

DOI: 10.19666/j.rlfed.202310178

塔式太阳能吸热器曲面涂层吸收率 测试方法研究

黄羿琿^{1,2}, 陈冬^{1,2}, 肖刚^{1,2,3}, 祝培旺^{1,2,3}, 帅威^{1,2}, 张添^{1,2}

(1.浙江省清洁能源与碳中和全国重点实验室, 浙江 杭州 310027;

2.浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;

3.浙江大学嘉兴研究院, 浙江 嘉兴 314031)

[摘要] 吸热器涂层吸收率的准确测量对吸热器性能评估、优化具有重要意义。目前吸热器涂层吸收率的实验研究大多局限于平面金属基材。以塔式太阳能熔盐吸热器圆柱形吸热管为研究对象, 提出蓝丁胶法和漫反射盒法 2 种广泛适用的测量曲面涂层吸收率测试方法。蓝丁胶法器材准备简单, 操作复杂; 漫反射盒法器材准备复杂, 操作简单。2 种方法在测量过程中隔绝环境光线干扰, 得到各种涂层附着于平板和圆管表面的测量吸收率, 通过不同涂层在平板和圆管上的吸收率对应关系建立拟合曲线, 从而修正测量数据得到吸热管涂层吸收率, 拟合曲线精确性 $R^2 \geq 0.995$; 不遮光条件下直接测量 2.5 cm 直径吸热管吸收率, 最大相对误差为 13.39%, 使用蓝丁胶法和漫反射盒法后相对误差分别降为 0.27% 和 0.45%, 2 种方法各点结果相对误差之差小于 0.30%, 测量过程中涂层吸收率越大, 各因素对测量结果影响越小; 在蓝丁胶测试方法中, 吸热管直径越大, 测得的吸收率越小。

[关键词] 涂层; 太阳能吸热器; 吸收率; 测试

[引用本文格式] 黄羿琿, 陈冬, 肖刚, 等. 塔式太阳能吸热器曲面涂层吸收率测试方法研究[J]. 热力发电, 2024, 53(4): 1-8.
HUANG Yihui, CHEN Dong, XIAO Gang, et al. Research on measurement methods for curved surface coating absorption of tower solar absorber[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(4): 1-8.

Research on measurement methods for curved surface coating absorption of tower solar absorber

HUANG Yihui^{1,2}, CHEN Dong^{1,2}, XIAO Gang^{1,2,3}, ZHU Peiwan^{1,2,3},
SHUAI Wei^{1,2}, ZHANG Tian^{1,2}

(1.Key Laboratory of Clean Energy and Carbon Neutrality of Zhejiang Province, Hangzhou 310027, China;

2.State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3.Jiaxing Institute of Zhejiang University, Jiaxing 314031, China)

Abstract: The accurate measurement of solar absorber coating absorption is of great significance to the evaluation and optimization of the absorber performance. At present, the experimental researches of absorber coating absorption are mostly limited to the flat metal substrate. By taking the cylindrical tube of tower solar molten salt absorber, two widely used measurement methods for testing the absorption of curved surface coatings are proposed. The equipment preparation of Blu-Tack method is simple but the operation is complex, and the equipment preparation of diffuse reflection box method is complex but the operation is simple. The two methods isolate the interference of ambient light during the measurement process, and obtain the measured absorption of various coatings attached to the surface of plate and tube. The fitting curve is then established by the corresponding relationship between the absorption of different coatings on the plate and tube, so as to modify the

收稿日期: 2023-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(52176207); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2022ZFJH004)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (52176207); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2022ZF JH004)

第一作者简介: 黄羿琿(1998), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为塔式光热发电, 22127060@zju.edu.cn.

通信作者简介: 祝培旺(1987), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为太阳能热发电、规模化储热、压缩气体储能和多能互补, zhupw@zju.edu.cn.

measured data to obtain the absorption of the absorber tube coating. The results show that, the accuracy of the fitting curve $R^2 \geq 0.995$, the maximum relative error is 13.39% when the absorption of 2.5 cm diameter tube is measured directly under unshaded conditions, and the relative error reduces to 0.27% and 0.45% by using Blu-Tack method and diffuse reflection box method, respectively. The difference of the relative error of each point of the two methods is less than 0.30%. The greater the coating absorption, the less the influence of each factor on the measurement results. In the test method of Blu-Tack, the larger the tube diameter, the smaller the measured absorption.

Key words: coatings; solar absorber; absorption rate; testing

塔式太阳能热发电技术具有光热转化效率高、储热系统和发电规模可扩展性强等优点,被认为是最具发展潜力的光热发电技术之一^[1-3]。

塔式太阳能电站利用镜面将太阳辐射能反射到吸热器上,进一步由附着涂层的吸热管实现光到热的转换^[4],吸热器的效率是决定发电能力的关键因素之一。太阳能吸热器的热效率与吸热管表面涂层吸收率密切相关,太阳能吸收涂层是决定吸热器效率的重要因素^[5-7]。

吸热器吸热管的涂层吸收率是检验光热电站运行效率的关键指标。何梓年等^[8]利用半球向全发射率测定装置测定金属、太阳能选择性吸收涂层和其他低发射率涂层的吸收率。齐锡龄等^[9]设计了1种高真空腔装置,基于能量平衡原理测量以金属薄板为基材的涂层吸收率。Fussell 等人^[10]使用了1种动态热真空技术,测量航天器涂层的太阳吸收率和热发射率。张宇峰等^[11]基于傅里叶光谱仪和积分球,研制了能够测试金属基板上太阳能选择性吸收涂层吸收率,并防止高温氧化的高真空测量装置。但是以上测试方法与测量装置都是以金属平板上的涂层为对象,缺乏针对曲面样品表面涂层吸收率测试方法的研究。

测量过程中,涂层的吸收率受多种因素影响。Coventry 等人^[12]将不同厚度的耐高温尖晶石涂层应用于4种不同金属基板材料,发现较薄的涂层性能比较厚的涂层好,或两者性能相同。Reoyo 等人^[13]研究了4种合金基板(T91、T22、VM12、Inconel 617)上选择性吸收涂层的高温耐久性能。Ho 等人^[14]研究了不同入射角度和不同温度对涂层的吸收率和发射率的影响,并分析了涂层厚度、金属基材材料、入射角度和温度对涂层吸收率等性能的影响。

工程实际运用中,往往使用管材作为涂层基材,更关注吸热器长期运行过程中吸热管表面涂层吸收率的变化。管材在实验过程中热应力、光照角度、光强均匀性等与金属平板截然不同,其涂层吸收率变化规律也与金属平板涂层不同,难以根据平板涂层吸收率变化推算得到管材涂层吸收率。另外,已投

入运行的吸热器涂层吸收率难以测量,只能通过管材涂层长期老化实验,或建立模型挖掘数据对工程项目管材涂层性能变化进行预测。为精确获知吸热管涂层的吸收率、研究管材涂层吸收率变化规律、优化光热电站的运行策略、提高系统热效率和安全性,有必要研究吸管表面涂层吸收率测试方法。

1 吸收率测量原理与测试系统

物体对投入辐射所吸收的百分数称为该物体的吸收率,实际物体的吸收率大小取决于吸收物体本身的情况和投入辐射的特性 2 方面因素。物体本身的情况系指物质种类、物体温度以及表面状况^[15]。

涂层吸收率在测试过程中受到多种因素影响,如温度、入射光线偏振方向、入射角度等。其中,入射角度对测量结果影响很大。涂层对不同入射角度的光线吸收率不同:入射角越小,越接近垂直入射,涂层吸收率越大;入射角越大,越接近平行入射时,涂层吸收率越小^[14]。在测量平板涂层吸收率时,测试光线垂直入射平板,在涂层不透光的情况下,部分光线被涂层吸收,剩余光线被反射,测量系统接收反射光线后根据测试光线与反射光线的能量不同,计算得到涂层吸收率。

1.1 真实吸收率与曲面测量吸收率

对于测量吸热器吸热管这类弯曲表面涂层的吸收率时,测试光线为平行光,管材表面各点接收光线的入射角度各不相同,测试时管材表面各点对测试光线的吸收率也各不相同。使用这种方法测试得到的吸收率称为曲面测量吸收率。光线反射时,由于曲面各点反射角度不同且测试装置的通光孔不能完全贴合曲面,导致部分反射光线汇聚或发散到外界,必须使用遮光装置隔绝外界环境,但这也使得光线二次反射和吸收,影响测量结果准确性。

测量平板涂层得到的吸收率称为真实吸收率,真实吸收率是涂层某点吸收垂直入射光线的百分数。曲面测量吸收率是真实吸收率因为入射光线入射角度不同和反射光线存在二次反射与吸收等原因得到的偏差值。为修正曲面测量吸收率,本文设

计了蓝丁胶法和漫反射盒法隔绝外界光线,利用相同涂层真实吸收率和曲面测量吸收率的对应关系,建立拟合曲线,将待测样品曲面测量吸收率代入拟合曲线方程,得到修正后的吸收率,称为点吸收率。

1.2 积分球测试系统

积分球是一种在光度学和辐射度学等领域广泛使用的光学仪器^[16-17],其内表面涂有高漫反射材料,并且在球体表面根据测量需求设置有通光孔^[18]。当光线从通光孔进入球体后,经由内壁的漫反射材料进行多次漫反射,使得光线在球体内表面均匀分布,目的是尽可能地形成一个理想的朗伯体,从球体表面任意一点向球内观察时,观察到的光线光亮度相同。这减少了试样与测量仪器间受光面不均匀和偏振带来的影响,有效提高了测量精度^[11]。积分球测试系统如图1所示,主要部件有分光光度仪、积分球、光电探测器^[19]。

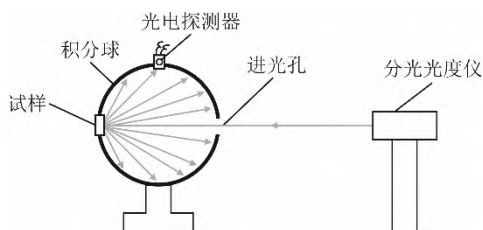


图1 积分球测试系统示意

Fig.1 Schematic diagram of the integral ball testing system

太阳辐射按波长可分为三部分,可见光、红外线、紫外线波段所占能量分别为50%、43%、7%,太阳辐射99%的能量位于150~4 000 nm波段^[20-21]。针对太阳能涂层的光谱辐射特性,光源的光谱波长范围应为300~2 500 nm^[22]。

太阳能吸收率是太阳能吸收涂层光学效率的主要指标,被用于聚光太阳能热发电电站整体效率计算^[23]。太阳能吸收涂层不透光(透射率为0),根据能量守恒定律,太阳能吸收涂层的吸收率为^[24]:

$$\alpha(\lambda) = 1 - \rho(\lambda) \quad (1)$$

式中: α 为太阳能吸收涂层光谱吸收率; ρ 为太阳能吸收涂层光谱反射率; λ 为波长, nm。

标准样品的涂层材料光谱反射率已知,则波长 λ 下试样涂层材料反射率为:

$$\rho_s(\lambda) = \frac{I_s}{I_0} \cdot \rho_0(\lambda) \quad (2)$$

式中: ρ_s 为试样涂层材料光谱反射率; ρ_0 为标准样品涂层材料光谱反射率; I_s 为涂层试样在 λ 波长下的光电探测器读数, W/m²; I_0 为标准样品在 λ 波长下

的光电探测器读数, W/m²。

美国材料与试验协会(ASTM)发布的太阳光直射光谱辐照度AM1.5D常用于光热发电行业,根据该太阳光谱的分布,对每个试样在不同特定波长下的反射率进行计算,得出每个试样在该次检测条件下的反射率为^[25]:

$$\rho = \frac{\sum_{300}^{2500} \rho_s(\lambda) E_\lambda \Delta\lambda}{\sum_{300}^{2500} E_\lambda \Delta\lambda} \cdot 100\% \quad (3)$$

式中: E_λ 为太阳直射光谱辐照度, W/(m²·nm); ρ 为检测条件下的试样涂层材料反射率; ρ_s 为试样涂层材料在 λ 波长的反射率; $\Delta\lambda$ 为波长间隔, nm。

2 管材涂层样品吸收率测试方法

积分球测试系统可以精确测得平板涂层的吸收率,但在测量曲面涂层样品时,因为通光孔无法与曲面样品紧密贴合,会出现漏光现象,测量结果相对误差约10%。为此本文提出使用遮光装置防止测试系统光线照射到外界,再根据不同涂层曲面测量吸收率和真实吸收率的对应关系建立拟合曲线,修正样品测量值。根据遮光装置材料的不同,该测试方法分为蓝丁胶法和漫反射盒法。

2.1 蓝丁胶法和漫反射盒法

以塔式太阳能熔盐吸热器吸热管为例,2种测试方法也可用于其他规则或不规则曲面样品吸收率测试,具体方法如图2所示。积分球测试系统光源的光线通过通光孔直接照射在吸热管上,其反射光被遮光装置阻挡,重新进入通光孔,由积分球测试系统得到吸热管的吸收率。

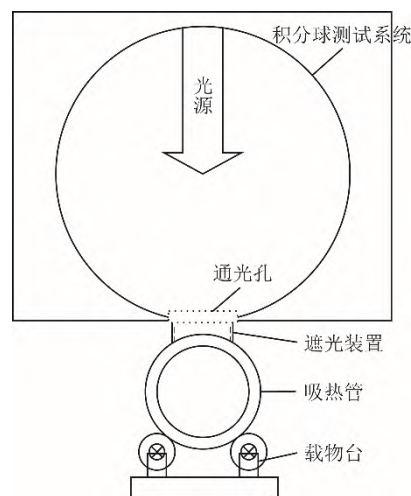


图2 吸热管涂层吸收率测量示意

Fig.2 Schematic diagram of measurement of the solar absorber tube coating absorption

蓝丁胶方法主要使用蓝丁胶这类柔性的天然橡胶或树脂材料作为遮光装置, 填补通光孔与试样之间的缝隙, 隔绝外界环境防止漏光, 使得光源的测试光线直接照射到试样上, 且反射光经由柔性材料反射进入积分球。蓝丁胶方法优点在于可适应各种形状的曲面样品、通用性高, 缺点在于测量操作较复杂。

蓝丁胶和漫反射盒测量装置如图 3 所示。为保证多次测量结果稳定, 使得试样与通光孔之间的蓝丁胶厚度一致, 将蓝丁胶平铺在图 3a) 模具上, 该模具圆台凸起部分直径与通光孔一致, 厚度为 2.5 mm, 把蓝丁胶制作成图 3c) 厚度为 2.5 mm 的扁平空心圆环, 将蓝丁胶圆环贴合通光孔, 再将吸热管与蓝丁胶贴合, 利用蓝丁胶填补可能漏光的部位, 确保通光孔光线无遮挡直射样品, 且无漏光现象 (图 3b))。

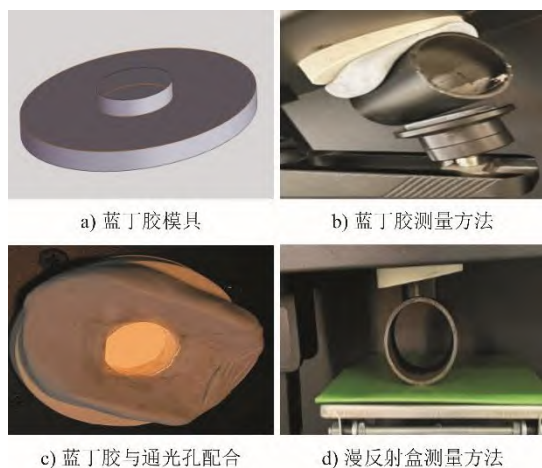


图 3 蓝丁胶和漫反射盒测量装置

Fig.3 The measurement devices of the Blu-Tack and diffuse reflection box

漫反射盒法则是利用内壁为漫反射材料的金属模具, 紧密贴合通光孔和试样, 从而防止漏光 (图 3d))。漫反射盒法优点在于操作简单、测量方便, 缺点在于需要针对不同形状曲面样品准备不同规格的漫反射盒。

现常用的积分球测量方法为分光光度法的分支, 受限于直径约 20~30 mm 的圆形测量孔^[11], 且要求待测样品贴合测量孔^[18], 对样品平整度要求较高。该测试方法使用光学隔离器件, 实现外部光线屏蔽, 其优点在于: 1) 通用性强, 可测量各种尺寸大小的样品; 2) 拓展性好, 不仅可测量圆管、球形等规则曲面, 还可测量不规则曲面, 如波浪面、凹凸面等。

上述 2 种方法均可测得曲面涂层样品吸收率,

该吸收率为曲面测量吸收率, 因为光线入射角度不同和反射光线的二次反射吸收, 需要将曲面测量吸收率修正为点吸收率。测试同种涂层的平板样品得到真实吸收率, 将其与通过上述方法测量出的曲面测量吸收率一一对应。以测量吸热管涂层吸收率为例, 具体步骤如下:

1) 准备与该吸热管相同外形的多个圆管, 喷涂不同吸收率的喷漆或涂料, 其吸收率范围应覆盖吸热管涂层吸收率;

2) 使用积分球测试系统和遮光装置测量各吸热管测试曲面测量吸收率;

3) 利用各吸热管测量出的曲面测量吸收率和喷漆或涂料的真实吸收率对应关系得到拟合曲线 (拟合曲线横坐标为不同喷漆或涂料的曲面测量吸收率, 纵坐标为不同喷漆或涂料的真实吸收率, 横坐标数据来源于步骤 2) 的测量, 纵坐标数据来源于喷漆或涂料产品说明数据, 或其喷刷在平板上的吸收率测量值);

4) 使用步骤 2) 的方法测得吸热管样品曲面测量吸收率, 再根据步骤 3) 的拟合曲线, 将样品曲面测量吸收率代入拟合曲线方程, 得到吸热管样品修正后的点吸收率值。

2.2 吸热管曲面测量吸收率测试方法

准备 50 mm×50 mm×2 mm 的不锈钢平板 7 块; 准备直径 2.5~5.0 cm、长 5 cm、厚 2 mm 的不锈钢圆管, 6 种直径各 7 个, 共 42 个。平板与圆管材质皆为不锈钢 310S。用相同粗糙度砂纸打磨金属平板和圆管表面并清洗烘干, 并在其表面分别喷涂 6 种手喷漆或太阳能吸收涂层, 1 组平板和圆管不喷涂涂料。因应用背景为塔式太阳能熔盐吸热器涂层, 吸收率约 95%, 长期高温老化后吸收率约 90%, 故选择涂料吸收率范围为 60%~97%。使用积分球测试系统测量平板真实吸收率, 分别在不遮光、使用蓝丁胶法、使用漫反射盒法 3 种条件下测试各圆管的曲面测量吸收率, 测试数据取 5 次测试平均值。记录数据后建立蓝丁胶法和漫反射盒法的 2.5~5.0 cm 吸热管吸收率拟合曲线, 用于将吸热管的曲面测量吸收率修正为对应涂层的点吸收率。所以拟合曲线设横坐标为曲面测量吸收率, 纵坐标为真实吸收率。

2.3 拟合曲线精确性分析

通过蓝丁胶法和漫反射盒法测得 2.5~5.0 cm 吸热管 6 种直径 7 种不同吸收率表面的曲面测量吸收率, 得到 2 方法各直径吸热管真实吸收率和曲面测

量吸收率的对应关系，并建立了 12 根拟合曲线。每根曲线存在 7 个测量数据点和 1 个虚拟数据点，虚拟数据点坐标为(100%,100%)，认为涂层吸收率为 100%时，曲面测量吸收率必为 100%。

拟合方法为 B 样条曲线拟合，该方法根据多个离散点进行分段拟合，使用低幂次多项式作为各段的拟合曲线，以一定约束条件将各段形成一条平滑的曲线，B 样条曲线公式如下：

$$P(t) = \sum_{i=0}^{n-1} P_i B_{i,d}(t), t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, 2 \leq d \leq n \quad (4)$$

式中： $P(t)$ 为曲线上的点坐标向量； P_i 为离散点坐标（ i 从 0 开始）； n 为离散点 P_i 数量； $B_{i,d}(t)$ 为离散点坐标影响权重的多项式系数（下标 i 代表坐标的编号， n 代表多项式最高幂数）； d 为影响 B 样条曲线的幂数； t 为绘制曲线时的取值。

图 4、图 5 分别为蓝丁胶法和漫反射盒法的拟合曲线。由图 4、图 5 可见，真实吸收率越大，吸热管直径、测试方法等因素对曲面测量吸收率影响越小，各拟合曲线更趋于同一曲线。

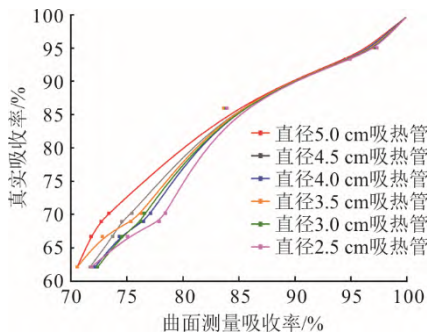


图 4 蓝丁胶法测试吸热管吸收率拟合曲线
Fig.4 The absorption fitting curves of cm absorber tube tested by Blu-Tack method

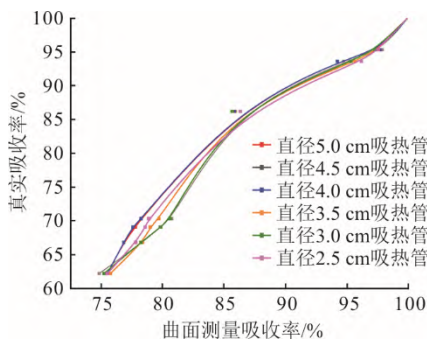


图 5 漫反射盒法测试吸热管吸收率拟合曲线
Fig.5 The absorption fitting curves of absorber tube tested by diffuse reflection box method

使用 R^2 和均方根误差 δ_{RMSE} 评价拟合曲线的精

度。蓝丁胶法拟合曲线 R^2 不低于 0.995， δ_{RMSE} 不大于 0.75%；漫反射盒法拟合曲线 R^2 不低于 0.995， δ_{RMSE} 不大于 0.65%。可见，2 种方法拟合曲线精确度均较高。

表 1 不同直径吸热管拟合曲线 R^2 与 δ_{RMSE}

Tab.1 The fitting curve R^2 and δ_{RMSE} of the absorber tubes with different diameters obtained by the above two methods

项目		不锈钢圆直径/cm					
		5.0	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5
蓝丁胶法	R^2	0.998	0.997	0.996	0.996	0.996	0.995
	$\delta_{RMSE}/\%$	0.53	0.65	0.66	0.70	0.68	0.75
漫反射盒法	R^2	0.997	0.995	0.997	0.995	0.995	0.996
	$\delta_{RMSE}/\%$	0.51	0.62	0.52	0.64	0.65	0.57

3 吸收率修正结果与影响因素分析

3.1 吸收率修正结果误差分析

对不遮光、使用蓝丁胶法、使用漫反射盒法 3 种条件下的吸热管测试曲面测量吸收率。不遮光条件下测试结果无需修正，因为受外界光线影响大，误差波动严重，无法在多次测量时得到稳定值，作为对照组。

使用蓝丁胶法和漫反射盒法的曲面测量吸收率结果共 12 根曲线，每根曲线 8 个数据点，取每根曲线最大值和最小值外的任意一数据点，将该点视为待测点，剩下 7 个数据点重新生成拟合曲线。根据重新生成的拟合曲线，将待测点曲面测量吸收率代入拟合曲线方程修正为一点吸收率值。该值与待测点原真实吸收率值之差，为待测曲面涂层样品曲面测量吸收率通过拟合曲线修正为点吸收率的误差。

图 6 为以 2.5 cm 吸热管为对象，不遮光条件、使用蓝丁胶法修正、使用漫反射盒法修正后和理想真值吸收率曲线。同一真实吸收率下曲面测量吸收率或修正后的点吸收率与理想真值的差即为该点误差，与理想真值曲线的远近可反应误差大小。由图 6 可见，不遮光条件下最大相对误差为 13.39%，经过蓝丁胶法和漫反射盒法修正后该点相对误差分别为 0.27%和 0.45%。不遮光条件下，涂层真实吸收率越小，相对误差越大。真实吸收率为 60%~95%时，不遮光条件下曲面测量吸收率相对误差为 2%~13%，平均相对误差为 7.07%，经过蓝丁胶法和漫反射盒法修正后平均相对误差分别为 0.38%和 0.30%。

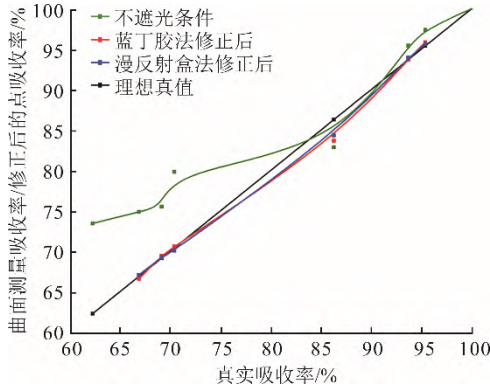


图 6 不遮光条件及 2 种方法结果修正后 2.5 cm 吸热管吸收率曲线

Fig.6 The absorption curves of 2.5 cm absorber tube under the condition of unshaded light and the ones modified by two methods

针对该涂层吸收率变化特点，本文主要研究吸收率大于 90%的数据点误差。该范围内，2.5 cm 吸热管在不遮光条件下平均相对误差为 1.97%，经过蓝丁胶法和漫反射盒法修正后平均相对误差分别为 0.25%和 0.26%。当真实吸收率为 86.23%时，蓝丁胶法和漫反射盒方法修正效果不显著。这是因为该吸收率附近数据点太少，无法提供更精确的拟合曲线方程对该点进行修正。

3.2 直径和测量方法对曲面测量吸收率的影响

实际测试过程中，影响曲面测量吸收率的因素很多，除吸热管直径和测量方法外，还包括通光孔大小、遮光材料的吸收率、环境温度、仪器精度等。本文主要研究吸热管直径和测量方法不同对涂层曲面测量吸收率的影响。图 7 为蓝丁胶法测量不同直径吸热管曲面测量吸收率结果。

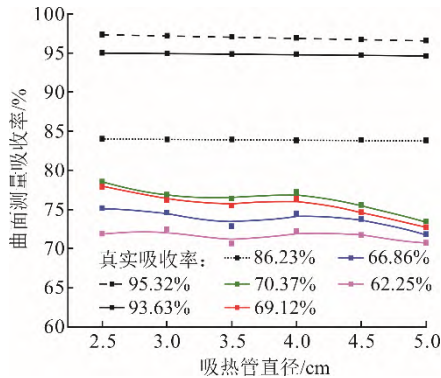


图 7 蓝丁胶法测量不同直径吸热管曲面测量吸收率结果 Fig.7 The measured curved surface absorption curves of the absorber tube with different diameters using Blu-Tack method

从图 4 和图 7 蓝丁胶法的拟合曲线和曲面测量吸收率数值变化中可以看出，真实吸收率为 60%~70%

时，吸热管直径变大，曲面测量吸收率变小。当吸热管直径变大时，测试光线入射角度变小，则曲面测量吸收率变大；直径变大也使光线二次反射吸收程度变小，曲面测量吸收率也变小。这说明使用蓝丁胶方法时，吸热管直径同时影响入射角度和二次反射吸收 2 项因素，二次反射吸收因素起主导作用。当真实吸收率大于 70%时，这种影响不显著，因为真实吸收率变大时，吸热管直径对曲面测量吸收率的影响变小。

图 8 为漫反射盒法测量不同直径吸热管曲面测量吸收率结果。从图 5 和图 8 漫反射盒法的曲面测量吸收率数据中可以看出，使用漫反射盒法时，吸热管直径对曲面测量吸收率的影响不显著，因为漫反射材料吸收率远小于蓝丁胶，入射角度和二次反射吸收 2 项因素互相平衡。

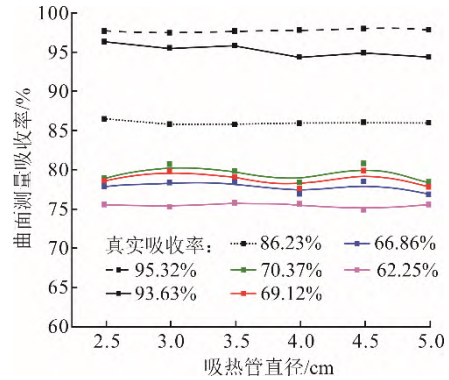


图 8 漫反射盒法测量不同直径吸热管曲面测量吸收率结果 Fig.8 The measured curved surface absorption curves of the absorber tube with different diameters using diffuse reflection box method

比较图 7、图 8 发现，蓝丁胶法各数据点的曲面测量吸收率与真实吸收率之差为 1.5%~9.0%，漫反射盒法各数据点的曲面测量吸收率与真实吸收率之差为 2.3%~13.0%，真实吸收率越大差异越小。漫反射盒法比蓝丁胶法测得的曲面测量吸收率更大，约 0.8%~4.0%；但经过拟合曲线修正后，2 种方法各数据点相对误差的差值小于 0.3%。2 种方法主要差异在于：蓝丁胶法器材准备简单，适用于各种形状的样品，但测量操作复杂；漫反射盒法器材准备复杂，需根据样品形状定制，但测量操作简单。

直径和测量方法仅影响曲面测量吸收率，对于修正后点吸收率的相对误差并无影响。为减小修正后结果的相对误差，应在待测涂层吸收率附近设置多个数据点，以提高拟合曲线的精度。

4 结 论

本文设计了蓝丁胶法和漫反射盒法这2种广泛适用于测量曲面涂层吸收率的测试方法,以2.5~5.0 cm吸热管为对象,实验测量得到真实吸收率和曲面测量吸收率的关系,对拟合曲线的精确性、修正后点吸收率的相对误差以及影响曲面测量吸收率的各因素进行了分析。

1) 12根拟合曲线中,蓝丁胶法拟合曲线 $R^2 \geq 0.995$, $\delta_{RMSE} \leq 0.75\%$;漫反射盒法曲线 $R^2 \geq 0.995$, $\delta_{RMSE} \leq 0.65\%$ 。

2) 2.5 cm吸热管不遮光条件下最大相对误差为13.39%,经蓝丁胶法和漫反射盒法修正后该点相对误差分别为0.27%和0.45%。数据点平均相对误差为7.07%,修正后平均相对误差分别为0.38%和0.30%。在塔式太阳能熔盐吸热器涂层吸收率范围内,平均相对误差为1.97%,修正后平均相对误差分别为0.25%和0.26%。

3) 使用蓝丁胶方法时,直径越大,曲面测量吸收率越小;漫反射盒法测得的曲面测量吸收率比蓝丁胶法大0.8%~4.0%,但随着真实吸收率变大,曲面测量吸收率受各种因素的影响变小。曲面测量吸收率经过拟合曲线修正后结果的相对误差,与吸热管直径、测量方法无显著关联。

【参 考 文 献】

- [1] RIZVI A A, DANISH S N, ELLEATHY A, et al. A review and classification of layouts and optimization techniques used in design of heliostat fields in solar central receiver systems[J]. *Solar Energy*, 2021, 218: 296-311.
- [2] 刘世隆, 邓薇. 塔式太阳能热发电技术在我国发展现状与前景分析[J]. *电气技术*, 2016(10): 8-10.
LIU Shilong, DENG Wei. Current status and perspective for solar power tower technology in China[J]. *Electrical Engineering*, 2016(10): 8-10.
- [3] KOLB G J, ALPERT D J, LOPEZ C W. Insights from the operation of solar one and their implications for future central receiver plants[J]. *Solar Energy*, 1991, 47(1): 39-47.
- [4] WANG Q, HUANG J, SHEN Z, et al. Negative thermal-flux phenomenon and regional solar absorbing coating improvement strategy for the next-generation solar power tower[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 247: 114756.
- [5] 曾季川. 塔式太阳能吸热器热效率评估方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 1.
ZENG Jichuan. Research on thermal efficiency evaluation method of solar power tower receivers[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021: 1.
- [6] 牛树群. 塔式太阳能光热发电系统吸热器传热与力学特性研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2021: 1.
NIU Shuqun. Study of heat transfer and mechanical characteristics of thermal receiver for solar tower power generation system[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2021: 1.
- [7] 贾朋森. 塔式太阳能吸热器的光-热-力耦合模拟及能流匹配特性研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2023: 1.
JIA Pengsen. Optical-thermal-mechanical coupling simulation of tower solar receiver and energy flow matching characteristics research[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2023: 1.
- [8] 何梓年, 郭信章, 曾星, 等. 微计算机运控的非稳态法半球向全发射率测定装置[J]. *太阳能学报*, 1985(3): 307-318.
HE Zinian, GUO Xinzhang, ZENG Xing, et al. Measurement device of hemispherical total emissivity by unsteady state method controlled by microcomputer[J]. *Acta Energetica Sinica*, 1985(3): 307-318.
- [9] 齐锡龄, 方承超, 孔华. 半球向全发射率和定向吸收率的测试研究[J]. *天津大学学报*, 1992(2): 92-97.
QI Xiling, FANG Chengchao, KONG Hua. The study on the measurement of total hemispherical emittance and directional absorptance[J]. *Transactions of Tianjin University*, 1992(2): 92-97.
- [10] FUSSELL W B, TRIOLO J J, HENNINGER J H. A dynamic thermal vacuum technique for measuring the solar absorptance and thermal emittance of spacecraft coatings[M]. National Aeronautics and Space Administration, 1963: 1.
- [11] 张宇峰, 李明, 戴景民, 等. 太阳能选择性吸收涂层高温光谱吸收率的测量方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(6): 1814-1818.
ZHANG Yufeng, LI Ming, DAI Jingmin, et al. Measuring method of the spectral absorptivity for solar selective absorption coatings at high temperature[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(6): 1814-1818.
- [12] COVENTRY J, BURGE P. Optical properties of Pyromark 2500 coatings of variable thicknesses on a range of materials for concentrating solar thermal applications[C]//AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2017, 1850(1): 030012.
- [13] REOYO PRATS R, PLAZA A C, FAUGEROUX O, et al. Accelerated aging of absorber coatings for CSP receivers under real high solar flux - Evolution of their optical properties[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2019, 193: 92-100.
- [14] HO C K, MAHONEY A R, AMBROSINI A, et al. Characterization of Pyromark 2500 paint for high-temperature solar receivers[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2014, 136(1): 014502.
- [15] 陶文铨. 传热学[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2019: 365-366.
TAO Wenquan. Heat transfer[M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2019: 365-366.
- [16] CLARE J F. Comparison of four analytic methods for the calculation of irradiance in integrating spheres[J]. *Journal of the Optical Society of America, A. Optics*, 1998, 15(12): 3086-3096.
- [17] FINKEL M W. Integrating sphere theory[J]. *Optics Communications*, 1970, 2(1): 25-28.
- [18] 汤顺青, 朱正芳. 积分球的系统误差分析[J]. *计量技术*, 2005(12): 30-32.
TANG Shunqing, ZHU Zhengfang. Systematic error analysis of integrating sphere[J]. *Measurement*

- Technique, 2005(12): 30-32.
- [19] 塔式太阳能热发电站吸热器检测方法: GB/T 41307—2022[S]. 北京: 国家标准化管理委员会, 2022: 5.
Test method for receiver of solar power plant: GB/T 41307—2022[S]. Beijing: Standardization Administration of the People's Republic of China, 2022: 5.
- [20] 刘红年, 徐玉貌, 张宁, 等. 大气科学概论[M]. 南京: 南京大学出版社, 2019: 298.
LIU Hongnian, XU Yumao, ZHANG Ning, et al. Introduction to atmospheric science[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2019: 298.
- [21] 陈丹, 周斌, 陈立民. 利用天顶散射光观测反演大气臭氧柱浓度[J]. 复旦学报(自然科学版), 2008, 47(4): 478-486.
CHEN Dan, ZHOU Bin, CHEN Limin. The retrieval of atmospheric ozone column densities using zenith-sky scattered light observations[J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2008, 47(4): 478-486.
- [22] DURY M R, THEOCHAROUS T, HARRISON N, et al. Common black coatings-reflectance and ageing characteristics in the 0.32-14.3 μm wavelength range[J]. Optics Communications, 2007, 270(2): 262-272.
- [23] LÓPEZHERRAIZ M, FERNÁNDEZ A B, MARTINEZ N, et al. Effect of the optical properties of the coating of a concentrated solar power central receiver on its thermal efficiency[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017, 159: 66-72.
- [24] 张宇峰, 戴景民, 张昱, 等. 基于积分球反射计的红外光谱发射率测量系统校正方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(8): 2267-2271.
ZHANG Yufeng, DAI Jingmin, ZHANG Yu, et al. Correction method for infrared spectral emissivity measurement system based on integrating sphere reflectometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(8): 2267-2271.
- [25] 周志伟. 塔式太阳能热发电聚光集热系统优化与涂层老化试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022: 17.
ZHOU Zhiwei. Optimization and coating aging test of concentrating and heating system for solar tower power[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022: 17.

(责任编辑 杨嘉蕾)