

单轴压缩下不同含水状态岩石声电特性实验

陈彪¹, 赵伏军^{1,2*}, 刘永宏¹, 田芯宇¹, 陈品莹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: 利用 RMT-150C 试验系统对砂岩进行单轴压缩试验, 采用 AEwin-USB 型声发射和 KBD5 电磁辐射信号采集系统接收试验过程中的声电信号, 对不同含水状态岩石破碎过程中的声电信号特征进行了研究. 结果表明: 在岩石破坏过程中产生的声发射与电磁辐射信号特征曲线与岩石的应力-应变曲线具有较好的一致性; 随着试样含水状态的改变, 声发射振铃计数和电磁辐射脉冲数在压密、弹性、屈服、破坏 4 个阶段呈相应变化; 在试验加载过程中, 声发射信号与电磁辐射信号并非一一对应, 声发射信号随着载荷的增加而增强, 而电磁辐射信号在加载初期就具有一定的强度, 中后期无明显增长趋势, 直至试件破坏时信号强度突增到峰值.

关键词: 单轴压缩; 电磁辐射; 声发射; 含水状态

中图分类号: TD315

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2020)03-0001-07

Experimental Study on the Acoustic-Electromagnetic Characteristics of Rock Under Uniaxial Compression with Different Moisture Contents

Chen Biao¹, Zhao Fujun^{1,2}, Liu Yonghong¹, Tian Xinyu¹, Chen Pinyin¹

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Uniaxial compression test of sandstone is carried out on the RMT-150C test system and receives the acoustic-electromagnetic signals by using AEwin-USB type acoustic emission and KBD5 electromagnetic emission acquisition system to study the characteristics of acoustic-electromagnetic signals in the process of rock fracture under different moisture contents. Results show that the characteristic curves of acoustic emission and electromagnetic emission generate during rock crushing is consistent with the stress-strain curve; with the change of the moisture contents of the sample, the acoustic emission bell count and the electromagnetic emission pulse number show corresponding changes in the four stages of compression, elastic, yield and failure. During the entire loading process, acoustic emission signals do not correspond exactly to electromagnetic emission signals, which increases with the increase of load, however, electromagnetic emission signals has a certain strength at the initial stage of loading, and then has no obvious growth trend, until the signal strength suddenly increases to the peak at the time of rock failure.

Keywords: uniaxial compression; electromagnetic emission (EME); acoustic emission; moisture contents

在岩石受外载荷作用时, 岩石内部发生变形以及微小结构面破坏断裂, 然后耗散的能量以弹性波和电磁波的形式释放出来, 这一现象称为声发射和电磁辐射现象^[1,2]. 声发射和电磁辐射技术能够实时不间断

地监测岩石内部裂纹产生和扩展,并通过观察其声电信号特征来进行工程地质灾害等的预测预报,被当作一种动态无损监测技术.因此,对于岩石受力破坏过程中的声电效应以及特征,众多学者开展了大量的基础性研究工作.李期森等^[3]通过对红砂岩进行单轴声发射特征研究,发现在峰值应力前,低主频声发射随着应力增加而增加,在峰后破坏阶段,声发射主频变宽.高保彬等^[4,5]对脆性、塑形破坏类型岩石进行研究,发现了脆性破坏累计计数的平均增长率高于塑形破坏.王恩元等^[6]对受载煤体破裂过程中产生电磁辐射进行了研究,发现电磁辐射信号与声发射信号并非完全同步.王笑然等^[7]研究发现了相对于自然状态试件,饱水试件的声发射现象出现较晚.腾天野等^[8,9]通过对不同含水率状态下的岩体进行声发射采集实验得出,随着含水率的增加,AE振铃计数减少,岩石强度降低.综观上述研究,其成果主要集中在自然状态的岩石破坏声发射或电磁辐射特性以及水对岩石破坏特征影响的研究上,而针对不同含水状态下岩石破坏声电特性的综合研究则较少.因此本文以工程中常见的砂岩为研究对象,进行不同含水状态岩石的单轴压缩试验,并结合声发射与电磁辐射系统,对不同含水状态岩石破碎过程的声电效应进行研究与分析.研究成果可为判别工程岩体稳定性提供理论依据.

1 试验概况

1.1 试验加载系统

试验系统(如图1所示)主要包括加载系统、声发射采集系统和电磁辐射采集系统.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.声发射仪阈值设定为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).

1.2 试样制备

1.2.1 试验材料选取及分类

实验选用砂岩材料,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3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

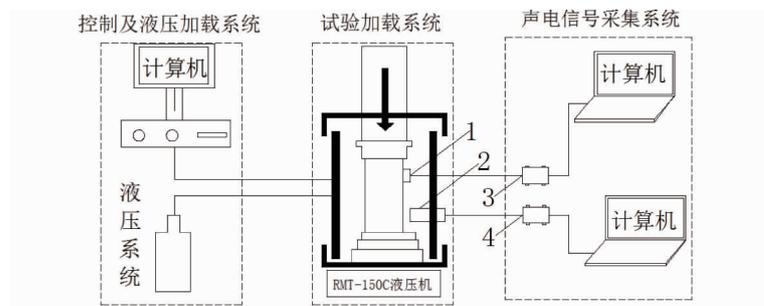
状态	干燥状态组	自然状态组	饱水状态组
静载	GJ-1	ZJ-1	BJ-1
	GJ-2	ZJ-2	BJ-2
	GJ-3	ZJ-3	BJ-3

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 试验结果与分析

自然状态下单轴压缩所得到的应力-应变曲线如图2所示,由声发射系统监测所得的载荷-时间-声发射信号关系曲线如图3所示,由电磁辐射系统测试所得的载荷-时间-电磁辐射信号关系曲线如图4所



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.从图 2~图 4 可以看出,岩石的破坏特征曲线、声发射和电磁辐射信号特征曲线都经历了压密、弹性、屈服和破坏 4 个阶段:

(1) 压密阶段(OA 段):在加载初期,不同含水状态砂岩原有微裂隙逐渐闭合,岩石被压密,全应力-应变曲线出现了上凹型;由于岩石内部裂隙闭合、压实等原因,该阶段经历较长时间,不同含水状态试样的声发射振铃计数和能量都很小.不同于声发射信号参数,电磁辐射脉冲数和电磁辐射最大值在加载初期就出现较强信号,这是由于受载岩样内部颗粒的摩擦和裂纹扩展引起的.(2) 弹性变形与裂隙发展阶段(AC 段):岩石中存在的裂隙被压密后,进入弹性变形阶段(AB 段)该阶段的应力-应变曲线接近直线型.随后试样内部裂隙继续稳定萌生、扩展(BC 段),试样的变形时间较短;该阶段试样变形总吸收能随应力的增加而增加,岩石内部破裂活动增加,裂隙萌生和发育速度渐渐加快.声发射活动在该阶段都开始增加,电磁辐射脉冲值与最大值在一个固定值上下波动.

(3) 屈服阶段(CD 段):C 点为岩石从弹性变为塑性的转折点,其应力大小约为峰值强度的 2/3,进入该阶段后,微裂隙扩展速度加快,破裂不断发展,该阶段试样裂隙迅速扩展,试样体积由压缩变为扩容.声发射信号随着裂隙的产生与发展快速增加,逐渐趋于最大值,同时该过程中的电磁辐射脉冲数和电磁辐射最大值也在增加,在应力达到峰值强度时,电磁辐射信号值也达到最大水平.(4) 破坏后阶段(D 点以后段):达到峰值强度后,试样内部遭到严重破坏,裂隙快速交叉发展,形成宏观破坏面,此时试样承载能力急剧下降,对应应力迅速降低.在应力到达峰值时,对应声发射(振铃计数和能量)与电磁辐射(脉冲数和强度最大值)信号也达到最大值,随后试样应力迅速降低,声发射活动也随之减小,电磁辐射信号开始减弱至消失.

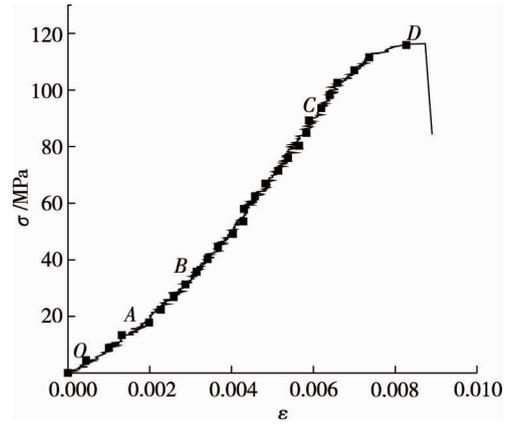


图 2 自然状态试样应力-应变曲线

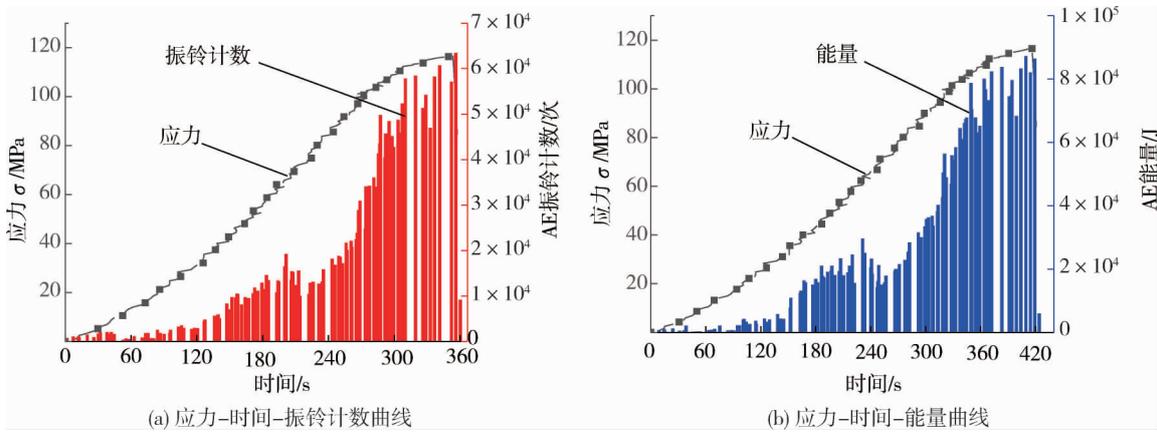


图 3 自然状态砂岩应力-时间-声发射特征曲线

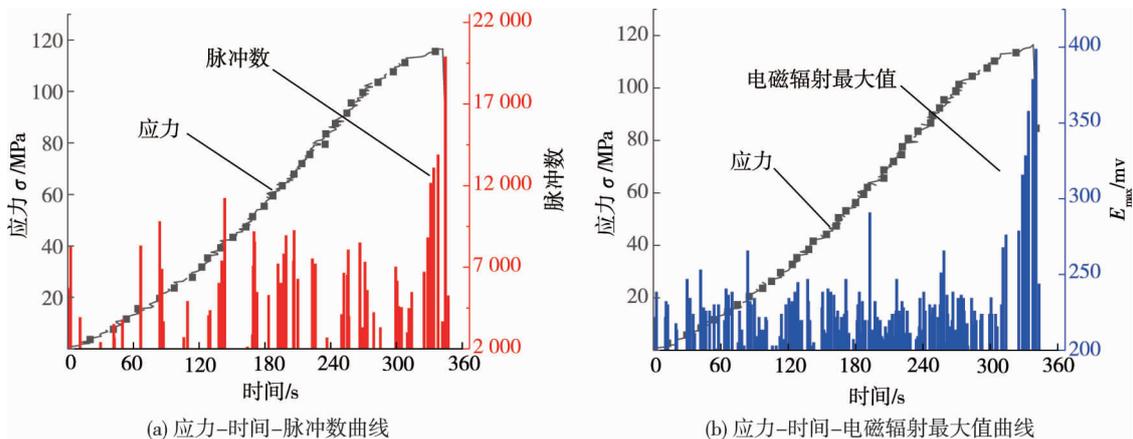


图 4 自然状态砂岩应力-时间-电磁辐射参数特征曲线

通过分析比较单轴压缩下岩石声发射与电磁辐射信号特征结果可以发现,在岩石被压缩的过程中,电磁辐射信号出现的时间更早、更丰富且变化不大,说明电磁辐射信号的产生不仅仅与裂纹的产生与扩展有关,还与压电磁效应以及岩石在破坏过程中内部微粒的剧烈碰撞与摩擦密切相关^[10].总的来说,在岩石被压缩的过程中,声发射与电磁辐射的信号特征曲线与岩石全应力-应变曲线具有较好的一致性.因此,岩石破碎所产生的声电信号可用来表示岩石在破坏过程中裂隙的产生与扩展规律.

3 不同含水状态砂岩的声电特性对比分析

3.1 不同含水状态下的声电特性分析

图5、图6分别为累计声发射参数和累计电磁辐射参数随时间的变化曲线.由图5和图6的卸载过程可知,试样释放的声发射信号和电磁辐射信号和不同含水状态有密切关系,即随着试件含水程度的增加,砂岩的声发射累计振铃计数、累计能量和电磁辐射累计脉冲数、累计最大值都变小,这是因为水分子进入岩石颗粒间的间隙会削弱粒间的联结,使得含水状态岩石强度发生降低,岩样在破裂时所需的能量减少,加载过程中对应产生的声发射信号和电磁辐射信号也减小.

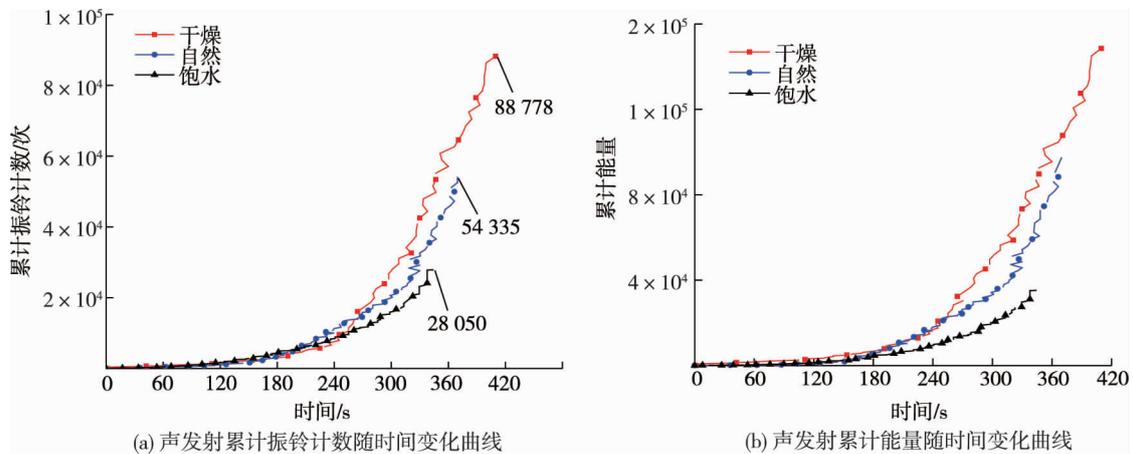


图5 声发射参数随时间变化曲线

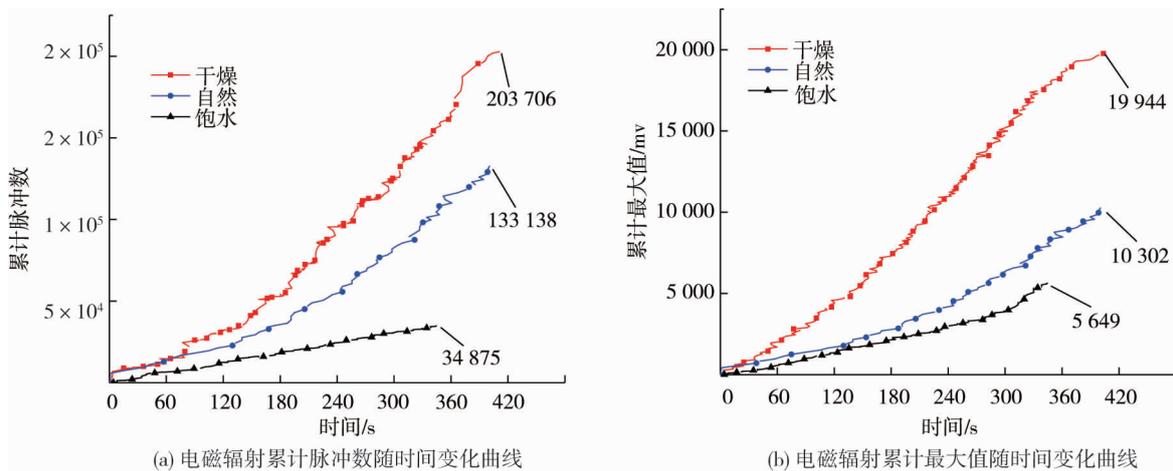


图6 电磁辐射参数随时间的变化曲线

3.2 声电特性对比分析

表3为不同含水状态试样在破坏各阶段产生的声发射振铃计数和电磁辐射脉冲数所占比例,从表3可以看出:随着试样的含水状态由干燥变为自然、饱水,压密、弹性阶段的声发射振铃计数所占比例增加,屈服、破坏阶段减少,且电磁辐射脉冲数所占比例也在压密阶段增加,破坏阶段减小,说明岩石破坏各阶段声电信号计数与含水状态密切相关.

表 3 声发射振铃计数和电磁辐射脉冲数各阶段所占比例统计

状态	AE 振铃计数/次			电磁辐射脉冲数		
	干燥	自然	饱水	干燥	自然	饱水
压密阶段	1.2%	4.6%	6.9%	8.7%	12.3%	16.8%
弹性阶段	9.5%	19.6%	28.1%	21.6%	23.7%	22.6%
屈服阶段	30.6%	21.2%	19.6%	27.5%	29.4%	28.5%
破坏阶段	58.7%	54.6%	45.4%	42.2%	34.6%	32.1%

图 7、图 8 分别为不同含水状态下砂岩应力-时间-声电信号参数特征曲线.从图 7 可以看出,3 种状态下的砂岩在加载初始时声发射信号特征值都较低,但干燥试样在弹性阶段后期就产生了比较强的声发射信号,而自然状态试样则是到了屈服阶段才有这种现象产生,饱水试样则是在接近峰值点时才有明显的声发射信号.这是因为干燥试样呈现更强的脆性,内部微裂隙积累的弹性能在弹性阶段后期随着裂隙的破裂扩展而释放出来,形成了较强的声发射信号,而水的存在削弱了岩石的脆性,导致这一现象延迟出现.由图 8 可知,电磁辐射脉冲数和能量最大值在加载初期就具有一定的强度,随后无明显增长趋势,直至试件破坏达到峰值.对比图 7 和图 8 可以看出,整个加载过程中声发射信号与电磁辐射信号并非一一对应,这说明声发射信号和电磁辐射信号来源不完全相同.而不同含水状态砂岩的声发射与电磁辐射信号有着明显差异,即干燥试样的声电信号比自然与饱水状态更加密集.因此,根据不同含水状态砂岩受载变形破坏过程中不同阶段的声电信号特征和规律,可以预测现场工程中含水岩体的失稳过程,提供更加全面的理论指导.

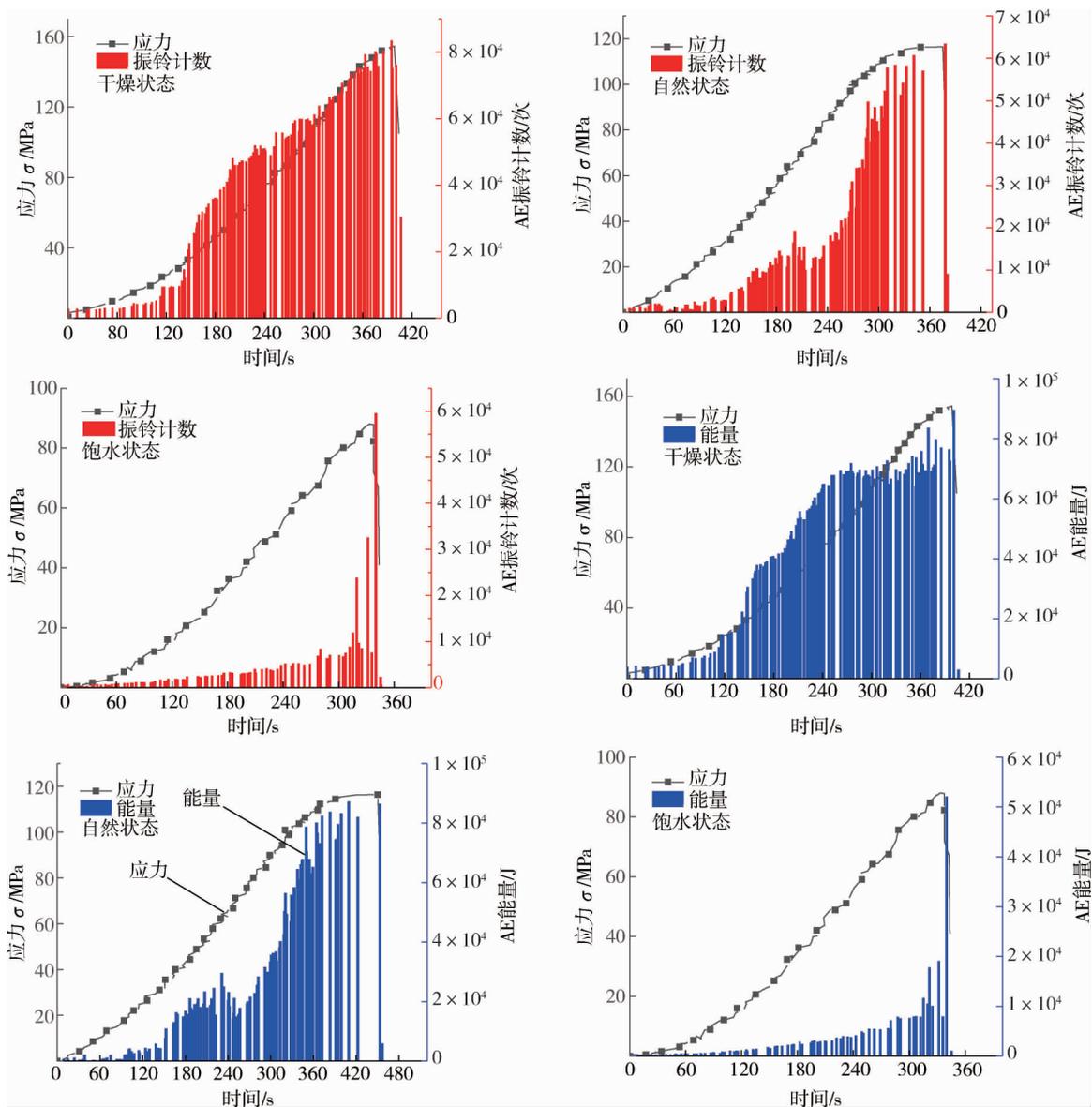


图 7 不同含水状态砂岩应力-时间-声发射参数特征曲线

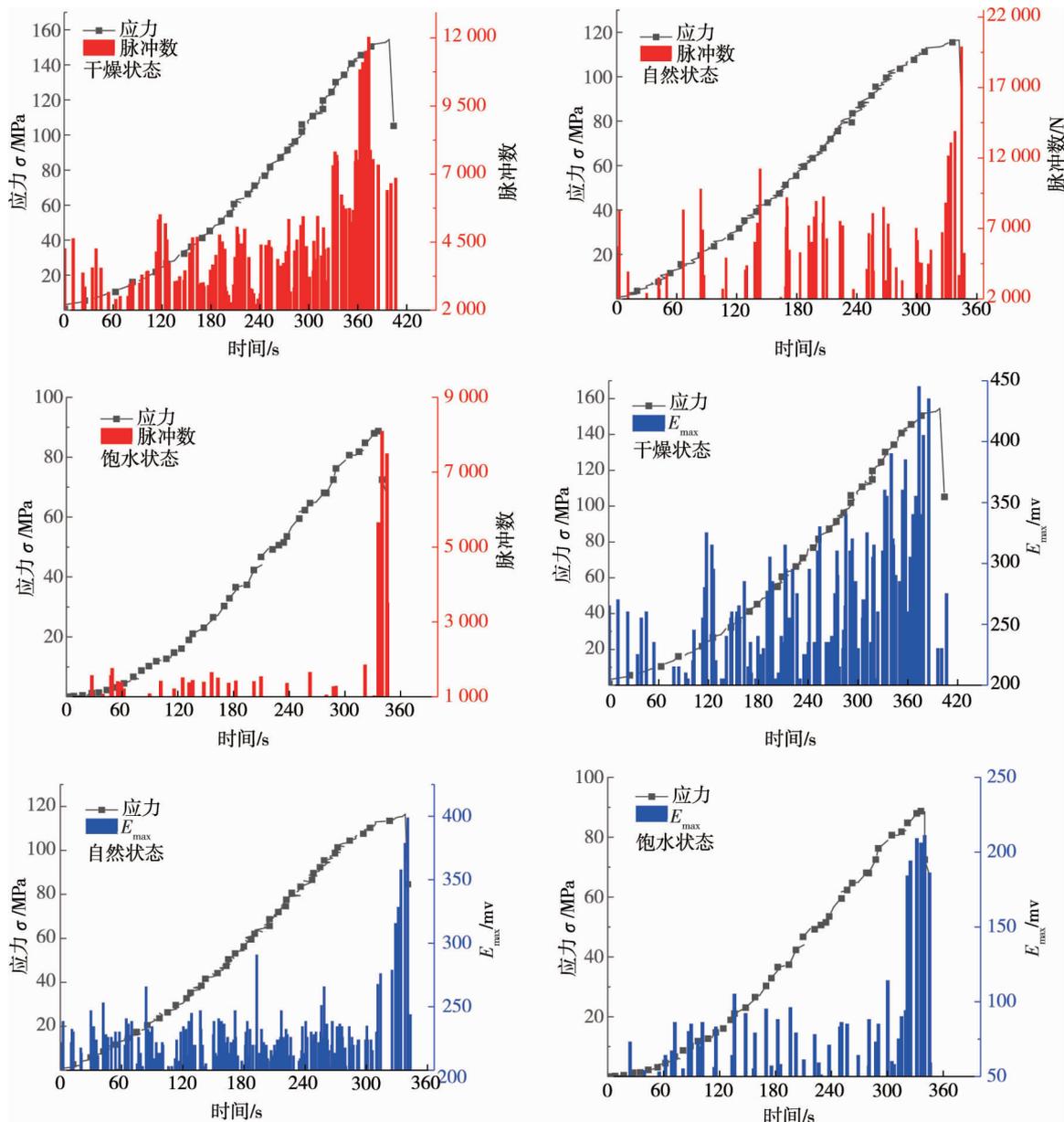


图8 不同含水状态砂岩应力-时间-电磁辐射参数特征曲线

4 结论

1) 在岩石单轴压缩破坏过程中,声发射与电磁辐射信号的特征曲线与岩石全应力-应变特征曲线具有较好的一致性.因此,可以将岩石加载过程中产生的声电信号曲线作为岩石内部裂隙演化规律的体现,并将声发射与电磁辐射信号当作岩石破坏失稳的判定依据.

2) 试样在静载荷作用下产生的声发射信号、电磁辐射信号强度与不同含水状态有着密切关系,达到饱和状态时,声发射累计振铃计数和电磁辐射累计脉冲数最小.

3) 试样由干燥状态变成自然状态和饱水状态,在压密、弹性阶段的声发射振铃计数所占总计数的比例逐渐增加,而屈服、破坏阶段则逐渐减少.

4) 岩石破碎过程中声发射信号与电磁辐射信号并非完全对应,声发射信号随着载荷的增加而增强,而电磁辐射信号在加载初期就有一定的强度,中后期无明显增长趋势,直到试件破坏时信号强度突增到峰值.

参考文献:

- [1] Tham L G, Liu H, Tan C A, et al. On Tension Failure of 2-D Rock Specimens and Associated Acoustic Emission[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2005,38(1):1-19.
- [2] 王恩元,何学秋,陈忠辉,等.煤岩电磁辐射技术及其应用[M].北京:科学出版社,2009.
- [3] 李期森.单轴压缩条件下红砂岩特征强度点声发射特性试验研究[D].赣州:江西理工大学,2018.
- [4] 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(2):358-363.
- [5] 高保彬,李回贵,刘云鹏,等.单轴压缩下煤岩声发射及分形特征研究[J].*地下空间与工程学报*,2013,9(5):986-991.
- [6] 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(1):131-137.
- [7] 王笑然,刘晓斐,沈荣喜,等.自然和饱水煤样受载破坏声发射特征实验研究[J].*煤矿安全*,2016,47(1):28-32.
- [8] 腾天野.单轴压缩条件不同含水率红砂岩声发射特性试验研究[D].赣州:江西理工大学,2019.
- [9] 陈春谏,赵耀江,郭胜亮,等.不同含水率煤岩声发射特性试验研究[J].*煤矿安全*,2018,49(5):40-42.
- [10] 赵伏军,李玉,陈珂,等.岩石破碎声发射和电磁辐射特征试验研究[J].*地下空间与工程学报*,2019,15(2):345-351.