

干热岩裂隙剪切渗流试验与增强型地热系统热性能数值评估研究

王驰宇¹, 王彤标², 谢亚辰³, 廖建兴^{1, 2*}, 周庆¹

(1. 贵州大学 土木工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州省煤矿设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550025;

3. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 地热能是一种潜力巨大的可再生能源, 已受到广泛关注。在深部地热储层中, 人工改造形成的复杂裂隙网络为热能提取提供关键通道, 裂隙渗透率和空间分布会直接影响热提取效率。鉴于此, 通过花岗岩粗糙单裂隙剪切渗流试验, 分析围压、剪切位移和裂隙粗糙度对渗透率的影响, 建立三因素耦合作用下粗糙裂隙剪切过程中渗透系数非线性演化模型。采用 TOUGH2MP-FLAC^{3D} 框架下建立的 THM 耦合模型, 并引入建立的渗透系数非线性演化模型, 研究增强型地热系统在不同裂缝分布密度和水平应力比条件下的长期性能, 进行系统性评估。研究表明: 裂隙渗透率与围压呈指数负相关, 与剪切位移呈对数正相关, 与裂缝粗糙度呈二次函数关系; 裂缝分布密度的提升可明显改善储层热性能, 不同裂缝分布密度从 0.1 增至 0.25, 热突破时间最多延长 6.4 a, 增强型地热系统寿命最多延长 13 a, 总产热能最大增幅约 22.5%; 水平应力各向异性抑制储层热量提取, 导致热突破时间、增强型地热系统寿命和总产热能减少; 裂缝分布密度的增大能有效减弱应力各向异性对热量提取的抑制作用。研究结果为干热岩造缝增渗改造提供一定的理论指导。

关键词: 岩石力学; 裂隙剪切渗流; 渗透率; 增强型地热系统; 裂缝分布; 水平应力比; 数值模拟

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2026)02 - 0578 - 16

第一作者: 王驰宇(2002 -), 现为硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: chiyuwang2296@163.com

***通信作者:** 廖建兴(1991 -), 现任讲师, 主要从事岩石力学与渗流方面的教学与研究工作。E-mail: jxliao@gzu.edu.cn

Shear seepage test of hot dry rock fractures and numerical evaluation of thermal performance in the enhanced geothermal system

WANG Chiyu¹, WANG Tongbiao², XIE Yachen³, LIAO Jianxing^{1, 2*}, ZHOU Qing¹

(1. College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. Guizhou Coal Mine Design and Research Institute Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550025, China; 3. College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: Geothermal energy, a renewable resource with immense potential, has garnered significant attention. In deep geothermal reservoirs, artificially stimulated fracture networks serve as critical pathways for heat extraction. Consequently, the permeability and spatial distribution of these fractures directly impact heat extraction efficiency. This study conducted shear-seepage experiments on a single rough granite fracture under varying confining pressures, shear displacements, and fracture roughnesses. A nonlinear relationship between permeability

收稿日期: 2025 - 07 - 24; **修回日期:** 2025 - 11 - 11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U22A20166, 52504080); 贵州省科技计划项目 (QKHJC-ZK[2023]YB074)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U22A20166 and 52504080) and Guizhou Provincial Science and Technology Projects (Grant No. QKHJC-ZK [2023] YB074)

and the aforementioned three factors was established based on the experimental results. This relationship was then integrated into the THM coupled framework TOUGH2MP-FLAC^{3D} to assess the long-term performance of Enhanced Geothermal Systems (EGS) under varying fracture networks, fracture densities, and horizontal stress ratio conditions. The findings reveal that fracture permeability exhibits an exponential negative correlation with confining pressure, a logarithmic positive correlation with shear displacement, and a quadratic correlation with fracture roughness. Increased fracture density significantly enhances thermal performance; as fracture densities increase from 0.1 to 0.25, the thermal breakthrough time extends by up to 6.4 years, the EGS lifespan increases by up to 13 years, and total heat production rises by approximately 22.5%. Horizontal stress anisotropy negatively affects thermal performance, while higher fracture density effectively mitigates the reduction in heat extraction caused by stress anisotropy. This work provides a theoretical foundation for hydraulic fracturing during the stimulation of hot dry rock reservoirs.

Key words: rock mechanics; shear seepage test; permeability; enhanced geothermal system (EGS); fracture distribution; horizontal stress ratio; numerical simulation

First author: WANG Chiyu (2002 -), postgraduate student, is engaged in geotechnical engineering research. E-mail: chiyuwang2296@163.com

***Corresponding author:** LIAO Jianxing (1991 -), assistant professor, is engaged in teaching and research in rock mechanics and seepage. E-mail: jxliao@gzu.edu.cn

1 引言

地热能储量丰富、分布广泛、不受气候限制, 具有显著的开发利用潜力^[1-2]。地热资源分为浅层水热型(埋深 < 200 m)和深层干热岩(埋深 > 3 km, 温度 150 °C ~ 650 °C)^[3]。深层干热岩渗透性极低 ($< 10^{-15} \text{ m}^2$), 需通过增强型地热系统(enhanced geothermal system, EGS)采用水力压裂等技术提升储层渗透性和换热效率^[4]。EGS 通过注入流体与干热岩进行热交换, 是目前最有效的热提取技术^[5-6]。传统水力压裂存在压裂范围难控、成本高的问题, 相比之下, 水力剪切技术通过低压注水诱导裂隙滑移, 形成高渗透性裂隙网络, 实现高效增渗^[7-9]。

在水力剪切增渗过程中, 天然裂隙表面粗糙且不规则, 裂隙几何特征(如开度、粗糙度)与受力形式显著影响渗流特性。Y. Ju 等^[10]采用分形模型研究粗糙单裂隙的流体阻力, 表明裂隙粗糙度对流动特性起关键作用。Y. D. Chen 等^[11]通过渗流试验, 量化裂隙几何特征与围压变化对渗流行为的影响, 显示围压增大导致流动行为改变。刘才华等^[12]研究了在剪应力作用下粗糙裂隙的渗流特性, 结果显示渗透率随剪应力的增加而减小, 并提出了粗糙裂隙渗透率与粗糙度及隙宽的关系。甘磊等^[13]研究了不同粗糙度下的裂隙渗流特性并定量分析渗透率与

JRC 之间的关系, 表明渗透率与 JRC 之间的关系服从二次函数。地热储层渗透性除受裂隙形态和受力形式影响外, 还受剪切位移制约。C. Cao 等^[14]研究 0.2~0.8 MPa 水压下单裂隙径向流动, 发现高压下偏离立方定律, 非达西流动显著, 渗透性随剪切位移先增后减。然而, 以上研究未充分分析多因素耦合作用下裂隙渗流特性。

增强型地热系统的长期采热性能受注入参数、裂隙特性及储层地质条件影响。学者们利用 THM 耦合模型的数值方法, 设计了多种模拟方案以研究这些参数的影响规律。F. C. Gong 等^[15]模拟了多裂隙水平井 EGS, 发现注入流率从 30 kg/s 增至 70 kg/s 时, 热产出增加, 但过高流率加速热突破, 系统寿命缩短至 20 a 以下。J. M. Zinsalo 等^[16]分析了不同注入温度在 40 a 运行中的表现, 发现低注入温度更有利于长期热提取。X. Y. Duan 等^[17]分析了不同裂隙网络下的热性能, 发现垂直裂隙提升产出温度约 8 °C, 短裂隙优于长裂隙。王丹丹等^[18]总结了裂隙数量以及裂隙长度的变化对储层系统采热的影响, 发现随着裂隙数量的增加, 储层热提取率越大。M. Gudala 等^[19]研究了 Puga 地热储层, 发现高初始温度 (> 180 °C) 和适中裂缝密度为优选条件, 过度密集裂隙降低性能 10%。J. Liu 等^[20]模拟三维分形裂隙 EGS, 发现高应力下裂隙渗透率异质性增强, 热突破时间提前约 3 a。然而, 以上研究多集中于分析单

一因素对 EGS 采热性能的影响,忽略了在采热过程中裂隙剪切变形对裂隙渗透率以及不同裂缝分布和水平应力比对 EGS 采热性能的影响。

综上,笔者首先以花岗岩为研究对象,通过室内试验和理论分析,研究粗糙度、围压和剪切位移影响下裂隙渗透率演化规律,建立三因素耦合下粗糙裂隙剪切过程中渗透系数非线性演化模型。并将渗透系数增量形式引入热-流-固耦合复杂裂缝网络模型,用于分析不同裂缝网络分布和水平应力比对储层地热提取性能的影响,基于热突破时间、EGS 寿命、总产热量等指标系统地评估储层热性能。

2 花岗岩粗糙裂隙剪切渗流试验

2.1 试验准备

裂隙表面的粗糙度变化直接影响裂隙渗透率。试验所用花岗岩取自山东济宁同一矿区,加工制备成尺寸为 $\phi 25\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的圆柱形试样。岩样的基本物理参数为:密度 2.58 g/cm^3 、天然含水率 0.02% 、孔隙率 0.74% 、纵波波速 2.405 km/s 。采用巴西劈裂技术得到裂隙,再通过 Free Scan UE7 蓝

色激光手持三维扫描仪获取裂隙表面三维形貌信息(精度可达 0.02 mm)。裂隙制作与粗糙度计算流程如图 1 所示。

参考刘日成等^[21-23]的研究经验,以 R. Tse 和 D. M. Cruden^[24]提出的二维节理面粗糙度理论为基础,采用如下公式求解岩样裂隙三维表面粗糙度系数(JRC)值^[25]:

$$JRC = 32.20 + 32.47 \lg Z_2^{3D} \quad (1)$$

$$Z_2^{3D} = \sum_{p=1}^n \left[\sqrt{\left(\frac{1}{m_{p-1}} \sum_{q=1}^{m_{p-1}} \left(\frac{Z_{p,q+1} - Z_{p,q}}{s} \right)^2 \right)} \right]$$

式中: Z_2^{3D} 为岩石裂隙三维表面均方根; s 为取样间距,取 0.05 mm ; n 为平行于剪切方向上的二维采样线的数量,取 500 条; m_p 为沿采样线在剪切方向上的采样点数; $Z_{p,q}$ 为裂隙表面形貌在垂直方向上的坐标值; p 为不同二维采样线的序号; q 为单条采样线上不同点的序号。

根据计算结果得出花岗岩裂隙表面粗糙度分别为 $8.516, 10.014, 12.944$ 。其三维表面如图 1(d)所示。

2.2 试验方案

试验采用岩石传导性能测试系统(见图 2(a))进行单裂隙渗流试验。初始渗流压力设置为 0.5 MPa ,

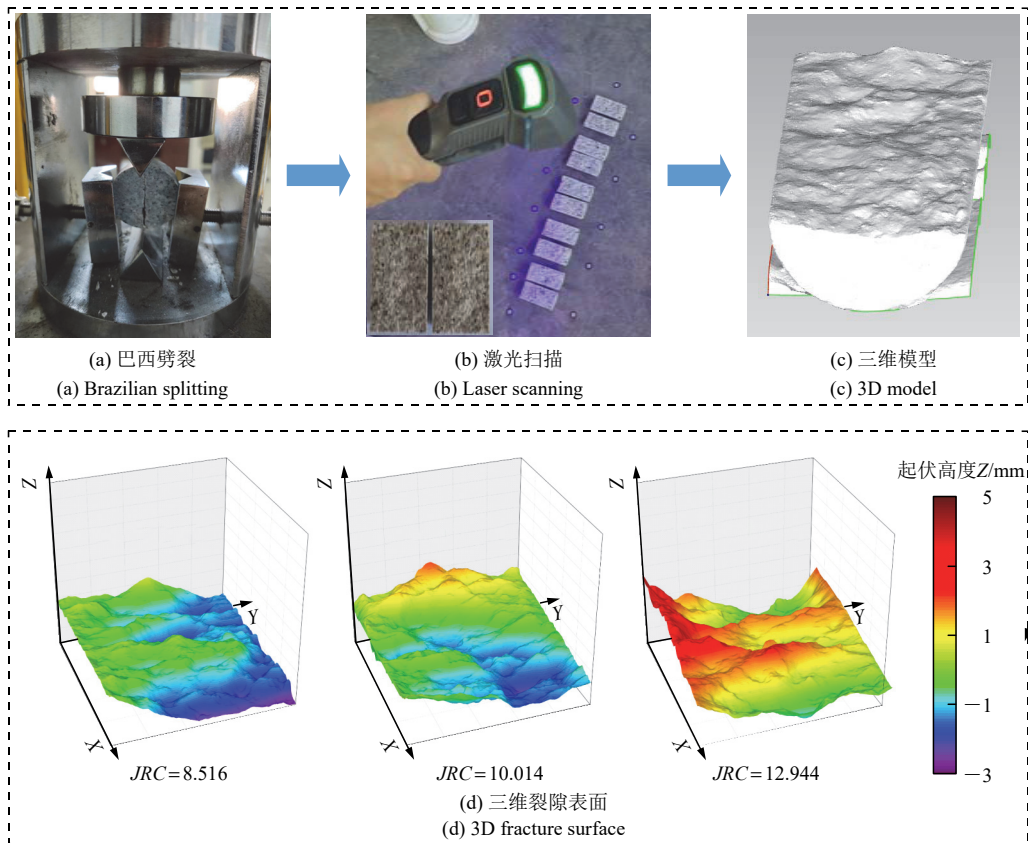


图 1 岩样粗糙度(JRC)获取流程图

Fig.1 Flowchart for obtaining rock sample roughness(JRC)

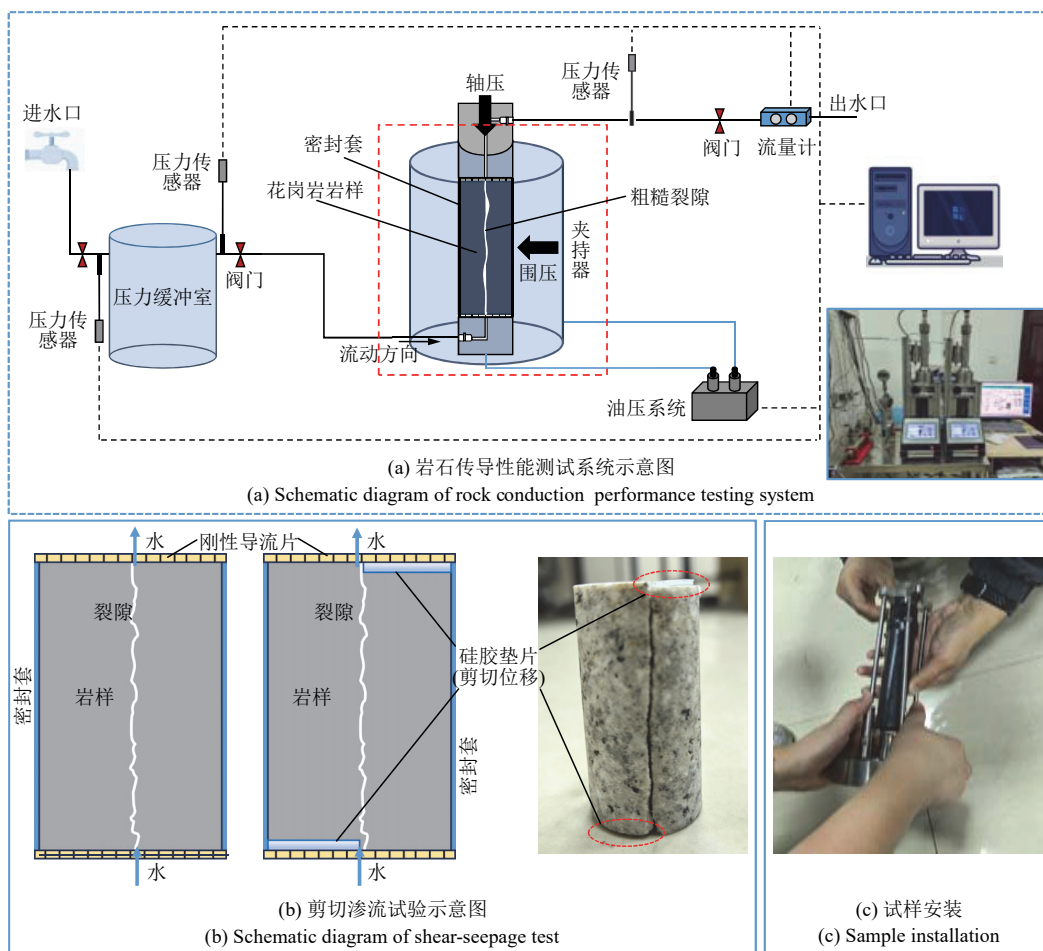


图 2 裂隙渗流试验示意图

Fig.2 Schematic diagram of fracture seepage test

试验分别在 3 种粗糙度, 3 个不同围压及 4 种不同剪切位移组合下完成。粗糙度系数 JRC 分别为: 8.516, 10.014, 12.944; 围压 σ 分别设置为 2.5, 5, 7.5 MPa; 剪切位移 δ 设置为: 0, 1, 1.5, 2 mm; 共 36 组试验。

2.3 试验方法

剪切渗流试验示意图如图 2(b)所示, 为精确控制裂隙剪切位移, 试件置于平整度误差 <0.01 mm 的刚性导流片之间, 在裂隙两端垫上相同厚度的两片硅胶垫片(厚度经千分尺测厚仪测定, 精度达 0.001 mm), 确保平整贴合、无褶皱。随后整体固定于夹持器中, 以防止滑动或位移偏差, 保证剪切位移均匀传递^[26], 如图 2(c)所示。试验的具体步骤如下:

(1) 安装试件至夹持器, 确保平整, 连接进出水管路, 密封腔体后注入油液。

(2) 操控主油缸提升三轴室, 使压头接触轴向反力架。以 0.05 MPa/s 速率同时加载轴压至 3 MPa、围压至 2.5 MPa, 保持轴压恒定以固定试件。

(3) 稳定围压于 2.5 MPa, 开启进水管路, 待水流稳定后记录流量数据, 施加下一级围压。

(4) 通过不同厚度硅胶垫片(0.5, 0.75, 1.0 mm) 调整裂隙剪切位移, 重复步骤(1)~(3), 将剪切位移依次增至 1.0, 1.5, 2.0 mm。

(5) 对 3 种不同粗糙度试件重复上述步骤。保存数据, 试验完成。

3 试验结果分析

根据试验条件, 注入流体全部从裂隙通道通过。基于达西定律计算裂隙渗透率, 多孔介质流动的达西定律在一维中的形式^[27-28]如下所示:

$$Q = \frac{kA_{cr}\Delta P}{\mu L} \quad (2)$$

式中: Q 为渗流量(m^3); k 为裂隙渗透率(m^2); A_{cr} 为裂隙的横截面积(m^2); ΔP 为试验仪器进出口压力差(Pa); μ 为水的动力黏滞系数, 常温下为 1.005×10^{-3} Pa · s; L 为裂隙长度(m)。由式(2)可得裂隙渗

透率为

$$k = \frac{Q\mu L}{A_{cr}\Delta P} \tag{3}$$

3.1 围压对裂隙渗透率的影响

图 3 显示了裂隙渗透率 k 随围压的变化规律。由图可知，渗透率随围压增加而降低。在相同剪切位移条件下，随着围压的增加，岩石的渗透率均呈现下降趋势，因为围压增大会导致裂隙闭合，从而减小了流体流通的通道，降低了渗透率。当 $\delta = 0$ mm 时，渗透率随围压的变化最为显著。随着剪切位移的增加，渗透率对围压变化的敏感性逐渐降低，曲线变得更加平缓，因为剪切位移会造成裂隙错动，形成新的流通通道，从而降低了围压对渗透率的影响。结合冯宇迪等^[29]的研究，对每个粗糙度、剪切位移下裂隙渗透率随围压变化进行拟合，可得出围压 - 渗透率关系：

$$k = Ae^{B\sigma} \tag{4}$$

式中： σ 为围压(MPa)； A, B 均为拟合常数。曲线拟合度均大于 0.95，拟合度较高，说明围压 - 渗透率呈指数函数关系是合理的。

3.2 剪切位移对裂隙渗透率的影响

图 4 显示了裂隙渗透率 k 随剪切位移的变化规律。由图可知，粗糙度相同、围压相同条件下的裂隙渗透率随剪切位移的增大而增大，在剪切位移增加的初始阶段，渗透率随着剪切位移的增加迅速增大，这与王刚等^[30]的研究结果一致。出现该现象的原因是剪切作用导致裂隙面上的凸起错动、分离，从而增加了裂隙的有效开度，进而导致渗透率的提高。而当剪切位移达到一定值后，渗透率随剪切位移的增加变化趋于平缓，这可能是由于随着剪切位移的继续增大，部分错动的岩块发生了重新排列和咬合，或者一些细小颗粒填充了裂隙空间，导

致裂隙开度减小，从而使得渗透率的增长减缓或略微下降。说明剪切位移增加到一定值后，剪切位移的继续增加对渗透率的影响较小。对每个粗糙度、围压下裂隙渗透率随剪切位移变化规律进行拟合，可得出剪切位移 - 渗透率关系：

$$k = m_1 \ln(\delta + n_1) + c_1 \tag{5}$$

式中： δ 为剪切位移(mm)； m_1, n_1, c_1 均为拟合常数。曲线拟合度均大于 0.95，拟合度较高，说明剪切位移 - 渗透率呈对数函数关系是合理的。

3.3 粗糙度对裂隙渗透率的影响

根据 L. Gan 等^[31]的研究，利用下式对渗流试验结果进行拟合：

$$k = m_2 JRC^2 + n_2 JRC + c_2 \tag{6}$$

式中： m_2, n_2, c_2 均为拟合常数。曲线拟合度均大于 0.95，拟合度较高，说明 JRC - 渗透率呈二次函数关系是合理的。

不同围压与剪切位移条件下粗糙度 - 渗透率关系拟合曲线如图 5 所示。由图可知，在 $\delta = 0$ mm 时，裂隙渗透率随 JRC 的增大而增大，并且围压越小，渗透率增幅越大，但随 JRC 的增大渗透率增幅变小。这是因为在一定范围内，粗糙度增加可以促进裂隙内部的紊流，增加水流与裂隙岩石表面的接触面积，从而提高裂隙渗透率。 $\delta = 1.0, 1.5$ mm 时，渗透率随着 JRC 的增加，均呈现先下降后上升的趋势，因为更粗糙的表面会导致更复杂的流体通道，增加流动阻力，从而降低渗透率，而当粗糙度达到一定程度后，粗糙度越大，导致裂隙开度增大，从而提高裂隙渗透率。 $\delta = 2.0$ mm 时，渗透率随着 JRC 的增大而减小，因为剪切位移的增大会使裂隙面发生错动，高 JRC 值裂隙的凸起体在剪切中更易破碎，产生的岩屑颗粒随渗流迁移并卡堵狭窄通道；同时，凸起体压平或破坏可能导致裂隙接触面

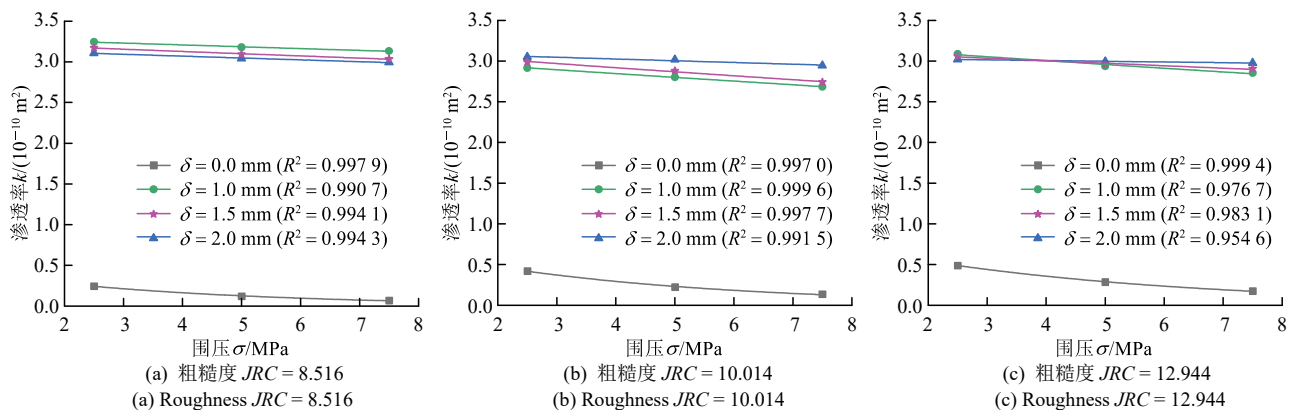


图 3 不同剪切位移与粗糙度条件下围压 - 渗透率关系拟合曲线

Fig.3 Fitted curves of relationship between confining pressure and permeability under different shear displacements and roughness

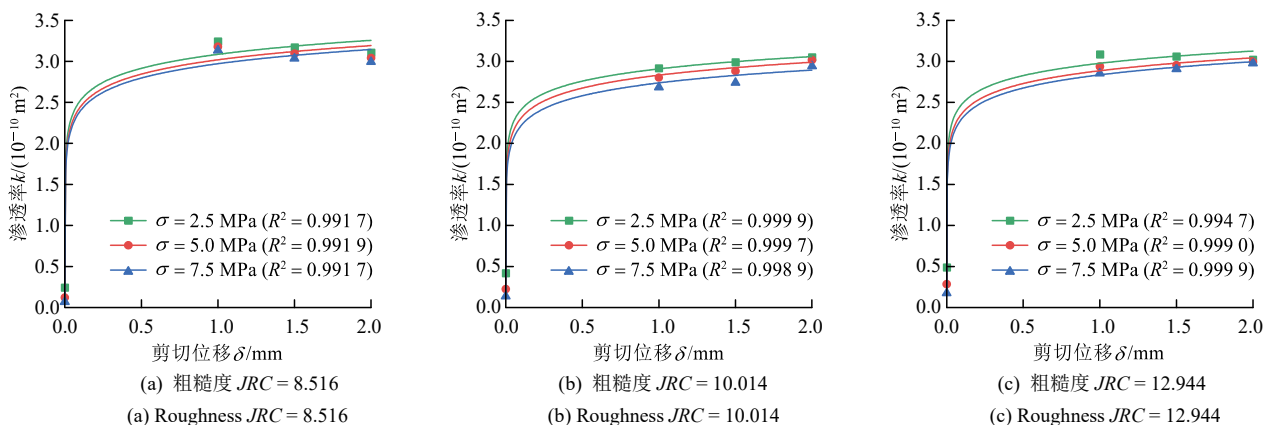


图 4 不同围压与粗糙度条件下剪切位移 - 渗透率关系拟合曲线

Fig.4 Fitted curves of relationship between shear displacement and permeability under different confining pressures and roughness

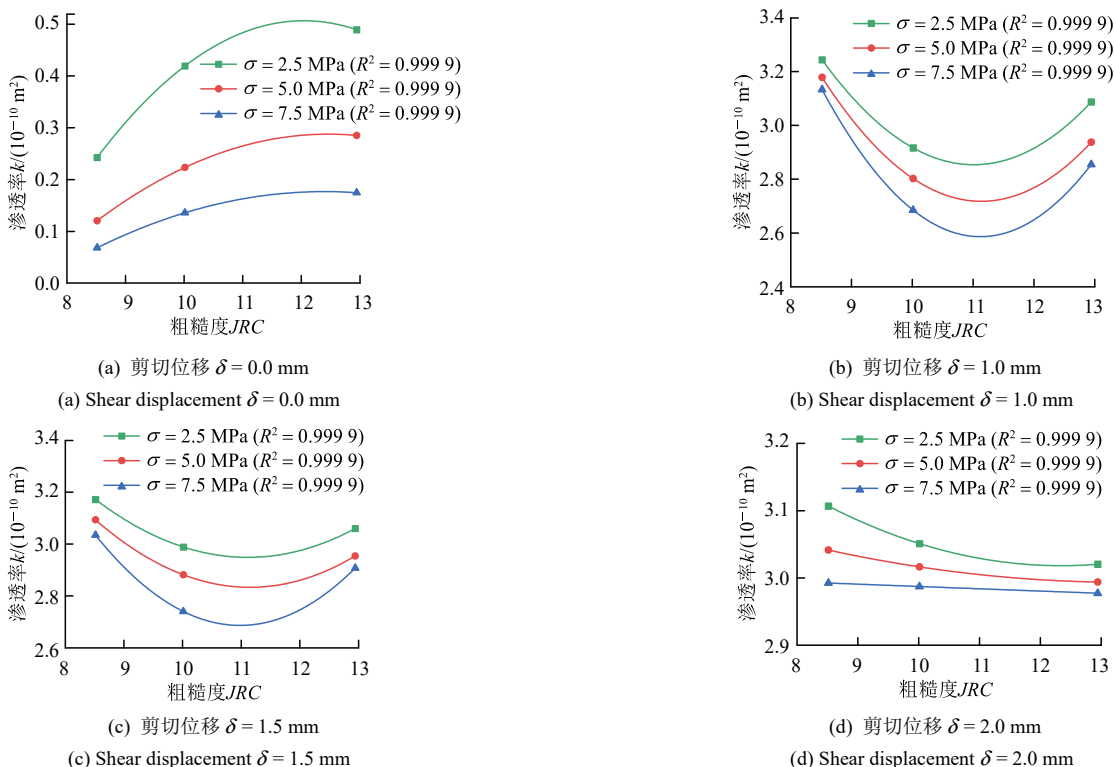


图 5 不同围压与剪切位移条件下粗糙度 - 渗透率关系拟合曲线

Fig.5 Fitted curves of relationship between roughness and permeability under different confining pressures and shear displacements

积增加，有效过水通道压缩，最终导致裂隙渗透率降低^[32-33]。

3.4 耦合作用下裂隙渗透率变化规律

耦合作用下，应力与渗透率的关系采用有效应力表征，有效围压可根据有效应力原理^[34]计算而得。计算公式如下：

$$\sigma' = \sigma - \frac{1}{2}(P_{in} - P_{out}) \quad (7)$$

式中： σ' 为有效围压(MPa)； σ 为总围压(MPa)； P_{in} ， P_{out} 分别为进口和出口压力(MPa)。

利用式(4)拟合有效围压 - 渗透率之间的关系，

结果与围压 - 渗透率之间的关系效果一致，其拟合度均大于 0.95，表明有效围压 - 渗透率之间的关系符合指数函数关系。

耦合作用下，式(4)中拟合参数 A 和 B 受剪切位移和粗糙度的影响。拟合 A ， B 与剪切位移的关系，一般拟合方程如下：

$$\left. \begin{aligned} A &= a_1 \ln(\delta + 1.5811 \times 10^{-7}) + b_1 \\ B &= a_2 \ln(\delta + 1.5811 \times 10^{-7}) + b_2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中： a_1 ， b_1 ， a_2 ， b_2 均为拟合参数。

再将式(8)中拟合参数与粗糙度系数 JRC 进行拟合，方程如下：

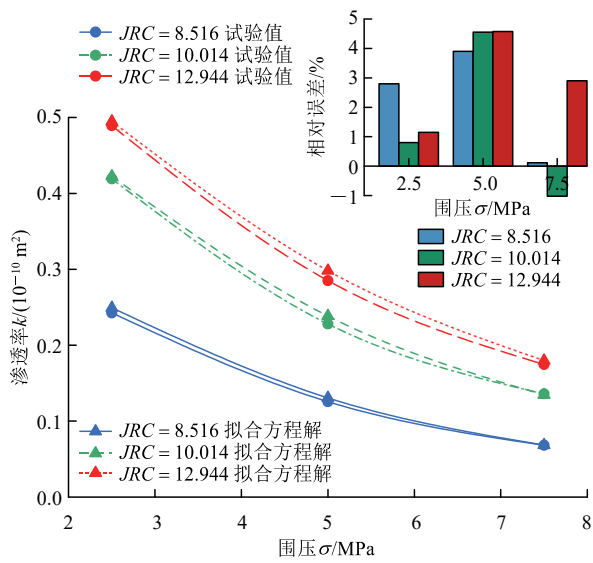
$$\left. \begin{aligned}
 a_1 &= 0.0037JRC^2 - 0.0856JRC + 0.6353 \\
 &\quad (R^2 = 0.9999) \\
 b_1 &= 0.0260JRC^2 - 0.5819JRC + 6.2234 \\
 &\quad (R^2 = 0.9999) \\
 a_2 &= 0.00021JRC^2 - 0.0053JRC + 0.0457 \\
 &\quad (R^2 = 0.9999) \\
 b_2 &= 0.00079JRC^2 - 0.0171JRC + 0.0754 \\
 &\quad (R^2 = 0.9999)
 \end{aligned} \right\} (9)$$

最后,再联立式(4)与(7)~(9),得到初始渗透压力为0.5 MPa,当 $\delta \geq 0$ mm, $8 \leq JRC \leq 13$ 时,裂隙渗透率 $k(10^{-10} \text{ m}^2)$ 与相对剪切位移 δ (mm)、有效围

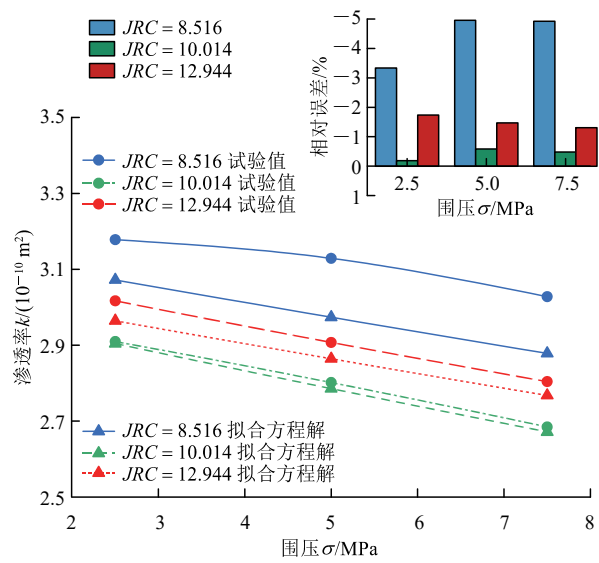
压 $\sigma \geq 0$ MPa及 JRC 之间的拟合关系式为

$$k = [(0.0037JRC^2 - 0.0856JRC + 0.6353)\ln(\gamma l + 1.5811 \times 10^{-7}) + (0.0260JRC^2 - 0.5819JRC + 6.2234)] \exp\{[(0.00020868JRC^2 - 0.0053JRC + 0.0457)\ln(\gamma l + 1.5811 \times 10^{-7}) + (0.000789JRC^2 - 0.0171JRC + 0.0754)]\sigma^l\} \quad (10)$$

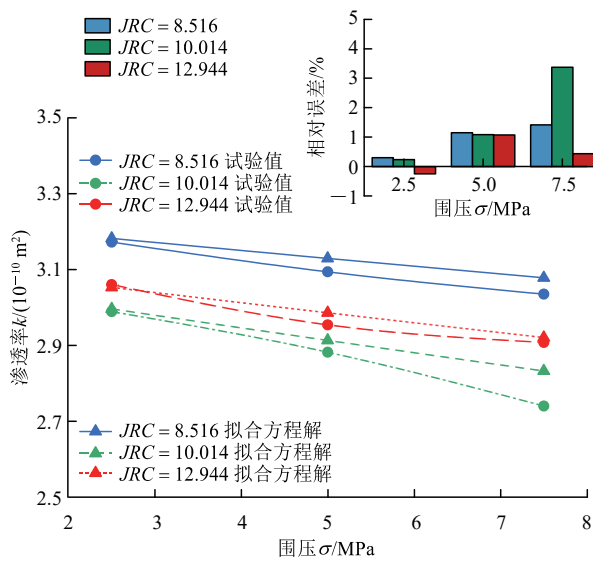
式中: l 为裂隙长度(mm); γ 为剪切应变, $\gamma = \delta / l$ 。为了验证拟合方程,对不同渗流流体条件下的试验数据进行了对比分析。拟合数据与试验数据的比较如图6所示,拟合值与试验数据之间差异较小,误差值均小于5%,说明了该拟合方程的可行性。



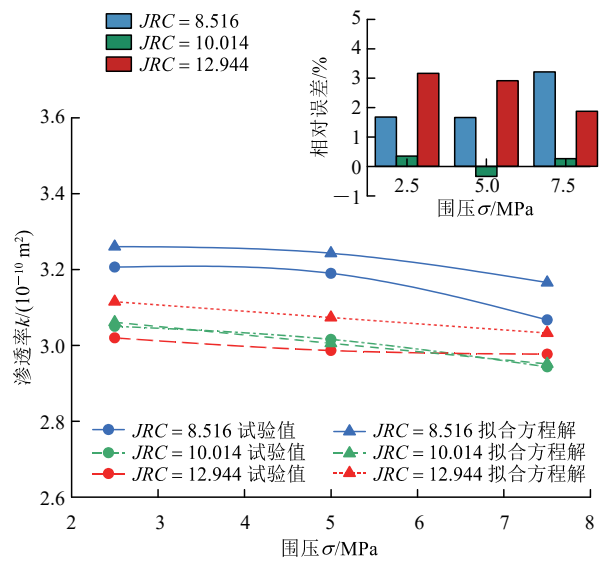
(a) 剪切位移 $\delta = 0.0$ mm
(a) Shear displacement $\delta = 0.0$ mm



(b) 剪切位移 $\delta = 1.0$ mm
(b) Shear displacement $\delta = 1.0$ mm



(c) 剪切位移 $\delta = 1.5$ mm
(c) Shear displacement $\delta = 1.5$ mm



(d) 剪切位移 $\delta = 2.0$ mm
(d) Shear displacement $\delta = 2.0$ mm

图6 裂隙渗透率拟合方程解与试验值比较

Fig.6 Comparison between fitted equation solution and experimental values of fracture permeability

4 EGS 长期热性能数值模拟研究

为研究在采热过程中裂隙剪切变形对裂隙渗透率及不同裂缝分布和水平应力比对 EGS 采热性能的影响，以 J. X. Liao 等^[35]建立的嵌入式离散裂缝网络模型为基础，引入前文推导得到的渗透系数非线性演化关系。地热储层中的流体流动涉及复杂的 THM 耦合过程，该模型通过集成 FLAC^{3D} 与 TOUGH2MP 软件构建了 THM 耦合模型，其中 FLAC^{3D} 负责力学计算，TOUGH2MP 用于模拟流体流动和热传输问题^[36]。

4.1 建模方法

4.1.1 控制方程与耦合模型

该模型将裂缝等效为连续多孔介质。多孔介质中流体流动控制方程包括连续方程、质量守恒方程、能量守恒方程、平衡方程和几何方程，详见周庆等^[37]。在产热过程中，裂缝宽度的变化取决于应力状态与裂缝压力，具体理论公式可参阅 J. X. Liao 等^[36]。注入流体(水)的热力学参数(如焓、密度、黏度)可通过 TOUGH2MP 软件内置公式计算获得，具体计算方法可参阅 J. X. Liao 等^[36]。

在剪切过程中，裂隙渗透率可通过式(10)表达，其中剪切应变 γ 和有效围压 σ' 为变量，而对于特定裂隙，其 JRC 值为常数。在模型中 $JRC = 10$ 的条件下，令，

$$A = (0.0037JRC^2 - 0.0856JRC + 0.6353) \cdot \ln(\gamma l + 1.5811 \times 10^{-7}) + (0.026JRC^2 - 0.5819JRC + 6.2234) = 0.1493 \cdot \ln(\gamma l + 1.5811 \times 10^{-7}) + 3.0044 \quad (11)$$

$$B = [(2.0868 \times 10^{-4} JRC^2 - 0.0053JRC + 0.0457) \ln(\gamma l + 1.5811 \times 10^{-7}) + (7.89 \times 10^{-4} JRC^2 - 0.0171JRC + 0.0754)] \sigma' = [0.013568 \ln(\gamma l + 1.5811 \times 10^{-7}) - 0.0167] \sigma' \quad (12)$$

式(10)可简化为

$$k = A \exp(B) \quad (13)$$

渗透率增量 Δk 可表示为

$$\Delta k = \left[\frac{\partial A}{\partial \gamma} \exp(B) + A \frac{\partial B}{\partial \gamma} \exp(B) \right] \Delta \gamma + \left[A \frac{\partial B}{\partial \sigma'} \exp(B) \right] \Delta \sigma' \quad (14)$$

式中： $\Delta \gamma$ 为剪切应变增量， $\Delta \sigma'$ 为有效围压增量。分别对 A, B 求偏导：

$$\frac{\partial A}{\partial \gamma} = \frac{0.1493l}{\gamma l + 1.5811 \times 10^{-7}} \quad (15)$$

$$\frac{\partial B}{\partial \gamma} = \frac{0.013568l\sigma'}{\gamma l + 1.5811 \times 10^{-7}} \quad (16)$$

$$\frac{\partial B}{\partial \sigma'} = 0.013568 \ln(\gamma l + 1.5811 \times 10^{-7}) - 0.0167 \quad (17)$$

4.1.2 模型验证

实际 EGS 储层包含复杂的裂隙网络，而单裂隙作为其基本构成单元，通过研究单裂隙模型中岩石基质与裂隙之间的热传导特性，可有效揭示裂隙采热的基本规律。因此，本研究构建了一个尺寸为 $100 \text{ m} \times 80 \text{ m}$ 的单裂隙数值模型模拟裂隙岩体中流体的流动，以验证裂隙网络中的热传递行为。如图 7 所示，模型中设计了一条宽度恒定为 1 mm 的裂隙，其 $X = 0$ 位置与入口对齐。模型的关键参数如表 1 所示，单裂隙模型中热传导的解析解^[36]为

$$T(x, t) = T_{inj} + (T_s - T_{inj}) \operatorname{erf} \left(\frac{\lambda_s}{w_f \rho_f C_f} \cdot \sqrt{\frac{v \rho_s C_s}{\lambda_s (vt - x)}} \right) \delta(vt - x) \quad (18)$$

式中： $T(x, t)$ 为与位置和时间相关的温度($^{\circ}\text{C}$)， T_{inj} 为注入流体的温度($^{\circ}\text{C}$)， T_s 为基质的初始温度($^{\circ}\text{C}$)， λ_s 为岩石导热系数， v 为流体速率， w_f 为裂隙孔径， ρ_f 为流体密度， C_f 为流体比热容， ρ_s 为岩石密度， C_s 为岩石比热容， t 为时间， $\operatorname{erf}()$ 为误差函数； $\delta()$ 为单位步长函数。

图 8(a)显示了第 10, 50 和 100 d 时沿裂隙的空间温度分布。并将模拟的 $x = 10, 20$ 和 50 m 不同位置的温度变化与理论解析解进行了比较(见图 8(b))。结果表明，模拟结果与解析解高度吻合，验证了该模型在裂隙岩体热传导和对流模拟中的有效性。

4.1.3 评价指标

产热相关因素是评估 EGS 性能的关键指标。热突破时间和 EGS 寿命的延长可有效减少生产温度

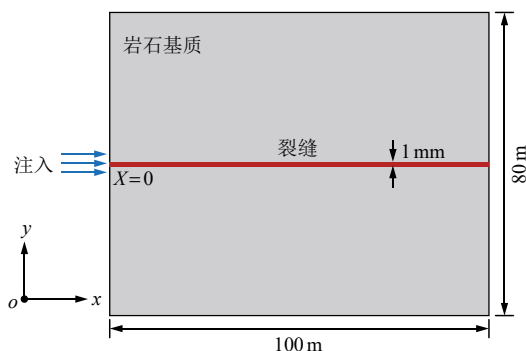
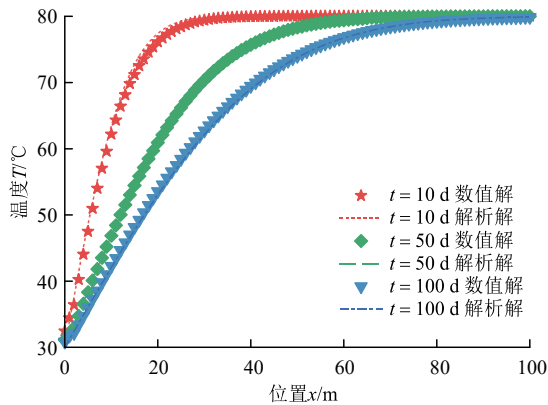


图 7 2D 单裂缝模型示意图

Fig.7 Schematic diagram of 2D model of a single fracture

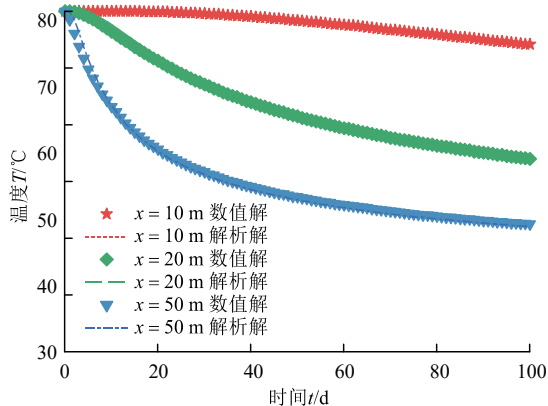
表 1 裂隙传热相关参数
Table 1 Parameters related to heat transfer in fractures

岩石密度 (rock density) $\rho_r / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	岩石导热系数 (thermal conductivity of rock) $\lambda_r / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1})$	岩石比热容 (specific heat capacity of rock) $C_r / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1})$	流体比热容 (specific heat capacity of fluid) $C_f / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1})$	流体密度 (fluid density) $\rho_f / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	流体速率 (fluid velocity) $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	初始储层温度 (initial reservoir temperature) T_i / C	注入流体温度 (injected fluid temperature) T_{inj} / C	裂隙宽度 (fracture width) w / m
2 700	3	1 000	4 200	1 000	0.01	180	30	1×10^{-3}



(a) 不同时期的空间温度演变

(a) spatial temperature evolution at different times



(b) 不同位置的时间温度演变

(b) temporal temperature evolution at different locations

图 8 不同时期空间温度和不同位置时间温度的解析解与数值解的比较

Fig.8 Comparison between analytical and numerical solutions of spatial temperature at different times and temporal temperature at different positions

的下降，有助于实现商业化开采。

(1) 热突破时间(T_b): 从系统运行开始到生产温度比初始温度下降 1 °C 所需的时间总长。

(2) EGS 寿命(T_1): 从运行开始直到生产温度下降到初始温度 60% 以下的总持续时间。

(3) 总产热能 $W^{[38]}$: 从运行启动到生产寿命结束期间生成的能量总量(J):

$$W = \int_0^t (q_{pro} h_{pro} - q_{inj} h_{inj}) dt \quad (19)$$

式中: q_{inj} , q_{pro} 分别为注入、产出速率(kg/s); h_{inj} ,

h_{pro} 分别为注入和产出流体的比焓(J/kg)。

4.2 模型概况

干热岩具有低渗透性，其热能提取通常依赖于由天然裂缝和水力压裂裂缝形成的复杂裂缝网络，因此裂缝网络的几何和渗透特性直接影响增强型地热系统(EGS)的热提取效率和整体性能^[18-20]。本研究通过数值模拟构建了一个尺寸为 400 m(长)×400 m(宽)×100 m(高)的三维模型(见图 9)。模型底面埋深为 2 000 m，顶面埋深为 1 900 m。模型初始应力沿 Z 方向为 47.5 MPa，Y 方向为 40 MPa 水平应力，X 方向水平应力根据水平应力比例计算。模型边界设定为不透水，且与外界无热交换^[37]。

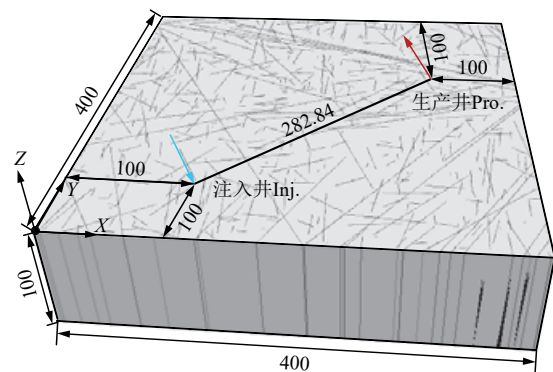


图 9 裂隙储层模型的形状与尺寸(单位: m)

Fig.9 Geometry and dimensions of the fractured reservoir model(unit: m)

模型内设置了随机分布的裂缝热储层，并采用一注一采的开采方案。注入井(Inj.)位于坐标 $X = 100 \text{ m}$, $Y = 100 \text{ m}$ ，生产井(Pro.)位于 $X = 300 \text{ m}$, $Y = 300 \text{ m}$ ，两井间距为 282.84 m。注入井深度 $Z_1 = 2 000 \text{ m}$ ，生产井深度 $Z_2 = 1 950 \text{ m}$ ，EGS 运行时间设定为 40 a。模型其他参数如表 2 所示。

4.3 模拟方案

参考 Q. H. Lei 等^[39]的研究，裂缝分布密度常数 α 取 0.10, 0.15, 0.20, 0.25。水平应力比(σ_x / σ_y)取 0.9, 1.0 和 1.1，共设计 12 个模拟案例。图 10 显示了不同密度下的裂缝分布情况。由图可知，随着分布密度常数 α 增大，裂缝数量增加，注采井间

表 2 裂缝储层模型相关计算参数

Table 2 Calculation parameters related to the fractured reservoir model

泊松比 (Poisson ratio) ν	弹性模量 (Young's modulus) E/Pa	岩石密度 (rock density) $\rho_s / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	岩石导热系数 (thermal conductivity of rock) $\lambda_s / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1})$	岩石比热容 (specific heat capacity of rock) $C_s / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1})$	流体导热系数 (thermal conductivity of fluid) $\lambda_f / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1})$	流体比热容 (specific heat capacity of fluid) $C_f / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1})$	流体密度 (fluid density) $\rho_f / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	流体黏度 (fluid viscosity) $\mu / (\text{Pa} \cdot \text{s})$
0.25	50×10^9	2 700	3	1 000	$f(p, T)^{[40]}$	$f(p, T)^{[40]}$	$f(p, T)^{[40]}$	$f(p, T)^{[40]}$
热膨胀系数 (thermal expansion coefficient) $\alpha_{th} / (\text{C}^{-1})$	岩石孔隙率 (rock porosity) $\varphi / \%$	渗透率 (permeability) k/m^2	注入速率 (injection rate) $q_{inj} / (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	初始储层温度 (initial reservoir temperature) T_s / C	注入流体温度 (injected fluid temperature) T_{inj} / C	初始注入压力 (initial injection pressure) p_{inj} / MPa	零应力裂缝宽度 (fracture width at zero stress) w_0 / m	
1×10^{-6}	0.1	式(14)	8	180	25	26	1×10^{-3}	

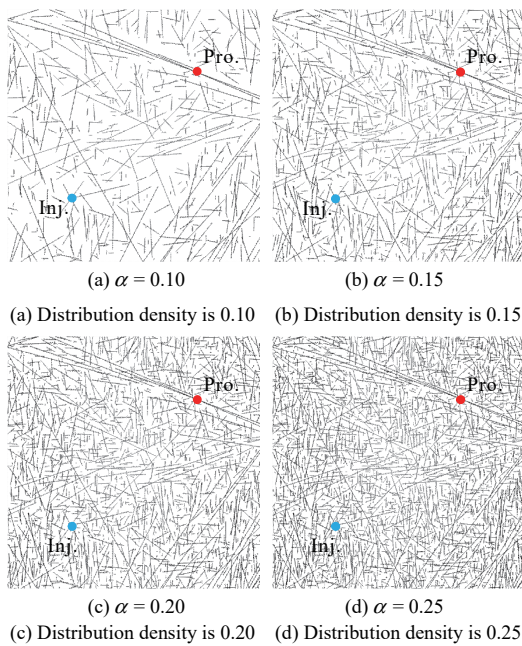


图 10 模型裂缝分布变化示意图

Fig.10 Schematic diagram of the variation in crack distribution of the model

贯穿裂缝增多，连通性增强。此外，流体注入速率与注入温度也是影响 EGS 采热性能的重要因素，为研究其影响，在水平应力比(σ_x / σ_y)取 1.1 的情况下，设置流体注入速率(q_{inj})为 6, 8, 10 kg/s，注入温度(T_{inj})为 20 °C, 25 °C, 30 °C，共增加 16 个模拟案例，通过热突破时间、EGS 寿命和总产热量 3 个指标评估储层热性能。

4.4 模拟结果分析

4.4.1 温度分布

图 11 展示了储层运行 30 a 后，在不同水平应力比和裂缝分布条件下的基质温度分布情况。在水平应力比恒定时，随着裂缝分布密度 α 增加，储层基质低温区(蓝色区域)逐渐扩大，注入井附近尤为显著。这表明高裂缝分布密度扩大了冷水在储层的渗透范围，导致储层温度整体下降。当 α 不变， α

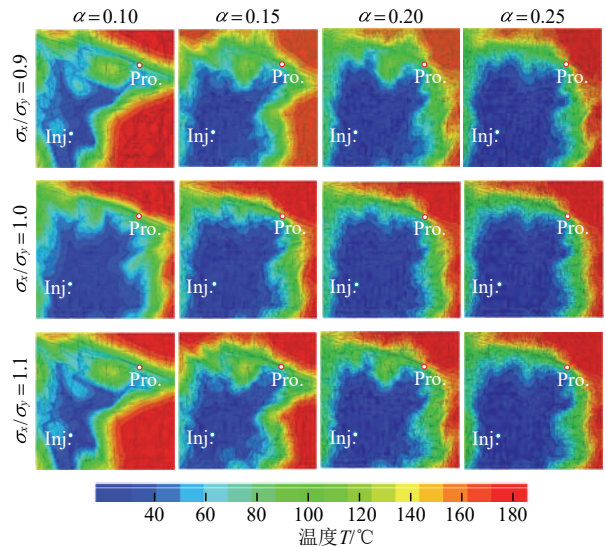


图 11 不同 σ_x / σ_y 与 α 条件下储层温度分布(30 a)

Fig.11 Distributions of reservoir temperature (30 a) under different σ_x / σ_y and α values

较小(如 0.10)时，水平应力比对温度分布的影响相对显著。随着水平应力比从 0.9 增至 1.1，注入井附近低温区(蓝色区域)呈现先扩大后缩小的趋势，且在应力比为 0.9 和 1.1 时，储层温度分布情况相似。因为应力比的变化影响着裂缝渗透性和流体流动路径，在水平应力各向异性的情况下，裂缝可能受到更大压缩，部分闭合，导致渗透率下降，流体流动受阻，热提取效率降低。当 α 较大时(如 $\alpha = 0.25$)，水平应力比对温度分布的影响相对较弱。随着水平应力比的增大，储层温度分布情况几乎不变。原因如下：(1) 裂缝分布密度增加显著增强流体流动和热交换，导致储层温度下降，低温区扩大；(2) 应力比主要通过影响渗透率间接改变热提取效率，最终导致水平应力比增加对温度分布影响较小。

4.4.2 裂缝宽度

裂缝是注采井间流体流动的主要通道，其宽度

变化直接影响通道尺寸和流体流动效率。图 12 显示了储层运行 30 a 后，不同水平应力比和裂缝分布密度条件下的裂缝宽度分布。在相同水平应力比条件下，随着 α 从 0.10 增加到 0.25，图中黄色和橙色区域(表示较大裂缝宽度)的范围逐渐扩大，表明裂缝宽度整体呈现增大的趋势。这是由于 α 越大，裂缝网络越密集，裂缝之间的相互作用越强，更容易形成连通的裂缝网络，从而促进裂缝扩展，导致裂缝宽度增大。当 α 值恒定时，随着水平应力比增大，图中蓝色和青色区域(代表较小裂缝宽度)的范围逐渐扩大，表明裂缝宽度整体呈现减小的趋势。这是由于水平应力比越大，应力越大，裂缝扩展受到的抑制越强，导致裂缝宽度减小。在案例中，无论 α 值和应力比如何变化，注入井附近裂缝宽度均相对较大，呈现出以注入井为中心的辐射状分布，因为注入流体提升了孔隙压力，降低了有效应力，从而促进了裂缝的开启和扩展。

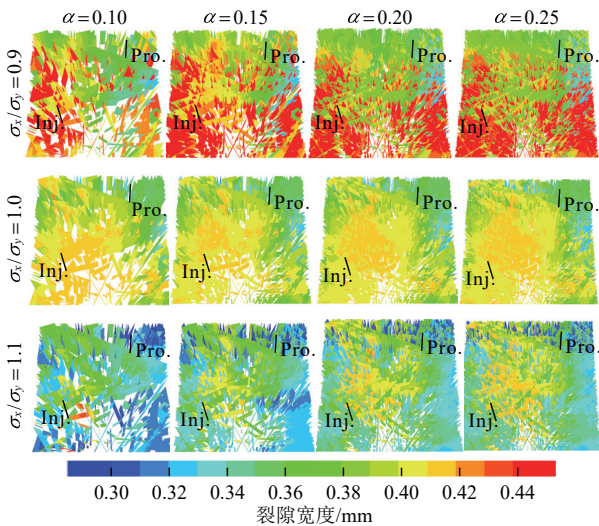


图 12 不同 σ_x / σ_y 与 α 条件下裂缝宽度分布(30 a)

Fig.12 Distributions of fracture width(30 a) under different σ_x / σ_y and α values

4.4.3 流体流动

系统运行 30 a 后，流体流线分布情况如图 13 所示。当水平应力比恒定时，随着裂缝分布密度增大，流速较快区域(深红色)范围缩小，流速分布更均匀，流体渗透范围扩大，因为裂缝连通性随密度增大而增强。当裂缝分布密度不变时，随着水平应力比的增大，流速较快区域范围先缩小后扩大，流体渗透范围先扩大后缩小。当 α 值较小时(如 $\alpha = 0.10$)，水平应力比为 0.9 和 1.1 的流体流速、流速分布和流体渗透范围较为相似，但随着 α 值增大，

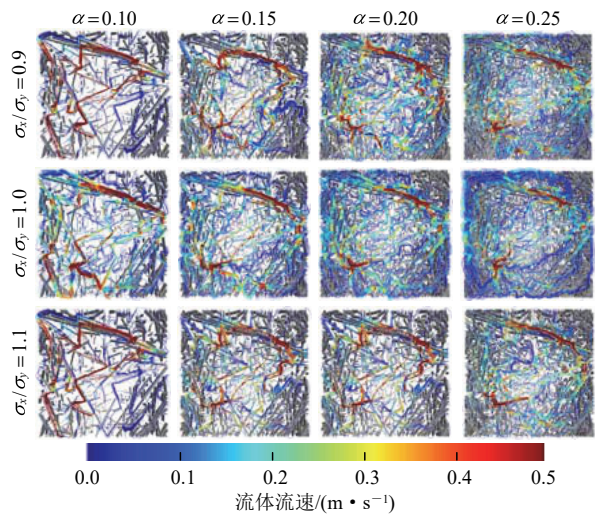


图 13 不同 σ_x / σ_y 与 α 条件下流体流线分布(30 a)

Fig.13 Distributions of fluid streamline (30 a) under different σ_x / σ_y and α values

二者差异逐渐增大。相较于水平应力比为 0.9 和 1.1，当水平应力比为 1.0 时，部分区域流速降低，整体流速分布更均匀，流体渗透范围更大，说明水平应力各向异性会抑制流体流动，从而影响储层热量提取。

4.4.4 评价指标分析

(1) 不同应力比与 α 条件下

不同水平应力比下的储层热突破时间和 EGS 寿命随裂缝分布密度改变的变化如图 14(a), (b)所示。当水平应力比为 1.0 时，随着裂缝分布密度的增大，热突破时间(Γ_b)和 EGS 寿命(Γ_1)的变化不明显， Γ_b 在 9 a 左右波动， Γ_1 在 31 a 左右波动，且均高于应力各向异性时的热突破时间与 EGS 寿命。这是因为应力各向异性增大，导致部分裂缝闭合，渗透率降低，流体流动阻力增加，从而延缓冷水到达生产井的时间，导致热突破时间和运行寿命延长。水平应力比不为 1.0 时，热突破时间和 EGS 寿命均随 α 值的增大而延长。如当水平应力比为 1.1 时，热突破时间从 $\alpha = 0.1$ 时的 2.4 a 延长到 $\alpha = 0.25$ 时的 8.8 a，延长了 6.4 a，增幅约 2.7 倍；EGS 寿命从 18 a 延长到 31 a，延长了 13 a，增幅约 72%。这是因为高裂缝分布密度增加了储层中流体与基质的接触面积，提高了热交换效率，从而延长了系统的热突破时间和运行寿命。

图 14(c)显示，储层在不同水平应力比下运行 40 a 后，总产热能随裂缝分布密度改变的变化情况。在水平应力比为 1.0(各向同性)时，总产热能随密度增加在 7.55×10^{15} J 左右波动，表明分布密度变化对

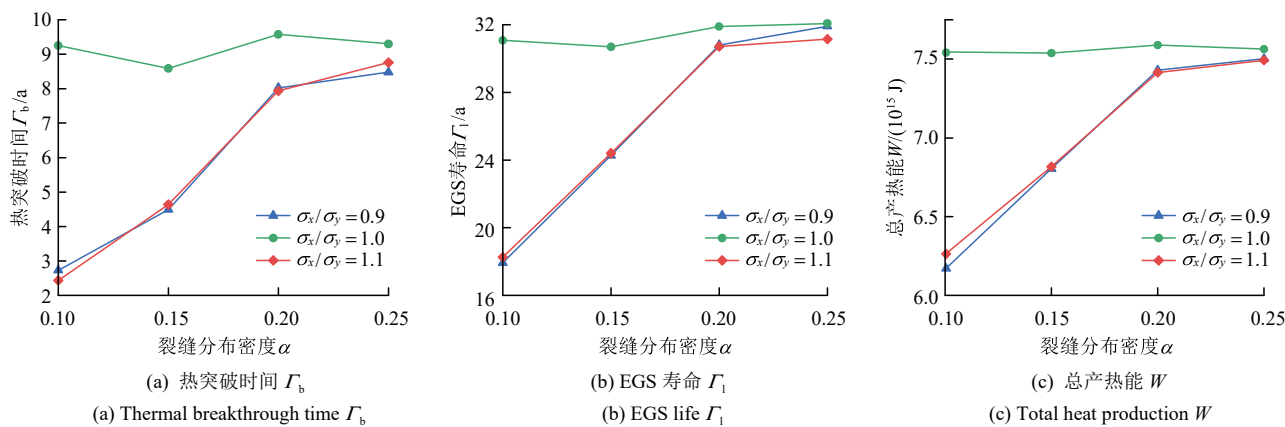


图 14 不同 σ_x / σ_y 与 α 条件下热突破时间、储层运行寿命与总产热能(40 a)
 Fig.14 Thermal breakthrough times, EGS lives and total heat productions(40 a) under different σ_x / σ_y and α values

总产热能影响可忽略不计。在水平应力各向异性时，总产热能随分布密度增加显著上升。裂缝分布密度恒定时，水平应力各向异性显著抑制储层地热提取，但抑制作用随裂缝密度增加而减弱。当 α 值较小时 ($\alpha = 0.10$)，抑制作用最为显著，运行 40 a 后的总产热能从应力比为 1.0 时的 $7.55 \times 10^{15} J$ 下降至应力比为 0.9 时的 $6.17 \times 10^{15} J$ ，下降约 18.3%。而当 $\alpha = 0.25$ 时，总产热能从应力比为 1.0 时的 $7.56 \times 10^{15} J$ 下降至应力比为 0.9 时的 $7.50 \times 10^{15} J$ ，下降约 1%。

(2) 不同流体注入速率与 α 条件下

在不同裂缝分布密度下，储层热突破时间、EGS 寿命及储层运行 40 a 后的总产热能随流体注入速率 (q_{inj}) 改变的变化规律如图 15 所示。当裂缝分布密度不变时，随着注入速率的增大，热突破时间和 EGS 寿命均呈现下降趋势，而总产热能呈现上升趋势，这与 W. W. Ma 等^[41]的研究结果一致。具体而言，较高的注入速率使冷流体更快到达生产井，加速储层内热量传递，导致热量被更快提取，从而缩短热突破时间和 EGS 寿命，同时增加总产热能。此外， α 值越大，热量传递的增强效应越显著，导致热突破时间和 EGS 寿命的降值以及总产热能的增幅更大。以 $\alpha = 0.1$ 为例，热突破时间从注入速率 6 kg/s 时的 3.1 a 缩短至 10 kg/s 时的 2.2 a，减少 0.9 a，降幅约 29%；EGS 寿命从 22.2 a 缩短至 16.3 a，减少 5.9 a，降幅约 26.6%；总产热能从 $6.01 \times 10^{15} J$ 提升至 $6.78 \times 10^{15} J$ ，增加 $0.77 \times 10^{15} J$ ，增幅约 12.8%。而当 $\alpha = 0.25$ 时，热突破时间从注入速率 6 kg/s 时的 10 a 缩短至 10 kg/s 时的 7.5 a，减少 2.5 a，降幅约 25%；EGS 寿命从 35.7 a 缩短至 27.8 a，减

少 7.9 a，降幅约 22%；总产热能从 $6.83 \times 10^{15} J$ 提升至 $8.17 \times 10^{15} J$ ，增加 $1.34 \times 10^{15} J$ ，增幅约 19.6%。

(3) 不同流体注入温度与 α 条件下

不同裂缝分布密度下的储层热突破时间和 EGS 寿命随流体注入温度 (T_{inj}) 改变的变化如图 16(a), (b) 所示。当裂缝分布密度不变时，随着流体注入温度的增大，热突破时间与 EGS 寿命均呈现上升趋势，这与 J. Zhang 等^[42]的研究结果一致。这归因于增加流体注入温度使得流体与基质之间的温差减小，削弱对流热传输，导致生产温度下降减慢，减缓冷水前沿推进，延迟热耗尽。所有案例中，流体注入温度从 20 °C 增加到 30 °C 时，热突破时间的增幅均在 1.5% 左右；当 $\alpha = 0.1$ 时，EGS 寿命从注入温度 20 °C 时的 17.8 a 延长到 30 °C 时的 18.8 a，延长了 1 a，增幅约 5.6%，并且 α 值越大，EGS 寿命的增幅越小，如当 $\alpha = 0.25$ 时，增幅缩小至约 2.4%。

图 16(c) 显示储层在不同裂缝分布密度下运行 40 a 后，总产热能随流体注入温度改变的变化情况。当裂缝分布密度不变时，随着注入温度的增大，总产热能呈现下降趋势，这与 Z. B. Liu 等^[43]的研究结果一致。因为温差减小，减少单位流体提取的热量，降低热交换效率，导致累计热输出降低，总产热能下降。并且 α 值越大，总产热能的降幅越小，当 $\alpha = 0.1$ 时，总产热能从注入温度 20 °C 时的 $6.52 \times 10^{15} J$ 下降到 30 °C 时的 $6.0 \times 10^{15} J$ ，下降了 $0.52 \times 10^{15} J$ ，降幅约 8%，而当 $\alpha = 0.25$ 时，总产热能注入温度 20 °C 时的 $7.72 \times 10^{15} J$ 下降到 30 °C 时的 $7.26 \times 10^{15} J$ ，下降了 $0.46 \times 10^{15} J$ ，降幅约 6%。这是因为高裂缝分布密度增加了储层中流体与基质的接触面积，提高了热交换效率，使得总产热能的降幅减小。

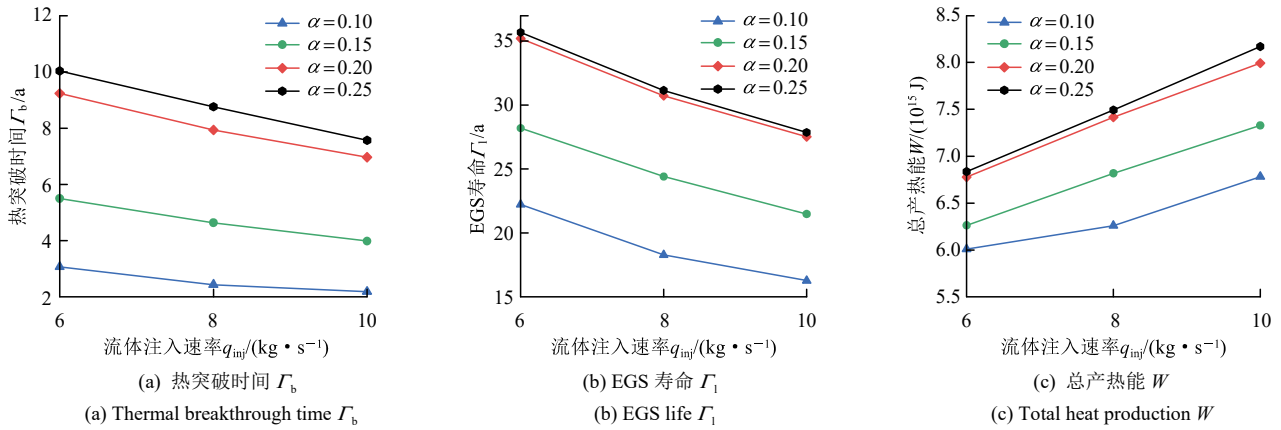


图 15 不同 q_{inj} 与 α 条件下热突破时间、储层运行寿命与总产热能(40 a)

Fig.15 Thermal breakthrough times, EGS lifes and Total heat productions(40 a) under different q_{inj} and α values

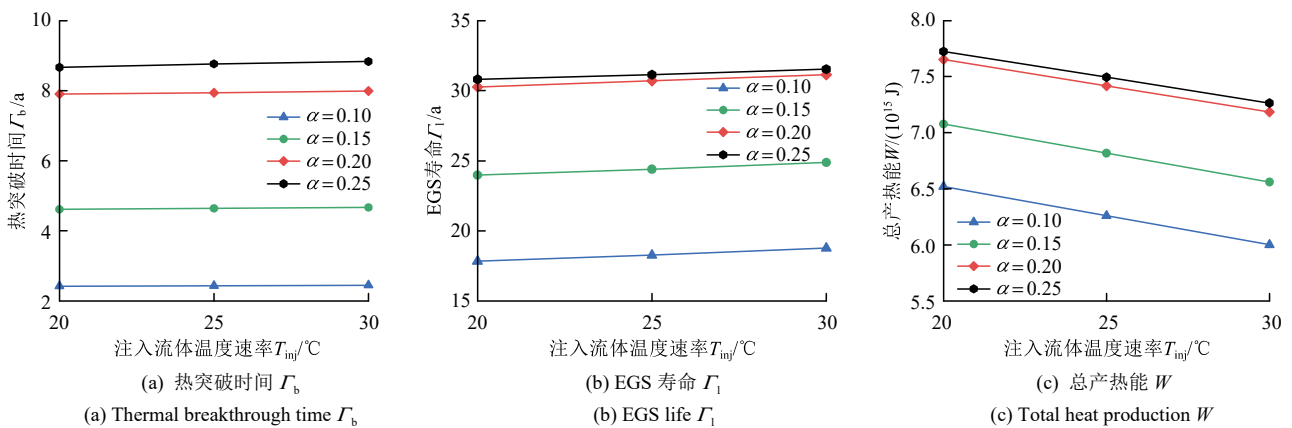


图 16 不同 T_{inj} 与 α 条件下热突破时间、储层运行寿命与总产热能(40 a)

Fig.16 Thermal breakthrough times, EGS lifes and Total heat productions(40 a) under different T_{inj} and α values

5 讨论

本研究通过采用小尺寸岩样进行试验、硅胶垫片厚度变化简易模拟裂隙剪切位移变化与等效连续介质模型分析裂缝网络，简化试验与计算过程，提供了初步评估基础。以下从试验与建模两方面进一步探讨研究局限性与改进方向：

(1) 参考唐巨鹏等^[7, 11, 26]的研究经验，采用 $\phi 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 小尺度花岗岩试样和硅胶垫片模拟裂隙剪切位移，试验可控、数据采集简便，利于分析围压、粗糙度及位移对渗透率的耦合效应。然而，其局限性在于小尺度试样难以模拟野外裂隙的复杂异质性和多尺度效应。野外裂隙常延伸数百米，涉及复杂异质性，而小试样边界效应显著， JRC 和开度变化受限，可能低估非线性流动和颗粒迁移。此外，自然环境中剪切常伴随颗粒剥落与迁移，改变裂隙粗糙度、增加流动阻力或堵塞通道，影响渗透率非线性演化。硅胶垫片假设裂隙表面在剪切中

保持相对稳定，难以反映因磨损引起的粗糙度增加或颗粒迁移导致的开度减小，可能高估渗透率。拟合模型基于小尺度静态数据，忽略大尺度几何缩放与动态表面变化，导致渗透率估算偏高，尤其在较大剪切位移下，可能高估 EGS 热突破时间、寿命和总产热能，影响 EGS 优化设计。未来研究将结合大尺度试样和伺服控制剪切渗流仪，模拟真实剪切动态行为，以验证模型、分析尺度效应对渗流和热提取效率的影响，从而优化 EGS 设计，提升干热岩开发的指导意义。

(2) 研究采用等效连续介质模型模拟裂缝网络，可有效地捕捉宏观渗流和热传输规律，同时固定 JRC 值便于参数化渗透率演化模型，提高了计算效率和可重复性。然而，假设裂隙粗糙度系数(JRC)为固定值，忽略了剪切过程中 JRC 的动态变化。在实际干热岩储层中，剪切过程往往伴随表面磨损、颗粒剥落和迁移，导致粗糙度局部增加或分布重构，从而影响流动通道的非线性变化。固定 JRC 假设无法反映这些微观机制，可能导致渗透率估算偏差。

具体而言,在剪切位移较大时,动态 JRC 增加可能增强流动阻力,降低渗透率增幅,从而导致数值模拟高估 EGS 热突破时间和寿命,或低估应力各向异性对热提取的抑制效应。未来将结合离散元方法,模拟 JRC 动态变化,优化模型,以期更准确评估储层性能。

6 结 论

针对干热岩储层裂隙在剪切变形下的渗流特性及其对增强型地热系统(EGS)长期采热性能的影响,本文结合室内粗糙裂隙剪切渗流试验与 THM 耦合数值模拟方法,研究了围压、剪切位移及裂隙粗糙度对渗透率演化规律的影响,建立了渗透系数非线性演化模型,并将其引入三维嵌入式裂缝网络模型,对不同裂隙分布密度、水平应力比及注入条件下的 EGS 长期热性能进行了模拟分析。主要结论如下:

(1) 在相同粗糙度和剪切位移条件下,裂缝渗透率随围压增大而减小,呈负指数关系, R^2 最小值为 0.954 6。在围压与粗糙度条件相同的情况下,裂缝渗透率随剪切位移增大而增大,初始阶段,渗透率迅速增大,剪切位移达到一定值后,增长速度减缓,总体呈对数关系变化, R^2 最小值为 0.991 7。当围压与剪切位移不变时,裂缝渗透率随粗糙度 JRC 呈二次函数关系式变化, R^2 最小值为 0.999 9。

(2) 研究发现,裂缝渗透率与围压、粗糙度和剪切位移之间存在显著的非线性关系,且各因素之间具有相互作用和叠加效应。基于对试验数据的拟合分析,得出了裂缝渗透率的耦合关系式,提出的公式适用于裂隙性花岗岩的渗透率估算。

(3) 提高裂缝密度可明显改善储层热性能。在所有案例中,随着 α 值的增大,储层基质低温区、裂缝宽度和流体渗透范围均呈现增大的趋势;热突破时间最高延长了 6.4 a,增幅约 2.7 倍;EGS 寿命最多延长了 13 a,增幅约 72%;总产热能最多可从 6.17×10^{15} J 增长到 7.56×10^{15} J,增幅约 22.5%。

(4) 水平应力各向异性抑制储层热量提取。在 α 值恒定时,裂缝宽度随水平应力比增大而减小。水平应力各向异性的发生,会导致储层基质低温区和流体渗透范围缩小;热突破时间、EGS 寿命和总产热能均减少,且 α 值越小,减幅越大。

(5) 裂缝分布密度的增大能有效减弱应力各向

异性对热量提取的抑制。在所有案例中,随着 α 值增加,应力各向异性导致的热突破时间、EGS 寿命及总产热能的下降幅度逐渐减小。

(6) 流体注入速率和注入温度对 EGS 采热性能都有显著影响。当流体注入速率提升时,热突破时间和 EGS 寿命均呈现下降趋势,而总产热能呈现上升趋势;当流体注入温度提升时,热突破时间和 EGS 寿命均呈现上升趋势,而总产热能呈现下降趋势。

参考文献(References):

- [1] 许天福,文冬光,袁益龙.干热岩地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.(in Chinese))
- [2] CAI X L, DENG Q, XU K, et al. Impact of dual-fracture location on heat extraction from Enhanced geothermal system in low-permeability reservoirs[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 259: 124754.
- [3] HU J J, XIE H P, LI C B, et al. Evolution mechanism of permeability of hot dry rock under coupled effect of thermal fatigue and seawater interaction during coastal geothermal development[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 189: 114061.
- [4] 于涵.增强型地热系统复杂裂缝水热运移耦合模拟方法研究与应用[博士学位论文][D].长春:吉林大学,2024.(YU han. Research and application of heat and mass transfer coupling method for complex fracture medium in enhanced geothermal system[Ph. D. Thesis][D]. Changchun: Jilin University, 2024.(in Chinese))
- [5] ZHANG C, JIANG G Z, JIA X F, et al. Parametric study of the production performance of an enhanced geothermal system: A case study at the Qiabuqia geothermal area, northeast Tibetan plateau[J]. Renewable Energy, 2019, 132: 959-978.
- [6] 韩东旭,张炜韬,焦开拓,等.基于嵌入式离散裂缝模型的增强型地热系统热-流-力-化耦合分析[J].天然气工业,2023,43(7):126-138.(HAN Dongxu, ZHANG Weitao, JIAO Kaituo, et al. Analysis of thermal-hydraulic-mechanical-chemical coupling for EGS based on embedded discrete fracture model[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(7): 126-138.(in Chinese))
- [7] 唐巨鹏,余泓浩,魏志豪,等.三向应力下花岗岩水力剪切和渗流试验研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(4):797-808.(TANG Jupeng, YU Honghao, WEI Zhihao, et al. Experimental study on hydraulic shear and seepage of granite under three-dimensional stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(4): 797-808.(in Chinese))
- [8] CORNET F H. The engineering of safe hydraulic stimulations for

- EGS development in hot crystalline rock masses[J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2021, 26: 100151.
- [9] 张洪伟, 万志军, 赵毅鑫, 等. 深层地热储层水力剪切增透机制研究进展[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(10): 3 172 - 3 185.(ZHANG Hongwei, WAN Zhijun, ZHAO Yixin, et al. A review of the research on the mechanism of hydro-shearing in geothermal reservoir[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(10): 3 172 - 3 185.(in Chinese))
- [10] JU Y, ZHANG Q G, YANG Y M, et al. An experimental investigation on the mechanism of fluid flow through single rough fracture of rock[J]. *Science China Technological Sciences*, 2013, 56(8): 2 070 - 2 080.
- [11] CHEN Y D, LIANG W G, LIAN H J, et al. Experimental study on the effect of fracture geometric characteristics on the permeability in deformable rough-walled fractures[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 98: 121 - 140.
- [12] 刘才华, 陈从新, 付少兰. 剪应力作用下岩体裂隙渗流特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(10): 1 651 - 1 655.(LIU Caihua, CHEN Congxin, FU Shaolan. Study on seepage characteristics of a single rock fracture under shear stresses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(10): 1 651 - 1 655.(in Chinese))
- [13] 甘磊, 金洪杰, 沈振中, 等. 不同粗糙度和充填隙宽下石灰岩裂缝渗流特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(增 1): 3 415 - 3 424.(GAN Lei, JIN Hongjie, SHEN Zhenzhong, et al. Experimental investigation on seepage characteristics of limestone fractures with different roughness and filling gap width[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(Supp.1): 3 415 - 3 424.(in Chinese))
- [14] CAO C, XU Z G, CHAI J R, et al. Radial fluid flow regime in a single fracture under high hydraulic pressure during shear process[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 579: 124142.
- [15] GONG F C, GUO T K, SUN W, et al. Evaluation of geothermal energy extraction in Enhanced Geothermal System(EGS) with multiple fracturing horizontal wells(MFHW)[J]. *Renewable Energy*, 2020, 151: 1 339 - 1 351.
- [16] ZINSALO J M, LAMARCHE L, RAYMOND J. Performance analysis and working fluid selection of an organic rankine cycle power plant coupled to an enhanced geothermal system[J]. *Energy*, 2022, 245: 123259.
- [17] DUAN X Y, HUANG D, LEI W X, et al. Investigation of heat extraction in an enhanced geothermal system embedded with fracture networks using the thermal-hydraulic-mechanical coupling model[J]. *Energies*, 2023, 16(9): 3 758.
- [18] 王丹丹, 党志伟, 石哲伟, 等. 裂缝分布及井间距对增强型地热系统采热性能的影响[J]. *地球物理学进展*, 2024, 39(3): 975 - 989.(WANG Dandan, DANG Zhiwei, SHI Zhewei, et al. Effect of fracture distribution and well spacing on heat recovery performance of enhanced geothermal system[J]. *Progress in Geophysics*, 2024, 39(3): 975 - 989.(in Chinese))
- [19] GUDALA M, GOVINDARAJAN S K, TARIQ Z, et al. Numerical investigations and evaluation of a puga geothermal reservoir with horizontal wells using a fully coupled thermo-hydro-geomechanical model(THM) and EDAS associated with AHP[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 228: 212035.
- [20] LIU J, XUE Y, ZHANG Q, et al. Coupled thermo-hydro-mechanical modelling for geothermal doublet system with 3D fractal fracture[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 200: 117716.
- [21] 刘日成, 尹乾, 杨瀚清, 等. 恒定法向刚度边界条件下三维粗糙节理面循环剪切力学特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(6): 1 092 - 1 109.(LIU Richeng, YIN Qian, YANG Hanqing, et al. Cyclic shear mechanical properties of 3D rough joint surfaces under constant normal stiffness(CNS) boundary conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(6): 1 092 - 1 109.(in Chinese))
- [22] 刘杰, 钟伦伟, 钟振, 等. 恒定法向刚度边界条件下受剪岩石裂隙非线性渗流特性的数值模拟研究[J]. *岩土力学*, 2025, 46(6): 1 919 - 1 933.(LIU Jie, ZHONG Lunwei, ZHONG Zhen, et al. Numerical simulation of nonlinear flow behavior of fractures in rock subjected to shear under constant normal stiffness boundary conditions[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2025, 46(6): 1 919 - 1 933.(in Chinese))
- [23] 蔚立元, 杨瀚清, 王晓琳, 等. 循环剪切作用下三维粗糙裂隙非线性渗流特性数值模拟研究[J]. *岩土力学*, 2023, 44(9): 2 757 - 2 766.(YU Liyuan, YANG Hanqing, WANG Xiaolin, et al. Numerical study on nonlinear hydraulic properties of three-dimensional rough joints under cyclic shear conditions[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(9): 2 757 - 2 766.(in Chinese))
- [24] TSE R, CRUDEN D M. Estimating joint roughness coefficients[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1979, 16(5): 303 - 307.
- [25] RENAUD S, SAICHI T, BOUAANANI N, et al. Roughness effects on the shear strength of concrete and rock joints in dams based on experimental data[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(10): 3 867 - 3 888.
- [26] 林志南, 冯世宏, 张强, 等. 高应力和高渗压下饱和完整砂岩三轴剪切-渗流耦合特性试验研究[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2023, 54(6): 2 419 - 2 430.(LIN Zhinan, FENG Shihong, ZHANG Qiang, et al. Experimental study of triaxial shear-seepage coupling characteristics of saturated intact sandstone under high stress and high seepage pressure[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2023, 54(6): 2 419 - 2 430.(in Chinese))
- [27] 钟承昊. 超临界地热条件下石英溶解沉淀规律及对岩层渗透性影响研究[博士学位论文][D]. 长春: 吉林大学, 2024.(ZHONG Chenghao. Study on quartz dissolution/precipitation law and its effect on stratum permeability under supercritical geothermal conditions[Ph. D.

- Thesis[D]. Changchun: Jilin University, 2024.(in Chinese))
- [28] 高雪峰. 花岗岩非均质裂隙的水热产出特征及模型研究[博士学位论文][D]. 长春: 吉林大学, 2023.(GAO Xuefeng. Study on the characteristics and models of hydrothermal production in heterogeneous fractures of granite[Ph. D. Thesis][D]. Changchun: Jilin University, 2023.(in Chinese))
- [29] 冯宇迪, 陈世江, 雷旺, 等. 不同粗糙度单裂缝渗流规律研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(2): 46 - 51.(FENG Yudi, CHEN Shijiang, LEI Wang, et al. Study on seepage law of single fracture with different roughness[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2022, 49(2): 46 - 51.(in Chinese))
- [30] 王刚, 蒋宇静, 王渭明, 等. 新型数控岩石节理剪切渗流试验台的设计与应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3 200 - 3 208.(WANG Gang, JIANG Yujing, WANG Weiming, et al. Development and application of an improved numeric control shear-fluid coupled apparatus for rock joint[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 3 200 - 3 208.(in Chinese))
- [31] GAN L, LIU Y, XU T, et al. Experimental investigation of the seepage characteristics of a single fracture in limestone with different roughness and seepage fluids[J]. Journal of Hydrology, 2023, 622: 129699.
- [32] DANG W G, WU W, KONIETZKY H, et al. Effect of shear-induced aperture evolution on fluid flow in rock fractures[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 114: 103152.
- [33] ZHAO Z H, JING L R, NERETNIEKS I. Particle mechanics model for the effects of shear on solute retardation coefficient in rock fractures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 52: 92 - 102.
- [34] 陈跃都, 梁卫国, 杨健锋, 等. 含水压粗糙岩石裂隙有效应力规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增 2): 3 850 - 3 860. (CHEN Yuedu, LIANG Weiguo, YANG Jianfeng, et al. Study on the effective stress characteristic of rough rock fractures with water pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(Supp.2): 3 850 - 3 860.(in Chinese))
- [35] LIAO J X, XU B, MEHMOOD F, et al. Numerical study of the long-term performance of EGS based on discrete fracture network with consideration of fracture deformation[J]. Renewable Energy, 2023, 216: 119045.
- [36] LIAO J X, HU K, 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.
- [37] 周庆, 廖建兴, 徐斌, 等. 裂缝分布对 CO₂-EGS 热提取的影响研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(1): 117 - 128.(ZHOU Qing, LIAO Jianxing, XU Bin, et al. Effects of fracture distribution on heat extraction through CO₂-EGS[J]. Coal Geology and Exploration, 2024, 52(1): 117 - 128.(in Chinese))
- [38] ZHONG C H, XU T F, YUAN Y L, et al. The feasibility of clean power generation from a novel dual-vertical-well enhanced geothermal system(EGS): A case study in the Gonghe Basin, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 344: 131109.
- [39] LEI Q H, LATHAM J P, TSANG C F. The use of discrete fracture networks for modelling coupled geomechanical and hydrological behaviour of fractured rocks[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 85: 151 - 176.
- [40] KENI Z, HAJIME Y, KARSTEN P. TMVOC-MP: a parallel numerical simulator for three-phase non-isothermal flows of multicomponent hydrocarbon mixtures in porous/fractured media[R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2008.
- [41] MA W W, XU Y F, AHMED S F, et al. Production performance optimization of water-enhanced geothermal system based on effective time-averaged volume[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236: 121525.
- [42] 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.
- [43] LIU Z B, WU M, ZHOU H Y, et al. Performance evaluation of enhanced geothermal systems with intermittent thermal extraction for sustainable energy production[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 434: 139954.