

敖嫩, 曹志成, 王虎文, 等. 地质不连续体对花岗岩水力裂缝扩展路径影响机制[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S2): 453-464.

AO Nen, CAO Zhicheng, WANG Huwen, et al. The influence mechanism of the discontinuous rock on the propagation path of hydraulic fractures in granite[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S2): 453-464.

地质不连续体对花岗岩水力裂缝扩展路径影响机制

敖嫩¹, 曹志成^{2,3}, 王虎文⁴, 郝文才⁴, 王豪⁴, 郭杰⁴,
张全立³, 陈秋³, 乔伟³

- (1. 内蒙古自治区地质调查研究院, 内蒙古呼和浩特 010041; 2. 甘肃煤田地质研究所, 甘肃兰州 730000;
3. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州 221116;
4. 内蒙古煤炭建设工程(集团)总公司, 内蒙古呼和浩特 010010)

摘要: 干热岩型地热资源开发为我国能源行业发展提供了零碳负碳的解决方案, 建造干热岩人工热储离不开水力压裂。与煤岩、页岩等沉积岩不同, 干热花岗岩属火成岩, 其中发育有岩脉、岩石分界面等地质不连续体, 水力裂缝与其相交后的扩展形态难以预测和控制。基于扩展有限元法(Extended Finite Element Method, XFEM)针对花岗岩中的地质不连续体对水力裂缝扩展路径的影响机制开展研究。结果表明: 岩石基质体与地质不连续体之间的抗拉强度、杨氏模量差异越大, 地质不连续体对水力裂缝的阻碍作用越明显; 泊松比差异越大, 越有利于水力裂缝穿透地质不连续体。对于基质体致密的花岗岩而言, 较小的泵注排量有利于水力裂缝穿透地质不连续体; 在最大主地应力与水力裂缝起裂方向一致的前提下, 较大的地应力差异系数有利于水力裂缝穿透地质不连续体。相同地质和工程参数条件下, 相比于岩脉, 水力裂缝会更容易穿透岩石分界面; 同时, 地质不连续体胶结程度的差异也会影响花岗岩中水力裂缝的扩展路径。

关键词: 花岗岩; 水力裂缝; 地质不连续体; 扩展有限元法

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.S2.075

中图分类号: P314

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)S2-0453-12

The influence mechanism of the discontinuous rock on the propagation path of hydraulic fractures in granite

AO Nen¹, CAO Zhicheng^{2,3}, WANG Huwen⁴, HAO Wencai⁴, WANG Hao⁴, GUO Jie⁴,
ZHANG Quanli³, CHEN Qiu³, QIAO Wei³

- (1. Inner Mongolia Geological Survey and Research Institute, Hohhot 010041, Inner Mongolia, China; 2. Coalfield Geology Research Institute of Gansu, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 4. Inner Mongolia Coal Construction Engineering Group General Company, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

收稿日期: 2024-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(42472334); 深地国家科技重大专项青年科学家课题(2024ZD1004208)

作者简介: 敖嫩(1968—), 男, 正高级工程师, 硕士, 主要从事水工环地质与矿产勘查研究。E-mail: nmgdzdcyjy@163.com

通信作者: 曹志成(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事干热岩水力压裂与裂缝扩展研究。E-mail: caozhicheng0923@163.com

Abstract: The development of hot dry rock (HDR) provides a zero-carbon and negative-carbon solution for China's energy industry. Hydraulic fracturing is one of the main means for building the geothermal reservoirs. Different from sedimentary rocks such as coal and shale, granitic hot dry rock is igneous rock, in which the geologically discontinuous rock, such as veins and rock interfaces are developed. Therefore, it is difficult to predict and control the propagation geometry of the hydraulic fractures when intersecting with these discontinuous rocks. Based on XFEM, the investigations were conducted on the influence mechanism of the discontinuous rock on the propagation path of hydraulic fractures in granite. The result show that: The greater the difference in tensile strength and Young's modulus between rock matrix and the discontinuous rocks, the hindrance effect on the propagating hydraulic fracture is more obvious. A large difference in Poisson's ratio is beneficial for hydraulic fractures to penetrate the discontinuous rock. For the granite with dense matrix, a smaller injection rate is beneficial for the hydraulic fracture to penetrate the discontinuous rock. When the maximum in-situ stress is consistent with the direction of hydraulic fracture initiation, a larger in-situ stress difference coefficient is beneficial for hydraulic fractures to penetrate the discontinuous rock. Under the same geological and engineering parameters, hydraulic fractures are more likely to penetrate the rock interface rather than rock veins. At the same time, the difference in the cementation degree of the discontinuous rock can also affect the propagation path of hydraulic fractures in granite.

Keywords: granite; hydraulic fracture; the discontinuous rock; extended finite element method

0 引言

随着环境问题日益凸显, 环保形势日趋严峻, 传统能源的大量使用所带来的一系列负面效应, 正促使世界各国积极寻求清洁、可持续的新型能源替代方案。干热岩型地热作为一种大储量的清洁能源, 在日趋严峻的环保形势下, 正在逐渐影响着世界能源格局, 并成为学术界、政府和企业关注的焦点^[1-2]。2017年我国在黄河中上游的共和盆地首次钻获高品质干热花岗岩(3 705 m 温度 236 ℃), 标志中国干热岩开发进入“快车道”^[3]。安全、高效地开发干热岩对我国黄河流域生态保护和高质量发展、应对能源短缺和气候变化以及实现碳中和的战略目标都具有积极意义。再者, 面对全球能源短缺的严峻挑战以及应对气候变化、实现碳中和的宏伟战略目标, 干热岩开发更是具有不可替代的积极意义^[4]。

开发干热岩需要建立增强型地热系统(Enhanced Geothermal Systems, EGS), 其核心是向储层钻井并压裂形成一定规模的裂缝网络, 构建注入井和生产井的循环回路来提取热能发电^[5-6]。可见, 水力裂缝是决定储热规模与换热效率的关键。众多学者长期以来都聚焦于水力裂缝的扩展机制展开深入研究^[7-8], 通过大量的理论分析、数值模拟以及现场试验等手段, 深入地揭示了工程参数和地质参数对裂缝形态以及起裂压力的影响。侯公羽等^[9]基于断裂力学准则构建压裂模型, 揭示多种变量对裂缝起裂角和起裂压力的影响机制, 研究发现注水压力的增大会降低起裂角, 随着应力差的增大起裂角逐渐增加。宋进鑫等^[10]基于有限元-离散元方法, 通过改进网格自适应划分建立

多裂缝扩展模型, 模型考虑水力裂缝、天然裂隙以及孔隙结构的相互作用, 研究发现应力阴影影响了裂缝的扩展方向, 但未改变裂缝的扩展长度, 多裂缝扩展主要受裂缝间距的影响, 当间距增大时中间的裂缝扩展长度增加, 裂缝网格总长度不变。解经宇等^[11]基于室内物理试验方法研究了龙马溪组层状页岩的物理力学特征和力学各向异性对水力裂缝扩展形态的影响, 发现页岩微观与力学特征影响压裂时水力裂缝扩展及停泵后压裂液渗流路径。

然而, 在实际的地质环境中, 地质不连续体广泛存在, 其对水力压裂的重要性不容小觑。这些地质不连续体的存在极大地改变了岩石的力学性质和渗流特性^[12]。与完整岩石相比, 它们的存在使得岩石的连续性被破坏, 局部应力场发生重新分布。在水力压裂过程中, 当压裂液遇到地质不连续体时, 其流动路径会发生改变, 可能会沿着这些不连续体优先扩展, 从而导致裂缝的扩展方向和形态与在完整岩石中的情况截然不同。理论和实践研究表明: 岩体中非连续结构面能显著影响水力裂缝的扩展路径, 是形成复杂缝网的关键^[13-14]。诸多学者针对岩石中最为常见的结构面——天然裂缝影响水力裂缝的扩展路径建立了力学模型, 比较经典的有 Warpinski 模型^[15]、Gu 模型^[16]和程万模型^[17]等。以上模型预测了水力裂缝遇结构面时的扩展路径, 例如转向沿结构面滑移或穿过结构面。干热花岗岩属火成岩, 野外地质调查^[18]和岩心分析^[19]显示, 共和盆地花岗岩结构面种类繁多、分布错综复杂, 其中以不同尺度的岩脉、天然裂缝、岩石分界面最为常见(见图 1)。这些结构面与页岩层理^[20]、

煤岩割理^[21]等结构面存在本质区别, 不仅包括单纯的地质不连续面(如天然裂缝), 还包括物理学性质存在差异的地质不连续体(如岩脉、岩石分界面)。随机分布的不同结构面, 使得干热岩水力裂缝的扩展形态变得更加难以预测和控制^[22]。SCHILL 等^[23]的研究指出, 岩脉和岩石分界面在花岗岩中分布极为广泛(见图1)。要探讨干热花岗岩水力压裂机理, 必须要对水力裂缝遇地质不连续体后的扩展路径进行深入研究。

本研究基于扩展有限元法(Extended Finite Element Methon, XFEM), 模拟不同地质和工程参数条件下水力裂缝分别与岩脉和岩石分界面相交后的扩展路径, 进而讨论地质不连续体对花岗岩水力裂缝扩展路径的影响机制。

1 水力裂缝扩展模型

1.1 岩石本构模型

在低渗透储层水力压裂研究中, 为实现模型简化并提升计算效率, 通常忽略因储层地应力变化而引发的储层渗透率改变, 将储层渗透率视作常数^[24]。假

定低渗透储层岩石为线弹性各向同性材料, 其本构关系的矩阵表达式如下

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, ε 为弹性应变; γ 为剪切应变; σ 为弹性应力; E 为弹性模量; ν 为泊松比; G 为剪切模量, $G = E/[2(1 + \nu)]$ 。

1.2 流-固耦合理论

在多孔介质材料建模时, 常规的处理方式是将多孔介质视作多相材料, 借助有效应力原理来描述其应力与渗流行为特性^[25]。对于节点的总应力 σ , 可分解为润湿性流体的平均压应力与有效应力两部分, u_w 为润湿性流体压力, u_a 为其他流体的平均压应力, $\bar{\sigma}$ 为有效应力, 则有效应力表达式如下

$$\bar{\sigma} = \sigma + [Xu_w + (1 - X)u_a]I \quad (2)$$

参数 X 与饱和度以及液/固体体系表面张力系数密切相关。当多孔介质处于完全饱和状态时, $X = 1.0$; 而在非饱和的多孔介质中, X 的取值范围为 $0 \leq X \leq 1$ 。在时刻 t , 依据虚功原理构建的多孔介质材料平衡方程可表示如下

$$\int_v \sigma \cdot \delta \varepsilon dV = \int_s t \cdot \delta v ds + \int_v \hat{f} \cdot \delta v dV \quad (3)$$

式中, δv 为虚速度场; $\delta \varepsilon$ 为虚变形; σ 为真应力; t 为单位面积面作用力; \hat{f} 为单位体积作用力。

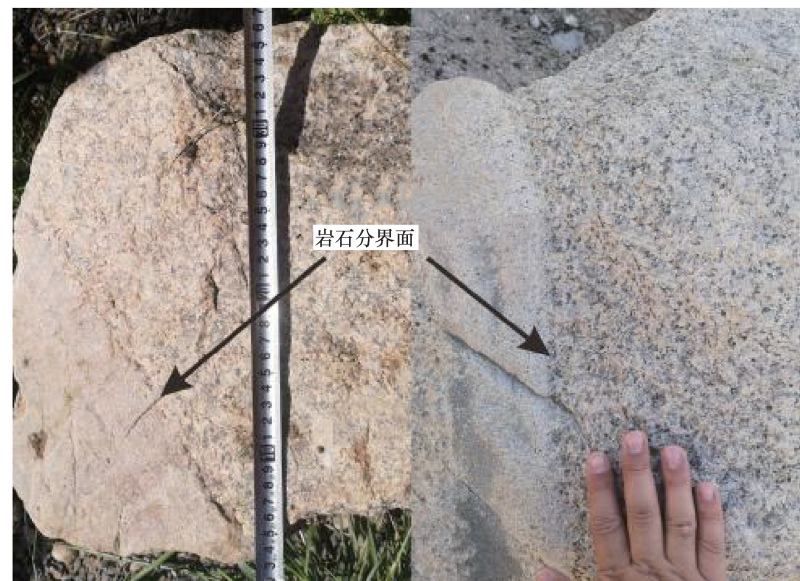
1.3 XFEM 模型的建立

在裂缝断裂分析过程中, 首先运用水平集法精准确定裂缝尖端单元以及裂缝穿透单元, 进而开展不连续位移函数的构建^[26]。位移不连续函数主要包含两部分: 一部分是能够捕获裂缝尖端周围奇点的近尖端渐近函数, 另一部分是表征跨裂缝表面位移跳跃的不连续函数。由此, 单元的位移矢量函数近似值可表示为

$$u = \sum_{I=1}^N N_I(x) [u_I + H(x)a_I + \sum_{\alpha=1}^4 F_{\alpha}(x)b_I^{\alpha}] \quad (4)$$



(a) 岩心及露头中的岩脉



(b) 共和盆地中含岩石分界面的花岗岩露头

图1 花岗岩中的地质不连续体

式中, u_i 为常规有限元解的联系单元相关节点位移矢量; I 为单元全部节点数量; N_i 为单元的形函数; $H(x)$ 为裂缝穿透单元不连续跳跃 Heaviside 函数; a_i 为裂缝穿透单元附加自由度; $F_a(x)$ 为裂缝尖端单元附加函数; b_i^a 为裂缝尖端单元附加自由度。

在二维裂缝扩展情形下, 当单元被裂缝完全穿透时, 在原有常规自由度基础之上, 单元节点将额外增加 2 个自由度。倘若单元处于裂缝尖端位置, 那么单元的每个节点会增加 8 个自由度。若单元节点同时归属于尖端单元节点与裂缝穿透单元节点这两种类型, 该节点将被判定优先属于尖端单元节点类型。而对于未受裂缝影响的单元节点, 其每个节点所具有的自由度保持不变。

(1) 初始损伤准则。假设任意一个方向承受的应力达到单元设置的临界应力时, 单元开始产生损伤, 相应的表达式为

$$\max\left\{\frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0}\right\} = 1 \quad (5)$$

式中, t 为名义应力; t^0 为最高名义应力; n 、 t 、 s 表示方向。

(2) 损伤演化。如果定义了损伤演化模型, 则在损坏开始后进一步加载时, 损伤变量 D 从 0 单调演变为 1.0。法向应力和剪应力分量受以下因素影响

$$\begin{cases} t_n = \begin{cases} (1 - D) \times T_n, & T_n \geq 0 \\ T_n, & \text{其他情况(压缩刚度系数无损伤)} \end{cases} \\ t_s = (1 - D) \times T_s \\ t_t = (1 - D) \times T_t \end{cases} \quad (6)$$

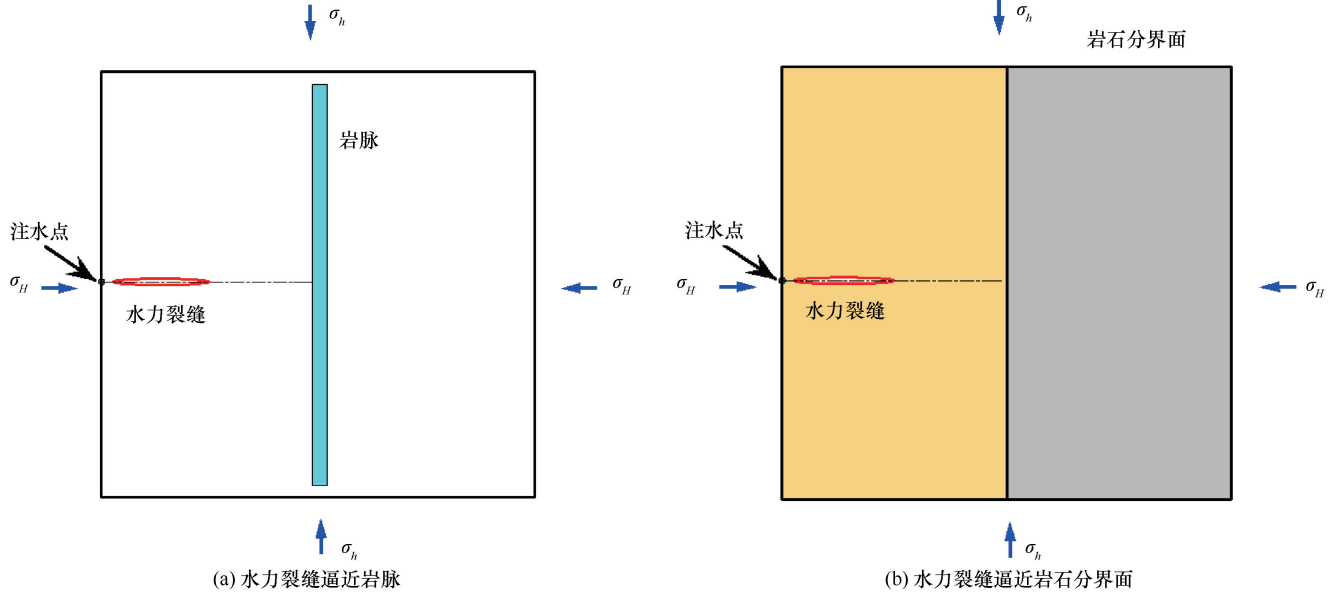


图 2 水力裂缝逼近地质不连续体示意

式中, n 、 s 、 t 表示方向; T 为当前无损伤时弹性牵引-分离行为法向和切向应力张量; t 为实际承受的应力。

2 地质不连续体与水力裂缝相互作用模型的建立

如图 2 所示, 分别含岩脉和岩石分界面的二维水力裂缝扩展模型 (300 mm×300 mm), 通过定义材料属性的方法模拟两种不同的岩性, 整个模型均定义为 XFEM 裂缝扩展路径。CHENG 等^[27]的研究表明, 水力裂缝穿透结构面的现象主要发生在高逼近角的情况下。为保证水力裂缝与不同地质不连续体之间充分作用, 本模型将逼近角设置为 90°, 初始裂缝长度 50 mm。两种模型的网格划分如图 3 所示, 不连续体附近网格被加密。 σ_h 为水平最小主应力, σ_H 为水平最大主应力, 应力差异系数 $\Psi = (\sigma_H - \sigma_h) / \sigma_H$, 模拟研究不同力学参数、应力差异系数、泵注排量等条件下, 两种地质不连续体对水力裂缝扩展路径的影响机制。

数值模拟参数设置以青海共和盆地恰卜恰干热岩地质资料为依据, 数据来源于干热岩探采结合井岩心测试及部分测井解释结果。测试结果如下。(1) 平均矿物组分: 钾长石 (15.17%)、钠长石 (35.08%)、石英 (36.52%)、(金)云母 (10.24%) 和绿泥石 (2.99%)。(2) 力学性质: 杨氏模量 16 498~45 695 MPa (平均 29 857.7 MPa), 泊松比 0.181~0.276 (平均 0.223), 抗拉强度 3.02~6.03 MPa (平均 4.97 MPa), 围压 20 MPa 时的抗压强度 92.1~243.4 MPa (平均 191.78 MPa)、围压 40 MPa 时的抗压强度 196.5~

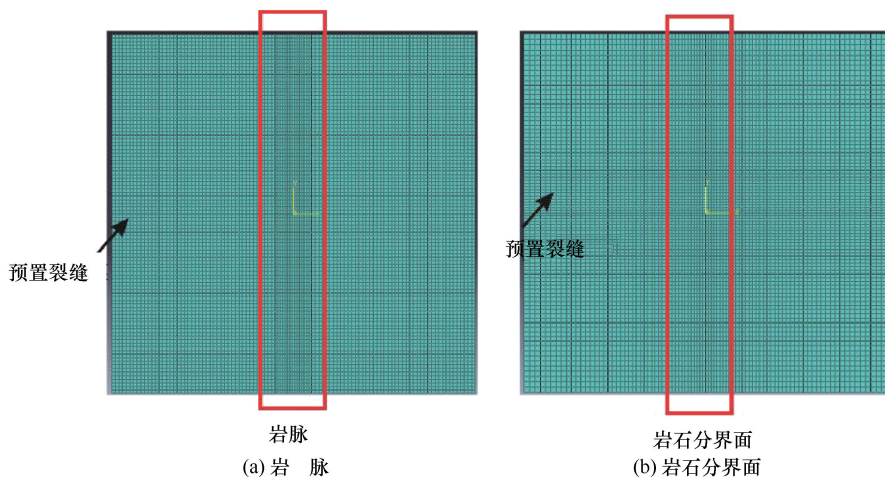


图3 网格划分

389.5 MPa(平均 320.88 MPa)、围压 60 MPa 时的抗压强度 69.8~403.8 MPa(平均 189.7 MPa), 总平均为 226.11 MPa。(3)地应力: 综合采用等多种地应力测量方法显示 4 000 m 深处最大水平主应力为 144.22 MPa, 最小主应力为 106.15 MPa, 垂直主应力为 99.93 MPa。

以上述现场数据为参照, 并依据压裂模拟试验相似准则^[28], 对两组不同的水力裂缝逼近地质不连续体模型设置三组模拟地应力: (1) $\sigma_H=15$ MPa, $\sigma_h=11$ MPa, $\Psi=0.27$; (2) $\sigma_H=18$ MPa, $\sigma_h=11$ MPa, $\Psi=0.39$; (3) $\sigma_H=12$ MPa, $\sigma_h=11$ MPa, $\Psi=0.08$ 。每种地质不连续体的每一种地应力条件下按照表 1 进行模拟, 分别研究不同抗拉强度、杨氏模量、泊松比, 以及泵注排量条件下水力裂缝与地质不连续体之间的作用关系。

表 1 模拟参数设置

组别	岩石 1			岩石 2			参数差异			泵注 排量/ $m^2 \cdot s^{-1}$
	抗拉 强度/MPa	杨氏 模量/GPa	泊松比	抗拉 强度/MPa	杨氏 模量/GPa	泊松比	抗拉强度 之差/MPa	杨氏模量 之差/GPa	泊松比 之差	
1	3	15	0.25	6	30	0.15	3	15	0.10	0.000 10
2	3	15	0.25	6	45	0.15	3	30	0.10	0.000 10
3	3	15	0.25	6	60	0.15	3	45	0.10	0.000 10
4	3	15	0.25	6	75	0.15	3	60	0.10	0.000 10
5	3	15	0.25	6	45	0.15	3	30	0.10	0.000 50
6	3	15	0.25	6	45	0.15	3	30	0.10	0.000 05
7	3	15	0.25	6	45	0.15	3	30	0.10	0.001 00
8	3	15	0.25	9	45	0.15	6	30	0.10	0.000 10
9	3	15	0.25	15	45	0.15	12	30	0.10	0.000 10
10	3	15	0.20	6	45	0.15	3	30	0.05	0.000 10
11	3	15	0.30	6	45	0.15	3	30	0.15	0.000 10
12	3	15	0.35	6	45	0.15	3	30	0.20	0.000 10

注: 岩石 1 代表水力裂缝初始所在的岩石(岩脉模型中为岩石基质体, 岩石分界面模型中为左侧岩石), 岩石 2 代表其中的不连续体(岩脉模型中为岩脉, 岩石分界面模型中为右侧岩石)。

3 模拟结果与讨论

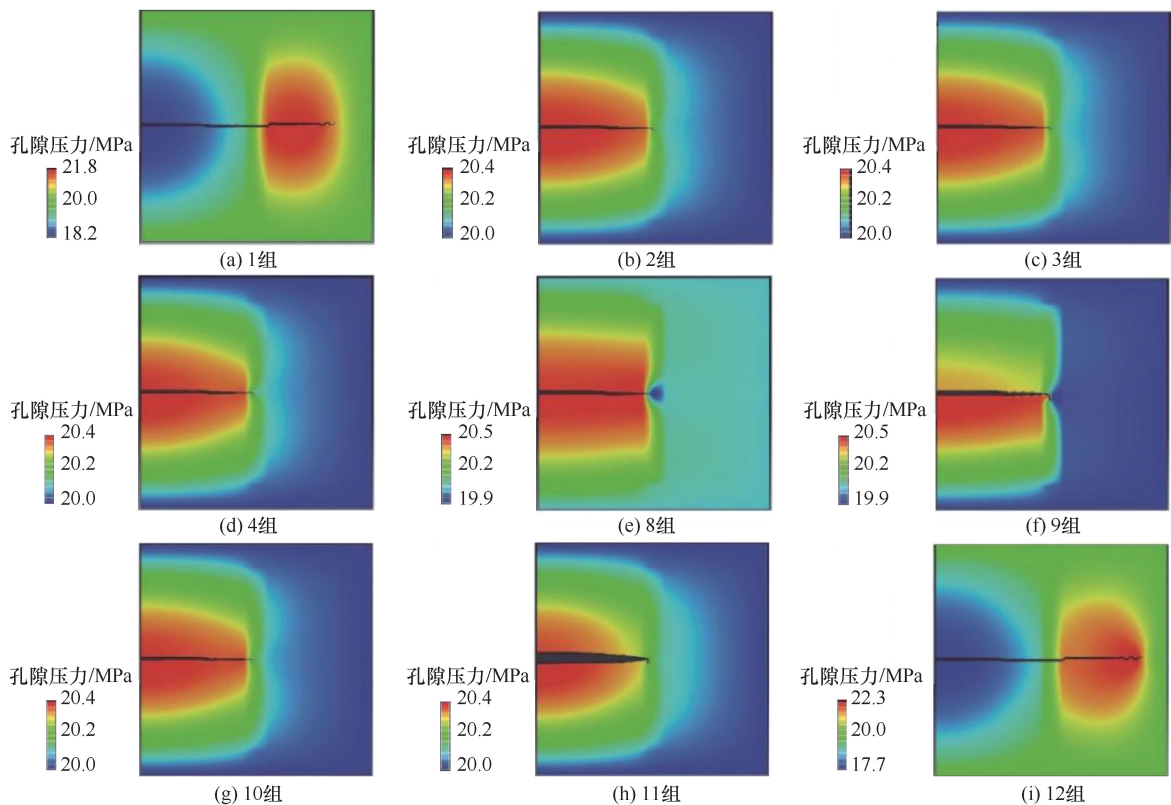
水力裂缝是否穿透地质不连续体影响着人工热储规模及换热面积, 同时还影响着近井区域结构面滑移及潜在的诱发地震情况。

3.1 地质不连续体力学性质的差异对水力裂缝扩展的影响

图 4 展示了水力裂缝与岩脉作用后的扩展行为结果, 为了减小地应力差异系数的影响, 选择 $\Psi=0.08$ 的情况讨论。地质不连续体杨氏模量的差异对水力裂缝扩展行为的影响结果如图 4(a)~(d)所示,

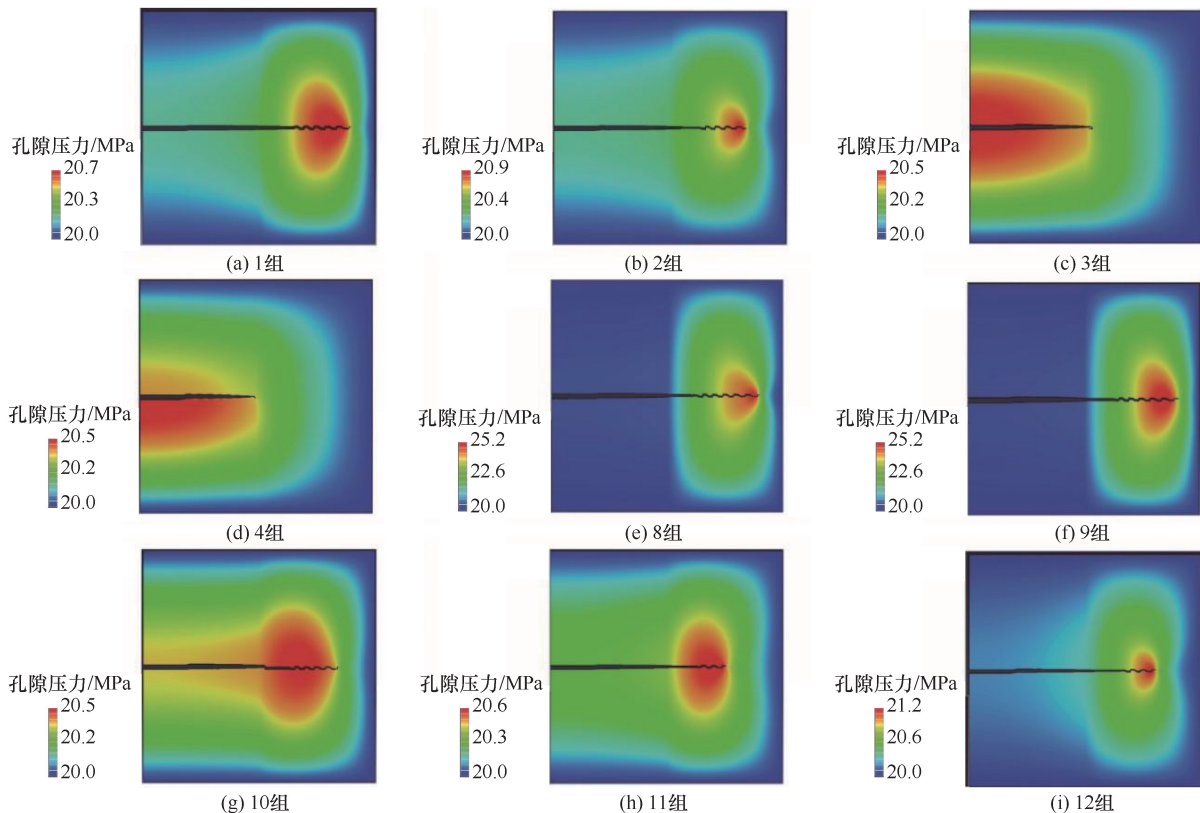
当岩脉与岩石基质体的杨氏模量之差超过 30 GPa 时, 水力裂缝便难以突破岩脉并呈现出转向沿岩脉滑移的趋势。如图 4(b)(e)(f)所示, 当岩脉与岩石基质体抗拉强度之差超过 3 MPa 时, 水力裂缝便难以穿透岩脉。如图 4(b)(g)(h)(i)所示, 泊松比之差超过 0.15 时, 水力裂缝更容易穿透岩脉。

图 5 展示了水力裂缝与岩石分界面作用后的扩展行为, 对比岩脉, 相同参数条件下岩石分界面阻碍水力裂缝扩展的能力较弱, 仅在杨氏模量之差大于 45 GPa 的条件下[见图 5(c)(d)], 水力裂缝在岩石分界面处止裂。水力裂缝与地质不连续体的相互作用关系对杨氏模量较为敏感, 随着杨氏模量之差的逐渐增大, 水力裂缝与岩脉和岩石分界面的作用关系均出现了从穿透到止裂的变化。泊松比和抗拉强度的变化并未影响水力裂缝穿透岩石分界面。



图中对应的是 $\sigma_H = 12 \text{ MPa}$, $\sigma_h = 11 \text{ MPa}$ 条件下, (a)—(d)对应表 1 中 1—4 组的参数, (e)—(i)对应表 1 中 8—12 组的参数

图 4 水力裂缝与岩脉作用后的扩展行为结果



图中对应的是 $\sigma_H = 12 \text{ MPa}$, $\sigma_h = 11 \text{ MPa}$ 条件下, (a)—(d)对应表 1 中 1—4 组的参数, (e)—(i)对应表 1 中 8—12 组的参数

图 5 水力裂缝与岩石分界面作用后的扩展行为结果

3.2 泵注排量对水力裂缝扩展的影响

图6、图7分别展示了 $\Psi=0.08$ 时岩石物理力学性质相同条件下,不同泵注排量对水力裂缝扩展路径的影响规律。可以看出,岩石分界面阻碍水力裂缝延伸的能力小于岩脉,同时,较小排量条件下水力裂缝的延伸能力更强。当泵注排量为 $0.00005\text{ m}^2/\text{s}$ 时,水力裂缝在与岩脉相交后呈现出“先转移后穿透”的扩展行为;而在相同的小排量条件下,水力裂缝在穿透岩石分界面后也在新的岩石基质体中延伸得更远。XIE等^[29]的试验结果表明:在水力裂缝与天然裂缝等地质不连续面相交时,较大的排量有助于水力裂缝穿透天然裂缝。这一现象在水力裂缝与地质不连续体的相互作用过程中却并未被发现。黄中伟等人^[30]的研究表明:较小的泵注排量有助于压裂液在微-细观孔隙、裂隙中渗流。对于基质体致密的花岗岩来说,微-细观孔隙、裂隙在泵注水压力的作用下逐渐扩展并汇合贯通最终有利于形成宏观裂纹^[31]。

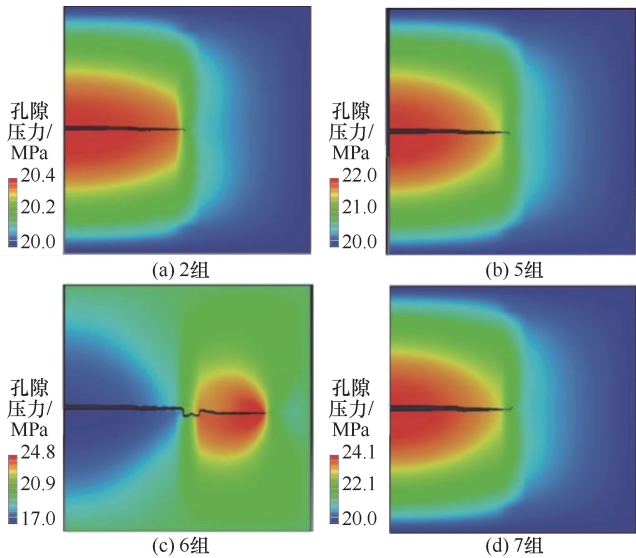


图6 不同排量条件下水力裂缝与岩脉相交

3.3 模拟地应力对水力裂缝扩展的影响

本研究的模拟地应力是根据共和盆地干热岩热储层地应力分布并结合相似准则进行设置,图8—图11

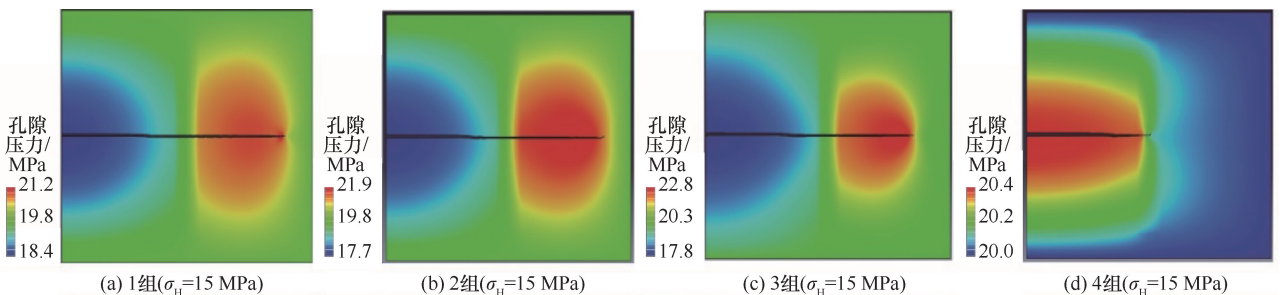
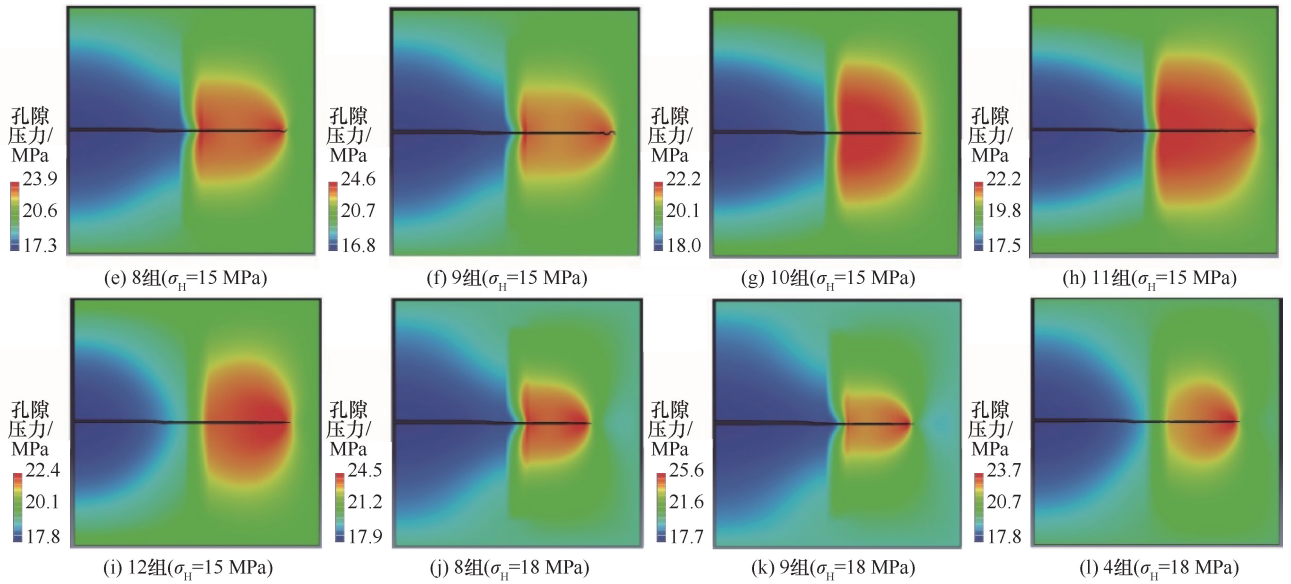


图6、图7中(a)—(d)对应表1中2、5—7组的参数
图7 不同排量条件下水力裂缝与岩石分界面相交

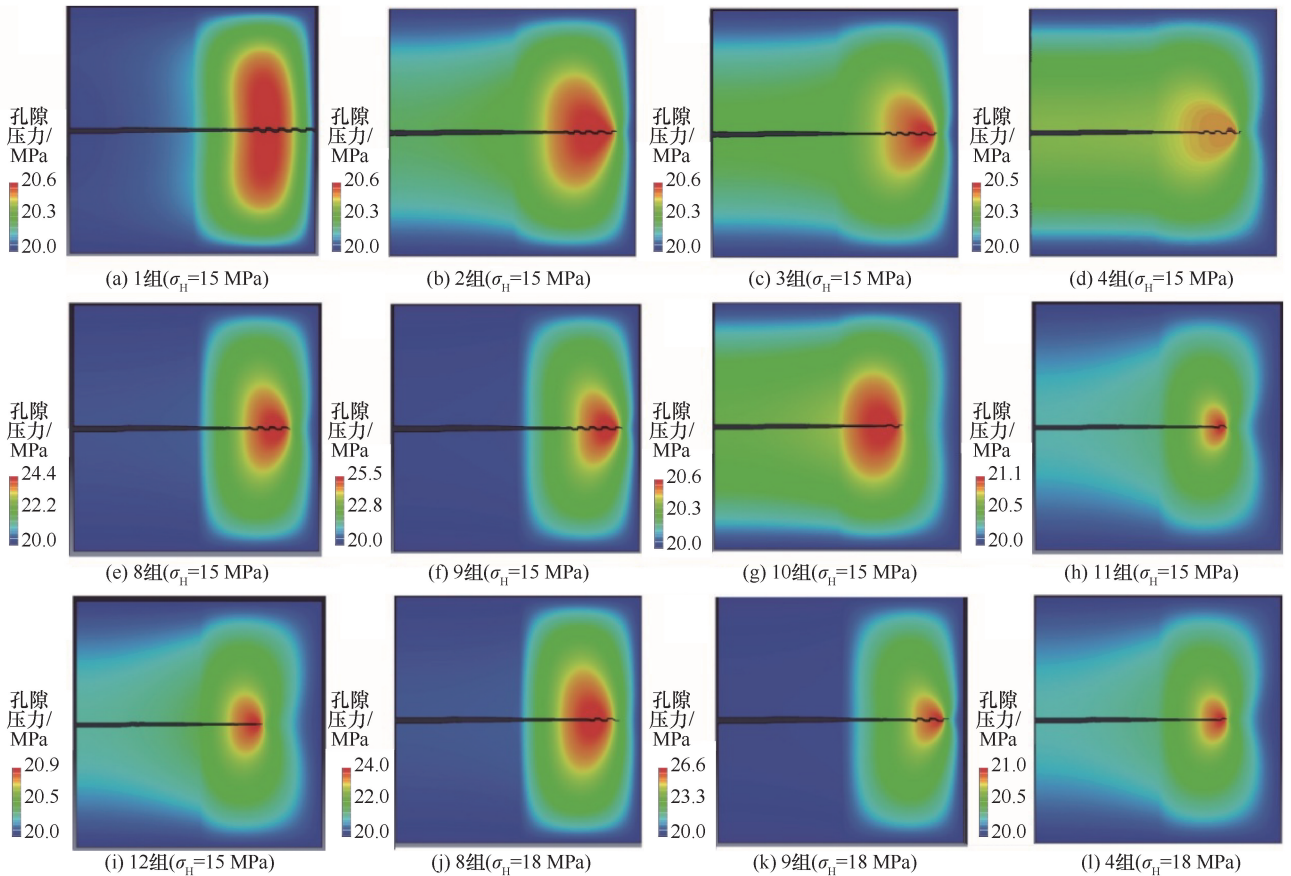
展示了不同地应力条件下水力裂缝与不同地质不连续体相交后的扩展行为,对比图3、图4可以看出:在水力裂缝沿最大水平主地应力扩展的前提下^[32],地应力差异系数越大,越有利于水力裂缝穿透地质不连续体[对比图4(b)和(c),图8(b)和(c)],且相同地质和工程参数条件下岩脉对于水力裂缝的阻力要大于岩石分界面[对比图8(d)、图9(d)]。

此外,在与岩石分界面相交后水力裂缝尖端往往呈现出沿网格单元之间的间隙扩展的波浪状形态,但水力裂缝在穿透岩脉后并未展现出类似的扩展形态,且穿透岩石分界面后水力裂缝的扩展距离要明显长于穿透岩脉。水力压裂过程中的泵压-时间曲线能在一定程度上反映整个压裂的过程,图10展示了水力裂缝分别穿透两种地质不连续体过程的泵压-时间曲线。可以看出,扩展中的水力裂缝在延伸至新的岩石基质体后,泵压会因需要重新建立平衡而剧烈波动。水力裂缝沟通岩脉的泵压-时间曲线波动集中在曲线前半段,且泵压都有快速下降的阶段;水力裂缝沟通岩石分界面的泵压-时间曲线波动集中在曲线后半段,且从压裂开始泵压都一直保持在一个较高的水平。对于



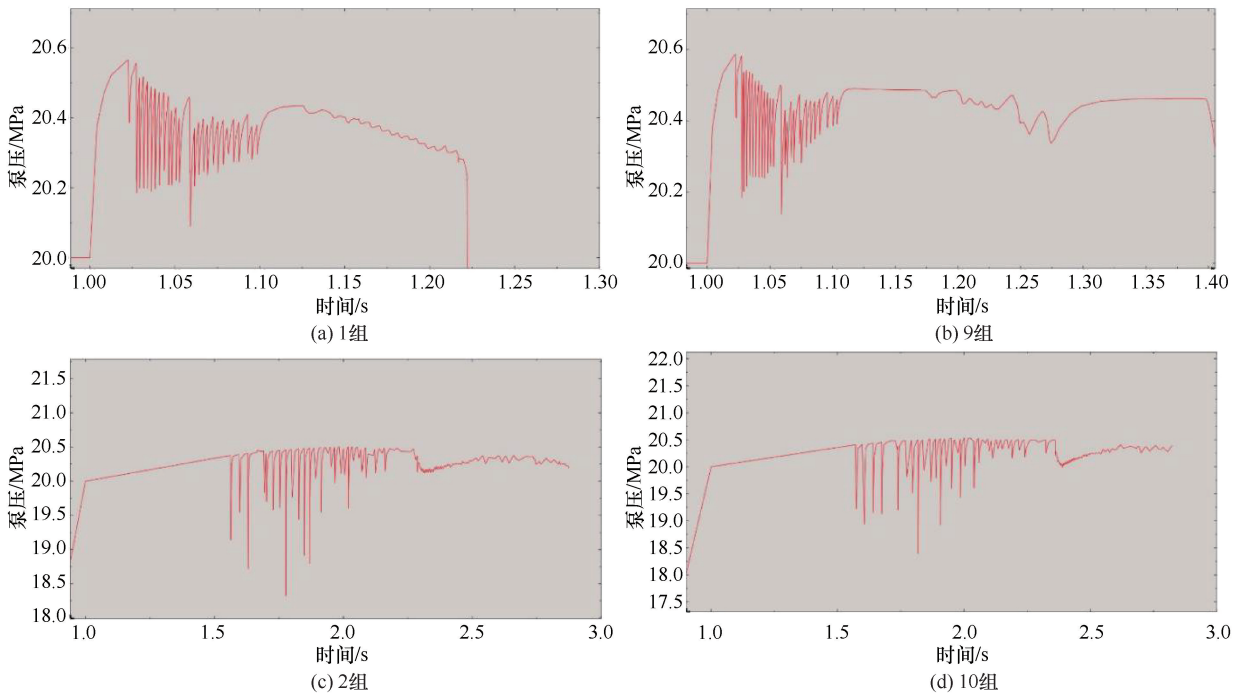
图中(a)——(i)是水力裂缝在地应力为 $\sigma_H = 15 \text{ MPa}$, $\sigma_h = 11 \text{ MPa}$ 时的扩展形态, 其中(a)——(d)对应表1中1—4组的参数, (e)——(i)对应表1中8—12组的参数, (j)——(l)是在地应力为 $\sigma_H = 18 \text{ MPa}$, $\sigma_h = 11 \text{ MPa}$ 时的扩展形态, 分别对应表1中8、9、4

图8 不同地应力条件下水力裂缝与岩脉作用后的扩展行为



图中(a)——(i)是水力裂缝在地应力为 $\sigma_H = 15 \text{ MPa}$, $\sigma_h = 11 \text{ MPa}$ 时的扩展形态, 其中(a)——(d)对应表1中1—4组的参数, (e)——(i)对应表1中8—12组的参数, (j)——(l)是在地应力为 $\sigma_H = 18 \text{ MPa}$, $\sigma_h = 11 \text{ MPa}$ 时的扩展形态, 分别对应表1中8、9、4。

图9 不同地应力条件下水力裂缝与岩脉作用后的扩展行为



图中(a)(b)是水力裂缝沟通岩脉过程中在地应力为 $\sigma_H=12\text{ MPa}$ 、 $\sigma_h=11\text{ MPa}$ 时表1中1、9组数据的模拟结果，
(c)(d)是水力裂缝沟通岩石分界面过程中在地应力为 $\sigma_H=12\text{ MPa}$ 、 $\sigma_h=11\text{ MPa}$ 时表1中2组数据的模拟结果，
以及 $\sigma_H=15\text{ MPa}$ 、 $\sigma_h=11\text{ MPa}$ 时表1中10组数据的模拟结果。

图10 水力裂缝沟通岩脉和岩石分界面后泵压-时间曲线的差异

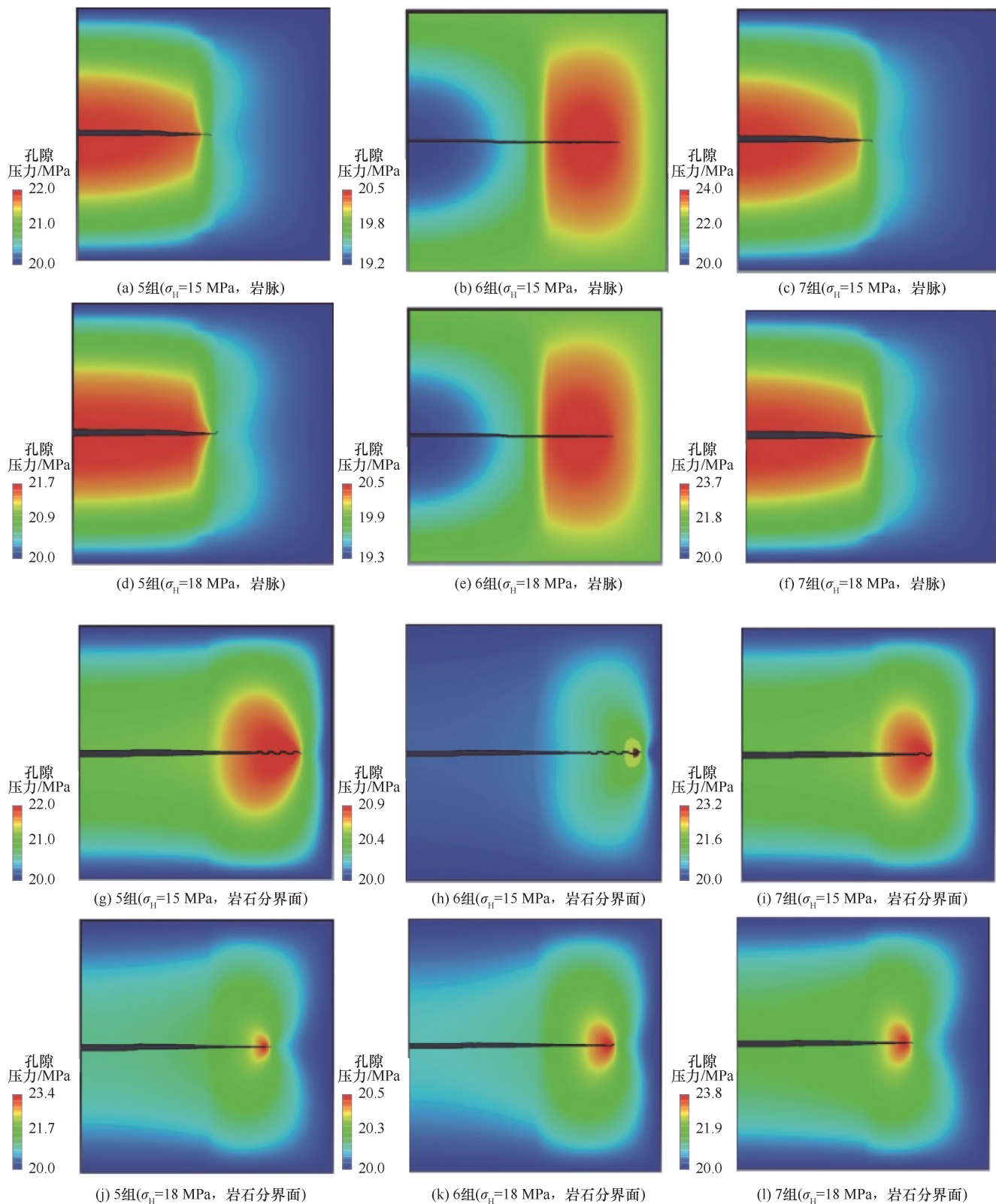
基质体致密的花岗岩而言，较小的排量更容易促进微观孔隙-裂隙扩展并汇合贯通成宏观裂缝。图11展示了水力裂缝在不同地应力、排量条件下分别与岩脉和岩石分界面相交后的扩展行为，由图可知，当泵注排量为 $0.00005\text{ m}^2/\text{s}$ 时，水力裂缝相比于其他两组排量更容易穿透岩脉，且在水力裂缝穿透岩石分界面后延伸的距离相较于其他两组更大的排量也更远。此外，通过水力裂缝穿透不同地质不连续体后扩展的形态可以看出，较大的地应力差异系数有利于水力裂缝穿透地质不连续体，但对于穿透之后裂缝进一步的扩展影响并不明显。

3.4 讨论

水力裂缝与岩脉作用过程中的泵注压力要大于与岩石分界面的，而作用后泵注压力的下降幅度又小于水力裂缝与岩石分界面作用。此外，泵注排量的变化对泵注压力波动影响最为明显[见图12(a)(b)]。图12(c)(d)显示了水力裂缝与不同地质不连续体作用后泵注压力下降值的分布，不论是岩脉还是岩石分界

面，水力裂缝未穿透地质不连续体时泵注压力的降幅要明显大于穿透时。未能穿透地质不连续体的水力裂缝多是在新的岩石基质体中并未建立泵注能量输入与裂缝表面能耗散之间的平衡，使得止裂或沿界面滑移的扩展行为发生。通过泵注压力的降幅可对水力裂缝的扩展行为进行一定预判。

在花岗岩水力压裂物理模拟试验中，水力裂缝往往很难直接穿透岩脉，多类似于图6(c)中展示的模拟结果。水力裂缝扩展至基质体和岩脉的交界面后沿该面滑移，后通过岩脉中发育的天然裂缝穿透岩脉[见图13(a)]。形成此扩展模式主要受基质体和石英脉界面胶结强度的影响。以石英脉为例，含石英脉的花岗岩是在成岩过程中水侵入古老岩体裂隙中形成的，界面胶结强度往往远低于基质体的抗拉强度。而岩石分界面的形成原因多为同一块岩石处在不同的成岩环境^[23]，其胶结强度往往大于岩脉与基质体的交界面，因此岩石分界面阻碍裂缝延伸的能力更弱[见图13(b)]。



图中(a)—(c)是水力裂缝在地应力为 $\sigma_H=15$ MPa, $\sigma_h=11$ MPa时与岩脉相交后的扩展形态, 图中(d)—(f)是水力裂缝在地应力为 $\sigma_H=18$ MPa, $\sigma_h=11$ MPa时与岩脉相交后的扩展形态, 图中(g)—(i)是水力裂缝在地应力为 $\sigma_H=15$ MPa, $\sigma_h=11$ MPa时与岩石分界面相交后的扩展形态, 图中(j)—(k)是水力裂缝在地应力为 $\sigma_H=18$ MPa, $\sigma_h=11$ MPa时与岩石分界面相交后的扩展形态, 均对应表1中5—7组的参数

图 11 水力裂缝在不同地应力、排量条件下分别与岩脉和岩石分界面相交后的扩展行为

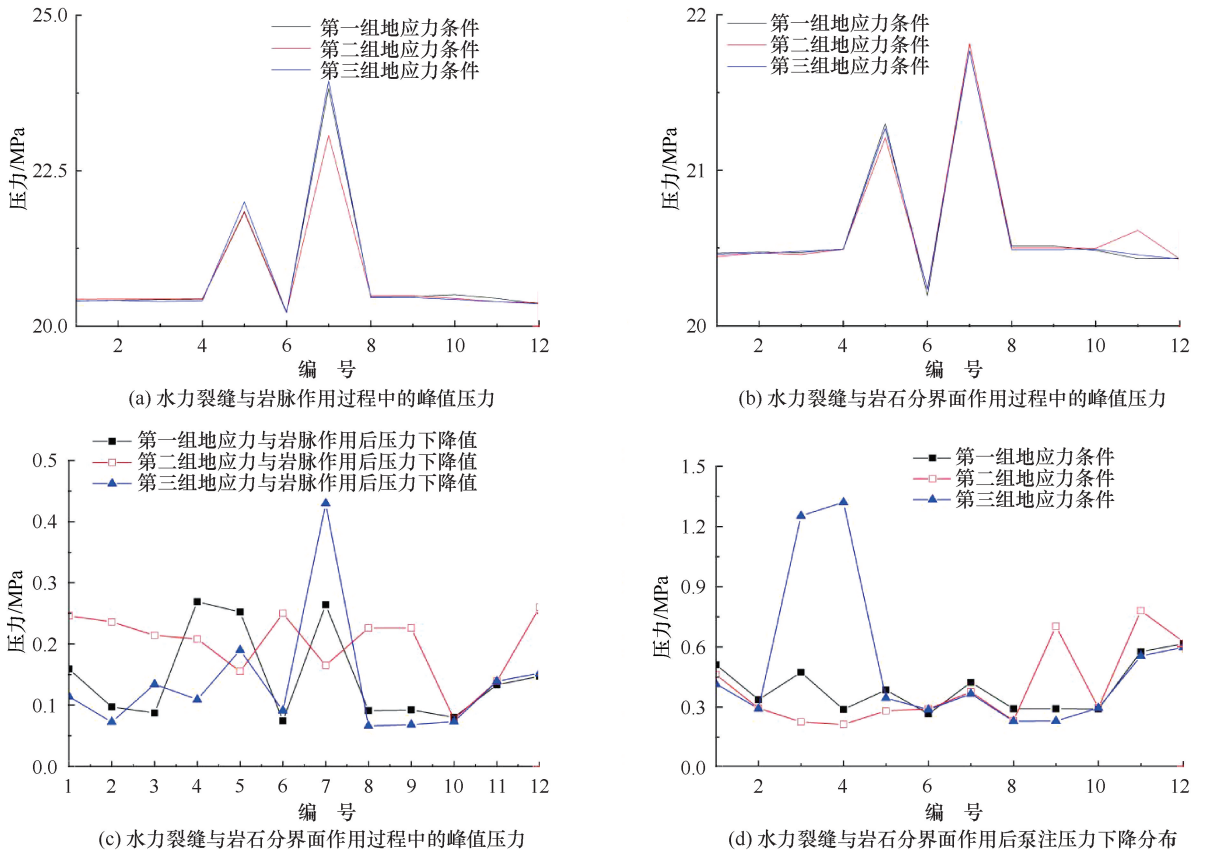


图 12 不同地应力条件下水力压裂过程中泵注压力特征

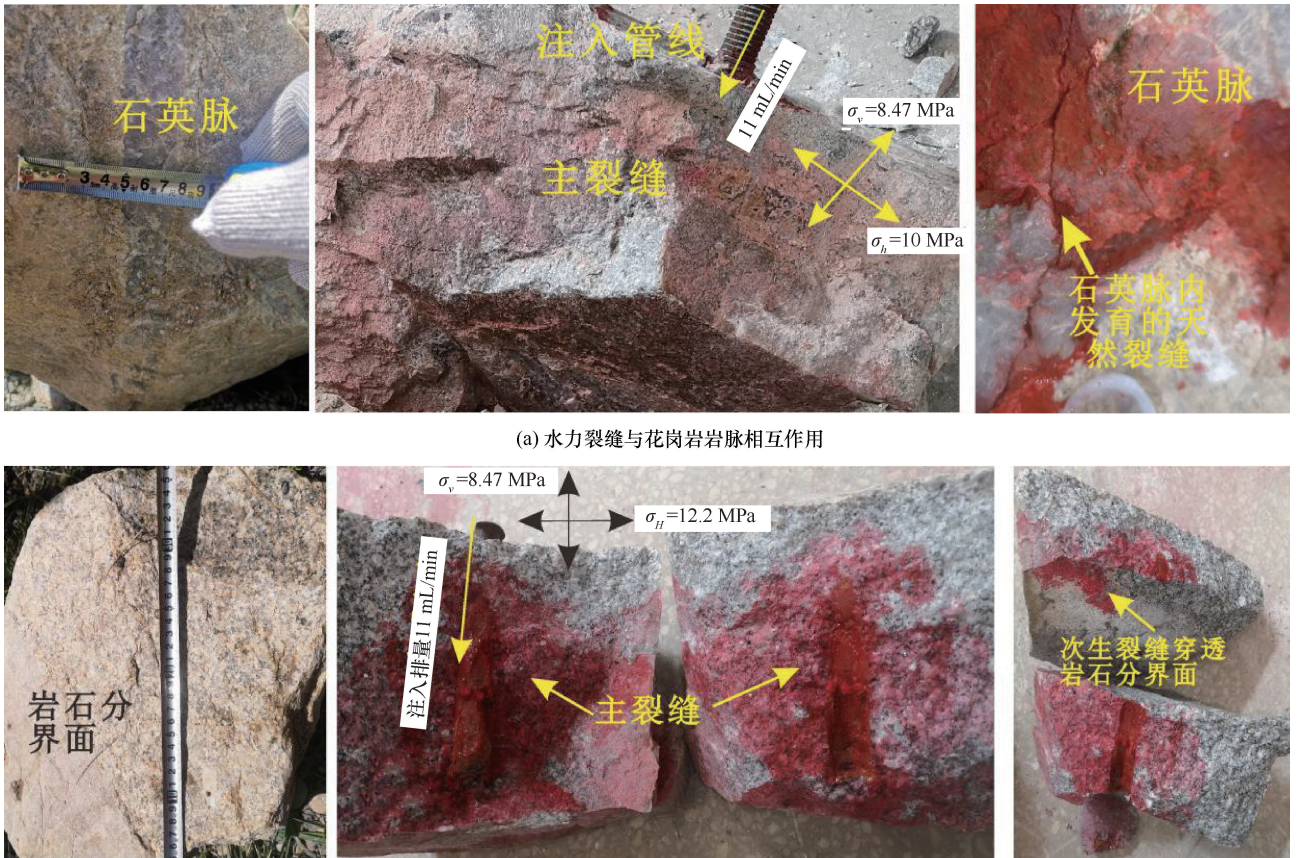


图 13 花岗岩水力裂缝与不同地质不连续体相交^[12]

4 结 论

(1) 花岗岩中发育的岩脉、岩石分界面等地质不连续体对于水力裂缝的扩展路径有着显著的影响: 抗拉强度、杨氏模量之间的差异越大, 地质不连续体对于水力裂缝的阻碍作用越明显; 泊松比差异越大, 越有利于水力裂缝穿透地质不连续体。水力裂缝与地质不连续体之间的相互作用关系对杨氏模量较为敏感; 随着上述三种参数的变化, 水力裂缝与岩脉的作用关系变化要比与岩石分界面的变化明显。

(2) 较小的泵注排量有利于水力裂缝穿透地质不连续体; 在最大主地应力与水力裂缝起裂方向一致的情况下, 较大的地应力差异系数有利于水力裂缝穿透地质不连续体; 泵注压力的波动在一定程度上能反映水力裂缝扩展的过程。

(3) 相同地质和工程参数条件下, 相比于岩脉水力裂缝会更容易穿透岩石分界面, 地质不连续体的胶结程度的差异也会影响花岗岩中水力裂缝的扩展路径。

参考文献:

[1] 汪集昉, 胡圣标, 庞忠和, 等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 25-31.

[2] 李德威, 王焰新. 干热岩热能研究与开发的若干重大问题[J]. 地球科学, 2015, 40(11): 1858-1869.

[3] 邵保平, 吴阳春, 王帅, 等. 青海共和盆地花岗岩高温热损伤力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 69-83.

[4] 王转转, 欧成华, 王红印, 等. 国内地热资源类型特征及其开发利用进展[J]. 水利水电技术, 2019, 50(6): 187-195.

[5] 王贵玲, 马峰, 蔺文静, 等. 干热岩资源开发工程储层激发研究进展[J]. 科技导报, 2015, 33(11): 103-107.

[6] XIE J Y, CHENG W, WANG R J, et al. Experiments and analysis on the influence of perforation mode on hydraulic fracture geometry in shale formation[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 168: 133-147.

[7] 胡晓东, 易普康, 丘阳, 等. 基于井场实测数据水击压力波波速特征分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(5): 95-104.

[8] 鲍先凯, 段东明, 曹嘉星, 等. 电脉冲水力压裂煤体机理及裂缝效果评价[J]. 水利水电技术, 2018, 49(8): 39-46.

[9] 侯公羽, 刘云峰, 于续楠, 等. 基于不同断裂准则下水力压裂裂纹起裂规律研究[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(5): 687-697.

[10] 宋进鑫, 郁航, 王雅亭, 等. 多级水力压裂应力阴影效应的数值分析[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(3): 475-482.

[11] 解经宇, 陆洪智, 陈磊, 等. 龙马溪组层状页岩微观非均质性及各向异性特征[J]. 地质科技通报, 2021, 40(3): 67-77.

[12] 司富安, 贾国臣, 高玉生, 等. 不均匀及不连续结构面抗剪强度模拟试验研究[J]. 水利水电技术, 2010, 41(2): 75-79.

[13] 解经宇, 蒋国盛, 王荣璟, 等. 射孔对页岩水力裂缝形态影响的物理模拟实验[J]. 煤炭学报, 2018, 43(3): 776-783.

[14] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报,

2019, 44(5): 1283-1305.

[15] WARPINSKI N R, TEUFEL L W. Influence of geologic discontinuities on hydraulic fracture propagation (includes associated papers 17 011 and 17 074)[J]. Journal of Petroleum Technology, 1987, 39(2): 209-220.

[16] GU H, WENG X, LUND J, et al. Hydraulic fracture crossing natural fracture at nonorthogonal angles; a criterion and its validation[J]. SPE Production & Operations, 2012, 27(1): 20-26.

[17] 程万, 金衍, 陈勉, 等. 三维空间中非连续面对水力压裂影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 559-563.

[18] 张森琦, 严维德, 黎敦朋, 等. 青海省共和县恰卜恰干热岩体地热地质特征[J]. 中国地质, 2018, 45(6): 1087-1102.

[19] XIE J Y, LI L, WEN D G, et al. Experiments and analysis of the hydraulic fracture propagation behaviors of the granite with structural planes in the Gonghe basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(6): 1816-1827.

[20] 李存宝, 谢和平, 谢凌志. 页岩起裂应力和裂纹损伤应力的试验及理论[J]. 煤炭学报, 2017, 42(4): 969-976.

[21] 彭苏萍. 我国煤矿安全高效开采地质保障系统研究现状及展望[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2331-2345.

[22] LU G Y, CRANDALL D, BUNGER A P. Observations of breakage for transversely isotropic shale using acoustic emission and X-ray computed tomography: Effect of bedding orientation, pre-existing weaknesses, and pore water[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 139: 104650.

[23] SCHILL E, MEIXNER J, MELLER C, et al. Criteria and geological setting for the generic geothermal underground research laboratory, GEOLAB[J]. Geothermal Energy, 2016, 4(1): 7.

[24] 王恩元, 孔祥国, 何学秋, 等. 冲击载荷下三轴煤体动力学分析及损伤本构方程[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 2049-2056.

[25] 金毅, 权伟哲, 秦建辉, 等. 孔隙-孔喉分形多孔介质复杂类型组构模式表征[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1845-1854.

[26] 杨现禹, 解经宇, 叶晓平, 等. 低渗油藏 CO₂ 地质封存矿物颗粒运移及注入堵塞机理[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2827-2835.

[27] CHENG W, JIANG G S, XIE J Y, et al. A Simulation study comparing the Texas two-step and the multistage consecutive fracturing method[J]. Petroleum Science, 2019, 16: 1121-1133.

[28] 郭天魁, 刘晓强, 顾启林. 射孔井水力压裂模拟实验相似准则推导[J]. 中国海上油气, 2015, 27(3): 108-112.

[29] XIE J Y, CHENG W, WANG R J, et al. Experiments and analysis on the influence of perforation mode on hydraulic fracture geometry in shale formation[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 168: 133-147.

[30] 黄中伟, 李志军, 李根生, 等. 煤层气水平井定向喷射防砂压裂技术及应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2687-2697.

[31] 解经宇, 王丹, 李宁, 等. 干热岩压裂建造人工热储发展现状及建议[J]. 地质科技通报, 2022, 41(3): 321-329.

[32] 李倩, 李童, 蔡益栋, 等. 煤层气储层水力裂缝扩展特征与控因研究进展[J]. 煤炭学报, 2023, 48(12): 4443-4460.

(责任编辑 王海锋)