

建筑墙体潮湿区湿度计算方法研究

③
16-22

陈永成

(加拿大萨期喀彻温大学)

陈启高

(重庆建筑大学建筑城规学院 630045)

TU111.49

摘 要 分析提出了围护结构墙体潮湿区的物理模型和湿度计算方程,得到了潮湿区湿度分布的解析式及工程上的简化实用公式。此理论解计算方便,所需湿参数少。与实验结果及繁琐的数值计算结果一致。

关键词 建筑墙体、潮湿区、潮湿分布、潮湿计算参数 围护结构,物理模型

中图分类号 TU111.49

围护结构潮湿计算,现在国内外大都采用蒸汽渗透方法^{[1][2]}。这一方法较简便,便于设计人员掌握。但正如我国建筑热工界所公认,该法没考虑材料中液相水的迁移,没全面反映结构中湿热迁移机理。文献[3]依热湿传递原理提出了多孔材料湿度计算理论,文献[4]根据 A·B 雷柯夫教授的毛细多孔体热质传递微分方程,对围护结构进行了传湿的计算机分析,文献[5]考虑了材料内部的液相水分,推出了潮湿区湿度计算的稳态方法。以上研究丰富了潮湿计算的理论和方法。本文则提出建筑墙体潮湿区湿度计算的非稳态方法。

1 围护结构潮湿区的物理模型

一般围护结构受潮分为三个阶段:水蒸汽渗透阶段,此时材料的湿度小于其最大吸湿湿度,水蒸汽按扩散和喷射形式进行迁移;毛细扩散阶段,此时材料的湿度达到或超过其最大吸湿湿度,水开始在材料内部未充满水的空隙中流动,除液相水外,当材料中具有温差时,还产生汽态水分流动;液相水渗流阶段,即当材料进一步受潮时,在孔隙中的各个段上的水汇成一个总水流。由于在房屋围护结构中,渗流阶段是绝不允许出现的,故而研究前两个阶段的湿迁移才具有实际意义。

为便于研究,可按上述的受潮阶段将围护结构分区,分别研究每个区的湿状况。即在第一区,研究纯蒸汽相水分的状况;在第二区,研究未饱和蒸汽相水分和液相水分的状况,在第三区研究饱和蒸汽相水分与液相水分共存的状况。为便于研究,可将第一、二区合称吸湿区,而将第三区称潮湿区。表 1 给出了外墙受潮阶段模型。

本文研究潮湿区湿度分布状况,其他区的湿度分布状况将另著文探讨。根据分析及受潮阶段的模型,这儿认为潮湿区有一些简化特点,特说明如下:

收稿日期:1996-04-29

陈永成,男,1957年生,副研究员

国家自然科学基金资助项目

表 1 外墙受潮阶段示意

	一 区	二 区	三 区	二 区	一 区	
室内	纯蒸汽区	未饱和蒸汽、液相水区	饱和蒸汽、液态水区	未饱和蒸汽、液态水区	纯蒸汽区	室外
	吸 湿 区		潮 湿 区	吸 湿 区		

(1) 当潮湿区开始形成时,其湿度为材料的最大吸湿湿度;

(2) 在潮湿区内水蒸汽分压力达到饱和值;

(3) 潮湿区出现后,其边界随时间而变动,但根据 A. Y 弗兰丘克的有限差分计算^[6],可以看到其边界的坐标随时间的变化极微小,这是因为方向相反的汽液两相流在这里产生了平衡,因此,可以认为,只要潮湿区存在,其边界基本是固定的。

(4) 由于材料孔隙内的水并不是在 0℃,而是在温度更低时才结冰,又冰只在变成水或汽时才可迁移,故潮湿区湿迁移分析时,不考虑冰的存在。

另外,由于温度场趋于稳定的时间远较湿度场趋于稳定的时间为短,可将温度场视为稳定。在稳定温度场中,结构内温度为线性分布;热湿迁移系数均取为常量。

2 潮湿区湿度计算模型

潮湿区内分别存在:

(1) 由于温度梯度产生的饱和状态的蒸汽相水分流 J_1 ;

(2) 由于温度梯度和湿度梯度产生的液相水分流 J_2 。

总的水分流 J 为

$$J = J_1 + J_2 \tag{1}$$

而

$$J_1 = -D_0 \frac{\partial E}{\partial x} - D_t \frac{\partial t}{\partial x} \tag{2}$$

$$J_2 = -k_0 \frac{\partial u}{\partial x} - k_t \frac{\partial t}{\partial x} \tag{3}$$

式中

D_0, D_t —扩散系数(g/mhPa)和热扩散系数(g/mh℃);

k_0, k_t —导水系数(g/mh%)和热导水系数(g/mh℃);

E —饱和水蒸汽分压力,Pa;

t —温度,℃;

u —重量湿度,kg/kg。

取潮湿区一微元体(图 1),令在某一时刻 τ 经 $\Delta\tau$ 时间进入元体的水分量为 $J_x \Delta\tau$,同时水分流出量为 $J_{x+\Delta x} \Delta\tau$,根据质量守恒定律,元体内水分的增量为

$$(J_x - J_{x+\Delta x}) \Delta\tau = \rho \Delta u \Delta x$$

于是有

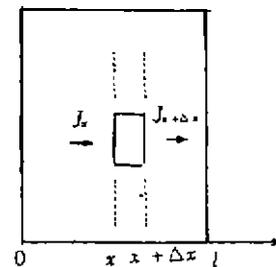


图 1 微分方程推导简图

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial J}{\partial x} \quad (4)$$

将(2)式和(3)式代入上式有

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{1}{\rho} [D_0 \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + k_0 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + (D_0 + k_0) \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}] \quad (5)$$

潮湿区温度分布为

$$t = t_1 + \frac{t_2 - t_1}{l} x \quad (6)$$

于是有

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = 0 \quad (7)$$

实验表明,水蒸汽饱和压力可用平方抛物线表示:

$$E = (a_0 + b_0 t + c_0 t^2) \cdot E_p \quad (8)$$

根据现有图表^[6],可求出其近似表达式为:

$$E = (4.58 + 0.287t + 0.017t^2) \cdot E_p \quad (9)$$

而 $E_p = 133.28 \text{ Pa/mmHg}$

$$\frac{dE}{dx} = \frac{dE}{dt} \frac{dt}{dx} = (0.287 + 0.034t) \left(\frac{t_2 - t_1}{l} \right) \cdot E_p$$

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = 0.034 \left(\frac{t_2 - t_1}{l} \right)^2 \cdot E_p \quad (10)$$

将(7)式和(10)式代入(5)式,得

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = 0.034 \frac{D_0 \cdot E_p}{\rho} \left(\frac{t_2 - t_1}{l} \right)^2 + \frac{k_0}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (11)$$

(11)式三项,依本文所取系数的单位制,因次分别为: $\left[\frac{\text{kg}}{\text{kg h}} \right]$ 、 $\left[\frac{\text{g}}{\text{kg h}} \right]$ 、 $\left[\frac{100 \text{ g}}{\text{kg h}} \right]$ 。

若要统一,须有

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{0.034 \cdot E_p}{1000} \frac{D_0}{\rho} \left(\frac{t_2 - t_1}{l} \right)^2 + \frac{k_0}{\rho \times 10} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (12)$$

设

$$B = \frac{0.034 \cdot E_p}{1000} \frac{D_0}{\rho} \left(\frac{t_2 - t_1}{l} \right)^2$$

$$a_m = \frac{k_0}{10\rho}$$

有

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = B + a_m \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (13)$$

潮湿区初始湿度为 u_{100} ,即材料最大吸湿湿度,亦即初始条件为

$$u(x, 0) = u_{100} \quad (14)$$

根据本文的物理模型,得边界条件应为:

$$u(0, \tau) = u_{100} \quad (15)$$

$$u(l, \tau) = u_{100} \quad (16)$$

设

$$u(x, \tau) = W(x, \tau) - \frac{B}{2a_m} x^2 \quad (17)$$

则得

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial \tau} &= a_m \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \\ W(x, 0) &= u_{100} + \frac{B}{2a_m} x^2 \\ W(0, \tau) &= u_{100} \\ W(l, \tau) &= u_{100} + \frac{B}{2a_m} l^2 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

可见, 解湿迁移问题已转化成解热传导方程(18)的问题了。

3 潮湿区湿度分布的理论解

对于热传导方程^[7]

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial \tau} &= a_m \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \\ W(x, 0) &= f(x) \\ W(0, \tau) &= W_1 \\ W(l, \tau) &= W_2 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中

$$\begin{aligned} f(x) &= u_{100} + \frac{B}{2a_m} x^2 \\ W_1 &= u_{100} \\ W_2 &= u_{100} + \frac{B}{2a_m} l^2 \end{aligned}$$

解为^[7]:

$$\begin{aligned} W(x, \tau) &= W_1 + (W_2 - W_1) \frac{x}{l} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{W_2 \cos n\pi - W_1 \sin \frac{n\pi}{l}}{n} \sin \frac{n\pi}{l} \exp\left(-\frac{a_m n^2 \pi^2 \tau}{l^2}\right) \\ &\quad + \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi}{l} x \exp\left(-a_m n^2 \pi^2 \tau / l^2\right) \int_0^l f(\zeta) \sin \frac{n\pi}{l} \zeta d\zeta \end{aligned} \quad (20)$$

而

$$\frac{2}{l} \int_0^l f(\zeta) \sin \frac{n\pi}{l} \zeta d\zeta = \frac{2u_{100}(1 - \cos n\pi)}{n} - \frac{2Bl^2}{n^3 \pi^3 a_m} (1 - \cos n\pi) - \frac{Bl^2}{n \pi a_m} \cos n\pi$$

从(17)式有:

$$\begin{aligned}
 u(x, \tau) = & u_{100} - \frac{B}{2a_m} x^2 + \frac{B}{2a_m} lx + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(u_{100} + \frac{Bl^2}{2a_m}\right) \cos n\pi - u_{100}}{n} \sin \frac{n\pi}{l} x \\
 & \cdot \exp(-a_m n^2 \pi^2 \tau / l^2) + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2u_{100}(1 - \cos n\pi)}{n\pi} - \frac{2Bl^2}{n^3 \pi^3 a_m} (1 - \cos n\pi) - \frac{Bl^2}{n\pi a_m} \cos n\pi \right] \\
 & \cdot \sin \frac{n\pi}{l} x \exp(-a_m n^2 \pi^2 \tau / l^2) \quad (21)
 \end{aligned}$$

化简整理得:

$$u(x, \tau) = u_{100} - \frac{B}{2a_m} x^2 + \frac{B}{2a_m} lx + \sum_{n=1}^{\infty} [(-1)^n - 1] \frac{2Bl^2}{n^3 \pi^3 a_m} \sin \frac{n\pi}{l} x \exp(-a_m n^2 \pi^2 \tau / l^2) \quad (22)$$

如果设傅立叶数 F_0 为

$$F_0 = a_m \tau / l^2 \quad (23)$$

且将(23)式及 B 的值均代入(22)式,有

$$\begin{aligned}
 u(x, \tau) = & u_{100} - \frac{0.034 \cdot E_p \cdot D_0}{200} \frac{D_0}{k_0} (t_2 - t_1)^2 \left(\frac{x}{l}\right)^2 + \frac{0.034 \cdot E_p \cdot D_0}{200} \frac{D_0}{k_0} (t_2 - t_1)^2 \frac{x}{l} \\
 & - \sum_{n=1}^{\infty} [1 - (-1)^n] \frac{2 \times 0.034 \cdot E_p \cdot D_0}{n^3 \pi^3 \times 100} \frac{D_0}{k_0} (t_2 - t_1)^2 \sin \frac{n\pi}{l} x \exp(-F_0 n^2 \pi^2) \quad (24)
 \end{aligned}$$

也可写成下式

$$\begin{aligned}
 \Delta u = & \frac{u(x, \tau) - u_{100}}{100} = -\left(\frac{x}{l}\right)^2 + \frac{x}{l} - \sum_{n=1}^{\infty} [1 - (-1)^n] \frac{4}{n^3 \pi^3} \sin \frac{n\pi}{l} x \cdot \\
 & \exp(-F_0 n^2 \pi^2) \quad (25)
 \end{aligned}$$

此式即为潮湿区湿度计算的理论解析式。

解(25)绘成图 2。

计算结果表明,式(25)中的级数收敛迅速,当 F_0 不太小时,取式中级数的前三项,精确度已极高。为简化计,将公式写成:

$$\begin{aligned}
 u(x, \tau) = & u_{100} - 0.17 \cdot E_p \times 10^{-3} \frac{D_0}{k_0} (t_2 - t_1)^2 \left(\frac{x}{l}\right)^2 + 0.17 \cdot E_p \times 10^{-3} \frac{0.034}{200} \frac{D_0}{k_0} (t_2 - t_1)^2 \frac{x}{l} \\
 & - 0.17 \cdot E_p \times 10^{-3} \frac{8}{\pi^3} \frac{D_0}{k_0} (t_2 - t_1)^2 \sin \pi \frac{x}{l} \exp(-F_0 \pi^2) \\
 & - 0.17 \cdot E_p \times 10^{-3} \frac{8}{27\pi^3} \frac{D_0}{k_0} (t_2 - t_1)^2 \sin \frac{3\pi x}{l} \exp(-F_0 \pi^2 \times 9) \quad (26)
 \end{aligned}$$

对于建筑潮湿状况的分析计算,可将上式进一步简化成:

$$\begin{aligned}
 u(x, \tau) = & u_{100} - 0.17 \cdot E_p \times 10^{-3} \frac{D_0}{k_0} (t_2 - t_1)^2 \left(\frac{x}{l}\right)^2 + 0.17 \cdot E_p \times 10^{-3} \frac{0.034}{200} \frac{D_0}{k_0} (t_2 - t_1)^2 \frac{x}{l} \\
 & - 0.17 \cdot E_p \times 10^{-3} \frac{8}{\pi^3} \frac{D_0}{k_0} (t_2 - t_1)^2 \sin \pi \frac{x}{l} \exp(-F_0 \pi^2) \quad (27)
 \end{aligned}$$

或写成

$$\Delta u = \frac{u(x, \tau) - u_{100}}{\frac{0.017 \cdot E_p \cdot D_0}{100} \cdot \frac{D_0}{k_0} (t_2 - t_1)^2} = -\left(\frac{x}{l}\right)^2 + \frac{x}{l} - \frac{8}{\pi^3} \sin \pi \frac{x}{l} \exp(-Fo \pi^2) \quad (28)$$

4 潮湿区湿度分布的计算与比较

文献[6]就泡沫混凝土单层墙受潮问题进行了有限差分的计算及实验。本文取相同的计算参数,用公式(28)进行了计算。计算时作了如下处理:

(1) 仅计算潮湿区的湿度分布,潮湿区的长度为 0.1119 m,坐标原点取在左界面上。

(2) 文献[6]中计算的总时间为 88 昼夜,从试验结果知经过 32 天仍未出现潮湿区。本文近似取从潮湿区形成至计算结束时间为 30 昼夜,此数值的计算方法见文献[8]。

计算参数如下:

$$D_0 = 0.025 E_p^{-1} \cdot Pa; k_0 = 0.00352$$

g/mh %;

$$Fo = 0.02; t_2 - t_1 = 19.44^\circ C$$

计算结果列于表 2。

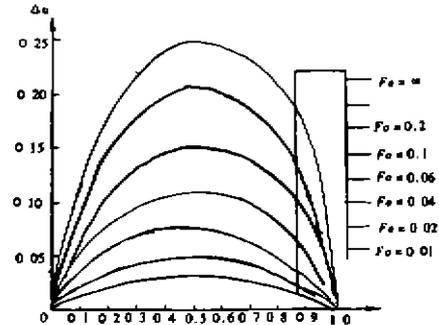


图 2 Δu 与 x/l、Fo 的关系

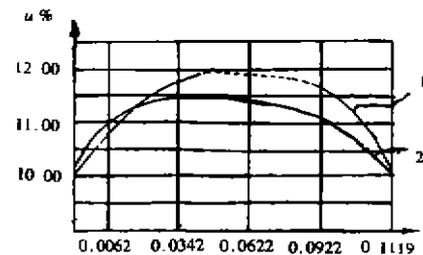


图 3 潮湿区湿度的理论研究与试验的比较

表 2 潮湿区湿度计算比较表

x		x/l	-(x/l) ² + (x/l)	sin π(x/l)	(8/π ³) e ^{-Foπ²}	((0.017/100) · (D ₀ /k ₀) · (t ₂ -t ₁) ²)	u % 本文值	u % 文献[6]值
原值	换算值							
0.0218	0	0	0	0	0.2118	0.4563	10	10
0.0280	0.0062	0.0554	0.0523	0.1732			10.71	10.95
0.0560	0.0342	0.3056	0.2122	0.8192			11.76	11.46
0.0840	0.0622	0.5558	0.2460	0.9847			11.71	11.45
0.1140	0.0922	0.8239	0.1451	0.5254			11.54	11.17
0.1337	0.1119	1	0	0			10	10

为清晰直观起见,下面将本文的计算结果与文献[6]的有限差分计算结果一并与实验结果绘成图 3。从图 3 可见,本文计算结果是令人满意的。

5 结 语

本文根据建筑墙体潮湿区湿状况分析,提出了湿分布的非稳态计算的解析方法,并给出

了结果较为简便的实用计算式。计算结果表明本法与文献[6]的数值方法较为一致。但本法十分简明实用。并且与实验结果有相当好的吻合,为围护结构潮湿区湿度分布计算提供了一个实用的计算工具。

参 考 文 献

- 1 西安冶金建筑学院等编. 建筑物理. 第二版. 北京:中国建筑工业出版社,1987
- 2 R M E, 狄曼特著. 吕绍泉译. 建筑物的保温. 北京:中国建筑工业出版社,1975
- 3 陈启高. 多孔围护结构中湿度计算理论. 重庆建筑工程学院学报,1984(3)
- 4 R Kohomen. Transient Analysis of the Thermal and Moisture Physical Behaviour of Building Constructions Building and Environment, 1984
- 5 王建翔. 围护结构内部受潮分析及保温层湿度的推算. 西安冶金建筑学院学报,1986(1)
- 6 A Y. 弗兰丘克著. 谭天佑译. 房屋围护部分受潮理论与计算. 北京:中国工业出版社,1964
- 7 H S Carslaw & J C Jaeger. Conduction of Heat in Solids Oxford Press, 1959
- 8 A M. 什克洛维尔等著. 住宅和公用房屋建筑热工学基础. 北京:建筑工业出版社,1959

Analysis of Moisture Distribution in Wet Zones of Building walls

Chen Yongcheng

(University of Saskatchewan, Canada)

Chen Qigao

(Faculty of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jianzhu University, 630045)

Abstract An analytical solution is obtained for determining the moisture distribution of the wet zones in a building envelope. The method is more simple and convenient to practical problems than the finite difference method. It needs only few moisture parameters and the results are well coincided with the experimental results.

Key Words building walls, wet zones, moisture distribution, moisture parameter

(编辑:袁 江)