

• 水工岩石力学 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202500156



本刊网刊

恒定法向刚度下裂隙网络剪切-渗流特性数值模拟研究

蔚立元, 王晓琳*, 杨瀚清, 刘日成, 李树忱

(中国矿业大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要:为揭示裂隙网络剪切损伤演化及其对渗流行为的控制机制,明确剪切位移对裂隙网络渗透率各向异性与流体通道演化的影响规律,本研究建立了含断层的3维离散裂隙网络(DFN)模型,模拟了恒定法向刚度(CNS)边界条件下DFN内断层剪切的过程,分析了开度各向异性、法向刚度及边界应力对裂隙网络的剪切损伤特性的影响机制,开展了不同流动方向的DFN内流体流动数值模拟研究,获取了断层剪切过程中含断层DFN模型的流体分布状态和渗流各向异性特性,阐明了断层剪切“增透”与裂隙网络压缩“降透”的竞争作用机制,受剪切位移、法向刚度及边界应力共同调控。结果表明:在相同的剪切位移 u_s 下,开度标准差 σ_0 增大,DFN的损伤率逐渐降低,DFN和断层中的流体因开度空间异质性沿局部高渗透通道集中流动(沟槽流)的现象均会更加明显;边界刚度和应力 σ_y 的增加会加剧DFN的损伤过程,在断层剪切位移从0增加至40 mm时,DFN的损伤率增量最大;随着边界刚度和应力的逐渐增大,DFN和断层中的流体流动更加集中;断层的剪切会使得流体沿 z 轴方向的渗透系数显著升高,当 u_s 大于160 mm时,由于断层剪切产生的法向应力和剪切应力已远大于 σ_y, σ_x 对模型渗透系数的影响已被极大地弱化;当流体沿 z 轴方向流动,在 $u_s=200$ mm时,所有边界条件下的模型中流体在断层中的流量占比均超过了0.94,模型中流体几乎全部经断层流过。

关键词:裂隙岩体;渗透率;剪切;离散裂隙网络

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2026)01-0031-15

增强型地热系统(EGS)利用工程技术人为地在地下高温岩体内建造裂隙网络或改造原有裂隙网络,是干热岩型地热能的主要开发途径^[1-3]。水压致裂是EGS开发干热岩型地热能的常用手段,但是在高地应力作用下会产生裂隙闭合、渗透系数降低、地热采收率不高等工程问题^[4-6]。为解决这些难题,充分发挥干热岩储层粗糙裂隙的自支撑作用,有工程采用水力剪切刺激诱发水压致裂产生裂隙滑移,进而实现储层增透^[7-9]。美国沙漠峰(desert peak)地热田^[10-11]、美国盖瑟尔斯(Geysers)地热田^[12]、法国苏尔茨(Soultz)地热田^[13]等EGS工程都应用了水力剪切技术,储层渗透性都得到了较大提高。

为探究水力剪切对于裂隙岩体渗透性的影响机制,国内外学者开展了大量室内试验与数值模拟计算。Esaki等^[14]设计并研发了一种新型实验室室内剪切流耦合试验系统,用以研究节理剪切变形和剪胀对节理岩体渗透率的影响;Ji^[15]研发了常温下岩石剪切-渗流试验

机,并开展了类岩石材料、岩石材料及煤的剪切-渗流耦合实验;夏才初等^[16]自主研发了多功能岩石裂隙全剪切-渗流耦合试验系统,实现了常法向荷载、常法向位移、常法向刚度3种法向边界控制方式,揭示了应力-渗流条件下岩石裂隙的长期力学、渗流特性规律及其破坏机制,解决了用位移信号反馈控制荷载的伺服控制中交叉控制的技术难题。许江等^[17]研发了密封效果良好的剪切渗流耦合试验装置,可实现不同荷载加载速率与不同位移加载速率的加载方式。单裂隙在恒定法向刚度条件下的剪切滑移过程中,会发生剪胀,引起开度的增加和渗透系数的增大^[18-20]。然而,剪胀作用也会导致施加在垂直于滑移裂隙面方向的应力不断增大,进而降低周围交叉裂隙或裂隙网络的渗透系数^[21]。Liu等^[22]从裂隙网络中提取了交叉裂隙,计算了剪切过程中表面粗糙度对渗透率和临界水力梯度演化的影响,分析了恒定法向刚度(CNS)边界条件下提高渗透率的剪切裂隙和降低渗透

收稿日期:2024-04-25 修回日期:2025-05-02 网络出版日期:2025-05-19

基金项目:国家自然科学基金项目(U24B2040;52179118);江苏省基础研究计划重点项目(BK20243050)

作者简介:蔚立元(1982—),男,教授,博士。研究方向:岩石力学与地下工程。E-mail:yuliyuan@cumt.edu.cn

*通信作者:王晓琳, E-mail:wangxiaolin@cumt.edu.cn

率的压缩邻近裂隙所起的竞争作用。Huang 等^[9]提出了评估剪切过程中 3 维自仿射粗糙裂隙渗透率的预测模型,分析了裂隙开度和渗透率随剪切位移的演变规律。

以上研究在一定程度上阐明了常温下单裂隙岩体剪切过程中的剪切-渗流机理,但裂隙网络的剪切-渗流特性演化规律仍很模糊。因此,为提高干热岩储层内裂隙网络的连通率,增大注入液体与地下高温热源的热交换面积,从而提高采收效率,有必要明确恒定法向刚度边界条件下裂隙岩体的剪切损伤特征与非线性渗流规律。本研究基于概率统计理论,建立了包含断层的 3 维离散裂隙网络模型,模拟了恒刚度条件下断层的剪切过程中裂隙网络的损伤及渗流过程。通过生成具有不同均值和标准差的离散裂隙网络模型,研究了开度各向异性、不同法向刚度及边界应力条件下裂隙网络的剪切损伤特征,评估了不同断层剪切位移下离散裂隙网络的线性渗透特性,探究了断层剪切“增透”与裂隙网络损伤“降透”的竞争作用机制。

1 考虑剪切损伤的 3 维离散裂隙网络模型构建

1.1 建模依据

干热岩的埋深较大,在周围岩体的约束作用下,其变形会受到一定程度的限制,因此,本研究采用 CNS 边界条件来模拟断层的剪切过程。图 1 为带有断层的离散裂隙剪切前后的 3 维网络模型。假定剪切时断层处于闭合状态,断层左、右匹配良好,即断层的开度为 0;含断层的 3 维裂隙网络 (DFN) 模型在 x 轴方向受 CNS 边界条件约束,所承受的初始法向应力为 σ_x ,在 y 轴方向受恒定的边界应力 σ_y ,在 z 轴方向受剪切力 σ_z 。在水力剪切实施过程中,右部岩块沿 z 轴负方向发生剪切,产生的剪切位移为 u_s ,法向位移为 v_n 。法向位移的增大势必会导致作用在 3 维 DFN 上的 σ_x 显著增加,由于难以模拟应力改变导致 DFN 中裂隙滑动,本研究假设断层剪切过程中带来的应力增加只会导致裂隙的闭合,以此来表征断层剪切过程中 DFN 的剪切损伤。

本文建立了含断层的 3 维 DFN 模型,用于研究断层剪切过程中 DFN 的损伤特征及水力学响应。该模型包含 15 条圆盘裂隙,根据裂隙的长度将裂隙分为 3 组,3 组裂隙的半径分别为 0.3 m、0.4 m 和 0.5 m,每组的裂隙半径相同。裂隙的位置和朝向符合均匀分布。该模型的几何尺寸为 $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$,本研究分别建立了 u_s 为 40、80、120、160、200 mm 的模型,见附录 A 图 A1,并沿着模型的中心提取了一个 $1 \times 1 \times 0.8 \text{ m}^3$ 的小尺寸模型 (图 A1(a) 黄色区域),用于探究不同断层剪切位移下 3 维 DFN 的损伤特征和水力学特性。

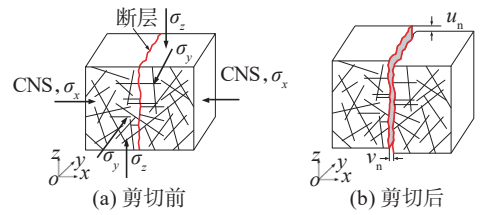


图 1 水力剪切诱发断层剪切示意图

Fig. 1 Schematic diagram of shearing process of fault induced by hydro-shearing

为了描述含断层 3 维 DFN 中断层的剪切过程,先采用连续随加 (SRA) 算法,建立了具有自相似特性的 3 维粗糙裂隙面的貌形图,如图 2 所示,并基于 Indratana 的解析模型,模拟了法向刚度 k_n 为 1.00 GPa/m 的 CNS 条件下裂隙的剪切过程。该裂隙面的几何尺寸为 $0.2 \times 0.2 \text{ m}^2$,裂隙面剪切过程中的力学响应特征如图 3 所示。随着剪切位移的增大,裂隙面的法向位移及作用在裂隙面上的法向应力逐渐增加,作用在裂隙面上的剪切应力在剪切位移为 7.5 mm 时达到峰值,随后逐渐降低。但上述方法仅能模拟小尺度的裂隙剪切过程,无法表征大尺度 ($1 \times 1 \text{ m}^2$) 下断层的剪切特征。

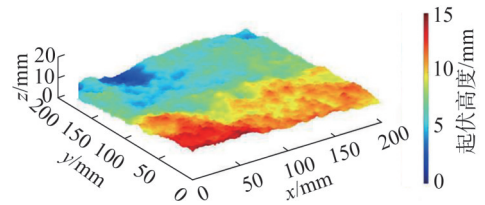
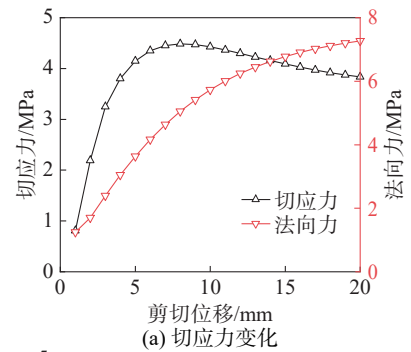
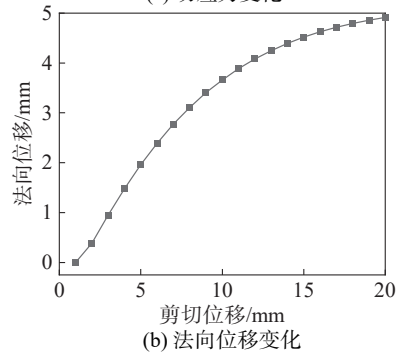


图 2 尺寸为 $0.2 \times 0.2 \text{ m}^2$ 的 3 维裂隙面形貌

Fig. 2 Three-dimensional fracture surface topography with dimensions of $0.2 \times 0.2 \text{ m}^2$



(a) 切应力变化



(b) 法向位移变化

图 3 裂隙的剪切响应特征

Fig. 3 Shear response characteristics of fractures

由于裂隙面和裂隙的剪切响应具有自相似的特性,裂隙的剪切响应与裂隙表面的最大起伏体高度近似成正比。裂隙表面的最大起伏体高度 L 随裂缝面积 S 增大的变化趋势如图 4 所示,随着几何尺寸的增大,最大起伏体高度会逐渐增大,并最终趋于平缓。拟合最大起伏体高度与裂隙面积的关系曲线,两者近似呈对数关系,曲线判定系数 R^2 为 0.876 5。根据所得到的对数关系式,对裂隙面几何尺寸及表面高程信息进行放大,当面积为 $10\ 000\ \text{mm}^2$ 时,即本研究中断层的面积时,断层面上最大起伏体高度为 14.63 mm。含断层 3 维 DFN 中断层的剪切响应包括剪切应力、法向应力和法向位移^[23],计算式如下:

$$\frac{R_{\text{fracture}}}{R_{\text{fault}}} \propto \frac{L}{H_{\text{fault}}} \quad (1)$$

式中, R_{fracture} 和 R_{fault} 分别表示裂隙和断层的剪应力、法向应力和法向位移的剪切响应, L 和 H_{fault} 分别表示裂隙和断层的最大起伏体高度, \propto 表示正比于。

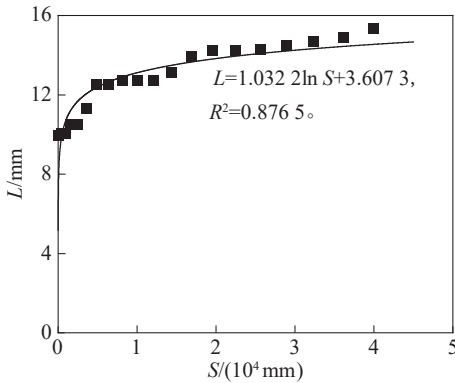


图 4 裂隙表面最大起伏体高度与裂隙面积的关系曲线
Fig. 4 Relationship between the maximum height of asperities on the fracture surface and the fracture area

由式(1)计算得到的断层剪切响应见表 1。

表 1 考虑尺寸效应后的断层剪切响应

Tab. 1 Shear response of the fault with considering size effect

剪切位移/mm	法向刚度/(GPa·m ⁻¹)	边界固定应力/MPa	剪应力/MPa	法向应力/MPa	法向位移/mm
40			4.668 2	3.045 5	1.817 1
80			5.508 5	5.047 7	3.819 3
120	0.25	1.0	5.280 4	6.241 2	5.012 8
160			4.947 9	6.908 1	5.679 7
200			4.708 6	7.264 8	6.036 4

在未发生剪切位移时,假定断层的左、右面为相互匹配的。在任一 u_s 下,断层的开度 b_f 可根据式(2)求得^[24-26]:

$$b_f(z, y) = \begin{cases} Z(z+u_s, y) - Z(z, y) + v_n \cdot Z(z+u_s, y) < Z(z, y) + v_n; \\ 0, Z(z+u_s, y) \leq Z(z, y) + v_n \end{cases} \quad (2)$$

式中, $Z(z, y)$ 为初始断层表面起伏体高度, $Z(z+u_s, y)$ 为产生剪切位移后的断层表面起伏体高度。

含断层 3 维 DFN 模型中的裂隙为表面粗糙的裂隙,本模型不考虑裂隙面的粗糙度,仅研究由裂隙粗糙度导致的开度分布不均匀性对模型水力学特性的影响。假定裂隙开度场的初始状态(即未发生剪切时)符合截断高斯分布,并具有空间相关性:

$$f(b) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(b-\mu_0)^2}{2\sigma_0^2}}, & b \geq 0; \\ 0, & b < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, μ_0 和 σ_0 分别为开度的均值和标准差。

分别生成符合均值 μ_0 为 1、2、3、4 m, 标准差 σ_0 为 0.3、0.6、0.9、1.2 mm 分布的特征开度场(附录 A 图 A2~A5), 并将其作为含断层 3 维 DFN 模型中裂隙的初始孔径分布。0~4 mm 区间可包含大多数自然界中常见的粗糙裂隙开度。

模型边界处的三轴应力 σ_x 、 σ_y 和 σ_z 可以在局部坐标系 $o'-x'y'z'$ 下转化为单个裂隙上的正应力 σ_n , 如图 5 所示。原空间坐标系 $o-xyz$ 下的裂隙面单位法向量 z' , 根据坐标变换计算如下:

$$z' = \left(\begin{array}{c} \frac{\tan \theta}{\sqrt{\tan^2 \theta + \tan^2 \alpha + 1}}, \\ \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\tan^2 \theta + \tan^2 \alpha + 1}}, \\ \frac{-1}{\sqrt{\tan^2 \theta + \tan^2 \alpha + 1}} \end{array} \right) \quad (4)$$

式中, θ 和 α 分别为裂隙面相对于 x 轴和 y 轴的角度。

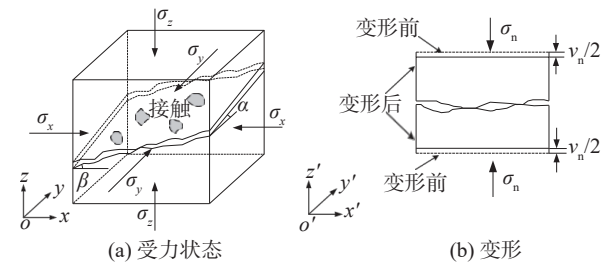


图 5 裂隙受力状态及变形示意图

Fig. 5 Schematic diagram of stress state and deformation of fracture

然后,使用式(5)计算作用在单个裂隙上的 σ_n :

$$\sigma_n = \cos^2 \langle z', x \rangle \sigma_x + \cos^2 \langle z', y \rangle \sigma_y + \cos^2 \langle z', z \rangle \sigma_z \quad (5)$$

式中, $\cos \langle z', x \rangle$, $\cos \langle z', y \rangle$ 和 $\cos \langle z', z \rangle$ 分别为坐标系 $o'-x'y'z'$ 中的 z' 和空间坐标系 $o-xyz$ 中的单位法向量 x 、 y 和 z 之间的余弦角。

由于裂隙的剪切位移可以忽略不计, σ_n 作用下裂隙产生的法向位移 v_n 可根据 Bandis 双曲函数进行计算^[27]:

$$\sigma_n = k_0 \cdot \frac{v_n}{1 - v_n/v_{nmax}} \quad (6)$$

式中, k_0 为初始法向刚度, v_{nmax} 为裂隙开度 b 的 0.9 倍的最大裂隙闭合值(即 $v_{nmax}=0.9b$)。随着 σ_n 的增大, v_n 先显著增大, 后缓慢增长, 增长速率逐渐变小。在 CNS 条件下断层的剪切过程中, 法向应力 σ_x 随法向位移的增大而增大, 进而导致 σ_n 的增大。因此, v_n 随剪切过程中 σ_n 的变化而变化。每个断层剪切位移下模型中每条单裂隙的孔径分布可根据 v_n 的结果进行计算。

1.2 流体流动数值模拟计算

干热岩基岩为致密的低渗岩体, 储层改造后产生的裂隙网络或剪切断层为流体提供了主要的流动通道。相较于裂隙网络或断层, 干热岩基岩的渗透系数几乎可忽略不计。因此, 本研究只考虑了流体在裂隙网络和断层中的流动, 不考虑流体在基岩中的流动。在进行数值模型建立时, 删去表征基岩的域, 仅保留断层和 3 维 DFN。流体在裂隙和断层中的流动可通过求解雷诺方程进行模拟:

$$\frac{\partial}{\partial x'} \left(\frac{\rho g b^3}{12\mu} \cdot \frac{\partial h}{\partial x'} \right) + \frac{\partial}{\partial y'} \left(\frac{\rho g b^3}{12\mu} \cdot \frac{\partial h}{\partial y'} \right) = 0 \quad (7)$$

式中, h 为压力水头, μ 为动力黏度, ρ 为流体密度, g 为重力加速度。开度的各向异性可以通过在式(7)中裂隙开度 b 的值进行考虑, 这种方法在模拟流体流经粗糙裂隙时被广泛采用。雷诺方程的求解在数值模拟软件 COMSOL Multiphysics 中完成。

图 6 描述沿 x 轴方向的流动(垂直于剪切方向)和沿 y 轴方向的流动(平行于剪切方向)下两种边界条件。在入口边界设置恒定压力为 1 MPa 的边界条件, 在出口边界设置恒定压力为 0 的边界条件, 其余边界设置为不可渗透边界。流体介质假定为水, ρ 为 998.2 kg/m^3 , μ 为 0.001 Pa/s 。

最终所建立的数值模型为断层面和若干个裂隙面组成的几何模型, 无 3 维域单元。因此, 在进行网格划分时, 采用自由三角形网格划分数值模型, 最大单元为 6 mm , 最小单元为 0.2 mm , 最大单元增长率为 1.2, 曲率因子为 0.2, 狭窄区域最小单元格长度为 1 mm 。图 7 为 u_s 为 40 mm 时的局部模型网格划分, 在裂隙与裂隙及裂隙与断层相交处, 需进行网格加密, 以提高模型的收敛性和计算结果的准确性。

在完成流体在含断层 3 维 DFN 中的流动的模拟后, 对模型出口边界的局部流量进行线积分, 以获取流经整个含断层 3 维 DFN 模型中的体积流量 Q 。模型的等效渗透系数 K 可由式(8)求得:

$$K = \frac{Q\mu}{AVP} \quad (8)$$

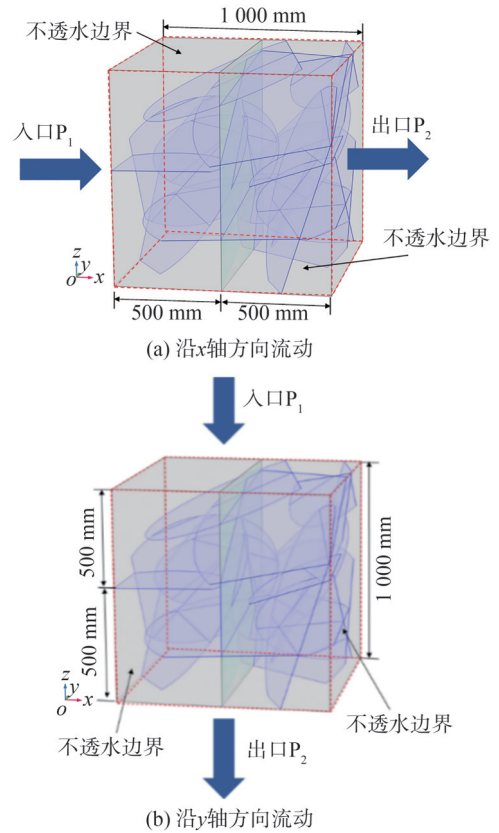


图 6 流体流动的边界条件

Fig. 6 Boundary conditions for fluid flow

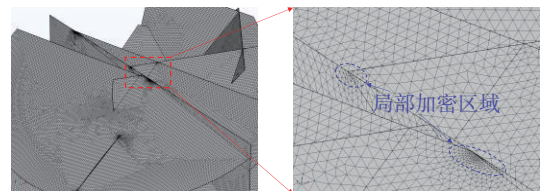


图 7 数值模型网格划分($u_s=40 \text{ mm}$)

Fig. 7 Meshing of the numerical model ($u_s=40 \text{ mm}$)

式中, A 为截面面积, ∇P 为进、出口边界之间的压力梯度。

2 结果与讨论

2.1 考虑 DFN 开度各向异性的 DFN 剪切损伤特征

裂隙和断层的开度空间为流体提供主要渗流通道, 开度分布明显影响含断层 3 维 DFN 中的流体流动。断层剪切过程中, 微凸体相互爬升引起剪胀, 法向位移增加, 且在恒定法向刚度条件下, 法向位移受周围岩体限制, 导致法向应力和剪切力不断增大。随着断层剪切位移的增加, σ_x 和 σ_z 均会不断增加, 作用在 DFN 中各条裂隙上的法向应力 σ_n 也会逐渐增加, 各条裂隙的开度也会逐渐减小。此处, 使用参数裂隙损伤率 R_D 用以表征 DFN 中裂隙的损伤程度, R_D 可通过式(9)求得:

$$R_D = \frac{\mu' - \mu_0}{0.9\mu_0} \times 100\% \quad (9)$$

式中, μ' 为任一 u_s 下 DFN 所有裂隙开度的平均值。

断层剪切过程中各个模型的 μ' 的演化过程如图 8 所示。随着 u_s 的不断增大, 所有模型的 μ' 均呈现不断降低的趋势。当 u_s 在 $[0, 40]$ mm 区间里, DFN 有最大的裂隙闭合量, 这与断层的剪切相应特征相吻合的。当 u_s 从 0 增加到 40 mm 时, σ_x 和 σ_z 均急剧增长, 由此导致的 σ_n 的大幅增长会带来裂隙开度闭合量的显著增加。当 u_s 从 40 mm 增加到 80 mm 时, 相较于初始的 40 mm 剪切过程, μ' 的降低速率轻微地变缓, σ_x 持续增长, σ_z 逐渐

增长到峰值。因此, 作用在 DFN 中裂隙上 σ_n 的增长也会变缓, 裂隙开度的闭合速率会相应地降低。当 u_s 大于 80 mm 时, 断层应切力到达峰后阶段, 随着 u_s 的增长, σ_z 开始逐渐降低。由于法向位移的不断增长, σ_x 继续缓慢增长(图 8)。由于 σ_x 的增长量远大于 σ_z 的减小量, σ_n 仍保持增长的趋势, 但增长速率相较于前两个阶段已有了很大程度的降低。因此, 当 u_s 大于 80 mm 时, u_s 的不断增长会导致 DFN 中裂隙的开度持续降低, 但降低速率会逐渐变小。

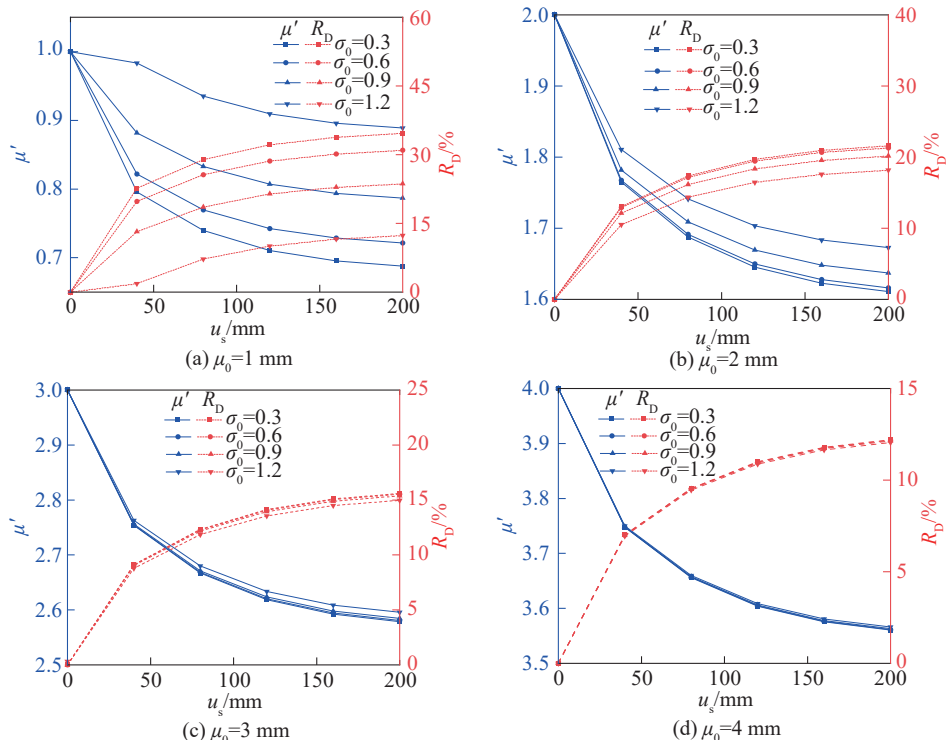


图 8 不同 μ_0 和 σ_0 下 μ' 及 R_D 随剪切位移的变化规律

Fig. 8 Variations of μ' and R_D with shear displacement under different μ_0 and σ_0

随着 u_s 的增加, 所有模型的 R_D 均会逐渐增加, DFN 中裂隙承受的剪切损伤逐渐加剧。但受开度的各向异性分布特征影响, 具有不同 μ_0 和 σ_0 的含断层 3 维 DFN 模型在剪切过程中的 R_D 呈现出不一样的演化特征。对于 μ_0 为 1 mm 的含断层 3 维 DFN 模型(图 8(a)), 随着 u_s 从 40 mm 增长到 200 mm; 当 σ_0 为 0.3 mm 时, R_D 从 22.68% 增长到 34.68%; 当 σ_0 为 0.6 mm 时, R_D 从 19.81% 增长到 30.96%; 当 σ_0 为 0.9 mm 时, R_D 从 13.17% 增长到 23.68%; 当 σ_0 为 1.2 mm 时, R_D 从 1.85% 增长到 12.35%。在相同的 u_s 下, σ_0 越大, R_D 越小。随着 σ_0 的逐渐增大, 裂隙的开度区间范围更加大, 接触区域(开度为 0 的闭合区域)和大开度区域也极大地增加。应力增加仅影响未闭合区域, 导致开度减小。当裂隙接触面积较大时, 闭合区域的零损伤会减弱裂隙的整体损伤程度。因此, 在任一 u_s 下, 随着 σ_0 的增大, R_D 不断减小。

随着 μ_0 的逐渐增加, 在相同的 u_s 下, 由 σ_0 增大导致

的 R_D 减小量会逐渐降低。对于 μ_0 为 4 mm 的含断层 3 维 DFN 模型图(8(d)), 随着 u_s 从 40 mm 增长到 200 mm: 当 σ_0 为 0.3 mm 时, R_D 从 7.01% 增长到 12.20%; 当 σ_0 为 0.6 mm 时, R_D 从 7.00% 增长到 12.18%; 当 σ_0 为 0.9 mm 时, R_D 从 6.98% 增长到 12.13%; 当 σ_0 为 1.2 mm 时, R_D 从 6.95% 增长到 12.05%。随着 σ_0 的增大, R_D 仅仅有小幅度的降低。相较于 μ_0 为 1 mm 的情况, 当 μ_0 为 4 mm 时, R_D 的下降可以几乎忽略不计。造成该现象的原因可能是当 μ_0 为 4 mm 时, 随着 σ_0 从 0.3 mm 增加到 1.2 mm, 裂隙上的接触点或闭合区域不会显著增加, 并且始终处于一个极低的水平。因此, 随着 μ_0 的增大, σ_0 增大对 R_D 的弱化效应会被逐渐削弱。

图 9 绘制了 u_s 为 200 mm 时, 不同 σ_0 下 DFN 损伤比 R_D 随 μ_0 演化特征。当 σ_0 为 0.3、0.6 和 0.9 mm 时, 随着 μ_0 从 1 mm 增长至 4 mm, R_D 分别从 34.68%、30.96% 和 23.68% 降低至 12.20%、12.18% 和 12.13%。在 σ_0 为 1.2 mm 的情

随着 μ_0 的逐渐增加, 在相同的 u_s 下, 由 σ_0 增大导致

况下,当 μ_0 从 1 mm 增长至 4 mm 时, R_D 先从 12.35% 增长至 18.16%,随后逐渐降低至 12.05%。当 μ_0 为 1 mm 时,裂隙的闭合区域占裂隙总面积的占比为 20.41%,而当 μ_0 为 2 mm 时,裂隙的闭合区域占裂隙总面积的占比仅为 5.18%。闭合区域面积的急剧降低,导致闭合区域对 R_D 的弱化效应造成了极大的削弱,因此,在 μ_0 从 1 mm 增长至 2 mm 时, R_D 显著升高。 σ_0 对损伤率的影响可通过细观力学机制解释:1)应力传递路径的非均匀性,高 σ_0 模型中稀疏的接触点导致应力场分散(图 8(d)),降低局部应力集中,抑制损伤累积;2)微凸体选择性承载,离散接触点因过载优先损伤(图 8(a)),而大开度区域因应力卸载延缓闭合(式(6)),整体法向刚度降低;3)损伤区域孤立化,局部损伤难以扩展至全裂隙面,阻碍连锁破坏。上述机制与 Huang 等^[23]的接触重分布理论及 Bandis 模型^[27]一致。

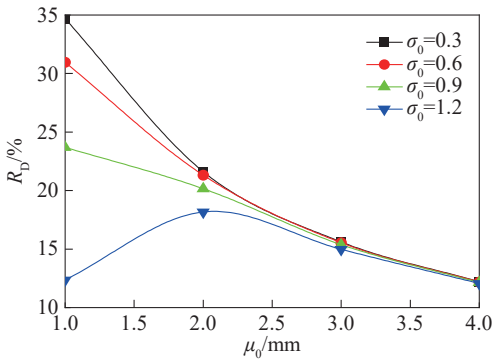


图 9 不同 σ_0 下 DFN 的 R_D 随 μ_0 演化特征($u_s=200$ mm)

Fig. 9 Evolution of R_D of DFN with μ_0 under different σ_0 ($u_s=200$ mm)

2.2 考虑 DFN 开度各向异性的 DFN 渗流特性

为更好地呈现含断层 3 维 DFN 中流体的流动状态及流动特征,定义了等效局部流量 F_1 ,其值通过局部流速与局部开度值相乘得出。在求得整个模型的 F_1 后,对其进行归一化,获取模型的局部流量分布。图 10 展示了不同 μ_0 和 σ_0 的 DFN 模型在断层未发生剪切时沿 x 轴方向(即垂直于断层剪切方向)流动的局部流量分布图。在断层未发生剪切,即 u_s 为 0 时,假定断层的左、右断层面之间是相互匹配良好的,断层是完全闭合的,因此,在绘制局部流量图时,未展示断层面上的流量分布。由图 10 可知,随着 σ_0 的逐渐增大,DFN 模型中沟槽流的现象逐渐明显;随着 μ_0 的增长,DFN 模型中沟槽流的现象会被逐渐弱化。通过对照附录 A 图 A2~A5 中 DFN 的开度分布可知,流体会沿着贯穿进、出口边界的裂隙流动,并在这些裂隙上沿着开度较大的区域优先流动。

图 11 展示了在不同的 u_s 下不同 μ_0 和 σ_0 的含断层 3 维 DFN 模型(图 11(a)~(c))及其中断层(图 11(d)~(f))的局部流量分布。在断层未产生较大的剪切位移

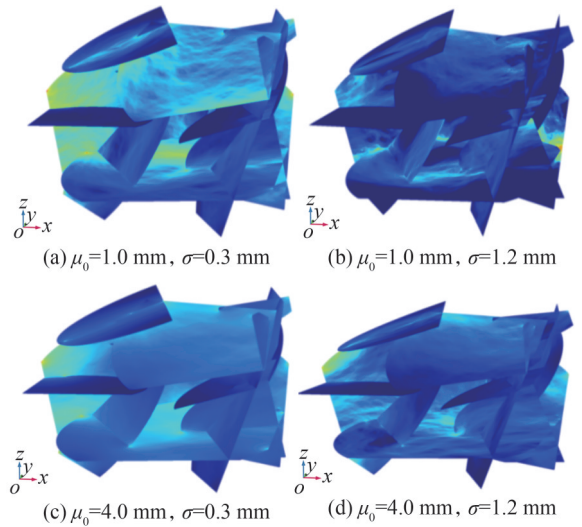


图 10 断层未剪切 DFN 局部流量分布(沿 x 轴方向流动)
Fig. 10 Distribution of local flow rate in DFN when the fault is not subjected to shearing (in x -directional flow)

时,即 u_s 为 40 mm、120 mm 时,含断层 3 维 DFN 模型中的 DFN 的局部流量分布特征与未剪切时的 DFN 模型类似。当断层产生较大的剪切位移时,即 u_s 为 200 mm 时,DFN 中部分裂隙会形成新的流动通道,部分区域的流体分布会发生明显改变。随着 u_s 的增大,由于 DFN 中裂隙损伤程度的提升, μ' 逐渐下降,DFN 中的沟槽流现象被逐渐弱化。在 u_s 为 40 mm 时,断层中的沟槽流现象十分显著,在 u_s 为 200 mm 时,由于断层的剪胀效应,断层的开度极大地增大且不均匀性降低,断层中的沟槽流现象被弱化。对于 μ_0 为 1 mm、 σ_0 为 0.3 mm 的模型,断层中的流体集中分布在断层的左上和右下区域。随着 σ_0 的增大,对于 μ_0 为 1 mm、 σ_0 为 1.2 mm 的模型,断层中的流体集中分布在断层的右下区域。并且由于 DFN 中沟槽流现象更加显著,在断层中出现了极大流量点,流体在

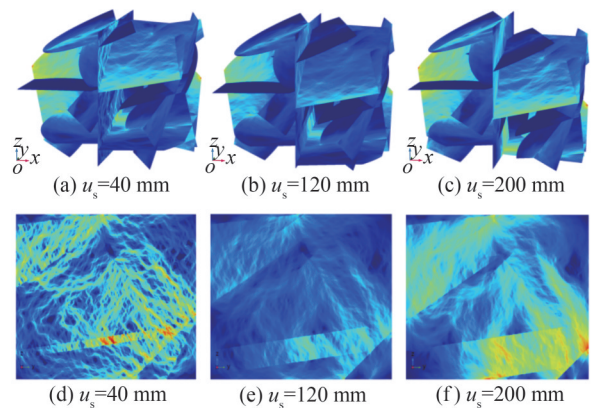


图 11 整个模型和断层中局部流量分布图(沿 x 轴方向流动, $\mu_0=1$ mm, $\sigma_0=0.3$ mm)
Fig. 11 Distribution of local flow rate in the whole model and the fault (in x -directional flow, $\mu_0=1$ mm, $\sigma_0=0.3$ mm)

此点向四周扩散开。对于 μ_0 为 4 mm, σ_0 为 0.3、1.2 mm 的含断层 3 维 DFN 模型, σ_0 的增加并未对断层中的流体分布造成太大影响。在相同的 u_s 下,对于 μ_0 为 4 mm, σ_0 为 0.3、1.2 mm 模型,模型间断层的局部流量分布十分相似,且断层中流量集中分布于断层右部 DFN 发生剪切位移的区域。

为量化断层发生剪切后含断层 3 维 DFN 模型的渗透性能,定义变量 R_k 用于刻画含断层 3 维 DFN 模型的渗透系数演化规律, R_k 可根据式(10)算得:

$$R_k = \frac{K}{K_0} \quad (10)$$

式中, K 为模型在不同的 u_s 下的等效渗透系数, K_0 为模型未发生剪切位移时的等效渗透系数。

附录 A 图 A6 描述了当 μ_0 为 1、2、3、4 mm, σ_0 为 0.3、0.6、0.9、1.2 mm 时,含断层 3 维 DFN 模型沿 x 方向渗流(垂直于断层剪切方向)的 R_k 随 u_s 下演化规律。对于所有的模型,在 u_s 从 0 增加到 40 mm 时, R_k 都显著降低。在断层剪切过程中,由于剪胀效应断层开度会显著增大,无

疑会促进流体的流动,但与之而来的是应力增大导致的 DFN 中裂隙的损伤和开度减小,会显著降低模型的渗透性能。因此,在 u_s 从 40 mm 逐渐增加的过程中, R_k 的演化过程会较为复杂,呈现上升的趋势,但所有模型最终均呈现下降的趋势。整体来看,对于具有相同的 σ_0 的含断层 3 维 DFN 模型,在相同的 u_s 下,随着 μ_0 的增大, R_k 也逐渐升高。随着 σ_0 的增大,“断层剪切增透”与“裂隙损伤减透”之间的竞争关系逐渐显著。当 σ_0 小于 1.2 mm 时,随着 u_s 的增长, R_k 始终小于 1.000,即相较于未剪切状态,含断层 3 维 DFN 的渗透性降低。当 σ_0 为 1.2 mm 时,对于 μ_0 为 2 mm 的模型:当 u_s 从 0 增加至 40 mm 时, R_k 从 1.000 降低至 0.958;当 u_s 从 40 mm 增加至 80 mm 时, R_k 从 0.958 增长至 1.150;当 u_s 从 80 mm 增加至 120 mm 时, R_k 从 1.150 降低至 1.120,随着 u_s 的持续增长, R_k 先降低到 1.020,并最终降为 0.809。当 u_s 从 80 mm 增加到 160 mm,该模型实现了长距离的渗透系数增强。

图 12 描绘了不同 μ_0 和 σ_0 下,流体沿 x 方向流动通过 DFN 和通过断层的流量占比随 u_s 演变过程。

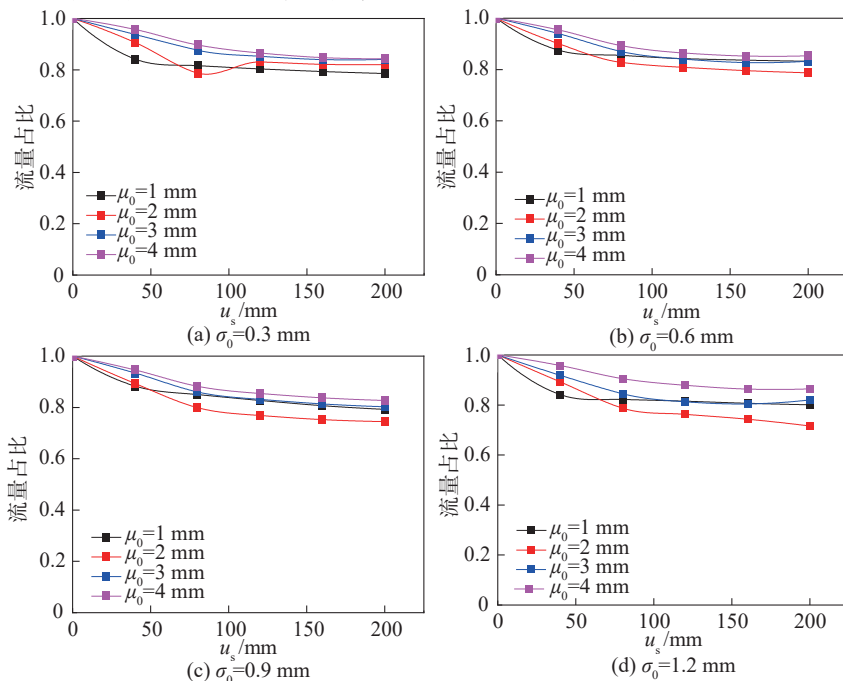


图 12 不同 μ_0 和 σ_0 下,流体沿 x 方向流动通过 DFN 的流量占比随 u_s 演变过程

Fig. 12 Evolution of the proportion of flow rate ratio through the DFN with u_s for the DFN with different μ_0 and σ_0 in x direction

随着 u_s 的逐渐增加,由于 DFN 中裂隙的损伤逐渐加剧,流体流经裂隙网络的流量占比逐渐降低,并最终趋于稳定;相应地,由于剪胀效应,断层开度迅速增加,流体流经断层的流量占比逐渐增高。在含断层 3 维 DFN 模型中, μ_0 越大,流经断层的流体流量占比就越高。在 u_s 为 200 mm 的情况下,随着 μ_0 从 1 mm 增长至 4 mm:当 σ_0 为 0.3 mm 时,流经断层的流体流量占比从 0.215 降低至 0.157;当 σ_0 为 1.2 mm 时,流经断层的流体流量占比从 0.200 降低至 0.136。相较于 μ_0 变化对断层中流体流量占比的影响, σ_0 的变化对断层中流体流量占比的影响更大,并且使得其流量占比的变化规律更加复杂化。对于 σ_0 大于 0.3 mm 的模型,当 u_s 大于 40 mm 时, μ_0 为 2 mm 的模型中流经断层的流体流量占比超过了 μ_0 为 1 mm 的模型。造成该现象的原因可能是:当 μ_0 为 1 mm 时,较大的 σ_0 使得 DFN 中有较多的闭合区域或接触点,因此,部分裂隙由于接触点较多,无法与断层之间形成贯通的渗流通道。这就导致没有足够多的流体补充至断层内部,断层中的流体流量占比较低。

含断层 3 维 DFN 模型由于其几何特征的不均匀性,其渗流特性具有典型的各向异性。图 13 绘制了不同 μ_0 和 σ_0 的 DFN 模型在断层未发生剪切时沿 x 轴方向(即平行于断层剪切方向)流动的局部流量分布图。相较于沿 z 轴方向流动,模型中流体的流量分布有显著的区别。当流体沿 z 轴方向流动时,由于模型左、右侧均存在较大的贯通裂隙,该贯通裂隙连接了进、出口边界,流体主要沿该贯通裂隙流动。

图 14 展示了 μ_0 为 1 mm、 σ_0 为 0.3 mm 的含断层 3 维

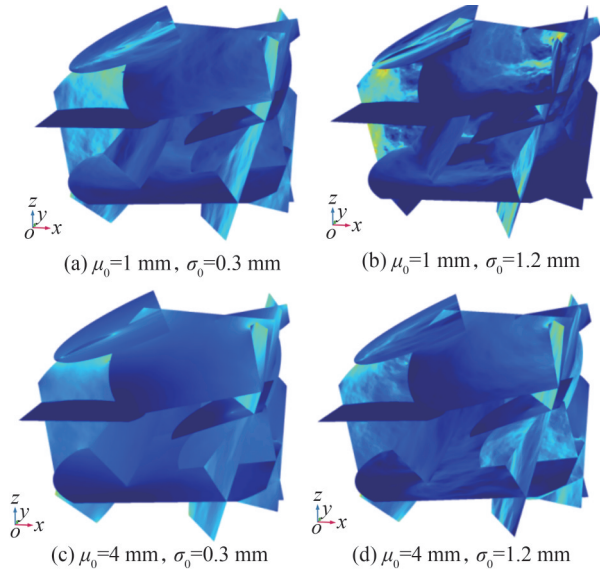


图 13 断层未剪切时 DFN 中局部流量分布(沿 z 轴方向流动)
Fig. 13 Distribution of local flow rate in DFN when the fault is not subjected to shearing (in z -directional flow)

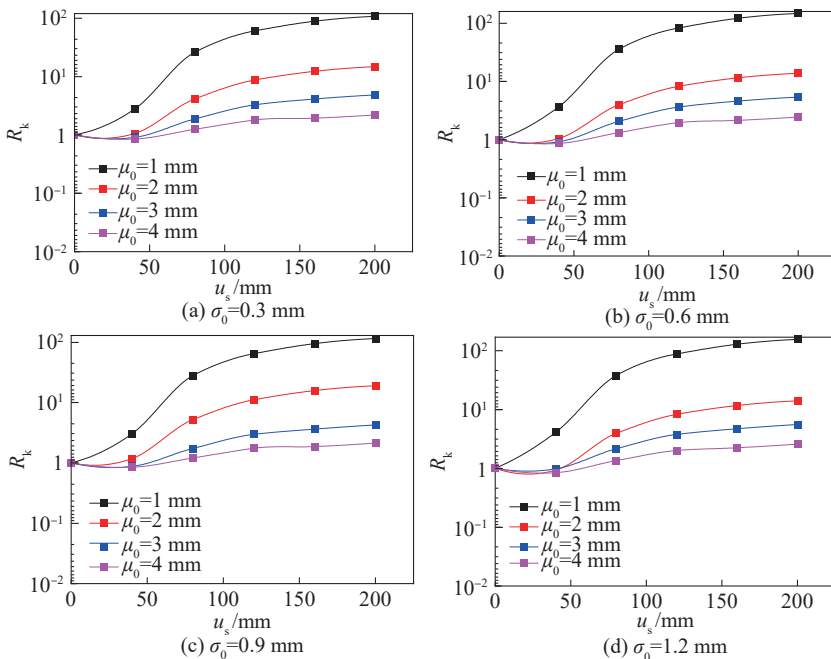


图 15 不同 μ_0 和 σ_0 下,流体沿 z 轴方向流动 R_k 随 u_s 演化特征

Fig. 15 Evolution of R_k with u_s for the DFN with different μ_0 and σ_0 in z -directional flow

DFN 模型在不同 u_s 下模型局部和断层上的局部流量分布图。断层连接着进、出口边界,提供了大量空间供流体流动。随着 u_s 的增大,断层的开度迅速升高,接触面积迅速降低,更多的流体集中在断层中流动。断层中的沟槽流现象也被逐渐削弱,众多沟槽逐渐汇集,形成了沟槽数量更少但沟槽面积更大的沟槽流。

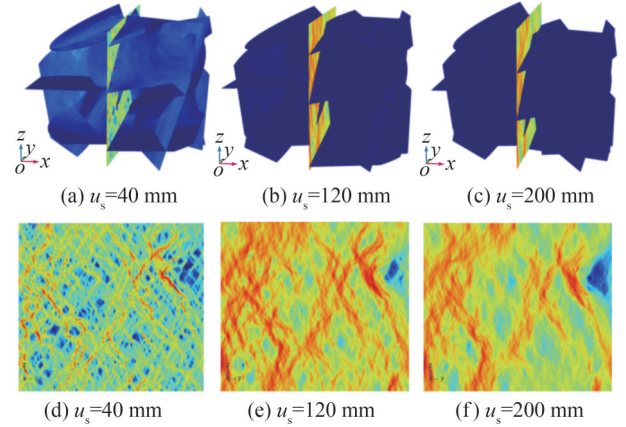


图 14 整个模型和断层中局部流量分布图(沿 z 轴方向流动, $\mu_0=1$ mm, $\sigma_0=0.3$ mm)

Fig. 14 Distribution of local flow rate in the whole model and the fault (in z -directional flow, $\mu_0=1$ mm, $\sigma_0=0.3$ mm)

图 15 描述了 μ_0 为 1、2、3、4 mm, σ_0 为 0.3、0.6、0.9、1.2 mm 的含断层 3 维 DFN 模型沿 y 轴方向(平行于断层剪切方向)流动的 R_k 随 u_s 的演化规律。总体上,随着 u_s 继续增长,所有模型均呈现增加趋势。当 μ_0 为 4 mm 时,随着剪切过程的进行,各个模型的渗透系数并没有出现很明显的增加。随着 u_s 从 0 增加至 40 mm,当 μ_0

为 1 mm 时, R_k 呈现上升趋势; 当 μ_0 大于 1 mm 时, R_k 呈现微小的下降趋势。当 u_s 从 40 增加至 80 mm 时, 该区间内的 R_k 增长最快, 当 u_s 大于 80 mm 时, 所有模型增长速度减慢, 最终趋于平缓。此时裂隙表面的损伤程度已趋于稳定, 流体的流动模式也渐趋于稳定, 渗透系数的增长速度也逐渐变缓。

附录 A 图 A7~A8 分别描述了在平行于断层剪切的方向上, 不同 μ_0 和 σ_0 下断层剪切过程中, 通过 DFN 的流量比演变过程以及通过断层的流量比演变过程。随着 u_s 的增加, 流体流经 DFN 的流量占比逐渐增大, 并最终趋于稳定。相应地, 断层中流体流经断层的流量占比逐渐降低。对于 μ_0 为 1 mm 的情况, 当 u_s 大于 80 mm 时, 所有模型通过裂隙网络的流量比已经超过 95%, 并达到较为稳定的状态。相应地, 通过断层的流量比随着剪切过程的发生在不断减小。对于 σ_0 为 0.3 mm, 在 u_s 为 200 mm 的情况, 当 μ_0 为 1、2、3 和 4 mm 时, 流经断层的流体流量占比分别为 0.997、0.958、0.851 和 0.699。对于 σ_0 为 1.2 mm、 u_s 为 200 mm 的情况, 当 μ_0 为 1、2、3 和 4 mm 时, 流经断层的流体流量占比分别为 0.991、0.954、0.851 和 0.686。 σ_0 的增大并未对流体在模型中的流动和分布带来显著影响。

2.3 考虑边界刚度和应力的 DFN 剪切损伤特征及渗流特性

1) 考虑边界刚度和应力的 DFN 剪切损伤特征

本研究模拟了不同边界刚度 k_n 和边界应力 σ_y 下含断层 3 维 DFN 模型断层的剪切过程及沿 x 和 z 方向的流体流动, 所采用的模型 DFN 的 μ_0 为 2 mm, σ_0 为 0.6 mm。在断层剪切过程中, 不同的 k_n 和 σ_y 下作用在 DFN 中各个裂隙上的 σ_n 会有很大的变化, 因此, DFN 会经历不同的剪切损伤。不同的 k_n 和 σ_y 下各个模型的断层在其发生剪切时的剪切响应如表 2 所示。

图 16 描述了不同的 k_n 和 σ_y 下, 在剪切过程中各模

型的 μ' 和 R_D 的演化过程。所有模型的 μ' 演变过程呈现出一个共同特点, 即在整个过程中表现出逐渐降低的趋势。在剪切过程初始阶段, 即 u_s 从 0 增大到 40 mm 时, μ' 降低幅度最大。参照表 2 结果可知, 断层在经历 0~40 mm 的剪切过程中, 作用在断层上的剪应力和法向应力迎来了最大增量。特别是对于 k_n 为 0.25、0.50 GPa/m 的模型, 当 $u_s=40$ mm 时, 作用在断层上的剪应力已经接近峰值状态。极大的应力增量导致作用在断层上的 σ_n 也急剧增加, 因此, DFN 损伤率 R_D 在 u_s 小于 40 mm 时也急剧升高。当 u_s 大于 40 mm 时, 断层逐渐进入残余阶段, 作用在断层上的剪切应力缓慢下降或缓慢升高至峰值应力后逐渐下降, 仅法向应力持续缓慢上升。因此, 当 u_s 大于 40 mm 时, σ_n 缓慢增长, 裂隙的 μ' 降低幅度变小, 下降速率变慢, R_D 缓慢升高, 并逐渐趋于稳定。

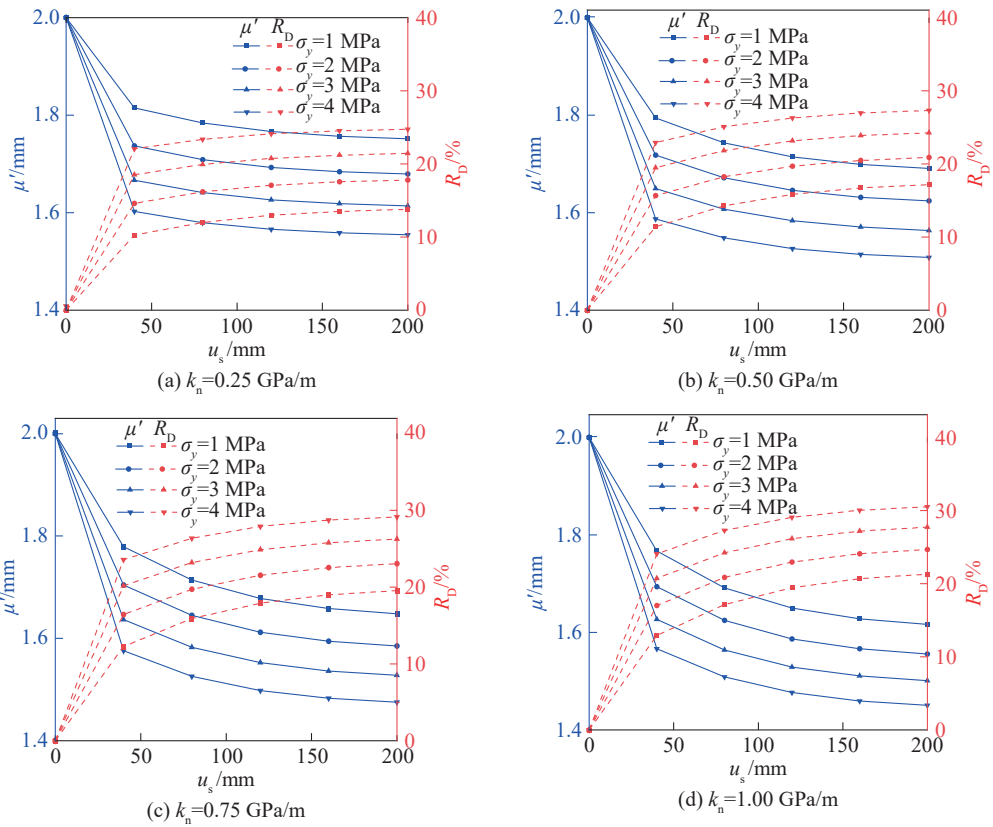
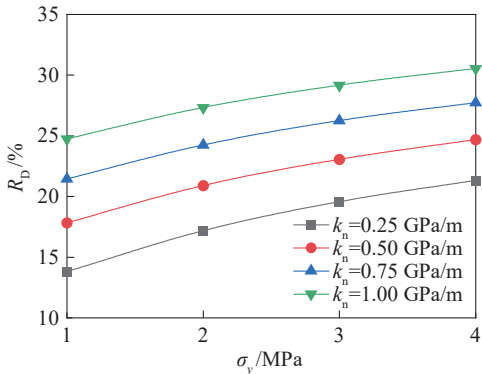
随着 σ_y 的逐渐增加, μ' 的降低幅度和 R_D 的上升幅度也越来越大。在 u_s 从 0 增加至 40 mm 的过程中, 随着 σ_y 升高, 具有不同 σ_y 的模型的 μ' 降低幅度逐渐增大。如图 16(a) 所示, 对于 k_n 为 0.25 GPa/m 的模型, 当 u_s 为 40 mm 时, 随着 σ_y 从 1 MPa 增长到 4 MPa, μ' 的降低幅度从 20% 增加到 40%, R_D 的上升幅度从 10.27% 增加到 22.07%。此外, k_n 的升高也会对 μ' 的降低和 R_D 的上升起到促进作用。以 σ_y 为 3 MPa 为例, 当 u_s 从 0 增加至 40 mm 时, 随着 k_n 从 0.25 GPa/m 增长到 1.00 GPa/m, μ' 的降低幅度从 33% 增加到 38%, R_D 的上升幅度从 18.53% 增加到 20.72%。

图 17 描述了 u_s 为 200 mm 时, 不同 k_n 下 R_D 随 σ_y 演化特征, 即 DFN 的最终损伤率。随着 σ_y 从 1 MPa 增长到 4 MPa, 当 k_n 分别为 0.25、0.50、0.75、1.00 GPa/m 时, R_D 分别从 13.8% 增长至 24.7%、17.17% 增长至 27.32%、19.55% 增长至 29.16%、21.32% 增长至 30.53%。 σ_y 和 k_n 的增加均会加强断层剪切过程中 DFN 的剪切损伤。

表 2 不同 k_n 和 σ_y 下断层的剪切响应

Tab. 2 Shear response of fault with different k_n and σ_y

法向刚度/ (GPa·m ⁻¹)	剪切 位移/mm	边界应力/ MPa	剪应力/ MPa	法向应 力/MPa	法向位 移/mm	法向刚度/ (GPa·m ⁻¹)	剪切 位移/mm	边界应力/ MPa	剪应力/ MPa	法向应力/ MPa	法向位移/ mm
0.25	40	1、2、 3、4	4.382 0	1.894 4	2.664 2	0.50	40	1、2、 3、4	4.623 8	2.381 3	2.305 8
	80		3.727 3	2.628 4	5.599 8		80		4.641 6	3.651 7	4.846 6
	120		3.047 2	3.065 8	7.349 7		120		4.097 5	4.409 0	6.361 2
	160		2.604 8	3.310 3	8.327 6		160		3.655 6	4.832 2	7.207 5
	200		2.349 0	3.441 0	8.850 5		200		3.378 7	5.058 5	7.660 1
0.75	40	1、2、 3、4	4.683 1	2.752 8	2.032 5	1.00	40	1、2、 3、4	4.668 2	3.045 5	1.817 1
	80		5.176 2	4.432 4	4.272 1		80		5.508 5	5.047 7	3.819 3
	120		4.793 1	5.433 7	5.607 0		120		5.280 4	6.241 2	5.012 8
	160		4.398 0	5.993 2	6.353 0		160		4.947 9	6.908 1	5.679 7
	200		4.133 0	6.292 4	6.752 0		200		4.708 6	7.264 8	6.036 4

图 16 不同 k_n 和 σ_y 下, μ' 及 R_D 随着剪切位移的变化规律Fig. 16 Variations of μ' and R_D with shear displacement under different k_n and σ_y 图 17 不同 k_n 下 DFN 的 R_D 随 σ_y 演化特征 ($u_s=200$ mm)Fig. 17 Evolution of R_D of DFN with σ_y under different k_n ($u_s=200$ mm)

2) 考虑边界刚度和应力的 DFN 渗流特性

边界刚度和边界应力会显著影响断层开度的演化过程和 DFN 中裂隙的闭合过程, 因此, 也会极大地影响含断层 3 维 DFN 模型的渗流特性。附录 A 图 A9、A10 分别为 $k_n=0.25$ GPa/m、 $\sigma_y=1$ MPa 和 $k_n=1.00$ GPa/m、 $\sigma_y=4$ MPa 的模型在不同 u_s 下流体沿 x 轴方向流动的局部流量分布图。随着 u_s 的逐渐增大, DFN 中裂隙的闭合量逐渐增大, 断层的开度逐渐增大, 断层中的沟槽流现象被逐渐弱化。在剪切过程中, 随着 k_n 的增大, 断层的法向位移的增加量会逐渐减小。并且在 CNS 条件下, 作用在断层上的切应力和法向应力会明显地增

大。在切应力、法向应力和 σ_y 三向应力的共同作用下, DFN 中裂隙的闭合量也会显著升高。因此, 在相同的 u_s 下, 更大的 k_n 和 σ_y 会导致断层和 DFN 中沟槽流的现象更明显。

附录 A 图 A11 描述了 k_n 为 0.25、0.50、0.75、1.00 GPa/m, σ_y 为 1、2、3、4 MPa 条件下, 含断层 3 维 DFN 模型沿 x 轴方向渗流 (垂直于断层剪切方向) 的 R_k 随 u_s 演化过程。随着 u_s 的不断增大, 所有案例中模型的渗透系数均呈现下降的趋势。并且随着 k_n 和 σ_y 的增加, 断层的法向位移被限制, 裂隙的损伤加剧, 模型的渗透性会被进一步弱化。在 u_s 为 200 mm、 σ_y 为 1 MPa 的情况下, 当 k_n 分别为 0.25、0.50、0.75 和 1.00 GPa/m 时, R_k 分别为 0.76、0.68、0.62 和 0.58。而在 σ_y 为 4 MPa 条件下, 当 k_n 分别为 0.25、0.50、0.75 和 1.00 GPa/m 时, R_k 分别为 0.53、0.48、0.45 和 0.42。相较于 σ_y 为 1 MPa 的情况, 模型的渗透系数分别被进一步弱化了 30.26%、29.41%、27.42% 和 27.58%。

流经 DFN 和断层的流体流量占比亦受 k_n 和 σ_y 显著影响, 附录 A 图 A12、A13 分别描绘了不同 k_n 和 σ_y 下, 断层剪切过程中流体沿 x 方向流动通过 DFN 的流量占比和通过断层的流量占比。随着 u_s 的增大, 所有边界条件下流经 DFN 中流体的流量占比均不断降低, 并在 u_s 大于 160 mm 后逐渐趋于稳定。当 u_s 小于 120 mm 时, 在相同的 u_s 下, 对于除 σ_y 为 2 MPa 的所有边界应力

下,随着 k_n 的增大,流经 DFN 流体的流量占比会逐渐升高。当 u_s 大于 120 mm 时,随着 u_s 的增大,表征 k_n 为 0.75 GPa/m 和 1.00 GPa/m 的流量比曲线会渐渐低于表征 k_n 为 0.50 GPa/m 和 0.25 GPa/m 的流量比曲线,且 k_n 对于流经 DFN 流体的流量占比的影响被极大地弱化。当 u_s 为 200 mm 时,在大多数边界应力条件下,流经 DFN 流体的流量占比从高到低呈现出的顺序为: k_n 为 0.25 GPa/m 时最高, k_n 为 0.50 GPa/m 时次之,接下来是 k_n 为 0.75 GPa/m 时,1.00 GPa/m 的流量占比最低。

图 18 和 19 分别绘制了 $k_n=0.25$ GPa/m、 $\sigma_y=1$ MPa 和 $k_n=1.00$ GPa/m、 $\sigma_y=4$ MPa 模型在不同 u_s 下流体沿 y 轴方向(平行于剪切方向)流动的局部流量分布图。对于不同 k_n 和 σ_y 下的模型,在 u_s 为 40 mm 时,均会有流体经 DFN 补充至断层中。当 u_s 大于 120 mm 时,断层较大的开度空间为流体提供了主要的流动场所,且 DFN 中裂隙不断闭合,使得流经 DFN 的流体逐渐变少。随着 u_s 的增大,更多的流体流经断层之后流出,断层中的沟槽流现象被逐渐弱化。

不同 k_n 和 σ_y 下,含断层 3 维 DFN 模型沿 z 轴方向渗流时 R_k 随 u_s 演化过程如图 20 所示。对于 k_n 为 1.00 GPa/m 的情况,当 σ_y 为 1 MPa 时,随着 u_s 的增大, R_k 起初缓慢增加,并在 u_s 较大时快速增长至 13.81;当 σ_y 为 2.3、4 MPa 时,随着 u_s 从 0 增长至 40 mm, R_k 均出现了降低,当 u_s 大于 40 mm 时, R_k 迅速回升至 1.0 以上并持续上升。

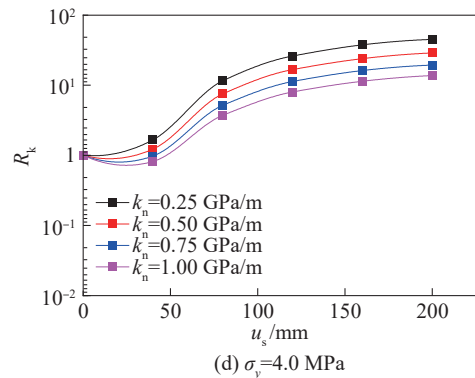
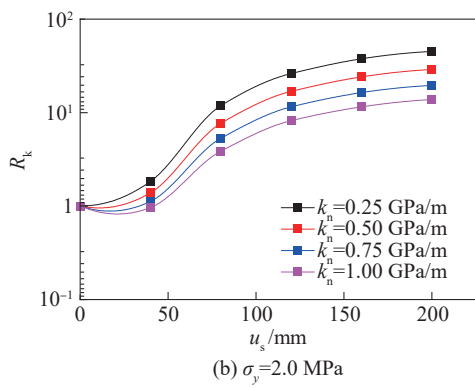
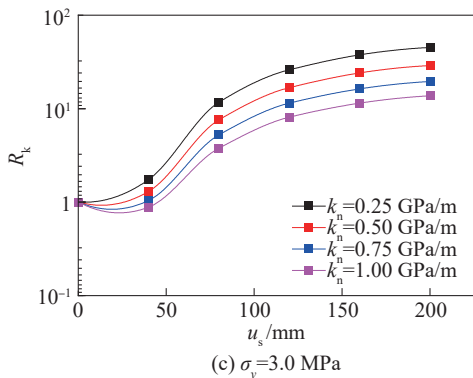
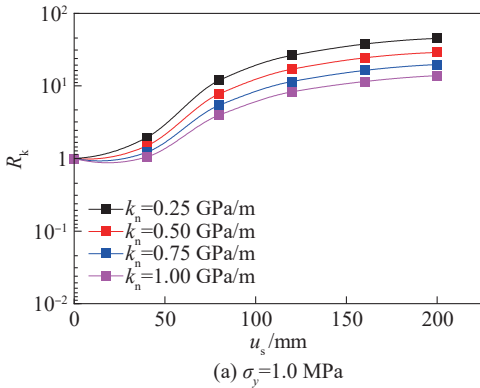


图 20 不同 k_n 和 σ_y 下,流体沿 z 轴方向流动 R_k 随 u_s 演化特征

Fig. 20 Evolution of R_k with u_s under different k_n and σ_y in the z -directional flow

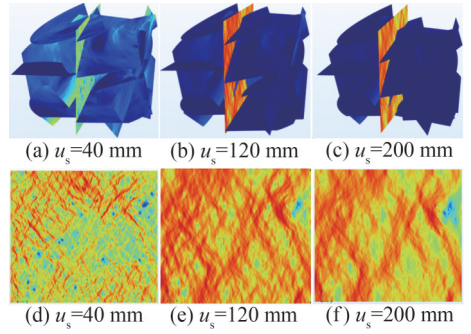


图 18 整个模型和断层中局部流量分布图(沿 z 轴方向流动, $k_n=0.25$ GPa/m, $\sigma_y=1$ MPa)

Fig. 18 Distribution of local flow rate in the whole model and the fault (in z -directional flow, $k_n=0.25$ GPa/m, $\sigma_y=1$ MPa)

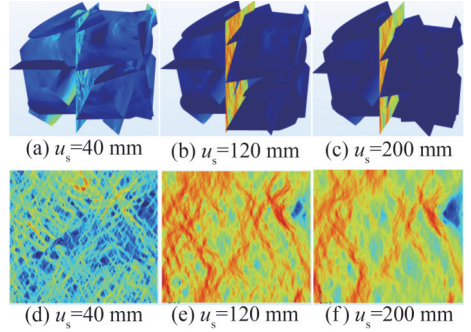


图 19 整个模型和断层中局部流量分布图(沿 z 轴方向流动, $k_n=1.00$ GPa/m, $\sigma_y=4$ MPa)

Fig. 19 Distribution of local flow rate in the whole model and the fault (in z -directional flow, $k_n=1.00$ GPa/m, $\sigma_y=4$ MPa)

图 20 中,对于 k_n 为 0.25、0.50、0.75 GPa/m 的情况,在断层的剪切过程中,模型的渗透系数均会得到提升。随着 k_n 和 σ_y 的增大,由断层剪切导致的渗透系数增强均会受到抑制。在 u_s 为 200 mm 的条件下,对于 σ_y 为 1 MPa 的情况,当 k_n 分别为 0.25、0.50、0.75 和 1.00 GPa/m 时, R_k 分别为 45.20、28.93、19.56 和 13.81;而对于 σ_y 为 4 MPa 的情况,当 k_n 分别为 0.25、0.50、0.75 和 1.00 GPa/m 时, R_k 分别为 45.04、28.80、19.43 和 13.69。当 u_s 为 200 mm 时,由于断层剪切产生的法向应力和剪切应力已远大于 σ_y , σ_y 对模型渗透系数的影响已被极大地弱化。

附录 A 图 A14、A15 分别描绘了不同 k_n 和 σ_y 下,断层剪切过程中流体沿 y 方向流动通过 DFN 的流量占比和通过断层的流量占比。对于所有的 k_n 和 σ_y 下的模型:随着 u_s 从 0 增加至 80 mm,流经 DFN 流体流量占比迅速降低;当 u_s 从 80 mm 增加至 200 mm 时,流经 DFN 流体流量占比缓慢降低,并最终低于 0.06。这意味着,当 u_s 为 200 mm 时,含断层 3 维 DFN 模型中流体几乎全部经断层流过,仅少量的流体经 DFN 流出。 k_n 的增大和 σ_y 的减小会弱化流体通过断层的流量占比增加的趋势。

3 结论

本研究以水力剪切过程中诱发断层滑移后的地热储层为研究对象,建立含断层 3 维离散裂隙网络(3 维 DFN)模型表征地热储层的岩体几何特性。通过生成具有不同开度均值 μ_0 和标准差 σ_0 的含断层 3 维 DFN 模型,探究了开度各向异性、边界刚度和应力对断层剪切过程中的 DFN 开度的影响,获取了断层剪切过程中 DFN 剪切损伤率的变化规律,研究了 DFN 的剪切损伤特征,得到了模型的线性渗流规律。得到如下结论:

1)随着断层剪切位移的不断增大,所有模型 DFN 的损伤率均显著上升。开度的 μ_0 和 σ_0 会显著影响断层剪切过程中 DFN 的损伤特征,在相同的剪切位移下,随着 σ_0 的升高,DFN 的损伤率会逐渐降低。当 μ_0 大于 3 mm 时, σ_0 对 DFN 损伤率的影响会极大的减小。

2)开度的不均匀分布会使得各个含断层 3 维 DFN 模型中流体的分布状态和流动特征有显著区别,随着 σ_0 的增大,DFN 和断层中的沟槽流现象均会更加明显。含断层 3 维 DFN 模型的渗流特性具有显著的各向异性,随着断层剪切的进行,当流体沿 x 轴方向流动时,大多数模型的渗透系数均出现了降低。 σ_0 越大,渗透系数的降低量越低。当流体沿 z 轴方向流动时,模型的渗透系数在剪切位移小于 40 mm 时先缓慢降低,随后迅速升高,并且流体在断层中的流量占比高于在 DFN 中的流体流量占比。

3)边界刚度和应力的增加会加剧 DFN 的损伤过程,在断层剪切位移从 0 增加至 40 mm 时,DFN 的损伤率迎来了最大增量。随着边界刚度和应力的逐渐增大,DFN 和断层中的流体流动更加集中;随着剪切位移的不断增长及边界刚度和应力的增加,模型沿 x 轴方向的渗透系数均会大幅降低。断层的剪切会使得流体沿 z 轴方向的渗透系数显著升高,当剪切位移 u_s 大于 160 mm 时,由于断层剪切产生的法向应力和剪切应力已远大于边界应力 σ_x , σ_y 对模型渗透系数的影响已被极大地弱化。当流体沿 z 轴方向流动,在 u_s 为 200 mm 时,所有边界条件下的模型中流体在断层中的流量占比均超过了 0.94,断层 3 维 DFN 模型中流体几乎全部经断层流过。在储层改造中,建议将剪切位移控制在 80~160 mm 之内。此阶段断层渗透系数沿剪切方向提升 2~3 个数量级,且 DFN 损伤率增量趋缓,可平衡“增透”与“损伤”效应。

本研究假设断层初始开度为 0 且左右匹配良好,这与实际地质条件可能存在一定差异。实际断层可能具有非 0 初始开度或填充物(如黏土、断层泥等),这些因素会影响剪切过程中的剪胀效应和渗流路径的演化。例如,初始微开度可能降低剪切过程中法向应力的累积速度,从而减弱 DFN 的损伤率;而填充物的存在可能抑制断层的剪胀开度,导致渗透系数增幅减小。因此,本研究结果更适用于初始闭合且未填充的粗糙断层系统。未来工作可进一步探讨初始开度非 0 或含填充物断层的剪切-渗流特性,以更全面地反映复杂地质条件下的演化规律。

附录见本刊网络版,扫描标题旁的二维码可阅读网络全文。

参考文献:

- [1] Pang Zhonghe, Luo Ji, Cheng Yuanzhi, et al. Evaluation of geological conditions for the development of deep geothermal energy in China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1):134-151.[庞忠和,罗霖,程远志,等.中国深层地热能开采的地质条件评价[J].地质前缘,2020,27(1):134-151.]
- [2] 张建英.增强型地热系统(EGS)资源开发利用研究[J].中国能源,2011,33(1):29-32.
- [3] McClure M W, Horne R N. An investigation of stimulation mechanisms in Enhanced Geothermal Systems[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 72:242-260.
- [4] Gutierrez M, Makurat A. Coupled HTH modelling of cold water injection in fractured hydrocarbon reservoirs[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(3/4):113.e1-113.e15.

- [5] Sun Zhixue, Zhang Xu, Xu Yi, et al. Numerical simulation of the heat extraction in EGS with thermal-hydraulic-mechanical coupling method based on discrete fractures model[J]. *Energy*, 2017, 120: 20–33.
- [6] Watanabe N, Takahashi K, Takahashi R, et al. Novel chemical stimulation for geothermal reservoirs by chelating agent driven selective mineral dissolution in fractured rocks[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 19994.
- [9] Huang Na, Liu Richeng, Jiang Yujing. Numerical study of the geometrical and hydraulic characteristics of 3D self-affine rough fractures during shear[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, 45: 127–142.
- [10] Han Guansheng, Jing Hongwen, Jiang Yujing, et al. Effect of cyclic loading on the shear behaviours of both unfilled and infilled rough rock joints under constant normal stiffness conditions[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(1): 31–57.
- [11] Ziagos J P, Phillips B, Boyd L W, et al. A technology roadmap for strategic development of enhanced geothermal systems[C]// *Proceeding of the 38th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford, CA: Geothermal Rising*, 2013: 11–13.
- [12] Panel M. The future of geothermal energy: Impact of enhanced geo-thermal systems (EGS) on the United States in the 21st century[J]. *Geothermics*, 2006, 17: 881–882.
- [13] Pine R J, Batchelor A S. Downward migration of shearing in jointed rock during hydraulic injections[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1984, 21(5): 249–263.
- [14] Esaki T, Du S, Mitani Y, et al. Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(5): 641–650.
- [15] Ji Yinlin. Shear-flow characteristics of rock fractures and implications for injection-induced seismicity[D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2020.
- [16] Xia Caichu, Qian Xin, Gui Yang, et al. A novel multi-functional shear-flow coupled test system for rock joints and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(10): 2219–2231. [夏才初, 钱鑫, 桂洋, 等. 多功能岩石节理全剪切-渗流耦合试验系统研制与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(10): 2219–2231.]
- [17] Xu Jiang, Liu Yixin, Yin Guangzhi, et al. Development of shear-flow coupling test device for coal rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34 (Supp1): 2987–2995. [许江, 刘义鑫, 尹光志, 等. 煤岩剪切-渗流耦合试验装置研制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(增 1): 2987–2995.]
- [18] Gao Min, Zhang Chengguo, Oh J. Assessments of the effects of various fracture surface morphology on single fracture flow: A review[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 33(1): 1–29.
- [19] Li Man, Liu Xianshan, Li Yu, et al. Effect of contact areas on seepage behavior in rough fractures under normal stress[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2022, 22(4): 04022019.
- [20] Rong Guan, Yang Jie, Cheng Long, et al. Laboratory investigation of nonlinear flow characteristics in rough fractures during shear process[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 541: 1385–1394.
- [21] Yin Qian, Ma Guowei, Jing Hongwen, et al. Hydraulic properties of 3D rough-walled fractures during shearing: An experimental study[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 555: 169–184.
- [22] Liu Richeng, Wang Yingsen, Li Bo, et al. Linear and nonlinear fluid flow responses of connected fractures subject to shearing under constant normal load and constant normal stiffness boundary conditions[J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 141: 104517.
- [23] Huang Na, Liu Richeng, Jiang Yujing, et al. Shear-flow coupling characteristics of a three-dimensional discrete fracture network-fault model considering stress-induced aperture variations[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 571: 416–424.
- [24] Ye Zuyang, Liu Huihai, Jiang Qinghui, et al. Two-phase flow properties of a horizontal fracture: The effect of aperture distribution[J]. *Advances in Water Resources*, 2015, 76: 43–54.
- [25] Liu Richeng, Huang Na, Jiang Yujing, et al. A numerical study of shear-induced evolutions of geometric and hydraulic properties of self-affine rough-walled rock fractures[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 127: 104211.
- [26] Molz F J, Liu H H, Szulga J. Fractional Brownian motion and fractional Gaussian noise in subsurface hydrology: A review, presentation of fundamental properties, and extensions [J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(10): 2273–2286.
- [27] Bandis S C, Lumsden A C, Barton N R. Fundamentals of rock joint deformation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1983, 20(6): 249–268.

Numerical Simulation Study of Shear–Seepage Characteristics of Fractured Network Under Constant Normal Stiffness

YU Liyuan, WANG Xiaolin*, YANG Hanqing, LIU Richeng, LI Shuchen

(State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract:

Objective Accurately predicting permeability evolution during fault shear in fractured rock masses under constant normal stiffness (CNS) boundary conditions is of fundamental importance for the design and optimization of geothermal reservoir stimulation, subsurface energy extraction, and fluid management in deep rock engineering. In enhanced geothermal systems (EGS), hydraulic stimulation commonly induces shear slip along pre-existing faults and fracture networks, resulting in complex and competing hydraulic responses. On one hand, fault shear dilation can significantly enhance permeability by generating preferential flow channels; on the other hand, the associated stress redistribution and normal stress amplification may induce closure and damage of surrounding fracture networks, leading to permeability degradation. Despite extensive experimental and numerical studies on shear–flow coupling in single fractures, the permeability evolution of three-dimensional discrete fracture networks (DFNs) interacting with a shearing fault under CNS conditions remains poorly understood. Existing studies often focus on either fault permeability enhancement or fracture closure effects in isolation, while neglecting the coupled competition between shear-induced dilation and network-scale compression damage. Moreover, the influence of aperture anisotropy, boundary stiffness, and stress constraints on flow anisotropy and channelization patterns has not been systematically quantified. The objective of this study is therefore to quantitatively investigate the dual mechanisms governing permeability evolution during fault shear under CNS conditions: 1) permeability enhancement driven by fault shear dilation and channelization, and 2) permeability reduction induced by compression damage of the surrounding fracture network. Particular emphasis is placed on evaluating the effects of fracture aperture anisotropy, normal stiffness, and boundary stress on damage evolution, permeability anisotropy, and flow partitioning between faults and fracture networks.

Methods A three-dimensional DFN model incorporating a through-going fault was developed to simulate shear–flow coupling processes under CNS boundary conditions. The DFN consists of multiple randomly oriented fractures with statistically prescribed aperture distributions, embedded within a cubic rock domain. Fracture apertures were assumed to follow a truncated Gaussian distribution with spatial correlations, characterized by a mean aperture μ_0 ranging from 1 to 4 mm and a standard deviation σ_0 ranging from 0.3 to 1.2 mm. This formulation captures the inherent heterogeneity and anisotropy of natural fracture apertures while avoiding unrealistically negative values. Fault shear was simulated by imposing incremental shear displacements (u_s : 0 to 200 mm) under CNS constraints, such that normal stress evolved dynamically in response to shear-induced dilation. The mechanical response of fractures to normal stress was governed by a nonlinear hyperbolic closure relationship, enabling progressive aperture reduction and damage accumulation in the DFN during shear. A fracture damage rate (R_D), defined based on the reduction of average fracture aperture relative to the maximum allowable closure, was introduced to quantify the degree of DFN damage at each shear stage. Fluid flow within the DFN and fault was modeled using the Reynolds equation, assuming laminar flow through rough-walled fractures. Numerical simulations were conducted in COMSOL Multiphysics, with flow applied along the x -, y -, and z -directions to evaluate permeability anisotropy. Equivalent permeability coefficients were calculated using the cubic law, and permeability evolution ratios were derived relative to the initial, undeformed state. To assess the influence of mechanical boundary conditions, a parametric study was conducted by varying the normal stiffness (k_n : 0.25 to 1.00 GPa/m) and boundary stress (σ_y : 1 to 4 MPa). Flow partitioning between the fault and the DFN was quantified by calculating the proportion of total volumetric flux transmitted through each component, allowing for detailed analysis of channelization and hydraulic dominance.

Results and Discussions Simulation results reveal that permeability evolution during fault shear is governed by a pronounced competition between fault-induced permeability enhancement and DFN compression-induced permeability reduction. This competition is strongly modulated by fracture aperture anisotropy, mechanical boundary conditions, and flow direction. Increasing aperture standard deviation σ_0 significantly reduced the DFN damage rate R_D across all shear stages. For example, at $\mu_0 = 1$ mm and $u_s = 200$ mm, R_D decreased from 34.68% for $\sigma_0 = 0.3$ mm to 12.35% for $\sigma_0 = 1.2$ mm, representing a reduction of approximately 64%. This effect arises from the increased heterogeneity of fracture apertures, which promotes stress redistribution and limits the spatial extent of fracture closure. Highly heterogeneous apertures also facilitate localized channelized flow, resulting in pronounced groove flow patterns within both the DFN and the fault. Normal stiffness k_n and boundary stress σ_y exerted a strong control on DFN damage evolution. Higher k_n and σ_y amplified normal stress accumulation during shear, leading to accelerated fracture closure and increased R_D . The most significant damage increments, reaching up to 45%, occurred during the initial shear stage (u_s : 0 to 40 mm), corresponding to rapid stress build-up under CNS conditions. Beyond this stage, damage accumulation gradually stabilized as shear progressed into a residual regime. Flow simulations demonstrated marked permeability anisotropy induced by fault shear. Permeability along the shear-parallel z -

axis increased by two to three orders of magnitude due to fault dilation and the development of continuous high-aperture channels. In contrast, permeability along the x - and y -directions decreased by approximately 60% to 80%, reflecting dominant DFN compression and loss of interconnected flow pathways. Flow partitioning analysis showed that fluid progressively concentrated within the fault as shear displacement increased. At $u_s = 200$ mm, more than 94% of the total flow was transmitted through the fault for most boundary conditions, rendering the surrounding DFN hydraulically negligible. This dominance of fault channel flow was further enhanced by higher k_n and σ_y , which suppressed DFN permeability while promoting fault-controlled transport. Notably, at large shear displacements ($u_s > 160$ mm), shear-induced stresses significantly exceeded the imposed boundary stress σ_y , resulting in a diminished influence of σ_y on permeability evolution. This indicates a transition from boundary-controlled to shear-dominated hydraulic behavior, with important implications for long-term reservoir performance.

Conclusions This study provides a comprehensive quantitative framework for understanding permeability evolution in fractured rock masses during fault shear under CNS conditions. The results highlight that permeability enhancement and reduction mechanisms coexist and compete throughout the shear process, with their relative dominance controlled by fracture aperture anisotropy, normal stiffness, and boundary stress. From an engineering perspective, the findings suggest that stimulation strategies in geothermal reservoirs should explicitly account for DFN damage induced by shear-related stress amplification, rather than assuming monotonic permeability enhancement. High aperture heterogeneity and controlled shear displacements may be leveraged to promote stable channelized flow while minimizing network-scale permeability loss. The strong localization of flow within faults at large shear displacements also underscores the need to manage fault-dominated flow paths to avoid premature thermal breakthrough or uneven reservoir depletion.

Key words: fractured rock mass; permeability; shear; discrete fracture network

(编辑 吴芝明)

引用格式: Yu Liyuan, Wang Xiaolin, Yang Hanqing, et al. Numerical simulation study of shear-seepage characteristics of fractured network under constant normal stiffness[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2026, 58(1): 31-45. [蔚立元, 王晓琳, 杨瀚清, 等. 恒定法向刚度下裂隙网络剪切-渗流特性数值模拟研究[J]. *工程科学与技术*, 2026, 58(1): 31-45.]