

基于离散元的层理页岩水力裂缝扩展行为研究

纪凡祥¹, 王鑫尧¹, 李 硕¹, 王 英¹, 李 源²

¹辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

²山西冶金岩土工程勘察有限公司, 山西 太原

收稿日期: 2026年5月29日; 录用日期: 2026年6月28日; 发布日期: 2026年7月22日

摘 要

水力压裂是开发页岩气等非常规油气资源的核心技术, 而层理作为页岩等沉积岩的典型结构特征, 对水力裂缝的扩展路径、形态及压裂效果具有显著影响。文章建立了流固耦合的水力压裂数值模型, 系统研究了不同注水压力、层理角度及层理厚度条件下水力裂缝的扩展行为。研究结果表明: 注水压力对起裂压力影响较小, 存在最优压力窗口(25~35 MPa), 过低则裂缝扩展受限, 过高则裂缝网络复杂度降低; 层理角度控制裂缝偏转与分支行为, 当倾角为45°时最易形成复杂缝网, 而0°或60°时裂缝形态趋于简单; 层理厚度增加显著增强裂缝穿层阻力, 裂缝由穿层主导逐渐转向沿层偏转主导, 纵向延伸距离受限。研究结果对层理页岩水力压裂的裂缝形态控制与压裂参数优化具有重要意义。

关键词

页岩, 流固耦合, 层理界面, 水力压裂, 裂缝扩展

Study on Hydraulic Fracture Propagation Behavior of Bedding Shale Based on Discrete Element Method

Fanxiang Ji¹, Xinyao Wang¹, Shuo Li¹, Ying Wang¹, Yuan Li²

¹School of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

²Shanxi Metallurgical Geotechnical Engineering Investigation Co., Ltd., Taiyuan Shanxi

Received: May 29, 2026; accepted: June 28, 2026; published: July 22, 2026

Abstract

Hydraulic fracturing is the core technology for the development of unconventional oil and gas resources such as shale gas. As a typical structural feature of sedimentary rocks such as shale, bedding has a significant impact on the propagation path, morphology, and fracturing effect of hydraulic

fractures. In this paper, a numerical model of fluid-solid coupling hydraulic fracturing is established, and the propagation behavior of hydraulic fractures under different water injection pressures, bedding angles, and bedding thicknesses is systematically studied. The results show that the water injection pressure has little effect on the initiation pressure, and there is an optimal pressure window (25~35 MPa). If the water injection pressure is too low, the fracture propagation is limited, and if the water injection pressure is too high, the fracture network complexity is reduced. The bedding angle controls the fracture deflection and branching behavior. When the dip angle is 45° , it is most likely to form a complex fracture network, while the fracture morphology tends to be simple when the dip angle is 0° or 60° . The increase in the bedding thickness significantly enhances the resistance of the crack through the layer. The crack is gradually dominated by the layer through the layer and gradually turns to the deflection along the layer, and the longitudinal extension distance is limited. The research results are of great significance to the fracture morphology control and fracturing parameter optimization of hydraulic fracturing of bedding shale.

Keywords

Shale, Fluid-Solid Coupling, Bedding Interface, Hydraulic Fracturing, Fracture Propagation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着我国经济的快速发展,能源需求持续攀升,传统化石能源的储备日益减少,能源结构转型已成为国家战略重点。非常规天然气资源,特别是页岩气,因其储量丰富、燃烧清洁等优势,成为替代传统能源的重要选择。页岩储层具有低孔隙度、超低渗透率的特点,天然产能极低,必须依靠水力压裂等储层改造技术才能实现商业开发[1][2]。

水力压裂技术通过在储层中注入高压流体,迫使岩石产生裂缝,形成复杂的裂缝网络,从而提高油气渗流能力。然而,页岩等沉积岩普遍发育有层理结构,层理面是岩石中的弱面,其力学性质与基质存在显著差异,对水力裂缝的扩展行为具有重要影响。实验和现场观测均表明,水力裂缝在遇到层理面时可能发生偏转、分支、止裂或穿越等多种响应,这些行为直接决定了压裂后的裂缝网络形态及储层改造效果[3]。

因此,深入研究层理页岩中水力裂缝的扩展机理,揭示层理特征参数对裂缝扩展的影响规律,对于优化压裂设计、提高压裂效果具有重要意义。由于物理实验成本高、周期长,且难以实时观测裂缝扩展过程,数值模拟成为研究该问题的有效手段。离散元方法(DEM)能够显式模拟岩石的非连续性和裂缝萌生、扩展过程,在岩石力学与水力压裂研究中得到了广泛应用[4][5]。

本文基于 PFC2D 离散元软件,构建了流固耦合的水力压裂数值模型,系统分析注水压力、层理角度及层理厚度三个关键参数对水力裂缝扩展行为的影响规律,以期对层理页岩的水力压裂裂缝控制提供理论指导。

2. 层理页岩水力压裂数值模拟研究

2.1. 数值模型及参数确定

模型构建采用 PFC2D 软件建立尺寸为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的二维离散元模型。在模型中心位置预设半径为 5.0 mm 的水力压裂钻孔,以模拟注水井筒,如图 1 所示。为了模拟层理页岩的力学特性,在模型中设置不同倾角的层理界面。模型四周采用位移边界条件,即对模型边界的颗粒进行法向和切向固定,防止模型在压裂过程中发生整体移动。

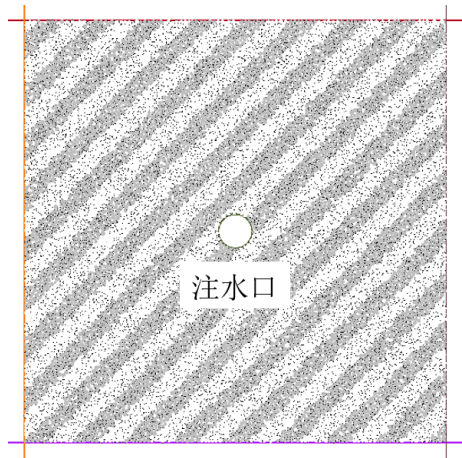


Figure 1. Numerical model of hydraulic fracturing
图 1. 水力压裂数值模型

为研究不同层理厚度对水力裂缝扩展的影响，在模型初始平衡阶段对模型进行不同层理厚度建模，分别模拟少、中、多层理状态。层理倾角分别设置为 0° 、 30° 、 45° 、 60° ，以研究层理方向对裂缝扩展路径的影响规律。为研究不同层理强度对水力裂缝扩展的影响，后续又设置了不同层理强度，分别模拟低、中、高强度层理状态。

借助 PFC 中的双轴数值试验，通过反复对比数值试验结果与实际结果，确定本次模拟所用的颗粒流细观力学参数[6] [7]，具体参数如表 1 所示：

Table 1. Mesoscopic parameters of shale numerical model
表 1. 页岩数值模型的细观参数

细观参数	数值
颗粒粒径比	1.66
颗粒粒径最大值/mm	0.18
接触模量/GPa	9.0
颗粒刚度比	1.0
平行黏结模量/GPa	17.5
平行黏结刚度比	1.2
平行黏结黏聚力/MPa	50.5
平行黏结抗拉强度/MPa	30.7
平行黏结摩擦角/ $^{\circ}$	30
颗粒摩擦因数	1.2
光滑节理法向刚度/(GPa·m ⁻¹)	66
光滑节理切向刚度/(GPa·m ⁻¹)	66
光滑节理摩擦因数	1.2
光滑节理抗拉强度/MPa	13.5
光滑节理黏聚力/MPa	13.5
光滑节理摩擦角/ $^{\circ}$	45
颗粒键合半径/mm	0.05

2.2. 水力压裂实现方式

PFC2D 进行水力压裂模拟时, 如图 2 所示, 采用内置的管道域模型(Pipe Domain Model)实现流固耦合计算[8]-[10]。该模型假设流体通道由相邻两颗粒的接触点构成, 每个接触对应一个平行板通道, 长度为 L , 开度为 a , 厚度为单位厚度。流体在通道内的流动服从 Hagen-Poiseuille 方程:

$$q = ka^2 \frac{\Delta p}{L} \quad (1.1)$$

式中: q 为流量, m^3/s ; k 为渗透系数, $\text{m}/(\text{Pa}\cdot\text{s})$; Δp 为两个孔隙域之间的压力差, Pa 。

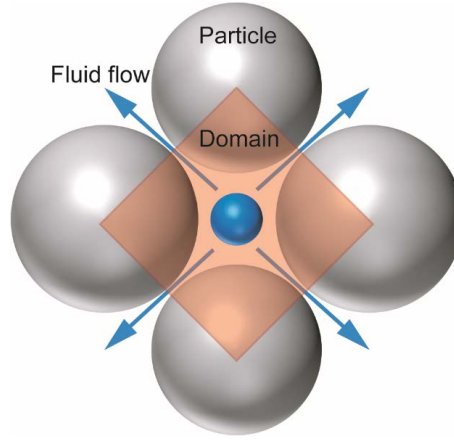


Figure 2. The unit diagram of PFC tube domain method

图 2. PFC 管域法单元示意图

在颗粒接触处, 存在初始开度 a_0 , 其允许即使颗粒紧密接触时流体仍可流动, 从而保证了材料的基质渗透率。流体通道的开度 a 取决于颗粒间的法向接触力。当两颗粒间的法向接触力为压应力时, 开度 a 可表示为:

$$a = \frac{a_0 F_0}{F + F_0} \quad (1.2)$$

式中: F 为当前两颗粒间的法向压缩力, N ; F_0 为管道开度降低为初始开度一半时的压缩力, N 。

当两颗粒处于张拉状态或颗粒间粘结已破坏时, 开度 a 为:

$$a = a_0 + \lambda(d - R_1 - R_2) \quad (1.3)$$

式中: d 为两颗粒中心距, m ; R_1 、 R_2 分别为两颗粒半径, m ; λ 为无量纲乘子, 通常取小于 1 的常数, 以修正因颗粒尺寸放大导致的开度偏大问题。

在时间步 Δt 内, 由于流体流动引起的孔隙域压力变化由流体的体积压缩模量计算。对于具有 N 条流体通道的孔隙域, 在 Δt 内总流量为 $\sum q$, 则孔隙压力变化 Δp 为:

$$\Delta p = \frac{K_f}{V_d} (\sum q \Delta t - \Delta V_d) \quad (1.4)$$

式中: K_f 为流体压缩模量, Pa ; V_d 为孔隙域体积, m^3 ; ΔV_d 为孔隙域体积变化, m^3 。

在 PFC2D 中, 流体与颗粒间的耦合作用主要通过以下三种方式实现: ① 通过接触的张开与闭合或接触力的变化改变通道孔隙开度; ② 通过改变研究区域的力学特性来影响孔隙压力分布; ③ 孔隙压力

对周围颗粒产生推移作用，驱动颗粒运动[11]。

为保证计算稳定，采用显式方法交替求解流动方程和压力方程。临界时间步长 Δt_c 由下式确定：

$$\Delta t_c = \frac{2rV_d}{NK_fka^2} \quad (1.5)$$

式中： r 为孔隙域周围颗粒的平均半径，m。

模拟过程中，在注水钻孔处设置恒定压力边界条件，注水压力分别设置为 200 kPa、300 kPa 和 400 kPa，以研究不同法向应力条件下的水力压裂效果。计算步数设置为 10,000 步，时间步长为 0.001 s，总模拟时长为 10 s。

2.3. 模拟过程

采用 PFC2D 软件分别模拟以下关键因素对层理页岩水力压裂行为(包括起裂压力、裂缝扩展形态、扩展长度及裂缝网络复杂度等)的影响。

1) 注水压力对压裂效果的影响

在保持层理几何参数(厚度、角度)及岩石力学参数不变的条件下，研究不同注水压力对水力压裂效果的影响。分别设置低、中、高三种注水压力水平。通过分析不同注水压力下的裂缝扩展范围与网络形态，评估注水压力对储层改造体积及复杂度的贡献。

2) 层理倾角对压裂效果的影响

在保持注水压力及地层参数不变的条件下，研究不同层理角度对水力压裂效果的影响。层理角度变化范围为 $0^\circ \sim 60^\circ$ ，分别设置 0° 、 30° 、 45° 、 60° 四种倾角工况。通过对比不同层理角度下裂缝的穿越、偏转或分支行为，分析层理方向对裂缝扩展路径的控制规律。

3) 层理厚度对压裂效果的影响

在保持储层颗粒细观力学参数及层理倾角、注水压力一定的条件下，研究不同层理厚度对水力压裂效果的影响。层理厚度变化范围设定为 3~5 mm，增量为 1 mm。通过对比分析不同层理厚度工况下的裂缝扩展形态、裂隙数量及扩展范围，揭示层理厚度对压裂效果的调控机制。

3. 模拟结果分析

为系统研究层理页岩水力压裂的裂缝扩展规律，首先选取基准工况进行详细分析。基准工况参数设置如下：注水压力为 30 MPa，层理倾角为 45° ，层理厚度为 3 mm。在此基准工况下，对水力压裂全过程进行模拟，分析起裂压力、裂缝扩展形态、裂缝扩展长度及裂缝网络特征[12]。

水力压裂全过程分析

图 3 展示了基准工况下水力压裂过程中不同时间步的裂缝扩展形态。从图中可以看出，水力压裂过程大致可分为三个阶段：初始起裂阶段($t = 0 \sim 2.5$ s)：在注水初期，流体压力在钻孔内逐渐累积，钻孔周围颗粒间的接触力开始发生变化。当注水压力达到起裂压力时，钻孔壁面处首先产生微裂纹。初始裂纹主要沿最大主应力方向萌生，呈对称分布。裂缝扩展阶段($t = 2.5 \sim 7.0$ s)：随着注水持续，裂缝向远离钻孔的方向扩展。当裂缝前端遇到层理界面时，裂缝扩展路径发生改变。在 45° 层理倾角条件下，裂缝在层理界面处发生明显偏转，沿层理方向扩展一段距离后，部分裂缝分支再次转向最大主应力方向，形成“Z”形裂缝轨迹。此阶段裂缝扩展速度较快。裂缝稳定阶段($t = 7.0 \sim 10.0$ s)：当裂缝扩展至模型边界附近时，扩展速度逐渐减缓，裂缝形态趋于稳定。裂缝总体呈现复杂网络形态，表明层理界面对裂缝扩展具有显著的导向和分支作用。

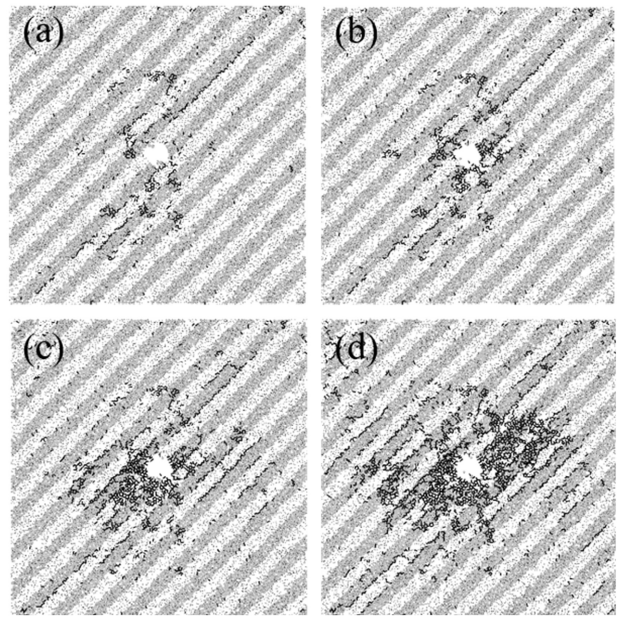


Figure 3. Crack propagation morphology
图 3. 裂缝扩展形态

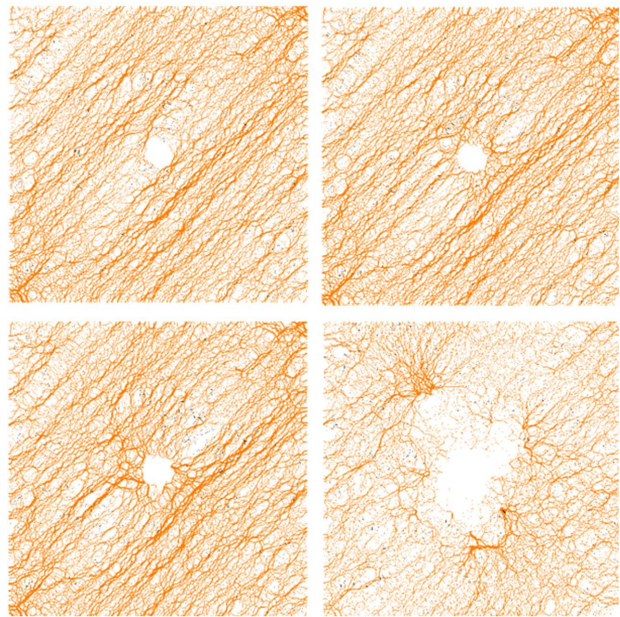


Figure 4. Force chain network
图 4. 力链网络

图 4 通过分析裂缝分布特征，可以归纳出以下规律：裂缝的空间分布：主裂缝沿最大主应力方向总体延伸，但在层理界面处发生偏转，形成约 15° 的偏转角。次级裂缝主要沿层理方向发育，与主裂缝形成约 45° 的夹角。裂缝的连通性：主裂缝与次级裂缝在层理界面处相互连通，形成有效的裂缝网络。这种连通结构有利于提高储层的整体渗透性。裂缝的密度：在层理界面附近，裂缝密度显著高于远离界面的区域。统计结果表明，层理界面两侧 5 mm 范围内的裂缝密度约为远离界面区域的 2.3 倍，说明层理界面是裂缝发育的优势区域。

4. 层理页岩的水力裂缝扩展特性

4.1. 注入压力对储层压裂的影响分析

为研究注水压力对水力压裂效果的影响，在保持层理倾角 45° 、层理厚度为 3 mm 的条件下，分别模拟注水压力为 30 MPa 、 40 MPa 、 50 MPa 共 3 种工况。

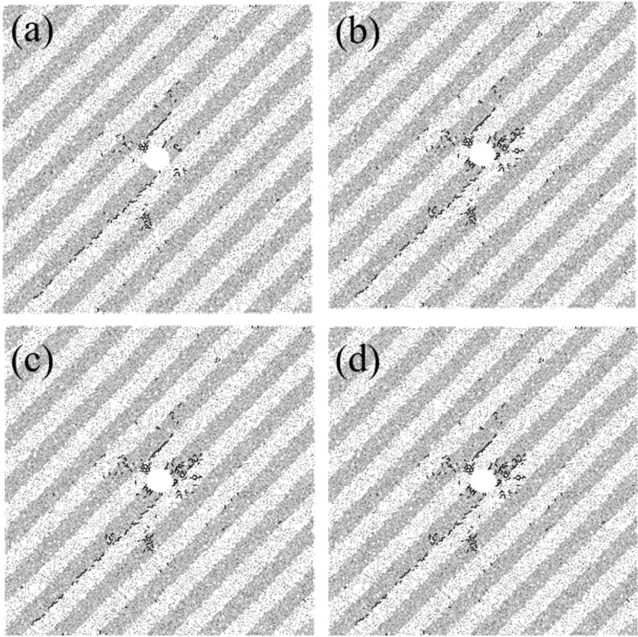


Figure 5. The influence law of hydraulic fracture propagation under 30 MPa
图 5. 30 MPa 下水力裂缝扩展的影响规律

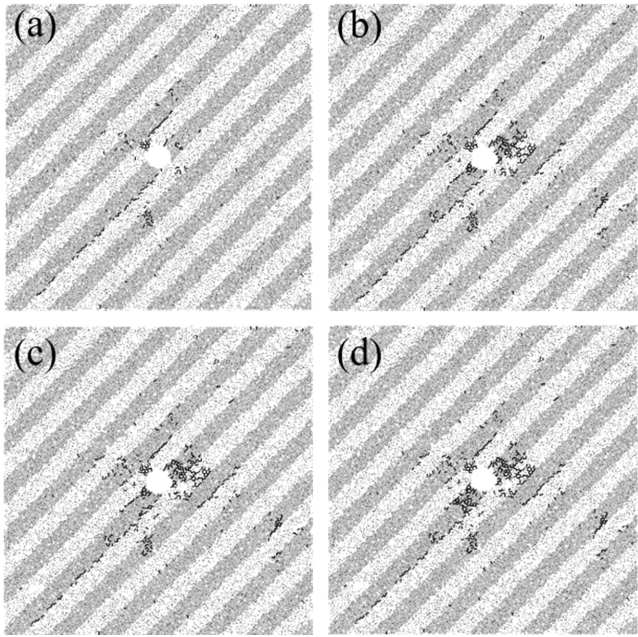


Figure 6. The influence law of hydraulic fracture propagation under 40 MPa
图 6. 40 MPa 下水力裂缝扩展的影响规律

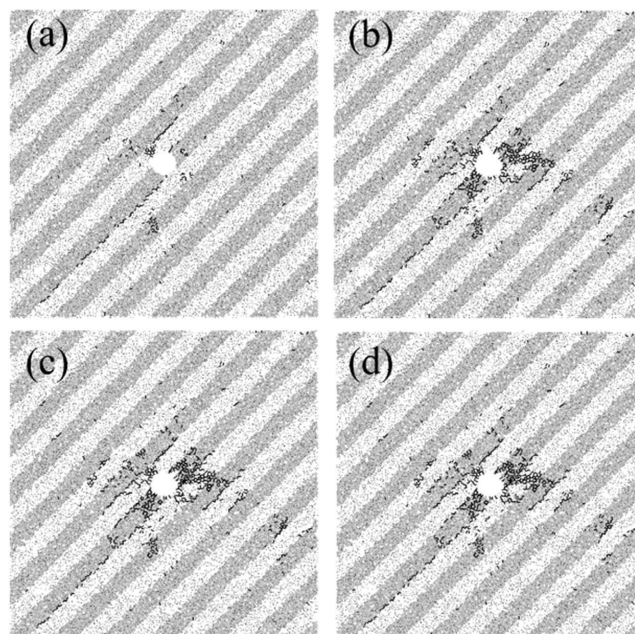


Figure 7. The influence law of hydraulic fracture propagation under 50 MPa
图 7. 50 MPa 下水力裂缝扩展的影响规律

图 5~7 展示了不同注水压力条件下起裂压力的变化规律。结果表明，起裂压力受注水压力影响较小。这说明起裂压力主要取决于岩石的力学性质，而非注水压力大小。注水压力主要影响起裂后的裂缝扩展行为。从图中可以看出：当注水压力为 30 MPa 时，裂缝扩展范围有限，仅在钻孔附近形成少量微裂纹，难以形成贯穿裂缝网络。此时压裂效果较差，裂缝扩展长度不足 30 mm。当注水压力为 40 MPa 时，裂缝能够有效扩展，并在层理界面处发生偏转和分支，形成较为复杂的裂缝网络。主裂缝扩展长度达到 70~90 mm，次级裂缝数量为 2~4 条。当注水压力为 50 MPa 时，裂缝扩展范围显著增大，主裂缝扩展长度可达 110 mm 以上。但过高的注水压力会导致裂缝过度扩展，裂缝形态趋于简单，分支现象减少，裂缝网络复杂度反而降低。这可能是由于高压下裂缝扩展速度过快，流体来不及在层理界面处形成分支[13]。

4.2. 层理角度对储层压裂的影响分析

为研究层理倾角对水力压裂效果的影响，在保持注水压力 30 MPa、层理厚度为 3 mm 不变的条件下，分别模拟层理倾角为 0°、30°、45°、60° 共 4 种工况。

不同层理倾角下的最终裂缝形态如图 8~11 所示。从图中可以观察到显著的差异：当层理倾角为 0° (水平层理) 时，裂缝数量很少，几乎没有达到起裂压力。此时裂缝形态最简单，分支现象不明显。当层理倾角为 30° 时，裂纹数量依旧很少，几乎没有达到起裂压力。当层理倾角为 45° 时，裂缝偏转最为显著，在层理界面处发生分支，形成主裂缝与次级裂缝共存的复杂裂缝网络。这是裂缝网络复杂度最高的工况。当层理倾角为 60° 时，裂缝偏转程度减弱，沿层理扩展的距离缩短，裂缝整体沿最大主应力方向扩展。虽然仍存在一定的偏转，但分支现象减少。

4.3. 层理厚度对储层压裂的影响分析

为研究层理强度对水力压裂效果的影响，在保持注水压力 30 MPa、层理倾角 45° 不变的条件下，分别模拟层理厚度为 3 mm、4 mm、5 mm 共 3 种工况。

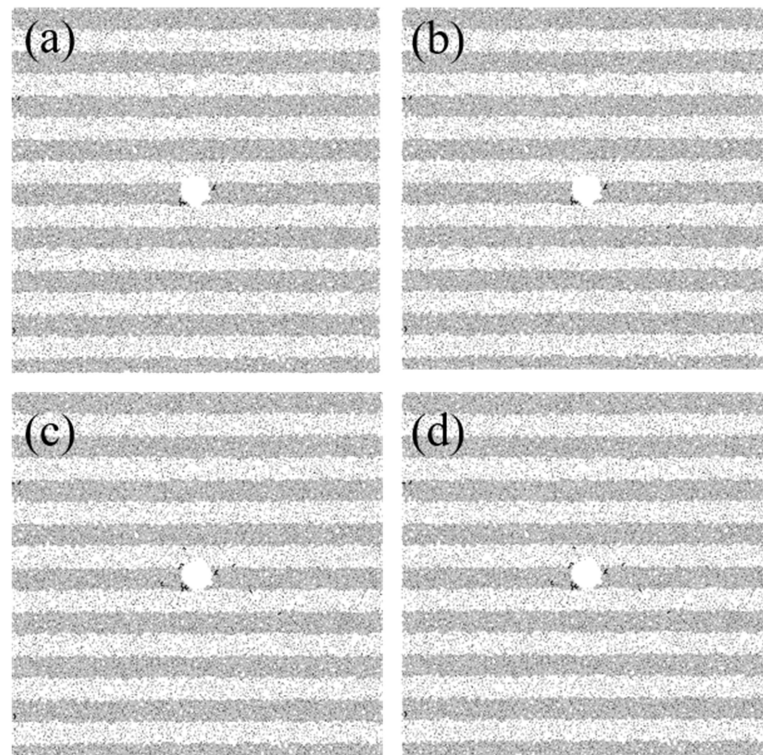


Figure 8. The influence law of hydraulic fracture propagation when the bedding angle is 0°
图 8. 层理角度为 0° 时水力裂缝扩展的影响规律

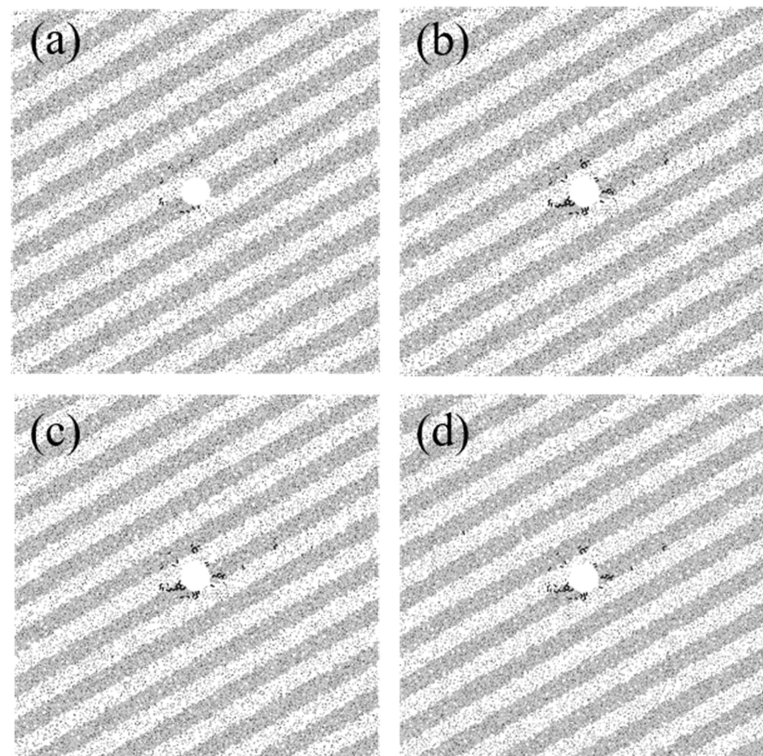


Figure 9. The influence law of hydraulic fracture propagation when the bedding angle is 30°
图 9. 层理角度为 30° 时水力裂缝扩展的影响规律

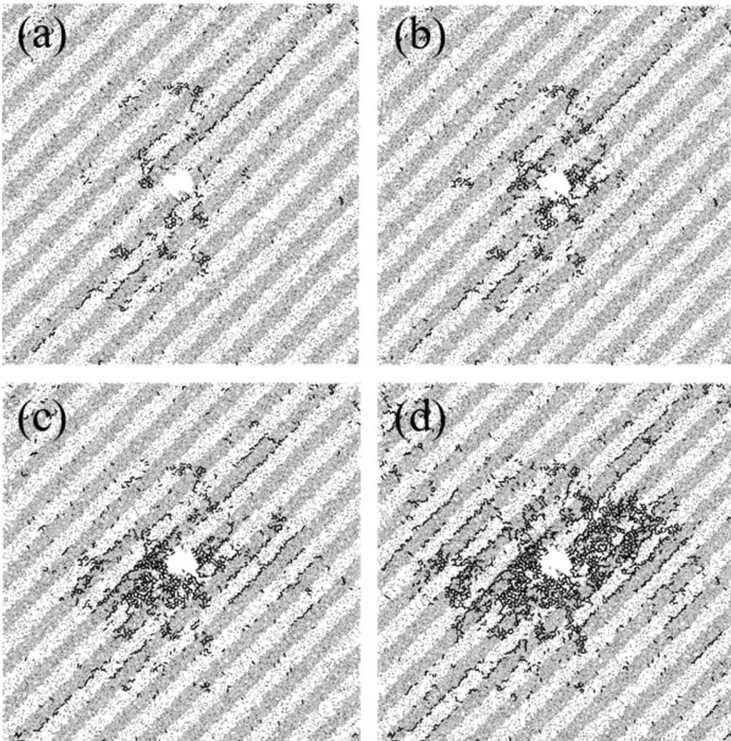


Figure 10. The influence law of hydraulic fracture propagation when the bedding angle is 45°
图 10. 层理角度为 45°时水力裂缝扩展的影响规律

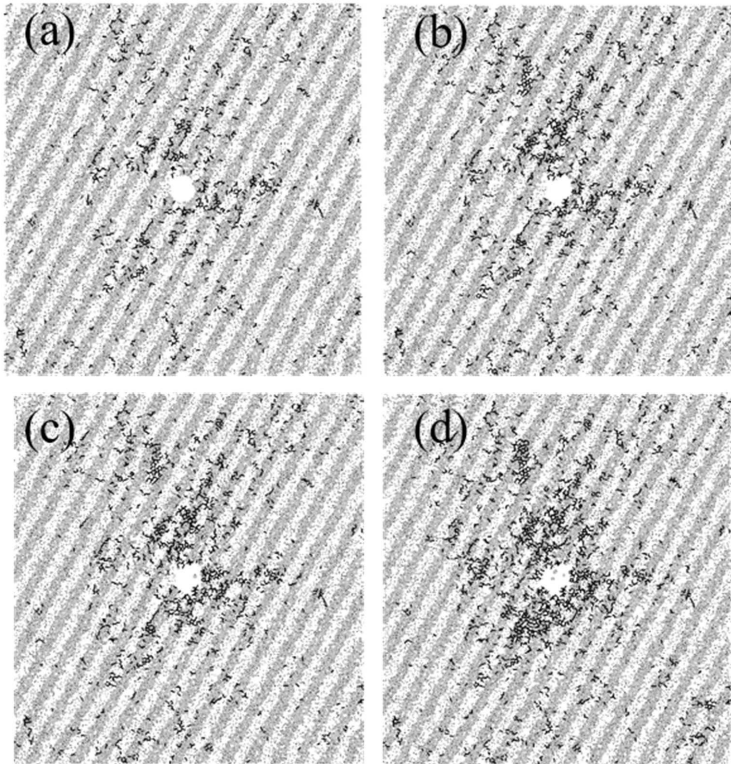


Figure 11. The influence law of hydraulic fracture propagation when the bedding angle is 60°
图 11. 层理角度为 60°时水力裂缝扩展的影响规律

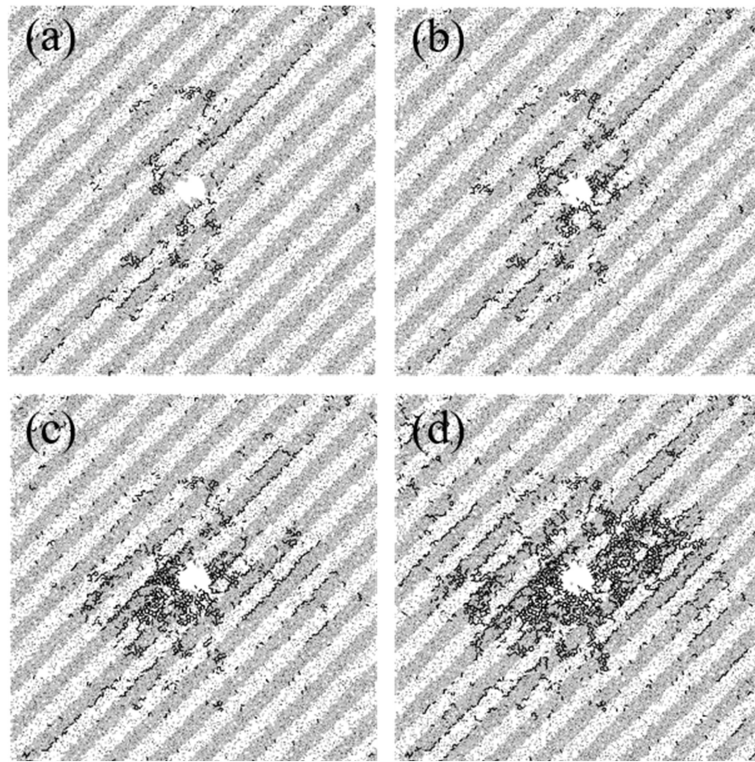


Figure 12. The influence law of hydraulic fracture propagation when the bedding thickness is 3 mm
图 12. 层理厚度为 3 mm 时水力裂缝扩展的影响规律

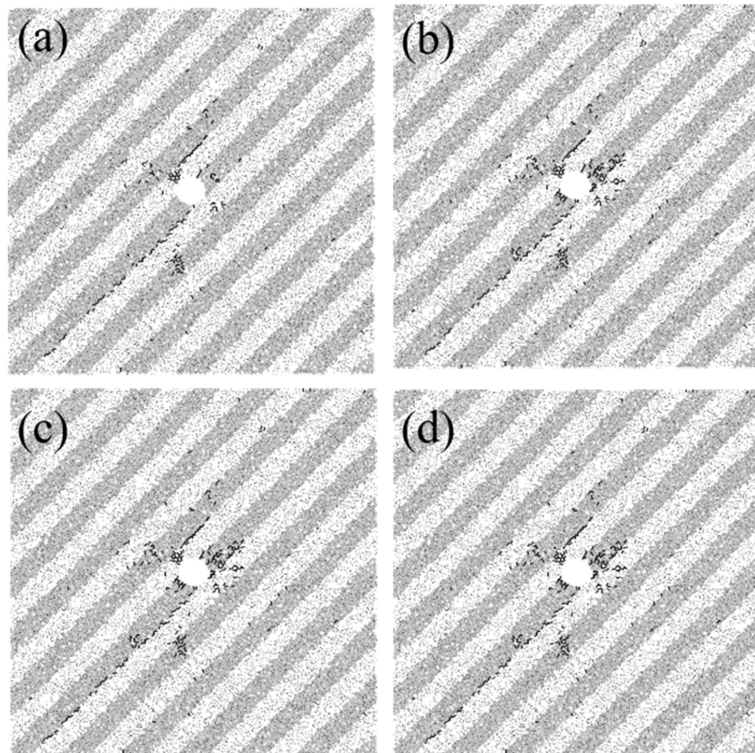


Figure 13. The influence law of hydraulic fracture propagation when the bedding thickness is 4 mm
图 13. 层理厚度为 4 mm 时水力裂缝扩展的影响规律

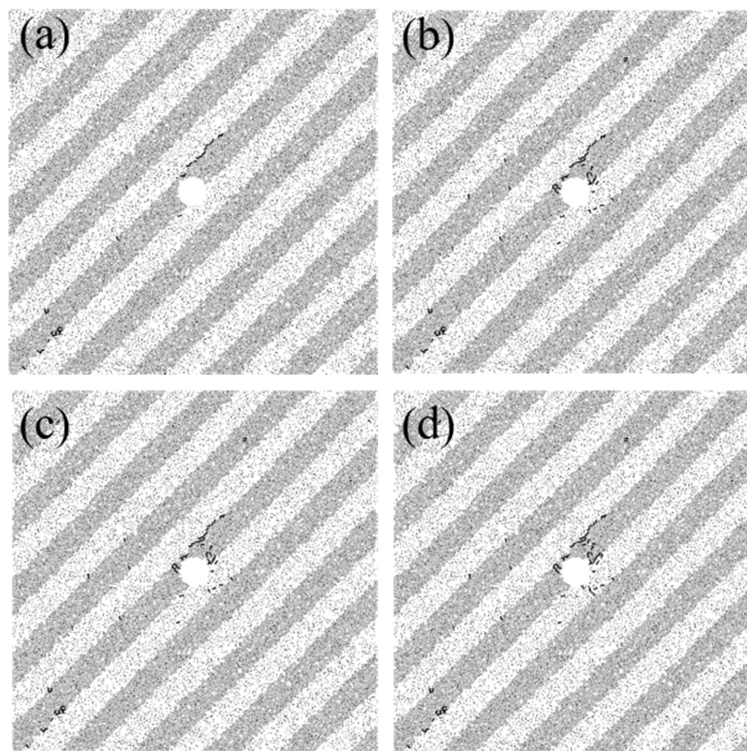


Figure 14. The influence law of hydraulic fracture propagation when the bedding thickness is 5 mm

图 14. 层理厚度为 5 mm 时水力裂缝扩展的影响规律

不同层理厚度下的最终裂缝形态如图 12~14 所示。从模拟结果可以看出，层理厚度对裂缝扩展路径及穿越能力具有显著影响：薄层理(3 mm)工况：岩石的起裂压力很小，在水力压裂的过程中产生了大量的裂纹，且主要沿着层理面进行扩展。中厚层理(4 mm)工况：层理结构开始对裂缝扩展产生明显的阻滞作用。裂缝前端在穿越层理时消耗能量增加，裂纹并没有向四周萌生扩展。厚层理(5 mm)工况：层理厚度对岩石的起裂压力产生巨大影响，在后层理的工况中，没有产生复杂的裂纹网络，仅仅沿着井壁周围有少许裂纹萌生。

上述结果表明，随着层理厚度的增加，水力裂缝穿越层理所受的阻力增大，裂缝扩展由穿层主导逐渐向沿层偏转主导过渡。

5. 结论

本文通过建立流固耦合的水力压裂数值模型，系统分析了注水压力、层理角度及层理厚度对层理页岩水力裂缝扩展行为的影响规律，得出主要结论如下：

1) 注水压力对起裂压力幅值影响甚微，但对起裂后的裂缝扩展行为具有决定性作用。研究发现存在最优注水压力窗口(25~35 MPa)，在该区间内裂缝既能充分扩展延伸，又能诱发显著的层理分支效应，形成高导流能力的复杂缝网。注水压力过低将导致裂缝扩展受限，改造体积不足；压力过高则会导致裂缝扩展速率过快，流体难以充分浸润层理弱面，反而降低裂缝网络复杂度，趋向形成单一贯穿裂缝。

2) 层理角度决定了水力裂缝与层理弱面的交会几何关系及相互作用机制。模拟结果表明，当层理角度为 45°时，裂缝在界面处的偏转与分支现象最为显著，最易诱发形成“Z”字形或羽状复杂裂缝网络；当层理角度为 0°或 60°时，层理面对裂缝的导向作用占主导，裂缝形态趋于简单平直，不利于形成复杂缝网。

3) 层理厚度的增加会显著提升裂缝穿层扩展的能量耗散。随着层理厚度从 3 mm 增大至 5 mm, 水力裂缝穿越层理所受的阻滞效应逐渐增强。厚层理条件下, 裂缝更倾向于沿层理界面偏转或止裂, 导致主裂缝的纵向延伸距离受限, 裂缝网络形态由穿层贯穿型向沿层偏转型过渡。

基金项目

辽宁省科技计划联合计划(自然科学基金 - 博士科研启动项目), 编号: 2024-BSLH-113。

参考文献

- [1] 张搏, 李晓, 王宇, 等. 油气藏水力压裂计算模拟技术研究现状与展望[J]. 工程地质学报, 2015, 23(2): 301-310.
- [2] 王涛, 周炜波, 徐大朋, 等. 基于光滑节理模型的岩体水力压裂数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(4): 500-508.
- [3] 王建伟. 松软低透气性煤层水力压裂增透瓦斯抽采技术研究[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(6): 47-52.
- [4] 李全贵, 邓羿泽, 胡千庭, 等. 煤层水力压裂应力与裂隙演化的细观规律[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(6): 32-40.
- [5] 杨典森, 周云, 周再乐. 含界面储层水力压裂试验与数值模拟研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(9): 1771-1794.
- [6] 刘先珊, 曾南豆, 李涛, 等. 基于改进 PFC 流固耦合算法的页岩水力压裂裂缝扩展研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(9): 3545-3560.
- [7] 王世斌, 王刚, 陈雪畅, 等. 基于 PFC2D-COMSOL 的煤层水力压裂增透促抽瓦斯数值模拟研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(10): 132-140.
- [8] 李然, 易新斌, 王天一, 等. 基于细观离散元方法的低渗透储层水力压裂数值模拟[J]. 石油科学通报, 2022, 7(4): 576-583.
- [9] 梁运培, 李其罡, 黄旭超, 等. 基于颗粒流的倾斜厚煤层坚硬顶板运动失稳规律及水力弱化参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(S1): 3428-3438.
- [10] 韩志勇, 郑春山. 不同地应力和注水流量影响下水力压裂裂隙扩展规律研究[J]. 煤炭技术, 2025, 44(4): 154-158.
- [11] 张增宝, 孟宪波, 黄滚, 等. 水平应力差异系数对水力压裂裂缝形态的影响研究[J]. 煤矿安全, 2025, 56(4): 37-42.
- [12] 梁顺, 张渊, 落弘业, 等. 多孔水力压裂缝网耦合扩展规律及硬岩巷道快掘工艺优化研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2025, 42(4): 807-822.
- [13] 郑春山, 韩志勇, 江丙友, 等. 真三轴状态下煤体水力压裂裂隙扩展及损伤特性实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2025, 21(12): 5-12.