

# 岩石破碎声发射和电磁辐射特征试验研究\*

赵伏军<sup>1,2</sup>, 李玉<sup>1,3</sup>, 陈珂<sup>1</sup>, 张柏<sup>1</sup>

(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; 3. 长沙理工大学 土木工程学院, 长沙 410114)

**摘要:** 为了研究岩石破碎声发射和电磁辐射特征, 利用 RMT-150C 压力试验机进行刀具静力侵入花岗岩破碎试验, 采用 AEwin-USB 型声发射和 KBD5 电磁辐射采集系统接收声发射和电磁辐射信号, 开展了刀具破岩过程中声发射和电磁辐射特性及加载速率对其影响的研究。以 3 种加载速率分别为 0.001 mm/s、0.01 mm/s、0.1 mm/s 进行破岩试验, 结果表明: 刀具受载侵入破岩过程中产生声发射和电磁辐射现象, 采集的两信号波形变化与刀具侵入载荷曲线均呈跃进式特征, 且具有较好的一致性; 随加载速率增加, 声发射和电磁辐射信号增强, 声发射峰值计数率、能量率和电磁辐射峰值强度、脉冲数与加载速率呈较好的正相关性。

**关键词:** 刀具破岩; 声发射; 电磁辐射; 信号特征; 加载速率

中图分类号: TU459

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2019)02-0345-07

## Experimental Research on Characteristics of Acoustic Electrical Signal of Rock Fragmentation

Zhao Fujun<sup>1,2</sup>, Li Yu<sup>1,3</sup>, Chen Ke<sup>1</sup>, Zhang Bai<sup>1</sup>

(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; 3. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, P.R. China)

**Abstract:** For researching acoustic emission and electromagnetic emission characteristics of rock fragmentation, rock static breaking experiment on the granite was carried out on the RMT-150C rock mechanics testing machine with normal cutter by using AEwin-USB type acoustic emission and KBD5 electromagnetic emission acquisition system. The characteristics of acoustic emission and electromagnetic emission and the influence of loading rate on the rock breaking process were studied. The static rock invasion test was carried out with three loading rates of 0.001 mm/s, 0.01 mm/s and 0.1 mm/s. The results show that the phenomenon of acoustic emission and electromagnetic radiation is produced during the process of loading and breaking rock. The wave forms of the two signals and the load curves of the tools are in the form of a leap forward and have good consistency. With the increase of loading rate, the acoustic emission and electromagnetic emission signals are enhanced, and the acoustic emission peak count rate is positively correlated with the energy rate, the peak intensity of electromagnetic emission, the pulse number and the loading rate.

**Keywords:** rock breaking tool; acoustic emission; electromagnetic emission; fractal dimension; loading rate

\* 收稿日期: 2018-09-07(修改稿)

作者简介: 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。

E-mail: zfxn@263.net

基金项目: 国家自然科学基金(51474103); 湖南省自然科学基金(2015JJ2070)

## 0 引言

岩石受外载荷作用下产生变形以及破坏断裂,并以弹性波和电磁波的形式释放能量的现象,称为声发射(简称 AE)和电磁辐射(简称 EME)<sup>[1-3]</sup>。声发射和电磁辐射技术作为一种动态无损监测技术,能够连续、实时地监测岩石内部裂纹产生和扩展,并对地震灾害和煤岩动力灾害等进行预测预报。因此,学者们对于煤岩受力破坏过程中声电效应开展了大量的基础性研究工作。Shkuratnik 等<sup>[4]</sup>进行了三轴循环加、卸载压缩试验,分析了不同应力状态下煤岩的声发射记忆效应。李果等<sup>[5]</sup>对 10 类岩石在巴西劈裂下的声发射特征进行了试验研究,得到了巷道顶板岩层不同岩石的微观破裂机理。高保彬等<sup>[6-7]</sup>在单轴压缩下对不同破坏类型煤岩声发射特性及分形特征进行了研究。秦虎等<sup>[8]</sup>开展了含水率对单轴压缩下煤岩破坏声发射信号特征影响的研究,表明水对煤岩样的力学特性及声发射特征有明显的影响。Huang 等<sup>[9]</sup>通过运用压电效应和断层位错模型理论,研究了同震时电磁辐射信号的产生机制。窦林名等<sup>[10]</sup>研究了煤岩变形破裂峰值前后电磁辐射的变化规律。任学坤等<sup>[11]</sup>研究了同裂纹倾角花岗岩岩板破坏电位和电磁辐射变化规律。吕岗岗<sup>[12]</sup>等通过建立矿井突水相似模型,研究了突水演化过程中的声电信号变化特征。王恩元等<sup>[13]</sup>对煤岩变形破裂电磁辐射规律进行了研究,表明电磁辐射很好反映了煤岩变形破裂。另外,加载速率对煤岩破坏过程中的声电效应有很大的影响<sup>[14-18]</sup>。纵观国内外学者取得的研究成果主要侧重于对各种静应力状态下煤岩样声发射和电磁辐射特征的研究,而对于刀具静力侵入岩

石破坏过程中声电效应的研究还尚未见诸报端。因此,本文以工程中常见的脆性岩石花岗岩为研究对象进行刀具侵入破岩试验,同时实时监测声发射和电磁辐射信号,对刀具侵入岩石破碎过程中声电效应及加载速率对其影响进行分析,为岩石破碎机理和判别工程岩体稳定性研究提供参考和依据。

## 1 试验概况

### 1.1 试样制备

本次试验所选取的试样为脆性岩石花岗岩,通过室内切割加工成 150 mm×150 mm×150 mm 的正方体试样,按照岩石力学试验性能测试要求,使用磨石机进行打磨,保证试样两端面的平整度小于 0.05 mm,平行度小于 0.02 mm。将试样分为 3 组,每组试样为 5 个,其物理力学参数分别为:密度  $\rho = 2.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量  $E = 21.35 \text{ GPa}$ ,抗压强度  $\sigma_c = 106.46 \text{ MPa}$ ,泊松比  $\nu = 0.09$ ,抗拉强度  $\sigma_t = 7.65 \text{ MPa}$ 。

### 1.2 实验系统

试验在 RMT-150C 压力试验机上进行一字型刀具静力侵入破碎试验,采用位移控制方式,设定加载速率为 0.001 mm/s、0.01 mm/s、0.1 mm/s。运用声发射监测系统(AEwin-USB)、电磁辐射监测系统(KBD5)及电磁屏蔽系统对试样破坏过程中的声发射和电磁辐射信号进行记录和采集(如图 1 所示),以保证包围住试样体积为原则。声发射传感器布置如图 2 所示。同时,为保证信号采集效果,将耦合剂涂抹在试样与声发射传感器之间。试验中声发射系统总增益设为 76 dB(其中前放为 40 dB,主放为 36 dB),门槛值设为 40 dB,采样频率设定为 5MSPS。

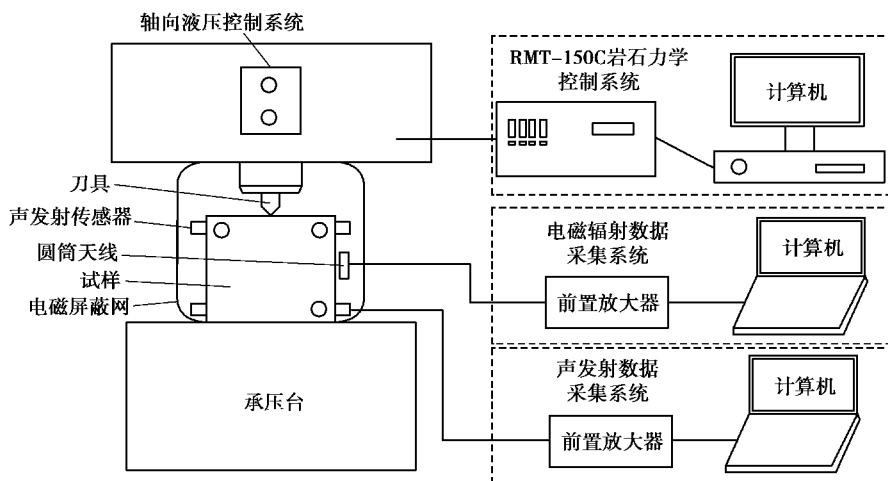


图 1 试验系统示意图

Fig. 1 Sketch map of experiment system

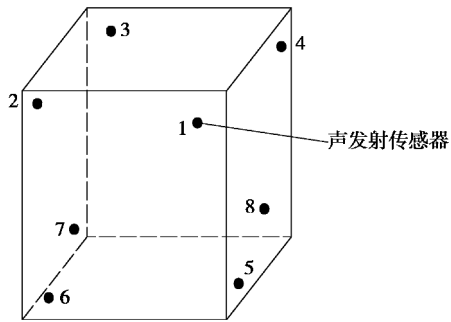


图 2 声发射传感器布置示意图

Fig. 2 Sketch map of acoustic emission sensors

## 2 试验结果分析

在刀具(一字型刀具、加载速率为  $0.001 \text{ mm/s}$ )静力侵入花岗岩破碎过程中,由力-位移测试实验得到载荷-侵深曲线如图 3 所示,由声发射系统测试得到载荷-时间-声发射关系曲线如图 4 所示,由电磁辐射系统测试得到载荷-时间-电磁辐射关系曲线如图 5 所示。分析图 3 可以看出,岩石破碎的过程是一个跃进式变化过程,在前期岩石发生接触变形及小压裂破碎,经若干次小破碎后形成大破碎坑,岩石碎块崩出,载荷立即卸载、跌落。图 3 表明,随侵深增加破岩实验全过程共发生了 4 次跃进式破碎。从图 4、5 中可知,刀具静力侵入岩石破碎过程中会伴随着声发射和电磁辐射信号的产生,声发射和电磁辐射信号是阵发性的脉冲信号,而不是连续性的,分别也呈现出多次跃进式变化。这表明了刀具破岩过程不是连续性的而是阵发性的。将破岩过程分 4 个阶段来讨论:①OAB 段,即刀具静力侵入岩石初期。在侵深小于 A 点的数值时,刀具与岩石接触载荷很小,实质上产生的是接触变形,岩石内部原微裂纹和孔隙呈闭合状态,或者产生微弱的微破裂。这个阶段声发射计数率和能量率很小,电磁辐射信号较丰富。在岩石(在 A 点)首先产生脆性破裂时,可以发现刀具周围有小碎片飞出和侵入载荷快速下降(AB 段),此时出现声发射(计数率和能量率)和电磁辐射(脉冲数和强度最大值)信号的小波峰。②BCD 段。随着刀具继续侵入岩石,在已形成一定破碎的基础上,岩石进一步发生弹性和塑性变形,发育程度不同的微裂纹

急剧增多,刀具侵入脆性岩石发生新的跃进侵入,此阶段声发射计数率和能量率逐渐增大,当到达 C 点后快速卸载,产生小碎块外飞,此时声发射和电磁辐射信号出现第二个小波峰。③DEF 段。当刀具继续侵入岩石时,重复出现上述岩石破碎过程,出现岩石碎块崩出,载荷立即卸载、跌落,声发射计数率和能量率逐渐增大。④FGH 段。通过前 3 段岩石损伤积累和现阶段裂纹的萌生、扩展,导致岩石产生破碎,最终形成一个破碎漏斗或破碎穴,并伴有清脆的“噼啪”破碎声。岩石碎块蹦出时伴随着大量能量释放,产生强烈的声发射和电磁辐射信号,到岩石破碎后,声发射和电磁辐射信号衰减到完全消失。至此,一次完整的刀具静力侵入脆性岩石破碎过程便算完成。

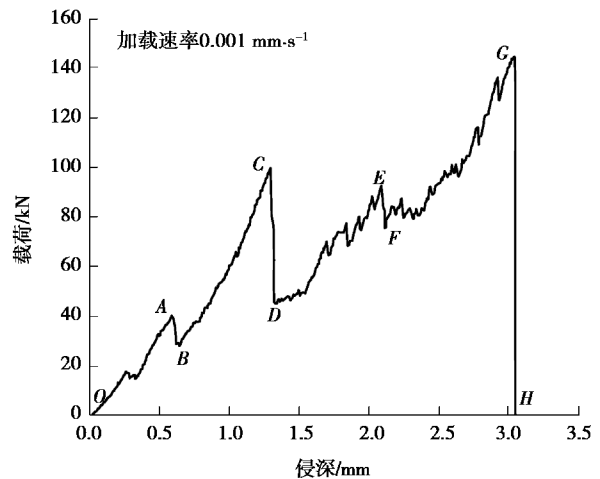


图 3 刀具静力侵入花岗岩载荷-侵深曲线

Fig. 3 Load vs. penetration curves of static intrusion of granite

分析比较岩石在刀具静力侵入下岩石声发射和电磁辐射特征结果可知,相对于声发射信号,刀具静力侵入岩石过程中产生的电磁辐射信号更丰富、时间更早,且电磁辐射信号变化相对更平缓。这说明电磁辐射信号并非都只与岩石裂纹扩展有关,而且还与压电电压磁效应或者是与岩石破碎过程中产生的微粒之间的碰撞和摩擦有关。总的来说,刀具侵入岩石破碎过程中,声发射和电磁辐射信号特征结果与刀具侵入岩石破碎过程具有较好的一致性。因此,可以利用岩石破碎声电信号可用来表征岩石破碎过程裂纹扩展演化规律。

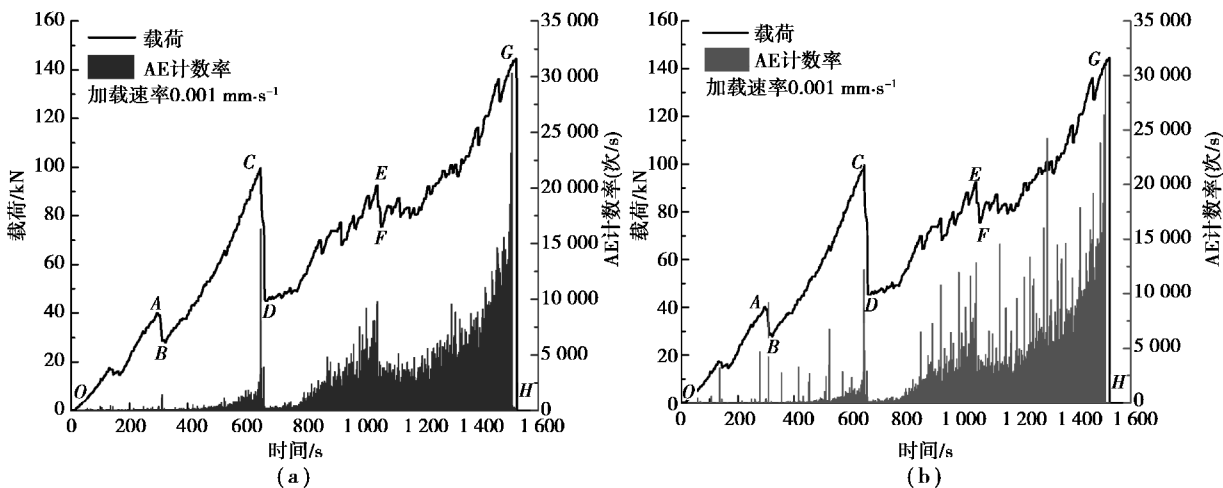


图 4 刀具静力侵入花岗岩声发射特征曲线  
Fig. 4 AE characteristic curves of static intrusion of granite

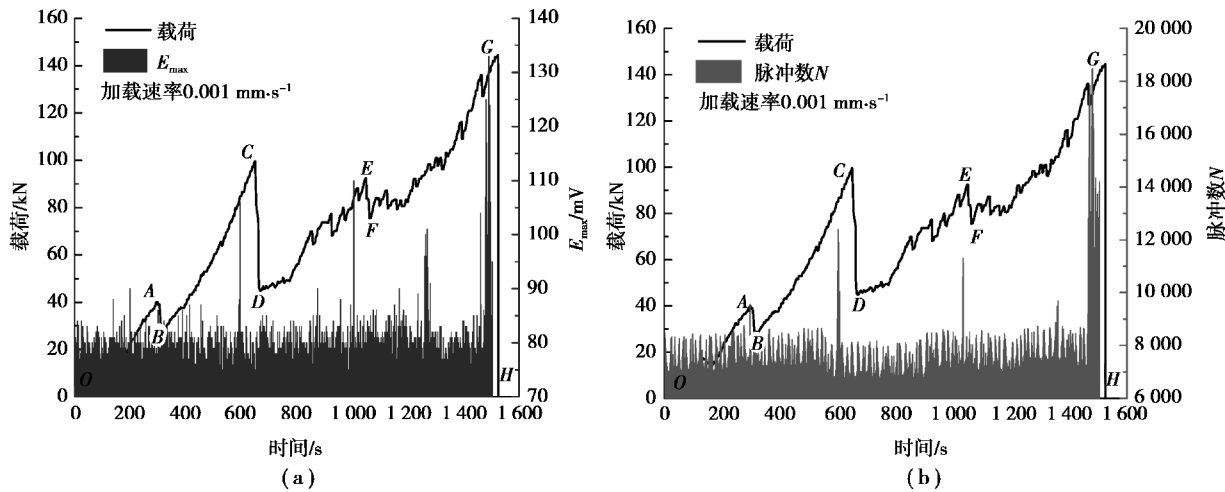


图 5 刀具静力侵入花岗岩电磁辐射特征曲线  
Fig. 5 EME characteristic curves of static intrusion of granite

3 加载速率对声电信号特征的影响

不同加载速率下采用一字型刀具静力侵入花岗岩,其破碎过程中声发射信号参数、电磁辐射信号参数、载荷记录分别如表 1 和图 6、7 所示,表 1 中的比例表示峰值声发射和电磁辐射对应的载荷与极限载荷的比值。对比分析加载速率对刀具破岩声发射、电磁辐射和破岩特点的影响,主要表现在以下几个方面。

(1)从图 6 和图 7 中可以看出,刀具破岩过程中声发射和电磁辐射信号基本上随载荷的增大而增强。加载速率为 0.001 mm/s 时,在刀具侵入岩石发生跃进变化时(A、B、C、D 点),声发射和电磁辐射信号出现突增,另两个加载速率下也呈相似的规律,表明了不同加载速率下的声发射和电磁辐射

变化规律基本一致。

表 1 声发射和电磁辐射基本特征

比较项目		加载速率/(mm·s <sup>-1</sup> )		
		0.001	0.01	0.1
极限载荷/kN		144.86	169.02	175.32
峰值声发射率/(次·s <sup>-1</sup> )	计数率	30 303	36 329	38 360
	能量率	30 876	120 356	189 748
	比例/%	96	96	95
峰值电磁辐射	强度/mv	133	153	261
	脉冲数	18509	35000	52000
	比例/%	95	97	96

(2)加载速率在某种程度上影响了岩石的破坏程度,加载速率越大,刀具破岩程度越显剧烈。



结合表1可以看出,不同加载速率下刀具侵入破碎花岗岩中的极限载荷随加载速率的增加有着不同程度的提高;刀具破岩过程中的声发射峰值计数率、能量率和电磁辐射峰值强度、脉冲数随加载速率的增加逐渐增加,表现出较好的正相关性。

(3)在刀具破岩产生电磁辐射信号峰值之前,加载速率大的花岗岩破坏产生的电磁辐射信号较加载速率小的要相对稳定,这是由于加载速率较小,刀具静力侵入破岩需要能量的累积,导致花岗

岩变形和微破裂的频次较多,直接影响了电磁辐射的强度值,以致刀具破岩过程中电磁辐射信号起伏变化趋势较大<sup>[19]</sup>。

(4)由表1可知,当侵入载荷加载到峰极限载荷的95%附近时,刀具破岩过程中声发射和电磁辐射信号基本同时发生跃进变化,且达到最大值,这说明了岩石声发射和电磁辐射信号存在载荷阈值。因此,可以根据岩石声发射和电磁辐射信号载荷阈值来作为岩石破坏失稳的前兆依据。

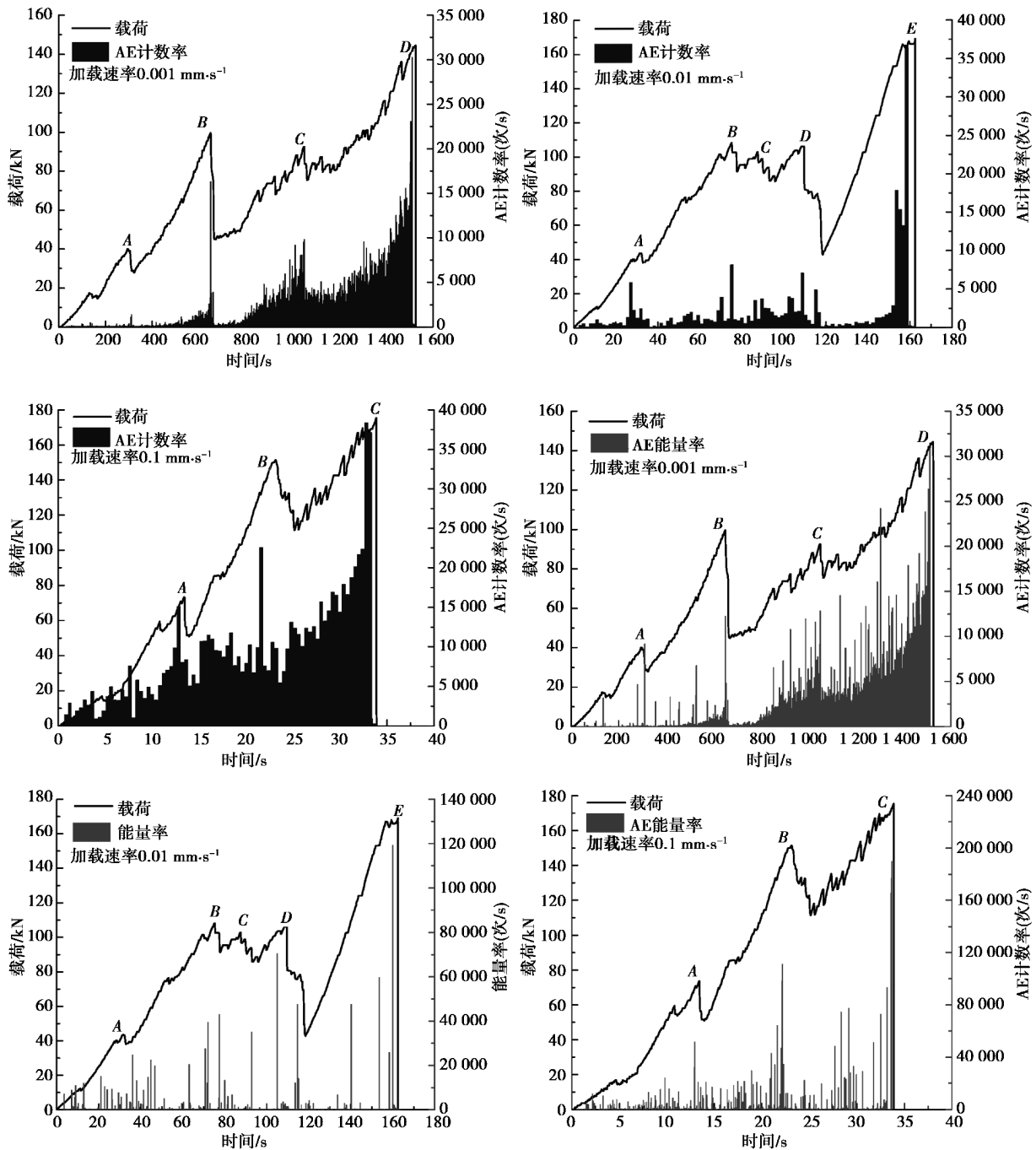


图6 不同加载速率下岩样声发射特征曲线

Fig. 6 AE characteristic curves of rock sample under different loading rates

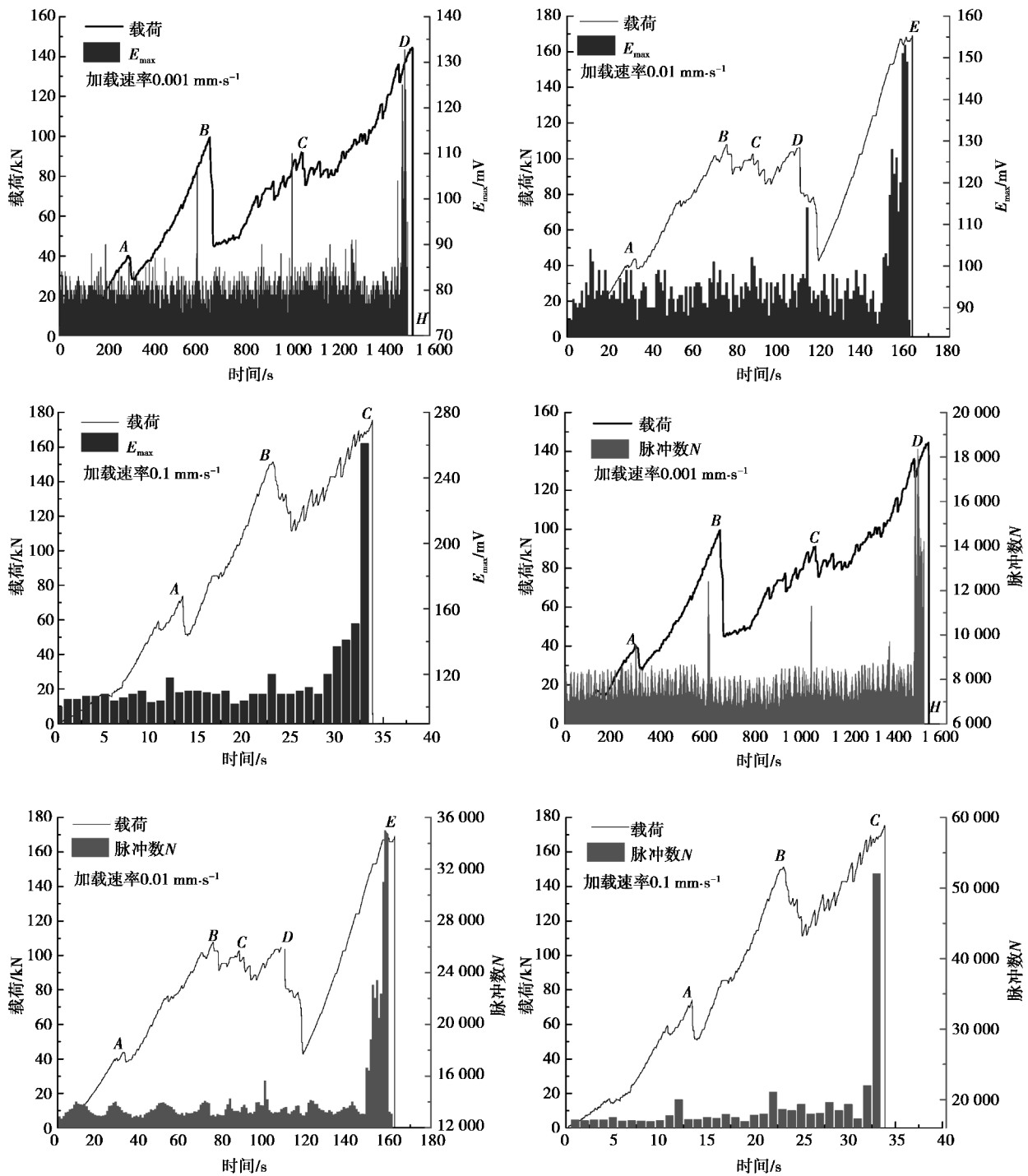


图7 不同加载速率下岩样电磁辐射特征曲线

Fig. 7 EME characteristic curves of rock sample under different loading rates

#### 4 结论

(1) 根据刀具静力侵入花岗岩的侵入载荷-侵深变化曲线,岩石破碎是呈一个跃进式变化的破碎过程。随加载速率的增加,花岗岩受载的极限载荷依次逐渐增大。加载速率对岩石的破坏方式有一

定的影响,加载速率越大,刀具静力侵入岩石破碎程度越显剧烈。

(2) 刀具静力侵入破碎岩石过程中伴随着声发射和电磁辐射信号的产生,声发射和电磁辐射信号变化能很好反映刀具静力侵入破岩过程。因此,利用声发射和电磁辐射技术可很好表征刀具静力

侵入岩石过程中损伤演化规律。同时,应用声发射和电磁辐射信号的载荷阈值可作为岩石破坏失稳的前兆判据。

(3)加载速率对岩石破碎过程中声电信号有很大的影响。加载速率越大,刀具静力侵入岩石破碎产生声发射和电磁辐射信号的强度越强,声发射峰值计数率、能量率和电磁辐射峰值强度、脉冲数与加载速率具有较好的正相关性。

#### 参考文献(References)

- [1] 谢和平,彭瑞东,鞠杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3565-3570. (Xie Heping, Peng Ruidong, Ju Yang. Energy dissipation of rock deformation and fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3565-3570. (in Chinese))
- [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. (Wang Enyuan, He Xueqiu, Chen Zhonghui, et al. Electromagnetic emission technology of coal and rock and its application[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [3] Tham L G, Liu H, Tang 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.
- [4] Shkuratnik V L, Filimonov Y L, Kuchurin S V. Regularities of acoustic emission in coal samples under triaxial compression[J]. Journal of Mining Science, 2005, 41(1): 44-52.
- [5] 李果,艾婷,于斌,等. 不同岩性巴西劈裂实验的声发射特征[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 870-881. (Li Guo, Ai Ting, Yu Bin, et al. Acoustic emission characteristics of different lithologies under Brazilian splitting[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 870-881. (in Chinese))
- [6] 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, 1005. (Gao Baobin, Li Huigui, Liu Yunpeng, et al. Study of acoustic emission and fractal characteristics of coal rock under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(5): 986-991, 1005. (in Chinese))
- [7] 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. (Gao Baobin, Li Huigui, Li Huamin. Study on acoustic emission and fractal characteristics of different damage types of rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(2): 358-363. (in Chinese))
- [8] 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. (in Chinese))
- [9] Huang Q. One Possible generation mechanism of coseismic electric signals[J]. Physical and Biological sciences, 2002, 78(7): 173-178.
- [10] 窦林名,王云海,何学秋,等. 煤样变形破坏峰值前后电磁辐射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 908-914. (Dou Linming, Wang Yuhai, He Xueqiu, et al. Study on electromagnetic emission characteristic for coal sample deformation and failure during pre-and-post-peaking phases[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 908-914. (in Chinese))
- [11] 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(3): 440-446. (Ren Xuekun, Wang Enyuan, Li Zhonghui. Experimental study of characteristics of surface potential and electromagnetic radiation of pre-cracked rock plate during fracture[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2016, 45(3): 440-446. (in Chinese))
- [12] 吕岗岗,沈荣喜,邱黎明,等. 矿井底板突水过程声电信号变化特征实验研究[J]. 工矿自动化, 2015, 41(10): 16-19. (Lü Ganggang, Shen Rongxi, Qiu Lingming, et al. Experimental research of variation characteristic of electromagnetic radiation, acoustic emission and surface electric potential during water inrush in mine floor[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(10): 16-19. (in Chinese))