度小,同样尺寸的箱盖,其质量仅约为其他几种材料的1/3,同样的吸热量,同体积铝合金的温升最高,且其导热系数大于200 W/(m·℃)。因此,铝合金可以作为箱盖加工的优选材料。通常采用厚度

表 1 几种常用金属材料的比热容和导热系数  
Tab.1 Specific heat capacity and thermal conductivity of several commonly used metal materials

材料	导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )		比热容/ (kJ·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )
	0 °C	100 °C	
碳钢板	52	48	0.46
不锈钢板	16	17	0.51
锌板	112	109	0.39
铝合金板	230	230	0.88
铜板	383	379	0.39

注: 表中数据仅为近似值, 材料的导热系数会还与材料成分有关。

为 2 mm 的铝合金板, 进行阳极氧化后, 喷涂黑色亚光太阳能吸热涂层, 吸热率应达到 90% 以上。如采用含纳米尖晶石吸光剂的黑色亚光涂层或含其他吸光剂的黑色亚光涂层, 这样既能够保证漆膜附着力, 又能够提高热传导能力, 还能够增强光热转换效率<sup>[17-18]</sup>。

试验箱的外循环既有保证箱体内外环境介质一致性的作用, 又起到在必要时吸入环境大气, 迅速降低箱内温度的作用, 保证箱体内部微环境的环境应力不超过产品承受上限。外循环组合包括安装于箱体外壁的离心风机、波纹软管风道和安装于箱体底部的弹簧式泄压阀。外循环风道与箱体内部连通, 但吸入外环境空气时, 泄压阀会自动打开, 保持内外压差为 0, 避免外循环风机过载损坏。

### 2.3 跟踪太阳转台基座部件设计<sup>[19]</sup>

跟踪太阳转台基座是试验箱的支撑部件, 可水平 360° 旋转和俯仰 90° 旋转, 且能实现自锁, 由控制器控制其转动的角度和位置。从图 1 可以清楚地看出, 跟踪太阳转台基座部件的结构, 包括底座、水平转动机构、俯仰转动机构。

底座是跟踪太阳转台的支撑构件, 采用膨胀螺钉将其固定于水泥基地上, 通常采用不小于 20 mm 厚的 316L 不锈钢板加工而成, 水平转动机构安装于底座上。

水平转动机构主要包括转速为 10~15 r/min 的直流减速电机、实现位置自锁的大变比蜗轮蜗杆箱、角度传感器以及水平转动支架等零件。水平转动支架与蜗轮蜗杆箱输出端刚性连接, 同时连接角度传感器, 直流减速电机驱动蜗轮蜗杆箱运动, 从而带动水平转动机构作水平旋转, 其旋转角度由安装在蜗轮蜗杆箱输出端的角度编码器读出。

俯仰转动机构安装于水平转动支架上, 主要包括箱体支撑架、转动组件、电动推杆和角度传感器等零件。电动推杆外套筒固定在水平转动支架中部, 推杆顶部与箱体支撑架连接, 电动推杆推动箱体支撑架绕着转动组件翻转, 其角度由安装于转动组件的角度传感器给出。

### 2.4 控制器部件设计

控制器部件既要控制跟踪太阳转台基座部件和试验箱体部件, 还要采集和记录多路温度数据。因此, 通常采用 PLC 作为主控单元, 同时配备具有人机交互功能的触摸屏和电气执行元件, 安装于具有双层结构的电气箱内。高效集热自然环境加速试验设备运行方式、系统参数、试验参数等可通过触摸屏进行设定。

由于太阳每天的轨迹符合一个固定的运行模型<sup>[20]</sup>, 其实时角度主要与地理位置(经纬度)和时间有关, 因此控制器 PLC 可以通过 GPS 或北斗系统获得装置安装地点的经度、纬度和标准时间, 计算出当地当时的太阳高度角和方位角。再与俯仰和水平位置传感器的实际值进行对比, 得到控制方向和俯仰、水平的转动角度, 输出相应的控制信号, 执行零件驱动跟踪太阳转台旋转到目标位置, 确保跟踪太阳转台始终跟随太阳, 使得转台上的黑色试验箱体顶面与太阳光垂直, 从而达到强化太阳光辐射效应的目的。

控制器部件还需要进行试验参数的采集, 包括安装于内循环风道出风口和入风口的 2 路温度和大气环境温度数据。当出风口温度和入风口温度差的绝对值超过 3 °C 时, 启动内循环风机, 搅拌箱内空气, 使得箱内温度均匀。夜晚或箱内温度超过设定的温度上限, 启动外循环风机, 实现内外循环, 确保试验温度满足试验样品的上限要求和箱体内部微环境与大气环境介质基本一致。同时, 控制器还可根据需求设置上限温度, 当超过上限温度时, 控制器会控制设备开启外循环降温或离焦降温, 以满足试验要求。

### 3 结语

本文研制的高效集热自然环境加速试验设备, 加工与制造难度小, 使用成本低, 试验效果好, 易于实施。涂覆黑色太阳能吸热涂层的试验箱始终与太阳光垂直, 不仅能够有效强化太阳辐射热效应, 增大试验箱内的升温速率和最大升温量值, 使得安装于试验箱内的试验样品受到更严酷的环境作用, 提升加速性, 而且能够使试验样品承受的环境应力种类与相应的大气环境下基本一致, 提升试验结果的相关性和机理一致性。与常规自然环境试验相比, 本设备可大大缩短试验周期, 有效反映在该自然环境下的老化特征; 与实验室交变湿热箱相比, 其能耗极低, 具有更好的环境友好性, 是一种较为绿色的加速试验技术。

#### 参考文献:

- [1] 文建国, 郭桂友. 弹上电子产品加速寿命试验设计与应用[J]. 舰船电子工程, 2013, 33(2): 99-101.  
WEN Jian-guo, GUO Gui-you. Design and Application of the Accelerated Life Test on Electronic Products of Mis-

- sile[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2013, 33(2): 99-101.
- [2] 陈津虎, 朱曦全, 胡彦平, 等. 航天电子产品加速贮存试验技术综述[J]. *强度与环境*, 2015, 42(5): 11-18.  
CHEN Jin-hu, ZHU Xi-quan, HU Yan-ping, et al. Summarization on Space Electronic Products Accelerated Storage Test Technology[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2015, 42(5): 11-18.
- [3] 彭京川, 郭赞洪, 杨晓然. 多因素综合海洋气候自然加速试验技术相关性和加速性验证[J]. *装备环境工程*, 2016, 13(5): 98-104.  
PENG Jing-chuan, GUO Zan-hong, YANG Xiao-ran. Relativity and Acceleration Verification of Multi-Factors Integrated Marine Climate Natural Accelerated Test Technologies[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2016, 13(5): 98-104.
- [4] 徐友康, 刘德军, 胡鑫. 军用电子产品加速度试验监测问题探讨[J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 2017, 35(3): 30-35.  
XU You-kang, LIU De-jun, HU Xin. Discussion on Acceleration Test Monitoring Problem of Military Electronic Products[J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing*, 2017, 35(3): 30-35.
- [5] 李平, 安富强, 张剑波, 等. 电动汽车用锂离子电池的温度敏感性研究综述[J]. *汽车安全与节能学报*, 2014, 5(3): 224-237.  
LI Ping, AN Fu-qiang, ZHANG Jian-bo, et al. Temperature Sensitivity of Lithium-Ion Battery: A Review[J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2014, 5(3): 224-237.
- [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] 熊可嘉, 王伟, 张万平. 考虑太阳辐射的轿车客舱流场与温度场的数值计算[J]. *制冷与空调*, 2008, 22(6): 12-15.  
XIONG Ke-jia, WANGWEI, ZHANG Wan-ping. Automotive Passenger Compartment HVAC Simulation with Solar Radiation[J]. *Refrigeration & Air-Condition*, 2008, 22(6): 12-15.
- [8] 孔舒婷, 张晓彤, 陈健, 等. 太阳辐射下前挡风玻璃特性对车内热舒适的影响[J]. *建筑热能通风空调*, 2020, 39(9): 24-28.  
KONG Shu-ting, ZHANG Xiao-tong, CHEN Jian, et al. Influence of Front Windshield Characteristics on Thermal Comfort under Solar Radiation[J]. *Building Energy & Environment*, 2020, 39(9): 24-28.
- [9] 彭荣强. 太阳辐射下车辆内外温度场数值模拟[J]. *暨南大学学报(自然科学版)*, 2008, 29(1): 20-24.  
PENG Rong-qiang. Inner and Outer Thermal Field Numerical Simulaton of Vehicle under Solar Radiation[J]. *Journal of Jinan University (Natural Science Edition)*, 2008, 29(1): 20-24.
- [10] 魏小琴, 吴护林, 张伦武, 等. HTPB 推进剂自然环境加速老化试验方法研究[J]. *装备环境工程*, 2018, 15(12): 104-108.  
WEI Xiao-qin, WU Hu-lin, ZHANG Lun-wu, et al. Natural Environmental Accelerated Aging Test Method of HTPB Propellant[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2018, 15(12): 104-108.
- [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 Natural Environmental Accelerated Test Methods in Typical Environment[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2014, 11(2): 26-31.
- [12] 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.
- [13] 史巨峰, 杜明霄. 太阳辐射变化对光伏电站最佳倾角的影响分析[J]. *通信电源技术*, 2020, 37(1): 285-286.  
SHI Ju-feng, DU Ming-xiao. Analysis on the Influence of Solar Radiation Change on the Optimal Inclination Angle of Photovoltaic Power Station[J]. *Telecom Power Technology*, 2020, 37(1): 285-286.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 彭小兰, 王红成. 散热器用 Al-Mg-Si 系 6101 铝合金材料性能优化研究[J]. *东莞理工学院学报*, 2015, 22(3): 7-11.  
PENG Xiao-lan, WANG Hong-cheng. Study of High Property Al-Mg-Si 6101 Alloy for Radiator[J]. *Journal of Dongguan University of Technology*, 2015, 22(3): 7-11.
- [17] 贺佑康, 钟志尧, 钟金山, 等. 一种水性太阳能吸热涂料: CN104387880B[P]. 2016-08-24.  
HE You-kang, ZHONG Zhi-yao, ZHONG Jin-shan, et al. Aqueous Solar Energy Heat-Absorbing Coating:

- CN104387880B[P]. 2020-11-27.
- [18] 王自宇. 一种光吸收率高的太阳能吸热涂料: CN105713502B[P]. 2018-09-21.  
WANG Zi-yu. High-Light-Absorptivity Solar Heat-Absorbing Paint: CN105713502B[P]. 2018-09-21.
- [19] 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.
- [20] 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.

责任编辑: 刘世忠