

文章编号: 1673-3363-(2013)05-0717-06

单轴压缩下含水砂岩强度损伤及声发射特征

姚强岭, 李学华, 何利辉, 周健

(中国矿业大学矿业工程学院, 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要 宁东煤田主采煤层顶板广泛分布含水砂岩, 该层砂岩受采动影响易于变形失稳。通过实验室试验, 定量分析了含水砂岩组分, 研究了其烘干、吸水随时间变化规律。研究发现该含水砂岩富含黏土矿物, 砂岩分别烘干和浸水 6 h 后含水率变化趋于稳定, 且随着含水率增加该砂岩单轴抗压强度和弹性模量呈指数函数减小。声发射试验结果表明: 干燥状态下, 含水砂岩声发射计数峰值与应力峰值相对应, 而随着含水率增加, 声发射计数峰值较应力峰值位置滞后, 呈现出“延迟”特征, 并据此提出了预测预报该类砂岩顶板稳定的技术思路。

关键词 单轴压缩; 含水砂岩; 强度损伤; 声发射特征

中图分类号 TD 353

文献标志码 A

Strength deterioration and acoustic emission characteristics of water-bearing sandstone in uniaxial compressive experiment

YAO Qiang-ling, LI Xue-hua, HE Li-hui, ZHOU Jian

(School of Mines, Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract Water-bearing sandstone is widely distributed in the roof of primary mining coal seam of Ningdong coal field, which is prone to deformation and instability. In this experiment component of water-bearing sandstone is quantitatively analyzed, and time relationship between drying and water suction of sandstone is also studied. Research shows that this kind of sandstone is rich in clay minerals, and the variation of moisture content tends to keep stable six hours after being dried and soaked respectively; moreover, uniaxial compressive strength and elastic modulus of the sandstone decrease on the scale of exponential function with the increase of moisture content. The results of acoustic emission characteristics experiment show that count peak of acoustic emission of sandstone samples corresponds to the peak stress under the condition of being dried and lags behind with the increase of moisture content which shows “delaying” characteristics; in the mean time, pulse count decreases significantly with the peak of energy. According to these, technical thoughts are put forward to predict and forecast the stability of such kind of sandstone roof.

Key words uniaxial compression; water-bearing sandstone; strength deterioration; AE characteristics

已有的研究成果表明, 含水量大小不仅显著影响煤岩体单轴抗压强度和弹性模量, 同时也改变了

其变形破坏特征^[1-3]。岩石在一定的水压力作用下产生的物理、化学和力学作用过程正是导致工程岩体

收稿日期: 2013-02-18

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51304208); 国家自然科学基金项目(51374197); 江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介: 姚强岭(1982-), 男, 河南省兰考县人, 讲师, 博士, 从事矿山压力及其岩层控制方面研究。

E-mail: yaoqiangling@126.com

Tel: 13805210624

发生变形破坏的根本原因,而不仅是从有效应力原理简单考虑的力学效应^[4-9],其中水对岩石的化学作用是不可逆的,而物理作用过程一般是可逆的,力学作用在其弹性范围内可逆^[10]。对于孔隙由黏土矿物充填的岩石,随着含水量的变化,充填物由固态向塑态直至液态变化,使得岩体力学性质降低^[11]。诸多学者从物理、化学、力学等方面研究了水-岩作用下岩石强度、破坏形态等,但不能全面反映岩石遇水后其内部结构损伤的过程,而声发射技术能够从捕捉到的声发射信号反映出物体内部结构的变化特征。文献[12-15]研究了在不同应力路径、不同围压及温度条件下煤岩体声发射特征。本文利用煤岩体声发射加载系统,以宁东煤田侏罗系延安组煤系顶板典型含水砂岩为例,研究了不同含水状态下单轴压缩声发射特征。

1 砂岩组分及吸水失水特征

宁东煤田侏罗系延安组煤系顶板广泛分布着含水砂岩,在该煤系中掘进巷道期间,顶板淋水现

象明显,水岩作用下该类砂岩顶板多次发生冒顶事故^[16]。为此,实验室试验研究了砂岩类别,并分析了其矿物组分及其失水、吸水随时间变化规律。

1.1 砂岩鉴定

根据中国矿业大学岩石鉴定实验室提供的鉴定结果,该砂岩为中粒泥质长石岩屑砂岩^[17]。该砂岩呈现如下特征:淡黄色,中砂结构,粒度 0.25~0.50 mm 占 75%; 0.5~1 mm 占 25%。块状层理,泥质胶结,胶结物含量 30% 左右。碎屑分选性较好,圆度中等。综合分析认为,该砂岩形成于快速堆积环境,结构退变,杂基含量 15%,且含伊蒙混层类黏土,吸水性及膨胀性强,导致岩性疏松。

1.2 砂岩组分分析

利用 D/Max-3B 型 X 射线衍射仪测试了砂岩矿物组分。其中,定量分析采用步进扫描方式,扫描速度为 0.25/min,采样间隔 0.01,而定性分析利用粉末衍射联合会国际数据中心(JCPDS-ICDD)提供的各种物质标准粉末衍射资料(PDF),并按照标准分析方法进行对照分析。砂岩组分分析结果见图 1。

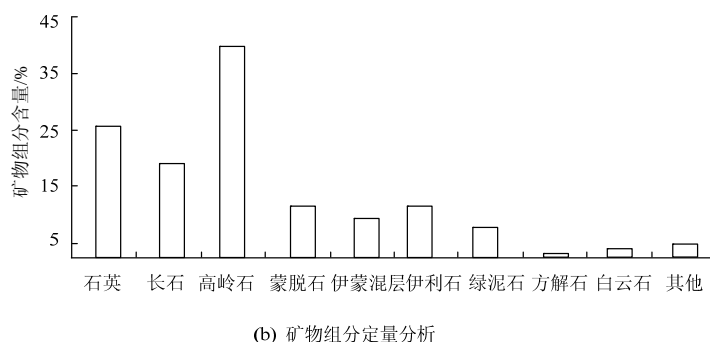
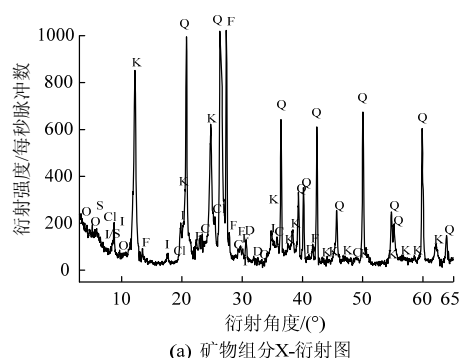


图 1 砂岩矿物组分分析

Fig.1 Analysis on mineral component of sandstone

由图 1 可知:砂岩中矿物成分主要为黏土矿物,其次为石英和长石,并含有少量方解石和白云石。黏土矿物、石英和长石分别占矿物总量的 59.9%, 23.5% 和 14.2%,而黏土矿物中高岭石、蒙脱石及伊蒙混层、伊利石和绿泥石分别占 40.1%, 11.3%, 6.4% 和 2.1%。其中,蒙脱石及伊蒙混层在周围介质湿度不同时,吸收或放出弱结合水,从而使晶体膨胀或收缩,绿泥石对风化作用极为敏感,高岭石膨胀性极小,伊利石膨胀性不大,这与它们的组成成分及内部结构密切相关。该砂岩均含有较高的黏土矿物,且为泥质胶结、杂基含量高,而较高含量的蒙脱石和伊蒙混层使得该砂岩具有较强的膨胀性和吸水性,这也是其区别于其他砂岩的典型特征。该

类砂岩具备一般砂岩的结构特征,同时也兼具了软弱岩层强度较低、遇水后物理力学性质弱化明显的特点^[17]。

1.3 砂岩吸水、失水特征

为了合理设计不同含水状态下单轴压缩声发射特征试验,分别进行 3 组砂岩吸水、失水随时间变化规律试验,每组 3 块试样,并以其中的 3[#]砂岩为例进行分析,其他试验砂岩具有类似的吸水、失水规律。失水试验基本要求:岩石烘干温度 105~110 °C,烘干前 3 h 每 30 min 称量 1 次质量,之后每间隔 1 h 称量 1 次质量,烘干 24 h。吸水试验要求:前 1 h 每 10 min 称量 1 次质量,1~2 h 每隔 30 min 称量 1 次质量,之后每间隔 1 h 称量 1 次质量,浸

水 48 h。称量精确至 0.01 g。

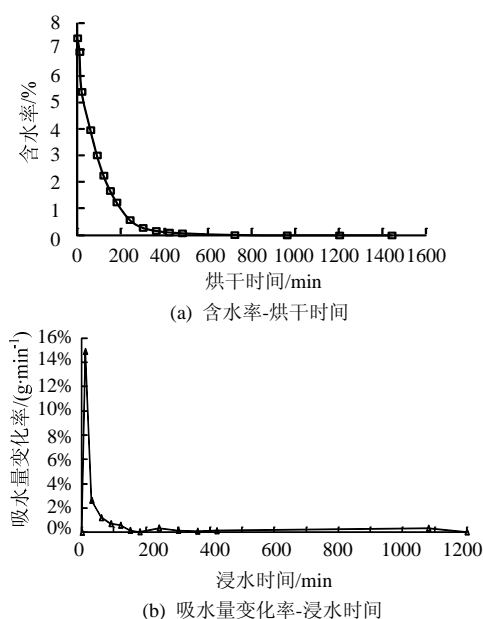


图 2 砂岩吸水、失水-时间变化曲线

Fig.2 Curve of time variation on water suction and water loss of the sandstone

由图 2 可知，砂岩失水、吸水随时间变化呈现如下规律：1) 砂岩烘干 6 h 后，含水率基本不再发生变化。2) 砂岩烘干后浸水 6 h 已基本饱和，而吸水量变化最大的区域集中在 0~4 h 时间段内，且浸 1 h 内吸水量变化最为显著。

2 试验设计

2.1 试验设备

试验设备主要包括煤岩样加载系统、岩样轴向及环向应变采集系统、声发射数据采集系统等。

试验中加载系统为三思公司生产的 SANS-3 000 kN 微机控制电液伺服试验机，应变采集系统为 TS3890 静态电阻应变仪，声发射采集系统为 DISP-24 型声电数据采集系统。同时，为了减少外界环境干扰，本试验在屏蔽室内进行，可以有效减少外界机械振动等干扰。试验系统如图 3 所示。

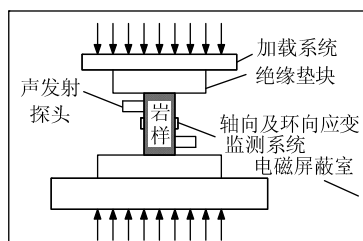


图 3 煤岩加载声发射测试系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of coal-rock loading acoustic emission testing system

2.2 试样制备

根据 1.3 节砂岩失水、吸水-时间变化规律，将试样分为 3 个试验组，分别为干燥、浸水 1 h 和浸水 8 h，每组包括 3~5 块岩样，岩样尺寸为 $\Phi 50 \text{ mm} \times L100 \text{ mm}$ 。制备完成试样见图 4。

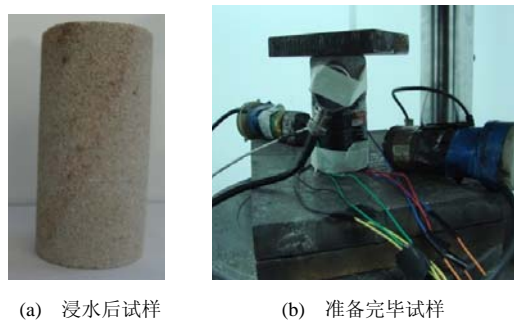


图 4 制备完成砂岩试样

Fig.4 Completion of the preparation of sandstone samples

2.3 试验步骤

1) 连接各种试验仪器和数据采集线路，检查仪器状态，并进行初步调试。

2) 将岩样放置在试验机承压板中心，调整有球形座的承压板，使试样两端面接触均匀，试样与试验机的底座、压头间用绝缘纸绝缘。

3) 将岩样电阻应变片导线与静态电阻应变仪按照半桥方式连接，将测试的初始值调零，并使用万用量表测导线的连接情况；在岩样试样上布置声发射传感器，且要求二者接触部位涂凡士林，以保证传感器与试样的耦合效果，关闭电磁屏蔽室大门。

4) 启动 TS3890 静态电阻应变仪和 DISP-24 高速声电数据采集系统，通过测试选取比较灵敏的声发射传感器，并测试背景信号的影响，当调试的参数在 1.0~2.0 min 无明显背景事件发生时，停止观察，准备采集数据。

5) 启动 SANS-3000 kN 微机控制电液伺服试验机，以 100 N/s 的加载速度施加荷载，直到试样破坏为止，并记录最大破坏载荷及加荷过程中出现的现象，并同步开始声发射和静态电阻应变仪数据的采集。

6) 试验结束后，停止加载和相关数据的采集，观察岩样破坏情况并对破坏后的试件进行描述。

3 试验结果分析

3.1 单轴压缩下强度及变形特征

对于遇水后强度降低的岩石，水是造成其强度损伤的重要原因之一。水溶液分子或离子对岩石矿

物的侵蚀、溶解、交换等作用,改变了岩石的组分、结构等,而水化学作用使裂隙面黏聚力和摩擦因数降低,使得岩石强度降低^[8]。图5为砂岩在不同含水状态下其单轴抗压强度和弹性模量变化曲线。

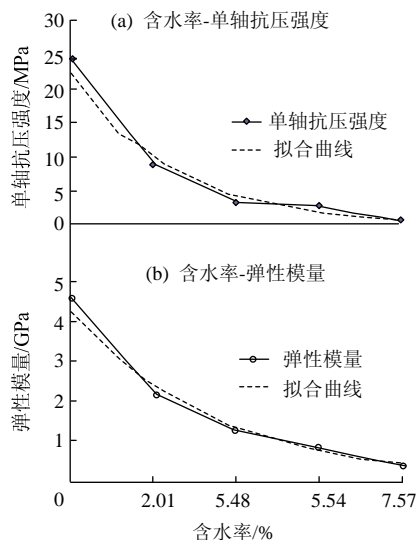


图5 单轴压缩下砂岩单轴抗压强度及变形曲线

Fig.5 Curve of uniaxial compressive strength and deformation under the condition of uniaxial

由图5可知,随着含水率增加,砂岩单轴抗压强度、弹性模量均呈指数关系递减。从干燥状态到含水率 2.01%,单轴抗压强度、弹性模量分别由 24.68 MPa, 4.6 GPa 降低为 9.13 MPa, 2.19 GPa。砂岩单轴抗压强度和弹性模量分别降低了 63.03%, 52.4%。当砂岩含水率为 5.48%时,单轴抗压强度、弹性模量分别为 3.62 MPa, 1.3 GPa, 较干燥状态抗压强度、弹性模量分别降低了 85.3%, 71.7%。而砂岩饱水状态含水率为 7.57%时,单轴抗压强度、弹性模量分别为 0.81 MPa, 0.41 MPa, 较干燥状态单轴抗压强度、弹性模量分别降低了 96.7%, 91.1%。由此可见,砂岩含水率对其单轴抗压强度及其弹性模量削弱作用明显。

3.2 单轴压缩下声发射特征

声发射特征参数主要包括:声发射计数、声发射能量、声发射事件率等,这些参数均随着加载试样内部结构的变化而随之产生变化。声发射计数与岩石的组分及结构有关,同时也与受力状态有一定关系。岩石加载初期的声发射是岩石内部原生裂纹闭合而产生的,此时产生的能量较低,波动性也比较大。主破裂发生前后,岩体相对来说处于一个稳定的状态,声发射事件较少。当主破裂面产生时,导致了试件破坏时声发射率和声发射能量达到最

大值。图6为单轴压缩下砂岩声发射特征曲线。

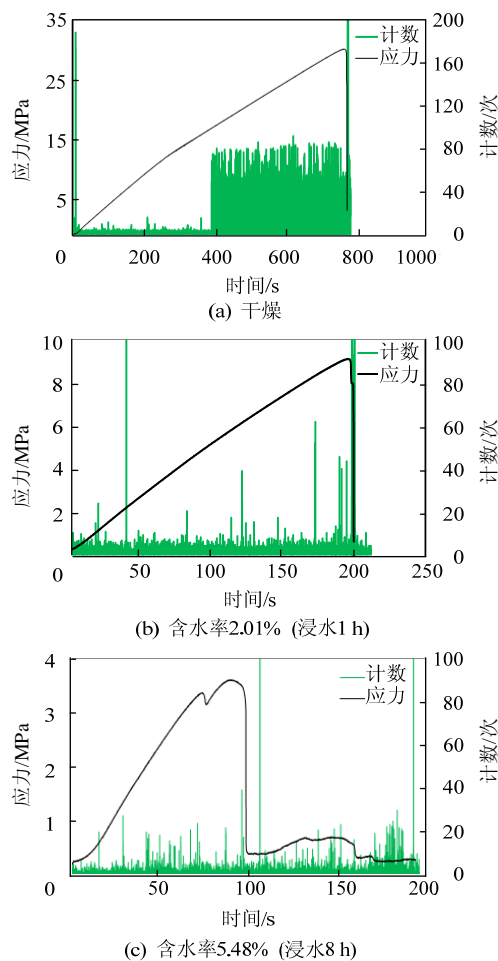


图6 单轴压缩下砂岩应力-声发射计数关系曲线

Fig.6 Curve of the relationship between stress and acoustic emission count of sandstone under the condition of uniaxial compression

由图6a, b, c之间对比分析可以发现:1)不同含水率砂岩单轴压缩下均产生了声发射信号,其中干燥状态和含水率2.01%时,砂岩声发射脉冲计数-时间与应力之间具有较好的关联性,应力峰值、声发射计数在同一时刻达到最大值。而含水率5.48%时,砂岩声发射计数较应力峰值位置滞后产生,存在一定的“延迟”,且其他几组试验发现了类似规律。由此可以推断,随着含水率的增加,改变了岩石的破坏形态或者破坏方式,使得应力峰值与声发射计数峰值产生的时间不一致,这为利用声发射技术预测预报该砂岩顶板稳定性提供了可能。2)干燥和含水率2.01%时,分别在400s和180s位置声发射计数发生跳跃,增加幅度较大,说明此时砂岩内部出现了较大的裂隙,但还没有完全贯通,当主破裂产生时声发射脉冲数及能量达到最大值。3)含水率越高的岩样峰前阶段声发射信号要多一些,因为

水的存在使岩石内部结构面的内摩擦因数降低, 导致结构面在较低的应力水平就会产生滑移扩展, 产生声发射信号。4) 在试验开始的初期, 含水砂岩的声发射现象就比较明显, 这是由于在较低的应力状态下砂岩颗粒破碎以及结构面产生滑移而引起岩样变形。该变形由2部分组成: 一部分是组成岩样颗粒发生破坏产生的压缩变形; 另一部分是岩样内孔隙裂隙发生结构变化产生的变形。

4 工程意义

巷道围岩失稳破坏造成的冒顶事故灾害的有效监测、预报及控制技术一直是研究热点与难点, 传统的顶板监测技术方法主要是位移与压力监测, 实施方便、简单易懂, 但需配备较多的人力, 且数据的真实性难以评判和掌握。而如何实现对巷道围岩稳定性的连续、实时和准确性监测, 国内外学者进行了一些有益探索, 并进行了工程实践^[18-19]。

不同含水状态下砂岩声发射技术特点表明: 声发射计数与其含水率密切相关, 巷道顶板变形失稳甚至发生冒顶事故, 本质上是岩体缺陷损伤演化到发生宏观破裂破坏的过程, 据此, 提出建立顶板稳定性预测预报系统, 见图7。

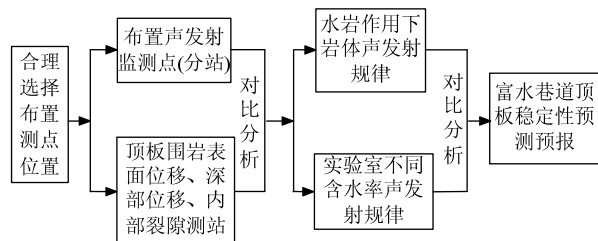


图7 基于声发射特征的巷道顶板稳定性预测预报技术路线

Fig.7 Technical route of the predicting and forecasting on the stability of the roof of roadway based on acoustic emission characteristics

富水巷道顶板稳定性预测预报技术主要包括以下几个方面:

1) 声发射测点位置的选择。具体做法如下:

① 根据富水巷道顶板在水作用下的变形破坏特点, 确定需要进行监测巷道的位置, 并记录分析该处顶板岩石性质、顶板水渗流情况、支护技术参数等;

② 确定测点布置密度;

③ 在选定的位置上打钻孔, 布置声发射监测装置。

2) 常规对比监测测站布置。在声发射测点位置

布置顶板表面位移、深部位移以及内部裂隙观测测站等, 与获得的声发射监测数据对比, 进而分析顶板位移与声发射事件之间的关系, 见图8。

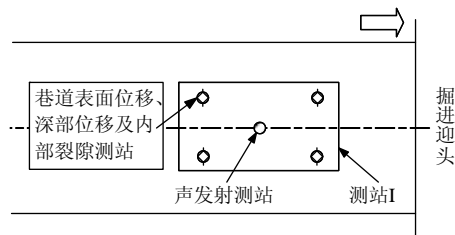


图8 富水巷道顶板稳定性预测预报测站布置

Fig.8 Observation station layout of the predicting and forecasting on the stability of the roof of water-enriched roadway

3) 数据处理分析。通过计算机及时处理监测到的声发射监测数据, 并与实验室试验获得的不同含水率下声发射特征进行对比分析, 总结岩体与岩石不同含水率状态下声发射事件的区别和联系, 掌握富水巷道顶板变形失稳的前兆信息和特征。

4) 顶板稳定性预测预报。根据前期研究获得的水作用下富水巷道顶板声发射技术特征, 分析研究提出该类巷道顶板稳定性预测预报指标。

5 结 论

1) 研究发现随着含水率增加, 砂岩单轴抗压强度和弹性模量呈指数函数减小。

2) 在试验开始的初期, 含水砂岩的声发射现象就比较明显, 这是由于在较低的应力状态下砂岩颗粒破碎以及结构面产生滑移而引起岩样变形, 激发了声发射信号。但随着含水率增加, 砂岩声发射计数峰值较应力峰值位置滞后产生, 存在一定的“延迟”现象。

3) 根据不同含水率砂岩声发射特征, 提出了富水巷道顶板稳定性预测预报的技术思路, 主要包括声发射测点位置的选择、常规对比监测测站布置、数据处理分析和顶板稳定性预测预报4个部分。

参考文献:

- [1] 杨彩红, 王永岩, 李剑光, 等. 含水率对岩石蠕变规律影响的试验研究[J]. 煤炭学报, 2007, 32(7): 695-699. YANG Cai-hong, WANG Yong-yan, LI Jian-guang, et al. Testing study about the effect of different water content on rock creep law[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(7): 695-699.
- [2] 刘彬, 聂德新. 断层泥强度参数与含水率关系研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2164-2167. LIU Bin, NIE De-xin. Study on relation between strength parameter and water content of gouge[J]. Chinese Journal

- of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2164-2167.
- [3] 秦虎, 黄滚, 王维忠. 不同含水率煤岩受压变形破坏全过程声发射特征试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 31(6): 1115-1120.
QIN Hu, HUANG Gun, WANG Wei-zhong. Experimental study of acoustic emission characteristics of coal samples with different moisture contents in process of compression deformation and failure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 31(6): 1115-1120.
- [4] 黄伟, 周文斌, 陈鹏. 水-岩化学作用对岩石的力学效应研究[J]. 西部探矿工程, 2006, 28(1): 122-125.
HUANG Wei, ZHOU Wen-bin, CHEN Peng. The study on mechanical effect of the chemical action of water-rock on rocks[J]. West-China Exploration Engineering, 2006, 28(1): 122-125.
- [5] 陈钢林, 周仁德. 水对受力岩石变形破坏宏观力学效应的实验研究[J]. 地球物理学报, 1991, 34(3): 335-341.
CHEN Gang-lin, ZHOU Ren-de. An experimental study concerning the macroscopic effect of water on the deformation and failure of loaded rocks[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1991, 34(3): 335-341.
- [6] 沈荣喜, 刘长武, 刘晓斐. 压力水作用下碳质页岩三轴流变特征及模型研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 1031-1034.
SHENG Rong-xi, LIU Chang-wu, LIU Xiao-fei. Triaxial rheology characteristics and model of carbonaceous shale in pressure water[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(7): 1031-1034.
- [7] 费晓东, 董正筑, 李玉寿, 等. 动态孔隙水作用下砂岩力学特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(3): 425-428.
FEI Xiao-dong, DONG Zheng-zhu, LI Yu-shou, et al. Experimental study of mechanical properties of sandstone under a dynamic pore pressure[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(3): 425-428.
- [8] 汤连生, 张鹏程, 王思敬. 水-岩化学作用的岩石宏观力学效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 526-531.
TANG Lian-sheng, ZHANG PENG-cheng, WANG Si-jing. Testing study on macroscopic mechanics effect of chemical action of water rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 526-531.
- [9] 陈四利, 冯夏庭, 周辉. 化学腐蚀下砂岩三轴压缩力学效应的试验[J]. 东北大学学报, 2003, 24(3): 292-295.
CHEN Si-li, FENG Xia-ting, ZHOU Hui. Experiments on the mechanical effects of sandstone with chemical erosion under the triaxial compress[J]. Journal of North-eastern University, 2003, 24(3): 292-295.
- [10] 常春, 周德培, 郭增军. 水对岩石屈服强度的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(4): 407-411.
CHANG Chun, ZHOU De-pei, GUO Zeng-jun. The effect of water on rock yield strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(4): 407-411.
- [11] 张有天. 岩石水力学与工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 34-40.
- [12] 苏承东, 高保彬, 南华, 等. 不同应力路径下煤样变形破坏过程声发射特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 757-766.
SU Cheng-dong, GAO Bao-bin, NAN Hua, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics during deformation and failure process of coal samples under different stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 757-766.
- [13] 宿辉, 李长洪. 不同围压条件下花岗岩压缩破坏声发射特征细观数值模拟[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(11): 1312-1318.
SU Hui, LI Chang-hong. Mesoscopic numerical simulation of acoustic emission experiment in rock compression failure under different confining pressures[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(11): 1312-1318.
- [14] 蒋海昆, 张流, 周永胜. 不同温度条件下花岗岩变形破坏及声发射时序特征[J]. 地震, 2000, 20(3): 87-94.
JIANG Hai-kun, ZHANG Liu, ZHOU Yong-sheng. Characteristics of AE temporal sequences in the process of deformation and failure of Granite at high pressure and different temperatures[J]. Earthquake, 2000, 20(3): 87-94.
- [15] 唐书恒, 颜志丰, 朱宝存, 等. 饱和含水煤岩单轴压缩条件下的声发射特征[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 37-41.
TANG Shu-heng, YAN Zhi-feng, Zhu Bao-cun, et al. Acoustic emission characteristics of water-saturated coals in uniaxial compression experiment[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 37-41.
- [16] 姚强岭, 李学华, 瞿群迪. 富水煤层巷道顶板失稳机理与围岩控制技术[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1): 12-17.
YAO Qiang-ling, LI Xue-hua, QU Qun-di. Instability mechanism and technique of surrounding rock control of water-enriched roofs of coal drifts[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 12-17.
- [17] 姚强岭, 李学华, 陈庆峰. 含水砂岩顶板巷道失稳破坏特征及分类研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(1): 50-56.
YAO Qiang-ling, LI Xue-hua, CHEN Qing-feng. Research on the characteristics and classification of water-enriched sandstone roofs[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(1): 50-56.
- [18] 文兴, 唐绍辉, 闭理楚. 多通道声发射监测系统在矿山安全开采中的应用[J]. 矿业研究与开发, 2009, 29(3): 65-67.
WEN Xing, TANG Shao-hui, BI Li-chu. Application of multi-channel AE system in mining engineering[J]. Mining Research and Development, 2009, 29(3): 65-67.
- [19] 王宁, 雷劲松, 韩志型. 岩体声发射量化指标在采场稳定性监测中的应用[J]. 有色金属, 2008, 60(1): 96-100.
WANG Ning, LEI Jin-song, HAN Zhi-xing. Acoustic Emission quantitative criterion on rock mass and application on stope stability monitoring [J]. Nonferrous, 2008, 60(1): 96-100.