

常/变法向应力下花岗岩节理剪切力学行为研究

韩建华^a, 孟凡震^{a,*}, 崔广昊^b, 修占国^a, 蔡其金^a, 李致远^a, 王在泉^a

(青岛理工大学 a. 理学院; b. 土木工程学院, 青岛 266525)

摘要:为深入研究花岗岩在深部高压环境下的变形特性和破裂行为,开展了高压条件下花岗岩节理直剪试验。采用常法向应力和变法向应力分级加载两种方案,探究不同法向应力对岩石节理的剪切强度、剪胀变形及黏滑行为的影响。试验结果表明:常法向应力加载条件下,花岗岩节理的峰值和残余剪切强度均随法向应力的增加而增加;剪切过程中,节理面的剪胀受法向应力所抑制,且法向应力越大抑制作用越明显。变法向应力分级加载条件下,随着法向应力的增加,花岗岩节理的剪切峰后阶段由混沌黏滑逐渐过渡为规则黏滑,且黏滑特性在高法向应力下更为显著;剪胀速率及变形量随法向应力的增加而降低,黏滑幅值和黏滑时间间隔随之增加。

关键词:花岗岩节理;直剪试验;法向应力;剪切强度;黏滑幅值;黏滑时间间隔

中图分类号:TU458⁺.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4602(2025)05-0058-07

Study on the shear behavior of granite joints under constant and variable normal stress

HAN Jianhua^a, MENG Fanzhen^{a,*}, CUI Guanghao^b,
XIU Zhanguo^a, CAI Qijin^a, LI Zhiyuan^a, WANG Zaiquan^a

(a. School of Science; b. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: To investigate the deformation characteristics and fracture behavior of granite under deep high-pressure conditions, direct shear tests on granite joints were conducted under high-pressure conditions. Two loading schemes, constant normal stress loading and variable normal stress loading, were employed to study the influence of different normal stresses on the shear strength, shear dilation deformation and stick-slip behavior of rock joints. Test results indicate that both the peak and the residual shear strength of the granite joints increase with the rise of normal stress under the constant normal stress loading conditions. Shear dilation of the joints is suppressed by the applied normal stress during shearing, and the suppression effect becomes more pronounced with the rise of normal stress. Under the variable normal stress loading conditions, the post-peak shear stage of the granite joints transitions from chaotic stick-slip to regular stick-slip with the rise of normal stress, and the stick-slip characteristics become more pronounced under high normal stress. As the normal stress ri-

收稿日期:2024-02-09

基金项目:山东省泰山学者青年专家项目(2019KJG002)

作者简介:韩建华(1999—),男,河北邯郸人。硕士,研究方向为岩石力学与地下工程。E-mail:1512127553@qq.com。

*通信作者:孟凡震(1988—),男,山东潍坊人。博士,教授,博士生导师,主要从事岩石力学与地下工程等方面的研究。
E-mail:xuelianmfzh@163.com。

ses, the shear dilation rate and the deformation decrease accordingly, while the stick-slip amplitude and the stick-slip time interval increase.

Key words: granite joints; direct shear test; normal stress; shear strength; stick-slip amplitude; stick-slip time interval

裂隙、节理、断层等不连续面的存在严重威胁围岩的稳定性^[1]。在深部隧道开挖过程中,由于开挖卸荷使原有不连续面的原位应力发生调整,极易造成岩体沿着原始断层或新形成的剪切破坏面滑动失稳,诱发围岩垮塌甚至岩爆^[2-4];对于深层构造断层来说,在多种外力的联合作用下,围岩应力不断积累,易导致断层失稳滑动甚至诱发地震^[5-6]。

天然岩石节理往往难以从现场直接获取,因此,通过对完整岩石进行劈裂获取粗糙节理面,对岩石节理面进行剪切试验的研究方法逐渐被采用。刘畅等^[7]对 8 种不同节理角度的花岗岩节理开展常法向应力剪切试验。吴备创^[8]分析了岩石节理在直接荷载和循环荷载下的剪应力、法向变形和破坏特征的演化规律。ZHAO 等^[9]对劈裂花岗岩节理开展常法向应力直剪试验,剪切过程中起伏体的退化主要分为峰值脆性破坏和峰后剪切摩擦。MORAD 等^[10]发现常法向应力下粗糙节理的剪切变形特性明显不同于完整岩石和光滑节理。可见,大多直剪试验是在常法向应力下进行的,对于变法向应力下岩石节理剪切行为的影响研究鲜有涉及。

LIU 等^[11]对 3 种岩石节理进行不同法向应力下的直剪试验,发现仅花岗岩节理在剪切过程中产生明显的黏滑。ZHOU 等^[12]发现在较低的法向应力下花岗岩节理的黏滑不会稳定发生,而在较高的法向应力下才会出现规则连续的黏滑。MENG 等^[13]对劈裂的花岗岩节理开展不同法向应力下的直剪试验,发现其在剪切过程中均发生了黏滑,且法向应力越大黏滑越明显。大量试验研究表明,花岗岩节理在高法向应力下的剪切黏滑行为通常伴随着断面滑动和能量释放^[13-16],且与深部断层滑动引起的地震事件相似^[5]。综上所述,开展高法向应力对花岗岩节理黏滑行为的试验研究是十分必要的,对于地震的发震机理研究和深埋隧道的防震减灾具有深远意义。

因此,研究常/变法向应力下花岗岩节理的剪切力学行为和变形演化规律,有助于了解地下岩体工程的灾害诱发机制,从而减少工程地质灾害所带来的经济损失和安全风险。

1 试验设备

青岛理工大学岩体多场耦合力学实验室自主设计的高温高压剪切试验系统(图 1),由高压加载系统、液压伺服控制系统、高温剪切试验箱、高精度传感器及数据采集系统组成。高压加载系统的位移加载速率为 0.001~1 mm/s,力加载速率为 0.01~10.0 kN/s,系统控制精度可达最大荷载量程的 0.5%,可实现力和位移控制方式的平滑切换。系统可进行常温和高温条件下完整岩石及岩石节理的常法向应力和常法向刚度直剪试验,并可实现实时精准伺服控制和实时监测双向液压缸的位移和压力。

2 试验方案及流程

2.1 花岗岩节理面制备

试验所用的细粒花岗岩的矿物颗粒平均粒径为 0.75 mm,其中石英、长石、云母的质量分数分别为 20.35%、44.12%、24.1%,其余矿物为角闪石和磁赤铁矿等。为了确保试验结果的准确性,采用的所有试样均取自同一块母岩。每个试样经过切割和磨平,加工成边长为 10 cm 的标准立方体,试样的表面粗糙度误差范围为±0.2 mm。采用巴西劈裂夹具将立方体试样固定在单轴压缩试验机上,施加轴向荷载,试样在线荷载压力作用

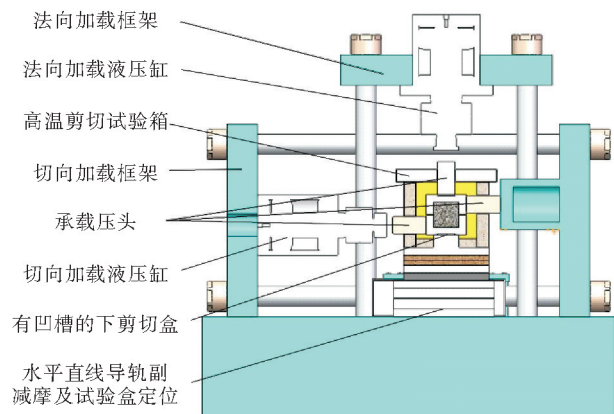


图 1 剪切试验系统

下发生拉伸破坏,形成2个相互咬合的节理面,见图2。

2.2 节理面粗糙度量

为定量描述结构面粗糙度,采用华朗三维形貌扫描仪对岩石节理面进行扫描,扫描前在节理面上喷涂 HD-ST 显像剂,使其表面呈现出亚光白色,提高获取节理面三维点云数据的扫描精度。扫描采集后的点云数据通过 Geomagic studio 三维软件封装,并采用 Matlab 软件进行数字化重建,生成花岗岩节理面的三维可视化云图(图3)。通常将一组节理面中较为凸起的节理面作为下盘,以节理面的某一直角作为原点,2条直角边延伸方向为正方向,岩石节理面边长均为10 cm。

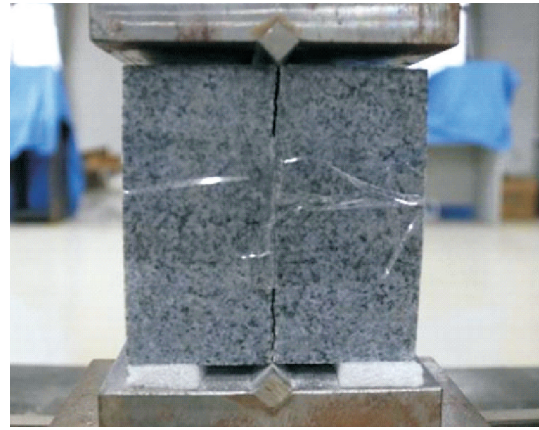


图2 巴西劈裂夹具制作粗糙节理面

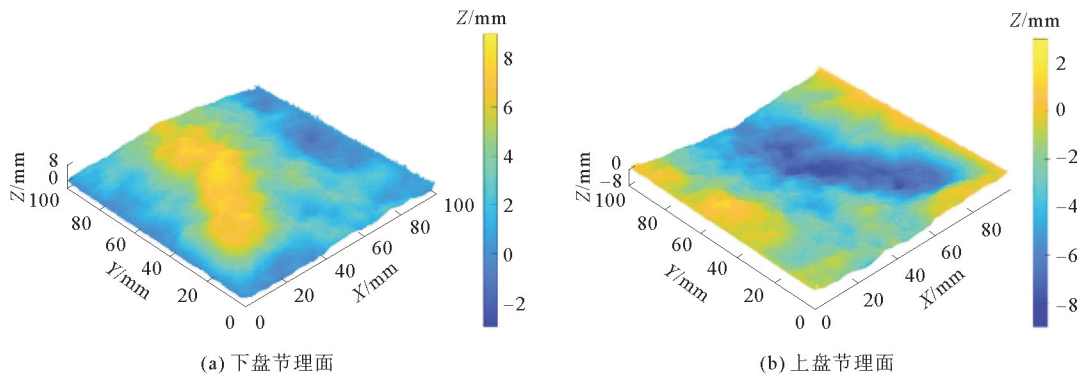


图3 劈裂节理面三维可视化云图

采用节理面粗糙度系数(C_{JR})定量描述节理面的粗糙度。沿垂直于节理面剪切方向等间距取10条剖面线,根据式(1)计算每条剖面线的 C_{JR} :

$$C_{JR} = 32.2 + 32.47 \log Z_2 \quad (1)$$

式中: Z_2 为二维坡度均方根,计算10条剖面线的 C_{JR} 平均值来表征三维节理面粗糙度。

2.3 试验方案

为探究不同的法向应力加载条件下,法向应力对花岗岩节理剪切力学行为的影响,设计了如下2种试验方案。

1) 常法向应力直剪试验:对同种花岗岩进行20和30 MPa法向应力下的节理剪切试验。试验过程如下:施加法向荷载至目标值,待法向荷载稳定后,保持法向荷载恒定,切向油缸再以恒定的速率施加切向荷载。法向加载速率始终保持为0.1 kN/s,剪切加载速率保持为0.3 mm/min。

2) 变法向应力直剪试验:对同一花岗岩进行变法向应力分级加载的节理剪切试验,法向应力分别为15、25和30 MPa。试验过程如下:①施加法向荷载至15 MPa,法向荷载稳定后,以恒定剪切速率施加切向荷载至剪应力相对稳定后停止加载;②施加法向荷载至25 MPa,法向荷载稳定后,以恒定剪切速率施加切向荷载至剪应力稳定后停止施加;③继续施加法向荷载至30 MPa,法向荷载稳定后,以恒定剪切速率施加切向荷载直至试验结束。法向加载速率和剪切加载速率同验证方案1)。

3 试验结果

3.1 常法向应力直剪试验

3.1.1 剪切强度

根据上述试验方案,选取2个粗糙度不同的花岗岩节理试样J1($C_{JR} = 12.4$)和J2($C_{JR} = 13.3$)开展常

法向应力直剪试验,J1 在法向应力 20 MPa 下进行,J2 在法向应力 30 MPa 下进行,2 个试样的剪应力和法向变形随剪切位移的变化曲线如图 4 所示。在剪切初始阶段,剪应力随剪切位移的增加呈缓慢上升趋势,曲线呈下凹状。随着剪切位移的增加,剪应力曲线进入线弹性增长阶段,且 J2 进入峰前线弹性阶段所需的剪切位移比 J1 更短,一方面是高法向应力使得试样内部原生裂隙充分压密,另一方面是 J2 的节理面具有较大的粗糙度,节理面上下盘之间的起伏体更容易相互咬合。

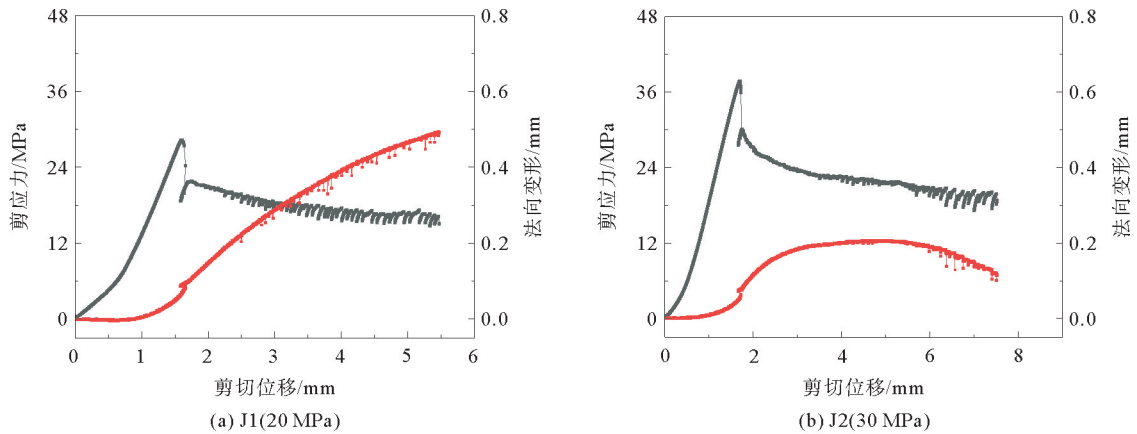


图 4 剪应力和法向变形随剪切位移的变化曲线

— 剪应力; — 法向变形

在峰值破坏阶段,节理试样 J1 和 J2 均表现出脆性破坏特征。随着剪切位移的增加,发挥抗剪作用的起伏体要不断经历“爬坡”或“啃断”,剪切才能继续进行。岩石节理面上盘沿下盘起伏体的剪胀扩容受到法向荷载的约束。法向应力越大,节理面的闭合程度越高,剪切过程中被“啃断”的起伏体体积越大,节理面的抗剪强度也就越高。

剪应力到达峰值后,峰前发挥抗剪作用的起伏体被剪断,试样发生脆性破坏。由图 4 可知,J2 峰后应力降的幅值略大于 J1,这意味着,在高法向应力下,J2 峰值破坏时释放了更大的能量。随着剪切位移的继续增加,剪应力开始下降,最终逐渐趋于平缓,进入残余阶段,且两者均表现出较为规律的黏滑。J2 的剪应力曲线在峰后存在较长的稳定段(应力曲线不发生波动或者波动幅度很小),且应力波动的发生时间晚于 J1。

3.1.2 剪胀效应

法向荷载施加阶段,节理面上下盘起伏体之间相互压密咬合,但很难实现完全吻合。在剪切初始阶段,随着切向荷载开始施加,J1 上下盘起伏体在法向荷载和切向荷载的共同作用下继续压密咬合,试样在法向变形曲线上表现为轻微的剪缩现象(图 4)。随着剪切位移继续增加,试样上盘克服法向荷载,沿着下盘节理面起伏体发生“爬坡”,试样在法向变形曲线上逐渐表现为剪胀效应。当试样峰值破坏时,剪应力迅速下降,试样表现出明显的脆性破坏特征。

J1 峰值破坏发生后,在法向变形曲线上表现为持续剪胀,法向变形曲线随着剪切位移增加近乎呈线性增长,3 mm 后曲线的增长速率逐渐变缓,直至试验结束(图 4)。对于 J2 而言,随着剪切位移的增加,法向变形曲线的增长速率逐渐变缓,剪胀逐渐转为剪缩。剪切前的节理试样 J2(图 5(a)),在高法向应力和切向荷载的共同作用下,节理面之间相互咬合的起伏体不断发生剪切



图 5 剪切前后的节理试样 J2

磨损,且花岗岩节理在应力集中处发生拉伸断裂,如图5(b)所示。

3.1.3 黏滑阶段

在切向荷载的作用下,试样节理面不断摩擦挤压导致部分起伏体被剪断,剪断产生的岩石碎屑颗粒在剪切研磨作用下分布于节理表面,形成了易于黏滑发生的节理面。由图4的剪应力曲线可知,J1和J2的剪切峰后阶段均存在黏滑行为。但由于J2节理面相较于J1节理面粗糙度更大,J2的峰后剪切黏滑现象并不显著。以J1为例,试样在剪应力到达峰值后发生脆性破坏,剪应力开始降低并逐渐趋于平缓,在经历几次较小且不稳定的剪应力波动之后,进入峰后残余阶段,见图6。

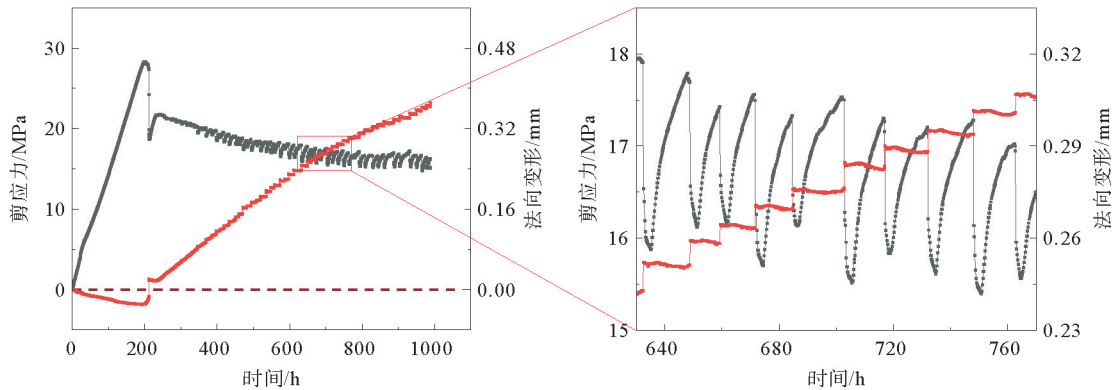


图6 节理试样J1的剪应力和法向变形随时间的变化曲线

—●— 剪应力; — 法向变形

从图6中的放大图中可以观察到,在每个黏滑事件中,剪应力逐渐缓慢增加,能量不断积聚,到达应力峰值 τ_{\max} ,这个阶段被称为“黏”滞阶段。随后,伴随着一声“啪嗒”声剪应力跌落至最小值 τ_{\min} ,并伴有能量释放,这个阶段被称为“滑”。黏滑以“黏”和“滑”交替出现的方式发生,并具有一定的周期性。同时,每个黏滑应力降发生时,法向变形曲线均表现出一段阶梯式的“跳跃”。对黏滑事件中每个应力降的幅值和与之对应的法向“跳跃”进行了统计(图7),可以看出,黏滑幅值与对应的法向变形“跳跃”距离呈正相关。

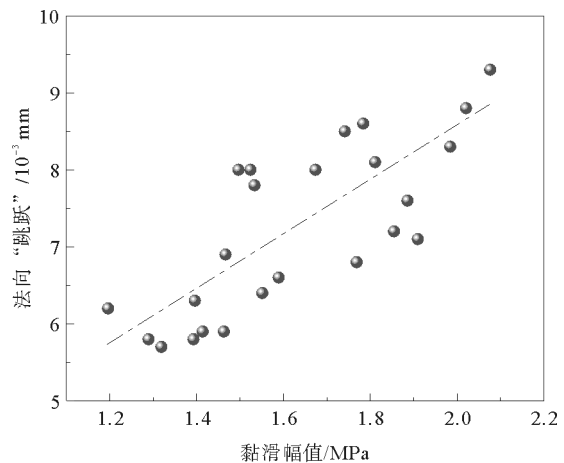


图7 黏滑幅值与法向“跳跃”的关系

● “跳跃”点; --- 拟合曲线

3.2 变法向应力直剪试验

3.2.1 剪切强度

根据变法向应力分级加载的试验方案,花岗岩节理试样在不同法向应力下进行剪切试验,得到的剪应力和法向变形随剪切位移的变化曲线如图8所示。

由图8可知,试样在剪切初始阶段,剪应力曲线存在短暂的压密段,这与花岗岩内部的原生裂隙及上下盘节理面之间未完全压密有关。随着剪切位移的继续增加,剪应力曲线进入近乎线弹性增长阶段。试样在接近剪切破坏之前,剪应力曲线上升斜率逐渐变缓,试样发生剪切屈服破坏。在不同的法向应力下,剪应力曲线在到达峰值剪切强度后均开始缓慢下降,并随着剪切位移的增加逐渐趋于平稳,进入残余阶段(见图中绿色虚线)。从图中可以直观地看出,节理试样的峰值剪切强度和残余剪切强度均随法向应力的增加而增加。而变法向应力直剪试验相较于常法向应力直剪试验不同的是,变法向应力直剪试验条件下对节理试样剪切试验结果的影响因素较为单一,避免了试样间的差异性对试验结果的影响。

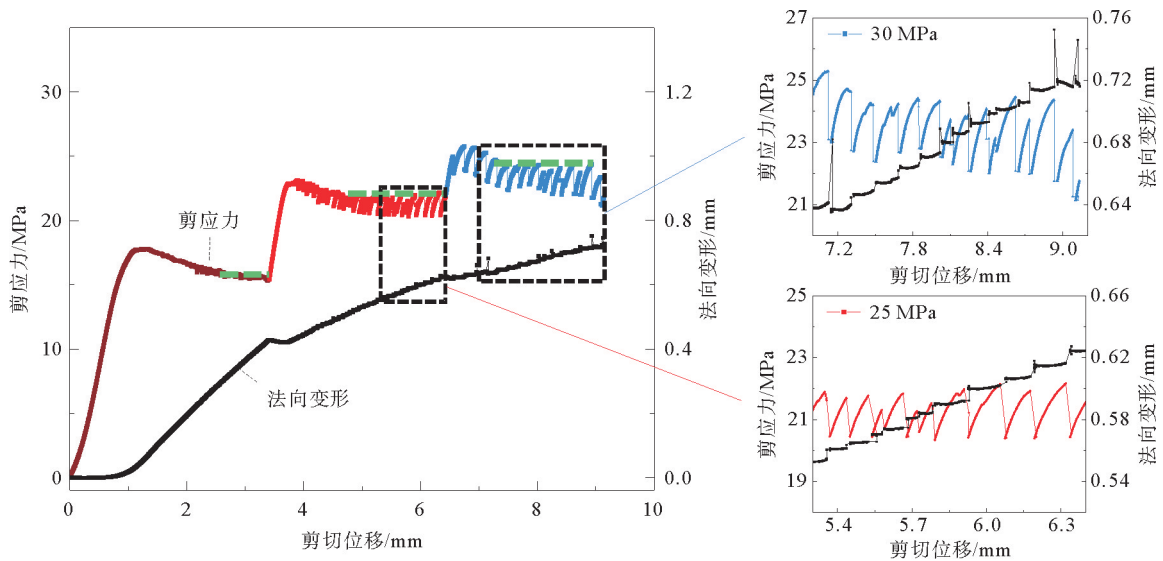


图 8 变法向应力下剪应力和法向变形随剪切位移的变化曲线

— 15 MPa; — 25 MPa; — 30 MPa

3.2.2 剪胀效应

图 8 显示,在剪应力加载初期,法向变形曲线存在一段较长的平静期。随着剪切位移的继续增加,剪应力曲线逐渐偏离弹性段,进入峰前屈服阶段,法向变形曲线也随之上升。当剪应力曲线进入峰后阶段后,法向变形的斜率近乎为线性,与此同时,随着剪切位移的增加,剪应力曲线在峰后缓慢下降一段时间后开始出现微小且不规律的应力波动,即混沌黏滑。

在不同的法向应力下,法向变形曲线表现出不同程度的剪胀特征。随法向应力升高,法向变形曲线的增长斜率(剪胀速率)随之下降,有 2 个原因:①节理面的磨损程度随剪切位移的增加越来越严重,起伏体的“爬坡”效应减弱;②法向应力在很大程度上直接限制了节理面的法向剪胀,且法向应力对剪胀的抑制作用随法向应力的增加愈发明显。

3.2.3 黏滑阶段

由图 9 可知,当法向应力为 15 MPa 时,剪应力曲线的峰后剪切阶段多表现为混沌黏滑。当法向应力增加至 25 和 30 MPa 时,峰后阶段的黏滑特征表现得更加明显,且表现出更强的周期性。在每个黏滑事件中,黏滑应力降均在法向变形曲线上有对应的“跳跃”产生,且黏滑应力降与法向变形的“跳跃”之间存在良好的对应关系。通过图 8 中的放大图可以发现,法向变形的“跳跃”并不总是稳定的,而是呈现出类似“尖锥”形状的曲线,这种“尖锥”曲线与黏滑应力降同步发生。随着法向应力的增加,法向变形曲线中“尖锥”出现的次数也随之增多,这说明在高法向应力下,黏滑幅值更大,伴随释放的能量也更剧烈。

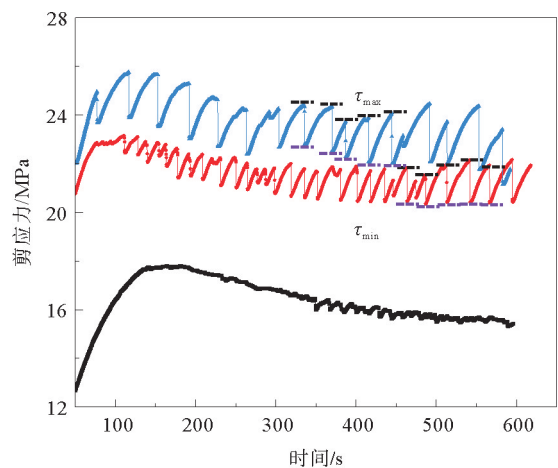


图 9 不同法向应力下剪切峰后阶段的剪应力曲线

— 15 MPa; — 25 MPa; — 30 MPa

通常定义黏滑事件中 2 个相邻的 τ_{min} 所对应的时间差值为黏滑时间间隔。在单个黏滑事件中, τ_{max} 和 τ_{min} 的差值被称为黏滑幅值。随着法向应力的增加,剪应力曲线的峰后阶段由混沌黏滑逐渐过渡为规则黏滑。在高法向应力下的规则黏滑中,每个黏滑事件的应力降发生时均伴随着清脆的声响,且黏滑应力降的幅值越大,所发出的声响也越大,这也说明此过程中有较大的能量释放。

对 3 种法向应力下剪应力曲线峰后阶段的黏滑事件进行量化分析,从峰后黏滑阶段中选取具有代表

性的、连续且规则的黏滑事件,并对黏滑幅值、黏滑时间间隔和法向应力之间的关系进行对比分析,如图10和图11所示。可以发现,黏滑幅值随法向应力的增加而增加,且随着黏滑次数的增加,黏滑幅值有逐渐增大的趋势。此外,黏滑时间间隔与法向应力整体呈现出正相关。这也表明,法向应力的增加使得节理面之间起伏体的咬合程度加深,试样更难发生剪切滑动,“黏”滞阶段的时间增加,黏滑时间间隔也随之增加,试样有更多的时间积累应变能,从而产生更大的黏滑应力降。

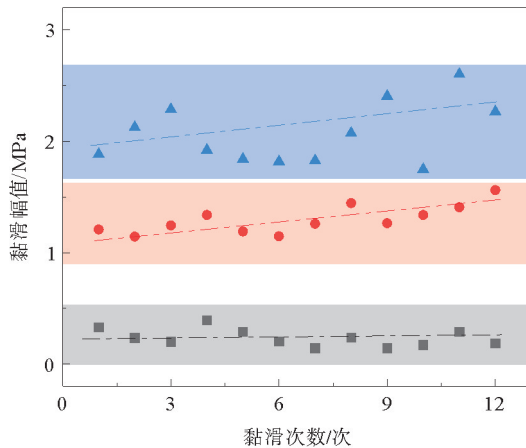


图10 不同法向应力下黏滑幅值

■ 15 MPa; ● 25 MPa; ▲ 30 MPa

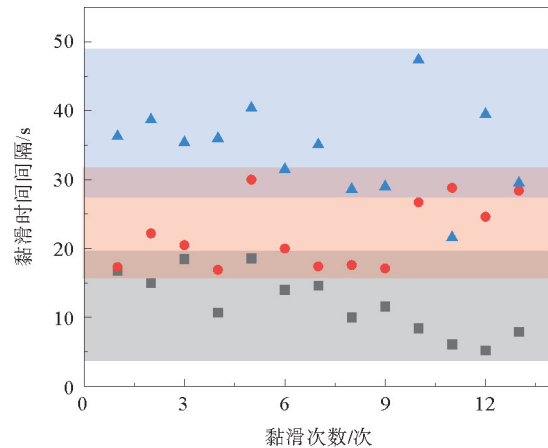


图11 不同法向应力下黏滑时间间隔

■ 15 MPa; ● 25 MPa; ▲ 30 MPa

4 结论

通过开展常法向应力和变法向应力分级加载条件下花岗岩节理直剪试验,探究了不同法向应力对花岗岩节理剪切力学行为的影响,得出以下4个结论:

- 1) 花岗岩节理的峰值和残余剪切强度均随法向应力的增加而增加,节理面的剪胀受法向应力抑制,且随法向应力的增加抑制作用更加明显,甚至可能出现剪缩现象。
- 2) 黏滑与法向变形曲线之间存在着良好的对应关系,黏滑应力降的发生通常伴随着法向变形的“跳跃”,且随法向应力的增加,“跳跃”程度更明显。
- 3) 变法向应力剪切过程中,法向应力对剪胀效应的抑制作用随着法向应力的增加变得更加明显,法向变形曲线的增长速率随着法向应力的增加而降低。
- 4) 变法向应力分级加载条件下,随着法向应力的增加,剪应力曲线的峰后阶段由混沌黏滑逐渐过渡为规则黏滑,且周期性更强。同时,黏滑幅值和黏滑时间间隔均随法向应力的增加而增加,且黏滑幅值随黏滑次数的增加有逐渐增大的趋势。

参考文献(References):

- [1] 宋杰,孟凡震,岳祝凤,等. 节理裂隙岩体力学特性的研究进展[J]. 青岛理工大学学报,2021,42(5):140-150.
SONG Jie, MENG Fanzhen, YUE Zhufeng, et al. Research progress in mechanical properties of jointed and fractured rock mass[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2021, 42(5): 140-150.
- [2] HU L, FENG X T, XIAO Y X, et al. Effects of structural planes on rockburst position with respect to tunnel cross-sections: A case study involving a railway tunnel in China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(2): 1061-1081.
- [3] WANG Y C, TANG C A, TANG L X, et al. Microseismicity characteristics before and after a rockburst and mechanisms of intermittent rockbursts in a water diversion tunnel[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(1): 341-361.
- [4] 周雄,孟凡震,岳祝凤,等. 基于GDEM的结构面型岩爆孕育演化机制[J]. 煤炭学报,2023,48(5):2207-2223.
ZHOU Xiong, MENG Fanzhen, YUE Zhufeng, et al. Evolution and mechanism of rockburst induced by structural plane based on GDEM[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 2207-2223.