

文章编号: 0254-0096(2008)02-0220-07

# 多孔介质太阳能集热组合墙的耦合传热与流动分析

陈威<sup>1</sup>, 刘伟<sup>2</sup>

(1. 上海海事大学热能与动力教研室, 上海 200135; 2. 华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074)

**摘要:** 针对接触型和分隔型多孔介质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。多孔介质太阳能集热组合墙中, 多孔介质起半透明隔热体和蓄热体的作用。多孔介质集热层的孔隙率、粒径、材料热导率和多孔介质集热层在组合墙中的位置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

**中图分类号:** TK124 **文献标识码:** A

## 0 引言

被动式太阳能集热墙在建筑领域获得广泛应用, 如何合理地建造太阳能集热墙一直是国内外研究探讨的课题<sup>[1]</sup>。本文将多孔介质层作为集热和蓄热体应用于太阳能采暖墙, 比较两种类型的多孔介质太阳能组合墙的传热与流动及对房间采暖的影响。

## 1 数学物理模型

### 1.1 物理模型

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。多孔介质层与蓄热南墙紧密接触, 且与透明玻璃结构之间有空气夹层称为接触型, 多孔介质分别与蓄热南墙和玻璃板之间有空气夹层的为分隔型, 如图1所示。

### 1.2 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。蓄热南墙内为无气体流动的纯导热问题。

连续性方程:

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

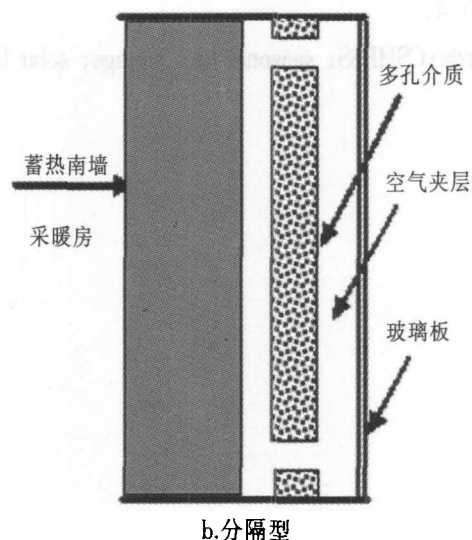
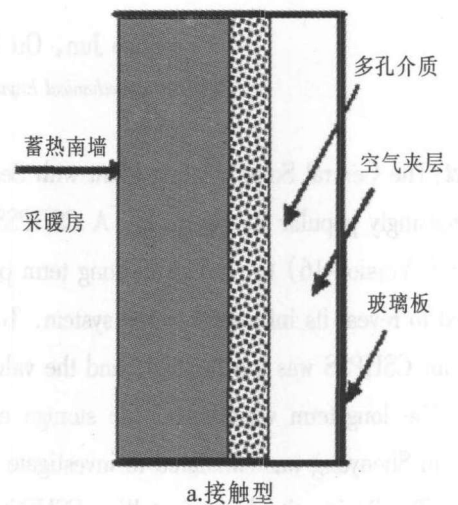


图1 多孔介质太阳能集热组合墙示意图  
Fig.1 Schematic of a composite wall solar collector with a porous absorber

收稿日期: 2006-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(50376015); 上海市教委科研项目; 上海市重点专业建设项目

通讯作者: 陈威(1968—), 男, 博士, 副教授, 主要从事多孔介质中的传热传质及其应用方面的研究。weichen96@sina.com

$$\text{动量方程: } \frac{\partial(\rho u)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u v}{\partial x} + \frac{\partial \rho v v}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \rho g \beta (T - T_c) \quad (3)$$

能量方程:

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

### 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>。

$$\text{连续性方程: } \frac{\partial(\rho u_d)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_d)}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{动量方程: } & \frac{\rho}{\theta} \frac{\partial u_d}{\partial \tau} + \frac{\rho}{\theta} \left( u_d \frac{\partial u_d}{\partial x} + v_d \frac{\partial u_d}{\partial y} \right) \\ & = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_d}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_d}{\partial y} \right) - \\ & \quad \frac{\mu u_d}{K} + \frac{\rho C \theta}{\sqrt{K}} |v_d| u_d \end{aligned} \quad (6)$$

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

$$\begin{aligned} \text{能量方程: } & (\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial \tau} + \rho c \left( u_d \frac{\partial T}{\partial x} + v_d \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left( k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $u_d$ 、 $v_d$ ——分别表示集热层的达西速度;  $\theta$ 、 $\mu_m$ 、 $k_m$ ——分别表示集热层的孔隙率、有效粘度、表观导热系数;  $K$ 、 $C$ ——分别表示集热层的渗透率、惯性系数;  $k_s$ 、 $k_g$ ——分别表示空气和集热层的导热系数;  $d_b$ ——粒径。

$$k_m = (1 - \theta) k_s + \theta k_g, \quad \mu_m = \mu / \theta, \quad K = \frac{d_b^2 \theta^3}{175(1 - \theta)^2},$$

$$C = \frac{1.75}{\sqrt{175}} \theta^{-3/2}$$

### 1.4 边界条件及初始条件

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的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。

2) 多孔集热层的外表面热平衡条件:

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

式中,  $\delta$ 、 $\eta_p$ 、 $A_p$ ——分别表示集热层表面对太阳辐射的吸收率、玻璃板对太阳辐射的透过率、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:

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

3) 分隔式多孔介质太阳能集热墙的南墙外表面热平衡条件:

$$K_w A_w \frac{\partial T_{s, \text{wallo}}}{\partial x} = Q_{s, \text{wallo}} + Q_{s, \text{wallp}} \quad (11)$$

式中,  $K_w$ 、 $A_w$ 、 $T_{s, \text{wallo}}$ ——分别为南墙导热率、南墙表面积和南墙内表温度;  $Q_{s, \text{wallo}}$ ——南墙外表面与多孔介质集热层之间的空气换热量;  $Q_{s, \text{wallp}}$ ——南墙外表面与多孔介质内表面之间的辐射换热量。接触式多孔介质太阳能集热墙无此热平衡。

4) 蓄热南墙内表面及采暖房的热平衡条件:

$$\text{蓄热南墙内表面: } K_w A_w \frac{\partial T_{s, \text{walli}}}{\partial x} = Q_{s, \text{walli}} \quad (12)$$

$$\text{采暖房: } (\rho c V) \frac{\partial T_{\text{room}}}{\partial \tau} = Q_{\text{wall}} + Q_{s, \text{walli}} \quad (13)$$

式中,  $T_{s, \text{walli}}$ 、 $T_{\text{room}}$ 、 $V$ ——分别为南墙温度、房间的温度和体积;  $Q_{s, \text{walli}}$ ——房间与南墙内表面的换热量;  $Q_{\text{wall}}$ ——房间与除南墙外其他墙体内表面的换热量; 房间的体积  $V = 30\text{m}^3$ 。

5) 房间的顶部和底部视为绝热边界。

6) 初始条件:

$$\tau = 0, T = \text{const}, u = 0, v = 0.$$

7) 气象因素<sup>[3]</sup>:

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

$$G_{\text{sun}}(\tau) = \bar{G}_{\text{sun}} \sin\left(\frac{\tau - a}{b - a}\pi\right), (a < \tau < b) \quad (15)$$

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;  $\bar{G}_{\text{sun}}$ ——太阳日辐射的最大值;  $a$ 、 $b$ ——分别为日出、日落时刻。本文在数值计算, 所取气象参数  $\bar{T}_{\text{ao}}$ 、 $T_{\text{ar}}$ 、 $\bar{G}_{\text{sun}}$ 、 $a$ 、 $b$  分别为  $10^\circ\text{C}$ 、 $5^\circ\text{C}$ 、 $400\text{W}/\text{m}^2$ 、 $6:00$ 、 $18:00$ 。

8) 多孔介质集热层及蓄热墙体材料热工物性参数:

石英岩<sup>[4]</sup>:  $\rho = 2635\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $c = 732\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,  
 $K = 5.17\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

混凝土<sup>[5]</sup>:  $\rho = 2250\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $c = 837\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,  
 $K = 1.5\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

大理石<sup>[5]</sup>:  $\rho = 2650\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $c = 840\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,  
 $K = 2.7\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

$\rho$ 、 $c$ 、 $K$ ——分别为密度、热容和热导率。蓄热南墙采用混凝土板, 多孔介质集热层为石英岩。采用多孔介质集热层分别为大理石和石英岩, 比较采暖房间气温。

## 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, 时间步长取为  $45\text{s}$ , 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, 满足采暖房间和南墙的增温需要; 房间南墙蓄存了热量, 相对于室外环境气温和多孔介质集热层表面, 南墙内表面最高温度的滞后。无太阳辐射时, 南墙内表面温度较高, 墙体蓄存的热量释放出来, 起供热、保温的作用。与接触型多孔介质集热南墙相比, 分隔型多孔介质集热南墙温度随时间的变化较大, 最高温度与最低温度相差较大, 并且最低温度与接触型多孔介质集热南墙内表面的最低温度相差近  $5^\circ\text{C}$ 。

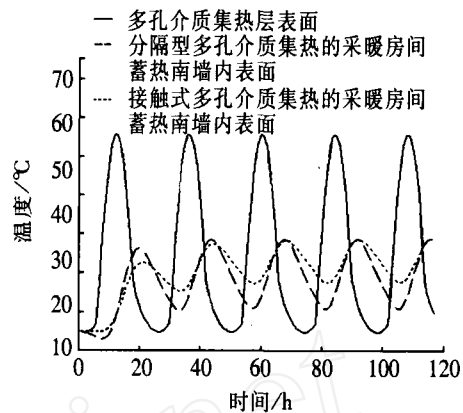


图 2 多孔介质集热层表面, 分隔型多孔介质集热蓄热南墙内表面及接触式多孔介质集热蓄热南墙内表面的温度比较

Fig. 2 Comparison among predicted values of temperature for porous absorber surface, south wall out-surface of separation type and south wall out-surface of contact type

由图 3、图 4 可见, 在采暖组合墙内, 多孔介质集热层吸收太阳辐射, 通过导热、对流或辐射的方式与墙体换热。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  $12:00$ ), 多孔介质集热板的温度由外表面向内表面逐渐降低, 分隔型多孔集热板通过对流传热和热辐射的方式加热蓄热南墙; 接触型多孔集热板以对流和热传导的形式加热蓄热南墙。随着太阳辐射强度的减弱(如  $16:00$ ), 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和蓄热南墙迁移。在无太阳辐射时(如  $19:00$  和  $24:00$  时), 蓄热南墙的温度相对较高, 用以满足采暖房增温需求; 蓄热南墙和多孔介质层的温度, 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, 采暖墙的热散失减小。在分隔型多孔介质集热组合墙中, 多孔板两侧空气夹层之间的气体对流明显降低, 在接触型多孔介质集热组合墙中, 多孔介质集热层与温度较低的空气夹层之间的对流减小, 采暖房的热散失大大降低。在  $24:00$  时, 与分隔型多孔介质采暖墙相比, 在接触型多孔介质集热组合墙内, 靠近南墙内表面区域的温度较高, 墙体隔热保温性相对较好。

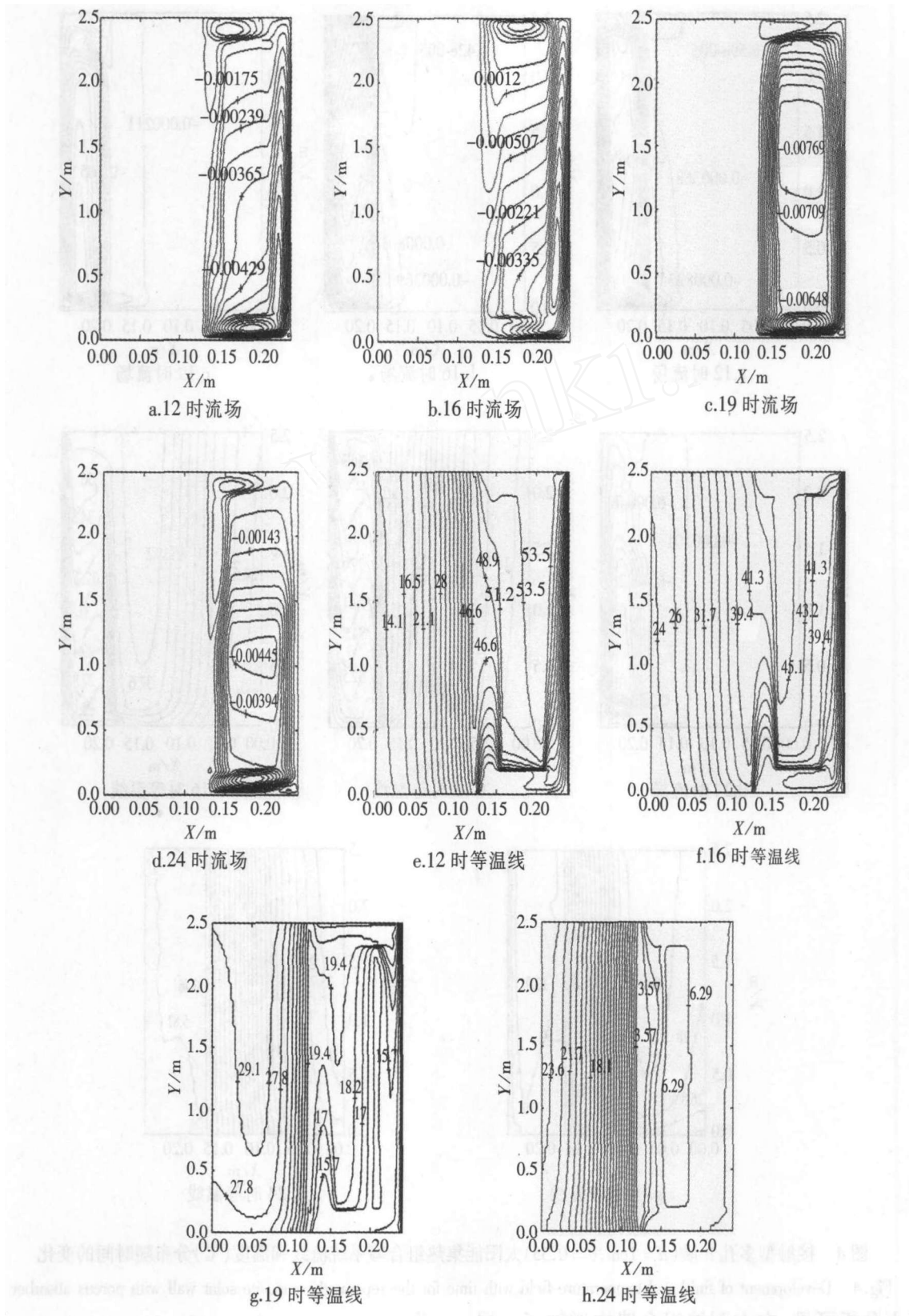


图3 分隔型多孔介质( $d = 1\text{cm}$ ,  $\theta = 0.55$ )太阳集热组墙流线和温度( $^{\circ}\text{C}$ )分布随时间的变化  
 Fig.3 Development of fluid and temperature field with time for the separated composite solar wall with porous absorber

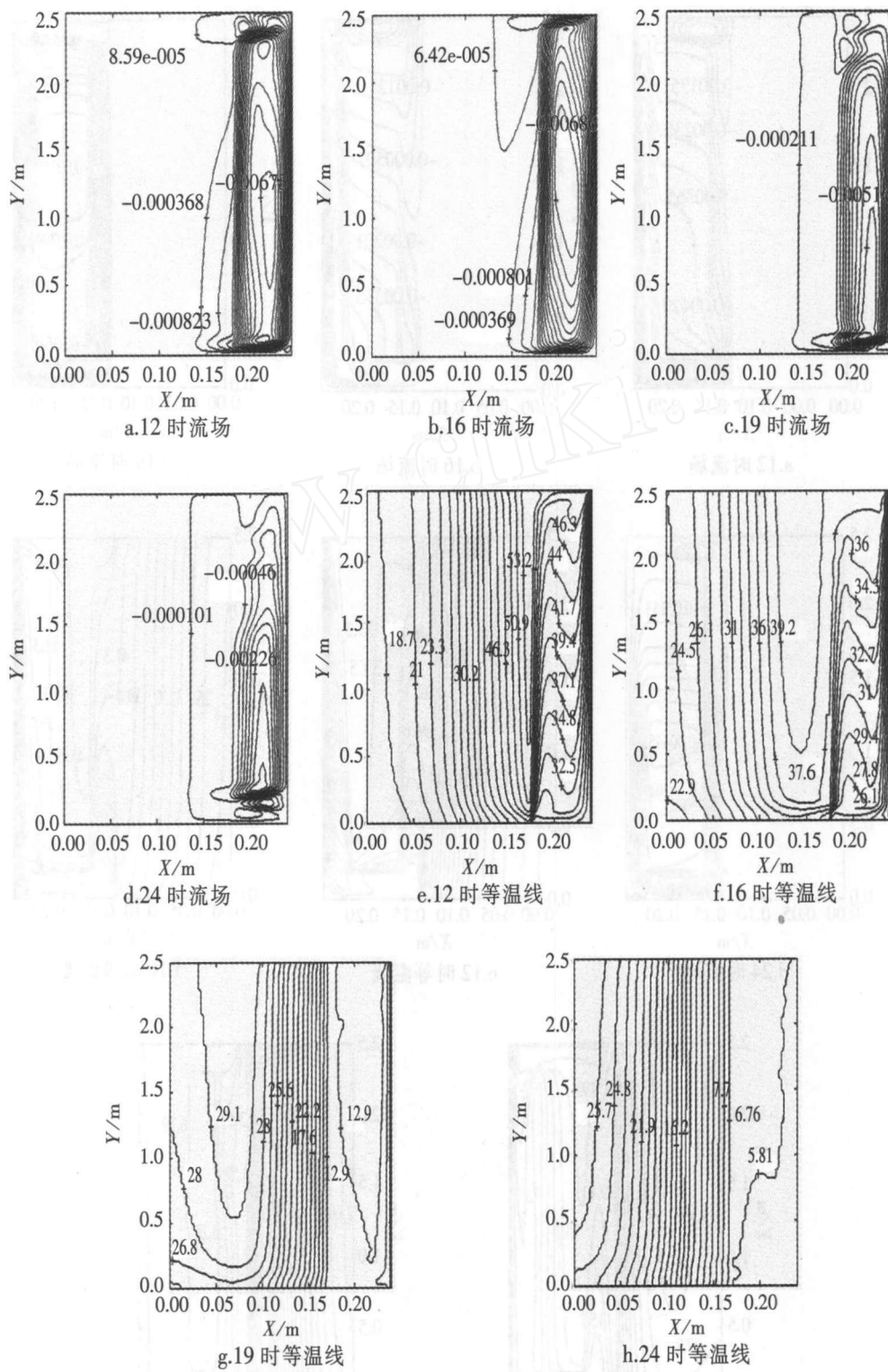


图4 接触型多孔介质( $d=1\text{cm}, \theta=0.55$ )太阳能集热组合墙系统流线和温度( $^{\circ}\text{C}$ )分布随时间的变化

Fig.4 Development of fluid and temperature field with time for the separated composite solar wall with porous absorber

以上分析可见,在太阳能组合墙内增加了一层多孔介质作为集热板,利用多孔介质“半透明”隔热体特性,在太阳辐射较强时,多孔介质通过对流和热传导形式传递热量,防止采暖墙出现采暖供热不足和采暖房间升温较慢的现象。在多孔集热板贮存了一部分热量,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”现象出现;在没有太阳辐射时,减小了采暖房与环境的热交换,降低了热散

失。

由图5可见,多孔介质太阳能集热层组合墙中,多孔介质集热板在组合墙中的位置对采暖房的气温影响较大。分隔型多孔介质集热墙的采暖房间温度受室外环境影响较大,房间温度变化幅度相对较大。比较图2和图5可见,房间热量主要由采暖蓄热南墙提供,房间气温的变化与蓄热南墙温度变化相一致。无多孔介质实体采暖墙的房间易出现采暖供热

不足的现象。

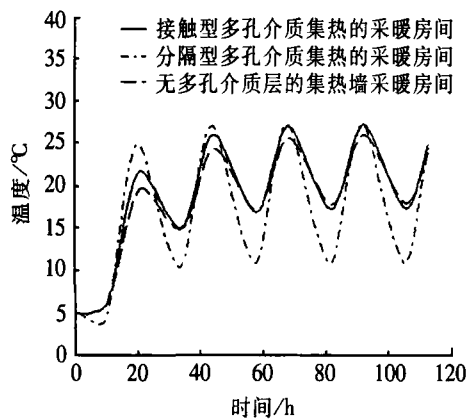


图5 比较接触型多孔介质集热、分隔型多孔介质集热和无多孔介质层墙体集热的采暖房间气温  
Fig.5 Comparison among predicted values of temperature for the heating room versus contact type porous absorber layer, separation type porous absorber layer and absorber without porous layer

由图6可见,与具有大理石多孔介质集热层采暖房相比,石英岩多孔介质集热层采暖房内气温最高点的温度较高,最低点的温度较低。石英岩与大理石的热容量( $\rho c$ )几乎一致,石英岩的热导率相对较高,有太阳辐射时,石英岩集热层吸收的热量较多地供给房间采暖,无太阳辐射和环境温度低于房间温度时,房间热量损失相对较大。

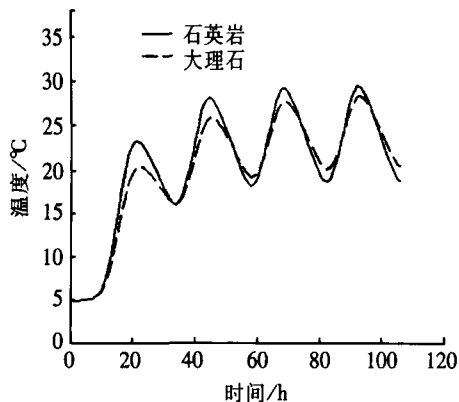


图6 比较石英岩和大理石分别作为接触型多孔介质集热层时,采暖房间气温  
Fig.6 Comparison between air temperature inside heating room with Quartzite contact type porous absorber and that with Marble

由图7、图8可见,多孔介质集热层的孔隙率、粒径对采暖房内气温和集热层温度影响较大。多孔介质集热层内,孔隙率为0.55,粒径由0.22cm增大到1cm;粒径为1cm,孔隙率由0.2增为0.55,分隔型多孔介质采暖房气温分别相应升高。接触型多孔介

质采暖墙中,与孔隙率为0.15的多孔介质集热层相比,孔隙率分别为0.35和0.55集热层的温度相对较高。比较孔隙率为0.35和0.55多孔介质集热层温度可见,孔隙率为0.35的多孔介质集热层温度相对较高。这些现象是由多孔介质层的热量传递主要通过热传导和气体自然对流造成的。粒径和孔隙率增加,多孔介质层内气体自然对流的热传递以及与墙体空气夹层的对流换热增加,采暖房和集热层温度升高。而孔隙率的增加导致多孔介质层固体骨架之间的接触面减少,固体骨架向集热层内的热传导量减少。孔隙率增加到一定程度,多孔介质层内固体骨架之间热传导降幅较大,集热层内温度相对较低,同时孔介质层内固体材料减少,其内部蓄存热量相对减少。因此应合理选择集热层的孔隙率。

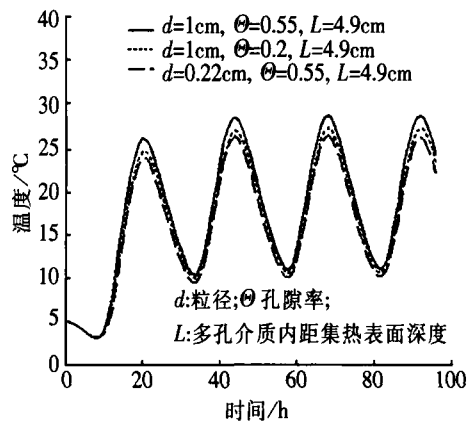


图7 孔隙率和粒径不同,分隔型多孔集热层内温度比较  
Fig.7 Comparison among temperature inside contact type porous absorber versus different diameters and porosities of porous medium

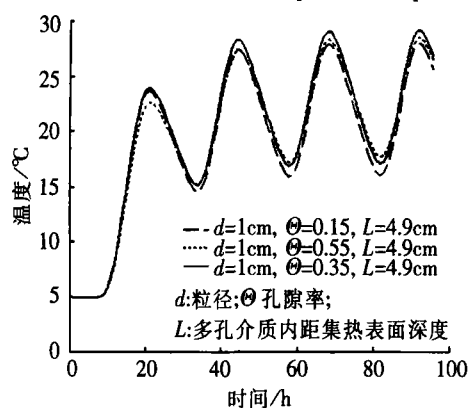


图8 孔隙率不同,接触型多孔集热层内温度的比较  
Fig.8 Comparison among predicted values of temperature inside contact type porous absorber versus different diameters

### 3 结论

多孔介质太阳能集热层组合墙体可以缓解采暖

系统出现采暖热量“不足”和采暖房间升温较慢的现象,多孔介质可作为“半透明”隔热体。采暖期“过剩”的热量由多孔介质集热层贮存,在无太阳辐射时用作隔热保温。多孔介质集热层的孔隙率、粒径、材料的热工特性以及在太阳能采暖组合墙的位置对采暖房间的气温影响较大。在一定范围内,孔隙率、粒径的增大,多孔介质内对流换热增强,采暖房气温和集热层温度增加。多孔介质固体骨架的热传导特性对采暖房气温和集热层温度影响较大。分隔型多孔介质集热墙的采暖房间温度受室外环境影响较大,房间温度变化幅度相对较大。接触型多孔介质集热采暖墙,可以避免实体采暖墙的房间易出现采暖供热不足和升温较慢的现象。因此,在设计和建造多孔介质太阳能集热墙时,应综合考虑以上因素。

#### [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 D A S. 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.

[4] Chen Wei, Liu Wei. Numerical analysis of heat transfer in a composite wall solar-collector system with a porous absorber[J]. *Applied Energy*, 2004, 78:137—149.

[5] 杨世铭. 传热学[M]. 高等教育出版社(第2版), 1987, 441.

## ANALYSIS OF THE HEAT TRANSFER AND FLOW IN SOLAR COMPOSITE WALL WITH POROUS ABSORBER

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

(1. Department of Energy and Power, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China;

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

**Abstract:** The heat transfer and flow in the solar composite wall with porous absorber were studied in the paper. The unsteady numerical simulation was employed to analyze the performance of the flow and temperature field in the composite solar wall. The overplus heat was stored within the porous absorber during solar radiation and there was stratification in the porous layer and the porous absorber works as thermal insulator to some extent when no sunshine was available. The influence of particle size, porosity, thermal conductivity of porous absorber and its position in the solar composite wall on the heating room temperature is significant. The results show that all these factors should be taken into account for a better design of a heating system.

**Keywords:** solar energy; heating wall; porous medium; heat transfer and flow