

热湿气候地区墙体内部冷凝分析

郭兴国^{1,2}, 陈友明²

(1. 南昌大学 建筑工程学院, 南昌 330031; 2. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082)

摘要:根据 Motakef 和 El-Masri 的研究, 将墙体分为“干-湿-干”3 个区域。以多孔介质传热传质学为基础, 将水蒸气冷凝看成是湿源、热源、蒸汽汇, 建立起墙体湿区域内、热湿耦合传递方程。通过分析解得到了墙体内部冷凝率和液态含湿量的分布曲线以及达到临界含湿量所需的时间。分析结果表明墙体内部的冷凝率跟湿区域两侧的温差成正比, 最大冷凝率出现在低温侧的湿区域边界处。

关键词:湿区域; 冷凝; 热湿耦合传递; 含湿率

中图分类号: TU111 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2011)05-0121-04

Analysis of Condensation in Porous Wall Exposed to Hot Humid Climate

GUO Xing-guo^{1,2}, CHEN You-ming²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, P. R. China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China)

Abstract: According to the work of Motakef and El-Masri, the wall was divided into dry-wet-dry zones. Based on the heat and moisture transfer through porous media, considering the vapour condensation as a vapour sink, water source and heat source, coupled heat and moisture equations for wet zone were established. Closed-form analytical expressions for the condensation rate, moisture content and the time when critical moisture content value reached are obtained. It is indicated that the condensation rate exhibits a strong dependence on the temperature difference of the two sides of wet zone, and the maximum condensation rate value is reached at the boundary of wet zone close to lower temperature.

Key words: wet zone; condensation; coupled heat and moisture transfer; moisture content

热湿气候控制着中国长江流域及其以南地区。在热湿气候中, 当墙体中的湿传导过程和周围空气湿度水平发生变化时, 容易引起墙体内部和表面结露, 增加墙体内部湿积累, 导致许多建筑物在使用几年后便出现墙表面剥蚀、渗漏、发霉甚至结构出现损坏的现象。这严重影响了墙体的使用寿命和美观, 导致建筑维护费用增加。同时, 墙体内部湿积累, 还会导致保温材料保温性能下降, 增加墙体的传热系数, 进而增加建筑能耗。因此, 对墙体内部冷凝情况进行精确分析以防止冷凝水在墙体内部的过量积累是一个需要迫切解决的问题。

国外从 20 世纪 70 年代后期开始重视对热湿环境下墙体内部湿迁移过程的理论及应用研究, 发展了许多围护结构热湿传递的数值模型。其中较先进的模型有基于吸放湿理论^[1]、有效渗透深度理论^[2-3]、蒸发冷凝理论^[4]所建立起来得热湿同时传递方程。最近, Qin 在 Luikov 模型的基础上建立了 1 个多层材料内的热湿耦合传递方程^[5-7]。在实际建筑应用中, 一些学者通过各种假设建立了一些简化模型^[8-10]。随着建筑节能的深入开展, 中国学者对围护结构热湿传递也开始重视起来, 近年来也做了许多工作^[11-13]。

收稿日期: 2011-01-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078127); 教育部高等学校博士学科点专项基金资助项目(200605322015)

作者简介: 郭兴国(1979-), 男, 博士, 主要从事建筑热湿工程分析及建筑节能新技术研究, (E-mail) xingguo@163.com。

陈友明(通讯作者), 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) ymchen@hnu.edu.cn。

但是,学者们都将研究重点集中在围护结构热湿迁移上,专门关于墙体内部的水蒸气冷凝方面的研究还比较少。Ogniewicz 跟 Tien 首次分析了绝热材料内的水蒸气冷凝问题^[14]。Motakef 和 EI-Masri 在考虑相变的基础上研究了平板中的一维热湿耦合传递现象^[15]。Shapiro 和 Motakef 分析了平板内瞬态热湿传递问题,并将分析结果与试验数据进行了对比^[16]。Wyrwal 和 Marynowicz 分析了在墙体材料含湿量低于最大含湿量的情况下的墙体内部湿积累情况^[17]。陈永成和陈启高等人通过建筑墙体湿分布分析,建立了墙体潮湿区湿度分布微分方程及湿度计算方程^[18]。朱传晟对围护结构热桥部位进行了结露理论分析与计算,找出了形成结露的原因^[19]。

根据 Motakef 和 EI-Masri 的热湿同时传递理论,将水蒸气冷凝同时看成是湿源、热源和蒸汽汇,建立起了墙体内部热湿同时传递方程,分析了热湿气候地区墙体内部的冷凝状况。

1 模型的建立

将各向同性的墙体内部的热湿传递过程看作是一维的,其边界处的温度和相对湿度分别为 (φ_e, T_e) , (φ_i, T_i) , 如图 1 所示。夏天,在热湿气候地区,高温高湿的室外空气向室内扩散。对常压系统而言,饱和水蒸气浓度是温度的单一函数,因此,墙体内部的饱和水蒸气浓度曲线是由温度分布曲线来决定的。当墙体内部的水蒸气浓度高于饱和水蒸气浓度时,扩散的水蒸气就会产生相变,在墙体内部的某个区域发生冷凝。如果墙体两侧的相对湿度都达到 100%, 那么整个墙体都会发生冷凝,如果两侧的相对湿度低于 100%, 冷凝只发生在某个区域,这个区域称为湿区域,整个墙体由一个湿区域跟两个干区域组成,如图 1 所示。

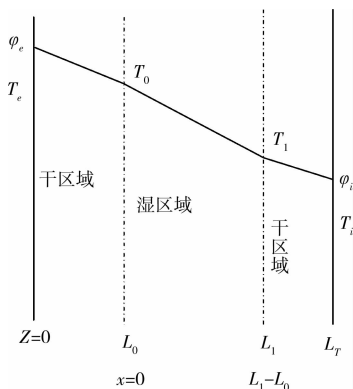


图 1 热湿环境中的墙体

根据文献^[15]的研究,当冷凝发生时,材料内的湿扩散将会经历 2 个阶段,如图 2 所示。当冷凝刚发

生时会存在一个较短的瞬态阶段,温度跟水蒸气浓度都随着时间的变化而变化。过了这个瞬态阶段以后,温度跟水蒸气浓度不再随时间变化,水蒸气在湿区域内持续冷凝,材料含湿量跟时间呈线性关系,如图 2 所示。这个阶段材料内没有冷凝水迁移,该稳态阶段称为第 1 次空间稳态阶段。随着冷凝水的不断增加,当材料的含湿率达到了临界含湿率后,冷凝水在表面张力的驱动下从湿区域向干区域扩散,湿区域经过一段时间以后,又重新达到一个新的稳态阶段,这个稳态阶段称为第 2 次空间稳态阶段。对于实际墙体而言,墙体材料的含湿率一般都低于临界含湿率,没有冷凝水的迁移,因此只探讨低于材料临界含湿率的情况下的墙体内部冷凝情况。

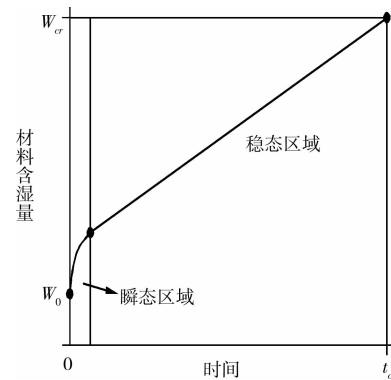


图 2 含湿量的变化

在湿区域内,热湿传递的控制方程为:

$$K \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \gamma h_{fg} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$$D_v \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \gamma = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2)$$

$$\gamma = \rho_c \epsilon \frac{\partial W}{\partial t} \quad (3)$$

其中, K 是材料的导热系数, $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$; T 为温度, K ; γ 为冷凝率, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; h_{fg} 为冷凝潜热, J/kg ; ρ 和 c 分别是材料的密度跟比热; C 为水蒸气浓度, kg/m^3 ; D_v 为水蒸气传递系数, m^2/s ; ϵ 为材料的孔隙率, m^3/m^3 ; ρ_c 为冷凝水密度; W 为液态水含量, m^3/m^3 ; t 是时间, s 。

如图 2 所示,在墙体冷凝的初始阶段经历了一个瞬态过程,这个过程时间比较短,材料内积累的冷凝水量很少,对墙体内部的冷凝分析影响不大,因此,忽略了这个阶段的分析,只讨论稳态情况下的冷凝情况。在稳态条件下,方程(1)、(2)的右端等于 0,因此由方程(1)、(2)可得:

$$K \frac{d^2 T}{dx^2} + h_{fg} D_v \frac{d^2 C_{sat}}{dx^2} = 0 \quad (4)$$

因为在整个湿区域都发生冷凝,因此,在该区域水蒸气浓度是温度的单一函数,方程(4)是关于温度

的二阶微分方程。将水蒸气看作是理想气体,则有:

$$C_{\text{sat}}(T) = \frac{p_{\text{sat}}(T)}{R_v T} \quad (5)$$

其中, p_{sat} 是饱和水蒸气压力, R_v 是水蒸气气态常数 ($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$)。

由 Clausius-Clapeyron 方程得:

$$\frac{dp_{\text{sat}}}{dT} = \frac{h_{\text{fg}} p_{\text{sat}}}{R_v T^2} \quad (6)$$

根据方程(5)、(6),方程(4)可改写为:

$$\frac{d}{dx} \left[k(T) \frac{dT}{dx} \right] = 0 \quad (7)$$

$$\text{其中: } k(T) = K + \frac{D_v h_{\text{fg}}^2}{R_v^2 T} \cdot \frac{p_{\text{sat}}(T)}{T^2} \cdot \left(1 - \frac{R_v}{h_{\text{fg}}} T \right) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{边界条件为: } T &= T_0 & x &= 0 \\ T &= T_1 & x &= L_1 - L_0 \end{aligned}$$

为了获得方程(7)的解析解,令:

$$k(T) \approx k(T_0) A^{\frac{1}{(T_0 - T_1)}} \quad (9)$$

$$\text{其中: } A = \frac{k(T_1)}{k(T_0)}$$

将式(9)代入方程(7)中得:

$$T(x) = T_0 - \frac{T_0 - T_1}{\ln A} \ln \left(\frac{A-1}{L_1 - L_0} x + 1 \right) \quad (10)$$

再联立方程(1)、(10)可求得墙体内部的冷凝率为:

$$\gamma(x) = \frac{K(T_0 - T_1)(A-1)^2}{h_{\text{fg}}(L_1 - L_0)^2 \ln A \left[(A-1) \frac{x}{L_1 - L_0} + 1 \right]^2} \quad (11)$$

由上式可知,墙体内部的冷凝率跟湿区域两侧的温差成正比,两侧的温差越大则冷凝率越大。在 $x = L_1 - L_0$ 处的冷凝率最大,其值为:

$$\gamma_{\text{max}} = - \frac{K(T_0 - T_1)(A-1)^2}{h_{\text{fg}}(L_1 - L_0)^2 A^2 \ln A}$$

由方程(3)可得湿区域内的含湿量分布为:

$$W(x, t) = \frac{K(T_0 - T_1)(A-1)^2 t}{\rho_c \epsilon h_{\text{fg}}(L_1 - L_0)^2 \ln A \left[(A-1) \frac{x}{L_1 - L_0} + 1 \right]^2} + W_0(x) \quad (12)$$

其中 $W_0(x)$ 为湿区域内的初始含湿量分布。

由式(12)可求得材料达到临界含湿量所需的时间 t_{cr} 为:

$$t_{\text{cr}} = \frac{[W_0(L_1 - L_0) - W_{\text{cr}}] \rho_c \epsilon h_{\text{fg}} A^2 (L_1 - L_0)^2 \ln A}{K(T_0 - T_1)(A-1)^2} W_{\text{cr}}$$

为材料的临界含湿量。

2 湿区域的确定

根据文献[15]的研究,在干区域内,水蒸汽浓度和温度是线性变化的。因此,可得到如下4个方程:

$$\frac{T_e - T_0}{L_0} = - \frac{dT}{dz}, z = L_0 \quad (13)$$

$$\frac{C_e - C_0}{L_0} = - \frac{dC}{dz}, z = L_0 \quad (14)$$

$$\frac{T_1 - T_i}{L_T - L_1} = - \frac{dT}{dz}, z = L_1 \quad (15)$$

$$\frac{C_1 - C_i}{L_T - L_1} = - \frac{dC}{dz}, z = L_1 \quad (16)$$

$$\text{令 } \eta = \frac{T - \left[\frac{(T_e + T_i)}{2} \right]}{T_e - T_i},$$

$$u_e = \eta_e - \eta_0, u_i = \eta_i - \eta_1$$

$$\bar{\omega}_e = \frac{C_e}{C_{\text{sat}}(T_e)}, \bar{\omega}_i = \frac{C_i}{C_{\text{sat}}(T_i)}$$

联立 Clausius-Clapeyron 方程,方程(13)、(14)、(15)、(16)化为:

$$1 - \varphi_e \exp(u_e) + u_e = 0 \quad (17)$$

$$1 - \varphi_i \exp(u_i) + u_i = 0 \quad (18)$$

由方程(17)、(18)可分别求出 T_0, T_1 。

根据文献[8]的研究,在湿区域内有:

$$\frac{T - T_r}{T_0 - T_1} =$$

$$\frac{1}{2} \left[1 - \frac{x}{L_1 - L_0} - \frac{\exp\left(m \frac{x}{L_1 - L_0}\right) - 1}{\exp(m) - 1} \right] \quad (19)$$

其中:

$$m = \frac{2h_{\text{fg}}^3 D_v C_r (T_0 - T_1)}{R_v^2 K T_r^4 + h_{\text{fg}}^2 R_v T_r^2 C_r D_v}, C_r = \exp\left(-\frac{h_{\text{fg}}}{R_v} \cdot \frac{1}{T_r}\right), T_r = \frac{T_0 + T_1}{2}.$$

$$\text{根据式(19)和边界条件即可求出 } L_0, L_1:$$

根据式(19)和边界条件即可求出 L_0, L_1 :

$$L_0 = \frac{\beta L_T}{\beta + \left(\frac{0.5 + \eta_1}{0.5 - \eta_0} \right) \alpha - \left(\frac{\eta_0 - \eta_1}{0.5 - \eta_0} \right) \alpha \beta}$$

$$L_1 = \frac{\beta \left(1 - \frac{\eta_0 - \eta_1}{0.5 - \eta_0} \alpha \right) L_T}{\beta + \left(\frac{0.5 + \eta_1}{0.5 - \eta_0} \right) \alpha - \left(\frac{\eta_0 - \eta_1}{0.5 - \eta_0} \right) \alpha \beta}$$

$$\text{其中: } \alpha = - \frac{1}{2} \frac{m}{\exp m - 1}, \beta = - \frac{1}{2} \left(\frac{m \exp m}{\exp m - 1} + 1 \right)$$

3 实例分析

以石膏板-玻璃纤维-砖墙为例,分析了热湿气候地区墙体内部的冷凝情况。墙厚 0.14 m, 其中石膏板和砖都为 0.02 m, 材料的物性参数(如表 1 所示)来源于文献[20, 21], 室内侧表面温湿度为 18℃ 和

50%，室外侧表面温湿度为 34℃和 95%。根据上文的计算方法，求得 $T_0 = 305.2 \text{ K}$, $T_1 = 301.9 \text{ K}$, $L_0 = 0.022 \text{ m}$, $L_1 = 0.052 \text{ m}$ ，即冷凝发生的区域在靠近室外侧的玻璃纤维内，冷凝区域的宽度为 0.03 m。

冷凝率为： $\gamma(x) = \frac{0.00568}{(3-x)^2} \text{ kg}/(\text{m}^3 \text{ s})$ ，最大冷凝率为 0.00064 $\text{kg}/(\text{m}^3 \text{ s})$ 。

假设材料的初始含湿率为 0.00016 m^3/m^3 ，则湿区域内的含湿量分布函数为：

$$W(x,t) = \frac{5.7 \times 10^{-6} t}{(3-x)^2} + 0.00016$$

。最大含湿量处达到临界含湿量所需的时间为 408.3 h。

表 1 墙体各层材料的物性参数

	$K /$ ($\text{W} \cdot \text{mK}^{-1}$)	$D_v /$ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	$\epsilon /$ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	$W_{cr} /$ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)
石膏板	0.262	5.26×10^{-6}	0.7	0.095
玻璃纤维	0.043	3.3×10^{-5}	0.996	0.95
砖	0.44	5.59×10^{-7}	0.25	0.034

4 结 论

在多孔介质传热传质学的基础上，根据 Motakef 和 EI-Masri 的热湿同时传递理论，将水蒸气冷凝看成是湿源、热源、蒸汽汇，建立了冷凝区域内的热湿同时传递方程。通过分析解得出了墙体内部的冷凝率分布函数、液态含湿量分布函数以及达到临界含湿量所需的时间。

参考文献：

- [1] 陈友明, 陈在康. 多孔体围护结构热湿同时传导基本方程及其线性化[J]. 应用基础与工程科学学报, 1997, 5(2): 161-171.
CHEN YOU-MING, CHEN ZAI-KANG. The simultaneous heat and moisture transfer equations of porous building envelope and their linearization[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 1997, 5(2): 161-171.
- [2] KERESTECIOGLUE A, SWAMA M, KAMEL A. Theoretical and computational investigation of simultaneous heat and moisture transfer in buildings: effective penetration depth theory [J]. ASHRAE Transactions, 1990, 96(1): 447-453.
- [3] CUNNINGHAM M J. Effective penetration depth and effective resistance in moisture transfer [J]. Building and Environment, 1992, 27(3): 379-386.
- [4] KERESTECIOGLUE A, GU L. Theoretical and computational investigation of simultaneous heat and moisture transfer in buildings: evaporation and condensation theory[J]. ASHRAE Transactions, 1990,

96(1): 455-464.

- [5] QIN M H, BELARBI R, AÏT-MOKHTAR A, NILSSON L O. Coupled heat and moisture transfer in multi-layer building materials [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23: 967-975.
- [6] QIN M H, BELARBI R, AIT-MOKHTAR A, et al. Simultaneous heat and moisture transport in porous building materials: evaluation of nonisothermal moisture transport properties [J]. Journal of Materials Science, 2008, 43(10): 3655-3663.
- [7] BELARBI R, QIN M H, AIT-MOKHTAR A, et al. Experimental and theoretical investigation of non-isothermal transfer in hygroscopic building materials [J]. Building and Environment, 2008, 43: 2154-2162.
- [8] 闫增峰. 生土建筑室内热湿环境研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.
- [9] QIN M H, BELARBI R. Development of an analytical method for simultaneous heat and moisture transfer in building materials utilizing transfer function method [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(5): 492-497.
- [10] KAROGLOU M, MOROPOULOU A, KROKIDA M K, et al. A powerful simulator for moisture transfer in buildings [J]. Building and Environment, 2007, 42(2): 902-912.
- [11] 孔凡红, 郑茂余, 韩宗伟, 等. 新建建筑围护结构热质传递对建筑能耗的影响 [J]. 暖通空调, 2008, 38(7): 6-9.
KONG FAN-HONG, ZHENG MAO-YU, HAN ZONG-WEI, et al. Effect of heat and moisture transfer of new built building envelop on building energy consumption [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2008, 38(7): 6-9.
- [12] 李魁山, 张旭, 韩星, 等. 建筑材料水蒸气渗透系数实验研究 [J]. 建筑材料学报, 2009, 12(3): 288-291.
LI KUI-SHAN, ZHANG XU, HAN XING, et al. Experimental research of water vapor permeability through building materials [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(3): 288-291.
- [13] 李魁山, 张旭, 高军. 周期性边界条件下多层墙体热湿耦合迁移 [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 multilayer wall under periodic boundary conditions [J]. Journal of Tongji University: natural science, 2009, 37(6): 814-818.
- [14] OGNIWICZ Y, TIEN C E. Analysis of condensation in porous insulation [J]. International Heat and Mass Transfer 1981; 24(3): 421-429.

- [5] POON C S, QIAO X C, CHEESEMAN C R. Feasibility of using reject fly ash in cement-based stabilization/solidification processes [J]. *Environmental Engineering Science*, 2006, 23(1): 14-23.
- [6] QIAO X C, POON C S, CHEESEMAN C R. Use of flue gas desulphurisation (FGD) waste and rejected fly ash in waste stabilization/solidification systems [J]. *Waste Management*, 2006, 26(2): 141-149.
- [7] ARIÖZ O, TOKYAY M, ARIÖZ E, et al. Properties of fly ash-FGD gypsum-lime based products [J]. *Journal of the Australasian Ceramic Society*, 2006, 42(1): 13-21.
- [8] GUO XIAO-LU, SHI HUI-SHENG. Thermal treatment and utilization of flue gas desulphurization gypsum as an admixture in cement and concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(7): 1471-1476.
- [9] 原永涛, 王方群, 齐立强, 等. 化学添加剂对“粉煤灰-脱硫石膏”胶结材抗压强度的影响 [J]. *材料导报*, 2007, 25(18): 47-51.
YUAN YONG-TAO, WANG FANG-QUN, QI LI-QIANG, et al. Effects of chemical additives on compressive strength of fly ash-desulphogypsum [J]. *Materials Review*, 2007, 25(18): 47-51.
- [10] 吴敏, 施惠生. 钢渣及脱硫石膏-粉煤灰复合胶凝材料的改性研究 [J]. *水泥*, 2008, 7: 1-6.
WU MIN, SHI HUI-SHENG. Modification of composite materials made of steel slag, flue gas desulphurization gypsum and fly ash [J]. *Cement*, 2008, 7: 1-6.
- [11] 高英力, 陈瑜, 王迪, 等. 脱硫石膏-粉煤灰活性矿物掺合料设计及水化特性 [J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2010, 42(2): 1-7.
GAO YING-LI, CHEN YU, WANG DI, et al. Design and hydration characteristics of desulphurization gypsum-fly ash active admixture [J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2010, 42(2): 1-7.
- [12] P KUMAR MEHTA, PAULO J M MONTEIRO. 混凝土微观结构、性能和材料 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [13] BERNDT M L. Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(7): 2606-2613.
- [14] 高英力, 马保国, 王信刚, 等. 钢筋保护层混凝土细观界面过渡区优化及耐久性 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2009, 31(4): 19-24.
GAO YING-LI, MA BAO-GUO, WANG XIN-GANG, et al. Durability and meso interfacial transition zone optimization of reinforced concrete cover [J]. *Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering*, 2009, 31(4): 19-24.
- [15] GAO YING-LI, MA BAO-GUO, ZHOU SHI-QIONG. Production and Engineering Application of C60 high-performance pump pebble concrete containing ultra-fine fly ash [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2008, 35(8): 757-763.

(编辑 胡 玲)

(上接第 124 页)

- [15] MOTAKEF S, EI-MASRI M A. Simultaneous heat and mass transfer with phase change in a porous slab [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1986; 29(10): 1503-1512.
- [16] SHAPIRO A P, MOTAKEF S. Unsteady heat and mass transfer with phase change in a porous slab: analytical solutions and experimental results [J]. *International Journal Heat and Mass Transfer*, 1990; 33(1): 163-173.
- [17] WYRWAL J, MARYONWICZ A. Vapour condensation and moisture accumulation in porous building wall [J]. *Building and Environment*, 2002; 37(3): 313-318.
- [18] 陈永成, 陈启高. 建筑墙体潮湿区湿度计算方法研究 [J]. *重庆建筑大学学报*, 1997, 19(4): 30-38.
CHEN YONG-CHENG, CHEN QI-GAO. Analysis of moisture distribution in wet zones of building walls [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 1997, 19(4): 30-38.
- [19] 朱传晟. 建筑围护结构热桥部位结露原因分析研究 [J]. *建筑节能*, 2008, 36(12): 6-8.
ZHU CHUAN-SHENG. Study on causes of moisture condensation in thermal bridge position of building envelope structure [J]. *Construction Conserves Energy*, 2008, 36(12): 6-8.
- [20] LIESEN R J, PEDERSEN C O. Modeling the energy effects of combined heat and mass transfer in building elements: part 2—Application to a building energy analysis program and examples [J]. *ASHRAE Transactions*, 1999, 105(2): 954-961.
- [21] PEDERSEN C R. Combined heat and moisture transfer in building constructions [D]. Ph. D. Thesis, Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark, Lyngby, 1990.

(编辑 胡 玲)