

不同卸载方向下高应力岩石真三轴卸荷力学特性研究

向前, 王科, 翁磊, 尤伟军, 储昭飞, 李泽宇

Experimental study of mechanical properties of highly-stressed rocks under true triaxial unloading conditions with different unloading directions

XIANG Qian, WANG Ke, WENG Lei, YOU Weijun, CHU Zhaofei, and LI Zeyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202304042>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同应力路径下饱和重塑黄土的力学特性

Mechanical properties of saturated remolded loess under different stress paths

赵丹旗, 付昱凯, 侯晓坤, 李同录, 李萍, 李燕, 张林 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 74-80

高应力区岩石统计损伤本构模型研究

A study of the statistical damage constitutive model of rock in high stress areas

贾逸, 魏良帅, 黄安邦, 和铭, 黄细超, 蓝康文 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 118-118

考虑土拱效应及中主应力影响的桩间挡板土压力计算方法

A calculation method of earth pressure on sheeting between two piles considering soil arching effect and intermediate principal stress

尤静霖, 王士杰, 王昊岚 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 90-95

排弃物料力学性质大型三轴剪切试验研究

A study of large-scale triaxial shear test of the mechanical properties of abandoned materials

刘小平, 刘天林, 曹晓毅, 张宝元, 王玉涛 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 191-198

固化轻质土在干湿循环及大变形条件下力学特性研究

A study of the mechanical properties of curing light soil under the condition of drying-wetting circles and large deformation

杨爱武, 姜帅, 封安坤, 陈立杰, 赵梦生 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 93-100

初始固结应力对平面应变黄土剪切破坏特性影响

Effect of initial solidification stress on shear failure characteristics of loess under the plane strain condition

李宝平, 杨倩, 张玉, 平高权, 王智 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 92-99



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202304042

向前, 王科, 翁磊, 等. 不同卸载方向下高应力岩石真三轴卸荷力学特性研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(3): 80-89.
XIANG Qian, WANG Ke, WENG Lei, et al. Experimental study of mechanical properties of highly-stressed rocks under true triaxial unloading conditions with different unloading directions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(3): 80-89.

不同卸载方向下高应力岩石真三轴卸荷 力学特性研究

向前¹, 王科², 翁磊³, 尤伟军¹, 储昭飞³, 李泽宇³

(1. 中建三局第一建设工程有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 无限元数创科技有限公司, 浙江 杭州 311215; 3. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 深部岩体开挖过程中, 围岩应力场在开挖面附近形成交替分布的应力升高区(加载区)和应力降低区(卸载区), 极易引发高应力岩体失稳破坏。尽管目前已有诸多关于岩石加载卸载破坏方面的研究, 但在复杂真三轴应力路径下岩石加载卸载破坏机理的认识仍不充分。针对这一问题, 文章以山东玲珑金矿花岗岩立方块试样为研究对象, 首先进行了不同侧向应力下真三轴加载破坏试验, 并进一步开展了不同卸荷方向下真三轴卸载破坏试验, 深入研究了花岗岩试样在复杂真三轴加载卸载路径下的强度及破坏特征。试验结果表明: 随着中间主应力的增大, 真三轴加载条件花岗岩的破坏模式由张拉-剪切复合型破坏转变到张拉破坏, 真三轴加载破坏强度先增大后缓慢减小; 在相同中间主应力和最小主应力条件下, 花岗岩的真三轴卸载破坏强度均小于其加载破坏强度, Mogi 强度公式可以很好地拟合卸载最小主应力条件下的真三轴卸载强度。该成果可为深部岩体工程稳定性控制和设计提供重要的理论依据和指导。

关键词: 真三轴加卸载; 中间主应力; 卸载方向; 强度; 岩石力学

中图分类号: TU458

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)03-0080-10

Experimental study of mechanical properties of highly-stressed rocks under true triaxial unloading conditions with different unloading directions

XIANG Qian¹, WANG Ke², WENG Lei³, YOU Weijun¹, CHU Zhaoferi³, LI Zeyu³

(1. The First Construction Engineering Co. Ltd. of China Construction Third Engineering Bureau, Wuhan, Hubei 430040, China; 2. Infinite Yuanshuchuang Technology Co. Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311215, China; 3. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: During the excavation process of deep rock masses, the surrounding rock stress field forms alternating zones of stress increase (loading zones) and stress decrease (unloading zones) near the excavation surface, which can easily trigger instability and failure in high-stress rock masses. Despite numerous studies that have been conducted on rock loading and unloading failures, the understanding of rock failure mechanisms under complex true triaxial stress paths remains insufficient. This study focuses on cubic granite specimens from the Linglong

收稿日期: 2023-04-24; 修订日期: 2023-08-13

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52278412; 42077246); 中央高校基本科研业务费专项资金(2042022kf1055)

第一作者: 向前(1976—), 男, 硕士, 主要从事智能建造和岩土工程应用研究。E-mail: xq.zh@126.com

通讯作者: 翁磊(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩体力学与工程灾害控制研究。E-mail: leiweng@whu.edu.cn

gold mine in Shandong. To comprehensively investigate the strength and failure characteristics of granite samples under complex true triaxial loading and unloading paths, true triaxial loading tests under different lateral stresses were conducted, followed by further true triaxial unloading tests in different unloading directions. The experimental results reveal that with the increase of intermediate principal stress, the failure mode of granite under true triaxial loading condition changes from shear-tensile failure to tensile failure, and the true triaxial loading failure strength increases first and then decreases slowly. Under the same intermediate and minimum principal stress conditions, the true triaxial unloading failure strength of granite is smaller than its loading failure strength, and the Mogi strength formula fits well with the true triaxial unloading strength under the minimum principal stress condition. This study provides an essential theoretical basis and guidance for controlling and designing the stability of deep rock masses in engineering applications.

Keywords: true triaxial loading and unloading; intermediate principal stress; unloading direction; strength; rock mechanics

世界经济的迅速发展,使得地球浅部矿产资源逐渐枯竭,资源开发不断走向地球深部^[1-3]。矿山进入深部开采以后,围岩地压活动显著增多,深部岩体力学问题愈发突出,岩石饼化、板裂化现象严重,岩爆及矿震等灾害频繁发生,甚至严重威胁作业人员的生命安全。深部工程开挖前,岩体通常处于初始三维应力状态,岩体开挖后,由于产生了新的自由面,深部岩体初始三维应力平衡状态被打破,开挖面附近的围岩应力状态将发生调整,其切向应力开始逐渐增大、径向应力逐渐减小,同时轴向应力也会产生微调(取决于原岩应力状态和单元体位置)。在此过程中,原本三维应力状态逐渐转变为二维应力状态甚至一维应力状态,围岩应力分异严重^[4]。研究表明,由于开挖引起围岩部分应力集中和部分应力降低,造成应力差加剧,是导致围岩结构发生失稳破坏的重要因素^[5-7]。因此,研究高应力岩石的卸荷力学特性对于深部岩体工程稳定性控制具有重要意义。

早在 1966 年,Jaeger^[8]就指出岩石的强度与其应力路径有关,是一个尚待研究的问题。Crouch^[9]的早期研究表明围压的升、降会使岩石的应力应变曲线和体积应变曲线发生一定的转变。哈秋龄^[10]首次提出了卸荷岩体力学的概念,指出了卸荷非线性岩石力学与加载岩石力学的区别。此后,围绕卸荷条件下岩石的变形破坏特性,人们做了大量的试验研究,如尤明庆等^[11]在 MTS 液压伺服机上进行保持轴向变形不变逐步卸围压的试验,得到了应力应变全过程曲线;张黎明等^[12]开展了峰前、峰后卸围压试验,结果表明峰前卸围压条件下岩石表现出脆性剪切破坏,峰后卸围压条件下岩石表现出张剪破坏特征;黄达等^[13]开展了高围压卸荷条件下大理岩的卸荷破坏试验,从破坏块

度分形特征、破裂面细微观形态及岩石损伤破裂应变能转化机制等方面进行了研究。

除了上述常规三轴卸荷试验研究外,学者们利用岩石真三轴试验机进行了岩石真三轴卸荷方面的试验研究^[14-17]。例如,陈景涛等^[18]开展真三轴卸载试验模拟了高应力下岩体开挖引起的复杂应力路径;周火明等^[19]对大理岩试样开展了高压卸载路径下的真三轴试验,引入 Hoek-Brown 强度准则研究大理岩卸载路径真三轴强度参数;何满潮等^[20]对高应力花岗岩在真三轴应力状态下突然卸荷而产生的岩爆过程进行了试验研究,通过分析声发射频谱特性及声发射参数 RA 值的不同研究岩爆破坏过程的微观机制;Zhao 等^[21]对 Beishan 花岗岩开展了真三轴岩爆试验,分析了卸载速率对岩爆特征的影响。Du 等^[22]和 Li 等^[23]在进行岩石真三轴卸载试验时,通过监测岩石的声发射和红外热辐射等特性分析了岩石板裂破坏的发生机制,并研究了在卸载最小主应力下,岩石随中间主应力增加时由剪切破坏转变为板裂破坏的机制。

然而,深部岩体工程开挖过程中,掌子面不断向前推进,围岩所经历的应力路径非常复杂。Martin^[24]指出靠近掌子面区域的岩体会经历应力增加、应力减小甚至应力方向偏转等复杂应力路径。Eberhardt^[25]和 Diederichs 等^[26]的研究也证实由于掌子面不断前移,围岩各处的主应力方向会发生偏转,导致微裂纹多次扩展,并影响其扩展方向。可见,卸荷不同方向上的主应力对微裂纹的起裂、扩展和贯通均会产生很大影响,进而直接影响岩石的宏观力学特性。然而,现有卸荷试验研究大多仅关注卸荷速率及卸荷方式等对岩石卸荷力学特性的影响^[27-28],而不同卸荷方向方面的研究仍不够充分,特别是真三轴卸荷试验中卸载

σ_2 或 σ_3 的对比试验研究还鲜有报道。

本文针对山东玲珑金矿花岗岩试样开展不同侧向应力下真三轴加载破坏试验,详细分析中间主应力对花岗岩真三轴强度及破坏模式的影响规律;在此基础上,开展真三轴卸载破坏试验,研究不同卸载方向对花岗岩三轴卸荷力学特性的影响规律,研究结果可为深部岩体工程稳定性控制和设计提供理论依据和指导。

1 试验设置与方案

1.1 花岗岩试样

岩石试样选自山东玲珑金矿西山坑口-50 m 中段的花岗岩,在现场选取较完整、表面无裂纹,且最短边长不小于 40 cm 的花岗岩大块。将花岗岩大块切割加工成尺寸为 10 cm×10 cm×10 cm 的立方块试样,并保证试样端面不平行度和不垂直度控制在 0.02 mm 以下。试样分组前,对试样 3 个方向均进行弹性纵波(P波)波速测试,获得了每个试样 3 个方向上的 P 波波速,如图 1 所示。安装试样时,设置最大主应力方向与最大波速方向平行,中间主应力方向与中等波速方向平行,最小主应力方向与最小波速方向平行。波速值统计结果表明,平行于 σ_1 方向的波速范围为 3 389~4 387 m/s,平均值为 3 897 m/s;平行于 σ_2 方向的波速范围为 3 360~4 269 m/s,平均值为 3 768 m/s;平行于 σ_3 方向的波速范围为 3 102~4 180 m/s,平均值为 3 643 m/s。可以看到同一试样在 3 个方向上的纵波波速非常接近,表明试样的均一性较好。但试样间仍存在一定的个体差异,故将与平均值差异很大的试样剔除,仅保留波速值在 3 500~4 000 m/s 范围内的试样进行后续试验。同时,分组时将波速接近的试样设置在同一组中,以此最大限度减小由于试样差异性而导致的试验误差。

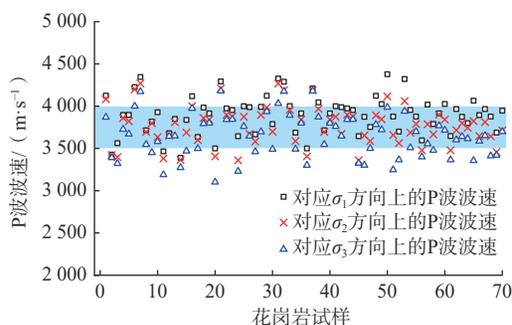


图 1 70 个花岗岩试样各方向上的 P 波波速分布

Fig. 1 Statistics of P-wave velocities for the granite samples

1.2 试验设备

真三轴加卸载试验在 TRW-3000 型岩石真三轴电液伺服诱变(扰动)试验系统上进行。该试验系统由加载单元、计算机测控单元、液压伺服单元、拖车单元以及功能附件等组成,通过由计算机、控制器、执行元件和传感元件等部分组成的全数字闭环控制系统实现对载荷、变形和位移的自动控制。试验系统能够模拟加载三向(X、Y、Z 方向)独立的真三轴应力状态,并能实现侧边单向或双向卸载工况,试验系统的结构如图 2 所示。

1.3 真三轴加载破坏试验方案

根据翁磊等^[29]研究结果,玲珑金矿硬岩巷道掌子面开挖过程中,巷道顶板围岩的切向应力(σ_1)逐渐增大,径向应力(σ_3)逐渐减小,而轴向应力(σ_2)经小幅增加后基本保持不变。因此,本研究设定真三轴加载破坏试验的应力路径分 3 个阶段,即初始应力阶段、应力分异阶段和加载破坏阶段,如图 3 所示。

应力加载速率均设定为 0.5 MPa/s,加载过程中始终保持 $\sigma_1 > \sigma_2 \geq \sigma_3$,具体加载方案为:初始应力阶段,将 3 个方向的应力加载到初始应力水平,即 $\sigma_1=30$ MPa, $\sigma_2=14$ MPa, $\sigma_3=14$ MPa;应力分异阶段,根据该花岗岩巷道的应力分异演化结果,加载 σ_1 至 65 MPa,卸载 σ_3 至 0,将 σ_2 保持为 14 MPa 以及分别增大至 25 MPa、35 MPa、40 MPa、45 MPa 和 50 MPa 等 6 个水平进行多次试验;加载破坏阶段,保持 σ_2 、 σ_3 不变,继续加载 σ_1 直至试样破坏。表 1 为真三轴加载破坏试验各阶段的应力水平,每种应力条件下重复试验 3 个试样。但由于操作原因导致部分组别仅完成了 2 次有效试验,故部分组别仅有 2 组有效试验数据。

1.4 真三轴卸载破坏试验方案

为研究卸载作用与岩石力学强度的相关性,分别开展卸载中间主应力(σ_2)和卸载最小主应力(σ_3)的真三轴卸载破坏试验。试验的应力路径(图 4)分 3 个阶段,即初始应力阶段、应力分异阶段和卸载破坏阶段。试验分 4 组进行,即 TTUL1 组、TTUL2 组、TTUL3 组和 TTUL4 组,各组具体加载方案见表 2。

TTUL1 组和 TTUL2 组:应力初始阶段,将 σ_1 加载至 30 MPa, σ_2 和 σ_3 加载至 14 MPa;应力分异阶段,先将 σ_1 加载至对应 σ_2 和 σ_3 真三轴强度的 80%~90%后保持,将 σ_3 分别卸载至 5 MPa(TTUL1 组)和 10 MPa(TTUL2 组),然后在卸载阶段将 σ_2 卸载,观察卸载过程中岩石是否破坏,记录应力突然跌落或岩石破坏时的 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 值。

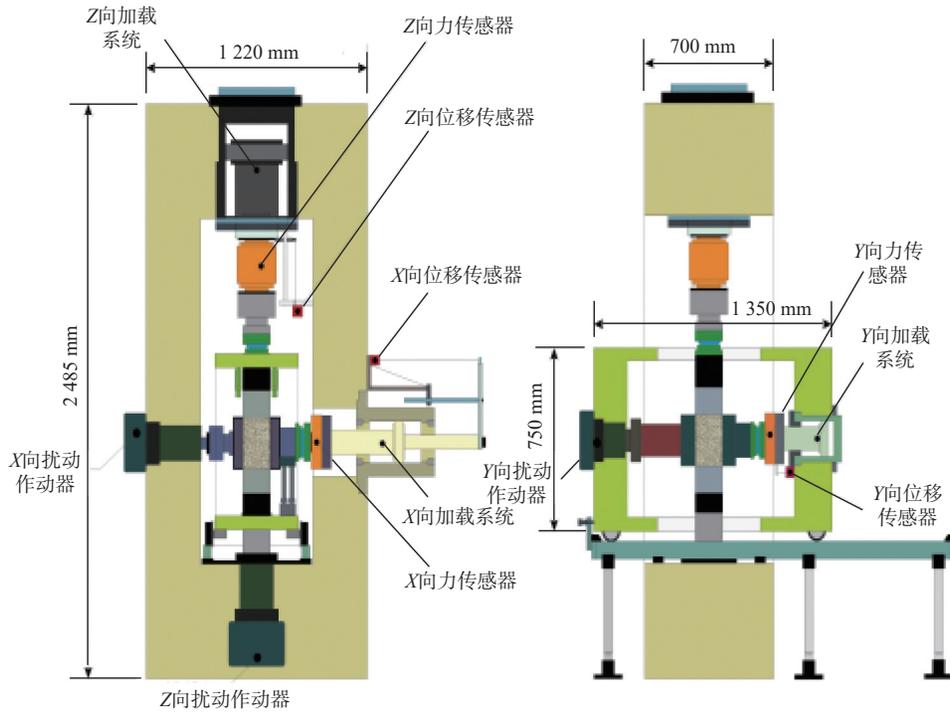


图 2 岩石真三轴电液伺服诱变 (扰动) 试验系统

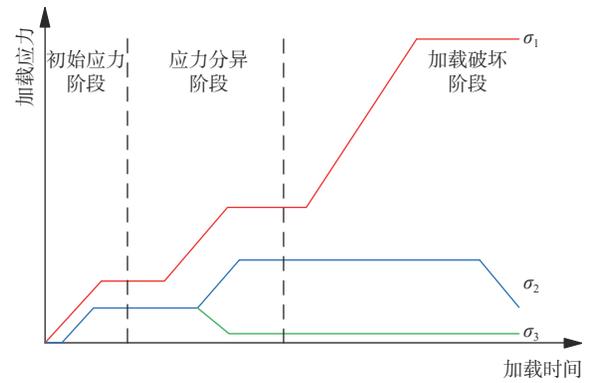
Fig. 2 Rock true triaxial servo-controlled test system

表 1 真三轴加载破坏试验的应力水平

Table 1 Stress levels for the true triaxial loading failure tests

单位: MPa

试验分组	初始应力阶段			应力分异阶段			加载破坏阶段		
	σ_1	σ_2	σ_3	σ_1	σ_2	σ_3	σ_1	σ_2	σ_3
TTL-1				保持14			保持14		
TTL-2				14→25			保持25		
TTL-3	0→	0→	0→	30→	14→35	14→	65→	保持35	
TTL-4	30	14	14	65	14→40	0	破坏	保持40	0
TTL-5				14→45			保持45		
TTL-6				14→50			保持50		



(a) 卸载中间主应力

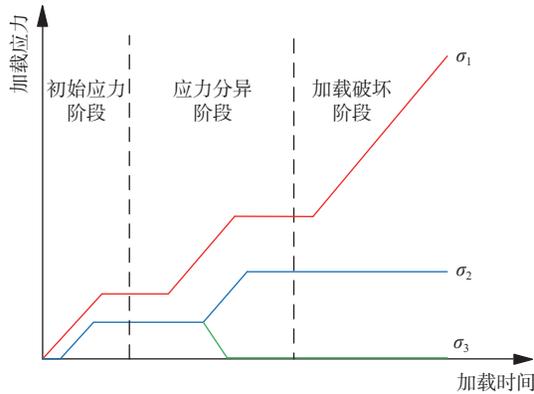
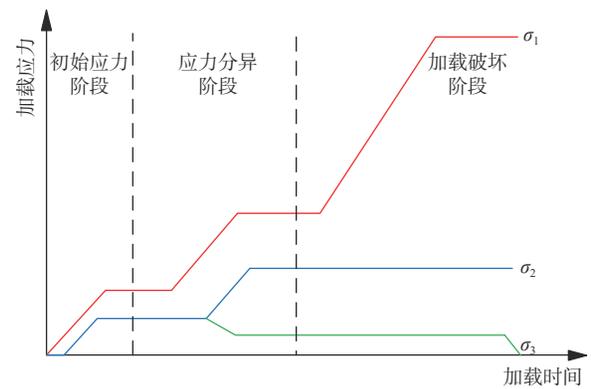


图 3 真三轴加载破坏试验的应力路径

Fig. 3 Stress path for true triaxial loading failure tests



(b) 卸载最小主应力

图 4 真三轴卸载破坏试验应力路径

Fig. 4 Stress path for true triaxial unloading failure tests

TTUL3 组和 TTUL4 组: 应力初始阶段与 TTUL1 组相同。应力分异阶段, 首先将 σ_1 加载至对应 σ_2 和

表 2 真三轴卸载破坏试验的应力水平
 Table 2 Stress levels for the true triaxial unloading failure tests

单位: MPa

试验分组	初始应力阶段			应力分异阶段			卸载破坏阶段					
	σ_1	σ_2	σ_3	σ_1	σ_2	σ_3	σ_1	σ_2	σ_3			
卸载 σ_2	TTUL1-1	与真三轴加载 破坏试验相同		30→	14→25	14→5	保持	25→0	保持5			
	TTUL1-2			(0.8~0.9) σ_{cs}	14→35			35→0				
	TTUL1-3			14→45	45→0							
	TTUL2-1			30→	14→25			25→0				
	TTUL2-2			(0.8~0.9) σ_{cs}	14→35			14→10		保持	35→0	保持10
	TTUL2-3			14→45	45→0							
卸载 σ_3	TTUL3-1	与真三轴加载 破坏试验相同		30→	14→25	14→5	保持	保持25	5→0			
	TTUL3-2			(0.8~0.9) σ_{cs}	14→35			保持35				
	TTUL3-3			14→45	保持45							
	TTUL4-1			30→	14→25			保持25				
	TTUL4-2			(0.8~0.9) σ_{cs}	14→35			14→10		保持	保持35	10→0
	TTUL4-3			14→45	保持45							

注: σ_{cs} 表示真三轴压缩强度, 可通过3.1节中的Mogi强度公式(式4)进行预测。

σ_3 真三轴强度的 80% ~ 90% 后保持, 将 σ_3 卸载至 5 MPa (TTUL3 组) 和 10 MPa (TTUL4 组), 然后在卸载阶段将 σ_3 卸载, 观察卸载过程中岩石是否破坏, 记录应力突然跌落或岩石破坏时的 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 值。

上述 4 组试验中, 应力加载速率均设定为 0.5 MPa/s, 卸载速率均设定为 -0.1 MPa/s, 每种应力条件下重复试验 3 个试样。若试样在卸载条件下未发生破坏则新增一个试样重新试验, 保证每种应力工况下获得 2 组或 2 组以上的数据。

2 试验结果

2.1 真三轴加载试验结果

图 5 汇总了不同 σ_2 下试样最大主应力和最大主应变的关系曲线。从图中可以看出, 不同 σ_2 下, 最大主应力与最大主应变关系曲线的变化趋势基本一致。应力加载的初始阶段, 花岗岩试样均经历压密阶段, 随后应力应变曲线呈近似线性增长, 当应力达到较高水平时, 试样进入应变软化阶段, 直至发生破坏。图 6 为单轴压缩破坏($\sigma_2 = 0$)、 $\sigma_2 = 25$ MPa 及 $\sigma_2 = 50$ MPa 条件下试样加载破坏形态照片。参照前人做法^[30-31], 根据试样断裂面形态及其与最大主应力的夹角可大致判断试样的破坏模式。可以看出, 单轴压缩时花岗岩试样破坏后保留有较完整的“三角锥形”岩块, 试样的主破裂面与最大主应力方向呈明显的斜交关系, 表明试样的破坏主要受其内部斜面形成的贯通剪切面控制, 发生剪切破坏。当 $\sigma_2 = 25$ MPa 时, 碎块中除了有少量锥形碎块外, 还出现了较多长条形碎块, 长条

形碎块的长轴与最大主应力方向平行, 表明试样的破坏包含了张拉-剪切(张-剪)复合破坏作用。当 $\sigma_2 = 50$ MPa 时, 试样破碎块度较小, 产生大量狭长条岩片或岩柱, 表明此工况下试样破坏以张拉破坏为主。

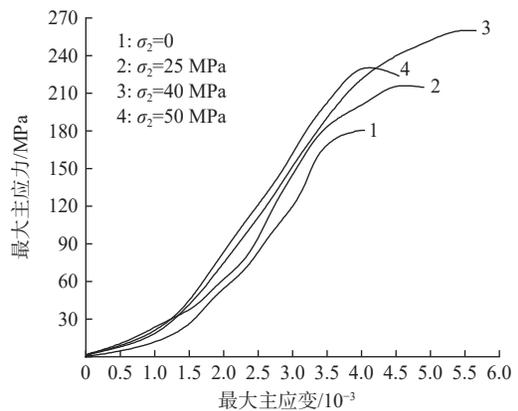


图 5 不同 σ_2 下花岗岩最大主应力与最大主应变关系
 Fig. 5 Curves of maximum principal stress vs maximum principal strain under varying σ_2

图 7 汇总了花岗岩加载破坏时最大主应力与 σ_2 的关系。从图中可以看出, 最大主应力随 σ_2 的增加表现出先增大后缓慢减小的趋势, 表明当中间主应力达到某一较高水平后, 试样的强度反而降低。主要原因在于, σ_2 较低情况下岩石的裂纹主要沿平行于最大主应力方向进行扩展, 当 σ_2 增大到一定水平后, 岩石内部裂纹的生成和贯通方向在很大程度上受到中间主应力的影响, 将沿最大主应力和 σ_2 的平面优先扩展, 使裂纹更易贯穿形成宏观失稳破坏面。同时, 破坏模式



图 6 不同 σ_2 下花岗岩加载破坏照片

Fig. 6 Loading failure images of the granites under different σ_2

从以剪切破坏为主, 到张-剪复合型破坏, 再到以张性拉裂破坏为主进行转变, 这一现象与 Du 等^[32] 的试验结果一致。

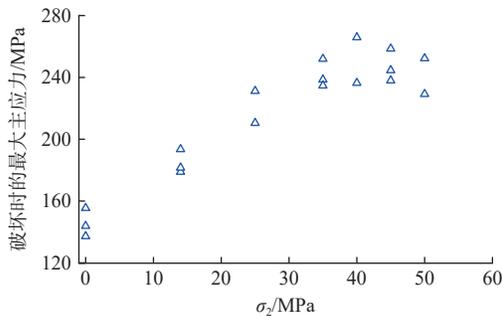


图 7 不同 σ_2 下花岗岩加载破坏时的最大主应力

Fig. 7 Maximum principal stresses of the granite upon failure under varying σ_2

2.2 真三轴卸载试验结果

按表 2 设置的应力路径将 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 加载至预设水平, 然后保持 σ_1 和 σ_3 不变, 对 σ_2 进行卸载, 卸载过程中观察最大主应力的变化情况, 记录花岗岩试样破坏或主应力突然跌落时的应力值。图 8 为卸载中间主应力条件下, 花岗岩试验强度与 Mogi 预测强度的对比曲线。

从图 8 中可以看到, 卸载中间主应力时, 相同 σ_2 和 σ_3 条件下花岗岩的试验破坏强度均小于 Mogi 公式预测强度, 且预测值与试验值的差值随中间主应力的增大而增大。相同 σ_2 和 σ_3 条件下, 花岗岩的卸载破坏强度小于加载破坏强度, 表明卸载更利于岩石内部裂纹的生成和贯通。究其原因, 卸载开始时, 花岗岩已经处于较高的应力水平, 尤其是最大主应力已加载至试样三轴强度的 80%~90%, 这种情况下, 卸载 σ_2 时花岗岩会迅速向 σ_2 方向膨胀变形, 这将利于微裂纹的生成和贯通, 使岩石整体强度下降。不同的是, 采用 Mogi 强度公式计算得到的真三轴强度是在加载条件下得到的强度, 加载条件下岩石受到侧面 σ_2 和 σ_3 作用, 其侧向变形受到一定的限制, 不利于内部裂纹的

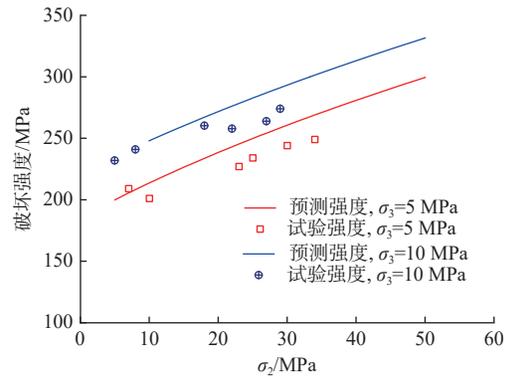


图 8 卸载 σ_2 下试验强度与 Mogi 预测强度对比曲线

Fig. 8 Comparisons of tested strength and Mogi strength of the granite under unloading σ_2 conditions

扩展和贯通, 使得岩石最终强度较高。

进一步开展了卸载最小主应力条件下花岗岩的真三轴卸载试验, 图 9 为卸载最小主应力条件下花岗岩试验强度与 Mogi 预测强度的对比结果。从图中可以看到, 卸载最小主应力时, 花岗岩试样的破坏强度均小于相同条件下 Mogi 公式预测强度。随着 σ_2 从 25 MPa 增加到 45 MPa, Mogi 预测值与试验强度的差值增大, 其原因是较大的 σ_2 作用下, 微小的最小主应力降低使试样会更易于向最小主应力方向变形, 进而产生破坏。

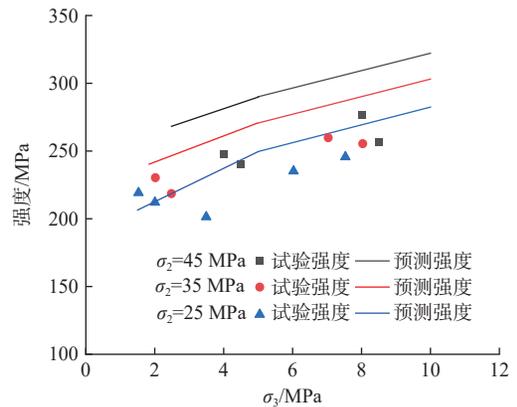


图 9 卸载 σ_3 下试验强度和 Mogi 预测强度对比

Fig. 9 Comparisons of tested strength and Mogi strength of the granite under unloading σ_3 conditions

3 分析与讨论

3.1 真三轴加载破坏分析与讨论

莫尔-库仑强度准则是目前应用最广泛的岩石强度判据,该判据没有考虑中间主应力对岩石强度的影响,认为岩石的宏观破坏为剪切破坏。根据翁磊^[28]等单轴压缩及剪切试验结果,玲珑金矿花岗岩的莫尔-库仑强度公式为:

$$\tau = 0.87\sigma + 28.03 \quad (1)$$

式中: τ ——剪应力/MPa;

σ ——正应力/MPa。

用主应力表示的莫尔-库仑准则为:

$$\sigma_1 = \frac{2c(1 + \sin\varphi)}{\cos\varphi} + \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}\sigma_3 \quad (2)$$

式中: c ——岩石的内聚力/MPa;

φ ——岩石内摩擦角/(°)。

通过换算后,得到:

$$\sigma_1 = 123.04 + 4.82\sigma_3 \quad (3)$$

式(3)为按莫尔-库仑准则回归的理论强度公式。

图 10 汇总了试样常规三轴试验强度、真三轴试验强度与莫尔-库仑理论回归强度随中间主应力的变化规律。由于最小主应力 σ_3 在真三轴加载的第二阶段被卸载为 0,因此仅得到 $\sigma_3 = 0$ 时真三轴强度随中间主应力的变化关系。从图中可以看到,采用莫尔-库仑准则回归的强度随 σ_2 增大而线性增加,常规三轴试验强度随 σ_2 增大而非线性增大,即增幅变小。然而,真三轴试验强度随 σ_2 增大先增大后缓慢减小,且真三轴加载试验得到的岩石强度在 $\sigma_2 > 14$ MPa 条件下低于莫尔-库仑回归强度,这与 Chang 等^[33] 结论一致,进一步证实了较高中间主应力会导致岩石破坏机理发生转

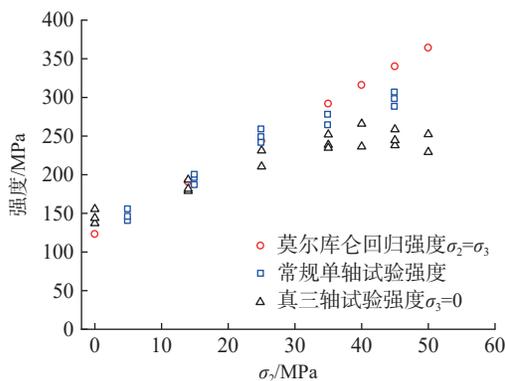


图 10 花岗岩常规三轴试验强度、真三轴试验强度与莫尔-库仑回归强度对比

Fig. 10 Comparisons of conventional triaxial strength, true triaxial strength and M-C strength of the granites

变。此外,注意到本试验中采用立方块试样所得到的单轴压缩强度稍大于标准圆柱试样的单轴压缩强度,这主要是由于立方块试样的高径比较小(立方块试样高径比为 1 : 1,圆柱试样高径比为 2 : 1),导致试样加载端部摩擦效应更明显,从而使得岩石承载力提高。

Mogi 等^[34] 观察到真三轴应力条件下岩石的破坏平面基本平行于中间主应力方向,据此采用一种幂函数来拟合研究八面体剪应力 τ_{oct} 与平均正应力 $\sigma_{m,2}$ 之间的关系,采用一种幂函数来拟合,即:

$$\tau_{oct} = A\sigma_{m,2}^n \quad (4)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad (5)$$

$$\sigma_{m,2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (6)$$

根据加载破坏试验数据,采用式(4)对 τ_{oct} 与 $\sigma_{m,2}$ 之间的关系进行回归,同时将 $\sigma_{m,3}$ 代替 $\sigma_{m,2}$ 也按式(4)进行回归,结果如图 11 所示。从图中可以看到,当中间主应力较低时,2 种方法的拟合结果非常接近;但当中间主应力较高时,采用 Mogi 提出的平均正应力 $\sigma_{m,2}$ 可以较好地拟合试验数据,相关度达 0.994 6。

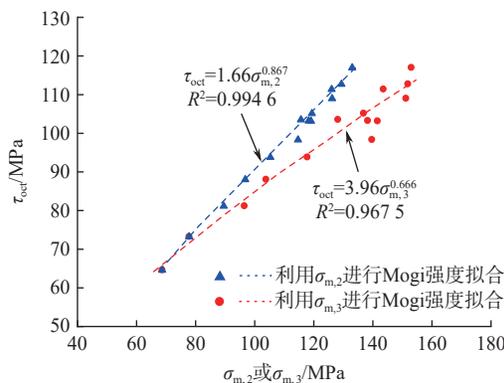


图 11 2 种平均主应力下的幂函数拟合曲线

Fig. 11 Fitting curves of strength based on two mean principal stresses

3.2 真三轴卸载破坏分析与讨论

目前,对于岩石的卸载强度尚未形成统一的或者达成共识的强度判别公式。本文仍采用 Mogi 公式对卸载条件下的花岗岩强度进行分析。采用 Mogi 公式分别对卸载 σ_2 和 σ_3 条件下强度数据进行拟合,得到了八面体剪应力和平均正应力之间的关系,如图 12 所示。

从图 12 可以看到,卸载 σ_2 条件下采用 Mogi 公式进行拟合,其相关性为 0.979 8,而卸载 σ_3 条件下采用 Mogi 公式拟合的相关性高达 0.993 5。可见,卸载 σ_3 时,采用 Mogi 强度公式可以更好地拟合花岗岩的卸

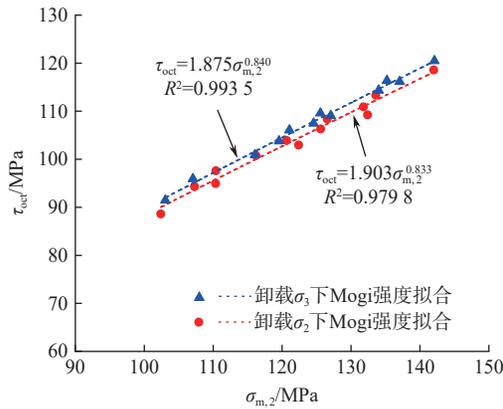


图 12 卸载 σ_2 、 σ_3 条件下 Mogi 强度公式拟合

Fig. 12 Fitting result as per the Mogi strength formula under unloading σ_2 and σ_3 condition

载强度, 而卸载中间主应力下的卸载强度不能用 Mogi 公式进行很好地拟合。这一现象可能与花岗岩试样在卸载破坏下的破坏面形态有关, 以下将详细进行分析。

图 13(a) 为试样在 $\sigma_1=218.5$ MPa, $\sigma_2=35.0$ MPa 状态下卸载 σ_3 时的破坏情况, 可以看到岩石发生脆性破裂, 产生很多长条岩柱碎块, 破裂面平行于 σ_1 和 σ_2 的平面, 这与文献 [22] 试验得到的破坏特征比较吻合。图 13(b) 表示了卸载最小主应力下花岗岩破坏的示意图, 可以看到随着最小主应力的卸载, 劈裂面逐渐沿 σ_1 - σ_2 平面生成, 这与 Mogi 的加载试验破坏结果很相似。Mogi 指出随着中间主应力的增大, 岩石破坏时的破裂面将沿 σ_1 - σ_2 平面产生, 并表现出较强的脆性。可见, 卸载 σ_3 下的岩石破坏模式与 Mogi 增加 σ_2 条件下的加载破坏模式基本相同, 因此采用 Mogi 公式可以合理地对接卸最小主应力条件下的卸载强度进行拟合。

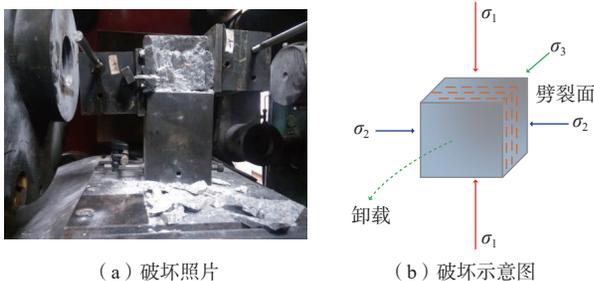


图 13 花岗岩在 $\sigma_1=218.5$ MPa, $\sigma_2=35.0$ MPa 状态下卸载 σ_3 时的破坏情况

Fig. 13 Failure mechanism of the granite under unloading σ_3 condition when $\sigma_1=218.5$ MPa, $\sigma_2=35.0$ MPa

以上结果表明, 即便岩石最终的应力状态相同, 其经历的应力路径(卸载或加载)对岩石的力学特性和变形特征也有很大影响。实际工程中, 靠近开挖面

的岩体所受的应力路径(包括应力大小和应力方向等)非常复杂, 包含了主应力反复加卸载及主应力方向多次转变等作用过程。因此, 实验条件下, 仍难以完全真实模拟工程岩体的实际应力路径。本文对花岗岩试样进行了复杂应力路径下的真三轴加卸载试验, 分别对花岗岩在卸载 σ_2 和 σ_3 条件下的破坏和强度特征进行了分析, 得到了一些有意义的认识。但由于试验条件限制, 试验所施加的最小主应力和中间主应力的范围均较小, 后续研究中应增加中间主应力和最小主应力的变化范围, 进一步深入对比分析卸载中间主应力和最小主应力对岩石变形破坏特性的影响。

4 结论

(1) 随着中间主应力的增大, 花岗岩真三轴加载破坏强度先增大后缓慢减小, 且破坏时表现出更显著的脆性, 破坏模式由张-剪复合型破坏向以张拉破坏为主进行转变;

(2) 卸载 σ_3 条件下花岗岩的卸载破坏模式与增大 σ_2 条件下花岗岩的加载破坏模式类似, 即花岗岩发生沿 σ_1 - σ_2 平面的脆性断裂破坏;

(3) 相同 σ_2 和 σ_3 条件下, 花岗岩的真三轴卸载破坏强度均小于其加载破坏强度, Mogi 强度公式可以很好地描述卸载 σ_3 条件下真三轴卸载强度, 但对于卸载 σ_2 下真三轴卸载强度的拟合效果较差。

参考文献 (References) :

- [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. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 李夕兵, 宫凤强. 基于动静组合加载力学试验的深部开采岩石力学研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 846-866. [LI Xibing, GONG Fengqiang. Research progress and prospect of deep mining rock mechanics based on coupled static-dynamic loading testing[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 846-866. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 全永威, 王军, 熊永润, 等. 爆破扰动下 TBM 隧洞时滞型岩爆特征及影响机制研究[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 94-103. [QUAN Yongwei, WANG Jun, XIONG Yongrun, et al. A study of the characteristics and influence mechanism of time delayed rockburst in a

- TBM tunnel under the blasting disturbance[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(1): 94 – 103. (in Chinese with English abstract)]
- [4] SU Guoshao, JIANG Jianqing, ZHAI Shaobin, et al. Influence of tunnel axis stress on strainburst: An experimental study[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(6): 1551 – 1567.
- [5] 熊诗湖, 钟作武, 唐爱松, 等. 乌东德层状岩体卸荷力学特性原位真三轴试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(增刊 2): 3724 – 3731. [XIONG Shihu, ZHONG Zuowu, TANG Aisong, et al. Study of mechanical properties of wudongde layered rockmass under unloading conditions by in situ true triaxial tests[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(Sup 2): 3724 – 3731. (in Chinese)]
- [6] 封陈晨, 李傲, 王志亮, 等. 锦屏大理岩单轴压缩过程中的微结构演化 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(6): 90 – 96. [FENG Chenchen, LI Ao, WANG Zhiliang, et al. A study of mineral compositions and micro-structure characteristics for the Jinping marble[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(6): 90 – 96. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 刘威军, 范俊奇, 李天斌, 等. 深埋高地应力隧道勘察期岩爆烈度概率分级预测 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(6): 114 – 123. [LIU Weijun, FAN Junqi, LI Tianbin, et al. Probabilistic classification prediction of rockburst intensity in a deep buried high geo-stress rock tunnel during engineering investigation[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(6): 114 – 123. (in Chinese with English abstract)]
- [8] JAEGER J C. Brittle fracture of rocks[C]//The 8th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS), American Rock Mechanics Association, 1966.
- [9] CROUCH S L. A note on post-failure stress-strain path dependence in norite[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1972, 9(2): 197 – 204.
- [10] 哈秋龄. 岩石边坡工程与卸荷非线性岩石(体)力学 [J]. *岩石力学与工程学报*, 1997, 16(4): 386 – 391. [HA Qiuling. Rock slope engineering and unloading nonlinear rock mass mechanics[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1997, 16(4): 386 – 391. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 尤明庆, 华安增. 岩石试样的三轴卸围压试验 [J]. *岩石力学与工程学报*, 1998, 17(1): 24 – 29. [YOU Mingqing, HUA Anzeng. Triaxial confining depressure test of rock sample[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(1): 24 – 29. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 张黎明, 王在泉, 王建新, 等. 岩石卸荷破坏的试验研究 [J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2006, 38(3): 34 – 37. [ZHANG Liming, WANG Zaiquan, WANG Jianxin, et al. Experimental study on the rock behavior under unloading condition[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2006, 38(3): 34 – 37. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 黄达, 谭清, 黄润秋. 高围压卸荷条件下大理岩破碎块度分形特征及其与能量相关性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(7): 1379 – 1389. [HUANG Da, TAN Qing, HUANG Runqiu. Fractal characteristics of fragmentation and correlation with energy of marble under unloading with high confining pressure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(7): 1379 – 1389. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 刘婕, 张黎明, 丛宇, 等. 真三轴应力路径花岗岩卸荷破坏力学特性研究 [J]. *岩土力学*, 2021, 42(8): 2069 – 2077. [LIU Jie, ZHANG Liming, CONG Yu, et al. Research on the mechanical characteristics of granite failure process under true triaxial stress path[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(8): 2069 – 2077. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 张俊文, 范文兵, 宋治祥, 等. 真三轴不同应力路径下深部砂岩力学特性 [J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(1): 106 – 114. [ZHANG Junwen, FAN Wenbing, SONG Zhixiang, et al. Mechanical characteristics of deep sandstone under different true triaxial stress paths[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(1): 106 – 114. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 杨成祥, 陈祥艳, 周建华. 三山岛金矿深埋蚀变硬岩真三轴压缩下的力学性质 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(11): 1599 – 1606. [YANG Chengxiang, CHEN Xiangyan, ZHOU Jianhua. Mechanical properties of deep buried altered hard rock under true triaxial compression in Sanshandao gold mine[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2022, 43(11): 1599 – 1606. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 马钰沛, 李江腾, 刘双飞. 考虑中间主应力的粉砂岩侧向卸荷力学特性试验研究 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(11): 2792 – 2800. [MA Yupe, LI Jiangteng, LIU Shuangfei. Experimental study on lateral unloading mechanical properties of siltstone considering intermediate principal stress[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(11): 2792 – 2800. (in Chinese with English abstract)]

- [18] 陈景涛, 冯夏庭. 高地应力下岩石的真三轴试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1537 - 1543. [CHEN Jingtao, FENG Xiating. True triaxial experimental study on rock with high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1537 - 1543. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 周火明, 单冶钢, 李维树, 等. 深埋隧洞大理岩卸载路径真三轴强度参数研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1524 - 1529. [ZHOU Huoming, SHAN Zhigang, LI Weishu, et al. Study of true triaxial strength parameters in unloading path of marbles in deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1524 - 1529. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 何满潮, 苗金丽, 李德建, 等. 深部花岗岩试样岩爆过程实验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 865 - 876. [HE Manchao, MIAO Jinli, LI Dejian, et al. Experimental study on rockburst processes of granite specimen at great depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 865 - 876. (in Chinese with English abstract)]
- [21] ZHAO X G, WANG J, CAI M, et al. Influence of unloading rate on the strainburst characteristics of Beishan granite under true-triaxial unloading conditions[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(2): 467 - 483.
- [22] DU Kun, LI Xibing, LI Diyuan, et al. Failure properties of rocks in true triaxial unloading compressive test[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(2): 571 - 581.
- [23] LI Xibing, DU Kun, LI Diyuan. True triaxial strength and failure modes of cubic rock specimens with unloading the minor principal stress[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(6): 2185 - 2196.
- [24] MARTIN C D. The strength of massive Lac du Bonnet granite around underground openings[D]. Manitoba, Canada: University of Manitoba, 1994.
- [25] EBERHARDT E. Numerical modelling of three-dimension stress rotation ahead of an advancing tunnel face[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38(4): 499 - 518.
- [26] DIEDERICHS M S, KAISER P K, EBERHARDT E. Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(5): 785 - 812.
- [27] 荣浩宇, 李桂臣, 赵光明, 等. 不同应力路径下深部岩石真三轴卸荷特性试验 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(9): 3140 - 3149. [RONG Haoyu, LI Guichen, ZHAO Guangming, et al. True triaxial test study on mechanical properties of deep rock mass in different stress paths[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(9): 3140 - 3149. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 李傲, 王志亮, 封陈晨, 等. 动态冲击下锦屏大理岩力学响应与能量特性 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 112 - 118. [LI Ao, WANG Zhiliang, FENG Chenchen, et al. Mechanical responses and energy characteristics of the Jinping marble under the dynamic impact[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 112 - 118. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 翁磊, 李夕兵, 周子龙, 等. 屈曲型岩爆的发生机制及其时效性研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(1): 172 - 178. [WENG Lei, LI Xibing, ZHOU Zilong, et al. Occurrence mechanism and time-dependency effect of buckling rock burst[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(1): 172 - 178. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 陈国庆, 张岩, 李阳, 等. 岩石真三轴加载破坏的热-声前兆信息链初探 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(9): 1764 - 1776. [CHEN Guoqing, ZHANG Yan, LI Yang, et al. Thermal-acoustic precursor information chain of rock failure under true triaxial loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(9): 1764 - 1776. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 刘婕, 丛宇, 张黎明, 等. 花岗岩真三轴加、卸载破坏的细观损伤机制研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(8): 2677 - 2688. [LIU Jie, CONG Yu, ZHANG Liming, et al. Mesoscopic damage mechanism of granite under true triaxial loading and unloading[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(8): 2677 - 2688. (in Chinese with English abstract)]
- [32] DU Kun, YANG Chengzhi, SU Rui, et al. Failure properties of cubic granite, marble, and sandstone specimens under true triaxial stress[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 130: 104309.
- [33] CHANG Chandong, HAIMSON B. True triaxial strength and deformability of the German Continental Deep Drilling Program (KTDB) deep hole amphibolite[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2000, 105(B8): 18999 - 19013.
- [34] MOGI K. Fracture and flow of rocks under high triaxial compression[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76(5): 1255 - 1269.