

建筑结构中的湿迁移*

陶 智

北京航空航天大学动力系,
北京(邮政编码100083)

康 宁

北京航空航天大学流体所,
北京(邮政编码100083)

G.H.Galbraith

Dept. of Building & Surveying
Caledonian University, U.K.

R.C.McLean

Dept. of Thermo-Fluid & Environmental Eng.
University of Strathclyde, U.K.

提要 本文有三部分内容。第一部分是就现有各种多孔建筑材料中的湿迁移理论进行回顾,并讨论了以 Glaser 为代表的纯蒸汽扩散模型和以 Luikov 为代表的水蒸汽和液态水同时存在同时传递的混合模型的优缺点,指出纯蒸汽扩散模型虽然简单易用,但从机理上违背了实际;而水蒸汽和液态水混合传递模型虽然在机理上较符合实际情况,却由于模型中所需实验待定参数的不确定性而不能得到发展。指出混合传递模型的根本突破在于多孔介质湿迁移中以水蒸汽和液态水两种状态同时传递时各自传递速率的确定。

第二部分是理论分析,在简化多孔介质中湿迁移机理的基础上,给出了一个用常规材料湿迁移系数确定其中水蒸汽和液态水各自传递速率的方法,并给出了若干典型建筑材料中水蒸汽和液态水的传递系数。

第三部分是建立完整的湿迁移理论控制方程组,并就具体情况给出各种边界条件。理论模型既考虑了水蒸汽的传递也考虑了毛细内部液态水的存在和传递。通过有限差分方法将理论方程组离散,并用其相应的计算机程序对一单壁和一典型建筑墙壁结构在标准大气条件下的湿迁移进行模拟计算,并做了分析讨论。

关键词 湿迁移; 多孔建筑材料; 内部毛细冷凝

1 引言

湿分对建筑的影响日趋严重,只有两千万人口的英国的两项调查中就指出英国约有三百五十万的住宅受到湿分不同程度的破坏^[1,2]。湿分对建筑的影响可分为内、外两个方面。外部影响主要表现在可见的建筑表面的冷凝和长霉,在这方面各国科学工作者所做工作较多。内部影响则是湿分在多孔建筑材料毛细结构内部的冷凝所带来的一系列问题。建筑材料内部

* 本工作由英国国家科学工程委员会 (SERC) 及中国国家教委优秀青年教师基金资助。

冷凝水的积累会导致材料性能的恶化,甚至结构破坏。这个问题在目前大量采用新型建筑材料的情况下尤为突出,因为新型材料大都对水的存在极为敏感。因而研究材料的含湿特性,研究多孔建筑材料中的湿迁移以防止冷凝水在材料内部的过量积累成为科学工作者极为感兴趣的问题。在工程设计中,以 Glaser^[3]提出的纯蒸汽扩散模型为代表的稳态理论^[4-6]多年来一直被普遍采用。原因在于这类模型用简单的几个步骤就可以计算出湿迁移速率,预估出建筑结构内部冷凝的可能性和冷凝可能发生的位置。但此类模型的致命弱点在于它们的基本假设。它们假设在多孔介质内部只存在水蒸汽,湿迁移只是以水蒸汽的形式进行的,传递的驱动力是蒸汽分压梯度,湿迁移速率符合费克定律(Fick's Law),即

$$j_m = -\mu \nabla p_1 \quad (1)$$

式中 j_m 为总湿迁移速率, μ 为湿迁移系数, p_1 为蒸汽分压。但由于多孔介质的毛细作用,除极低的相对湿度情况外,毛细结构内部实际上都存在冷凝水。对于大多数建筑材料,在一般情况下,它们的含湿量中冷凝水所占的比例远大于水蒸汽的比例。Rose^[7,8]在1963年对湿分在多孔介质中传递的机理做了实验研究,认为对于不同的相对湿度存在4个不同的阶段:

第1阶段:吸收。这一阶段发生在极低的相对湿度的情况下($\sim 0.6\%$)。在这一阶段,湿分进入多孔介质但没有传递出去,而是全部吸附在介质内部毛细表面,形成单分子表面。

第2阶段:蒸汽传递。在稍高相对湿度时,湿分开始传递出去,此时为纯蒸汽分子扩散。

第3阶段:蒸汽和水同时传递。除第1、2阶段中低的相对湿度条件外,在多孔介质内都将有毛细冷凝发生。一开始,冷凝在最小的毛细孔内产生,然后随着相对湿度的逐渐增加而逐渐充满全部孔隙。在这个阶段,湿分是以水蒸汽和液态水两种状态同时传递的。实际上,实验显示由于液态水的存在湿迁移速率得到大大提高^[9,10]。

第4阶段:水传递。在相对湿度 $>98\%$ 时,冷凝水已充满所有的孔隙而形成一连续相,此时为纯水传递。

工程中的情况一般是处于第3阶段的,即液态水和水蒸汽是同时并存、同时传递的。由此可见在传递机理上纯蒸汽扩散模型是远脱离实际的。而且纯蒸汽扩散理论认为湿迁移的驱动力唯一的是蒸汽分压。但实际上除蒸汽分压外,温度梯度也是存在并发生作用的。早在1939年,Rowley^[11]就认为简单的蒸汽扩散理论对湿分在多孔介质中的传递是不够的,在非恒温条件下,热量和质量的传递应该是相互影响相互作用的。de Vrier 和 Philip^[9,10]在土壤力学领域中也论证了简单地以蒸汽分压为驱动力的扩散理论的不足,认为湿迁移是以水蒸汽和液态水两种状态进行的,而且驱动力也应包括温度梯度。Luikov^[12,13]经过对多孔介质内湿迁移的多年研究给出了一维湿迁移的控制方程组

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \varepsilon \frac{L}{c_p} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial j_m}{\partial x} \quad (3)$$

$$j_m = \alpha \frac{\partial u}{\partial x} + \beta \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4)$$

式中 T 为热力学温度, k 为材料的导热系数, L 为水的相变潜热, c_p 为定压比热容, u 为材料的含湿量, t 为时间,式(4)的 j_m 为以含湿量梯度和温度梯度为驱动力的包括水蒸汽和

液态水的总湿迁移速率，式(2)中的 ε 为相变系数(phase conversion factor)，其定义式为

$$\varepsilon = \frac{j_{m_1}}{j_{m_1} + j_{m_2}} \quad (5)$$

ε 的物理意义是湿迁移中水蒸汽传递所占的比率。式(5)中 j_{m_1} 为水蒸汽扩散速率， j_{m_2} 为液态水的传递速率。

上述控制方程组奠定了液态水和水蒸汽同时传递混合模型的理论基础，此后大量的工作基本上是在此基础上开展起来的^[14-16]。这类模型的优点在于从机理上较真实地反映了在多孔介质中的湿迁移过程，而且由于混合模型基本上都是非稳态的，所以可以就建筑材料和建筑结构在真实外界条件下长期变化的特性做出模拟。但混合模型的欠缺之处在于控制方程中引入了需由实验确定的参数，即上面列出的湿迁移控制方程组中的相变系数 ε 。Luikov没能给出相变系数的测定方法。由 ε 的定义式可知它的确定完全依赖于是否掌握湿迁移过程中水蒸汽和液态水各自的传递速率。这带来了相当大的困难，因为由于多孔建筑材料内部结构极为复杂，其中各组分又相互影响，实验上就目前的实验技术能直接测定的只是总的湿迁移速率。尚无分别测定水蒸汽和液态水传递速率的报道。各混合模型对相变系数 ε 的处理上没有突破性进展。有的凭经验取定^[14]，有的则在基本概念上发生严重错误^[15,16]，都没有真正地能把相变系数 ε 确定下来。这使得混合传递模型在可靠性和准确性上让人颇有疑义，因而也无法广泛应用于工程设计中。

综观各混合模型，根本性的突破在于湿迁移中水蒸汽和液态水各自传递速率的确定。一旦掌握这两个速率，控制方程组封闭，结合具体的边界条件便可用数值方法求解。下面要介绍的是笔者给出的一个利用常规的材料湿迁移系数的测定实验来确定水蒸汽和液态水各自传递速率的方法，并给出几种典型建筑材料的水蒸汽和液态水的传递系数。

2 湿迁移中各组分传递速率的确定

在推导过程中，将首先假定多孔介质是均匀的，不考虑材料在制作过程中造成的不均匀性。认为多孔介质内部的总压场均匀，总压梯度为零。这个假定对一般情况是合适的。此外由于结构内的温度梯度不大，可以忽略纯粹由温度梯度产生的分子热扩散。在这假定条件的基础上，对于水蒸汽这种气相分子扩散，其传递驱动力为浓度梯度或密度梯度；而对于在多孔介质的毛细结构中液态水的传递，其驱动力为液态水的毛细压力(capillary pressure)梯度，这样通过多孔介质内任一点的湿迁移就可以表示为

$$j_m = j_{m_1} + j_{m_2} = -D_1 \nabla \rho_1 - D_2 \nabla p_2 \quad (6)$$

D_1 为水蒸汽扩散系数， D_2 为液态水的传递系数， ρ_1 为水蒸汽的密度， p_2 为液态水的毛细压力。

如果假定水蒸汽可以当做完全气体来处理，则水蒸汽传递速率可以展开为

$$j_{m_1} = -D_1 \nabla \rho_1 = -\frac{D_1}{R_1 T} \nabla p_1 + \frac{p_1 D_1}{R_1 T^2} \nabla T \quad (7)$$

式中 R_1 为水蒸汽的气体常数。

利用开尔文(Kelvin's)公式和克劳修斯-克拉百龙(Clausius-Clapeyron)公式，液态水的毛细压力梯度可表示为

$$\nabla p_2 = \frac{R_1 T \rho_2}{p_1} \nabla p_1 + R_1 \rho_2 \left(\ln \phi - \frac{L}{R_1 T} \right) \nabla T \quad (8)$$

式中 ϕ 为相对湿度, $\phi = p_1/p_s$, p_s 为对应热力学温度 T 的饱和蒸汽压.

这样式 (6) 的湿迁移速率可以展开为

$$j_m = j_{m_1} + j_{m_2} = - \left(\frac{D_1}{R_1 T} + \frac{D_2 R_1 T \rho_2}{p_1} \right) \nabla p_1 + \left[\frac{p_1 D_1}{R_1 T^2} - D_2 R_1 \rho_2 \left(\ln \phi - \frac{L}{R_1 T} \right) \right] \nabla T \quad (9)$$

式 (9) 为在总压梯度为零, 忽略纯分子热扩散条件下以蒸汽分压梯度和温度梯度为驱动力的湿迁移速率表达式. 式中两大括号中的第一项为蒸汽传递速率的一部分, 第二项为液态水的传递速率的一部分, 在等温条件下, 温度梯度为零, 上式简化为

$$j_m = - \left(\frac{D_1}{R_1 T} + \frac{D_2 R_1 T \rho_2}{p_1} \right) \nabla p_1 \quad (10)$$

用材料的等温湿迁移系数 (moisture permeability) μ , 湿迁移速率可以表示为

$$j_m = - \mu \nabla p_1 \quad (11)$$

式中的等温湿迁移系数 μ 为温度和相对湿度的函数, $\mu = \mu(T, \phi)$ [17-19]. 比较式 (10) 和式 (11) 得到

$$\mu = \frac{D_1}{R_1 T} + \frac{D_2 R_1 T \rho_2}{\phi p_s} \quad (12)$$

公式中, μ , D_1 和 D_2 都是温度和相对湿度或蒸汽分压的函数. 式 (12) 把等温湿迁移系数分为两部分: 右式第一项为水蒸汽传递的贡献; 第二项为液态水传递的贡献. 由于多孔介质中扩散空间的限制和复杂的毛细结构, 上式的蒸汽扩散系数 D_1 与大量空气中蒸汽的扩散系数 D_0 不同. D_1 和 D_0 之间的关系可以通过考虑材料的孔隙弯曲度等因素来建立 [9,20], 即

$$D_1 = D_0 \nu \alpha \quad (13)$$

式中 D_0 为蒸汽在大量空气中的分子扩散系数, ν 为毛细结构的弯曲度, α 为多孔介质中气相所占空间率.

对一多孔介质而言, 随着相对湿度的增加, 内部冷凝水含量随之增加, 从而导致单位体积材料中气相所占空间 α 和气体分子扩散通道弯曲度 ν 的变化. 这个变化与材料的毛细结构及其含湿量有直接的关系. 取材料一微元块并任切一截面 A , 其中 A_1 的面积为气相所占, A_2 的面积为液相所占. 把这一截面中的液相和气相理想化为单连通域, 即 A_1 和 A_2 分别为单连通域. 由多孔介质各向均匀假设可推断在 A_1 中单位体积材料的气相所占空间和气体分子扩散通道弯曲度将保持不变. 在 A_2 中, 则由于完全被液态水充满, 气相的扩散传递将为零. 这样可以引入一水蒸汽扩散有效面积系数 τ , 使得多孔介质中水蒸汽的扩散系数表示为

$$D_1 = \tau D_0 \nu \alpha = \tau D_1' \quad (14)$$

上式与式 (13) 不同之处在于 ν 和 α 在式 (12) 中为随温度和相对湿度变化而变化的变量, 而在式 (14) 中却为常量, 材料一定, 则式 (13) 中的 ν 和 α 为定常量. 若多孔介质的孔隙率为 ξ , 等温吸收含湿量 (sorption isotherm moisture content) 为 u , 则水蒸汽扩散有效面积系数可表示为

$$\tau \approx 1 - \frac{\rho_0 u}{\rho_2 \xi} \quad (15)$$

对于液态水的传递系数，考虑到当相对湿度趋于零时 $\phi \rightarrow 0$ ，液态水含量为零，其传递速率为零，可以把相对湿度对其影响明确表示为

$$D_2 = D'_2 \phi^n \quad (16)$$

式中 D'_2 在等温的条件下对一确定材料为常数，指数 n 为一由实验确定的与材料性质有关的参数。提出式(16)中相对湿度的指数形式是笔者在大量实验工作的基础上分析得出的。把式(14)，(15)和(16)代入式(12)，将湿迁移系数变为

$$\mu = \frac{D'_1}{R_1 T} \tau + \frac{D'_2 R_1 T \rho_2}{p_s} \phi^{n-1} = D_1^* \left(1 - \frac{\rho_0 u}{\rho_2 \xi}\right) + D_2^* \phi^m \quad (17)$$

式中 $m = n - 1$ ， $D_1^* = \frac{D'_1}{R_1 T}$ ， $D_2^* = \frac{D'_2 R_1 T \rho_2}{p_s}$ 。

在式(17)中， ρ_0 和 ξ 为干材料的物理参数； ρ_2 为液态水的密度； D_1^* 和 D_2^* 在总压不变的条件只是温度的函数；等温吸收含湿量 u 为相对湿度的函数。具体函数形式可由实验测得。因在等温的实验条件下， T 为常量，其中独立变量只有相对湿度 ϕ ，需要测定的是三个常量： D_1^* 、 D_2^* 和 m 。利用中值定理取材料的湿迁移系数在一定的相对湿度范围内的平均值。由式(17)可得

$$\bar{\mu} = D_1^* \left(1 - \frac{\rho_0 \bar{u}}{\rho_2 \xi}\right) + \frac{D_2^*}{\Delta \phi (m+1)} (\phi_2^{m+1} - \phi_1^{m+1}) \quad (18)$$

式中 $\bar{\mu}$ 和 \bar{u} 分别为在 $\phi_2 - \phi_1$ 相对湿度区间内的平均湿迁移系数和平均含湿量。

根据式(18)，在实验中首先测得材料在0—100%相对湿度范围内的等温吸收含湿量曲线 $u = u(\phi)$ ，再于0—100%的相对湿度范围内至少做三套湿迁移系数测定的实验，给出相应的平均湿迁移系数以确定式中的三个常量： D_1^* 、 D_2^* 和 m 。一旦掌握了这三个量，湿迁移中水蒸汽和液态水各自传递速率也就随之确定了。以蒸汽分压梯度和温度梯度为驱动力的湿迁移的总表达式(9)也完全确定，与湿传递速率有关的问题从而得到解决。

至此，总的湿迁移速率的各组元分量已被分离开来，下面就典型的建筑材料——木材给出实验结果。

木材的来源为挪威(Norwegian spruce variety)，厚度14 mm，干密度388 kg/m³，孔隙率经测定为76.5%。湿迁移测定方法为符合英国4370标准(BS 4370)的等温杯实验(isothermal cup test)^[21]。具体实验步骤从略，欧共体各国采用的标准及对它们的鉴定可参见文献[22—25]。下表格为四组湿迁移系数的测定实验条件和结果。

表 1 木材测定的实验条件和结果

| 材料名称 | 实验温度 ℃ | 相对湿度(%) 范围 | 测定的平均湿迁移系数×10 ¹³ (s) |
|----------|-----------|---------------|---------------------------------|
| 挪威 云杉 | 20 | 0—60 | 1.8 |
| | | 90—60 | 11.5 |
| | | 100—60 | 14.2 |
| | | 100—80 | 23 |

对该材料进行的等温吸收含湿量实验（具体实验步骤从略，可参见文献[26]。文献[27]给出大量常用建筑材料的等温吸收含湿量数据）给出 $u = u(\phi)$ 的具体关联式如下：

$$u = 0.4198 \left(1 - \frac{\ln \phi}{0.453} \right)^{-0.63} \quad (19)$$

将以上的实验结果代入式（18）即可得到该木材的湿迁移系数和其中水蒸汽和液态水的各自传递系数，从而得到式（17）为

$$\begin{aligned} \mu &= D_1^* \left(1 - \frac{\rho_0 u}{\rho_2 \xi} \right) + D_2^* \phi^m \\ &= 1.58 \times 10^{-12} (1 - 0.508u) + 3.70 \times 10^{-11} \phi^{0.04} \end{aligned} \quad (20)$$

忽略液态水密度随温度的变化，由上式给出式（9）的湿迁移速率明确表达式为

$$\begin{aligned} j_m = j_{m_1} + j_{m_2} &= - \left\{ \left[4.63 \times (1 - 0.508u) \frac{1}{T} + 2.95 \frac{T}{p_s} \phi^{0.04} \right] \nabla p_1 \right. \\ &\quad \left. + \left[4.63 \times (1 - 0.508u) \frac{p_1}{T^2} - 2.95 \times \left(\ln \phi - \frac{L}{R_1 T} \right) \phi^{10.04} \right] \nabla T \right\} \times 10^{-10} \end{aligned} \quad (21)$$

其中水蒸汽和液态水各自的传递速率为

$$j_{m_1} = -4.63 \times 10^{-10} (1 - 0.508u) \frac{1}{T} \left(\nabla p_1 - \frac{p_1}{T} \nabla T \right) \quad (22)$$

$$j_{m_2} = -2.95 \times 10^{-10} \phi^{0.04} \left[\nabla p_1 + \left(\ln \phi - \frac{L}{R_1 T} \right) \phi \nabla T \right] \quad (23)$$

用此实验及计算方法也可相应地得到其它多孔建筑材料中液态水和水蒸汽各自的传递速率系数，由于篇幅有限在本文中不再一一列出。有了湿迁移的总速率和各组元的传递速率，使得多孔建筑材料和建筑结构中的湿迁移的计算成为可能。下面开始建立湿传递的控制方程组和适当的定解条件。

3 水蒸汽和液态水同时传递的湿迁移混合模型

在以下的理论分析和建立模型的过程中，将假定多孔介质中任一点的温度皆在冰点以上，即过程中没有结冰，多孔介质内将只有水、水蒸汽和惰性气体（干空气）。为避开多孔建筑材料内部的极端复杂性，建立模型基于下列假设：（1）多孔介质为各向同性，均匀连续；（2）各变量在介质内连续；（3）局部热力学平衡。

在以下公式中，下标 0 代表干的多孔介质， i 代表其中各组元： $i=1$ 为蒸汽， $i=2$ 为水， $i=3$ 为惰性气体（干空气）。

3.1 控制方程组

考虑各向同性均匀连续多孔介质内任一组元是质量守恒的，即可得

$$\frac{\partial \rho_0 u_i}{\partial t} = -\nabla \cdot j_{m_i} + I_i \quad (24)$$

式中 u_i 为材料中各组元的质量含量。 I_i 为第 i 组元产生率，并满足 $\sum I_i = 0$ ，对无化学反应的情况， $I_3 = 0$ 。若不考虑由于含湿而发生的材料体积变化，则式中多孔介质的干密度 ρ_0 为常数。一般情况下，含湿量中液态水占的比例远大于气相，即 u_1 和 $u_3 \ll u_2$ 。

方程 (24) 也可写成

$$\frac{\partial \rho_0 u}{\partial t} = -\nabla \cdot (\sum j_{m_i}) = -\nabla \cdot j_m \quad (25)$$

关于湿分通过多孔建筑材料的传递问题, 总压可认为是一常数。由于传递过程运动极为缓慢, 可以忽略流体变形, 也不考虑辐射换热以及重力场的影响。在此简化基础上由相应的能量守恒定律可得到

$$\frac{\partial}{\partial t} (\sum h_i \rho_i u_i) = -\nabla \cdot (q + \sum h_i j_{m_i}) \quad (26)$$

式中 h 为比焓, q 为导热速率。

利用连续方程 (24), 上式可变为

$$c_p \rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} + h_1 \frac{\partial (\rho_0 u_1)}{\partial t} + h_2 \frac{\partial (\rho_0 u_2)}{\partial t} = -\nabla \cdot q - \sum c_{p_i} j_{m_i} \nabla T - \sum h_i \nabla \cdot j_{m_i} \quad (27)$$

式中 c_{p_i} 为第 i 组元的定压比热容, $c_p = \sum c_{p_i} u_i$ 。

上式是能量方程的基本形式。式中的湿迁移各组元传递速率用上面介绍的方法确定。此能量方程可就下面两种情况做相应的简化。

3.1.1 吸湿性 (hygroscopic) 材料的能量方程

对吸湿性材料, 除较低的相对湿度条件外, 湿分在多孔介质内主要是以液态水的形式存在, 也就是说

$$u_2 \gg u_1, \quad u_2 \approx u = u_1 + u_2 \quad (28)$$

把此条件用于连续方程 (24) 可得关系

$$I_1 = \nabla \cdot j_{m_1} \quad (29)$$

利用上式, 能量方程 (27) 可简化为

$$c_p \rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot q - \sum c_{p_i} j_{m_i} \nabla T + L \nabla \cdot j_{m_1} \quad (30)$$

式中 $L = h_2 - h_1$ 为水的相变潜热。

上式是在条件 (28) 的情况下推出的, 但当相对湿度很低, 或者多孔材料为非吸湿性时, 多孔介质中液态水和水蒸汽的含量处于同一量级, 式 (28) 和式 (29) 不满足, 应用能量方程 (30) 将产生相当大的误差。对这种情况则须采用下面另一形式的能量方程。

3.1.2 非吸湿性 (non-hygroscopic) 材料或相对湿度低时的能量方程

对非吸湿性材料或相对湿度较低条件下的吸湿性材料, 由于其中蒸汽含量不可忽略, 能量方程 (30) 不再适用。但对此情况, 可以断定其气相所占体积将远远大于液相体积, 多孔介质的内空间将主要为气相。若完全忽略液相所占体积, 利用材料的孔隙率 ξ , 则

$$\rho_0 u_1 = \xi \rho_1 \quad (31)$$

如认为水蒸汽可近似当作理想气体处理, 并利用材料的等温湿吸收曲线, 可推出此时的能量方程为

$$a_k^i \frac{\partial T}{\partial t} + a_k^{i-1} \frac{\partial p_i}{\partial t} = -\nabla \cdot q - \sum c_{p_i} j_{m_i} \nabla T + \sum_{i=1}^2 h_i \nabla \cdot j_{m_i} \quad (32)$$

式中的参数为

$$a_k^r = c_p \rho_0 - L \xi \frac{p_1}{R_1 T^2} + h_2 \rho_0 a_u^{p_1} \quad (33)$$

$$a_k^{p_1} = L \xi \frac{1}{R_1 T} + h_2 \rho_0 a_u^r \quad (34)$$

上式中的 $a_u^r = \left(\frac{\partial u}{\partial p_1} \right)_T$, 等温吸收含湿量曲线的斜率。

$a_u^{p_1} = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_{p_1}$, 可由不同温度下的等温吸收含湿量曲线算出。

综合以上的讨论, 现可给出下列完整的控制方程组

$$\frac{\partial \rho_0 u_i}{\partial t} = -\nabla \cdot j_{m_i} + I_i \quad (24)$$

$$\text{当 } u_2 \cong u, \quad c_p \rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot q - \sum c_{p_i} j_{m_i} \nabla T + L \nabla \cdot j_{m_1} \quad (30)$$

$$\text{当 } O(u_2) = O(u_1), \quad a_k^r \frac{\partial T}{\partial t} + a_k^{p_1} \frac{\partial p_1}{\partial t} = -\nabla \cdot q - \sum c_{p_i} j_{m_i} \nabla T + \sum_{i=1}^2 h_i \nabla \cdot j_{m_i} \quad (32)$$

$$j_{m_1} = -\frac{D_1}{R_1 T} \nabla p_1 + \frac{p_1 D_1}{R_1 T^2} \nabla T \quad (35)$$

$$j_{m_2} = -\frac{D_2 R_1 T \rho_2}{\rho_1} \nabla p_1 - D_2 R_1 \rho_2 \left(\ln \phi - \frac{L}{R_1 T} \right) \nabla T \quad (36)$$

$$u = u(p_1, T) \quad (37)$$

$$q = -k \nabla T \quad (38)$$

视不同材料和不同相对湿度确定使用式 (30) 和 (32) 中的一个。式 (37) 为材料在一定条件下的含湿量, 通常情况下 $u(p_1, T)$ 与温度的关系不大, 所以式 (36) 可以用等温吸收含湿量曲线。式 (38) 中的 k 为含湿材料的导热系数, 它不是常数而是材料含湿量的函数 $k = \sum k_i u_i$, i 取值为 0—3。上述控制方程组结合适当的定解条件即可用数值方法求解。

3.2 湿迁移的定解条件

求解以上得到的控制方程组需要确定适当的初始条件和边界条件。初始条件可以定义全计算域各参变量均匀或按某一形式给定。对一建筑结构来说, 边界条件包括与环境接触的墙壁表面和结构内部不同材料间分界面上的各种不同条件。建筑结构的墙壁表面又因与环境的对流形式不同而分为与建筑结构内空间接触的内表面和与外空间接触的外表面。建筑结构内不同材料的分界面也由于考虑到具有特殊性质的空气层 (air gap) 和水蒸汽阻碍层 (vapour barrier) 的可能存在而又细分为多种形式。下面就不同情况分别进行讨论。

3.2.1 建筑结构的内外表面

建筑结构的内外表面与周围的环境接触。环境的状况由温度, 相对湿度或蒸汽分压以及不同的对流传热传质形式而确定。可表示为

$$\begin{cases} T_e = T_e(t) \\ P_e = P_e(t) \text{ or } \phi_e = \phi_e(t) \\ \text{convection conditions} \end{cases} \quad (39)$$

式中下标 e 表示为环境参量。

环境条件都是时间的函数，可以是真实的气候数据库，也可以是假想的各种气候条件。

建筑结构的内表面一般说来是处于自然对流状态，其传热系数 H 按 CIBSE GUIDE [28] 的取值为：墙壁 $3.0 \text{ W/m}^2\text{K}$ ；天棚 $4.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ；地面 $1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ 。建筑结构的外表面一般说来是处于强迫对流状态的，这方面的实验关联式很多，下面的传热系数表达式是 Jurges (参见文献[16]) 给出的

$$H = \begin{cases} 5.82 + 3.96V & V \leq 5 \text{ m/s} \\ 7.68V^{0.75} & V \geq 5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (40)$$

式中 V 为风速。

而内外墙壁表面与周围环境的自然对流和强迫对流过程中，其传质边界层的水蒸汽分子扩散传质系数 β ，则可由下式得到：

$$\beta = 9.28 \times 10^{-4} H \quad (41)$$

上式对于通常建筑研究中所遇情况是适用的 [29]。

3.2.2 建筑结构内部的分界面

首先假设建筑结构内部不同材料之间的分界面是完全接触的 (perfect hygrothermal contact)，即接触表面对传热和传质都无任何阻力。提出这个假设的原因一方面是由于文献中很少有关于内部表面阻力的资料；另一方面是由于就一般情况而言表面阻力在整个结构阻力中所占比例不大，上述假设带来的误差不大。完全接触表面的边界条件为

$$\text{湿质量平衡} \quad j_{m_1}^{\text{in}} + j_{m_2}^{\text{in}} = j_{m_1}^{\text{out}} + j_{m_2}^{\text{out}} \quad (42)$$

$$\text{总能量平衡} \quad \sum j_{m_i}^{\text{in}} h_i^{\text{in}} - k' \nabla T' = \sum j_{m_i}^{\text{out}} h_i^{\text{out}} - k'' \nabla T'' \quad (43)$$

在 (42) 和 (43) 两式中，上标 in 代表进入接触面，out 代表离开接触面。上标 ' 代表图 1 中左边材料的右表面参量，'' 代表右边材料的左表面参量。

对于建筑结构内部可能存在的空气层将只考虑非强迫对流的一种形式，并认为空气层内沿传递方向温度和水蒸汽分压为线性分布的。对于水蒸汽阻碍层的处理是认为它对传热没有阻力，对湿迁移则只允许水蒸汽的分子扩散而完全阻止液态水的传递。由于空气层和水蒸汽阻碍层的特殊性质，在计算过程中实际上是把它们当做一种特殊接触表面来处理的，即空气层为具有传热阻力和传质阻力的材料接触表

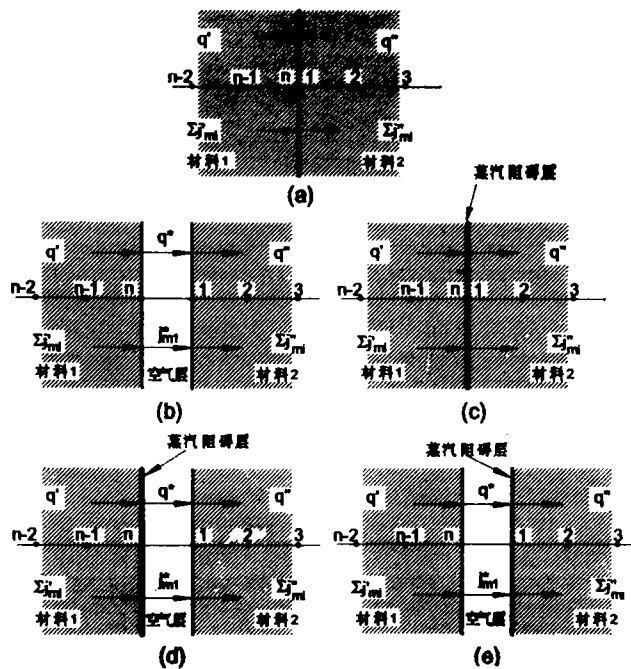


图 1 各种边界类型

面；而水蒸汽阻碍层为只有传质阻力的接触表面。这样可降低计算程序的复杂性。根据空气层和水蒸汽阻碍层的存在与否和不同位置，建筑结构内部边界条件可分为下面 5 种情况（参见图 1）：（a）材料-材料；（b）材料-空气层-材料；（c）材料-水蒸汽阻碍层-材料；（d）材料-水蒸汽阻碍层-空气层-材料；（e）材料-空气层-水蒸汽阻碍层-材料。

表 2 各种不同情况的边界条件

| 边界类型 | 边界条件 | |
|------|---|---|
| | 质量守恒 | 能量守恒 |
| (a) | $\sum j'_{m_i, n} = \sum j''_{m_i, 1}$ $p'_{1, n} = p''_{1, 1}$ | $\sum j'_{m_i, n} h'_{i, n} - k'_n \nabla T'_n = \sum j''_{m_i, 1} h''_{i, 1} - k''_1 \nabla T''_1$ $T'_{1, n} = T''_{1, 1}$ |
| (b) | $\sum j'_{m_i, n} = j^*_{m_i} = \sum j''_{m_i, 1}$ $j^*_{m_i} = -\frac{1}{\eta} (p''_{1, 1} - p'_{1, n})$ | $\sum j'_{m_i, n} h'_{i, n} - k'_n \nabla T'_n = q^* = \sum j''_{m_i, 1} h''_{i, 1} - k''_1 \nabla T''_1$ $q^* = -(T''_{1, 1} - T'_{1, n}) H^*$ |
| (c) | $\sum j'_{m_i, n} = j^+_{m_i} = \sum j''_{m_i, 1}$ $j^+_{m_i} = -\frac{1}{\zeta} (p''_{1, 1} - p'_{1, n})$ | $\sum j'_{m_i, n} h'_{i, n} - k'_n \nabla T'_n = \sum j''_{m_i, 1} h''_{i, 1} - k''_1 \nabla T''_1$ $T'_{1, n} = T''_{1, 1}$ |
| (d) | $\sum j'_{m_i, n} = j^+_{m_i} = j^*_{m_i} = \sum j''_{m_i, 1}$ $j^+_{m_i} = -\frac{1}{\eta + \zeta} (p''_{1, 1} - p'_{1, n})$ | $\sum j'_{m_i, n} h'_{i, n} - k'_n \nabla T'_n = q^+ = q^* = \sum j''_{m_i, 1} h''_{i, 1} - k''_1 \nabla T''_1$ $q^+ = q^* = -(T''_{1, 1} - T'_{1, n}) H^*$ |
| (e) | $\sum j'_{m_i, n} = j^*_{m_i} = j^+_{m_i} = \sum j''_{m_i, 1}$ $j^*_{m_i} = -\frac{1}{\eta + \zeta} (p''_{1, 1} - p'_{1, n})$ | $\sum j'_{m_i, n} h'_{i, n} - k'_n \nabla T'_n = q^* = q^+ = \sum j''_{m_i, 1} h''_{i, 1} - k''_1 \nabla T''_1$ $q^* = q^+ = -(T''_{1, 1} - T'_{1, n}) H^*$ |

根据以上的分析，在不同情况下边界条件（42）和（43）的具体形式由表 2 列出。表中公式上标'代表图 1 中左边材料的参量，''代表右边材料的参量，* 和 + 分别为空气层和水蒸汽阻碍层的参量。下标的第一项仍代表湿组员，第二项为计算网格的号码，其中 n 为每层材料的计算网格中最大的号码，1 为最小的网格号。式中 η 和 H* 分别为空气层的水蒸汽传递阻力系数和传热系数；ζ 为水蒸汽阻碍层的传递阻力。式中多孔材料内部的液态水和水蒸汽的传递速率的具体形式为式（35）和（36）。

3.3 计算模型

对于建筑结构的湿迁移，一般情况可简化为一维问题，上面导出的控制方程组可因而得到极大的简化。简化后的方程组利用下列有限差分显格式离散

时间导数
$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{y_i^{k+1} - y_i^k}{\Delta t}$$

空间一维导数
$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{y_{i+1}^k - y_{i-1}^k}{2\Delta x}$$

空间二维导数

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{y_{i+1}^k - 2y_i^k + y_{i-1}^k}{\Delta x^2}$$

左边墙壁表面

$$\left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{i-1} = \frac{-3y_1^k + 4y_2^k - y_3^k}{2\Delta x}$$

右边墙壁表面

$$\left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{i-n} = \frac{3y_n^k - 4y_{n-1}^k + y_{n-2}^k}{2\Delta x}$$

式中 y 为任一因变量。

具体离散方程组从略。根据离散方程完成计算机编程。下面对两个具体情况进行计算机数值计算。

4 计算结果及分析

4.1 103mm 厚的单层砖壁

首先进行简单的单层墙壁运算是因为在大量实验过程中积累的经验可对该类运算结果的合理性作出判断。本文所研究的 103mm 砖壁首先假定已在 65% 的相对湿度和 15℃ 的温度条件下达到平衡，然后一表面作为外表面，其环境条件变为 95% 的相对湿度和 5℃ 的温度，并伴有微弱的强迫对流。另一表面为内表面仍与相对湿度 65% 和温度 15℃ 的环境接触，对流形式为自然对流。由此带来的沿壁厚的温度梯度和蒸汽分压梯度将导致一维非稳态的湿迁移，材料内部各参数将发生变化直到最后达到稳定。以上环境条件的选择是按照英国设计标准 BS 5250 [30] 而确定的。计算机程序首先对前 30 天的情况进行了模拟，计算结果

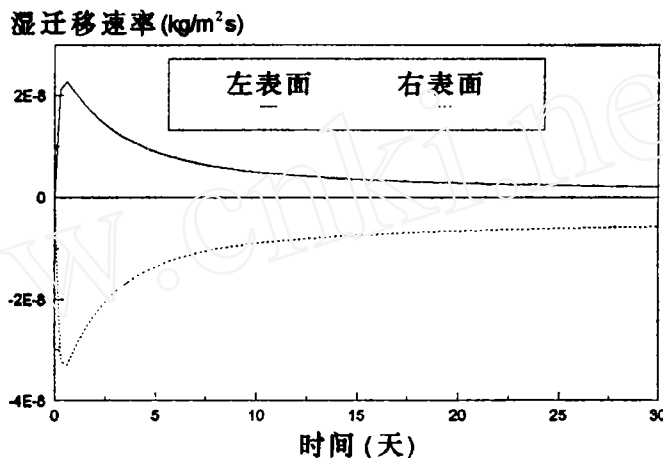


图 2 通过内外表面的湿迁移速率

含湿量 (kg 湿分/kg 材料)

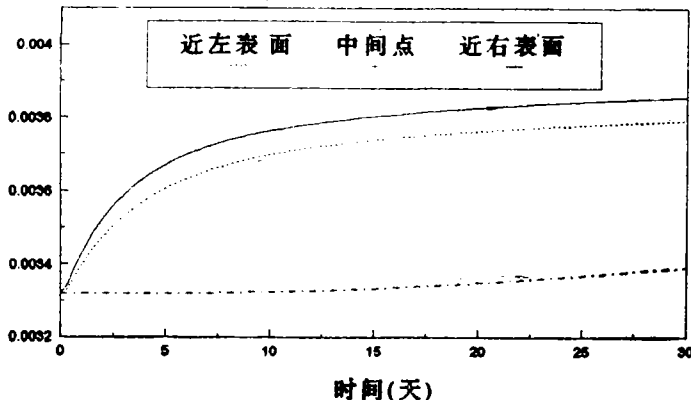


图 3 三选定点的含湿量变化

示于图 2 至图 5。图 2 示出通过砖壁内外两表面的湿迁移速率随时间变化的曲线；图 3 示出了壁内三选定点（两靠近表面点及中点）的含湿量随时间变化的曲线；图 4 示出了壁内三选定点的蒸汽分压随时间变化的曲线；图 5 示出了壁内三选定点的温度随时间变化的曲线。从计算结果可以看出过程是逐渐趋于稳定的，但在 30 天的期间内并没有达到稳定。从

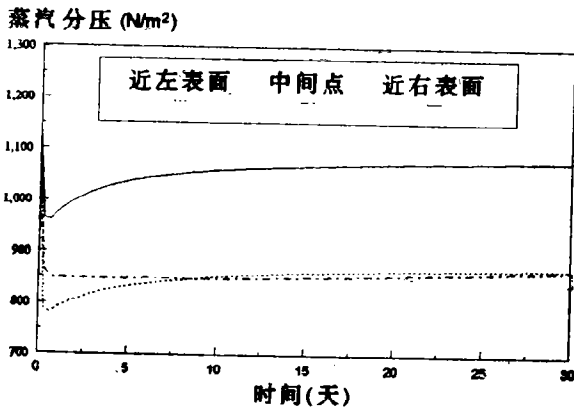


图4 三选定点的蒸汽分压变化

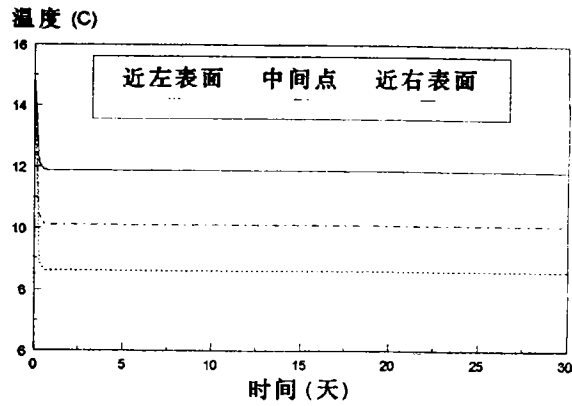


图5 三选定点的温度变化

图2看,通过内外表面的湿迁移速率仍有较大的差别,图3和图4也显示出材料内含湿量、蒸汽分压仍在变化中。从图5可见,即使导致能量运输和材料内物性变化的湿迁移未达稳定,但由于在此扩散传递过程中在能量传递中起决定作用的是导热,它的速率远远大于由于质量扩散导致的能量传递速率,所以材料内温度很快便趋于稳定,其它影响很微弱而不能觉察。以上的计算结果是合理的。对砖这种高密度、高含湿性和高湿迁移阻抗的材料,实验中一般是需要相当长时间才能使砖材样品达到稳定。现再对砖壁在365天期间的情况进行模拟,计算所得的通过内外两表面的湿迁移速率随时间的变化结果示于图6。从图上可以看出在365天时稳定状态已基本达到。通过一表面进入的湿量基本上完全由另一面扩散出去。图7示出壁

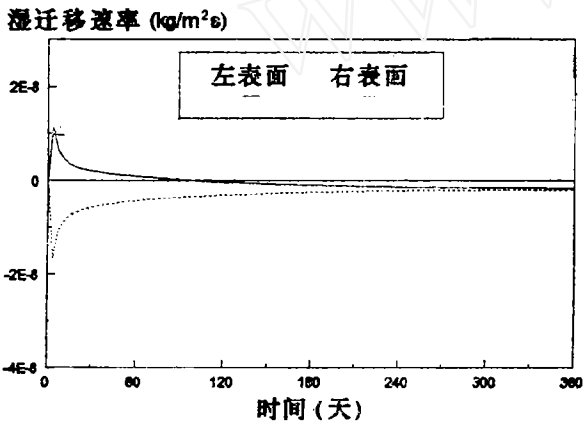


图6 通过内外表面的湿迁移速率

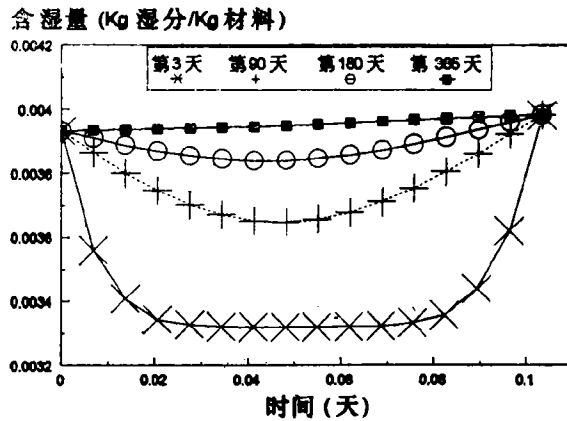


图7 材料内部不同时刻的含湿量

内各点含湿量在3天,90天,180天,365天的情况。从该图可以看出内外两表面由于与外界环境接触通过对流很快稳定下来,而材料内部靠扩散而缓慢变化,但到第365天时已基本趋于线性稳定。

4.2 一标准复合墙壁

本文所考虑的是英国建筑设计中一标准复合墙壁 (standard timber framed wall)。它包括一外砖层 (brick), 一空气层 (air gap), 一层胶合板 (plywood), 一层聚苯乙烯

保温材料 (polystyrene)。一蒸汽阻碍层 (vapour barrier) 和里面一石膏层 (plasterboard)。墙壁结构及尺寸见图 8。与 4.1 中单砖壁的情形一样, 复合壁也假定为在 $t=0$ 时已在 65% 的相对湿度和 15°C 的温度条件下达到平衡。然后墙壁结构的外砖面作为外表面, 其环境条件变为 95% 的相对湿度和 5°C 的温度, 墙壁结构的石膏面为内表面仍与相对湿度 65% 和温度 15°C 的环境接触。由此带来的沿壁厚度的温度梯度和蒸汽分压梯度同样将导致一维非稳态的湿迁移, 材料内部各参数将发生变化直到最后达到稳定。用计算机程序对前三个月 (90 天) 的情况进行模拟, 计算结果示于图 9 至图 17。图 9 至图 12 为墙壁结构内各材料层中三选定点 (两靠近表面点及中点) 含湿量随时间的变化情况。在这个复合墙壁中, 对于最左边的石膏层, 由于一开始温度的迅速降低, 局部相对湿度增大, 材料的平衡含湿量相应的增加, 平衡遭到破坏, 湿气从环境以较高的速率进入高吸湿性高湿迁移速率的石膏层。而此时石膏层的另一面与蒸汽阻碍层相接触, 蒸汽阻碍层完全阻止液态水的传递, 对蒸汽分子扩散也有相当大的阻力, 因此通过它的湿迁移速率将很小。这样, 石膏层的含湿量就迅速上升。随着温度的快速趋于稳定, 通过蒸汽阻碍层的湿迁移速率又很小, 石膏层很快就基本上趋于稳定。其它层的变化对其影响不大 (见图 9)。湿迁移通过蒸汽阻碍层从石膏层进入聚苯乙烯保温材料。该保温材料的特点是

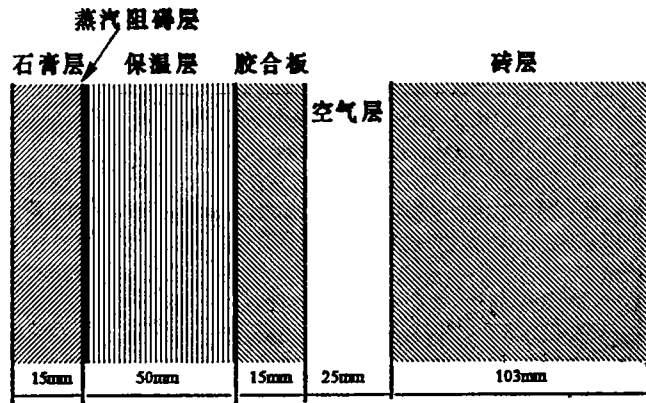


图 8 复合墙壁的结构尺寸

其它层的变化对其影响不大 (见图 9)。湿迁移通过蒸汽阻碍层从石膏层进入聚苯乙烯保温材料。该保温材料的特点是

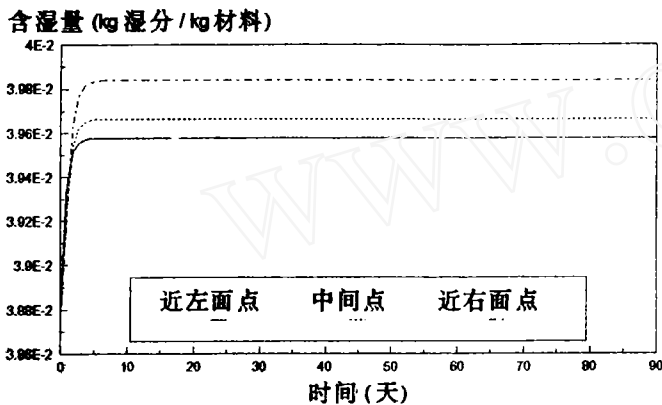


图 9 石膏层含湿量的变化

高孔隙率和非吸湿性, 通过这层材料的湿迁移主要是以蒸汽分子扩散的形式进行的。由于材料的含湿主要是蒸汽形式, 相对湿度对含湿量的影响不大, 加之湿迁移速率很

其它层的变化对其影响不大 (见图 9)。湿迁移通过蒸汽阻碍层从石膏层进入聚苯乙烯保温材料。该保温材料的特点是

高孔隙率和非吸湿性, 通过这层材料的湿迁移主要是以蒸汽分子扩散的形式进行的。由于材料的含湿主要是蒸汽形式, 相对湿度对含湿量的影响不大, 加之湿迁移速率很

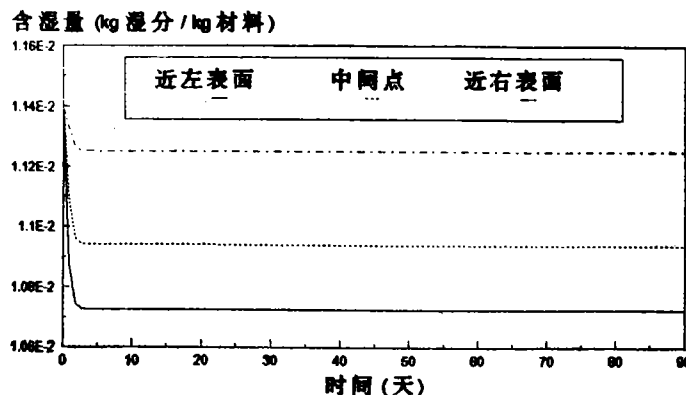


图 10 保温层的含湿量变化

小，各点相对湿度随时间的变化微小，因而保温层的含湿量除了因初始环境条件的突然变化

而引起的短暂的相对明显变化外很快便看不到变化了。

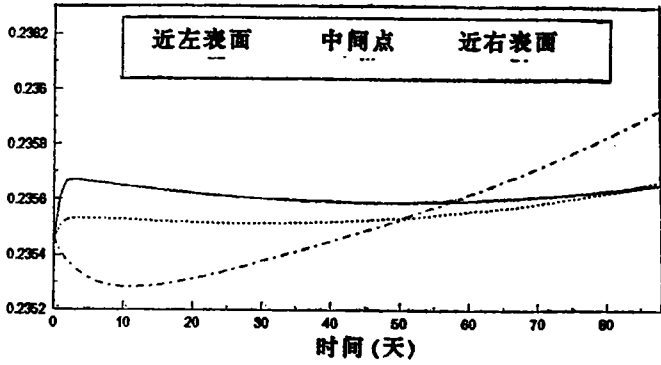


图 11 胶合板的含湿量变化

而图 10 中显示保温层的含湿量是首先快速降低，然后稳定在一较低的水平，而其它各层的含湿量都不同程度地有所增加。聚苯乙烯保温层的含湿量降低是由于层内蒸汽分压过低而造成的。由于保温层毗邻蒸汽阻碍层，从石膏层过渡到保温层的蒸汽分压有显著下降，尽管沿保温层有较大的温度降，饱和蒸汽压相应有所下降，但不足以弥补蒸汽分压的降低。

对于第三层的胶合板，其左边由于从保温层的湿迁移，使得左面的含湿量上升。胶合板的右面通过空气层与砖层相连。在初始阶段，温度降主要在砖层，高含湿量的砖层处于高度不平衡状态，导致从胶合板层的湿迁移，使得胶合板的右面含湿量迅速下降，最后波及到整个胶合板层，使各点含湿量都有所下降。随着温度分布迅速趋于稳定和砖层左面不平衡性的降低，从胶合板的湿迁移速率也随之降低，从保温层进

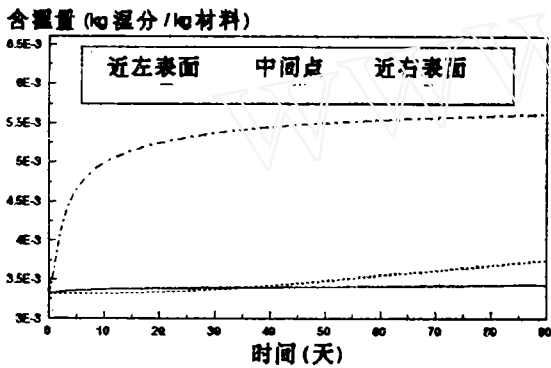


图 12 砖层的含湿量变化

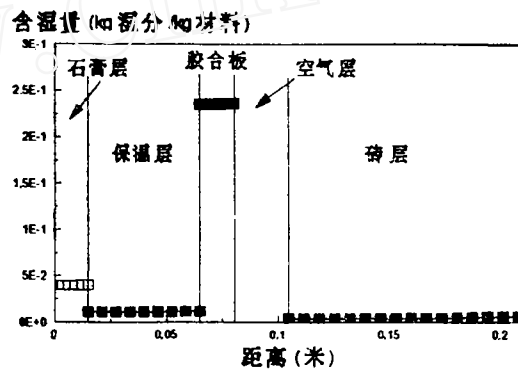


图 13 墙壁结构内含湿量

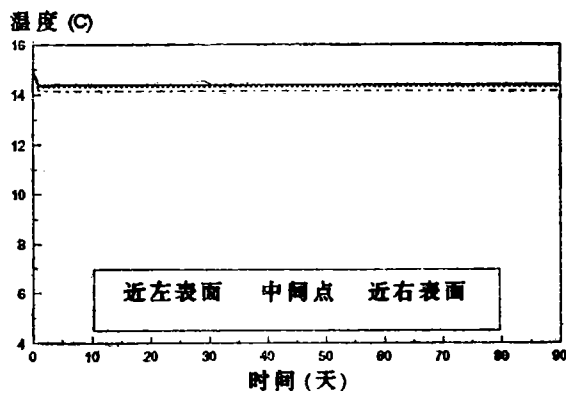


图 14 石膏层的温度变化

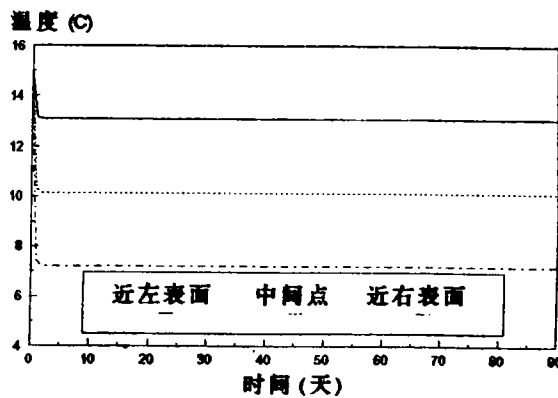


图 15 保温层的温度变化

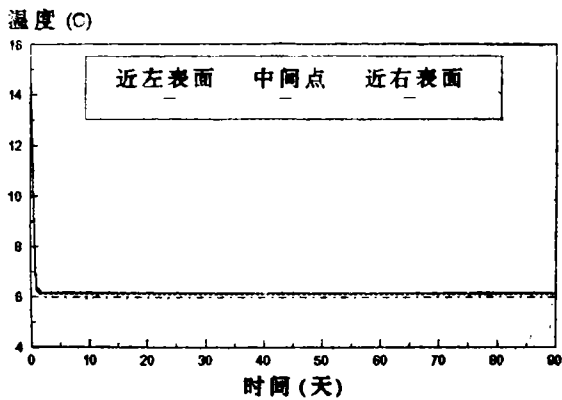


图 16 胶合板的温度变化

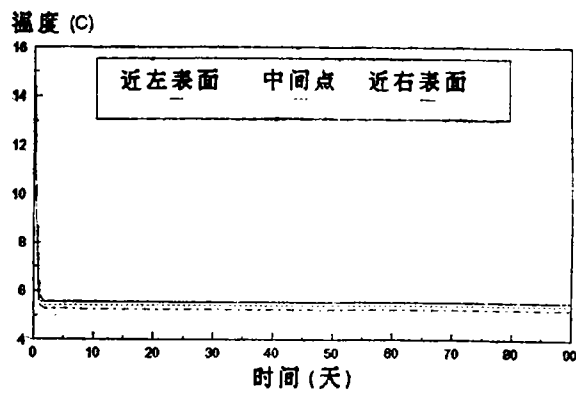


图 17 砖层的温度变化

入的湿量逐渐使胶合板的各点的含湿量开始回升(见图 11)。此建筑结构的最外层为砖层。初始阶段,由于蒸汽分压高于环境,温度尚未有足够的降低,湿开始由砖层向周围环境传递,砖层右面的含湿量以及蒸汽分压相应有所下降。随着温度的迅速降低,使得砖右边含湿量处于高度不平衡状态,湿气开始从环境进入砖层。这一切都发生在初始很短的几个小时内,所以在图 12 显示不出。之后从环境和通过空气层从胶合板到砖层的湿迁移使其含湿量逐渐上升(见图 12)。在单层砖壁的计算中得知需要一年多的时间单层砖壁才能达到稳定。对于该复合壁,砖层左边不是直接与环境接触,则达到稳定所需时间将更长。图 13 给出了在第 90 天复合墙壁内的各层含湿量的详细情况。可以看出胶合板的含湿量达 24%,而且有继续上升的趋势。含湿量对胶合板是很重要的,超过 20% 就将严重影响其性能^[31,32]。此计算结果说明该标准复合墙壁在设计上是不合理。图 14 至图 17 显示由于导热起决定性作用使墙壁内温度变化迅速达到稳定。图 18 显示了在第 90 天复合墙壁内温度的详细情况,各层内部都已达线性稳定。图 19 给出了复合墙壁内局部湿迁移速率在 90 天时的详细情况。可以看出此时仍

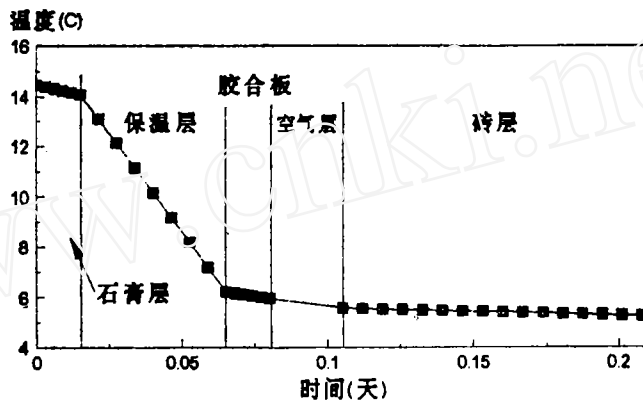


图 18 墙壁结构内温度分布

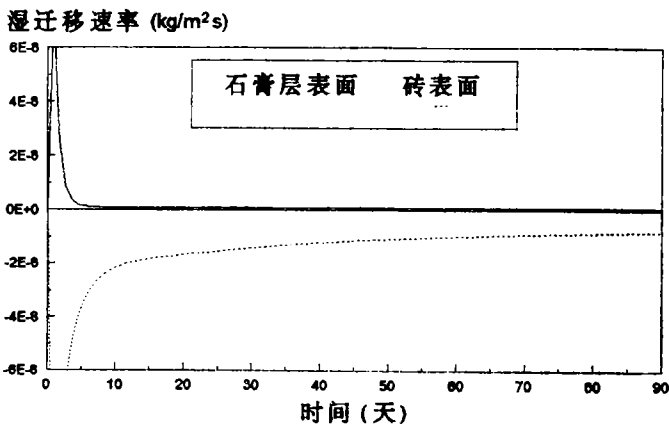


图 19 通过内外两表面的湿迁移速率

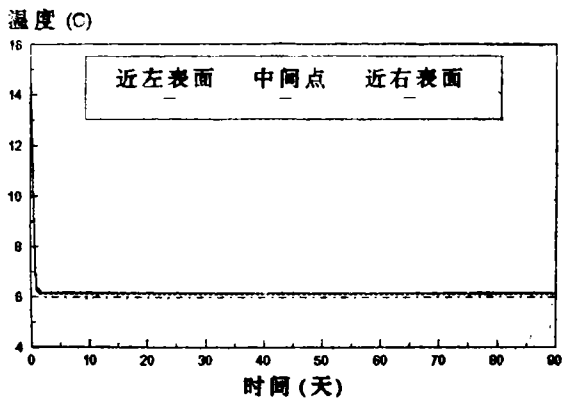


图 16 胶合板的温度变化

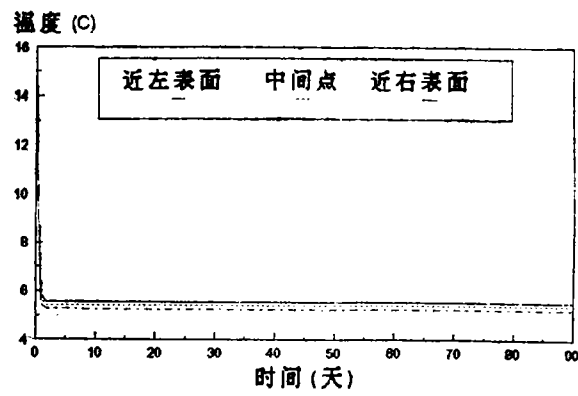


图 17 砖层的温度变化

入的湿量逐渐使胶合板的各点的含湿量开始回升（见图 11）。此建筑结构的最外层为砖层。初始阶段，由于蒸汽分压高于环境，温度尚未有足够的降低，湿开始由砖层向周围环境传递，砖层右面的含湿量以及蒸汽分压相应有所下降。随着温度的迅速降低，使得砖右边含湿量处于高度不平衡状态，湿气开始从环境进入砖层。这一切都发生在初始很短的几个小时内，所以在图 12 显示不出。之后从环境和通过空气层从胶合板到砖层的湿迁移使其含湿量逐渐上升（见图 12）。在单层砖壁的计算中得知需要一年多的时间单层砖壁才能达到稳定。对于该复合壁，砖层左边不是直接与环境接触，则达到稳定所需时间将更长。图 13 给出了在第 90 天复合墙壁内的各层含湿量的详细情况。可以看出胶合板的含湿量达 24%，而且有继续上升的趋势。含湿量对胶合板是很重要的，超过 20% 就将严重影响其性能^[31,32]。此计算结果说明该标准复合墙壁在设计上是不合理。图 14 至图 17 显示由于导热起决定性作用使墙壁内温度变化迅速达到稳定。图 18 显示了在第 90 天复合墙壁内温度的详细情况，各层内部都已达线性稳定。图 19 给出了复合墙壁内局部湿迁移速率在 90 天时的详细情况。可以看出此时仍

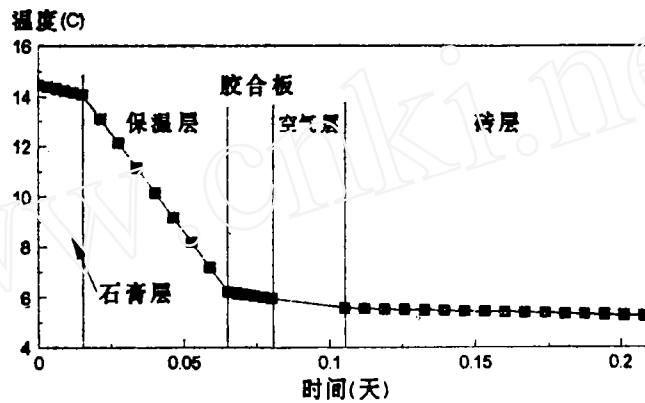


图 18 墙壁结构内温度分布

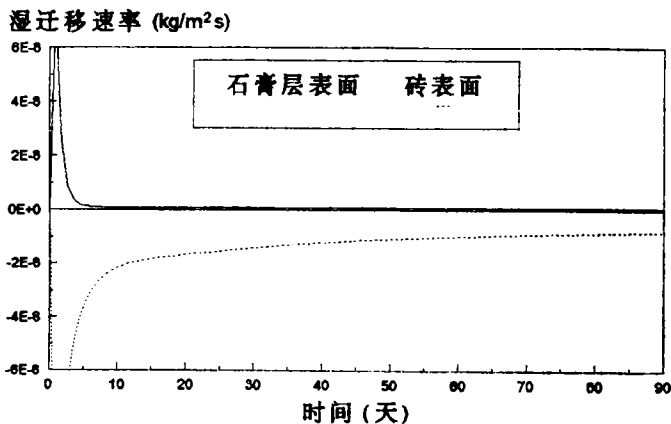


图 19 通过内外两表面的湿迁移速率