

基于离散裂缝网络的多段压裂注入诱发断层滑移及震级评估方法

易昕政^{1, 2, 3}, 刘福深^{1, 2, 3*}, 张芳雪⁴, 严一熙^{4, 5},

雷伟鑫^{1, 2, 3}, 陈云枫⁴, 石许华^{4, 5}, 陈汉林^{4, 5}

1. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江杭州 310058;

2. 浙江大学岩土工程计算中心, 浙江杭州 310058;

3. 全省地下空间开发利用重点实验室, 浙江杭州 310058;

4. 浙江大学地球科学学院, 浙江杭州 310058;

5. 教育部含油气盆地构造研究中心, 浙江杭州 310058

摘要: 水力压裂是非常规油气高效开发的关键技术, 但注入流体引起的流体压力扩散与应力重分布可能诱发断层滑移, 当其转变为失稳滑移时, 将引发地震。现有研究多聚焦单段压裂或单个大断层, 在全井尺度上表征随机天然裂缝网络的非线性滑移行为及其震级响应的研究相对不足。本文采用了流固耦合摩擦接触有限元法, 利用罚函数方法模拟裂缝面库仑摩擦接触, 采用显-隐式迭代求解策略, 可实现全井多段压裂过程中裂缝的张开、闭合及剪切滑移行为的高效求解。应用该方法结合实际工程地质数据引入随机离散裂缝网络(Discrete Fracture Network, DFN)模型, 分析流体压力与应力场的时空演化特征, 估测随机裂缝滑移位置及其滑移量, 明确诱发地震空间分布和能量耗散演化规律, 进而估算地震震级。基于能量耗散概念提出了区域总地震矩评价指标, 并揭示了摩擦系数、地应力差及裂缝数量等因素对该指标的影响规律。进一步定量阐明了多段压裂过程中的段间压力累积机制, 指出其是驱动天然裂缝持续滑移并频繁诱发地震活动的主要原因。本研究可为全井尺度压裂注入诱发断层滑移与地震风险评估提供有效的基于物理机制的分析方法。

关键词: 断层滑移、随机离散裂缝网络、地震震级、多段压裂诱发地震

中图分类号: TE357

收稿日期: 2026-3-8

Fault Slip and Seismic Magnitude Assessment During Multi-Stage Hydraulic Fracturing Injection Based on Discrete Fracture Networks

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 42577162, No. 52179112).

作者简介: 易昕政(2001-), 男, 硕士研究生, 主要从事水力压裂诱发地震研究. ORCID: 0009-0004-9099-0438. E-mail: xin-zheng_yi06@zju.edu.cn.

*通讯作者: 刘福深, 研究员, 博士生导师, 长期从事深地岩土工程领域的研究. ORCID: 0000-0002-3451-2341. E-mail: fu-shenliu@zju.edu.cn.

Yi Xinzhen^{1, 2, 3}, Liu Fushen^{1, 2, 3*}, Zhang Fangxue⁴, Yan Yixi^{4, 5},

Lei Weixin^{1, 2, 3}, Chen Yunfeng⁴, Shi Xuhua^{4, 5}, Chen Hanlin^{4, 5}

1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China;

2. Computing Center for Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China ;

3. Zhejiang Key Laboratory of the Development and Utilization of Underground Space, Hangzhou, Zhejiang 310058, China;

4. School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China;

5. Structural Research Centre of Oil and Gas Bearing Basin of Ministry of Education, Hangzhou, Zhejiang 310058, China

Abstract: Hydraulic fracturing is a key technology for the efficient development of unconventional oil and gas resources. However, fluid pressure diffusion and stress redistribution induced by fluid injection may trigger fault slip, and seismic events can occur once the slip evolves into unstable failure. Existing studies have primarily focused on single-stage fracturing or individual large-scale faults, whereas relatively limited attention has been devoted to the characterization of nonlinear slip behavior and associated seismic magnitude responses of stochastic natural fracture networks at the full-well scale. In this study, a hydro-mechanically coupled frictional contact finite element method is developed to investigate fracture slip and induced seismicity during multi-stage hydraulic fracturing. Coulomb frictional contact along fracture surfaces is modeled using a penalty-function approach, while an explicit–implicit iterative solution strategy is adopted to efficiently capture fracture opening, closure, and shear slip behaviors throughout the entire multi-stage fracturing process. Based on realistic geological and engineering data, a stochastic Discrete Fracture Network (DFN) model is incorporated into the numerical framework. The spatiotemporal evolution of pore pressure and stress fields is analyzed, and the locations and magnitudes of stochastic fracture slip are quantitatively evaluated. Furthermore, the spatial distribution of induced seismicity and the evolution of energy dissipation are characterized, enabling estimation of the corresponding seismic magnitudes. A regional total seismic moment index is proposed based on the concept of energy dissipation, and the effects of friction coefficient, in-situ stress difference, and fracture density on this index are systematically investigated. In addition, the pressure accumulation mechanism between fracturing stages is quantitatively clarified, and the results indicate that it is the primary driving factor for sustained slip of natural fractures and frequent induced seismic events during multi-stage hydraulic fracturing. This study provides an effective physics-based approach for evaluating fault slip and seismic risks induced by full-well hydraulic fracturing operations.

Keywords: fault slip; stochastic discrete fracture network; seismic magnitude; Multi-stage hydraulic fracturing-induced seismicity

1 引言

非常规油气资源主要分布在低孔隙度、低渗透率的页岩储层里,需要水力压裂技术作为主要开发手段(张士诚等, 2025)。水力压裂技术通过注入高压流体改造储层,生成

大量水力裂缝,提高储层渗透性,增强导流能力,有助于非常规油气资源的高效开发(Zhang et al., 2021)。近年来,水力压裂技术引发的环境与地质安全问题日益凸显,其中诱发地震已成为广泛关注的风险之一(Ellsworth, 2013)。大量工程经验与相关研究

表明,水力压裂与附近地震活动之间存在密切联系。例如,加拿大 Horn River 流域、阿尔伯塔省 Exshaw、Montney 及 Duvernay 等非常规油气区块,在开发过程中观测到大量与压裂作业高度时空相关的地震事件,震级多集中在 M_w 2-4,个别可达 M_w 4.0 以上 (Schultz et al., 2020)。美国俄亥俄州由水力压裂引起的发震率较周边地区高出一个数量级 (Skoumal et al., 2015), 德克萨斯州 Eagle Ford 及 Permian 等非常规油气田在水力压裂过程中也表现出地震活动显著增强的趋势,个别地区观测到的最大震级接近 M_w 5.0 (Skoumal and Trugman, 2021)。我国四川盆地页岩气开发过程中也存在地震发生率明显升高的问题,例如,泸县、威远与长宁等区块多次发生大于 M_w 4.0 级的地震 (黄炳香等, 2025; 柳存喜等, 2026), 表明大规模水力压裂与附近区域地震频次升高之间存在清晰的时空关联 (黄炳香等, 2025)。因此,系统认识水力压裂诱发地震的发生机制、时空演化特征及其控制因素,对于科学评估非常规油气开发过程中的地震风险,指导安全、高效的工程实践具有重要意义。

水力压裂诱发地震的主要机制包括孔隙压力扩散、孔隙弹性应力扰动和无震滑移等 (Schultz et al., 2020), 这些耦合机制可在不同尺度上改变断层附近的孔隙流体压力与有效应力状态,进而影响断层面的剪应力与抗剪强度,当剪应力超过抗剪强度时,断层会发生滑移,个别失稳滑移会引起地震事件的发生 (Ellsworth, 2013)。由于原位监测技术成本较高,且难以直接反映深地环境中的多场耦合作用 (El-kaseh et al., 2017), 理论解析解在处理非均质和非线性材料问题时存在一定困难 (Sun and Fish, 2021), 因此,基于孔隙弹性理论的数值模拟方法已成为研究水力压裂诱发地震的重要手段。

库伦破坏应力的变化指标 (Δ Coulomb Failure Stress, Δ CFS) 是当前判断断层是否活化的常用方法,例如,惠钢等 (2021) 通过建立流固耦合模型,围绕加拿大 Fox Creek 区域整口井水力压裂的注入过程,分析了井周围断层的活化时序演变; Cao 等 (2022) 针对英国 Preston New Road 地区的水力压裂活动,探讨了初始孔隙压力及其扩散效应对断层活化的影响; Xu 等 (2025) 模拟了长宁地区两口压裂井的注入过程,分析不同渗透性条件对断层活化的影响,证明了低渗条件下孔隙弹性应力主导地震活动,而高渗条件下孔隙压力扩散的影响更为显著。尽管 Δ CFS 方法在水力压裂诱发地震方面被广泛应用,但该方法无法反映断层活化后的静动力摩擦滑移过程,具体包括断层面滑移位置、滑移量及应力演化。

为反映断层活化及滑移的全过程,需要在流固耦合框架下引入摩擦接触机制,模拟断层的滑移行为。Yoon 等 (2015) 基于库伦摩擦滑移模型,研究了孔压扩散对附近断层活化的影响,表明仅需要不足 0.1MPa 的孔压升高即可触发临界断层滑移; Yin 等 (2020) 引入滑移弱化摩擦本构关系,模拟了注水与返排阶段诱发断层滑移的过程,指出注入断层内的流体体积决定了其最大滑移量和地震规模; Li 等 (2026) 结合速率-状态相关摩擦本构,分析了注水后断层的延迟活化过程,表明最大地震发生在孔压与孔弹性应力在时空叠加之后最有利于断层失稳的位置,而非瞬时孔压最高处。然而,上述工作普遍假设储层为均匀介质,忽略了天然裂缝在实际储层中的随机分布和非均匀连通性,无法考虑天然裂缝网络对流体扩散路径和断层滑移过程的影响,限制了模型在真实地质条件下的适用性。

含有天然裂缝的地质储层可以通过连

续介质模型(CM)进行建模,典型的连续介质模型包括等效多孔介质模型(Huang et al., 2017)和双重介质模型(Ye and Wang, 2020),等效多孔介质模型通常将裂缝和储层视为一个连续体,通过等效渗透率、等效弹性模量等参数表征裂缝对流体流动和力学响应的影响,双重介质模型则将裂隙岩体分为裂隙域和岩石基质域,并计算两个叠加域之间的质量和能量转移量,然而,连续介质模型不能考虑裂缝的位置、长度、方向和连通性等细节,对裂缝网络产生的优势渗流通道和应力集中等现象描述不足(Ye and Wang, 2020)。为表征天然裂缝的几何特征,单独考虑裂缝的物理参数,基于离散裂缝网络的方法逐渐被引入到储层模型的建立中(Lei and Tsang, 2022)。DFN 将地下天然裂缝视为一系列具有独立几何和物理属性的离散单元,通过显式方式嵌入到储层数值模型中,从而在数值模型中直接刻画裂缝的空间分布特征。近年来,许多水力压裂模拟研究将 DFN 与断层滑移相结合,使数值模型能够更接近实际地下复杂的裂缝结构,分析流体流动、应力扰动以及断层滑移和诱发地震的过程。例如, Sainoki 等(2021)在断层滑移模拟中引入 DFN 表征断层破碎带的非均质性,发现由此产生的非均质应力场可使断层最大滑移量提高约 5 倍,地震矩提高 1 个数量级以上; Zhang 等(2020a)同样利用 DFN 模拟断层破碎带,探究了不同参数对断层滑移的影响,表明注入速率越快、压裂液黏度越高,断层滑移量越大,而总井口注入体积可能对滑移量影响较小; Lei 和 Tsang (2022)的研究指出,注水诱发的滑移与地震主要发生在断层破碎带内的天然裂缝中,且裂缝密度较低的区域更易发生流体压力积累,可能导致更大的地震事件。当前在利用 DFN 描述断层滑移与发震行为方面的工作多聚焦于单段

注入下的断层响应,对于全井多段水力压裂作业中,段间压力消散效应、压裂先后顺序及裂缝空间分布对断层滑移累积与地震触发过程的影响,目前的研究尚不成熟。

综上所述,在大尺度、多段压裂、强注入背景下,需要能够同时描述孔隙流体压力扩散、孔弹性应力扰动、天然裂缝开闭、滑移以及剪胀等动态演化过程的数值预测能力,并对压裂期间断层滑移及震级规模开展基于物理过程的评估。鉴于此,本研究基于流固耦合摩擦接触有限元框架,针对全井多段水力压裂工况,分析了断层滑移过程及相应的地震震级。利用罚函数方法模拟裂缝面库伦摩擦接触,采用显-隐式求解策略对流固耦合有限元模型进行迭代求解。通过数值算例对显-隐式迭代求解算法进行验证后,结合实际的水力压裂施工数据和高分辨率三维地震资料,构建包含随机天然裂缝的地质构造模型,模拟全井多段注入过程中裂缝的张开、闭合及剪切滑移行为,研究应力场演化与孔隙压力时空分布的特征。结合数值计算得到的天然裂缝滑移位置及滑移量,估算发震区域内的地震位置和震级分布。通过参数敏感性分析,可计算该区域内诱发地震可释放的总能量,并以此评估可能孕育的总地震矩。本文为水力压裂诱发断层滑移及震级评估提供了基于流固耦合岩土力学的分析方法,可为水力压裂诱发地震风险控制提供量化依据。

2 流固耦合控制方程

本文以裂隙页岩为研究对象,考虑其物理力学特性,在建立有限元模型时主要假设:岩石基质为各向同性饱和多孔介质材料且满足线弹性本构关系;裂缝及孔隙内的流体为单相弱可压缩流体;流体在岩石基质和裂缝中的渗流遵循达西定律;不考虑岩石变形

和流体流动过程中的惯性效应。

2.1 固体应力平衡方程

饱和多孔裂隙岩体的应力平衡控制方程为(Liu, 2020):

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{f} = \mathbf{0} \quad (1)$$

其中, $\boldsymbol{\sigma}$ 为柯西应力张量, $\mathbf{f}$ 为体积力。基于线弹性理论, 岩石基质的应力应变关系为:

$$\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma} + \alpha p \mathbf{I} = \mathbf{D} : \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2)$$

这里为 $\boldsymbol{\sigma}'$ 有效应力张量, α 为比奥系数, p 为流体压力, $\mathbf{I}$ 为单位二阶张量, $\mathbf{D}$ 为四阶弹性张量, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为小应变张量。

2.2 流体质量守恒方程

流体在岩石基质和裂隙中的流动遵循质量守恒方程(Rutqvist and Stephansson, 2003):

$$\rho_w S_m \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w \mathbf{U}_m) + \alpha \rho_w \frac{\partial \varepsilon_{vol}}{\partial t} = Q_m \quad (3)$$

$$b_f \rho_w S_f \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (b_f \rho_w \mathbf{U}_f) = b_f Q_{mf} \quad (4)$$

式中, ρ_w 为流体密度, S_m 为岩石基质储水系数, t 为时间, $\mathbf{U}_m$ 为流体在岩石基质中的达西速度, ε_{vol} 为岩石基质体积应变, b_f 为裂隙开度, S_f 为裂隙储水系数, $\mathbf{U}_f$ 为流体在裂隙中的达西速度, Q_m 为单位体积的质量源项, Q_{mf} 为岩石基质与裂隙面上的质量交换。流体在岩石基质和裂隙中的流动遵循达西定律:

$$\mathbf{U}_m = -\frac{k_m}{\mu_w} \nabla p \quad (5)$$

$$\mathbf{U}_f = -\frac{k_f}{\mu_w} \nabla p \quad (6)$$

其中, μ_w 为流体粘度, k_m 为岩石基质渗透率; k_f 为裂隙渗透率, 与总体开度 b_f 有关, 遵循立方定律(Witherspoon et al., 1980):

$$k_f = \frac{b_f^3}{12} \quad (7)$$

岩石基质和裂隙的储水系数分别由下式表示(Rutqvist et al., 1998):

$$S_m = \phi_m c_w + (1 - \alpha)(\alpha - \phi_m) c_m \quad (8)$$

$$S_f = c_w + \frac{1}{k_n b_f} \quad (9)$$

这里 ϕ_m 为岩石基质的孔隙度, c_w 为流体压缩系数, $c_m = \frac{3(1-2\nu)}{E}$ 为岩石骨架压缩系

数, ν 为泊松比, E 为岩石基质弹性模量, k_n 为裂缝法向刚度。

2.3 裂缝面本构方程

本文采用零厚度节理单元表征裂缝, 并通过罚函数描述其法向位移和切向位移的演化规律。当裂缝处于压缩状态时, 裂缝的开度与裂缝面的有效法向应力有关, 用如下的双曲线模型描述(Bandis et al., 1983):

$$b_c = -\frac{\sigma'_n b_m}{k_{n0} b_m + \sigma'_n} \quad (10)$$

式中 b_c 为当前裂缝闭合位移, b_m 为最大允许闭合位移, σ'_n 为裂缝面上的有效法向应力, k_{n0} 为初始法向刚度, 据此可得裂缝的法向刚度演化如下(Saeb and Amadei, 1992):

$$k_n = \frac{\partial \sigma'_n}{\partial b_c} = \frac{(k_{n0} b_m + \sigma'_n)^2}{k_{n0} b_m^2} \quad (11)$$

进一步考虑裂缝面上的摩擦接触, 裂缝面的剪切滑移行为遵从库伦摩擦定律(Byerlee, 1978):

$$\tau_s = \begin{cases} k_{s0} u_s, & u_s \leq u_p \\ \tau_p, & u_s > u_p \end{cases} \quad (12)$$

式中, τ_s 为剪应力, $\tau_p = \mu \sigma'_n = k_s u_s$ 为峰值剪应力, $\mu = \tan \phi_f$ 为摩擦系数, ϕ_f 为摩擦角, u_s 为剪切滑移, u_p 为峰值剪切滑移, k_s 为切向刚度, k_{s0} 为初始切向刚度。当计算裂缝数量较多, 且存在裂缝相交或分叉情况时, 摩擦滑移数值计算往往收敛困难, 因此本文采用变切向刚度 k_s 方法模拟裂缝的摩擦接触行为:

$$k_s = \frac{\sigma'_n \tan \phi_f}{u_s} \quad (13)$$

当裂缝开始出现摩擦滑移时, 剪胀效应也随之发生。如图 1 所示, 假设剪胀 v_s 与切向滑移满足如下关系(Min et al., 2004):

$$v_s = \begin{cases} (u_r - u_p) \tan \phi_d, & u_s \geq u_r \\ (u_s - u_p) \tan \phi_d, & u_p < u_s < u_r \\ 0, & u_s \leq u_p \end{cases} \quad (14)$$

式中, ϕ_d 为剪切膨胀角, u_r 为残余剪切滑

移。

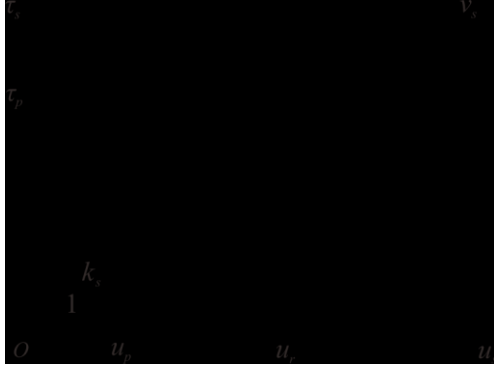


图1 剪应力-切向位移关系曲线与剪胀-切向位移关系曲线

Fig.1 The relationship curve between shear stress and tangential displacement, and the relationship curve between shear dilation and tangential displacement.

因此，在法向变形和切向变形的共同作用下，裂缝总体开度 b_f 为：

$$b_f = \begin{cases} b_0 + b_c + v_s, & \sigma'_n \geq 0 \\ b_0 + w, & \sigma'_n < 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中， b_0 为裂缝初始开度， w 为当裂缝处于拉伸状态时的分离量。

2.4 诱发地震震级估计

对于断层滑移引起的地震活动，本文基于数值模拟结果提取各裂缝单元的滑移量及其空间分布特征，在此基础上计算对应地震矩 M_0 ，并进一步换算得到矩震级 M_w 。地震矩是表征震源规模的基本物理量，其表达式为(Kanamori and Brodsky, 2004)：

$$M_0 = GA\bar{u}_s \quad (16)$$

式中， G 为剪切模量， A 为发生滑移的破裂面积，对于走滑型断层，其破裂面积近似等

于断层的总面积， $\bar{u}_s$ 为断层平均滑移量。

矩震级 M_w 是在对数尺度上对地震矩进行归一化处理后得到的震级指标，其表达式为(Scholz, 2019)：

$$M_w = \frac{2}{3} \log(M_0) - 6.06 \quad (17)$$

结合断层滑移过程中的剪应力降，可以得到断层宽度 W 的表达式为(Kanamori and Anderson, 1975)：

$$W = \sqrt[3]{\frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{\omega} \cdot \frac{M_0}{\Delta\tau}} \quad (18)$$

这里 ω 为断层的长宽比， $\omega = \frac{L}{W}$ ， L 为断层长度， $\Delta\tau$ 为断层滑移时断层面的剪应力降，对于水力压裂过程中的微小地震， $\Delta\tau$ 取 0.1 MPa(Lei and Mark, 2015)。

3 流固耦合有限元模型求解与验证

3.1 有限元模型求解方法

本文采用显-隐式耦合求解策略对控制方程组进行数值计算。其中，切向刚度采用显式方法处理，只在每一时间步开始时更新，在迭代过程中不更新，以提高收敛效率，流固耦合控制方程则采用隐式迭代方法求解，并使用向后差分法进行时间离散，以保证计算精度与稳定性。模型空间离散采用非结构化三角形网格，天然裂缝网络通过相邻三角形单元之间插入的节理单元进行刻画。具体计算流程如图2所示：

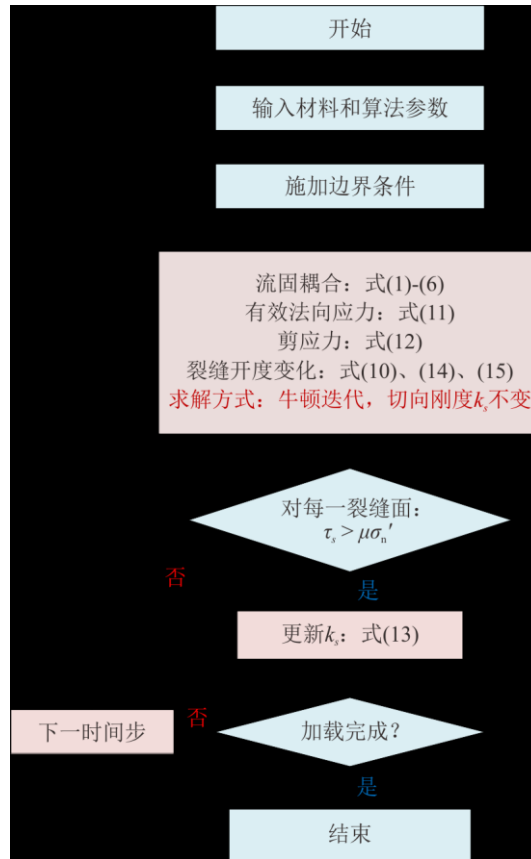


图2 有限元裂缝摩擦滑移计算流程图

Fig.2 Finite element calculation flowchart for fracture friction slip.

3.2 有限元模型验证

(1) 断层附近注水诱发滑移算例

本算例建立了断层附近注水诱发断层滑移模型, 如图3所示, 在边长为10000 m的正方形岩体域内, 存在一条处于临界应力状态的断层, 长度为5000 m, 渗透系数为 $1.17 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ 。模型初始孔隙压力为20 MPa, 在距离断层500 m处布置一口注水井, 并在3天内将井底压力由20 MPa均匀升高至28 MPa, 以模拟注水过程。模型下边界和左边界为辊支撑, 上边界和右边界为应力边界, 分别施加60 MPa与34 MPa的均布应力。

计算总时长为30天, 岩石弹性模量为20 GPa, 断层摩擦系数为0.5773。图3(b)为第30天的流体压力云图, 图4(a)、(b)分别为第30天x、y方向的位移云图, 结果显示断层附近出现明显的位移不连续, 表明断层发生了滑移。如图5所示, 将本方法得到的断层滑移量与内嵌不连续方法(Liu et al., 2024)的结果进行对比, 在第20天和第30天, 两者在滑移位置和滑移量上均表现出良好的一致性, 误差范围在5%以内, 证明了本文采用的显-隐式流固耦合摩擦接触方法能够较为准确地模拟断层附近注水诱发滑移问题。

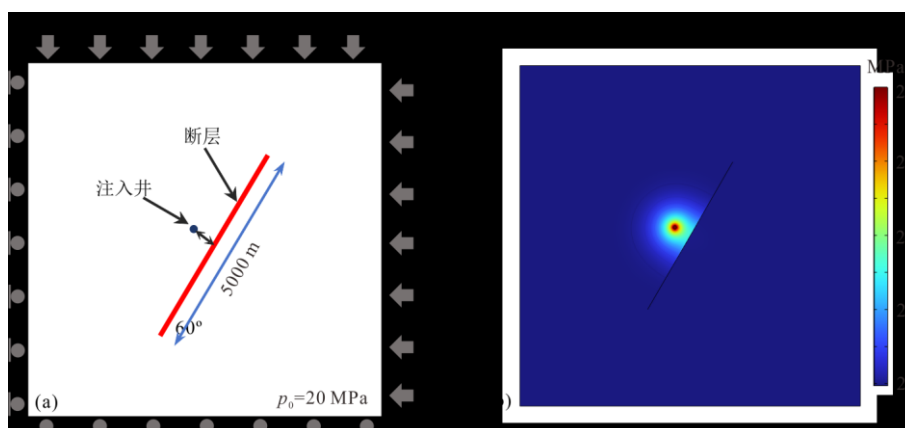


图 3 (a)断层附近注水诱发滑移算例示意图 (b)第 30 天流体压力分布图

Fig.3 (a) Schematic diagram of induced slip near the fault with fluid injection example.

(b) Fluid pressure distribution on day 30.

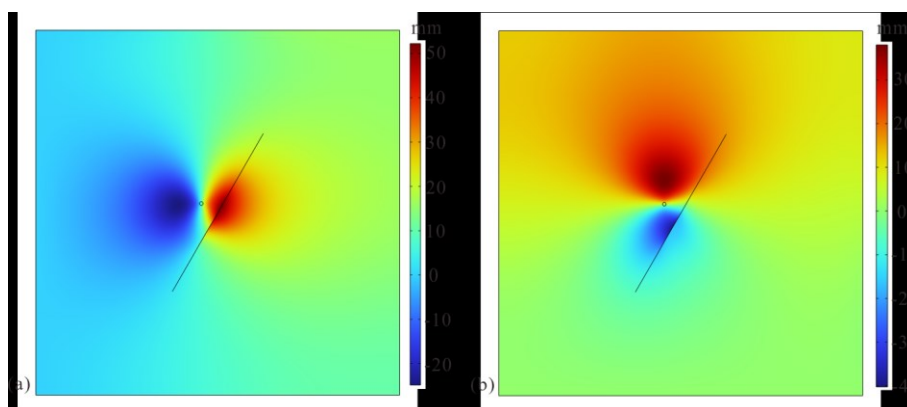


图 4 第 30 天位移结果分布图: (a)第 30 天 x 方向位移分布图 (b)30 天 y 方向位移分布图

Fig.4 Displacement results distribution on day 30: (a) Displacement distribution in the x-direction on day 30. (b)

Displacement distribution in the y-direction on day 30.

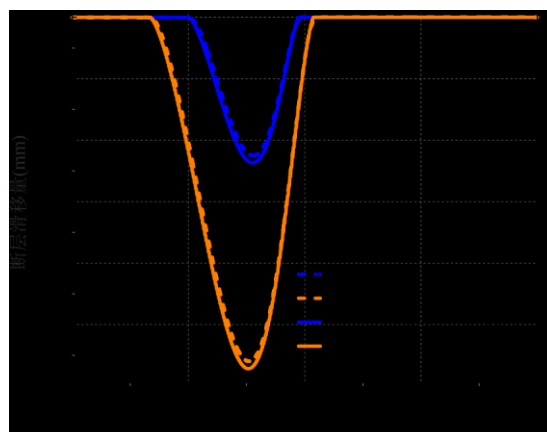


图 5 第 20 天和第 30 天断层滑移量分布曲线

Fig.5 Fault slip distribution curves on day 20 and day 30.

(2)断层内注水诱发滑移算例

本算例建立了断层内注水诱发滑移的数值模型。如图 6 所示，在边长为 300 m 的

正方形岩体域中，有一条与最大主应力成 30° 夹角且长 230 m 的断层，岩石弹性模量为 30 GPa，模型下边界和左边界为辊支撑，上

边界和右边界分别施加 68.4 MPa 与 91.5 MPa 的均布应力荷载, 断层摩擦系数为 0.5, 初始孔隙压力为 20 MPa, 在断层中心以 2 kg/s 的恒定注入速率注水。

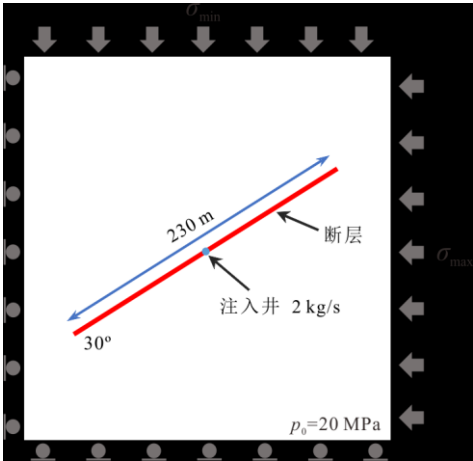


图 6 断层内注水诱发滑移算例示意图
Fig.6 Schematic diagram of induced slip in the fault with fluid injection example.

图 7 展示了本方法预测的断层中心滑移量, 与文献(王孔阳, 2022)结果基本一致。当流体压力提高至 54 MPa 时, 断层开始滑移; 当压力继续升高至 74 MPa 时, 滑移量达到峰值, 最大滑移量为 140 mm。此算例表明本文采用的显-隐式流固耦合摩擦接触方法可比较准确模拟断层内注水诱发滑移

问题。

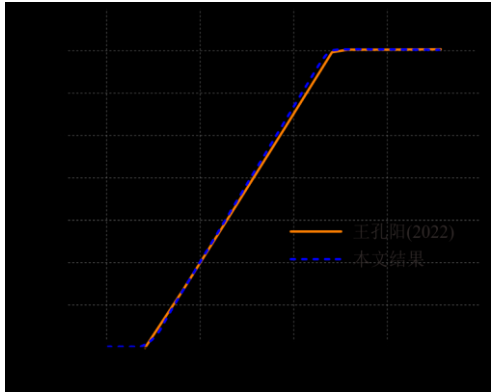


图 7 断层中心滑移量随流体压力变化曲线
Fig.7 Curve of fault center slip variation with fluid pressure.

4 工程案例分析

4.1 案例介绍

如图 8 所示, 研究区域位于中国四川盆地南缘, 四川盆地在大地构造背景上属于扬子地块西缘(罗胜元等, 2025), 毗邻青藏高原东侧。该区域地质构造复杂, 经历了多期板内(陆内)构造运动的强烈改造, 其主体构造框架可能形成于三叠纪印支造山运动时期, 后期又经历了燕山期陆内造山和喜山期的改造。因此, 区域内变形以整体升降及挤压褶皱为主(李纯泉等, 2025)。

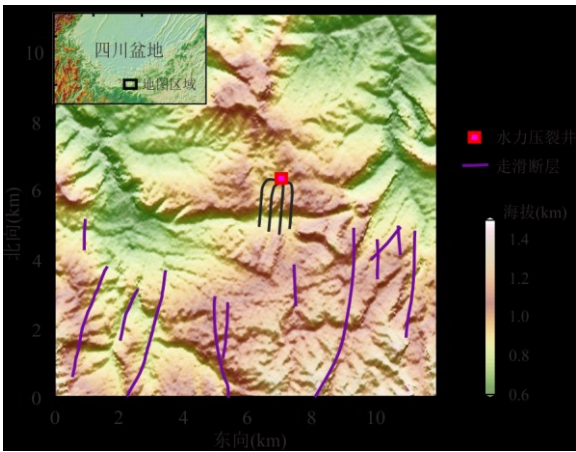


图 8 研究区域位置示意图(修改自 Zhang et al., 2025)

Fig.8 Schematic diagram of the study area location (modified from Zhang et al., 2025).

龙马溪页岩地层是该盆地页岩气勘探和开发的主要目的层, 已探明页岩气储量超

过 $5.44 \times 10^{11} \text{ m}^3$ (Zhang et al., 2020b), 页岩气储量极丰富, 是重要的页岩气资源区(He

et al., 2023; 范宇等, 2025)。研究区 HX 井实钻井深约为 1700 m, 水平井段长 1000 m, 压裂设计分为 11 段, 测井解释的矿物成分表明脆性矿物含量较高, 易于压裂产生网状缝。为了监测施工过程中由于水力压裂导致

的地震事件, 在页岩气开发区附近部署了 60 个三分量地震检波器, 平均间距为 300 m(Zhang et al., 2025), 以确保能够很好地捕捉井下的地震活动。

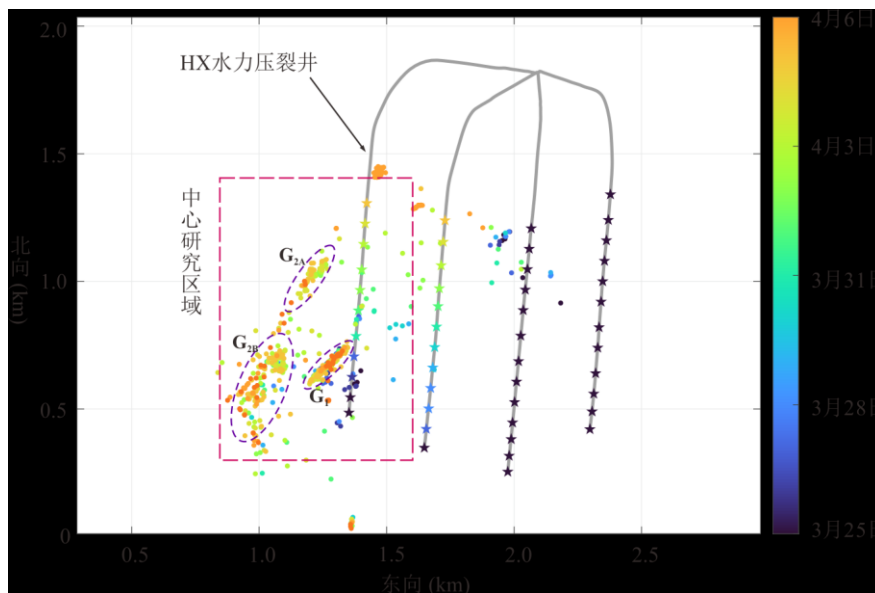


图9 监测地震事件时空分布图(修改自 Zhang et al., 2025)

Fig.9 Spatiotemporal distribution of monitored seismic events (modified from Zhang et al., 2025).

图9展示了HX井水力压裂操作期间发生的地震事件空间分布特征, 在压裂过程中, 地震事件主要发生在 G_1 和 G_2 两个地震区域内, 且 G_1 发震时间早于 G_2 , 其震级多集中于-1至0之间。在HX井1至4段压裂过程中, 地震事件主要集中于 G_1 区域, 长度延伸约 200 m。随着后续压裂的开展, G_1 西侧逐渐形成尺度更大的 G_2 地震区域, 其中一簇整体形态呈 V 型结构, 包括北部一条长度约 300 m、走向为东北—西南向的分支, 以及南部一条长度约 140 m、走向为西北—东南向的分支, 将这一簇地震区域命名为 G_{2B} 。在 G_{2B} 的东北方向上也分散有较多地震事件, 其长度延伸约 160 m, 命名为 G_{2A} 。图10统计了每一段压裂过程中 G_1 和 G_2 区域的地震总数量, 根据监测结果, G_1 和 G_2 区域包含了绝大部分地震事件, 本文的数值模拟工作主要针对这两块地震活动集中区域展开。

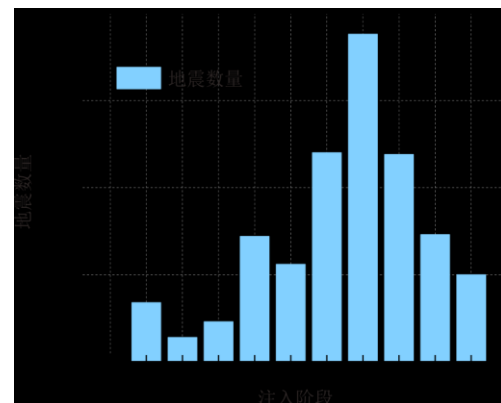


图10 诱发地震数量分段统计图

Fig.10 Segmented statistical chart of induced earthquake quantity.

4.2 有限元计算模型建立

岩层平均密度约为 2400 kg/m^3 , 覆盖层压力 σ_v 为 40.8 MPa, 实测原位最大主应力 σ_H 为 55 MPa, 最小主应力 σ_h 为 35 MPa, 即 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$, 为典型的走滑断层应力状态(Zhang et al., 2025), 流体密度为 1000 kg/m^3 , 基于目标储层深度, 原位流体压力为

17 MPa。如图 11 所示，结合前人震源机制解的应力场张量反演结果，最大主应力轴呈北北东-南南西走向，约为 N17°E，这一应力场特征与该区域右旋走滑断层的活动模式基本吻合(Zhang et al., 2025)。

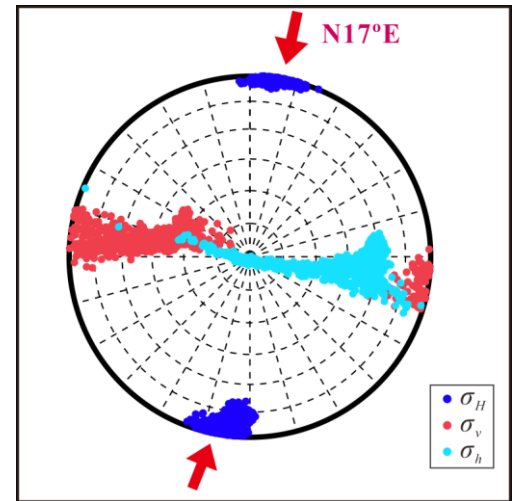


图 11 地震记录空间分布特征及震源机制分析 (Zhang et al., 2025)

Fig.11 Spatial distribution characteristics of seismic records and source mechanism analysis. (Zhang et al., 2025).

在本研究中，将 G₁ 和 G₂ 地震区域视为由两组正交的天然裂缝构成的断层带。针对震级范围为-1 至 0 级的地震事件，假设天然裂缝长宽比为 1，根据公式(18)可得，天然裂缝长度分布范围约为 6–20 m。本文假设天然裂缝长度遵循正态分布，均值为 13 m，标准差为 5 m，摩擦系数为 0.6。设定一组随机裂缝倾角均值为 47°，与最大主应力方向成 30°，标准差为 5°，对应最不利应力条件；另一组共轭随机裂缝与其正交分布。如图 12 所示，G₁ 区域包含 160 条裂缝、G_{2A} 区域包含 70 条裂缝，G_{2B} 区域包含 200 条裂缝。

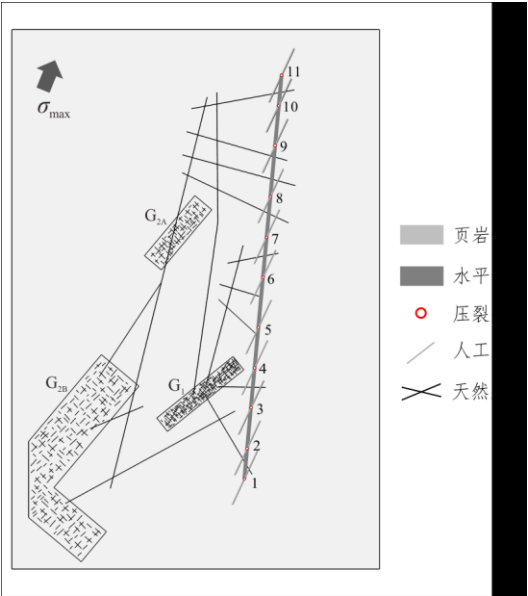


图 12 全井水力压裂-断层带分布模型示意图

Fig.12 Schematic diagram of the full-well hydraulic fracturing-fault zone distribution model.

结合 HX 井周围的地质条件与施工数据，建立二维有限元数值模型，模拟整口 HX 井全部十一段压裂注水过程中的天然裂缝静态摩擦滑移。如图 12 所示，研究区域设定为 2000 m×2000 m，并顺时针旋转 17°，使其与实际最大主应力方向一致，便于施加边界条件。模型边界条件设置为：下侧和左侧为辊支撑，上侧施加 σ_H 应力边界，右侧施加 σ_h 应力边界，四周固定流体压力为原位流体压力值 17 MPa，水平井及随机天然裂缝主要分布在中心 750 m×1100 m 的区域内，其余参数见表 1。

表 1 水力压裂模型参数表

Table 1. Hydraulic fracturing model parameters.

参数名称	值	单位
岩石基质		
密度 ρ_m	2400	kg/m ³
弹性模量 E	35	GPa
泊松比 ν	0.25	1
孔隙度 ϕ_m	0.035	1
渗透系数 k_m	5×10^{-18}	m ²
比奥系数 α	1	1

续表 1		
裂缝带渗透系数 k_{m1}	5×10^{-14}	m^2
流体		
密度 ρ_w	1000	kg/m^3
粘度 μ_w	1×10^{-3}	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
压缩系数 c_w	4.4×10^{-10}	Pa^{-1}
裂缝		
初始法向刚度 k_{n0}	50	GPa/m
初始切向刚度 k_{s0}	50	GPa/m
摩擦系数 μ	0.6	1
膨胀角 ϕ_d	3	°
残余剪切滑移 u_r	5	mm
初始裂缝开度 b_0	0.4	mm
最大闭合度 b_m	0.38	mm

对研究区域中央的网格进行局部加密，

最大网格尺寸为 10 m，有限元模型包含 57956 个三角形单元。计算过程首先通过准静态分析得到初始地应场，随后依据具体施工过程，按照实际注入压力逐段对模型施加注水边界条件，实现分段注入过程的数值模拟。

4.3 全井分段压裂注入诱发地震数值分析

本节针对复杂全井多段水力压裂注入条件，系统研究流体压力传递与累积作用下断层带内天然裂缝滑移及地震响应的时空演化机制。以流固耦合摩擦接触数值模型为基础，本节重点分析多段压裂注入过程中不同地震区域天然裂缝失稳触发条件与发震先后顺序，结合第 4、8 和 11 段诱发地震的模拟结果探讨孔隙流体压力累积对断层带持续发震现象的影响规律。

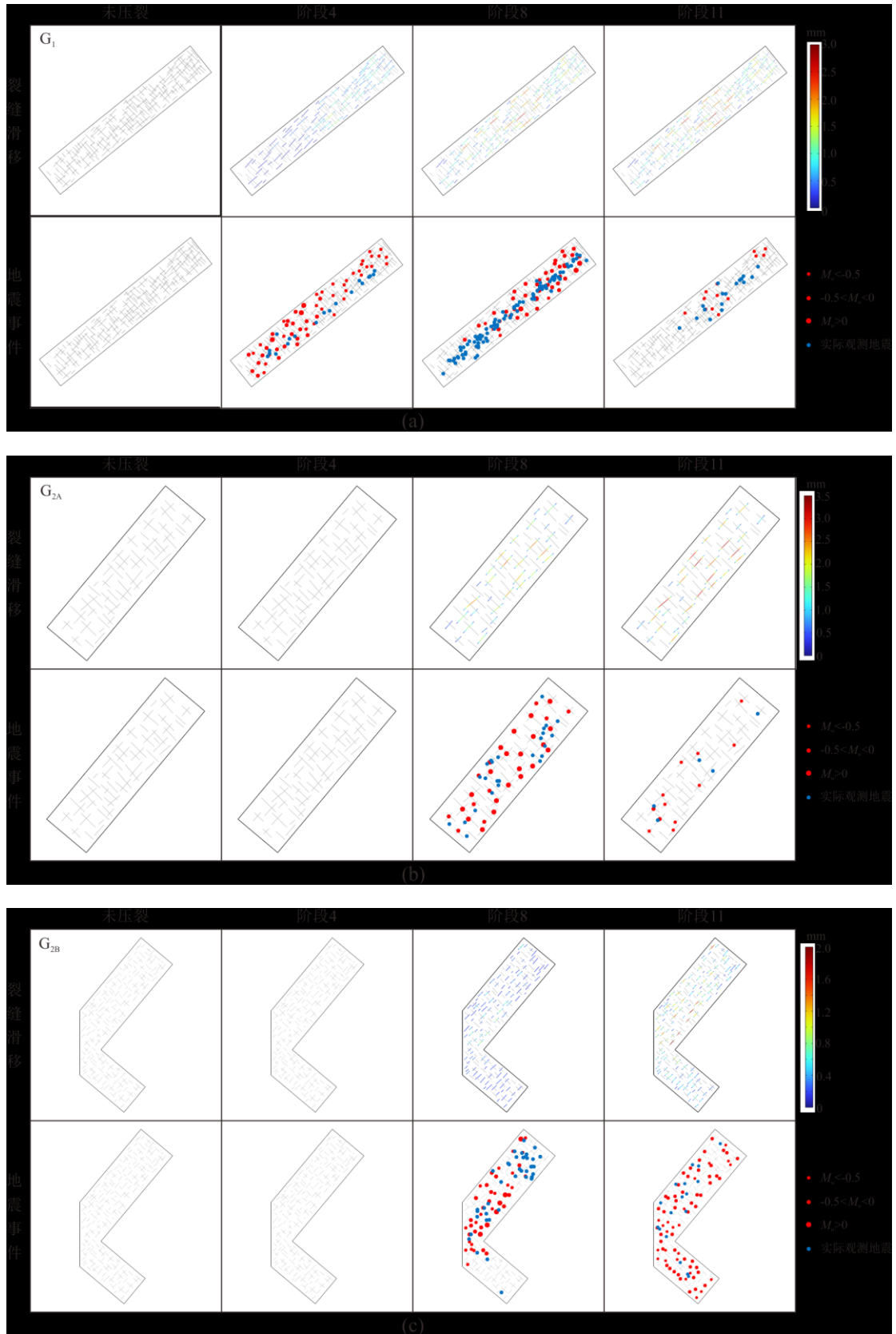


图 13 各区域滑移量与地震事件分布图: (a) G_1 区域、(b) G_{2A} 区域、(c) G_{2B} 区域

Fig.13 Distribution of slip amounts and seismic events in each region: (a) G_1 region, (b) G_{2A} region, (c) G_{2B} region.

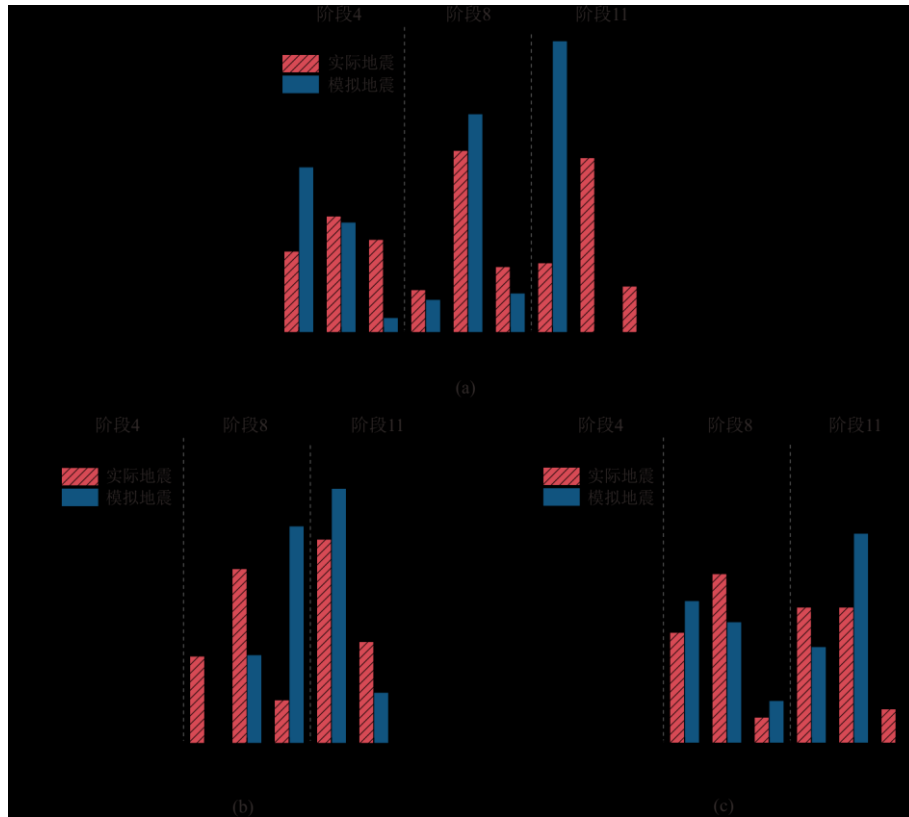


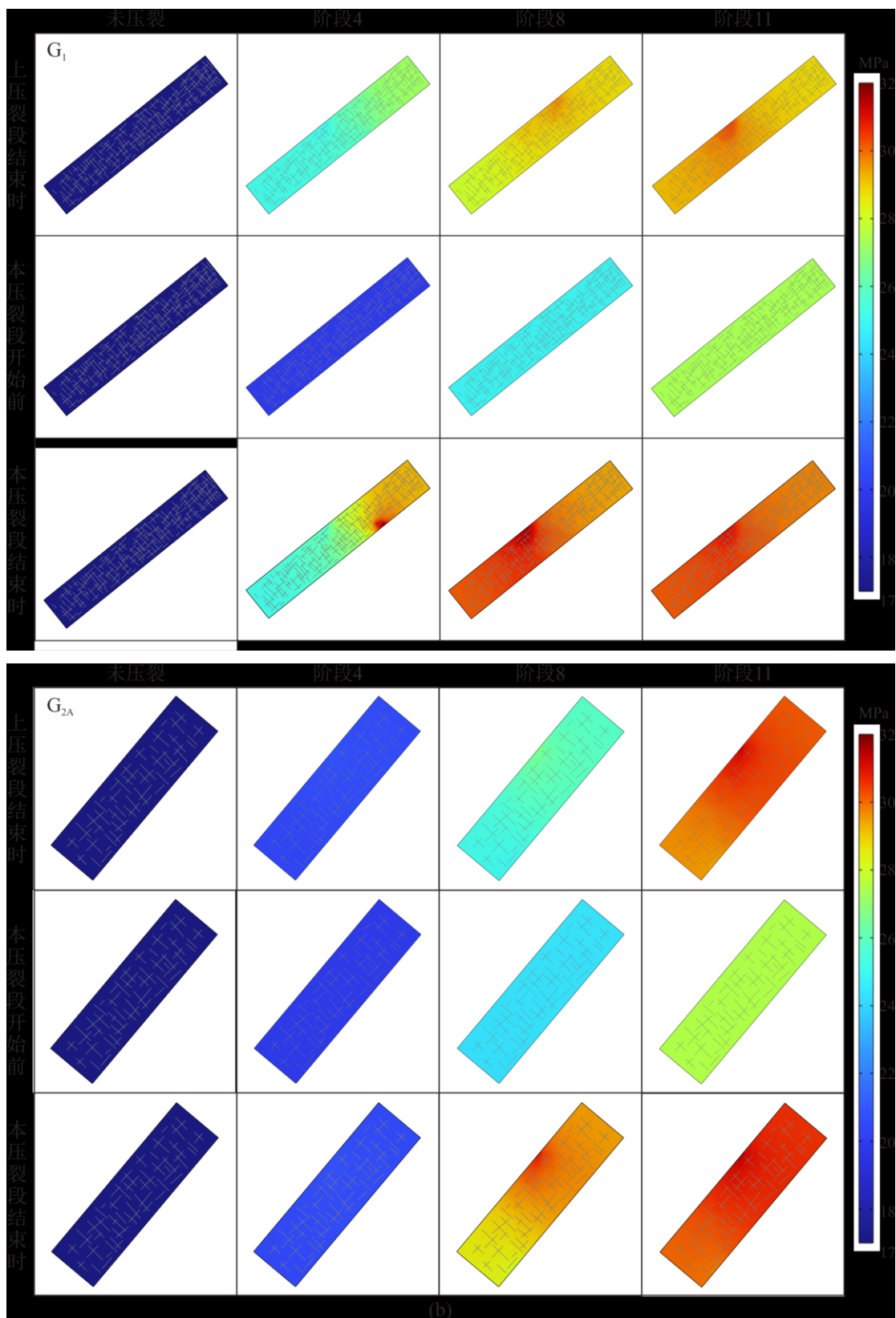
图 14 各区域实际地震与模拟地震分布对比图: (a)G₁ 区域、(b)G_{2A} 区域、(c)G_{2B} 区域

Fig.14 Comparison of observed and simulated seismic event distributions in each region: (a) G₁ region, (b) G_{2A} region, (c) G_{2B} region.

图 13 为未压裂、第 4、8 和 11 段压裂结束之后，G₁、G_{2A} 和 G_{2B} 三处区域中的天然裂缝滑移量以及地震事件分布图。对比模拟的地震事件分布结果与监测数据可见，G₁ 区域最早出现地震活动，在第 4 段压裂完成后，G₁ 区域即出现天然裂缝滑移，并伴随小规模地震事件发生。图 14 给出了三个区域在不同震级范围内实际地震与模拟地震的百分比对比。结合图 13 与图 14 可以看出，模拟结果在发震位置与震级分布方面均和监测结果基本一致。G₁ 区域出现地震较早的主要原因在于其与前 4 个压裂段距离较近，注入的流体可沿天然裂缝与人工裂缝共同构成的导流网络快速流通至该区域，提高该区域流体压力，降低裂缝面的有效法向应力，使得天然裂缝发生剪切滑移并释放能量，从而诱发地震。G₂ 区域距离前 4 个压裂段较远，且缺乏有效连通的天然裂缝，流体难以

在短时间内传输至该区域，压力升高较慢，因此前 4 个压裂段 G₂ 区域未具备触发滑移条件。

图 15 为各地震区域注入前后流体压力分布图，在第四段注水结束后，G₁ 区域流体压力已升高至 26 MPa 以上，增幅超过 9 MPa，而同期 G₂ 区域的流体压力仅为 22-23 MPa，压力增幅不足 6 MPa。结合研究区域初始应力状态及其在注水条件下的应力路径(图 16)进行分析，对于与最大主应力夹角成 30° 和 120° 的天然裂缝，流体压力分别至少需提高 8.6 MPa 和 18.6 MPa 才可能使其发生剪切滑移，因此在第四段注水结束之后，仅有 G₁ 区域与最大主应力夹角成 30° 的部分天然裂缝发生滑移，产生地震事件，而 120° 的天然裂缝与 G₂ 区域的天然裂缝仍处于稳定状态。



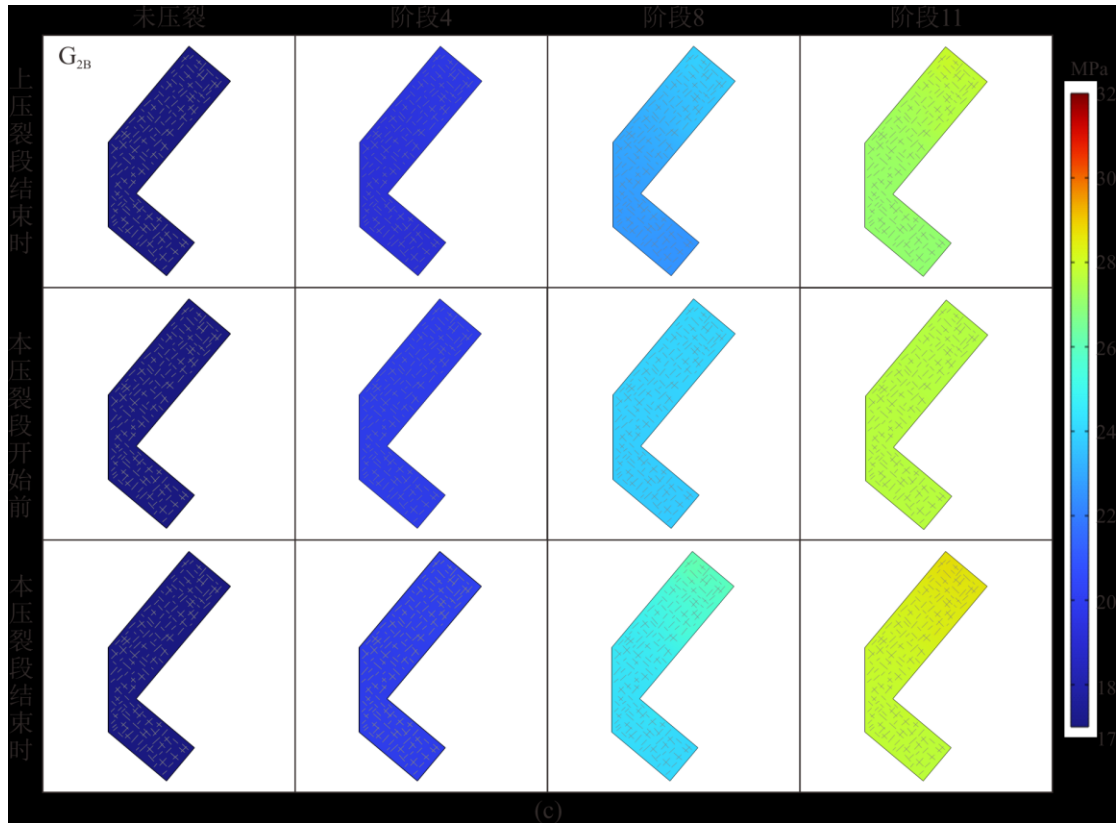


图 15 各地震区域注入前后流体压力分布图: (a)G₁ 区域、(b)G_{2A} 区域、(c)G_{2B} 区域

Fig.15 Fluid pressure distribution before and after injection in each seismic region: (a) G₁ region, (b) G_{2A} region, (c) G_{2B} region.

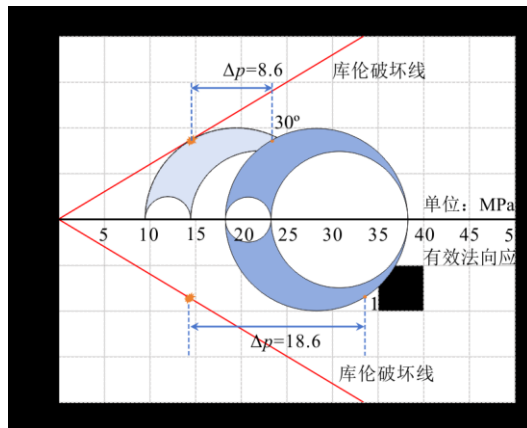


图 16 研究区域初始应力状态及其在注水条件下的应力路径示意图

Fig.16 Schematic diagram of the initial stress state in the study area and its stress path under water injection conditions.

随着后续压裂段依次开启, G₁ 区域天然裂缝滑移量持续增大, G₂ 区域裂缝也逐渐发生滑移, 并伴随小规模地震事件。结合图 15 分析各阶段注入前后的流体压力, G₁ 与 G₂ 区域在各阶段注入后的流体压力整体高

于前一阶段, 表明断层带内流体压力具有明显的累积效应。从渗流特征角度分析, 岩石基质渗透率极低, 而断层带内天然裂缝发育、渗透率较高, 注入流体主要沿连通裂缝网络快速扩散, 向周围基质渗流有限, 导致区域内压力难以及时衰减。在前一段流体压力尚未充分消散时, 下一段已开始注入, 使压力不断叠加, 当压力升高至使裂缝接近临界应力状态时, 微小的应力扰动即可触发滑移。因此, 在每一段注入过程中, 已经发生过滑移的天然裂缝可能会由于流体压力的进一步升高或附近的应力扰动, 再次触发滑移, 先前稳定的裂缝也可能随着压力的升高而达到临界应力状态进而发生滑移, 产生新的地震, 这种累积效应是断层带内天然裂缝持续滑移与发震的重要原因。同时, 孔隙压力升高会增大裂缝开度、提高渗透能力, 进而加快流体在 G₁ 与 G₂ 区域的扩散速度, 这

种“压力升高—裂缝张开—渗透性增强—压力进一步提高”的正反馈机制，使断层带内流体压力持续累积，从而在各压裂阶段均可能具备触发天然裂缝滑移及诱发地震的条件。

综上所述，多段压裂注入过程中流体压力的传递与累积是控制断层带内天然裂缝滑移及地震活动的主导因素。 G_1 区域因距离压裂段较近且裂缝连通性较好，流体压力能够快速升高并率先达到剪切滑移的临界条件，因而较早发生地震，而 G_2 区域受距离与连通性限制，压力传递滞后，早期未发生天然裂缝失稳。随着后续压裂段实施，流体压力在断层带内逐渐升高， G_2 区域在后期逐渐具备发震条件。由于流体压力在各个压裂段不断累积， G_1 和 G_2 区域内的天然裂缝在每一个压裂段都可能触发滑移，从而导致地震持续发生。

4.4 区域总地震矩估算

为了定量评估全井压裂注入过程可能诱发的地震风险，有必要构建能够表征地震区域内总体应变能释放的综合指标。本节对所有天然裂缝诱发地震的地震矩进行累加，得到总地震矩，作为该区域地震风险的评价指标。在此基础上，进一步阐释摩擦系数、地应力差与裂缝数量对区域地震风险的影响规律。

如图 17 所示，分析了 G_1 区域 1 至 4 段

压裂注入过程中，不同摩擦系数(0.5、0.6、0.7、0.8)条件下该区域总地震矩的演化特征。结果表明，总地震矩整体呈“阶梯式”增长：在水力压裂施工期间出现显著跃升，而在相邻压裂段之间则趋于稳定，形成相对平缓的平台阶段。总地震矩的增长具有明显滞后性，通常在每段注入接近结束时才出现显著上升。其主要原因在于注入井与 G_1 区域之间存在一定距离，流体压力需要一定时间才可传播至 G_1 区域并产生压力累积，导致天然裂缝滑移诱发地震事件。随着摩擦系数降低，总地震矩明显增大且开始显著增长的时间提前。这是由于摩擦系数较小时，裂缝发生滑移所需的临界流体压力相应降低。

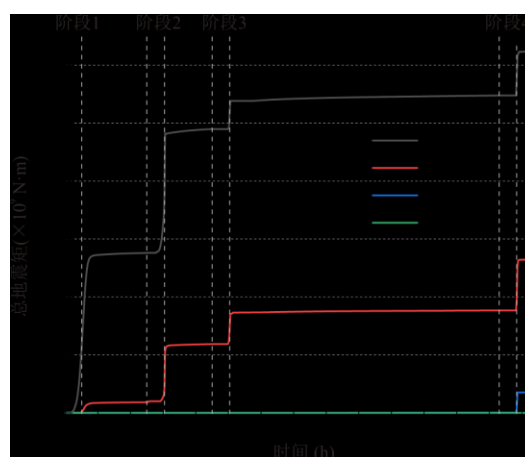


图 17 不同摩擦系数下 1 至 4 段注入 G_1 区域总地震矩时程曲线

Fig.17 Time history curve of the total seismic moment in the G_1 region for injection stages 1 to 4 under different friction coefficients.

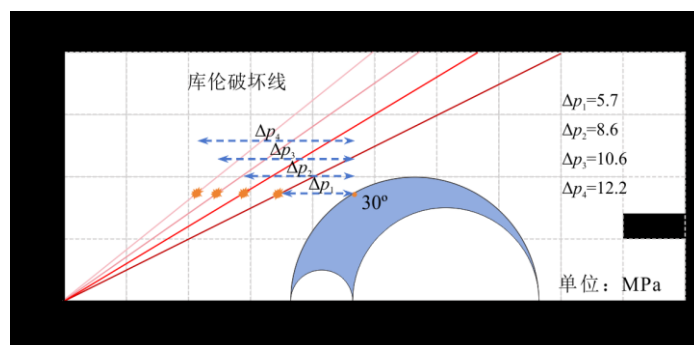


图 18 不同摩擦系数下流体注入应力路径示意图

Fig.18 Schematic diagram of the stress path during fluid injection under different friction coefficients.

结合不同摩擦系数下流体注入应力路径(图 18)进行分析,以与最大主应力成 30° 倾角的裂缝为例,当摩擦系数从 0.6 降低至 0.5 时,触发滑移的临界流体压力升增加值 Δp 降低约 3 MPa,临界压力的降低使天然裂缝更易达到失稳条件,从而提前发生滑移,且滑移距离增大,产生更大的地震矩。随着摩擦系数的增大,总地震矩显著减小,当摩擦系数为 0.5 时,第 4 段注入结束后总地震矩约为 $1.22 \times 10^{11} \text{ N}\cdot\text{m}$,当摩擦系数增至 0.6 时,尽管总地震矩仍出现多次跃升,但峰值明显降低,最终约为 $0.52 \times 10^{11} \text{ N}\cdot\text{m}$,当摩擦系数进一步提高至 0.7 和 0.8 时,总地震矩几乎为零,仅在第 4 压裂段才出现略微增长。上述结果表明,摩擦系数对压裂期间裂缝滑移与能量释放有显著控制作用,较低的摩擦系数有利于天然裂缝发生滑移,产生更大的总地震矩,而较高的摩擦系数则限制了裂缝的滑移行为,能量释放更小。

图 19 反映了在摩擦系数为 0.6 时,不同地应力差对 G_1 区域总地震矩演化特征的影响。总体来看,在不同地应力差下, G_1 区域 1 至 4 段压裂注入的总地震矩也是呈现

“阶梯式”增长,主要跃升阶段集中在水力压裂操作期间。随着地应力差增大,总地震矩显著升高,且其开始明显增长的时间相应提前。这是由于地应力差增大会提高裂缝面上的剪应力,同时降低有效法向应力,使裂缝更易满足剪切滑移条件。因此,在相同流体压力作用下,应力差较大的裂缝更早发生滑移,且滑移距离更大,从而释放更多地震能量。

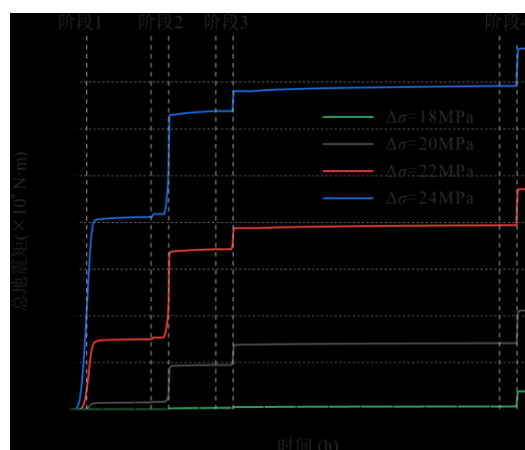


图 19 不同地应力差下 1 至 4 段注入 G_1 区域总地震矩时程曲线

Fig.19 Time history curve of the total seismic moment in the G_1 region for fracture stages 1 to 4 under different differential stress conditions.

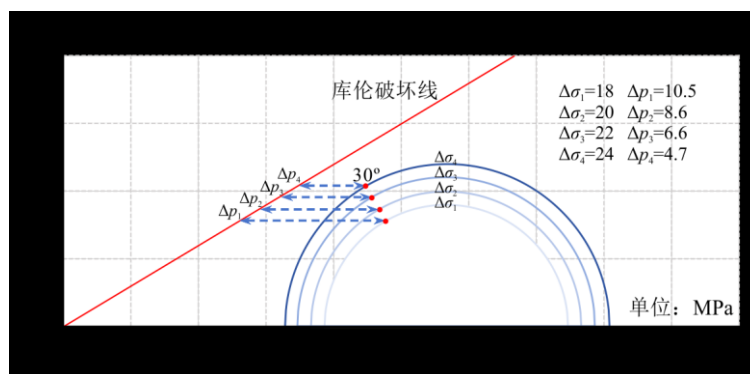


图 20 不同地应力差下流体注入应力路径示意图

Fig.20 Schematic diagram of the stress path during fluid injection under different differential stress conditions.

结合不同地应力差下的流体注入应力路径(图 20)分析,随着地应力差增大,应力莫尔圆半径增大,圆周更易与摩擦强度包络线相交,裂缝发生滑移所需的临界流体压力

随之降低。当应力差增至 22 MPa 时,仅需约 4.7 MPa 的流体压力增量即可触发裂缝滑移,因此该条件下裂缝最早失稳,且最终累积的总地震矩最大。

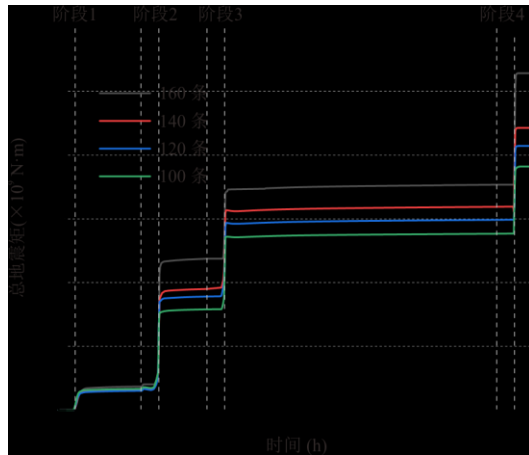


图 21 不同裂缝数量下 1 至 4 段注入 G_1 区域总地震矩时程曲线

Fig.21 Time history curve of the total seismic moment in the G_1 region for injection stages 1 to 4 under different numbers of fractures.

图 21 为不同裂缝数量下, G_1 区域 1 至 4 段注入的总地震矩变化曲线。总体来看, 各组总地震矩的变化趋势相似, 但随着裂缝数量的增加, 总地震矩逐步上升。这主要是因为裂缝数量增加, 提高了研究区域天然裂缝网络的连通性, 加快了流体压力在裂缝网络中的扩散速度, 使更多裂缝发生失稳滑移, 增加了滑移裂缝的数量, 从而提升了区域的总地震矩。当裂缝数量达到 160 条时, G_1 区域裂缝连通性最佳, 发生滑移的裂缝数量最多, 总地震矩达到最大值约 $0.52 \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}$; 而裂缝数量为 100 条时, 总地震矩明显较低, 仅约 $0.38 \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

5 结论

本文针对全井多段压裂注入过程中诱发断层滑移与地震活动问题, 构建了流固耦合摩擦接触有限元模型, 结合实际工程地质数据引入 DFN 以表征页岩储层中复杂的天然裂缝网络, 利用罚函数方法模拟裂缝面的库仑摩擦接触, 采用显-隐式迭代求解策略实现对裂缝非线性滑移的高效求解, 估测裂缝滑移位置与滑移量, 明确诱发地震空间分

布和能量耗散演化规律, 进而估算地震震级, 基于能量耗散, 提出了区域总地震矩评价指标, 用于评估研究区域的地震风险。

研究表明, 在全井压裂注入过程中, 流体压力沿天然裂缝形成的优势渗流通道快速传播, 导致断层带内孔隙压力显著升高。由于邻近岩石基质渗透率较低, 各压裂段之间的流体压力难以及时消散, 使断层带内流体压力逐步累积, 进而持续触发其中天然裂缝失稳滑移, 造成地震活动的持续发生。模拟得到的地震空间分布特征与现场监测结果具有良好一致性, 验证了本文构建的全耦合摩擦滑移数值模型在全井尺度下, 描述压裂注入诱发断层滑移及地震响应过程的有效性与可靠性。通过区域总地震矩估算及参数敏感性分析, 系统揭示了摩擦系数、地应力差以及裂缝数量对能量释放规模的控制作用, 表明较低的摩擦系数、较大的地应力差以及较多的裂缝数量均可能显著提高区域总地震矩, 从而增大诱发地震风险。本文可为全井尺度压裂注入诱发断层滑移与地震风险的定量评估提供具有工程应用价值的力学分析框架。

本研究假设岩石基质为各向同性均质多孔介质, 未考虑惯性效应及多相流动。在实际非常规油气开采过程中, 裂缝网络通常结构复杂且空间分布差异显著, 储层内气-液多相流体的流动规律及相间耦合作用具有较强的不确定性, 地下应力场、岩石密度和弹性模量等关键地质力学参数难以实现准确获取, 故当前诱发地震数值模拟结果与实际工程之间仍存在一定差距。未来可进一步完善计算模型, 对压裂注入过程中断层滑移与诱发地震的时空演化机制开展更深入的研究。

References

- Bandis, S.C., Lumsden, A.C., Barton, N.R., 1983. Fundamentals of Rock Joint Deformation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 20(6): 249-268. doi: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(83\)90595-8](https://doi.org/10.1016/0148-9062(83)90595-8).
- Byerlee, J., 1978. Friction of Rocks. *Pure and Applied Geophysics*, 116(4): 615-626. doi: 10.1007/BF00876528.
- Cao, W., Verdon, J.P., Tao, M., 2022. Coupled Poroe-lastic Modeling of Hydraulic Fracturing-Induced Seismicity: Implications for Understanding the Post Shut-in ML 2.9 Earthquake at The Preston New Road, UK. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(3): e2021JB023376. doi: 10.1029/2021JB023376.
- Ellsworth, W.L., 2013. Injection-Induced Earthquakes. *Science*, 341(6142): 1225942. doi: 10.1126/science.1225942.
- El-kaseeh, G., Will, R., Balch, R., et al., 2017. Multi-scale Seismic Measurements for CO₂ Monitoring in an EOR/CCUS Project. *Energy Procedia*, 114: 3656-3670. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1497.
- Fan, Y., Zhou, J. H., Song, Y., 2025. Key Technologies Innovation and Practice in Deep Shale Gas Drilling and Reservoir Stimulation in Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 45(12): 167-178 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2025.12.013.
- He, X., Chen, G. S., Wu, J. F., et al., 2023. Deep Shale Gas Exploration and Development in the Southern Sichuan Basin: New Progress and Challenges. *Natural Gas Industry B*, 10(1): 32-43. doi: 10.1016/j.ngib.2023.01.007.
- Huang B. X., Xing Y. K., Li B. H., et al., 2025. Discussion and Prospects of Induced Seismicity Caused by Shale Gas Exploitation: A Case Study of the Sichuan Basin. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 44(11): 2843-2869 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3724/1000-6915/jrme.2025.0130.
- Huang, W., Cao, W., Jiang, F., 2017. Heat Extraction Performance of EGS with Heterogeneous Reservoir: A Numerical Evaluation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108: 645-657. doi: 10.1016/j.jheatmasstransfer.2016.12.037.
- Hui G, Chen S. N., Gu F., 2021. Coupled Fluid-Geo-mechanical Modeling for Characterizing Hydraulic Fracturing-Induced Seismicity: A Case Study of the Fox Creek Area, Canada. *Chinese Journal of Geophysics*, 64(03): 864-875 (in Chinese with English abstract). doi: 10.6038/cjg202100267.
- Kanamori, H., Anderson, D.L. 1975. Theoretical Basis of Some Empirical Relations in Seismology. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(5): 1073-1095. doi: 10.1785/BSSA0650051073.
- Kanamori, H., Brodsky, E.E., 2004. The Physics of Earthquakes. *Reports on progress in physics*, 67(8): 1429-1496. doi: 10.1088/0034-4885/67/8/R03
- Jin, L., Zoback, M.D. 2015. Identification of Fault-Controlled Damage Zones in Microseismic Data-an Example from the Haynesville Shale. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2015*, 726-730. doi:10.1190/segam2015-5853108.1.
- Lei, Q. H., Tsang, C.-F., 2022. Numerical Study of Fluid Injection-Induced Deformation and Seismicity in a Mature Fault Zone with a Low-Permeability Fault Core Bounded by a Densely Fractured Damage Zone. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 31: 100277. doi: 10.1016/j.gete.2021.100277.
- Li, C. Q., Chen, H. H., Han, G. J., et al., 2025. Oil and Gas Charging Characteristics of the Cambrian Xixiangchi Formation in the Central Sichuan Basin. *Earth Science*, 50(6): 2227-2238 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3799/dqkx.2025.017.
- Li, J. H., Zhu, A. Y., Li, Y. H., et al., 2026. The Poroe-lastic Stress and Pore Pressure Effects on Delayed Seismicity Based on Fully Coupled Fluid-Solid Simulations and Rate-and-State Friction Laws.

- Geophysical Journal International*, 244(3): ggaf536. doi: 10.1093/gji/ggaf536.
- Liu, C. X., Liu, H. B., Zhang, C., et al., 2026. High-Resolution Seismic Catalog Reconstruction of the 2017 ML4.9/MS4.4 Earthquake Sequence in Muli, Sichuan. *Earth Science*, 51(1): 173-184 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3799/dqkx.2025.206.
- Liu, F. S., Sun, W., Li, M. H., et al., 2024. A Smoothed Assumed Enhanced Strain Method for Frictional Contact with Constant Strain Elements. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(11): 4369-4385. doi: 10.1016/j.jrmge.2023.07.018.
- Luo, S. Y., Jiang, S., Zhang, B. M., et al., 2025. Classification and Accumulation Analysis of Helium-Bearing Natural Gas Based on Cluster Statistics: A Case Study in the Sichuan Basin. *Earth Science*, 50(6): 2179-2198 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3799/dqkx.2025.020.
- Min, K.-B., Rutqvist, J., Tsang, C.-F., et al., 2004. Stress-Dependent Permeability of Fractured Rock Masses: A Numerical Study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(7): 1191-1210. doi: 10.1016/j.ijrmms.2004.05.005.
- Rutqvist, J., Noorishad, J., Tsang, C., et al., 1998. Determination of Fracture Storativity in Hard Rocks Using High-Pressure Injection Testing. *Water Resources Research*, 34(10): 2551-2560. doi: 10.1029/98WR01863.
- Rutqvist, J., Stephansson, O., 2003. The Role of Hydromechanical Coupling in Fractured Rock Engineering. *Hydrogeology Journal*, 11(1): 7-40. doi: 10.1007/s10040-002-0241-5.
- Saeb, S., Amadei, B., 1992. Modelling Rock Joints Under Shear and Normal Loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 29(3): 267-278. doi: 10.1016/0148-9062(92)93660-C.
- Sainoki, A., Iwata, N., Asahina, D., 2021. Characterization of Fault-Slip Taking Place in a Fractured Fault Damage Zone. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 861(5): 052038. doi: 10.1088/1755-1315/861/5/052038.
- Scholz, C.H., 2019. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. doi: 10.1017/9781316681473.
- Schultz, R., Skoumal, R.J., Brudzinski, M.R., et al., 2020. Hydraulic Fracturing-Induced Seismicity. *Reviews of Geophysics*, 58(3): e2019RG000695. doi: 10.1029/2019RG000695.
- Skoumal, R.J., Brudzinski, M.R., Currie, B.S., 2015. Earthquakes Induced by Hydraulic Fracturing in Poland Township, Ohio. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(1): 189-197. doi: 10.1785/0120140168.
- Skoumal, R.J., Trugman, D.T., 2021. The Proliferation of Induced Seismicity in the Permian Basin, Texas. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(6): e2021JB021921. doi: 10.1029/2021JB021921.
- Sun, W., Fish, J., 2021. Coupling of Non-Ordinary State-Based Peridynamics and Finite Element Method for Fracture Propagation in Saturated Porous Media. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 45(9): 1260-1281. doi: 10.1002/nag.3200.
- Wang K. Y., 2022. Study on Fault Slip Induced by Hydraulic Fracturing in Shale Reservoirs and Characteristics of Casing Damage (Dissertation). China University of Petroleum (Beijing), Beijing (in Chinese with English abstract).
- Witherspoon, P.A., Wang, J.S.Y., Iwai, K., et al., 1980. Validity of Cubic Law for Fluid Flow in a Deformable Rock Fracture. *Water Resources Research*, 16(6): 1016-1024. doi: 10.1029/WR016i006p01016.
- Xu, J., Li, J. L., Yang, W., et al., 2025. Shallow Lingering and Deep Transient Seismicity Related to Hydraulic Fracturing in the Changning Shale Gas Field, Sichuan Basin, China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 130(4): e2024JB030279. doi: 10.1029/2024JB030279.

- Ye, Z. W., Wang, J. G., 2020. A Thermal-Hydraulic-Mechanical Coupling Study of Heat Extraction from the Geothermal Reservoir with a Discrete Fracture Network. *Geofluids*, 2020: 1-18. doi: 10.1155/2020/8875918.
- Yin, Z. R., Huang, H. W., Zhang, F. S., et al., 2020. Three-Dimensional Distinct Element Modeling of Fault Reactivation and Induced Seismicity Due to Hydraulic Fracturing Injection and Backflow. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(4): 752-767. doi: 10.1016/j.jrmge.2019.12.009.
- Yoon, J. S., Zimmermann, G., Zang, A., et al., 2015. Discrete Element Modeling of Fluid Injection-Induced Seismicity and Activation of Nearby Fault. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(10): 1457-1465. doi: 10.1139/cgj-2014-0435.
- Zhang, F. X., Chen, Y. F., Wang, R. J., et al., 2025. Integrated Analysis of Seismic Sources and Structures: Understanding Earthquake Clustering During Hydraulic Fracturing. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 130(1): e2024JB030008. doi: 10.1029/2024JB030008.
- Zhang, F. S., Jiang, Z. Y., Chen, Z. W., et al., 2020a. Hydraulic Fracturing Induced Fault Slip and Casing Shear in Sichuan Basin: A Multi-Scale Numerical Investigation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 195: 107797. doi: 10.1016/j.petrol.2020.107797.
- Zhang, F. S., Yin, Z. R., Chen, Z. W., et al., 2020b. Fault Reactivation and Induced Seismicity During Multistage Hydraulic Fracturing: Microseismic Analysis and Geomechanical Modeling. *SPE Journal*, 25(02): 692-711. doi: 10.2118/199883-PA.
- Zhang, N. L., Luo, Z. F., Chen, X., et al., 2021. Investigation of the Artificial Fracture Conductivity of Volcanic Rocks from Permian Igneous in the Sichuan Basin, China, with Different Stimulation Method Using an Experiment Approach. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 95: 104234. doi: 10.1016/j.jngse.2021.104234.
- Zhang, S. C., Li, J. M., Xu, J. W., et al., 2025. Advances in Hydraulic Fracturing Monitoring Techniques for Unconventional Reservoirs in the Junggar Basin. *Natural Gas Industry*, 45(4): 70-84. (in Chinese with English abstract). doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2025.04.006
- ### 中文参考文献
- 范宇, 周井红, 宋毅, 2025. 四川盆地深层页岩气钻井、储层改造关键技术创新与实践. *天然气工业*, 45(12): 167-178. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2025.12.013.
- 黄炳香, 邢岳堃, 李炳宏, 等, 2025. 页岩气开采诱发地震问题探讨与展望: 以四川盆地为例. *岩石力学与工程学报*, 44(11): 2843-2869. doi: 10.3724/1000-6915.jrme.2025.0130.
- 惠钢, 陈胜男, 顾斐, 2021. 流体-地质力学耦合建模表征水力压裂诱发地震: 以加拿大 Fox Creek 地区为例. *地球物理学报*, 64(03): 864-875. doi: 10.6038/cjg202100267.
- 李纯泉, 陈红汉, 韩广金, 等, 2025. 四川盆地中部地区寒武系洗象池组油气充注特征. *地球科学*, 50(6): 2227-2238. doi: 10.3799/dqkx.2025.017.
- 柳存喜, 刘骅标, 张晨, 等, 2026. 四川木里 2017 年 ML4.9/MS4.4 级地震序列高精度地震目录重建. *地球科学*, 51(1): 173-184. doi: 10.3799/dqkx.2025.206.
- 罗胜元, 蒋恕, 张保民, 等, 2025. 基于聚类统计的含氦天然气分类与成藏分析: 以四川盆地为例. *地球科学*, 50(6): 2179-2198. doi: 10.3799/dqkx.2025.020.
- 王孔阳, 2022. 页岩储层水力压裂诱发断层错动规律及套管损坏特征研究(博士学位论文). 北京: 中国石油大学(北京).
- 张士诚, 李建民, 许江文, 等, 2025. 准噶尔盆地非常规储层水力压裂监测技术进展. *天然气工业*, 45(4): 70-84. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2025.04.006.

论文亮点：

1. 提出显 - 隐式流固耦合摩擦滑移求解策略，提高多裂缝滑移数值计算效率。
2. 考虑全井尺度多段压裂注入过程的段间压力扩散及累积对断层滑移的影响。
3. 引入离散裂缝网络模型刻画断层带中随机天然裂缝滑移的时空演化及地震过程。
4. 提出区域总地震矩评价指标，用于定量评估井场尺度的压裂诱发地震风险。