

# 调湿材料动态调湿性能的评价方法

冉茂宇

(华侨大学建筑学院, 福建 泉州 362021)

**摘要** 通过调湿材料内部热湿耦合方程周期性条件下的理论分析, 获得封闭空间内板状调湿材料的吸放湿特性, 发现封闭空间的空气含湿比的振幅与温度振幅的比值为—常数. 在此基础上, 提出用封闭空箱热扰动法来测量和评价材料的调湿性能. 该方法简单易行, 能直接体现建筑气候周期性热湿作用下材料调湿性状.

**关键词** 调湿材料, 调湿性能, 封闭空箱, 热扰动法

**中图分类号** TU 502<sup>+</sup>.4; TU 111.19

**文献标识码** A

调湿材料又称为呼吸性材料, 它具有自律性温湿度调节能力, 广泛用于建筑中, 改善人居热湿环境. 例如, 用于炎热地区空调房间, 减小空调的湿热负荷<sup>[1,2]</sup>; 用于寒冷地区, 防止室内表面结露或维护结构内部冷凝; 用于湿热地区, 控制地板泛潮; 用于美术馆、档案馆等, 防止霉菌的增生和虫害<sup>[3]</sup>. 它还被用于食品和药品的包装贮藏中, 以实现稳定的湿度环境, 从而提高产品的保存质量<sup>[4]</sup>. 然而, 材料的调湿性能与哪些因素有关, 用什么指标来衡量, 到目前为止仍是一个模糊不清的问题. 笔者曾详细描述过 4 种常见的评价指标<sup>[5]</sup>, 并推导出了一个新的指标 BT, 从理论上澄清了目前在日本被广泛使用的指标 B 是 BT 的特殊情况<sup>[6]</sup>, 但这一指标只适用于温湿度变化较缓慢的情况. 事实上, 建筑气候总是呈周期性变化的, 材料的调湿调湿性能也总是在变化的热湿条件下才能体现出来. 因此, 建立动态条件下材料调湿调湿性能的评价理论与测试方法, 已成为急需解决的问题.

## 1 材料内部热湿传递耦合方程的建立

### 1.1 假设条件

根据材料在建筑环境中的吸热放热、吸湿放湿特性, 可对其内部的热湿传递过程作如下 4 点假设.

- (1) 材料中的气态含湿和液态含湿总是处于热湿平衡, 即任一点的任何时刻, 两者温度相同, 化学势相等.
- (2) 材料含湿量总是小于其最大吸湿平衡湿度, 即材料内部不含毛细管液态水, 不处于淋湿状态.
- (3) 温度势既是热量传递驱动力, 也是质量传递的驱动力, 忽略湿度势对传热的影响.
- (4) 调湿调湿过程中, 材料的液态含湿量变化很小, 其孔隙不收缩, 孔隙率为常数.

### 1.2 耦合方程

在材料内部任取一微小控制容积, 其中气态水和液态水的化学势可表示为

$$\mu = R(273.15 + t) \ln \varphi \quad (1)$$

在式(1)中,  $R$  为气体常数,  $t$  为摄氏温度,  $\varphi$  为相对湿度. 流入控制容积的湿流为

$$J_w = -\lambda_w \nabla \mu - \lambda_r \nabla t \quad (2)$$

在式(2)中,  $\lambda_w$ ,  $\lambda_r$  是基于化学势和温度势的传递系数. 流入控制容积的热流为

$$J_q = -\lambda_q \nabla t. \quad (3)$$

收稿日期 2006-03-14

**作者简介** 冉茂宇(1967-), 男, 副教授, 博士, 主要从事室内外热湿环境、建筑热工与建筑节能的研究. E-mail: ranmaoyu@hqu.edu.cn

**基金项目** 国家自然科学基金资助项目(59808007); 福建省自然科学基金资助项目(D0210013)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

式(3)中,  $\lambda_k$  为材料的导热系数. 湿平衡方程和能量平衡方程为

$$\frac{\partial(\rho_k \theta)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho(\eta - \theta))}{\partial \tau} = - \nabla J_w, \quad c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = - \nabla J_q + rm. \tag{4}$$

在上式中,  $\rho_k, \rho$  分别为材料中液态水和气态水的密度;  $\eta, \theta$  分别为材料的孔隙率和液态水所占体积率 (即控制容积中液态水的体积与控制容积体积的比值);  $\rho_c$  为材料的密度和比热;  $r$  为相变潜热,  $m$  为材料内部的相变率 (即单位时间内液态水蒸发成气态水或气态水凝结成液态水的量), 它可表示为

$$m = - \nabla J_w - \frac{\partial(\rho(\eta - \theta))}{\partial \tau} = \frac{\partial(\rho_k \theta)}{\partial \tau}. \tag{5}$$

因为材料中液态水体积率  $\theta$  是空气的含湿比  $w$  和温度  $t$  的函数, 表示为  $\theta = f(w, t)$ . 考虑到  $r = \frac{\partial(\rho(\eta - \theta))}{\partial \tau} \ll c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau}$ , 材料的等温湿容量是指等温吸放湿平衡曲线上, 材料的平衡含湿量相对于空气含

湿比的变化率, 可表示为  $k = \rho_k \frac{\partial f}{\partial w}$ . 热梯度系数是指环境空气含湿比一定时, 材料的平衡含湿量相对于温度的变化率, 表示为  $v = - \rho_k \frac{\partial f}{\partial t}$ . 则耦合方程可变为

$$(\rho_a(\eta - \theta) + k) \frac{\partial w}{\partial \tau} - v \frac{\partial t}{\partial \tau} = \nabla \lambda_w \nabla \mu + \nabla \lambda_r \nabla t, \tag{6}$$

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} + r \frac{\partial(\rho(\eta - \theta))}{\partial \tau} = \nabla(\lambda_k + r\lambda_r) \nabla t + \nabla(r\lambda_w) \nabla \mu, \tag{7}$$

在上式中,  $\rho_a$  为干空气密度. 在式(6), (7)中代入蒸气扩散方程  $\lambda \frac{\partial \mu}{\partial x} + \lambda_r \frac{\partial t}{\partial x} = \lambda_w \frac{\partial w}{\partial x}$ , 整理可得一维的热湿耦合方程为

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} = \bar{a} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \bar{b} \frac{\partial t}{\partial \tau}, \quad \frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + b \frac{\partial w}{\partial \tau}. \tag{8}$$

上式中,  $\lambda_k$  为材料的导湿系数, 系数  $a = \frac{\lambda_k}{c\rho + rv}$ ,  $\bar{a} = \frac{\lambda_w}{\rho_a(\eta - \theta) + k}$ ,  $b = \frac{rk}{c\rho + rv}$ ,  $\bar{b} = \frac{v}{\rho_a(\eta - \theta) + k}$  分别为材料各种物性参数的组合值.

## 2 周期性热湿作用下耦合方程的理论解

在建筑环境中, 由于气候条件和人的行为总是呈现出周期性, 因此使用周期性波动的热湿条件所得的结论, 是和实际应用状况相一致的. 可以用傅氏级数将复杂的周期性条件分解为简单的各阶谐量, 便于理论分析, 得到最终理论解. 另外, 调湿材料用于建筑环境中, 通常都是暴露在被调节的空气环境中, 为厚度较薄的薄板, 可视为一维的热湿传递过程, 边界条件为对流换热换湿条件. 建立如图 1 所示的板状调湿材料的物理模型, 其边界条件为

$$\lambda_k \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \lambda_w \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \tag{9}$$

$$- \lambda_k \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=L} = h_q(t(L, \tau) - t_f(\tau)), \tag{10}$$

$$- \lambda_w \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=L} = h_w(w(L, \tau) - w_f(\tau)). \tag{11}$$

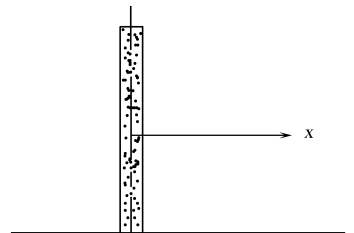


图 1 房间中的调湿材料

上面的式子中,  $h_q, h_w$  分别为调湿材料表面的对流换热、换湿系数;  $t_f, w_f$  为环境空气的温度和含湿比, 在周期性条件下, 可表示为

$$t_f = t_0 + \Theta_t e^{i\omega\tau}, \quad w_f = w_0 + \Theta_w e^{i\omega\tau}.$$

令下列参数和变量

$$s_p^2 = \frac{(a + \bar{a}) + \sqrt{(a + \bar{a})^2 - 4a\bar{a}b\bar{b}}}{2a\bar{a}}, \quad s_m^2 = \frac{(a + \bar{a}) - \sqrt{(a + \bar{a})^2 - 4a\bar{a}b\bar{b}}}{2a\bar{a}};$$

$$A_{11} = \frac{as_p^2 - 1}{a(s_p^2 - s_m^2)}, \quad B_{11} = \frac{\bar{a}s_p^2 - 1}{\bar{a}(s_p^2 - s_m^2)}, \quad A_{22} = \frac{\bar{b}}{a(s_p^2 - s_m^2)}, \quad B_{22} = \frac{b}{a(s_p^2 - s_m^2)};$$

则有

$$Z_1 = a(s_p^2 - s_m^2)B_{22}w - a(s_p^2 - s_m^2)B_{11}t, \quad Z_2 = a(s_p^2 - s_m^2)B_{22}w + a(s_p^2 - s_m^2)A_{11}t,$$

温度和含湿比变量为

$$A_{11}B_{11} = A_{22}B_{22}, \quad A_{11} + B_{11} = 1.$$

$$w = \frac{A_{11}}{b}Z_1 + \frac{B_{11}}{b}Z_2, \quad t = -\frac{B_{22}}{b}Z_1 + \frac{B_{22}}{b}Z_2. \tag{12}$$

方程(8)可转换为

$$\frac{\partial Z_1}{\partial \tau} = \frac{1}{s_p^2} \frac{\partial^2 Z_1}{\partial x^2}, \quad \frac{\partial Z_2}{\partial \tau} = \frac{1}{s_m^2} \frac{\partial^2 Z_2}{\partial x^2}. \tag{13}$$

边界条件(9)~(11)转化为

$$\frac{\partial Z_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \frac{\partial Z_2}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \tag{14}$$

$$-\frac{B_{22}}{b} \frac{\partial Z_1}{\partial x} \Big|_{x=L} + \frac{B_{22}}{b} \frac{\partial Z_2}{\partial x} \Big|_{x=L} = \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=L} = -\frac{h_q}{\lambda_q}(t(L, \tau) - t(\tau)), \tag{15}$$

$$\frac{A_{11}}{b} \frac{\partial Z_1}{\partial x} \Big|_{x=L} + \frac{B_{11}}{b} \frac{\partial Z_2}{\partial x} \Big|_{x=L} = \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=L} = -\frac{h_w}{\lambda_w}(w(L, \tau) - w(\tau)). \tag{16}$$

用边界条件(14)~(16)解方程(13), 可得出  $Z_1, Z_2$  的表达式. 将  $Z_1, Z_2$  的表达式代入式(12)中, 可得出材料内部温度和含湿比的变化表达式. 即

$$w = w_0 + \frac{A_{11}D_{11}\Theta_w + A_{22}D_{12}\Theta_t}{D}\cos(\epsilon_p x) \cdot e^{i\omega\tau} + \frac{B_{11}D_{21}\Theta_w + A_{22}D_{22}\Theta_t}{D}\cos(\epsilon_m x) \cdot e^{i\omega\tau}, \tag{17}$$

$$t = t_0 - \frac{B_{22}D_{11}\Theta_w + B_{11}D_{12}\Theta_t}{D}\cos(\epsilon_p x) \cdot e^{i\omega\tau} + \frac{B_{22}D_{21}\Theta_w + A_{11}D_{22}\Theta_t}{D}\cos(\epsilon_m x) \cdot e^{i\omega\tau}. \tag{18}$$

上式中,  $\epsilon_m = (1-i)s_m \sqrt{\frac{\omega}{2}}$ ,  $\epsilon_p = (1-i)s_p \sqrt{\frac{\omega}{2}}$ ,  $D_{11} = \cos(\epsilon_m L) - \frac{\lambda_q}{h_q}\epsilon_m \sin(\epsilon_m L)$ ,  $D_{12} = -\cos(\epsilon_m L) + \frac{\lambda_w}{h_w}\epsilon_m \sin(\epsilon_m L)$ ,  $D_{21} = \cos(\epsilon_p L) - \frac{\lambda_q}{h_q}\epsilon_p \sin(\epsilon_p L)$ ,  $D_{22} = \cos(\epsilon_p L) - \frac{\lambda_w}{h_w}\epsilon_p \sin(\epsilon_p L)$ ,  $D = A_{11}D_{11}D_{22} - B_{11}D_{21}D_{12}$ .

上述解在只有温度波动或湿度波动的情况下, 都可以大大简化.

### 3 封闭空间中调湿材料的吸放湿特性

对于一个内含调湿材料的封闭空间, 由于调湿材料不仅具有蓄热体的作用, 也具有吸放湿功能, 因此, 不仅对空气温度有调节作用, 对空气绝对湿度也有调节作用. 当空气温度升高时, 相对湿度下降, 此时材料放出水分; 当空气温度下降时, 相对湿度升高, 材料又会吸收空气中水分. 对于封闭的空间, 空气的含湿平衡关系为

$$\rho_a V \frac{\partial w_f(\tau)}{\partial \tau} = -\lambda_w F \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=L}, \tag{19}$$

$$\rho_a V \frac{\partial w_f(\tau)}{\partial \tau} = i\rho_a V_w \Theta_w e^{i\omega\tau}, \tag{20}$$

$$-\lambda_w F \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=L} = \lambda_w F \left[ \frac{A_{11}D_{11}\Theta_w + A_{22}D_{12}\Theta_t}{D}\epsilon_p \sin(\epsilon_p L) + \frac{B_{11}D_{21}\Theta_w + A_{22}D_{22}\Theta_t}{D}\epsilon_m \sin(\epsilon_m L) \right] \cdot e^{i\omega\tau}, \tag{21}$$

由式(17)~(21)可得

$$\Theta_w = \frac{A_{22}D_{12}\epsilon_p \sin(\epsilon_p L) + A_{22}D_{22}\epsilon_m \sin(\epsilon_m L)}{i\rho_a v \frac{\omega}{\lambda_w F} D - A_{11}D_{11}\epsilon_p \sin(\epsilon_p L) - B_{11}D_{21}\epsilon_m \sin(\epsilon_m L)} \cdot \Theta_t = C \cdot \Theta_t, \tag{22}$$

$$C = \frac{A_{22}D_{12}\epsilon_p \sin(\epsilon_p L) + A_{22}D_{22}\epsilon_m \sin(\epsilon_m L)}{i\rho_a v \frac{\omega}{\lambda_w F} D - A_{11}D_{11}\epsilon_p \sin(\epsilon_p L) - B_{11}D_{21}\epsilon_m \sin(\epsilon_m L)}. \tag{23}$$

从式(22)可知, 含调湿材料的封闭空间, 空气的含湿比的振幅与空气温度振幅成正比, 两者比值为一常数  $C$ . 在温度波幅相同的情况下,  $C$  值越大, 材料的吸放湿性能越好;  $C$  值越小, 材料的吸放湿性能越差. 房间空气体积与调湿材料暴露表面积之比、波动频率的快慢、调湿材料的厚度  $2L$  以及材料的各种物性  $\varepsilon_p$  和  $\varepsilon_m$  等, 都对调湿性能有影响.

#### 4 封闭空间热扰动法评价的调湿性能

从式(23)可知,  $C$  值反映了各种因素对材料调湿性能的影响. 在知道各种物性和参数后, 其值是可以 通过计算得到. 但这种计算比较复杂, 且材料的物性不易测试. 因此, 如果能寻找一种简单的方法得 到  $C$  值, 既避免了各种物性的测试困难, 又能综合准确体现各种参数对材料的吸放湿性能的影响, 对于 评价材料的调湿性能、开发和选用调湿材料都是很有意义的. 这里提出的封闭空箱热扰动方法, 是最简 单可行的一种方法. 它将调湿材料做成板状, 置于一密闭的箱中, 在空箱内部或外部实现周期性的热作 用, 直接测试箱内空气温度和相对湿度变化. 通过相对湿度和空气温度得出空气含湿比的变化; 含湿比 的振幅与温度振幅的比值即是  $C$  值. 值得一提的是, 要评价不同材料的调湿性能, 应将材料做成相同的 尺寸, 在相同的热扰动条件下来得到  $C$  值; 否则, 是没有可比性的.

#### 5 结束语

含有调湿材料的封闭空间, 当有周期性热扰动作用时, 其中空气含湿比的振幅与温度波动的振幅的 比值为一常数. 该常数可反映调湿材料的吸放湿性能, 可作为衡量调湿材料调湿性能的指标, 它可以用 封闭空间热扰动法方便地测量.

#### 参 考 文 献

- 1 Kerestecioglu A, Gu L. Theoretical and computational investigation of simultaneous heat and moisture transfer in buildings: Evaporation and condensation theory[ J ]. ASH ARE Transactions, 1990, 96( 1) : 455~ 464
- 2 Akihito Ozaki. Analysis of heat and moisture transfer through building wall[ J ]. Journal of HT SJ, 1997, 140( 36) : 57~ 66
- 3 Ono Kohei. Humidity controlling characteristics of maral material[ J ]. Asahiglass Research Report, 1983, 33( 1) : 65~ 75
- 4 中野修. 调湿纸の開発と展开[ J ]. 机能材料, 1999, 19( 3) : 20~ 24
- 5 冉茂宇. 日本对调湿材料的研究及应用[ J ]. 材料导报, 2002, 16( 11) : 42~ 43
- 6 冉茂宇. 封闭空间调湿材料新的调湿特性指标及其理论基础[ J ]. 华侨大学学报( 自然科学版), 2003, 24( 1) : 64~ 69

### Evaluation Method of Humidity Control Performance of Aspiration Material

Ran Maoyu

( College of Architecture, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China)

**Abstract** Based on the internal heat and moisture transfer coupling equations for the humidity controlled material, the analytical solutions are obtained under the steady periodic conditions, then the moisture desorption and adsorption properties of humidity controlled material in a closed space are investigated. It shows that the air humidity ratio in the closed space changes periodically in consistent with the air temperature. The ratio of the absolute humidity amplitude to the air temperature amplitude is a constant, which can be taken as a criterion to evaluate the humidity control performance of the material. A simple method, namely, the close box and heat impulse method is put forward to measure the constant value.

**Keywords** aspiration material, humidity control performance, close box, thermal effect method