

文章编号:1006-7329(2000)04-0083-04

# 含湿多孔介质热湿迁移特性参数研究

83-86  
17

TU111.1  
TU834.9

卢军<sup>1</sup>, 付祥钊<sup>1</sup>, 冯雅<sup>2</sup>, 陈启高<sup>3</sup>

(1.重庆建筑大学 城建学院, 重庆 400045; 2.中国建筑西南设计研究院, 成都 610081; 3.重庆建筑大学 城规学院, 重庆 400045)

**摘要:**分析含湿多孔介质内部的传热传质过程及其热湿传递特性参数,建立一维热湿迁移过程方程组,通过特征函数法解出多孔介质内部温、湿度分布,由测试值作非线性最小二乘拟合,得到含湿多孔材料的热湿特性参数值。

**关键词:**传热传质; 多孔介质; 温湿度场

**中图分类号:** TU834.9

**文献标识码:** A

含湿多孔介质内部的传热传质过程是温度场和湿度场相关联的耦合过程。多孔介质内部热湿交换的规律主要取决于材料的热湿特性参数。如若求得含湿多孔材料的热湿特性参数值,就能数值模拟其内部的温湿度分布,从而分析含湿材料的热湿传递过程特征。

## 1 热湿迁移特性参数<sup>[1]</sup>

1) 导温系数  $a$ , 表示材料局部受热时, 反抗局部区域温度单独提高性质即其热惰性的物性参数。

$$a = \frac{\lambda}{c\gamma} \quad (1)$$

式中:  $a$ ——材料的导温系数,  $m^2/s$ ;  $\lambda$ ——材料的导热系数,  $W/(m \cdot k)$ ;  $c$ ——材料的比热,  $kJ/(kg \cdot C)$ ;  $\gamma$ ——材料的容重,  $kg/m^3$ 。

2) 质扩散系数  $a_m$ , 热质扩散系数  $a_t$ 。

类似传热过程, 可以将湿迁移理解为湿的浓度扩散, 即:

$$q_m = -a_m \frac{dw'_v}{dx} \quad (2)$$

$$w'_v = \gamma_0 u \quad (3)$$

式中,  $w'_v$  为材料的湿浓度,  $kg/m^3$ ;  $u$  为材料的重湿度,  $kg/kg$ ;  $a_m$  为质扩散系数,  $m^2/h$ ;  $q_m$  为比湿流,  $kg/(m^2 \cdot h)$ ;  $\gamma_0$  为材料脱去水分后的容重,  $kg/m^3$ 。

设材料中重湿度等于气相与液相湿度二者之和, 即:

$$u = u_1 + u_2 \quad (4)$$

$$q_m = -a_m \gamma_0 \frac{\partial u_1}{\partial x} - a_m \gamma_0 \frac{\partial u_2}{\partial x} \quad (5)$$

材料中的气相湿度梯度  $\frac{\partial u_2}{\partial x}$  可以表示成温度梯度关系, 即,

$$\frac{\partial u_1}{\partial x} = \delta_T \frac{\partial t}{\partial x} \quad (6)$$

• 收稿日期: 1999-09-20

基金项目: 重庆市应用基础研究项目基金资助(渝科委计[1999]33-40)

作者简介: 卢军(1965-), 男, 四川渠县人, 讲师, 主要从事建筑节能理论与技术研究。

式中,  $\delta_T$  为热梯度系数,  $1/k$ ; 这样(5)式变为

$$q_m = -a_m \gamma_a \frac{\partial u_1}{\partial x} - a_m \gamma_a \delta_T \frac{\partial t}{\partial x} \quad (7)$$

取  $u_i = a_m \delta_T$ ,  $m^2/(h \cdot k)$ ; 则:

$$q_m = -a_m \gamma_a \frac{\partial u_1}{\partial x} - a_i \gamma_a \frac{\partial t}{\partial x} \quad (8)$$

所以, 材料中湿迁移一方面取决于材料中的湿浓度分布, 另一方面也取决于材料中的温度分布。质扩散系数  $a_m$  的物理意义表示材料中存在液相浓度梯度时, 抵抗材料湿不均匀性的特性参数; 而热质扩散系数  $a_i$  的物理意义表示材料中存在气相湿度梯度时, 抵抗材料湿不平衡性的物性参数, 与材料中的温度梯度有关。热湿迁移特性参数在分析计算含湿多孔介质内的热传递和湿传递的过程中起着很大的作用。但是受现有实验手段的限制, 各类含湿多孔介质的热湿迁移特性参数十分缺乏, 特别是研究质传递过程的特性参数。这极大地影响了工程领域的研究开发工作, 特别在建筑物节能、能源开发、农业水土保持和环境保护等方面的应用。因此, 迫切需要简化现有复杂理论体系, 建立更为实用的分析方法。

## 2 一维热湿迁移过程的描述

对于无总压差作用的非饱和扩散过程, 由于水蒸汽的分子扩散, 蒸发凝结和毛细势的联合作用, 多孔介质内部的瞬态传热传质由下述方程组描述<sup>[2]</sup>:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \varepsilon \frac{r}{c} \frac{\partial u}{\partial \tau} \quad (9)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 u + a_i \nabla^2 t \quad (10)$$

式中  $\varepsilon$  为水在材料内部的汽化准则,  $r$  为水的汽化潜热。

(9)、(10)二式显然过于复杂也难于求解, 可作如下假定简化问题:

- 1) 所研究材料在宏观上分布均匀, 且吸水和蒸发后的体积不变化。
- 2) 材料孔隙中总压力保持均匀分布, 忽略由于压力梯度造成的热湿迁移。
- 3) 固体骨架与水分之间不发生生物或化学反应。
- 4) 材料中的毛细势远大于重力势, 重力作用予以忽略。
- 5) 温度范围为常温条件。

对厚度为  $l$  的含湿多孔材料大平板, 其内表面及四个侧壁绝热绝湿, 如图 1 所示。当其外表面受太阳辐射和其它热作用影响后, 内部水分在热湿迁移机理作用下迁移至表面并在此蒸发, 当其内部温度和湿度变化范围较小时, 物性参数可视为常数;

方程(9)、(10)进一步简化为<sup>[3]</sup>:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (11)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + a_i \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (12)$$

在初始时刻  $\tau=0$  时, 多孔介质具有均匀的  $t_0$  和湿度  $u_0$ , 即:

$$\tau = 0, t = t_0, u = u_0, \quad (0 \leq x \leq l) \quad (13)$$

平板内表面隔湿, 即:

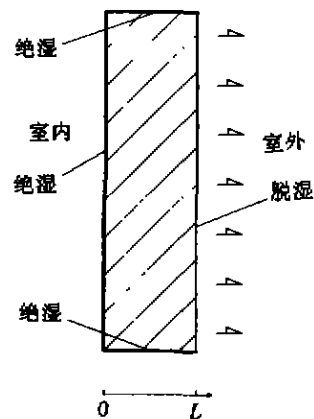


图 1 含湿材料蒸发过程示意

$$x=0, t(0, \tau) = t_1(\tau) \quad (14)$$

$$-\rho_0 \left( a_m \frac{\partial u}{\partial x} + a_1 \frac{\partial t}{\partial x} \right) = 0 \quad (15)$$

平板外表面暴露于空气中,其内部水分迁移至表面并在此蒸发,蒸发率为  $E_s$ 。

$$x=L, t(L, \tau) = t_2(\tau) \quad (16)$$

$$-\rho_0 \left( a_m \frac{\partial u}{\partial x} + a_1 \frac{\partial t}{\partial x} \right) = E_s(\tau) \quad (17)$$

式中  $E_s(\tau)$  为材料的蒸发率,  $\text{g/m}^2 \cdot \text{h}$ 。

内表面温度  $t_1(\tau)$ , 外表面温度  $t_2(\tau)$ , 蒸发率  $E_s(\tau)$  为周期函数, 随外界气象条件的改变而改变, 周期  $T=24 \text{ h}$ , 可以展开成付氏级数。

由特征函数法求得定解问题解为<sup>[4]</sup>

$$t(x, \tau) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \int_0^{\tau} B_k(\xi) e^{-a(\frac{k\pi}{l})^2(\tau-\xi)} d\xi \right] \sin \frac{k\pi}{l} x + \sum_{k=1}^{\infty} A_k e^{-a(\frac{k\pi}{l})^2 \tau} \sin \frac{k\pi}{l} x + \lambda_1(\tau) + \frac{x}{l} [\lambda_2(\tau) - t_1(\tau)] \quad (18)$$

$$u(x, \tau) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k e^{-a_m(\frac{k\pi}{l})^2 \tau} \cos \frac{k\pi}{l} x + \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \int_0^{\tau} D_k(\xi) e^{-a_m(\frac{k\pi}{l})^2(\tau-\xi)} d\xi \right] \cos \frac{k\pi}{l} x + x H_1(\tau) + \frac{x^2}{H} [H_2(\tau) - H_1(\tau)] \quad (19)$$

$$\text{式中, } A_k = \frac{2}{l} \int_0^l \left\{ t_0 - t_1(0) - \frac{x}{l} [t_2(0) - t_1(0)] \right\} \sin \frac{k\pi}{l} x dx \quad (20)$$

$$B_k = \frac{2}{l} \int_0^l \left\{ t'_1(\tau) + \frac{x}{l} [t'_2(\tau) - t'_1(\tau)] \right\} \sin \frac{k\pi}{l} x dx \quad (21)$$

$$C_k = \frac{1}{(k\pi/l)^2} [H_1(0) - H_2(0)] \quad (22)$$

$$D_k(\xi) = \frac{2}{l} \frac{1}{(k\pi/l)^2} [H'_1(\xi) - H'_2(\xi) \cos k\pi] \quad (23)$$

$$H_1(\tau) = -\frac{a_1}{a_m} \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} \int_0^{\tau} B_k(\xi) e^{-a(\frac{k\pi}{l})^2(\tau-\xi)} d\xi \frac{k\pi}{l} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k e^{-a(\frac{k\pi}{l})^2 \tau} \cdot \frac{k\pi}{l} + \frac{1}{l} [t_2(\tau) - t_1(\tau)] \right\} \quad (24)$$

$$H_2(\tau) = -\frac{E_s(\tau)}{a_m \cdot \rho_0} - \frac{a_1}{a_m} \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} A_k e^{-a(\frac{k\pi}{l})^2 \tau} \cos k\pi \cdot \frac{k\pi}{l} + \sum_{k=1}^{\infty} \int_0^{\tau} B_k(\xi) e^{-a(\frac{k\pi}{l})^2(\tau-\xi)} d\xi \cdot \cos k\pi \cdot \left( \frac{k\pi}{l} \right) + \frac{1}{l} [t_2(\tau) - t_1(\tau)] \right\} \quad (25)$$

### 3 热湿迁移特性参数的测定方法

如果同时测定  $x=0$ ,  $x=l/2$ ,  $x=l$  处多孔介质的温度  $t$  及  $x=l/2$  处的含湿量  $u$  以及多孔介质水分的逐时逸出量。根据前面的计算结果, 材料中部  $x=l/2$  处的温度  $t$  及含湿量  $u$  可由下式计算:

$$t\left(\frac{l}{2}, \tau\right) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \int_0^{\tau} B_k(\xi) e^{-a(\frac{k\pi}{l})^2(\tau-\xi)} d\xi \right] \sin \frac{k}{2} \pi + \sum_{k=1}^{\infty} A_k e^{-a(\frac{k\pi}{l})^2 \tau} \cdot \sin \frac{k}{2} \pi + t_1(\tau) + \frac{1}{2} [t_2(\tau) - t_1(\tau)] \quad (26)$$

$$u\left(\frac{l}{2}, \tau\right) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k e^{-a_m(\frac{k\pi}{l})^2 \tau} \cos \frac{k}{2} \pi + \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \int_0^{\tau} D_k(\xi) e^{-a_m(\frac{k\pi}{l})^2(\tau-\xi)} d\xi \right] \cos \frac{k}{2} \pi + \frac{1}{2} H_1(\tau) + \frac{l}{8} [H_2(\tau) - H_1(\tau)] \quad (27)$$

将实验测试得到的  $r(\frac{l}{2}, \tau)$ ,  $u(\frac{l}{2}, \tau)$ , 按式(26)(27)作最小二乘拟合[5], 便可定出实验常数  $\alpha, \alpha_m, \alpha_s$ .

测试中, 在平板内部制作二块小样, 试样 1 为测温用, 试样 2 为测量材料湿度用。分别均匀分成 4 等分, 如图 2 所示。利用三对经标定的热电偶同时测定试样 1 内外表面及中部的温度, 对试样 2 分别测试各块试件的湿重, 测试完后, 依次顺序放入原位。测试每隔一小时进行一次。由试件前后二段时间湿重之差计算其蒸发率。测试前, 作为准备工作, 先将一定含湿量的平板放入密闭容器内足够长的时间, 以使试件内部温度和含湿量趋于均匀。

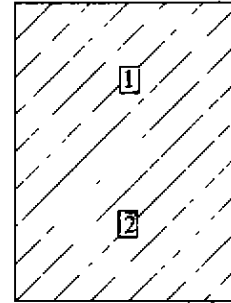


图 2 测试本体示意图

#### 4 结束语

本文提出一种现场实测含湿多孔介质热湿迁移特性参数的方法, 简便实用。可以为深入研究含湿多孔介质的热湿传递过程解决关键的特性参数问题, 也可推广到其它多孔介质的热质传递过程中。

#### 参考文献:

- [1] 陈启高. 建筑热物理基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991
- [2] A. B. 雷柯夫. 建筑热物理理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 1965
- [3] 孟庆林. 建筑外表面被动蒸发冷却研究[D]. 重庆: 重庆建筑大学, 1996
- [4] 张延昌, 等. 计算方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1986
- [5] 刘德贵等. FORTRAN 算法汇编第二分册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984

## Study on Heat and Moisture Transport Properties of Moist Porous Media

LU Jun<sup>1</sup>, FU Xiang-zhao<sup>1</sup>, FENG Ya<sup>2</sup>, CHEN Qi-gao<sup>3</sup>

(1. Faculty of Urban Construction, Chongqing Jianzhu University, Chongqing 400045, China; 2. China Southwest Architectural Design & Research Institute, Chengdu 610081, China; 3. Faculty of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jianzhu University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** By analyzing heat and mass transport process and transport properties of moist porous media, this paper established a computational model for one dimensional field of heat and moisture transport process. Based on the distinguishing characteristic functions, the inner temperature and humidity distribution of porous media was worked out. With the actual spot measurement, the heat and moisture properties were obtained by nonlinear least square method.

**Keywords:** heat and mass transport; porous media; heat and mass transport properties