

引用格式:高小荣,李红岩,任小庆,等. 岩土分层对中深层U型对接井换热性能的影响[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(6): 703-712.
GAO Xiaorong, LI Hongyan, REN Xiaoqing, et al. Effect of rock-soil stratification on the heat transfer performance of U-shaped butted well in medium-deep layers[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(6): 703-712.
DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.06.001

岩土分层对中深层U型对接井换热性能的影响

高小荣¹,李红岩^{1,2},任小庆^{1,3},孙彩霞¹,卢星辰¹,刘林¹,吕强强¹,许勇¹,董文斌¹,王泽沐¹,王荣康¹,苗瑞灿¹
(1. 中国石化绿源地热能开发有限公司,河北保定 071800;2. 西安交通大学能源与动力工程学院,陕西西安 710049;
3. 中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083)

摘要:中深层U型对接式换热井出水温度高、取热能力大、井内流动阻力小,是理想的中深层地热能换热形式。基于热阻串联理论,建立了中深层U型对接式换热井地下换热的分层解析计算模型,并采用实测结果进行了验证。在建立解析模型的基础上,选取关中盆地作为研究区域,分析了地下3000m以浅深度范围内的岩土导热系数和体积比热分层变化对中深层U型对接式换热井整个采暖期内出水温度和取热量的影响。结果表明:岩土导热系数分层对地下换热特性有较大影响,根据平均导热系数计算会高估井口出水温度和取热量,偏差值介于6%~15%;岩土体积比热分层对地下换热特性影响较小。在中深层U型对接式换热井的设计和传热性能分析中,应考虑地下分层的影响,建议分层数量不低于8层。

关键词:中深层地热;U型对接式换热井;传热性能;岩土分层;解析模型

中图分类号:TE09

文献标识码:A

Effect of rock-soil stratification on the heat transfer performance of U-shaped butted well in medium-deep layers

GAO Xiaorong¹, LI Hongyan^{1,2}, REN Xiaoqing^{1,3}, SUN Caixia¹, LU Xingchen¹, LIU Lin¹, LYU Qiangqiang¹, XU Yong¹,
DONG Wenbin¹, WANG Zemu¹, WANG Rongkang¹, MIAO Ruican¹

(1. Sinopec Green Energy Geothermal Development Co., Ltd., Baoding, Hebei 071800, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China;

3. College of Energy, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The medium-deep geothermal exchanger featuring a U-shaped pipe configuration presents an optimal solution for geothermal energy heat exchange due to its capability to deliver higher temperature water, achieve greater heat extraction rates, and maintain minimal flow resistance. A layered analytical model for such exchanger is established based on the theory of thermal resistance in series methods. Experimental results are employed to validate the accuracy of this layered analytical model. By focusing on the Guanzhong Basin in Shaanxi Province as the focal point of research, the model investigates the influence of subterranean stratification in thermal conductivity and volumetric specific heat on the outlet water temperature and heat extraction rate throughout an entire heating period for a 3000 m deep geothermal exchanger with U-shaped pipe. The findings reveal that the underground thermal conductivity stratification has a significant impact on the heat transfer performance. A simplistic approach using average thermal conductivity, as opposed to a detailed accounting of layered conductivities, results in an overestimation of outlet water temperature and heat extraction rate by approximately 6% to 15%. However, specific heat stratification exerts minimal influence on the subterranean heat transfer dynamics. This underscores the importance of considering the effects of

收稿日期:2023-04-10。

第一作者简介:高小荣(1976—),男,本科,高级工程师,主要从事地热能开发利用方面研究。地址:河北省保定市雄县雄州路746号,邮政编码:071800。E-mail: ga Xiaorong.xxy@sinopec.com

通信作者简介:任小庆(1980—),男,在读博士,高级工程师,主要从事地热能勘探开发和地热尾水回灌工作。地址:河北省保定市雄县雄州路746号,邮政编码:071800。E-mail: renxiaoqing.xxy@sinopec.com

基金项目:中国石化科技项目“‘井下换热’中深层地热能开发技术研究”(JR22010);中国石化集团新星石油有限责任公司科技项目“U型对接井换热技术研究——现场工程配套及性能分析”(10500000-21-ZC0607-0025)。

underground thermal property stratification in the design and analysis of the heat transfer performance of a medium-deep geothermal exchanger with U-shaped pipe. For precise modeling and results, it is recommended to segment the underground area into at least eight distinct layers.

Keywords: medium-deep geothermal; U-shaped heat transfer butted well; thermal performance; rock-soil stratification; analytical model

“十四五”期间,碳达峰、碳中和成为全社会关注的热点。据最新统计,中国2020年建筑运行相关的终端用能占全社会能耗的21%,CO₂排放占中国总CO₂排放的19%^[1]。降低建筑运行相关的CO₂排放是实现碳达峰、碳中和目标的重要环节。在建筑能源应用中,提升能源利用效率、发展可再生能源势在必行。2020年中国北方城镇供暖建筑面积156×10⁸ m²,冬季供暖能耗为62.7×10⁸ GJ,占中国全年建筑总能耗的20%^[1]。北方建筑冬季取暖用能量巨大,提高可再生能源建筑供暖比例,对于推动煤炭消费尽早达峰具有重要意义。在众多可再生能源中,地热能储量丰富、分布广泛,是优质的供热热源。中国目前拥有世界上规模最大的地热能产业,地热供暖面积超过14×10⁸ m²^[2],其中,中深层地热供暖面积达5.8×10⁸ m²^[3]。《关于促进地热能开发利用的若干意见》(国能发新能规[2021]43号)、《“十四五”现代能源体系规划》(发改能源[2022]210号)、《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》(建标[2022]24号)等重要文件都提出了对地热能开发利用的要求。在“十四五”期间,地热能将得到快速发展。

中深层地热能用于冬季供暖,基本不受地域限制^[4],其开发利用形式包括水热型、无干扰换热型和干热岩型3种形式^[5]。水热型地热资源以热水形式埋藏在200~3 000 m深度范围内,主要赋存于高渗透孔隙或裂隙介质中,以液态水或水蒸气等形式存在^[6]。对于常规的水热型地热资源,中国地热发电潜力达到6 700.00 MW^[7],但目前总装机容量仅为34.89 MW,具有较大的开发空间^[8]。2012年陕西省首次将无干扰换热型中深层地热能技术运用在工程中并取得了成功,后期在中国西部科技创新港、沔西新城总部经济园能源站等多个项目中应用。截至2019年底,该技术应用面积已超过1 300×10⁸ m²,在建项目超过2 000×10⁸ m²,供热面积及工程体量世界领先^[9]。无干扰换热型地热系统目前应用最多的为同轴套管式换热井^[10]和U井对接式换热井^[11],重力热管式换热井也有部分应用^[12]。干热岩是指不含或仅

含少量流体,温度高于180℃,其热能在当前技术经济条件下可以利用的岩体。中国于2010年启动了“中国干热岩勘查关键技术研究”科研项目,开展干热岩高温钻探技术研究。目前,干热岩开采主要关注储层改造技术。

中深层U型对接式换热井具有单井取热能力大、管道阻力小等特点,近年来引起人们高度重视。与中深层同轴套管式换热井相比,因增加了高温区水平段换热从而大幅提升单井供热能力。由于传热过程涉及不同温度和热物性参数的地层,且管内外传热相互耦合,因此,目前研究中主要采用数值计算方法^[11,13-16],辅助部分实验测试^[11,17-18],全面系统研究流速、管径、深度、水平管长度、固井层热物性参数、岩土热物性参数、流体热物性参数、出口段保温等影响因素对地下传热特性的影响。中深层地热换热器穿越多个地层结构,传热过程已不能单纯视为均匀地层传热问题。目前多数研究均将地下岩土视为均匀物性,仅考虑地温沿深度方向变化的影响。现有的分层研究只考虑了均匀热物性参数下的温度分层计算^[19]或岩土的实际分层情况^[20],没有系统分析岩土热物性分层特性对传热特性的影响。通过对中深层U型对接式换热井在分层岩土中的传热性能分析,研究岩土不同热物性参数分层情况下各换热段的取热量及水温变化,为中深层U型对接式换热井的结构优化提供参考。

1 地下传热模型

1.1 地下传热过程

中深层U型对接式换热井由回水井、水平连接井和供水井组成,通过地面热泵系统向建筑供热(图1)。热泵主机低温回水沿回水井进入地层深部过程中与周围岩土换热,温度缓慢升高;水平连接井内由于换热温差加大,管内水温快速升高;在供水井内由于换热温差减小,管内水温缓慢升高,保温段(防止管内水温降低)水温基本保持不变。

对西安市某中深层U型对接式换热井运行第120 d最后时刻的沿程水温分布(图2)进行分析。

回水井的长度为2 000 m,地面入口至井底的温升为3.44 °C,沿程温升梯度为1.72 °C/km;水平连接井

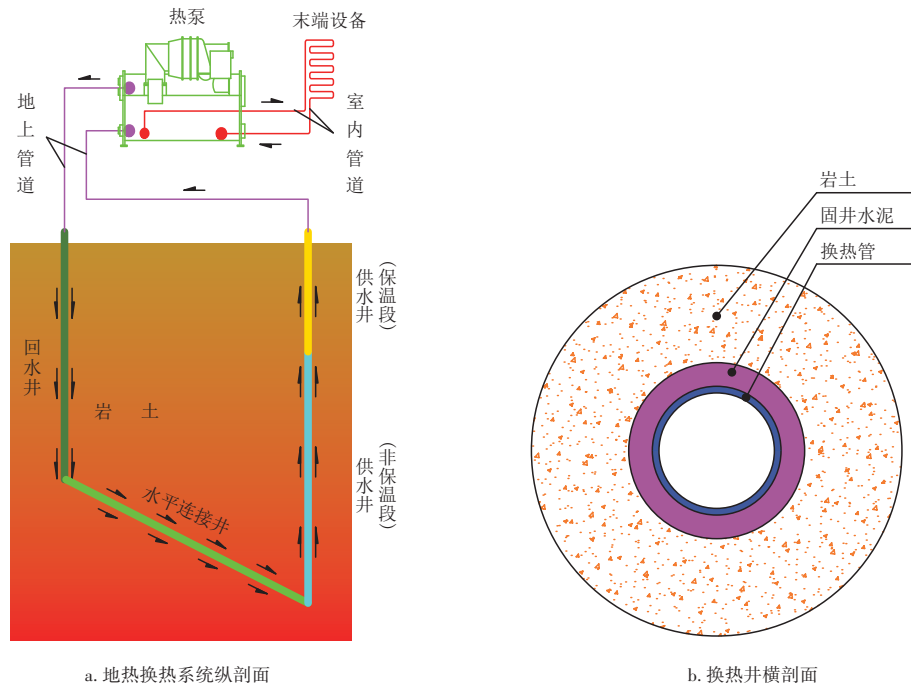


图1 中深层U型对接式换热井示意图

Fig. 1 Schematic diagram of medium-deep geothermal exchanger with U-shaped pipe

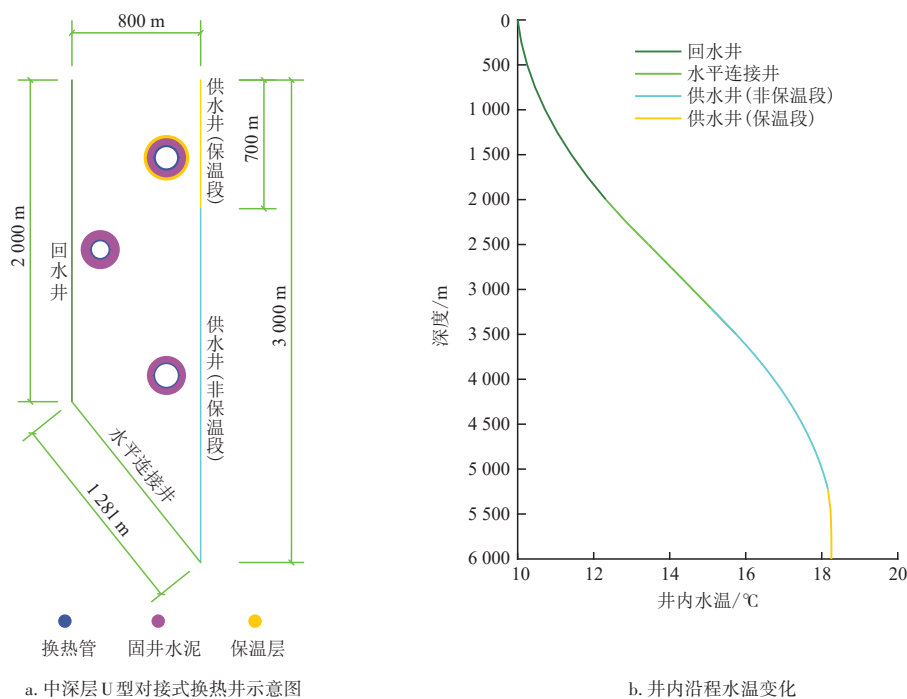


图2 西安市某中深层U型对接式换热井及井内水温变化

Fig. 2 A medium-deep U-shaped heat exchanger well in Xi'an and the change of water temperature inside wellbore

长度为1 281 m,入口至出口的温升为2.31 °C,沿程温升梯度为1.80 °C/km;供水井的长度为3 000 m,入口至地面出口的温升为2.5 °C,沿程温升梯度为0.83 °C/km。换热效率最高为水平连接井,其次为回水井。

为充分发挥中深层地热井的供热能力,最大限度地提取地下热量,除供热初期外,热泵蒸发器测出水温度一般会低于岩土温度,因此,全井段都处于从地下取热的过程。

1.2 传热模型建立

由于采用的是闭式换热方式,换热过程对地下水无干扰,管内水温高于0 °C且低于100 °C,岩土中的水分不会发生相变,岩土中可视为纯导热过程。将中深层U型对接式换热井沿换热管轴向展开,得到类似于垂直埋管的传热结构(图3),不同之处在于上、下2个面都是地面。

换热管的径向尺度相比地层要小得多,可以将其看成是无限大岩土中的线热源。岩土中的传热方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_s}{\rho_s c_s} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad \frac{d_b}{2} \leq r < \infty, \quad t > 0 \quad (1)$$

$$T = T_{ff}, \quad \frac{d_b}{2} \leq r < \infty, \quad t > 0 \quad (2)$$

$$-\pi d_b \lambda_s \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=\frac{d_b}{2}} = q_L, \quad t > 0 \quad (3)$$

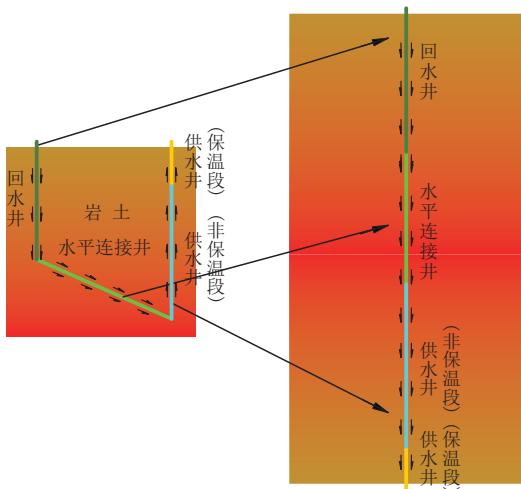


图3 中深层U型对接式换热井及轴向展开
Fig. 3 A medium-deep geothermal exchanger with U-shaped pipe and its axial extension drawing

$$T = T_{ff}, \quad r \rightarrow \infty, \quad t > 0 \quad (4)$$

式(1)~式(4)中: λ_s 为埋管周围岩土的导热系数,单位W/(m·K); ρ_s 为钻孔周围岩土的密度,单位kg/m³; c_s 为埋管周围岩土的比热容,单位J/(kg·K); T 为钻孔周围岩土温度,单位°C; T_{ff} 为无穷远处岩土温度,单位°C; t 为时间,单位s; r 为距离钻孔中心的距离,单位m; d_b 为钻孔直径,单位m; q_L 为单位长度埋管释放的热量,单位W/m。

钻孔内视为稳态传热过程,固井层的热阻为:

$$R_g = \frac{1}{2\pi\lambda_g} \ln \frac{d_g}{d_b} \quad (5)$$

式中: R_g 为固井层的热阻,单位m²·K/W; λ_g 为固井材料的导热系数,单位W/(m·K); d_g 为固井层外径,单位m。

换热管壁的热阻为:

$$R_p = \frac{1}{2\pi\lambda_p} \ln \frac{d_o}{d_i} \quad (6)$$

式中: R_p 为换热管壁的热阻,单位m²·K/W; λ_p 为管壁的导热系数,单位W/(m·K); d_o 为换热管外径,单位m; d_i 为换热管内径,单位m。

管内对流换热热阻为:

$$R_f = \frac{1}{\pi d_i h} \quad (7)$$

式中: R_f 为管内对流换热热阻,单位m²·K/W; h 为管内壁与管内流体之间的对流换热系数,单位W/(m²·K)。

管内对流换热系数按Dittus-Boelter公式计算^[20]:

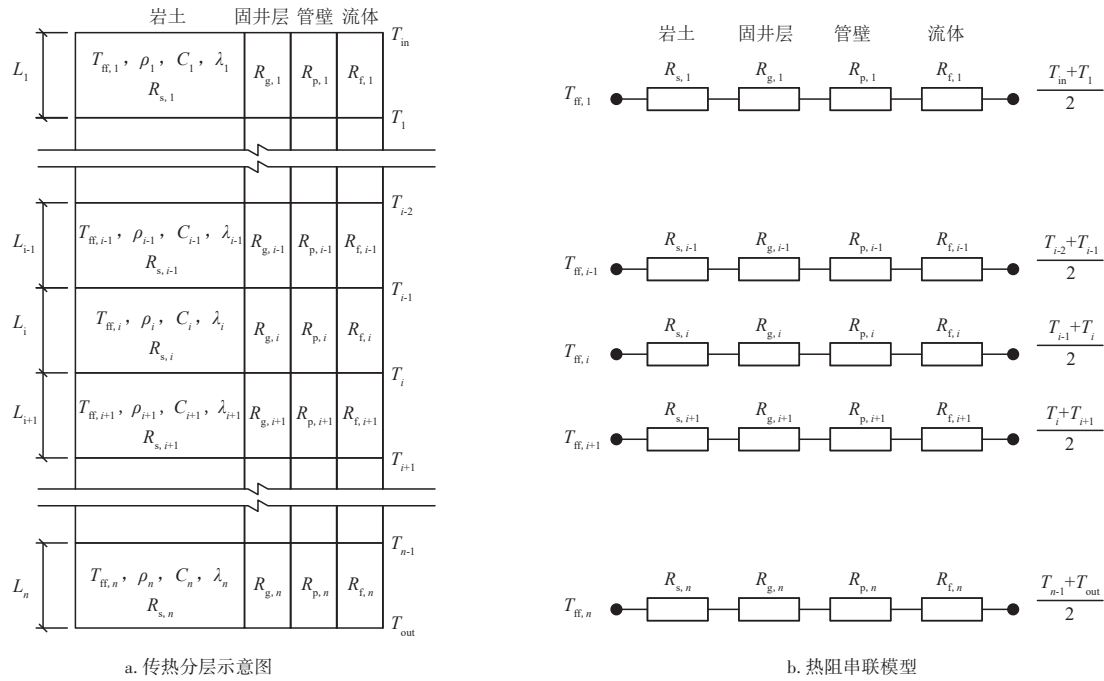
$$h = 0.023 \frac{\lambda_f}{d_i} Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (8)$$

式中: Re 为管内流动的雷诺数; λ_f 为管内流体的导热系数,单位W/(m·K); Pr 为管内流体的普朗特数。

尽管进行了上述简化,但对于分层岩土的计算仍比较困难。针对分层岩土中的中深层U型对接式换热井,LI等^[21]提出了一种高精度的解析计算模型,原理清晰、公式简单、计算结果与实测结果完全吻合。在此基础上,假定各分层换热管中的岩土温度线性分布,得到更为简化的计算模型(图4)。

将岩土竖向分为 n 层,各层的深度为 L_i (图4a)。按照热阻串联模型(图4b),可以得到各层的热平衡方程为:

$$c_f G (T_i - T_{i-1}) = \frac{T_{ff,i} - (T_{i-1} + T_i)/2}{R_{s,i} + R_{g,i} + R_{p,i} + R_{f,i}} \quad (9)$$



注: L_1, L_2, \dots, L_n 为岩土分层深度,单位m; $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ 为岩土分层密度,单位 kg/m^3 ; C_1, C_2, \dots, C_n 为岩土分层比热容,单位 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 为岩土分层导热系数,单位 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; T_1, T_2, \dots, T_{n-1} 为岩土分层界面处流体的温度,单位 $^\circ\text{C}$; T_{in} 为流体进口温度,单位 $^\circ\text{C}$; T_{out} 为流体出口温度,单位 $^\circ\text{C}$ 。

图4 分层传热模型

Fig. 4 Layered heat transfer model

式中: c_f 为管内流体的比热容,单位 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; G 为管内流体的流量,单位 kg/s ; $R_{s,i}$ 为第 i 层岩土的热阻,单位 $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$; $R_{g,i}$ 为第 i 层固井水泥热阻,单位 $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$; $R_{p,i}$ 为第 i 层套管管壁热阻,单位 $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$; $R_{f,i}$ 为第 i 层管内对流换热热阻,单位 $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$; $T_{\text{ff},i}$ 为第 i 层岩土温度,单位 $^\circ\text{C}$; T_{i-1} 为第 i 层流体进口温度,单位 $^\circ\text{C}$; T_i 为第 i 层流体出口温度,单位 $^\circ\text{C}$ 。

从而,得到各层水温为:

$$T_i = \frac{2T_{\text{ff},i} + [2c_f G (R_{s,i} + R_{g,i} + R_{p,i} + R_{f,i}) - 1] T_{i-1}}{2c_f G (R_{s,i} + R_{g,i} + R_{p,i} + R_{f,i}) + 1} \quad (10)$$

采用简化后的计算模型对某中深层U型对接式换热井进行计算和实测验证(图5)。实测结果与计算结果能较好吻合,360 h的平均误差为 $0.40\text{ }^\circ\text{C}$,具有较高的计算精度。在此基础上分析了中深层U型对接式换热井的地下传热性能。

2 分层原则

依据陕西省工程建设标准《中深层地热地埋管

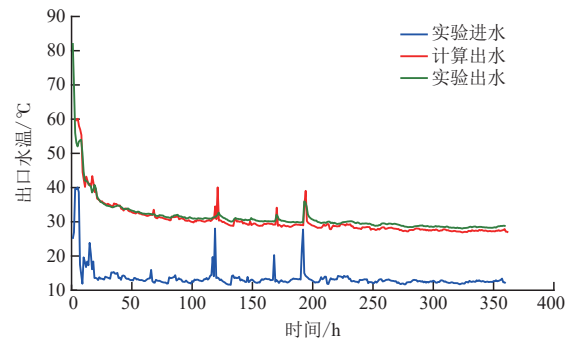


图5 分层传热模型计算结果与实验结果对比

Fig. 5 Comparison between calculated results of layered heat transfer model and experimental results

供热系统应用技术规程:DBJ 61/T166—2020》^[22],关中盆地地温梯度变化介于 $21.8 \sim 45.1\text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ (表1),岩土导热系数变化介于 $1.28 \sim 3.00\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,岩土体积比热容变化介于 $761 \sim 1\,500\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ (表2)。

地下岩土分层主要体现在导热系数和体积比热容的分层变化。根据传热基本原理,加大高温区的导热系数有利于提高传热性能。因此,岩土自上而

表1 关中盆地各构造单元地温梯度-深度变化

Table 1 Variations of geothermal temperature gradient with depth for each tectonic unit in Guanzhong Basin

深度/ m	西安凹陷/ (°C/km)	咸礼凸起		临蓝凸起/ (°C/km)	固市凹陷/ (°C/km)	宝鸡凸起/ (°C/km)	蒲城凸起/ (°C/km)
		扶风—礼泉断阶/(°C/km)	杨凌—咸阳断阶/(°C/km)				
1 000	36.5		45.1	32.3		28.1	27.1
1 500	30.6	35.2	24.6	28.2	39.2	25.7	26.3
2 000	33.2	33.0	21.8	23.2	38.8		26.0
2 500	31.2	30.5	29.2	29.0	37.6		25.9
3 000	29.7	27.9	25.8		35.9		25.8
4 000	26.5		25.6		31.0		25.6
5 000	25.0				28.0		

表2 关中盆地岩土热物性参数

Table 2 Geothermal properties in Guanzhong Basin

地层	岩性	导热系数/ [W/(m·K)]	体积比热容/ [J/(kg·K)]
第四系秦川群	砂岩	1.90	1 256
	粉质黏土	1.75	1 433
新近系蓝田灞河组	砂岩	3.00	1 500
	粉砂岩	1.89	1 000
	砂质泥岩	1.40	994
	泥岩	2.09	1 289
新近系高陵群	粗砂岩	1.97	1 072
	细砂岩	1.84	761
	砂质泥岩	1.41	1 006
古近系白鹿原组	砂岩	1.30	939
	泥岩	1.28	1 128
古近系红河组	砂质泥岩	1.92	933

下导热系数增加有利于提取热量,减少则不利于提取热量。体积比热容影响传热后岩土温度的衰减,岩土自上而下体积比热容增加有利于维持岩土高温,从而降低温度衰减;自上而下体积比热容减少,不利于岩土温度稳定。

针对关中地区的岩土热物性参数,采用热物性参数自上而下递增分层和递减分层2种情况,研究分层顺序和分层数量对换热过程的影响。

3 分层岩土中的传热特性

采用目前常用的井型进行分析。直井埋深3 000 m,在2 000 m处造斜对接(图2a)。下降管为

$\phi 139.70 \text{ mm} \times 7.72 \text{ mm}$ 钢管,固井水泥外径为 $\phi 243.1 \text{ mm}$;上升管为 $\phi 177.80 \text{ mm} \times 9.19 \text{ mm}$ 钢管,固井水泥外径为 $\phi 243.1 \text{ mm}$;上升管地下700 m进行保温处理,保温外径为 $\phi 273.9 \text{ mm}$ 。设定进水流量为 $80 \text{ m}^3/\text{h}$ 、进水温度为 $10 \text{ }^\circ\text{C}$,分析出水温度变化。地表温度取 $16 \text{ }^\circ\text{C}$ 、岩土地温梯度取 $30 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ 。

3.1 导热系数分层换热分析

在保证平均导热系数不变的前提下,岩土竖向分层考虑自上而下递增分层(图6a)和递减分层(图6b)2种情况。岩土体积比热容取平均值 $1 133 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,按导热系数竖向递增分层,得到出水温度变化(图7)

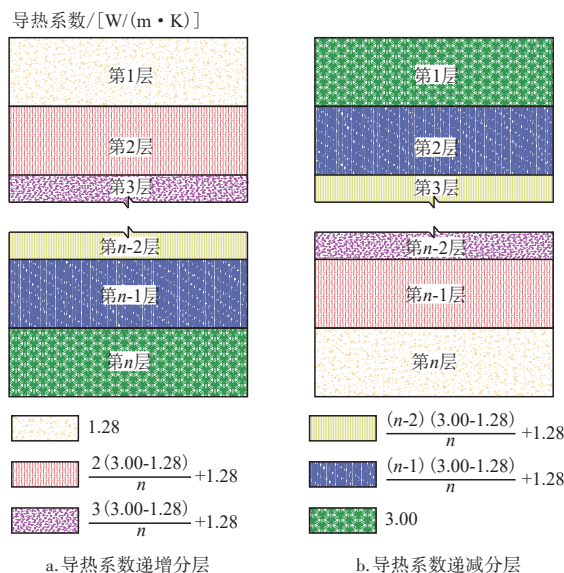


图6 岩土导热系数竖向分层示意图

Fig. 6 Schematic diagram of vertical stratification of underground thermal conductivity

和取热功率变化(图8),递增分层情况下的出口水温低于均匀物性参数,各分层平均取热功率比均匀(1层)情况下低8%~15%;按导热系数竖向递减分层,得到出口水温度变化(图9)和取热功率变化(图10),递

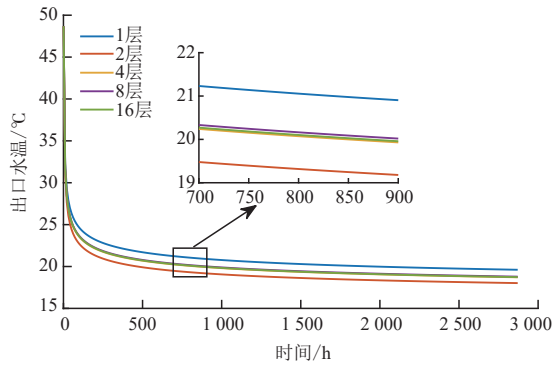


图7 岩土导热系数竖向递增分层情况下的出口水温变化
Fig. 7 Outlet water temperature variations while thermal conductivities increase with depth

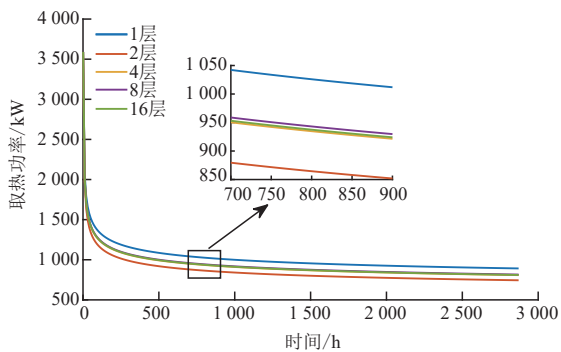


图8 岩土导热系数竖向递增分层情况下的取热功率变化
Fig. 8 Heat exchange rate variations while thermal conductivities increase with depth

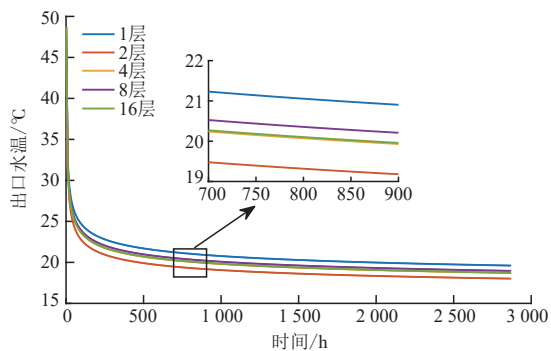


图9 岩土导热系数竖向递减分层情况下的出口水温变化
Fig. 9 Outlet water temperature variations while thermal conductivities decrease with depth

减分层情况下的出口水温低于均匀物性参数,各分层平均取热功率比均匀(1层)情况下低6%~15%。

当不考虑岩土导热系数上下分层时,按平均导热系数计算的中深层U型对接式换热井的出口水温、取热功率偏高。为了真实反映中深层U型对接式换热井的换热特性,应考虑地层的分层特性。对于3000m深度范围内的传热问题,分层数量8层以上时计算结果基本稳定,建议分层计算的层数不低于8层。

3.2 体积比热分层换热分析

岩土导热系数取平均值2.14 W/(m·K),在保证平均体积比热不变的前提下,按体积比热竖向递增分层,得到出口水温变化(图11)和取热功率变化(图12),各分层情况下的出口水温和平均取热功率差别不大;按体积比热竖向递减分层,也得到同样的结果(图13、图14)。

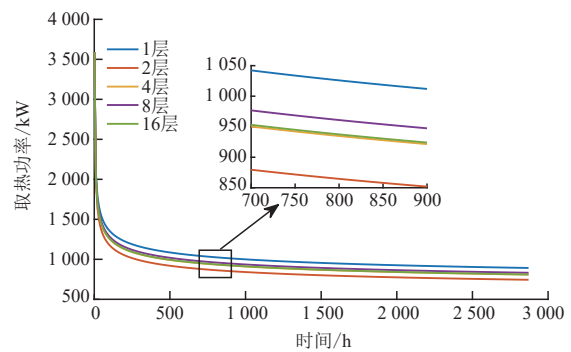


图10 岩土导热系数竖向递减分层情况下的取热功率变化
Fig. 10 Heat exchange rate variations while thermal conductivities decrease with depth

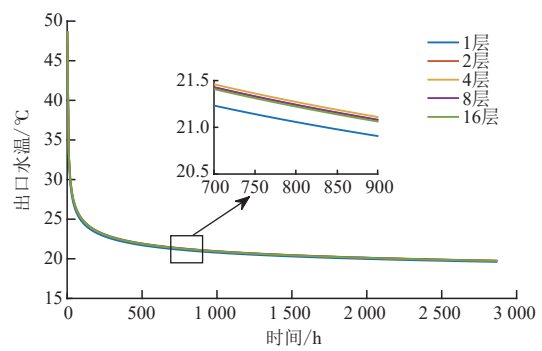


图11 岩土体积比热竖向递增分层情况下的出口水温变化
Fig. 11 Outlet water temperature variations while volumetric specific heats increase with depth

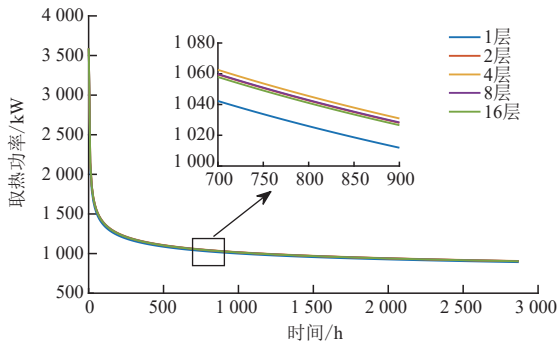


图12 岩土体积比热竖向递增分层情况下的取热功率变化
Fig. 12 Heat exchange rate variations while volumetric specific heats increase with depth

当不考虑岩土体积比热上下分层时,按平均体积比热计算的中深层U型对接式换热井的出口水温、取热功率区别不大。因此,可以忽略体积比热分层的影响。

3.3 换热计算与评价

为了进一步验证岩土分层对中深层U型对接井换热性能的影响,采用西安市某实际项目的岩土热物性参数(图15)和实测数据^[11]做对比分析。中深层U型对接井参数同图2a,设定进口水温为12℃,流量为23.5 m³/h,实验进行了72 h。

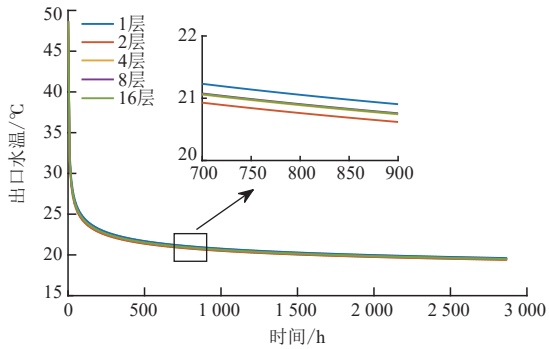


图13 岩土体积比热竖向递减分层情况下的出口水温变化
Fig. 13 Outlet water temperature variations while volumetric specific heats decrease with depth

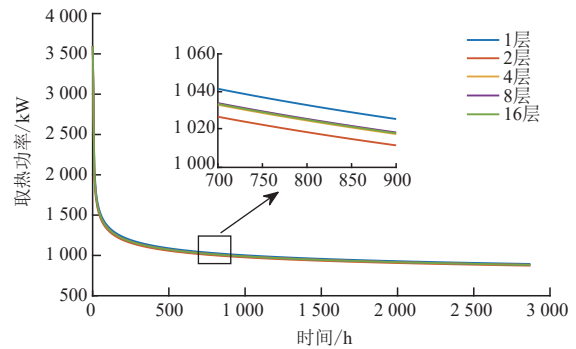


图14 岩土体积比热竖向递减分层情况下的取热功率变化
Fig. 14 Heat exchange rate variations while volumetric specific heats decrease with depth

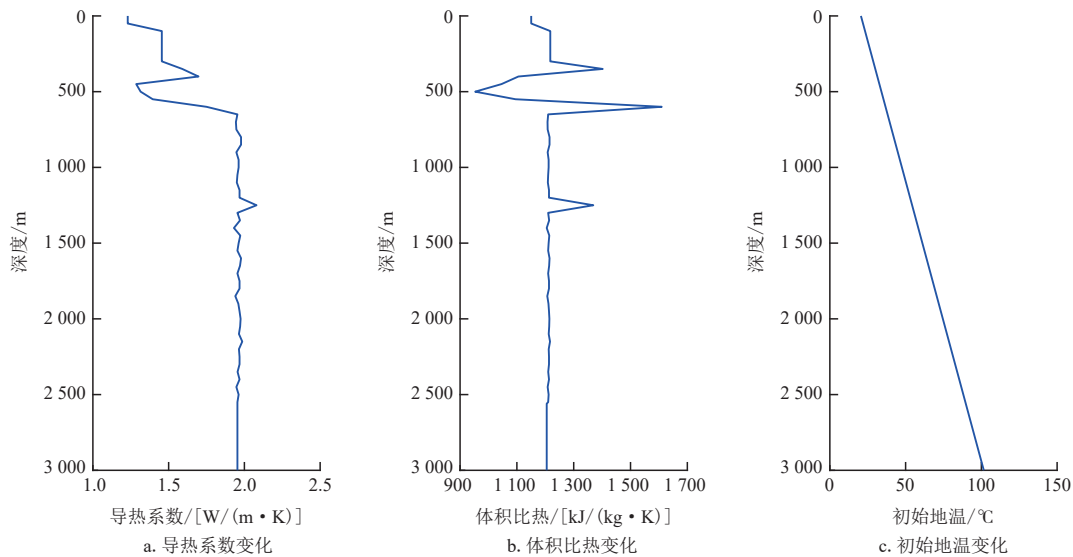


图15 西安市某中深层U型对接式换热井埋管区域的岩土热物性

Fig. 15 Underground thermal properties around the medium-deep geothermal exchanger with U-shaped pipe in Xi'an

- [5] 李嘉舒,戴传山,雷海燕,等. 我国中深层地热开发技术专利综述与分析[J]. 能源研究与信息, 2022, 38(4): 195-202.
LI Jiashu, DAI Chuanshan, LEI Haiyan, et al. Patents review and analysis of mid-deep geothermal energy exploitation technology in China[J]. Energy Research and Information, 2022, 38(4): 195-202.
- [6] 多吉. 典型高温地热系统——羊八井热田基本特征[J]. 中国工程科学, 2003, 5(1): 42-47.
DUO Ji. The basic characteristics of the Yangbajing Geothermal Field: A typical high temperature geothermal system[J]. Engineering Science, 2003, 5(1): 42-47.
- [7] 赵旭,杨艳,刘雨虹,等. 全球地热产业现状与技术发展趋势[J]. 世界石油工业, 2020, 27(1): 53-57.
ZHAO Xu, YANG Yan, LIU Yuhong, et al. Development trend and outlook of geothermal industry in the world[J]. World Petroleum Industry, 2020, 27(1): 53-57.
- [8] 曹锐,多吉,李玉彬,等. 我国中深层地热资源赋存特征、发展现状及展望[J]. 工程科学学报, 2022, 44(10): 1623-1631.
CAO Rui, DUO Ji, LI Yubin, et al. Occurrence characteristics, development status, and prospect of deep high-temperature geothermal resources in China[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(10): 1623-1631.
- [9] 王泮浩,蔡皖龙,王铭,等. 地热能供热技术研究现状及展望[J]. 制冷学报, 2021, 42(1): 14-22.
WANG Fenghao, CAI Wanlong, WANG Ming, et al. Status and outlook for research on geothermal heating technology[J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(1): 14-22.
- [10] 冉运敏,卜宪标. 单井地热采暖系统岩石温度特性模拟研究[J]. 新能源进展, 2019, 7(2): 161-167.
RAN Yunmin, BU Xianbiao. Simulation study on rock temperature characteristics of single well geothermal heating system[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2019, 7(2): 161-167.
- [11] 李超. 中深层地热能建筑供暖埋管换热特性及运行参数优化[D]. 西安: 长安大学, 2022.
LI Chao. Heat transfer characteristics and operating parameters optimization of buried pipes for building heating using geothermal energy in middle-deep layers[D]. Xi'an: Chang'an University, 2022.
- [12] 李庭樑,岑继文,黄文博,等. 超长重力热管传热性能实验研究[J]. 化工学报, 2020, 71(3): 997-1008.
LI Tingliang, CEN Jiwen, HUANG Wenbo, et al. Experimental study on heat transfer performance of super long gravity heat pipe[J]. CIESC Journal, 2020, 71(3): 997-1008.
- [13] 陈静平. 深层U型地热换热器换热过程模拟计算研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
CHEN Jingping. Simulation research on thermal process of deep U-pipe geothermal heat exchanger[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012.
- [14] 李超,官燕玲,高海仁,等. 纳米流体对U型深埋管换热特性影响的研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(1): 392-399.
LI Chao, GUAN Yanling, GAO Hairen, et al. Study on influence of nanofluids on heat transfer characteristics of deep-buried U-bend pipes[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(1): 392-399.
- [15] 李超,官燕玲,杨瑞涛,等. U型深埋管固井层对埋管换热性能影响的研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(2): 267-273.
LI Chao, GUAN Yanling, YANG Ruitao, et al. Study on influence of cementing layer on heat transfer performance of U-bend deep-buried pipe[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(2): 267-273.
- [16] 李超,江超,杨瑞涛,等. 埋深及连接管长度对U型深埋管换热的影响[J]. 太阳能学报, 2021, 42(7): 490-496.
LI Chao, JIANG Chao, YANG Ruitao, et al. Effect of buried depth and connecting pipe length on deep-buried u-bend pipe heat transfer[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(7): 490-496.
- [17] 王兴,李超,官燕玲,等. 竖向U型深埋管建筑供暖连续及间歇运行的现场实验[J]. 区域供热, 2018, 194(3): 8-12.
WANG Xing, LI Chao, GUAN Yanling, et al. In-situ experiment of continuous and intermittent operation of vertical U-bend deep-buried pipe to supply heat in buildings[J]. District Heating, 2018, 194(3): 8-12.
- [18] 王伟. 深层U型地热井仿真模拟及取热性能研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(7): 477-484.
WANG Wei. Study on simulation and heat removal performance of deep U-shaped geothermal geothermal well[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(7): 477-484.
- [19] 鲍玲玲,王雪,刘俊,等. 基于岩土纵向分层的U型埋管换热器取热性能研究[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(4): 1371-1378.
BAO Lingling, WANG Xue, LIU Jun, et al. Research on heat extraction performance of U-shaped underground heat exchanger based on longitudinal layering of rock and soil[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(4): 1371-1378.
- [20] 杨世铭,陶文铨. 传热学(第四版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat Transfer(Fourth Edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [21] LI C, JIANG C, GUAN Y L. An analytical model for heat transfer characteristics of a deep-buried U-bend pipe and its heat transfer performance under different deflecting angles[J]. Energy, 2022, 244: 122682.
- [22] 陕西省住房和城乡建设厅. 中深层地热埋管供热系统应用技术规程: DBJ 61/T166—2020[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2020: 1.
Department of housing and urban rural development of Shaanxi province. Technical regulation for medium deep geothermal buried pipe heating system: DBJ 61/T166-2020[S]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2020: 1.

(编辑 郭群)