

DOI: 10.19666/j.rlfed.202209208

关中地区中深层同轴套管换热器换热能力及提升措施研究

张杰^{1,2}, 王贵洋^{1,2}, 王鹏涛^{3,4}

(1.西南石油大学机电工程学院, 四川 成都 610500;

2.西南石油大学地热能研究中心, 四川 成都 610500;

3.中石化绿源地热能(陕西)开发有限公司, 陕西 咸阳 712000;

4.陕西省“四主体一联合”地热能校企联合研究中心, 陕西 咸阳 712000)

[摘要] 同轴套管换热器是实现中深层地热能井下高效取热技术之一, 其换热能力对地热系统的可持续开发至关重要。以关中地区为例, 考虑地层不均匀性建立中深层地热井同轴套管传热计算模型, 研究注入温度、注入流量、埋管深度等因素对其取热性能的影响, 探讨间歇开采工况下注入温度和注入流量对热储层温度恢复的影响。结果表明: 随着注入流量增加, 出口流体温度下降, 但整个系统的取热功率提高; 当注入温度较高时, 可有效提高出口流体温度, 但系统取热功率降幅较大; 随着地层深度增加, 出口流体温度和取热功率逐渐上升; 减小内管管径, 增加外管管径, 可有效提高出口流体温度和取热功率; 热储层温度恢复能力随注入流量和注入温度的升高而提高; 通过降低内管导热系数或选用双内管结构可以降低内管流体沿程温度损失, 提高系统的出口流体温度。

[关键词] 中深层地热井; 同轴套管换热器; 取热功率; 间歇开采; 热储层温度恢复

[引用本文格式] 张杰, 王贵洋, 王鹏涛. 关中地区中深层同轴套管换热器换热能力及提升措施研究[J]. 热力发电, 2023, 52(2): 54-63. ZHANG Jie, WANG Guiyang, WANG Pengtao. Heat transfer capacity of middle-deep coaxial casing heat exchanger in Guanzhong area and the improvement measures[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(2): 54-63.

Heat transfer capacity of middle-deep coaxial casing heat exchanger in Guanzhong area and the improvement measures

ZHANG Jie^{1,2}, WANG Guiyang^{1,2}, WANG Pengtao^{3,4}

(1. School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Geothermal Energy Research Center, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

3. Sinopec Green Energy Geothermal Development Co., Ltd., Xianyang 712000, China;

4. Geothermal University-Enterprise Joint Research Center of Shaanxi "Four Subjects and One Joint", Xianyang 712000, China)

Abstract: The coaxial casing heat exchanger is one of the technologies to realize high efficient heat extraction in the middle and deep geothermal energy wells, and its heat transfer capacity is crucial to the sustainable development of geothermal system. Taking Guanzhong area as an example, the heat transfer model of coaxial casing heat exchanger in middle-deep geothermal wells is established considering the formation inhomogeneity, and the effects of injection temperature, injection flow rate, buried depth and other factors on its heat extraction performance are studied. The influences of injection temperature and injection flow rate on thermal reservoir temperature recovery under intermittent production condition are discussed. The results show that, the outlet fluid temperature decreases with the increasing of injection flow rate, but the heat extraction power of the whole system increases. Increasing the injection temperature can improve the outlet fluid temperature, but the system heat extraction power decreases greatly. With the increasing of formation depth, the temperature of outlet fluid and heat extraction power increase gradually. Reducing the inner pipe diameter and enlarging the outer pipe diameter can effectively improve the

收稿日期: 2022-09-23 网络首发日期: 2022-11-02

基金项目: 四川省青年科学基金(2022NSFSC1249); 四川省科技创新苗子工程(2022033)

Supported by: Sichuan Youth Science Foundation (2022NSFSC1249); Sichuan Science and Technology Innovation Miao Project (2022033)

第一作者简介: 张杰(1987), 男, 副教授, 主要研究方向为清洁能源安全高效利用、管道力学等, Longmenshao@163.com。

temperature of outlet fluid and heat extraction power. The temperature recovery ability of the thermal reservoir increases with the injection flow and injection temperature. Reducing the thermal conductivity of inner pipe or choosing double-layer inner pipe structure can reduce the fluid temperature loss along the inner tube and increase the outlet fluid temperature.

Key words: middle-deep geothermal well; coaxial casing heat exchanger; heat extraction power; intermittent production; temperature recovery ability of thermal reservoir

地热能因储量大、可再生、绿色低碳等优点，成为一种发展潜力巨大的清洁能源^[1-2]。在地热能供热技术领域，取热利用主要分为浅层地源热泵技术、水热型供热技术与中深层地埋管供热技术^[3]。其中，中深层同轴套管技术因其“取热不取水”，不破坏地下水环境，又具有占地面积小、可利用地温高、系统稳定等优点而被推广应用^[4]。

学者已开展相关技术研究，如李思奇等^[5]通过数值仿真研究了内管绝热性和绝热段长度对换热性能的影响，认为内管绝热性对深井换热性能影响显著，合理绝热段比例为 0.875；冯波等^[6]研究了单井闭循环地热系统的可持续开发潜力，通过改变注入温度和流速寻求最佳开采方式；赵春虎等^[7]构建了垂直单井岩-水耦合传热模型，分析了深层地热单井套管的换热能力及群井中心井出口温度；赵金洲等^[8]基于双层非稳态导热过程的井筒温度场半解析模型，分析了相关参数对井筒温度分布的影响；李奉翠等^[9]研究了长期运行过程中换热器换热性能；Song 等人^[10]建立了深层同轴地埋管换热器的非稳态传热模型，分析了关键参数对同轴地埋管换热器性能影响；Huang 等人^[11]基于分布式光纤温度传感器对深层同轴地埋管换热器进行了现场测试，评价了深层同轴地埋管换热器的热提取性能；Hu 等人^[12]分析了水和地层的比热容、热导率等参数对深层同轴地埋管换热器输出功率的影响；Pan 等人^[13]建立了深层同轴地埋管换热器分析模型，绘制了取热性能与各种参数之间关系的趋势图；Chen 等人^[14]建立了双 U 型地埋管换热器和间断布置螺旋环肋片的结构，研究了 2 种埋管换热器的传热性能。

现有研究主要将地层物性参数假定为平均值，

较少考虑内管流体沿程温度损失和热储层温度恢复能力。为此，本文将关中地区地热井为例，考虑地层不均匀性建立计算模型，研究注入流量、注入温度、内外管径、埋管深度等因素对换热器换热性能的影响；探究间歇开采工况下注入温度和注入流量对热储层温度恢复能力的影响，并提出提高同轴套管传热的改进措施。

1 中深层同轴套管换热器

1.1 物理模型

中深层地热井同轴套管换热系统如图 1 所示，主要包括内管、外管、回填材料和地下热储。取热过程中，冷循环水从同轴套管外管环腔流入，向下流动过程中与周围热储进行热交换吸热，到达底部后高温热水从内管底部向上流动返回地面。

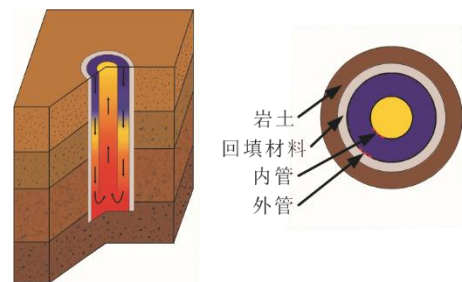


图 1 中深层同轴套管换热系统结构示意图
Fig.1 Structural diagram of the middle and deep coaxial casing heat exchanger

热储地层自上而下依次为第四系秦川群 ($Q_{2-4}qc$)、三门组 (Q_1s) 以及新近系的张家坡组 (N_2z) 和蓝田-灞河组 (N_{2l+b})，常温层厚度为 20 m，地层物性数据^[15-16]见表 1，同轴套管结构及物性参数见表 2。

表 1 地层物性参数
Tab.1 Physical parameters of the stratum

地层	厚度/m	垂深/m	密度/($kg \cdot m^{-3}$)	定压比热容/($J \cdot (kg \cdot ^\circ C)^{-1}$)	导热系数/($W \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-1}$)
秦川群 ($Q_{2-4}qc$)	612	612	1 760	933	1.55
三门组 (Q_1s)	402	1 014	1 860	824	1.59
张家坡组 (N_2z)	852	1 866	1 970	878	1.64
蓝田-灞河组 (N_{2l+b})	234	2 100	2 070	878	1.73

表2 同轴套管结构及物性参数
Tab.2 Structural and physical parameters of the coaxial casing

项目	数值
井孔深度/m	2 000
井孔直径/m	0.244 5
外管外径/m	0.177 8
外管内直径/m	0.156 8
内管外径/m	0.089 0
内管内直径/m	0.050 6
外管导热系数/(W·(m·°C) ⁻¹)	46.0
内管导热系数/(W·(m·°C) ⁻¹)	0.2
回填材料导热系数/(W·(m·°C) ⁻¹)	1.5
地层半径/m	100

1.2 数学模型

1.2.1 基本假设

建立计算模型，做如下假设^[17-22]：

1) 忽略不同地层岩性对地温梯度影响，地温梯度均匀；

2) 岩土为各向同性且热物性恒定，忽略地下水渗流的影响，岩土传热视为纯导热过程；

3) 初始时刻，井筒温度与同一层位岩土初始温度相同；

4) 研究范围内的热通量为定值不变。

1.2.2 控制方程

基于傅里叶定律与守恒定律，传热区域中每层岩土导热方程为^[17]：

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial T^2}{\partial z^2} \quad (1)$$

式中： a 为岩土层的热扩散系数， m^2/s ； T 为岩土层温度， $^{\circ}\text{C}$ ； r 、 z 分别为径向和垂直方向长度， m 。

换热器外管环腔与内管循环工质的温度分布可由流体热平衡来判断，流体由外管环腔进入，内管流出。外管环腔进入内管中流体能量公式为^[18]：

$$C_1 \frac{\partial T_{f1}}{\partial t} = \frac{T_{f2} - T_{f1}}{R_2} + \frac{T_b - T_{f1}}{R_1} - M c_f \frac{\partial T_{f1}}{\partial z} \quad (2)$$

$$C_2 \frac{\partial T_{f2}}{\partial t} = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{R_2} + M c_f \frac{\partial T_{f2}}{\partial z} \quad (3)$$

其中：

$$C_1 = \pi(r_{i1}^2 - r_{o2}^2)\rho_f c_f + \pi(r_{o1}^2 - r_{i1}^2)\rho_1 c_1 + \pi(r_b^2 - r_{o1}^2)\rho_b c_b \quad (4)$$

$$C_2 = \pi r_{i2}^2 \rho_f c_f + \pi(r_{o2}^2 - r_{i2}^2)\rho_2 c_2 \quad (5)$$

R_1 及 R_2 可通过稳态热阻表达式计算得到：

$$R_1 = \frac{1}{2\pi r_{i1} h_1} + \frac{1}{2\pi k_{p1}} \ln\left(\frac{r_{i1}}{r_{o1}}\right) + \frac{1}{2\pi k_b} \ln\left(\frac{r_b}{r_{o1}}\right) \quad (6)$$

$$R_2 = \frac{1}{2\pi r_{i2} h_2} + \frac{1}{2\pi k_{p2}} \ln\left(\frac{r_{o2}}{r_{i2}}\right) + \frac{1}{2\pi r_{o2} h_1} \quad (7)$$

式中： C_1 为外管环腔通道热容量， W/m^2 ； C_2 为内管通道热容量， W/m^2 ； M 为水流量， kg/s ； c_f 为水的比热容， $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ； r_{o2} 为内管外半径， m ； r_{i2} 为内管内半径， m ； r_{i1} 为外管内半径， m ； r_{o1} 为外管外半径， m ； $\rho_f c_f$ 为水的体积比热容， $\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ ； $\rho_1 c_1$ 为外管的体积比热容， $\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ ； $\rho_b c_b$ 为回填材料的体积比热容， $\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ ； $\rho_2 c_2$ 为内管的体积比热容， $\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ ； h_1 为外管对流换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ； h_2 为内管对流换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

1.3 模型验证

为验证所建立模型的可靠性，建立与夏威夷HGP-A井现场参数^[23-25]相同的仿真模型进行对比，结果如图2所示。由图2可以看出，模拟结果与现场实测数据吻合较好，误差小于2.8%，说明所建立计算模型较为可靠。

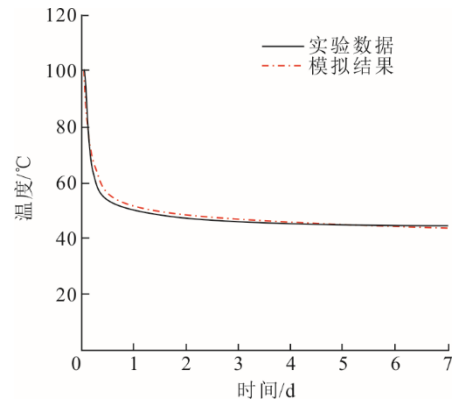


图2 模拟结果与实验对比

Fig.2 Comparison between the simulation results and the experimental data

2 同轴套管换热性能

为研究不同参数对同轴套管换热器换热性能的影响，建立如图1所示模型，参数设置见表1、表2。地面设为恒温边界，常年平均温度 15°C ；地层平均地温梯度 $3.47^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ；模型侧边界和底部边界设定为温度边界条件，温度为对应地层的初始温度；大地热流值为 $68\text{mW}/\text{m}^2$ 。

2.1 换热器内管取热流体温度规律

当注入温度 15°C 、注入流量 $20\text{m}^3/\text{h}$ 时，图3为不同深度内管流体温度和换热器截面温度。由图3可以看出：不同深度流体温度变化趋势基本相同，越深处的流体温度越高；随深度增加，换热越

剧烈，流体从地层中吸收的热量越多。以 0 m 地面处出口水温为例，开采前 20 天的流体温度下降较快，出口水温由 68.4 °C 降至 27.9 °C，下降率 59.2%；开采第 20~60 天，温度曲线下降缓慢，出口水温由 27.9 °C 降至 25.5 °C，下降 8.6%；开采第 60~120 天，出口温度稳定在约 24.9 °C。这是由于开始换热阶段，流体与地层温差大，换热程度剧烈，流体从地层中吸取大量热量，使得井壁附近岩土温度快速降低；随着换热过程进行，井壁附近岩土热量恢复与地热井的热量提取达到动态平衡，岩土温度趋于稳定，流体温度也缓慢下降并趋于稳定。

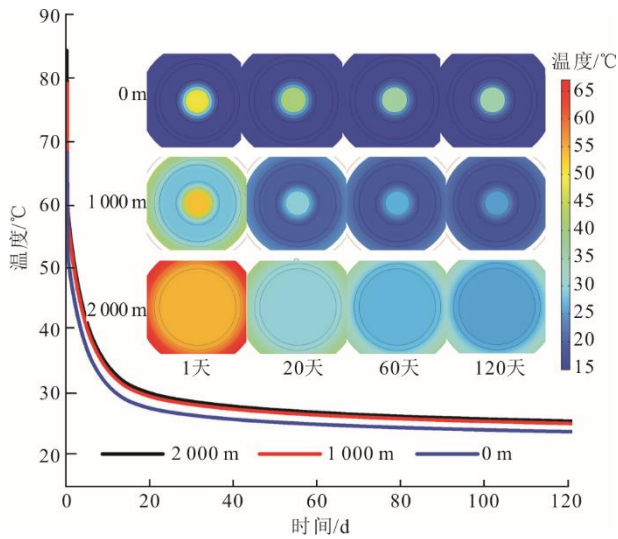


图 3 不同深度内管流体温度和换热器截面温度
Fig.3 Fluid temperature of the inner tube and section temperature of the heat exchanger at different depths

2.2 注入流量

不同注入流量下出口温度和取热功率如图 4 所示。

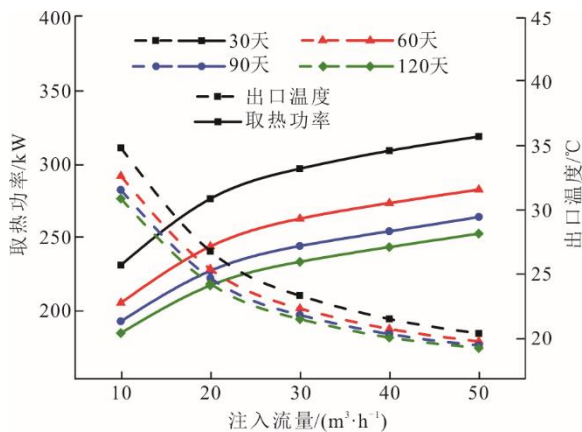


图 4 注入流量对出口水温和取热功率的影响
Fig.4 Effects of injection flow on outlet water temperature and heat extraction power

由图 4 可以看出：相同注入温度下，随注入流量增大，流体出口温度不断降低，取热功率不断增加，但取热功率和出口水温的变化幅度越来越小。说明增加注入流量对提高系统换热性能作用有限。开采第 120 天，注入流量从 10 m³/h 增加到 50 m³/h，出口温度从 30.94 °C 下降到 19.38 °C；取热功率从 186.02 kW 增加到 255.33 kW，提高了 37.3%。这是由于流量增加促进了管内强制对流，同时单位时间内与地层进行热交换的流体质量增加，导致取热功率增加。但是流量越大，管内流体和地层之间的热传递时间越短，出口流体温度越低。

2.3 注入温度

当注入流量为 50 m³/h 时，不同注入温度下的出口温度和取热功率如图 5 所示。由图 5 可以看出，流体出口温度与注入温度呈线性增加关系，取热功率随注入温度升高而减小。开采第 120 天，注入温度从 10 °C 升高到 30 °C，流体出口温度从 15.27 °C 升高到 31.52 °C，温度提升差从 5.27 °C 降低到 1.52 °C，取热功率从 307.53 kW 降至 75.63 kW。这是由于注入温度越低，外管中流体与周围地层温差越大，井筒换热性能越强，导致系统取热功率越大，适当降低入口水温可以提高换热器的换热能力。

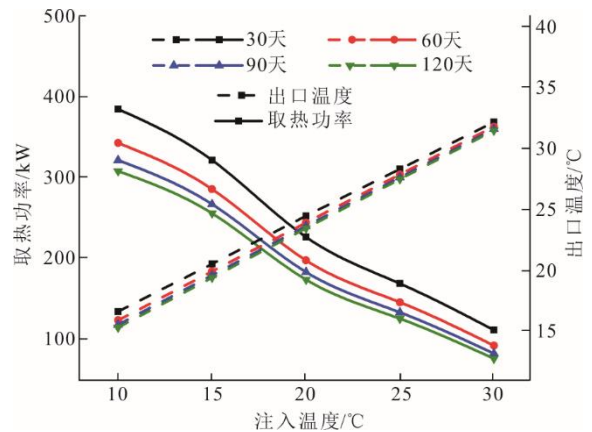


图 5 注入温度对出口水温和取热功率的影响
Fig.5 Effects of injection temperature on outlet water temperature and heat extraction power

2.4 埋管深度

当注入温度 15 °C、注入流量 40 m³/h 时，开采第 120 天管内流体温度随埋管深度变化曲线如图 6 所示。由图 6 可以看出，环腔流体温升幅度随埋管深度增加而逐渐升高，内管流体温度从井底到出口不断降低，且温降随埋管深度的增加而增大。这是因为内管高温流体与环腔注入的低温流体发生了热交换，埋管深度越大，与环腔中低温流体的热交换时间就越长，温降越大。

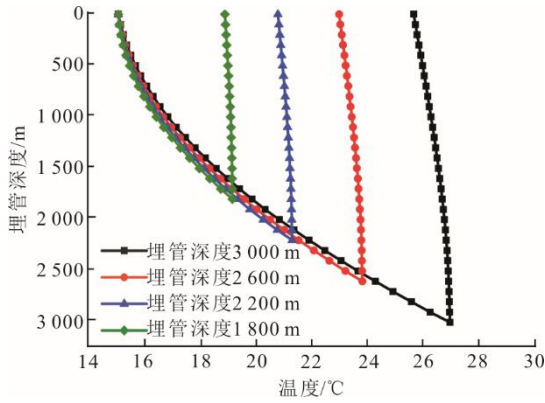


图6 不同埋管深度下的管内流体温度

Fig.6 Fluid temperature in the heat exchanger at different buried pipe depths

不同埋管深度流体出口温度和取热功率如图7所示。由图7可以看出，流体出口温度和取热功率随埋管深度加深而增加，当埋管深度从1800m增加到3000m时，出口温度从18.814℃升高到25.567℃，平均增幅为0.563℃/100m。而相应的取热功率平均增幅为21.48kW/100m。因此，增加埋管深度能够获得温度更高的热源，系统换热性能更好。

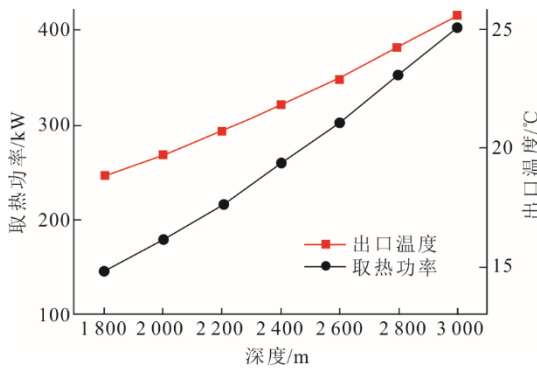


图7 埋管深度对出口水温和取热功率的影响

Fig.7 Effects of buried pipe depth on outlet water temperature and heat extraction power

2.5 内管管径

当注入流量为30m³/h时，图8为开采第120天时1500m深处换热器径向截面温度分布。其中0m为内管轴线位置，由于对流换热效应导致靠近外管壁处流体温度较高，高温流体向外管环腔通道低温流体传热，故外管管壁到内管方向的流体温度逐渐降低；同理，内管通道中心高温流体向内管壁处低温流体传热，故内管通道中心到内管管壁的流体温度逐渐降低。

第120天不同内管管径比换热器出口温度和取热功率如图9所示。由图9可以看出，出口温度和取热功率随着内管管径比增大而减小，当内管管径

比从3/8增大到3/4时，出口水温从21.16℃下降到21.06℃，取热功率从215.59kW下降到212.1kW。

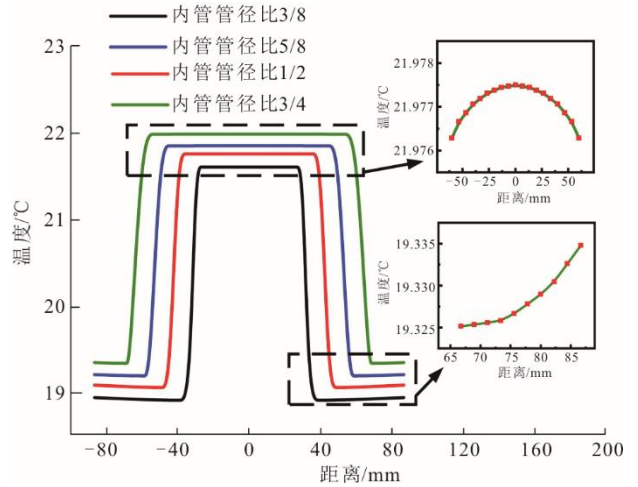


图8 1500m处换热器径向截面温度

Fig.8 Radial section temperature of the heat exchanger at 1500m depth

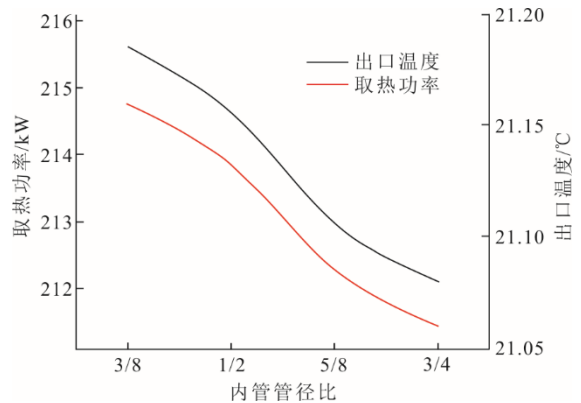


图9 内管管径比对出口水温和取热功率的影响

Fig.9 Effects of inner pipe diameter ratio on outlet water temperature and heat extraction power

图10为井筒内流体温度随内管管径比变化曲线。

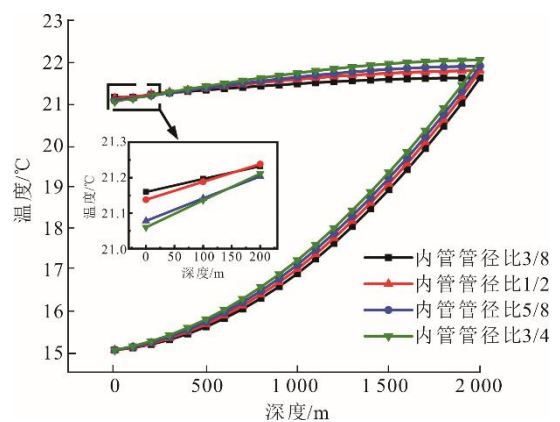


图10 不同内管管径比的井筒内流体温度

Fig.10 Fluid temperature in the pipe with different diameter ratios of inner pipe

由图10可以看出，外管环腔流体温升和内管

流体从井底到采出口温度下降幅度随内管管径比的增大而增大。这主要是由于：内管径比增大后，外管环腔截面面积减小，外管与地层换热面积不变，外管环腔流体平均温度升高；相同流量下，内管径比越大，内管流体流速越慢，内外管间换热时间变长且换热面积增大，导致内管流体温度损失增大，出水温度降低，取热量减少。

2.6 外管管径

当注入温度 15 °C、注入流量 30 m³/h 时，第 120 天 1 500 m 处换热器径向截面温度曲线如图 11 所示。由图 11 可以看出：外管管径比越大，内外管流体温度越高；内管中流体温度呈轴对称分布，内管轴线位置温度最高，越靠近内管壁，温度越低；外管环腔中流体温度呈抛物线分布，内管外壁处流体温度最低，流体温度随到外管内壁距离的缩小而不断升高。

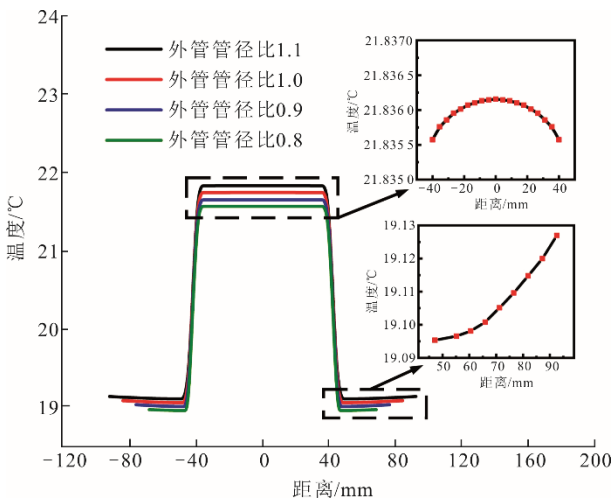


图 11 1 500 m 处换热器径向截面温度

Fig.11 Radial section temperature of the heat exchanger at 1 500 m depth

第 120 天不同外管管径比下的出口温度和取热功率如图 12 所示。由图 12 可以看出，出口温度和取热功率随外管管径比的增大而提高，当管径比从 0.8 增大到 1.1 时，出口水温提高 1.2%，取热功率提高 4.1%。

图 13 为井筒内流体温度随外管管径比变化曲线。由图 13 可以看出，外管环腔流体温度随管径比增大而升高，内管流体从井底到采出口温度下降幅度几乎相同。这是由于外管管径比增大，外管环腔内流体与周围地层的换热面积增加，相同流量下外管环腔截面面积与流体流速呈反比，外管管径比越大，流体流速越低，环腔内流体与地层的换热越充

分，换热器的换热效率越高。

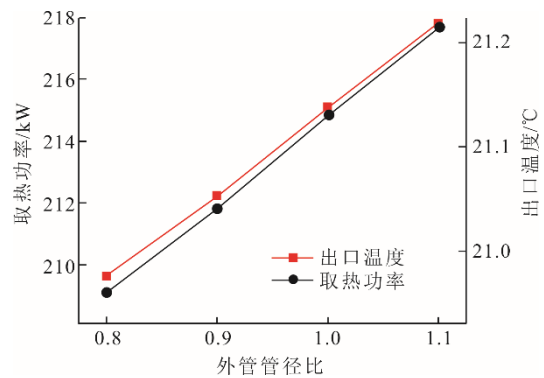


图 12 外管管径比对出口水温和取热功率影响

Fig.12 Effects of outer pipe diameter ratio on outlet water temperature and heat extraction power

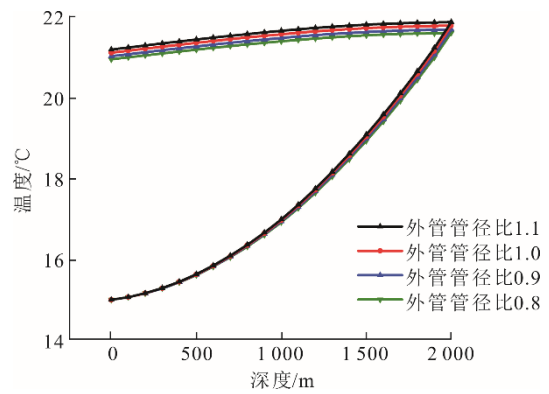


图 13 不同外管管径比下井筒内流体温度

Fig.13 The fluid temperature in pipe with different diameter ratios of outer pipe

3 热储层温度恢复能力

同轴套管换热器的换热能力也受周围热储层温度影响，以间歇运行供暖工况为例，每年 120 天连续采热，245 天自然恢复，研究注入温度和注入流量对非采暖期热储层温度恢复的影响规律。

3.1 注入温度

当注入流量为 30 m³/h 时，注入温度与流体出口温度关系如图 14 所示。由图 14 可以看出，随着注入温度升高，稳定后的出口水温不断上升，注入温度 10、15、20 °C 工况下，运行第 1 年与第 10 年出口温度降幅分别为 6.2%、4.6%、3.3%。可见，注入温度越高，出口水温降幅越小，热储层温度恢复能力越强。

第 5 年和第 10 年热恢复期结束时 1 500、2 000 m 处储层温度分布如图 15 所示。由图 15 可以看出：恢复后的储层温度未能达到初始温度，且随开采年限增加，恢复后的储层温度逐年降低，说明开采热

量大于地层自然恢复热量，储层存在低温堆积现象；注入温度越高，恢复期结束后的储层温度越高，主要原因是注入温度升高后与周围储层温差减小，地热井换热热量减小，从周围储层提取的热量减少。

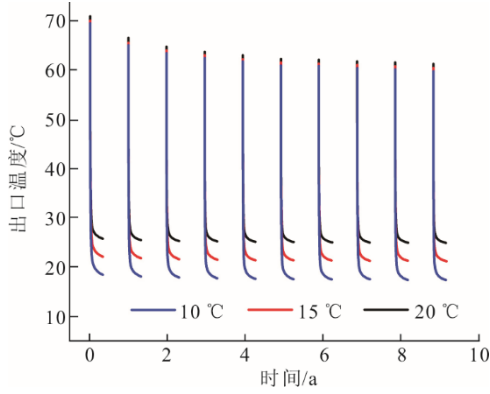


图 14 不同注入温度下的出口温度

Fig.14 The outlet temperature at different injection temperatures

的出口温度随注入流量增加而降低，当注入流量为 20、30、40 m³/h 时，运行第 1 年与运行第 10 年的出口温度降幅分别为 5.4%、4.6%、3.7%。因此，增大注入流量，出口温度降幅减小，储层温度恢复能力增强。

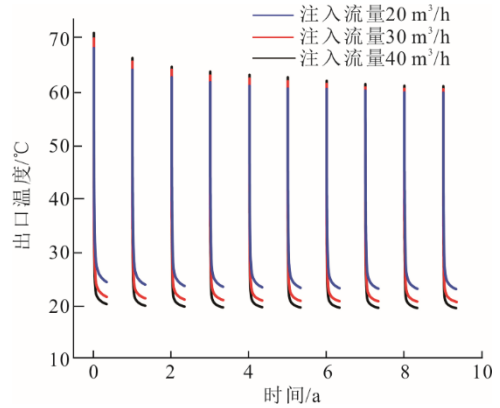


图 16 不同注入流量下的出口温度

Fig.16 The outlet temperature at different injection flows

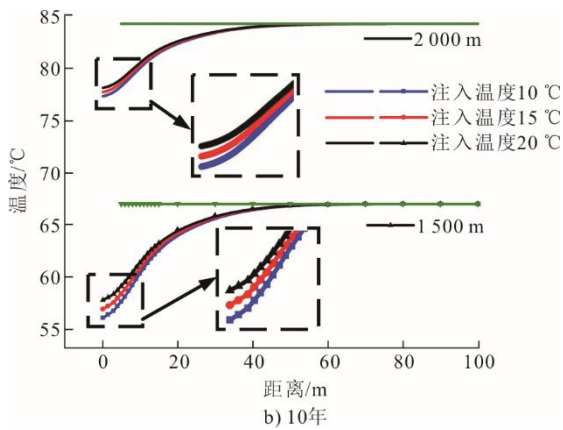
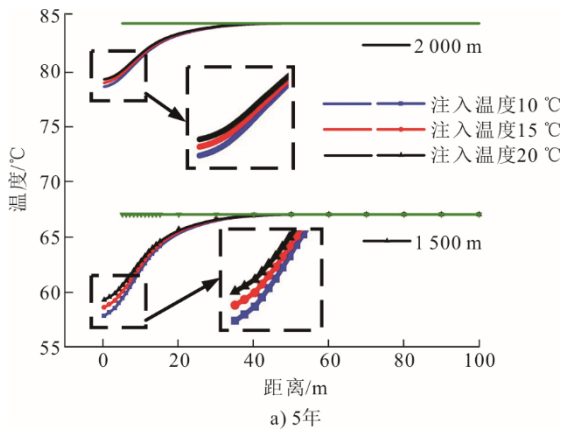


图 15 不同注入温度下的地层温度分布

Fig.15 The formation temperature distribution at different injection temperatures

第 5 年和第 10 年热恢复期结束时 1500、2000 m 处储层温度分布如图 17 所示。

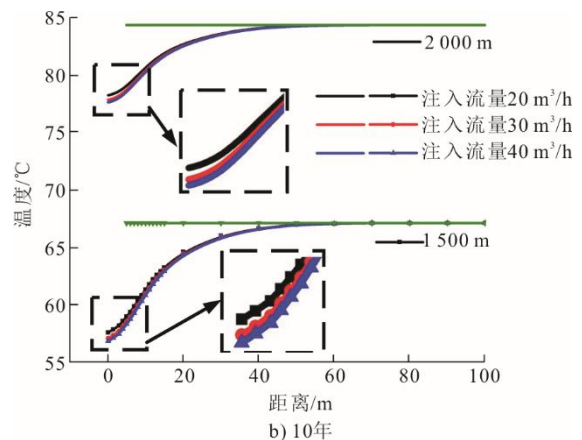
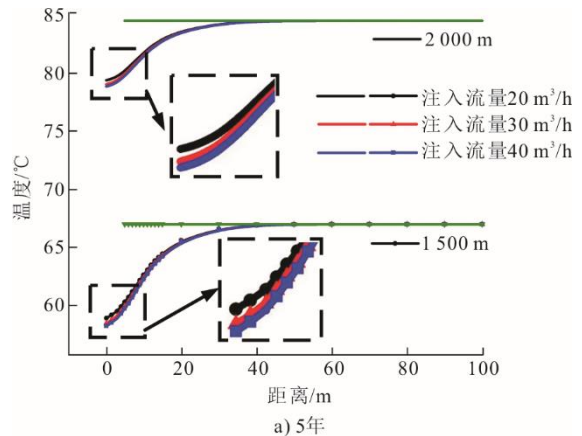


图 17 不同注入流量下的地层温度分布

Fig.17 The formation temperature distribution at different injection flows

3.2 注入流量

当注入温度为 15 °C 时，注入流量与流体出口温度关系如图 16 所示。由图 16 可以看出，稳定后

由图 17 可以看出，随着注入流量增加，储层恢复后温差减小。以 1 500 m 处为例，注入流量为 20 m³/h 与 30 m³/h 的储层热恢复后温度之差为 0.45 °C，注入流量为 30 m³/h 和 40 m³/h 之间储层热恢复后温度之差为 0.22 °C。主要原因是，流量越大，相同时间内提取热量越多，井筒周围储层温度越低，与远处高温储层温度差越大，热传递越强，从而提高了储层温度恢复能力。但注入流量越大，储层热量损失越多，热恢复期结束后储层温度越低。

4 降低沿程热损失措施

4.1 降低内管导热系数

当注入温度为 15 °C、注入流量为 30 m³/h 时，开采 10 天后不同内管导热系数下的内管流体温度分布如图 18 所示。由图 18 可以看出，内管导热系数越大，井底处流体温度越高，流体沿程温度损失越大。

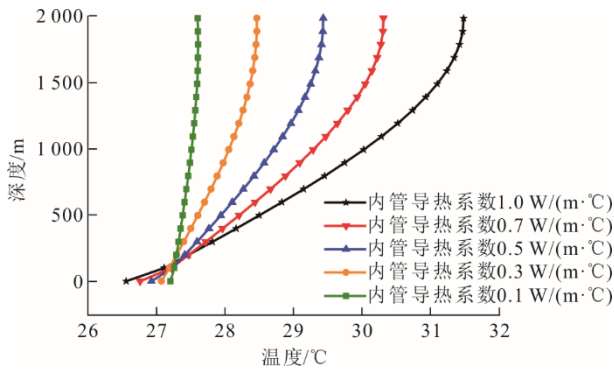


图 18 不同内管导热系数下的内管流体温度分布
Fig.18 Temperature distribution of the inner tube fluid with different inner tube thermal conductivity coefficients

开采 10 天后内管导热系数对出口温度和换热量的影响如图 19 所示。

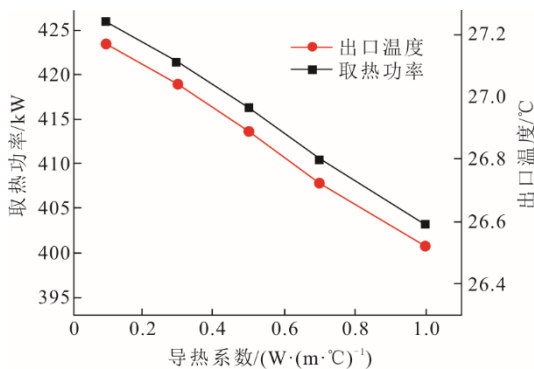


图 19 内管导热系数对出口水温 and 取热功率的影响
Fig.19 Effects of thermal conductivity of inner pipe on outlet water temperature and heat extraction power

由图 19 可以看出，出口温度随内管导热系数

增大而降低，相应换热量也随之减少。内管导热系数从 0.1 W/(m·°C) 增加到 1 W/(m·°C)，取热功率降低 5.4%，出口温度降低 2.5%。主要原因是，外管环腔低温流体在从周围地层取热的同时又不断与内管中高温流体发生热交换，内管导热系数越低，环腔流体吸热就越多，导致内管出口流体温度下降。因此，为提高换热器取热量，降低流体沿程温度损失，有必要选用导热系数低的内管。

4.2 双内管结构

为提高出口温度和系统取热功率，设计了一种双内管结构（图 20），主要参数见表 3，其余参数见表 1 和表 2。该结构在前文单内管结构基础上新增 1 个内管，将原单采出通道分为 2 个通道，以避免外管环腔 A 中低温流体与中心套管 C 中高温流体发生热交换，提高中心套管 C 出口温度。

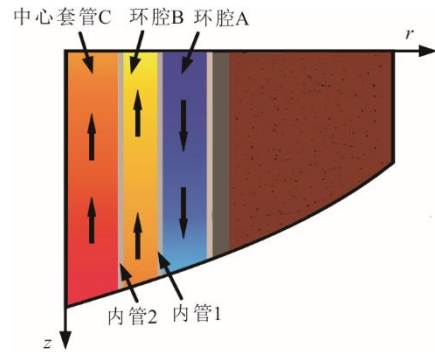


图 20 双内管结构示意图
Fig.20 Schematic diagram of the structure of a double-layer inner tube

表 3 双内管结构参数 单位: m
Tab.3 Structural parameters of the double-layer inner tube

项目	数值	项目	数值
内管 1 外直径	0.114	内管 2 外直径	0.064
内管 1 厚度	0.011	内管 2 厚度	0.011

当注入温度 15 °C、注入流量 30 m³/h 时，开采第 10 天 1 000 m 处换热器截面温度分布如图 21 所示。

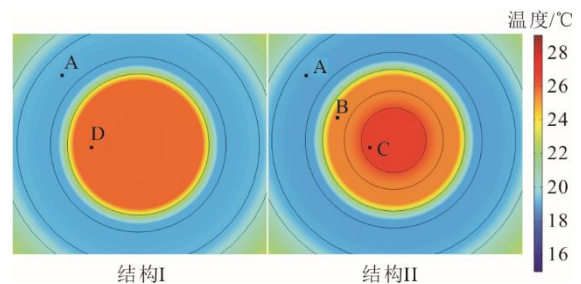


图 21 1 000 m 深处换热器截面温度
Fig.21 Cross-section temperature of the heat exchanger at depth of 1 000 m

图 21 中, 结构 I 为单内管结构, 结构 II 为双内管结构, 结构 I 中通道命名为环腔 A 和中心套管 D, 结构 II 中通道命名为环腔 A、环腔 B 和中心套管 C。中心套管 D 和环腔 B 管壁处热交换剧烈, 中心套管 C 管壁处热交换程度弱, 中心套管 C 流体温度高于中心套管 D, 说明双内管结构可以有效提高中心套管的出口温度。

图 22 为开采第 10 天 2 种结构采出通道中的流体温度。由图 22 可以看出, 中心套管 D 温度下降幅值小于中心套管 C 和环腔 B。环腔 B、中心套管 C 和中心套管 D 的流体沿程温度损失分别为 4.59、1.02、3.47 °C。

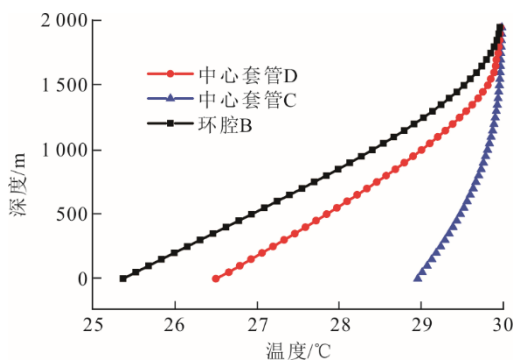


图 22 2 种结构下采出通道中的流体温度分布
Fig.22 The temperature distribution of the fluid in pipe with two structures

图 23 为 2 种结构出口温度和取热功率。

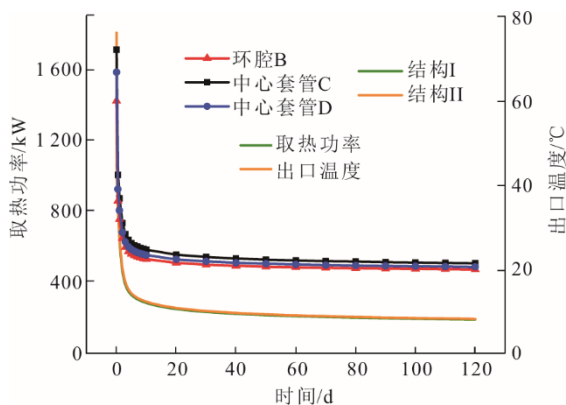


图 23 2 种结构下的流体出口温度和取热功率
Fig.23 The fluid outlet temperature and heat extraction power under the two structures

由图 23 可以看出, 中心套管 C 的出口温度高于中心套管 D, 2 种结构取热功率相差不大。开采第 10 天, 环腔 B、中心套管 C 和中心套管 D 出口温度分别为 25.37、28.96、26.5 °C, 结构 I、结构 II 的取热功率分别为 218.61、284.36 kW。主要原因是: 结

构 II 中增加了环腔 B, 将中心套管 C 和环腔 A 隔开, 环腔 B 中流体温度高于环腔 A, 使得中心套管 C 流体沿程温度损失小, 出口温度高; 环腔 B 和中心套管 D 与环腔 A 中低温流体直接接触, 流体沿程温度损失大, 出口温度低, 由于环腔 B 截面面积小, 流体平均温度低于中心套管 D。

5 结 论

1) 同轴套管换热器取热功率随着注入温度的升高而降低, 适当降低注入温度可提高取热功率; 随着注入流量增大, 出口温度降低, 换热器取热功率增加, 但变化幅度越来越小; 增加埋管深度可提高换热器出口温度和取热功率; 流体出口温度和取热功率随着内管管径增大而减小; 增大外管管径有利于提高换热器与地层之间换热量。

2) 对于间歇开采工况, 随着开采年限增加, 恢复后的储层温度逐年降低, 开采期间热量提取大于热储层自然恢复热量, 储层中存在低温堆积现象; 注入温度越高, 出口水温下降幅度越小, 储层温度恢复越好; 增大注入流量, 流体出口温度降幅减小, 储层温度恢复增强, 但是注入流量过大易导致储层热量损失过多, 热储层温度降低。

3) 出口温度和取热功率随着内管导热系数的增大而降低; 通过在双内管结构中增加环腔, 可以避免中心套管高温流体与外管环腔低温流体发生热交换, 有效提高中心套管出口温度。

[参 考 文 献]

- [1] 张杰, 赵萌, 牛世伟. 干热岩 EGS 关键技术进展与发展趋势[J]. 区域供热, 2021(2): 79-84.
ZHANG Jie, ZHAO Meng, NIU Shiwei. Key technology progress and development trend of engineered geothermal system for dry hot rock[J]. District Heating, 2021(2): 79-84.
- [2] 张杰, 谢经轩. 多分支井增强型地热开发系统设计及产能评价[J]. 天然气工业, 2021, 41(3): 179-188.
ZHANG Jie, XIE Jingxuan. Design and productivity evaluation of multi-lateral well enhanced geothermal development system[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(3): 179-188.
- [3] 王洋浩, 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.
- [4] 王德敬, 胡松涛, 高志友, 等. 中深层套管式地埋管换热器性能的参数分析[J]. 区域供热, 2018(3): 1-7.
WANG Dejing, HU Songtao, GAO Zhiyou, et al. Parameter analysis of the performance of the deep borehole heat exchanger[J]. District Heating, 2018(3): 1-7.

- [5] 李思奇, 赵军, 李扬, 等. 闭式中深层井下换热数值模拟与内管分段绝热影响研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(11): 369-374.
LI Siqi, ZHAO Jun, LI Yang, et al. Numerical simulation of closed loop medium-deep downhole heat exchange: a focus on influence of segmented insulation on central pipe[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(11): 369-374.
- [6] 冯波, 刘鑫, 张国斌, 等. 单井闭循环地热系统可持续开发潜力数值模拟[J]. 天然气工业, 2020, 40(9): 146-155.
FENG Bo, LIU Xin, ZHANG Guobin, et al. Numerical simulation on the sustainable development potential of a single-well closed-cycle geothermal system[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(9): 146-155.
- [7] 赵春虎, 尚宏波, 靳德武, 等. 深层垂直井同轴换热能力数值模拟分析[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(5): 174-181.
ZHAO Chunhu, SHANG Hongbo, JIN Dewu, et al. Numerical simulation of coaxial heat transfer capacity of deep vertical wells[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(5): 174-181.
- [8] 赵金洲, 彭瑀, 李勇明, 等. 基于双层非稳态导热过程的井筒温度场半解析模型[J]. 天然气工业, 2016, 36(1): 68-75.
ZHAO Jinzhou, PENG Yu, LI Yongming, et al. A semi-analytic model of wellbore temperature field based on double-layer unsteady heat conducting process[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(1): 68-75.
- [9] 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.
- [10] SONG X Z, WANG G S, SHI Y, et al. Numerical analysis of heat extraction performance of a deep coaxial borehole heat exchanger geothermal system[J]. Energy, 2018, 164: 1298-1310.
- [11] HUANG Y, ZHANG Y, XIE Y, et al. Field test and numerical investigation on deep coaxial borehole heat exchanger based on distributed optical fiber temperature sensor[J]. Energy, 2020, 210: 118643.
- [12] HU X, BANKS J, GUO Y, et al. Effects of temperature-dependent property variations on the output capacity prediction of a deep coaxial borehole heat exchanger[J]. Renewable Energy, 2021, 165: 334-349.
- [13] PAN A, LU L, CUI P, et al. A new analytical heat transfer model for deep borehole heat exchangers with coaxial tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 141: 1056-1065.
- [14] CHEN K, ZHENG J, LI J, et al. Numerical study on the heat performance of enhanced coaxial borehole heat exchanger and double U borehole heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 203: 117916.
- [15] 张育平, 黄少鹏, 杨甫, 等. 关中盆地西安凹陷深层地热 U 型对接井地温特征[J]. 中国煤炭地质, 2019, 31(6): 54-61.
ZHANG Yuping, HUANG Shaopeng, YANG Fu, et al. Geothermal features of two deep U-shape downhole heat exchangers in the Xi'an depression, Guanzhong basin[J]. Coal Geology of China, 2019, 31(6): 54-61.
- [16] 穆根胥, 李锋, 闫文中, 等. 关中盆地地热资源赋存规律及开发利用关键技术[M]. 北京: 地质出版社, 2016: 1.
MU Genxu, LI Feng, YAN Wenzhong, et al. Occurrence regularity and key technologies of exploitation and utilization of geothermal resources in Guanzhong basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016: 1.
- [17] 贾力, 方肇洪. 高等传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 1.
JIA Li, FANG Zhaohong. Advanced heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 1.
- [18] FANG L, DIAO N, SHAO Z, et al. A computationally efficient numerical model for heat transfer simulation of deep borehole heat exchangers[J]. Energy and Buildings, 2018, 167: 79-88.
- [19] ZHANG J, ZHAO M, WANG G Y, et al. Evaluation of heat extraction performance of multi-well injection enhanced geothermal system[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 201: 117808.
- [20] ZHANG J, XIE J. Effect of reservoir's permeability and porosity on the performance of cellular development model for enhanced geothermal system[J]. Renewable Energy, 2020, 148: 824-838.
- [21] WALCH A, MOHAJERI N, AGUST G, et al. Quantifying the technical geothermal potential from shallow borehole heat exchangers at regional scale[J]. Renewable Energy, 2021, 165: 369-380.
- [22] FARAZ N, KHAMEHCHI E, TAHAN H N. Impact of boiling heat transfer on geothermal reservoir simulation using local thermal non-equilibrium model[J]. Geothermics, 2021, 90: 102016.
- [23] CHO H, CHEON S, JEONG J. Preliminary study on air-to-air latent heat exchanger fabricated using hollow fiber composite membrane for air-conditioning applications[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 251: 15000.
- [24] SANGWOOK L, YOONG C, YEONWOO J, et al. Investigation on the performance enhancement of electric vehicle heat pump system with air-to-air regenerative heat exchanger in cold condition[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 50: 10179.
- [25] MORITA K, BOLLMEIER W, MIZOGAMI H. An experiment to prove the concept of the downhole coaxial heat exchanger (DCHE) in Hawaii[J]. Geothermal Resource Council Transactions, 1992, 16: 9-16.

(责任编辑 李园)