

水岩反应蚀变矿物对模拟花岗岩断层泥 摩擦系数与速度依赖性的影响*

马泽强¹, 刘金锋^{1,2,3}, 范财源¹

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 珠海 519082
2. 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广东 珠海 519082
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082

摘要: 地热开采过程中水岩反应生成的蚀变矿物可能会影响储层断层的摩擦特性, 进而诱发不稳定滑动。本文以深圳东北部潜在地热储层的断裂构造为背景, 考虑了埋深约 2.5 km、温度约 150 °C 的储层条件及横岗-罗湖断裂带, 估算得出流体注入导致断层滑动的临界孔隙流体压力(约 50 MPa)及临界有效正应力(约 20 MPa)。热力学计算表明, 在临界流体压力及地热温度下, 高产热燕山期花岗岩粉末与水反应在平衡状态下生成的蚀变矿物为: 二氧化硅、高岭石和绿泥石, 质量比为 16:7:2。基于此, 本文在室温、恒定含水率(10%)及恒定有效正应力(20 MPa)条件下, 通过 19 个速度阶跃直剪试验, 研究了 3 种蚀变矿物单独作用及其共同作用下对模拟花岗岩断层泥的摩擦系数及其速度依赖性的影响, 并结合声发射及微观特征分析了其控制机理。试验结果表明: 天然花岗岩粉末的摩擦系数为 0.64, 表现为速度弱化。单种蚀变矿物作用下, 二氧化硅对模拟花岗岩断层泥的摩擦系数影响不显著, 但能增强断层泥速度弱化特性, 甚至引发黏滑; 相反, 黏土矿物(高岭石和绿泥石)可以显著降低断层泥的摩擦系数, 并起速度强化的作用。3 种蚀变矿物共同作用下, 黏土矿物起主控作用: 降低断层泥的摩擦系数, 并起速度强化的作用。微观结构分析发现, 相比于 3 种蚀变矿物总含量为 33% 的变形样品, 总含量为 67% 的变形样品未观察到明显的剪切带且累计声发射事件数显著下降, 暗示其变形可能从脆性转变为半塑性。如果在深圳东北部地热储层进行地热开采, 应当控制流体注入压力避免断层滑动。

关键词: 地热开采; 摩擦特性; 水岩反应; 蚀变矿物

中图分类号: TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2024)05-0013-15

Effect of water-rock reaction altered minerals on friction coefficient and velocity dependence of simulated granite fault gouges

MA Zeqiang¹, LIU Jinfeng^{1,2,3}, FAN Caiyuan¹

1. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
2. Guangdong Provincial Key Lab of Geodynamics and Geohazards, Zhuhai 519082, China
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory(Zhuhai), Zhuhai 519082, China

Abstract: Altered minerals introduced by water-rock reactions during geothermal energy recovery may play a role in the frictional properties of fault gouges, perhaps inducing earthquakes. Based on the

* 收稿日期: 2024-04-01 录用日期: 2024-04-26 网络首发日期: 2024-07-02

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2021A1515012202);
国家自然科学基金(42293350, 42293354)

作者简介: 马泽强(1999年生), 男; 研究方向: 断层泥摩擦; E-mail: mazq7@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 刘金锋(1985年生), 男; 研究方向: 高温高压岩石力学;
E-mail: liujinf5@mail.sysu.edu.cn



ZR20240094

geological conditions of potential geothermal reservoirs in northeastern Shenzhen, this paper considers the critical pore pressure (about 50 MPa) and critical effective normal stress (about 20 MPa), which may lead to reactivation of the Henggang-Luohu fault zone due to fluid injection into a potential geothermal reservoir at a buried depth of about 2.5 km with the temperature of 150 °C. Under such hydrothermal conditions (50 MPa fluid pressure and 150 °C), thermodynamic calculations suggest that the reaction of Yanshanian granular granite and water, at equilibrium, can produce silica, kaolinite, and chlorite at a mass ratio of 16: 7: 2. Here we report 19 direct shear experiments performed on simulated fault gouges consisting of the binary mixture of silica + granite, kaolinite + granite, and chlorite + granite, and the multivariate mixture of silica + kaolinite + chlorite + granite, to investigate the effects of altered minerals on frictional properties of simulated granite fault gouges. Velocity stepping experiments were conducted on the wet samples with 10% water content at an initial normal stress of 20 MPa under drained conditions at room temperature. On this basis and together with acoustic emission observation and microstructural analysis, we discussed the likely mechanism responsible for the observed behavior. The results show that, for the presence of a single altered mineral, silica has little effect on the friction coefficient, though it contributes to velocity weakening and even stick-slip events. Whereas, clay minerals can significantly decrease the friction coefficient, though they have a contribution to velocity strengthening. For the presence of a mixture of silica + kaolinite + chlorite, clay minerals play a dominant role in controlling frictional properties of the simulated fault gouges: altered minerals can also significantly decrease the friction coefficient and contribute to velocity strengthening. Development of R1 shear planes was observed using microstructural analysis for the simulated granite fault gouges consisting of 0% or 33% of the altered minerals, while the R1 shear plane cannot be observed anymore in the sample consisting of 67% of the altered minerals. The number of acoustic emission events decreases significantly when the content of the altered minerals is 33%~67%. This may indicate a transition in the deformation mechanism from brittle to semi-plastic. Our study suggests that if geothermal energy recovery is carried out in northeastern Shenzhen, the fluid injection pressure should be controlled to avoid the slip of the fault.

Key words: geothermal mining; friction characteristics; water-rock reaction; alteration minerals

地热能是一种可再生绿色能源, 具有重要的开采利用价值。广东地热资源丰富、开采潜力大, 干热岩型地热能开采是当前地热能开发的重要方向。粤港澳大湾区位于广东中南部, 部分地区为地热资源赋存相对高值区, 干热岩地热资源丰富, 其中深圳东北部更是具有显著的干热岩开采价值(谢和平等, 2019)。但同时, 深圳东北部存在横岗-罗湖断裂带, 为莲花山断裂带的分支, 目前仍不明确地热开采是否会影响断层的稳定性, 进而诱发地震(于成华等, 2010)。增强型地热系统(EGS工程)是一种有效开采高温地热资源的人工地热系统, 国外许多典型的增强型地热系统在开采过程中发生了地震事件, 部分地震事件发生的原因在于长期的地热开采会造成水与储层(花岗岩)发生复杂的水岩化学反应, 会生成绿帘石、石英、绿泥石、蒙脱石和高岭石等蚀变矿物, 这会改变断

层带的矿物组成, 而断层带矿物组成能够显著影响断层泥的摩擦系数和速度依赖性(Ait-Epping et al., 2013; Westaway et al., 2019)。因此, 理解蚀变矿物种类和含量对断层泥摩擦系数及其速度依赖性的影响, 对合理评价长期地热开采是否会诱发地震具有重要指示意义。

增强型地热系统开采时需要向地热储层注入流体, 当注入的流体压力大于断层临界孔隙压力时, 断层就会被重新激活(刘贺娟等, 2022)。根据Jaeger et al.(2007)提出的断层活化判别模型, 临界孔隙压力的大小与断层的摩擦系数有关, 当断层的摩擦系数降低时, 临界孔隙压力也会降低, 此时注入的流体压力如果大于临界孔隙压力, 断层可能被激活。前人的研究表明, 在水热条件下, 蚀变矿物绿帘石(150 °C、有效正应力 68 MPa)对花岗岩断层泥的摩擦系数影响不大, 但少

量的蚀变黏土矿物能够显著降低断层的摩擦系数, 如10%含量的绿泥石能够使断层泥的摩擦系数下降10%~15%, 且绿泥石的摩擦系数随着温度的升高呈上升趋势, 从23 °C的约0.25上升至600 °C的约0.35(Okamoto et al., 2019; An et al., 2021, 2022)。蚀变黏土矿物能够显著降低断层的摩擦系数, 可能导致断层被激活, 发生剪切滑移。

断层发生剪切滑移后, 断层摩擦系数的速度依赖性判断断层是否稳定滑动的重要因素之一(Ruina, 1983)。前人研究发现矿物的种类及含量对断层泥摩擦系数的速度依赖性起到较为重要的作用。例如, 绿帘石和石英能够增强花岗岩断层泥速度弱化的特性, An et al. (2021)在韩国浦项地热井原位花岗岩裂隙中发现了蚀变矿物绿帘石, 在150 °C、68 MPa有效正应力条件下, 当绿帘石含量超过25%后, 会由速度强化转变为速度弱化, 可能会促进断层发生不稳定滑动; 在200 °C、有效正应力100 MPa试验条件下, 石英能够起增强断层泥速度弱化的作用, 甚至能够引发黏滑, 而黏滑被认为是浅层地震的诱发机制(Moore et al., 2011; Ashman et al., 2023)。相反, 在相似温压条件下, 黏土矿物(绿泥石、蒙脱石和高岭石等)却有利于增强断层的速度强化(Takahashi et al., 2007; An et al., 2021; Ashman et al., 2023), 同时黏土矿物的速度依赖性表现出对温度的依赖性, 例如在180 MPa有效正应力、23~600 °C条件下, 绿泥石的速度依赖性参数($a-b$)随着温度的升高呈先降低后升高的趋势, 最低值出现在200~300 °C, 在这个温度下可能表现为速度弱化的摩擦滑动行为(Okamoto et al., 2019)。目前, 多种蚀变矿物对断层泥速度依赖性的耦合影响尚不明确, 且Blanpied et al. (1991, 1995)试验结果显示花岗岩断层泥在100~350 °C温度下会出现速度弱化的摩擦滑动行为, 如果多种蚀变矿物的耦合作用会增强花岗岩断层泥速度弱化的特性, 当断层发生滑动, 有可能会促进断层发生不稳定滑动, 从而诱发地震。

综上, 大多数学者关注的是单种蚀变矿物对断层泥摩擦系数和速度依赖性的影响, 而地热储层位置断层由于地热开采抽水过程发生水岩反应会生成多种蚀变矿物, 多种蚀变矿物对花岗岩断层泥摩擦系数和速度依赖性的耦合影响仍不明确, 是否会导致断层不稳定滑动从而诱发地震值得关注。因此, 本文将专注于水岩反应蚀变矿物本身的作用, 研究单一蚀变矿物作用和多种蚀变

矿物共同作用对花岗岩断层泥摩擦系数和速度依赖性的影响及其可能机制, 并探讨了如果在深圳东北部潜在地热储层进行地热开采时, 蚀变矿物对横岗-罗湖断裂带滑动稳定性的影响, 进而提出地热开采时需要注意的问题。

1 试验方法与样品

1.1 试验条件

本文根据深圳东北部储层的地质背景, 设置试验的有效正应力及水岩反应的温压条件。深圳东北部尚未进行大规模的地热勘察, 缺乏地应力数据, 本文选用同构造区的惠州地热田地应力的实测数据及数值模拟结果(曾凡蛟, 2013; 李彬, 2022), 推算深圳东北部横岗-罗湖断裂带断层的最大主应力(σ_1)、最小主应力(σ_3)和正应力(σ)随埋深(H)的变化关系

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= 0.0334H + 0.495, \\ \sigma_3 &= 0.0248H - 1.540,\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}\sigma &= (-0.0043H - 1.0175)\cos 2\theta + 0.0291H - 0.5225 \\ &= \begin{cases} 0.0276H - 0.871, & \theta = 35^\circ \\ 0.03125H - 0.01375, & \theta = 60^\circ \end{cases}\end{aligned}\quad (2)$$

式中 θ 为断层倾角, 结果见图1。

根据谢和平等(2019)在深圳地热实测井数据及其估算结果, 2~3 km花岗岩储层的温度为84~150 °C, 为干热岩型地热类型。在埋深为2.5 km处, 作用在断层的正应力 $\sigma=68.1\sim 78.1$ MPa(图1)。断层是否发生剪切滑移可以用断层最大和最小有效应力 σ'_1 和 σ'_3 的比值来判别,

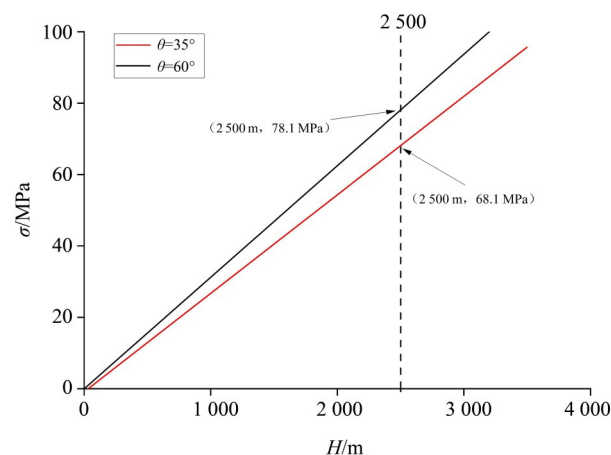


图1 断层上的正应力(σ)随埋深(H)的关系
Fig. 1 The relationship between normal stress on fault with buried depth

$$\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} = \frac{\sigma_1 - P}{\sigma_3 - P} = K_\mu = \left[\sqrt{(1 + \mu^2)} + \mu \right]^2 \quad (3)$$

式中 K_μ 为滑移摩擦指标, P 为临界孔隙压力。当比值小于 K_μ 时, 断层处于稳定状态(刘贺娟, 2022; Jaeger et al., 2007); 而当比值等于 K_μ 时, 断层处于临界状态。

由公式(1)得到 $H=2.5$ km 时, $\sigma_1=84$ MPa, $\sigma_3=60$ MPa, 假设花岗岩断层摩擦系数 $\mu=0.6$, 代入公式(3)得到临界孔隙压力 $P=50$ MPa。因此, 在埋深 2.5 km 处横岗-罗湖断裂带断层的临界有效正应力为 18.1~28.1 MPa。

由上, 本文以深圳东北部埋深约 2.5 km 的潜在地热储层的水岩反应温度 150 °C 和临界有效正应力 20 MPa 为背景, 制备模拟断层泥样品与设置试验条件。其思路为首先通过热力学计算获得花岗岩粉末与水(150 °C、 $P=50$ MPa)反应生成的蚀变矿物, 并按照蚀变矿物比例制备含不同蚀变矿物成分的模拟花岗岩断层泥样品。本文在室温下采

用恒定有效正应力(20 MPa), 以排除模拟断层泥摩擦特性可能存在的温度依赖性, 更好揭示蚀变矿物本身的作用。

1.2 试验样品

试验选用取自深圳的花岗岩样品, 将花岗岩研磨并过 60 目的筛网得到粒径小于 250 μm 的花岗岩粉末。本文用 The Geochemist's Workbench 软件的 React 模块, 采用滴定模式反应路径(反应保持平衡状态), 得到花岗岩粉末与水完全反应(150 °C、50 MPa)生成绿泥石(Chl)、高岭石(Kln)和二氧化硅(Sil), 其质量比 $m(\text{Sil}):m(\text{Kln}):m(\text{Chl})=16:7:2$ (图 2)。

模拟花岗岩断层泥样品(简称模拟断层泥), 由花岗岩粉末、二氧化硅(粒径 <48 μm)、绿泥石(<106 μm)和高岭石(<106 μm)矿物, 按不同配比混合制备而成; 二氧化硅、绿泥石和高岭石均为市售产品。本文制备模拟断层泥试验样品共 3 组, 其配比组成及编号见表 1。第一组, 仅含有单种蚀

表 1 断层泥的矿物组成和试验结果

Table 1 Mineral composition of fault gouges and experimental results

试验组	样号	w/%				μ	$(a-b)^{1)}$				N
		Sil	Kln	Chl	Gr		1~3	3~10	10~30	30~100	
第一组 单种矿物 作用	Kln-80	0	80	0	20	0.288	0.001 87	0.001 20	0.001 21	0.001 98	398
	Kln-60	0	60	0	40	0.330	0.001 39	0.001 30	0.001 15	0.002 05	683
	Kln-40	0	40	0	60	0.403	0.000 73	0.000 71	0.000 36	0.001 46	2 123
	Kln-30	0	30	0	70	0.464	-0.000 09	0.000 17	0.000 23	-0.000 45	3 773
	Kln-20	0	20	0	80	0.520	-0.000 46	-0.000 60	-0.000 36	-0.000 52	3 742
	Chl-80	0	0	80	20	0.299	0.001 34	0.002 54	0.005 17	0.006 44	326
	Chl-60	0	0	60	40	0.334	0.000 82	0.002 15	0.003 13	0.005 36	1 406
	Chl-40	0	0	40	60	0.397	-0.002 57	-0.000 43	0.000 63	0.003 20	1 475
	Chl-20	0	0	20	80	0.511	-0.002 14	-0.001 9	-0.001 47	0.000 11	2 521
第二组 3种蚀变矿物 共同作用	Sil-33	33	0	0	67	0.647	0.000 59	-0.000 14	-0.001 31	-0.002 07	5 408
	Sil-67	67	0	0	33	0.629	-0.001 91	-0.007 72	-0.002 73	-0.002 41	11 484
	W-33	21.1	9.2	2.7	67	0.556	-0.001 39	-0.001 43	-0.001 82	-0.000 91	7 974
	W-50	32.0	14.0	4.0	50	0.524	-0.000 33	-0.002 17	-0.001 60	-0.000 55	2 549
第三组 参照组	W-67	42.9	18.7	5.4	33	0.471	0.000 20	0.000 48	0.001 24	0.001 33	1 721
	W-100	64.0	28.0	8.0	0	0.318	0.001 06	0.001 92	0.003 22	0.003 10	685
	Sil-100	100	0	0	0	0.639	-0.007 28	-0.002 33	-0.003 82	-0.003 49	2 664
	Kln-100	0	100	0	0	0.245	0.002 46	0.002 56	0.002 31	0.001 34	871
	Chl-100	0	0	100	0	0.210	0.003 64	0.008 01	0.010 70	0.008 70	146
Gr-100	0	0	0	100	0.642	-0.000 59	-0.001 79	-0.002 26	-0.000 79	14 236	

1) $(a-b)$ 分别为剪切速度 1~3、3~10、10~30 和 30~100 $\mu\text{m/s}$ 下的速度依赖性参数。

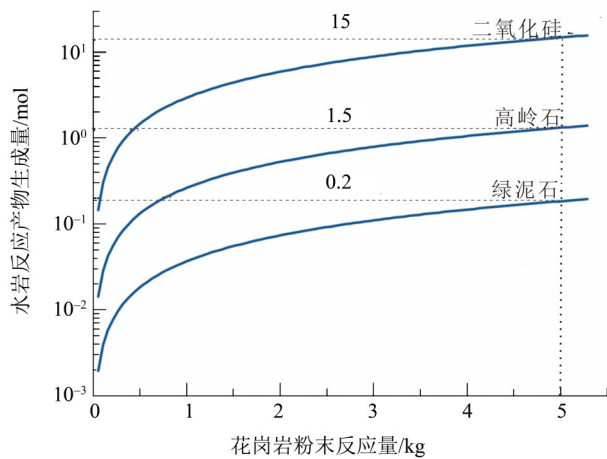


图2 在150 °C、50 MPa的温压条件下水岩反应生成的蚀变矿物种类及其含量

Fig. 2 Thermodynamic calculations showing altered minerals introduced by water-rock reaction at equilibrium under conditions of a fluid pressure of 50 MPa and 150 °C

变矿物的模拟断层泥, 样品将二氧化硅(Sil)、高岭石(Kln)或绿泥石(Chl), 分别和花岗岩粉末(Gr)混合, 制备成单种蚀变矿物质量分数 $w=20\% \sim 80\%$ 的模拟断层泥样品。比如, 样品 Kln-80 表示由 $w(\text{Kln})=80\%$ 高岭石和 $w(\text{Gr})=20\%$ 花岗岩粉末混合制成; 样品 Chl-40 由绿泥石 $w(\text{Chl})=40\%$ 、花岗岩粉末 $w(\text{Gr})=60\%$ 混合制成; 样品 Sil-67 由二氧化硅 $w(\text{Sil})=67\%$ 和花岗岩粉末 $w(\text{Gr})=33\%$ 混合制备而成。第二组为混入3种蚀变矿物的模拟断层泥: 根据水岩反应生成的蚀变矿物结果, 将 $m(\text{Sil}):m(\text{Kln}):m(\text{Chl})=16:7:2$ 的混合物与Gr粉末进行混合, 制备成断层泥样品。样品编号“W-33”代表由3种蚀变矿物混合物 $w=33\%$ 和花岗岩粉末 $w(\text{Gr})=67\%$ 组成的模拟花岗岩断层泥样品。第三组为参照组, 为 $w=100\%$ 的绿泥石(Chl-

100)、高岭石(Kln-100)、二氧化硅(Sil-100)和天然花岗岩粉末(Gr-100)。所有样品均加水配置至10%含水率。

1.3 试验设备及流程

本研究采用青岛乾坤兴智能科技有限公司研制的直剪设备。设备最大法向荷载为200 kN, 最大剪切力为300 kN, 剪切速度1~1 000 $\mu\text{m/s}$ (图3)。试验过程中保持上钢块位置不变, 下钢块发生滑动, 从而获得模拟断层泥的摩擦特性。

试验流程: ①将样品装入2个钢块之间, 在20 MPa的正应力下固结900 s; ②固结完成后, 维持法向荷载不变, 以1 $\mu\text{m/s}$ 的速度开始剪切, 剪切位移为4~5 mm, 随后依次切换剪切速度3、10、30、100 $\mu\text{m/s}$, 剪切位移均为1 mm。

1.4 试验数据采集与处理

试验期间, 直剪仪以12 Hz的频率连续采集切向力、法向力、剪切位移及法向位移数据, 直剪仪搭配的声发射监测仪提取参数的阈值为100 mV(振幅), 振幅超过100 mV的事件记为一个声发射事件, 并全程统计样品在剪切过程中的累计声发射事件数(N)(Mair et al., 2007)。

试验过程中采用恒定法向力控制, 因此摩擦系数(强度) μ

$$\mu = \frac{\tau_n}{\sigma_n} = \frac{F_s/A}{F_n/A} = \frac{F_s}{F_n} \quad (4)$$

根据速度和状态的摩擦本构关系(RSF定律)(Dieterich, 1978, 1979), 速度依赖性参数($a-b$)

$$a - b = \frac{\mu - \mu_0}{\ln(v/v_0)} = \frac{\Delta\mu_{ss}}{\ln(v/v_0)}, \quad (5)$$

式中 v_0 和 μ_0 分别为初始滑动速度及其对应的稳态摩擦系数, v 和 μ 分别为速度切换后的滑动速度及其对应的稳态摩擦系数。 a 表征速度切换后摩擦系数变

(a) 试验设备



(b) 原理示意图

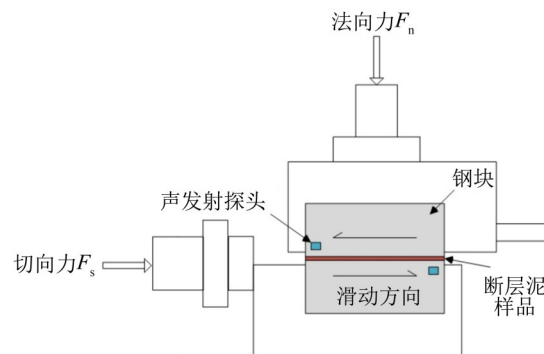


图3 试验设备及其原理示意图

Fig. 3 The test equipment and schematic testing process

化的直接效应, b 表征速度切换后摩擦系数的演化效应, D_c 为特征滑动距离。当 $(a-b) > 0$, 摩擦系数随着剪切速度的增加而增加, 为速度强化, 断层

不容易出现加速滑移, 为稳定滑动; 当 $(a-b) < 0$, μ 随着剪切速度的增加而减小, 为速度弱化, 会导致不稳定滑动, 有可能会诱发地震(图 4)。

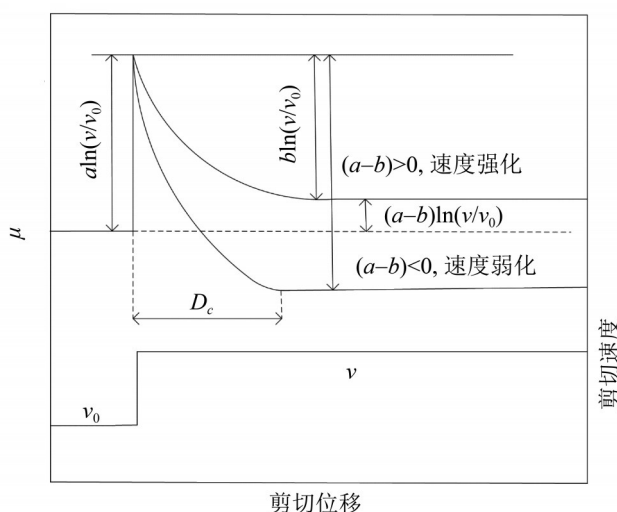


图 4 速度依赖性参数 $(a-b)$ 数值的示意图

Fig. 4 Schematic diagram showing the meaning of $(a-b)$ values

试验中 LVDT 测量设备的法向变形 $H=L-L_0$, 其中 L 为剪切过程中 LVDT 的实时读数, L_0 为剪切前 LVDT 的读数。该法向变形 H 包含样品的变形和滑动过程样品接触面积变小导致正应力增大而引起的下钢块弹性变形, 使用公式(6)剔除下钢块的弹性变形, 得到样品的法向变形 h 。

$$h = H - \frac{F_n d}{E} \left(\frac{1}{A_1} - \frac{1}{A_0} \right), \quad (6)$$

式中 F_n 为法向力 (kN), $d=50$ mm 为下钢块的厚度, A_0 和 A_1 分别为样品初始和剪切过程中的面积 (mm^2), $E=193$ kN/ mm^2 为 304 不锈钢钢块的弹性模量, $h>0$ 表示样品法向压缩。此时 h 所表示样品的法向变形包含样品由于接触面积变小导致正应力增大而引起的弹性变形。

2 结果与分析

摩擦系数与剪切位移的关系曲线如图 5 所示, 在单种蚀变矿物 Sil 样品中出现黏滑现象, 其中 Sil-100 和 Sil-67 分别在 3~100、10~100 $\mu\text{m/s}$ 剪切速度下出现黏滑, Sil-33 仅在 30 和 100 $\mu\text{m/s}$ 剪切速度下出现黏滑(图 5c), 其余样品均表现为稳定摩擦滑动行为。所有样品在剪切速度 1 $\mu\text{m/s}$ 阶段、剪切位移 4 mm 处摩擦系数基本稳定, 因此本文取此处数值作为样品的稳态摩擦系数(简称摩擦系数 μ)。试验结果见表 1。

2.1 单种蚀变矿物的影响

2.1.1 摩擦系数 图 6 给出了模拟断层泥的摩擦系数在不同单种蚀变矿物种类及其含量下的变化趋势。天然花岗岩粉末样品 Gr-100(蚀变矿物含量为 0%)的 $\mu=0.64$ 。模拟断层泥摩擦系数随高岭石或者绿泥石含量的增加呈“二段式线性降低”: 0%~40%, 迅速降低; 40%~60%, 缓慢降低。而不同的二氧化硅含量对断层泥 μ 无显著影响。

2.1.2 速度依赖性 图 7~9 展示了样品的速度依赖性、法向变形和声发射特征随单种蚀变矿物种类及含量的变化趋势。样品的法向变形(h)和累计声发射事件数(N)随剪切位移的变化趋势见图 7b~9b 和 7d~9d, 所有样品都具有相同的特征: 随着剪切位移的增加, 先发生剪胀, 然后发生剪缩, 且大部分的声发射事件出现在样品剪胀时。

速度依赖性参数 $(a-b)$ 、剪切结束时的法向变形(h_E)、 N , 与高岭石或绿泥石含量的关系见图 7(a、c)和 8(a、c)。天然花岗岩粉末样品 Gr-100(不含蚀变矿物)表现为速度弱化的摩擦滑动行为, $(a-b)=-0.00226\sim-0.00059$; 随着绿泥石或高岭石的含量增加, $(a-b)$ 呈上升趋势, N 呈下降趋势; 当高岭石和绿泥石含量分别增加至 30% 和 40% 时, 开始由速度弱化转变为速度强化。在含高岭石的样品中, 相较于表现为速度弱化的样品(0%~20% 高岭石)及速度依赖性转变的样品(30% 高岭石), 表现为速度强化的样品(40%~100% 高岭石)其 h_E 更大;

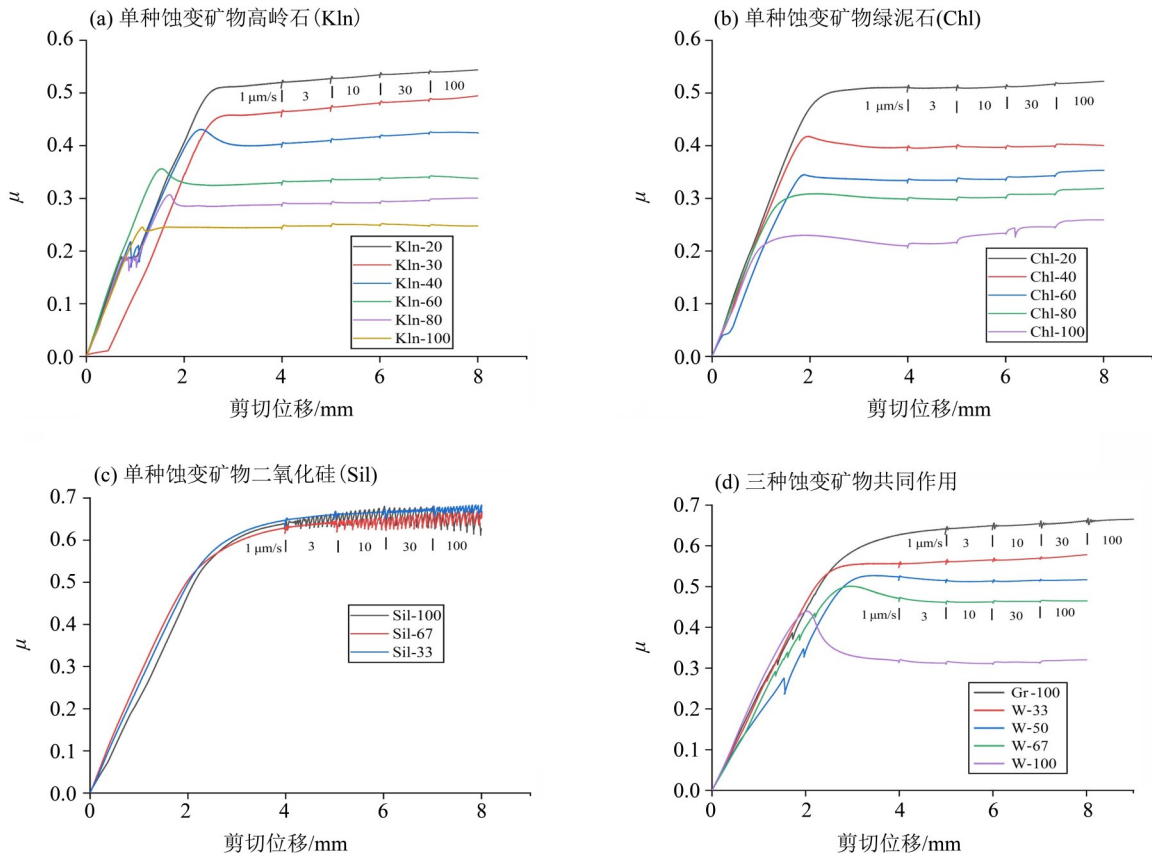


图5 含单矿物蚀变矿物或3种蚀变矿物的模拟花岗岩断层泥的试验变形曲线
 Fig. 5 Friction coefficient of all samples plotted against shear displacement

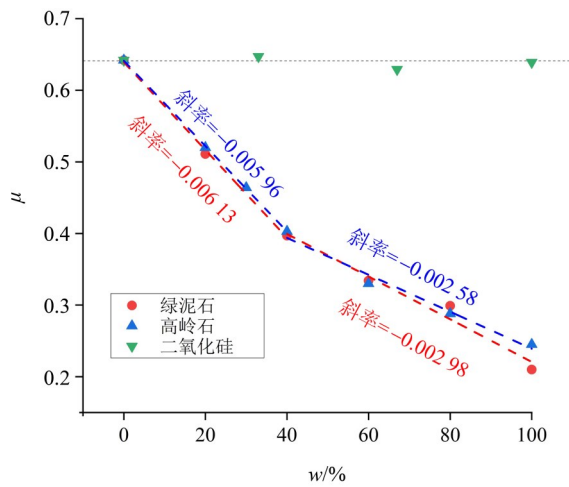


图6 模拟断层泥摩擦系数与单种蚀变矿物关系
 Fig. 6 Effect of single altered mineral content on friction coefficient

在含绿泥石的样品中, 表现为速度强化的样品(60%~100%绿泥石)其 h_E 大于天然花岗岩粉末样品(速度弱化)和40%绿泥石的样品(速度依赖性转变), 与20%绿泥石的样品(速度弱化)的 h_E 近似接近; 法向变形随剪切位移的变化趋势则显示, 随着绿泥石或高岭石含量的增加, 从剪胀向剪缩转

变的剪切位移呈减小趋势, 即样品越早出现剪缩。
 由图9可知, 二氧化硅对模拟断层泥起速度弱化的作用; 当二氧化硅含量($w(\text{Sil})$)为0%和67%时, 累计声发射事件数出现高值, 分别为14 236和11 484, 而当 $w(\text{Sil})=33%$ 和100%时, N 相对较少。当 $w(\text{Sil})=0\% \sim 67\%$ 时 h_E 较小, $w(\text{Sil})=100\%$ 时 h_E 显著增大。法向变形随着剪切位移的变化趋势(图9b,d), $w(\text{Sil})=33%$ 和67%的样品Sil-33和Sil-67), 从剪胀向剪缩转变的剪切位移相近, 而 $w(\text{Sil})=100\%$ 的样品Sil-100转变的剪切位移更小。

2.2 三种蚀变矿物共同作用的影响

2.2.1 摩擦系数 3种蚀变矿物(Chl、Kln和Sil)共同作用时, 随着3种蚀变矿物在模拟断层泥中总含量的升高, 样品摩擦系数线性降低(斜率约-0.003), 从0.64线性下降到0.32(图10)。

2.2.2 速度依赖性 图11给出了模拟花岗岩断层泥速度依赖性参数($a-b$)、剪切结束时的法向变形 h_E 和累计声发射事件数 N , 随3种蚀变矿物总含量的变化趋势, 以及法向变形 h 、 N 和剪切位移的关系。由图可知, 随着3种蚀变矿物总含量的增加, ($a-b$)呈上升趋势, 当总含量增加至67%时, 模拟

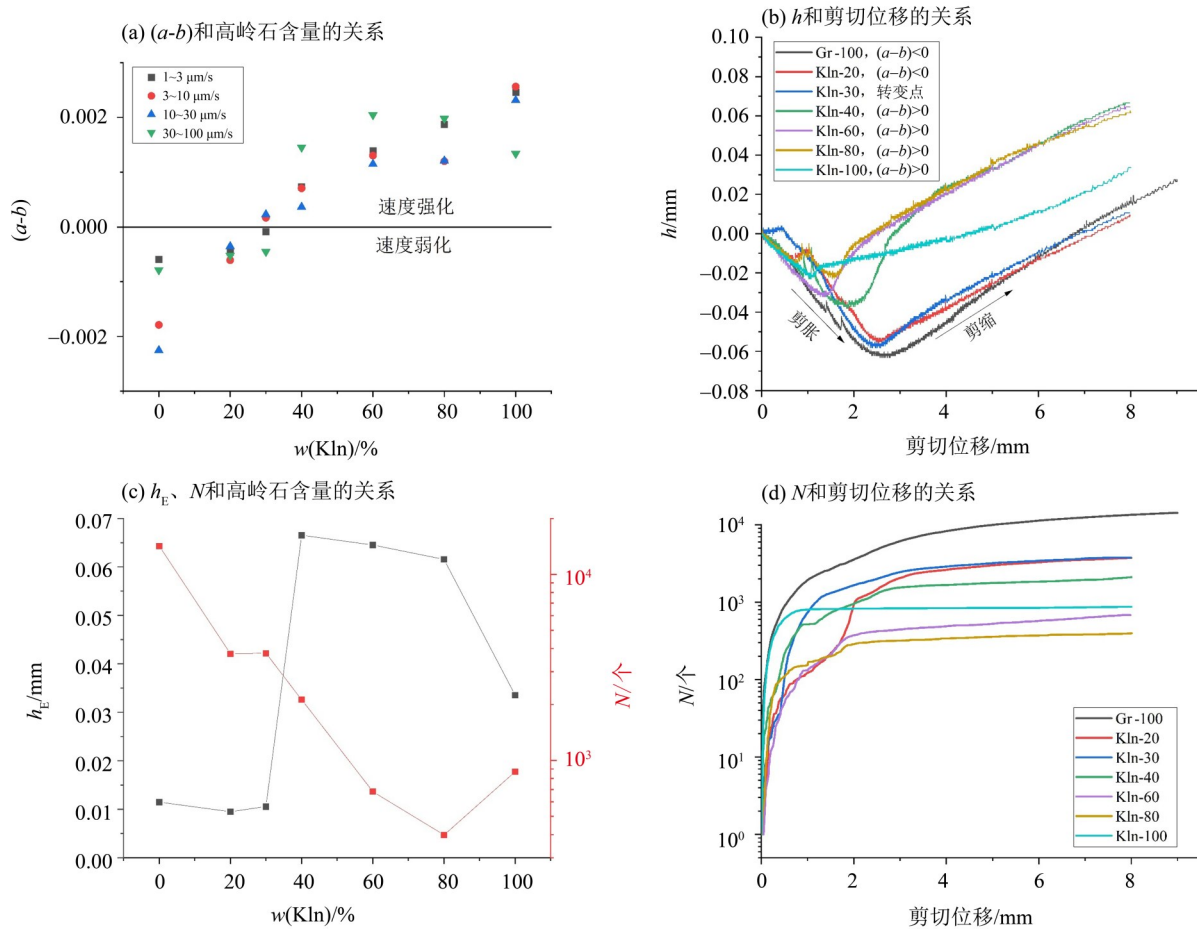


图7 单种蚀变矿物高岭石作用下模拟断层泥的试验结果

Fig. 7 Effect of single altered mineral kaolinite content on granite fault gouges

断层泥开始由速度弱化转变为速度强化, N 逐渐降低, h_E 逐渐增大; 所有样品随着剪切位移的增加, 先发生剪胀, 然后发生剪缩, 大部分的声发射事件出现在样品剪胀时; 随着3种蚀变矿物总含量的增加, 样品从剪胀向剪缩转变的剪切位移呈减小趋势(图 11b、d)。

2.3 微观结构

本文对剪切结束后的变形样品垂直于滑动面进行切割, 用扫描电镜(配有能谱仪)观察其纵剖面的微观结构, 并用 Logan (1979) 建立的剪切带模型及其论述来对微观结构进行定名。100%天然花岗岩粉末的变形样品 Gr-100 的显微结构见图 12, 可见明显的 R_1 和 P 剪切带, R_1 剪切带附近颗粒破碎显著(图 12b), 且部分 R_1 剪切带发育中断(图 12c), 中断处物质为石英。

单种蚀变矿物绿泥石作用的显微结构见图 13。图 13a 展示了含绿泥石 $w(\text{Chl})=20\%$ 的模拟断层泥变形样品(Chl-20)的显微结构, 可见少量的 R_1 剪切带, R_1 剪切带附近的 I 区域的颗粒发生破裂, 颗粒

粒径显著降低, 而离 R_1 剪切带较远的 II 区域的颗粒较为完整, 未发现明显的颗粒破碎(图 13c); 部分 R_1 剪切带发育中断, 中断处的物质为二氧化硅或者石英(图 13d)。图 13b 展示了 80% 绿泥石的变形样品 Chl-80 的显微结构, 发育有较为丰富的 R_1 剪切带并贯穿整个断层泥的厚度, 且 R_1 剪切带内聚集了大量的绿泥石(图 13e)。

3 种蚀变矿物共同作用的模拟断层泥的显微结构见图 14。图 14a 展示了 3 种蚀变矿物质量分数为 33% 的模拟断层泥变形样品(W-33)的显微结构, 可见 R_1 和 Y 剪切带发育丰富, 且部分 R_1 剪切带和 Y 剪切带相连接; 部分 R_1 剪切带发育中断, 中断处的物质为二氧化硅或石英(图 14c)。3 种蚀变矿物 ($w=67\%$) 的模拟断层泥变形样品 W-67 中未观察到明显的剪切带(图 14b)。

3 讨论

试验结果显示取自深圳的天然花岗岩粉末在 20 MPa 有效正应力及室温条件下摩擦系数为 0.64,

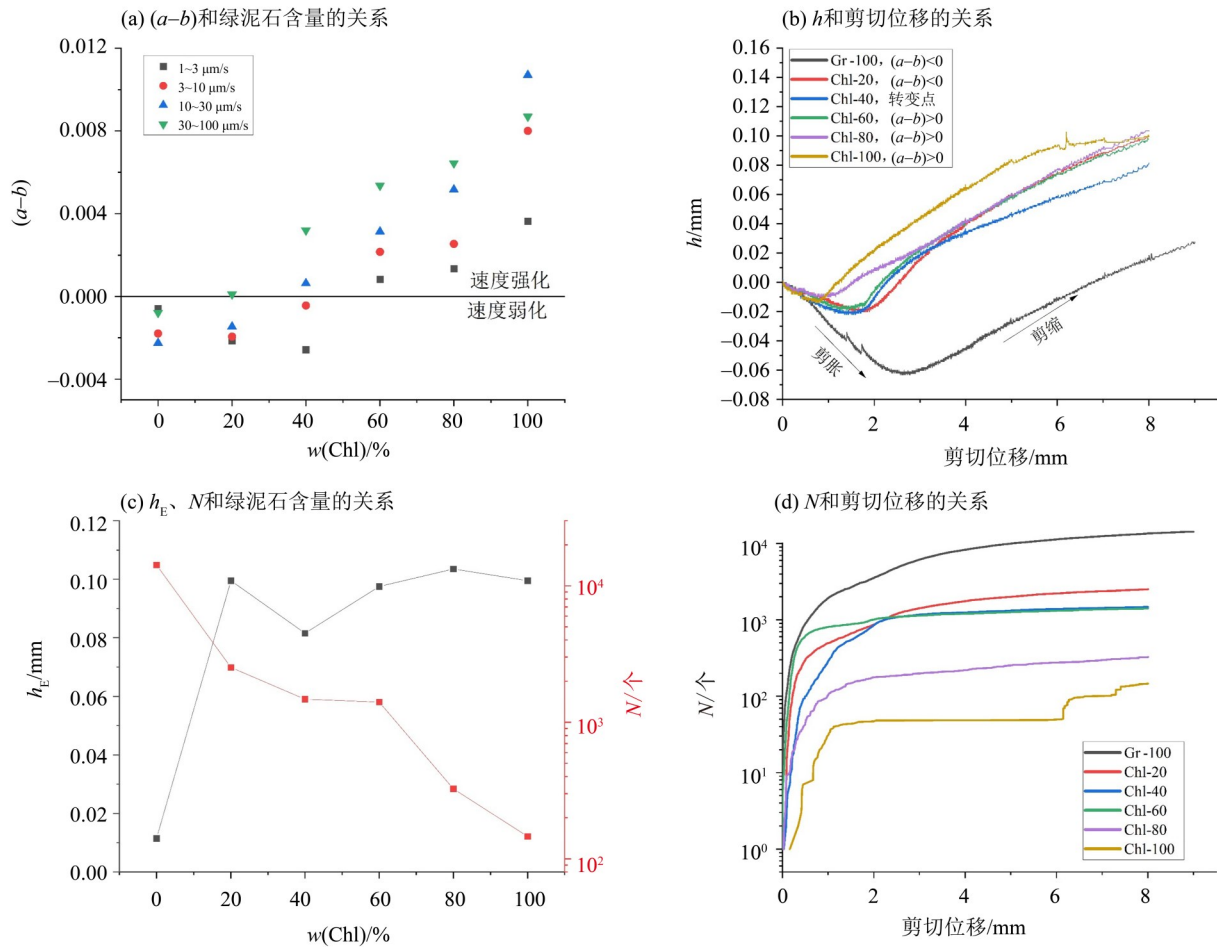


图 8 单种蚀变矿物绿泥石作用下花岗岩断层泥的试验结果

Fig. 8 Effect of single altered mineral chlorite content on granite fault gouges

表现为速度弱化的摩擦滑动行为。水岩反应生成的蚀变矿物对模拟花岗岩断层泥摩擦系数和速度依赖性的影响较为复杂。单一蚀变矿物的影响表现为：二氧化硅的含量对模拟花岗岩断层泥摩擦系数的影响不大，但可以增强断层泥的速度弱化；相反，黏土矿物（高岭石、绿泥石）含量的增加，会降低摩擦系数，但起到速度强化的作用。当 3 种蚀变矿物共同作用时，黏土矿物将起到主控作用：3 种蚀变矿物能够降低断层泥的 μ ，并对断层泥起速度强化作用。因此，本文将重点讨论单种蚀变矿物作用和 3 种蚀变矿物共同作用对花岗岩断层泥摩擦特性的影响及其控制机理，并探讨了如果在深圳东北部潜在地热储层进行地热开采时，水岩反应蚀变矿物对横岗-罗湖断裂带滑动稳定性的可能影响，进而提出地热开采时需要注意的问题。

3.1 单种蚀变矿物对断层泥摩擦特性的影响

3.1.1 摩擦系数 模拟花岗岩断层泥的摩擦系数 (μ) 随高岭石或绿泥石含量的增加呈二段式线性降低 (图 6)：黏土矿物含量为 0%~40% 时， μ 迅速降

低 (0.64~0.40)；当含量为 40%~100% 时， μ 缓慢降低 (0.40~0.23)。这与 Ashman et al. (2023) 的石英和高岭石二元混合物摩擦试验结果基本一致， μ 随着高岭石含量增加呈二段式近似线性降低：迅速降低 0.67~0.42 (0%~40%) 以及缓慢降低 0.42~0.28 (40%~100%)。而二氧化硅含量对花岗岩断层泥的 μ 影响不大， $\mu=0.63\sim 0.65$ 。

当绿泥石或高岭石含量为 0%~40% 时， μ 迅速降低，累计声发射事件数从天然花岗岩粉末 (0% 黏土矿物) 的 14236 迅速降至含 40% 高岭石样品的 2123 (40% 绿泥石样品的 1475) (图 7c、8c)。相较于黏土颗粒间的相互摩擦接触，花岗岩颗粒 (μ 较大) 间的相互摩擦接触可能产生更多的声发射事件，因此摩擦系数的显著下降阶段可能与断层泥的支撑框架转变有关，即花岗岩颗粒的支撑框架向黏土矿物的支撑框架转变。Takahashi et al. (2007) 给出了支撑框架转变的微观证据，蒙脱石含量为 0%~45% 时，断层泥的支撑框架从石英颗粒的支撑框架向蒙脱石颗粒的支撑框架转变。因

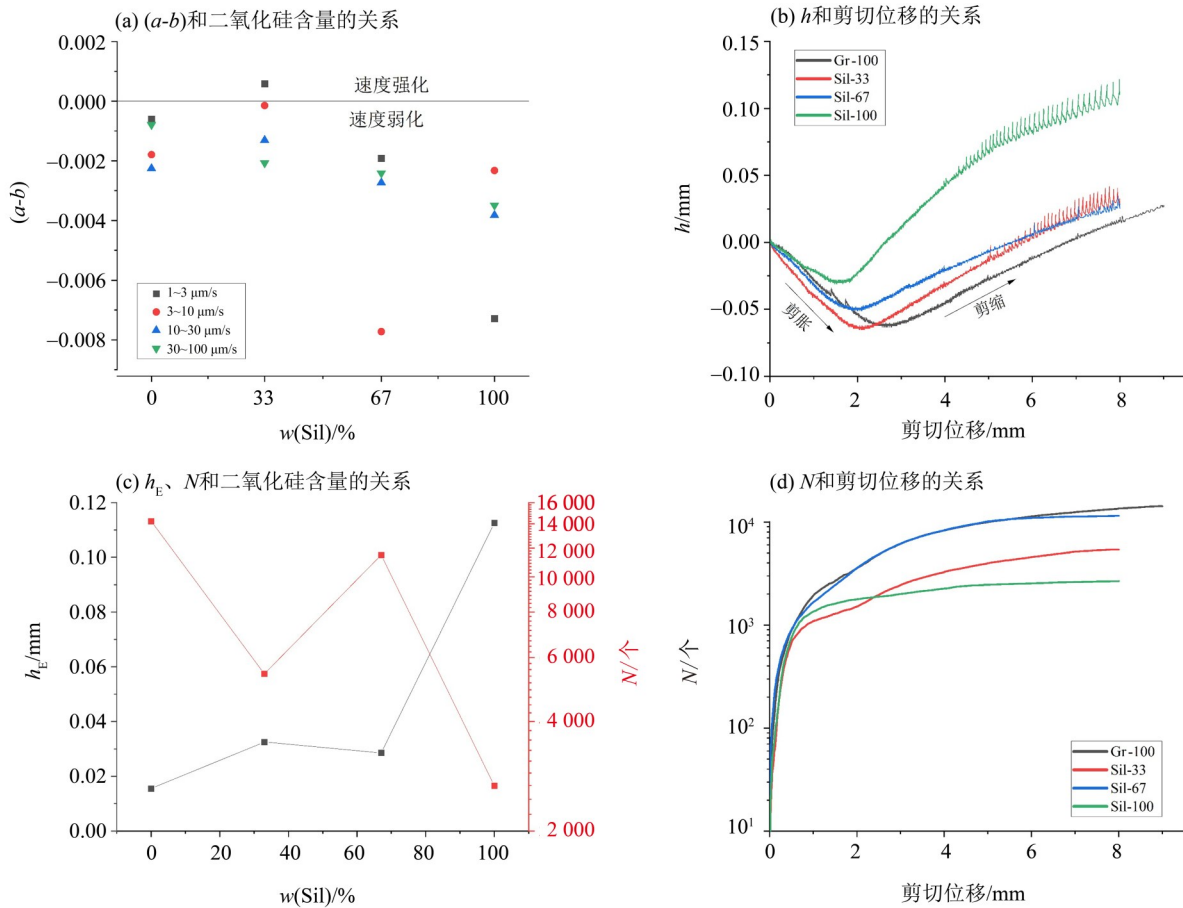


图9 单种蚀变矿物二氧化硅作用下花岗岩断层泥的试验结果

Fig. 9 Effect of single altered mineral silica content on granite fault gouges

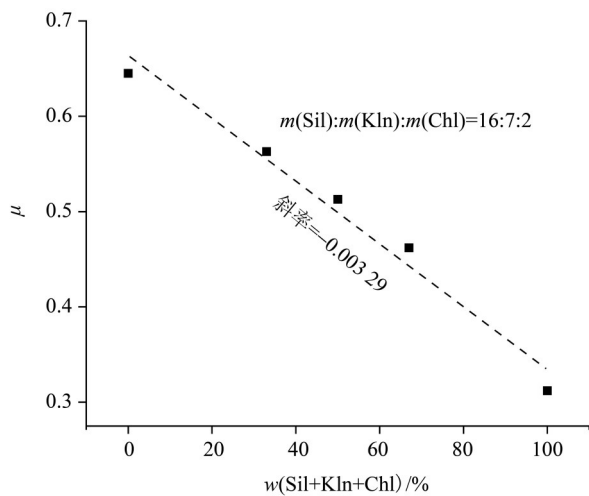


图10 模拟断层泥摩擦系数随3种蚀变矿物总含量的变化

Fig. 10 Effect of mixture of silica + kaolinite + chlorite content on friction coefficient

此, 根据本文声发射数据进行推测, 摩擦系数的显著降低与断层泥支撑框架从花岗岩颗粒的支撑框架向黏土矿物的支撑框架转变有关。

当黏土矿物含量为40%~100%时, μ 缓慢降低

可能与 R_1 剪切带在黏土矿物中的发育有关。在20%绿泥石的样品 Chl-20 的显微结构中, 仅少量的 R_1 剪切带被观察到, 而在含80%绿泥石的样品 Chl-80 的显微结构中, 存在较为丰富且基本贯穿整个断层泥厚度的 R_1 剪切带, 且剪切带内聚集有丰富的绿泥石矿物(图 13b、e)。类似的试验现象文献中也有报道, 在 Tembe et al. (2010) 由石英和蒙脱石组成的断层泥摩擦试验中, 随着蒙脱石含量增加(70%~100%), 断层泥的 μ 缓慢降低, 高蒙脱石含量的样品剪切结束后微观结构显示 R_1 剪切带发育更为完整, 更少受到石英颗粒的“阻挡”。基于此, 本文推测黏土矿物含量为40%~100%时, R_1 剪切带在黏土矿物中的发育导致了 μ 缓慢降低。

3.1.2 速度依赖性 试验结果显示绿泥石和高岭石对模拟花岗岩断层泥起速度强化的作用(图 7a, 8a), 相反二氧化硅能够增强模拟花岗岩断层泥速度弱化的特性, 甚至引发黏滑, 这与前人研究结果一致(Moore et al., 2011; Ashman et al., 2023)。

关于黏土矿物对花岗岩断层泥起速度强化的作用, 可能与黏土矿物能够增强断层泥的剪缩行

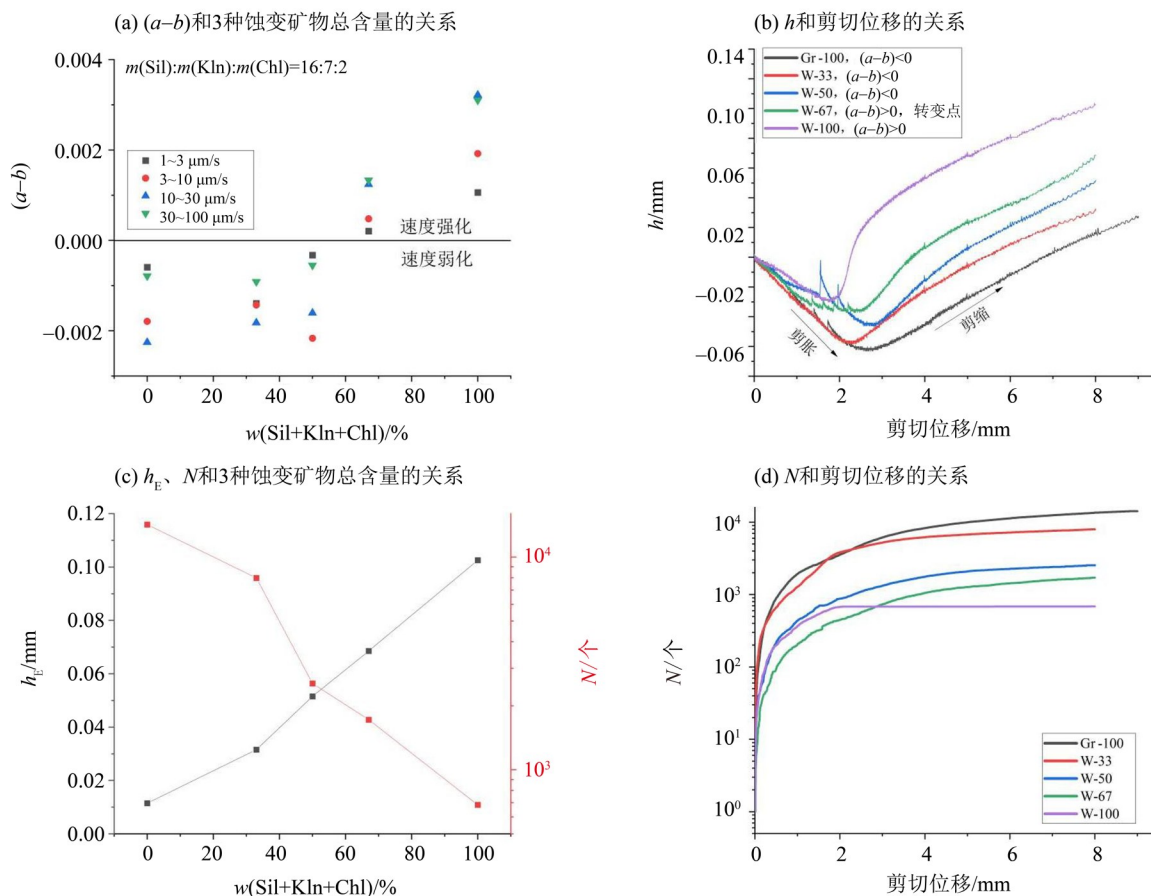


图 11 花岗岩断层泥的试验结果随 3 种蚀变矿物总含量和剪切位移的变化趋势
 Fig. 11 Effect of mixture of silica + kaolinite + chlorite content on granite fault gouges

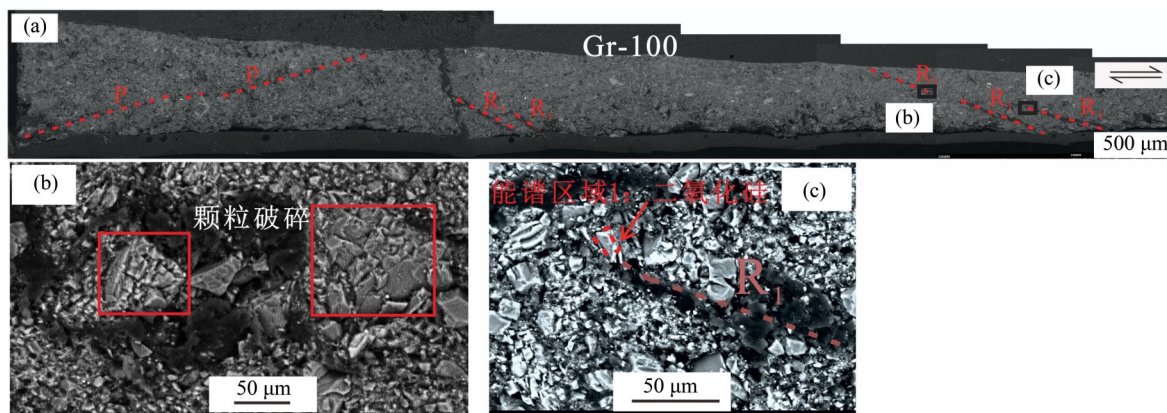


图 12 天然花岗岩粉末变形样品的扫描电镜图
 Fig. 12 Representative microstructural images of the deformed sample Gr-100

为有关, 本文用 CNS 微观物理模型 (Chen et al., 2016; Chen et al., 2020) 进行解释, 该模型认为摩擦系数的速度依赖性受剪切过程中断层泥材料的接触状态 (剪胀和剪缩) 控制, 当断层泥的剪胀速率与剪缩速率近似接近时表现为速度弱化, 而当剪胀或者剪缩一方占主导时表现为速度强化。本文试验结果显示, 黏土矿物含量高的样品更早出

现剪缩作用, 且剪切结束时的法向变形普遍更大 (图 7 和图 8), 这表明黏土矿物能够增强断层泥的剪缩作用, 使断层泥材料在剪切过程中由剪缩作用主导, 进而对模拟花岗岩断层泥起速度强化的作用。

单种二氧化硅的控制机制可能与黏土矿物的机制不同, 图 9 显示二氧化硅同样能够增强断层泥

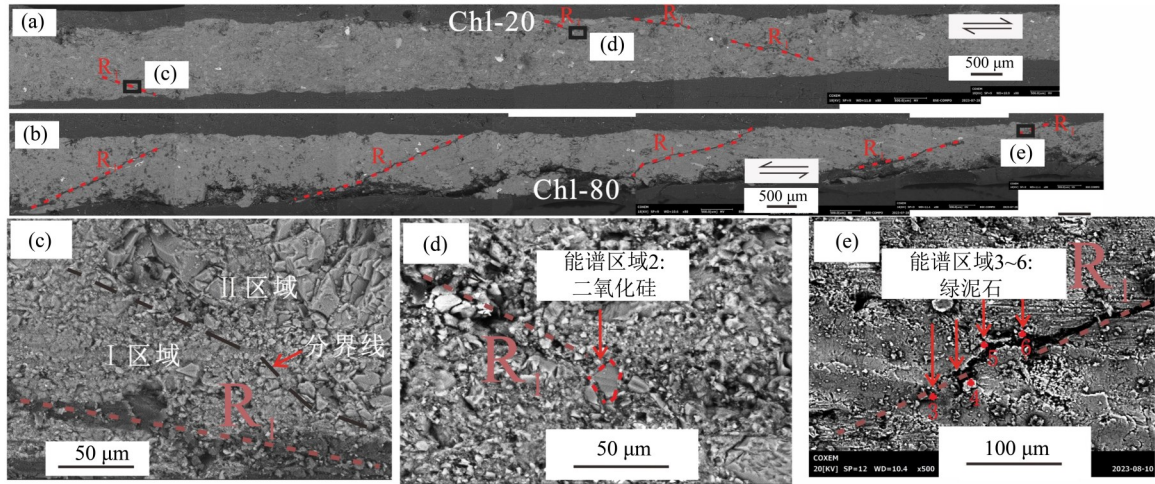


图 13 单种绿泥矿物作用的变形样品扫描电镜图

Fig. 13 Representative microstructural images of the deformed samples Chl-20 and Chl-80

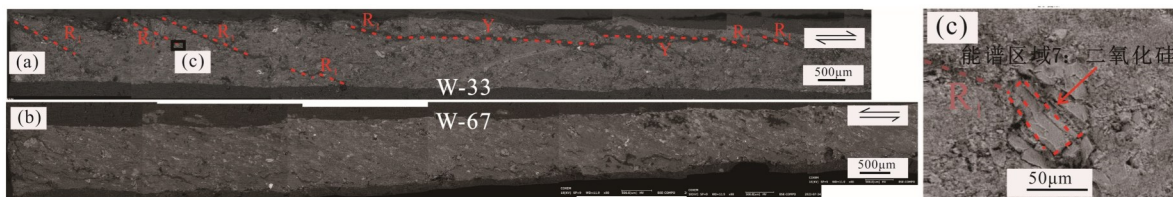


图 14 3种蚀变矿物共同作用的变形样品扫描电镜图

Fig. 14 Representative microstructural images of the deformed samples W-33 and W-67

的剪缩作用,却表现为速度弱化并出现黏滑,这样的现象无法用CNS微观物理模型解释。类似试验现象在文献中也有报道,Rowe et al.(2019)在石英岩粉末的摩擦试验中,发现形成了纳米颗粒的无定型二氧化硅,起颗粒润滑作用导致滑动弱化。Toy et al.(2017)在100%石英粉末的摩擦试验的显微分析中也发现了纳米颗粒的无定型二氧化硅,同时试验出现了黏滑现象。基于此,考虑到本文试验采用的是粒径小于48 μm的无定型二氧化硅,推断二氧化硅对模拟花岗岩断层泥速度弱化的增强作用与纳米颗粒无定型二氧化硅的形成有关,但本文没有获得含单种蚀变矿物二氧化硅的显微结构,缺乏直接的微观图像证据。

3.2 三种蚀变矿物对断层泥摩擦特性的影响

3种蚀变矿物共同作用时,模拟花岗岩断层泥的摩擦系数及速度依赖性随黏土矿物(绿泥石+高岭石)总含量和二氧化硅含量的变化趋势见图15,黏土矿物总含量从0%增加到36%(二氧化硅含量从0%增加到64%),花岗岩断层泥 μ 线性降低,速度依赖性参数($a-b$)呈上升趋势,这与单种黏土矿物作用时的结果一致,表明黏土矿物对花岗岩断层泥 μ 和速度依赖性起主控作用,这可能与黏土矿

物和二氧化硅之间的相对含量有关。100%的3种蚀变矿物的样品W-100由36%黏土矿物(高岭石和绿泥石)和64%二氧化硅组成,表现为低摩擦系数0.32和速度强化的摩擦滑动行为。这与前人由黏土矿物和二氧化硅组成的模拟断层泥摩擦试验结果相符,当黏土矿物含量为30%~40%时,黏土矿物能够显著降低模拟断层泥的摩擦系数(μ 从约0.7下降到约0.4),并表现为速度强化的摩擦滑动行为(An et al., 2021; Ashman et al., 2023)。而混合物的摩擦系数与弱摩擦系数矿物的含量呈负相关,并且速度依赖性参数($a-b$)值与表现为速度强化的矿物(黑云母、黏土矿物等)的含量呈正相关(路珍, 2014),因此,3种蚀变矿物的混合物视为弱摩擦系数和速度强化的材料,可以显著降低模拟花岗岩断层泥的摩擦强度,并对断层泥起速度强化的作用。

本次试验研究还发现,3种蚀变矿物共同作用时,相比于3种蚀变矿物总含量为33%的变形样品,总含量为67%的变形样品未观察到明显的剪切带且累计声发射事件数显著下降,我们推测其变形从脆性转变为半塑性。导致这种转变的可能机制为黏土矿物含量的升高,促进了花岗岩断层

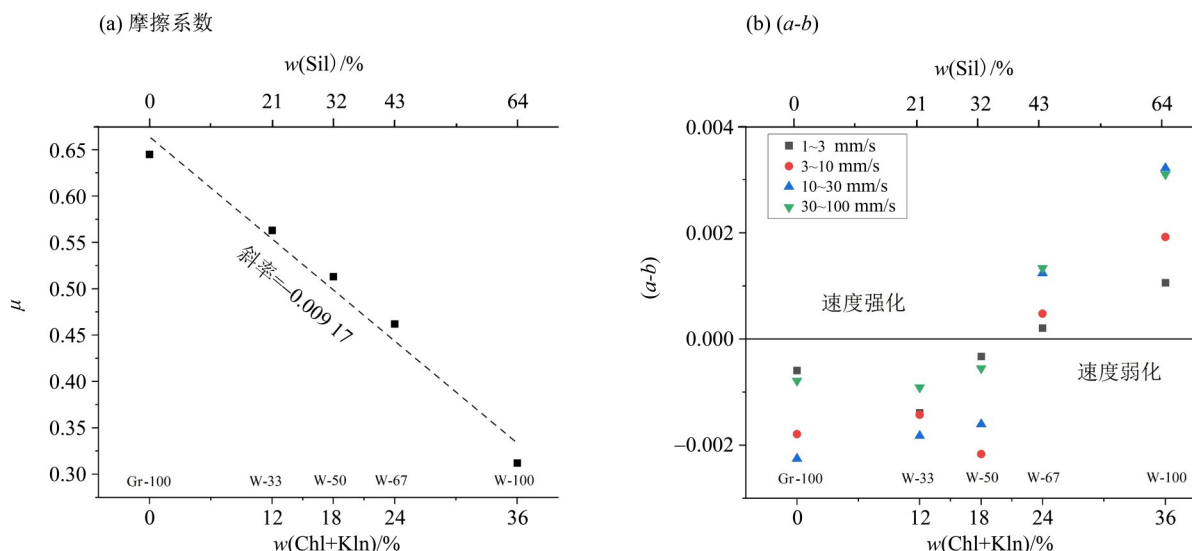


图 15 3 种蚀变矿物共同作用下花岗岩断层泥速度性参数 $(a-b)$ 和摩擦系数的变化趋势

Fig. 15 Effect of mixture of kaolinite + chlorite mineral content on $(a-b)$ and friction coefficient

泥的塑性变形, 更多的剪切应变能通过塑性变形释放(张雷等, 2020), 这与 3 种蚀变矿物共同作用下黏土矿物起主控作用的结论保持一致。

3.3 试验结果对长期地热开采诱发地震的启示

深圳东北部 2~3 km 储层深度, 为干热岩型地热能, 温度 84~150 °C, 具备显著的地热开采价值(谢和平等, 2019)。同时横岗-罗湖断裂带横穿深圳东北部, 从中更新世以来整体处于稳定状态, 却有发生中强震的潜势, 最大发震震级综合评价能达到 Ms6.5 级(余成华, 2010)。本文摩擦滑动试验结果表明, 如果要在深圳东北部进行干热岩开采, 在埋深为 2.5 km 处, 如果注入流体压力大于断层临界孔隙压力, 水与花岗岩反应生成的蚀变黏土矿物有可能会引起横岗-罗湖断裂带的不稳定滑动, 进而诱发地震。

横岗-罗湖断裂带 2.5 km 深度处储层温度约为 150 °C, 在储层温度下黏土矿物同样能够降低花岗岩断层泥的 μ , 并对花岗岩断层泥起速度强化的作用。相较于室温, 尽管 150 °C 下黏土矿物的摩擦系数会轻微升高, 如绿泥石在 120 MPa 有效正应力下, μ 从 25 °C 的约 0.4 升高到 130 °C 的约 0.46, 但仍可以降低花岗岩断层泥的摩擦系数(Belzer et al., 2022); 另外, 即使黏土矿物的速度依赖性参数 $(a-b)$ 数值会因温度升高(23~150 °C 范围)而降低, 但仍处于速度强化范围(Okamoto et al., 2019)。综上, 虽然本文摩擦试验在室温下进行, 但根据前人在储层温度的摩擦试验结果推断, 黏土矿物在室温下的摩擦滑动特性与储层温度下的摩擦滑动特性基本一致, 同样能够降低断层的摩擦系数,

并对断层起速度强化的作用。

将本文室温下的试验结论应用至深圳东北部埋深 2.5 km 储层(150 °C)中, 根据模拟花岗岩断层泥的摩擦系数随黏土矿物含量的变化(图 15)以及公式(3), 计算了横岗-罗湖断裂带临界孔隙压力 (P) 随蚀变黏土矿物含量的变化趋势如图 16, 随着蚀变黏土矿物含量从 0% 增加到 36% (花岗岩的蚀变程度从 0% 增加到 100%), 断层的临界孔隙压力从 50 MPa 下降到 33 MPa。黏土矿物能够显著降低横岗-罗湖断裂带的摩擦系数, 进而降低断层的临界孔隙压力, 如果流体注入压力大于临界孔隙压力, 断层有可能被激动。根据黏土矿物的含量, 断层表现为不同的速度依赖性, 可以分为两种滑动方式: 当蚀变黏土矿物含量小于 24%, 断层泥

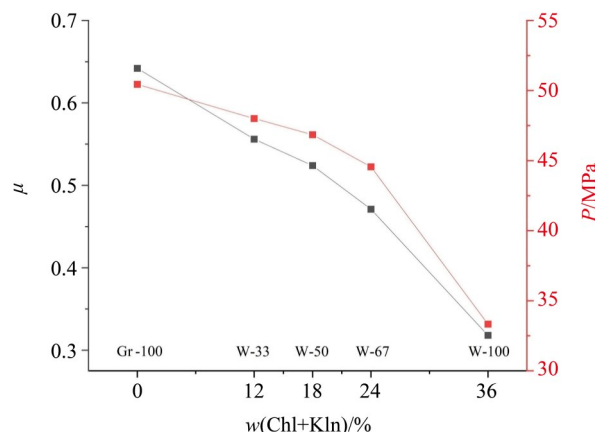


图 16 摩擦系数和临界孔隙压力随蚀变矿物含量的变化

Fig. 16 Effect of clay minerals content on friction coefficient and critical pore pressure

表现为速度弱化($(a-b)<0$), 断层的摩擦系数随着滑动速度的增加而降低, 有可能会诱发断层的不稳定滑动, 进而诱发地震; 而当蚀变黏土矿物含量大于 24% 时, 此时断层的速度依赖性为速度强化, 断层的摩擦系数随着滑动速度的增加而增加, 为稳定滑动。

4 结 论

本文以深圳东北部潜在地热储层的断裂构造为背景, 考虑了埋深大约在 2.5 km 处, 由于流体注入导致横岗-罗湖断裂带滑动的临界孔隙压力(约 50 MPa)及临界有效正应力(约 20 MPa)。在室温、有效正应力 20 MPa 下, 获得了 3 种蚀变矿物(二氧化硅、高岭石和绿泥石)单独作用及其共同作用($m(\text{Sil}):m(\text{Kln}):m(\text{Chl})=16:7:2$)下对模拟花岗岩断层泥(10% 含水率)的摩擦系数及其速度依赖性的影响。主要结论如下:

1) 单种蚀变矿物作用时, 黏土矿物能够显著降低模拟花岗岩断层泥的摩擦系数, 而二氧化硅含量对断层泥摩擦系数影响不大。3 种蚀变矿物共同作用时, 黏土矿物起主控作用, 随着 3 种蚀变矿物总含量的增加, 模拟花岗岩断层泥的摩擦系数

线性降低。

2) 单种蚀变矿物作用时, 黏土矿物可以对花岗岩断层泥起速度强化的作用, 当黏土矿物含量为 30~40% 时, 开始由速度弱化转变为速度强化, 速度依赖性的转变可能与黏土矿物能够增强断层泥的剪缩作用有关。相反, 二氧化硅可以增强模拟花岗岩断层泥速度弱化的特性, 甚至可以引发黏滑。3 种蚀变矿物共同作用时, 黏土矿物起主控作用, 在 3 种蚀变矿物总含量为 67% 时出现速度弱化向速度强化的转变。

3) 显微结构分析发现, 相比于 3 种蚀变矿物总含量为 33% 的变形样品, 总含量为 67% 的变形样品未观察到明显的剪切带且累计声发射事件数显著下降, 暗示其变形可能从脆性转变为半塑性。

基于本文试验结果及分析, 仅从水岩反应蚀变矿物的影响推断, 深圳东北部潜在地热储层开采时, 抽注水过程中水与花岗岩反应生成的蚀变矿物可能会导致横岗-罗湖断裂带的不稳定滑动, 有可能会诱发地震, 应当控制流体注入的压力, 使注入流体压力低于断层的临界孔隙压力, 以避免断层发生不稳定滑动。

参考文献:

- 路珍, 2014. 含黑云母断层岩碎屑在热水条件下的摩擦滑动实验研究——含弱矿物断层的力学性质研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 李彬, 2022. 地热田干热岩地应力测量及其特征研究——以广东惠州地热田为例[D]. 西宁: 青海大学.
- 刘贺娟, 童荣琛, 侯正猛, 等, 2022. 地下流体注采诱发地震综述及对深部高温岩体地热开发的影响[J]. 工程科学与技术, 54(1): 83-96.
- 谢和平, 杨仲康, 邓建辉, 2019. 粤港澳大湾区地热资源潜力评估[J]. 工程科学与技术, 51(1): 1-8.
- 余成华, 2010. 深圳断层活动性和地震危险性研究[D]. 杭州: 浙江大学.
- 曾凡蛟, 2013. 横岗-罗湖断裂特征及第四纪活动性[J]. 科技资讯, 11(4): 160-162.
- 张雷, 何昌荣, 周永胜, 2020. 水热条件下富层状硅酸盐矿物糜棱岩的摩擦特性实验研究[J]. 地球物理学报, 63(2): 573-582.
- ALT-EPPING P, DIAMOND L W, HÄRING M O, et al, 2013. Prediction of water-rock interaction and porosity evolution in a granitoid-hosted enhanced geothermal system, using constraints from the 5 km Basel-1 well [J]. Appl Geochem, 38: 121-133.
- AN M, ZHANG F, MIN K B, et al, 2021. The potential for low-grade metamorphism to facilitate fault instability in a geothermal reservoir [J]. Geophys Res Lett, 48(11): e2021GL093552.
- AN M, ZHANG F, MIN K B, et al, 2022. Frictional stability of metamorphic epidote in granitoid faults under hydrothermal conditions and implications for injection-induced seismicity [J]. J Geophys Res Solid Earth, 127(3): e2021JB023136.
- ASHMAN I R, FAULKNER D R, 2023. The effect of clay content on the dilatancy and frictional properties of fault gouge [J]. J Geophys Res Solid Earth, 128(4): e2022JB025878.
- BELZER B D, FRENCH M E, 2022. Frictional constitutive behavior of chlorite at low shearing rates and hydrothermal conditions [J]. Tectonophysics, 837: 229435.
- BLANPIED M L, LOCKNER D A, BYERLEE J D, 1991. Fault stability inferred from granite sliding experiments at hydrothermal conditions [J]. Geophys Res Lett, 18(4):

- 609–612.
- BLANPIED M L, LOCKNER D A, BYERLEE J D, 1995. Frictional slip of granite at hydrothermal conditions[J]. *J Geophys Res Solid Earth*, 100(B7): 13045–13064.
- CHEN J, SPIERS C J, 2016. Rate and state frictional and healing behavior of carbonate fault gouge explained using microphysical model[J]. *J Geophys Res Solid Earth*, 121(12): 8642–8665.
- CHEN J, van den ENDE M P A, NIEMEIJER A R, 2020. Microphysical model predictions of fault restrengthening under room-humidity and hydrothermal conditions: From logarithmic to power-law healing [J]. *J Geophys Res Solid Earth*, 125(4): e2019JB018567.
- DIETERICH J H, 1978. Time-dependent friction and the mechanics of stick-slip [J]. *Pure Appl Geophys*, 116(4): 790–806.
- DIETERICH J H, 1979. Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations [J]. *J Geophys Res Solid Earth*, 84(B5): 2161–2168.
- JAEGER J G, COOK N G W, ZIMMERMAN R W, 2007. *Fundamental of rock mechanics*[M].
- LOGAN J M, 1979. Experimental studies of simulated gouge and their application to studies of natural fault gouge[J]. *Analysis of Actual Fault Zones in Bedrock*, 305–343.
- MAIR K, MARONE C, YOUNG R P, 2007. Rate dependence of acoustic emissions generated during shear of simulated fault gouge[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 97(6): 1841–1849.
- MOORE D E, LOCKNER D A, 2011. Frictional strengths of talc-serpentine and talc-quartz mixtures [J]. *J Geophys Res Solid Earth*, 116(B1): B01403.
- OKAMOTO A S, VERBERNE B A, NIEMEIJER A R, et al, 2019. Frictional properties of simulated chlorite gouge at hydrothermal conditions: Implications for subduction megathrusts [J]. *J Geophys Res Solid Earth*, 124(5): 4545–4565.
- ROWE C D, LAMOTHE K, REMPE M, et al, 2019. Earthquake lubrication and healing explained by amorphous nanosilica[J]. *Nat Commun*, 10(1): 320.
- RUINA A, 1983. Slip instability and state variable friction laws[J]. *J Geophys Res Solid Earth*, 88(B12): 10359–10370.
- TAKAHASHI M, MIZOGUCHI K, KITAMURA K, et al, 2007. Effects of clay content on the frictional strength and fluid transport property of faults[J]. *J Geophys Res Solid Earth*, 112(B8): B08206.
- TEMBE S, LOCKNER D A, WONG T F, 2010. Effect of clay content and mineralogy on frictional sliding behavior of simulated gouges: Binary and ternary mixtures of quartz, illite, and montmorillonite [J]. *J Geophys Res Solid Earth*, 115(B3): B03416.
- TOY V G, NIEMEIJER A, RENARD F, et al, 2017. Striation and slickenline development on quartz fault surfaces at crustal conditions: Origin and effect on friction [J]. *J Geophys Res Solid Earth*, 122(5): 3497–3512.
- WESTAWAY R, BURNSIDE N M, 2019. Fault “corrosion” by fluid injection: A potential cause of the November 2017 MW 5.5 Korean earthquake[J]. *Geofluids*, 2019: 1280721.

(责任编辑 秦社彩)