

文章编号:0253-4339(2025)04-0044-09

doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.04.044

# 渗流作用下复合能源地下结构的协同传热机理

游田<sup>1</sup> 张永正<sup>2</sup> 罗丹<sup>2</sup>

(1 深圳大学土木与交通工程学院 深圳 518060; 2 中山大学土木工程学院 珠海 519082)

**摘要** 复合能源地下结构地源热泵系统可与土壤高效换热并具备较高供冷供热能效比,在建筑节能方面应用前景广阔。但土壤中地下水的渗流对复合能源地下结构换热性能会产生显著影响,进而影响系统性能。因此,建立了考虑渗流的复合能源地下结构数值模型,以夏季工况为例,研究了渗流作用下复合能源地下结构的协同传热机理。结果表明:渗流作用下,由于能源桩和钻孔的协同传热,复合能源地下结构换热量比单一能源桩提高60%;地下水渗流有助于复合能源地下结构的传热,当水平渗流速度为60 m/a时,复合能源地下结构的换热量是无渗流工况下的1.39倍,结构自身温升可降低25.32%。在地下水渗流的作用下,沿上游布置的能源地下结构与土体的热量交换较多,且土壤热影响范围在渗流上游显著缩小,而在渗流下游则明显扩大。

**关键词** 地源热泵;地下水渗流;能源地下结构;耦合机理;换热性能

中图分类号:TB61<sup>+</sup>1; TU96<sup>+</sup>2; TK11<sup>+</sup>4

文献标识码:A

## Synergistic Heat Transfer Mechanism of a Composite Energy Geo-Structure under Seepage Conditions

You Tian<sup>1</sup> Zhang Yongzheng<sup>2</sup> Luo Dan<sup>2</sup>

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, 518060, China; 2. School of Civil Engineering, Sun Yat-Sen University, Zhuhai, 519082, China)

**Abstract** Ground-source heat pump (GSHP) systems using composite energy geostructures can efficiently transfer heat to soil and provide a high coefficient of performance (COP) for both cooling and heating, which has broad application prospects for energy saving in buildings. However, groundwater seepage in the soil can significantly affect the heat-transfer performance of a composite energy geostructure, thereby affecting the overall system performance. Therefore, this study establishes a numerical model of composite energy geo-structures considering groundwater seepage and investigates their synergistic heat transfer mechanism of composite energy geo-structures during summer. The results indicate that the heat transfer of composite energy geostructures is 60% higher than that of single energy piles under seepage conditions owing to the synergistic heat transfer of the energy pile and borehole. Groundwater seepage contributes to heat transfer in composite energy geostructures. When the seepage velocity reaches 60 m/a, heat transfer capacity increases by 1.39 compared to non-seepage conditions, while the temperature rise of the structure itself decreases by 25.32%. Under seepage, the upstream energy geostructures exhibit greater heat transfer with the soil than those downstream. The thermal influence area of the energy geostructures significantly reduced upstream and expanded downstream. This study guides the rational application of composite energy geostructures in regions with seepage.

**Keywords** ground-source heat pump; groundwater seepage; energy geo-structure; coupling mechanism; heat transfer performance

地源热泵(ground-source heat pump, GSHP)以土壤作为低品位热源或热汇,通过少量电力驱动,在冬季从土壤中提取热能来供应建筑供暖,在夏季则将建筑余热排放至土壤中实现供冷,具有能效比高和节能环保的优点<sup>[1-3]</sup>。能源地下结构<sup>[4]</sup>作为地源热泵与土壤换热的重要部件,其取排热能力直接影响建筑用能系统的节能性、经济性和舒适性。目前,常见的

能源地下结构有钻孔地埋管<sup>[5-6]</sup>和能源桩<sup>[7-9]</sup>,但在多年运行中发现单一型地埋管有钻井成本高、占地面积大的缺点,单一型能源桩取排热能力又受限。针对上述不足,课题组提出了基于能源桩和地埋管的复合能源地下结构<sup>[10]</sup>,实现了单一型能源地下结构的优势互补。基于矩形排布的群桩结构,在4根相邻能源桩围成的矩形中心增加钻孔地埋管,使钻孔距离4根

基金项目:国家自然科学基金(52108102)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52108102).)

收稿日期:2024-04-09;修回日期:2024-05-11;录用日期:2024-07-30

能源桩的距离相同且最大化,以最小化热干扰。能源桩和地理管彼此并联连接,共同作为 GSHP 的地下换热器,可在占地面积不变的情况下与土壤进行全面均匀的热量交换。并以杭州某办公建筑为例,通过模拟和实验的研究方法分析了复合能源地下结构夏季运行 1 个月后的换热效果。结果表明,运行 1 个月后,能源地下结构的总换热量为 6 860 W,相对于单一型能源桩的 4 110 W,提高 67%。复合能源地下结构具有更高的换热能力、更深的取排热深度和更大的热影响区域,在夏热冬冷城市建筑节能方面具有广阔的应用前景。

在地源热泵实际应用中,众多外界环境因素会对能源地下结构的运行产生一定的影响,地下水渗流就是一个关键的因素,其会提高能源桩的换热性能。You Tian 等<sup>[11]</sup>提出一种带渗流的螺旋盘状能源桩群模型,发现渗流工况可以提高系统加热时的性能系数 (coefficient of performance, COP); Zhang Wenke 等<sup>[12-13]</sup>提出了热传导和地下水渗流联合作用下能源桩的温度响应解析解,得出渗流可有效提高能源桩传热效率的结论;杨军兵等<sup>[14]</sup>通过构建深层埋管式能源桩单桩三维热渗耦合物理模型,分析了制冷、制热工况下运行情况,得出渗流作用可在一定程度上消除冷热堆积问题的结论;Lou Yang 等<sup>[15]</sup>将不同地下水流速度的恒定加热通量应用于 4 种常见的能源桩进行建模研究,发现上下游桩之间的温差和机组性能均与渗流流速呈正相关。杨卫波等<sup>[16]</sup>通过数值模型研究了渗流作用下能源桩的热-力耦合特性,表明渗流减小桩体 9.12% 的温升、5.77% 的桩顶位移和 7.31% 的桩体轴力。

综上所述,地下水渗流不仅能够促进能源地下结构周围土壤中热量的扩散,还可以减小能源桩桩体温度的变化幅度,从而影响其力学性能。目前关于地下水渗流对单一型能源桩结构热力影响的研究已经较为充分。然而,现有研究不能揭示渗流对复合能源地下结构的协同作用机理。为此,本文基于有限元软件 COMSOL 建立了复合能源地下结构的数值模型,对复合能源地下结构在地下水渗流工况下的运行特性进行数值模拟,研究了渗流作用下复合能源地下结构的传热机理,从而为复合能源地下结构在实际工程中的合理应用提供借鉴。

## 1 数值模型

本文选用杭州某小型办公建筑为例,采用数值模拟方法分析地下水渗流条件下复合能源地下结构的协同传热特性。杭州作为典型的夏热冬冷地区,适合

采用地源热泵技术供暖供冷;此外,该建筑地下土壤为淤泥质粉质黏土软土层,常年地下水渗流,具备渗流模拟条件,具有较好的代表性。图 1 所示为 COMSOL 建立的有限元数值模型,该复合能源地下结构由 2 根螺旋形能源桩和 2 个单 U 形垂直钻孔并联组成。以仅有 2 根螺旋形能源桩的结构作为对照组,以分析加入钻孔后的协同效果。模型的几何参数如表 1 所示。

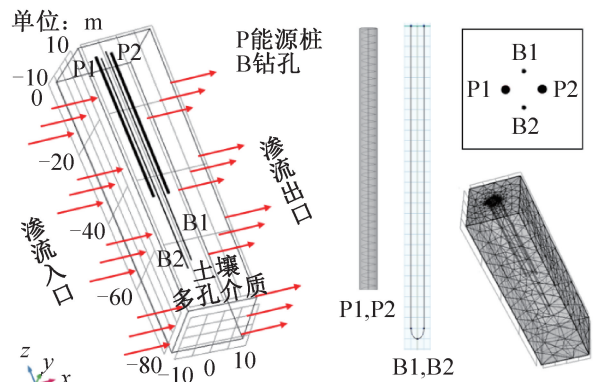


图 1 渗流作用下复合能源地下结构物理模型

Fig.1 Physical model of composite energy geo-structure under seepage conditions

表 1 模型的几何参数

Tab.1 Geometric parameters of the model

参数	数值
能源桩桩深高/m	40
能源桩桩径/m	0.6
能源桩桩间距/m	4.2
螺旋管螺旋半径/m	0.24
钻孔深度/m	60
钻孔内径/m	0.12
钻孔间距/m	4.2
U 形管深度/m	60
U 形管半宽/m	0.03
换热管内径/mm	26
换热管外径/mm	32
土体横截面积/m <sup>2</sup>	10 × 10
土体深度/m	80

### 1.1 物理模型

为了便于传热过程的建模,简化模型并作如下假设:

1) 地基中的土壤、换热管材料、能源桩桩身材料以及钻孔内回填材料均被视为各向同性材料处理,其

热物性参数不会受到温度变化的影响,并忽略由水分迁移导致的热量传递;

2) 能源桩(钻孔)与土壤的接触边界满足连续性条件;

3) 能源桩(钻孔)周围土壤为多孔且充满水分的介质,热量在其中的传递方式包括热传导和热对流,忽略辐射传热;

4) 渗流始终为单方向,流速保持不变,并且不考虑渗流流速在深度方向上的变化。

## 1.2 控制方程

数值模型的控制方程包括:能源桩和钻孔地埋管中有换热管,则有换热管内流体的传热和流动控制方程;能源地下结构自身传热控制方程;土壤中存在地下水渗流,则有渗流土与能源地下结构的传热方程及渗流水的流动方程。

### 1.2.1 换热管内流体控制方程

能源地下结构中换热管内流体的流动为湍流模式,故使用  $k-\varepsilon$  湍流模型<sup>[17]</sup>来描述湍流过程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_t k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_t k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho_t \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}(\rho_t \varepsilon) + \frac{\partial \rho}{\partial x_j}(\rho_t \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho_t A S \varepsilon - \rho_t B \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (2)$$

式中:  $t$  为时间, s;  $\rho_t$  为换热管内流体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $k$  为湍流动能, J;  $u_j$  为  $x_j$  为坐标上的速度矢量分量,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $\mu$  为流体的动力黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $\mu_t$  为湍流黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $\nu$  为运动黏度,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $\varepsilon$  为湍流耗散率;  $G_k$  是由于平均速度梯度产生的  $k$  的迭代项; 湍流动能  $k$  和  $\varepsilon$  的 Prandtl 数  $\sigma_k$  和  $\sigma_\varepsilon$  分别取 1.0 和 1.2;  $A$  和  $B$  为经验常数。

### 1.2.2 能源地下结构传热控制方程

能源桩和钻孔内部自身传递热量的形式均为导热,控制微分方程为:

$$\rho_s c_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla g \lambda_s \nabla T_s \quad (3)$$

式中:  $\rho_s$  为桩基础(或钻孔回填体)的材料密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_{p,s}$  为固体材料的比定压热容,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $T_s$  为固体材料的温度, K;  $\lambda_s$  为固体材料的导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

### 1.2.3 能源地下结构周围土壤渗流控制方程

能源地下结构周围土壤中的地下水渗流由连续性、动量和能量守恒方程决定,如式(4)~式(6)所示。

$$\frac{\partial(\gamma \rho_{sf})}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma \rho_{sf} \nu_{sf}) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{sf} u) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho_{sf} u u) = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + S_i \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[\gamma \rho_{sf} E_{sf} + (1 - \gamma) \rho_s E_s] + \nabla \cdot [\nu_{sf}(\rho_{sf} E_{sf} + p)] =$$

$$S_{sf} + \nabla \cdot [\lambda_{\text{eff}} \nabla T - \left( \sum_i h_i J_i \right) + (\bar{\tau} \cdot \nu_{sf})] \quad (6)$$

式中:  $\gamma$  为土壤的孔隙率;  $\nu_{sf}$  为渗流水流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\rho_{sf}$  和  $\rho_s$  分别为多孔介质中渗流水的密度和土壤干材料密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $S_i$  代表由于黏性和惯性引起的损失项;  $E_{sf}$  和  $E_s$  分别为多孔介质中渗流水和土壤干材料单位质量的热力学能, J;  $p$  为压强, Pa;  $S_{sf}$  为多孔介质中渗流水的熵,  $\text{J}/\text{K}$ ;  $h_i$  为渗流水的焓, J;  $J_i$  为渗流水扩散通量,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $\lambda_{\text{eff}}$  为多孔介质土的有效导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,可按式(7)计算。

$$\lambda_{\text{eff}} = \gamma \lambda_{sf} + (1 - \gamma) \lambda_s \quad (7)$$

式中:  $\lambda_{sf}$  和  $\lambda_s$  分别为多孔介质中渗流水和土壤干材料的导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

## 1.3 定解条件

调用 COMSOL 中的非等温管道流物理场实现换热管中流体的流动及传热,调用多孔介质传热物理场实现渗流状态下能源地下结构自身传热及与土壤的换热,调用管壁传热的多物理场实现换热管与能源地下结构间的传热耦合。

### 1.3.1 温度场

1) 初始条件。

$$T_e(f, t) = T_e(x, y, z, t) = T_s(x, y, z, t) = T_0(t = 0) \quad (8)$$

式中:  $T_e(f, t)$  为  $t$  时刻能源地下结构中换热管的温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_e(x, y, z, t)$  为  $t$  时刻  $(x, y, z)$  处的能源桩(或钻孔)的温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_s(x, y, z, t)$  为  $t$  时刻  $(x, y, z)$  处的土壤温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_0$  为土壤初始温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

2) 边界条件。

土壤远侧边界:

$$q(x, y, z, t) \Big|_{x,y=\pm 10} = 0 \quad (9)$$

土体顶面边界:

$$T_s(x, y, z, t) \Big|_{z=0} = T_a \quad (10)$$

土体底面边界:

$$T_s(x, y, z, t) \Big|_{z=-80} = T_0 \quad (11)$$

式中:  $q$  为热流密度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $T_a$  为室内空调温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

### 1.3.2 渗流场

土壤中地下水渗流入口处需设置速度边界条件,渗流方向和速度均设定为定值( $x$ 轴方向为正方向),并且只在  $x$  轴方向进行渗流。渗流入口的温度设定

为 20 °C,出口设置为标准压力出口,以避免出现回流效应。

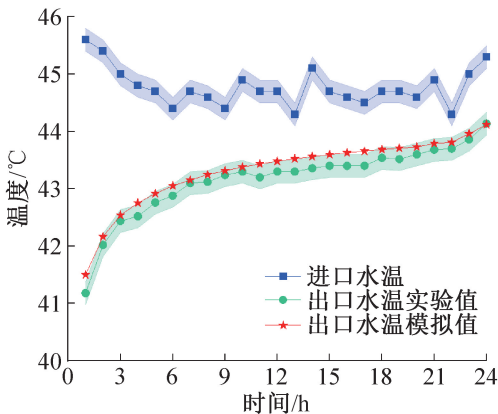
### 1.4 模型验证

为验证上述模型的准确性,搭建了复合能源地下结构协同传热缩尺实验台,如图 2(a)所示,由 2 根螺旋形能源桩和 3 根垂直单 U 形地埋管并联组成。实验以 40 L/h 的循环流速、45 °C 的恒定水温注入各换热管中模拟夏季向土壤注热的工况,运行 24 h。在 COMSOL 中建立了与实验模型箱相同尺度、相同材料、相同工况的数值模型。初始土壤温度设为实验开始时的平均土壤温度(28.7 °C),用实验中测得的瞬态入口水温设置入口边界条件。

复合能源地下结构进出口水温的对比如图 2(b)所示,色带为实验测量误差( $\pm 0.2$  °C)。出口水温模拟值基本可以在实验值的误差范围内,仿真结果与实验结果吻合良好,即所建立的复合能源地下结构模型具有足够的精度,可以可靠地用于分析复合能源地下结构的换热性能。



(a) 复合能源地下结构协同传热缩尺实验台



(b) 进出口水温对比

图 2 模型验证

Fig.2 Model verification

## 2 计算结果与分析

采用有限元方法进行求解,模型被划分为 618 172 个四边形网格。模拟运行时间为 30 d,复合

能源地下结构中各换热管的入口水温为 35 °C,流速为 0.2 m/s,土壤的初始温度设定为 20 °C,地下水的渗流流速为 60 m/a。土体顶面设置为夏季室内空调温度 26 °C,底面根据杭州地温的长期监测数据设置为恒温层 20 °C<sup>[18]</sup>,相关热物性参数设置如表 2 所示。能源桩桩身为钢筋混凝土,钻孔内回填材料为高导热性能的水泥砂浆,土壤为综合土壤参数,其与杭州地下的多层土具有等效均匀的热物性<sup>[19]</sup>。分别模拟渗流作用下复合能源地下结构和仅能源桩结构的传热,以分析能源桩和钻孔地埋管的协同传热机理;分别模拟复合能源地下结构在无渗流和有渗流工况下的传热,以分析渗流对复合能源地下结构传热的增益效果。

表 2 模型的热物性参数

Tab.2 Thermophysical parameters of the model

材料	导热系数/ [W/(m·K)]	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	比热容/ [J/(kg·K)]	孔隙率
能源桩桩身	2.3	2 551	960	—
钻孔回填材料	2.2	2 050	1 068	—
土体	1.8	1 830	1 500	0.4
换热管	0.42	—	—	—

### 2.1 能源桩与钻孔地埋管的协同传热

渗流影响下,复合能源地下结构相比单一型能源桩结构仍具有更高的换热量和更大的热影响区域,表现出更好的传热能力。

图 3 所示为单一型能源桩结构和复合能源地下结构分别在地下水渗流工况下运行 30 d 后地下 20 m 深处的截面温度云图。可以发现,相同深度处复合能源地下结构的热影响区域更广,这是能源桩与钻孔协同工作导致热注入能力增加所致。具体而言,在该截面处单一型能源桩结构和复合能源地下结构的土壤中心温度分别为 23.0 °C 和 23.1 °C。单一型能源桩结构中,下游能源桩 P2 仅受到来自上游能源桩 P1 的热量影响;复合能源地下结构中,下游能源桩 P2 同时受到来自上游能源桩 P1、钻孔 B1、钻孔 B2 协同影响。

复合能源地下结构与土壤的换热能力明显优于单一型能源桩。计算了运行至第 30 天时各能源地下结构的每延米换热能力。渗流状态下单一型能源桩中的能源桩 P1、P2 的换热能力分别为 83.12、78.14 W/m;渗流状态下复合能源地下结构中的能源桩 P1、P2 的换热能力分别为 83.10、76.30 W/m,钻孔 B1 和 B2 的换热能力均为 33.05 W/m。即在能源桩间距中

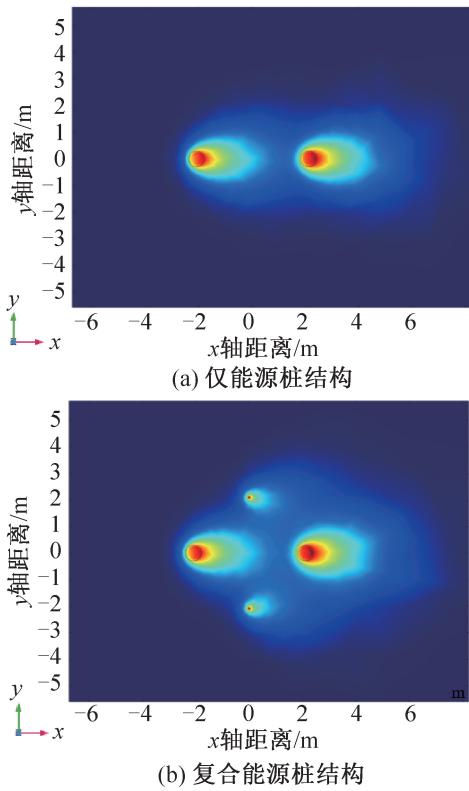


图3 能源地下结构温度云图对比

Fig.3 Comparison of temperature nephogram of energy geo-structure

加入钻孔,对于上游能源桩 P1 的换热能力几乎没有影响,下游能源桩 P2 的换热能力也仅受到极小的削弱,而增加的钻孔 B1 和 B2 可与原能源桩协同换热,进而提高系统的总换热量。

图4所示为渗流状态下单一型能源桩与复合能源地下结构总换热量的逐日对比。具体而言,运行1个月后,单一型能源桩结构的总换热量为 6 450 W,复合能源地下结构的总换热量为 10 342 W,提高了

60%。这是因为通过合理布局,新增地理管与能源桩间保持了最大间距,其相互热扰较小。增加地理管对原能源桩的换热性能几乎没有削弱,相反在相同的土壤占用面积内,能源桩和地理管协同与土壤进行更多的热量交换,提高了 GSHP 的效率。因此基于复合能源地下结构的地源热泵系统具有更强的传热性能,可为建筑物提供更高的制冷量,满足更多楼层的热舒适需求。其在地源热泵系统推广方面具有更加广阔的应用前景。

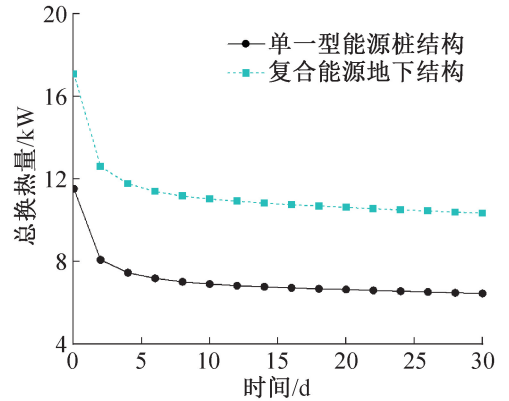


图4 能源地下结构总换热量对比

Fig.4 Comparison of total heat transfer of energy geo-structures

## 2.2 渗流对复合能源地下结构传热增益效果

### 2.2.1 热影响范围

定义能源地下结构周围土壤温升超过 3 ℃ 的区域为热影响范围。图5所示为在无地下水渗流和有渗流工况下运行 30 d 后,地下 20 m 深处复合能源地下结构周围土壤的温度云图。在无渗流工况下,各能源地下结构(能源桩、钻孔)协同工作,对周围土壤进行对称排热。虽然能源桩与钻孔保持了较大间距,但

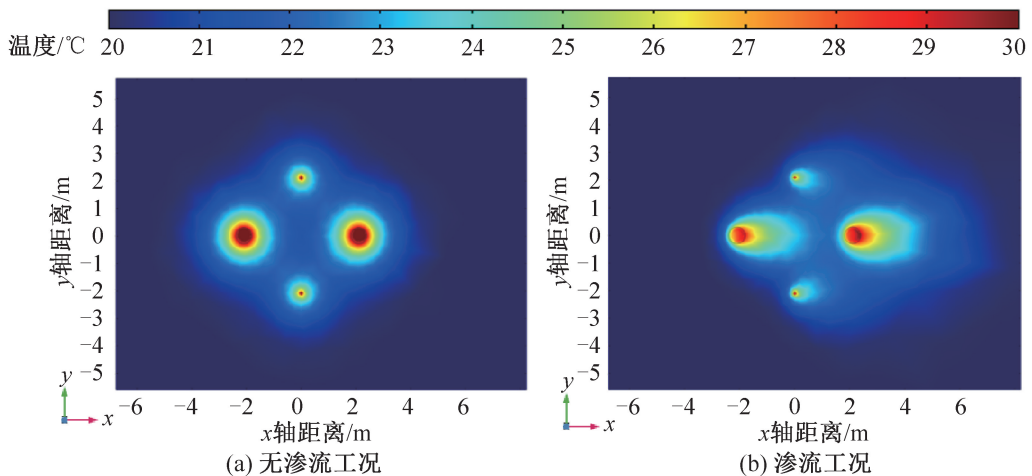


图5 有无渗流工况下复合能源地下结构 20 m 深度处截面温度云图

Fig.5 Temperature nephogram at 20 m depth of composite energy geo-structure with or without seepage conditions

能源桩的热影响范围也有 1.20 m, 钻孔的热影响范围约为 0.65 m, 长期运行仍有可能在土壤中造成热堆积<sup>[20]</sup>。在渗流工况下, 温度场会向地下水流动方向产生偏移。具体而言, 能源桩在地下水上游和下游的土壤热影响范围分别为 0.52、2.10 m; 钻孔在地下水上游和下游的土壤热影响范围分别为 0.26、1.16 m。在地下水渗流作用的影响下, 能源地下结构在地下水上游和下游的热影响范围平均是无地下水时的 42% 和 175%。由图 5 还可知, 复合能源地下结构中心土壤的热扰动由于地下水渗流的作用被大幅减小, 使复合能源地下结构远离热堆积, 更利于长期运行。但渗流的存在导致复合结构中前排能源桩和钻孔向土壤中传递的热量沿渗流方向传播, 从而影响了后排能源地下结构的散热效果。

### 2.2.2 能源地下结构温升

能源地下结构与土壤间的传热温差是影响地源热泵系统性能的关键内因, 渗流的作用就是能够减小能源地下结构自身的温度变化幅度, 进而保持高效的传热温差。

图 6 所示为有无地下水渗流情况下能源地下结构自身的温升变化。可以明显看出, 渗流导致能源地下结构的温度变化幅度大幅减小。例如运行至第 30 天时, 能源桩 P1 和 P2 在有无地下水渗流情况下的温升分别为 10.0、7.4 °C, 钻孔 B1 和 B2 在有无地下水渗流情况下的温升分别为 8.8、6.7 °C。渗流使得能源地下结构自身的平均温升降低 25.32%。

### 2.2.3 换热量

复合能源地下结构的最大优点是能源桩与地埋管并联连接, 共同作为 GSHP 的地下换热器, 与土壤协同换热, 使传热率升高, 从而更好地传递热量。而渗流的作用在于可以进一步提高复合能源地下结构

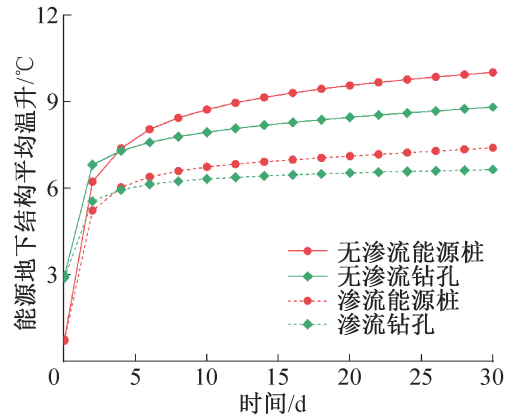


图 6 有无渗流下能源地下结构温升变化

Fig.6 Temperature rise of energy geo-structure with or without seepage conditions

的协同换热量。

图 7 所示为有无渗流下复合能源地下结构换热性能对比, 可知渗流的作用是提高了复合能源地下结构的换热性能。具体而言, 随着时间的推移, 无渗流工况下能源桩 P1、P2 和钻孔 B1、B2 的每延米换热量持续减少且换热量明显小于有地下水渗流的工况。复合能源地下结构在渗流影响下, 位于上游的能源桩 P1 的每延米换热量随着时间的推移逐渐接近稳定, 位于下游的能源桩 P2 受到前排能源地下结构 P1、B1、B2 的热量传递, 其每延米换热量也会随时间递减但始终高于无渗流的工况。如运行至第 30 天时, 无渗流工况下, 能源桩 P1、P2 的换热强度为 49.84 W/m, 而渗流工况下能源桩 P1 的换热强度为 83.10 W/m; 能源桩 P2 的换热强度为 76.30 W/m。钻孔 B1、B2 的换热强度也从 23.94 W/m 升至 33.06 W/m。这是因为地下水的存在导致结构在夏季排出的热量沿着渗流方向移动, 即实现了热量“迁移”, 从而降低了能

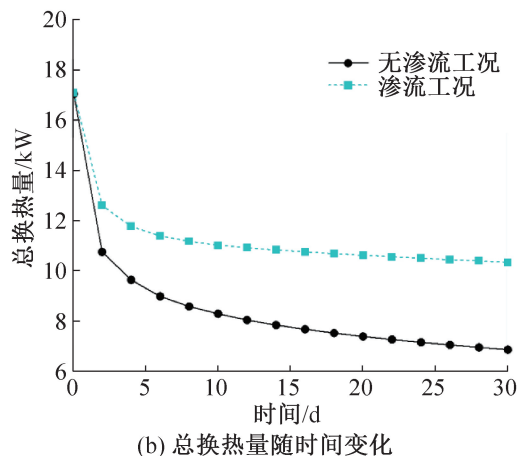
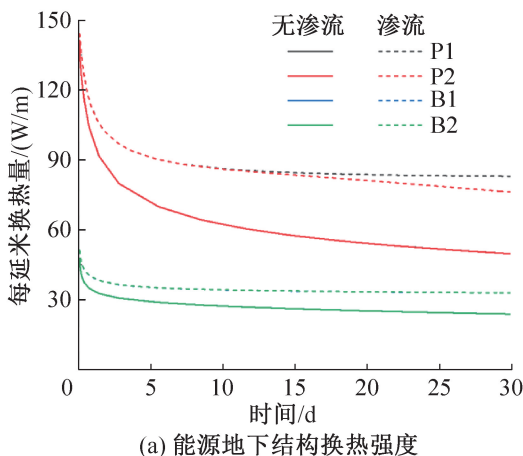


图 7 有无渗流下复合能源地下结构换热性能对比

Fig.7 Comparison of heat transfer performance of composite energy geo-structure with or without seepage conditions

源桩本身、钻孔本身和土壤的温升幅度,使得复合能源地下结构换热性能增强。

相应地,在无渗流工况下,复合能源地下结构的总换热量也随着时间的推移持续减少,且明显小于有渗流工况,但渗流工况下换热量随时间的减小率更低。例如,当运行至15天时,无渗流工况下的总换热量为7 752 W,而在渗流工况下为10 795 W,增加39%。且2种工况下换热量的差值随着时间的推移而越来越大。例如,运行第3天时,两者的日换热量差值为2 067 W,而运行至最后一天时,差值增至3 482 W。

### 3 不同渗流流速的影响

由第2.2节结论可知,复合能源地下结构在地下水渗流的影响下,能源桩和钻孔的温升幅度得到降低,换热性能得到增强。本节就不同渗流流速对复合能源地下结构的影响进行了研究。依次改变渗流流速为40、60、80、100 m/a,运行30 d后的复合能源地下结构总换热量和结构平均温升如图8所示。

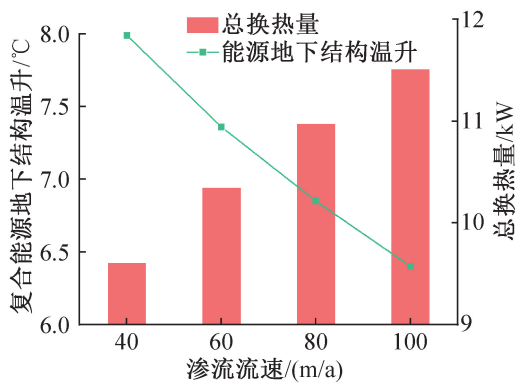


图8 渗流流速对复合能源地下结构换热性能的影响

Fig.8 Impact of seepage velocity on heat transfer performance of composite energy geo-structure

由图8可知,夏季向土壤中排热工况下,增加渗流速度可以提高复合能源地下结构的总换热量。运行至第30天时,在水平渗流速度为40、60、80、100 m/a下,夏季工况其对应的总换热量分别为9 604、10 342、10 970、11 508 W。这是因为地下水渗流速度越快,越有利于在能源地下结构附近堆积的热量向周围的土壤“迁移”,在夏季工况运行下复合能源地下结构的温升得到减小,温升分别为7.4、7.3、7.2、7.1 °C,这就增大了能源地下结构本身与换热管之间的传热温差,所以复合能源地下结构的换热量也越大。因此,地下水渗流流速对能源地下结构的换热性能影响巨大。特别是在复合能源地下结构的协同换热中,常年的高效取热和排热容易造成不平衡而导

致土壤温度出现失衡状况,较快流速渗流工况运行时则刚好利于改善该状况。

### 4 结论

本文基于有限元软件COMSOL建立了考虑渗流作用的复合能源地下结构数值模型并模拟夏季建筑向土壤排热的性能。与无渗流作用的复合能源地下结构、有渗流作用的单一型能源桩结构作对比,研究了渗流作用下的复合能源地下结构的协同传热机理,得到结论如下:

1) 复合能源地下结构中能源桩和钻孔埋管的协同工作可使整体具有更高的换热量。在渗流工况下,相较于单一能源桩,复合能源地下结构的换热量可提高60%。

2) 渗流工况下,复合能源地下结构周围的土壤温度场会随着渗流流动方向发生“迁移”。一方面,会对后排能源地下结构的换热性能产生影响,表现在复合能源地下结构渗流工况时上游的热影响范围是无地下水渗流工况下的175%,而下游的热影响范围则仅为无地下水渗流工况下的42%。另一方面,土壤的热扰动因此被大幅减小,使复合能源地下结构远离热堆积,更利于长期运行。

3) 地下水渗流有助于带走复合能源地下结构排放至土壤中的热量,从而减小了地下能源桩、钻孔和土壤温度的变化幅度,复合能源地下结构自身的温升幅度在渗流影响下平均降低约25.32%。这维持了结构自身的传热温差,并增强了能源地下结构的换热性能。且渗流越快,性能增强越多,在60 m/a的渗流速度下运行至第15天时,复合能源地下结构的总换热量比无渗流工况下提高39%。

本文受广东省基础与应用基础研究基金(2020A1515110391)项目资助。(The project was supported by the Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (No. 2020A1515110391).)

#### 参考文献

[1] 陈鹏旭,许波,陈振乾,等. 土壤源热泵埋管侧水系统优化运行研究[J]. 制冷学报, 2024, 45(1): 110-117. (CHEN Pengxu, XU Bo, CHEN Zhenqian, et al. Investigating optimal operation of buried pipe side water system of ground source heat pump [J]. Journal of Refrigeration, 2024, 45(1): 110-117.)

[2] 张宇航,孙博,张小松,等. 住宅地源热泵系统设计及冬季运行性能分析[J]. 制冷学报, 2020, 41(5): 89-95. (ZHANG Yuhang, SUN Bo, ZHANG Xiaosong, et

- al. Design and performance analysis under winter condition of a residential ground-source heat pump system [J]. *Journal of Refrigeration*, 2020, 41(5): 89-95.)
- [3] 徐伟, 杨芯岩, 张时聪. 中国近零能耗建筑发展关键问题及解决路径[J]. *建筑科学*, 2018, 34(12): 165-173. (XU Wei, YANG Xinyan, ZHANG Shicong. Key issues and solutions for the development of near-zero energy buildings in China[J]. *Building Science*, 2018, 34(12): 165-173.)
- [4] 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. (WEN Jiwei, HOU Junlong, LIU Xinghong, et al. Research and application progress of energy underground structures[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(10): 119-130.)
- [5] 丁宗保, 许健, 王煜哲, 等. 浅层地热埋管热泵设计运行分析[J]. *暖通空调*, 2023, 53(增刊1): 24-27. (DING Zongbao, XU Jian, WANG Yuzhe, et al. Design and operation analysis of shallow geothermal ground heat pump[J]. *Journal of HV & AC*, 2023, 53(Suppl. 1): 24-27.)
- [6] 郝梅. 地源热泵系统埋管设计和热平衡分析[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022. (HAO Mei. Design and thermal balance analysis of buried pipe in ground source heat pump system [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2022.)
- [7] SANI A K, SINGH R M, AMIS T, et al. A review on the performance of geothermal energy pile foundation, its design process and applications [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 106: 54-78.
- [8] 崔宏志, 黎海星, 包小华, 等. 非饱和黏土地层中相变能源桩热性能测试[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(5): 881-890. (CUI Hongzhi, LI Haixing, BAO Xiaohua, et al. Measured thermal characteristics of a phase change energy pile in unsaturated clay[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2022, 62(5): 881-890.)
- [9] YOU Tian, ZENG Weitao. Zoning operation of energy piles to alleviate the soil thermal imbalance of ground source heat pump systems[J]. *Energy and Built Environment*, 2023, 4(1): 57-63.
- [10] YOU Tian, ZHANG Yongzheng, ZHOU Sihan, et al. Investigation on the heat transfer performance of a novel composite energy geo-structure with energy piles and boreholes[J]. *Renewable Energy*, 2024, 220: 119614.
- [11] YOU Tian, LI Xianting, CAO Sunliang, 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.
- [12] ZHANG Wenke, ZHANG Linhua, CUI Ping, 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.
- [13] ZHANG Wenke, YANG Hongxing, FANG Liang, et al. Study on heat transfer of pile foundation ground heat exchanger with three-dimensional groundwater seepage[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 105: 58-66.
- [14] 杨军兵, 连星玮, 李军, 等. 地下水渗流对深层埋管式能源桩传热特性的影响[J]. *四川建筑科学研究*, 2023, 49(5): 66-76. (YANG Junbing, LIAN Xingwei, LI Jun, et al. The influence of groundwater seepage on the heat transfer characteristics of deep buried pipe energy pile [J]. *Sichuan Building Science*, 2023, 49(5): 66-76.)
- [15] LOU Yang, FANG Pengfei, XIE Xinyu, et al. Numerical research on thermal response for geothermal energy pile groups under groundwater flow [J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2021, 28: 100257.
- [16] 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 Weibo, YAN Chaoyi, ZHANG Laijun, et al. Heat transfer and thermal-mechanical coupling characteristics of an energy pile with groundwater seepage [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2022, 62(5): 891-899.)
- [17] CHEN Fei, MAO Jinfeng, CHEN Shangyuan, et al. Efficiency analysis of utilizing phase change materials as grout for a vertical U-tube heat exchanger coupled ground source heat pump system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 130: 698-709.
- [18] 李少华, 滕亦旺, 林楠, 等. 杭州某埋管地源热泵系统性能与地温场监测分析[J]. *河北工业大学学报*, 2022, 51(4): 80-86. (LI Shaohua, TENG Yiwang, LIN Nan, et al. Monitoring and analysis of ground temperature field for a ground source heat pump system in Hangzhou [J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2022, 51(4): 80-86.)
- [19] 黄勇. 地源热泵技术在杭州地区某住宅项目中的运用 [C]//第6届全国建筑环境与设备技术交流大会文集. 广州, 2015: 194-197. (HUANG Yong. Application of ground-source heat pump technology in a residential project in Hangzhou area [C]//Proceedings of the 6th National Building Environment and Equipment Technology Exchange Conference of China Survey and Design Association Building Environment and Equipment Branch. Guangzhou: 2015:194-197.)

- [20] MA D D, XIA G D, WANG J, et al. An experimental study on hydrothermal performance of microchannel heat sinks with 4-ports and offset zigzag channels[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 152: 157-165.
- [21] WU J M, ZHAO J Y, TSENG K J. Parametric study on the performance of double-layered microchannels heat sink [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 80: 550-560.

(上接第 51 页)

- [20] 吕超, 郑茂余. 土壤源热泵系统土壤热平衡的评价方法研究[J]. *制冷学报*, 2016, 37(3): 42-47. (LYU Chao, ZHENG Maoyu. Research on evaluation method of soil heat balance of ground-coupled heat pump system[J]. *Journal of Refrigeration*, 2016, 37(3): 42-47.)

#### 通信作者简介

游田, 女, 副教授, 深圳大学土木与交通工程学院,

#### 通信作者简介

李红艳, 女, 副教授, 青岛科技大学机电工程学院, 18661739996, E-mail: lihongyan@qust.edu.cn。研究方向: 机械结构强度分析。

#### About the corresponding author

Li Hongyan, female, associate professor, College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, 86-18661739996, E-mail: lihongyan@qust.edu.cn. Research fields: strength analysis of mechanical structure.

18210065523, E-mail: youtian@szu.edu.cn。研究方向: 能源地下结构, 光伏建筑一体化, 可再生能源利用, 建筑节能技术。

#### About the corresponding author

You Tian, female, associate professor, College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, 86-18210065523, E-mail: youtian@szu.edu.cn. Research fields: energy geo-structure, building integrated photovoltaics, renewable energy utilization, building energy efficiency.