

干热花岗岩压裂裂缝剪切滑移数值模拟研究

徐志鹏^{1,2}, 盛茂^{1,2*}

1.石油工程学院, 中国石油大学(北京), 北京

2.油气资源与探测国家重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京

* 通讯作者, shengmao@cup.edu.cn

前言

干热岩(简称 HDR)是一种不含水或蒸汽的热岩体, 温度 150℃以上, 其中蕴含着巨大的地热资源, 可用于发电和热水利用^[1]。据中国地质调查局数据^[2], 我国埋深在 3-10 km 的干热岩资源量折合 856 亿吨标准煤, 是 2016 年全国能源消费总量(43.6 亿吨标准煤)的 20 万倍, 资源量巨大。干热岩岩性致密且天然裂缝发育, 但裂缝连通性差, 自然状态下很难获取具有经济价值的热能^[3]。要达到干热岩地热能的经济高效开采, 压裂改造是目前首选的增产措施。

干热岩压裂增产机理不同于常规油气压裂, 能否充分激活天然裂缝、剪切滑移成网、提高储层连通性是获得良好改造效果的关键。干热岩压裂时监测到的微地震事件, 被解释为天然裂缝的剪切滑移, 验证了天然裂缝对干热岩裂缝系统起决定性作用^[4]。Jung (2013)^[5]提出翼状裂缝概念, 即天然裂缝错动一定程度后会在裂缝的两端沿一定倾角扩展, 然后沟通其他天然裂缝。Mcclure and Horne (2012)^[6]对张开型和剪切型两种裂缝扩展模式的缝间流体压力临界值进行了研究。Mcclure and Horne (2013)^[7]总结前人成果提出四种裂缝扩展模式: 纯剪切型, 纯张开型, 混合型和主裂缝尖端滤失型。Ghassemi 等 (2016)^[8]用理论分析和数值模拟, 研究储层的热-孔隙弹性效应对渗透率和地震活动(岩石破裂)的影响。结果表明: 注入流体的水压作用和热应力作用使裂缝面正应力产生显著变化。随后, Bauer 与 Ghassemi 等(2016)^[9]搭建了干热岩注采换热室内模拟实验装置, 结果表明, 裂缝剪切滑移量受到注水压力、孔隙压力、岩石应力差和注入水与热储的温度差等因素影响, 其中, 热应力会促进裂缝剪切滑移。在此基础上, Zhi Ye 等人(2017)^[10]实验研究了干热岩天然裂缝剪切滑移量与渗透率增加量的关系, 研究发现定正应力条件下, 当裂缝剪切速率为 10^{-3} m/s 时, 裂缝渗透率提高了 3 个数量级, 裂缝剪切增渗效果显著。综上可知, 前人针对干热岩压裂裂缝剪切机理开展了大量理论和实验研究, 但是均为热储尺度, 未深入讨论单条裂缝的剪切滑移规律及其影响因素。

本文以干热花岗岩为研究对象, 基于 COMSOL 多物理场计算平台, 建立考虑热-流-固耦合作用的干热岩天然裂缝剪切滑移模型, 得到了裂缝剪切滑移过程中加速度、速度、位移等因素随滑移距离的变化规律, 揭示了法向加载路径、切向载荷、缝面摩擦系数等因素对极限滑移距离的影响规律。研究结果有望深入认识干热岩压裂增产机理。

1. 考虑温度应力的裂缝剪切滑移模型

1.1 物理模型

干热岩压裂通常保持注入压力低于最小水平主应力, 裂缝在缝内水压力作用下, 缝面有效正压力先减后增, 裂缝滑移速度先增后减。将花岗岩剪切滑移简化为平面应力问题, 且不考虑体积力, 岩石为线弹性材料。

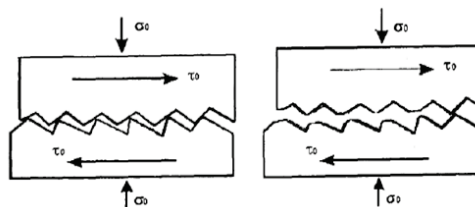


图 1 花岗岩剪切滑移过程示意图
Fig. 1 Schematic diagram of hydro-shearing process

1.2 材料属性

花岗岩杨氏模量 10~85GPa (模拟不同硬度岩石), 泊松比 0.3, 密度 2800kg/m^3 。上盘岩石的体积为 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 50\text{mm}$, 导热系数 $2.9\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 热膨胀系数 $7 \times 10^{-6}\text{K}^{-1}$ 。

1.3 初始条件和边界条件

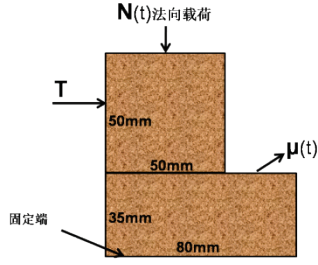


图2 几何模型
Fig. 2 Geometric model

图2为建立的几何模型。考虑裂缝面有效正压力先减后增，将上盘法向载荷设置为随时间变化的压力 $N(t)$ 。为模拟裂缝剪切滑移的切向力，在上盘岩石左侧施加大小恒定的切向力 T 。下盘岩石为 $80\text{mm} \times 35\text{mm}$ 的矩形，底部位移全约束。裂缝面摩擦系数为随时间变化的函数 $\mu(t)$ 。

以二次型法向载荷加载路径为例，设法向载荷 $N(t)$ 为二次型函数：

$$N(t) = at^2 + bt + c \quad (1)$$

上盘岩石在水平方向受到切向力 T （动力）以及摩擦力 $N(t)$ ，则上盘岩石的加速度为

$$a = \frac{T - \mu N(t)}{m} \quad (2)$$

加速度 a 对时间 t 积分得到上部岩石的滑动速度 v ， v 对时间 t 积分得到上部岩石的位移 s

$$v = \int a dt \quad (3)$$

$$s = \int v dt \quad (4)$$

公式(1)到(4)联立得到控制方程：

$$\begin{cases} N(t) = at^2 + bt + c \\ a = \frac{T - \mu N(t)}{m} \\ v = \int a dt \\ s = \int v dt \end{cases} \quad (5)$$

除了控制方程以外，数值模拟中还有约束条件。约束1) 由于上盘岩石右边界到下盘岩石右边界的距离只有 0.03m ，所以上部岩石的移动距离应小于 0.03m ，由此可得

$$\int_0^{t_1} v dt < 0.03 \quad (6)$$

约束2) 为使上盘岩石剪切滑移，在法向载荷为最小值时，切向力应大于摩擦阻力，即

$$T > \mu N \left(-\frac{b}{2a} \right) \quad (7)$$

约束3) 零时刻上盘岩石速度为零， $t=t_1$ 时刻上盘岩石停止滑动，速度也为零。为了保证法向

载荷 $N(t) = at^2 + bt + c$ 是先减小后增大的， a 应该 >0 ，同时 $-\frac{b}{2a}$ 也应该大于 0 。由此约束条件总结为

$$\begin{cases} \int_0^{t_1} v dt < 0.03 \\ T > \mu N \left(-\frac{b}{2a} \right) \\ v|_{t=0} = 0 \\ v|_{t=t_1} = 0 \\ a > 0 \\ -\frac{b}{2a} > 0 \end{cases} \quad (8)$$

设干热岩原始温度为 200°C ，下盘岩石上表面和上盘岩石下表面设为热通量边界，换热系数为强制对流，缝内流体温度 20°C 。其他模型参数如表1所示。

表1 裂缝剪切滑移特性数值模拟研究方案
Table 1 Numerical simulation study on shear slip characteristics of fracture

(a)材料属性

杨氏模量 (MPa)	泊松比 (1)	密度 (kg/m^3)
10	0.3	2800
35	0.3	2800
60	0.3	2800
85	0.3	2800

(b)法向载荷加载路径

法向载荷 (N)	切向载荷 (N)	摩擦系数 (1)
$6t^2 - 6t + 16$	3	$0.004t + 0.2$
$\ln(t+1) + 15$		
$(0 < t < 0.5)$	3	$0.004t + 0.2$
$\ln(t+1) + 14.2$		
$(0.5 < t < 1)$		

(c)切向载荷

法向载荷 (N)	切向载荷 (N)	摩擦系数 (1)
$6t^2 - 6t + 16$	3	$0.004t + 0.2$
$6t^2 - 6t + 16$	3.5	$0.004t + 0.2$
$6t^2 - 6t + 16$	4	$0.004t + 0.2$

(d)摩擦系数

法向载荷 (N)	切向载荷 (N)	摩擦系数 (1)
$6t^2-6t+16$	3	$-0.004t+0.2$
$6t^2-6t+16$	3	$0.004t+0.2$
$6t^2-6t+16$	3	$0.004t+0.1$

2.结果与分析

2.1 温度对裂缝剪切滑移的影响

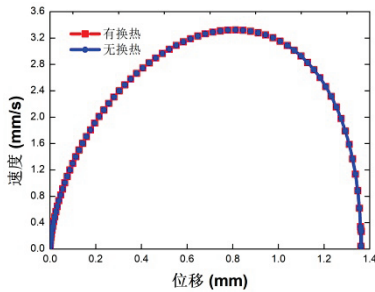


图3 换热对速度-位移曲线影响

Fig. 3 Effect of heat transfer on velocity and displacement curve

图3对比分析考虑流体与岩石换热和不考虑二者换热条件下的裂缝剪切滑移位移与滑移速度的关系。由此可知,在短时间换热条件下(本文换热时间仅1s),岩石与压裂流体间的温差热应力对裂缝剪切滑移过程未见明显影响。

2.2 裂缝剪切滑移加速度变化

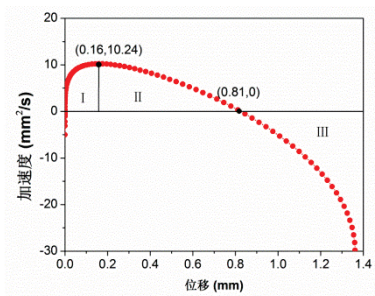


图4 加速度与位移关系曲线

Fig. 4 Acceleration and displacement curve

图4为裂缝剪切滑移过程加速度变化规律,其曲线可划分为I, II, III三个区间。I区:位移从0mm到0.16mm,裂缝剪切滑移加速度逐渐增大,但是加速度梯度逐渐减小。II区:位移从0.16mm到0.81mm,加速度一直减小,但仍为正值,加速度梯度较为平缓。这是因为法向载荷开始增大,使摩擦阻力逐渐增大。但此时切向力仍

可以克服摩擦阻力推动试件运动。在0.81mm处试件的加速度减小到0。III区:随着法向载荷的进一步增大,摩擦力也进一步增大,切向力自0.81mm开始小于摩擦阻力,此时加速度变为负值,且减小的趋势越来越明显,最后加速度达到反向最大值-294mm²/s。

2.3 裂缝剪切滑移速度变化

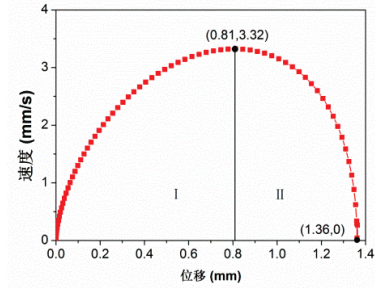


图5 速度与位移关系曲线

Fig. 5 Velocity and displacement curve

图5可知,裂缝剪切滑移速度变化曲线可划分为I区和II区。I区:位移从0mm到0.81mm,随滑动距离增加,滑移速度逐渐增大,但是速度梯度逐渐降低,最终增加至极值3.32mm/s。位移0.81mm处切向力正好等于摩擦阻力,因此速度曲线的切线斜率为0。II区:位移从0.81mm到1.36mm,随滑动距离增加,滑移速度逐渐下降,最终停止在1.36mm处。速度下降是因为在II区法向载荷的增加使得缝面摩擦力大于切向力。速度达到最大值时的位移0.8mm并不在整个运动过程位移(1.36mm)的中央,而是在其右侧,说明这裂缝剪切滑移加速过程比减速过程要缓慢。

2.4 裂缝剪切滑移位移变化

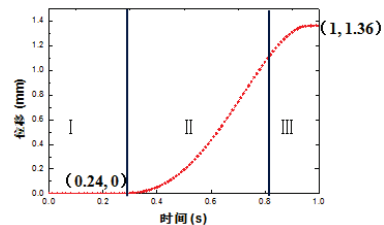


图6 位移与时间关系曲线

Fig. 6 Displacement and time curve

如图6所示,将位移与时间关系曲线划分为I, II, III三个区间。I区:从0s到0.24s,裂

缝滑移位始终为零，说明初始切向力未克服裂缝面静摩擦力。随着法向载荷的降低，直到 0.24 s，裂缝开始滑移。II区：从 0.24 s 到 0.81 s，法向载荷进一步减小，使得切向力大于缝面摩擦力，位移迅速增加。之后法向载荷转而增大，使得曲线斜率没有进一步增大。III区：法向载荷进一步增大，摩擦力大于切向力，位移增长趋势逐渐变缓至平稳，即最终停止在极限位移距离 1.36 mm。

2.5 裂缝剪切滑移中摩擦力变化

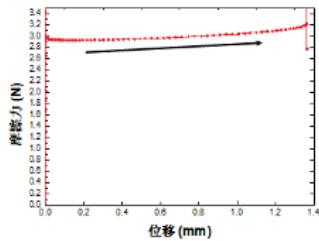


图 7 摩擦力与位移关系曲线
Fig.7 Friction and displacement curve

图 6 可知，随着滑动距离的增加，摩擦力在缓慢增加。整个过程法向载荷变化 9.84%，而摩擦力增加了 6.4%，基本稳定在 2.9~3.3 N 这个区间。法向载荷变化是二次型变化，是一个对称的先减小后增大过程，然而缝面摩擦力增长缓慢，表明法向载荷对摩擦力的影响不明显。

3. 极限滑移距离敏感性分析

3.1 弹性模量

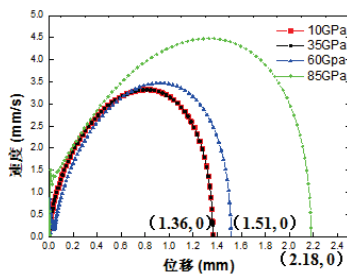


图 8 不同材料属性下速度与位移关系曲线
Fig. 8 The velocity and displacement curve under different material properties

由图 8 可知，杨氏模量为 10 GPa 和 35 GPa 时，极限滑移距离基本一致，其整个运动过程也基本一致，最大运动速度为 3.32 mm/s，极限滑移距离为 1.36 mm。当杨氏模量为 60 GPa 时，其极限滑移距离增大，达 1.51 mm，且运动过程中的最大运动速度也增大，达 3.47 mm/s。当杨氏模量

为 85 GPa 时，极限滑移距离和最大运动速度持续提高，分别为 2.18 mm 和 4.48 mm/s。由此可见，材料属性不同，极限滑移距离也不同，但是由于 10 GPa 和 35 GPa 这两条几乎重合的曲线的存在，极限滑移距离与杨氏模量之间并不是一种线性或者同增同减的关系，存在临界杨氏模量值。

3.2 法向加载路径

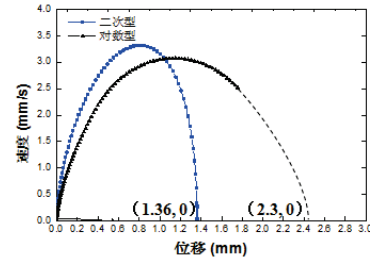


图 9 不同法向加载路径下速度与位移曲线
Fig. 9 The velocity and displacement curve under different normal loading paths

对比了两种不同法向加载路径（二次型和对数型）。二次型和对数型的加载峰值基本接近，但是它们作用下的裂缝剪切滑移过程有所不同：对于二次型，裂缝剪切滑移速度上升较快，速度极值较高，但是下降同样更迅速，裂缝极限滑移距离为 1.36 mm。而对于对数型，裂缝剪切滑移速度上升慢下降也慢，裂缝极限滑移距离更远，为 2.3 mm。结果表明，为有效控制裂缝面极限滑移距离，可通过调节裂缝面加载路径得以实现。

3.3 切向载荷

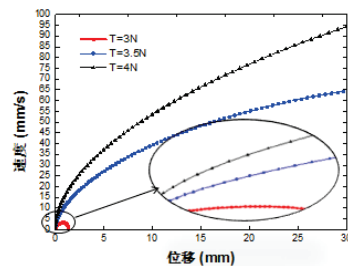


图 10 不同切向载荷下的速度与位移关系曲线
Fig. 10 The velocity and displacement curve under different tangential loads

图 10 可知，裂缝极限滑移距离受切向载荷影响较大。切向载荷越大，极限滑移距离越大。尽管切向载荷差异较小，仅为 0.5 N，但是极限滑移

距离则相应增加了 80 mm~90 mm。因此为增加裂缝极限滑移距离，应尽量增大切向载荷。

3.4 摩擦系数

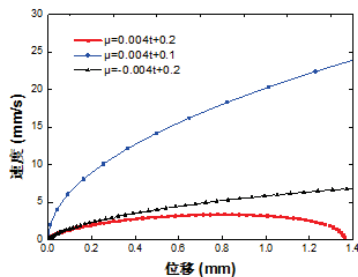


图 11 不同摩擦系数下的速度与位移关系曲线

Fig. 11 The speed and displacement under different friction coefficients

图 11 可知，摩擦系数越小，极限滑移距离越大；正摩擦增长率模式（摩擦系数逐渐增加）比负摩擦增长率模式（摩擦系数逐渐减小）的极限滑移距离小。

结论

以干热花岗岩为研究对象，基于 COMSOL 多物理场计算平台，建立考虑热-流-固耦合作用的干热岩天然裂缝剪切滑移模型，数值模拟研究了杨氏模量、切向载荷、法向加载路径和摩擦系数等主要因素影响下的裂缝剪切滑移特性。结果表明，裂缝极限滑移距离受岩石杨氏模量、裂缝面摩擦系数、裂缝法向载荷的加载路径等因素影响较大。岩石杨氏模量存在临界值，大于该临界值时，杨氏模量越大，其他参数相同条件下极限滑移距离越大；裂缝法向加载路径可控裂缝面极限滑动距离。研究结果助于深入认识干热岩压裂增产机理。

参考文献

1. Potter R, Robinson E, Smith M. *Method of extracting heat from dry geothermal reservoirs*. USA. Los Alamos, New Mexico: US Patent No. 3,786,858. (1974).
2. 国家发展和改革委员会, 国家能源局, 国土资源部. *地热能开发利用“十三五”规划*. (2017).
3. Genter A, Evans K, Cuenot N, Fritsch D, Sanjuan B. Contribution of the exploration of deep crystalline fractured reservoir of Soultz to the knowledge of enhanced geothermal systems (EGS). *Comptes Rendus Geoscience*, **342(7-8)**: 502-516.(2010).

4. Evans, K. F. Does significant aseismic slip occur on fractures in HDR systems under stimulation conditions. *Draft proceedings, 4th, HDR forum.*(1998).
5. Jung, R. *Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing*.96-121. (2013).
6. McClure, M. W., & Horne, R. N. Opening mode stimulation or shear stimulation. *Geothermal Resources Council Transactions*, **36**, 515-522. (2012).
7. McClure, M. W., & Horne, R. N. Conditions required for shear stimulation in EGS. *European Geothermal Conference 2013*. (2013).
8. Ghassemi A, Tao Q. Thermo-poroelastic effects on reservoir seismicity and permeability change. *Geothermics*, 210-224. (2016).
9. Bauer S, Huang K, Chen Q, Ghassemi A, Barrow P. Laboratory and Numerical Evaluation of EGS Shear Stimulation . *proceedings of 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University, Stanford, California. (2016).
10. Ye Z, Janis M, Ghassemi A, Bauer S. Experimental Investigation of Injection-driven Shear Slip and Permeability Evolution in Granite for EGS Stimulation . *Proceedings of 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University, Stanford, California. (2017).

致谢

本文得到国家自然科学基金青年基金项目 (No.51704308) 和中国石油大学 (北京) 青年拔尖人才科研启动基金 (No. 2463014YJRC048) 项目的支持。