

文章编号: 1671-6612 (2023) 01-026-09

能源连续墙运行期热湿耦合传递数值模拟研究

黄琳

(中铁第一勘察设计院集团有限公司 西安 710043)

【摘要】 目前国内外针对能源连续墙的研究主要集中在其热性能和力学行为,然而,埋管换热器置于连续墙内将会对墙体及建筑内部空气带来影响,关于其运行期的热湿耦合传递过程的研究尚缺乏。分析了能源连续墙内部由于埋管换热器传热过程引起的热湿耦合迁移过程,重点研究室内侧壁面的温湿度变化以及通过壁面的显热,潜热热流密度和湿通量。根据埋管换热器不同运行工况:夏季放热、冬季吸热,对比分析了能源连续墙在不同取/放热强度下温度场和湿度场的变化及差异。研究结果表明:在冬夏两季时,能源连续墙运行造成的壁面显热热流密度达到最大水平。而湿通量分和潜热热流密度的最大通量值则发生在过渡季节。夏季埋管的换热功率增加时,壁面夏季显热热流密度和潜热热流密度均增大了。

【关键词】 能源墙系统;热湿传递;壁面热湿通量

中图分类号 TU83 文献标识码 A

Numerical Investigations of Coupled Heat and Moisture Transfer during the Operation of Energy Diaphragm Wall

Huang Lin

(China Railway First Survey and Design Institute Group Ltd, Xi'an, 710043)

【Abstract】 Current domestic and international research on energy diaphragm walls focuses on the thermal performance and mechanical behavior. However, heat exchangers integrated inside the diaphragm wall will induce an impact on the wall and the air inside the building, and there is a lack of attention on the coupled heat and moisture transfer during the operation of energy diaphragm wall. This paper analyses the coupled heat and moisture transfer processes within the energy diaphragm wall, focusing on the temperature and humidity changes at the interior wall surface as well as the sensible heat, latent heat and moisture flux through the wall surface. According to the different operating conditions of the heat exchanger: heat injection in summer and extraction in winter, both the temperature and humidity under different heat injection/extraction levels are investigated. Results show that the flux of the sensible heat through the wall surface reaches its maximum level during the winter and summer. In contrast, the maximum flux of the moisture and latent heat occur during the transition seasons. Both the sensible and latent heat flux increase during the summer months when the rate of the heat exchanger increases.

【Keywords】 Energy diaphragm wall system; Heat and moisture transfer; Wall heat and moisture flux

0 引言

能源连续墙作为地埋管换热器的一种形式,通

过将埋管换热器直接嵌入到建筑地下结构中(如连续墙),在不影响建筑结构稳定性的情况下,通过

基金项目:深地空间热湿环境保障及烟气控制技术研究(2021KY23ZD(JMRH)-02PT);陕西省重点研发计划—黄土地区地铁车站毛细管能源墙开发及设计方法研究(2023-YBSF-382)

作者(通讯作者)简介:黄琳(1993.10-),女,博士,工程师,E-mail:785995324@qq.com

收稿日期:2022-12-12

埋管内循环水进行热量的交换^[1]。能源连续墙可减少常规埋管打井费用,大大节约了施工周期及初投资^[2,3]。在现有研究中,大部分是关于能源连续墙热性能和因此引起的力学行为。孙猛^[2]等人首先对能源连续墙的热性能进行实测研究,指出能源连续墙内埋管与传统埋管在结构形式及传热特性方面具有较大差异,在试验工况下可实现大于 50W/m 的换热量。夏才初^[4]等人通过数值模拟研究了能源连续墙内热交换引起的温度应力,指出换热管区域附近小范围内应力场的变化较大,最大应力可达 2.3MPa。Sterpi^[5]等人分析了长期和短期运行时,能源连续墙邻近土壤域的温度场分布特性。

能源连续墙可作为地下建筑(地下车站,车库等)的部分内墙,这类能源连续墙应当被视为建筑的围护结构。对于建筑围护结构中的热湿耦合传递的研究很多,相关理论也很成熟。Luikov^[6]最早提出了多孔介质中的热湿耦合传递数学模型,以温度和含湿量作为驱动势,并考虑了总压力,浓度梯度,湿度梯度,分子迁移和毛细作用的影响。王莹莹^[7,8]研究了建筑围护结构内湿分的迁移对墙体传热的影响,并指出墙体材料的热物性受到温湿度的影响,且墙体内表面的吸放湿作用会造成墙体材料热物性参数明显变化。张潇^[9]等人研究了多层墙体的热湿耦合迁移过程,分析了在室外空气温湿度正弦变化,室内空气温湿度固定条件下,墙体外壁面、分层界面、内壁面的温度、热流密度、单位面积热阻、含湿量的变化。陈友明^[10]等人采用有限差分法分析了热湿耦合迁移对建筑能耗的影响,指出不考虑热湿耦合迁移时供冷季累计得热被低估了 8.69%~10.04%,且供暖季累计失热被低估了 6.3%~6.62%。

能源连续墙作为一种特殊的、内部含有变化热源的围护结构,其内部的热湿耦合传递过程以及对墙体内壁面热湿交换的影响值得注意,因为室内侧墙体壁面的传热、传湿量会对室内热湿负荷造成影响。本文以相对湿度和温度梯度为热湿耦合传递过程的驱动势,研究了不同负荷模式下的能源连续墙热湿耦合传递特性,并分析了这种传递过程造成的壁面显热,潜热和湿的交换。

1 能源连续墙热湿耦合传递模型建立

1.1 物理模型

能源连续墙的结构示意图如图 1 所示,其主要

组成部分包括:钢筋混凝土结构,内埋管换热器,未开挖部分的岩土层以及相邻的地下室。埋管内的流体与周围介质发生热量的交换。在这里,我们只考虑能源连续墙热湿耦合传递对室内侧墙面传热传湿的影响,因此仅考虑有邻近地下室的部分。该部分结构包含四层建筑材料:与室内空气直接接触的水泥砂浆层,EPS(聚苯乙烯泡沫)保温层,钢筋混凝土层以及未开挖侧的岩土层。水泥砂浆层的厚度为 0.01m,保温层为 0.05m,混凝土为 0.6m,土壤层考虑为 1m 的厚度。

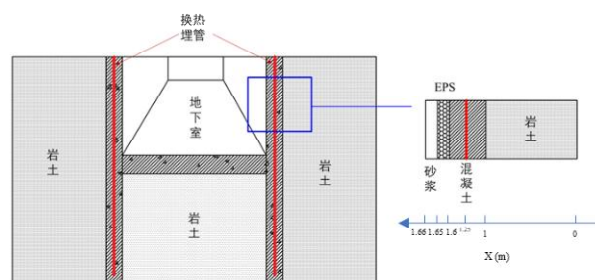


图 1 能源连续墙结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of energy diaphragm wall

1.2 数学模型

对于能源连续墙热湿耦合传递过程,进行如下的假设:将热湿耦合传递过程视为一维过程;多孔建筑材料内部的湿分传递只有气液两相;孔隙内的湿润空气满足理想气体状态方程;能源连续墙的埋深足够大,室外气象参数的影响可以被忽略;地下室为空调房间,其温湿度能实现完全的人为控制;不考虑材料层的热阻和湿阻。

(1) 传湿控制方程

本研究采用相对湿度和温度作为湿组分传递的驱动势。基于 Philip de Vries 模型^[11],综合考虑了水蒸气和液态水的热湿耦合传递过程。

多孔建筑材料内部的湿平衡方程为:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla(\overline{g_v} + \overline{g_l}) \quad (1)$$

式中: w 为材料的体积含湿量; t 为时间; $\overline{g_v}$ 和 $\overline{g_l}$ 分别为水蒸气扩散流和液态水渗透流。

水蒸气的扩散流和液态水的渗透流分别满足 Fick 定律和 Darcy 定律。

因此多孔建筑材料内部湿分传递控制方程为:

$$\xi \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\delta_v p_{v,sat}(T) \frac{\partial \phi}{\partial x} + \delta_v \phi \frac{\partial p_{v,sat}(T)}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} (K_l \frac{\rho_l R (T + 273.15)}{Mo} \frac{1}{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} + K_l \frac{\rho_l R \ln(\phi)}{Mo} \frac{\partial T}{\partial x}) \quad (2)$$

式中： ξ 为多孔建筑材料的等温吸湿平衡曲线的斜率： $\xi = \frac{\partial w}{\partial \phi}$ ； ϕ 为材料的相对湿度； x 表示由岩土侧到室内侧的一维方向（见图1）； δ_v 为水蒸气渗透系数； $p_{v,sat}(T)$ 为饱和水蒸气分压力，由式（3）计算； K_l 为液态水传导系数，由式（4）计算； T 表示温度； ρ_l 为液态水密度； R 为理想气体常数； Mo 表示水蒸气的摩尔质量。

$$p_{v,sat}(T) = 610.5 e^{\left(\frac{17.269 \cdot T}{237.3 + T}\right)} \quad (3)$$

$$K_l = \frac{\delta_v \phi p_{v,sat} Mo}{RT \rho_l} \quad (4)$$

（2）传热控制方程

多孔建筑材料内部的水蒸气在扩散的过程中，遇冷发生相变生成液态水，或者液态水遇热蒸发成蒸汽，因此在传热控制方程中需要考虑相变潜热项。

多孔建筑材料传热平衡方程为：

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\nabla(\overline{q_{cond}} + \overline{q_{conv}}) + q_{sour} \quad (5)$$

式中： E 表示内能； $\overline{q_{cond}}$ 和 $\overline{q_{conv}}$ 分别表示通过传导和对流形式传递的热量； q_{sour} 为内热源，仅内埋管换热器考虑此项。

因此多孔建筑材料内部热量传递控制方程为：

$$(\rho_m c_m + w c_l) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left[L \delta_v p_{v,sat} \nabla \phi + (\lambda_w + L \delta_v \phi \frac{\partial p_{v,sat}}{\partial T}) \nabla T \right] + q_{sour} \quad (6)$$

式中： ρ_m 为干材料密度； c_m 为干材料的比热容； w 为材料的含湿量； c_l 为水的比热容； L 为蒸发潜热，由式（1）计算； λ_w 为干材料的导热系数。

$$L(T) = (2500 - 2.4T) \times 10^3 \quad (7)$$

1.3 初始和边界条件

初始时刻条件：

$$\phi(x, t)|_{t=0} = \phi(x, 0) \quad (8)$$

$$T(x, t)|_{t=0} = T(x, 0)$$

传湿边界为：

$$\phi_{soil}(0, t) = \phi_{cons}$$

$$\phi_{indoor}(t) = \phi_{cons} \quad (9)$$

$$g_{n,i} = \beta_i (\phi_{indoor} p_{sat,indoor} - \phi_{sur} p_{sat,sur})$$

式中： $\phi_{soil}(0, t)$ 表示土壤侧远边界相对湿度； ϕ_{cons} 表示相对湿度为一个定常数值； $\phi_{indoor}(t)$ 表示室内侧的相对湿度； $g_{n,i}$ 为湿传递的量； β_i 为传质系数。

传热边界为：

$$T_{soil}(0, t) = T_{cons}$$

$$T_{indoor}(t) = T(t) \quad (10)$$

$$q_{n,i} = h_i (T_{indoor} - T_i) +$$

$$\beta_i L (\phi_{indoor} p_{sat,indoor} - \phi_{sur} p_{sat,sur})$$

式中： $T_{soil}(0, t)$ 表示土壤侧远边界温度； T_{cons} 表示温度为一个定常数值； $T_{indoor}(t)$ 表示室内侧的温度； $T(t)$ 表示室内空气温度是随着时间变化的值； h_i 为对流换热系数，取 $8.7 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[12]。

$$\beta_i = 7.7 \times 10^{-9} h_i \quad (11)$$

1.4 模型验证

为了验证数学模型求解热湿耦合传递过程的准确性，将模型的计算结果与 Steeman H J 等人^[13]的试验测试结果进行对比分析，试验设置及测试条件详见原文献：石膏板的初始温度为 23.3°C ，相对湿度为30%，石膏板首先在温度为 23.8°C ，相对湿度为71.9%的一侧侧面气流下经历了一个吸湿升温过程，然后在温度为 22.5°C ，相对湿度为29.6%的侧面气流下降温解湿。石膏板的密度为 $690 \text{kg}/\text{m}^3$ ；比热容为 $840 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，导热系数为 $0.198 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，材料的物性参数与原文献中的参数保持一致。结果选取石膏板内部深度为12.5mm和25mm处两个测点的温湿度数据作为基准对本文的数值结果进行验证。从图2中可以看出，数值结果和试验结果的符合程度很好。初始阶段比较明显的温度偏差可能是由于试验启动阶段的热湿传递过程受到外界扰动的影响，但

测试和数值结果温度值的最大绝对误差不超过 1℃，相对误差不超过 4%。

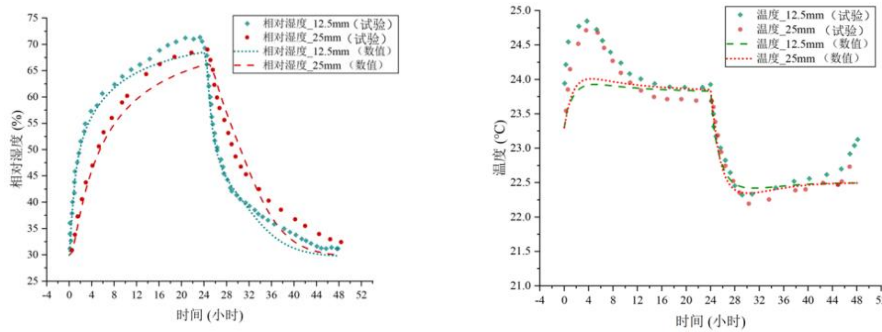


图 2 石膏板热湿耦合传递的数值结果与试验结果对比

Fig.2 Comparison of numerical and experimental results of coupled heat and moisture transfer in gypsum board

2 能源连续墙的运行对热湿耦合传递的影响

2.1 能源连续墙热湿耦合传递特性

由热湿传递控制方程可以看出，多孔建筑材料内部的热湿传递过程受到温度和相对湿度的双重影响。而能源连续墙由于其内部存在换热埋管的原因，在释热/取热工况下造成的高温/低温环境会引起内部和表面的热湿状态发生变化，热湿耦合传递示意如图 3 所示。本文的气象参数考虑为夏热冬冷

地区。研究所用到的材料物性参数如表 1 所示。

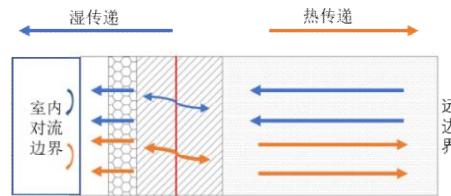


图 3 热湿耦合传递特性示意图

Fig.3 Schematic diagram of coupled heat and moisture transfer characteristics

表 1 材料物性参数

Table 1 Properties of materials

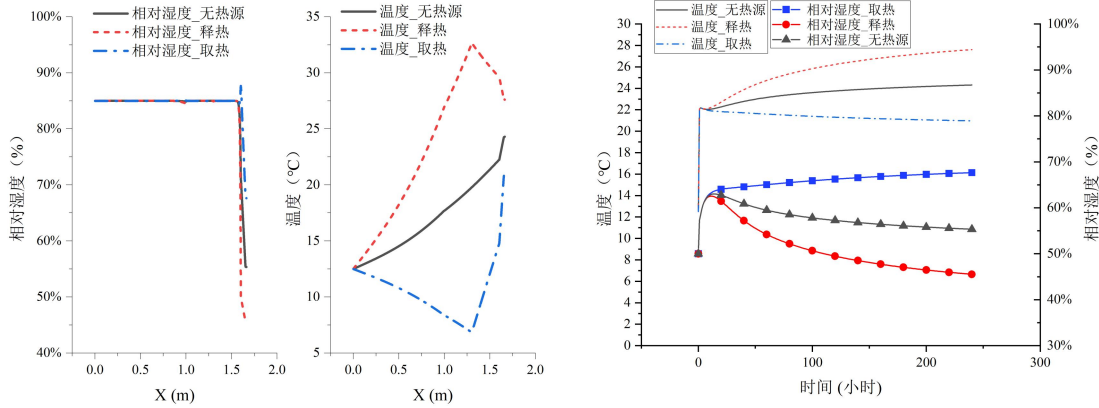
材料层	水蒸气渗透系数 kg/(m·s·Pa)	导热系数 W/(m·K)	比热 J/(kg·K)	密度 kg/m ³	吸湿能力 kg/m ³
土壤	$\frac{2.13 \times 10^{-6}}{R_v (T + 273.15)}$	1.21	920	2400	$38.4\phi^{15.2} + 60\phi^{0.45}$
混凝土	$3.09 \times 10^{-14} + 5.51 \times 10^{-12} \phi^{20.7}$	$1.38 + 0.0032w$	837	2500	$\frac{\phi}{0.018\phi^2 - 0.027\phi + 0.02}$
EPS	1.1×10^{-11}	$0.0331 + 0.00123w$	1470	30	$\frac{\phi}{-0.527\phi^2 + 0.964\phi + 0.0708}$
砂浆	5.467×10^{-11}	$1.965 + 0.0045w$	840	1807	$\frac{\phi}{-0.022\phi^2 + 0.025\phi + 0.0001}$

图 4 (a) 给出了能源连续墙分别在 10 天 (240 小时) 的释热和取热工况下最终的温湿度场分布。释热和取热功率分别为 50W/m 和 -50W/m。为了方便对比分析，室内空气温度保持恒定为 26℃，空

气的相对湿度为 50%，土壤侧远边界的温度为 12.5℃，远边界的相对湿度为 85%。土壤和混凝土初始状态下的温度为 12.5℃，相对湿度为 85%。而 EPS 和砂浆层的初始相对湿度考虑为和室内一致，

为 50%，但温度为 12.5℃。从图中可以看出，释热工况下，EPS 和砂浆层的温度明显升高了，但是相对湿度下降了。这是由于在高温差驱动势作用下，EPS 和砂浆层中的湿分向地下室环境空气传递，这

相当于一个受热干燥的过程。而取热工况下的温湿度表现刚好与释热工况相反，相当于经历了一个降温吸湿过程。壁面的温湿度变化如图 4 (b) 所示，同样表现为温度越高相对湿度越低。



(a) 运行 240 小时后的温度场和湿度场分布

(b) 240 小时壁面的温湿度变化

图 4 温湿度分布及壁面温湿度变化

Fig.4 Temperature and humidity distribution and wall temperature and humidity change

能源连续墙运行期引起的壁面温湿度变化会造成额外的壁面热流密度和湿通量，如图 5 所示。在释热工况下，通过墙体壁面流向室内空气的显热流密度明显增大了，这意味着邻近的地下空间室内空气的显热得热量明显增加了。而在取热工况下，通过室内空气流向墙体壁面的显热流密度也明显增大了，这意味着引起了室内空气额外的显热失热量(图中数据的正值表示热湿通量的传递方向为从墙体壁面到室内空气，负值表示传递方向为从室内空气到墙体壁面)。壁面潜热流密度和湿通

量在 100h 左右趋于 0，这是因为壁面和室内空气之间的传湿过程在壁面温湿度变化的影响下趋于平衡，壁面和室内空气之间的传湿驱动势在逐渐减小。释热和取热工况造成的壁面热湿通量的变化趋势是不同的，但是单一工况下的结果只能反映一部分的客观规律。为了更好地分析能源连续墙运行期造成的热湿耦合传递行为，在 3.2 小节中，研究分析了长期连续运行工况下能源连续墙的热湿耦合传递过程。

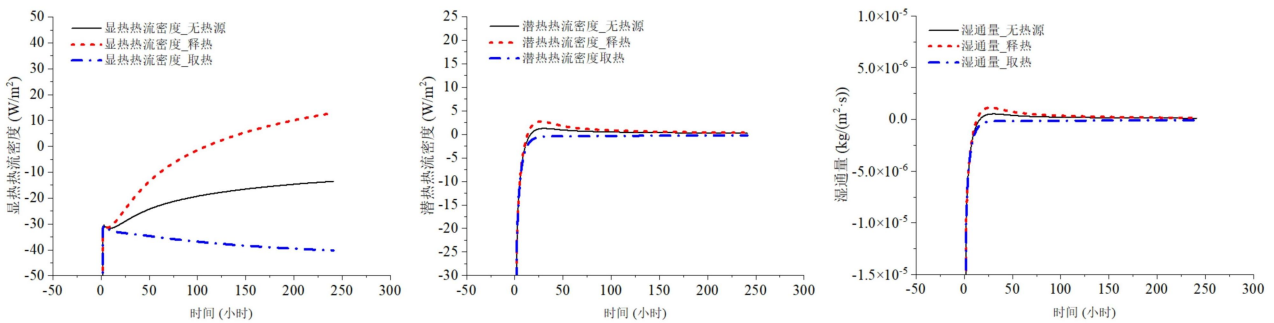


图 5 壁面热流密度和湿通量变化

Fig.5 Wall heat and moisture flux

2.2 能源连续墙长期运行负荷模式

针对不同的建筑负荷需求特性，能源连续墙内部换热埋管的换热功率也不相同。为了研究长期运

行不同负荷模式下，能源连续墙的热湿耦合传递特性，选取了 3 种具有代表性的负荷模式。分别考虑了一年中夏季和冬季释热量和取热量平衡和不平

衡的情况，不平衡又分为夏季释热量比冬季取热量高和低的两种情况。如图 6 和表 2 所示。此时土壤和混凝土的初始温湿度依然为 12.5℃ 和 85%，EPS 和砂浆层的初始温湿度为 12.5℃ 和 50%，土壤远边界的温湿度保持恒定为 12.5℃ 和 85%，这与 3.1 小节是相同的。不同的是室内空气的相对湿度保持为 50%，但温度是季节性变化的。数值计算的开始时间为夏季，全年为 365 天，夏季 93 天，冬季 92 天，夏秋和冬春之交的过渡季节各为 90 天。

表 2 长期运行负荷模式

Table 2 Thermal load modes

工况 1	夏季：50 W/m；冬季：-50 W/m；（平衡模式）
工况 2	夏季：50 W/m；冬季：-25 W/m；（不平衡模式）
工况 3	夏季：25 W/m；冬季：-50 W/m；（不平衡模式）

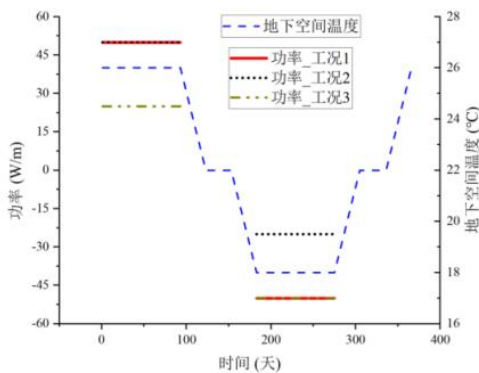


图 6 三种工况下埋管换热量以及空气温度设置

Fig.6 The heat exchange rate and the indoor air temperature

图 7 给出了不同负荷模式对室内墙面的温湿度的影响。在夏季，平衡工况下（工况 1）墙体壁面的温度可高达 28℃ 左右，为全年最高水平；而墙面的相对湿度降低至 42% 左右，为全年的最低水平。夏季的释热量越大（工况 1 和工况 2），墙面的温度越高，相对湿度就越低。相反地，冬季的取热量越大（工况 1 和工况 3），墙面的温度越低，相对湿度就越高。而在过渡季节，墙面的温度和相对湿度很快恢复到平衡位置。与普通墙体（无热源工况）相比，50W/m 的夏季埋管释热量（工况 1 和工况 2）使得墙面的温度提高了大约 10%，而相应地，相对湿度降低了大约 18.9%。这与温度梯度引起的传湿驱动势是密不可分的，即温度梯度越

大，传湿速率越快，墙面的湿分被传递到了室内空气中。

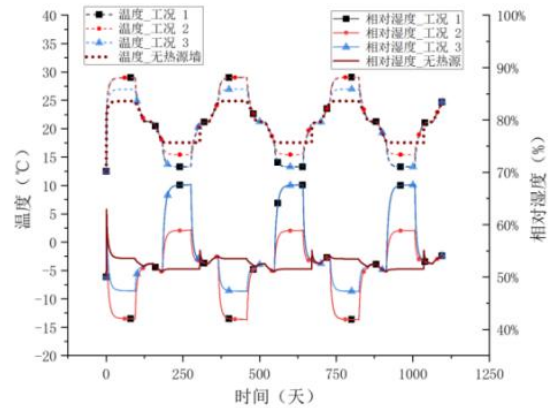
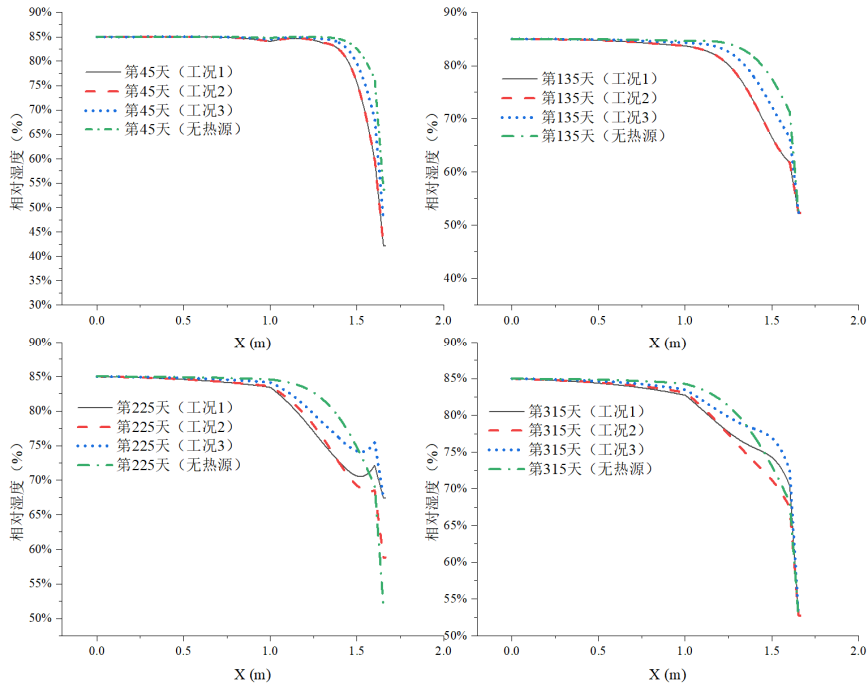


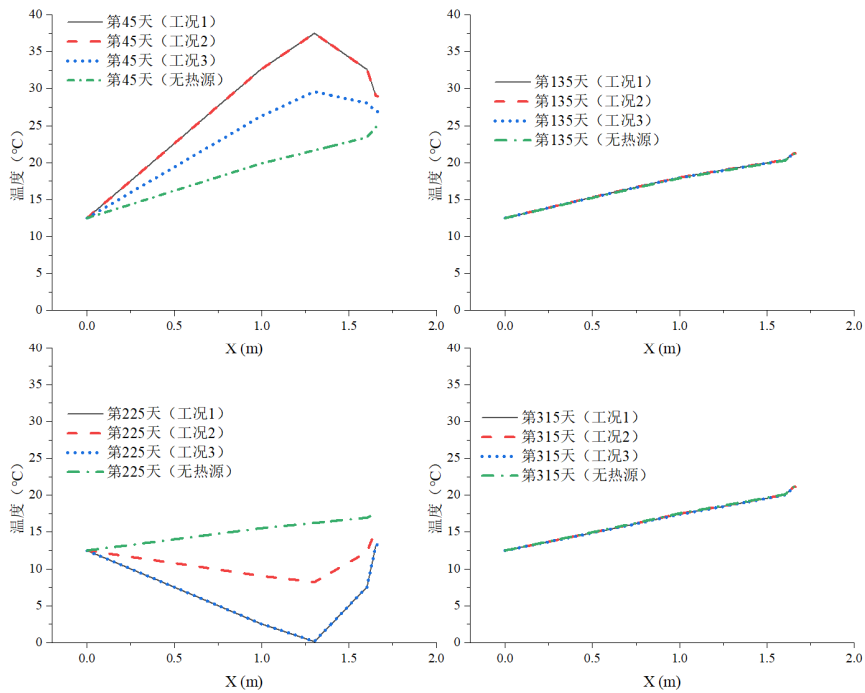
图 7 不同负荷模式下室内侧墙面的温度和相对湿度变化

Fig.7 Temperature and relative humidity change of wall surface under different load modes

不同负荷模式下，选取夏季中间日（第 45 天），冬季中间日（第 225 天）和过渡季节中间日（第 135 天和第 315 天）作为典型日进行分析，地下能源连续墙及岩土的温度场和湿度场分布如图 8（a）和（b）所示。在夏季和冬季的典型日，埋管位置附近存在明显的高温和低温区域，而在过渡季节中间日（第 135 天和第 315 天），整个温度场的分布趋于一致，这表明能源连续墙在过渡季节的恢复能力是比较强的。除此之外，不同的负荷工况在运行相同时间所造成的空间温度场分布是不一样的。夏季的释热量大，埋管附近的温度就高，而冬季的取热量大，埋管附近位置的温度就低。温度场的变化会引起相对湿度场发生对应的改变，如图 8（a）所示。不同的负荷模式下，相对湿度场的分布具有明显的差异性。较高的冬季取热量（工况 3）会引起较高的相对湿度场，这是因为高取热量造成墙体的温度明显低于室内空气温度，从而使得室内空气中的湿分被吸收至墙体中，同时较低的墙体温度改变了水蒸气分压力条件，两者共同引起了相对较高的湿度分布。与温度场过渡季节恢复能力相比，湿度场的恢复能力要差得多，在过渡季节（第 135 天和第 315 天），不同工况下的湿度场在过渡季节不能恢复到趋于一致，这是由于传湿过程要明显慢于传热过程。值得一提的是，EPS 保温材料层具有明显的绝缘作用，在温度场和湿度场中造成了明显的转折点。



(a)



(b)

图 8 不同负荷模式下土壤等围护结构相对湿度和温度场分布

Fig.8 Distribution of relative humidity and temperature of soil and other envelopes under different load modes

为了分析能源连续墙中的这种热湿耦合传递过程对壁面传热传湿量的影响,图9绘制了这几种负荷工况下的墙面与地下空间室内空气之间的显

热,潜热和湿分交换量。可以明显地看出,最大显热传热量发生在夏季和冬季,而最大潜热传热量和湿分传递量发生在过渡季节。这是由于壁面的湿传

递受到壁面和室内的相对湿度差及饱和水蒸气分压力差的共同影响(见式(10)),而过渡季节由于室内空气环境温度的变化较为明显,造成了饱和水蒸气分压力发生相应的改变,因此在此期间出现了较大的湿分通量。除此之外,这几种负荷模式工况下的湿分通量和潜热热流密度区别不大,但是显热热流密度的差异比较明显。显热热流密度的差异是由埋管换热强度的差异造成的。湿分通量和潜热热

流密度受到传湿过程的影响,而墙体含湿量比较低,引起的传湿过程在短时间内降低至较小的水平,因此这三种负荷模式工况下的湿分通量和潜热热流密度差异不大。工况 1 和工况 2 在夏季引起的显热得热热流密度要远大于工况 3,而工况 1 和工况 3 在冬季引起的显热失热热流密度要明显大于工况 2。

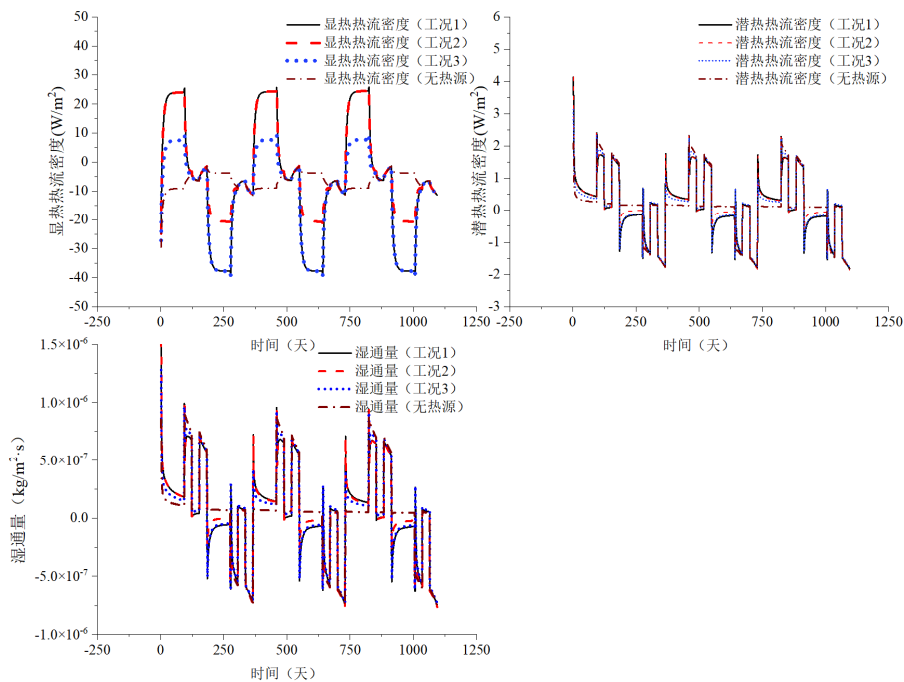


图 9 不同负荷模式下壁面的显热、潜热和湿分通量

Fig.9 Sensible heat, latent heat and wet fluxes of wall surface under different load modes

3 结论

通过以上针对能源连续墙运行期的热湿耦合传递研究结果,可以得出以下几点主要的结论:

(1) 能源连续墙运行期会造成墙体等围护结构内部以及室内侧墙面明显的温度变化。与普通墙体组成的围护结构相比,能源连续墙在释热和取热工况下,会分别造成显著的显热得热和显热失热。这种显热热流密度会对地下空间内部环境造成额外的热负荷,在制定空调计划时应该被关注。

(2) 夏季埋管的换热功率增加 100%时(25W/m 和 50W/m),壁面夏季最大显热热流密度增加了大约 243.9%,夏季潜热热流密度增大了 21.3%,壁面过渡季节最大湿通量降低了 6.8%。冬

季埋管的换热功率增加 100%时(-25W/m 和 -50W/m),壁面冬季最大显热热流密度增加了 82.9%,冬季潜热热流密度增加了 16.5 倍,壁面过渡季节最大湿通量降低了 4.4%。

(3) 过渡季节壁面的潜热和湿通量是非常显著的,达到峰值。因此在对有应用能源连续墙技术的地下空间制定空调策略时,针对过渡季节的防潮和除湿措施可能需要额外考虑。

参考文献:

- [1] 温继伟,侯珺洸,刘星宏,等.能源地下结构研究及应用进展[J].煤田地质与勘探,2022,50(10):119-130.
- [2] 孙猛,夏才初,张国柱,等.地下连续墙内埋管换热器传

- 热性能的试验研究[J].中国矿业大学学报,2012,41(2):225-230.
- [3] Zhou X, 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.
- [4] 夏才初,朱建龙,曹诗定.地下连续墙内热交换管引起的温度应力研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(1):90-95.
- [5] Sterpi D, G Tomaselli, A Angelotti. Energy performance of ground heat exchangers embedded in diaphragm walls: Field observations and optimization by numerical modelling[J]. *Renewable Energy*, 2020,147:2748-2760.
- [6] Luikov A V. Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies[J]. *Advances in Heat Transfer*, 1964,1(1):123-184.
- [7] 王莹莹,刘艳峰,王登甲,等.墙体传湿对内表面温度的影响关系研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2012,40(12):128-132.
- [8] Wang Y, et al, The effect of moisture transfer on the inner surface thermal performance and the thermal transmittance of the roof-wall corner building node in high-temperature and high-humidity areas[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021,44.
- [9] 张潇,刘芳,李子淳,等.多层墙体热湿迁移数值模拟[J].*煤气与热力*,2022,42(10):17-21.
- [10] 陈友明,鲍洋,董文强,等.热湿耦合迁移对长江流域建筑能耗模拟的影响[J].*华中科技大学学报(自然科学版)*,2020,48(2):67-72.
- [11] Philip J R, D D Vries. Moisture movement in porous materials under temperature gradients[J]. *Trans. Amer. Geophys Union*, 1957,38(2):222.
- [12] Yanfeng Liu, Yingying Wang, Dengjia Wang, et al. Effect of moisture transfer on internal surface temperature[J]. *Energy and Buildings*, 2013,60:83-91.
- [13] H J Steeman, M Van Belleghem, A Janssens, et al. Coupled simulation of heat and moisture transport in air and porous materials for the assessment of moisture related damage[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(10):2176-2184.