

王海帆,赵伏军,李玉,等. 静力侵入岩石裂纹扩展及声发射特征[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2019, 34(3): 18-24. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.03.003

Wang H F, Zhao F J, Li Y, et al. Crack Propagation and Acoustic Emission Characteristics of Statically Intruded Rocks [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(3): 18-24. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.03.003

静力侵入岩石裂纹扩展及声发射特征

王海帆¹, 赵伏军^{1*}, 李玉², 章思平¹, 刘永宏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. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为了研究刀具静力侵入岩石过程中裂纹扩展及声发射特征, 基于刀具侵入岩石断裂特征, 确定了声发射参数与刀具侵入岩石过程中径、侧向裂纹长度的关系式; 通过分析不同脆性岩石和裂纹长度对声发射信号的影响, 得到声发射参数随裂纹长度增加而增大, 不同岩石脆性程度对声发射参数随裂纹长度的变化曲线有很大影响, 是造成声发射曲线不同的根本原因. 选取不同脆性的水泥砂浆和花岗岩为研究对象, 在 RMT-150C 压力试验机上进行刀具侵入破岩试验. 结果表明: 高脆性花岗岩声发射计数率和能量率远大于低脆性水泥砂浆; 不同脆性岩石在刀具侵入作用下声发射特征曲线与侵入载荷-侵深曲线具有较好的一致性, 可以很好表征刀具侵入过程中岩石内部裂纹扩展和宏观破碎过程. 研究结果对于判断岩石材料破坏性质、深化岩石破碎机理及指导岩体稳定性监测有一定参考作用.

关键词: 刀具破岩; 声发射; 断裂形态; 裂纹扩展; 信号特征

中图分类号: TU452 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2019)03-0018-07

Crack Propagation and Acoustic Emission Characteristics of Statically Intruded Rocks

Wang Haifan¹, Zhao Fujun¹, Li Yu², Zhang Siping¹, Liu Yonghong¹

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

2. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to study the characteristics of crack propagation and acoustic emission during static penetration of rock, based on the fracture characteristics of rock under cutter, the relation between acoustic emission parameters and the length of the median, radial and lateral cracks during the penetration of the tool into the rock were determined. The effects of different brittle rocks and crack length on acoustic emission signals were analyzed. The obtained results show that the acoustic emission parameters increase with the increase of crack length, and the degree of brittleness of different rocks has a great influence on the variation curve of the acoustic emission parameters, which is the root cause of the acoustic emission curve. The cement mortar and granite with different brittleness are selected as the research object, and the rock breaking test is carried out on the RMT-150C pressure testing machine. The results show that the acoustic emission rate and energy ratio of high brittle granite are much larger than those of low brittle cement mortar. The acoustic emission characteristic curves of different brittle rock under tool invasion are in good agreement with the load-penetration curves and can

收稿日期: 2017-07-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474103)

* 通信作者, E-mail: zfjxxn@263.net

describe the crack propagation and the macroscopic fracture process in the process of tool penetration. The results are of certain reference function to judge the failure properties of rock materials, deepen the mechanism of rock fragmentation and guide the stability monitoring of rock mass.

Keywords: rock breaking tool; acoustic emission (AE); fracture pattern; crack propagation; signal characteristics

在机械破碎岩石过程中,侵入破岩作为岩石挖掘及机械破岩的基本形式,研究刀具侵入破碎岩石的基本规律对于提高机械破岩效率有着重要作用^[1-2].岩石受外载荷作用下产生变形以及破坏断裂主要与岩石内部裂纹萌生、扩展过程有关,而裂纹扩展的过程同时也是应力松弛并释放部分储存在岩石内部的能量的过程,这部分能量以弹性波的形式表现出来,产生声发射^[3-4].声发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.自声发射技术运用到岩石力学研究领域以来,学者们关于岩石受载荷作用下破碎过程中声发射信号展开了大量理论及实验研究,取得了丰硕的成果^[5-10].宋义敏等^[5]研究了岩石受载变形场演化过程中的变形局部化、裂纹扩展以及界面错动对声发射特征的影响;郝兵元等^[6]通过研究静态破碎裂纹扩展规律,有效地改善了高瓦斯矿井工作面强制放顶的安全生产环境;宿辉等^[7]采用颗粒流软件 PFC^{2D},在侧限压缩条件下对非均匀花岗岩进行声发射时空特征数值研究,结果表明围压对声发射的时序特征和相对平静期有很大影响,并验证了岩石破坏过程中存在损伤愈合过程;谭青^[8]等利用离散元方法模拟了盘形滚刀破岩过程,并得到了滚刀结构参数与岩石破碎特征的规律.然而,上述研究成果都是在普通压力试验机上选用标准压头进行的单轴或三轴压缩下岩石破裂实验和数值模拟试验获得的,很少有开展刀具静力侵入破碎岩石声发射的试验研究.因此,本文首先从理论上分析刀具侵入破岩过程中裂纹扩展与声发射参数之间的关系,然后开展刀具侵入破岩声发射特性试验研究,对于深入研究岩石破碎机理及指导岩体稳定性监测具有一定参考作用.

1 岩石声发射与裂纹扩展理论分析

1.1 刀具侵入断裂形态分析

刀具静力侵入脆性岩石,其裂纹扩展形式一般为中间、径向和侧向裂纹,并在刀具下方形成一个密实核^[11],如图1所示.中间裂纹在刀具加载阶段产生,在卸载时出现部分弹性恢复;侧向裂纹在卸载阶段产生并扩展;径向裂纹在加载或卸载期间均可产生,不论何时产生其裂纹都在卸载阶段继续扩展.岩石内任何一个裂纹的萌生、扩展、成核直至贯通的过程都是产生声发射的原因.

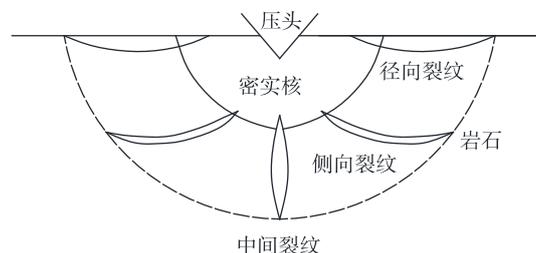


图1 静态侵入岩石断裂形态

1.2 侵入破岩声发射与裂纹扩展关系

1.2.1 声发射与径向裂纹扩展关系

基于弹脆性侵入产生的裂纹最终形态在刀具离开材料表面完成和压痕下不可逆变形区的形状近似半球形2个普遍实验现象,Marshall^[12-14]利用半理论半经验的方法得到了与径向裂纹扩展有关的应力强度因子:

$$K_r = \beta(EH)^{1/2}(\delta V)^{2/3}/C_r^{3/2}. \quad (1)$$

式中: β 为无量纲常数; E, H 分别为岩石的弹性模量和被侵入岩石材料的硬度; δV 为压痕体积; C_r 为径向

裂纹长度.

同时通过试验测定岩石的平面应变断裂韧度 K_c , 当 $K_r \geq K_c$ 时, 则会产生径向裂纹扩展.

$$P/C_r^{3/2} = K_c/x. \quad (2)$$

式中: $x = \beta(E/H)^{1/2}(a \cot \psi)^{2/3}/a_0$. 若把阈值应力看作径向裂纹开始扩展所对应的应力, 则初始径向裂纹扩展时可以表示为

$$\sigma_0/C_{r0}^{3/2} = K_c/x. \quad (3)$$

式中: ψ 为刀具特征角; a 为接触半径; a_0 为刀具几何常数.

根据脆性岩石中晶粒断裂产生的声发射, 可推得声发射总数及声发射率的表达式^[15]:

$$N = A_1 \left[\left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \left(\frac{\ln \sigma - \ln \sigma_0}{m} - \frac{1}{m^2} \right) + \frac{1}{m^2} \right]; \quad (4)$$

$$\frac{dN}{dt} = A_2 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{m-1} \ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right). \quad (5)$$

式中: $A_1 = ALBm$ 为常数; 在实验过程中, 一般加载速率不变, 即 $A_2 = \frac{A_1}{\sigma_0} \frac{d\sigma}{dt}$ 为常数.

将式(2)代入式(4)和式(5)中, 得到声发射总数及声发射率与径向裂纹长度的关系:

$$N = A_1 \left[\left(\frac{C_r}{C_{r0}} \right)^{3m/2} \left(\frac{\ln(C_r/C_{r0})^{3/2} - 1}{m} + \frac{1}{m^2} \right) + \frac{1}{m^2} \right]; \quad (6)$$

$$\frac{dN}{dt} = A_2 \left(\frac{C_r}{C_{r0}} \right)^{3/2(m-1)} \ln \left(\frac{C_r}{C_{r0}} \right)^{3/2}. \quad (7)$$

式(6)和式(7)为刀具侵入破岩声发射参数与径向裂纹扩展的关系式. 可以看出刀具侵入破岩声发射与径向裂纹长度和岩石材料的脆性程度等有关.

1.2.2 声发射与侧向裂纹扩展关系

试验表明^[14]侧向裂纹是在刀具卸载时扩展的, 因而残余应力起主要作用. 侧向裂纹在侵入破碎坑和磨损、腐蚀坑的形成方面具有重要作用. 得到平衡状态下侧向裂纹长度 C_L 与侵入载荷 P 的关系为

$$C_L = C_L^* [1 - (P_{L0}/P)^{1/4}]^{1/2}. \quad (8)$$

式中: P_{L0} 为侧向裂纹扩展的门槛载荷值, 其值为

$$P_{L0} = (\xi_0/A^{1/2})(\cot \theta)^{-2/3}(K_c^4/H^3)(E/H). \quad (9)$$

当 $P \gg P_{L0}$ 时, 最大侧向裂纹长度为

$$C_L^* = \{ (\xi_L/A^{1/2})(\cot \theta)^{5/8} [(E/H)^{3/4}/K_c H^{1/4}] \}^{1/2} P_m^{5/8}. \quad (10)$$

式中: ξ_0, ξ_L 为无量纲常数, 与刀具和材料无关, 由实验标定法确定; A 是无量纲几何常数, 当 $C_L \gg C$ 时, $A = 3(1-\nu)/4\pi$, $C_L < C$ 时, $A = 3/4$.

将式(4)代入式(7)和式(8)中, 得到声发射总数及声发射率与侧向裂纹长度的关系:

$$N = A_1 \left[\left(1 - \left(\frac{C_L}{C_L^*} \right)^2 \right)^{-4m} \left(\frac{\ln \left(1 - \left(\frac{C_L}{C_L^*} \right)^2 \right)^{-4}}{m} - \frac{1}{m^2} \right) + \frac{1}{m^2} \right]; \quad (11)$$

$$\frac{dN}{dt} = A_2 \left(1 - \left(\frac{C_L}{C_L^*} \right)^2 \right)^{4(1-m)} \ln \left(1 - \left(\frac{C_L}{C_L^*} \right)^2 \right)^{-4}. \quad (12)$$

式(11)和式(12)为刀具侵入破岩声发射参数与侧向裂纹长度的关系式. 可以看出刀具侵入破岩声发射与侧向裂纹长度和岩石材料的脆性程度等有关.

利用 Matlab 软件分析不同脆性程度 m 对声发射与径向、侧向裂纹长度之间的关系, 得到刀具侵入破岩声发射参数与径向、侧向裂纹长度的关系曲线, 如图 2 和图 3 所示.

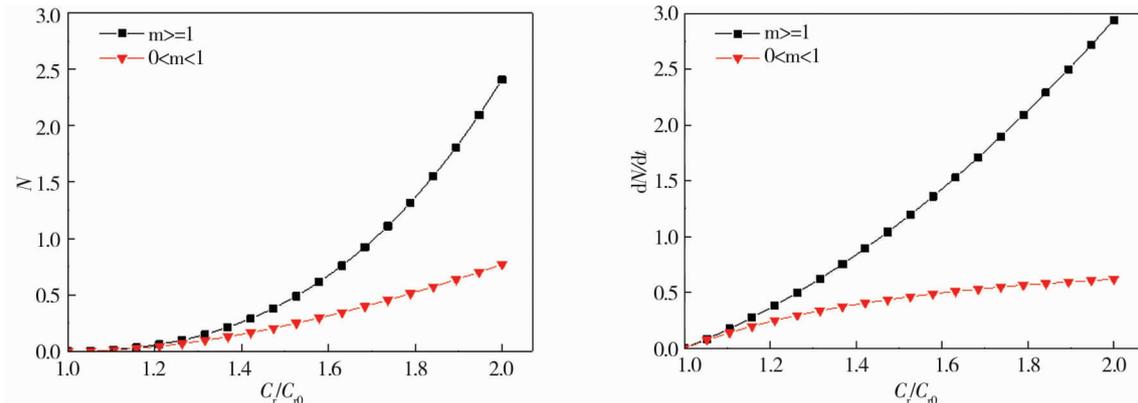


图2 声发射参数与径向裂纹的关系

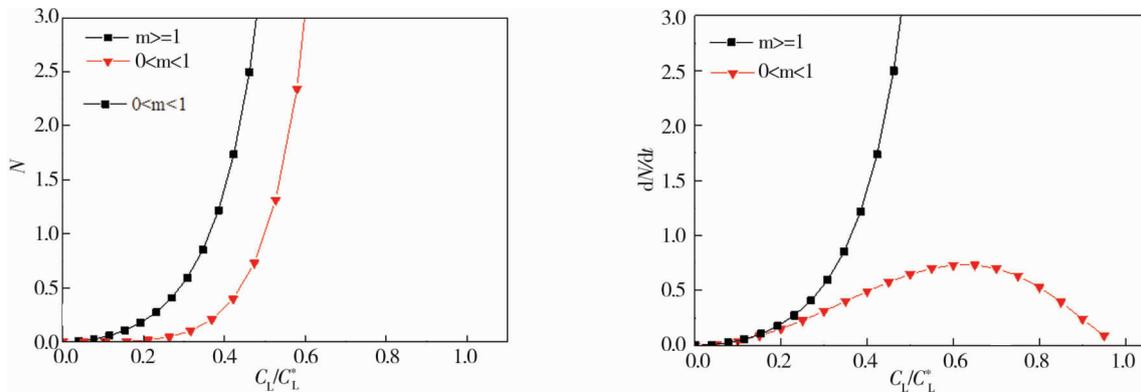


图3 声发射参数与侧向裂纹的关系

从图2和图3可以看出,刀具侵入破岩声发射总数和声发射率随岩石脆性程度的增大而增大,侧向裂纹对声发射总数和声发射率的影响要大于径向裂纹;声发射总数和声发射率与径、侧向裂纹的关系,随岩石脆性程度不同而有所变化,当岩石脆性程度较小时,径、侧向裂纹的增加对声发射总数和声发射率的影响较小,其中随侧向裂纹增加会导致声发射率先增加后减小;而岩石脆性程度越大,即岩石刚度越大时,声发射总数和声发射率随径、侧向裂纹增加的速率更快,说明了岩石脆性程度不同是造成声发射曲线形式不同的根本原因.因此,研究刀具侵入破岩声发射参数曲线特性,对于判断岩石材料破坏性质和指导岩体稳定性监测有一定参考作用.

2 刀具破岩声发射试验

2.1 试验系统

刀具破岩声发射实验系统由加载系统和声发射采集系统组成,如图4所示.采用RMT-150C压力试验机作为加载系统,以位移控制方式进行一字型刀具静力侵入岩石破碎实验,加载速率设定为0.001 mm/s.采用AEwin-USB型声发射检测系统采集加载全过程试样声发射信号,以保证包围住试样体积为原则,将8个传感器耦合在试样的表面,传感器与试样加载两端保留约20 mm的距离,以减小压力机对声发射信号的干扰,且每一面两个传感器对角布置.实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),阈值值设为40 dB,采样频率设定为5 Msps.实验选用的破岩刀具为高耐磨的硬质合金,对岩体性能适应性强;岩样为水泥砂浆和花岗岩,其中水泥砂浆预制成型,严格按照标准养护规定,养护龄期28 d以上,试样尺寸为150 mm×150 mm×150 mm的正方体,其试样基本力学参数如表1所示.

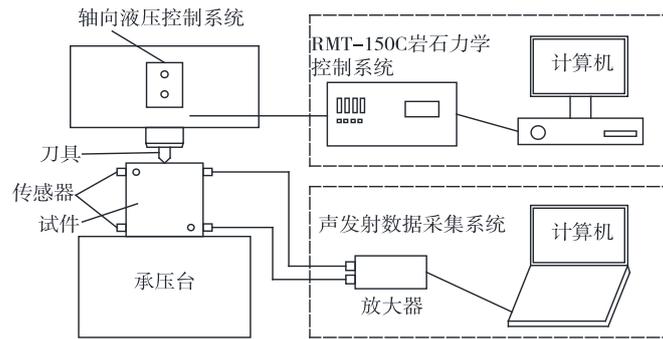


图4 侵入破岩声发射实验系统

表1 岩石试样基本力学参数

试样	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	体积密度/(kg/m ³)
水泥砂浆	31.60	2.48	13.74	2 236
花岗岩	107.16	7.76	21.46	2 678

2.2 试样载荷-侵深曲线分析

根据侵入载荷-侵深曲线可以表征刀具静力侵入载荷随时间的变化规律,及岩石内部裂纹扩展和宏观破坏的演化过程.由力-位移测试实验得到刀具静力侵入不同岩石试样载荷-侵深曲线如图5所示.对比分析不同脆性岩石在刀具静力侵入作用下的侵入载荷-侵深曲线可知,侵入载荷并不是简单的随侵深的增加而单调增加,而是呈跃进式增加.研究表明^[16],岩石性质尤其是脆塑性对压头侵入破岩过程中跃进式破碎现象的幅度和次数产生较大的影响.对于低强度和低脆性的水泥砂浆试样,在刀具静力侵入破岩过程中发生2次跃进式破碎后,还存在一定承载能力,具有塑性变形破坏特征;而对于高强度和高脆性的花岗岩试样,其静力侵入破岩过程中发生多次跃进式破碎,之后完全失去承载能力,呈现脆性断裂破坏特征.

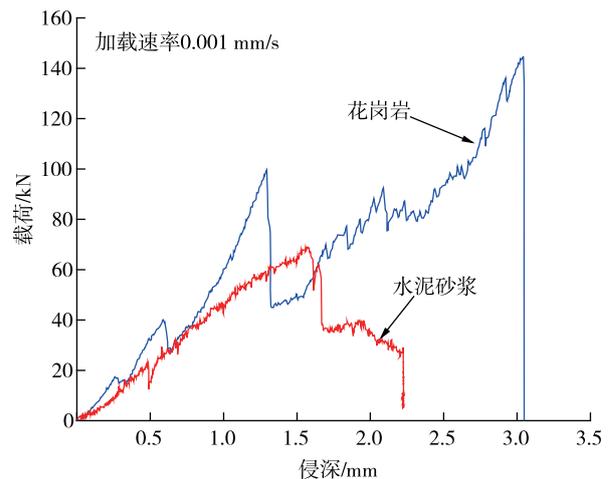


图5 不同岩石试样载荷-侵深曲线

2.3 刀具侵入破岩声发射特征分析

刀具侵入破岩声发射与岩石裂纹扩展关系理论分析表明,声发射活动能很好表征岩石内部裂纹扩展情况,声发射信号越丰富,岩石内部裂纹扩展越剧烈,其裂纹长度和隙宽会急剧增加.通过分析岩石破碎过程中声发射特征,可以推断岩石内部裂纹扩展情况,反映其破坏过程和破坏机制.在刀具静力侵入不同脆性岩石试样破碎过程中,由声发射系统测试得到不同试样载荷-时间-声发射关系曲线如图6和图7所示.从整体上来说,可以将刀具侵入岩石过程中声发射活动分为4个阶段^[16]:平静期(Ⅰ)、发展期(Ⅱ)、爆发期(Ⅲ)及回落期(Ⅳ).(1)平静期(Ⅰ):在刀具侵入岩石初期,刀具正下方岩石首先发生接触变形,岩石内部原生微裂隙被压实,此阶段声发射计数率和能量率很小几乎没有;(2)发展期(Ⅱ):随着刀具侵深增加,岩石内部微破裂活动不断加剧,原有微裂纹出现滑移和扩展,新生中间、径向裂纹不断出现,微破裂事件范围不断扩大,频度不断增加.随着微裂纹不断生成与扩展,声发射计数率和能量率逐渐增加,但总体来说并不剧烈;(3)爆发期(Ⅲ):当刀具侵深达到一定程度后,原来稳定扩展的中间径向、侧向裂纹迅速失稳扩展,其长度和隙宽急剧增加,微裂纹之间交汇贯通使得试样出现宏观破坏,具体表现为一条或者若干条

宏观主裂纹的出现.在此过程中声发射活动很剧烈,且声发射计数率和能量率会突增到最大值;(4)回落期(IV):当岩石失稳破坏后,试样内部应力场并没有停止变化,而是在寻求新的应力平衡状态^[17],在此过程中声发射信号很弱,直至试样彻底失去承载能力或者达到新的平衡状态,声发射活动停止.

由于不同岩石脆性程度、晶粒大小、晶粒形状及矿物颗粒组成和胶结情况等微观结构性性质不同,内部微孔洞、微裂纹、节理和层理等细观和宏观不连续结构面分布密度和分布形式具有显著差异,在宏观上表现为岩石强度和变形性质不同,其破坏过程中声发射特征也是有差异的.对于低脆性水泥砂浆试样侵入破岩过程中产生的声发射计数率和能量率小于高脆性花岗岩试样,且花岗岩试样破坏时产生的声发射峰值计数率和能量率大于水泥砂浆.低脆性水泥砂浆试样声发射特征曲线中“发展期”阶段时间较长,而高脆性花岗岩试样声发射特征曲线中“爆发期”阶段时间较长,说明了花岗岩在刀具侵入作用下裂纹萌生扩展及岩石破碎更加剧烈.水泥砂浆试样在刀具侵入作用下声发射计数率和能量率在峰值载荷附近出现峰值,而花岗岩试样在刀具侵入作用下声发射计数率和能量率出现多次峰值,与侵入载荷-侵深曲线中的跃进式破碎相对应.总的来说,不同脆性岩石在刀具侵入作用下声发射特征曲线与侵入载荷-侵深曲线具有较好的一致性.因此,可以利用声发射信号的变化来表征岩石破碎过程,对于深入了解岩石破碎机理具有重要意义.

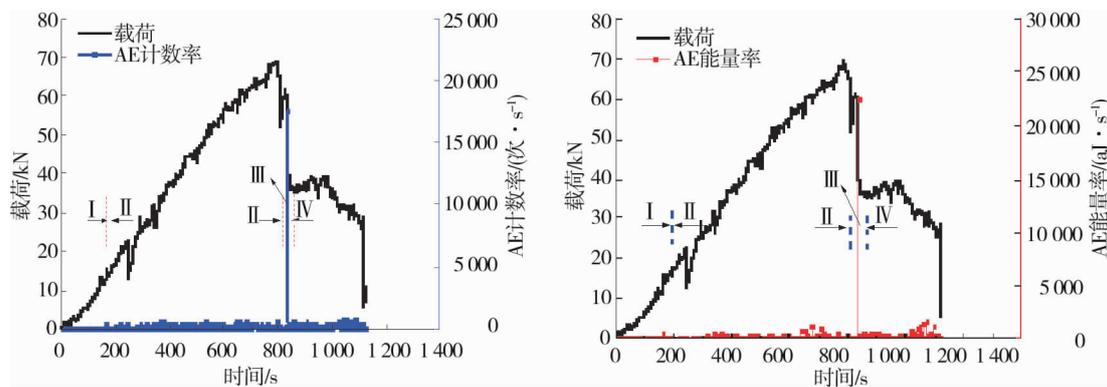


图6 刀具静力侵入水泥砂浆声发射参数曲线

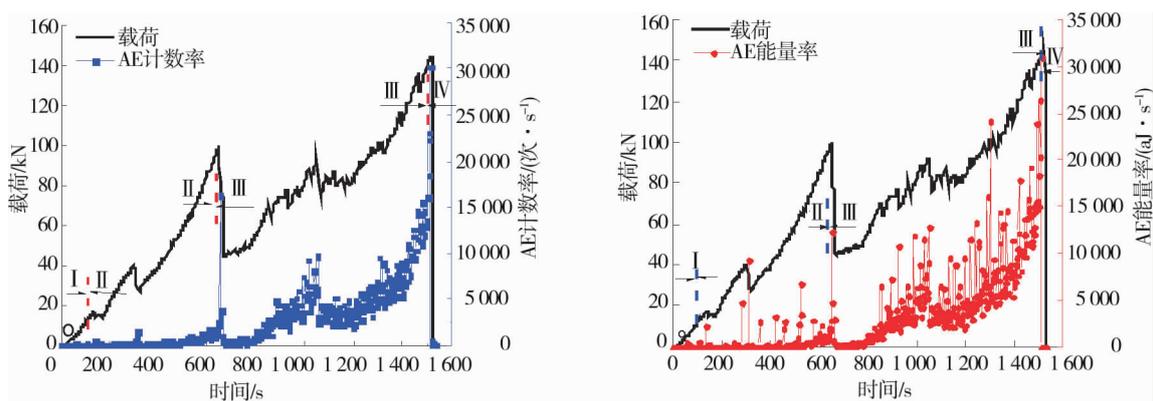


图7 刀具静力侵入花岗岩声发射参数曲线

3 结论

1) 通过理论分析得到刀具侵入破岩过程中声发射数和声发射率随径、侧向裂纹长度增加而增加,且岩石脆性程度越大,声发射数和声发射率增加的速率越快.因此,研究岩石破碎声发射参数曲线特性,对于判断岩石材料破坏性质和指导岩体稳定性监测有一定参考作用.

2) 刀具侵入破岩实验中侵入载荷不是简单的随侵深增加而增加,水泥砂浆试样侵入载荷-侵深曲线

跃进现象不明显,呈塑性破坏特征,花岗岩试样侵入载荷-侵深曲线跃进现象显著,呈脆性断裂特征。

3)不同脆性岩石在刀具侵入作用下声发射计数率和能量率最大值均出现在峰值载荷附近,而且声发射特征曲线与侵入载荷-侵深曲线具有较好的一致性.因此,可以利用声发射信号的变化来表征岩石破碎过程,对于深入研究岩石破碎机理具有重要意义。

参考文献:

- [1] Kahraman S, Fener M, Kozman E. Predicting the compressive and tensile strength of rocks from indentation hardness index [J]. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2012, 112 (5): 331-339.
- [2] Zhang H, Song H, Kang Y, et al. Experimental analysis on deformation evolution and crack propagation of rock under cyclic indentation [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2013, 46(5): 1053-1059.
- [3] Lokner D A. The role of acoustic emission in the study of rock failure [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining, Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1993, 30(7): 883-899.
- [4] 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.
- [5] 宋义敏, 邢同振, 赵同彬, 等. 岩石单轴压缩变形场演化的声发射特征研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(3): 534-542.
- [6] 郝兵元, 黄辉, 冯子军, 等. 单轴应力状态下石灰岩体静态破碎裂纹演化规律及应用 [J]. *煤炭学报*, 2014, 39(12): 2397-2404.
- [7] 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.
- [8] 谭青, 李建芳, 夏毅敏, 等. 盘形滚刀破岩过程的数值研究 [J]. *岩土力学*, 2013, 34(9): 2707-2714.
- [9] 李玉, 赵伏军, 陈珂, 等. 刀具破岩声发射能量理论分析及数值模拟 [J]. *矿业研究与开发*, 2017, 37(10): 62-66.
- [10] 李安强, 张茹, 艾婷, 等. 花岗岩单轴压缩全过程声发射时空演化行为及破坏前兆研究 [J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(s2): 306-311.
- [11] 赵伏军, 李夕兵, 冯涛, 等. 动静载荷耦合作用下岩石破碎理论分析及试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(8): 1315-1320.
- [12] Marshall D B. Geometrical effects in elastic/plastic indentation [J]. *J Amer Ceram Soc*, 1983, 66(8): 57-60.
- [13] Marshall D B, Lawn B R, Evans A G. Elastic/plastic indentation damage in ceramics: the lateral crack system [J]. *J Amer Ceram Soc*, 1982, 65(11): 561-566.
- [14] Marshall D B. Measurement of dynamic hardness by controlled sharp projectile impact effects in elastic/plastic indentation [J]. *Amer Ceram Soc*, 1984, 67(1): 580-585.
- [15] 秦四清, 李造鼎, 张倬元, 等. 岩石声发射技术概论 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1993.
- [16] 刘泉声, 潘玉丛, 刘建平, 等. 常截面滚刀贯入实验中岩石破坏力学行为分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(s2): 3516-3525.
- [17] 赵兴东, 唐春安, 李元辉, 等. 花岗岩破裂全过程的声发射特性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(s2): 3673-3678.