

温室中岩床蓄热性的分析

陈 威 刘 伟 许国良

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要 本文针对被动式太阳温室岩床蓄热系统, 分析了岩床孔隙率、粒径和材料对岩床蓄热的影响。岩床应分层铺设, 岩床上部孔隙率、粒径相对较大; 超过一定深度后, 铺设孔隙率、粒径小的岩石; 热容量 (ρc) 和导热系数影响岩床平均温度日变幅和热惯性。

关键词 太阳能利用; 蓄热; 岩床

中图分类号: TK124 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X(2004)04-0679-03

A ANALYSIS OF HEAT STORAGE CHARACTERISTIC FOR ROCK BED IN PASSIVE SOLAR GREENHOUSE

CHEN Wei LIU Wei XU Guo-Liang

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract In this paper, the effects of bed porosity, rock size and rock material on the heat storage of bed have been studied. The rock bed needs to be divided into two layers, the larger bed porosity and rock exists in the upper, in the excess of a certain depth, the smaller rock and bed porosity is in the bed. The specific heat capacity and thermal conductivity have a remarkable effect on the average temperature of rock bed versus time

Key words solar energy; heat storage; rock bed

1 前 言

岩床作为一种经济的蓄热材料, 广泛用于热量贮存系统。本文针对岩床置于温室底部时, 岩床孔隙率、岩石粒径和材料对岩床蓄热影响进行了理论分析和实验研究。

2 数学物理模型

2.1 物理模型

如图 1 所示, 温室岩床蓄热系统为坐北朝南, 本文以蓄热系统由东向西垂直剖面, 作为研究对象。蓄热系统分为上下两部分, 上部为空气, 下部是岩床。岩床四周及底部铺设保温材料。蓄热系统顶部和围护结构材料采用透明玻璃板。

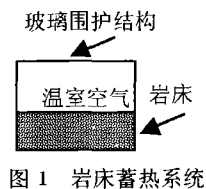


图 1 岩床蓄热系统

2.2 温室岩床蓄热系统数学模型^[1]

在对岩床上部温度分布、气体流动进行分析时, 认为 Boussinesq 假设成立, 采用低 Re 数 $k-\epsilon$ 模型。

(1) 连续性方程:

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

(2) 动量方程:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S$$

当 ϕ 为 u, v 时, $\Gamma = \mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$ 。 μ 、 μ_t 分别为流体的分子粘性系数和湍流粘性系数。

源项 (u):

$$S = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

源项 (v):

$$S = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \rho g \beta (T - T_C)$$

式中, ρ 、 β 、 T_C 分别为密度、 体积膨胀系数、 参考点温度。

收稿日期: 2004-01-08; 修订日期: 2004-05-11

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目资助 (No.G2000026303); 国家自然科学基金项目资助 (No.59976010); 教育部博士点基金项目资助 (No.2000048731)

作者简介: 陈 威 (1968-), 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 主要从事太阳能在建筑中应用的研究。

(3) 能量方程

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial y} \right),$$

$$\Gamma = \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_T}$$

(4) 脉动动能 k 和脉动动能耗散率 ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S$$

当 ϕ 为脉动动能 k 时, $\Gamma = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$; 当 ϕ 为脉动动能耗散率 ε 时, $\Gamma = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}$.

源项 (k):

$$S = \mu_t G - \rho \varepsilon - 2\mu \left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial y} \right)^2$$

源项 (ε):

$$S = \frac{\varepsilon}{k} c_1 f_1 \mu_t G - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} f_2 + 2 \frac{\mu \mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)^2,$$

$$G = \frac{\mu_t}{\rho} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\},$$

$$\mu_t = c_\mu f_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad f_\mu = \exp \left(\frac{-2.5}{1 + Re_t/50} \right),$$

$$f_2 = 1 - 0.3 \exp(-Re_t^2), \quad f_1 = 1, \quad Re_t = \rho k^2 / (\varepsilon \mu),$$

$$c_\mu = 0.09, \quad c_1 = 1.44, \quad \sigma_k = 1, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3, \quad \sigma_t = 1$$

2.3 岩床蓄热层的数学模型

温室内气体流动与岩床蓄热层内气体流动相互影响, 在研究蓄热层内的传热与流动时, 将两者作为一个整体考虑。温室岩床蓄热层, 可视为多孔介质, 可采用 Brinkman-Forchheimer Extended Darcy 模型 [2]。

连续性方程:

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

动量方程:

$$\rho \left(\frac{1}{\theta} \frac{\partial u_d}{\partial \tau} + u_d \frac{\partial u_d}{\partial x} + v_d \frac{\partial u_d}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_m \frac{\partial u_d}{\partial x} \right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_m \frac{\partial u_d}{\partial y} \right) - \left(\frac{\mu}{K} + \frac{\rho C}{\sqrt{K}} |v_d| \right) u_d$$

$$\rho \left(\frac{1}{\theta} \frac{\partial v_d}{\partial \tau} + u_d \frac{\partial v_d}{\partial x} + v_d \frac{\partial v_d}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_m \frac{\partial v_d}{\partial x} \right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_m \frac{\partial v_d}{\partial y} \right) - \left(\frac{\mu}{K} + \frac{\rho C}{\sqrt{K}} |v_d| \right) v_d + \rho g \beta (T - T_c)$$

能量方程:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u_d \frac{\partial T}{\partial x} + v_d \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_m \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_m \frac{\partial T}{\partial y} \right)$$

其中, u_d 、 v_d 分别表示蓄热层的达西速度; θ 、 μ_m 、 k_m 分别表示蓄热层的孔隙率、有效粘度、表观导热系数; K 、 C 分别表示蓄热层的渗透率、惯性系数; k_s 、 k_g 分别表示蓄热层固体颗粒和空气的导热系数; d_b 表示粒径。 $k_m = (1 - \theta)k_s + \theta k_g$, $\mu_m = \mu / \theta$, $K = \frac{d_b^2 \theta^3}{175(1 - \theta)^2}$, $C = \frac{1.75}{\sqrt{175}} \theta^{-3/2}$ 。

2.4 边界条件及初始条件

(1) 温室顶部及玻璃围护结构条件热平衡条件:

$\eta_g G_{\text{sun}} + Q_{g\text{sky}} + Q_{gh} + Q_{\text{cai}} + Q_{\text{cao}} = 0$, $T = T_g$, $u = 0$, $v = 0$ 。其中, G_{sun} 为太阳辐射; η_g 为围护结构对太阳辐射的吸收系数; Q_{gh} 为因温室内热辐射, 玻璃围护结构所吸收的热量; Q_{rao} 、 Q_{rai} 分别为温室围护结构与温室外、温室内的空气对流换热。 $Q_{g\text{sky}}$ 为玻璃板表面与天空之间的辐射换热量。

(2) 岩床蓄热层表面条件, 热边界条件: $y = h_p$, $K_m \frac{dT_s}{dy} = \delta \eta_s G_{\text{sun}} A_s + Q_{rs} + Q_{as}$ 。其中, η_s 、 δ 分别表示蓄热层表面对太阳辐射的吸收率、温室玻璃对太阳辐射的透过率; T_s 为蓄热层表面温度; Q_{rs} 为由于温室内热辐射蓄热层表面所吸收的热量; Q_{as} 表示蓄热层表面与温室内空气的对流换热; h_p 为蓄热层的高度坐标。

$$u \Big|_{y=h_p^-} = u \Big|_{y=h_p^+}, \quad v \Big|_{y=h_p^-} = v \Big|_{y=h_p^+}, \quad p \Big|_{y=h_p^-} = p \Big|_{y=h_p^+},$$

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

(3) 初始条件: $\tau = 0$, $T = \text{const}$, $u = 0$, $v = 0$ 。

(4) 气象因素: $T_{ao}(\tau) = \bar{T}_{ao} + T_{ar} \cos \left[\frac{\pi}{12} (\tau - 14) \right]$, $G_{\text{sun}}(\tau) = \bar{G}_{\text{sun}} \sin \left(\frac{\tau - a}{b - a} \pi \right)$ ($a < \tau < b$)。其中, \bar{T}_{ao} 、 T_{ar} 分别为环境气温的日平均值, 日变幅值; \bar{G}_{sun} 为太阳日辐射的最大值; a 、 b 分别为日出, 日落时刻。本文在数值计算中, 所取气象参数, \bar{T}_{ao} 、 T_{ar} 、 \bar{G}_{sun} 、 a 、 b 分别为 20°C 、 10°C 、 350 W/m^2 、6 时、18 时。

(5) 主要特性参数的选取: 所取岩床特征量 [3]: 岩石 (I): $k_s = 1.74 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $\rho = 1400 \text{ kg/m}^3$, $c = 0.836 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$; 凝灰岩: $k_s = 0.53 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $\rho = 1300 \text{ kg/m}^3$, $c = 0.92 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$; 玄武石: $\rho = 2695 \text{ kg/m}^3$, $c = 0.92 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$, $k_s = 1.71 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。

3 数值计算与结果讨论

温室在没有通风时, 是一个封闭系统, 温室及其蓄热层内的气体流动为自然对流。数值计算采用有限差分法。非稳态数值计算, 时间步长取为 10 s 。

由图 2~7 可见: 岩床中孔隙率、粒径的变化, 对温室内岩床表面以上的气流、温度分布影响较小; 对岩床内部的温度、气流分布影响较大。孔隙率为 0.25、粒径为 2 cm 时, 岩床等温线趋于水平线, 岩床主要以热传导方式向下传递热量。孔隙率为 0.35、粒径为 3.5 cm 时, 岩床等温线在水平方向出现明显波动, 温室气流对岩床影响及岩床内部对流换热加强, 岩床平均温度增加。岩床超过一定深度后, 岩床内部受温室气流影响较小, 岩床主要以热传导方式向下传递热量, 孔隙率、粒径减小, 有效接触面积增大, 利于热传导传递。岩床应分层铺设, 上部为孔隙率、粒径大的岩石; 超过一定深度后, 铺设孔隙率、粒径小的岩石。

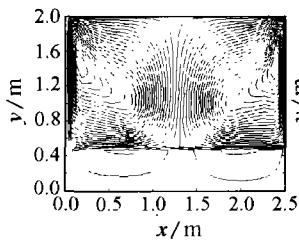


图 2 岩床孔隙率 0.25 粒径 2 cm 温室流函数分布

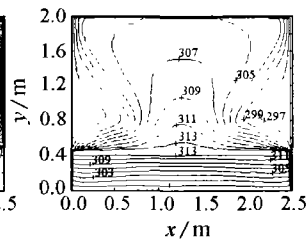


图 3 岩床孔隙率 0.25 粒径 2 cm 温室等温线分布

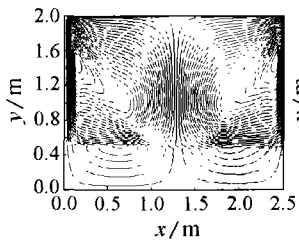


图 4 岩床孔隙率 0.3 粒径 3.5 cm 温室流函数分布

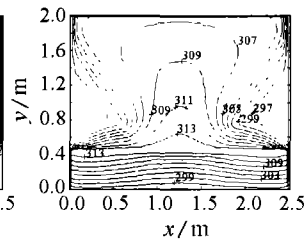


图 5 岩床孔隙率 0.3 粒径 3.5 cm 温室等温线分布

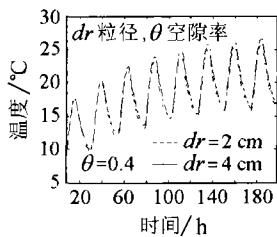


图 6 不同粒径岩床平均温度随时间变化

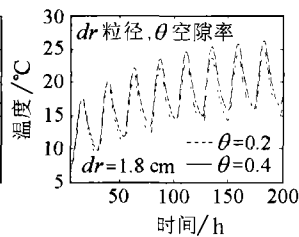


图 7 不同空隙率岩床层平均温度随时间变化

由图 8 可见: 岩床的热容量 (ρc) 和导热系数对岩床的平均温度影响较大。热容量 (ρc) 小, 岩床平均温度日夜变幅相对较大; 导热系数小, 热惯性增强即无太阳辐射时, 温度相对较高。

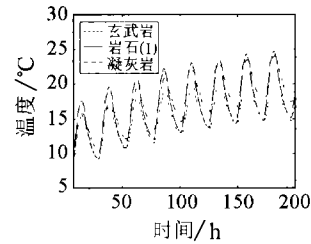


图 8 材料不同的蓄热层平均温度随时间变化

4 实验验证

实验时, 不同粒径和空隙率, 以及不同岩床材料分别组成的温室蓄热层内, 在不同深度处布置了铜 - 康铜热电偶, 深度处布置了铜 - 康铜热电偶, 用数字电压表测量。温室室外温度采用水银温度计测量。速度采用微风速测量仪测量。辐射强度由太阳能辐射仪测量。实验数据与计算数据趋势上一致 (见图 9, 10)。

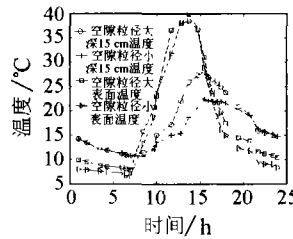


图 9 粒径孔隙不同蓄热床 15 cm 处温度实验值

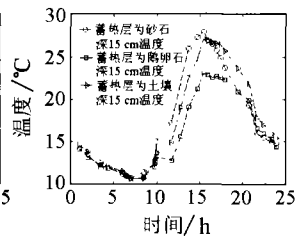


图 10 不同材料蓄热层深 15 cm 处温度随时间变化

5 结 论

在温室系统中, 岩床具有蓄热作用。岩床上部, 对流传热是岩床内部主要换热方式, 超过一定深度后, 岩床主要以热传导方式向下传递热量, 因此, 岩床应分层铺设, 岩床上部孔隙率、粒径相对较大; 超过一定深度后, 铺设孔隙率、粒径小的岩石; 热容值 (ρc) 和导热系数影响岩床平均温度日夜变幅和热惯性。

参 考 文 献

- [1] H Iacovides, M Raisee. Computation of Flow and Heat Transfer in Two-Dimensional Rib-Roughened Passages, Using Low-Reynolds-Number Turbulence Models. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2001, 11(2): 138-155
- [2] D A S Rees. The Onset of Dary-Brinkman Convection in a Porous Layer: an Asymptotic Analysis. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(11): 2213-2220
- [3] Ma Qing-Fang. Practical Thermal Physical Property Handbook. The Chinese Agriculture Mechanics Press. 1986. 701-710