

不同粗糙度岩石界面断层滑移失稳力学特征分析

龚 政, 宋 凯, 司 绪, 梁钦锋, 赵扬锋*

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 为探究岩石界面粗糙度对断层滑移力学特征的影响, 研究不同粗糙度岩石组合结构在不同加载速度和竖向载荷下双面剪切实验的力学特征。研究结果表明: 岩石界面粗糙度的增加, 提高了凹凸体强度和排列层次, 竖向载荷的增加, 提高了凹凸体闭合程度, 进而影响岩层滑移的类型和进程; 岩石界面粗糙度的增加使界面黏聚力增加和启滑剪应力提高, 平均每单位节理粗糙系数 (joint roughness coefficient, JRC) 的提高可提升 9.35% 的界面黏聚力, 在特定 JRC 范围内, 断层界面凹凸体微观力链结构在滑移初期易发生断裂, 引发微冲击前兆事件; 水平加载速度的增加降低了岩层启滑时断层面剪应力, 但降低幅度随着岩石界面粗糙度的增加而减小, 不同 JRC 下降低幅度的最大差值达到 4.26%。

关键词: 冲击地压; 断层滑移; 粗糙度; 滑移速度; 岩石界面; 黏聚力; 加载速度; 力学特征

中图分类号: TU457

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)05-0554-07

Mechanical characteristics analysis of fault slip instability of rock interfaces with different roughness

GONG Zheng, SONG Kai, SI Xu, LIANG Qinfeng, ZHAO Yangfeng*

(School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to investigate the influence of rock interface roughness on the mechanical characteristics of fault slip, the mechanical characteristics of rock assemblage structures with different roughness under different loading speeds and vertical loads in two-sided shear experiments are investigated. The results show that: the increase of rock interface roughness will improve the strength and arrangement level of the bumps, and the increase of the vertical load will increase the degree of the bumps closure, which will then affect the type and process of the rock slip. The increase of rock interface roughness will increase the interfacial cohesion and slip shear stress, and the average interfacial cohesion can be increased by 9.35% per unit of joint roughness coefficient (JRC) increase. Within a specific range of JRC, the microscopic force chain structure of the fault interface bumps is prone to fracture at the early stage of slip, which will lead to micro-impact precursor events. Increasing the horizontal loading rate reduces the fault surface shear stress during initiation of slip, but the reduction decreases with the increase of rock interface roughness, and the maximum difference of the reduction under different JRC reaches 4.26%.

Keywords: rock burst; fault slip; roughness; slip velocity; rock interface; cohesion; loading speed; mechanical characteristics

0 引言

在外部应力的作用下, 断层会发生失稳和剪切滑移, 从而引发矿震、地壳变形等地质灾害^[1], 近 2/3 的冲击地压事故属于断层等地质构造引发的断层滑移型冲击地压^[2]。因此, 研究断层在不同条

件下发生滑移的力学特征, 对深部开采中预防断层滑移型灾害具有重要参考意义。

断层滑移特性的研究主要通过剪切试验来进行^[3]。樊玉峰等^[4]开展了静载、侧向动载和两向动载条件下, 含弱面岩煤结构体双面剪切滑移失稳试验, 研究表明静载条件下岩煤组合结构表现出

收稿日期: 2025-03-03 修回日期: 2025-04-13 接受日期: 2025-04-20 责任编辑: 焦丽

基金项目: 辽宁省教育厅基本科研项目 (JYTZD2023078); 国家及省级大学生创新训练计划项目 (S202410147024)

作者简介: 龚 政 (2001-), 男, 安徽 六安人, 硕士研究生, 主要从事矿山灾害力学方面的研究。E-mail: 3174273786@qq.com

通信作者: 赵扬锋 (1979-), 男, 河南 三门峡人, 博士, 教授, 主要从事矿山灾害力学方面的研究。E-mail: zhyf_20010284@sina.com

明显的分区破坏形式。宋义敏等^[5]通过岩石的双面剪切试验发现,随着岩石表面位移场的演化,裂纹尖端阻碍位移传递,形成压应变集中区。赵扬锋等^[6]利用双向剪切摩擦试验,对不同预制倾角断层的花岗岩失稳过程进行声-电信号联合分析,得出断层黏滑过程中声发射信号和电荷感应信号的能量、分形维数和频谱幅值等多源参量联合演化规律。

粗糙度作为影响断层结构面剪切滑移的重要力学特性之一,在一定程度上控制着断层的滑移和失稳等行为^[7]。李利萍等^[8]利用煤岩界面超低摩擦试验装置,研究煤岩组合结构在不同界面粗糙度下发生滑移时的超低摩擦特征,结果表明粗糙度越小,煤岩组合结构越容易发生超低摩擦现象。LIU等^[9]认为,沿剪切方向的最大节理粗糙系数(JRC)能较好地表征总节理面,估算其抗剪强度。

许多学者注意到粗糙度的变化对断层滑移失

稳特征的影响,并利用剪切试验进行了许多断层滑移机理和特性方面的研究。但在双面剪切条件下,岩石断层界面粗糙度对断层滑移特征影响方面的研究却鲜有报道。本文利用双面剪切试验研究不同粗糙度岩石组合结构在不同加载速度和竖向载荷下滑移失稳的力学特征,为深部开采中预防断层滑移所引发的灾害提供理论和试验基础。

1 试验方案

1.1 试验系统

试验加载与位移记录系统采用岩煤结构静动组合加载试验系统^[4],见图1。该系统的加载主体部分为静动组合加载试验机,轴向和侧向加载控制范围为0~600 kN,位移记录范围为0~100 mm。试验加载速度采用慢速加载(0.4 kN/s)和快速加载(0.8 kN/s)两种方式。粗糙度测量使用SJ-210表面粗糙度测量仪。



图1 试验加载系统

Fig.1 test loading system

红砂岩试样表面测线布置见图2。由于断层面粗糙构成不同^[10],考虑到试样滑动面综合粗糙度对断层滑移的影响,将长为200 mm,宽为50 mm的滑动面划分为100个10 mm×10 mm的方格,见图2中黑色线,依次测量图2中红色测线的粗糙度系数。

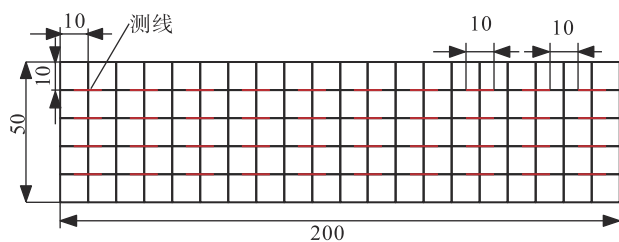


图2 红砂岩摩擦面测线布置(单位:mm)

Fig.2 layout of measurement lines for red sandstone friction surface (unit: mm)

1.2 试样制备

为探究不同粗糙度对断层滑移的影响,现场取回红砂岩,加工成12组标准岩石组合试样,每

组试样由上、下固定岩样和中部滑动岩样组成。两端岩样尺寸为250 mm×50 mm×50 mm(长×宽×高),中间岩样尺寸为200 mm×50 mm×100 mm(长×宽×高)。将岩石组合试样的上、下摩擦面分别用理论粒径为0.423 mm、0.169 mm和0.016 mm的砂纸打磨^[11],再利用SJ-210表面粗糙度测量仪测得岩样摩擦面的粗糙度系数。

粗糙度系数^[12]的计算式为

$$JRC = 13.69 + 32.98 \lg Z_2, \quad (1)$$

式中, Z_2 为每条测线(剖面线)上所有测点高度坐标的均方根。

$$Z_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N-1} (Z_i - Z_{i+1})^2}{(N-1) \Delta s^2}}, \quad (2)$$

式中: N 为测点数; Z_i 、 Z_{i+1} 分别为第*i*个和第*i*+1个测点高度; Δs 为测点间距。

依据式(1)、式(2)及王来贵等^[13]的处理方法,得到上述3种理论粒径砂纸打磨的红砂岩试件,JRC分别为17.19、17.91和19.98。粗糙度系数越大,红砂岩表面越粗糙。将岩样按照打磨砂

纸的目数进行编号,见表1。岩样加工后处于自然干燥状态备用,加工后备用的部分岩样见图3。

表 1 红砂岩试样分组
Tab.1 classification of red sandstone

JRC	试验组号	加载速度/(kN·s ⁻¹)	竖向载荷/kN
17.19	1-1	0.4	25
	1-2	0.4	50
	1-3	0.8	25
	1-4	0.8	50
17.91	2-1	0.4	25
	2-2	0.4	50
	2-3	0.8	25
	2-4	0.8	50
19.98	3-1	0.4	25
	3-2	0.4	50
	3-3	0.8	25
	3-4	0.8	50



图3 部分红砂岩试样

Fig.3 partial red sandstone specimens

2 力学特征分析

2.1 断层界面应力

构建岩石组合结构的断层活化模型,见图4。

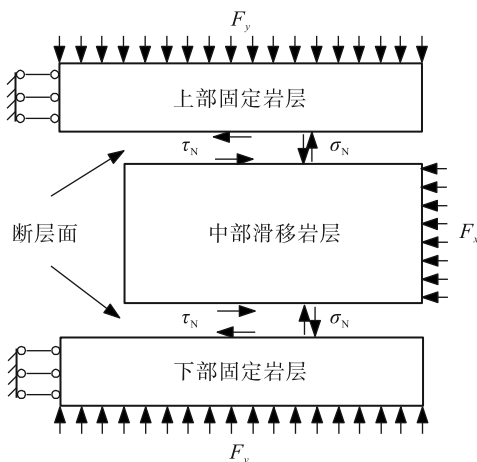


图4 断层活化力学模型

Fig.4 mechanical model of fault activation

图4中, F_x 为水平载荷, F_y 为竖向载荷, σ_N 为断层面正应力, τ_N 为剪应力, S 为断层面实际接触面积。当断层面应力状态处于极限平衡状态,由图4可得断层面正应力为

$$\sigma_N = F_y / S, \quad (3)$$

剪应力为

$$\tau_N = F_x / 2S_0. \quad (4)$$

2.2 竖向载荷对不同粗糙度岩石界面滑移的影响

为展示断层面凹凸体分层构成,利用赫兹理论,将断层上、下两粗糙界面的接触等效为粗糙界面和刚性界面的接触,建立断层接触面凹凸体分层排列模型,见图5。

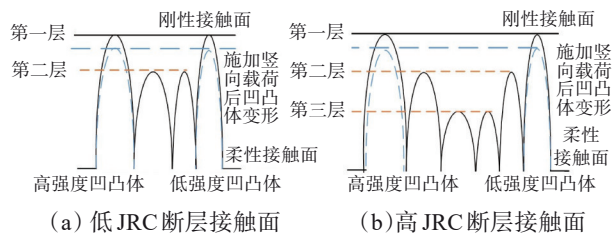


图5 断层接触面凹凸体分层排列模型

Fig.5 fault contact surface convex-concave body layered arrangement model

图5中,断层面凹凸体为点接触形式,基于弹性力学方程和赫兹理论,假设接触压力呈半椭圆分布,最大压应力出现在接触中心。将高度接近且有一定抵抗外部载荷能力的凹凸体称为1个分层。柔性界面由多个分层组成,断层面分层数随粗糙度的增加而增加。椭圆的高度越大表示凹凸体有效长度越大,宽度越大表示凹凸体强度越高。

断层面滑动产生的滑动摩擦力由摩擦面作用力和黏聚力组成。摩擦面作用力主要包括凹凸体间的闭锁和犁沟,黏聚力主要产生于外力作用下凹凸体的塑性变形。若凹凸体的抗剪强度为 τ_m ,塑性接触面积为 A ,根据微观滑动摩擦研究^[14],断层面滑动摩擦力可表示为

$$F = eF_y - F_x / 2 + \lambda \tau_m A, \quad (5)$$

式中: e 为能量耗散系数, $0 < e \leq 1$; λ 为黏聚系数, $0 < \lambda \leq 1$ 。

由图5和式(5)可知,断层滑移失稳过程中,滑动摩擦力主要与断层面正应力、剪应力和凹凸体抗剪强度有关。最外层凹凸体处首先发生应力集中,低强度者先断裂,高强度者后断裂,外层凹凸体断裂后,内层凹凸体逐层闭锁并断裂。

以竖向载荷开始加载时刻为0 s,绘制不同粗糙度系数下岩石组合结构的时间-水平载荷-水平位移,见图6和图7。

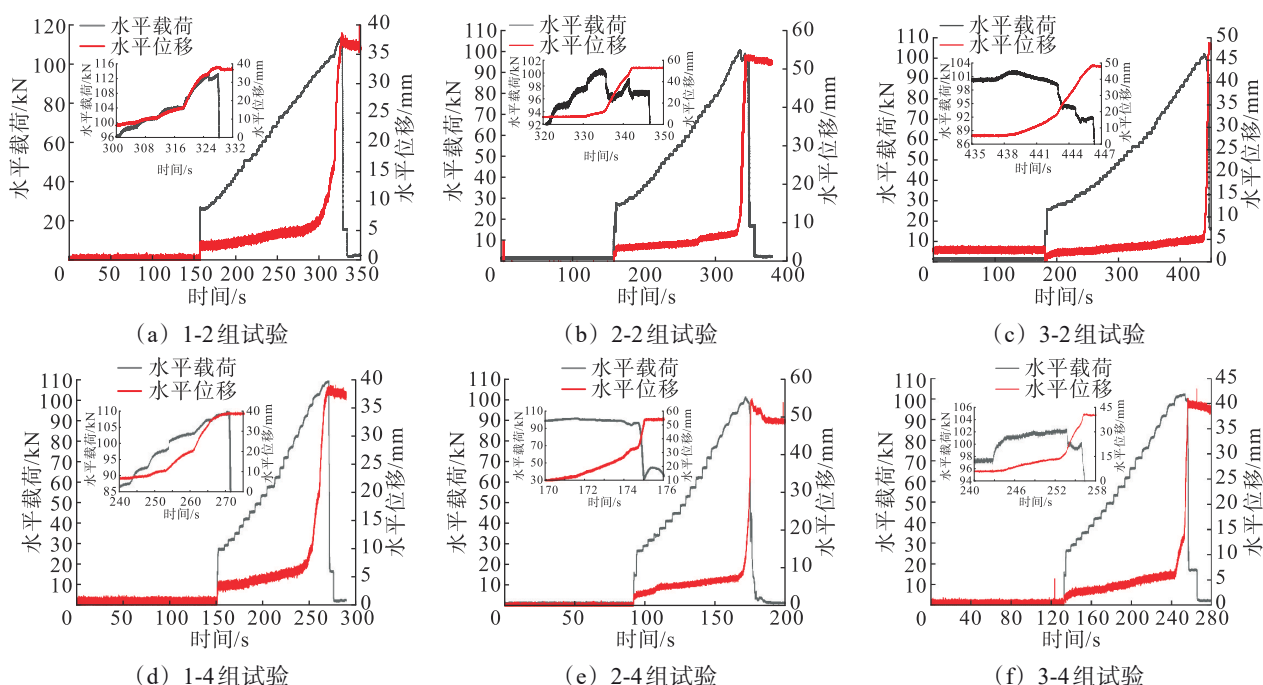


图6 竖向载荷为50 kN时岩层滑动时间-水平载荷-水平位移

Fig.6 rock layer sliding time-horizontal load horizontal displacement under a vertical load of 50 kN

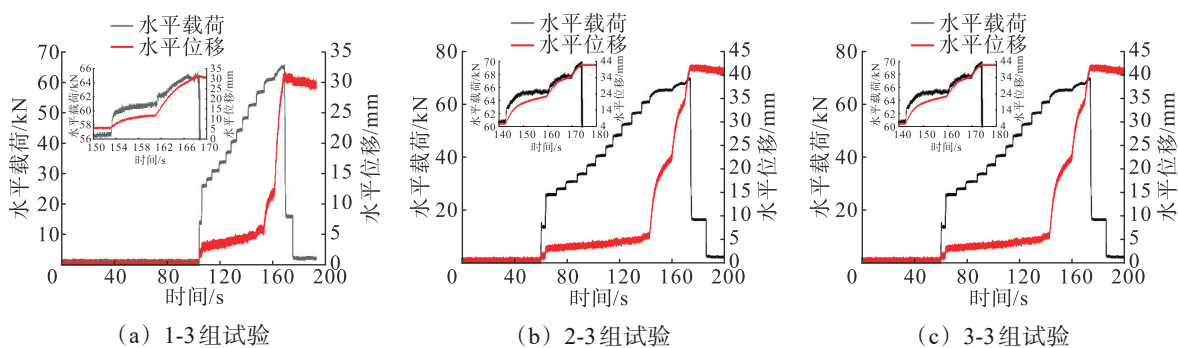


图7 竖向载荷为25 kN时岩层滑动时间-水平载荷-水平位移

Fig.7 rock layer sliding time-horizontal load horizontal displacement under a vertical load of 25 kN

由图6和图7可知,在静载作用下,按照中间红砂岩试块(简称“岩层”)的位移速度,将岩石组合结构的滑移过程划分为3个阶段:岩层位移的轻微增加阶段(弹性变形阶段)、缓慢增加阶段(启滑阶段)和快速增加阶段(剪切塑性变形阶段)^[15]。当滑动位移行程接近50 mm时,去除水平载荷,位移出现小幅回弹。

竖向载荷为50 kN时,断层面存在弱段和分层排列的凹凸体,各处摩擦强度分布不一致。在应力积累过程中,当外部载荷接近凹凸体破裂强度时,局部区域会先发生微破裂和微滑移^[16]。第一阶段时,在竖向载荷的作用下,岩石组合结构滑动面具有较大的摩擦力,水平载荷的增加无法直接造成岩层的实质滑动。此时岩层位移轻微增加,这是由摩擦面外层凹凸体在水平载荷的作用下逐渐闭合、锁死造成的。进入第二阶段后,摩擦面

内部的外层凹凸体已经完成闭锁,凹凸体的闭合作用使水平载荷快速累加。由于断层面应力分布不均匀,随着水平载荷的不断增大,在凹凸体处出现应力集中,断层面中闭锁的外层凹凸体无法完全抵抗水平载荷的作用,低强度凹凸体的微破裂逐渐增多,摩擦面损伤不断发育,断层滑移的速度缓慢增加。进入第三阶段后,随着水平载荷的进一步增加,断层面平均剪应力达到峰值点,断层摩擦强度趋于极限,外层凹凸体被爬越、剪断,储存的弹性能突然释放,断层失去力学平衡。但此时断层界面仍残留一定的摩擦强度,断层累积的应力逐渐加速释放,直到断层错动失稳,断层剪应力突降^[17-18],断层面的力学平衡被打破后,岩层进入自失稳演化,岩层位移出现快速增加。

JRC为17.19时,由图6(a)和图6(d)可知,由于断层面内部的凹凸体分层不明显,闭锁

时提供的摩擦力较小, 1-2组和1-4组试验岩层滑动时, 未出现水平载荷的突降, 在第二阶段摩擦面凹凸体完全破裂后, 每次增加水平载荷都会引起岩层的稳定滑动。JRC为17.91时, 由图6(b)和图6(e)可知, 2-2组和2-4组试验在岩层滑动的第一阶段中期, 分别在277.219 s和108.109 s时发生0.87 mm和0.96 mm的位移突增。这是因为断层面部分凹凸体没有完全发育, 部分外层凹凸体强度较低, 在闭合的过程中, 强度较低的凹凸体会突然出现大破裂, 位移突增, 随后断层面又重新达到受力平衡, 凹凸体开始新的闭合过程。到达第二阶段后, 闭锁的凹凸体使水平载荷不断累积, 并在岩层发生快速位移时产生水平载荷突降。JRC为19.98时, 由图6(c)和图6(f)可知, 3-2组和3-4组试验在岩层滑动的第一阶段均表现为位移稳定的缓慢增加, 说明摩擦面凹凸体已经发育完全, 在闭合过程中没有发生较多的大破裂。凹凸体的相互作用决定了断层的宏观摩擦强度, 控制着断层摩擦滑动过程^[19-20]。JRC为17.19时, 1-2组和1-4组试验滑移分别在318.430 s和253.742 s进入第三阶段, 未出现水平载荷突降, 岩层滑动表现为稳滑。JRC为17.91时, 在第三阶段, 水平载荷达到峰值后出现突降。在随后的快速滑动中, 水平载荷呈数次“台阶型”下降至滑动结束, 岩层滑动表现出黏滑的特征。

如图7所示, 当竖向载荷降低至25 kN时(以0.4 kN/s为例), 断层滑移无黏滑特征。JRC为17.19时, 岩层滑移表现为稳滑。随着粗糙度系数的增加, 岩层的滑移表现为稳滑和振颤相结合的滑动形式。研究表明, 同一粗糙度下, 竖向载荷的增加使断层面摩擦强度减小^[1]。在低竖向载荷作用下, 断层面滑动面之间的闭合程度降低, 使断层更易发生稳滑现象, 滑动规律与竖向载荷为50 kN时类似。

岩层黏滑周期和水平峰值载荷见表2。由表2可知, JRC为17.91时, 2-2组和2-4组试验的水平载荷经过启滑阶段快速积累后, 在第三阶段初期, 分别在335.014 s和171.457 s, 水平载荷达到100.59 kN和101.51 kN时出现突降, 随后只发生一次明显黏滑事件, 黏滑周期持续时间分别为6.145 s和3.038 s。这是因为部分摩擦面凹凸体在达到承载极限后发生快速脆性破裂, 进入“再闭合”和“再破裂”。当加载速度增加, 凹凸体破裂后再闭合程度下降, 更加容易发生“再破裂”, 因此2-2组、2-4组试验经历一次黏滑周期后, 第二次水平载荷峰值较首次峰值分别降低了1.457 kN和4.941 kN。

JRC为19.98时, 3-2组和3-4组试验水平载荷分别在438.840 s和253.680 s达到102.24 kN和102.42 kN, 随后突降, 进入黏滑周期。第一次黏滑周期持续时间分别为0.803 s和0.451 s, 第二次水平载荷峰值较首次峰值分别降低了7.502 kN和2.01 kN。与低粗糙度相比, 高粗糙度下, 更大的应力累加使快速滑移时断层在更短时间内发生更大的应力降低。并且经历第一次黏滑事件后, 岩层又经历了第二次较小的黏滑事件, 持续时间分别为1.665 s和1.672 s, 水平载荷峰值较上次分别降低7.50 kN和2.01 kN。研究初步认为, 粗糙度的增加不仅使断层面凹凸体强度增加, 而且使各层凹凸体顶端长度差距加大, 产生更为明显的分层排列; 外层凹凸体总体强度高于内层; 在发生首次黏滑时, 外层凹凸体先发生大规模破裂, 之后破裂向内层凹凸体逐层蔓延, 从而发生后续黏滑事件。

表2 岩层黏滑周期和水平峰值载荷
Tab.2 rock layer stick-slip cycle and horizontal peak load

试验组号	黏滑周期/s		载荷峰值/kN		
	首次	第二次	首次	第二次	第三次
2-2	6.145		100.590	99.133	
2-4	3.038		101.510	96.569	
3-2	0.803	1.665	102.240	94.738	87.236
3-4	0.451	1.672	102.420	100.400	98.400

依据Mohr-Coulomb强度准则可得

$$\tau_N = c + \sigma_N \tan \varphi, \tag{6}$$

式中: c 为断层面的黏聚力, MPa; φ 为断层面的内摩擦角, $^\circ$ 。

将式(3)、式(4)和式(6)联立, 可推导出断层面正应力与剪应力函数, 见图8, c 和 φ 的计算值见表3。

由图8和表3可知, 随着断层面粗糙度的增加, 断层面黏聚力不断增加, 最高JRC下黏聚力较最低JRC提升26.1%。不同JRC组试验的内摩擦角最大误差为0.039 $^\circ$, 试验情况良好。

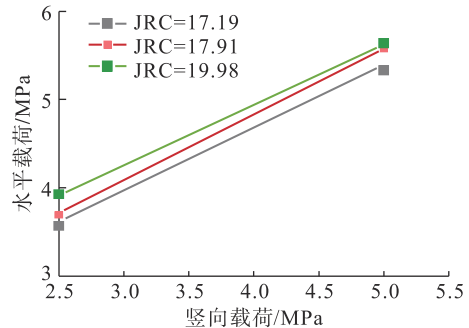


图8 断层面正应力与剪应力函数

Fig.8 normal stress and shear stress function on fault plane

表3 c 与 ϕ 的计算值
Tab.3 calculated values of c and ϕ

JRC	c/MPa	$\phi/(\text{°})$
17.19	1.340 5	0.958
17.91	1.358 7	0.979
19.98	1.697 8	0.940

综上,界面粗糙度的变化主要通过影响断层面凹凸体分层程度和剪切强度来控制滑动摩擦力,进而控制滑移进程,其中凹凸体分层程度对滑移类型控制起主要作用,凹凸体剪切强度仅随粗糙度提升有小幅增加。只有一个分层的断层面经历一次凹凸体全面破裂后无法重新累计应力,后续滑移表现为稳滑,凹凸体分层越多,断层面可以累计应力的次数越多,黏滑事件就越多。

2.3 加载速度对不同粗糙度岩石界面滑移的影响

当断层发生黏滑、加载速度为0.8 kN/s时,JRC为17.19组和19.98组试验首次黏滑持续时间分别为加载速度为0.4 kN/s时的47.4%和56.2%,表现出高度反比关系。JRC为19.98组试验的后续黏滑持续时间则没有降低,只有首次黏滑持续时间表现出速度依赖性。图9为不同粗糙度和加载速度下岩层启滑水平载荷和峰值水平载荷。

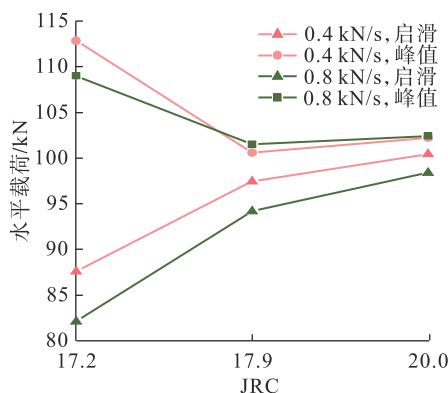


图9 不同粗糙度和加载速度下岩层启滑载荷与峰值载荷

Fig.9 graph of rock layer initial sliding load and peak load under different roughness and loading rates

对比分析不同粗糙度系数下水平加载速度的改变对岩石组合结构滑移方式和稳定性的影响,可以发现,JRC为17.19时,岩层发生稳滑时的峰值水平载荷和滑动距离有关,1-2组和1-4组试验分别在318.43 s和252.74 s进入第三阶段后,每次水平载荷的增加都会引起岩层的快速滑动。随着断层面粗糙度的提高,进入启滑阶段所需的水平载荷逐渐提高。岩层发生黏滑时,粗糙度系数的提高只引起峰值水平载荷的轻微增加。0.4 kN/s的加载速度下2-2组和3-2组试验启滑水平载荷与峰值水平载荷的差值分别为3.11 kN和1.82 kN,0.8 kN/s

的加载速度下2-4组和3-4组试验启滑水平载荷与峰值水平载荷的差值分别为7.32 kN和4.02 kN。

加载速度为0.4 kN/s时的启滑水平载荷均明显高于加载速度为0.8 kN/s的试验组,说明加载速度的提升会导致岩层滑移第一阶段凹凸体微破裂后的重新闭合度下降,从而引起启滑水平载荷的降低。随着粗糙度的增加,高加载速度下启滑水平载荷比低加载速度分别下降了6.27%、3.38%和2.01%,下降百分比逐渐减小。这是由于摩擦面粗糙度系数提升,凹凸体承载能力提高,第一阶段凹凸体微破裂事件变少,积累的能量在第二阶段启滑后释放。对于岩石组合结构,摩擦面越粗糙,加载速度越大,发生滑移型冲击地压的可能性越大。

综上,加载速度较大时,启滑水平载荷显著减小,这是由于凹凸体更快到达塑性抗剪强度,滑动摩擦力组成中黏聚力部分迅速降低,断层抗剪切能力下降。断层滑移速度和能量释放之间有较好对应关系,断层面粗糙度的变化不仅会影响滑移的形式,还会影响滑移的能量释放速度,随着粗糙度的增加,滑移过程表现出更大量的能量积累和更迅速的能量释放。

3 结论

(1) 岩石组合结构断层界面凹凸体分层排列,界面粗糙度的增加会提高凹凸体强度和排列层次,竖向载荷的增加会提高凹凸体闭合程度,进而影响岩层滑移的类型和进程。断层发生黏滑时,JRC的增加会引起断层面峰值应力提高,黏滑周期缩短和黏滑事件增多。首次黏滑事件的持续时间表现出速度依赖性,与水平加载速度呈高度反相关。

(2) 断层面粗糙度增加会使岩石界面黏聚力增加和启滑剪应力提高,平均每单位JRC的提高可提升9.35%的界面黏聚力。在特定JRC范围内,断层界面凹凸体微观力链结构在滑移初期易发生断裂,引发微冲击前兆事件。

(3) 水平加载速度的增加会降低岩层启滑时断层面剪应力,但降低幅度随着岩石界面粗糙度的增加而减小,不同JRC下降降低幅度最大差值达到4.26%。

参考文献(Reference):

- [1] 侯丙昌,孙峰,薛世峰,等.地质断层滑移剪切特性及力学机制研究[C]//中国力学学会.中国力学大会-2021+1论文集(第二册).中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院,2022:279-291.
- [2] LIU F, TANG C A, MA T H, et al. Characterizing rockbursts along a structural plane in a tunnel of the Hanjiang-to-Weihe River

- diversion project by microseismic monitoring[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(6): 1835-1856.
- [3] 范海军,郝艳广,肖盛燮. 岩样直剪应力-应变全程曲线研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊1): 2612-2617.
FAN Haijun, HAO Yanguang, XIAO Shengxie. Study on complete stress-strain curve of rock specimen under direct shear test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (Suppl.1): 2612-2617.
- [4] 樊玉峰,肖晓春,丁鑫,等. 岩煤结构静动组合加载试验系统研制及应用[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(3): 502-512.
FAN Yufeng, XIAO Xiaochun, DING Xin, et al. Development and application of a testing system for static and dynamic combined loading of rock-coal structures[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(3): 502-512.
- [5] 宋义敏,李肖飞,许海亮,等. 基于裂纹界面摩擦滑动演化的岩石断裂研究[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(2): 255-261, 279.
SONG Yimin, LI Xiaofei, XU Hailiang, et al. Research on rock fracture based on the evolution of friction sliding of crack interface [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49 (2): 255-261, 279.
- [6] 赵扬锋,丁玲,王学滨,等. 断层黏滑失稳过程声-电信号响应特征研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(4): 973-990.
ZHAO Yangfeng, DING Ling, WANG Xuebin, et al. Acoustic emission and charge signal response characteristics in the process of fault stick-slip instability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45 (4): 973-990.
- [7] RENAUD S, SAICHI T, BOUAAANANI N, et al. Roughness effects on the shear strength of concrete and rock joints in dams based on experimental data[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(10): 3867-3888.
- [8] 李利萍,胡学锦,潘一山,等. 不同粗糙度煤岩界面超低摩擦效应与声发射特征试验研究[J]. 力学学报, 2024, 56(4): 1047-1056.
LI Liping, HU Xuejin, PAN Yishan, et al. Experimental study on ultra-low friction effect and acoustic emission characteristics of coal-rock interface with different roughness[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2024, 56(4): 1047-1056.
- [9] LIU X G, ZHU W C, YU Q L, et al. Estimation of the joint roughness coefficient of rock joints by consideration of two-order asperity and its application in double-joint shear tests[J]. Engineering Geology, 2017, 220: 243-255.
- [10] 陶振宇,唐方福,张黎明,等. 节理与断层岩石力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992: 52-58.
- [11] 张健,许博,魏建平,等. 煤体表面粗糙度对接触角和表面能的影响研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2023, 42(6): 44-50.
ZHANG Jian, XU Bo, WEI Jianping, et al. Study on the influence of coal surface roughness on contact angle and surface energy[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2023, 42(6): 44-50.
- [12] YANG Z Y, LO S C, DI C C. Reassessing the joint roughness coefficient (JRC) estimation using Z_2 [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2001, 34(3): 243-251.
- [13] 王来贵,赵国超,刘向峰,等. 滑动过程中砂岩节理摩擦因数演化规律[J]. 煤炭学报, 2021, 46(9): 2874-2882.
WANG Laigui, ZHAO Guochao, LIU Xiangfeng, et al. Analysis the evolution of friction coefficient of sandstone joint during sliding process[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(9): 2874-2882.
- [14] PAN W J, LI X P, WANG L L, et al. Influence of surface topography on three-dimensional fractal model of sliding friction [J]. AIP Advances, 2017, 7(9): 095321.
- [15] 王泽利,何昌荣,周永胜,等. 断层摩擦实验中的应力状态及摩擦强度[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 4079-4083.
WANG Zeli, HE Changrong, ZHOU Yongsheng, et al. Stress state and frictional strength obtained with frictional experiments of fault [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (23): 4079-4083.
- [16] 陆坤权,曹则贤,厚美瑛,等. 论地震发生机制[J]. 物理学报, 2014, 63(21): 452-474.
LU Kunquan, CAO Zexian, HOU Meiyang, et al. On the mechanism of earthquake[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(21): 452-474.
- [17] 张重远,何满潮,陶志刚,等. 发震断层震前应力降现象及其机制探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(5): 916-927.
ZHANG Chongyuan, HE Manchao, TAO Zhigang, et al. Discussion on stress drop mechanisms of seismogenic faults before earthquakes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(5): 916-927.
- [18] 夏洪春,严滑钧,朱训国,等. 深埋隧洞中黏结型锚固系统的黏结性能研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2025, 44(2): 175-185.
XIA Hongchun, YAN Huajun, ZHU Xunguo, et al. Study of the bonding performance of bonded anchorage systems in deep-buried tunnels[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(2): 175-185.
- [19] 赵扬锋,樊艺,荆刚,等. 断层黏滑失稳过程声发射特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(增刊2): 3101-3113.
ZHAO Yangfeng, FAN Yi, JING Gang, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics in the process of fault stick-slip instability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(Suppl.2): 3101-3113.
- [20] 代树红,徐涛,黄华森,等. 基于DIC-FEM的岩石I型裂纹损伤扩展研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2023, 42(4): 385-390.
DAI Shuhong, XU Tao, HUANG Huasen, et al. Damage propagation research of rock mode I crack based on DIC-FEM[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2023, 42(4): 385-390.