

超临界二氧化碳开采干热岩热量过程中 裂隙网络的热流固耦合分析

乔明正, 景泽锋, 周雨娟, 郑龙, 王立超
(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对使用超临界二氧化碳(SC-CO₂)开发干热岩深层地热能时,裂隙储层在多物理场耦合作用下的特性演变规律,以及裂隙网络连通性对热采性能影响不明确的问题,使用数值模拟的方法,探究了裂隙储层网络的热流固(THM)耦合作用,并且模拟了不同压裂工况下裂隙网络的热采过程。研究对比了 SC-CO₂ 与水作为工作介质的取热效果,探究储层特性演变规律,分析了裂隙网络连通性对各物理场和储层特性的影响。研究结果表明:SC-CO₂ 较水具有更高的生产温度和更缓的温度下降趋势,且对储层位移影响更小,更适合长期开采;多条水力裂隙网络的生产温度比单条水力裂隙网络的生产温度高出约 24 K;单条水力裂隙网络中,断路距离的增加能够延缓温度下降,但也增大压力损失;多条水力裂隙网络中,断路会减少换热面积并降低换热量,但不影响热突破时间;储层孔隙度、渗透率及裂隙开度受 THM 耦合作用显著,井眼附近因流体压力梯度导致裂隙开度变化剧烈。该研究为增强型地热系统中裂隙网络的优化及高效热采提供理论依据。

关键词: 地热能;干热岩;裂隙储层;超临界二氧化碳;多物理场

中图分类号: TK521.1 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202602008 **文章编号:** 0253-987X(2026)02-0082-10

Thermo-Hydro-Mechanical Coupling Analysis of Fracture Networks During Heat Extraction from Hot Dry Rock Using Supercritical Carbon Dioxide

QIAO Mingzheng, JING Zefeng, ZHOU Yujuan, ZHENG Long, WANG Lichao
(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address the unclear issues concerning the evolution of properties in fractured reservoirs under multi-physical field coupling effects and the influence of fracture network connectivity on thermal extraction performance during the development of deep geothermal energy from hot dry rock using supercritical carbon dioxide (SC-CO₂), a numerical simulation study was conducted. The thermo-hydro-mechanical (THM) coupling in fractured reservoir networks was investigated, and the heat extraction processes of fracture networks under different fracturing conditions were simulated. A comparison of heat extraction efficiency was made between SC-CO₂ and water as working fluids, the evolution of reservoir properties was explored, and the impact of fracture network connectivity on various physical fields and reservoir characteristics was analyzed. The results indicate that, compared with water, SC-CO₂ yields a higher production temperature, a slower temperature decline trend, and less impact on reservoir displacement, rendering it more

收稿日期: 2025-07-13。 作者简介: 乔明正(1998—),男,博士生;景泽锋(通信作者),男,副教授,博士生导师。 基金
项目: 国家自然科学基金资助项目(52476160)。

网络出版时间: 2025-10-09

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20250930.1536.006>

suitable for long-term extraction. The production temperature of the multi-hydraulic fracture network is approximately 24 K higher than that of the single hydraulic fracture network. In a single hydraulic fracture network, an increase in disconnection distance delays the temperature decline but raises the pressure loss. In multi-hydraulic fracture networks, disconnection reduces the heat exchange area and total heat transfer, yet does not affect the thermal breakthrough time. Reservoir porosity, permeability, and fracture aperture are significantly influenced by THM coupling. Notably, the fracture aperture near the wellbore undergoes drastic changes due to the high fluid pressure gradient. This study provides a theoretical basis for the optimization of fracture networks and efficient heat extraction in enhanced geothermal systems.

Keywords: geothermal energy; hot dry rock; fractured reservoir; supercritical carbon dioxide; multi-physics field

干热岩地热能作为一种清洁且可持续的能源形式,储量丰富且来源稳定,已成为地热能开发的重要方向^[1]。当前,利用超临界二氧化碳(SC-CO₂)对于干热岩进行增产及开采热量,是地热能开发研究的热点^[2-3]。SC-CO₂ 由于较低黏度、较高密度等物理化学性质,在地热储层中的渗透性与传热效率显著高于传统水基工质。学者们结合实际地质条件,对增强型地热系统(EGS)中二氧化碳与水的性能进行对比研究表明:SC-CO₂ 更适合作为双垂直井 EGS 的工作介质,但存在由于焦耳-汤姆逊效应造成 SC-CO₂ 在井筒中温度快速下降的缺陷^[4-5]。与此同时,SC-CO₂ 的使用还提供了一个潜在的碳封存途径,有助于减少温室气体的排放^[6]。由此可见,利用 SC-CO₂ 开采干热岩地热能,不仅在技术上具有优势可行性,而且在环境保护方面具有重要意义。

干热岩岩性致密,需要通过水力压裂手段提高岩体渗透率和孔隙度,以构建人工储层^[7-8]。因此,干热岩地热能的产出效率取决于储层中广泛裂隙网络的可用性^[9]。压裂液通过井筒套管进入地层,随着压力的持续增加,岩石发生破裂产生裂隙。当地层存在天然裂隙、夹层等地质弱面时,会显著影响水力裂隙的扩展路径。此时,水力裂隙可能会沿着弱面扩展并改变水力裂隙方向,也可能会穿过天然裂隙,保持原有的扩展趋势^[10-11]。不同的裂隙发展方式会产生不同的裂隙网络,进而对储层的热量提取和流体流动效率产生影响^[12]。在理想情况下,裂隙网络应尽可能在更大范围的储层区域内扩展并相互连通。然而,在实际操作中,可能会出现注入压力不足,导致岩石无法破裂或者裂缝延伸受限,形成短而孤立的裂隙;或因支撑剂未达到裂缝远端,导致裂缝远端闭合,形成无效的裂隙^[13]。另外,当水力裂隙未连通时,维持流体循环往往需要消耗大量泵功。

增强型地热系统中的地热能开发过程中涉及复杂的热流固(THM)耦合过程^[14-15]。储层特性会随着温度场、流动场以及应力场的变化而变化。已有部分学者针对多物理场耦合过程展开研究,Guo 等^[16]利用三维的 THM 耦合模型分析了不同天然裂隙尺寸和工作流体的 EGS 性能发现,与恒定流量的水相比,二氧化碳具有更高的取热能力。Pandey 等^[17]基于 THM 耦合模型建立了等效多孔介质性质和裂隙开度之间的动态关系,实现对注入井附近裂缝起裂及远场裂缝闭合的预测。Ma 等^[18]建立了考虑岩石弹性模量和泊松比温度变化的裂缝岩体 THM 耦合模型,研究了裂隙开度和渗透率的动态变化。Xue 等^[19]建立了热流固化(THMC)与井筒热损失模型,并考虑储层渗透率和孔隙度的变化,证实剪切裂缝网络在热提取方面通常优于垂直裂缝系统。

尽管已有许多 THM 和 THMC 耦合模型用于探究干热岩热开采过程,但是在以 SC-CO₂ 为工作介质的 EGS 中,储层特性演变研究及裂隙网络连通性对热采性能的影响机制缺乏系统性研究。基于此,本研究拟在热流固耦合的条件下,揭示 SC-CO₂ 在不同的压裂工况下形成的裂隙网络中,储层特性演变规律以及其对热采性能的影响。

1 数值模型

1.1 模型假设

在本研究中,使用 COMSOL 多物理场模拟软件对热开采过程展开数值模拟研究,并做出如下假设:增强型地热系统储层被构建为二维模型,该模型由岩石基体与离散裂隙构成。其中,岩石基体被简化为各向同性的连续多孔介质,其渗透率显著低于裂隙的渗透率。水力压裂形成的裂隙与天然裂隙共同构成储层中的主要流动通道,天然裂隙经几何简

化后呈现为垂直于水力裂隙的线段。此外,裂隙多孔隙介质储层中饱和单相液体,其在储层内的流动严格遵循达西定律。关于储层的几何参数及地质条件,均取自经过验证的文献^[20-23]以及实地数据,并通过与同类型储层文献数据的对比验证了参数取值的合理性,具体详见表1。

为模拟不同裂隙网络条件下的热开采过程,研

究中分别构建了单条水力裂隙模型,以及多条水力裂隙与天然裂隙交叉形成的裂隙网络模型。如图1所示,Case 1~Case 6为单条水力裂隙在不同连通状态下形成的裂隙网络,用于分析未连通裂隙的位置及距离对热开采过程的影响;Case A~Case F为3条水力裂隙与天然裂隙组成的裂隙网络,旨在探究不同复杂程度裂隙网络条件下的热开采效果。

表1 储层几何参数

Table 1 Reservoir geometric parameters

参数	数值	参数	数值
储层长度/m	1 000	天然裂隙长度/m	160
储层宽度/m	400	天然裂隙间距/m	100
储层深度/m	4 000	裂隙初始开度/mm	0.5
井间距/m	600	流体注入温度/K	300
储层初始温度/K	393.15	储层初始孔隙度	0.035 4
流体注入压力/MPa	50	储层初始渗透率/ m^2	4.93×10^{-16}
热膨胀系数/ K^{-1}	5×10^{-6}	储层杨氏模量/GPa	44.1
储层密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 600	毕渥系数	0.7
储层泊松比	0.23	裂隙孔隙度	1
裂隙面法向刚度/GPa	2	裂隙导热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	2.5
储层导热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	2.51	裂隙比热容/ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	750
储层比热容/ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	754.4	裂隙密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 000
流体注入质量流量/ $(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	30		

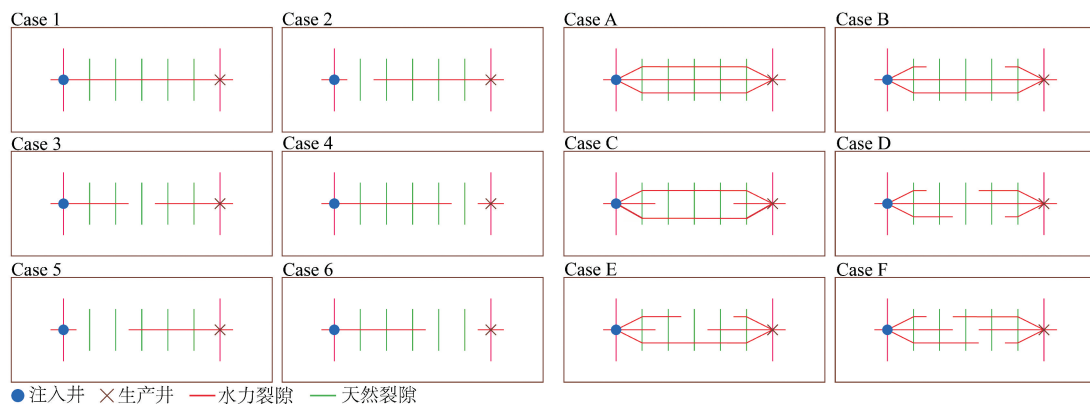


图1 裂隙网络模型

Fig. 1 Model of fracture network

1.2 THM 耦合模型

本文中多物理场耦合模型的离散化基于有限元法,求解过程采用非线性求解器,选用 Newton-Raphson 迭代法。非线性迭代中每个子步的线性方程组采用 MUMPS 算法。模型中 THM 耦合通过全耦合求解实现。裂隙储层中的热开采过程包括温度场、流动场和应力场的变化,以下为3个场的控制方程。

应力场控制方程为

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho_r \mathbf{g} = 0 \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_{th}) + p\mathbf{I} \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}$ 为总应力张量; ρ_r 为储层密度; $\mathbf{g}$ 为重力矢量; $\mathbf{C}$ 为材料的弹性矩阵,由材料的杨氏模量和泊松比确定; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为总应变张量, $\boldsymbol{\varepsilon}_{th}$ 为热应变张量; $p\mathbf{I}$ 代表孔隙流体压力对总应力的贡献,其中 p 为流体压力, $\mathbf{I}$ 为单位张量。

流动场控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi \rho_f) + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{u}) = Q_m \quad (3)$$

$$\mathbf{u} = -\frac{\kappa}{\mu} \nabla p \quad (4)$$

式中: ρ_f 为流体密度; φ 为储层孔隙率; $\mathbf{u}$ 表示流体速度矢量; Q_m 为质量源项; μ 为流体动力黏度; κ 为渗透率。

温度场控制方程为

$$(\rho c_p)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f c_{pf} \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q \quad (5)$$

$$(\rho c_p)_{\text{eff}} = \varphi \rho_f c_{pf} + (1 - \varphi) \rho_s c_{ps} \quad (6)$$

式中: ρ 为密度; c_p 为质量定压热容; 下标 eff 代表多孔介质等效值; T 为温度; c_{pf} 为流体的质量定压热容; ρ_s 为固体的密度; c_{ps} 为固体的质量定压热容; Q 为其他热源项; $\mathbf{q}$ 为外界输入的热流密度。

为表征储层特性的变化规律,需明确储层孔隙度和渗透率、裂隙开度和渗透率受应力场、温度场与流动场变化的影响,因此这4个变量构成了热流固耦合过程中的耦合节点,以下为其计算式。

储层孔隙度表示为

$$\varphi = 1 - (1 - \varphi_0) \exp \left[-\frac{1}{K_s} (p - p_0) + \alpha_T (T - T_0) - (\varepsilon_V - \varepsilon_{V_0}) \right] \quad (7)$$

基岩渗透率表示为

$$\kappa = \kappa_{r_0} \left\{ \frac{1}{\varphi_0} - \left(\frac{1}{\varphi_0} - 1 \right) \exp \left[-\frac{1}{K_s} (p - p_0) + \alpha_T (T - T_0) - (\varepsilon_V - \varepsilon_{V_0}) \right] \right\}^3 \quad (8)$$

裂隙开度表示为

$$u_m = \frac{\sigma_{n, \text{frac}} - p}{K_n} \quad (9)$$

$$d_f = d_{f_0} - u_m \quad (10)$$

裂隙渗透率表示为

$$\kappa_f = \frac{d_f^2}{12 f_f} \quad (11)$$

式中: K_s 为固体体积模量; ε_V 为储层体积应变; ε_{V_0} 为储层体积应变初始值; φ_0 为储层孔隙率初始值; T_0 为温度初始值; p_0 为流体压力初始值; α_T 为热膨胀系数; κ_{r_0} 为储层渗透率初始值; u_m 为裂隙开度变化量; $\sigma_{n, \text{frac}}$ 为裂隙面法向应力; K_n 为裂隙面法向刚度; d_f 为裂隙开度; d_{f_0} 为裂隙开度初始值; f_f 为裂隙粗糙度系数; κ_f 为裂隙渗透率。

温度场、流动场和应力场之间存在3个耦合接口: 温度场与流动场通过二氧化碳的物性变化实现

耦合,其物性参数采用 Peng-Robinson 方程计算; 温度场与应力场通过热膨胀模型耦合; 应力场与流动场则通过多孔弹性模型耦合。以下为各耦合接口的数学表达式。

Peng-Robinson 方程为

$$p_{\text{abs}} = \frac{RT}{V - b} - \frac{a\alpha}{V^2 + 2bV - b^2} \quad (12)$$

式中: p_{abs} 为流体的绝对压力; V 为摩尔体积; R 为气体常数,其值为 $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; a 和 b 为与临界参数相关的物质特性参数; α 是反映非理想性随温度的变化的温度修正因子。

热膨胀方程为

$$\varepsilon_{\text{th}} = \alpha_T (T - T_{\text{ref}}) \quad (13)$$

$$Q_d = -T \frac{\partial M}{\partial t} : \alpha_T \quad (14)$$

式中: T_{ref} 为参考温度; Q_d 为所描述的热源; M 为 Mandel 应力,用于描述应力与热膨胀的耦合关系。式(13)描述了温度变化对应力场的影响; 式(14)描述了热弹性阻尼效应产生的热源,此热源项通常可以忽略不计。

多孔弹性方程为

$$(\rho_r + \varphi \rho_f) \frac{\partial^2 \mathbf{s}_d}{\partial t^2} = \nabla \cdot (\mathbf{S} - \alpha_B (p - p_{\text{ref}}) \mathbf{I}) + \mathbf{F}_V \quad (15)$$

$$\rho_f s_p \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{u}_d) = -\rho_f \alpha_B \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t} + Q_m \quad (16)$$

式中: ρ_r 为储层密度; $\mathbf{s}_d$ 为固体骨架的位移矢量; $\mathbf{S}$ 为固体的应力张量; α_B 为 Biot 系数; p_{ref} 为参考压力; $\mathbf{F}_V$ 代表其他体积力; s_p 为储水系数; $\mathbf{u}_d$ 为流体相对于固体骨架的渗流速度矢量。式(15)描述了储层的运动方程,左侧第一项表示了多孔介质的惯性力。式(16)为考虑了耦合关系的质量守恒方程。

1.3 模型验证

COMSOL 在多物理场耦合模拟中的可靠性已得到广泛证实,其有限元求解器对多孔介质中热传导方程、达西流动方程及弹性力学控制方程的离散化处理,在诸多地下工程研究中通过解析解对比得到验证。针对 THM 全耦合过程,本模型采用的全耦合算法,与相关地热能开采、 CO_2 封存储层研究中验证的耦合逻辑一致,其核心物理场交互机制已被理论推导与实验数据双重证实^[24-26]。

此外,为确保数值计算的稳定性与精度,如图2所示,本文针对复杂裂隙网络储层 Case A 开展了网格独立性验证。验证过程选取生产温度、生产压力及储层位移作为特征指标,分别对应温度场、流动场与

应力场的网格敏感性进行分析。其中,生产温度与生产压力采用第 30 a 的模拟数据,储层位移则选取 30 a 内最大位移时刻的储层几何中心的数值。验证结果表明:生产温度与储层位移在第 4 套网格时已达到数值稳定状态,而生产压力的数值稳定则出现于第 5 套网格;基于确保所有物理场计算精度的原则,最终选取第 5 套网格数量为 82 694 的网格作为计算网格。

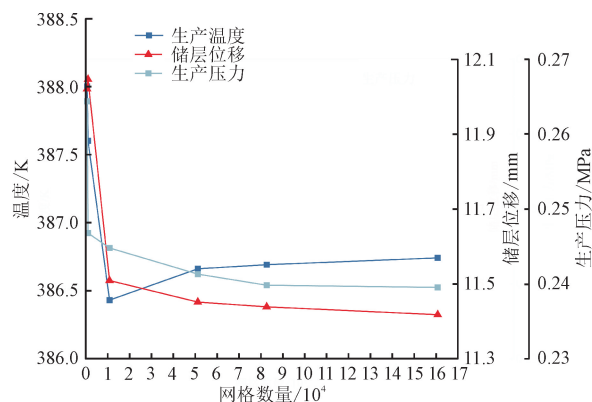


图 2 裂隙网络 Case A 的网格独立性验证

Fig. 2 Grid independence verification of fracture networks Case A

2 结果与讨论

2.1 工作介质对比分析

在水力裂隙充分连通且 SC-CO₂ 与 H₂O 作为工作介质时,单条水力裂隙网络 Case 1 和多条水力裂隙网络 Case A 生产井的井底温度,如图 3 所示。由图可知,在相同裂隙网络条件下,以 SC-CO₂ 为工作介质时,生产井的井底温度更高,且温度下降幅度较缓;但由于 SC-CO₂ 的比热容小于 H₂O,其在提取的热能总量方面不具备优势。同时,无论是以 H₂O 还是 SC-CO₂ 为工作介质,在多条水力裂隙组成的裂隙网络中均能取得更优的取热效果。具体而言,在第 30 a 时,以 SC-CO₂ 为介质的多条水力裂隙储层,其生产温度比单条水力裂隙储层的生产温度高出约 24 K。由此可见,构造体积更大的裂缝储层有助于实现较高的生产温度。

注入井与生产井井底的压差随开采时间的变化较小。图 4 为第 30 a 时,不同单条水力裂隙网络 Case 1~Case 6 的储层流体压力损失。结果显示:在裂隙连通的情况下,压力损失最小;随着未连通距离的增加,压力损失逐渐增大。未连通区域的位置对压力损失几乎没有影响,且当以 SC-CO₂ 作为工作介质时,压力损失相对较小。

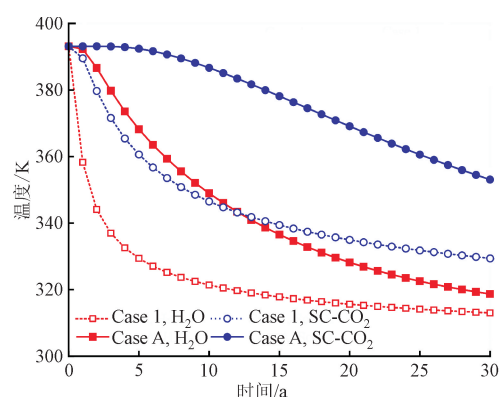


图 3 不同工作介质下的生产井井底温度

Fig. 3 Bottom hole temperature of production wells under different working fluid

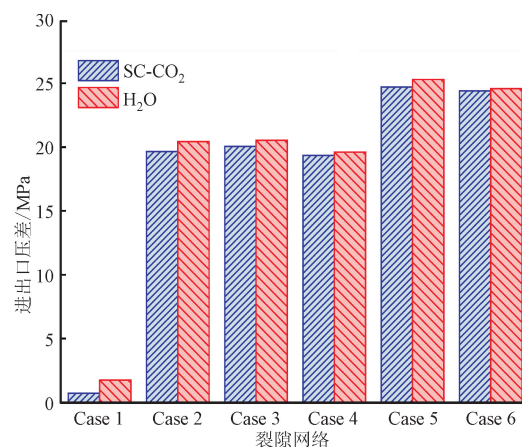


图 4 不同工作介质和裂隙网络下第 30 a 的储层流体压力损失

Fig. 4 Reservoir fluid pressure loss in the 30th a under different working fluid and fracture networks

不同工作介质在不同换热时长下导致的储层位移存在差异。如图 5 和图 6 所示,随着工作介质不断从地层取热,储层在孔隙压力和热应力的作用下产生形变位移,位移范围在 35 mm 以内。储层在裂隙末端处的位移相对较大,而在注入井与生产井的连接线上,储层位移情况较为复杂。在假设井筒和储层远场边界不发生位移的条件下,由于井筒附近热冲击效应较强,储层形变较大,整体呈现向内收缩的规律。随着热量不断被开采,储层收缩中心会沿着两井的中心线向生产井方向移动。此外,相较于水,以 SC-CO₂ 作为工作介质时造成的储层位移更小,这表明超 SC-CO₂ 对地层变化的影响较小,更适宜作为长期热开采介质。

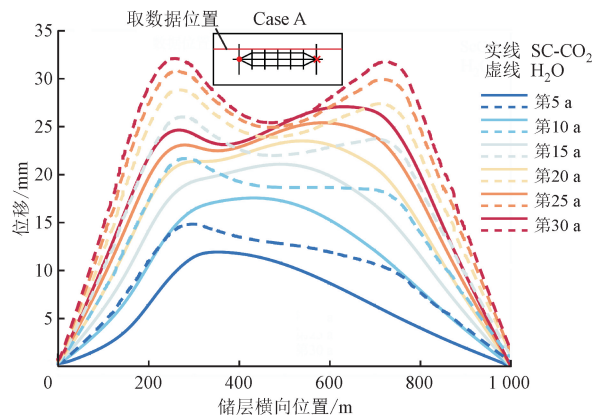


图5 不同工作介质分别在天然裂隙末端处引起的储层位移变化

Fig. 5 Reservoir displacement changes induced by different working fluid at the ends of natural fractures

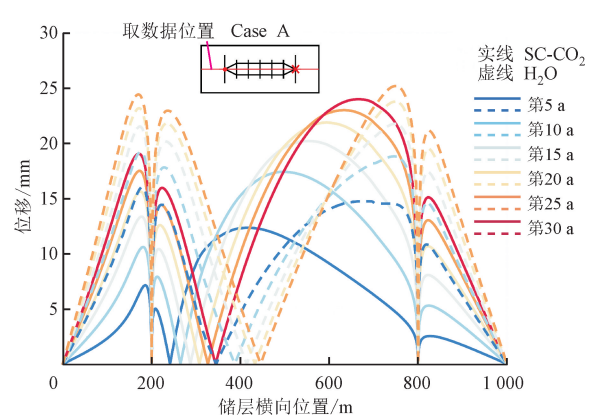


图6 不同工作介质分别在两井连接线处引起的储层位移变化

Fig. 6 Reservoir displacement changes induced by different working fluid at the connecting line of two wells

2.2 裂隙网络连通性分析

本节探究了不同连通性下的单水力裂隙网络和多水力裂隙网络的换热情况。如图7所示,不同裂隙网络下,地下储层的温度场变化存在差异。在单条水力裂隙网络中,未连通区域对温度场影响显著,SC-CO₂会在储层中通过渗流从周围岩石取热,直至到达生产

井。在断路位置之前,主要天然裂隙会引导 SC-CO₂ 的流动,而断路位置之后的主要天然裂隙几乎不会对温度场变化产生影响。在多条水力裂隙网络中,天然裂隙的存在会增强裂隙网络的连通性,有效降低裂隙断路概率。SC-CO₂ 会通过最优流动路径从注入井到达生产井,其取的热量取决于可流动路径的覆盖范围。

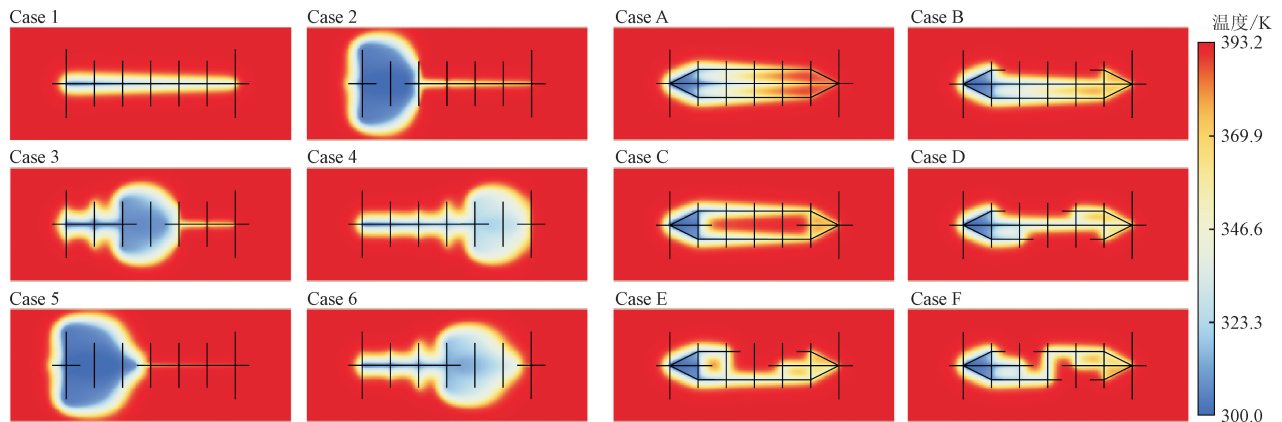


图7 不同裂隙网络下第15a的温度场变化

Fig. 7 Temperature field changes in the 15th a under different fracture networks

图8为不同单条水力裂隙网络的生产井井底温度变化。如图所示,完全连通的单条水力裂隙因存在最短优势流动通道,导致井底温度快速下降。当水力裂隙出现断路时,工作介质会向周围储层扩散并完成取热过程,这使得井底温度下降速率放缓,且随着断路距离的增加,工作介质到达生产井的运移时间延长,热储换热面积也随之进一步扩大。因此,在单条水力裂隙条件下,断路距离越长,出口井温度下降越缓慢,地热系统在生产周期前期可维持较高

的产出温度。不过,结合图4可知,裂隙断路会显著增大工作介质的流动阻力,进而导致泵送功率消耗大幅增加。图9为不同连通状态下多条水力裂隙网络的换热特征。随着水力裂隙数量的增加,水力裂隙与主要天然裂隙共同构成了更为复杂的裂隙网络体系,这使得单条水力裂隙的断路不会造成整个裂隙网络的完全阻断。结合图7与图9的分析可知,多条水力裂隙网络中出现的断路会导致工作介质的有效换热面积缩减,进而使生产井底温度降低,最终

造成热储整体换热量的减少。这一现象的本质在于,多条水力裂隙网络的换热机制已不同于单条水力裂隙,其换热过程不再依赖工作介质在储层中的渗流扩散,而是裂隙所构成的流动通道,故呈现出与单条水力裂隙截然不同的换热规律。热突破时间是指热储在换热过程中,从换热过程启动至热储温度发生显著突破性变化的时间节点。由此可知,由于网络中存在完全连通的主流通道,断路的数量与位置对热突破时间几乎未产生显著影响。

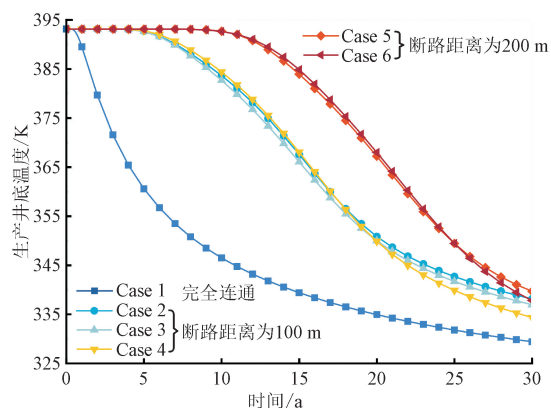


图8 不同单条水力裂隙网络的生产井井底温度变化

Fig. 8 Bottom hole temperature changes of production wells in different single hydraulic fracture networks

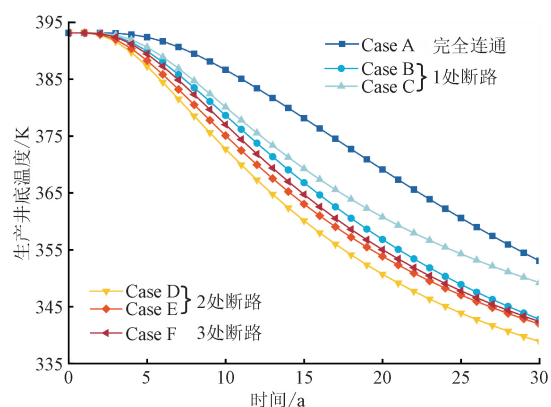


图9 不同多条水力裂隙网络的生产井井底温度变化

Fig. 9 Bottom hole temperature changes of production wells in different multiple hydraulic fracture networks

在孔隙压力与温差的耦合作用下,储层整体呈现向内收缩的位移特征,但裂隙网络的结构差异会导致储层位移大小与方向的改变。如图10所示,在裂隙充分连通的条件下,储层最大形变出现在靠近生产井的水力裂隙区域,最大位移量可达2.7 cm;当裂隙网络存在断路时,储层的整体位移程度明显减弱。当单条水力裂隙未连通时(即裂隙网络 Case B 与 Case C),高位移区域呈现分散分布,最大位移降

至2.3 cm。当两条及以上水力裂隙未连通时(即裂隙网络 Case D~Case F),储层位移程度进一步减小,且在裂隙断路位置处的位移量显著降低,同时高位移区被分割为两个独立区域,分别集中于注入井裂隙附近及生产井裂隙外缘。

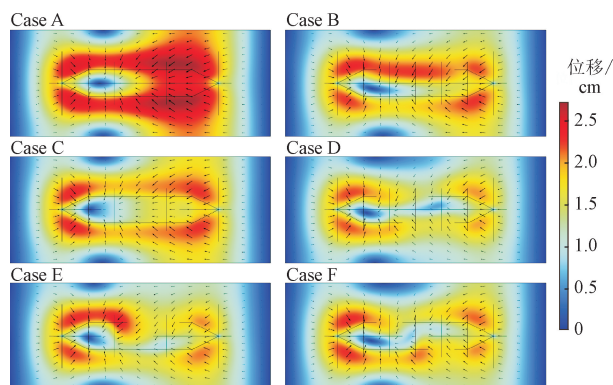


图10 不同的多条水力裂隙网络在第30 a时的储层位移变化情况

Fig. 10 Reservoir displacement changes of different multiple hydraulic fracture networks in the 30th a

由于多水力裂隙连通性存在差异,储层的流动场会产生不同变化。图11为不同多条水力裂隙下,第30 a时的孔隙压力以及优势流动通道特征。在完全连通的 Case A 场景中,水力裂隙构成完整的流体传输裂隙网络,孔隙压力变化最小,并且生产井和注入井之间的压力损失仅为0.24 MPa。当出现断路,在 Case B 和 Case C 中,工作介质依赖两条水力裂隙作为主要流动通道,此时压力损失上升至0.33 MPa,孔隙压力分布开始出现局部差异,优势通道作用更突出。当水力裂隙网络出现2处断路时,如 Case D 和 Case E,此时裂隙网络中仅存一条完整水力裂隙作为

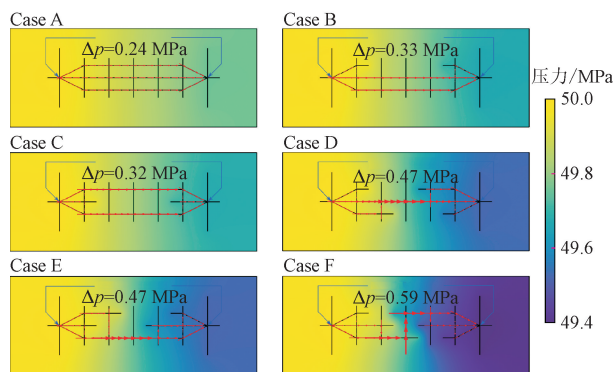


图11 不同的多条水力裂隙网络在第30 a时的孔隙压力变化

Fig. 11 Pore pressure changes of different multiple hydraulic fracture networks in the 30th a

主通道,两井之间的压力损失升高至 0.47 MPa。当裂隙网络出现 3 处断路,如 Case F,此时裂隙网络中没有完整的水力裂隙,工作介质依靠天然裂隙连接水力裂隙,流体运移路径复杂阻力增加,压力损失达最大的 0.59 MPa,孔隙压力分布极不均衡,生产井区域压力衰减更为明显。因此,随水力裂隙断路增多,优势流动通道逐步缩减、流动阻力递增,孔隙压力从均匀到局部差异再到显著不均衡,这反映出连通性与流体渗流效率的直接关联性。

2.3 储层特性变化分析

本小节以裂隙网络 Case A 和 Case F 为研究对象,系统探究了开采过程中储层特性的动态变化规律,具体包括储层孔隙度、储层渗透率、裂隙开度及裂隙渗透率的演化特征。图 12 为第 30 a 时的储层孔隙度和渗透率。

如图 12 所示,相较于孔隙度为 3.540×10^{-2} 和渗透率为 $4.93 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 的初始情况,开采至第 30 a 时,储层孔隙度与渗透率的变化幅度均处于较小范围。由于渗透率与孔隙度呈 3 次方关系,二者的变化趋势具有一致性;在整体流动路径上,孔隙度与渗透率均呈现下降特征,且生产井附近的下降趋势更为显著。这是由于冷流体的注入会引发热储层收缩,而生产井附近区域因孔隙压力降幅较大,进一步加剧了孔渗参数的变化程度。此外,Case F 因流动路径单一,流动过程中的压力损失显著大于 Case A,因此其生产井附近的孔渗参数下降幅度较 Case A 更为突出。

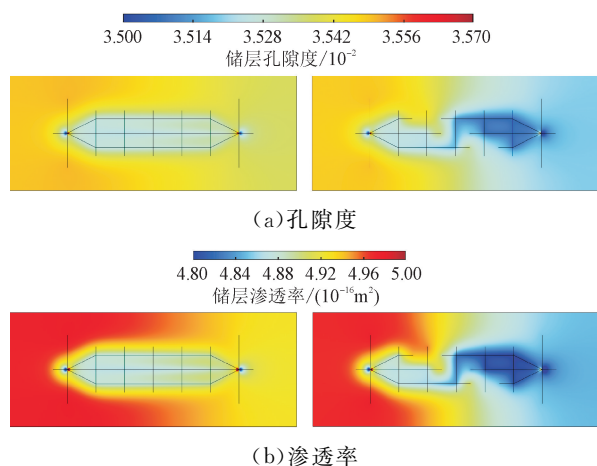


图 12 Case A 和 Case F 在第 30 a 时的储层孔隙度和渗透率
Fig. 12 Reservoir porosity and permeability of Case A and Case F in the 30 a

图 13 为裂隙开度随热量开采过程呈现的动态变化特征。裂隙初始开度为 0.50 mm,在未进行热量开采时,注入流体的孔隙压力可使裂隙发生初步扩张,

此时裂隙开度分布相对均匀,约为 0.58 mm。从第 15 a 的裂隙开度分布图可见,随着冷流体注入地下储层,裂隙因受冷而开始收缩,其中:主水力裂隙率先发生收缩,开度降至 0.55 mm 左右。值得注意的是,由于流体在裂隙两端的流速较低,温度变化幅度较小,因此裂隙两端的开度受热冲击的影响相对较弱。

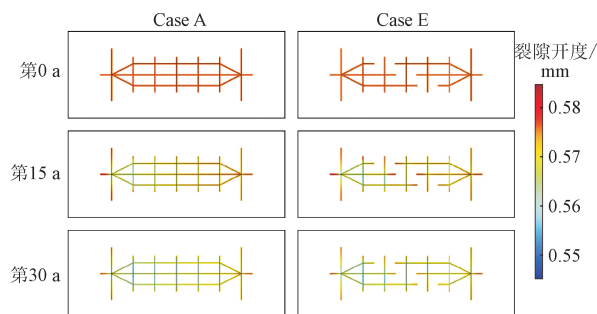


图 13 裂隙网络中的裂隙开度随时间变化

Fig. 13 Variation of fracture aperture with time in fracture networks

图 14 和图 15 为不同裂隙网络条件下主要水力裂隙的开度变化特征。由图可知,注入井与生产井附近的裂隙开度呈现剧烈波动,这与井眼周围形成的强流体压力梯度直接相关;大量流体在此区域快速涌入或涌出,会导致裂隙内流体压力骤升,孔隙压力显著增大,进而促使裂隙开度明显扩张,极端情况下甚至可能因压力超限引发局部压裂扩展。对于不同类型的裂隙网络而言,多水力裂隙网络因具备更大的换热面积,储层温差产生的热应力影响范围更广泛,由此导致的储层应力也相应更大。尽管多水力裂隙网络中的流体压力损失相对更小,但其差异程度远不及地层应力的差异显著,因此地层应力仍是主导裂隙开度变化的关键因素。

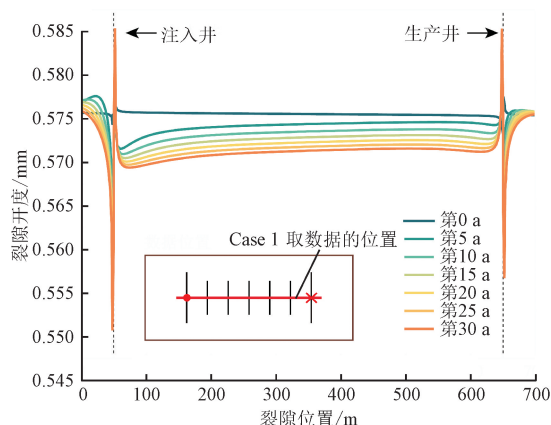


图 14 单水力裂隙网络下水力裂隙开度随时间的变化

Fig. 14 Variation of hydraulic fracture aperture with time in a single hydraulic fracture network

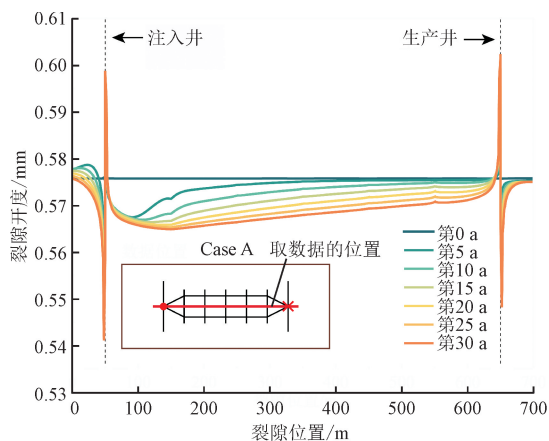


图15 多水力裂隙网络下双井连接处水力裂隙开度随时间的变化

Fig. 15 Variation of hydraulic fracture aperture with time in a multiple hydraulic fracture network

3 结 论

本文围绕 SC-CO₂ 开采干热岩热能过程中裂隙网络的热流固耦合作用展开研究,系统探究了不同裂隙网络在不同连通状态下的热采性能及储层特性演变规律,揭示了裂隙网络连通性、THM 耦合作用对储层特性及生产温度等关键指标的影响机制,得到如下主要结论。

SC-CO₂ 作为工作介质能维持更高的生产井井底温度,且温度下降趋势更缓。同时,SC-CO₂ 对储层位移的影响更小,对地层扰动更弱,综合性能优于传统水基工质,更适合干热岩的长期热量开采。

单条水力裂隙网络中,断路距离增加会延长工作介质渗流取热路径,延缓生产温度下降,但会增大压力损失;多条水力裂隙网络中,单一裂隙断路不会导致整体网络断路,但会减少换热面积,降低总换热量。然而,由于裂隙网络依然存在连通的裂隙通道,因此对热突破时间无显著影响。

储层孔隙度、渗透率及裂隙开度均受 THM 耦合作用显著影响。井眼附近因流体压力梯度强烈,裂隙开度变化剧烈,可能引发局部压裂扩展。储层孔隙度、渗透率呈下降趋势,且在生产井附近及流动路径单一的裂隙网络中变化更显著。

参考文献:

[1] QIAO Mingzheng, JING Zefeng, FENG Chenchen, et al. Review on heat extraction systems of hot dry rock: classifications, benefits, limitations, research status and future prospects [J]. Renewable and Sustainable

Energy Reviews, 2024, 196: 114364.

- [2] QIAO Mingzheng, ZHOU Yujuan, JING Zefeng, et al. Heat extraction analysis of an innovative single-well open-loop geothermal system using scCO₂ [J]. Energy, 2025, 328: 136502.
- [3] ZHANG Wei, WANG Chunguang, GUO Tiankui, et al. Study on the cracking mechanism of hydraulic and supercritical CO₂ fracturing in hot dry rock under thermal stress [J]. Energy, 2021, 221: 119886.
- [4] LIAO Jianxing, HU Ke, MEHMOOD F, et al. Embedded discrete fracture network method for numerical estimation of long-term performance of CO₂-EGS under THM coupled framework [J]. Energy, 2023, 285: 128734.
- [5] ATRENS A D, GURGENCI H, RUDOLPH V. CO₂ thermosiphon for competitive geothermal power generation [J]. Energy & Fuels, 2009, 23(1): 553-557.
- [6] 蒋恕, 张凯, 杜凤双, 等. 二氧化碳地质封存及提高油气和地热采收率技术进展与展望 [J]. 地球科学, 2023, 48(7): 2733-2749.
- JIANG Shu, ZHANG Kai, DU Fengshuang, et al. Progress and prospects of CO₂ storage and enhanced oil, gas and geothermal recovery [J]. Earth Science, 2023, 48(7): 2733-2749.
- [7] XIE Zhiqiang, HAN Dongya, LI Jiangteng, et al. A state-of-the-art review of hydraulic fracturing in geothermal systems [J]. Sustainability, 2024, 16(24): 11087.
- [8] 许天福, 文冬光, 袁益龙. 干热岩热能开发技术挑战与发展战略 [J]. 地球科学, 2024, 49(6): 2131-2147.
- XU Tianfu, WEN Dongguang, YUAN Yilong. Technical challenges and strategy of geothermal energy development from hot dry rock [J]. Earth Science, 2024, 49(6): 2131-2147.
- [9] ZHANG Xu, HUANG Zhaoqin, LEI Qinghua, et al. Improving heat extraction performance of enhanced geothermal systems: insights from critical fracture network parameter and multi-objective optimization method [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 213: 118671.
- [10] 谢紫霄, 黄中伟, 熊建华, 等. 天然裂缝对于干热岩水力压裂裂缝扩展的影响规律 [J]. 天然气工业, 2022, 42(4): 63-72.
- XIE Zixiao, HUANG Zhongwei, XIONG Jianhua, et al. Influence of natural fractures on the propagation of hydraulic fractures in hot dry rock [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(4): 63-72.
- [11] 史璨, 林伯韬. 页岩储层压裂裂缝扩展规律及影响因

- 素研究探讨[J]. 石油科学通报, 2021, 6(1): 92-113.
- SHI Can, LIN Botao. Principles and influencing factors for shale formations [J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 6(1): 92-113.
- [12] ZHOU Zhou, JIN Yan, ZENG Yijin, et al. Investigation on fracture creation in hot dry rock geothermal formations of China during hydraulic fracturing [J]. Renewable Energy, 2020, 153: 301-313.
- [13] LIU Shiduo, XIONG Tingsong, LIU Yong, et al. Optimization design of hydraulic fracturing fracture parameters of horizontal wells in algal limestone reservoir [J]. Processes, 2024, 12(7): 1302.
- [14] FU Xiaofei, MA Yuanyuan, LI Shibin, et al. Sensitivity analysis of mechanical field parameters in fractured HDR reservoir based on THM coupling [J]. Energy, 2025, 320: 135360.
- [15] ZHAO Yangsheng, FENG Zijun, FENG Zengchao, et al. THM (thermo-hydro-mechanical) coupled mathematical model of fractured media and numerical simulation of a 3D enhanced geothermal system at 573 K and buried depth 6 000—7 000 M [J]. Energy, 2015, 82 (15): 193-205.
- [16] GUO Tiankui, GONG Facheng, WANG Xiaozhi, et al. Performance of enhanced geothermal system (EGS) in fractured geothermal reservoirs with CO₂ as working fluid [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 152: 215-230.
- [17] PANDEY S N, CHAUDHURI A, KELKAR S. A coupled thermo-hydro-mechanical modeling of fracture aperture alteration and reservoir deformation during heat extraction from a geothermal reservoir [J]. Geothermics, 2017, 65: 17-31.
- [18] MA Yuanyuan, FU Xiaofei, LI Shibin, et al. Investigation on the effect of the relative position between fracture and injection-production well on thermal extraction performance [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 254: 123876.
- [19] XUE Zhenqian, WEI Zichao, MA Haoming, et al. Exploring the role of fracture networks in enhanced geothermal systems: insights from integrated thermal-hydraulic-mechanical-chemical and wellbore dynamics simulations [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, 215: 115636.
- [20] SONG Guofeng, SONG Xianzhi, XU Fuqiang, et al. Contributions of thermo-poroelastic and chemical effects to the production of enhanced geothermal system based on thermo-hydro-mechanical-chemical modeling [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 377: 134471.
- [21] SHI Honglei, WANG Guiling, LU Chuan, et al. Enhancing geothermal energy recovery in Yangbajing: the role of natural and artificial fracture connectivity in EGS performance [J]. Geothermics, 2025, 132: 103438.
- [22] SONG Guofeng, SONG Xianzhi, JI Jiayan, et al. Evolution of fracture aperture and thermal productivity influenced by chemical reaction in enhanced geothermal system [J]. Renewable Energy, 2022, 186: 126-142.
- [23] LEI Zhihong, ZHANG Yanjun, ZHANG Senqi, et al. Electricity generation from a three-horizontal-well enhanced geothermal system in the Qiabuqia geothermal field, China: slickwater fracturing treatments for different reservoir scenarios [J]. Renewable Energy, 2020, 145: 65-83.
- [24] MAHMOODPOUR S, SINGH M, TURAN A, et al. Simulations and global sensitivity analysis of the thermo-hydraulic-mechanical processes in a fractured geothermal reservoir [J]. Energy, 2022, 247: 123511.
- [25] SONG Guofeng, SHI Yu, XU Fuqiang, et al. The magnitudes of multi-physics effects on geothermal reservoir characteristics during the production of enhanced geothermal system [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 434: 140070.
- [26] ZHANG Wei, WANG Mingjian, WEI Zhengnan, et al. Study of the fracture propagation and the corresponding heat mining performance of multi-branch radial wells geothermal system based on the THM-D coupling model [J]. Geoenergy Science and Engineering, 2024, 243: 213302.

(编辑 刘懿莹)