

# 浅层地热能地下换热系统适宜性评价与优化设计

——以郑州市浅层地热能示范工程为例

卢 玮<sup>1,2</sup>, 尚永升<sup>1,3</sup>, 申云飞<sup>1,2</sup>

(1. 河南省地矿局第二地质环境调查院, 河南 郑州 450053;

2. 河南省深部探矿工程技术研究中心, 河南 郑州 450053;

3. 河南省地热能开发工程技术研究中心, 河南 郑州 450053)

**摘要:** 地热资源的开发利用对减少CO<sub>2</sub>排放和抑制全球气候变化能起到积极的作用。目前,国内浅层地热能地下换热主要有地下水换热系统和埋管换热系统2种方式,其共同优点是能源利用系数高、安全稳定、零污染排放等,但在换热效率、开发利用条件、空间占用等方面各有利弊。本文叙述了浅层地热能地下换热系统适宜性评价指标,结合郑州市浅层地热能示范工程建设项目,分别进行了抽水与回灌试验、岩土热物性参数测试、地层热响应试验等现场试验,对浅层地热能2种换热方式的适宜性进行了分析比较,得出建设区岩土具有较高的导热系数和容积比热容,有利于热量的传导与保持;但区域水位埋深浅,现场试验回灌量仅107.37 m<sup>3</sup>/d,回灌能力较差。相比之后,优化设计并选择了更适用于建设区浅层地热能开发利用的地下埋管换热系统。

**关键词:** 浅层地热能; 地下换热系统; 地下水换热系统; 埋管换热系统; 回灌试验; 岩土热物测试; 优化设计; 郑州市

中图分类号: P634; P314 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2022)03-0146-08

## Suitability evaluation and optimization design of the shallow geothermal energy underground heat exchange system—Taking Zhengzhou shallow geothermal energy demonstration project as an example

LU Wei<sup>1,2</sup>, SHANG Yongsheng<sup>1,3</sup>, SHEN Yunfei<sup>1,2</sup>

(1.No.2 Institute of Geo-environment Survey of Henan, Zhengzhou Henan 450053, China;

2.Henan Engineering Research Center of Deep Exploration, Zhengzhou Henan 450053, China;

3.Henan Engineering Research Center of Geothermal Resources Development, Zhengzhou Henan 450053, China)

**Abstract:** The development and utilization of geothermal resources can play a positive role in reducing CO<sub>2</sub> emissions and restraining global climate change. Underground heat transfer of shallow geothermal energy mainly includes the groundwater well system and the underground buried pipe system. Their common advantages are high energy utilization coefficient, safety and stability, zero pollution discharge, etc.; however it has advantages and disadvantages in heat exchange efficiency, development and utilization conditions, space occupation and so on. This paper describes the suitability evaluation index of the shallow geothermal energy underground heat exchange system; and in the execution

收稿日期: 2022-01-19; 修回日期: 2022-04-12 DOI: 10.12143/j.ztgc.2022.03.019

基金项目: 河南省自然资源厅自然资源科技项目“河南省地热资源监测技术与示范”(编号: 豫自然资函[2021]157号-3); 郑州市财政项目“郑州市多要素城市地质调查浅层地热能示范工程建设”(编号: 郑财招标采购-2020-439)

第一作者: 卢玮, 女, 汉族, 1987年生, 工程师, 河南省深部探矿工程技术研究中心主任, 从事地热资源勘查开发和深部探测工程与研究, 河南省郑州市南阳路56号, 21542173@qq.com。

引用格式: 卢玮, 尚永升, 申云飞. 浅层地热能地下换热系统适宜性评价与优化设计——以郑州市浅层地热能示范工程为例[J]. 钻探工程, 2022, 49(3): 146-153.

LU Wei, SHANG Yongsheng, SHEN Yunfei. Suitability evaluation and optimization design of the shallow geothermal energy underground heat exchange system—Taking Zhengzhou shallow geothermal energy demonstration project as an example[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(3): 146-153.

of the shallow geothermal energy demonstration project in Zhengzhou, field tests such as pumping and reinjection test, geotechnical thermophysical parameter test and formation thermal response test were carried out respectively, and the suitability of two heat exchange modes of shallow geothermal energy is analyzed and compared, It is concluded that the rock and soil in the construction area has high thermal conductivity and volume specific heat capacity, which is conducive to heat conduction and maintenance; but the buried depth of the regional water level is shallow, the reinjection capacity is only 107.37m<sup>3</sup>/d, and is poor. Through comparison, the underground buried pipe heat exchange system which is more suitable for the development and utilization of shallow geothermal energy in the construction area has been finally optimized and selected for development.

**Key words:** shallow geothermal energy; underground heat exchange system; groundwater heat exchange system; buried pipe heat exchange system; reinjection test; geotechnical thermophysical test; optimize design; Zhengzhou city

## 0 引言

人类规模化活动导致气候变化和生态环境恶化已经成为不争事实,也是人类共同面对的一个全球性问题。其中,CO<sub>2</sub>的产生几乎都与人类对能源的需求和工业过程中传统化石燃料的排放密切相关<sup>[1-2]</sup>,据统计显示:我国化石类能源的消耗产生的CO<sub>2</sub>贡献率达90%<sup>[3]</sup>,2020年,我国CO<sub>2</sub>排放量近100亿t,位居世界第一<sup>[4]</sup>。所以,减少化石类能源消耗,寻找新的替代能源和资源势在必行。

地热资源是一种储量丰富、分布较广、稳定可靠的清洁可再生能源。从目前开发利用方式划分,地热资源主要有浅层地热能、中深层水热型地热和干热岩3种类型,是目前和未来的重要能源和资源<sup>[5-6]</sup>。统计表明:地热能源利用系数高达73%,约是太阳能的5.4倍、风能的3.6倍<sup>[7]</sup>。2015—2020年,全球新增地热发电约3649GW,增长约27%,地热直接利用总装机容量增长52.0%,全球每年地热直接利用可减少2.526亿t的CO<sub>2</sub>排放<sup>[8]</sup>。由此可见,地热资源的开发利用对减少CO<sub>2</sub>排放和抑制全球气候变化起到积极的作用<sup>[9]</sup>。

所以,大力推进地热资源勘查开发,对保障国家能源资源安全,构建清洁低碳、安全高效能源体系,实现碳中和目标具有重要的意义。

本文结合2021年度郑州市浅层地热能示范工程建设项目,根据其适宜性评价原则,对浅层地热能开发利用的地下水换热和地埋管换热2种地下换热系统进行试验研究,并提出优化设计方案。

## 1 浅层地热能地下换热系统类型

目前,国内浅层地热能地下换热系统从换热介质类型划分主要有地下水换热系统和地埋管换热系

统2种方式。这2种浅层地热能开发利用方式与其它供暖制冷系统相比,可以实现供暖(冷)区域的零污染排放,直接改善适用区域的大气质量,具有资源分布广泛、储量巨大、安全稳定、开发便利、清洁高效等特点,属于可再生绿色能源<sup>[10]</sup>。但2种方式各有利弊,地下水换热系统换热效率高、占用地下空间少、投资较低,突出问题是在细颗粒地层回灌率较低,对地质环境影响较大,水井及抽水设备需要持续维护保养,对水文地质条件及水质要求高;地埋管换热系统对水文地质条件适宜性较强、对地质环境影响较小、地下系统不需要维护保养,不占用地面空间,存在问题是换热效率相对地下水换热系统低、占用较大地下空间、投资较水源系统高。

## 2 地下换热系统适宜性评价内容

### 2.1 地下水换热系统

地下水换热系统主要由抽水井和回灌井组成,能否保证供暖制冷持续稳定,主要取决于水资源量、回灌能力、成井质量和设备使用寿命。所以,对于地下水源换热系统重点应从区域水文地质条件、回灌能力、水质和地质环境损害等方面进行评价<sup>[11-14]</sup>。

(1)区域水文地质条件评价。采用地下水源换热系统供暖制冷时,首先考虑地下水资源量能否满足需求,并且水位埋深和钻井深度不宜过深。评价时重点考虑地下水的富水性、补给条件、开采潜力3个因素。

(2)地下换热系统回灌能力评价。回灌能力的大小决定区域地质环境的损害程度和工程成本,同时也决定了整个系统的成败。影响回灌效果的因素主要有含水层岩性、地下水位埋深和成井质量。含水层颗粒越粗,越有利于回灌。据实际工程表明:一

一般情况下,构造含水层和卵砾石含水层中回灌率为70%~100%;粗砂、中砂含水层中回灌率为40%~70%;中细砂含水层中回灌率为30%~50%;细砂、粉砂含水层中回灌率<30%。水位埋深对总回灌量的大小影响明显,在成井质量理想的情况下,水位埋深越大、含水层颗粒越粗,单位回灌量越大。

(3)地下水水质评价。水质的好坏直接影响系统管网和设备的使用寿命。地下水水质评价包括温度、化学成分、浑浊度、含砂量、硬度、矿化度等,在此基础上应重点进行腐蚀性评价。

(4)地质环境损害评价。在水质和腐蚀性评价基础上,对可能造成的地下水位下降、水质变化、地面沉降和尾水排放等进行预测和评价。

## 2.2 地埋管换热系统

由于地下水换热系统回灌问题、地下水保护区划分和钻井取水许可等政策限制,地下埋管换热系统被广泛应用。在进行适宜性评价时,一般包括以下内容和指标:

(1)场地岩土特性评价。场地地层条件和岩土特性是浅层地热能资源赋存的基本条件,包括岩体的地层岩性、结构、颗粒度、密度、比热、地层厚度、含水率和岩土力学参数等。重点考虑地埋管钻探的经济性、钻探方法和回填材料选择,与此同时需要取样测试,主要用于评价岩土层的导热性能、换热效率等。值得注意的是不同岩性其导热系数、容积比热容数值相差较大,多数情况下钻孔由不同岩性组成。所以,为了更加精准取得岩土综合热物参数和优化工程设计,在此单项测试基础上必须进行岩土热响应试验<sup>[15]</sup>。需要说明的是单位孔深换热量不是恒定不变的,它与很多因素有关<sup>[16-18]</sup>。因此,单位孔深换热量的取值工程设计中应加以注意。

(2)水文地质条件评价。实践证明区域水文地质条件较好地区,其地下埋管系统换热效率更高,因为地下水的流动减小了热阻,为散热和吸热创造了有利条件。所以,在地下埋管换热系统适宜性评价中应进行地层岩体的含水率、含水层结构、水动力条件、地下水径流、地下水渗流等水文地质条件评价。

(3)热失衡评价。主要对供暖制冷2个工况条件下冷热失衡导致的换热效率变化,地下水水质和土壤中微生物、种群变化及影响的监测评估。

## 3 郑州市浅层地热能示范工程优化设计

### 3.1 项目来源及要求

郑州市浅层地热能示范工程为2021年度郑州市多要素城市地质调查子项目,依托河南省黄河迎宾馆原有和正在实施的节能改造项目进行示范工程建设。工作内容包括前期建设场地勘查试验、设计、地下换热工程建设、监测系统建设和浅层地热能展示系统建设等,同时解决宾馆部分别墅楼近31350 m<sup>2</sup>建筑面积的供暖制冷。

根据河南省黄河迎宾馆地源热泵(一期)项目情况,地源热泵空调系统建设内容包括300口双U型PE管垂直埋管系统,其中单口井换热热量5 kW,井深120 m,井径180 mm,井与井的间距5 m,连接井之间的水平管采用同程连接,取得了良好的节能效果和环境效益。因此,本次设计拟采用原设计方案,同时,对建设场地地下水换热方式进行可行性分析。

为了优化设计,开展了示范工程区内抽水与回灌试验、示范项目前期试验和分析研究。

### 3.2 示范工程区抽水与回灌试验

示范工程位于郑州市北部黄河冲积平原内,含水层以粉细砂为主,局部夹粗砂和砾石,顶板埋深10~15 m,地下水位埋深5~15 m。本次示范工程首先在黄河迎宾馆3个地下水环境影响监测孔中,分别进行3个落程的稳定流抽水试验及自流回灌试验。

#### 3.2.1 抽水试验

根据潜水含水层单孔稳定流抽水试验资料,按下式计算水文地质参数:

$$K = \frac{Q}{\pi(H^2 - h^2)} \ln \frac{R}{r} \quad (1)$$

$$R = 2S\sqrt{HK} \quad (2)$$

式中:K——渗透系数,m/d;Q——稳定抽水量或注水量,m<sup>3</sup>/d;H——未抽水时含水层厚度,m;h——抽水含水层厚度,m;S——水位降深或升深,m;R——影响半径,m;r——过滤器半径,m。

三组抽水试验主要参数成果见表1。

从表1可以看出:三组抽水试验的单位涌水量平均值为9.36 m<sup>3</sup>/(h·m),表明建设区含水层富水性较好,渗透系数平均值为8.14 m/d,渗透性相对较差。

表 1 抽水试验主要参数成果

Table1 Main parameter results of pumping test

序号	孔号	主要含水层		静水位/ m	涌水量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	降深/ m	单位涌水量/ [m <sup>3</sup> ·(h·m) <sup>-1</sup> ]	参数计算	
		岩性	厚度/m					渗透系数/(m·d <sup>-1</sup> )	影响半径/m
1	SJ1	粉砂	26.2	13.22	14.43	1.48	9.75	7.84	42
					27.16	2.98	9.11	8.60	89
2	SJ2	粉砂	25.6	14.20	14.40	1.42	9.85	8.30	41
					28.26	3.00	9.42	9.15	92
3	SJ3	粉砂	27.8	13.60	14.48	1.66	8.72	6.70	45
					27.50	2.96	9.29	8.23	90

### 3.2.2 回灌试验

该区岩性主要由粉砂岩及粉细砂岩组成,从表 1 可知,其渗透性较差,根据抽水回灌试验所得数据,绘制其回灌量变化曲线(如图 1 所示)。回灌时,前 20 min 内,水位变化较快,随着时间的延长,水位增加,回灌速率越来越慢,根据场地 SJ2 孔回灌试验数据,其回灌量为 107.37 m<sup>3</sup>/d。另外,建设区含水层水位埋深基本在 5~15 m,埋深较浅,总体评价含水层回灌能力较弱。

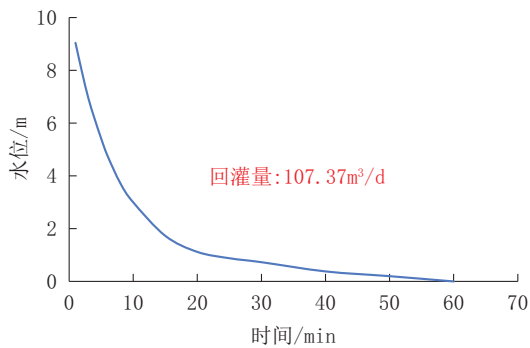


图 1 SJ2 孔回灌量变化曲线  
Fig.1 Recharge volume change curve

### 3.3 岩土热物性参数测试

本次在 4 个热响应试验孔和 14 个地质孔中共采取原状土样 200 组进行热物性参数测试,获取了不同岩性岩土体的热物性指标(见表 2 及图 2~4)。

从图 2~4 关系曲线反映出不同岩性热物理参数具有以下特征:

(1)随岩性颗粒变细,导热系数 $\lambda$ 、热扩散系数 $\alpha$ 有增大的趋势,容积比热容 $C$ 则呈减小的趋势。

(2)不同岩性中,随着岩性颗粒变细,岩石含水量呈减小的趋势。

(3)不同岩性的导热系数 $\lambda$ 、热扩散系数 $\alpha$ 与含

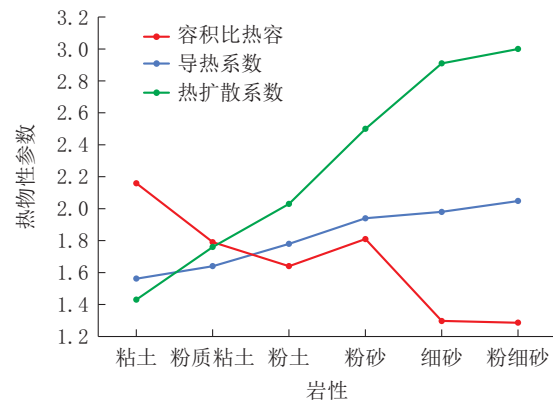


图 2 不同岩性平均热物性参数曲线

Fig.2 Curves of average thermophysical parameters for different lithologies

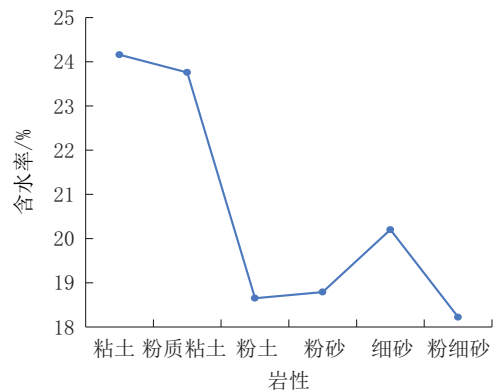


图 3 不同岩性平均含水量曲线

Fig.3 Average water content curves of different lithologies

水量呈负相关,容积比热容 $C$ 与含水量则呈正相关。

### 3.4 岩土热响应试验

#### 3.4.1 现场热响应试验分析

在示范区内选择 4 个点进行了 4 组热响应试验,测试孔钻孔深度 152 m,换热器类型为双 U 型,埋管

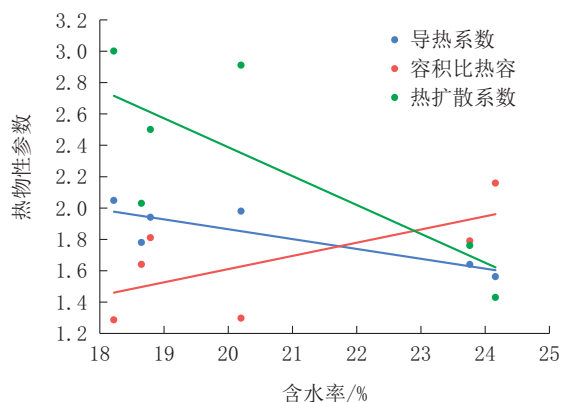


图4 不同岩性平均热物性参数与含水量相关性曲线

Fig.4 Correlation curves between average thermophysical parameters and water content of different lithologies

深度 152 m, 埋管直径为 DN32 mm, 壁厚 3.0 mm。

分别对岩土体初始平均温度、小功率恒热流、大功率恒热流进行了试验, 每次加热(冷)负荷停止后, 均进行了地温恢复试验, 试验结果见表 3 及图 5。

从试验结果可以看出:

(1) 大功率与小功率两个不同加热条件下, 对岩石的热导率系数影响不大, 在进行现场试验加热功率及试验参数选取时, 应根据实际工程运行的参数进行设计和取值。本次暂按照不同功率热响应试验及室内试验参数加权取值确定参数。

(2) DJ1、DJ3 孔在同一场地, 相距 80 m, 在基本相近的大加热功率的情况下取得的导热系数相差约 14.1%, 经分析认为 14.1% 的数值差异可能与埋管平均进水温度差异有关; DJ4 孔在两个差异加大的加热功率下取得的导热系数相同, 在许可误差范围。

表 2 不同岩性热物性参数统计

Table 2 Summary of thermophysical parameters of different lithology

岩性	含水率/ %	密度 $\rho$ / ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	导热系数 $\lambda$ / [ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ ]	容积比热容 $C$ / [ $\text{J}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{k})^{-1}$ ]	热扩散系数 $\alpha$ / [ $10^{-3}(\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1})$ ]	
	样本数 110 个					
粉质粘土	最大值	28.86	2.100	1.940	2.320	2.34
	最小值	18.66	1.910	1.330	1.270	1.18
	平均值	23.76	2.000	1.640	1.790	1.76
	样本数 7 个					
粉土	最大值	22.65	2.050	1.900	1.700	2.12
	最小值	14.65	1.930	1.660	1.580	1.94
	平均值	18.65	1.990	1.780	1.640	2.03
	样本数 55 个					
粉砂	最大值	23.40	2.130	2.260	2.530	3.51
	最小值	14.18	1.960	1.620	1.090	1.48
	平均值	18.79	2.040	1.940	1.810	2.50
	样本数 6 个					
细砂	最大值	26.90	2.040	2.658	1.665	4.64
	最小值	10.90	1.780	1.371	0.793	1.73
	平均值	20.20	1.940	1.973	1.297	2.91
	样本数 10 个					
粉细砂	最大值	26.90	2.140	2.365	1.715	5.26
	最小值	10.90	1.950	1.517	0.777	1.56
	平均值	18.22	2.043	2.048	1.286	3.00
	样本数 9 个					
粘土	最大值	34.20	2.100	2.020	3.078	3.02
	最小值	17.90	1.940	1.321	1.473	0.76
	平均值	24.16	2.020	1.562	2.159	1.43

表 3 现场热响应试验结果统计

Table 3 Summary of field thermal response test results

孔号	埋管方式	孔深/m	孔径/mm	有效埋管深度/m	循环流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	埋管平均进水温度/°C	埋管平均出水温度/°C	进出温差/°C	平均加热功率/kW	岩土综合导热系数λ/[W·(m·K) <sup>-1</sup> ]	岩土容积比热容C/[J·(m <sup>3</sup> ·°C) <sup>-1</sup> ]
DJ1	双U	152	180	152	0.948	25.30	21.88	3.42	3.770	2.07	3.5779
				152	1.274	32.02	26.82	5.20	7.703	2.27	
DJ2	双U	152	180	152	1.019	24.24	21.57	2.67	3.164	1.86	3.1853
				152	1.412	31.73	27.12	4.61	7.569	1.93	
DJ3	双U	152	180	152	1.002	26.42	22.87	3.55	4.136	2.05	3.4563
				152	1.322	33.25	28.22	5.03	7.732	1.94	
DJ4	双U	152	180	152	1.008	25.84	22.38	3.46	4.055	1.83	3.4065
				152	1.313	32.38	27.42	4.96	7.573	1.83	

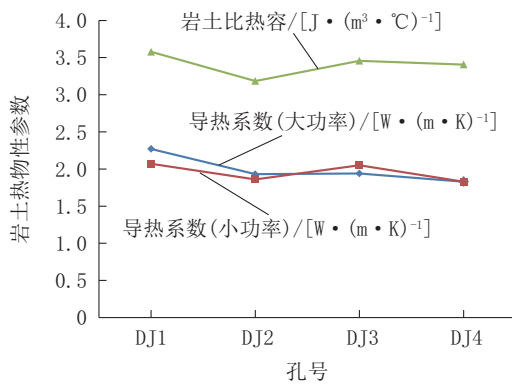


图 5 不同试验孔岩土热物性参数曲线

Fig.5 Curves of the geotechnical thermophysical parameters of different test holes

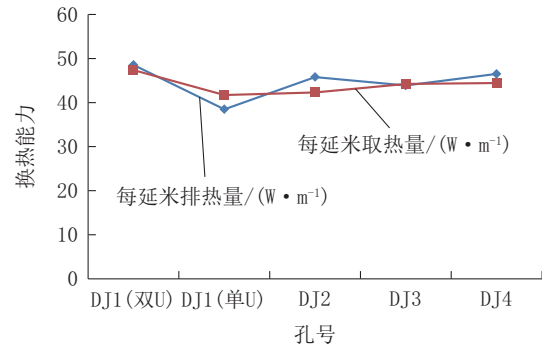


图 6 不同试验孔换热能力曲线

Fig.6 Heat transfer capacity curves of different test holes

3.4.2 地埋管换热能力的确定

测试孔深度均为 152 m,工作区 152 m 以浅岩土体初始平均温度约为 17.47~18.08 °C,各孔测试回填方式及换热结果详见表 4 及图 6。

试验结果表明:采用中细砂回填换热效果最好

(DJ1 双 U);其次为原浆回填(DJ4)(钻遇地层累计砂层厚度较厚,原浆中砂含量较高);之后为水泥+中细砂回填和膨润土+中细砂回填。

与原浆回填相比,采用中细砂回填方式,拟合工况条件下的排热能力和取热能力分别提高 4.3% 和 6.7%;采用水泥+细砂回填方式,拟合工况条件下

表 4 测试孔现场热响应试验测试结果

Table 4 Field thermal response test results of test holes

埋管类型	测试孔编号	回填方式	初始温度/°C	小功率导热系数/[W·(m·°C) <sup>-1</sup> ]	大功率导热系数/[W·(m·°C) <sup>-1</sup> ]	单位孔深排热量参考值/(W·m <sup>-1</sup> )	单位孔深取热量参考值/(W·m <sup>-1</sup> )
双U	DJ1	中细砂	18.03	2.07	2.27	48.52	-47.38
单U	DJ1	中细砂	—	—	—	38.48	-41.70
双U	DJ2	水泥+中细砂	17.81	1.86	1.93	45.78	-42.29
双U	DJ3	膨润土+中细砂	18.08	2.05	1.94	43.87	-44.24
双U	DJ4	原浆	17.47	1.83	1.83	46.50	-44.42

注:单位孔深排热或取热量是在特定进、出水温度下测得的,表中给定的单位孔深排热量为供/回水温度 33 °C/28 °C 条件的拟合值,单位孔深取热量为供/回水温度 5 °C/8 °C 条件的拟合值

的排热能力和取热能力分别降低1.5%和4.8%;采用膨润土+中细砂回填方式,拟合工况条件下的排热能力和取热能力分别降低5.7%和0.4%。

此外,根据DJ1孔“双U”和“单U”两组试验的换热能力可以看出,与“双U”相比,“单U”每延米排热量下降20.69%,每延米取热量下降11.99%,说明“单U”虽然孔内换热管长度减半,但是仍具有较强的换热能力。

### 3.5 地质环境影响动态监测

采用地埋管换热系统,传热介质通过密闭的管内循环,实现传热介质与地下岩土层的热交换。整个换热过程与地下水无直接接触,避免了对地下水水质、水位等的侵扰。同时,为了评估项目运行对地质环境的影响,在场地不同位置布设15个地质环境影响监测孔和3个地下水环境影响监测孔,并按层位安装监测仪器,定期取样化验,以实现地下土壤温度场,地下水水温、水质和微生物变化等进行长期动态监测。

### 3.6 优化设计结果

综上所述,建设场地含水层回灌能力较弱,建设区岩土具有较高的导热系数和容积比热容,有利于热量的传导与保持。相较于地下水换热系统,地埋管换热系统更适用于建设区浅层地热能开发利用。

示范工程最终在黄河迎宾馆湖底和树林区域优化设计地下换热孔360个,采用De32 mm双U型PE管,换热孔间距5 m。根据场地岩土热物性参数分析,确定单孔有效深度150 m,钻孔孔径180 mm,既能节约建设成本,又能减少换热场地面积。

根据不同回填材料现场试验结果,下管完毕后设计采用中细砂回填。

设计水平管与双U垂直换热孔采用双回路连接,在双U换热孔内,一条支路出现故障废弃时,另一条支路可变换成单U换热孔运行,仍具有较强的换热能力。

同时布设15个地质环境影响监测孔和3个地下水监测孔,对地下温度场、水质及微生物等环境影响进行监测和评价。

## 4 结论

(1)建设区位于郑州市北部的黄河冲积平原,黄河冲积平原为强富水性区,含水层以粉细砂为主,水位埋深浅,回灌量仅107.37 m<sup>3</sup>/d,回灌能力较差。

(2)根据对不同岩性热物理参数分析,认为随岩性颗粒变细,导热系数 $\lambda$ 、热扩散系数 $\alpha$ 有增大的趋势,容积比热容 $C$ 则呈减小的趋势。不同岩性中,随着岩性颗粒变细,岩石含水百分量呈减小的趋势。不同岩性的导热系数 $\lambda$ 、热扩散系数 $\alpha$ 与含水量呈负相关,容积比热容 $C$ 与含水量则呈正相关;其中粉细砂的导热系数 $\lambda$ 和热扩散系数 $\alpha$ 平均值最大。

(3)根据现场热响应试验结果,采用中细砂回填换热效果最好,其次为原浆回填,最后为水泥+中细砂回填和膨润土+中细砂回填。

(4)通过综合研究分析,建设区岩土具有较高的导热系数和容积比热容,有利于热量的传导与保持。相较于地下水换热系统,地埋管换热系统更适用于建设区浅层地热能开发利用。

### 参考文献(References):

- [1] 习近平.在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[J].中华人民共和国国务院公报,2020(28):5-7.  
XI Jinping. The statement at the general debate of the 75<sup>th</sup> Session of the United Nations General Assembly[J]. The Bulletin of the State Council of the People's Republic of China, 2020(28):5-7.
- [2] 刘强,陈怡,陈济,等.新常态下我国碳排放达峰形势分析[R]. 2021.  
LIU Qiang, CHEN Yi, CHEN Ji, et al. Analysis of China's Carbon Emission Peaking Situation under the New Status[R]. 2021.
- [3] Ritchie H, Roser M. CO<sub>2</sub> and Green house Gas Emissions[EB/OL]. Our World in Data. Org, (2020-08). <https://ourworldindata.org/CO2-and-other-greenhouse-gas-emissions>.
- [4] BP. Statistical Review of World Energy[R].2021.
- [5] 卢予北,李艺,卢玮,等.新时代地热资源勘查开发问题研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(3):1-8.  
LU Yubei, LI Yi, LU Wei, et al. Research on the exploration and development of geothermal resources in the new era[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(3):1-8.
- [6] 吴焯,王建华,卢予北.“钻探+”在民生地质工作中的作用与地位[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(11):1-5.  
WU Ye, WANG Jianhua, LU Yubei. Role and position of “Drilling +” in livelihood geology[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(11):1-5.
- [7] 廖忠礼,张予杰,陈文彬,等.地热资源的特点与可持续开发利用[J].中国矿业,2006(10):8-11.  
LIAO Zhongli, ZHANG Yujie, CHEN Wenbin, et al. Available persist exploitation and utilization of geothermal resources

- [J]. China Mining Maga, 2006, 15(10): 8-11.
- [8] 马冰,贾凌霄,于洋,等.世界地热能开发利用现状与展望[J].中国地质,2021,48(6):1734-1747.  
MA Bing, JIA Lingxiao, YU Yang, et al. The development and utilization of geothermal energy in the world[J]. Geology in China, 2021, 48(6): 1734-1747.
- [9] 尹立河.地热利用迎来又一个高峰——2010年世界地热大会见闻[J].国土资源,2010(6):33.  
YIN Lihe. Geothermal utilization ushers in another peak—Information from the 2010 World Geothermal Conference[J]. Land Resource, 2010(6):33.
- [10] 冉宇进,张浩.浅层地热能资源调查及开发利用研究[J].冶金与材料,2018,38(5):1-2.  
RAN Yujin, ZHANG Hao. Shallow geothermal energy resources investigation and utilization research [J]. Metallurgy and Materials, 2018, 38(5): 1-2.
- [11] 杜新强,冶雪艳,路莹,等.地下水人工回灌堵塞问题研究进展[J].地球科学进展,2009,24(9):973-980.  
DU Xinqiang, YE Xueyan, LU Ying, et al. Advances in clogging research of artificial recharge[J]. Advance in Earth Sciences, 2009, 24(9): 973-980.
- [12] 亢涵,李玲,潘俊,等.悬浮物颗粒导致的地下水热源回灌堵塞研究现状及展望[J].建筑与预算,2018,265(5):61-63.  
KANG Han, LI Ling, PAN Jun, et al. Research status and prospects of groundwater source heat pump recharge blockage caused by suspended particles [J]. Construction and Budget, 2018, 265(5): 61-63.
- [13] 路莹,杜新强,范伟,等.地下水人工回灌过程中微生物堵塞的预测[J].湖南大学学报(自然科学版),2012,39(1):77-80.  
LU Ying, DU Xinqiang, FAN Wei, et al. Prediction of microbial clogging in groundwater artificial recharge [J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2012, 39(1): 77-80.
- [14] 潘俊,王天慧,杜晓宇,等.铁细菌对地下水热源回灌堵塞的生物化学行为研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(2):360-367.  
PAN Jun, WANG Tianhui, DU Xiaoyu, et al. Biochemical behavior of iron bacteria on plugging of groundwater source heat pump[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2018, 34(2): 360-367.
- [15] 李鹏翔,陈胜.地源热泵岩土热响应测试分析及应用[J].工程地球物理学报,2021,18(4):531-537.  
LI Pengxiang, CHEN Sheng. Analysis and applications of geothermal response test for ground coupled heat pump [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2021, 18(4): 531-537.
- [16] 王雯璐,吴焯,陈莹,等.地源热泵回填材料配比优选室内试验研究[J].水电能源科学,2014,32(6):141-144.  
WANG Wenlu, WU Ye, CHEN Ying, et al. Laboratory test study on optimization of backfill material ratio of ground source heat pump [J]. Hydropower Energy Science, 2014, 32(6): 141-144.
- [17] 王冲,易发成,吴利.垂直埋管地源热泵膨润土基钻孔回填材料导热特性研究[J].中国建材科技,2014,23(1):48-50.  
WANG Chong, YI Facheng, WU Li. Study on the thermal conductivity of bentonitebased drilling backfill material for vertical underground pipe groundsource heat pump[J]. China Building Materials Science and Technology, 2014, 23(1): 48-50.
- [18] 庄迎春,孙友宏,谢康和.直埋闭式地源热泵回填土性能研究[J].太阳能学报,2004,25(2):216-220.  
ZHUANG Yingchun, SUN Youhong, XIE Kanghe. Study on performance of backfilled soil for vertical-buried closed-loop gshp[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2004, 25(2): 216-220.

(编辑 荐华)