

湿迁移对墙体传热的影响分析

王莹莹^a, 刘艳峰^a, 刘加平^b

(西安建筑科技大学 a. 环境与市政工程学院; b. 建筑学院, 西安 710055)

摘要:考虑温湿度对墙体材料热湿物性参数的影响,建立以相对湿度和温度为驱动势的墙体热湿耦合传递模型。在变温湿度边界条件下对墙体非稳态热湿耦合传递过程进行分析,计算得到墙体表面温湿度及热流密度,与不考虑传湿情况进行对比分析。结果表明:不考虑吸放湿时墙体内表面温度比考虑吸放湿时变化幅度大,且前者内表面平均温度与后者相差约 0.9℃;因墙体内表面吸放湿作用引起的相变潜热约占总壁体传热量的 27.5%,在负荷计算中不可忽略。

关键词:热湿耦合传递;变物性参数;相变潜热;温度;热流

中图分类号:TU111.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2012)06-0109-06

Analysis on the Effect of Moisture Migration through Walls on Heat Transfer

WANG Yingying^a, LIU Yanfeng^a, LIU Jiaping^b

(a. School of Environment and Municipal Engineering;

b. School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: A dynamic mathematical model for simulating the coupled heat and moisture transfer through walls was proposed with variable material properties. Relative humidity and temperature were chosen as the driving potentials. The temperature and relative humidity and heat flux of wall surface were calculated under varying boundary conditions and compared with those without taking moisture transfer into account. The results show that without and with absorption and desorption processes, the wall interior surface temperature amplitude of the former case is larger than that of the latter, and the average difference temperature of two cases is 0.9℃. The phase change latent heat caused by absorption and desorption of wall surface takes up 27.5% of the total heat transfer quantity, which can't be neglected.

Key words: coupled heat and moisture transfer; inconstant physical parameters; phase change latent heat; temperature; heat flux

准确计算围护结构传热量是建筑能耗分析、暖通系统设计计算的基础。在以往围护结构传热计算中,往往忽略了壁体的传湿作用,而事实上壁体传湿和传热过程存在相互作用关系,且前者对后者有很大影响^[1-5]。目前相关负荷分析计算软件和设计规范都主要建立在热传递的基础上^[6-8],缺乏准确估计

传湿对室内空气温湿度及负荷影响的方法,潜热负荷通常用显热负荷乘以附加百分数的形式表示,计算准确性难以保证,在湿热地区,此不准确性尤明显。

由于墙体湿传导阻力大,室外湿度边界条件波动性难以在墙体内表面得以体现。从有效渗透厚度

收稿日期:2012-04-18

基金项目:国家自然科学基金(51178375);国家自然科学基金创新群体项目(50921005)

作者简介:王莹莹(1986-),女,博士生,主要从事建筑热湿过程分析研究,(E-mail)yingying_2016@163.com。

刘艳峰(通信作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)liuyanfeng@xauat.edu.cn。

理论^[9]可知,室内湿度变化而引起的墙体湿传导主要集中在墙体内部材料的吸放湿过程,且吸放湿作用发生在墙体内部表面的薄层内,而吸放湿过程可能伴随的相变换热,会影响墙体表面温度,其影响程度如何?同时该过程对墙体内部表面的传导热流产生一定的影响,其影响是否可以忽略?

笔者针对上述围护结构热湿耦合传递过程中存在的问题,建立了以相对湿度和温度为驱动势的墙体热湿耦合传递模型,并利用实验数据验证了模型的准确性,进而在变温湿度边界条件下,利用所建立模型对墙体热湿耦合传递过程进行了计算,得到了墙体内部表面温度、相对湿度、传热量及传湿量变化特性,与不考虑墙体表面吸放湿作用下进行对比分析,研究结论将对高湿度地区墙体热工设计计算提供一定的指导。

1 热湿耦合迁移数学模型

因2种不同材料的界面处材料含湿量不连续,若以材料含湿量作为湿迁移的驱动势,需要在每层边界处重新换算为其他驱动势,不便于多层复合墙面的湿度计算;而空气相对湿度在两材料接触界面上是连续的,因此选择相对湿度 φ 作为湿组分迁移的驱动势。

1.1 传湿控制方程

墙体热湿耦合迁移过程按一维处理。仅考虑纯蒸汽的传递模型是偏离实际情况的,因此,建立了全面考虑水蒸气和液态水同时传递的热湿耦合模型,其控制方程如式(1)。

$$\xi \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \rho \frac{\partial u}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} (D_T \frac{\partial T}{\partial x}) \quad (1)$$

式中:

$$D_{\varphi} = \delta_v P_{v, \text{sat}} + D_1 \frac{\rho_l R}{M_1} \frac{T_k}{\varphi} \quad (2)$$

$$D_T = \delta_v \varphi \frac{\partial P_{v, \text{sat}}}{\partial T} + D_1 \frac{\rho_l R}{M_1} \ln(\varphi) \quad (3)$$

其中 ξ 为多孔建筑材料等温吸湿平衡曲线斜率:

$$\xi = \frac{\partial w}{\partial \varphi} \quad (4)$$

液态水传导系数 D_1 ^[10]按下式计算:

$$D_1 = \frac{D_v \varphi \rho_{v, \text{sat}}}{R_v T \rho_l} \quad (5)$$

水蒸气扩散系数 D_v :

$$D_v = \delta_v R_v T_k \quad (6)$$

将方程各系数转换成相对湿度和温度的函数,有:

$$D_{\varphi} = \delta_v P_{v, \text{sat}} (1 + \frac{(T+273)}{T}) \quad (7)$$

$$D_T = \delta_v \varphi \frac{\partial P_{v, \text{sat}}}{\partial T} + \delta_v \varphi P_{v, \text{sat}} \frac{\ln(\varphi)}{T} \quad (8)$$

1.2 传热控制方程

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_0 \frac{\partial T}{\partial x}) - L(T) \frac{\partial J_v}{\partial x} \quad (9)$$

$$\text{其中 } J_v = -(\delta_v (\varphi \frac{\partial P_{v, \text{sat}}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} + P_{v, \text{sat}} \frac{\partial \varphi}{\partial x})) \quad (10)$$

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_0 \frac{\partial T}{\partial x}) + L(T) \frac{\partial}{\partial x} (\delta_v (\varphi \frac{\partial P_{v, \text{sat}}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} + P_{v, \text{sat}} \frac{\partial \varphi}{\partial x})) \quad (11)$$

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x}) + L(T) \frac{\partial}{\partial x} (\delta_v P_{v, \text{sat}} \frac{\partial \varphi}{\partial x}) \quad (12)$$

$$\text{其中 } \lambda_{\text{eff}} = \lambda_0 + L(T) \delta_v \varphi \frac{\partial P_{v, \text{sat}}}{\partial T} \quad (13)$$

λ_0 为材料的导热系数,与材料的含湿量有关。

$\lambda_0 = \lambda + au$, 其中 λ 为干燥状态时材料的导热系数, a 由实验测试所得系数。

1.3 定解条件

初始条件:

$$\varphi(x, t) |_{t=0} = \varphi(x, 0) \quad (14)$$

$$T(x, t) |_{t=0} = T(x, 0) \quad (15)$$

墙体内部表面($x=0$)边界条件:

$$(-D_{\omega} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial x} - D_T \frac{\partial T}{\partial x}) \Big|_{x=0} = h_{m0} (\rho_{v, x=0} - \rho_{v, 0}) \quad (16)$$

$$-(\lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x} + L(T) \delta_v P_{v, \text{sat}} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial x}) \Big|_{x=0} = h_{e0} (T_{x=0} - T_0) + L(T) h_{m0} (\rho_{v, x=0} - \rho_{v, 0}) + \sum_{j=1}^n h_{r, j} (T_n - T_{x=0}) \quad (17)$$

墙体外表面($x=l$)边界条件:

$$(-D_{\omega} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial x} - D_T \frac{\partial T}{\partial x}) \Big|_{x=l} = h_{me} (\rho_{v, e} - \rho_{v, x=l}) \quad (18)$$

$$-(\lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x} + L(T) \delta_v P_{v, \text{sat}} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial x}) \Big|_{x=l} = h_{ce} (T_e - T_{x=l}) + L(T) h_{me} (\rho_{v, e} - \rho_{v, x=l}) + \alpha q_{\text{rad}} \quad (19)$$

水蒸气密度 ρ_v 利用相对湿度 φ 和温度 T 可表示^[11]为:

$$\rho_v = \frac{P_v}{R_v T_k} = \frac{\varphi P_{v, \text{sat}}}{R_v (T+273)}, \text{kg/m}^3 \quad (20)$$

其中,

$$L(T) = (2500 - 2.4T) \times 10^3 \text{ [12]}, \text{J/kg} \quad (21)$$

式中: T_k 为热力学温度,K; T 为摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$; φ 为相对湿度,%; u 为材料含湿量,kg/kg; w 为材料体积分含湿量,kg/m³; J_v 为水蒸气迁移量,kg/m²·s; ρ

为材料密度, kg/m^3 ; C 为材料定压比热, $\text{J/kg} \cdot \text{K}$; λ_0 为材料导热系数, $\text{W/m} \cdot \text{K}$; λ_{eff} 为材料的有效导热系数, $\text{W/m} \cdot \text{K}$; t 为时间, s ; x 为坐标, m ; $P_{v,\text{sat}}$ 为水蒸气饱和压力, Pa ; $L(T)$ 为蒸发潜热, J/kg ; R 为通用气体常数, $\text{J/kg} \cdot \text{K}$; R_v 为水蒸气气体常数, $\text{J/kg} \cdot \text{K}$; ρ_l 为水的密度, kg/m^3 ; $\rho_{v,\text{sat}}$ 为相应温度下饱和水蒸气密度, kg/m^3 ; M_l 为水的摩尔质量, g/mol ; h_{c0} 、 h_{ce} 分别为围护结构内、外表面的对流换热系数, $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$; h_{m0} 、 h_{me} 分别为内、外表面的质交换系数, m/s ; $T_{x=0}$ 、 $T_{x=l}$ 分别为墙体内、外表面温度, $^{\circ}\text{C}$; T_0 、 T_e 分别为室内外空气温度, $^{\circ}\text{C}$; $\rho_{v,x=0}$ 、 $\rho_{v,x=l}$ 分别为墙体内、外表面水蒸气密度, kg/m^3 ; $\rho_{v,0}$ 、 $\rho_{v,e}$ 分别为室内、外水蒸气密度, kg/m^3 ; α 为太阳辐射吸收系数; q_{rad} 为太阳辐射强度, W/m^2 ; $h_{r,j}$ 为室内各表面间的辐射换热系数, $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$; T_n 为室内各表面的温度, $^{\circ}\text{C}$; δ_v 为水蒸气渗透系数, $\text{kg/Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}$; j 为室内表面个数; B 为总压力, 取 $101\,325\,\text{Pa}$ 。

2 模型验证

为验证本文提出数学模型的准确性, 将模拟计算结果与实验测试值^[13-14] 进行对比分析, 结果如图 1(a)和(b)所示。云杉板的热湿物性参数、实验装置

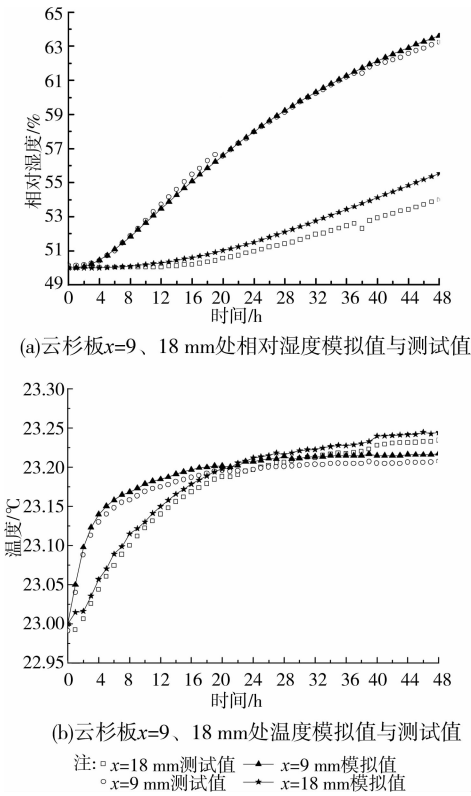


图 1 模拟值与测试值对比图

及测点分布见文献[13], 初始温度和相对湿度分别为 23°C 和 50% , 外部温度和相对湿度分别为 23.1°C 和 85% 。由图可知, 实验测试值与模拟计算结果吻合性良好。

3 实例计算

3.1 材料热湿物性参数

计算墙体为 $240\,\text{mm}$ 多孔粘土砖+ $15\,\text{mm}$ 石灰砂浆, 材料物性参数如表 1。很多学者在研究墙体热湿耦合传递时, 假设墙体材料热湿物性参数为恒值^[15-16]。事实上材料热湿物性参数受温湿度变化影响^[17-19], 为提高计算准确性, 本文考虑了材料热湿物

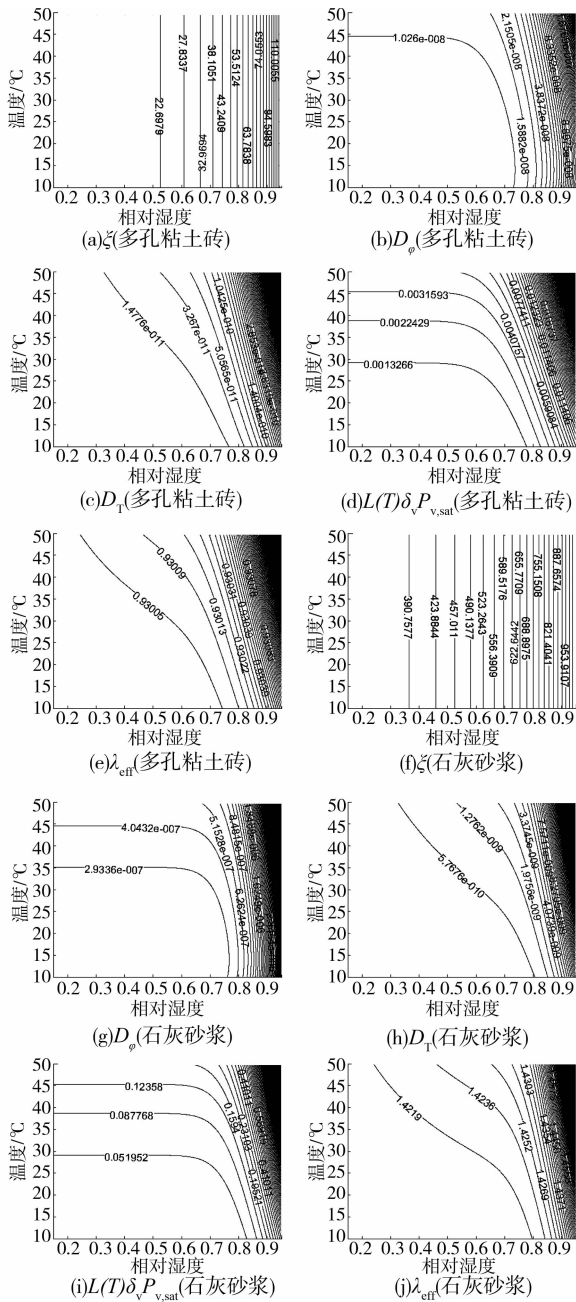


图 2 热湿耦合传递方程系数

表 1 材料基本物性参数

	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	比热/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
多孔粘土砖	1 800	0.93	1 050
石灰砂浆	2 500	1.42	837

性参数受温湿度变化的影响。其中,多孔粘土砖与石灰砂浆的水蒸气渗透系数和等温吸湿平衡曲线源于文献[17-18],进而根据本文前述数学描述计算得到热湿控制方程系数 ξ 、 D_φ 、 D_T 、 $L(T)\delta_v P_{v,\text{sat}}$ 和 λ_{eff} 随温湿度变化特征,如图 2 所示,温湿度越高,控制方程系数 D_φ 、 D_T 变化越明显,对墙体热湿传递影响越大。在热湿地区,上述作用更加明显。

3.2 室内外温湿度

室内外空气温度及相对湿度变化规律分别如图 3(a)、(b)所示。从图中可知:室内外空气温湿度呈正余弦变化,室内空气温度波幅较小,室外空气温度波幅较大。室内空气相对湿度始终高于室外,且波幅小于室外。

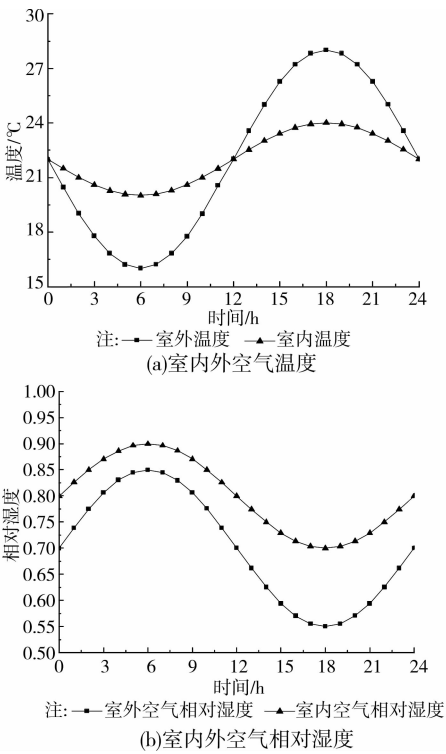


图 3 室内外空气温度及湿度变化规律

3.3 计算结果及分析

计算中仅考虑湿度对传热的影响,因此不考虑太阳辐射及室内各表面之间的辐射换热,即

$$\sum_{j=1}^n h_{r,j} (T_n - T_{x=0}) = 0, \alpha q_{\text{rad}} = 0.$$

图 4(a)、(b)分别为墙体材料水蒸气渗透系数

为常量和变量时墙体内部表面的温湿度变化情况。模拟计算时假设墙体初始相对湿度为 60%,初始温度为 22℃。粘土砖与水泥砂浆的水蒸气渗透系数与相对湿度之间的关系如式(22)、(23)所示[15]。

粘土砖:

$$\delta_v = 1.35 \times 10^{-13} + 5.46 \times 10^{-12} \times \varphi^{11.46} \quad (22)$$

水泥砂浆:

$$\delta_v = 5.31 \times 10^{-12} + 2.8 \times 10^{-10} \times \varphi^{16.76} \quad (23)$$

当粘土砖与水泥砂浆的水蒸气渗透系数取常数时,按文献[15]中的规定取值。相对湿度为 0~60%时,粘土砖与水泥砂浆的水蒸气渗透系数 a_1 分别为 1.37×10^{-13} 、 $5.31 \times 10^{-12} \text{ kg/Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}$;相对湿度为 60%~100%时,粘土砖与水泥砂浆的水蒸气渗透系数 a_2 分别为 1.24×10^{-10} 、 $1.28 \times 10^{-12} \text{ kg/Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}$ 。

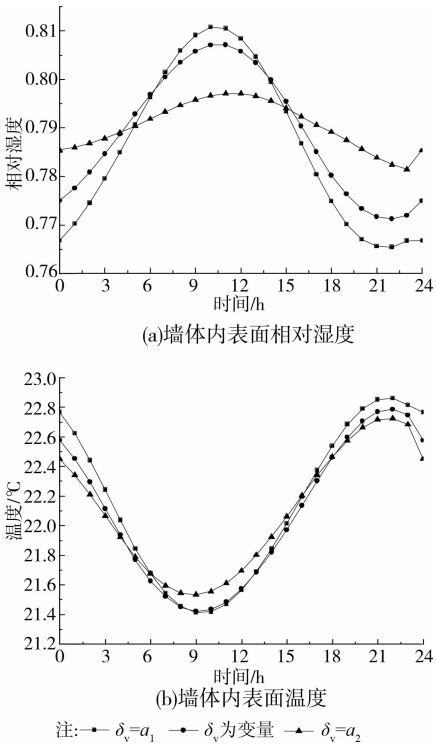


图 4 墙体材料水蒸气渗透系数为常量和变量时墙体内部表面的温湿度变化情况

如图 4(a)、(b)所示,水蒸气渗透系数是否为常量对墙体内部表面相对湿度影响较大,对温度影响则较小。由于墙体初始相对湿度为 60%,所以水蒸气渗透系数取 a_1 时比取 a_2 更贴近于实际情况,其温湿度情况与水蒸气渗透系数取变量时的结果吻合良好。水蒸气渗透系数取 a_2 时,表明材料吸放湿能力增加,墙体表面的相对湿度变化幅度较小,使墙体表面的湿度稳定性较好,因此准确计算墙体传湿时,必须要考虑内表面材料的热湿物性随外部温湿度的变化。

图5为墙体初始相对湿度分别取20%、60%与80%时,对应的墙体内表面相对湿度变化规律。由图可知,3种工况下的内表面湿度变化规律基本一致,与室内空气相对湿度进行对比,发现墙体表面相对湿度最大值的出现时间要滞后于室内空气相对湿度,说明墙体内表面从吸湿过程达到稳定状态存在滞后现象。

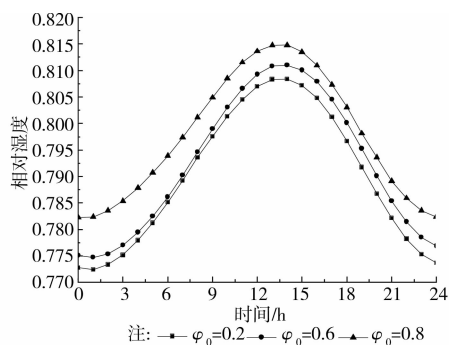


图5 3种工况下墙体内表面相对湿度

图6为墙体初始相对湿度分别取20%、60%、80%及不考虑传湿情况下,对应的墙体内表面温度变化规律。不考虑传湿情况下的墙体内表面温度变化幅度大于考虑传湿情况,说明墙体内表面的吸放湿有利于保持内表面温度稳定性,使得平均辐射温度稳定性较好,因此对人体舒适性的冲击性较小。0:00~9:00之间考虑传湿情况下的内表面平均温度比不考虑传湿情况高约0.9℃,12:00~21:00之间考虑传湿情况下的内表面平均温度比不考虑传湿情况低约0.8℃。

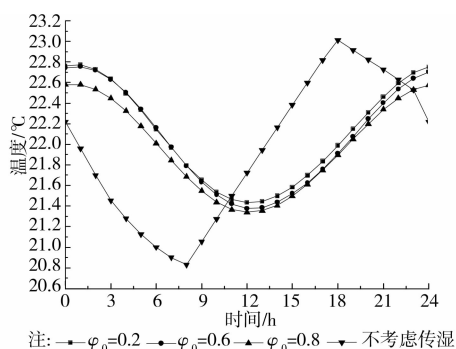


图6 3种工况下墙体内表面温度

图7为墙体初始相对湿度分别取20%、60%与80%时,对应的墙体内表面湿通量变化规律。湿组分由墙体内表面向室内传递时,其数值为正,反之为负。由图可知,湿通量与室内空气相对湿度变化趋势相反,当室内空气相对湿度升高时,墙体吸湿,反之放湿。初始相对湿度为20%和60%时,全天墙体表现为吸湿,平均吸湿量分别为 1.12×10^{-6} 、 $5.31 \times$

$10^{-6} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$;初始相对湿度为80%时,全天墙体表现为放湿,平均放湿量为 $1 \times 10^{-7} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 。

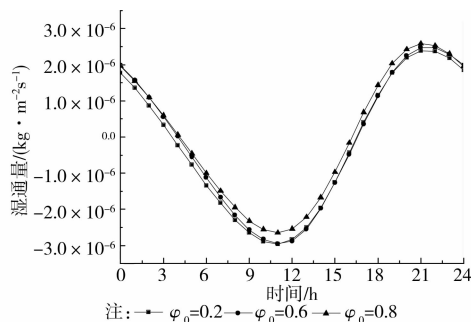


图7 3种工况下墙体内表面湿通量

图8为墙体初始相对湿度分别取20%、60%与80%时,对应的墙体内表面热通量变化规律。墙体内表面吸放湿过程中伴随着水蒸气的相变潜热。由图可知,初始含湿量越高,墙体内表面湿通量越少,水蒸气相变潜热量越小,反之越高。考虑墙体吸放湿作用下的热通量数值比不考虑吸放湿时的大,主要是因为相变潜热量的存在,因墙体内表面吸放湿作用引起的相变潜热约占总壁体传热量的27.5%。

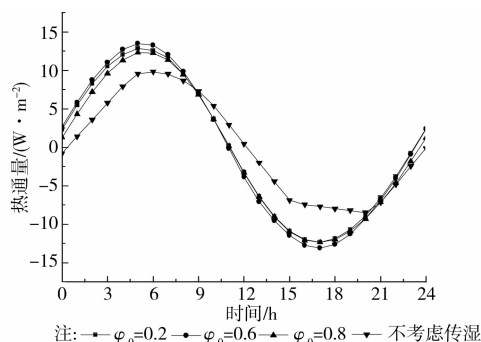


图8 3种工况下墙体内表面热通量

4 结论

考虑了温湿度对墙体材料热湿物性参数的影响,建立了以相对湿度和温度为驱动势的墙体热湿耦合传递模型。在变边界条件下对墙体表面的温湿度及热流密度进行计算,与不考虑传湿作用时进行了对比分析,得出以下结论:

- 1) 墙体材料热湿物性受温湿度影响,尤其墙体内表面材料的吸放湿作用使其物性变化尤为明显,因此准确计算墙体传湿时,必须要考虑内表面材料的热湿物性随外部温湿度的变化。
- 2) 不考虑吸放湿时墙体内表面温度比考虑吸放湿时内表面温度变化幅度大,且前者内表面平均温度与后者内表面平均温度相差0.9℃左右。
- 3) 因墙体内表面吸放湿作用引起的相变潜热约

占总墙体传热量的 27.5%,在负荷计算中不可忽略。

4)准确计算空调负荷必须考虑墙体的传湿,尤其是内表面吸放湿引起的相变潜热。

参考文献:

- [1] Qin M H, Belarbi R, Ait-mokhtar A, et al. Simulation of coupled heat and moisture transfer in air-conditioned buildings [J]. *Automation in Construction*, 2009, 18: 624-631.
- [2] Tariku F, Kumaran K, Fazio P. Transient model for coupled heat, air and moisture transfer through multilayered porous media [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53: 3035-3044.
- [3] Djongyang N, Tchinda R, Njomo D. A study of coupled heat and mass transfer across a porous building component in intertropical conditions [J]. *Energy and Buildings*, 2009, 41: 461-469.
- [4] Qin M H, Belarbi R, Ait-mokhtar A, et al. Coupled heat and moisture transfer in multi-layer building materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23: 967-975.
- [5] 孔凡红, 郑茂余, 韩宗伟, 等. 新建建筑围护结构热质传递对室内温湿度环境的影响 [J]. *建筑科学*, 2008, 24 (8): 94-97.
KONG Fanhong, ZHENG Maoyu, HAN Zongwei, et al. Influence of envelop heat and moisture transfer of new building on indoor temperature and humidity [J]. *Building Science*, 2008, 24 (8): 94-97.
- [6] Hong T Z, Chou S K, Bong T Y. Building simulation: an overview of development and information sources [J]. *Building and Environment*, 2000, 35: 347-361.
- [7] GB 50019—2003 采暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [8] GB 50189—2005 公共建筑节能设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [9] Kerestecioglu A, Swami 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): 447-454.
- [10] Valen M S. Moisture transfer in organic coatings on porous materials [D]. Department of Building and Construction Engineering Norwegian University of Science and Technology, NTNUN-7034 Trondheim, Norway, 1998.
- [11] 廉乐明, 李力能, 吴家正, 等. 工程热力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [12] 周淑贞, 张如一, 张超. 气象学与气候学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [13] Talukdar P, Olutmayin S O, Olalekan 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: 4527-4539.
- [14] Talukdar P, Olalekan O F, Osanyintola S O, et al. An experimental data set for benchmarking 1-D, transient heat and moisture transfer models of hygroscopic building materials. Part II: experimental, numerical and analytical data [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50: 4915-4926.
- [15] 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: 1195-1204.
- [16] dos Santos G H, Mendes N. Heat, air and moisture transfer through hollow porous blocks [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52: 2390-2398.
- [17] 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 Kuishan, 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.
- [18] 李魁山, 张旭, 韩星, 等. 建筑材料等温吸放湿曲线性能实验研究 [J]. *建筑材料学报*, 2009, 12 (1): 81-84.
LI Kuishan, ZHANG Xu, HAN Xing, et al. Experimental research of isothermal sorption curve of building materials [J]. *Journal of Building Materials*, 2009, 12 (1): 81-84.
- [19] van Schijndel A W M. Multiphysics modeling of building physical constructions [J]. *Building Simulation*, 2011, 4 (1): 49-60.

(编辑 王秀玲)