

地下洞室多孔墙体 热湿传递的数值模拟

重庆大学 张华玲[☆] 刘 朝 刘 方 付祥钊

摘要 提出了一种以温度与相对湿度为驱动势的多孔墙体热湿耦合传递的数学模型,该模型同时考虑了水蒸气与毛细孔内液态水的传递。采用控制容积法将理论方程组离散并编制了计算程序,对深埋地下洞室的墙体进行了热湿传递的数值模拟,得到了墙体温度、相对湿度、热流率、湿流率的变化规律。结果表明,墙体传热过程趋于稳定的时间远小于传湿过程。

关键词 地下洞室 多孔墙体 热湿耦合传递 温度 相对湿度 数值模拟

Numerical simulation of heat and moisture transfer in porous wall in underground caves

By Zhang Hualing[★], Liu Chao, Liu Fang and Fu Xiangzhao

Abstract Presents a mathematical model described with temperature and relative humidity as driving potential for coupled heat and moisture transfer in porous wall materials. The model includes the transfer of liquid and vapor flow in porous materials simultaneously. A calculation program is developed based on the control equations discretized by using the control volume method. Simulates the heat and moisture transfer for wall in deeply-buried underground caves, and obtains the variation characteristics of temperature, relative humidity, and rate of heat and moisture flow. The results show that the time of heat transfer tending to the steady state is far shorter than that of moisture transfer.

Keywords underground cave, porous wall, coupled heat and moisture transfer, temperature, relative humidity, numerical simulation

★ Chongqing University, Chongqing, China

①

0 引言

多年来地下洞室的潮湿问题一直是建筑工程界关注的焦点。建筑材料一般都属于多孔介质, Wong 等人把砖、混凝土、石膏板等建筑材料称为毛细多孔介质^[1]。Luikov, Philip 及 Whitaker 等人对多孔介质的研究较早,对多孔介质内的传热传湿问题提出了许多基本观点和研究方法^[2-4]。Philip 等人分析了温度对湿迁移的影响,他们在土壤力学领域建立的热质传递模型中将含湿量迁移分为液体的毛细流动和蒸汽的扩散渗透,湿迁移的驱动势包括含湿量梯度和温度梯度,把多孔介质处理成连续介质,发展了非等温湿迁移理论,建立了双场驱动的耦合理论模型^[3]。

近 10 年来,许多学者针对多孔墙体的耦合传热传湿进行了研究,但由于多孔介质的结构和多相组分湿传递过程的复杂性,以及各类边界条件的确定、材料物性的测定、高度非线性控制方程的求解等都存在一定的难度,致使这类问题一直没有得到很好的解决。尽管已有许多数学模型和模拟方法,但这些模型和方法都有一定的适用条件和范

①[☆] 张华玲,女,1967 年 11 月生,博士研究生,副教授
400030 重庆市沙坪坝区渝碕路 131 号重庆大学城市建设与
环境工程学院
(023) 65118481
E-mail: hlzhang@cqu.edu.cn
收稿日期:2005-09-02
一次修回:2006-03-14
二次修回:2006-11-09

围。在工程设计中,以 Fourier 的一维稳态导热模型和 Glaser 提出的纯蒸汽扩散模型为代表的稳态理论,其热湿迁移率符合 Fick 定律,这种常系数的稳态模型多年来一直被普遍采用,但比较粗糙。

1 热湿耦合传递模型

1.1 基本理论

J. Arfvidsson 指出建立热湿耦合传递模型的理论基础大致有:Philip-de Vries 或 Luikov 的混合模型、热质平衡方程、Fourier 定律、Fick 定律、Darcy 定律等^[5]。理论上只要表示湿分含量的所有参数都可以作为湿分传递的驱动势,建筑多孔墙体常用的湿驱动势为体积湿度 u (kg/m^3),墙体含湿量 w (g/kg),水蒸气的含湿量 ρ_v (kg/m^3),水蒸气分压力 p_v (Pa),质迁移势 m ($^\circ\text{M}$)。各国学者发展了许多不同驱动势的多孔墙体热湿耦合传递数学模型。笔者在前人研究的基础上,根据相关理论^[6-9]提出了以相对湿度和温度为驱动势的热湿传递过程的理论模型。

1.2 基本假设

在建立建筑多孔墙体热湿迁移计算模型时,需要作一些合理的简化假设,如下。

- 1) 多孔材料为连续、均匀介质,且各向同性;
- 2) 多孔材料内局部任一点处于热力学平衡状态,墙体内部的压力场均匀,压力梯度为零;
- 3) 墙体内不同材料层界面处毛细压力相等,即为水力连续;
- 4) 吸放湿过程为等温过程,不考虑材料的毛细滞后特性的影响;
- 5) 相对于墙壁面积,墙体厚度极小,按一维问题处理,水蒸气扩散系数和材料导热系数为常数;
- 6) 水蒸气分子的扩散驱动力为密度梯度,多孔介质毛细结构中液态水的传递驱动力为毛细压力梯度。

1.3 物理数学模型

在以上假设的基础上,对如图 1 所示的由材料 1 和材料 2 组成墙体的物理模型建立热湿迁移过程的数学模型。

热传递方程:

$$\rho_m c_m \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\text{app}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1)$$

其中

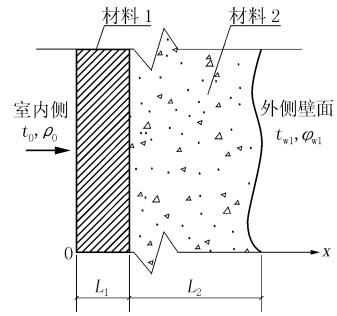


图 1 多孔墙体物理模型

$$\lambda_{\text{app}} = \lambda_m + \frac{L(T) D_v p_{v,\text{sat}}}{R_v T^2} \varphi \left[\frac{L(T)}{R_v T} - 1 \right] \quad (2)$$

式(1),(2)中 ρ_m 为多孔材料的密度, kg/m^3 ; c_m 为多孔材料的比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T 为多孔材料的势力学温度, K ; τ 为时间, s ; λ_{app} 为多孔材料表观导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; λ_m 为多孔材料导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; $L(T)$ 为水的汽化潜热, J/kg ; D_v 为水蒸气扩散系数, m^2/s ; $p_{v,\text{sat}}$ 为水蒸气的饱和分压力, Pa ; φ 为相对于孔隙中饱和水分含量的相对湿度, %; R_v 为水蒸气气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

湿传递方程:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \rho_m \xi \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} + D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3)$$

其中

$$D_\varphi = \frac{D_v p_{v,\text{sat}}}{R_v T} + \frac{D_l \rho_l R_v T}{\varphi} \quad (4)$$

$$D_T = D_l \rho_l R_v \ln \varphi + \frac{D_v p_{v,\text{sat}}}{R_v T^2} \varphi \left[\frac{L(T)}{R_v T} - 1 \right] \quad (5)$$

式(3)~(5)中 ξ 为多孔材料湿平衡曲线的斜率, $\xi = \frac{\partial w}{\partial \varphi}$; ρ_l 为水的密度, kg/m^3 ; D_l 为液体渗透系数, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, 且 $D_l = \frac{D_v \varphi \rho_{v,\text{sat}}}{R_v T \rho_l}$ ^[10], 其中 $\rho_{v,\text{sat}}$ 为饱和水蒸气的密度, kg/m^3 。

初始条件:

$$T(x, \tau)_{\tau=0} = T(x, 0) \quad (6)$$

$$\varphi(x, \tau)_{\tau=0} = \varphi(x, 0) \quad (7)$$

室内侧墙体表面边界条件:

$$h_{c,0} (T_0 - T_{x=0}) + L(T) h_{m,0} (\rho_0 - \rho_{x=0}) =$$

$$\left(-\lambda_{\text{app}} \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (8)$$

$$h_{m,0} (\rho_0 - \rho_{x=0}) = \left(-D_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} - D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (9)$$

式(8),(9)中 $h_{c,0}$ 为墙体内部表面传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; $h_{m,0}$ 为墙体内部表面传质系数, m/s 。

外侧墙体表面边界条件:

$$T_{x=L} = T_{w1} \quad (10)$$

$$\varphi_{x=L} = \varphi_{w1} \quad (11)$$

式(10),(11)中 $L=L_1+L_2$ 。

不同材料界面处:

$$T_{1,x=L_1} = T_{2,x=L_1} \quad (12)$$

$$\varphi_{1,x=L_1} = \varphi_{2,x=L_1} \quad (13)$$

式(12),(13)中 $T_{1,x=L_1}, T_{2,x=L_1}$ 分别为界面处材料 1 和材料 2 的温度, K ; $\varphi_{1,x=L_1}, \varphi_{2,x=L_1}$ 分别为界面处材料 1 和材料 2 的相对湿度, %。

2 数值模拟计算实例及分析

2.1 计算实例

通过控制容积法离散上述数学模型, 用 FORTRAN 语言编写计算程序^[11-13]。对位于福州地区深埋地下的石灰岩洞室墙体进行模拟计算, 洞室墙体结构如图 1 所示, 混凝土贴壁衬砌层厚度 $L_1=200$ mm, 石灰岩体层厚度 $L_2=500$ mm。混凝土湿平衡曲线的拟合关系式为^[14]: $w =$

$\frac{0.000392\varphi}{1-1.8504\varphi+0.9874\varphi^2}$; 石灰岩的吸湿特性曲线见图 2^[15], 拟合关系式为: $w=0.014\varphi^4-0.021\varphi^3+0.014\varphi^2+0.0014\varphi+0.00042$ 。石灰岩和碎石混凝土的热物理性能参数见表 1^[16]。垂直壁面强迫对流表面传热系数选用 ASHRAE 手册(1985b)推荐的关系式: $h_c=5.6+3.9v(v \leq 5 \text{ m/s})$; 壁面传质系数可近似为 $h_m=9.28 \times 10^{-4} h_c$ ^[17]。

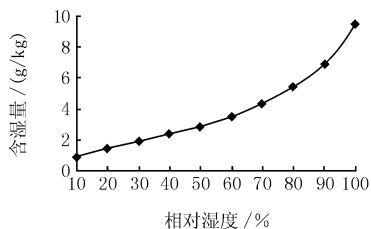


图 2 石灰岩的吸湿特性曲线

表 1 石灰岩和碎石混凝土的热物理性能参数

名称	密度/ (kg/m^3)	导热系数/($W/(m \cdot K)$)	比热容/($J/(kg \cdot K)$)	水蒸气扩散系 数/(m^2/s)
石灰岩	1 700	0.93	930	6.9×10^{-6}
碎石混凝土	2 200	1.28	840	1.4×10^{-5}

深埋洞室处于地下恒温层内, 不受地面温度波动的影响, 对非室内侧壁面的边界应通过实测按第一类边界条件给出。本例中边界壁面温度近似按

当地岩石等温层的温度, 取表面温度 $t_{w1}=21.6$ $^{\circ}C$, 相对湿度 $\varphi_{w1}=90\%$ ^[18]。在室内温度 $t_0=20$ $^{\circ}C$, 相对湿度 $\varphi_0=70\%$ 的条件下墙体的热湿交换达到平衡, 模拟计算得出通过墙体的热流率为 2.19 W/m^2 , 湿流率为 $0.082 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{h)}$, 热湿从墙体传递到室内。然后室内环境参数变为 $t_0=28$ $^{\circ}C$, $\varphi_0=85\%$, 由此将造成墙体内部温湿度的重新分布, 最后达到新的平衡状态。

2.2 计算结果

应用程序对前 60 d 的变化情况进行模拟, 图 3 和图 4 显示了通过墙体内外侧的热湿传递率, 负值表示热湿从室内传到墙体。图 5, 6 显示了墙体内部

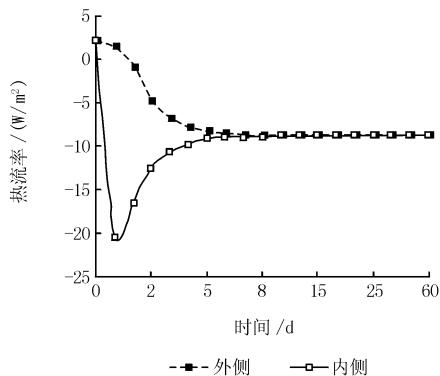


图 3 墙体内外侧热传递率

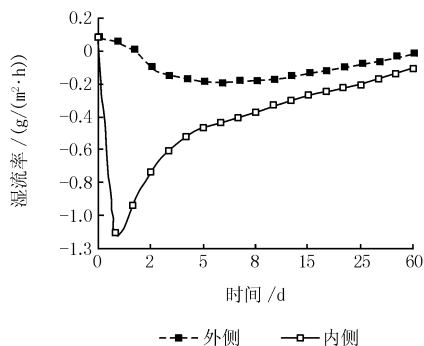


图 4 墙体内外侧湿传递率

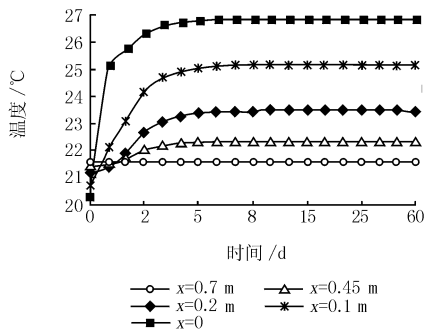


图 5 墙体的温度变化

温度和相对湿度变化情况。图 7~9 分别显示了室内状态改变前后墙体温度、相对湿度及含湿量的分布情况。

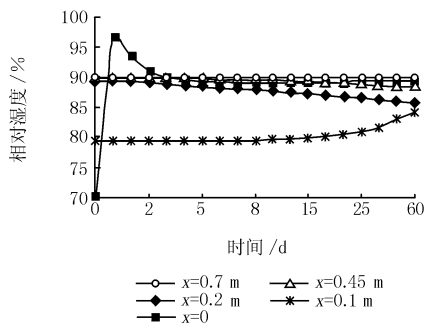


图 6 墙体的相对湿度变化

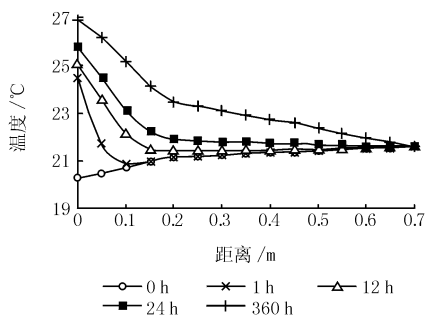


图 7 室内状态变化后墙体温度分布

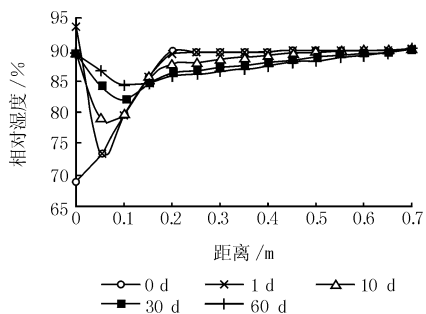


图 8 室内状态变化后墙体相对湿度分布

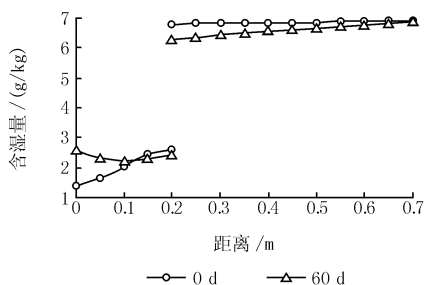


图 9 室内状态变化后墙体含湿量分布

2.3 结果分析

从计算结果来看，当室内状态改变后，通过与室内直接接触的墙体内表面的热流和湿流很快发

生变化。从图 3 可以看出，前 5 d 的热流率变化较大，8 d 后热流率变化已很小，10 d 内墙体热传递基本上趋于稳定，此时通过墙体的热流率为 -8.76 W/m^2 ，墙体为吸热。由于热传递中起主要作用的是热扩散，湿迁移引起的能量变化和水分相变吸放热量对热传递的影响较小，所以墙体内温度几天后就趋于稳定，见图 5 和图 7。

图 4 则反映出湿流率在 60 d 后还在继续变化，此时通过内侧墙壁的湿流率为 $-0.11 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{h)}$ ，通过外侧墙壁的湿流率为 $-0.015 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{h)}$ ，墙体为吸湿。通过计算，1 d 后通过内侧墙壁吸收的湿流率为 $-0.95 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{h)}$ ，湿传递过程要近 1 a 才逐渐趋于稳定，基本稳定后通过墙体的湿流率为 $-0.05 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{h)}$ ，与文献[17]中讨论的高密度、高传湿阻抗多孔材料传湿过程需要较长时间才能达到稳定的结论是一致的。

文献[13]对采用贴壁衬砌的地下洞室暖通空调设计时给出的湿流率推荐值为 $1.0 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{h)}$ ，如果室内环境条件变为 $t_0 = 25^\circ\text{C}$ ， $\varphi_0 = 50\%$ ，1 d 后通过内侧墙壁释放的湿流率为 $0.70 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{h)}$ 。模拟计算值与推荐值基本一致。

从图 6 和图 8 可以看出，在室内参数变化 1 d 后内侧墙壁表面的相对湿度急剧升高到 96.2%。计算室内参数变化 1 h 后的情况，得出此时内侧墙壁表面的相对湿度高达 99%，当室温保持 28°C ，相对湿度增大到 87%，1 h 后内侧墙壁表面就已达到饱和，出现潮湿现象。分析原因，主要是室内参数的突然改变使内侧墙壁温度与湿度迅速响应而增大，由于热传递速度远大于湿传递速度，内侧墙壁出现短暂的湿量积聚。从图 9 中可以看出，石灰岩体与碎石混凝土贴壁衬砌层含湿量的模拟计算值与文献[14~15]中给出的实测数据（相对湿度 90% 时两种材料的含湿量分别为 6.8 g/kg 和 2.9 g/kg ）吻合得较好，图中还显示出 60 d 后含湿量为曲线分布，没有达到稳定后的均匀分布。

3 结论

3.1 建立了以相对湿度和温度为驱动势的热湿耦合传递的数学模型，模型采用的湿度参数用于模拟地下洞室多层墙体传湿过程在边界处是连续的，避免了在侧墙内不同材料层界面处进行不必要的换算，便于计算多层墙体的传湿。

3.2 采用相对湿度作为湿参数进行数值模拟，可

以直观地反映出地下洞室多孔墙体湿传递过程中墙体内部凝结的情况。

3.3 在室内参数变化条件下,对深埋地下洞室墙体的热湿传递进行了数值模拟,得到了墙体温度、湿度、热流率、湿流率的变化规律。结果表明,墙体传热过程趋于稳定的时间远小于传湿过程。

参考文献

- [1] Wong S P W, Wang S K. Fundamentals of simultaneous heat and moisture transfer between the building envelope and the conditioned space air[G]//ASHRAE Trans, 1990, 96(2):73-83
- [2] Luikov A V. System of differential equation of heat and mass transfer in capillary porous bodies[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1975,18(10):1-14
- [3] Philip J R, de Vries D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients[G]//Transactions of the American Geophysical Union, 1957, 38(2):222-232
- [4] Whitaker S. Simulation heat mass and momentum transfer in porous media: a dry theory of dry[J]. Advances in Heat Transfer, 1977,13:119-203
- [5] Arfvidsson J. Isothermal moisture flow in building materials: modeling measurements and calculations based on Kirchhoff's potential [J]. Building and Environment, 2000,35(6): 519-536
- [6] 杨世铭. 传热学[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社, 1987
- [7] 曾丹苓,敖越,张新铭,等. 工程热力学[M]. 北京:高

(上接第 21 页)

过程中,对降雨引起其他参数变化较大的月份,如 1~3 月和 10~12 月,错判率小,判断效果很好;对 4~9 月份的错判率高,效果略微不足。这是由于模拟数据是历年数据的统计结果,与实际某一年的数据存在差别,通过对这部分结果的修正可以得到满意的结果,且 4~9 月份降雨频率大,错判对于分析能耗的影响不大。

6.2 全年的总降雨日数为 127 d,分布规律与历年气候统计值接近。

6.3 全年 12 个月逐时降雨判断结果显示,白天的判断误差要明显小于夜间,白天的判断误差平均为 11.19%,夜间判断误差平均为 16.15%。这是由于白天的降雨和非降雨时刻气象参数间的差别明显,夜间降雨和非降雨的气象参数差别没有白天明显。逐时降雨的结果除个别误判,其他均比较理

想。对个别太阳辐射照度较大却判为降雨的时刻进行修正能得到理想的结果。

- 等教育出版社,2002
- [8] 林瑞泰. 多孔介质传热传质引论[M]. 北京:科学出版社,1995
- [9] 陈启高. 建筑热物理基础[M]. 西安:西安交通大学出版社,1991
- [10] Marit S V. Moisture transfer in organic coatings on porous materials [D]. Norway: Building and Construction Engineering Norwegian University of Science and Technology, NTNUN-7034 Trondheim, 1998
- [11] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安:西安交通大学出版社,2001
- [12] 谭浩强,田淑清. FORTRAN 77 结构化程序设计[M]. 北京:高等教育出版社,1985
- [13] 地下建筑暖通空调设计手册编写组. 地下建筑暖通空调设计手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1983
- [14] 裴清清,陈在康. 几种常用建材的等温吸放湿线试验研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,1999,26(4):96-99
- [15] 马庆芳,方荣生,项立成,等. 实用热物理性质手册[M]. 北京:中国农业机械出版社,1986
- [16] 沈韞元,白玉珍,陈玉梅,等. 建筑材料热物理性能[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1981
- [17] 陶智,康宁. 建筑结构中的湿迁移[J]. 力学进展, 1994,24(4):441-455
- [18] 杨述任,周文铎,王裕湘,等. 地下水电站厂房设计[M]. 北京:水利电力出版社,1993

想。对个别太阳辐射照度较大却判为降雨的时刻进行修正能得到理想的结果。

参考文献

- [1] 中华人民共和国建设部. GB 50178—93 建筑气候区划标准[S]. 北京:中国计划出版社,1993:132-134
- [2] 中国建筑科学研究院,重庆大学. JGJ 134—2001 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001:18-19
- [3] 中国建筑科学研究院,广东省建筑科学研究院. JGJ 75—2003 夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2003:26-30
- [4] 江亿. 空调负荷计算用随机气象模型[J]. 制冷学报, 1981(3):45-55
- [5] 江亿. 建筑环境系统模拟分析方法——DeST[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006:120-122
- [6] 范金城,梅长林. 数据分析[M]. 北京:科学出版社, 2002:280-282