

氧化铝陶瓷磨削金刚石砂轮磨损的声发射监测^{*}

郭力[†], 邓喻, 霍可可

(湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:阐述了声发射监测工程陶瓷磨削的研究进展,发现目前对金刚石砂轮磨损监测研究基本上是选取声发射信号均方根(即有效值)进行分析,且金刚石砂轮磨损状态的声发射监测准确率不高.为提高金刚石砂轮磨损状态的声发射监测准确率,设计了氧化铝陶瓷磨削声发射实验,并采用支持向量机建立金刚石砂轮磨损状态的分类模型.分析发现氧化铝陶瓷精密磨削中声发射信号最强频谱能量在30~40 kHz频段.金刚石砂轮轻度磨损、严重磨损钝化和修锐之后的磨削声发射信号频谱有明显不同;而且磨削声发射信号小波分解系数的方差值能够很好地反映金刚石砂轮磨损状态.结果表明采用磨削声发射信号的小波分解系数方差作为支持向量机判别金刚石砂轮磨损状态的输入特征,金刚石砂轮磨损状态分类测试的准确率达100%.

关键词:氧化铝磨削;金刚石砂轮磨损;声发射监测;小波分析;支持向量机

中图分类号: TG580

文献标志码: A

Acoustic Emission Monitoring of Diamond Wheel Wear with Grinding Alumina Ceramics Grinding

GUO Li[†], DENG Yu, HUO Keke

(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Research progress of monitoring engineering ceramics grinding by acoustic emission (AE) is firstly described. It is found that the study of grinding diamond wheel wear monitoring is normally based on the analysis of the root mean square of acoustic emission signal, and the accuracy of acoustic emission monitoring is not high. In order to promote the accuracy of acoustic emission monitoring for wear states of grinding diamond wheel, support vector machine is applied to establish the classification model of grinding diamond wheel wear states. Through the analysis of acoustic emission signals, it is found that the strongest spectral energy of alumina ceramic acoustic emission signal under precision grinding is in 30~40 kHz band. The AE signal spectrum of the diamond grinding wheel wear states including mild wear, serious wear and after dressing are significantly different. The wavelet decomposition coefficient variances of the grinding acoustic emission signal can well reflect the wear states of the grinding diamond wheel. Therefore, the wavelet decomposition coefficient variances of grinding acoustic emission signal is applied as the input characteristics of support vector machine to identify grinding diamond wheel wear states, and the ac-

^{*} 收稿日期:2017-03-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51475157), National Natural Science Foundation of China (51475157)

作者简介:郭力(1964—),男,湖南益阳人,湖南大学教授,博士

[†] 通讯联系人, E-mail: guoli@hnu8@163.com

curacy of classification test is 100%.

Key words: alumina grinding; grinding diamond wheel wear; acoustic emission monitoring; wavelet analysis; support vector machine

1 陶瓷磨削声发射监测研究进展

工程陶瓷具有耐高温、耐腐蚀、耐磨损和质量轻等突出优点,在国防、航空航天、机械电子等领域得到了非常广泛的应用.然而工程陶瓷是硬脆难加工材料,目前工程陶瓷使用范围受到限制,主要原因之一就是其磨削金刚石砂轮非常昂贵而又容易磨损,而目前确定金刚石砂轮的磨损状态与修整时机都还靠经验.一般而言采用智能磨削监控技术后,能够将砂轮工件故障停机时间大幅度减少,将有效磨削时间大幅度提高,将磨床利用率大大提高,并能够把握正确的砂轮修整时机同时节省可观的磨削砂轮修整费用.所以磨削金刚石砂轮磨损智能监测对砂轮修整来说非常重要.

磨削力、磨削功率、振动、超声技术和声发射(acoustic emission, AE)技术都可以用于磨削过程监测,但是声发射技术是最好的技术之一,30多年来用于砂轮的磨损与堵塞、磨削颤振、磨削烧伤与裂纹、砂轮与工件的碰撞与间隙的消除、磨削工艺控制、砂轮修整等,取得了较好的效果.声发射技术是磨削智能检测的有力工具,在智能磨削中起作非常重要的作用,在智能制造中有着广泛的应用前景.

国内外学者对陶瓷材料磨削声发射 AE 监测做了一些研究.郭力等对镍基合金热 AE 信号特征进行了研究,在排除其他干扰的影响下,提取出模拟的磨削高温的热 AE 信号频率特征^[1-2]. Akbari 等实验研究了氧化铝在不同磨削参数下的 AE 信号特征,发现 AE 信号随工作台速度和磨削深度增大而增大、随砂轮转速增大而减小,单颗磨粒切深系数越大则 AE 信号越强^[3]. Hwang 等使用金刚石砂轮对氮化硅陶瓷进行了高速磨削 AE 监测研究,指出单位宽度磨削功率与测出的 AE 信号功率有简单的关系,因此 AE 信号功率可用来预测磨削功率,AE 信号还可做砂轮磨损和砂轮形貌的监测^[4]. Susic 等应用 AE 信号来离线和在线监测工件表面形貌,认为砂轮修整后的工件外圆磨削表面粗糙度显著提高,而轻度磨损砂轮与严重磨损砂轮之间的工件表面粗糙度差异不明显,建立了用 AE 信号来监测轻度磨

损砂轮磨削工件的表面特征^[5]. Webster 等研究了磨削原始 AE 信号的瞬态特征,在知道声发射传感器频率特征条件下对 AE 波进行了频率分析,进行了不同积分时间常数的 AE 均方根 RMS 的评价^[6]. Liu 等研究了基于小波分析 AE 信号的能量系数,应用 BP 神经网络来检测磨削氧化铝陶瓷金刚石砂轮钝化的准确率为 90%^[7]. Mokbel 等实验研究表明当工件表面粗糙度值较低时磨削声发射信号的幅值较大,工件表面粗糙度与磨削声发射信号之间的联系能准确地反映砂轮的状态^[8]. Liao 等使用自适应遗传聚类算法(adaptive genetic clustering algorithm)等多种算法分析 AE 信号来判别砂轮磨损的状态,但是准确率不太高,尤其是在材料去除率比较低的精密磨削中判别的准确率为 90%^[9-10]. Yang 等使用小波分析与支持向量机方法,对金属磨削刚玉砂轮磨损进行了声发射监测,精密磨削中刚玉砂轮磨损状态判别的准确率达 95%^[11]. Tawakolz 和 Chen 等给出了 AE 在金属磨削机理监测中的新进展^[12-13]. 彭延峰等认为自适应最稀疏时频分析方法在抑制端点效应和模态混淆、抗噪声性能、提高分量的准确性等方面要优于经验模态分解方法,可以用于信号分析^[14].

综上所述,目前对工程陶瓷磨削金刚石砂轮磨损监测研究中基本上是选取 AE 信号均方根 RMS(即有效值)进行分析,但是在磨削 AE 信号中包含的大量有用的信息没有得到充分理解;同时陶瓷磨削金刚石砂轮的磨损状态的 AE 监测准确率不很高.所以本文在对工程陶瓷氧化铝磨削 AE 信号进行深入分析基础上,基于小波分析和支持向量机对金刚石砂轮磨损进行了 AE 智能监测.

2 氧化铝磨削声发射实验

在一台 MGS-250AH 精密平面磨床上进行试验,试验中使用青铜结合剂金刚石砂轮,粒度为 60#,金刚石砂轮宽度为 10 mm,砂轮直径为 150 mm,实验中砂轮转速固定为 1 500 r/min,即砂轮线速度为 11.8 m/s;工件工作台速度不变,改变磨削切深.工程陶瓷氧化铝磨削试件安装在虎钳夹具中,

虎钳用电磁吸附力安装在磨床工作台上,声发射传感器用磁性夹具安装在虎钳的侧面尽可能靠近磨削工件,如图 1 所示. 试验不用磨削液,消除了磨削液对 AE 信号采集的影响;同时由于磨削温度较高也可以考虑氧化铝精密磨削温度的影响. 本试验所采用的氧化铝磨削试件尺寸为 50 mm×20 mm×6 mm,磨削在工件 50 mm×20 mm 的平面内沿 20 mm 方向进行. 氧化铝材料密度为 3.87 g/cm³;抗弯强度为 335 MPa;微观硬度为 15 GPa;断裂韧性为 4 MPa·m^{1/2};弹性模量为 350 GPa. 由图 2 可知,氧化铝的晶粒尺寸为 4 μm,其中存在一定量的气孔.

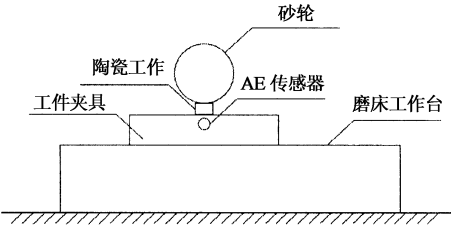


图 1 实验原理
Fig. 1 Experimental principle

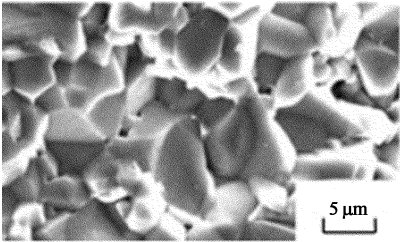


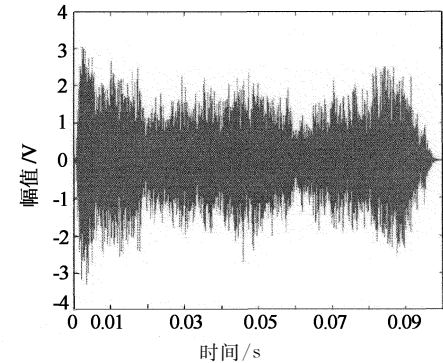
图 2 氧化铝显微结构
Fig. 2 Alumina microstructure

氧化铝精密磨削过程产生的大量 AE 信号,传播到放在平面磨床工作台夹具上的美国物理声学公司 PAC 生产的压电 AE 传感器并被接收,然后经过 AE 压电连接器的前置放大,将它们输出到 PAC 生产的 PCI-2 声发射信号采集卡应用 AEwin 系统进行磨削 AE 信号采集,并输入到计算机进行保存等待 MATLAB 软件进行后续的处理. 为了不失真,AE 信号采样频率为 2 MHz,前置放大增益为 40 dB. AE 传感器 R6a 通过耦合剂粘结在工件夹具上,在靠近磨削工件的位置再用声发射传感器磁力夹具固定. 由于陶瓷等硬脆性材料的固有频率一般在 0~200 kHz,故选用谐振频率为 55 kHz 的 R6a 传感器,该传感器在 100 kHz 内都具有较高的灵敏度并且能够测量到 0~200 kHz 的磨削 AE 信号. 磨削系统中有机机械、电气与液压噪声,为了排除这些噪声,

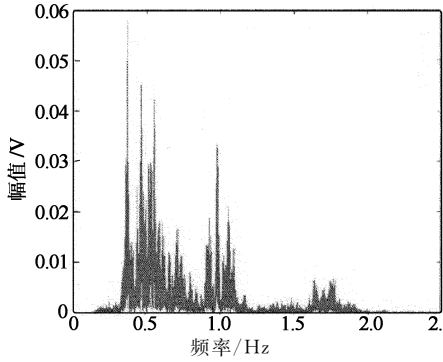
取 AE 信号采集门槛为 46 dB. PAC-2 声发射系统中,有 AEwin 系统来采集磨削实验的 AE 信号,有 AE 采集卡的硬件设置、磨削声发射信号 DTA 文件采集与监测、磨削 AE 信号波形流文件采集与文本文件转换、AE 信号特征值采集与统计等. 应用 MATLAB 软件,除可以对磨削 AE 信号 DTA 文件转换后的 CSV 文件进行离线分析外,可以对转换为文本文件后的磨削 AE 信号波形流文件在时域、频域和时频域进行离线分析.

3 氧化铝磨削声发射信号分析

图 3(a)为典型的氧化铝磨削 AE 信号,其磨削深度为 25 μm 条件下,磨削过程中可以明显看到火花即磨削温度较高. 图 3(b)为氧化铝磨削 AE 信号的快速傅里叶变换 FFT 频谱分析,该频谱的能量主要集中在 30~200 kHz 的低频段,大于 200 kHz 的频谱能量比较弱小,该频谱的能量的峰值一般在 37 kHz. 30~200 kHz 频段 AE 源主要来自于金刚石砂轮与氧化铝的弹性接触和摩擦,滑擦、犁耕、切削去除氧化铝材料时塑性变形和裂纹碎裂,以及金刚石砂轮磨粒的微裂纹. 如图 4 所示,氧化铝陶瓷磨削



(a) 磨削 AE 原始信号



(b) 磨削 AE 的 FFT 频谱分析

图 3 氧化铝磨削 AE 监测

Fig. 3 Alumina grinding AE monitoring

中,由于加工中剪切应力大形成大量的微观裂纹,材料大部分为脆性去除;氧化铝磨削表面还有少许涂敷层,即出现了氧化铝陶瓷的再烧结、再结晶,这是由于磨削区高的磨削温度造成的^[15].

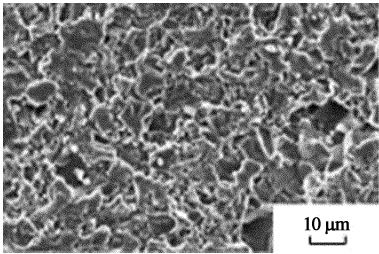


图 4 氧化铝磨削表面微观形貌
Fig. 4 Alumina grinding surface microstructure

声发射 PCI-2 系统中可以测量到多个 AE 信号特征参数.对于磨削 AE 信号这种连续 AE 信号,由表 1 可见,测量得到的磨削连续 AE 信号的特征参数包括计数、能量、平均信号电平 ASL 和均方根 RMS 有效值,都随着磨削切深的增加而增大,这说明磨削中金刚石砂轮与氧化铝陶瓷之间的磨削作用加剧,氧化铝磨削微裂纹增加,即可以根据这些 AE 信号特征值的增大来判断磨削切深的增加.

表 1 不同磨削切深 AE 信号特征值

Tab.1 Grinding AE signal characteristics of different cut depth				
切深/ μm	计数	能量	ASL/dB	RMS/V
5	1 273	2 275	50	0.05
10	5 634	40 504	67	0.15
15	6 241	58 040	69	0.21
20	6 267	65 535	71	0.27
25	6 493	65 535	72	0.30
30	6 513	65 535	74	0.40

图 5 是不同磨削深度下磨削 AE 信号的时域波形图,随着磨削切深的增加,AE 信号的幅值增加.图 6 是不同磨削深度下磨削 AE 信号频谱图,随着切深增加,磨削 AE 信号频谱能量增大.

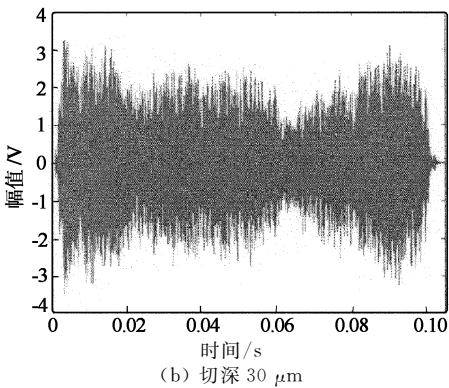
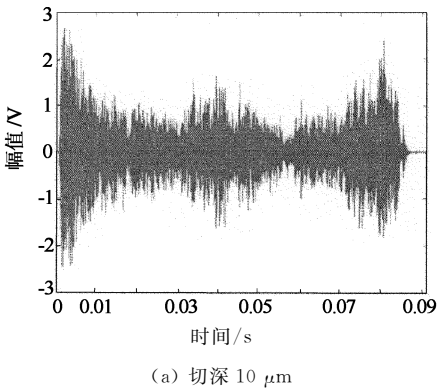


图 5 不同切深下 AE 信号时域波形图
Fig. 5 AE signal under different cut depth

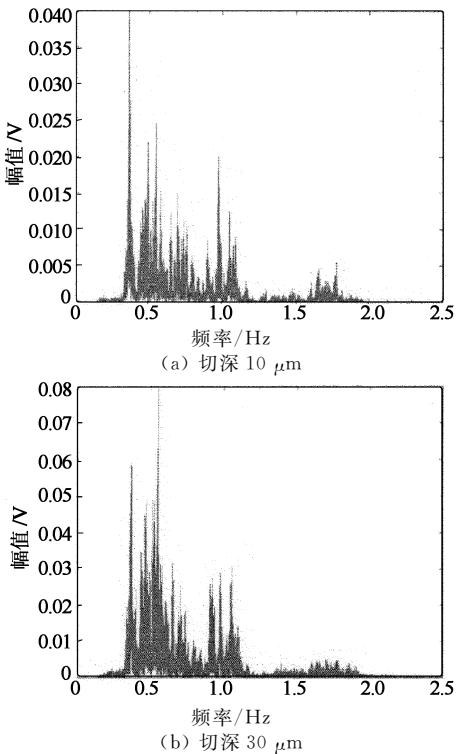


图 6 不同切深下 AE 频谱分布图
Fig. 6 AE spectrum distribution at different cut depth

实验表明氧化铝精密磨削的 AE 信号最强频谱能量在 30~40 kHz.由表 2 可见,30~200 kHz 段能量占总能量百分比的绝大部分;随着磨削切深增加,氧化铝精密磨削 AE 信号在 30~60 kHz 频谱能量增加.

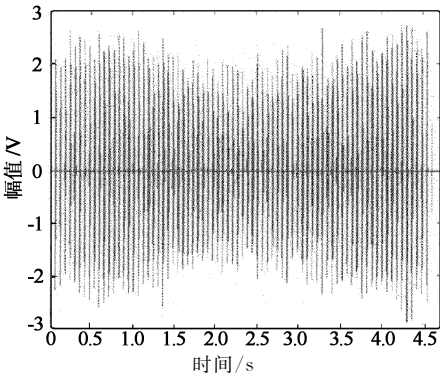
表 2 不同切深下 AE 频谱能量分布百分比
Tab.2 AE spectrum energy distribution at different cut depth

切深/ μm	%				
	0~30 kHz	30~60 kHz	60~90 kHz	90~120 kHz	120~200 kHz
5	0.05	56.33	18.81	12.33	12.4
10	0.05	68.40	15.28	13.75	2.51
15	0.05	69.26	13.34	15.46	1.88
20	0.07	69.00	11.43	17.58	1.90
25	0.07	71.34	10.38	15.99	2.20
30	0.12	72.15	12.33	13.99	1.40

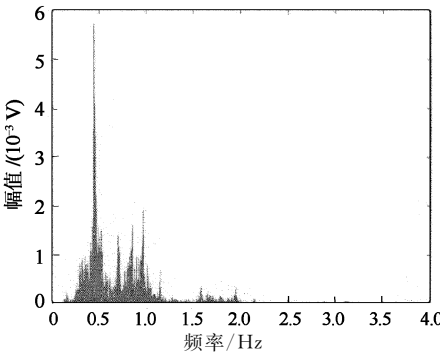
4 金刚石砂轮磨损声发射监测

金刚石砂轮轻度磨损即新砂轮使用时间比较短,砂轮磨粒比较锋利.金刚石砂轮严重磨损即磨除了较多氧化铝陶瓷材料,砂轮磨粒形成磨损平面磨粒钝化.金刚石砂轮修整是在整形后再用氧化铝砂条修锐,使砂轮结合剂脱落锋利的金刚石磨粒重新露出砂轮表面切削,即严重磨损后砂轮通过修整重新获得较高的切削能力.

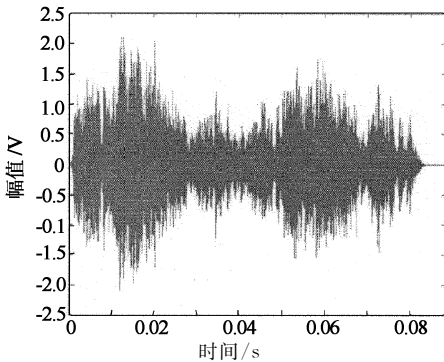
分别取砂轮轻度磨损、严重磨损和砂轮修整后的氧化铝磨削实验采集的 AE 信号作为金刚石砂轮在 3 种磨损状态下的 AE 信号,图 7 为切深为 15 μm 的轻度磨损与严重磨损 AE 及其快速傅里叶变换 FFT 比较.轻度磨损的金刚石砂轮磨削锋利,在相同磨削切深下,轻度磨损 AE 信号 FFT 图上只有一个明显的较低频率尖峰;而砂轮严重磨损的 AE 信号 FFT 图上不仅有多个尖峰而且向高频率发展,而且幅值比较大.图 8 为切深 5 μm 的砂轮严重磨损与砂轮修整后 AE 及其 FFT 比较,砂轮修整后金刚石砂轮经过修锐重新锋利,同样的砂轮严重磨损的 AE 信号 FFT 图上有多个尖峰;而砂轮修整后 AE 信号 FFT 图上只有一个明显的低频率尖峰.可见金刚石砂轮锋利与严重磨损钝化的磨削 AE 信号频谱有明显不同.



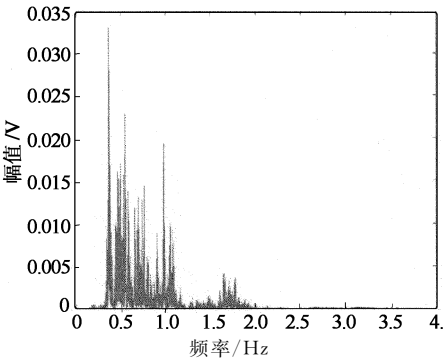
(a) 砂轮轻度磨损 AE 信号



(b) 砂轮轻度磨损 AE 信号 FFT



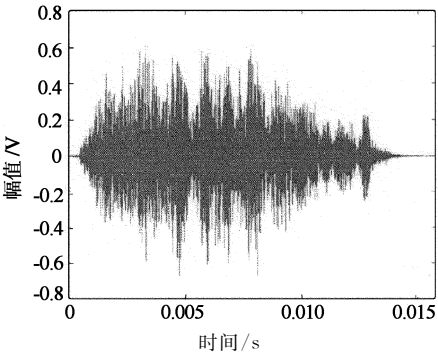
(c) 砂轮严重磨损 AE 信号



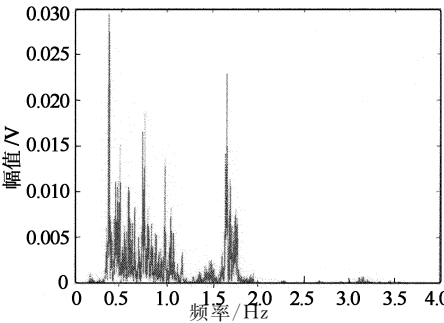
(d) 砂轮严重磨损 AE 信号 FFT

图 7 砂轮轻度磨损与严重磨损 AE 比较
Fig. 7 AE comparison between mild and serious wear

应用 MATLAB 软件的小波分析工具箱,对磨削 AE 信号进行 db4 小波分解,计算每组实验的磨削 AE 信号小波分解系数的方差值 S_{var} . AE 信号的方差描述 AE 信号的波动范围.采用 db4 小波基对



(a) 砂轮严重磨损 AE 信号



(b) 砂轮严重磨损 AE 信号 FFT

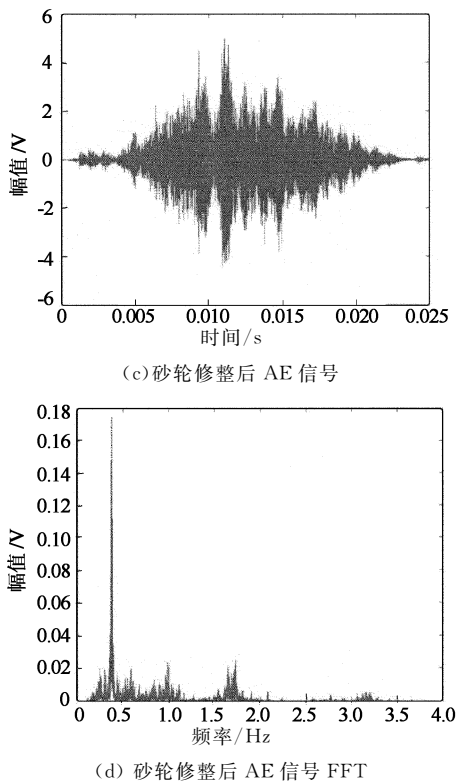


图 8 砂轮严重磨损与砂轮修整后 AE 比较
Fig. 8 AE comparison between serious wear and wheel dressing

AE 信号进行 5 层离散小波分解,得到 a5、d5、d4、d3、d2 和 d1 共 6 个小波分解系数,其对应 AE 信号频率范围分别为 0~31.25 kHz、31.25~62.5 kHz、62.5~125 kHz、125~250 kHz、250~500 kHz 和 500~1 000 kHz. 计算各组 AE 信号小波分解系数的方差值 S_{var} ,再取 3 种不同砂轮磨损状态下的磨削 AE 信号小波分解系数方差值 S_{var} 平均值作图,如图 9 所示.

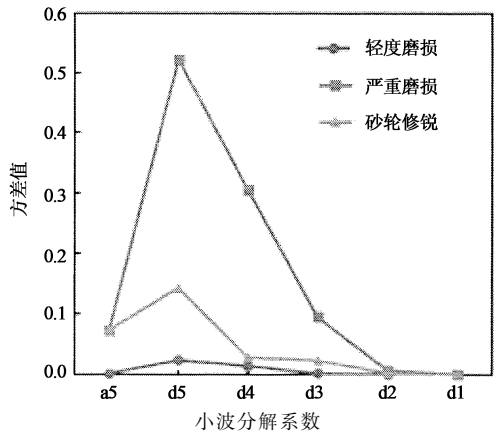


图 9 不同砂轮磨损状态 AE 小波系数方差
Fig. 9 AE wavelet coefficient variance under different wear states

金刚石砂轮发生磨损后,由于金刚石磨粒磨损平面增大,磨损的磨粒和新形成的切削刃同时参与磨削,使磨削 AE 信号产生波动,由于 AE 信号方差值描述信号的波动范围,这时 AE 信号小波分解系数的方差值 S_{var} 均出现明显增大,AE 信号的波动越大则小波分解系数的方差值越大,即金刚石砂轮的磨损越严重.图 9 中 AE 信号小波分解系数的方差值大意味着金刚石砂轮磨损严重;而轻度磨损的砂轮小波分解系数的方差值很小意味着砂轮非常锋利;砂轮修整后 AE 信号小波分解系数的方差值较砂轮严重磨损的方差值明显减小,意味着金刚石砂轮比较锋利了.磨削 AE 信号小波分解系数方差值能够很好的反映砂轮磨损状态,而文献[7]中磨削 AE 信号的小波分解能量系数不能直接反映砂轮磨损状态.

由于磨削过程非常复杂难以建立数学模型,所以利用金刚石砂轮、氧化铝陶瓷、精密磨削工艺产生的不同的磨削 AE 信号,对 AE 信号进行小波分解得到小波分解系数的方差值等参数,就可以通过支持向量机或 BP 神经网络建立起该方差值与金刚石砂轮磨损状态之间的非线性关系.

支持向量机(Support Vector Machines,SVM)克服了一般神经网络算法中网络结构难以确定、存在局部极小值以及过学习、欠学习等问题,解决了小样本、非线性、高维数和局部极小值等实际问题.本文中由于磨削 AE 信号样本比较少,特别适合采用支持向量机对砂轮磨损状态分类判别.

采用磨削声发射信号小波分解系数的方差作为输入特征值数据,使用 SCG(量化共轭梯度法)BP 神经网络和支持向量机两种方法进行砂轮磨损状态智能判别,SCG(量化共轭梯度法)是一种 BP 神经网络的改进算法,适合于砂轮磨损状态分类问题.训练数据和测试数据如表 3 所示,其中第 1~18 组数据作为训练样本,第 19~24 组数据作为测试样本.对分析的训练数据和测试数据作为输入特征值统一归一化至范围(0,1)^[11].分别以“-1”、“0”和“1”作为分类标签表示金刚石砂轮轻度磨损、严重磨损和砂轮修整 3 种状态.分析中支持向量机(SVM)采用径向基核函数,设置初始惩罚因子 c 为 2,核函数参数 g 为 1,训练步长 42.而 BP 神经网络训练步长 48,训练误差 0.000 179.

利用完成训练的支持向量机和 BP 神经网络对测试数据进行分类预测,得到预测结果如表 4 所示,可见测试结果的准确率高达 100%;同时发现对本

文 AE 信号小样本数据的条件下,支持向量机要比 BP 神经网络的结果好. 所以利用磨削氧化铝陶瓷 AE 信号的小波分解系数的方差作为判别砂轮磨损状态的特征值,采用支持向量机和量化共轭梯度法 BP 神经网络可以对金刚石砂轮的磨损与修整状态做出非常正确的判断.

表 3 训练数据和测试数据值

Tab. 3 Training data and test data values

序号	输入特征						标签
	a5	d5	d4	d3	d2	d1	
1	0.000	0.003	0.004	0.001	6.8E-05	2.1E-06	-1
2	0.003	0.053	0.023	0.003	1.3E-04	3.3E-06	-1
3	0.000	0.004	0.007	0.002	1.2E-04	3.2E-06	-1
4	0.000	0.006	0.009	0.002	1.3E-04	3.8E-06	-1
5	0.000	0.005	0.010	0.002	1.6E-04	4.1E-06	-1
6	0.003	0.059	0.025	0.003	1.3E-04	3.5E-06	-1
7	0.056	0.395	0.253	0.274	2.2E-02	2.4E-04	0
8	0.047	0.458	0.385	0.103	6.7E-03	9.4E-05	0
9	0.079	0.575	0.297	0.047	2.3E-03	3.6E-05	0
10	0.068	0.540	0.333	0.057	2.4E-03	3.8E-05	0
11	0.086	0.558	0.304	0.050	2.1E-03	3.3E-05	0
12	0.084	0.563	0.299	0.053	2.2E-03	3.5E-05	0
13	0.107	0.120	0.052	0.039	5.5E-03	1.8E-04	1
14	0.075	0.159	0.033	0.034	4.4E-03	1.3E-04	1
15	0.090	0.168	0.048	0.037	5.0E-03	1.5E-04	1
16	0.020	0.106	0.007	0.012	2.2E-03	8.0E-05	1
17	0.163	0.155	0.048	0.021	3.0E-03	1.1E-04	1
18	0.015	0.104	0.005	0.012	2.0E-03	7.0E-05	1
19	0.003	0.055	0.023	0.003	1.2E-04	3.1E-06	-1
20	0.000	0.006	0.010	0.002	1.3E-04	3.4E-06	-1
21	0.070	0.503	0.285	0.132	1.0E-02	1.4E-04	0
22	0.086	0.584	0.281	0.047	2.1E-03	3.3E-05	0
23	0.066	0.180	0.026	0.023	3.4E-03	1.1E-04	1
24	0.047	0.150	0.012	0.008	1.7E-03	6.8E-05	1

表 4 砂轮磨损状态测试结果

Tab. 4 Grinding wheel wear states test results

序号	理想输出	BP 神经网络	SVM
1	-1	-0.980 4	-1
2	-1	-0.984 6	-1
3	0	0.038 8	0
4	0	0.011 9	0
5	1	0.999 4	1
6	1	0.981 5	1
准确率/%		100	100

5 结 论

采用先进的 AE 仪器,工程陶瓷氧化铝的精密磨削中,AE 信号分布为 30~200 kHz 频段,最强频谱能量在 30~40 kHz 频段. 磨削 AE 信号的特征值,包括计数、能量、平均信号电平 ASL 和有效值 RMS,都能够反映磨削参数的变化. 金刚石砂轮锋利与严重磨损钝化的磨削 AE 信号频谱有明显不同. 磨削 AE 信号小波分解系数的方差值能够反映金刚石砂轮的磨损状态. 利用磨削 AE 信号的小波

分解系数方差作为判别氧化铝磨削金刚石砂轮磨损状态的特征值,采用支持向量机对金刚石砂轮的磨损与修整状态判断准确率达 100%.

参考文献

[1] 郭力,尹绍辉,李波,等. 模拟磨削烧伤条件下的声发射信号特征[J]. 中国机械工程,2009,20(4):413-416.
GUO Li, YIN Shaohui, LI Bo, *et al.* Investigation of acoustic emission signals under a simulative environment of grinding burn [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(4): 413-416. (In Chinese)

[2] MOHAMED Arif, FOLKES Janet, CHEN Xun. Detection of grinding temperature using laser irradiation and acoustic emission sensing technique [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2012, 27: 1-6.

[3] AKBARI Javad, STAITO Yoshio, HANAOKA Tadaaki, *et al.* Effect of grinding parameters on acoustic emission signals while grinding ceramics [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 62: 403-407.

[4] HWANG 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.

[5] SUSIC Egon, GRABEC Igor. Characterization of the grinding process by acoustic emission [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40: 225-238.

[6] WEBSTER J, DONG W P, LINDSAY R. Raw acoustic emission signal analysis of grinding process [J]. Annals of the CIRP, 1996, 45(1): 335-340.

[7] LIU Guijie, WANG Qiang, KANG Renke. Study on the wavelet transform based monitor signal processing method for grinding wheel dull [J]. Key Engineering Materials, 2008(375/376): 598-602.

[8] MOKBEL Amin A, MAKSOUD T M A. Monitoring of the condition of diamond grinding wheels using acoustic emission technique [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 101: 292-297.

[9] LIAO T W, TING C F, QU J, *et al.* A wavelet-based methodology for grinding wheel condition monitoring [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47: 580-592.

[10] LIAO T W. Feature extraction and selection from acoustic emission signals with an application in grinding wheel condition monitoring [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2010, 23: 74-84.

[11] YANG Zhensheng, YU Zhonghua. Grinding wheel wear monitoring based on wavelet analysis and support vector machine [J]. International Journal of Advanced Manufacture Technology, 2012, 62: 107-121.

[12] TAWAKOLZ Taghi. Developments in grinding process monitoring and evaluation of results [J]. Int J Mechatronics and Manufacturing Systems, 2008, 1(4): 307-320.

[13] CHEN Xun, ÖPOZ Tahsin T. Effect of different parameters on grinding efficiency and its monitoring by acoustic emission [J]. Production & Manufacturing Research, 2016, 4(1): 190-208.

[14] 彭延峰, 刘贞涛, 程军圣, 等. 基于初值优化的自适应最稀疏时频分析方法 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(8): 50-56.
PENG Yanfeng, LIU Zhentao, CHENG Junsheng, *et al.* Adaptive and sparsest time-frequency analysis method based on initial value optimization [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(8): 50-56. (In Chinese)

[15] ZHANG B, ZHENG X L, TOKURA H, *et al.* Grinding induced damage in ceramics [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 132: 353-364.