

文章编号:0253-9993(2012)04-0590-06

粉砂岩三轴压缩条件下细观损伤特征的定量研究

李晓娟^{1,2,3},倪晓慧^{1,2,3},孙斌祥¹,朱珍德^{2,3},杜时贵¹

(1. 绍兴文理学院 土木工程系,浙江 绍兴 312000;2. 河海大学 岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098;3. 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要:首先利用RMT-150B岩石伺服试验系统,以不同围压(2,4,6,8,10 MPa)分别对大坦沙工程粉砂岩试样进行三轴压缩试验。然后,利用扫描电镜(SEM)拍摄得到的大量细观损伤图片,运用数字图像技术获取微裂纹的细观几何信息,从方位角、长度、宽度、面积和数量对不同围压条件相应的粉砂岩细观尺度微损伤特征进行统计分析。研究表明:三轴压缩条件下粉砂岩微裂纹的方位角、长度和宽度基本服从广义极限分布;微裂纹的方位角主要集中在与 σ_1 作用方向成 35° 附近;随着围压的增长,仅有小部分微裂纹在长度尺寸上出现较大幅度的增长,而绝大部分微裂纹在宽度尺寸上基本不发育;经历三轴压缩试验的粉砂岩试样的能量耗散方式,主要以数量和长度两个方式进行。

关键词:粉砂岩;三轴压缩;微裂纹

中图分类号:TU459 **文献标志码:**A

Quantitative study on meso-damage characteristics of siltstone under triaxial compression

LI Xiao-juan^{1,2,3}, NI Xiao-hui^{1,2,3}, SUN Bin-xiang¹, ZHU Zhen-de^{2,3}, DU Shi-gui¹

(1. Department of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Nanjing 210098, China)

Abstract: The triaxial compression tests on siltstone from Datansha of Guangzhou City were done by the RMT-150B multi-function automatic rigid rock servo material testing machine. The loads with five different values of 2, 4, 6, 8, 10 MPa were adopted as confining pressures. A great deal of mesostructural images of Datansha siltstone were obtained by means of scanning electron microscopy (SEM). The mesostructural images of siltstone were processed by regional growing theory based on the image processing technique. The meso-damage information of siltstone microcracks were obtained from SEM images. The mesostructural information of microcracks was analyzed by statistical theory and the distribution regularities of microcrack parameters including angle, length, width, area and number were proposed. It is concluded that the azimuth angle, length and width of Datansha siltstone's microcracks under triaxial compression obey the regularity of generalized extreme value distribution of variable parameters. The azimuth of microcracks mainly focuses on the angle of approximate 35° . With the confining pressure increasing, there is only a substantial growth along the length of the microcracks, while no development on the width. The energy dissipation approach of siltstone samples under triaxial compression has two ways which are the growth of the number and length of microcracks.

Key words: siltstone; triaxial compression; microcracks

岩石是自然界历久育成的产物,是由多种矿物晶粒、孔隙和胶结物组成的混杂体。在经过亿万年的地

收稿日期:2011-08-12 责任编辑:王婉洁

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41172292);浙江省教育厅科研基金资助项目(Y201122490);绍兴市科技计划重点科研资助项目(2011A21058)

作者简介:李晓娟(1978—),女,河北临西人,讲师。Tel:0575-88341503, E-mail:xiaojuanli2007@163.com

质演变和多期复杂的构造运动后,岩石中形成了各种随机微裂隙和微孔洞,所以岩石结构是极其复杂的非连续和非均质体,它的力学属性具有非线性、各向异性及流变特性。在长期的实践中,人们认识到岩石复杂的宏观物理力学特点是其微细结构特性的集中体现,岩石受载后的宏观断裂失稳和破坏与其变形时内部微裂纹的分布以及微裂纹的萌生、扩展和贯通密切相关。因此,通过建立多尺度的力学模型将岩石细观微裂纹的特征同宏观坏的力学机制联系起来进行研究,对进一步理解和研究岩石材料的宏观力学特性具有重要意义^[1]。

近年来,国内外学者开展了关于岩石三轴压缩试验相关力学性质的研究。Penumadu 等^[2]用人工神经网络模拟了岩石三轴压缩试验的应力应变特征。Chang 等^[3]研究了岩石三轴压缩试验的声发射特征。Lenoir 等^[4]运用计算机断层扫描分析技术分析了泥岩三轴压缩试验过程中的损伤特征。任建喜等^[5-7]利用具有三轴加载设备的 CT 机研究了三轴压缩岩石细观损伤扩展机理。杨永杰等^[8-9]通过煤岩的三轴压缩试验分析了不同围压条件下微孔隙裂隙对煤岩弹性模量的影响。赵阳升、万志军等^[10-11]采用高温高压三轴试验机等设备,系统地研究大尺寸花岗岩试样在高温条件下三轴压缩破坏特征及相关热学和力学参数变化规律。李廷春等^[12]通过 CT 实时扫描试验研究了类岩石材料在三轴压缩荷载作用下单裂隙的扩展特征。李玉寿等^[13]研究了煤岩在三轴及孔隙水等试验条件下的声发射特征。由此可见,在岩石三轴压缩力学性质的研究方面,从细观尺度层面通过扫描电镜(SEM)对经历三轴压缩试验的岩石微损伤特征进行定量分析研究的文献较为鲜见。

本文在文献[14-16]研究基础上,以大坦沙粉砂岩试样的细观尺度微损伤的几何特征为研究对象,基于 RMT-150B 多功能全自动刚性岩石伺服试验机和 Hitachi S-3000h 型扫描电镜试验设备,进行不同围压条件下的三轴压缩试验,通过对试样细观尺度微损伤信息的量化处理,定量分析了大坦沙粉砂岩试样在不同围压作用后的细观微裂纹损伤特征,在细观尺度层面定量研究了粉砂岩的三轴压缩损伤特征,为损伤岩石力学的理论分析奠定了基础。

1 粉砂岩细观损伤量化试验

为了研究粉砂岩在三轴压缩条件中不同围压作用下的细观尺度微损伤特征,试验由两部分组成:①粉砂岩不同围压作用下的三轴压缩试验;②粉砂岩细观损伤量化试验。

1.1 粉砂岩不同围压作用下的三轴压缩试验

岩样取自广州市大坦沙工程中的粉砂岩,宏观均匀一致,经 X 射线衍射检测,矿物成份为石英(含量为 69%)、方解石(含量为 27%)以及其他物质(含量为 4%)。为保证岩样性质的一致性,实行严格密集采样;为保证试验结果的可靠性和可比性,试样加工成型后对其外观仔细观察,剔除表面有明显节理及裂纹等宏观明显差异的试样,制成标准圆柱体试样 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。试样两端面进行研磨抛光,以保证其平行度、平整度和光洁度。制备试样过程中,试样高度、直径误差需控制在 0.3 mm 内,两端面的不平行度最大不超过 0.05 mm。在剔除尺寸及平整度不符合要求的试样后,共制备 5 组试样(6 个试样/组),每组对应于 5 个不同围压条件下的三轴压缩试验。

试验采用河海大学岩土工程研究所 RMT-150B 多功能全自动刚性岩石伺服试验机(图 1)。试验机的轴向加荷能力为 1 000 kN,水平向加荷能力为 500 kN。为研究不同围压条件下粉砂岩试样中产生的损伤特征,本试验选用 5 组(2, 4, 6, 8, 10 MPa)不同围压值进行粉砂岩三轴压缩试验。



图 1 RMT-150B 多功能全自动刚性岩石伺服试验机

Fig. 1 RMT-150B automatic multifunctional rigidity servo rock testing machine

1.2 粉砂岩细观损伤量化试验

对于经历三轴压缩试验破坏后的粉砂岩试样,由于粉砂岩自身特点及其内部所蕴含的大量微损伤,所以破坏后的试样质地较为酥松,制备切片相对较困难,每个试样约制备 10 个切片,用于统计经历破坏后粉砂岩细观微损伤。

试验采用 Hitachi S-3000h 型扫描电镜对切片进行观测。为满足获取足够多的微裂纹信息以进行统计分析,SEM 图像拍摄时,对每个切片均采用“从上而下,从左而右”的图像采集顺序,以避免信息的重复获取和遗漏。图像放大率主要根据课题组以往试验经验,并结合粉砂岩的细观损伤特征,采用以 300 倍、500 倍为主,部分区域采用 1 000 倍^[14-16]。

针对岩石细观扫描电子显微镜图像的特点,通过编写基于 Matlab 图像处理工具箱的图像识别程序,

实现对 SEM 图像中蕴含的微损伤信息进行获取。大理岩数字细观结构的获取步骤如下:① 根据扫描电镜图像的像素和几何处理功能,输入处理图片的大小比例;② 对图像进行图像增强处理,突出图像中所关心的微损伤信息;③ 基于生态学的区域生长算法,获取微裂纹基本几何参数(面积、倾角、长度、宽度等)。

2 试验结果及分析

2.1 粉砂岩三轴压缩试验结果

在粉砂岩试样三轴压缩试验数据的基础上进行统计分析,当围压为 2,4,6,8,10 MPa 时,峰值强度分别为 20.13,32.81,46.25,59.77,75.25 MPa,可得相应试验结果如图 2 所示。可见,随着试样围压的增加,粉砂岩的峰值强度也在增加。

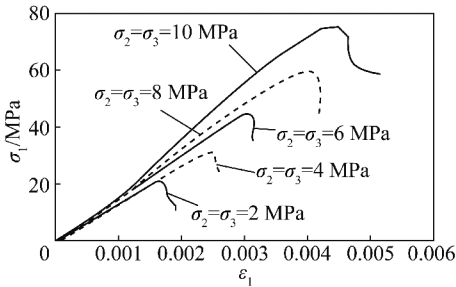


图 2 不同围压时粉砂岩 $\sigma_1-\varepsilon_1$ 曲线
Fig. 2 $\sigma_1-\varepsilon_1$ curves of siltstone under different confining pressures

2.2 粉砂岩细观损伤量化试验结果

通过对 5 组经历不同围压条件的三轴压缩试验破坏试样的细观微损伤图片进行处理,获取大量的细观尺度微裂纹的几何数据。根据 SEM 图片中微裂纹图像的特点,可以从微裂纹的方位角、长度、宽度、数量和总面积 5 个方面对粉砂岩细观尺度微裂纹进行几何特征描述。为了分别得到不同围压下粉砂岩三轴压缩破坏的细观微裂纹的方位角、长度及宽度的分布特征,对 5 组不同围压状态下的试样微裂纹几何特征分别作方位角概率直方图、长度概率直方图及间距概率直方图,图 3 为部分试样不同围压条件下粉砂岩微裂纹细观结构信息直方图。统计分析表明,细观尺度微裂纹的方位角、长度及宽度的分布特征基本上符合广义极限分布 (Generalized Extreme Value, GEV)。GEV 的密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} \exp \left[- \left(1 + k \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{k}} \right] \left(1 + k \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{-1-\frac{1}{k}} \quad (1)$$

式中, x 为对应于微裂纹的方位角、长度、宽度; μ 为位置参数; σ 为比例参数; k 为形状参数,当 $k > 0$ 时,退化为 Gumbel 分布,当 $k = 0$ 时,退化为 Frechet 分布,当 $k < 0$ 时,退化为 Weibull 分布。

2.2.1 方位角

由图 4 可知,微裂纹方位角在 2 MPa 围压时主要

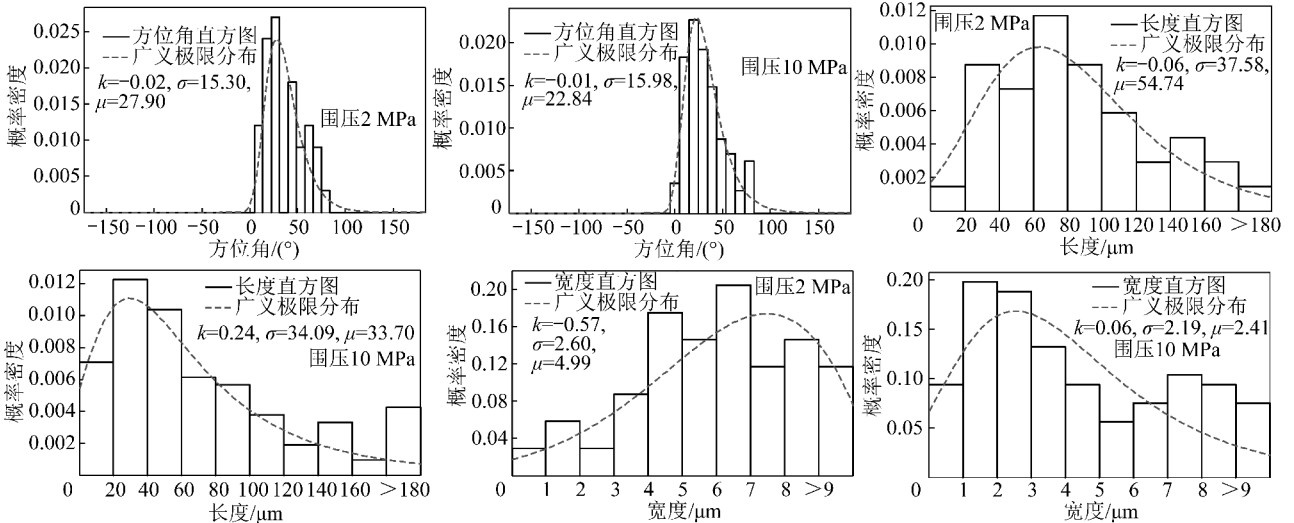


图 3 粉砂岩微裂纹损伤信息直方图

Fig. 3 Histogram of microcrack information of siltstone under different confining pressures

以 30°左右的为主;当围压为 10 MPa 时,则 10°和 20°左右的方位角明显增多,30°左右的方位角则相对减少。根据图 5 可知,方位角在不同围压下的统计平均值随着围压的增加总体呈现出下降趋势,方位角均值基本保持在 30°~40°区间内;同时,随着围压不断增

加,方位角统计方差随围压的增加呈现明显上升趋势,从围压 2 MPa 的 364.9 到围压 10 MPa 的 435.7。根据不同围压条件下方位角统计平均值和统计方差的变化特点,可见在经历不同围压三轴压缩荷载的粉砂岩试样中,微裂纹萌生及发展的则更加偏向于主应

力 σ_1 作用方向;同时,随着围压的增长,微裂纹数量不断增加,其方位角的方向变化不断增加,方位角离散程度增大。这是由于随着围压不断增长,砂粒被压碎,砂岩碎屑变细,产生多种不同能量阈值的不同类型的微裂纹,破坏产生微裂纹类型相互之间的比例也发生变化所造成的。

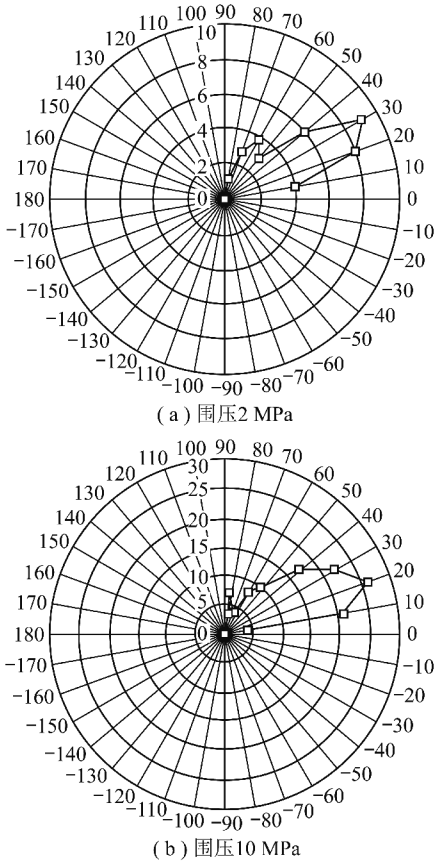


图4 不同围压条件下的微裂纹方位角的风玫瑰图

Fig. 4 The wind rose of microcrack azimuth angle under different confining pressures

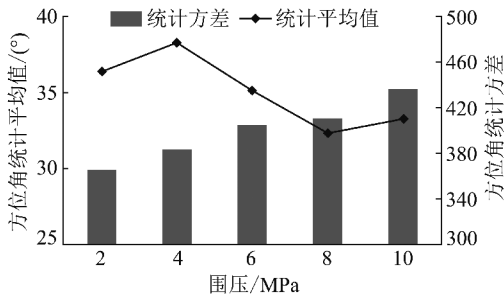


图5 不同围压条件下的微裂纹方位角统计平均值及方差

Fig. 5 The statistical mean and variance of microcrack azimuth angle under different confining pressures

2.2.2 长度和宽度

由图6可知,随着粉砂岩所受围压从2 MPa增长至10 MPa,微裂纹长度统计平均值总体表现为由74 μm 微减至63 μm ,变化区间仅为60~80 μm ,

而长度统计方差则出现长度统计方差随着围压的不断增长,增长迅速的现象(由围压为2 MPa时的2 017.6增至围压为10 MPa时的4 776.6,变化区间较大)。根据微裂纹长度统计平均值和方差的变化特点,可知随着围压的不断增高,粉砂岩试样中萌发出较多不同尺寸的微裂纹,其中长度尺寸发育较慢的微裂纹在试样全部微裂纹数量中所占比例在迅速增加,而长度尺寸发育较快微裂纹所占比例则处于较低水平。

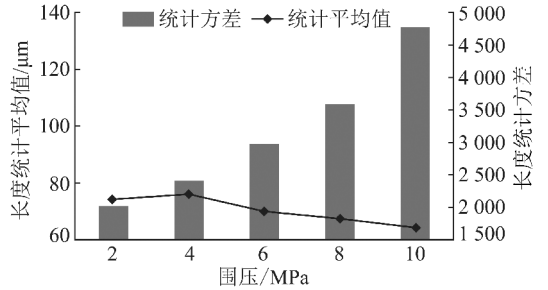


图6 不同围压条件下的微裂纹长度统计平均值及方差

Fig. 6 The statistical mean and variance of microcrack length under different confining pressures

根据图7所示,随着试样所受围压从2~10 MPa逐渐增加,微裂纹的宽度统计平均值表现出缓慢下降趋势,即由5.9 μm 减至3.8 μm ,同时,与长度统计方差值相比,宽度的统计方差值则表现出随着围压的增长,缓慢上升趋势,即由5.7增至9.3。根据微裂纹宽度统计平均值和方差的变化特点,随着试样围压的增长时,细小宽度尺寸的微裂纹所占比例增加,而宽度尺寸有一定发育的微裂纹数目则比例较少,可见在三轴压缩破坏过程中粉砂岩微裂纹宽度尺寸发育速度较为缓慢,通过宽度发育进行耗散的能量所占比例相对较少。

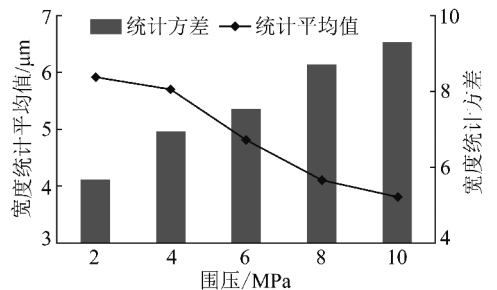


图7 不同围压条件下的微裂纹宽度统计平均值及方差

Fig. 7 The statistical mean and variance of microcrack width under different confining pressures

2.2.3 面积和数量

根据图8,试样微裂纹总面积随着试样所受围压的增加不断增加;在围压分别为4和10 MPa时,微裂纹总面积增幅基本为15%左右;在围压分别为6

和 8 MPa 时,微裂纹总面积增幅分别约为 26.9% 和 23.7%。由图 9 可知,与微裂纹总面积变化趋势相比,微裂纹数量也是呈现出总体上升趋势,在围压分别为 4 和 6 MPa 时,其增幅较大(分别达到 39.5% 和 37.7%)。这说明围压的增加有助于粉砂岩细观尺度微裂纹的发育,而且可能由于不同类型的微裂纹发育的诱因不同,则所需能量有所不同,所以在围压为 4, 6 和 8 MPa 条件下微裂纹的总面积和数量指标增加速度均较快。

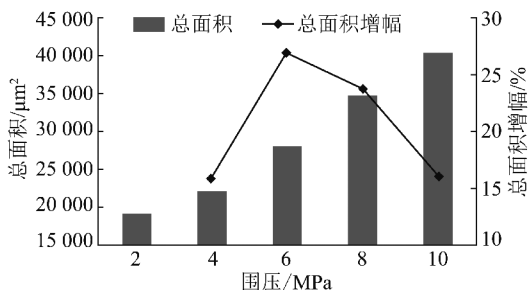


图 8 不同围压条件下的微裂纹总面积及增幅

Fig. 8 The total area and increase amplitude of microcrack under different confining pressures

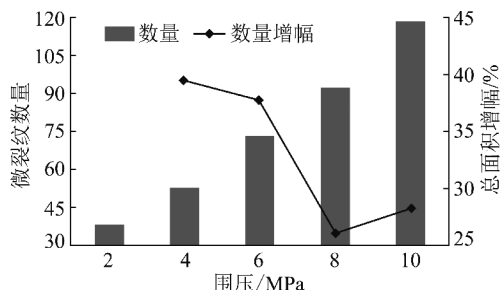


图 9 不同围压条件下的微裂纹数量及增幅

Fig. 9 The number and increase amplitude of microcrack under different confining pressures

综上所述,经历三轴压缩试验的粉砂岩试样,在不同的围压条件中细观尺度微损伤表现出不同的特征。当围压处于低水平时(2 MPa),微裂纹数量在 50 以下,相应的方位角以 30° 左右居多,长度在 $70 \sim 80 \mu\text{m}$,宽度在 $5 \sim 6 \mu\text{m}$;当围压达到中高水平时(4, 6, 8, 10 MPa),微裂纹数量及总面积迅速增多,长度均值有大幅度下降,但其方差则增长较快,方位角与宽度均值和方差则变化不大,这说明此时出现大量微小微裂纹且尺寸发育迟缓,仅有较少部分微裂纹在尺寸上有一定发展,形成最终的宏观损伤破坏,损伤耗散能量方式则以微裂纹数量及长度的增加为主要方式。

3 结 论

(1) 粉砂岩三轴压缩条件下细观损伤特征试验

方案为研究粉砂岩不同围压条件下的三轴压缩损伤破坏机理提供了丰富的细观损伤信息;

(2) 利用统计学理论,得到粉砂岩三轴压缩条件下的细观损伤具有一定统计特征,方位角、长度和宽度基本服从广义极限分布;

(3) 试样细观尺度微裂纹在不同围压条件下,其发育的方位角方向主要集中在与 σ_1 作用方向成 35° 附近,且随着围压的增加,新生微小微裂纹方向角则分布较广;

(4) 随着围压的增长,仅部分微裂纹在长度尺寸上出现较大幅度的增长,而大部分新生微裂纹在长度上未见较快发育;与长度相比,绝大部分微裂纹在宽度尺寸上则基本不发育;

(5) 经历三轴压缩试验的粉砂岩试样的能量耗散方式,主要以数量和长度两个方式进行。

参考文献:

- [1] Kassner M E, Nemat-Nasser S, Suo Z G, et al. New directions in mechanics[J]. *Mechanics of Materials*, 2005, 37(2/3): 231-259.
- [2] Dayakar Penumadu, Zhao Rongda. Triaxial compression behavior of sand and gravel using artificial neural networks(ANN)[J]. *Computers and Geotechnics*, 1999, 24(3): 207-230.
- [3] Chang S H, Lee C I. Estimation of cracking and damage mechanisms in rock under triaxial compression by moment tensor analysis of acoustic emission[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(7): 1069-1086.
- [4] Lenoir N, Bornert M, Desrues J, et al. Volumetric digital image correlation applied to X-ray microtomography images from triaxial compression tests on Argillaceous rock[J]. *Strain*, 2007, 43(3): 193-205.
- [5] 任建喜,葛修润,蒲毅彬,等. 岩石卸荷损伤演化机制 CT 实时分析初探[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(6): 697-701.
Ren Jianxi, Ge Xiurun, Pu Yibin, et al. Primary study of real-time CT testing of unloading damage evolution law of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(6): 697-701.
- [6] 任建喜. 三轴压缩岩石损伤扩展细观机理及其本构模型[J]. *煤炭学报*, 2001, 26(6): 578-583.
Ren Jianxi. Rock meso-damage propagation law in the triaxial compression loading and its constitutive model[J]. *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(6): 578-583.
- [7] 任建喜,冯晓光,刘 慧. 三轴压缩单一裂隙砂岩细观损伤破坏特性 CT 分析[J]. *西安科技大学学报*, 2009, 29(3): 300-304, 338.
Ren Jianxi, Feng Xiaoguang, Liu Hui. CT testing on mesodamage propagation mechanism of cracked sandstone sample under triaxial compression loading[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2009, 29(3): 300-304, 338.
- [8] 杨永杰,宋 扬,陈绍杰. 三轴压缩煤岩强度及变形特征的试验研究[J]. *煤炭学报*, 2006, 31(2): 150-153.

- Yang Yongjie, Song Yang, Chen Shaojie. Test study of coal's strength and deformation characteristics under triaxial compression [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(2): 150-153.
- [9] 杨永杰, 宋扬, 陈绍杰, 等. 煤岩强度离散性及三轴压缩试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1763-1766.
- Yang Yongjie, Song Yang, Chen Shaojie, et al. Experimental study on strength discreteness and triaxial compression of coal [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 1763-1766.
- [10] 赵阳升, 万志军, 张渊, 等. 20 mN 伺服控制高温高压岩体三轴试验机的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 1-8.
- Zhao Yangsheng, Wan Zhijun, Zhang Yuan, et al. Research and development of 20 mN servo-controlled rock triaxial testing system with high temperature and high pressure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 1-8.
- [11] 万志军, 赵阳升, 董付科, 等. 高温及三轴应力下花岗岩体力学特性的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 72-77.
- Wan Zhijun, Zhao Yangsheng, Dong Fuke, et al. Experimental study on mechanical characteristics of granite under high temperatures and triaxial stresses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 72-77.
- [12] 李廷春, 吕海波. 三轴压缩载荷作用下单裂隙扩展的 CT 实时扫描试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 289-296.
- Li Tingchun, Lü Haibo. CT real-time scanning tests on single crack propagation under triaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 289-296.
- [13] 李玉寿, 杨永杰, 杨圣奇, 等. 三轴及孔隙水作用下煤的变形和声发射特性[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(6): 658-663.
- Li Yushou, Yang Yongjie, Yang Shengqi, et al. Deformation and acoustic emission behaviors of coal under triaxial compression and pore water pressure [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(6): 658-663.
- [14] Zhu Z D, Zhang Y, Jiang Z J, et al. Damage analysis of red sandstone dynamic deformation with digital image technique [A]. ASCE GeoShanghai International Conference 2006 [C]. Shanghai: 112-118.
- [15] 倪晓慧, 李晓娟, 朱珍德. 不同温度循环作用后大理岩细观损伤特征的定量研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 248-254.
- Ni Xiaohui, Li Xiaojuan, Zhu Zhende. Quantitative test on meso-damage characteristics of marble after different temperatures [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 248-254.
- [16] 倪晓慧, 李晓娟, 朱珍德. 不同频率循环荷载作用下花岗岩细观疲劳损伤特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 29(2): 289-296.
- Ni Xiaohui, Li Xiaojuan, Zhu Zhende. Characteristics of mesodamage of granite samples subjected to dynamic uniaxial cyclic loading with different frequencies [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 29(2): 289-296.

重要启事

2012年4月10日,中国科协所属全国学会主办的千余种科技期刊发布关于加强科技期刊科学道德规范营造良好学术氛围的联合声明。

中国科协副主席、中国工程院副院长谢克昌宣读了《中国科协所属全国学会关于加强科技期刊科学道德规范营造良好学术氛围的联合声明》。

声明指出,存在学术不端行为的文章一经被发现,将由发现刊物联合中国科协所属相关科技期刊视情节轻重予以严肃处理:轻者给予3~5年不允许刊发其论文的处罚;情节严重者,将以适当方式公布,该作者论文永久不得刊用,同时通报国家自然科学基金资助等部门,并转请有关部门处理。

与此同时,加强期刊编审者队伍建设,严格稿件学术质量审查规范,建立明确的审稿、撤稿及发布制度,如发现已发表的论文存在弄虚作假、抄袭剽窃或严重差错等问题,应在最短时间内采取及时发布撤稿声明、更正启事或公开致歉信等方式纠正,并通知收录有关文章的数据库予以撤稿;如发现审稿人利用审稿谋取私利乃至剽窃所审稿件内容,将根据情节轻重予以警告、永久禁止其审稿、公开披露等处分。

我刊编辑部将坚决响应科协号召,对学术不端行为坚决说“不”,请广大读者相互告知。

本刊编辑部