



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2307738

引用格式:姜泽飞. 真三向应力下节理岩体多尺度断裂特征与破坏机理[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(4): 1637-1647.

Jiang Zefei. Multi-scale fracture characteristics and failure mechanism of cracked rock under true triaxial stress[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(4): 1637-1647.

真三向应力下节理岩体多尺度断裂特征与破坏机理

姜泽飞

(中国南水北调集团新能源投资有限公司, 北京 100097)

摘要 阐明真实地应力环境下节理岩体破坏机理对深部地下工程安全建设具有重要意义。针对含单条预制节理砂岩开展真三轴破裂试验,归纳其破坏模式,识别基本裂纹多尺度断裂特征,分析节理与应力环境对岩体破坏机理的影响。结果表明:真三向应力下节理岩体破坏模式由应力与节理共同控制;基于裂纹多尺度断裂特征,可定性判别裂纹断裂机理;最小主应力 σ_3 增大可显著提升剪切裂纹比重,而中间主应力 σ_2 增大可促进张拉型裂纹比重上升;节理的存在对于张拉断裂具有一定的促进作用,但真三向应力环境是控制岩体破坏机理的决定性因素。

关键词 真三向应力; 节理岩体; 多尺度断裂特征; 破坏机理

中图分类号 TU923; **文献标志码** A

Multi-scale Fracture Characteristics and Failure Mechanism of Cracked Rock under True Triaxial Stress

JIANG Ze-fei

(China South-to-North Water Diversion Group Renewables Investment Co., Ltd., Beijing 100097, China)

[Abstract] Understanding the failure mechanism of cracked rock mass under the general stress state is essential for underground engineering construction safety. A series of true triaxial fracture tests on the sandstone with single pre-existing flaw were conducted. The failure modes of the cracked sandstone were analysed, and the multi-scale fracture characteristics and mechanisms of the basic types of crack were identified. Moreover, the influences of the stress state and the pre-existing flaw on the rock failure mechanism were summarized. The results indicate that the rock failure mode is controlled by the true triaxial stress and the pre-existing crack. Based on the multi-scale fracture characteristics, the fracture mechanism of the crack. The rise of minimum principal stress σ_3 can significantly reduce the percentage of the shear crack, while the rise of intermediate principal stress σ_2 conduces to the increase of the percentage of the tensile crack. The pre-existing flaw has a certain promoting effect on the initiation of the tensile crack, however, the true triaxial stress is the decisive factor controlling the rock failure mechanism.

[Keywords] true triaxial stress; cracked rock; multi-scale fracture characteristic; failure mechanism

近年来,深部地下空间已成为中外正在探索和开发的资源^[1]。深部岩石通常赋存在真三向高地应力环境中($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$)^[2](σ_1 为最大主应力, σ_2 为中间主应力, σ_3 为最小主应力),并在构造作用下,广泛发育节理裂隙^[3]。工程开挖引发应力加卸荷,极易诱发节理岩体破裂失稳,导致岩爆、塌方等工程灾害,造成重大人员伤亡和财产损失。因此,开展真三向应力下节理岩体破坏机理研究,对保障深部工程安全建设具有重要意义^[4-7]。

为了模拟深部应力环境,学者们研发真三轴装置^[2,8-12],并开展了大量岩石真三轴破裂试验。在岩石宏观破坏模式方面,Feng等^[13]研究了中主应力和小主应力对岩石宏观破坏模式的影响,发现小主

应力对破坏模式影响最大。何满潮等^[14-15]、Li等^[16-17]、Su等^[18-19]开展了一系列岩石单面真三轴加载试验,并研究了影响岩爆弹射破坏的因素。Lu等^[20]研究了真三轴常规加载路径和定Lode角加载路径下煤岩和砂岩的破坏模式。Couture等^[21]和Ingraham等^[22]开展高孔隙率砂岩真三轴压缩试验,发现应变局部化现象。在岩石微观破裂特征方面,Ma等^[23-24]研究了砂岩真三轴微裂缝发育特征。Gao等^[25]研究了低 σ_3 水平($\sigma_3 \leq 10$ MPa)下岩石微观断裂特征,发现断口主要以张拉断裂花样为主。Li等^[26]分析了高 σ_3 水平($\sigma_3 = 20$ MPa)下砂岩微观断裂特征,发现断口主要以剪切断裂花样为主。上述研究对岩石真三轴破坏模式的分析多局限在

收稿日期: 2023-10-05; 修订日期: 2025-01-17

作者简介: 姜泽飞 (1992—),男,汉族,山东济南人,硕士,工程师。研究方向: 岩石力学。E-mail: pkaw50@163.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

单一尺度上,宏观破坏模式与微观断裂特征的内在关联尚未建立。更重要的,现有研究大多以完整岩石为试验对象,节理岩体真三轴破裂特征研究仍处于初步探索阶段。

此外,Chang 等^[27]开展了含单预制节理砂岩真三轴宏观破坏模式研究,分析了宏观破坏形态。Gao 等^[28-29]针对含天然节理大理岩开展真三轴破裂试验,发现节理面与真三向应力间几何关系是控制节理岩体破坏模式的关键因素。现有少量研究证实了节理对岩体真三轴破裂存在重要影响,但仍未充分揭示节理岩体真三轴破坏机理。因此,亟需开展真三向应力下节理岩体破裂试验。

鉴于此,以含单预制节理砂岩为研究对象,开展真三轴破裂试验。通过分析宏观破坏模式,归纳7种基本裂纹类型;基于基本裂纹的多尺度断裂特征,识别了不同类型裂纹断裂机理;对节理岩体不同断裂机理裂纹数量统计,阐释了真三向应力环境和节理对岩体破坏机理的影响。相关研究成果对深部工程围岩稳定性和灾害防治具有一定的指导作用。

1 试验方法

1.1 试验工况

为研究节理岩体破坏特征与机理,采用砂岩制作含预制节理岩样。本研究采用的砂岩选自四川自贡某采石场,质地均匀,层理微弱,各向同性较好,单轴抗压强度约为88.48 MPa,弹性模量和泊松比分别为14.08 GPa和0.20。在细观尺度上,砂岩呈中细粒结构,粒径集中在0.25~0.5 mm区间内,

孔隙率约为6.60%,主要矿物成分包括:石英、长石、绿泥石等,如图1(a)和图1(b)所示。

为研究节理对岩体破坏机理影响,试验包括完整岩样与节理岩样,尺寸70 mm(长)×70 mm(宽)×140 mm(高)。节理岩样在 σ_2 加载面中心预置倾角为45°的贯穿节理,如图1(c)所示。为研究真三向应力对岩体破坏机理影响,试验设置6种应力工况: σ_2 固定为30 MPa, σ_3 设置为2、15、30 MPa; σ_3 固定为30 MPa, σ_2 设置为50、100、150 MPa,各工况设置如表1所示。

表1 各工况岩样与应力设置

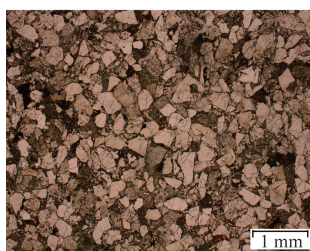
Table 1 Specimen type and stress state setting in each condition

类型	编号	σ_2 /MPa	σ_3 /MPa	类型	编号	σ_2 /MPa	σ_3 /MPa
完整岩样	I-1	30	2	节理岩样	A45-1	30	2
	I-2	30	15		A45-2	30	15
	I-3	30	30		A45-3	30	30
	I-4	50	30		A45-4	50	30
	I-5	100	30		A45-5	100	30
	I-6	150	30		A45-6	150 <td 30	

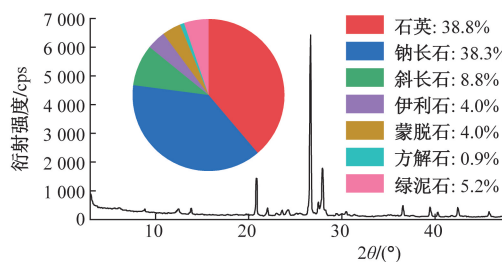
1.2 试验装置

试验依托广西大学水科所刚性加载型岩石真三轴仪开展,如图1(d)和图1(e)所示。真三轴仪整机刚度超过9 GN/m,确保可获取真三向应力下岩石全应力应变曲线。加载期间岩样主应变由3个线性可变差动变压器(LVDT)监测,如图1(f)所示。

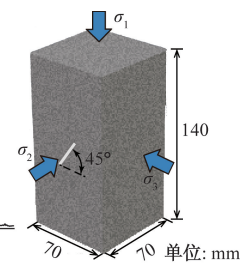
试验真三向应力加载路径可分为3个阶段:第一阶段为静水压力施加阶段,静水压力($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$)按照0.5 MPa/s加载速度加载至 σ_3 设定值;第



(a) 砂岩颗粒结构



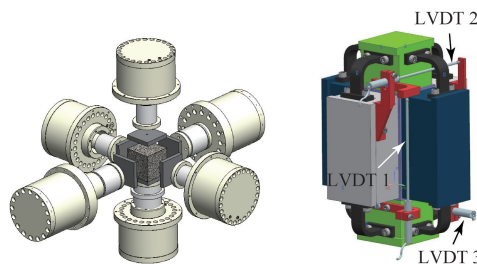
(b) 砂岩矿物成分



(c) 砂岩矿物成分

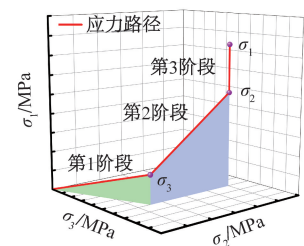


(d) 硬岩真三轴试验仪



(e) 真三轴加载结构

(f) 试验夹具与变形测量



(g) 真三向应力加载路径

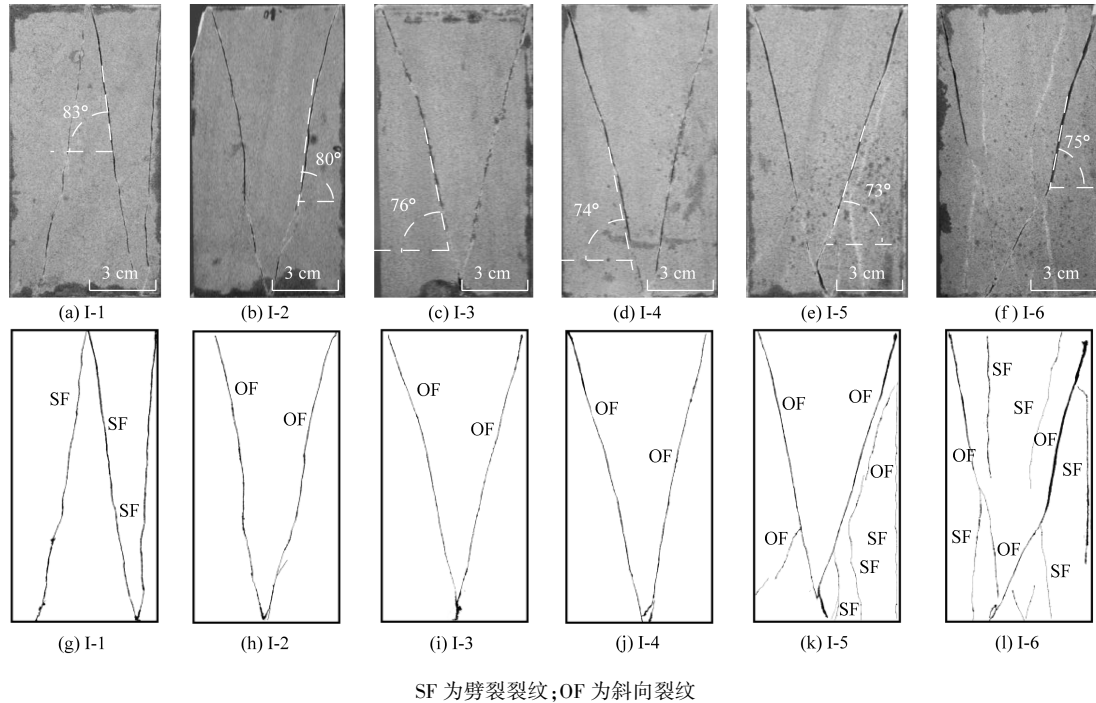
图1 砂岩与真三轴试验装置

Fig. 1 Sandstone and true triaxial apparatus

二阶段为中主应力加载阶段,保持 σ_3 恒定, $\sigma_1 = \sigma_2$ 按照0.5 MPa/s加载速度同时加载至 σ_2 设定值;第三阶段为大主应力加载阶段,保持 σ_3 和 σ_2 在设定值,按照 $6 \times 10^{-4} / \text{min}$ 加载速率施加 σ_1 ,直至岩样达到残余强度。加载路径如图1(g)所示。

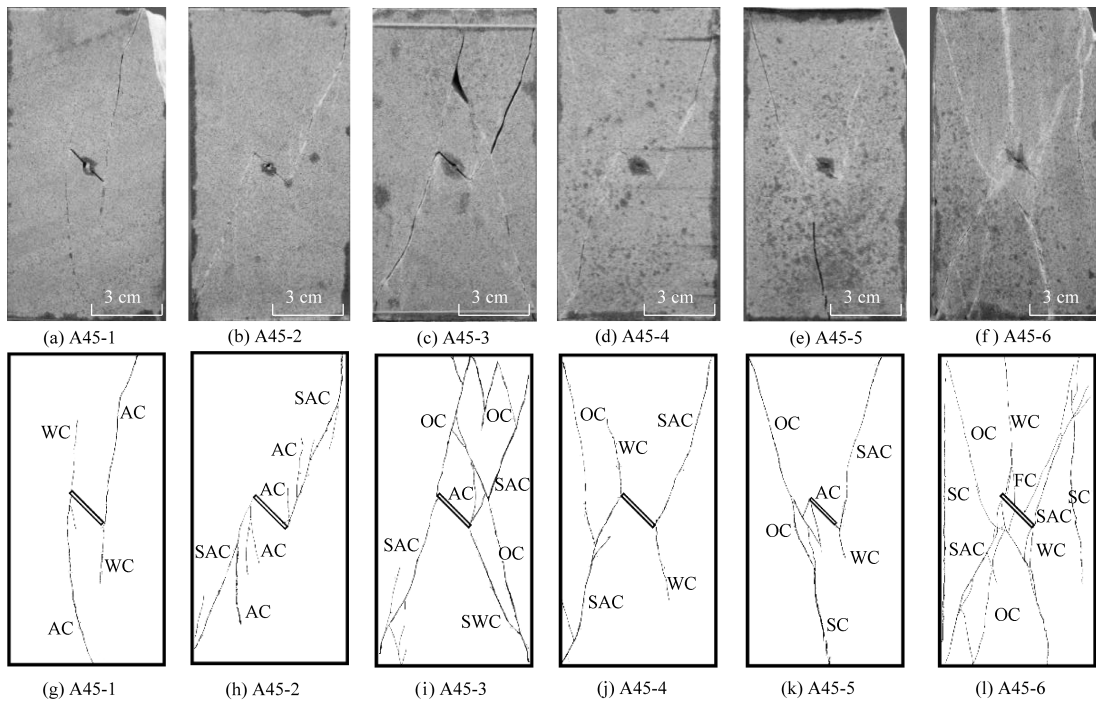
2 节理岩体宏观破坏模式

图2和图3分别为真三向应力下完整岩石与节理岩体宏观破坏模式。通过分析宏观破坏模式,根据形态特征将裂纹划分为7种基本类型,如表2所示。



SF 为劈裂裂纹;OF 为斜向裂纹
图2 真三向应力下完整岩石宏观破坏模式

Fig. 2 Macro failure modes of intact rock under true triaxial stress



WC 为翼裂纹;AC 为反翼裂纹;SWC 为次生翼裂纹;SF 为劈裂裂纹;OF 为斜向裂纹

图3 真三向应力下节理岩体宏观破坏模式

Fig. 3 Macro failure modes of cracked rock under true triaxial stress

由图2和图3可知,真三向应力下岩体宏观破坏模式主要由应力状态和预制节理控制。对于完整岩石,其破坏是由劈裂裂纹和斜向裂纹导致。当 σ_2 保持恒定, σ_3 数值较小时(I-1工况, $\sigma_3 = 2$ MPa),岩石破坏由3条劈裂裂纹导致[图2(a)和图2(g)];当 σ_3 升高至15 MPa和30 MPa,岩石破坏逐渐由两条贯通成V字形的斜向裂纹主导[图2(b)、图2(c)、图2(h)和图2(i)]。当 σ_3 保持恒定,随 σ_2 升高,尽管岩石破坏模式仍由斜向裂纹主导,但是劈裂裂纹重新出现且数量逐渐增多。例如,当 σ_2 升高至150 MPa后,劈裂裂纹数量达到5条,并与斜向裂纹搭接贯通,导致岩石破碎程度较高,如图2(f)和图2(l)所示。

对于节理岩体,裂纹组成更加复杂。保持 σ_2 恒定, $\sigma_3 = 2$ MPa工况下,翼裂纹扩展长度有限,岩体破坏是由反翼裂纹扩展导致[图3(a)和图3(g)];在 $\sigma_3 = 15$ MPa工况下,翼裂纹消失,反

翼裂纹扩展程度有限,岩体破坏由次生反翼裂纹导致[图3(b)和图3(h)];当 σ_3 升高至30 MPa后,反翼裂纹基本消失,岩体破坏由数条斜向裂纹、次生翼裂纹和次生反翼裂纹共同导致[图3(c)和图3(i)]。保持 σ_3 恒定,随 σ_2 升高,劈裂裂纹、翼裂纹和反翼裂纹数量增多;在 $\sigma_2 = 50$ MPa工况下,翼裂纹重新出现;在 $\sigma_2 = 100$ MPa工况下,劈裂裂纹和反翼裂纹与斜向裂纹贯通,诱发岩体破坏;当 σ_2 升高至150 MPa后,岩体破裂后多达5种裂纹存在,导致节理岩体破碎程度较高,如图3(f)和图3(l)所示。

与完整岩石相比,节理岩体破坏主要由萌生自预制节理的新裂纹扩展演化导致,裂纹种类更多,破坏模式更为复杂。推断节理的存在对岩体破坏模式具有明显影响,为此统计各工况岩体基本裂纹数量和总数,如表3所示,并对比同工况完整岩石和节理岩体裂纹总数,如图4所示。

表2 真三向应力下岩体破坏基本裂纹类型
Table 2 Basic types of crack under true triaxial stress

裂纹类型	裂纹形态	断裂特征	裂纹类型	裂纹形态	断裂特征
劈裂裂纹(SF)		近似与 σ_1 方向平行,倾角大于 80° 。	斜向裂纹(OF)		斜向扩展,倾角小于 80°
翼裂纹(WC)		萌生于节理尖端,沿 σ_1 方向扩展,与裂纹面夹角大于 90°	鱼鳍状裂纹(FC)		萌生于节理中部,沿 σ_1 方向扩展
反翼裂纹(AC)		萌生于节理尖端,沿 σ_1 方向扩展,与裂纹面夹角小于 90°	次生翼裂纹(SWC)		萌生于节理尖端,斜向扩展,方向近似与预制节理共面
次生反翼裂纹(SAW)		萌生于节理尖端,斜向扩展,方向与预制节理呈较大夹角			

表3 各工况岩体破坏模式裂纹数量统计
Table 3 Statistic of crack quantity of rock in each condition

工况	裂纹数量							N	N _t	N _s	P _t /%
	WC	FC	SF	AW	SW	SAW	OF				
I-1	—	—	3	—	—	—	—	3	3	—	100
I-2	—	—	1	—	—	—	2	3	1	2	33
I-3	—	—	1	—	—	—	2	3	1	2	33
I-4	—	—	—	—	—	—	2	2	—	2	0
I-5	—	—	3	—	—	—	4	7	3	4	43
I-6	—	—	5	—	—	—	2	7	5	2	71
A45-1	2	—	—	2	—	—	—	4	4	—	100
A45-2	—	—	—	2	—	2	—	4	2	2	50
A45-3	—	—	—	1	1	2	2	6	1	5	17
A45-4	2	—	—	—	—	2	2	6	2	4	33
A45-5	1	—	1	1	—	1	1	5	3	2	60
A45-6	2	1	2	—	—	2	1	8	5	3	63

注:N为裂纹数量;N_t为张拉裂纹数量;N_s为剪切裂纹数量;P_t为张拉裂纹占比。

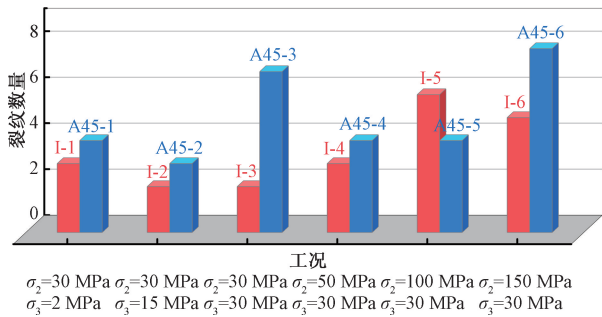


图4 完整岩石与节理岩体破坏模式裂纹数量对比

Fig. 4 Comparison of crack quantity between intact rock and cracked rock

如图4所示,除 $\sigma_2 = 100\text{ MPa}$ 工况,其余工况下节理岩体裂纹数量均高于完整岩石。结合裂纹多是萌生自预制节理这一现象,说明节理的存在可以显著促进裂纹萌生扩展,促使岩体发生破坏。这与真三向高应力下预制节理尖端存在应力集中有关,一旦应力集中超过岩石断裂韧度,裂纹即会萌生,进而对岩体形成持续弱化,形成更多裂纹。

3 节理岩体破坏机理

3.1 多尺度断裂特征

断裂特征是岩体破坏过程的直观记录,采用微距摄像、超景深显微镜和扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)识别7种基本裂纹微观断裂特征,分析岩体断裂机理。以劈裂裂纹和斜向裂纹为例,详述分析过程。

图5为劈裂裂纹宏观断裂特征。裂纹路径呈现较强的颗粒感,断裂面粗糙且起伏程度较大,可观察到明显的表面凸起和凹陷。断裂面上存在零星的摩擦痕迹。总体来说,劈裂裂纹断裂面较为干净,只在剪切摩擦区域附着有岩石粉末和碎屑。

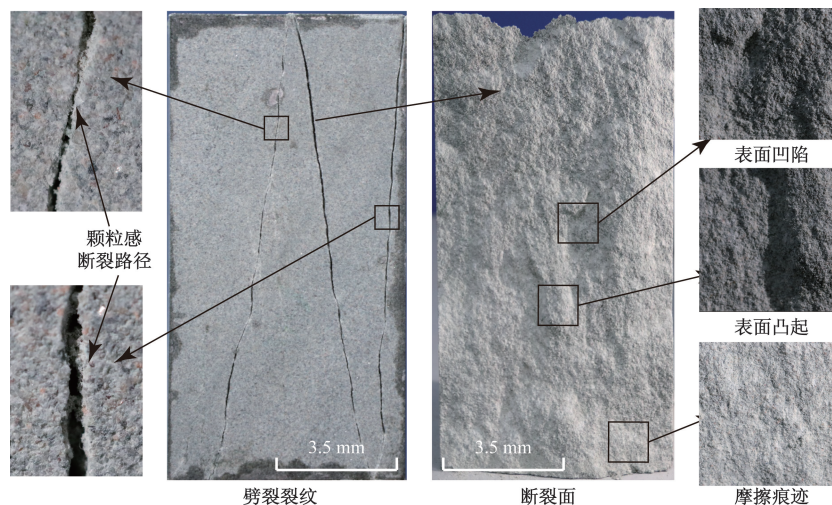


图5 劈裂裂纹宏观断裂特征

Fig. 5 Macroscopic pattern and characteristic of splitting fracture path

图6为劈裂裂纹细观断裂特征。在细观尺度上,裂纹沿矿物颗粒边缘扩展,因此大部分呈锯齿状,如图6(a)所示。这是由于颗粒间胶结物抗拉强度远低于矿物颗粒,在张拉作用下会率先破裂,因此裂纹主要沿颗粒边缘扩展,如图6(b)所示。

只有很少区域裂纹路径呈平直特征[图6(c)],裂纹横穿矿物颗粒扩展[图6(d)]。这是由于在剪切作用下,裂纹沿剪切力方向扩展,并将路径上矿物颗粒剪碎,因此裂纹较为平直。

图7为劈裂裂纹微观断裂特征。在矿物颗粒尺度上,断裂面呈现明显粗糙特征[图7(a)],颗粒轮廓清晰,保持完整[图7(b)];在晶体尺度上,微裂纹沿晶粒边缘扩展,呈沿晶断裂[图7(c)和图7(d)],这些特征为典型的张拉断裂特征。与此同时,局部区域也存在剪切作用产生的破碎晶粒[图7(c)]。

图8为斜向裂纹宏观断裂特征。斜向裂纹断裂路径平直,断裂面平坦,不存在明显表面起伏,且广泛分布摩擦痕迹,并附着有大量岩石粉末和碎屑。

图9为斜向裂纹细观断裂特征。在细观尺度上,斜向裂纹扩展路径仍呈现平直特征[图9(a)],这是由于扩展路径的起伏和颗粒已被剪切作用磨蚀。这也可以通过广泛可见横穿矿物颗粒的裂纹路径印证[图9(b)]。

图10为斜向裂纹微观断裂特征。在矿物颗粒尺度,断裂面大部分区域平坦,颗粒磨蚀破坏,轮廓不可见[图10(a)和图10(b)],微裂纹横穿颗粒扩展[图10(c)];在晶体尺度上,可观察到穿晶断裂和破碎晶粒。以上特征均为典型的剪切断裂特征。

3.2 破坏机理判别

综合裂纹多尺度断裂特征,劈裂裂纹的断裂机理可判定为张拉断裂主导的拉剪复合型断裂,斜向

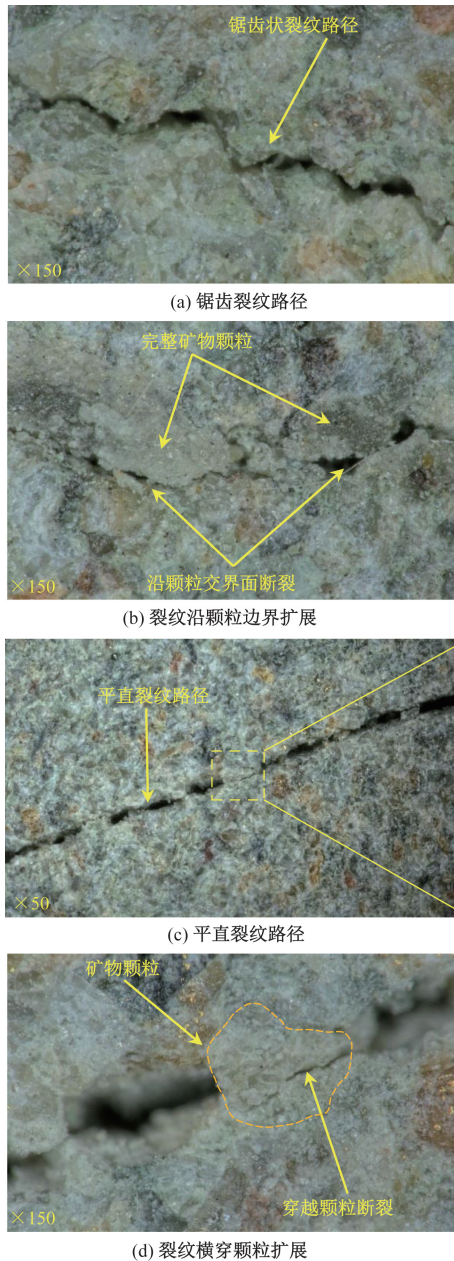


图6 劈裂裂纹扩展路径微观断裂特征

Fig.6 Mesoscopic characteristics of splitting fracture path

裂纹的断裂机理可判定为剪切断裂。基于多尺度断裂特征,识别7种基本裂纹断裂机理,并将其分为四类,如表4所示。类型I为张拉断裂,包括翼裂纹和鱼鳍状裂纹;类型II为张拉断裂主导的拉剪复合型断裂,包括劈裂裂纹和反翼裂纹;类型III为剪切断裂主导的拉剪复合性断裂,包括次生翼裂纹和次生反翼裂纹,类型IV为剪切断裂,包括斜向裂纹。

为了便于分析,将表4中类型I和类型II归类于张拉型裂纹,数量记为 N_1 ,而 N_1 占 N 的百分比记为 P_1 ;将类型III和类型IV归类于剪切型裂纹,数量记为 N_s 。归类后的裂纹数量统计如表3所示。基于统计结果,分析真三向应力和预制节理对岩体破

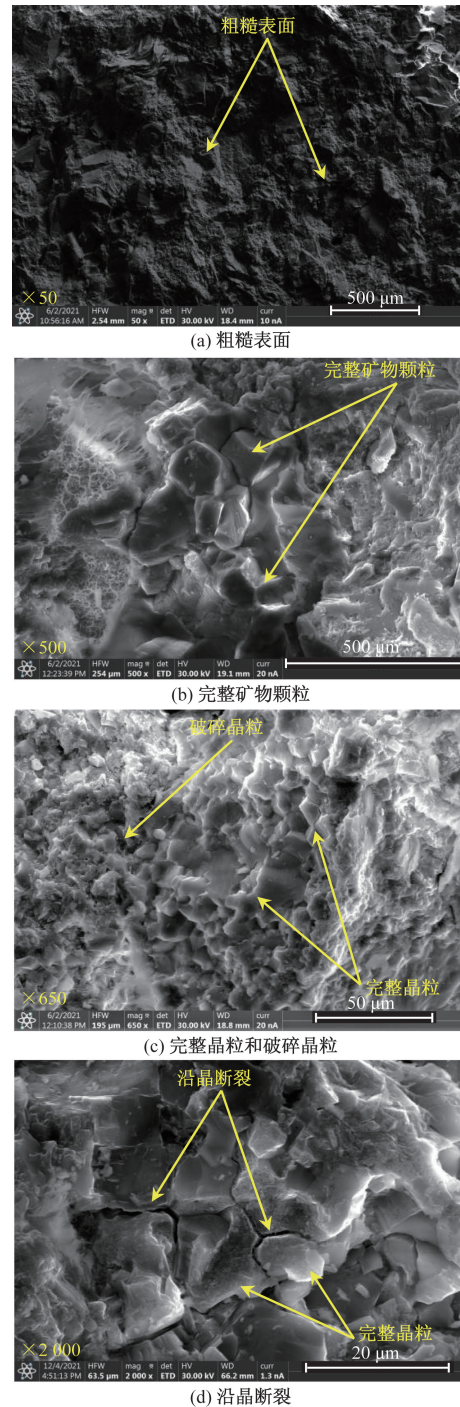


图7 劈裂裂纹断裂面微观断裂特征

Fig.7 Microscopic characteristics of splitting fracture surface
坏机理的影响。

3.3 应力与节理对岩体破坏机理影响

图11为随 σ_3 升高不同类型裂纹数量与张拉型裂纹比重变化趋势。保持 σ_2 恒定,当 σ_3 数值较小时,岩体破坏由张拉断裂主导;随 σ_3 升高,张拉型裂纹比重减小,剪切型裂纹数量持续增多,岩体破坏逐渐由剪切断裂主导。当 σ_3 数值较小时,岩体在 σ_3 方向上受到的约束作用较弱,侧向膨胀可以充分发

表 4 基本裂纹断裂机理与分类

Table 4 Fracture mechanisms and classification of basic type of crack

类型	断裂机理	断裂类型	裂纹类型
类型 I	张拉断裂	翼裂纹	张拉型裂纹
		鱼鳍状裂纹	
类型 II	张拉断裂主导的拉剪复合断裂	反翼裂纹	张拉型裂纹
		劈裂裂纹	
类型 III	剪切断裂主导的拉剪复合断裂	次生翼裂纹	剪切型裂纹
		次生反翼裂纹	
类型 IV	剪切断裂	斜向裂纹	

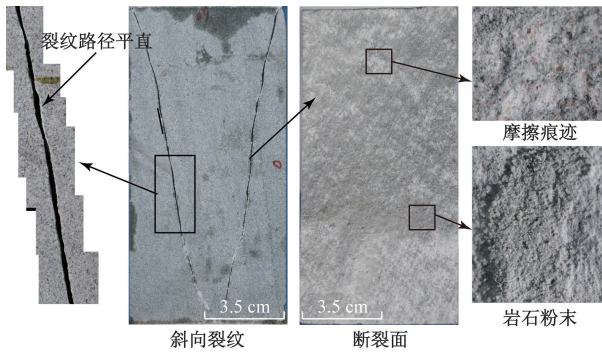


图 8 斜向裂纹宏观断裂特征

Fig. 8 Macroscopic pattern and characteristic of oblique fracture path

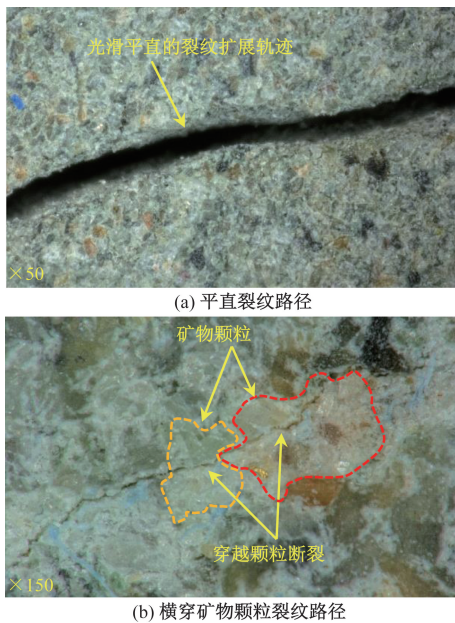
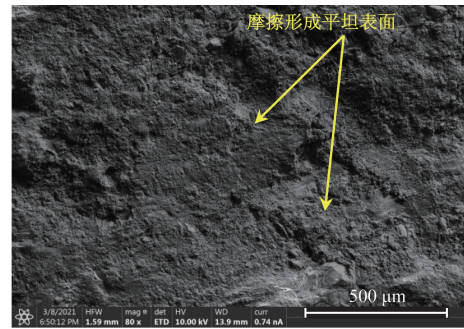


图 9 斜向裂纹扩展路径细观断裂特征

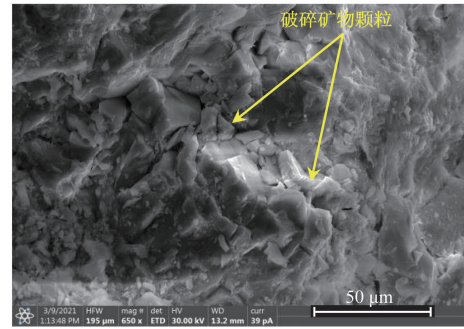
Fig. 9 Mesoscopic characteristics of oblique fracture path

展,促进张拉断裂萌生;随 σ_3 升高,侧向约束作用增强,张拉断裂的萌生受到显著抑制。因此,岩体破坏逐渐转变为压剪破坏,剪切型裂纹数量上升。

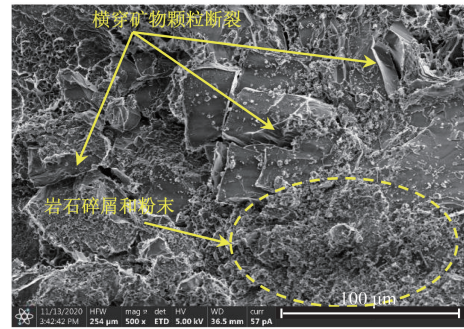
图 12 为随 σ_2 升高不同类型裂纹数量与张拉型裂纹比重变化趋势。当 σ_3 保持恒定,随 σ_2 升高,张拉型裂纹数量和比重均呈上升趋势。 σ_2 升高会导



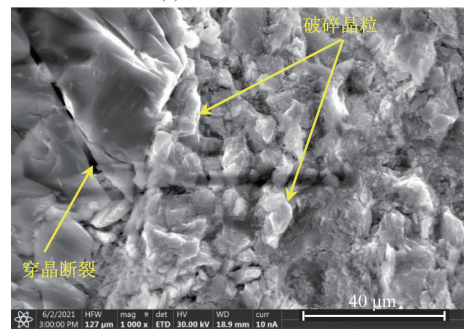
(a) 平坦表面



(b) 破碎矿物颗粒



(c) 岩石碎屑与粉末



(d) 破碎晶粒

图 10 斜向裂纹断面微观断裂特征

Fig. 10 Microscopic characteristics of oblique fracture surface

致中主应力加载阶段变长。这期间岩石处于三轴伸长应力状态($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$),受 σ_1 和 σ_2 方向双重挤压作用, σ_3 方向的膨胀变形显著增强,极大促进了张拉断裂的萌生扩展,因此,张拉型裂纹数量和比重均呈上升趋势。

图 13 为相同应力工况完整岩石和节理岩体张拉型断裂比重对比。除 I-3(A45-3)工况和 I-6(A45-6)工况外,在其余应力状态下节理岩体张拉型裂纹比

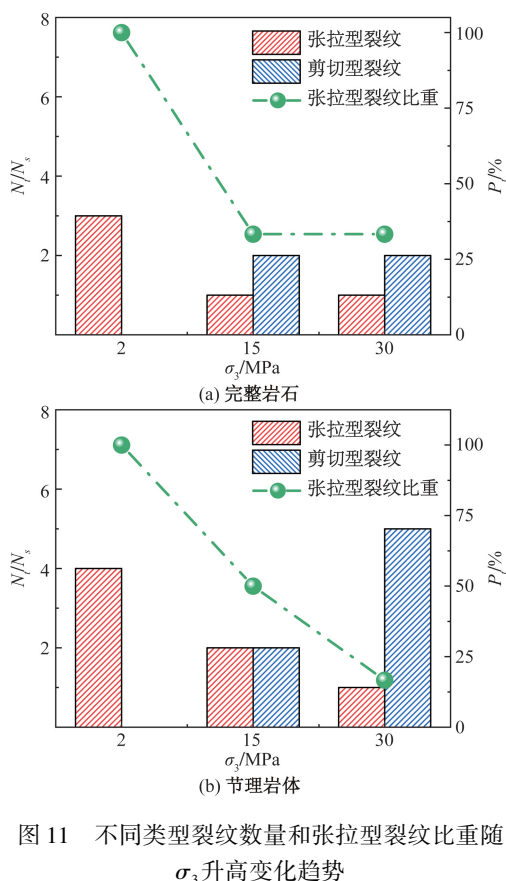


图 11 不同类型裂纹数量和张拉型裂纹比重随 σ_3 升高变化趋势

Fig. 11 Variation trends of numbers of different fracture types and proportions of tensile-dominated fractures with σ_3 increasing

重总是不低于完整岩石,说明预制节理的存在对于张拉断裂萌生具有一定的促进作用。这与节理尖端存在拉应力集中,可有效促进张拉断裂的萌生有关。

与真三向应力相比,预制节理对岩体破坏机理的影响作用稍弱,规律性不明显。推测真三向应力会促使节理闭合,增强节理面间摩擦力,抑制裂隙尖端的张拉应力集中。因此,真三向应力环境是控制岩体破坏机理的决定性因素,并能有效弱化节理对岩体破坏机理的影响。

4 岩体破坏机理定量分析

在裂纹多尺度断裂特征识别过程,通过肉眼观察发现,张拉型断裂面粗糙度和起伏程度都较剪切型更大,表面凸起和凹陷更明显,推断裂纹断裂机理与表面三维形貌之间存在直接关联。为了验证这一推断,基于激光扫描技术,以翼裂纹、劈裂裂纹、次生翼裂纹和斜向裂纹为例,重构断裂面三维形貌。

图 14 为不同机理断裂面三维形貌。从重构结果可以看出,随断裂机理由张拉型断裂(翼裂纹)向剪切型断裂(斜向裂纹)过渡,断裂面三维形貌起伏

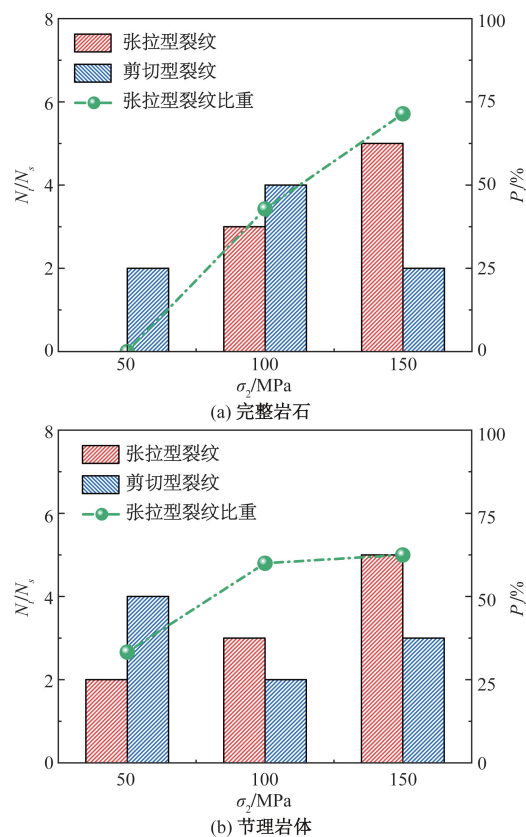


图 12 不同断裂类型裂纹数量和张拉型裂纹比重随 σ_2 升高变化趋势

Fig. 12 Variation trends of numbers of different fracture types and proportion of tensile-dominated fractures with σ_2 increasing

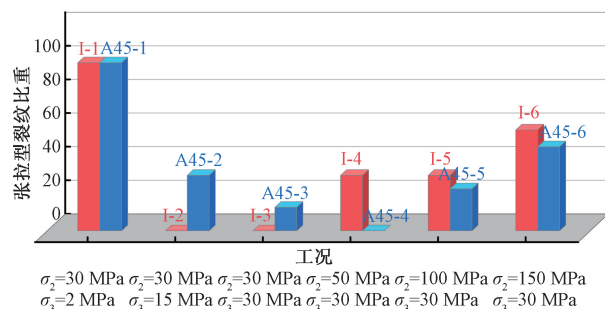


图 13 相同应力工况下完整岩石和节理岩体张拉型断裂比重对比

Fig. 13 Comparison of percentage of tensile crack between intact rock and cracked rock under same stress state

程度持续降低。点云数据表明,翼裂纹表面高差约为 10 mm,而斜向裂纹表面高差仅约 2 mm,这也验证了裂纹断裂机理与表面起伏程度存在直接关联,就本次试验采用的砂岩来说,张拉型断裂面起伏程度更高,而剪切型断裂面则更平坦。

为了更客观、准确地描述断裂面起伏程度差异,采用立方覆盖法^[30]计算断裂面分形维度,定量表征三维形貌起伏程度,如图 15 所示。其中, a 为网格划分尺度, N_a 为用边长为 a 的立方体覆盖断裂

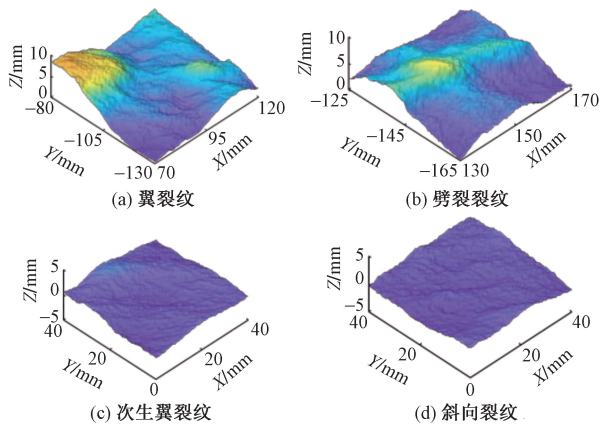


图 14 不同机理断面三维形貌重构

Fig. 14 3D surface morphology reconstructions of fractures with different mechanisms

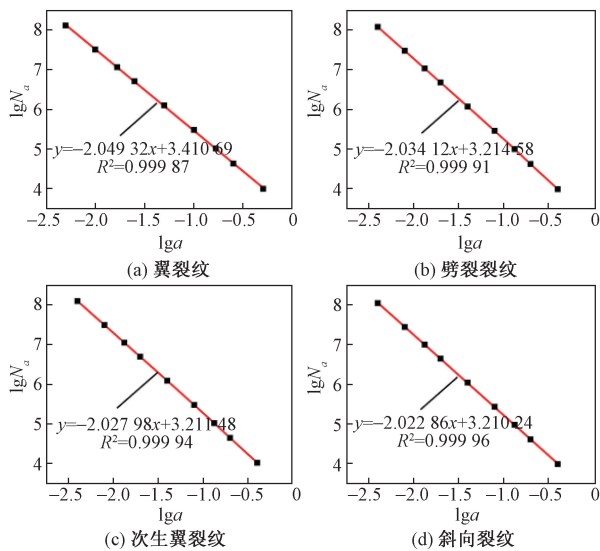


图 15 双对数坐标系下断裂面盒子数与网格尺度关系
Fig. 15 Relationship between cube number and grid size under bio-logarithmic coordinate system

面所需立方体个数。由计算结果可知,随断裂机理由张拉型断裂向剪切型断裂过渡,断裂面分形维度呈单调降低趋势,如图 16 所示。由此,产生一种想法,是否可以将断裂面分形维度作为量化指标,建立岩石破坏机理定量分析方法,相关工作将会在后续研究中重点开展。

5 结论

为研究真实应力环境下岩体破坏机理,对完整岩石和节理岩体开展真三轴破裂试验;通过识别多尺度断裂特征,分析岩体破坏基本裂纹断裂机理;基于基本裂纹数量统计,阐释真三向应力环境和节理对岩体破坏机理的影响,并探讨断裂面分形维度与断裂机理间定量关系。得出如下主要结论。

(1)真三向应力下岩体破坏包含 7 种基本类型

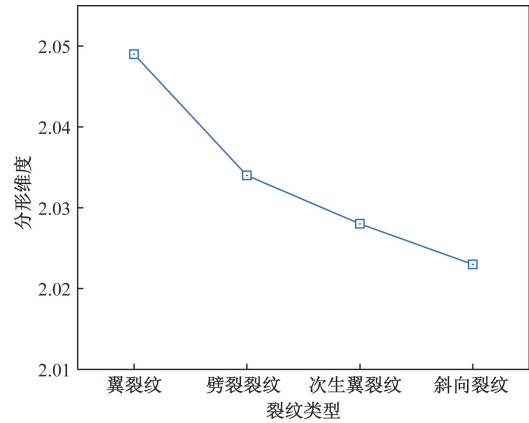


图 16 不同裂纹断面分形维度

Fig. 16 Fractal dimensions of different fracture surfaces

裂纹,分别为劈裂裂纹、斜向裂纹、翼裂纹、鱼鳍状裂纹、反翼裂纹、次生翼裂纹和次生反翼裂纹。

(2)岩体破坏模式由真三向应力与节理共同控制。通过识别多尺度断裂特征,分析基本裂纹断裂机理,并将其分为两大类:张拉型裂纹和剪切型裂纹。基于不同类型裂纹数量统计,分析真三向应力与预制节理对岩体破坏机理影响。

(3)随 σ_3 增大,张拉型裂纹数量和比重显著降低,岩体趋向于发生剪切破坏;而 σ_2 增大可以有效促进岩体在 σ_3 方向发生张拉断裂,导致张拉型裂纹数量和比重上升。

(4)节理的存在对于张拉断裂萌生具有一定的促进作用,但与真三向应力相比,节理对岩体破坏机理的影响作用稍弱。真三向应力环境是控制岩体破坏机理的决定性因素,并能有效弱化节理对岩体破坏机理的影响。

(5)裂纹断裂机理与表面起伏程度存在直接关联。随断裂机理由张拉型断裂向剪切型断裂过渡,断裂面分形维度呈单调降低趋势,断裂面起伏程度逐渐趋于平坦。将分形维度作为量化指标建立岩石破坏机理定量分析方法具有较好的可行性。

参 考 文 献

[1] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161-2178.
Xie Heping, Gao Feng, Ju Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161-2178.

[2] 张希巍, 冯夏庭, 孔瑞, 等. 硬岩应力-应变曲线真三轴研制关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(11): 2629-2640.
Zhang Xiwei, Feng Xiating, Kong Rui, et al. Key technology in development of true triaxial apparatus to determine stress-strain curves for hard rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(11): 2629-2640.

- [3] 苏方声, 潘鹏志, 高要辉, 等. 含天然硬性结构面大理岩破裂过程与机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 611-620.
Su Fangsheng, Pan Pengzhi, Gao Yaohui, et al. Experimental study on failure process and mechanism of marble containing natural hard structural plane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 611-620.
- [4] 苏国韶, 胡李华, 冯夏庭, 等. 低频周期扰动荷载与静载联合作用下岩爆过程的真三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1309-1322.
Su Guoshao, Hu Lihua, Feng Xiating, et al. True triaxial experimental study of rockburst process under low frequency cyclic disturbance load combined with static load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1309-1322.
- [5] 尹光志, 李铭辉, 许江, 等. 多功能真三轴流固耦合试验系统的研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(12): 2436-2445.
Yin Guangzhi, Li Minghui, Xu Jiang, et al. A new multi-functional true triaxial fluid-solid coupling experiment system and its applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(12): 2436-2445.
- [6] Li X B, Du K, Li D Y. True triaxial strength and failure modes of cubic rock specimens with unloading the minor principal stress[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2015, 48: 2185-2196.
- [7] He M C, Jia X N, Coli M, et al. Experimental study of rockbursts in underground quarrying of Carrara marble[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 52: 1-8.
- [8] 罗爱忠, 邵生俊, 王桃桃. XAGT-1 型真三轴压力室结构完善和饱和砂土真三轴试验[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(19): 283-288.
Luo Aizhong, Shao Shengjun, Wang Taotao. The complete of XAGT-1 type true tri-axial pressure chamber structure and the results of saturated sand[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(19): 283-288.
- [9] 潘元贵, 杜春阳, 谢小国, 等. 花岗岩真三轴加载破坏前兆信息[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(23): 9739-9746.
Pan Yuanguai, Du Chunyang, Xie Xiaoguo, et al. Precursor information of red sandstone failure under true triaxial loading[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(23): 9739-9746.
- [10] 侯冰, 陈勉, 刁策, 等. 砂泥交互储层定向井压裂裂缝穿层扩展真三轴实验研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(26): 54-59.
Hou Bing, Chen Mian, Diao Ce, et al. True triaxial experimental study of hydraulic fracture penetrating sand and mud interbedding in deviated wellbore[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(26): 54-59.
- [11] 高美奔, 李天斌, 陈国庆, 等. 工程温压内花岗岩破裂特征与机理分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(15): 13-18.
Gao Meiben, Li Tianbin, Chen Guoqing, et al. The analysis on fracture characteristics and mechanism of granite under engineering temperature and pressure[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(15): 13-18.
- [12] 杨兆中, 余秋爽, 李小刚, 等. 页岩形变及破坏特征研究进展及展望[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(26): 11015-11022.
Yang Zhaozhong, Yu Qiushuang, Li Xiaogang, et al. Research progress and prospects on deformation and failure characteristics of shale[J]. Science, Technology and Engineering, 2021, 21(26): 11015-11022.
- [13] Feng X T, Kong R, Zhang X, et al. Experimental study of failure differences in hard rock under true triaxial compression[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, 52: 2109-2122.
- [14] 何满潮, 赵菲, 杜帅, 等. 不同卸载速率下岩爆破坏特征试验分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2737-2747, 2793.
He Manchao, Zhao Fei, Du Shuai, et al. Rockburst characteristics based on experimental tests under different unloading rates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 2737-2747, 2793.
- [15] 何满潮, 李杰宇, 任富强, 等. 不同层理倾角砂岩单向双面卸荷岩爆弹射速度实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(3): 433-447.
He Manchao, Li Jieyu, Ren Fuqiang, et al. Experimental investigation on rockburst ejection velocity of unidirectional double-face unloading of sandstone with different bedding angles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(3): 433-447.
- [16] Li X B, Wang S F, Wang S Y. Experimental investigation of the influence of confining stress on hard rock fragmentation using a conical pick[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, 51(1): 255-277.
- [17] Li X B, Feng F, Li D Y, et al. Failure characteristics of granite influenced by sample height-to-width ratios and intermediate principal stress under true-triaxial unloading conditions[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 51(5): 1321-1345.
- [18] Su G S, Jiang J Q, Zhai S B, et al. Influence of tunnel axis stress on strainburst: an experimental study[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, 50(6): 1551-1567.
- [19] Su G S, Zhai S B, Jiang J Q, et al. Influence of radial stress gradient on strainbursts: an experimental study[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, 50(10): 2659-2676.
- [20] Lu J, Yin G Z, Zhang D M, et al. True triaxial strength and failure characteristics of cubic coal and sandstone under different loading paths[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 135: 1-15.
- [21] Couture C, Bésuelle P. A true triaxial experimental study on porous Vosges sandstone: from strain localization precursors to failure using full-field measurements[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022, 153: 105031.
- [22] Ingraham M, Issen K, Holcomb D. Response of Castlegate sandstone to true triaxial states of stress[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2013, 118: 536-552.
- [23] Ma X D, Haimson B C. Failure characteristics of two porous sandstones subjected to true triaxial stresses[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2016, 121(9): 6477-6498.
- [24] Ma X D, Rudnicki J W., Haimson B C. Failure characteristics of two porous sandstones subjected to true triaxial stresses: applied through a novel loading path[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2017, 122(4): 2525-2540.
- [25] Gao Y H, Feng X T, Zhang X W, et al. Characteristic stress lev-

- els and brittle fracturing of hard rocks subjected to true triaxial compression with low minimum principal stress [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018, 51: 3681-3697.
- [26] Li B X, Zhang W M, Xue Y G, et al. An image segmentation-based method for quantifying the rock failure mechanism under true triaxial compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 158: 105195.
- [27] Chang X, Zhang X, Dang F N, et al. Failure behavior of sandstone specimens containing a single flaw under true triaxial compression[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55 (4): 2111-2127.
- [28] Gao Ya H, Feng X T. Study on damage evolution of intact and jointed marble subjected to cyclic true triaxial loading[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, 215: 224-234.
- [29] Gao Y H, Feng X T, Wang Z F, et al. Strength and failure characteristics of jointed marble under true triaxial compression[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79 (2): 891-905.
- [30] Zhou H W, Xie H. Direct estimation of the fractal dimensions of a fracture surface of rock[J]. *Surface Review & Letters*, 2008, 10 (5): 751-762.