

# 西安中深层 U 型对接换热井取热能力及热影响半径

韩元红<sup>1</sup>, 张育平<sup>1</sup>, 张廷会<sup>1</sup>, 刘俊<sup>2</sup>, 薛宇泽<sup>1</sup>

(1.自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室, 陕西 西安 710021; 2.西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 中深层地热能井下换热技术是一种环保的地热能开发利用技术, U 型对接换热井为重要类型之一, 取热能力和热影响半径是这一技术应用推广的关键问题。文章以西安某 2 500 m 深、水平段长 200 m 的 U 型对接换热井为研究对象, 基于实测地层温度和围岩热物性参数, 通过原位测试及数值模拟技术, 分析换热井的取热能力, 探讨换热过程中围岩地层温度变化特征及范围。结果表明: 目标换热井 30 a 可持续取热功率达 750 kW, 平均换热功率为 144 W/m; 围岩地温衰减程度和范围随着取热功率增大而增大; 换热井不同深度热影响半径不同, 深部地层整体大于浅部, 750 kW 取热功率下取热 30 a 最大热影响半径超过 100 m, 换热井进、出水井间存在一定程度的热干扰。

**关键词:** 地热能; U 型对接换热井; 取热能力; 热影响半径

**中图分类号:** TK529 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)05-0620-07

## 0 引言

地热能是一种绿色低碳的可再生能源, 具有分布广、储量大、清洁环保等特点。利用地热能作为建筑供暖, 能够有效缓解我国化石能源紧缺、大气污染严重等方面的压力, 满足碳减排和治污、降霾的需求<sup>[1]</sup>。深井换热技术因不涉及回灌和排放问题, 不会因回灌不利而造成地面沉降或因地下水排放造成土壤和地表水污染, 是目前公认环保的地热能开发、利用方式。该技术又被称为“中深层无干扰供热技术”<sup>[2]</sup>、“保水采热”技术<sup>[3]</sup>或“取热不取水”技术<sup>[4]</sup>。我国居民住宅集中, 地热供暖项目施工面积有限, 很多城市限制开采地下水, 深井换热技术是这些地区地热能开发的唯一选择。

20 世纪末深井换热技术被提出<sup>[5]</sup>, 之后针对这一技术的取热能力<sup>[6-8]</sup>和影响因素的研究相继展开<sup>[9-12]</sup>。以往研究大多针对较常见的同轴套管换热井, 而对于 U 型对接换热井的研究刚刚起步。高有川<sup>[4]</sup>借助数值模拟技术预测 U 型对接井换热性能。Li C<sup>[13]</sup>分析、研究了影响取热性能的因素。但是少见针对热影响半径的专门研究, 基于实测地温和实测热物性参数对于取热能力的研究、评

估也较少, 计算结果缺乏实际井原位试验验证。本文以西安某实际运行 U 型对接换热井为原型, 基于实测地温及岩土热物性参数, 通过原位试验及其验证下的数值模拟, 分析围岩地温影响范围, 讨论 U 型对接换热井取热能力及可持续性, 以期为相同热背景区域 U 型对接换热井开发、设计提供依据。

## 1 目标井概况

### 1.1 位置及结构

目标井位于陕西省西安市某小区内, 井深 2 500 m, 井型结构、井径配比、几何尺寸、材质选用等如图 1 所示。

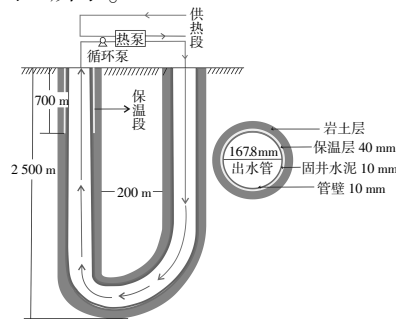


图 1 换热井几何结构

Fig.1 Structure of the deep U-shaped borehole exchanger

收稿日期: 2023-08-29。

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2020JM-717, 2023-JC-QN-0631); 陕西省重点研发计划项目(S2020-YF-ZDCXL-ZDLSF-0114, 2021ZDLSF05-12, 2022ZDLSF07-06)。

作者简介: 韩元红(1988-), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事地热资源开发利用相关研究。E-mail: hanyuanhong222@163.com

1.2 围岩地温

钻井完成后静置至井内外温度达到平衡,选择长度更大的直井段开展井温测试,并经去斜校正后得到井温曲线,如图 2 所示。百米平均地温梯度为 3.3 ℃。

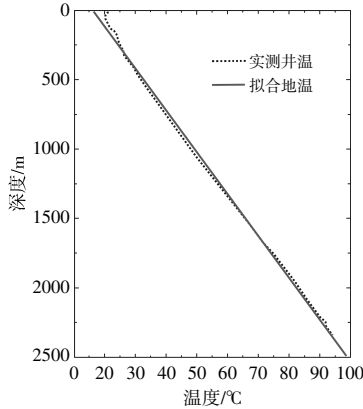


图 2 围岩地温

Fig.2 Ground temperature curves

1.3 围岩热物性

根据目标井层位特征,取沉积物或典型岩心样品进行热物性参数测试。选用 TC3100E 热线法导热系数测试仪测量黄土和松散粉砂层导热系数;借助 DSC 间接法测得样品的比热容;采用德国 Lippmann and Rauhen GbR 光学扫描热导仪 TCS(Thermal Conductivity Scanning)测试半固结-固结围岩岩心样品热物性参数,其中饱和水校正算法为

$$K_c = K_m \cdot \left( \frac{K_w}{K_a} \right)^\phi \quad (1)$$

式中: $K_m, K_c$  分别为实测热导率和校正热导率,  $W/(m \cdot K)$ ;  $K_w$  为水热导率,  $0.600 W/(m \cdot K)$ ;  $K_a$  为空气热导率,  $0.026 W/(m \cdot K)$ ;  $\phi$  为孔隙度, %。

经饱和水校正后得到各层位热物性参数如表 1 所示。

表 1 各层位实测热物性参数

Table 1 Hermophysical parameters of typical samples in each layer

地层	厚度/m	岩性	密度/ $g \cdot cm^{-3}$	导热系数/ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	热扩散系数/ $mm^2 \cdot s^{-1}$	比热容/ $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$
	30	干黄土	1.60	0.63	0.35	1 809.33
	60	松散粉砂	1.80	1.41	0.85	1 669.50
	540	粉砂岩	2.18	3.15	1.96	1 608.85
三门组	394	细砂岩	2.28	3.25	1.80	1 807.56
	170	粉砂质泥岩	2.37	2.42	0.90	2 691.52
张家坡组	406	粉砂质泥岩	2.19	2.18	0.89	2 443.36
	290	泥质粉砂岩	2.27	2.41	1.11	2 177.68
	240	泥质粉砂岩	2.31	2.66	1.06	2 509.03
蓝田组	210	粉砂岩	2.06	2.89	1.22	2 365.09
	160	细砂岩	2.18	3.66	1.75	2 095.78

2 研究方法

2.1 原井取热能力测试

取热能力原位测试可以得到换热系统一段时间内的进、出口水温,从而换算出取热强度。本次研究在换热系统安装供暖之前,开展取热能力原位测试<sup>[13]</sup>。根据原位测试获取进、出口温度和流量数据,计算出测试条件下换热井的综合取热强度,计算式为

$$Q = c \cdot G \cdot \Delta t \quad (2)$$

式中: $Q$  为取热强度,  $W$ ;  $c$  为水的比热容,  $J/(kg \cdot K)$ ;  $G$  为流率,  $kg/s$ ;  $\Delta t$  为埋管进、出口水温差值,  $K$ 。

2.2 数值模拟

本次数值模拟使用 CFD(Computational Fluid

Dynamics)软件包 ANSYS Fluent 执行。

2.2.1 几何模型及网格

为保证模拟结果不因围岩计算域过小而失真,本次严格按照原型换热井井身结构和几何大小搭建整体模型,选取了 150 m 围岩半径计算域进行计算,计算域整体为长方体,长 500 m,宽 300 m,高 2 650 m,换热井在整个计算域中的位置如图 3 所示。

划分六面体结构化流固传热计算的 CFD 网格如图 3 所示。流动区域边界层网格均进行了加密处理,换热井底部由于流体方向改变,为精确捕捉流体流动情况,该区域网格也进行了一定程度加密。同时开展了网格无关性验证。划分了 5 种网格数量不同的模型,见表 2。各模型计算得到的第

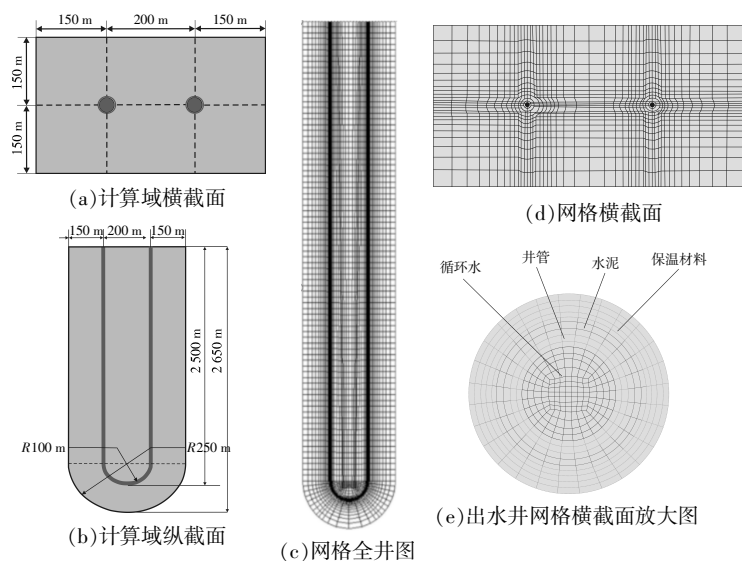


图3 模型计算域和网格划分

Fig.3 Computational domain and mesh of the simulation model

表2 5种方案网格数量分布  
Table 2 Grid independence verification

方案	水	套管	水泥	保温	岩土	总数
1	28 560	6 720	10 080	20 160	128 160	193 680
2	37 536	8 832	13 248	26 496	168 816	254 928
3	57 120	13 440	20 160	40 320	287 520	418 560
4	75 888	17 856	26 784	53 568	407 040	581 136
5	114 240	26 880	40 320	80 640	699 840	961 920

24小时出口水温如图4所示。在保证计算精度的前提下,为节约计算成本,最终采用方案3对应的网格模型开展计算。

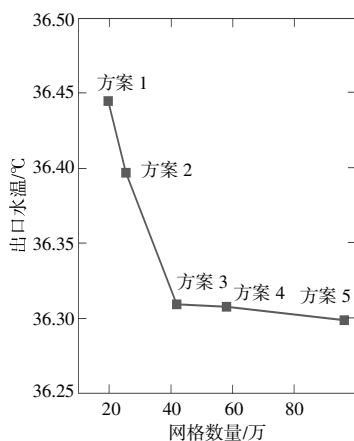


图4 网格无关性验证

Fig.4 Grid independence verification

### 2.2.2 边界条件及参数设定

初始条件为管内水流静止,管内水体、管壁、管外固井水泥均与周围岩土温度相同。边界条件为计算区域的岩土外表面温度恒定,与岩土的初

场温度相同。地温数据采用实测拟合,围岩不同层段热物性采用实测并保水矫正数据,根据地层岩性分层,热物性参数赋值见表1,换热系统各部分物性参数见表3,循环水流率为7.2 kg/s。

表3 换热系统各部分物性参数

Table 3 Physical properties of the deep U-shaped borehole exchanger

参数	密度/kg·m <sup>-3</sup>	导热系数/W·(m·K) <sup>-1</sup>	比热容/J·(kg·K) <sup>-1</sup>
套管	7 912.58	14.48	485.62
固井水泥	2 100	1.34	1 000
循环水	1 000	0.62	4 200
保温管	5 685.19	0.02	22.00

### 2.2.3 控制方程

换热井中循环水从岩土取热、温度升高的过程是一个典型的热传导过程,包含循环水与石油钢管管壁的传热过程、管壁导热、固井水泥导热、岩土导热4个过程。因目标区域内地下水年渗流速度非常小,且围岩热物性参数均经过饱和水矫正,故模拟未考虑围岩地下水渗流。模拟涉及流体运动的控制方程包括连续性方程和动量方程,涉及热量传递的控制方程为能量方程。连续性方程(3)<sup>[14]</sup>、动量方程(4)和能量方程(5)如下。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3)$$

式中: $\rho$ 为流体密度,kg/m<sup>3</sup>;t为时刻,s; $\nabla$ 为哈密顿算子; $\mathbf{u}$ 为流体速度矢量,m/s。

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \nabla(\rho u_i \mathbf{u}) = \nabla(\mu \nabla u_i) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + S_i \quad (4)$$

式中: $u$ 为流体动力粘度, $m \cdot Pa \cdot s$ ;  $p$ 为流体压力, $Pa$ ;  $x$ 为坐标轴; $S$ 为流体运动源项;下标 $i$ 表示在直角坐标系3个坐标轴上的分量;等式左边第二项为对流项,等式右边第一项为耗散项。

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla(\rho Tu) = \nabla \left( \frac{k}{c_p} \nabla T \right) + S_T \quad (5)$$

式中: $T$ 为介质的热力学温度, $K$ ;  $k$ 为介质的传热系数, $W/(m \cdot K)$ ;  $c_p$ 为介质的定压比热容, $J/(kg \cdot$

$K)$ ;  $S_T$ 为介质内热源项。

需要注意的是,固体导热时无对流项。

### 2.2.4 模型验证

按照取热试验完全一致的工况进行模拟计算来验证数值模型的可靠性。给定恒定的进水温度和流量,通过模拟计算得出出口温度,然后与试验出口水温进行对比,验证模型合理性。结果如图5所示。

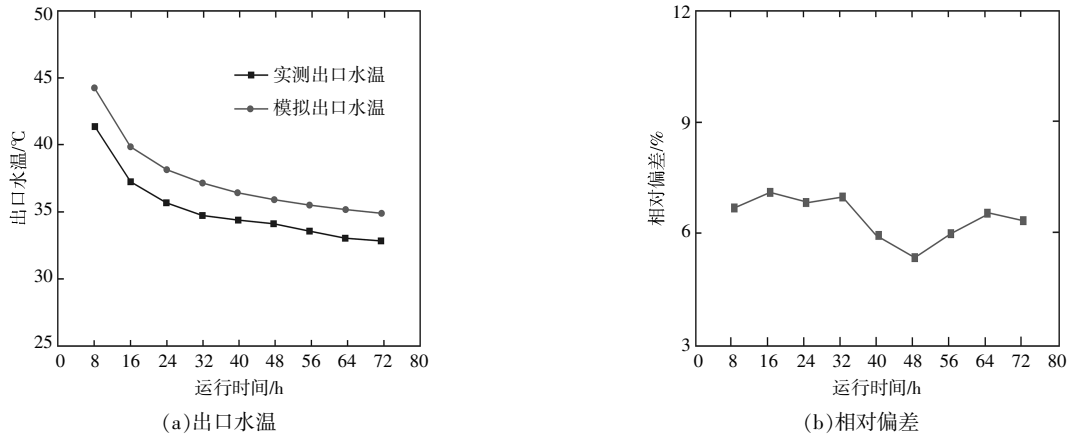


图5 实验与模拟进、出口水温对比及偏差

Fig.5 Comparison and error of inlet and outlet water temperature between experiment and simulation

从图5可见,模拟与试验结果较吻合,平均误差为6.41%。模拟表达的是理想状态下的换热过程,而原位试验过程以实际生产井为依托,会存在局部井管壁贴合不良等模拟无法表达的热损耗过程,故模拟结果略高于试验值。

## 3 结果及分析

### 3.1 取热能力

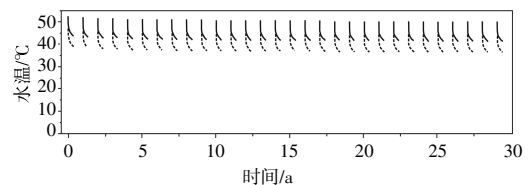
持续取热能力原位测试是连续72h特定工况下的试验,结果如表4所示。根据进、出口温差和质量流量,计算得出取热强度。原位试验数据32h之后出口水温趋于稳定,计算得出稳定后换热量最低可达750kW,平均为144W/m。根据西安实际供暖时长,设置每年取热4个月,恢复8个月,进行平均50,100,120,144W/m取热功率下

表4 取热试验测试结果

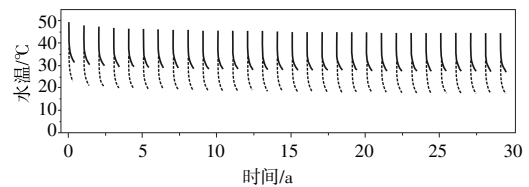
Table 4 The water temperature, flow rate and heat extraction capacity under heat extraction tests

时间/h	8	16	24	32	40	48	56	72
进口温度/°C	19.75	19.30	19.60	19.54	19.41	19.68	19.90	19.50
出口温度/°C	41.50	37.20	35.70	34.70	34.40	34.10	33.50	32.80
流量/kg·s <sup>-1</sup>	12.58	12.43	12.87	12.89	12.91	13.08	13.194	13.11
取热强度/MW	1.149	0.934	0.870	0.821	0.813	0.792	0.754	0.732

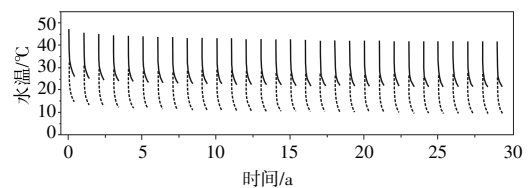
30a模拟计算,结果如图6所示。由图6可见:平均取热功率为50W/m时,进、出口温差较小,系统最低进口温度高于35°C,明显造成能耗的浪费;平均取热功率为100,120W/m时,运行30a



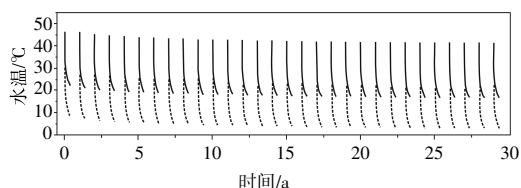
(a)取热功率为260kW,平均延米功率为50kW



(b)取热功率为520kW,平均延米功率为100kW



(c)取热功率为624kW,平均延米功率为120kW



(d)取热功率为 750 kW,平均延米功率为 144 kW  
--- 进口水温 — 出口水温

图 6 4 种取热功率下 30 a 进、出口水温

Fig.6 Inlet and outlet water temperature of the deep U-shaped heat exchanger under different heat extraction power for 30 years

最低进口温度分别为 16.7 °C,9.8 °C, 高于正常热泵工作下限温度; 取热功率增加至平均 144 W/m 时,30 a 最低进口温度接近普通热泵工作下限温

度,表明换热井 30 a 最大稳定取热功率接近 144 W/m,全井换热量为 750 kW。

### 3.2 围岩地温变化特征

换热井围岩地温变化和地温影响范围随着深度和取热功率的变化如图 7 所示。图中深部区域地温衰减程度和半径明显大于浅部,目标井 750 kW 换热功率下最大热影响半径约在 2 400 m 深度。换热井进、出水井浅部层段地温影响差异大,取热功率超过 100 W 时,进水孔浅层围岩地温衰减程度大于出水孔。取热功率较低工况下,浅部一定地层存在围岩升温区,随着取热功率增大,围岩地温衰减层位变浅,衰减地层围岩地温衰减程度和热影响半径增大。

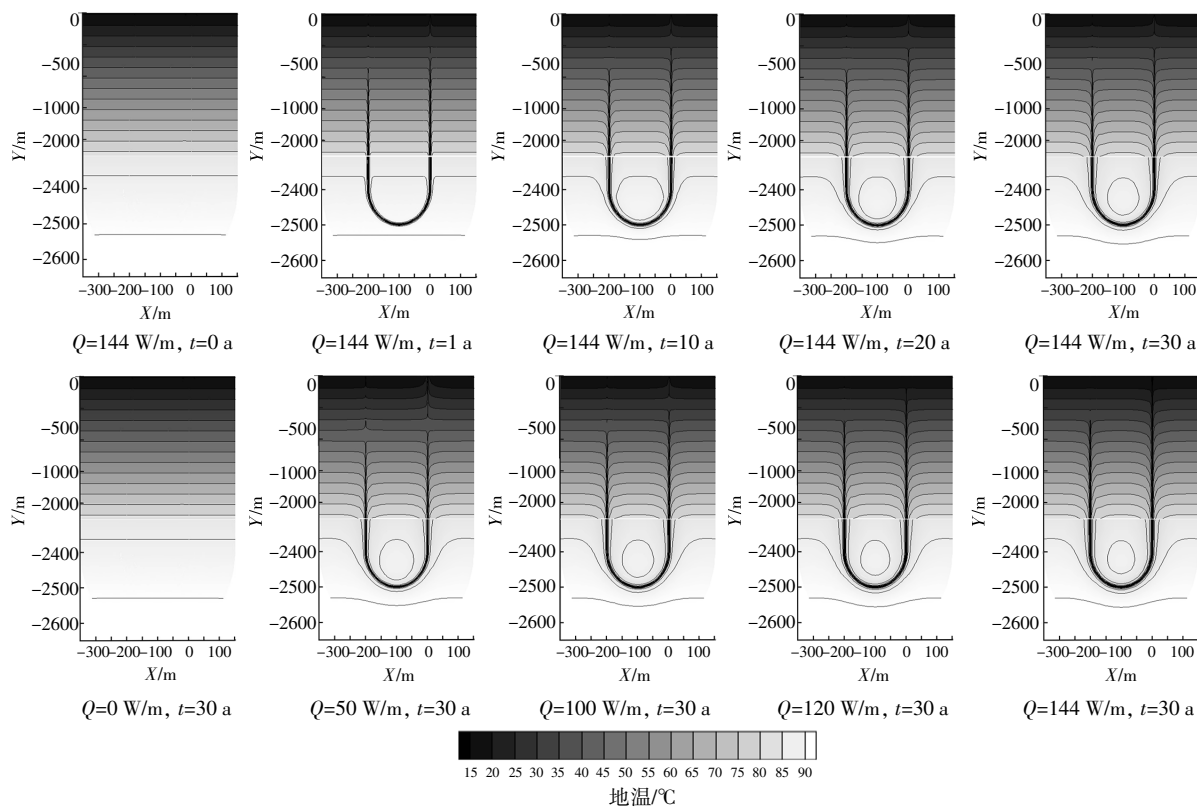


图 7 U 型对接换热井及其围岩地温云图

Fig.7 Temperature map of of the deep U-shaped heat exchanger and its surrounding rock

### 3.3 热影响半径

由图 7 可以看出,不同深度地温影响范围不同。为进一步明确原型换热井的地温影响半径,本文模拟出换热井 600,1 200,1 800 m 和 2 400 m 深度换热后地温与原始地温差为 0.0,0.1,0.5,1.0

°C等值线图,观察地温衰减程度及影响范围,结果如图 8 所示。由图 8 可见,换热井 750 kW 功率下取热 30 a 围岩地温衰减 1.0 °C,0.5 °C最大半径分别为 60 m,75 m,地温衰减 0.1 °C最大半径超过 100 m,指示进出水井间存在热干扰。

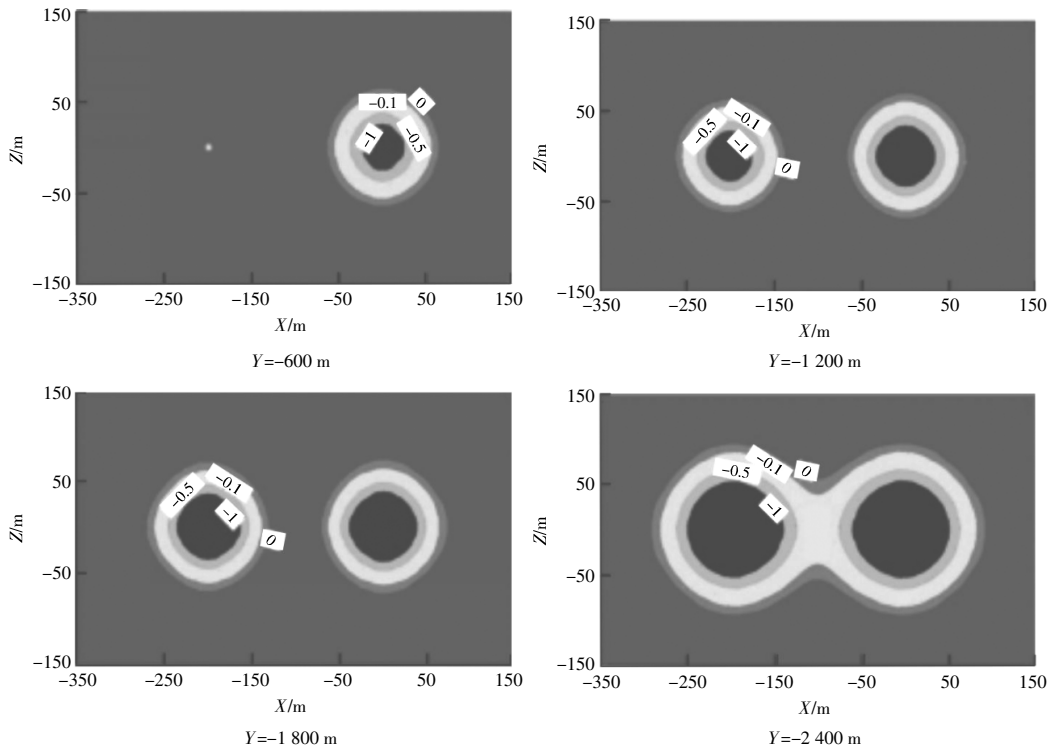


图8 换热井750 kW取热功率下30 a不同深度地温衰减

Fig.8 Ground temperature attenuation of the deep U-shaped borehole heat exchanger under 750 kW heat extraction power at different depths after 30 years operation

#### 4 结论

本文基于原井实测热物性参数,通过原位试验验证传热模型,研究了长时间尺度下换热性能及地温变化规律。主要结论如下。

①西安某2 500 m深,进、出口井间距200 m的U型对接换热井30 a稳定可持续取热量接近750 kW,平均换热功率为144 W/m。

②该U型对接换热井750 kW换热功率下运行30 a,单井最大热影响半径超过100 m,目标井进、出水井间存在热干扰,提示在相同热背景区域、场地允许的情况下,进、出口井间直线距离应大于200 m。

#### 参考文献:

[1] Lund J W, Boyd T L. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review [J]. *Geothermics*, 2016, 60: 66.  
 [2] 徐伟. 中国地源热泵发展研究报告[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.  
 [3] 张育平. 中深层地热钻井换热供暖关键技术[M]. 北京: 科学出版社, 2020.  
 [4] 高有川, 许天福, 于涵, 等. U型井取热不取水地热开采潜力及影响因素分析[J]. *可再生能源*, 2023, 41(2):

199-206.  
 [5] Rybach L, Hopkiek R J. Shallow and deep borehole heat exchangers—achievements and prospects[M]. *Proceedings of World Geothermal Congress*. Florence; International Geothermal Association, 1995. 2133-2138.  
 [6] Dijkshoorn L, Speer S, Peching R. Measurements and design calculations for a deep coaxial borehole heat exchanger in Aachen, Germany [J]. *International Journal of Geophysics*, 2013(1): 916541-916554.  
 [7] Welsch B, Ruhaak W, Schulte D, et al. Characteristics of medium deep borehole thermal energy storage [J]. *International Journal of Energy Research*, 2016, 40: 1855-1868.  
 [8] 孔彦龙, 陈超凡, 邵亥冰, 等. 深井换热技术原理及其换热量评估[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(12): 4741-4752.  
 [9] 张炜韬, 韩东旭, 李敬法, 等. 增强型地热储层多场耦合数值模拟研究进展[J]. *东北电力大学学报*, 2022, 42(3): 1-14.  
 [10] 黄帅, 朱科, 董建锴, 等. 中深层地埋管换热器取热稳定性及热影响半径[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(6): 119-127.  
 [11] Song X Z, Wang G, Wang Y, et al. Numerical analysis of heat extraction performance of a deep coaxial borehole

- heat exchanger geothermal system[J].Energy, 2018, 164: 1298–1310.
- [12] Liu J, Wang F H, Cai W L, et al. Numerical study on the effects of design parameters on the heat transfer performance of coaxial deep borehole heat exchanger[J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43 (12): 6337–6352.
- [13] Li C, Guan Y, Wang X, et al. Experimental and numerical studies on heat transfer characteristics of vertical deep-buried U-Bend pipe to supply heat in buildings with geothermal energy[J]. Energy, 2018, 142: 689–701.
- [14] 王福军. 计算流体力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

## Heat extraction capacity and heat-affected radius of deep U-shaped borehole heat exchanger in Xi'an

Han Yuanhong<sup>1</sup>, Zhang Yuping<sup>1</sup>, Zhang Tinghui<sup>1</sup>, Liu Jun<sup>2</sup>, Xue Yuze<sup>1</sup>

(1.Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710021, China; 2.School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Deep-borehole heat exchangers (DBHE) is currently recognized as the most environmentally friendly way to exploit geothermal energy. The deep U-shaped borehole heat exchanger is a new type of DBHE which is being explored. Heat extraction capacity and influence radius are the important problems in the process of popularizing this technology. Based on the measured parameters of ground temperature and thermophysical properties, the heat extraction capacity and influence radius of the 2 500 m deep U-shaped borehole heat exchanger are analyzed by the way of in-situ test and numerical simulation in Caotan area of Xi'an. The results show that the sustainable heat extraction power of the heat exchanger in 30 years is closed to 750 kW, with an average linear meter of 144 W; The attenuation degree and range of wall rock temperature increase with the increase of heat extraction power; The influence radius of the deep U-shaped borehole heat exchanger are different at different depths, and the deep stratum is larger than the shallow stratum as a whole; The influence radius of the 2 500 m deep U-shaped borehole heat exchanger with the heat extraction rates of 750 kW can greater than 100 m after work for 30 years, and there is a certain degree of thermal interference between the inlet well and outlet well of the Deep U-shaped borehole exchanger.

**Keywords:** geothermal energy; deep U-shaped borehole heat exchanger; heat extraction capacity; heat-affected radius