

DOI: 10.19666/j.rlfed.202308136

# 含重晶石粉回填料提升地埋管换热能力研究

刘爱华<sup>1,2</sup>, 郑佳<sup>1,2</sup>, 贾子龙<sup>1,2</sup>, 刘冰<sup>1,2</sup>, 许真瑞<sup>1,2</sup>, 王哲<sup>1,2</sup>  
(1.北京市地热调查研究所, 北京 102218; 2.自然资源部浅层地热能重点实验室, 北京 100195)

**[摘要]** 为研究含重晶石粉回填料对平原区第四系和山区岩石地层钻孔地埋管换热能力的影响, 开展了导热系数测试实验对比分析、现场热响应实验和长期运行条件的模拟计算。平原区第四系钻孔采用中砂回填, 山区基岩钻孔采用水泥砂浆回填。室内导热系数测试发现: 中砂回填料中重晶石粉质量分数为5%时, 导热系数提升14.3%; 水泥砂浆中添加5%的重晶石粉, 导热系数提升7.3%。钻孔现场热响应测试发现: 同一场地内夏季工况下, 平原区含5%重晶石粉回填料钻孔地埋管延米换热量提高2.4 W/m, 换热效率提升3.5%; 山区内含5%重晶石粉水泥砂浆回填料钻孔地埋管延米换热量提高2.7 W/m, 换热效率提升3.9%。经数值模拟计算, 钻孔回填料重晶石粉质量分数提升至10%, 地埋管延米换热能力提升约6.0%。总体上添加重晶石粉后地埋管换热能力得到提高且可持续性较好。

**[关键词]** 地埋管; 回填料; 重晶石粉; 热响应测试; 延米换热量

**[引用本文格式]** 刘爱华, 郑佳, 贾子龙, 等. 含重晶石粉回填料提升地埋管换热能力研究[J]. 热力发电, 2024, 53(3): 67-73.  
LIU Aihua, ZHENG Jia, JIA Zilong, et al. Heat transfer capacity analysis of buried pipe borehole with barite powder backfill[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(3): 67-73.

## Heat transfer capacity analysis of buried pipe borehole with barite powder backfill

LIU Aihua<sup>1,2</sup>, ZHENG Jia<sup>1,2</sup>, JIA Zilong<sup>1,2</sup>, LIU Bing<sup>1,2</sup>, XU Zhenrui<sup>1,2</sup>, WANG Zhe<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Geothermal Research Institute, Beijing 102218, China;

2. Key Laboratory of Shallow Geothermal Energy, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Beijing 100195, China)

**Abstract:** In order to study the effect of backfilling containing barite powder on the heat transfer efficiency of buried pipe boreholes in plain and mountainous areas of Beijing, a comparative analysis of laboratory experiments and field thermal response experiments was carried out. The quaternary boreholes in plain areas were backfilled with medium sand and the bedrock boreholes in mountainous areas were backfilled with cement mortar. When the specific gravity of medium sand barite powder was 5%, the thermal conductivity of medium sand backfill samples increased by 14%. When 5% barite powder was added to cement mortar, the thermal conductivity increased 7.3%. According to the field thermal response test results, under summer conditions in the same site, the heat transfer rate of a backfilling borehole containing barite powder increased by 2.4 W/m and 3.5% per meter compared with that of the medium-sand backfilling borehole in plain area. The heat transfer rate of cement mortar backfill containing barite powder increased by 2.7 W/m and 3.9% per meter. The numerical simulation model of the quaternary system and bedrock area was established. It was found that the content of barite powder increased to 10% and the heat transfer rate of boreholes increased by about 6.0%. In general, the heat transfer capacity of buried pipe is improved and its sustainability gets better after adding barite powder.

**Key words:** barite powder; backfill material; barite powder; thermal response test; heat transfer rate

浅层地热能开发利用是近年来清洁可再生能源领域的重要研究方向<sup>[1-5]</sup>。浅层地热能开发利用主

要通过地埋管地源热泵方式实现。增进地层导热性能有助于提高地埋管换热能力, 进而提升地源热泵

收稿日期: 2023-08-18 网络首发日期: 2023-10-17

基金项目: 北京市财政资助项目(11000023T000002056332)

Supported by: Beijing Municipal Bureau of Finance (11000023T000002056332)

第一作者简介: 刘爱华(1984), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为浅层地热能开发利用技术, liuaihua0129@163.com。

工作效率。其中, 钻孔回填料是提升钻孔地层导热性能的重要方式之一<sup>[6-9]</sup>。

近年来提高地埋管回填料的配比物质及测试方法呈现多样化, 国内外学者开展了钻孔不同回填料配制研究, 新材料、新手段不断涌现<sup>[10-11]</sup>, 膨润土<sup>[12]</sup>、水泥<sup>[13]</sup>、粉煤灰<sup>[14]</sup>、石英砂<sup>[15]</sup>、石墨<sup>[16]</sup>、土砂混合物<sup>[17]</sup>等材料均加入了回填料配比研究中。在各类回填料配比研究中, 笔者前期曾考虑重晶石粉化学性质稳定, 不溶于水、酸、碱与有机中介, 无磁性和毒性等特征, 在实验室内开展了中砂回填料中加入重晶石粉导热系数测试研究。研究发现, 在饱水条件下, 随着重晶石粉含量的增加, 回填料导热系数逐步升高<sup>[18-19]</sup>。

目前, 随着浅层地热能的开发利用, 平原区和山区内地埋管钻孔普遍应用。平原区第四系厚度一般大于钻孔厚度 (150 m), 山区为岩石地层地区。含重晶石粉回填料室内测试可提高回填料 (中砂) 换热能力。但在地埋管钻孔内现场换热时, 是否会因加入含重晶石粉回填料换热能力获得提升尚不可知。平原区和山区内含重晶石粉回填料地埋管钻孔换热能力是否存在差异性以及差异有多大, 仍有待于测试研究。本文从室内测试与野外换热测试及数值模拟计算结果等 3 个方面进行对比分析, 说明不同岩性地区含重晶石粉回填料提升钻孔换热能力的贡献程度。

## 1 含重晶石粉回填料导热能力室内测试

### 1.1 样品采集与配制

从北京市通州西集镇 (平原区) 地埋管地源热泵示范工程项目现场采集 1 号中砂回填料, 饱水后制成样品 TX-1。在回填料中分别混合 1%、2%、3%、4%、5%、6%、7%、8%、9%、10% 等 10 个不同质量分数的重晶石粉, 分别连续编号为 TX-2—TX-11, 连同不含重晶石粉的中砂样品, 共制成 11 个饱水样品。

从北京市通州副中心 (平原区) 2 个钻孔处分别采集 2 号和 3 号中砂样品。将中砂回填料样品饱水后制成 TF-1、TC-1, 在 TF-1 样品中加入质量分数为 5% 的重晶石粉, 在 TC-1 样品中加入质量分数为 50% 的重晶石粉, 制成 2 个饱水样品, 分别编号为 TF-2、TC-2。

从北京市平谷区南叉镇地源热泵示范工程项目现场采集回填料用膨润土、水泥和中砂原料, 配比

制成膨润土水泥砂浆回填料。水泥砂浆的配比为中砂:水泥:膨润土为 3.0:1.0:0.5。混入 5% 的重晶石, 制成水泥砂浆和含重晶石粉的 2 个饱水样品 PN-1 和 PN-2。

### 1.2 样品测试

利用 Hotdisk 热常数分析仪, 测试不同重晶石粉质量分数的中砂回填料导热系数。热常数分析仪型号为 Hotdisk TPS 2500s (图 1), 仪器采用瞬态平面热源法开展岩土样品热物性测试。瞬态平面热源法依据平面一维非稳态导热原理: 无限大介质中平面热源在初始热平衡状态受到瞬间加热脉冲后在介质内部产生动态温度场, 利用热传导过程产生的温度数据, 拟合函数曲线, 计算得出样品的导热系数和热扩散系数<sup>[20]</sup>。待测试样品制备成为圆柱体, 表面平整, 采用 2501 型号的探头进行测试。



图 1 热常数分析仪  
Fig.1 Thermal constant analyzer

测试温度为室温 20 °C, 测试时间 40 s, 测试功率 200 mW。测试样品数共 19 个, 其中平原区样品 15 个, 山区样品 4 个。

### 1.3 回填料导热系数分析

室内样品 TX-1 导热系数测试试验结果如图 2 所示。

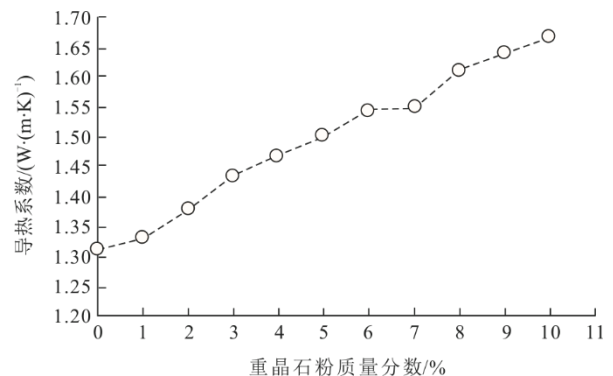


图 2 随重晶石粉质量增加回填料导热系数变化  
Fig.2 Change of the backfill heat conductivity with specific gravity increase of barite powder

从图2可见,样品导热系数随重晶石粉质量分数增大而增大,呈线性变化关系。1号中砂回填料(TX-1样品)中每增加1%的重晶石粉,回填料导热系数提升约 $0.037\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;重晶石粉质量分数至5%时,导热系数提高 $0.19\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,提升了14.3%;重晶石粉质量分数达到10%时,提升比例上升至27.2%。

图3为回填料导热系数柱状对比。综合对比3个中砂回填料可见,随着重晶石粉质量分数的增加,回填料导热系数逐渐增加。不同中砂回填料的初始导热系数不同,加入重晶石粉后导热系统提升略有差异。2号中砂中添加重晶石粉质量分数至5%时(TF-2样品),导热系数从 $1.8107\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 提升至 $2.0547\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,提升了13.5%。3号中砂中添加重晶石粉质量分数至50%时(TC-2样品),导热系数从 $1.5837\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 提升至 $2.1190\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,提升了33.8%。总体上,重晶石粉质量分数10%以内时,导热系数增加比例稳步提升,约为质量分数5%时的2倍;在10%~50%时,导热系数增加缓慢。

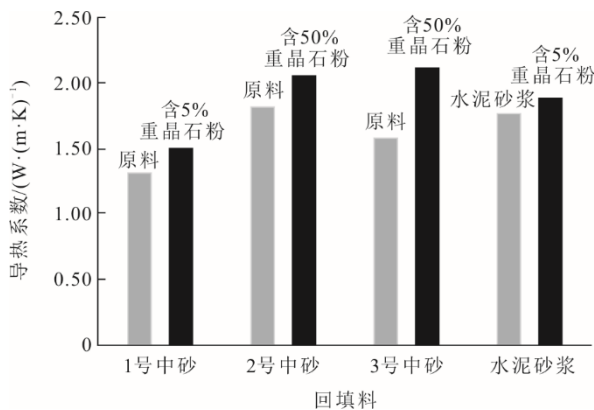


图3 回填料导热系数柱状对比  
Fig.3 Column graph of backfill heat conductivity

水泥砂浆中添加5%的重晶石粉后,导热系数从 $1.7630\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 提升至 $1.8917\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,提高了 $0.13\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,提升7.3%。相较中砂而言,水泥砂浆中加入重晶石粉后提升比例比中砂回填料低。

## 2 钻孔地埋管现场换热测试

### 2.1 现场换热测试方法

考虑室内测试回填料样品添加含重晶石粉后导热性能提升,且该配料的环境安全性,在同一工程区内,将中砂回填料与含重晶石粉的回填料填入钻孔开展现场换热试验。在钻凿的钻孔内下入

高密度聚乙烯管、回填入不同的混合回填料完成热响应测试孔成孔工作(图4)。



图4 钻孔现场回填  
Fig.4 Backfilling at drill hole site

回填完毕后,再进行一次打压试验,打压 $0.6\sim 1.2\text{ MPa}$ ,带压观测2h以上,无渗不漏无破裂,压力下降不超过 $0.05\text{ MPa}$ 即为合格。

换热孔施工完成后进行现场热响应测试,每孔开展现场热响应测试1组,获取地层初始温度、单孔换热量、地层平均导热系数等参数。现场热响应试验测试原理是将测试仪的水路循环部分与所要测试的地埋管换热器相连接,形成闭式环路,通过仪器内的微型循环水泵驱动循环。测试仪能够提供一能量稳定且可调节的热源,其热量通过循环水释放给地埋管换热器,最终传导到地层。测试仪夏季工况测试温度稳定为 $35\text{ }^\circ\text{C}$ ,冬季工况供水温度为 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 。稳定热流热响应测试加热功率分别为 $6\text{ kW}$ 和 $9\text{ kW}$ 。运行过程中记录地埋管换热器的进出水温度、循环水流量以及加热功率等参数,通过计算获得每延米地埋管换热器的换热能力和地层平均导热系数。热响应测试持续时间不少于48h,循环流量不小于 $0.8\text{ m}^3/\text{h}$ 。

### 2.2 实测结果

在平原区通州西集镇地源热泵示范工程场地内选取两眼地埋管钻孔A5(中砂回填料)和A7(含5%重晶石粉的中砂回填料),两孔间距小于10m,地层岩性一致;在山区平谷区南岔镇地源热泵示范工程选取K3(水泥砂浆),同时在场内选取K4(含5%重晶石粉的水泥砂浆):对上述四孔开展现场热响应测试,结果见表1。

由表1可见:A5平均导热系数为 $2.17\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,A7导热系数提高至 $2.65\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;稳定工况下,A7夏、冬季延米换热量分别较A5提升 $2.36\text{ W}/\text{m}$ (提高3.39%)和 $2.49\text{ W}/\text{m}$ (提升5.86%)。冬夏两季工

况对比看, 延米换热量提升比例基本相当; 但从提升比例来看, 冬季工况略高夏季工况。

K3 平均导热系数为 2.59 W/(m·K), K4 为 2.97 W/(m·K)。稳定工况下, K4 较 K3 夏季工况延

米换热量提升 2.74 W/m, 提高 3.85%; 冬季工况延米换热量提升 0.81 W/m, 提升 2.06%。冬夏两季工况对比看, 夏季工况延米换热量和提升比例均略高于冬季工况。

表 1 现场热响应测试结果一览  
Tab.1 List of field thermal response test results

钻孔编号	平均导热系数/(W·(m·K) <sup>-1</sup> )	延米换热量/(W·m <sup>-1</sup> )	
		夏季工况	冬季工况
A5 (中砂回填料)	2.17	69.56	42.46
A7 (含 5% 重晶石粉的中砂回填料)	2.65	71.92	44.95
K3 (水泥砂浆)	2.59	71.15	39.34
K4 (含 5% 重晶石粉的水泥砂浆)	2.97	73.89	40.15

### 3 地埋管换热数值模拟

#### 3.1 模型建设

选择 COMSOL 软件平台来模拟地埋管内流体与周围岩土之间的热交换过程。通过建立地埋管钻孔数值模型, 用实测数据进行校正, 开展回填料钻孔换热能力模拟预测。

地层内岩石和土壤层均为多孔介质传热, 其数学方程为:

$$(\rho c_p)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q \quad (1)$$

$$\mathbf{q} = -k_{\text{eff}} \cdot \nabla T \quad (2)$$

地下水流动采用达西定律数学模型:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_p \rho) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = Q_m \quad (3)$$

$$\mathbf{v} = -\frac{k}{\mu} \nabla \quad (4)$$

地埋管传热及水的流动采用非等温管道流传热数学模型<sup>[21]</sup>:

$$\rho A c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho A c_p u e_i \cdot \nabla_i T = \nabla_i \cdot (A k \nabla_i T) + \frac{1}{2} f_D \frac{\rho A}{d_h} |u| u^2 + Q + Q_{\text{wall}} \quad (5)$$

式中:  $\rho$  为流体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $c_p$  为定压比热容, J/(kg·K);  $q$  为热通量, W/m<sup>2</sup>;  $\mathbf{u}$  为地下水流速, m/s;  $k_{\text{eff}}$  为有效导热系数,  $k_{\text{eff}} = (1-\phi)k_s + \phi k_l$ , W/(m·K);  $k_s$  和  $k_l$  分别为固体和液体的导热系数;  $\phi$  为孔隙率, %;  $Q$  为热源 (热汇), W/m<sup>3</sup>;  $\varepsilon_p$  为孔隙率;  $k$  为多孔介质渗透率, m<sup>2</sup>;  $Q_m$  为质量源项;  $\mathbf{v}$  为达西流速, m/s;  $\mu$  为动力黏度, Pa·s;  $A$  为管道截面积, m<sup>2</sup>;  $u$  为循环流体的切向速度, m/s;  $f_D$  为黏性系数;  $d_h$  为平均水力直径, m;  $Q_{\text{wall}}$  为管壁的热交换, W/m。

式(5)中, 等式右边第 2 部分表示由于黏性耗散引起的摩擦热。

根据北京通州平原区研究区内钻孔所揭露的地层差异, 按照岩性将钻孔周围岩土体分为黏土、粉细砂、中粗砂、粉土互层。山区内地层岩性为黏性土、卵砾石、粉砂岩、泥岩和石英砂岩。基于数值计算平台建立地层结构几何模型。在多孔介质传热物理场中, 模型四周及底部根据初始地温场及地温梯度均设为线性温度边界。在达西定律物理场中, 含水层中有地下水通过的边界根据水力梯度给定初始水头, 为定水头边界, 顶底面及无水流通过的边界设为隔水边界。地埋管内初始温度等于周围岩土体初始温度, 开始运行后温度恒定为埋管入口流体的温度。模型顶部为开放边界。综合考虑计算精度与计算效率之间的平衡, 在模型进行网格剖分时将埋管及钻孔区域局部细化, 分层处也进行了自动加密。

#### 3.2 模型验证

针对平原区 A7 钻井, 分夏季和冬季 2 种工况对所建立的双 U 地埋管数值计算模型进行验证。运行时长设为 56 h, 模拟计算时地埋管的入口温度采用试验时的实时入口温度, 进而对比试验出口和模型出口温度的差别, 结果如图 5 所示。由图 5 可见: 在 56 h 左右的热响应试验结束后, 夏季工况下, 随着运行时间的增加, 入口温度迅速上升并趋于稳定, 模拟与实测出口温度相差 0.70 °C, 误差为 2.3%; 冬季工况下, 随着运行时间的增加, 入口温度迅速下降并趋于稳定, 模拟与实测出口温度相差 0.08 °C。

图 6 为山区地埋管出口温度拟合验证结果。模拟山区平谷研究区内 K4 孔夏季稳定工况换热试验, 设置入口温度为 35 °C。随着换热时间的加长,

出口温度不断升高且逐渐趋于稳定。稳定时，出口温度模拟值与实测值相差 0.2 °C。模拟 K4 冬季换热试验，设置入口温度为 5 °C。随着换热时间的加长，出口温度不断降低且逐渐趋于稳定，稳定时，出口温度相差 0.8 °C。

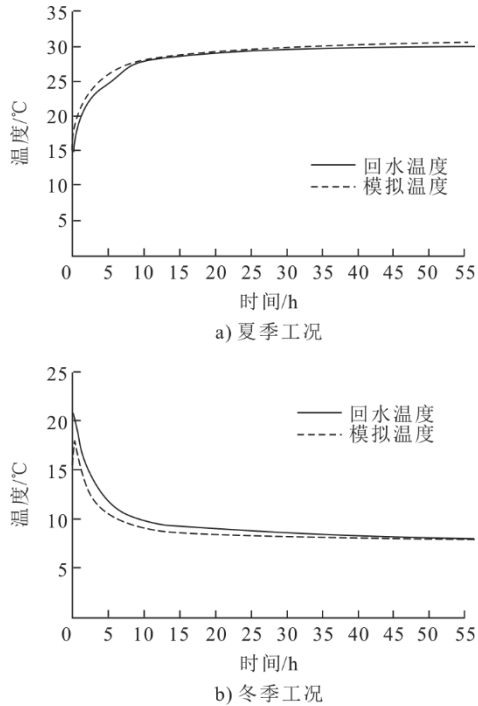


图 5 平原区地埋管出口温度拟合验证

Fig.5 Fit validation of borehole outlet temperature in plain

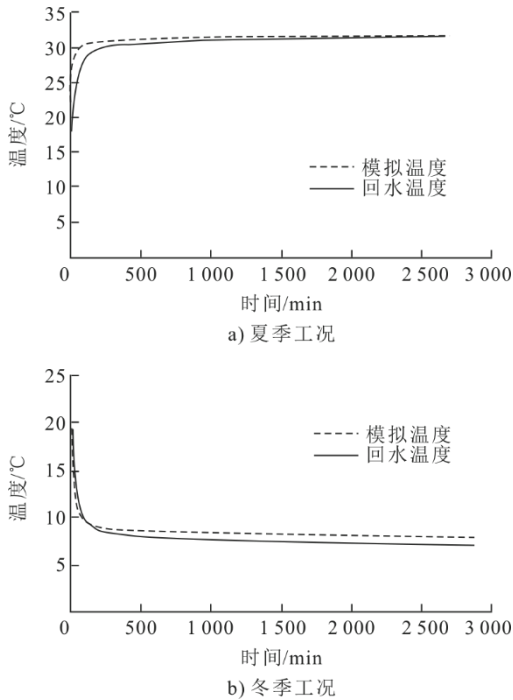


图 6 山区地埋管出口温度拟合验证

Fig.6 Fit validation of borehole outlet temperature in mountain

### 3.3 模型预测

模拟增加钻孔中砂回填料重晶石粉质量分数至 10%，模拟计算结果见表 2。由表 2 可知：平原区第四系地埋管夏季延米换热量为 73.74 W/m，较中砂回填料地埋管换热能力提高 4.18 W/m，提升 6.01%；冬季延米换热量为 46.98 W/m，换热能力较中砂回填料地埋管换热能力提高 4.52 W/m，提升 10.65%。

表 2 模拟计算结果  
Tab.2 Numerical simulation results

模型建设地点	设定入口水温/°C		出口水温/°C		延米换热量/(W·m <sup>-1</sup> )	
	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季
平原区	35.00	5.00	32.06	7.68	73.74	46.98
山区	35.00	5.00	31.97	7.35	75.97	41.14

山区水泥砂浆回填料中添加重晶石粉质量分数至 10%后，夏季延米换热量为 75.97 W/m，地埋管换热能力提高 4.82 W/m，提升 6.77%；冬季延米换热量为 41.14 W/m，换热能力较水泥砂浆回填料地埋管提高 1.80 W/m，提升 4.58%。

总体上，从现场热响应测试结果来看，钻孔回填料中加入重晶石粉，钻孔导热性能得到不同程度的提升，山区地层热传导性能高于平原区。

## 4 钻孔含重晶石粉回填料适宜性

由于含钻孔回填料的地层平均导热能力增强，地埋管换热能力均得到了不同程度的提升，但平原区土壤层和山区岩石地层地埋管换热能力存在差异。钻孔回填料中添加 5% 的重晶石粉后，平原区夏季换热能力提升 3%；冬季平均提高 5%，提升比例略高于夏季。山区岩石地层内地层导热能力同样升高，地埋管夏季换热能力提升 3%，冬季提升 2%，夏季工况地埋管换热量更大，比例也略高。

从初始温度来看，平原区地层 120 m 深度内、20 m 恒温层以下地温随深度增加而升高，地层温度介于 14.5~16.7 °C，平均温度为 15.5 °C。山区地层初始温度介于 14.0~14.5 °C，平均温度约为 14.3°C，低于平原区第四系地层温度。地层初始温度对地埋管换热能力影响不容忽视<sup>[22]</sup>。夏季工况，地埋管注入较高温度的水后，较低温度、较高导热系数的岩石地层更容易为地埋管内高温水降温，因此山区夏季工况地埋管换热效率高。冬季工况下，地埋管水流更易在较高温度的地层内获取热量，因此初始温度较高的平原区地埋管冬季换热效率高于山区。增

强钻孔回填料导热性能是经济可行的提升地埋管换热能力的重要方式。

地下水流动与回填料中的重晶石粉滤失性息息相关。当地下水流动性较强或者填埋方式不当, 换热能力提升效果将会受到影响。从重晶石化学性质来看, 其化学成分为硫酸钡 ( $\text{BaSO}_4$ ), 比重大 (4.2~4.7)、硬度低、性脆, 重晶石粉易分散, 凝聚性低, 导热性、热稳定性及流变性好, 填充性高, 在石油钻井液中已有广泛应用<sup>[23-24]</sup>。在钻井作业中, 重晶石对液相表现更加亲水, 悬浮性较好<sup>[25]</sup>。同时, 重晶石粉的沉降稳定性受重晶石密度和颗粒度的影响<sup>[26]</sup>。地埋管钻孔回填料中重晶石粉稳定、不易滤失, 适宜在地下水流动较弱的平原区第四系地层内应用。山区岩石地层裂隙发育区地下水径流速度加快, 采用可快速凝固的含重晶石粉水泥砂浆回填更适于山区钻孔地埋管提升换热效率。

## 5 结 论

1) 中砂回填料样品加入重晶石粉后导热系数均提升。重晶石粉质量分数为 5% 时, 导热系数提升 14.3%。水泥砂浆样品中添加 5% 的重晶石粉后, 导热系数提升 7.3%。水泥砂浆中加入重晶石粉后导热系数提升比例低于中砂回填料。

2) 平原区钻孔现场中砂回填料增加质量分数 5% 的重晶石粉, 地埋管夏季延米换热量提高 3.39%, 冬季提高 5.86%, 比例略高于夏季。山区地层钻孔采用含重晶石粉水泥砂浆回填料, 地埋管夏季延米换热功率提高 3.85%, 冬季提高 2.06%, 夏季比例略高于冬季。

3) 经模型计算钻孔回填料中重晶石粉质量分数为 10% 时, 平原区夏季地埋管换热功率提升 6.01%, 冬季提升 10.65%。山区地埋管夏季换热功率提升 6.77%, 冬季换热功率提升 4.58%, 这与含 5% 重晶石粉回填料钻孔现场换热测试结果获得的规律基本一致。

4) 山区和平原区地层导热能力、地层初始温度均存在差异, 钻孔内回填料添加重晶石粉后地埋管换热能力提升程度不同。考虑重晶石粉物理化学性质稳定, 平原区第四系钻孔与山区水泥砂浆凝固回填材料中适用重晶石粉用以提升地埋管换热性能。

### 【参 考 文 献】

[1] 杨梅芳, 王庆华, 黄坚. 浅层地热能与地下结构协同发展的研究与应用现状[J]. 建筑结构, 2020, 50(增刊 2): 819-823.

YANG Meifang, WANG Qinghua, HUANG Jian. Research and application status of coordinated development of shallow geothermal energy and underground structure[J]. Building Structure, 2020, 50(Suppl.2): 819-823.

[2] 黄露玉, 梁金龙, 刘斌, 等. 基于组合赋权法的广安市地源热泵适宜性分区[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(13): 5116-5124.

HUANG Luyu, LIANG Jinlong, LIU Bin, et al. Suitability zoning of ground source heat pump in Guang'an City based on combination weighting method[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(13): 5116-5124.

[3] 易荣, 贾开国. “双碳”战略背景下城市地下空间开发策略[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(12): 1977-1984.

YI Rong, JIA Kaiguo. Strategy for development of urban underground space under “carbon peaking and carbon neutralization”[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(12): 1977-1984.

[4] 张杰, 王贵洋, 王鹏涛. 关中地区中深层同轴套管换热器换热能力及提升措施研究[J]. 热力发电, 2023, 52(2): 54-63.

ZHANG Jie, WANG Guiyang, WANG Pengtao. Heat transfer capacity of middle-deep coaxial casing heat exchanger in Guanzhong area and the improvement measures[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(2): 54-63.

[5] 李娟, 郑佳, 雷晓东, 等. 北京平原区第四系热物性参数特征及对浅层地热能开采的影响因素分析[J]. 中国地质, 2022, 49(5): 1543-1554.

LI Juan, ZHENG Jia, LEI Xiaodong, et al. Analysis of quaternary thermal properties and influencing factors on shallow geothermal energy exploitation in Beijing plain[J]. Geology in China, 2022, 49(5): 1543-1554.

[6] 王琬. 地源热泵可持续设计方法[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2020, 37(2): 57-60.

WANG Wan. Sustainable design approach of ground resource heat pump[J]. Journal of Guizhou University (Natural Science), 2020, 37(2): 57-60.

[7] 张洋. 宿州地区地源热泵地埋管换热性能优化与分析[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2021: 1.

ZHANG Yang. Optimization and analysis of heat transfer performance of ground source heat pump in Suzhou area[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2021: 1.

[8] 王楠, 杨小凤, 庄春龙, 等. 单 U 形地埋管换热特性及热作用半径数值分析[J]. 暖通节能, 2017, 45(3): 10-14.

WANG Nan, YANG Xiaofeng, ZHUANG Chunlong, et al. Numerical analysis on heat transfer characteristics and thermal effect radius of the U-shaped buried tube[J]. Building Energy Efficiency, 2017, 45(3): 10-14.

[9] JIA Y Y, FANG Z W, ZHAO Y X, et al. Optimal insulation backfill depth analysis of coaxial deep borehole heat exchanger based on multi-factor orthogonal experiments[J]. Energy and Buildings, 2022, 273: 112-114.

[10] 王有镗, 郑斌, 王春光, 等. 回填土质材料对地下换热器冻胀特性的影响研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 205-211.

WANG Youtang, ZHENG Bin, WANG Chunguang, et al. Effects of backfill materials on frost heave characteristic of ground heat exchanger[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(14): 205-211.

[11] 尚飞跃, 周亚素, 费一超, 等. 成型温度与水分蒸发对地埋管回填料热物性参数的影响[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2019, 45(6): 951-957.

- SHANG Xianyue, ZHOU Yasu, FEI Yichao, et al. Effect of forming temperature and water evaporation on thermal property parameters of buried pipe grouting material. *Journal of Donghua University (Natural Science)*, 2019, 45(6): 951-957.
- [12] 地源热泵系统工程技术规范: GB/T 50336—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 1.  
Technical code for ground-source heat pump system: GB/T 50336—2009[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 1.
- [13] 陈子源, 郝振凯, 计孝飞, 等. 地源热泵系统水泥基回填料材料综合性能及节能效果研究[J]. *可再生能源*, 2022, 41(4): 27-30.  
CHEN Ziyuan, HAO Zhenkai, JI Xiaofei, et al. Study on comprehensive performance and energy saving effect of cement based grouting materials for GSHP systems[J]. *Renewable Energy Resources*, 2022, 41(4): 27-30.
- [14] 陈卫翠, 刘巧玲, 贾立群, 等. 高性能地埋管换热器钻孔回填料材料的实验研究[J]. *暖通空调*, 2006, 36(9): 1-6.  
CHEN Weicui, LIU Qiaoling, JIA Liqun, et al. Experimental research on high-performance backfill materials for ground heat exchangers[J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2006, 36(9): 1-6.
- [15] REMUND C P. Borehole thermal resistance: laboratory and field studies[J]. *ASHRAE Transactions*, 1999, 105(1): 439-445.
- [16] LEE C, LEE K, CHOI H. Characteristics of thermally-enhanced bentonite grouts for geothermal heat exchanger in South Korea[J]. *Technological Sciences*, 2010, 1(3): 123-128.
- [17] 张旭, 高晓兵. 华东地区土壤及土沙混合物导热系数的实验研究[J]. *暖通空调*, 2004, 34(5): 216-220.  
ZHANG Xu, GAO Xiaobing. Experimental study on thermal conductivity of soil and its mixture with sand[J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2004, 34(5): 216-220.
- [18] 李宁波, 刘爱华, 张进平, 等. 重晶石粉用于提高地埋管回填料材料导热性能的实验研究[J]. *河北工业大学学报*, 2018, 47(5): 89-93.  
LI Ningbo, LIU Aihua, ZHANG Jinping, et al. Experimental study of barite powder for improving thermal conductivity as backfill materials of ground heat exchanger[J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2018, 47(5): 89-93.
- [19] 贾子龙, 郑佳, 郭艳春, 等. 岩石地层条件下回填料对地埋孔换热能力的影响[J]. *城市地质*, 2020, 15(4): 410-414.  
JIA Zilong, ZHENG Jia, GUO Yanchun, et al. Influence of backfilling materials on the heat transfer capacity of buried hole under the lithostratigraphic condition[J]. *Urban Geology*, 2020, 15(4): 410-414.
- [20] 建筑材料导热系数和热扩散系数瞬态平面热源测试法: GB/T 32064—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1.  
Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity of building materials: transient plane heat source method GB/T 32064—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1.
- [21] 田凯旋, 夏才初, 徐英俊. 钻孔埋管换热器用于寒区隧道消防管网加热保温的理论研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2023, 54(4): 1472-1480.  
TIAN Kaixuan, XIA Caichu, XU Yingjun. Theoretical research on application of borehole heat exchangers to heating fire pipes in cold region tunnels[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2023, 54(4): 1472-1480.
- [22] 王小清, 王洋. 软土地区竖直地埋管换热器参数与换热性能分析[J]. *可再生能源*, 2016, 34(11): 1696-1705.  
WANG Xiaoqing, WANG Yang. Analysis on the design parameter and performance of vertical ground heat exchanger in soft clay area[J]. *Renewable Energy Resource*, 2016, 34(11): 1696-1705.
- [23] 钻井液用重晶石粉技术要求: Q/SH 0041—2007[S]. 北京: 中国石油化工集团公司, 2007: 1.  
Control analysis of barite powder fineness for drilling fluid: Q/SH 0041—2007[S]. Beijing: China Petrochemical Corporation, 2007: 1.
- [24] 中国石油天然气集团公司钻井液技术规范[S]. 北京: 中国石油天然气集团有限公司, 2010: 1.  
Technical specification for drilling fluids of China National Petroleum Corporation[S]. Beijing: China National Petroleum Corporation, 2010: 1.
- [25] 潘谊党, 于培志, 马京缘. 高密度钻井液加重材料沉降问题研究进展[J]. *钻井液与完井液*, 2019, 36(1): 1-9.  
PAN Yidang, YU Peizhi, MA Jingyuan. Review on settlement problem of drilling fluid weighting materials[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2019, 36(1): 1-9.
- [26] 孙强, 邱正松, 李自立, 等. 高密度钻井液沉降稳定性的模拟试验研究[J]. *能源化工*, 2020, 41(6): 49-55.  
SUN Qiang, QIU Zhengsong, LI Zili, et al. Simulation study on sedimentation stability of high density drilling fluid[J]. *Energy Chemical Industry*, 2020, 41(6): 49-55.

(责任编辑 刘永强)