

文章编号:1674-2974(2016)01-0152-05

墙体热、湿及空气耦合传递非稳态模型及验证*

刘向伟¹, 陈国杰^{1,2}, 陈友明^{1†}

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 南华大学 城市建设学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要:为了更准确地预测墙体内部的温湿度分布, 研究多孔介质墙体内部的热、湿及空气耦合非稳态传递规律, 以温度、相对湿度和空气压力为驱动势, 考虑热传递、湿传递、空气渗透及其相互作用, 建立了建筑多孔介质墙体热、湿及空气耦合传递非稳态模型, 并采用有限元方法设计了相应的模拟计算程序. 通过对比新建模型模拟结果与国际公认的 HAMSTAD 标准验证实例, 验证了模型的正确性.

关键词:建筑墙体; 非稳态; 热、空气、湿耦合传递; 含湿量; 相对湿度

中图分类号: TU111.4

文献标识码: A

Modeling of the Transient Heat, Air and Moisture Transfer in Building Walls

LIU Xiang-wei¹, CHEN Guo-jie^{1,2}, CHEN You-ming^{1†}

(1. College of Civil Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China;

2. College of City Construction, Univ of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: A coupled heat, air and moisture transfer model, which takes into consideration the heat transfer, moisture transfer and air convection and their coupled effect, was developed to predict the distribution of the temperature and humidity and to investigate the rule of the coupled heat, air and moisture transfer in walls. The temperature, relative humidity and air pressure were chosen as the driving potentials. A program based on the finite element method was developed to calculate the governing equations. And the numerical results of this model were compared with the internationally accepted HAMSTAD benchmarks, and the results agree well with each other.

Key words: building walls; transient; heat, air and moisture transfer; moisture content; relative humidity

建筑墙体多为多孔介质材料, 建筑墙体热湿传递研究以多孔介质传热传质学为理论基础. Philip 与 Devries^[1] (1957 年) 和 Luikov^[2] (1966 年) 以温度和含湿量为驱动势, 考虑多孔介质内热传递、湿迁移及其相互作用建立了多孔介质热湿耦合传递模型. 在 Philip

与 Devries 和 Luikov 模型的基础上 Kunzel^[3], Kong^[4], Chu^[5], Abahri^[6], Leskovsek^[7], Zhong^[8], Belarbi^[9], Qin^[10], 李魁山^[11] 和郭兴国^[12] 等各自建立了多孔介质材料的热湿耦合传递模型. 空气渗透对热湿传递过程

* 收稿日期: 2015-02-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078127, 51408294), National Natural Science Foundation of China(51078127, 51408294)

作者简介: 刘向伟(1987-), 男, 湖南宁乡人, 湖南大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: ymchen@hnu.edu.cn

的影响在上述研究中均未考虑。

建筑墙体长期暴露在非稳态气候条件下,由于室内外环境存在温度、湿度及空气压力梯度,这将导致墙体内部的热传递、湿迁移及空气渗透。建筑墙体热湿耦合传递研究中忽略空气渗透对建筑墙体热湿传递过程的影响将不利于准确地分析建筑墙体内部的热度和湿度分布。为了更准确地研究建筑墙体内部的热湿耦合传递规律,刘晓燕等^[13]建立了建筑墙体热、湿及空气耦合传递模型。该模型从微观的角度,通过定义气体所占体积百分比与液态水所占体积百分比来分别计算水蒸汽含量和液态水含量,但是在自然条件下很难将水的物相分开测量,模型参数难以确定。另外,该模型采用室外空气日平均温度作为室外边界条件,不能充分反应室外气候的逐时非稳态变化。本文在 KUNZEL 的研究基础上,通过考虑空气渗透,以室外气象条件作为边界条件,建立了一个以温度、相对湿度和空气压力为驱动势的建筑墙体热、湿及空气耦合传递非稳态模型。通过对比该模型模拟结果与 HAMSTAD 验证实例^[14],验证了模型的正确性。

1 模型的建立

本文以相对湿度、温度和空气压力为驱动势,根据能量守恒和质量守恒定律建立墙体热、湿及空气耦合传递非稳态模型,并作如下假设:1)材料骨架是一个固定的、不变形的惰性骨架,不与液相、气相发生化学反应;2)墙体材料为各向同性的连续多孔介质;3)温度对材料平衡含湿量的影响忽略不计;4)墙体材料中的水只有汽、液两相,材料中始终存在局部湿平衡;5)孔隙内的混合气体(湿空气)按理想气体处理;6)多层墙体层与层之间的湿传递主要受边界湿传递阻的影响,如果不同层之间接触十分紧密,则湿阻较小,可认为这两种材料的边界表面处于湿平衡状态。

1.1 湿传递

由于墙体材料为各向同性的连续多孔介质,根据单元体质量守恒(连续性方程):

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = -\nabla(j_v + j_l) \quad (1)$$

式中 ω 为体积含湿量, kg/m^3 ; t 为时间, s ; j_v 为水蒸气传递速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; j_l 为液态水传递速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

根据菲克定律和达西定律:

$$j_v = -\delta_p \nabla P_v + j_a x_a \quad (2)$$

$$j_l = K_l \nabla P_k \quad (3)$$

式中 δ_p 为水蒸气渗透率, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$; P_v 为水蒸气分压力, Pa ; j_a 为空气流动速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; x_a 为空气含湿量, kg/kg ; K_l 为液态水渗透率, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$; P_k 为毛细水压力, Pa 。

将式(2)和(3)代入式(1)得:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \nabla(\delta_p \nabla P_v - j_a x_a - K_l \nabla P_k) \quad (4)$$

根据假设3)温度对材料平衡含湿量的影响忽略不计:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{d\omega}{d\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \zeta \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (5)$$

式中 φ 为相对湿度; ζ 为等温吸放湿曲线的斜率, kg/m^3 。

根据假设4),由于局部存在湿平衡,开尔文关系式可表示为:

$$\varphi = \exp\left(-\frac{P_k}{\rho_l R_D T}\right) \quad (6)$$

根据假设5),孔隙内的混合气体(湿空气)按理想气体处理,则:

$$P_v = \varphi P_s \quad (7)$$

$$x_a = 6.2 \times 10^{-6} P_v \quad (8)$$

式中 ρ_l 为液态水密度, kg/m^3 ; R_D 为水蒸气气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T 为温度, K ; P_s 为饱和水蒸汽压力, Pa 。

将式(5)~式(8)代入式(4)得:

$$\zeta \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla(D_\varphi \nabla \varphi + D_T \nabla T) - 6.2 \times 10^{-6} \nabla(j_a \varphi P_s) \quad (9)$$

其中, $D_\varphi = \delta_p P_s + K_l \rho_l R_D \frac{T}{\varphi}$

$$D_T = \delta_p \varphi \frac{dP_s}{dT} + K_l \rho_l R_D \ln \varphi$$

1.2 热传递

假设材料中的水只有汽、液两相,根据单元体能量守恒:

$$(\rho_m c_{p,m} + \omega c_{p,l}) \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla(q_{\text{cond}} + q_{\text{conv}}) \quad (10)$$

式中 ρ_m 为干材料的密度, kg/m^3 ; $c_{p,m}$ 为干材料的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $c_{p,l}$ 为液态水的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; q_{cond} 为导热热流密度, W/m^2 ; q_{conv} 为对流热流密度, W/m^2 。

$$q_{\text{cond}} = -k \nabla T \quad (11)$$

$$q_{\text{conv}} = c_{p,a} j_a T + j_v h_{l,v} \quad (12)$$

式中 k 为材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; $c_{p,a}$ 为干空气的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; h_{lv} 为水蒸气汽化潜热, J/kg .

将式(11)和(12)代入(13)得:

$$(\rho_m c_{p,m} + \alpha c_{p,l}) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + h_{lv} \nabla(\delta_p \nabla P_v) - \nabla(c_{p,a} j_a T + 6.2 \times 10^{-6} h_{lv} j_a P_s) \quad (13)$$

1.3 空气流动方程

根据泊肃叶定律^[15], 通过多孔介质的空气平均流动速度可表述为压力梯度与速度的关系:

$$j_a = -k_a \nabla P_a \quad (14)$$

式中 k_a 为多孔介质材料中空气的渗透率, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, 其物理意义为沿流动方向, 空气流动速率与压力梯度的比值; P_a 为空气压力, Pa .

根据连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho_a \epsilon)}{\partial t} = -\nabla(k_a \nabla P_a) \quad (15)$$

式中 ρ_a 为空气密度, kg/m^3 ; ϵ 为材料孔隙率, %.

在建筑物理应用领域, 由于空气流速低, 压力低, 温度变化不大, 所以空气可以当不可压缩气体考虑, 则方程(15)可简化为:

$$\nabla(k_a \nabla P_a) = 0 \quad (16)$$

1.4 边界条件

通过墙体外表面的湿流量 $g_{n,e}$ 可表示为:

$$g_{n,e} = \beta_{p,e} (\varphi_e P_{s,e} - \varphi_{\text{surfe}} P_{s,\text{surfe}}) + g_1 + \begin{cases} j_a x_{a,e} & , j_a > 0 \\ j_a x_{a,\text{surfe}} & , j_a < 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中 $\beta_{p,e}$ 为墙体外表面对流传质系数, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$; φ_e 为室外相对湿度; φ_{surfe} 为墙体外表面相对湿度; $p_{s,e}$ 为室外饱和水蒸汽压力, Pa ; $p_{s,\text{surfe}}$ 为墙体外表面饱和水蒸汽压力, Pa ; g_1 为雨水吸收量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; $x_{a,e}$ 为室外空气含湿量, kg/kg ; $x_{a,\text{surfe}}$ 为外表面空气含湿量, kg/kg ; 空气由室外侧流向室内 $j_a > 0$.

通过外表面的热流量 $q_{n,e}$ 包括对流换热, 太阳辐射及水蒸气潜热:

$$q_{n,e} = h_e (T_e - T_{\text{surfe}}) + h_{lv} g_{n,e} + \alpha \cdot q_{\text{solar}} + g_1 c_{p,l} T_e + \begin{cases} c_{p,a} j_a T_e & , j_a > 0 \\ c_{p,a} j_a T_{\text{surfe}} & , j_a < 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中 h_e 为墙体外表面对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_e 为室外空气温度, K ; T_{surfe} 为墙体外表面温度, K ; α 为墙体外表面太阳辐射吸收率; q_{solar} 为垂直照射在墙体外表面上的太阳辐射, W/m^2 .

通过墙体内表面的湿流量 $g_{n,i}$ 可表示为:

$$g_{n,i} = \beta_{p,i} (\varphi_i P_{s,i} - \varphi_{\text{surfi}} P_{s,\text{surfi}}) - \begin{cases} j_a x_{a,\text{surfi}} & , j_a > 0 \\ j_a x_{a,i} & , j_a < 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中 $\beta_{p,i}$ 为墙体内表面对流传质系数, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$; φ_i 为室内相对湿度; φ_{surfi} 为墙体内表面相对湿度; $p_{s,i}$ 为室内饱和水蒸汽压力, Pa ; $p_{s,\text{surfi}}$ 为墙体内表面饱和水蒸汽压力, Pa ; $x_{a,i}$ 为室内空气含湿量, kg/kg ; $x_{a,\text{surfi}}$ 为内表面空气含湿量, kg/kg .

通过内表面的热流量 $q_{n,i}$ 可表示为:

$$q_{n,i} = h_i (T_i - T_{\text{surfi}}) + h_{lv} \cdot g_{n,i} - \begin{cases} c_{p,a} j_a T_{\text{surfi}} & , j_a > 0 \\ c_{p,a} j_a T_i & , j_a < 0 \end{cases} \quad (20)$$

式中 h_i 为墙体内表面对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_i 为室内空气温度, K ; T_{surfi} 为墙体内表面温度, K .

2 模型求解

建筑墙体热、空气、湿传递过程相互耦合, 为了获得墙体内部的热度和湿度分布, 控制方程组需同时求解. 本文采用有限元方法对控制方程组进行求解. 时间步长可根据实际边界条件确定, 本文将时间步长设定为 1 h.

3 模型验证

HAMSTAD 验证实例是为了评价建筑物理领域热、空气、湿传递机理模型而建立的一个开放性平台. 对比新建模型模拟结果与 HAMSTAD 验证实例是目前国际公认的建筑墙体热、空气、湿耦合传递模型验证方法.

HAMSTAD 包含了 5 个验证实例, 每个验证实例至少包含热传递、湿传递及空气渗透机理中的两项. 本文通过对比新模型模拟结果与 HAMSTAD 验证实例 3 和 5 来验证模型的正确性.

3.1 HAMSTAD 验证实例 3

HAMSTAD 验证实例 3 中, 墙体厚度为 200 mm, 密度为 212 kg/m^3 , 比热容为 1 000 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 初始条件为 20 $^{\circ}\text{C}$, 95%, 室外温湿度为 2 $^{\circ}\text{C}$, 80%, 室内温湿度为 20 $^{\circ}\text{C}$, 70%, 室内外对流换热系数均为 10 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 室内外对流质传递系数分别为 $2 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 和 $7.38 \times 10^{-12} \text{ m/s}$. 室内外压差为 ΔP (Pa), 空气由室内流向室外时 $\Delta P > 0$.

$$\Delta P = \begin{cases} 30, & t \leq 20 \text{ d} \\ -30, & t \geq 21 \text{ d} \end{cases} \quad (21)$$

在 20~21 d 之间压差线性变化,其它详细参数见文献[14].

如图 1~图 6 所示,新模型模拟结果与 HAMS-TAD 验证实例吻合良好,该模型能准确地预测建筑墙体内部的温度和湿度分布.图中 CTH, TUD, Technion 和 NRC 表示参与 HAMSTAD 项目的其它研究机构的模拟结果,新建模型模拟结果表示本文所提出模型的模拟结果.

如图 1,3,5 所示,在 20~21 d 之间,由于压力梯度方向的改变,室外低温空气向室内渗透,墙体内温度迅速下降,快速接近室外空气温度.同样,如图 2,4,6 所示,由于室外空气的含湿量低于墙体内部的含湿量,室外空气向室内渗透的过程中带走大量的湿,墙体内部的含湿量快速降低.由此可见,建筑材料孔隙内的空气对流,对建筑墙体的热湿性能有重要的影响.

结构为 365 mm 砖墙,15 mm 抹灰层,40 mm 保温层.初始条件为 25 °C,60%,室外温湿度为 0 °C,80%,室内温湿度为 20 °C,60%,室内外对流换热系数分别为 8 W/(m²·K)和 25 W/(m²·K),室内外对流质传递系数分别为 5.882 3 × 10⁻⁸ m/s 和 1.838 2 × 10⁻⁷ m/s.其它参数详见文献[14].

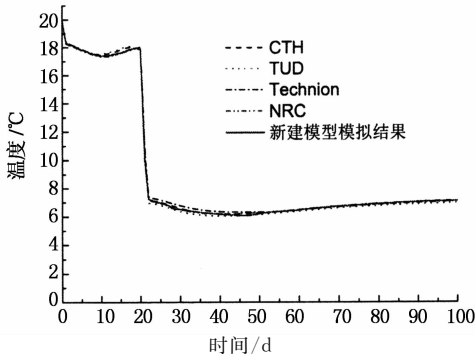


图 1 材料厚度为 0.05 m 处的温度分布

Fig.1 Temperature distribution at the distance of 0.05 m

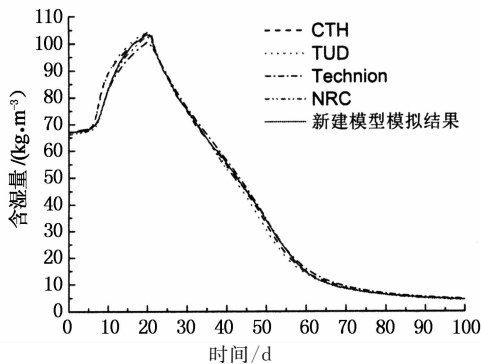


图 2 材料厚度为 0.05 m 处的含湿量分布
Fig.2 Moisture content distribution at the distance of 0.05 m

3.2 HAMSTAD 验证实例 5

HAMSTAD 验证实例 5 中,由外至内,墙体的

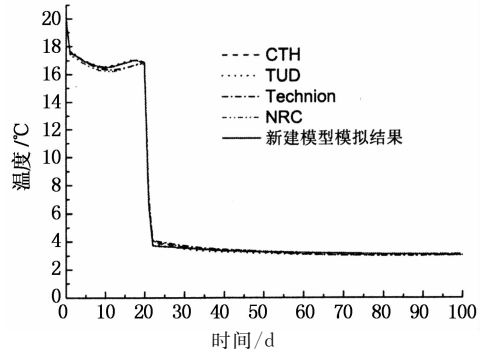


图 3 材料厚度为 0.1 m 处的温度分布
Fig.3 Temperature distribution at the distance of 0.1 m

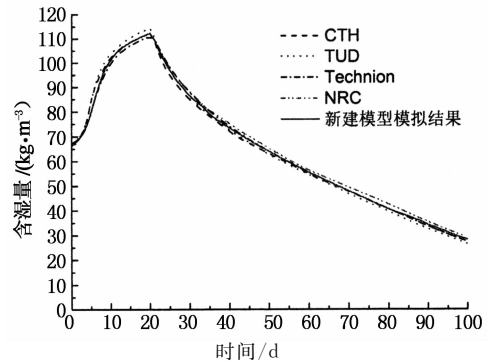


图 4 材料厚度为 0.1 m 处的含湿量分布
Fig.4 Moisture content distribution at the distance of 0.1 m

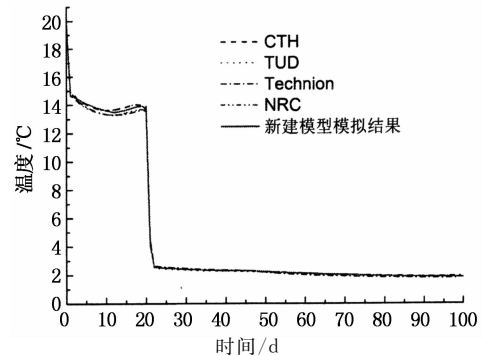


图 5 材料厚度为 0.15 m 处的温度分布
Fig.5 Temperature distribution at the distance of 0.15 m

如图 7 和图 8 所示,新模型模拟结果与 HAM-

STAD 验证实例吻合良好。图中 TUD, Technion, KUL, TUE, CTH 和 NRC 表示参与 HAMSTAD 项目的其它研究机构的模拟结果,新建模型模拟结果表示本文所提出模型的模拟结果。

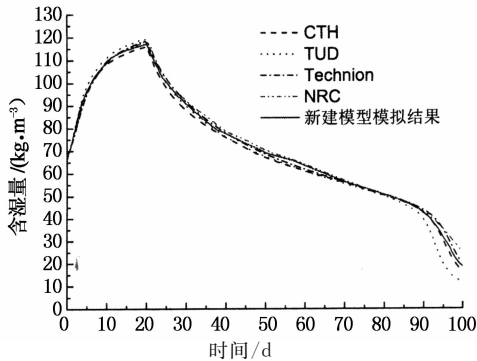


图6 材料厚度为0.15 m处的含湿量分布
Fig. 6 Moisture content distribution at the distance of 0.15 m

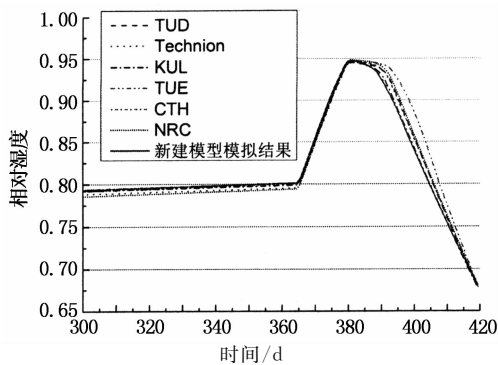


图7 墙体内部相对湿度分布
Fig. 7 Relative humidity profile in wall

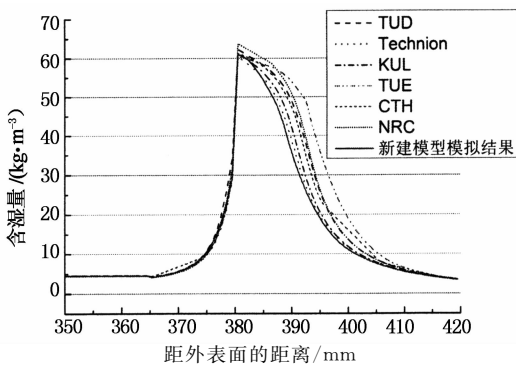


图8 墙体内部含湿量分布
Fig. 8 Water content profile in wall

4 结论

本文在 Kunzel 的研究基础上,通过考虑空气渗透,建立了一个以温度、相对湿度和空气压力为驱动势的建筑墙体热、湿及空气耦合传递非稳态模型,并采用有限元方法对该模型进行求解。该模型模拟结

果与 HAMSTAD 验证实例吻合良好,结果表明该模型能准确地预测热传递、湿传递及空气渗透机理作用下建筑墙体内的温度和湿度分布。

参考文献

- [1] PHILIP J R, DEVRIES D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients[J]. *Trans Am Geophys Union*, 1957, 38(2):222-232.
- [2] LUIKOV A V. Heat and mass transfer in capillary-porous bodies [M]. Oxford: Pergamon, 1966:75-99.
- [3] KUNZEL H M. Simultaneous heat and moisture transport in building components[R]. Verlag Stuttgart: Fraunhofer IRB, 1995:38-40.
- [4] KONG F, ZHENG M. Effects of combined heat and mass transfer on heating load in building drying period[J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40(8):1614-1622.
- [5] CHU S S, FANG T H, CHANG W J. Modelling of coupled heat and moisture transfer in porous construction materials[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2009, 50(7/8):1195-1204.
- [6] ABAHRI K, BELARBI R, TRABELSI A. Contribution to analytical and numerical study of combined heat and moisture transfers in porous building materials[J]. *Building and Environment*, 2011, 46(7): 1354-1360.
- [7] LESKOVSEK U, MEDVED S. Heat and moisture transfer in fibrous thermal insulation with tight boundaries and a dynamical boundary temperature[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 54(19/20):4333-4340.
- [8] ZHONG Z P. Combined heat and moisture transport modeling for residential buildings[D]. Indiana: Purdue University, 2008:18-24.
- [9] BELARBI R, QIN M, ABDELKARIM A M, *et al.* Experimental and theoretical investigation of non-isothermal transfer in hygroscopic building materials[J]. *Building and Environment*, 2008, 43(12): 2154-2162.
- [10] QIN M, BELARBI R, ABDELKARIM A M, *et al.* Coupled heat and moisture transfer in multi-layer building materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(2):967-975.
- [11] 李魁山, 张旭, 高军. 周期边界条件下多层墙体内部热湿耦合迁移[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2009, 37(6): 814-818. LI Kui-shan, ZHANG Xu, GAO Jun. Coupled heat and moisture transfer in multi-wall under periodic boundary conditions[J]. *Journal of Tongji University: Natural Sciences*, 2009, 37(6):814-818. (In Chinese)
- [12] 郭兴国, 陈友明. 一种新型木结构墙体的热湿性能分析[J]. *湖南大学学报:自然科学版*, 2009, 36(12):18-21. GUO Xing-guo, CHEN You-ming. Analysis of the hygrothermal performance of a new timber structure wall[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2009, 36(12):18-21. (In Chinese)
- [13] 刘晓燕, 贾永英, 王志国. 建筑墙体热、湿及空气耦合传递[J]. *太阳能学报*, 2004, 25(1): 13-18. LIU Xiao-yan, JIA Yong-ying, WANG Zhi-guo. The study of coupled transfer of heat, moisture and air in building walls[J]. *Acta Energiae Solatis Sinica*, 2004, 25(1):13-18. (In Chinese)
- [14] HAGENTOFT C E. Hamstad-final report: methodology of HAM-modeling, Report R-02:8[R]. Gothenburg: Department of Building Physics, Chalmers university of Technology, 2002:5-51.
- [15] HUGO H. Building physics-heat, air and moisture: fundamentals and engineering methods with examples and exercises[M]. Berlin: Ernst & Sohn A Wiley, 2012:136.