

·土木工程·

DOI:10.15961/j.jsuese.202201120



## 石英砂岩三轴剪切力学特性及裂隙面形态特征

林志南<sup>1</sup>, 冯世宏<sup>1,2</sup>, 王家全<sup>1,2</sup>, 张强<sup>3\*</sup>, 龙海锋<sup>1,2</sup>

(1.广西科技大学土木与建筑工程学院, 广西柳州 545006; 2.广西壮族自治区岩土灾变与生态治理工程研究中心, 广西柳州 545006;  
3.中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:**为研究3维压剪应力状态下岩质边坡中完整岩石的剪切损伤破坏特征,采用 Rock Top-50HT全应力多场耦合三轴试验系统,对成分简单、结构均质及饱和完整的细粒石英砂岩进行16组不同围压的三轴剪切试验,获得相应的三轴剪切应力-应变曲线和含有原岩屑碎片的剪切破坏裂隙面,分析三轴剪切应力作用下石英砂岩的非线性强度变化特征,探究石英砂岩的三轴剪切破坏模式和裂隙结构面形态粗糙特征。基于德洛内(delaunay)点云离散算法重构石英砂岩破坏裂隙结构面,分析剪切破坏结构面的潜在接触部分随着表面有效倾角门槛值的变化特征。结果表明:1)随着围压逐渐增大,石英砂岩的三轴剪切破坏模式先由脆性破坏转变为塑性破坏,再逐渐转变为塑形流动破坏;2)石英砂岩的三轴剪切强度随着围压的递增呈现出明显的非线性变化特征,可用幂函数描述,并采用摩尔-库仑准则(Mohr-Coulomb)对石英砂岩的三轴剪切强度进行分段线性拟合,可知随着围压的增大,黏聚力逐渐增大,内摩擦角逐渐减小;3)剪切破坏裂隙面3维粗糙特征可用传统的Grasselli模型评估,其非线性拟合参数 $\theta_{\max}^*$ 和粗糙度参数 $c$ 能充分描述三轴剪切破坏裂隙的粗糙度特征。研究成果对岩石在复杂应力状态下的三轴剪切强度评价、岩石工程中边坡的稳定性分析和支护设计方案优化具有重要意义。

**关键词:**岩石力学;三轴剪切试验;破坏模式;非线性剪切强度;裂隙面形态特征

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2024)04-0161-12

准确确定工程岩石力学参数是进行工程岩体稳定性评价、结构设计优化和承载能力评估的基础。然而,工程岩石是一种极其复杂的地质体,其力学性质和变形破坏特征在不同应力环境下是复杂多变的。与3向压应力条件和单向压应力、单向剪切应力条件不同,两向压应力、单向剪切应力条件下,尤其在高地应力条件下,工程岩石(高边坡滑动带)的力学参数和变形破坏机制非常复杂。因而,3维压剪条件下岩石剪切损伤变形特性研究成为当前岩石力学领域的一个重要研究课题。

近几十年,国内外学者结合辅助计算手段,通过室内三轴压缩试验<sup>[1-6]</sup>和室内直剪试验<sup>[7-17]</sup>对岩石力学参数及破坏机制展开研究。例如:李鹏飞等<sup>[3]</sup>对北

山花岗岩在三轴循环加卸载试验中岩石强度参数的演化特征及屈服变形后的强度变化规律展开研究。黄锋等<sup>[4]</sup>通过室内试验对花岗岩的宏观力学参数及其渐进破坏机制进行了研究,并结合数值模拟从宏观、微观全面地分析花岗岩变形破坏的本质。王传乐等<sup>[5]</sup>利用声发射信号分析北山花岗岩三轴压缩的破裂演化机制,并获得了变形参数。Deng等<sup>[6]</sup>对锦屏Ⅱ级工程的大理岩进行三轴压缩试验,并采用最大熵概率密度函数描述三轴测试中大理岩剪切强度参数的分布特征。

虽然岩石三轴压缩试验能直观地分析岩石剪切破坏的裂缝扩展形态,但剪切破坏面的不确定性和裂缝起裂点的随机性造成岩石剪切裂缝扩展演化研

收稿日期:2022-10-17 修回日期:2023-02-28 网络出版日期:2023-03-06

基金项目:广西自然科学基金项目(2021GXNSFBA196043; 2023GXNSFAA026185; 2022GXNSFDA035081);国家自然科学基金项目(41962017);国家自然科学基金雅鲁江联合基金项目(U1965204);广西科技大学博士基金项目(校科博19Z42);广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目(桂教人才[2020]6号);广西高校中青年教師科研基础能力提升项目(2020KY08023);中国水利水电科学研究院科研专项项目(GE110145B0022021);广西研究生教育创新计划项目(YCSW2022441)

作者简介:林志南(1987—),男,讲师。研究方向:岩石力学与工程。E-mail: zhinan\_lin@gxust.edu.cn

\*通信作者:张强,正高级工程师, E-mail: zhangq@iwhr.com

究极其困难。因而,部分学者采用室内直剪试验研究预制岩石节理面的变形破坏特征。程坦等<sup>[7-8]</sup>采用劈裂法制取不规则砂岩,研究不同法向应力下岩石节理面的剪切强度特性,提出不规则岩石节理剪切强度经验公式,并采用分段函数建立岩石节理剪切变形本构模型。宋磊博等<sup>[9]</sup>基于节理表面微凸体磨损特征,定量分析不同法向应力下粗糙节理的强度特征与破坏特征。周辉等<sup>[10]</sup>开展大理岩规则齿形节理试样的剪切试验,将节理剪切破坏模式划分为滑动破坏型和切齿破坏型。Wu等<sup>[11]</sup>采用神经网络智能算法预测正应力和节理粗糙度对节理强度影响的变化规律。金磊磊<sup>[12]</sup>和Zhang<sup>[13]</sup>等开展人工节理试样在不同法向应力作用下的直剪试验,研究抗拉强度对剪切破坏模式的影响。申辉等<sup>[14]</sup>对人工节理试样开展不同法向应力条件下的直剪试验,并对Goodman线性模型进行改进,提出更加接近实际情况的非线性全量剪切模型。彭守建<sup>[15]</sup>和许江<sup>[16-17]</sup>等利用自主研发的煤岩剪切细观试验装置研究砂岩等材料在剪切破坏过程中裂纹细观特性随法向应力的变化规律。

国内外学者对岩石抗剪强度特征的研究主要集中在结构面自身力学性质和粗糙度两个内在因素对其的作用机制,且主要基于压剪条件下节理结构面直剪试验,但直剪试验的压剪应力条件并不能正确模拟实际边坡工程岩石所处的3维压剪应力状态。随着水电能源需求的不断攀升,能源工程日益向地下深部拓展,使高地应力复杂环境下的工程岩体展现出与浅部岩体截然不同的力学响应,特别是其非线性强度特征尤为显著<sup>[18-19]</sup>。综上所述,3维高应力-剪切条件下岩石非线性强度变化特征研究方面成果较少,亟需深入研究3维压剪应力状态下完整岩石剪切损伤特征及贯通机制。

鉴于此,在已有研究成果的基础上,利用Rock Top-50 HT全应力多场耦合三轴试验系统,以四川某地石英砂岩为对象,开展围压为0~30 MPa下的三轴剪切试验研究,分析石英砂岩剪切损伤演化过程,研究不同围压作用下三轴剪切峰值强度的非线性特征,并探讨剪切损伤破坏后结构裂隙面的3维形态特征。

## 1 试验装置与方法

### 1.1 试验岩样

试验岩样取四川某地的石英砂岩,外观呈淡绿色。为减小石英砂岩物理力学性质的差异,尽量避免其原有内部结构产生扰动破坏,排除岩样离散性对试验的影响。采用人工操作机械的方法,从同一块岩芯上钻取出圆柱形试样,经过切割和打磨后得到尺寸为50.00 mm×90.00 mm ( $D \times H$ )的标准试验岩样,其外观均匀、端部平整,直径和长度的误差均小于0.50 mm,

样品端部平度在 $\pm 0.02$  mm以内。采用称重的方式统计试样的密度,其平均密度为 $2.31 \text{ g/cm}^3$ ,剔除密度偏离平均值大于 $0.05 \text{ g/cm}^3$ 的岩样。

试验采用扫描电子显微镜和全自动粉末X射线衍射仪对岩样薄片进行电子显微镜扫描和矿物成分分析,获得石英砂岩X射线衍射和石英砂岩的电镜扫描图片,分别如图1、2所示。鉴定结果表明,石英砂岩属于细粒石英类砂岩,具有结晶和块状构造及孔隙式胶结特征,砂岩中的矿物成分包括73.9%的石英、21.7%的斜长石和4.4%的高岭石。

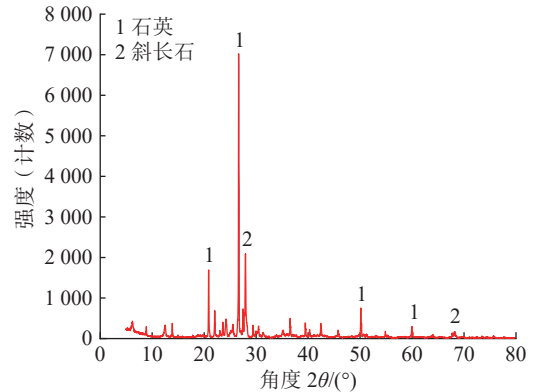
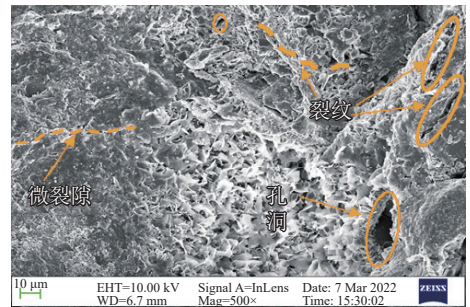
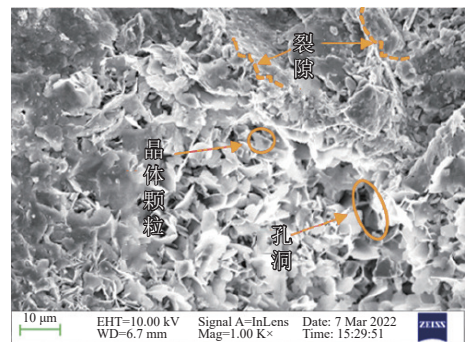


图1 石英砂岩X射线衍射

Fig. 1 X-ray diffraction pattern of quartz sandstone



(a) 500倍



(b) 1 000倍

图2 石英砂岩的电镜扫描图片

Fig. 2 Electron microscope scanning image of quartz sandstone

深部岩石常赋存在富水环境中,因此,将所有样品放置在 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度下的烘箱中干燥24 h,并采用真空饱水机对岩样进行真空饱水处理24 h;待浸水中的试样在真空泵抽取下表面无气泡产生,可确保试样

内部所有孔隙都被蒸馏水充满;通过超声检测方法剔除波速异常的岩样,所筛选出石英砂岩的基本物理参数如表1所示。

表1 石英砂岩的基本物理参数

Tab. 1 Basic physical parameters of quartz sandstone

干密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	饱和密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	含水率/%	波速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	单轴强度/ MPa
2.31	2.45	5.64	2142	59.05

## 1.2 试验设备

试验所采用的设备是Rock Top-50 HT全应力多场耦合三轴试验系统,如图3所示,配备了轴压、围压和渗透水压3套独立的加载系统,可施加的最大轴压为500 MPa,最大围压为60 MPa,最大渗压为50 MPa。三轴剪切压力室装置如图4所示,该仪器拥有一套多通道PC控制系统,可独立伺服控制轴向压力、径向围压和孔隙水压力,且拥有两个轴向双通道LVDT传感器,测量精度为0.001 mm,量程为12 mm,可准确测量试验过程中试样的剪切位移。

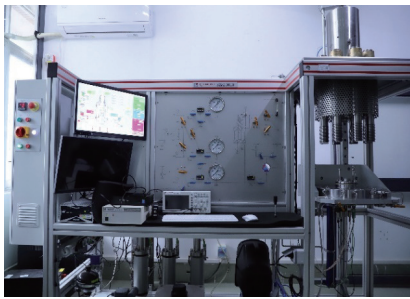


图3 Rock Top-50HT全应力多场耦合三轴试验系统

Fig. 3 Rock Top-50HT full-stress multi-field coupling tri-axial test system

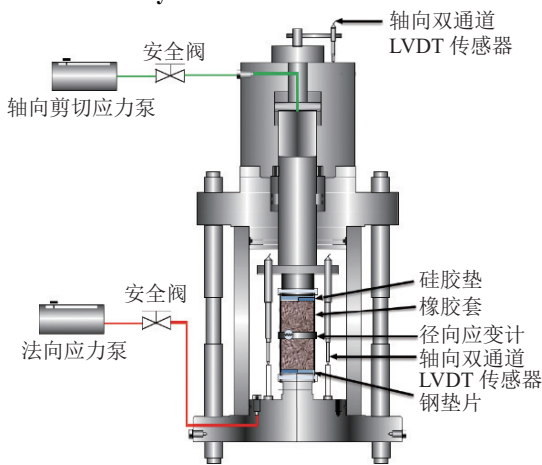


图4 三轴剪切压力室装置构造

Fig. 4 Triaxial shear pressure chamber device

## 1.3 试验原理

三轴剪切试验示意图如图5所示,左右侧半圆柱受到大小相同、方向相反的剪应力,从而实现三轴应力作用下岩石的剪切试验。由图5可知,试样两断面

的垫块均由上下位置错开的半圆柱硅胶垫和缺半圆柱的圆柱钢垫片组成<sup>[20]</sup>。硅胶垫硬度和弹性模量很低,在相同法向位移产生时,硅胶垫承受的应力远小于岩石的应力。

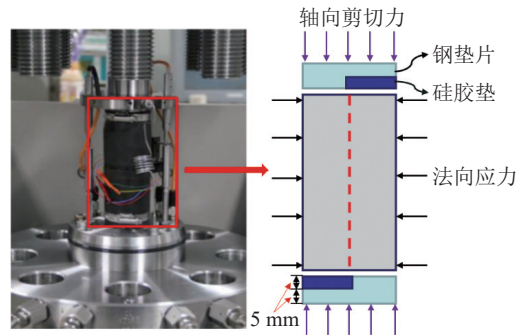


图5 三轴剪切试验示意图

Fig. 5 Schematic diagram of triaxial shear test

试验过程中,岩石轴向受力平衡,不同围压作用下岩石的抗剪强度 $\tau$ 可表示为:

$$\tau = (F' - F)/S \quad (1)$$

$$F' + F = F_0 \quad (2)$$

$$\tau = (F_0 - 2F)/S \quad (3)$$

$$F = kA\varepsilon \quad (4)$$

式(1)~(4)中, $F$ 为岩石右侧上端和左侧下端受力, $F'$ 为岩石左侧上端和右侧下端受力, $S$ 为岩块剪切作用面积, $F_0$ 为轴向荷载, $k$ 为硅胶垫的变形模量, $A$ 为硅胶垫的截面面积, $\varepsilon$ 为橡胶垫的变形量。

为获取硅胶垫的变形模量 $k$ 值,将硅胶垫的尺寸裁剪成厚度为90 mm、直径为50 mm的圆柱体,通过测试获得硅胶垫圆柱体应力-应变曲线,如图6所示。

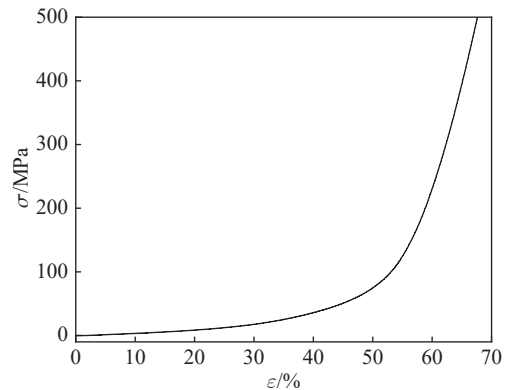


图6 硅胶垫圆柱体应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curve test of silicone rubber

## 1.4 试验方法及步骤

首先,将石英砂岩试样用橡胶套包裹起来;然后,在岩样两端分别垫上直径50 mm的半缺口钢垫片和半圆形硅胶垫(图5);最后,将试样放入三轴应力室中。围压应力水平分别设置为0、2、4、6、8、10、12、14、

16、18、20、22、24、26、28和30 MPa。本文所有三轴剪切试验均在24 ℃恒温环境内进行,步骤如下:

1)以1 MPa/min的恒定应力加载速率逐步把围压应力值加载到预设目标值;

2)以0.02 mm/min的恒定位移加载速率施加轴压荷载直至试样完全破坏。

试验结束后,试样两端的硅垫片均被明显压缩,且部分嵌入钢垫片中间的空洞中,钢垫片并未发生翻转变形。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 不同围压下的三轴剪切变形特征

石英砂岩的三轴剪切变形过程分为初始压缩、线弹性变形、塑性屈服、剪切破坏及峰后残余变形5个阶段,各阶段的变形特征如下:

#### 1)初始压缩阶段

石英砂岩内部原有的空隙和微裂缝均被压实,砂岩基质体被紧密结合,因此,石英砂岩的三轴剪切应力-应变曲线初期存在一定下凹段。该阶段的应变是由孔隙和微裂隙被压缩闭合引起的空隙压缩应变 $\varepsilon_A$ 和岩石基质剪切压缩引起的基质压缩应变 $\varepsilon_m$ 组成。此时,相对应的石英砂岩空隙压实应力 $\sigma_A$ 为3.032 MPa,剪切初始压密裂纹应力 $\sigma_B$ 为8.428 MPa。随着内部孔隙逐渐被压缩及岩石基质逐渐紧密结合,该阶段剪切应力-应变曲线在剪切压缩后期呈现出一定的应变硬化特征<sup>[21]</sup>。不同围压下石英砂岩的三轴剪切应力-应变曲线如图7所示。由图7(b)和(c)可知:当围压 $\sigma_3 < 18$  MPa时,石英砂岩的剪切应力-应变曲线呈现出明显的下凹特征,且随着围压的逐渐增大,石英砂岩的初始压密裂纹应力逐渐减小;当围压 $\sigma_3 \geq 18$  MPa时,石英砂岩的剪切应力-应变曲线没有明显的下凹特征,主要原因是轴向剪切荷载作用前,围压逐渐增大,使岩石内部的孔隙和微裂纹压密,岩石基质紧密结合。

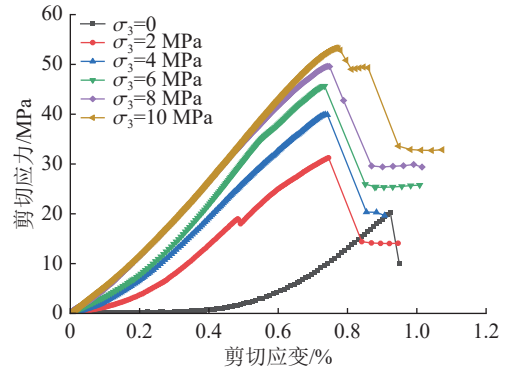
#### 2)线弹性变形阶段

岩石基质体的弹性应变占总弹性应变的大部分,石英砂岩试样的剪切应力与剪切应变呈线性关系。随着围压的逐渐增大,石英砂岩三轴剪切过程中的初始压缩应变逐渐减小,石英砂岩在三轴剪切应力条件的线弹性变形阶段逐渐延长。

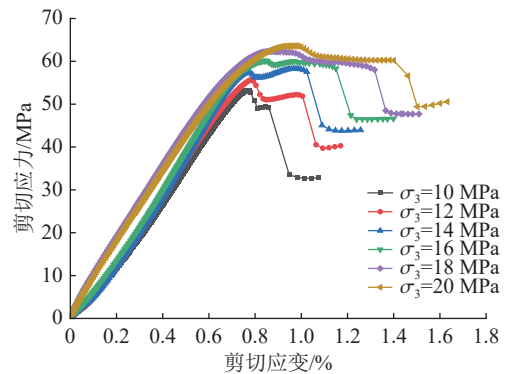
#### 3)塑性屈服阶段

石英砂岩的三轴剪切应力-应变曲线呈非线性增长特征,且随着围压的逐渐增大,剪切屈服点的剪切应变值逐渐增大,导致这种非线性增长特征愈加明显。当轴向剪切应力超过屈服点后,石英砂岩的内

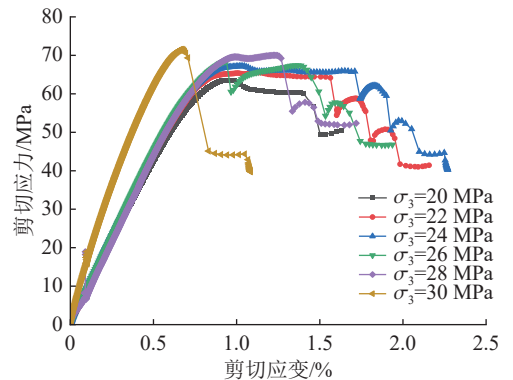
部原生裂纹和孔隙将不再压密,砂岩试样的部分内部聚集能量逐渐释放,开始发生不可逆塑性变形。石英砂岩内部稳定性被破坏后,逐渐形成内部裂纹且稳定扩展,但没有达到宏观上的剪切贯通破坏。



(a) 围压  $\sigma_3$  为 0、2、4、6、8、10 MPa



(b) 围压  $\sigma_3$  为 10、12、14、16、18、20 MPa



(c) 围压  $\sigma_3$  为 20、22、24、26、28、30 MPa

图 7 不同围压作用下石英砂岩的三轴剪切应力-应变关系曲线

Fig. 7 Triaxial shear stress-strain curves of quartz sandstone under different confining pressures

#### 4)剪切破坏阶段

石英砂岩内部新生的微裂缝数量迅速增多,试样内部聚集的能量被进一步释放。随着轴向剪切应力进一步增大,岩石内部新发展的裂纹发生不稳定的扩展,宏观剪切裂纹持续发展聚集,逐渐形成剪切主裂纹,砂岩将被破坏。

随着围压的增大,石英砂岩的脆性特征降低、延性特征增强<sup>[22]</sup>。当 $\sigma_3 \leq 9$  MPa时,石英砂岩在三轴剪切应力状态下发生脆性破坏;当 $9 \text{ MPa} < \sigma_3 \leq 14$  MPa时,剪切应力-应变曲线在剪切破坏阶段存在明显的应力下降特征,石英砂岩的轴向剪切峰值应力并非剪切破坏应力,其剪切破坏应力明显滞后于剪切峰值应力,应力下降的幅度随着围压的增大而减小。三轴剪切裂缝逐渐贯通,在较高围压作用下出现塑形破坏,峰值剪切极限应力并非是三轴剪切应力作用下的失稳破坏点,该阶段存在亚失稳破坏阶段<sup>[23-24]</sup>。当 $\sigma_3 \geq 16$  MPa时,石英砂岩剪切应力-应变曲线在剪切破坏阶段呈现出塑性流动状态<sup>[25]</sup>,即剪切应力不再增大并产生较大的塑性变形;当围压 $\sigma_3 = 18$  MPa时,石英砂岩破坏塑性流动状态下的剪切应变变形量为0.500%;当围压 $\sigma_3 = 24$  MPa时,石英砂岩的剪切破坏应变变形量最大为0.675%;随着围压的继续增大,塑性流动状态的剪切应变变形量整体呈现出先增大后减小的趋势。当围压 $\sigma_3 \geq 24$  MPa时,石英砂岩的剪切破坏特征发生明显变化,主要与石英砂岩在高围压下的剪切滑移破坏倾角模式有关。石英砂岩在三轴剪切作用下的破坏模式与余华中<sup>[26]</sup>、谢和平<sup>[27]</sup>等基于三轴压缩试验分析围压水平变化对岩石应力特征值及破坏模式的研究结果一致。

### 5) 峰后残余变形阶段

随着轴向剪切应力的逐渐增大,石英砂岩在恒定围压作用下产生贯通剪切主裂纹,主裂隙面呈现凹凸不平的形态特征,在应力水平作用下会继续滑动剪切,使石英砂岩试样存在一定的破坏后的剪切强度,即残余变形强度。

高、低围压作用下石英砂岩的典型剪切应力-应变曲线如图8所示。由图7、8可知,随着围压逐渐增大,石英砂岩的剪切残余强度逐渐增大,其残余破坏承载能力主要由滑移摩擦力决定。随着3维应力水平值逐渐增大,石英砂岩的破坏行为使峰后剪切残余变形发生明显变化,如:当围压 $\sigma_3 < 22$  MPa时,石英砂岩峰后剪切应力-应变曲线的斜率为负值(I级)。当围压 $\sigma_3 \geq 22$  MPa时,石英砂岩峰后剪切应力-应变曲线的斜率为正值(II级),与Yang<sup>[28]</sup>在三轴压缩试验中所提的岩石峰后破坏模式相似;石英砂岩剪切应力-应变曲线在峰后残余变形阶段呈现出多个凸包特征(图8(b)),在三轴剪切残余变形阶段,剪切破坏形成贯通结构面。随着剪切应力的持续增大,剪切块相互作用并沿着凸起面继续剪切磨损,与恒定法向刚度(CNS)条件下呈现出的剪切峰后变形特征相似<sup>[29]</sup>。

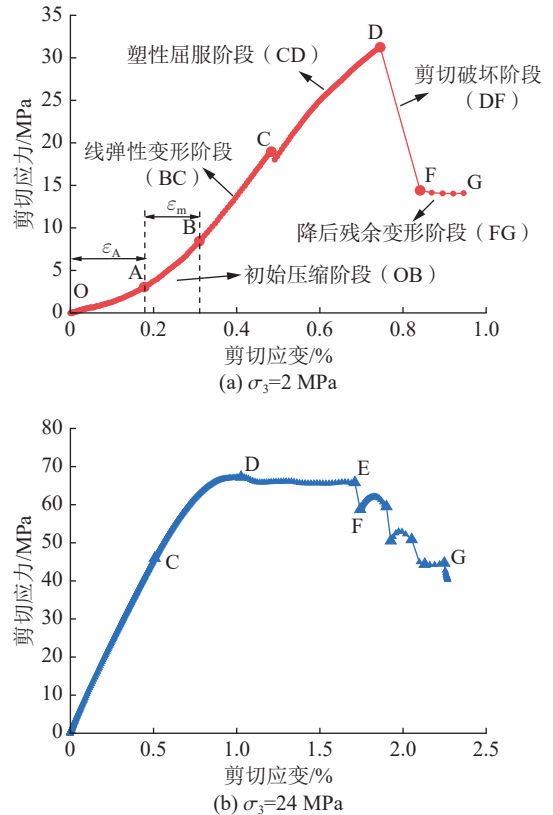


图8 高、低围压作用下石英砂岩的典型剪切应力-应变曲线

Fig. 8 Typical shear stress-strain curves of quartz sandstone under high and low confining pressures

## 2.2 三轴剪切应力作用下石英砂岩的非线性剪切强度特征

汪斌等<sup>[30]</sup>采用2次抛物线型、双曲线型和幂函数型等描述深部岩石开挖后表现出的非线性强度特征。本文采用幂函数准则 $\tau = 11.597\sigma^{0.448} + 19.218$ 描述岩石三轴剪切强度,最终拟合相关系数 $R^2 = 0.991$ 。不同围压下石英砂岩的三轴剪切强度如图9所示。由图9可知,石英砂岩在三轴剪切应力条件下的峰值剪切强度随着围压的增大表现出明显的非线性行为特征,与Xie等<sup>[31]</sup>通过三轴压缩试验获得不同围压条件下的岩石三轴抗压强度相似。由此说明,幂函数准则能更好地反映石英砂岩在三轴剪切应力条件下的峰值剪切破坏强度。随着围压的增大,石英砂岩的三轴剪切破坏模式由剪切面贯通破坏向张拉与剪断破坏转变,最后向双滑移剪切破坏转变,进一步说明石英砂岩在三轴剪切应力作用下的复杂变形破坏特征。

不同围压(低、中和高应力水平)下石英砂岩三轴剪切强度的Mohr切线簇<sup>[30,32]</sup>如图10所示。由图10可知,不同围压区段,剪切强度的近似线性强度包络线差异性特征明显,其切点斜率整体呈现出连续变化的规律。高围压作用引起的剪切变形破坏模式更

加复杂,使剪切强度偏离线性变化特征。因此,采用多段直线描述不同围压下的剪切强度包络线,7个围压段上的剪切强度线性回归参数结果如表2所示。由表2可知,石英砂岩的抗剪强度包络线具有多段线性特征。由图10和表2可知:在 $\sigma_3$ 为0~4 MPa的围压作用下(图10中的区段I),采用Mohr-Coulomb准则得出黏聚力为20.62 MPa,内摩擦角为78.52°;随着围压逐渐增大,石英砂岩的多段线性包络线的黏聚力逐渐增大,增长幅度逐级递减(由最初的47.96%减小到最终的7.19%);内摩擦角随着围压的增大逐渐增大。

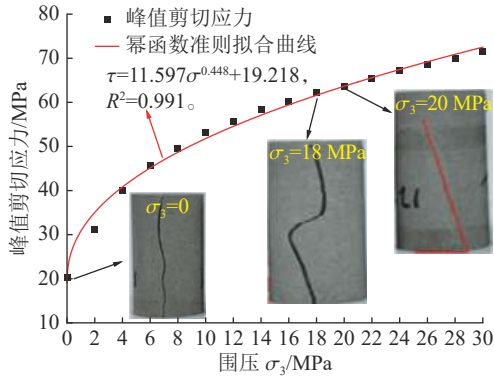


图 9 不同围压下石英砂岩的三轴剪切强度

Fig. 9 Triaxial shear strength of quartz sandstone under different confining pressures

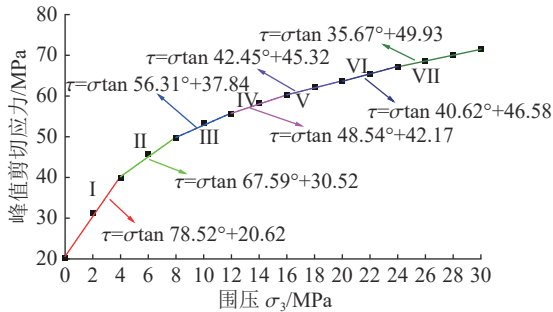


图 10 不同围压下石英砂岩三轴剪切强度的Mohr切线簇  
Fig. 10 Mohr cluster of triaxial shear strength of quartz sandstone under different confining pressures

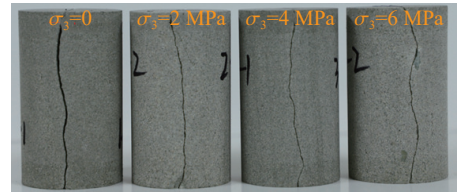
表 2 剪切强度线性回归拟合参数

Tab. 2 Piecewise linear regression fitting parameters of triaxial shear strength

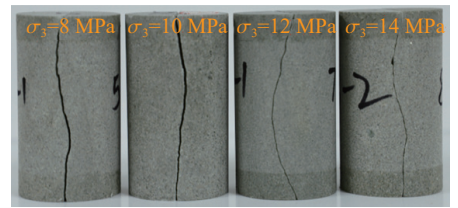
区段	Mohr-Coulomb准则公式	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
I	$\tau = 11.597\sigma^{0.448} + 19.218$	20.62	78.52
II	$\tau = 11.597\sigma^{0.448} + 19.218$	30.51	67.59
III	$\tau = 11.597\sigma^{0.448} + 19.218$	37.84	56.31
IV	$\tau = 11.597\sigma^{0.448} + 19.218$	42.17	48.54
V	$\tau = 11.597\sigma^{0.448} + 19.218$	45.32	42.45
VI	$\tau = 11.597\sigma^{0.448} + 19.218$	46.58	40.62
VII	$\tau = 11.597\sigma^{0.448} + 19.218$	49.93	35.67

### 2.3 三轴剪切应力作用下的石英砂岩破坏模式

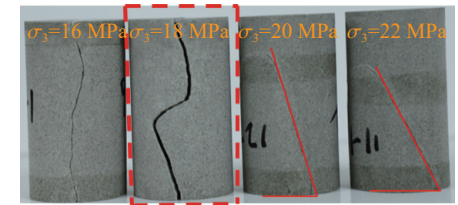
岩石在外部荷载作用下的宏观破坏模式是反映岩石破坏机制的重要体现和关键特征<sup>[33-34]</sup>。不同围压下岩样剪切破坏特征如图11所示,围压对三轴剪切破坏模式产生了明显的影响。



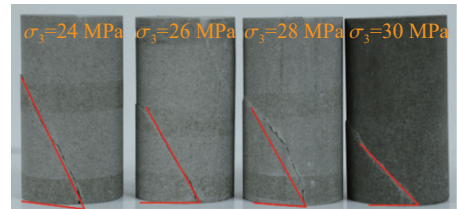
(a)  $\sigma_3$  为 0、2、4、6 MPa



(b)  $\sigma_3$  为 8、10、12、14 MPa



(c)  $\sigma_3$  为 16、18、20、22 MPa



(d)  $\sigma_3$  为 24、26、28、30 MPa

图 11 不同围压下岩样剪切破坏特征

Fig. 11 Shear failure characteristics of quartz sandstone under different confining pressures

由图11可知:当围压 $\sigma_3 < 18$  MPa时,石英砂岩试样的破坏模式均表现为剪切断裂破坏,此阶段与完整岩石直接剪切变形有相似的破坏模式和损伤特性<sup>[35]</sup>。在此围压范围内,随着围压的逐级增大,剪切裂隙的破坏形态曲折性逐渐变大,原因是在围压作用下,张拉作用逐渐产生,使剪切破裂面的曲折程度逐渐增大。

当围压 $\sigma_3 = 18$  MPa时,石英砂岩试样破坏后形成明显的张拉裂缝及张拉剪断复合破坏结构面,此时试样的破坏形态为贯通剪切破坏与双滑移剪切破坏的过渡形态。

当围压 $\sigma_3 > 18$  MPa时,在三轴剪切应力作用下,石英砂岩的破坏模式为双滑移剪切破坏。由于围压作用较强,石英砂岩在复杂应力作用下没有形成轴

向的贯通剪切破坏, 进而形成与轴向呈一定倾角的宏观斜向裂纹, 与王刚等<sup>[36]</sup>对完整花岗岩进行直剪试验所提的破坏模式类似。该围压范围内主要形成拉伸剪切滑移破坏, 且沿着剪切破裂面方向相互摩擦滑动。当围压 $\sigma_3=20$  MPa时, 剪切破裂面角度为 $74^\circ$ ; 围压继续增大到22、24、26、28和30 MPa时, 形成的剪切破裂面角度分别为 $63^\circ$ 、 $61^\circ$ 、 $58^\circ$ 、 $56^\circ$ 和 $46^\circ$ 。

石英砂岩试样的剪切结构面破坏形态主要是三轴剪切破坏过程中综合力学效应的宏观表现。不同围压下石英砂岩的典型剪切破坏形态如图12所示。在剪切变形过程中, 受剪岩块左、右部发生相对错动; 破坏面上存在明显的乳白色粉末状区域, 石英砂岩中的石英、长石等颗粒和胶结材料在三轴剪切破坏后形成剪切磨损粉末区; 结构面中间部分存在明显的剪切损伤区域, 呈现出起伏和粗糙的平面特征, 原因是剪切破坏阶段在不断发展的张力作用下, 出现一定深度的凹凸性, 与王刚<sup>[36]</sup>、Cho<sup>[37]</sup>和Bewick<sup>[38]</sup>等得到的结论一致。

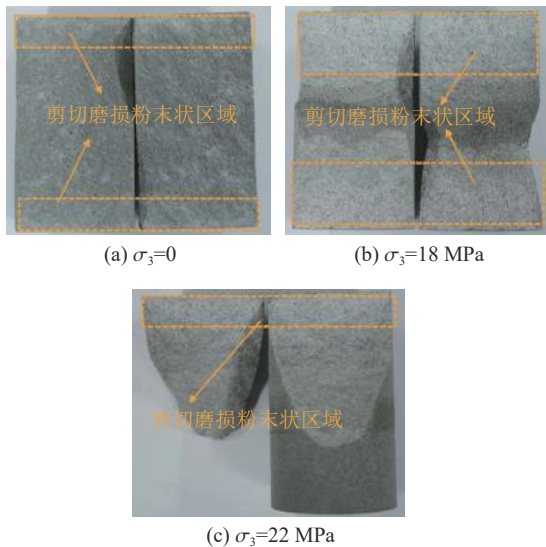


图12 不同围压下石英砂岩的典型剪切破坏形态

Fig. 12 Typical shear failure characteristics of quartz sandstone under different confining pressures

### 3 讨论

自然裂隙面大多是凹凸不平的, 裂隙面表面形态特征对围岩洞室及边坡稳定性、流体流动的曲折性和溶质运移的弥散特征等都有重要的影响。定量地描述裂隙表面形态, 进而确定合理的表面形态参数, 对研究裂隙流动特性, 建立形态特征参数与流动特性之间的定量关系具有重要的意义。

为研究不同围压作用下石英砂岩三轴剪切破坏面形态特征, 对石英砂岩破坏结构面进行了3维形貌扫描。使用非接触式3维激光扫描仪, 如图13所示, 对

石英砂岩破坏结构面进行手动扫描, 提取点云数据。扫描仪的测量精度和平均点距分别为 $0.001\sim 0.050$  mm和 $0.005\sim 0.100$  mm。基于双目立体视觉原理和蓝色条纹投影的光学测量方法, 扫描仪可以准确捕捉结构面上特征点的细节信息并计算3维点云数据。3维激光扫描仪操作步骤如下: ①扫描前, 用十字板校准扫描仪; ②手动扫描, 其结果实时显示在计算机接收终端上; ③从不同角度观察并手动缝合扫描结果; ④扫描完毕后, 将所有的点云数据导入逆向工程软件(geomagic studio)中, 选取相关研究区域, 进行降噪处理并封装成完整结构面, 进一步将点云数据导入MATLAB, 利用delaunay三角剖分算法对这些点云数据进行三角化, 在给定的点集中生成一个三角网格, 使所有三角形的最小内角最大化, 从而得到一个尽可能均匀的三角面片集合。



图13 非接触式3维激光扫描仪

Fig. 13 Non-contact 3D laser scanner

根据Tatone等<sup>[39]</sup>提出的方法将3维扫描获得的点云变换为一系列微三角单元体, 微单元体与三轴剪切方向的特征关系如图14所示。

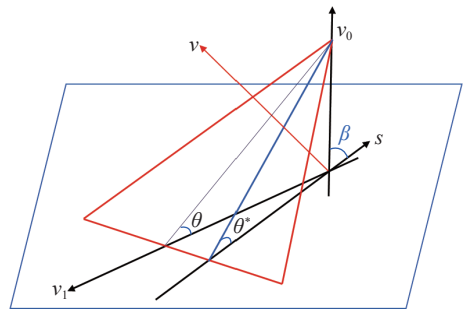


图14 微单元体与三轴剪切方向的特征关系

Fig. 14 Characteristic relationship between asperity and triaxial shear direction

根据单个三角单元体的特征分析, 可得到三角单元体的夹角值, 其表达式为:

$$\cos \beta = \frac{sv_1}{|s||v_1|} \quad (5)$$

$$\cos \theta = \frac{vv_0}{|v||v_0|} \quad (6)$$

式(5)~(6)中,  $s$ 为剪切方向,  $v$ 为单元体的外法线,  $v_1$ 为 $v$ 在剪切平面上的投影方向,  $v_0$ 为剪切平面的外法线,  $\beta$ 为剪切方向 $s$ 与剪切平面的夹角。

由于有效倾角 $\theta^*$ 与剪切方向密切相关, 其统计特征可以较好地解释节理粗糙度的方向相关性, 而 $\beta$ 与选定研究的剪切方向有关, 表达式如下:

$$\tan \theta^* = -\tan \theta \tan \beta \quad (7)$$

式中,  $\theta$ 为某一单元体的倾角。

根据破坏面点云特征, 可获取一系列三角单元体的几何信息特征。在给定剪切方向后, 背离剪切侧的微单元体( $\theta^* < 0$ )没有参与抵抗剪切破坏强度的特征。在Grasselli<sup>[40-41]</sup>方法中, 给定不同的门槛值 $\theta^*$ , 寻找所有三角形微单元体中有效倾角大于门槛值的单元, 即剪切结构面两端的潜在接触部分。

不同有效倾角门槛值对应潜在接触部分如图15所示。剪切方向如图15(a)所示; 当有效倾角门槛值 $\theta^*$ 为0°、5°、10°、15°、20°时, 三轴剪切结构面对应的潜在接触部分(黑色)分别如图15(b)~(f)所示。不同的门槛值 $\theta^*$ 对应不同的潜在接触部分, 门槛值 $\theta^*$ 越大, 剪切结构面的接触部分越少。

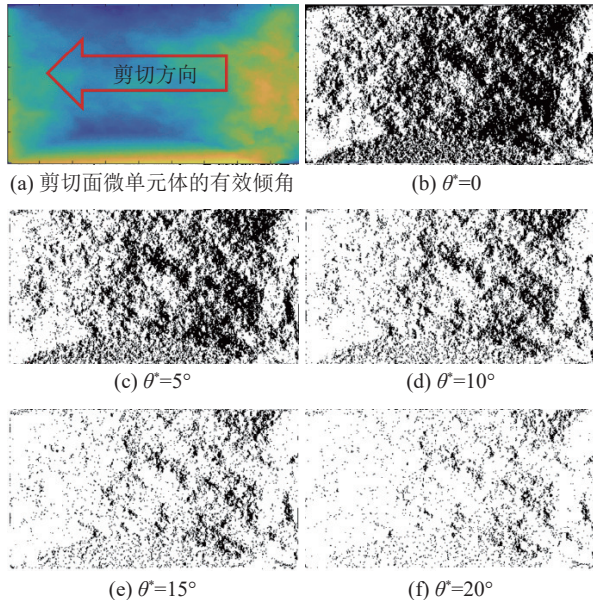


图 15 不同有效倾角门槛值对应潜在接触部分  
Fig. 15 Potential contact area corresponding to different effective inclination thresholds

根据Grasselli<sup>[40-41]</sup>的研究, 剪切结构面的潜在接触部分用潜在接触面积比描述, 不同有效倾角门槛值对应的接触面积比如图16所示。由图16可知, 潜在接触面积比 $A_\theta^*$ 为有效倾角门槛值 $\theta^*$ 的函数, Grasselli指出两者的关系可以表述为:

$$A_\theta^* = A_0 \left( \frac{\theta_{\max}^* - \theta^*}{\theta_{\max}^*} \right)^c \quad (8)$$

式中:  $A_0$ 为最大可能接触面积比;  $\theta_{\max}^*$ 为最大有效倾角;  $c$ 为粗糙度参数, 通过拟合,  $c$ 在理论上的取值范围为0到无穷大。当 $c=0$ 时, 砂岩剪切破坏裂隙面呈锯齿形, 表明裂隙面上所有的微凸体面具有相同的倾角; 当 $c$ 趋近于无穷大时, 砂岩剪切破坏裂隙面为一个完全光滑的平面<sup>[36]</sup>。

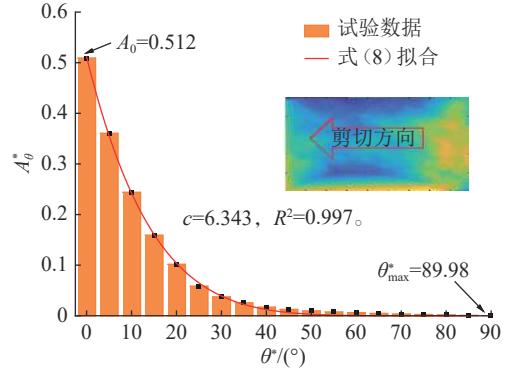


图 16 不同有效倾角门槛值对应的接触面积比  
Fig. 16 Contact area ratios corresponding to different effective inclination thresholds

通过非线性拟合及最小二乘法回归分析, 得到粗糙度参数 $c=6.343$ ,  $c$ 值控制着结构面的凹凸性特征, 可见三轴剪切破坏裂隙面的凹凸性特征明显。对不同围压下的石英砂岩进行三轴剪切破坏裂隙面扫描回归分析, 得到Grasselli准则拟合参数如表3所示。由表3可知, 虽然高、低围压作用下产生的剪切裂隙面破坏模式及裂纹发展特征明显, 但粗糙度参数 $c$ 主要表 3 不同围压下石英砂岩三轴剪切破坏裂隙面Grasselli准则拟合参数

Tab. 3 Fitting parameters of Grasselli criterion for failure structural surface of quartz sandstone under different confining pressures

围压/MPa	$A_0$	$\theta_{\max}^*/(^{\circ})$	$c$	$R^2$
0	0.471	89.99	7.105	0.998
2	0.512	89.98	6.343	0.997
4	0.468	89.99	8.206	0.999
6	0.435	89.94	7.606	0.998
8	0.489	89.96	9.310	0.998
10	0.449	89.86	9.384	0.999
12	0.460	89.90	6.723	0.999
14	0.453	89.90	8.441	0.995
16	0.472	89.96	7.104	0.996
18	0.474	89.75	7.935	0.993
20	0.492	89.21	7.968	0.997
22	0.483	89.32	8.231	0.999
24	0.469	89.66	8.453	0.995
26	0.517	89.74	8.179	0.997
28	0.498	89.53	8.514	0.993
30	0.489	89.96	7.979	0.994

分布在6.000~8.500之间。可见,高、低围压的大小变化对三轴剪切破坏裂隙面的凹凸性特征影响作用不明显,其主要原因是石英砂岩的结构均质和组分细粒石英占比较高,岩石脆性较弱,剪切摩擦损伤作用较小,与Zhang等<sup>[42]</sup>针对花岗岩开展的三轴剪切试验所形成的结构面破坏特征存在明显差异。

## 4 结 论

在围压为0~30 MPa内,选取16组不同围压对饱和完整石英砂岩试样进行三轴剪切试验,研究石英砂岩在不同应力水平作用下的剪切强度、变形特性及剪切破坏裂隙面形态特征,主要结论如下:

1)不同围压作用下,石英砂岩的三轴剪切应力-应变曲线表现出不同的特征,主要破坏模式有脆性破坏、塑形破坏和塑性流动状态。由此说明,3维应力状态下饱和完整石英砂岩的压剪破坏模式比直剪试验和三轴压缩试验下石英砂岩的破坏模式更加复杂。

2)完整石英砂岩在三轴剪切变形中的剪切峰值强度呈现出明显的非线性增长特征,可用幂函数准则 $\tau = 11.597\sigma^{0.448} + 19.218$ 描述其结果;采用Mohr-Coulomb准则进行多段线性拟合发现,随着围压的增大,黏聚力逐渐增大,由最初的20.62 MPa缓慢增大至49.93 MPa;相反,内摩擦角逐渐减小,由78.52°降低至35.67°。

3)随着围压的逐渐增大,石英砂岩的三轴剪切变形破坏由剪切贯通破坏转变为张拉剪断复合破坏,最后转变为双滑移剪切破坏。

4)Grasselli准则能够充分描述不同围压作用下石英砂岩三轴剪切破坏裂隙面的凹凸性特征。围压对石英砂岩三轴剪切破坏模式及裂纹发展特征的影响明显,但其对裂隙面凹凸性特征的影响不明显。

### 参考文献:

[1] Zhang Peisen,Zhao Chengye,Li Tenghui,et al.Experimental study on wave velocity variation and energy evolution of red sandstone during triaxial loading process[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2021,40(7):1369-1382.[张培森,赵成业,李腾辉,等.红砂岩三轴加载过程中波速变化及能量演化规律试验研究[J].*岩石力学与工程学报*,2021,40(7):1369-1382.]

[2] Zhao Jianjun,Xie Mingli,Li Tao,et al.Softening effect of phyllite with water saturation[J].*Journal of Engineering Geology*,2017,25(6):1449-1454.[赵建军,解明礼,李涛,等.饱水条件下千枚岩软化效应试验分析[J].*工程地质学报*,2017,25(6):1449-1454.]

[3] Li Pengfei,Zhao Xingguang,Guo Zheng,et al.Variation of

strength parameters of Beishan granite under triaxial compression[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2017,36(7):1599-1610.[李鹏飞,赵星光,郭政,等.北山花岗岩在三轴压缩条件下的强度参数演化[J].*岩石力学与工程学报*,2017,36(7):1599-1610.]

- [4] Huang Feng,Li Tianyong,Gao Xiaoye,et al.Study on the macro-micro failure mechanism of granite and its geometry effect under the different conditions of confining pressure by discrete element[J].*Journal of China Coal Society*,2019,44(3):924-933.[黄锋,李天勇,高啸也,等.不同围压下花岗岩破裂机制及形状效应的离散元研究[J].*煤炭学报*,2019,44(3):924-933.]
- [5] Wang Chuanle,Du Guangyin,Li Erbing,et al.Evolution of strength parameters and energy dissipation of Beishan deep granite under conventional triaxial compression[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2021,40(11):2238-2248.[王传乐,杜广印,李二兵,等.北山深部花岗岩常规三轴压缩条件下的强度参数演化及能量耗散[J].*岩石力学与工程学报*,2021,40(11):2238-2248.]
- [6] Deng Jian,Li Shaojun,Jiang Quan,et al.Probabilistic analysis of shear strength of intact rock in triaxial compression:A case study of Jinping II project[J].*Tunnelling and Underground Space Technology*,2021,111:103833.
- [7] Cheng Tan,Guo Baohua,Sun Jiehao,et al.A strength empirical formula of irregular rock joints based on peak shear test[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2022,41(1):93-105.[程坦,郭保华,孙杰豪,等.非规则岩石节理峰值剪切试验与强度经验公式研究[J].*岩石力学与工程学报*,2022,41(1):93-105.]
- [8] Cheng Tan,Guo Baohua,Sun Jiehao,et al.Establishment of constitutive relation of shear deformation for irregular joints in sandstone[J].*Rock and Soil Mechanics*,2022,43(1):51-64.[程坦,郭保华,孙杰豪,等.非规则砂岩节理剪切变形本构关系试验研究[J].*岩土力学*,2022,43(1):51-64.]
- [9] Song Leibo,Kang Qianqian,Du Shigui,et al.Anisotropy mechanism of shear strength based on wear and shear failure evolution of asperities of joint surface[J].*Rock and Soil Mechanics*,2021,42(9):2331-2343.[宋磊博,亢倩倩,杜时贵,等.基于表面微凸体磨损特征演化规律的节理剪切强度各向异性机制研究[J].*岩土力学*,2021,42(9):2331-2343.]
- [10] Zhou Hui,Cheng Guangtan,Zhu Yong,et al.Experimental study of shear deformation characteristics of marble dentate joints[J].*Rock and Soil Mechanics*,2019,40(3):852-860.[周辉,程广坦,朱勇,等.大理岩规则齿形结构面剪切特性试验

- 研究[J].*岩土力学*,2019,40(3):852–860.]
- [11] Wu Qiong,Xu Yanjun,Tang Huiming,et al.Peak shear strength prediction for discontinuities between two different rock types using a neural network approach[J].*Bulletin of Engineering Geology and the Environment*,2019,78(4): 2315–2329.
- [12] Jin Leilei,Wei Yufeng,Huang Xin,et al.Shear strength calculation model of rock joints based on three-dimensional morphology of joint surface[J].*Rock and Soil Mechanics*,2020,41(10):3355–3364.[金磊磊,魏玉峰,黄鑫,等.基于节理面三维形貌的岩石节理抗剪强度计算模型[J].*岩土力学*,2020,41(10):3355–3364.]
- [13] Zhang Xiaobo,Jiang Qinghui,Chen Na,et al.Laboratory investigation on shear behavior of rock joints and a new peak shear strength criterion[J].*Rock Mechanics and Rock Engineering*,2016,49(9):3495–3512.
- [14] Shen Hui,Liu Yaqun,Liu Bo,et al.Nonlinear theoretical model for describing shear mechanical behaviors of rock joints[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2021,40(12):2421–2433.[申辉,刘亚群,刘博,等.岩石节理剪切力学特性的非线性理论模型研究[J].*岩石力学与工程学报*,2021,40(12):2421–2433.]
- [15] Peng Shoujian,Xu Jiang,Zhang Chaolin,et al.Fractal characteristics of crack evolution in gas-bearing coal under shear loading[J].*Journal of China Coal Society*,2015,40(4):801–808.[彭守建,许江,张超林,等.含瓦斯煤岩剪切破坏过程中裂纹演化及其分形特征[J].*煤炭学报*,2015,40(4):801–808.]
- [16] Xu Jiang,Lu Lifeng,Yang Hongwei,et al.Study of evolution law of microfracturing progress of sandstone under shear loading[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2011,30(5):944–950.[许江,陆丽丰,杨红伟,等.剪切荷载作用下砂岩细观开裂扩展演化特征研究[J].*岩石力学与工程学报*,2011,30(5):944–950.]
- [17] Xu Jiang,Cheng Lichao,Tan Haoyue,et al.Effects of original cracks on macro-meso evolution law of coal shear failure[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2013,32(1):33–40.[许江,程立朝,谭皓月,等.原生裂纹对煤岩剪切破坏宏细观演化规律的影响研究[J].*岩石力学与工程学报*,2013,32(1):33–40.]
- [18] He Manchao,Xie Heping,Peng Suping,et al.Study on rock mechanics in deep mining engineering[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2005,24(16):2803–2813.[何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].*岩石力学与工程学报*,2005,24(16):2803–2813.]
- [19] Xie Heping.Research review of the state key research development program of China:Deep rock mechanics and mining theory[J].*Journal of China Coal Society*,2019,44(5): 1283–1305.[谢和平.深部岩体力学与开采理论研究进展[J].*煤炭学报*,2019,44(5):1283–1305.]
- [20] Yang Zejin.A study on roughness characterization of rock mass discontinuities and shear mechanical behavior under confining pressure[D].Taiyuan:Taiyuan University of Technology,2021.[杨泽进.岩石结构面粗糙度表征及其围压作用下剪切力学行为研究[D].太原:太原理工大学,2021.]
- [21] Huang Shibing,He Yingbo,Liu Guofeng,et al.Effect of water content on the mechanical properties and deformation characteristics of the clay-bearing red sandstone[J].*Bulletin of Engineering Geology and the Environment*,2021,80(2): 1767–1790.
- [22] Wang Yunfei,Wang Liping,Jiao Huazhe,et al.Mechanical characteristics of deformation and damage mechanism of sandstone under different confining pressure[J].*Coal Geology & Exploration*,2015,43(4):63–68.[王云飞,王立平,焦华喆,等.不同围压下砂岩的变形力学特性与损伤机制[J].*煤田地质与勘探*,2015,43(4):63–68.]
- [23] Ma Jin,Sherman S I,Guo Yanshuang.Identification of sub-instability stress state before earthquake—Taking the experiment of deformation and temperature field evolution of 5-turn fracture layer as an example[J].*Scientia Sinica (Terrae)*, 2012,42(5):633–645.[马瑾,Sherman S I,郭彦双.地震前亚失稳应力状态的识别——以5°拐折断层变形温度场演化的实验为例[J].*中国科学:地球科学*,2012,42(5):633–645.]
- [24] Ren Yaqiong,Liu Peixun,Ma Jin,et al.Experimental study on evolution of thermal field of an echelon fault during the meta-instability stage[J].*Chinese Journal of Geophysics*, 2013,56(7):2348–2357.[任雅琼,刘培润,马瑾,等.亚失稳阶段雁列断层热场演化的实验研究[J].*地球物理学报*,2013, 56(7):2348–2357.]
- [25] Zhang Qian,Li Shucai,Li Liping,et al.Discussion on relationship between post-peak curves and shear strength parameters of rock subjected to triaxial compression[J].*Chinese Journal of Underground Space and Engineering*,2015,11(3): 642–646.[张骞,李术才,李利平,等.岩石三轴压缩峰后曲线与抗剪强度参数关系探讨[J].*地下空间与工程学报*,2015, 11(3):642–646.]
- [26] Yu Huazhong,Ruan Huaining,Chu Weijiang.Mesoscopic simulation study of brittle–ductile–plastic transition character of marble[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and*

- Engineering,2013,32(1):55–64.[余华中,阮怀宁,褚卫江.大理岩脆–延–塑转换特性的细观模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(1):55–64.]
- [27] Xie Heping,Gao Mingzhong,Fu Chenghang,et al.Mechanical behavior of brittle–ductile transition in rocks at different depths[J].*Journal of China Coal Society*,2021,46(3):701–715.[谢和平,高明忠,付成行,等.深部不同深度岩石脆延转化力学行为研究[J].煤炭学报,2021,46(3):701–715.]
- [28] Yang Shengqi.Mechanical behavior and damage fracture mechanism of deep rocks[M].Singapore:Springer Nature Singapore,2022.
- [29] Meng Bo,Jing Hongwen,Yang Shengqi,et al.Experimental investigation on shear behavior of intact sandstones under constant normal stiffness conditions[J].*International Journal of Geomechanics*,2021,21(2):04020259.
- [30] Wang Bin,Zhu Jiebing,Wu Aiqing,et al.Experimental validation of nonlinear strength property of rock under high geostress[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2010,29(3):542–548.[汪斌,朱杰兵,邬爱清,等.高应力下岩石非线性强度特性的试验验证[J].岩石力学与工程学报,2010,29(3):542–548.]
- [31] Xie Shijie,Lin Hang,Chen Yifan,et al.A new nonlinear empirical strength criterion for rocks under conventional triaxial compression[J].*Journal of Central South University*,2021,28(5):1448–1458.
- [32] Li Kaihui,Han Dongya,Fan Xiang,et al.Shear rupture behaviors of intact and granulated Wombeyan marble with the flat-jointed model[J].*Archives of Civil and Mechanical Engineering*,2022,22(1):51.
- [33] Bobet A,Einstein H H.Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression[J].*International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*,1998,35(7):863–888.
- [34] Yang Shengqi,Jing Hongwen,Wang Shanyong.Experimental investigation on the strength,deformability,failure behavior and acoustic emission locations of red sandstone under triaxial compression[J].*Rock Mechanics and Rock Engineering*,2012,45(4):583–606.
- [35] Shang Delei,Chen Yuedu,Zhao Zhihong,et al.Mechanical behavior and acoustic emission characteristics of intact granite undergoing direct shear[J].*Engineering Fracture Mechanics*,2021,245:107581.
- [36] 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.[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.]
- [37] Cho N,Martin C D,Sego D C.Development of a shear zone in brittle rock subjected to direct shear[J].*International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*,2008,45(8):1335–1346.
- [38] Bewick R P,Kaiser P K,Bawden W F.Shear rupture under constant normal stiffness boundary conditions[J].*Tectonophysics*,2014,634:76–90.
- [39] Tatone B S A,Grasselli G.A method to evaluate the three-dimensional roughness of fracture surfaces in brittle geomaterials[J].*The Review of Scientific Instruments*,2009,80(12):125110.
- [40] Grasselli G.Shear strength of rock joints based on quantified surface description[D].Zurich:Swiss Federal Institute of Technology,2001.
- [41] Grasselli G.Manuel rocha medal recipient shear strength of rock joints based on quantified surface description[J].*Rock Mechanics and Rock Engineering*,2006,39(4):295–314.
- [42] Zhang Qiang,Lin Zhinan,Wang Jiaquan,et al.Flow characteristics of deep fractured rock mass under water-rock mass coupling[J].*IOP Conference Series:Earth and Environmental Science*,2021,861(7):072090.

## Mechanical Properties and Fracture Surface Morphology of Quartz Sandstone Under Triaxial Shear

LIN Zhinan<sup>1</sup>, FENG Shihong<sup>1,2</sup>, WANG Jiaquan<sup>1,2</sup>, ZHANG Qiang<sup>3\*</sup>, LONG Haifeng<sup>1,2</sup>

(1.College of Civil and Architectural Eng., Guangxi Univ. of Sci. and Technol., Liuzhou 545006, China;

2.Geotechnical Disaster and Ecological Control Eng. Research Center of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Liuzhou 545006, China;

3.China Inst. of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** To study the shear damage deformation characteristics of intact rock in rock slopes under three-dimensional compressive–shear stress conditions, 16 sets of triaxial shear tests were conducted on saturated intact fine-grained quartz sandstone with simple composition and homogeneous structure under different confining pressures by using the Rock Top–50HT full-stress multi-field coupling triaxial test system. In the tests, the corresponding triaxial shear stress–strain curves and the shear–failure fracture surfaces containing original rock debris were obtained, the non-

linear variations of the strength characteristics of quartz sandstone under triaxial shear stress were analyzed, and the triaxial shear failure mode and the roughness characteristics of the fracture-surface morphology of quartz sandstone were explored. Also, based on the Delaunay point–cloud discretization algorithm, the failure fracture surface of quartz sandstone was reconstructed, and the variation characteristics of its potential contact part with the effective inclination threshold of the surface were analyzed. The results show that with increasing normal stress, the triaxial shear failure mode of quartz sandstone changes gradually from brittle failure to plastic failure and finally to plastic flow failure. The triaxial shear strength of quartz sandstone shows obvious nonlinear variation with increasing confining pressure. The Mohr–Coulomb criterion is used to fit the triaxial shear strength of quartz sandstone via piecewise linear fitting, and it is found that with increasing confining pressure, the cohesion increases while the internal friction angle decreases. The three-dimensional roughness characteristics of the shear–failure fracture surface are evaluated using the traditional Grasselli model, and its nonlinear fitting parameters  $\theta_{\max}^*$  and  $c$  fully describe the roughness characteristics of the fracture surface under triaxial shear failure. The present results are very important for predicting the triaxial shear strength of rock under complex stress and for evaluating the stability of slopes in rock engineering and optimizing the design schemes for supporting them.

**Key words:** rock mechanics; triaxial shear test; failure mode; nonlinear shear strength; morphological characteristics of fracture surface

(编辑 周璇)

引用格式: Lin Zhinan, Feng Shihong, Wang Jiaquan, et al. Mechanical properties and fracture surface morphology of quartz sandstone under triaxial shear[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2024, 56(4): 161–172. [林志南, 冯世宏, 王家全, 等. 石英砂岩三轴剪切力学特性及裂隙面形态特征[J]. *工程科学与技术*, 2024, 56(4): 161–172.]