

地质条件及埋管形式对地埋管换热器 换热性能影响研究

李娟^{1,2)}, 郑佳^{1,2)}, 雷晓东³⁾, 贾子龙^{1,2)},
刘爱华^{1,2)}, 徐子君^{1,2)}

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;

3)北京市生态地质研究所, 北京 102218

摘要: 利用北京市 35 个现场换热孔岩土热响应试验数据, 分析了地质条件和埋管形式对地埋管换热器换热性能的影响。研究表明地质条件对地埋管换热性能具有显著影响: 地层初始平均温度每变化 1 °C, 换热能力相差 8%左右; 基岩地层的埋管换热能力平均比松散层高 35%; 换热孔处地下水流速从 0.14 m/d 增至 0.91 m/d, Pe 值从 18 增加至 113, 由于热对流换热作用加强, 延米换热量提升 13%。在相同地质条件下, 套管式换热器冬季延米取热量比双 U 型换热器高约 40%; 换热深度从 150 m 增加至 300 m 时, 双 U 型和套管式换热器延米取热量均略有升高。

关键词: 浅层地热能; 岩土热响应试验; 地层温度; 地下水径流; 埋管形式

中图分类号: TU83 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.092602

Study on the Influence of Geological Conditions and Heat Exchanger Type on BHE Thermal Performance

LI Juan^{1,2)}, ZHENG Jia^{1,2)}, LEI Xiao-dong³⁾, JIA Zi-long^{1,2)}, LIU Ai-hua^{1,2)}, XU Zi-jun^{1,2)}

1) Beijing Institute of Geothermal Research, Beijing 102218;

2) Key Laboratory of Shallow Geothermal Energy, Ministry of Natural Resources, Beijing 100195;

3) Beijing Institute of Ecological Geology, Beijing 102218

Abstract: Based on the rock-soil thermal response test results of 35 in-situ heat exchange holes in Beijing, the influence of different geological conditions and heat exchanger type on the heat transfer capacity of borehole heat exchangers (BHEs) was analyzed. The results show that geological conditions significantly influence BHE thermal performance. When the stratum temperature changes by 1 °C, the heat transfer capacity changes by ~8%. The thermal performance of bedrock stratum is 35% higher than that of loose stratum on average. The groundwater flow rate at the test hole increased from 0.14 m/d to 0.91 m/d and the Pe value increased from 18 to 113. Additionally, due to the strengthening of heat convection, the BHE thermal performance increased by 13%. Under the same geological conditions, the heat exchange per meter of coaxial BHE is 40% higher than that of double U BHE in winter. Furthermore, when the depth increased from 150 m to 300 m, the heat exchange per meter of double U and coaxial BHEs increased slightly.

Key words: shallow geothermal energy; rock-soil thermal response test; stratum temperature; groundwater runoff; heat exchanger type

浅层地热能资源丰富, 是一种清洁可再生的非
碳基能源, 对其进行规模化开发利用能够有效降低

碳排放, 助力“双碳”目标实现。近年来, 浅层地
热能利用发展速度快, 应用规模大。以北京市为例,

本文由北京市地质矿产勘查院综合地质调查与评价项目(编号: PXM2018_158203_000010; PXM2018_158309_000002; PXM2020_158309_000012)资助。

收稿日期: 2022-06-20; 改回日期: 2022-09-18; 网络首发日期: 2022-09-30。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 李娟, 女, 1983 年生。硕士, 高级工程师。主要从事浅层地热能资源开发利用研究。通讯地址: 102218, 北京市朝阳区立水桥甲 2 号。E-mail: lj1983205@163.com。

已涌现出北京城市副中心、北京大兴国际机场等一批应用规模在百万平方米以上的超大型项目(王贵玲等, 2021; 贺继超等, 2022)。地理管地源热泵系统是浅层地热能开发利用的主要方式之一, 全国省会城市浅层地热能调查评价成果显示我国 31 个省会城市超过 80% 的土地面积适宜采用地理管热泵系统开发浅层地热能, 因此从利用方式来看, 地理管热泵系统应用将会更广泛(王贵玲等, 2017)。已有的地理管热泵系统工程应用中发现换热器换热性能的偏差会造成埋管长度(或钻孔深度)的偏差, 影响系统前期投资的经济性。同时地理管换热器长度设计失误会使系统运行时, 吸热或释热量不能及时散开, 产生冷或热堆积, 长期运行会影响地理管换热器的换热效率, 导致地源热泵系统节能效果不明显(孙秀刚等, 2015; 尚少文等, 2018; 陈忠, 2020)。因此, 地理管换热器换热性能研究是浅层地热能应用领域关注的重点问题。

地理管换热器的换热性能会受到开采区地质条件、回填材料、埋管形式及管群排列方式等多种因素的影响。本文主要讨论地质条件及埋管形式这两方面。地质条件如地层初始平均温度、地层岩性以及地下水径流条件等, 其差异会导致地理管换热能力不同。埋管形式则可以人为设计, 通过改变埋管直径、埋管深度及管内循环流体的流量等改变换热能力。目前已有研究中多是利用数值计算的方法模拟换热过程(Rees et al., 2004; 王瑜和刘志成, 2019; Li et al., 2020; 杨培志等, 2021; 李泽锟和杜震宇, 2021; 赵天雨等, 2022; Chen et al., 2022), 利用实测数据研究地质条件和埋管形式对换热性能的影响较少。本文基于北京市 35 个换热孔开展的岩土热响应试验数据, 讨论地层初始温度、地层岩性、地下水径流条件以及埋管形式对地理管换热器换热性能的影响, 以期为提高地源热泵系统设计合理性和运行能效等提供依据。

1 试验方法

地理管换热器换热性能可以通过岩土热响应试验确定, 测试装置示意图如图 1 所示。目前国内常采用的热响应试验方法主要有恒热流法和恒温法。恒热流法是对岩土体施加恒定热流量, 通过获取流体进出口温度及流量等参数来确定岩土体平均热导率以及钻孔内的热阻, 然后采用软件或按设计规范计算得到浅层地热能利用系统换热孔的设计总长度。恒温法是在试验中保持地理管供水温度恒定, 确定在“稳定”状态下换热孔每米的换热量, 测试结果可作为反映钻孔处换热能力的一个指标(方亮等, 2009)。两者相比较, 恒热流法是一种有效的

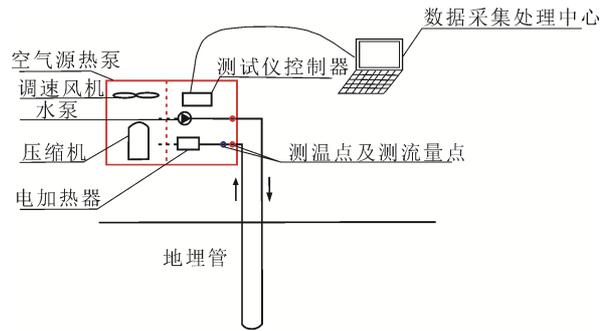


图 1 岩土热响应测试装置示意图
Fig. 1 Composition of rock-soil thermal response test equipment

岩土热响应实验手段, 但也存在一些不足, 例如只能间接得出岩土体热导率和热阻, 不能直接得出地源热泵系统设计所需延米换热量。恒温法是建立稳定的地理管换热器运行工况, 并直观获得地理管换热器每米换热量的方法, 避免了复杂的计算, 但测试数据与设定工况相关(邓娜等, 2014)。

恒热流法测试数据处理采用国标推荐的线热源理论模型, 地理管内流体的平均温度可表述为:

$$t_f = \frac{Q}{4\pi\lambda_s L} \ln \tau + \frac{Q}{L} \left[R_b + \frac{1}{4\pi\lambda_s} (\ln \frac{4\alpha}{r_b^2} - \gamma) \right] + t_0 \quad (1)$$

式中: t_f —流体平均温度(°C); t_0 —地层初始温度(°C); Q —单井换热量(W); λ_s —热导率(W/(m·K)); L —换热器长度(m); τ —运行时间(s); α —岩土体热扩散系数(m²/s); γ —欧拉常数, 取 0.5772; R_b —钻孔内热阻((m·°C)/W)。

加热功率恒定时, 式(1)可简化为:

$$t_f = k \ln \tau + b \quad (2)$$

式中: k — $t_f - \ln \tau$ 曲线的线性段变化斜率; b —直线截距。

岩土体平均热导率计算式为:

$$\lambda_s = \frac{Q}{4\pi k L} \quad (3)$$

恒温法测试根据测得的管内流量和温差, 利用公式(4)计算地理管换热器的延米换热量。

$$q = \frac{c_m m (t_{in} - t_{out})}{L} \quad (4)$$

式中: q —延米换热量(W/m); m —流量(kg/s); c_m —岩土体平均比热容(J/(kg·°C)); t_{in} —进口温度(°C); t_{out} —出口温度(°C)。

2 试验概况

本文收集的北京市 35 个换热孔岩土热响应试验既有恒热流法, 也有恒温法。恒热流法测试加热功率满足实际地理管换热器高峰负荷值(通常为 50~80 W/m), 计算得到岩土体热导率。恒温法测试以 35 °C 进水稳定温度为夏季标准排热工况, 以

5℃进水稳定温度为冬季标准取热工况,获取埋管换热器的延米换热量。其中,通州区浅层地热能勘查换热孔22个,孔深150m,下入双U型埋管换热器,采用恒温法获取换热孔延米换热量。平原区和山区100m深换热孔各4个,满足地层初始温度基本接近且埋管形式一致。昌平区“北京市地热示范基地”抽水试验区域换热孔1个。通州区西集镇某场地不同埋管形式换热孔4个,换热器形式分别是150m深双U型、300m深双U型、150m深增强型同轴套管式和300m深增强型同轴套管式,换热孔位置见图2。

3 埋管换热性能影响因素

3.1 地层初始温度

地层初始温度是指岩土体未受人为扰动或虽受人为扰动但经足够长时间恢复后的温度,浅层地热能本质就是地表以下资源开发利用深度范围内地层初始温度与地表温度之差而形成的能量,是两个状态不同的温度场之间存在的势能,所以地层初始温度是决定浅层地热能利用效率的重要参数(陈友明等,2007)。

本文收集通州区22个换热孔岩土热响应试验数据分析地层初始温度对埋管换热能力的影响,试验数据包括地层初始平均温度测试和恒温法加热测试。地层初始平均温度采用无负荷循环法,即不开启测试仪加热装置,仅依靠循环泵来维持埋管换热器环路循环,经过一定时间后,埋管换热器的进出口水温将逐渐趋于相等或保持一个很小的温差,此状态下的进出口平均水温视为地层初始平均

温度(王华军和齐承英,2010)。利用试验数据绘制了通州区150m以浅地层初始平均温度和夏季延米排热量等值线图,反映出两者之间存在对应关系(见图3)。通州区年恒温带的深度为10~30m,恒温带温度为13~14℃,地温梯度分布在1.34~3.12℃/(100m)范围内(李文,2021)。150m以浅地层初始平均温度在15℃左右,其中宋庄镇东部一带较高,为16.8℃,夏季延米排热量数值较低,为51W/m;宋庄镇北部、西集镇东部及于家务乡地层初始平均温度较低,分别为14.4、14.6、14.2℃,夏季延米排热量数值较高,排热效果好,基本在60W/m以上。地层初始平均温度每变化1℃时,埋管换热能力相差8%左右。通州区属于永定河冲洪积扇和潮白河冲洪积扇中下游,第四系岩性为黏性土层和砂层互层,地下水径流条件较差,地层初始温度是导致该地区埋管换热能力产生差异的主要原因。

地层初始温度在数值上相当于换热深度内浅层地温场垂向变温带、恒温带及增温带的平均值。浅层地温场恒温带的温度与当地年均气温相近,更容易获取,在一定程度上也反映出—个地区近地表处浅层的热状况,因此经常将恒温带的温度作为评价浅层地热能资源开发利用的重要参数(卫万顺等,2010)。例如卫万顺等(2020)根据恒温带温度 t_0 的高低,对我国浅层地热能利用适宜性进行了区划,将 $t_0 \geq 10^\circ\text{C}$ 、 $t_0 = 5 \sim 10^\circ\text{C}$ 及 $t_0 \leq 5^\circ\text{C}$ 的区域分别划分为浅层地热能开发利用适宜区、较适宜区和不适宜区。在适宜区和较适宜区地层初始温度较低的区域换热孔排热效果好,地层温度较高时有利于取热。

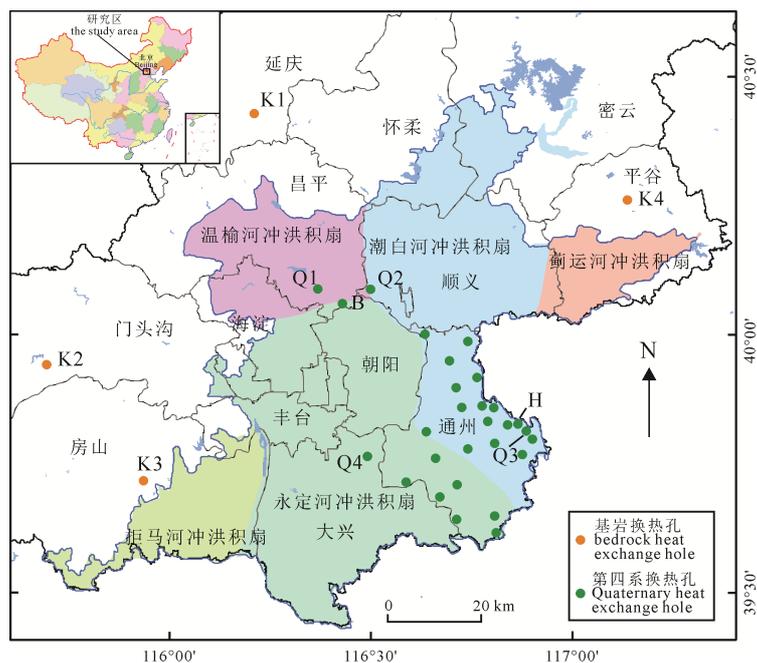


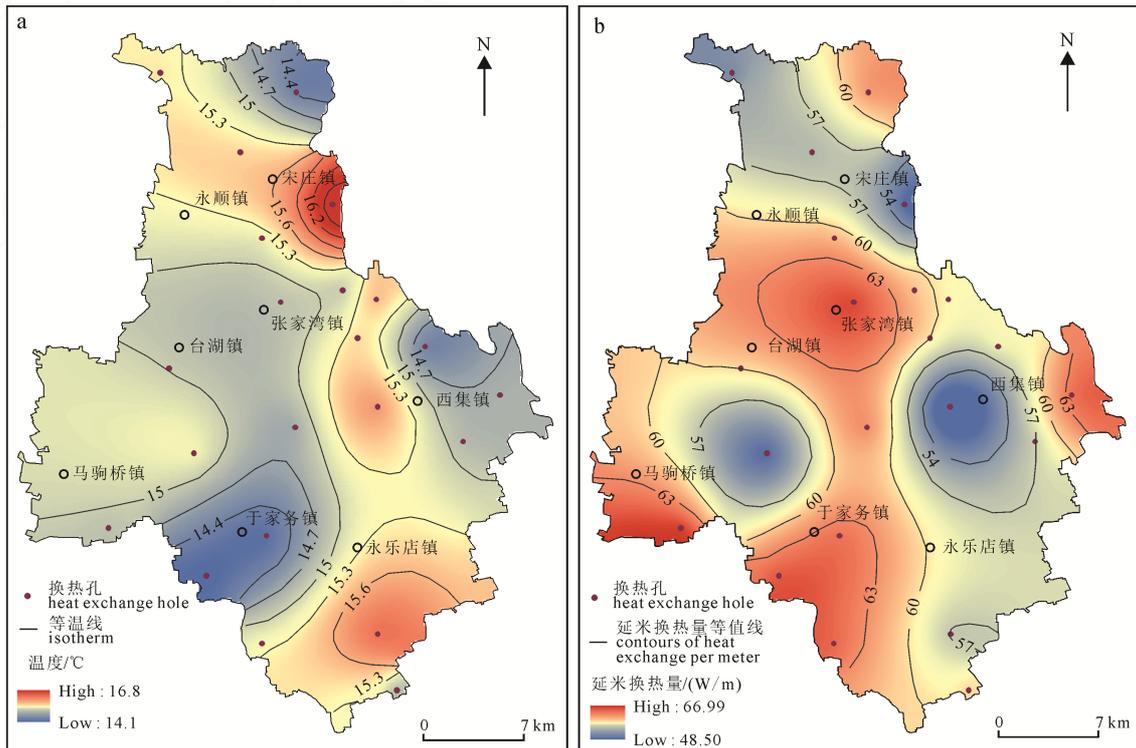
图2 换热孔位置图

Fig. 2 Map showing locations of heat exchange holes

3.2 地层岩性

地层岩性体现了物质组成特征,是影响岩土体热导率的本质因素,在北京平原区和山区分别选定4个地层初始温度基本接近的100 m深换热孔作为研究对象,对比第四系和基岩地层中地理管换热能力差异(表1)。第四系4个换热孔Q1~Q4位于平原区北部顺义区和昌平区、东南部通州区以及南部大兴区,地层初始平均温度14.0~15.1℃,换热孔围岩以黏土和砂为主,夏季延米排热量57.4~68.3 W/m。基岩地区4个换热孔K1~K4分别

位于北京西南部门头沟区和房山区、西北部延庆区以及东部平谷区,地层初始平均温度13.0~14.6℃,比平原区低约1℃,换热孔钻探深度内第四系厚度15~26 m,下覆基岩分别有页岩、砂岩、砾岩、灰岩和侵入岩等,地理管换热器夏季延米排热量70.7~104.2 W/m,平均比第四系高35%。可见地层岩性有明显差异时,对地理管换热能力有较大影响。王松涛等(2012)在山东省基岩地层也开展了换热测试,发现基岩地层的地理管换热器的传热性能明显优于第四系。



a—地层平均温度等值线; b—延米换热量等值线。
a—contour map of stratum temperature; b—contour map of heat exchange per meter.

图3 通州区地温及钻孔换热量等值线图

Fig. 3 Contour map of stratum temperature and borehole heat exchange in Tongzhou

表1 第四系与基岩地区换热孔岩土热响应测试结果

Table 1 The rock-soil thermal response test results of borehole heat exchangers (BHEs) in quaternary and bedrock areas

地层	钻孔编号	地层初始平均温度 /℃	恒热流法		岩性描述
			平均热导率 / $(W/(m \cdot K))$	恒温法 延米排热量 / (W/m)	
第四系	Q1	15.1	-	68.3	第四系以黏土和砂为主, 含少量砾卵石层
	Q2	14.7	-	67.6	第四系为黏土和砂砾石, 水位埋深 19.8 m
	Q3	14.0	-	61.8	第四系以黏土和砂为主
	Q4	15.1	-	57.4	第四系主要为砂层, 夹少量砾卵石, 水位埋深 40 m
基岩	K1	13.0	3.38	104.2	第四系为黏土、砂及卵石, 厚 15 m, 下部燕山期侵入岩, 岩性为闪长玢岩, 水位埋深 8 m, 20 m 和 60 m 处见地层破碎
	K2	13.5	2.83	89.2	第四系为黏土、砂卵石层, 厚 18 m, 下伏基岩以粉砂岩和砂砾岩为主, 夹薄层泥岩, 水位埋深 38 m
	K3	14.6	-	79.6	第四系为砂卵石, 厚 26 m, 下伏白垩系砂砾岩, 水位埋深 23 m
	K4	14.4	2.71	70.7	第四系以黏土砂卵石为主, 厚 15 m, 下伏中元古界长城系地层, 其中埋深 15~55 m 为长城系串岭沟组, 岩性为黑色粉砂质页岩, 埋深 55~100 m 为长城系常州沟组, 岩性为灰白色长石英砂岩, 水位埋深 76 m

岩土体是浅层地热能开发利用时吸热和释热的场所, 地层岩性的差异在很大程度上决定了其导热能力的大小。笔者对北京平原区各冲洪积扇采集的 695 件第四系样品热导率进行过统计, 其平均值范围为 1.465~2.022 W/(m·K)(李娟等, 2022)。已有研究对北京地区采集的 548 块基岩样品热导率进行测试, 发现不同岩性基岩的热导率平均值范围在 2.231~4.330 W/(m·K)之间(雷晓东等, 2018)。图 4 给出北京市不同岩性在实验室测得热导率的极大、极小值和中值, 基岩热导率显然比第四系松散沉积物高, 换热能力相对较强。K1 孔基岩岩性为侵入岩, K2 孔主要为粉砂岩和砂砾岩, K4 孔为页岩和石英砂岩, 岩土热响应测试获得热导率比实验室测试热导率中值(图 4)偏高, 这是由于实验室热导率测试忽略了地下水流动的影响, 可以视为一个下限数值, 其中 K1 孔岩土热响应测试获得热导率最大, 为 3.38 W/(m·K), 埋管换热器夏季延米排热量 104.2 W/m, 在实际场地中, 该换热孔处地下水位埋深 8 m, 在埋深 20 m 及 60 m 处基岩裂隙水流动强烈, 强化了埋管换热性能, 使热导率值高于实验室测试的极大值。因此, 岩土热响应试验得到的地层热导率是岩土热传导和地下水流动引起的热对流的综合参数。

3.3 地下水径流

地下水可以传递和储存能量, 能够把岩土层中热量带入或带出。在浅层地热能开发利用深度内通常会伴随含水层中地下水的流动, 形成热对流, 影响埋管换热能力。我们在位于昌平区的“北京市地热示范基地”实地开展抽水试验改变试验区地下水径流条件, 研究地下水流速对埋管换热能力的影响。该区地层岩性主要为砂、砂卵石与黏性土互层, 水位埋深 13 m, 含水层为多层或单层较薄的卵石, 颗粒较粗, 厚度约 30 m。试验区内布设

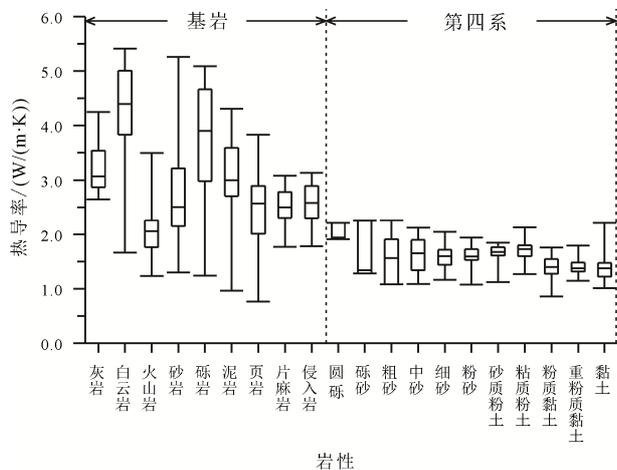


图 4 北京市不同岩性热导率箱线图
Fig. 4 Box plot of thermal conductivity of different lithologies in Beijing

1 眼抽水井和 3 眼观测井开展抽水试验, 距离抽水井 30 m 处布设 1 眼换热孔 B, 孔深 100 m(图 5), 开展岩土热响应试验。

换热孔处地层初始平均温度 18.5 °C。表 2 给出了在天然状态和抽水条件下, 换热孔岩土热响应试验结果。天然状态下, 换热孔处地下水流速 0.14 m/d, 夏季延米排热量 45.2 W/m, 岩土平均热导率 1.70 W/(m·K)。抽水井流量 28 m³/h 时, 换热孔处地下水流速 0.91 m/d, 夏季延米排热量 50.9 W/m, 岩土平均热导率 1.76 W/(m·K)。与天然状态下相比, 地下水流速增加时, 埋管换热器处于地下水位以下的部分把岩土层中热量带入或带出的速度也加快, 有利于强化埋管换热器与周围岩土体之间的换热效果。

埋管换热器换热受地下水影响的大小, 可以用无量纲佩克莱数判断, 它是对流换热与热传导的比值, 其表达式为:

$$Pe = \frac{\rho_w c_w v L}{\lambda} \quad (5)$$

式中: ρ_w —水的密度(kg/m³); c_w —水的比热容(J/(kg·K)); v —地下水流速(m/s); L —特征长度(m), 一般为相邻钻孔的水平间距, 本文取 4.5 m; λ —多孔介质的热导率(W/(m·K))。

Pe 值越大, 对流换热所占的比重也越大, 试验区通过抽水加快区内地下水流速, Pe 值从 18 增加至 113, 热对流换热作用加强, 延米换热量提升了 13%, 换热效率升高。北京平原区地下水流动的总趋势是由山区向平原、由北西向南东流动。山前地带径流条件好, 地下水流速一般大于 0.15 m/d,

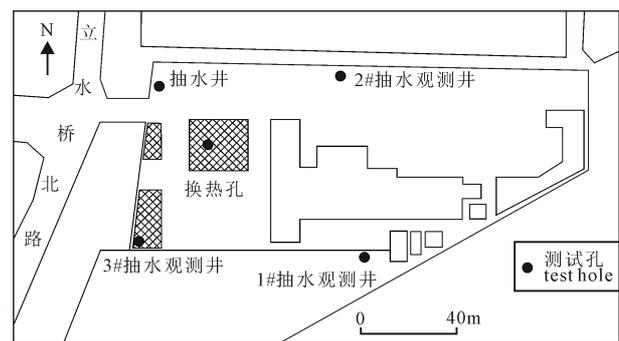


图 5 试验区井孔布设图
Fig. 5 Location of holes in the test site

表 2 地下水流速与换热量之间的关系

Table 2 Relationship between groundwater flow rate and heat exchange

抽水量 /(m ³ /h)	地下水流速 /(m/d)	恒热流法		Pe
		平均热导率 /(W/(m·K))	延米排热量 /(W/m)	
0	0.14	1.70	45.2	18
28	0.91	1.76	50.9	113

相应地 $Pe > 19$; 冲洪积扇顶部向中部含水层水力坡度逐渐减小, 径流变弱, 冲洪积扇顶部地下水流速一般 $0.025\sim 0.15\text{ m/d}$, 中上部地区地下水流速一般 $0.005\sim 0.05\text{ m/d}$; 冲洪积扇下部地下水径流条件变差, 地下水流速一般小于 0.004 m/d , $Pe < 1$ 。可以看出, 以城市为单元, 径流条件好的区域地下水流速是径流条件较差区域的几十倍, Pe 值也随之增加。研究发现 $Pe < 6$ 时, 换热量比无渗流时增加不超 5%, 可以忽略渗流产生的对流换热的影响(Wang et al., 2009; 顾吉浩等, 2015)。北京山前地带、冲洪积扇上部, 地下水流速较大, 有利于提高热泵系统的运行效率; 在冲洪积扇下部, 地下水径流对换热的有利影响相对减弱。

地下水径流不仅会影响埋管换热器的换热性能, 同时会影响换热区域地温场的变化, 地下水径流越强, 对换热孔下游的热影响作用也越强。蔡晶晶等(2009)和曾召田等(2015)提出埋设埋管换热器需考虑地下水流动的影响, 在顺着径流方向适当地增大埋管换热器之间的间距, 在垂直于径流的方向可适当减少换热器之间的间距, 有效利用地下水流动将多余热(冷)量带走, 缓解埋管换热器周围的热(冷)量堆积, 增加换热器的进回水温差, 提高埋管的换热效果(彭涛等, 2017)。

3.4 埋管形式

上文中换热孔埋管形式均采用传统双 U 型埋管换热器, 换热孔孔径一般 152 mm , 换热深度不大于 150 m , 双 U 型换热器外径 32 mm , 内径 26 mm , 管内循环流体流量 $1.5\text{ m}^3/\text{h}$ 。近年来套管技术成为国内地热采暖技术探索的新方向, 其原理与传统的浅层地热能换热技术相似, 是用同轴套管替换双 U 型埋管, 循环流体从外(内)套管中注入与周边岩土体进行换热, 到达套管底部之后, 通过内(外)管向上运移将热(冷)量带至地表(孔彦龙等, 2017)。

通州区西集镇某场地设计了 4 种类型的换热器, 其中 H1 孔为常规 150 m 双 U 型埋管换热器, 埋管外径 32 mm , 内径 26 mm ; H2 孔为 300 m 双 U 型埋管换热器, 考虑承压将埋管壁加厚, 外径 40 mm , 内径 26 mm ; H3 孔和 H4 孔均为增强型同轴套管换热器(图 6), 深度分别是 150 m 和 300 m , 换热器外管为外径 114 mm 钢制套管, 壁厚 2 mm , 内管为外径 50 mm PE 管, 壁厚 2.3 mm 。内管外壁上每 2 m 周期性敷设了螺旋环肋片, 单根螺旋环肋段长度 0.4 m , 螺旋环肋厚度为 2 mm , 高度为 23.5 mm , 4 种不同方式换热孔埋管截面如图 7 所示。

4 个换热孔岩土热响应试验开展了初始温度测试和恒温法冬季工况测试。为了加强换热效果, 确保管内循环流体为紊流状态, 套管式换热器管内循

环水体流量为 $3.5\text{ m}^3/\text{h}$ 。图 8 给出了 4 种埋管形式换热孔冬季取热工况下进出口温度及单孔换热量变化情况, 测试时长不小于 48 h , 埋管进口温度控制在 $5\text{ }^\circ\text{C}$, 随着换热孔与周围岩土体之间不断进行热交换, 埋管换热器出口温度基本趋于稳定, 测试结果见表 3。

对相同换热深度不同埋管形式的换热孔测试结果进行对比, 结果表明套管式换热器进出口温差小于双 U 型, 150 m 深换热器进出口温差由 $2.74\text{ }^\circ\text{C}$ 下降为 $1.68\text{ }^\circ\text{C}$, 300 m 深换热器进出口温差由 $6.09\text{ }^\circ\text{C}$ 下降为 $3.64\text{ }^\circ\text{C}$, 但由于套管式换热器管内循环流体的流量增加到 $3.5\text{ m}^3/\text{h}$, 使得套管式换热器冬季延米取热量比双 U 型提升了约 40%。梅新忠等(2019)曾开展过套管式和双 U 型埋管夏季工况下的排热对比试验, 发现增强型同轴套管的夏季延米排热量同样高于双 U 埋管。分析认为对于套管式换热器, 内管位于外管之中, 仅环形空间中的流体与岩土存在热交换(Beier et al., 2014), 换热器

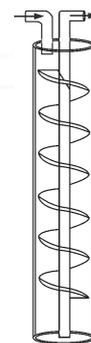
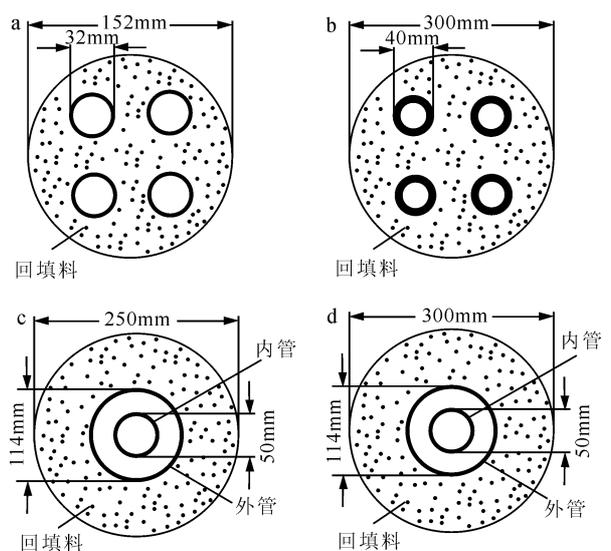


图 6 增强型同轴套管

Fig. 6 Enhanced coaxial borehole heat exchanger (BHE)



a—H1 150 m 双 U 孔; b—H2 300 m 双 U 孔;

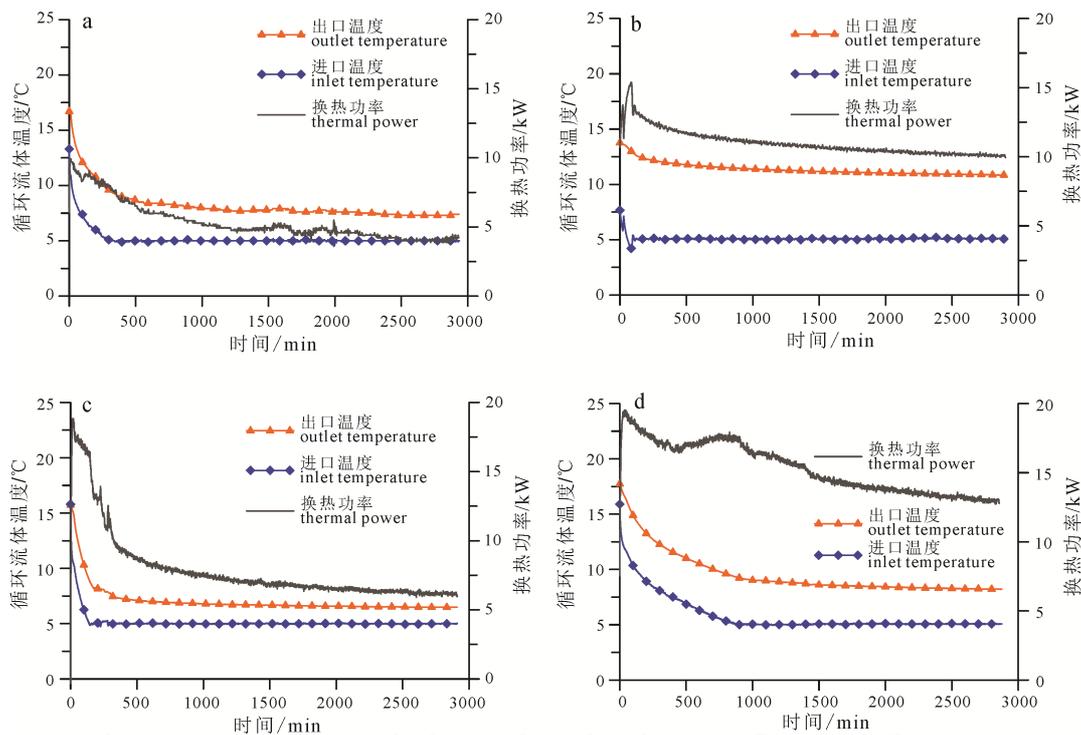
c—H3 150 m 套管孔; d—H4 300 m 套管孔。

a—H1 150 m double U BHE; b—H2 300 m double U BHE;

c—H3 150 m coaxial BHE; d—H4 300 m coaxial BHE.

图 7 换热孔埋管截面图

Fig. 7 Sectional view of borehole heat exchangers (BHEs)



a—H1 孔测试曲线; b—H2 孔测试曲线; c—H3 孔测试曲线; d—H4 孔测试曲线。
a—H1 hole test curve; b—H2 hole test curve; c—H3 hole test curve; d—H4 hole test curve.

图 8 恒温法冬季工况试验曲线

Fig. 8 Test curve of the constant temperature method under winter conditions

表 3 岩土热响应试验结果汇总表

Table 3 Summary table of results of rock-soil thermal response tests

孔号	孔深 /m	埋管方式	地层初始平均温度 /°C	流量 /(m ³ /h)	进出口温差 /°C	延米取热量 /(W/m)	单孔换热功率 /kW
H1	150	双 U 型	15.7	1.5	2.74	32.1	4.8
H2	300	双 U 型	17.8	1.5	6.09	35.5	10.7
H3	150	增强型套管	15.7	3.5	1.68	46.3	6.9
H4	300	增强型套管	17.8	3.5	3.64	49.5	14.9

外管直径加大后,增加了循环流体与岩土体之间的接触面积,并且当循环流体流量增加时,埋管中流体参与到与周围岩土体换热的体积增大,提高了换热效率。同时由于内管外侧设置了螺旋环肋片,在一定程度上增加了流程长度,强化了换热过程。

同一埋管形式换热深度从 150 m 增加至 300 m,地层初始平均温度升高,有利于取热,换热孔冬季延米取热量略有升高。双 U 换热孔冬季延米取热量从 32.1 W/m 提高至 35.5 W/m,套管换热孔冬季延米取热量从 46.3 W/m 提高至 49.5 W/m,同时由于换热深度增加,300 m 换热孔单孔取热量约为 150 m 换热孔的 2.2 倍。夏季排热情况下,同样受地层初始平均温度升高的影响,延米换热量会随埋管深度增加而下降(陈旭等, 2010),但单孔排热量因为深度增加而增大。

通常,换热孔的钻探费用和地下埋管材料费用占地源热泵系统初投资的一半以上。由于套管换热孔施工工艺相对复杂,初投资成本是双 U 换热孔的

2.5 倍,因此,在场地布孔条件充足的条件下,双 U 型埋管一般是更为经济合理的埋管形式;当场地面积有限时,可考虑加深换热孔深度或采用套管式换热器,增加单孔换热量,减少换热孔布设数量。

4 结论

不同地质条件以及埋管形式,会导致埋管换热能力产生差异。利用北京市 35 个现场换热孔岩土热响应试验数据分析了地层初始温度、地层岩性、地下水径流条件以及埋管形式对埋管换热能力的影响,主要结论如下:

(1)埋管换热能力与其换热深度内地层初始温度有相关性,地层初始温度较低的区域夏季排热效果更好,地层温度每变化 1 °C 时,换热能力相差 8% 左右。

(2)基岩热导率值比第四系松散沉积物大,换热能力相对较强,基岩分布区埋管换热能力比第四系平均高约 35%。在基岩地区利用浅层地热能有利

于减少钻孔数量或换热深度,但实际应用时,需充分分析钻探施工的经济性。

(3)地下水流速增加,热对流换热作用加强,当地下水流速从 0.14 m/d 增至 0.91 m/d, 延米换热量提升 13%。在冲洪积平原地区开发利用浅层地热能时,从扇顶到扇缘水动力条件由强变弱,地下水径流对埋管换热能力的有利影响会逐渐减小。

(4)相较双 U 换热器,套管换热器冬季延米取热量提升约 40%。换热深度从 150 m 增加至 300 m, 换热孔延米取热量略有升高,同时由于换热深度增加,300 m 换热孔单孔换热量约为 150 m 换热孔的 2.2 倍。在场地布孔条件充足的情况下,宜采用双 U 型埋管,当场地面积有限时,可考虑加深换热孔深度或采用套管式换热器。

致谢:研究过程中得到了北京市地热调查研究所柯柏林、张进平正高级工程师的大力支持,在此一并向给予项目支持的单位和个人表示衷心感谢!

Acknowledgements:

This study was supported by Beijing Institute of Geo-exploration Technology (Nos. PXM2018_158203_000010, PXM2018_158309_000002 and PXM2020_158309_000012).

参考文献:

- 蔡晶晶,陈汝东,王健. 2009. 地下水渗流对埋管传热影响的理论分析[J]. 流体机械, 37(12): 62-67, 18.
- 陈旭,范蕊,龙惟定,张改景. 2010. 竖单 U 形埋管换热器单因素敏感性分析[J]. 暖通空调, 40(2): 112-116.
- 陈友明,王宇航,莫姝皎. 2007. 土壤初始温度模型[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 34(7): 27-29.
- 陈忠. 2020. 地源热泵埋管换热器换热性能研究[J]. 真空科学与技术学报, 40(5): 495-498.
- 邓娜,王继林,王建栓,于晓慧,张于峰. 2014. 基于恒温法与恒热流法的土壤热响应测试分析与比较[J]. 太阳能学报, 35(2): 320-325.
- 方亮,张方方,方肇洪. 2009. 关于埋管换热器热响应试验的讨论[J]. 建筑热能通风空调, 28(4): 48-51.
- 顾吉浩,孙学梅,齐承英. 2015. 地下水渗流对单孔埋管换热器换热性能影响的数值模拟[J]. 暖通空调, 45(2): 120-123.
- 贺继超,别舒,易巍,任君,任毅. 2022. 地源热泵系统在北京大兴国际机场的应用[J]. 暖通空调, 52(5): 90-95.
- 孔彦龙,陈超凡,邵亥冰,庞忠和,熊亮萍,汪集暘. 2017. 深井换热技术原理及其换热量评估[J]. 地球物理学报, 60(12): 4741-4752.
- 雷晓东,胡圣标,李娟,杨全合,韩宇达,姜光政,郑佳. 2018. 北京地区基岩地层热物性参数特征[J]. 地球物理学进展, 33(5): 1814-1823.
- 李娟,郑佳,雷晓东,杜境然,李富,贾子龙,刘爱华. 2022. 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, 49(5): 1543-1554.
- 李文. 2021. 北京通州地温场特征及其影响因素[J]. 地质通报, 40(7): 1189-1194.
- 李泽锟,杜震宇. 2021. 地下水渗流对单 U 形埋管换热的影

- 响[J]. 科学技术与工程, 21(21): 9067-9073.
- 梅新忠,王楠,王子珑,孟德平,王华军. 2019. 增强型同轴套管换热器热响应试验及换热对比分析[J]. 河北工业大学学报, 48(3): 81-85.
- 彭涛,孙铁,王秉忱,李杨,赵军. 2017. 地下水人工流场能效增强技术在浅层地热能开发中的应用[J]. 水文地质工程地质, 44(6): 169-174.
- 尚少文,刘金玉,刘兵红,纪森,李龙新. 2018. 埋管群换热器温度场影响因素的模拟研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 34(3): 566-576.
- 孙秀刚,石俊龙,程大磊,林晓波,李国柱. 2015. 吉林省可再生能源建筑应用示范项目测评分析[J]. 沈阳工业大学学报, 37(4): 469-474.
- 王贵玲,杨轩,马凌,周佳琦,沈国华,王婉丽. 2021. 地热能供热技术的应用现状及发展趋势[J]. 华电技术, 43(11): 15-24.
- 王贵玲,张薇,梁继运,蔺文静,刘志明,王婉丽. 2017. 中国地热资源潜力评价[J]. 地球学报, 38(4): 449-459.
- 王华军,齐承英. 2010. 地下热响应实验中土壤初始温度的探讨[J]. 暖通空调, 40(1): 95-98.
- 王松涛,吴振,王华军. 2012. 基岩地区埋管换热器传热特性的测试研究[J]. 河北工业大学学报, 41(6): 69-73.
- 王瑜,刘志成. 2019. 地下水渗流对地源热泵竖单 U 埋管群传热特性的影响[J]. 实验室研究与探索, 38(9): 53-57.
- 卫万顺,李宁波,郑桂森,栾英波,杨俊伟,李翔,于媛,王立志. 2020. 中国浅层地热能成因机理及其控制条件研究[J]. 城市地质, 15(1): 1-8.
- 卫万顺,郑桂森,栾英波. 2010. 北京平原区浅层地温场特征及其影响因素研究[J]. 中国地质, 37(6): 1733-1739.
- 杨培志,陈嘉鹏,陈君文,李明. 2021. 双 U 型埋管换热器换热性能模拟分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 52(6): 1733-1738.
- 曾召田,吕海波,赵艳林,葛若东. 2015. 地下水渗流对竖埋管换热器传热影响的数值模拟[J]. 太阳能学报, 36(12): 3007-3014.
- 赵天雨,朱启银,杨强,朱冠宇,赵耿,庄培芝. 2022. 冬季工况埋管换热器换热特性的影响因素[J]. 深圳大学学报(理工版), 39(1): 28-35.

References:

- BEIER R A, ACUÑA J, MOGENSEN P, PALM B. 2014. Transient heat transfer in a coaxial borehole heat exchanger[J]. Geothermics, 51(7): 470-482.
- CAI Jing-jing, CHEN Ru-dong, WANG Jian. 2009. Analysis of effects of groundwater advection on geothermal heat exchanger[J]. Fluid Machinery, 37(12): 62-67, 18(in Chinese with English abstract).
- CHEN Ke, ZHENG Jia, LI Juan, SHAO Jing-li, ZHANG Qiu-lan. 2022. Numerical study on the heat performance of enhanced coaxial borehole heat exchanger and double U borehole heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 203: 117916.
- CHEN Xu, FAN Rui, LONG Wei-ding, ZHANG Gai-jing. 2010. Single factor sensitivity study of heat exchange performance of vertical single U-tube ground heat exchangers[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 40(2): 112-116(in Chinese with English abstract).
- CHEN You-ming, WANG Yu-hang, MO Zhi-jiao. 2007. Modeling for initial soil temperature[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 34(7): 27-29(in Chinese with English abstract).
- CHEN Zhong. 2020. Heat transfer of underground heat exchanger of ground-source heat pump air-conditioner: A simulation

- study[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 40(5): 495-498(in Chinese with English abstract).
- DENG Na, WANG Ji-lin, WANG Jian-shuan, YU Xiao-hui, ZHANG Yu-feng. 2014. Quantitative analysis and comparison of ground thermal response test based on constant temperature method and constant heat-flux method[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 35(2): 320-325(in Chinese with English abstract).
- FANG Liang, ZHANG Fang-fang, FANG Zhao-hong. 2009. Comments on the thermal response test of the ground heat exchangers[J]. Building Energy & Environment, 28(4): 48-51(in Chinese with English abstract).
- GU Ji-hao, SUN Xue-mei, QI Cheng-ying. 2015. Numerical simulation on influence of groundwater seepage on heat exchange performance of single-borehole ground heat exchangers[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 45(2): 120-123(in Chinese with English abstract).
- HE Ji-chao, BIE Shu, YI Wei, REN Jun, REN Yi. 2022. Application of ground-source heat pump systems to Beijing Daxing International Airport[J]. Heating Ventilating and Air Conditioning, 52(5): 90-95(in Chinese with English abstract).
- KONG Yan-long, CHEN Chao-fan, SHAO Hai-bing, PANG Zhong-he, XIONG Liang-ping, WANG Ji-yang. 2017. Principle and capacity quantification of deep-borehole heat exchangers[J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(12): 4741-4752(in Chinese with English abstract).
- LEI Xiao-dong, HU Sheng-biao, LI Juan, YANG Quan-he, HAN Yu-da, JIANG Guang-zheng, ZHENG Jia. 2018. Thermal properties analysis of bedrock in Beijing[J]. Progress in Geophysics, 33(5): 1814-1823(in Chinese with English abstract).
- LI Biao, HAN Zong-wei, HU Hong-hao, BAI Chen-guang. 2020. Study on the effect of groundwater flow on the identification of thermal properties of soils[J]. Renewable Energy, 147(P2): 2688-2695.
- LI Juan, ZHENG Jia, LEI Xiao-dong, DU Jing-ran, LI Fu, JIA Zi-long, LIU Ai-hua. 2022. Analysis of quaternary thermal properties and influencing factors on shallow geothermal energy exploitation in Beijing plain[J]. Geology in China, 49(5): 1543-1554(in Chinese with English abstract).
- LI Wen. 2021. Geothermal field in Tongzhou District of Beijing and its influencing factors[J]. Geological Bulletin of China, 40(7): 1189-1194(in Chinese with English abstract).
- LI Ze-kun, DU Zhen-yu. 2021. Influence of groundwater seepage on the buried depth of single U-type tube heat exchanger[J]. Science Technology and Engineering, 21(21): 9067-9073(in Chinese with English abstract).
- MEI Xin-zhong, WANG Nan, WANG Zi-long, MENG De-ping, WANG Hua-jun. 2019. Thermal response test and heat-transfer comparison of enhanced coaxial heat exchanger (ECHE)[J]. Journal of Hebei University of Technology, 48(3): 81-85(in Chinese with English abstract).
- PENG Tao, SUN Tie, WANG Bing-chen, LI Yang, ZHAO Jun. 2017. The energy efficiency enhancement technique of soil source heat pump system through groundwater artificial flow field[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 44(6): 169-174(in Chinese with English abstract).
- REES S J, SPITLER J D, DENG Zheng, ORIO C D, JOHNSON C N. 2004. A study of geothermal heat pump and standing column well performance[J]. ASHRAE Transactions, 109(1): 3-14.
- SHANG Shao-wen, LIU Jin-yu, LIU Bing-hong, JI Miao, LI Long-xin. 2018. Ground-coupled group heat exchanger factors affecting temperature simulation[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science), 34(3): 566-576(in Chinese with English abstract).
- SUN Xiu-gang, SHI Jun-long, CHENG Da-lei, LIN Xiao-bo, LI Guo-zhu. 2015. Evaluation and analysis for building application demonstration projects of renewable energy in Jilin province[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 37(4): 469-474(in Chinese with English abstract).
- WANG Gui-ling, YANG Xuan, MA Ling, ZHOU Jia-qi, SHEN Guo-hua, WANG Wan-li. 2021. Status quo and prospects of geothermal energy in heat supply[J]. Huadian Technology, 43(11): 15-24(in Chinese with English abstract).
- WANG Gui-ling, ZHANG Wei, LIANG Ji-yun, LIN Wen-jing, LIU Zhi-ming, WANG Wan-li. 2017. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta Geoscientia Sinica, 38(4): 449-459(in Chinese with English abstract).
- WANG Hua-jun, QI Cheng-ying, DU Hong-pu, GU Ji-hao. 2009. Thermal performance of borehole heat exchanger under groundwater flow: A case study from Baoding[J]. Energy and Buildings, 41(12): 1368-1373.
- WANG Hua-jun, QI Cheng-ying. 2010. Discussion on the initial ground temperature during thermal response tests[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 40(1): 95-98(in Chinese with English abstract).
- WANG Song-tao, WU Zhen, WANG Hua-jun. 2012. Test study of heat transfer performance of borehole heat exchangers in bedrock areas[J]. Journal of Hebei University of Technology, 41(6): 69-73(in Chinese with English abstract).
- WANG Yu, LIU Zhi-cheng. 2019. Influence of groundwater seepage to the heat transfer characteristics of double U-type ground heat exchanger group in heat pump system[J]. Research and Exploration in Laboratory, 38(9): 53-57(in Chinese with English abstract).
- WEI Wan-shun, LI Ning-bo, ZHENG Gui-sen, LUAN Ying-bo, YANG Jun-wei, LI Xiang, YU Yuan, WANG Li-zhi. 2020. Study on genetic mechanism and control conditions of shallow geothermal energy in China[J]. Urban Geology, 15(1): 1-8(in Chinese with English abstract).
- WEI Wan-shun, ZHENG Gui-sen, LUAN Ying-bo. 2010. Characteristics and influencing factors of the shallow geothermal field in Beijing plain area[J]. Geology in China, 37(6): 1733-1739(in Chinese with English abstract).
- YANG Pei-zhi, CHEN Jia-peng, CHEN Jun-wen, LI Ming. 2021. Simulation and analysis of heat transfer performance of double U-tube ground heat exchangers[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 52(6): 1733-1738(in Chinese with English abstract).
- ZENG Zhao-tian, LÜ Hai-bo, ZHAO Yan-lin, GE Ruo-dong. 2015. Numerical simulation of effect of groundwater seepage on vertically buried tubular heat exchanger[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 36(12): 3007-3014(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Tian-yu, ZHU Qi-yin, YANG Qiang, ZHU Guan-yu, ZHAO Geng, ZHUANG Pei-zhi. 2022. Thermal performance of ground heat exchanger under winter conditions[J]. Journal of Shenzhen University(Science and Engineering), 39(1): 28-35(in Chinese with English abstract).