



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111259475 A

(43)申请公布日 2020.06.09

(21)申请号 202010037076.7

G06F 17/16(2006.01)

(22)申请日 2020.01.14

(71)申请人 哈尔滨工业大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西  
大直街92号

(72)发明人 孙澄 加加林·弗拉基米尔

周志波 韩昀松

朱巴列夫·基里尔

(74)专利代理机构 哈尔滨市阳光惠远知识产权

代理有限公司 23211

代理人 刘景祥

(51)Int.Cl.

G06F 30/13(2020.01)

G06F 30/20(2020.01)

G06F 119/08(2020.01)

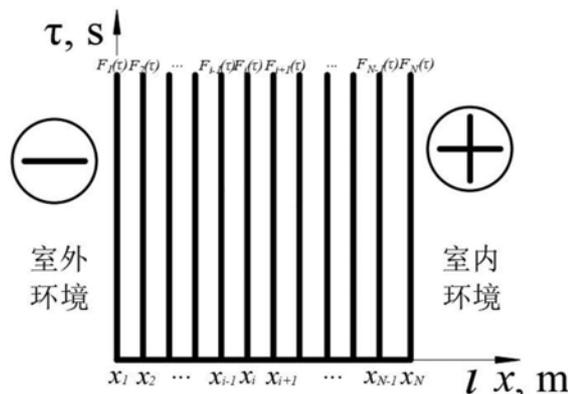
权利要求书7页 说明书16页 附图7页

(54)发明名称

一种建筑外围护结构墙体湿工况的确定方法

(57)摘要

本发明公开了一种建筑外围护结构墙体湿工况的确定方法。步骤1:确定气候条件;步骤2:根据空间坐标将建筑物围护结构划分为若干区间,步骤3:给出建筑物围护结构所有区间初始湿势分布和初始时间;步骤4:确定建筑物围护结构墙体湿势分布;步骤5:确定建筑物围护结构月末和所需时刻湿工况;步骤6:建筑物围护结构温度场的变化;步骤7:确定下月初始湿势分布;步骤8:重复计算步骤4-步骤7,得到所需时间内建筑物围护结构非稳态湿工况。确定建筑物围护结构任何时刻任何区域内湿势分布,同时考虑温度分布对其影响,指出基于离散-连续法得到的方程计算围护结构沿厚度方向湿势分布优点,简化计算方法,达到准确计算建筑物围护结构热损失效果。



1. 一种建筑外围护结构墙体湿工况的确定方法,其特征在于,所述确定方法包括以下步骤,

步骤1:确定气候条件,包括室外空气相对湿度与天数变化关系和室外空气月平均温度与天数关系,室内微气候条件;

步骤2:根据空间坐标将建筑物围护结构划分为若干区间;

步骤3:给出建筑物围护结构所有区间初始湿势分布和初始时间;

步骤4:确定建筑物围护结构墙体单层结构湿势分布或多层结构湿势分布,确定月区间内任意时刻湿势分布;

步骤5:确定建筑物围护结构月末和所需时刻湿工况;

步骤6:建筑物围护结构温度场的变化,按照下月室外环境气候条件得到;

步骤7:确定下月初始湿势分布,借助于上月末围护结构湿工况湿势分布;

步骤8:重复计算步骤4-步骤7,得到所需时间内建筑物围护结构非稳态湿工况。

2. 根据权利要求1所述确定方法,其特征在于,所述步骤1的室内微气候条件为空气温度为18-22℃,节能设计室内温度为18℃,空气相对湿度为45%-55%。

3. 根据权利要求1所述确定方法,其特征在于,所述步骤3具体为围护结构内湿度分布取决于湿势F和温度t,函数关系,

$$w = f(F, t) \quad (1)$$

由能量平衡定律,一维稳态传热方程原理,根据相似准则,湿度梯度随时间变化正比于湿流密度梯度,表达为下式:

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial g}{\partial x} \quad (2)$$

同理,湿流密度正比于湿势,按下式表达:

$$g = \mu \frac{\partial F}{\partial x} \quad (3)$$

湿势按下式确定:

$$F(w, t) = E_t(t) \cdot \varphi(w) + \frac{1}{\mu} \int_0^w \beta(\zeta) d\zeta \quad (4)$$

$E_t$ -饱和水蒸气压,Pa;  $\varphi$ -空气相对湿度;  $\mu$ -蒸汽渗透系数,kg/(m·c·Pa);  $\beta$ -静态水分传导率,kg/(m·c·kg/kg);  $w$ -湿度,%;  $t$ -温度,℃;  $F$ -湿势,Pa.  $E_t(t) \cdot \varphi(w)$ -空气水蒸气分压,Pa;  $\frac{1}{\mu} \int_0^w \beta(\zeta) d\zeta$ -当量附加压力,Pa;

定义概念,当量附加压力饱和压力 $E_{\max}$ :

$$E_{\max} = \frac{1}{\mu} \int_0^{w_{\max}} \beta(\zeta) d\zeta \quad (5)$$

则当量附加压力相对湿度, $\psi(w)$ ,按下式确定:

$$\psi(w) = \frac{\frac{1}{\mu} \int_0^w \beta(\zeta) d\zeta}{\frac{1}{\mu} \int_0^{w_{\max}} \beta(\zeta) d\zeta} = \frac{\frac{1}{\mu} \int_0^w \beta(\zeta) d\zeta}{E_{\max}} \quad (6)$$

则围护结构湿势数学模型,如下:

$$F(w,t) = E_i(t) \cdot \varphi(w) + E_{\max} \cdot \psi(w) \quad (7)$$

建立围护结构墙体材料湿度、湿势、温度关系,得到下列关系方程

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} = \rho \frac{\partial w}{\partial F} \cdot \frac{\partial F}{\partial \tau} + \rho \frac{\partial w}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (8)$$

变换方程(8),得到下式:

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} = \rho \frac{\partial w}{\partial F(w,t)} \cdot \frac{\partial F(w,t)}{\partial \tau} \quad (9)$$

将方程(3)和(9)带入方程(2),得到下列方程

$$\rho \frac{\partial w}{\partial F(w,t)} \cdot \frac{\partial F(w,t)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial F(w,t)}{\partial x} \right) \quad (10)$$

将公式(4)进行微分,得到下列公式

$$\frac{\partial w}{\partial F(w,t)} = \left( \frac{1}{\mu} \beta(w) + E_i(t) \cdot \frac{\partial \varphi(w)}{\partial w} \right)^{-1} \quad (11)$$

将公式(11)带入到公式(10),得到下式

$$\rho \cdot \left( \frac{1}{\mu} \beta(w) + \frac{\partial \varphi(w)}{\partial w} E_i(t) \right)^{-1} \frac{\partial F(w,t)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial F(w,t)}{\partial x} \right) \quad (12)$$

$\rho_0$ -墙体材料干密度,kg/m<sup>3</sup>,

得到的方程(12)进行简化,定义新系数,相对潜湿容, $\xi_F$ ,Kg/Kg:

$$\xi_F(w,t) = \left( \frac{\partial \varphi(w)}{\partial w} + \frac{1}{\mu \cdot E_i(t)} \beta(w) \right)^{-1} \quad (13)$$

该系数表征温湿度函数关系,在结构层中,材料吸湿处,该系数不取决于温度,而是取决于蒸汽容量;

将式(13)带入(12),得到建筑物围护结构湿迁移数学模型计算公式:

$$\rho \cdot \frac{\xi_F(w,t)}{E_i(t)} \cdot \frac{\partial F(w,t)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial F(w,t)}{\partial x} \right) \quad (14)$$

变换公式(14),找出湿势与时间的关系方程:

$$\frac{\partial F(w,t)}{\partial \tau} = \frac{\mu}{\rho \cdot \xi_F(w,t)} \cdot E_i(t) \cdot \frac{\partial^2 F(w,t)}{\partial x^2} \quad (15)$$

导入新系数-材料热湿属性系数, $k_F$ ,[m<sup>2</sup>/s · Pa],该系数同样在结构内材料吸湿处,不取决于温度;

$$k_F = \frac{\mu}{\rho \cdot \xi_F(w,t)} \quad (16)$$

边界条件:

$$-\mu_1 \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{x=1} = \beta_e (F_e - F_1) \quad (17)$$

$\beta_e$ -围护结构外表面换湿系数,Kg/(m<sup>2</sup> · s · Pa); $\mu_1$ -围护结构与室外空气接触层材料蒸汽渗透系数,kg/(m · c · Pa); $F_e$ -室外空气湿势,Pa; $F_1$ -围护结构与室外空气接触材料界面湿势,Pa;

在缺乏外围护结构外表面水湿条件下,认为室外空气湿势等于室外空气压力,围护结构与室外空气接触材料界面湿势等于其表面压力;

$$\mu_2 \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_{i=N} = \beta_i (F_i - F_N) \quad (18)$$

$\beta_i$ -围护结构内表面换湿系数,  $\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ;  $\mu_2$ -围护结构与室内空气接触层材料蒸汽渗透系数,  $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{c} \cdot \text{Pa})$ ;  $F_i$ -室内空气湿势,  $\text{Pa}$ ;  $F_N$ -围护结构与室内空气接触材料界面湿势,  $\text{Pa}$ ;

在缺乏外围护结构内表面水湿条件下,认为室内空气湿势等于室内空气压力,围护结构与室内空气接触材料界面湿势等于其表面压力,

围护结构与室外空气换热边界条件:

$$-\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{i=1} = \alpha_e (t_e - t_1), \quad (19)$$

$t_e$ -室外空气温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_1$ -围护结构与室外空气界面温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha_e$ -围护结构外表面与室外空气换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;

围护结构与室内空气换热边界条件:

$$\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{i=N} = \alpha_i (t_i - t_N) \quad (20)$$

$t_i$ -室内空气温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_N$ -围护结构与室内空气界面温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha_i$ -围护结构内表面与室内空气换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;

饱和蒸汽压和温度的关系,按照下式确定:

$$E_t(t) = 1.84 \cdot 10^{11} \cdot \exp(-5330/(273+t)) \quad (21)$$

4. 根据权利要求1所述确定方法,其特征在于,所述步骤4具体为,建筑物单层结构湿迁移,按照公式(14),得到下式:

$$\rho \cdot \frac{\xi_{F0}}{E_i(t)} \cdot \frac{\partial F(w,t)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial F(w,t)}{\partial x} \right) \quad (28)$$

则 $k_F$ 变为平均材料热湿属性系数,  $k_{F0}$ ,  $[\text{m}^2/\text{s} \cdot \text{Pa}]$ ,可用下式表达:

$$k_F = \frac{\mu}{\rho \cdot \xi_{F0}} \quad (29)$$

根据式(20)的边界条件,离散-连续法解决墙体单层结构非稳态湿迁移可描述为下式:

$$\begin{cases} \frac{\partial F_1(\tau)}{\partial \tau} = \frac{k_{F0}}{h^2} \cdot E_{i1} \cdot \left( -\left(1 + \frac{\beta_e}{\mu} h\right) F_1(\tau) + F_2(\tau) \right) + \frac{k_{F0}}{h^2} \cdot E_{i1} \cdot \frac{\beta_e}{\mu} h \cdot F_e(\tau) \\ \frac{\partial F_i(\tau)}{\partial \tau} = \frac{k_{F0}}{h^2} \cdot E_{in} \cdot (F_{i-1}(\tau) - 2 \cdot F_i(\tau) + F_{i+1}(\tau)), i = 2, 3, 4, \dots, N-1 \\ \frac{\partial F_N(\tau)}{\partial \tau} = \frac{k_{F0}}{h^2} \cdot E_{iN} \cdot (F_{N-1}(\tau) - \left(1 + \frac{\beta_i}{\mu} h\right) F_N(\tau)) + \frac{k_{F0}}{h^2} \cdot E_{iN} \cdot \frac{\beta_i}{\mu} h \cdot F_i(\tau) \\ F(x, 0) = f(x), 0 \leq x \leq l \end{cases} \quad (30)$$

考虑到湿势随季节性变化,那么在一个月內,湿势变化可以用柯西矩阵进行描述:

$$\begin{cases} \bar{F}'_{\tau} = E_{iM} \cdot A \cdot \bar{F} + p \cdot \tau \cdot \bar{L} + \bar{B} \\ \bar{F}(0) = \bar{F}_0(0), 0 \leq x \leq l \end{cases} \quad (31)$$

$p$ -边界条件系数;  $E_{iM}$ -饱和蒸汽压对角矩阵;  $A$ -湿势函数系数对角矩阵;  $\bar{L}$ -第一行值为1,其他行为0的列向量;  $\bar{B}$ -第一和最后元素为围护结构内外表面边界条件,其他元素为0的列向量;  $\bar{F}$ -建筑物围护结构湿势分布列向量;  $\bar{F}_0$ -初始条件下围护结构内湿势分布列向量;  $\bar{F}$ -围护结构内所需湿势分布列向量;  $\bar{F}'_{\tau}$ -围护结构内湿势随时间变化的分布列向量;  $\tau$ -时

间,  $s$ ,

边界条件系数  $p$  可描述为下式:

$$p = k_{F0} \cdot E_{t1} \cdot h \cdot n \cdot \frac{\beta_e}{h^2 \cdot \mu} \quad (32)$$

$E_{tM}$  饱和和蒸汽压可描述为下列对角矩阵:

$$E_{tM} = \begin{pmatrix} E_{t1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_{t2} & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & E_{t(N-1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_{tN} \end{pmatrix} \quad (33)$$

$E_{t1}, E_{t2}, E_{t(N-1)}, E_{tN}$  - 在一个月时间内, 墙体划分区间内饱和蒸汽压, Pa,

$A$  湿势函数系数可描述为下列对角矩阵:

$$A = \frac{k}{h^2} \begin{pmatrix} -(1 + \frac{\beta_e}{\mu} h) & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -(1 + \frac{\beta_i}{\mu} h) \end{pmatrix} \quad (34)$$

$\bar{L}$  是第一行值为1, 其他行为0的列向量:

$$L = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (35)$$

$\bar{B}$  - 第一和最后元素为围护结构内外表面边界条件, 其他元素为0的列向量:

$$\bar{B} = \begin{pmatrix} k_{F0} \cdot E_{t1} \cdot h \cdot n \cdot \frac{\beta_e}{h^2 \cdot \mu} \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ k_{F0} \cdot E_{tN} \cdot h \cdot F_i \cdot \frac{\beta_i}{h^2 \cdot \mu} \end{pmatrix} \quad (36)$$

$\bar{F}_0$  初始条件下围护结构内湿势分布列向量:

$$\bar{F}_0 = \begin{pmatrix} F_1(0) \\ F_2(0) \\ \dots \\ F_{N-1}(0) \\ F_N(0) \end{pmatrix} \quad (37)$$

$\bar{F}$  围护结构内所需湿势分布列向量:

$$\bar{F} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \dots \\ F_{N-1} \\ F_N \end{pmatrix} \quad (38)$$

$\bar{F}'_\tau$  围护结构内湿势随时间变化的分布列向量:

$$\bar{F}'_\tau = \begin{pmatrix} \bar{F}'_1(\tau) \\ \bar{F}'_2(\tau) \\ \dots \\ \bar{F}'_{N-1}(\tau) \\ \bar{F}'_N(\tau) \end{pmatrix} \quad (39)$$

解方程 (28) 围护结构湿传递方程, 基于离散-连续法, 得到下列计算方程:

$$\bar{F} = p \cdot \left( (E_{IM} \cdot A)^{-2} \cdot e^{E_{IM} \cdot A \cdot \tau} - \tau \cdot (E_{IM} \cdot A)^{-1} - (E_{IM} \cdot A)^{-2} \right) \cdot \bar{L} + (E_{Mt} \cdot A)^{-1} \left( e^{E_{IM} \cdot A \cdot \tau} - E \right) \bar{B} + e^{E_{IM} \cdot A \cdot \tau} \cdot \bar{F}_0 \quad (40)$$

E 是单位矩阵, 可按下列矩阵确定:

$$E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (41)$$

公式 (37) 中  $e^{E_i \cdot A \cdot \tau}$  是指数矩阵, 可按下列确定:

$$e^{E_i \cdot A \cdot \tau} = T \cdot e^{J \cdot \tau} \cdot T^{-1} \quad (42)$$

$$e^{J \cdot \tau} = \begin{pmatrix} e^{\lambda_1 \cdot \tau} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{\lambda_2 \cdot \tau} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{\lambda_{(N-1)} \cdot \tau} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{\lambda_N \cdot \tau} \end{pmatrix} \quad (43)$$

$\lambda_1 \cdot \tau, \lambda_2 \cdot \tau, \dots, \lambda_{(N-1)} \cdot \tau, \lambda_N \cdot \tau$  矩阵的特征值, 它是由矩阵  $E_i$  除以矩阵 A 得到,

T-特征向量矩阵的矩阵, 由矩阵  $E_i$  除以矩阵 A 确定,

$T^{-1}$ -特征向量矩阵的逆矩阵, 由矩阵  $E_i$  除以矩阵 A 确定,

公式 (37) 可以确定任意时刻围护结构内单层墙体湿势分布, 同时兼顾考虑温度持续性影响,

离散-连续法解决墙体多层结构非稳态湿迁移可描述为下式:

$$\begin{cases} \frac{\partial F_1(\tau)}{\partial \tau} = \frac{k_{F0}}{h^2} \cdot E_{i1} \cdot \left( -\left(1 + \frac{\beta_e}{\mu} h\right) F_1(\tau) + F_2(\tau) \right) + \frac{k_{F0}}{h^2} \cdot E_{i1} \cdot \frac{\beta_e}{\mu} h \cdot F_e(\tau) \\ \frac{\partial F_i(\tau)}{\partial \tau} = \frac{k_{F0i}}{h^2} \cdot E_{ii} \cdot (F_{i-1}(\tau) - 2 \cdot F_i(\tau) + F_{i+1}(\tau)), i = 2, 3, 4, \dots, v-1 \\ \frac{\partial F_v(\tau)}{\partial \tau} = d_{v-1} \cdot F_{v-1}(\tau) - d_v \cdot F_v(\tau) + d_{v+1} \cdot F_{v+1}(\tau) \\ \frac{\partial F_i(\tau)}{\partial \tau} = \frac{k_{F0i}}{h^2} \cdot E_{ii} \cdot (F_{i-1}(\tau) - 2 \cdot F_i(\tau) + F_{i+1}(\tau)), i = v+1, v+1, \dots, N-1 \\ \frac{\partial F_N(\tau)}{\partial \tau} = \frac{k_{F0}}{h^2} \cdot E_{iN} \cdot (F_{N-1}(\tau) - \left(1 + \frac{\beta_i}{\mu} h\right) F_N(\tau)) + \frac{k_{F0}}{h^2} \cdot E_{iN} \cdot \frac{\beta_i}{\mu} h \cdot F_i(\tau) \\ F(x, 0) = f(x), 0 \leq x \leq l \end{cases} \quad (44)$$

$k_{F01}$ -材料一热湿属性平均系数,  $[m^2/s \cdot Pa]$ ;  $k_{F02}$ -材料二热湿属性平均系数,  $[m^2/s \cdot Pa]$ ;  $F_{v-1}(\tau)$ -围护结构墙体内在 $v-1$ 区间湿势值,  $Pa$ ;  $F_v(\tau)$ -围护结构墙体内在 $v$ 区间湿势值,  $Pa$ ;  $F_{v+1}(\tau)$ -围护结构墙体内在 $v+1$ 区间湿势值,  $Pa$ ;  $d_{v-1}$ -围护结构墙体内在 $v-1$ 区间湿势系数,  $1/s$ ;  $d_v$ -围护结构墙体内在 $v$ 区间湿势系数,  $1/s$ ;  $d_{v+1}$ -围护结构墙体内在 $v+1$ 区间湿势系数,  $1/s$ ,

$d_{v-1}, d_v, d_{v+1}$ 系数方程组如下:

$$\begin{cases} d_{v-1} = 2 \cdot E_{nv} \cdot \mu_1 / (h_1(h_1 \cdot \rho_{01} \cdot \xi_{F01} + h_2 \cdot \rho_{02} \cdot \xi_{F02})) \\ d_v = 2 \cdot E_{nv} \cdot (\mu_1 / h_1 + \mu_2 / h_2) / (h_1 \cdot \rho_{01} \cdot \xi_{F01} + h_2 \cdot \rho_{02} \cdot \xi_{F02}) \\ d_{v+1} = 2 \cdot E_{nv} \cdot \mu_2 / (h_2(h_1 \cdot \rho_{01} \cdot \xi_{F01} + h_2 \cdot \rho_{02} \cdot \xi_{F02})) \end{cases} \quad (45)$$

解公式 (45) 借助柯西矩阵法, 可近似得到下式:

$$\begin{cases} \bar{F}'_\tau = (G + K \cdot E_{IM} \cdot A_{MH}) \cdot \bar{F} + p_{MH} \cdot \tau \cdot \bar{L} + \bar{B}_{MH} \\ \bar{F}(0) = \bar{F}_0(0), 0 \leq x \leq l \end{cases} \quad (46)$$

$G$ -材料结合处系数矩阵;  $K$ -材料热湿属性系数矩阵;  $A_{MH}$ -多层结构材料湿势系数矩阵;  $\bar{B}_{MH}$ -第一和最后元素为围护结构内外表面边界条件, 其他元素为0的列向量;  $p_{MH}$ -多层结构墙体外界条件系数,  $Pa/s^2$ ,

矩阵 $G$ 可描述为:

$$G = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_{v-1} & d_v & d_{v+1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (47)$$

矩阵 $K$ 可, 可描述为:

$$K = \begin{pmatrix} k_{F01} / h_1^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{F01} / h_1^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{F02} / h_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{F02} / h_2^2 \end{pmatrix} \quad (48)$$

矩阵 $A_{MH}$ 可描述为:

$$A_{MH} = \begin{pmatrix} -(1 + \frac{\beta_e}{\mu_1} h_1) & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -(1 + \frac{\beta_i}{\mu_2} h_2) \end{pmatrix} \quad (49)$$

矩阵 $\bar{B}_{MH}$ 可描述为:

$$\bar{B}_{MH} = \begin{pmatrix} k_{F0} \cdot E_{i1} \cdot h_1 \cdot n \cdot \frac{\beta_e}{h_1^2 \cdot \mu_1} \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ k_{F0} \cdot E_{iN} \cdot h_2 \cdot F_i \cdot \frac{\beta_i}{h_2^2 \cdot \mu_2} \end{pmatrix} \quad (50)$$

系数p按下式确定：

$$p = k_{F0} \cdot E_{i1} \cdot h_1 \cdot m \cdot \frac{\beta_e}{h_1^2 \cdot \mu_1} \quad (51)$$

解方程(46)可描述为下式：

$$\begin{aligned} \bar{F} = p_{MH} \cdot \left( (G + K \cdot E_{iM} \cdot A_{MH})^{-2} \cdot e^{(G+K \cdot E_{iM} \cdot A_{MH}) \cdot \tau} - \tau \cdot (G + K \cdot E_{iM} \cdot A_{MH})^{-1} - (G + K \cdot E_{iM} \cdot A_{MH})^{-2} \right) \cdot \bar{L} + \\ (G + K \cdot E_{iM} \cdot A_{MH})^{-1} \left( e^{(G+K \cdot E_{iM} \cdot A_{MH}) \cdot \tau} - E \right) \cdot \bar{B}_{MH} + e^{(G+K \cdot E_{iM} \cdot A_{MH}) \cdot \tau} \cdot \bar{F}_0 \end{aligned} \quad (52)$$

根据公式(52)可以确定建筑物围护结构墙体多层结构内湿势的分布。

## 一种建筑外围护结构墙体湿工况的确定方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于建筑外围护结构技术领域；具体涉及一种建筑外围护结构墙体湿工况的确定方法。

### 背景技术

[0002] 现有技术存在以下缺点需要进行大量复杂的试验测试和计算；不能确定墙体沿厚度方向的湿度分布，也不能进行预测运行建筑湿工况状态，需进行大量的试验测试和数值计算，没有考虑到建筑材料的吸湿性和静态水分传导率随时间的变化，没有考虑温湿度微气候随时间的变化对墙体的影响，不能够评估在年内某一时刻墙体内湿含量和墙体内湿含量随时间变化的非稳态关系。

### 发明内容

[0003] 本发明提出了一种建筑外围护结构墙体湿工况的确定方法，能够确定建筑物围护结构任何时刻任何区域内湿势分布，同时考虑温度分布对其影响，指出基于离散-连续法得到的方程计算围护结构沿厚度方向湿势分布优点，简化计算方法，达到准确计算建筑物围护结构热损失效果。

[0004] 本发明通过以下技术方案实现：

[0005] 一种建筑外围护结构墙体湿工况的确定方法，所述确定方法包括以下步骤，

[0006] 步骤1：确定气候条件，包括室外空气相对湿度与天数变化关系和室外空气月平均温度与天数关系，室内微气候条件；

[0007] 步骤2：根据空间坐标将建筑物围护结构划分为若干区间，

[0008] 步骤3：给出建筑物围护结构所有区间初始湿势分布和初始时间；

[0009] 步骤4：确定建筑物围护结构墙体单层结构湿势分布或多层结构湿势分布，确定月区间内任意时刻湿势分布；

[0010] 步骤5：确定建筑物围护结构月末和所需时刻湿工况；

[0011] 步骤6：建筑物围护结构温度场的变化，按照下月室外环境气候条件得到；

[0012] 步骤7：确定下月初始湿势分布，借助于上月末围护结构湿工况湿势分布；

[0013] 步骤8：重复计算步骤4-步骤7，得到所需时间内建筑物围护结构非稳态湿工况。

[0014] 进一步的，所述步骤1的室内微气候条件为空气温度为18-22℃，节能设计室内温度为18℃，空气相对湿度为45%-55%。

[0015] 进一步的，所述步骤3具体为围护结构内湿度分布取决于湿势F和温度t，函数关系，

[0016]  $w=f(F, t)$  (1)

[0017] 由能量平衡定律，一维稳态传热方程原理，根据相似准则，湿度梯度随时间变化正比于湿流密度梯度，表达为下式：

$$[0018] \quad \rho \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial g}{\partial x} \quad (2)$$

[0019] 同理,湿流密度正比于湿势,按下式表达:

$$[0020] \quad g = \mu \frac{\partial F}{\partial x} \quad (3)$$

[0021] 湿势按下式确定:

$$[0022] \quad F(w, t) = E_t(t) \cdot \varphi(w) + \frac{1}{\mu} \int_0^w \beta(\zeta) d\zeta \quad (4)$$

[0023]  $E_t$ -饱和水蒸气压, Pa;  $\varphi$ -空气相对湿度;  $\mu$ -蒸汽渗透系数,  $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{c} \cdot \text{Pa})$ ;  $\beta$ -静态水分传导率,  $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{c} \cdot \text{kg}/\text{kg})$ ;  $w$ -湿度, %;  $t$ -温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $F$ -湿势, Pa.  $E_t(t) \cdot \varphi(w)$ -空气水蒸气分压, Pa;  $\frac{1}{\mu} \int_0^w \beta(\zeta) d\zeta$ -当量附加压力, Pa;

[0024] 定义概念,当量附加压力饱和压力  $E_{\max}$ :

$$[0025] \quad E_{\max} = \frac{1}{\mu} \int_0^{w_{\max}} \beta(\zeta) d\zeta \quad (5)$$

[0026] 则当量附加压力相对湿度,  $\psi(w)$ , 按下式确定:

$$[0027] \quad \psi(w) = \frac{\frac{1}{\mu} \int_0^w \beta(\zeta) d\zeta}{\frac{1}{\mu} \int_0^{w_{\max}} \beta(\zeta) d\zeta} = \frac{\frac{1}{\mu} \int_0^w \beta(\zeta) d\zeta}{E_{\max}} \quad (6)$$

[0028] 则围护结构湿势数学模型,如下:

$$[0029] \quad F(w, t) = E_t(t) \cdot \varphi(w) + E_{\max} \cdot \psi(w) \quad (7)$$

[0030] 建立围护结构墙体内材料湿度、湿势、温度关系,得到下列关系方程

$$[0031] \quad \rho \frac{\partial w}{\partial t} = \rho \frac{\partial w}{\partial F} \cdot \frac{\partial F}{\partial \tau} + \rho \frac{\partial w}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (8)$$

[0032] 变换方程(8),得到下式:

$$[0033] \quad \rho \frac{\partial w}{\partial t} = \rho \frac{\partial w}{\partial F(w, t)} \cdot \frac{\partial F(w, t)}{\partial \tau} \quad (9)$$

[0034] 将方程(3)和(9)带入方程(2),得到下列方程

$$[0035] \quad \rho \frac{\partial w}{\partial F(w, t)} \cdot \frac{\partial F(w, t)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial F(w, t)}{\partial x} \right) \quad (10)$$

[0036] 将公式(4)进行微分,得到下列公式

$$[0037] \quad \frac{\partial w}{\partial F(w, t)} = \left( \frac{1}{\mu} \beta(w) + E_t(t) \cdot \frac{\partial \varphi(w)}{\partial w} \right)^{-1} \quad (11)$$

[0038] 将公式(11)带入到公式(10),得到下式

$$[0039] \quad \rho \cdot \left( \frac{1}{\mu} \beta(w) + \frac{\partial \varphi(w)}{\partial w} E_t(t) \right)^{-1} \cdot \frac{\partial F(w, t)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial F(w, t)}{\partial x} \right) \quad (12)$$

[0040]  $\rho_0$ -墙体材料干密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,

[0041] 得到的方程(12)进行简化,定义新系数,相对潜湿容,  $\xi_F, \text{Kg}/\text{Kg}$ :

$$[0042] \quad \xi_F(w, t) = \left( \frac{\partial \varphi(w)}{\partial w} + \frac{1}{\mu \cdot E_i(t)} \beta(w) \right)^{-1} \quad (13)$$

[0043] 该系数表征温湿度函数关系,在结构层中,材料吸湿处,该系数不取决于温度,而是取决于蒸汽容量;

[0044] 将式(13)带入(12),得到建筑物围护结构湿迁移数学模型计算公式:

$$[0045] \quad \rho \cdot \frac{\xi_F(w, t)}{E_i(t)} \cdot \frac{\partial F(w, t)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial F(w, t)}{\partial x} \right) \quad (14)$$

[0046] 变换公式(14),找出湿势与时间的关系方程:

$$[0047] \quad \frac{\partial F(w, t)}{\partial \tau} = \frac{\mu}{\rho \cdot \xi_F(w, t)} \cdot E_i(t) \cdot \frac{\partial^2 F(w, t)}{\partial x^2} \quad (15)$$

[0048] 导入新系数-材料热湿属性系数,  $k_F$ ,  $[m^2/s \cdot Pa]$ , 该系数同样在结构内材料吸湿处,不取决于温度;

$$[0049] \quad k_F = \frac{\mu}{\rho \cdot \xi_F(w, t)} \quad (16)$$

[0050] 边界条件:

$$[0051] \quad -\mu_1 \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_{i=1} = \beta_e (F_e - F_1) \quad (17)$$

[0052]  $\beta_e$ -围护结构外表面换湿系数,  $Kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$ ;  $\mu_1$ -围护结构与室外空气接触层材料蒸汽渗透系数,  $kg/(m \cdot c \cdot Pa)$ ;  $F_e$ -室外空气湿势,  $Pa$ ;  $F_1$ -围护结构与室外空气接触材料界面湿势,  $Pa$ ;

[0053] 在缺乏外围护结构外表面水湿条件下,认为室外空气湿势等于室外空气压力,围护结构与室外空气接触材料界面湿势等于其表面压力;

$$[0054] \quad \mu_2 \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_{i=N} = \beta_i (F_i - F_N) \quad (18)$$

[0055]  $\beta_i$ -围护结构内表面换湿系数,  $Kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$ ;  $\mu_2$ -围护结构与室内空气接触层材料蒸汽渗透系数,  $kg/(m \cdot c \cdot Pa)$ ;  $F_i$ -室内空气湿势,  $Pa$ ;  $F_N$ -围护结构与室内空气接触材料界面湿势,  $Pa$ ;

[0056] 在缺乏外围护结构内表面水湿条件下,认为室内空气湿势等于室内空气压力,围护结构与室内空气接触材料界面湿势等于其表面压力,

[0057] 围护结构与室外空气换热边界条件:

$$[0058] \quad -\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{i=1} = \alpha_e (t_e - t_1) \quad (19)$$

[0059]  $t_e$ -室外空气温度,  $^{\circ}C$ ;  $t_1$ -围护结构与室外空气界面温度,  $^{\circ}C$ ;  $\alpha_e$ -围护结构外表面与室外空气换热系数,  $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$ ;

[0060] 围护结构与室内空气换热边界条件:

$$[0061] \quad \lambda \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{i=N} = \alpha_i (t_i - t_N) \quad (20)$$

[0062]  $t_i$ -室内空气温度,  $^{\circ}C$ ;  $t_N$ -围护结构与室内空气界面温度,  $^{\circ}C$ ;  $\alpha_i$ -围护结构内表面与室内空气换热系数,  $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$ ;

[0063] 饱和蒸汽压和温度的关系,按照下式确定:

[0064]  $E_t(t) = 1.84 \cdot 10^{11} \cdot \exp(-5330/(273+t))$  (21)。

[0065] 进一步的,所述步骤4具体为,建筑物单层结构湿迁移,按照公式(14),得到下式:

[0066]  $\rho \cdot \frac{\xi_{F0}}{E_i(t)} \cdot \frac{\partial F(w,t)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial F(w,t)}{\partial x} \right)$  (28)

[0067] 则 $k_F$ 变为平均材料热湿属性系数, $k_{F0}$ , [ $m^2/s \cdot Pa$ ],可用下式表达:

[0068]  $k_F = \frac{\mu}{\rho \cdot \xi_{F0}}$  (29)

[0069] 根据式(20)的边界条件,离散-连续法解决墙体单层结构非稳态湿迁移可描述为下式:

[0070] 
$$\begin{cases} \frac{\partial F_1(\tau)}{\partial \tau} = \frac{k_{F0}}{h^2} \cdot E_{i1} \cdot \left( -\left(1 + \frac{\beta_e}{\mu} h\right) F_1(\tau) + F_2(\tau) \right) + \frac{k_{F0}}{h^2} \cdot E_{i1} \cdot \frac{\beta_e}{\mu} h \cdot F_e(\tau) \\ \frac{\partial F_i(\tau)}{\partial \tau} = \frac{k_{F0}}{h^2} \cdot E_{ii} \cdot (F_{i-1}(\tau) - 2 \cdot F_i(\tau) + F_{i+1}(\tau)), i = 2, 3, 4, \dots, N-1 \\ \frac{\partial F_N(\tau)}{\partial \tau} = \frac{k_{F0}}{h^2} \cdot E_{iN} \cdot (F_{N-1}(\tau) - \left(1 + \frac{\beta_e}{\mu} h\right) F_N(\tau)) + \frac{k_{F0}}{h^2} \cdot E_{iN} \cdot \frac{\beta_e}{\mu} h \cdot F_i(\tau) \\ F(x, 0) = f(x), 0 \leq x \leq l \end{cases}$$
 (30)

[0071] 考虑到湿势随季节性变化,那么在一个月內,湿势变化可以用柯西矩阵进行描述:

[0072] 
$$\begin{cases} \bar{F}'_r = E_{iM} \cdot A \cdot \bar{F} + p \cdot \tau \cdot \bar{L} + \bar{B} \\ \bar{F}(0) = \bar{F}_0(0), 0 \leq x \leq l \end{cases}$$
 (31)

[0073]  $p$ -边界条件系数; $E_{iM}$ -饱和蒸汽压对角矩阵; $A$ -湿势函数系数对角矩阵; $\bar{L}$ -第一行值为1,其他行为0的列向量; $\bar{B}$ -第一和最后元素为围护结构内外表面边界条件,其他元素为0的列向量; $\bar{F}$ -建筑物围护结构湿势分布列向量; $\bar{F}_0$ -初始条件下围护结构内湿势分布列向量; $\bar{F}$ -围护结构内所需湿势分布列向量; $\bar{F}'_r$ -围护结构内湿势随时间变化的分布列向量;  
 $\tau$ -时间,s,

[0074] 边界条件系数 $p$ 可描述为下式:

[0075]  $p = k_{F0} \cdot E_{i1} \cdot h \cdot n \cdot \frac{\beta_e}{h^2 \cdot \mu}$  (32)

[0076]  $E_{iM}$ 饱和蒸汽压可描述为下列对角矩阵:

[0077] 
$$E_{iM} = \begin{pmatrix} E_{i1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_{i2} & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & E_{i(N-1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_{iN} \end{pmatrix}$$
 (33)

[0078]  $E_{t1}, E_{t2}, E_{t(N-1)}, E_{tN}$ -在一个月时间内,墙体划分区间内饱和蒸汽压,Pa,

[0079]  $A$ 湿势函数系数可描述为下列对角矩阵:

$$[0080] \quad A = \frac{k}{h^2} \begin{pmatrix} -(1 + \frac{\beta_e}{\mu} h) & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -(1 + \frac{\beta_i}{\mu} h) \end{pmatrix} \quad (34)$$

[0081]  $\bar{L}$  是第一行值为1,其他行为0的列向量:

$$[0082] \quad L = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (35)$$

[0083]  $\bar{B}$  - 第一和最后元素为围护结构内外表面边界条件,其他元素为0的列向量:

$$[0084] \quad \bar{B} = \begin{pmatrix} k_{F0} \cdot E_{i1} \cdot h \cdot n \cdot \frac{\beta_e}{h^2 \cdot \mu} \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ k_{F0} \cdot E_{iN} \cdot h \cdot F_i \cdot \frac{\beta_i}{h^2 \cdot \mu} \end{pmatrix} \quad (36)$$

[0085]  $\bar{F}_0$  初始条件下围护结构内湿势分布列向量:

$$[0086] \quad \bar{F}_0 = \begin{pmatrix} F_1(0) \\ F_2(0) \\ \dots \\ F_{N-1}(0) \\ F_N(0) \end{pmatrix} \quad (37)$$

[0087]  $\bar{F}$  围护结构内所需湿势分布列向量:

$$[0088] \quad \bar{F} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \dots \\ F_{N-1} \\ F_N \end{pmatrix} \quad (38)$$

[0089]  $\bar{F}'_\tau$  围护结构内湿势随时间变化的分布列向量:

$$[0090] \quad \bar{F}'_\tau = \begin{pmatrix} \bar{F}'_1(\tau) \\ \bar{F}'_2(\tau) \\ \dots \\ \bar{F}'_{N-1}(\tau) \\ \bar{F}'_N(\tau) \end{pmatrix} \quad (39)$$

[0091] 解方程(28)围护结构湿传递方程,基于离散-连续法,得到下列计算方程:

$$[0092] \quad \bar{F} = p \cdot \left( (E_{iM} \cdot A)^{-2} \cdot e^{E_{iM} \cdot A \cdot \tau} - \tau \cdot (E_{iM} \cdot A)^{-1} - (E_{iM} \cdot A)^{-2} \right) \cdot \bar{L} + (E_{iM} \cdot A)^{-1} \left( e^{E_{iM} \cdot A \cdot \tau} - E \right) \bar{B} + e^{E_{iM} \cdot A \cdot \tau} \cdot \bar{F}_0 \quad (40)$$

[0093] E是单位矩阵,可按矩阵确定:

$$[0094] \quad E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (41)$$

[0095] 公式(37)中 $e^{E_t \cdot A \cdot \tau}$ 是指数矩阵,可按下列确定:

$$[0096] \quad e^{E_t \cdot A \cdot \tau} = T \cdot e^{J \cdot \tau} T^{-1} \quad (42)$$

$$[0097] \quad e^{J \cdot \tau} = \begin{pmatrix} e^{\lambda_1 \cdot \tau} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{\lambda_2 \cdot \tau} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{\lambda_{(N-1)} \cdot \tau} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{\lambda_N \cdot \tau} \end{pmatrix} \quad (43)$$

[0098]  $\lambda_1 \cdot \tau, \lambda_2 \cdot \tau, \dots, \lambda_{(N-1)} \cdot \tau, \lambda_N \cdot \tau$ -矩阵的特征值,它是由矩阵 $E_t$ 除以矩阵A得到,

[0099] T-特征向量矩阵的矩阵,由矩阵 $E_t$ 除以矩阵A确定,

[0100]  $T^{-1}$ -特征向量矩阵的逆矩阵,由矩阵 $E_t$ 除以矩阵A确定,

[0101] 公式(37)可以确定任意时刻围护结构内单层墙体湿势分布,同时兼顾考虑温度持续性影响,

[0102] 离散-连续法解决墙体多层结构非稳态湿迁移可描述为下式:

$$[0103] \quad \begin{cases} \frac{\partial F_1(\tau)}{\partial \tau} = \frac{k_{F01}}{h^2} \cdot E_{t1} \cdot \left( -\left(1 + \frac{\beta_e}{\mu} h\right) F_1(\tau) + F_2(\tau) \right) + \frac{k_{F01}}{h^2} \cdot E_{t1} \cdot \frac{\beta_e}{\mu} h \cdot F_e(\tau) \\ \frac{\partial F_i(\tau)}{\partial \tau} = \frac{k_{F01}}{h^2} \cdot E_{ti} \cdot (F_{i-1}(\tau) - 2 \cdot F_i(\tau) + F_{i+1}(\tau)), i = 2, 3, 4, \dots, v-1 \\ \frac{\partial F_v(\tau)}{\partial \tau} = d_{v-1} \cdot F_{v-1}(\tau) - d_v \cdot F_v(\tau) + d_{v+1} \cdot F_{v+1}(\tau) \\ \frac{\partial F_i(\tau)}{\partial \tau} = \frac{k_{F02}}{h^2} \cdot E_{ti} \cdot (F_{i-1}(\tau) - 2 \cdot F_i(\tau) + F_{i+1}(\tau)), i = v+1, v+2, \dots, N-1 \\ \frac{\partial F_N(\tau)}{\partial \tau} = \frac{k_{F02}}{h^2} \cdot E_{tN} \cdot (F_{N-1}(\tau) - \left(1 + \frac{\beta_e}{\mu} h\right) F_N(\tau)) + \frac{k_{F02}}{h^2} \cdot E_{tN} \cdot \frac{\beta_e}{\mu} h \cdot F_i(\tau) \\ F(x, 0) = f(x), 0 \leq x \leq l \end{cases} \quad (44)$$

[0104]  $k_{F01}$ -材料一热湿属性平均系数, [ $m^2/s \cdot Pa$ ];  $k_{F02}$ -材料二热湿属性平均系数,

[0105] [ $m^2/s \cdot Pa$ ];  $F_{v-1}(\tau)$ -围护结构墙体内在 $v-1$ 区间湿势值, Pa;  $F_v(\tau)$ -围护结构墙体内在 $v$ 区间湿势值, Pa;  $F_{v+1}(\tau)$ -围护结构墙体内在 $v+1$ 区间湿势值, Pa;  $d_{v-1}$ -围护结构墙体内在 $v-1$ 区间湿势系数,  $1/s$ ;  $d_v$ -围护结构墙体内在 $v$ 区间湿势系数,  $1/s$ ;  $d_{v+1}$ -围护结构墙体内在 $v+1$ 区间湿势系数,  $1/s$ ,

[0106]  $d_{v-1}, d_v, d_{v+1}$ 系数方程组如下:

$$[0107] \quad \begin{cases} d_{v-1} = 2 \cdot E_{tv} \cdot \mu_1 / (h_1 \cdot \rho_{01} \cdot \xi_{F01} + h_2 \cdot \rho_{02} \cdot \xi_{F02}) \\ d_v = 2 \cdot E_{tv} \cdot (\mu_1 / h_1 + \mu_2 / h_2) / (h_1 \cdot \rho_{01} \cdot \xi_{F01} + h_2 \cdot \rho_{02} \cdot \xi_{F02}) \\ d_{v+1} = 2 \cdot E_{tv} \cdot \mu_2 / (h_2 \cdot \rho_{01} \cdot \xi_{F01} + h_2 \cdot \rho_{02} \cdot \xi_{F02}) \end{cases} \quad (45)$$

[0108] 解公式(45)借助柯西矩阵法,可近似得到下式:

$$[0109] \quad \begin{cases} \bar{F}' = (G + K \cdot E_{IM} \cdot A_{MH}) \cdot \bar{F} + p_{MH} \cdot \tau \cdot \bar{L} + \bar{B}_{MH} \\ \bar{F}(0) = \bar{F}_0(0), 0 \leq x \leq l \end{cases} \quad (46)$$

[0110] G-材料结合处系数矩阵;K-材料热湿属性系数矩阵;  $A_{MH}$ -多层结构材料湿势系数矩

阵;  $\bar{B}_{MH}$  - 第一和最后元素为围护结构内外表面边界条件,其他元素为0的列向量;  $p_{MH}$ -多层结构墙体外界条件系数,  $\text{Pa}/\text{s}^2$ ,

[0111] 矩阵G可描述为:

$$[0112] \quad G = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_{v-1} & d_v & d_{v+1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (47)$$

[0113] 矩阵K可,可描述为:

$$[0114] \quad K = \begin{pmatrix} k_{F01}/h_1^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{F01}/h_1^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{F02}/h_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{F02}/h_2^2 \end{pmatrix} \quad (48)$$

[0115] 矩阵 $A_{MH}$ 可描述为:

$$[0116] \quad A_{MH} = \begin{pmatrix} -(1 + \frac{\beta_e}{\mu_1} h_1) & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -(1 + \frac{\beta_i}{\mu_2} h_2) \end{pmatrix} \quad (49)$$

[0117] 矩阵 $\bar{B}_{MH}$ 可描述为:

$$[0118] \quad \bar{B}_{MH} = \begin{pmatrix} k_{F0} \cdot E_n \cdot h_1 \cdot n \cdot \frac{\beta_e}{h_1^2 \cdot \mu_1} \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ k_{F0} \cdot E_n \cdot h_2 \cdot F_i \cdot \frac{\beta_i}{h_2^2 \cdot \mu_2} \end{pmatrix} \quad (50)$$

[0119] 系数p按下式确定:

$$[0120] \quad p = k_{F0} \cdot E_n \cdot h_1 \cdot m \cdot \frac{\beta_e}{h_1^2 \cdot \mu_1} \quad (51)$$

[0121] 解方程(46)可描述为下式:

$$[0122] \quad \bar{F} = p_{MH} \cdot \left( (G + K \cdot E_{iM} \cdot A_{MH})^{-2} \cdot e^{(G+K \cdot E_{iM} \cdot A_{MH}) \cdot \tau} - \tau \cdot (G + K \cdot E_{iM} \cdot A_{MH})^{-1} - (G + K \cdot E_{iM} \cdot A_{MH})^{-2} \right) \cdot \bar{L} + (G + K \cdot E_{iM} \cdot A_{MH})^{-1} \left( e^{(G+K \cdot E_{iM} \cdot A_{MH}) \cdot \tau} - E \right) \cdot \bar{B}_{MH} + e^{(G+K \cdot E_{iM} \cdot A_{MH}) \cdot \tau} \cdot \bar{F}_0 \quad (52)$$

[0123] 根据公式(52)可以确定建筑物围护结构墙体多层结构内湿势的分布。

[0124] 本发明的有益效果是:

[0125] 本发明能精确计算建筑物围护结构的热损失效果,达到节能效果。

### 附图说明

- [0126] 图1本发明离散空间-时间阈分布图。  
[0127] 图2本发明单层墙体非稳态湿迁移空间-时间湿势分布图。  
[0128] 图3本发明室外空气相对湿度与天数变化关系图。  
[0129] 图4本发明室外空气月平均温度与天数关系图。  
[0130] 图5本发明加气混凝土砌块含湿率与湿势关系图。  
[0131] 图6本发明陶瓷砖含湿率与湿势关系图。  
[0132] 图7本发明矿棉含湿率与湿势关系图。  
[0133] 图8本发明聚苯乙烯泡沫含湿率与湿势关系图。  
[0134] 图9本发明墙体1含湿量沿墙体厚度方向分布图。  
[0135] 图10本发明墙体2含湿量沿墙体厚度方向分布图。  
[0136] 图11本发明墙体3含湿量沿墙体厚度方向分布图。  
[0137] 图12本发明墙体4含湿量沿墙体厚度方向分布图。  
[0138] 图13本发明墙体1年含湿量变化图。  
[0139] 图14本发明墙体3年含湿量变化图。

### 具体实施方式

[0140] 下面将结合本发明实施例中的附图对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

#### [0141] 实施例1

[0142] 一种建筑外围护结构墙体湿工况的确定方法,所述确定方法包括以下步骤,

[0143] 步骤1:确定气候条件,包括室外空气相对湿度与天数变化关系和室外空气月平均温度与天数关系,室内微气候条件;

[0144] 步骤2:根据空间坐标将建筑物围护结构划分为若干区间,如图2,划分的区间长度 $h$ 达到准确计算的结果;在多层围护结构不同层中应用不同的中区间长度 $h$ ;

[0145] 步骤3:给出建筑物围护结构所有区间初始湿势分布和初始时间;

[0146] 步骤4:确定建筑物围护结构墙体单层结构湿势分布按照公式(40)或多层结构湿势分布按照公式(51),确定月区间内任意时刻湿势分布,同时按照公式(40)和(51)计算;

[0147] 步骤5:确定建筑物围护结构月末和所需时刻湿工况,借助于建筑物围护结构材料含湿量与湿势分布图;

[0148] 步骤6:建筑物围护结构温度场的变化,按照下月室外环境气候条件得到;

[0149] 步骤7:确定下月初始湿势分布,借助于上月末围护结构湿工况湿势分布;

[0150] 步骤8:重复计算步骤4-步骤7,得到所需时间内建筑物围护结构非稳态湿工况。

[0151] 进一步的,所述步骤1的室内微气候条件为空气温度为18-22℃,节能设计室内温度为18℃,空气相对湿度为45%-55%,优选50%;

[0152] 进一步的,所述步骤3具体为围护结构内湿度分布取决于湿势F和温度t,函数关系

$$[0153] \quad w=f(F, t) \quad (1)$$

[0154] 由能量平衡定律,一维稳态传热方程原理,根据相似准则,湿度梯度随时间变化正比于湿流密度梯度,表达为下式:

$$[0155] \quad \rho \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial g}{\partial x} \quad (2)$$

[0156] 同理,湿流密度正比于湿势,按下式表达:

$$[0157] \quad g = \mu \frac{\partial F}{\partial x} \quad (3)$$

[0158] 湿势按下式确定:

$$[0159] \quad F(w, t) = E_t(t) \cdot \varphi(w) + \frac{1}{\mu} \int_0^w \beta(\zeta) d\zeta \quad (4)$$

[0160]  $E_t$ -饱和水蒸气压,Pa;  $\varphi$ -空气相对湿度; $\mu$ -蒸汽渗透系数,kg/(m·c·Pa); $\beta$ -静态水分传导率,kg/(m·c·kg/kg); $w$ -湿度,%; $t$ -温度,°C; $F$ -湿势,Pa. $E_t(t) \cdot \varphi(w)$ -空气水蒸气分压,Pa; $\frac{1}{\mu} \int_0^w \beta(\zeta) d\zeta$ -当量附加压力,Pa;

[0161] 定义概念,当量附加压力饱和压力 $E_{\max}$ :

$$[0162] \quad E_{\max} = \frac{1}{\mu} \int_0^{w_{\max}} \beta(\zeta) d\zeta \quad (5)$$

[0163] 则当量附加压力相对湿度, $\psi(w)$ ,按下式确定:

$$[0164] \quad \psi(w) = \frac{\frac{1}{\mu} \int_0^w \beta(\zeta) d\zeta}{\frac{1}{\mu} \int_0^{w_{\max}} \beta(\zeta) d\zeta} = \frac{\frac{1}{\mu} \int_0^w \beta(\zeta) d\zeta}{E_{\max}} \quad (6)$$

[0165] 则围护结构湿势数学模型,如下:

$$[0166] \quad F(w, t) = E_t(t) \cdot \varphi(w) + E_{\max} \cdot \psi(w) \quad (7)$$

[0167] 建立围护结构墙体内材料湿度、湿势、温度关系,得到下列关系方程

$$[0168] \quad \rho \frac{\partial w}{\partial t} = \rho \frac{\partial w}{\partial F} \cdot \frac{\partial F}{\partial \tau} + \rho \frac{\partial w}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (8)$$

[0169] 变换方程(8),得到下式:

$$[0170] \quad \rho \frac{\partial w}{\partial t} = \rho \frac{\partial w}{\partial F(w, t)} \cdot \frac{\partial F(w, t)}{\partial \tau} \quad (9)$$

[0171] 将方程(3)和(9)带入方程(2),得到下列方程

$$[0172] \quad \rho \frac{\partial w}{\partial F(w, t)} \cdot \frac{\partial F(w, t)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial F(w, t)}{\partial x} \right) \quad (10)$$

[0173] 将公式(4)进行微分,得到下列公式

$$[0174] \quad \frac{\partial w}{\partial F(w, t)} = \left( \frac{1}{\mu} \beta(w) + E_t(t) \cdot \frac{\partial \varphi(w)}{\partial w} \right)^{-1} \quad (11)$$

[0175] 将公式(11)带入到公式(10),得到下式

$$[0176] \quad \rho \cdot \left( \frac{1}{\mu} \beta(w) + \frac{\partial \varphi(w)}{\partial w} E_t(t) \right)^{-1} \frac{\partial F(w,t)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial F(w,t)}{\partial x} \right) \quad (12)$$

[0177]  $\rho_0$ -墙体材料干密度, kg/m<sup>3</sup>,

[0178] 得到的方程(12)进行简化,定义新系数,相对潜湿容,  $\xi_F$ , Kg/Kg:

$$[0179] \quad \xi_F(w,t) = \left( \frac{\partial \varphi(w)}{\partial w} + \frac{1}{\mu \cdot E_t(t)} \beta(w) \right)^{-1} \quad (13)$$

[0180] 该系数表征温湿度函数关系。在结构层中,材料吸湿处,该系数不取决于温度,而是取决于蒸汽容量;

[0181] 将式(13)带入(12),得到建筑物围护结构湿迁移数学模型计算公式:

$$[0182] \quad \rho \cdot \frac{\xi_F(w,t)}{E_t(t)} \cdot \frac{\partial F(w,t)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial F(w,t)}{\partial x} \right) \quad (14)$$

[0183] 变换公式(14),找出湿势与时间的关系方程:

$$[0184] \quad \frac{\partial F(w,t)}{\partial \tau} = \frac{\mu}{\rho \cdot \xi_F(w,t)} \cdot E_t(t) \cdot \frac{\partial^2 F(w,t)}{\partial x^2} \quad (15)$$

[0185] 导入新系数-材料热湿属性系数,  $k_F$ , [m<sup>2</sup>/s · Pa], 该系数同样在结构内材料吸湿处,不取决于温度;

$$[0186] \quad k_F = \frac{\mu}{\rho \cdot \xi_F(w,t)} \quad (16)$$

[0187] 边界条件:

$$[0188] \quad -\mu_1 \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_{i=1} = \beta_e (F_e - F_1) \quad (17)$$

[0189]  $\beta_e$ -围护结构外表面换湿系数, Kg/(m<sup>2</sup> · s · Pa);  $\mu_1$ -围护结构与室外空气接触层材料蒸汽渗透系数, kg/(m · c · Pa);  $F_e$ -室外空气湿势, Pa;  $F_1$ -围护结构与室外空气接触材料界面湿势, Pa;

[0190] 在缺乏外围护结构外表面水湿条件下,认为室外空气湿势等于室外空气压力,围护结构与室外空气接触材料界面湿势等于其表面压力;

$$[0191] \quad \mu_2 \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_{i=N} = \beta_i (F_i - F_N) \quad (18)$$

[0192]  $\beta_i$ -围护结构内表面换湿系数, Kg/(m<sup>2</sup> · s · Pa);  $\mu_2$ -围护结构与室内空气接触层材料蒸汽渗透系数, kg/(m · c · Pa);  $F_i$ -室内空气湿势, Pa;  $F_N$ -围护结构与室内空气接触材料界面湿势, Pa;

[0193] 在缺乏外围护结构内表面水湿条件下,认为室内空气湿势等于室内空气压力,围护结构与室内空气接触材料界面湿势等于其表面压力。

[0194] 围护结构与室外空气换热边界条件:

$$[0195] \quad -\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{i=1} = \alpha_e (t_e - t_1), \quad (19)$$

[0196]  $t_e$ -室外空气温度, °C;  $t_1$ -围护结构与室外空气界面温度, °C;  $\alpha_e$ -围护结构外表面与室外空气换热系数, W/(m<sup>2</sup> · °C);

[0197] 围护结构与室内空气换热边界条件:

$$[0198] \quad \lambda \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{i=N} = \alpha_i (t_i - t_N) \quad (20)$$

[0199]  $t_i$ -室内空气温度, °C;  $t_N$ -围护结构与室内空气界面温度, °C;  $\alpha_i$ -围护结构内表面与室内空气换热系数, W/(m<sup>2</sup>·°C);

[0200] 饱和蒸汽压和温度的关系, 按照下式确定:

$$[0201] \quad E_t(t) = 1.84 \cdot 10^{11} \cdot \exp(-5330/(273+t)) \quad (21)$$

[0202] 进一步的, 建筑物单层结构湿迁移, 按照公式 (14), 得到下式:

$$[0203] \quad \rho \cdot \frac{\xi_F(w,t)}{E_i(t)} \cdot \frac{\partial F(w,t)}{\partial \tau} = \mu \frac{\partial^2 F(w,t)}{\partial x^2} \quad (22)$$

[0204] 有限差分法解决围护结构非稳态湿迁移湿势分布离散空间-时间阈如图1,

[0205] 根据上述边界条件, 确定初始湿势分布, 基于有限差分法, 解决建筑物墙体单层结构湿势空间-时间分布, 归纳为下列方程组:

$$[0206] \quad \begin{cases} F_1^{k+1} = F_1^k + \Delta\tau \frac{k_{F_1}^k}{h^2} E_n^k \left( -\left(1 + \frac{\beta_e}{\mu} h\right) F_1^k + F_2^k \right) + \Delta\tau \frac{k_{F_1}^k}{h^2} E_n^k \frac{\beta_e}{\mu} h F_e^k \\ F_i^{k+1} = F_i^k + \Delta\tau \frac{k_{F_i}^k}{h^2} E_n^k (F_{i+1}^k - 2F_i^k + F_{i-1}^k), i = 2, \dots, N-1, k = 0, 1, \dots \\ F_N^{k+1} = F_N^k + \Delta\tau \frac{k_{F_N}^k}{h^2} E_{iN}^k (F_{N-1}^k - \left(1 + \frac{\beta_i}{\mu} h\right) F_1^k) + \Delta\tau \frac{k_{F_N}^k}{h^2} E_{iN}^k \frac{\beta_i}{\mu} h F_i^k \\ F(x, 0) = f(x), 0 \leq x \leq l \end{cases} \quad (23)$$

[0207]  $h$ -网格间距, m;  $\Delta\tau$ -时间间隔, s。

[0208] 建筑物墙体多层结构湿势空间-时间分布可归纳下列方程组:

$$[0209] \quad \begin{cases} F_1^{k+1} = F_1^k + \Delta\tau \frac{k_{F_1}^k}{h^2} E_n^k \left( -\left(1 + \frac{\beta_e}{\mu} h\right) F_1^k + F_2^k \right) + \Delta\tau \frac{k_{F_1}^k}{h^2} E_n^k \frac{\beta_e}{\mu} h F_e^k \\ F_i^{k+1} = F_i^k + \Delta\tau \frac{k_{F_i}^k}{h^2} E_n^k (F_{i+1}^k - 2F_i^k + F_{i-1}^k), i = 2, \dots, v-1, k = 0, 1, \dots \\ F_v^{k+1} = F_v^k + 2 \cdot \Delta\tau \cdot E_{F_v}^k \frac{(F_{v-1}^k - F_v^k) \frac{\mu_1}{h_1} - (F_v^k - F_{v+1}^k) \frac{\mu_2}{h_2}}{\mu_1 \rho_{01} \xi_{F_{1v}}^k + \mu_2 \rho_{02} \xi_{F_{2v}}^k} \\ F_i^{k+1} = F_i^k + \Delta\tau \frac{k_{F_i}^k}{h^2} E_n^k (F_{i+1}^k - 2F_i^k + F_{i-1}^k), i = v+1, \dots, N-1, k = 0, 1, \dots \\ F_N^{k+1} = F_N^k + \Delta\tau \frac{k_{F_N}^k}{h^2} E_{iN}^k (F_{N-1}^k - \left(1 + \frac{\beta_i}{\mu} h\right) F_1^k) + \Delta\tau \frac{k_{F_N}^k}{h^2} E_{iN}^k \frac{\beta_i}{\mu} h F_i^k \\ F(x, 0) = f(x), 0 \leq x \leq l \end{cases} \quad (24)$$

[0210]  $\rho_{01}$ -材料一干密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_{02}$ -材料二干密度, kg/m<sup>3</sup>;  $h_1$ -材料一区间单位长度, m;  $h_2$ -材料二区间单位长度, m;  $k_{F_{1i}}$ -材料一在单位区间第k步热湿属性平均系数, [m<sup>2</sup>/s·Pa];  $k_{F_{2i}}$ -材料二在单位区间第k步热湿属性平均系数, [m<sup>2</sup>/s·Pa];  $\xi_{F_{1v}}^k$ -材料一在v层处第k步相对潜湿容, kg/kg;  $\xi_{F_{2v}}^k$ -材料二在v层处第k步相对潜湿容, kg/kg;  $E_{F_v}^k$ -在v层处第k步饱和蒸汽压, Pa;  $F_{v-1}^k$ -围护结构墙体内在v-1区间第k步湿势值, Pa;  $F_v^k$ -围护结构墙体内在v区间第k步湿势值, Pa;  $F_{v+1}^k$ -围护结构墙体内在v+1区间第k步湿势值, Pa;  $F_v^{k+1}$ -围护结构墙体内在v+1区间第k+1步湿势值, Pa,

[0211] 结构材料层接触面处边界条件:

$$[0212] \quad \begin{cases} \varphi(w)|_{x=0} = \varphi(w)|_{x+l} \\ \psi(w)|_{x=0} = \psi(w)|_{x+l} \end{cases} \quad (25)$$

$$[0213] \quad \mu(x) \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{x=0} = \mu(x) \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{x+l} \quad (26)$$

[0214] 两种材料接触面水蒸气分压相等,当量附加压力相对湿度相等,湿流密度相等。

[0215] 方程组 (23) 和 (24) 有意义的条件如下:

$$[0216] \quad \Delta \tau \leq \frac{h^2}{2 \cdot k_F \cdot E_t} \quad (27)$$

[0217] 进一步的,所述步骤4具体为,建筑物单层结构湿迁移,按照公式 (14),得到下式:

$$[0218] \quad \rho \cdot \frac{\xi_{F0}}{E_t(t)} \cdot \frac{\partial F(w,t)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial F(w,t)}{\partial x} \right) \quad (28)$$

[0219] 则 $k_F$ 变为平均材料热湿属性系数, $k_{F0}$ , [ $\text{m}^2/\text{s} \cdot \text{Pa}$ ],可用下式表达:

$$[0220] \quad k_F = \frac{\mu}{\rho \cdot \xi_{F0}} \quad (29)$$

[0221] 基于离散-连续法解决非稳态湿迁移空间-时间湿势分布可用图2进行描述:

[0222] 根据式 (20) 的边界条件,离散-连续法解决墙体单层结构非稳态湿迁移可描述为下式:

$$[0223] \quad \begin{cases} \frac{\partial F_1(\tau)}{\partial \tau} = \frac{k_{F0}}{h^2} \cdot E_{t1} \cdot \left( -\left(1 + \frac{\beta_e}{\mu} h\right) F_1(\tau) + F_2(\tau) \right) + \frac{k_{F0}}{h^2} \cdot E_{t1} \cdot \frac{\beta_e}{\mu} h \cdot F_e(\tau) \\ \frac{\partial F_i(\tau)}{\partial \tau} = \frac{k_{F0}}{h^2} \cdot E_{ti} \cdot (F_{i-1}(\tau) - 2 \cdot F_i(\tau) + F_{i+1}(\tau)), i = 2, 3, 4, \dots, N-1 \\ \frac{\partial F_N(\tau)}{\partial \tau} = \frac{k_{F0}}{h^2} \cdot E_{tN} \cdot (F_{N-1}(\tau) - \left(1 + \frac{\beta_e}{\mu} h\right) F_N(\tau)) + \frac{k_{F0}}{h^2} \cdot E_{tN} \cdot \frac{\beta_e}{\mu} h \cdot F_i(\tau) \\ F(x, 0) = f(x), 0 \leq x \leq l \end{cases} \quad (30)$$

[0224] 考虑到湿势随季节性变化,那么在一个月內,湿势变化可以用柯西矩阵进行描述:

$$[0225] \quad \begin{cases} \bar{F}'_\tau = E_{tM} \cdot A \cdot \bar{F} + p \cdot \tau \cdot \bar{L} + \bar{B} \\ \bar{F}(0) = \bar{F}_0(0), 0 \leq x \leq l \end{cases} \quad (31)$$

[0226]  $p$ -边界条件系数; $E_{tM}$ -饱和蒸汽压对角矩阵; $A$ -湿势函数系数对角矩阵; $\bar{L}$ -第一行为1,其他行为0的列向量; $\bar{B}$ -第一和最后元素为围护结构内外表面边界条件,其他元素为0的列向量; $\bar{F}$ -建筑物围护结构湿势分布列向量; $\bar{F}_0$ -初始条件下围护结构内湿势分布列向量; $\bar{F}$ -围护结构内所需湿势分布列向量; $\bar{F}'_\tau$ -围护结构内湿势随时间变化的分布列向量; $\tau$ -时间,s,

[0227] 边界条件系数 $p$ 可描述为下式:

$$[0228] \quad p = k_{F0} \cdot E_{t1} \cdot h \cdot n \cdot \frac{\beta_e}{h^2 \cdot \mu} \quad (32)$$

[0229]  $E_{tM}$ 饱和蒸汽压可描述为下列对角矩阵:

$$[0230] \quad E_{tM} = \begin{pmatrix} E_{t1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_{t2} & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & E_{t(N-1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_{tN} \end{pmatrix} \quad (33)$$

[0231]  $E_{t1}, E_{t2}, E_{t(N-1)}, E_{tN}$ -在一个月时间内,墙体划分区间内饱和蒸汽压,Pa,

[0232] A湿势函数系数可描述为下列对角矩阵:

$$[0233] \quad A = \frac{k}{h^2} \begin{pmatrix} -(1 + \frac{\beta_e}{\mu} h) & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -(1 + \frac{\beta_i}{\mu} h) \end{pmatrix} \quad (34)$$

[0234]  $L$ 是第一行为1,其他行为0的列向量:

$$[0235] \quad L = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (35)$$

[0236]  $\bar{B}$ -第一和最后元素为围护结构内外表面边界条件,其他元素为0的列向量:

$$[0237] \quad \bar{B} = \begin{pmatrix} k_{F0} \cdot E_{t1} \cdot h \cdot n \cdot \frac{\beta_e}{h^2 \cdot \mu} \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ k_{F0} \cdot E_{tN} \cdot h \cdot F_i \cdot \frac{\beta_i}{h^2 \cdot \mu} \end{pmatrix} \quad (36)$$

[0238]  $\bar{F}_0$ 初始条件下围护结构内湿势分布列向量:

$$[0239] \quad \bar{F}_0 = \begin{pmatrix} F_1(0) \\ F_2(0) \\ \dots \\ F_{N-1}(0) \\ F_N(0) \end{pmatrix} \quad (37)$$

[0240]  $\bar{F}$ 围护结构内所需湿势分布列向量:

$$[0241] \quad \bar{F} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \dots \\ F_{N-1} \\ F_N \end{pmatrix} \quad (38)$$

[0242]  $\bar{F}'_\tau$ 围护结构内湿势随时间变化的分布列向量:

$$[0243] \quad \bar{F}'_\tau = \begin{pmatrix} \bar{F}'_1(\tau) \\ \bar{F}'_2(\tau) \\ \dots \\ \bar{F}'_{N-1}(\tau) \\ \bar{F}'_N(\tau) \end{pmatrix} \quad (39)$$

[0244] 解方程(28)围护结构湿传递方程,基于离散-连续法,得到下列计算方程:

[0245] 
$$\bar{F} = p \cdot \left( (E_{IM} \cdot A)^{-2} \cdot e^{E_{IM} \cdot A \cdot \tau} - \tau \cdot (E_{IM} \cdot A)^{-1} - (E_{IM} \cdot A)^{-2} \right) \cdot \bar{L} + (E_{MI} \cdot A)^{-1} \cdot (e^{E_{MI} \cdot A \cdot \tau} - E) \cdot \bar{B} + e^{E_{MI} \cdot A \cdot \tau} \cdot \bar{F}_0 \quad (40)$$

[0246] E是单位矩阵,可按下列矩阵确定:

[0247] 
$$E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (41)$$

[0248] 公式(37)中 $e^{E_i \cdot A \cdot \tau}$ 是指数矩阵,可按下列确定:

[0249] 
$$e^{E_i \cdot A \cdot \tau} = T \cdot e^{J \cdot \tau} \cdot T^{-1} \quad (42)$$

[0250] 
$$e^{J \cdot \tau} = \begin{pmatrix} e^{\lambda_1 \cdot \tau} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{\lambda_2 \cdot \tau} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{\lambda_{(N-1)} \cdot \tau} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{\lambda_N \cdot \tau} \end{pmatrix} \quad (43)$$

[0251]  $\lambda_1 \cdot \tau, \lambda_2 \cdot \tau, \dots, \lambda_{(N-1)} \cdot \tau, \lambda_N \cdot \tau$ -矩阵的特征值,它是由矩阵 $E_t$ 除以矩阵A得到,

[0252] T-特征向量矩阵的矩阵,由矩阵 $E_t$ 除以矩阵A确定,

[0253]  $T^{-1}$ -特征向量矩阵的逆矩阵,由矩阵 $E_t$ 除以矩阵A确定,

[0254] 公式(37)可以确定任意时刻围护结构内单层墙体湿势分布,同时兼顾考虑温度持续性影响,

[0255] 离散-连续法解决墙体多层结构非稳态湿迁移可描述为下式:

[0256] 
$$\begin{cases} \frac{\partial F_1(\tau)}{\partial \tau} = \frac{k_{F01}}{h^2} \cdot E_{i1} \cdot \left( -\left(1 + \frac{\beta_c}{\mu} h\right) F_1(\tau) + F_2(\tau) \right) + \frac{k_{F01}}{h^2} \cdot E_{i1} \cdot \frac{\beta_c}{\mu} h \cdot F_c(\tau) \\ \frac{\partial F_i(\tau)}{\partial \tau} = \frac{k_{F0i}}{h^2} \cdot E_{in} \cdot (F_{i-1}(\tau) - 2 \cdot F_i(\tau) + F_{i+1}(\tau)), i = 2, 3, 4, \dots, v-1 \\ \frac{\partial F_v(\tau)}{\partial \tau} = d_{v-1} \cdot F_{v-1}(\tau) - d_v \cdot F_v(\tau) + d_{v+1} \cdot F_{v+1}(\tau) \\ \frac{\partial F_i(\tau)}{\partial \tau} = \frac{k_{F0i}}{h^2} \cdot E_{in} \cdot (F_{i-1}(\tau) - 2 \cdot F_i(\tau) + F_{i+1}(\tau)), i = v+1, v+2, \dots, N-1 \\ \frac{\partial F_N(\tau)}{\partial \tau} = \frac{k_{F0N}}{h^2} \cdot E_{iN} \cdot (F_{N-1}(\tau) - \left(1 + \frac{\beta_t}{\mu} h\right) F_N(\tau)) + \frac{k_{F0N}}{h^2} \cdot E_{iN} \cdot \frac{\beta_t}{\mu} h \cdot F_i(\tau) \\ F(x, 0) = f(x), 0 \leq x \leq l \end{cases} \quad (44)$$

[0257]  $k_{F01}$ -材料一热湿属性平均系数, [ $m^2/s \cdot Pa$ ];  $k_{F02}$ -材料二热湿属性平均系数,

[0258] [ $m^2/s \cdot Pa$ ];  $F_{v-1}(\tau)$ -围护结构墙体内在 $v-1$ 区间湿势值, Pa;  $F_v(\tau)$ -围护结构墙体内在 $v$ 区间湿势值, Pa;  $F_{v+1}(\tau)$ -围护结构墙体内在 $v+1$ 区间湿势值, Pa;  $d_{v-1}$ -围护结构墙体内在 $v-1$ 区间湿势系数, 1/s;  $d_v$ -围护结构墙体内在 $v$ 区间湿势系数, 1/s;  $d_{v+1}$ -围护结构墙体内在 $v+1$ 区间湿势系数, 1/s,

[0259]  $d_{v-1}, d_v, d_{v+1}$ 系数方程组如下:

[0260] 
$$\begin{cases} d_{v-1} = 2 \cdot E_{iv} \cdot \mu_1 / (h_1 \cdot \rho_{01} \cdot \xi_{F01} + h_2 \cdot \rho_{02} \cdot \xi_{F02}) \\ d_v = 2 \cdot E_{iv} \cdot (\mu_1 / h_1 + \mu_2 / h_2) / (h_1 \cdot \rho_{01} \cdot \xi_{F01} + h_2 \cdot \rho_{02} \cdot \xi_{F02}) \\ d_{v+1} = 2 \cdot E_{iv} \cdot \mu_2 / (h_2 \cdot \rho_{01} \cdot \xi_{F01} + h_2 \cdot \rho_{02} \cdot \xi_{F02}) \end{cases} \quad (45)$$

[0261] 解公式(45)借助柯西矩阵法,可近似得到下式:

[0262] 
$$\begin{cases} \bar{F}'_r = (G + K \cdot E_{tM} \cdot A_{MH}) \cdot \bar{F} + p_{MH} \cdot \tau \cdot \bar{L} + \bar{B}_{MH} \\ \bar{F}(0) = \bar{F}_0(0), 0 \leq x \leq l \end{cases} \quad (46)$$

[0263] G-材料结合处系数矩阵;K-材料热湿属性系数矩阵;A<sub>MH</sub>-多层结构材料湿势系数矩阵;B<sub>MH</sub>-第一和最后元素为围护结构内外表面边界条件,其他元素为0的列向量;p<sub>MH</sub>-多层结构墙体外界条件系数,Pa/s<sup>2</sup>,

[0264] 矩阵G可描述为:

[0265] 
$$G = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_{v-1} & d_v & d_{v+1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (47)$$

[0266] 矩阵K可,可描述为:

[0267] 
$$K = \begin{pmatrix} k_{F01} / h_1^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{F01} / h_1^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{F02} / h_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{F02} / h_2^2 \end{pmatrix} \quad (48)$$

[0268] 矩阵A<sub>MH</sub>可描述为:

[0269] 
$$A_{MH} = \begin{pmatrix} -(1 + \frac{\beta_e}{\mu_1} h_1) & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -(1 + \frac{\beta_i}{\mu_2} h_2) \end{pmatrix} \quad (49)$$

[0270] 矩阵B<sub>MH</sub>可描述为:

[0271] 
$$\bar{B}_{MH} = \begin{pmatrix} k_{F0} \cdot E_{a1} \cdot h_1 \cdot n \cdot \frac{\beta_e}{h_1^2 \cdot \mu_1} \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ k_{F0} \cdot E_{a2} \cdot h_2 \cdot F_i \cdot \frac{\beta_i}{h_2^2 \cdot \mu_2} \end{pmatrix} \quad (50)$$

[0272] 系数p按下式确定:

[0273] 
$$p = k_{F0} \cdot E_{a1} \cdot h_1 \cdot m \cdot \frac{\beta_e}{h_1^2 \cdot \mu_1} \quad (51)$$

[0274] 解方程(46)可描述为下式:

$$\begin{aligned}
 \bar{F} = & p_{MH} \cdot \left( (G+K \cdot E_{iM} \cdot A_{MH})^{-2} \cdot e^{(G+K \cdot E_{iM} \cdot A_{MH}) \cdot \tau} - \tau \cdot (G+K \cdot E_{iM} \cdot A_{MH})^{-1} - (G+K \cdot E_{iM} \cdot A_{MH})^{-2} \right) \cdot \bar{L} + \\
 [0275] & (G+K \cdot E_{iM} \cdot A_{MH})^{-1} \left( e^{(G+K \cdot E_{iM} \cdot A_{MH}) \cdot \tau} - E \right) \cdot \bar{B}_{MH} + e^{(G+K \cdot E_{iM} \cdot A_{MH}) \cdot \tau} \cdot \bar{F}_0
 \end{aligned} \quad (52)$$

[0276] 根据公式(52)可以确定建筑物围护结构墙体多层结构内湿势的分布。

[0277] 图3-6给出不同材料在不同温度下,含湿率与湿势的关系。图4为加气混凝土砌块(B04),图4为陶瓷砖,图5为土砖,图6为矿棉,图7为聚苯乙烯泡沫。

[0278] 如图7-12所示,墙体1:砌体由加气混凝土砌块组成,厚度为0.4m,双面粉刷涂料;墙体2:砌体由加气混凝土砌块组成,厚度为0.375m,外饰面由陶瓷砖组成,厚度为0.12m;内饰面粉刷涂料;墙体3:砌体由加气混凝土砌块组成,厚度为0.3m,外保温由矿棉组成,厚度0.12m,外刷涂料,内表面水泥砂浆;墙体4:砌体由加气混凝土砌块组成,厚度为0.3m,外保温由聚苯乙烯泡沫组成,厚度为0.12m,外刷涂料,内表面水泥砂浆。时间为1月份,室内空气温度为18℃,空气湿度为50%。

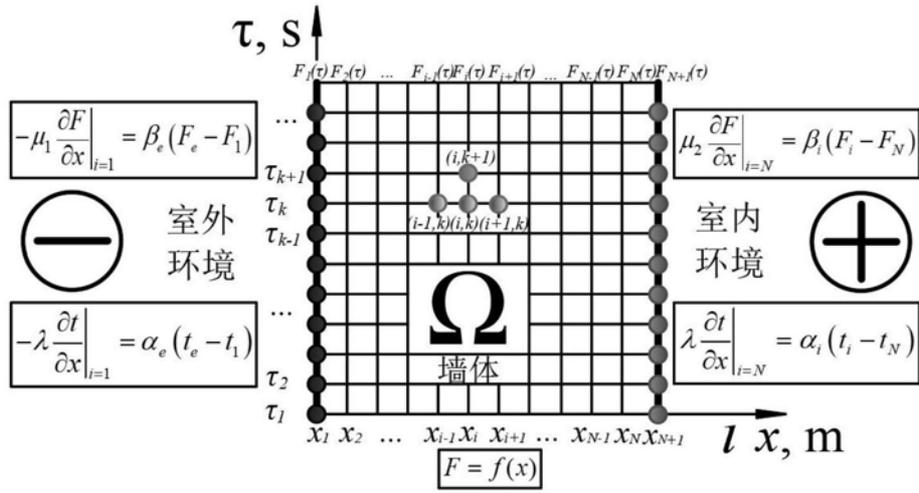


图1

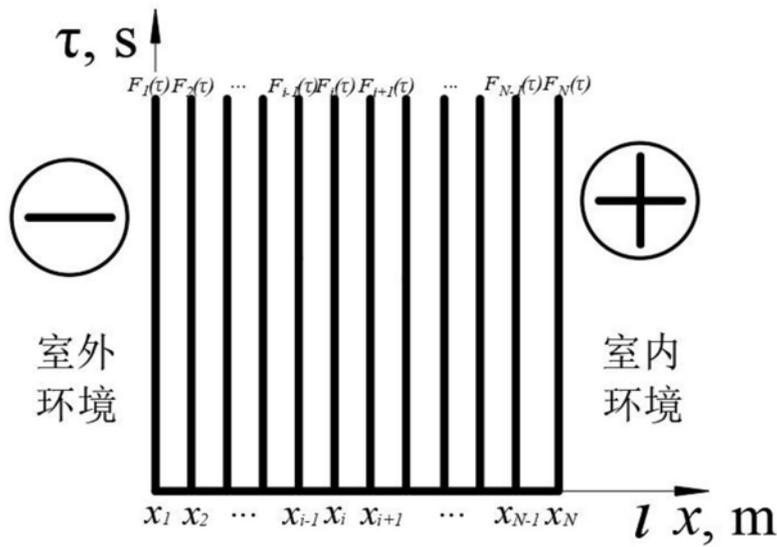


图2

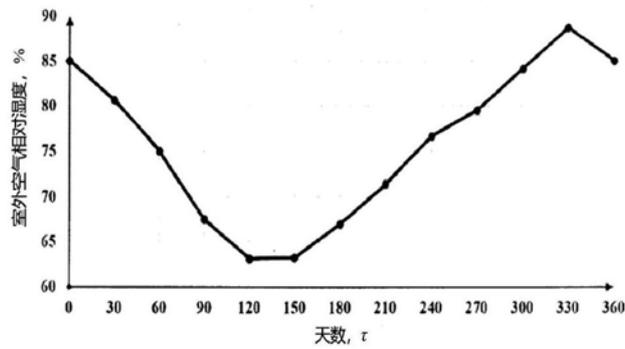


图3

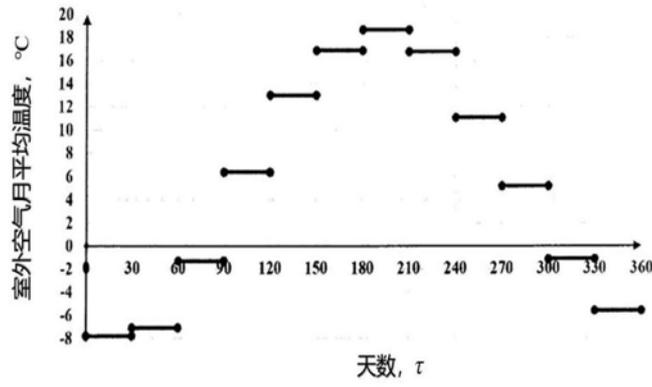


图4

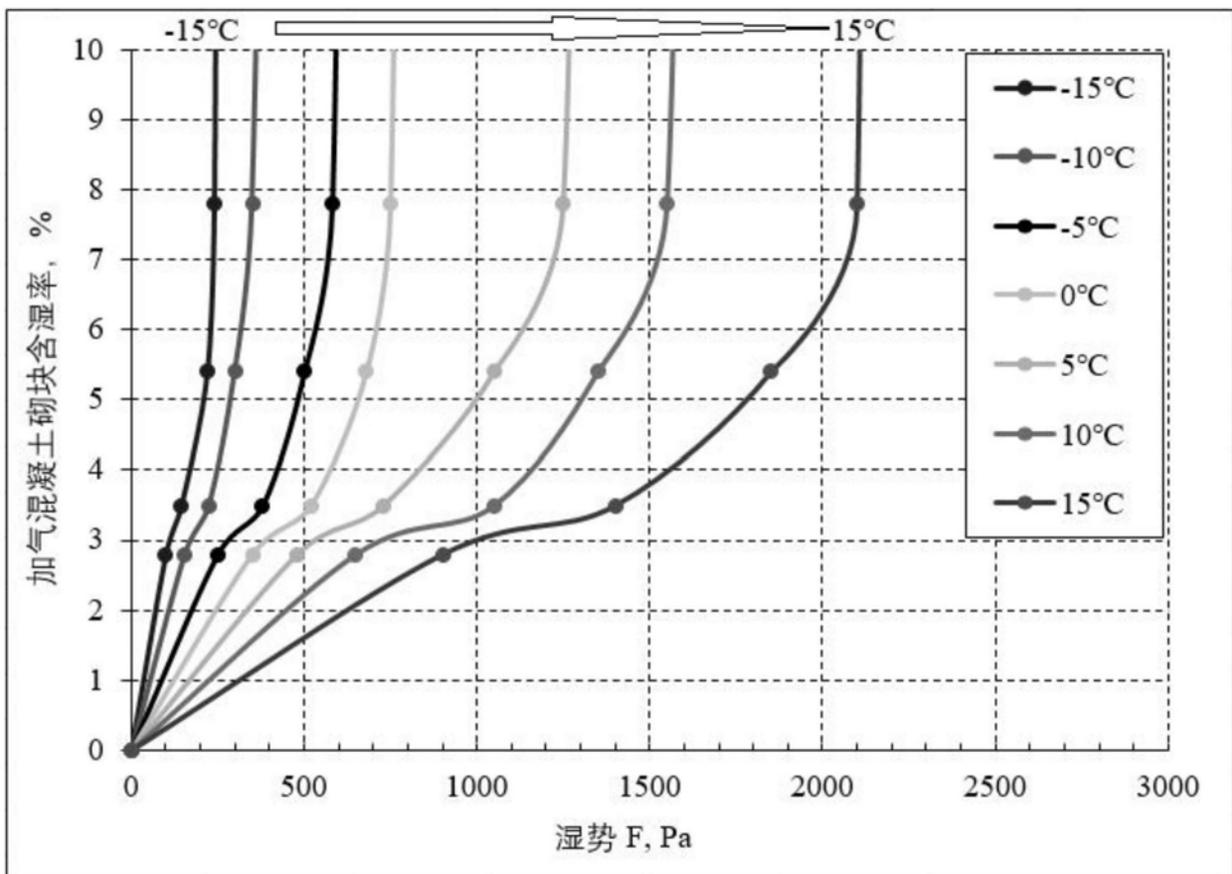


图5

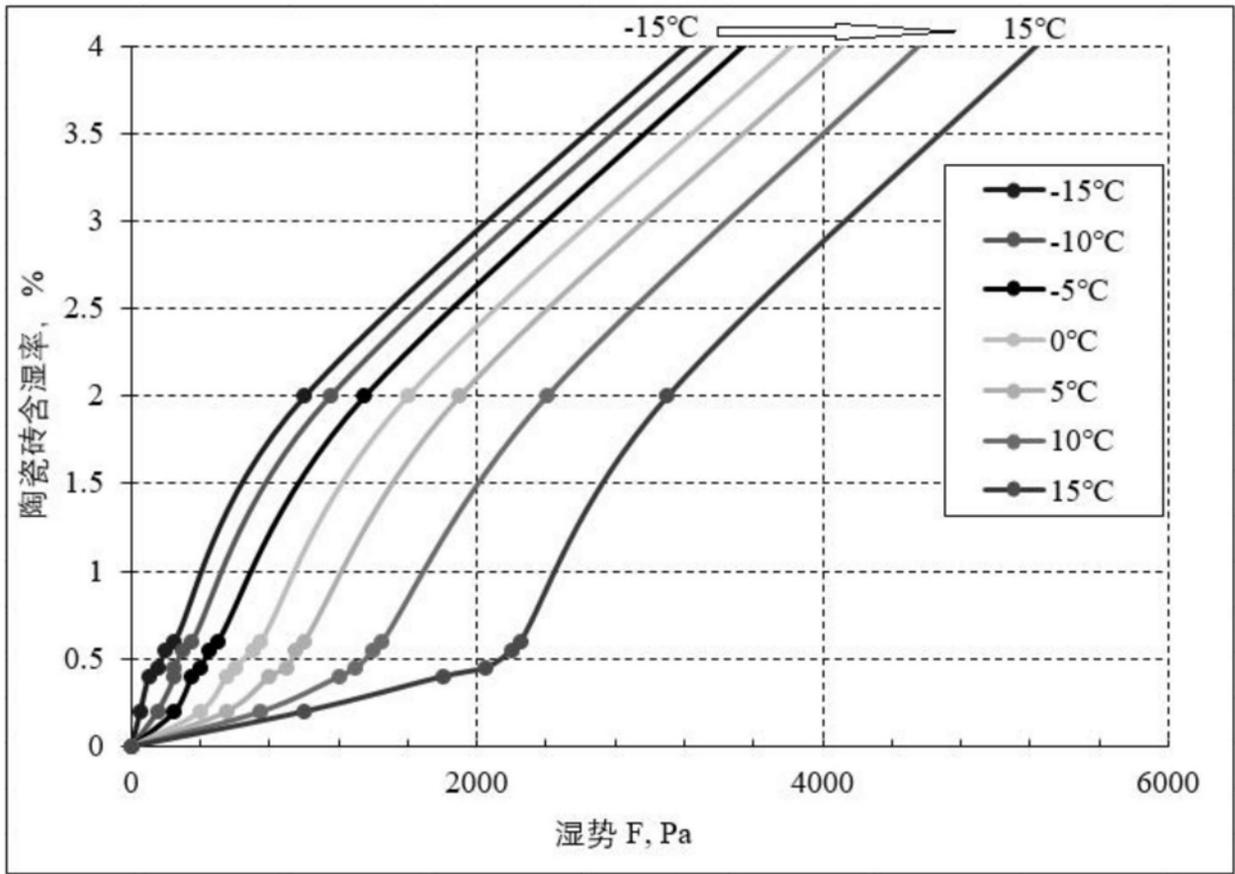


图6

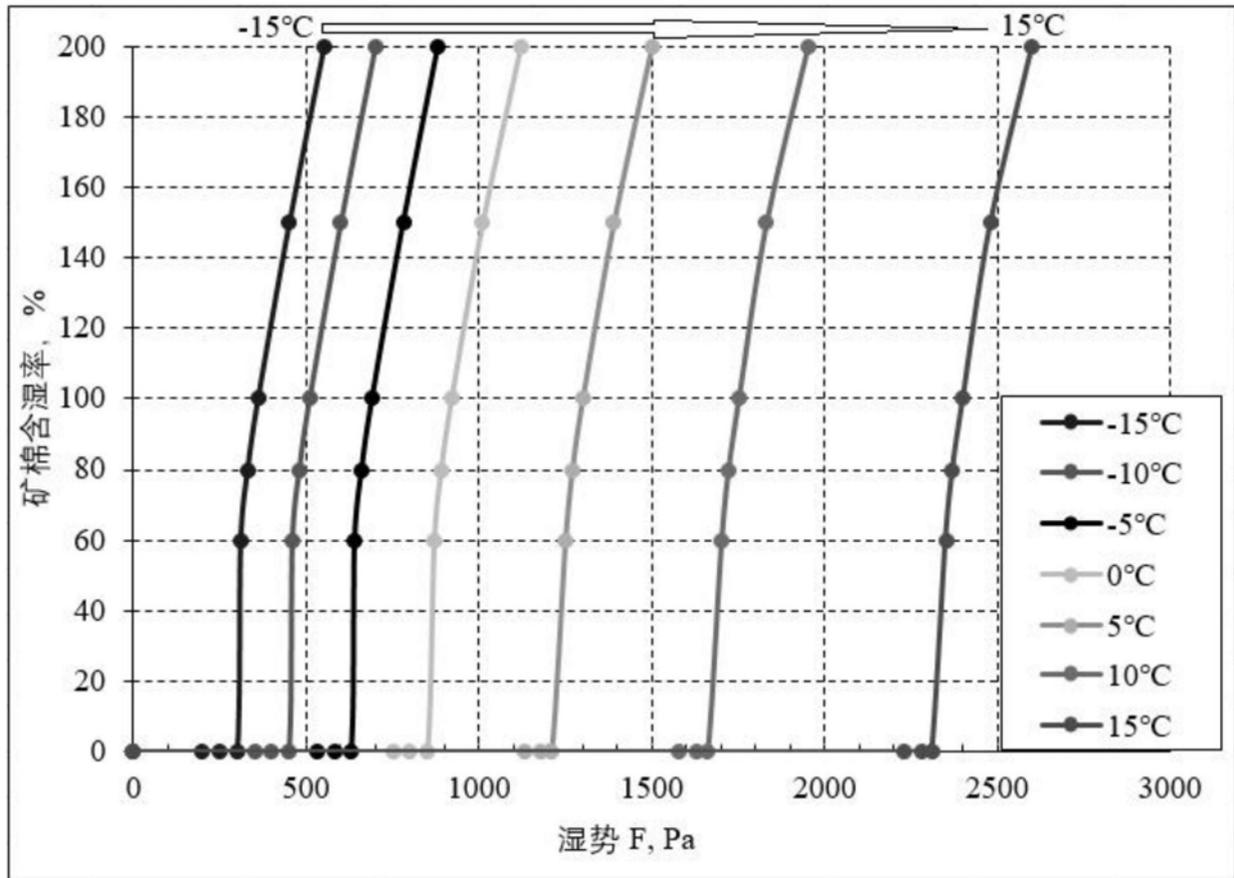


图7

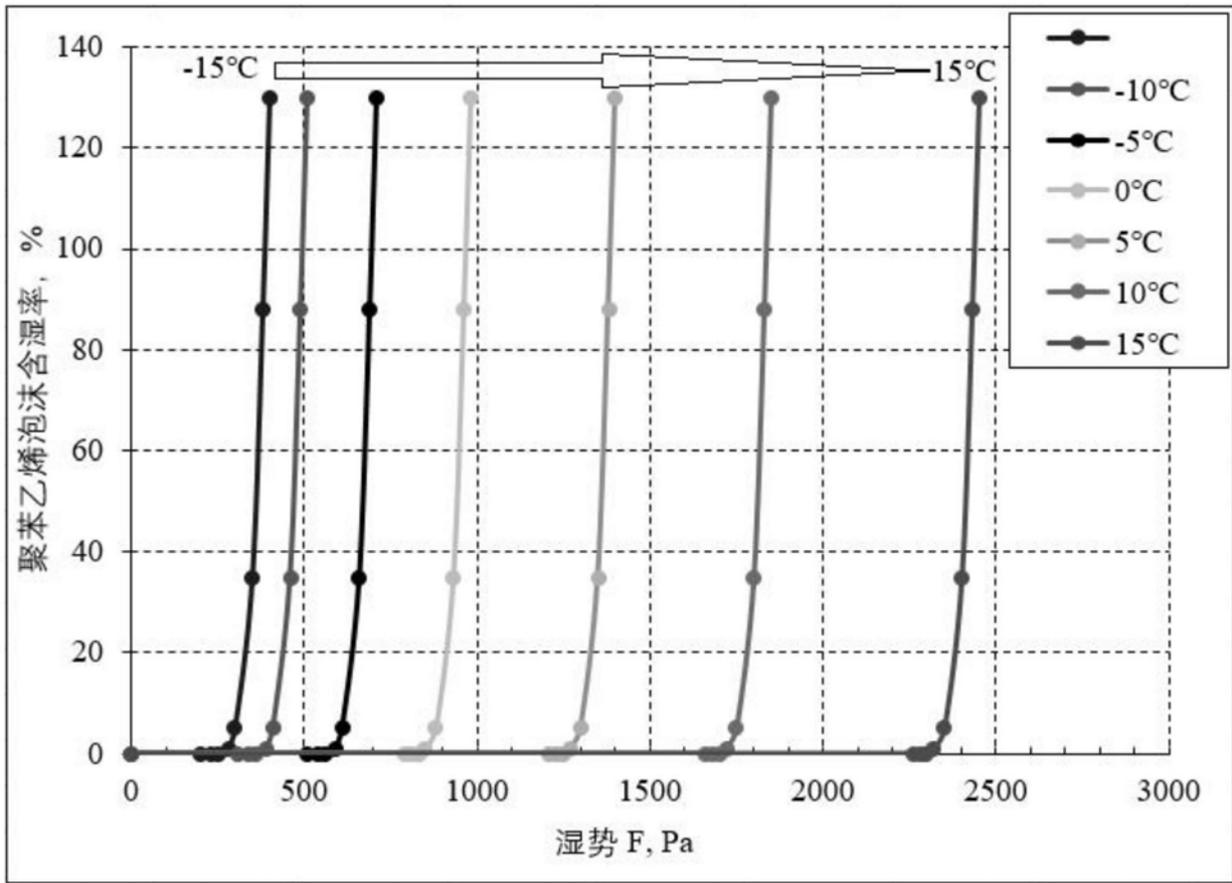


图8

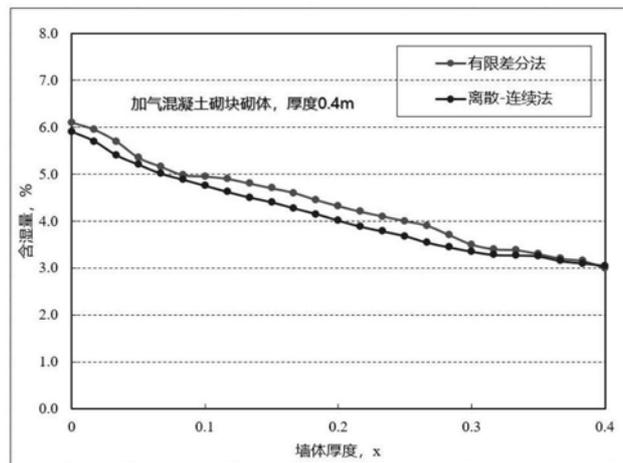


图9

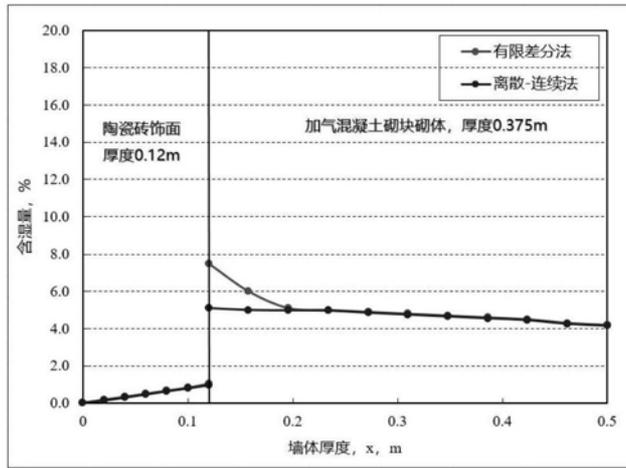


图10

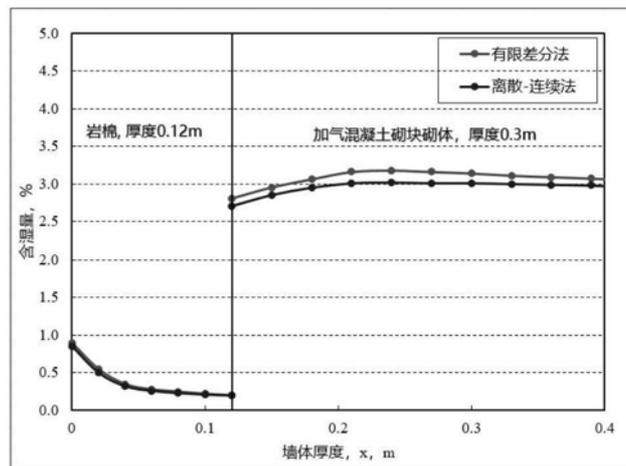


图11

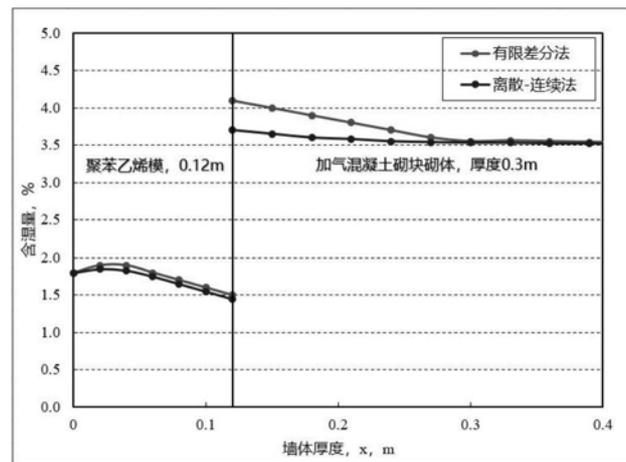


图12

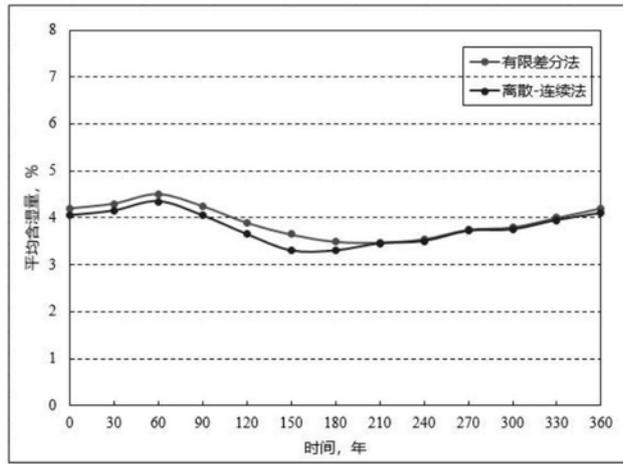


图13

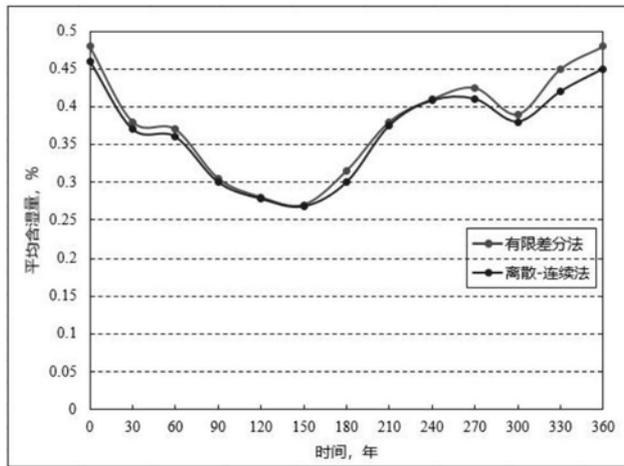


图14