

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.03.018

考虑水-力耦合和不同应力路径的 砂岩卸荷力学特性试验

李均奕^{1,2}, 王伟^{1,2}, 曹亚军^{1,2}, 陈超维^{1,2}, 朱其志^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究不同渗透压力条件下的岩石卸荷力学特性, 选取砂岩为研究对象, 开展了不同渗透压力和不同应力路径下的三轴卸荷试验, 并与常规三轴试验进行对比, 比较了不同应力路径下的岩石强度特性, 分析了渗透压力对岩石变形和强度参数的影响。试验结果表明: 渗透压力的增大会弱化岩石强度, 岩石的峰值强度随渗透压力的增大而降低, 而轴向变形随渗透压力增大而增加, 渗透压力越大, 岩石的压密段特征越明显; 针对两种不同的卸荷应力路径, 恒轴压卸围压路径条件下, 岩石的黏聚力不断降低, 内摩擦角不断增加, 而加轴压卸围压路径条件下, 岩石的黏聚力不断增加, 内摩擦角逐渐降低。

关键词: 岩石力学; 三轴卸荷; 渗透压力; 砂岩; 水-力耦合

中图分类号: TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)03-0135-08

Experimental study on unloading mechanical characteristics of sandstone considering water-mechanical coupling and different stress paths

LI Junyi^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, CAO Yajun^{1,2}, CHEN Chaowei^{1,2}, ZHU Qizhi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098;

2. Jiangsu Research Center for Geomechanical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the unloading mechanical properties of rock under different seepage pressures, this paper selects the sandstone as the research object, conducts triaxial unloading tests under different seepage pressures and different stress paths, and compares the results with conventional triaxial tests. The rock strength characteristics under different stress paths are compared, and the effect of seepage pressure on the rock deformation and strength parameters is further analyzed. The test results show that the increase of seepage pressure will weaken the rock strength, the peak strength of rock decreases with the increase of seepage pressure, and the axial deformation increases with the increase of seepage pressure. Aiming at two different unloading stress paths, under the condition of constant axial pressure and unloading confining pressure, the cohesion of rock keeps decreasing and the internal friction angle increases; under the condition of increasing axial pressure and unloading confining pressure, the cohesion of rock keeps increasing and the internal friction angle decreases.

Key words: rock mechanics; triaxial unloading; seepage pressure; sandstone; water-mechanical coupling

地下工程中, 应力状态变化路径对围岩力学特性的影响显著, 如隧道围岩在开挖过程中, 围岩所处的应力状态十分复杂, 在某些情况下围岩在一个方向上应力处于卸荷状态, 另一方的应力处于加荷或卸荷状态, 不同应力状态变化路径下的岩石力学特性不同, 同时由于岩石内部往往存在一定的孔隙水, 孔隙水压力与岩石变形之间存在相互动态耦合。因此, 研究水-力耦合条件下不同卸荷应力路径对岩石力学特性的影响十分重要。

目前, 很多学者从不同角度对岩石在卸荷条件下的力学特性进行了研究, 叶洲元等^[1]通过砂岩在复杂

基金项目: 国家自然科学基金(12072102); 中国博士后基金(2021M690047); 江苏省六大高峰人才项目; 江苏高校“青蓝工程”项目

作者简介: 李均奕(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事多场耦合岩石力学理论与试验研究。E-mail: 592400368@qq.com

通信作者: 王伟(1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事多场耦合岩石力学理论与试验研究。E-mail: wwang@hhu.edu.cn

引用本文: 李均奕, 王伟, 曹亚军, 等. 考虑水-力耦合和不同应力路径的砂岩卸荷力学特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 135-142.

LI Junyi, WANG Wei, CAO Yajun, et al. Experimental study on Unloading Mechanical Characteristics of Sandstone Considering Water-Mechanical Coupling and Different Stress Paths[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(3): 135-142.

应力路径下的三轴试验,分析了砂岩在复杂应力状态下的强度、变形特性及其应变能随应力路径的变化规律;雷涛等^[2]对矿石进行了连续卸荷开挖试验,结果表明,在卸荷试验过程中,岩石的黏聚力与内摩擦角等参数逐渐降低;Li 等^[3]通过对砂岩进行不同条件下的三轴卸荷试验,研究了裂隙岩体在卸荷过程中的力学特性;黄达等^[4]对高应力下脆性岩石进行了不同条件下的三轴卸荷试验,结果表明,高应力下脆性岩石在卸荷过程中呈现较为显著的应变强化特性,同时给出了卸荷条件下参数的数值计算方法;赵航^[5]对深部大理岩进行的三轴卸荷试验结果表明,卸荷试验比加载试验更易引起岩石的破坏,岩石破坏发生时,试件的侧向变形更为剧烈,同时发现在峰值点开始卸荷条件下的破坏更加剧烈;Zhang 等^[6]通过进行一系列的卸荷试验研究了加卸载条件下岩体的应力-应变关系,分析了岩石在卸荷条件下的力学特性;Wang 等^[7]进行了三轴试验和恒轴压卸围压试验,结果表明,在卸荷条件下,岩石强度较为脆弱,破坏时损伤较大,初始围压越大,越容易发生卸载破坏;Li 等^[8-9]通过对岩石开展三轴加卸载试验,研究了岩石在卸荷条件下的力学特性;李地元等^[10]发现相对于常规三轴试验,恒轴压卸围压试验黏聚力降低 24.21%,内摩擦角增大 16.71%,而加轴压卸围压路径黏聚力增大 10.25%,内摩擦角减少 6.64%,表明在恒轴压卸围压试验中岩石抗破坏的主控因素为摩擦力,而在加轴压卸围压路径中为黏聚力;陈秀铜等^[11]进一步研究了水压影响下的卸荷试验,通过对高围压、高水压下的岩石进行试验,得出有水压卸荷对岩石强度的影响比无水压卸荷要大的结论,有水压卸荷,水削弱了围压对岩石的影响;邓华锋等^[12]在研究水-岩作用对岩石的影响中发现,水-岩作用过程中,砂岩的三轴卸荷强度和抗剪强度总体呈先陡后缓的劣化趋势;王伟等^[13]对花岗岩岩样进行了渗透试验并给出了岩石渗流-应力耦合的拟合函数,表明了花岗岩渗透率和体积应变之间的关系。综上,目前国内外对于考虑水-力耦合三轴卸荷试验的研究并不多见,特别是针对不同卸荷路径下水-力耦合的砂岩应力-应变特征与力学特性的研究。

本文结合某隧道工程围岩的卸荷应力状态,设计了恒轴压卸围压以及加轴压卸围压两种应力路径,以砂岩为研究对象,开展不同渗透压力 and 不同卸荷路径耦合作用下室内岩石卸荷力学特性研究,并分析了不同卸荷路径下的砂岩水-力耦合力学特性。

1 试验方法

1.1 试验岩样与试验仪器

试验对象为红砂岩,质地由均匀的砂砾组成,颜色为暗红色。经过对该红砂岩进行测量,其平均含水率为 3%,密度为 2.41 g/cm³。根据 SL 264—264《水利水电工程岩石试验规程》和 GBT50266—2013《工程岩体试验方法标准》,最终将岩块加工为直径为 50 mm、高度为 100 mm 的标准圆柱体试样,如图 1 所示。试验采用的仪器为中国科学院武汉岩土力学研究所开发的岩石多场耦合三轴仪,如图 2 所示。

1.2 试验方案

恒轴压卸围压以及加轴压卸围压两种不同卸荷路径如图 3 所示,具体试验方案如下:①常规三轴试验。卸荷点为常规三轴试验破坏时强度的 75%。为提供对比,引入一组常规三轴试验数据,试验数据采用同种岩样进行常规三轴试验得到,见表 1(表中 σ_3 为初始围压, p_w 为渗透压力)。②恒轴压卸围压路径试验。将轴压升至该围压条件下岩石常规三轴试验破坏时强度的 75%,保持轴压不变,开始卸载围压,至试样发生破坏为止,试验初始预设压力值见表 2(表中 σ_1 为轴压)。③加轴压卸围压路径试验。将轴压加载至相同围压



图 1 试验岩样
Fig. 1 Test samples



图 2 三轴试验仪
Fig. 2 Triaxial testing apparatus

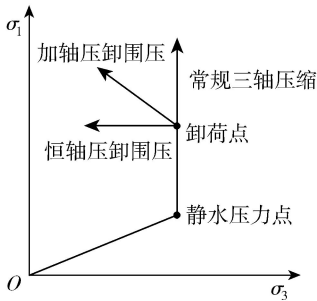


图 3 应力路径
Fig. 3 Stress path diagram

条件下岩石极限强度的 75%,然后在增加轴压的同时卸载围压,在卸载围压过程中需保持平均应力基本不变,直到试样发生破坏为止。试验初始预设压力值见表 3。

表 1 常规三轴试验数据	表 2 恒轴压卸围压路径预设压力值	表 3 加轴压卸围压路径预设压力值
Table 1 Conventional triaxial tests	Table 2 Preset pressure value of stress paths with constant axial pressure and unloading confining pressure path	Table 3 Preset pressure value of stress paths with increasing axial pressure and unloading confining pressure
岩石编号 σ_3/MPa p_w/MPa	岩石编号 σ_1/MPa σ_3/MPa p_w/MPa	岩石编号 σ_1/MPa σ_3/MPa p_w/MPa
1 0 0	9 75 5 0	17 75 5 0
2 5 0	10 107 10 0	18 107 10 0
3 10 0	11 95 10 3	19 95 10 3
4 10 3	12 85 10 5	20 85 10 5
5 10 5	13 142 20 0	21 142 20 0
6 20 0	14 132 20 3	22 132 20 3
7 20 3	15 125 20 5	23 125 20 5
8 20 5	16 118 20 7	24 118 20 7

2 试验结果分析

2.1 不同应力路径变形特征分析

图 4 为渗透压力为 0,围压分别为 5 MPa、10 MPa、20 MPa 下,恒轴压卸围压路径与加轴压卸围压路径的偏压-应变图,可以明显得到,在两种卸荷路径中,围压越大,岩石的峰值强度越大,说明围压对岩石具有保护作用。另外,从卸荷点开始两个方案同样出现环向应变曲线斜率减小、环向应变增长迅速、环向发生明显的扩容等现象,说明围压卸载以环向膨胀为主,且在相同渗透压力与围压条件下,加轴压卸围压路径的扩容程度更大。体积应变在卸载过程变为负值,试样由压缩状态变为扩容状态,且加轴压卸围压路径下的体积扩容更为明显。分析可知砂岩卸荷的破坏形式主要是横向变形快速发展进而导致体积膨胀破坏。当围压卸载至一定程度时,偏应力迅速减小,表明试样在短时间内丧失承载力,有明显脆性破坏特征,且加轴压卸围压路径曲线降低斜率更大,试验时伴随更清脆的破裂声音,表现出更加剧烈的脆性破坏。表 4 为破坏时的围压 σ_3' 与轴向峰值应变 ε_e 结果。

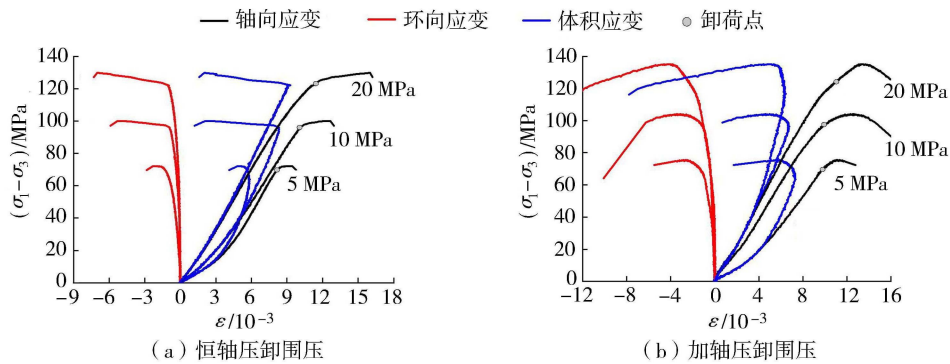


图 4 2 种路径下的偏压-应变关系

Fig. 4 The bias strain relationship under two paths

2.2 渗透压力影响分析

2.2.1 恒轴压卸围压路径

图 5 为恒轴压卸围压路径试验在相同初始围压不同渗透压力的应力-应变曲线对比,图 6 为不同渗透压力卸荷段的围压-应变关系曲线。

从图 5 可以看出,当初始围压相同、渗透压力不同时,在卸荷阶段,随着围压的逐渐降低,岩石的轴向应变在初期降低速率较小,在岩石接近破坏围压时,轴向应变降低速率增大。从图 6 可以

表 4 卸荷试验结果
Table 4 Unloading test results
岩石编号 σ_3'/MPa $\varepsilon_e/10^{-3}$
9 3.09 9.43
10 7.37 12.36
13 12.15 16.09
17 3.31 10.88
18 7.92 11.51
21 15.26 14.68

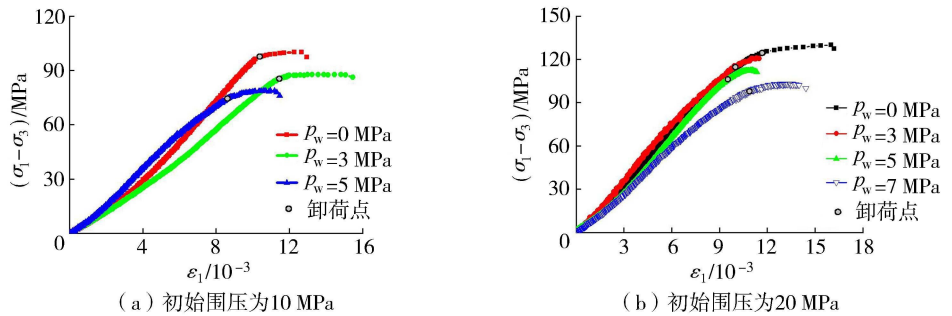


图 5 恒轴压卸围压路径不同渗透压力应力-应变全阶段关系曲线

Fig. 5 Whole stress-strain curves under different seepage pressure with constant axial pressure and unloading confining pressure path

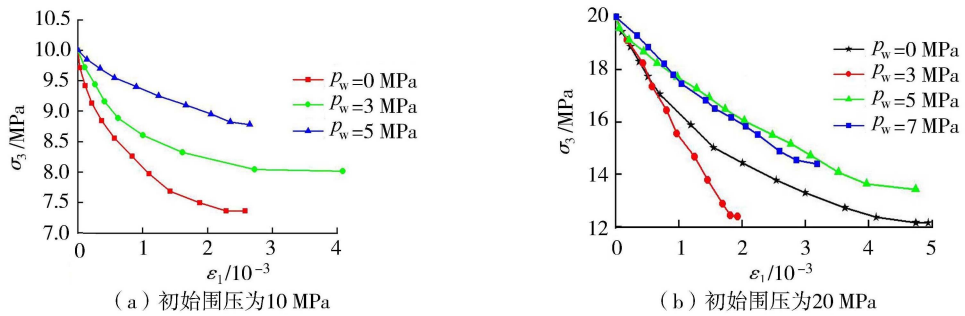


图 6 恒轴压卸围压路径不同渗透压力卸荷阶段围压-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain relationship curves of unloading phase under different seepage pressure with constant axial pressure and unloading confining pressure path

看出,渗透压力越大破坏时的围压越大;同时渗透压力越小,在卸荷初期岩石的轴向应变增长速率越小。这主要是在相同条件下,随着渗透压力的减小,岩石的有效围压增大,此时对岩石的变形有着较好的约束作用,所以轴向应变增长速率较小;轴向应变相同时,渗透压力越大,围压减小值越小。以初始围压为 10 MPa 为例,当轴向应变为 10^{-3} 时,渗透压力为 0 所对应的围压减小量为 2.03 MPa,渗透压力为 3 MPa 所对应的围压减小量为 1.42 MPa,渗透压力为 5 MPa 所对应的围压减小量为 0.66 MPa,这主要是由于渗透压力越大,降低单位围压后的有效围压越小,则产生相同轴向应变条件下所需要降低的围压越小。当围压减小至相同时,渗透压力越大,岩石的轴向应变越大。以围压为 10 MPa 为例,当围压降低 1 MPa 时,渗透压力为 0 所对应的轴向应变为 0.27×10^{-3} ,渗透压力为 3 MPa 所对应的轴向应变为 0.53×10^{-3} ,渗透压力为 5 MPa 所对应的轴向应变为 1.91×10^{-3} 。可以看出,相同围压卸载量条件下,渗透压力越大,产生的轴向应变越大。这是由于卸载相同的围压后,渗透压力越大,有效围压越小,则对岩石变形的约束作用就越小,则产生的轴向应变就越大。在保持渗透压力不变时,随着初始围压的升高,岩石的峰值强度以及轴向峰值应变也随之增大,表明在卸荷条件下,围压对岩石的强度起着强化作用,当初始围压不变时,随着渗透压力的增大,试样的峰值强度逐渐降低,说明渗透压力对岩石的强度起着劣化作用。

2.2.2 加轴压卸围压路径

图 7 为加轴压卸围压路径下相同初始围压不同渗透压力的应力-应变全阶段关系曲线,图 8 为卸荷阶段不同渗透压力对应的应力-应变关系曲线。

由图 7 可知,加轴压卸围压路径与恒轴压卸围压路径渗透压力作用相同;渗透压力对岩石的强度有劣化作用;由图 8 可知,在相同初始围压条件下,渗透压力越大,岩石的峰值强度越小,岩石的压密段特征越明显。这主要是因为随着渗透压力的增大,岩石的有效围压逐渐降低,而有效围压能够抑制岩石损伤的发展。岩石的压密程度反映了岩石变形模量的变化规律,在压密段曲线的斜率即岩石的变形模量逐渐增大,表明在压密段岩石的损伤逐渐降低,而有效围压越大岩石的损伤降低速率越快,从而导致压密段变得越小,即岩石的压密特征越不明显。根据对恒轴压卸围压路径应力-应变曲线的分析,相同围压卸载量条件下,渗透压力越大则产生的轴向应变越大,在加轴压卸围压路径过程中,由于轴压的增大,渗透压力对岩石的劣化作用更为明

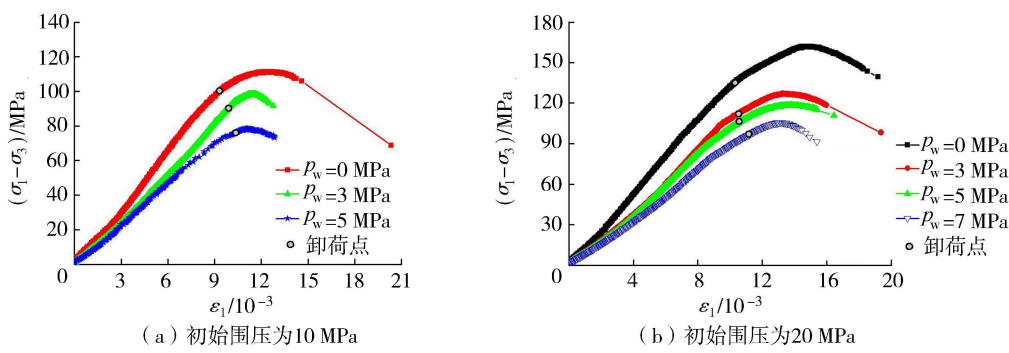


图 7 加轴压卸围压路径不同渗透压力应力-应变全阶段关系曲线
Fig.7 Whole stress-strain curves under different seepage pressure with increasing axial pressure and unloading confining pressure

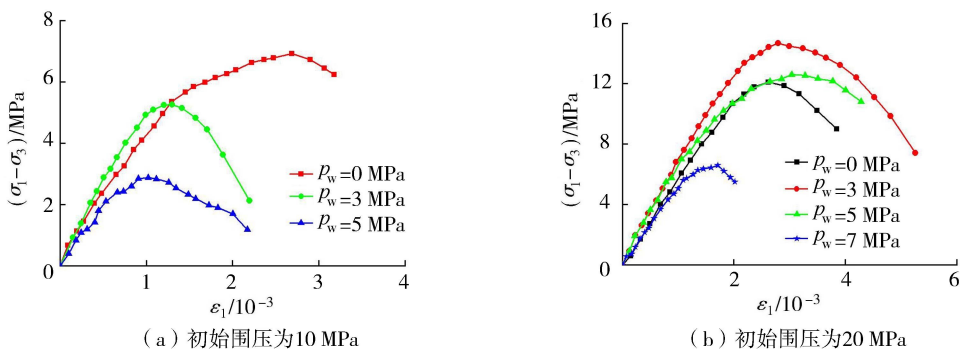


图 8 加轴压卸围压路径不同渗透压力卸荷阶段应力-应变关系曲线
Fig.8 Stress-strain relationship curve of unloading phase under different seepage pressure with increasing axial pressure and unloading confining pressure

显。对图 8 中曲线切线斜率进行观察可以发现,在卸荷段,岩石在卸荷前期应变的增长速率较慢,随着围压的逐渐降低,轴压逐渐增大,岩石的轴向应变增长速率开始增大。

2.3 考虑渗透压力的强度准则拟合分析

直线型 Mohr-Coulomb 强度理论模型能线性反映岩石强度与围压之间的关系。考虑围压对岩石强度的影响,采用其作为拟合方法:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中: σ 为岩石破坏面上的主应力; τ 为破坏面上的剪应力; c 为岩石的黏聚力; φ 为岩石的内摩擦角。式(1)可以用主应力的方式进行表述,即:

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

式中 σ_1 、 σ_3 分别为试样中的最大主应力与最小主应力。式(2)可化简为

$$\sigma_1 = a \sigma_3 + b \quad (3)$$

其中 $a = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$ $b = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$ $\varphi = \arcsin \frac{a - 1}{a + 1}$ $c = b \frac{1 - \sin \varphi}{2 \cos \varphi}$

式中: a 为强度拟合曲线的斜率; b 为强度拟合曲线的截距。

已有研究表明:岩石在不同应力路径下的强度特性具有一定的差异性^[14-17]。为探究岩石的强度特性,对两种不同应力路径的试验结果分别进行拟合。根据拟合结果预测卸荷条件下达到破坏围压时的常规三轴试验压缩强度值,然后将该理论值与卸荷试验值对比,以分析卸荷路径对岩石强度的影响。

图 9 为常规三轴试验的拟合结果。由图 9 可得,Mohr-Coulomb 强度理论模型的参数拟合结果为 $c = 12.23$ MPa, $\varphi = 47.58^\circ$ 。

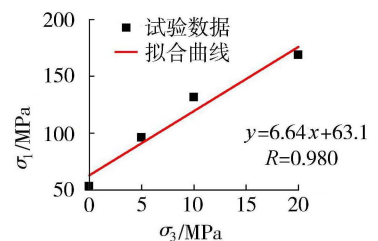


图 9 常规三轴试验拟合结果
Fig.9 Fitting result of conventional triaxial test

2.3.1 恒轴压卸围压路径

对恒轴压卸围压路径试验结果进行强度理论拟合,如图 10 所示, Mohr-Coulomb 强度理论模型的参数拟合结果为 $c = 9.61\text{ MPa}$, $\varphi = 52.28^\circ$ 。

恒轴压卸围压路径条件下岩石的强度值普遍低于常规三轴压缩条件下的岩石强度值,这是由于在恒轴压卸围压路径过程中岩石内部的微裂隙发育更加迅速,卸围压过程相当于对岩石作用侧向的拉应力。该过程不仅会降低岩石的围压值,降低对岩石变形的约束作用,加剧岩石裂缝的发展,同时也会由于岩石较弱的抗拉裂能力,使得岩石产生一定程度的微小张拉裂隙,最终使得岩石强度降低。当渗透压力较低时,岩石的卸荷强度相比常规三轴试验强度值降低幅度较少,当围压较高时,岩石的卸荷强度降低幅度较小。如当渗透压力为 0 时,围压为 3.09 MPa,岩石卸荷强度降低幅度为 2.46%;围压为 7.37 MPa 时,卸荷强度降低幅度为 4.42%;围压为 12.15 MPa 时,卸荷强度降低幅度为 1.18%,平均降低幅度为 2.69%。当渗透压力为 3 MPa,围压为 8.71 MPa 时,卸荷强度降低幅度为 18.69%;围压为 13.38 MPa 时,卸荷强度降低幅度为 6.84%,平均降低幅度为 12.77%。当渗透压力为 5 MPa,围压为 9.02 MPa 时,卸荷强度降低幅度为 20.98%;围压为 14.42 MPa 时,卸荷强度降低幅度为 8.43%,平均降低幅度为 14.71%。通过以上数据做出不同渗透压力下岩石常规三轴预测结果与试验值对比图(图 11)。根据有效应力原理,在围压一定的情况下,渗透压力的增加会导致有效围压减小,围压对岩石内部微裂隙的抑制作用减弱,孔隙裂纹更易发育延伸,进而导致岩石的破坏,所以渗透压力对岩石强度具有劣化作用。

另外,对比岩石常规三轴试验的拟合结果可以看出,岩石的黏聚力在常规三轴试验条件下为 12.23 MPa,在卸荷条件下变为 9.61 MPa,黏聚力降低了 21.42%;岩石的内摩擦角在常规三轴试验条件下为 47.58°,在卸荷条件下变为 52.28°,内摩擦角提高了 9.88%。这主要是由于在卸荷条件下岩石的侧向张裂变形更加明显,导致岩石内部的节理发育更加发达,从而使得岩石整体变得松散,即岩石的黏聚力变小,同时变形过程中的裂缝较常规三轴试验中产生裂缝粗糙程度更大,因而导致岩石的内摩擦角增大。

2.3.2 加轴压卸围压路径

同样对加轴压卸围压路径干燥条件下的岩石试验数据进行拟合,结果如图 12 所示。

由图 12 可得,直线型 Mohr-Coulomb 强度理论模型的参数拟合结果为 $c = 12.42\text{ MPa}$, $\varphi = 45.38^\circ$ 。

加轴压卸围压路径常规三轴试验与卸荷强度线对比见图 13。由图 13 可知,在加轴压卸围压条件下,岩石的强度较常规三轴试验强度而言也会有相应的降低,相较常规三轴试验,试样在卸围压过程中,围压不断降低,对岩石的保护程度也随之减小,而轴压在增大,岩石的承载能力也逐渐变小,从而使得岩石的强度降低。岩石在加轴压的同时卸围压,即相当于在侧向对岩石施加拉应力。根据直线型 Mohr-Coulomb 强度理论模型的特点易知,岩石的极限强度与围压呈正相关关系,所以当围压降低时岩石的强度也随之降低。

当渗透压力较低时,岩石的卸荷强度相比常规三轴试验强度值降低幅度较小;当围压较高时,岩石卸荷强度的降低幅度较大。如当渗透压力为 0,在围压为 3.31 MPa 时,岩石卸荷强度降低幅度为 7.74%;围压为

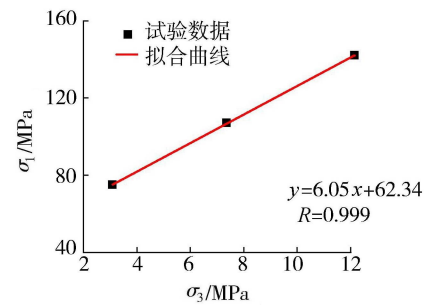


图 10 恒轴压卸围压路径
Fig. 10 Fitting result with constant axial pressure unloading confining pressure path

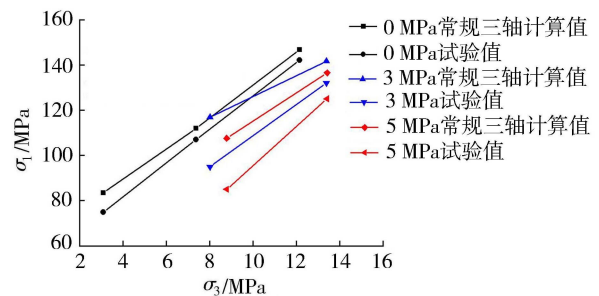


图 11 恒轴压卸围压路径常规三轴试验与卸荷强度线对比
Fig. 11 Comparison of conventional triaxial and unloading strength lines with constant axial pressure unloading confining pressure path

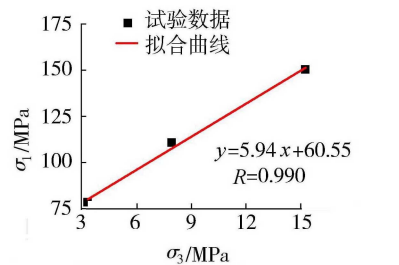


图 12 加轴压卸围压路径
Fig. 12 Stress path with increasing axial pressure and unloading confining pressure

7.92 MPa 时,卸荷强度降低幅度为 4.39%;围压为 15.26 MPa 时,卸荷强度降低幅度为 8.70%,平均降低幅度为 6.94%。当渗透压力为 3 MPa,围压为 8.52 MPa 时,卸荷强度降低幅度为 15.01%;围压为 15.01 MPa 时,卸荷强度降低幅度为 5.55%,平均降低幅度为 10.28%。当渗透压力为 5 MPa,围压为 9.03 MPa 时,卸荷强度降低幅度为 18.80%,围压为 15.72 MPa 时,卸荷强度降低幅度为 6.40%,平均降低幅度为 12.60%。

就岩石的物理性质而言,加轴压卸围压路径条件下岩石的内摩擦角为 45.38°,黏聚力为 12.42 MPa,其中内摩擦角相比常规三轴试验条件下的 47.58°降低了 4.62%,黏聚力相比常规三轴试验条件下的 12.23 MPa 提高了 1.55%,这是由于相较于恒轴压卸围压路径条件而言,在卸围压的同时增加轴压,使得岩石沿着破坏面迅速滑移,此时作用在节理面上岩块之间的力为滑动摩擦力,低于相对静止状态时节理面两侧岩块之间的静摩擦力,所以表现为内摩擦力降低的现象,而对于黏聚力而言,由于在卸荷过程中轴压逐渐增加,使得岩石会沿着一个主要的破坏面产生滑移,而不会持续作用在主裂缝两侧的岩块上,从而使得主裂缝两侧的岩块完整性得以保持,即降低了主裂缝附近岩块的松散性,使得岩石的黏聚力相对于常规三轴试验条件得以提高。

3 结 论

- a. 加轴压卸围压和恒轴压卸围压两种卸荷路径下的岩石强度较同条件下常规三轴试验中岩石强度具有较大的降低幅度,其中加轴压卸围压路径条件下的岩石强度降低幅度最大,其次为恒轴压卸围压路径,这是由于与恒轴压卸围压路径相比,加轴压卸围压路径过程中不仅岩石抵抗变形能力逐渐降低,而且同时轴向荷载使得岩石内部的能量在不断地增加,从而造成强度降低幅度更大。
- b. 在卸荷条件下,渗透压力对岩石强度有着劣化作用,且随着渗透压力的增大,试样的峰值强度逐渐降低,相同初始围压渗透压力越大,其平均降低幅度越大。
- c. 恒轴压卸荷路径,相同围压卸载量条件下,渗透压力越大则产生的轴向应变越大。加轴压卸荷路径,在相同初始围压条件下,渗透压力越大,岩石的峰值强度越小,岩石的压密段特征越明显。
- d. 岩石的强度参数黏聚力和内摩擦角在不同的应力路径下具有不同的变化规律,以常规三轴试验中的黏聚力和内摩擦角值作为基本值,根据恒轴压卸围压路径试验数据可知,黏聚力逐渐降低,内摩擦角逐渐增大,而加轴压卸围压路径过程中的黏聚力逐渐增大,内摩擦角逐渐降低。

参考文献:

[1] 叶洲元,赵伏军,周子龙. 动静组合载荷下卸荷岩石力学特性分析[J]. 岩土工程学报,2013,35(3): 454-459. (YE Zhouyuan,ZHAO Fujun,ZHOU Zilong. Mechanical characteristics of unloading rock under coupled dynamic and static loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(3): 454-459. (in Chinese))

[2] 雷涛,周科平,胡建华,等. 卸荷岩石力学参数劣化规律的细观损伤分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(1): 275-281. (LEI Tao,ZHOU Keping,HU Jianhua,et al. Mechanics parameters deterioration laws of unloading rock mass by meso-damage mechanics[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2013,44(1): 275-281. (in Chinese))

[3] LI Yu,MING Fufu,BIN Tu. Variational problem of unloading fractured rock mass[J]. Advanced Materials Research,2011,1335 (291): 45-53.

[4] 黄达,谭清,黄润秋. 高应力下脆性岩石卸荷力学特性及数值模拟[J]. 重庆大学学报,2012,35(6): 72-79. (HUANG Da,TAN Qing,HUANG Runqiu. Mechanical properties and numerical simulation of unloading of brittle rocks under high geostress [J]. Journal of Chongqing University,2012,35(6): 72-79. (in Chinese))

[5] 赵航. 深部大理岩卸荷力学特性及数值模拟研究[D]. 武汉: 武汉理工大学,2012.

[6] ZHANG L M,WANG Z Q. Study on rock unloading failure and its effects on rock burst[J]. Applied Mechanics & Materials,

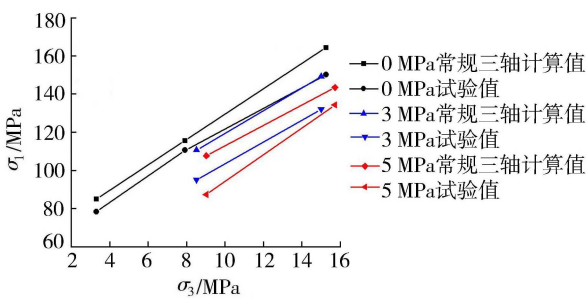


图 13 加轴压卸围压路径常规三轴试验与卸荷强度线对比
Fig. 13 Comparison of conventional triaxial and unloading strength lines with increasing axial pressure unloading confining pressure path

2011,71-78;1455-1458.

[7] WANG Xingxia, MA Wenjuan, HUANG Jianwen, et al. Mechanical properties of sandstone under loading and unloading conditions[J]. Advanced Materials Research,2014,2879(852):21-32.

[8] LI Jianlin, WANG Lehua, WANG Xingxia, et al. Research on unloading nonlinear mechanical characteristics of jointed rock masses[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2010,2(4):49-51.

[9] 李志敬,朱珍德,施毅,等. 高围压高水压条件下岩石卸荷强度特性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2009,37(2):162-165. (LI Zhijing,ZHU Zhende,SHI Yi,et al. Unloading strength properties of rocks under high confining pressure and hydraulic pressure[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2009,37(2):162-165. (in Chinese))

[10] 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(增刊2):3449-3457. (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(Sup2):3449-3457. (in Chinese))

[11] 陈秀铜,李璐. 高围压、高水压条件下岩石卸荷力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(增刊1):2694-2699. (CHEN Xiutong,LI Lu. Experimental study of unloading mechanical mechanical properties of rock under high confining pressure and high water pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(Sup1):2694-2699. (in Chinese))

[12] 邓华锋,张恒宾,李建林,等. 水-岩作用对砂岩卸荷力学特性及微观结构的影响[J]. 岩土力学,2018,39(7):2344-2352. (DENG Huafeng,ZHANG Hengbin,LI Jianlin,et al. Effect of water-rock interaction on unloading mechanical properties and microstructure of sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics,2018,39(7):2344-2352. (in Chinese))

[13] 王伟,徐卫亚,王如宾,等. 低渗透岩石三轴压缩过程中的渗透性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(1):40-47. (WANG Wei,XU Weiya,WANG Rubin,et al. Permeability of dense rock under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(1):40-47. (in Chinese))

[14] 李宏哲,夏才初,闫子舰,等. 锦屏水电站大理岩在高应力条件下的卸荷力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(10):2104-2109. (LI Hongzhe,XIA Caichu,YAN Zijian,et al. Study on marble unloading mechanical properties of Jinping Hydropower Station under high geostress conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(10):2104-2109. (in Chinese))

[15] 李兆霖,周伟,王连国,等. 不同真三轴路径下岩石卸荷特性与破裂特征研究[J]. 采矿与安全工程学报,2022,39(3):480-488. (LI Zhaolin,ZHOU Wei,WANG Lianguo,et al. Unloading properties and fracture characteristics of rock under different true triaxial unloading paths[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2022,39(3):480-488. (in Chinese))

[16] 蔚斐,张通,刘文杰,等. 不同卸荷应力路径下煤样破坏特征实验研究[J]. 工矿自动化,2022,48(4):96-104. (WEI Fei,ZHANG Tong,LIU Wenjie,et al. Study on failure characteristics of coal sample under different unloading stress paths[J]. Journal of Mine Automatio,2022,48(4):96-104. (in Chinese))

[17] 刘刚. 卸荷路径下砂岩力学响应机理与工程应用[D]. 合肥:安徽理工大学,2021.

(收稿日期:2022 - 10 - 06 编辑:胡新宇)