

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230927019

## 考虑地下渗流影响的能源地连墙换热性能研究

黄睿<sup>1,2,3</sup>, 张飞宇<sup>1</sup>, 周长冰<sup>1</sup>, 朱宓能<sup>1</sup>, 张鑫<sup>3</sup>

(1. 绍兴文理学院土木工程学院, 浙江 绍兴 312000; 2. 东北林业大学土木与交通学院, 黑龙江 哈尔滨 150090;  
3. 华汇工程设计集团股份有限公司, 浙江 绍兴 312000)

**摘要:** 能源地下连续墙是一类新型的能源地下结构, 兼顾结构承载和热量交换的双重功能, 地下渗流对能源结构的换热性能影响显著, 有必要开展深入研究。以上海自然博物馆的能源地下连续墙为工程背景, 利用COMSOL多物理场耦合软件构建数值模型, 分析了换热管入口温度、地下水渗流方向、渗流速度、换热运行模式和运行周期对地连墙结构换热量的影响规律。结果表明, 地下渗流的流速和方向都对能源结构换热有显著的影响, 地下渗流能有效地缓解地下结构换热引起的热量积累, 保障能源结构的换热效率。因此, 能源地下结构适合在有较好渗流条件的地质环境中应用。地源热泵间歇运行可以有助于土体中的热量恢复, 在长期运行工况下, 能源结构在夏季的换热量要高于冬季。研究成果对完善能源地下连续墙的设计理论具有一定的参考意义, 有助于推动浅层地热能的开发利用。

**关键词:** 能源地下连续墙; 地源热泵; COMSOL; 渗流; 换热能力

**中图分类号:** TU91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)04-0901-09

### Study on Heat Transfer Performance of Energy Diaphragm Wall Considering Underground Seepage

HUANG Rui<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Feiyu<sup>1</sup>, ZHOU Changbing<sup>1</sup>, ZHU Mineng<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China;  
2. School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150090, China;  
3. Huahui Engineering Design Group Co., Ltd., Shaoxing 312000, China)

**Abstract:** The energy diaphragm wall is a new type of underground energy structure that combines the dual functions of structural bearing and heat exchange. Underground seepage significantly impacts the heat transfer performance of energy structures, necessitating in-depth research. Taking the energy diaphragm wall of the Shanghai Natural History Museum as the engineering background, a numerical model was established using COMSOL multi-physical field coupling software to analyze the influence of the heat exchange tube inlet temperature, groundwater seepage direction, seepage velocity, heat exchange operation mode, and operation period on the heat exchange of the underground diaphragm wall structure. The results showed that both the velocity and direction of underground seepage significantly affected the heat transfer of the energy structures. Underground seepage could effectively alleviate the heat accumulation caused by heat exchange in underground structures, ensuring the heat exchange efficiency of energy structures. Therefore, energy underground structures are suitable for geo-

\* 收稿日期: 2023-09-27; 修回日期: 2024-01-08

作者简介: 黄睿(1987—), 男, 副教授, 硕导, 博士。主要从事地下建筑结构工程研究。E-mail: zjuhr@hotmail.com

logical environments with good seepage conditions. Intermittent operation of ground source heat pumps can help restore the heat in the soil mass. Under long-term operation conditions, the heat exchange in energy structures is higher in summer than in winter. The research results provide a certain reference for improving the design theory of energy underground diaphragm walls and contribute to the development and utilization of shallow geothermal energy.

**Keywords:** energy diaphragm wall; ground source heat pump; COMSOL; seepage; heat exchange capacity

## 0 引言

能源地下结构是指将换热管预埋进地下构筑物(基础底板、钻孔灌注桩和地下连续墙等)而共同形成地下换热器。该技术不仅继承了原有结构的稳定性和耐久性,而且还兼顾了传热性的优点。20世纪80年代开始,能源地下结构最先在奥地利和瑞士出现,首先是基础底板,第一根能源桩和第一面能源地下连续墙分别于1984年和1996年于奥地利和瑞士安装<sup>[1]</sup>。经过多年发展,中国的上海自然博物馆<sup>[2-4]</sup>也运用了该技术。

目前关于能源地下连续墙在现场试验研究主要针对其换热性能展开<sup>[2-6]</sup>。而针对能源地下连续墙热应力和热应变的研究<sup>[7-8]</sup>主要多是采用数值模拟的方法,不过也存在少量的室内模型试验<sup>[9-10]</sup>。文献<sup>[11-13]</sup>针对能源地下连续墙换热性能进行了大量的数值模拟,通过改变不同影响因素观察地源热泵的换热性能,并得到了丰富的理论数据。由于能源地下连续墙单面墙体足够长,换热管可以在墙内进行不同的排布<sup>[14-15]</sup>。M. Barla等<sup>[14]</sup>、Y. Rui等<sup>[16-17]</sup>、X. Zhou等<sup>[18]</sup>针对能源地下连续墙分别进行了二维和三维有限元数值模拟,对墙体力学响应及变化规律展开研究。上述研究针对能源地下连续墙换热性能及换热过程中的热应力问题展开,但都忽略了地下水这一影响因素。能源地下连续墙有别于能源桩,其特殊的结构形式在应用过程中往往具有挡水作用,进而改变地层渗流场,故地下水的影响不容忽视。渗流条件下能源桩的相关研究在逐渐壮大<sup>[19-22]</sup>,而渗流条件下能源地下连续墙的研究鲜有出现。

鉴于此,本文重点讨论渗流条件下的能源地下连续墙的换热性能。在本文中,以上海自然博物馆地下工程为背景,运用COMSOL多场耦合软件对渗流条件下的能源地下连续墙进行三维有限元数

值模拟。目的是检验不同工况下(换热管入口温度、地下水渗流速度、渗流方向和地源热泵运行模式)对能源地下连续墙换热性能的影响,并对地源热泵长期运行下的换热量变化进行了分析。该方法更加贴合实际工况,对能源地下连续墙在渗流条件下的设计提供理论依据。

## 1 工程概况

### 1.1 上海自然博物馆工程概况

上海自然博物馆地上建筑用地面积12 029 m<sup>2</sup>,地下建筑用地面积16 294 m<sup>2</sup>,总建筑面积45 086 m<sup>2</sup>,地上建筑3层,地下2层,总高度18 m<sup>[2]</sup>。该博物馆采用地源热泵系统为展厅和藏品库等大空间提供冬季热负荷和夏季部分冷负荷。

地源热泵系统换热管回路布置在地铁连续墙、博物馆外围连续墙以及地下室室的灌注桩之中。地下连续墙内埋管425口,每口井均为一组W型埋管(分别由在地下连续墙的内侧和外侧布置的U型埋管串联而成),每一幅连续墙(内有四口井,个别例外)并联成一个回路,换热管有效埋深30~38 m;埋管采用PE100型聚乙烯管,埋管外径25 mm,壁厚2.3 mm,导热系数为0.42 W/(m·°C)<sup>[2]</sup>。地下连续墙宽1 m,单幅墙长6 m,混凝土强度等级为C30。地下连续墙平面布置如图1所示。

## 2 控制方程和有限元模型

### 2.1 控制方程

#### 2.1.1 达西定律

地下水在土体中渗流时,由于阻力的存在,地下水渗流过程中必然发生能量损失。基于此,法国工程师经过大量试验研究,最终得出达西定律,见式(1):

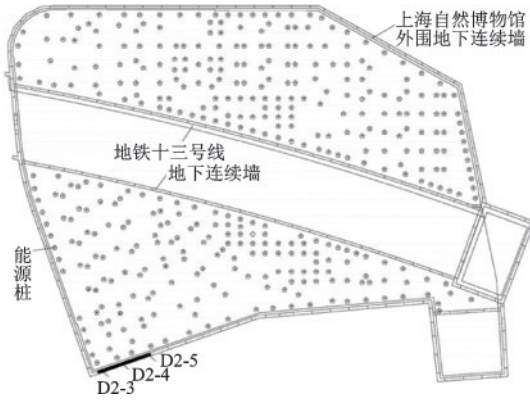


图1 上海自然博物馆地下连续墙布置<sup>[2]</sup>

Fig.1 Layout of diaphragm wall of Shanghai Natural History Museum<sup>[2]</sup>

$$Q = uA = -k \frac{\Delta H}{\Delta L} A \quad (1)$$

式中,  $Q$  为水流流量;  $u$  为渗流速度;  $A$  为垂直于水流方向的土体断面积;  $k$  为多孔介质渗透系数;  $\Delta H$  为静压水头;  $\Delta L$  为沿水流方向土体的长度。

而本文地下水渗流是以水力传导率的方式进行模拟, 其中  $u$  的方程见式(2):

$$u = -\frac{K}{\rho g} (\nabla p + \rho g \nabla H) \quad (2)$$

式中,  $u$  为渗流速度;  $K$  为水力传导系数;  $\rho$  为流体密度;  $g$  为重力加速度;  $p$  为孔隙水压力;  $\nabla H$  为静压水头。

### 2.1.2 多孔介质传热控制方程

多孔介质传热能量守恒方程见式(3):

$$\left( \rho C_p \right)_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_l C_{pL} u \nabla T = \nabla (k_{eq} \nabla T) + Q_G + \nabla k_q \nabla T \quad (3)$$

式中,  $t$  为时间;  $T$  为地下水温度;  $u$  为地下水流速;  $Q_G$  为热源产生的单位体积的热量即热源项;  $\nabla k_q \nabla T$  为热扩散项;  $C_p$  为流体定压比热;  $k_{eq}$  为热传导系数等效值。

### 2.1.3 换热管控制方程

换热管传热控制方程见式(4):

$$\rho A C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho A C_p u \nabla T = \nabla (A k \nabla T) + \frac{1}{2} f_D \frac{\rho_A}{d_h} |u| u^2 + Q_{wall} \quad (4)$$

式中,  $\rho$  为管道内流体密度;  $A$  为管道内截面积;  $C_p$  为管道内流体的比热容;  $t$  为时间;  $T$  为管道内流体温度;  $u$  为管道内流体的速度;  $k$  为管道内流体的热传导系数;  $d_h$  为管道内水力直径;  $f_D$  为达西摩擦因

子, 模型中  $f_D$  取经验数据  $f_D = 64/Re$ ,  $Re$  为雷诺系数。

## 2.2 几何模型

本文采用多物理场仿真软件 COMSOL 建立有限元模型。该模型以上海自然博物馆外围 D2-3、D2-4、D2-5 段地下连续墙为背景进行研究。由于实际工程中地下连续墙范围较广, 故本文主要考虑单扇墙。为了简化计算, 该模型较原位试验换热管进行了优化, 布置为单侧 W 型, 支管间距 1.5 m, 距离土体 0.25 m。模型设置地下水位 -3.7 m (即 -3.7 m 以下均为渗流层)。地下连续墙深 38 m, 厚 1 m, 开挖深度 18.5 m, 基础底板厚 1 m。几何模型示意如图 2 所示。

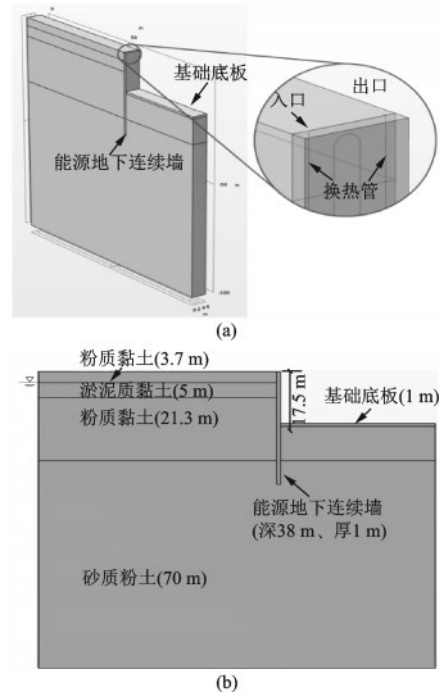


图2 几何模型示意

Fig.2 Schematic diagram of geometric model

## 2.3 换热能力计算

在换热管出口位置设置监测点, 记录出口温度。埋管换热量可根据式(5)计算:

$$Q = \frac{\pi \rho v c_p d_{pi}^2 (T_{in} - T_{out})}{4} \quad (5)$$

式中,  $Q$  为埋管换热量, W;  $\rho$  为流体密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $v$  为循环水流速,  $\text{m/s}$ ;  $c_p$  为流体的比热,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $d_{pi}$  为埋管内径,  $\text{m}$ ;  $T_{in}$  为埋管进水温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_{out}$  为埋管

出水温度,℃。

则埋管单位深度换热量可由式(6)所得:

$$q = \frac{Q}{H} \quad (6)$$

式中, $q$ 为埋管单位深度换热量,W/m; $H$ 为埋管有效深度,m。

## 2.4 边界条件

实际工程中,地源热泵系统运行过程中易受环境的影响,故所构建有限元模型时应基于如下假设:

(1) 为保证计算结果不受外界干扰,基坑和未开挖侧顶部空气对流不对地源热泵系统产生影响。

(2) 地下水渗流仅存在于特定渗流层中,对渗流层外的介质不产生影响,远离墙位置处渗流速度保持稳定。

(3) 地层远场温度保持不变。

(4) 热物性参数不随温度变化。

## 2.5 材料特性和模型验证

本节通过 COMSOL 软件验证并优化了 C.C. Xia 等<sup>[2]</sup>开展的能源地下连续墙原位试验。选取原位试验中的单 U 型埋管形式,换热管中流体流速为 0.6 m/s,入口温度 35℃,墙体平均温度 23℃,土层温度为 16.3℃,连续运行 48 h。假设空气对流对其不产生影响。模型所用材料参数见表 1。

表 1 地下连续墙和土层材料参数

Table 1 Material parameters of diaphragm wall and soil layer

材料参数	导热系数 $\lambda/(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	比热容 $C/(J \cdot (K \cdot kg)^{-1})$	孔隙率
粉质黏土	1.464	1 880	1 635	0.476
淤泥质黏土	1.344	1 800	1 714	0.526
粉质黏土	1.405	1 835	1 720	0.514
砂质粉土	1.900	1 960	1 233	0.418
连续墙	2.340	2 500	1 046	

COMSOL 数值模拟结果与原位试验结果对比如图 3 所示。结果表明,数值模拟结果前 11 h,模拟值小于实测值,特别是在模拟刚开始时。已知的 COMSOL 数值模型计算中,土层和墙体的初始温度为平均值。然而在实际工程中,土层近地表温度受环境温度影响较大,但随着深度的增加,土层温度变化幅度急剧下降,在 5 m 深度以下土层温度几乎保持稳定,依据相关理论,冬(夏)季土壤温度下降(升高)1℃,热交换率可能会降低 6%<sup>[3]</sup>。此外,地下连续墙由于浇筑完成后的水泥水化热的影响导致墙体的温度分布不均,根据原位试验数据可知墙体深 9、25、35 m 处温度分别为 12.2、25、21.2℃。实际工程中换热管是绑扎在钢筋上,而钢筋的导热系数约为混凝土的 15~20 倍。而建立的数值模型在验证过程中,并未考虑上述这些情况,这些因素的存在是导致模拟值与实测值存在差异的主要原因。而在 11 h 之后,模拟值与实测值拟合结果较好,另外本文改进的 W 型埋管的模拟结果与实测值也有较高的拟合度,并且在长时间的模拟过程中,拟合结果更加接近。改进的 W 型埋管形式具有低热干扰和容易施工的优点,故本文以 W 型埋管形式

展开论述。

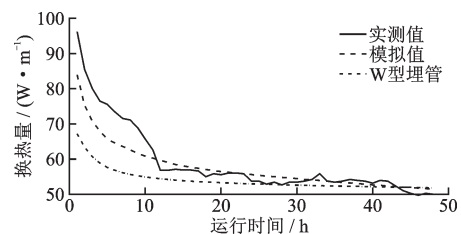


图 3 数值模拟结果与原位试验结果对比

Fig.3 Comparison between numerical simulation and in-situ test results

## 3 分析与讨论

本文采用 COMSOL 多物理场耦合软件建立的有限元模型使用了多孔介质传热、管道传热和达西定律三个模块,主要观察换热管出口温度的变化。本节针对换热管入口温度;地下水渗流速度、渗流方向和地源热泵运行模式几种因素对换热管换热能力进行讨论,并针对地源热泵进行了长期的换热量监测,其中换热管入口温度的设置是根据上海自

然博物馆实际试验数据和该地区温度变化范围所取。部分模拟方案见表2。

表2 地下连续墙内埋管换热性能测试模拟工况

Table 2 Test and simulation scheme for heat transfer performance of embedded pipes in diaphragm wall

模拟工况	渗流速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	入口温度/ $^{\circ}\text{C}$	渗流方向
工况一	0	32	与墙垂直
工况二	0	35	与墙垂直
工况三	0	38	与墙垂直
工况四	$3.9\times 10^{-5}$	32	与墙垂直
工况五	$3.9\times 10^{-5}$	35	与墙垂直
工况六	$3.9\times 10^{-5}$	38	与墙垂直
工况七	0	35	与墙垂直
工况八	$3.9\times 10^{-6}$	35	与墙垂直
工况九	$3.9\times 10^{-5}$	35	与墙垂直
工况十	$3.9\times 10^{-5}$	35	与墙垂直
工况十一	$3.9\times 10^{-5}$	35	与墙平行

### 3.1 入口温度对换热量的影响

不同入口温度下的换热量变化如图4所示。从图4中可以看出,不同入口温度换热量的变化近似倍数关系。工况三的换热量比工况一、二的换热量分别提高了42.3%和17.5%,这说明提高换热管入口温度能极大地改善地源热泵的换热性能,入口温度的改变对换热量的影响也十分显著。从图4中还可以看出,工况四、五、六的换热量比工况一、二、三的换热量分别高26%、24.8%和23.9%,且在渗流作用下工况四、五和六运行后期换热量变化趋势逐渐趋于稳定。这说明地源热泵系统在渗流作用下具有较强的热交换能力,地下水渗流起到了积极作用。地下水渗流的积极作用随着入口温度的升高在逐渐减弱,根据能源桩的已有研究可对其作出解释<sup>[19-22]</sup>,地源热泵系统在热交换过程中热量逐渐在换热管周围积累,并对周围介质造成热干扰,地下水能将这一热量从上游带往下游,进而减少换热管周围热量积累。热量在能源地下连续墙周围积累云图如图5所示。从图5中明显可以看出地下水渗流对能源地下连续墙周围热量的影响。总的来说,地源热泵系统的热交换能力会随着换热管入口温度的提高而变大,这一效果会在地下水渗流的作用下进一步加强。

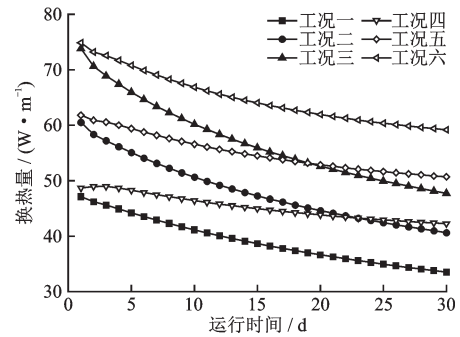


图4 换热量随入口温度的变化  
Fig.4 Variations of heat exchange with inlet temperature

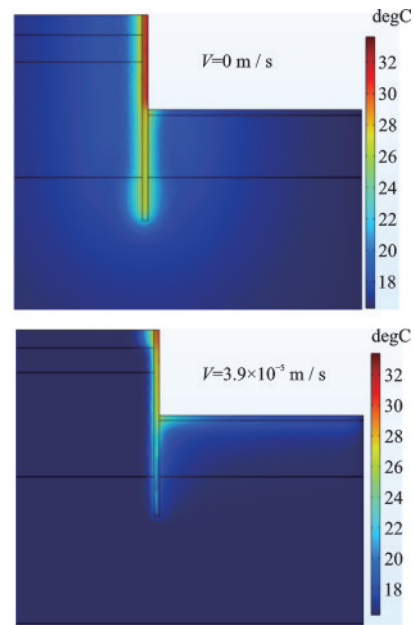


图5 模型温度云图  
Fig.5 Contour diagram of model temperature

### 3.2 渗流速度对换热量的影响

渗流速度对换热量的影响如图6所示。从图中可以看出,工况八和工况九的换热量比工况七的换热量提高了2.2%和24.8%,这说明渗流速度的改变对换热量的影响也十分明显。工况八的换热量相较于工况七的换热量提升并不明显,说明 $10^{-6}$  m/s(即黏土层渗流水平)这一数量级对换热量的提升并不明显,故下文不对其展开论述。换热管的热交换能力随着渗流速度的增大而升高,渗流速度越大,即缓解热干扰的能力就越强。工况九后期换热量变化趋势逐渐趋于稳定,这说明地下水渗流能使换热管出口温度更快达到稳定,且居于一个较低水平。总的来说,渗流速度越大,地源热泵系统热交换能力就越强,能源地下结构更适用于地下水资源

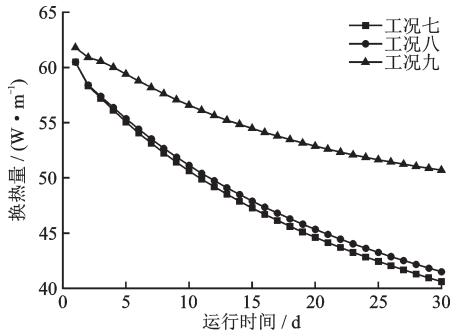


图6 换热量随渗流速度的变化

Fig.6 Variations of heat exchange with seepage velocities

丰富的地区。

### 3.3 渗流方向对换热量的影响

不同渗流方向对换热量影响如图7所示。本节在讨论渗流方向的影响时,分别设置渗流方向与地下连续墙平行和垂直,以此分析渗流方向对换热管热交换作用的影响。从图7中可以看出,工况十的换热量比工况十一的换热量平均提高了24.9%,这说明能源地下连续墙与渗流方向的相对位置对换热量的影响十分明显。由于地下连续墙特殊的结构形式具有挡水的功能,相较于工况十一能更充分地减少换热管周围热量积累。工况十一的热交换能力呈现降低的趋势,这是由于换热管的布置方向与渗流方向平行,导致热量在下游逐渐积累(即热量积累在出口处),使地连墙下游的热干扰效果更加明显,即换热管出口温度升高加快。这也就说明地下水渗流方向与能源地下连续墙的相对位置对地源热泵系统的热交换能力影响十分明显,地下水渗流方向与连续墙放置方向的夹角越接近直角,换热能力就越强。能源地下连续墙布置时将渗流方向考虑其中,会大幅度提高地源热泵系统的工作效率,减少不必要的经济损失。

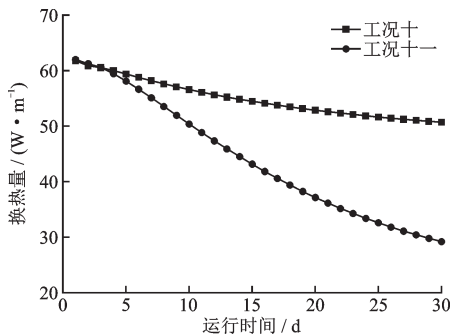


图7 换热量随渗流方向的变化

Fig.7 Variations of heat exchange with seepage directions

### 3.4 运行模式对换热量的影响

本节通过间歇运行与连续运行两种模式对换热量变化进行分析。间歇运行模式是指换热管内流体循环和静止各12 h,入口温度一定;连续运行模式是指换热管内流体始终保持循环,入口温度呈周期性变化(模拟实际工程中环境温度变化),两种运行模式24 h为一个周期,运行30 d,根据调研对换热管入口温度变化设置如图8所示,图8(a)为间歇运行模式,图8(b)为连续运行模式。

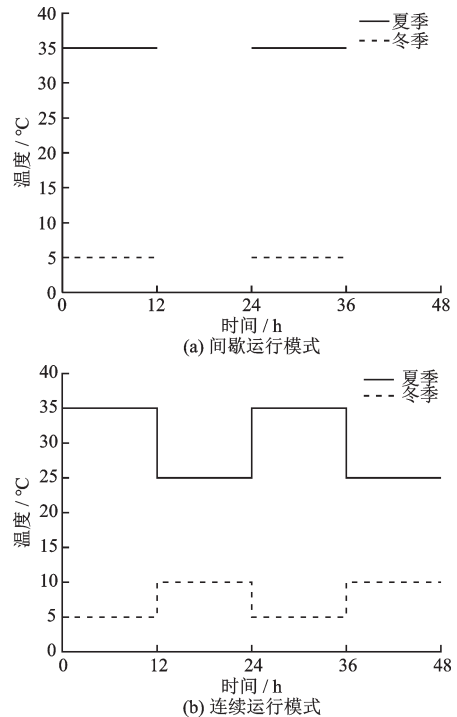


图8 换热管的入口温度

Fig.8 Inlet temperature of heat exchange tube

图9为不同渗流速度下换热管夏(冬)季出口温度变化图(图9(a)为间歇运行模式,图9(b)为连续运行模式)。从图9中可以看出地源热泵系统在夏季和冬季运行过程中受渗流影响程度并不相同,夏季出口温度的变化受渗流影响更加明显。图10显示了两种运行模式下换热管出口平均温度和换热量的变化,图中点线图表示换热管出口平均温度,柱状图表示换热量。结合图9~10分析可得,间歇运行模式下的地源热泵系统热交换能力较强,这种差异在夏季更加明显,图9中夏季的换热量间歇模式比连续模式高13.3%,而冬季仅高0.06%。这说明间歇运行模式下的地源热泵系统热交换能力更强,并且在夏季效果更加明显。

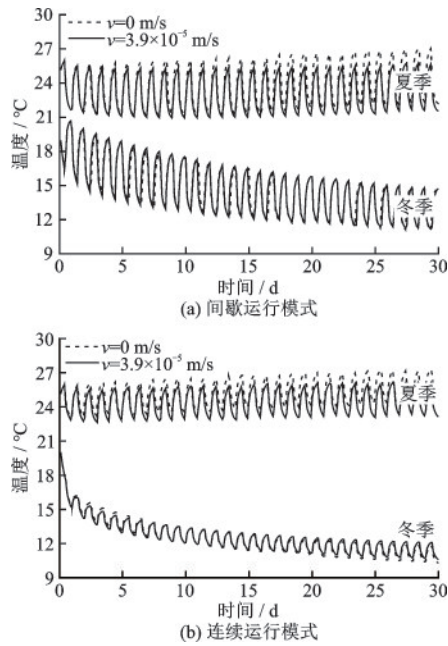


图9 不同渗流条件下出口温度变化

Fig.9 Variations of outlet temperature under different seepage conditions

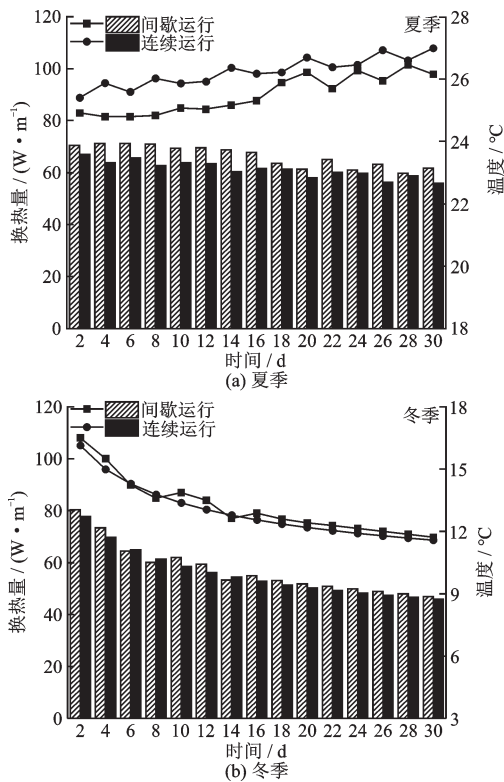


图10 出口平均温度和换热量的变化

Fig.10 Variations of average outlet temperature and heat exchange

图9(a)显示周期内温度呈波动变化,这说明土体具有一定的温度调节能力,这也是土体温度常年保持恒定的主要原因。对比图9(a)、9(b)夏季温度

变化曲线,说明地下水渗流能够提高土体调节温度的能力,但在冬季这一提升微乎其微。此外,图9(a)的温度变化幅度大于图9(b)的温度变化幅度,说明采用间歇运行方式,土体自身恢复热扰动温度的能力是强于地源热泵系统的,故采用间歇运行模式能够提高地源热泵系统的热交换性能。

### 3.5 长期运行的换热量变化

本节讨论地源热泵在四季交替运行下的换热量变化,运行10 a,一年360 d(一周周期)平均分配到4个季节。地源热泵在长期运行状态下的入口温度变化如图11所示。图12为不同渗流速度下的换热管出口温度变化,从图中可以看出在同一渗流水平下换热管出口温度的波动幅度几乎没有变化,仅在前两年有稍微提升。这说明地源热泵系统在长期运行过程中换热能力会保持在一个相对稳定的状态,这一稳定状态会随着渗流速度的增大而加强。

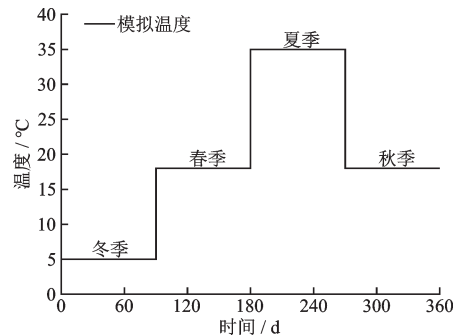


图11 换热管的入口温度

Fig.11 Inlet temperature of heat exchange tube

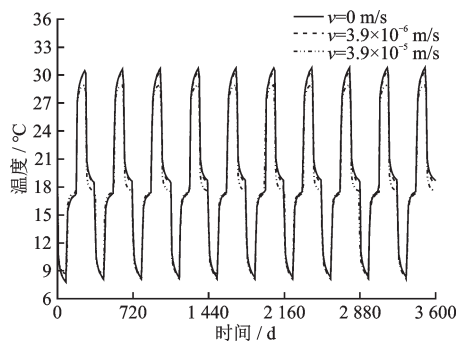


图12 出口温度的变化

Fig.12 Variations of outlet temperature

图13显示了不同渗流速度下各个周期夏(冬)季的换热量变化。模拟中在春、秋两季为低换热量状态,故本节只针对夏、冬季的换热量进行分析。图13中显示地源热泵夏季的换热量比冬季的还能

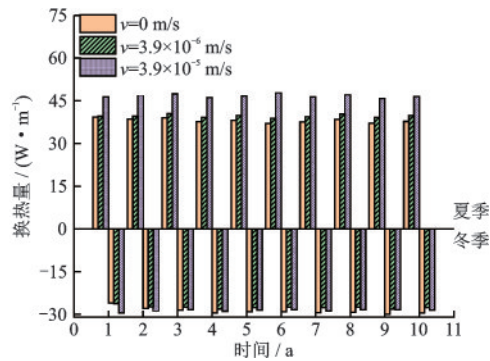


图 13 长期运行下的换热量变化

Fig.13 Variations of heat exchange under long-term operation

热量整体高 43% 左右,且冬季的换热量受渗流速度的影响并不明显,故在该地区,夏季使用地源热泵能使其利用率达到最高。

## 4 结 论

以上海自然博物馆外围能源地下连续墙为背景建立有限元数值模型,比较了渗流条件下能源地下连续墙换热性能的变化。研究发现,换热管入口温度、地下水渗流速度、渗流方向和地源热泵运行方式都是影响能源地下连续墙换热性能的重要因素,此外,还对地源热泵长期运行进行了分析。主要结论如下:

(1)地源热泵系统的热交换能力会随着换热管入口温度的提高而变大,这一效果会在地下水渗流的作用下进一步加强,因为地下水渗流能够将换热管周围积累的热量从上游带往下游,缓解地源热泵系统运行过程中的热积累。

(2)渗流速度越大,地源热泵系统热交换能力就越强,能源地下结构更适用于地下水资源丰富的地区。地下水渗流方向与能源地下连续墙的相对位置对地源热泵系统的热交换能力影响十分明显,地下水渗流方向与连续墙放置方向的夹角越接近直角,换热能力就越强。能源地下连续墙布置时将渗流方向考虑其中,会大幅度提高地源热泵系统的工作效率,减少不必要的经济损失。

(3)地源热泵系统采用间歇运行模式具有较强的热交换能力,且在夏季更为明显。土体具有一定的温度调节能力,这一能力会随着渗流速度的变大而增强,且在间歇运行模式下效果更加明显。

(4)地源热泵系统在长期运行过程中换热能力

会保持在一个稳定的状态,这一稳定状态会随着渗流速度的增大而加强,且长期运行过程中地源热泵系统夏季的换热量高于冬季的换热量。

## 参考文献:

- [1] Brandl H. Energy foundations and other thermo-active ground structures [J]. Géotechnique, 2006, 56 (2) : 81-122.
- [2] Xia C C, Sun M, Zhang G Z, et al. Experimental study on geothermal heat exchangers buried in diaphragm walls [J]. Energy and Buildings, 2012, 52: 50-55.
- [3] Sun M, Xia C C, Zhang G Z. Heat transfer model and design method for geothermal heat exchange tubes in diaphragm walls [J]. Energy and Buildings, 2013, 61: 250-259.
- [4] 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.  
Sun M, Xia C C, Zhang G Z, et al. Experimental study on heat transfer performance of embedded tube heat exchanger for slurry wall [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2012, 41 (2) : 225-230. (in Chinese)
- [5] Sterpi D, Tomaselli G, Angelotti A. 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] Sterpi D, Angelotti A, Habibzadeh-Bigdarvish O, et al. Assessment of thermal behaviour of thermo-active diaphragm walls based on monitoring data [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(6): 1145-1153.
- [7] 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.  
Xia C C, Zhu J L, Cao S D. Research on temperature stress caused by heat exchange tubes in slurry wall [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10 (1): 90-95. (in Chinese)
- [8] 董盛时,李晓昭,熊志勇,等. 能源地下连续墙的热力学行为模型试验研究[J]. 高校地质学报, 2019, 25(5): 748-755.  
Dong S S, Li X Z, Xiong Z Y, et al. Experimental

- study on thermodynamic behavior model of energy slurry wall [J]. *Journal of University Geology*, 2019, 25(5): 748-755. (in Chinese)
- [9] Dong S S, Li X Z, Tang M A, et al. Thermo-mechanical behavior of energy diaphragm wall: physical and numerical modelling [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 146: 243-251.
- [10] 李淑勇, 夏才初, 朱建龙, 等. 能源地下连续墙温度应力的离心模型试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2020, 16(4): 1012-1020.
- Li S Y, Xia C C, Zhu J L, et al. Centrifugal model test study on thermal stress of energy slurry wall [J]. *Journal of Underground Space and Engineering*, 2020, 16(4): 1012-1020. (in Chinese)
- [11] Shafagh I, Rees S, Urrea Mardaras I, et al. A model of a diaphragm wall ground heat exchanger [J]. *Energies*, 2020, 13(2): 300.
- [12] 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 [J]. *Geothermics*, 2021, 91: 102044.
- [13] Peterson E L, Shafagh I. Evaluation of diaphragm wall heat exchanger potential [J]. *Energy and Buildings*, 2022, 266: 112107.
- [14] Barla M, Di Donna A, Santi A. Energy and mechanical aspects on the thermal activation of diaphragm walls for heating and cooling [J]. *Renewable Energy*, 2020, 147: 2654-2663.
- [15] Makasis N, Narsilio G A. Energy diaphragm wall thermal design: The effects of pipe configuration and spacing [J]. *Renewable Energy*, 2020, 154: 476-487.
- [16] Rui Y, Yin M. Thermo-hydro-mechanical coupling analysis of a thermo-active diaphragm wall [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, 55(5): 720-735.
- [17] Rui Y, Yin M. Finite element modeling of thermo-active diaphragm walls [J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2020, 14: 646-663.
- [18] 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.
- [19] You T, Li X, Cao S, et al. Soil thermal imbalance of ground source heat pump systems with spiral-coil energy pile groups under seepage conditions and various influential factors [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 178: 123-136.
- [20] Zhang W, Zhang L, Cui P, et al. The influence of groundwater seepage on the performance of ground source heat pump system with energy pile [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 162: 114217.
- [21] 张来军. 渗流场下能量桩换热及热-力耦合特性的理论和实验研究[D]. 扬州: 扬州大学. 2021.
- Zhang L J. Theoretical and experimental research on heat transfer and thermo mechanical coupling characteristics of energy pile under seepage field [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021. (in Chinese)
- [22] 杨卫波, 严超逸, 张来军, 等. 渗流作用下能源桩的换热性能及热-力耦合特性[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(5): 891-899.
- Yang W B, Yan C Y, Zhang L J, et al. Heat transfer performance and thermal mechanical coupling characteristics of energy piles under seepage [J]. *Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition)*, 2022, 62(5): 891-899. (in Chinese)

(本文责编:张艺)