

玻璃套管-多孔介质双层吸热器耦合传热特性研究

庄燕如¹, 陈雪淇², 戴贵龙³

(1. 闽南理工学院 智能建造工程学院, 福建 石狮 362700;

2. 福建省建筑科学研究院有限责任公司 福建省绿色建筑技术重点实验室, 福建 福州 350108;

3. 福建理工大学 建筑新能源与节能福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要:为降低多孔介质吸热器辐射散热损失,采用石英玻璃套管和多孔介质构建了一种双层吸热器,实现了多孔介质吸热器吸收系数的阶梯式增加。该吸热器通过石英玻璃套管回收部分红外热辐射损失,同时均化非均匀聚集太阳能热流密度来降低吸热峰值温度,从而提高吸热效率和吸热安全性。基于经过实验验证的耦合传热数值模型,对双层吸热器的聚光太阳能热转换特性进行了模拟研究。模拟结果表明:与单层多孔介质吸收器相比,在空气质量流量3~10 g/s范围内,双层吸热器热效率提高约5.8%~11.2%;非均匀等比型速度入口与高斯聚集太阳光匹配性更好,热效率较均匀速度入口增加约3.1%;增加玻璃套管长度、减小其壁厚及降低孔隙直径等结构调整,均有益于吸热器热效率的提高。

关键词:太阳能;吸热器;辐射传输;对流换热;热效率

中图分类号:TK513.5

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.mdlgc.2026.02.021

[引用本文格式]庄燕如,陈雪淇,戴贵龙.玻璃套管-多孔介质双层吸热器耦合传热特性研究[J].热能动力工程,2026,41(2):190-196. ZHUANG Yanru, CHEN Xueqi, DAI Guilong. Conjugated heat transfer performances of porous solar absorber with quartz glass multi-tubes[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2026, 41(2): 190-196.

Conjugated Heat Transfer Performances of Porous Solar Absorber with Quartz Glass Multi-tubes

ZHUANG Yanru¹, CHEN Xueqi², DAI Guilong³

(1. School of Intelligent Construction Engineering, Minnan University of Science and Technology, Shishi, China, Post Code: 362700;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Green Building, Fujian Academy of Building Research Co., Ltd., Fuzhou, China, Post Code: 350108; 3. Key Laboratory of New Energy and Energy-saving in Building, Fujian University of Technology,

Fuzhou, China, Post Code: 350118)

Abstract: A double-layer solar absorber consisting of quartz glass multi-tubes and a porous medium was proposed to reduce re-radiation loss and realize the step-type increase in absorption coefficient of a porous absorbers. The solar absorber recovered part of the infrared thermal radiation loss through a quartz glass multi-tubes, while homogenizing the non-uniform concentrated solar heat flux density to reduce the peak temperature of heat absorption, improving heat absorption efficiency and safety. The concentrated solar thermal conversion characteristics of a double-layer solar absorber were simulated and studied based on coupled heat transfer numerical model verified through experiments. Results indicate that the thermal efficiency of the double-layer porous solar absorber is approximately 5.8% to 11.2% higher than that of the monolayer porous absorber when the air mass flow rate varies from 3 to 10 g/s. Since the double-layer de-

收稿日期:2025-08-06; 修订日期:2025-10-22

基金项目:国家自然科学基金(52176181)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (52176181)

作者简介:庄燕如(1987-),女,闽南理工学院讲师。

通信作者:戴贵龙(1983-),男,福建理工大学教授。

sign is more suitable for Gaussian-shaped concentrated solar flux, the thermal efficiency at a non-uniform velocity inlet is about 3.1% higher than that at a uniform velocity inlet. Additionally, the thermal efficiency increases with longer quartz glass multi-tubes but decreases with thicker tube walls and larger pore diameters.

Key words: solar energy; solar absorber; radiation transfer; convection heat transfer; thermal efficiency

符号说明	
A_1, A_2	—聚集太阳光能流密度拟合参数, $A_1 = 1.5 \times 10^6 \text{ W/m}^2$, $A_2 = 2\,560 \text{ m}^2$
B	—谱带辐射能量份额
c_p	—工质流体的定压比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
d	—直径, m
e	—单根太阳光携带能量, W
F	—固体微元体发射能量传递到外界环境的份额
h	—容积对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
m	—质量流量, kg/s
N	—数量
NR	—吸热器径向网格总数
Pr	—工质流体的普朗特数
Q	—辐射能量, 取 $1\,840 \text{ W}$
r	—聚集太阳光光斑半径, m
Re	—雷诺数
S	—热源项, W/m^3
T	—热力学温度, K
V	—网格体积, m^3
κ	—固体的吸收系数, m^{-1}
λ	—导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
ϕ	—多孔介质的孔隙率
下标:	
in	—入口
a	—吸收行为
B	—谱带
f	—工质流体
g	—玻璃套管
gr	—玻璃套管辐射作用
sgr	—玻璃套管太阳辐射作用
pgr	—玻璃套管多孔介质红外辐射作用
i, j, k	—网格序号
l	—谱带序号
m	—网格序号
NX	—吸热器轴向网格总数
p	—多孔介质
RL	—辐射散热损失
sun	—太阳光
s	—固体域
∞	—外界环境
v	—容积
d	—孔隙

引 言

太阳能多孔介质吸热器具有比表面积大, 固体骨架迂曲连通的特点, 兼具高温对流传热性能好、质量轻等优点, 是太阳能吸热、强化传热和化学反应的重要媒介^[1]。

在太阳光辐照作用下, 多孔介质固体骨架之间及固体骨架与工质流体之间进行多重耦合传热, 过程复杂^[2]。早期针对多孔介质吸热器的传热性能的研究以单层多孔介质为主, 其中多孔骨架与工质之间的对流传热常采用局部热平衡和局部非热平衡模型进行处理^[3]。入射太阳辐射加热模型包括均匀与非均匀热流密度分布模型、边界热流加热模型(太阳辐射热流作用在多孔介质表面)以及辐射内热源项模型(太阳辐射热流作用在多孔介质内部)等多种形式^[4]。此外, 部分研究也考虑了多孔介质内部的辐射换热效应, 介质辐射计算方法包括球型谐波法(P1 模型)和蒙特卡洛法(Monte Carlo Method, MCM)等^[5]。

由于碳化硅、氧化锆等多孔固体骨架不透明且结构弯曲, 入射太阳光基本在表面区域被吸收, 导致多孔介质表面温度高, 容易引起局部烧蚀并产生显著的热辐射损失^[6]。为了降低多孔介质前端的温度, 减小高温辐射散热损失, 单层多孔介质逐渐发展成双层多孔介质, 其中包括蜂窝陶瓷层加多孔介质双层结构^[7], 变孔隙直径双层多孔介质结构^[8]以及渐变孔隙参数吸热器^[9]。然而, 已有的双层多孔介质结构本质上是从对流传热角度改善多孔介质的传热性能, 虽然在一定程度降低了多孔介质前端温度, 但效果有限, 仍无法形成多孔介质的容积式吸收效应(工质出口温度高于多孔介质固体前端温度)^[10]。

由于入射太阳辐射光谱能量分布与多孔介质的红外辐射存在显著差异, 本文提出一种玻璃套管与多孔介质结合的双层吸热器设计方案, 利用玻璃套

管对入射太阳辐射高透过、对多孔介质红外辐射高吸收的特点,回收部分多孔介质红外辐射能量,并通过玻璃套管与工质的对流预热工质,提高多孔介质吸热器的热效率,实现多孔介质的容积式吸收。

1 数值模型

1.1 研究对象

本文设计的双层吸热器为圆柱结构,由玻璃套管与多孔介质组成,其纵截面如图 1 所示。沿入射太阳光传输方向,第 1 层为玻璃套管,第 2 层为多孔吸热芯,入射太阳光穿过玻璃套管进入多孔介质区并被吸收。由于玻璃套管具有光谱选择性,来自多孔介质的高温辐射在穿透玻璃套管时,部分能量会直接透射损失,其余部分则被套管吸收,继而通过对流传热预热工质,实现热能回收。双层吸热器壳体半径为 R 、总长为 L ,其中玻璃套管长为 L_1 ,多孔吸热芯长为 L_2 。每层玻璃套管的壁厚和间隙均相同,分别为 d_a 和 d_b 。

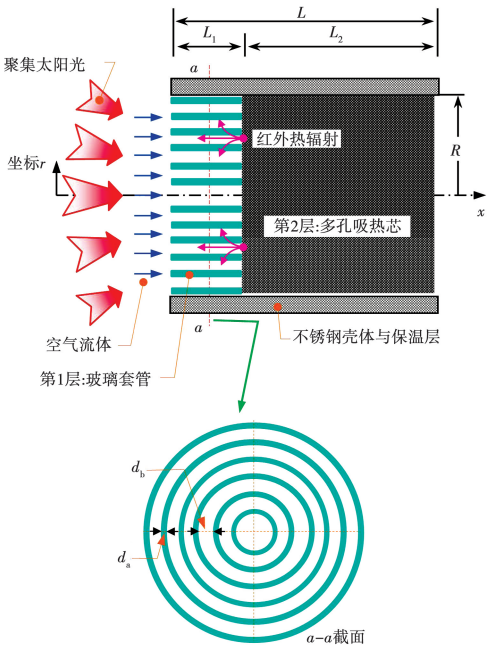


图 1 双层吸热器传热模型

Fig.1 Heat transfer model of double-layer absorber

1.2 玻璃套管耦合传热模型

通过建立玻璃套管的几何结构,采用流固耦合边界条件模型计算玻璃套管与工质的对流传热。多孔吸热芯与工质的对流传热采用局部非热平衡

(Local Thermal Non-equilibrium, LTNE) 的体积平均模型。该模型不需要直接建立多孔介质的孔隙结构,而是利用体积平均的对流、导热和辐射性能计算其传热性能,在保证计算精度的同时兼顾计算效率。为便于分析,传热过程假设如下:

- (1) 玻璃套管表面光滑,其对入射的太阳辐射及多孔介质红外辐射均遵循镜面反射与折射定律。
- (2) 工质为空气,入口速度均匀,不考虑其可压缩性,但其密度、导热系数和黏度等热物性随温度变化。
- (3) 玻璃套管与多孔介质直接接触,不考虑接触热阻;吸热器侧壁外表面有保温层,满足绝热条件。

基于 LTNE 流动传热问题的控制方程包括质量守恒、动量守恒、流体和固体域能量守恒方程,具体表达式见文献[7-8]。通过传热模型确定固体域的热源项是求解控制的关键。太阳光与多孔介质热辐射作为外热源对玻璃套管进行加热,玻璃套管外热源的表达式为:

$$S_{gr} = S_{sgr} + S_{pgr} \tag{1}$$

1.2.1 太阳光热源

入射太阳辐射能流密度 q_{sun} 沿半径近似高斯型非均匀分布^[5],其表达式为:

$$q_{sun} = A_1 \exp(-A_2 r^2) \tag{2}$$

太阳光在双层吸热器(玻璃套管与多孔介质)中的传输、吸收、反射及折射等行为采用蒙特卡洛法(Monte Carlo Method, MCM)追踪。通过统计各微元体吸收的光线数量,可直接得到第 i 个微元体的太阳光热源 $S_{sgr,i}$ 计算式^[11]:

$$S_{sgr,i} = \sum_{l=1}^{N_B} \frac{B_{l,sun} N_{a,l,i} e_l}{\Delta V_i} \tag{3}$$

玻璃套管微元体的多孔介质热辐射热源 S_{pgr} 的计算思路与式(3)类似,详见相关文献[11],此处不再赘述。

1.2.2 吸热器的热效率

热效率定义为工质吸收的热量与入射太阳能量 Q_s 的比值,计算式为:

$$\eta = \left(\sum_{j=1}^{NR} m_{f,(NX,j)} c_{p,f(NX,j)} T_{f,(NX,j)} - m_f c_{p,f0} T_{f0} \right) \times 100\% / Q_{sun} \tag{4}$$

1.3 多孔介质传热模型

多孔介质的太阳辐射外热源项计算模型与石英玻璃套管的太阳辐射外热源计算思路一致,详细过程参考相关文献[11],不再赘述。

多孔介质固体骨架与工质流体的体积传热系数采用 Xia 等人^[12]提出的经验式,即:

$$h_v = 0.34\lambda_t \phi^2 d_p^{0.61} Pr_t^{1/3} \tag{5}$$

多孔介质衰减系数 β 由 Cunsolo 等人^[13]推荐的公式估算,即:

$$\beta = 3.09 \sqrt{1 - \phi} / d_p \tag{6}$$

1.4 材料热物性模型

玻璃套管选用石英材质,采用谱带模型表征石英玻璃套管的折射率和吸收系数等热辐射物性。碳化硅多孔介质、空气工质的基础热物性见相关文献[10,14]。碳化硅多孔介质的孔隙直径和孔隙率分别取 3 mm 和 0.9。入射太阳光的光谱分布为 AM1.5。

1.5 边界条件

采用归一化辐射传递因子计算太阳光入口面的辐射散热损失 Q_{RL} ^[14],即:

$$Q_{RL} = \sum_{l=1}^{N_B} \sum_{k=1}^{N_p} 4\kappa_p V_k B_{l,T_k} F_{l,k \rightarrow \infty} (T_k^4 - T_\infty^4) + \sum_{l=1}^{N_B} \sum_{m=1}^{N_g} 4\kappa_{g,l} V_m B_{l,T_m} F_{l,m \rightarrow \infty} (T_m^4 - T_\infty^4) \tag{7}$$

1.6 数值模拟方法及条件

根据模型几何尺寸,径向和轴向微元体边长均设置为 1.0 mm,网格数为 50 ×100。经验证,此网格设置可获得网格独立解。压力与速度的离散方程采用耦合算法求解,控制方程的离散均采用二阶迎风格式。计算以能量方程收敛精度为准,残差设定为 10⁻¹²。在模拟太阳辐射和红外辐射时,为兼顾计算效率和独立性,每个工况跟踪的太阳光线数为 10⁹,微元体跟踪的光线数为 10⁷,具体设置详见文献[15]。

玻璃套管壁厚 2.0 mm(从内至外,内半径分别为 6,14,22,30,38 和 46 mm)。每层玻璃套管的壁厚和长度均为 2 和 20 mm。碳化硅多孔材料半径为 50 mm,厚度为 80 mm(多孔介质吸热器由 4 块相同的碳化硅多孔材料组合而成)。工质入口质量流量为 3.0 g/s,温度为 300 K。根据式(1),计算得到入射太阳能量 Q_s 为 1 840 W。

2 实验验证

2.1 测量方案

双层吸热器测试样机如图 2 所示。主要部件包括:玻璃套管(通过不锈钢支撑架固定)、碳化硅多孔材料、不锈钢外壳以及耐高温保温棉等。

玻璃套管和碳化硅多孔材料的几何结构与模拟中的设置一致,详细参数见 1.6 节。其中,碳化硅多孔材料的直径为 100 mm,每片厚度为 20 mm。而不锈钢壳体内直径为 101 mm,壁厚为 5 mm。前端法兰内直径为 90 mm,外直径为 110 mm,用于固定位于前端的碳化硅多孔介质吸热芯。

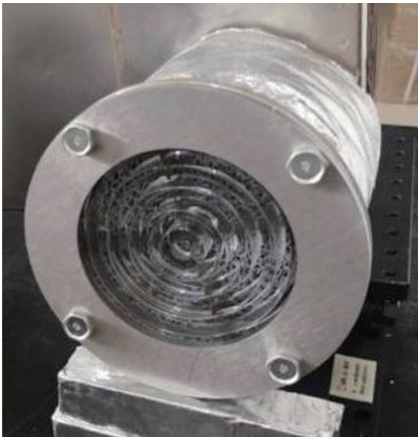


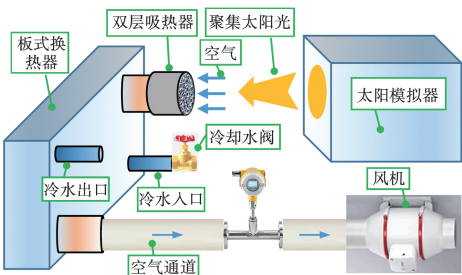
图 2 双层吸热器测试样机

Fig.2 Experimental sample of double-layer absorber

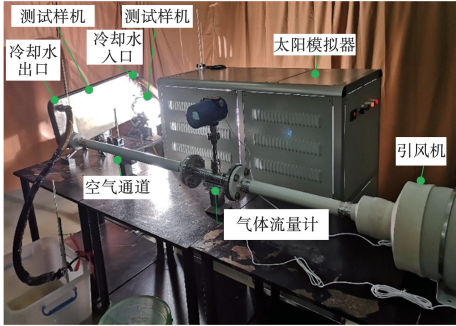
室内太阳能模拟器测试平台如图 3 所示。测试平台包括太阳模拟器、测试样机、板式换热器、气体流量计、引风机、冷却水出入口等。实验前,调整吸热器样机位置,确保多孔介质表面与模拟器的焦平面重合。实验时,首先启动冷却水阀和引风机,再开启太阳模拟器。

利用温度计和流量计测量冷却水和吸热空气的进出口温度及流量,通过计算得到冷却水和吸热空气的焓增,即吸热空气从吸热器测试样机吸收的热量。该吸收热量与入射太阳能的比值,即为实验热效率,具体表达式及其不确定度分析见文献[14]。

实验时通过变频风机将空气的质量流量控制在 3 ~10 g/s 之间。室内环境温度为 293 K,冷却水进口温度为 288 K,冷却水质量流量为 13 g/s。



(a) 原理图

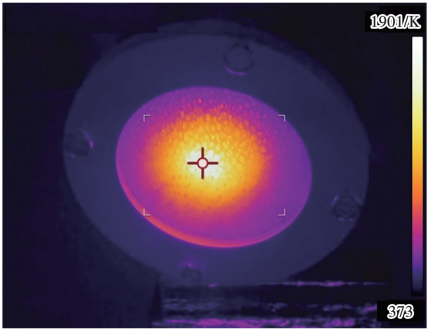


(b) 实物装置

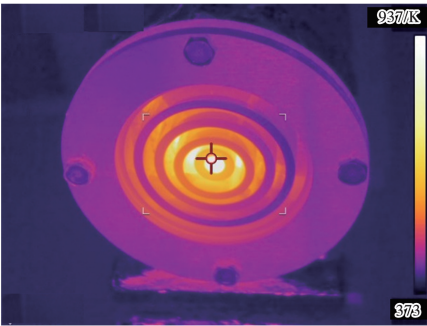
图 3 高温吸热器测试平台

Fig. 3 Test platforms of high-temperature absorber

实验测试时,单层多孔介质(指纯多孔介质)和双层多孔介质吸热器的太阳光入射面红外温度图像如图 4 所示(空气质量流量为 5 g/s,太阳光辐射功率约为 1 840 W)。



(a) 单层



(b) 双层

图 4 单层和双层吸热器的太阳光入射面红外温度图像

Fig. 4 Infrared temperature images on sunlight incidence surface of mono- and double-layer absorbers

从图 4(a)可看出,单层吸热器红外温度中心高,峰值约为 1 901 K,沿半径方向逐渐降低。从图 4(b)可看出,玻璃套管对入射聚集太阳光有调节作用,使中心区域最高红外温度值降至 937 K,较单层结构降低 50.7%,证实了双层结构的吸热安全性更高。

2.2 可靠性验证

热效率为间接测量参数,测量结果随机误差包括 A 类不确定度(进出口水温、空气温度和流量)和仪器系统误差产生的 B 类不确定度(温度计、流量计和太阳模拟器)。

通过实验测量和数据处理,得到单层多孔介质和双层多孔介质两种吸热器的热效率及其不确定度随质量流量的变化曲线,如图 5 所示。由图 5 可以看出,两种吸热器的热效率均随空气质量流量的增加而持续提高。这主要是因为随着空气质量流量的增大,固体骨架温度不断降低,辐射热损失相应减小,从而导致热效率不断提高。整体而言,双层吸热器的热效率明显较单层吸热器提高 5.8% ~ 11.2%。对比模拟结果与实验测量结果发现,两种吸热器热效率的实验测量结果和数值模拟结果的相对误差在 5.26% ~ 5.86% 之间,低于 6.0%,说明单层和双层吸热器的热效率曲线整体吻合较好,验证了本文建立的双层吸热器耦合传热模型的可靠性。

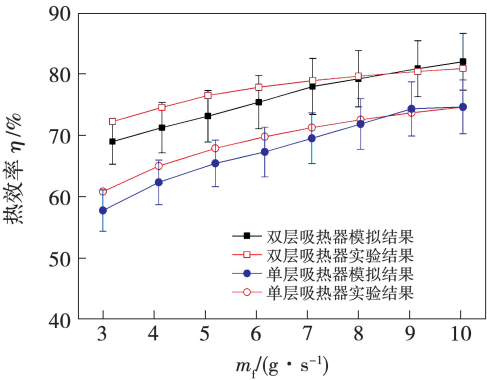


图 5 传热模型验证

Fig. 5 Verification of heat transfer model

3 分析与讨论

3.1 双层吸热器的温度场分布特性

图 6 为双层吸热器内部固体域和流体域的温度分布云图。在图 6(a)中,前端条形区域为玻璃套管,后端其余区域为多孔介质。由图 6(a)可知,固

体域温度 T_s 主要受聚集太阳热流影响,从中心向边缘温度递减。由于多孔介质的红外辐射热流递增,玻璃套管的温度沿 x 轴方向逐渐增加,整个玻璃套管温度在 320 ~ 1 220 K 之间。由于聚集太阳光径向分布影响,多孔介质固体域高温区在其中心入口处,且沿半径和轴向不断降低。多孔介质固体域的温度在 600 ~ 1 550 K 之间。由图 6(b)可知,受固体域温度的影响,流体域温度 T_f 沿半径方向整体降低,沿轴向整体逐渐升高。由于玻璃套管的阻碍,注入多孔介质的流体速度变化存在波动性,导致流体域温度出现锯齿现象,即在玻璃套管之间的缝隙区域,工质流速大、温度低、形成齿谷;在玻璃套管的底面处,工质少、温度高,出现温度齿峰。通过统计,流体域的出口平均温度约为 720 K,热效率约为 71.0%。

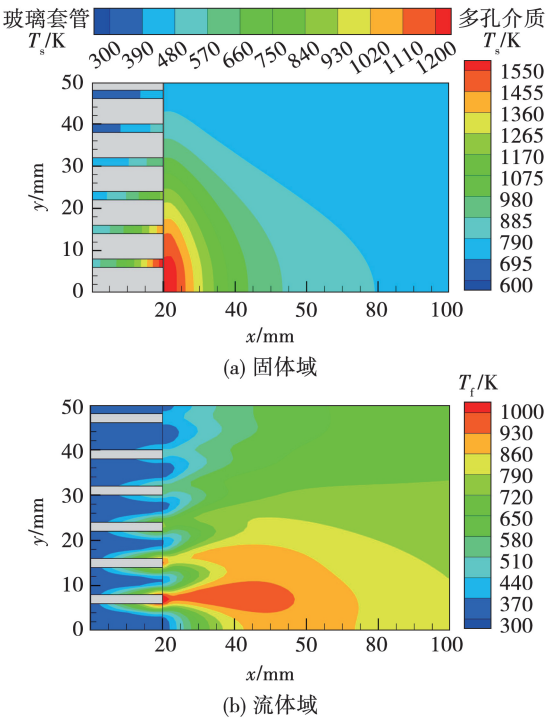


图 6 双层吸热器固体域和流体域温度分布
Fig. 6 Temperature profiles in solid and fluid domains of double-layer absorber

3.2 非均匀速度入口对吸热器传热性能的影响

为了降低多孔骨架峰值温度、提高吸热器的热效率,需要探究非均匀速度入口对双层吸热器峰值温度和热效率的影响。如在多孔介质吸热芯前端(太阳光入射端)或后端掏挖台阶状曲面结构。该结构中心处台阶深,多孔介质区域薄,流动阻力小,

因此速度较高;边缘区域台阶浅,多孔介质较厚,流动阻力大,速度相应较低。通过优化台阶形状,可实现非均匀速度入口,提高热效率。

假定空气质量流量恒定为 3.0 g/s,但沿玻璃套管的缝隙按等比数列非均匀分配,中心处的缝隙为第 1 项,依次类推,最外层缝隙为第 7 项。分别计算公比 q 为 0.1 ~ 1.0 共 10 个工况下的热效率(公比越小,中心区域速度越大),结果如图 7 所示。由图 7 可知,当公比为 0.7 时,热效率最高,达到 74.77%,较公比 q 为 1.0 时的均匀入口热效率 71.71% 提高了约 3.1%。这说明非均匀速度入口与非高斯型聚集太阳光匹配性更好,可以提高热效率。

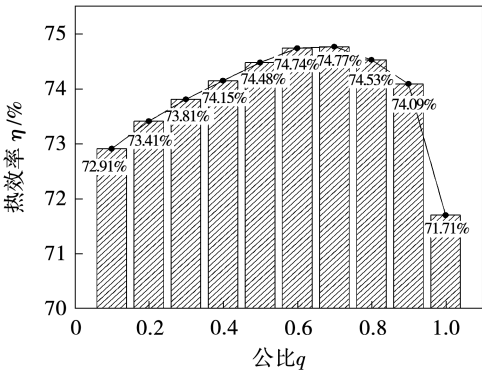


图 7 非均匀流速对热效率的影响
Fig. 7 Effect of non-uniform flow velocity on thermal efficiency

3.3 结构参数对热效率的影响

多孔介质和玻璃套管的结构参数对热效率的影响如图 8 所示。

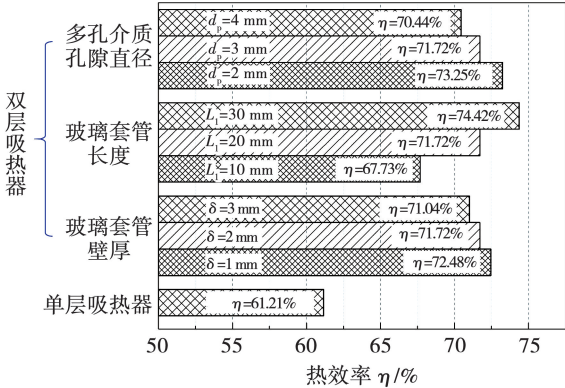


图 8 结构参数对吸热器的热效率影响
Fig. 8 Effect of structural parameters on thermal efficiency of absorber

由图 8 可以看出,当孔隙直径由 4 mm 减小至 2 mm 时,热效率由 70.44% 增大到 73.25%。这主要是因为多孔介质的对流传热强度随着孔隙直径减小而增强,从而促进多孔介质温度降低,红外辐射热损失减小。但孔隙直径不能太小,否则固体骨架纤细,易发生碳化或烧毁的情况。

增大玻璃套管长度可以使其吸收更多来自多孔介质的红外热辐射,进而提升双层吸热器热效率。但增加玻璃套管壁厚,会增大太阳光的反射损失,导致热效率下降。

通过对比单层和双层吸热器可以发现,双层吸热器的热效率较单层吸热器 (61.21%) 提高了 10.5%。这意味着玻璃套管回收了约 27% (10.5% / (1.0 - 61.21%)) 的多孔介质红外热辐射损失。

4 结 论

(1) 由于玻璃套管可有效回收高温辐射热损失,双层吸热器的热效率相较于单层提高约 10.5%。

(2) 与均匀速度入口相比,采用等比型非均匀速度入口可使热效率提高约 3.1%。

(3) 结构参数优化方面,减小玻璃套管壁厚和多孔介质的孔隙直径,并适当增加玻璃套管长度,均有助于提高系统热效率。

参考文献:

[1] HE Yaling, DU Shen, SHEN Sheng. Advances in porous volumetric solar receivers and enhancement of volumetric absorption[J]. Energy Reviews, 2023, 2(3): 100035.

[2] NI Xuewei, LIU Bingxin, FENG Hao, et al. Volumetric solar carbon dioxide receiver designs with geometric parameters optimized in combination [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236: 121579.

[3] SHARMA S, TALUKDAR P. Thermo-mechanical performance enhancement of volumetric solar receivers using graded porous absorbers[J]. Energy, 2024, 304: 132070.

[4] AVILA-MARIN A L, FERNANDEZ-RECHE J, MARTINEZ-TARIFA A. Modelling strategies for porous structures as solar receivers in central receiver systems: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019: 15 - 33.

[5] DU Shen, HE Yaling, LI Dong, et al. Parametric analysis of empirical parameters and solar radiation uniformity on the thermal perfor-

mance of porous volumetric solar receivers[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2025, 282: 113454.

[6] ZHANG Weichen, LI Qing, QIU Yu. Design and optimization of a solar-driven methane dry reforming reactor by developing an optical-thermal-chemical model [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 483: 149094.

[7] FEND T, HOFFSHMIDT B, PITZ-PAAL R, et al. Porous materials as open volumetric solar receivers - Experimental determination of thermophysical and heat transfer properties[J]. Energy, 2004, 29: 823 - 833.

[8] ROLDÁN M I, SMIRNOVA O, FEND T, et al. Thermal analysis and design of a volumetric solar absorber depending on the porosity[J]. Renewable Energy, 2014, 62: 116 - 128.

[9] AVILA-MARIN A L. CFD parametric analysis of wire meshes open volumetric receivers with axial-varied porosity and comparison with small-scale solar receiver tests[J]. Renewable Energy, 2022, 193: 1094 - 1105.

[10] 戴贵龙, 薛鑫杰, 陈雪淇, 等. 双层吸热芯聚集太阳光吸收分布特性研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(4): 328 - 333.

DAI Guilong, XUE Xinjie, CHEN Xueqi, et al. Absorption distribution performances of double layer absorber for concentrated solar light [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(4): 328 - 333.

[11] 陈雪淇. 双层吸热芯太阳能热转换特性研究[D]. 福州: 福建工程学院, 2021.

CHEN Xueqi. Study on solar thermal conversion characteristics of double-layer heat absorption core[D]. Fuzhou: Fujian University of Technology, 2021.

[12] XIA Xinlin, CHEN Xue, SUN Chuang, et al. Experiment on the convective heat transfer from airflow to skeleton in open-cell porous foams[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 106: 83 - 90.

[13] CUNSOLO S, COQUARD R, BAILLIS D, et al. Radiative properties of irregular open cell solid foams[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2017, 17: 77 - 89.

[14] DAI Guilong, LIU Yishuo, XIANG Tao, et al. Thermal performance enhancement in porous solar receiver with a bionic petal-shaped quartz glass annular tube [J]. Energy Conversion and Management, 2025, 342: 120111.

[15] 戴贵龙, 陈雪淇, 王孝宇. 玻璃孔板 - 多孔介质太阳能吸热器耦合传热特性研究[J]. 太阳能学报, 2025, 46(1): 704 - 709.

DAI Guilong, CHEN Xueqi, WANG Xiaoyu. Combined heat transfer performances of volumetric solar absorber with quartz glass perforated plates[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46(1): 704 - 709.