

文章编号:1000-5013(2015)06-0615-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.06.0615

花岗石锯切过程声发射信号特征的实验

张美琴¹, 高振², 吴海融², 李远², 黄国钦²

(1. 厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021)

摘要: 采用不同锯切参数对 G603, G657, G654 三种花岗石进行锯切实验, 监测锯切过程工件上声发射信号和锯机主轴功率消耗, 并以声发射均方值(AE_{RMS})为特征值对实验结果进行分析. 结果表明: 锯切过程中, AE_{RMS}随着锯切深度和进给速度的增大而增大, 随着锯片线速度的增大而减小; 与锯切功率具有良好的线性正相关对应关系; 不同花岗石锯切时, AE_{RMS}随锯切参数的变化趋势一致, 但幅值存在明显差异, 花岗石的抗压强度越高, AE_{RMS}值越大.

关键词: 花岗石; 锯切; 声发射; 锯切功率; 抗压强度

中图分类号: TG 580.6; TG 74

文献标志码: A

金刚石圆锯片锯切是石材行业主导加工方式之一. 受岩石的高硬度、非均质、解离面及缺陷丰富等天然属性影响, 如何控制锯切过程和正确判断岩石可加工性一直都是业界的难题. 尽管以往学者已对上述问题展开大量工作并取得一定研究成果, 但主要依赖于锯切力和功率这两个过程量^[1-2]. 声发射(acoustic emission, AE)是材料或构件在受力过程中产生变形或裂纹时, 以弹性波形式释放出应变能的现象, 一直以来都是研究岩石破碎失效过程的一个重要手段^[3]. 锯切过程是岩石在大量磨粒磨削作用下, 不断破碎失效的过程, 必然会伴有丰富的声发射信号. 因此, 国内外学者很早就尝试将 AE 技术应用于岩石锯切过程的研究. 马春孝等^[4]通过单颗磨粒划擦岩石, 发现声发射幅值波形和力波形的变化趋势有较好的一致性. 王成勇^[5]研究了单颗金刚石磨粒划擦岩石的 AE 信号特征, 发现磨粒刻划不同岩相组织时, 声发射均分根值(AE_{RMS})差异较大, 与岩石可加工性存在某种对应关系. Meding^[6]指出圆锯片锯切岩石时, 锯切加工性越差, AE_{RMS}值越大, 但没有指出其与常用于评判岩石可加工性力学指标的关联性. 在加工过程监控上, 胡映宁等^[7]将 AE 应用于锯切混凝土监测研究, 但在花岗石锯切监控上却鲜有报道. 随着花岗石超薄件、机床结构件等高附加值产品应用的日益增多, 采用 AE 技术监控锯切过程倍受业界关注. 本文通过对 3 种花岗石进行变参数锯切, 研究锯切过程 AE_{RMS}随锯切参数的变化规律, 初步分析其与锯切功率及岩石材料属性的对应关系.

1 实验方法

1.1 条件及方案

锯切测试系统原理, 如图 1 所示. 锯切实验在 QHD-500 型高速大切深数控桥式锯切平台(最高转速为 5 000 r · min⁻¹)上进行, 冷却液采用自来水. 所用金刚石圆锯片的技术参数: 直径为 500 mm, 钴基胎体, 磨粒粒度为 US 40/50 目, 体积分数为 30%, 结块尺寸(长×高×宽)40 mm×5.0 mm×3.8 mm. 锯切参数组合, 如表 1 所示. 表 1 中: v_s 为线速度; v_f 为进给速度; a_p 为单次切深. 每种实验参数重复进

收稿日期: 2015-07-19

通信作者: 黄国钦(1981-), 男, 副教授, 博士, 主要从事硬脆材料高效加工及超硬材料工具制备技术的研究. E-mail: smarthgq@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAF13B04); 国家自然科学基金资助项目(51175194); 福建省教育厅 A 类科技项目(JA13019); 福建省厦门市科技计划指导性项目(3502Z20077003)

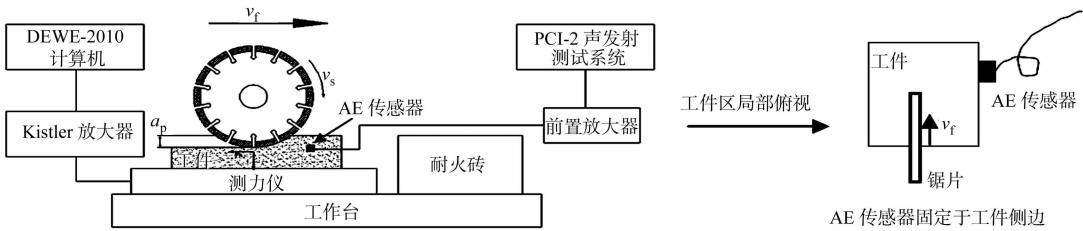


图 1 锯切测试系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of sawing measurement system

行 5 次后取平均值,以提高实验数据的可靠性. 为了保证锯片节块工作状态一致,每次锯切行程后都用耐火砖对锯片进行修整,具体放置的位置,如图 1 所示.

采用 DEWE-2010 型信号采集分析仪采集主轴电机功率信号,监控加工中锯切弧区功率消耗,采样频率为 1 kHz. 将 ISR50-AA15 型声发射信号传感器(美国物理声学

公司)固定在工件侧边(图 1),采用 PCI-2 型声发射信号测试分析仪(美国物理声学公司)对信号进行实时采集和分析. 由于岩石的固有频率一般在 0~200 kHz 之间,故设声发射信号采样频率为 1 MHz. 实验中选用的 3 种花岗岩的主要矿物成分及机械性能指标,如表 2 所示. 表 2 中: $w_{\text{石英}}$, $w_{\text{正长石}}$, $w_{\text{斜长石}}$ 分别为石英、正长石、斜长石的体积分数; ρ 为密度;HS 为肖氏硬度; σ_{bb} 为抗弯强度; σ_{bc} 为抗压强度.

表 2 花岗岩主要矿物成分及机械性能指标

Tab. 2 Main mineral compositions and mechanical properties of granites

石材代号	$w_{\text{石英}}/\%$	$w_{\text{正长石}}/\%$	$w_{\text{斜长石}}/\%$	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	HS	σ_{bb}/MPa	σ_{bc}/MPa	结晶颗粒尺寸
G654	35	10	55	2.80	61.0	26	219	细
G603	25	5	60	2.70	89.1	17	185	中
G657	35	35	25	2.65	65.3	15	136	中粗

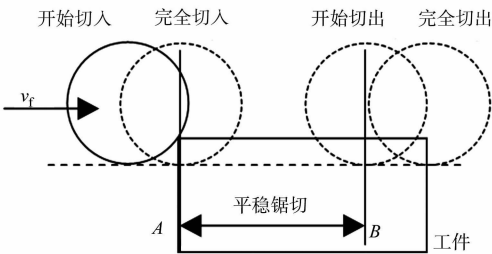
1.2 声发射信号处理

根据声发射信号在时间上的持续性,可分为突发型和连续型^[3]. 由于锯切过程是众多磨粒相互交替连续不断地对工件进行微观切削,以达到宏观上的材料去除,期间有大量的声发射事件同时发生,在时间上不可分辨. 因此,采用连续型声发射信号分法进行分析,即以声发射信号均方根值(AE_{RMS} , 通常也称声发射有效值)衡量锯切过程声发射信号特征的变化. 声发射信号的 AE_{RMS} 表达式为

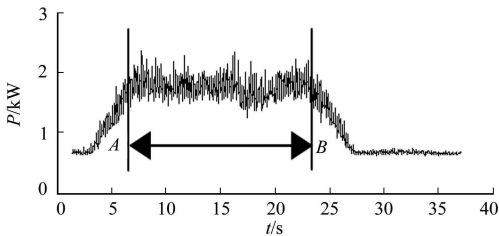
$$AE_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} u_{AE}^2 d\tau}.$$
 (1)

式(1)中: u_{AE} 为采集的声发射电压值, $d\tau$ 为采样时间.

一金刚石圆锯片切入切出工件完整过程中,其锯切功率(P)、声发射信号电压值(u_{AE})和 AE_{RMS} ,如图 2 所示. 由图 2 可知:在锯片切入、平稳锯切和切出工件 3 个阶段中, AE_{RMS} 和功率信号都随之呈现显著规律性变化;锯片进入 A-B 锯切阶段,由于锯片与工件接触弧长不变,处于稳定锯切阶段^[2],因此, AE_{RMS} 和功率信号也都进入相对稳定阶段. 为了便于研究,文中取平稳锯切阶段的 u_{AE} 和功率信号进行分析,即图上的 A-B 区间信号.



(a) 锯切过程锯片与工件相对位置示意



(b) 锯切功率信号图

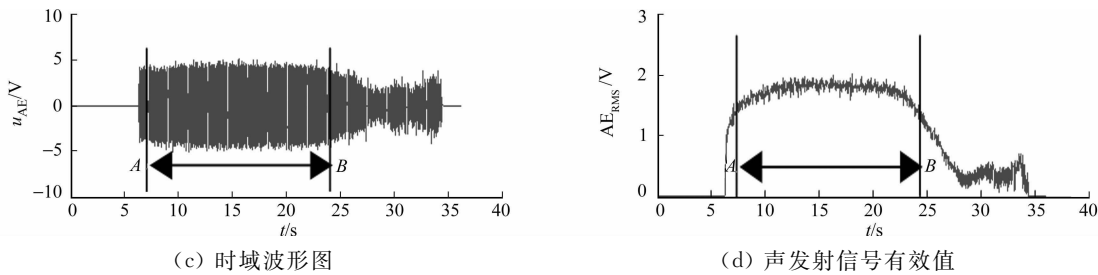


图 2 锯切切入切出过程的声发射信号

Fig. 2 AE signals collected in the whole sawing-in and sawing-out process

2 实验结果及分析

2.1 AE_{RMS} 随锯切参数的变化

锯切平稳过程中, AE_{RMS} 随锯切工艺参数的变化趋势, 如图 3 所示. 图 3 中: a_p 为锯切深度; v_f 为进给速度; v_s 为锯切线速度. 由图 3 可知: 随着锯切深度增大, AE_{RMS} 明显随之增大; AE_{RMS} 随着进给速度的增大而增大; AE_{RMS} 是随着锯切线速度增大呈缓慢减小的趋势.

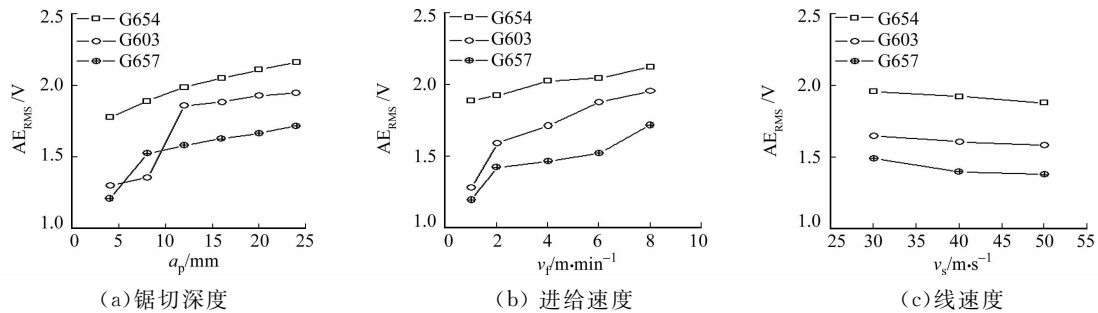


图 3 AE_{RMS} 随锯切工艺参数的变化趋势

Fig. 3 Tendency of AE_{RMS} versus sawing parameters

锯片与工件之间的干涉运动是去除工件材料的前提. 单颗磨粒进出锯切弧区的切削深度变化, 如图 4 所示. 图 4 中: 从弧区底部 A 点逐渐增大至顶部 B 点. 通常用单颗磨粒最大切削深度 h_{max} 衡量在锯切参数(线速度 v_s 、进给速度 v_f 和锯切深度 a_p)的控制下, 单颗磨粒对工件的刻划程度, 表达式^[1]为

$$h_{max} = \sqrt{\frac{3}{C_a \cdot \tan \theta_g} \left(\frac{v_f}{v_s} \right) \sqrt{\frac{a_p}{D_s}}} \quad (2)$$

式(2)中: θ 为弧区接触角; θ_g 是磨粒刃角的一半, 取 $\theta_g = 60^\circ$; D_s 为锯片直径; C_a 为锯片节块表面单位面积内动态参与切削的有效磨粒数.

文献[4-5]表明, 在单颗磨粒划擦方式下, 增大磨削深度(即增大 h_{max})时, AE_{RMS} 随之增大. 线速度固定时, 单位时间进入锯切弧区磨粒数不变. 由式(2)可知: 增大锯切深度和进给速度时, h_{max} 增大, AE_{RMS} 也随之增大. 从声发射定义方面也容易理解, 材料释放的声发射能量与材料应变率及体积均成正比关系^[8]. 线速度固定时, 材料应变率变化不大, 但是, 进给速度和锯切深度增大均会导致单位时间材料去除体积直接增加, 因此, AE_{RMS} 随之增大.

相比上述而言, 线速度的影响更为复杂. 从压痕理论看, 锯切过程磨粒对工作材料的作用实际上可视为一个移动的压缩行为. 当进给速度和锯切深度固定、单位时间内材料去除体积不变、提高线速度时, 磨粒移动速度加快, 材料应变率增大, 理论上声发射能量增强, AE_{RMS} 应该增大. 但实际上, 由于锯切过程花岗石主要以脆性去除方式去除, 如图 5 所示. 从单颗磨粒去除材料角度看, 提高线速度时, h_{max} 变小(式 3), 花岗石材料倾向微脆性去除趋势, 即大块体积破碎减小^[1,9]. 单轴抗压实验表明^[10], 与金属等材料不同, 受岩石天然属性及其组织构成影响, 花岗石内部存在大量解离面、空隙等缺陷, 压缩的前期(弹、

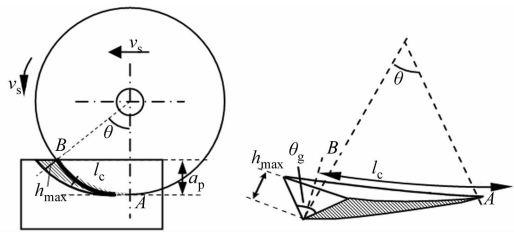


图 4 锯切弧区内单颗磨粒切削深度示意

Fig. 4 Cutting depth of a grit in cutting zone

塑变形过程)声发射事件很少,存在静默期,声发射主要集中在花岗石脆性碎裂瞬间释放.因此,随着 h_{\max} 减小,声发射事件及强度变小, AE_{RMS} 减小.文献[8]指出 h_{\max} 减小时,微细破碎增多, AE 事件率增大但幅值减小,总体上 AE_{RMS} 减小.可见,线速度提高时, AE_{RMS} 变化是材料应变率和 h_{\max} 影响的综合反映.从 AE_{RMS} 随锯切线速度增大而减小(图 3(c))的趋势看,花岗石锯切时, h_{\max} 的影响略占主导.

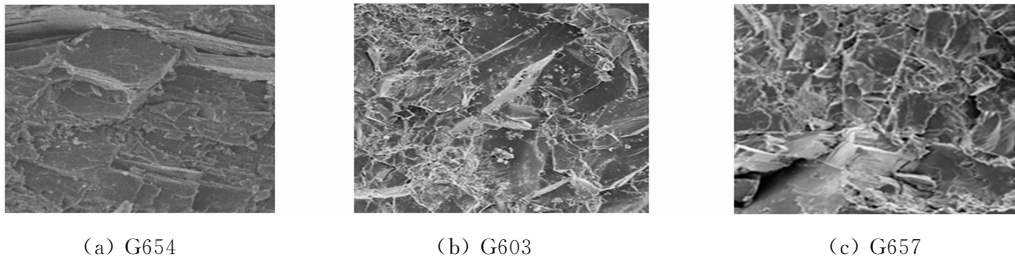


图 5 锯切加工面的 SEM 图
Fig. 5 SEM photographs of machined surface

2.2 AE_{RMS} 与锯切功率的对应关系

锯切功率是锯切弧区内磨粒滑擦耕型、去除工件、岩屑摩擦等因素复杂作用的综合反映,是目前业界用于监控锯切过程难易程度、锯片磨损程度的关键指标. AE_{RMS} 随锯切功率(P)的变化趋势,如图 6 所示.由图 6 可知: AE_{RMS} 与锯切功率两者间具有很好的线性正相关,这与 Tawakoli 等^[11]在磨削金属上的研究结果一致,即 AE_{RMS} 也可充分反映锯切过程的能量消耗.因此,实际生产中也可以采用监测锯切过程声发射信号对锯切过程进行控制.

2.3 AE_{RMS} 受材料特性的影响

AE_{RMS} 与花岗石抗压强度(σ_{bc})的关系,如图 7 所示.由图 3,6,7 可知:锯切不同花岗石时, AE_{RMS} 表现出来的变化规律基本一致,但数值上存在明显的差异,总体上是 $G654 > G603 > G657$,与这 3 种花岗石的抗压强度排序一致(表 2).

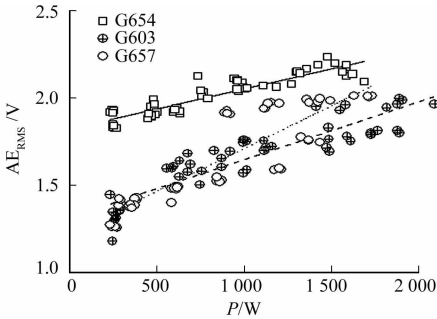


图 6 AE_{RMS} 与锯切功率的关系
Fig. 6 Relationship between AE_{RMS} and sawing power

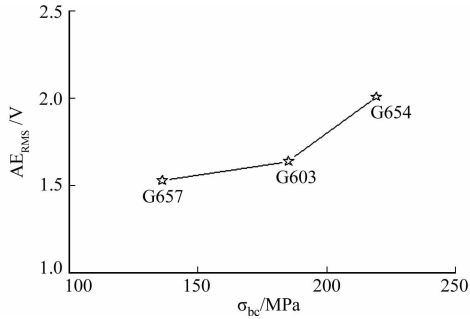


图 7 AE_{RMS} 与花岗石抗压强度的关系
Fig. 7 Relationship between AE_{RMS} and compressive strength of granite

花岗石是由火山爆发的熔岩在受到相当的压力的熔融状态下,隆起至地壳表层并慢慢冷却凝固结晶后形成的一种火成岩(构造岩),其岩相主要由石英、长石、云母及少量胶结物构成,呈粒状或似斑状结构,其中石英和长石是主要硬质相.G603,G654 和 G657 中所含石英和长石岩相总量比例相差不大,主要差异体现在结晶粒度上: $G654(\text{细粒}) < G603(\text{中等}) < G657(\text{中粗})$.花岗石颗粒越均匀细密,其间隙小,结合强度越好,综合机械性越优异,这从表 2 中密度、抗弯及抗压强度均可以看出.

对岩石断裂过程中声发射的研究表明,在微裂纹生成区, AE_{RMS} 幅值较低,主裂纹的失稳扩展时, AE_{RMS} 达到最高值,且与岩石构造有很大的关系^[12].压缩研究表明,花岗石晶粒越细越均匀,岩石构造致密度就越高,综合表现在其抗压强度越大,压缩失效瞬间的声发射强度越强,总体上 AE_{RMS} 随着抗压强度的增大而增大^[13].从试验结果不难看出,锯切过程同样也存在这样的规律,即花岗石抗压强度越高,锯切过程释放的 AE_{RMS} 也越大.从锯切过程看,弧区内众多磨粒对岩石的划擦过程,实际上是大量微裂纹生成和主裂纹失稳扩展同时并存,使材料以脆性方式去除(图 5).因而, AE_{RMS} 总体反映了弧区界面上工件材料裂纹形成与扩展的数量与难易程度,其值越大,难度越大.从 AE_{RMS} 看,3 种花岗石中,G657 的

可锯性最好, G654 最差, 这也与业界常用抗压强度判断石材可锯性的结果基本一致, 即通常花岗石的抗压强度越高, 其加工难度越大. 可见, 实际生产中可采用声发射进行花岗石可加工性的评判.

3 结束语

文中主要从时域上对锯切过程 AE_{RMS} 随锯切参数的变化规律进行实验研究, 并分析其与锯切功率和岩石抗压强度的对应关系. 后续工作将着重从频域角度对 AE 信号进行进一步分析.

参考文献:

[1] 李远. 花岗石超大切深锯切机理与技术研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2004: 4-12.

[2] 黄国钦, 徐西鹏. 基于锯切弧区切向力分布的功率消耗模型[J]. 机械工程学报, 2011, 47(21): 170-176.

[3] 刘国华. 声发射信号处理关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008: 20-28.

[4] 马孝春, 张大伦. 岩石切削中的声发射研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1996(15): 77-78.

[5] 王成勇. 单颗粒金刚石磨削花岗岩的声发射信号特征[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 1996(3): 2-7.

[6] MEDING M. Analysis of acoustic emission from single grit scoring[J]. Industrial Diamond Review, 1995, 6(2): 20-22.

[7] 胡映宁, 许振力, 胡珊珊, 等. 基于声发射技术金刚石组合圆锯片干切混凝土的切削状态研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2008(4): 28-34.

[8] 郭力. 工程陶瓷高效深切磨削加工中声发射的实验研究[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2008, 20(2): 78-84.

[9] KONSTANTY J. Theoretical analysis of stone sawing with diamonds[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 123(1): 146-154.

[10] LOCKNER D. The role of acoustic emission in the study of rock fracture[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1993, 3(7): 883-899.

[11] TAWAKOLI T. Developments in grinding process monitoring and evaluation of results[J]. International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems, 2008, 1(4): 307-320.

[12] HASHIDA T, THAKAHASHI H. Significance of AE crack monitoring in fracture toughness evaluation and non-linear rock fracture mechanics[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1993, 30(1): 47-60.

[13] MANTHEI G. Characterization of acoustic emission sources in a rock salt specimen under triaxial compression[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2005, 95(5): 1674-1700.

Experiment on the Characteristic of Acoustic Emission in Circular Sawing of Granite

ZHANG Meiqin¹, GAO Zhen², WU Hairong²,
LI Yuan², HUANG Guoqin²

(1. School of Mechanical and Automotive, Xiamen University of Technology, Xiamen 361021, China;
2. Institution of Manufacture Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Using different parameters, sawing experiments were carried out on three kinds of granites (G603, G654, G657), and acoustic emission (AE) and spindle power consumption were monitored during sawing processes. The experimental results were analyzed with the mean square value of AE (AE_{RMS}). The results show that AE_{RMS} increases with the increase of sawing depth and feeding speed, but decreases with the sawing speed, and has a good linear positive correlation relationship with sawing power. In sawing of different granites, AE_{RMS} tendencies with different sawing parameters are the same but there is obvious difference in amplitude. And the higher the compressive strength of granite is, the larger the value of AE_{RMS} becomes.

Keywords: granite; sawing; acoustic emission; sawing power; compressive strength