

建筑屋面利用含湿多孔材料 被动蒸发降温技术研究

35-41

孟庆林

(华南理工大学亚热带建筑研究室 广州 075024)

TU111.42
TU765

摘要 研究了利用含湿多孔材料被动蒸发冷却建筑外表面的方法。建立了含湿多孔材料利用太阳能被动蒸发的热质传递过程数学模型。通过理论分析,数值模拟和实验测试,完整地揭示了热过程规律,结果表明,利用太阳能被动蒸发多孔材料所含水分降低建筑屋面温度的方法是可行的。

关键词 建筑外表面降温, 多孔含湿材料, 蒸发冷却, 热过程, 数值模拟

中图分类号 TU111 建筑屋面, 降温

建筑外表面直接利用水的蒸发冷却方法最早是由美国学者提出, 针对屋顶蓄水和洒水两种情况的蒸发降温热效果进行了研究, 证明了这两种方法的有效性^[1]。后来又对均质材料与复合材料构造屋顶进行了周期性传热过程分析^{[2][3]}, 美国ASHVE手册也以此为根据提出了一个用以评判两种蒸发降温方法的热工设计参考数据^[4]。作为空调的单层厂房或商场一类低层大屋面建筑物, 使用洒水蒸发冷却系统, 空调负荷将下降25%^{[5][6][7]}。然而这种依靠自由水面蒸发降温的方法无法避免系统管理与水资源浪费的问题, 以至这种高效率的蒸发降温方法普及困难。

本文提出以多孔含湿材料层铺设于建筑屋面, 依靠天然降水补充材料层水分, 利用此材料中水分的被动蒸发来冷却建筑屋面, 达到隔热降温与节能的目的。

1 含湿多孔材料蒸发冷却模型

如图1在屋面上铺设一层厚为 d 的多孔材料, 当材料含湿后受太阳辐射和大气对流及天空长波辐射换热, 内部水分通过热湿迁移机理的作用迁移至表面并在此蒸发, 全面描述多孔体中的热湿迁移机理显然过于复杂^{[8][9]}, 也难以求解, 因此, 这里把问题作如下简化:

- 1) 所研究的多孔材料在宏观上是统计均匀的, 且吸

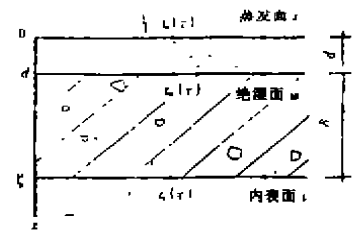


图1 多孔材料屋顶构造

收稿日期: 1996-01-20

孟庆林, 男, 1962年生, 博士

水与蒸发后体积不发生变化;

- 2) 材料孔隙中总压力保持均匀分布,可以忽略由于压力梯度造成的热湿迁移;
- 3) 固体骨架与水分之间不发生生物或化学反应;
- 4) 介质中的毛细势远大于重力势,重力作用予以忽略;
- 5) 温度范围为常温条件。

由经典的毛细多孔体热湿迁移过程模型^{[8][14]},经上述简化可得大平板情形为

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_t \frac{\partial t}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha \frac{\partial t}{\partial z} \right) \quad (2)$$

式中, u ——材料的干基含湿量; t ——材料的内部温度; α ——材料的导温系数; D_m ——材料的质扩散系数; D_t ——材料的热质扩散系数。 D_m 、 D_t 、 α 、 λ 是含湿量 u 和温度 t 的函数。

关于边界条件,对方程(1)的湿边界为:

$$\left\{ \begin{array}{l} z=0, \quad -\rho \left(D_m \frac{d u}{d z} + D_t \frac{d t}{d z} \right) = E_s(\tau) \\ z=d, \quad -\rho \left(D_m \frac{d u}{d z} - D_t \frac{d t}{d z} \right) = 0 \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} z=0, \quad -\rho \left(D_m \frac{d u}{d z} + D_t \frac{d t}{d z} \right) = E_s(\tau) \\ z=d, \quad -\rho \left(D_m \frac{d u}{d z} - D_t \frac{d t}{d z} \right) = 0 \end{array} \right. \quad (4)$$

对方程(2)的热边界为

$$\left\{ \begin{array}{l} z=0, \quad t = t_s(\tau) \\ z=d, \quad t = t_w = (R_d h_i + 1) t_i - R_d (h_i t_a) \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} z=0, \quad t = t_s(\tau) \\ z=d, \quad t = t_w = (R_d h_i + 1) t_i - R_d (h_i t_a) \end{array} \right. \quad (6)$$

式中: ρ ——多孔材料的干基容重; $E_s(\tau)$ ——蒸发率; t_s ——蒸发表面温度; t_w ——蒸发层底面温度; t_r ——楼板底面温度; t_a ——室内空气温度; R_d ——楼板的热阻; h_i ——楼板底面与室内空气的换热系数。

楼板内表面温度和室内空气的谐量分析式为:

$$t_s = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n e^{i n \omega \tau} \quad (7)$$

$$t_a = N_0 + \sum_{n=1}^{\infty} N_n e^{i n \omega \tau} \quad (8)$$

且 $I_n = A_n \exp(-i \sigma_n)$, $N_n = A_n' \exp(-i \sigma_n')$ (9)

式中, I_0 ——表面温度平均值; N_0 ——室温平均值; A_n ——表面温度第 n 级谐量振幅; A_n' ——室内温度第 n 级谐量振幅; σ_n ——表面温度第 n 级谐量相位; σ_n' ——室内气温第 n 级谐量相位; τ ——时间变量。根据材料表面的能量守恒方程:

$$q_0 + q_{sr} - q_{sr} = q_0 + q_e + q_d \quad (10)$$

式中, q_0 ——材料吸收太阳总辐射热量; q_{sr} ——大气长波辐射热量; q_{sr} ——材料表面对天空的长波辐射热量; q_e ——材料表面蒸发热量; q_c ——材料表面对流换热热量; q_d ——材料由表面向内部导入的热量。

$$q_0 = (1 - \rho_s) I_{\odot} \quad (11)$$

$$q_{sr} = \sigma [t_s(\tau) + 273.16]^4 [0.802 + 0.004 t_s(\tau)] \quad (12)$$

$$q_{sr} = \varepsilon \sigma [t_s(\tau) + 273.16]^4 \quad (13)$$

式中, I_{\odot} ——太阳辐射强度; ρ_s ——湿材料表面反射率; ε ——蒸发面的发射率; σ ——Stefan - Boltz - mann 常数; t_a ——大气温度; t_d ——露点温度。

$$t_d = 8.22 + 12.4 \ln P_{ab} + 1.9 (\ln P_{ab})^2 \quad (14)$$

$$q_e = h_c [t_s(\tau) - t_a(\tau)] \quad (15)$$

$$q_e = E_s(\tau) L \quad (16)$$

式中, L ——水的汽化潜热; $E_s(\tau)$ ——蒸发面的蒸发率; P_{ab} ——大气饱和水蒸汽分压力; h_c ——对流换热系数。

多孔材料水分蒸发率计算引用土壤表面蒸发率的计算式^{[9][10][11]}, 并对其进行修正后为:

$$E_s(\tau) = (d_s - d_a) / (\zeta + \zeta_s) \quad (17)$$

$$\zeta = \zeta_s S_1 \quad (18)$$

$$\zeta_s = [\ln(z/z_0)]^2 / (0.16 v \gamma_a) \quad (19)$$

$$S_1 = 1 / (1 - 10R_1) \quad (20)$$

$$R_1 = 9.81(z - z_0)(t_a - t_d) / (t_a + 273.16) v^2 \quad (21)$$

$$\zeta_s = a + b(u_{ab} + u_s) \quad (22)$$

式中, d_s —— t_s 下的空气含湿量; d_a ——空气在参考高度 z 处的含湿量; ζ ——蒸发面上的空气动力学阻力; ζ_s ——材料的表面蒸发阻力; ζ_s ——中性条件下的空气动力学阻力; R_1 ——稳定度系数; R_1 ——理查逊数; z ——参考高度; z_0 ——蒸发面的粗糙度; v ——蒸发面上的风速; t_a ——空气温度; γ_a ——干空气密度; u_{ab} ——材料表面的饱和含湿量; u_s ——表面含湿量; a 、 b ——拟合参数。

2 离散与求解

采用有限差分法离散热湿耦合迁移方程组及其边界条件(图 2), 给出一组内结点 $i-1$ 、 i 、 $i+1$, 以结点 i 所代表的控制单元进行分析, 控制单元在图中以阴影范围表示, 其位置用小写 n 、 s 标明, 对一维问题, y 与 x 方向均取单位长度, 故控制单元的体积为 Δz 。

将式(1)两边对 z 与 τ 进行积分有:

$$\begin{aligned} & \int_{\tau_1}^{\tau_2} \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial}{\partial z} \left(D_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) dz d\tau + \int_{\tau_1}^{\tau_2} \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial}{\partial z} \left(D_t \frac{\partial t}{\partial z} \right) dz d\tau \\ & = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{\partial u}{\partial \tau} d\tau dz \end{aligned} \quad (23)$$

当假定控制单元内的湿度 u_s 不随 z 变化, 而随时间作线性变化时, 则式(23)右端可得差分关系:

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{\partial u}{\partial \tau} dz d\tau = (u_i^{t+1} - u_i^t) \Delta z \quad (24)$$

假定 i 控制单元内的湿度 u_i 和温度 t_i 随 z 作线性变化, 则式(23)左边为:

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial}{\partial z} \left(D_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) dz d\tau + \int_{\tau_1}^{\tau_2} \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial}{\partial z} \left(D_t \frac{\partial t}{\partial z} \right) dz d\tau$$

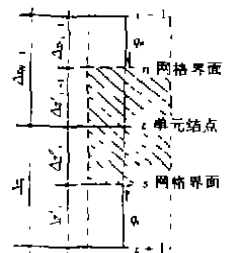


图 2 网格划分

$$= \int_{\tau} \left[\frac{D_{n+1}}{\Delta z} (u_{i+1} - u_i) - \frac{D_{n+1}}{\Delta z_{i-1}} (u_i - u_{i-1}) \right] d\tau + \int_{\tau} \left[\frac{D_{i+1}}{\Delta z_i} (t_{i+1} - t_i) - \frac{D_{i+1}}{\Delta z_{i-1}} (t_i - t_{i+1}) \right] d\tau \quad (25)$$

引入加权因子 f 后式(24)与式(25)可写成:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta z}{\Delta \tau} (u_i^{t+1} - u_i^t) = & f \left[\frac{D_{n+1}}{\Delta z_i} (u_i^{t+1} - u_i^{t+1}) - \frac{D_{n+1}}{\Delta z_{i-1}} (u_i^{t+1} - u_i^{t+1}) + \right. \\ & \left. \frac{D_{i+1}}{\Delta z_i} (t_i^{t+1} - t_i^{t+1}) - \frac{D_{i+1}}{\Delta z_{i-1}} (t_i^{t+1} - t_i^{t+1}) \right] + \\ & (1-f) \left[\frac{D_{n+1}}{\Delta z_i} (u_i^{t+1} - u_i^t) - \frac{D_{n+1}}{\Delta z_{i-1}} (u_i^t - u_i^{t-1}) + \right. \\ & \left. \frac{D_{i+1}}{\Delta z_i} (t_i^{t+1} - t_i^t) - \frac{D_{i+1}}{\Delta z_{i-1}} (t_i^t - t_i^{t-1}) \right] \end{aligned} \quad (26)$$

f 介于 0-1 之间, $f=0$ 时为显格差分; $f=0.5$ 为 C-N 格式差分; $f=1$ 为全隐式差分。基于差分格式稳定性考虑, 在用完全隐式格式差分计算对步长 $\Delta \tau$ 与 Δz 的选择是无条件的稳定格式^{[12][13]}。当 $f=1$ 时式(26)为:

$$a_i u_{i+1} + b_i u_i + c_i u_{i-1} = d_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (27)$$

式中,

$$\begin{aligned} a_i &= \alpha_{n+1}, \quad b_i = -(\alpha_i^0 + \alpha_{n+1} + \alpha_{n+1}), \quad c_i = \alpha_{n+1}, \\ d_i &= -\alpha_i^0 u_i^0 - \alpha_{n+1} t_{i-1} + (\alpha_{n+1} + \alpha_{n+1}) t_i + \alpha_{n+1} t_{i+1} \end{aligned}$$

且 $\alpha_i^0 = \frac{\Delta z}{\Delta \tau}$, $\alpha_{n+1} = \frac{D_{n+1}}{\Delta z_{i-1}}$, $\alpha_{n+1} = \frac{D_{n+1}}{\Delta z_i}$, $\alpha_{n+1} = \frac{D_{i+1}}{\Delta z_{i-1}}$, $\alpha_{n+1} = \frac{D_{i+1}}{\Delta z_i}$

同理,对热传导方程式(2)差分后为:

$$\dot{a}_i t_{i-1} + b_i t_i + \dot{c}_i t_{i+1} = d_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (28)$$

式中, $\dot{a}_i = \frac{a_n}{\Delta z_{i-1}}$, $b_i = -\left(\frac{a_n}{\Delta z_{i-1}} + \frac{a_2}{\Delta z_i} + \frac{\Delta z}{\Delta \tau}\right)$, $\dot{c}_i = \frac{a_2}{\Delta z_i}$, $d_i = -\frac{\Delta z}{\Delta \tau} t_i$

对热边界条件式(5)式(6)在第一类边界条件下: $z=0$, 显然 $\dot{a}_i = 0$, 边界差分方程为:

$$b_1 t_1 + \dot{c}_1 t_2 = d_1 \quad (29)$$

式中, $b_1 = -\frac{a_2}{\Delta z_1} - \frac{\Delta z}{\Delta \tau}$, $\dot{c}_1 = \frac{a_2}{\Delta z_1}$, $d_1 = -\frac{\Delta z}{\Delta \tau} t_1^0$ 且 $t_1^0 = t_1$

当 $z=d$, 显然 $\dot{c}_N = 0$, 边界差分方程为:

$$\dot{a}_N t_{N-1} + b_N t_N = d_N \quad (30)$$

式中 $\dot{a}_N = \frac{a_n}{\Delta z_{N-1}}$, $b_N = -\left(\frac{a_n}{\Delta z_{N-1}} - \frac{a_1}{\Delta z_N} - \frac{\Delta z}{\Delta \tau}\right)$,

$$d_N = -\frac{\Delta z}{\Delta \tau} t_N^0$$

同理,对湿边界式(3)式(4),材料层上表面如图 3 所示,由边界控制单元的水量平衡关系有如下方程

$$\begin{aligned} E_i(\tau) - \left(\rho \cdot D_{n+1} \frac{u_1 - u_2}{\Delta z_1} + \rho \cdot D_{i+1} \frac{t_1 - t_2}{\Delta z_1} \right) \\ = \frac{\Delta z_n}{\Delta \tau} (u_1 - u_1^0) = \frac{\Delta z_1}{2 \Delta \tau} (u_1 - u_1^0) \end{aligned} \quad (31)$$

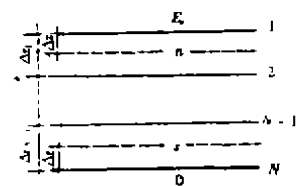


图 3 边界网格划分

整理后,
$$b_1 u_1 + c_1 u_2 = d_1 \tag{32}$$

式中,
$$b_1 = - \left(\frac{D_{m-1}}{\Delta z} + \frac{\Delta z_i}{2 \Delta \tau} \cdot \frac{1}{\rho} \right), \quad c_1 = \frac{D_{m-1}}{\Delta z_i},$$

$$d_1 = - \left[\frac{\Delta z_1}{2 \Delta \tau \rho} u_1^0 + \frac{D_{i-1}}{\Delta z_1} (t_1 - t_2) + \frac{E_i(\tau)}{\rho} \right]$$

边界差分方程为
$$a_N u_{N-1} + b_N u_N = d_N \tag{33}$$

式中, $a_N = \frac{D_{m \cdot N}}{\Delta z_{N-1}}, \quad b_N = - \left(\frac{D_{m \cdot N}}{\Delta z_{N-1}} + \frac{\Delta z_{N-1}}{2 \Delta \tau} \cdot \frac{1}{\rho} \right), \quad d_N = - \left[\frac{\Delta z_{N-1}}{2 \Delta \tau \rho} u_N^0 + \frac{D_{i \cdot N}}{\Delta z_1} (t_{N-1} - t_N) \right]$

于是,由式(27)、(32)、(33)构成含湿材料层水分迁移计算有限差分方程组;由式(28)、(29)、(30)构成热迁移方程组,即:

$$[A] [T] = [D] \tag{34}$$

$$[A] [U] = [D] \tag{35}$$

需要指出,系数阵[A]和[A]中的所有系数均是*n*和*t*的二元函数,因此,每次求解方程组之前都需要进行二元插值,然后先求解式(34)后求解式(35)。

3 模拟与实测结果

实验用的多孔材料系选用空隙率为 41.7%、容重为 1 600 kg/m³、饱和含水率为 29.8%、粒径 0.15 mm、筛余为 82.8% 的细砂铺设于平屋面构成松散的含湿材料蒸发层;另一种是选用加气混凝土块铺设于平屋面构成有一定强度的含湿材料蒸发层。

图 4 为重庆夏季最热月连续晴天中 8 月 8 日~8 月 10 日内,含湿材料蒸发屋面与普通刚性屋面的外表面温度实测值比较,可见在三日内平均最高空气温度为 37.5℃ 情况下,砂蒸发面和加气混凝土块蒸发面温度明显低于普通屋面温度,在第一蒸发日里砂蒸发面和加气块蒸发面最高温度分别较普通屋面低 22℃ 和 19℃;第二蒸发日分别低 25℃ 和 10℃;第三蒸发日分别低 4℃ 和 7℃。由此可知蒸发冷却的降温效果十分显著。但随着蒸发日的延长,蒸发冷却效果减弱,原因就在于蒸发面的蒸发率发生衰减。如图 5 为砂层蒸发率计

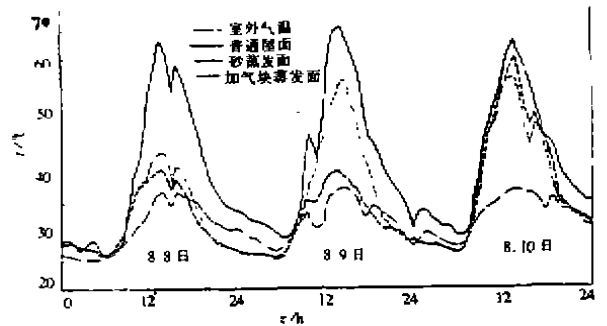


图 4 蒸发冷却屋面温度比较

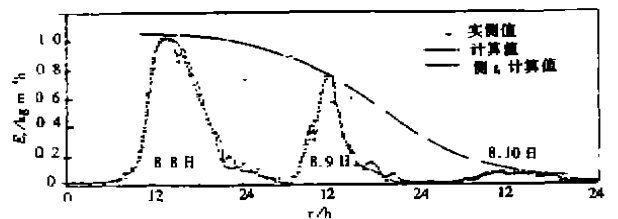


图 5 砂层蒸发率 E_s 实测值与计算值

算值与实测值,图 6 为加气混凝土块含湿蒸发率实测值。可发现三个蒸发日内自饱和状态蒸发的蒸发率衰减情形,砂层蒸发率是 S 型衰减,而加气块则呈指数衰减。

图 7 为蒸发面经过 72 小时蒸发过程的累计蒸发量 $ACCES$ 的计算值与实测情况。可以发现在第一蒸发日中砂层的蒸发效果优于纯水面的蒸发情况,说明以砂层含水蒸发冷却降温方法将有可能优于现行传统的蓄水屋面的降温效果。在第二个蒸发日 15 时左右,出现砂层蒸发量与纯水蒸发量相同情况,此时刻后的时段,砂层蒸发量低于纯水蒸发量。

图 8 为三个蒸发日内屋顶内表面温度被动的测试值。砂层蓄水屋面情况比较理想,内表面温度在连续三天里的平均值约低于刚性屋面 5°C ,加气块屋面与砂层屋面的热工效果在屋顶内表面上表现十分接近,前者略高约 0.7°C ,且两者都具有足够的热稳定性,内表面温度波幅大约为 1°C 左右。

4 结 论

1) 通过建立多孔材料热湿耦合迁移模型并通过有限差分法计算周期边界条件下的蒸发冷却热过程,表明计算的结果与实测值吻合较好,证明数学模型是正确的。

2) 理论计算与实验测试均证明多孔含湿材料层被动蒸发冷却的降温方法效果显著,建筑屋面降温约 25°C ,屋顶内表面降温约 5°C ,优于现行传统的蓄水屋面。

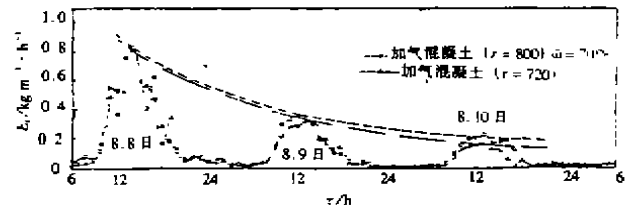


图 6 加气混凝土值蓄水蒸发率实测值

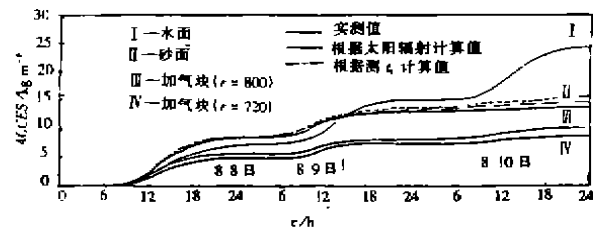


图 7 累计蒸发量 $ACCES$ 的实测值与计算值

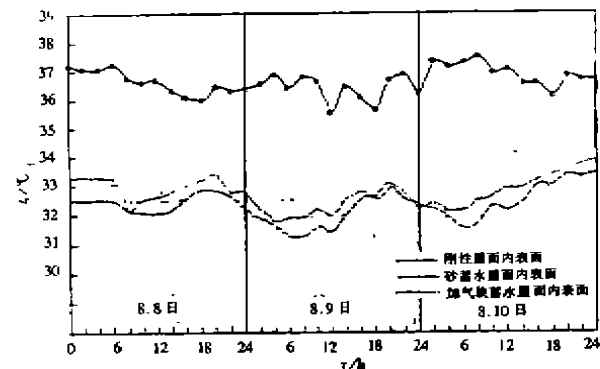


图 8 三种屋面室内表面温度比较

参 考 文 献

- 1 F. C. Houghtan, H. T. Olsen and C. Gutherlet, ASHVE Trans, 1940, (46): 231
- 2 C. O. Mackey and L. T. Wright, J. ASHVE Trans, 1944, (50): 292
- 3 C. O. Mackey and L. T. Wright, J. ASHVE Trans, 1946, (52): 283
- 4 Am Soc, Heat, vent, Engrs Guide, CHAP, Table, 1958, (9): 139, 304

- 5 A. B. Thappen, Excessive Temperature in Flat - top Building: Refrigerating Engineering, 1943: 163
- 6 L. H. Holder, Automatic Roof Cooling, P. 2, April showers, Washington, D. C., 1957
- 7 S. M. Bount Ind, Exp, Prog, Focts for Industrg ser, Bull, No 9, North Carolina state college, 1985
- 8 A. V. Luilow, Heat and Mass Transfer, Mir publishers, Moscow, 1980
- 9 Van Barel, C. H. M and D. L. Hilled, Calculating Potential and Actional Evaporation from a Bare soil surface by Simulation of Concurrent Flow of water and Hear, Agric, Meteorol, 1976(17): 453 ~ 476
- 10 林家鼎等. 土壤内水分流动温度分布及其表面蒸发效应的研究. 水利学报, 1983
- 11 Caminlo, P. J and Robert, J. Curmey, A Resistance Parameter for Bare soil Evaporation Modeis, Soil science, 1986(2): 141
- 12 钱壬章. 传热分析计算. 北京: 高等教育出版社, 1987
- 13 郭宽良等. 计算传热学. 安徽: 中国科学技术大学出版社, 1988
- 14 陈启高. 建筑热物理基础. 西安: 西安交通大学出版社, 1991

Study on Cooling Technique of Roof Using Porous - Moist Material Cover by Passive Solar Evaporation

Meng Qinglin

(Institute of Tropical Building Huanan Technological University Cuang Zhou 075024)

Abstract The thesis studies the cooling method using the porous - moist material covering on exterior surface by the passive solar evaporation. The mathematical Model for the process of heat and moisture transfer based on the moist - porous material under passive solar vaporization cooling is established. Through theoretical analysis, computer simulation and test measurement in situ, all results show the law of the thermal process. It is said that this method is feasible.

Key Words cooling exterior surface by passive solar evaporation, porous - moist material cover, cooling by evaporation, thermal process, computer simulation

(编辑: 袁 江)