

单轴压缩下不同含水状态砂岩损伤演化试验

田芯宇¹,赵伏军^{1,2*},刘永宏¹,陈彪¹,陈品奎¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201)

摘要: 为了研究不同含水状态岩石损伤演化特性,利用 RMT-150C 岩石力学试验机、AEwin-USB 型声发射信号采集系统和 KBD5 电磁辐射采集系统,对干燥、自然和饱水状态下的红砂岩进行单轴压缩声电信号监测试验。基于岩石破坏过程中声发射振铃计数、电磁辐射脉冲数和应力变化,建立了砂岩损伤演化模型。结果表明:声发射、电磁辐射信号和损伤变量特征曲线均与岩石应力应变曲线有着较好的一致性;砂岩损伤演化过程可分为初始损伤、损伤持续增长和损伤快速增长三个阶段,随着损伤程度的加深,振铃计数和脉冲数也随之增加;在初始损伤和损伤持续增长阶段中,饱水状态岩样在该阶段的振铃计数和脉冲数占其累计振铃计数和脉冲数的比例最高,自然状态其次,干燥状态最低,而在损伤快速增长阶段则相反。

关键词: 含水状态;岩石损伤;声发射;电磁辐射;单轴压缩

中图分类号: TD353

文献标识码: A

Damage Evolution Test of Sandstone under Uniaxial Compression with Different Moisture Contents

TIAN Xinyu¹, ZHAO Fujun^{1,2*}, LIU Yonghong¹, CHEN Biao¹, CHEN Pinyin¹

(1. School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, P. R. China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, P. R. China)

Abstract: In order to study the damage evolution characteristics of sandstone with different moisture contents, uniaxial compression acoustic and electrical signal monitoring test was carried out for red sandstone under dry, natural and saturated conditions by using RMT-150C rock mechanics testing machine, AEwin-USB acoustic emission signal acquisition system and KBD5 electromagnetic radiation acquisition system. Based on the acoustic emission bell count, electromagnetic radiation pulse number and stress change during rock failure, the damage evolution model of sandstone is established. The results show that the characteristic curves of acoustic emission, electromagnetic radiation and damage variables are in good agreement with the stress-strain curves of rock. The damage evolution of sandstone can be divided into three stages: initial damage stage, continuous damage growth stage and rapid damage growth stage. As the damage degree deepens, the number of rings and pulses increases. In the stage of initial damage and continuous damage growth, the ratio of ringing count and pulse number in the saturated rock sample in this stage is the highest, followed by that in the natural state and the lowest in the dry state, while it is the opposite in the stage of rapid damage growth.

Key words: moisture condition; rock damage; acoustic emission; electromagnetic radiation; uniaxial compression

收稿日期:2020-12-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674116,51474103)

作者简介:田芯宇(1996-),女,湖南湘西人,硕士研究生,从事岩石力学方面的研究。

* 通讯作者:赵伏军(1963-),男,湖南衡山人,博士,教授,主要从事岩石力学等领域的教学与科研工作。

在荷载作用下,岩石内部原有的微裂隙、微孔隙因外界作用进一步扩展,随着荷载的不断增加,岩石变形逐渐增大,岩石内部的微缺陷不断变化,微破裂将在一个临界点发生质的变化,储存的能量以弹性波的形式迅速释放,最终导致岩石破坏。因此,利用岩石变形破坏过程中产生的声发射和电磁辐射现象检测细观组织结构变化及宏观力学性能变化,能更好地研究岩石破坏机制及损伤演化规律。国内外学者对岩石破坏过程中声发射和电磁辐射特性进行了一系列试验研究,取得了丰硕的研究成果。Jia 等^[1]通过力学性能和实时声发射(AE)测试,研究了三轴压缩条件下不同深度煤体损伤的时空演化规律。高保彬等^[2]通过不同破坏类型的煤岩进行单轴压缩试验,发现了煤岩声发射信号具有分形特征。杨睿^[3]发现了三轴压缩作用下饱水状态试样声发射信号存在“滞后”现象。郝以瑞等^[4]研究了砂岩常规压缩下的声发射特征及损伤演化规律。高子兴等^[5]利用声发射检测技术研究了不同含水状态岩石破裂的损伤演化规律。姚欢迎等^[6]研究了页岩单轴压缩声发射特征,首次提出受载岩石损伤先减小后增大,建立了更加合理的损伤本构模型。王恩元等^[7-9]对受载岩石进行电磁辐射特性研究,研究表明电磁辐射能很好地反映岩石破碎变形。宋晓艳等^[10]通过对含预制裂隙粉砂岩进行单轴压缩试验,发现原生岩样破坏的电磁辐射强度高于含预制裂纹岩样的电磁辐射强度。樊勇等^[11]利用分形理论对花岗岩单轴压缩过程中产生的电磁辐射脉冲数进行了分形特征分析。

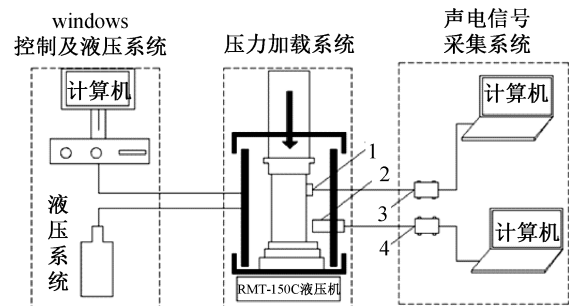
综观上述研究,其成果主要集中在岩石破坏过程中声电效应研究,而关于不同含水状态下岩石声发射和电磁辐射的损伤特性研究较少,因此,本文以红砂岩为研究对象,进行不同含水状态岩石的单轴压缩试验,同时监测声发射和电磁辐射信号,对干燥、自然、饱水三种状态下岩石破碎损伤特性进行研究与分析,为岩石失稳破坏的前兆预警提供理论依据。

1 试验概况

1.1 试验加载系统

试验系统主要包括 RMT-150C 岩石力学试验机、AEwin-USB 型声发射信号采集系统和 KBD5 电磁辐射采集系统(图 1)。为保证声发射信号和电磁辐射信号的采集效果,在试件和声发射探头之间涂抹耦合剂,同时在试验装置上加盖防辐射材料。加

载方式采用位移控制式,加载速率为 0.002 mm/s。声发射仪门槛值设定为 45 dB,声发射系统总增益值设为 76 dB(其中前放增益值为 40 dB,主放增益值为 36 dB)。



注:1-声发射传感器,2-电磁辐射传感器,3-声发射采集主机,4-电磁辐射采集主机。

图 1 试验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test system

1.2 试样制备

1.2.1 试验材料选取及分类

试验选用红砂岩材料,试样尺寸为 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,不平行度和不垂直度低于 0.02 mm。不同含水状态设为干燥状态、自然状态和饱水状态三种,每种状态对应 3 个试样,试样的分类编号如表 1 所示。

表 1 试样分类

Tab. 1 The sample classification

含水状态	干燥状态组	自然状态组	饱水状态组
	G-1	Z-1	B-1
试样编号	G-2	Z-2	B-2
	G-3	Z-3	B-3

1.2.2 不同含水状态砂岩制备及分类

根据试验要求,3 种不同含水状态红砂岩具体制备方法如下:①干燥状态试样:将试样放在 108° 的干燥箱烘干 48 h。②自然状态试样:将加工完成的岩样直接用保鲜膜包裹好。③饱水状态试样:根据《水利水电工程岩石试验规程》(SL264—2001)自由吸水法的步骤,先将水浸没试件 1/3 的位置,12 h 后将水位加至 2/3 高度,再过 12 h 后,使试件全部浸入水中,浸泡 30 d 后饱水试件制作完成。

2 试验结果及分析

2.1 力学特征分析

三种含水状态红砂岩单轴压缩所得到的应力应变曲线如图 2 所示,其全应力-应变曲线特征大致相同,都可以看作经历了压密、弹性、屈服和破坏 4 个阶段:①压密阶段(OA 段):三种状态试件全应力-应变曲线呈上凹型,并且在此段中非线性

特征较为明显,这是由于岩石内部原本存在的微小裂隙或孔隙被逐渐压密。②弹性变形与裂隙发展阶段(AC 段):岩石随着内部裂隙的变化,从弹性变形阶段(AB 段)进入裂隙稳定发展阶段(BC 段)。③屈服阶段(CD 段): C 点为屈服点,表示岩石从弹性阶段进入塑性阶段。进入本阶段后,试样裂隙迅速扩展,试样体积由压缩变为扩容。④破坏后阶段(D 点以后段):在此阶段中岩石内部微裂隙迅速交叉扩展直至试件完全破坏,岩石应力达到峰值强度后迅速跌落。

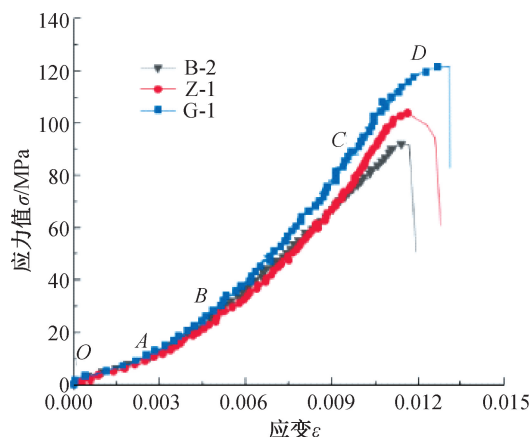


图2 三种含水状态红砂岩全应力-应变曲线

Fig. 2 Total stress - strain curves of red sandstone in three water-bearing states

2.2 声发射及电磁辐射特征分析

在单轴压缩过程中,不同含水状态应力-时间-

声发射信号特征曲线如图3所示,应力-时间-电磁辐射信号特征曲线如图4所示。从图3和图4可以看出,岩石的声发射和电磁辐射特征曲线均可分为压密、弹性、屈服和破坏四个阶段。加载初期即为岩石压密阶段,应力增长缓慢,三种不同含水状态下的砂岩的声发射信号较弱,但电磁辐射脉冲数出现较强信号;随后进入弹性阶段,饱水状态试样的声发射信号相较于干燥与自然状态增长不明显,这是由于岩石内部微裂隙被水“软化”,导致产生的声发射信号变弱,此时电磁辐射信号维持在某个值附近,没有较大变化趋势;随着载荷的不断增加,岩石进入应力屈服阶段,微裂隙快速发展,出现了质的变化,弹性能大量释放,干燥与自然试样声发射信号迅速增加,该过程中的电磁辐射脉冲数和电磁辐射最大值也迅速增加;当试样进入破坏阶段后,裂隙迅速发展、贯通,直至试样完全破坏,应力与声发射和电磁辐射信号达到峰值强度。总的来说,声发射、电磁辐射信号特征曲线和岩石全应力-应变曲线具有较好的一致性,但电磁辐射的整体信号变化规律与应力-应变曲线的吻合度没有声发射信号特征曲线高。

3 损伤特征分析

3.1 损伤演化特性

对于损伤演化方程的建立方法有很多,文献

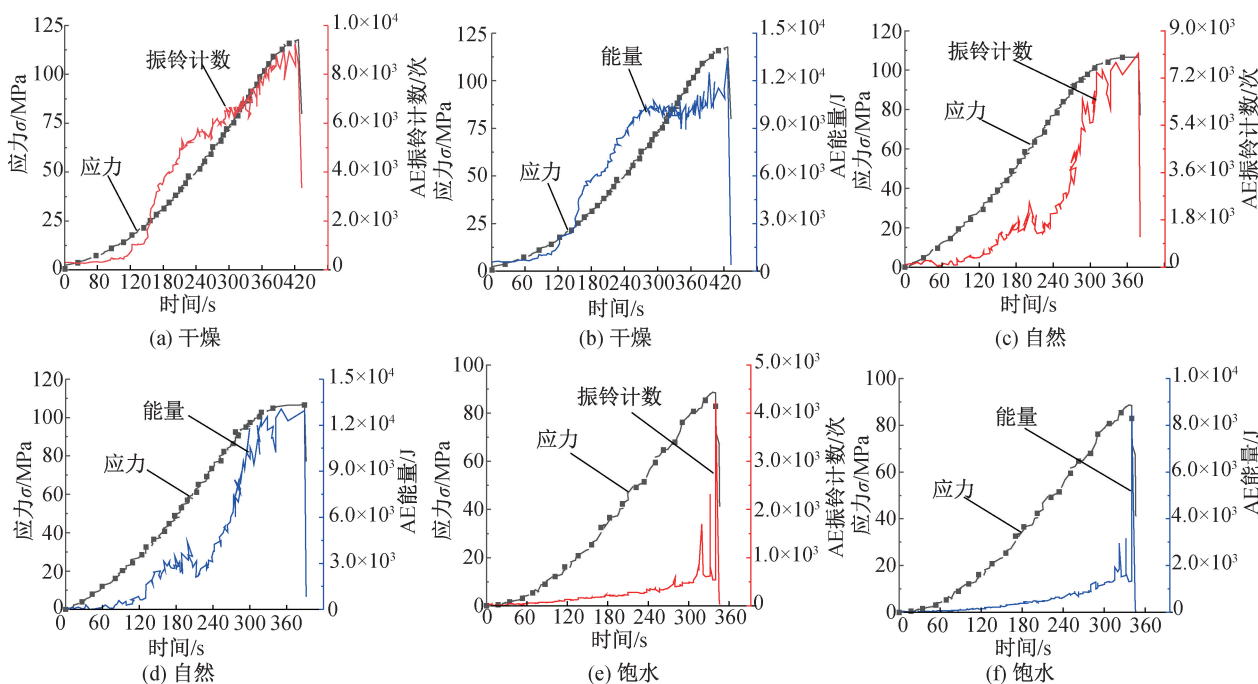


图3 不同含水状态岩样应力-时间-声发射信号特征曲线

Fig. 3 Characteristic curves of stress-time-AE signals of rock samples in different water-bearing states

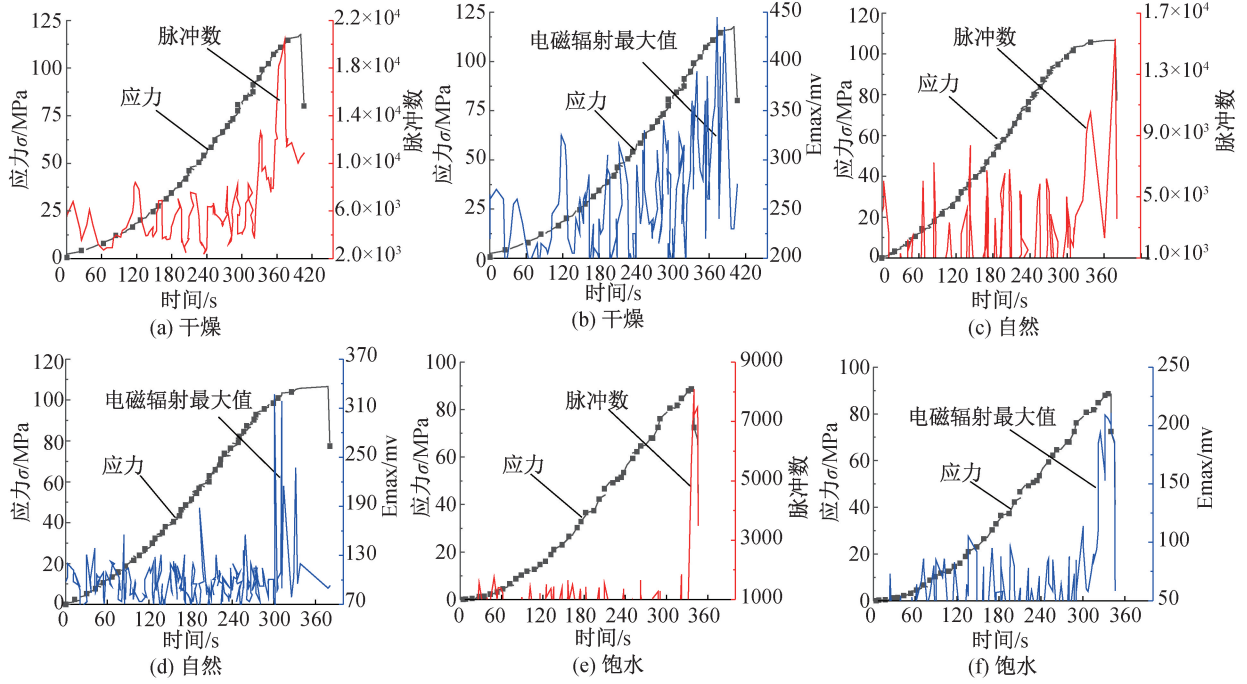


图4 不同含水状态岩样应力-时间-电磁辐射信号特征曲线

Fig. 4 Characteristic curves of stress-time-Electromagnetic radiation signals of rock samples in different water-bearing states

[12]中提到 Weibull 分布函数可近似反映微元强度等力学参数的不同,因此本文采用 Weibull 分布函数来建立试样微元损伤率 $\varphi(\varepsilon)$ 的方程,即有:

$$\varphi(\varepsilon) = \frac{m}{\alpha} \varepsilon^{m-1} \exp\left(-\frac{\varepsilon^m}{\alpha}\right) \quad (1)$$

式中: ε 为试样受压过程中的应变值; m 为试样的结构参数; α 为式样的尺度参数。

研究岩石在破坏过程中的损伤特性常利用损伤变量 D 来确定其劣化程度, D 与 $\varphi(\varepsilon)$ 有如下关系:

$$\varphi(\varepsilon) = \frac{dD}{d\varepsilon} \quad (2)$$

联立式(1)和式(2)可得损伤变量 D 为:

$$D = \int_0^\varepsilon \varphi(x) dx = 1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon^m}{\alpha}\right) \quad (3)$$

若无损岩样断面发生完全破坏时的声发射累计振铃计数为 E_0 , E 为岩样应力值为 ε 时的累计振铃计数,则有:

$$E = E_0 \int_0^\varepsilon \varphi(x) dx \quad (4)$$

同理, N_0 为无损岩样断面发生完全破坏时的电磁辐射累计脉冲数, N 为岩样应力值为 ε 时的累计脉冲数,有:

$$N = N_0 \int_0^\varepsilon \varphi(x) dx \quad (5)$$

结合式(3)与式(4),基于声发射振铃计数的

损伤变量 D_e 与累计振铃计数的关系有:

$$D_e = \frac{E}{E_0} \quad (6)$$

结合式(3)与式(5),基于电磁辐射脉冲数的损伤变量 D_n 与累计脉冲数的关系有:

$$D_n = \frac{N}{N_0} \quad (7)$$

由式(6)得到基于声发射振铃计数的岩石应力、损伤变量与应变的关系(图5),由式(7)可得基于电磁辐射脉冲数的砂岩损伤演化过程(图6)。结合图5、图6,根据损伤的发展速度将红砂岩损伤演化过程大致分为三个阶段:(I)初始损伤阶段:岩石内部微裂隙等变化很小,三种状态的损伤值较小,损伤曲线斜率都较小,增长趋势较为缓慢,但电磁辐射损伤值比声发射损伤值增长较明显,这是由于电磁辐射脉冲数在加载初期就具有一定的强度;(II)损伤持续增长阶段:岩石开始出现不可恢复的变形,裂纹增多,该阶段的声发射损伤曲线呈下凹型,电磁辐射损伤曲线斜率变大,砂岩损伤速度变快;(III)损伤快速增长阶段:声发射和电磁辐射的损伤曲线都呈上凸型,当应力达到峰值,损伤变量值也达到1。总的来说,损伤变量特征曲线与岩石应力应变曲线有着较好的一致性,能反映岩石的损伤演化规律及其破坏过程,为岩石失稳预警提供了理论依据。

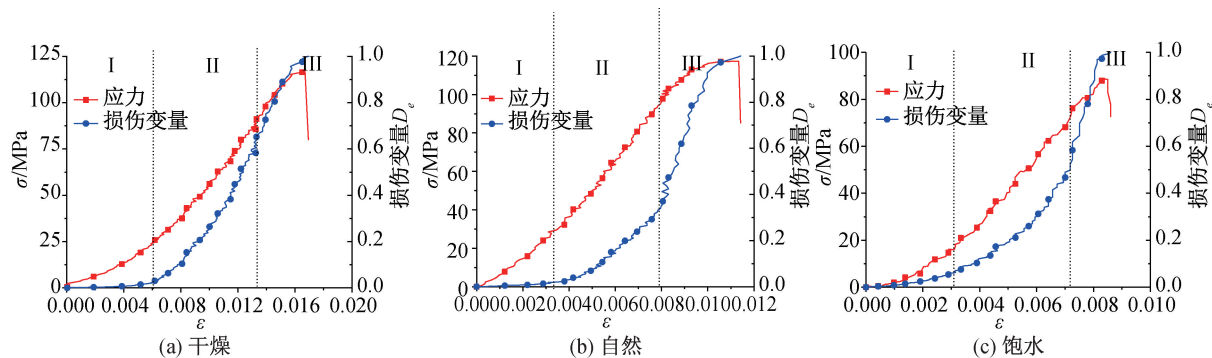


图5 基于声发射振铃计数的三种含水状态下的应力-应变-损伤变量关系曲线

Fig. 5 Stress-strain - damage variable relation curves based on acoustic emission bell count in three water-bearing states

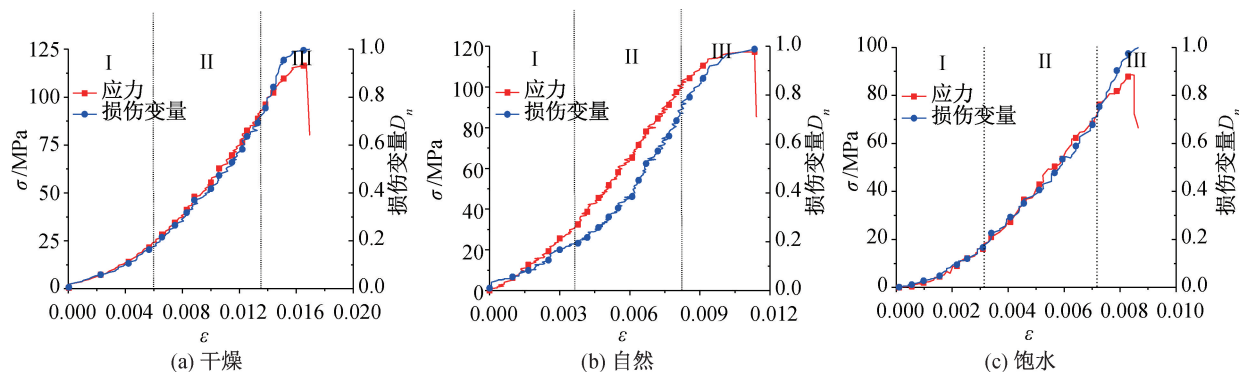


图6 基于电磁辐射脉冲数的三种含水状态下的应力-应变-损伤变量关系曲线

Fig. 6 Stress-strain - damage variable relation curves of three water-bearing states based on the number of electromagnetic radiation pulses

3.2 不同含水状态岩样损伤特性

由于声发射与电磁辐射信号的产生都和裂纹的产生与扩展有关,而裂纹的产生又会受到水的影响,因此不同含水状态岩样的损伤规律就会不同。表2、表3为不同含水状态岩样损伤演化过程中的各阶段声电信号特征值所占比例。由表2、表3纵向对比可以看出,当处于初始损伤阶段时,干燥、自然和饱水状态的振铃计数分别占各自累计振铃计数的3.2%、4.6%和6.9%,对应的脉冲数分别占各自累计脉冲数的8.7%、12.3%、16.8%;损伤持续增长阶段中,干燥、自然和饱水状态的振铃计数所占比例分别为11.5%、18.6%和29.1%,三种状态的脉冲数所占比例分别为21.6%、22.6%、23.7%,上述两个阶段中含水岩样的声电信号所占比例明显高于干燥岩样,这是由于在试验前期应力较低时,岩样内部微裂纹水的软化作用下强度降低,裂纹持续产生与扩展,从而产生了更多的声电信号;而在损伤快速增长阶段中,干燥、自然和饱水状态的振铃计数所占比例分别为85.3%、76.8%和64%,三种状态的脉冲数所占比例分别为69.7%、65.1%、59.5%,可以看出随着应力的增

加,干燥状态岩样的声电信号所占比例超过了含水岩样,这是因为其内部微裂纹逐渐达到了屈服极限,积攒的弹性能快速释放所造成的。而从横向对比可知,随着损伤程度的加深,振铃计数和脉冲数所占比例也随之增加。综上可得,在不同损伤演化阶段中声电信号的所占比例能很好地反映岩石的损伤演化规律,且含水状态的改变对岩石的损伤演化规律具有一定的影响。

4 结论

1)随着含水状态的改变,试样强度发生改变,声发射和电磁辐射信号也有所改变。声发射、电磁辐射信号特征曲线和岩石全应力-应变曲线具有较好的一致性,能反映岩石的损伤演化规律及其破坏过程,为岩石失稳预警提供了理论依据。

2)基于声发射振铃计数和电磁辐射脉冲数建立的损伤演化模型能够较好地反映岩石变形过程中破裂的发展,可将红砂岩损伤演化过程分为初始损伤、损伤持续增长、损伤快速增长三个阶段。

表 2 砂岩损伤演化过程中声发射振铃计数各阶段所占比例

Tab. 2 The proportion of each stage of acoustic emission ringing count in the damage evolution of sandstone							
状态	累计振铃 计数	初始损伤阶段		损伤持续增长阶段		损伤快速增长阶段	
		振铃计数	占比/%	振铃计数	占比/%	振铃计数	占比/%
干燥	88 778	2 841	3.2	10 210	11.5	75 727	85.3
自然	54 335	2 499	4.6	10 107	18.6	41 729	76.8
饱水	28 050	1 935	6.9	8 163	29.1	17 952	64

表 3 砂岩损伤演化过程中电磁辐射脉冲数各阶段所占比例

Tab. 3 The proportion of electromagnetic pulse number in each stage during the damage evolution of sandstone							
状态	累计脉 冲数	初始损伤阶段		损伤持续增长阶段		损伤快速增长阶段	
		脉冲数	占比/%	脉冲数	占比/%	脉冲数	占比/%
干燥	203 706	17 722	8.7	44 000	21.6	141 984	69.7
自然	133 138	16 376	12.3	30 089	22.6	86 673	65.1
饱水	50 948	8 559	16.8	12 075	23.7	30 314	59.5

3)随着损伤程度的加深,振铃计数和脉冲数所占比例也随之增加,不同损伤演化阶段中声电信号所占比例能很好地反映岩石的损伤演化规律。

4)在初始损伤和损伤持续增长阶段中,饱水状态振铃计数和脉冲数所占比例最高,干燥状态最低,在损伤快速增长阶段则相反,含水状态的改变对岩石的损伤演化规律具有一定的影响。

参考文献:

[1] JIA Z, XIE H, ZHANG R, et al. Acoustic Emission Characteristics and Damage Evolution of Coal at Different Depths Under Triaxial Compression[J]. Rock Mech Rock Eng, 2020, 53: 2063-2076.

[2] 高保彬,李回贵,李化敏. 不同破坏类型岩石的声发射及分形特征研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(02): 358-363.

[3] 杨睿. 不同含水状态砂岩三轴压缩声发射特征试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2016, 36(05): 79-82.

[4] 郝以瑞,吕嘉锟,宁杉. 常规压缩下砂岩的声发射与损伤演化[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(07): 28-31.

[5] 高子兴,夏冬,杨意德,等. 基于声发射监测的含水岩石动态损伤演化过程试验研究[J]. 采矿技术, 2018, 18(01): 51-55.

[6] 姚欢迎,陈军斌,聂向荣,等. 单轴压缩声发射试验的页岩损伤演化规律[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(04): 1581-1586.

[7] 王恩元,何学秋,刘贞堂,等. 受载岩石电磁辐射特性及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002(10): 1473-1477.

[8] 任学坤,王恩元,李忠辉. 预制裂纹岩板破坏电位与电磁辐射特征的实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(03): 440-446.

[9] 王恩元,何学秋. 煤岩变形破裂电磁辐射的实验研究[J]. 地球物理学报, 2000(01): 131-137.

[10] 宋晓艳,李忠辉. 预制裂纹煤系岩石破坏的电磁辐射规律研究[J]. 煤矿安全, 2015, 46(10): 56-59.

[11] 樊勇,赵伏军,张孟举,等. 静力破碎花岗岩电磁辐射信号的分形特征[J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2017, 32(01): 7-11.

[12] 黄明利,唐春安,朱万成. 岩石破裂过程的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000(04): 468-471.

(责任编辑 王利君)