

8-25-2019

Study on uniaxial compression mechanical properties of sandstone with different moisture content and wave velocity method

DUAN Tianzhu

Chongqing Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Chongqing 400039, China

REN Yaping

Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China

Follow this and additional works at: <https://cge.researchcommons.org/journal>



Part of the [Earth Sciences Commons](#), [Mining Engineering Commons](#), [Oil, Gas, and Energy Commons](#), and the [Sustainability Commons](#)

Recommended Citation

D R. (2019) "Study on uniaxial compression mechanical properties of sandstone with different moisture content and wave velocity method," *Coal Geology & Exploration*: Vol. 47: Iss. 4, Article 24.

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.023

Available at: <https://cge.researchcommons.org/journal/vol47/iss4/24>

This Hydrogeology, Engineering Geology, Environmental Geology is brought to you for free and open access by Coal Geology & Exploration. It has been accepted for inclusion in Coal Geology & Exploration by an authorized editor of Coal Geology & Exploration. For more information, please contact 380940179@qq.com.

文章编号: 1001-1986(2019)04-0153-06

不同含水率砂岩单轴压缩力学特性及波速法损伤

段天柱¹, 任亚平²

(1. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039;

2. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 为了探究不同含水率砂岩单轴压缩下力学特性及损伤变化情况, 首先对 5 种不同含水率砂岩进行静态单轴压缩实验, 获得其物理力学参数; 而后利用超声波检测仪测量该 5 种不同含水率砂岩的波速, 将该批次砂岩加载到 80% 峰值强度后卸载到 0, 测量此时砂岩声波波速, 利用声波法定义损伤, 研究含水率对砂岩损伤的影响。结果表明: 单轴压缩下, 砂岩的峰值强度及弹性模量随含水率升高逐渐降低, 而峰值应变变化呈相反趋势; 总功及弹性能随含水率增加而下降, 耗散能随含水率增加而增大。实验前声波波速随含水率升高逐渐减小, 实验后声波波速随含水率升高而下降, 且下降趋势较实验前更迅速; 砂岩的残余塑性变形和内部损伤均随含水率升高逐渐增大。研究结果可为现场岩石损伤测试提供依据。

关键词: 声波; 单轴压缩; 含水率; 损伤

中图分类号: TD45 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.023



Study on uniaxial compression mechanical properties of sandstone with different moisture content and wave velocity method

DUAN Tianzhu¹, REN Yaping²

(1. Chongqing Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Chongqing 400039, China; 2. Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to investigate the mechanical properties and damage of sandstone under different uniaxial compression, the static uniaxial compression tests of five sandstones with different moisture content were carried out, and the physical and mechanical parameters were obtained. And the wave velocity of the sandstone samples with different moisture content were measured by ultrasonic detector. Then the sandstone was loaded to 80% peak intensity and then unloaded to 0. The acoustic wave velocity of sandstone was measured at this time. The damage was determined by acoustic wave method. The results show that the peak strength of sandstone under uniaxial compression and the elastic modulus decreases with the increase of moisture content, but the peak strain changes in the opposite direction; the total work and elastic energy decrease with the increase of moisture content, and the dissipation energy change is opposite with the moisture content. The effect of sandstone damage indicates that the wave velocity of the acoustic wave decreases with the increase of moisture content before the test. The wave velocity of the acoustic wave decreases with the increase of moisture content and the trend is slower than that before the test. The residual plastic deformation of sandstone increases gradually with the moisture content; The internal damage of sandstone increases with the increase of moisture content. The results of the study can provide a basis for on-site testing of rock damage.

Keywords: acoustic emission; uniaxial compression; moisture content; damage

水分对岩石物理力学参数有重要影响, 含水率的变化可能引起岩石内部损伤, 导致地质灾害的发

生^[1]。深部煤炭开采中, 围岩常处于含水状态, 同时, 煤矿开挖导致围岩应力改变, 并对围岩造成损

收稿日期: 2018-11-22

基金项目: 国家科技重大专项课题(2016ZX05045-002-003)

Foundation item: National Science and Technology Major Project(2016ZX05045-002-003)

第一作者简介: 段天柱, 1985 年生, 男, 河南光山人, 硕士研究生, 助理研究员, 从事煤田地球物理勘探工作。E-mail: duantianzhu@163.com

引用格式: 段天柱, 任亚平. 不同含水率砂岩单轴压缩力学特性及波速法损伤[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(4): 153-158.

DUAN Tianzhu, REN Yaping. Study on uniaxial compression mechanical properties of sandstone with different moisture content and wave velocity method[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(4): 153-158.

伤^[2]。因此,应力和岩石含水率变化对岩石损伤影响研究是当前重要的科研方向。

岩石作为一种脆性复合材料,当外力作用岩石时会对其内部产生损伤^[3-5]。国内外关于应力对岩石损伤影响的研究已很成熟,大量学者通过岩石损伤实验得到大量的成果。王云飞等^[6]在赵固一矿煤层顶板砂岩不同围压下的损伤演化实验,发现砂岩的损伤破坏经历损伤弥散分布、聚集成核、局部裂隙形成和主控破裂面形成 4 个阶段;张国凯等^[7]利用割线模量定义损伤变量,同时选取模量加速下降处为损伤门槛,发现 3 种工况下微裂纹数量与损伤呈线性发展关系;刘保县等^[8]、罗福友等^[9]、苏承东等^[10]、宿辉等^[11]利用声发射研究了岩石在外力作用下的损伤变化情况。此外,一些学者从超声波波速的角度着手,利用岩石内部结构改变会导致超声波波速发生变化来定义岩石的损伤。吴春等^[12]通过软岩相似材料进行了 2 种不同流变加载方式下的单轴流变损伤破坏实验,结合超声检测技术,发现当应力达到或超过软岩试件单轴抗压强度 80% 时,纵波波速曲线才会在流变过程中持续下降,出现可检测损伤迹象;赵明阶等^[13]、赵奎等^[14]基于岩石在受荷载条件下的声学特性模型,建立岩石损伤与声波波速之间的方程。

近年来随着煤炭开采朝深部发展及实验技术的成熟,大量学者开展了水环境下岩石的损伤研究,并取得了一定成果^[15]。姚强岭等^[16]研究发现,干燥状态下含水砂岩声发射计数峰值与应力峰值相对应,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。王凯等^[17]针对不同含水率的原煤煤样和型煤煤样进行单轴压缩力学实验,利用力学实验数据建立了考虑含水率的煤体分段式损伤本构模型。

上述研究一般将应力和水分变化对岩石损伤的影响单独进行考虑,而煤矿挖掘过程中岩石处于水分和应力变化的双重作用下,要求现场可采用一种科学简便的方法更好更快地获得二者对岩石损伤的影响。因此,笔者利用超声波研究应力和水分同时作用时对砂岩的损伤影响,研究成果对煤矿安全回采有重要的实际意义。

1 试样制备及实验方案

1.1 试样制备

试样采用淮北某矿地下 500 m 巷道内砂岩,对巷道砂岩进行取样并现场测量其含水率,其含水率范围为 1.76%~2.42%。为了探究该范围内含水率变化对砂岩力学性能及损伤的影响,设计本次实验试样

含水率 ω 分别为 0 及现场实测含水率范围中的 1.8%、2.0%、2.2% 和 2.4%。试样制成 50 mm×100 mm 的标准圆柱体,每组 6 块。制成的部分试样如图 1 所示。



图 1 砂岩试样

Fig.1 Sandstone samples

1.2 实验设备

单轴压缩实验设备采用中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室的万能试验机,声波测量装备采用型号为 HC-U81 的超声波检测仪。

1.3 实验方案

为了获取不同含水率砂岩,首先将制备好的圆柱体放在 105℃ 烘干箱中烘干 24 h 后称量质量,重复多次,直至前后两次质量变化小于 0.01%,即认为此时砂岩为干燥状态,测量此时砂岩的声波波速;而后,取波速相近的 4 组干燥砂岩放入 4 种不同含水率的恒湿恒温养护箱中进行吸水,吸水 24 h 后进行称量,重复多次,直至前后两次质量变化小于 0.01%,即认为此时砂岩已达到恒温养护箱中设定的含水率,测量此时砂岩的声波波速;最后,将每组取出 3 块利用万能试验机以 0.12 mm/min 进行单轴压缩实验,得到不同含水率下每组样品的物理力学参数;将每组剩余 3 块按照同样加载速率加压至 80% 峰值强度^[12,18],然后以相同的速率卸载到 0,测量加载后试样的波速。

2 含水率对砂岩力学特性影响

含水率变化对砂岩的力学特性有重要的影响,利用单轴压缩试验可以明确含水率变化对砂岩的峰值强度、峰值应变及弹性模量的影响。

2.1 不同含水率砂岩应力-应变曲线

图 2 为单轴压缩下不同含水率砂岩的应力-应变曲线。从图 2 中可以看出随着含水率的升高砂岩应力-应变曲线呈以下特点: 压密阶段占比逐渐增加,近似线弹性阶段占比逐渐减小; 峰值强度逐渐降低,峰值应变逐渐加大,弹性模量逐渐减小。

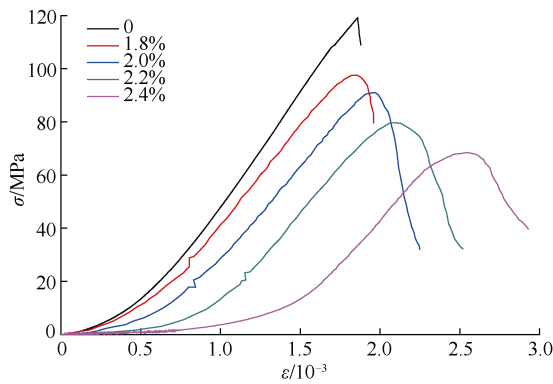


图 2 单轴压缩下不同含水率砂岩应力-应变曲线
Fig.2 Stress-strain curves of sandstones with different moisture contents under uniaxial compression

2.2 含水率对砂岩力学特性影响

图 3 为砂岩的峰值强度随含水率变化曲线，从图 3 可以看出，随着含水率的增大，砂岩峰值强度逐渐降低，在含水率 1.8%~2.4%阶段，其峰值强度与含水率关系呈线性下降。含水率对峰值强度的影响说明砂岩中含水率升高降低了砂岩的承载能力。

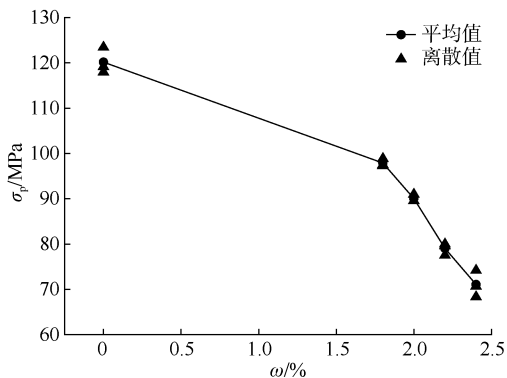


图 3 砂岩的峰值强度 σ_p 随含水率 ω 变化曲线
Fig.3 Variation of the peak intensity σ_p of sandstone with moisture content ω

图 4 为砂岩的峰值应变随含水率变化曲线，从图 4 可以看出，干燥时的峰值应变最小，随着含水率的增大，砂岩的峰值应变逐渐上升，其峰值应变与含水率关系呈线性上升，说明含水率升高可以增加砂岩抵抗极限变形的能力。

图 5 为砂岩的弹性模量随含水率变化曲线，从图 5 中可以看出，干燥时砂岩的弹性模量最大，随着含水率的增大，砂岩的弹性模量逐渐减小，在含水阶段，其弹性模量与含水率关系呈线性下降。

2.3 含水率对砂岩能量耗散的影响

单轴压缩过程中，不同含水率砂岩的能量耗散表现出不同特征，通过研究砂岩能量随水分的变化规律，可以明确含水率在砂岩变形破坏中的作用。砂

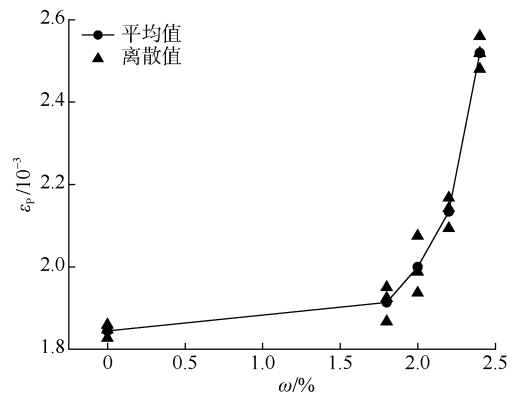


图 4 砂岩的峰值应变 ϵ_p 随含水率 ω 变化曲线
Fig.4 Variation of peak strain ϵ_p of sandstone with moisture content ω

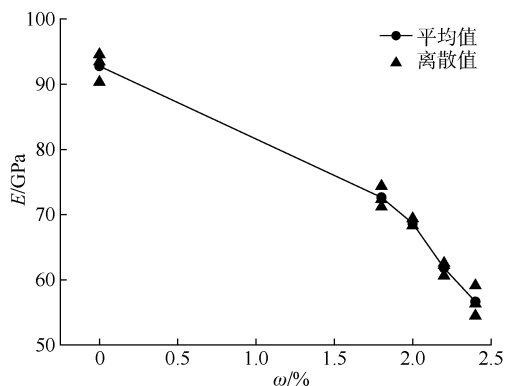


图 5 砂岩的弹性模量 E 随含水率 ω 变化曲线
Fig.5 Curve of elastic modulus E of sandstone with moisture content ω

岩受压从产生变形到破坏这一过程，是能量的吸收、耗散和释放。能量的耗散反映了砂岩材料内部微裂纹不断演化和闭合，同时孔隙被破坏产生新的裂纹和裂隙的过程，其实质是砂岩变形破坏的过程。砂岩在单轴压缩过程中，其能量转化关系如式(1)所示：

$$W = W_e + W_d \quad (1)$$

式中 W 为外力对砂岩所做的功，即外界输入的能量； W_e 为变形过程中储存在砂岩中的弹性变形能； W_d 为加载过程中砂岩耗散的能量，这一部分能量主要使砂岩内部损伤并产生塑性变形。

图 6 为砂岩各能量随含水率变化曲线。从图 6 可以看出：含水状态下的总功及弹性能均小于干燥条件下的，且总功与弹性能随着含水率的升高逐渐减小；耗散能随含水率的升高逐渐增大，这是由于水分增加导致砂岩延性变大，吸收的塑性变形能增多。

2.4 应力幅值为 80%峰值强度时砂岩的力学特性

图 7 为加载 80%峰值强度后卸载到 0 时试样的

应力-应变曲线。从图 7 可以看出，含水率越大其 80%峰值强度对应的应力幅值越小，加载和卸载过程中近似线弹性阶段的斜率随着含水率的增大而减小，且干燥时残余塑性变形最小；含水状态下，残余塑性变形随含水率上升逐渐增大；残余塑性变形的增加表明砂岩内部脆性逐渐减弱，延性逐渐增强^[19]，同时其积聚的塑性变形能逐渐增多。

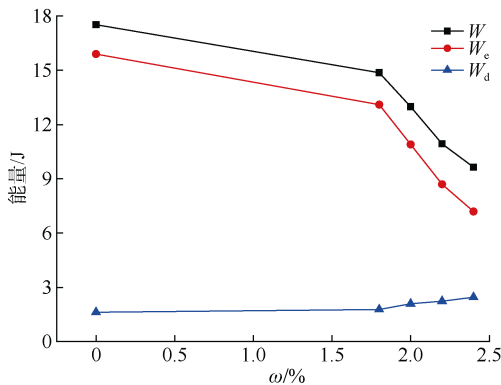


图 6 砂岩中各能量随含水率 ω 变化曲线

Fig.6 Variation of different energy of sandstone with moisture content ω

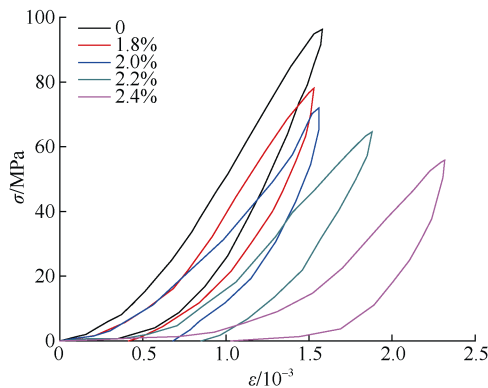


图 7 加载 80%峰值强度后卸载到 0 时的应力-应变曲线

Fig.7 Curve when unloading to 0 after loading 80% peak intensity

3 不同含水率砂岩的损伤特性

3.1 实验前后砂岩的声波波速

水分对砂岩有一定的损伤作用，这种损伤表现在水分对砂岩软化、溶蚀等物理化学作用，在一定程度上改变砂岩内部的孔隙结构，同时改变砂岩的脆延性。在超声波实验中，水分可以使砂岩声波波速出现变化，当进行单轴压缩时，砂岩内部遭遇不同的损伤，其声波变化情况更加明显。

图 8 为砂岩声波波速随含水率变化曲线。从图 8 可以看出，声波波速随含水率变化呈以下特点：实验前砂岩声波的波速 v_f 随含水率的升高逐渐下降；实验后砂岩声波的波速 v_c 随着含水率的升高逐渐下降，且较实验前下降更加迅

速；从相同含水率下砂岩的声波波速对比可以看出，实验前的声波波速 v_f 大于实验后的声波波速 v_c 。

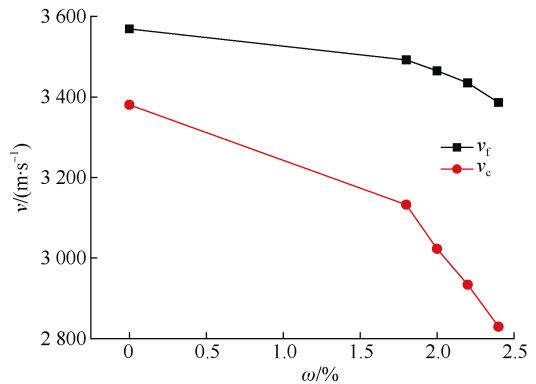


图 8 砂岩声波波速 v 随含水率 ω 变化曲线

Fig.8 Variation of acoustic wave velocity v of sandstone with moisture content ω

3.2 砂岩损伤随含水率变化规律

声波波速的变化可以有效反映砂岩实验前后的损伤变化，大量学者通过岩石声波波速的变化获得其损伤变化，并提出了相应的公式^[20]：

$$D = 1 - \frac{v_c}{v_f} \quad (2)$$

式中 D 为损伤变量， v_c 为实验后声波波速， v_f 为实验前声波波速。

利用式(2)对砂岩 3 组声波波速进行处理，得到其损伤变化情况如图 9 所示。从图 9 中可以看出，随着含水率的升高，砂岩加卸载过程造成的损伤逐渐增大，表明砂岩内部的完整性遭到破坏，这种破坏导致砂岩内部黏聚力显著性减小，同时其内部的单元体被破坏，最终使得砂岩整个支撑面失效。

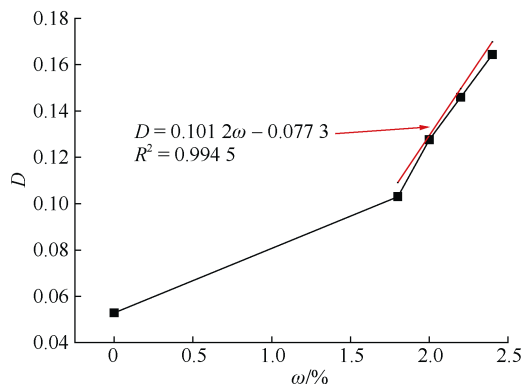


图 9 砂岩损伤变量 D 随含水率 ω 变化曲线

Fig.9 Variation of sandstone damage variable D with moisture content ω

4 结论

a. 单轴压缩实验下，砂岩的峰值强度、弹性模

量、总功及弹性能随着含水率的升高逐渐降低, 峰值应变和耗散能随着含水率升高逐渐增大。

b. 随着含水率升高, 加载过程和卸载过程的斜率逐渐减小, 残余塑性变形逐渐加大。

c. 3种不同情况下的声波波速测试结果显示, 干燥情况下波速最大, 随着含水率的升高, 声波的波速逐渐下降, 80%峰值强度压缩后的声波波速随含水率增加逐渐下降, 且下降速率较实验前更迅速。

d. 实验前, 砂岩的损伤随含水率增加逐渐加大; 加卸载后, 砂岩的损伤随含水率的升高增大, 且损伤变化趋势较单独水分影响更大。

参考文献

- [1] KIM E, CHANGANI H. Effect of water saturation and loading rate on the mechanical properties of Red and Buff sandstones[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2016, 88: 23–28.
- [2] 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]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(6): 1115–1120.
QIN Hu, HUANG Gun, WANG Weizhong. Experimental study of acoustic emission characteristics of coal samples with different moisture contents in process of compression deformation and failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(6): 1115–1120.
- [3] 吉育兵, 杨伟峰, 赵国荣. 脆性岩石单轴压缩条件下损伤机制分析[J]. *煤矿安全*, 2011, 42(7): 165–167.
JI Yubing, YANG Weifeng, ZHAO Guorong. Damage mechanism of brittle rock under uniaxial compression[J]. *Safety in Coal Mines*, 2011, 42(7): 165–167.
- [4] 林大能, 陈寿如. 循环冲击荷载作用下岩石损伤规律的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(22): 4094–4098.
LIN Daneng, CHEN Shouru. Experimental study on damage evolution law of rock under cyclical impact loadings[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(22): 4094–4098.
- [5] 王超, 袁旭朋, 汪开旺. 煤和砂岩加载弹塑性损伤本构方程[J]. *煤田地质与勘探*, 2017, 45(2): 105–111.
WANG Chao, YUAN Xupeng, WANG Kaiwang. Constitutive equation of loading-induced elastic-plastic damage of coal and sandstone[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2017, 45(2): 105–111.
- [6] 王云飞, 王立平, 焦华喆, 等. 不同围压下砂岩的变形力学特性与损伤机制[J]. *煤田地质与勘探*, 2015, 43(4): 63–68.
WANG Yunfei, WANG Liping, JIAO Huazhe, et al. Mechanical characteristics of deformation and damage mechanism of sandstone under different confining pressure[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2015, 43(4): 63–68.
- [7] 张国凯, 李海波, 夏祥, 等. 岩石单轴压缩下能量与损伤演化规律研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(增刊1): 94–100.
ZHANG Guokai, LI Haibo, XIA Xiang, et al. Research on energy and damage evolution of rock under uniaxial compression[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(S1): 94–100.
- [8] 刘保县, 赵宝云, 姜永东. 单轴压缩煤岩变形损伤及声发射特性研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2007, 3(4): 647–650.
LIU Baoxian, ZHAO Baoyun, JIANG Yongdong. Study of deformation-damage and acoustic emission character of coal rock under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2007, 3(4): 647–650.
- [9] 罗福友, 罗福龙, 邓飞, 等. 砂岩单轴压缩下声发射特征与损伤演化[J]. *中国钨业*, 2014, 29(6): 7–10.
LUO Fuyou, LUO Fulong, DENG Fei, et al. Acoustic emission characteristics and damage evolution of sandstone under uniaxial compression condition[J]. *China Tungsten Industry*, 2014, 29(6): 7–10.
- [10] 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*, 2008, 28(4): 757–766.
SU Chengdong, GAO Baobin, NAN Hua, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics during deformation and failure processes of coal samples under different stress paths[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 28(4): 757–766.
- [11] 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 Changhong. 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.
- [12] 吴春, 郭棋武, 洪涛, 等. 基于超声检测的软岩单轴流变损伤试验[J]. *煤田地质与勘探*, 2017, 45(5): 105–111.
WU Chun, GUO Qiwu, HONG Tao, et al. Uniaxial rheological damage experiment of soft rock based on the ultrasonic testing[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2017, 45(5): 105–111.
- [13] 赵明阶, 徐蓉. 岩石损伤特性与强度的超声波速研究[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(6): 720–722.
ZHAO Mingjie, XU Rong. The rock damage and strength study based on ultrasonic velocity[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(6): 720–722.

- [14] 赵奎, 金解放, 王晓军, 等. 岩石声速与其损伤及声发射关系研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2105-2109.
ZHAO Kui, JIN Jiefang, WANG Xiaojun, et al. Study on rock damage and acoustic emission based on ultrasonic velocity test of rock specimen under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2105-2109.
- [15] LU Aihong, HU Shanchao, LI Ming, et al. Impact of moisture content on the dynamic failure energy dissipation characteristics of sandstone[J]. Shock and Vibration, 2019: 1-10.
- [16] 姚强岭, 李学华, 何利辉, 等. 单轴压缩下含水砂岩强度损伤及声发射特征[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(5): 717-722.
YAO Qiangling, LI Xuehua, HE Lihui. Strength deterioration and acoustic emission characteristics of water-bearing sandstone in uniaxial compressive experiment[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(5): 717-722.
- [17] 王凯, 蒋一峰, 徐超. 不同含水率煤体单轴压缩力学特性及损伤统计模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1070-1079.
WANG Kai, JIANG Yifeng, XU Chao. Mechanical properties and statistical damage model of coal with different moisture contents under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1070-1079.
- [18] 张连英. 高温作用下泥岩的损伤演化及破裂机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- [19] LIU Zaobao, SHAO Jianfu, XIE Shouyi, et al. Effects of relative humidity and mineral compositions on creep deformation and failure of a claystone under compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 103: 68-76.
- [20] 李明. 高温及冲击载荷作用下煤系砂岩损伤破裂机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.

(责任编辑 周建军)