

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202107057

元兆伟, 闫方平, 傅大庆, 等. 井筒自循环技术开采干热岩地热的试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(3): 198-208.
QI Zhaowei, YAN Fangping, FU Daqing, *et al.* Experimental study on influence factors of wellbore self-circulation mining hot dry rocks[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(3): 198-208.

井筒自循环技术开采干热岩地热的试验研究

元兆伟¹, 闫方平^{2,3}, 傅大庆¹, 邱建强¹

(1. 河北华勘资环勘测有限公司, 河北 承德 067000; 2. 河北石油职业技术大学, 河北 承德 067000;
3. 承德市地热开发与应用技术创新中心, 河北 承德 067000)

摘要: 井筒自循环技术是开发干热岩地热的一种新技术, 它采用油管和套管组成的 U 形通道作为换热器, 目前对该项技术的现场和室内试验研究尚不够。文章建立了一个实验室规模的模拟装置来模拟干热岩局部井筒自循环的热交换过程, 以水作为换热介质, 进行一系列室内试验, 对换热的影响因素及换热参数进行研究。试验结果表明: 具有较大采热能力和热容量的花岗岩在高温下具有较高的采热速率; 较高的注水速率会产生较高的采热速率, 但出口温度会降低, 因此, 应慎重选择较高出口温度和较高采热量之间的平衡。相似性分析表明, 876 m 长的垂直井在 602.8 m³/d 的注入速率下, 可从 150 ℃ 的干热岩中获取的采热量高达 565 kW, 该结果与现场实测数据很接近, 可以证明相似性分析结果的合理性。建立的模拟装置及试验原理也同样适用于“取热不取水”的中深层同轴套管式地埋管换热技术, 可以为中深层地热开发研究和实际应用提供一定的参考。

关键词: 干热岩; 井筒自循环; 试验模拟装置; 换热参数; 相似性分析

中图分类号: P314

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)03-0198-11

Experimental study on influence factors of wellbore self-circulation mining hot dry rocks

QI Zhaowei¹, YAN Fangping^{2,3}, FU Daqing¹, QIU Jianqiang¹

(1. Hebei Huakan Zihuan Survey Co. Ltd., Chengde, Hebei 067000, China; 2. Hebei Petroleum University of Technology, Chengde, Hebei 067000, China; 3. Chengde Geothermal Development and Application Technology Innovation Center, Chengde, Hebei 067000, China)

Abstract: The wellbore self-circulation technology, which exchanges heat through a U-channel composed of the oil tubing and casing, is a new technology used to exploiting geothermal energy from hot dry rocks. In this study a laboratory-scale simulation device is established to simulate the heat exchange process of local wellbore self-circulation in hot dry rocks. A series of laboratory experiments using water as heat transfer fluid are carried out to study the influencing factors and parameters of heat exchange. The experimental results show that the granite with larger heat mining capacity and heat capacity has higher heat mining rate at high temperature. In addition, increasing water injection rate will increase the heat mining rate but decrease the outlet temperature. Therefore, the balance between the higher outlet temperature and the higher heat mining capacity should be carefully selected.

收稿日期: 2021-07-27; 修订日期: 2021-10-08

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 河北省科技计划项目(17276005); 天津华北地质勘查局科研项目(HK2021-B6)

第一作者: 元兆伟(1980-), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事水文与水资源勘查工作。E-mail: cdkey@126.com

通讯作者: 闫方平(1981-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事提高油气采收率、地热开发等方面研究。E-mail: yanfp@126.com

The similarity analysis shows that the 876-meter-long vertical well can obtain 565 kW heat mining capacity from hot dry rocks at 150 °C when the injection rate is 602.8 m³/d, which is very close to the field measured data and can prove the rationality of the similarity analysis results. The simulation device and experimental principle established in this study are also applicable to the middle and deep coaxial casing buried pipe heat exchange technology with characteristic of "taking heat without taking water", which can provide a certain reference for the research and practical application of middle and deep geothermal exploitation.

Keywords: hot dry rocks; wellbore self-circulation; experimental simulation device; heat transfer parameters; similarity analysis

地热资源是前景广阔的可再生能源之一,可分为水热型和干热岩型^[1]。干热岩(hot dry rocks, HDR)指地层深处(一般指地下3~10 km)存在的没有水或蒸汽的致密热岩体,是地热资源的重要赋存形式之一^[2-3]。目前,开发利用干热岩的主要方法是增强型地热开采系统(enhanced geothermal system, EGS)^[4-7],但EGS存在携热流体流失、岩流反应或支撑剂失效导致裂缝堵塞或闭合、经济成本高和诱发地震等问题^[8-9]。近年来,Kujawa等^[10]、Bu等^[11]、Wang等^[12]、Song等^[13]提出了一种新型的井筒自循环地热开采技术,可以很好地避免上述EGS的问题。该技术是将携热流体从套管环空注入,携热流体在向下流动过程中从高温地层提取热量,到达井底后,再通过隔热油管返回地面。如果隔热油管具有良好的保温能力,井口便可获得可利用的高温携热流体。

目前,对于井筒自循环地热开采技术,已经进行了一些相关的研究。Kujawa等^[10]提出了利用已存在的石油生产井开采地热的方法,建立了井筒与地层的传热模型,研究了隔热层的性能和注入流量对采出流体温度和采热速率的影响,为后续研究废弃油井开发地热能资源奠定了基础;Bu等^[11]建立了废弃油井开采地热能过程中地层-井筒-流体传热的非稳态模型,分析了流体的注入流量和地温梯度对采出流体温度和采热速率的影响,并采用闪蒸发电系统对采出流体的发电性能进行了分析,但模型未考虑流体热物性参数的变化;Wang等^[12]针对干热岩地热发电技术,对比了4种携热介质(水、导热油、异丁烷及四氟乙烷)的发电性能,结果表明四氟乙烷的发电性能优于其他3种介质;Song等^[13]、Holmberg等^[14]、Nian等^[15]、Beier等^[16-17]建立了地源热泵系统中井下同轴换热器的传热模型,并将预测结果与分布式热响应试验进行了比较,结果表明:储层内的流体流动可以强化井下换热器传热效率,此外出口温度和热功率在初始阶段显著降低,但随后保持相对稳定。Davis等^[18]提出利用废

弃油井进行地热能发电的方法,采用异丁烷作为循环携热介质,携热介质的出口端温度压力达到超临界状态,从而实现直接发电;但由于模型中地层的导热方式为稳态导热,未考虑采出流体的温度和采热速率随开采时间增加而逐渐降低,因而发电功率的计算结果偏大。

Cheng等^[19-20]建立了考虑地层导热函数、井筒流体流动和传热的非稳态模型,分析了岩石导热系数、热容、注入流体流速等因素对采热效果的影响,并且根据不同地层温度条件,对有机携热介质的发电性能进行了评估;Gordon等^[21]利用标准地热管道材料建立了一套垂直同轴钻孔热交换器,并比较了不同内径热交换器的热开采性能,结果表明,在外管径保持恒定时,增加内管的尺寸可以平衡每个流动通道内的压力,有利于系统的整体性能;McDaniel等^[22]在不同地质条件下进行了分布式热响应测试(distributed thermal response test, DTRT),并结合该结果与岩芯的热物理测量和新的数据分析技术,提供了地下传热变化的详细描述;Dai等^[23]利用塘沽深部地热井,采用井下同轴开环设计进行了地热生产试验,结果表明:井下结构对深部地热开采的影响良好,换热能力远高于普通换热器。综上所述,虽然目前的研究对于井筒自循环地热开采技术具有一定的参考意义,但室内及现场试验研究有限。朱琳等^[24]对二维无限大多孔介质内单向均匀水平流垂直绕过“固体小圆柱-多孔介质环-水环-多孔介质”复杂四层结构下的流场进行了解析求解,结果表明外部多孔区流型主要受控于外部渗透系数;水环间隙宽度对水环内速率峰值影响较大;内部渗透系数增加到某一临界值情况下,横截面速率分布从阶梯形变为抛物形,即“穿透”现象。该研究结果对类似结构的地理管换热器的设计研发有理论指导意义。

本研究建立了一套实验室规模的模拟装置来模拟干热岩局部井筒自循环的热交换过程,以水作为传

热流体,进行了一系列的实验室试验,对换热的影响因素及换热参数进行研究。最后,通过相似性分析,估算了井筒自循环技术的热开采能力。

1 试验部分

1.1 试验设备

试验系统如图 1 所示,主要由换热管、地热储层系统、流体循环系统和数据监测系统 4 部分组成。

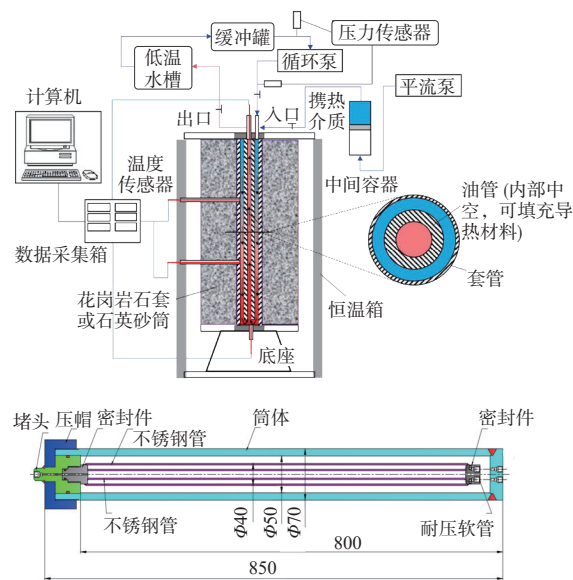


图 1 井筒自循环试验系统
Fig. 1 Wellbore self-circulation experimental system

(1) 换热管由套管和油管(均为 304 不锈钢)组成。套管长 850 mm,有效传热长度 800 mm,外径和内径分别为 70 mm 和 50 mm;油管长 800 mm,外径和内径分别为 40 mm 和 10 mm。油管管壁中空并填加绝热材料,以降低管壁的导热系数。

(2) 地热储层系统包括石英砂筒、花岗岩石套和恒温箱。石英砂筒和花岗岩石套直径均为 30 cm,可覆盖整个套管外壁;恒温箱(20~250 ℃)用于保持花

岗岩石套和石英砂筒的温度达到设计值。
(3) 流体循环系统用于循环换热介质,包括低温水浴(-20~50 ℃)、缓冲罐(1 000 mL)和柱塞计量泵。柱塞计量泵流量控制范围为 0~32 L/h(精度 95%),最大工作压力为 25 MPa。

(4) 数据监测系统用于监测循环系统中流体的温度和压力,包括压力传感器(± 0.01 MPa)和温度传感器(± 0.01 ℃)。压力传感器用于监测换热管入口和出口的压力,温度传感器用于监测换热管进出口、环空中部和底部以及套管外壁的温度,并使用计算机和数据采集系统记录数据。

1.2 试验材料

(1) 换热介质:纯净水,价格便宜,比热容大,广泛应用于各种换热设备中。
(2) 热储介质:分别选择花岗岩和石英砂代表不同的热储介质(图 2)。花岗岩石套(主要矿物为石英、正长石和酸性斜长石)中部开有直径 7 cm 的孔径,换热管和花岗岩石套之间的空隙使用与花岗岩导热系数相近的导热泥填充,使石套可以完全包裹换热管,用于模拟干热岩储层。为便于比较,石英砂筒内部用粒径为 0.15 mm 的石英砂填充以模拟砂岩储层。

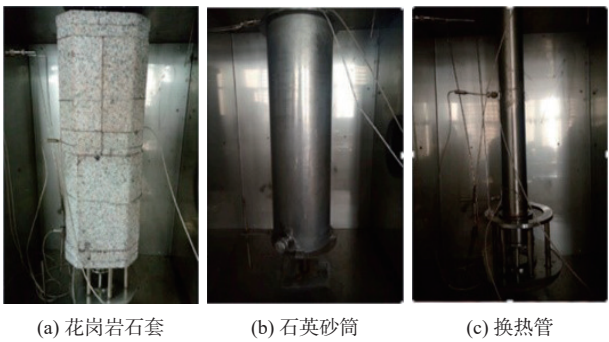


图 2 热储介质及换热管
Fig. 2 Heat storage medium and heat exchange tube

流体、热储介质和换热管的热物性如表 1 所示。

表 1 0.1 MPa、20 ℃ 条件下流体、热储介质和不锈钢管的热物性
Table 1 Thermophysical properties of fluid, heat storage medium and stainless steel pipe at 0.1 MPa and 20 ℃

材料	水	空气	堆积石英砂	花岗岩	套管	油管
密度/(kg·m ⁻³)	998.2	1.169 1	1 332.1	2 700	7 930	7 930
定压比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	4 182	1 012	872	653.2	500	500
导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.62	0.024	0.272	2.7	16.2	16.2
体积/m ³	0.011 6	0.360 9	0.024 3	0.029 8	0.001 3	0.001 9
100 ℃热储量/kJ	3 885.9	34.3	2 261.3	4 207.0	396.8	590.6
150 ℃热储量/kJ	6 314.6	55.7	3 674.6	6 836.3	644.8	959.6
200 ℃热储量/kJ	8 743.3	77.2	5 087.9	9 465.6	892.7	1 328.7

1.3 试验过程

以基本参数为例, 具体试验过程如下:

(1) 将试验设备按流程图组装完成, 并检查各连接部位有无渗漏。

(2) 用平流泵将中间容器的携热介质以 10 mL/min 的速率注入流体循环系统, 并将其中的空气全部排出, 关闭回路出口并继续注水, 使压力增加至设计值, 然后关闭回路入口。注入过程中, 需注意检查各连接部位有无渗漏。

(3) 启动恒温箱, 使花岗岩石套和换热管温度达到并稳定在设计值。注意在加热过程中, 要调节压力, 使其稳定在设计值。将低温水浴的冷却温度调整为 20 ℃。

(4) 当换热管内的压力和温度达到稳定状态时, 启动柱塞计量泵, 使换热管内的水以 107 mL/min 的速率循环, 冷水从入口流入套管环空, 经过热交换后, 从出口油管流出热水。

(5) 打开计算机, 每 10 秒记录 1 次换热系统的温度和压力变化, 当出口温度达到稳定时, 试验结束。

(6) 根据监测数据, 计算井口采热量、热通量、平均对流换热系数及环空底部到油管出口的热损失率等描述井筒自循环换热性能的参数。

井口采热量由热交换管的进出口温度和水的体积流量决定, 计算公式如下^[25-26]:

$$Q_w = V_w \rho_w C_w (T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

式中: Q_w ——井口采热量/W;

V_w ——水的体积流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

ρ_w ——水的密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

C_w ——恒压条件下水的质量比热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$);

T_{in} 、 T_{out} ——热交换管中水的入口和出口温度/℃。

为了避免不同半径处因截面积变化引起的热通量变化, 工程上经常按单位管长计算热通量^[26]。

$$q_w = \frac{V_w C_w (T_{bottom} - T_{in})}{L} \quad (2)$$

式中: q_w ——热通量/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$);

C_w ——水的体积热容/($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$);

T_{bottom} ——套管环空底部水温/℃;

L ——套管换热段长度/m。

当出口温度达到稳态时, 出口产生的热量与通过套管壁传递的热量相当, 而不受套管中储存的热量的影响。因此, 可用式(3)计算套管壁与环空内水的平均对流换热系数^[26]:

$$h_w = \frac{q_w}{\Delta T_m \cdot \pi d_{oi} L} \quad (3)$$

式中: h_w ——平均对流换热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$);

ΔT_m ——水与套管内壁的平均换热温差/℃;

d_{oi} ——套管内径/m。

ΔT_m 可按式(4)计算^[26]:

$$\Delta T_m = \frac{T_{bottom} - T_{in}}{\ln \left(\frac{T_{oi} - T_{in}}{T_{oi} - T_{bottom}} \right)} \quad (4)$$

式中: T_{oi} ——套管内壁温度/℃。

当水在油管中向上流动时, 从油管到套管环空的热损失率($f_{loss}/\%$)计算公式如下:

$$f_{loss} = \frac{T_{bottom} - T_{out}}{T_{bottom} - T_{in}} \times 100\% \quad (5)$$

1.4 试验方案

由于换热管长度较短, 建立的井筒自循环试验系统旨在模拟局部井段的换热过程, 并评价储层类型、储层温度、注入速率和注入压力等 4 个因素对换热性能的影响。试验方案如表 2 所示, 在基本条件下, 储层类型为花岗岩, 初始储层温度为 150 ℃, 注入速率为 107 mL/min, 注入压力为 10 MPa, 并通过套管环空注入以获取更高的热量^[27]。根据监测的温度、压力数据, 计算试验系统的采热量、热通量、平均对流传热系数和热损失率等参数, 以进行井筒自循环换热效果分析。试验过程中, 当对其中一个因素进行评价时, 其它因素均保持表 2 中的基本条件不变, 以减少不同因素间的相互干扰。

表 2 井筒自循环地热开采模拟试验方案

Table 2 Simulation experiment scheme of wellbore self-circulation geothermal exploitation

影响因素	试验参数
储层类型	空气, 石英砂, 花岗岩*
储层温度/℃	90, 120, 150*, 180
注入速率/($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)	53, 107*, 153, 213
注入压力/MPa	5, 10*, 15

注: 带*号的数值为基本条件, 所有试验均采用套管环空注入。

2 试验结果

试验仅测量了换热管的入口、出口、中间及环空底部的水温, 不能满足井筒完整温度剖面的要求; 同时, 基于监测数据的差分计算不符合要求, 本文采用 Comsol Multiphysics 数值计算软件中的流体流动和传热模块建立了井筒自循环热交换模型, 以拟合并筒的

实测温度。具体参数如表 3 所示,数值模拟模型如图 3(a)所示,模拟结果与试验结果的拟合误差小于 5%,如图 3(b)所示。

2.1 储层类型

选取花岗岩、石英砂和空气三种热储介质模拟不同的地热储层,不同类型储层的出口温度和井筒温度分布如图 4 所示,主要换热参数如图 5 所示。其中,出口温度数据来自室内试验观测结果,井筒温度数据是通过拟合温度监测数据进行预测的结果,其他因素下出口温度和井筒温度数据解释同上。

2.2 储层温度

不同储层温度条件下的出口温度和井筒温度分布如图 6 所示,主要换热参数如图 7 所示。

表 3 模型参数设置

Table 3 Model parameters

参数	数值	参数	数值
深度/m	0.8	岩体温度/℃	150
入口温度/℃	20	入口速率/(mL·min ⁻¹)	107
岩体直径/m	0.3	套管直径/m	0.07
油管直径/m	0.04	套管壁厚/m	0.01
油管壁厚/m	0.015	套管壁导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.45
油管壁导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.2	水导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.62
岩体平均导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	2.7	套管壁体积热容/(J·m ⁻³ ·K ⁻¹)	3.63×10 ⁶
油管壁体积热容/(J·m ⁻³ ·K ⁻¹)	3.63×10 ⁶	水体积热容/(J·m ⁻³ ·K ⁻¹)	4.20×10 ⁶
岩体平均体积热容/(J·m ⁻³ ·K ⁻¹)	1.76×10 ⁶	运行时间/min	120

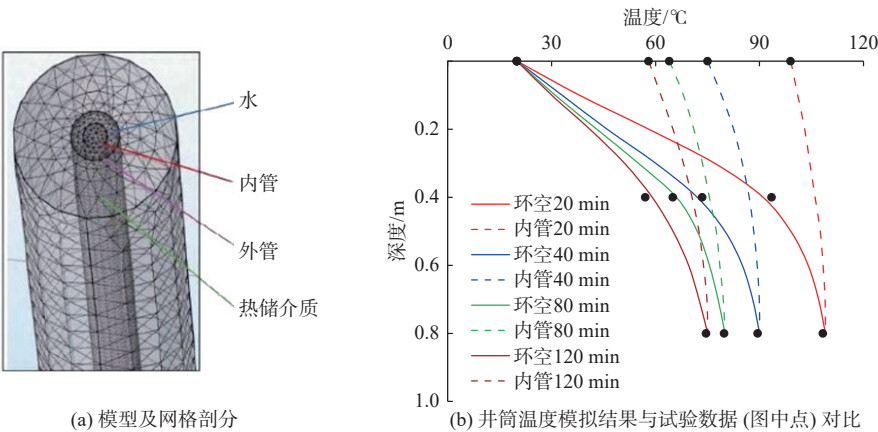


图 3 井筒自循环换热数值模拟
Fig. 3 Numerical simulation of wellbore self-circulation heat transfer

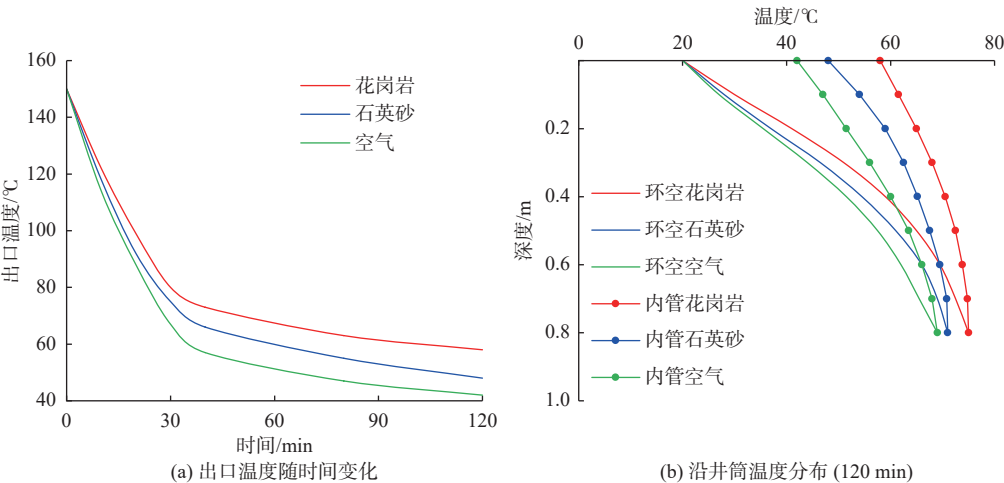


图 4 不同储层出口温度和井筒温度分布
Fig. 4 Distributions of outlet temperature and wellbore temperature of different reservoirs

2.3 入口压力

不同入口压力条件下的出口温度和井筒温度分布如图 8 所示。

2.4 注入速率

不同注入速率条件下的出口温度和井筒温度分布如图 9 所示,主要换热参数如图 10 所示。

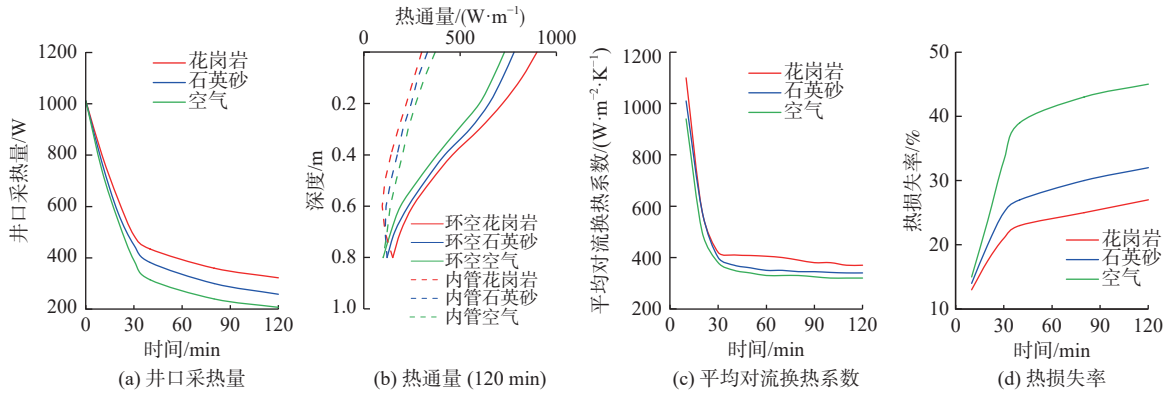


图 5 不同储层主要换热参数

Fig. 5 Main heat transfer parameters of different reservoirs

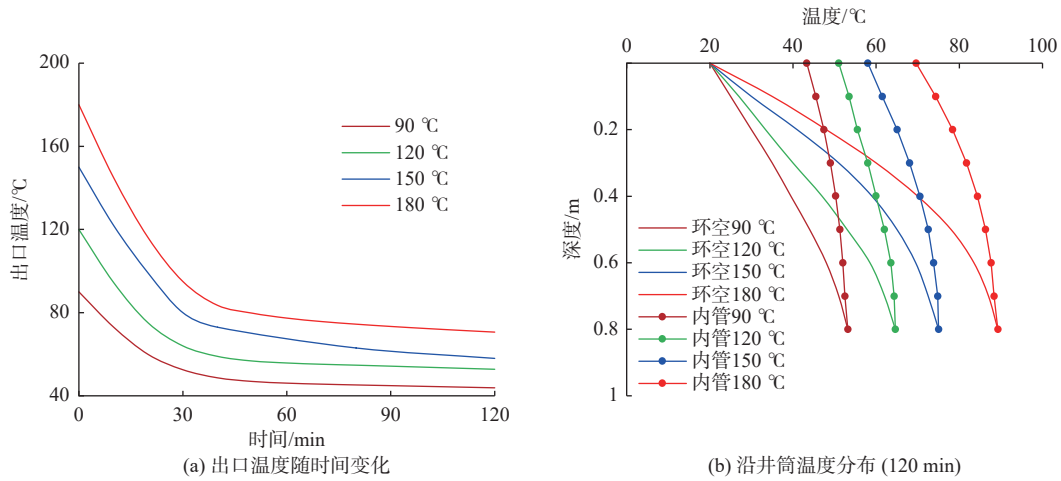


图 6 不同储层温度出口温度和井筒温度分布

Fig. 6 Distributions of outlet temperature and wellbore temperature at different reservoir temperatures

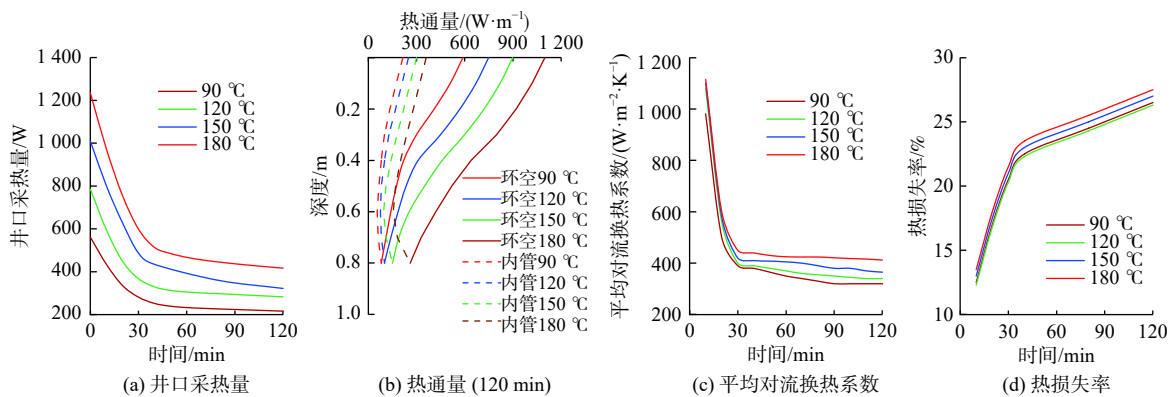


图 7 不同储层温度主要换热参数

Fig. 7 Main heat transfer parameters at different reservoir temperatures

3 分析与讨论

3.1 储层类型

从图 4 可以看出, 套管环空上部流体温度上升幅度较大, 下部流体温度上升幅度较小, 其原因是随着

深度增加, 流体温度逐渐升高, 套管环空中流体与储热介质之间的温差逐渐减小。当水在油管中向上流动时, 由于油管的导热系数较小, 水的温度变化相对较小。相比之下, 花岗岩导热系数和蓄热量最大, 采热开始后从花岗岩储层向换热管周围补给热量速率

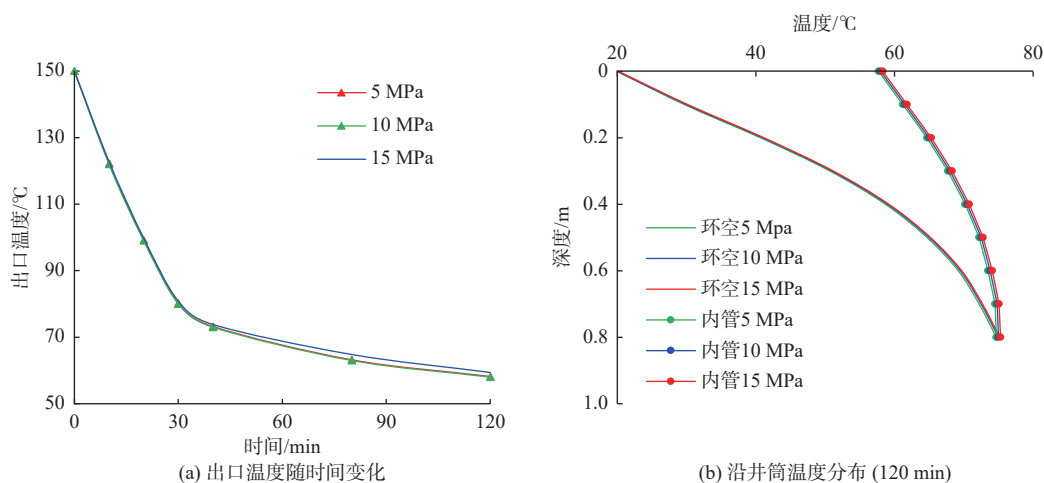


图 8 不同入口压力出口温度和井筒温度分布

Fig. 8 Distributions of outlet temperature and wellbore temperature under different inlet pressures

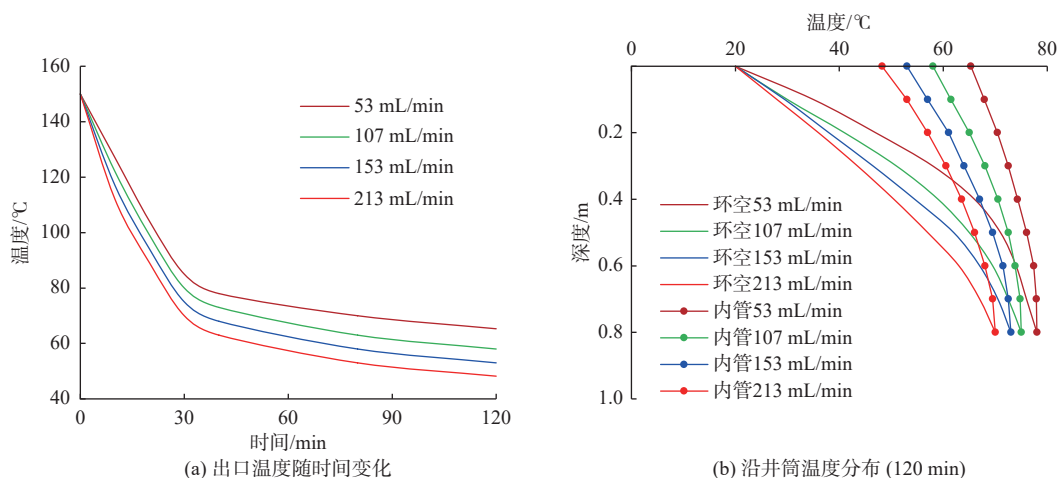


图 9 不同注入速率出口温度和井筒温度分布

Fig. 9 Distributions of outlet temperature and wellbore temperature at different injection rates

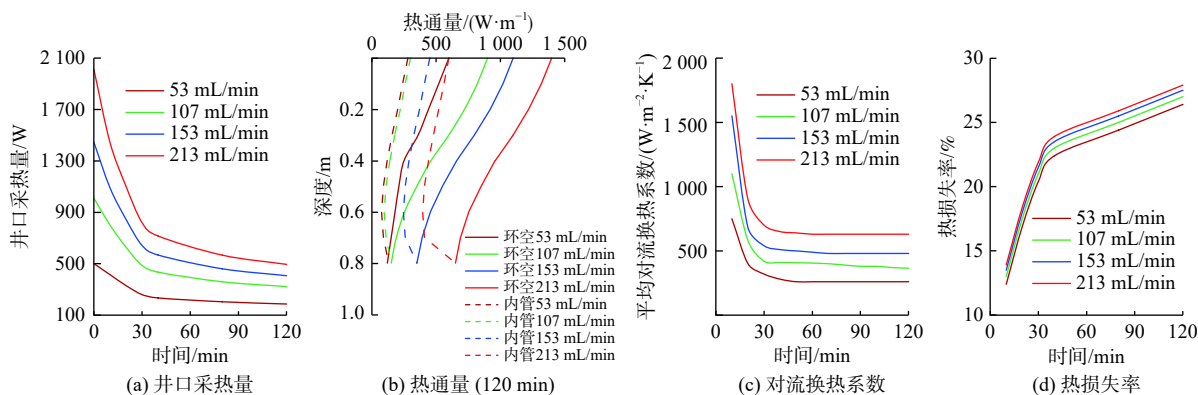


图 10 不同注入速率主要换热参数

Fig. 10 Main heat transfer parameters at different injection rates

最快, 沿井筒方向和出口处的温度远高于石英砂和空气环境温度。因此, 花岗岩对换热管的加热能力最强, 石英砂次之, 空气的加热能力最差。

从图 5 可以看出, 在采热初期, 采热主要来自不锈钢换热管, 因此, 三种储层的采热量相近。当换热达到稳态后, 花岗岩的采热量高于石英砂和空气的采热

量。在这一过程中, 花岗岩石套、石英砂筒和空气中储存的热量被采出, 不同储层的热容和导热系数对其影响很大。此外, 与石英砂和空气相比, 花岗岩在套管环空中的热通量最大, 在油管的热通量最小, 表明花岗岩可以提取更多的热量, 但油管的热损失率最小。在稳定换热状态下, 采用花岗岩石套时油管的热损失率为 26.4%, 而在空气中热损失率高达 44.6%。三种储层的套管环空平均对流换热系数在热采初期迅速下降, 但最终趋于稳定, 差别不大, 表明不同地热储层对平均对流换热系数的影响很小(稳定状态下为 316~373 W/(m²·K)), 但花岗岩的平均对流换热系数仍最高。

3.2 储层温度

从图 6 可以看出, 稳定状态下, 随着储层温度从 90 ℃ 升高到 180 ℃ (2 倍), 换热管的出口温度从 43.8 ℃ 增加到 70.6 ℃ (大约 1.5 倍), 同时由于油管到套管环空的热损失, 内管水温从井底到井口将降低 9.7~19.1 ℃。

从图 7 可以看出, 稳定状态下, 当储层温度升高 2 倍 (90~180 ℃) 时, 水的采热量可提高约 2.5 倍 (232~581 W), 说明储层温度对采热量影响显著。储层温度越高, 沿井筒环空的热通量越大, 但下降幅度也剧增, 同时油管的热通量也随之增加, 而油管的热损失率几乎相同 (26.3%~27.5%)。套管环空平均对流换热系数在初始 10 min 差异较大, 而采热达到平衡后, 在不同储层温度下换热系数基本趋于一致 (320~412 W/(m²·K))。

3.3 入口压力

从图 8 可以看出, 在入口压力分别为 5, 10, 15 MPa 时, 稳定状态下的出口温度分别为 58.2, 58, 59.4 ℃, 同时井筒内的温度分布基本相同, 说明入口压力对井筒自循环传热过程几乎没有影响。

3.4 注入速率

从图 9 可以看出, 注入速率越高, 出口温度越低。当注入速率从 53 mL/min 增加到 213 mL/min 时, 出口温度从 65.3 ℃ 下降到 48.2 ℃, 而采热量随着注入速率的增加而显著增加。采热初期出口温度迅速下降, 速率越大, 出口温度下降越快。在开始的 20 min 内, 以 53 mL/min 和 213 mL/min 的速率注入时, 出口温度分别从 150 ℃ 下降到 103 ℃ 和 88.6 ℃。热采达到稳定后, 出口温度和井筒温度分布趋于稳定。

从图 10 可以看出, 随着注入速率的增加, 水的采热量显著增加。当注入速率从 53 mL/min 增加到

213 mL/min 时, 采热量从 186 W 增加到 495 W, 但采热量的增加以降低出口温度为代价, 如图 9(a) 所示。因此, 应根据现场应用的具体要求, 慎重选择较高出口温度和较高采热量之间的平衡。此外, 注入速率对沿井筒的热通量也有很大的影响, 大的注入速率意味着套管环空从地热储层中提取更多热通量, 但损失的热通量也多。随注入速率增加, 套管环空内的对流换热系数从 262 W/(m²·K) 增加到 631 W/(m²·K)。油管的热损失率随注入速率的增加而增加, 但差别不大 (26.4%~27.9%), 此时井筒内流体均处于层流状态。当管内流速继续增加, 管内流体雷诺数增加, 层流逐渐转为湍流时, 由于油管中水流状态的变化, 加强了油管对环空的对流换热, 油管到环空的热损失率将显著增加。

4 用相似度分析估算现场规模采热量

室内试验的最终目的是将试验结果应用到现场中去, 因此应使试验装置与实际装置相似, 两者对应物理现象的单值性条件相似, 已定准则数相等, 利用相似准则将实验室规模计算结果推广到现场规模^[28]。

在强迫对流换热中, 存在三个互相独立的相似准则, 分别是努塞尔数 (Nu)、雷诺数 (Re) 和普朗特数 (Pr)。 Nu 表示对流换热强度的一个准数, Re 的大小决定流体运动的流动状态, Pr 反映流体物理性质对流传热过程的影响。根据相似第二定理, 强迫对流换热微分方程组的解可以表示成以下三个相似准则之间的关系, 计算公式如下:

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (6)$$

Nu 是对流换热热流量与通过特征长度为 l 的流体层的热通量之比, 计算公式如下:

$$Nu = \frac{h_w l}{\lambda} \quad (7)$$

式中: h_w ——对流换热系数/(W·m⁻²·K⁻¹);

λ ——水的导热系数/(W·m⁻¹·K⁻¹);

l ——特征长度/m。

对于圆形环空截面, $l = d_{oi} - d_{to}$, 其中 d_{to} 为油管外径/m, d_{oi} 为套管内径/m。

对于管内层流换热, 利用西得-塔特关联式计算努塞尔数 Nu :

$$Nu = 1.86 \left(Re Pr \frac{d_{oi}}{L} \right)^{\frac{1}{3}} = 1.86 \left(\frac{\rho_w v l C_w d_{oi}}{\lambda L} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

式中: Re ——管内雷诺数, $Re = \rho_w v l / \mu$, 其中 μ 为热流

体的动力黏度/($\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$) ;

Pr ——携热流体的普朗特数, $Pr = \mu C_w / \lambda$;

v ——套管环空截面平均流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), $v = 4V_w / \pi(d_{oi}^2 - d_{to}^2)$ 。

根据相似第一定理, 即彼此相似的现象, 其同名准则数相等。因此, 对于实验室规模(下标为 1)和现场规模(下标为 2)可得如下计算公式:

$$\left(\frac{\rho_{w1} v_1 (d_{oi,1} - d_{to,1}) C_{w1} d_{oi,1}}{\lambda_1 L_1} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{\rho_{w2} v_2 (d_{oi,2} - d_{to,2}) C_{w2} d_{oi,2}}{\lambda_2 L_2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

$$Nu_1 = 1.86 \left(\frac{\rho_{w1} v_1 (d_{oi,1} - d_{to,1}) C_{w1} d_{oi,1}}{\lambda_1 L_1} \right)^{\frac{1}{3}} = \frac{h_2 (d_{oi,2} - d_{to,2})}{\lambda_2} = Nu_2 \quad (10)$$

把计算套管环空流体平均速率的式(8)带入式(9), 得到式(11):

$$V_2 = \frac{0.00144 \lambda_2 \rho_{w1} C_{w1} d_{oi,1} L_2 V_1 (d_{oi,2} + d_{to,2})}{\lambda_1 \rho_{w2} C_{w2} d_{oi,2} L_1 (d_{oi,1} + d_{to,1})} \quad (11)$$

式中: V_2 ——现场规模的井筒排量/($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$);

V_1 ——实验室规模的井筒排量/($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)。

水作为携热介质时温度和压力对密度、定压比热容和导热系数的影响很小, 因此可以认为水在实验室规模和现场规模下的密度、定压比热容和导热系数近似相等。将式(2)(3)代入式(10), 得到:

$$Q_2 = \frac{1.86 \pi \lambda_2 d_{oi,2} L_2 \Delta T_{m2}}{(d_{oi,2} - d_{to,2})} \left(\frac{\rho_{w1} v_1 (d_{oi,1} - d_{to,1}) C_{w1} d_{oi,1}}{\lambda_1 L_1} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

式中: Q_2 ——现场规模下的井口采热量/W。

采用相似准则将实验室规模映射到现场规模时, 由于缺乏采用水平井自循环开采干热岩地热的现场试验, 因此采用垂直井同心管换热器开采地热能的现场数据^[29](现场地热地质条件如表 4 和图 11 所示)与本文计算结果进行对比, 验证本文模型的准确性, 对应参数如表 5 所示, 计算结果如图 12 所示。当实验室注入速率从 53 mL/min 增加到 213 mL/min 时, 现场注入速率从 298 m^3/d 增加到 1 199 m^3/d , 采热量从 433 kW 增加到 699 kW(花岗岩和 150℃ 的条件下); 当储层温度从 90℃ 升高到 180℃ 时, 采热量从 289 kW 升高到 660 kW(花岗岩和 602 m^3/d 的条件下); 当分别用花岗岩、石英砂和空气作为储热介质时, 采热量分别为 548 kW、426 kW 和 333 kW(602 m^3/d 和 150℃ 的条件下)。总之, 876 m 垂直井段的估算采热量与现场数据^[29]具有相同的数量级, 可以证明相似分析结果的合理性。

表 4 现场储层热物性参数

Table 4 Thermophysical parameters of field reservoir

热物性参数	数值
岩石密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	3 050
导热系数/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	1.6
质量热容/($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$)	870

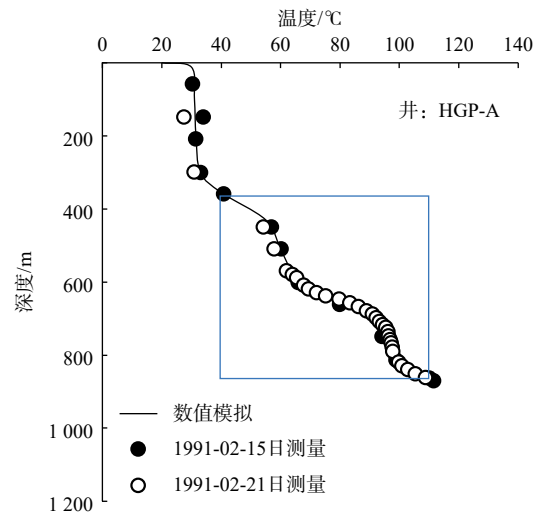


图 11 现场储层温度分布^[29]

Fig. 11 Temperature distribution of field reservoir^[29]

表 5 实验室规模和现场规模的井筒尺寸和储层深度

Table 5 Wellbore size and reservoir depth on laboratory-scale and field-scale

类别	井筒参数	数值
实验室规模	换热段长度 L_1/m	0.8
	套管内径 $d_{oi,1}/\text{m}$	0.05
	油管外径 $d_{to,1}/\text{m}$	0.04
现场规模	换热段长度 L_2/m	876
	套管内径 $d_{oi,2}/\text{m}$	0.177 8
	油管外径 $d_{to,2}/\text{m}$	0.126 2

在节能减排的背景下, 为保护地质环境和防治地面沉降, 鼓励“取热不取水”的中深层地热开发方式。本研究建立的模拟装置及试验原理也同样适用于“取热不取水”的中深层同轴套管式地埋管换热技术^[30], 可以为中深层地热开发研究和实际应用提供一定的参考。

5 结论

本研究基于井筒自循环采热原理, 建立了一个实验室规模的模拟装置来模拟干热岩局部井筒自循环的热交换过程, 以水为传热流体, 进行了一系列的实验室试验, 对换热的影响因素及换热参数进行研究。

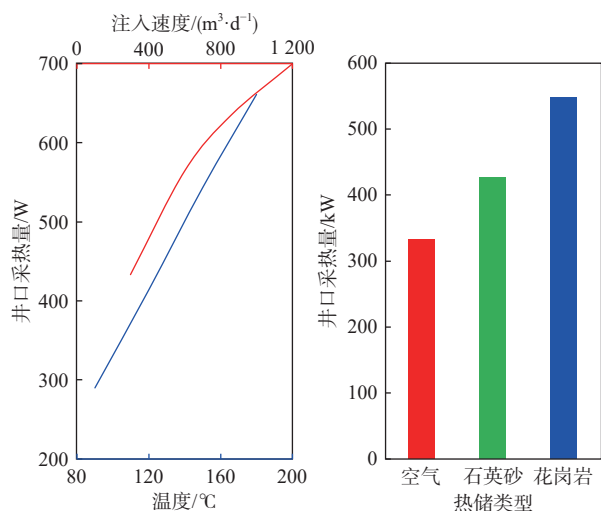


图 12 现场规模下不同注入速率、储层温度和储层类型条件下的采热量

Fig. 12 Heat mining capacity at different injection rates, reservoir temperatures and reservoir types on filed-scale

(1)花岗岩导热系数及热容大,出口温度高,采热量大,可从中提取更多的热量,且内管热量损失较少;储层温度对采热率影响很大,当储层温度升高2倍时,采热率可提高2.5倍;相比之下,注入压力对采热率几乎没有影响;注入速率对出口温度和采热速率有很大影响,应根据现场需要优化采热率和出口温度之间的平衡(因为随着采热率的增加,出口温度通常会降低)。

(2)相似性分析表明,876 m 长的垂直井在 $602.8 \text{ m}^3/\text{d}$ 的注入速率下,可从 150°C 的干热岩中获取的采热量高达 565 kW,该结果与现场实测数据很接近,可以证明相似性分析结果的合理性。

(3)本研究建立的模拟装置及试验原理也同样适用于“取热不取水”的中深层同轴套管式地理管换热技术,可以为中深层地热开发研究和实际应用提供一定的参考。

参考文献 (References) :

- [1] 汪集旻,胡圣标,庞忠和,等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 25 – 31. [WANG Jiyang, HU Shengbiao, PANG Zhonghe, et al. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(32): 25 – 31. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 蔺文静,王贵玲,邵景力,等. 我国干热岩资源分布及勘探:进展与启示[J]. 地质学报, 2021, 95(5): 1366 –

1381. [LIN Wenjing, WANG Guiling, SHAO Jingli, et al. Distribution and exploration of hot dry rock resources in China: progress and inspiration[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(5): 1366 – 1381. (in Chinese with English abstract)]

- [3] 陈梓慧,郑克桢,姜建军. 试论我国干热岩地热资源开发战略[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(3): 161 – 166. [CHEN Zihui, ZHENG Keyan, JIANG Jianjun. Discussion on the development strategy of hot dry rock in China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(3): 161 – 166. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 张亮,裴晶晶,任韶然. 超临界 CO_2 的携热优势及在地热开发中的应用潜力分析[J]. 可再生能源, 2014, 32(3): 330 – 334. [ZHANG Liang, PEI Jingjing, REN Shaoran. Advantages of supercritical CO_2 as heat transmission fluid and its application potential in development of geothermal resources[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(3): 330 – 334. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 许天福,袁益龙,姜振蛟,等. 干热岩资源和增强型地热工程:国际经验和我国展望[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(4): 1139 – 1152. [XU Tianfu, YUAN Yilong, JIANG Zhenjiao, et al. Hot dry rock and enhanced geothermal engineering: International experience and China prospect[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(4): 1139 – 1152. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 段云星,杨浩. 增强型地热系统采热性能影响因素分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(4): 1161 – 1172. [DUAN Yunxing, YANG Hao. Analysis of influencing factors on heat extraction performance of enhanced geothermal system[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(4): 1161 – 1172. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 崔翰博,唐巨鹏,姜昕彤. 渗透率对干热岩开采过程储层变化规律的影响[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(1): 171 – 180. [CUI Hanbo, TANG Jupeng, JIANG Xintong. Influence of permeability on reservoir change during dry hot rock mining[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(1): 171 – 180. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 陆川,王贵玲. 干热岩研究现状与展望[J]. 科技导报, 2015, 33(19): 13 – 21. [LU Chuan, WANG Guiling. Current status and prospect of hot dry rock research[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(19): 13 – 21. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 尹欣欣,蒋长胜,翟鸿宇,等. 全球干热岩资源开发诱发地震活动和灾害风险管控[J]. 地球物理学报,

- 2021, 64(11): 3817 – 3836. [YIN Xinxin, JIANG Changsheng, ZHAI Hongyu, et al. Review of induced seismicity and disaster risk control in dry hot rock resource development worldwide[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(11): 3817 – 3836. (in Chinese with English abstract)]
- [10] KUJAWA T, NOWAK W, STACHEL A A. Utilization of existing deep geological wells for acquisitions of geothermal energy[J]. *Energy*, 2006, 31(5): 650 – 664.
- [11] BU X, MA W, LI H. Geothermal energy production utilizing abandoned oil and gas wells[J]. *Renewable Energy*, 2011, 41: 80 – 85.
- [12] WANG Y, ZHANG L, CUI G D, et al. Geothermal development and power generation by circulating water and isobutane via a closed-loop horizontal well from hot dry rocks[J]. *Renewable Energy*, 2019, 136: 909 – 922.
- [13] SONG X Z, ZHENG R, LI G S, et al. Heat extraction performance of a downhole coaxial heat exchanger geothermal system by considering fluid flow in the reservoir[J]. *Geothermics*, 2018, 76: 190 – 200.
- [14] HOLMBERG H, ACUÑA J, NÆSS E, et al. Thermal evaluation of coaxial deep borehole heat exchangers[J]. *Renewable Energy*, 2016, 97: 65 – 76.
- [15] NIAN Y L, CHENG W L. Evaluation of geothermal heating from abandoned oil wells[J]. *Energy*, 2018, 142: 592 – 607.
- [16] BEIER R A, ACUÑA J, MOGENSEN P, et al. Borehole resistance and vertical temperature profiles in coaxial borehole heat exchangers[J]. *Applied Energy*, 2013, 102: 665 – 675.
- [17] BEIER R A, ACUÑA J, MOGENSEN P, et al. Transient heat transfer in a coaxial borehole heat exchanger[J]. *Geothermics*, 2014, 51: 470 – 482.
- [18] DAVIS A P, MICHAELIDES E E. Geothermal power production from abandoned oil wells[J]. *Energy*, 2009, 34(7): 866 – 872.
- [19] CHENG W L, LI T T, NIAN Y L, et al. Studies on geothermal power generation using abandoned oil wells[J]. *Energy*, 2013, 59: 248 – 254.
- [20] CHENG W L, LI T T, NIAN Y L, et al. Evaluation of working fluids for geothermal power generation from abandoned oil wells[J]. *Applied Energy*, 2014, 118: 238 – 245.
- [21] GORDON D, BOLISSETTI T, TING D S K, et al. Experimental and analytical investigation on pipe sizes for a coaxial borehole heat exchanger[J]. *Renewable Energy*, 2018, 115: 946 – 953.
- [22] MCDANIEL A, TINJUM J, HART D J, et al. Distributed thermal response test to analyze thermal properties in heterogeneous lithology[J]. *Geothermics*, 2018, 76: 116 – 124.
- [23] DAI C S, LI J S, SHI Y, et al. An experiment on heat extraction from a deep geothermal well using a downhole coaxial open loop design[J]. *Applied Energy*, 2019, 252: 113447.
- [24] 朱琳, 雷海燕, 马非, 等. 井内嵌入同轴多孔与固体圆柱地下水渗流流型分析[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(4): 25 – 31. [ZHU Lin, LEI Haiyan, MA Fei, et al. Flow pattern analysis around a solid cylinder with both porous and water rings in porous media[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(4): 25 – 31. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 李奉翠, 韩二帅, 梁磊, 等. 中深层地热井下同轴换热器长期换热性能研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(2): 194 – 201. [LI Fengcui, HAN Ershuai, LIANG Lei, et al. Long-term heat transfer performance of underground coaxial heat exchanger for medium-deep geothermal[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(2): 194 – 201. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 张靖周, 常海萍. 传热学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2015. [ZHANG Jingzhou, CHANG Haiping. Heat transfer[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)]
- [27] ZANCHINI E, LAZZARI S, PRIARONE A. Effects of flow direction and thermal short-circuiting on the performance of small coaxial ground heat exchangers[J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(6): 1255 – 1265.
- [28] 彭远玲, 李文欣, 韦科娟, 等. 竖直埋管热相似试验台原理及试验验证[J]. *暖通空调*, 2018, 48(9): 45 – 49. [PENG Yuanling, LI Wenxin, WEI Kejuan, et al. Principle and verification of a similar experiment system for vertical ground heat exchangers[J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2018, 48(9): 45 – 49. (in Chinese with English abstract)]
- [29] MORITA K, BOLLMEIER W, MIZOGAMI H. Analysis of the results from the downhole coaxial heat exchanger (DCHE) experiment in Hawaii[J]. *Transactions - Geothermal Resources Council*, 1992, 16: 17 – 23.
- [30] 尚宏波, 赵春虎, 靳德武, 等. 中深层地热单井换热数值计算[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(6): 159 – 166. [SHANG Hongbo, ZHAO Chunhu, JIN Dewu, et al. Numerical calculation of heat transfer in single medium-deep geothermal well[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(6): 159 – 166. (in Chinese with English abstract)]