

# 温室内多孔蓄热墙传热与流动特性

欧阳莉 刘伟

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 本文采用一维稳态饱和多孔介质能量双方程模型, 对温室内多孔蓄热墙的传热与流动特性进行了研究。结果表明, 多孔蓄热墙的固体骨架与空气之间的换热取决于空气的入口流速、多孔材料的孔隙率、渗透率和固体骨架的导热系数。由于多孔蓄热墙接受的太阳辐照是不均匀的, 因此推荐采用具有不同孔隙率的新型复合多孔蓄热墙, 以减少这种不利的影响。

**关键词** 温室; 多孔蓄热墙; 流动与传热

**中图分类号**: TK511 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-231X(2008)02-0284-03

## FLOW AND HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF POROUS HEAT- STORAGE WALL IN GREENHOUSE

OU-YANG Li LIU Wei

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

**Abstract** Flow and heat transfer characteristics of porous heat- storage wall in greenhouse are studied using the one-dimensional steady energy two-equation model for saturated porous medium. Results show that the heat exchange between air and the solid matrix of porous heat-storage wall depends upon the inlet air velocity, the porosity and permeability of porous medium, the thermal conductivity of solid matrix. Because the incidence of solar radiation on the porous heat- storage wall is not uniform, the new composite porous solar wall with different porosity is proposed to reduce the disadvantageous effect.

**Key words** greenhouse; porous heat- storage wall; flow and heat transfer

## 1 引言

农业温室的主要用途是在非栽培季节或者非栽培地带种植农作物, 提高土地的利用率, 从而提高了经济效益。因此, 因地制宜地建造和管理农业温室, 为农作物提供一个最佳室内生长环境, 一直是国内外研究机构探讨的课题。

墙体作为温室的围护结构之一, 对温室内的热环境有直接的影响。我国的专家学者曾对几种温室墙体的温度分布进行了测试<sup>[1,2]</sup>, 但目前对温室墙体的传热特性还缺乏理论研究。国外学者对温室墙体的传热及能耗进行了理论分析及实验测试<sup>[3,4]</sup>, 但由于所处的地理环境以及所研究的温室结构与我国不同, 我们还不能直接照搬国外的研究模式和结果。因此, 进一步研究墙体内部的传热与流动特性, 并对墙体进行改进, 提高温室利用率, 有着非常重要的意义。

的意义。

本文设计了一种太阳能温室系统, 温室的墙体是多孔墙。多孔墙可直接收集和蓄积太阳能, 并加热温室空气。将温室与多孔蓄热墙结合起来, 充分发挥二者的作用, 从而提高了温室的太阳能利用效果。

## 2 物理模型

如图 1 所示, 温室坐北朝南, 温室顶部向南倾斜, 顶部、东、西、南由透明玻璃围成, 底部为土壤, 温室北墙是多孔蓄热墙, 墙体采用表面涂黑的多孔材料。它具有一般温室不同的特点: (1) 温室内空气的流动由自然对流循环改为受迫对流循环; (2) 能够根据日照的强度、多孔蓄热墙的温度和温室负荷的要求, 调节风机的风量, 实现节能运行, 使得多孔

收稿日期: 2007-12-09; 修订日期: 2008-01-07

作者简介: 欧阳莉 (1967-), 女, 湖南长沙人, 博士研究生, 主要从事建筑节能方面的研究。

蓄热墙具有能量调节作用。因此, 采用这种系统, 不仅扩大了供暖面积, 而且提高了对房间供暖的主动性。进一步提高了温室的利用率和多孔蓄热墙的使用效率。本文在一定假设条件下, 采用一维稳态饱和多孔介质能量双方程模型, 对温室内多孔蓄热墙的传热与流动特性进行了数值模拟。

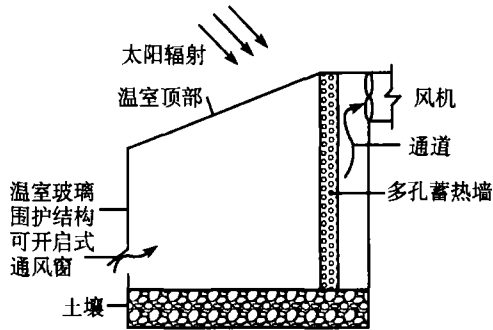


图 1 温室系统示意图

Fig.1 Schematic of greenhouse system

### 3 数学模型

#### 3.1 模型的简化和假设

多孔蓄热墙入口空气流速均匀, 其温度等于温室温度; 在多孔蓄热墙中, 流入空气与多孔固体骨架之间有热量的传递, 对流换热系数处处相等。

#### 3.2 数学模型<sup>[5]</sup>

##### (1) 连续性方程

$$\frac{\partial(\rho_f u)}{\partial x} = 0$$

##### (2) 动量方程

$$\frac{\rho_f}{\varepsilon^2} u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial x} \right) -$$

$$\frac{\mu_f u}{K} - \frac{\rho_f C \varepsilon}{\sqrt{K}} |u| u$$

$$K = \frac{d_b^2 \varepsilon^3}{175(1-\varepsilon)^2}, \quad C = \frac{1.75}{\sqrt{175}} \varepsilon^{-3/2}$$

式中,  $u$  表示多孔墙的达西速度;  $\varepsilon$ 、 $\mu_{\text{eff}}$  分别表示多孔墙的孔隙率、有效粘度;  $K$ 、 $C$  分别表示多孔墙的渗透率、惯性系数;  $d_b$  表示平均颗粒直径。

动量方程的边界条件:

$$x=0: u = u_0; \quad x=L: \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

$x=0$ 、 $x=L$  分别表示多孔蓄热墙内侧 (靠温室侧) 和外侧 (靠通道侧)。

##### (3) 能量方程

气相能量方程:

$$\frac{\partial(c_f \rho_f u T_f)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + S_f$$

式中, 源项为:  $S_f = h(T_s - T_f)$

固相能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{\text{seff}} \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + S_s = 0$$

式中, 源项为:  $S_s = -h(T_s - T_f)$

$$\lambda_{\text{seff}} = k_f \left\{ 1 - \sqrt{1-\varepsilon} + 2 \frac{\sqrt{1-\varepsilon}}{1-\lambda B} \times \right.$$

$$\left. \left[ \frac{B(1-\lambda)}{(1+\lambda B)^2} \ln \left( \frac{1}{\lambda B} \right) - \frac{B+1}{2} - \frac{B-1}{1-\lambda B} \right] \right\}$$

$$\lambda = \frac{k_f}{k_s}, \quad B = 1.25 [(1-\varepsilon)/\varepsilon]^{10/9}$$

式中,  $k_f$ 、 $c_f$ 、 $\mu_f$ 、 $\rho_f$  分别表示空气的导热系数、比热、粘度、密度;  $\lambda_{\text{seff}}$ 、 $k_s$ 、 $h$  分别表示多孔蓄热墙有效导热系数<sup>[6]</sup>、多孔固体骨架的导热系数、空气与多孔固体骨架之间的对流换热系数;  $B$  表示规则球体构成的堆积床的形状系数<sup>[6]</sup>。

能量方程的边界条件:

$$x=0: T_f = T_0,$$

$$\lambda_{\text{seff}} \frac{\partial T_{\text{sw1}}}{\partial x} = \alpha_p \tau G_{\text{sun}} + q_1 + q_2 + q_3$$

$$x=L: \lambda_{\text{seff}} \frac{\partial T_{\text{sw2}}}{\partial x} = q_4$$

式中,  $G_{\text{sun}}$  表示太阳辐射强度;  $\alpha_p$  表示多孔蓄热墙表面的太阳辐射吸收率;  $\tau$  表示玻璃的透射率;  $q_1$ 、 $q_2$  分别表示多孔蓄热墙内壁 (靠温室侧) 与土壤、玻璃的辐射换热量;  $q_3$  表示多孔蓄热墙内壁 (靠温室侧) 与温室空气的对流换热量;  $q_4$  表示多孔蓄热墙外壁 (靠通道侧) 与通道壁面的辐射换热量;  $T_{\text{sw1}}$ 、 $T_{\text{sw2}}$  分别表示多孔蓄热墙内、外壁的温度。

#### 3.3 数值模拟主要参数

多孔固体骨架分别采用铝和岩石, 铝的导热系数为 236 W/(m·K), 岩石的导热系数为 1.74 W/(m·K), 多孔蓄热墙的吸收率为 0.9, 孔隙率分别为 0.2、0.5, 平均颗粒直径为 20 mm。太阳辐射强度为 800 W/m<sup>2</sup>, 玻璃的透射率为 0.97, 空气

入口温度为 283 K, 入口流速分别为 0.1 m/s, 0.15 m/s,  $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$ 、 $q_4$  设为常数。

#### 4 数值计算结果及分析

图 2 表示在引风机作用下, 空气以不同的流速流入多孔蓄热墙时, 空气温度的分布情况。由图可知, 因多孔蓄热墙的温度高于流入空气的温度, 空气在流入过程中不断地被加热, 温度不断升高。空气的温度在入口处温升幅度较大, 而沿气流流动方向, 由于空气与多孔固体骨架之间的温差逐渐减小, 换热强度变弱, 空气的温升幅度变小。因此, 降低空气入口流速, 能够提高空气的出口温度, 同时能够减小空气流过墙体的流动阻力, 降低运行能耗。

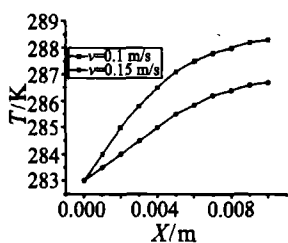


图 2 入口流速变化的影响

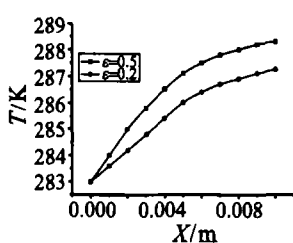


图 3 孔隙率变化的影响

Fig.2 Effect of inlet air velocity Fig.3 Effect of porosity

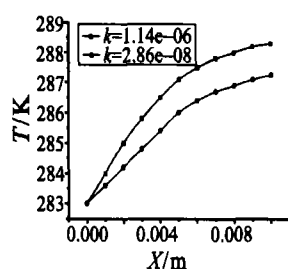


图 4 渗透率变化的影响

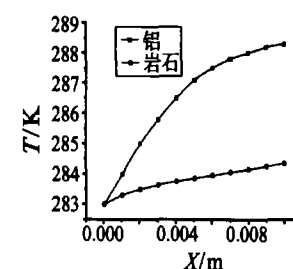


图 5 多孔骨架材料变化的影响

Fig.4 Effect of permeability Fig.5 Effect of porous material

图 3 表示当多孔蓄热墙的孔隙率改变时空气的温度分布。由图可知, 孔隙率大时, 空气的温度较高, 孔隙率小时, 空气的温度较低。因此, 增大多孔蓄热墙的孔隙率, 虽然降低了它的有效导热系数, 但其内部对流换热加强, 提高了多孔蓄热墙的温度, 使空气的温度提高。

图 4 表示当多孔蓄热墙的渗透率改变时空气的温度分布。由图可知, 渗透率大时, 空气温度较高。同时, 多孔蓄热墙的渗透率取决于其固有几何特性,

影响墙体的造价。

图 5 表示多孔固体骨架分别采用铝、岩石时空气的温度分布。由图可知, 当多孔固体骨架材料是铝时, 空气的温升幅度较大, 空气的出口温度高。而采用岩石, 空气的温升幅度变小。其原因是铝的导热系数大, 使得多孔蓄热墙的有效导热系数大, 从而提高了空气的温升幅度。

#### 5 结论

具有一定温度的空气, 在引风机的抽吸作用下, 流过多孔蓄热墙时被加热, 通过数值计算, 可以得到: 由于多孔蓄热墙孔隙率的大小, 影响墙体的温度分布, 因此, 根据不同地区的太阳辐照情况, 合理采用不同孔隙率的复合多孔介质, 设置孔隙率分区、分层多孔墙, 有利于改善太阳辐照不均匀性的影响。并且, 应合理选择多孔蓄热墙的渗透率、固体骨架材料, 在保证满足使用要求的条件下, 尽可能地降低初投资。

#### 参考文献

- [1] 陈端生, 郑海山, 刘步洲. 日光温室气象环境综合研究——墙体、覆盖物热效应研究初报. 农业工程学报, 1990, 6(2): 77-81  
Chen Duansheng, Zhang Haishan, Liu Buzhou. Comprehensive Study on the Meteorological Environment of Sunlight Greenhouse—Preliminary Study on the Thermal Effect of the Wall Body and Covering Materials. Transactions of CSAE, 1990, 6(2): 77-81
- [2] 亢树华, 陈端生. 日光温室优型结构的研究. 农业工程学报, 1997, 12(A00): 30-35  
Kang Shuhua, Chen Duansheng. Study on the Structure Optimization of Sunlight Greenhouse. Transactions of CSAE, 1997, 12(A00): 30-35
- [3] Fuller R J, Meyer C P, Sale P J M. Validation of a Dynamic Model for Predicting Energy Use in Greenhouse. Agric. Engng. Res., 1987, 38: 1-14
- [4] Jolliet O, Danloy L, Gay J-B, et al. Horticorn: an Improved Static Model for Predicting the Energy Consumption of a Greenhouse. Agricultural and Forest Meteorology, 1991, 55: 265-294
- [5] 刘伟, 范爱武, 黄晓明. 多孔介质传热传质理论与应用. 北京: 科学出版社, 2006  
Liu Wei, Fan Aiwu, Huang Xiaoming. Theory and Application of Heat and Mass Transfer in Porous Media. Beijing: Science Press, 2006
- [6] 过增元, 黄素逸, 等. 场协同原理与强化传热新技术. 北京: 中国电力出版社, 2004  
Guo Zengyuan, Huang Suyi, et al. Field Coordination Principle and New Techniques in Heat Transfer Enhancement. Beijing: China Electric Power Press, 2004