

不同加载速率下花岗岩破裂声发射试验研究

张孟举¹, 赵伏军^{1,2*}, 陈珂¹, 张柏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 岩石力学试验系统, 选用十字型钎头和一字型钎头对花岗岩进行了不同加载速率下单轴压入破碎试验, 采用多通道 AE 信号检测系统采集了花岗岩破坏的声发射信号。结果表明: 加载速率对受载岩石内部声发射活动有较大影响, 岩石声发射累积能量及声发射振铃计数均随加载速率的增加而增加, 到达一定程度增加幅度下降; 十字型钎头与一字型钎头相比, 岩石破碎声发射活动更加活跃, 释放的声发射能量更多, 破岩效果更加明显; 适当增加施加载荷的速率以及选择合适的钎头对脆性岩石破碎有较好的效果。

关键词: 花岗岩; 岩石破碎; 钎头; 加载速率; 破碎试验

中图分类号: TD315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2016)04-0008-06

On acoustic emission of granite's failure under different loading rate

ZHANG Mengju¹, ZHAO Fujun^{1,2}, CHEN Ke¹, ZHANG Bai¹

(1. School of Resource, 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: Using the RMT-150c rock mechanics test system, this paper selects the cross-shaped and bar-shaped drill bits and carries out the axial compression test about the granite under different loading rates. It adopts the multi-channel AE signal detection system collecting the granite damage acoustic emission signal. Results show that the loading rate has a great influence on acoustic emission activities of rock, and the total acoustic emission energy and acoustic emission ringing in broken rock increases with the increasing loading rate, but the increasing amplitude declines when it reaches a certain degree; compared with bar shaped drill bit, the granite damage acoustic is more active when it is under cross-shaped drill bit, and the more the acoustic emission energy releases, the more obvious the rock broken effect is. Increasing the loading rate properly and selecting proper bits has good effects on the brittle rock's breaking.

Key words: granite; rock crushing; drill bit; loading rate; crushing test

岩石在刀具作用下从岩体上剥离、崩落是一个非常复杂的从微观损伤到宏观断裂的破碎过程。此过程随着刀具侵深的增加, 岩石内部缺陷产生变化, 颗粒间应力松弛并释放储存能, 其中声发射就是内部能量释放的表现形式之一^[1]。由于声发射技术具有其他试验方法无法监测得到岩石破裂过程中的能量信号特征这一显著优点, 因此越来越多的学者更为关注岩石声发射效应的研究^[2-6]。在实验方面, V. L. Shkuratnik 等^[7]通过开展三轴循环加、卸载试验, 研究了煤样在复杂应力过程中声发射的记忆效应; Mogi^[8]通过对岩石试样破裂的声发射特征试验研究, 得到典型岩石受载内部结构变化与声发射计数之间的对应关系; 日本学者茂木清夫^[9]进行了许多不同脆性岩石试样的拉伸破断试验, 结果表明岩石材料的均质度对声发射模

收稿日期: 2016-04-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474103); 湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ2070); 湖南省研究生科研创新项目(CX2015B508)

* 通信作者, E-mail: zfxn@263.net

式有很大的影响.国内学者赵东兴等^[10]应用声发射及其定位技术研究了单向加载条件下花岗岩试样破裂失稳过程声发射的演化过程;刘保县等^[11]对单轴压缩荷载作用下煤岩变形损伤及声发射特性进行了研究;唐书恒等^[12]进行了饱和含水煤岩单轴压缩破裂实验以及声发射测试;苏承东等^[13]在单三轴压缩下,对义马曹窑煤矿顶板砂岩进行了声发射实验,认为砂岩在失稳破坏过程中的声发射特性与加载方式有关;吴刚等^[14]通过在单轴压缩下实施的声发射测试,结合不同温度下砂岩的力学性质,通过声发射参数分析研究砂岩在不同受力阶段的声发射特点;吴贤振等^[15]通过对不同岩性的岩石进行单轴压缩声发射试验分析声发射参数与破坏过程载荷的变化关系.以上研究虽然采用了声发射等试验方法,但主要是围绕岩石力学试验机上的单、双轴与三轴压缩条件下破岩声发射整体变化特点展开的,而针对岩石在钎头集中载荷作用下破碎时声发射活动规律的研究较少,特别是对不同加载速率下岩石呈现出的裂纹扩展状态和声发射特征参数变化规律的试验研究则更少.因此本文对花岗岩进行了不同加载速率下单轴压入破碎试验,采用多通道 AE 信号检测系统采集并分析了钎头作用下岩石破坏的声发射信号,以期对丰富破岩机理、指导岩石破碎工程机械的设计与应用提供有益的参考.

1 试验装置及试验方法

1.1 试验装置

试验装置主要包括:RMT-150C 岩石力学试验系统,电脑可视化操作系统,AEwin-USB 型声发射检测系统等,试验钎头选用采掘工业凿岩钻井工程中常用的一字型 and 十字型 2 种型号的钎头.工作原理如图 1 所示.

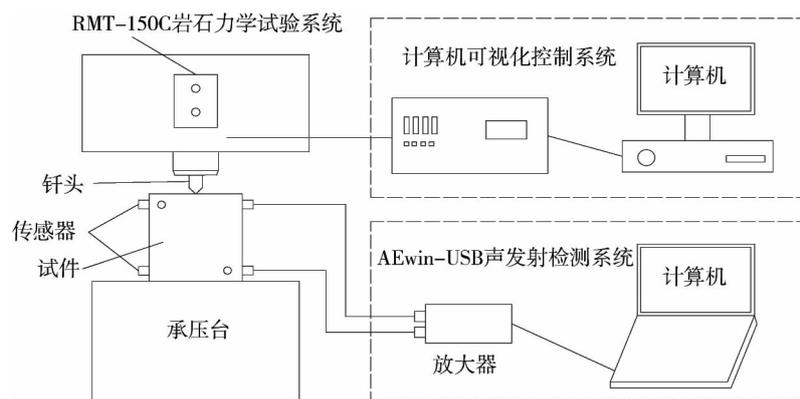


图 1 岩石声发射试验系统示意图

1.2 试验方法

选脆性花岗岩为试验岩石,花岗岩的物理力学参数如下:体积密度 2678 kg/m^3 ,抗压强度 107.16 MPa ,抗拉强度 7.76 MPa ,弹性模量 21.46 GPa ,泊松比 0.09 .岩样尺寸为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$.试件分 2 组:第一组编号为 HY-1, HY-2, HY-3, HY-4, HY-5, HY-6, 进行一字型钎头加载;第二组编号为 HS-1, HS-2, HS-3, HS-4, HS-5, HS-6, 进行十字型钎头加载.每组试样加载速率分别为 $0.002, 0.005, 0.010, 0.020, 0.050, 0.100 \text{ mm/s}$,每一加载试验重复 3 次.

本试验布置 8 个声发射传感器,任一传感器与试件两端保留约 20 mm 的间距,尽量减少试验机对监测信号的干扰,且每一面 2 个传感器对角布置,然后以黄油为耦合剂均匀适量涂抹于试件和传感器之间;测量室内外环境噪音及试验机预加载时本身因素干扰幅值范围在 $45 \sim 50 \text{ dB}$ 之间,故设定声发射仪阈值为 50 dB ,响应频率设定为 $20 \sim 1 \text{ MHz}$,采样率设定为 10 Msps ,选定全局波形采集;将试件放入承压台,启动高压,设定试验机系统参数,将钎头固定于试件规定位置,采用位移加载的方式对试样进行预加载;观测力学试验系统和声发射监测系统处于稳定后,同时点击试验机运行和声发射系统的采集,记录载荷-侵深及声发射数据;待试件破碎,停止应力数据和声发射数据采集,并记录存盘.

2 试验结果与分析

2.1 不同型号钎头破碎花岗岩声发射参数分析

试验将花岗岩试件分 2 组,依次进行了 6 种加载速率下的破碎声发射试验,得到试验结果,根据试验

数据作出不同加载速率条件下破碎整个过程的声发射能量率与振铃计数率随时间、侵入力变化特征曲线,下面对3种典型速率情况下(0.002,0.020,0.100 mm/s)的特征曲线进行分析,如图2~图4.

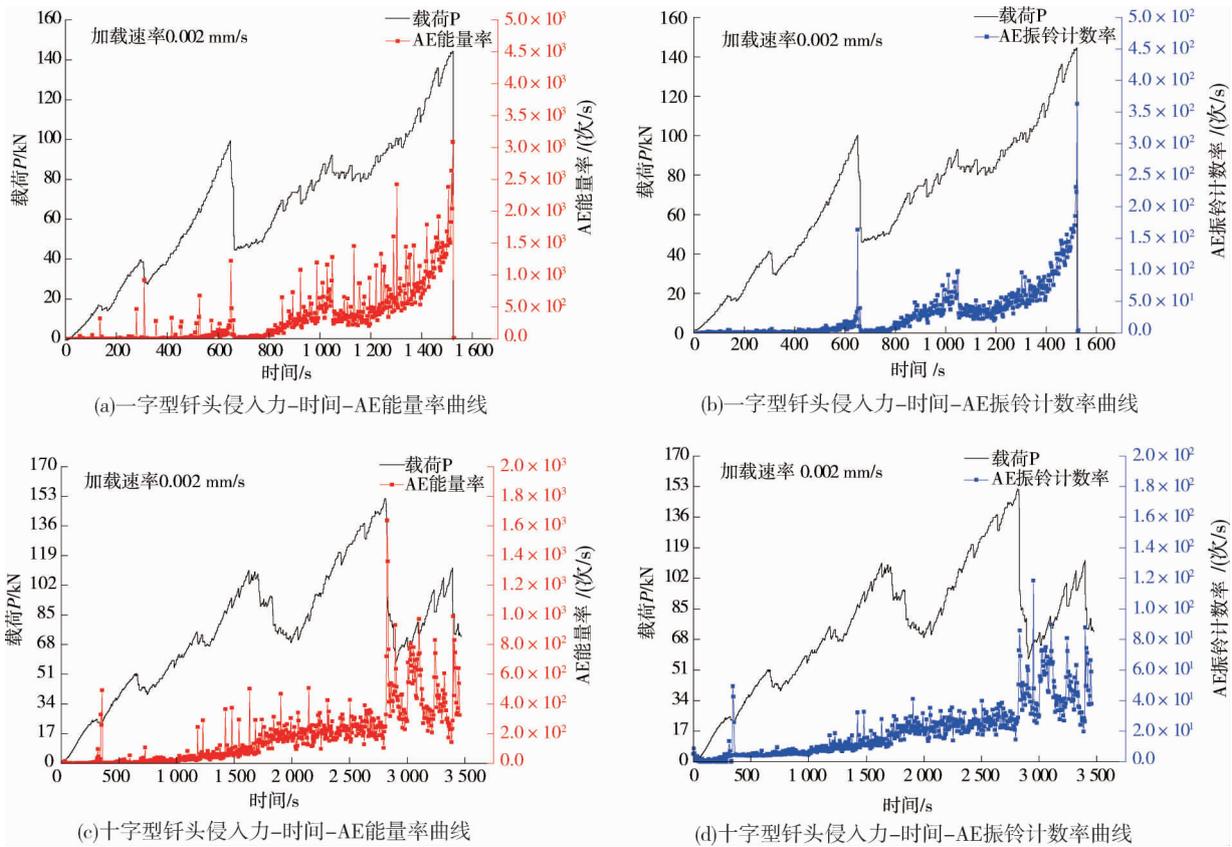


图2 0.002 mm/s速率下2种钎头侵入力-时间-声发射关系曲线

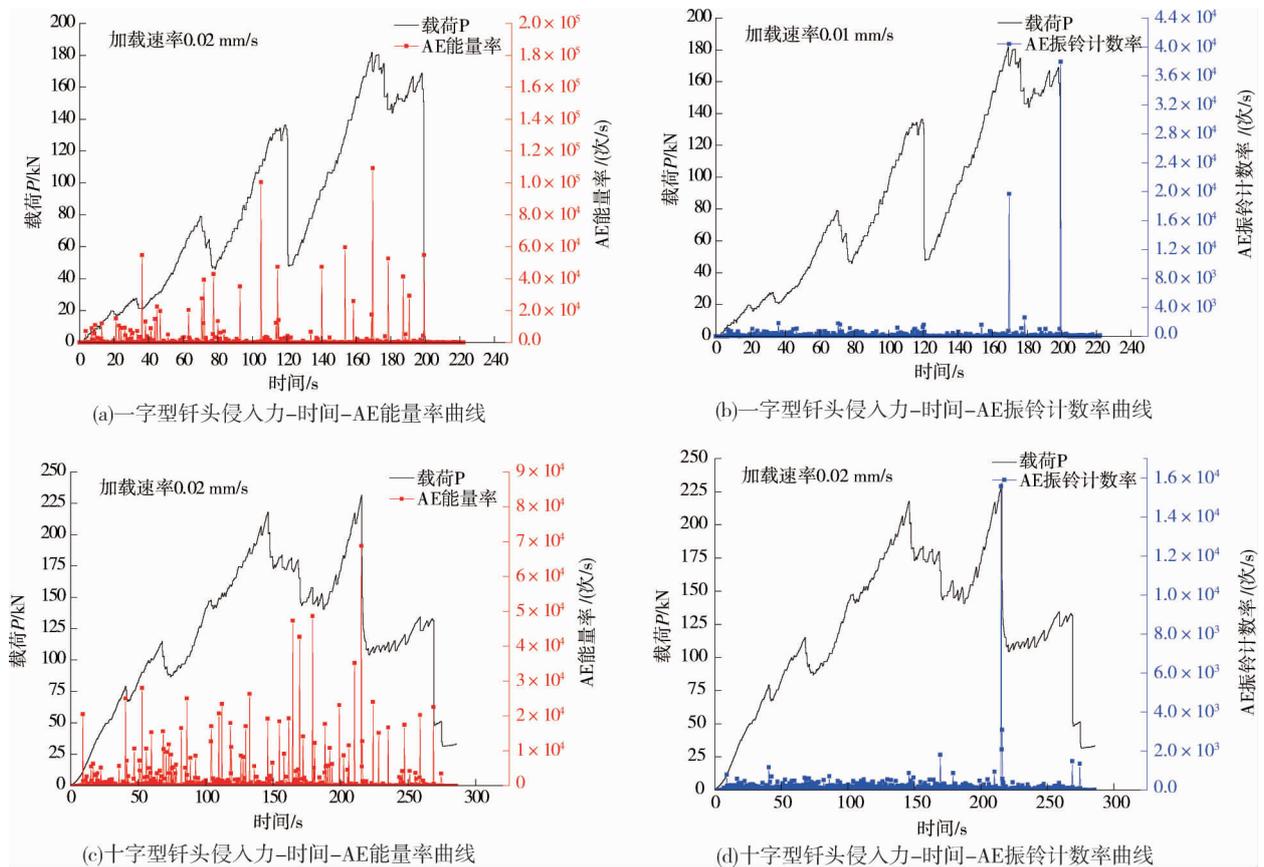


图3 0.020 mm/s速率下2种钎头侵入力-时间-声发射关系曲线

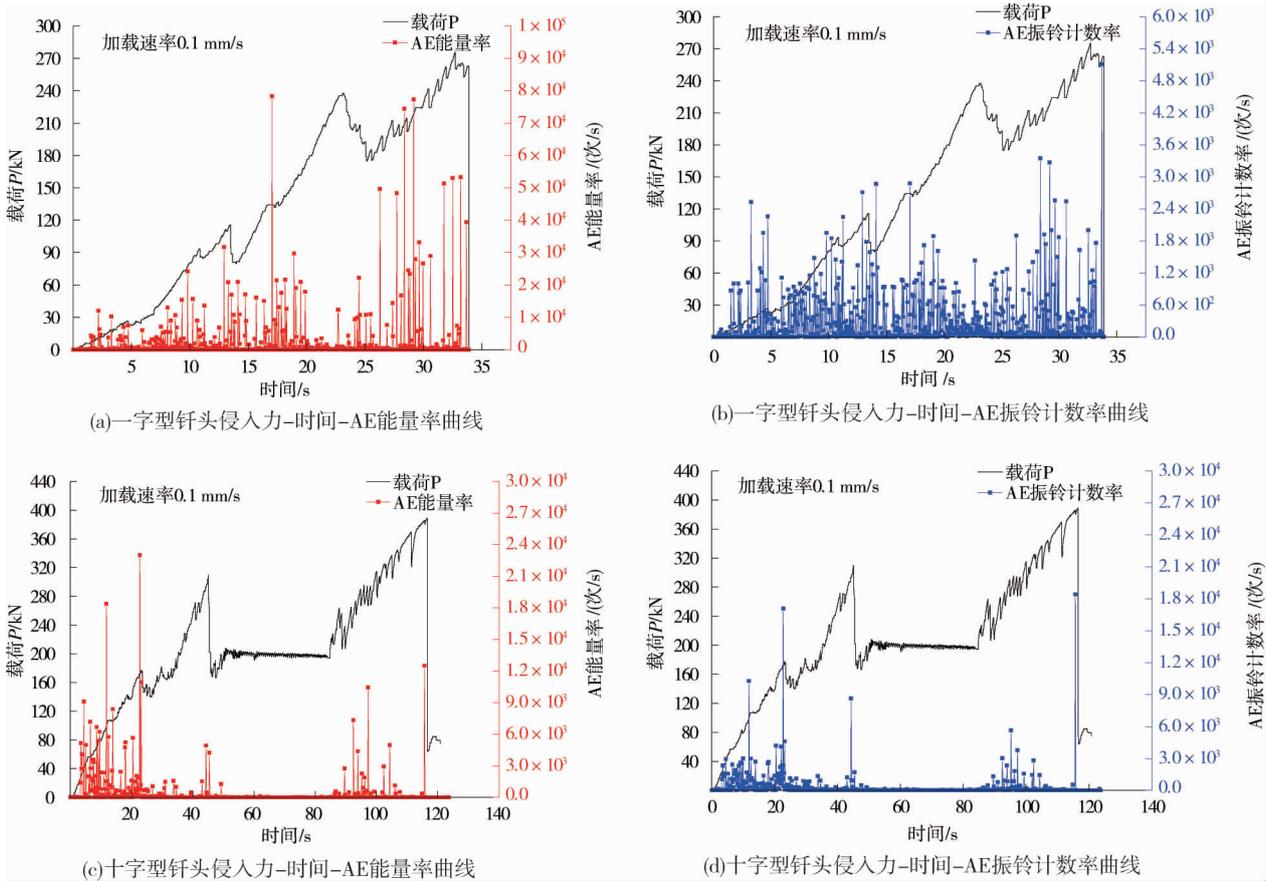


图 4 0.100 mm/s 速率下 2 种钎头侵入力-时间-声发射关系曲线

首先通过对比分析不同速率加载的 AE 特征曲线图可以发现,一字型钎头与十字型钎头对应的曲线之间存在共性,每一阶段施载情况的变化都有相对应的声发射信号产生.以图 2 为例阐述试件破碎整个过程中对应声发射变化特征,当钎头作用试件达到载荷强度的 12%,出现 1 次小的跃进现象,对应声发射能量达到第一次小的峰值(图 2a,图 2c),声发射振铃计数也对应 1 个小的激增(图 2b,图 2d).当达到载荷强度的 28%,再次发生相比上一次更大的跃进,同样对应的声发射能量值和声发射振铃计数达到的新阶段的最大值,之后每当发生跃进现象(如载荷强度 55%,60%和 71%),都会重复出现上述情况,声发射能量和振铃计数都会有激增,试件最终破碎时,声发射能量率及声发射振铃计数率达到了峰值.

对比一字型与十字型钎头对应曲线发现,在钎头侵入花岗岩初期,随着侵入力的增加,声发射率呈增大的趋势,声发射产生的密度也越来越大.加载过程的中后期,侵入力开始出现上下浮动甚至急剧的下降,声发射能量和声发射振铃计数突增,体现了钎头破碎脆性岩石“阶跃型”的特点.低速率下,十字型钎头声发射能量始终处在一个较高的水平,钎头侵入花岗岩初期声发射参数较大,声发射活动也比较频繁,内部裂纹萌生扩展的更加剧烈.高速率下的十字型钎头作用花岗岩主要体现在加载的上半期,此过程伴有清脆的劈裂声,当发生较大跃进时会出现较大的爆裂声.

2.2 加载速率对声发射特征的影响分析

运用 ORGLAB 数据分析软件对不同加载速率下的钎头破岩侵入力及声发射累积释放能量和声发射振铃计数进行数据拟合,并对所得加载速率对三者影响的拟合曲线进行分析.拟合曲线如图 5 所示.其中表 1 为 2 种钎头不同加载速率下的试验数据.

由图 5 可知,所得拟合函数其相关系数 R^2 均在 0.95 以上,拟合精度较高.从上图各拟合曲线可以看出,破岩侵入力随加载速率的增加而线性增加,十字型钎头作用花岗岩破碎所需侵入力较一字型大.在一定速率范围内,岩石声发射累积能量及声发射振铃计数均随加载速率的增加而增加.同样情况下十字型钎头作用花岗岩产生声发射事件总数、释放的声发射能量比一字型要多,且破碎过程声发射活动也较一字型丰富.由拟合曲线可以看出,加载速率到达一定程度后,两钎头下试件产生的 AE 累积释放能量与 AE 振铃

计数增加幅度下降.

表1 不同加载速率下破岩侵入力、AE 累积能量及 AE 振铃计数统计数据

编号	加载速率/(mm/s)	侵入力/kN	AE 累积能量次数	AE 振铃计数
HY-1	0.002	144.46	193 488	17 346
HY-2	0.005	154.04	240 993	42 326
HY-3	0.010	174.04	859 946	108 384
HY-4	0.020	181.66	1 269 883	147 625
HY-5	0.050	210.91	1 679 139	199 112
HY-6	0.100	275.25	1 783 240	237 390
HS-1	0.002	151.56	121 727	14 249
HS-2	0.005	170.24	241 431	58 546
HS-3	0.010	207.66	520 301	112 805
HS-4	0.020	231.46	1 350 125	130 746
HS-5	0.050	303.80	1 939 395	165 793
HS-6	0.100	388.82	2 751 080	224 462

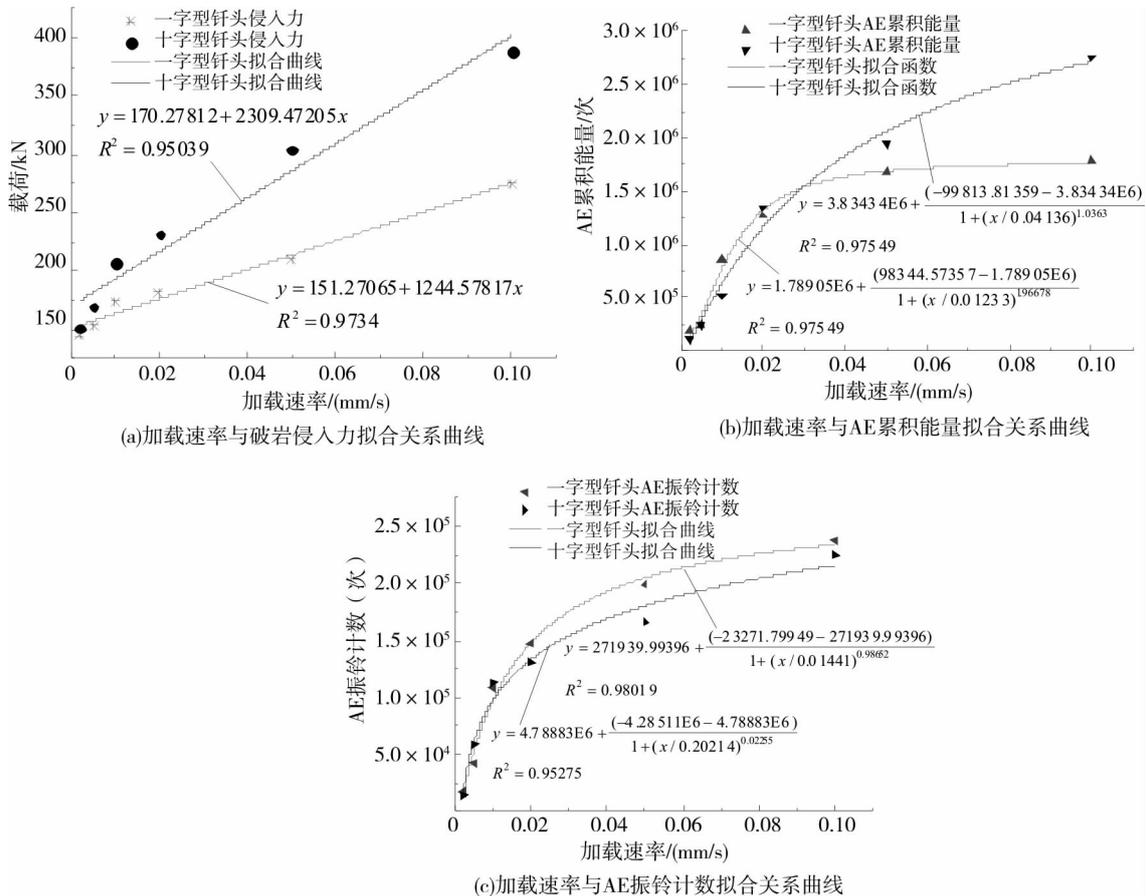


图5 加载速率与破岩侵入力、AE 累积能量及 AE 振铃计数拟合关系曲线

3 结论

1) 不同钎头破碎岩石所产生声发射特征不尽相同, 每当侵入载荷出现波动, 对应声发射信号也出现不稳定现象, 相对而言十字型钎头下较一字型钎头释放更多声发射能量, 发生跃进时这种情况更加明显, 十字型钎头更有利于岩石内部裂隙的扩展.

2) 钎头每发生一次跃进, 就伴有大块或片状岩石颗粒崩离试件, 形成类似钎头状的椭圆形破碎坑, 在较大加载速率下, 钎头下方试件受载中心区域更容易产生微裂纹并持续快速发展.

3) 钎头破岩载荷随加载速率的增加而增加, 十字型钎头下花岗岩产生声发射事件总数比一字型多,

且破碎过程声发射活动也较一字型丰富,随着加载速率的增大,两钎头下试件产生的 AE 累积释放能量与 AE 振铃计数均趋于平缓.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 吕森鹏,陈卫忠,贾善坡,等.脆性岩石破坏试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(s1):2772-2777.
- [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 Mech Rock Engn, 2005, 38(1): 1-19.
- [4] 李元辉,刘建坡,赵兴东,等.岩石破裂过程中的声发射 b 值及分形特征研究[J].岩土力学,2009,30(9):2559-2563.
- [5] Frid V. Calculation of electromagnetic radiation criterion for rock burst hazard forecast in coal mines[J]. Pure and Applied Geophysics, 2001, 158: 931-944.
- [6] 余斐.单轴压缩条件下岩石的声发射试验研究[D].北京:中国地质大学(北京),2012.
- [7] 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.
- [8] Mogi K. Study of elastic cracks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relations to earthquake phenomena[J]. Bulletin of the Earthquake Research Institute, 1962,40(1):125-173.
- [9] 胜山邦久.声发射(AE)技术的应用[M].冯夏庭,译.北京:冶金工业出版社,1996.
- [10] 赵兴东,李元辉,袁瑞甫,等.基于声发射定位的岩石裂纹动态演化过程研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(5):944-950.
- [11] 刘保县,黄敬林,王泽云,等.单轴压缩煤岩损伤演化及声发射特性研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(s1):3233-3238.
- [12] 唐书恒,颜志丰,朱宝存,等.饱和含水煤岩单轴压缩条件下的声发射特征[J].煤炭学报,2010,35(1):37-41.
- [13] 苏承东,翟新献,李宝富,等.砂岩单三轴压缩过程中声发射特征的试验研究[J].采矿与安全工程学报,2011,28(2):225-230.
- [14] 吴刚,王德咏,翟松韬.单轴压缩下高温后砂岩的声发射特征[J].岩土力学,2012,33(11):3237-3242.
- [15] 吴贤振,刘祥鑫,梁正召,等.不同岩石破裂全过程的声发射序列分形特征试验研究[J].岩土力学,2012,33(12):3561-3569.