

磨粒变切深划擦陶瓷声发射及其时间序列建模

郭力[†], 王伟程, 郭君涛

(湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:实验研究了不同切深下单颗金刚石磨粒分别划擦氧化铝和氧化锆陶瓷时的声发射信号的频谱和特征值,并对金刚石磨粒划擦氧化铝和氧化锆陶瓷时的声发射信号建立合适阶次的时间序列自回归滑动平均模型.研究表明,随着切深的增大氧化铝的划擦声发射信号在 0~110 kHz 主频段的能量增大,并且声发射信号最大幅值在较高频率;随着切深的增加氧化锆划擦声发射信号在 0~100 kHz 主频段的能量减少,并且声发射信号最大幅值在较低频率;同时划擦声发射信号特征值会随着切深的增大而增加.合适的自回归滑动平均模型与单颗金刚石磨粒分别划擦氧化铝和氧化锆陶瓷时的声发射信号有较高的相似度,其特征参数与单颗磨粒切深之间也具有好的线性关系,说明合适的自回归滑动平均模型能较好地表征单颗金刚石磨粒划擦氧化铝和氧化锆的声发射信号特征,并可实时分析单颗金刚石磨粒划擦陶瓷的深度.

关键词:单颗金刚石磨粒;声发射;时间序列;自回归滑动平均模型;工程陶瓷

中图分类号:TH161

文献标志码:A

Characteristics of Acoustic Emission Signal Due to Diamond Grit Scratching on Engineering Ceramics and Its Time Series Modeling

GUO Li[†], WANG Weicheng, GUO Juntao

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

Abstract: The spectrum and characteristic values of acoustic emission signals of single diamond grit scratching alumina and zirconia ceramics at different cutting depths were studied experimentally. A time series Auto Regressive Moving Average (ARMA) model was established for the acoustic emission of diamond grit scratching alumina and zirconia ceramics by appropriate time series model and model order. The main frequency of single diamond grit scratching on alumina and zirconia ceramics is dominant on the frequency band of 0~110 kHz. The results show that the main frequency band energy of scratch alumina Acoustic Emission (AE) signal increases with the increase of cutting depth, and the maximum amplitude of AE signal is at a higher frequency in the main frequency band. The main frequency band energy of scratch zirconia Acoustic Emission (AE) signal decreases with the increase of cutting depth, and the maximum amplitude of AE signal is at a lower frequency in the main frequency band. The eigenvalues of the acoustic emission signal will increase with the increase of the depth of cut. The appropriate ARMA model has a high similarity with the acoustic emission signal of diamond grit scratching alumina and zirconia ceramics, and the linear relationship between the characteristic value and the cutting depth is also good. It shows that the appropriate ARMA model can

* 收稿日期:2019-04-17

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: guolihnu8@163.com

better characterize the acoustic emission signal characteristics of single diamond grit scratching alumina and zirconia ceramics. The real time analysis of scratching depth of single diamond grit can be done by use of the appropriate AR-MA model.

Key words: single diamond grit; Acoustic Emission (AE); time series; Auto Regression Moving Average (AR-MA); engineering ceramics

工程陶瓷在航空航天、化工、国防、机械、电子等行业中有非常广泛的应用,采用金刚石砂轮磨削加工作为工程陶瓷精密制造的有效方式占工程陶瓷总体加工的80%左右。然而作为硬脆难加工材料,工程陶瓷因其高脆性和低断裂韧性而在磨削加工过程中易产生微裂纹、变质层和残余应力等缺陷,为了防止产生磨削缺陷,在工程陶瓷磨削过程中的监测非常重要。在工程陶瓷材料磨削过程中产生的高应力和高应变会在磨削区发出丰富的声发射(Acoustic Emission, AE)信号^[1],这些AE信号中包含磨削过程中陶瓷工件磨削质量和金刚石砂轮磨削状态等大量有用信息,因此,AE被认为是磨削工程陶瓷的最灵敏的监测方式之一。

由于磨削砂轮由大量的磨粒黏结而成,磨削过程中砂轮上大量磨粒参加磨削,所以砂轮磨削机理非常复杂,而研究磨削加工的机理是优化磨削工艺的关键。研究单颗磨粒划擦机理是研究磨削砂轮磨削机理的基础,监测单颗磨粒划擦磨削机理的主要方法是应用声发射技术,因此,单颗磨粒划擦的声发射监测在磨削监测过程研究中有着重要的作用。

目前国内外学者对单颗磨粒划擦的声发射监测进行了一些研究。文献[1]中通过立方氮化硼(CBN)磨粒划擦En24T材料,发现多切削刃磨粒划擦的AE信号比单切削刃的AE信号强;单颗磨粒划擦中耕犁作用产生的AE信号较切削和划擦作用产生的AE信号更强;单刃磨粒划擦AE信号功率谱频率在小于100kHz的频段内较强,而多切削刃磨粒划擦的AE信号功率谱频率在大于100kHz的频段内较强;耕犁动作可以激发更多的高频AE信号。文献[2]对单颗磨粒划擦高温合金CMSX4和Titanium-64材料的AE信号通过短时傅里叶变换(STFT)进行分析,发现其中的滑擦、耕犁和切削三部分的AE信号的强度不同,但信号主要集中在同样的几个频段内,切削、耕犁和滑擦的AE信号幅值依次减小;同时这两种材料单颗磨粒划擦的AE信号也具有高度相似性;并且基于此对切削、耕犁和滑擦的AE信号进行实时模糊聚

类分类的准确度为90%左右。文献[3]在CBN单颗磨粒划擦En24T材料的实验发现,其滑擦、耕犁和切削过程中的不同阶段的AE信号的功率、幅值和频率都会有不同的特征,滑擦阶段产生的AE信号常在低于100kHz的频率范围内,在频率大约为50kHz的时候达到最大值;耕犁和切削阶段的AE信号不易区分,它们的AE信号常出现于50~660kHz的频率之内,其中50~660kHz之间也分为两个阶段,50~320kHz和320~660kHz,前者的AE信号幅值大于后者。文献[4]研究了氧化铝单颗磨粒分别对Inconel718、EN8、MAR-M002等高温合金材料划擦后的表面形貌,并用划痕堆积率的不同来区分切削、耕犁和滑擦。对这3个阶段的AE信号进行STFT、小波变换(WT)分析,发现其中滑擦、耕犁和切削3部分的AE信号主要频段不同,耕犁的主要频段在以50kHz和100kHz为峰值的频段附近,切削的主要频段主要在以50kHz和600kHz为峰值的频段附近,而滑擦在50~100kHz之间有较大的幅值,同时在600~750kHz的频带之间有较小的幅值。文献[5-6]中通过氧化铝单颗磨粒划擦CMSX4高温合金材料,并用单颗磨粒划擦划痕堆积率的不同来区分单颗磨粒的滑擦、耕犁和切削3个阶段,对不同阶段的AE信号分别进行短时傅立叶变换(STFT)、小波变换(WT)分析,发现滑擦、耕犁和切削3个阶段AE信号的主要频段不同。并将STFT、WT分析结果通过神经网络对滑擦、耕犁和切削进行识别,分类精度在80%到100%之间;并在此基础上研究了神经网络(NNS)和模糊聚类/遗传算法(GA)对其的识别,其精度都有所提高。文献[7]中对CBN单颗磨粒划擦Inconel718高温合金实验中的划痕和AE信号进行了监测,发现第1个划痕滑擦占比较大,而最后一个划痕耕犁、切削占比较大,AE信号能明显分辨出这种不同;而力传感器采集的信号和采用表面观察的方法很难看出区别,只能通过白光干涉仪看出划痕的不同。

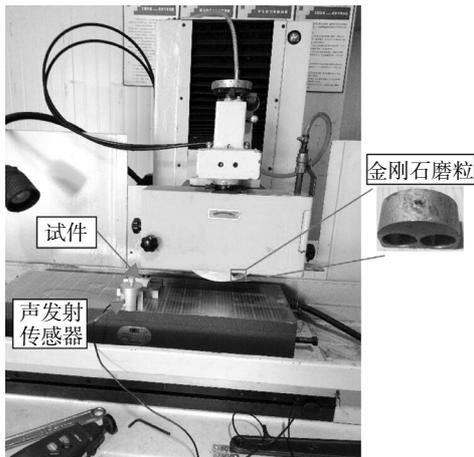
单颗金刚石磨粒划擦工程陶瓷的声发射监测研究很少。本文通过单颗金刚石磨粒分别划擦氧化锆、

氧化铝这 2 种工程陶瓷,采集实验过程的声发射信号,对其特征进行研究;并利用时间序列方法对声发射信号进行建模分析.旨在通过深入研究单颗金刚石磨粒划擦氧化铝和氧化铝陶瓷声发射监测,为金刚石砂轮磨削工程陶瓷的声发射监测研究打下基础.

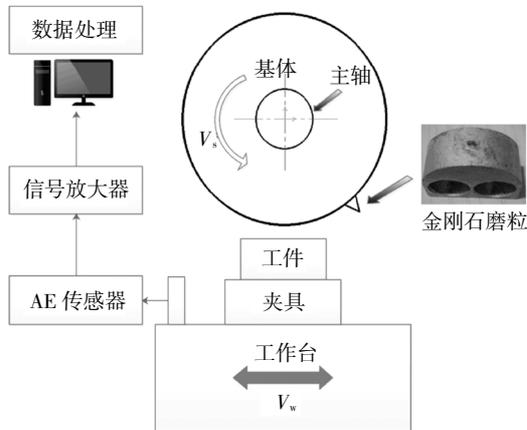
1 实验条件及方法

实验是在一台 MGK7-120X6/F 高精度数控平面磨床上进行的,如图 1 所示,单颗金刚石磨粒通过高温钎焊焊接到不锈钢螺帽基体上,螺帽基体通过螺纹安装在直径为 200 mm、宽度为 12 mm 的铝盘圆周上,铝盘安装在机床主轴上,机床主轴带动铝盘和其上面的单颗金刚石磨粒旋转.在实验过程中机床主轴的转速为 3 000 r/min 不变,即单颗金刚石磨粒划擦速度为 31.4 m/s 不变;而磨粒划擦切深分别为 5、10、15、20 μm .同时为了突出变划擦切深的影响,保持工件工作台速度为 4 m/min 不变.采用材料物理机

械性能相差较大的较易磨削的氧化锆(PSZ)和较难磨削的氧化铝 Al_2O_3 两种典型工程陶瓷材料来进行划擦实验,采用的氧化锆和氧化铝陶瓷试件的尺寸均为 35 mm \times 15 mm \times 10 mm,并在 35 mm \times 15 mm 的平面上进行划擦,陶瓷试件材料力学性能见表 1.试件固定在夹具上,夹具通过电磁吸力安装在磨床工作台上.声发射传感器由磁力夹具装夹在工作台上,声发射传感器和工作台之间界面填充声耦合剂凡士林,以减少传播中的声发射信号在界面的衰减.采用美国物理声学公司 PAC 生产的压电晶体 AE 传感器 W5a,其工作频率带宽宽、灵敏度高,可在 -65~175 $^{\circ}\text{C}$ 之间正常工作.划擦工程陶瓷试件产生的单颗金刚石磨粒声发射信号从试件夹具传播到磨床工作台上,然后由声发射传感器测得,经过前置放大器,最后由 PAC 公司生产的 PCI-2 声发射信号采集卡和 AEwin 声发射信号采集系统进行采集.声发射信号的采样频率为 2 MHz,前置放大增益为 40 dB,门槛为固定 40 dB.采集得到的声发射波形流信号输入到 MATLAB 软件中进行分析处理.



(a)实验装置



(b)实验原理

图 1 实验台

Fig.1 Test rig

表 1 工程陶瓷试件材料性能

Tab.1 Mechanical properties of engineering ceramic materials

工件材料	晶粒尺寸/ μm	烧结方式	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	抗弯强度/MPa	微观硬度/GPa	断裂韧性/($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	弹性模量/GPa
氧化铝	2~10	常压烧结	3.9	250	16.7	4.99	320
氧化锆	≤ 1	常压烧结	6	946	11.8	8.1	205

2 实验结果

单颗金刚石磨粒划擦工程陶瓷氧化铝和氧化锆的 AE 信号特征参数分别如表 2 和表 3 所示.由表 2 和表 3 可以看出,随着划擦切深的增大,AE 信号的能量、持续时间、幅值和均方根 RMS 增大,而上升时间和计数特征参数则呈现波动上升.这是由于随着划擦切深的增大,陶瓷工件的划擦去除体积增加,去除材料所需能量增加,金刚石磨粒耕犁和切削工程陶瓷深度逐渐增加,从而使 AE 信号的能量、幅值、RMS 值都会随之增加.在同样的实验条件下,单颗金刚石磨粒划擦氧化铝的 AE 信号特征参数大于氧化锆的 AE 信号特征参数.

表2 不同切深下的氧化铝划擦 AE 特征参数

Tab.2 AE characteristic parameters of alumina at different depths of cut

切深/ μm	上升时间/ μs	计数	能量/ $(10^{-12}\text{W}\cdot\text{s})$	持续时间/ μs	幅值/dB	RMS/V
5	36 494	4 743	3 194	437 371	84	0.026 8
10	11 877	4 517	8 662	477 872	90	0.073 6
15	46 570	5 066	9 830	726 370	92.5	0.088 9
20	39 508	8 930	22 740	999 994	95	0.151 8

表3 不同切深下的氧化锆划擦 AE 特征参数

Tab.3 AE characteristic parameters of zirconia at different depths of cut

切深/ μm	上升时间/ μs	计数	能量/ $(10^{-12}\text{W}\cdot\text{s})$	持续时间/ μs	幅值/dB	RMS/V
5	1 249	5 240	3 993	999 995	75	0.015 4
10	15 514	6 906	5 343	999 953	81	0.023 1
15	56 141	7 798	7 361	999 997	84	0.034 9
20	16 147	7 575	8 610	999 884	89	0.063 9

图2为不同切深下单颗金刚石磨粒单次划擦氧化铝 AE 信号的时域波形,虽然磨粒单次划擦中磨粒与氧化铝划擦接触时间较短,但是在磨粒单次划擦结束后,划擦 AE 信号还在衰减传播,所以磨粒单次划擦 AE 信号传播的时间较磨粒与氧化铝工件单次划擦接触时间长.同时,虽然金刚石磨粒在划过工件最低点时才达到名义的切深,但是磨削本质上就是一种对材料的磨粒旋转划擦去除过程,工件材料划擦深度是从浅到深再由深到浅变化的,一次工件材料磨粒旋转划擦去除过程才构成了完整的磨粒划擦过程与完整的磨粒划擦 AE 信号,所以取金刚石磨粒在陶瓷工件上一次划擦的整体 AE 信号进行分析.

图2中随着单颗磨粒划擦氧化铝切深的增加,AE 信号幅值明显增加;切深分别为 5、10、15、20 μm 的 AE 信号最大幅值分别达到 625、1 182、2 091、2 917 mV;同时 AE 信号幅值包络曲线越加密集.图3为 AE 信号在 MATLAB 软件中的快速傅里叶变换 FFT 频谱,AE 信号主要能量分布在 0~107 kHz 频段之内,切深为 5 μm 的 AE 信号频谱在 85 kHz 附近幅值达到最大值,为 19 mV;切深 10 μm 的 AE 信号频谱在 107 kHz 附近幅值达到最大值,为 35 mV;切深 15 μm 的 AE 信号频谱在 98 kHz 附近幅值达到最大

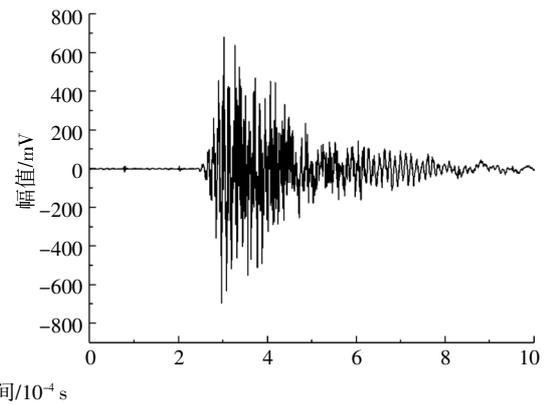
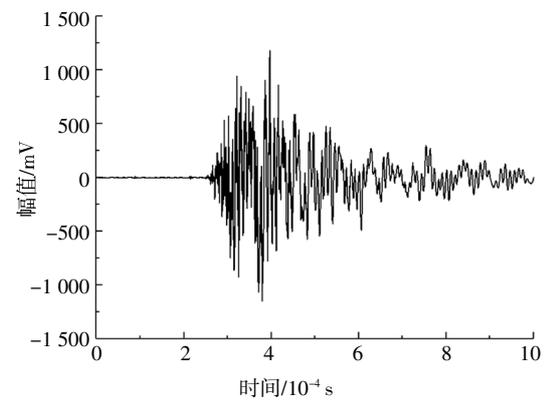
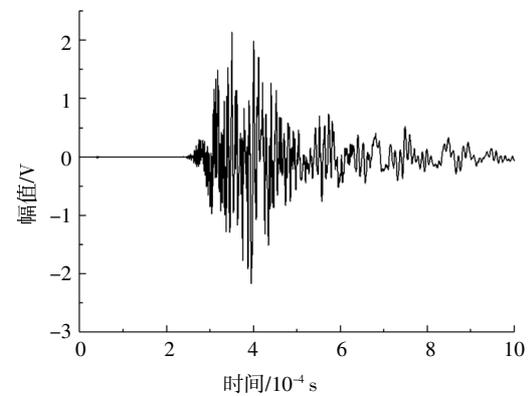
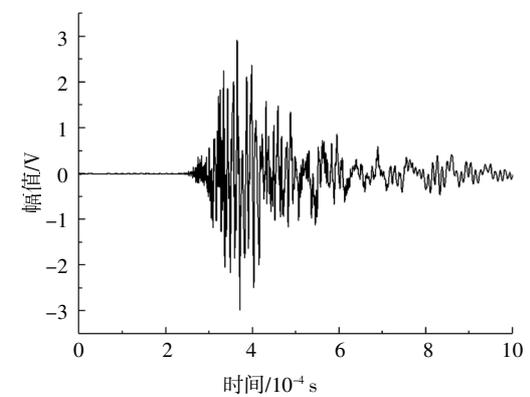
(a) 切深 5 μm (b) 切深 10 μm (c) 切深 15 μm (d) 切深 20 μm

图2 不同划擦切深下氧化铝 AE 信号

Fig.2 AE signal of alumina at different depths of cut

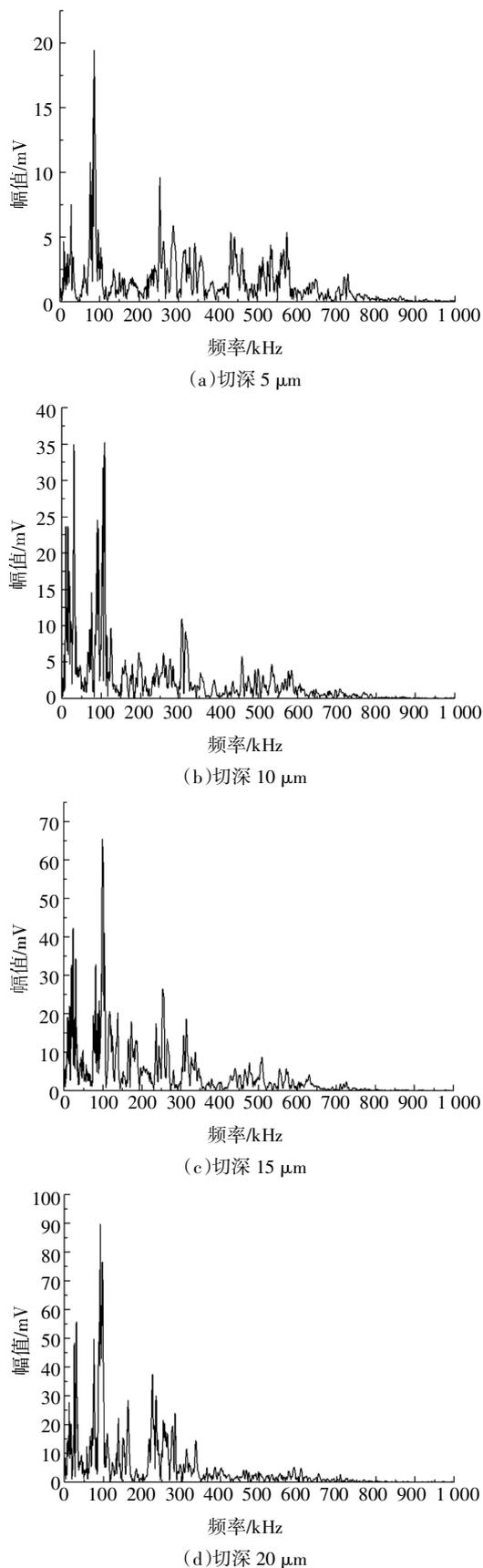


图 3 不同划擦切深下氧化铝 AE 信号频谱图

Fig.3 Spectrum of AE signal of alumina at different depths of cut

值,为 65 mV;切深 20 μm 的 AE 信号频谱在 91 kHz 附近幅值达到最大值,为 90 mV. 可见随着切深的增加,AE 信号频域的最大幅值也增加. 同时对不同切深下 AE 信号的功率谱分析也可以发现,随着切深 5、10、15、20 μm 增大,分别在 AE 信号主频 85、107、98、91 kHz 上达到 AE 信号最大峰值,分别为 25、30、36、39 dB. 切深增大,AE 信号的功率谱最大峰值增加.

图 4 为不同切深下单颗金刚石磨粒单次划擦氧化锆 AE 信号的时域波形. 由图 4 可知,随着切深的增加 AE 信号幅值明显增加;5、10、15、20 μm 切深下的最大幅值分别达到 336、750、1 253、1 913 mV;同时 AE 信号幅值包络曲线越加密集. 图 5 为不同切深下单颗金刚石磨粒划擦氧化锆声发射信号的 FFT 频谱图,切深为 5 μm 的 AE 信号频谱在 9.3 kHz 附近幅值达到最大值,为 26 mV;切深为 10 μm 的 AE 信号频谱在 6.8 kHz 附近幅值达到最大值,为 58 mV;切深 15 μm 的 AE 信号频谱在 30 kHz 附近幅值达到最大值,为 106 mV;切深为 20 μm 的 AE 信号频谱在 38 kHz 附近幅值达到最大值,为 189 mV. 由此可见,切深增加,AE 信号频域的最大幅值也增加,同时 AE 信号频域的最大幅值出现的频率增大. 对不同切深下氧化铝划擦 AE 信号的功率谱分析也可以发现,随着切深 5、10、15、20 μm 增大,分别在 AE 信号主频 9.3、6.8、30、38 kHz 上达到 AE 信号最大峰值,分别为 26、33、37、43 dB. AE 功率谱最大峰值随切深增加而增大.

与氧化铝划擦 AE 信号频率域最大幅值在 85~107 kHz 频段不同,氧化锆划擦切深分别为 5、10、15、20 μm 下声发射信号频域的最大幅值都出现在 6.8~38 kHz 的低频范围内. 单颗金刚石磨粒分别划擦氧化铝和氧化锆的 AE 信号,切深与 AE 信号最大幅值之间有着近似线性关系.

可见氧化铝单颗磨粒划擦 AE 信号最大幅值大于氧化锆的单颗磨粒划擦 AE 信号最大幅值. 而在工程陶瓷磨削 AE 信号与磨削力和磨削温度的关系研究中发现,虽然在相同的磨削切深下,氧化锆的磨削力大于氧化铝的磨削力,但氧化锆的切向磨削力小于氧化铝的切向磨削力. 而切向磨削力与砂轮线速度(实验中砂轮线速度不变)的乘积为磨削功率,也即为磨削声发射信号的能量,因此金刚石砂轮氧化

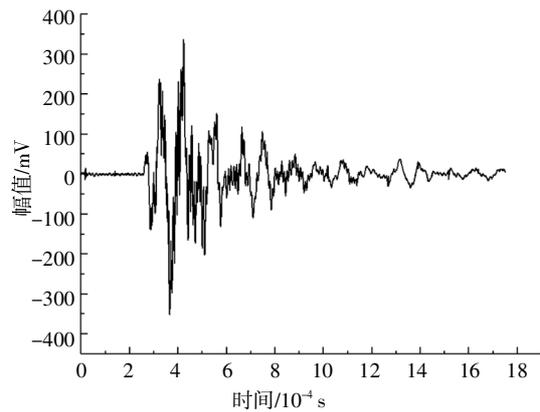
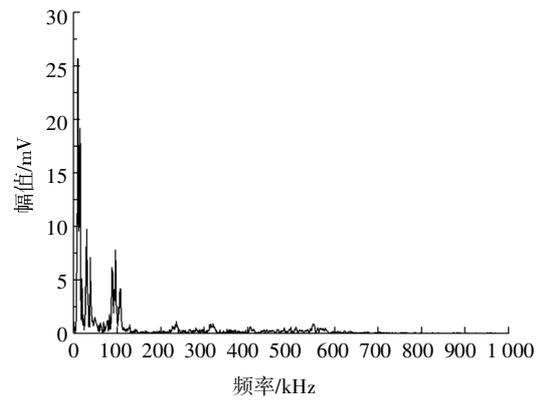
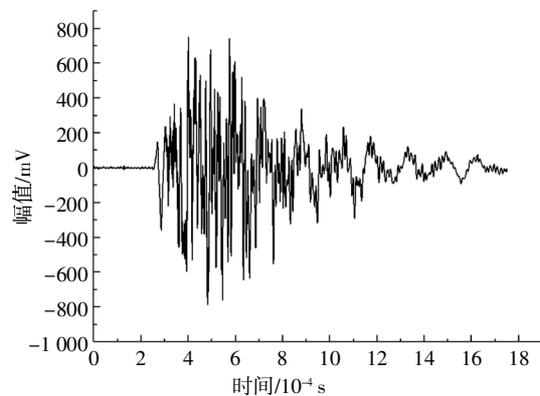
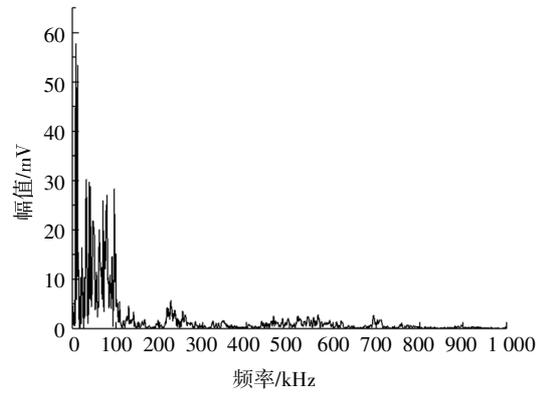
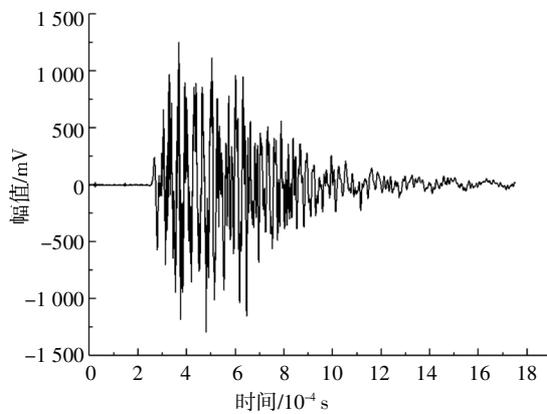
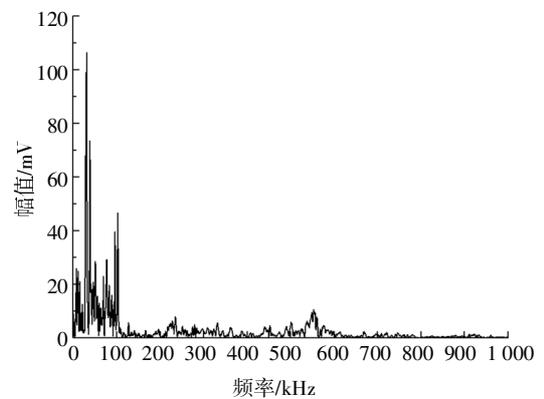
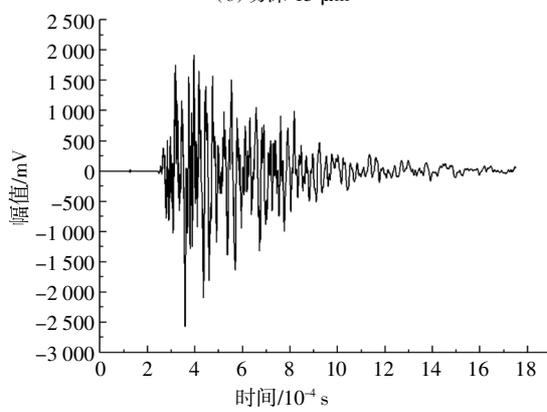
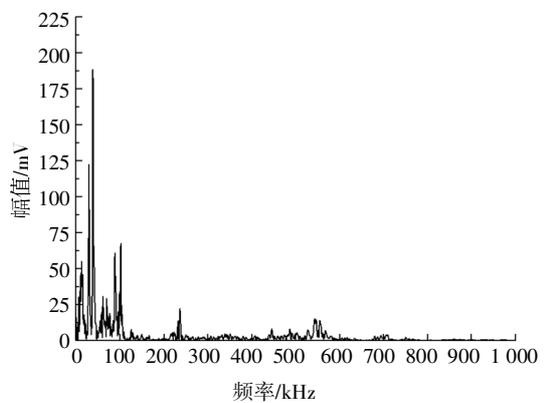
(a)切深 5 μm (a)切深 5 μm (b)切深 10 μm (b)切深 10 μm (c)切深 15 μm (c)切深 15 μm (d)切深 20 μm (d)切深 20 μm

图4 不同划擦切深下氧化锆 AE 信号

Fig.4 AE signal of zirconia at different depths of cut

图5 不同划擦切深下氧化锆 AE 信号频谱图

Fig.5 Spectrum of AE signal of zirconia at different depths of cut

锆陶瓷磨削声发射信号能量会小于氧化铝陶瓷的。同样道理单颗金刚石磨粒划擦氧化铝陶瓷 AE 信号最大幅值小于氧化铝陶瓷的,单颗金刚石磨粒划擦氧化铝的 AE 信号特征参数大于氧化锆的 AE 信号特征参数,即单颗金刚石磨粒划擦较难磨削的氧化铝的 AE 信号能量比较易磨削的氧化锆的 AE 信号能量大。

图6和图7分别为氧化铝、氧化锆陶瓷划擦声发射信号经过快速傅里叶变换 FFT 后的各频段能量占比。可见随着切深的增加氧化铝的划擦声发射信号的最强能量 0~110 kHz 频段的能量增大,而 110~400 kHz 频段的 AE 信号能量减少。由于氧化铝较难磨削所以其划擦声发射信号在 0~400 kHz 较高频率范围内都有分布。氧化锆陶瓷划擦 AE 信号的最强能量(0~100 kHz 频段的能量)随切深增加而减少,而在 100~200 kHz 内的 AE 信号能量随切深增加而增大;由于氧化锆较容易磨削所以其划擦 AE 信号仅在 0~300 kHz 较低频率范围内分布。

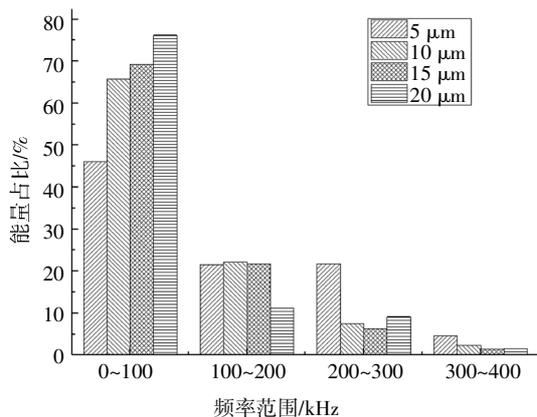


图6 氧化铝 AE 信号 FFT 各幅值能量占比

Fig.6 Energy ratio of amplitude of AE signal FFT of alumina

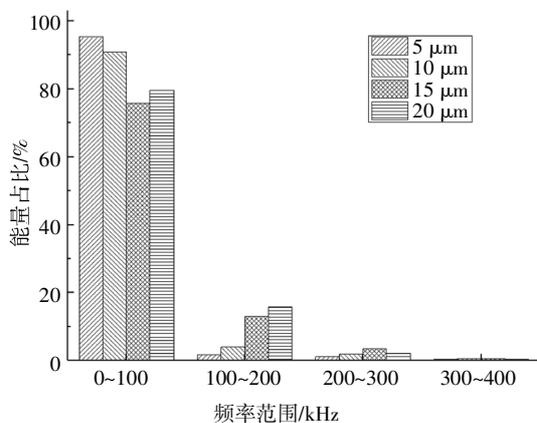


图7 氧化锆 AE 信号 FFT 各幅值能量占比

Fig.7 Energy ratio of amplitude of AE signal FFT of zirconia

重复实验结果表明,对于同样的划擦参数,单颗金刚石磨粒划擦氧化铝和氧化锆陶瓷声发射信号的均方根 RMS 值与其平均值的偏差在 15%以内。这表明,在同样的划擦参数条件下,单颗磨粒划擦陶瓷声发射重复实验后这些分析结论的稳定性较好。

3 时间序列建模

单颗金刚石磨粒分别划擦工程陶瓷氧化铝和氧化锆的声发射信号是一个十分复杂的随机过程,工程陶瓷材料在划擦过程中主要受到金刚石磨粒的塑性去除(包括滑擦、耕犁和切削),切深的不同导致 AE 信号各异,切深的变化与 AE 信号特征有着必然的因果联系。单颗磨粒划擦陶瓷过程中的 AE 信号作为时间序列的一种,可以采用时间序列法^[8]对不同切深划擦过程中的 AE 信号进行数据处理,不同切深下的单颗金刚石磨粒划擦工程陶瓷的声发射信号时间序列满足自回归滑动平均模型(ARMA)。

时间序列 ARMA(n, m)模型定阶即对 n, m 进行确定,是时间序列模型建立中关键的一步,若模型阶数过低,则不能准确反映原 AE 信号的特征;若模型阶数过高,则其计算量过大,建模过程过于复杂。本文采用的是动态数据系统建模方法(Dynamic Data System, DDS)^[9-11],即使用 ARMA($n, n-1$)的模型形式,这样在准确反映原 AE 信号特征的前提下,从需要确定 n 和 m 两个阶数简化到只需确定一个阶数 n ,减少了分析计算工作量。时间序列模型的定阶方法有很多,本文使用最小信息准则(Akaike Information Criterion, AIC)方法^[8]对实验中采集的单颗磨粒划擦工程陶瓷 AE 信号进行阶数判断,其函数为:

$$AIC = -2L/k + 2n/k \quad (1)$$

式中: L 为模型中极大似然函数值; k 为信号长度; n 为模型中的参数个数(即 ARMA($n, n-1$)模型阶数 n)。一般来说,当模型复杂度提高, n 增大时,极大似然函数 L 也会增大,从而使 AIC 变小。AIC 的准则要求是其数值越小越好,但考虑到如果实际阶数 n 过大,模型过于复杂,计算量过大,所以要选择合适的 ARMA($n, n-1$)模型阶数 n 。具体是在 MATLAB 软件中建立阶数为 1~20 阶的 AE 信号的时间序列 ARMA 模型,再用 MATLAB 软件计算 ARMA 模型的 AIC 值。

4 ARMA 模型建立与解析

4.1 划擦氧化铝声发射信号的时间序列模型

单颗磨粒划擦氧化铝陶瓷 AE 信号 ARMA 模型通过 AIC 准则进行定阶分析, 通过计算发现, 当 ARMA 模型阶数为 10 时, 时间序列模型与原 AE 信号的相似度达 90%, 而在阶数为 20 时其相似度仅提高到 91%, 可见后续随阶数的提高, 时间序列模型相似度的提升幅度会越来越小, 但是计算工作量大大增加. 90%左右的相似度说明时间序列模型能较好地反映原始 AE 信号的特征, 因此确定 ARMA 模型的阶数 n 在 1~20 之间. 通过 AIC 分析, 由图 8 可以看出, 在 $n = 4$ 后的 AIC 下降趋势减缓, 因此在满足分析精度要求的条件下, 为了减少计算量, 可以选定氧化铝 AE 信号的 ARMA ($n, n-1$) 模型的阶数为 ARMA(4,3). 由文献[9]可以得出, 划擦氧化铝 AE 信号 ARMA(4,3)模型的一般形式为:

$$x_t + \varphi_1 x_{t-1} + \varphi_2 x_{t-2} + \varphi_3 x_{t-3} + \varphi_4 x_{t-4} = \alpha_t + \theta_1 \alpha_{t-1} + \theta_2 \alpha_{t-2} + \theta_3 \alpha_{t-3} \quad (2)$$

式中: x_t 为当前 AE 信号的值; x_{t-n} 是 x_t 信号 n 点前的信号值; α_t 是一零均值、方差为 σ_α^2 的正态白噪声, 即 $\alpha_t \in N(0, \sigma_\alpha^2)$; φ_n, θ_{n-1} 是 ARMA(4,3)模型的特征参数.

在 ARMA(4,3)模型的阶数确定后, 分析 ARMA(4,3)模型的特征参数来完成对 ARMA(4,3)模型的构造, 采用 MATLAB 软件中自带的函数算法 Forward-backward 法对 ARMA(4,3)模型特征参数进行分析, 得到不同切深划擦 AE 信号的 ARMA(4,3)模型的特征参数.

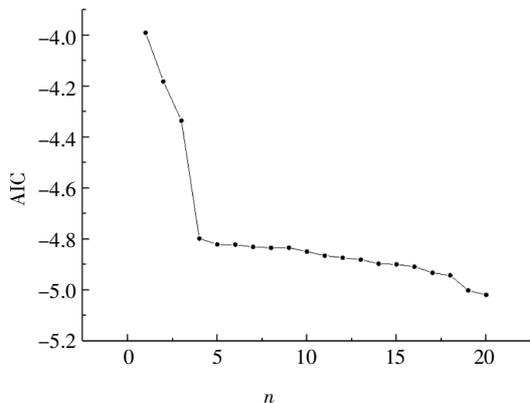
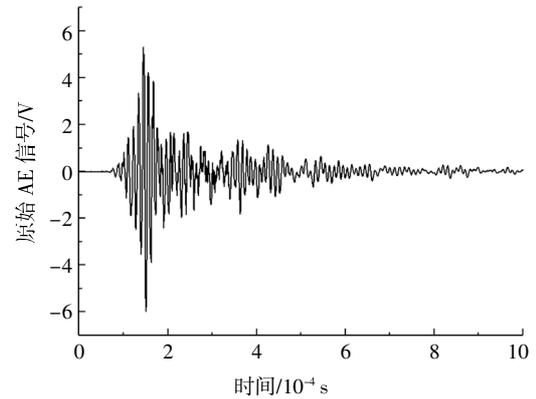
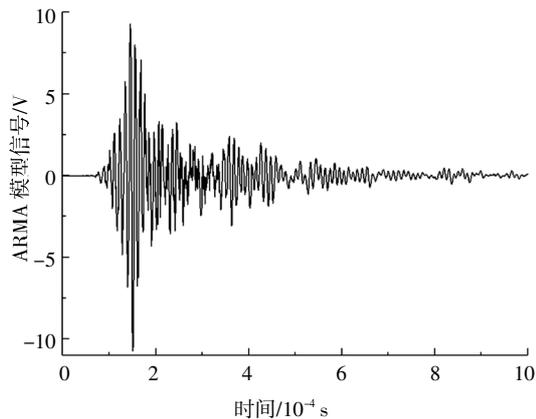


图 8 氧化铝的 ARMA($n, n-1$)模型的 AIC 阶数检测
Fig.8 AIC order detection of ARMA ($n, n-1$) model of alumina

由图 9 可以看出, 切深为 5 μm 时的单颗金刚石磨粒划擦氧化铝的 AE 信号和其 ARMA (4,3)模型信号的相似度较高, 能达到 87%以上; 由分析可知, 切深分别在 10、15、20 μm 时的单颗磨粒划擦氧化铝的 AE 信号和其 ARMA(4,3)模型信号的相似度都能达到 89%以上. 说明单颗磨粒划擦氧化铝的 AE 信号的时间序列 ARMA(4,3)模型信号能较好地反映出原始 AE 信号的特征.



(a)单颗磨粒 AE 信号

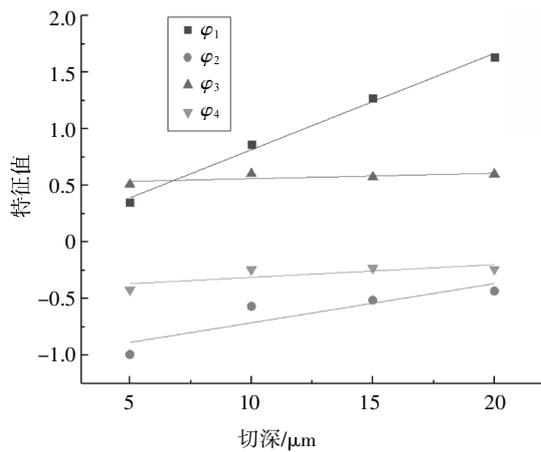


(b)ARMA(4,3)模型的 AE 信号

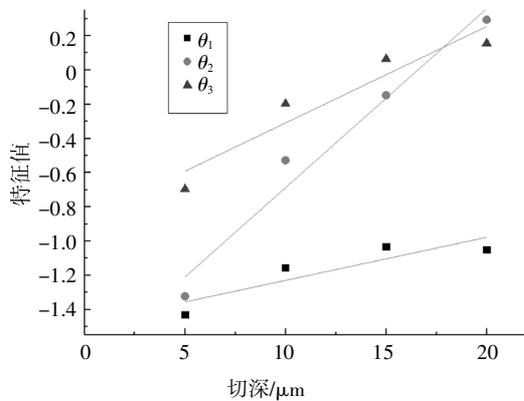
图 9 切深 5 μm 氧化铝 AE 信号和其 ARMA(4,3)模型信号的对比

Fig.9 Comparison of AE signal of alumina with a depth of 5 μm and its ARMA (4,3) model

图 10 为 AE 信号 ARMA(4,3)模型特征参数与切深的关系, 随着切深的增加, ARMA(4,3)模型的特征参数基本也随之增加. 从表 4 中线性拟合的各个特征参数数值还可以看出, 氧化铝 AE 信号 ARMA(4,3)模型特征参数 ($\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \theta_1, \theta_2, \theta_3$) 与切深之间有良好的线性关系, 参数 a, b 的标准差在较低范围内, 自相关性 R^2 接近 1. 这表明合适阶次的 ARMA 模型可较好地表征单颗金刚石磨粒划擦氧化铝的 AE 信号特征. 结合实验结果表 2、表 3 和 ARMA



(a) φ_n 与切深的关联



(b) θ_n 与切深的关联

图 10 氧化铝的 ARMA(4,3)模型参数与切深的关联

Fig.10 Correlation between ARMA(4,3) model parameters of alumina and its depth of cut

表 4 氧化铝 ARMA(4,3)模型特征值与切深拟合关系

Tab.4 Fitting relationship between the characteristic values of ARMA (4,3) model of alumina and its depth of cut

拟合公式	a		b		R ²
	值	标准差	值	标准差	
$\varphi_1 = a \times \alpha_p + b$	0.085 0	0.005 0	-0.034 1	0.068 7	0.99
$\varphi_2 = a \times \alpha_p + b$	0.034 6	0.012 2	-1.065 1	0.068 1	0.89
$\varphi_3 = a \times \alpha_p + b$	0.004 8	0.003 3	0.511 2	0.045 3	0.91
$\varphi_4 = a \times \alpha_p + b$	0.011 2	0.006 2	-0.424 9	0.084 7	0.92
$\theta_1 = a \times \alpha_p + b$	0.025 2	0.009 2	-1.481 0	0.101 7	0.89
$\theta_2 = a \times \alpha_p + b$	0.104 5	0.013 0	-1.732 4	0.178 5	0.97
$\theta_3 = a \times \alpha_p + b$	0.056 3	0.012 9	-0.872 5	0.177 1	0.91

模型分析可知,单颗金刚石磨粒划擦陶瓷时,声发射

的能量值、幅值和 RMS 值等的变化,基本随着划擦切深的增加呈线性增加的趋势,这与 ARMA 模型各特征参数与切深之间的变化特征较为相似.这表明,随着划擦切深的增加,陶瓷材料塑性去除程度加剧,声发射信号的特征参数及其 ARMA(4,3)模型的特征参数与划擦切深呈线性正效应关系.合适阶次的 ARMA 模型可实时分析金刚石磨粒划擦氧化铝工程陶瓷的深度.

4.2 划擦氧化锆声发射信号的时间序列模型

同样,对单颗金刚石磨粒划擦氧化锆陶瓷 AE 信号时间序列 ARMA($n, n-1$)模型通过 AIC 准则进行定阶,由图 11 可以看出,ARMA 模型在 $n = 4$ 后的 AIC 值下降趋势大为减缓,因此选定单颗磨粒划擦氧化锆 AE 信号的 ARMA ($n, n-1$) 模型为 ARMA (4,3)模型,ARMA(4,3)模型的一般形式见式(2).同样通过 MATLAB 软件分析后得出的氧化锆不同切深刻擦 AE 信号的 ARMA(4,3)模型的参数.

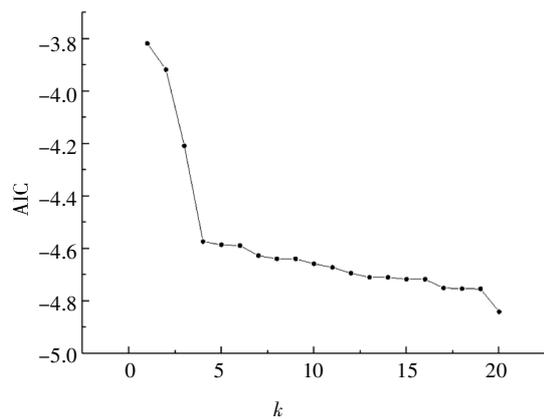


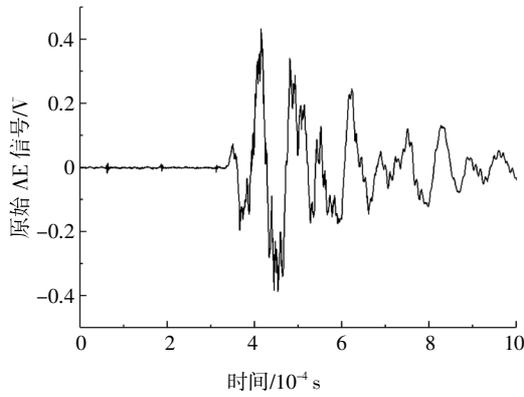
图 11 氧化锆的 ARMA($n, n-1$)模型 AIC 阶数检测

Fig.11 AIC order detection of ARMA ($n, n-1$) model of zirconia

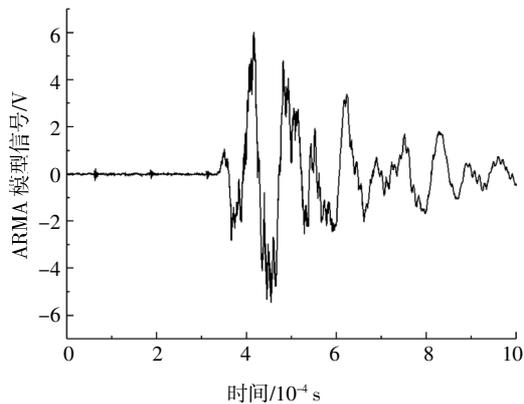
由图 12 可以看出,切深为 5 μm 时的单颗磨粒划擦氧化锆的 AE 信号和其 ARMA(4,3)模型的相似度能达到 92%以上;同时,分析可知,切深分别为 10、15、20 μm 时的单颗磨粒划擦氧化锆的 AE 信号与其时间序列 ARMA (4,3) 模型的相似度能达到 92%以上.说明单颗磨粒划擦氧化锆的 AE 信号的时间序列 ARMA(4,3)模型能较好地反映出原 AE 信号的特征.

由图 13 可以看出,随着切深的增加,ARMA (4,3)模型的各个特征参数基本也随之增加;切深分别为 5、10、15、20 μm 的氧化锆 AE 信号 ARMA (4,3)模型特征参数($\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \theta_1, \theta_2, \theta_3$)与切深之

间有近似线性关系, 这从表 5 中线性拟合的关系式参数可以很明显看出. 这表明合适阶次的 ARMA 模型可较好地表征单颗金刚石磨粒划擦氧化锆的 AE 信号特征. 合适阶次的 ARMA 模型可实时分析金刚石磨粒划擦氧化锆工程陶瓷的深度.



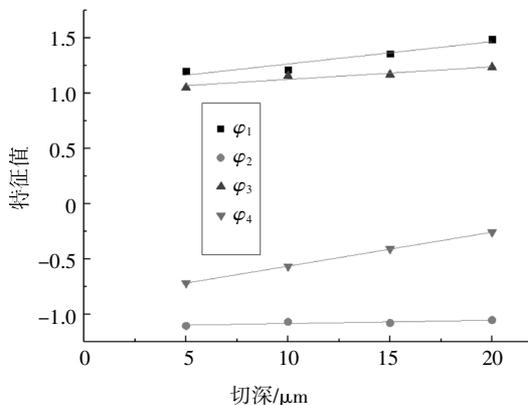
(a)单颗磨粒 AE 信号



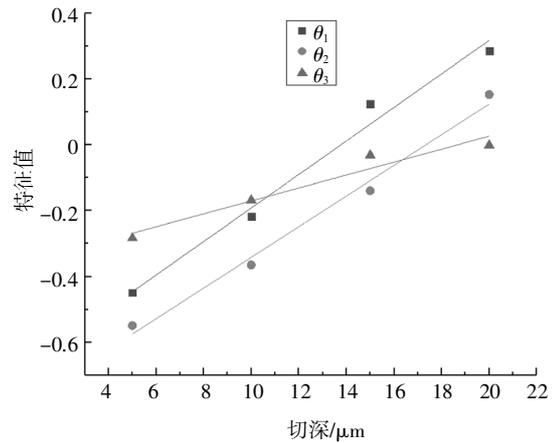
(b)ARMA(4,3)模型的 AE 信号

图 12 切深为 5 μm 氧化锆的 AE 信号和其 ARMA(4,3)模型信号的对比

Fig.12 Comparison of AE signal of zirconia with a depth of 5 μm and its ARMA (4,3) model



(a) φ_n 与切深的关联



(b) θ_n 与切深的关联

图 13 氧化锆的 ARMA(4,3)模型参数与切深的关联

Fig.13 Correlation between ARMA(4,3) model parameters of zirconia and its depth of cut

表 5 氧化锆 ARMA(4,3)模型特征值与切深拟合关系

Tab.5 Fitting relationship between the characteristic values of ARMA (4,3) model of zirconia and its depth of cut

拟合公式	a		b		R^2
	值	标准差	值	标准差	
$\varphi_1 = a \times \alpha_p + b$	0.020 2	0.004 4	1.064 9	0.059 7	0.91
$\varphi_2 = a \times \alpha_p + b$	0.002 9	0.001 2	-1.110 7	0.016 7	0.94
$\varphi_3 = a \times \alpha_p + b$	0.011 3	0.002 5	1.014 3	0.034 0	0.91
$\varphi_4 = a \times \alpha_p + b$	0.030 7	0.000 2	-0.869 2	0.003 0	0.98
$\theta_1 = a \times \alpha_p + b$	0.051 0	0.004 7	-0.702 3	0.065 2	0.98
$\theta_2 = a \times \alpha_p + b$	0.046 7	0.003 4	-0.808 8	0.047 1	0.98
$\theta_3 = a \times \alpha_p + b$	0.019 6	0.003 2	-0.366 6	0.044 4	0.95

5 结论

1)对单颗金刚石磨粒划擦工程陶瓷氧化铝和氧化锆声发射信号研究发现, 随着磨粒划擦切深的增大,其 AE 信号能量、持续时间、幅值和 RMS 等特征值也增大. 与氧化铝划擦 AE 信号频率域最大幅值在 85~107 kHz 较高频率段不同, 氧化锆划擦切深分别为 5、10、15、20 μm 下的 AE 信号频域的最大幅值皆出现在 6.8~38 kHz 的低频范围内. 随着切深的增加, 氧化铝的划擦声发射信号的 0~110 kHz 主频段的能量增大, 而氧化锆划擦声发射信号的 0~100 kHz 主

频段的能量减少.随着切深的增加,工程陶瓷去除量增加和去除所需能量增加,AE信号的最大幅值和特征参数也会随着增大.单颗金刚石磨粒划擦氧化铝和氧化锆的AE信号最大幅值与磨粒切深之间有着近似线性关系.在相同切深下氧化铝的单颗磨粒划擦声发射信号特征参数大于氧化锆的.

2)单颗金刚石磨粒划擦氧化铝和氧化锆AE信号的时间序列ARMA(4,3)模型的特征参数与磨粒切深之间有近似的线性正效应关系,都随着切深的增加而增加.合适阶次的ARMA模型可较好地表征单颗金刚石磨粒划擦氧化铝和氧化锆工程陶瓷的AE信号特征,并可实时分析金刚石磨粒划擦工程陶瓷的深度.

参考文献

- [1] CHEN X, ÖPÖZ T T. Effect of different parameters on grinding efficiency and its monitoring by acoustic emission[J]. *Production & Manufacturing Research*, 2016, 4(1): 190—208.
- [2] GRIFFIN J, CHEN X. Real-time fuzzy-clustering and cart rules classification of the characteristics of emitted acoustic emission during horizontal single-grit scratch tests [J]. *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 74(1/4): 481—502.
- [3] ÖPÖZ T T, CHEN X. Acoustic emission features of material removal during single grit scratching [C]// *International Conference on Automation and Computing*. Uxbridge: IEEE, 2013: 1—6.
- [4] CHEN X, ÖPÖZ T, OLUWAJOBI A O. Analysis of grinding surface creation by single grit approach [J]. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2017, 139(12): 1—10.
- [5] GRIFFIN J, CHEN X. Classification of the acoustic emission signals of rubbing, ploughing and cutting during single grit scratch tests[J]. *International Journal of Nanomanufacturing*, 2006, 1(2): 189—209.
- [6] GRIFFIN J, CHEN X. Characteristics of the acoustic emission during horizontal single grit scratch tests: Part 2 classification and grinding tests[J]. *International Journal of Abrasive Technology*, 2009, 2(1): 43—59.
- [7] ÖPÖZ T T, CHEN X. Process monitoring and metrology for single grit grinding test performance [C]// *International Conference on Automation and Computing*. Huddersfield: IEEE, 2011: 143—148.
- [8] 杨叔子. 时间序列分析的工程应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2007: 15—80.
YANG S Z. *Engineering application of time series analysis* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2007: 15—80. (In Chinese)
- [9] 吴海勇, 黄辉. 金刚石磨粒变切深划擦无氧铜的声发射及其时间序列建模[J]. *声学技术*, 2017, 36(2): 99—103.
WU H Y, HUANG H. Characteristics of acoustic emission signal due to diamond grit scratching on oxygen free copper and its time series modeling [J]. *Technical Acoustics*, 2017, 36 (2): 99—103. (In Chinese)
- [10] 吴海勇, 黄辉. 金刚石磨粒划擦 Ta12W 的声发射特征与建模[J]. *润滑与密封*, 2018, 43(7): 96—101.
WU H Y, HUANG H. Acoustic emission characteristics and modeling for diamond abrasive grit scratching on Ta12W [J]. *Lubrication Engineering*, 2018, 43(7): 96—101. (In Chinese)
- [11] 吴海勇. 单晶金刚石磨粒机械磨损声发射关联维特征研究[J]. *人工晶体学报*, 2019, 48(1): 54—59.
WU H Y. Correlation dimension characteristics of acoustic emission for the mechanical wear of single crystal diamond abrasive grit [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2019, 48(1): 54—59. (In Chinese)