# 多孔墙体湿分传递与 室内热湿环境研究

重庆大学 张华玲☆ 刘 朝 付祥钊

**摘要**简要回顾了多孔建筑材料基本湿特性和湿迁移基本理论。对多孔墙体湿迁移的水 蒸气理论模型、有效渗透深度理论模型、蒸发与凝结理论模型、考虑液体和水蒸气同时传递的 热湿耦合模型和室内热湿环境平衡方程进行了综合分析。指出目前多孔建筑材料热湿传递和 室内热湿环境研究的热点和存在的问题。

关键词 传湿模型 耦合热湿传递 多孔墙体

# Study on moisture transfer in porous building components and indoor environment

By Zhang Hualing★, Liu Chao and Fu Xiangzhao

Abstract Briefly reviews fundamental characteristics of moisture properties of porous building materials and fundamental theories of moisture migration. Analyses simplified moisture models based on vapour theory, effective penetration depth theory, evaporation and condensation theories, and coupled heat and moisture transfer models considering liquid and vapour flow in building components, and indoor mass and energy balance equations. Points out focuses in current research and remaining problems.

Keywords moisture transfer model, coupled heat and moisture transfer, porous building component

★ Chongqing University, Chongqing, China

# 1

0 引言 多孔介质是指内部含有众多空隙的固体材料, 如土壤、砖、木材等。Wong等人根据水分存在的 方式把建筑材料分为三类:1)非多孔介质,如玻 璃;2)吸湿多孔介质,如木材、黏土;3)毛细多孔 介质,如砖、混凝土、石膏板等<sup>[1]</sup>。因此大部分建筑 材料都属于多孔介质。建筑多孔材料空隙内总是 充满了水蒸气、水(或冰)和空气,工程中通常用等 温吸湿曲线来描述多孔材料在所处环境中含有的 水分。

Andersson认为在吸湿区湿分传递主要以水 蒸气扩散为主,湿分吸附在毛细孔壁,随着含湿量 的增加,毛细管内形成液岛<sup>[2]</sup>。Rose 对湿分在多 孔介质中的传递机理进行了实验研究,认为对于不 同的相对湿度存在四个不同的阶段:1)吸收阶段; 2)蒸汽传递阶段;3)蒸汽和水同时传递阶段;4) 水传递阶段<sup>[3]</sup>。建筑材料在热湿气候条件下或在 地下工程中大多数都处于汽和水同时传递的第三 阶段,可见纯蒸汽扩散理论是远脱离实际的。

研究多孔墙体的湿分传递过程可为室内湿负 荷计算奠定理论基础,对湿环境的控制和建筑能耗 分析都具有重要意义,从目前已有的研究成果来 看,对热环境的研究比较多,而对湿环境的研究还 很缺乏,主要原因是对湿环境的研究要困难得多。 目前对多孔墙体热湿传递的研究主要包括:1)针 对寒冷地区保温墙体冬季结露受潮问题,热湿地区

①☆ 张华玲,女,1967年11月生,博士研究生,副教授 400030 重庆大学城市建设与环境工程学院 (023)65118481
 E-mail: hlzhang@cqu. edu. cn 收稿日期;2005-08-10

修回日期:2005-10-27

夏季墙体积湿的霉变问题,研究沿墙体厚度方向水 蒸气压力和温度分布情况;2)研究多孔墙体传热 传湿对室内温湿度或热湿负荷的影响;3)研究多 孔墙体热湿吸放过程对室内热湿环境的影响;4) 耦合热湿模型的求解方法。但由于湿分在多孔介 质内的流动和扩散原因非常复杂,在一定条件下的 传输机理很难确定,因此对这类问题的进一步探索 和深入研究还很必要。

1 多孔墙体湿分传递研究

## 1.1 多孔材料湿传递理论

Luikov,Philip和 de Vries及 Whitaker等人 较早对这一领域进行了研究,对多孔介质内的传热 传湿问题提出了许多基本观点和研究方法<sup>[4-6]</sup>。理 论上多孔介质传热传湿过程的数学模型大体有 Luikov唯象理论和 Whitaker体积平均理论。前 苏联著名学者 Luikov早在 1934年就认识到温度 对水分迁移的影响,他根据不可逆热力学、宏观质 量、能量守恒定律,并引入迁移势概念,认为热传递 不仅取决于热传导,而且还取决于湿分的再分布; 质传递不仅取决于湿扩散,还取决于热扩散,建立 了多孔介质以温度和体积含湿量为参变量的热质 耦合双参数理论模型。

Philip 和 de Vries 在 20 世纪 50 年代中期分 析了温度对湿迁移的影响。他们在土壤力学领域 建立了热质传递模型,认为含湿量迁移可分为液体 的毛细流动和蒸汽的扩散渗透,把多孔介质处理成 连续介质,发展了非等温湿分迁移理论,建立了双 场驱动耦合理论模型。

Whitaker 通过对表征体元(REV)采用体积平 均建立了质量、动量和能量守恒的连续介质模型, 考虑了介质内部湿分、能量的多种传输机制,其动 量方程是将饱和的 Darcy 定律作一些简单的非饱 和系数修正,REV 方法克服了模拟各向异性多孔 介质的困难,后来被研究者广泛采用。该模型的最 大缺陷是确定大量的传输系数非常困难,需要通过 复杂的实验测试。

由此可见,湿分在多孔介质内的传递可能是多种传输机理的作用,实际上没有一种单一理论能概括某种多孔介质在所有条件下的湿传递,多孔材料中的湿分传递是蒸汽扩散、液态扩散、表面扩散、 Knudsen 扩散、毛细流、纯水力流动以及蒸发与凝结等联合作用的结果。湿传递还与多孔材料的孔隙结 构有关,因此,在数学上描述理论模型通常都需要作 一些简化假设,从而限制这些模型的使用范围。

1.2 多孔介质湿分传递的理论模型

关于多孔介质热湿传递研究,在探求迁移机理 方面先后发展了能量理论、蒸汽扩散理论、毛细流 动理论和蒸发凝结等单一理论模型,用来解释毛细 多孔介质的热湿迁移机制<sup>[7]</sup>。Jesper 指出多孔介 质的湿分传递的经典模型始于 1950 年由 Philip 和 de Vries 建立的以含湿量和温度为驱动势的计算 模型<sup>[8]</sup>,后来各国学者又发展了许多不同驱动势的 数学模型。

1.2.1 多孔材料湿分传递水蒸气理论模型

由于多孔介质的结构和多相多组分的湿传递 过程的复杂性,以及各类边界条件确定、材料物性 的测定、控制方程的高度非线性等,致使这类问题 一直没有得到很好的解决。尽管已经有了许多数 学模型和模拟方法,但这些模型和方法都有一定的 适用条件和范围。以Fourier 的一维稳态导热和 Glaser 提出的纯蒸汽扩散模型为代表的稳态理论, 其湿迁移率符合 Fick 定律。由于用几个简单的步 骤就可计算出湿迁移率,预测与分析建筑墙体内部 发生凝结的可能性和凝结的位置,因此这种常系数 的稳态模型多年来一直在工程设计中被普遍采用, 但由于比较粗糙,不适用于特殊环境条件下的多孔 墙体的模拟计算。

Hartwig认为建筑多孔材料蒸汽扩散主要是 在大孔内传递,而液态水传递主要在孔表面、裂隙 和小孔内发生(也叫表面扩散),这两种流动的方向 相反<sup>[9]</sup>。蒸汽扩散的驱动势为蒸汽分压力,在吸湿 层和小毛细孔内的液态水传递的驱动势为毛细压 力或相对湿度。尽管多孔材料蒸汽流和水流事实 上有相互作用,但通常将问题简化处理为两个独立 过程,即

蒸汽扩散:

$$J_{\rm v} = -\frac{D_{\rm \theta}}{\mu} \,\nabla p_{\rm v} \tag{1}$$

液态水传递:

$$J_1 = -D_{\varphi} \nabla \varphi = -D_{w} \frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}\varphi} \nabla \varphi \qquad (2)$$

式(1),(2)中 *J*<sub>v</sub>,*J*<sub>1</sub>分别为蒸汽和液态湿流通 量,kg/(s・m<sup>2</sup>);*D*<sub>0</sub>为蒸汽渗透系数,kg/(m・s・ Pa);*D*<sub>w</sub> 为液体扩散系数,m<sup>2</sup>/s;*μ* 为水蒸气扩散阻 力系数; $p_v$ 为水蒸气分压力, $Pa;D_{\varphi}$ 为液体传导系数, $kg \cdot m/s; \varphi$ 为相对于孔隙中饱和水分含量的相对湿度,%;w为含湿量, $kg/kg; dw/d\varphi$ 可由等温吸湿函数得出。

在等温吸湿范围内,大多数多孔介质的液体传 递系数远小于蒸汽扩散系数,相对湿度低到 60% 时液体传递系数更小,湿传递的主要形式是蒸汽扩 散,湿传递模型简化为不考虑液态水的传递:

$$\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}\varphi}\frac{\partial\varphi}{\partial\tau} = \nabla \left( D_{\mathrm{w}} \frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}\varphi} \nabla \varphi + D_{\theta} \nabla p_{\mathrm{v}} \right)$$
(3)

式中 7为时间,s。

Budaiwi 等人认为多孔墙体的湿传递包括气 相和液相传递,指出材料的含湿量低于其固有含湿 量时,材料中的水分绝大部分以蒸汽扩散形式运 动,可以忽略液态扩散运动,给出了以空气含湿量 和温度作为驱动势的湿传递模型<sup>[10]</sup>:

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} = \frac{w_{\text{sat}}}{\xi} D_{\text{v}} \rho_{\text{a}} R T_{\text{K}} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \varphi \frac{\mathrm{d} w_{\text{sat}}}{\mathrm{d} t}\right) \frac{\partial t}{\partial \tau}$$

$$\tag{4}$$

式中  $w_{sat}$ 为饱和含湿量,kg/kg; $\varepsilon$ 为湿平衡曲线的斜率; $D_v$ 为蒸汽扩散系数,m<sup>2</sup>/s; $\rho_a$ 为空气密度,kg/m<sup>3</sup>;t, $T_K$ 分别为材料温度和热力学温度, $\mathbb{C}$ ,K;x为距离,m。

Lu Xiaoshu运用 Whitaker 的 REV 方法模拟 通过多孔墙体的热湿传递,并假设湿传递时只有蒸 汽相,给出了以体积含湿量为驱动势的湿传递简化 模型<sup>[11]</sup>:

$$\frac{\partial \rho_{\rm v}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{\rm v} \, \frac{\partial \rho_{\rm v}}{\partial x} \right) \tag{5}$$

式中  $\rho_v$  为水蒸气的体积含湿量, kg/m<sup>3</sup>。

尽管水蒸气扩散系数和多孔材料在一定环境 条件下的平衡吸放湿曲线比较容易获得,许多学者 认为水蒸气理论更为简便适用,但大多数情况下, 纯蒸汽理论模型是脱离实际的。

1.2.2 多孔材料湿分传递有效渗透深度理论模型

有效渗透深度理论是研究建筑多孔墙体表面 吸放湿特性的主导理论。Diasty 等人从数学上证 明了当 $Bi_m \rightarrow \infty$ ( $Bi_m = L_m h_m / D_v$ ,其中 $L_m$ 为墙体 内表面的湿度有效作用厚度; $h_m$ 为内表面质交换 系数),材料表面的水蒸气分压力对于周围环境很 快达到湿平衡,传入或传出材料的湿量可以忽 略<sup>[12]</sup>;大多数建筑材料的  $Bi_m$ 介于 0~∞之间,研 究房间湿度变化应考虑多孔材料的吸放湿量,文献 [13-14]给出了以水蒸气分压力为驱动势的模型 (Fick 第二定律):

$$\frac{\partial p_{\rm v}(x,\tau)}{\partial \tau} = \frac{D_{\rm \theta}}{\rho_{\rm m} C_{\rm m}} \frac{\partial^2 p_{\rm v}(x,\tau)}{\partial x^2} \tag{6}$$

边界条件:

$$I|_{x=0} = -h_{\rm m}(p_{\rm v} - p_{\rm v, in})|_{x=0}$$
(7)

$$J \mid_{x=L_{\rm m}} = D_{\theta} \frac{\partial p_{\rm v}}{\partial x} \Big|_{x=L_{\rm m}} = 0$$
(8)

式(6)~(8)中  $\rho_{m}$  为干材料密度,kg/m<sup>3</sup>; $C_{m}$  为材 料湿容量,kg/(kg・Pa), $C_{m} = -\frac{1}{p_{v,sat}} \frac{dw(\varphi)}{d\varphi}$ ,其 中, $p_{v,sat}$ 为室内空气水蒸气饱和分压力,Pa; $p_{v,m}$ 为 室内空气水蒸气分压力,Pa。当 $Bi_{m} \rightarrow 0$ 时,材料 内的水蒸气分压力梯度很小,可以认为材料内湿分 分布均匀,可采用集总模型:

$$\rho_{\rm m} C_{\rm m} V_{\rm m} \, \frac{\mathrm{d}p_{\rm v}}{\mathrm{d}\tau} = h_{\rm m} A_{\rm m} (p_{\rm v} - p_{\rm v,\,\rm in}) \qquad (9)$$

$$Q_{\rm m} = \rho_{\rm m} C_{\rm m} V_{\rm m} \Delta p_{\rm v} \tag{10}$$

式(9),(10)中  $V_m$  为材料体积, $m^3$ ; $A_m$  为表面 积, $m^2$ ; $Q_m$  为总的传湿量, $kg_o$ 

Cunningham 对集总分析法的研究最早,发展 了采用修正的对流质传递系数来计算吸湿建筑构 件的湿度的数学模型,并用实验对模型进行了验 证。还指出单侧墙体的有效渗透深度值为  $\sqrt{D/2\omega}$ ,D为扩散系数, $\omega$ 为角频率,双侧墙体的 有效渗透深度为 1/6 墙体厚度,与边界层的表面与 阻力无关<sup>[15-16]</sup>。Kerestecioglue 等人指出只有  $Bi_m < 0.1$ 才能采用集总分析法<sup>[17]</sup>,而空调房间每 日的湿度变化只影响很薄(1~5 mm)的表面边界, 即有效渗透深度  $L_m$ 很小,以此为特征长度计算的  $Bi_m$  也很小,可采用集总热湿平衡方程进行计算。 许多学者采用有效渗透深度理论研究多孔墙体的 吸放湿特性,主要是因为其比较简便,但由于简化 的成分较多,存在一定的误差。

1.2.3 多孔材料湿分传递蒸发与凝结理论模型

Liesen 等人认为多孔材料在没有压力梯度的 温度梯度作用下,即使在较高的孔隙饱和度条件 下,湿分传递几乎都是以水蒸气方式传递,水分是 在高温侧蒸发后,再以气态方式传递到低温侧凝 结,用蒸发与凝结理论建立了多孔墙体湿传递模型 (见式(11)),并采用湿传递函数法求解多孔介质内 的湿传递过程<sup>[18-19]</sup>。可见蒸发与凝结理论实际上 也只考虑蒸汽的扩散传递,没有考虑多孔材料内的 液态水分的传输。

$$\frac{\partial \rho_{\rm v}}{\partial \tau} + \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} \rho_{\rm m} \frac{\partial w}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{\rm v} \frac{\partial \rho_{\rm v}}{\partial x} \right) \qquad (11)$$

式中 ε为多孔介质的孔隙率,m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>。 1.2.4 多孔材料热湿耦合传递模型

温度梯度的存在不仅会导致热迁移,而且也会 引起湿迁移,湿分迁移的潜热变化也对热量传递产 生影响,这种耦合热湿传递还与物性有关,比如热 湿扩散系数 D<sub>T</sub>(w,t),D<sub>w</sub>(w,t)和有效导热系数 λ<sub>eff</sub>(w,t)均是温度和含湿量的函数。此外,只有 在理论上全面考虑水蒸气和液态水共同传递的热 湿耦合模型才能使计算更合理、更精确<sup>[20]</sup>。建立 热湿耦合传递模型有 Philip-de Vries 或 Luikov 的 混合模型,热质平衡方程,Fourier 定律,Fick 定律, Darcy 定律等理论基础<sup>[21]</sup>。

Mendes 等人用 Philip 和 de Vries 的数学模型 来研究多孔墙体含湿和传湿时潜热部分对导热的 影响<sup>[22]</sup>。模型考虑了墙体显热和潜热、表面对流、 太阳辐射、墙体的热湿传递、气液相变。热流、蒸汽 和水流同时耦合传递,以温度和湿度为驱动势建立 的模型适用范围更广,并采用残余函数法对边界进 行处理求解。

能量方程为

$$\rho_{\rm m} C_{\rm m}(t,w) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_{\rm eff}(t,w) \frac{\partial t}{\partial x} \right] - L(t) \frac{\partial}{\partial x} (J_v)$$
(12)

质量方程为

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{J}{\rho_1} \right) \tag{13}$$

$$\frac{J_{\rm v}}{\rho_{\rm l}} = -D_{\rm tv}(t,w) \frac{\partial t}{\partial x} - D_{\rm wv}(t,w) \frac{\partial w}{\partial x} \quad (14)$$

$$\frac{J}{p_{\rm l}} = -D_{\rm t}(t,w) \frac{\partial t}{\partial x} - D_{\rm w}(t,w) \frac{\partial w}{\partial x} \quad (15)$$

式(12)~(15)中 L(t)为水的汽化潜热,J/kg;J 为总水流通量,kg/(m<sup>2</sup> • s); $\rho_1$  为水的密度,kg/ m<sup>3</sup>; $D_{tv}$  为温度作用下的蒸汽扩散系数,m<sup>2</sup>/ (s • ℃); $D_{wv}$ 为湿度作用下的蒸汽扩散系数,m<sup>2</sup>/ s; $D_t$  为温度作用下的质扩散系数,m<sup>2</sup>/(s • ℃)。

Lu Xiaoshu 比较精确地对多孔墙体和室内空 气的温度和湿度进行了预测<sup>[23]</sup>。墙体的湿传递由 液态毛细流动和蒸汽扩散组成,采用 REV 方法建 立了多孔墙体热湿传递模型。

能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho_{\rm m}ct) + \frac{\partial}{\partial x}\left(h_{\rm l}D_{\rm l}\frac{\partial S}{\partial x} + h_{\rm v}D_{\theta}\frac{\partial p_{\rm v}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(-\lambda_{\rm eff}\frac{\partial t}{\partial x}\right) = 0$$
(16)

质量方程为

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{\rm l} \frac{\partial S}{\partial x} + D_{\rm v} \frac{\partial p_{\rm v}}{\partial x} \right) = 0 \qquad (17)$$

式(16)~(17)中 c为多孔材料的比热容,J/ (kg・ $\mathbb{C}$ ); $h_1,h_v$ 分别为水和蒸汽的比焓,J/kg; $D_1$ 为液体传输系数,kg/(m・s・Pa);S为孔隙内的 毛细吸附压力,Pa。

实际上,这些热湿耦合传递模型仍不成熟,近 似太多,忽略的因素也很多。随着理论研究的深入 和计算工具的更新,将会有更多的学者针对具体工 程提出更为完善的耦合传递模型。

### 1.3 耦合模型的求解方法和工具

多孔介质热湿耦合传递过程的数学模型呈高度非线性,无法直接得到精确的分析解。目前主要是通过数值方法求解,主要方法有:1)Nrank-Nicholson法<sup>[24]</sup>;2)有限差分法<sup>[25]</sup>;3)有限控制容积法<sup>[26]</sup>;4)传递函数法<sup>[27]</sup>;5)边界元法<sup>[28]</sup>;6) 基于实验数据的经验公式法<sup>[29]</sup>。 为了应用方便,许多学者开发了一些计算软件。Burch和Thomas开发的计算程序(MOIST),使用有限差分法来求解通过非等温条件下复合墙体的热湿传递。Liesen使用蒸发凝结理论和反应系数法开发的程序(IBLAST),热质传递模型忽略热湿特性参数的变化和液体的传递。IEA(International Energy Agency)Annex 24介绍的五个计算程序(1D-HAM, LATENITE, HYGRAN24, MATCH, WUFIZ)都是使用Philip-de Vries模型,主要区别在于简化假设不同,只能适用于不太潮湿的气候条件<sup>[30]</sup>。这些计算程序适用范围较窄,不属于通用软件,用户不能对其进行修改和二次开发,从而限制了计算软件使用。

### 2 多孔墙体热湿传递对室内热湿环境的影响研究

室内热湿环境是影响人体的舒适、健康,设备 安全性和使用寿命,建筑结构的耐久性,建筑耗能 等方面的关键因素。目前,全面考虑建筑墙体的辐 射、对流和导热来研究室内热环境的理论和方法已 比较完善,而且开发了许多应用广泛的软件,如 ASEAM,BLAST,BUS++,DOE-2,TARP, TRNSYS,DeST等<sup>[31]</sup>。直到20世纪80年代,国 内外学者才开始对多孔墙体表面的吸放湿特性以 及对室内湿环境的影响开展研究<sup>[32]</sup>。

#### 2.1 多孔墙体表面湿流量计算模型

研究室内湿环境的难点是多孔墙体表面的吸放湿特性,通过求解多孔墙体热湿传递微分方程可以定量计算建筑壁面热湿吸放量,由于使用的湿分传递理论模型各异,因此墙体表面吸放湿量计算模型也不同,Diasty 给出的计算模型为<sup>[12]</sup>

$$J_{\rm v} = -D_{\theta} \, \frac{\mathrm{d}p_{\rm v}}{\mathrm{d}x} \tag{18}$$

Wong 应用的计算模型见式(15)<sup>[1]</sup>。但通常 使用 Defreitas 的计算模型<sup>[33]</sup>:

$$J = h_{\rm m}(\rho_{\rm x=0} - \rho_0) \tag{19}$$

因此,湿流量的大小很大程度上取决于墙体内 表面边界层内的对流质交换系数 h<sub>m</sub>;可用 Chilton-Colburn 类比关系来确定<sup>[34]</sup>:

$$\left(\frac{h_{\rm c}}{v_0\rho_{\rm a}c_{\rho}}\right)Pr^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{h_{\rm m}}{v_0}\right)Sc^{\frac{2}{3}} \tag{20}$$

0.6 < Sc < 2 500</li>
 0.6 < Pr < 100</li>
 式中 h<sub>c</sub> 为表面传热系数, W/(m<sup>2</sup> • ℃); v<sub>0</sub> 为空

气流速,m/s; $c_p$ 为空气的比定压热容,J/(kg・℃); Pr为普朗特数;Sc为施密特数。

2.2 室内热湿环境计算模型

Lu Xiaoshu 研究了室内瞬时产湿率的计算方法,并引入瞬时产湿率对室内空气的湿度进行预测,描述室内环境的热湿平衡方程为<sup>[11]</sup>

$$\frac{\partial t_0}{\partial \tau} = n(t_{\infty} - t_0) + \frac{\sum Q}{V c_{p} \rho_a} + \frac{Q_i}{V c_{p} \rho_a} \qquad (21)$$

$$\frac{\partial \rho_0}{\partial \tau} = n(\rho_{\infty} - \rho_0) + \frac{\sum G}{V} + \frac{G_i}{V} \qquad (22)$$

式(21),(22)中  $t_0$ , $t_\infty$  分别为室内外空气温 度,C;n 为房间换气次数, $s^{-1}$ ;  $\sum Q$  为通过墙体 传入室内的热量,W;  $\sum G$  为通过墙体传入室内 的湿量,kg/s;V 为房间体积, $m^3$ ; $\rho_a$  为室内空气密 度, $kg/m^3$ ; $Q_i$  为室内产热率,W; $G_i$  为室内产湿 率,kg/s; $\rho_0$ , $\rho_\infty$  分别为室内外空气中的水蒸气密 度, $kg/m^3$ 。Lu Xiaoshu 研究墙体表面湿特性时考 虑蒸汽和水同时传递,但没有考虑热湿的耦合关 系。

闫增峰研究了考虑生土建筑围护结构热湿传 递及表面吸放湿对室内热湿环境的影响<sup>[35]</sup>,但没 有进一步分析对室内空调热湿负荷的影响。模拟 房间湿度动态模型为

$$\rho_{a}V\frac{dw_{0}}{d\tau} = \sum G(\tau) - \rho_{a}Vn[w_{0}(\tau) - w_{\infty}(\tau)] - \frac{dw_{m}(\tau)}{d\tau}$$
(23)

式中  $w_0, w_\infty$ 分别为室内外空气的含湿量, kg/kg;  $G(\tau)$ 为房间产湿速率, kg/s;  $\frac{dw_m(\tau)}{d\tau}$ 为围护结构内表面吸湿速率, kg/s。

陈友明采用考虑墙体内表面吸放湿过程的热湿简化模型,模拟分析了吸放湿过程对室内湿度及 空调负荷的影响,指出建筑内表面吸放湿过程对室 内湿度具有非常明显的调节作用;建筑内表面吸放 湿过程对空调潜热负荷有较大的影响<sup>[36]</sup>。但闫增 峰和陈友明都是采用纯蒸汽理论研究墙体表面湿 特性,没有考虑液态水分的传递。因为研究室内热 湿环境必须考虑多孔墙体的热湿过程,否则会带来 很大的误差。因此采用同时考虑蒸汽和水传递热 湿模型研究多孔墙体表面湿特性,建立描述房间热 湿环境的三维计算模型是很有必要的。

#### 3 结语

综上所述,虽然国内外学者对多孔墙体的热湿 传递过程进行了大量的研究并提出了各种模型,但 是已有的湿分传递和室内热湿环境的简化模型还 存在一定的局限性,目前在工程应用方面研究的热 点和难点主要表现在以下几个方面。

1) 学者们提出的数学模型形式多样,涉及到 多孔材料湿过程的各类传输系数难以确定。由于 建筑墙体材料种类繁多,即使同一种材料,由于比 例配方不同,湿传输系数差异也很大,目前这些基 础数据非常缺乏,而且研究的工作量非常大,需要 进行大量的理论计算和实验来获得这些特性系数。

 2)地下建筑壁面热湿吸放对室内热湿环境的 影响尤为显著,合理确定多孔壁面热湿方程远端边 界对正确求解非常重要。

3)多孔墙体耦合热湿过程方程的求解十分复杂,研究获得用于不同的工程条件下墙体热湿传递和热湿吸放的经验方程,不仅可以大大地简化工程设计,也便于模拟房间热湿环境和能耗分析。

4)将全室温湿度假设为均匀分布建立的室内 一维热湿平衡方程来研究房间热湿环境很有局限 性,当模拟空间较大时这种简化会带来很大的误 差,应考虑室内温湿度的三维空间分布。

总之,研究多孔墙体的热湿传递对更好地控制 室内热湿环境,提高舒适性,节约能源等方面都很 有意义。

#### 参考文献

- Wong S P W, Wang S K. Fundamentals of simultaneous heat and moisture transfer between the building envelope and the conditioned space air[G]// ASHRAE Trans, 1990, 96(2):73-83
- [2] Marit S V. Moisture transfer in organic coatings on porous materials [D]. Norway: Norwegian University of Science and Technology, NTNUN-7034 Trondheim, 1998
- [3] 陶智,康宁.建筑结构中的湿迁移[J].力学进展, 1994,24(4):441-455
- [4] Luikov A V. System of differential equation of heat and mass transfer in capillary porous bodies[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1957, 18(10):1-14
- [5] Philip J R, de Vries D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients [J]. Transactions of the American Geophysical Union, 1957, 38 (2), 222-232
- [6] Whitaker S. Simulation heat mass and momentum transfer in porous media: a dry theory of dry[J]. Advances in Heat Transfer, 1977,13:119-203
- [7] 施明恒,虞维平. 多孔介质传热传质研究的现状和展 望[J]. 东南大学学报,1994,24(11): 35-38
- [8] Jesper A. Isothermal moisture flow in building materials: modeling measurements and calculations based on Kirchhoff's potential [J]. Building and Enviroment, 2000,35(6): 519-536
- [9] Hartwig M K. Calculation of heat moisture transfer in exposed building components[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1997, 40(1):159-167
- [10] Budaiwi I, Diasty R E, Abdou A. Modelling of moisture and thermal transient behavior of multilayer non-cavity walls [J]. Building and Environment, 1999,34(5):537-551
- [11] Lu Xiaoshu. Estimation of indoor moisture generation rate from measurement in buildings [J].
   Building and Environment,2003,38(5):665-675

- [12] Diasty R E, Fazio P. Dynamic modelling of moisture absorption and desorption in buildings [J]. Building and Environment, 1993,28(1): 21-32
- [13] Barringer C. Development of a dynamic model for simulating indoor temperature and humidity [G] // ASHRAE Trans, 1989,95(1):49-460
- [14] Chen Youming, Chen Zaikang. Transfer function method to calculate moisture absorption and desorption in buildings [J]. Building and Environment, 1998,33 (4):201
- [15] Cunningham M J. Modelling of moisture transfer in structure—II a comparision of a numerical model, an analytical model and some experimental results[J]. Building and Environment, 1990,25(2):85-94
- [16] Cunningham M J. Effective penetration depth and effective resistance in moisture transfer[J]. Building and Environment, 1992,27(3):379-386
- [17] Kerestecioglue A, Swami M, Kamel A. Theoretical and computational investigation of simultaneous heat and moisture transfer in buildings: "effective penetration depth" theory [G] // ASHRAE Trans, 1990,96(1):447-53
- [18] Liesen R J, Pedersen C O. Modeling the energy effects of combined heat and mass transfer in building elements: part 1—theory [G] // ASHRAE Trans, 1999, 105(2): 941-953
- [19] 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 [G] // ASHRAE Trans, 1999, 105 (2):954-961
- [20] Cunningham M J. Moisture diffusion due to periodic moisture and temperature boundary conditions—an approximate steady analytical solution with nonconstant diffusion coefficients [J]. Building and Environment, 1992, 27 (3):367-377
- [21] 林瑞泰. 多孔介质传热传质引论[M]. 北京:科学出版社,1995
- [22] Mendes N, Philippi P C, Lamberts R. A new mathematical method to solve highly coupled equations of heat and mass transfer in porous media [J]. Int J of Heat and Mass Transfer, 2002,45(3): 509-518
- [23] Lu Xiaoshu. Modelling of heat and moisture transfer in buildings, I model program [J]. Energy and Buildings, 2002,34(4):1033-1043