文章编号：1001-4888(2025)06-0783-12

不同粗糙度花岗岩-混凝土黏结界面剪切声发射特性研究*

徐海峻[1]，姜谙男[1]，闵庆华[2]，聂生泽[2]
（1. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所，辽宁大连 116026；2. 中建交通建设集团有限公司，北京 100166）

摘要：为了研究粗糙度对花岗岩-混凝土试件剪切力学性质的影响规律，首先采用劈裂法制得花岗岩结构面，使用激光三维形貌仪扫描获得其节理粗糙度系数，并在结构面上浇筑混凝土制成花岗岩-混凝土黏结试件；然后进行剪切试验并同步进行声发射监测。剪切试验结果表明，不同粗糙度的花岗岩-混凝土黏结界面的剪切应力-应变曲线大致趋势一致，试件的剪切破坏模式有所不同；随着粗糙度的增大，试件的剪切软化特征越来越明显，且峰值剪切强度逐渐增大。剪切过程中的同步声发射监测表明，声发射能量及振铃计数都随着粗糙度的增大呈增大趋势，声发射特征值随着粗糙度的增大而减小。本文研究结果可为揭示工程中花岗岩-混凝土黏结界面剪切破坏规律提供参考依据。

关键词：黏结界面；粗糙度；直剪试验；剪切特性；声发射参数
中图分类号：TU452 **文献标志码**：A DOI：10.7520/1001-4888-24-091

0 引言

岩石-混凝土结构在土木水利工程中广泛存在，如混凝土大坝的坝踵与基岩交界面、基坑中的地连墙与基岩交界面、隧道工程中的围岩-衬砌结构等。这种结构在施工和环境等各种因素影响下，岩石-混凝土黏结界面处容易被破坏[1]，因此对其剪切特性进行研究是非常有必要的。

岩体结构在剪应力的作用下可能产生包括剪切变形、剪切断裂等力学行为，容易沿着结构面发生破坏，进而影响岩体工程的稳定性。国内外学者对岩体结构面的剪切特性进行了较多的研究。如 BARTON[2]考虑到天然结构面上粗糙体不规则形态使结构面的剪切机制变得十分复杂，提出采用节理粗糙度系数(Joint Roughness Coefficient，JRC)对结构面粗糙度进行量化，并给出了结构面抗剪强度计算公式及不同粗糙度的 JRC 曲线。刘丹等[3]结合三维激光扫描技术、3D 打印技术和模拟材料批量制作模型结构面，开展了不同法向应力条件下的直剪试验。易鑫[4]在野外采集天然异性结构面试件进行干湿循环和剪切试验，采用三维离散元软件 3DEC 及其内置的 fish 二次开发语言编程建立结构面模型，并进行数值模拟，结果表明，结构面峰值强度会随着干湿循环而降低，且降低程度随着法向应力和粗糙度的增大而增大。

上述文献主要集中在岩石结构面粗糙度对剪切力学性质的影响方面，近年来较多学者对岩石-混凝土结构的剪切力学特性也进行了一定研究。ANDJELKOVIC 等[5]对 1960 年以来关于岩石-混凝土界

* **收稿日期**：2024-06-06；**修回日期**：2024-11-16
基金项目：国家自然科学基金项目(52578465)；辽宁省兴辽英才项目(XLYC1905015)
通信作者：姜谙男(1971—)，男，博士，教授。主要从事岩土工程稳定性分析和多场耦合方面的研究工作。Email：jiangannan@163.com

面剪切试验数据进行总结分析,提出了岩石-混凝土接触面的剪切变形模型和剪切强度模型,并用于初步设计阶段的混凝土坝结构分析。CHEN 等[6]分别对人工和天然断裂花岗岩试件进行直剪试验,重点分析了剪切过程中的粗糙度演化过程。丁士君等[7]采用同一场地的玄武岩和 C20、C30 混凝土制成 30 组岩石-混凝土试件,开展室内模型剪切试验,分析了接触面尺度、混凝土设计强度等级和龄期、岩石完整性因素对界面抗剪性能的影响。DONG 等[8]对不同粗糙度的岩石-混凝土黏结试件进行拉伸、弯曲及剪切试验,基于试验结果建立了一种能反映混合断裂模式的剪切-软化本构模型,计算得到的荷载-裂缝张开位移曲线与试验结果吻合良好。JIANG 等[9]对不同强度的岩石-混凝土试件进行不同法向荷载的直剪试验,发现混凝土剪切破坏的区域只出现在某些特定位置,且破坏面积及损伤程度随强度增加而减小;并根据试验结果提出了一种考虑界面粗糙度的岩石-混凝土黏结界面抗剪强度公式。

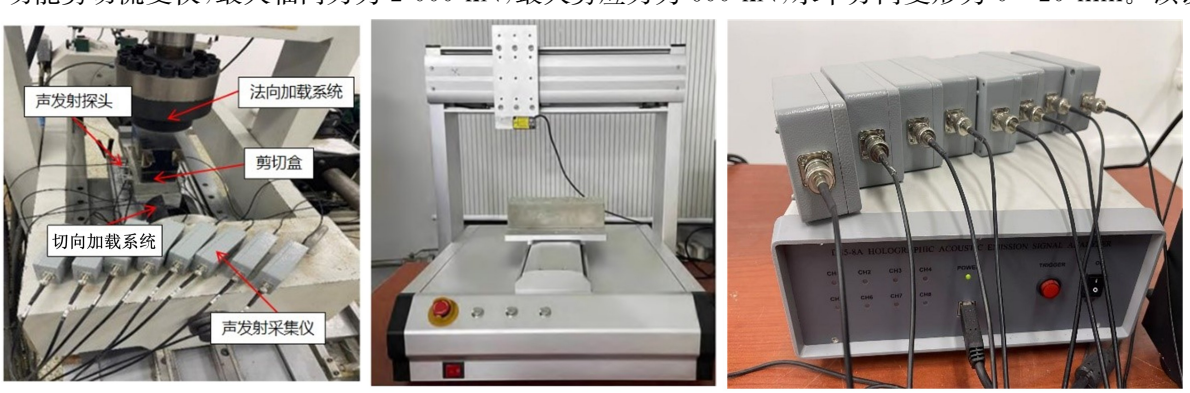
声发射(Acoustic Emission,AE)是指材料断裂破坏过程中能量快速释放而产生瞬态弹性波的现象,通过声发射信号监测可以对岩石剪切过程的内部损伤演化机制进行揭示。金嘉怡等[10]对砂岩、灰岩及玄武岩分别进行剪切试验和同步声发射监测,通过对比剪切曲线及声发射信号,发现粗糙度不同会导致声发射参数变化。王刚等[11]分别对贯通节理和完整节理的花岗岩进行剪切试验,并监测其声发射信号,发现声发射能量及振铃计数随着法向应力增大而出现延后的现象。张延新等[12]对不同循环加载应力下的花岗岩 Kaiser 效应进行了试验研究,并利用 Felicity 比来识别 Kaiser 效应的有效应力区间,发现每次循环均伴有大量声发射现象,且累积振铃计数呈阶梯状上升。MORADIAN 等[13]将岩石剪切过程的声发射参数与应力-应变曲线进行对比分析,发现声发射能量及振铃计数的变化可以反映岩石内部破裂过程,且声发射特征 b 值(低能量事件与高能量事件的比值)可以揭示岩石的破坏机制。ZHANG 等[14]研究了不同冻融(FT)循环次数和裂纹倾角对声发射信号特性的影响,通过分析 AE 计数和 b 值特征发现,FT 循环减弱了剪切过程不同阶段 AE 信号特征的差异。SHANG 等[15]对完整与裂隙花岗岩进行剪切试验,发现 AE 事件在峰前阶段分散,但在峰后阶段集中于断裂面附近。

综上所述,学者们对岩体结构面、岩石-混凝土黏结试件的剪切特性已经开展了较多研究,通过监测岩石剪切过程的声发射信息揭示剪切破坏演化特性的研究也有报道,但是对岩石-混凝土黏结界面剪切声发射特性的研究还较为少见。为此,本文通过对 3 种不同粗糙度的花岗岩-混凝土黏结试件进行剪切试验并进行声发射监测,分析不同结构面粗糙度试件的剪切特性及声发射参数随粗糙度的变化规律,研究结果可为相关工程的稳定性分析和监测预警提供依据。

1 试验方案

1.1 试验设备

剪切试验设备如图 1(a)所示,该设备为大连海事大学与长春朝阳试验机厂联合研制的 JAW-600 多功能剪切流变仪,最大轴向力为 2 000 kN,最大剪应力为 600 kN,水平方向变形为 0～20 mm。该设



(a)剪切设备及声发射探头 (b)三维形貌扫描仪 (c)声发射采集设备

图 1 试验设备

Fig. 1 Test equipment

备由主机、切向加载系统、法向加载系统、剪切盒、传感器及信息采集系统组成。试验全过程采用计算机自动加载、分析、操作，从而能够安全、实时地获取试验数据。

采用的三维形貌扫描仪为本课题组自主研发，由工作台、激光扫描器、数据采集系统及控制器组成(图 1(b))，通过该设备可以自动获取结构面的三维形貌数据。三维形貌扫描仪具体操作过程如下：先将需要扫描的岩块放在工作台上，通过控制器使试件移动；再利用激光扫描器获取结构面的起伏形貌，同时自动采集得到结构面的形貌数据。

试验所用的声发射设备为北京软岛公司生产的DS5 型采集仪，如图 1(c)所示，该设备基于 USB3.0 接口设计，可以实现最高 32 通道的高数据量采集，采样频率为 3 MHz，外参转化精度为 16 bit，A/D 转换误差为±0.5 最低有效位，采取外部触发的方式进行采样。通过该设备可以获得剪切试验过程中的完整声发射信号参数。

1.2　试件制备

试验所采用的灰白色花岗岩取自某高速公路隧道，参考已有文献[16]将岩块进行切割打磨，制成 200 mm×100 mm×100 mm 的长方体试件。经测试得到该花岗岩和混凝土的力学参数见表 1，表中：c 为黏聚力；φ 为内摩擦角；φ_b 为基本摩擦角；ρ 为密度；f_t 为单轴抗拉强度；f_c 为单轴抗压强度；E 为弹性模量；μ 为泊松比。

表 1　花岗岩与混凝土的力学参数

Tab.1　Mechanical parameters of granite and concrete

试件类型	c/MPa	φ/(°)	φ_b/(°)	ρ/(kg/cm^3)	f_t/MPa	f_c/MPa	E/GPa	μ
花岗岩	30.15	42.7	32.46	2600	6.57	132.47	32.56	0.24
混凝土	10.10	32.5	34.55	2500	3.24	28.90	20.53	0.23

花岗岩-混凝土黏结试件的制备过程如下：

1)首先通过剪切仪对长方体花岗岩试件进行劈裂，并测试结构面的粗糙度。将长方体岩样放在剪切仪的 2 块承压板之间，使承压板钢刃与试件的中心点对准，避免试件发生偏心受压。放好岩样后，打开剪切仪液压开关，先将轴向加载头快速移动，使上部压力板与试件接触并轻微受力，然后再按照 0.01 mm/min 的速度控制轴向加载直至试件劈裂，得到岩体天然结构面。采用三维激光仪对花岗岩结构面试件进行扫描，借助 Matlab 软件获得三维形貌特征如图 2 所示。JRC 是能够体现结构面形貌特征的重要参数，对结构面的剪切力学特性及剪切破坏机理等都有很大影响。一般的 JRC 测定方法主观性较大，影响测量精确性，因此本文采用 TSE 等[17]提出的方法，在试件结构面均匀提取 3 条轮廓线，先分别计算二维 JRC，再计算三维 JRC。

二维 JRC 计算公式如下：

$$J_i = 32.2 + 32.4 \lg Z_2 \tag{1}$$

$$Z_2 = \left[\frac{1}{L}\sum_{i=1}^{N-1}\frac{(y_{i+1}-y_i)^2}{(x_{i+1}-x_i)^2}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

$$L = \sum_{i=1}^{N-1}(x_{i+1}-x_i) \tag{3}$$

式中：J_i 为结构面第 i 条二维剖面线的 JRC 的值；Z_2 为坡度均方根；L 为结构面剖面线的长度；x_i 与 y_i 分别为剖面线上采样点的横、纵坐标；N 为采样点的总数。

通过对各剖面线的二维 JRC 进行加权平均，获得结构面的三维 JRC 的公式如下：

$$J_{3D} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} J_i \tag{4}$$

式中：J_{3D} 为三维 JRC 的值；m 为剖面线的个数。

为消除试件离散性对结果的影响，按照粗糙度大小将结构面试件分成 3 组、每组 3 块进行试件制备和试验，选取试验结果中间值对应的试件为有效试件，3 个有效试件编号分别为 R1、R2 和 R3，其对应的

三维 JRC 分别为 4.1、8.6、13.2。试件及对应的三维形貌如图 2 所示。

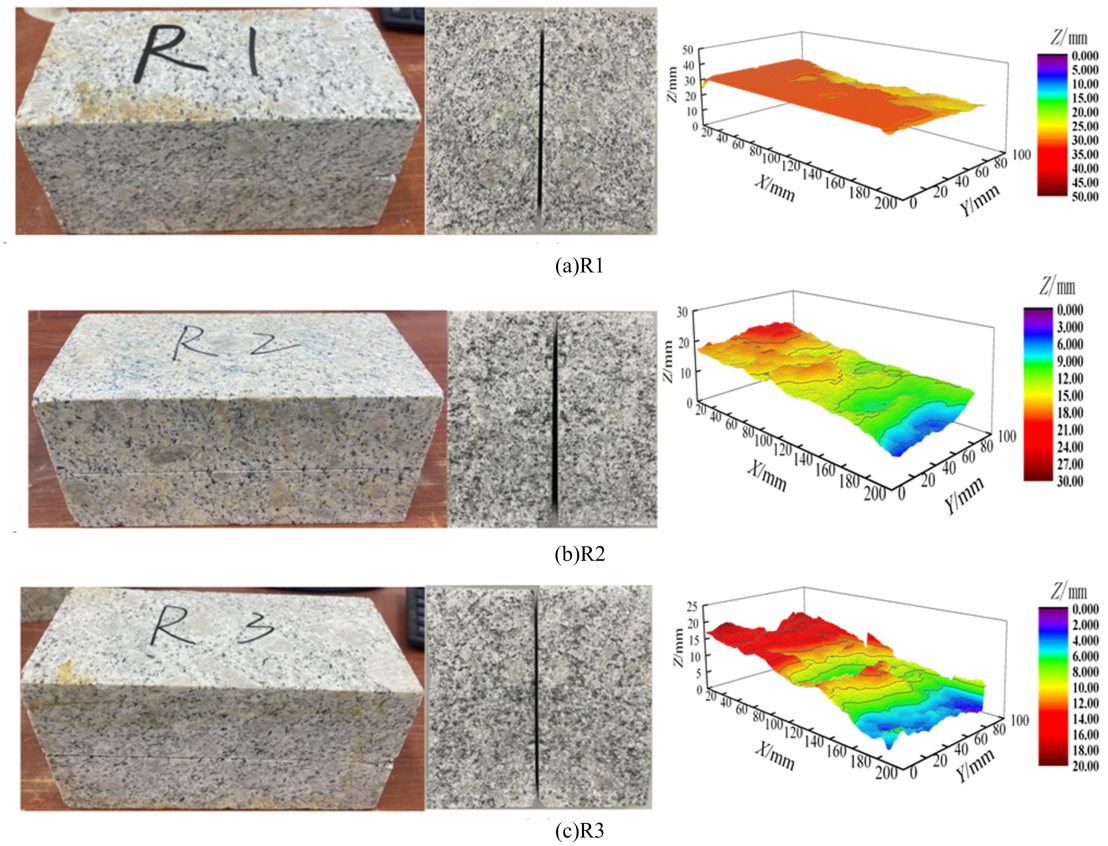


图 2 结构面试件及三维形貌图

Fig. 2 Structural plane specimen and 3D topographic map

2)将劈裂得到的花岗岩试件与混凝土通过浇模结合,形成花岗岩-混凝土黏结试件。试验所用混凝土细骨料为中粒砂,粗骨料为石子,水泥为高强速凝水泥。水泥∶水∶砂子∶石子的配比为 1∶0.42∶1.5∶3。先将模具四周抹上润滑剂,将 1.2 节所述的劈裂花岗岩结构面放入模具中并用螺栓固定,然后在结构面上均匀涂抹凡士林,再将按配比制备的混凝土放入搅拌机中不停搅拌并倒入模具中,用小刀将表面抹平,将模具放在振捣台上振捣,每分钟振捣 1 次,直至表面的气泡全部消失,常温放置 24 h 后进行拆模。将拆模后的岩石-混凝土黏结试件放入标准的恒温恒湿混凝土养护箱内,保持箱内湿润程度 95%以上、温度 20 ℃,养护 28 d 取出,并敲掉多余混凝土,具体制备过程如图 3 所示。

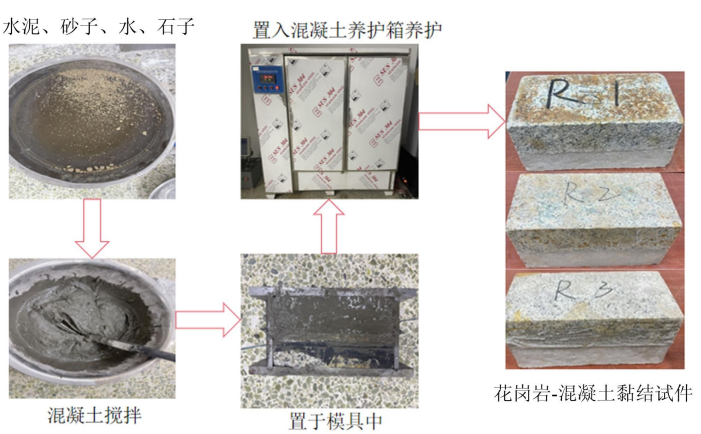


图 3 花岗岩-混凝土黏结试件制备过程

Fig. 3 Granite-concrete bonding specimen preparation process

1.3　试验内容

为了研究粗糙度对混凝土-花岗岩黏结界面剪切强度及声发射特征的影响，选取编号为 R1、R2、R3 的 3 种不同粗糙度的试件，确定法向应力为 5 MPa，具体试验过程如下：

1）剪切试验：将黏结试件放入上下 2 个剪切盒中，在试件上施加 5 MPa 的法向应力，加载速率为 0.1 MPa/min，切向加载通过计算机中设置的位移来进行控制，剪切速率为 0.6 mm/min，设置最大剪切位移为 5 mm，在试验过程中记录法向应力、剪切应力、剪切位移数据。

2）声发射试验：在剪切过程中监测声发射信号，设置采样频率为 3.0 MHz，设置门槛值为 100 mV。为了提高声发射源的定位精度，试验剪切盒经过改造，可安置 8 个声发射探头。在探头表面涂抹耦合剂使其与试件表面密贴，采用固定器将探头固定在剪切盒上。在剪切试验开始后同步采集声发射信号，剪切试验完成后即终止声发射采集，剪切过程如图 4 所示。由于不同介质材料的声波传播速度不同，为了进行声源定位，在声发射测试之前先用 2 个探头对试件进行声波测速。为了使声波尽可能达到较远的距离，将探头贴在试件两端。通过人工折断铅笔芯产生突发型弹性波来模拟声发射源，即断铅操作，断铅位置选取在试件左右对称三分之一位置处，各进行 3 次断铅操作并取平均值，从而测得试件的波速为 3 125 m/s。

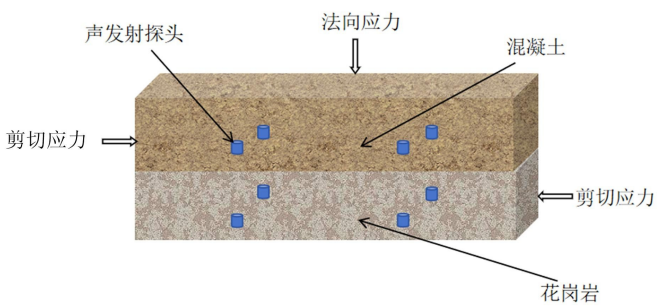


图 4　剪切过程示意图

Fig. 4　Schematic diagram of the shearing process

2　试验结果分析

2.1　剪切应力-位移曲线分析

通过试验获得混凝土-花岗岩黏结界面的典型剪切曲线如图 5 所示（A、B、C、D 代表不同阶段临界点），其压密阶段并不明显，可以将曲线分为 4 个阶段：（Ⅰ）弹性变形阶段：该阶段曲线基本为直线，即剪切应力与剪切位移呈线性关系。（Ⅱ）硬化变形阶段：该阶段的剪切应力随着剪切位移的增加呈现非线性增加，并且曲线斜率呈减小趋势，剪切应力缓慢增加到峰值剪切强度。（Ⅲ）峰后软化变形阶段：该阶段的剪切应力从峰值后发生骤降，且会发生一些小的上下波动，试件出现剪切软化特征。（Ⅳ）残余变形阶段：在此阶段随着剪切位移增加，剪切应力缓慢减小至残余抗剪强度并趋于稳定。

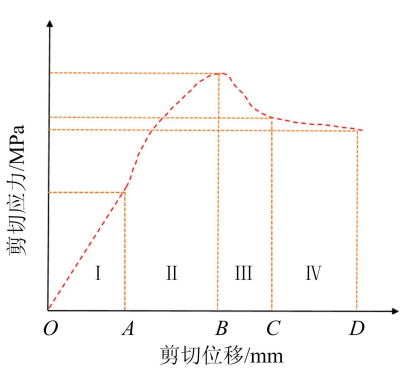


图 5　剪切曲线不同阶段

Fig. 5　Different stages of the shear curve

不同粗糙度的岩石-混凝土黏结界面对应的剪切应力曲线如图 6 所示。由图 6 可见，对应三维 JRC 的剪切应力在峰值之后下降幅度最大，剪切软化特征最为明显；而当三维 JRC 增大至 8.6、13.2 时，剪切应力峰值之后的下降幅度逐渐减小，达到稳定残余剪切强度时的剪切位移随之增大，这表明随着表面粗糙度的增大，花岗岩-混凝土黏结界面剪切软化特征逐渐减弱。较低粗糙度（J_{3D} 为 4.1）时，剪切应力-位移曲线斜率波动较小，软化变形阶段平稳，峰后剪应力急剧减小为残余摩擦应力，这是由粗糙度低引发的破坏机制比较简单所致。而较高粗糙度（J_{3D} 为 8.6、13.2）时，剪

切应力-位移曲线斜率波动较大,软化变形阶段剪切应力在不断减小,这表明岩石界面粗糙度的增加,显著提高了黏结界面的抗剪破坏机制的复杂性,即可能存在结构面突起的剪断效应。

图 7 为花岗岩-混凝土黏结界面的峰值剪切应力、位移及剪切刚度随着粗糙度的变化曲线。结构面的剪切刚度体现了结构面抵抗剪切变形的能力,根据结构面的剪切位移曲线,将曲线弹性变形阶段内应力梯度定义为剪切刚度 K_s,具体表达式为

$$K_s=\frac{\partial \tau}{\partial u} \tag{5}$$

式中:K_s 为结构面剪切刚度,GPa/m;τ 为剪切应力,MPa;u 为剪切位移,mm。

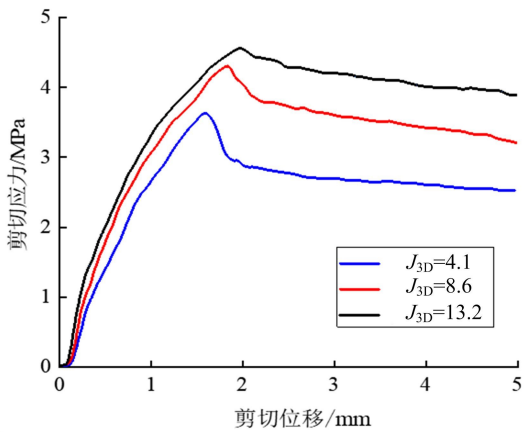


图 6 不同粗糙度的剪切应力-位移曲线

Fig. 6 Shear stress-displacement curves with different roughness

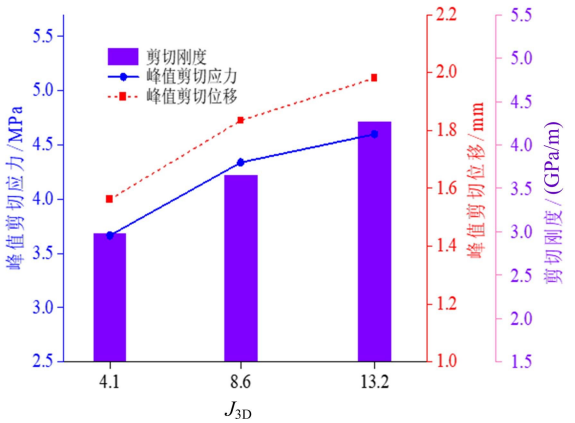


图 7 峰值剪切应力、位移及剪切刚度随粗糙度变化曲线

Fig. 7 Peak shear stress, displacement and shear stiffness vary curves with roughness

由图 7 可以看出,当法向应力不变时,试件的剪切刚度随着粗糙度的增加而增加,当粗糙度较小时,由于结构面起伏小,导致岩石和混凝土之间的互锁效应较小,抵抗剪切变形的能力不足,因此剪切刚度较低;而随着粗糙度的增加,岩石和混凝土间的互锁效应也增大,对应的剪切刚度变大。随着三维 JRC 从 4.1 到 8.6 再增加到 13.2,剪切刚度增幅逐渐减小,这是由于混凝土强度有限,从而导致剪切刚度增幅会随着粗糙度的增加呈现减小的趋势。此外,随着粗糙度增加,黏结界面的峰值剪切应力和峰值剪切位移也逐渐增大。

2.2 界面破坏模式分析

图 8 为在本文试验条件下 3 种粗糙度的花岗岩-混凝土黏结试件的剪切破坏形态,由图可见,这些试件破坏的位置大致出现在岩石-混凝土黏结界面处及混凝土处,但具体破坏位置及破坏模式随着粗糙度的不同而有所不同。

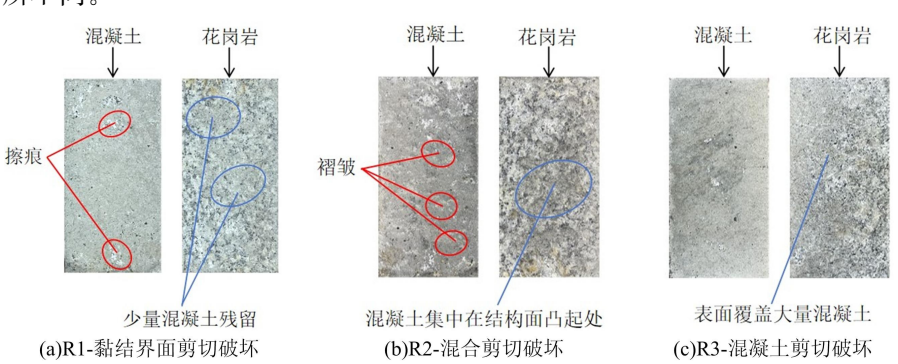


图 8 不同粗糙度下结构界面的破坏形态

Fig. 8 Diagram of shear failure mode with different roughness

具体而言，花岗岩-混凝土黏结试件存在 3 种典型的破坏模式：

1）黏结界面破坏：当 $J_{3D}=4.1$ 时，在剪切断面处可以看到少量明显的擦痕（图 8(a)）。由于粗糙度较低，剪切强度基本来源于花岗岩与混凝土之间的黏结力，剪切破坏会沿着两者的黏结界面发生，表现为破坏面由黏结界面脱开并逐渐扩大贯通，从而发生剪切滑动。

2）混合剪切破坏：当 $J_{3D}=8.6$ 时，岩石和混凝土都有所破坏，大量混凝土碎屑残留在结构面凸起处，混凝土一侧有明显的“褶皱”，破裂面形态、起伏度差异较大（图 8(b)），这是由于随着粗糙度的增加，花岗岩与混凝土之间的接触面积和咬合力增大，剪切软弱带位于黏结界面且略向混凝土转移，其破坏模式由黏结界面破坏向混合剪切破坏转变。

3）混凝土剪切破坏：当 $J_{3D}=13.2$ 时，剪切破坏发生于混凝土内部，花岗岩表面覆盖大量混凝土，剪切滑动带形貌明显（图 8(c)），这是因为混凝土与花岗岩接触面积增大，摩擦力和机械咬合力成为剪切强度的主体，黏结界面剪切强度高，此时的混凝土内部即成为更易破坏的薄弱部位。

由上述破坏模式分析可见，岩石结构面粗糙度对黏结界面的破坏形态有着明显的影响，粗糙度变化改变了 2 种介质之间的咬合力及摩阻力，使剪切破坏的位置发生改变，从而导致破坏模式的变化。

2.3　剪切过程中的声发射能量及振铃计数变化

MORADIAN 等[13]对岩石节理剪切过程进行了声发射测试，经过声发射信息分析发现声发射信号和损伤具有一致性。本文监测了花岗岩-混凝土黏结试件剪切过程的声发射信号，以研究试件内部损伤或破坏规律。声发射参数有多种，其中声发射振铃计数为声发射信号波形越过预设阈值后产生的震荡次数；声发射能量是指声发射事件释放的弹性能量；累积声发射能量是从初始状态到当下的总能量，通过声发射包络线（电压-时间）函数的积分获得。本文选择声发射振铃计数、能量等来描述岩石-混凝土黏结界面的裂纹扩展损伤过程。图 9 是 3 种试件（R1、R2、R3）的声发射能量与剪切应力-应变曲线；图 10 是声发射振铃计数与剪切应力-应变曲线。

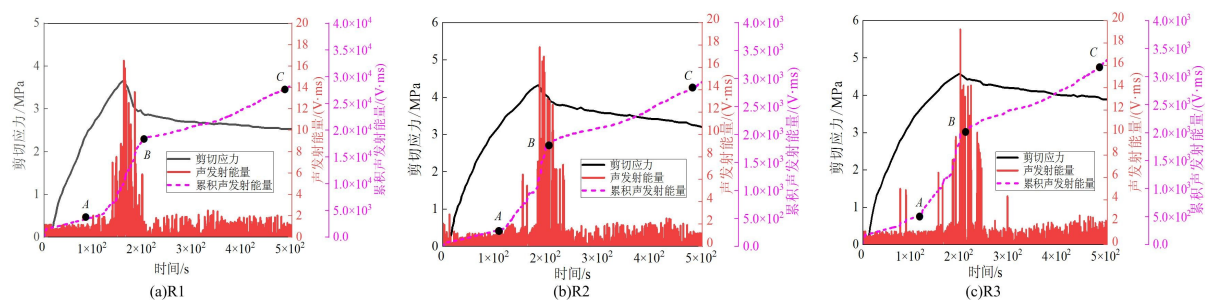


图 9　声发射能量与剪切应力-应变曲线

Fig. 9　Acoustic emission energy and shear stress-strain curve

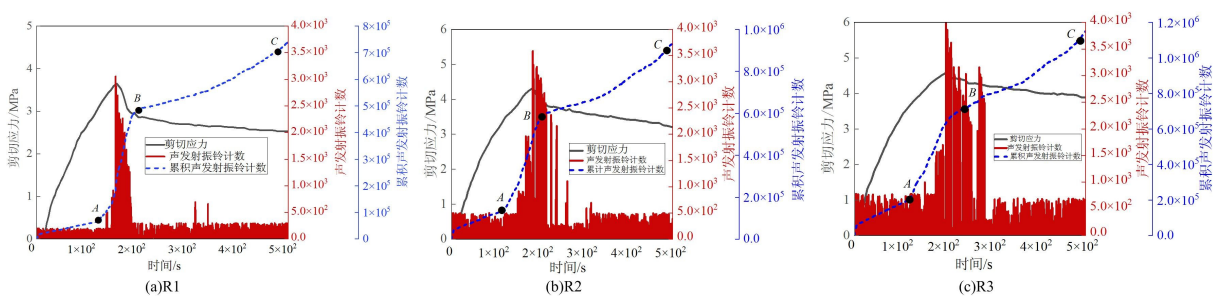


图 10　声发射振铃计数与剪切应力-应变曲线

Fig. 10　Acoustic emission ringing number and shear stress-strain curve

从图 9、图 10 中可以看出，剪切过程中的累积声发射信号曲线分为 3 个阶段，分别为：

1）安静期（OA）：这个阶段是应力-应变曲线的弹性变形阶段，此时试件内部微裂缝及孔隙在法向应力的作用下已经闭合，颗粒之间产生弹性变形。在弹性变形阶段，累积声发射能量与振铃计数均保持在

较低的水平,且上升趋势并不明显。此外,从图 9 看到 R3 试件在这个阶段有较大的声发射能量,这是由于粗糙度较大的岩石结构面在剪切过程中发生磨损啃断、混凝土被压碎等所致,这也对应了在图 8(c)中混凝土破坏程度较大的现象。

2)快速上升期(AB):这个时期处于剪切过程中的硬化变形阶段和小部分峰后软化阶段,此时试件内部发生较明显的破裂,声发射能量及振铃计数都随剪切应力的增大而不断增大,随着剪切应力达到峰值剪切强度,同时声发射的能量及振铃计数在小振幅处陡升至最大值,这意味着试件进入了失稳破坏阶段,试件内部剪切面逐渐贯通。通过图 10(a)~(c)的对比,试件剪切带存在应力集中,声发射振铃计数突然增加体现了较为明显的裂纹扩展作用,粗糙度越大的试件破坏范围越大。值得注意的是,声发射信号峰值要稍微滞后于剪切强度的峰值,峰前阶段试件的累积声发射振铃曲线斜率逐渐增大,呈阶梯状上升,这是剪切应力达到峰值后试件内部裂纹扩展、贯通从而释放出较大能量所致。随着粗糙度增大,试件达到峰值应力时的声发射能量也越来越大,累积声发射振铃曲线的阶梯上升趋势越明显。

3)缓慢上升期(BC):这个时期对应峰后软化后段和残余变形阶段,此时的声发射能量及振铃计数都逐渐下降,试件内部沿着结构面的凸起部分发生滑动和破碎,仍会产生声发射信号,累积声发射参数曲线在这个时期上升较为平缓。达到峰值应力后的声发射能量及声发射振铃计数总体水平都随着粗糙度的增大而增大,这是因为粗糙度大的界面岩石与混凝土之间剪切破坏消耗能量更大,剪切带破损更严重。

图 11 为累积声发射能量与累积振铃计数随粗糙度的变化曲线,由图可知,在 J_{3D} 分别为 4.1、8.6、13.2 时,对应的累积声发射能量分别为 2.849×10^6、2.939×10^6、3.294×10^6 mV·ms,累积振铃计数分别为 7.26×10^5、9.37×10^5、1.01×10^6。随着试件粗糙度的增大,累积声发射能量及振铃计数均呈现增大的趋势,这是因为在相同的剪切速率及法向应力下,粗糙度越大,限制裂纹扩展的约束越明显,试件的抗剪能力越强,储存的弹性应变能越多,因此破坏时释放的能量也越大。

图 12 是峰值应力之前累积声发射能量与累积振铃计数随粗糙度的变化曲线,在 J_{3D} 为 4.1、8.6、13.2 时,对应的峰前累积能量为 9.870×10^5、1.289×10^6、1.996×10^6 mV·ms;累积振铃计数为 1.88×10^5、4.65×10^5、6.29×10^5,该阶段变化规律与整体过程的变化规律大致相同。

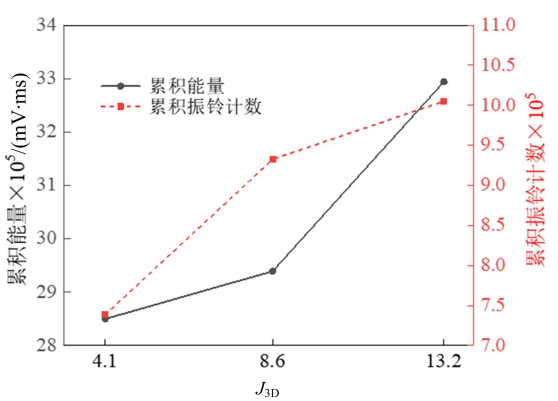


图 11 累积声发射能量与累积振铃计数随粗糙度的变化

Fig. 11 Accumulated acoustic emission energy and ringing count with roughness variation

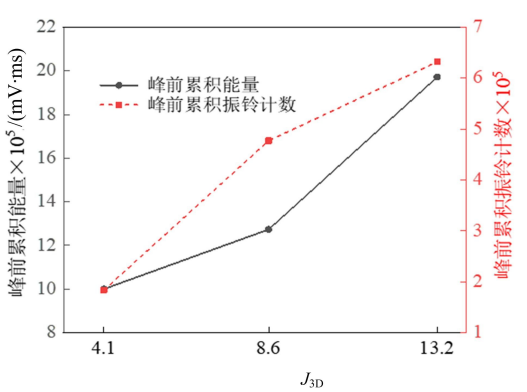


图 12 峰前累积能量与累积振铃计数随粗糙度的变化

Fig. 12 Accumulated energy and ringing count before peak stress with roughness variation

2.4 基于 b 值的剪切破坏研究

声发射特征 b 值是一个重要的参数,可以反映试件内在的破坏机制。b 值起源于地震学,是 GUTENBERG 和 RICHTER[18] 提出的地震震级与频度之间的关系式中的一个参数,该公式为

$$\lg N = a - bM \tag{6}$$

式中:M 为震级;N 为震级在一定范围内的地震次数;a 和 b 为常数。

声发射的 b 值增大与减小可以有效区分岩石破坏时是以大尺度裂纹扩展还是小尺度裂纹开裂。当

b 值的变化不是很明显时，表明岩石内部裂缝逐渐扩大，若 b 值变化很大时，表明岩石裂纹快速发展。根据体波地震震级的定义，可由声发射信号的最大振幅的对数（大致为弹性波的振动速度）确定声发射事件的震级[5]：

$$M=\lg(A_{\max}/A_0)+M_0 \tag{7}$$

式中：M_0 代表参考震级，表示某特定振幅水平对应的震级基准值；A_0 为参考振幅，表示基准震动的振幅值，通常为固定值；$A_{\max}$ 为地震波的最大记录振幅。由于波的衰减是射线路径的函数，一些能量不足的事件只能用离声发射震源最近的探测器来记录，在 2 个探测器之间计算的事件数通常不同，因此 M_0 取−11 可以对 AE 事件最大值进行精准估计。在将声发射应用到岩石剪切过程检测时，用声发射的振幅除以 20 来表示声发射的震级，并以该声发射的震级计算 b 值。因此，与地震发生机制类似，声发射 b 值可以反映岩石的破裂过程。计算声发射过程 b 值的公式可以表示为

$$\lg N=a-b\frac{A_{\mathrm{dB}}}{20} \tag{8}$$

式中：$A_{\mathrm{dB}}=20\lg A_{\max}$，为 AE 事件的最大振幅；$N$ 与式(6)含义一致，这里具体为振幅大于 A_{dB} 的声发射事件数量；本文以极大似然法计算 b 值，表达式如下：

$$b=\frac{n\lg \mathrm{e}}{\sum(n_i\lg A_i)-n\lg A_{\min}} \tag{9}$$

式中：A_i 为第 i 个振幅区间的振幅值；n_i 为第 i 个振幅区间内的声发射事件数量；$A_{\min}$ 为计算区间内的最小振幅值；n 为计算区间内振幅大于 $A_{\min}$ 的声发射事件总数，已有研究表明[6]，AE 事件数 n 为 2 000 时，所计算得到的 b 值结果最为平滑且符合实际，e 为自然对数的底数。

图 13 反映了 3 种试件剪切过程中的声发射 b 值，由图可以看出，剪切结束时的 b 值与剪切初期相比，数值略有下降但幅度不大，且粗糙度越大的试件，其剪切阶段的整体 b 值越小，这是因为粗糙度越大的试件其内部的小尺度裂纹越少，大尺度裂纹占主导，故其声发射 b 值越小。在弹性变形阶段，b 值并无明显变化；随着剪切应力的增大，在硬化变形阶段 b 值缓慢上升，此时试件内部存在大量小尺度裂纹；在剪切应力达到最大值时，剪切面上的大裂纹开始产生，b 值开始降低；随着大裂纹的进一步扩展和贯通，试件进入峰后软化变形阶段，此时 b 值下降趋势愈加明显，且 b 值曲线上下波动的频率达到最大。这一现象随着粗糙度的增加也有所增加，说明粗糙度越大，试件在破坏时内部的裂纹扩展行为就越频繁。R1 试件由于粗糙度较小，在达到峰值剪切强度后试件内部裂纹种类并未发生大量改变，如图 8(a)所示，因而上述现象并不明显；随着试件进入残余变形阶段，这个时期的声发射信号主要产生于剪切面上一些细小颗粒间的相互摩擦，因此这个阶段的 b 值在一定数值范围内波动。

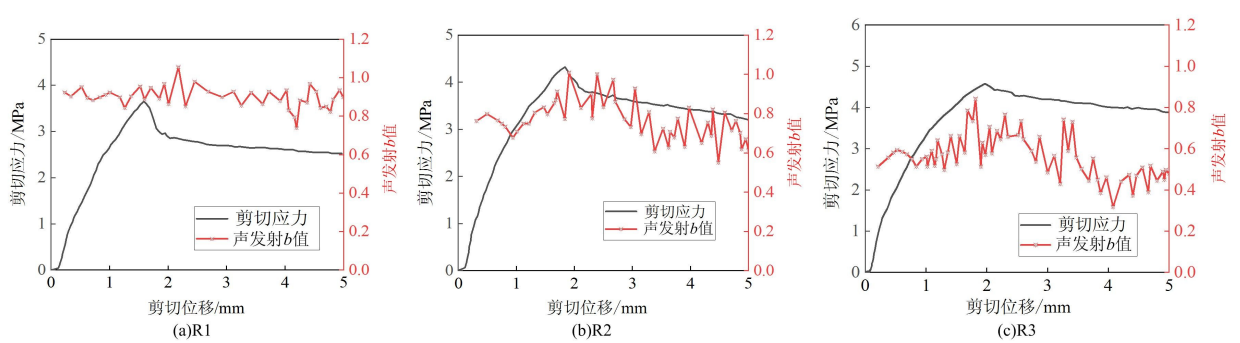


图 13　不同粗糙度剪切声发射 b 值曲线

Fig. 13　b-value curves of shear acoustic emissions with different roughness

需要注意的是，图 13 的 b 值与真正值有所偏差，这是因为按照式(9)计算的 b 值的振幅是由传感器在试件边缘处测量的，该值从源头是逐渐衰减的，测得的频率-振幅分布并不能代表振源的分布，从而导致 b 值不精确。对此，学者们[19−21]提出了一种使用视振幅计算声发射 b 值的方法（Frequency-Gradient Spectrum，FGS），该方法用 Fisher 最优分割和全局搜索算法来确定频率-振幅分布中的对数线性段，从

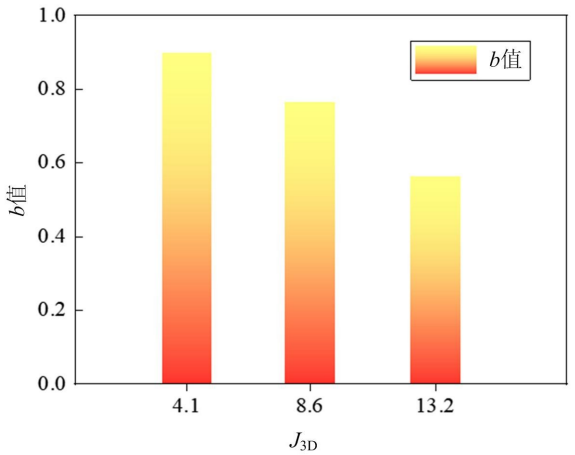


图 14 不同粗糙度的整体 b 值

Fig. 14 Overall b-value for different roughness

而实现对 b 值更精确的计算,用该方法计算的不同粗糙度试件的整体 b 值如图 14 所示,由图可以看出,随着粗糙度增大,其整体 b 值逐渐减小,意味着出现更多的大裂纹扩展;由 2.2 节的黏结界面破坏形态也可以看出,粗糙度小时,剪切导致试件内部出现小尺度裂纹,随着粗糙度增大,大尺度裂纹增多,逐渐演变为混凝土内部的更大范围破碎。

3 结论

本文通过采用 JAW-600 剪切仪对 3 种不同粗糙度的花岗岩-混凝土黏结试件进行剪切试验和声发射监测,探究了不同粗糙度的黏结试件的剪切特性和声发射参数变化规律,揭示了花岗岩-混凝土黏结界面的损伤演化和破坏机制,具体总结如下:

1)通过对花岗岩-混凝土黏结试件剪切应力-位移曲线的分析,可将曲线分为 4 个典型阶段,黏结界面粗糙度越低,其剪切软化特征越明显,黏结界面的剪切强度及峰值位移都随着粗糙度的增大而增大。在本文研究条件下,随着粗糙度的增大,试件剪切刚度的增加幅度变小。

2)通过对 3 种不同粗糙度试件的破坏形态分析发现,粗糙度不同会导致花岗岩-混凝土黏结界面的破坏部位发生改变,剪切后试件表现为 3 种典型剪切破坏模式,分别为黏结界面破坏、混合剪切破坏及混凝土剪切破坏。

3)从声发射能量及振铃计数随剪切过程中的变化可以看出,与剪切过程相对应,声发射参数经历安静期、快速上升期、缓慢上升期。粗糙度越大,声发射能量及振铃计数越大,且声发射振铃计数和能量峰值滞后于峰值应力,说明粗糙度会加剧试件内部磨损啃断现象,从而导致声发射参数变化。

4)由声发射 b 值的规律分析可以得知,花岗岩-混凝土黏结试件粗糙度越大,剪切峰值应力处的 b 值波动频率及下降幅度越大。基于 FGS 方法计算了不同粗糙度试件的整体 b 值,发现粗糙度越大的试件,声发射 b 值越小,其对应的试件内部大尺度裂纹的数量越多。

参考文献:

[1] 刘江豪, 郭保华, 程坦, 等. 岩石-混凝土界面峰值剪切强度经验公式试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(10):2552-2565 (LIU Jianghao, GUO Baohua, CHENG Tan, et al. Experimental study on empirical formula of peak shear strength for rock-concrete interface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(10):2552-2565 (in Chinese))

[2] BARTON N. The shear strength of rock and rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1976, 13(9):255-279.

[3] 刘丹, 张博文, 洪陈杰, 等. 岩石结构面两级形貌剪切特性研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(8):1434-1442 (LIU Dan, ZHANG Bowen, HONG Chenjie, et al. Shear properties of two-order morphology of rock joints[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(8):1434-1442 (in Chinese))

[4] 易鑫. 不同粗糙度异性结构面剪切强度劣化规律数值研究[J]. 甘肃水利水电技术, 2022, 58(12):16-18 (YI Xin. Numerical study on shear strength deterioration law of heterogeneous structural planes with different roughness[J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2022, 58(12):16-18 (in Chinese))

[5] ANDJELKOVIC V, PAVLOVIC N, LAZAREVIC Z, et al. Modelling of shear characteristics at the concrete-

rock mass interface[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 76:222-236.

[6] CHEN Y D, ZHAO Z H. Correlation between shear induced asperity degradation and acoustic emission energy in single granite fracture[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 235:107184.

[7] 丁士君，丁民涛，满银，等. 玄武岩-混凝土界面抗剪性能的影响因素及特征分析[J]. 工业建筑，2023，53(1)：194-200 (DING Shijun, DING Mintao, MAN Yin, et al. Analysis on effect factors and characteristics of shear properties for interfaces between basalt and concrete[J]. Industrial Construction, 2023, 53(1): 194-200 (in Chinese))

[8] DONG W, WU Z M, ZHANG B S, et al. Study on shear-softening constitutive law of rock-concrete interface[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(9):4677-4694.

[9] JIANG Q, YANG Y, YAN F, et al. Deformation and failure behaviours of rock-concrete interfaces with natural morphology under shear testing[J]. Construction and Building Materials, 2021, 293:123468.

[10] 金嘉怡，朱泽威，陈忠清，等. 结构面剪切条件下岩石声发射特征研究[J]. 土工基础，2021，35(5)：621-623，634 (JIN Jiayi, ZHU Zewei, CHEN Zhongqing, et al. Experimental study on the effect of liquid nitrogen cycling freezing on the mechanical properties of rock mass[J]. Soil Engineering and Foundation, 2021, 35(5):621-623, 634 (in Chinese))

[11] 王刚，宋磊博，刘夕奇，等. 非贯通节理花岗岩剪切断裂力学特性及声发射特征研究[J]. 岩土力学，2022，43(6)：1533-1545 (WANG Gang, SONG Leibo, LIU Xiqi, et al. Shear fracture mechanical properties and acoustic emission characteristics of discontinuous jointed granite[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(6):1533-1545 (in Chinese))

[12] 张延新，曹龙辉，李泽杰，等. 不同循环加载应力下花岗岩 Kaiser 效应特征的试验研究[J]. 实验力学，2021，36(1)：123-132 (ZHANG Yanxin, CAO Longhui, LI Zejie, et al. Experimental study on Kaiser effect characteristics of granite under different cyclic loading stresses[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021, 36(1):123-132 (in Chinese))

[13] MORADIAN Z A, BALLIVY G, RIVARD P, et al. Evaluating damage during shear tests of rock joints using acoustic emissions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(4):590-598.

[14] ZHANG S W, LIN H, CHEN Y F, et al. Acoustic emission and failure characteristics of cracked rock under freezing-thawing and shearing[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022, 121:103537.

[15] SHANG D L, CHEN Y D, ZHAO Z H, et al. Mechanical behavior and acoustic emission characteristics of intact granite undergoing direct shear[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 245:107581.

[16] 唐志成，刘泉声，夏才初. 节理三维形貌参数的采样效应与峰值抗剪强度准则[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2015，46(7)：2524-2531 (TANG Zhicheng, LIU Quansheng, XIA Caichu. Investigation of three-dimensional roughness scale-dependency and peak shear strength criterion[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(7):2524-2531 (in Chinese))

[17] TSE R, CRUDEN D M. Estimating joint roughness coefficients[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1979, 16(5):303-307.

[18] GUTENBERG B, RICHTER C F. Frequency of earthquakes in California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 34(4):185-188.

[19] LOCKNER D A, BYERLEE J D, KUKSENKO V, et al. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite[J]. Nature, 1991, 350:39-42.

[20] LIU X L, HAN M S, HE W, et al. A new b value estimation method in rock acoustic emission testing[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2020, 125(12): e2020JB019658.

[21] CHEN D L, LIU X L, HE W, et al. Effect of attenuation on amplitude distribution and b value in rock acoustic emission tests[J]. Geophysical Journal International, 2021, 229(1):933-947.

Study on the shear acoustic emission characteristics of the granite-concrete bonding interface with different roughness

XU Haijun[1], JIANG Annan[1], MIN Qinghua[2], NIE Shengze[2]

(1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China; 2. China Construction Communications Engineering Group Corporation Limited, Beijing 100166, China)

Abstract: In order to study the influence of roughness on the shear mechanical properties of granite concrete specimens, the splitting method was first used to obtain the granite structural planes, and the joint roughness coefficient JRC was obtained by scanning with a laser three-dimensional profilometer. Concrete was poured on the structural planes to make rock-concrete bonding specimens, and then shear tests were conducted and acoustic emission monitoring was carried out simultaneously. The results of the shear test show that the shear stress-strain curves of granite concrete bonded specimens with different roughness have a roughly consistent trend, and the shear failure modes of the specimens are different. As the roughness increases, the shear softening characteristics of the specimen become increasingly apparent, and the peak shear strength gradually increases. The synchronous acoustic emission monitoring during the shearing process shows that the acoustic emission energy and ringing count both increase with the increase of roughness, while the acoustic emission characteristic b value decreases with the increase of roughness. The research results of this article can provide a reference for revealing the shear failure behavior of granite concrete interface in engineering.

Keywords: bonding interface; roughness; direct shear test; shear properties; acoustic emission parameters