文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-10
doi:10.12465/issn.0253-4339.20260710002

相变套管型地埋管换热器换热性能优化及经济性分析

丁舒媚　朱白茹　魏二剑

(河南工业职业技术大学建筑工程学院　南阳　473000)

摘　要　为研究低PCM体积占比的相变套管对地埋管换热器换热和经济性影响,本文基于COMSOL搭建了相变套管型地埋管换热器(phase-change sleeve-type ground heat exchanger,PCS-GHE)3D模型,通过优选PCM种类、体积掺量和导热系数提升了PCS-GHE传热性能,并结合工程案例评价了不同方案的建设成本。结果表明:PCM1(CA-LA-金属导热增强材料)具有较优的传热效果和循环蓄放热能力,更适合作为相变套管夹层材料。当PCM1掺量由10.73%增至30.60%时,第3天末,PCS-GHE总热阻增加约19.5%,其单位传热功率下降约20.3%,回填土温度下降约0.85 ℃。当导热系数由0.6增至1.8 W/(m·K)时,PCM层热阻和PCS-GHE总热阻分别下降约66.5%和38.4%,单位传热功率提升约42.6%。经济性分析表明,PCM1掺量增加导致建筑制冷所需建设投资成本上升;而PCM导热系数增加可有效节约建设投资成本。PCM1导热系数为1.8 W/(m·K)时,PCS-GHE建设成本最优,可节约26.3%和20.5%的PCM与建设投资成本。

关键词　相变套管;地埋管换热器;相变材料掺量;导热系数;经济性分析

中图分类号:TB61⁺1;TK529　　**文献标识码**:A

Optimization of Heat Transfer Performance and Economic Analysis for Phase-Change Sleeve-Type Ground Heat Exchanger

Ding Shumei　Zhu Bairu　Wei Erjian

(College of Civil Engineering, Henan University of Industry Technology, Nanyang 473000, China)

Abstract　A three-dimensional model of a phase-change sleeve-type ground heat exchanger (PCS-GHE) was developed using COMSOL to investigate the effects of a low PCM volume fraction in a phase-change sleeve on the heat transfer performance and construction cost economics. The heat-transfer performance of the PCS-GHE was improved by optimizing the PCM type, volume dosage, and thermal conductivity. The economic feasibility of construction was evaluated based on an engineering case study. The results show that PCM1, namely the CA-LA-metal thermal conductivity-enhancing material, exhibited a relatively high heat transfer performance, making it more suitable as a phase-change interlayer material for the sleeve. At the end of the third day, when the volume dosage of PCM1 increased from 10.73% to 30.60%, the total thermal resistance of the PCS-GHE increased by approximately 19.5%. The unit heat transfer power and backfill soil temperature decreased by approximately 20.3% and 0.85 ℃, respectively. When the thermal conductivity of PCM1 was increased from 0.6 to 1.8 W/(m·K), the thermal resistance of the PCM layer and the total thermal resistance of the PCS-GHE decreased by approximately 66.5% and 38.4%, respectively. The unit heat transfer power increases by approximately 42.6%. An increase in the volume dosage of PCM1 led to a higher construction investment for building cooling. In contrast, an increase in PCM thermal conductivity effectively reduces construction investment. When the PCM thermal conductivity was 1.8 W/(m·K), the construction cost of the PCS-GHE achieved the lowest cost, with the PCM cost and construction investment reduced by 26.3% and 20.5%, respectively.

Keywords　phase-change sleeve; ground heat exchanger; phase-change material dosage; thermal conductivity; economic analysis

浅层地热能的高效利用是降低建筑能耗和碳排放的重要途径[1]。地源热泵作为利用地热能为建筑供能的主要技术,其增强换热途径主要有:增强地埋管换热器的回填料和换热管导热、换热管形状和回填蓄热材料等[2]。其中相变材料(phase change material,PCM)作为储能材料可提升回填料的蓄热能

收稿日期:2026-07-10;修回日期:2026-08-05;录用日期:2026-09-22　　责任编辑:王亚薇

移动阅读

力并有效降低周围土体温度波动、改善热短路等问题[3]。

PCM在地埋管换热器(ground heat exchanger, GHE)中的作用效果主要由相变温度和相变潜热控制。已有研究表明,PCM的最佳熔化温度主要介于初始土壤温度和进水温度之间[4]。金光等[5]对比了PCM和土壤回填条件下GHE的换热能力,PCM回填时井内温度扩散缓慢,系统运行温度更低。杨卫波等[6]数值研究表明,随相变温度由19 ℃增至22 ℃,相变GHE的换热率逐渐降低。M. M. Mousa等[7]在GHE模型实验中指出,相变温度为24 ℃时,PCM蓄热能力在一个冷热循环中被完全利用。Fei Wenbin等[8]通过对比相变温度为20、25、30 ℃的PCM表明,相变温度较低的相变材料更适用于延长GHE的运行时间。Yang Weibo等[9]指出与22 ℃和25 ℃相比,PCM的相变温度为19 ℃时,土壤温度波动更稳定且有利于其热恢复。Cao Ziming等[10]模拟优化了夏季工况中相变GHE的换热性能,通过较低的相变温度(24 ℃)能够实现更出色的换热能力。Hu Chaoxin等[11]指出,与换热流体温度相比,PCM的最佳相变温度接近初始土体温度,并表现出较高的利用效率和换热性能。此外,随着PCM潜热的增加,PCM回填GHE的换热量呈上涨趋势[12-13]。具有高潜热的PCM能够在GHE系统运行过程中汲取更多地热能,有效提高了GHE的传热效率和换热总量[14]。

可见,优选PCM能够有效增强GHE的换热性能[15]。现有GHE的应用结构主要包含形状稳定的PCM直接回填[16],形状稳定的PCM与回填料拌合回填[8,17],U管和铜管封装PCM嵌入钻孔[7,18],PCM薄层近换热管水平布置等多种形式。Li Xiangli等[16]采用形状稳定的PCM回填钻孔,有效提升了GHE的换热性能。A. Aljabr等[17]对比了钻孔中心、外围环形和均匀分散等径向布置,低导热系数下PCM与回填灌浆混合更优。J. Pássaro等[18]提出改进双U管结构,其一单U管填充PCM提升GHE蓄热容量。G. Emmi等[19]对比了PCM薄层与传热表面直接接触及相距3 cm的结构,证明近换热器布置更有利于利用潜热。当前PCM在GHE结构中应用主要存在PCM掺量需求较大、运行过程中PCM利用不充分等问题。同时现有研究也指出PCM靠近换热管时促进PCM潜热利用;采用PCM回填GHE时,优先融化区域主要集中在换热管周围。因此,基于现有管壳式换热器结构[20],本文提出采用PCM近换热管封装成相变套管,集成相变套管型GHE结构(phase-change sleeve-type ground heat exchanger, PCS-GHE),优先发挥PCM蓄热潜能。

此外,PCM成本是实现PCM在GHE工程应用的主要限制因素。现有研究分析中,适用于GHE传热效率提升的相变温度选取18~30 ℃,如十六烷,相变温度约为20.4 ℃,单价约为200元/kg。若直接采用PCM回填钻孔将面临建设成本急剧增加,亦可能随地下水渗流发生PCM泄漏的问题;因此,PCM在GHE中的应用需要控制建设成本并有效提升其换热性能。

本文采用PCS-GHE替代PCM直接回填GHE方案,相变套管中PCM体积约占钻孔体积的10%~30%;不仅避免了PCM直接回填随地下水渗流流失,还大幅降低了PCM的单孔利用量和PCM回填GHE的建设成本。基于PCS-GHE分别优选PCM种类和体积掺量,并分析不同导热系数回填料对其换热性能的影响。最后,基于工程案例进行经济性分析,为实际工程提出可行的PCM利用方案。

1 模型构建

1.1 物理模型

本文采用PCS-GHE替代PCM直接回填方案,其三维计算域示意图如图1所示。土体和钻孔的深度分别为35 m和30 m;直径分别为3 m和0.2 m。相变套管的壁厚与PCM夹层厚度分别为2 mm和15 mm,PCM夹层体积占钻孔体积的10.6%。相变套管内径为20 mm,进出口中心间距为70 mm,且采用普通泥浆回填钻孔区域。该计算域足够大,可以避免计算过程中GHE热量传递受干扰,土体底部温度恒定。PCM、换热管、土体、普通泥浆等具体参数如表1所示。此外,本文借助COMSOL 6.1有限元软件开展PCS-GHE三维结构的瞬态换热数值模拟。换热管内流体流速为0.6 m/s,管内流动状态按湍流处理,采用标准$k-\varepsilon$湍流模型及壁函数计算管道的水流和换热。控制方程采用有限元方法进行离散求解,模拟收敛标准为能量方程残差小于10^{-6}、其余控制方程残差小于10^{-3}。为了简化计算,对模型进行如下假设:

1)换热流体为不可压缩的流体,且换热管内处于湍流流动状态。

2)忽略换热管、相变套管、PCM、回填材料及土体之间的接触热阻,同时不考虑地下水渗流对传热过程的影响。

3)固体材料均视为均匀、各向同性介质,除PCM相变过程外,其余材料热物性参数不随温度变化。

1.2 数值模型

流体流动的控制方程主要包括连续性方程、动

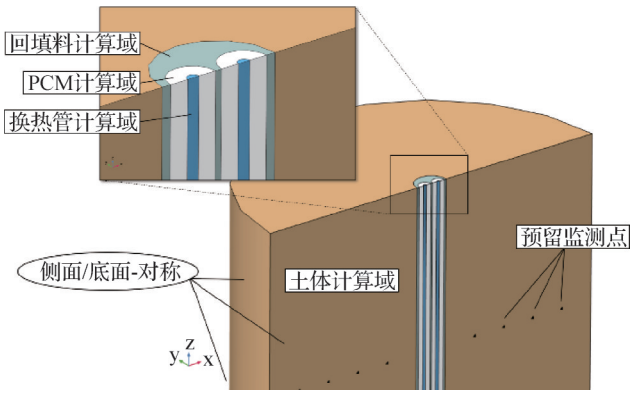


图1 PCS-GHE模型及计算域

Fig.1 PCS-GHE model and computational domain

表1 PCS-GHE模型及材料参数[5,14]

Tab.1 Model and material parameters of PCS-GHE [5,14]

参数	数值
土域直径/m	3.0
土域高/m	35.0
钻孔直径/mm	200
钻孔深/m	30.0
管内径/mm	20
管壁厚/mm	2
管中心距/mm	70
石墨烯改性PE管导热系数/[W/(m·K)]	0.9
管壁比热容/[J/(kg·K)]	1 460
管壁密度/(kg·m^3)	1 200
土体导热系数/[W/(m·K)]	2.1
土体比热容/[J/(kg·K)]	1 200
土体密度/(kg/m^3)	1 960
回填泥浆导热系数/[W/(m·K)]	1.72
回填泥浆比热容/[J/(kg·K)]	2 120
回填泥浆密度/(kg/m^3)	1 900
PCM比热容/[J/(kg·K)]	2 000
PCM密度/(kg/m^3)	881
PCM相变温度/℃	18.4~22.4
PCM潜热/(kJ/kg)	138.8
PCM掺量(占回填区域总体积比)/%	10~30
进口水温/℃	30
进水流速/(m/s)	0.6
计算时长/d	3

量方程和能量方程[4],分别为:

$$\frac{\partial \rho_{\mathrm{f}}}{\partial t}+\nabla\cdot\rho_{\mathrm{f}}v=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho_{\mathrm{f}}v}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho_{\mathrm{f}}\boldsymbol{v}_i v)=-\nabla p+\nabla\cdot(\tau) \tag{2}$$

$$\rho_{\mathrm{f}}c_{p,\mathrm{f}}\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u\cdot\nabla T\right)=\nabla\cdot(k_{\mathrm{f}}\nabla T)+Q_{\mathrm{f}} \tag{3}$$

式中:ρ为密度,kg/m^3;k为导热系数,W/(m·K);c_p为比定压热容,J/(kg·K);;下标f表示换热流体;p为静压,Pa;τ为表面切应力,Pa;v为换热流体速度,m/s;$\boldsymbol{v}_i$为换热流体在i方向的速度分量;T为温度,K;t为时间,s;Q_{f}为热源项,W/m^3。

固体区域的三维热传导方程[12]为:

$$\rho_{\mathrm{s}}c_{p,\mathrm{s}}\frac{\partial T}{\partial t}=\nabla\cdot(k_{\mathrm{s}}\nabla T)+Q_{\mathrm{s}} \tag{4}$$

式中:下标s表示固体材料属性。而相变套管则需采用热焓法进行热传递模拟,能量方程[10]、热焓计算如式(5)~式(7)所示:

$$\rho_{\mathrm{pcm}}\frac{\partial H}{\partial t}=\nabla\cdot(k_{\mathrm{pcm}}\nabla T) \tag{5}$$

$$H(T)=\int_{T\mathrm{ref}}^{T}c_{p,\mathrm{pcm}}(T)\mathrm{d}T+\beta(T)L \tag{6}$$

式中:H为PCM单位质量焓,J/kg;T_{ref}为参考温度,K;L为潜热,J/kg;下标pcm表示PCM。

$$\beta=\begin{cases}0, & T<T_{\mathrm{s}}\\ \dfrac{T-T_{\mathrm{s}}}{T_{\mathrm{l}}-T_{\mathrm{s}}}, & T_{\mathrm{l}}>T>T_{\mathrm{s}}\\ 1, & T>T_{\mathrm{l}}\end{cases} \tag{7}$$

式中:β为PCM液相体积分数;T_{s}为PCM凝固温度,K;T_{l}为PCM熔化温度,K。

1.3 换热性能评价指标

GHE的总传热速率Q(W)、单位传热速率Q_{m}(W/m)和总换热量Q_{total}(kW·h)的计算式[10]为:

$$Q=c_{p,\mathrm{f}}\rho_{\mathrm{f}}\boldsymbol{v}A(T_{\mathrm{in}}-T_{\mathrm{out}}) \tag{8}$$

$$Q_{\mathrm{m}}=Q/l \tag{9}$$

$$Q_{\mathrm{total}}=\frac{1}{3.6\times10^{6}}\int_{t_{\mathrm{start}}}^{t_{\mathrm{end}}}Q\mathrm{d}t \tag{10}$$

式中:A为换热管截面面积,m^2;T_{in}为换热管入口温度,K;T_{out}为换热管出口温度,K;l为GHE的换热管埋深,m。

圆柱壁单位长度热阻和PCS-GHE总热阻计算如下:

$$R'=\ln(r_{\mathrm{out}}/r_{\mathrm{in}})/2\pi k \tag{11}$$

$$R'_{\mathrm{PCS-GHE}}=R'_{\mathrm{pe-in}}+R'_{\mathrm{PCM}}+R'_{\mathrm{pe-out}}+R'_{\mathrm{soil}} \tag{12}$$

式中:R'为圆柱壁单位长度热阻,m·K/W;r_{in}为换热管内半径,m;r_{out}为换热管外半径,m;$R'_{\mathrm{PCS-GHE}}$、$R'_{\mathrm{pe-in}}$、R'_{PCM}、$R'_{\mathrm{pe-out}}$、R'_{soil}分别为PCS-GHE、换热管内壁、PCM层、换热管外壁、回填土的单位长度热阻,m·K/W。

1.4 边界条件

在GHE系统运行之前,U形管内的换热流体处于静止状态,所有模拟区域的初始温度相等,管壁处

的流动条件为无滑移边界。运行期间，U形管的入口设定为恒定流量，且流体温度为恒定的T_{in}[9]。

$$T(r=r_0,t)=T_0 \tag{13}$$

$$T(z=0,t)=T(z=30,t)=T_0 \tag{14}$$

式中：T_0为初始温度，17.4 ℃；r_0为土体半径，m；z为GHE埋深，m。

2 模型验证

表2所示为GHE模型的时间步长无关性验证分析数据，由表2可知，GHE数值模型的结果精度和合理性受时间步长与网格数量的影响。随着时间步长的增加，土体测点温度先保持平稳然后逐渐降低的趋势；尤其当时间步长大于0.10 h时，GHE运行8 h后，距钻孔0.2 m处土温开始明显下降，受时间步长影响，结果精度开始逐渐降低。由网格无关性验证可知，5.4×10^4网格数量对应的GHE出口水温较2.4×10^5网格精度下最大相差0.35 ℃，约1.9%；随着网格数量的进一步增加，土体温度的计算结果逐渐趋于一致。综合考虑模型计算精度和计算效率的基础上，简化了模型网格数量，本文最终选择时间步长为0.1 h，网格数量为236 770进行后续数值计算。

表2 GHE数值模型网格和时间步长无关性验证

Tab.2 Grid and time-step independence validation of the GHE numerical model

网格数量	土体温度/℃	时间步长	土体温度/℃
5.4×10^4	18.26	0.001	18.53
8.9×10^4	18.37	0.05	18.53
2.4×10^5	18.61	0.10	18.52
6.1×10^5	18.62	0.20	18.45
1.1×10^6	18.62	0.50	18.31

本文以PCM回填GHE模型实验进行模型校验[16]，如图2所示。流体流速为0.16 m/s，进口水温为45 ℃，具体参数详见表3。由图2可知，以钻孔0.2 m处的土体温度为参照，实验与模拟的土体温度随相变GHE运行时间的增加而上升，温度变化趋势一致；模拟与实验土温的平均绝对误差(mean absolute error，MAE)和均方根误差(root mean square error，RMSE)分别为0.099 ℃和0.120 ℃，表明数值结果与实验结果吻合较好；其温升误差约为14.8%，主要受实验环境和测试误差影响。

本文进一步参照管壳式换热铜管实验进行模型验证，其采用双层铝壳夹层填充PCM[20]，结果如图3所示。入口流体温度为140 ℃，流量为30 kg/min，换

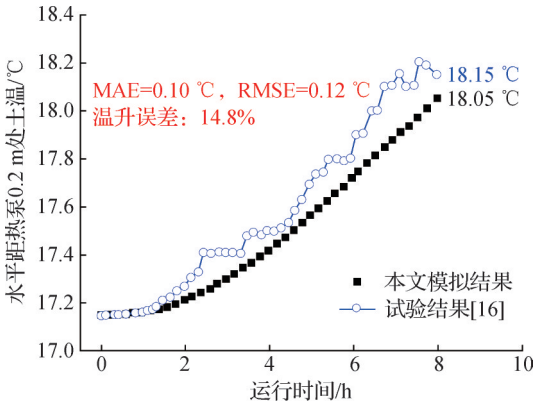


图2 PCM回填GHE的实验与模拟结果验证[16]

Fig.2 Validation between experimental and numerical simulation results for PCM-backfilled GHE[16]

表3 PCM回填GHE实验参数

Tab.3 PCM backfilling GHE test parameters

类别	具体参数
换热管	PE管：DN25，导热系数：0.42 W/(m·K)，比热容：2 300 J/(kg·K)，密度：950 kg/m^3
钻孔	孔深：0.8 m，孔径：150 mm，管间距：100 mm
土体	导热系数：1.8 W/(m·K)，比热容：1 640 J/(kg·K)，密度：1 600 kg/m^3
PCM	相变温度：20.3 ℃，潜热：128.6 kJ/kg，导热系数：0.235 W/(m·K)，比热容：1 960 J/(kg·K)，密度：880 kg/m^3

热管总长为1 m，内外径分别为25.5 mm和46.2 mm，采用保温棉进行绝热保温，初始温度为20 ℃，材料参数如表4所示。模拟与文献出口流体温度之间的MAE和RMSE分别为4.36 ℃和5.59 ℃。与文献实验温升94.44 ℃相比，模拟温升为99.36 ℃，温度相对误差为5.20%。综上，本文的模拟具有一定的合理性与准确性。

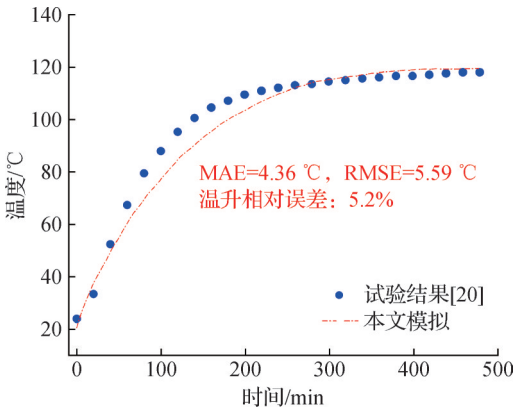


图3 相变套管实验与模拟结果验证[20]

Fig.3 Validation between experimental tests and numerical simulation results for PCM sleeve[20]

表4 相变套管实验参数

Tab.4 Parameters of PCM sleeve[20]

类别	具体参数
换热管	外壁厚:3 mm,内壁厚:1.5 mm;内、外径分别为25.5、46.2 mm
铝壳	导热系数:237 W/(m·K),比热容:900 J/(kg·K),密度:2 700 kg/m^3
PCM	相变温度:117.7 ℃,潜热:339.3 kJ/kg,导热系数(固/液):0.733/0.326 W/(m·K),比热容(固/液):1 380/2 760 J/(kg·K),密度(固/液):1 480/1 300 kg/m^3

3 结果与讨论

3.1 不同PCM影响

提升PCM利用效率和GHE的换热性能是GHE工程项目的核心目标。因此,本节选取PCM1、PCM2、PCM3作为相变夹层基材分别分析了PCM对PCS-GHE的换热性能影响,具体PCM属性如表5所示。由图4可知,在单个运行-间歇周期内,PCM液化率与回填土平均温度均表现为运行阶段升高、间歇阶段降低的周期性变化;GHE运行过程中的传热功率呈现逐渐降低趋势。图4(a)中,第3日末,PCM1、2、3对应的单位传热功率分别为31.65、20.75、20.70 W/m。与PCM1相比,PCM2和PCM3对应的GHE传热功率分别降低约10.9 W/m和10.95 W/m,降幅分别为34.4%和34.6%。图4(b)和(c)中,PCM1在运行时能够充分熔化吸热、间歇时大幅凝固恢复,在运行周期持续发挥储能能力,第3日回填土峰值温度为21.96 ℃;PCM2在运行初期即快速融化,在间歇期间恢复率最低,第3日回填土峰值温度为23.47 ℃;PCM3的储能能力在运行时利用率超90%,并且在间歇期间完全恢复,第3日回填土峰值温度为23.49 ℃。与PCM1相比,PCM2和PCM3对应的回填土平均温度分别增加约1.51 ℃(6.9%)和1.53 ℃(7.0%)。PCM2的相变温度接近土体温度且相变区间较窄,在运行初期迅速完全熔化。间歇时,PCM与回填土温差较小,PCM层向外散热比例较低,导致其储能能力无法高效循环利用,故PCM2不适合工程应用。PCM3的相变温度和相变区间较高,潜热吸热触发较迟缓,部分热量传递至回填土和周围土体,易引起回填土升温积热和传热功率降低。综合单位传热功率、PCM液化率和回填料温度,PCM1在PCS-GHE中表现出更优的换热能力和循环储能能力,更适合作为相变夹层材料。

3.2 不同PCM体积掺量影响

随着PCM体积掺量的增加,相变回填GHE的蓄热能力提升带动GHE的传热能力上涨。然而,采用PCM直接回填的成本较高,且利用率需要进一步优化提升。为此,本节分别考虑了10.73%、20.16%和30.6% PCM体积掺量来分析PCS-GHE的换热性能,结果如图5和表6所示。由图5(a)可知,随着PCM掺量增加,PCS-GHE的单位传热功率呈现逐渐降低的趋势。第3天末,PCM体积掺量为10.73%、20.16%、30.6%对应的单位传热功率分别为31.65、26.33、25.23 W/m。与10.73%掺量相比,20.16%和30.60%掺量下的单位传热功率分别降低约5.32 W/m和6.42 W/m,降幅分别为16.8%和20.3%。由表6可知,随PCM掺量增加,PCM夹层厚度增大,PCS-GHE的总热阻由0.375 m·K/W增至0.448 m·K/W,增幅约为19.5%。该结果表明,增加PCM掺量虽然提高了潜热储能容量,但同时增大了径向传热热阻,限制了换热管内热量向PCM夹层及周围土体的传递,从而导致单位传热功率下降。

由图5(b)可知,随PCM掺量增加,PCM均呈现较高利用率,而恢复效果逐渐下降。第1天末,10.73%、20.16%和30.60% PCM掺量的液化率分别为7.27%、21.11%和23.30%;第3天末分别增至27.22%、39.91%和41.13%。图5(c)所示为不同PCM掺量下回填料平均温度变化。随着运行时间的增加,回填料平均温度均呈周期性升降变化,且日峰值温度逐渐升高。第3天时,PCM掺量为10.73%、20.16%、30.60%对应的最高平均温度分别为21.96、

表5 不同PCM材料属性

Tab.5 Properties of different PCM materials

PCM种类	密度/(kg/m^3)	比热容/[J/(kg·K)]	导热系数/[W/(m·K)]	相变温度/℃	相变潜热/(kJ/kg)	单价/(元/kg)
PCM1[5](CA:LA=66:34+金属导热增强材料)	881	2 000	0.6	18.4~22.4	138.8	27.1
PCM2[21](HD:HDPE=7:3+2.5%EG)	980	2 200	0.6	18.02~20.02	139.9	48.7
PCM3[22](C17:EG=10:1)	890	2 100	0.6	19.86~26.86	163.15	57.0

注:CA、LA、HD、C17、HDPE和EG分别为癸酸、月桂酸、十六烷、正十七烷、高密度聚乙烯和膨胀石墨;其中,PCM1的金属导热增强材料组分并未在原论文中阐明,本文基于CA-LA的导热系数与Bruggeman公式逆推,假定掺入方案为质量分数38.2%的铝粉[23-24]。

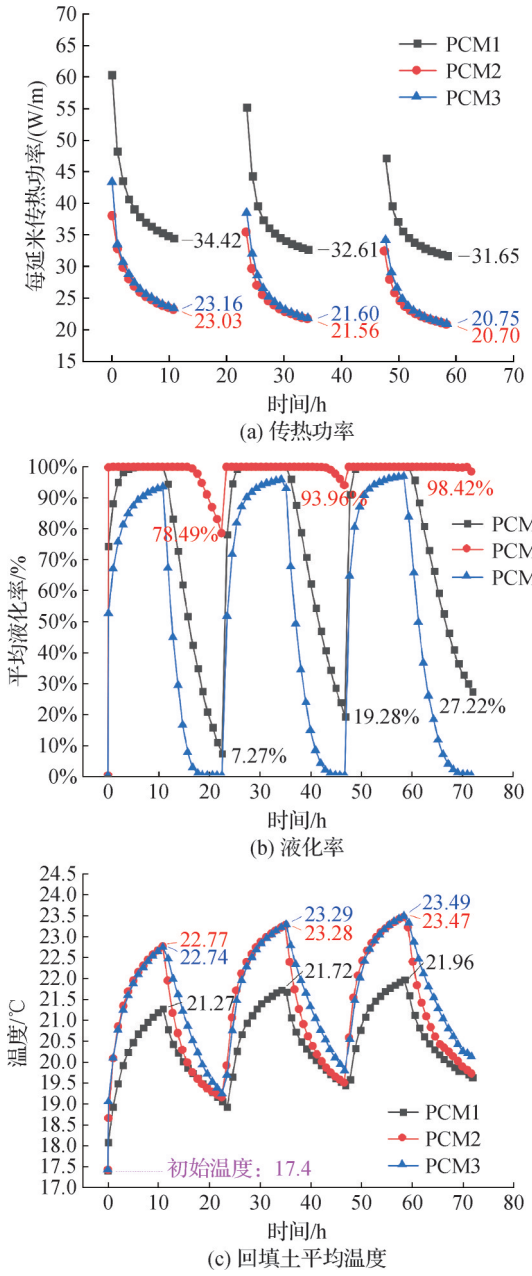


图 4 不同种类 PCM 对 PCS-GHE 换热性能的影响

Fig.4 Effects of different PCMs on heat transfer performance of PCS-GHE

21.48、21.11 ℃。与 10.73% 掺量相比，20.16% 和 30.60% 掺量下的最高平均温度分别降低 0.48 ℃和 0.85 ℃。随着 PCM 掺量的增加，相变套管的潜热储能能力增强，更多热量以潜热形式暂存在 PCM 夹层中，相同间歇时间内难以完全释放，导致其液化率恢复幅度逐渐降低，回填土升温放缓。增加 PCM 掺量有利于降低回填料温度波动和热积累，但会削弱相同间歇时间内 PCM 的液化恢复效果。综上，增加 PCM 掺量有利于提升相变套管的储热能力，并改善回填料温度控制效果；但高 PCM 掺量下热阻增加反而限制了 PCM 储存的热量向土体中传递。因此，低掺量 PCM 具有较低热阻和较高单位传热功率，高掺量 PCM 具有更强温度控制能力但循环恢复较差，相变套管中 PCM 掺量需要在传热强化和热阻增加之间寻求平衡。与常规 PCM 回填 GHE 相比，PCS-GHE 中 PCM 集中在换热管附近，其厚度变化会直接影响径向传热热阻，故呈现不同的换热性能变化规律。

3.3 不同 PCM 导热系数影响

PCM 的低导热系数导致 PCS-GHE 的径向热阻增高，限制了换热流体向 PCM 夹层及回填料释放热量；而提高 PCM 导热系数有助于降低 PCM 层热阻，增强系统换热能力。本节选取 PCM 导热系数为 0.6、1.2、1.8 W/(m·K)进行 PCS-GHE 的换热性能分析。由图 6 和表 7 可知，随着 PCM 导热系数的增加，PCS-GHE 的单位传热功率和回填土平均温度逐渐增加，液化恢复效果和热阻呈现下降趋势。第 3 天末，PCM 导热系数为 0.6、1.2、1.8 W/(m·K) 时，PCS-GHE 的单位传热功率和回填土平均温度分别为 31.65、41.01、45.20 W/m 和 21.96、23.35、24.04 ℃；与 0.6 W/(m·K)相比，导热系数为 1.2、1.8 W/(m·K)时，GHE 单位传热功率和回填土平均温度分别提升约 9.3 W/m (29.3%) 和 1.39 ℃(6.3%)、13.5 W/m (42.6%) 和 2.08 ℃(9.5%)。当 PCM 导热系数从 0.6 W/(m·K) 增至 1.8 W/(m·K)时，PCM 层和 GHE 的单位长度总热阻显著降低，降幅分别达 66.5% 和 38.4%。虽然增加 PCM 导热系数导致回填土温度升高、降低了换热流体与土体的温差，但 PCS-GHE 总热阻降低的传热强化作用占主导，使相同换热流体温度下，GHE 能向土壤中释放更多热量，PCM 导热增加带来的换热增益大于温度差缩小的换热损失。此外，PCM 在间

表 6 不同 PCM 体积掺量下 PCS-GHE 热阻变化

Tab.6 Variation of thermal resistance for PCS-GHE under different PCM volume dosage

PCM1 掺量/%	内管壁 m·K/W	PCM 层		外管壁 m·K/W	回填土 m·K/W	总热阻 m·K/W	PCM 占比/%
		厚/mm	m·K/W				
10.73	0.032	15	0.215	0.013	0.115	0.375	57.3
20.16	0.032	23	0.284	0.010	0.092	0.418	67.9
30.60	0.032	30	0.332	0.008	0.076	0.448	74.1

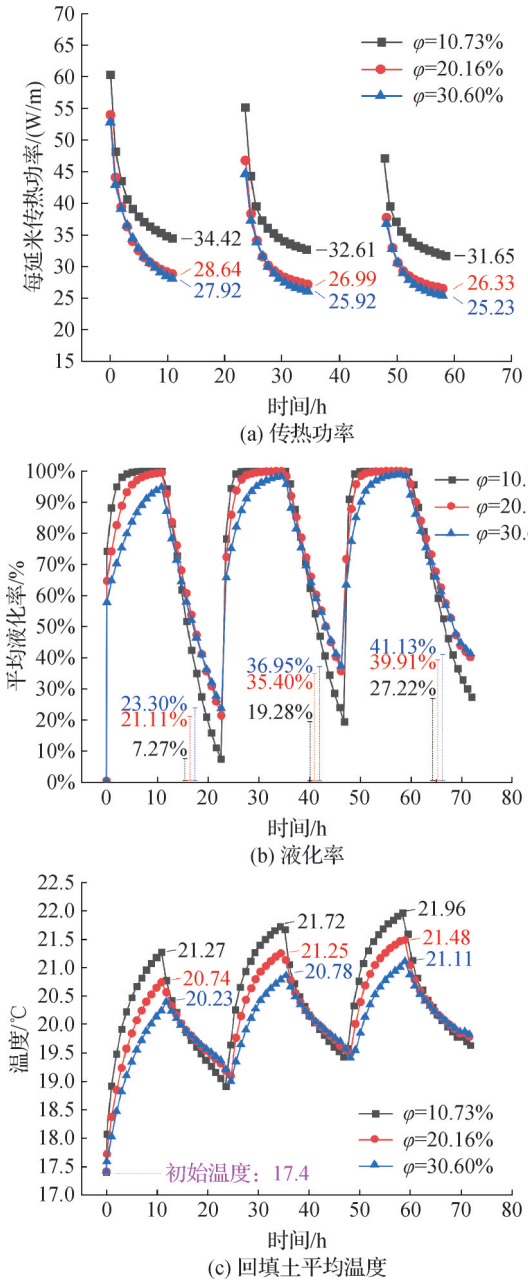


图5 不同PCM体积掺量对PCS-GHE的影响

Fig.5 Effects of PCM volume dosage on PCS-GHE

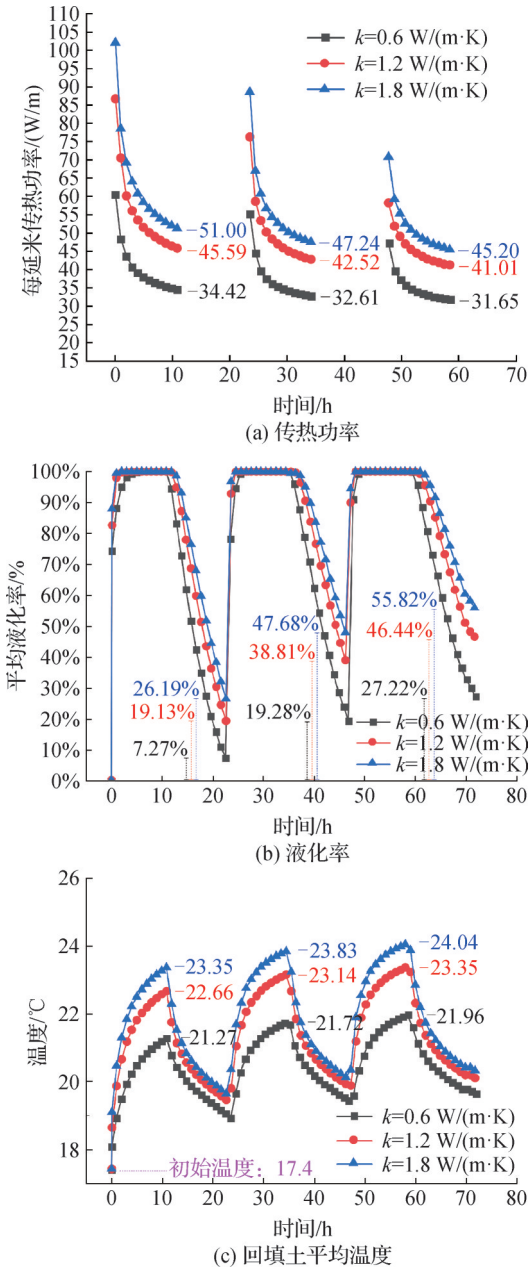


图6 不同PCM导热系数对PCS-GHE换热性能的影响

Fig.6 Effects of different PCM thermal conductivities on heat transfer performance of PCS-GHE

歇期间恢复率逐渐降低,且导热系数越高,恢复效果越差;高导热向回填土中传递更多热量,回填土温度逐渐接近PCM降温凝固阈值,导致PCM向外散热效率降低、恢复效果减弱,后续运行-间歇循环过程中,PCM储热余量减少。因此,PCM导热系数增加可带来换热增益效果,但同时会引起回填土积热,降低PCM重复利用效率,在增加PCM导热系数时,应同步考虑传热功率、回填土温度和PCM恢复效果,避免追求过高导热引起PCM储能失效。

表7 不同PCM导热系数下PCS-GHE单位长度热阻变化

Tab.7 Variation of thermal resistance per unit length for PCS-GHE under different PCM thermal conductivities

PCM1-导热系数/[W/(m·K)]	PCM层热阻/(m·K/W)	总热阻/(m·K/W)	PCM热阻降幅/%	总热阻降幅/%
0.6	0.215	0.375	—	—
1.2	0.108	0.267	49.8	28.8
1.8	0.072	0.231	66.5	38.4

3.4 经济性分析

低PCM占比的PCS-GHE的成本直接关乎其工程应用可行性。本文以河南平舆"坝道工程医院"为例进一步分析PCS-GHE的经济性。该建筑总建筑面

积约329.7 m²,年累计冷负荷约7.02×10⁷ kJ[25]。表8所示为不同PCS-GHE建设投资成本估算结果,由PE管、PCM、钻孔和设备费用组成;并依据建筑累计冷负荷和第3天PCS-GHE的日总换热量进行满足建筑制冷所需的GHE井数、PE管和PCM用量估算[26];适用于本文设定的运行工况和短期评价周期,可作为方案间对比及初步设计参考。其中,钻孔、PE管单价分别为90元/m和8.85元/m;设备费用为4.3万元。以PCM1为参照,随PCM种类和掺量变化,建筑制冷所需GHE井数及建设投资成本均大幅增加;而PCM导热系数增加可有效节约钻孔、PE管和PCM的成本,降低建设投资成本。由于PCM3的单价最高且换热效果弱于PCM1,其PCM成本增幅约227.3%。而PCM1-30.6%掺量工况中,PCM1用量上涨约2倍,PCM和建设投资成本分别上涨约207.7%和100.0%,但较高热阻弱化了PCS-GHE的传热效果。导热系数增加有效提升了PCS-GHE的传热能力,PCM1-1.2 W/(m·K)和PCM1-1.8 W/(m·K)工况下PCM和建设投资成本分别节约18.9%、26.3%和14.6%、20.5%。综合换热能力与经济性分析,PCM1-1.8 W/(m·K)可有效控制PCS-GHE的投资成本且满足坝道工程医院的年制冷负荷的初步估算。

为进一步验证PCS-GHE的经济性,保持了相同的PCM1-1.8 W/(m·K)掺入比(10.73%)进行普通相变回填。结果表明,与PCM1-1.8 W/(m·K)的工况相比,直接回填的单孔日换热量下降12.7%,钻孔数增加,固定投资成本增加1.2万元,增幅10.0%。PCS-GHE可有效促进PCM潜热利用,提升其换热能力,节约工程投资。

$$N = \frac{1.15Q_{\text{year}}}{Q_{\text{day}}} \tag{15}$$

$$L_{\text{pe}} = N \times 2l \tag{16}$$

$$C_{\text{construction}} = C_{\text{pe}} + C_{\text{PCM}} + C_{\text{pore}} + C_{\text{device}} \tag{17}$$

式中:L_{pe}为PE管总长,m;N为钻孔总数,个;Q_{day}为单孔日总换热量,kJ;Q_{year}为全年制冷负荷,kJ;$C_{\text{construction}}$、C_{pe}、C_{PCM}、C_{pore}、C_{device}分别为建设投资成本、PE管、PCM、钻孔和设备费用,万元;其中设备费用为4.3万元。

此外,PCM1-1.2 W/(m·K)和PCM1-1.8 W/(m·K)这2种工况下,按照铝粉质量掺入分数进一步提升至50.9%和54.7%进行理论估算,单价分别为28.6元/kg和29.1元/kg。同时,由于缺乏金属导热增强材料对潜热、密度及实际导热性能影响的实验数据,本文暂保持相关参数不变,以单独分析导热系数对PCS-GHE换热性能的影响及揭示可行性优化方向。

表8 PCS-GHE经济性分析

Tab.8 Economic analysis on PCS-GHE

PCM工况	日总换热量/kJ	钻孔		PE管		PCM		建设投资成本	
		数量/个	费用/万元	长度/m	费用/万元	费用/万元	节约比例/%	费用/万元	节约比例/%
PCM1-参照	33 177.2	14	3.7	810.7	0.7	6.4	—	15.1	—
PCM2	21 349.7	16	4.2	939.4	0.8	13.8	-117.7	23.1	-53.0
PCM3	22 927.7	16	4.2	930.5	0.8	20.8	-227.3	30.1	-99.3
PCM1-20.2%掺量	28 634.2	21	5.7	1 259.9	1.1	19.7	-210.7	30.8	-104.0
PCM1-30.6%掺量	28 905.4	20	5.3	1 173.2	1.0	19.6	-207.7	30.2	-100.0
PCM1-1.2 W/(m·K)	43 199.2	10	2.8	622.6	0.6	5.2	18.9	12.9	14.6
PCM1-1.8 W/(m·K)	48 329.3	9	2.5	556.6	0.5	4.7	26.3	12.0	20.5
PCM1-1.8 W/(m·K)回填	42 191.5	11	2.9	637.5	0.6	5.4	15.6	13.2	12.6

4 结论

本文基于COMSOL搭建了相变套管型地埋管换热器(PCS-GHE)三维模型,通过优选PCM种类、掺量和导热系数提升了PCS-GHE的换热性能,并结合工程案例对其建设成本经济性进行了评价。得到结论如下:

1)PCM种类对PCS-GHE的换热性能具有显著影响。PCS-GHE采用PCM1(CA-LA-金属导热增强材料)的换热效果和建设经济成本均优于采用PCM2(HD-HDPE-EG)和PCM3(C17-EG)。

2)PCM掺量越高,PCS-GHE总热阻越高,传热功率减弱;随着PCM导热系数提升,其热阻大幅下降,传热功率显著增加。第3天末,随着PCM掺量增加2倍,PCS-GHE总热阻增加约19.5%,其单位传热功率下降约20.3%,回填土温度下降约0.85 ℃

(3.9%);导热系数增至1.8 W/(m·K)时,PCM层热阻和PCS-GHE总热阻分别下降约66.5%和38.4%,单位传热功率提升约42.6%。

3)随着PCM种类变化和PCM1掺量的增加,建筑制冷所需建设投资成本大幅增长;而PCM导热系数增加可有效节约建设投资成本。当PCM1导热系数为1.8 W/(m·K)时,PCS-GHE建设投资成本最优,可分别节约26.3%和20.5%的PCM与建设投资成本。

本文研究局限性:本文结果适用于不同PCM方案的短期性能对比,对于长期循环稳定性、完整制冷/制热季运行性能及多年土壤热积累效应,仍需开展更长时间尺度的研究。PCM配比改变引起的参数变化及经济性波动仍需进一步开展实验研究。

本文受2025年度河南省高等学校重点科研项目计划(25A560025)资助。(The project was supported by the 2025 Key Research Program of Henan Provincial Universities (No. 25A560025).)

参考文献

[1] 游田,张永正,罗丹.渗流作用下复合能源地下结构的协同传热机理[J].制冷学报,2025,46(4):44-51.(You Tian, Zhang Yongzheng, Luo Dan. Synergistic heat transfer mechanism of a composite energy geo-structure under seepage conditions [J]. Journal of Refrigeration, 2025, 46(4): 44-51.)

[2] 张远艳,陶修,陈谋,等.考虑岩土分层的不同管材地埋管换热器换热性能研究[J].太阳能学报,2024,45(10):764-770.(Zhang Yuanyan, Tao Xiu, Chen Mou, et al. Study on heat transfer performance of ground heat exchangers with different pipes considering layered stratum [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(10): 764-770.)

[3] 张玟,郝斌尧,王胜,等.地源热泵系统中钻孔回填材料研究进展[J].钻探工程,2021,48(8):96-102.(Zhang Wen, Hao Binyao, Wang Sheng, et al. Research progress on borehole backfill materials in ground source heat pump systems [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(8): 96-102.)

[4] Chen Fei, Mao Jinfeng, Li Chaofeng, et al. Restoration performance and operation characteristics of a vertical U-tube ground source heat pump system with phase change grouts under different running modes[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 141: 467-482.

[5] 金光,王冰,吴晅,等.相变回填材料地埋管的传热特性与运行分析[J].硅酸盐通报,2018,37(9):2794-2801.(Jin Guang, Wang Bing, Wu Xuan, et al. Numerical simulation of ground source heat pump with phase change backfills materials [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(9): 2794-2801.)

[6] 杨卫波,徐瑞,杨晶晶,等.相变材料回填地埋管换热器热响应特性的数值模拟及试验验证[J].流体机械,2019,47(7):72-79.(Yang Weibo, Xu Rui, Yang Jingjing, et al. Numerical simulation and experimental validation of the thermal response characteristics of ground heat exchanger with PCM backfill [J]. Fluid Machinery, 2019, 47(7): 72-79.)

[7] Mousa M M, Bayomy A M, Saghir M Z. Phase change materials effect on the thermal radius and energy storage capacity of energy piles: Experimental and numerical study [J]. International Journal of Thermofluids, 2021, 10: 100094.

[8] Fei Wenbin, Bandeira Neto L A, Dai Sheng, et al. Numerical analyses of energy screw pile filled with phase change materials [J]. Renewable Energy, 2023, 202: 865-879.

[9] Yang Weibo, Sun Taofu, Yang Binbin, et al. Laboratory study on the thermo-mechanical behaviour of a phase change concrete energy pile in summer mode [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 41: 102875.

[10] Cao Ziming, Zhang Guozhu, Liu Yiping, et al. Thermal performance analysis and assessment of PCM backfilled precast high-strength concrete energy pile under heating and cooling modes of building [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 216: 119144.

[11] Hu Chaoxin, Gu He, Luo Jin, et al. Numerical study on heat restoration cycle performance of energy pile with backfilling PCM [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 61: 105047.

[12] 王畅.相变材料回填地埋管换热器换热特性研究[D].成都:西南交通大学,2018.(Wang Chang. Study on heat exchange characteristics of ground tube heat exchanger with phase change material backfill [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.)

[13] Deng Zhenpeng, Nian Yongle, Liu Qun, et al. Numerical analysis of borehole heat exchanger using a single shape-stabilized phase change material in heating and cooling seasons[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 70: 107897.

[14] Daneshazarian R, Eslami R, Azizi N, et al. Performance evaluation of a novel nano-enhanced phase change material for thermal energy storage applications [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 74: 109376.

[15] Alavy M, Shirazi P, Rosen M A. Effectiveness of phase change materials and their properties on the performance of geothermal and foundation-based energy systems: a review [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 246: 122903.

[16] Li Xiangli, Tong Cang, Duanmu Lin, et al. Research on U-tube heat exchanger with shape-stabilized phase change backfill material[J]. Procedia Engineering, 2016, 146: 640-647.

[17] Aljabr A, Chiasson A. Numerical modeling of the effects of the radial and axial location of added micro-encapsulated phase change materials in vertical borehole heat exchangers[J]. Geothermics, 2023, 110: 102684.

[18] Pássaro J, Rebola A, Coelho L, et al. Numeric study of geothermal borehole heat exchanger enhancement *via* phase change material macro encapsulation [J]. International Journal of Thermofluids, 2022, 16: 100245.

[19] Emmi G, Bottarelli M. Enhancement of shallow ground heat exchanger with phase change material[J]. Renewable Energy, 2023, 206: 828-837.

[20] Agyenim F, Eames P, Smyth M. A comparison of heat transfer enhancement in a medium temperature thermal energy storage heat exchanger using fins[J]. Solar Energy, 2009, 83(9): 1509-1520.

[21] 王世慧. 粮仓相变能源桩热力学性能试验研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2024. (Wang Shihui. Experimental study on thermodynamic performance of granary phase change energy pile [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2024.)

[22] 常远, 张世杰, 郑晨潇, 等. 膨胀石墨/石蜡-正十七烷复合相变材料制备及蓄热单元性能研究[J]. 炭素技术, 2026, 45(4): 32-39. (Chang Yuan, Zhang Shijie, Zheng Chenxiao, et al. Preparation of composite phase change materials and simulation study on the performance of phase change heat storage unit [J]. Carbon Techniques, 2026, 45(4): 32-39.)

[23] Bruggeman D A G. Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen[J]. Annalen der Physik, 1935, 416(7): 636-664.

[24] Brent R P. An algorithm with guaranteed convergence for finding a zero of a function[J]. The Computer Journal, 1971, 14(4): 422-425.

[25] 王福慧, 孔纲强. 桩基埋管地源热泵与空气源热泵系统对比研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2025, 45(2): 477-484. (Wang Fuhui, Kong Gangqiang. Comparative study of pile foundation ground-source heat pump systems and air-source heat pump systems [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2025, 45 (2): 477-484.)

[26] 穆玄, 裴鹏, 杨斌, 等. 岩溶地区竖直埋管热泵系统建设成本分析——以某地源热泵项目为例[J]. 建筑经济, 2022, 43(增刊1): 299-304. (Mu Xuan, Pei Peng, Yang Bin, et al. Analysis of construction cost of vertical buried heat pump system in karst area: taking a ground source heat pump project as an example[J]. Construction Economy, 2022, 43(S1): 299-304.)

通信作者简介

丁舒媚,女,讲师,河南工业职业技术大学建筑工程学院,13523677188,E-mail:tjpp122@sina.com。研究方向:土木工程技术、绿色低碳、工程管理方向研究。

About the corresponding author

Ding Shumei, female, lecturer, College of Civil Engineering, Henan University of Industry Technology, 86-13523677188, E-mail: tjpp122@sina.com. Research fields: civil engineering technology, green and low-carbon, and engineering management.