

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2016.04.002

# 单轴压缩下横观各向同性岩石破裂过程 声发射特性的离散元模拟

刘京铄, 范金星, 李娟, 刘斌

(湖南水利水电职业技术学院 水利水电工程系, 湖南长沙 410131)

**摘要:** 采用离散单元法研究了横观各向同性岩石在不同层面倾角条件下的单轴压缩破坏过程及声发射特性。结果表明: 由于层面倾角的变化, 导致横观各向同性岩石破裂过程具有不同的声发射特性。声发射特性与应力存在一定的耦合关系, 且声发射空间响应集中在2种岩石的交界面上。互层岩体由于层间力学属性不同, 极有可能在交界面处引起应力集中, 使得在交界面附近裂纹最先萌生, 裂纹进一步向交界面两侧岩体中扩展, 从而引起宏观裂纹的出现, 最终引起岩体的破坏。随着层面倾角的增大, 岩石的单轴抗压强度和弹性模量呈先减小后增大, 层面倾角 $90^\circ$ 时的强度甚至超过了 $0^\circ$ 时的强度。

**关键词:** 横观各向同性岩石; 软硬互层; 层面倾角; 单轴压缩; 声发射; 离散单元法

中图分类号: TU452

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2016)04-0005-05

## DEM Simulation of Acoustic Emission Characteristics in the Failure Process of Transversely Isotropic Rocks Under Uniaxial Compression

LIU Jingshuo, FANG Jinxing, LI Juan, LIU Bin

(Department of Hydraulic Engineering, Hunan Polytechnic of Water Resources and Electric Power, Changsha 410131, China)

**Abstract:** A research has been conducted, with the discrete element method introduced, on the failure process under uniaxial compression and the acoustic emission characteristics of transversely isotropic rocks with different orientation angles. The experimental results show that the difference in orientation angle of transversely isotropic rocks results in various acoustic emission characteristics. A coupling relation has been found between acoustic emission characteristics and the corresponding stresses, with the spatial response of acoustic emissions occurring mainly at the interface of two kinds of rocks. Differences between mechanical properties of transversely isotropic rocks result in a stress concentration at the interface of inter-stratified rock mass where a crack initiation may first occur, which expands into the nearby area and then causes macroscopic cracks to form, finally resulting in the total failure of the entire specimen. With the increase of orientation angles, the uniaxial compression strength and modulus of elasticity decrease initially and then increase. The compression strength reaches its peak when  $\beta=90^\circ$ , where it exceeds the corresponding compression strength when  $\beta=0^\circ$ .

**Keywords:** transversely isotropy rock; inter-layered rock; orientation angle; uniaxial compression; acoustic emission (AE); discrete element method

收稿日期: 2016-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51174228), 湖南省教育厅科学研究基金资助项目(14C0746, 15C0895)

作者简介: 刘京铄(1979-), 男, 湖南邵东人, 湖南水利水电职业技术学院讲师, 中南大学博士生, 主要研究方向为岩土工程和水工结构, E-mail: ljs7327@163.com

## 0 引言

层状岩体是广泛存在的地质材料,其各向异性性状对岩体的力学行为有重要的影响。岩石弹塑性变形只是各种微结构之间相互作用的宏观体积响应。变形的机理是微裂纹成核和增长及其聚集而生成细观裂纹和裂纹的扩展与传播<sup>[1]</sup>。但是,由于岩体中包含的微观颗粒数目庞大,表现形态各异,要从理论上精确地描述和分析各个损伤实体,几乎是不可能的。随着计算机技术的发展,数值模拟手段越来越多地应用到岩石力学研究中。

岩体内部微缺陷和微裂纹等的成核、扩展并快速释放能量,是岩体损伤、失效与破坏的主要机制。声发射技术可以实时监测岩石的微观损伤和演化过程,是一种行之有效的研究手段<sup>[2-8]</sup>。离散元通过颗粒间的接触和粘结来储存岩体弹性应变能。在应力作用下,当颗粒间平行黏结的应力大于其黏结强度时,黏结发生破坏断裂,并释放应变能。所以,采用离散元模拟声发射行为是可行的<sup>[9]</sup>。

本文借助离散元软件,用2种不同的岩石材料来组成不同层面倾角的横观各向同性的岩石试件,通过单轴加载数值模拟试验,模拟横观各向同性岩石破裂的整个过程,结合声发射监测技术,研究单轴压缩条件下横观各向同性岩石试件的力学特性。

## 1 离散元数值分析

图1为不同层面倾角( $\beta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ )的数值模拟岩石试件,试件高10 cm,直径5 cm。数值模拟试件中,浅色条带表示强度较高的岩石介质A,深色的条带代表强度较弱的岩石介质B,岩层厚度均为1.5 cm。由这2种介质组成了不同角度层理的岩石试件。颗粒间的接触采用平行黏结模型。模型细观力学参数见表1与表2。岩体在荷载作用下,内部颗粒间会产生相应的力与弯矩。当局部颗粒间平行黏结的应力超过其黏结强度时,平行粘结断裂形成一处微裂纹,并产生声发射。

离散元细观参数的标定是:以岩石常规单轴压缩应力-应变数值模拟曲线和室内试验曲线吻合为细观参数标定的准则;基本过程是,不断调整颗粒法向、切向接触刚度,同时控制其峰值强度在一定的范围内,使颗粒流的细观数值模拟得到的结果逼近材料的宏观力学响应。细观单元力学参数间虽相互独立,而又同时影响着试件的某种宏观力学响应。与材料强度有关的细观参数有接触刚度、黏结强度和摩擦因数,同时变化这些参数来得到宏观强度变

化规律是非常困难的,目前尚无有效的解决方法。因此,选择颗粒细观结构、力学参数与物理模型的过程是非常复杂而又困难的,有一个大量试错的过程。

表1 介质颗粒参数

参数	介质 A	介质 B
颗粒密度 / ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	1.427	1.494
弹性模量 / GPa	6.514	2.556
刚度比	1.5	1.0
摩擦因数	0.37	0.37
抗压强度 / MPa	28.50	15.28
孔隙率 / %	37	37

注:刚度比即横向刚度与纵向刚度的比值。下同。

表2 介质黏结参数

参数	介质黏结方式		
	A-A	B-B	A-B
半径乘子	1	1	1
弹性模量 / GPa	6.514	2.556	2.850
刚度比	1.50	1.00	1.25
法向强度 / MPa	28.50	15.28	21.00
切向强度 / MPa	28.50	15.28	3.00

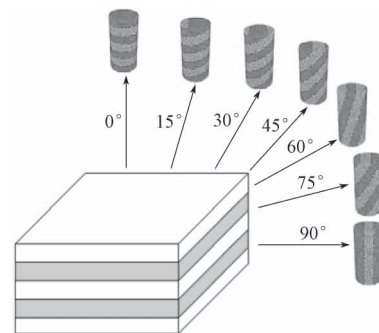


图1 不同倾角的数值模拟试件示意图

Fig. 1 A diagram of numerical simulation specimens with different orientation angles

## 2 结果与分析

为了探讨横观各向同性岩石的力学性质,利用不同层面倾角的横观各向同性岩石试件进行单轴压缩试验模拟。图2为不同层面倾角试件的应力-应变和累计AE数曲线。由图可知,不同层面倾角试件的应力-应变和累计AE数曲线的形态基本一致。应力-应变曲线可分为5个阶段。

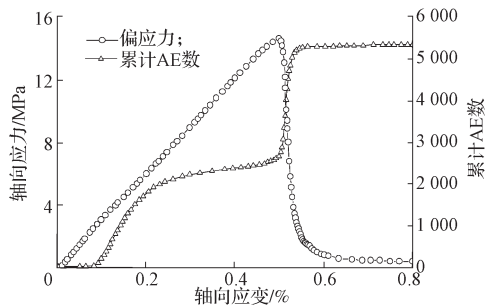
1) 初始压密阶段:应力-应变关系曲线微向上弯曲。此阶段几乎没有裂纹产生,累计AE数维持在较低水平。

2) 弹性阶段:应力-应变曲线近似于直线,随着荷载的增加,岩石内部开始产生微裂纹。此阶段为裂纹的稳定扩展段,对应累计AE数稳定增加。

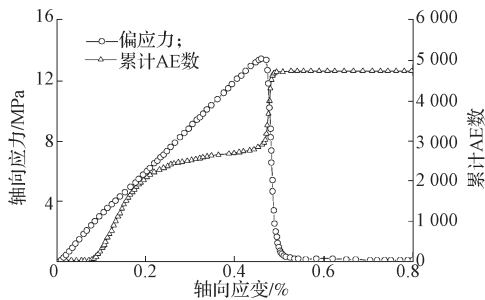
3) 应变硬化阶段: 此阶段为裂纹的加速扩展阶段, 应力-应变曲线呈显著非线性, 随着法向荷载的继续增加, 黏结断裂后相应的受力构架会发生应力调整, 导致临近单元应力增加, 临近单元应力水平达到黏结强度时随之破坏, 应力传递路径不断变化, 受力构架不断削弱。同一时间破坏的黏结数急剧增加, 表现为累计 AE 数急剧增加。这说明内部破坏急剧产生, 裂纹加速发展, 逐渐出现一定的贯通趋向性。

4) 应变软化阶段: 岩体承载力达到峰值强度后, 其内部结构遭到破坏, 但试件基本保持整体状。到本阶段, 应力迅速衰减, 出现明显的应力降, 裂纹快速发展, 内部损伤不断累积, 最终形成宏观断裂面, 使试件发生失稳破坏。累计 AE 数呈近线性增长趋势。

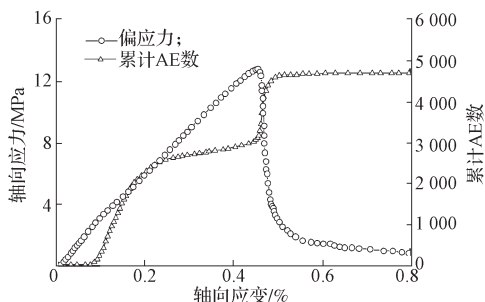
5) 残余强度阶段: 试件变形主要表现为沿宏观断裂面的块体滑移, 试件承载力随变形增大迅速下降, 并降到 0。此时, 累计 AE 数增加速率降低并最终趋于稳定。



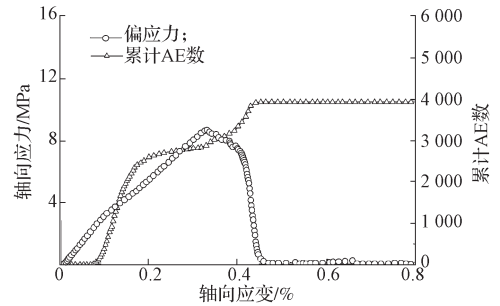
a)  $\beta=0^\circ$



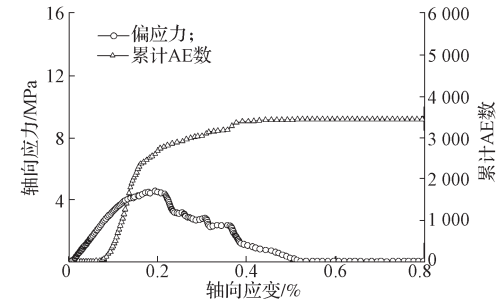
b)  $\beta=15^\circ$



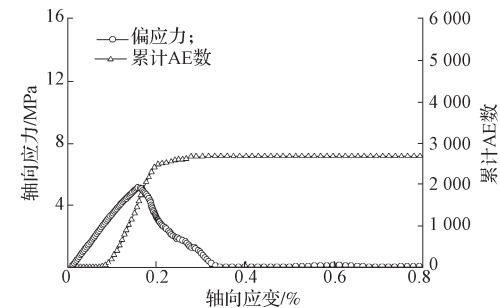
c)  $\beta=30^\circ$



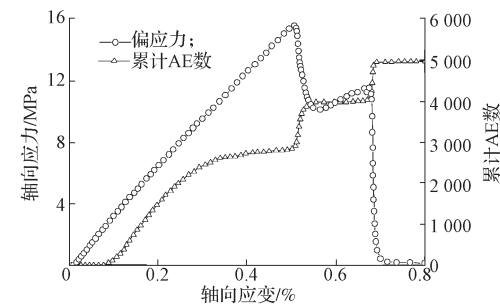
d)  $\beta=45^\circ$



e)  $\beta=60^\circ$



f)  $\beta=75^\circ$



g)  $\beta=90^\circ$

图 2 不同层面倾角试件的应力-应变和累计 AE 数曲线

Fig. 2 Diagrams of stress-strain and accumulative AE curves of specimens with different orientation angles

图 3 是不同层面倾角  $\beta$  的岩石试件分别在轴向应变为 0.2%, 0.4%, 0.6% 和 0.8% 时的累计 AE 数。由图可知, 轴向应变为 0.2% 时, 累计 AE 数先随着层面倾角的增大而增大, 并在  $60^\circ$  时达到最大, 之后随着层面倾角的增大而减小。轴向应变为 0.4% 时, 累计 AE 数先随着层面倾角的增大而增大, 在  $60^\circ$  时达到最大, 在  $75^\circ$  时降低, 而在  $90^\circ$  时再次增大。轴向应变为 0.6% 和 0.8% 时, 累计 AE 数随着层面倾角的增大而减

小, 在 75° 时达到最小, 而在 90° 时明显增加。

从图 3 还可以看出, 轴向应变从 0.2% 增大到 0.6%, 累计 AE 数逐渐增加。而轴向应变为 0.6% 时的累计 AE 数与轴向应变为 0.8% 时的累计 AE 数几乎相同。这说明轴向应变为 0.6%~0.8% 已处于残余强度阶段, 累计 AE 数增加速率降低并最终趋于稳定。层面倾角从 0° 增大到 75° 时, 不同轴向应变时的累计 AE 数的差值减小。层面倾角 90° 时, 差值增大。

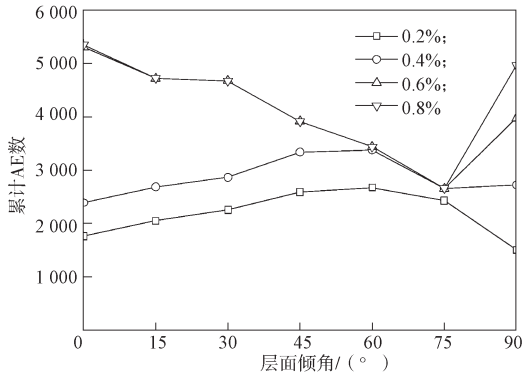


图 3 不同轴向应变时的累计 AE 数 - 层面倾角曲线

Fig. 3 A curve diagram of accumulative AE event-orientation angles at different axial strains

目前, 基于声发射特性的研究往往是从声发射 - 应变的角度进行分析, 然而应力是导致材料变形破坏的主动因素。而应变、声发射是应力作用下的被动响应。所以, 声发射与应力之间的耦合关系对于揭示声发射的潜在力学本质更有帮助。图 4 为加载过程中累计 AE 数 - 应力曲线。由图可知, 不同层面倾角试件的声发射特性与应力关系都呈现出一定的规

律, 二者存在一定的耦合关系。

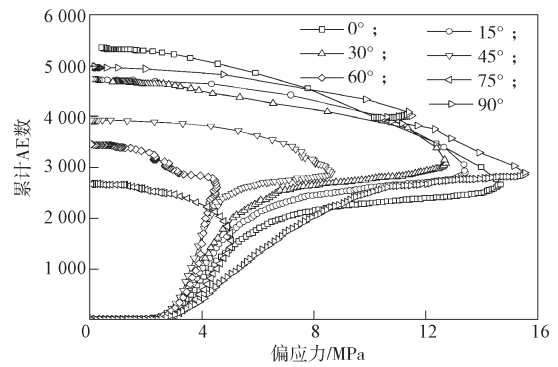


图 4 不同层面倾角试件的累计 AE 数 - 偏应力曲线

Fig. 4 A curve diagram of accumulative AE event-deviator stresses of rock samples with different orientation angles

岩石的稳定性与裂纹的分布关系密切。岩石工程的失稳破坏往往是由于原有裂纹的演化、扩展和贯通造成的, 微裂纹成核时瞬间释放的弹性应变能是声发射最主要的组成部分。声发射空间响应对应着微裂纹的空间分布。不同层面倾角条件下岩石试件破坏时的裂纹分布如图 5 所示。由图可知, 试件的声发射空间响应集中在材料交界面上。交界面上的微裂纹开始贯通成较大的宏观断裂面, 裂纹首先出现在交界面处。由于横观各向同性岩石的非连续性与非均质性, 在 2 种材料的交界面处形成复杂的应力 - 应变关系, 极有可能在交界面处引起应力集中, 导致裂纹最有可能产生于交界面处。且层面倾角的存在使得交界面处存在剪切应力。所以, 交界面就成为裂纹优先萌生和扩展的位置<sup>[10-11]</sup>。

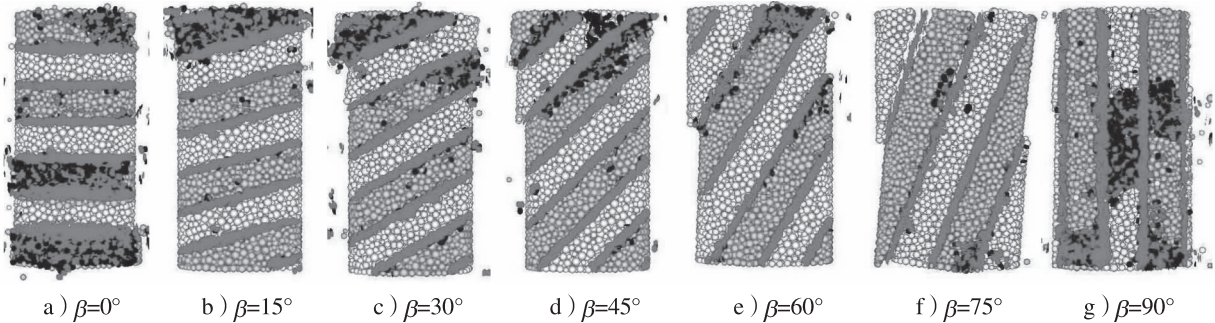


图 5 不同层面倾角条件下试件破坏时的声发射空间响应

Fig. 5 Spatial responses of acoustic emissions at the failure for specimens with different orientation angles

图 6 为不同倾角试件的单轴抗压强度和弹性模量关系曲线。由图可知, 随着层面倾角的增大, 岩石的单轴抗压强度先减小后增大。层面倾角  $\beta$  从 0° 增大到 30°, 单轴抗压强度降幅较小。 $\beta=15^\circ$  和  $30^\circ$  时, 单轴抗压强度从 14.67 MPa 分别减小到 13.40 MPa 和 12.74 MPa, 降幅分别为 8.67% 和 13.16%。之后单轴抗压强度加速减小,  $\beta=60^\circ$  时, 岩石试件的单轴抗压强度减小到最小值 4.53 MPa。随后, 单轴抗压强度随

着层面倾角的增大而增大。当  $\beta=75^\circ$  时, 单轴抗压强度增大到 5.06 MPa, 并在  $\beta=90^\circ$  时达到最大值, 甚至高于  $\beta=0^\circ$  时的强度, 这也说明层状岩体具有强烈的各向异性。相比于单轴抗压强度, 弹性模量的变化范围较小, 尤其是层面倾角在  $0^\circ \sim 45^\circ$  的范围内, 弹性模量随着层面倾角的增大而单调缓慢减小。说明层面倾角对弹性模量的影响较小。虽然单轴抗压强度是在  $\beta=60^\circ$  时最小, 但弹性模量却是在  $\beta=45^\circ$  时最

小。 $\beta=75^\circ$  时单轴抗压强度较小, 但弹性模量却是最大。这说明了横观各向同性岩石, 在弹性阶段所表现出的弹性模量的大小并不能代表其最终峰值强度的大小。

由以上各倾角试件的单轴压缩模拟试验获得的应力-应变关系发现, 低倾角轴向应变值有时会比较小, 弱相岩石 B 的弹性模量较低、强度也较小(较易发生破坏), 因此低倾角试件的力学行为主要由弱相岩石 B 主导。中倾角试件( $\beta$ 为  $45^\circ \sim 75^\circ$ ) 破坏形式主要为沿界面产生滑动破坏, 试件在受到轴向应力时, 界面剪力强度承受不住剪应力的持续增大导致界面破坏。因此, 中倾角试件的力学行为主要由界面性质所主导。高倾角( $\beta=90^\circ$ ) 试件由岩石材料 A 和 B 一同承受载荷, 强度较高的岩石材料 A 会分担更多的应力, 故高倾角试件的力学行为由岩石材料 A 所主导的比例较多。

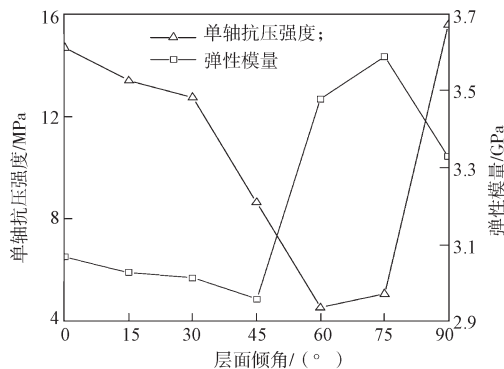


图6 单轴抗压强度和弹性模量与层面倾角的关系曲线

Fig. 6 A contrast diagram of UCS and elastic modulus with different orientation angles

### 3 结论

1) 由于层面倾角的变化, 导致横观各向同性岩石破裂过程具有不同的声发射特性, 且声发射空间响应集中在材料交界面上。

2) 层状岩体由于层间力学属性不同, 极有可能在界面处引起应力集中, 使得在界面附近裂纹最先萌生, 裂纹进一步向界面两侧岩体中扩展, 从而引起宏观裂纹出现, 最终导致岩体破坏。

3) 应力是导致声发射事件产生的主动因素, 声发射特性与应力存在一定的耦合关系。

4) 随着层面倾角的增大, 岩石的单轴抗压强度和弹性模量呈先减小后增大的变化趋势。

#### 参考文献:

[1] 刘卡丁, 张玉军. 层状岩体剪切破坏面方向的影响因素

[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 335-339.

LIU Kading, ZHANG Yujun. Influence Factors on Shear Failure Orientation of Layered Rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 335-339.

[2] BAUD P, KLEIN E, WONG T F. Compaction Localization in Porous Sandstones: Spatial Evolution of Damage and Acoustic Emission Activity[J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26(4): 603-624.

[3] INGRAHAM M D, ISSEN K A, HOLCOMB D J. Use of Acoustic Emissions to Investigate Localization in High-Porosity Sandstone Subjected to True Triaxial Stresses[J]. Acta Geotechnica, 2013, 8(6): 645-663.

[4] CHITRALA Y, MORENO C, SONDERGELD C, et al. An Experimental Investigation into Hydraulic Fracture Propagation Under Different Applied Stresses in Tight Sands Using Acoustic Emissions[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2013, 108: 151-161.

[5] ISHIDA T. Acoustic Emission Monitoring of Hydraulic Fracturing in Laboratory and Field[J]. Construction and Building Materials, 2001, 15(5/6): 283-295.

[6] DONG L J, LI X B, ZHOU Z L, et al. Three-Dimensional Analytical Solution of Acoustic Emission Source Location for Cuboid Monitoring Network Without Pre-Measured Wave Velocity[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(1): 293-302.

[7] PRADHAN S, STROISZ A M, FJÆR E, et al. Stress-Induced Fracturing of Reservoir Rocks: Acoustic Monitoring and  $\mu$ CT Image Analysis[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(6): 2529-2540.

[8] 穆康, 俞缙, 李宏, 等. 水-力耦合条件下砂岩声发射和能量耗散的颗粒流模拟[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1496-1504.

MU Kang, YU Jin, LI Hong, et al. Acoustic Emission of Sandstone with Hydro-Mechanical Coupling and PFC-Based Modelling of Energy Dissipation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1496-1504.

[9] 王云飞, 黄正均, 崔芳. 煤岩破坏过程的细观力学损伤演化机制[J]. 煤炭学报, 2014, 39(12): 2390-2396. WANG Yunfei, HUANG Zhengjun, CUI Fang. Damage Evolution Mechanism in the Failure Process of Coal Rock Based on Mesomechanics[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(12): 2390-2396.

[10] LI Y P, LIU W, YANG C H, et al. Experimental Investigation of Mechanical Behavior of Bedded Rock Salt Containing Inclined Interlayer[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 69: 39-49.

[11] LI Y P, CHEN L Z, WANG Y H. Experimental Research on Pre-Cracked Marble Under Compression[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(9/10): 2505-2516.

(责任编辑: 邓光辉)