



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404446

引用格式:魏菊艳,付美龙,黎旭东,等.热补偿作用与生产井数对CO<sub>2</sub>羽流地热系统采热性能的影响[J].科学技术与工程,2025,25(13):5429-5437.

Wei Juyan, Fu Meilong, Li Xudong, et al. Numerical simulation of thermal compensation effect and number of production wells on heat recovery performance of CO<sub>2</sub> plume geothermal system [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(13): 5429-5437.

能源与动力工程

## 热补偿作用与生产井数对CO<sub>2</sub>羽流地热系统采热性能的影响

魏菊艳,付美龙\*,黎旭东,方丽

(长江大学石油工程学院油气钻采工程湖北省重点实验室,武汉430100)

**摘要** 为实现可再生能源利用与CO<sub>2</sub>减排技术结合,通过CO<sub>2</sub>羽流地热系统进行高温气田地热资源开采。CO<sub>2</sub>羽流地热系统结合了CO<sub>2</sub>封存和深部地热资源开发两种优势,在采热时实现CO<sub>2</sub>的同步封存。以高温气田为目标热储,利用COMSOL软件,构建盖岩-热储-基岩的三维热-流耦合模型,分析热储上、下两侧岩体热补偿作用和生产井数与系统采热性能的关系。结果表明:在考虑热补偿时,羽流地热系统运行后期,流体温度下降速率降低,系统获得更高采热速率并取得较大热开采资源,热储开采程度更低,延长了系统运行寿命;在考虑生产井数时,发现增加生产井数,生产流体温度降幅越低。可见在CO<sub>2</sub>羽流地热系统运行中,盖岩和基岩对热储的热补偿作用和生产井数增加都能够延长系统寿命,为未来CO<sub>2</sub>羽流地热系统优化与实际应用提供理论参考。

**关键词** CO<sub>2</sub>羽流地热系统;地热能开发;热补偿;生产井数;数值模拟

中图分类号 TK521;

文献标志码 A

## Numerical Simulation of Thermal Compensation Effect and Number of Production Wells on Heat Recovery Performance of CO<sub>2</sub> Plume Geothermal System

WEI Ju-yan, FU Mei-long\*, LI Xu-dong, FANG Li

(Hubei Provincial Key Laboratory of Oil and Gas Drilling and Production Engineering,  
College of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan 430100, China)

**[Abstract]** To achieve the integration of renewable energy utilization and CO<sub>2</sub> emission reduction technology, high-temperature gas field geothermal resource extraction was conducted *via* the CO<sub>2</sub> plume geothermal system, which merges the benefits of CO<sub>2</sub> sequestration with deep geothermal resource development, facilitating the concurrent sequestration of CO<sub>2</sub> during thermal extraction. Taking a high-temperature gas field as the target thermal storage, a three-dimensional thermal flow coupling model of cap rock thermal storage bedrock was constructed using COMSOL software to analyze the thermal compensation effect of the rock mass on both sides of the thermal storage and the relationship between the number of production wells and the system's thermal recovery performance. The findings indicate that during the advanced phases of the plume geothermal system's operation, when thermal compensation is considered, the fluid's temperature decline rate diminishes, resulting in an enhanced heat extraction rate and a greater heat extraction resource, while the thermal storage extraction degree is reduced, thereby extending the system's operational lifespan. It was discovered that increasing the number of production wells resulted in a smaller production fluid temperature decline. The operation of a CO<sub>2</sub> plume geothermal system demonstrates that the thermal compensation effect of cap rock and bedrock on thermal storage, along with an increase in the number of production wells, can extend the system's lifespan, offering theoretical insights for the optimisation and practical implementation of CO<sub>2</sub> plume geothermal systems in the future.

**[Keywords]** CO<sub>2</sub> plume geothermal system; geothermal energy development; thermal compensation; number of production wells; numerical modelling

收稿日期:2024-06-14 修订日期:2025-02-06

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(42302286)

第一作者:魏菊艳(1998—),女,汉族,陕西宝鸡人,硕士研究生。研究方向:地热能开发与利用。E-mail:wjy19982022@163.com。

\*通信作者:付美龙(1967—),男,汉族,湖北天门人,博士,教授。研究方向:油田化学、提高采收率和CCUS等。E-mail:fmlytze@163.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

在当前全球能源向清洁和可持续能源转型的时代,为了应对温室气体带来的挑战,CO<sub>2</sub> 捕获和储存被广泛认为是减少 CO<sub>2</sub> 排放到大气中的重要手段<sup>[1-3]</sup>。Randolph 等<sup>[4]</sup>提出 CO<sub>2</sub> 羽流地热系统的概念。CO<sub>2</sub> 羽流地热系统(CO<sub>2</sub>-plume geothermal system, CPGS)是将超临界 CO<sub>2</sub> 从注入井注入高渗透性热含水层中,用于地热资源的提取,同时将最初注入的 CO<sub>2</sub> 在地层中封存起来。

CPGS 研究对象为深部热储层,热储上、下两侧均为渗透率较低的岩体。随 CPGS 的运行,注入的低温 CO<sub>2</sub> 与热储换热过程中,热储被冷却,导致盖岩、基岩与热储温差变大,盖岩与基岩对热储存在加热作用,即对热储的热补偿作用。因为系统运行时间长(基本为几十年),所以盖岩与基岩会持续为热储进行热补偿作用,对热储内部换热和系统采热性能有重要影响,这种影响不可忽略。

先前研究仅关注了热储性质,如热储岩石比热容、初始渗透率、初始温度、初始厚度等<sup>[5-10]</sup>,针对盖岩和基岩对热储热补偿作用的分析资料较少。现在学者们建立模型时,对热储热补偿作用的处理分为两种:一种是把热储边界设置成随时间变化的,这种方式考虑了盖岩和基岩热补偿作用对系统采热性能的影响<sup>[11-12]</sup>,更符合实际开采情况;另一种是将热储边界设置为绝热边界,这种设置未考虑基岩与盖岩对热储的热补偿作用,模拟计算的系统采热量与实际采热量相差较大。程继良等<sup>[13]</sup>通过对增强型地热系统(enhanced geothermal system, EGS)在不同地质环境下的开采过程进行数值模拟分析得到:热储周边岩体的热补偿作用对提升流体温度具有积极影响。Jiang 等<sup>[14]</sup>在热储周围设置渗透率可忽略的岩体,考虑周边岩体的热补偿作用,和之前两种处理方式相比更贴近实际情况。模型针对研究 CO<sub>2</sub>-EGS 时忽略了热储中的水。李静岩等<sup>[15-16]</sup>采用数值模拟方式建立三维模型,研究不同条件下,岩石的热补偿作用对热储温度分布和流体温度的影响。研究表明:盖岩和基岩对热储热补偿的作用对系统采热性能具有正向影响。例如在冰岛的一些高温地热田中,周边岩石的热补偿作用显著提升了地热井中流体的温度;基于青海共和盆地地热田实测数据,建立流体传热模型,发现考虑盖岩与基岩热补偿作用使产出流体温度升高,提高系统运行时间。

目前关于从低渗高温废弃气藏中开发地热资源的研究很少。由于 CO<sub>2</sub> 独有的性质和良好的流动性,所以现将 CO<sub>2</sub> 作为地热开采的载热介质,将充满 CO<sub>2</sub> 的热储作为研究对象,通过 COMSOL 软件构建盖岩-

热储-基岩三维热-流耦合模型,分析忽略热补偿作用与考虑热补偿作用时,热储岩石温度分布情况,生产井流体温度、采热速率、累计采热量以及储层开采程度随时间的变化规律。在考虑岩体热补偿作用时,通过分析盖岩与基岩岩体的温度分布情况,发现基岩的热补偿作用强于盖岩的热补偿作用。同时考虑热补偿作用时,在系统运行 50 年后,生产流体温度与采热速率随着生产井数的增加而增加,延长了系统运行寿命。以期为未来 CPGS 的优化、提高系统经济效益及系统实际应用提供理论参考。

## 1 模型简述

CPGS 模型由生产井、注入井、热储及上下岩体组成。该模型将 CPGS 地下部分划分为 3 个部分:①生产井和注入井为开式流道;②热储层设置为多孔介质;③热储的上下侧岩石渗透率很小。模拟在初始模型中充满 CO<sub>2</sub> 的情况,流体和岩石不发生化学作用。COMSOL 采用的控制方程<sup>[12]</sup>如下。

连续性方程:

$$\frac{\partial(\varphi\rho_c)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_c v_c) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$v_c = -\frac{K_c}{\mu_c}(\nabla P_c - \rho_c g) \quad (2)$$

岩石的能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}[(1-\varphi)\rho_s C_s T] = \nabla[(1-\varphi)k_s \nabla T] + (1-\varphi)q_s \quad (3)$$

固体的能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}[\varphi S_c \rho_c e_c] = -\nabla \rho_c h_c v_c + \nabla \varphi_c k_c \nabla T + \varphi q_f \quad (4)$$

式中: $\varphi$  为孔隙率; $t$  为时间, s;  $\rho_c$  为 CO<sub>2</sub> 密度, kg/m<sup>3</sup>;  $v_c$  为 CO<sub>2</sub> 速度, m/s;  $P_c$  为流体压力, Pa;  $K_c$  为渗透率, m<sup>2</sup>;  $\mu_c$  为流体黏度, Pa·s;  $g$  为重力加速度矢量, 方向向下, m/s<sup>2</sup>;  $\rho_s$  为岩石密度, kg/m<sup>3</sup>;  $C_s$  为岩石比热容, J/(kg·K);  $T$  为温度, K;  $k_s$  为岩体导热系数, W/(m·K);  $q_s$  为岩体内热源, W/m<sup>3</sup>;  $S_c$  为 CO<sub>2</sub> 饱和度;  $e_c$  为 CO<sub>2</sub> 比内能, J/kg;  $h_c$  为 CO<sub>2</sub> 比焓, J/kg;  $k_c$  为 CO<sub>2</sub> 导热系数, W/m·K;  $q_f$  为流体内热源, W/m<sup>3</sup>。

## 2 模型设置

基础模型采用一采一注布井方式,如图 1 所示。模型整体规模为 500 m × 500 m × 300 m,热储、基岩和盖岩的厚度均为 100 m,热储中心位于地下 3 150 m,热储周边被大量致密岩体包裹。注入井与生产

井间距为 300 m, 生产井和注入井半径均为 0.15 m 的圆柱通道。

区块中充满 CO<sub>2</sub>, 地表温度和地温梯度分别设为 293.15 K, 0.039 8 K/m。忽略流体在井筒中的流动和换热, 注入井注入流量为 20 kg/s, 生产井底压力设为 30 MPa。注入井的 CO<sub>2</sub> 温度为 308.15 K。其中忽略热补偿时, 将热储上下侧岩体与热储的接触面设为绝热边界。考虑热补偿时, 将热储上下侧岩体与热储的接触面设为开放边界。盖岩、热储及基岩的物性参数如表 1 所示。

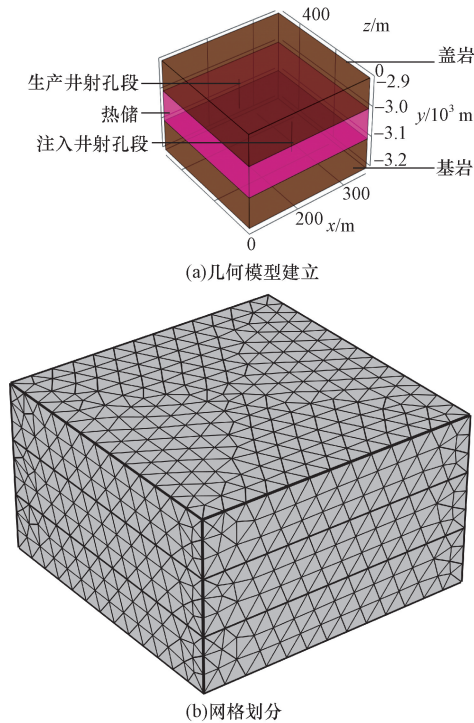


图 1 几何模型以及网格划分

Fig. 1 Geometrical model and meshing

表 1 储层物性参数

Table 1 Reservoir physical parameters

参数	热储参数	盖岩及基岩地质参数
储层比热容	900 J/(kg·°C)	1 000 J/(kg·°C)
储层密度	2 600 kg/m <sup>3</sup>	2 800 kg/m <sup>3</sup>
储层导热系数	2.5 W/(m·°C)	3 W/(m·°C)
储层渗透率	45.5 mD	0.01 mD
储层孔隙度	0.155	0.05

## 3 结果与讨论

### 3.1 岩层温度分布情况

图 2 为考虑有无热补偿作用时, 热储岩层温度随时间的分布情况。从图 2 可知, 从注入井注入低温 CO<sub>2</sub> 后, 注入井周围岩体温度迅速下降, 形成低温区, 随系统运行, 低温 CO<sub>2</sub> 向生产井扩散, 低温区域也向生产井方向延伸。在纵向上, 由于重力作用导

致热储底部 CO<sub>2</sub> 流速快, 热储底部岩石温度降低快。图 2(a)、图 2(c)、图 2(e)、图 2(g)、图 2(i) 展示了盖岩与基岩对热储热补偿作用随时间的变化情况。在纵向上热补偿作用在靠近基岩和盖岩的部分较强, 热储中部的热补偿作用较弱, 导致热储上部和底部温度变化慢, 中部温度变化快<sup>[15-16]</sup>, 图 2(b)、图 2(d)、图 2(f)、图 2(h)、图 2(j) 展示了无热补偿作用时, 盖岩与基岩随时间的变化情况。

图 3 展示了考虑盖岩和基岩对热储热补偿时, 盖岩和基岩的温度场随时间的分布情况。因为流体对流传热作用导致热储交界处的盖岩和基岩温度下降。在注入井周围岩体形成低温区, 随系统运行, 低温 CO<sub>2</sub> 向生产井扩散。由于盖岩与基岩的渗透率很小, 基本不存在渗流, 岩体温度变化由岩石传热造成, 所以低温区域在纵向延伸速度很慢。通过图 3(a)、图 3(c)、图 3(e)、图 3(g)、图 3(i) 和图 3(b)、图 3(d)、图 3(f)、图 3(h)、图 3(j) 发现, 系统运行至 50 年时, 垂直方向上基岩中低温区域面积大于盖岩的低温面积, 由此可以看出, 在整个开采过程中, 基岩的热量损失更加显著。

### 3.2 热补偿作用对 CPGS 的影响

#### 3.2.1 生产流体温度变化

图 4 为考虑热补偿作用和忽略热补偿作用时, 生产流体温度随时间的变化图。从图 4 可知, 考虑盖岩和基岩对热储热补偿作用时, 生产流体温度下降时间早, 下降速率慢; 忽略热补偿作用时, 生产流体温度出现下降时间晚, 下降速率快。为了解释这一现象, 图 5 给出了系统运行 50 年时, 考虑热补偿和忽略热补偿时储层中的渗流速度, 可以看出考虑热补偿时的渗流速度大于忽略热补偿时的渗流速度。这是因为在考虑盖岩与基岩对热储热补偿时, 热储整体温度较高, 高温下 CO<sub>2</sub> 流体黏度低, 流动速度快, 加强和热储的换热作用, 所以流体温度出现明显下降时间提前。同时因为盖岩与基岩对热储的加热作用, 减慢了热储温度的下降速率, 所以生产流体温度的下降速率也较为缓慢。

#### 3.2.2 采热速率

采热速率的计算表达式<sup>[15]</sup>为

$$G = F_{\text{pro}} (h_{\text{pro}} - h_{\text{inj}}) \quad (5)$$

式(5)中:  $G$  为采热速率, W;  $F_{\text{pro}}$  为二氧化碳的质量流量, kg/s;  $h_{\text{pro}}$  为生产井二氧化碳的焓值, J/kg;  $h_{\text{inj}}$  为注入井二氧化碳的焓值, J/kg。

图 6 为考虑热补偿作用和忽略热补偿作用时, 采热速率的变化曲线。可知, 采热速率随时间的变化与生产流体温度随时间的变化是一致的。通过对比分析两种情况下采热速率的变化曲线发现: CPGS

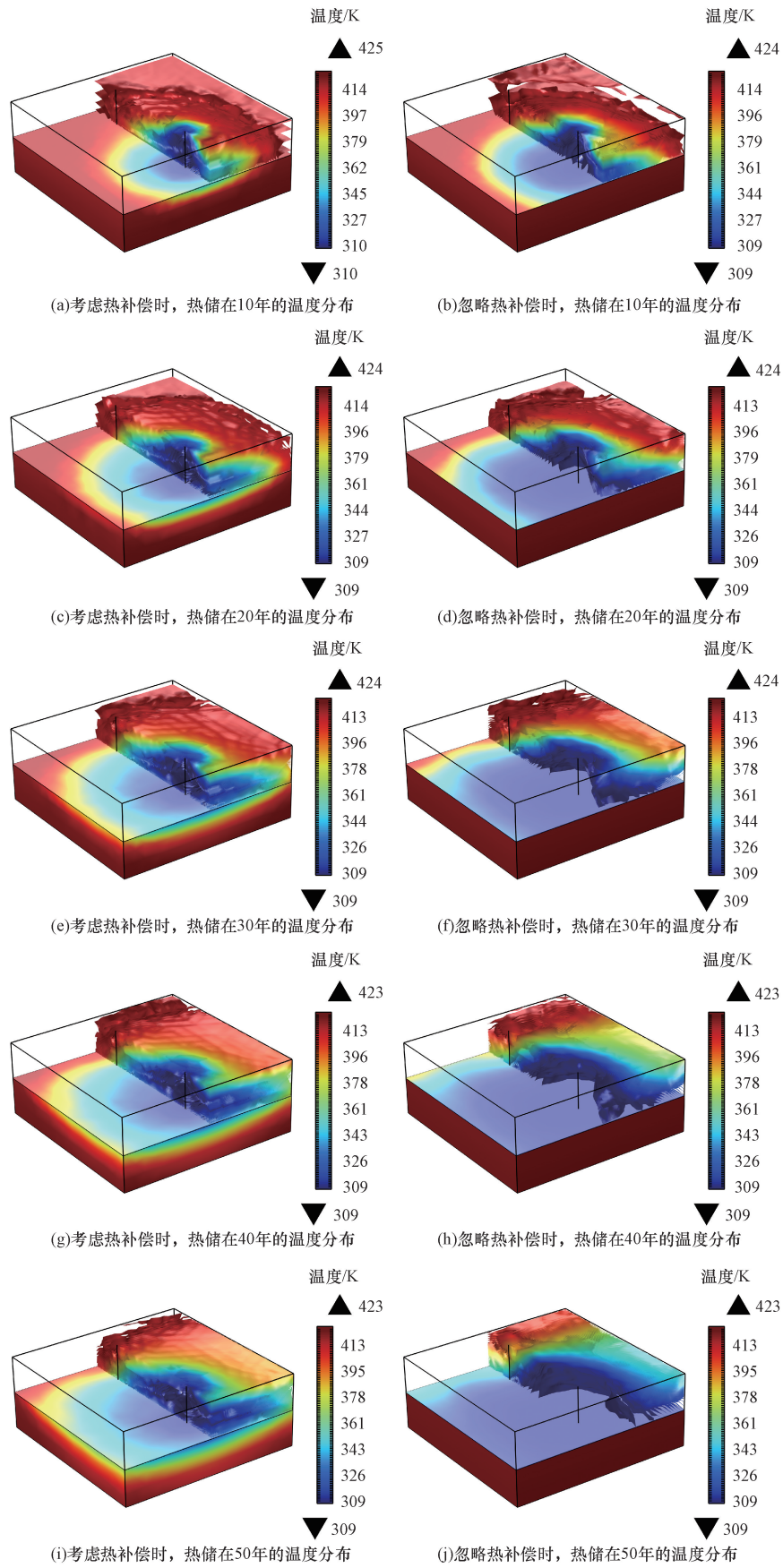


图2 热储岩层在不同时刻的温度分布

Fig. 2 Temperature distribution of thermal storage formations at different time

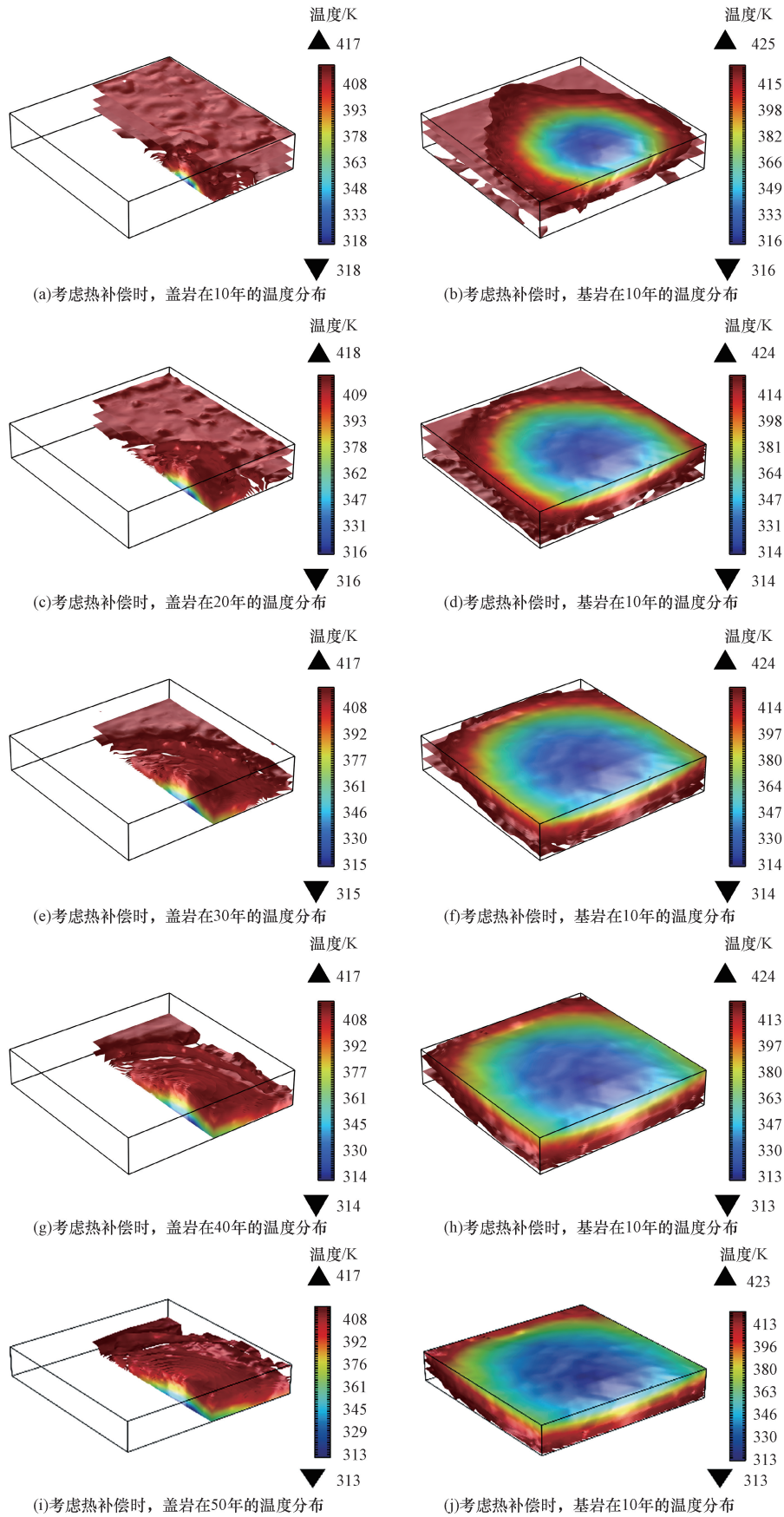


图3 盖岩和基岩在不同时刻的温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of cap rock and bedrock at different time

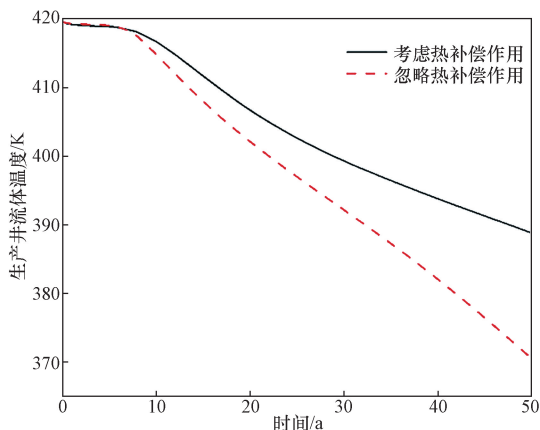


图4 生产流体温度随时间变化曲线

Fig. 4 Curve of production fluid temperature versus time

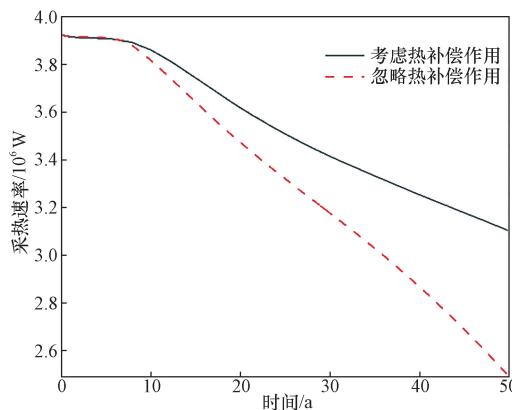
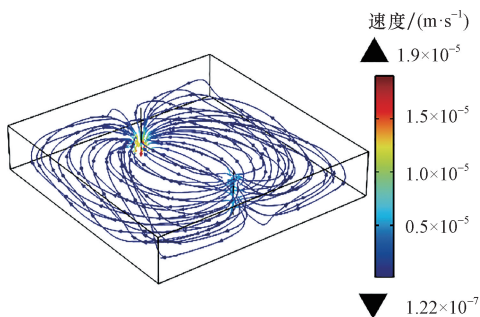
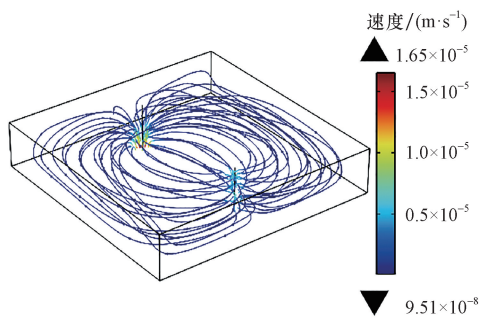


图6 采热速率随时间的变化图

Fig. 6 Plot of heat extraction rate with time



(a)考虑热补偿时, 50年后的达西速度场



(b)忽略热补偿时, 50年后的达西速度场

图5 考虑热补偿和忽略热补偿时, 系统运行 50 年后的达西速度场

Fig. 5 Darcy velocity field magnitude after 50 years of system operation when thermal compensation is considered and ignored

运行 6.5 年后, 盖岩和基岩对热储的热补偿作用明显, 在 6.5 年后考虑热补偿的采热速率较忽略热补偿的采热速率要高。这是因为: 随系统的运行, 盖岩和基岩对热储的热补偿作用增强, 热储温度下降速率较低, 导致考虑热补偿作用的采热速率高于忽略热补偿时的采热速率。同时考虑热补偿作用提高 CPGS 的采热速率, 降低采热速率的下降幅度, 从而使系统达到更好的采热性能和更稳定的产能。

### 3. 2. 3 系统累积采出能量

累积采出能量定义为生产井射孔段采热速率对时间的积分, 其计算表达式<sup>[16]</sup>为

$$\gamma = \int_0^t q\rho_f c_{p,f} (T_{out} - T_{in}) dt \quad (6)$$

式(6)中:  $\gamma$  为累积采出能量, J;  $t$  为累积生产时间, s;  $q$  为工质质量流量, kg/s;  $\rho_f$  为工质密度, kg/m<sup>3</sup>;  $c_{p,f}$  为工质在恒定压力下的比热容, J/(kg·K);  $T_{out}$  为产出温度, K;  $T_{in}$  为注入温度, K。

图 7 给出了不同情况下, 累积采出能量随时间的变化曲线。随 CPGS 运行, 累积采出能量增大。在系统运行前期, 两种情况下累积采出能量差别不大, 随着系统的运行, 考虑热补偿的累积采出能量高于忽略热补偿的累积采出能量。原因在于盖岩和基岩对热储进行热补偿作用后, CO<sub>2</sub> 不仅可以从热储中获得热量, 也可以从盖岩和基岩中获得热量, 而忽略盖岩与基岩对热储的热补偿后, CO<sub>2</sub> 仅从热储中获得热量, 从而导致忽略热补偿时累积采出能量的较低。

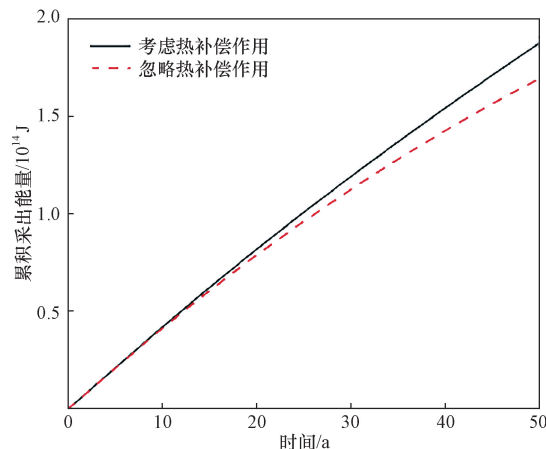


图7 累积采出能量随时间的变化图

Fig. 7 Plot of cumulative extracted energy over time for different scenarios

### 3.2.4 储层开采程度

储层开采程度计算表达式<sup>[16]</sup>为

$$\eta = \frac{\iiint_{V_s} \rho_s c_{p,s} [T_i - T(t)] dv}{\iiint_{V_s} \rho_s c_{p,s} (T_i - T_{in}) dv} \times 100\% \quad (7)$$

式(7)中:  $\eta$  为储层采出程度;  $V_s$  为裂缝储层区域的体积, m<sup>3</sup>;  $\rho_s$  为储层岩石的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $c_{p,s}$  为储层岩石的等压热容, J/(kg·°C);  $T_i$  为储层原始温度, °C;  $T_{in}$  为注入温度, °C;  $v$  为体积元素;  $dv$  为积分过程中考虑的微小体积。

图 8 给出考虑热补偿作用和忽略热补偿作用时, 储层开采程度随时间的变化曲线。随着 CPGS 运行, 储层开采程度增大, 考虑热补偿时的储层开采程度比忽略时的储层采出程度小。主要原因是: 在忽略热补偿时, 盖岩与基岩和热储的交界面处于绝热状态, CO<sub>2</sub> 仅从热储中获得热量, 因而流体在热储内的扩散体积大; 而考虑热补偿时, 随系统运行, CO<sub>2</sub> 不仅从热储中获得热量, 也逐渐从盖岩和基岩中获取热量, 因此热储中的扩散体积小, 导致热储的采出程度小。

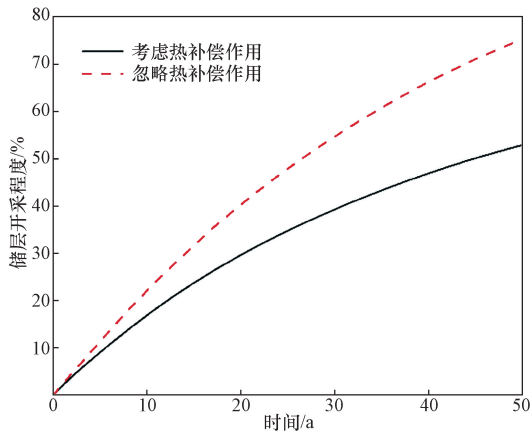


图 8 储层开采程度随时间的变化图

Fig. 8 Plot of the extent of reservoir exploitation over time

### 3.3 考虑生产井数对采热性能的影响

在地热系统的设计中, 合理布局井网是至关重要的, 它影响到系统采热性能和经济效益。生产井的数量对地下流体渗流的均衡性具有显著影响。渗流分布不均, 会导致地热储层中的热量无法被充分有效地开采出来, 进而限制系统的整体效能, 并可能缩短其有效运行周期; 注入井数影响到流体的渗流面积及渗流量, 较小的渗流面积可能伴随着局部高渗流量, 影响系统的长期稳定运行, 缩短运行寿命。

分析生产井数对流体温度和采热速率的影响。设置 1 口注入井, 在其他参数不变的基础上, 设置 2 口生产井、4 口生产井、6 口生产井和 8 口生产井共 4 种方案, 井数方案如图 9 所示。

图 10、图 11 展示了 4 种方案生产流体温度和采热速率的变化情况。生产井数越多, 流体温度和采热速率在系统运行 50 年时越高。生产井数从 2 口

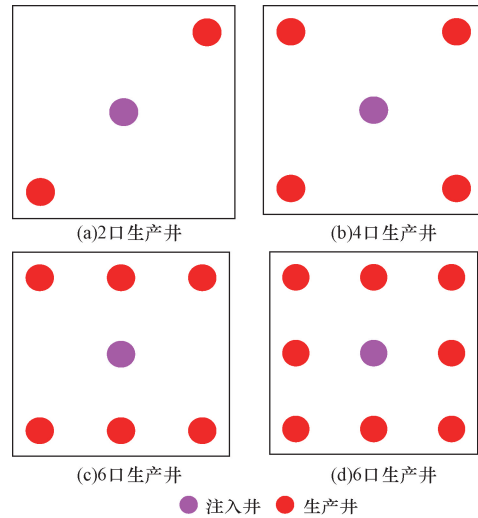


图 9 井数方案图

Fig. 9 Schematic diagram of the number of wells

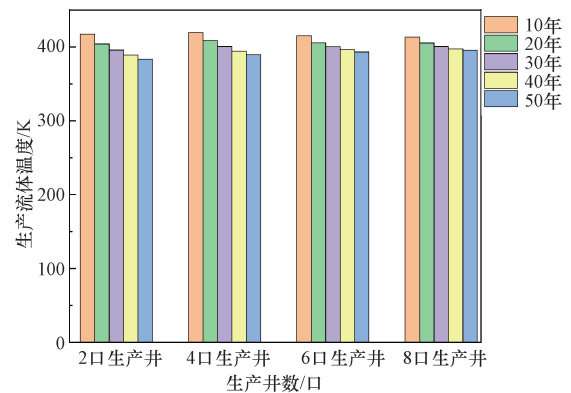


图 10 生产流体温度随井数的变化情况

Fig. 10 Variation of production fluid temperature with the number of wells

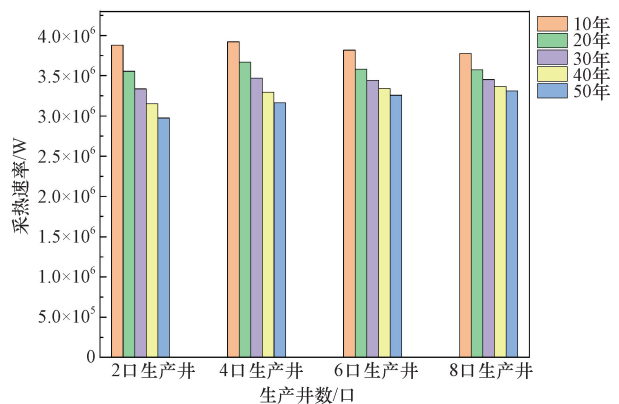


图 11 生产流体采热速率随井数的变化情况

Fig. 11 Variation of production fluid heat extraction rate with the number of wells

井到8口井,CPGS运行10年时,流体温度分别为416.1、417.87、414.36、413.27 K,采热速率分别约为3 132 000、3 182 400、3 090 500、3 063 000 W,运行50年时流体温度分别为392.49、394.53、394.5、395.96 K,采热速率分别为2 403 200、2 543 500、2 532 200、2 576 700 W。另外从流体温降幅度来看,生产井数越多流体温降幅度越低,在生产井数为8时,温降幅度最低,大约为12.4%,而生产井数为2、4、6时,流体温度降幅分别约为16.5%、16.1%和14.1%。由图12可知,在生产井数由2增加到8的过程中,低温区域逐渐扩大,同时采热面积也扩大。生产井数为8时,低温区域与四周边界更近,没有出现生产井数为2时热储四周流动弱、流动不均匀的情况。由模拟结果可知,生产井数越多,流场分布越均匀,换热能力提高。与基础模型的一采一注系统相比,尽管在相同的计算区域内,生产井数为8的系统在50年时的生产流体温度为395.96 K,一采一注系统在50年时的生产流体温度为388.80 K,比一采一注系统提高7.96 K。但是从目前的钻井工艺和费用来看,一采一注仍为最基本的采热方式<sup>[17-18]</sup>。

## 4 结论

利用COMSOL软件建立盖岩-热储-基岩三维热-流耦合模型,对比分析有无热补偿作用对系统采热性能的影响及在考虑热补偿作用时,分析生产井数对系统采热性能的影响,得到以下结论。

(1)考虑热补偿作用时,系统运行后期生产流体温降速率较慢,可以延长系统运行时间,有利于提高系统的采热速率,降低系统采热速率的下降范围,提高了系统的采热能力和生产的稳定性;此外,在考虑热补偿之后,系统的累计采出量有了显著提高。

(2)在忽略热补偿时,盖岩与基岩和热储的交界面为绝热状态,CO<sub>2</sub>只从热储中提取热量,因此CO<sub>2</sub>在热储中的扩散体积更大;而考虑热补偿时,随系统的运行,CO<sub>2</sub>不仅从热储中提取热量,也可以从盖岩和基岩中获得的热量,所以在热储中的扩散体积小,导致热储的开采程度低。因此在考虑热补偿时,储层的运行寿命比忽略热补偿时更长。

(3)在考虑热补偿时,研究生产井数对系统采热性能的影响。研究发现:生产井数越多生产流体温降幅度越低。在系统运行50年后,8口生产井的生产流体温度和采热速率均为最高。但是考虑钻井工艺和费用后,一采一注仍是最基本的采热方式。以上研究为未来CPGS的实际工程应用提供了理论指导也为未来系统的优化奠定基础。

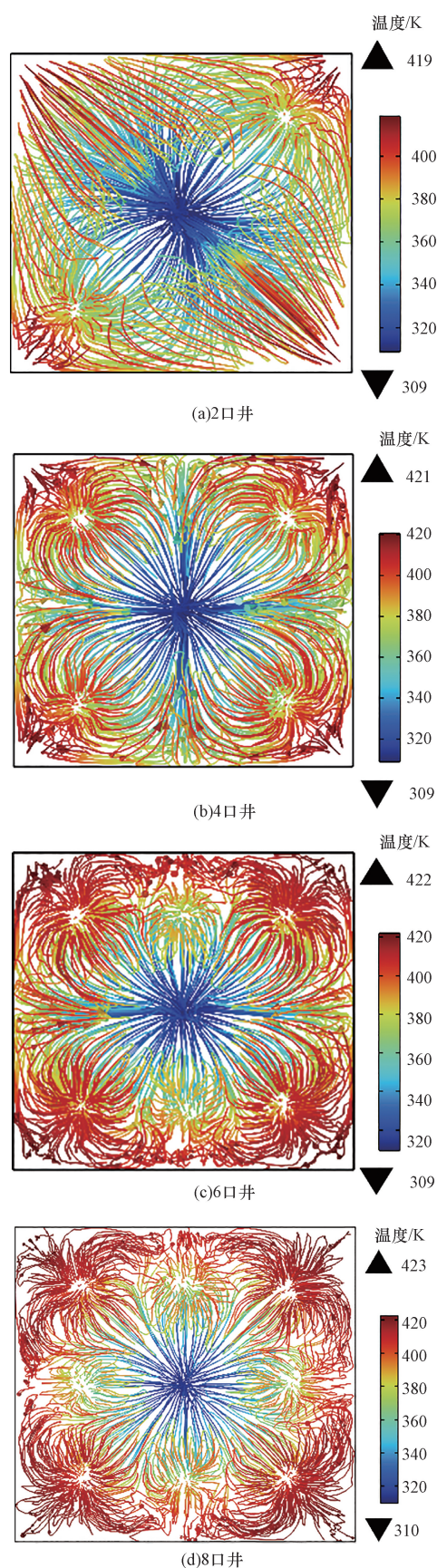


图12 各生产井数50年后温度流场分布云图

Fig. 12 Cloud map of temperature flow field distribution after 50 years for each number of producing wells

## 参 考 文 献

- [1] 邹才能, 何东博, 贾成业, 等. 世界能源转型内涵、路径及其对碳中和的意义[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 233-247.  
Zou Caineng, He Dongbo, Jia Chengye, et al. The connotation and path of world energy transition and its significance to carbon neutrality[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(2): 233-247.
- [2] 许博越, 王磊, 胡志强, 等. 基于热电效应的地热资源发电技术[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(3): 1011-1015.  
Xu Boyue, Wang Lei, Hu Zhiqiang, et al. Technology of geothermal power generation based on thermoelectric effect [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(3): 1011-1015.
- [3] 霍超, 林倚天, 李刚, 等. 碳中和背景下中国地热资源勘查技术研究进展[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(12): 4917-4927.  
Huo Chao, Lin Yitian, Li Gang, et al. Research progress on geothermal resource exploration technology in China under the background of carbon neutrality[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(12): 4917-4927.
- [4] Randolph J B, Saar M O. Coupling carbon dioxide sequestration with geothermal energy capture in naturally permeable, porous geologic formations: implications for CO<sub>2</sub> sequestration [J]. Energy Procedia, 2011, 4: 2206-2213.
- [5] 蒋坤卿, 黄思浩, 李华山, 等. 同轴开式地热单井换热器性能分析[J]. 可再生能源, 2022, 40(2): 172-177.  
Jiang Kunqing, Huang Sihao, Li Huashan, et al. Performance analysis of coaxial open geothermal single-well heat exchanger[J]. Renewable Energy, 2022, 40(2): 172-177.
- [6] 张育平, 刘俊, 王洋浩, 等. 中深层 U 型对接井取热能力影响因素显著性分析[J]. 可再生能源, 2022, 40(11): 1473-1480.  
Zhang Yuping, Liu Jun, Wang Fenghao, et al. Significant analysis of influencing factors of heat extraction capacity of medium and deep U-shaped docking wells[J]. Renewable Energy, 2022, 40(11): 1473-1480.
- [7] 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.  
Gao Youchuan, Xu Tianfu, Yu Han, et al. Analysis of geothermal exploitation potential and influencing factors of U-shaped wells without water[J]. Renewable Energy, 2023, 41(2): 199-206.
- [8] 王奕雅, 于海龙, 黄刘洋, 等. 干热岩增强型地热系统平行三裂隙传热影响因素分析[J]. 可再生能源, 2022, 40(9): 1181-1188.  
Wang Yiya, Yu Hailong, Huang Liuyang, et al. Analysis on the influence factors of parallel fissure heat transfer in a dry-hot rock enhanced geothermal system [J]. Renewable Energy Sources, 2022, 40(9): 1181-1188.
- [9] 刘洪涛, 刘俊, 王洋浩, 等. 设计参数对中深层地埋管换热器长期换热性能的影响研究[J]. 可再生能源, 2021, 39(12): 1594-1601.  
Liu Hongtao, Liu Jun, Wang Fenghao, et al. Research on the influence of design parameters on the long-term heat transfer performance of medium and deep underground tube heat exchanger [J]. Renewable Energy, 2021, 39(12): 1594-1601.
- [10] 景登岩, 施志钢, 刘福强, 等. 基于 TRNSYS 的中深层地热供暖系统运行特性研究[J]. 可再生能源, 2022, 40(6): 751-759.  
Jing Dengyan, Shi Zhigang, Liu Fuqiang, et al. Research on operation characteristics of medium and deep geothermal heating system based on TRNSYS [J]. Renewable Energy, 2022, 40(6): 751-759.
- [11] 方艺蛟, 刘卫群, 王墨龙. 地热开采的裂隙渗透 T-H-M 耦合模型及模拟研究[J]. 可再生能源, 2017, 35(1): 119-125.  
Fang Yijiao, Liu Weiqun, Wang Conglong. Coupled model and simulation study of fracture infiltration T-H-M in geothermal exploitation [J]. Renewable Energy, 2017, 35(1): 119-125.
- [12] Adams B M, Kuehn T H, Bielicki J M, et al. A comparison of electric power output of CO<sub>2</sub> plume geothermal (CPG) and brine geothermal systems for varying reservoir conditions [J]. Applied Energy, 2015, 140: 365-377.
- [13] 陈继良, 罗良, 蒋方明. 热储周围岩石热补偿对增强型地热系统采热过程的影响[J]. 计算物理, 2013, 30(6): 862-870.  
Chen Jiliang, Luo Liang, Jiang Fangming. Effect of rock heat compensation around heat storage on the heat recovery process of enhanced geothermal system [J]. Computational Physics, 2013, 30(6): 862-870.
- [14] Jiang F, Chen J, Huang W, et al. A three-dimensional transient model for EGS subsurface thermo-hydraulic process [J]. Energy, 2014, 72: 300-310.
- [15] 李静岩. CO<sub>2</sub> 羽流地热系统地热开采特性的数值模拟研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2019.  
Li Jingyan. Numerical simulation study on geothermal exploitation characteristics of CO<sub>2</sub> plume geothermal system [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019.
- [16] Pruess K. Enhanced geothermal systems (EGS) using CO<sub>2</sub> as working fluid: a novel approach for generating renewable energy with simultaneous sequestration of carbon [J]. Geothermics, 2006, 35(4): 351-367.
- [17] 石宇. 多分支井循环二氧化碳开采地热机理与参数研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022.  
Shi Yu. Study on geothermal mechanism and parameters of circulating carbon dioxide exploitation in multi-lateral wells [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2022.
- [18] 袁安冬. 基于热流耦合的增强型地热系统传热特性研究 [D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2023.  
Yuan Andong. Research on heat transfer characteristics of enhanced geothermal system based on heat-flow coupling [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2023.