

DOI: 10.11779/CJGE201606020

岩石应变软化及渗透率演化模型和试验验证

张春会^{1, 2}, 郑晓明¹

(1. 河北科技大学建筑工程学院, 河北 石家庄 050018; 2. 辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 为预测承载岩石的应变软化和渗透率演化, 基于 Gebdykes 白云岩的三轴试验结果, 分析了围压对岩石弹性模量、破坏应变、峰值强度、强度退化过程、残余强度和剪胀扩容的影响规律。将岩石变形全过程简化为 3 阶段, 使用强度退化指数、脆性模量系数和扩容指数改进 FLAC 中的 SS 模型, 建立了考虑围压影响的岩石应变软化模型。基于淮南潘一矿煤、凝灰岩、巴里坤砂岩、山西安家岭泥岩的渗透率与体积应变实验数据, 建立了基于体积应变增透率的岩石渗透率演化模型, 与改进 SS 模型结合, 建立了考虑围压影响的岩石应变软化和渗透率演化模型。利用本文模型分别模拟了安家岭泥岩和 Gebdykes 白云岩的三轴压缩、渗透率演化和体积扩容过程, 结果表明: ①体积应变增透率模型能较好地描述体积应变与渗透率的关系; ②本文模型能较好地模拟围压对岩石残余强度、峰后强度退化过程和剪胀扩容的影响, 能较准确预测承载岩石的渗透率演化。

关键词: 应变软化; 改进 SS 模型; 体积应变增透率; 渗透率演化

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2016)06 - 1125 - 08

作者简介: 张春会(1976 -), 男, 辽宁沈阳人, 博士后, 教授, 主要从事破坏岩石力学方面的研究。E-mail: zhangchunhui789@126.com。

Strain softening and permeability evolution model of loaded rock and experimental verification

ZHANG Chun-hui^{1, 2}, ZHENG Xiao-ming¹

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 2. Department of Mechanics and Science Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 23000, China)

Abstract: To predict the strain softening behaviors and permeability evolution of the loaded rock, according to the tri-axial compression experimental results of Gebdykes dolomite, the effects of the confining pressure on the elastic modulus, failure strain, peak strength, strength degradation process, residual strength and dilatancy are analyzed. The whole deformation process of loaded rock is divided into three stages. The strength degradation index, brittle modulus coefficient and dilatant index are employed to improve the SS model (strain softening model) in FLAC, and a new strain softening model with the effects of confining pressure is proposed. According to the test data analysis of the permeability VS volumetric strain obtained including the coal of Huainan Panyi mine, tuff, sandstone of Balikun mine, mudstone of Anjialing, a permeability evolution model based on the enhanced permeability of volumetric strain is established. Based on the improved SS model, the strain softening and permeability evolution model of loaded rock is set up. The processes of the tri-axial compression, permeability evolution and dilatancy of Anjialing mudstones and Gebdykes dolomite are numerically modeled using the proposed model. The results show that (1) The permeability evolution model of the enhanced permeability of volumetric strain can better describe the relationship between the permeability and the volumetric strain. (2) The proposed model can better numerically model the effects of confining pressure on the residual strength, strength degradation process, dilatancy and permeability evolution of loaded rock.

Key words: strain softening; improved SS model; enhanced-permeability of volumetric strain; permeability evolution

0 引 言

开挖或填筑等工程扰动, 打破了岩石的力学平衡状态, 岩石发生变形, 局部甚至破坏, 形成破坏岩石、未破坏岩石共同承载的新系统, 维持岩石工程的稳定。岩石是一种应变软化材料, 破坏后的岩石通常表现为

强度退化、模量降低和体积扩容, 渗透性也随着岩石的变形而动态变化, 改变着岩石的水力特性。科学预测岩石的应变软化力学行为及渗透率演化规律是岩石

基金项目: 河北省自然科学基金项目 (E2013208148, E2015208089)

收稿日期: 2015 - 04 - 17

边坡稳定性分析、煤炭资源开采、有色金属资源开采、煤层气抽采、硐室、隧道稳定性分析等诸多岩石工程中的关键科学问题。

岩石是一种天然地质体, 遭受地应力的作用, 地应力对岩石的力学特性有很大影响。国内外学者广泛采用三轴试验研究地应力的影响, 使用围压模拟地应力的作用, 先后对砂岩、花岗岩、泥岩、煤和大理岩等开展了三轴压缩试验研究^[1-7]。岩石三轴试验结果表明, 围压对岩石的力学行为有很大影响。随着围压增加, 岩石的弹性模量、峰值强度和破坏应变都增长。峰值强度后, 随着围压增加, 岩石的残余强度增长, 强度退化速率、剪胀扩容速率和渗透率增长都趋缓。为了预测承载岩石的上述力学特征, 国内外开展了许多研究。陆银龙等^[3]基于广义强度指标方法, 建立了岩石应变软化力学模型, 该模型可以描述围压对岩石残余强度的影响, 但广义摩擦角和黏聚力确定非常复杂。Fang等^[8-9]分析了围压对岩石峰后残余强度和模量的影响, 提出了强度退化指数, 较好地描述了围压对岩石残余强度的影响。Yuan等^[10-11]分析了围压对岩石峰后剪胀扩容的影响, 提出了扩容指数, 较好地描述了围压对岩石剪胀角的影响。Zhao等^[12]注意到岩石破坏后剪胀速率逐渐减小的现象, 提出了动态剪胀角模型。于永江等^[13]使用退化角来描述围压对岩石峰后强度退化过程的影响, 研究中假设岩石破坏后的泊松比不变, 这与岩石破坏后泊松比不是定值相悖。张春会等^[14]使用脆性模量系数较好描述了围压对岩石峰后强度退化过程的影响。岩石变形破坏过程中的渗透率演化规律与瓦斯抽采及灾害预报、岩石工程水渗流破坏分析等密切相关, 因此, 岩石变形破坏过程中的渗透率演化规律也受到了国内外学者的关注, 并开展了大量三轴应力渗流试验研究^[15-19]。这些试验研究结果表明, 三轴压缩过程中岩石的渗透率通常呈先减小、后增加的“V”型型式演化, 且与岩样的变形和破坏过程密切相关。薛东杰等^[19]认为渗透率演化与体积应变正相关, 建立了相应的基于体积应变的分段函数关系式。谢和平等^[20]提出了增透率的概念, 并给出了几种理论解。Yuan等^[11]给出了一个岩样渐进破坏过程中渗透率演化的数值模拟方法, 但计算的渗透率与单元尺寸有关。张春会等^[21]基于改进Hoek-Brown模型模拟了采动煤岩的渗透率演化。张春会等^[14]初步建立了渗透率与体积应变的线性关系, 但还缺乏试验验证。

本文基于 Gebdykes 白云岩的三轴试验结果, 利用强度退化指数、脆性模量系数和扩容指数改进了 FLAC 中的 SS 模型。建立了基于体积应变增透率的岩石渗透率演化模型, 使用淮南潘一矿煤、凝灰岩、巴里坤砂岩、山西安家岭泥岩的渗透率与体积应变实验

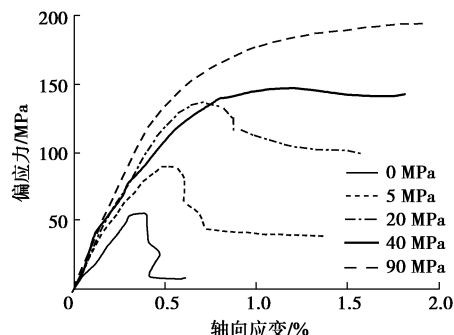
数据进行了验证。与改进 SS 模型结合, 建立了考虑围压影响的岩石应变软化和渗透率演化模型。最后, 利用建立的模型模拟了安家岭泥岩、Gebdykes 白云岩的三轴压缩、渗透率演化和体积扩容过程, 从而为岩石应变软化和渗透率演化预测提供了一个新的思路。

1 岩石应变软化的改进 SS 模型

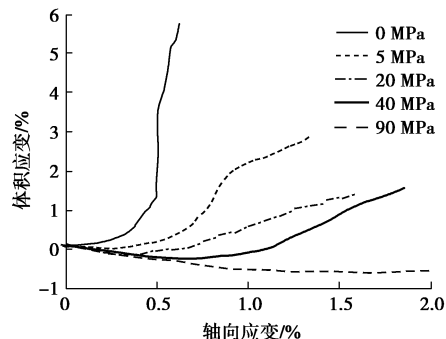
1.1 围压对岩石力学特性的影响

图1为Gebdykes白云岩^[10]三轴压缩下偏应力应变和体积应变曲线, 从图1可以看出, 加载后Gebdykes白云岩先近似呈线弹性变形, 当应力达到峰值强度后再加载岩石的承载能力不增反降, 降低至残余强度后, 基本维持不变, 呈现明显的应变软化特征。围压对白云岩的全程变形过程有很大影响, 具体体现在以下5点。

(1) 随着围压增加, 白云岩的弹性模量总体上有所增长(弹性模量, 指的是平均模量^[22])。一般来讲, 均质岩样的弹性模量并不受围压的影响。白云岩的弹性模量之所以随围压增加而略有增加, 主要是由于岩石并非理想均质材料, 内部赋存初始微裂隙和微孔隙等缺陷, 围压使得这些初始缺陷结构闭合, 岩样的弹性模量随之有所增长。但总体来看, 弹性模量变化幅度并不大。



(a) 偏应力-轴向应变曲线



(b) 体积应变-轴向应变曲线

图1 Gebdykes 白云岩三轴偏应力及体积应变曲线^[10]

Fig. 1 Volumetric and deviatoric stress responses of Gebdykes dolomite in tri-axial compression tests^[10]

(2) 随着围压增加, 白云岩的残余强度增大, 峰后强度降减小。单轴条件下, 岩石的残余强度和

强度降分别为7.5, 48 MPa, 40 MPa围压下岩石的残余强度和峰后强度降分别为141, 6.3 MPa, 当围压为90 MPa时, 峰后强度基本不降低。

(3)随着围压增加, 岩石峰后强度退化速率趋缓, 即岩石的脆性减弱, 塑性增强。在高围压下(如90 MPa), 岩石峰后变形近似为理想塑性。

(4)随着围压增加, 岩石的峰值强度增长, 破坏应变增加。

(5)岩石峰值强度后, 通常发生剪胀扩容。随着围压增加, 岩石的剪胀扩容速率趋缓。

岩石的上述变形特征已为大量岩石三轴试验结果所证实。根据上述岩石变形特征, 可将岩石的变形简化为如图2所示^[14]。岩石全程变形包括3个阶段^[14]: 第1阶段OA为线弹性阶段。由于围压对岩石的弹性模量影响有限, 不考虑围压对弹性模量的影响。第2阶段AB为强度退化阶段。当岩石的应力达到峰值强度, 岩石破坏, 再加载承载能力降低, 发生强度退化。强度退化速率随围压增加而趋缓。第3阶段BC, 当强度退化至残余强度, 岩石强度不再退化, 变形近似理想塑性状态。

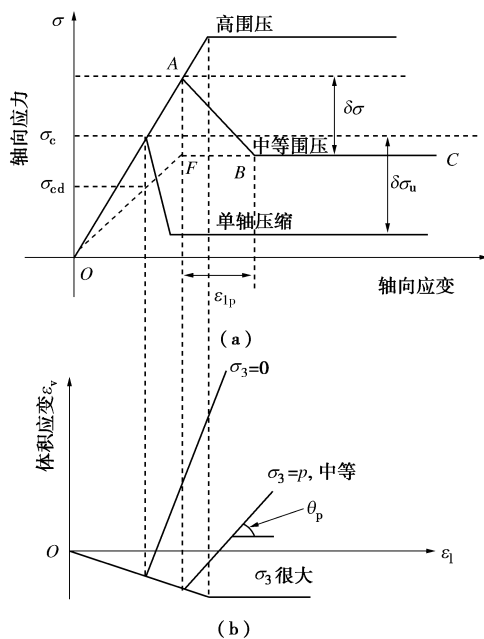


图2 岩石三轴应力应变曲线^[14]

Fig. 2 Stress-strain curves under tri-axial compression^[14]

1.2 FLAC 中的 SS 模型

FLAC 中^[23]使用 strain-hardening/softening model (SS model)模拟岩石的应变硬化及软化行为。使用 SS 模型可以模拟 1.1 中所述的岩石变形 3 阶段过程。在 SS 模型中使用 Mohr–Column 准则判断岩石是否发生破坏。若岩石破坏, 则发生强度退化, 使用 table 函数来定义岩石的黏聚力、内摩擦角、剪胀角和抗拉强度

随等效塑性应变的变化, 如图3所示。在 FLAC 中, 若定义了 table 函数, 则在计算中在每一计算时步, 计算等效塑性应变, 进而获得该时步的黏聚力、内摩擦角等力学参数。

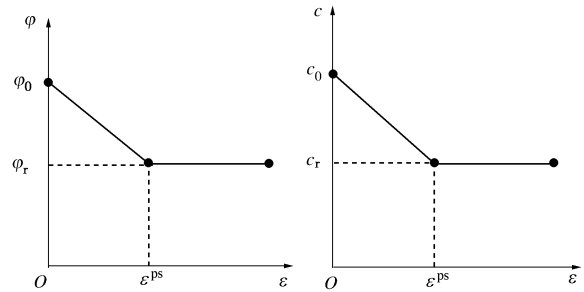


图3 内摩擦角和黏聚力与塑性剪切应变的关系

Fig. 3 Degradation of internal friction angle and cohesion with plastic shear strain

SS 模型中的塑性剪切应变可以表示为^[23]

$$\varepsilon^{ps} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_{1p} - \varepsilon_{mp})^2 + (\varepsilon_{3p} - \varepsilon_{mp})^2 + (\varepsilon_{mp})^2}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{mp} = \frac{1}{3}(\varepsilon_{1p} + \varepsilon_{3p}), \quad (2)$$

式中, ε_{1p} , ε_{3p} 分别为主塑性应变分量。

FLAC 中 SS 模型中的塑性势函数与 Mohr–Column 准则一致, 则非关联的塑性势函数可以写为

$$g = \sigma_1 - \sigma_3 N_\psi, \quad (3)$$

式中, $N_\psi = (1 + \sin \psi_p) / (1 - \sin \psi_p)$, ψ_p 为围压 σ_3 下的剪胀角。

于是, 由塑性理论可得塑性剪切应变为^[23]

$$\varepsilon^{ps} = \frac{\sqrt{3}}{3} \sqrt{1 + N_\psi + N_\psi^2} \varepsilon_{1p}. \quad (4)$$

1.3 SS 模型改进

从图1, 2可见, 围压对岩石峰后强度退化速率、残余强度和剪胀扩容速率都有很大影响, 而直接使用 FLAC 中的 SS 模型无法予以考虑。因此需要建立围压与 ε_{1p} 、残余强度和剪胀角之间的关系, 并将其引入到 SS 模型中, 才能较好地描述围压对岩石峰后力学行为的影响。为此, 本文引入脆性模量系数、强度退化指数和扩容指数来改进 SS 模型。

(1) 围压对强度退化过程的影响

张春会等^[14]将图2中的 $\angle ABF$ 的正切值定义为脆性模量, 脆性模量可以表示为

$$E_b = \frac{\delta\sigma}{\varepsilon_{1p}}, \quad (5)$$

式中, $\delta\sigma$ 为峰值强度与残余强度的差值。 ε_{1p} 为岩石强度退化过程中的轴向塑性应变, 如图2。

于是, 脆性模量系数定义为^[14]

$$\gamma_E = \frac{E_b}{E_{b0}}, \quad (6)$$

式中, E_{b0} 为单轴下岩石的脆性模量, E_b 为某围压下岩石的脆性模量。

通过对巴里坤砂岩、山西含碳泥岩和Tennessee大理岩等围压与脆性模量系数实验数据拟合, 围压与脆性模量系数之间符合如下负指数函数关系^[14]:

$$\gamma_E = \exp(-n_b \sigma_3), \quad (7)$$

式中, n_b 为试验拟合常数, σ_3 为围压。

由式(7)、(5)、(4)可以得到

$$\varepsilon^{ps} = \frac{\sqrt{3}}{3} \sqrt{1 + N_\psi + N_\psi^2} \frac{\delta\sigma}{\gamma_E E_{b0}}. \quad (8)$$

式(8)描述了围压对塑性剪切应变和强度退化过程的影响。

(2) 围压对残余强度的影响

Fang 等^[8]分析了围压对岩石残余强度和峰后模量的影响, 并提出了强度退化指数的概念来描述, 强度退化指数 r_d 与围压之间近似服从负指数函数关系, 可表示为^[8]

$$r_d = \exp(-n_d \sigma_3), \quad (9)$$

式中, n_d 为试验拟合常数, σ_3 为围压。

于是, 围压 σ_3 时岩石的残余强度为

$$\sigma_r = \sigma \left(1 - \frac{r_d \delta\sigma_u}{\sigma_c} \right), \quad (10)$$

式中, $\delta\sigma_u$ 为单轴下峰值强度与残余强度的差值, σ_1 为围压 σ_3 时的峰值强度, σ_c 为单轴抗压强度。

由Mohr-Column强度准则, σ_1 可表示为

$$\sigma_1 = k\sigma_3 + 2c\sqrt{k}, \quad (11)$$

式中, $k=(1+\sin\varphi)/(1-\sin\varphi)$, φ 为内摩擦角, c 为黏聚力。

在岩石残余阶段仍服从Mohr-Column准则, 则

$$\sigma_r = k_r \sigma_3 - 2c_r \sqrt{k_r}, \quad (12)$$

式中, $k_r=(1+\sin\varphi_r)/(1-\sin\varphi_r)$, φ_r 为残余内摩擦角, c_r 为残余黏聚力。由式(12)通过数据拟合确定与残余强度相应的残余内摩擦角和残余黏聚力。

(3) 围压对剪胀扩容的影响

假设剪胀在峰值强度才发生, 围压对剪胀扩容速率的影响可使用Yuan等^[10]提出的扩容指数来描述, 扩容指数 I_d 与围压之间近似符合如下关系:

$$I_d = \left(1 - \frac{\sigma_3}{\sigma_h} \right)^{m_d}, \quad (13)$$

式中, σ_h 为脆延转化围压值, m_d 为试验拟合常数。

在围压 σ_3 下剪胀角 ψ_p 可表示为

$$\psi_p = \arcsin \frac{\tan(I_d \theta_0)}{2 + \tan(I_d \theta_0)}, \quad (14a)$$

$$\theta_0 = \arctan \frac{2 \sin \psi_0}{1 - \sin \psi_0}, \quad (14b)$$

式中, ψ_0 为单轴下岩石的剪胀角。

(4) 改进SS模型的实现

在数值模拟中, 按如下过程进行计算: ①根据工程问题, 确定模型形状、尺寸及初边值条件, 通过试算确定网格剖分方案。通过岩石三轴试验, 确定岩石的弹性模量、泊松比、拟合获得 n_b , n_d , m_d , σ_h , λ , η_0 等参数, 并输入到计算模型中。②先按弹性材料进行计算, 获得模型的初应力场。③将岩石的本构模型修改为SS模型, 体积模量、剪切模量不变。计算各单元的围压, 计算单元强度退化指数、扩容指数和脆性模量系数, 计算残余内摩擦角、残余黏聚力、剪胀角、塑性剪切应变, 进而建立SS模型中内摩擦角、黏聚力的table函数, 同时为SS模型中的剪胀角赋值。④开始开挖或加载, 获得体积应变, 利用式(16)计算渗透率, 每20时步重算单元围压, 修正参数。⑤输出计算结果, 进行工况分析。

2 岩石渗透率演化模型

岩石的渗透率与岩石内部孔隙和裂隙空间正相关, 孔隙和裂隙空间越大, 渗透率越大。岩石固体颗粒一般不发生胀缩, 三轴压缩岩石的胀缩实质是孔隙和裂隙空间的胀缩。体积应变反映了岩石孔隙和裂隙空间的变化。因此, 可使用体积应变来描述岩石的渗透率演化。

定义体积应变增透率为

$$\lambda = \frac{d\eta}{d\varepsilon_v}, \quad (15)$$

式中, η 为渗透率, ε_v 为体积应变。

式(15)的物理意义是岩石体应变率引起的渗透率改变。

基于式(15), 建立体积应变增透率的渗透率演化模型:

$$\eta = \eta_0 + \frac{d\eta}{d\varepsilon_v} \varepsilon_v, \quad (16)$$

式中, η_0 为初始渗透率。

体积应变增透率 λ 由渗透率与体积应变试验数据拟合确定, 且可写成如下多项式形式:

$$\lambda = a_0 + a_1 \varepsilon_v^2 + a_2 \varepsilon_v^4 + \dots + a_n \varepsilon_v^{2n}, \quad (17)$$

式中, a_0 , a_1 , a_2 , ..., a_n 为拟合常数。

在实际应用中取式(17)中前1项就可取得较好拟合效果。

使用式(16)拟合淮南潘一矿煤^[19]、凝灰岩^[18]、巴里坤砂岩^[14]的渗透率与体积应变的关系, λ 取式

(17) 中第 1 项, 结果如图 4~6 所示。从图 4~6 中可以看出, 渗透率与体积应变之间近似服从线性关系, 可以使用式 (16) 来描述。

在改进 FLAC 的 SS 模型内, 可以结合体积应变增透率演化模型计算岩石承载全程变形过程中的渗透率演化, 如 1.3 节中所述。

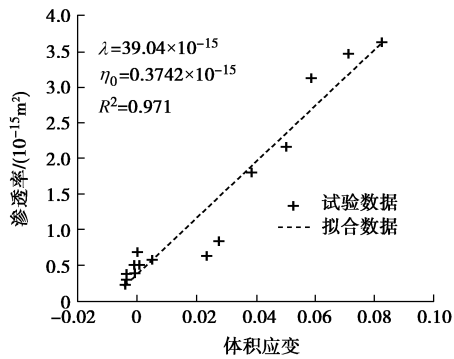


图 4 淮南潘一矿煤的渗透率与体积应变
Fig. 4 Permeability and volumetric strain of coal of Panyi Mine in Huainan

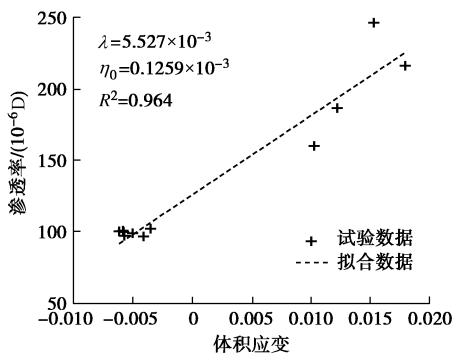


图 5 凝灰岩的渗透率与体积应变
Fig. 5 Permeability and volumetric strain of Tuff

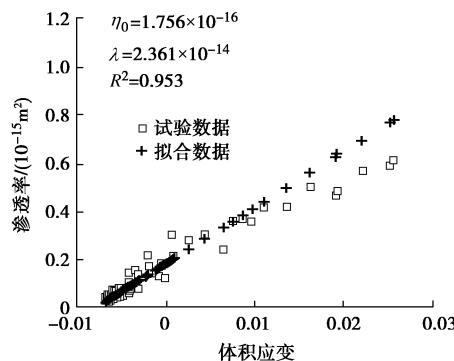


图 6 巴里坤砂岩的渗透率与体积应变
Fig. 6 Permeability and volumetric strain of Balikun sandstone

3 试验验证

3.1 安家岭泥岩三轴压缩及渗透率演化模拟 (1) 试验及试验结果分析

从山西安家岭露天矿取泥岩试样。岩样从钻孔岩芯内直接提取, 取样后及时蜡封, 然后装箱运送至实验室进行切割, 切割后的试样为圆柱形, 直径约为 60~70 mm, 高度约为 120~140 mm, 高径比大于 2, 如图 7 所示。



图 7 试样
Fig. 7 Samples

安家岭泥岩的真密度为 2.48 g/cm³, 测试岩样的有效孔隙率, 利用非金属超声检测分析仪测试各岩样波速。取有效孔隙率和波速相近的 6 个岩样作为试验岩样, 试验岩样的含水率为 2.5%。

取其中 5 个岩样在吉林金力 YAW2000 电液伺服试验机上开展三轴压缩试验, 三轴压力室为自制^[5]。试验中的围压分别为 0, 5, 10, 15, 20 MPa。施加预定围压后, 轴向位移加载。

另取 1 个试样在 MTS8.15 电液伺服试验机上开展三轴应力渗流试验, 试验方法为瞬态法。通过围压伺服油源加围压至 5 MPa。施加预定轴向压力后, 维持上端孔压为 2.8 MPa, 降低试样下端的孔压, 在试样两端形成渗透压差, 测定渗透压差随时间的变化过程, 计算该轴压下岩样的渗透率。测试轴向和侧向的变形, 计算轴向和侧向应变和体积应变; 然后再施加下一轴压, 重复上述过程。

通过试验获得安家岭泥岩的三轴全程应力应变曲线和 5 区 MPa 围压下的时间 - 体积应变 - 渗透率曲线如图 8, 9 所示。

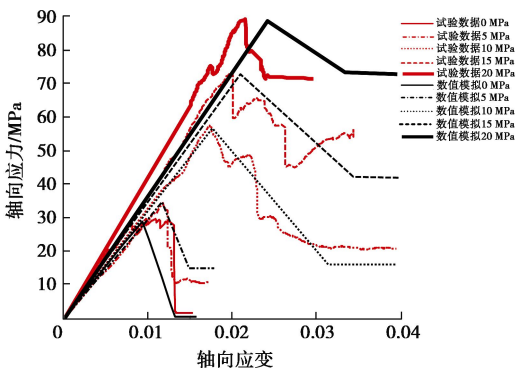


图 8 安家岭泥岩三轴试验及数值模拟结果
Fig. 8 Tri-axial compression test and numerical simulation results of Anjialing mudstone

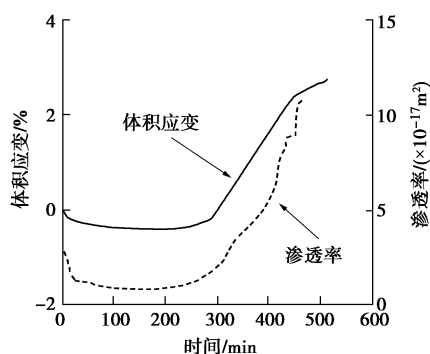


图9 安家岭泥岩时间-渗透率-体积应变

Fig. 9 Time-permeability-volumetric strain of Anjialing mudstone

从图8可见,三轴压缩下安家岭泥岩具有明显的应变软化特征。围压对安家岭泥岩的力学特性有很大影响。随着围压增加,泥岩的弹性模量略有增长。随着围压增加,泥岩的峰值强度和破坏应变增长,残余强度增大,强度退化过程趋缓。

从图9可见,泥岩的体积应变和渗透率密切相关,两者变化趋势基本趋同。在加载初期,泥岩处于线弹性变形阶段,体积压缩,渗透率也相应降低。当泥岩发生剪胀扩容,体积增长,渗透率也随之增长。利用式(16)拟合安家岭泥岩体积应变与渗透率的关系,拟合结果如图10所示。从图(10)可见,式(16)能较好地拟合渗透率与体积应变之间的关系,本文的体积应变渗透率演化模型是合理的。

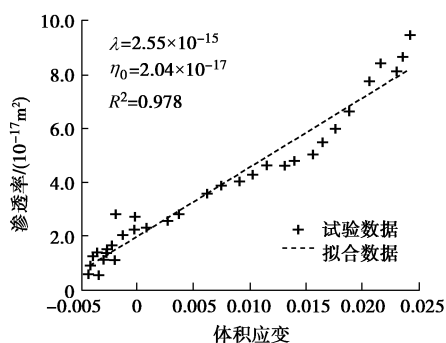


图10 安家岭泥岩的渗透率与体积应变

Fig. 10 Permeability and volumetric strain of Anjialing mudstone

(2) 数值模拟

在FLAC下建立6 cm(直径)×12 cm(高度)的安家岭泥岩三轴压缩数值模型。围压分别为0, 5, 10, 15, 20 MPa,在数值岩样上、下2端施加 1.0×10^{-7} m/step。岩样的物理力学参数均由三轴压缩和三轴应力渗流试验获得,其中 n_b 由围压与残余强度试验数据拟合确定^[8], n_d 由围压与脆性模量试验数据拟合确定^[14], m_d 和 σ_h 由围压与塑性体积应变和塑性轴向应变曲线夹角的试验数据确定^[10], η_0 和 λ 由渗透率与体积应变试验数据确定,弹性模量为3.8 GPa,泊松比为0.35,单轴抗压强度为29.7 MPa,密度为2240 kg/m³,单轴强度降为28.0 MPa,单轴脆性模量为17.5 GPa,

η_0 为 2.04×10^{-17} m²,单轴剪胀角为18°,抗拉强度为2.1 MPa, n_b 为0.0950, n_d 为0.0653, m_d 为1.4, σ_h 为45 MPa, λ 为 2.55×10^{-15} m²。在数值模拟中,不考虑孔压的作用,采用非耦合算法^[24]。

利用建立的数值模型进行计算,获得不同围压下泥岩的全程应力应变曲线如图8所示。从图8可见,本文模型能较好地模拟围压对泥岩峰后残余强度和强度退化过程的影响。

从图8可见,本文应变软化模型不仅能较好地模拟围压对泥岩峰后残余强度的影响,还能较好地模拟围压对泥岩峰后强度退化过程的影响。

图11为5 MPa围压下轴向应变和渗透率关系的实验和数值模拟结果。从图11可以看出,刚开始压缩时,由于岩样发生弹性压缩,体积减小,相应的渗透率也减小。当应力达到峰值应力的2/3附近时,岩样开始发生剪胀,岩样的渗透率减小速率开始趋缓,甚至逐渐变为增加。当应力达到峰值强度后,岩样内出现宏观裂纹,体积扩容加速,岩样的渗透率快速增加。数值模拟得到的渗透率基本与实验数据结果吻合,这表明本文的渗透率演化模型合理。

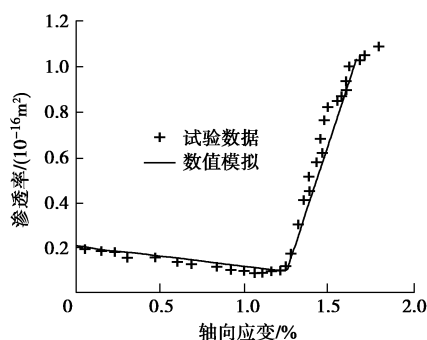


图11 轴向应变与渗透率

Fig. 11 Axial strain and permeability

3.2 Gebdykes 白云岩压缩及剪胀模拟

Gebdykes 白云岩三轴压缩及剪胀的试验结果如图1,2所示。根据试验结果和本文模型,给出数值模拟中的物理力学参数:密度为2550 kg/m³,弹性模量为36.0 GPa,泊松比为0.25,单轴抗压强度为55.1 MPa,单轴残余强度为7.5 MPa,单轴剪胀角为28°,抗拉强度为4.2 MPa, $n_d=0.0827$, $m_d=1.38$, $\sigma_h=100$ MPa, $n_b=0.1907$ 。

数值模型为圆柱形,直径50 mm,高度100 mm,围压按图1中的5种围压值取值,竖向位移加载。

图12为数值模拟得到的不同围压下白云岩应力、变形曲线与试验结果的对比图,其中图12(a)为轴向应力-轴向应变曲线图,图12(b)为白云岩三轴压缩下的体积扩容曲线。从图12可以看出,数值模拟

结果与试验结果基本一致, 本文模型能较好地模拟围压对白云岩峰后强度退化和残余强度的影响, 能较好地模拟围压对岩石剪胀扩容的影响。

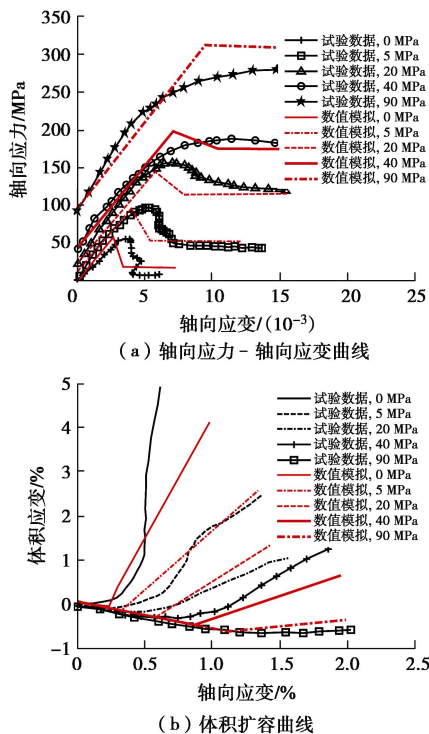


图 12 Gebdykes 白云岩数值模拟结果与试验结果的对比
Fig. 12 Comparison between numerical and test results of Gebdykes dolomite

4 结 语

本文基于 Gebdykes 白云岩的三轴试验结果, 分析了围压对岩石弹性模量、破坏应变、峰值强度、强度退化过程、残余强度和剪胀扩容的影响规律。使用强度退化指数、脆性模量系数和扩容指数对 SS 模型改进, 与基于体积应变增透率的渗透率演化模型结合, 建立了考虑围压影响的岩石应变软化及渗透率演化模型。对西安家岭泥岩开展了三轴试验和三轴应力渗透率试验, 获得了不同围压下泥岩的全程应力应变曲线和 5 MPa 下泥岩的渗透率 - 体积应变曲线。利用本文模型分别预测了西安家岭泥岩和 Gebdykes 白云岩的三轴压缩变形、渗透率演化和剪胀扩容行为, 试验数据与数值模拟结果较为一致, 表明本文模型能较好地模拟围压对岩石残余强度、峰后退化过程和剪胀扩容的影响, 能较准确预测三轴压缩岩石的渗透率演化。

参考文献:

[1] BÉSUELLE P, DESRUES J, RAYNAUD S. Experimental characterization of the localisation phenomenon inside a

Vosges sandstone in a triaxial cell[J]. Int J Rock Mech Min Sci 2000, **37**: 1223 - 37.

- [2] 张帆, 盛谦, 朱泽奇, 等. 三峡花岗岩峰后力学特性及应变软化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(增刊 1): 2651 - 2655. (ZHANG Fan, SHENG Qian, ZHU Ze-qi, et al. Study of post-peak mechanical behavior and strain-softening model of Three Gorges granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(S1): 2651 - 2655. (in Chinese))
- [3] 陆银龙, 王连国, 杨峰, 等. 软弱煤岩峰后应变软化力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(3): 640 - 648. (LU Yin-long, WANG Lian-guo, YANG Feng, et al. Post-peak strain softening mechanical properties of weak rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(3): 640 - 648. (in Chinese))
- [4] MISHRA B, NIE D. Experimental investigation of the effect of change in control modes on the post-failure behavior of coal and coal measures rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2013, **60**(12): 363 - 369.
- [5] 张春会, 赵全胜. 饱和度对砂岩强度和模量影响的三轴试验[J]. 岩土力学, 2014, **35**(4): 951 - 958. (ZHANG Chun-hui, ZHAO Quan-sheng. Triaxial tests of effects of varied saturations on strength and modulus for sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(4): 951 - 958. (in Chinese))
- [6] 杨圣奇, 苏承东, 徐卫亚. 大理岩常规三轴压缩下强度和变形特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(3): 475 - 478. (YANG Sheng-qi, SU Cheng-dong, XU Wei-ya. Experimental investigation on strength and deformation properties of marble under conventional triaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(3): 475 - 478. (in Chinese))
- [7] 苏承东, 付义胜. 红砂岩三轴压缩变形与强度特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(增刊 1): 3164 - 3169. (SU Cheng-dong, FU Yi-sheng. Experimental study of triaxial compression deformation and strength characteristics of red sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(S1): 3164 - 3169. (in Chinese))
- [8] FANG Z, HARRISON J P. A mechanical degradation index for rock[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2001, **38**: 1193 - 1199.
- [9] FANG Z, HARRISON J P. Application of a local degradation model to the analysis of brittle fracture of laboratory scale rock specimens under triaxial conditions[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2002, **39**: 459 - 476.

- [10] YUAN S C, HARRISON J P. An empirical dilatancy index for the dilatant deformation of rock[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2004, **41**: 679 – 686.
- [11] YUAN S C, HARRISON J P. Development of a hydro-mechanical local degradation approach and its application to modelling fluid flow during progressive fracturing of heterogeneous rocks[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2005, **42**: 961 – 984.
- [12] ZHAO X G, CAI M. A mobilized dilation angle model for rocks[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2010, **47**: 368 – 384.
- [13] 于永江, 张春会, 王来贵. 基于退化角的岩石峰后应变软化模型[J]. *煤炭学报*, 2012, **37**(3): 402 – 406. (YU Yong-jiang, ZHANG Chun-hui, WANG Lai-gui. Post-peak strain softening model of rock based on degradation angle[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, **37**(3): 402 – 406. (in Chinese))
- [14] 张春会, 赵全胜, 王来贵, 等. 三轴压缩岩石应变软化及渗透率演化的实验和数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2015, **40**(8): 1774 – 1782. (ZHANG Chun-hui, ZHAO Quan-sheng, WANG Lai-gui, et al. Investigation of test and numerical modeling for strain softening behavior and permeability evolution of rock under tri-axial compression[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, **40**(8): 1774 – 1782. (in Chinese))
- [15] CAI Y D, LIU D M, JONATHAN P M, et al. Permeability evolution in fractured coal Combining tri-axial confinement with X-ray computed tomography, acoustic emission and ultrasonic techniques[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2014, **122**: 91 – 104.
- [16] CHEN Y F, HU S H, WEI K, et al. Experimental characterization and micromechanical modeling of damage-induced permeability variation in Beishan granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2014, **71**: 64 – 76.
- [17] WANG S, ELSWORTH D, LIU J. Permeability evolution during progressive deformation of intact coal and implications for instability in underground coal seams[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2013, **58**: 34 – 45.
- [18] 刘洪磊, 杨天鸿, 于庆磊, 等. 凝灰岩破坏全过程渗流演化规律的实验研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2009, **30**(7): 1030 – 1033. (LIU Hong-lei, YANG Tian-hong, YU Qing-lei, et al. Experimental study on fluid permeation evolution in whole failure process of tuff[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2009, **30**(7): 1030 – 1033. (in Chinese))
- [19] 薛东杰, 周宏伟, 唐威力, 等. 采动煤岩体瓦斯渗透率分布规律与演化过程[J]. *煤炭学报*, 2013, **38**(6): 930 – 935. (XUE Dong-jie, ZHOU Hong-wei, TANG Xian-li, et al. Evolution of mining-induced enhancement and distribution of gas permeability in coal seam and surrounding rock[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, **38**(6): 930 – 935. (in Chinese))
- [20] 谢和平, 高峰, 周宏伟, 等. 煤与瓦斯共采中煤层增透率理论与模型研究[J]. *煤炭学报*, 2013, **38**(7): 1101 – 1108. (XIE He-ping, GAO Feng, ZHOU Hong-wei, et al. On theoretical and modeling approach to mining-enhanced permeability for simultaneous exploitation of coal and gas[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, **38**(7): 1101 – 1108. (in Chinese))
- [21] 张春会, 赵莺菲, 王来贵, 等. 采动煤岩渗透率演化模型及数值模拟[J]. *岩土力学*, 2015, **36**(8): 2409 – 2418. (ZHANG Chun-hui, ZHAO Ying-fei, WANG Lai-gui, et al. Permeability evolution model of mined coal rock and its numerical simulation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(8): 2409 – 2418. (in Chinese))
- [22] 尤明庆. 岩石试样的杨氏模量与围压的关系[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, **22**(1): 53 – 60. (YOU Ming-qing. Effect of confining pressure on the Young's modulus of rock specimen[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, **22**(1): 53 – 60. (in Chinese))
- [23] ITASCA. Fast Lagrangian analysis of continua. Version 5.0[M]. Minnesota: ITASCA, 2012.
- [24] 于永江, 张春会, 赵全胜, 等. 承载围岩渗透率演化模型及数值分析[J]. *煤炭学报*, 2014, **39**(5): 841 – 848. (YU Yong-jiang, ZHANG Chun-hui, ZHAO Quan-sheng, et al. Permeability model for loaded rock and numerical analysis[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, **39**(5): 841 – 848. (in Chinese))