

水力压裂诱发裂缝动态失稳滑移的响应规律研究

陈鸿杰¹, 王鑫尧^{1*}, 张博文¹, 王 春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: 2025年12月7日; 录用日期: 2025年12月28日; 发布日期: 2026年1月14日

摘 要

随着全球新型能源需求增长, 水力压裂等工业活动诱发的地震事件显著增加。文章采用离散元方法, 探究了压裂液注入速率(通过增压速率体现)、地应力(通过有效正应力体现)以及压裂液黏度三个主要压裂参数对裂缝动态失稳滑移的影响。结果表明: 1) 提高压裂液增压速率会促进裂缝从稳定蠕滑向黏滑运动转变; 2) 增加有效正应力会提高裂缝滑移所需的临界剪应力, 从而增强其稳定性; 3) 压裂液黏度的变化对裂缝失稳激活的临界条件影响不大, 但高黏度液体会限制流体扩散、增强局部孔隙压力而加剧滑移量和不稳定性。该研究为油气资源开发中的诱发地震风险防控提供理论指导。

关键词

水力压裂, 裂缝失稳, 裂缝滑动, 压裂参数

Study on the Response Mechanism of Dynamic Instability and Slip in Fractures Induced by Hydraulic Fracturing

Hongjie Chen¹, Xinyao Wang^{1*}, Bowen Zhang¹, Chun Wang²

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

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

Received: December 7, 2025; accepted: December 28, 2025; published: January 14, 2026

*通讯作者。

文章引用: 陈鸿杰, 王鑫尧, 张博文, 王春. 水力压裂诱发裂缝动态失稳滑移的响应规律研究[J]. 土木工程, 2026, 15(1): 34-40. DOI: 10.12677/hjce.2026.151005

Abstract

With the global growth in demand for new energy sources, induced seismic events triggered by industrial activities such as hydraulic fracturing have significantly increased. This study employs the discrete element method to investigate the effects of three primary fracturing parameters—fracturing fluid injection rate (represented by the pressurization rate), in-situ stress (represented by effective normal stress), and fracturing fluid viscosity—on the dynamic instability and slip of fractures. Results indicate: 1) Increasing the pressurization rate of fracturing fluid accelerates the transition of fractures from stable creep to viscous slip; 2) Elevating effective normal stress raises the critical shear stress required for fracture slip, thereby enhancing stability; 3) Changes in fracturing fluid viscosity have a limited impact on the critical conditions for fracture instability activation. However, high-viscosity fluids exacerbate slip magnitude and instability by restricting fluid diffusion and increasing local pore pressure. This research provides theoretical guidance for mitigating induced seismicity risks in oil and gas resource development.

Keywords

Hydraulic Fracturing, Fracture Instability, Fracture Slip, Fracturing Parameter

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

全球能源短缺问题正推动着新型能源的快速发展，然而在页岩气开采、废水处理、水力压裂及增强型地热系统工程等相关工业活动中，向地下注入流体已成为诱发地层失稳的诱因之一[1]-[3]。例如，2011 年在美国俄克拉荷马州地区因废水处理引发 M_w 5.7 地震[4]，2015 年加拿大西部的水力压裂生产活动诱发 M_w 3.9 地震，2017 年韩国浦项通过 EGS 流体注入引发 M_w 5.5 地震[6] [7]，2018 年四川兴文由于页岩气开采诱发 M_s 5.8 地震[8]，断层滑动也可能在水力作用下发生[9]。因此，了解流体注入条件下的断层滑移对于确保地下工程的安全至关重要。

流体注入断层活化的主要原因是降低有效正应力，使断层面的摩擦剪切强度更接近库仑破坏标准[10]，因此，研究注入速率和应力条件以及粘度操作设计参数对断层滑动激活的影响，具有重要的实际和理论意义。研究人员建立许多数值和理论模型，其中大多数模型都是基于速率和状态相关的摩擦模型，例如，Dempsey 等[11]使用压力扩散模型与速率和状态摩擦模型耦合，表明注入率的降低可能导致俄克拉荷马州地震活动率的降低。Lagenbruch 等[12]使用统计理论模型对俄克拉荷马州的许多注入诱发地震进行校准，获得类似的结果。Barbour 等[13]观察到，在俄克拉荷马州，与恒定注入率相比，可变注入率可能导致更大的地震活动率增加。Chang 等[14]研究注入率变化对关井后地震活动率的影响并指出注入速率的逐渐降低会使注入后的地震活动率最小化。Rudnicki 等[15]对弹簧块模型的研究表明由于速率和状态摩擦，较大的加压速率使断层滑动稳定。Sun 等[16]通过建立基于速率 - 状态分数定律和线性稳定性分析的孔隙弹性模型，提出一种修正的临界刚度准则，将有效应力变化率作为一个关键变量，探讨断层失稳滑动的可能性。Passelègue 等[17]研究了应力大小和流体注入速率对断层再活化的作用。Cebry 等[18]比较了不同背景剪切应力水平下诱发的地震事件。Cornelio 等[19]探讨了流体粘度对断层重新激活和同震弱化的影响，

发现流体粘度不影响断层重新激活的起始,但会影响弱化机制。Jiang 等[20]实验不同注水速率对花岗岩中平滑和粗糙裂缝激活的影响,通过分析得出裂缝表面粗糙度对注水诱导裂缝激活的重要作用。Butt 等[21]进行实验室花岗岩的水力压裂实验,探究不同粘度注入流体对水力压裂能量预算的影响,发现高粘度流体导致更高的破裂压力。

由以上分析可知,多位学者对断层滑动的影响参数运用速率与状态摩擦进行试验研究,取得了丰富的研究成果与认识。光滑断面为速率-状态摩擦本构关系等理论模型提供了理想化的验证平台,通过对比光滑断面与理论预测的摩擦行为,可检验模型在高速滑动条件下的适用性,为地震成核机制研究提供基础。本文通过 UDEC 软件构建光滑断层模型,揭示流体注入速率、地应力和流体黏度对裂缝动态失稳滑移的基本响应规律,为管控工业活动中诱发的地震风险提供理论支撑。

2. 本构模型与材料参数

2.1. 本构模型

使用 UDEC 二维离散元软件建立宽为 50 mm、高为 100 mm 的模型,分为上下两个块体,块体之间由一条倾角为 45° 的斜裂缝分开,见图 1。图中所示为法向荷载和水平荷载下共同加载的模型示意图,块体下边界设置有位移限制和一定量的法向应力,然后将水平方向上的速度控制条件调整到试块上边界的左侧,保持恒定水平加载速度为 0.001 m/s,将进水口设在裂缝中并施加固定的水压(p),模型的四条边界均设为不透水边界。

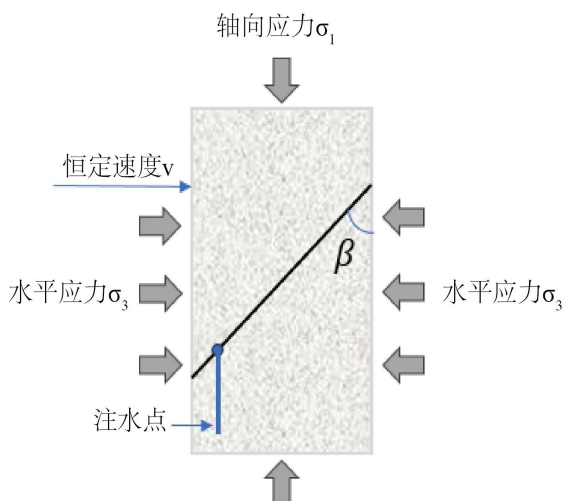


Figure 1. Schematic diagram of the model
图 1. 模型示意图

通过改变流体注入速率(IP)和地应力大小以及粘度(η)条件来实现试块的运动,具体方案如表 1 所示。当流体注入裂缝中,先达到最大剪应力值 τ_s ,再到临界剪应力值 τ_0 ,裂缝发生滑动时,其应力状态遵循有效应力准则[22]:

$$\tau_0 = \mu \sigma'_n + c \quad (1)$$

式中, τ_0 为临界剪应力; μ 为摩擦系数; σ'_n 为有效正应力; c 为粘聚力。公式(1)表明,当剪切力超过某一阈值时,断层将发生滑动。

Table 1. Simulation scheme design
表 1. 模拟方案设计

编号	σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)	P (MPa)	σ_{eff} (MPa)	IP (Mpa/s)	η (Pa·s)
S-1	11	6	1	10	0.005	0.001
S-2	21	11	1	20	0.005	0.001
S-3	27	16	1	26	0.005	0.001
W-1	21	11	1	20	0.04	0.001
T-1	11	6	1	10	0.005	0.01

2.2. 材料参数

模型的材料参数包括岩石基质和裂缝，其中杨氏模量(E) = 24 GPa，泊松比(ν) = 0.24，岩石基质被模拟为弹性，采用库伦滑移本构模型，岩体、裂缝面的具体参数如表 2 所示。

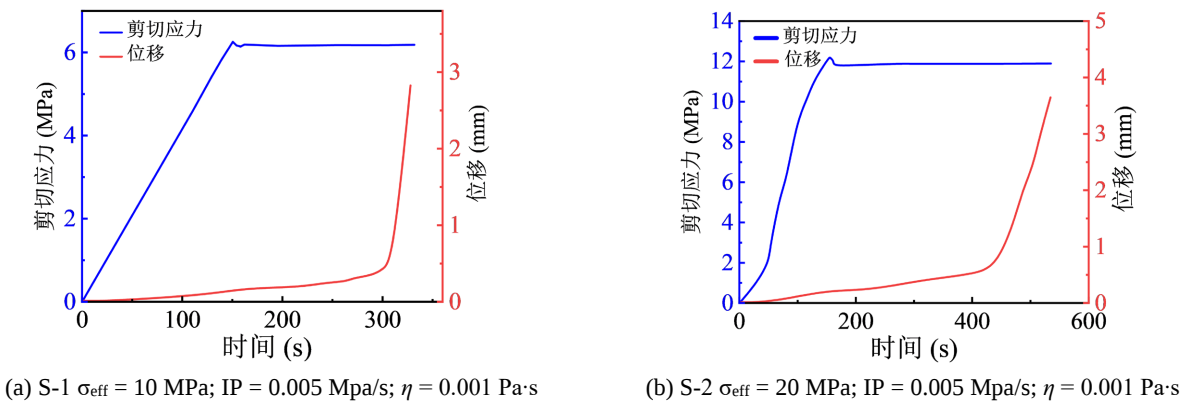
Table 2. Physical and mechanical parameters of materials
表 2. 材料物理力学参数

力学参数	单位	值	力学参数	单位	值
密度 ρ	Kg/m ³	2200	剪切模量 k	Gpa	13
体积模量 g	Gpa	20	内聚力 c	Mpa	10
摩擦角 φ	°	20	抗拉强度 σ_t	Mpa	4
裂缝切向刚度 K_j^s	Gpa/m	3500	裂缝法向刚度 jkn	Gpa/m	3500
流体密度 ρ_w	Kg/m ³	1000	流体粘度 μ	Pa·s	0.001

3. 数值结果——压裂参数对裂缝失稳滑动影响

3.1. 压裂液注入速率对裂缝失稳滑动的影响

图 2(b)与图 2(d)展示了在相同有效正应力下和不同压裂液增压速率对裂缝滑动行为的影响。由图可知，当压裂液注入速率提高 8 倍时，临界剪应力分别为 $\tau_0 = 11.81$ MPa 与 $\tau_0 = 12$ MPa，数值较为接近。表明通过降低压裂液增压速率并不能完全阻止裂缝发生滑动，只能推迟其启动时间，而较低的压裂液注入速率会减小裂缝滑动过程中的剪切位移量。



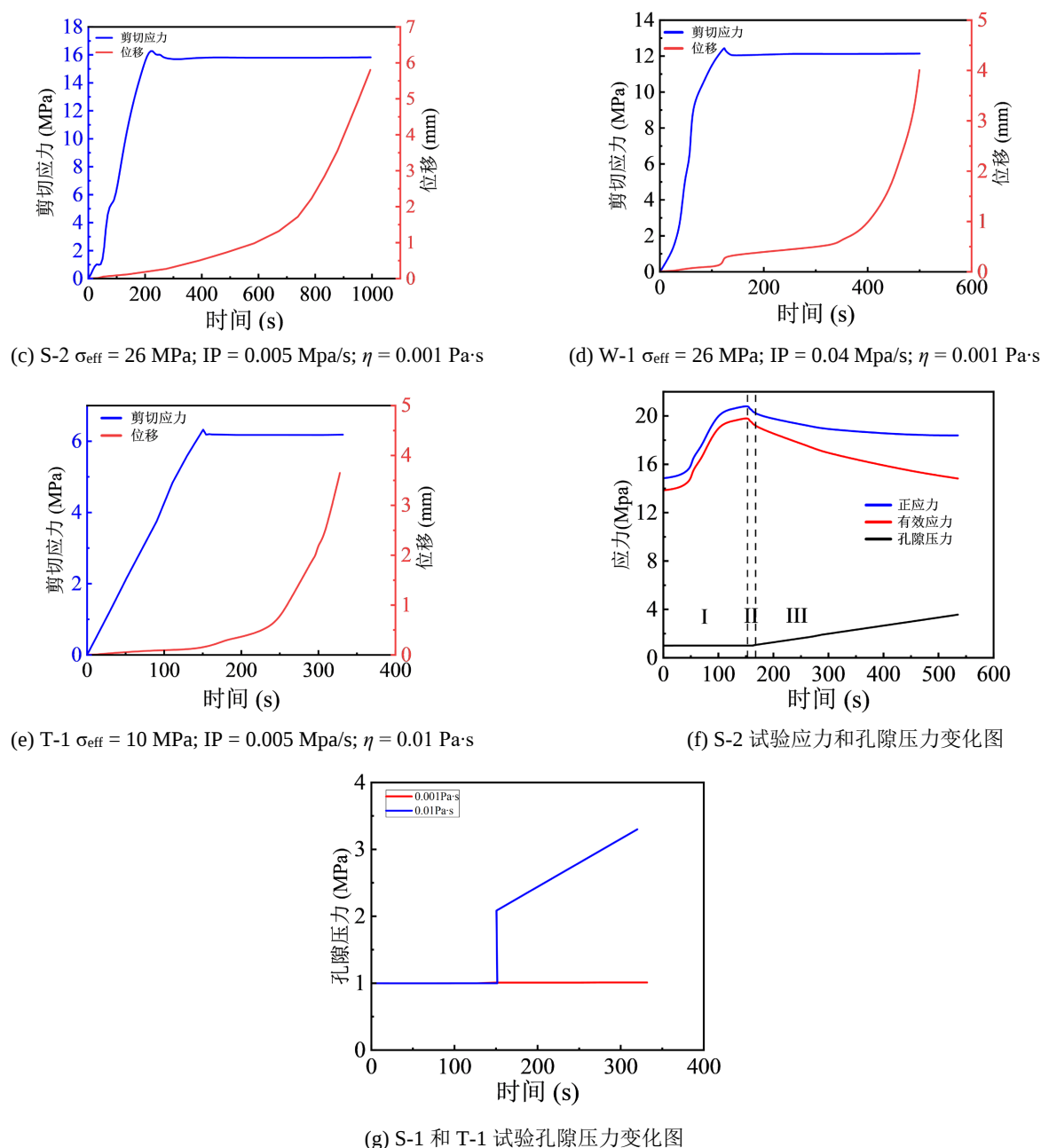


Figure 2. Evolution law diagram of fault slip stress-displacement

图 2. 断层滑动应力 - 位移演化规律图

如图所示, 在注入速率较高的 W-1 试验中, 压裂液注入初期观测到裂缝发生较大剪切位移, 表现为典型的黏滑运动; 而在注入速率较低的 S-2 试验中, 裂缝则始终呈现稳定的蠕滑行为。因此压裂液的增压速率是控制裂缝滑动模式的关键因素。高速注入易发生黏滑运动, 而低速注入则更利于维持稳定蠕滑, 提高压裂液增压速率可能会促进裂缝从稳定滑动到不稳定滑动转变。

3.2. 正应力和孔隙压力对裂缝失稳滑动的影响

为了研究不同正应力下对裂缝失稳滑动的影响, 在注水速率为 0.005 MPa/s , 有效正应力分别为 10

MPa、20 MPa 和 26 MPa 的条件下进行模拟,如图 2(a)~(c)所示。由图可得,临界剪应力分别为 6.1 MPa、11.8 MPa 和 15.8 MPa,这表明随着有效正应力不断提高,裂缝滑动所需的剪切力 τ_0 越大,裂缝越不容易滑动;反之,则更容易滑动。

正应力和孔隙压力的变化对有效应力的影响如图 2(f)所示,在阶段(I)时,正应力的变化速率先低速增加后快速增大最后缓慢增加,有效应力的演化以正应力演化为主,该阶段正应力的增加速率远大于孔隙压力的增加速率,有效应力增加速率快,在图 2(b)中的剪切位移变化呈现低速增加。阶段(II)时,正应力快速下降,有效应力变化率为负,在 S-2 试验中的剪切位移出现略微起伏变化。阶段(III)时,随着流体在裂缝的扩散作用,正应力进一步下降,裂缝的孔隙压力增加,此时,裂缝的孔隙压力变化率高于正应力的变化率,有效应力变化率变为负值,裂缝的有效应力迅速下降。如图 2(b)所示,裂缝处的剪切位移持续增加,在 400 秒之后,位移近似呈线性增长。

3.3. 黏度对裂缝失稳滑动的影响

图 S-1 与 T-1 展示了黏度对裂缝失稳滑动的应力与位移演化结果,随着压裂液黏度升高 10 倍,剪切应力临界值基本不变,由此表明裂缝的失稳滑动由剪切应力是否达到临界值所控制,与压裂液的黏度无关。如图 S-1 与 T-1 相比,高黏度流体导致更大的滑动位移量,剪切位移增大了约 30%,这是由于裂缝失稳滑动遵循有效应力原理,流体注入主要通过提高孔隙压力来降低有效正应力,高黏度的流体在裂缝中流动时阻力更大,导致流体压力增大,使裂缝断面上有更高的孔隙压力,降低该结构面的强度,促使剪切位移增大。高黏度流体会制约流体扩散,从而形成局部超压,此过程不仅加剧裂缝的不稳定滑动,还可能弱化裂缝激活滑动机制,如图 2(g)所示。由此表明压裂液黏度是控制裂缝失稳滑动的一个重要因素。

4. 结论

本文通过 UDEC 数值模拟,分析水力压裂过程中流体注入速率、地应力和流体粘度对光滑裂缝失稳滑动行为的影响,结论如下:

- 1) 压裂液增压速率是控制裂缝滑动模式的关键因素。较高的压裂液注入速率会促使裂缝发生黏滑运动,压裂液低速注入使裂缝维持稳定的蠕滑状态,降低压裂液注入速率虽不能完全阻止滑动发生,但可推迟启动时间并减小滑移量。
- 2) 随着有效正应力的增大,裂缝滑动所需的临界剪应力显著提高,裂缝更难以被激活。因此,高地应力条件下的裂缝稳定性更高。
- 3) 尽管压裂液黏度对裂缝失稳滑动的起始条件影响不显著,但是高黏度压裂液限制流体扩散,增强局部超压,可能促进裂缝不稳定滑动,弱化裂缝激活机制,加剧裂缝滑移量。

参考文献

- [1] Tran, M. and Jha, B. (2021) Effect of Poroelastic Coupling and Fracture Dynamics on Solute Transport and Geomechanical Stability. *Water Resources Research*, 57, e2021WR029584. <https://doi.org/10.1029/2021wr029584>
- [2] Zhao, X. and Jha, B. (2022) Diagnostic and Predictive Analysis of Production and Injection-Induced Fault Activation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 46, 392-415. <https://doi.org/10.1002/nag.3304>
- [3] Dana, S., Zhao, X. and Jha, B. (2022) A Two-Grid Simulation Framework for Fast Monitoring of Fault Stability and Ground Deformation in Multiphase Geomechanics. *Journal of Computational Physics*, 466, Article 111405. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2022.111405>
- [4] Kim, K., Ree, J., Kim, Y., Kim, S., Kang, S.Y. and Seo, W. (2018) Assessing Whether the 2017 M_w 5.4 Pohang Earthquake in South Korea Was an Induced Event. *Science*, 360, 1007-1009. <https://doi.org/10.1126/science.aat6081>

- [5] Bao, X. and Eaton, D.W. (2016) Fault Activation by Hydraulic Fracturing in Western Canada. *Science*, **354**, 1406-1409. <https://doi.org/10.1126/science.aag2583>
- [6] Woo, J.-U., Kim, M., Sheen, D.-H., Kang, T., Rhie, J., Grigoli, F., *et al.* (2019) An In-Depth Seismological Analysis Revealing a Causal Link between the 2017 M_w 5.5 Pohang Earthquake and EGS Project. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **124**, 13060-13078. <https://doi.org/10.1029/2019jb018368>
- [7] Grigoli, F., Cesca, S., Rinaldi, A.P., Manconi, A., López-Comino, J.A., Clinton, J.F., *et al.* (2018) The November 2017 M_w 5.5 Pohang Earthquake: A Possible Case of Induced Seismicity in South Korea. *Science*, **360**, 1003-1006. <https://doi.org/10.1126/science.aat2010>
- [8] 雷兴林, 苏金蓉, 王志伟. 四川盆地南部持续增长的地震活动及其与工业注水活动的关联[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(11): 1505-1532+1-8.
- [9] Kolawole, F., Johnston, C.S., Morgan, C.B., Chang, J.C., Marfurt, K.J., Lockner, D.A., *et al.* (2019) The Susceptibility of Oklahoma's Basement to Seismic Reactivation. *Nature Geoscience*, **12**, 839-844. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0440-5>
- [10] Ellsworth, W.L. (2013) Injection-Induced Earthquakes. *Science*, **341**, Article 1225942. <https://doi.org/10.1126/science.1225942>
- [11] Dempsey, D. and Riffault, J. (2019) Response of Induced Seismicity to Injection Rate Reduction: Models of Delay, Decay, Quiescence, Recovery, and Oklahoma. *Water Resources Research*, **55**, 656-681. <https://doi.org/10.1029/2018wr023587>
- [12] Langenbruch, C. and Zoback, M.D. (2016) How Will Induced Seismicity in Oklahoma Respond to Decreased Saltwater Injection Rates? *Science Advances*, **2**, e1601542. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601542>
- [13] Barbour, A.J., Norbeck, J.H. and Rubinstein, J.L. (2017) The Effects of Varying Injection Rates in Osage County, Oklahoma, on the 2016 M_w 5.8 Pawnee Earthquake. *Seismological Research Letters*, **88**, 1040-1053. <https://doi.org/10.1785/0220170003>
- [14] Chang, K.W., Yoon, H. and Martinez, M.J. (2018) Seismicity Rate Surge on Faults after Shut-In: Poroelastic Response to Fluid Injection. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **108**, 1889-1904. <https://doi.org/10.1785/0120180054>
- [15] Rudnicki, J.W. and Zhan, Y. (2020) Effect of Pressure Rate on Rate and State Frictional Slip. *Geophysical Research Letters*, **47**, e2020GL089426. <https://doi.org/10.1029/2020gl089426>
- [16] Sun, Z., Che, M., Zhu, L., Zhang, S., Lu, J. and Jin, C. (2024) Implications for Fault Reactivation and Seismicity Induced by Hydraulic Fracturing. *Petroleum Science*, **21**, 1081-1098. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.11.022>
- [17] Passelègue, F.X., Brantut, N. and Mitchell, T.M. (2018) Fault Reactivation by Fluid Injection: Controls from Stress State and Injection Rate. *Geophysical Research Letters*, **45**, 12,837-12,846. <https://doi.org/10.1029/2018gl080470>
- [18] Cebry, S.B.L., Ke, C.-Y. and McLaskey, G.C. (2022) The Role of Background Stress State in Fluid-Induced Aseismic Slip and Dynamic Rupture on a 3-m Laboratory Fault. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **127**, e2022JB024371. <https://doi.org/10.1029/2022jb024371>
- [19] Cornelio, C., Passelègue, F.X., Spagnuolo, E., Di Toro, G. and Violay, M. (2020) Effect of Fluid Viscosity on Fault Reactivation and Coseismic Weakening. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **125**, e2019JB018883. <https://doi.org/10.1029/2019jb018883>
- [20] Jiang, R., Duan, K., Ji, Y., Zhang, Q., Wang, L. and Zheng, Y. (2025) Impact of Injection Rate on Smooth and Rough Fracture Activation in Granite: Laboratory-Scale Acoustic Emission Analysis. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **17**, 2133-2145. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.08.011>
- [21] Butt, A., Hedayat, A. and Moradian, O. (2023) Energy Budgeting of Laboratory Hydraulic Fracturing in Granite with Different Viscosity Injection Fluids. *57th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, Atlanta, 25-28 June 2023, ARMA-2023-0751. <https://doi.org/10.56952/arma-2023-0751>
- [22] 张致伟, 孙小龙. 四川长宁地区注水诱发地震的孔隙压力扩散特征[J]. 国际地震动态, 2018(8): 132-133.