

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2024.10.020

基于能量自我抑制模型理论的岩石 损伤模型研究

吕洪淼

(辽东学院 土木工程系, 辽宁 丹东 118003)

摘要: 为建立更具普适性、更接近岩石变形破坏本质的应力-应变关系和能量演化规律, 基于能量自我抑制模型理论建立了描述岩石应力-应变关系的本构模型, 以及建立了岩石破坏的能量非线性演化模型。以辽宁某煤矿砂岩为研究对象, 采用 MTS815.03 试验系统对围岩开展不同围压作用下的力学特性试验, 分析围压对能量演化规律的影响。从热力学能量演化角度出发, 通过采用能量自我抑制模型的理论建立了岩石应变-弹性能的本构模型, 并通过能量微分对能量模型中的应变求导得到可描述岩石应力-应变关系的本构模型。结果表明: 围压可以有效地提升岩石的能量储存和耗散。演化模型计算值和应力-应变关系本构计算值都与试验值有着良好的吻合度, 且计算值与试验值的相关性系数均在 0.95 以上, 说明建立的模型可以较好地反映岩石破坏过程中的能量演化规律和应力-应变关系。在模型中引入的等效参数具有明显的物理参数意义, 能较好地反映岩石能量的演化规律, 提供了一个可以通过模型参数值来判断岩石能量变化趋势的方法, 这对实际围岩的变形支护具有指导意义, 进而更好地分析和预测岩石能量变化规律和应力-应变规律。

关键词: 隧道工程; 能量演化; 岩石损伤; 能量自我抑制模型; 力学特性; 应力-应变; 围压

中图分类号: U452

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2024) 10-0184-08

Rock Damage Model Study Based on Energy Self-inhibition Model Theory

LÜ Hong-miao

(School of Civil Engineering, Eastern Liaoning University, Dandong, Liaoning 118003, China)

Abstract: To establish a more universal stress-strain relation and energy evolution rule closer to the essence of rock deformation and failure, the constitutive model, describing the rock stress-strain relation, was established based on the energy self-inhibition model theory. The energy nonlinear evolution model of rock failure was established. Taking the coal mine sandstone in Liaoning province as the study object, the MTS815.03 test system was used to carry out the mechanical property test on surrounding rock under different confining pressures; and the influence of confining pressure on the energy evolution rule was analyzed. From the perspective of thermodynamic energy evolution, the constitutive model of rock strain-elastic energy was established by using the energy self-inhibition model theory. By applying the energy differentials, the strain with energy model was derived to develop the constitutive model, accurately describing the rock stress-strain relation. The result indicates that the confining pressure can effectively improve the energy storage and dissipation of rock. The calculated values with evolution model and the stress-strain relation constitutive calculated values are in good agreement with the test values; the correlation coefficients between calculated values and test values are all above 0.95. It shows that the established model can better reflect the energy evolution rule and stress-strain relation in the rock failure process. The equivalent parameters introduced in the model have obvious physical parameter significance. It can better

收稿日期: 2022-03-29 修改日期: 2024-01-28

基金项目: 辽东学院校级博士科研启动基金项目 (2021BS011); 辽宁省科技计划联合计划 (应用基础研究项目) (2023JH2/101700003)

作者简介: 吕洪淼 (1986-), 男, 辽宁丹东人, 博士. (lntulv hongmiao@163.com)

reflect the rock energy evolution rule, providing the method to assess the rock energy variation trends through the model parameter values, and offering the practical guidance for surrounding rock deformation and support. The proposed approach enhances the analysis and prediction on rock energy evolution and corresponding stress-strain behavior.

Key words: tunnel engineering; energy evolution; rock damage; energy self-inhibition model; mechanical property; stress-strain; confining pressure

0 引言

物体破坏的实质就是在能量驱动下状态失稳, 受载岩石在能量输入, 聚集, 耗散和释放的过程中发生变形破坏^[1-3]。为此, 许多学者通过能量角度研究岩石变形破坏规律, 特别是在冲击矿压、岩石爆破等相关领域取得了较好的效果, 为岩石力学研究开拓新领域, 同时也给相关岩石工程问题带来了新的解决思路^[4]。若想使其应用得更加广泛且准确, 研究岩石破坏不同受载条件下的能量演化规律尤为重要, 这也是运用岩石能量原理的基础条件^[5-6]。

通过国内外学者对岩石破坏能量演化规律的研究, 发现外界因素的干扰对岩石能量演化有较大的影响^[7-10]。学者们对各种不同条件下的围岩做了大量的试验, 深入分析受载岩石的变形破坏内部机理, 并取得了丰硕的成果。其中从能量演化角度分析受载岩体破坏机制的方法研究越来越多, 通常以单轴或者三轴压缩试验从受载到破坏的全过程为基础, 以能量角度分析岩石破坏机理, 但是对三轴加载压缩试验的非线性能量研究相对较少^[11-13]。

同时, 由热力学定理可知, 岩石在外荷载作用的变形破坏过程实际上是能量驱动作用下的一种变形失稳过程。在地下工程施工和地下资源开采中, 围岩变形过程也是伴随着能量的输入、积聚、耗散和释放, 甚至在后期支护过程中围岩的变形也是能量的转移和转化过程。从能量角度研究岩石变形破坏机理, 建立岩石破坏过程中的能量演化机制和变形破坏机理的联系, 可能更具普适性, 更接近岩石的变形破坏本质。因此, 本研究利用能量自我抑制模型的理论建立了岩石应变-弹性能的本构模型, 进而通过对能量微分得到岩石在变形过程中应力-应变关系模型, 进而更好地分析和预测岩石能量变化规律和应力-应变规律。

1 岩石本构模型和应变-能量模型的建立

1.1 模型的建立

结合能量自我抑制模型的理论可知^[14],

$$W - W_{e0} > 0. \quad (1)$$

在满足上述条件时, 能量变化率可以表示为:

$$\frac{1}{W_e} \frac{dW_e}{d\varepsilon} = a(W - W_{e0}). \quad (2)$$

式 (2) 可以转化以下形式,

$$\frac{1}{W_e} \frac{dW_e}{d\varepsilon} = a(W - W_{e0}) - bW_e, \quad (3)$$

式中, W_{e0} 为岩石初始弹性应变能; a 和 b 为岩石系统内部促进或抑制参数。

根据分离变量法对式 (3) 进行积分, 得到:

$$W_e = \frac{k}{1 + \exp(-m\varepsilon_1 - c)}, \quad (4)$$

式中, c 为积分常数; m 和 k 为等效参数; ε_1 为岩石应变。

参数 m 和 k 可表示为:

$$m = a(W - W_{e0}); k = \frac{a(W - W_{e0})}{b} = \frac{m}{b}. \quad (5)$$

以式 (4) 和式 (5) 为岩石弹性能演化模型。

根据应变能理论可知岩石总能量为应变和应力的乘积^[15-17], 故对式 (4) 进行应变一阶导数, 可以得到岩石在变形过程中应力-应变关系, 即

$$\sigma_1 = \frac{\partial W_e}{\partial \varepsilon_1} = \frac{mk \exp(-m\varepsilon_1 - c)}{[1 + \exp(-m\varepsilon_1 - c)]^2}. \quad (6)$$

通过推导得到岩石变形过程中能量演化和应力-应变关系模型, 而模型中具有 3 个未知参数需要确定。因此, 结合弹性能-应变曲线和应力-应变关系曲线特征点来确定上述 3 个未知参数。

1.2 模型参数确定

在峰值点处满足以下关系: 当 $\varepsilon_1 = \varepsilon_{1c}$ 时, 存在 $\sigma_1 = \sigma_{1c}$, $W_e = W_{ec}$; 且 $\partial \sigma_1 / \partial \varepsilon_1 = 0$ 。

通过上述条件结合式 (4) 和式 (6) 可得:

$$W_{ec} = \frac{k}{1 + \exp(-m\varepsilon_{1c} - c)}, \quad (7)$$

$$\sigma_{1c} = \frac{mk \exp(-m\varepsilon_{1c} - c)}{[1 + \exp(-m\varepsilon_{1c} - c)]^2}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} \bigg|_{\sigma_1=\sigma_{1c}, \varepsilon_1=\varepsilon_{1c}} = 0, \quad (9)$$

式中, σ_{1c} 为峰值应力; ε_{1c} 为峰值应变; W_{ec} 为峰值弹性能。

将式 (8) 代入式 (9) 中, 得到:

$$c = -\frac{2\sigma_{1c}\varepsilon_{1c}}{W_{ec}}; m = \frac{2\sigma_{1c}}{W_{ec}}; k = 2W_{ec}。 \quad (10)$$

积分常数 c 为定值, 但是等效参数 m 和 k 包含了岩石系统内部促进或抑制参数 a 和 b , 由于岩石在卸荷过程中受力状态是不断变化的, 岩石系统内部促进或抑制参数与应力的关系具有显著的非线性特征, 故通过上述确定出参数 m 和 k 不再是一个定值, 而是随着应力状态不断变化的变量。因此, 将固定积分常数 c 代入到式 (4) 和式 (6) 得到:

$$W_e = \frac{k}{1 + \exp(-m\varepsilon_1 + 2\sigma_{1c}\varepsilon_{1c}/W_{ec})}, \quad (11)$$

$$\sigma_1 = \frac{mk \exp(-m\varepsilon_1 + 2\sigma_{1c}\varepsilon_{1c}/W_{ec})}{[1 + \exp(-m\varepsilon_1 + 2\sigma_{1c}\varepsilon_{1c}/W_{ec})]^2}。 \quad (12)$$

联立式 (11) 和式 (12), 得到:

$$W_e = \frac{k}{1 - m\varepsilon_1 + 2W'_{ec}\varepsilon_{1c}/W_{ec}}, \quad (13)$$

$$W'_e = \frac{mk(-m\varepsilon_1 + 2W'_{ec}\varepsilon_{1c}/W_{ec})}{[1 - m\varepsilon_1 + 2W'_{ec}\varepsilon_{1c}/W_{ec}]^2}。 \quad (14)$$

联立式 (13) 和式 (14), 得到:

$$k = (1 - m\varepsilon_1 + 2W'_{ec}\varepsilon_{1c}/W_{ec})W_e, \quad (15)$$

$$m = \frac{(\varepsilon_1 - 2W'_{ec}\varepsilon_{1c}/W_{ec} \cdot W_e/W'_e) \pm A}{-W_e/W'_e\varepsilon_1}$$

$$A = \sqrt{\frac{(2W'_{ec}\varepsilon_{1c}/W_{ec} \cdot W_e/W'_e - \varepsilon_1)^2 - 4W_e/W'_e\varepsilon_1(2W'_{ec}\varepsilon_{1c}/W_{ec} + 1)}{}}。 \quad (16)$$

2 岩石应力-应变曲线和能量演化规律分析

2.1 岩石三轴应力-应变曲线

本研究所采用的岩石取自辽宁阜新某煤矿, 该岩石经过检测为砂岩。将大块的砂岩试样带回实验室, 按照国际岩石力学学会制定的标准将砂岩试样制备成高度为 100 mm, 直径为 50 mm 的标准圆柱体。岩石的三轴压缩试验采用辽宁工程技术大学的 MTS815.03 岩石试验系统。

由于所取岩石的埋深为 700~800 m, 经过测定该岩石的含水率为 0.165%, 自然吸水率为 2.156%, 密度为 2.365 g/cm³。经过地应力的测定得到该位置处的地应力较高, 水平地应力可以达到 35 MPa 左右, 垂直地应力为 20 MPa 左右, 属于高地应力环境, 故可以选择试验的围压值为 0, 10, 20 MPa 和 30 MPa, 来模拟不同围压作用下岩石的受力情况, 为后续分析围压对变形和力学性质的影响做铺垫。

试验方案和步骤如下: (1) 将安装在试验台上的砂岩试样放在加载平台上, 保证试样的轴心与加载平台的轴心在同一直线上。(2) 放下加载仓后, 向加载仓中充满液压油。(3) 以 0.002 mm/s 的加载速率将围压加载至预定值, 并在整个试验过程中保持围压值恒定不变。(4) 再以 0.002 mm/s 的加载速率将轴压加载至峰值点, 继续以同等速率加载至应力-应变曲线出现残余应变阶段为止。(5) 将围压和轴压依次卸载, 待液压油回到油箱后, 打开加载仓将破坏后砂岩试样取出后, 编号放在试验专用位置处保存。(6) 按照 5 s 的时间间隔将试验数据保存。

通过施加不同围压进行砂岩破坏试验, 绘制轴向应力-应变曲线如图 1 所示。

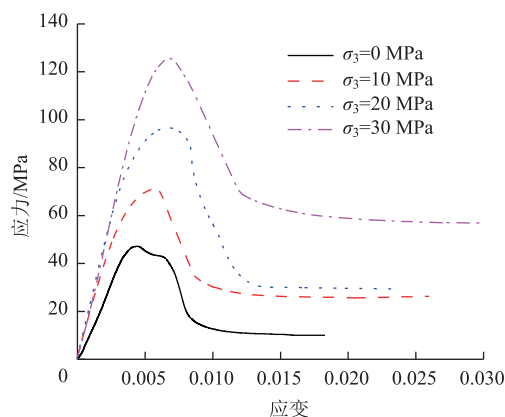


图1 轴向应力-应变曲线

Fig. 1 Axial stress-strain curves

2.2 岩石三轴应变-能量曲线

根据热力学定律可知^[18-22], 做功输入能量 W 为:

$$W = W_e + W_d, \quad (17)$$

式中, W_e 为弹性能; W_d 为耗散能 (由损伤造成)。

各个能量演化计算方法如下^[16-17]

$$W = \sum_{i=0}^n (\varepsilon_{3(i+1)} - \varepsilon_{3i})(\sigma_{3(i+1)} + \sigma_{3i}) + \sum_{i=0}^n \frac{1}{2}(\varepsilon_{1(i+1)} - \varepsilon_{1i})(\sigma_{1(i+1)} + \sigma_{1i}), \quad (18)$$

式中, σ_{1i} , σ_{3i} , ε_{1i} , ε_{3i} 分别为各自对应三轴压缩试验应力-应变曲线上一点的轴径向应力和轴径向应变。

$$W_e = \frac{1}{2}\sigma_1\varepsilon_1^e + \frac{1}{2}\sigma_2\varepsilon_2^e + \frac{1}{2}\sigma_3\varepsilon_3^e \quad (19)$$

能量曲线的计算方法如下:

(1) 总能量: 将应力-应变试验数据放入到软件 Origin 中, 采用面积积分的方法对应力-应变试验数

据进行积分, 得到了轴向和环向试验数据, 按照式 (18) 将两列数据计算得到总能量-应变数据。(2) 单元弹性能: 利用初始弹性模量 E 和泊松比 ν , 将不同围压条件下的轴向和径向应力-应变弹性模量和泊松比数值代入到式 (19) 中得到弹性能-应变数据。(3) 耗散能: 将已经得到弹性能-应变数据和总能量-应变数据代入式 (17) 中, 计算得到耗散能-应变数据。绘制出各部分能量曲线如图 2 所示。

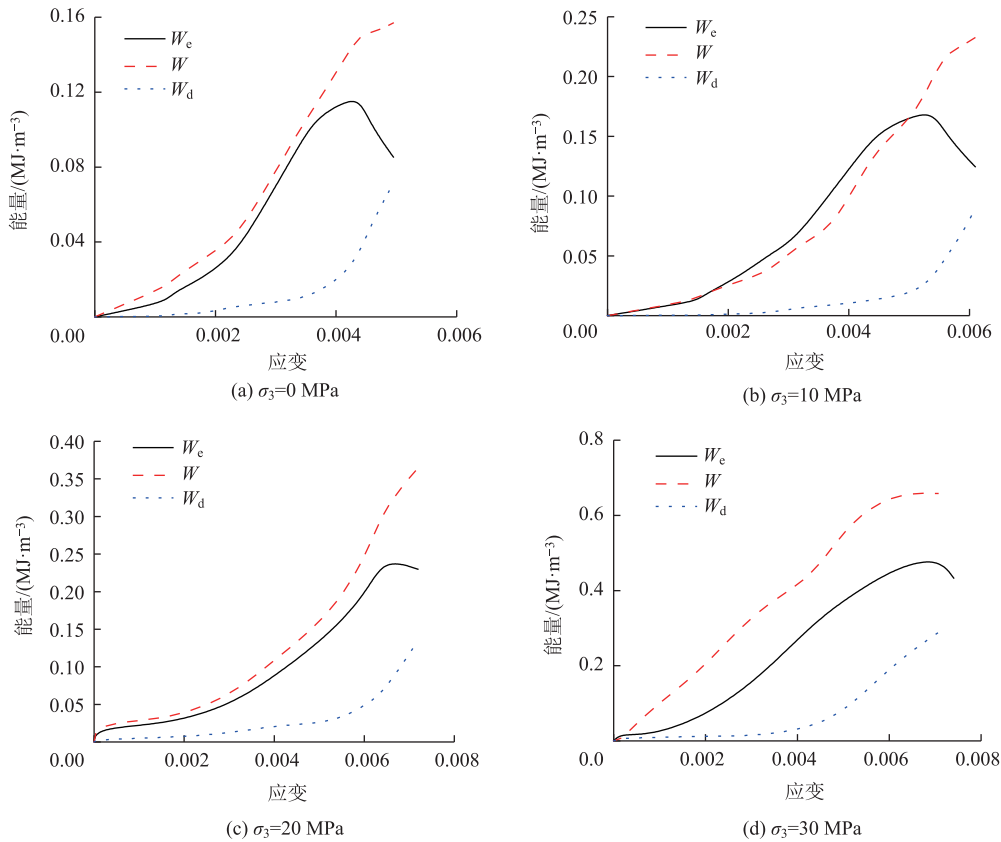


图 2 砂岩能量演化规律

Fig. 2 Sandstone energy evolution rule

由图 2 可知, 随着围压的增大, 在同一应变作用下岩石的能量值就越大, 这说明了围压可以有效地提升岩石的能量储存和耗散。

3 模型验证与参数敏感性分析

3.1 模型验证

为了更好地描述岩石在残余变形阶段的应力-应变关系^[23-25], 使得

$$\sigma_1 = \sigma_D, \quad (20)$$

式中 σ_D 为残余应力。

不同围岩作用下岩石本构计算值和试验值的对比如图 3 所示。由图 3 可知, 计算值和试验值吻合

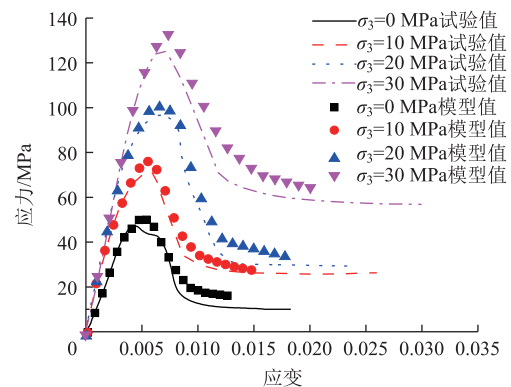


图 3 计算值与试验值的对比

Fig. 3 Calculated values v. s. test values

度较高,而计算值却无法去描述岩石在残余阶段应力-应变的变化规律,且在峰后阶段计算值与试验值的吻合度在0.80~0.90之间。

结合试验数据和模型参数的确定方法对围压0, 20 MPa作用下模型的能量演化曲线和试验值进行对比,得到计算值和试验值的对比如图4所示。

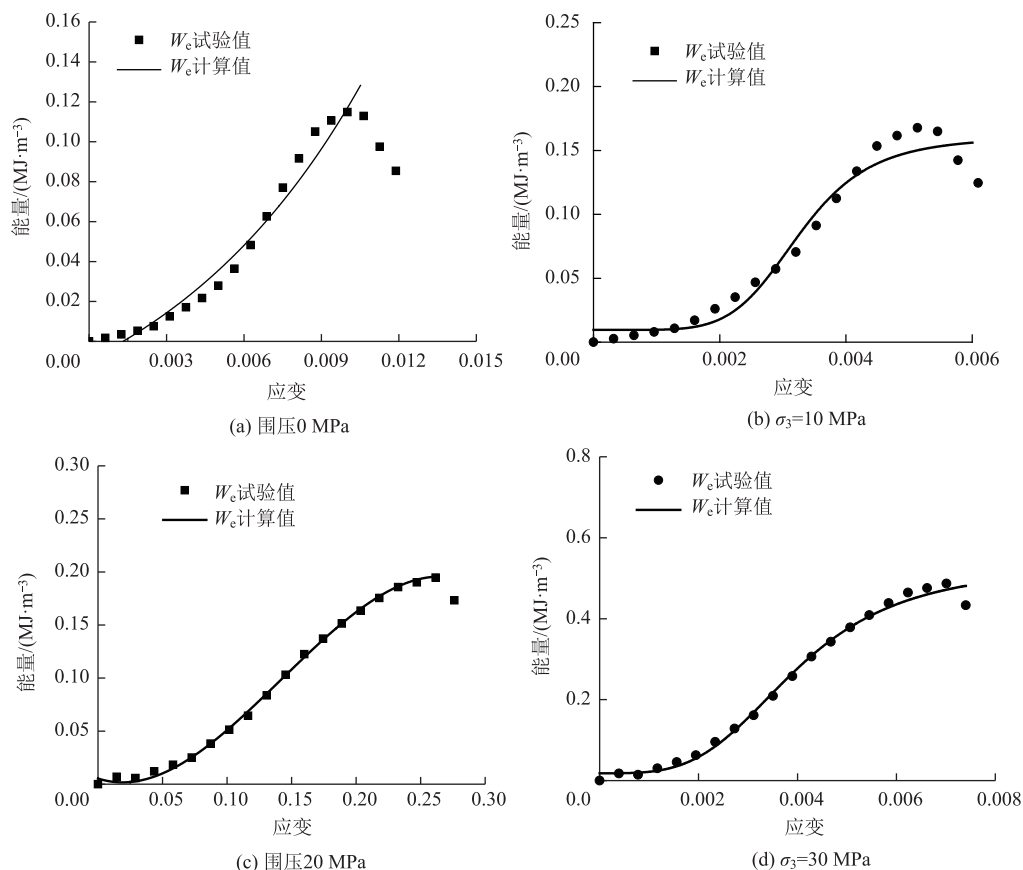


图4 砂岩能量模型与试验对比

Fig.4 Comparison between sandstone energy model and test

由图4可知,岩石破坏的能量非线性演化模型与试验数据基本吻合,试验值变化趋势与拟合曲线基本一致,相关性系数均在0.95以上,说明建立各种非线性能量模型可以较好地反映岩石破坏过程中的能量演化规律,也较好地反映了3种不同能量之间的相互关系,为以后岩石能量演化规律预测提供一定的依据。

论文只是针对砂岩做的研究,是否适用于其他岩石有待研究。本研究将采用大理岩开展同等条件下的三轴压缩试验,采用本研究的本构模型与大理岩的试验值进行对比,得到不同围压作用下大理岩的计算值与试验值的对比如图5所示。

按照上述应力-应变曲线和能量的计算方法,得到不同围压作用下大理岩的能量计算值与试验值的对比如图6所示。

由图5和图6可知,非线性能量模型也可以较好地描述大理岩能量演化规律,也较好地描述了大

理岩的应力-应变曲线,说明了上述模型也适用于大理岩。

3.2 模型参数敏感性分析

为了明确引入参数的物理意义,对引入模型的参数进行敏感性分析^[26-30]。以围压0 MPa为例,分析不同参数 k , m 和 c 作用下岩石的能量演化规律如图7所示。

由图7可知,当 m 和 c 固定不变时,随着 k 的增大岩石的弹性能呈现出不断增大趋势,且岩石弹性能初始值也呈现出小幅度增大,这说明了参数 k 可控制弹性能量的增长率和初始值大小;当 k 和 c 固定不变时,随着 m 的增大岩石弹性能的初始值始终不变,只是岩石的弹性能呈现出不断增大趋势,这说明了参数 k 只控制弹性能量的增长率;当 k 和 m 固定不变时,随着 c 的增大岩石弹性能的初始值越来越大,且岩石的弹性能呈现出不断增大趋势,这说明了参数 c 控制了弹性能量的增

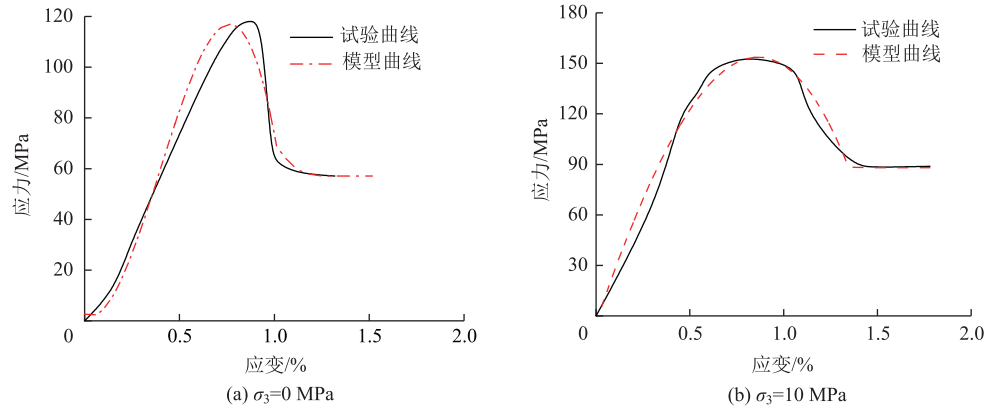


图 5 不同围压作用下大理岩的计算值与试验值的对比

Fig. 5 Comparison of calculated and test values of marble under different confining pressures

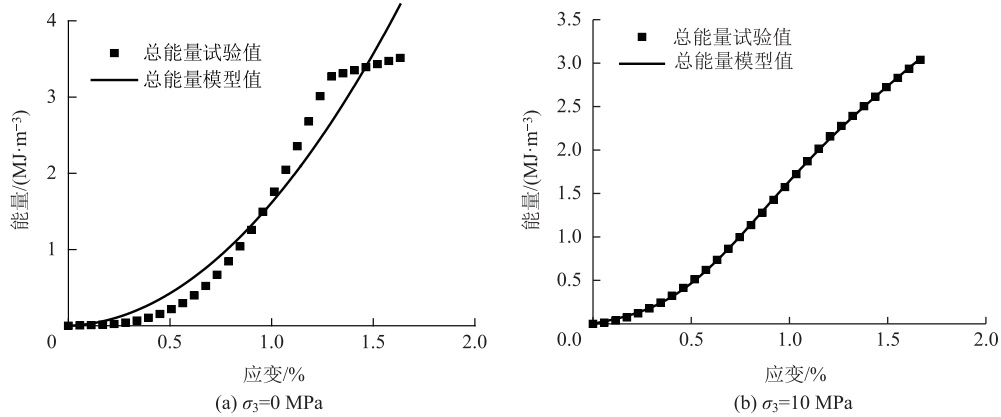


图 6 不同围压作用下大理岩的能量计算值与试验值的对比

Fig. 6 Comparison of calculated and test values of marble energy under different confining pressures

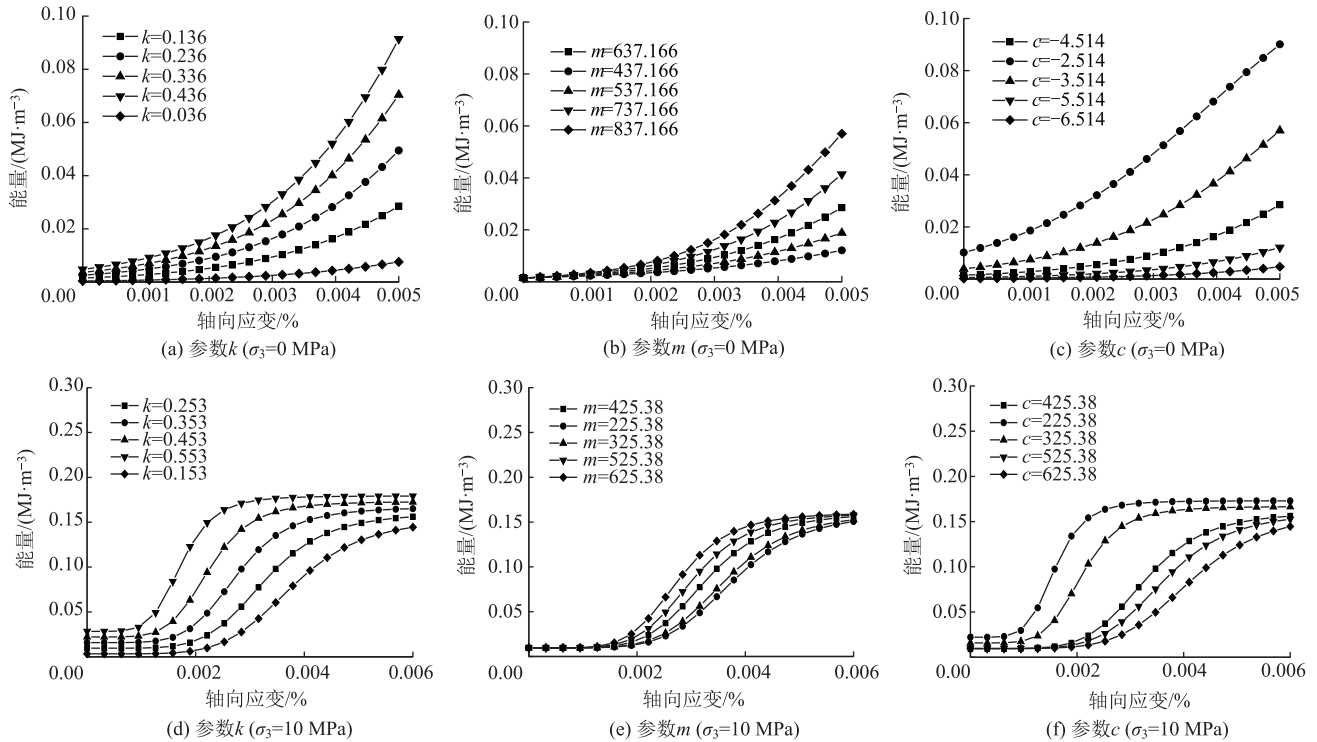


图 7 参数敏感性分析

Fig. 7 Parameter sensitivity analysis

长率和初始值大小。因此,模型参数 k 、 m 和 c 能较好地反映岩石能量的演化规律,提供了一个可以通过模型参数值来判断岩石能量变化趋势的方法。

4 结论

(1) 随着围压的增大,再同一般作用下岩石的能量值就越大,这说明了围压可以有效地提升岩石的能量储存和耗散。

(2) 岩石能量计算值和应力-应变关系本构计算值都与试验值有着良好的吻合度,且计算值与试验值的相关性系数均在 0.95 以上,说明建立的模型可以较好地反映岩石破坏过程中的能量演化规律和应力-应变关系。

(3) 模型参数 k 、 m 和 c 能较好地反映岩石能量的演化规律,提供了一个可以通过模型参数值来判断岩石能量变化趋势的方法。

参考文献:

References:

- [1] 张黎明, 高速, 王在泉, 等. 大理岩加卸荷破坏过程的能量演化特征分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32 (8): 1572-1578.
ZHANG Li-ming, GAO Su, WANG Zai-quan, et al. Analysis of Marble Failure Energy Evolution under Loading and Unloading Conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (8): 1572-1578.
- [2] LIU Wen-bo, ZHANG Shu-guang, SUN Bo-yi. Energy Evolution of Rock under Different Stress Paths and Establishment of A Statistical Damage Model [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23 (10): 4274-4287.
- [3] 经来旺, 李学帅, 严悦, 等. 循环加卸载下饱和类岩石材料能量演化和损伤特性分析 [J]. 矿业研究与开发, 2022, 42 (1): 113-119.
JING Lai-wang, LI Xue-shuai, YAN Yue, et al. Energy Evolution and Damage Characteristics of Saturated Rock-like Materials under Cyclic Loading and Unloading [J]. Mining Research and Development, 2022, 42 (1): 113-119.
- [4] 陈建勋, 牛嘉伟, 刘伟伟, 等. 高地应力软岩隧道仰拱结构受力特性与参数优化 [J]. 公路交通科技, 2024, 41 (1): 126-137.
CHEN Jian-xun, NIU Jia-wei, LIU Wei-wei, et al. Stress Characteristics and Parameter Optimization of Inverted Arch Structure in High Ground Stress Soft Rock Tunnel [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41 (1): 126-137.
- [5] 黄达, 黄润秋, 张永兴. 粗晶大理岩单轴压缩力学特性的静态加载速率效应及能量机制试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (2): 245-255.
HUANG Da, HUANG Run-qiu, ZHANG Yong-xing. Experimental Investigations on Static Loading Rate Effects on Mechanical Properties and Energy Mechanism of Coarse Crystal Grain Marble under Uniaxial Compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31 (2): 245-255.
- [6] HUANG Da, LI Yan-rong. Conversion of Strain Energy in Triaxial Unloading Tests on Marble [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 66 (1): 160-168.
- [7] 高速, 张黎明, 王在泉, 等. 大理岩卸荷破坏变形及能量特征研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33 (增 1): 2808-2813.
GAO Su, ZHANG Li-ming, WANG Zai-quan, et al. Study of Deformation and Energy Properties of Marble Unloading Failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (S1): 2808-2813.
- [8] 温韬, 刘佑荣, 胡政, 等. 高应力区砂岩加卸载条件下能量变化规律及损伤分析 [J]. 地质科技情报, 2015, 34 (2): 200-206.
WEN Tao, LIU You-rong, HU Zheng, et al. Energy Change Law Damage Analysis of Sandstone Under Loading and Unloading Conditions in High Stress Area [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2015, 34 (2): 200-206.
- [9] 王桂林, 张亮, 许明, 等. 单轴压缩下非贯通节理岩体损伤破坏能量演化机制研究 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41 (4): 639-647.
WANG Gui-lin, ZHANG Liang, XU Ming, et al. Energy Damage Evolution Mechanism of Non-across Jointed Rock Mass Under Uniaxial Compression [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41 (4): 639-647.
- [10] 宋洪强, 左建平, 陈岩, 等. 基于岩石破坏全过程能量特征改进的能量跌落系数 [J]. 岩土力学, 2019, 40 (1): 91-98.
SONG Hong-qiang, ZUO Jian-ping, CHEN Yan, et al. Revised Energy Drop Coefficient Based on Energy Characteristics in Whole Process of Rock Failure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40 (1): 91-98.
- [11] ZHOU Tian-bai, QIN Yue-ping, MA Qiu-feng, et al. A

- Constitutive Model for Rock Based on Energy Dissipation and Transformation Principles [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12 (15): 492.
- [12] XI Yan, LI Jun, ZENG Yi-jin, et al. Research on Lateral Scale Effect and Constitutive Model of Rock Damage Energy Evolution [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2018, 36 (4): 2415-2424.
- [13] ZHAO Zhong-hu, MA Wen-peng, FU Xiang-yu, et al. Energy Theory and Application of Rocks [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12 (15), 474.
- [14] 张黎明, 高速, 任明远, 等. 岩石加荷破坏弹性能和耗散能演化特性 [J]. *煤炭学报*, 2014, 39 (7): 1238-1242.
- ZHANG Li-ming, GAO Su, REN Ming-yuan, et al. Rock Elastic Strain Energy and Dissipation Strain Energy Evolution Characteristics Under Conventional Triaxial Compression [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39 (7): 1238-1242.
- [15] 张志镇, 高峰. 单轴压缩下岩石能量演化的非线性特性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31 (6): 1198-1207.
- ZHANG Zhi-zhen, GAO Feng. Research on Nonlinear Characteristics of Rock Energy Evolution Under Uniaxial Compression [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31 (6): 1198-1207.
- [16] 杨小彬, 秦跃平, 叶飞. 考虑残余应力的砂岩损伤理论模型 [J]. *煤炭学报*, 2015, 40 (12): 2807-2811.
- YANG Xiao-bin, QIN Yue-ping, YE Fei. Damage Constitutive Relation of Sandstone Considering Residual Stress [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40 (12): 2807-2811.
- [17] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24 (17): 3003-3010.
- XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun. Criteria for Strength and Structural Failure of Rocks Based on Energy Dissipation and Energy Release Principles [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24 (17): 3003-3010.
- [18] KACHNOV M. Effective Elastic Properties of Cracked Solids; Critical Review of Some Basic Concepts [J]. *Applied Mechanics Review*, 1992, 45 (8): 304-335.
- [19] 曹文贵, 张超, 贺敏, 等. 考虑空隙压密阶段特征的岩石应变软化统计损伤模拟方法 [J]. *岩土工程学报*, 2016, 38 (10): 1754-1761.
- CAO Wen-gui, ZHANG Chao, HE Min, et al. Statistical Damage Simulation Method of Strain Softening Deformation Process for Rocks Considering Characteristics of Void Compaction Stage [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38 (10): 1754-1761.
- [20] 刘国民, 黄梅, 陈华, 等. 炭质板岩冻融后蠕变特性试验及损伤模型研究 [J]. *公路交通科技*, 2024, 41 (3): 143-150.
- LIU Guo-min, HUANG Mei, CHEN Hua, et al. Experimental Study on Creep Characteristics and Damage Model of Carbonaceous Slate After Freeze-thaw [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2024, 41 (3): 143-150.
- [21] 王苏生, 徐卫亚, 王伟, 等. 岩石统计损伤本构模型与试验 [J]. *河海大学学报 (自然科学版)*, 2017, 45 (5): 464-470.
- WANG Su-sheng, XU Wei-ya, WANG Wei, et al. The Statistical Damage Constitutive Model of Rocks and Its Experiment [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2017, 45 (5): 464-470.
- [22] 温韬, 唐辉明, 刘佑荣, 等. 考虑裂纹闭合效应的岩石损伤力学模型及耗散能量分析 [J]. *长江科学院院报*, 2016, 33 (5): 69-75.
- WEN Tao, TANG Hui-ming, LIU You-rong, et al. A Rock Damage Mechanics Model and Analysis on Damage Energy Dissipation in Consideration of Crack Closure Effect [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2016, 33 (5): 69-75.
- [23] 蒋维, 邓建, 李隐. 基于对数正态分布的岩石损伤本构模型研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2010, 6 (6): 1190-1194.
- JIANG Wei, DENG Jian, LI Yin. Study on Constitutive Model of Rock Damage Based on Lognormal Distribution [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2010, 6 (6): 1190-1194.
- [24] PENG Rui-dong, JU Yang, XIE He-ping, et al. Energy Dissipation and Release During Coal Failure under Conventional Triaxial Compression [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48 (2): 509-526.
- [25] HE Ming-ming, HUANG Bin-qian, ZHU Cai-hui, et al. Energy Dissipationbased Method for Fatigue Life Prediction of Rock Salt [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51 (5): 1447-1455.
- [26] 杨圣奇, 徐卫亚, 苏承东. 大理岩三轴压缩变形破坏与能量特征研究 [J]. *工程力学*, 2007, 24 (1): 136-142.
- YANG Sheng-qi, XU Wei-ya, SU Cheng-dong. Study on the Deformation Failure and Energy Properties of Marble Specimen under Triaxial Compression [J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24 (1): 136-142.

- [38] CHOUDHARY J, KUMAR B, GUPTA A. Potential Utilization of Construction Wastes in Asphalt Pavements as Fillers Using Ranking Framework [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 277: 122262. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122262>.
- [39] 惠迎新, 王欣宇, 徐新强, 等. 钢渣沥青混合料在道路工程中的应用 [J]. *公路交通科技*, 2024, 41 (2): 22-38. HUI Ying-xin, WANG Xin-yu, XU Xin-qiang, et al. Application of Steel Slag Asphalt Mixture for Road Engineering [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*. 2024, 41 (2): 22-38.
- [40] SABERI F K, FAKHRI M, AZAMI A. Evaluation of Warm Mix Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement and Crumb Rubber [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 165: 1125-1132.
- [41] SAEEDZADEH R, ROMANOSCHI S A, AKBARIYEH N, et al. Sustainability Assessment of Recycled Asphalt Mixtures Based on Performance in Full-scale Testing [J]. *Journal of Transportation Engineering Part B: Pavements*, 2018, 144 (2): 04018024. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000048>.
- [42] 柴明明, 李明, 齐桂才, 等. 就地热再生沥青路面建设期碳排放分析 [J]. *公路交通科技*, 2016, 33 (10): 148-151, 158. CHAI Ming-ming, LI Ming, QI Gui-cai, et al. Analysis of Carbon Emission during Hot In-place Recycling Asphalt Pavement Construction [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*. 2016, 33 (10): 148-151, 158.
- [43] CAO R J, LENG Z, YU H Y, et al. Comparative Life Cycle Assessment of Warm Mix Technologies in Asphalt Rubber Pavements with Uncertainty Analysis [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 147: 137-144.
- [44] PENG B, TONG X, CAO S, et al. Carbon Emission Calculation Method and Low-carbon Technology for Use in Expressway Construction [J]. *Sustainability*, 2020, 12 (8): 3219. <https://doi.org/10.3390/su12083219>.
- [45] 张海涛, 孟良, 吕丽华. 基于 LCA 的沥青路面设计参数对碳排放的影响 [J]. *公路交通科技*, 2018, 35 (2): 1-7. ZHANG Hai-tao, MENG Liang, LÜ Li-hua. Influence of Asphalt Pavement Design Parameters on Carbon Emissions Based on LCA Technology [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*. 2018, 35 (2): 1-7.
- [46] ARAÚJO J P C, OLIVEIRA J R M, SILVA H M R D. The Importance of the Use Phase on the LCA of Environmentally Friendly Solutions for Asphalt Road Pavements [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014, 32 (32): 97-110.
- [47] CHONG D, WANG Y H. Impacts of Flexible Pavement Design and Management Decisions on Life Cycle Energy Consumption and Carbon Footprint [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2017, 22 (6): 952-971.
- [48] CHOI J H. Strategy for Reducing Carbon Dioxide Emissions from Maintenance and Rehabilitation of Highway Pavement [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 209: 88-100.
- [49] GULOTTA T M, MISTRETTA M, PRATICO F G. A Life Cycle Scenario Analysis of Different Pavement Technologies for Urban Roads [J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 673: 585-593.

(上接第 191 页)

- [27] 丛宇, 王在泉, 郑颖人, 等. 不同卸荷路径下大理岩破坏过程能量演化规律 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2016, 47 (9): 3140-3147. CONG Yu, WANG Zai-quan, ZHENG Ying-ren, et al. Energy Evolution Principle of Fracture Propagation of Marble With Different Unloading Stress Paths [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47 (9): 3140-3147.
- [28] 赵永川, 刘洪磊, 杨天鸿, 等. 中生代砂岩微观结构对强度和能量耗散的影响 [J]. *煤炭学报*, 2017, 42 (2): 452-459. ZHAO Yong-chuan, LIU Hong-lei, YANG Tian-hong, et al. Effect of Mesozoic Sandstone Meso Structure on Strength and Energy Dissipation Characteristic [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42 (2): 452-459.
- [29] LAN Qiao, LU Chen, GAUTAM D, et al. Surface Characterization and Frictional Energy Dissipation Characteristics of Deep Granite under High Stress Conditions [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52 (5): 1577-1589.
- [30] 张超, 白允, 安永林, 等. 基于全应力应变曲线的岩石脆性特征评价新方法 [J]. *公路交通科技*, 2021, 38 (3): 63-72. ZHANG Chao, BAI Yun, AN Yong-lin, et al. A New Method for Evaluating Rock Brittle Characteristics Based on Full Stress-strain Curve [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2021, 38 (3): 63-72.