

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2018.09.015

# 基于 AE 信号的新型砂轮点磨削状态监测方法

尹国强, 巩亚东, 李宥玮, 王 飞  
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 提出了一种基于声发射(AE)信号对新型点磨削砂轮磨削状态进行实时监测方法. 建立了表面粗糙度与 AE 信号的对应关系, 为监测磨削加工表面粗糙度提供了条件. 采用单因素实验研究了各参数对 AE 信号 RMS 值的影响规律, 结果进一步证明了 AE 信号与表面粗糙度的对应关系. 对比分析了砂轮不同磨损状况下的 AE 信号, 依据此信号可对磨削状态进行实时监测. 为了区分声发射源性质的异同, 对磨削过程中的 AE 信号进行了频谱分析, 砂轮发生磨损时, AE 信号在 45 ~ 65 kHz, 80 ~ 90 kHz, 100 ~ 110 kHz 频段的能量升高显著, 并且在 15 kHz 附近出现了很高的尖峰, 为监测磨削状态提供了一种可行且有效的方法.

**关 键 词:** 点磨削; 新型砂轮; AE 信号; 表面粗糙度; 磨削状态监测

**中图分类号:** TH 161      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2018)09-1288-05

## Method for Grinding State Monitoring of Novel Point Grinding Wheels Based on AE Signal

YIN Guo-qiang, GONG Ya-dong, LI You-wei, WANG Fei  
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
Corresponding author: YIN Guo-qiang, E-mail: yinguoqiang@me.neu.edu.cn)

**Abstract:** A method for grinding state real-time monitoring of a novel point grinding wheel was proposed based on the acoustic emission (AE) signal. The correspondence between surface roughness and the AE signals were established, which provided the condition for monitoring the surface roughness. Single factor experiments were used to obtain the influence of parameters on RMS values of the AE signals. The conclusion further proves the correspondence. Firstly, the AE signals of different wear state of grinding wheel were compared and analyzed. According to this signal, the grinding process could be monitored in real time. Secondly, in order to distinguish the sources of the AE signals, spectrum analysis of the AE signals was carried out. When the grinding wheel worn, the energy of AE signals in 45 ~ 65 kHz, 80 ~ 90 kHz and 100 ~ 110 kHz were significantly increased and there is a high spike at 15 kHz. Therefore, the as-proposed method is feasible and effective.

**Key words:** point grinding; novel grinding wheels; AE signal; surface roughness; grinding state monitoring

在实际加工中为确保磨削加工系统设备与工件的安全,提高磨削效率,减轻工人劳动强度,降低成本,需要对磨削过程进行实时监测. 磨削过程的 AE 信号具有丰富的信息,信号的时域和频域结构与砂轮表面形貌和磨削过程有关<sup>[1]</sup>,通过提取有用的 AE 信号特征参量进行分析,可以对磨削过程进行实时监测.

研究者对利用 AE 信号监测磨削过程方面进行了一些研究工作;Tran 等<sup>[2]</sup>通过研究晶体的滑移和位错,得出 AE 信号的强度随着位错运动密度的增大而增大;Dornfeld 等<sup>[3]</sup>通过分析磨削区 AE 信号的形成来测量砂轮的加载磨损和砂轮与工件表面的无火花磨削. 结果表明 AE 信号能量随着砂轮磨损和增加负载的联合效应而增大;

Wakuda 等<sup>[4]</sup>研发了 AE 传感器集成的 CBN 砂轮用来监测砂轮的磨削状况. 同时还表明了当颤振发生时, 在 AE 信号功率谱中可以观测到显著的峰值. 但是, 就目前检索的文献来看, 主要集中在通过 AE 信号监测刀具磨损、工件和砂轮的接触状态, 而在研究通过 AE 信号监测表面粗糙度方面的文献较少.

本文针对点磨削过程的实时监测进行了深入研究. 首先, 通过建立 AE 信号与表面粗糙度的关系, 监测磨削过程中的表面粗糙度; 其次, 通过单因素实验得到各参数对 RMS 值的影响规律; 最后, 通过时域和频域两方面分析砂轮磨损状态.

## 1 声发射监测磨削实验

### 1.1 实验条件

点磨削与传统外圆磨削相比, 砂轮轴线与工件轴线不平行, 而是绕 Z 轴, 并且平行于 XOY 面转过一定角度  $\alpha$ , 如图 1 所示, 把  $\alpha$  称作倾斜角. 使砂轮与工件由线接触变成理论上的点接触, 降低了砂轮与工件的接触面积, 减小了磨削力<sup>[5]</sup>, 提高了加工精度和表面质量<sup>[6]</sup>.

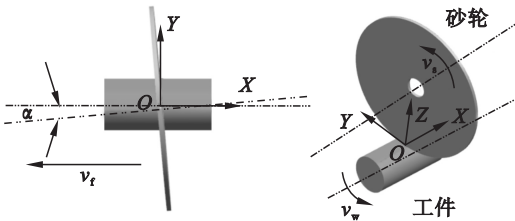


图 1 点磨削示意图  
Fig. 1 Schematic of point grinding

新型点磨削砂轮在磨料层轴向前端设置有粗磨区倾角  $\theta$ , 由于  $\theta$  角的存在使切屑更容易排出磨削区, 减少了磨屑堆积现象. 前端粗磨区负责去除材料, 后面精磨区负责光整和减小表面粗糙度, 提高了磨削效率<sup>[7]</sup>, 磨料层结构如图 2 所示.

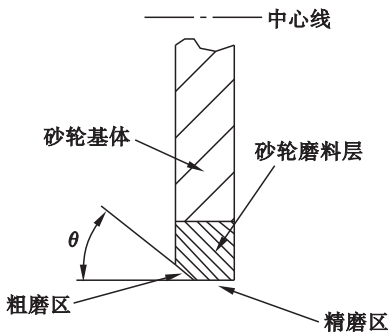


图 2 新型点磨削砂轮磨料层结构

Fig. 2 Abrasive layer structure of novel point grinding wheel

本文制备的 7 片砂轮除了  $\theta$  角度不同, 其余参数都相同, 数据如下: 砂轮外径 180 mm, 内径 32 mm, 磨料层宽度 5 mm, 厚度 5 mm,  $\theta$  角分别为  $0^\circ, 4^\circ, 7^\circ, 10^\circ, 13^\circ, 16^\circ, 20^\circ$ , 粒度 120#, 体积分数 100%, 制作的砂轮如图 3 所示. 实验在 MK9025A 型光学曲线磨床上完成, 采用 PXWAE 声发射监测系统测量点磨削工件的 AE 信号.

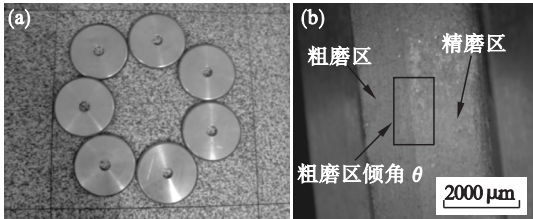


图 3 带有粗磨区倾角  $\theta$  的点磨削砂轮  
Fig. 3 Point grinding wheels with slope angle  $\theta$   
(a)—新型砂轮; (b)—粗磨区倾角  $\theta$ .

### 1.2 实验方案

首先用新型砂轮磨削材料为 QT700 的阶梯轴, 针对不同的磨削情况, 建立  $R_a$  和 AE 信号的对应关系. 其次, 采用单因素实验, 分别研究磨削深度  $a_p$ 、砂轮线速度  $v_s$ 、倾斜角  $\alpha$ 、粗磨区倾角  $\theta$  对 AE 信号特征值 RMS 的影响, 实验参数见表 1, 工件转速和轴向进给速度  $v_w = 60 \text{ r/min}$ ,  $v_f = 1.2 \text{ mm/min}$ . 最后, 从时域和频域两个方面分析监测砂轮的磨损状态. 为了避免声发射传感器与

表 1 磨削实验参数  
Table 1 Grinding experiment parameters

序号	磨削深度 $a_p/\text{mm}$	砂轮线速度 $v_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	倾斜角 $\alpha/(\text{^\circ})$	粗磨区倾角 $\theta/(\text{^\circ})$
1	0.01, 0.03, 0.05, 0.08	45	0.5	0
2	0.05	35, 45, 50, 60	0.5	0
3	0.05	45	-1, -0.5, 0, 0.5, 1	0
4	0.05	45	0.5	0, 4, 7, 10, 13, 16, 20

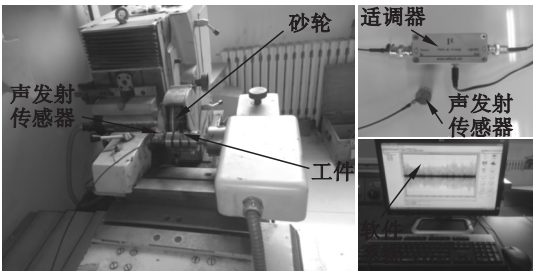


图 4 声发射监测实验

Fig. 4 Acoustic emission detection experiment

磨削区的距离影响采集到的 AE 信号强度,所以全部实验都在一个工件的同一个阶梯上完成,声发射监测实验如图 4 所示.

## 2 实验结果及分析

### 2.1 表面粗糙度监测

磨削加工所形成的表面形貌是磨粒在工件表面运动轨迹的反映<sup>[8]</sup>. 平稳磨削时加工表面所形成的沟痕方向基本相同,所对应的 AE 信号电压值数值较小,而且比较平稳,电子显微镜照片及对应的 AE 信号如图 5a 所示. 在磨削过程中,当磨削温度升高到一定温度时,会引起表面烧伤,工件表面粗糙度也会随之增大,AE 信号电压值增大,信号整体产生一定程度的波动,如图 5b 所示. 在

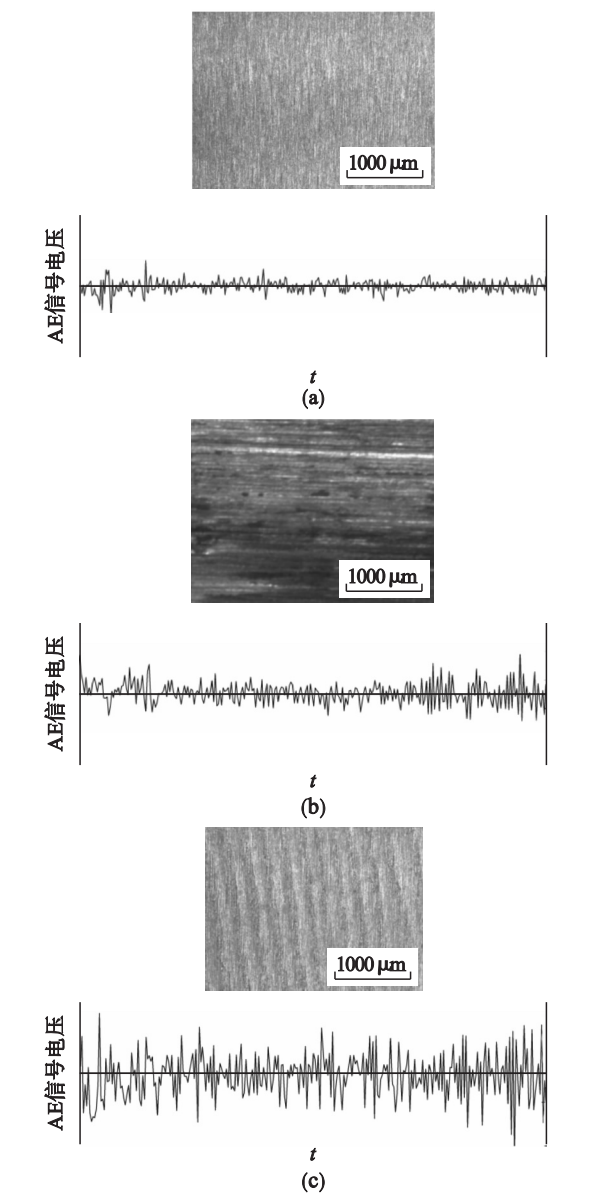


图 5 不同磨削状态下表面粗糙度和声发射信号  
Fig. 5 Roughness and AE signal in different conditions  
(a)—正常磨削状态;(b)—烧伤状态;(c)—颤振状态.

磨削过程中,发生颤振时,会导致砂轮与工件接触不稳定,同样会造成表面粗糙度增大,AE 信号电压值大幅度增加,信号整体波动很大,如图 5c 所示. 因此,可以通过 AE 信号与表面粗糙度的对应关系对磨削状态进行实时监测.

不同的表面粗糙度也对应不同的声发射频谱信号,从图 6 中可以看出,磨削表面的粗糙度越大,两表面摩擦时产生的 AE 信号越剧烈,表面粗糙度  $R_a = 0.882\text{ }\mu\text{m}$  时 AE 信号幅值最小,  $R_a = 1.173\text{ }\mu\text{m}$  时 AE 信号幅值最大. AE 信号与表面粗糙度有很好的对应关系,可以利用磨削过程中 AE 信号对磨削表面粗糙度进行实时监测.

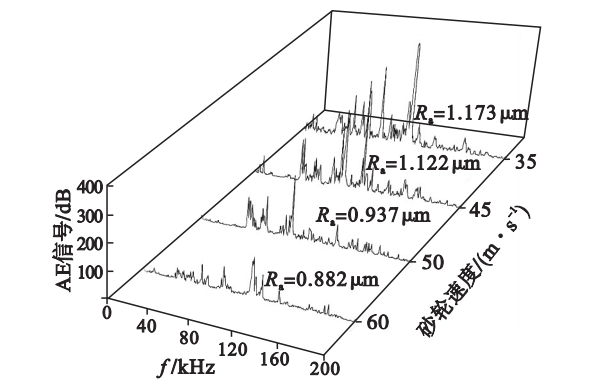


图 6 不同粗糙度对应的 AE 信号  
Fig. 6 AE signal corresponding to different roughness

### 2.2 各参数对声发射 RMS 值的影响

AE 信号的有效值 RMS 则是能量的表征<sup>[9]</sup>. 磨削参数的变化会造成工件去除材料时释放的能量发生变化,AE 信号的 RMS 值也随之改变.

#### 2.2.1 磨削深度 $a_p$ 对 AE 信号 RMS 值的影响

RMS 值随着磨削深度  $a_p$  的增加而增加,如图 7 所示. 因为  $a_p$  增加,最大未变形切屑厚度增加,单颗磨粒去除的材料体积增加,又因为其他参数不变,所以单位时间内去除材料的体积增加,去除材料时释放的能量也相应增加,反映在 RMS 值

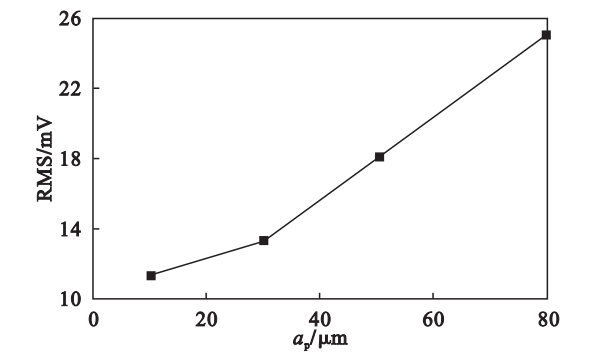


图 7 磨削深度  $a_p$  对 RMS 值的影响  
Fig. 7 Effect of  $a_p$  on RMS

上,其值也同时增大.从图中还可以看出,磨削深度对 RMS 值的影响曲线接近于 1 条直线,由直线的斜率可知  $a_p$  与 RMS 值的对应关系.在实际加工中,可以依据  $a_p$  的值预测 AE 信号的 RMS 值,当出现实际值与预测值相差较大时,就应该引起注意.

2.2.2 砂轮速度  $v_s$  对 AE 信号 RMS 值的影响

RMS 值随着砂轮速度  $v_s$  的增加而减小,如图 8 所示.  $v_s$  从 35 m/s 增加到 45 m/s 时,RMS 值的变化趋势不太显著,从 45 m/s 逐渐增加到 50, 60 m/s 时 RMS 值明显减小,变化趋势非常显著.随着  $v_s$  的增大,最大未变形切屑厚度变小,材料应变率减小,在磨削过程中,材料所释放的声发射能量与材料应变率成正比,材料应变率越小,所产生的 AE 信号越弱,因此,AE 信号有变小的趋势.砂轮速度达到 60 m/s 时,AE 信号 RMS 值减小较快,这是由于砂轮速度达到 60 m/s 后,进入了高速磨削,磨粒去除工件表面材料的方式发生了变化,导致 AE 信号 RMS 值减小非常明显.

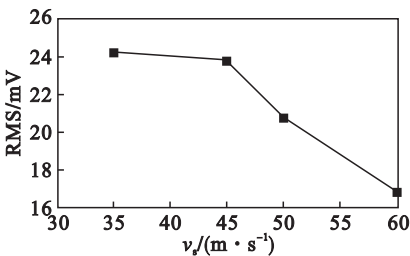


图 8 砂轮速度  $v_s$  对 RMS 值的影响  
Fig. 8 Effect of  $v_s$  on RMS

2.2.3 倾斜角  $\alpha$  对 AE 信号 RMS 值的影响

RMS 值随着  $\alpha$  绝对值增大而减小,而且曲线关于  $X = 0$  对称,如图 9 所示.这是由于  $\alpha$  的存在,砂轮与工件形成点接触,减小了砂轮与工件的接触面积,由于工件表面形变释放的弹性波减少,RMS 值也相应地减小.从图中还可知,倾斜角  $\alpha$  正负对 RMS 值影响不大,主要取决于绝对值的大小,这是因为改变倾斜角  $\alpha$  的方向,砂轮与工件接触区面积变化相同,所以 RMS 值不变.

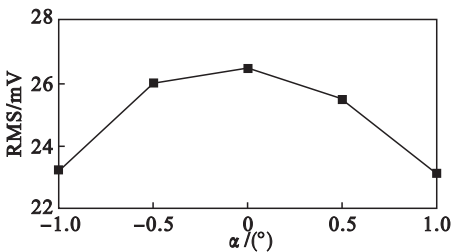


图 9 倾斜角  $\alpha$  对 RMS 值的影响  
Fig. 9 Effect of  $\alpha$  on RMS

2.2.4 粗磨区倾角  $\theta$  对 AE 信号 RMS 值的影响

RMS 值随着倾角  $\theta$  的增加,先减小后增大,如图 10 所示. RMS 值在  $\theta = 0^\circ$  时取得最大值,随着  $\theta$  角的增大而逐渐减小,当  $\theta = 10^\circ$  时取得最小值,然后随着粗磨区倾角  $\theta$  的增大逐渐增大.

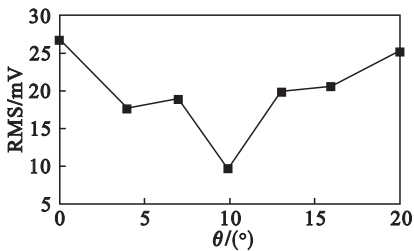


图 10 粗磨区倾角  $\theta$  对声发射有效值 RMS 的影响  
Fig. 10 Effect of  $\theta$  on effective value RMS

经过上述 4 组实验分析得出各参数对 AE 信号 RMS 值的影响规律,可以发现这些规律与作者前期研究成果<sup>[6]</sup>的表面粗糙度的变化规律基本一致,同时也证明了表面粗糙度与 AE 信号的对应关系,为监测磨削表面粗糙度提供了条件.

2.3 砂轮磨损监测

磨削加工中,砂轮磨损会随着砂轮工作时间的延长而加剧,进而导致磨粒钝化,磨削有效性降低,工件表面质量变差<sup>[10]</sup>.因此,需要对磨削过程中的砂轮磨损状态进行实时监测,声发射技术的运用可以有效地解决这个问题.

2.3.1 时域分析

砂轮磨损前后 AE 信号变化如图 11 所示.图 11a 为砂轮正常工作时的 AE 信号,图 11b 为砂轮磨损时的 AE 信号.从图中可以明显看出,当砂轮钝化的时候,AE 信号急剧增加,电压幅值大于砂轮未发生钝化时的幅值.而且,AE 信号会呈现出具有许多尖峰的杂乱状态而不是平稳变化.因此,可以根据 AE 信号的变化判断砂轮是否钝化.

2.3.2 频域分析

AE 信号的 RMS 值只能反映信号的强度,为了区分声发射源性质的异同,还需要对 AE 信号进行频域分析.图 12 为砂轮不同磨损状态下的声发射信号频谱图,磨削参数为: $a_p = 0.08 \text{ mm}$ ,  $v_s = 45 \text{ m/s}$ ,  $\alpha = 0.5^\circ$ ,  $\theta = 0^\circ$ .通过对比图 12a 和图 12b 可知,砂轮发生磨损时,AE 信号在 45 ~ 65 kHz, 80 ~ 90 kHz, 100 ~ 110 kHz 频段的能量升高显著,并且在 15 kHz 左右出现了很高的尖峰.因此,AE 信号频谱可以反映磨削过程中的能量释放情况,并通过频谱分析来监测砂轮的磨损状态.



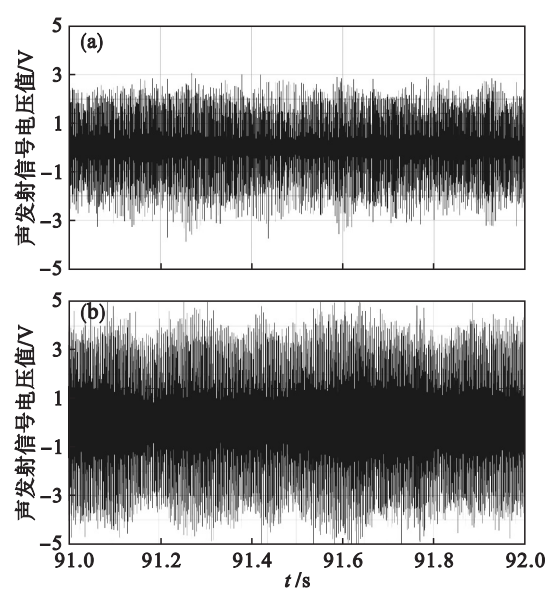


图 11 砂轮磨损前后声发射信号对比  
Fig. 11 Comparison of AE signal before and after wear  
(a)—正常磨削; (b)—砂轮钝化磨削.

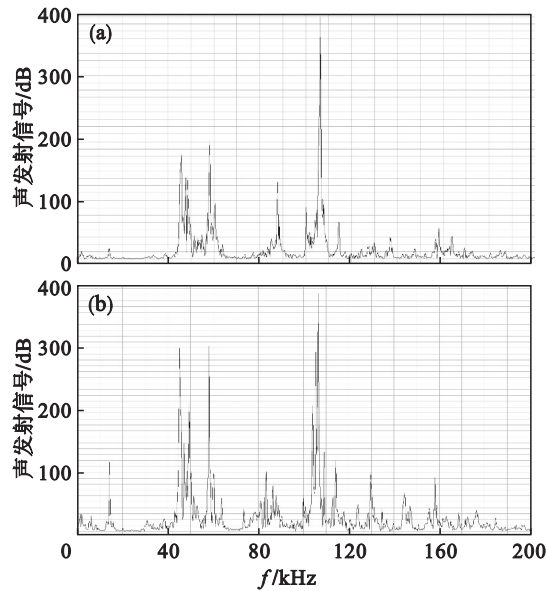


图 12 砂轮不同磨损状态频谱图

Fig. 12 Spectrum diagram of different wear state of grinding wheel  
(a)—砂轮正常磨削; (b)—砂轮钝化磨削.

3 结 论

1) 建立了 AE 信号与表面粗糙度的对应关系,以及正常磨削、磨削烧伤和磨削颤振状态下对应的 AE 信号,为监测磨削表面粗糙度提供了条件.

2) 研究了各参数对 AE 信号 RMS 值的影响,RMS 值随着磨削深度  $a_p$ 、砂轮速度  $v_s$  增大而增加;随着  $\alpha$  绝对值增大而减小,曲线关于  $X=0$  对称;随着粗磨区倾角  $\theta$  的增加,先减小,后增大,

当  $\theta=0^\circ$  时 RMS 值取得最大值,当  $\theta=10^\circ$  时取得最小值.

3) 对比了砂轮不同磨损状态下的 AE 信号,依据此信号可对磨削过程进行实时监测;对砂轮不同磨损状态下的 AE 信号进行了频域分析,当砂轮磨损时,AE 信号在 45 ~ 65 kHz,80 ~ 90 kHz,100 ~ 110 kHz 频段的能量升高显著,并且在 15 kHz 左右出现了很高的尖峰.

参考文献:

[ 1 ] Hundt W,Leuenberger D,Rehsteiner F,et al. An approach to monitoring of the grinding process using acoustic emission ( AE ) technique [ J ]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*,1994,43(1):295-298.

[ 2 ] Tran T A,Iii W V M,Murphy K A,et al. Stabilized extrinsic fiber optic Fabry-Perot sensor for surface acoustic wave detection[ C ]// OE Fiber-DL Tentative. Boston:Proceedings of the SPIE,1991:178-186.

[ 3 ] Dornfeld D,Cai H G. An investigation of grinding and wheel loading using acoustic emission[ J ]. *Journal of Engineering for Industry*,1984,106(1):28-33.

[ 4 ] Wakuda M,Inasaki I,Ogawa K,et al. Monitoring of the grinding process with an AE sensor integrated CBN wheel [ J ]. *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*,1993,59(2):275-280.

[ 5 ] 尹国强,巩亚东,温雪龙,等. 新型点磨削砂轮磨削力模型及试验研究[ J ]. *机械工程学报*,2016,52(9):193-200. ( Yin Guo-qiang, Gong Ya-dong, Wen Xue-long, et al. Modeling and experimental investigations on point grinding force for novel point grinding wheel [ J ]. *Journal of Mechanical Engineering*,2016,52(9):193-200. )

[ 6 ] Gong Y D,Yin G Q,Wen X L,et al. Research on simulation and experiment for surface topography machined by a novel point grinding wheel[ J ]. *Journal of Mechanical Science and Technology*,2015,29(10):4367-4378.

[ 7 ] 尹国强,巩亚东,王超,等. 新型点磨削砂轮磨削参数对表面质量的影响[ J ]. *东北大学学报( 自然科学版)*,2014,35(2):273-276. ( Yin Guo-qiang, Gong Ya-dong, Wang Chao, et al. Effects of processing parameters for novel point grinding wheels on surface quality [ J ]. *Journal of Northeastern University ( Natural Science)*,2014,35(2):273-276. )

[ 8 ] Malkin S. Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives [ M ]. Horwood: Halsted Press, 1989.

[ 9 ] 吴天宇. 面向高效精密磨削的声发射机制及其在线监测系统的研究[ D ]. 天津:天津大学,2010. ( Wu Tian-yu. Analysis on mechanism and on-line monitoring system of acoustic emission oriented to precision and high efficiency grinding[ D ]. Tianjin:Tianjin University,2010. )

[ 10 ] Inasaki I. Monitoring and optimization of internal grinding process[ J ]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*,1991,40(1):359-362.