

文章编号: 0254-0096(2005)-06-0882-05

# 太阳能集热组合墙系统的耦合传热与流动分析

陈 威<sup>1</sup>, 刘 伟<sup>2</sup>

(1. 上海海事大学商船学院, 上海 200135; 2. 华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074)

摘 要: 针对太阳能集热组合墙系统, 分析了太阳辐射及环境温度变化时, 组合墙内传热与流动变化。太阳能集热组合墙系统中, 多孔介质起半透明隔热体和蓄热体的作用。多孔介质的空隙率、粒径大小对系统的采暖效果影响较大。

关键词: 太阳能; 采暖墙; 多孔介质; 传热与流动; 计算模拟

中图分类号: TK124 文献标识码: A

## 0 引 言

太阳能建筑中普遍采用采暖墙。如何合理地建造被动式太阳能采暖墙, 一直是国内外研究探讨的课题<sup>[1]</sup>。作者针对普遍应用的 Trombe 墙易出现“过热”现象和受室外环境因素影响较大等缺陷, 增加一层多孔介质作为采暖墙的集热层, 分析太阳能组合墙的传热与流动, 以及对房间采暖的影响。

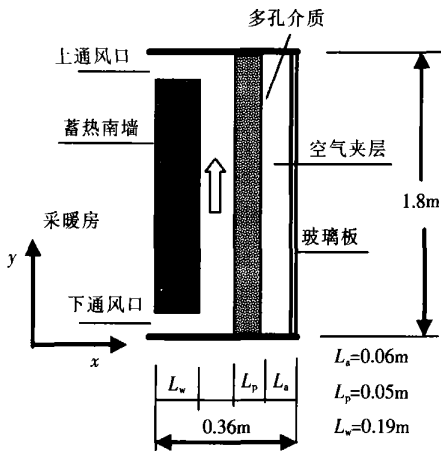


图 1 多孔介质太阳能集热组合墙示意图

Fig. 1 Schematic of a composite wall solar collector with a porous absorber

## 1 数学物理模型

### 1.1 物理模型

如图 1 所示, 以多孔介质为太阳能集热层的采

暖组合墙体在采暖房的南侧。组合墙体外侧为透明玻璃结构, 多孔介质太阳能集热层外表面面对太阳辐射吸收率较大, 位于采暖房蓄热南墙与透明玻璃结构之间, 蓄热南墙与采暖房之间上下设有通风口; 玻璃、多孔介质集热层和蓄热南墙之间为空气夹层。

### 1.2 采暖组合墙系统空气层和蓄热南墙的数学模型

在对采暖组合墙系统空气层的温度分布、气体流动进行分析时认为 Boussinesq 假设成立, 采用 N-S 方程。蓄热南墙内为没有气体流动的纯导热问题。连续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial y} \\ = \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial u}{\partial y}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} \\ = \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial v}{\partial y}) + \rho \beta(T - T_c) \end{aligned} \quad (3)$$

能量方程:

$$\begin{aligned} \rho c \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

### 1.3 多孔介质集热层

采暖组合墙系统内空气层的气体流动与多孔介质集热层内气体流动相互影响, 在研究集热层内的传热与流动时, 将两者作为一个整体考虑。多孔介质集热层采用 Brinkman-Forchheimer Extended Darcy 模型<sup>[2]</sup>。

连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho u_d)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_d)}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

动量方程:

$$\frac{\rho}{\theta} \frac{\partial u_d}{\partial \tau} + \frac{\rho}{\theta} (u_d \frac{\partial u_d}{\partial x} + v_d \frac{\partial u_d}{\partial y}) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_d}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_d}{\partial y}) - \frac{\mu u_d}{K} + \frac{\rho C \theta}{\sqrt{K}} |v_d| u_d \quad (6)$$

$$\frac{\rho}{\theta} \frac{\partial v_d}{\partial \tau} + \frac{\rho}{\theta} (u_d \frac{\partial v_d}{\partial x} + v_d \frac{\partial v_d}{\partial y}) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v_d}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v_d}{\partial y}) - \frac{\mu v_d}{K} + \frac{\rho C \theta}{\sqrt{K}} |v_d| v_d + \rho \beta (T - T_c) \quad (7)$$

能量方程:

$$(\rho C)_m \frac{\partial T}{\partial \tau} + \rho C (u_d \frac{\partial T}{\partial x} + v_d \frac{\partial T}{\partial y}) = \frac{\partial}{\partial x} (k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial y}) \quad (8)$$

其中,  $u_d, v_d$  —— 分别表示集热层的达西速度;  $\theta$  —— 集热层的孔隙率;  $\mu_m$  —— 集热层的有效粘度,  $\mu_m = \mu/\theta$ ;  $k_m$  —— 集热层的表观导热系数,  $k_m = (1 - \theta)k_s + \theta k_g$ ;  $K$  —— 集热层的渗透率,  $K = \frac{d_b^2 \theta^3}{175(1 - \theta^2)}$ ;  $C$  —— 集热层的惯性系数,  $C = \frac{1.75}{\sqrt{175}} \theta^{-3/2}$ ;  $k_s$  —— 空气的导热系数;  $k_g$  —— 集热层的导热系数;  $d_b$  —— 粒径。

## 1.4 边界条件及初始条件

### 1.4.1 采暖组合墙外侧透明玻璃板热的平衡条件

$$\eta_g A_g G_{\text{sun}} + Q_{\text{gsky}} + Q_{\text{gh}} + Q_{\text{cai}} + Q_{\text{cao}} = 0 \quad (9)$$

式中,  $G_{\text{sun}}$  —— 太阳入射辐射;  $\eta_g, A_g$  —— 分别为玻璃板对太阳辐射吸收系数和外表面积;  $Q_{\text{gh}}$  —— 玻璃板与多孔集热层间的辐射换热中玻璃板所吸收的量;  $Q_{\text{gsky}}$  —— 玻璃板表面与天空之间的辐射换热量;  $Q_{\text{cao}}, Q_{\text{cai}}$  —— 分别为玻璃板与室外、玻璃板与多孔集热层之间空气对流换热量。

### 1.4.2 多孔集热层的外表面热平衡条件

$$x = h_p; K_m A_p \frac{dT_p}{dx} = \delta \eta_p G_{\text{sun}} A_p + Q_{\text{ph}} + Q_{\text{ap}} \quad (10)$$

式中,  $\delta$  —— 集热层表面对太阳辐射的吸收率;  $\eta_p$  —— 玻璃板对太阳辐射的透过率;  $A_p$  —— 集热层表面积;  $T_p$  —— 集热层表面温度;  $Q_{\text{ph}}$  —— 集热层表面与玻璃板之间的辐射换热中集热层表面所吸收的量;  $Q_{\text{ap}}$  —— 集热层外表面与玻璃板之间空气的对流换热量;  $h_p$  —— 多孔集热层的表面坐标。

其它条件:

$$u \Big|_{x=h_p^-} = u \Big|_{x=h_p^+}, \quad v \Big|_{x=h_p^-} = v \Big|_{x=h_p^+}, \quad p \Big|_{x=h_p^-} = p \Big|_{x=h_p^+}, \quad \mu_m \left( \frac{\partial u_d}{\partial y} + \frac{\partial v_d}{\partial x} \right) \Big|_{x=h_p^-} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \Big|_{x=h_p^+}$$

### 1.4.3 蓄热南墙内表面及采暖房的热平衡条件

蓄热南墙内表面:

$$K_w A_w \frac{\partial T_{\text{wall}}}{\partial x} = Q_{\text{wall}} \quad (11)$$

采暖房:

$$(\rho V) \frac{\partial T_{\text{room}}}{\partial \tau} = Q_{\text{rin}} + Q_{\text{rout}} + Q_{\text{wall}} \quad (12)$$

$K_w$  —— 南墙导热率;  $T_{\text{wall}}$  —— 南墙温度;  $A_w$  —— 内表面积;  $T_{\text{room}}, V$  —— 分别为房间的温度和体积, 房间的体积  $V = 16.2 \text{ m}^3$ ;  $Q_{\text{wall}}$  —— 房间与南墙内表面的换热量;  $Q_{\text{rin}}$  —— 由上通风口进入房间热量;  $Q_{\text{rout}}$  —— 由下通风口流出房间热量。

除南墙外, 房间的其它围护结构视为绝热边界。初始条件:  $\tau = 0, T = \text{const}, u = 0, v = 0; u_{\text{下}} = \text{const}, u_{\text{下}}$  —— 下通风口流入房间速度。

气象因素<sup>[3]</sup>:

$$T_{\text{ao}}(\tau) = \bar{T}_{\text{ao}} + T_{\text{ar}} \cos \left[ \frac{\pi}{12} (\tau - 14) \right] \quad (13)$$

$$G_{\text{sun}}(\tau) = \bar{G}_{\text{sun}} \sin \left[ \frac{\tau - a}{b - a} \pi \right] \quad (a < \tau < b) \quad (14)$$

式中,  $\bar{T}_{\text{ao}}, T_{\text{ar}}$  —— 分别为环境气温的日平均值、日变幅值,  $\bar{T}_{\text{ao}} = 10^\circ \text{C}, T_{\text{ar}} = 5^\circ \text{C}$ ;  $\bar{G}_{\text{sun}}$  —— 太阳日辐射的最大值,  $\bar{G}_{\text{sun}} = 450 \text{ W/m}^2$ ;  $a, b$  —— 分别为日出、日落时刻,  $a$  为 6 时、 $b$  为 18 时。

## 2 数值计算与结果讨论

数值计算主要研究采用多孔介质太阳能集热层对采暖组合墙系统传热与流动的影响。组合墙内空气层为自然对流, 采暖房间气流由下通风口进入采

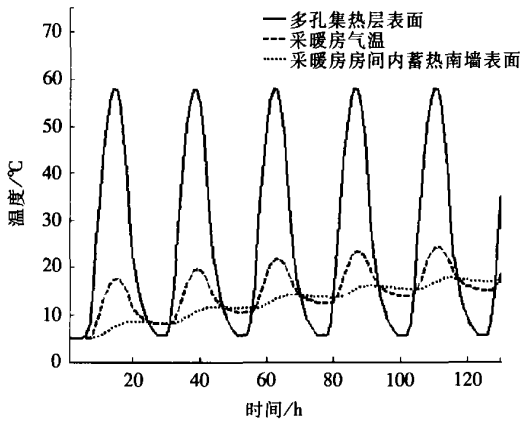


图2 多孔介质集热层表面, 蓄热南墙内表面及采暖房的温度比较

Fig. 2 Comparison among predicted values of temperature for porous absorber surface, air in the heating room and south wall surface inside the heating room

暖组合墙系统。时间步长取为 45s。数值计算采用有限差分法。

由图 2 可见, 有太阳辐射时, 多孔介质集热层表面温度相对较高, 可满足采暖房间和蓄热南墙的增温需要; 没有太阳辐射时, 蓄热南墙内表面温度较高, 起供热、保温的作用。

由图 3 可见, 在采暖组合墙系统内, 温度相对较低的房间气流与多孔介质集热层和空气夹层换热后, 由上通风口返回采暖房, 形成采暖房与组合墙之间的气流循环。多孔介质集热板的温度分层分布。在太阳辐射较强时(如中午 12 时), 集热板的温度由外表面向内表面逐渐降低, 多孔集热板通过对流换热和热辐射的方式加热蓄热墙。随着太阳辐射强度的减弱(如 16 时) 多孔介质集热层温度相对较高的区域, 逐渐向多孔介质集热层内表面迁移。在多孔介质集热板两侧, 空气夹层与空气通道之间的气体

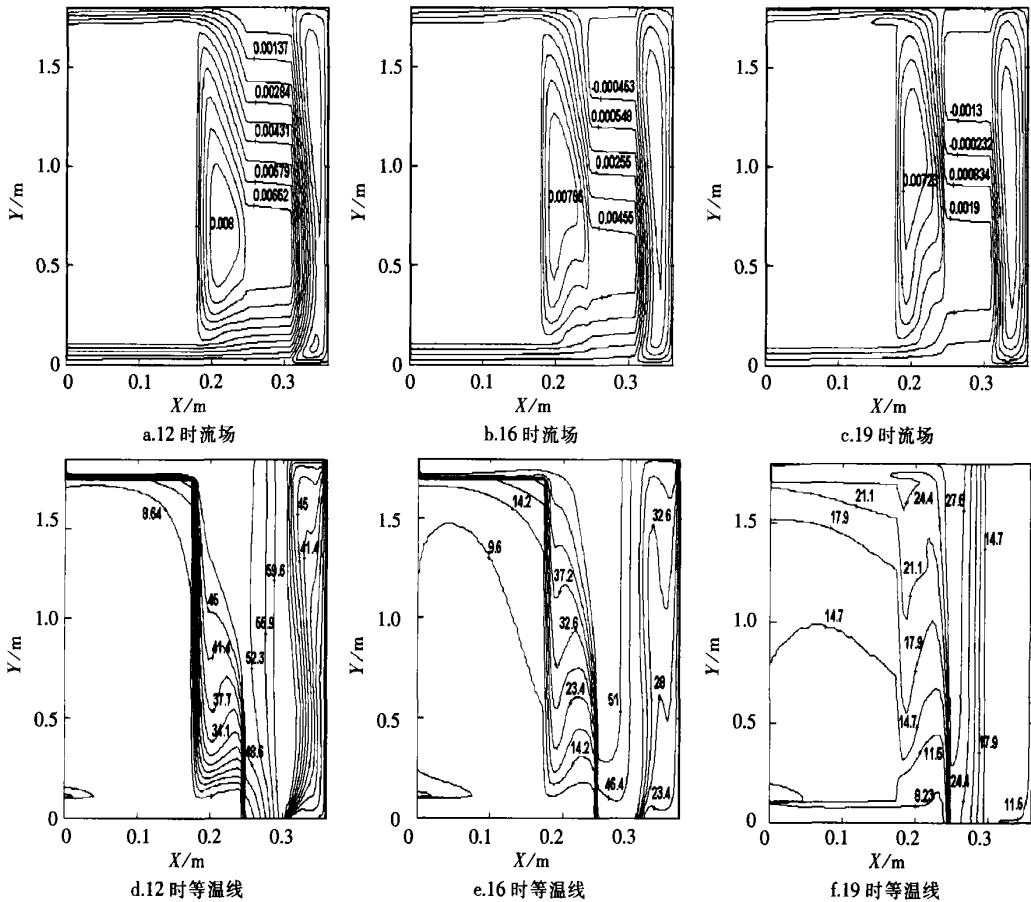


图3 多孔介质 ( $d = 1\text{cm}, \theta = 0.25$ ) 太阳能集热组合墙系统流线和温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ) 分布随时间的变化

Fig. 3 Development of fluid and temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) field with time for the composite solar wall with porous absorber ( $d = 1\text{cm}, \theta = 0.25$ )

对流, 组合墙与采暖房之间的气流循环相对减弱。在没有太阳辐射时(如 19 时)蓄热墙的温度相对较高, 用以满足采暖房增温需求; 多孔介质层的温度, 由内表面向外表面逐渐降低, 因此, 组合墙与外界环境的辐射换热、对流换热量降低, 组合墙的热散失减小; 组合墙内, 温度相对较高的空气流道与空气夹层之间的气体对流明显降低, 组合墙与采暖房之间的气体流动相对减小, 采暖房的热散失大大地降低。

由以上分析可见, 在 Trombe 墙内增加了一层多孔介质作为集热板, 在太阳辐射较强时, 多孔介质集热板贮存了一部分的热量, 一定厚度的多孔介质集热板的温度分层分布, 减少了采暖“过热”的现象出现; 在没有太阳辐射时, 由于多孔介质集热板的存在, 减小了采暖房与环境的热交换, 降低了热散失。在多孔介质太阳能组合墙系统中, 多孔介质层起“半透明”隔热体的作用。

比较图 3 和图 4 可见, 采用多孔介质为太阳能集热板时, 随着多孔介质集热板空隙率减小, 在有太阳辐射时(如 12 时、16 时)温度较高的夹层空气与温度相对较低的房间气流的对流换热减小, 多孔介质集热两侧的温度差加大, 因对流和辐射传递给蓄热南墙和采暖房获得的热量减小; 没有太阳辐射期间(如 19 时), 孔隙率相对较小的多孔介质集热板两侧的温度相差较大, 气体对流减弱, 采暖房的热散失降低, 多孔介质太阳能组合墙系统的隔热保温作用增强。但采暖系统的温度相对降低。因此, 多孔介质集热板的空隙率和粒径对组合墙的温度分布和气体流动影响较大。

由图 5 可见, 采用多孔介质太阳能集热层组合墙系统时, 多孔介质的空隙率、粒径(多孔介质渗透率)对采暖房的气温影响较大。多孔介质集热层的渗透率增大, 采暖房易出现“过热”现象; 渗透率减

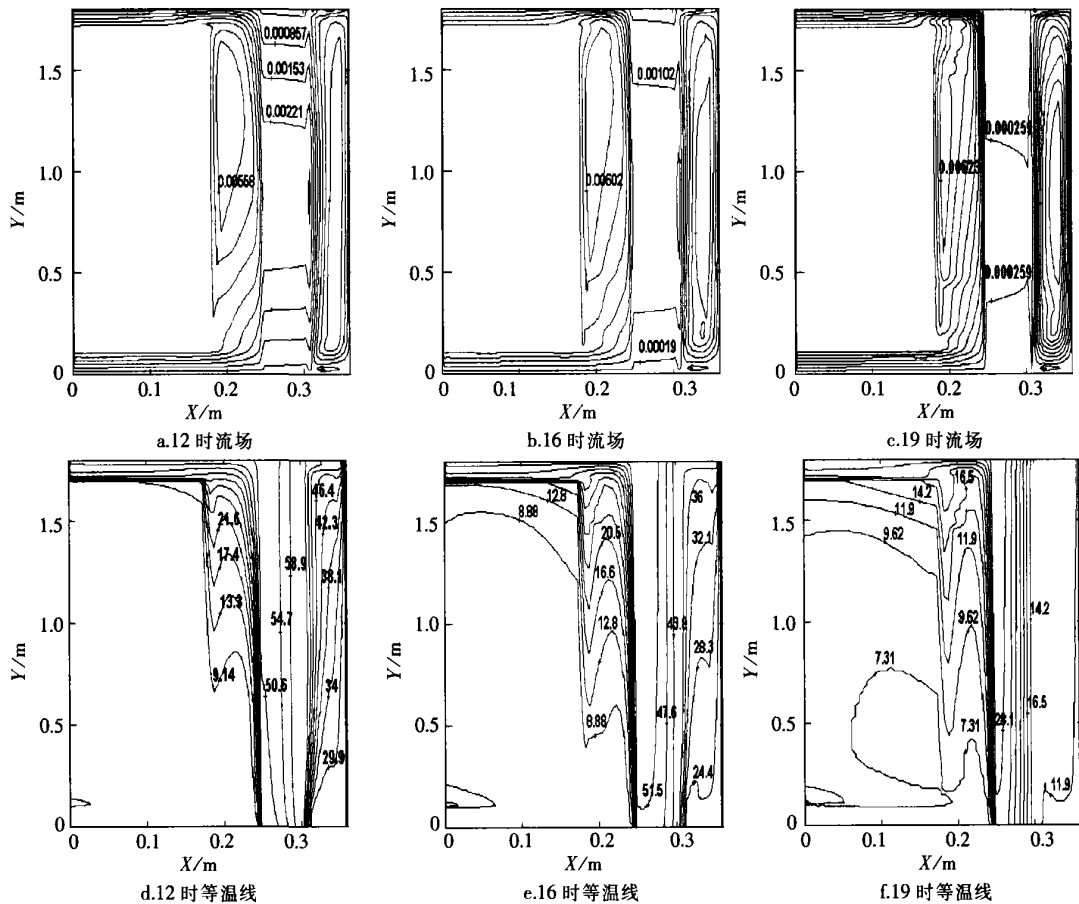


图 4 多孔介质( $d = 1\text{cm}$ ,  $\theta = 0.1$ )太阳能集热组合墙系统流线和温度( $^{\circ}\text{C}$ )分布随时间的变化

Fig. 4 Development of fluid and temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) field with time

for the composite solar wall with porous absorber ( $d = 1\text{cm}$ ,  $\theta = 0.1$ )

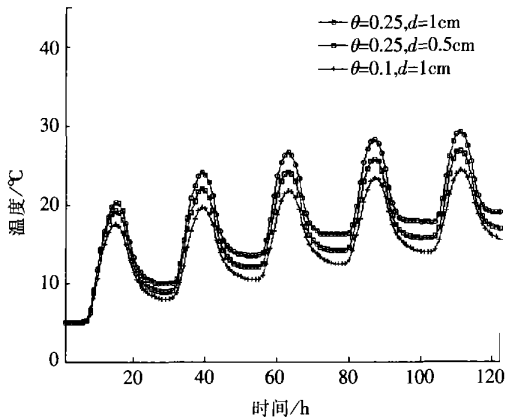


图5 比较多孔介质空隙率, 粒径不同对采暖房气温的影响

Fig. 5 Comparison among predicted values of temperature for the heating room versus different diameters and porosity of the porous absorber layer

小, 则采暖房易出现供暖不足现象。因此, 应合理选择集热层多孔介质的空隙率和粒径大小。

本文数值计算中, 除采暖组合墙外, 未考虑采暖房间的热散失, 可根据实际选取。

### 3 结 论

应用多孔介质太阳能集热层组合墙体可以缓解采暖系统出现热量“过剩”现象, 减小受室外环境的影响, 多孔介质集热层可以作为热缓冲层, 相当于“半透明”隔热体。采暖期“过剩”的热量由多孔介质集热层贮存, 在没有太阳辐射时, 用作隔热保温。多孔介质集热层的空隙率、粒径大小对系统的采暖效果影响较大, 应适当选择集热层多孔介质的空隙率和粒径大小, 减少采暖房气温过高和过低的现象出现。

#### [参考文献]

- [1] Ben Yedder R, Bilgen E. Natural convection and conduction in Trombe wall systems[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1991, 34(4/5): 1237.
- [2] Rees DAS. The onset of Darcy-Brinkman convection in a porous layer: an asymptotic analysis[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45, 2213—2220.
- [3] Chen Wei, Liu Wei. Numerical and experimental analysis of convection heat transfer in passive solar heating room with greenhouse and heat storage[J]. Solar Energy, 2004, 76(5): 623—633.

## NUMERICAL ANALYSIS OF THE HEAT TRANSFER IN SOLAR COMPOSITE WALL COLLECTOR SYSTEM WITH POROUS ABSORBER

Chen Wei<sup>1</sup>, Liu Wei<sup>2</sup>

(1. School of Merchant Marine, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Heat transfer and flow in the composite solar wall with porous absorber has been studied. The unsteady numerical simulation is employed to analyze the performance of the flow and temperature field in winter in the composite solar wall. The overplus heat is stored within the porous absorber under solar radiation and there is stratification in the porous layer. So, the porous absorber works as thermal insulator in a degree without solar shining. The influence of the particle size and the porosity within the porous absorber on the heating room temperature is significant. The results showed that all these factors should be taken into account for a better design of a heating system.

**Keywords:** solar energy; heating room; porous medium; heat transfer and flow; numerical simulation

联系人 E-mail: weichen96@sina.com