

文章编号:1000-2472(2007)11-0051-05

## 工程陶瓷高速深磨中声发射的实验研究\*

李 波<sup>1</sup>, 郭 力<sup>2†</sup>

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 湖南大学 机械与汽车工程学院, 湖南长沙 410082)

**摘 要:**建立了工程陶瓷高速深磨中声发射的实验系统, 自主开发了其中的声发射信号虚拟仪器采集系统. 对部分稳定氧化锆(PSZ)和氧化铝进行了高速深磨声发射的实验研究, 分析了磨削参数和工程陶瓷材料对声发射信号的影响. 研究了砂轮修整前后声发射信号的变化. 结果表明, 即使在砂轮超高速和大切深下, 声发射增加仍较小. 选择砂轮超高速、大切深和小的工作台速度对高效低成本磨削工程陶瓷是有利的. 运用声发射还可对砂轮磨损状态进行在线监测.

**关键词:**声发射; 高速深磨; 工程陶瓷; 信号处理; 监测

**中图分类号:**TQ164

**文献标识码:**A

## Experimental Study on the Acoustic Emission of High Speed Deep Grinding of Engineering Ceramics

LI Bo<sup>1</sup>, GUO Li<sup>2†</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China;

2. College of Mechanical and Automotive Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract:** An acoustic emission (AE) test rig with signal acquisition virtual instrument system has been developed for engineering ceramics high speed deep grinding. By using the AE test rig, the AE signals of the high speed deep grinding of partially stabilized zirconium (PSZ) and alumina were studied. And the changes of AE signals with different grinding parameters in the grinding of the PSZ and the alumina were analyzed. The AE signals were compared before and after the dressing of the grinding wheel. The results have indicated that the strength of AE increases slightly under super high wheel speed and large depth of cut. The AE effective value increases with the workpiece feedrate. It can be a good choice for grinding engineering ceramics in high efficiency and lower costs to use super high wheel speed, large depth of cut and relative small workpiece feedrate. The AE signal may also be used for the on-line monitoring of grinding wheel wear.

**Key words:** acoustic emission; high speed deep grinding; engineering ceramic; signal processing; monitoring.

工程陶瓷因具有耐高温、耐腐蚀、耐磨损、高强度和轻质量等显著特点, 最近二十多年来在航空航天、电子、机械等领域得到广泛应用. 磨削是工程陶瓷最常用的精密加工技术. 资料表明<sup>[1]</sup>: 磨削加工的费用占到了工程陶瓷制品总费用的 80%. 所以, 为了提高磨削加工的效率、降低加工成本, 采用高效

磨削加工陶瓷为大势所趋. 以砂轮超高速、大切深为标志的高速深磨<sup>[2]</sup>技术正在陶瓷加工领域迅猛发展. 工程陶瓷高速磨削过程的监测非常重要. 而声发射(acoustic emission, AE)技术作为一种在线智能无损监测方法, 自从 1984 年被引入磨削研究领域以来, 监测磨削质量、磨削过程等都取得了满意的效

\* 收稿日期: 2007-03-28  
基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(06JJ50088)  
作者简介: 李 波(1972-), 女, 湖南长沙人, 湖南大学教师  
† 通讯联系人, E-mail: guolihnu@hotmail.com

果<sup>[3-4]</sup>.文献[3]中研究了磨削过程中产生的各种声发射源,指出当砂轮与工件弹性接触、砂轮粘接剂破裂、砂轮磨粒崩碎、砂轮磨粒与工件摩擦、工件表面出现裂纹等均可发射出弹性波.这些因素和工件材料、磨削条件、砂轮表面的状态等因素都有着密切的关系.这就使得可以通过检测声发射信号的变化来对磨削状态进行判别.一般而言,声发射越强,变化越大,则对磨削质量的损害就越大,所以,应采取措施尽量降低磨削过程中的声发射值.但是,对于工程陶瓷高速深磨过程中声发射全面而又深入的实验研究,目前还没有文献报道;监测声发射信号源的信号特征的获取及声发射信号的处理方法是在线监测磨削加工的难点;声发射在磨削领域的应用仍处于实验研究阶段,离实际应用还有一定的距离.

本文建立了工程陶瓷高速深磨中声发射的实验系统.首次对部分稳定氧化锆(PSZ)和氧化铝两种典型的工程陶瓷进行了高速深磨声发射全面而又深入的实验研究,分析了磨削参数和工程陶瓷材料对声发射信号的影响.研究利用声发射技术对磨削接触、砂轮磨损等进行监测.分析了高速深磨中声发射信号的频谱分布范围,取得了有实用价值的成果.

## 1 实验设计

### 1.1 超高速磨削实验台

实验在一具有国际先进水平的数控超高速平面磨削实验台上进行.机床电主轴功率为40 kW,采用陶瓷轴承,转速为300~20 000 r/min,砂轮最高速度达400 m/s.机床采用西门子802D四轴数控系统,磨削时能实现自动磨削循环,自动补偿砂轮修整量,砂

轮有恒线速控制.工作台电机驱动功率5 kW.采用SBS4500砂轮动平衡系统对砂轮进行实时动平衡,以降低砂轮不平衡对工件磨削质量的影响<sup>[1]</sup>.

由于工程陶瓷材料属硬脆难加工材料,实验中采用树脂结合剂金刚石砂轮,砂轮参数是:外径348 mm,宽度6 mm,粒度120/140#,浓度100.该砂轮的修整,分为整形和修锐两个工序.实验时,采用80#碳化硅制动式修整器对砂轮进行修整.当修整至砂轮外圆跳动约为10 μm,再用200#氧化铝砂条对砂轮修锐.

本实验中采用物理机械性能相差较大的较易磨削的PSZ和较难磨削的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>两种典型工程陶瓷材料(都是常压烧结而成)进行磨削实验.PSZ试件的尺寸大小为50 mm×15 mm×10 mm,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>试件的尺寸大小为45 mm×20 mm×6.7 mm.磨削在PSZ工件50 mm×10 mm的平面内沿纵向(50 mm)进行;对氧化铝工件在45 mm×6.7 mm面沿45 mm方向磨削.材料的力学性能参数如表1所示.

实验中,磨削方式采用顺磨,磨削液为含亚硝酸钠的水基冷却液,供液压力为8 MPa.考虑到高速深磨工艺的特点,砂轮线速度选用40 m/s,90 m/s,120 m/s和160 m/s 4种速度;工作台速度为600 mm/min,1 200 mm/min,2 400 mm/min,3 600 mm/min,4 800 mm/min和6 000 mm/min;磨削深度为0.5 mm,0.8 mm,1.0 mm,1.5 mm,2.0 mm,2.5 mm.

总共进行了3轮实验,前2轮实验主要是PSZ的工艺实验和砂轮修整前后的对比实验.第3轮实验是Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的工艺实验.

表1 材料的力学性能参数

Tab.1 Material mechanics performance parameters

材料参数	试件规格 /mm <sup>3</sup>	晶粒尺寸 /μm	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	抗弯强度 /MPa	微观硬度 /MPa	断裂韧性 /(MPa·m <sup>1/2</sup> )	弹性模量 /GPa
99.5% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	45×20×6.7	2~5	3.9	250	1 559×9.8	4.99	320
PSZ	50×15×10	≤1	6	946	1 172×9.8	8.1	205

### 1.2 声发射(AE)实验系统

磨削过程产生的大量AE信号,传播到放在磨床工作台上的Kistler 8152B2压电AE传感器(其频率范围是100~900 kHz)并被接收,然后经过Kistler 5125B AE压电连接器(Gain=20 dB)的前置放大、带通滤波(其频率范围是50~1 000 kHz)和RMS(root-mean-square)转换,经过Kistler 5125B AE压电连接器得到两路信号:滤波后AE信号和经

过RMS转换后AE信号有效值,将它们输出到PCI6115采集卡.采集卡执行LabVIEW采集程序的指令进行采集(采样频率是5 MHz),并输入到计算机进行保存,等待后续的处理.

结合虚拟仪器开发平台LabVIEW,并根据高速深磨加工实际过程,自主开发了AE信号虚拟仪器采集系统.例如,在LabVIEW环境下开发的应用程序称之为VI(Virtual Instrument).VI是LabVIEW

的核心. LabVIEW7.1 开发环境安装时,会自动安装 NI - DAQ7.4 软件,它包含驱动程序:NI - DAQmx,这个驱动程序自有单独的应用程序编程接口 API,形成了独立的数据采集系统.由于 DAQmx 实现了新的多线程支持,使系统性能在一定程度上得到了提高.又由于高速磨削 AE 信号采样频率要求比较高,故程序的采集部分使用 DAQmx 方法编写,以提高采集信号的效率.另外,该 AE 信号虚拟仪器采集系统具有较好的适应性,只要对软件稍加修改,再配以相应的传感器就可以进行其他磨削参数(力和温度等)的测量.

### 1.3 高速深磨 AE 信号的特征

图 1 所示是一次磨削过程所产生的 AE 信号.当砂轮和工件磨削接触时,产生强烈的 AE 信号,可采用有效值 RMS 作为特征参量.图 1(b)AE 信号有效值变化趋势为:在砂轮与工件接触时陡然增大(bc 段),中间的稳定磨削过程(cd 段)稍有降低,离开工件时 AE 信号有效值很快增大(de 段)后,也很快降低为背景噪声水平(ef 段和 ab 段).实验分析时,主要考虑稳定磨削 cd 段 AE 有效值的变化情况.

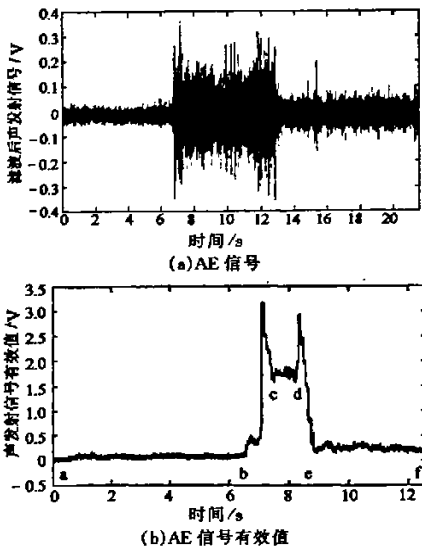


图 1 磨削过程 AE 信号  
Fig.1 AE signals in grinding process

由图 1 可见,在高速深磨加工中,砂轮与工件磨削接触时的 AE 信号有效值峰值比背景信号高出 300%,因此该信号可用于磨削接触分析.可以通过对磨削接触前的噪声信号进行采样,根据采样结果,设定合适的阈值,并以 AE 信号有效值的变化作为判断磨削是否接触的标志.

## 2 实验结果分析

图 2~图 4 中,为第 1 轮 PSZ 实验值和第 3 轮 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 实验值.

### 2.1 工作台速度对 AE 信号的影响

图 2 表示了砂轮线速度为 120 m/s,磨削深度为 0.5 mm 磨削条件下,AE 有效值随工作台速度变化曲线.可见,PSZ 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 两种材料的 AE 有效值随工作台速度的增大而明显增大.原因是随着工作台速度的增大,单位工件材料切除量也随之增大,切削变形变大等<sup>[5]</sup>.

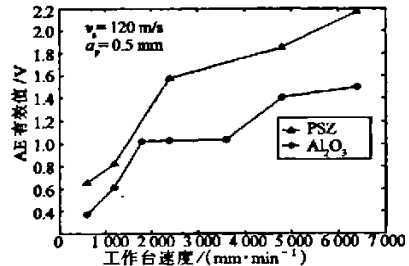


图 2 AE 有效值随工作台速度变化规律  
Fig.2 AE RMS changes with workpiece feedrates

### 2.2 砂轮线速度对 AE 信号的影响

图 3 所示在工作台速度为 2 400 mm/min,磨削深度为 1.0 mm 的条件下 AE 有效值与砂轮线速度的关系曲线.可以看出 AE 有效值有先减小,后增大的趋势,但是变化较小,远不如工作台速度影响明显.而且 PSZ 在砂轮线速度达到 90 m/s 时,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在砂轮线速度达到 120 m/s 时,AE 有效值达到最小值.

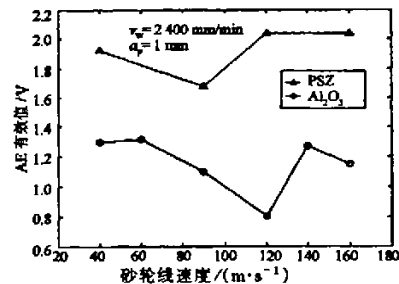


图 3 AE 有效值随砂轮线速度变化规律  
Fig.3 AE RMS change with wheel speeds

磨削加工中,工程陶瓷材料塑性去除方式比脆性去除方式要释放更多的 AE 能量<sup>[1]</sup>.一方面,在 AE 有效值减小阶段,提高砂轮速度,切屑变形和磨削力变小的影响起主导作用,AE 信号逐渐变小;另

一方面,在AE有效值增大阶段,材料塑性去除增加的影响起主要作用,AE信号逐渐变大.

### 2.3 磨削深度对AE信号的影响

图4是在砂轮线速度为120 m/s,工作台速度为2 400 mm/min磨削条件下AE有效值与磨削深度的关系曲线.可以看出AE有效值随着磨削深度增大而稍微有增大的趋势;但即便是在大磨削深度下,增加较小,远不如工作台速度影响明显.

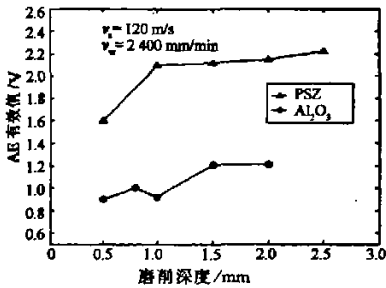


图4 AE有效值随磨削深度变化规律  
Fig. 4 AE RMS change with depths of cut

随着磨削深度的增加,一方面由于单位材料切除率的增加,使得切屑变形有增加的趋势,另一方面,由于磨削加工中的尺寸效应,使得切屑变形有减小的趋势,二者相互作用,使得磨削深度对AE信号的影响不显著,总体上表现出稍微增大的趋势.

综上所述,在3个磨削参数中,发现工作台速度对AE有效值影响最为明显,随工作台速度的增大,AE有效值明显增大.随砂轮线速度的增大,AE有效值变化较小.AE有效值随磨削深度略微有增大.由此可见,砂轮超高速、大切深和较低的工作台速度对磨削陶瓷工件来说是可行的!因为这种磨削条件下,AE比较小,工件的磨削损伤比较小!这样能提高磨削效率和保证磨削质量.

文献[6]认为,增大工作台速度和切深以及降低砂轮线速度时,AE有效值显著增大,这会增加陶瓷工件的磨削裂纹损伤.但这个结论是在砂轮线速度低于30 m/s和切深小于25  $\mu\text{m}$ 得到的.

同时,比较图2~图4中可以发现,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的AE有效值要小于PSZ.原因是两种材料的磨削机理不同<sup>[2]</sup>,PSZ的塑性去除的部分要多于Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.塑性变形要比脆性断裂释放更多的AE能量,故PSZ的AE有效值要大于Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的.

### 2.4 同一磨除率,不同工件进给速度和磨削深度下磨削表面形貌

图5是PSZ材料在单位宽度磨除率60 mm<sup>3</sup>/mm

·s,砂轮线速度120 m/s,工作台速度和磨削深度分别为图5(a):10 mm/s,6 mm和图5(b):100 mm/s,0.6 mm时磨削表面的扫描电镜(SEM)照片.图5(a)中PSZ表面主要由光滑区域和塑性沟槽部分组成,图5(b)则出现明显的涂敷区和脆性断裂区.可见PSZ在图5(a)的磨削表面状态比图5(b)好.也就是说,选择砂轮超高速、大切深和小的工作台速度对磨削工程陶瓷是有利的.这与前面的PSZ信号实验结果分析是一致的.

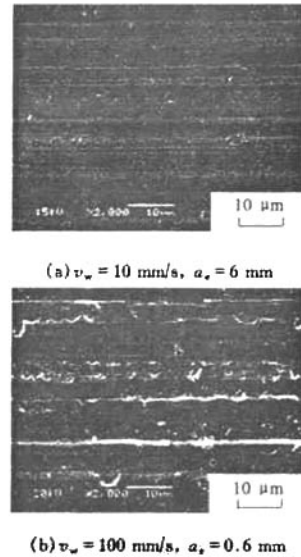


图5 PSZ扫描电镜照片  
Fig. 5 SEM micrographs on ground surface of PSZ

由[7]知,磨削表面的平均波高均随着进给速度的增加而迅速增大,而磨削深度对表面波纹度影响较小.对两种陶瓷材料进行高速深磨后观察其亚表面损伤不大于20  $\mu\text{m}$ .所以陶瓷高效加工中可选取高速深磨工艺.同时,对本试验采用的超高速平面磨床,采用120 m/s进行低粗糙度磨削是最佳选择,这时不会引起工件表面振纹的加剧.却能显著地改善磨削表面粗糙度和提高磨削生产率.

### 2.5 砂轮修整前后AE实验

图6是砂轮修整前后PSZ在砂轮线速度为120 m/s,磨削深度为0.5 mm磨削条件下AE有效值与工作台速度的关系曲线,可见,修整后的AE有效值小于修整前的.这表明砂轮磨损大时AE有效值也随之变大<sup>[3]</sup>.结合[8]中关于高速磨削氮化硅工程陶瓷时,AE信号中包含砂轮磨损量和砂轮形貌等信息,可见,在高速深磨过程中,可以通过设定合适的阈值,监测AE有效值的变化来监测砂轮的钝化

程度。

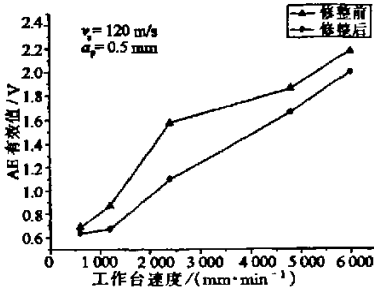


图 6 砂轮修整前后声发射信号比较

Fig. 6 AE RMS before and after dressing of the wheel

### 2.6 AE 信号频谱分析

图 7 为相同磨削参数下 PSZ 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 AE 信号的频谱分析,图中横坐标是 10<sup>6</sup> Hz. 由图可以看出,AE 频谱的能量主要集中在 100~500 kHz 的低频段.在进行频谱分析时,集中分析低频段的 AE 信号,可提高信号的抗干扰性和灵敏度.另外两种材料 AE 信号频谱能量也不同,PSZ 的大,原因与前面 AE 有效值的相同. AE 信号的频谱对目前我们正在进行的工程陶瓷磨削烧伤研究很有用.

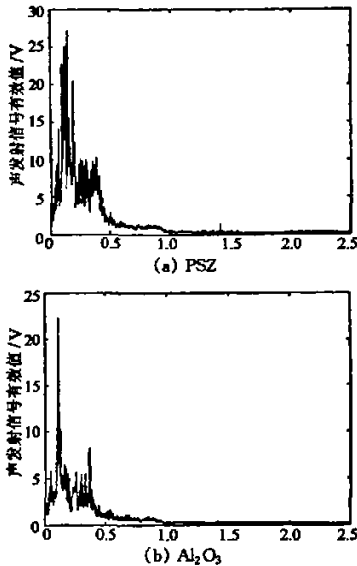


图 7 2 种材料的频谱分析  
Fig. 7 Spectrum of PSZ and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

### 3 结 论

1)建立了工程陶瓷高速深磨中声发射的实验系

统,自主开发了其中的声发射信号虚拟仪器采集系统.

2)通过深入研究发现:工作台速度和工程陶瓷材料对 AE 信号影响最为明显,随工作台速度的增大,AE 有效值明显增大;Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 AE 有效值与 PSZ 的 AE 有效值有明显差异.砂轮线速度和磨削深度对声发射信号的影响相比之下要弱.总之,选择砂轮超高速、大切深和小的工作台速度对工程陶瓷提高磨削加工效率、降低生产成本和保证加工质量是有利的.陶瓷工件磨削表面的扫描电镜照片也证明了这一点.所以陶瓷高效磨削中可选取高速深磨工艺.

3)高速深磨中砂轮修整前 AE 有效值比修整后的要高.可以用 AE 信号对砂轮的表面形貌、磨损状态进行在线监测.还可以用 AE 信号对磨削接触过程进行监测.

4)高速深磨 PSZ 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 AE 频谱的能量主要集中在 100~500 kHz 的低频段.

### 参考文献

- [1] HUANG H, LING Y. Grinding characteristics of engineering ceramics in high speed regime[J]. International Journal of Abrasive Technology, 2007, 1(1): 78-93.
- [2] HUANG H, LIU Y C. Experimental investigations of machining characteristics and removal mechanisms of advanced ceramics in high speed deep grinding [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43: 811-823.
- [3] 刘贵杰, 巩亚东, 王宛山. 声发射技术在磨削加工监测中的应用 [J]. 机械工程师, 2001, (12): 4-6.  
LIU G J, GONG Y D, WANG W S. Applications of acoustic emission technology in monitoring of grinding processes [J]. Machinists, 2001, (12): 4-6. (In Chinese)
- [4] HUNDT W, LEUENBERGER D, REHSTEINER F. An approach to monitoring of the grinding process using acoustic emission (AE) technique [J]. Annals of the CIRP, 1994, 43(1): 295-298.
- [5] JAVAD Akbari, YOSHIO Staito, TADAOKI Hanaoka, et al. Effect of grinding parameters on acoustic emission signals while grinding ceramics [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 62: 403-407.
- [6] GUO L, LI B, CHEN X. Grinding temperature in high efficiency deep grinding of engineering ceramics [C]// YU H N. Proceedings of the 13th International Conference on Automation and Computing. UK: University of Staffordshire, 2007: 84-88.
- [7] HWNG T W, WHITENTON E P, HSU N N, et al. Acoustic emission monitoring of high speed grinding of silicon nitride [J]. Ultrasonics, 2000, 38: 614-619.
- [8] LIU Q, CHEN X, GINDY N. Investigation of acoustic emission signals under a simulative environment of grinding burn [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46: 284-292.

# 工程陶瓷高速深磨中声发射的实验研究

作者: 李波, 郭力, LI Bo, GUO Li  
作者单位: 李波, LI Bo (湖南大学, 电气与信息工程学院, 湖南, 长沙, 410082), 郭力, GUO Li (湖南大学, 机械与汽车工程学院, 湖南, 长沙, 410082)  
刊名: 湖南大学学报 (自然科学版) ISTIC EI PKU  
英文刊名: JOURNAL OF HUNAN UNIVERSITY (NATURAL SCIENCES)  
年, 卷(期): 2007, 34(11)  
引用次数: 2次

## 参考文献(8条)

1. HUANG H. LING Y [Grinding characteristics of engineering ceramics in high speed regime](#) 2007(01)
2. HUANG H. LIU Y C [Experimental investigations of machining characteristics and removal mechanisms of advanced ceramics in high speed deep grinding](#) 2003
3. 刘贵杰, 巩亚东, 王宛山 [声发射技术在磨削加工监测中的应用](#)[期刊论文]-[机械工程师](#) 2001(12)
4. HUNDT W. LEUENBERGER D. REHSTEINER F [An approach to monitoring of the grinding process using acoustic emission \(AE\) technique](#) 1994(01)
5. JAVAD Akbari, YOSHIO Staito, TADAAKI Hanaoka [Effect of grinding parameters on acoustic emission signals while grinding ceramics](#) 1996
6. GUO L. LI B. CHEN X [Grinding temperature in high efficiency deep grinding of engineering ceramics](#) 2007
7. HWNG T W. WHITENTON E P. HSU N N [Acoustic emission monitoring of high speed grinding of silicon nitride](#) 2000
8. LIU Q. CHEN X. GINDY N [Investigation of acoustic emission signals under a simulative environment of grinding burn](#) 2006

## 相似文献(2条)

1. 期刊论文 李波, 黄红武 [陶瓷材料高速深磨声发射信号分析](#) -[机械制造](#)2006, 44(7)  
通过实验分析了工程陶瓷材料在高速深磨中不同磨削参数与声发射信号的关系. 实验表明: 材料、砂轮速度、工作台速度、切深4个因素与声发射信号有着很好的对应关系. 声发射信号包含了大量有用的信息, 可以利用声发射技术对陶瓷磨削过程进行有效的监测.
2. 期刊论文 彭兰. PENG Lan [高速深切磨削陶瓷工件表面粗糙度的在线监测](#) -[制造业自动化](#)2009, 31(4)  
直接从放在工件夹具上的声发射(AE)传感器测得的磨削加工中的AE信号中, 提取有关磨削表面粗糙度的信息, 用神经网络的方法对高速深切平面磨削工程陶瓷氯化铝的工件表面粗糙度进行了在线连续监测. 结果表明, 该新方法不仅简单易直接, 而且切实可行, 通过进一步改进, 可以用于高速深切磨削加工工程陶瓷工件表面粗糙度的在线监测.

## 引证文献(2条)

1. 彭兰 [高速深切磨削陶瓷工件表面粗糙度的在线监测](#)[期刊论文]-[制造业自动化](#) 2009(4)
2. 郭力, 尹韶辉, 李波, 陈迅 [模拟磨削烧伤条件下的声发射信号特征](#)[期刊论文]-[中国机械工程](#) 2009(4)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_hndxxb200711012.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_hndxxb200711012.aspx)

下载时间: 2010年5月31日