

文章编号:0253-9993(2010)12-2022-06

侧向变形控制下的灰岩破坏规律及其峰后本构关系

王 东^{1,2},王 丁^{1,2},韩小刚^{1,2},周晓明^{1,2}

(1. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,四川 成都 610065;2. 四川大学 水利水电学院,四川 成都 610065)

摘 要:根据不同含水状态(干燥和泡水饱和)和不同围压条件下的灰岩岩样的三轴压缩全程试验和峰后加卸载循环试验,分析干燥和饱水状态灰岩的变形破坏规律、围压对灰岩峰值强度和残余强度及破裂面角度的影响,研究灰岩峰前、峰后强度与变形之间的关系。结果表明:灰岩的破坏方式不仅和围压水平有关,而且和岩石的含水状态相关;灰岩的残余强度与峰值强度相比很小,且随峰后加卸载循环次数的增加继续衰减;该类灰岩在低围压下产生拉剪组合破坏,导致其破裂角度较 Coulomb 准则预测值偏大,在高围压下发生完全剪切破坏,破裂角度与 Coulomb 准则计算结果吻合;岩石轴向应力在峰值前是由其轴向应变决定的,峰后则由侧向变形控制,随侧向变形的增加逐渐衰减至残余强度。在此基础上建立了灰岩峰后本构模型,给出了分段的岩石应力-应变关系函数。利用该模型对岩石应力-应变全过程进行计算,计算结果与试验结果吻合较好。

关键词:侧向变形;峰后特性;泡水;围压;循环加载

中图分类号:TU452 **文献标志码:**A

Limestone failure law and post-failure constitutive relation in the control of lateral deformation

WANG Dong^{1,2}, WANG Ding^{1,2}, HAN Xiao-gang^{1,2}, ZHOU Xiao-ming^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Based on the mechanical tests of limestone which were conducted under different moisture conditions (fully saturated and dry) and different confining pressures, and the cyclic loading tests of broken limestone, analyzed the law of deformation and failure, the effect to peak and residual strength and angle of rupture brought by confining pressure, and researched the law between strength and deformation of whole process. The study results show that: different confining pressure leads different form of failure, and pore water will strengthen the brittleness of limestone. The residual strength is much smaller than the peak strength, and decreases as the cyclic loading. The form of failure about this classification of limestone is tension-shearing under low confining pressure which leads a higher angle of rupture, and fully shearing under high confining pressure which leads a angle as Coulomb criterion. The axial stress is caused by axial strain before failure, but controlled by lateral strain after failure and decreases to the residual strength as the lateral strain increasing. Based on that, limestone constitutive model and stress-strain function were founded, which accord with the test results.

Key words: lateral deformation; post-failure behavior; moisture; confining pressure; cyclic loading

深部煤炭资源是 21 世纪我国主体能源的后备力量。随着开采深度的增加,围岩由浅部开采中的弹性

状态逐渐进入到峰后的塑性破坏状态,导致工程灾害日趋增多,对深部资源的安全高效开采造成了巨大威

收稿日期:2010-08-25 责任编辑:毕永华

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB226802);国家自然科学基金资助项目(50879049,50574064)

作者简介:王 东(1986—),男,山东邹城人,博士研究生。E-mail: dongdongsky100@163.com

胁^[1]。因此,深部资源开采过程中所产生的岩石力学问题已成为国内外研究的焦点^[2-8]。深部开采力学问题就是研究开采围岩破坏后与支护系统相互作用达到二次稳定的复杂力学问题。而目前国内外对于岩石力学的研究,多集中于岩石峰前力学特性;损伤力学的引入较好地描述了岩石内部裂纹扩展对岩石强度的影响^[9-17],但欠缺对岩石宏观裂纹产生后的强度描述。

本文选取华北石炭二叠系煤田分布广泛的大青灰岩,进行不同含水状态(干燥和泡水饱和)的三轴压缩全程试验和峰后加卸载循环试验,结合弹性力学、塑性力学和损伤力学理论,对灰岩的强度、变形和破坏过程进行了研究,以期为矿山深部开采和类似岩土工程提供理论参考。

1 试验设备和试验方法

试验所用灰岩岩样取自河北省冀中能源股份有限公司葛泉煤矿 8 号煤顶板,将 8 块标准岩样分为两组,第 1 组做干燥状态下的三轴压缩试验,第 2 组做常温常压下饱水 24 h 后的三轴压缩试验。同时,利用三轴压缩试验中破坏的岩样再进行峰后重复加卸载循环试验。

试验利用四川大学水利水电学院的 MTS815 型电液伺服岩石力学试验系统,对两组岩样分别进行围压为 5、10、15 和 20 MPa 的三轴压缩试验。整个试验过程由计算机同时按照时间间隔 3 s、轴向位移 0.001 mm 和环向位移 0.005 mm 的方式自动采集记录应力-应变过程中的轴向压力、轴向位移、环向位移等数据。

2 试验结果

2.1 三轴压缩试验

对干燥灰岩试样进行的三轴压缩试验,结果如图 1 所示。在灰岩达到峰值强度前,应力-应变曲线近似为一条直线,其弹性模量几乎不变。达到峰值强度后,低围压下试样很快破坏,强度很快降至残余强度,灰岩发生脆性破坏,并伴有轴向应变的弹性回弹;在围压较高的情况下,岩样在达到峰值强度后发生了一个塑性屈服过程,其强度逐渐衰减,最后稳定在残余强度,灰岩发生延性破坏。灰岩的轴向峰值强度随着围压的增加而升高,但增加的幅度逐渐减小;残余强度随围压的变化规律与峰值强度类似,但在低围压下增加的幅度更快。

2.2 破碎灰岩循环加载试验

将三轴压缩试验压坏的岩样进行峰后重复加卸

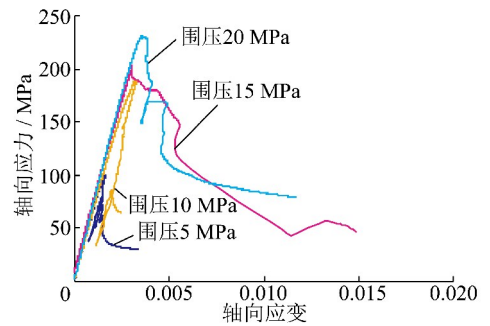


图 1 干燥灰岩三轴压缩应力-应变全程曲线

载试验,得到残余强度和加卸载循环次数的关系,如图 2 所示。

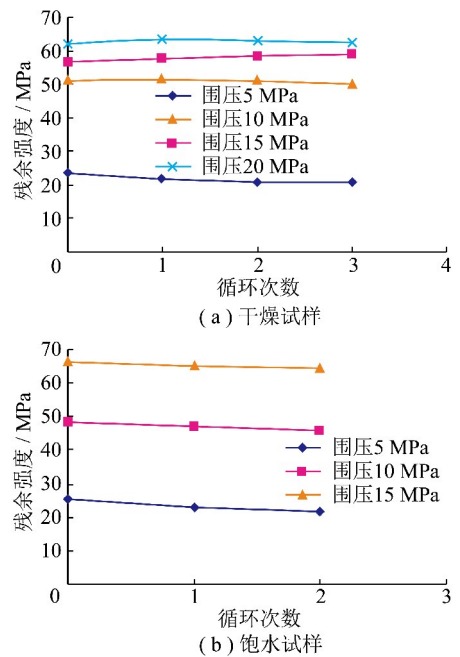


图 2 灰岩残余强度与循环加载次数的关系曲线

Fig. 2 Relation between residual strength and cyclic loading

可以看出,破坏后的灰岩在干燥和饱水状态下,其强度随着加卸载循环的次数增加而逐渐降低,降低幅度达 15% 左右。通过对试验结果的整理,同时得到了灰岩抗剪强度参数黏聚力 c 和内摩擦角 φ 从破坏前到破坏后循环加载过程的变化曲线,如图 3 所示。无论干燥还是饱水状态,灰岩破坏前后,抗剪强度指标均大幅下降:干燥状态下灰岩试样的黏聚力从破坏前的 8.48 MPa 经历破坏后下降到 2.90 MPa,约为峰值的 30% 左右;内摩擦角则从峰值时的 48.16° 下降为破坏后的 28° ,约为峰值的 58%。岩样在破坏后随着循环加载次数的增加,其抗剪强度进一步的降低,其中黏聚力在经历一次峰后加卸载循环后,下降了 17%,从 2.9 MPa 降为 2.4 MPa,二次加卸载循环后降为 2.1 MPa,第三次加卸载循环基本不再发生变

化,保持在 2.1 MPa 左右;内摩擦角在灰岩破坏后,基本不随加卸载循环而变化,维持在灰岩破坏时的 28° 左右。

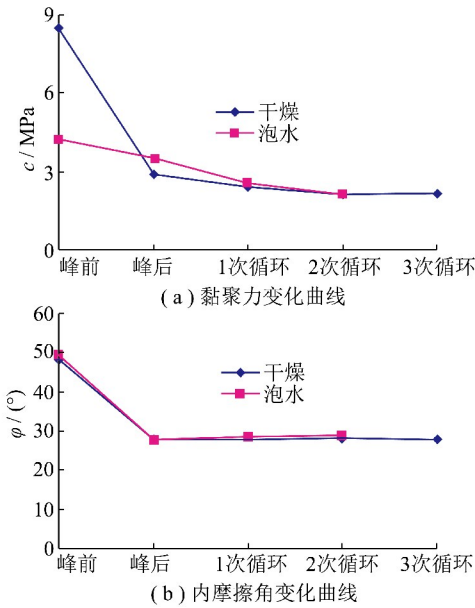


图 3 灰岩抗剪强度参数变化曲线

Fig. 3 Variation curves of shear strength parameters

另外,从图 3 中还可以得出水对灰岩峰前峰后抗剪强度的影响:水使灰岩在峰值时的黏聚力下降到干燥状态的 50%,而在灰岩破坏后与干燥状态下灰岩的峰后黏聚力基本相等;水对于内摩擦角的影响,无论是峰前还是峰后都不显著。

2.3 岩石的承载能力和破坏形式

灰岩的极限承载能力与围压的关系如图 4 所示,可以发现灰岩试样的轴向承载能力随围压增加逐渐增大,且在围压达到一定值时,轴向承载能力增加幅度减小。饱水状态与干燥状态下该值有所区别:干燥状态下灰岩试样在围压达到 10 MPa 前,其峰值强度和残余强度随围压增加均快速增大,在围压超过 10 MPa 以后,灰岩开始呈现部分延性,其轴向承载能力随围压变化程度减缓;饱水状态下的灰岩试样在围压达到 15 MPa 前,其峰值强度和残余强度均随围压增加快速增大,在围压超过 15 MPa 后开始放缓。可以看出,灰岩中的水使灰岩脆-延性破坏转化的临界围压强度增加。这个可以从孔隙水压力的角度来解释。

令 σ_L 表示岩石在干燥状态下的脆延性破坏的围压临界值,则在饱水状态下岩石的脆延性转化临界值 σ_L^* 与孔隙水压力 p_w 之间的关系为

$$\sigma_L = \sigma_L^* - p_w \quad (1)$$

该试验过程不排水,饱水灰岩试样在压缩过程中产生了孔隙水压力,这导致了泡水岩样进入延性破坏

的临界围压强度的增加。孔隙水压力的产生使灰岩的脆性增加。

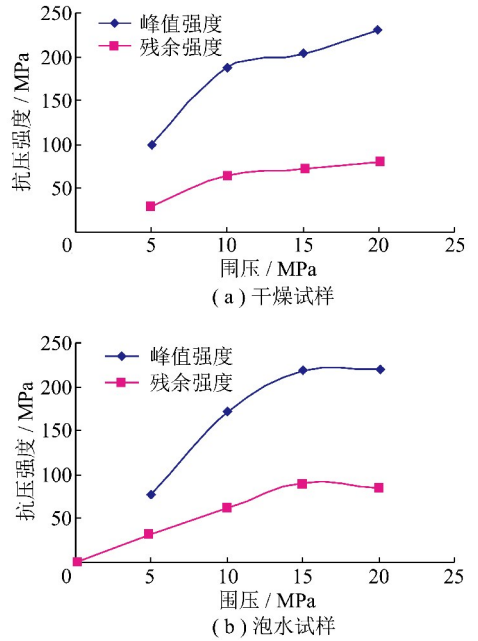


图 4 灰岩强度与围压关系曲线

Fig. 4 Relation between rock strength and confining pressure

图 5 为干燥灰岩试样在三轴压缩试验中的破裂面示意图,可以看出,围压增大,试样的破裂角度(破裂面与最小主应力方向的夹角)呈现减小的趋势。在围压为 5 MPa 时,破裂角为 76°,比 Coulomb 准则预测的 $(45^\circ + \varphi/2) = 69^\circ$ 大了 10% 左右;而随着围压的增加,破裂角逐渐向 69° 靠拢,与 Coulomb 准则对破裂面角度的预测相吻合。

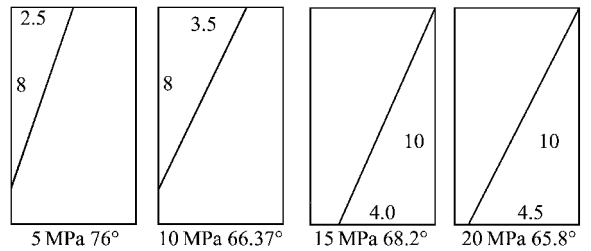


图 5 灰岩破裂面示意

Fig. 5 Schematic diagram of rock fracture surface
注:图上无单位数字为破裂尺寸,cm

对于岩石破裂角有多种解释,文献[18]认为:由于岩石具有明显非均匀性,因而实际破裂角将受到岩样内部的层理、裂隙影响,具有一定随机性。这在解释“低围压下岩石破裂角总是大于理论值”方面有不足之处。分析认为,由于岩石颗粒应力分布的不均匀性,使得在低围压下灰岩内部一部分微元的应力状况为:拉应变先达到极限值,产生拉破坏;而灰岩内部其它微元的受力状况为:剪应力先达到极限值,发生了

剪切破坏。因而在低围压下可视该类岩样的破坏为“拉剪组合破坏”。拉破坏下岩样近似为劈裂破坏,破裂角度大;剪切破坏下的破裂角可以认为是 Coulomb 强度准则计算出的 $(45^\circ + \varphi/2)$ 。低围压下灰岩的破坏是这两种破坏的组合,因此破裂角大于 $(45^\circ + \varphi/2)$ 。随着围压的升高,较大的围压对拉破坏产生了较强的抑制作用,因而使灰岩微元逐渐进入完全剪切破坏状态,破裂角接近 $(45^\circ + \varphi/2)$ 。

3 岩石强度、变形和破坏的讨论

3.1 岩石强度的决定因素和破坏控制条件

图 1 反映的是灰岩压缩过程中轴向应力与轴向应变之间的关系。可以看出在达到峰值强度前,轴向应力-应变曲线近似一条直线,可以认为在破坏前满足线弹性广义胡克定律,即

$$\begin{cases} \sigma_1 = (\lambda + 2G)\varepsilon_1 + \lambda\varepsilon_2 + \lambda\varepsilon_3 \\ \sigma_2 = \lambda\varepsilon_1 + (\lambda + 2G)\varepsilon_2 + \lambda\varepsilon_3 \\ \sigma_3 = \lambda\varepsilon_1 + \lambda\varepsilon_2 + (\lambda + 2G)\varepsilon_3 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 为岩石 3 个主应力和主应变; λ, G 为拉梅常数。令 $\sigma_2 = \sigma_3$, 并代入泊松比 μ 可以得到

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1 + 2\mu\sigma_3 \quad (3)$$

$$\sigma_1 - 2\mu\sigma_3 = E\varepsilon_1 \quad (4)$$

式中, E 为弹性模量。

对灰岩等脆性硬岩而言,在压缩过程中的泊松比和弹性模量近似常数,可以认为 $(\sigma_1 - 2\mu\sigma_3)$ 与轴向应变成线性关系;岩样在破坏前允许轴向变形越大,意味着其轴向承载能力越高。但是一旦岩石破坏,轴向应变的增加将不能产生新的弹力,也就无法产生更大的轴向应力。

对于岩石破坏的控制条件,前人研究了很多,多数定义岩石的轴向应变临界值作为岩石破坏的控制条件^[13-14]。从图 1 中可以看出,灰岩在破坏时对应的轴向应变值随围压的变化而变化,取决于应力水平,不是定值。图 6 是干燥灰岩试样压缩的轴向应力与环向应变的全程曲线。在不同围压下,试样在峰值强度时对应的环向应变几乎不变,保持在 -0.001 左右(压为正),说明在不同应力条件下该岩石破坏时的环向应变是基本固定的。

同时,比较图 1 和图 6 可以发现:图 1 中的轴向应力-轴向应变曲线,在灰岩达到峰值强度后,先是轴向应力产生了跌落,然后产生轴向应变的增加;而在图 6 的轴向应力与环向应变曲线中,灰岩达到峰值强度后,都是先产生环向应变的增加(拉应变),然后发生灰岩轴向应力的跌落。也就是说,在灰岩达到峰

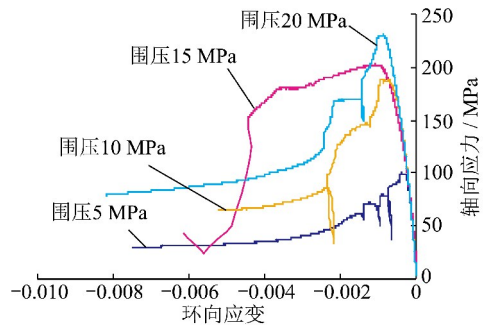


图 6 灰岩轴向应力与环向应变关系曲线

Fig. 6 Axial stress-lateral strain curves of rock

值强度后,先发生环向变形的增加,再产生轴向应力的降低,紧接着发生轴向应变的增加。这说明,引起灰岩轴向应力跌落的原因是环向变形,而不是轴向变形;是环向应变的增加导致灰岩的破坏,引起轴向应力的跌落以及轴向应变的增加。因此将灰岩的环向应变作为灰岩破坏的控制变量是合理且可行的。

综合上述分析可以得出:灰岩破坏前的轴向抗压强度是由其轴向应变决定的;环向变形控制着灰岩的破坏以及破坏后其承载能力的跌落。

3.2 本构模型的建立

曹文贵、方祖烈等^[13]提出了“岩石损伤统计软化模型”,该模型在岩土工程中得到广泛应用。

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1(1 - D) + 2\mu\sigma_3 \quad (5)$$

$$\varphi(\varepsilon) = \frac{m}{\varepsilon^*} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon^*}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon^*}\right)^m\right] \quad (6)$$

$$D = \frac{S}{S_m} \int_0^\varepsilon \varphi(\varepsilon) d\varepsilon = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon^*}\right)^m\right] \quad (7)$$

式中, D 为岩石的损伤参量,无量纲; m, ε^* 分别为 Weibull 分布的分布标度和以应变形式表征的形态参数,它们反映了岩石的力学性质,岩石的损失就是由这些微元体的不断破坏引起的; ε 为岩石微元体的轴向应变; $\varphi(\varepsilon)$ 为轴向应变为 ε 时微元体破坏的概率,是对岩石在加载过程中微元体损坏率的一种量度,它从宏观上反映了试样的损伤程度; S 和 S_m 分别为岩石损伤面积和无损时的全面积。

利用该模型对灰岩压缩过程轴向应力的计算值与试验值比较如图 7 所示,可以看出在灰岩达到峰值前,该模型对应力应变的预测与实际试验结果较为吻合,但是对峰后段的描述存在不足:无法描述灰岩轴向强度在达到峰值后的瞬间跌落;灰岩在完全破坏后,损伤参量 D 将达到 1,按此推算,灰岩破坏后残余强度将变成 $2\mu\sigma_3$,这明显低于灰岩实际残余强度值。

本文认为,灰岩在达到峰值强度前,其轴向承载能力是由轴向应变决定的,且随着轴向应变的增加而逐渐增大;达到峰值强度以后,灰岩轴向承载能力不

再由轴向应变控制,而是受环向应变的控制,随着环向应变的增加逐渐跌落。灰岩在开始的压缩过程中就有环向拉应变的产生,但在峰值前并未达到临界值或者并未达到影响灰岩强度的程度,在达到临界值(即峰值强度)时,环向应变开始影响灰岩强度,并且峰值前的累积环向应变也瞬间对灰岩的强度产生衰减作用。灰岩的应力应变本构模型如图 8 所示。

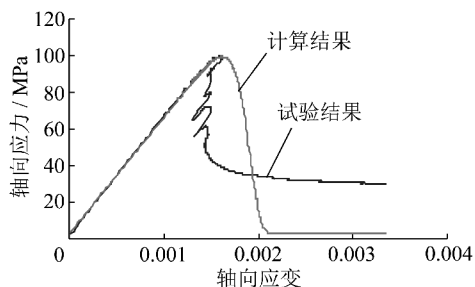


图 7 灰岩三轴压缩应力应变过程

Fig. 7 Triaxial compression stress-strain curves of limestone

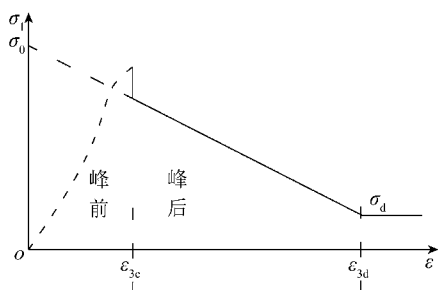


图 8 灰岩峰后本构模型

Fig. 8 Schematic diagram of post-failure constitutive model

σ_0 —灰岩没有损伤时的峰值强度; σ_d —灰岩完全破坏后的残余强度;

ε_{3c} —峰值对应的环向应变; ε_{3d} —残余强度对应的环向应变

据此建立灰岩的应力-应变关系,即

$$\begin{cases} \sigma_1 = E\varepsilon_1(1 - D) + 2\mu\sigma_3 & (\varepsilon_3 \leq \varepsilon_{3c}) \\ \sigma_1 = \sigma_0 - k\varepsilon_3 = \sigma_0 - \frac{\sigma_0 - \sigma_d}{\varepsilon_{3d}}\varepsilon_3 & (\varepsilon_{3c} < \varepsilon_3 < \varepsilon_{3d}) \\ \sigma_1 = \sigma_d & (\varepsilon_{3d} \leq \varepsilon_3) \end{cases} \quad (8)$$

灰岩在没有损伤情况下的峰值强度 σ_0 为

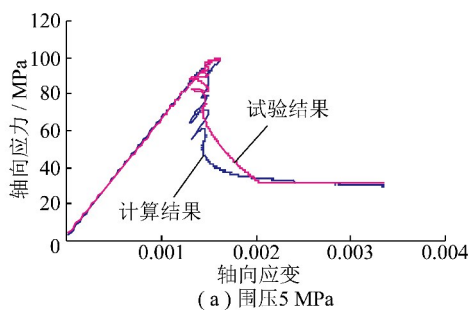
$$\sigma_0 = E\varepsilon_{1c} + 2\mu\sigma_3 \quad (9)$$

式中, ε_{1c} 为灰岩在三轴压缩达到峰值强度时对应的轴向应变值。

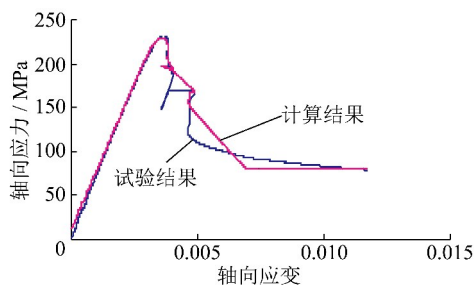
3.3 模型的解释及验证

该模型从灰岩压缩破坏的实际情况出发,将应力-应变曲线分段表达:峰前段灰岩承载能力是灰岩轴向应变的函数,由轴向应变控制;峰后段看作灰岩强度在环向变形作用下的衰减,只是环向应变的函数,与轴向应变无关,直至最后稳定到残余强度阶段。利用本模型对试验数据进行了计算,理论值与实际值的

吻合程度较高,如图 9 所示。



(a) 围压5 MPa



(b) 围压20 MPa

图 9 本构模型对灰岩应力-应变全过程模拟结果

Fig. 9 The computing results of rock stress-strain by the constitutive model

4 结 论

(1)不同围压水平条件下,灰岩三轴压缩时的破坏方式不同:低围压下呈现出典型的脆性破坏;高围压下表现出延性破坏。灰岩轴向承载能力随围压增加而增加,但当围压超过某一值后,轴向强度随围压增加的幅度逐渐减小,该值可视为灰岩脆延性转化的临界围压。泡水导致灰岩内部孔隙水压力的存在,加大了灰岩脆延性转化的临界围压值,在一定程度上增加了灰岩的脆性。

(2)灰岩的残余强度比相同条件下的峰值强度小得多,干燥状态下约为峰值强度的 30%,泡水状态下约为峰值强度的 40%;反映灰岩抗剪强度指标的黏结力和内摩擦角在破坏时产生不同程度的降低。破碎灰岩经历加卸载循环的过程中,黏聚力下降了 17%左右;内摩擦角则变化不大。

(3)灰岩在低围压下的破坏属于“拉剪组合”破坏,这导致了其破裂角大于按照 Coulomb 准则预测的 $(45^\circ + \varphi/2)$;随着围压的升高,围压对“拉破坏”的抑制作用逐渐增加,使得灰岩逐渐进入完全剪切破坏状态,破裂角趋近 Coulomb 准则的计算结果。

(4)灰岩的轴向抗压强度是由灰岩破坏前所能达到的轴向应变决定的;环向变形则控制着灰岩的破坏。在此基础上,建立了灰岩的应力-应变分段函数模型,利用该模型对灰岩试样进行了计算,得出的计算值与试验值较为吻合,说明该模型能较好地反映灰

岩三轴压缩情况下应力-应变的全过程。

参考文献:

- [1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2 803-2 813.
He Manchao, Xie Heping, Peng Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2 803-2 813.
- [2] 钱七虎.非线性岩石力学的新进展—深部岩体力学的若干问题[A].中国岩石力学与工程学会.第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集[C].北京:科学出版社,2004.
Qian Qihu. The current development of nonlinear rock mechanics; the mechanics problems of deep rock mass[A]. Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering. Proceedings of the 8th Rock Mechanics and Engineering Conference[C]. Beijing: Science Press, 2001.
- [3] Kidybinski A, Dubinski J. Strata control in deep mines [M]. Rotterdam; A. A. Balkema, 1990.
- [4] Sun J, Wang S J. Rock mechanics and rock engineering in China: developments and current state-of-art[J]. International Journal of Rock of Rock Mechanics and Mining Science, 2000, 37: 447-465.
- [5] 钱鸣高.20年来采场围岩控制理论和实践的回顾[J].中国矿业大学学报,2000,19(1):1-4.
Qian Minggao. Review of the theory and practice of strata control around longwall face in recent 20 years [J]. Journal of Chinese University of Mining and Technology, 2000, 19(1): 1-4.
- [6] Malan D F, Spottiswoode S M. Time-dependent fracture zone behavior and seismicity surrounding deep level stopping operations [A]. Rock Burst and Seismicity in Minest[C]. Rotterdam; A. A. Balkema, 1997: 173-177.
- [7] Swller E J, Klerck P. Modeling of the effect of discontinuities on the extent of the fracture zone surrounding deep tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2000, 15(4): 463-469.
- [8] 谢和平.深部高应力下的资源开采——现状、基础科学问题与展望[A].香山科学会议.科学前沿与未来(第六集)[C].北京:中国环境科学出版社,2002:179-191.
Xie Heping. Resources development under high ground stress: present state, base science problems and perspective[A]. Xiangshan Science Conference. Science Foreland and Future (Volume VI) [C]. Beijing: China Environment Science Press, 2002: 179-191.
- [9] 谢和平,彭瑞东,鞠杨,等.基于断裂力学与损伤力学的岩石强度理论研究进展[J].自然科学进展,2004,14(10):1 086-1 092.
Xie Heping, Peng Ruidong, Ju Yang, et al. Progress in strength theory of rocks based on fracture mechanics and damage mechanics[J]. Progress in Nature, 2004, 14(10): 1 086-1 092.
- [10] 刘齐建,杨林德,曹文贵.岩石统计损伤本构模型及其参数反演[J].岩石力学与工程学报,2005,24(4):616-621.
Liu Qijian, Yang Linde, Cao Wengui. Statistical damage constitutive model for rock and back analysis of its parameters [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(4): 616-621.
- [11] Lemaitre J. How to use damage mechanics[J]. Nuclear Engineering and Design, 1984, 80(2): 232-245.
- [12] Krajcinovic D, Silva M A G. Statistical aspects of the continuous damage theory [J]. Int. J. Solids Structures, 1982, 18(7): 551-562
- [13] 曹文贵,方祖烈,唐学军.岩石损伤软化统计本构模型之研究[J].岩石力学与工程学报,1998,17(6):628-633.
Cao Wengui, Fang Zulie, Tang Xuejun. A study of statistical constitutive model for soft and damage rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 628-633.
- [14] 徐卫亚,韦立德.岩石损伤软化统计本构模型的研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(6):787-791.
Xu Weiya, Wei Lide. Study on statistical damage constitutive model of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 787-791.
- [15] 谢和平.岩石、混凝土损伤力学[M].徐州:中国矿业大学出版社,1990.
Xie Heping. Damage mechanics in rock and concrete[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1990.
- [16] 唐春安.岩石破裂过程中的灾变[M].北京:煤炭工业出版社,1993.
Tang Chun'an. Catastrophe in rock unstable failure[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1993.
- [17] 余天庆,钱济成.损伤理论及其应用[M].北京:国防工业出版社,1993.
Yu Tianqing, Qian Jicheng. Damage theory and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1993.
- [18] 尤明庆.岩石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 Mingqing. Destroy character and coulomb criterion of rock specimen in pseudo-triaxial compression [J]. Journal of Geomechanics, 2002, 8(2): 179-185.