Mine Engineering 矿山工程, 2026, 14(6), 1566-1575
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/me
https://doi.org/10.12677/me.2026.146155

Hans汉斯

深层页岩储层CO_2复合压裂裂缝扩展机理研究

刘一凡*，李伊扬

重庆科技大学安全科学与工程学院，重庆

收稿日期：2026年10月24日；录用日期：2026年11月4日；发布日期：2026年11月11日

摘　要

深层页岩储层地应力水平高，裂缝扩展受地应力与岩体非均质性共同影响。在CO_2前置压裂与后续水力压裂过程中，前置裂缝的形成及其对后续流体通道的改变，使裂缝扩展同时受到流体性质、注入条件和已有裂缝分布的影响。为了明确前置CO_2造缝与后续水力扩展之间的关系，本文基于有限－离散元方法建立二维热流固耦合模型，通过重启动开展两阶段连续计算，研究固定总注入量下不同排量及水平地应力差条件下的裂缝扩展规律。结果表明，CO_2压裂较水压裂形成更多近井及主裂缝附近的分支，后续注水沿前置主缝和部分支缝继续扩展；提高CO_2排量使终态裂缝长度与开度增加，其中开度变化更为明显；较低地应力差有利于多方向分支发育，较高地应力差下优势主缝延伸更加突出，前置分支仍对后续扩展产生影响。研究结果可为深层页岩储层CO_2前置注入与后续水力压裂的参数选择提供依据。

关键词

超临界二氧化碳，复合压裂，有限－离散元，裂缝扩展，地应力差

Study on Fracture Propagation Mechanism of CO_2 Hybrid Fracturing in Deep Shale Reservoirs

Yifan Liu*, Yiyang Li

College of Safety Science and Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: October 24, 2026; accepted: November 4, 2026; published: November 11, 2026

Abstract

High in-situ stress and rock heterogeneity jointly affect fracture propagation in deep shale reservoirs.

*第一作者。

文章引用: 刘一凡, 李伊扬. 深层页岩储层 CO_2 复合压裂裂缝扩展机理研究[J]. 矿山工程, 2026, 14(6): 1566-1575.
DOI: 10.12677/me.2026.146155

During CO_2 prepad and subsequent hydraulic fracturing, the fractures created in the prepad stage alter the flow paths for subsequent injection, linking fracture growth to fluid properties, injection conditions and pre-existing fracture geometry. To clarify the connection between the two stages, a two-dimensional thermal-hydraulic-mechanical model is established using the finite-discrete element method. A restart procedure enables continuous simulation of CO_2 prepad and subsequent water injection. Fracture propagation is examined at different injection rates under a fixed total injection volume and at different horizontal stress differences. The results show that CO_2 fracturing produces more branches near the injection point and main fractures than water fracturing. Subsequent water injection extends the prepad main fractures and some branches. Increasing CO_2 injection rate increases final fracture length and aperture, with a more pronounced change in aperture. Lower stress differences favor multidirectional branching, whereas higher differences produce more distinct main-fracture paths while retaining the influence of prepad branches. The findings provide a basis for selecting injection parameters for CO_2 prepad and subsequent hydraulic fracturing in deep shale reservoirs.

Keywords

Supercritical Carbon Dioxide, Hybrid Fracturing, Finite-Discrete Element Method, Fracture Propagation, Stress Difference

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

页岩气储层致密，压裂形成的主裂缝及其分支是扩大储层改造范围的重要通道[1]。随着页岩气开发向深层推进，较高的地应力水平和岩体非均质性使裂缝扩展方向与分支分布受到共同约束。CO_2 复合压裂采用前置 CO_2 造缝、后续水基流体扩展的注入方式，将两种流体在造缝过程中的作用相结合[2] [3]。前置阶段形成的主裂缝与支缝既改变局部岩体状态，也为后续注水提供流动通道；后续裂缝沿这些路径继续扩展，并受到排量和地应力条件的影响。因此，两阶段之间的裂缝衔接是理解 CO_2 复合压裂扩展规律的重要问题。

已有研究表明，超临界 CO_2 相较水压裂更易形成分散的破裂区域和局部分支[4] [5]。CO_2 向孔隙及弱面渗入能够改变局部受力状态，与流体物性共同影响破裂过程及裂缝形态[6]；层理及内部弱面的微观损伤还会改变层状页岩的拉伸破坏路径[7]。数值研究已采用有限－离散元和相场等方法，将岩体变形、裂缝流动与传热纳入耦合计算[8] [9]，并揭示了温度、孔隙压力与岩体应力之间的相互作用[10]。敖翔等在深层页岩前置压裂研究中分析了 CO_2 压缩、扩散及相变与围压对裂缝扩展的共同影响[11]，前置注入量、天然裂缝密度和水平地应力差则影响裂缝网络的体积与复杂度[12]。储层渗透率与流体滤失也会改变造缝尺度及注入参数的适应性[13]。其中，排量改变单位时间的流体输入和注入历程，地应力差改变不同方向裂缝扩展受到的约束；二者通过前置裂缝的形成，进一步影响后续水力裂缝的张开与延伸。因此，分析 CO_2 复合压裂时，应将流体注入、前置裂缝分布及地应力约束联系起来，考察两阶段裂缝扩展的连续响应。

上述研究揭示了流体性质、岩石结构及耦合作用对 CO_2 造缝的影响。对于前置 CO_2 与后续水力压裂组成的连续过程，前置裂缝既是第一阶段的破裂结果，也是第二阶段的初始通道，需要将其形成与后续扩展联系起来，分析排量和地应力差对裂缝张开、延伸及分支发育的作用。为此，本文基于有限－离散

元热流固耦合模型，通过重启动开展前置 CO_2 与后续注水的连续计算，研究固定总注入量下排量对裂缝长度、开度(裂缝的张开程度)的影响，并比较不同水平地应力差下两阶段裂缝形态的变化，揭示两阶段裂缝的连续扩展规律，为深层页岩储层 CO_2 复合压裂参数选择提供依据。

2. 数值方法与模型验证

2.1. 岩体变形与节理破裂

本文采用 MultiFracS 有限－离散元方法描述岩体的变形和破裂。三角形单元承担连续介质中的应力与应变计算，相邻三角形之间设置节理单元。节理单元达到破坏条件后发生软化和断裂，破裂单元之间的接触继续参与力学求解。裂缝路径因此由局部受力与节理破坏共同形成，而不是预先规定为一条连续直线。

节点运动满足动力平衡方程：

$$M\ddot{u} + C\dot{u} = F \tag{1}$$

式中，M 为节点质量矩阵，C 为阻尼矩阵，u 为节点位移向量，上方一阶和二阶导数分别表示速度与加速度；F 为节点合力，包括单元变形、节理作用、接触、流体压力及外部荷载产生的作用力。节点运动、节理破裂及破裂后的接触共同参与计算，使裂缝扩展后形成的接触关系继续影响后续过程。

节理单元考虑 I 型拉伸、II 型剪切及拉剪混合破坏，采用的混合位移判据为：

$$\left(\frac{o-o_p}{o_r-o_p}\right)^2 + \left(\frac{s-s_p}{s_r-s_p}\right)^2 \geq 1 \tag{2}$$

式中，o 和 s 分别为法向张开量与切向滑移量；o_p、s_p 为达到峰值强度时的位移；o_r、s_r 为完全破坏时的极限位移。该式与节理峰值强度和软化关系共同描述拉剪混合破坏过程。节理单元满足破坏条件后发生断裂，随后通过接触计算处理破裂面之间的相互作用，从而连接岩体变形、损伤与裂缝扩展过程。

2.2. 基质与裂缝中的流动

模型区分低孔隙度基质中的孔隙流动和节理中的裂缝流动，两者通过缝壁流体交换相联系。基质孔隙流动采用 Darcy 定律；忽略水平二维模型平面内的重力势差时，流动由压力梯度驱动。考虑岩体体积变形对储流的影响，孔隙压力方程为：

$$\frac{1}{M}\frac{\partial p^p}{\partial t} = -\frac{\partial q_i^p}{\partial x_i} - \alpha_p \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \tag{3}$$

式中，p^p为孔隙压力，q^p为 Darcy 速度，M 为 Biot 模量，α_p 为 Biot 系数，ε_v 为体积应变，t 为时间。式中 M 与式(1)的质量矩阵含义不同。孔隙压力与骨架变形相互耦合：压力变化改变岩体的有效受力状态，体积变形则影响流体储存与压力演化；这一耦合关系与裂缝中的流动共同控制流体压力在岩体中的传递[8]。

在水平二维模型中，相邻裂缝节点之间按平行板流动近似计算：

$$q_{j\to i}^f = \frac{a_{ij}^3}{12\mu}\frac{p_j^f - p_i^f}{L_{ij}} \tag{4}$$

式中，a_{ij} 为水力开度，p^f为裂缝压力，L_{ij} 为节点间裂缝长度，μ 为流体动力黏度；流量按单位出平面厚度计。立方定律反映了开度变化对裂缝流动能力的显著影响。节理张开后，水力开度增大，流体更易沿该通道进入裂缝尖端及相连支缝；节理闭合则使通道中的流动阻力增大。计算通过裂缝开度、流量和压力的相互更新描述这一过程。

2.3. 热流固耦合与 CO_2 物性

计算框架考虑岩体导热、裂缝流体导热与热平流，以及流体和两侧缝壁之间的换热。低孔隙度基质中的流体与骨架采用局部热平衡假设，忽略基质流体的热平流；裂缝流体与岩体分别设置温度，从而允许流体沿裂缝流动时与缝壁保持温差。岩体内部导热遵循 Fourier 定律：

$$q_i^T = -k_{ij}^T \frac{\partial T^s}{\partial x_j} \tag{5}$$

式中，q^T为热流密度，k^T为导热系数张量，T^s为岩体温度。一个裂缝单元与两侧缝壁的换热量率为：

$$Q_e^T = h_T \left(T_+^s - T^f\right) L + h_T \left(T_-^s - T^f\right) L \tag{6}$$

式中，h_T 为缝壁换热系数，T^f为裂缝流体温度，T_+^s 和 T_-^s 为两侧缝壁温度，L 为裂缝单元长度。该式按单位出平面厚度计算。当缝壁温度高于流体温度时，流体从岩体吸热。缝内导热系数与缝壁换热系数具有不同含义和单位，前者描述流体内部导热，后者描述流体与岩体之间的热交换。

温度变化通过热应变影响岩体受力：

$$\Delta\varepsilon_{ij}^T = \delta_{ij}\alpha_T \Delta T^s \tag{7}$$

式中，α_T 为线膨胀系数，δ_{ij} 为 Kronecker 符号，ΔT^s为岩体温度增量。热应变在受到周围岩体约束时产生相应的应力变化。与此同时，孔隙压力进入骨架受力方程，裂缝压力对缝壁施加法向荷载。节理张开或闭合又改变流量、压力分布和换热位置，形成流动、温度与破裂之间的反馈。

CO_2 的密度、黏度、比热容和导热系数随温度与压力变化。Span 和 Wagner 建立的 CO_2 状态方程为密度等热力学性质计算提供了基础[14]，Fenghour 等给出了 CO_2 黏度关联式[15]。在耦合计算中，黏度影响基质与裂缝中的流动阻力，密度参与流体储量计算，密度与比热容共同决定流体热容量，导热系数影响裂缝内部的热量扩散。

模型采用温度和压力的二元拟合处理 CO_2 热物性，并将物性函数嵌入 MultiFracS 计算接口，供渗流与传热方程调用。裂缝压力和温度变化通过物性参数影响流体流动与换热，流动和换热又改变缝壁受力及裂缝张开状态。这种相互反馈使前置 CO_2 阶段的流体作用与岩体破裂相联系，并为后续注水阶段的连续扩展计算提供初始状态。

2.4. 模型验证

本文采用的 MultiFracS 软件基于有限－离散元法(FDEM)，通过耦合岩体变形与破裂、裂缝－孔隙混合渗流及传热过程，实现热－流－固多物理场的协同求解。Yan 等[8]针对该模型温度场的求解，分别建立了固体热传导、裂缝流体热传导、流体热对流及岩石－流体换热算例，并将数值计算结果与相应解析解进行比较，计算结果与理论解具有良好的一致性，基于此本文不再对温度场进行验证。

为进一步考察模型对裂缝扩展形态的描述能力，选取卢义玉等[5]开展的页岩超临界 CO_2 真三轴压裂试验作为对比依据。原试验采用 200 mm × 200 mm × 200 mm 的龙马溪组页岩试件，在试件中部预制井眼。所选工况的温度为 60℃，注入排量为 30 mL/min，垂直主应力、最大和最小水平主应力分别为 12、10 和 10 MPa。试验结束并卸载后，通过工业 CT 获取试件内部裂缝形态。本文以其平行层理面 CT 断面中的裂缝迹线为参照，与二维模拟得到的裂缝分布进行对比，结果如图 1 所示。

由图 1 可知，试验与模拟裂缝均从注入口附近向两侧延伸，主裂缝在扩展过程中发生局部偏转，并伴随次级分支。注入口上方，两者均形成向外展开的扩展路径；注入口下方，主缝逐渐分离，并在延伸过程中出现局部分叉。模拟结果能够反映试验中双侧主缝与局部分支共同发育的形态特征，但不同分支

的位置、长度及远端偏转程度存在差异，裂缝轨迹未完全重合。这是因为实际页岩试件的矿物组成、层理及内部微裂隙具有空间非均质性，局部弱面的分布会影响裂缝尖端的偏转和分叉。模型采用离散节理及力学参数的非均质描述，不能逐一还原实际试件内部弱面的位置；同时，试验 CT 图像反映三维压裂后的断面形态，二维计算对裂缝空间扩展过程进行了简化。因此，本节主要从主缝走向、局部偏转和分支发育等方面进行定性比较。上述结果表明，模型能够反映试验所显示的主要平面裂缝形态特征，为后续分析 CO_2 前置压裂及注水阶段的裂缝扩展提供参考。

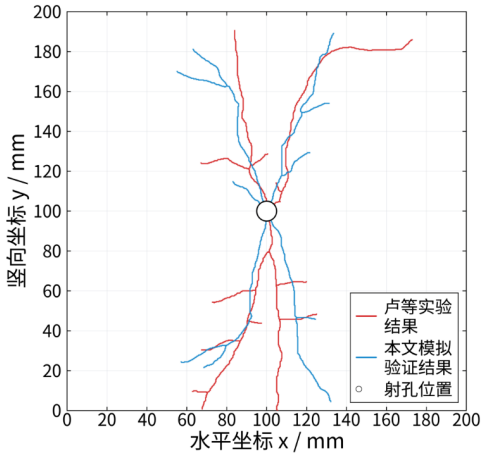


Figure 1. Comparison of model validation results
图 1. 模型验证结果对比图

3. 模型建立与基础参数

计算区域为 50 m × 50 m 二维正方形，注入口位于区域中部，共划分 33,370 个三角形单元。基础工况的最大和最小水平主应力分别为 49 MPa 和 42 MPa，水平主应力差为 7 MPa。表 1 列出模型主要参数，图 2 为模型简图与加载方向。应力采用压应力大小表示；参数分析另外设置 2、4、6、8 MPa 四种水平地应力差。

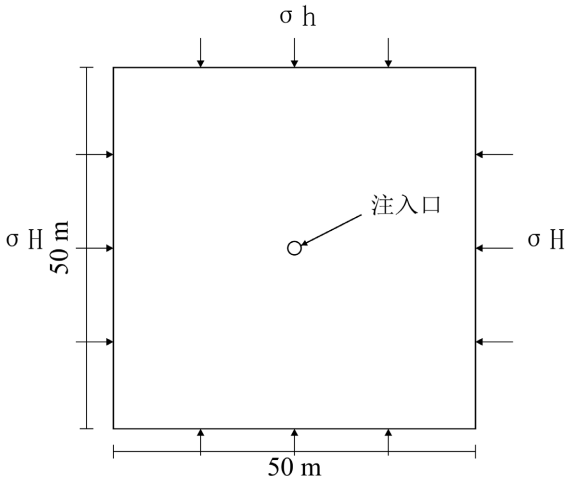


Figure 2. Schematic of the two-dimensional computational domain and loading directions
图 2. 二维计算域及加载方向示意

Table 1. Main parameters of the numerical model
表 1. 数值模型主要参数

参数	取值	参数	取值
计算区域	50 m × 50 m	三角形单元数	33,370
最大水平主应力	49 MPa	最小水平主应力	42 MPa
弹性模量	25 GPa	泊松比	0.3
基质黏聚力	15 MPa	基质内摩擦角	30˚
基质抗拉强度	10 MPa	CO_2 基准排量	2 m^3/min
岩石初始温度	373.15 K	岩石比热容	950 J/(kg·K)
岩石导热系数	4 W/(m·K)	岩石密度	2700 kg/m^3

弹性模量采用 Weibull 概率分布描述空间非均质性，代表取值为 25 GPa。不同位置的刚度差异使岩体受力与变形呈现非均匀分布，裂缝在扩展过程中能够发生局部偏转和分支。采用这一处理，可同时描述由地应力约束形成的优势主缝，以及局部非均质性作用下的次级扩展路径。

前置阶段注入超临界 CO_2，计算结束后以该阶段的模型状态重启动，转入后续水力压裂。后续计算在前置裂缝的基础上继续推进，因此能够连续反映两种流体依次注入时的裂缝扩展过程。计算分别比较单独 CO_2 与水压裂、前置 CO_2 与后续注水，以及不同排量和地应力差对应的裂缝响应。

排量分析设置 1、1.5 和 2 m^3/min 三种 CO_2 注入排量，并保持总注入量相同，用于比较裂缝长度、开度及整体形态。地应力分析设置 2、4、6、8 MPa 四种水平主应力差，保持注入排量、总注入量及其他条件一致，分别观察前置阶段和后续注水阶段。两类工况分别反映注入过程与地层应力条件对裂缝扩展的作用。

4. 模拟结果与分析

4.1. CO_2 与水压裂的裂缝形态

图 3 为 CO_2 与水压裂的裂缝形态。两种流体均形成由注入口向两侧扩展的主裂缝，但局部分支的发育程度存在明显差别。CO_2 压裂在近井区域及主裂缝附近形成较多偏转和分叉，部分支缝偏离主裂缝方向继续扩展；水压裂则以较集中的主裂缝延伸为主，右侧保留局部分叉。可以看出，CO_2 压裂形成的扩展路径更加分散，水压裂的主缝特征更加突出。

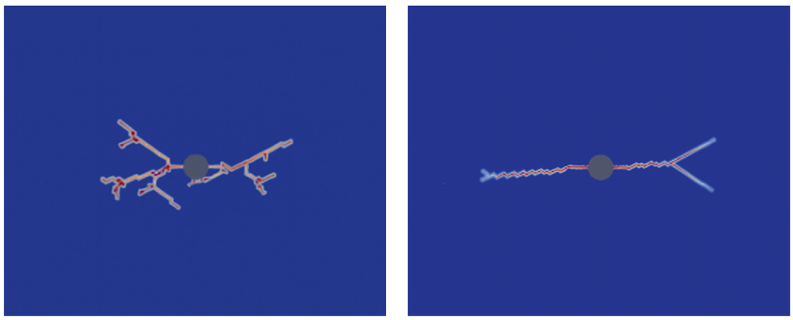


Figure 3. Comparison of fracture morphologies between CO_2 fracturing and hydraulic fracturing
图 3. CO_2 与水力压裂的裂缝形态对比图

超临界 CO_2 黏度较低，在裂缝开度和压力梯度相近时，流体通过狭窄通道的黏性阻力较小，有利于进入与主缝连通的局部节理。当流体压力与周围应力共同满足节理破坏条件时，主缝之外的节理参与破裂，形成新的分支。同时，流体由裂缝向周围孔隙和微裂隙迁移，改变局部孔隙压力及有效受力状态，使裂缝具有多条可供继续扩展的路径。流体性质与岩体非均质性共同作用，形成图 3 所示的主缝与分支组合。

4.2. 前置裂缝与后续水力裂缝的裂缝扩展形态

图 4 为前置 CO_2 压裂与后续注水的阶段结果。前置阶段已形成双侧主裂缝及其附近的分支；进入注水阶段后，主裂缝继续向外延伸，部分偏离主缝方向的支缝也进一步生长。前后阶段的主缝走向和支缝位置具有清晰的对应关系，表明后续水力压裂沿前置 CO_2 形成的裂缝继续发展。

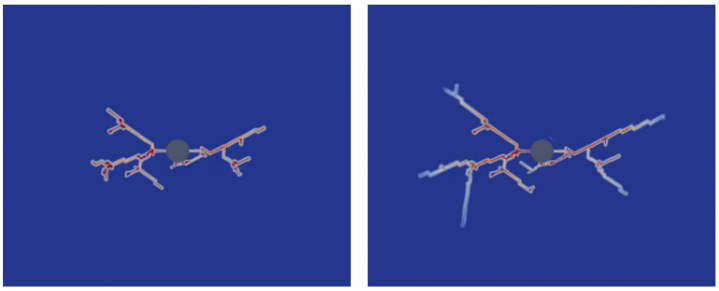


Figure 4. Comparison of fracture morphologies at two stages
图 4. 两阶段裂缝形态对比图

前置压裂使局部节理发生破坏并形成连通通道，改变了后续流体进入岩体时的受力条件和流动路径。注水后，流体沿已有主缝向外输送，在裂缝尖端及相连支缝内形成持续的压力作用。图 4 中主缝延长与局部分支生长同时出现，说明后续注水既促进优势主缝延伸，也使部分前置分支继续参与扩展。由此，复合压裂形成了前置 CO_2 造缝、后续水力裂缝沿已有路径继续扩展的两阶段过程。

4.3. 固定总注入量下不同排量的裂缝扩展形态

在 CO_2 总注入量相同的条件下，比较 1、1.5 和 2 m^3/min 三种排量。图 5 中，三组均形成向两侧延伸的主裂缝，并在近井区域及主缝附近发育局部分支。随排量变化，支缝的具体位置、偏转和延伸程度有所不同，但整体保持双侧主缝伴局部分支的形态，表明该排量范围内的变化主要体现为已有造缝形态下的继续延伸和张开。

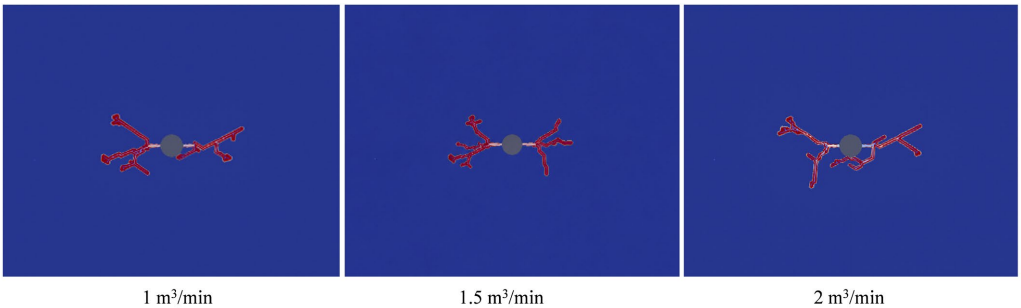


Figure 5. Comparison of fracture morphologies under different CO_2 displacement rates
图 5. 不同 CO_2 排量的裂缝形态

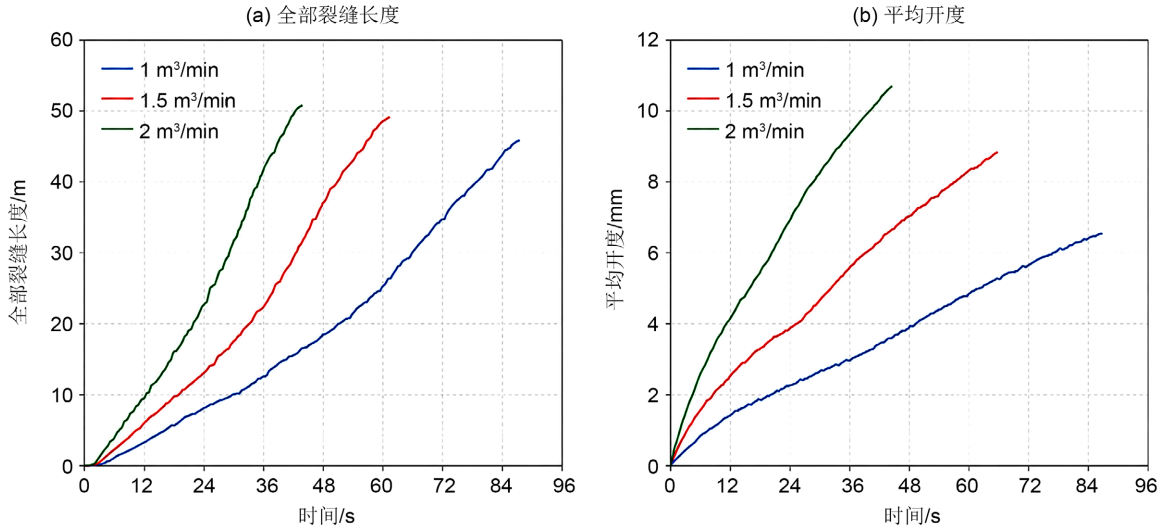


Figure 6. Curves of fracture length and aperture under different injection rates
图 6. 不同排量下的裂缝长度与开度曲线

图 6 给出了裂缝长度和开度随注入时间推进的变化。三种排量下，两项指标均随注入过程持续增大；排量提高后，终态裂缝长度与开度均增加，高排量曲线在较少的时间内达到终止状态。不同排量对应的开度差异更加明显，说明提高排量对裂缝张开的促进作用较为突出。

在总注入量相同的条件下，提高排量增加了单位时间进入裂缝的流体体积，并缩短注入历程，使裂缝内的压力作用更加集中。缝壁受压后张开程度增大，同时裂缝尖端获得继续扩展的驱动力，因此长度与开度均随排量提高而增加。与长度变化相比，开度变化更为明显，表明增大排量对已有裂缝张开的促进作用更为突出，同时推动裂缝继续向外延伸。三组裂缝的整体形态相近，也说明排量变化主要改变裂缝的尺度和张开程度。

4.4. 不同水平地应力差下的两阶段裂缝扩展形态

图 7 给出水平地应力差为 2、4、6、8 MPa 时的两阶段裂缝形态。各组保持注入排量、总注入量及其他条件一致，比较地应力差变化对前置 CO_2 造缝与后续水力扩展的影响。

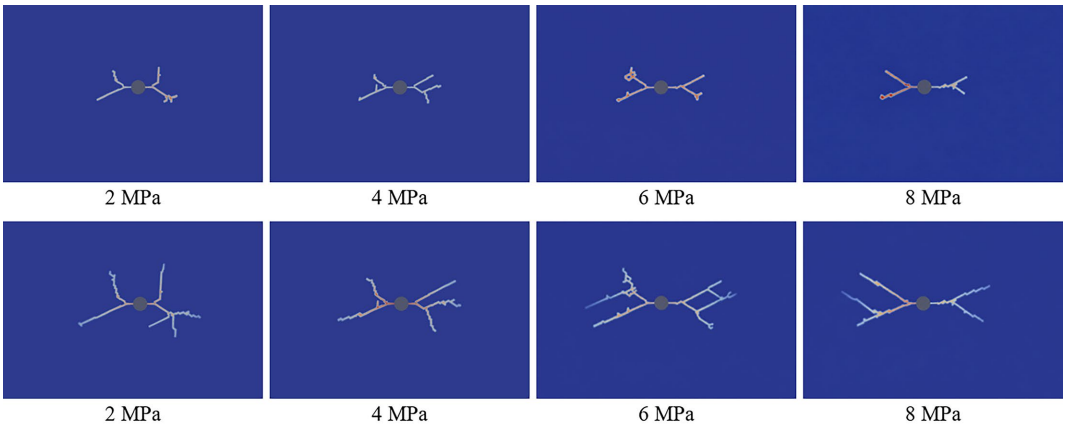


Figure 7. Fracture morphologies under different in-situ stress differences. The upper shows preposed CO_2 fracturing, and the lower shows subsequent water injection
图 7. 不同地应力差下的裂缝形态；上为前置 CO_2，下为后续注水

前置 CO_2 阶段，2 MPa 工况除双侧主缝外，还形成较大倾角的分支，多方向延伸特征较为突出；4 MPa 工况中主缝与近井分支同时发育。当地应力差增至 6 和 8 MPa 时，优势主裂缝的轮廓更加清晰，局部仍保留偏转及短分支。地应力差较小时，不同方向裂缝扩展受到的应力约束差别较小，局部非均质性对路径的影响较为明显；地应力差增大后，偏离优势方向的持续扩展受到更强约束，裂缝向少数优势路径集中。

进入注水阶段后，四种工况均沿前置裂缝继续发展。2 MPa 工况中的多方向分支得到保留，并向外延伸；4 MPa 工况中，两侧主缝与局部分支继续生长。6 MPa 工况在主缝延长的同时发育明显分叉；8 MPa 工况的优势主缝延伸更加突出，局部支缝仍继续参与扩展。可以看出，后续水力裂缝的总体方向受地应力约束，而具体的主缝与支缝分布又与前置阶段形成的裂缝路径密切相关。

综合两阶段结果，较低地应力差有利于保留多方向扩展路径，较高地应力差使优势主裂缝更加突出。前置阶段形成的分支在后续注水中具有持续影响，因此最终裂缝形态并非仅由后续流体决定，而是地应力条件与前置裂缝分布共同作用的结果。6 和 8 MPa 工况保留的局部分叉，进一步体现了这一作用。

5. 讨论

CO_2 压裂较水力压裂形成更多局部分支，与卢义玉等[5]真三轴试验及 CT 观察得到的裂缝复杂化趋势一致。低黏度流体进入狭窄通道时黏性阻力较小，孔压传递与有效应力变化有利于主缝附近的局部破裂。前置 CO_2 压裂形成的作用包括节理破坏、裂缝连通以及局部受力状态调整。对于后续注水，这些变化直接构成其继续扩展的初始条件。重启动计算将前置破裂状态传递至注水阶段，使后续裂缝能够沿同一岩体中的已有通道继续发展。图 4 与图 7 均显示，前置主缝和部分支缝在后续阶段保持了位置与走向上的对应关系，说明前置造缝对最终裂缝形态具有持续影响。这种持续影响表现为主裂缝延伸与分支扩展同时发生。主裂缝为后续流体提供主要通道，其尖端在持续压力作用下向外推进；与主缝相连的部分支缝也继续张开或延伸，使前置阶段形成的多方向路径得以保留。后续注水对不同已有路径的作用程度存在差别，因此最终形态呈现优势主缝与局部分支共同发育的特征。复合压裂的两阶段联系，体现为前置造缝位置与后续加载条件之间的连续作用。

排量和地应力差分别从注入条件与外部约束两方面影响裂缝扩展。在固定总注入量下，增大排量使流体更集中地进入裂缝，已有裂缝的张开更加明显，并伴随裂缝长度增加。图 5 所示整体形态基本一致，而图 6 中的长度与开度发生变化，表明该范围内的排量调整主要影响裂缝延伸和张开的程度。地应力差主要改变不同方向裂缝继续扩展时受到的约束。低应力差条件下，主缝之外的较大倾角分支能够生长，裂缝分布较为分散；高应力差条件下，优势方向的主裂缝扩展更多，这与敖翔等[11]的研究结果相符。与排量引起的尺度变化相比，地应力差对扩展方向和主缝、支缝组合的影响更加直接。后续注水阶段中，已有支缝仍能继续延伸，说明外部应力约束与前置裂缝分布共同参与后续路径的形成。

上述结果表明，复合压裂过程应将前置造缝与后续扩展作为连续过程分析。前置 CO_2 形成的裂缝决定后续流体能够进入的初始路径，排量影响这些路径的张开与延伸程度，地应力差则约束裂缝向不同方向持续扩展。对于较低应力差工况，可关注多方向分支的后续延伸；对于较高应力差工况，应结合优势主缝及已有支缝的分布分析后续扩展。两阶段裂缝形态与长度、开度曲线相结合，可为 CO_2 前置注入及后续水力压裂的参数选择提供依据。

本文二维模型描述同一平面内的裂缝延伸与张开，不能描述缝高增长、层间应力屏障和空间缝面交汇。流体分配也被限制在该平面内，三维条件下的缝高竞争会改变沿程供液和局部开度。因此，本文总长度、平均开度反映的是二维工况间的相对差异，不直接用于估计三维储层改造体积。且模型采用 Weibull 分布描述刚度非均质性，未显式设置具有走向、倾角、间距和界面强度的天然裂缝网络，这与实际底层情况也有差距。

6. 结论

(1) CO_2压裂较水压裂形成更多近井及主裂缝附近的分支，后续注水沿前置主裂缝和部分支缝继续扩展。前置CO_2造缝与后续水力扩展具有清晰的路径对应关系，共同形成最终裂缝形态。

(2) 在CO_2总注入量相同、排量为1~2 m^3/min的范围内，三种工况均以双侧主缝伴局部分支为主。提高排量使终态裂缝长度与开度增加，其中开度差异更加明显，表明增大排量对裂缝张开的促进作用较为突出。

(3) 在2~8 MPa水平地应力差范围内，较低应力差下多方向分支较为发育，较高应力差下优势主缝延伸更加突出。后续注水仍保留并延伸部分前置分支，最终裂缝形态受到地应力条件与前置裂缝分布的共同影响。

基金项目

重庆科技大学研究生科技创新项目“深层页岩储层 CO_2 复合压裂裂缝扩展机理研究”(编号：YKJCX2520820)。

参考文献

[1] 卢义玉, 周军平, 鲜学福, 等. 超临界 CO_2 强化页岩气开采及地质封存一体化研究进展与展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(6): 60-73.

[2] Ribeiro, L.H., Li, H. and Bryant, J.E. (2016) Use of a CO_2-Hybrid Fracturing Design to Enhance Production from Unpropped-Fracture Networks. *SPE Production & Operations*, **32**, 28-40. https://doi.org/10.2118/173380-pa

[3] 王博, 颜廷巍, 杨柳, 等. 非常规储层 CO_2 前置压裂技术研究进展[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2025, 57(4): 55-68.

[4] Ishida, T., Aoyagi, K., Niwa, T., Chen, Y., Murata, S., Chen, Q., *et al*. (2012) Acoustic Emission Monitoring of Hydraulic Fracturing Laboratory Experiment with Supercritical and Liquid CO_2. *Geophysical Research Letters*, **39**, L16309. https://doi.org/10.1029/2012gl052788

[5] 卢义玉, 廖引, 汤积仁, 等. 页岩超临界 CO_2 压裂起裂压力与裂缝形态试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 175-180.

[6] Song, X., Guo, Y., Zhang, J., Sun, N., Shen, G., Chang, X., *et al*. (2019) Fracturing with Carbon Dioxide: From Microscopic Mechanism to Reservoir Application. *Joule*, **3**, 1913-1926. https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.05.004

[7] 杜布戈, 张广清, 周大伟, 等. CO_2-水作用对层状页岩拉伸破坏影响的微观损伤研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(1): 59-67.

[8] Yan, C., Xie, X., Ren, Y., Ke, W. and Wang, G. (2022) A FDEM-Based 2D Coupled Thermal-Hydro-Mechanical Model for Multiphysical Simulation of Rock Fracturing. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **149**, Article ID: 104964. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104964

[9] 杨兆中, 刘建平, 易良平, 等. 基于内聚力相场法的超临界 CO_2 压裂模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(12): 3184-3197.

[10] 白冰, 陈勉, 金衍. 超临界 CO_2 渗流的流-固-热多场耦合机理研究[J]. 中国科学: 物理学·力学·天文学, 2023, 53(2): 101-113.

[11] 敖翔, 赖粮丰, 陆朝晖, 等. 深层页岩超临界 CO_2 前置压裂裂缝扩展机制[J]. 煤炭学报, 2025, 50(9): 4235-4246.

[12] 崔传智, 钱银, 吴忠维, 等. 页岩油藏 CO_2 前置压裂对裂缝网络的影响[J]. 特种油气藏, 2026, 33(2): 72-78.

[13] 杨兵, 黄海, 王海柱, 等. 超临界CO_2压裂对储层渗透率的适应性研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2025, 57(1): 79-91.

[14] Span, R. and Wagner, W. (1996) A New Equation of State for Carbon Dioxide Covering the Fluid Region from the Triple-Point Temperature to 1100 K at Pressures up to 800 MPa. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, **25**, 1509-1596. https://doi.org/10.1063/1.555991

[15] Fenghour, A., Wakeham, W.A. and Vesovic, V. (1998) The Viscosity of Carbon Dioxide. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, **27**, 31-44. https://doi.org/10.1063/1.556013