

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.01.004

## 多层墙体热湿耦合传递模型及验证

黄建恩, 吕恒林, 冯 伟

(中国矿业大学, 力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘 要:**从非平衡热力学角度论证了多层墙体热湿耦合过程采用水蒸气分压力和温度作为驱动势的合理性。由于水蒸气分压力是含湿量和温度的函数, 利用全微分思想, 建立了多层墙体热湿耦合传递模型, 该方法可避免 Budaiwi 方法在热湿耦合模型建立过程中采用的空气含湿量与相对湿度间的近似表达式, 而且简化了方程系数, 便于方程的求解。通过对多层墙体求解结果的对比, 验证了该模型的有效性。

**关键词:**数学模型; 墙体; 热传递; 湿传递; 热湿耦合

**中图分类号:** TU111.19    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2015)01-0018-05

### Mathematical model and its validation of coupled heat and moisture transfer for multilayer wall

Huang Jian'en, Lyu Henglin, Feng Wei

(School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, P. R. China)

**Abstract:** Its rationality of temperature and water vapor partial pressure as driving potential for coupled heat and moisture transfer was demonstrated based on non-equilibrium thermodynamics. As water vapor partial pressure is a function of moisture content and temperature, mathematical model of coupled heat and moisture transfer for multilayer wall were established according to the theory of total differential. The approximate expressions between humidity content and relative humidity of air used in Budaiwi method could be avoided. The coefficients of mathematical model were simplified and could improve efficiency of solution. Its validation was illustrated by contrasting and analyzing the simulation results of a multilayer wall.

**Key words:** mathematical models; walls; heat transfer; moisture transfer; coupled heat and moisture

墙体的热湿传递对建筑物的整体能耗水平具有十分重要的影响<sup>[1-2]</sup>, 湿传递会导致墙体内部积聚水分, 使保温性能下降、保温材料起鼓、冰冻和开裂, 甚至造成部分保温层脱落<sup>[3]</sup>。保温材料内产生凝结水、甚至结冰而使保温性能急剧下降是导致节能建

筑不节能的重要因素之一<sup>[4-6]</sup>。深入研究墙体的热湿耦合传递规律对正确的进行墙体隔热防潮设计、提高墙体性能、降低建筑能耗具有十分重要的意义。

几十年来, 很多学者致力于墙体的热湿传递过程研究, 建立和发展了很多理论模型, Luikov 模型

**收稿日期:** 2014-07-07

**基金项目:** 江苏省“六大人才高峰”资助项目(2010-JZ-006); 江苏省优势学科建设工程(SA1205)

**作者简介:** 黄建恩(1970-), 男, 副教授, 博士生, 主要从事暖通空调、建筑节能研究, (E-mail) yhgreen@163.com.

**Received:** 2014-07-07

**Foundation item:** The “Liu Da Ren Cai Gao Feng” Project of Jiangsu Province(2010-JZ-006); Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions(SA1205)

**Author brief:** Huang Jianen(1970-), associate professor, doctoral candidates, main research interests: heating ventilation and air conditioning, building energy efficiency, (E-mail) yhgreen@163.com.

和 Philip and De Vries 模型是被应用和接受的最著名的模型,采用温度和含湿量作为驱动势<sup>[7]</sup>。然而,由于多层结构中材料分界面上含湿量不连续,给模型的求解带来一定的困难。为此,一些研究者用其他驱动势代替含湿量。Pedersen 用毛细压力作为驱动势,但毛细压力很难直接测量,Künzel 用相对湿度作为推动势,Milly 等采用多孔介质基质势代替含湿量作为驱动势改写了热湿耦合 Philip and De Vries 方程组<sup>[7]</sup>。Belarbi 等<sup>[7]</sup>用蒸汽含量(kg/m<sup>3</sup>)和温度梯度作为推动势修正了 Luikov 模型。Budaiwi 等<sup>[8]</sup>通过定义空气含湿量是材料含湿量和温度的函数导出了热湿耦合传递模型。孔凡红、郑茂余、王怀柱等<sup>[9-11]</sup>用体积平均法,针对严寒地区新建建筑围护结构的干燥过程,建立了液态体积含湿量、温度和固态冰含湿量三参数热质耦合方程组,并用实验验证了模型的有效性。闫增峰<sup>[12]</sup>、郭兴国<sup>[13-14]</sup>等采用与 Budaiwi 相类似的方法建立了墙体热湿传递模型。郭兴国等<sup>[15]</sup>还对 Budaiwi 模型方程系数遗漏之处进行了修正,并用实验进行了验证。但是用 Budaiwi 方法建立的热湿耦合传递模型方程系数较为复杂且为非线性,给方程的求解带来一定的难度。

鉴于 Budaiwi 方法建立的模型方程系数较复杂,不便于求解,本文根据非平衡热力学原理,论证了以水蒸气分压力和温度为驱动势的合理性,根据水蒸气分压力是含湿量和温度的函数,利用全微分思想,建立了多层墙体热湿耦合传递模型。相对于 Budaiwi 方法建立的模型,该模型方程系数更加简单,便于求解,而求解结果具有高度的一致性。该模型可应用于多层墙体热湿耦合过程。

## 1 驱动势的选择

根据非平衡热力学原理,熵产率可用热力学流和力的双线性形式进行表示。根据文献[16],熵产率可表示为

$$\sigma = -\frac{1}{T^2} J_q \nabla T - \frac{1}{T} J_j \nabla (\mu_j)_T \quad (1)$$

由式(1)可得出热流和质量流的热力学力分别为

$$X_q = -\frac{1}{T^2} \nabla T \quad (2)$$

$$X_j = -\frac{1}{T} \nabla (\mu_j)_T \quad (3)$$

假设在建筑材料热湿耦合传递过程中固、液、汽三相存在局部热力学平衡,于是有

$$\mu_j = \mu_l = \mu_v = \mu_s \quad (4)$$

假设气相为理想气体,由工程热力学可知:

$$d(\mu_v)_T = RT \ln p_v \quad (5)$$

联立式(3)、(4)、(5),可得

$$X_j = -\frac{R}{p_v} dp_v \quad (6)$$

上述式中: $\sigma$ 为熵产率; $J_q$ 为热传导热流; $J_j$ 为质量流; $\mu_j$ 为化学势; $T$ 为热力学温度;式中 $\mu_l$ 、 $\mu_v$ 、 $\mu_s$ 分别为液相、汽相和固相水分的化学势; $R$ 为通用气体常数; $p_v$ 为水蒸气分压力。

根据式(2)和式(6),可以得出在热湿耦合传递过程中取水蒸气分压力和温度作为驱动势是合理的。而且,采用水蒸气分压力和温度作为驱动势在多层墙体分界面上驱动势是连续的,便于热湿耦合传递模型的求解。

## 2 模型的建立

### 2.1 基本物理模型的简化

为便于热湿耦合传递模型的建立,做如下假定:

- 1) 固、液、气相可以视为连续介质,且三相处于局部热力学平衡状态;
- 2) 建筑材料各向同性,物性参数可视为常数;
- 3) 建筑材料内湿空气压力为常数,水蒸气和空气可以视为理想气体;
- 4) 热湿耦合传递过程可简化为沿墙体厚度方向的一维过程,不考虑吸附滞后效应;
- 5) 材料使用历史对热湿传递的影响及温度对材料湿度的影响可以忽略;
- 6) 多层墙体层与层紧密接触,无接触热阻和湿传递阻;
- 7) 材料中的水分只有汽、液两相。

### 2.2 湿传递方程

材料中水蒸气分压力可以看作是材料含湿量和温度的函数

$$p_v = f(U, T)$$

$p_v$  对时间的全微分为

$$\frac{\partial p_v}{\partial \tau} = \frac{\partial p_v}{\partial U} \frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{\partial p_v}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (7)$$

其中

$$\frac{\partial p_v}{\partial U} = \frac{p_s}{\xi}$$

$$\frac{\partial p_v}{\partial T} = p_s \frac{\partial \varphi}{\partial T} + \varphi \frac{\partial p_s}{\partial T}$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = \frac{D_v}{\rho_m} \frac{\partial^2 p_v}{\partial x^2}$$

将以上各式代入式(7),整理得

$$\frac{\partial p_v}{\partial \tau} = \frac{p_s D_v}{\xi \rho_m} \frac{\partial^2 p_v}{\partial x^2} + (p_s \frac{\partial \varphi}{\partial T} + \varphi \frac{\partial p_s}{\partial T}) \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (8)$$

根据文献[13], $\frac{\partial \varphi}{\partial T} = 0$ ,因此式(8)可进一步简化为

$$\frac{\partial p_v}{\partial \tau} = \frac{p_s D_v}{\xi \rho_m} \frac{\partial^2 p_v}{\partial x^2} + \varphi \frac{\partial p_s}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (9)$$

式(9)即为以水蒸气分压力和温度为驱动势的湿传递方程。相对于 Budaiwi 方法建立的方程,该方程在建立过程中运用了水蒸气分压力与相对湿度的恒等关系式,避免了 Budaiwi 方法在方程建立过程中采用的空气含湿量与相对湿度间的近似表达式,可进一步提高方程的精度。而且,方程系数得到了简化,进一步降低了方程系数的非线性,便于方程的求解。

相应的边界条件为

$$-D_v \frac{\partial p_v}{\partial x} = h_{mp} (p_\infty - p_{surf}) \quad (10)$$

式中:  $p_v$ 、 $p_s$  分别为水蒸气分压力和饱和水蒸气分压力, Pa;  $\varphi$  为相对湿度,  $\varphi \equiv p_v/p_s$ ;  $U$  为材料的含湿量, kg/kg(干);  $T$  为温度, K;  $\tau$  为时间, s;  $\rho_m$  为材料密度, kg/m<sup>3</sup>;  $D_v$  为材料的水蒸气扩散系数, kg/(m·Pa·s);  $h_{mp}$  为以水蒸气分压力为驱动势的表面传质系数, kg/(m<sup>2</sup>·Pa·s),  $h_{mp} = 0.622 h_{md} / p_a$ ;  $h_{md}$  为以含湿量为驱动势的表面传质系数, kg/(m<sup>2</sup>·s), 可根据刘易斯关系式求得;  $p_a$  为空气压力, Pa;  $p_\infty$ 、 $p_{surf}$  分别为墙体表面空气中水蒸气分压力和周围空气中水蒸气分压力, Pa;  $\xi$  为材料湿平衡曲线的斜率,  $\xi = \frac{\varphi}{a\varphi^2 + b\varphi + c}$ ,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为常数。

### 2.3 热传递方程

根据微元体的能量守恒,可导出热传递方程为

$$\rho_m c_m \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + h_i g D_v \frac{\partial^2 p_v}{\partial x^2} \quad (11)$$

相应的边界条件为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = h_{ig} h_{mp} (p_\infty - p_{surf}) + h(T_\infty - T_{surf}) \quad (12)$$

式中:  $c_m$  为材料比热, J/kg·K;  $h_i g$  为水的蒸发潜热, J/kg;  $\lambda$  为材料的导热系数, W/m·K;  $h$  为墙体表面的对流换热系数, W/m<sup>2</sup>·K;  $T_\infty$ 、 $T_{surf}$  为分别为墙体表面的温度和周围空气的温度, K; 其余符号同上。

式(9)、(10)、(11)、(12)构成了完整的多层墙体热湿耦合传递模型。

## 3 模型的求解与验证

### 3.1 模型求解

将模型应用于某砖砌多层墙体,墙体共分 3 层,内侧为 20 mm 的水泥抹灰层,中间为 240 mm 厚砖墙,外侧为 20 mm 水泥砂浆层,各层材料物性如表 1<sup>[15]</sup>。内外表面的对流换热系数分别取 8.72 W/m<sup>2</sup>·K 和 23.26 W/m<sup>2</sup>·K,质交换系数由刘易斯关系式求得。

表 1 墙体各层材料的物性参数  
Table 1 Material parameters of multilayer wall

物性参数	水泥砂浆	砖墙	水泥抹灰层
$\lambda/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	1.965	0.44	0.81
$c_m/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	840	920	1 050
$\rho_m/(kg \cdot m^{-3})$	1 807	1 923.4	1 600
$D_v/(kg \cdot m^{-1} \cdot Pa^{-1} \cdot s^{-1})$	$5.467 \times 10^{-11}$	$2.6 \times 10^{-11}$	$1.2 \times 10^{-11}$
$a$	-42.68	-159.4	10.784
$b$	48.5	172.9	-21.6
$c$	0.194	29.4	12.32

饱和水蒸气压力按下式求得

$$p_s = \frac{400}{3} \exp(18.5916 - \frac{3991.11}{T - 39.31}) \text{ Pa} \quad (T >$$

273.15 K)

$$p_s = 610.8 \exp(22.46 - \frac{6134.949}{T}) \text{ Pa} \quad (T \leq$$

273.15 K)

采用隐式格式、有限差分法对控制方程进行离散,墙体各层材料分界面及室内外侧边界节点采用节点平衡法建立离散方程,运用 Matlab 编程对离散方程组进行求解。

模拟计算时室内外边界条件室内按夏季空调室内设计参数:温度 26 °C,相对湿度 0.6;室外按徐州地区夏季平均温度 32.4 °C,相对湿度 0.77;各层墙体具有相同的初始条件按徐州 5 月份标准日平均温度 21 °C,相对湿度为 0.66<sup>[17]</sup>。时间步长取 300 s。

### 3.2 结果分析

为验证模型的有效性,运用建立的模型和郭兴国等人建立并经试验验证的 Budaiwi 修正模型<sup>[15]</sup>对多层墙体各点水蒸气分压力和温度分别进行模拟求解,并将结果进行对比。

墙体内各点按下列方法选取,点 1 为室内侧水泥抹面层表面上的点,点 2 为水泥抹面层中间点,点 3 为水泥抹面层和砖墙分界面上的点,点 4 为砖墙中间点,点 5 为砖墙和水泥砂浆层分界面上的点,点 6 为水泥砂浆层中间点,点 7 为水泥砂浆层外表面上的点。

时间为 100×300 s 时新模型和 budaiwi 修正模型墙体各点的水蒸气分压力和温度模拟结果分别见图 1 和图 2,时间为 600×300 s 时,新模型和 budaiwi 修正模型墙体各点的水蒸气分压力和温度模拟结果分别见图 3 和图 4。

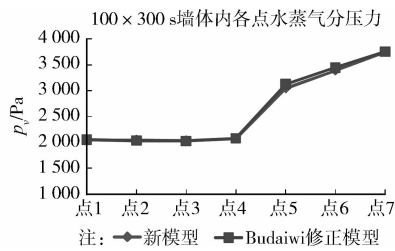


图 1  $\tau=100 \times 300$  s 墙体内水蒸气压力分布  
Fig. 1 Water vapor partial pressure distribution inside wall ( $\tau=100 \times 300$  s)

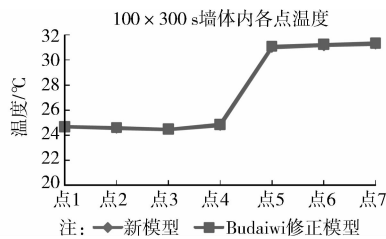


图 2  $\tau=100 \times 300$  s 墙体内温度分布  
Fig. 2 Temperatures distribution inside wall ( $\tau=100 \times 300$  s)

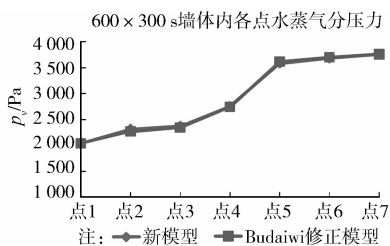


图 3  $\tau=600 \times 300$  s 墙体内水蒸气压力分布  
Fig. 3 Water vapor partial pressure distribution inside wall ( $\tau=600 \times 300$  s)

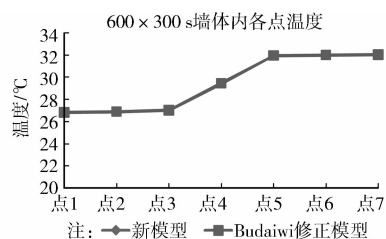


图 4  $\tau=600 \times 300$  s 墙体内温度分布  
Fig. 4 Temperatures distribution inside wall ( $\tau=600 \times 300$  s)

从图 1~图 4 的对比结果可以看出,两种模型模拟结果具有很好的一致性,这充分说明选择水蒸气分压力和温度为驱动势建立的热湿耦合传递模型是正确的,可以用于多层墙体的热湿耦合过程模拟分析。

#### 4 结论

1) 从非平衡热力学角度论证了多层墙体热湿耦合过程采用水蒸气分压力和温度作为驱动势的合理性。

2) 建立了以水蒸气分压力和温度为驱动势的热湿耦合传递模型,该方法可避免 Budaiwi 方法在热湿耦合模型建立过程中采用的含湿量与相对湿度间的近似表达式,而且简化了方程系数,便于方程的求解。

3) 通过对比新模型和 Budaiwi 修正模型多层墙体内不同时刻温度和湿度求解结果,验证了新模型的有效性。

#### 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(5): 624-631.
- [2] Qin M H, Belarbi R, Ait-Mokhtar A, et al. An analytical method to calculate the coupled heat and moisture transfer in building materials [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2006, 33(1): 39-48.
- [3] 赵立华,董重成,贾春霞. 外保温墙体传湿研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2001, 34(6): 78-82.  
Zhao L H, Dong Z C, Jia C X. Moisture transfer through external insulation wall [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2001, 34(6): 78-82. (in Chinese)
- [4] 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 F H, Zheng M Y, Han Z W, et al. Effect of heat and moisture transfer of new built building envelop on building energy consumption [J]. Journal of Heating, Ventilating and Air Conditioning, 2008, 38(7): 6-9. (in Chinese)
- [5] 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(15/16): 3111-3120.
- [6] 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(5): 461-469.
- [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(12): 2154-2162.
- [8] Budaiwi I, el Diasty R, Abdou A. Modelling of moisture and thermal transient behaviour of multi-layer non-

- cavity walls [J]. *Building and Environment*, 1999, 34(5):537-551.
- [9] Kong F H, Wang H Z. Heat and mass coupled transfer combined with freezing process in building materials: Modeling and experimental verification [J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(10):2850-2859.
- [10] 郑茂余, 孔凡红, 韩宗伟. 新建建筑外保温围护结构热质耦合传递[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2009, 41(4):118-122.
- Zheng M Y, Kong F H, Han Z W. Simulations on heat and mass coupling transfer in exterior insulated envelope of new building [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2009, 41(4):118-122. (in Chinese)
- [11] 孔凡红, 郑茂余. 新建建筑围护结构的热质耦合传递对建筑负荷的影响 I: 冬季热负荷[J]. *热科学与技术*, 2009, 8(2):146-150
- Kong F H, Zheng M Y. Effect of coupled heat and mass transfer in envelope on building load I: winter heating load [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2009, 8(2):146-150. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] 郭兴国, 陈友明, 张乐. 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 X G, Chen Y M, Zhang L. 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)
- [14] 郭兴国, 陈友明. 热湿气候地区多层墙体的热湿性能分析[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2008, 35(8):1-4.
- Guo X G, Chen Y M. Analysis of the hygrothermal performance of multilayer wall exposed to hot and humid climate [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2008, 35(8):1-4. (in Chinese)
- [15] 郭兴国, 陈友明, 邓永强, 等. Budaiwi 模型的修正及实验验证[J]. *土木建筑与环境工程*, 2010, 32(2):91-95.
- Guo X G, Chen Y M, Deng Y Q. A modified budaiwi model and its experimental evaluation [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2010, 32(2):91-95. (in Chinese)
- [16] Baker P H, Galbraith G H. Temperature gradient effects on moisture transport in porous building materials [J]. *Building Services Engineering Research and Technology*, 2009, 30(1):37-48.
- [17] 张晴原, 杨洪兴. 建筑用标准气象数据手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

(编辑 胡玲)