

文章编号 1004-924X(2019)07-1508-08

金刚石砂轮磨削性能退化评估

毕 果^{1*}, 王惠雪¹, 周 炼², 邵升阳¹

(1. 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361005;

2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 610041)

摘要: 为了提取高精度磨削干涉中的声发射信号特征, 实现砂轮磨削性能退化评估, 针对熔石英开展全寿命周期金刚石砂轮磨削实验, 基于小波包分析确定砂轮磨损敏感频段为低频段, 然后计算声发射信号在低频段的归一化能量占比, 再利用主成分分析对能量占比进行特征降维获得单值特征, 利用该单值特征绘制砂轮磨削性能退化曲线。研究表明, 监测特征能够清晰反映砂轮初期磨损、正常磨损和过度磨损三个阶段, 且监测结果不受加工参数影响; 砂轮磨削材料破裂尺度与声发射频率具有一定关系, 伴随砂轮磨损的加剧, 较大尺度破裂的比例上升, 造成 65 kHz 以下低频段特征的能量占比增大, 监测特征显著增加, 磨粒崩碎产生新的切削刃, 砂轮的去屑能力有所改善, 监测特征数值回落, 但是, 不同样本的声发信号频谱差异性显著增加, 说明砂轮加工状态不稳定, 不利于精密与超精密加工中维持稳定质量的要求。砂轮形貌图像的白像素占比变化曲线验证了声发射特征对砂轮磨损状态判断的正确性。

关键词: 声发射; 小波包分析; 特征提取; 磨损监测

中图分类号: TN911.6; TN305.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192707.1508

Grinding performance degradation of diamond wheel

BI Guo^{1*}, WANG Hui-xue¹, ZHOU Lian², SHAO Sheng-yang¹

(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 610041, China)

* Corresponding author, E-mail: yuobi@xmu.edu.cn

Abstract: Acoustic emission is the most direct and sensitive characterization of grinding interference. Therefore, to ensure high-precision grinding, acoustic emission signals were used to evaluate the degradation in grinding performance of a diamond wheel. A fused silica grinding experiment was conducted using a newly trimmed diamond grinding wheel to record the acoustic emission signal and surface morphology of the grinding wheel during its life cycle. A wavelet packet analysis was used to determine the typical low-frequency band of the abrasive wear of the grinding wheel. The frequency energy ratio was then extracted by using principal component analysis to characterize the degradation of grinding wheel grinding performance. The results showed that the acoustic emission frequency energy ratio was completely independent of the processing parameters. As the abrasive wear of the grinding wheel intensified, both the proportion of large-scale rupture and the amplitude of the corresponding

收稿日期: 2019-01-02; 修订日期: 2019-02-13.

基金项目: 科学挑战计划专题资助(JCKY2016212A506-0504); 国家自然科学基金资助项目(No. 51805459)

low-frequency characteristic increased. When the abrasive particles were worn to the limit, the abrasive grain was broken to produce a new cutting edge, improving the removal ability of the grinding wheel, but the variance of the spectrum was significantly increased, inhibiting the wheel from maintaining a stable quality in ultra-precision machining. The variation of the white pixel ratio of the grinding wheel shape image verified the correctness of the acoustic emission signal analysis results.

Key words: acoustic emission; wavelet packet analysis; feature extraction; wear monitoring

1 引言

在超精密磨削加工过程中,砂轮的磨损状态影响着加工精度和加工效率,及时修整砂轮能够保证稳定质量的超精密磨削。但在实际加工过程中,为了避免工件被破坏,在砂轮还未达到工作极限寿命时就提前修整砂轮,具有盲目性^[1]。因此,实时监测砂轮的磨损状态,对确保稳定质量的超精密磨削,提高砂轮极限寿命的服役时长具有重要意义。声发射是一种材料内部受到外部条件作用引起的弹性波的瞬间释放^[2]。在磨削加工过程中,砂轮表面的磨粒与工件表面进行接触、摩擦、磨粒崩碎脱落以及裂纹的产生和发展都伴随着声发射现象^[3]。声发射信号是磨削干涉最及时最灵敏的表征,因此,声发射可有效运用于监测磨削加工过程。

目前,声发射技术已经广泛应用于机床状态监测。近年来,国内外学者利用声发射信号监测砂轮磨削过程,用特定的方法对信号进行特征提取,能够表征砂轮磨损趋势。B Karpuschewsk 等利用声发射信号以及功率信号对磨削过程进行在线监测,判断砂轮的磨损状态,但实验系统较为复杂^[1]。Ning Ding 等提取声发射信号的平均小波分解系数特征,利用 BP 神经网络对砂轮磨损状态进行分类^[4]。郭力等根据小波分解系数方差值,利用支持向量机对金刚石砂轮磨损状态进行分类^[5]。王洪雨等利用声发射频域信号的频谱矩心作为特征值,并结合工件表面粗糙度表征砂轮的磨损状态^[6]。

本文利用刚修整过的树脂结合剂金刚石砂轮进行熔石英磨削实验,记录砂轮一个寿命周期过程中的声发射信号和砂轮表面形貌。首先,基于小波包分析确定表征砂轮磨粒磨损的典型频段;

其次,以 100 Hz 为间距计算声发射信号在该频段内的归一化能量占比,再利用主成分分析对能量占比进行降维,获得单值特征,利用该单值特征绘制砂轮磨削性能退化曲线;最后,提取砂轮形貌图像的白像素占比验证声发射信号的分析结果。

2 实验

2.1 实验装置与实验条件

实验装置如图 1 所示,砂轮磨损监测实验平台以四轴超精密磨床为基础,砂轮安装在机床主轴上,熔石英玻璃、声发射传感器分别通过热熔胶与磁力座吸附在工作台上的铁块。声发射信号采集设备采用美国物理声学公司的 PCI-2 声发射检测系统,声发射信号的采样频率为 1 MHz。

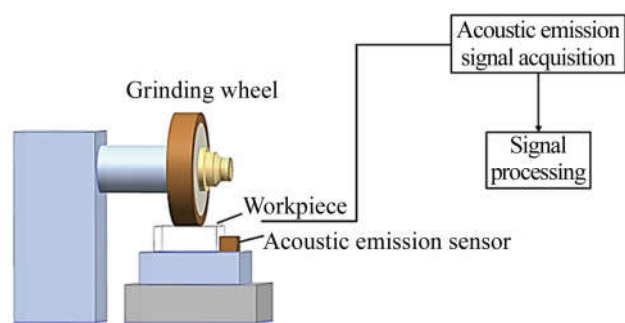


图 1 砂轮磨损监测实验装置

Fig. 1 Experimental instruments for wheel wear monitoring

本文利用刚修整过的金刚石砂轮进行磨削实验,探究一个周期内砂轮磨损的完整过程。在实验过程中设置 16 个节点,采集声发射信号和砂轮表面形貌图像,如表 1 所示,节点 1 的材料去除量为 4 cm^2 ,之后 15 个节点的材料去除量以等差的形式从 20 cm^2 增加到 300 cm^2 ,每个节点对应砂

轮不同的磨损状态。在砂轮磨损状态节点处,进行 16 种加工参数组合的磨削实验(4 种参数,每

种参数取两个不同的数值),采集声发射信号和砂轮圆周固定位置的表面形貌图像。

表 1 磨削加工参数

Tab. 1 Grinding processing parameters

实验	材料去除量 /cm ²	光栅步距 /mm	砂轮线速度 /(m · s ⁻¹)	每刀磨削深度 /μm	进给速度 /(mm · min ⁻¹)
1 : 16	4,20 : 20 : 300	5,10	20,30	5,10	3 500,7 500

2.2 声发射信号的频谱分析

考虑到砂轮磨削过程的随机性,以 10 μs 为间隔截断 16 种参数组合的所有声发射信号,获得多个样本。图 2 为材料去除量为 20 cm³ 和 300 cm³ 时,某一声发射样本信号的时域波形和频谱。

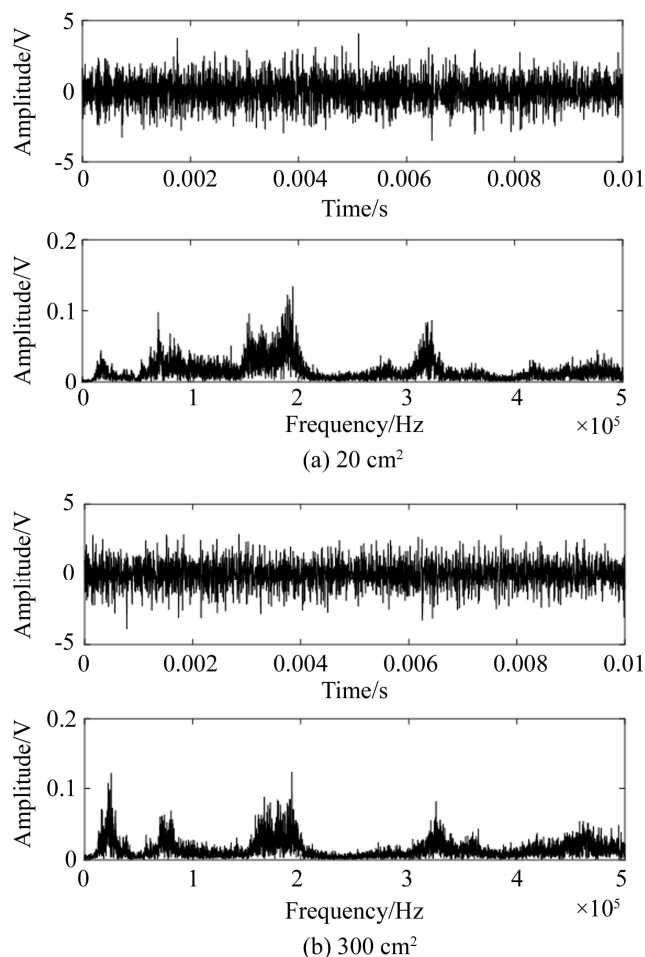


图 2 声发射信号的时域波形与频谱

Fig. 2 Time-domain waveform and frequency spectra of acoustic emission signal

从图 2 中可以观察到声发射信号宽频随机,且不同去除量对应的波形和频谱差异较小,难以从中直接得到砂轮磨损的变化趋势。

3 理论基础

由于声发射信号频谱的复杂性,本文利用小波包分解声发射信号的频谱,提取声发射信号的特征,利用主成分分析对特征进行降维,利用降维的特征绘制砂轮磨削性能退化曲线。

3.1 小波包分析

小波包分析是在小波分析的基础上发展起来的更为精细的频域划分,能够将小波分析没有细分的高频部分进一步分解,并能够根据分析信号的特征自适应地选择相应的频带,从而提高时-频分辨率^[7]。因此,文章采用小波包能量谱提取声发射信号的特征。

对声发射信号 f 进行 i 层小波包分解,则 i 层分解的小波包能量谱向量 E_i ^[8] 为:

$$E_i = \{E_{i,p}\} = \left\{ \sum |f_{i,p}|^2 \right\}, \quad (1)$$

其中: $p = 0, 1, \dots, 2^i - 1$, $f_{i,p}$ 为 i 层的小波包系数。

各个频带下小波包分解频带下的能量比 I_p :

$$I_p = \frac{E_{i,p}}{\sum_{j=1}^{2^i-1} E_{i,j}}. \quad (2)$$

能量比 I_p 反映磨削加工过程中,声发射信号在各个频段的小波包能量谱系数。

3.2 主成分分析

由于低维特征能够用可视化的形式反映出砂轮磨损的趋势,为了能够直观地从视图中得到砂轮的磨损形式,本文采用主成分分析法对特征进行降维^[9],降维过程如下:

原始数据的特征矩阵为:

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_p) = \begin{bmatrix} X_{1,1} & \cdots & X_{1,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n,1} & \cdots & X_{n,p} \end{bmatrix},$$

其中: n 表示样本的个数, m 表示特征的个数。

将数据按列进行标准化处理, 标准化后的数据记为 \mathbf{X} ;

(1) \mathbf{R} 的特征方程:

$$\det(\mathbf{R} - \lambda \mathbf{E}) = 0, \quad (3)$$

其中 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$;

相关系数矩阵 $\mathbf{R} = (r_{ij})_{p \times p}$

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{kj} - \bar{x}_j)(x_{ki} - \bar{x}_i)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{kj} - \bar{x}_j)^2 \sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)^2}}$$

(2) 确定主成分的个数:

$$\frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} \geq \alpha, \quad (4)$$

式中 α 为累积贡献率(通常取 85%)。

(3) 主成分 F_i 则表示为:

$$F_i = a_{1i}X_1 + a_{2i}X_2 + \dots + a_{pi}X_p, \quad (5)$$

其中: $i = 1, 2, \dots, m$; $\mathbf{a}_i = (a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{pi})^T$, 为单位特征向量。

4 实验结论及讨论

4.1 声发射信号特征提取

利用 db1 小波对采集到的声发射信号进行 3 层小波包分解, 得到 $[0 \sim 500]$ kHz 之间的 8 个频率带的小波包能量谱系数。对各节点内的各个样本通过小波包变换得到的小波包能量谱系数做均值处理, 为了能够更清楚地看出各个频段内各节点小波包能量谱系数的波动情况, 用方差表示各个频段内的小波包能量谱系数的波动情况, 结果如图 3 所示。

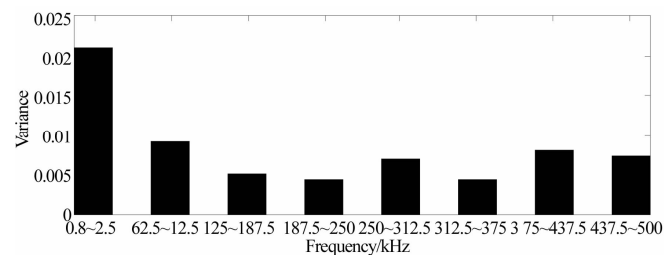


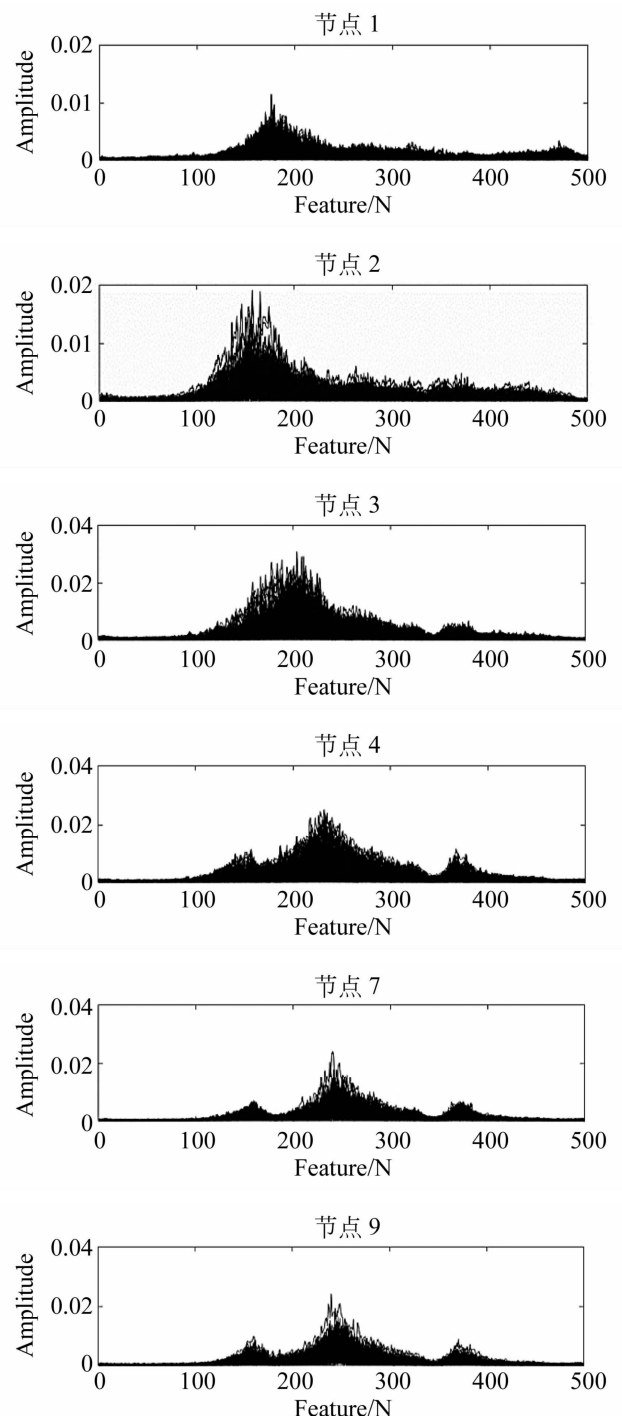
图 3 小波包能量谱系数方差

Fig. 3 Variance of wavelet packet energy coefficient

从能量谱系数波动图可以看出, 在 $[0 \sim 62.5]$ kHz 频段, 各节点间的小波包能量谱系数的波动最大, 表明伴随砂轮磨削性能的退化, $[0 \sim 62.5]$

kHz 频段各节点的频率变化最为剧烈, 说明该频段是砂轮磨损的特征频段。结合小波包分析结果与图 2 原始信号频谱的变化情况, 取 $[0 \sim 50]$ kHz 低频段的数据作为主要的研究对象。

已有研究表明, 裂纹的尺度与信号频率存在一定的对应关系^[10-12]。在磨削加工过程中, 不同磨削阶段磨粒会产生不同尺度的破裂, 所以声发射信号的频谱会随着不同的磨削阶段发生改变。因此, 以 100 Hz 为间距, 对 $[0 \sim 50]$ kHz 进行细化频段分析, 将各节点中不同工艺参数下的所有样本绘于一副图中, 如图 4 所示。



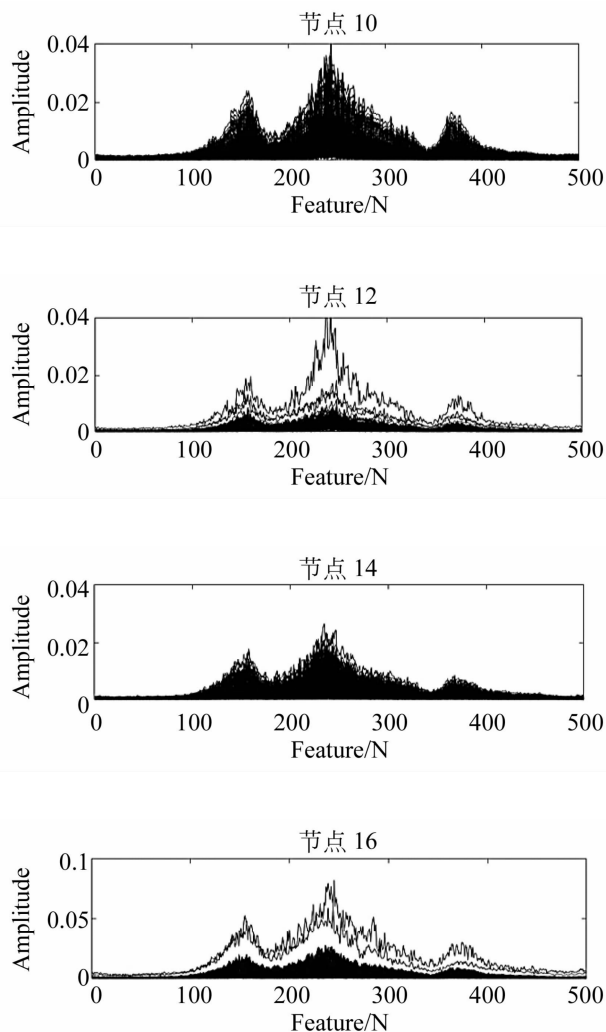


图 4 [0~50]kHz 频段能量占比
Fig. 4 Energy ratio in 0-50 kHz

从图 4 中可以看出,节点 1 到节点 10,不同加工参数得到的声发射样本频域能量占比具有很高的 consistency,重叠性较好;节点 10 以后,各节点内声发射样本的频域能量占比不再一致,说明砂轮磨削状态存在波动。

各组对比可知,节点 1 到节点 3 只有一个集中的峰值,并且随着磨削深度的增大,幅值不断增大;节点 4 开始,在 15 kHz 频段附近出现新的峰值;节点 4 到节点 9,频谱分布以及能量幅值都呈现一致的趋势(由于篇幅问题,这里只放上节点 4,7,9 的频谱图);节点 10 频谱的峰值急剧升高,在节点 10 之后,一方面 15 kHz 频段附近频谱的幅值有所上升,另一方面声发射样本信号的差异显著。

4.2 特征降维

为了简明表示砂轮磨削性能退化,应用主成分分析法对低频段的 500 个特征进行降维处理,降维结果如表 2 所示。

表 2 特征值以及主成分累积贡献率

Tab. 2 Result of feature and principal component analysis

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
F_1	0.001 400 0	89.32	89.32
F_2	0.000 104 0	6.79	96.10
F_3	0.000 037 0	2.45	98.55
F_4	0.000 013 0	0.83	99.39
F_5	0.000 005 2	0.34	99.72
F_6	0.000 004 2	0.28	100

由表 2 可知, F_1 的方差贡献率最大,达到 89.32%,由于第一个主成分的累积贡献率已经超过 85%,说明主成分 F_1 可以反映原有变量的大部分有效信息。因此,取主成分 F_1 来替代原始的 500 个变量,将它作为表征砂轮磨损的典型特征,计算各节点中典型特征的极差值和方差值,结果如图 5 所示。

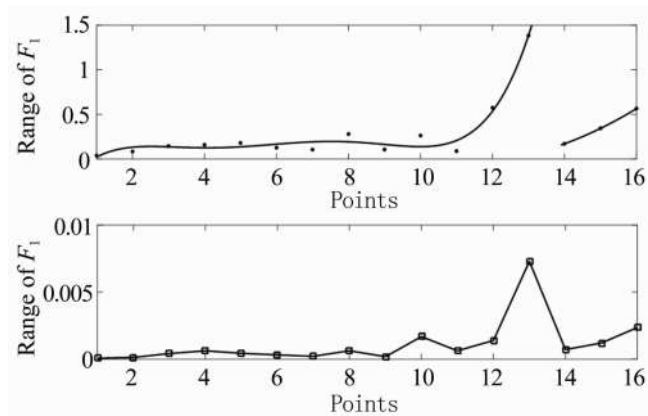


图 5 砂轮磨损曲线

Fig. 5 Curves of grinding wheel wear

图 5 是根据典型特征极差值绘制的砂轮磨削性能退化曲线。从图中可以看出,监测特征能够清晰反映砂轮的初期磨损、正常磨损和过度磨损三个阶段^[13],且监测结果不受加工参数的影响,避免了一直以来声发射信号易受加工条件影响,从而在实际监测中难以应用的问题。节点 1 到节点 3,砂轮刚经修整处于初磨损阶段,对工件进行加工主要是切削刃划刻作用,磨粒破碎的尺度发生变化,使频谱的幅值发生改变,导致节点 1 到节点 3 的特征数值有微小的变化;节点 4 砂轮进入

正常磨损时期,磨粒磨耗起主要作用,磨粒破碎裂纹的尺度大小比较一致,所以节点 4 到节点 9 的曲线趋于水平;而节点 9 之后,随着砂轮磨损的加剧,刮擦挤压作用造成较大尺度破裂的比例上升,对应低频段频谱幅值上升,节点 10 之后特征数值显著增加;节点 13 之后,磨粒磨损到极致,崩碎产生新的切削刃,砂轮去除能力有所改善,节点 13 之后特征数值回落。

根据典型特征方差值绘制的砂轮状态稳定曲线可以看出,前 10 个节点的特征值基本趋于一条直线,表现砂轮磨削状态基本保持稳定;但是节点 10 之后典型特征的方差值增大,不同样本声发射信号的频谱差异性显著增加,砂轮处于不稳定的状态,不利于精密与超精密加工中维持质量稳定的要求。

5 砂轮形貌在位检测

利用每个节点加工结束之后在砂轮圆周固定位置拍摄的表面形貌图验证声发射信号的分析结果。由于文章的篇幅问题,这里只给出了材料去除量分别为 4,60,120,180,240,300 cm³ 时,砂轮在同一个位置表面形貌的显微图片,如图 6 所示。

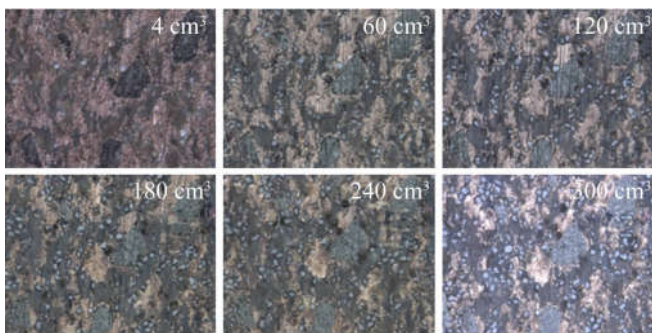


图 6 砂轮表面局部视图(放大倍数为 500)

Fig. 6 Partial view of grinding wheel surface(Magnification is 500 times)

白像素占比是衡量砂轮磨损程度的一个指标^[14]。刚修整的砂轮表面磨粒具有较多的切削刃,同一颗磨粒,在相同光照条件下,切削刃所反射的光强度会比其他部位高,经过二值化处理后,可以认为白像素所代表的就是砂轮磨粒的切削刃^[15]。在磨削加工过程中,切削刃会随

着磨削的过程被磨钝,磨粒崩碎又会出现新的切削刃,这些变化都将改变白像素占比。如图 7 所示,3 条曲线分别代表各个节点下,在砂轮圆周 3 个不同位置表面形貌图的黑像素占比变化情况。

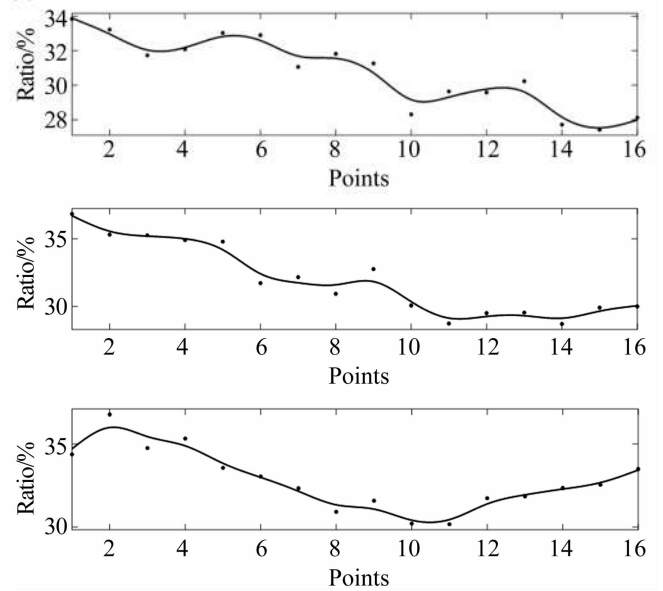


图 7 白像素占比

Fig. 7 Ratio of white pixel

从图中可以看出,前 10 个节点的白像素占比总体上呈现下降的趋势,在 10 个节点之后则有所不同。伴随砂轮表面的磨粒磨损,切削刃逐渐减少,白像素占比不断下降,节点 10 之后,磨粒破裂崩碎造成砂轮某些局部产生新的切削刃,因此,不同位置的白像素占比呈现不同趋势。砂轮表面形貌的黑像素占比分析结果与声发射信号的分析结果一致,说明声发射频率能量占比这单一特征能够监测砂轮磨削性能退化的过程。

6 结 论

本文针对熔石英开展全寿命周期金刚石砂轮磨削实验,基于小波包分析确定砂轮磨损敏感频带为 $[0\sim 62.5]$ kHz,然后以 100 Hz 为间距计算声发射信号在该频段内的归一化能量占比,通过主成分分析获得单值特征,利用该单值特征绘制砂轮磨削性能退化曲线。研究表明,监测特

征能够清晰反映砂轮的初期磨损、正常磨损和过度磨损三个阶段,且监测结果不受加工参数影响。伴随砂轮磨损的加剧,监测特征显著增加,随后砂轮的自锐性使砂轮的去除能力有所改善,监测特

征数值回落,但频谱差异性增加,不利于精密与超精密加工中维持稳定质量的要求。砂轮形貌图像在白像素占比变化曲线验证了监测特征对砂轮磨损状态判断的正确性。

参考文献:

- [1] KARPUSCHEWSKI B, WEHMEIER M, INASAKI I. Grinding monitoring system based on power and acoustic emission sensors[J]. *CIRP Annals*, 2000, 49(1): 235-240.
- [2] LEE D E, HWANG I, VALENTE C M O, *et al.*. Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, 46(2): 176-188.
- [3] 毕果, 许涛林, 彭云峰, 等. BK7 光学玻璃金刚石划刻声发射信号的特征提取[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(4): 934-942.
- BI G, XU T L, PENG Y F, *et al.*. Feature extraction of acoustic emission signal for diamond scratching of optical glass BK7[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(4): 934-942. (in Chinese)
- [4] DING N, ZHAO C L, LUO X C, *et al.*. An intelligent grinding wheel wear monitoring system based on acoustic emission[J]. *Solid State Phenomena*, 2017, 261: 195-200.
- [5] 郭力, 邓喻, 霍可可. 氧化铝陶瓷磨削金刚石砂轮磨损的声发射监测[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2018, 45(4): 34-40.
- GUO L, DENG Y, HUO K K. Acoustic emission monitoring of diamond wheel wear with grinding alumina ceramics grinding[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2018, 45(4): 34-40. (in Chinese)
- [6] 王洪雨, 姚振强, 许胜. 基于声发射技术的砂轮磨损实验研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2018(8): 33-37.
- WANG H Y, YAO ZH Q, XU SH. Experimental study of grinding wheel wear process based on acoustic emission technology[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2018(8): 33-37. (in Chinese)
- [7] YANG Z S, YU Z H. Grinding wheel wear monitoring based on wavelet analysis and support vector machine[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 62(1/2/3/4): 107-121.
- [8] 操礼林, 李爱群, 邓扬, 等. 声发射和小波包分析在损伤状态监测中的应用[J]. *振动、测试与诊断*, 2012, 32(4): 591-595, 688-689.
- CAO L L, LI A Q, DENG Y, *et al.*. Combined application of acoustic emission and wavelet packet analysis on damage condition monitoring of structures[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2012, 32(4): 591-595, 688-689. (in Chinese)
- [9] 林盖, 林述温. 基于主成分分析的高速铣削振动特性研究[J]. *机械制造与自动化*, 2018, 47(5): 28-32.
- LIN G, LIN SH W. Research on vibration characteristics in high speed milling based on principal component analysis[J]. *Machine Building & Automation*, 2018, 47(5): 28-32. (in Chinese)
- [10] BENSON P M, VINCIGUERRA S, MEREDITH P G, *et al.*. Laboratory simulation of volcano seismicity[J]. *Science*, 2008, 322(5899): 249-252.
- [11] 刘希灵, 王金鹏, 李夕兵, 等. 压缩与劈裂条件下矿岩声发射信号的频率特性[J]. *实验力学*, 2018, 33(2): 201-208.
- LIU X L, WANG J P, LI X B, *et al.*. On the frequency characteristics of ore's acoustic emission signal in uniaxial compression and Brazilian splitting test[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2018, 33(2): 201-208. (in Chinese)
- [12] LACIDOGNA G, SCHIAVI A, NICCOLINI G, *et al.*. Analysis of acoustic emissions at low frequencies in brittle materials under compression [J]. *Proceedings of the SEM Annual Conference*, June 1-4, 2009.
- [13] 朱爱斌, 胡浩强, 何大勇, 等. 采用频域融合方法的砂轮刀具磨损三维重构技术[J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(5): 82-86, 133.
- ZHU A B, HU H Q, HE D Y, *et al.*. Three-dimensional reconstruction of tool wear area for grinding wheel using frequency-domain fusion method[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*

ty, 2015, 49(5): 82-86, 133. (in Chinese)

- [14] GOPAN V, WINS K L D. Quantitative analysis of grinding wheel loading using image processing[J]. *Procedia Technology*, 2016, 25: 885-891.

- [15] FENG Z, CHEN X. Image processing of grinding wheel surface[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 32 (1/2): 27-33.

作者简介:



毕 果(1978—),女,河南南阳人,博士,副教授,2000年、2003年于郑州大学分别获得学士、硕士学位,2007年于上海交通大学获得博士学位,主要从事精密加工过程监测等方面的研究。E-mail: guobi@xmu.edu.cn



王惠雪(19—),女,福建漳州人,硕士研究生,主要从事精密加工、在线监测等方面的研究。E-mail: 15759219774@163.com