

不同应力路径下北山花岗岩临界状态前变形特性与扩容行为试验研究

韩 阳^{1,2,3}, 陈 亮⁴, 周 政^{1,2}, 濮仕坤^{1,2}, 张登科^{1,2}, 白志霄^{1,2}, 郭力玮^{2,5}, 李二兵^{1,2}

(1. 陆军工程大学 爆炸冲击防灾减灾全国重点实验室, 江苏 南京 210007; 2. 陆军工程大学 国防工程学院, 江苏 南京 210007; 3. 南京城市建设管理集团有限公司, 江苏 南京 210006; 4. 核工业北京地质研究院, 北京 100029; 5. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 准确掌握高放废物地质处置库近场围岩微损伤的力学规律与机制对于实现处置圈闭功能具有重要意义。鉴于岩石的力学行为和响应特征与应力路径有关, 以中国高放废物地质处置预选区北山花岗岩为研究对象, 开展增轴压恒围压、增轴压卸围压以及卸轴压卸围压 3 种典型应力路径的力学试验, 系统研究应力路径与初始围压对高应力水平下硬脆性岩石在临界状态前变形特性及扩容行为的影响。首先, 以应力脆性跌落为临界状态, 针对可控且可比的应力路径分岔阶段, 提出基于偏应力比统一量化比较宏观变形参数演化过程与特征。发现在高应力水平卸围压时, 轴压卸载相比于加载反而加剧了侧向变形与体积扩容; 不同路径间割线泊松比曲线分散集聚, 演化特征差异显著, 但围压效应均不明显; 体积应变增量与径向应变增量间均符合二次函数关系, 但不同路径曲线梯度与曲率差异较大。其次, 采用塑性理论描述岩石的非线性变形特征, 并定义塑性应变柔量和径向轴向塑性应变增量比(比例系数)等变量。结果表明围压越大则对侧向变形及体积扩容的抑制作用越显著, 塑性变形承受能力越强, 而相比于轴压加载, 其卸载延缓了破坏, 使得塑性变形发展更充分; 初始围压虽然对岩石变形破坏具有抑制作用, 但对塑性应变敏感性与发展起到更大的促进作用, 且对于轴向影响更大。最后, 发现各应力路径下体积塑性应变增量与轴向应变增量间均符合指数分布关系, 据此构建临界点前表观膨胀角、剪胀角统一理论关系式, 并通过扩容指标考察初始围压影响性。结果显示增轴压恒围压表观膨胀角与剪胀角均最小, 扩容指标降低的围压效应最为明显; 增轴压卸围压剪胀角增长梯度最大, 剪胀扩容趋势最为突出; 而卸轴压卸围压表观膨胀角与剪胀角最大, 扩容指标受初始围压影响最小, 扩容性质最为显著。研究结果揭示了高应力水平下北山花岗岩在临界点前变形演化与扩容特性的应力路径相关性, 表明高放废物地质处置工程实践与理论研究中需密切关注多向卸荷区域围岩扩容微损伤的发展。

关键词: 岩石力学; 北山花岗岩; 应力路径; 塑性变形; 扩容; 剪胀角

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2025)10-2696-19

Pre-critical deformation properties and dilatancy behaviors of Beishan granite under different stress paths

HAN Yang^{1,2,3}, CHEN Liang⁴, ZHOU Zheng^{1,2}, PU Shikun^{1,2}, ZHANG Dengke^{1,2}, BAI Zhixiao^{1,2},
GUO Liwei^{2,5}, LI Erbing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing, Jiangsu 210007, China; 2. College of Defense Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing, Jiangsu 210007,

收稿日期: 2025-04-17; **修回日期:** 2025-06-27

基金项目: 国家原子能机构核设施退役和放射性废物治理项目(科工二司[2020]194号); 国家自然科学基金资助项目(52278420)

Supported by the China Atomic Energy Authority (CAEA) through the Geological Disposal Program and National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52278420)

作者简介: 韩 阳(1991-), 男, 2013年毕业于东南大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩石力学与地下工程方面的研究工作。E-mail: hanyang_ge@126.com。通讯作者: 李二兵(1979-), 男, 博士, 现任教授, 博士生导师。E-mail: lebingest@126.com

DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2025.0254

China; 3. Nanjing Urban Construction Management Group Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210006, China; 4. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 5. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China)

Abstract: Accurately understanding the mechanical laws and mechanisms of micro-damage to the near-field surrounding rock in high-level radioactive waste geological disposal repository is of great significance for achieving the disposal encirclement function. Given that the mechanical behavior and response characteristics of rocks are related to stress paths, the mechanical tests were conducted on three typical stress paths, including loading axial pressure-fixing confining pressure, loading axial pressure-unloading confining pressure, and unloading axial pressure-unloading confining pressure. The Beishan granite in the pre-selected area for high-level radioactive waste geological disposal in China was taken as the research object, and the effects of stress path and initial confining pressure on the pre-critical deformation properties and dilatancy behavior of which under high stress levels were systematically studied. Firstly, taking the brittle stress-drop as the critical state, for the controllable and comparable stress path bifurcation stage, a unified quantitative comparison of macro deformation parameter evolution process and characteristics based on deviatoric stress ratio is proposed. It is found that when unloading confining pressure at high stress levels, axial pressure unloading actually exacerbates lateral deformation and dilatancy compared to loading; The secant Poisson's ratio curves of secants between different paths are dispersed and clustered, with significant differences in evolutionary characteristics, but the confining pressure effect is not obvious; The relationship between the volumetric and radial strain increment follows a quadratic function, but there are significant differences in gradient and curvature of curves under different paths. Secondly, the plastic theory is used to describe the nonlinear deformation characteristics of rocks, and variables such as plastic strain compliance and radial axial plastic strain increment ratio (proportional coefficient) are defined. The results show that the greater the confining pressure, the more significant the inhibitory effect on lateral deformation and dilatancy, and the stronger the ability to withstand plastic deformation. Compared with axial compression loading, unloading delays the failure, making the development of plastic deformation more complete; Although initial confining pressure has a suppressive effect on rock deformation and failure, it has a greater promoting effect on plastic strain sensitivity and development, and has a greater impact on axial deformation. Finally, it is found that the relationship between the volumetric and axial plastic strain increment under each stress path follow an exponential distribution relationship. Based on this, a unified theoretical relationship between the apparent dilatancy angle and dilation angle before the critical point was constructed, and the influence of initial confining pressure was examined through the dilatancy index. The results show that the apparent dilatancy angle and the dilation angle of loading axial pressure-fixing confining pressure are the smallest, and the confining pressure effect of the dilatancy index is the most obvious; The increase gradient of dilation angle of loading axial pressure-unloading confining pressure is the largest, and the dilatancy trend is the most prominent; The apparent dilatancy angle and dilatation angle of unloading axial-unloading confining pressure are the largest, the dilatancy index is least affected by the initial confining pressure, and the dilatancy property is the most significant. The research results reveal the correlation between the pre-critical deformation evolution and dilatancy properties of Beishan granite under high stress level with stress path, indicating that the development of surrounding rock dilatancy micro-damage in multi-directional unloading area need be paid close attention to in the engineering practice and theoretical research of high-level radioactive waste geological disposal.

Key words: rock mechanics; Beishan granite; stress paths; plastic deformation; dilatancy; dilation angle

1 引言

核能利用是实现“双碳”目标的重要途径,而如何安全处置高放射性废物则是关乎核能可持续发

展的重要课题。目前,深地质处置是国际上被广泛接受的可行而安全的方法^[1],且我国正在甘肃北山预选区的硬脆性花岗岩地层中建设高放废物地质处置地下实验室^[2-3]。而高放废物地质处置地下实验室与处置库,在施工过程中除涉及常见的岩爆、剥落、

坍塌、失稳等地质灾害^[4-5]外,开挖引起的处置围岩扰动与损伤可能会形成核素迁移的潜在通道,进而造成地质屏障隔离失效的灾难性后果^[6-7]。因此,深入研究北山花岗岩的力学行为与响应具有重要意义。

工程岩体开挖施工本质上是卸荷行为^[8],而其与加载条件下的力学特性存在较大差异^[9-11]。然而,不同工况下的卸荷过程有明显区别^[12],且对岩石力学性质及开挖稳定性有显著影响^[13-14]。因此,众多学者针对不同应力路径与加载方式对岩石力学性质的影响开展了试验研究。李地元等^[15-16]针对花岗岩进行了不同应力路径的加卸载试验,分析了其强度、变形以及破坏特征,发现三轴破坏是由岩石微拉伸裂纹和体积膨胀的发展造成的;Z. T. Zhang 等^[17]基于不同开采布局下的实际采动应力演化过程,研究了煤体的力学与渗流特性;王乐华等^[18]对石英云母片岩在不同围压、卸荷速率以及应力水平下的力学特性进行了试验研究,结果表明强度与变形参数均与卸荷条件密切相关;段淑倩等^[19]开展了不同围压和加卸荷应力路径下的三轴试验,研究了错动带塑性变形规律与硬化特征,发现塑形内变量均存在一定的应力路径相关性;苗胜军等^[20-25]从能量角度分别比较描述了辉绿岩、砂岩、花岗岩、大理岩等硬脆性岩石在不同应力路径下的变形破坏过程,分析了能量演化与转化的路径依赖性。上述成果丰富了对硬脆性岩石应力路径效应的总体认识,但关于不同路径间力学响应演化过程的定量对比研究较少,大多是对破坏点或峰值点的参量值进行比较,而演化比较往往是基于卸载围压进行考察,未考虑其他主应力同时变化的影响。

扩容是岩石中普遍存在且重要的现象与特征^[26-28],其与损伤累积及重大破坏现象密切相关^[29]。部分研究者针对卸荷条件下硬脆性岩石的扩容特性开展了试验与理论研究。程建超等^[30]基于三轴循环加卸载试验,建立了能够描述砂岩非线性体积扩容的逾渗模型;赵星光等^[31-32]探讨了岩石扩容对塑性剪切应变和围压的依赖性,并构建了峰后剪胀角模型;陈学章等^[33]研究了三轴卸荷条件下大理岩扩容特性与能量特征间关系;刘新荣等^[34]讨论了初始卸荷水平对砂岩扩容的影响;尹光志等^[35]通过真三轴卸荷试验,探讨了中间主应力对砂岩扩容特性的影响。上述研究对硬脆性岩石的卸荷扩容行为做了有益探索,但对于剪胀效应研究大多关注于峰后,而涉及无峰值路径且聚焦于峰前扩容演化规律的细化研究鲜见报道。另外,应力路径对于硬脆性岩石扩容性

质的影响性,不同研究者间尚存在一定争议,如赵国彦等^[36]通过不同应力路径下的三轴试验,研究发现花岗岩扩容程度与卸载路径有关,而 G. Walton 和 S. Gaines^[37]则认为卸载和加载情况下的明显剪胀差异可能是由试验控制模式引起的,并非应力路径效应。

考虑到高放废物地质处置的功能要求与围岩微损伤的重要影响,以及前述不同应力路径量化比较与硬岩扩容性质研究现状的不足。本文以北山花岗岩为研究对象,开展了3种典型应力路径的力学试验,定量分析了临界状态前岩石宏观变形与塑性扩容演化规律,揭示了北山花岗岩剪胀扩容特性的应力路径与初始围压相关性,为硬脆性岩石在复杂路径下非线性力学行为与扩容损伤破坏机制研究奠定基础,也为高放废物地质处置的工程实践提供理论参考。

2 不同应力路径试验方案

2.1 试验条件

本文基于高放废物地质处置的工程背景,聚焦于脆硬性岩石力学行为的规律性研究,试验岩样取自位于甘肃北山预选区旧井地段浅地层中。在距离地面约 50 m 的北山坑探设施^[38]内水平钻孔取样,挑选完整且表观一致的岩心,按照试验规范^[39-40]的制备要求,加工成 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的标准圆柱试件,如图 1 所示。通过岩石薄片鉴定与 X 射线衍射分析,岩石的主要矿物包括斜长石 Pl(38.6%)、钾长石 Pf(30.1%)、石英 Qz(25.3%)、黑云母 Bi(2.5%)、白云母 Mu(3.5%)等,呈细粒花岗结构,块状构造,为细粒二长花岗岩。

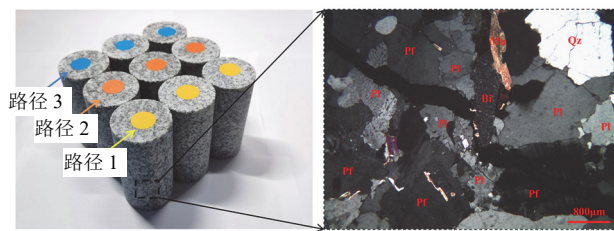


图 1 甘肃北山预选区旧井地段岩样

Fig.1 Rock samples from the old well section in the Beishan Preselected Area, Gansu Province

本文试验在四川大学 MTS815 Flex Test GT 岩石力学试验系统上完成,如图 2 所示。该系统可提供最大 4 600 kN 轴向载荷与 140 MPa 围压,并可通过荷载、轴向位移、环向位移等变化速率方式控制

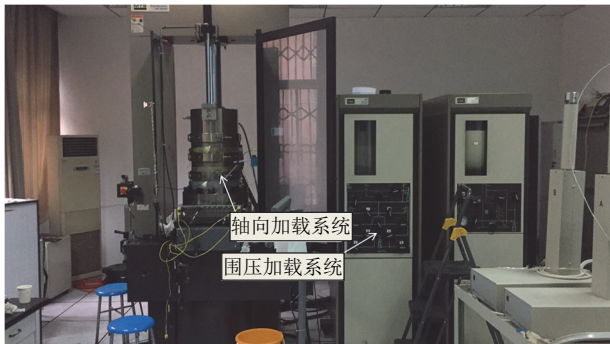


图 2 MTS815 Flex Test GT 岩石力学试验系统
Fig.2 Rock mechanics testing system of MTS815 Flex Test GT

加卸载进程^[41]。分别选用量程为-2.5~5.0 mm 与 -2.5~8.0 mm 的轴向、环向引伸计测量相应方向变形，两者均置于试件中部，轴向引伸计标距为 50 mm。

2.2 试验设计

李建贺等^[42-44]的研究结果表明，地下工程开挖施工会造成围岩应力状态经历复杂的变化过程，并根据开挖方式、开挖位置以及空间结构等工况条件的不同而差异明显^[12]。而我国高放废物地质处置北山地下实验正是由螺旋坡道、竖井以及多水平巷道构成的复杂空间结构，如图 3^[1]所示。

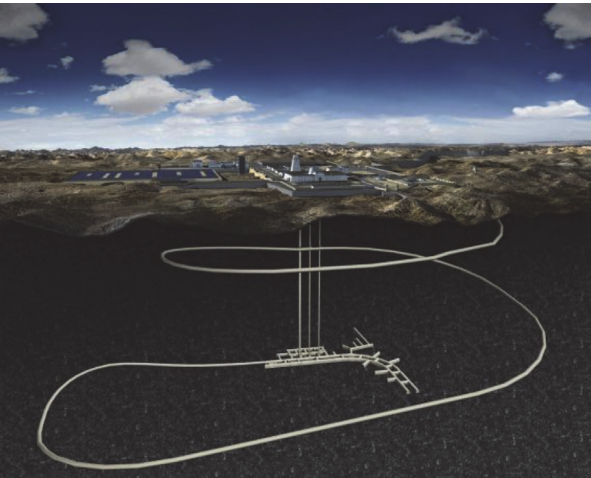


图 3 北山地下实验室空间结构示意图^[1]
Fig.3 Schematic diagram of the spatial structure of Beishan underground research laboratory^[1]

因此，本文为量化比较研究不同应力路径对北山花岗岩力学行为的影响，模拟实际应力路径的关键演化过程，采用 3 种典型的试验路径，并设计路径分岔点，将其划分为共同路径与分岔路径，如图 4 所示。其中，路径 1(增轴压恒围压)为常规三轴压缩试验，其为确定分岔点应力水平提供依据，并可获得加载路径下的力学响应规律以与其他应力路径作对比；路径 2(增轴压卸围压)为模拟常规隧洞(非分

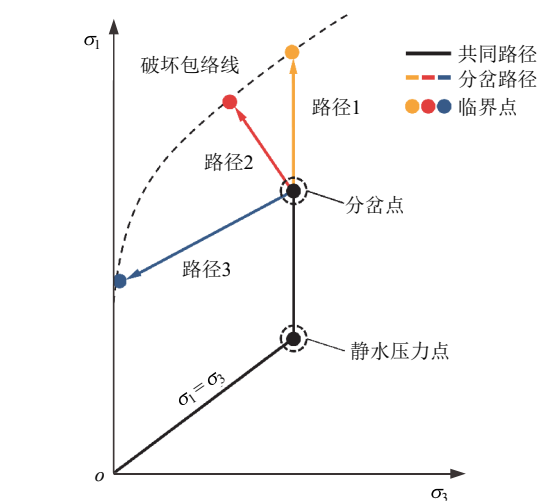


图 4 3 种典型试验路径示意图
Fig.4 Schematic diagram of three typical experimental paths

岔)开挖所引起的洞周围岩最大主应力升高而最小主应力降低的应力变化过程；而路径 3(卸轴压卸围压)则接近于地下洞室高边墙、分岔隧洞、巷道底板阵列分布处置坑等部位开挖时的多向卸荷情形。

弹性阶段时应力路径的差异对岩石力学行为并无明显影响，而在塑性状态下其影响性方才显现^[45]。为此，将路径分岔点轴向应力水平设为常规三轴压缩(路径 1)峰值偏应力的 80%。根据王传乐等^[46]已有试验结果，此时轴向应力略微超过裂纹损伤应力，处于裂纹非稳定扩展阶段，岩石开始出现损伤。故而本文是针对高应力水平下损伤岩石开展应力路径影响性研究。此外，根据我国高放废物地质处置地下实验室及处置库的设计深度与区域实测地应力条件^[47-48]，分岔点初始围压分别取 15，25，35 MPa。各试验岩样及其路径分岔点的初始应力条件如表 1 所示。

表 1 试验岩样路径分岔点初始应力条件

Table 1 Initial stress conditions for path bifurcation points of rock samples

试验路径	试件编号	初始围压 σ_{30} /MPa	初始偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_0$ /MPa
路径 1	1 - 1	15	280
	1 - 2	25	330
	1 - 3	35	380
路径 2	2 - 1	15	280
	2 - 2	25	330
	2 - 3	35	380
路径 3	3 - 1	15	280
	3 - 2	25	330
	3 - 3	35	380

共同路径阶段, 各试验的加载控制过程相同。

首先以 3 MPa/min 速率施加 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ 至初始围压设计值, 而后保持围压恒定, 以 30 kN/min 速率增加轴压至设计应力水平, 进而达到路径分岔点的初始应力状态。

分岔路径阶段, 各试验的加载控制过程不同, 分别为:

(1) 路径 1 从分岔点起, 继续保持围压不变, 轴压加载转换为环向位移控制方式, 速率为 0.08 mm/min, 直至破坏, 以获取全应力 - 应变曲线。

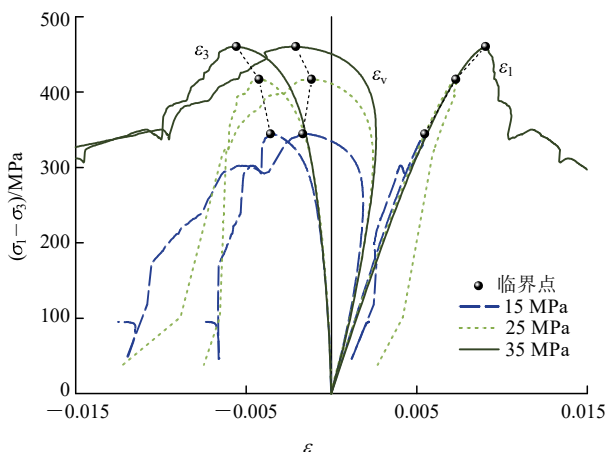
(2) 路径 2 从分岔点起, 以 2 MPa/min 速率卸载围压, 同时加载轴压, 并转换为环向位移控制方式, 速率为 0.04 mm/min, 试件破坏后立即停止卸荷, 保持围压不变, 继续施加轴压直至其不随轴向应变变化而降低时停止试验。

(3) 路径 3 从分岔点起, 保持轴压不变, 以 2 MPa/min 速率卸载围压, 试件破坏后立即停止卸荷, 保持围压不变, 转换为 LVDT 轴向位移控制方式, 以 0.01 mm/min 速率施加轴压, 直至其不随轴向应变变化而降低时停止试验。

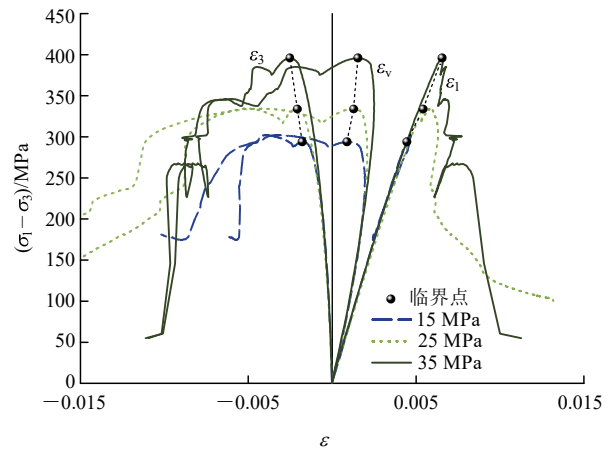
3 不同应力路径试验结果

3.1 偏应力 - 应变全过程曲线

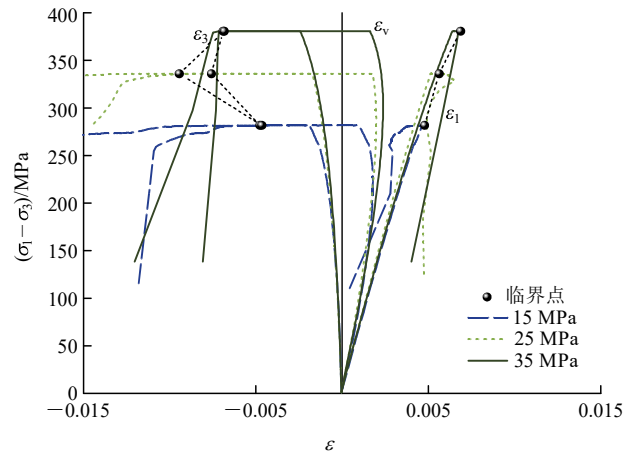
图 5 为不同应力路径的偏应力 - 应变全过程曲线, 其中 ε_1 , ε_3 和 ε_v 分别为轴向、径向以及体积应变, 且 $\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3$ 。应变均以压缩为正, 拉伸为负, 轴向应变以压缩方向为增大, 径向与体积应变以膨胀扩容方向为增大。同时, 为统一量化比较不同应力路径下岩石的力学特性, 根据试验路径应力变化与北山花岗岩脆性破坏的特点, 借鉴朱泽奇等^[49]的研究, 将偏应力脆性跌落前的状态视为临界状态。



(a) 路径 1



(b) 路径 2



(c) 路径 3

图 5 不同应力路径下偏应力 - 应变全过程曲线

Fig.5 Full process curves of deviatoric stress-strain under different stress paths

路径 1 以偏应力峰值点为临界点, 路径 2 以卸荷停止点为临界点, 路径 3 以偏应力跌落前的状态点作为临界点。

不同应力路径下的轴向应变曲线总体呈弹脆性或弹脆塑性特征。分岔点前, 均表现为显著的线弹性关系, 裂纹压密、扩展等阶段的非线性特征不明显。分岔点至临界点间, 路径 1 在初始围压较高时呈现出一定屈服趋势, 路径 2 则快速抵达峰值, 无屈服特征, 路径 3 在卸荷后即进入屈服平台。因而在临界点前, 岩石表观塑性屈服特征: 路径 3 > 路径 1 > 路径 2。值得一提的是, 北山花岗岩在压缩应力状态下峰值应力阶段具有明显的非线性塑性变形特征, 这与陈亮等^[50]已有研究结果一致, 是与其他工程常见花岗岩显著不同的特性。

在临界点后破坏阶段, 各路径均出现明显应力跌落现象, 表现出脆性破坏特征, 且初始围压越小越显著。其中, 路径 1 随初始围压增大, 脆性跌落

曲线由 II 型向 I 型转变, 高围压条件下(35 MPa)出现软化阶段; 路径 2 各初始围压下总体均表现为 II 型曲线跌落, 并在较高围压条件下(25 MPa)进入软化阶段; 路径 3 各初始围压下曲线均经 II 型跌落后直接脆断, 回弹强烈, 无软化阶段。各应力路径的峰后回弹变形在低初始围压下均十分强烈, 而随着围压增大, 均不同程度地呈现减弱趋势, 路径 3 的回弹减弱程度最小, 路径 1 最大, 因而峰后破裂回弹变形特征: 路径 3 > 路径 2 > 路径 1, 同时, 相应的应变软化趋势依次增强, 表现为: 路径 1 > 路径 2 > 路径 3。综合比较, 路径 3 峰后脆性破坏特征最为强烈, 脆性弱化的围压效应最不显著, 而路径 1 脆性程度随围压增大而降低表现得最为明显, 因此岩石的峰后脆性特征: 路径 3 > 路径 2 > 路径 1。

在分岔点后, 各应力路径下岩样体积均呈现出不同程度的扩容趋势。临界点前径向应变与体积应变曲线变化特征为: 路径 1 平滑加速增大, 路径 2 非线性加速转折增长, 路径 3 沿水平急速增大, 因而相对于偏应力, 临界点前加速扩容趋势及速率: 路径 3 > 路径 2 > 路径 1。各应力路径临界点后的径向应变与体积应变均随偏应力的降低而快速增大, 试件最终在强烈的侧向变形与体积扩容下完全破坏。

3.2 路径分岔阶段应变演化特征

为定量比较分析分岔点至临界点间(应力路径分岔阶段)岩石的力学响应参数, 并综合考虑不同路径下轴压与围压同步变化的影响, 引入参量偏应力比 $\eta = (\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_3$ 。其与偏应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ 成正比, 与围压 σ_3 成反比, 因而在本文中不同应力路径下, η 均逐步增大。

图 6 分别给出了各应力路径在分岔阶段的应变增量与偏应力比间关系曲线。可见, 同一应力路径的不同初始围压下各曲线形态高度一致, 轴向应变整体随偏应力比的增大呈压缩方向递增趋势, 径向与体积应变均随偏应力比的增大而向膨胀扩容方向递增。同时, 不同应力路径下各应变曲线均表现出随初始围压增大而向两侧张开的趋势, 即应变整体增长梯度均随初始围压增大而增大。

然而, 不同应力路径间的曲线差异明显。路径 1 的各应变增量均呈加速增大的趋势; 路径 2 的轴向应变增长缓慢, 呈减速增大趋势, 且在卸荷停止前产生回弹变形, 而径向应变与体积应变与偏应力比间近似呈线性增长关系; 路径 3 轴向应变增长缓慢, 径向应变与体积应变在初始阶段均随偏应力比

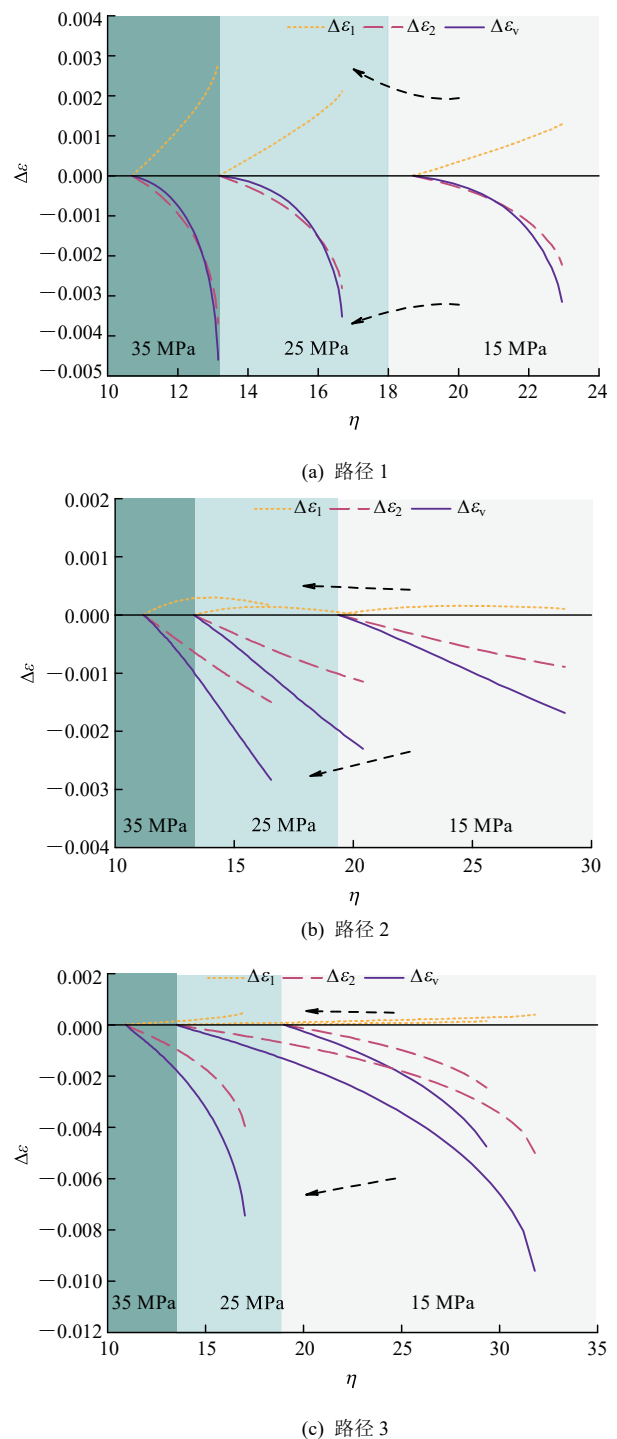


图 6 不同应力路径下应变增量与偏应力比关系曲线
Fig.6 Relationship curves between strain increment and deviatoric stress ratio under different stress paths

增大而近似线性增加, 而后逐渐加速增长。

对比可知, 路径 1 轴向应变的梯度与增量均与其径向、体积应变相仿, 而路径 2 和 3 的轴向应变梯度与增量均远小于径向应变与体积应变, 且相比之下, 路径 3 的应变间差异更大, 径向应变加速变化趋势更为明显, 体积膨胀更为剧烈。因此, 在高应力水平卸围压时, 轴压卸载相比于加载反而加剧

了侧向变形与体积扩容。

根据表 2 所示不同应力路径下临界点应力-应变与路径分岔阶段的应变增量,并结合图 4 和 5 可知,两者均不同程度地受到初始围压影响。其中,不同路径下临界点的应力、轴向与径向应变有随初始围压增大而增大的趋势,而临界点体积应变的围压效应则在不同路径下表现出一定差异,路径 1 和 3 表现为与初始围压正相关,路径 2 则与之相反;不同路径下各应变增量也随初始围压增大而趋于增大,但呈现出的围压影响性不同,路径 1 各应变增量的围压效应均较为明显,路径 2 径向与体积应变增量的围压效应远大于轴向应变增量,路径 3 各应变增量随初始围压的增大先增大而后趋于稳定。

进一步比较相同初始围压下不同应力路径的临界点应力-应变与应变增量。其中,路径 1 临界点轴向应变最大,且其增量值远大于路径 2 和路径 3,说明相比于轴压,围压的变化对轴向应变的发展影响更大,围压的降低减弱了岩样的轴向变形能力,强化了脆性特征。路径 2 的临界点各应变及其增量值均最小,且临界轴向应力与围压均为:路径 1>路径 2>路径 3,表明在路径 2 的增轴压卸围压条件下,岩石更易破坏,较小的围压卸荷量便会引起破裂,变形来不及发展,从而各应变增量最小。而路径 3 临界点径向与体积应变以及两者的增量值均最大,侧向膨胀与体积扩容最为显著。同时在高初始围压条件下(35 MPa),其围压卸荷量趋于减小,说明对于多向卸荷的岩石在高应力条件下具有强卸荷敏感性,工程上需引起注意。

4 应变间关系分析

4.1 径向应变与轴向应变关系

图 7 为不同应力路径下临界点前径向应变与轴向应变关系曲线。比较发现,临界点前各路径下径向应变均逐步呈现加速增长特征,相同路径的不同初始围压下,曲线形态具有较好的一致性。而随初始围压的增大,曲线均偏向于横轴且临界点轴向与径向应变均有逐渐增大的趋势,表明各路径下初始围压的增大在不同程度上均对岩石侧向变形产生约束作用,延缓了破裂过程,增强了变形与承载能力。

在同一初始围压的不同路径下,曲线在分岔点前基本一致,在分岔点后差异明显。其中路径 1 曲线整体光滑无转折,径向应变随轴向应变的增大而平稳增大,而路径 2 和 3 则均在分岔点处发生偏转,继而呈现出侧向加速变形特征。路径分岔阶段曲线的平均梯度,即径向应变增量与轴向应变增量比值如表 3 所示,依次为:路径 3>路径 2>路径 1,且均随初始围压增大而趋于减小。

为进一步研究径向应变与轴向应变间关系,通过相同应力差作用下两者之比计算割线泊松比 μ_s [51-52]:

$$\mu_s = -\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} \quad (1)$$

而为使得应力路径分岔阶段的参量能够在同一基础上作比较,对节 3.2 提出的偏应力比进行归一化处理,即

$$\tilde{\eta} = \frac{\Delta\eta}{\Delta\eta_f} \quad (2)$$

式中: $\tilde{\eta}$ 为归一化偏应力比, $\Delta\eta$ 为某一状态至分岔

表 2 临界点应力应变与应变增量
Table 2 Critical point stress strain and strain increment

试验	试件	临界点应力		临界点应变			路径分岔阶段应变增量		
路径	编号	σ_{1f}/MPa	σ_{3f}/MPa	$\varepsilon_{1f}/10^{-2}$	$\varepsilon_{3f}/10^{-2}$	$\varepsilon_{vf}/10^{-2}$	$\Delta\varepsilon_{1f}/10^{-2}$	$\Delta\varepsilon_{3f}/10^{-2}$	$\Delta\varepsilon_{vf}/10^{-2}$
路径 1	1-1	359.675	15	0.548	-0.358	-0.168	0.133	-0.241	-0.349
	1-2	442.233	25	0.731	-0.424	-0.117	0.211	-0.285	-0.359
	1-3	495.694	35	0.905	-0.557	-0.209	0.268	-0.364	-0.459
路径 2	2-1	306.032	12.260	0.445	-0.178	0.089	0.021	-0.098	-0.179
	2-2	355.972	22.314	0.543	-0.207	0.128	0.015	-0.120	-0.241
	2-3	426.464	30.753	0.657	-0.252	0.153	0.029	-0.156	-0.293
路径 3	3-1	290.630	9.459	0.484	-0.473	-0.462	0.016	-0.289	-0.563
	3-2	346.151	10.530	0.568	-0.755	-0.942	0.051	-0.587	-1.124
	3-3	402.718	22.287	0.693	-0.687	-0.680	0.049	-0.449	-0.849

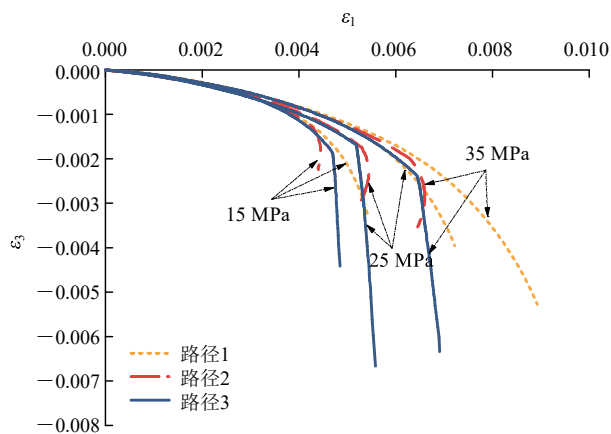


图 7 径向应变与轴向应变关系曲线

Fig.7 Relationship curves between radial strain and axial strain

表 3 割线泊松比临界值与增量值

Table 3 Critical and incremental values of secant Poisson's ratio

试验路径	试件编号	$\frac{\Delta \varepsilon_3}{\Delta \varepsilon_1}$	侧胀系数 μ_{sf}	割线泊松比增量 $\Delta \mu_{sf}$
路径 1	1-1	1.811	0.625	0.341
	1-2	1.350	0.575	0.309
	1-3	1.355	0.614	0.318
路径 2	2-1	2.505	0.501	0.197
	2-2	2.338	0.549	0.217
	2-3	1.839	0.543	0.224
路径 3	3-1	18.147	0.895	0.493
	3-2	11.614	1.199	0.872
	3-3	9.120	0.921	0.548

点间偏应力比增量, $\Delta \eta_i$ 为临界点至分岔点间偏应力比总增量。

进而得到割线泊松比 μ_s 与归一化偏应力比 $\tilde{\eta}$ 关系曲线, 如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 不同路径下割线泊松比均随偏应力比增大而增大, 同一路径的不同初始围压下曲线特征高度一致, 而不同路径的割线泊松比演化特征差异显著。其中, 路径 1 初始阶段增速较缓, 接近临界点时加速增大, 路径 2 割线泊松比与归一化偏应力比间表现为线性关系, 而路径 3 割线泊松比随偏应力比增大呈指数形式加速增长。

由图 8 和割线泊松比临界值(侧胀系数)^[53-54]、路径分岔阶段增量(见表 3)可以发现, 相同路径的各初始围压下割线泊松比曲线较为接近, 围压效应不明显。而不同路径间曲线分散集聚, 且侧胀系数与增量均表现为: 路径 3>路径 1>路径 2。路径 3 割线

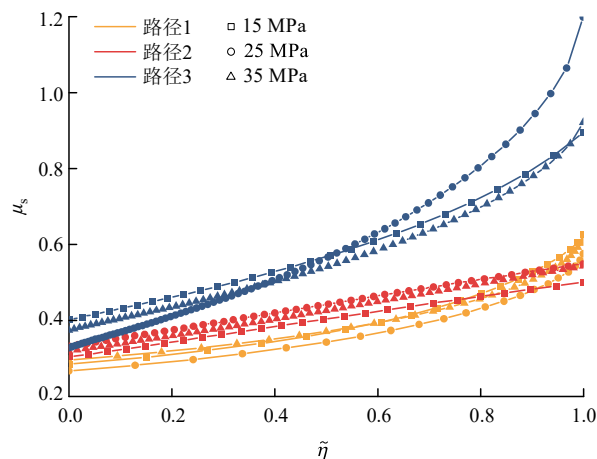


图 8 割线泊松比随归一化偏应力比演化曲线

Fig.8 Evolution curves of secant Poisson's ratio with normalized deviatoric stress ratio

泊松比远大于路径 1 和 2, 其侧胀系数是两者的 1.43~2.18 倍, 增量是两者的 1.45~4.02 倍。说明路径 3 割线泊松比劣化效应最为突出, 侧向膨胀最剧烈。

另外, 3 种路径下割线泊松比临界值均超过 0.5, 已非弹性意义上的泊松比, 表明路径分岔阶段岩石内部微裂纹不断延伸扩展, 侧向变形加剧, 割线泊松比中包含有裂纹扩张所致变形。

4.2 体积应变与径向应变关系

图 9 给出了体积应变与径向应变关系曲线, 不难看出, 不同路径下岩石体积在临界点前均经历了先压缩后扩容的过程, 且在临界点时体积均已处于扩容状态。同一应力路径的不同初始围压下曲线具有较强的一致性, 而不同路径间存在一定差异。同样, 路径 1 曲线平滑, 而路径 2 和 3 在分岔点处曲线发生一定转折。进而以分岔点为起始点, 绘制体积应变增量 $\Delta \varepsilon_v$ 与径向应变增量 $\Delta \varepsilon_3$ 间关系曲线, 如图 9(b)所示。从图中可知, 在路径分岔阶段各路径下体积应变演化差异明显。其中, 路径 1 曲线随初始围压的增大而显著分散且趋向于横轴, 而路径 2 和 3 则相对集聚。

为进一步分析不同路径下体积扩容的梯度特征, 采用以下二次函数进行拟合:

$$\Delta \varepsilon_v = B_1 \Delta \varepsilon_3 - B_2 (\Delta \varepsilon_3)^2 \quad (3)$$

式中: B_1 与 B_2 为拟合参数, 分别反映初始线性增长率与曲率强度。

拟合结果如图 10 与表 4 所示, 拟合曲线与试验数据高度吻合, 相关系数 R^2 均大于 0.999, 表明二次函数能够较好地描述路径分岔阶段体积应变随径

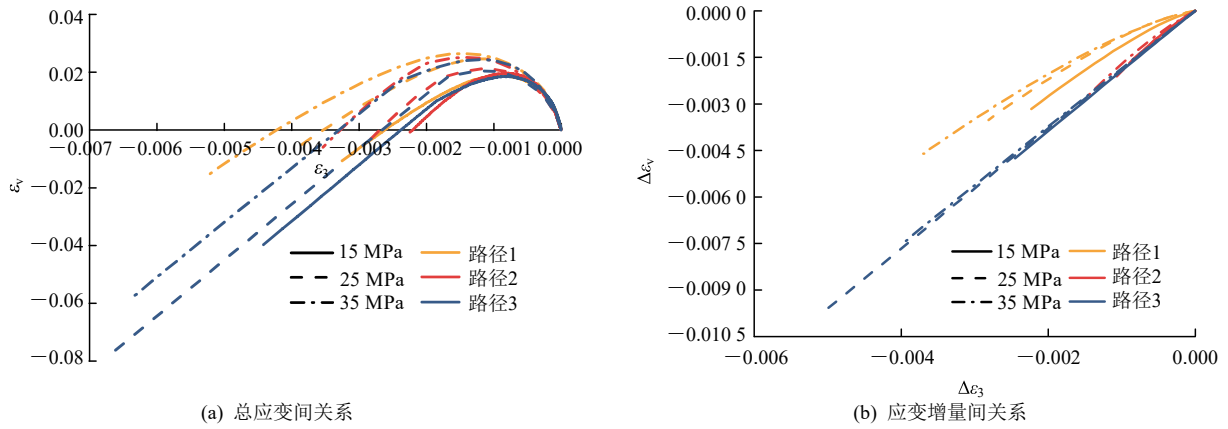


图9 体积应变与径向应变关系曲线

Fig.9 Relationship curves between volumetric and radial strain

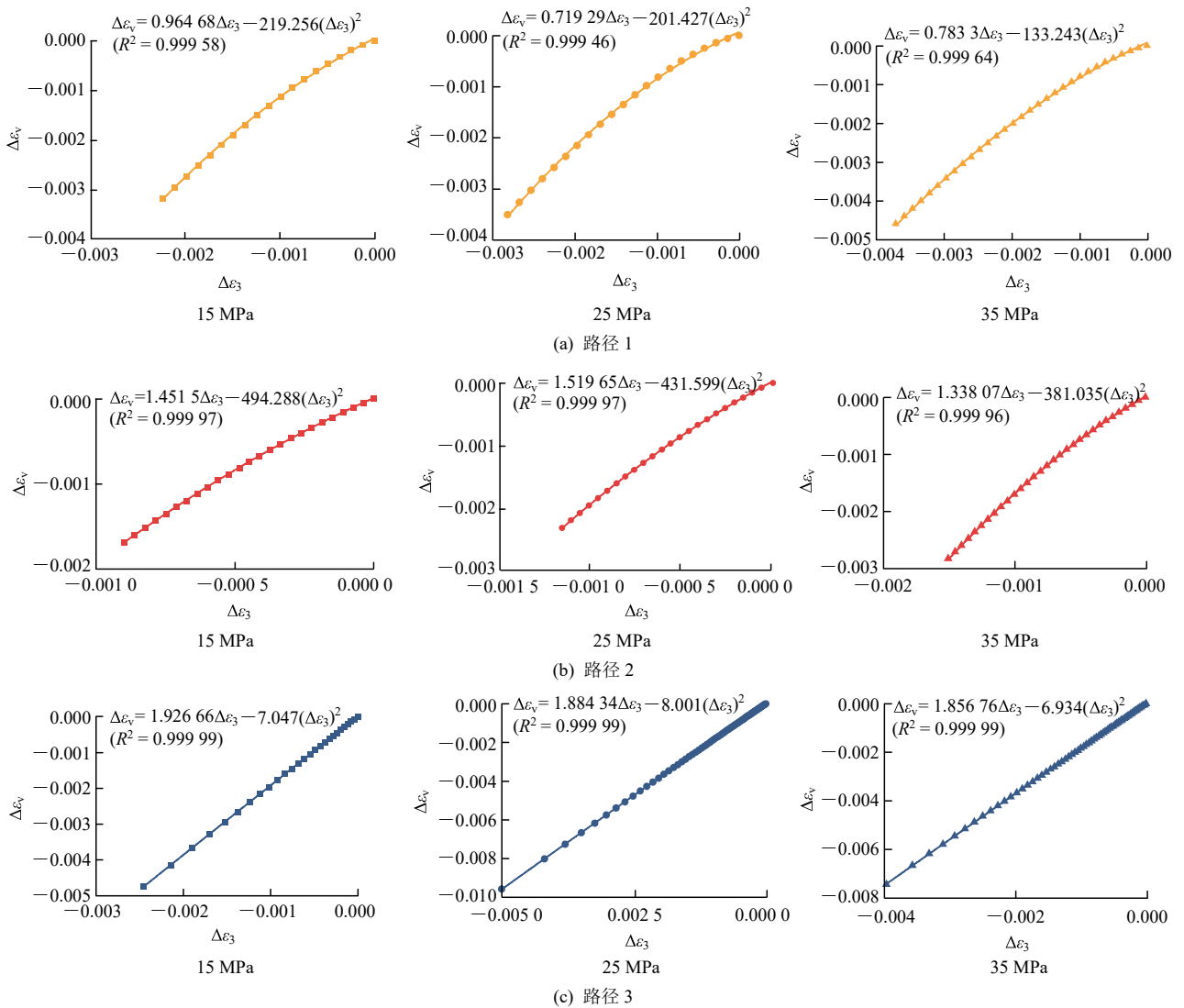


图10 体积应变增量与径向应变增量间关系拟合

Fig.10 Fitting the relationship between volumetric strain increment and radial strain increment

向应变的演化过程。比较不同路径下拟合参数可知, 相同初始围压下曲线的线性梯度 B_1 依次为: 路径 3 > 路径 2 > 路径 1, 而路径 3 的参数 B_2 远小于路径 1

与路径 2, 其曲率最小, 更接近于线性变化, 表明路径 3 的体积应变受径向应变影响最大且扩容最为强烈。路径 2 的参数 B_2 最大, 体积应变增长的非线性

表 4 体积应变增量与径向应变增量关系曲线拟合结果
Table 4 Fitting results of the relationship between volumetric and radial strain increment

试验路径	试件编号	B_1	B_2	R^2
路径 1	1-1	0.964 68	219.256	0.999 58
	1-2	0.719 29	201.427	0.999 46
	1-3	0.783 30	133.243	0.999 64
路径 2	2-1	1.451 50	494.288	0.999 97
	2-2	1.519 65	431.599	0.999 97
	2-3	1.338 07	381.035	0.999 96
路径 3	3-1	1.926 66	7.047	0.999 99
	3-2	1.884 34	8.001	0.999 99
	3-3	1.856 76	6.934	0.999 99

变化趋势最为显著, 且线性增长梯度仅次于路径 3, 说明在增轴压同时卸围压路径下, 岩石虽最易破裂, 但非线性扩容特征明显。而路径 1 由于围压始终不变, 轴向压缩变形能力最强, 受其影响, 故而体积扩容最缓。

另外, 通过图 9(a)可知, 路径分岔点均已越过体积应变最大压密点, 处于裂纹非稳定扩展阶段, 表明试验结果符合预设的高应力水平及岩石微损伤的初始条件。

5 塑性特征分析

5.1 塑性应变特征

根据塑性理论, 岩石的非线性变形特征可通过宏观塑性流动进行唯象描述, 即变形由塑性与弹性两部分构成。因此, 用实测总应变减去弹性应变可得到塑性应变^[55-56]:

$$\varepsilon_i^p = \varepsilon_i - \varepsilon_i^e \quad (4)$$

式中: 上标 e 与 p 分别表示弹性与塑性; 下标 $i=1, 3, v$, 分别表示轴向、径向以及体积。

而弹性应变 ε_i^e 基于广义胡克定律计算:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1^e &= \frac{\sigma_1 - 2\mu_e \sigma_3}{E_e} \\ \varepsilon_3^e &= \frac{\sigma_3 - (\sigma_1 + \sigma_3)\mu_e}{E_e} \\ \varepsilon_v^e &= \varepsilon_1^e + 2\varepsilon_3^e \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: E_e 与 μ_e 分别为弹性模量和泊松比, 通过全应力-应变曲线弹性阶段获得。

为比较不同路径下塑性变形演化特征, 以分岔

点为起点, 分别计算塑性应变增量 $\Delta\varepsilon_i^p$, 并绘制其与归一化偏应力比 $\bar{\eta}$ 的关系曲线, 如图 11 所示。而表 5 中列出了临界点塑性应变及其相对于分岔点的增量。据此可知, 不同路径下的塑性应变均随着归一化偏应力比的增大而增大, 同一路径的不同初始围压下曲线特征相一致。各路径下曲线均随初始围压的增大而向两侧张开, 临界点塑性应变及增量随之呈增大趋势, 均有不同程度的围压效应。

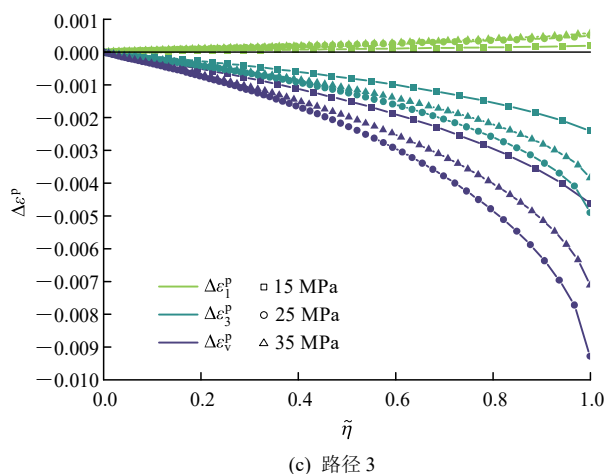
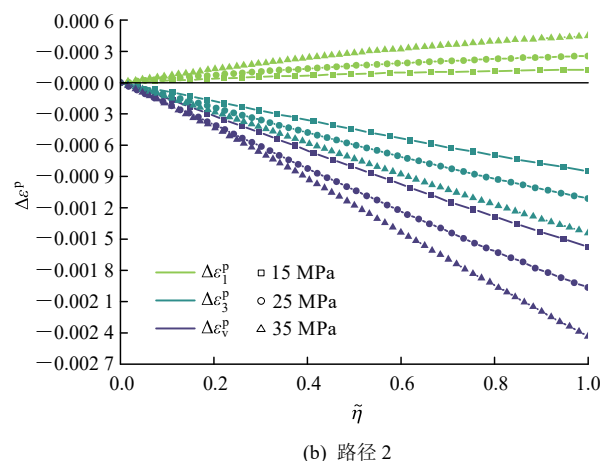
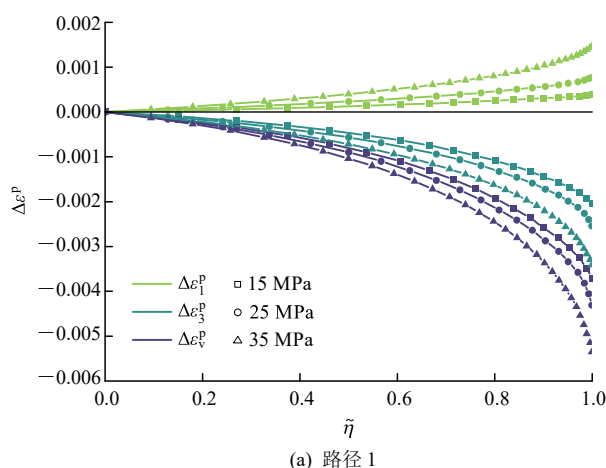


图 11 塑性应变增量随归一化偏应力比演化曲线
Fig.11 Evolution curves of plastic strain increment with normalized deviatoric stress ratio

表 5 临界点塑性应变与增量

Table 5 Critical point plastic strain and increment

试验 路径	试件 编号	临界点塑性应变			路径分岔阶段塑性应变增量		
		$\varepsilon_{1f}^p / 10^{-2}$	$\varepsilon_{3f}^p / 10^{-2}$	$\varepsilon_{vf}^p / 10^{-2}$	$\Delta\varepsilon_{1f}^p / 10^{-2}$	$\Delta\varepsilon_{3f}^p / 10^{-2}$	$\Delta\varepsilon_{vf}^p / 10^{-2}$
路径 1	1-1	0.053	-0.242	-0.431	0.038	-0.205	-0.371
	1-2	0.095	-0.291	-0.486	0.077	-0.254	-0.431
	1-3	0.192	-0.400	-0.607	0.147	-0.341	-0.536
路径 2	2-1	0.031	-0.139	-0.246	0.012	-0.085	-0.158
	2-2	0.053	-0.175	-0.298	0.026	-0.111	-0.197
	2-3	0.094	-0.216	-0.338	0.045	-0.144	-0.243
路径 3	3-1	0.049	-0.333	-0.618	0.020	-0.241	-0.462
	3-2	0.077	-0.541	-1.006	0.051	-0.490	-0.928
	3-3	0.106	-0.500	-0.894	0.057	-0.384	-0.712

不同应力路径下的岩石塑性变形特征差异明显, 塑性变形演变及增量和应力路径有很强的关联性。路径 1 与路径 3 曲线非线性增长特征显著, 而路径 2 则近似呈线性增长。路径 1 的轴向塑性变形最大, 而路径 3 的径向与体积塑性变形最为明显。这是因为应力路径不同则所经历的围压不同, 相比于路径 1 的围压恒定, 路径 2 和路径 3 的围压不断减小, 而围压越大则对侧向变形及体积扩容的抑制作用越显著, 轴向塑性变形能力越强。进一步比较路径 2 和路径 3, 同为围压降低路径, 路径 2 的轴压加载使得破坏较早出现, 而路径 3 轴压卸载反而延缓了轴向破坏, 进而提高了轴向塑性变形承受能力。同理, 对于径向及体积塑性变形, 卸围压应力路径使得侧向约束降低, 径向塑性变形更加容易。但路径 2 由于轴压同步加载造成较早破坏, 径向所能承受的塑性变形较小, 而路径 3 同时卸轴压使得变形破坏更可持续, 径向塑性变形发展充分, 故而表现为径向塑性能力最强, 而路径 1 围压不变的持续约束作用使得径向可承受的塑性变形也较大。

5.2 塑性变形参数

为进一步综合分析不同路径下应力变化对岩石塑性变形的影响, 借鉴邱士利等^[57-59]提出的应变围压柔量概念, 基于本文所提出的偏应力比将其变量化, 定义塑性应变柔量, 即在路径分岔点至临界点间塑性应变增量与偏应力比增量之比, 可表示为

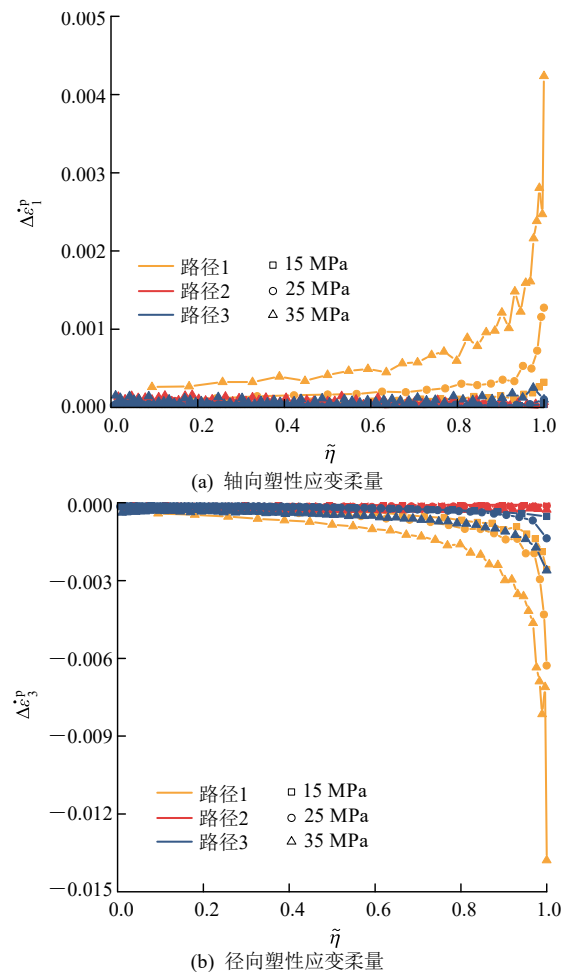
$$\Delta\dot{\varepsilon}_i^p = \frac{\Delta\varepsilon_i^p}{\Delta\eta} \quad (6)$$

式中: $\Delta\dot{\varepsilon}_i^p$ ($i=1, 3$ 和 v) 分别为轴向、径向以及体

积塑性应变柔量。

通过式(6)可知, 塑性应变柔量是表示增大单位偏应力比时各塑性变形变化快慢的描述变量。可以反映不同路径下偏应力比变化对岩石塑性变形的影响程度, 同时也可表征岩石对应力状态变化的响应速度。该值越大, 说明偏应力比的增大对某方向塑性变形影响越显著, 亦为某方向塑性变形对偏应力比的增大敏感性越强。

不同路径下的塑性应变柔量随归一化偏应力比的演化曲线如图 12 所示。可见, 不同应力路径下的塑性应变柔量差异较大。路径 1 的各塑性应变柔量均最大, 并随偏应力比的增大而逐渐呈非线性增长, 且在靠近临界点时急剧增大, 表明单位偏应力比将引起更大的塑性变形。路径 2 的各塑性应变柔量均最小且随偏应力比的增大而基本不变。路径 3 的轴向塑性应变柔量变化不明显, 而径向与体积塑性应变柔量则随偏应力比增大而总体呈增加趋势, 且同样在临界点附近加速增长。同时, 初始围压越大, 路径 1 与 3 的塑性应变柔量非线性增长越早, 且临界值越大, 而路径 2 在不同初始围压下各塑性变形增速基本不变。



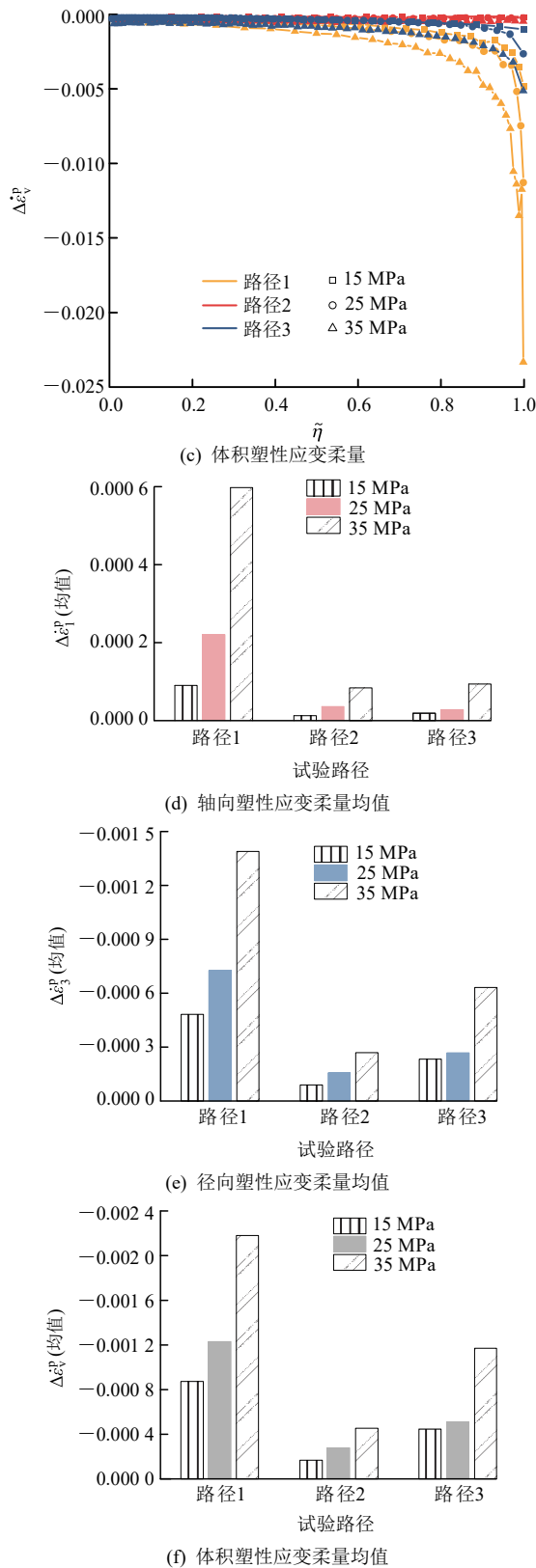


图 12 塑性应变柔量随归一化偏应力比演化曲线

Fig.12 Evolution curves of plastic strain compliance with normalized deviatoric stress ratio

为量化比较初始围压的影响,图 12 还给出了不同路径与初始围压下自分岔点至临界点的塑性应变总增量与偏应力比总增量间的比值,即塑性应变柔

量均值。从图中可以看出,各路径下各塑性应变柔量均值都随初始围压的增大而增大,这意味着高初始围压虽然对岩石变形破坏具有抑制作用,但其对塑性应变敏感性与发展起到更大的促进作用。

为进一步研究不同应力路径下轴向与径向塑性应变间关系,自路径分岔点起,以径向与轴向塑性应变增量比值 $\Delta\epsilon_3^p / \Delta\epsilon_1^p$ (比例系数)为描述变量,绘制其随归一化偏应力比的演化曲线,如图 13 所示。

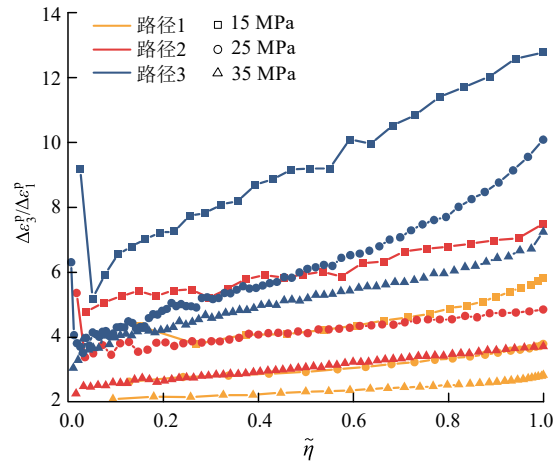


图 13 径向与轴向塑性应变增量比值随归一化偏应力比演化曲线

Fig.13 Evolution curves of radial and axial plastic strain increment ratio with normalized deviatoric stress ratio

由图 13 可知,除了卸荷路径(路径 2 与 3)在分岔点处由于加卸载方式转换引起的短暂波动外,不同路径下比例系数均随偏应力比增大而增大。各应力路径下,曲线均随初始围压增大而整体下移,临界点比例系数减小,但均大于 2。说明不同路径下径向塑性变形发展均快于轴向,同时围压均对径向塑性变形发展起约束作用而对轴向塑性变形发展有促进作用。

不同应力路径下曲线存在明显差异,其中路径 1 开始近似线性增长,而在接近临界点时加速上升,路径 2 除初始波动外全程均近似线性增大,路径 3 整体梯度最大,且在靠近临界点时也有加速增长趋势。而相同初始围压的不同应力路径间,比例系数依次为:路径 3 > 路径 2 > 路径 1,因此应力路径对岩石塑性状态与演变有显著影响。

6 扩容特性分析

6.1 塑性体积应变

从节 5 的研究结果可知,不同路径下径向塑性应变增量与柔量均大于轴向,从而均呈现出不同程

度的塑性体积扩容态势。为进一步研究其扩容特性,针对路径分岔阶段,绘制体积塑性应变增量与轴向塑性应变增量间关系曲线,如图 14 所示。可以看出,各应力路径下体积塑性应变增量均随轴向应变增量的增大而逐渐加速增长,且随初始围压的增大而趋向于横轴。

不同应力路径下两者均符合指数分布关系,因而采用下式进行拟合:

$$\Delta \varepsilon_v^p = A(1 - e^{\lambda \Delta \varepsilon_1^p}) \quad (7)$$

式中: A 与 λ 为拟合参数,拟合结果如图 15 与表 6 所示(表 6 中, ξ 为初始梯度, $\xi = A\lambda$)。

拟合曲线与试验数据高度吻合,相关系数 R^2 均在 0.99 以上,表明不同路径下临界点前体积塑性扩容均随轴向塑性应变的增大呈指数形式发展。

而塑性体积应变的增长梯度为

$$\frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_1^p} = -A\lambda e^{\lambda \Delta \varepsilon_1^p} \quad (8)$$

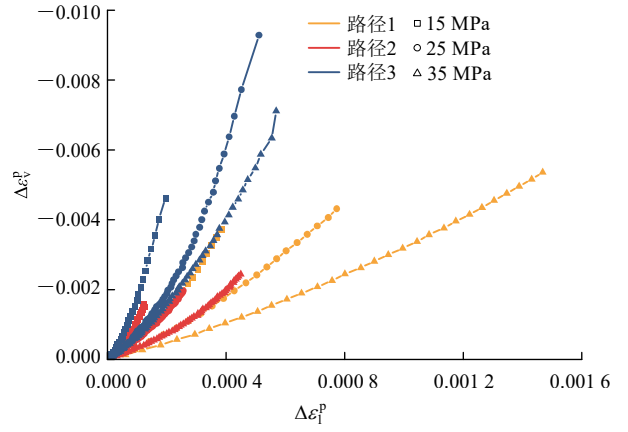


图 14 体积与轴向塑性应变增量间关系曲线

Fig.14 Relationship curves between volumetric and axial plastic strain increment

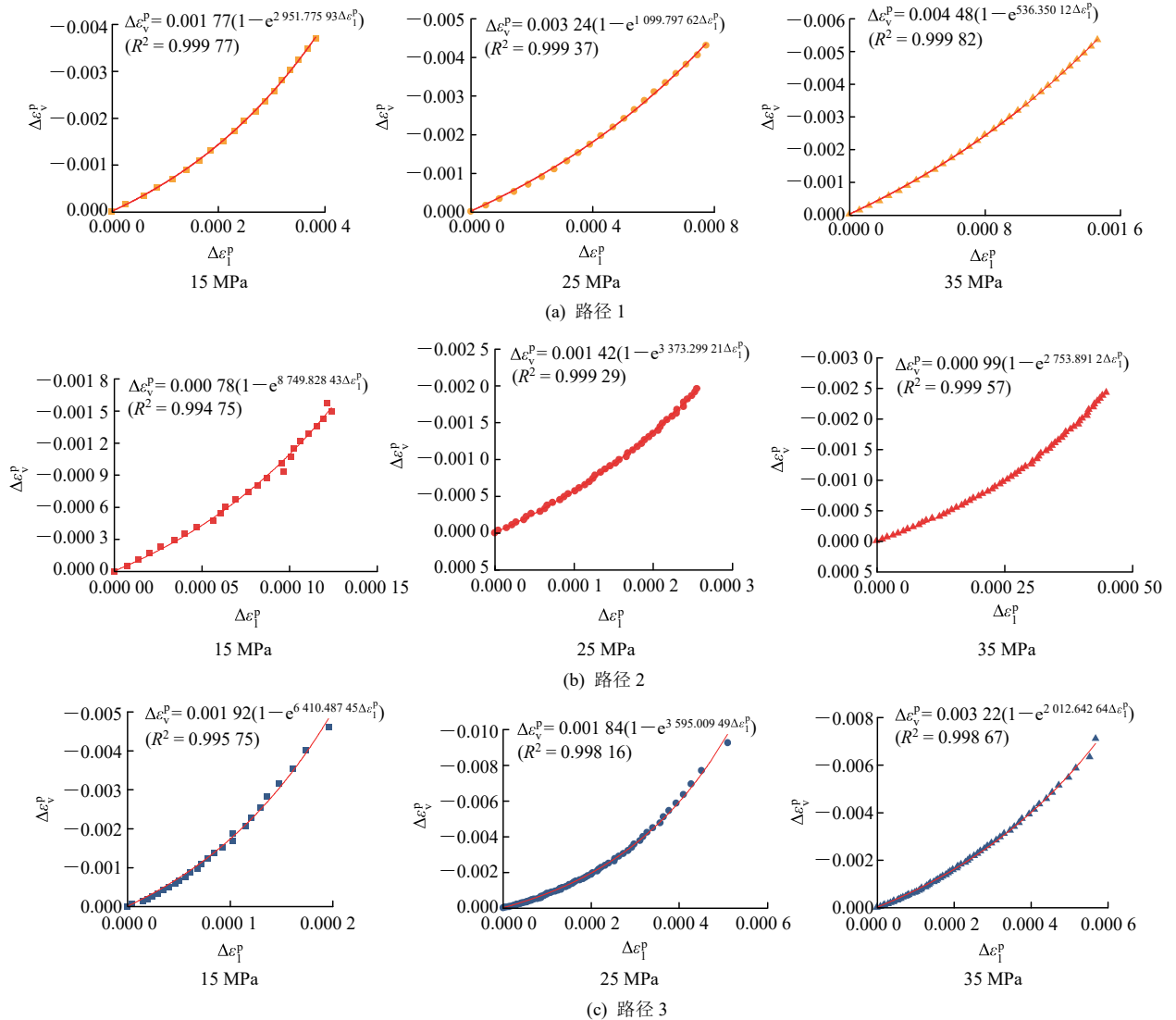


图 15 体积与轴向塑性应变增量间关系拟合

Fig.15 Fitting the relationship between volumetric and axial plastic strain increment

表 6 体积与轴向塑性应变增量关系拟合结果

Table 6 Fitting results of the relationship between plastic volumetric and axial strain increment

试验路径	试件编号	A	λ	R^2	ζ
路径 1	1-1	0.001 77	2 951.775 93	0.999 77	5.225
	1-2	0.003 24	1 099.797 62	0.999 37	3.563
	1-3	0.004 48	536.350 12	0.999 82	2.403
路径 2	2-1	0.000 78	8 749.828 43	0.994 75	6.833
	2-2	0.001 42	3 373.299 21	0.999 29	4.790
	2-3	0.000 99	2 753.891 2	0.999 57	2.733
路径 3	3-1	0.001 92	6 410.487 45	0.995 75	12.308
	3-2	0.001 84	3 595.009 49	0.998 16	6.615
	3-3	0.003 22	2 012.642 64	0.998 67	6.481

由表 6 可知, ζ 与 λ 在各路径下均随着初始围压的增大而减小。在相同初始围压的不同路径下, ζ 依次为: 路径 3 > 路径 2 > 路径 1, λ 依次为: 路径 2 > 路径 3 > 路径 1。说明在轴向塑性应变相同时, 卸围压路径 2 和 3 的塑性体积扩容梯度要大于围压不变的路径 1。而路径 3 的初始梯度大于路径 2, 但随着塑性变形发展, 路径 2 的梯度逐渐接近路径 3, 两者关系可能存在交替。

6.2 扩容指标

为更直观地体现应力路径对岩石在临界点前塑性扩容过程的影响, 借鉴陈学章等^[33, 60]中表观膨胀角 θ 概念, 并进行变量化, 即

$$\theta = \arctan \left| \frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_1^p} \right| = \arctan(\xi e^{\lambda \Delta \varepsilon_1^p}) \quad (9)$$

根据表 5 中临界点轴向塑性应变增量, 可得不同路径下表观膨胀角随归一化轴向塑性应变的演化曲线, 如图 16 所示。从图中可以看出, 不同路径下表观膨胀角均随轴向塑性应变的发展而增大, 但随着初始围压的增大, 曲线整体下移, 表现出不同程度的围压效应。路径 3 曲线均集中于高表观膨胀角区域, 其初始围压的影响性最小。由曲线分布可知, 相同初始围压下, 同一归一化轴向塑性应变对应的表观膨胀角大小依次为: 路径 3 > 路径 2 > 路径 1。

为定量描述初始围压岩石对扩容特性的影响, S. C. Yuan 等^[60-61]基于表观膨胀角提出了相对于单轴压缩的扩容指标 I_d , 其表达式为

$$I_d = \frac{\theta_p}{\theta_0} \quad (10)$$

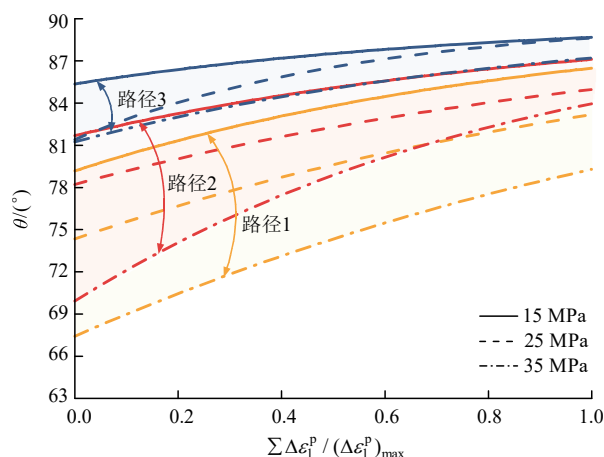
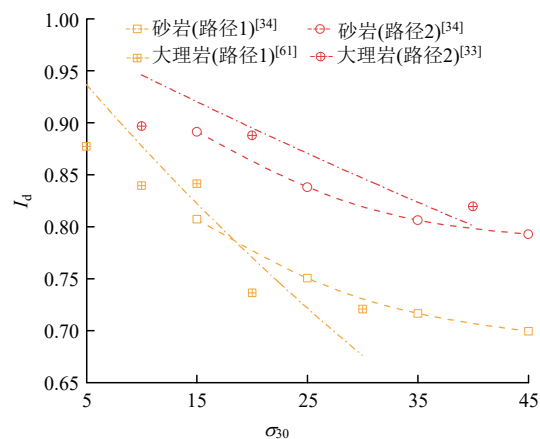


图 16 表观膨胀角随归一化轴向塑性应变增量演化曲线

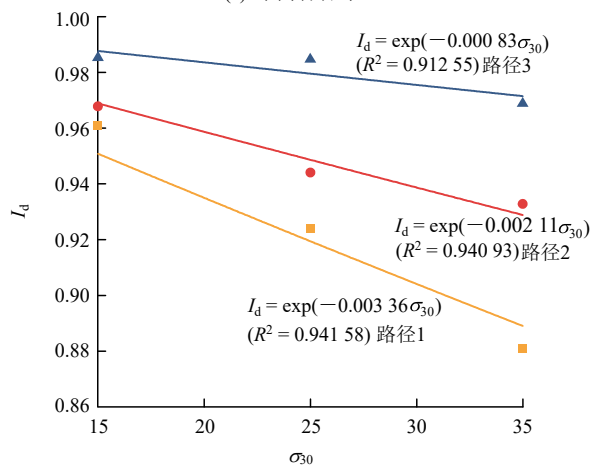
Fig.16 Evolution curves of apparent dilatancy angle with normalized axial plastic strain increment

式中: θ_0 和 θ_p 分别为单轴试验与三轴试验表观膨胀角。

为作统一比较且鉴于单轴压缩表观膨胀角为定值(初始围压为 0), 本文 θ_0 取理想值 90° 。从而得到如图 17 所示不同路径下临界点扩容指标随初始围压的变化情况。



(a) 不同岩石对比



(b) 北山花岗岩

图 17 临界点扩容指标与初始围压间关系

Fig.17 Relationship between the dilatancy index of the critical point and the initial confining pressure

其中,图 17(a)还给出了砂岩^[34]、大理岩^[33,61]不同硬脆性岩石的关系曲线。从图中可以看出,对于不同岩石与应力路径,临界点扩容指标均随初始围压增大而趋于减小,表现出扩容受初始围压抑制而减弱的特征。同时,各硬脆性岩石的路径 2 曲线均位于路径 1 上方,故在相同初始围压条件下,卸围压路径的扩容指标要大于恒围压加轴压路径。而本文研究进一步发现,在卸围压路径中,轴压卸载引起的临界点扩容指标更大,即路径 3>路径 2>路径 1。

此外,采用如下经验关系对北山花岗岩数据进行拟合:

$$I_d = e^{-m_d \sigma_{30}} \quad (11)$$

式中: σ_{30} 为路径分岔点处初始围压; m_d 为拟合参数,其表征初始围压对扩容指标的影响程度。

由图 17(b)可知,不同应力路径的拟合结果均较好,拟合参数 m_d 的大小依次为:路径 1>路径 2>路径 3,表明初始围压对扩容指标的影响程度具有路径差异性,其中路径 1 扩容指标降低的围压效应最为显著,而路径 3 扩容指标受初始围压影响最小。因此,初始围压越大,各路径间临界点扩容指标的差距越明显。

6.3 剪胀角

为进一步探讨临界点前不同路径下北山花岗岩的剪胀扩容特性,采用剪胀角 ψ 量化表征,根据 P. A. Vermeer 等^[62-63]的建议,其计算式为

$$\psi = \arcsin \left(\frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_v^p - 2d\varepsilon_1^p} \right) \quad (12)$$

将式(8)代入式(12)中,则有

$$\psi = \arcsin \left(\frac{\xi e^{\lambda \Delta \varepsilon_1^p}}{\xi e^{\lambda \Delta \varepsilon_1^p} + 2} \right) \quad (13)$$

进一步根据式(7)分岔点后体积塑性应变与轴向塑性应变间关系可得

$$\psi = \arcsin \left(\frac{\lambda \Delta \varepsilon_v^p - \xi}{\lambda \Delta \varepsilon_v^p - \xi - 2} \right) \quad (14)$$

从而得到图 18 所示不同路径下分岔点至临界点间剪胀角演化曲线及范围。从中可知,各路径下临界点前剪胀角均随轴向塑性应变增大而增大,表现出不同程度的剪胀性质。同时,随着初始围压的增大,曲线均倾向横轴,剪胀角增长趋缓,表明初始围压在各应力路径下均对岩石剪胀行为产生抑制作用。但从变化范围来看,各路径的初始围压影响程度存在差异,路径 1 的围压效应最明显,而卸荷路径 2 和 3 则影响相对较小。

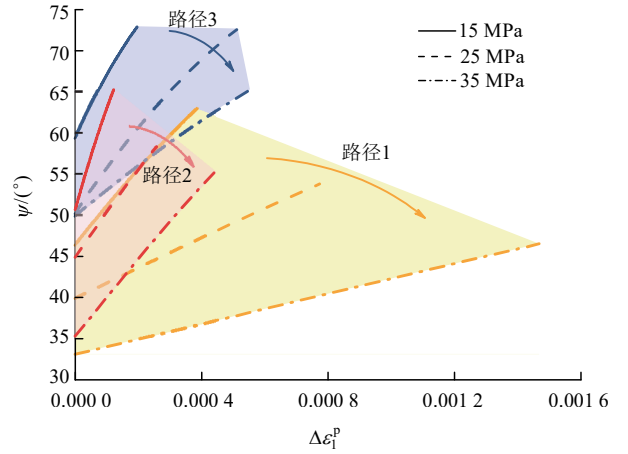


图 18 剪胀角随轴向塑性应变增量演化曲线

Fig.18 Evolution curves of dilation angle with axial plastic strain increment

另外,比较各路径剪胀角区域整体及相同初始围压的曲线可知,剪胀角的增长梯度依次为:路径 2>路径 3>路径 1,而临界点剪胀角则为:路径 3>路径 2>路径 1。这说明卸围压路径的剪胀角增长梯度与临界值均大于恒围压路径。对于同时增大轴压的路径 2,虽然因最易破坏而临界点轴向塑性应变最小,但剪胀角增长梯度最大,剪胀扩容趋势及演变性质突出;而对于同时卸载轴压的路径 3,虽然延缓了破坏发生,但促进了塑性变形的发展,因此临界剪胀角最大,扩容性质最为显著。

需要指出的是,表观膨胀角与剪胀角均是用于描述岩石在受力过程中体积扩容特征的量化参数,但两者在物理意义与工程应用中有所区别。表观膨胀角反映的是整体体积膨胀,包括非剪切引起的体积变化,其与损伤演化密切相关,多用于围岩损伤程度评估与阶段判断。而剪胀角则更多是体现剪切变形过程中的体积扩容行为,多用于围岩剪切变形破坏、滑移等相关稳定性分析及预测。

综上所述,在高应力水平下北山花岗岩在临界点前的变形演化规律与剪胀扩容性质具有强烈的应力路径相关性。其中,路径 3 接近于地下洞室高边墙、岔洞、处置坑等部位的多向卸荷情形,其体积扩容最为剧烈且受围压抑制影响最小,可能会造成更为严重的破坏,因而高放废物处置库与地下实验室要密切关注这些区域围岩微损伤的发展,以确保处置屏障的有效性。同时,对于工程中通过主动卸荷(如钻孔卸压)以降低围岩压力防治动力灾害发生的方法,需要充分考虑卸荷方向的影响与控制。路径 2 对应于地下洞室开挖最大主应力增大而最小主应力降低的一般工况,该路径下岩石最易破裂,剪

胀扩容梯度最大, 故而对于硬脆性裂隙岩体, 特别是在低围压条件下, 需注意其在开挖过程中的剪胀扩容特征。路径 1 为常规三轴压缩试验路径, 虽与实际工况中应力场调整路径差别较大, 但诸多本构及剪胀角模型均是基于该路径所建立, 然而其体积膨胀最缓, 扩容参数最小, 且受初围压约束影响最显著, 从而以往研究常常忽视其峰前剪胀扩容变化, 但卸围压路径与之差异较大, 因此硬脆性岩石本构及剪胀理论研究需考虑实际应力路径差异与影响。

7 结 论

本文对高应力水平下北山花岗岩开展了增轴压恒围压、增轴压卸围压以及卸轴压卸围压 3 种典型路径的力学试验, 针对路径分岔阶段, 探究了变形特性与扩容行为, 并量化比较了应力路径与初始围压的影响性。主要结论如下:

(1) 应力路径分岔阶段, 恒定围压增大轴压时轴向应变临界值与增量值最大, 各应变增量及梯度相近; 增轴压同时卸围压时岩石最易破坏, 各应变临界值与增量值均最小; 轴压与围压同时卸载时径向与体积应变临界值与增量值最大, 而应变间增量及梯度差异最为显著。在高应力水平卸围压时, 轴压卸载相比于加载反而加剧了侧向变形与体积扩容。

(2) 基于归一化偏应力比, 不同路径间割线泊松比曲线呈现出分散集聚的情况, 围压效应均不明显, 而各路径间演化特征差异显著。增轴压恒围压呈先线性后非线性增长, 增轴压卸围压呈线性关系, 卸轴压卸围压呈指数形式加速增长。路径分岔阶段体积应变随径向应变的演化过程均符合二次函数关系, 但增轴压恒围压线性梯度最小, 体积扩容最缓, 增轴压卸围压曲率最大, 非线性扩容特征显著, 卸轴压卸围压线性梯度最大而曲率最小, 体积应变受径向应变影响最大。

(3) 应力路径对岩石塑性状态与演变有显著影响, 围压越大, 对侧向变形及体积扩容的抑制作用越显著, 塑性变形承受能力越强。相比于轴压加载, 其卸载延缓了破坏, 使得塑性变形发展更充分。塑性应变柔量与比例系数的演化特征表明, 初始围压虽然对岩石变形破坏具有抑制作用, 但对塑性应变敏感性与发展起到更大的促进作用, 且对轴向影响更大。

(4) 不同路径下临界点前均呈现出不同程度的塑性体积扩容态势与剪胀性质, 体积塑性应变增量

与轴向应变增量间均符合指数函数关系。增轴压恒围压表观膨胀角与剪胀角均最小, 扩容指标降低的围压效应最为明显; 增轴压卸围压剪胀角增长梯度最大, 剪胀扩容趋势最为突出; 而卸轴压卸围压表观膨胀角与剪胀角最大, 扩容指标受初始围压影响最小, 扩容性质最为显著。

(5) 高应力水平下, 北山花岗岩临界点前的变形演化规律与剪胀扩容性质具有强烈的应力路径相关性, 工程实践与理论研究中需考虑应力路径差异的影响。特别是对于处置坑等多向卸荷情形, 其体积扩容最为剧烈且受围压抑制影响最小, 高放废物处置库与地下实验室需密切关注这些区域围岩扩容微损伤的发展, 且主动卸荷防治动力灾害时, 要考虑卸荷方向的影响。

必须指出的是, 尽管试件取自同源岩芯且经严格筛选, 但岩石作为天然材料, 其微观结构差异始终存在, 有限数量试件的结果可能具有局限性与片面性。为此, 将进一步通过更多试件重复试验量化研究岩石非均质性影响, 并基于方差和不确定性等统计分析, 对不同路径与初始围压下岩石相关力学参数范围和置信区间开展定量研究。另外, 关于本文提出的塑性应变柔量、比例系数等塑性变形参数可进一步结合 CT、声发射等开展细观机制研究以及结合扩容参数深入开展硬脆性岩石的非关联塑性理论研究。

参考文献(References):

- [1] WANG J, CHEN L, SU R, et al. The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: planning, site selection, site characterization and in situ tests[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018, 10(3): 411 - 435.
- [2] 王 驹, 陈 亮, 周志超, 等. 我国高放废物地质处置新突破[J]. *原子能科学技术*, 2024, 58(增 2): 217 - 230.(WANG Ju, CHEN Liang, ZHOU Zhichao, et al. Geological disposal of high level radioactive waste in China: Progress and breakthrough during 2019-2024[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2024, 58(Supp.2): 217 - 230.(in Chinese))
- [3] 王 驹. 中国高放废物地质处置 21 世纪进展[J]. *原子能科学技术*, 2019, 53(10): 2 072 - 2 082.(WANG Ju. Progress of geological disposal of high-level radioactive waste in China in the 21st Century[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2019, 53(10): 2 072 - 2 082. (in Chinese))
- [4] 康红普. 我国煤矿巷道围岩控制技术发展 70 年及展望[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(1): 1 - 30.(KANG Hongpu. Seventy years

- development and prospects of strata control technologies for coal mine roadways in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1): 1 - 30.(in Chinese))
- [5] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1 945 - 1 956.(QIAN Qihu. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1 945 - 1 956.(in Chinese))
- [6] ALKAN H, CINAR Y, PUSCH G. Rock salt dilatancy boundary from combined acoustic emission and triaxial compression tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(1): 108 - 119.
- [7] LAU J S O, CHANDLER N A. Innovative laboratory testing[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(8): 1 427 - 1 445.
- [8] 黄润秋, 黄 达. 卸荷条件下花岗岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2 205 - 2 213.(HUANG Runqiu, HUANG Da. Experimental research on mechanical properties of granites under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2 205 - 2 213.(in Chinese))
- [9] ZHANG Z Z, DENG M, BAI J B, et al. Strain energy evolution and conversion under triaxial unloading confining pressure tests due to gob-side entry retained[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 126: 104184.
- [10] GUO Y T, YANG C H, MAO H J. Mechanical properties of Jintan mine rock salt under complex stress paths[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 56: 54 - 61.
- [11] XIE H Q, HE C H. Study of the unloading characteristics of a rock mass using the triaxial test and damage mechanics[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41: 74 - 80.
- [12] 黄润秋, 黄 达. 高地应力条件下卸荷速率对锦屏大埋岩力学特性影响规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 21 - 33.(HUANG Runqiu, HUANG Da. Experimental research on affection laws of unloading rates on mechanical properties of Jinping marble under high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 21 - 33.(in Chinese))
- [13] ZHANG L M, CONG Y, MENG F Z, et al. Energy evolution analysis and failure criteria for rock under different stress paths[J]. Acta Geotechnica, 2021, 16: 569 - 580.
- [14] FENG X T, XU H, YANG C X, et al. Influence of loading and unloading stress paths on the deformation and failure features of Jinping marble under true triaxial compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53: 3 287 - 3 301.
- [15] 李地元, 孙 志, 李夕兵, 等. 不同应力路径下花岗岩三轴加卸载力学响应及其破坏特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增 2): 3 449 - 3 457.(LI Diyuan, SUN Zhi, LI Xibing, et al. Mechanical response and failure characteristics of granite under different stress paths in triaxial loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Supp.2): 3 449 - 3 457.(in Chinese))
- [16] LI D Y, SUN Z, XIE T, et al. Energy evolution characteristics of hard rock during triaxial failure with different loading and unloading paths[J]. Engineering Geology, 2017, 228: 270 - 281.
- [17] ZHANG Z T, ZHANG R, XIE H P, et al. Mining-induced coal permeability change under different mining layouts[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49: 3 753 - 3 768.
- [18] 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): 973 - 981.(WANG Lehua, NIU Caoyuan, ZHANG Bingyi, 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): 973 - 981.(in Chinese))
- [19] 段淑倩, 高 坡, 江 权, 等. 高地应力卸荷条件下错动带塑性变形规律与硬化特征[J]. 岩土力学, 2022, 43(1): 97 - 109.(DUAN Shuqian, GAO Po, JIANG Quan, et al. Plastic deformation and hardening characteristics of the staggered zone under high in-situ stress unloading conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(1): 97 - 109.(in Chinese))
- [20] 苗胜军, 段懿轩, 尹紫微, 等. 不同应力路径下辉绿岩能量演化与破坏机制研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(14): 154 - 161.(MIAO Shengjun, DUAN Yixuan, YIN Ziwei, et al. Energy evolution and failure mechanism of diabase under different stress paths[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(14): 154 - 161.(in Chinese))
- [21] 陈子全, 李天斌, 陈国庆, 等. 不同应力路径下砂岩能耗变化规律试验研究[J]. 工程力学, 2016, 33(6): 120 - 128.(CHEN Ziquan, LI Tianbin, CHEN Guoqing, et al. Experimental study on energy evolution of sandstone under different stress paths[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(6): 120 - 128.(in Chinese))
- [22] 何明明, 陈蕴生, 韩铁林, 等. 不同应力路径下砂岩能耗特征的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增 1): 2 632 - 2 638.(HE Mingming, CHEN Yunsheng, HAN Tielin, et al. Study of energy properties of sandstone under different loading paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Supp.1): 2 632 - 2 638.(in Chinese))
- [23] 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 Bin, ZHAO Guoyan, YANG Chen, et al. Energy evolution law of rocks in process of unloading failure under different paths[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2016, 33(2): 367 - 374.(in Chinese))
- [24] 由 爽, 李虎振, 侯晓旭, 等. 采动应力路径下花岗岩变形破坏特性及能量演化机制[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2023, 44(8): 1 177 - 1 187.(YOU Shuang, LI Huzhen, HOU Xiaoxu, et al. Deformation damage characteristics and energy evolution mechanism of granite under mining stress path[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2023, 44(8): 1 177 - 1 187.(in Chinese))

- [25] 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): 3 140 – 3 147. (CONG Yu, WANG Zaiquan, ZHENG Yingren, 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): 3 140 – 3 147. (in Chinese))
- [26] SCHOCK R N. A constitutive relation describing dilatant behavior of Climax Stock granodiorite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1976, 13(7): 221 – 223.
- [27] MAHMUTOGLU Y, VARDAR M. Effects of inelastic volume increase on fractured rock behaviour[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2003, 62: 117 – 121.
- [28] VAJDOVA V, BAUD P, WONG T F. Compaction, dilatancy, and failure in porous carbonate rocks[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2004, 109(B5), <https://doi.org/10.1029/2003JB002508>.
- [29] ZHANG Y, WANG Z F, XU D P, et al. True triaxial stresses mobilizing dilatant fracturing and engineering failure of hard rocks[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 154: 107652.
- [30] 程建超, 贾 震, 侯孟冬, 等. 砂岩三轴循环加卸载变形特性分析及扩容逾渗模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(11): 2 687 – 2 699. (CHEN Jianchao, JIA Zheng, HOU Mengdong, et al. Percolation modelling of dilation deformation evolution of sandstone under tri-axial cyclic loading-unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(11): 2 687 – 2 699. (in Chinese))
- [31] 赵星光, 李鹏飞, 马利科, 等. 循环加、卸载条件下北山深部花岗岩损伤与扩容特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1 740 – 1 748. (ZHAO Xingguang, LI Pengfei, MA Like, et al. Damage and dilation characteristics of deep granite at Beishan under cyclic loading-unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1 740 – 1 748. (in Chinese))
- [32] 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): 1 599 – 1 610. (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): 1 599 – 1 610. (in Chinese))
- [33] 陈学章, 何江达, 肖明砾, 等. 三轴卸荷条件下大理岩扩容与能量特征分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1 106 – 1 112. (CHEN Xuezhong, HE Jiangda, XIAO Mingli, et al. Dilatancy and energy properties of marble under triaxial unloading condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(6): 1 106 – 1 112. (in Chinese))
- [34] 刘新荣, 刘 俊, 李栋梁, 等. 不同初始卸荷水平对深埋砂岩力学特性影响规律试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3 081 – 3 088. (LIU Xinrong, LIU Jun, LI Dongliang, et al. Experimental research on the effect of different initial unloading levels on mechanical properties of deep-buried sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(11): 3 081 – 3 088. (in Chinese))
- [35] 尹光志, 鲁 俊, 李 星, 等. 中间主应力对砂岩扩容及强度特性影响[J]. 煤炭学报, 2017, 42(4): 879 – 885. (YIN Guangzhi, LU Jun, LI Xing, et al. Influence of intermediate principal stress on dilation and strength characteristics of sandstone[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4): 879 – 885. (in Chinese))
- [36] 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): 3 121 – 3 127. (ZHAO Guoyan, DAI Bing, DONG Longjun, 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): 3 121 – 3 127. (in Chinese))
- [37] WALTON G, GAINES S. Evaluation of stress path and load rate effects on rock strength using compression testing data for Stanstead Granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2023, 169: 105455.
- [38] CHEN L, ZHAO X G, LIU J, et al. Progress on rock mechanics research of Beishan granite for geological disposal of high-level radioactive waste in China[J]. Rock Mechanics Bulletin, 2023, 2(3): 100046.
- [39] ULUSAY R, HUDSON J A. 1974-2006 The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring[S]. Ankara, Turkey: ISRM Turkish National Group, 2007.
- [40] 中华人民共和国行业标准编写组. SL/T 264—2020 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020. (The Professional Standards Compilation Group of the People's Republic of China. SL/T 264 — 2020 Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering[S]. Beijing: China Water Power Press, 2020. (in Chinese))
- [41] LIU J F, QIU X S, YANG J X, et al. Failure transition of shear-to-dilation band of rock salt under triaxial stresses[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024, 16(1): 56 – 64.
- [42] 李建贺, 盛 谦, 朱泽奇, 等. Mine-by 试验洞开挖过程中围岩应力路径与破坏模式分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 821 – 830. (LI Jianhe, SHENG Qian, ZHU Zeqi, et al. Analysis of stress path and failure mode of surrounding rock during mining of Mine-by experimental cave[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4): 821 – 830. (in Chinese))
- [43] 朱合华, 蔡武强, 梁文灏. GZZ 岩体强度三维分析理论与深埋隧道应力控制设计分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(1): 1 – 27. (ZHU Hchua, CAI Wuqiang, LIANG Wenhao. GZZ strength-based three-dimensional analysis theory and stress-controlled design method in deep tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(1): 1 – 27. (in Chinese))
- [44] 刘 宁, 张春生, 陈祥荣, 等. 深埋隧洞开挖围岩应力演化过程监测及特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1 729 – 1 737. (LIU Ning, ZHANG Chunsheng, CHEN Xiangrong, et al. Monitoring and characteristics study of stress evolution of surrounding rock during deep tunnel excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

- Engineering, 2011, 30(9): 1 729 - 1 737.(in Chinese))
- [45] ZHOU X P. Localization of deformation and stress-strain relation for mesoscopic heterogeneous brittle rock materials under unloading[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2005, 44(1): 27 - 43.
- [46] 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): 2 238 - 2 248.(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): 2 238 - 2 248.(in Chinese))
- [47] ZHAO X G, WANG J, CAI M, et al. Influence of intermediate principal stress on the strainburst characteristics of Beishan granite with consideration of end effect[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(9): 4 771 - 4 791.
- [48] 赵星光, 王 驹, 秦向辉, 等. 中国高放废物地质处置地下实验室场址深部岩体地应力测量及工程应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2021, 52(8): 2 634 - 2 645.(ZHAO Xingguang, WANG Ju, QIN Xianghui, et al. In-situ stress measurements at depth and engineering application at China's underground research laboratory site for high-level radioactive waste disposal[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2021, 52(8): 2 634 - 2 645. (in Chinese))
- [49] 朱泽奇, 盛 谦, 张占荣. 脆性岩石侧向变形特征及损伤机理研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2 137 - 2 143.(ZHU Zeqi, SHENG Qian, ZHANG Zhanrong. Study of lateral deformation characteristics and damage mechanism of brittle rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(8): 2 137 - 2 143.(in Chinese))
- [50] 陈 亮, 刘建锋, 王春萍, 等. 北山深部花岗岩不同应力状态下声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增 2): 3 618 - 3 624.(CHEN Liang, LIU Jianfeng, WANG Chunping, et al. Study of acoustic emission characteristics of Beishan deep granite under different stress conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Supp.2): 3 618 - 3 624.(in Chinese))
- [51] XU X T, HUANG R Q, LI H, et al. Determination of Poisson's ratio of rock material by changing axial stress and unloading lateral stress test[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(6): 853 - 857.
- [52] 郭建强, 刘新荣, 赵 青. 岩石卸荷力学特性的理论研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(增 2): 123 - 130.(GUO Jianqiang, LIU Xinrong, ZHAO Qing. Theoretical research on rock unloading mechanical characteristics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(Supp.2): 123 - 130.(in Chinese))
- [53] 裴建良, 刘建锋, 徐 进. 层状大理岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2 496 - 2 502.(PEI Jianliang, LIU Jianfeng, XU Jin. Experimental study of mechanical properties of layered marble under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2 496 - 2 502.(in Chinese))
- [54] 高春玉, 徐 进, 何 鹏, 等. 大理岩加卸载力学特性的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 456 - 460.(GAO Chunyu, XU Jin, HE Peng, et al. Study on mechanical properties of marble under loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 456 - 460.(in Chinese))
- [55] CAI W Q, ZHU H H, LIANG W H, et al. A post-peak dilatancy model for soft rock and its application in deep tunnel excavation[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(3): 683 - 701.
- [56] 杨以荣, 谢红强, 肖明砾, 等. 卸荷条件下横观各向同性岩体扩容与能量特性分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1 589 - 1 599.(YANG Yirong, XIE Hongqiang, XIAO Mingli, et al. Dilatancy and energy characteristics analysis of transverse-isotropic rock mass under triaxial unloading condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(6): 1 589 - 1 599.(in Chinese))
- [57] 邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 等. 不同卸围压速率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, 2010, 29(9): 1 807 - 1 817.(QIU Shili, FENG Xiating, ZHANG Chuanqing, et al. Experimental research on mechanical properties of deep-buried marble under different unloading rates of confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1 807 - 1 817.(in Chinese))
- [58] 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): 1 686 - 1 697.(QIU Shili, FENG Xiating, ZHANG Chuanqing, 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): 1 686 - 1 697.(in Chinese))
- [59] 黄 兴, 刘泉声, 刘恺德, 等. 深部软弱地层 TBM 掘进围岩变形破坏特性室内试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 76 - 92.(HUANG Xing, LIU Quansheng, LIU Kaide, et al. Laboratory study of deformation and failure of soft rock for deep ground tunnelling with TBM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 76 - 92.(in Chinese))
- [60] YUAN S C, HARRISON J P. An empirical dilatancy index for the dilatant deformation of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(4): 679 - 686.
- [61] 俞 缙, 刘泽瀚, 林立华, 等. 变幅循环加卸载作用下大理岩扩容特性试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(11): 2 934 - 2 942.(YU Jin, LIU Zehan, LIN Lihua, et al. Characteristics of dilatancy of marble under variable amplitude cyclic loading and unloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(11): 2 934 - 2 942.(in Chinese))
- [62] VERMEER P A. Non-associated plasticity for soils, concrete and rock[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1998: 163 - 196.
- [63] ZHAO X G, CAI M. A mobilized dilation angle model for rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(3): 368 - 384.