

刘新荣,刘俊,李栋梁,等.不同水压与初始卸荷水平下砂岩的力学特性及卸荷本构模型[J].煤炭学报,2017,42(10):2592-2600. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0285

LIU Xinrong, LIU Jun, LI Dongliang, et al. Unloading mechanical properties and constitutive model of sandstone under different pore pressures and initial unloading levels[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2592-2600. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0285

不同水压与初始卸荷水平下砂岩的力学特性及卸荷本构模型

刘新荣¹, 刘俊^{1,2}, 李栋梁¹, 王军保³, 王子娟⁴, 钟祖良¹

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400045; 2. 中铁十一局集团第五工程有限公司, 重庆 400037; 3. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 4. 重庆工商大学 管理学院, 重庆 400067)

摘要:为研究深埋高水压条件下岩石卸荷力学特性,以砂岩为研究对象,开展了不同水压及初始卸荷水平条件下的三轴加、卸荷试验,研究了卸荷下砂岩的应力-应变特征、强度变形特征等,并推导了卸荷本构模型。研究表明:对于卸荷试验,当初始卸荷水平 n 降低或者水压 p 增大时,砂岩的卸荷极限强度和轴向应变 ε_1 降低,表现出更明显的脆性特征,侧向应变 ε_3 增大,扩容特征越明显。相对于常规加载试验,卸荷试验的峰值黏聚力 c 最大降低 59.78%,峰值摩擦角最大增加 54.72%,初始卸荷水平 n 每降低 0.1,峰值 $c(\varphi)$ 约多减少 10% (10% ~ 15%)。将卸荷应力-应变曲线划分为 4 段,选取 Mohr-Coulomb 屈服准则,对参数 a_t, a_r, b_t, b_r 进行了一元、二元函数拟合,获得了各参数的变化规律,最后得到了卸荷条件下的本构关系。结果表明,理论模型与试验结果吻合较好。

关键词:岩石力学;卸围压;初始卸荷水平;水压;本构模型

中图分类号:TU45 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2017)10-2592-09

Unloading mechanical properties and constitutive model of sandstone under different pore pressures and initial unloading levels

LIU Xinrong¹, LIU Jun^{1,2}, LI Dongliang¹, WANG Junbao³, WANG Zijuan⁴, ZHONG Zuliang¹

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster and Control, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. The Fifth Engineering Co., Ltd., of China Railway 11 Bureau Group Co. Ltd., Chongqing 400037, China; 3. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 4. School of Management, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: In order to study the unloading mechanical characteristics of deep rock under high pore pressure, the sandstone specimens were prepared, and the triaxial compression test and unloading test under different initial unloading levels and pore pressures were performed in laboratory. Stress-strain characteristics, strength deformation characteristics and constitutive model under unloading were studied. The test results show that for unloading test, when the initial unloading level n decreases or the pore pressure p increases, the ultimate strength and axial strain of sandstone decrease, showing more obvious brittle characteristics, and with the increase of lateral strain, the dilatancy characteristics are more obvious. Compared with the conventional triaxial compression test, the peak cohesive c of the unloading test is reduced by 59.78% and the peak friction angle is increased by up to 54.72%. With the initial unloading level of n decreased by 0.1, the peak $c(\varphi)$ decreases by approximately 10% (10% - 15%). The unloading stress-strain curve is

收稿日期:2017-03-07 修回日期:2017-06-20 责任编辑:毕永华

基金项目:煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室资助项目(2011DA105287-MS201208);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2016JQ4009);重庆市科委自然科学基金基础与前沿研究计划资助项目(cstc2013jcyjA30005)

作者简介:刘新荣(1969—),男,浙江开化人,教授。E-mail:liuxrong@126.com。通讯作者:李栋梁(1989—),男,山东临沂人,博士。E-mail:myheartwillgoon17@126.com

divided into 4 sections, and the Mohr-Coulomb is chosen as the yield criterion. The parameters of a_f , a_r , b_f and b_r are fitted by unary and binary function, and the variation law of each parameter is obtained. Finally, the unloading constitutive relation is derived. And the results show that the theoretical model is in good agreement with the experimental results.

Key words: rock mechanics; unloading confining pressure; initial unloading levels; pore pressure; constitutive model

随着我国公路、铁路、大型水电等工程的大力建设,以及煤矿资源大规模深部开采,深部高水压作用下的岩石工程问题越来越多,深埋地下隧洞及煤矿巷道等高应力下岩体的开挖卸荷稳定性已成为我国工程建设中面临的重大问题。从本质上讲,岩体开挖过程是一种应力卸荷过程,其力学机制与加载过程有本质区别。

近年来,卸荷岩体力学的研究有了较大的发展,同时,越来越多的学者对水力作用下的岩石卸荷力学特性进行了研究。唐浩等^[1]研究了高应力高水压卸荷条件下岩石的砂岩扩容特征与体积应变、变形模型的关系。李志敬^[2]、朱珍德等^[3]对锦屏引水隧洞的岩石进行了高应力高水压三轴卸荷试验,发现在高应力和水压的作用下,岩石的黏聚力和摩擦角有较大幅度的降低。梁宁慧^[4-5]等对裂隙砂岩展开了卸荷条件下的渗透率研究,揭示了卸荷量与渗透率的近似双曲线关系。在卸荷本构模型研究方面,张黎明等^[6]基于损伤力学理论,引入比例系数,建立了岩石卸荷损伤本构模型。黄伟等^[7]研究了岩石的卸荷扩容特性,并根据各阶段的卸荷应力-应变曲线建立了卸荷全过程的本构模型。黄润秋^[8]、卢允德等^[9]对砂岩卸荷条件下的本构模型展开了研究,将本构模型分为 4 段,建立了符合该岩石的本构模型。然而以往对卸荷本构的研究仍显不足,相关研究也较少。

此外,不同的卸荷方式将对岩石的力学性质影响较大,以往主要从不同的卸荷路径^[10-11]以及卸荷速率^[12-13]方面对岩石卸荷力学特性的研究,较少考虑初始卸荷水平对岩石力学特性的影响,通常选取峰值三轴压缩强度的 70% ~ 80% 为“初始卸荷点”,卸荷点选取比较随意,然而不同的支护方法、开挖速率及方式都将导致岩石初始卸荷水平的不同^[14-15],因此,有必要对该方面的研究展开进一步的分析。

针对不同初始卸荷水平和水压对深部岩体卸荷特性影响这一重要问题,本文通过室内三轴压缩试验、不同初始卸荷水平与水压下的卸载三轴试验,分析卸荷条件下砂岩的应力-应变特征和强度变形特征。并结合试验结果,对卸荷条件下的本构模型的相关关系进行了探讨。

1 试验方案

1.1 试验材料及仪器

试验岩样选取重庆某深埋隧道砂岩,将岩样制作为直径为 50 mm,高为 100 mm 的圆柱形试样,如图 1(a)所示。试验前对岩样进行饱水处理,然后在“岩石多场耦合三轴仪”系统上进行不同条件下的加、卸载试验,该仪器由法国里尔科技大学研发,仪器如图 1(b)所示。

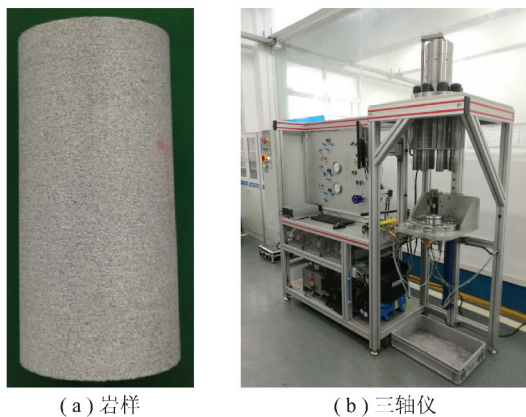


图 1 砂岩岩样及试验仪器

Fig. 1 Sandstone samples and test instruments

砂岩岩样偏光显微镜(采用仪器为 Olympus Bh-2 型)下的薄片鉴定结果为中-细粒长石砂岩,孔隙式胶结,主要矿物成分为石英 50%,长石 40%,岩屑 5%,绿泥石 4%,云母 1%。同时,对砂岩岩样粉末进行了 XRD 的分析(图 2),从衍射图中可知,试样里主要的矿物组成为石英和长石,这与偏关显微镜的结果吻合。

1.2 试验方法

深部岩体开挖过程是典型的卸荷过程,为了更好的模拟工程实际开挖,采用 σ_1 升高, σ_3 降低的加载方式,轴压以位移控制,围压卸载采用应力控制^[16]。

试验步骤为:①以应力控制的方式按 1 MPa/min 的加载速率加载围压到预定初始围压值,分别为:15, 25, 35 和 45 MPa;②围压达到设定值后施加水压,仪器的进口端水压设定为 0, 1, 4, 7 MPa,出口端水压设为大气压,即水压为 0;③以位移控制的方式按 0.02 mm/min 的速率将轴压加载至

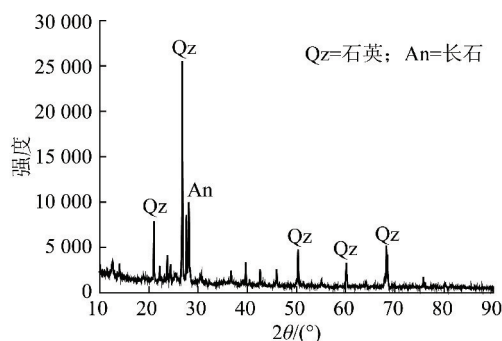


图2 砂岩岩样粉末X射线衍射

Fig. 2 X-ray diffraction powder spectrum of the sandstone

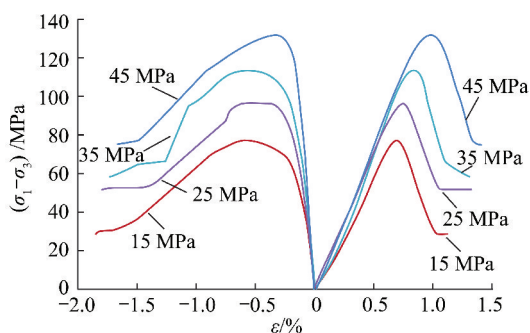
该条件下砂岩三轴压缩强度的70%、80%和90% (不同初始卸荷水平), 然后对围压进行卸荷, 卸载速率为2 MPa/min, 轴压继续以0.02 mm/min的速率加载。④ 岩样发生应力跌落后立即停止卸围压, 并保持该围压, 为得到试样的卸荷残余强度, 继续施加轴压直至应变不随其增加而降低, 试验结束。

2 试验结果及分析

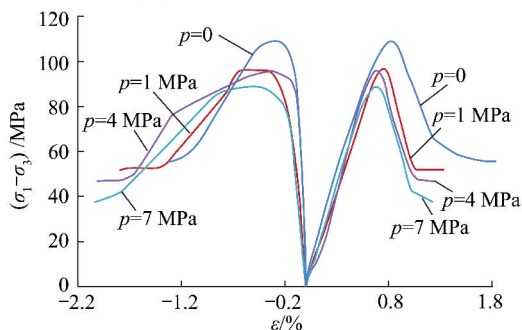
2.1 应力-应变特征

本次试验主要是在高应力条件下开展的不同围压、水压以及初始卸荷水平的三轴加卸荷试验。首先, 根据文献[15]中的探讨, 将三轴压缩试验当做初始卸荷水平为1的卸荷试验进行对比。此外, 由于试验数据较多, 而在相同的工况条件下砂岩的卸荷应力-应变变化趋势较为相似, 为节省篇幅, 只列出其中一组进行对比。图3(a)为不同围压下应力-应变关系(水压 p 为1 MPa, 初始卸荷水平 n 为0.7), 图3(b)为不同水压下的应力-应变关系(初始围压为25 MPa, 初始卸荷水平 n 为0.7), 图3(c)为不同初始卸荷水平的应力-应变关系(初始围压为25 MPa, 水压 p 为1 MPa)。

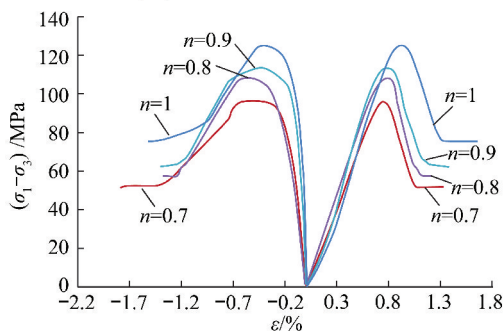
由图3(a)可知, 随着围压的增大, 砂岩的卸荷极限强度(峰值强度)逐渐增大, 与加载试验不同, 卸荷试验的侧向应变整体都比相应的轴向应变大, 表现出明显的侧向扩容现象。由图3(b)可知, 随着水压 p 的增大, 砂岩的卸荷极限强度降低, 轴向应变也降低, 表现出更明显的脆性特征, 而侧向应变与轴向应变的变化趋势刚好相反, 这是因为随着水压 p 的增大, 砂岩的体积扩容更明显。由图3(c)可知, 随着初始卸荷水平 n 的降低, 砂岩的极限强度降低, 这是因为 n 越小, 岩样越早进入卸围压状态, 因此最终的围压越小。随着 n 的降低, 岩样表现出更强的脆性特征, 同时, 当 n 较小时, 由于岩样较长时间的处于卸围压状态, 岩样有较大空间膨胀扩容, 因此可观察到 $n=0.7$



(a) 不同围压下的应力-应变关系



(b) 不同水压下的应力-应变关系



(c) 不同初始卸荷水平下的应力-应变关系

图3 不同工况下砂岩的卸荷应力-应变关系

Fig. 3 Unloading stress-strain relationship of sandstone under different conditions

的侧向扩容比 $n=1$ 时大很多。

2.2 卸荷变形特征分析

对于不同水压 p 和初始卸荷水平 n 的三轴卸荷试验, 可将卸荷过程分为3个阶段^[17], 由于本试验中初始卸荷点不同, 因此第1阶段不易对比, 而第3阶段的残余过程为加载过程, 因此本文只对卸荷过程第2阶段的变形进行了分析(以初始围压25, 35 MPa为例), 如图4所示。

由图4可知:

(1) 卸荷过程第2阶段的轴向应变增量 $\Delta\varepsilon_1$ 较小, 当 n 一定时, 随着水压 p 的升高, $\Delta\varepsilon_1$ 呈降低趋势, 说明 p 的升高会使试件更易脆性破坏。而当水压 p 一定时, 随 n 的降低, $\Delta\varepsilon_1$ 同样呈减小趋势, 岩石表现出更明显的脆性特征。围压为25, 35 MPa时, $\Delta\varepsilon_1$ 分别为0.162 5% ~ 0.336 4%和0.224 7% ~

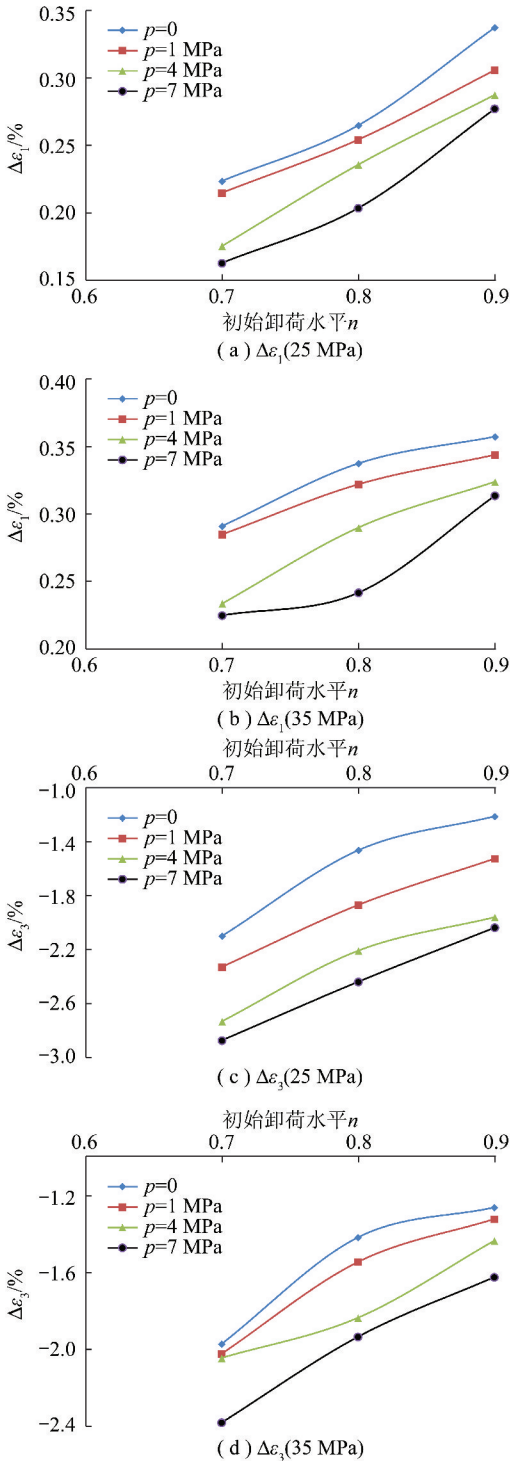


图 4 卸荷第 2 阶段的 $\Delta\varepsilon_1, \Delta\varepsilon_3$ 与水压、初始卸荷水平的变化规律

Fig. 4 Variation law between $\Delta\varepsilon_1, \Delta\varepsilon_3$ and water pressure, initial unloading level of the second unloading stage

0.356 7%。

(2) 侧向应变增量 $\Delta\varepsilon_3$ 较大,当 n 一定时,随着水压 p 的升高, $\Delta\varepsilon_3$ 却是增大的,与前文对应力-应变的分析相同,水压的升高会加速岩样的扩容。而当水压 p 一定时,随 n 的降低, $\Delta\varepsilon_3$ 增大。同样是因为围

压是限制岩样侧向变形的主因,而卸荷条件下,岩样的裂纹扩展更充分,扩容更明显。围压为 25, 35 MPa 时, $\Delta\varepsilon_3$ 分别是 $\Delta\varepsilon_1$ 的 3.6 ~ 17.7 倍和 3.5 ~ 10.6 倍。

2.3 卸荷强度特征分析

Mohr-Coulomb 屈服准则 σ_1 与 σ_3 为线性关系,因此可根据 $\sigma_1 = k\sigma_3 + b$ 得出岩样的强度参数,随不同水压 p 及初始卸荷水平 n 的改变抗剪强度 c, φ 值的变化规律如图 5 所示。

由图 5 可知:

(1) 相对于常规三轴压缩试验,不同水压 p 及初始卸荷水平 n 下的三轴卸荷试验的摩擦角增大,黏聚力降低。这是由于在卸围压过程中,岩石侧向扩容变形较明显,岩样的张裂特性更显著,而一般张剪破坏面的粗糙度相比常规三轴压缩试验的压剪破裂面高,从而摩擦角更大。在水压的作用下,岩样内颗粒间的胶结减弱,同时水压降低了岩石裂隙面及破坏面的有效应力^[18],且卸荷状态下围压不断减小,同样也使得岩样内颗粒间的胶结作用减弱,从而使得黏聚力减小,黏聚力的减小表现为岩样卸荷强度的降低。

(2) 相对于常规加载试验,卸荷条件下峰值黏聚力 c 最大降低 59.78%,初始卸荷水平 n 每降低 0.1,峰值 c 约多减少 10%,随水压 p 的增大,黏聚力也逐渐降低。残余黏聚力 c 最大降低可达 86.89%,其随 n 和 p 的变化规律同峰值黏聚力。卸荷条件下峰值摩擦角 φ 最大增加 54.72%,初始卸荷水平 n 每降低 0.1,峰值 φ 多减少 10% ~ 15%,随水压的增大,摩擦角也是逐渐降低的。残余摩擦角 φ 最大降低可达 42.31%,其随 n 和 p 的变化规律同峰值摩擦角。且发现初始卸荷水平 n 从 0.7 到 0.9 的过程中,黏聚力 c 和摩擦角 φ 变化值较小,而初始卸荷水平从 0.9 到 1 的过程中变化值较大,说明加、卸载应力路径的不同造成岩样的抗剪强度参数差异明显。

3 砂岩卸荷本构模型

3.1 卸荷本构模型的推导

根据本文岩石卸荷的应力-应变曲线特征以及卸荷岩石的破坏机制分析,在推导岩石卸荷本构模型时做如下假设:① 应变软化开始时,岩石的峰值强度符合 Mohr-Coulomb 屈服准则;② 岩石的残余强度也符合 Mohr-Coulomb 屈服准则;③ 应力-应变关系可简化为 4 段来表示,如图 6 所示。

该本构模型的特点是:在峰值前的 OB 段为线弹性段, BC 段采用弹性非线性模型, CD 段为连续线性软化来描述,为塑性模型, DE 段为残余段,按理想塑

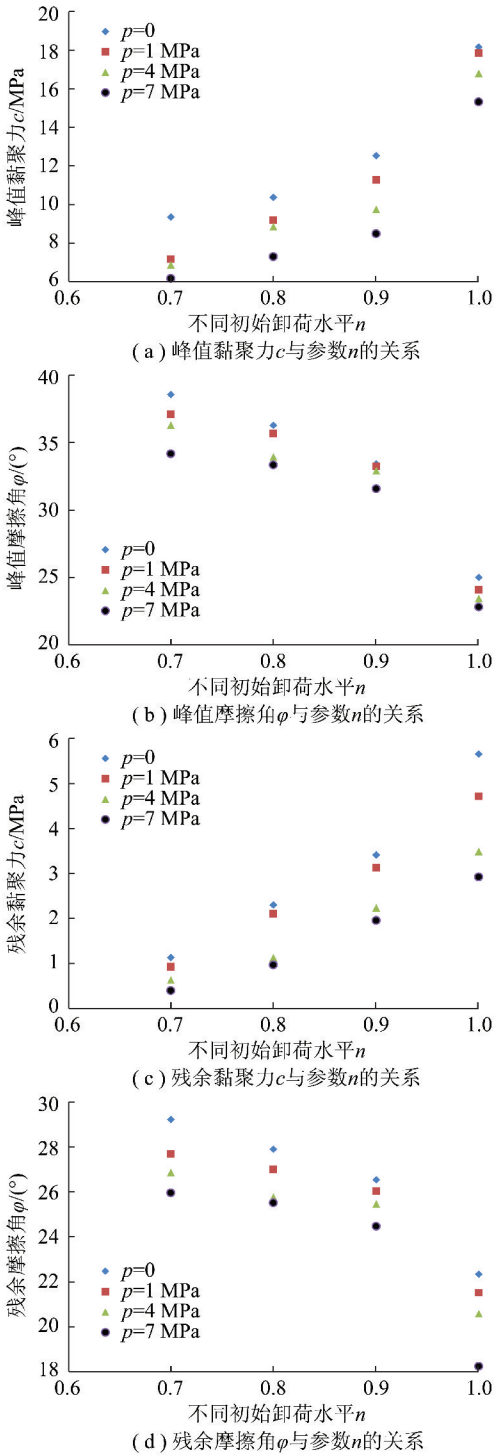


图5 不同初始卸荷水平 n 下抗剪强度参数 c, φ 的规律

Fig. 5 Regularity of shear strength parameters of c and φ under different initial unloading level n

性来处理。下面对卸荷条件下砂岩各个阶段的本构关系进行分析。

(1) 弹性段 OB

加载阶段如图6中 OB 段所示, 由于在高应力条件下, 岩石压密段不明显, 此处将压密段看作直线, 因此整个 OB 段简化为线弹性的应力-应变关系, 而终点 B 为卸荷起始点, 表达式如下:

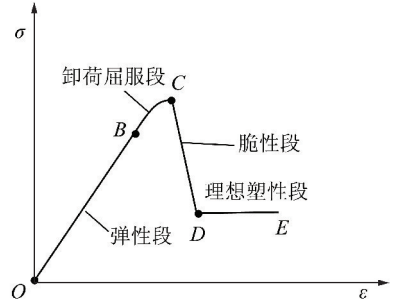


图6 岩石卸荷的弹-脆-塑性本构模型示意

Fig. 6 Sketch of the elastic-brittle-plastic constitutive model for rock under the unloading condition

$$\{d\sigma\} = \mathbf{D}_e \{d\varepsilon\} \quad (1)$$

式中, \mathbf{D}_e 为弹性刚度矩阵。

在本文的增量形式本构关系可表示为

$$d\sigma'(n, p) = E_u d\varepsilon_1 \quad \sigma'(n, p) \leq n\sigma_{1,f} \quad (2)$$

式中, $\sigma'(n, p)$ 为与水压 p 和初始卸荷水平 n 相关的主应力差值; E_u 为卸荷阶段的卸荷模量(由于此段与相应三轴压缩试验一致, 卸荷模量可取加载时的弹性模量); n 为卸荷起始点(卸荷点应力与峰值应力的比值), 即初始卸荷水平; $\sigma_{1,f}$ 为相应三轴加载试验的峰值应力。

(2) 卸荷段 BC

根据对本文卸荷试验的应力-应变曲线观察, 发现峰前卸荷段的曲线为抛物线形, 由于弹性模量的连续性, 假设在卸荷起始点的弹性模量等于弹性段的弹性模量, 则 BC 段可用下式表示:

$$\sigma'(n, p) = a(n, p)\varepsilon_1^2 + b(n, p)\varepsilon_1 + c(n, p), \quad n\sigma_{1,f} \leq \sigma'(n, p) \leq \sigma_{u,f} \quad (3)$$

式中, $a(n, p), b(n, p), c(n, p)$ 为与水压 p 和初始卸荷水平 n 有关的试验参数; $\sigma_{u,f}$ 为卸荷试验的极限强度。

对式(3)关于 ε_1 微分, 则切线弹性模量 E_t 为

$$E_t = 2a(n, p)\varepsilon_1 + b(n, p) \quad (4)$$

根据式(3)、卸荷起始点的应力应变值和卸荷试验的极限强度及极限轴向应变值, 这样就将卸荷试验所得到的结果与理论模型相联系上, 同时可以得到 $a(n, p), b(n, p), c(n, p)$ 的值, 各参数的物理意义如下:

$$\begin{cases} a(n, p) = \frac{\sigma_{u,f} - n\sigma_{1,f} - E_u(\varepsilon_{1u,f} - n\sigma_{1,f}/E_u)}{(\varepsilon_{1u,f} - n\sigma_{1,f}/E_u)^2} \\ b(n, p) = E_u - 2a(n, p)n\sigma_{1,f}/E_u \end{cases} \quad (5)$$

$$c(n, p) = \sigma_{u,f} - a(n, p)\varepsilon_{1u,f}^2 - b(n, p)\varepsilon_{1u,f}$$

式中, $\varepsilon_{1u,f}$ 为卸荷试验的峰值轴向应变。

增量形式的本构关系如下:

$$d\sigma'(n, p) = [2a(n, p)\varepsilon_1 + b(n, p)]d\varepsilon_1 \quad (6)$$

(3) 峰后应力跌落段 CD

根据之前的卸荷试验结果,应变跌落的 CD 段采用连续线性应变软化处理。

根据塑性理论,岩石达到了峰值强度,假设屈服函数符合 Mohr-Coulomb 准则,则有:

$$f_i(\sigma_1, \sigma_3) = \sigma_1 - a_f \sigma_3 - b_f \quad (7)$$

到达残余强度后,假设屈服函数同样符合 Mohr-Coulomb 准则,则有:

$$f_r(\sigma_1, \sigma_3) = \sigma_1 - a_r \sigma_3 - b_r \quad (8)$$

式中, a_f, a_r, b_f, b_r 为试验系数。

对于软化阶段,假定岩石在屈服过程中随着轴向应变 ε_1 在 f_f 和 f_r 之间呈线性变化,即

$$F(\sigma_1, \sigma_3, \varepsilon_1) = \sigma_1 - a(\varepsilon_1)\sigma_3 - b(\varepsilon_1) \quad (9)$$

式中, $a(\varepsilon_1) = \frac{1+\sin \varphi(\varepsilon_1)}{1-\sin \varphi(\varepsilon_1)}$; $b(\varepsilon_1) =$

$\frac{2c(\varepsilon_1)\cos \varphi(\varepsilon_1)}{1-\sin \varphi(\varepsilon_1)}$,此外,有

$$[a_f, \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{1u,f}$$

$$a(\varepsilon_1) = \begin{cases} a_{pp} = a_f + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{1u,f}}{\varepsilon_{1u,f} - \varepsilon_{1u,r}}(a_f - a_r), & \varepsilon_{1u,f} \leq \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{1u,r} \\ a_r, & \varepsilon_1 \geq \varepsilon_{1u,r} \end{cases}$$

$$[a_r, \varepsilon_{1u,r} \geq \varepsilon_1$$

(10)

$$[b_f, \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{1u,f}$$

$$b(\varepsilon_1) = \begin{cases} b_{pp} = b_f + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{1u,f}}{\varepsilon_{1u,f} - \varepsilon_{1u,r}}(b_f - b_r), & \varepsilon_{1u,f} \leq \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{1u,r} \\ b_r, & \varepsilon_1 \geq \varepsilon_{1u,r} \end{cases}$$

$$[b_r, \varepsilon_{1u,r} \geq \varepsilon_1$$

(11)

式中, $\varepsilon_{1u,f}$ 为卸荷试验的轴向峰值应变; $\varepsilon_{1u,r}$ 为卸荷试验的轴向残余应变; a_{pp}, b_{pp} 为软化段 M-C 系数,根据卸荷抗剪强度参数中 k, b 的值,关于初始卸荷水平 n 和水压 p 进行曲线拟合, a_f, a_r, b_f, b_r 这些变量可以求出,如图 7 所示。

拟合表达式有 ($n \leq 1$):

$$a_z = rn^2 + sn + t \quad (12)$$

$$b_z = ue^{vn} \quad (13)$$

式中, a_z 代表峰值状态时的 a_f 以及残余状态时的 a_r (表明 a_f, a_r 都符合此拟合函数); b_z 代表峰值状态时的 b_f 以及残余状态时的 b_r (表明 b_f, b_r 都符合此拟合函数); n 为初始卸荷水平; r, s, t, u, v 为回归参数,通过回归,拟合系数都在 0.93 以上,拟合效果较好。

此外,分析不同水压下参数 a_f, a_r, b_f, b_r 的规律,

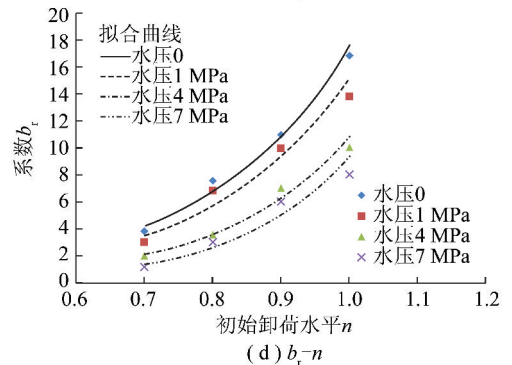
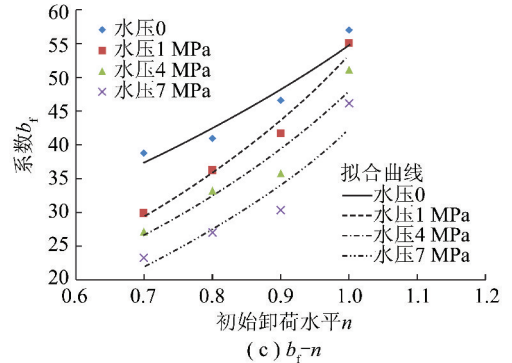
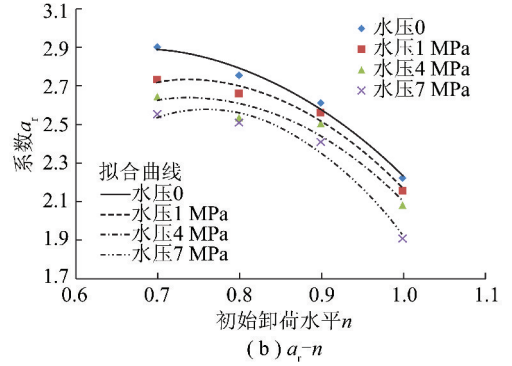
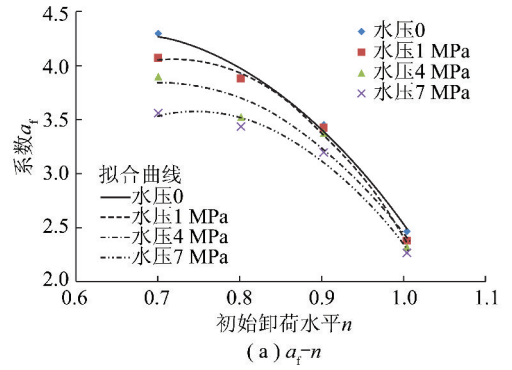


图 7 系数 a_f, a_r, b_f, b_r 与初始卸荷水平 n 的关系
Fig. 7 Relationship between coefficient a_f, a_r, b_f, b_r and initial unloading level n

发现 a_f, a_r, b_f, b_r 都线性减小,相关系数都较高,为节省篇幅,此处不予赘述。综合分析水压 p 和初始卸荷水平 n 对参数 a_f, a_r 的影响,对卸荷状态的参数 a_f, a_r 进行二元函数拟合,拟合曲面如图 8 所示,拟合关系式如下:

$$a_f = -18.21n^2 + 25.84n - 0.05716p - 5.073$$

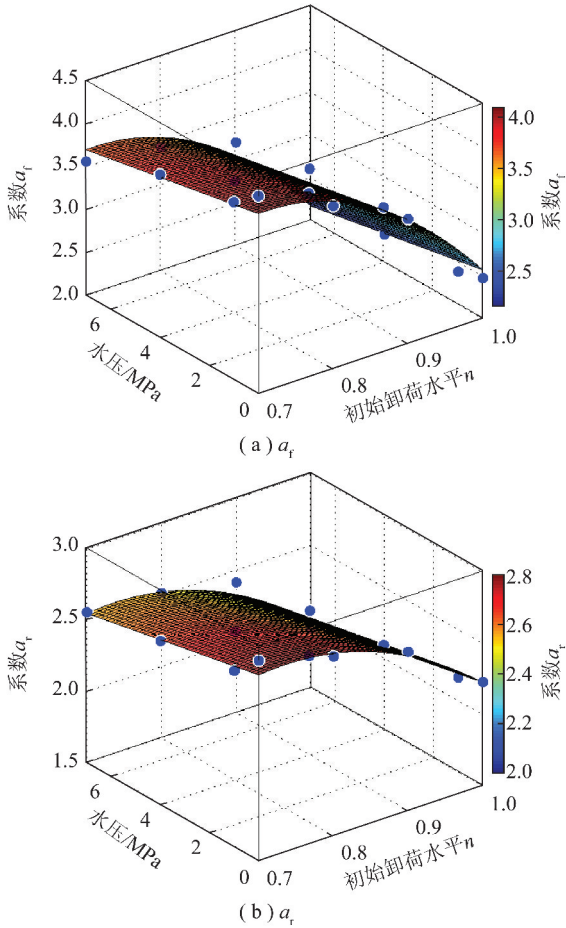


图8 卸荷状态下参数 a_f, a_r 与水压 p 、初始卸荷水平 n 的关系

Fig. 8 Relationship between the parameters a_f, a_r of unloading condition and the pore pressure and the initial unloading level

$$R^2 = 0.9672 \quad (14)$$

$$a_r = -8.387n^2 + 12.32n - 0.03655p - 1.718$$

$$R^2 = 0.9590 \quad (15)$$

同理,对卸荷状态的参数 b_f, b_r 关于 n, p 进行二元函数拟合,拟合曲面如图9所示,拟合关系式如下:

$$b_f = 0.01288e^{7.544n} - 1.841p + 33.34 \quad (16)$$

$$b_r = 6.268e^{1.465n} - 0.7409p - 12.75 \quad (17)$$

假设岩石为各向同性材料,在软化过程中服从等向软化准则,软化段的切线斜率:

$$E_R = \frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_1} = \frac{a_f - a_r}{\varepsilon_{1u,f} - \varepsilon_{1u,r}} \sigma_3 + \frac{b_f - b_r}{\varepsilon_{1u,f} - \varepsilon_{1u,r}} \quad (18)$$

增量形式的应力-应变关系为

$$d\sigma'(n, p) = \left[\frac{a_f - a_r}{\varepsilon_{1u,f} - \varepsilon_{1u,r}} \sigma_3 + \frac{b_f - b_r}{\varepsilon_{1u,f} - \varepsilon_{1u,r}} \right] d\varepsilon_1 \quad (19)$$

(4) 残余段 DE

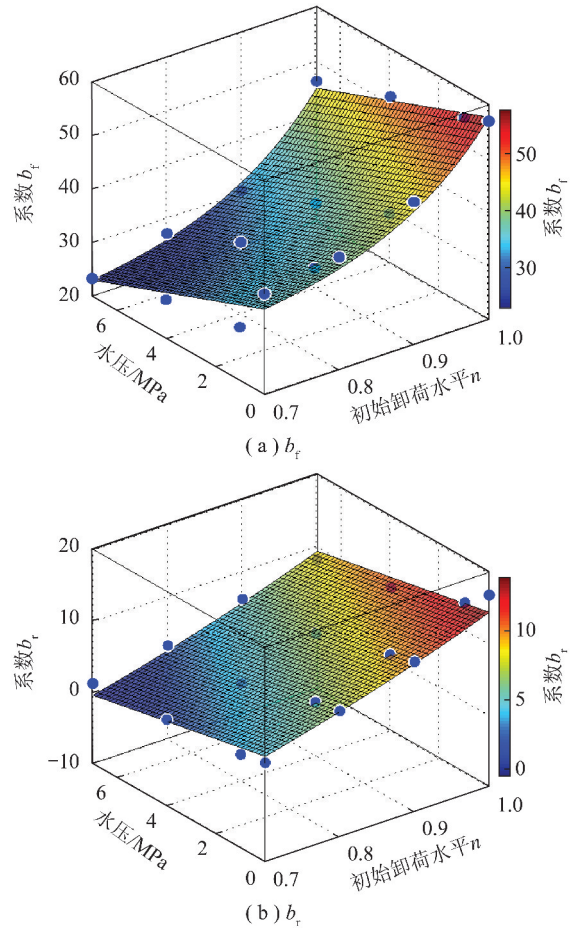


图9 卸荷状态下参数 b_f, b_r 与水压 p 、初始卸荷水平 n 的关系

Fig. 9 Relationship between the parameters b_f, b_r of unloading condition and the pore pressure and the initial unloading level

残余段的应力-应变曲线近似于直线,此阶段岩样沿着破裂面滑移,黏聚力 c 、内摩擦角 φ 保持不变,屈服面保持为残余屈服面不变,此段增量型本构关系为

$$d\sigma'(n, p) = 0 \quad \varepsilon_1 \geq \varepsilon_{1u,r} \quad (20)$$

3.2 卸荷本构模型的验证

根据所得到的参数,代入推导的本构关系中,可以得到理论应力-应变曲线。通过对比理论曲线与试验曲线,如图10所示,说明本文建立的本构模型能够较好的反映不同水压与初始卸荷水平下砂岩的应力-应变特性。

4 结 论

(1) 对于卸荷试验,当初始卸荷水平 n 降低或者水压 p 增大时,砂岩的卸荷极限强度降低,轴向应变 ε_1 也降低,表现出更明显的脆性特征,侧向应变 ε_3 增大,扩容特征更明显。

(2) 相对于常规加载试验,不同水压 p 及初始卸

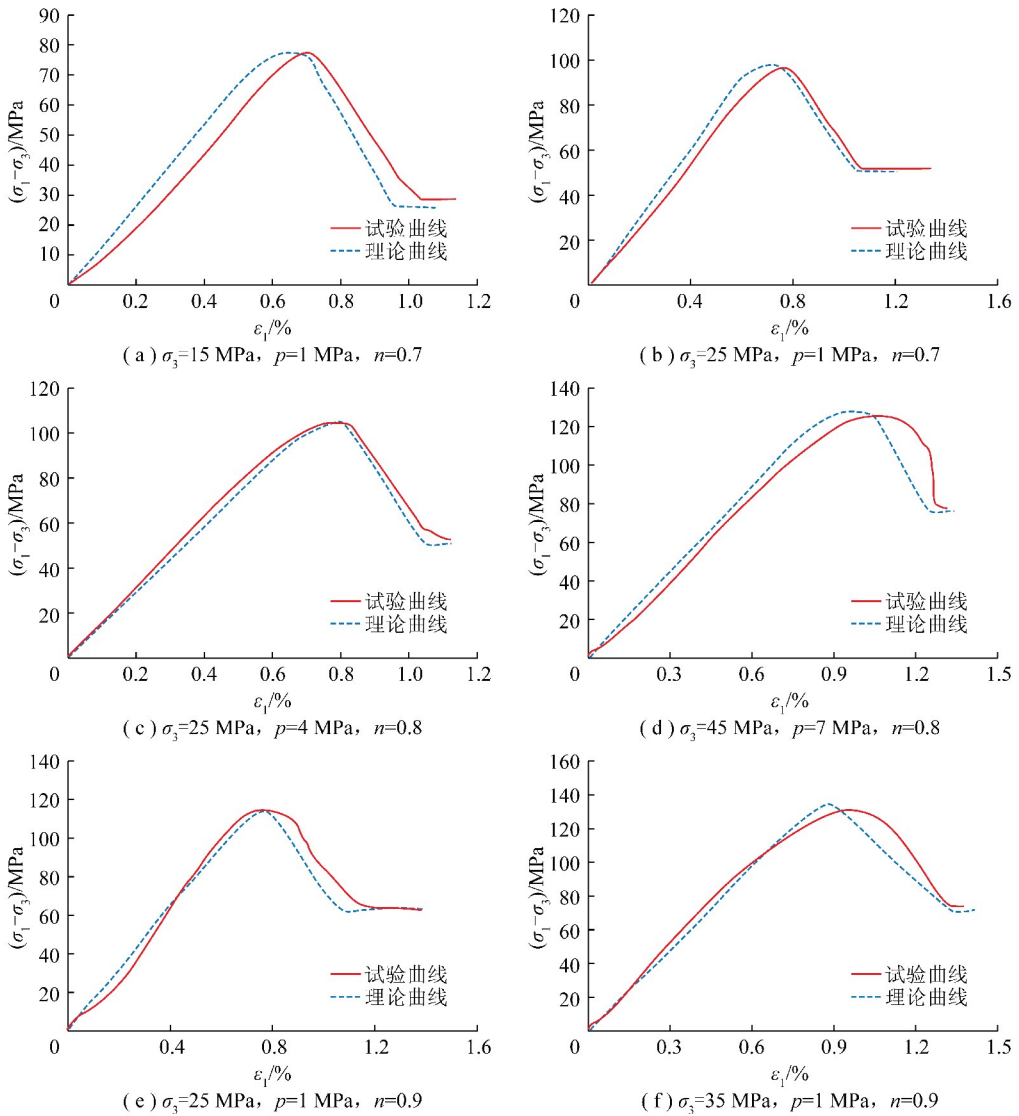


图 10 本文本构模型理论应力-应变曲线与试验曲线对比

Fig. 10 Comparison of theoretical stress-strain curves and test curves

荷水平 n 下的三轴卸荷试验的摩擦角增大,黏聚力降低。卸荷条件下峰值黏聚力 c 最大降低 59.78%,初始卸荷水平 n 每降低 0.1,峰值 $c(\varphi)$ 约多减少 10% (10% ~ 15%),随水压的增大,黏聚力和摩擦角也逐渐降低。

(3) 将卸荷应力-应变曲线划分为 4 段,把 OB 段简化为线弹性关系,并将峰前卸荷段 BC 看作抛物线进行了拟合,根据弹性模量的连续性,假设在卸荷起始点的弹性模量等于弹性段的值,对各参数进行了定义。

(4) 选取 Mohr-Coulomb 为屈服准则,根据不同初始卸荷水平 n 和水压 p 试验结果对参数 a_f, a_r, b_f, b_r 进行了一元、二元函数拟合,得到了参数的变化规律,并将得到的模型曲线与试验结果进行对比,发现

理论模型可以较好地反映卸荷应力-应变特性。

参考文献 (References):

[1] 唐浩,李天斌,陈国庆,等. 水力作用下砂岩三轴卸荷试验及破裂特性研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(3):519-525.
TANG Hao, LI Tianbin, CHEN Guoqing, et al. Triaxial unloading tests on rupture characteristics of sandstone under hydro-mechanical coupling conditions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(3): 519-525.

[2] 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.

[3] 邢福东,朱珍德,刘汉龙,等. 高围压高水压作用下脆性岩石强

- 度变形特性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(2): 184-187.
- XING Fudong, ZHU Zhende, LIU Hanlong, et al. Experimental study on strength and deformation characteristics of brittle rocks under high confining pressure and hydraulic pressure[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2004, 32(2): 184-187.
- [4] 梁宁慧, 刘新荣, 艾万民, 等. 裂隙岩体卸荷渗透规律试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(1): 88-92.
- LIANG Ninghui, LIU Xinrong, AI Wanmin, et al. Experiment study on the permeability of fractured rock under unloading[J]. China Civil Engineering, 2011, 44(1): 88-92.
- [5] LIU X R, LIU J, LIANG N H, et al. Experimental and theoretical analysis of permeability characteristics of sandstone under loading and unloading[J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2016, 9(5): 36-43.
- [6] 张黎明, 王在泉, 孙辉, 等. 岩石卸荷破坏的变形特征及本构模型[J]. 煤炭学报, 2009, 34(12): 1626-1631.
- ZHANG Liming, WANG Zaiquan, SUN Hui, et al. Failure characteristics and constitutive model of rock under unloading condition[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(12): 1626-1631.
- [7] 黄伟, 沈明荣, 张清照. 高围压下岩石卸荷的扩容性质及其本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 3475-3481.
- HUANG Wei, SHEN Mingrong, ZHANG Qingzhao. Study of unloading dilatancy property of rock and its constitutive model under high confining pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 3475-3481.
- [8] 黄润秋, 黄达. 卸荷条件下岩石变形特征及本构模型研究[J]. 地球科学进展, 2008, 23(5): 441-447.
- HUANG Runqiu, HUANG Da. Study on deformation characteristics and constitutive model of rock on the condition of unloading[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(5): 441-447.
- [9] 卢允德, 葛修润, 蒋宇, 等. 大理岩常规三轴压缩全过程试验和本构方程的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2489-2493.
- LU Yunde, GE Xiurun, JIANG Yu, et al. Study on conventional triaxial compression test of complete process for marble and its constitutive equation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2489-2493.
- [10] 蒋海飞. 高围压高孔隙水压力作用下岩石卸荷蠕变特性研究及其工程应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2014: 16-22.
- JIANG Haifei. Study of unload creep properties of rock under high confining pressure and high water pore pressure and its engineering application [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014: 16-22.
- [11] 李新平, 肖桃李, 汪斌, 等. 锦屏二级水电站大理岩不同应力路径下加卸载试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 882-889.
- LI Xinping, XIAO Taoli, WANG Bin, et al. Experimental study of jinning II hydropower station marble under loading and unloading stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 882-889.
- [12] 王在泉, 张黎明, 孙辉. 不同卸荷速度条件下灰岩力学特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1045-1050.
- WANG Zaiquan, ZHANG Liming, SUN Hui. Experimental study of mechanical properties of limestone under different unloading velocities[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1045-1050.
- [13] 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): 1807-1817.
- 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): 1807-1817.
- [14] 周科平, 苏淑华, 胡振襄, 等. 不同初始损伤下大理岩卸荷的核磁共振试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(8): 2144-2150.
- ZHOU Keping, SU Shuhua, HU Zhenxiang, et al. Experimental research into nuclear magnetic resonance in marble with different initial damages under unloading conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(8): 2144-2150.
- [15] 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 Shili, FENG Xiating, ZHANG Chuanqing, et al. Experimental presearch 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.
- [16] 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): 1106-1112.
- 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): 1106-1112.
- [17] 黄润秋, 黄达. 高地应力条件下卸荷速率对锦屏大理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.
- [18] 刘再斌. 岩体渗流-应力耦合作用及煤层底板突水效应研究[D]. 西安: 煤炭科学研究总院西安分院, 2014: 22-24.
- LIU Zaibin. Rock mass fluid-stress coupling process and coal seam floor water inrush mechanism study [D]. Xi'an: Xi'an Branch China Coal Research Institute, 2014: 22-24.