

# 竹材组合墙体构件热湿耦合迁移特性

王倩,李念平,曾德军,龙激波

湖南大学土木工程学院,长沙 410082

**摘要** 以多孔介质传热传质学为基础,建立以湿度梯度为热源或热汇,以温度梯度作为湿源或湿汇的建筑构件内热湿耦合迁移的动态数学方程。提出用传递函数分析方法研究建筑构件内的热湿耦合过程,利用 Laplace 变换方法求解耦合方程。使用该方法对竹材组合墙体构件竹板进行了热湿耦合过程的分析计算,得到了竹板内温度和含湿量的动态分布特性。计算结果与实测值吻合较好,表明本文建立的数学模型和求解方法合理可信,有利于竹结构组合墙体的特性研究,也有利于竹材作为一种新型建筑材料的发展。

**关键词** 建筑构件;竹板;热湿耦合传递;传递函数;动态分布

**中图分类号** X506,TU11.9<sup>4</sup>

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-7857(2010)17-0087-04

## Coupled Heat and Moisture Transfer in Bamboo Composite Wall

WANG Qian, LI Nianping, ZENG Dejun, LONG Jibo

College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

**Abstract** Based on the mechanism of heat and moisture transfer through porous media, the dynamic mathematical equations for the coupled heat and moisture transfer in building components are derived, in which the humidity gradient is considered as the heat source or heat sink, and the temperature gradient is considered as the moisture source or moisture sink. Meanwhile, an analytical method by using the transfer function is proposed to study the processes of coupled heat and moisture transfer in building elements. In this paper, the analytical calculations are carried out for the coupled heat and moisture transfer in bamboo plywood of a bamboo composite wall, to obtain the transient distributions of temperature and moisture content by using the above method. The results agree with the measured data, which shows that the mathematical equations and the solving method presented are reliable, and can be used to study bamboo composite walls, as well as for the development of bamboo as a new building material.

**Keywords** building component; bamboo plywood; coupled heat and moisture transfer; transfer function; dynamic distribution

### 0 引言

建筑构件内的热湿传递是一个典型的热质耦合传递过程。建筑材料多为复杂的毛细多孔体,孔径在  $10^{-9}\sim 10^{-2}\text{m}$  之间,孔隙中充满湿空气、液态水和水蒸气<sup>[1]</sup>。墙体的热湿迁移过程严重影响到围护结构的热工性能和建筑能耗,因此,建筑构件的湿度问题越来越引起人们的关注。由于多孔介质的结构和多相多组分的热湿传递过程的复杂性,以及各类边界条件确定、材料物性的测定、控制方程的高度非线性等,致使湿度问题一直没有得到很好的解决<sup>[2]</sup>。

本文通过 Laplace 变换将耦合的传热传湿偏微分方程简化为拉氏域内的耦合普通微分方程,由边界条件确定其系数,用传递函数表示温度和湿度,并最终通过 Laplace 逆变换

得到时间域内的结果。通过 Matlab 编程对热湿耦合传递方程进行数值解析法求解<sup>[3-5]</sup>。

竹子是最重要的森林资源之一,中国的竹材资源十分丰富,在中国被称为“第二森林”。竹结构因其资源丰富、生长周期短、造价低廉、抗震性能和耐久性能好、环保等特点将成为未来建筑重要的建筑材料之一。目前,国内外关于现代竹结构的研究和应用较少,竹结构具有较高的理论意义<sup>[6]</sup>。本文着重研究竹结构墙体构件竹板的热湿耦合特性。

### 1 模型的建立

温度梯度的存在不仅会导致热迁移,而且也会引起湿迁移,湿分迁移的潜热变化也对热量传递产生影响。建立热湿

收稿日期:2010-05-21

基金项目:国家自然科学基金项目(50878078)

作者简介:王倩,硕士研究生,研究方向为新型竹材结构建筑热湿耦合迁移模型及实验,电子信箱:wangqian5201@126.com;李念平(通信作者,中国科协所属全国学会个人会员登记号:E121950002S,E121900450M),教授,研究方向为建筑节能与室内空气品质,电子信箱:lianianping@126.com

耦合传递模型的理论基础主要有: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。多孔介质内部热传输通常可由 Fourier 定律表示,湿传输则通常根据 Fick 扩散定律进行描述。通常,描述湿传输和热传输的控制方程(三维)可以表示为<sup>[7-9]</sup>

$$-\frac{\partial}{\partial x}\left(-\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}\right)-\frac{\partial}{\partial y}\left(-\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}\right)-\frac{\partial}{\partial z}\left(-\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}\right)=\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(D_m \frac{\partial M}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(D_m \frac{\partial M}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(D_m \frac{\partial M}{\partial z}\right)=\rho c_p \frac{\partial M}{\partial t}$$

式中, $M$  为多孔建筑构件湿含量, $T$  为温度, $c_p$  为多孔材料的比热, $\lambda$  为多孔材料的导热系数, $\rho$  为多孔材料的密度, $D_m$  为湿扩散系数。下标  $x, y, z$  分别表示不同方向。

为了提出用以计算多孔构件内部热湿耦合传输的合理模型,必须在通用湿传输和热传输方程(未考虑耦合作用)基础上,参考多孔介质材料的热湿耦合传输方程的形式,并结合实际中可能存在的情况,在各方面对已有可供参考的计算方程(模型)进行修正和重新描述。

建立的多孔建筑构件热湿耦合传输的通用微分方程(一维)为

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}=\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\rho r h_{lv} \frac{\partial M}{\partial t}+Q \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t}=D_{nk} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+D_{nk} \delta \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+W \quad (2)$$

式中, $r$  为相变因子; $h_{lv}$  为蒸发潜热; $D_{nk}$  为考虑 Knudsen 扩散影响的多孔建筑构件湿扩散系数, $D_{nk}=D_m \cdot k_i$ ; $\delta$  为热梯度系数, $1/k_i$  为 Knudsen 扩散影响系数; $Q$  为由于相变和吸热、放热产生的热源或热汇; $W$  为与温度相关的湿源或湿汇。

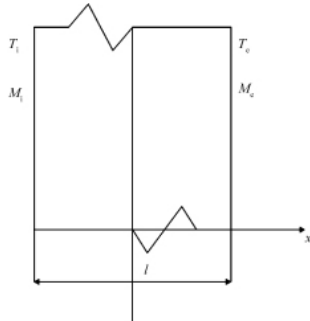


图 1 建筑构件示意图

Fig.1 Schematic diagram of the building components

对于如图 1 所示的多孔建筑构件所处的环境中构件内部无热源( $Q=0$ )与湿源( $W=0$ ),方程简化为

$$L \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}=\frac{\partial T}{\partial t}-\nu \frac{\partial M}{\partial t} \quad (3)$$

$$D \frac{\partial^2 M}{\partial x^2}=\frac{\partial M}{\partial t}-\theta \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

式中, $L$  为热扩散系数或导温系数, $L=\lambda/\rho c_p$ ; $D$  为等效湿扩散系数, $D=\lambda D_{nk}/(\lambda+\rho D_{nk} \delta r h_{lv})$ ; $\theta$  为湿迁移影响系数, $\theta=\rho c_p D_{nk} \delta/(\lambda+\rho D_{nk} \delta r h_{lv})$ ; $\nu$  为热传导影响系数, $\nu=r h_{lv}/c_p$ 。

$\nu$  与  $\theta$  因湿迁移和热迁移表现为正相关系数。式(3)中最

后一项表示了含湿量随时间的变化对温度的影响,当  $\partial M/\partial t > 0$  时,含湿量可以看作热源。类似地,式(4)中  $\partial T/\partial t$  项表示温度随时间的变化对湿度的影响。耦合热湿传递用式(3)、(4)更能紧凑而清晰地描述同样的物理过程。

在建立热平衡方程时考虑对流热传导和蒸发潜热的影响,建立湿平衡方程时考虑对流和温度变化引起的湿扩散的影响,则其边界条件可以表示为

$$\lambda \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0}=\alpha_i [T(0, t)-T_i(t)]+(1-r) h_{lv} \beta_i [M(0, t)-M_i(t)] \quad (5)$$

$$\lambda \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=l}=\alpha_e [T(l, t)-T_e(t)]+(1-r) h_{lv} \beta_e [M(l, t)-M_e(t)] \quad (6)$$

$$D_{nk} \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0}+D_{nk} \delta \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0}=\beta_i [M(0, t)-M_i(t)] \quad (7)$$

$$D_{nk} \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=l}+D_{nk} \delta \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=l}=\beta_e [M(l, t)-M_e(t)] \quad (8)$$

式中, $\alpha$  为多孔材料与空气的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot k)$ ; $\beta$  为多孔材料与空气的对流传湿系数, $kg/(m^2 \cdot s)$ ;下标  $i$  和  $e$  表示内侧和外侧。

初始温度和湿度条件可以表示为

$$T(x, 0)=T_0 \quad (9)$$

$$M(x, 0)=M_0 \quad (10)$$

## 2 热湿耦合方程的解析法求解

本文对热湿耦合方程进行数值解析,首先对传输方程、边界条件及初始条件进行 Laplace 变换,然后利用传递函数将热湿耦合传输方程转化为 4 阶普通微分方程,继而结合由边界条件及初始条件决定的系数矩阵得到 Laplace 域中的温、湿度分布,然后再对其进行 Laplace 逆变换得到物理空间的温湿度分布。

根据 Laplace 变换原理,对式(3)~(10)按  $t$  进行 Laplace 变换,则相关方程为

$$L \frac{d^2 \bar{T}}{dx^2}=s \bar{T}-T_0-\nu s \bar{M}+\nu M_0 \quad (11)$$

$$L \frac{d^2 \bar{M}}{dx^2}=s \bar{M}-M_0-\theta s \bar{T}+\theta T_0 \quad (12)$$

$$\lambda \frac{d \bar{T}(x, s)}{dx} \Big|_{x=0}=\alpha_i \left[ \bar{T}(0, s)-\frac{\bar{T}_i}{s} \right]+(1-r) h_{lv} \beta_i \left[ \bar{M}(0, s)-\frac{M_i}{s} \right] \quad (13)$$

$$-\lambda \frac{d \bar{T}(x, s)}{dx} \Big|_{x=l}=\alpha_e \left[ \bar{T}(l, s)-\frac{\bar{T}_e}{s} \right]+(1-r) h_{lv} \beta_e \left[ \bar{M}(l, s)-\frac{M_e}{s} \right] \quad (14)$$

$$D_{nk} \frac{d \bar{M}(x, s)}{dx} \Big|_{x=0}+D_{nk} \delta \frac{d \bar{T}(x, s)}{dx} \Big|_{x=0}=\beta_i \left[ \bar{M}(0, s)-\frac{M_i}{s} \right] \quad (15)$$

$$-D_{nk} \frac{d \bar{M}(x, s)}{dx} \Big|_{x=l}+D_{nk} \delta \frac{d \bar{T}(x, s)}{dx} \Big|_{x=l}=\beta_e \left[ \bar{M}(l, s)-\frac{M_e}{s} \right] \quad (16)$$

$$\bar{T}(x, 0) = \frac{T_0}{s} \quad (17)$$

$$\bar{M}(x, 0) = \frac{M_0}{s} \quad (18)$$

式中,  $s$  为 Laplace 变换参数。

利用传递函数法对方程组进行求解, 引入满足以下方程组的传递函数  $\varphi(x, s)$ , 即

$$\bar{T}(x, s) = \frac{\nu}{L} \varphi(x, s) + \frac{T_0}{s} \quad (19)$$

$$\bar{M}(x, s) = \frac{1}{L} \varphi(x, s) - \frac{1}{s} \frac{d^2 \varphi(x, s)}{dx^2} + \frac{M_0}{s} \quad (20)$$

经过 Laplace 逆变换, 可以得出温度和含湿量在物理空间的解:

$$T(x, t) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i}^2 \frac{Q_{ij}}{2lq_j} \cdot \left[ 2\sqrt{\frac{t}{\pi}} \exp\left(-\frac{n_{ij}^2}{4t}\right) - n_{ij} \operatorname{erfc}\left(\frac{n_{ij}}{2\sqrt{t}}\right) \right] + T_0 \quad (21)$$

$$M(x, t) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i}^2 \left( \frac{1}{L} - q_i^2 \right) \frac{Q_{ij}}{2lq_j} \cdot \left[ 2\sqrt{\frac{t}{\pi}} \exp\left(-\frac{n_{ij}^2}{4t}\right) - n_{ij} \operatorname{erfc}\left(\frac{n_{ij}}{2\sqrt{t}}\right) \right] + M_0 \quad (22)$$

式中,  $q_i = \frac{a_i}{\sqrt{2D}} \left[ 1 + \frac{D}{L} + b_i \sqrt{\left(1 + \frac{D}{L}\right)^2 + \frac{4\theta\nu D}{L}} \right]^{1/2}$ ;  $i=1, 2$  时,

$a_i=-1, i=3, 4$  时,  $a_i=1; i=1, 3$  时,  $b_i=-1, i=2, 4$  时,  $b_i=1; j=1, 2$ ;

当  $i=1, 2$  时,  $n_{ij}=q_i(jl-x)$ ; 当  $i=3, 4$  时,  $n_{ij}=q_{i-2}[(j-1)l+x]$ , 其中,

$$n_1 = \frac{(M_c - M_0)\nu - (1 - Lq_2^2)(T_c - T_0)}{L(q_2^2 - q_1^2)}$$

$$n_2 = \frac{(M_c - M_0)\nu - (1 - Lq_1^2)(T_c - T_0)}{L(q_2^2 - q_1^2)}$$

$$m_1 = -\frac{(M_i - M_0)\nu - (1 - Lq_2^2)(T_i - T_0)}{L(q_2^2 - q_1^2)}$$

$$m_2 = -\frac{(M_i - M_0)\nu - (1 - Lq_1^2)(T_i - T_0)}{L(q_2^2 - q_1^2)}$$

$$\operatorname{erfc}(x) = \int_x^0 e^{-t^2} dt; \nu \text{ 为热传导影响系数}; Q_{ij} \text{ 为矩阵 } \begin{bmatrix} n_1 & m_1 \\ n_2 & m_2 \\ -m_1 & -n_1 \\ -m_2 & -n_2 \end{bmatrix}$$

的对应元素。

### 3 实例分析

本文实取长沙地区某天连续 24h 的天气情况, 并在此条件下对竹结构组合墙体构件竹板进行温度和湿度测试, 每 0.5h 记录一次数据<sup>[10]</sup>。将温度传感器 (PT100 铂电阻)、湿度传感器 (Honeywell4030) 均匀布置在竹板室内侧和室外侧的几何中心。选用的竹板厚度  $l=0.02\text{m}$ 。室内平均温度  $T_i=16.3^\circ\text{C}$ , 室内平均相对湿度  $\varphi_i=71\%$ , 室外平均环境温度  $T_c=8.8^\circ\text{C}$ , 室外平均环境相对湿度  $\varphi_c=93\%$ 。竹板的物性参数为: 密度  $\rho=639\text{kg/m}^3$ , 比热  $c_p=1.722\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})$ , 导热系数  $\lambda=0.18\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 导热系数  $L=1.64\times 10^{-7}\text{m}^2/\text{s}$ 。

图 2 和图 3 分别给出了材料内温度和含湿量随时间和空间变化。结果表明, 竹板室内表面侧 ( $x=0$ ) 的温度变化幅度非常小, 室外表面侧 ( $x=0.02$ ) 的温度随着室外温度的变化而变化。中间层  $x=0.005$  和  $x=0.01$  处的温度曲线相似, 接近外侧的  $x=0.015$  处的温度变化幅度明显增大, 说明受外侧的影响较大。总体来看, 竹板内温度变化曲线平滑, 变化幅度较小, 14h 后趋于稳定。对于湿度分布, 通过图 3 可以看出,  $x=0$  处含湿量随时间的增加而有所增加, 这是由于湿气向湿度低的一侧迁移过程中产生了湿积累。中间层  $x=0.005$  和  $x=0.01$  处的含湿量曲线趋势一致, 接近外侧  $x=0.015$  处的含湿量变化幅度增大, 受外侧影响较大。总体看来, 竹板内含湿量和温度梯度方向相反, 外层受室外影响较大, 中间层变化缓慢。

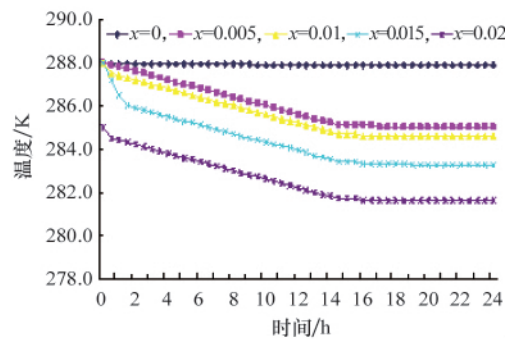


图 2 墙体构件内温度分布

Fig. 2 Distribution of temperature in building component

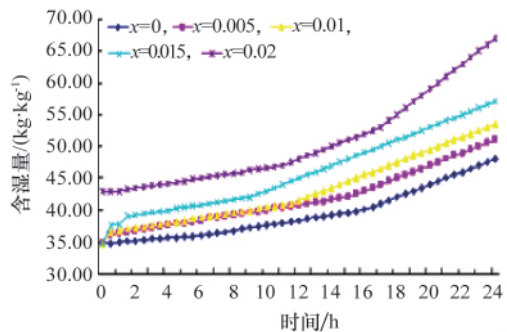


图 3 墙体构件内湿度分布

Fig. 3 Distribution of humidity in building component

因实验设备的限制, 只测试了竹板室内侧和室外侧 ( $x=0$  和  $x=0.02$  处) 的温度和湿度分布。图 4、图 5 显示了竹板室内侧和室外侧数值计算值和实验值的对比, 说明数值计算值和实验值吻合得较好。

### 4 结论

本文以多孔介质传热传质学中的 Fourier 定律和 Fick 定律为基础, 以湿度梯度作为热源或热汇, 以温度梯度作为湿源或湿汇, 根据质量守恒和能量守恒定律建立了建筑构件内热湿耦合迁移的动态数学方程, 提出了一种传递函数解析方法对墙体不同剖面处温度和含湿量进行动态预测。并对竹结构组合墙体构件竹板进行计算和实验测量, 结果符合较

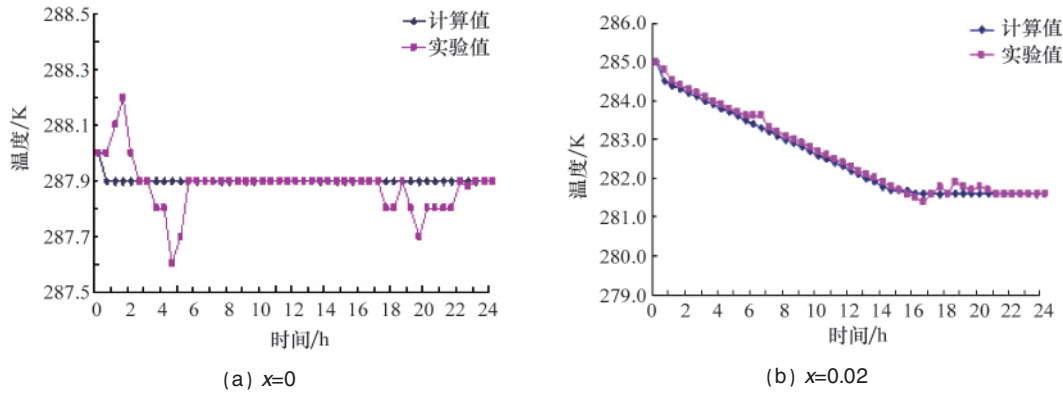


图4 墙体构件内温度分布比较  
Fig. 4 Comparison of temperature in building component

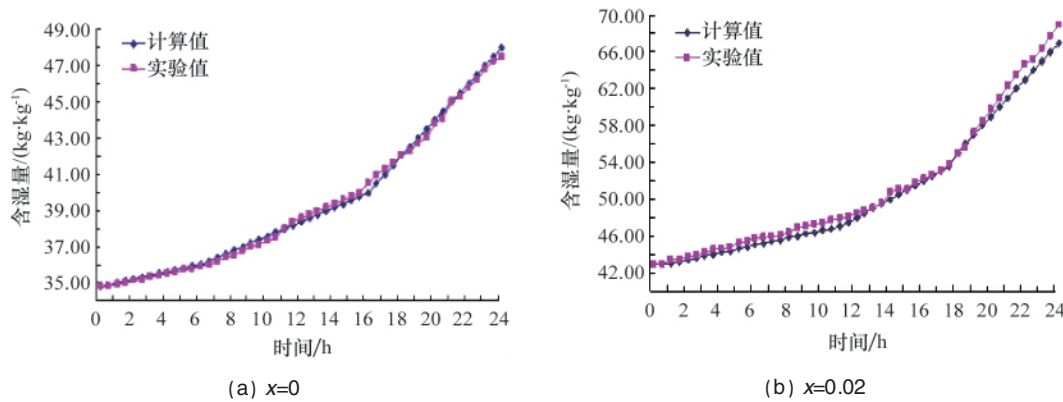


图5 墙体构件内湿度分布比较  
Fig. 5 Comparison of humidity in building component

好,从而验证了该方法的可靠性。另一方面,从本文可知竹结构组合墙体构件竹板内不同剖面温度和湿度的分布规律,有利于进一步进行竹结构组合墙体的特性研究。

参考文献 (References)

[1] 张寅平, 任立志, 刘晓华, 等. 建筑环境传质学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.  
Zhang Yinping, Ren Lizhi, Liu Xiaohua, *et al.* Architectural environment mass transfer theory[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.

[2] Steeman H J, van Belleghem M, Janssens A, *et al.* Coupled simulation of heat and moisture transport in air and porous materials for the assessment of moisture related damage [J]. *Building and Environment*, 2009, 44(10): 2176–2184.

[3] Chang W J, Weng C I. An analysis solution to coupled heat and moisture diffusion transfer in porous materials [J]. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 2003, 43(19): 3621–3632.

[4] 陈德鹏. 基于多孔介质湿热传输理论的混凝土湿热耦合变形数值模拟及应用[D]. 南京: 东南大学材料科学与工程学院, 2007.  
Chen Depeng. Numerical simulation and application of concrete deformation coupling heat and moisture based on heat and moisture transfer in porous medium [D]. Nanjing: School of Materials Science and Engineering, Southeast University, 2007.

[5] 苏向辉. 多层多孔结构内热湿耦合迁移特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学航空宇航学院, 2003.  
SU Xianghui. Study on characteristics of coupled heat and moisture migration in multilayer porous structures [D]. Nanjing: College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2003.

[6] van der Lugt P, van den Dobbelsteen A A J F, Janssen J J A. An environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures [J]. *Construction and Building Materials*, 2006, 20(10): 648–656.

[7] Chang Y C. Optimal chiller loading by evolution strategy for saving energy[J]. *Energy and Buildings*, 2007, 9(4): 437–444.

[8] Chen T C, Weng C I, Chang W J. Transient hygrothermal stresses induced in general plane problems by theory of coupled heat and moisture[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1992, 59(2S): S10–S16.

[9] Burch D M. A computer analysis of moisture accumulation in walls subjected to hot and humid climates [J]. *ASHRAE Transactions*, 1993, 99(2): 1013–1022.

[10] Talukdar P, Stephen O, Olutmayin O F, *et al.* An experimental data set for benchmarking 1–D, transient heat and moisture transfer models of hygroscopic building materials: Part I: Experimental facility and material property data [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50(23–24): 4527–4539.

(责任编辑 王芷)