

文章编号: 1671-6612 (2020) 03-335-05

新型太阳能热管集热墙性能研究

陈兴飞¹ 尤占平¹ 王亚男¹ 周书君²

(1.石家庄铁道大学机械工程学院 石家庄 050043;

2.河北空调工程安装有限公司 石家庄 050000)

【摘要】 建立了一种与建筑围护结构相结合的新型太阳能热管集热墙,该集热墙通过内置重力热管将太阳能由室外传给室内辐射板,并将辐射板作为室内采暖系统末端直接向室内散热。通过实验和数值研究表明,该系统集热效率较高,优化以后瞬时效率可达79.4%;当热管贴合面积与集热板或辐射板接触面积之比为18.4%时系统性能较高;通过旋转热管传热芯,夏季阻热性能较好。

【关键词】 太阳能热管墙;瞬时效率;数值模拟

中图分类号 TU832 文献标识码 A

Studies on the Performance of a New Type Solar Wall with Heat Pipe

Chen Xingfei¹ You Zhanping¹ Wang Ya'nan¹ Zhou Shujun²

(1.School of mechanical engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, 050043;

2.Hebei air conditioning engineering installation Co., Ltd, Shijiazhuang, 050000)

【Abstract】 A new type of solar heat pipe collector wall combined with the building envelope construction is established. Solar energy is transferred from outdoor to radiation plate through the built-in gravity heat pipe. As the end of indoor heating system, radiation plate radiates heat into indoor directly. Experimental and numerical studies show that the efficiency is relatively high and the instantaneous efficiency can reach 79.4% after optimization. The performance of the system is higher when the ratio of area between the contact area of heat pipe with collector or radiator plate to the area of collector or radiator plate is 18.4%. Through rotating heat transfer core of heat pipe, most heat is prevented from entering indoor.

【Keywords】 solar heat pipe wall; instantaneous efficiency; numerical simulation

基金项目:河北省教育厅资助科研项目(ZD2016155)

作者简介:陈兴飞(1990.09-),女,在读硕士研究生,E-mail:617540671@qq.com

通讯作者:尤占平(1973.04-),男,博士,副教授,硕士生导师,E-mail:youzhanping@163.com

收稿日期:2019-04-10

0 引言

降低我国北方地区冬季采暖化石能源消耗十分紧迫,作为可再生绿色能源的太阳能是重要选项,提高其应用效率是研究的重点内容。热管作为超高导热性能的传热元件,具有均温性、热流密度可变性及热二极管性等特性,使其在建筑与太阳能一体化技术中具有广阔应用前景^[1]。

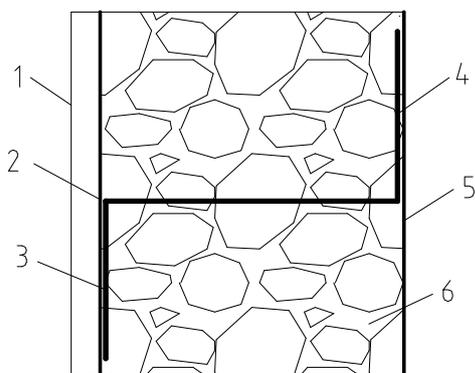
国内外学者对热管在太阳能热利用技术方面进行了较多研究。Corliss^[2]等较早的进行了热管用于太阳房采暖的研究。Susheela^[3]等设计了可安装在墙体上的热管系统,研究表明该系统在晴天时热效率可达60%。Michael V Albanese^[4]等通过实验对热管集热器性能进行了研究,发现其太阳能保证率较高,且气象条件恶劣时优势更加明显。丁祥等^[5]

介绍了我国目前已有热管式太阳能集热器的基本原理、构造及研究现状，并提出与建筑相结合的太阳能集热系统是太阳能热水技术的发展方向。裴刚等^[6]对一种平板热管太阳能集热装置进行了性能研究与分析，表明对性能影响较大的因素是太阳辐射。在以上研究基础上，本文建立了一种新型太阳能热管集热墙，其显著特点是通过末端辐射板直接向室内辐射传热，减少了传热的二次损失。本文通过实验和数值方法对该系统性能进行了研究，为太阳能热管集热墙的推广提供依据。

1 实验研究

1.1 工作原理

热管墙系统如图 1 所示。其中吸热板为 1000mm×350mm×1mm 喷涂哑光黑漆的镀锌钢板，辐射板尺寸与集热板相同，保温板导热系数为 0.024W/m·K。本文选取 10 根长度为 500mm 铜-甲醇压扁热管。其蒸发段和冷凝段长度均为 130mm，分别与集热板和辐射板紧密贴合；绝热段长度为 240mm，横穿保温材料。其工作原理为：太阳辐射经过玻璃透射到集热板上，集热板吸热后温度升高通过热传导将热量传递给热管蒸发段，使其工质迅速气化并上升到热管冷凝段凝结放热，冷凝热通过加热辐射板向室内辐射散热，工质依靠重力和毛细力回流到蒸发段，重复以上过程。



1—超白钢化玻璃；2—集热板；3—热管蒸发段；
4—热管冷凝段；5—辐射板；6—聚碳酸酯

图 1 热管墙结构简图

Fig.1 Structural sketch of heat pipe wall

1.2 实验过程及分析

实验装置放置在某实验楼屋顶临时小室的南墙内，其中太阳能辐射强度采用 JZLC-HJX 便携式

太阳辐射记录仪测量，数据通过 120 通道 Agilent34970A 数据采集系统采集，温度通过 T 型热电偶测量。室内设置 4 个测温点，集热板、辐射板分别布置 8 个测温点，温度取各测点平均值。实验分别在深秋与冬季进行，时间为 2017 年 10 月 30 日—12 月 22 日。选取 11 月 22 日、11 月 23 日的实验数据进行对比，在太阳辐射强度大致相同情况下，11 月 22 日采用遮挡装置覆盖玻璃盖板，11 月 23 日系统正常工作。图 2 是典型日室内、外温差对比曲线。从图 2 可知，系统工作时的室内外温差值要明显高于集热墙被遮挡的情况。尤其在 10:00 至 16:00 时间段，由于太阳辐射较强，温差变化也较为明显，其中 12:00 时达到最大值，室内外温差分别为 5.2℃、3.4℃。在 16:00 时以后，随着辐射强度变弱，温差趋于一致。以上实验表明该系统热力学性能较好。

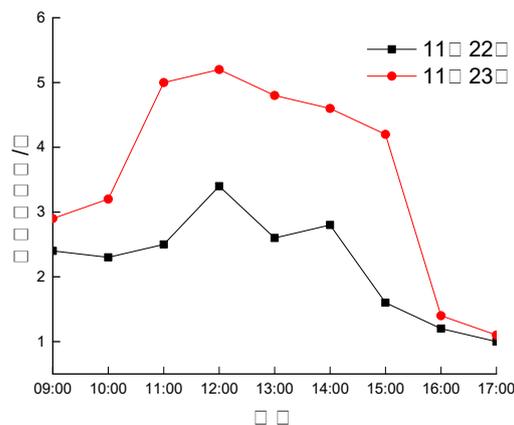


图 2 典型日室内外温差对比曲线图

Fig.2 Comparison of temperature difference between indoor and outdoor in typical day

1.3 瞬时效率的计算

瞬时效率计算如式 (1) [7]:

$$\eta = \frac{Q_s}{Q_i} \times 100\% = \frac{q_s}{I_v} \times 100\% \quad (1)$$

式中， Q_s 为有效散热量，W； Q_i 为太阳辐射强度，W； q_s 为辐射板有效散热量，W/m²； I_v 为铅垂面上太阳辐射强度，W/m²。其中辐射板有效散热量 q_s 通过式 (2) 计算：

$$q_s = 2.72 \times \left(\frac{L}{A}\right)^{0.08} (T_F - T_n)^{1.25} + 2.04 \times 10^{-7} \left(\frac{T_F + 273}{2} + \frac{T_n - 1.1 + 273}{2}\right)^3 (T_F - T_n + 1.1)$$

(2)

式中, A 为辐射板面积, m^2 ; L 为辐射板周长, m , T_F 为集热板平均温度, $^\circ\text{C}$; T_n 为环境温度, $^\circ\text{C}$ 。太阳辐射量通过太阳辐射记录仪测得。该系统在不同时刻的瞬时效率如表 1 所示。

表 1 太阳能热管集热墙系统的瞬时效率

Table 1 Instantaneous efficiency of solar heat pipe collector wall system

时间	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00
效率 η	51.1%	50.3%	49.8%	51.5%	52.3%

1.4 夏季实验及分析

夏季实验的目的是为了研究夏季系统传热对室内温度的影响。采用以下对比实验: 方案一: 系统未安装; 方案二: 将系统热管传热芯旋转 90° , 使热管蒸发段及冷凝段与装置上、下保温壁面相贴; 方案三: 装置正常工作。三种测试方案下的小室内、外温差曲线图如图 3 所示。

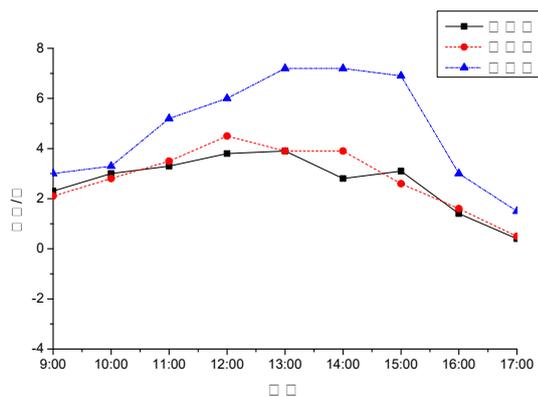


图 3 三种测试方案下小室内外温差

Fig.3 Temperature difference between indoor and outdoor under three test schemes

由图 3 可知, 方案一与方案二的温差曲线接近, 仅在 10:30—17:00 之间时方案二温差略高于方案一, 平均高 0.3°C , 最大相差 0.5°C ; 方案三温差与方案一、方案二相比较, 且 10:00 之后明显增大。由以上分析可知, 当热管传热芯旋转 90° 后, 虽仍有少量热量通过装置进入小室, 但数量很少, 因此夏季通过旋转传热芯方式阻止热量进入室内是可行的。

2 数值模拟研究

本文在实验基础上, 采用数值方法对装置进行改进及优化。

2.1 模型建立

2.1.1 模型假设

为了便于分析, 对模型作如下假设^[8]:

- (1) 系统处于稳定传热状态;
- (2) 忽略墙体垂直方向传热, 仅考虑热量沿着水平方向传递, 简化为二维导热问题;
- (3) 热管在墙体内均匀分布, 相邻热管间传热量相同, 将其视为绝热处理。

2.1.2 几何模型

鉴于装置的对称性, 因此选取系统最小重复单元, 其几何模型如图 4 所示。图中编号依次为①集热板、②热管、③保温块、④辐射板。本文对模型进行网格划分, 其中保温填充块采用非结构网格, 其它组块采用结构网格, 网格数量为 1368594 个。

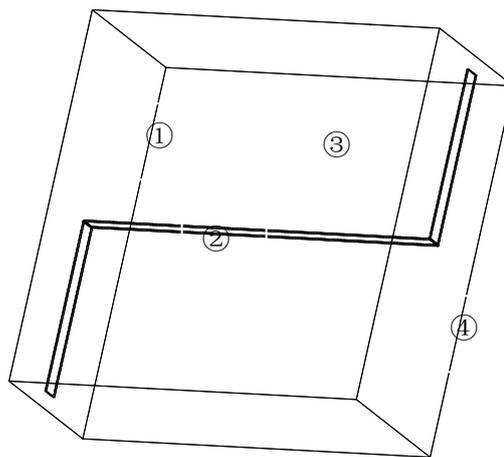


图 4 单元体三维模型图

Fig.4 Three dimensional model of cell

2.1.3 边界条件

集热板和辐射板定义为 Wall 壁面, 在此集热板给定壁面热流, 辐射板表面包括对流和辐射两种传热方式^[9]。辐射板散热采用降低室内温度法, 给定壁面与空气的对流换热系数及空气温度^[10]。

2.2 模型验证

为了对模型进行验证, 将数值计算结果与实验结果进行了对比, 其结果如表 2 所示。

从表 2 可知, 对集热板而言, 实验值和模拟值吻合较好, 误差一般小于 5%, 但在 13:00 时和 14:00 时, 模拟值与实验偏差较大。其原因可能是在模拟计算中未考虑集热板的蓄热, 但实际上 12:00 时到 13:00 时之间由于太阳辐射强度高导致集热板温度较高, 而辐射板散热不充分, 使得 13:00 时和 14:00 时集热板温度实验值高于模拟值。对辐

射板而言，不同时刻下误差均小于 5%，模拟值和实验值吻合较好。

表 2 模拟与实验数据对比表

Table 2 Comparison of simulated and experimental data

时间	热流 W/m ²	实测集热板平均 温度/°C	模拟集热板平均 温度/°C	相对 偏差%	实测辐射板平 均温度/°C	模拟辐射板平 均温度/°C	相对 偏差%
10:00	297.1	52.8	52.3	0.9%	23.0	23.5	2.2%
11:00	391.6	64.2	64.5	0.5%	26.2	26.8	2.3%
12:00	419.2	70.8	67.5	4.7%	27.6	28.1	1.8%
13:00	387.6	73.5	66.8	9.1%	30.0	29.0	3.5%
14:00	297.6	69.8	55.9	19.9%	27.8	26.6	4.3%

2.3 装置结构优化

2.3.1 热管贴合方式对性能的影响

实验过程中，热管蒸发段与冷凝段采用金属胶贴合方式与集热板和辐射板相接触，由于集热板和辐射板表面不十分平整，导致热管与其表面存在缝隙，产生较大热阻。将贴合方式改为焊接后效率得到了较大的提高。优化前后集热板、辐射板平均温度如图 5 所示，瞬时效率如图 6 所示。

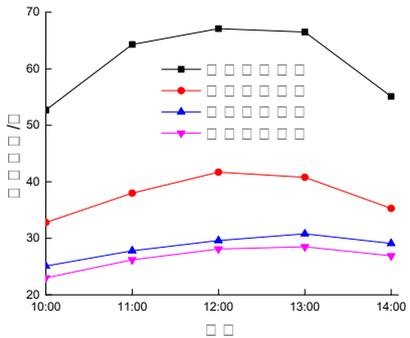


图 5 优化前后集热板、辐射板的平均温度

Fig.5 Average temperature of collector or radiator plate after optimizing

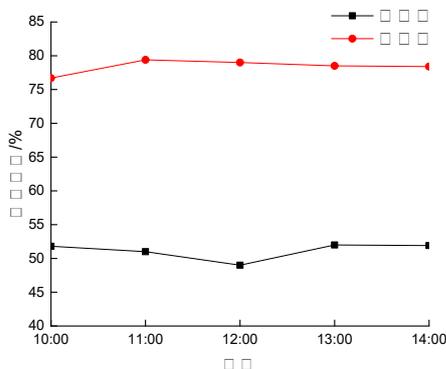


图 6 优化前后瞬时效率曲线图

Fig.6 Instantaneous efficiency after optimizing

由图 5、图 6 可知，优化后集热板在不同时刻平均温度均有降低，辐射板平均温度均有升高，二者平均温差由 30.6°C 降低到 11.1°C，瞬时传热效率最大提高了约 28%，最高可达 79.4%，系统性能得到了显著提高，因此减小热管与集热板、辐射板的接触热阻是提高系统性能的重要途径。

2.3.2 热管贴合宽度对传热性能的影响

在其他条件不变情况下，通过改变热管管径，相应贴合宽度分别为 10mm、20mm、30mm、40mm、50mm 时，可得集热板及辐射板平均温度变化，如图 7 所示。

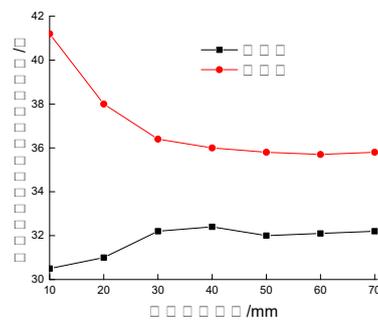


图 7 不同贴合面积时集热板及辐射板平均温度变化

Fig.7 Mean temperature change of collector and radiator plate with different spacing

从图 7 可知，当热管贴合宽度从 10mm 到 30mm 变化时，集热板平均温度降低，辐射板平均温度升高，二者曲线变化明显；当贴合宽度大于 30mm 时，两者平均温度波动平缓。因此本文中当热管贴合宽度为 30mm 时，传热效果最好，此时热管贴合面积与集热板或辐射板面积之比为 18.4%。

3 结论

(1) 太阳能热管集热墙系统作为较为新型的建筑采暖方式, 集热效率较高, 优化以后瞬时效率可达 79.4%, 是一种较好的采暖方式。

(2) 通过夏季性能实验, 即通过将热管传热芯部分旋转 90° 使系统不工作, 最大温差升为 0.5℃, 因此在采取措施的情况下, 夏季阻热性能较好。

(3) 当热管贴合面积与集热板或辐射板接触面积之比为 18.4%, 系统稳定且经济性较好, 推荐工厂制作集热墙时可将该数值作为参考。

参考文献:

- [1] 周景民, 孙世梅, 孙慧晶. 热管技术在暖通空调领域中的应用与发展前景[J]. 长春工业大学学报, 2007, 28(S1): 1-7.
- [2] Corliss J M. Evaluation of Heat Pipe Application for Passive Solar Systems[R]. Department of Energy, Washington, DC, 1979.
- [3] Susheela N, Sharp M K. A heat pipe augmented passive solar system for heating of buildings[J]. Journal of

Energy Engineering, 2001, 127(1):18-36.

- [4] Michael V Albanese, Brian S Robinson, Ellen G. Brehob. Simulated and experimental performance of a heat pipe assisted solar wall[J]. Solar Energy, 2012, 86(5): 1552-1562.
- [5] 丁祥, 林文贤, 许玲, 等. 热管式真空集热管及其太阳集热器的研究与应用[J]. 云南师范大学学报, 2011, 34(4): 41-49.
- [6] 裴刚, 杨金伟, 张涛, 等. 一种热管平板太阳能集热装置的性能研究[J]. 热科学与技术, 2011, 10(1):138-141.
- [7] 闫崇强. 平板型太阳能集热器热性能比较实验研究[J]. 中国太阳能产业资讯, 2017, (3):36-37.
- [8] 周亚平, 龚延风. 内置分离式热管墙体传热特性的数值模拟[J]. 建筑热能通风空调, 2016, 35(6):23-28.
- [9] Shan K Wang. Handbook of Air Conditioning and Refrigeration[M]. The United States of America: McGraw-Hill Companies, 2000.
- [10] 邱林. 地板辐射采暖房间热负荷计算方法的探讨与分析[J]. 建筑热能通风空调, 2003, (1):11-13.

(上接第 320 页)

- [2] 常琦, 袁慎芳. 飞行器综合健康管理(IVHM)系统技术现状及发展[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(11):2652-2657.
- [3] 洪晟, 陶文辉, 路君里, 等. 基于综合 PHM 方法的导弹维修保障综述[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(4):862-864, 868.
- [4] 刘志伟, 刘锐, 徐劲松, 等. 复杂系统故障预测与健康管理(PHM)技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(12): 2687-2689, 2751.
- [5] 全佳, 王旭. 飞机燃油系统健康管理研究[J]. 航空维修与工程, 2013, (6):90-92.
- [6] 谢春丽, 张继洲. 基于遗传 BP 神经网络的电控发动机故障诊断研究[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2016, 30(2):

18-22, 27

- [7] 任能. 制冷系统故障检测、诊断及预测研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [8] 曹志坤. 制冷陈列柜性能仿真 SVM 方法的研究及应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [9] 周观民, 王东霞. 基于人工神经网络的制冷系统工况模拟[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(7):2350-2353.
- [10] 张新荣. 基于 PCA 的连续过程性能监控与故障诊断研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
- [11] [HuaHan, ZhikunCao, BoGu, et al. PCA-SVM-Based Automated Fault Detection and Diagnosis (AFDD) for Vapor-Compression Refrigeration Systems[J]. HVAC&R Research, 2010, 16(3):19.