

# 含黏土断层滑动行为稳定性

KOCHARYAN Gevorg<sup>1</sup>, OSTAPCHUK Alexey<sup>1,2</sup>, SHATUNOV Ivan<sup>1,2</sup>, 戚承志<sup>3</sup>

(1. 俄罗斯科学院 萨多夫斯基基地圈动力学研究所, 俄罗斯 莫斯科;  
2. 莫斯科物理技术学院, 俄罗斯 多尔戈普鲁德内; 3. 北京建筑大学 土木与交通工程学院, 北京 102627)

**摘要:** 构造断层核主要由黏土矿物构成, 黏土矿物成分或含水饱和度的轻微变化将会导致断层滑动状态发生显著改变。利用滑块模型装置对填充有断层泥的模型断层进行试验, 以研究其滑动规律。断层泥由石英砂和不同类型黏土(膨润土、伊利石和高岭石)组成。断层滑动行为主要取决于断层泥的矿物学特性。累积应力可通过快速滑动和缓慢滑动2种方式释放, 快速滑动的比例动能介于 $10^{-5}$ ~ $10^{-3}$ 之间, 而缓慢滑动的比例动能为 $10^{-9}$ ~ $10^{-7}$ 。在干燥和湿润条件下, 填充有石英砂的模型断层具有快速黏滑特征。当黏土含量接近20%时, 石英砂/黏土断层泥从黏滑逐渐转变为稳定滑动。在黏土湿润的情况下, 矿物学特性起到了关键作用。当伊利石含量为5%时, 湿润会导致峰值速度增加一个数量级以上; 当膨润土含量为5%时, 则会使滑动稳定。虽然湿润后摩擦系数的变化相对较小, 但比例动能的变化可达几个数量级。

**关键词:** 滑动状态; 黏土断层泥; 辐射效率; 断层流变; 滑块模型

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2025)11-3513-10

## Stabilization of slip behavior of a clay-bearing fault

KOCHARYAN Gevorg<sup>1</sup>, OSTAPCHUK Alexey<sup>1,2</sup>, SHATUNOV Ivan<sup>1,2</sup>, QI Cheng-zhi<sup>3</sup>

(1. Sadosky Institute for Dynamics of Geospheres, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; 2. Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia; 3. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102627, China)

**Abstract:** Tectonic fault cores are formed substantially of clay minerals. Even a slight change in mineral composition or in water saturation can result in a significant alteration of the sliding regime on the fault. We present results of laboratory experiments on a slider model set-up that was used to study the regularities of slip behavior in a model fault filled with gouge. The gouge consisted of quartz sand and clays of different types (bentonite, illite and kaolinite). The slip behavior essentially depended on gouge mineralogy. The accumulated stress could release via both fast and slow slips. The scaled kinetic energy for fast slips was  $10^{-5}$ – $10^{-3}$ , while that for the slowest slips was  $10^{-9}$ – $10^{-7}$ . Fast stick-slip is characteristic of model faults filled with quartz sand in dry and moistened conditions. A gradual transformation from stick-slip to stable sliding was observed for quartz sand/clay gouge as the clay content approached 20%. Under moistening clay, mineralogy played a key role. If the illite clay content was 5%, the moistening led to an increase in peak velocity by more than an order of magnitude; if the bentonite clay was 5%, it led to stabilization of sliding. While alteration in friction coefficient after moistening remained relatively small, the scaled kinetic energy could vary by several orders of magnitude.

**Keywords:** sliding regime; clay gouge; radiation efficiency; fault rheology; slider-model

## 1 引言

构造断层是地壳的主要结构特征。若岩体中形成了断层, 构造应力的进一步累积和释放也将受到断层结构特性的控制。人为诱发的更强烈的地震通常发生在构造断层附近。地震既可能位于正在进行的采矿作业区附近, 也可能位于距离采矿作业区一

定距离的地方。人为诱发地震可能异常严重, 会造成的人员伤亡严重和资源损失巨大<sup>[1-2]</sup>。

在初始原岩改造过程中形成的成熟断层, 这些原岩是不同类型岩石和矿物成分的拼合体<sup>[3-6]</sup>。断层的长期演化伴随着交代过程, 并且会有活动流体输入。地壳和地幔流体渗入断层, 促进化学反应, 即强矿物相被弱矿物相所替代。因此, 黏土矿物(伊

利石、蒙脱石和其他矿物类型)通常集中在断层核心<sup>[2,7]</sup>,并影响断层的摩擦特性<sup>[8-10]</sup>。在湿润后,黏土矿物性质会发生本质变化。主滑移带中的黏土矿物可以吸收层间水,显著改变断层核心的强度和摩擦特性。温石棉、蒙脱石和利蛇纹石等矿物在吸水饱和后强度可降低约 50%<sup>[11]</sup>。在某些条件下,含黏土层会表现出明显的膨胀,这可能会导致强烈的交叉流动、孔隙压力降低和滑动失稳<sup>[12]</sup>。浅层富含黏土矿物断层的滑动行为可通过其黏弹性特性来确定。黏弹性特性受微观机制差异的影响,如微观层面的热活化过程,这些过程无法通过宏观测量得到。

关于不连续面填料中黏土矿物比例变化对摩擦系数影响的试验研究表明,摩擦系数会发生本质变化。Ruggieri 等<sup>[13]</sup>指出,将方解石基质中页岩材料的比例从 0 增加到 50%,摩擦系数会从 0.71 降低到 0.37。根据 Kocharyan 等<sup>[14]</sup>的试验,当石英砂中滑石的比例增加至 25%时,摩擦系数会从 0.61 降低到 0.39。含黏土的材料主要表现出速度强化特性(即滑动速度增加时断层抗剪力增强),这与石英、长石和方解石填料不同,后者表现出速度弱化特性<sup>[7,9]</sup>。

根据构成断层核的矿物成分,在受到构造力或重力作用的断层上可以出现不同的地震型或无地震型滑动模式<sup>[15-16]</sup>。除其他事项外,实验室试验促进了我们对断层行为机制和浅层地震活动变化的理解。本研究通过实验室试验,探讨了湿润条件下填充砂-黏土的模型断层滑动规律,研究了从黏滑到稳定蠕滑的转变,并展示了动态滑动在流变特性和能量特性上的变化。

## 2 材料与方法

本文开展了模型断层摩擦滑动的实验室试验,试验装置如图 1 所示。采用 2 块有机玻璃粗糙表面的接触面模拟模型断层,有机玻璃表面的粗糙度高度约为 0.5 mm,有机玻璃之间的间隙填充了一层由砂和黏土混合而成的颗粒材料(S)。在试验中,尺寸为 8 cm×8 cm×3 cm 的可移动块体 B1 在法向应力( $\sigma_N$ )和剪切应力( $\sigma_s$ )的作用下沿不可移动块体 B2 滑动。法向应力 $\sigma_N$ 由载荷重量决定,通常约为 80 kPa,剪切应力通过刚度为 60 kN/m 的弹簧 K 施加,弹簧的末端以约 20  $\mu\text{m/s}$  的恒定位移速率( $u_s$ )拉动。块体的相对位移使用激光传感器(D)ILD2300-100(Micro-Epsilon,德国)在 0~5 kHz 的频率范围内测量,精度为 1  $\mu\text{m}$ 。剪切力使用传感器(F)CFT/5 kN(HBM,德国)控制,精度为 1 N。力学参数随时间的变化趋势如图 2 所示。

在固定块上钻了 2 个直径为 1 mm 的小孔,孔距为 3 cm。这 2 个孔通过一个注入通道(W,见图 1)相连,用于将室温下矿化度为 1 g/L 的水泵入模型断层。试验中排水量保持恒定,在滑动模式变得规律后开始抽水,抽水持续 120~150 s,超压不超过 0.5 kPa,当块间接触面完全被水浸湿时停止抽水。在该试验设置下,孔隙压力没有明显变化,因此,所有观察到的效应都是由完全浸水后断层泥层流变特性的改变引起的。

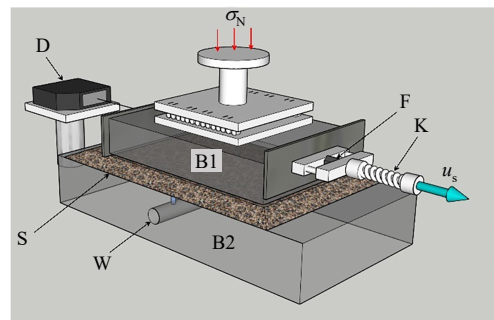
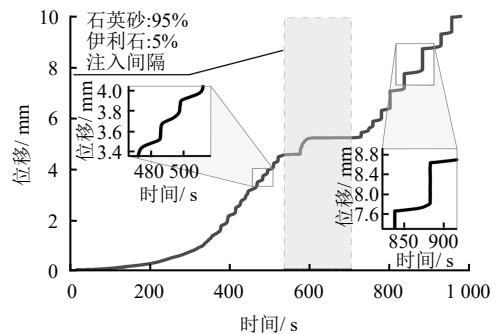
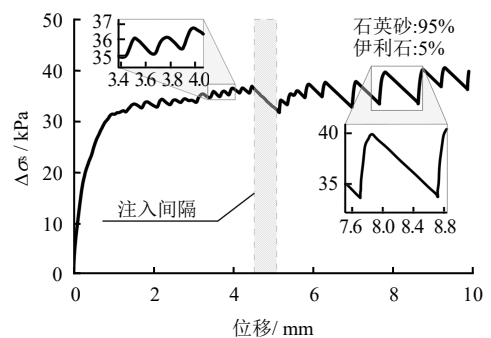


图 1 试验滑块模型装置示意图

Fig.1 Scheme of experimental slider model set-up



(a) 时间-位移曲线



(b) 位移-应力降曲线

图 2 试验过程中记录的力学参数(位移和剪切应力)  
Fig.2 Mechanical parameters (displacement and shear stress) recorded during experiment

本试验采用石英砂和不同黏土的混合物充当模型断层的填充物。石英砂由中等圆度的颗粒组成, 粒径范围为 0.160~0.315 mm。膨润土、伊利石和高岭石等黏土被用作填充物的第 2 组分。黏土的矿物成分见表 1。选择这些黏土是因为它们分布广泛, 且常出现在构造断层核的断层泥中<sup>[17]</sup>。黏土经过精细研磨, 偶尔会夹杂粉砂岩物质, 这些物质将在探针制备阶段被去除。所展示的黏土组(膨润土、伊利石和高岭石)中主要黏土矿物的含量各不相同。黏土组成材料的比例决定了黏土的物理和化学性质。例如, 随着蒙脱石含量的减少, 黏土的膨胀能力降低, 其吸附活性也随之降低。

表 1 试验所用黏土的矿物含量

Table 1 Mineral content of the clays used in experiments.

黏土类型	矿物含量 / %								
	蒙脱石	高岭石	伊利石	绿泥石	石英	微斜长石	斜长石	锐钛矿	菱铁矿
1	74.7	-	-	-	15.6	-	7.5	0.7	1.5
2	-	6.3	50.4	6.3	15.2	7.0	6.9	-	-
3	-	84.0	7.0	-	8.0	1.0	-	-	-

注: 1-膨润土 (Taganskoye 矿床); 2-伊利石黏土 (Nikolskoye 矿床); 3-高岭石黏土 (Eleninskoye 矿床)。

试验中实现了从规则黏滑到稳定蠕滑的广泛滑动状态。滑动行为(动态滑动)被定义为模型断层两侧的相对位移, 其峰值速度超过加载速度  $u_s$ , 并确定采用动态滑动参数(位移幅度  $\Delta x$ 、剪应力降  $\Delta\sigma_s$ 、滑动持续时间  $\Delta T$ 、峰值速度  $V_{peak}$ )来描述滑动状态。

### 3 结果

#### 3.1 断层滑动状态

模型断层填充物成分的改变导致了动态滑移参数的显著变化。在室温与湿度条件下, 填充有石英砂的模型断层表现出规律的黏滑运动。动态滑移的峰值速度  $V_{peak}$  为 0.6~3.0 mm/s, 平均约为 1.5 mm/s。断层湿润后, 动态滑移的特性发生了本质变化: 峰值速度增加 40 倍, 应力降幅度和每次滑移的位移幅度增加 3 倍, 而动态滑移的持续时间减少了 250%。湿润后的摩擦系数从 0.45 增加到 0.50。

在干燥条件下, 当向砂土中加入黏土且黏土比例增加时, 观察到断层滑动状态趋于稳定(见图 3)。这种稳定表现为峰值速度降低、剪切应力下降、位移幅度减小以及滑动持续时间延长。当填料中的黏土含量达到 20%时, 滑动最终稳定(过渡到稳定蠕变), 这一数值对于所研究 3 种矿物类型的黏土均相

同。值得注意的是, 含黏土断层的摩擦系数不依赖于黏土类型, 其值从 0.46 (无黏土) 增加到 0.54~0.55 (黏土含量为 20%)。

与干燥条件下的摩擦强度相比, 含黏土断层的摩擦强度在断层湿润后并未发生变化, 但它们的变形特性却产生了根本性改变。在相同黏土含量下, 不同类型黏土的峰值速度差值达到了 2 个数量级(见图 3(c))。对于所有 3 种类型的黏土, 随着填料中黏土含量的增加, 峰值速度呈下降趋势。与含膨润土和高岭石的断层相比, 含伊利石的断层在动态滑动时表现出相当高的峰值速度, 直至黏土含量达到 15%。对于含 5%伊利石黏土的模型断层, 其峰值滑动速度相对于纯石英砂填充的断层降低了不到一个数量级。对于膨润土和高岭石, 在黏土浓度相同的情况下, 峰值速度降低 2~3 个数量级(见图 3(c))。当填料中黏土含量为 20%时, 含不同类型黏土的断层行为差异已无法区分。

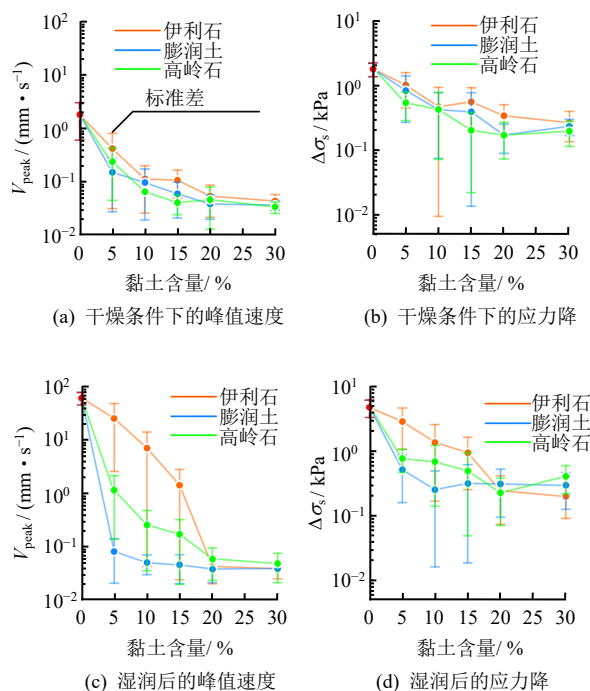


图 3 干燥条件下和湿润后峰值速度和应力降随黏土含量的变化

Fig.3 Variations of peak velocity and stress drop versus clay content in dry conditions and after moistening

剪应力降与滑移量之比随填料中黏土含量的变化表现出相同的变化趋势, 但趋势不太明显(见图 3(d))。模型断层在湿润后滑动状态转变的特性可通过  $Z$  因子的变化来体现<sup>[6]</sup>,  $Z$  因子表征了断层湿润后平均峰值滑移速度相对于其在干燥条件下的初始状态的相对减小量, 其计算方法如下:

$$Z = \frac{\langle V_{\text{peak}}^0 \rangle - \langle V_{\text{peak}}^1 \rangle}{\langle V_{\text{peak}}^0 \rangle} \quad (1)$$

式中： $\langle V_{\text{peak}}^0 \rangle$ 为湿润前的平均峰值速度； $\langle V_{\text{peak}}^1 \rangle$ 为湿润后的平均峰值速度。因此，如果 $Z$ 因子为负，则表明湿润后峰值速度有所增加；如果该参数接近于0，则表明湿润前后的峰值速度几乎相同。 $Z$ 因子与填料中黏土含量之间的关系（见图4）表明，对于纯石英砂，其湿润后的峰值速度增加了约30%（ $Z \approx -30$ ）。对于含有至少5%膨润土或高岭土的填料，湿润后的峰值速度几乎保持不变（ $Z \approx 0$ ）。然而，对于含有5%~10%伊利石的填料，湿润后的峰值速度与干燥条件下的峰值速度相比显著增加。随着填料中伊利石含量的增加，峰值速度降低，滑动状态逐渐稳定。伊利石的 $Z$ 因子表现出独特的行为，这可以通过湿润后的峰值速度显著高于湿润前的峰值速度来解释。从图4中可以看出，湿润后的峰值速度 $\langle V_{\text{peak}}^1 \rangle$ 几乎是湿润前峰值速度的50倍。

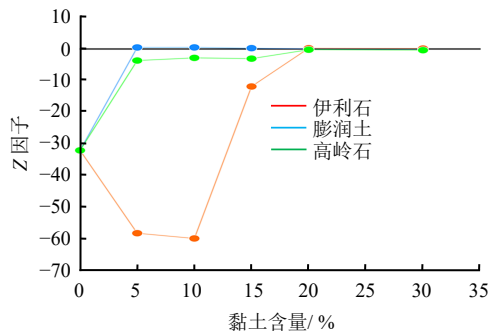


图4 模型断层中 $Z$ 因子与黏土含量的关系

Fig.4 Z-factor versus clay content in the model fault

### 3.2 动态滑移的缩放动能

改变填料中的黏土含量实质上影响了动态滑移过程中的能量平衡。针对所有检测到的事件，其比例动能估算如下：

$$e_{\text{lab}} = \frac{E_k}{M_{\text{lab}}} \quad (2)$$

式中： $e_{\text{lab}}$ 为比例动能； $E_k$ 为滑移过程中可动块体B1的最大动能值； $M_{\text{lab}}$ 为实验室地震矩，其计算方法如下<sup>[18]</sup>：

$$M_{\text{lab}} = \Delta\sigma_s SL \quad (3)$$

式中： $L$ 为块体的长度； $S$ 为接触面积。

参数 $e_{\text{lab}}$ 与能量/地震矩比 $e = E_s / M_0$ （ $E_s$ 为地震能量， $M_0$ 为标量地震矩）<sup>[18]</sup>类似，在地震学中

用于表征地震的效率。 $e_{\text{lab}}$ 的小值对应“慢滑事件或慢地震”，而大值则特指“实验室地震”。

比例动能可以很容易地通过动态滑移参数来表示：

$$e_{\text{lab}} = \frac{E_k}{M_{\text{lab}}} = \frac{mV_{\text{peak}}^2 / 2}{\Delta\sigma_s SL} = \frac{m}{2SL} \frac{V_{\text{peak}}^2}{\Delta\sigma_s} \quad (4)$$

图5展示了取决于动态滑移参数的 $e_{\text{lab}}$ 变化情况。在干燥条件下，含黏土的断层会产生慢速滑移，其比例动能介于 $10^{-9}$ ~ $10^{-7}$ 之间。不同矿物类型的黏土之间差异不明显，且在大多数“动态”事件中， $e_{\text{lab}}$ 不超过 $10^{-5}$ 。模型断层湿润后， $e_{\text{lab}}$ 在 $10^{-7}$ ~ $10^{-5}$ 范围内的动态滑移次数显著增加。当伊利石含量达到5%~10%时，峰值速度增加了2个数量级，比例动能量级达到 $10^{-3}$ 。

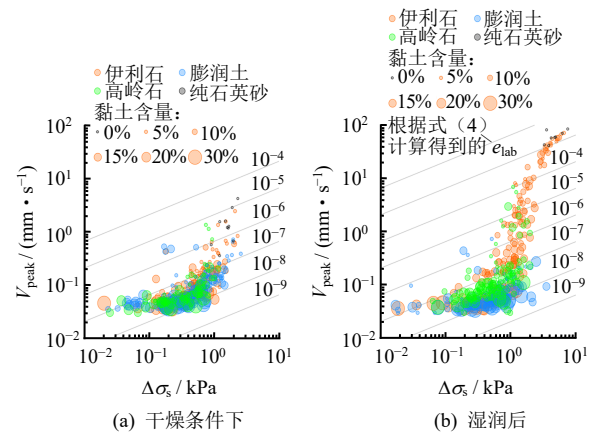


图5 峰值速度与剪切应力降的关系

Fig.5 Peak velocity versus shear stress drop.

在所进行的试验中，动态滑移参数的变化表明，由于填料中黏土含量的增加和矿物成分的变化，断层上的滑动状态发生了改变。这种变化涵盖了广泛的缩尺动能范围（6个数量级）。

### 3.3 模型断层的流变

断层行为的特殊性由断层泥的流变特性决定。通常用于描述多晶材料变形的结构超塑性模型，也可用于描述断层流变<sup>[19]</sup>。结构超塑性现象决定了在边界高应力集中下发生的晶间滑移和晶粒旋转的机制（在试验条件下，不会发生晶粒破坏）。多晶材料行为的特殊性表明，经典位错蠕变并不局限于每个晶粒的塑性变形，而是许多晶粒集体行为的特点。因此，在某些条件下，颗粒材料的变形可通过晶间滑动现象特有的关系来描述<sup>[6, 20]</sup>：

$$\dot{W} = \frac{1}{C} \sigma_s^{1/\alpha} \quad (5)$$

式中:  $\dot{W}$  为应变率;  $\zeta$  为材料常数;  $\sigma_s$  为施加应力;  $\alpha$  为表征应力敏感性的材料参数。

当剪切变形主要集中在断层核部时, 位移描述如下:

$$W(t) = \frac{\tau V_{\text{peak}}}{\alpha} \left\{ 1 - \left[ 1 + (1 - \alpha) \frac{t}{\tau} \right]^{\frac{\alpha}{\alpha-1}} \right\} \quad (6)$$

式中:  $V_{\text{peak}} = \frac{dW}{dt}$ ;  $W$  为沿界面的位移;  $t$  为滑移持续时间;  $\tau$  为该过程的特征时间,  $\tau = \frac{\alpha}{k_s V_{\text{peak}}} \sigma_{s0}$ ;  $\sigma_{s0}$

为蠕变开始时模型断层边界处的切向应力,  $k_s$  为断层的剪切刚度。

式 (6) 中用于估算断层泥流变特性的关键参数包括指数  $\alpha$ 、过程特征时间  $\tau$  和剪切刚度  $k_s$ 。式 (6) 中的指数  $\alpha$  在 0 到 1 之间变化。当  $\alpha$  趋近于 1 时, 式 (6) 趋近于黏性流体的相应流变方程:

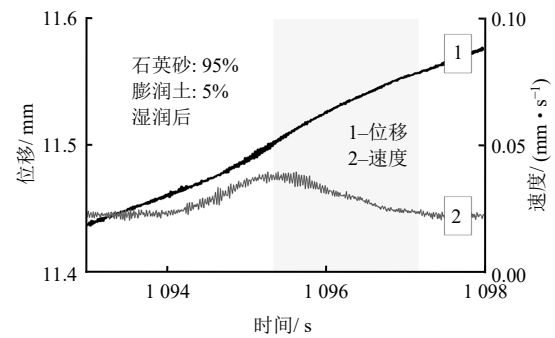
$$W(t) = \int_0^t V_{\text{peak}} e^{-\frac{t}{\tau}} dt = V_{\text{peak}} \tau \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (7)$$

当  $\alpha$  趋近于 0 时, 式 (6) 渐近趋于库仑 (干) 摩擦的对数关系特征<sup>[20]</sup>:

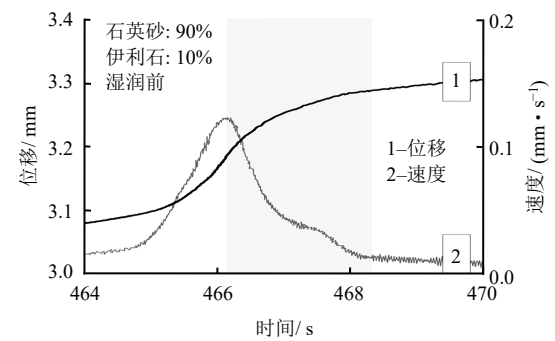
$$W(t) = \int_0^t \frac{V_{\text{peak}}}{1 + \frac{t}{\tau}} dt = V_{\text{peak}} \tau \ln \left( 1 + \frac{t}{\tau} \right) \quad (8)$$

图 6 为具有不同流变参数的动态滑移位移记录。通过式 (6) 对试验记录进行逼近, 以描述流变特性。曲线中应用近似的部分对应于后动态运动阶段。该部分的起点对应于滑动速度最大的时刻, 终点对应于蠕变开始的时刻。当后动态阶段的速率等于弹簧被拉伸的速率时, 即达到这一时刻。参数  $\alpha$  和  $\tau$  是通过使用 MATLAB 中的 nlinfit 方法进行非线性近似确定的。

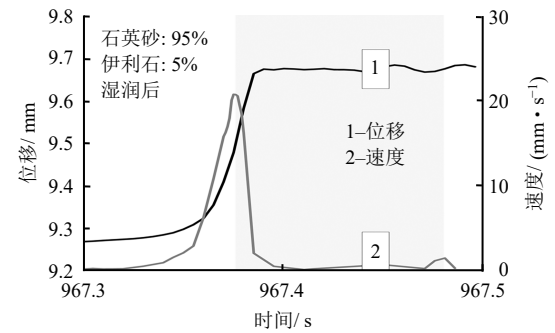
参数  $\alpha$  可用于估算湿润对含黏土断层流变性的影响。对于填充纯石英砂的断层, 参数  $\alpha$  接近于 0, 即其流变特性可通过干摩擦关系来描述。对于不同类型黏土含量变化时参数  $\alpha$  的变化, 图 7 所示的结果表明, 随着黏土比例的增加, 干燥和湿润状态下的断层行为逐渐过渡到黏性流体的流变特性, 但这种过渡的特性取决于黏土的矿物类型和湿润情况。例如, 填充物中含有高岭石的模型断层在干燥和饱水状态下的流变特性几乎相同 (见图 7(b)), 而对于含有伊利石的填充物, 随着黏土比例的增加, 干混合物向“黏性流体”流变特性的过渡要快得多。



(a)  $\alpha = 0.99, \tau = 2.71, V_{\text{peak}} = 0.04 \text{ mm/s}$



(b)  $\alpha = 0.56, \tau = 0.66, V_{\text{peak}} = 0.125 \text{ mm/s}$



(c)  $\alpha = 0.01, \tau = 0.0065, V_{\text{peak}} = 21 \text{ mm/s}$

图 6 不同流变参数下模型断层上的动态滑移示例 (灰色区域表示后动态阶段)

Fig.6 Examples of dynamic slips on model fault with different rheologic parameters (gray area marks the postdynamic phase)

特征时间  $\tau$  表示后动态阶段的持续时间, 其变化范围较大。随着黏土含量的增加,  $\tau$  会增加 1~2 个数量级, 但这种增加的特性在很大程度上取决于填料中黏土的矿物类型 (见图 8)。

## 4 讨论

流体饱和度会从根本上改变含黏土断层的滑动状态, 滑动状态转变的特性主要由填料的矿物成分以及湿润程度决定。地震滑动机制通常是在考虑孔隙压力上升<sup>[21-22]</sup>这一经典效应以及流体流入断层区导致摩擦系数降低<sup>[23]</sup>的背景下进行的。在浅层, 流体

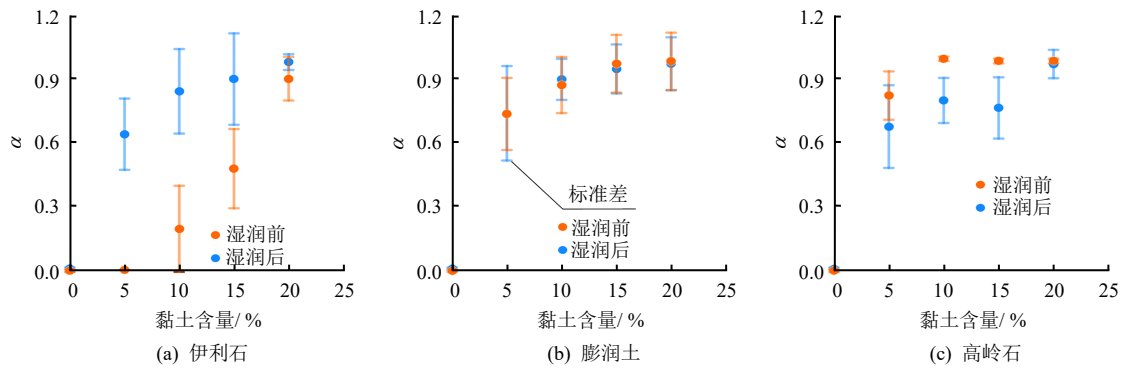


图7 指数 $\alpha$ 随黏土含量的变化  
Fig.7 Variations of exponent  $\alpha$  versus clay content

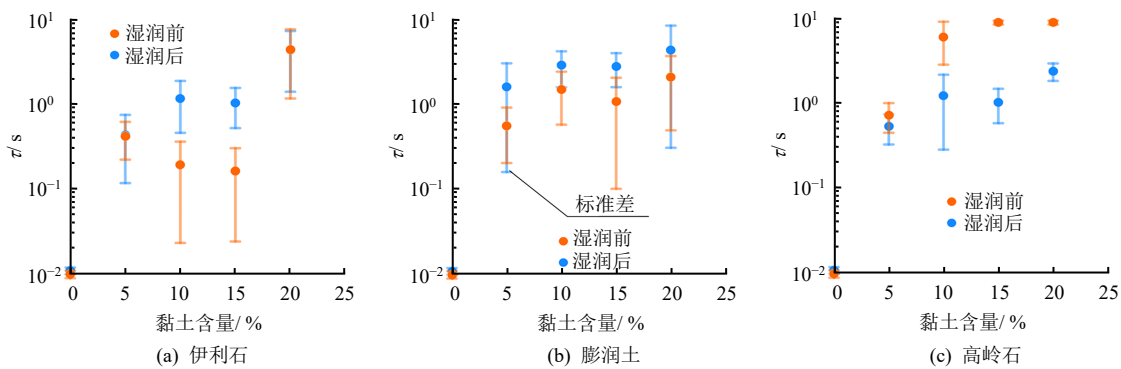


图8 特征时间 $\tau$ 与黏土含量的变化关系  
Fig.8 Variations of characteristic time  $\tau$  versus clay content

可以渗透到岩体中,并因人为过程(向地层内部注水或水库水位变化<sup>[24]</sup>)而引发地震。它也可能因自然过程而发生,如冰雪融化<sup>[25]</sup>和大量降雨<sup>[26]</sup>。流体的内生来源也可能发挥重要作用,例如沿断层上升的岩浆流体和地幔流体,或在沉积物和变质岩内部循环的地壳流体<sup>[27]</sup>。此外,当水被困在低渗透性岩石内部或之间时,它会施加稳定作用,并在岩石变形时提供高孔隙压力;或者,当水在矿物结构中松散结合时,如在水合黏土中,当黏土被压缩时,水会产生伪孔隙压力<sup>[28]</sup>。

湿度增加本质上会影响黏土的流变特性。由于水饱和和后吸附材料的强度降低,蒙脱石或利蛇纹石等材料的摩擦系数在饱和后将降低数倍<sup>[29]</sup>。然而,摩擦系数本身的降低并不一定意味着诱发地震滑动的概率更高。事实上,剪切摩擦阻力的变化可能会在滑动动力学中发挥更重要的作用。众所周知,富含弱层状硅酸盐矿物的层状结构断层泥比颗粒结构的矿物混合物表现出更稳定的滑动(连续蠕变),且黏土颗粒的排列方向是断层活动的重要指标<sup>[30]</sup>。这种效应在从断层带提取的天然材料和人造化合物中均有所发现。所进行的试验揭示了含黏土模型断层

在湿润后的摩擦行为存在本质差异,例如,当填料中湿润伊利石的含量在5%~10%之间时,会发生快速动态滑动,在此过程中,大部分累积能量以弹性振动的形式释放。

这些滑移可被视为具有高辐射效率的“普通地震的实验室模拟”<sup>[29]</sup>。同时,当填充物中含有10%的湿润膨润土时,模型断层表现出稳定的蠕变。然而,目前尚不清楚在不同压力-温度( $P-T$ )条件和剪切速率下,断层泥中页硅酸盐的阈值含量为多少时能够提供滑动稳定。所进行的试验表明,在低正应力下,任何黏土材料含量达到20%就足以使断层滑动完全稳定。增加正应力显然会导致阈值升高,例如,对于由方解石和页岩组成的材料,当页岩的比例超过30%~50%时,干接触就会稳定<sup>[26]</sup>。

滑移模式受断层泥的影响已在现场得到验证<sup>[15, 31-32]</sup>。在2个不同的岩体中,观察到了采矿期间由波纹状爆炸引发的微地震事件参数的显著差异<sup>[15, 31-32]</sup>。比较了俄罗斯别尔哥罗德区 Korobkovskoe 铁矿床和摩尔曼斯克区 Khibiny 磷灰石-霞石矿床的地震活动,在这2个矿床中,都发现了大型断层带。Korobkovskoe 矿床的围岩是由含铁石英岩组成

的完整岩石, 没有矿物集合体分异过程的迹象。东北断层核心的主要滑移带由断层泥构成, 主要矿物是绿泥石, 形成非常细小的集合体 (颗粒尺寸不超过  $10 \mu\text{m}$ )。黑云母的含量高达 1%, 与绿泥石集合体共生。构成主要滑移带的地质材料表现出速度增强特性<sup>[32]</sup>。在 Khibiny 磷灰石-霞石矿床观察到的剖面中, 存在以 Egrin 矿脉 (一种高脆性矿物) 和破碎蚀变带 (霞石氧化带) 形式存在的构造不连续性。霞石在风化过程中很容易被破坏, 在断层带中, 它被沸石、钙和钠的水铝硅酸盐所替代, 包括形成大量的黏土矿物, 如钠板石、蒙脱石、球粒石、蒙脱石和钾伊利石。

所分析的地震活动是在开采活动停止后, 即波纹状爆炸发生时记录的, 所获得的波形用于定位和估算震源参数。Korobkovskoe 矿床的地震事件主要集中在爆破硐室附近和断层带沿线, 检测到的地震事件震级从  $-2.8 \sim -0.8$  不等。在 Khibiny 地块的磷灰石-霞石矿床处检测到的震级较高, 为  $0.74 \sim 2.50$ 。在这 2 个矿床记录的地震事件中, 地震能量减少量和破裂传播的平均速度存在本质差异。Khibiny 矿床中计算得出的地震能量减少量在  $5.4 \times 10^{-7} \sim 10^{-5} \text{ J}/(\text{N} \cdot \text{m})$  之间, 而破裂速度为  $V_r = (0.36 \sim 0.80) C_\beta$  (地块中剪切波的传播速度), 这与“正常”地震的范围相对应<sup>[15]</sup>。在 Korobkovskoe 铁矿床处, 获得的地震能量减少量明显较低:  $E_s / M_0 = 5.3 \times 10^{-9} \sim 2.2 \times 10^{-6} \text{ J}/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。破裂速度为  $(0.008 \sim 0.500) C_\beta$ , 剪切裂缝的平均值为  $0.16 C_\beta$ , 拉伸裂缝的平均值为  $0.09 C_\beta$ , 这些值对应于所谓的“慢速”地震<sup>[32]</sup>。

这种地震能量减少和破裂速度的显著差异是由裂缝填充物的不同物质组成引起的。如上所述, 组成 Korobkovskoe 矿床主要滑移带的地质材料通常表现出速度增强特性, 但在 Khibiny 矿床, 许多已识别出的地震事件 (检测到了同震破裂的迹象) 发生在 Egrin 矿脉沿线, 即由脆性材料组成的不连续面沿线, 这些材料表现出速度减弱特性。值得注意的是, Khibiny 地块发生的最强烈地震之一 (1989 年, 震级为  $4.8 \sim 5.0$ ) 的震源是沿一条平倾 Egrin 矿脉的动态滑动<sup>[25]</sup>。

根据多年观测结果, 在 Khibiny 地块, 与枯水期 (11-4 月) 相比, 融雪和降雨期间 (5-10 月) 地震次数呈现季节性增长<sup>[25, 33-34]</sup>。许多学者将这一现象归因于孔隙压力增大, 因为大气降水沿着霞石氧化带的高渗透性区域渗入地块内部<sup>[33-34]</sup>。我们认为, 更可能的原因是含有大量黏土矿物 (蒙脱石和

皂石) 的破碎蚀变带, 在遇水时, 这些破碎蚀变带的摩擦系数会异常降低<sup>[29]</sup>。

改变构成断层主要滑移带的黏土矿物学特征可能导致从无震变形状态向孕震状态的转变。据推测, 在特定条件下, 蒙脱石向伊利石的转变可促进地震活动区域的出现<sup>[35]</sup>。根据计算, 在巴巴多斯增生楔 ( $7 \sim 18 \text{ km}$ ) 下发生这种转变的深度与增生楔朝海部分下方的地震空白区与前弧海沟下方的地震带之间的边界 ( $10 \sim 12 \text{ km}$ ) 相吻合<sup>[35]</sup>。

大多数诱发地震发生在板内区域。在历史上无地震的地区, 人为诱发的地震活动可能发生, 甚至规模较大<sup>[1]</sup>。断层再活化可能由流体注入引发<sup>[36]</sup>, 但滑动行为可能不会诱发地震<sup>[37]</sup>。若没有历史地震记录, 则地震风险评估将失效<sup>[38]</sup>。对于采矿作业区, 由于微地震活动、断层结构和流变特性之间存在联系<sup>[32]</sup>, 因此可用地质信息来补充地震数据的不足。

控制充填断层滑动的关键机制是受限断层泥层中颗粒间的相互作用<sup>[39-40]</sup>。正应力与剪应力的作用导致填充物内部形成力链, 这些力链由承担主要载荷的颗粒组成, 而周围颗粒则基本不受载荷, 正是这些力链决定了模型断层的摩擦阻力, 这一现象经常可在光弹性材料试验中观察到<sup>[41]</sup>。当断层被润湿且其填充物中含有黏土成分时, 黏土的吸湿活性会导致黏土质黏塑性组分的体积增加。因此, 硬质石英颗粒之间形成强颗粒间接触的概率降低, 力链的数量和结构也相应减少<sup>[42]</sup>。具有最高吸湿活性和最高膨胀能力的黏土材料是蒙脱石、贝得石和非特龙石等蒙脱石类矿物。伊利石不吸水, 在水中也不膨胀。因此, 当填充物中伊利石的比例较高时, 由伊利石组成的断层滑动会趋于稳定, 这与本文所得结果完全一致 (见图 3)。使用颗粒间滑动模型来描述含黏土断层的变形特性十分方便, 该模型能够根据黏土含量、矿物类型和湿润程度估算模型中参数的变化。之后, 可以估算在环境因素变化下的流变变化。

在受限断层泥层中发生的力学过程的特性, 可通过该层的有效黏度来描述<sup>[43]</sup>。随着断层填充物中黏土含量的增加, 可观察到从干摩擦流变到“黏性流体”流变的转变。在经典的“速率和状态”摩擦方程中引入一个附加项 (即剪切的“黏性”阻力), 以在数值模拟中更好地解释这一转变<sup>[44]</sup>:

$$\tau_{\text{vis}} = \eta V_{\text{peak}} / \delta \quad (9)$$

式中:  $\tau_{\text{vis}}$  为与动态黏度相关的抗剪力;  $\eta$  为有效黏度;  $\delta$  为层厚。值得注意的是, 固体的有效黏度并

非其材料的固有属性,这一点与牛顿流体不同。该参数是固体流变特性的一个特征,取决于变形过程的具体时间,或者更准确地说,取决于变形速率。因此,可以通过现场观测结合数值模拟来进行地震危险性评估。

## 5 结 论

研究表明,含黏土断层的滑动模式随着黏土含量和矿物学特性的变化而转变,包括在干燥和湿润状态下的变化。对于石英砂和含高达 10%伊利石的混合物,多表现为快速动态滑动;而在含 5%~20%黏土的断层泥中,则向稳定蠕变转变,且转变的阈值随矿物成分的不同而变化。尽管在湿润过程中摩擦系数变化很小,但滑动过程中耗散的能量却显著不同,这反映了断层泥流变特性的根本变化。

随着黏土比例的增加,干断层和含水断层的总体流变行为逐渐从干摩擦转变为黏性摩擦。这种变化的性质在很大程度上取决于矿物学特征,这强调了矿物成分在决定断层稳定性和滑动动力学中的关键作用。即使黏土含量相同,不同的黏土矿物也可能增加滑动稳定性或导致动态弱化,这对评估地震风险具有重要意义。了解这些流变变化对于改进断层力学预测模型至关重要,尤其是在含水变化随时间影响断层行为的地区。

## 参 考 文 献

- [1] FOULGER G R, WILSON M P, GLUYAS J G, et al. Global review of human-induced earthquakes[J]. **Earth-Science Reviews**, 2018, 178: 438-514.
- [2] KOCHARYAN G G, QI C, KISHKINA S B. et al. Potential triggers for large earthquakes in open pit mines: a case study from Kuzbass, Siberia[J]. **Deep Under-ground Science and Engineering**, 2022, 1(2): 101-115.
- [3] CHESTER F M, CHESTER J S. Ultracataclastic structure and friction processes of the Punchbowl fault, San Andreas system, California[J]. **Tectonophysics**, 1998, 295(1-2): 199-221.
- [4] CHOI J H, EDWARDS P, KO K, et al. Definition and classification of fault damage zones: a review and a new methodological approach[J]. **Earth-Science Reviews**, 2016, 152: 70-87.
- [5] FAULKNER D, JACKSON C, LUNN R, et al. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones[J]. **Journal of Structural Geology**, 2010, 32: 1557-1575.
- [6] KOCHARYAN G G. Geomechanics of faults[M]. Moscow: [s. n.], 2016.
- [7] COLLETTINI C, TESEI T, SCUDERI M, et al. Beyond Byerlee friction, weak faults and implications for slip behavior[J]. **Earth and Planetary Science Letters**, 2019, 519(11): 245-263.
- [8] HAINES S H, VAN DER PLUIJM B A. Patterns of mineral transformations in clay gouge, with examples from low-angle normal fault rocks in the western USA[J]. **Journal of Structural Geology**, 2012, 43: 2-32.
- [9] KOCHARYAN G G, SHATUNOV I V. Topical issues in hydrogeology of seismogenic fault zones[J]. **Izvestiya, Physics of the Solid Earth**, 2024, 60: 681-703.
- [10] 谢礼焕, 刘贺娟, 班胜男, 等. 不同组分断层泥的剪切特性试验研究[J]. **岩土力学**, 2023, 44(9): 3545-2554.
- XIE Li-huan, LIU He-juan, BAN Sheng-nan, et al. Experimental study on shear properties of fault gouge with different mineral compositions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(9): 3545-2554.
- [11] MORROW C A, MOORE D E, LOCKNER D A. The effect of mineral bond strength and adsorbed water on fault gouge frictional strength[J]. **Geophysical Research Letters**, 2000, 27(6): 815-818.
- [12] ASHMAN I R, FAULKNER D. The effect of clay content on the dilatancy and frictional properties of fault gouge[J]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 2023, 128: e2022JB025878.
- [13] RUGGIERI R, SCUDERI M M, TRIPPETTA F, et al. The role of shale content and pore-water saturation on frictional properties of simulated carbonate faults[J]. **Tectonophysics**, 2021, 807: 228811.
- [14] KOCHARYAN G, NOVIKOV V, OSTAPCHUK A, et al. A study of different fault slip modes governed by the gouge material composition in laboratory experiments[J]. **Geophysical Journal International**, 2017, 208(1): 521-528.
- [15] ADUSHKIN V V, BESEDINA A N, KOCHARYAN G G, et al. A new approach to hazard control of human-triggered earthquakes near mining facilities[J]. **Doklady Earth Sciences**, 2024, 519(1): 1930-1935.
- [16] OSTAPCHUK A A, PAVLOV D V, RUZHICH V V, et al. Seismic-acoustics of a block sliding along a fault[J]. **Pure and Applied Geophysics.**, 2020, 177: 2641-2651.
- [17] HAINES S H, VAN DER PLUIJM B A, IKARI M J, et al. Clay fabric intensity in natural and artificial fault gouges:

- implications for brittle fault zone processes and sedimentary basin clay fabric evolution[J]. **Journal of Geophysical Research**, 2009, 114: B05406.
- [18] ADUSHKIN V V, KOCHARYAN G G, OSTAPCHUK A A. Parameters determining the portion of energy radiated during dynamic unloading of a section of rock massif[J]. **Doklady Earth Sciences**, 2016, 467: 275-279.
- [19] GOLDIN S V. Dilatancy, repackaging and earthquakes[J]. **Izvestiya, Physics of the Solid Earth**, 2004, 40(10): 817-832.
- [20] KOCHARYAN G G, KULYUKIN A A, PAVLOV D V. Specific dynamics of interblock deformation in the Earth's crust[J]. **Russian Geology and Geophysics**, 2006, 47(5): 669-683.
- [21] KANG Y, GENG Z, LIU B, et al. Experimental investigation on fluid-induced slip behavior of fault filled with fault gouge[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2024, 16(9): 3661-3672.
- [22] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons, 1943.
- [23] BARANOV S V, SHEBALIN P N, ZHUKOVA S A, et al. Influence of rock watering on post-seismic activity: a study on the Khibiny massif[J]. **Russian Journal of Earth Sciences**, 2023, 6: 1-16.
- [24] SMIRNOV V B, PONOMAREV A V. Physics of transient modes of seismicity[M]. Moscow: RAS, 2020.
- [25] KOZYREV A A, BATUGIN A S, ZHUKOVA S A. Influence of water content on seismic activity of rocks mass in apatite mining in Khibiny[J]. **Gornyi Zhurnal**, 2021, 1: 31-36.
- [26] ROTH P, PAVONI N, DEICHMANN N. Seismotectonics of the eastern Swiss Alps and evidence for precipitation-induced variations of seismic activity[J]. **Tectonophysics**, 1992, 207: 183-197.
- [27] XU Z, YU T, LIN P, et al. Anomalous patterns of clay minerals in fault zones[J]. **Engineering Geology**, 2023, 325: 107279.
- [28] SUMMERS R, BYERLEE J. A note on the effect of fault gouge composition on the stability of frictional sliding[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1977, 14(3): 155-160.
- [29] KOCHARYAN G G, BESEDINA A N, GRIDIN G A, et al. Friction as a factor determining the radiation efficiency of fault slips and the possibility of their initiation: State of the art[J]. **Izvestiya, Physics of the Solid Earth**, 2023, 59: 337-363.
- [30] BAO H, QI Q, LAN H, et al. Sliding mechanical properties of fault gouge studied from ring shear test-based microscopic morphology characterization[J]. **Engineering Geology**, 2020, 279: 105879.
- [31] BESEDINA A N, GRIDIN G A, KOCHARYAN G G, et al. Activation of seismo-acoustic event safter large-scale blasting atan iron ore body of the kursk magnetic anomaly[J]. **Journal of Mining Science**, 2024, 60: 1-11.
- [32] OSTAPCHUK A A, MOROZOVA K G, BESEDINA A N, et al. Features of seismicity triggered by ripple-fired explosions at the Korobkovskoye iron ore deposit[J]. **Russian Journal of Earth Sciences**, 2024, 5: 1-16.
- [33] KOZYREV A A, ZHURAVLEVA O G, ZHUKOVA S A. Seismicity variations in space and time in the area of the Saamy fault, Khibiny Massif, Kola Peninsula[J]. **Gornyi Zhurnal**, 2023, (1): 79-84.
- [34] BARANOV S V, SHEBALIN P N, ZHUKOVA S A, et al. Influence of rock watering on post-seismic activity: a study on the khibiny massif[J]. **Russian Journal of Earth Sciences**, 2023, 6: 1-16.
- [35] VROLIJK P. On the mechanical role of smectite in subduction zones[J]. **Geology**, 1990, 18(8): 703.
- [36] URPI L, GRAUPNER B, WANG W, et al. Hydro-mechanical fault reactivation modeling based on elasto-plasticity with embedded weakness planes[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2020, 12(4): 877-885.
- [37] GUGLIELMI Y, CAPP A F, AVOUAC J P, et al. Seismicity triggered by fluid injection-induced aseismic slip[J]. **Science**, 2015, 348(6240): 1224-1226.
- [38] SHEBALIN P N, GVISHIANI A D, DZEBOEV B A, et al. Why are new approaches to seismic hazard assessment required?[J]. **Doklady Earth Sciences**, 2022, 507: 930-935.
- [39] KOCHARYAN G G, MARKOV V K, OSTAPCHUK A A, et al. Mesomechanics of shear resistance along a filled crack[J]. **Physical Mesomechanics**, 2014, 17: 123-133.
- [40] YASSAGHI A, MARONE C. The relationship between fault zone structure and frictional heterogeneity, insight from faults in the High Zagros[J]. **Tectonophysics**, 2019, 762: 109-120.
- [41] DRESCHER A, DE JOSSELIN DE JONG G. Photoelastic verification of a mechanical model for the

- flow of a granular material[J]. **Journal of Mechanics and Physics of Solids**, 1972, 20(5): 337-340.
- [42] TEMBE S, LOCKNER D A, WONG T F. Effect of clay content and mineralogy on frictional sliding behavior of simulated gouges: binary and ternary mixtures of quartz, illite, and montmorillonite[J]. **Journal of Geophysical Research**, 2010, 115(B3): B03416.
- [43] QI C, WANG Z, KOCHARYAN G G. Mechanical model of evolution of granular matter force chains[J]. **Granular Matter**, 2024, 26: 35.
- [44] BUDKOV A M, KOCHARYAN G G. Experimental study of different modes of block sliding along interface. Part 3: numerical modeling[J]. **Physical Mesomechanics**, 2017, 20(2): 203-208.

### 《岩土力学》2024年第12期被EI收录论文(27篇, 收录率100%)

序号	论文题名	作者	页码
1	压气储能内衬洞室储气关键问题与设计要点评述	蒋中明, 刘宇婷, 陆希, 等	3491-3509
2	基于单元调亡法的压气蓄能盐穴围岩潮解行为表征及其影响研究	曾真, 马洪岭, 梁孝鹏, 等	3510-3522
3	压缩空气储能地下内衬洞库上覆岩体稳定性分析	易琪, 孙冠华, 姚院峰, 等	3523-3532
4	考虑剪切变形的高压储气洞室复合式预设缝衬砌力学特性	张格诚, 徐晨, 夏才初	3533-3544
5	聚氨酯类聚合物砂浆-混凝土界面黏结性能与变形特征试验研究	蒋中明, 石兆丰, 杨雪, 等	3545-3554
6	压气法盾构仓内气压与围岩气-液两相流相互作用模型研究	黄继辉, 秦世康, 赵昱, 等	3555-3565
7	纤维增强柔性混凝土压气储能地下洞室力学响应研究	鲁青云, 徐英俊, 夏才初, 等	3566-3575
8	充填型岩石节理剪切力学特性研究进展	康永水, 周秀斌, 刘滨, 等	3576-3595
9	考虑轴向应力作用的贯通裂隙岩体变形及渗流特性研究	刘新荣, 张吉禄, 周小涵, 等	3596-3612
10	降雨作用下堆积层边坡与下穿隧道相互作用模型试验研究	张永杰, 胡涛, 郭一鹏, 等	3613-3623
11	碳化硅增强相变充填体热力学性能研究	乔兰, 尹雅, 李庆文, 等	3624-3634
12	过硫酸盐修复有机污染土的效果及强度特性研究	王菲, 叶子俊, 苗文权, 等	3635-3644
13	砂质充填型节理剪切力学行为试验研究	杨泰华, 黄友琦, 刘滨, 等	3645-3657
14	调控层胶结充填体三轴压缩力学性能及破坏特征研究	徐文彬, 赵康奇, 张亚伦, 等	3658-3667
15	考虑黏度时空变化特性速凝化学浆液渗透注浆机制	王鹏程, 阎学松, 孙星亮, 等	3668-3680
16	不同有效应力下泥岩盖层二氧化碳突破压力演化特征的试验研究	陈博文, 李琦, 谭永胜, 等	3681-3693
17	考虑水力滞后与变形耦合的非饱和土持水曲线模型	陈可, 王琛, 梁发云, 等	3694-3704
18	含水率对红层泥岩填料动力特性影响试验研究	陈康, 刘先峰, 蒋关鲁, 等	3705-3716
19	考虑地下连续墙接缝的深基坑RFD系统研究	THENDAR Yoshua, LIM Aswin	3717-3727
20	倾斜薄层炭质板岩隧道围岩大变形特征及其卸荷破坏防控对策研究	阳军生, 杨喜锋, 方星桦, 等	3728-3737
21	航油储罐珊瑚砂地基变形特性研究	张小燕, 李吉, 蔡燕燕, 等	3738-3747
22	复合地基极限承载力的变分极限平衡法分析——竖向增强	周志雄, 周凤玺, 曹小林, 等	3748-3754
23	基于短梁-弹簧模型的盾构隧道施工期上浮变形计算方法	李文博, 甘晓露, 刘念武, 等	3755-3767
24	基于符号回归算法的结构性砂土损伤规律研究	蒋明镜, 张卢丰, 韩亮, 等	3768-3778
25	抗转动对散粒介质三轴剪切力学行为的影响机制	金磊, 叶阳, 王宇, 等	3779-3790
26	基于LightGBM-Informer的盾构隧道管片上浮长时间序列预测模型	真嘉捷, 赖丰文, 黄明, 等	3791-3801
27	水锤作用下饱和地基蓄排水隧道的动力响应	黄超, 钱建固	3802-3814