

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230927013

## 能源连续墙对室内侧壁面热湿耦合传递行为的影响\*

周旭, 吴浪, 曹晓玲, 冷子瑜, 袁艳平

(西南交通大学机械工程学院, 四川成都, 610031)

**摘要:** 目前国内外针对能源连续墙的研究主要集热交换性能, 鲜有研究关注其对邻近地下建筑热湿环境的影响。本文通过建立热湿耦合传递三维数值模型, 研究了能源连续墙对相邻地下室墙体壁面热湿状态和与室内环境热湿交互通量的影响。研究表明, 能源连续墙的运行明显改变了室内侧壁面的热湿流方向和热湿流密度大小; 与纯传热结果相比, 虽然传湿过程对壁面温度的影响小于 $0.2^{\circ}\text{C}$ , 但是这部分差异会造成显热流密度预测偏差超过10%; 不计潜热流会造成对地下室热负荷的低估超过2.4%; 绝缘层的隔热防潮作用能够阻碍流向室内的热量和湿汽。

**关键词:** 能源连续墙; 热湿耦合传递; 地下空间; 壁面热湿流

中图分类号: TU83 文献标识码: A 文章编号: 1672-2132(2024)04-0893-08

### Effect of Energy Diaphragm Wall on the Coupled Heat and Moisture Transfer Behavior of Interior Side Walls

ZHOU Xu, WU Lang, CAO Xiaoling, LENG Ziyu, YUAN Yanping

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Current research on Energy Diaphragm Walls (EDWs), both domestically and internationally, mainly focuses on heat exchange performance, with few studies addressing their impact on the thermal and moisture environment of adjacent underground buildings. This paper investigates the influence of EDWs on the heat and moisture conditions of adjacent basement walls and the heat and moisture flux interaction with the indoor environment by establishing a 3D numerical model of coupled heat and moisture transfer. Results showed that the operation of the EDWs significantly changed the direction and intensity of heat and moisture flow on the interior side walls. Although the impact of the moisture transfer process on wall temperature change was less than  $0.2^{\circ}\text{C}$  compared to pure heat transfer results, this small discrepancy can cause a prediction deviation of sensible heat flux density by more than 10%. Ignoring the latent heat flux can result in an underestimation of the total thermal load of the underground space by more than 2.4%. Moreover, the insulation layer effectively blocks the flux of heat and moisture into the indoor environment.

**Keywords:** energy diaphragm wall; coupled heat and moisture transfer; underground space; wall heat and moisture flow

\* 收稿日期: 2023-09-27; 修回日期: 2023-12-26

基金项目: 四川省科技计划项目(2021YFG0120)资助

作者简介: 周旭(1996—), 男, 博士。主要从事能源地下结构研究。E-mail: zhouyi27@my.swjtu.edu.cn

通讯作者: 曹晓玲(1984—), 女, 高级工程师, 硕导, 博士。主要从事地下能源结构及能源系统研究。

Email: xlcao@swjtu.edu.cn

## 0 引言

地源热泵(GHSP)是一种环境友好、节能高效的换热系统,广泛用于满足建筑的制冷和供暖需求<sup>[1-3]</sup>。能源连续墙(EDW)是GHSP换热器的一种新形式,其通过将埋管换热器埋设在地下连续墙内,埋管内的流体在管道循环中,与周围介质传热以实现热量的交换。

在过去的二十年中,针对能源连续墙的研究主要集中在换热性能及影响因素,鲜有研究考虑能源连续墙与地下建筑室内侧环境的热湿交换作用。C. Xia等<sup>[4]</sup>在上海自然博物馆进行了现场测试,首次对EDW的热性能进行了评价。他们指出,在进口温度为32、35、38℃时,W形管道配置的换热率分别为40.3、66.3、85.0 W/m。此外,D. Sterpi等<sup>[5]</sup>和M. Barla等<sup>[6]</sup>通过对管道布置形式的参数化数值分析发现,适当间距的水平布置在换热率方面优于垂直布置。此外,部分学者还对边界条件、水文地质条件、混凝土热性能、运行参数等影响因素进行了深入研究<sup>[7-10]</sup>。

然而,能源连续墙可作为地下建筑内墙的一部分,其释热/取热过程对其墙体表面的热湿传递具有不可忽视的作用,影响着地下建筑室内的热湿负荷<sup>[11-12]</sup>。

水分的传递会导致围护结构的潜热热流密度增大,从而对地下室能耗产生影响。X.Liu等<sup>[13]</sup>通过对成都地区墙体壁面的传热传湿研究,指出忽略水分传递将导致负荷预测出现明显的偏差。C.Xu等<sup>[14]</sup>研究了内外墙保温配置中热量和水分传递的影响。他们发现,室内空气的相对湿度会显著影响传热过程。Y.Wang等<sup>[15]</sup>从多维度分析了高温高湿地区墙角处的热湿传递。并指出如果考虑围护结构的水分传递,热桥的影响区增大了52.4%,建筑节点的整体传热率提高了约55%~77%。H.J.Moon等<sup>[16]</sup>发现水分传递会使得室内热负荷增加4.63%,冷负荷增加11.26%。

多孔介质的传热传湿过程是完全耦合的,温度梯度会驱动湿分的传递,湿分传递的同时又会造成温度的变化<sup>[17]</sup>。能源连续墙作为内部含有变化热源的一种特殊地下建筑结构,在换热运行期势必对邻近地下室墙体壁面的热湿状态造成较大的影响。

同时墙壁面的传热、传湿过程会影响对地下室热湿负荷的预测。本文基于热湿耦合传递理论,借助COMSOL Multiphysics数值分析软件建立了能源连续墙三维传热传湿数值模型,考虑了毛细力的运输、蒸汽压力梯度导致的蒸汽扩散以及水分储存三种因素的影响,研究了夏季/冬季工况下能源连续墙热湿耦合传递行为特性,重点分析了壁面显热,潜热和湿分的交换。并与自然墙体(非EDW)和纯传热能源连续墙(仅导热)进行了对比分析。

## 1 数学物理模型

### 1.1 物理模型

能源连续墙的结构和热湿耦合传递过程示意图如图1所示,地下室被围岩(土壤)包覆。为了便于研究,在本文中取地下建筑空间的一部分作为研究对象。这个物理模型包括:围岩域,混凝土结构,换热埋管,绝缘层,墙面砂浆层。埋管的安装位置为混凝土墙体的中间位置,方便计算埋管内的流体与周围介质发生的热量交换。绝缘层具有防止埋管中的热量传递到相邻地下室内部环境中去,以及防止液态水渗入地下室双重功能。能源连续墙的结构形式是多样的<sup>[9,18,19]</sup>,在本文的研究当中,考虑墙面砂浆层的厚度为0.01 m(包括底板和天花板),绝缘层0.05 m,混凝土为0.6 m;为了规避边界效应,模型的整体长度为15 m,剩余部分为土壤域。能源连续墙埋管内径为23 mm,壁厚2.3 mm<sup>[7]</sup>。本文在研究中所用材料的物性参数如表1所示。土层的蒸汽扩散系数取 $2.13 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ <sup>[20]</sup>,蒸汽渗透系数可以根据计算式 $\delta_v = \frac{D_v}{R_v(T + 273.15)} \text{ kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})^{-1}$ 。其他材料层的物性参数参考于Y. Wang等发表的文章<sup>[12,15]</sup>。

热量和湿分的传递过程是完全耦合的,热量传递引起的温度梯度会引起湿分向着温度较低的区域传递,同时湿分的传递会引起材料内部温度的变化。如图1(右)所示,在高温热源的影响下,热量向两侧温度较低的区域传递,同时湿度也会向两侧传递。但是由于地下围岩的含湿量往往处于较高水平,湿分通常表现为从围岩向地下建筑室内方向传递,因此在湿度梯度和温度梯度的双重影响下,能源连续墙的热湿流实际传递过程根据计算才能确定。

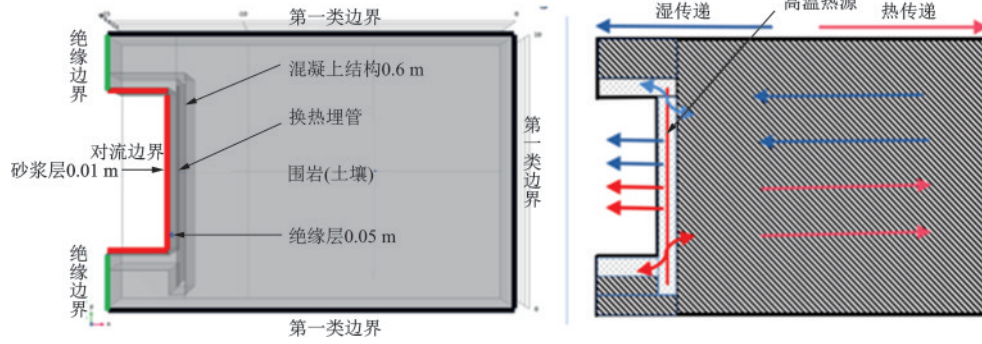


图1 地下能源连续墙结构(左)及热湿传递过程(右)示意

Fig.1 Schematic diagram of EDW (left) and heat and moisture transfer process (right)

表1 材料物性参数

Table 1 Parameters of materials

材料层	水蒸气渗透系数/ ( $\text{kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})^{-1}$ )	导热系数/ ( $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ )	比热/ ( $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$ )	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	含湿量曲线/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
土层	$\frac{2.13 \times 10^{-6}}{R_v(T + 273.15)}$	1.21	920	2 400	$38.4\phi^{15.2} + 60\phi^{0.45}$
混凝土层	$3.09 \times 10^{-14} + 5.51 \times 10^{-12}\phi^{20.7}$	$1.38 + 0.0032w$	837	2 500	$\frac{\phi}{0.018\phi^2 - 0.027\phi + 0.02}$
绝缘层	$1.1 \times 10^{-11}$	$0.0331 + 0.00123w$	1 470	30	$\frac{\phi}{-0.527\phi^2 + 0.964\phi + 0.0708}$
砂浆层	$5.467 \times 10^{-11}$	$1.965 + 0.0045w$	840	1 807	$\frac{\phi}{-0.022\phi^2 + 0.025\phi + 0.0001}$
管道		401			

## 1.2 数学模型

能源连续墙由于其埋地的特性,在实际物理场中,热湿耦合的传递过程受到诸多因素的影响,包括围岩材料的种类,围岩断层及裂隙等,存在许多的不确定性。为了便于分析,在本文中的研究中作以下假设:同种材料层的物性参数是各向同性的;多孔介质内部的湿分传递只存在气相和液相两种状态;所有材料层的含湿状态均为非饱和状态;基于A.V.Luikov<sup>[17]</sup>的多孔介质热湿传递理论,假设湿组分的传递过程仅受到毛细力的运输、蒸汽压力梯度导致的蒸汽扩散以及水分储存三种因素的影响;不考虑地表气象参数的波动;地下建筑室内热湿环境受到认为调控是恒定的;所有材料层被认为是紧密接触的不考虑材料层之间的接触热阻和湿阻;埋管内部的流动状态被认为是充分发展的稳态流动,不考虑内部膜阻。

### 1.2.1 湿度场控制方程

模型中计算毛细作用力下的水分传递以及扩散形式的蒸汽传递,因此建筑材料内部的湿组分传

递控制方程如式(3)所示。一方面材料内部的相对湿度梯度会引起湿组分从含量较高的区域向较低的区域传递,另一方面温度较高的区域其饱和水蒸气分压力较高,从而使得温度梯度的作用表现为水蒸气分压力梯度,迫使湿组分向着温度较低的区域传递。

$$G = \xi \frac{\partial \phi_w}{\partial t} + \nabla \cdot g_w \quad (1)$$

$$g_w = -(\xi D_w \nabla \phi_w + \delta_p \nabla(\phi_w p_{\text{sat}})) \quad (2)$$

$$\xi = \frac{\partial \tau}{\partial \phi_w} \quad (3)$$

式中, $G$ 为单位体积总含湿量的变化(水汽源), $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{s})^{-1}$ ; $\xi$ 表示储湿量(含湿量曲线对相对湿度的求偏导, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ); $\phi_w$ 为相对湿度,无量纲; $t$ 表示时间, $\text{s}$ ; $g_w$ 为传湿量, $\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ; $D_w$ 为水分扩散系数, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ; $\delta_p$ 为蒸汽渗透率, $\text{s}$ ; $p_{\text{sat}}$ 为蒸汽饱和压力, $\text{Pa}$ ; $\tau$ 表示体积含湿量, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

### 1.2.2 能量控制方程

(1)固体域传热:

数值模拟中考虑蒸汽扩散引起的潜热效应。

此外,还考虑了热湿存储,以及与湿度相关的热属性。因此能量控制方程如式(4)和(5)所示。在材料的能量场中,湿组分的传递使得材料内部的能量发生变化,具体表现为蒸发潜热的形式<sup>[12]</sup>。

$$Q = (\rho C_p)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot q \quad (4)$$

$$q = -(k_{\text{eff}} \nabla T + L_v \delta_p \nabla(\phi_w p_{\text{sat}})) \quad (5)$$

式中, $Q$ 为体积热量的变化, $\text{W} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{s})^{-1}$ ;  $(\rho C_p)_{\text{eff}}$ 为恒压下的有效体积热容, $\text{J} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{K})^{-1}$ ;  $T$ 为热力学温度, $\text{K}$ ;  $q$ 表示传导的热量, $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ;  $k_{\text{eff}}$ 表示有效导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ;  $L_v$ 为蒸发潜热,可由式(6)计算, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;

$$L_v = [2500 - 2.4(T - 273.15)] \times 10^3 \quad (6)$$

(2)管道传热:

埋管内流体的流动传热以及通过管壁与周围介质的传热控制方程如式(7)和(8)所示。

$$\rho A C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho A C_p u \vec{e}_i \cdot \nabla_i T = \nabla_i \cdot (A k \nabla_i T) + \frac{1}{2} f_D \frac{\rho A}{d_h} |u| u^2 + Q_{\text{wall}} \quad (7)$$

$$Q_{\text{wall}} = (hz)_{\text{eff}} (T_{\text{ext}} - T) \quad (8)$$

$$f_D = 8 \left[ \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + (C_A + C_B)^{-1.5} \right]^{\frac{1}{12}} \quad (9)$$

$$(hz)_{\text{eff}} = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_0 h_{\text{int}}} + \frac{1}{r_N h_{\text{ext}}} + \sum_{n=1}^N \left( \frac{\ln \left( \frac{r_n}{r_{n-1}} \right)}{k_n} \right)} \quad (10)$$

式中, $\rho$ 为介质的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $A$ 为管道的截面积, $\text{m}^2$ ;  $C_p$ 定压比热, $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ;  $u$ 为介质的流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\vec{e}_i$ 表示方向为管道的切向;  $k$ 为介质的导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ;  $f_D$ 为达西摩擦因子,由式(9)计算,其中  $C_A$ 、 $C_B$ 的确定方法详见文献<sup>[19]</sup>;  $d_h$ 为水力直径, $\text{m}$ ;  $Q_{\text{wall}}$ 为通过管壁的热交换量, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $(hz)_{\text{eff}}$ 为等效圆周换热系数,由式(10)计算, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ;  $T_{\text{ext}}$ 为管壁温度, $\text{K}$ ;  $r_0$ 为管道内半径, $\text{m}$ ;  $r_n$ 为管道外半径, $\text{m}$ ;  $h_{\text{int}}$ 和  $h_{\text{ext}}$ 为管内外的膜传热系数, $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ ;  $k_n$ 为管壁  $n$ 的导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 。

### 1.2.3 初始和边界条件

(1)初始时刻条件:

$$\phi(x, t) |_{t=0} = \phi_0 \quad (11)$$

$$T(x, t) |_{t=0} = T_0 \quad (12)$$

式中, $0$ 表示初始值。

(2)传热传湿边界条件:

对于第一类边界处,有:

$$\phi(x, t) = \phi_c \quad (13)$$

$$T(x, t) = T_c \quad (14)$$

式中, $c$ 表示该处对应的值为一常数。

对于绝缘边界处,有:

$$-g_w = 0 \quad (15)$$

$$-q = 0 \quad (16)$$

对于对流边界处,有:

$$g_w = \beta_i (\phi_i p_{s,i} - \phi p_s) \quad (17)$$

$$q = h(T_i - T_s) \quad (18)$$

式中, $\beta_i$ 为水分迁移系数, $\beta_i = 7.7 \times 10^{-9} h^{[13]}$ ,  $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $h$ 为壁面换热系数,本文取  $2.5 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1[21]}$ ;  $i$ 表示室内侧对应位置。

## 2 数值模型及验证

本文基于 COMSOL Multiphysics 软件对多物理场耦合计算的能力,建立如图1所示的三维几何模型,选择建筑材料传热,建筑材料中的水分输送以及管道传热三个物理场进行耦合数值模拟。在不关注管道内部流动和传热情况的条件下,管道流传热模块通过将三维模型中的管道流传热简化成一维流动传热,且管道流的壁传热模型仅需要考虑导热系数及壁厚,极大节省了算力。

### 2.1 工况设置

本文旨在研究能源连续墙运行对地下建筑室内侧墙体壁面热湿传递的影响,分别对比研究了夏季和冬季能源连续墙在埋管进口水温分别为  $35$ 、 $5$   $^{\circ}\text{C}$ ,进口流速为  $0.5 \text{ m/s}$ 时,墙体壁面的热湿耦合传递行为;同时将不含换热埋管的自然墙体(非 EDW),以及仅考虑传热的能源连续墙(仅导热)作为两组对照组进行对比研究。每个工况的计算时长为  $120 \text{ d}$ 。

初始时刻,每个工况的初始温度考虑为  $19$   $^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为  $85\%$ 。夏季工况,地下室内环境的温度恒定为  $27$   $^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度恒定为  $60\%$ ;冬季工况,室内的温度为  $18$   $^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度仍为  $60\%$ ;数值模型的远边界为第一类边界条件,温度恒定为  $19$   $^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度恒定为  $85\%$ 。

## 2.2 数值模型验证

本文研究所采用的数值模型的传热过程已经得到了验证,具体请参考文献<sup>[7,19]</sup>。因此这里我们仅对湿分的传递过程进行补充验证。COMSOL Multiphysics 软件提供了包括 EN15026<sup>[22]</sup>在内的多个基准测试的验证,结果如图 2(a)所示。但是这些基准测试是基于不含内热源的物理场模型的,因此本文补充了结果如图 2(b)所示的高温热源影响下多孔材料中湿分传递过程。结果证明本文使用的数值模型,其计算结果是可信的,误差在可接受范围内。

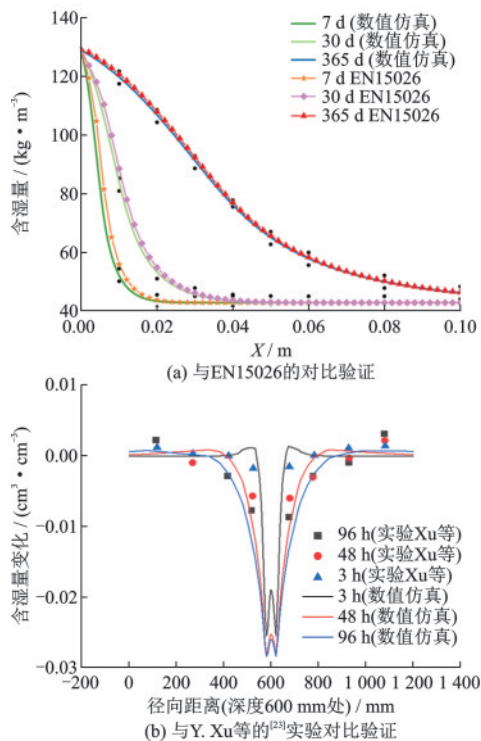


图2 数值模型验证

Fig.2 Validation of numerical model

## 3 数值模拟结果及讨论

### 3.1 壁面温湿度变化

壁面温湿度的变化受到传热过程的影响,如图 3 所示。夏季释热工况条件下,壁面的温度在短期内升高并达到稳定状态。与自然墙体相比,能源连续墙的壁面温度升高了约 9.2%,达到 28.48 °C,造成壁面温度升高的原因是因为墙体内部埋管大量释放热量,引起了能源连续墙整体温度的升高;而

自然墙体的壁面温度为 26.07 °C,略低于室内环境的 27 °C,这是由于室内环境通过围护结构与土壤低温侧存在热量传递。除此之外,与仅考虑传热过程的能源连续墙相比,热湿耦合传递造成的壁面温升变化很小,仅提高了 0.16 °C。这是由于湿分传递的数量级相较于热量传递是很小的,因此引起的温度变化不显著。冬季取热工况与夏季工况则完全相反。与自然墙体相比,能源连续墙的壁面温度降低了约 13.3%,降至 15.72 °C;而自然墙体的壁面温度为 18.13 °C,略低于室内环境的 19 °C。而在仅考虑传热的情况下,能源连续墙的壁面温度为 15.92 °C,与考虑热湿耦合传递的工况相比,增加了 0.2 °C。

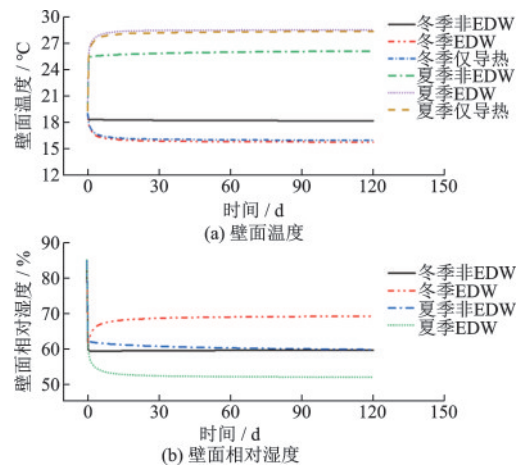


图3 地下室墙体壁面温湿度

Fig.3 Temperature and humidity of the underground wall surface

地下室内墙壁壁面湿度的变化与温度的变化是相反的,即温度越高,相对湿度越低。这是由于温度升高引起的高温度梯度会加快湿组分的传递过程。升温过程相当于墙体受热干燥的过程,夏季工况条件下,能源连续墙的墙体壁面相对湿度与自然墙体相比降低了 13%,分别为 51.98% 和 59.77%,墙体湿分被传递到了地下室室内环境中。而冬季工况条件下,能源连续墙的墙体壁面相对湿度与自然墙体相比升高了 16%,分别为 69.20% 和 59.59%。这是由于冬季取热,墙体壁面温度降低,在温度梯度的影响下,使得壁面相对湿度增加。降低/增加的湿度使得壁面与室内环境、围护结构的湿度梯度发生改变,最终两者的作用效果达到平衡,因此壁面的相对湿度在后期维持在一个相对稳定的状态。

通过夏季释热/冬季取热工况的综合对比分析可知,能源连续墙对地下室内墙壁面具有明显的升

温/降温作用。考虑热湿耦合传递对温度场的影响是很小的,在重点关注温度场分析的案例中,可以不必考虑湿组分传递造成的影响。

### 3.2 壁面热湿流密度

地下室内墙壁面温湿度的变化,势必引起传热传湿强度的变化。壁面水汽通量和显热热流密度的计算公式如式(14)所示。结合图4(a)分析可知(图中正值表示传递方向为:室内环境—围护结构,即壁面得热,室内环境失热;负值表示的方向与之相反),壁面的显热热流密度在能源连续墙内部换热埋管的影响下被明显增强了。夏季释热工况下,能源连续墙墙体壁面显热失热热流密度达 $3.69 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,与自然墙体相比,不仅热流方向被改变(壁面由显热得热变为显热失热),且热流强度也被增大了60%;即自然墙体壁面的显热失热为 $2.31 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。当忽略湿组分传递时,能源连续墙墙体壁面显热得热热流密度为 $3.29 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,相对差((热湿耦合—仅导热)/仅导热)为12.16%。冬季取热工况下的显热热流密度变化与夏季工况相似,壁面表现为得热。考虑热湿耦合传递与仅考虑传热的能源连续墙墙体壁面显热热流密度分别为 $5.71 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $5.19 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,相对差为10%;自然墙体为 $-0.33 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

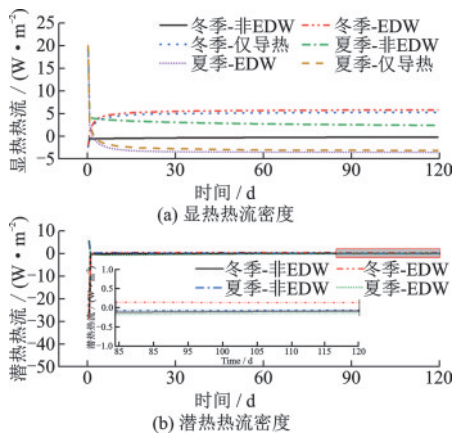


图4 地下室墙体壁面热流密度  
Fig.4 Heat flux of the underground wall surface

潜热热流对于地下建筑室内热湿环境的影响是同样值得被考虑的,尤其是在对温湿度有较高需求的功能房间,计算公式如式(19)所示。

$$q = L_v \cdot g_w \quad (19)$$

图4(b)给出了壁面的潜热热流密度在运行期内的变化。潜热热流密度与壁面水汽通量的变化是同步的,如图5所示。无论是夏季释热工况还是

冬季取热工况,壁面的潜热热流和水汽通量的数量级都比较小。夏季工况下,能源连续墙墙体壁面的潜热失热为 $0.14 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,水汽通量约稳定为 $5.85 \times 10^{-8} \text{ kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 。在本文的研究条件下,夏季工况能源连续墙潜热热流密度和显热热流密度的之比约为19:500,冬季工况下的比值约为12:500,因此不计这部分潜热热流会造成对总热负荷低估分别约为3.8%和2.4%。但是热流密度与围护结构的材料参数以及壁面对流换热边界条件是密切相关的,因此本文的结果仅提供启发性的参考。

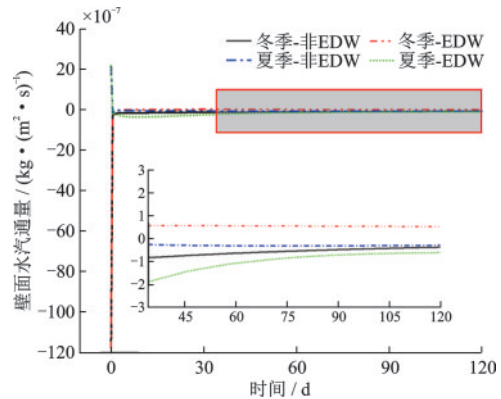


图5 地下室墙体壁面水汽通量  
Fig.5 Water vapor flux of the underground wall surface

### 3.3 温湿度场分布

为了便于理解能源连续墙内部热湿耦合传递的特性,本小节总结了温度场和湿度场在空间上的结果。由图6分析可知,空间温度场从换热埋管位置向向两端逐渐变化,且右端朝向地下建筑室内一侧存在一段温度呈直线变化的趋势,这是由于绝缘层的隔热作用造成,这样可以防止过多的热量被传递到邻近的地下室内。从图7(a)可以看出,夏季工况下,地下建筑室内壁面的温度明显低于混凝土结构层的温度,高温区域主要向着围岩一侧扩散;冬季工况与夏季工况相反(图7(c)),地下建筑室内壁面的温度明显高于混凝土结构层的温度,低温区域主要向着围岩一侧扩散。湿度场的分布变化相较于温度场要复杂,这是由于不同材料层的湿分传递特性[含湿量曲线,湿传递系数(气相和液相等)]存在差异;且由于绝缘层对液态水的屏蔽作用,其不具有毛细活性,因此可以看出图6(b)所示的相对湿度在混凝土—绝缘层,绝缘层—砂浆两类材料的交界面存在突变。同时结合图7(b)和(d)可以看出,

相对湿度在能源连续墙墙体壁面及围护结构浅层存在较明显的变化,与围护结构内层存在明显的差异,因此绝缘层的隔热隔湿作用在此得到了体现。

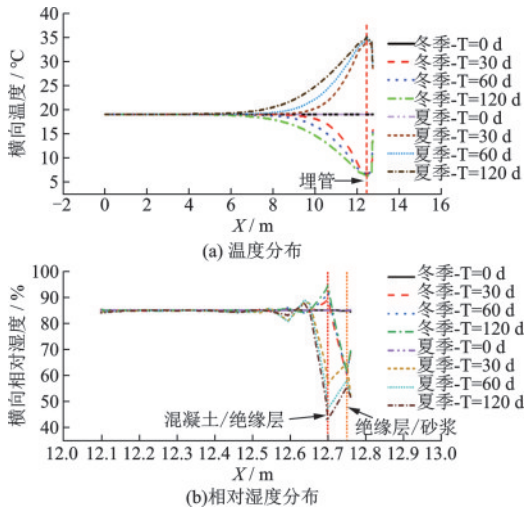


图6 横向空间温湿度分布

Fig.6 Transverse distribution of temperature and humidity

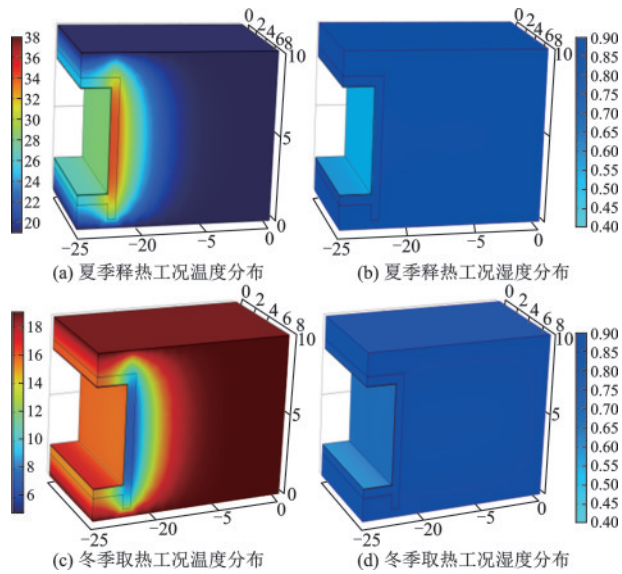


图7 120天时温湿度分布云图

Fig.7 Cloud map of temperature and humidity distribution at 120 d

## 4 结论

(1)能源连续墙对室内侧墙壁的温湿度影响是显著的,与自然墙体(非EDW)相比,夏季能源连续墙的壁面温度升高了约9.2%,相对湿度降低了13%;冬季壁面温度降低了约13.3%,相对湿度升高了16%。且显著的温湿度变化引起的壁面显热热

流密度大小和热流方向发生改变。

(2)忽略传湿过程对墙体壁面的温度影响小于0.2℃,然而这部分差异会对预测壁面显热热流造成超过10%的偏差;若不计潜热,会使得夏季室内热负荷被低估约3.8%,冬季室内热负荷被低估约2.4%。

(3)湿分传递的作用范围是有限的,主要集中于墙体表面的砂浆层。温湿度在空间上的扩散受到材料层物性参数的影响,绝缘层的隔热防潮作用能够降低能源连续墙对室内侧的影响,扩大室内侧方向上的温湿度梯度。

能源连续墙热湿耦合传递是一个值得被关注的问题,尤其与室内侧热湿环境进行耦合研究时。这项研究有助于明确其对相邻地下空间室内热湿环境的实时影响,对于能源连续墙的应用推广具有重要的意义。

## 参考文献:

- [1] Cao X, Yuan Y P, Sun L L. Restoration performance of vertical ground heat exchanger with various intermittent ratios [J]. Geothermics, 2015, 54: 115-121.
- [2] 郑秀玲, 刘耶军. 地源热泵系统优化控制的综述 [J]. 福建茶叶, 2020, 42(2): 33.  
Zheng X L, Liu Y J. A review of optimal control of ground source heat pump systems [J]. Fujian Tea, 2020, 42(2): 33. (in Chinese)
- [3] 赵雨桐, 唐澜, 余思言, 等. 绿色建筑可再生资源发展综述 [J]. 四川建材, 2021, 47(2): 20-22, 28.  
Zhao Y T, Tang N, Yu S Y, et al. Overview of renewable energy development for green buildings [J]. Sichuan Building Materials, 2021, 47(2): 20-22, 28. (in Chinese)
- [4] Xia C, Sun M, Zhang G, et al. Experimental study on geothermal heat exchangers buried in diaphragm walls [J]. Energy and Buildings, 2012, 52: 50-55.
- [5] Sterpi D, Angelotti A, Corti D, et al. Numerical analysis of heat transfer in thermo-active diaphragm walls [M]. [s.n.]: Numerical Methods in Geotechnical Engineering, 2014.
- [6] Barla M, Di Donna A. Energy tunnels: concept and design aspects [J]. Underground Space, 2018, 3(4): 268-276.
- [7] Zeng C, Tang F, Yuan Y, et al. Thermal performance of energy diaphragm wall (EDW) adjacent to air-conditioned space from the underground-engineering perspective

- tive [J]. *Geothermics*, 2021, 91: 102044.
- [8] Makasis N, Narsilio G A, Bidarmaghz A, et al. The importance of boundary conditions on the modelling of energy retaining walls [J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 120: 103399.
- [9] Di Donna A, Cecinato F, Loveridge F, et al. Energy performance of diaphragm walls used as heat exchangers [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 2017, 170 (3) : 232-245.
- [10] Sterpi D, Coletto A, Mauri L. Investigation on the behaviour of a thermo-active diaphragm wall by thermo-mechanical analyses [J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2017, 9: 1-20.
- [11] Mpq J, Delgado, De V P, et al. Influence of Mortar Joints on the Moisture Transfer in Layered Materials [J]. *Diffusion and Defect Data Solid State Data, Part A Defect and Diffusion Forum*, 2015, 365: 160-165.
- [12] Wang Y, Jiang C, Liu Y, et al. The effect of heat and moisture coupling migration of ground structure without damp-proof course on the indoor floor surface temperature and humidity: Experimental study [J]. *Energy and Buildings*, 2018, 158: 580-594.
- [13] Liu X, Chen Y, Ge H, et al. Numerical investigation for thermal performance of exterior walls of residential buildings with moisture transfer in hot summer and cold winter zone of China [J]. *Energy & Buildings*, 2015, 93(apr.): 259-268.
- [14] Xu C, Li S, Zou K. Study of heat and moisture transfer in internal and external wall insulation configurations [J]. *Journal of Building Engineering*, 2019, 24: 100724.
- [15] Wang Y, Tian Y, Zhao Z, et al. Effect of moisture transfer on heat transfer through exterior corners of cooled buildings in hot and humid areas [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 43: 103160.
- [16] Moon H J, Ryu S H, Kim J T. The effect of moisture transportation on energy efficiency and IAQ in residential buildings [J]. *Energy and Buildings*, 2014, 75: 439-446.
- [17] Luikov A V. Heat and mass transfer in capillary-porous bodies [J]. *Advances in Heat Transfer*, 1964, 1 (1) : 123-184.
- [18] Angelotti A, Sterpi D. On the performance of energy walls by monitoring assessment and numerical modeling: a case in Italy [J]. *Environmental Geotechnics*, 2020, 7(4): 266-273.
- [19] Zhou X, Yuan Y, Leng Z, et al. Numerical study on the thermal-induced mechanical behavior in deep energy diaphragm wall (EDW): The long-term soil elastoplastic effects [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 132: 104860.
- [20] Zanden A J J V D, Schoenmakers A M E. The influence of sorption isotherms on the drying of porous materials [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1996, 39(11): 2319-2327.
- [21] Thermal performance of buildings - Transmission and ventilation heat transfer coefficients - Calculation method: EN ISO 13789:2017[S]. IX-CEN: European.
- [22] EN15026, Hygrothermal Performance of Building Components and Building Elements-Assessment of Moisture Transfer by Numerical Simulation [M]. London, UK: British Standard, 2007: 18-21.
- [23] Xu Y, Zeng Z, Sun D A. Experimental and numerical investigation on the effect of heat and moisture coupling migration of unsaturated lateritic clay for the soil thermal storage system [J]. *Energy and Buildings*, 2022, 276: 112499.

(本文编辑:苏泽云)