

围压效应对钙泥质胶结砂岩强度和变形的影响

赵永川^{1,2}, 杨天鸿^{1,2}, 秦涛^{1,2}, 汪泓^{1,2}
(1. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;
2. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 针对西部地区侏罗系砂岩成岩年代新、胶结程度较差,以及煤矿高强度开采的特点,开展恒定围压下三轴压缩实验,不同速率卸围压,以及单块多级加载实验,研究围压路径变化效应对钙泥质胶结砂岩强度和变形特征的影响。实验表明:西部中粒砂岩峰值强度、残余强度、峰值应变、弹性模量、泊松比等力学参数均对围压依赖性较强,且由于其钙泥质胶结的细观特性使其黏聚力、内摩擦角相比其他地区、其他年代的砂岩较低。随着围压的增大,试件由简单平整破裂面向复杂非平整多破裂面破裂模式转化。变围压加载过程中,围压的变化对砂岩的承载能力和变性特征影响显著,围压主要通过束缚试件横向变形和裂纹扩展,以及增大内部摩擦的方式影响岩体的力学特征,围压卸载和加载对岩体力学参数的影响规律可为采场推进速度优化和围岩支护分析提供一定的参考。

关 键 词: 钙泥质砂岩;围压卸载速率;多级三轴加载;峰值强度;变形
中图分类号: TU 458 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)02-0254-06

Effects of Confining Pressure Paths on Strength and Deformation of Calcareous Argillaceous Cemented Sandstones

ZHAO Yong-chuan^{1,2}, YANG Tian-hong^{1,2}, QIN Tao^{1,2}, WANG Hong^{1,2}
(1. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: YANG Tian-hong, E-mail: yangtianhong@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Considering the characteristics of short diagenetic age and high intensity mining of Jurassic weak cemented sandstone in western China, the conventional triaxial compression tests, different unloading rates of confining pressure in triaxial compression tests and multi-stage triaxial tests were conducted to study the effects of confining pressure path on the strength and deformation. The results show that: the peak strength, residual strength, peak strain, elastic modulus and Poisson ratio depend on the confining pressure strongly, and the cohesion and internal friction angle of the sandstones in western China are lower than those of other sandstones. As the confining pressure increases, the failure mode transits from single plane fracture to complex multi-fracture. During the loading process, the change of confining pressure can remarkably affect the strength and the deformation characteristic by restricting lateral dilatation and increasing the angle of internal friction. The effect of unloading and loading confining pressure path on the mechanical parameters can provide references for the optimization of mining velocity and the support design of the surrounding rock masses.

Key words: calcareous argillaceous cemented sandstone; confining unloading rate; multi-stage triaxial loading; peak strength; deformation

我国西部煤炭储量丰富,开采条件复杂,且煤矿围岩多为侏罗系砂岩,往往体现出成矿年代短、

胶结性较差、空隙度高、裂隙较多的特点,其强度和变形特征对应力路径依赖性较强,深入研究该地区典型砂岩在不同加载路径下的强度变形特征对于分析预测西部煤矿采场岩体的稳定性具有一定意义。

在三轴压缩实验中学者对围压对岩体的承载能力、弹塑性转化、破裂模式^[1]、弹性模量、最大体积压缩量、渗透率^[2-3]的影响进行了深入研究;然而在现场岩体破坏实例(巷道片帮,采场岩爆等)中更多的是由于开挖卸荷引起岩体某一方向的应力释放打破了岩体的原始平衡状态,使岩体失稳破坏。Zhao 等^[4-5]对不同粒径岩体进行不同加载路径下的压缩实验,发现围压对岩石强度变形影响显著,且含水率越低,颗粒越细,应力和能量转移越不充分,破坏强度越大,越易发生岩爆失稳。He 等^[6]分别用声发射、能耗密度对卸围压下的动态力学参数进行研究,为控制开挖速度从而减缓由于强动力载荷扰动所引发的岩爆灾害提供了参考。岩石(体)是自然界中含有不同程度初始损伤的各种矿物的集合体,深入研究含有初始损伤和加载损伤的岩石对分析试件强度、变形有一定的指导意义。单块多级加载实验通过对单个试件在内部出现大量损伤的情况下持续加围压而得到损伤情况下岩石的强度特征,Youn 等^[7-8]通过对比单块多级实验与常规三轴实验的强度包络线,建立了不同围压下岩石损伤模型,并用单个试件分析了岩体的强度准则。以上国内外学者针对不同加载路径下围压效应对试件的强度和变形性质进行的深入研究,对岩体的失稳岩爆预测有重要参考价值。

近年来,我国煤炭资源开发重心已经由东部向晋陕蒙宁甘等西部地区转移,但西部矿区围岩与其他地区存在一定的差异性。西部地区多为侏罗系煤矿,成矿年代较新,围岩主要为高孔隙度、胶结性较差的钙泥质胶结砂岩,煤炭储存条件好,并具有大采高、长工作面、快速推进等高强度开采的特征,西部煤矿的这些特点使得研究应力路径对围岩力学参数的影响有重要的意义,但针对西部弱胶结砂岩的研究相对较少。本文通过分析西部围岩的细观结构,进行不同围压路径下的三轴压缩实验,主要包括常规三轴实验(围压固定)实验,不同卸围压速率三轴压缩(卸围压)实验,单块多级加载(增围压)实验,研究了围压变化对钙泥质胶结砂岩的强度和变形特征的影响,为分析西部钙泥质胶结砂岩煤矿高强度开采围岩稳定性提供参考。

1 弱胶结砂岩组成矿物分析

试样取自陕西榆横矿区顶底板砂岩,埋深 260 m,制成标准圆柱试件,做成 0.03 mm 切片进行镜下成分鉴定,如图 1 所示。岩石矿物成分主要为长石、石英、云母(少量)和钙泥质胶结物,胶结结晶程度较差。粒径多处于 0.1~0.5 mm 范围内。矿物颗粒呈现棱角-次棱角状,颗粒分选性和磨圆性较差,部分长石有泥化现象,以钙泥质胶结为主。

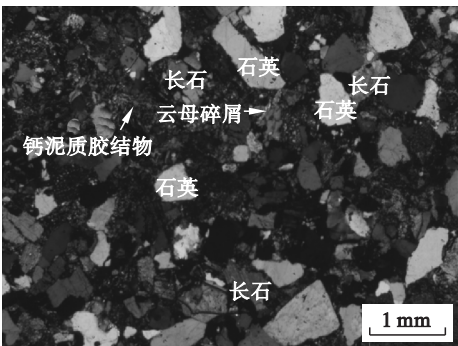


图 1 矿物成分分析(石英,长石,云母,钙泥质胶结)
Fig. 1 Mineral composition analyzation (quartz, feldspar, mica, calcium-mud cemented)

2 不同围压下弱胶结砂岩变形强度特征

选取密度波速相近的试件进行三轴实验,围压分别为 0,3.5,7.5,11.5,15.5,19.5 MPa,每组选 3 个试件进行实验,典型试件应力应变曲线如图 2 所示。

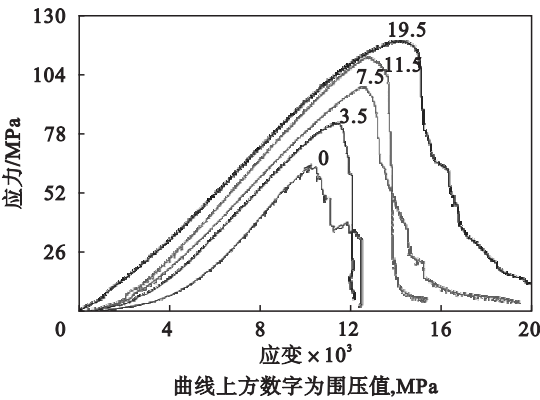


图 2 不同围压下的应力-应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curves of rocks at different confining pressures

图 3 和图 4 为对不同围压下的每一组试件(每组 3 个)的物理参数取平均值,分析了峰值强度、残余强度、峰值变形、泊松比随围压增大的变化趋势。从图 3 中可以看出,峰值强度随围压的增

大基本呈线性增大的趋势,而无围压作用下残余强度数值极低,随着围压的增大,残余强度呈略微上升的趋势,没有峰值强度上升趋势显著.对比峰值强度和残余强度的变化趋势可知,在试件完整性较好的情况下,较高的围压可以较大幅度地增加岩体的承载能力,一旦裂纹贯通(超过峰值强度)出现宏观破坏,承载力急剧下降,即使增大围压,也只能少量提升承载能力,故避免岩体宏观裂纹的形成才能确保岩体工程的稳定性.

图 4 描述了峰值变形和泊松比随围压的变化趋势,泊松比随围压增大呈稳定下降的趋势,可以看出围压对弱胶结砂岩的径向变形的束缚作用比较显著,围压越高越不易出现横向膨胀,而峰值变形随围压的增大也呈现出升高的趋势,并且峰值变形在低围压下增长趋势较为明显,在高围压下峰值变形趋于稳定,说明峰值变形对低围压作用比较敏感,对高围压变化敏感性有所降低.

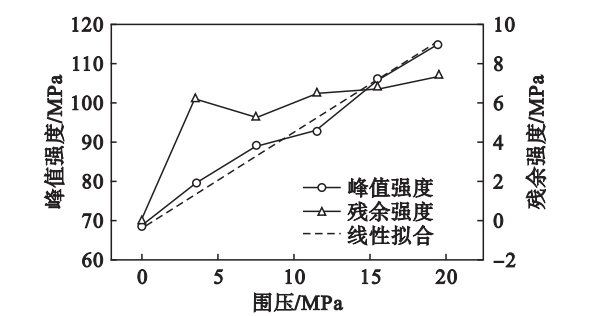


图 3 峰值强度和残余强度变化趋势
Fig. 3 Curves of peak strength and residual strength

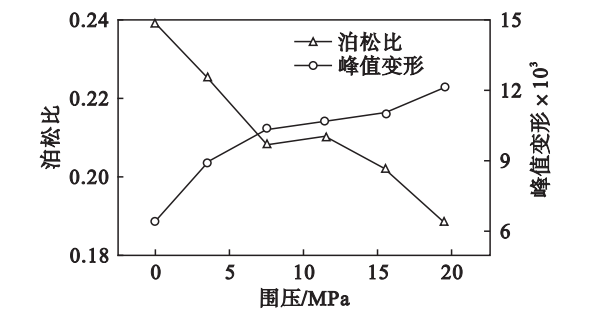


图 4 泊松比和峰值变形变化趋势
Fig. 4 Poisson ratio and peak deformation

围压改变岩石内部的应力状态,对岩石破裂模式有一定的影响^[9].图 5 是西部砂岩不同围压下的破裂模式:随着围压的增大,岩石破裂模式由单破裂面剪切破坏向多重剪切面破坏转化,并且破裂面也有由平面向非平面转化的趋势.低围压情况下,在试件临近破坏时横向束缚较弱,裂纹扩展较快,从而裂纹更易沿着同一方向扩展形成平整破裂面;而在高围压束缚下,裂纹扩展慢,有充分的时间调整裂纹扩展方向,使裂纹更易沿强度较低的弱面扩展,从而形成非平整破裂面.

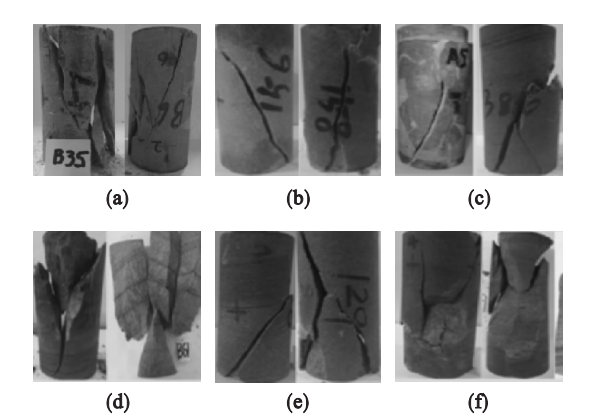


图 5 不同围压下砂岩破裂模式
Fig. 5 Fracture modes of rocks at different confining pressures
(a)—0 MPa; (b)—3.5 MPa; (c)—7.5 MPa; (d)—11.5 MPa; (e)—15.5 MPa; (f)—19.5 MPa.

内摩擦角和黏聚力是莫尔库伦理论的重要参数,在岩土工程界应用广泛.如图 3 所示对不同围压下抗压强度进行线性回归: $\sigma_s = Q + K\sigma_3$,得到 $Q = 70, K = 2.30, R = 0.98$.由 Coulomb 准则表示强度理论时,上述线性回归方程的形式为 $\tau = \mu\sigma + C$,其参数转换关系为^[10]

$$Q = 2C \cdot \cos\varphi / (1 - \sin\varphi),$$
$$K = \tan^2\theta = \tan^2(45^\circ + \varphi/2).$$

由此可得该批西部钙泥质胶结砂岩的内聚力 c 为 23.1 MPa,内摩擦角 φ 为 23.2°.其他文献^[11-12]中砂岩的内聚力为 30 MPa 左右,内摩擦角为 26°~38°.和其他地区砂岩特性比较,西部钙泥质胶结砂岩相关物理参数表现出了相对较弱的特点.

3 不同卸围压速率下的变形强度特征

在煤矿开采过程中,工作面前方煤岩体并不是在恒定围压下失稳破坏的,而是经历了从“原岩应力到轴向应力升高,而同时围压卸载直至破坏失稳”的完整采动力学过程,开采方式的差异导致了围岩卸载速率的差别^[13],为更加真实地体现岩体在开采过程中经历的应力场变化,开展了不同围压卸载速率下的三轴压缩实验.

图 6 为参考埋深而设计的不同卸载速率下的加载路径,图中虚线为依据不同围压下常规三轴实验的强度,基于莫尔准则得到的强度包络线,AB,AC,AD 分别为设定的 3 种加载路径,OA 阶段表示试件从空载条件下同时增加轴压和围压至岩石赋存的静水压力为 7.5 MPa(对应现场围岩

埋深 300 m,假设水平应力与垂直应力相等),AB 阶段轴压加载速率为0.25 kN/s,围压卸载速率为 0.015 MPa/s,AC 阶段轴压加载速率为 0.25 kN/s,围压卸载速率为 0.007 MPa/s,AD 阶段轴压加载速率为 0.25 kN/s,围压保持不变,即卸载速率为 0 MPa/s. 设定的加载路径既可以最大程度地接近岩体的真实三维受力状态,又可以确保在围压卸载至 0 MPa 之前试件发生失稳破坏,充分反映出围压的卸载速率对岩石强度变形的影响.

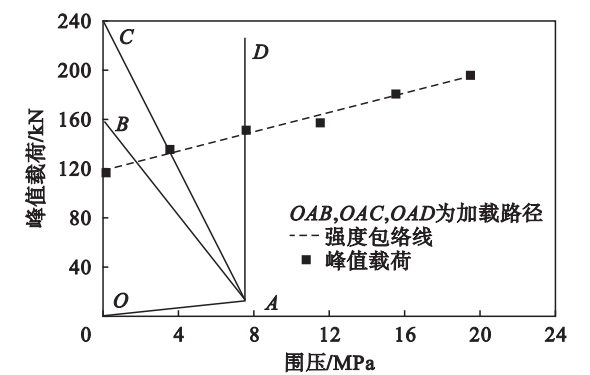


图6 不同卸载速率下的加载路径
Fig. 6 Loading paths of rocks at different unloading rates

图7 是不同加载路径下的轴向和径向变形曲线,在实验过程中每种应力路径选择 3 个试件进行实验,可以看出不同卸围压速率对岩石的应力应变曲线影响较大. 表 1 依次列举了各个试件的峰值强度、峰值变形、体积应变拐点应力水平、弹性模量、泊松比,以及残余强度的变化趋势,对同一组的物理参数取平均值,将均值结果绘制成图 8 和图 9.

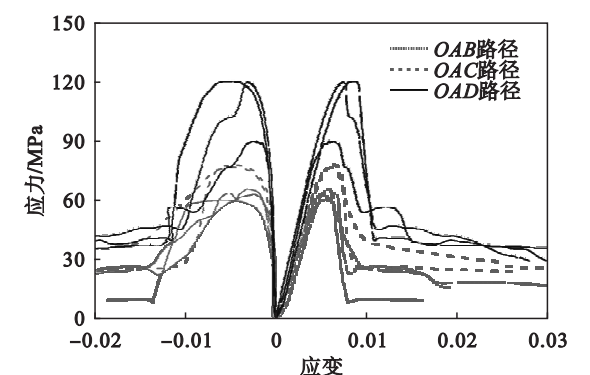


图7 不同加载路径下的应力-应变曲线
Fig. 7 Stress-strain curves of rocks at different loading paths

在图 8 和图 9 中可以看出,随着围压卸载速率的增大,试件破坏时围压降低,用来表征最大承载能力和峰后承载能力的峰值强度和残余强度显现出了迅速降低的趋势,意味着变化的围压对钙泥质胶结砂岩的承载能力影响显著;表征轴向变

| 表 1 不同加载路径下的强度和变形参数 Table 1 Strength and deformation parameters of rocks at various loading paths | | | | | | | |
|--|-----|-----------------|-------------------------------|----------------------|-----------------|---------|-----------------|
| 围压卸 载速率 MPa·s ⁻¹ | 编号 | 峰值 强度 MPa | 峰值 变形 × 10 ³ | 体积应变 拐点应力 水平/% | 弹性 模量 GPa | 泊松 比 | 残余 强度 MPa |
| 0.015 (OAB) | A19 | 60.2 | 5.74 | 48 | 15.7 | 0.28 | 9.17 |
| | A23 | 63 | 5.09 | 67 | 15.5 | 0.29 | 16.0 |
| | B29 | 65.8 | 6.04 | 58 | 16.0 | 0.18 | 15.2 |
| | 均值 | 63 | 5.62 | 58 | 15.7 | 0.25 | 13.5 |
| 0.007 (OAC) | A33 | 78 | 6.54 | 69 | 16.7 | 0.26 | 24.2 |
| | A34 | 76.9 | 6.15 | 64 | 17.8 | 0.22 | 24.0 |
| | A40 | 无效 | -- | -- | -- | -- | -- |
| | 均值 | 77.5 | 6.35 | 67 | 17.3 | 0.24 | 24.1 |
| 0 (OAD) | A14 | 90.3 | 6.33 | 93 | 21.1 | 0.21 | 35.40 |
| | A52 | 120.9 | 8.44 | 75 | 18.8 | 0.24 | 28.61 |
| | A5 | 120.3 | 7.58 | 81 | 19.8 | 0.16 | 31.40 |
| | 均值 | 110.5 | 7.45 | 83 | 19.9 | 0.21 | 31.80 |

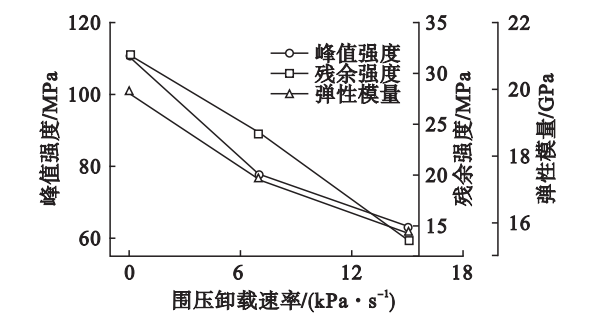


图8 卸围压速率对强度参数影响
Fig. 8 Effect of unloading rate on strength parameters

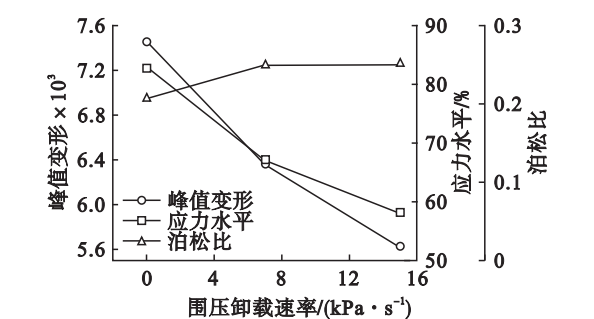


图9 卸围压速率对变形参数影响
Fig. 9 Effect of unloading rate on deformation parameters

形的峰值变形和弹性模量也出现了显著降低的变化趋势,意味着变化的围压对砂岩试件的最大变形能力和变形刚度等变形参数有一定的影响;而由于卸荷速率的增大,致使围压对横向变形的束缚减弱,使得横向变形增大,导致泊松比升高和体积应变由压缩向扩容转变点的提前到来. 这些迹象表明,对于胶结性较差的钙泥质砂岩而言,围压的卸荷效应对该类砂岩的强度和变形参数影响显著. 这种影响规律对于维护岩体稳定性有一定参考价值,即在现场施工过程中,开采速度越快,围

压下降越快,同时轴压的增大等因素直接影响岩体的稳定性;适当控制开采速度并且增加对围岩的支撑力度,对岩体的稳定性有重要影响.

4 单块多级加载下弱胶结砂岩变形特征

上述分析结果表明,恒定围压和卸围压对岩石的变形和强度有着重要影响,但是增加的围压也会影响岩石的承载能力和峰值变形. 为此对砂岩试件开展单块多级加载实验. 为避免试件离散性影响,单块多级加载实验常用于代替常规三轴压缩实验,以得到岩石的黏聚力和内摩擦角等基本岩石力学参数. 实验加载路径如图 10 所示,即在三轴压缩实验中,在临近岩石破坏时及时迅速增大围压以提高岩石的三轴抗压强度,最终得到不同围压下的抗压强度和峰值应变.

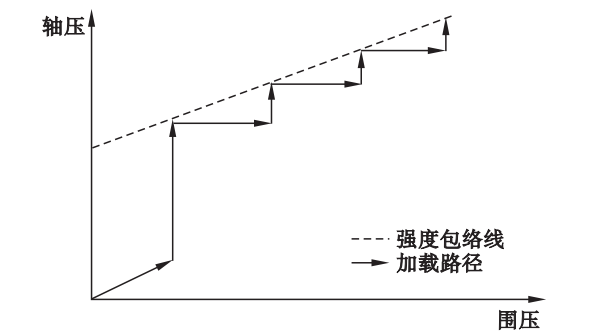


图 10 单块多级加载路径示意图
Fig. 10 Schematic diagram of multi-stage triaxial loading paths

在单块多级加载过程中,临近破坏时增大的围压束缚了岩体的横向膨胀,增强了破裂面间的压力,使颗粒的摩擦和咬合效果增强,延长了塑性变形阶段,积累了较多的塑性变形能量,从而提高了岩石的承载能力. 图 11 是单块多级加载的应力应变曲线,其应力应变曲线和常规三轴压缩实验

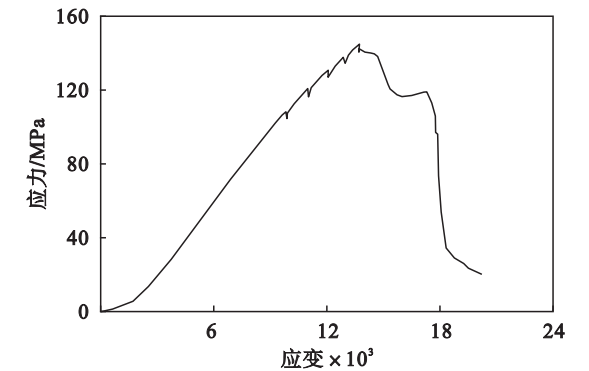


图 11 单块多级加载本构曲线
Fig. 11 Constitutive curves of multi-stage test

相似,且随着围压的增大,岩石的峰值应变和峰值强度都出现了显著上升. 图 12 中同时拟合了常规三轴和单块多级加载的峰值应力和峰值应变与围压的线性关系($y = ax + b$),其拟合参数如表 2 所示,可以看出峰值应力和峰值应变都与围压呈现较好的线性相关性,且两种加载条件下峰值应变和峰值应力的拟合斜率(a 值)比较接近,而截距(b 值)存在一定的差异性,说明单块多级实验在代替常规三轴实验时计算摩擦角(φ 值)有一定的参考价值,但是由于试件的离散性和其初始损伤情况的差异,会使其内聚力(c)的数值有一定的差异性.

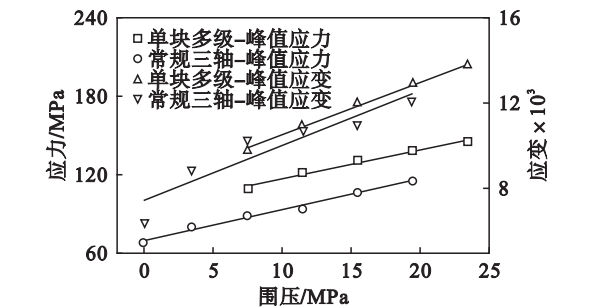


图 12 不同围压下的强度和峰值变形回归曲线
Fig. 12 Regression curves of strength and peak deformation with different confining pressures

表 2 峰值应力和峰值应变的拟合参数
Table 2 Fitting parameters of peak strength and peak strain

| 指标 | 实验类型 | a | b | R |
|------|------|-----------------------|-----------------------|------|
| 峰值应变 | 单块多级 | 2.46×10^{-4} | 8.04×10^{-3} | 0.99 |
| | 常规三轴 | 2.52×10^{-4} | 7.49×10^{-3} | 0.83 |
| 峰值应力 | 单块多级 | 2.28 | 93.7 | 0.98 |
| | 常规三轴 | 2.30 | 70.0 | 0.98 |

单块多级加载实验表明,在钙泥质胶结砂岩内部出现大量损伤后,其强度和峰值变形对围压的增大也非常敏感,主要体现为围压越高其承载能力和峰值变形越大. 所以在岩体工程中,即使岩体内部已经出现大量损伤,如果可以采取恰当措施增大围压,使其侧向束缚能力增强,也可以利用其岩体内部的摩擦和咬合在一定程度上提高其承载能力.

5 结 论

- 1) 围压对胶结程度较差的砂岩强度和变形特征影响显著,细观结构较差使钙泥质胶结砂岩的黏聚力和内摩擦角都比较小.
- 2) 低围压下岩石易出现单平面的剪切破坏;

而在高围压下,裂纹扩展速度受限,应力调整充分,试件易出现非平整的多破裂面混合破裂,破碎较为严重.

3) 卸围压速率和单块多级加载实验的围压效应对岩石的强度和变形特征有重要影响,其围压变化对岩石的强度和变形影响与常规三轴压缩实验相近,表现为在高围压下峰值应力和峰值应变均线性增高. 上述结论可以为矿山开采时围岩稳定性分析提供参考,对现场岩体的支护加固有一定的指导意义.

参考文献：

[1] Nasser M H, Rao K S, Ramamurthy T. Failure mechanism in schistose rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(3) : 205 – 219.

[2] Lion M, Skoczylas F, Ledésert B. Determination of the main hydraulic and poro-elastic properties of a limestone from Bourgogne, France [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(6) : 915 – 925.

[3] Badrul Alam A K M, Niioka M, Fujii Y, et al. Effects of confining pressure on the permeability of three rock types under compression [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 65(1) : 49 – 61.

[4] Zhao Y C, Yang T H, Xu T, et al. Mechanical and energy release characteristics of different water-bearing sandstones under uniaxial compression [J/OL]. [2016 – 12 – 05]. <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1056789517697472>.

[5] Dai B, Zhao G Y, Dong L J, et al. Mechanical characteristics for rocks under different paths and unloading rates under confining pressures [J/OL]. [2016 – 07 – 15]. <https://www.hindawi.com/journals/sv/2015/5787481/>. DOI: 10.1155/2015/578748.

[6] He M C, Miao J L, Feng J L. Rock burst process of limestone and its acoustic emission characteristics under true-triaxial unloading conditions [J]. *International Journal of*

Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(2) : 286 – 298.

[7] Youn H, Tonon F. Multi-stage triaxial test on brittle rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(4) : 678 – 684.

[8] Taheri A, Tani K. Developing a damage model to simulate multiple-step loading triaxial compression tests in rocks[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2013, 31(2) : 541 – 556.

[9] Tang L S, Sang H T, Song J, et al. Mechanical model for failure modes of rock and soil under compression [J]. *Transaction Nonferrous Metal Society of China*, 2016, 26(10) : 2711 – 2723.

[10] 尹明庆. 岩样三轴压缩的破坏形式和 Coulomb 强度准则 [J]. *地质力学学报*, 2002, 8(2) : 179 – 185.
(You Ming-qing. Destroy character and Coulomb criterion of rock specimen in triaxial compression [J]. *Journal of Geomechanics*, 2002, 8(2) : 179 – 185.)

[11] 尹光志, 李小双, 赵洪宝. 高温后粗砂岩常规三轴压缩条件下力学特性试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(3) : 598 – 604.
(Yin Guang-zhi, Li Xiao-shuang, Zhao Hong-bao. Experimental investigation on mechanical properties of coarse sandstone after high temperature under conventional triaxial compression [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(3) : 598 – 604.)

[12] 陶振宇, 陈铁民. 岩石的基本摩擦角及高压摩擦特性 [J]. *科学通报*, 1991, 36(20) : 1567 – 1569.
(Tao Zhen-yu, Chen Tie-min. Properties of rock basic friction angle and high friction [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1991, 36(20) : 1567 – 1569.)

[13] 谢和平, 周宏伟, 刘建锋, 等. 不同开采条件下采动力学行为研究 [J]. *煤炭学报*, 2011, 36(7) : 1067 – 1074.
(Xie He-ping, Zhou Hong-wei, Liu Jian-feng, et al. Mining induced mechanical behavior in coal seams under different mining layouts [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(7) : 1067 – 1074.)