

高梁, 杜朋召, 周文朋, 等. 页岩层理面力学参数对水力压裂裂缝扩展影响规律及机制的数值试验研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(3): 236-250. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.019

GAO Liang, DU Pengzhao, ZHOU Wenpeng, et al. Numerical simulation study on the effects and mechanisms of bedding plane mechanical parameters on hydraulic fracture propagation in shale[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(3): 236-250. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.019

页岩层理面力学参数对水力压裂裂缝扩展影响规律及机制的数值试验研究

高 梁^{1,2}, 杜朋召^{3,4}, 周文朋⁵, 徐荣超¹, 董金玉¹, 王怡博², 阎 震²

(1. 华北水利水电大学 地球科学与工程学院, 河南 郑州 450046; 2. 中国水利水电建设工程咨询西北有限公司, 陕西 西安 710100; 3. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003; 4. 郑州大学 水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 5. 中国水利水电第十一工程局有限公司, 河南 郑州 450001)

摘要:【目的】层理面力学参数对页岩水力压裂裂缝的起裂及扩展行为具有显著影响, 而目前针对层理面倾角及强度等对裂缝影响规律和机制的研究并不充分。【方法】利用 ABAQUS 有限元软件, 采用全局零厚度 Cohesive 单元开展二维数值模拟, 基于 Python 编程提取水力裂缝的力学参数, 分析层理面倾角、层理面强度和地应力差对压裂裂缝扩展的影响。【结果】研究表明: (1) 层理面倾角对于水力压裂裂缝的扩展方式影响较大, 在 0°~90° 范围内, 当层理面倾角为 45° 时裂缝长度最长, 裂缝数量最多。(2) 层理面强度越弱, 水力压裂裂缝的扩展路径受层理面影响越显著, 更容易沿着层理面产生低缝宽的剪切裂缝。(3) 当地应力差从 2 MPa 增加至 8 MPa 时, 水力压裂裂缝的偏转效应越显著, 即裂缝更容易向着大主应力方向扩展。(4) 与层理面强度和地应力差相比, 层理面倾角对水力压裂裂缝的影响更为显著。(5) 根据水力压裂裂缝与层理面之间的相互作用方式, 将裂缝形态分为贯穿、转向、分叉和捕获四种形式, 随着层理面倾角的增加, 水力压裂裂缝由贯穿向分叉或转向转变。【结论】层理面倾角、层理面强度和地应力差三种影响因素当中, 层理面倾角对压裂裂缝的影响最为显著。

关键词: 水力压裂裂缝; 层理面; 页岩; 数值模拟; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.019

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TE357

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)03-0236-15



Numerical simulation study on the effects and mechanisms of bedding plane mechanical parameters on hydraulic fracture propagation in shale

GAO Liang^{1,2}, DU Pengzhao^{3,4}, ZHOU Wenpeng⁵, XU Rongchao¹, DONG Jinyu¹, WANG Yibo², YAN Zhen²

(1. College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, Henan, China; 2. China Northwest Water Conservancy and Hydropower Engineering Consulting Co., Ltd., Xi'an 710100, Shaanxi, China; 3. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, Henan, China;

收稿日期: 2024-10-15; 修回日期: 2024-11-22; 录用日期: 2024-11-26; 网络出版日期: 2024-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51709113); 河南省重点研发专项(241111322900)

作者简介: 高 梁(1998—), 男, 博士研究生, 主要从事深部岩体工程灾害防控方面工作。E-mail: 954454726@qq.com

通信作者: 徐荣超(1988—), 男, 副教授, 博士研究生导师, 博士, 从事工程地质与岩土力学方面的教学和研究。E-mail: rcxism@126.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

4. School of Water Resources and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China; 5. Sinohydro Bureau 11 Co., Ltd., Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract: [Objective] The mechanical parameters of bedding planes have a significant influence on the initiation and propagation of hydraulic fractures in shale. However, current research on the effects and mechanisms of bedding plane inclination angle and strength on fractures remains limited. [Methods] ABAQUS finite element software was utilized in this study to conduct two-dimensional numerical simulations by adopting the global zero-thickness cohesive element. Python programming was employed to extract the mechanical parameters of hydraulic fractures, and the effects of bedding plane inclination angle, bedding plane strength, and in-situ stress difference on fracture propagation were analyzed. [Results] The result indicated that: (1) the bedding plane inclination angle had a significant impact on the propagation patterns of hydraulic fractures. Within the range of 0° to 90° , when the bedding plane inclination angle was 45° , the fracture length was the longest, and the number of fractures was the largest. (2) Weaker bedding plane strength resulted in more significant effects of the bedding plane on the propagation path of hydraulic fractures, making it easier for narrow-width shear fractures to develop along the bedding plane. (3) When the difference in stress increased from 2 MPa to 8 MPa, the deflection effect of hydraulic fracturing fractures became more prominent, meaning that the fractures were more likely to propagate in the direction of the major principal stress. (4) Compared with bedding plane strength and in-situ stress difference, the bedding plane inclination angle had a more significant impact on hydraulic fractures. (5) Based on the interaction between hydraulic fractures and bedding plane, fracture patterns were divided into four types: penetration, deflection, bifurcation, and capture. As the bedding plane inclination angle increased, hydraulic fractures transitioned from penetration to bifurcation or deflection. [Conclusion] Among the three influencing factors, namely bedding plane inclination angle, bedding plane strength, and in-situ stress difference, bedding plane inclination angle has the most significant effect on the hydraulic fractures.

Keywords: hydraulic fracture; bedding plane; shale; numerical simulation; influencing factors

0 引言

目前,水力压裂是开采页岩油、页岩气等非常规能源的核心技术之一^[1-4],而压裂裂缝的扩展规律及机制直接影响着开采的效率^[5-10]。在层理面影响下,压裂裂缝的扩展势必会受到层理面本身的影响,因此,探究页岩层理面对压裂裂缝的影响规律显得尤为必要。当下,水力压裂裂缝扩展规律与机制的研究主要从物理模拟和数值模拟两方面开展。

在物理模型方面,大量学者进行了室内的试验。针对自制试样,CHENG等^[11]认为天然裂缝对水力裂缝的扩展影响较强,更容易形成与天然层理面相交的压裂缝。DEGHAN等^[12]研究了不同水平差应力对裂缝萌生和扩展的影响。结果表明在高应力差下,裂缝的扩展行为从抑制模式变为交叉模式。MOGHADDAM等^[13]通过真三轴水力压裂试验认为循环注入压裂液会使产生的能量集中在井眼附近,容易形成裂缝长度较短的复杂性网络。TAN等^[14]通过真实试验研究了水力裂缝的扩展和侵彻行为,结果表明裂缝几何形态在垂直方向上表现出强烈的非对称性,并且认为天然裂缝集中发育的压裂层不利于开展综合压裂作业。周健等^[15]采用大尺寸三轴压缩系统,分

析了水平主应力和逼近角与水力裂缝的关系,表明水平主应力和逼近角越大,越有利于形成裂缝网络。针对四川三叠系须家河组页岩,GUO等^[16]通过真三轴试验系统对页岩露头岩石进行了模拟试验。结果表明当地应力差小于9 MPa时,水力裂缝容易沿着天然裂缝扩展,形成裂缝网络。针对四川龙马溪组页岩,TAN等^[17]通过大型三轴试验,发现水力裂缝在层状页岩地层的最终裂缝形态可以分为四类:简单裂缝,鱼骨状裂缝,鱼骨状裂缝开口状和多边鱼骨状裂缝网络,并且其认为形成裂缝网络的有效地应力差为6 MPa。乔宇等^[18-19]通过试验方法认为页岩内部的原生矿物质能够帮助和促进裂缝的发育和扩展。袁青松等^[20]研究了太原组页岩可压性综合研究,结果表明太原页岩具备形成复杂裂缝的基础。但是物理模型存在着无法观察裂纹实时变化、工况数量少、试验设备对结果影响大的局限性。因此,通过数值模拟能够更好的弥补上述缺陷,并且能够根据研究的具体内容设计独特的数值模拟方案^[21],具有其独特优势。

在数值模拟方面,KIM等^[22]认为裂缝扩展对抗拉强度、饱和度初始条件、注入流体类型、非均质

性、弹性模量和渗透率模型等因素敏感。LI 等^[23]将 DIP 技术与有限元程序相结合, 对水力裂缝的扩展进行了研究。表明地应力各向异性越低的储层往往能够产生更复杂的水力裂缝。ZOU 等^[24]利用一系列的水平垂直层理面表征了压裂裂缝和垂向应力各向异性的关系, 并且层理面的存在增加了压裂过程中的注入压力。DAHI-TALEGHANI 等^[25]同样基于扩展有限单元法, 认为水力裂缝的增长可能会对胶结天然裂缝施加足够的拉剪应力, 使得胶结天然裂缝在水力裂缝尖端达到之前发生脱黏、开缝或剪切。韩伟歌等^[26]通过数值模拟分析了层理面强度对水力裂缝缝网演化的规律, 其认为层理面强度越小, 其捕获压裂液的能力越强。FU 等^[27]将物理模型与数值模拟相结合, 研究发现水力裂缝与天然裂缝存在着张开、剪切和交叉三种简单方式, 又指出中国大部分页岩油盆地以最大方向单一裂缝扩展模式为主。LIN 等^[28]通过扫描电镜 (SEM) 和聚焦离子束扫描电镜 (FIB-SEM) 发现水力裂缝在扩展中主要是沿不同矿物的边界扩展。ZHANG 等^[29]综合研究了井筒类型、井眼相对于层理面方向、层理面倾角综合作用下裂缝网络的形成规律, 研究表明当井眼与层理面斜向相交时有利于形成复杂的裂缝网络。LI 等^[30]建立了三维 DFN 模型用以研究层状和天然裂缝储层中水力裂缝的扩展, 结果表明水平裂缝的复杂性要小于垂直方向裂缝的复杂性, 并且水力裂缝与天然的不连续面发生强烈相互作用, 导致裂缝形态复杂。

现阶段相关学者的研究主要集中在天然裂缝对于水力压裂的影响规律, 但是对于层理面的影响, 只研究了较少倾角下(水平或垂直)的影响规律。并且对于层理面倾角、层理面强度和地应力差综合影响下水力压裂裂缝扩展规律及机制尚不清楚。因此, 本文利用 ABAQUS 有限元软件, 采用全局零厚度 Cohesive 单元法, 分析层理面倾角、层理面强度和地应力差对水力压裂裂缝的扩展影响规律和机制。研究结果对指导实际水力压裂施工参数优化具有参考价值。

1 数值计算理论介绍

1.1 Cohesive 单元介绍及本构方程

Cohesive 单元作为 ABAQUS 中一种划分网格的工具, 其广泛应用于复合材料和岩石的断裂行为等方面的研究。其中常用的基于 Cohesive 黏聚力模型的建模方法有两种, 一是采用黏聚力单元 (Cohesive 单元) 建模, 二是定义黏聚力接触。而本文采用的是第一种黏

聚力单元 (Cohesive 单元) 进行建模。

在数值模型中, Cohesive 单元分为三层, 分别是岩石基质层、Cohesive 单元层、岩石基质层, 如图 1 所示。对于水力压裂的模拟, 在每层单元中分别采取不同的材料参数用于区分岩石基质和层理面 (Cohesive 单元)。同时, 由于在裂缝扩展中, 裂缝的扩展方向只能是按照预设的 Cohesive 单元进行扩展, 因此, 在本次模拟过程中, 利用插件采用全局零厚度的 Cohesive 单元, 这样就能够避免 Cohesive 单元的局限性, 其裂缝的扩展延伸不会受到限制。

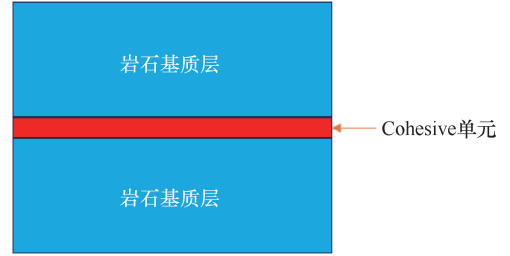


图 1 Cohesive 单元示意

Fig. 1 Schematic diagram of Cohesive element

黏聚力单元最初是由 DUGGDALE^[31] 和 BARENBLATT^[32] 提出, 该方法能够较好的解决裂缝扩展尖端奇异性问题。在 Cohesive 单元中, 采用的是牵引分离规律的线弹性本构模型, 如下

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = \mathbf{K}\boldsymbol{\delta} \quad (1)$$

式中, \mathbf{t} 为牵引力 (N); \mathbf{K} 为界面刚度 (GPa); 下标 n 为法向, s 和 t 为两个切向方向; $\boldsymbol{\delta}$ 为张开位移 (m)。

在本次 ABAQUS 建模过程中, 由于会用到黏聚力单元, 而在 ABAQUS 中输入的单元参数为 \mathbf{E} , 因此, 需要对式 (1) 进行相应转化, 为

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{nn} & E_{ns} & E_{nt} \\ E_{ns} & E_{ss} & E_{st} \\ E_{nt} & E_{st} & E_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \end{Bmatrix} = \mathbf{E}\boldsymbol{\varepsilon} \quad (2)$$

相应的, 式 (1) 和式 (2) 的转化关系为

$$\mathbf{K} = \frac{\mathbf{E}}{b} \quad (3)$$

式中, \mathbf{E} 为弹性模量 (GPa); b 为界面厚度 (m)。

1.2 Cohesive 单元损伤起始、演化理论

在水力压裂过程中, 裂缝的扩展往往会受到多种因素的影响, 产生张拉、剪切和复合型破坏的特征。而对于这种复杂性裂缝, ABAQUS 中利用 Cohesive 单元双线本构模型来描述, 其利用了拉伸应力和界面相

对位移之间的相互作用的关系。如图2所示,其横坐标为位移,纵坐标为应力。

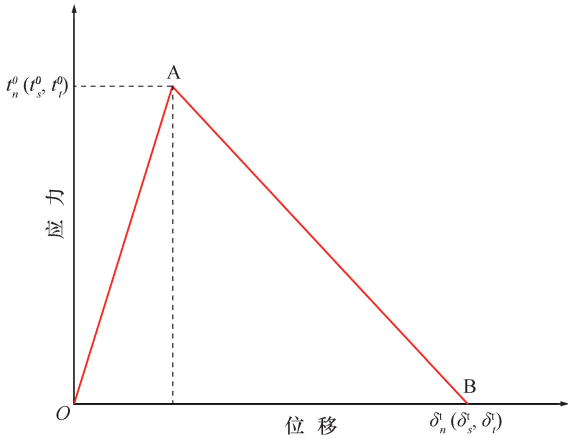


图2 双线本构模型示意

Fig. 2 Schematic diagram of two-line constitutive model

对于岩石裂缝起裂准则,本文采用的是最大应力准则。其公式为

$$\max \left\{ \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_l}{t_l^0} \right\} = 1 \quad (4)$$

式中, ε 和 t 为相应方向的力的大小(N);下标 n 、 s 、 l 代表的是三个应力方向。

式(4)表明在应力施加过程中,只要有一个方向上的应力达到了最大值后,那材料就开始损伤(见图2的OA段),即 Cohesive 单元在纯压缩情况下不会产生起始损伤。

当 Cohesive 单元产生起始损伤之后就会进入到损伤演化阶段(见图2中AB段),即单元将会不断发生损伤,最终会在达到最大位移或断裂能时发生破坏,产生裂纹。对于 Cohesive 单元,其损伤演化主要和损伤变量 D 有着直接的关系。

损伤变量 D 是基于 BENZEGGAGH^[33] 提出的 BK 准则而来的。BK 准则是基于断裂能得来的,并考虑了不同破坏形式的混合比,其物理意义为在不同破坏形式下所需要的总能量的大小,在当下已经取得了广泛的应用。其计算公式为

$$G_n^c + (G_s^c - G_n^c) \left(\frac{G_s}{G_T} \right)^\eta = G^c \quad (5)$$

式中, G^c 为复合型断裂临界能量释率($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$);下标 n 、 s 分别是两切向断裂临界能量释率($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$); η 为不同破坏模式混合比。

通过 BK 准则就能够清楚的计算出破坏时需要的总能量,其总能量的大小是和双线性本构模型(见图2)的面积相同。由于总面积相同,并且起始损伤

OA 段是由式(4)确定,因此其损伤演化 AB 段所围成的面积就可以由式(6)得出,其在损伤过程中从 0 演化到 1,其计算公式为

$$D = \frac{\delta_m^f (\delta_m^{\max} - \delta_m^0)}{\delta_m^{\max} (\delta_m^f - \delta_m^0)} \quad (6)$$

式中, δ_m^{\max} 为最大位移(m); δ_m^f 为 f 处的位移大小(m); δ_m^0 为起始位移(m)。

如图3所示,当裂纹在 Cohesive 单元扩展时,若水力裂缝裂纹尖端处所释放的能量大于 BK 准则所计算的能量,当前裂纹尖端所处的 Cohesive 单元将会失效破坏,裂缝将会继续张开向下一个 Cohesive 单元扩展。

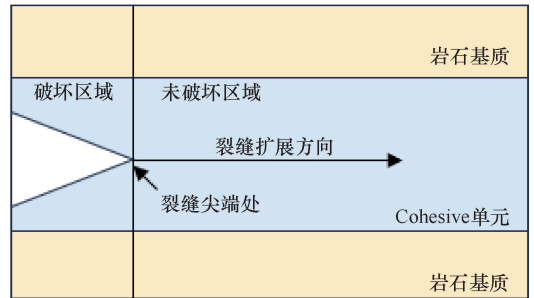


图3 Cohesive 单元裂缝扩展示意

Fig. 3 Schematic diagram of fracture propagation in Cohesive element

1.3 裂隙流体流动理论

在水力压裂模拟中,压裂液造成的流体压力会施加在裂缝表面,产生相应的流体压力促使裂缝进一步扩展。ABAQUS 中,假设裂隙内流体为不可压缩液体,则根据流体的流动方向可以分为切向流动和法向流动(见图4)。

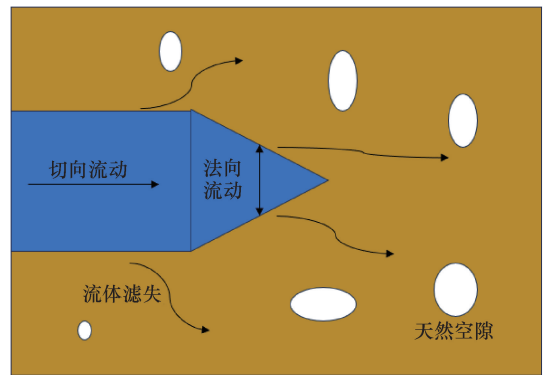


图4 Cohesive 单元渗流示意

Fig. 4 Diagram of Cohesive element permeability

(1) 流体切向流动方程。假设压裂液为牛顿流体并且在裂隙内以恒定流量 q 持续注入,其流量体积大小如下

$$Q = -k_i \Delta p \quad (7)$$

式中, Q 为压裂液流向 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); k_i 为流量系数; p 为流体压力 (MPa)。

k_i 的值可根据雷诺数方程 (8) 计算得出

$$k_i = \frac{d^2}{12\mu} \quad (8)$$

式中, d 为裂缝张开宽度 (m); μ 为黏度系数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。

(2) 流体法向流动方程。在 ABAQUS 中对于压裂液的法向流动则表示为压裂液在流动的过程中滤失的大小, 其与工程上的滤失现象相对应, 其计算公式为

$$\begin{cases} q_t = c_t(p_i - p_t) \\ q_b = c_b(p_i - p_b) \end{cases} \quad (9)$$

式中, q_t 、 q_b 分别分流体上下表面的流量大小 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); c_t 、 c_b 分别为裂缝上下表面的滤失系数 [$\text{m} \cdot (\text{Pa} \cdot \text{s})^{-1}$]; p_t 、 p_b 分别为上下表面的流体压力 (MPa); p_i 为流体单元的虚拟压力 (MPa)。

2 数值模拟方案

2.1 建立数值模型

采用 ABAQUS 有限元软件, 建立了如图 5 所示的二维水力压裂模型。建立模型尺寸为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$, 层理面间距为 5 m , 模型中心为压裂液注入点, 分别设置上下两个射孔方向, 射孔长度 0.5 m , 流量大小为 $0.01 \text{ m}^2/\text{s}$ [12]。在划分网格后, 采用插件对模型网络插入全局零厚度 Cohesive 单元, 最终模型单元为 185 396 个。岩石基质采用 CPE4RP 进行模拟, Cohesive 单元采用 COH2D4P 进行模拟。

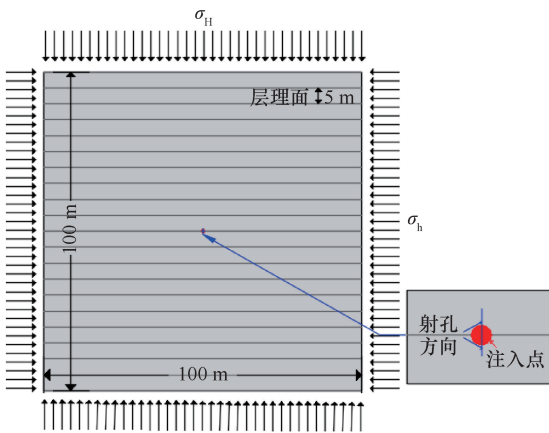


图 5 水力压裂模型

Fig. 5 Hydraulic fracturing model

模拟工况: 采用 5 种层理面倾角 (0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90°), 三种地应力差 (2 MPa、5 MPa、8 MPa) 分别模拟, 模拟共 15 种工况。地应力差通过让横向地应力 σ_h 始终为 1 MPa, 更改竖向地应力 σ_H

(3 MPa、6 MPa、9 MPa) 来达到不同地应力差的效果。为了分析层理面强度对水力压裂裂缝的影响, 以地应力差 5 MPa, 层理面倾角为 45° 为例, 引入层理面强度比 λ (层理面强度/岩石强度), 通过更改抗拉强度和抗剪强度来实现 3 种不同层理面强度对水力压裂裂缝扩展的影响。

水力压裂模拟过程: 第一阶段: 施加相应地应力, 保持地应力平衡。第二阶段: 注入压裂液。为了防止压裂液流量突增造成较大的冲击力, 在模拟前 1 s, 采用从 0 线性增加至设定值, 之后保持相同速率恒定注入 30 s, 如图 6 所示, 模拟结束。

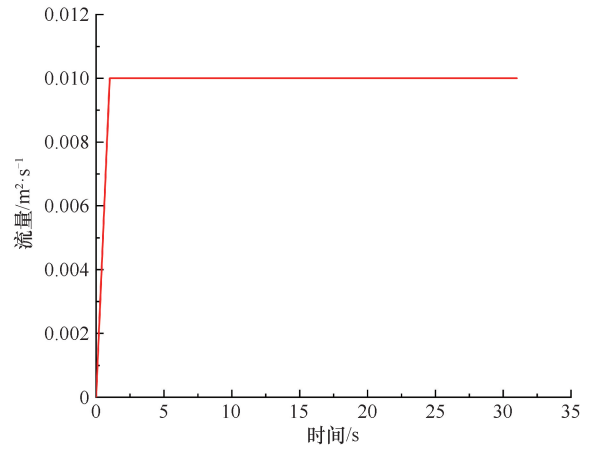


图 6 液体流量注入速率

Fig. 6 Liquid flow injection rate

2.2 力学参数标定

根据何柏等 [34] 的三轴压缩试验结果, 以围压 10 MPa 条件下为例, 在 ABAQUS 中建立了如图 7 所示的标准样模型, 宽×高为 $50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 采用轴向位移控制加载方式, 上端面保持不动, 下端面以恒定速率向上加载, 模型两侧施加 10 MPa 的围压。层

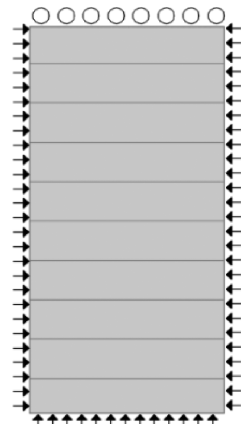


图 7 三轴压缩模型

Fig. 7 Triaxial compression model

理面间距为 10 mm。进行了三种层理面倾角下(0°、45°、90°)的页岩三轴压缩模拟试验。采用试错法最终得到相应力学参数如表 1 所列。

表 1 试样模型力学参数

Table 1 Mechanical parameters of sample model

参数	取值	单位
弹性模量	25	GPa
泊松比	0.25	—
岩石抗拉强度	10	MPa
岩石拉剪比	0.5	—
层理面抗拉强度	5	MPa
层理面拉剪比	0.5	—
渗透系数	1×10^{-7}	$m \cdot s^{-1}$
滤失系数	1×10^{-14}	$m \cdot min^{-1/2}$

通过模拟得到的试样破坏图和真实试验破坏对比图如图 8 所示。从图 8(a)中可以看出,当层理面倾角为 0°时候,模型试样多是以贯穿层理面的裂缝出现;当层理面为 45°时[见图 8(b)],模型试样多是沿着层理面方向发生剪切破坏;当层理面为 90°时[见图 8(c)],模型试样发生了柱状的劈裂破坏。数值模拟得到的宏观破裂面与真实试验加载破坏后的破坏形态具有较好的一致性。

图 9 绘制了模拟试验的应力应变曲线,并与真实试验的应力应变曲线进行了对比。从图中可以看到,在加载初期模型的压密阶段并没有真实试验明显,这是因为二维模型的局限性,二维模型无法很好的模拟出真实试样的压密阶段。但是从图中可以看到,模拟得到的峰值应力和峰值应变与真实试验具有较好的一致性,并且在峰前阶段,其曲线的斜率与真实试验斜率基本一致。上述从应力应变曲线和破坏形态两方面对比发现模型力学参数合理。因此本模型的细观参数能够用于水力压裂裂缝扩展的模拟。

3 结果分析

3.1 不同层理面倾角对裂缝扩展的影响

层理面作为页岩的显著特征,对压裂裂缝扩展的影响至关重要。因此分别绘制了在相同地应力差(5 MPa)不同层理面倾角下(0°、30°、45°、60°、90°)压裂裂缝的扩展形态图(见图 10)。图中蓝色部分为液体注入点,绿色表示张拉裂缝,红色表示剪切裂缝。

从图 10 中可以看到当地应力差相同时,随着层理面倾角的增大,裂缝的扩展形态有着比较大的区别。在地应力差为 5 MPa 下(见图 10),当层理面倾角为 0°时,压裂裂缝贯穿层理面。当层理面倾角从 0°增大至 30°时,压裂裂缝先是贯穿层理面,之后沿着层理面发育,在地应力差的影响下,压裂裂缝发生转向,会继续向岩石基质发育扩展,呈现出明显的“阶梯”状现象。当层理面倾角从 30°增加至 45°时,此时层理面能够捕获一部分压裂液,压裂裂缝沿着层理面的扩展路径较长,由剪切破坏而形成的压裂裂缝(红色线)明显增多,并且其裂缝形态更加的复杂,出现较多的 Y 字型裂缝。当层理面倾角增大至 60°时,由于存在着地应力差,层理面受到较大的剪切力,压裂裂缝起裂后沿着层理面发育扩展。当层理面增大至 90°时,压裂裂缝完全沿着层理面进行发育扩展,其垂向高度要大于 0°时的高度。

以地应力差 5 MPa 为例,分析了压裂裂缝的破坏类型占比(柱状图)、裂缝长度(黑色点线图)、注入点裂缝宽度(红色点线图)和裂缝数量(绿色点线图)的信息,并将之绘制成图(见图 11)。从图中可以看出,层理面倾角对压裂裂缝扩展的影响有着明显的各向异性现象。随着层理面倾角的增大,张拉裂纹占比先减小后增大,而剪切裂纹占比先增大后减小;裂缝

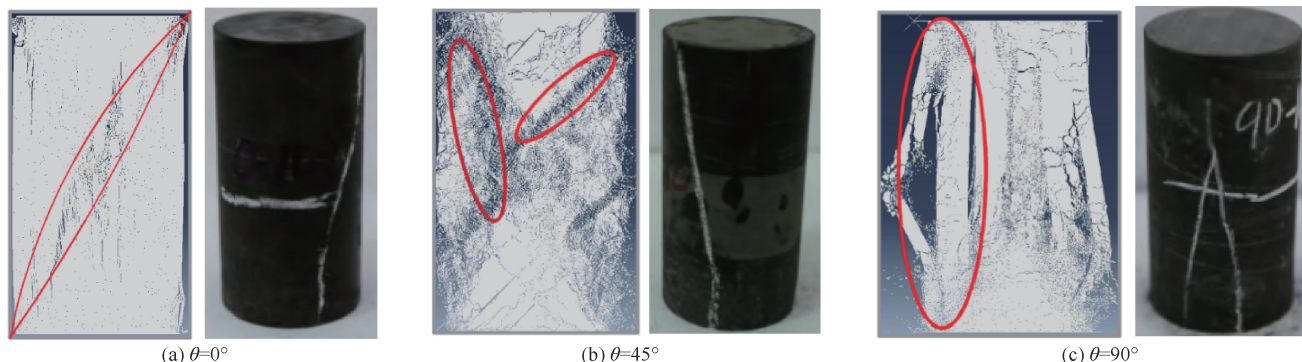


图 8 破坏对比

Fig. 8 Damage comparison

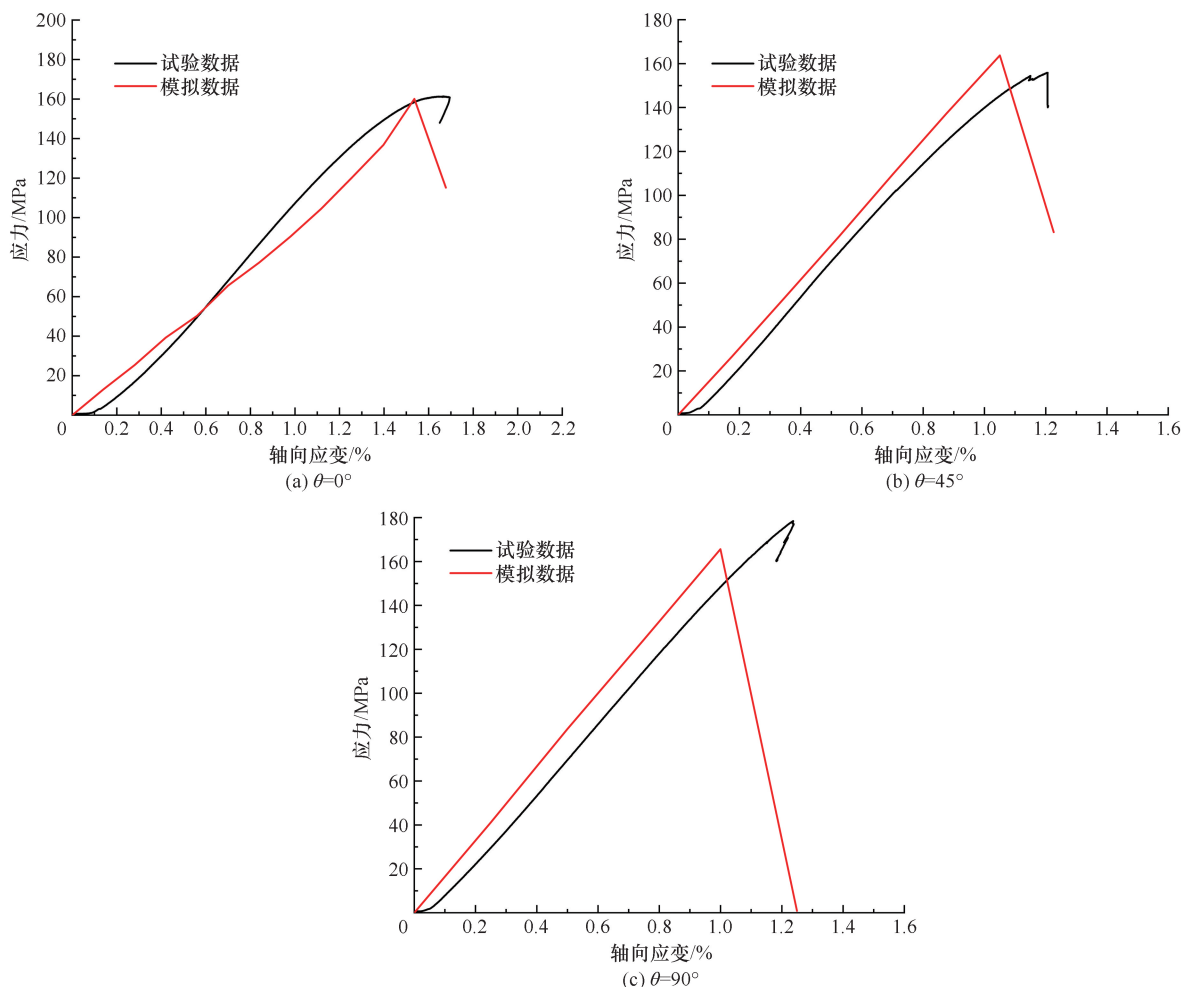


图9 应力-应变曲线对比

Fig. 9 Comparison of stress-strain curves

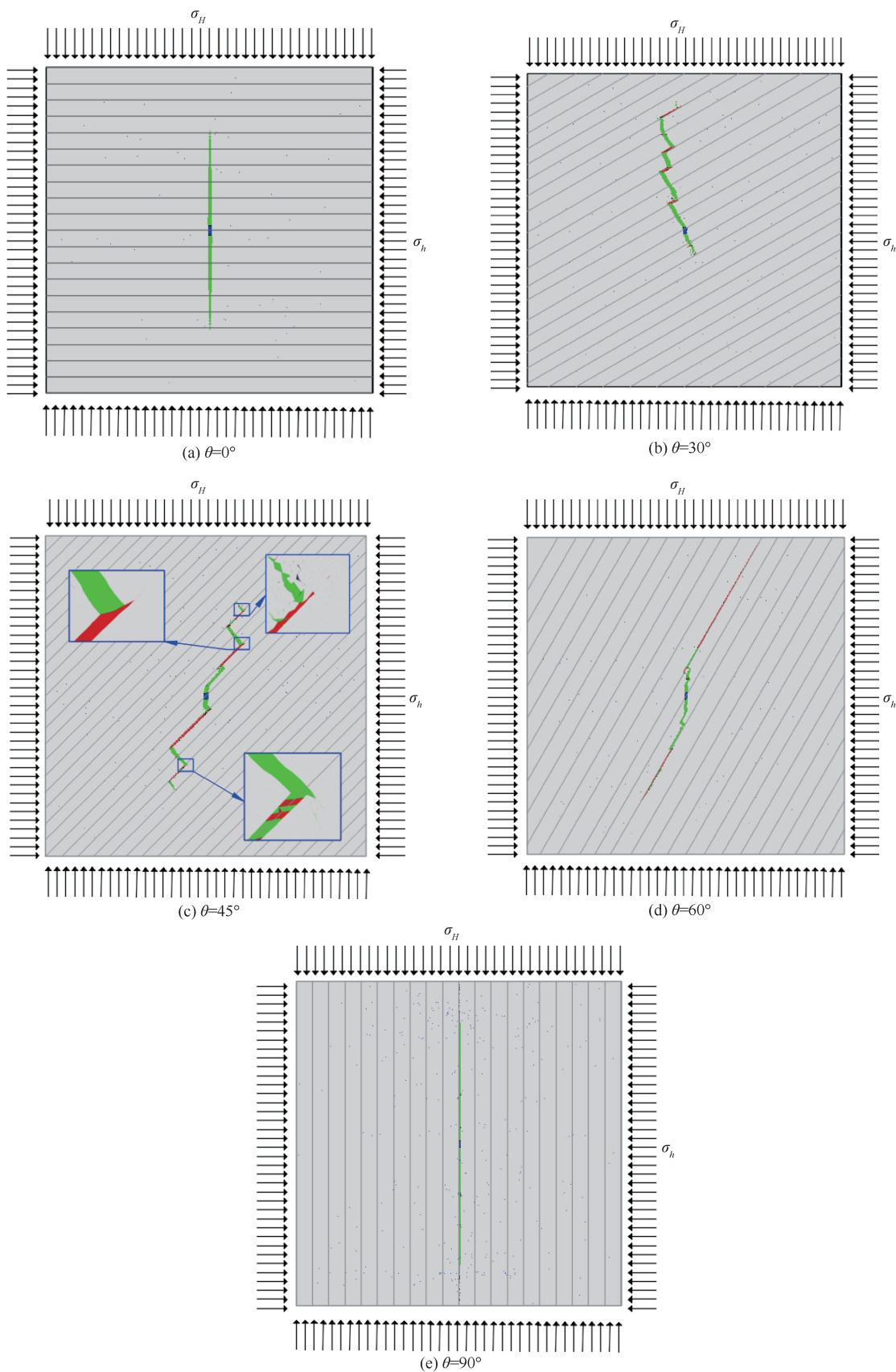
长度(黑色点线图)和裂缝数量(绿色点线图)随着层理面的增大呈现出先增大后减小的趋势,而注入点裂缝宽度(红色点线图)则正好相反,呈现出先减小后增大的趋势。在其他地应力差下(2 MPa、8 MPa),变化规律与5 MPa(见图11)一致。

通过上述分析可知,层理面对压裂裂缝的扩展具有较大的影响。这是因为当最大主应力与层理面垂直时($\theta=0^\circ$),压裂液扩展至层理面,此时层理面受到的垂向应力最大,压裂液并不能很容易的进入到层理面,压裂裂缝长度最短。而由于在模拟过程中注水流量和时间是相同的,除了少部分压裂液通过岩石自身滤失外,大部分的压裂液都会储存在压裂裂缝中,因此在该倾角下其注入点裂缝宽度是最大的。并且由于没有受到层理面的影响,压裂裂缝的破坏形态是较为单一的,裂缝数量也是最少的。当层理面倾角增大至 45° 时,此时层理面与垂向应力存在一定的夹角,作用在层理面上的法向应力减小,切向应力增大,层理

面受到的剪切应力增大,就会造成压裂液较容易进入层理面,从而增加了层理面内部压裂液的体积。同时,较大的剪切力能够造成层理面微观裂缝的产生,就会使得压裂裂缝容易沿着层理面发育和扩展,裂缝的长度和数量随之增大。而由于在压裂液体积相同的情况下,注入点裂缝宽度就会随之减小;并且在岩石基质和层理面的交界处,压裂裂缝更容易出现Y字形裂缝[见图10(c)],裂缝更容易出现分叉现象。当层理面倾角继续增大至 60° 时,层理面上的法向应力进一步减少,切向应力进一步增大,层理面捕获压裂液的能力进一步增强,因此在压裂裂缝起裂后会完全沿着层理面发育扩展。而当层理面倾角增大至 90° 时,由于此时层理面平行于垂向应力,层理面受到的法向应力最小,切向应力最大,因此其扩展是最容易的,裂缝长度最大,注入点裂缝宽度最小,裂缝形态较为单一。

3.2 不同层理面强度对裂缝扩展的影响

在模拟过程中发现层理面强度对压裂裂缝的影响



绿线—张拉裂缝；红线—剪切裂缝

图 10 地应力差为 5 MPa 下不同倾角下压裂裂缝的扩展形态 ($t=30$ s)

Fig. 10 Fracture propagation patterns at different inclination angles under an in-situ stress difference of 5 MPa ($t=30$ s)

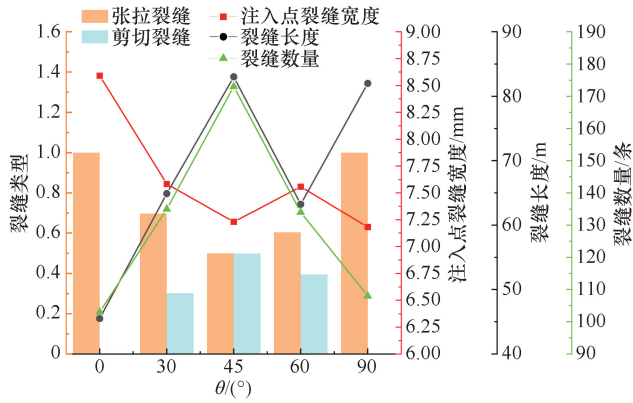
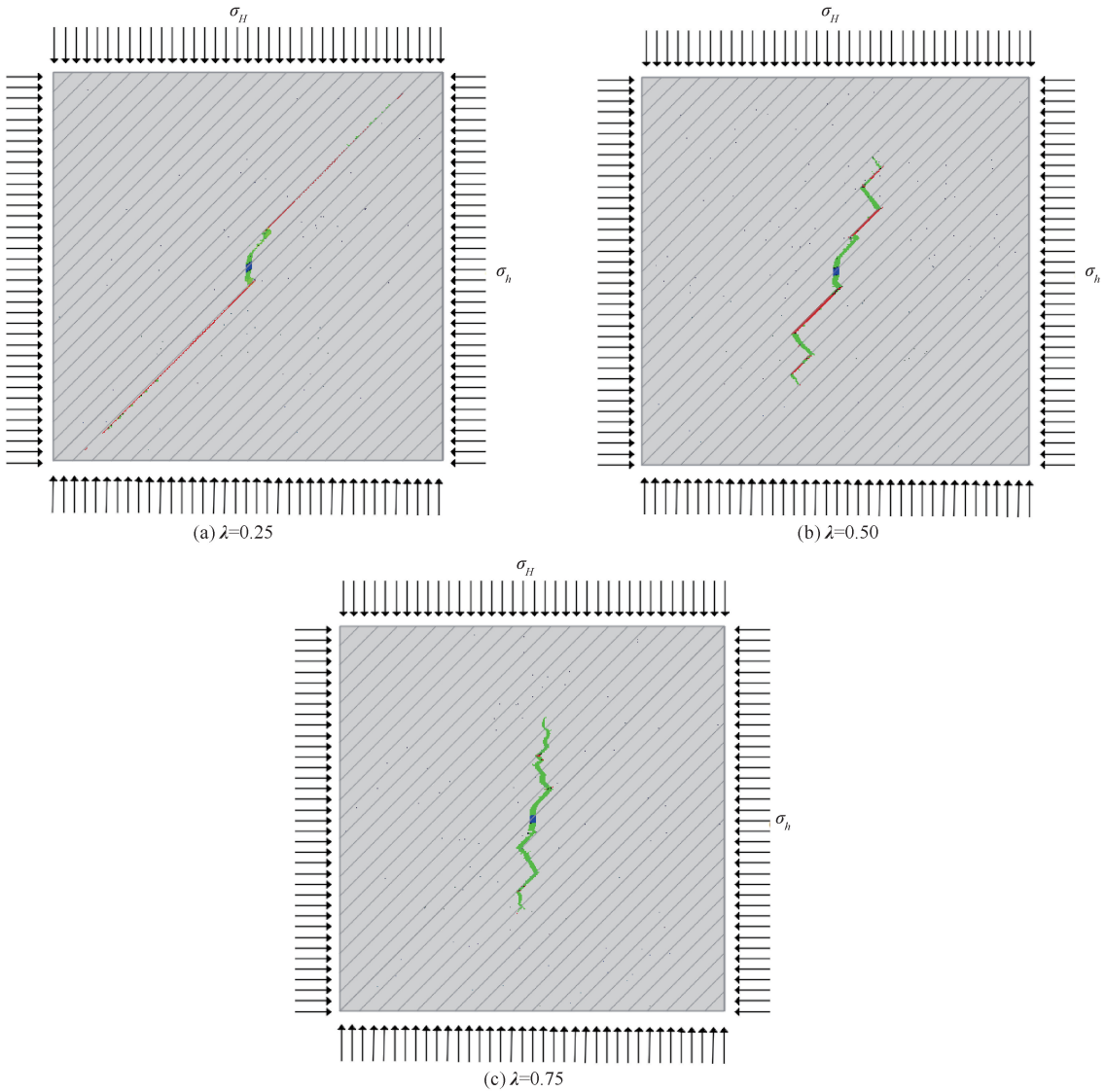


图 11 不同层理面倾角下压裂裂缝统计

Fig. 11 Fracture statistics diagram at different bedding plane inclination angles

规律在不同层理面倾角条件下是相似的, 因此本文以层理面倾角为 45°、地应力差为 5 MPa 为例, 分析了不同层理面强度对压裂裂缝扩展的影响规律, 并将扩展形态图绘制在图 12 中。从图 12(a) (λ 为 0.25) 中可以看到, 当层理面强度较弱时, 层理面捕获压裂液的能力最强, 压裂裂缝起裂后完全沿着层理面发育扩展, 层理面对压裂裂缝的控制作用较为显著, 其压裂裂缝的发育受到层理面主导。如图 12(b) 所示, 随着层理面强度的增大 (λ 为 0.5), 压裂裂缝的扩展表现为同时受到地应力差和层理面的共同作用, 其裂缝扩展会先沿着层理面发育, 随着压裂液不断注入, 压裂裂缝会向最大主应力方向发生偏转, 裂缝破坏类型是张拉裂缝和剪切裂缝同时发生的复合型破裂类型。当



绿线是张拉裂缝; 红线是剪切裂缝

图 12 不同层理面强度下裂缝扩展形态 ($t=30$ s)

Fig. 12 Fracture propagation patterns under different bedding plane strengths ($t=30$ s)

λ 为 0.75 [见图 12(c)] 时, 此时层理面对压裂裂缝的影响较小, 而地应力对压裂裂缝的控制作用明显增强, 压裂裂缝偏转效应明显。

结合图 13 进一步分析可得, 随着层理面强度的增大, 剪切裂缝的占比越来越小, 张拉裂缝的占比增大, 压裂裂缝的长度和数量随之减小, 注入点裂缝宽度变宽。

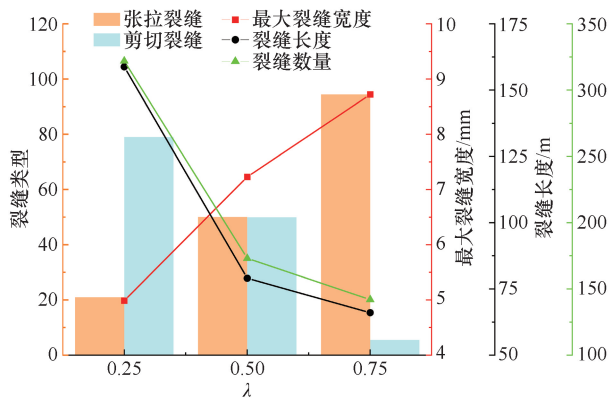
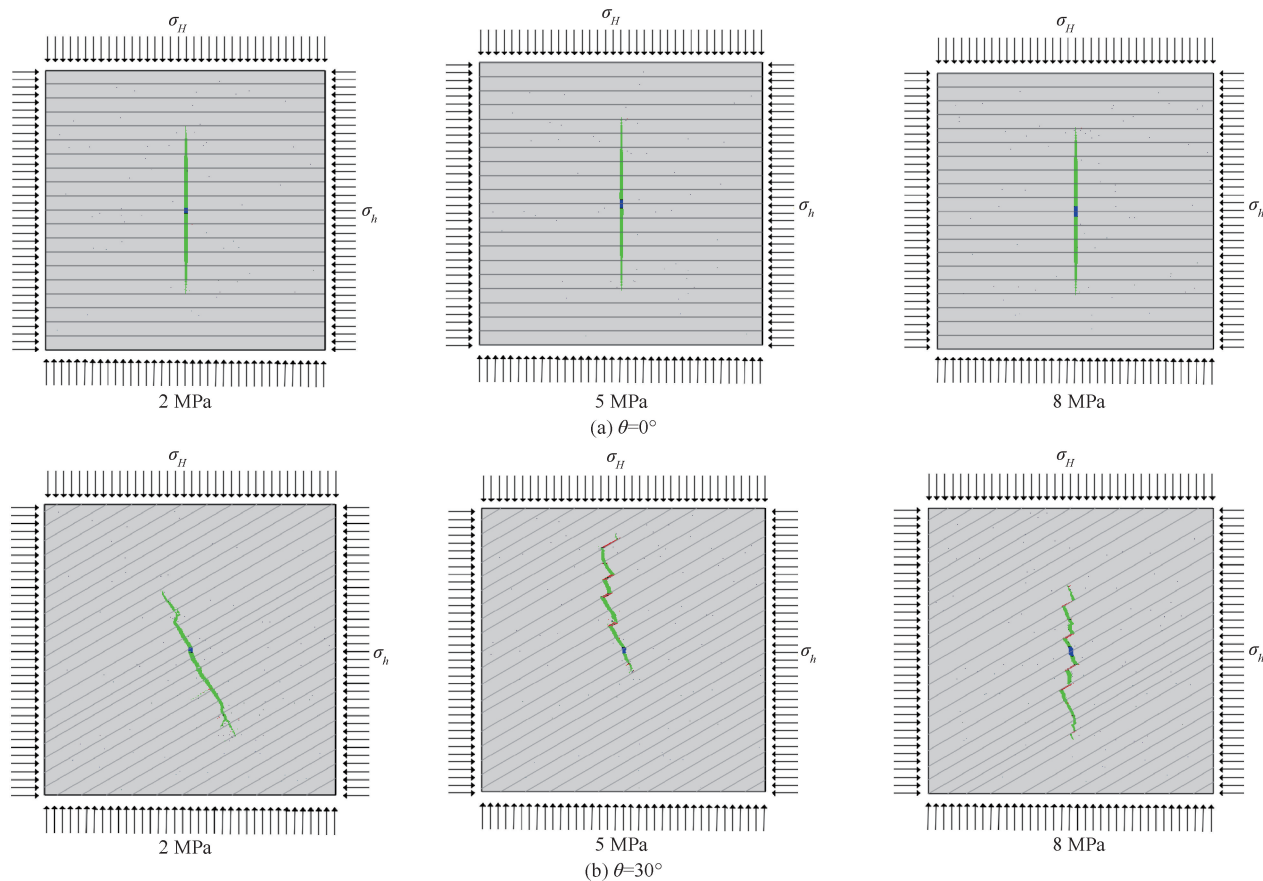


图 13 不同层理面强度下压裂裂缝统计图 ($t=20$ s)

Fig. 13 Fracture statistics diagram under different bedding plane strengths ($t=20$ s)

3.3 不同地应力差对裂缝扩展的影响

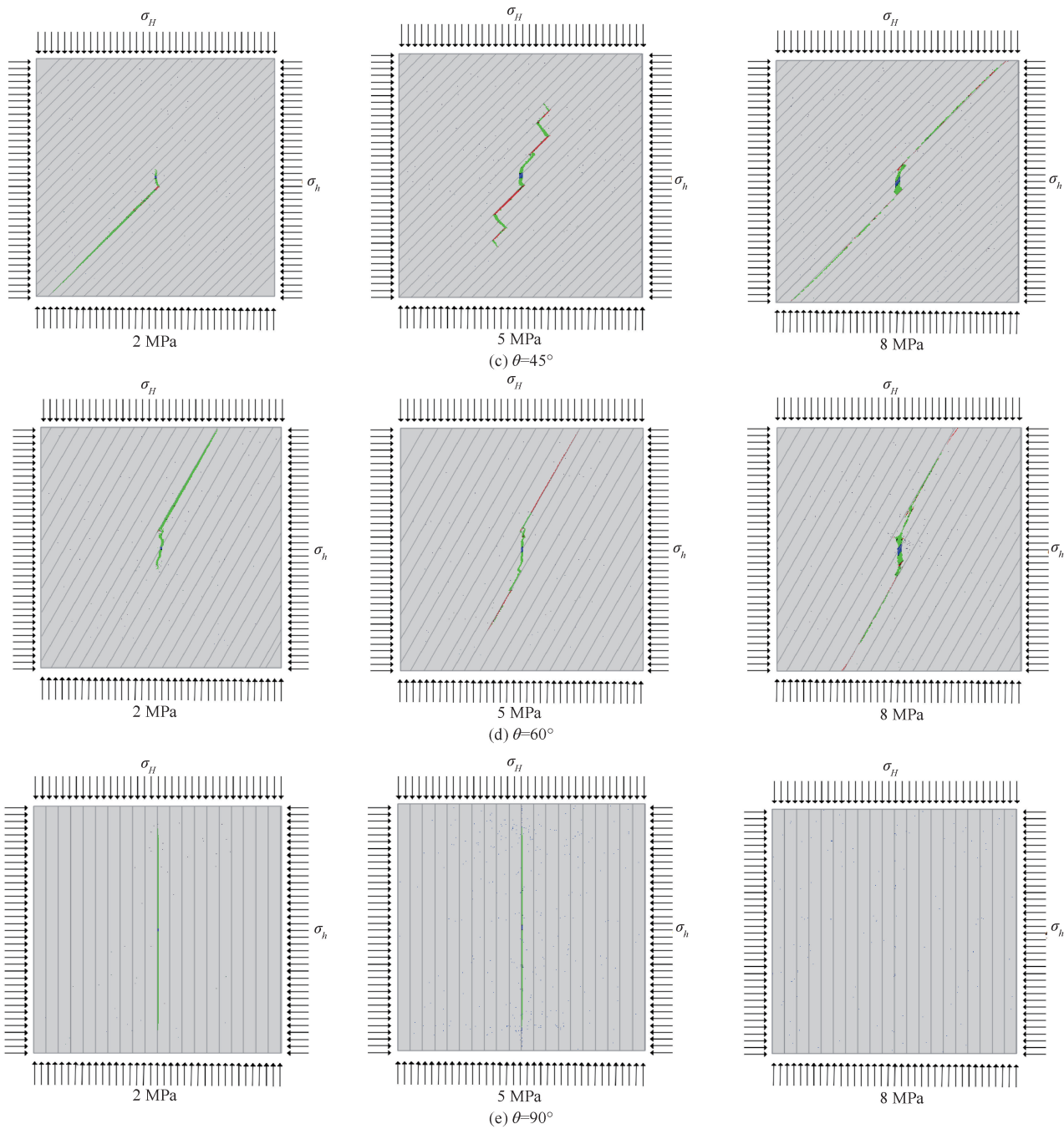
图 14 绘制了相同倾角不同地应力差下的压裂裂



缝扩展形态图。整体上看, 压裂裂缝受到最大主应力的影响较大。当层理面倾角为 0° 时, 层理面对压裂裂缝几乎没有影响, 压裂裂缝只是在长度上随着地应力差的增大而有略微增大。当层理面倾角为 30° 时, 随着地应力差的增大, 压裂裂缝会逐渐向着大主应力方向进行扩展, 并且其裂缝形态更加复杂, 剪切裂缝明显增多。当层理面为 45° 和 60° 时, 以剪切裂缝为主。

从图 14 提取裂缝相关参数, 绘制得到相同倾角不同地应力差下压裂裂缝扩展统计曲线, 如图 15 所示。总体来看, 在相同倾角下, 随着地应力差的增大, 张拉裂缝 (图中粉红色柱状图) 的占比随之减小, 剪切裂缝 (图中蓝色柱状图) 的占比随之增大; 裂缝长度 (黑色点线图) 和裂缝数量 (绿色点线图) 随之增大, 而注入点处裂缝宽度 (红色点线图) 随之减小。

可以发现, 当地应力不同时, 压裂裂缝的扩展形态差异同样较大。当地应力差为 2 MPa 时, 此时层理面受到的法向应力较小, 层理面捕获压裂液的能力较弱, 压裂裂缝的扩展相对自由。当地应力差增大至 5 MPa 时, 层理面受到的法向应力增大, 由于存在层理面倾角的作用, 会造成层理面处受到的剪切应力



绿线是张拉裂缝；红线是剪切裂缝

图 14 相同层理面倾角不同地应力差下压裂裂缝扩展形态 ($t = 30 \text{ s}$)

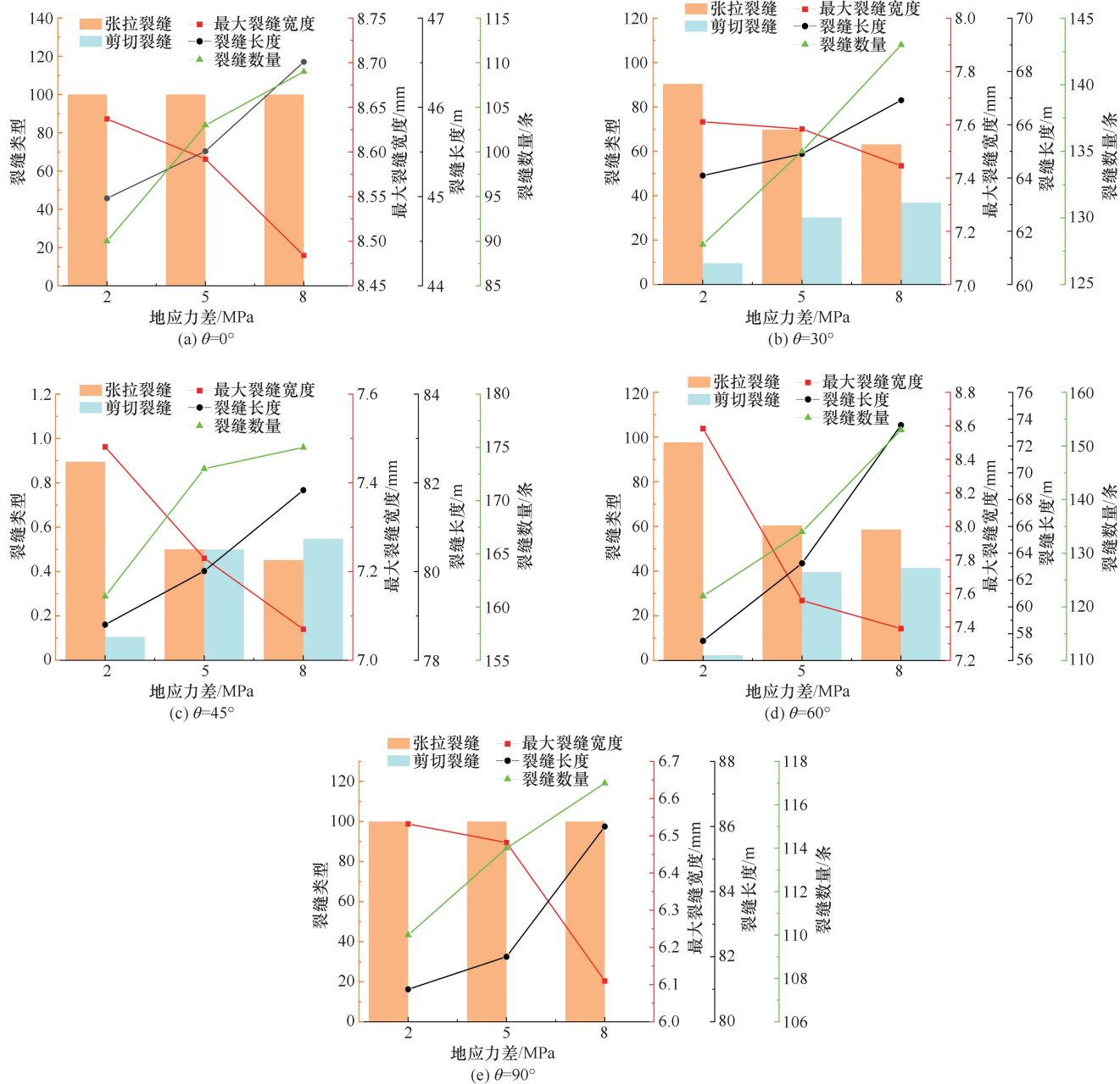
Fig. 14 Fracture propagation patterns at the same bedding plane inclination angle and under different in-situ stress differences ($t = 30 \text{ s}$)

同样增大，在二者的共同作用下，使得层理面捕获压裂液的能力增强，更容易沿着层理面发生剪切破坏，造成剪切裂缝占比的提高，裂缝长度和裂缝数量增大。当地应力差增大至 8 MPa，层理面处的法向应力最大，层理面捕获压裂液的能力最强，压裂裂缝极易沿着层理面发育扩展。并且可以发现，随着地应力差的增大，压裂裂缝的偏转效应增强，压裂裂缝更容

易向着大主应力方向发育扩展。此外，较低的地应力差下压裂裂缝的扩展方向更具有随机性，但其裂缝不长；而较高的地应力差下压裂裂缝的扩展更具有方向性，容易向着最大主应力方向进行扩展，同时压裂裂缝变长。

3.4 水力压裂裂缝扩展形态分析

从上述模拟结果来看，层理面倾角、层理面强度

图 15 相同倾角不同地应力差下压裂裂缝统计图 ($t=20$ s)Fig. 15 Fracture statistical diagrams at the same inclination angle and under different in-situ stress differences ($t=20$ s)

和地应力差对压裂裂缝的扩展均会产生影响。结合图 11 来看, 在地应力差相同时, 当层理面倾角从 0° 增长至 45° 时, 压裂裂缝长度从 44 m 增大至 83 m, 增加了 88%, 裂缝数量从 97 条增长至 172 条, 增加了 77%, 压裂裂缝增长较为明显, 从 45° 增长至 60° 时, 压裂裂缝长度和数量开始降低, 体现出压裂裂缝的扩展能力是随着层理面倾角的增大先由弱至强再减弱的趋势, 在层理面倾角为 45° 时扩展能力最强; 结合图 13 来看, 随着层理面强度的提高, 压裂裂缝长度从 162 m 降低至 62 m, 降低

了 62%, 裂缝数量从 320 条降低至 126 条, 降低了 62%。结合图 15 来看, 在层理面倾角相同时, 随着地应力差的增大, 压裂裂缝长度最多增加了 27%, 裂缝数量最多增加了 26% [见图 15(d)]。总的来说相较于层理面倾角的影响来说, 地应力差的增加对压裂裂缝的增长作用较弱, 而层理面强度在相同地区下的差别不会很大。因此, 层理面倾角对压裂裂缝的影响最为显著。根据压裂裂缝与层理面相互作用方式的不同, 将压裂裂缝的扩展形态分为如下四类 (见图 16)。

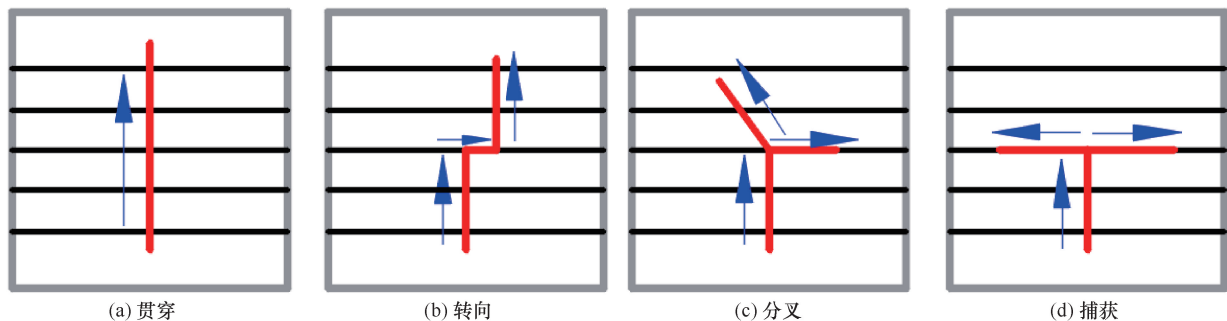


图 16 水力压裂裂缝扩展形态示意

Fig. 16 Schematic diagram of hydraulic fracture propagation patterns

(1)形态 I [见图 16(a)]: 贯穿。层理面捕获压裂液的能力最弱, 当压裂裂缝扩展至层理面时, 由于其水平扩展方向受到明显约束, 压裂裂缝会穿过层理面继续向着岩石基质发育扩展。在层理面倾角为 0° [见图 10(a)] 时, 压裂裂缝表现为形态 I。

(2)形态 II [见图 16(b)]: 转向。压裂裂缝首先贯穿层理面, 然后沿着层理面扩展一定距离后, 最后发生偏转, 继续沿着岩石基质发育, 其裂缝通常遵循“阶梯”分布。例如当层理面为 30° [见图 10(b)] 时, 其特征最为明显。

(3)形态 III [见图 16(c)]: 分叉。当裂缝扩展至层理面时, 其裂缝会在层理面处发生分叉, 一条沿着层理面发育, 另一条向着岩石基质发育。例如在层理面为 45° 或 60° [见图 10(c) 或图 10(d)] 时, 最有可能产生此类情况。

(4)形态 IV [见图 16(d)]: 捕获。此时由于层理面捕获压裂液的能力较强, 当裂缝扩展至层理面时, 压裂液基本上会被层理面完全捕获, 并不会贯穿层理面, 而是在层理面内部发育扩展, 直至到达模型边缘。在层理面倾角为 0° , 且较小的地应力差时最有可能发生此类情况^[35]。

此外, 除了层理面的倾角以外, 在地应力差和层理面强度的共同影响下, 形态 II 和形态 III 可能同时产生 [见图 10(c)]。

根据上述分析可得, 层理面倾角对于压裂裂缝的扩展影响最强, 地应力差次之, 层理面强度相对最弱。因此, 在实际水力压裂的施工中, 要重点关注页岩层理面的倾角, 建议压裂施工选址方面选择在中高倾角页岩地层, 地应力差较大时, 更有利于形成裂缝网络。同时针对低倾角 (0° 、 15°)、低应力差 (地应力差小于 2 MPa) 的页岩地层, 需要适当增加压裂液注入压力, 使压裂裂缝能够穿越层理面进一步发育, 提高造缝能力。

4 结 论

本研究利用 ABAQUS 有限元软件, 采用全局零厚度 Cohesive 单元开展二维数值模拟, 基于 Python 编程提取水力裂缝的力学参数, 分析层理面倾角 ($\theta=0^\circ$ 、 $\theta=30^\circ$ 、 $\theta=45^\circ$ 、 $\theta=60^\circ$ 、 $\theta=90^\circ$)、层理面强度 ($\lambda=0.25$ 、 $\lambda=0.5$ 、 $\lambda=0.75$) 和地应力差 (2 MPa 、 5 MPa 、 8 MPa) 对压裂裂缝扩展的影响规律。主要结论如下。

(1)层理面倾角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内, 当层理面为 45° 时, 压裂裂缝的扩展受到层理面的影响最大, 容易沿着层理面发育; 在此倾角下, 容易形成 Y 字形裂缝, 压裂裂缝形态最为复杂。

(2)随着层理面倾角的增大, 裂缝长度和数量均呈现先增大后减小的趋势, 而最大裂缝宽度呈现先减小后增大的趋势; 张拉裂缝占比随着层理面倾角的增大呈现出先减小后增大的趋势, 剪切裂缝占比与之相反。

(3)当强度比 λ 由 0.25 增大至 0.75 时, 裂缝长度和裂缝数量均呈现降低的趋势, 而最大裂缝宽度持续增大; 同时随着层理面强度的增大, 层理面捕获压裂液的能力减弱, 层理面对压裂裂缝的控制作用减弱。

(4)随着地应力差的增大, 压裂裂缝偏转效应越显著, 压裂裂缝逐步向着大主应力方向发育, 并且层理面捕获压裂液的能力同样增强, 压裂裂缝更容易沿着层理面发育扩展, 裂缝长度、裂缝数量均呈现增长的趋势, 而最大裂缝宽度呈现减小的趋势, 张拉裂缝占比逐步降低。

(5)在本次模拟的工况下, 层理面倾角、层理面强度和地应力差三种影响因素当中, 层理面倾角对压裂裂缝的影响最为显著; 根据压裂裂缝与层理面相互作用方式的不同, 压裂裂缝的扩展形态分为四类: 贯

穿、转向、分叉和捕获,随着层理面倾角的增加,水力压裂裂缝由贯穿向分叉或转向转变。

参考文献(References):

- [1] CHEN B, BARBOZA B R, SUN Y, et al. A review of hydraulic fracturing simulation [J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2022, 29: 1-58.
- [2] 田建超, 张艺, 李凝, 等. 页岩油水力压裂裂缝特征场地级数值模拟优化方法[J]. 石油钻采工艺, 2024, 46(3): 326-335.
TIAN Jianchao, ZHANG Yi, LI Ning, et al. Numerical simulation optimization method for site-level hydraulic fracturing fracture characteristics in shale oil[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2024, 46(3): 326-335.
- [3] 罗垚, 孔辉, 徐克山, 等. 砂泥岩储层水力裂缝穿层规律数值模拟[J]. 新疆石油天然气, 2023, 19(1): 49-56.
LUO Yao, KONG Hui, XU Keshan, et al. Numerical simulation for vertical propagation pattern of hydraulic fractures in sand-shale interbedded reservoirs[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2023, 19(1): 49-56.
- [4] 任岚, 李逸博, 彭思瑞, 等. 基于综合可压性的深层页岩气压裂经济效益预测方法[J]. 石油钻采工艺, 2023, 45(2): 229-236.
REN Lan, LI Yibo, PENG Sirui, et al. Predicting economic benefit of deep shale gas fracturing prediction based on comprehensive fracability[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2023, 45(2): 229-236.
- [5] HUANG L, LIAO X, FAN M, et al. Experimental and numerical simulation technique for hydraulic fracturing of shale formations[J]. Advances in Geo-Energy Research, 2024, 13(2): 83-88.
- [6] 刘东亮, 陈玉平, 李做仙, 等. 非常规油气水平井湿鞋固井首段压裂新工艺[J]. 石油钻采工艺, 2023, 45(1): 85-89.
LIU Dongliang, CHEN Yuping, LI Aoxian, et al. A new first-stage fracturing process of horizontal well in unconventional oil and gas based on wetshoe cementing [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2023, 45(1): 85-89.
- [7] 郭继香, 张小军, 褚艳杰, 等. 多功能压裂-提高采收率材料性能及驱替效果评价 [J]. 新疆石油天然气, 2024, 20(3): 72-82.
GUO Jixiang, ZHANG Xiaojun, CHU Yanjie, et al. Performance and displacement effect evaluation of multifunctional fracturing-enhanced oil recovery materials[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2024, 20(3): 72-82.
- [8] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障: 在 2024 年全国水利工作会议上的讲话 [J]. 水利发展研究, 2024, 24(1): 1-10.
LI G Y. Improved water security for China's efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization: Speech at the 2024 National Water Conservancy Work Conference [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(1): 1-10.
- [9] 李国英. 深入贯彻落实党的二十大精神 扎实推动新阶段水利高质量发展: 在 2023 年全国水利工作会议上的讲话 [J]. 水利发展研究, 2023, 23(1): 1-11.
LI G Y. Thoroughly implement the spirit of the 20th National Congress of the Communist Party of China and solidly promote the high-quality development of water conservancy in the new stage: Speech at the National Water Conservancy Work Conference in 2023 [J]. Water Resources Development Research, 2023, 23(1): 1-11.
- [10] 吴丰昌. 我国水体污染控制与治理成效、科技支撑与展望 [J]. 水利发展研究, 2023, 23(12): 1-8.
WU F C. Effectiveness, scientific and technological support, and prospects for water pollution control and management in China [J]. Water Resources Development Research, 2023, 23(12): 1-8.
- [11] CHENG W, JIN Y, LIN Q, et al. Experimental investigation about influence of pre-existing fracture on hydraulic fracture propagation under tri-axial stresses [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2015, 33: 467-473.
- [12] DEGHAN A N, GOSHTASBI K, AHANGARI K, et al. Mechanism of fracture initiation and propagation using a tri-axial hydraulic fracturing test system in naturally fractured reservoirs [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2016, 20(5): 560-585.
- [13] MOGHADDAM R H, GOLSHANI A. Experimental study on fracture propagation in anisotropy rock under cyclic hydraulic fracturing [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 295: 109775.
- [14] TAN P, CHEN Z, FU S, et al. Experimental investigation on fracture growth for integrated hydraulic fracturing in multiple gas bearing formations [J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 231: 212316.
- [15] 周健, 陈勉, 金衍, 等. 多裂缝储层水力裂缝扩展机理试验 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008(4): 51-54.
ZHOU J, CHEN M, JIN Y, et al. Experiment of propagation mechanism of hydraulic fracture in multi-fracture reservoir [J]. Journal of China University of Petroleum, 2008(4): 51-54.
- [16] GUO T, ZHANG S, QU Z, et al. Experimental study of hydraulic fracturing for shale by stimulated reservoir volume [J]. Fuel, 2014, 128: 373-380.
- [17] TAN P, JIN Y, HAN K, et al. Analysis of hydraulic fracture initiation and vertical propagation behavior in laminated shale formation [J]. Fuel, 2017, 206: 482-493.
- [18] 乔雨, 宋党育, 刘惟庆, 等. 鄂尔多斯盆地东缘山西组煤系页岩孔隙结构特征及其演化规律研究 [J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2024, 43(5): 53-66.
QIAO Y, SONG D Y, LIU W Q, et al. Pore structure characteristics and evolution laws of coal-measure shale in the Shanxi Formation, Eastern Ordos Basin [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2024, 43(5): 53-66.
- [19] 马元稹, 王猛, 马如英, 等. 海陆过渡相煤系页岩气储层微观特征及影响因素: 以沁水盆地中东部 Y2 井为例 [J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2023, 42(5): 80-92.
MA Y Z, WANG M, MA R Y, et al. Microscopic characteristics and development factors of shale gas reservoirs in marine-continent transitional facies: Taking the Y2 well in the central and eastern

- Qinshui Basin as an example [J]. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 2023, 42(5): 80-92.
- [20] 袁青松, 朱德胜, 汪超, 等. 南华北盆地海陆过渡相煤系页岩地质特征及可压性分析: 以中牟区块太原组为例[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(1): 62-70.
- YUAN Q S, ZHU D S, WANG C, et al. Geological characteristics and fracability analysis of marine-continental transitional facies coal measures shale in Southern North China Basin: A case of Taiyuan Formation, Zhongmu Block [J]. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 2023, 42(1): 62-70.
- [21] ISMAIL A, AZADBAKHT S. A comprehensive review of numerical simulation methods for hydraulic fracturing[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2024, 48(5): 1433-1459.
- [22] KIM J, MORIDIS G J. Numerical analysis of fracture propagation during hydraulic fracturing operations in shale gas systems [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 76: 127-137.
- [23] LI Z, LI L, HUANG B, et al. Numerical investigation on the propagation behavior of hydraulic fractures in shale reservoir based on the DIP technique [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 154: 302-314.
- [24] ZOU Y S, MA X F, ZHANG S C, et al. Numerical investigation into the influence of bedding plane on hydraulic fracture network propagation in shale formations [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49: 3597-3614.
- [25] DAHI-TALEGHANI A, OLSON J E. Numerical modeling of multistranded-hydraulic-fracture propagation: accounting for the interaction between induced and natural fractures[J]. *SPE Journal*, 2011, 16(3): 575-581.
- [26] 韩伟歌, 彭皓睿, 崔振东, 等. 层理面强度对水力裂缝网演化影响研究[J]. *工程地质学报*, 2023, 31(6): 2030-2040.
- HAN W G, PENG H R, CUI Z D, et al. Influence of bedding plane strength on evolution of hydraulic fracture network [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2023, 31(6): 2030-2040.
- [27] FU H, HUANG L, HOU B, et al. Experimental and numerical investigation on interaction mechanism between hydraulic fracture and natural fracture[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2024: 1-12.
- [28] LIN C, JIA X, DENG S, et al. The roles of micro pores and minerals in shale during hydraulic fracturing[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2024: 1-10.
- [29] ZHANG Y, LONG A, ZHAO Y, et al. Impacts of wellbore orientation with respect to bedding inclination and injection rate on laboratory hydraulic fracturing characteristics of Lushan shale [J]. *Fuel*, 2023, 353: 129220.
- [30] LI Y, HU W, ZHANG Z, et al. Numerical simulation of hydraulic fracturing process in a naturally fractured reservoir based on a discrete fracture network model [J]. *Journal of Structural Geology*, 2021, 147: 104331.
- [31] DUGDALE D S. Yielding of steel sheets containing slits[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1960, 8(2): 100-104.
- [32] BARENBLATT G I. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture [J]. *Advances in applied mechanics*, 1962, 7: 55-129.
- [33] BENZEGGAGH M, KENANE M. Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus [J]. *Composites Science and Technology*, 1996, 56(4): 439-449.
- [34] 何柏, 谢凌志, 李凤霞, 等. 龙马溪页岩各向异性变形破坏特征及其机理研究[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2017, 47(11): 107-118.
- HE B, XIE L Z, LI F X, et al. Anisotropic mechanism and characteristics of deformation and failure of Longmaxi shale [J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2017, 47(11): 107-118.
- [35] 李彦伟, 朱超凡, 曾壹坚, 等. 层理特征对油页岩水力压裂裂缝扩展规律影响的数值模拟研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(11): 44-54.
- LI Y W, ZHU C F, ZENG Y J, et al. Numerical simulations of the effects of bedding planes on hydraulic fracture propagation law in oil shale [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(11): 44-54.

(责任编辑 王海锋)