

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220415001

不同应力路径下灰岩卸荷损伤特性演化规律研究*

陈天楠¹, 邓华锋¹, 李建林¹, 刘立鹏², 陈兴周³, 李涛¹

(1. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北宜昌 443002; 2. 中国水利水电科学研究院水利部水工程建设与安全重点实验室, 北京 100038; 3. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西西安 710054)

摘要: 为探究应力路径对灰岩卸荷力学特性的影响机制, 考虑恒偏压卸围压、恒轴压卸围压及加轴压卸围压三种卸荷应力路径, 分别进行了卸荷试验和数值模拟, 分析了不同卸荷应力路径下灰岩的能量释放规律及细观损伤演化规律。研究结果表明: (1) 卸荷应力路径对灰岩宏观力学特性影响显著, 恒偏压卸围压路径下, 岩样卸荷强度最低, 变形模量与泊松比变化趋势最缓, 但变化幅度最大, 而加轴压卸围压路径下, 其卸荷强度最大, 但变形参数变化幅度较小; (2) 三种卸荷应力路径下, 卸荷过程中耗散能占比大小依次为恒偏压卸围压 > 恒轴压卸围压 > 加轴压卸围压, 弹性应变能占比大小则为加轴压卸围压 > 恒轴压卸围压 > 恒偏压卸围压, 说明外力所做的功在恒偏压卸围压方案下多转化为耗散能用于裂纹发育, 对应破坏时的损伤变量最大, 而加轴压卸围压方案下多转化为弹性应变能储存于岩样内部, 卸荷破坏更为突然; (3) 数值模拟结果分析发现, 恒偏压卸围压方案下, 卸荷过程中的裂纹总数量和张拉裂纹占比最大, 卸荷损伤程度最高, 对应的损伤变量最大, 而加轴压卸围压方案下岩样的裂纹数量最少, 损伤变量最小, 卸荷过程中岩样内部的细观损伤发育规律进一步说明了应力路径对其宏观力学特性的影响。

关键词: 卸荷; 应力路径; 变形特征; 能量释放; 细观损伤

中图分类号: TU452 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)06-1434-11

Influence of Stress Path on Unloading Mechanical Properties of Limestone

CHEN Tiannan¹, DENG Huafeng¹, LI Jianlin¹, LIU Lipeng², CHEN Xingzhou³, LI Tao¹

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang 443002, China; 2. Key Laboratory of Construction and Safety of Water Engineering of the Ministry of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: To explore the influence mechanism of the stress path on the unloading mechanical properties of limestone, we considered three unloading stress paths: unloading with a constant bias pressure unloading confining pressure, unloading with a constant axial pressure unloading confining pressure, and unloading under axial pressure and confining pressure. This paper conducted unloading tests and numerical analyses, and analyzed the energy release law and meso-damage evolution law of limestone under different unloading stress paths. The research results show that: (1) The path of unloading stress has a significant impact on the macro-mechanical properties of limestone. Under a constant bias

* 收稿日期: 2022-04-15; 修回日期: 2022-05-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2034203, 51979218)、中国水利水电科学研究院水利部水工程建设与安全重点实验室开放研究基金(NO.202001)资助

作者简介: 陈天楠(1998—), 男, 硕士研究生。主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: 1026585049@qq.com

通讯作者: 邓华锋(1979—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事岩土工程方面的教学与研究。E-mail: dhf8010@ctgu.edu.cn

pressure unloading confining pressure condition, the rock sample exhibits the lowest unloading strength, and the deformation modulus and Poisson's ratio show a slower rate of change. However, it exhibits the largest range of change. Under axial pressure unloading confining pressure path, the unloading strength is the largest. However, the variation of deformation parameters is relatively small. (2) Among the three unloading stress paths, the proportion of dissipation energy during the unloading process follows the order: constant bias pressure unloading confining pressure > constant axial pressure unloading confining pressure > axial pressure unloading confining pressure. The distribution of elastic strain energy is as follows: axial pressure unloading confining pressure > constant axial pressure unloading confining pressure > constant bias pressure unloading confining pressure. The findings indicate that the work performed by the external force is primarily converted into dissipation energy during crack development under constant bias pressure unloading confining pressure. Furthermore, the corresponding failure exhibits the highest damage variable. In contrast, when subjected to axial pressure unloading confining pressure, the energy is primarily converted into elastic strain energy, which is then stored within the rock sample. The failure during unloading occurs more abruptly in this case. (3) According to the numerical simulation results, under constant bias pressure unloading confining pressure, there is a higher total number of cracks and the proportion of tension cracks during the unloading process. Additionally, the degree of damage during unloading is the highest, with a larger value for the corresponding damage variable. In contrast, under axial pressure unloading confining pressure, the number of cracks and the damage variable of the rock sample are the smallest. Furthermore, the meso-damage development law within the rock sample during the unloading process further insight into the impact of stress path on its macroscopic mechanics.

Keywords: unloading; stress path; deformation characteristics; energy release; mesoscopic damage

0 引言

工程建设中往往涉及大量的岩体开挖,在不同开挖应力路径下,卸荷岩体产生不同的变形破坏特征。典型的如隧洞开挖过程中,边墙、顶拱等不同位置围岩的开挖卸荷应力路径是不一样的,对应的变形规律差异明显。较多学者开展了大量的卸荷力学试验研究,并取得了较多研究成果。陈旦熹等^[1]、吴玉山等^[2]、尤明庆等^[3]设计了恒轴压卸围压和加轴压卸围压两种应力路径的卸荷试验,发现应力路径对岩体卸荷变形破坏具有强烈的控制作用;在此基础上,韩铁林等^[4]研究发现相对于恒围压升轴压方案,卸围压升轴压及定轴压卸围压方案下砂岩的强度有所降低;荣浩宇等^[5]发现增轴压路径下岩石卸荷破坏更剧烈,卸轴压路径下岩石破坏变形相对较缓。邱士利等^[6]依托锦屏二级水电站大理岩开展恒轴压卸围压和增轴压卸围压试验,提出用应变围压柔量来描述岩石力学特性,发现增轴压卸围压路径下变形过程中的不可逆变形比重更高;赵国

彦等^[7]、孙雪等^[8]基于多种应力路径的三轴卸荷试验,对比分析发现加轴压卸围压路径下岩样的弹性模量的劣化速度更快,其内部损伤更加严重。

岩体变形破坏过程实际上就是一个从局部耗散到局部破坏、最终到整体灾变的过程,有的学者也从能量演化角度分析了不同卸荷应力路径岩体的力学特性。丛宇等^[9]开展了常规三轴压缩试验和加轴压卸围压试验的对比分析,发现围压对轴向能量—应变曲线增大率的影响比常规三轴压缩试验更加显著;张楚璇等^[10]、戴兵等^[11]依据能量计算原理,研究发现耗散能与时间呈非线性变化且受卸荷应力路径影响较为明显;G.Y.ZHAO等^[12]以应变能转化率分析卸荷应力路径下能量演化规律差异,发现加轴压卸围压路径下的应变能转化率最大。

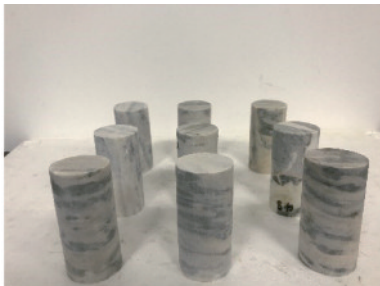
综合上述研究成果可以看出,应力路径对岩石卸荷力学特性存在明显影响,但不同卸荷应力路径下岩石能量释放规律及损伤演化过程还不够完善。基于此,本文以灰岩为研究对象,设计进行3种应力路径的卸荷试验,系统分析不同卸荷应力路径下岩石变形和强度参数的差别,从能量释放规律对其变

形破坏特征进行解释,并结合数值模拟分析卸荷过程中岩石的损伤演化规律,以期进一步完善应力路径对岩石卸荷损伤特性演化规律的影响。

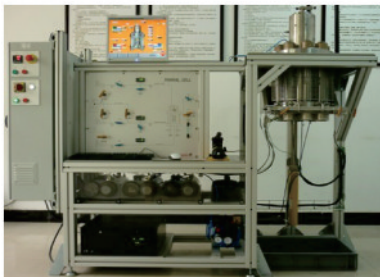
1 研究方案

1.1 试样制备

试验用岩样为乌东德水电工程坝址区的典型灰岩。将从现场取回的岩样进行钻芯制样,并严格按照规范要求制备尺寸为 $\Phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的标准圆柱体试样。岩样的密度为 2.72 g/cm^3 ,纵波波速均值为 5.67 km/s ,选取波速和密度集中的岩样进行后续试验,制备好的典型试样和试验设备如图1所示。



(a) 典型岩样照片



(b) TOP INDUSTRIE自适应全自动岩石三轴试验机

图1 典型试验与试验设备照片

Fig.1 TOP INDUSTRIE adaptive fully automated rock tri-axial testing machine

1.2 试验及数值模拟方案

为了对比分析不同应力路径对灰岩开挖卸荷效应的影响,参考以往的研究经验^[13],设计进行恒偏压卸围压、恒轴压卸围压和加轴压卸围压三种应力路径的卸荷试验。卸荷过程中的卸荷量^[14]按下式进行计算。

$$X_{\sigma} = \frac{(\sigma_3^0 - \sigma_3^i)}{(\sigma_3^0 - \sigma_3^f)} \times 100\% \quad (1)$$

式中, X_{σ} 为卸荷量; σ_3^f 为卸荷之前围压值; σ_3^i 为卸荷至*i*步时的围压值; σ_3^0 轴卸荷破坏时的围压值。

方案一:恒偏压卸围压(对应于开挖过程中围岩切向应力与径向应力等幅减小的应力调整过程),按静水压力的方式逐步施加轴压及围压值至设计值(20 MPa),保持围压恒定,将轴压加载至对应初始围压下三轴抗压强度(166.00 MPa)的80%,然后维持偏压恒定,逐步减小围压直至卸荷破坏。方案二:恒轴压卸围压(对应于开挖过程中围岩切向应力不变、径向应力减小的应力调整过程),加载阶段流程同方案一,然后恒定轴压,卸载围压至岩样破坏。方案三:加轴压卸围压(对应于开挖过程中围岩切向应力增加、径向应力减小的应力调整过程),加载流程同方案一,在卸荷阶段,在卸载围压的同时增加轴压的方式卸荷至岩样破坏。每种方案进行3个试样的试验,试验过程中加卸荷速率均为 0.05 MPa/s 。

为了从细观角度分析岩石在三种应力路径下的卸荷损伤演化过程,采用PFC^{2D}软件建立了相同尺寸的模型进行计算分析。

2 卸荷应力路径对灰岩强度和变形特性影响

绘制各方案应力—应变曲线如图2所示。在卸荷前的加载阶段,各种方案下的曲线总体一致,说明选取试样的离散性较小。在卸荷阶段,由于应力路径不同,三种方案的曲线呈现明显的差别,其中,恒偏压卸围压方案(以下简称方案一)达到破坏时的强度最低,峰值强度对应的轴向应变和侧向应变最大,而加轴压卸围压方案(以下简称方案三)达到破坏时的强度最大,峰值强度对应的轴向应变和侧向应变最小。各方案下岩样破坏时的强度和卸荷过程中的围压变化量见表1。比较而言,三种方案下的峰值强度差别在5%~10%左右,这与以往试验得到的结果一致^[15]。

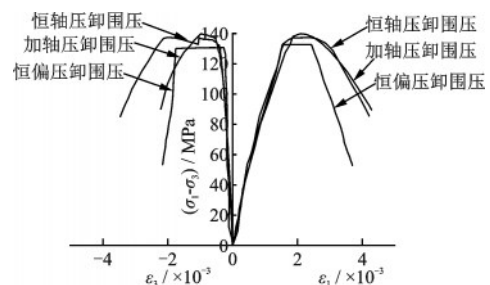


图2 不同卸荷应力路径下的典型应力—应变曲线

Fig.2 Typical stress-strain curve of rock sample during different unloading stress paths

表1 不同卸荷应力路径下卸荷破坏强度

Table 1 Unloading failure strength of rock sample under different unloading stress paths

单位:MPa

卸荷应力路径	编号	卸荷破坏强度	卸荷破坏围压值	围压变化值
方案一:恒偏压卸围压	1-1	132.80	5.00	15.00
	1-2	132.83	5.63	14.37
	1-3	132.89	6.44	13.56
方案二:恒轴压卸围压	2-1	137.47	15.38	4.62
	2-2	136.89	15.93	4.07
	2-3	136.66	16.16	3.84
方案三:加轴压卸围压	3-1	138.54	17.13	2.87
	3-2	137.88	17.46	2.54
	3-3	138.02	17.39	2.61

对三种方案下卸荷过程中岩样的变形模量和泊松比变化规律进行了统计(3个岩样的均值,以后类同),具体如图3、4所示。

从图2~4可以看出,在卸荷过程中,随着卸荷量的增大,变形模量不断减小,当临近卸荷破坏时,其降低速率迅速增大并出现陡降。泊松比的变化规律与变形模量变化规律刚好相反,即随着卸荷量

逐渐增大,泊松比的增长速率也在不断增大,在临近破坏时达到最大。

岩样的变形模量和泊松比在临近卸荷破坏时发生剧烈变化,其原因主要是临近卸荷破坏时,岩样内部裂隙已逐渐发育贯通,此时较小卸荷量的变化会引起较大的变形。具体而言,同卸荷起点相比,三种方案下岩样卸荷破坏时的变形模量分别减少了15.03%、13.45%、10.43%;泊松比分别增加了28.28%、25.54%、20.90%。比较而言,方案一的变形模量和泊松比变化幅度最大,变化趋势最缓,在卸荷量达到60%以后即出现明显下降趋势,而方案三的变化幅度相对较小,但变化趋势很突然,在卸荷量达90%后出现突变。

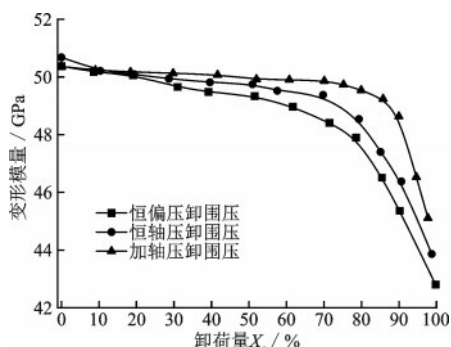


图3 卸荷阶段变形模量与卸荷量关系曲线

Fig.3 Curves of relationship between deformation modulus and unloading amount during unloading

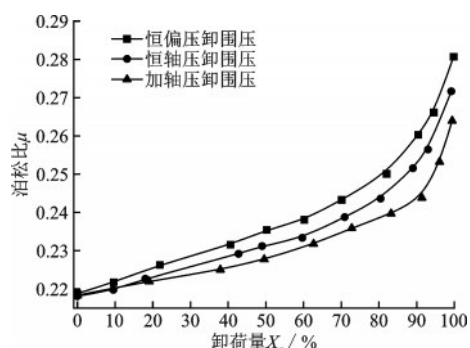


图4 卸荷阶段泊松比与卸荷量的关系曲线

Fig.4 Curves of relationship between poisson ratio and unloading amount during unloading

3 应力路径对灰岩卸荷损伤特性影响

上述分析表明三种应力路径下,灰岩的卸荷力学特性存在明显的区别,说明三种方案卸荷过程中,岩样的损伤演化是存在明显区别的,为了对损伤过程进行比较分析,特参考以往能量参数计算方法^[16],对卸荷过程中的能量参数进行了统计分析。具体见表2。为对比分析卸荷过程中能量演化规律,作出了耗散能占比与弹性应变能占比的变化曲线如图5、6所示。

综合表2和图4~6可以看出,卸荷前的初始加载阶段,耗散能占比很小,仅为13%左右,外力所做的功主要转化为弹性应变能储存在岩样内部。在卸荷过程中,耗散能占比呈先缓后陡形式逐渐增大,方案一在卸荷量达到80%、方案三在卸荷量达

表2 不同卸荷应力路径下卸荷阶段的能量密度参数

Table 2 Energy density of rock sample under different unloading stress paths

卸荷应力路径	卸荷量/ $\%$	能量密度参数/ $(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3})$		
		耗散能 U_d	弹性应变能 U_e	总能量 U
方案一:恒偏压卸围压	0	0.043	0.278	0.321
	30	0.065	0.276	0.341
	50	0.092	0.278	0.370
	70	0.121	0.273	0.394
	80	0.154	0.276	0.430
	90	0.236	0.209	0.445
	100	0.400	0.058	0.458
方案二:恒轴压卸围压	0	0.041	0.271	0.312
	30	0.053	0.277	0.330
	50	0.067	0.277	0.344
	70	0.078	0.277	0.355
	80	0.095	0.265	0.360
	90	0.131	0.234	0.365
	100	0.178	0.192	0.370
方案三:加轴压卸围压	0	0.040	0.274	0.314
	30	0.041	0.279	0.320
	50	0.042	0.283	0.325
	70	0.044	0.289	0.333
	80	0.045	0.295	0.340
	90	0.059	0.289	0.348
	100	0.148	0.208	0.356

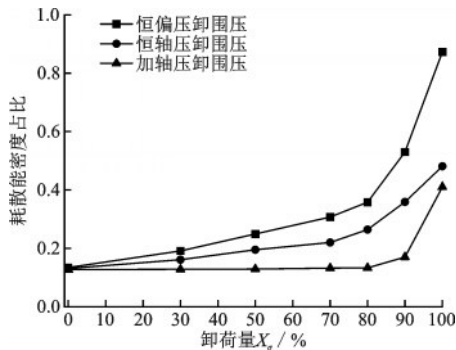


图5 卸荷阶段耗散能占比与卸荷量的关系曲线

Fig.5 Curves of relationship between the proportion of dissipated energy and unloading amount during unloading

90%之后,出现陡增现象。比较而言,在相同卸荷量情况下,方案一、方案二和方案三的耗散能占比逐渐减小,弹性能呈相反的变化规律。分析主要原因是,方案一恒偏压卸围压的过程中,卸荷持续时间较长,岩样内部的损伤有比较充分的发育,而方

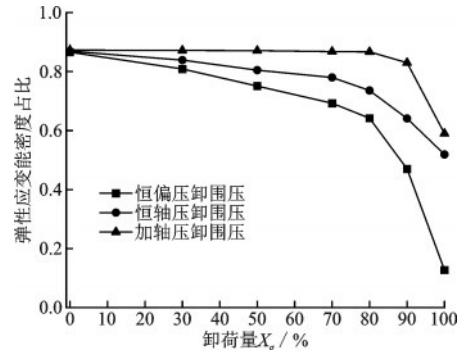


图6 卸荷阶段弹性能占比与卸荷量的关系曲线

Fig.6 Curves of relationship between the proportion of elastic strain energy and unloading amount during unloading

案三加轴压卸围压过程中,岩样内部的损伤发育较少,主要以弹性能的形式储存在试样内,在临近破坏时突然释放,导致岩样的破碎程度明显增大,这一点可以从后面岩样的破坏特征也可以看到。

为了进一步分析卸荷过程中能量参数的演化规律,特对不同卸荷阶段的耗散能释放速率进行统计,如图7所示。

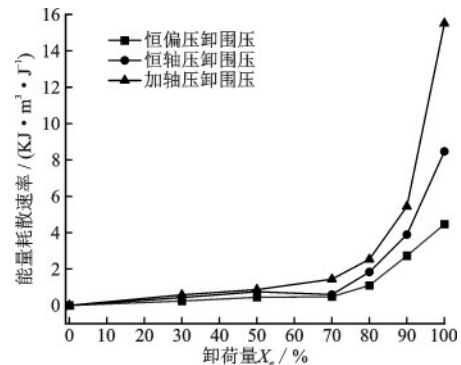


图7 卸荷阶段能量耗散速率与卸荷量关系曲线

Fig.7 Curves of relationship between energy dissipation rate and unloading amount during unloading

从图7可以看出,在卸荷阶段,三种应力路径下的耗散能速率呈先缓后陡的增长趋势,且三种应力路径的耗散能速率大小依次为:加轴压>恒轴压>恒偏压。从卸荷量从0增加至70%时,三种方案下的耗散能释放速率差异很小;卸荷量达到80%以后,三种方案的散能释放速率差异明显增大,而且在临近卸荷破坏时急剧增加,其中加轴压卸围压方案下的增长趋势尤为明显,这与前文得出的该方案变形参数与能量参数变化规律一致。

损伤变量的演变过程可以看作是材料内部结构的一种不可逆、消耗能量的演变过程,参考文献[17]的分析思路(式(2)),对三种方案下卸荷过程

中的损伤变量进行统计,具体如图8所示。

$$D = \frac{U_d}{U} \quad (2)$$

式中, D 为损伤变量; U_d 为耗散能密度; U 为外力做功所产生的总能量密度。

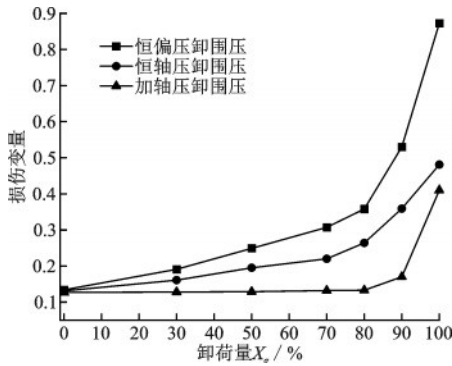


图8 不同卸荷应力路径下岩样的损伤变量

Fig.8 Visual damage variable of rock sample under different unloading stress paths

从图8可以看出,卸荷初始阶段,岩样的损伤变量较小,此时岩样内部裂隙发育缓慢,随着卸荷量的增大,损伤变量逐渐增大,且卸荷至临界卸荷量时,损伤变量开始急剧增加,同卸荷起点处相比,卸荷破坏时三种应力路径损伤变量分别增加了551.49%、267.18%、222.83%,总体上呈先缓后陡的非线性增大趋势,这与前文得出卸荷阶段岩样变形参数的劣化规律一致。比较而言,相同卸荷量情况下,恒偏压卸围压方案的损伤变量最大,加轴压卸围压方案的损伤变量最小。

分析其原因,恒偏压卸围压路径下,不同阶段岩样的耗散能占比较大,损伤发育呈逐步发育特征,裂隙发育充分,卸荷破坏时变形最大,扩容最明显,损伤发育程度最高;加轴压卸围压路径下,卸荷阶段的耗散能占比较少,岩样内部的裂纹发育的少,对应岩样卸荷破坏时的损伤变量最小,但试样内部积累的弹性应变能有突然释放的趋势,导致破坏时的损伤变量的突增趋势最为明显。这也能较好地说明前文得出的卸荷阶段变形参数演化规律。

4 不同应力路径下卸荷损伤演化过程模拟分析

4.1 模型与细观参数

采用PFC^{2D}建立了岩样的离散元分析模型,宽

度50 mm,高度100 mm,根据岩样矿物颗粒大小,设定颗粒半径在0.2~0.4 mm随机生成^[18],并通过半径扩大法调整模型内颗粒分布,具体如图9所示。利用伺服机制同时加载轴压和围压至预定围压20 MPa后,将轴压加载至132.80 MPa后停止;卸荷过程与加载过程不同,采用“应力/时步”方法控制围压的卸载^[19],并按照室内试验的3种应力路径进行卸荷试验直至试样破坏。反复调整细观力学参数,使得试样在20 MPa围压下的三轴卸荷应力—应变曲线与试验结果基本吻合为止,如图10所示,确定的细观参数见表3。

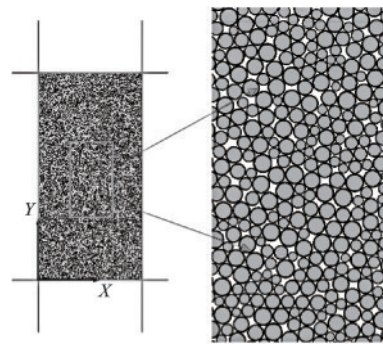


图9 三轴卸荷试验模型示意

Fig.9 Model diagram of triaxial unloading test

表3 PFC颗粒模型细观参数

Table 3 Microscopic parameters of the PFC model

参数类型	细观参数	数值
颗粒基本参数	颗粒密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 600.000
	最小颗粒半径/mm	0.200
	粒径比	2.000
	颗粒接触模量/GPa	10.000
	颗粒接触刚度比	1.500
平行黏结参数	颗粒-颗粒间摩擦因素	0.500
	平行黏结模量/GPa	45.000
	平行黏结半径乘子	1.000
	平行黏结刚度比	1.500
	平行黏结法向强度/MPa	45.000
	平行黏结切向强度/MPa	16.670

统计得到3种方案下的数值模拟与室内试验的应力—应变曲线如图10所示。对比发现不同应力路径下数值模拟试验的应力—应变曲线与室内试验结果基本吻合,两者变化规律基本一致,基于PFC^{2D}数值模拟能较好重现3种路径下灰岩完整的卸围压试验过程。

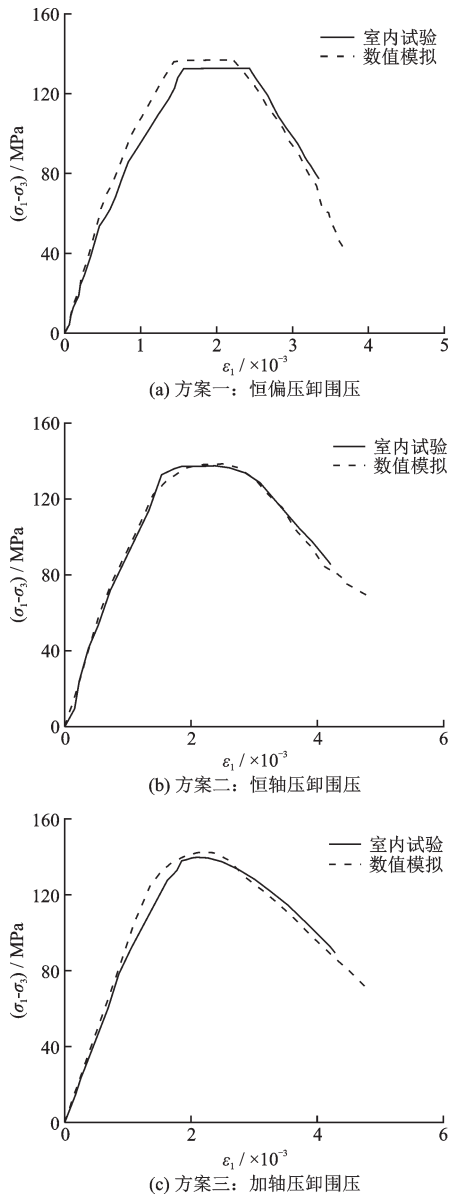


图10 三轴卸荷试验与PFC模拟结果对比

Fig.10 Comparison of triaxial unloading test and PFC simulation results

4.2 不同应力路径下卸荷损伤发育过程细观分析

岩样宏观破裂现象的本质是其内部细观损伤积累的表现,以往的研究表明^[20-25],卸荷量小于70%时,其岩样的卸荷损伤发育程度较低,对应生成的微观裂纹数量与卸荷起点相差不大,故依次截取三种卸荷应力路径下0%、70%、80%、90%、100%卸荷量时的岩样内部裂纹扩展图,如图11所示,并与室内试验灰岩卸荷破坏的照片进行对比。图中,浅白为剪切裂纹,深灰为张拉裂纹。

为更加直观对比三种卸荷应力路径下岩样内

部的裂纹变化,依据图11中的微观裂纹的扩展演化图,分别统计卸荷起点至相应卸荷量时岩样内部微观裂纹种类及数量,统计结果见表4。

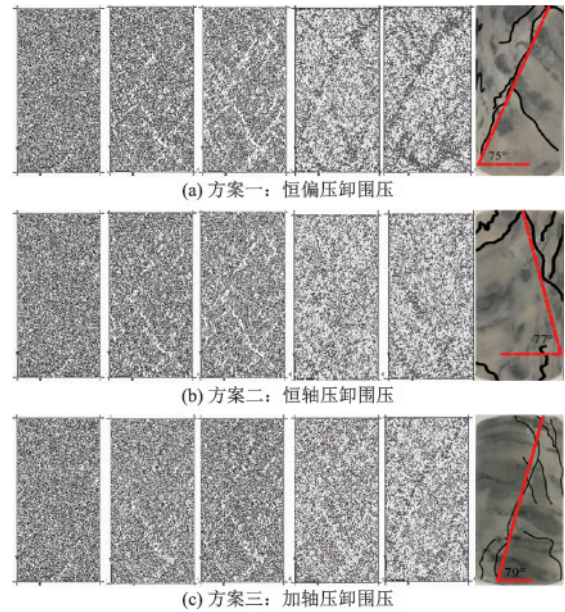


图11 三轴卸荷破坏岩样细观裂纹扩展演化图

Fig.11 Evolution diagram of micro-crack propagation of triaxial unloading failure rock sample

综合图11和表4,对比分析可以看出:

(1)恒偏压卸围压路径下,在卸荷起点处,岩样内部只有极少微观裂纹存在,且裂纹分布较为离散,此时内部裂纹以剪切裂纹为主,张拉裂纹占比不到2.00%;卸荷量逐渐增加至80%时,剪切裂纹与张拉裂纹数量逐渐增多,张拉裂纹占比也随之增加,表现为微观裂纹局部损伤集中现象;卸荷量达90%后,各裂纹数量显著增加,较80%卸荷量时增加了53.5%。在卸荷量达到90%后,岩样内部裂纹发育速率急剧增大,张拉裂纹与剪切裂纹分布更加集中,在岩样端部形成裂隙;最终卸荷破坏时,微观裂纹数量增长速率达到最大,微裂隙逐渐形成切割岩样的剪切贯通面,此时张拉裂纹占比为37.68%,且主要分布在剪切裂纹两侧附近。

(2)恒轴压卸围压路径下,卸荷初期阶段的裂纹发育程度与速度与恒偏压卸围压路径下相差不大;从卸荷量从0增加80%过程中,总裂纹数量增长了8倍左右,但整体裂纹数量小于恒偏压卸围压路径下,其中张拉裂纹数量占比5.90%;卸荷量增加至80%后,裂纹总数增长加快,但最终卸荷破坏时总体裂纹数量仅为恒偏压卸围压路径下的53.21%。

(3)加轴压卸围压路径下,卸荷阶段的裂纹演化

表 4 不同卸荷量时的微观裂纹统计

Table 4 Microscopic crack statistics at different unloading quantities

卸荷应力路径	卸荷量/%	微观裂纹数量/个			张拉裂纹占比/%
		剪切裂纹	张拉裂纹	总裂纹	
方案一:恒偏压卸围压	0	567	10	577	1.73
	70	7 483	425	7 908	5.37
	80	7 700	568	8 268	6.87
	90	9 123	3 568	12 691	28.11
	100	14 482	8 755	23 237	37.68
方案二:恒轴压卸围压	0	562	8	570	1.40
	70	4 882	227	5 109	4.43
	80	5 012	314	5 326	5.90
	90	7 809	1 268	9 077	13.97
	100	8 677	3 687	12 364	29.82
方案三:加轴压卸围压	0	566	9	575	1.57
	70	3 006	119	3 125	3.81
	80	3 219	149	3 368	4.42
	90	3 445	414	3 859	10.73
	100	7 699	1 946	9 645	20.18

规律与其它两种路径总体一致,但裂纹数量明显较少;卸荷量增大至 100% 时,裂纹较卸荷量 90% 增加了 149.93%,内部微观裂纹显著增加,但裂纹总数仅为恒偏压卸荷路径下的 41.51%。

(4)综合上述分析可知,恒偏压路径下整体裂纹数量最多,表明恒偏压路径下的卸荷损伤程度更高,同样破坏时张拉裂纹占比最大;而加轴压卸荷路径下,卸荷前期的裂纹发育最少,卸荷量增大至 90% 左右才开始加速发育,破坏时整体裂纹数量最小且破坏时裂纹数量突然陡增。说明在恒偏压卸围压过程中,由于卸荷过程持续较长,岩样内部的损伤充分发育,对应的裂纹数量明显较多,对应岩样的损伤变量明显较大;而在加轴压卸围压的过程,卸载较小的围压岩样即达到破坏,岩样内部的裂纹还没有充分发育,对应的裂纹数量少,损伤变量也比较小^[26-27]。

4.3 微观卸荷损伤变量分析

依据 PFC 内置的黏结断裂机制,在此引入破裂程度来表征岩样在卸载过程中的微观损伤程度。破裂程度与损伤变量在性质上是一样的,都表示岩样在实际卸载过程中的损伤程度,其定义如下^[28]:

$$\text{破裂程度} = \frac{\text{已断接触数目(微观裂纹数目)}}{\text{总接触数目}} \quad (3)$$

根据式(3),分别计算出三种方案下不同卸荷

量时的破裂程度,并将数值模拟计算得到的结果与室内试验中运用能量密度参数计算得到的损伤变量进行比较,具体见表 5。

从表 5 可以看出,三种方案下岩样的微观破裂程度与室内试验得到损伤变量表现出一致的变化规律,这也进一步说明,在不同卸荷应力路径下,岩样内部的微观损伤发育规律是不一致的,对应其宏观力学特性也存在明显的差别。

表 5 试验及数值模拟分析得到的岩样损伤变量

Table 5 Comparison of visual damage variable of rock sample under two test methods

卸荷应力路径	卸荷量/%	数值模拟计	能量参数计
		算破裂程度	算损伤变量
方案一:恒偏压卸围压	70	0.291	0.307
	80	0.304	0.358
	90	0.467	0.530
	100	0.855	0.873
方案二:恒轴压卸围压	70	0.188	0.220
	80	0.196	0.264
	90	0.334	0.359
	100	0.455	0.481
方案三:加轴压卸围压	70	0.115	0.132
	80	0.124	0.133
	90	0.142	0.170
	100	0.355	0.410

5 结论与讨论

(1)卸荷应力路径对灰岩宏观力学特性影响显著,恒偏压卸围压路径下的卸荷破坏强度最低,卸荷过程中变形模量与泊松比变化幅度最大,但变化趋势最缓;而加轴压卸围压路径下,其破坏强度最大,变形模量与泊松比变化幅度相对较小,在卸荷量达90%后,变形参数才发生显著突变现象。

(2)三种方案下,卸荷过程中的耗散能占比逐渐增加,弹性应变能占比逐渐减小,耗散能参数大小依次为恒偏压卸围压>恒轴压卸围压>加轴压卸围压,弹性应变能参数大小则为加轴压卸围压>恒轴压卸围压>恒偏压卸围压;说明外力所做的功在恒偏压卸围压方案下多转化为耗散能用于裂纹发育,而加轴压卸围压方案下多转化为弹性应变能储存于岩样内部。

(3)在卸荷阶段,随着卸荷量的增加,岩样耗散能速率呈先缓后陡的增长趋势,其中加轴压卸围压路径下,岩样卸荷持续时间最短,耗散能速率最大,临近卸荷破坏时,储存的弹性应变能快速释放,卸荷破坏更为突然。

(4)数值模拟分析结果表明,恒偏压卸围压方案下,卸荷过程中发育的裂纹总数量最多,张拉裂纹占比较大,卸荷破坏时卸荷损伤程度最高,对应的细观损伤变量最大,扩容更为显著;加轴压卸围压方案下,卸荷过程中发育的裂纹数量最少,卸荷破坏时的细观损伤变量最小。

(5)基于数值模拟得到的试样破裂程度与能量参数得到的损伤变量规律是一致的,说明了在不同应力路径卸荷过程中,岩样内部的不同细观损伤发育规律决定了其宏观力学特性差异。

参考文献:

- [1] 陈旦熹,戴冠一.三向应力状态下大理岩压缩变形试验研究[J].岩土力学,1982,10(1):27-44.
Chen D X, Dai G Y. Experimental study on compressive deformation of marble under triaxial stress states [J]. Rock and Soil Mechanics, 1982, 10(1): 27-44. (in Chinese)
- [2] 吴玉山,李纪鼎.大理岩卸载力学特性的研究[J].岩土力学,1984,14(1):29-36.
Wu Y S, Li J D. Unloading properties of marble [J].

Rock and Soil Mechanics, 1984, 14(1): 29-36. (in Chinese)

- [3] 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,1998,18(1):24-29.
You M Q, Hua A Z. Triaxial confining depressure test of rock sample [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 18(1): 24-29. (in Chinese)
- [4] 韩铁林,陈蕴生,宋勇军,等.不同应力路径下砂岩力学特性的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(增2):3959-3966.
Han T L, Chen Y S, Song Y J, et al. Experimental study of mechanical characteristics of sandstone under different loading paths [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Sup2): 3959-3966. (in Chinese)
- [5] 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 H Y, Li G C, Zhao G M, 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)
- [6] 邱士利,冯夏庭,张传庆,等.不同初始损伤和卸荷路径下深埋大理岩卸荷力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(8):1686-1697.
Qiu S L, Feng X T, Zhang C Q, et al. Experimental research on mechanical properties of deep marble under different initial damage levels and unloading paths [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1686-1697. (in Chinese)
- [7] 赵国彦,杨晨,郭阳,等.不同应力路径下花岗岩变形参数劣化试验研究[J].世界科技研究与发展,2015,37(4):355-358,373.
Zhao G Y, Yang C, Guo Y, et al. Experimental study on deformation parameters degradation of rock under different unloading paths [J]. World SCI-TECH R&D, 2015, 37(4): 355-358, 373. (in Chinese)
- [8] 孙雪,李二兵,韩阳,等.卸荷路径下花岗岩变形与破坏特征试验研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(3):665-679.
Sun X, Li E B, Han Y, et al. Experimental study on the deformation and failure characteristics of granite under unloading paths [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(3): 665-679. (in Chinese)
- [9] 丛宇,王在泉,郑颖人,等.不同卸荷路径下大理岩破坏过程能量演化规律[J].中南大学学报(自然科学

- 版), 2016, 47(9): 3140-3147.
- Cong Y, Wang Z Q, Zheng Y R, et al. Energy evolution principle of fracture propagation of marble with different unloading stress paths [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(9): 3140-3147. (in Chinese)
- [10] 张楚旋, 戴兵, 吴秋红. 不同应力路径下岩石卸荷破坏过程的变形特性与能量耗散分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(10): 35-40.
- Zhang C X, Dai B, Wu Q H. Analysis on deformation properties and energy dissipation of rock unloading failure process under different stress path [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 10(10): 35-40. (in Chinese)
- [11] 戴兵, 赵国彦, 杨晨, 等. 不同应力路径下岩石峰前卸荷破坏能量特征分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(2): 367-374.
- Dai B, Zhao G Y, Yang C, et al. Energy evolution law of rocks in process of unloading failure under different paths [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(2): 367-374. (in Chinese)
- [12] Zhao G Y, Dai B, Dong L J, et al. Energy conversion of rocks in process of unloading confining pressure under different unloading paths [J]. Transactions of Non-ferrous Metals Society of China, 2015, 25(5): 1626-1632.
- [13] 赵国彦, 戴兵, 董陇军, 等. 不同应力路径下岩石三轴卸荷力学特性与强度准则研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3121-3127.
- Zhao G Y, Dai B, Dong L J, et al. Experimental research on mechanical characteristics and strength criterion of rock triaxial unloading tests under different stress paths [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(11): 3121-3127. (in Chinese)
- [14] 赵二平, 贾小兵, 龚章龙, 等. 不同卸荷损伤程度砂岩吸水特性试验研究[J]. 人民长江, 2019, 50(6): 188-191, 224.
- Zhao E P, Jia X B, Gong Z L, et al. Experimental research on absorption characteristic of sandstone under different unloading damaged degree [J]. Yangtze River, 2019, 50(6): 188-191, 224. (in Chinese)
- [15] 朱子涵, 蔚立元, 李景龙, 等. 峰前卸荷大理岩变形演化规律及破坏耗能特征[J]. 煤炭学报, 2020, 45(增1): 181-190.
- Zhu Z H, Yu L Y, Li J L, et al. Deformation evolution and dissipated energy characteristics of marble under pre-peak unloading conditions [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(Sup1): 181-190. (in Chinese)
- [16] 郑晓娟, 王云飞, 隋智力. 加卸载应力路径对砂岩能量演化机制的影响[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(9): 2937-2943.
- Zheng X J, Wang Y F, Sui Z L. Influence of loading and unloading stress paths on energy evolution mechanism sandstone [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(9): 2937-2943. (in Chinese)
- [17] 温韬, 唐辉明, 刘佑荣. 不同围压下板岩三轴压缩过程能量及损伤分析[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(3): 80-86.
- Wen T, Tang H M, Liu Y R. Energy and damage analysis of slate during triaxial compression under different confining pressures [J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(3): 80-86. (in Chinese)
- [18] 何树江. 基于颗粒流的灰岩细观力学参数标定方法及其敏感性分析[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- He S J. Calibration method and sensitivity analysis of micromechanic parameters for limestone based on particle flow [D]. Ji'nan: Shandong University, 2018. (in Chinese)
- [19] 丛怡, 丛宇, 张黎明, 等. 大理岩加、卸荷破坏过程的三维颗粒流模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 1179-1186.
- Cong Y, Cong Y, Zhang L M, et al. 3D particle flow simulation of loading-unloading failure process of marble [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(3): 1179-1186. (in Chinese)
- [20] 李建林, 黄天柱, 张恒宾, 等. 卸荷岩体力学试验研究进展与展望[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2022, 44(1): 1-13.
- Li J L, Huang T Z, Zhang H B, et al. Research review and prospect in experimental studies for unloading rock mass mechanics [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2022, 44(1): 1-13. (in Chinese)
- [21] 丛怡, 贾乐鑫, 丛宇, 等. 不同应力路径下岩石破坏面细观形貌研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(6): 938-946, 953.
- Cong Y, Jia L X, Cong Y, et al. Experimental study on meso-topography of rock surface under various stress path [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(6): 938-946, 953. (in Chinese)
- [22] 丛怡, 王在泉, 张黎明, 等. 基于颗粒离散元法描述岩石断面形貌的方法研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(1): 43-50.
- Cong Y, Wang Z Q, Zhang L M, et al. Study on a

- method of describing the rock fracture surface based on PFC^{3D} [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(1): 43-50. (in Chinese)
- [23] 王乐华, 牛草原, 张冰祎, 等. 不同应力路径下深埋软岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(5): 947-981.
Wang L H, Niu C Y, Zhang B Y, et al. Experimental study on mechanical properties of deep-buried soft rock under different stress paths [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(5): 947-981. (in Chinese)
- [24] 王瑞红, 蒋昱州, 李建林, 等. 卸荷损伤对节理岩体变形特性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增2): 3747-3755.
Wang R H, Jiang Y Z, Li J L, et al. Effect of unloading damage on deformation characteristics of jointed rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Sup2): 3747-3755. (in Chinese)
- [25] 徐光彬, 金李. 不同卸荷路径下节理岩体的松动机理研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2007, 26(1): 81-84.
Xu G B, Jin L. Study on the mechanism of jointed rock masses loosening in different unloading ways [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2007, 26(1): 81-84. (in Chinese)
- [26] Dai B, Guo Y Z, Konietzky H, et al. Experimental investigation on damage evolution behaviour of a granitic rock under loading and unloading [J]. Journal of Central South University, 2018, 25(5): 1213-1225.
- [27] Qiu S L, Feng X T, Xiao J Q, et al. An experimental study on the pre-peak-unloading damage evolution of marble [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(2): 401-409.
- [28] 李夕兵, 陈正红, 曹文卓, 等. 不同卸荷速率下大理岩破裂时效特性与机理研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9): 1565-1574.
Li X B, Chen Z H, Cao W Z, et al. Time-effect properties and mechanisms of marble failure under different unloading rates [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(9): 1565-1574. (in Chinese)

(本文编辑:池营营)