# 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

# 吴海勇',黄辉2

(1. 漳州职业技术学院机械与自动化工程系,福建漳州 363000;
 2. 华侨大学制造工程研究院,福建厦门 361021)

摘要:试验研究了单颗金刚石磨粒以不同切深划擦无氧铜的声发射信号特征,对不同切深下的声发射信号进行平稳 化,确定合适的时间序列模型阶次和模型识别,建立了金刚石划擦无氧铜的声发射时间序列自回归(Auto Regressive, AR)模型。研究表明:随着切深的增加,声发射特征参数和最大振幅随之增大,AR模型的各特征向量与切深之间具 有较好的线性关系,合理的 AR 模型可较好地表征单颗金刚石磨粒划擦无氧铜的声发射信号特征,并可以实时分析 金刚石磨粒的划擦深度。

关键词:单颗金刚石磨粒;时间序列;声发射;自回归(AR)模型;无氧铜 中图分类号:TH161;TB52 文献标识码:A 文章编号:1000-3630(2017)-02-0099-05 DOI编码:10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.02.001

# Characteristics of acoustic emission signal due to diamond grit scratching on oxygen free copper and its time series modeling

#### WU Hai-yong<sup>1</sup>, HUANG Hui<sup>2</sup>

Department of Mechanical Engineering and Automation, Zhangzhou Institute of Technology, Zhangzhou 363000, Fujian, China;
 Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China)

**Abstract:** The acoustic emission characteristics of a single diamond grit scratching on oxygen free copper with different scratch depths are studied by experiments. The AE signals are pre-processed to become stabilized and to determine appropriate time series model order and model identification. The Auto Regressive (AR) model for the AE time series signals generated by a single diamond grit scratching on oxygen free copper is established. The results show that the AE characteristic parameters and maximum amplitude increase with the increase of scratching depth. There is a good linear relationship between the characteristic vector of the AR model and the scratching depth. The AE signal characteristics of different scratching depths can be well represented by the rational time series AR model. The scratching depth of the single diamond grit can also be real-time analyzed by the AR model.

Key words: single diamond grit; time-series; Acoustic Emission (AE); Auto Regressive (AR) model; oxygen free copper

# 0 引 言

无氧铜以其高纯度、优良的导热导电性能,广 泛运用于电工、电子、微波技术等众多领域。随着 对无氧铜表面加工质量要求的提高,无氧铜的精密 切削加工逐渐引起了学者的关注<sup>[1]</sup>。由于金刚石与 无氧铜的亲和性差,并且金刚石硬度远大于无氧铜 硬度,故金刚石常用于无氧铜的精密切削加工<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2016-10-10; 修回日期: 2017-02-14

目前研究主要集中在切削力、温度以及工具几何参数等对加工性能的影响<sup>[3-5]</sup>,无氧铜切削过程中塑性 形变的检测与机理尚未明晰。声发射是材料在应力 作用下由于形变而产生的瞬态弹性波<sup>[6-7]</sup>,声发射技 术广泛运用于金属切削加工的检测<sup>[8-9]</sup>。因此,本文 采用单颗金刚石磨粒划擦无氧铜,研究不同切深下 划擦无氧铜时的声发射信号特征,利用时间序列方 法对声发射信号进行建模分析,为研究无氧铜的切 削机理提供理论依据。

## 1 试验条件及方法

试验在高速精密数控平面成型磨床 Planomat HP408上进行,如图1所示。金刚石磨粒高温钎焊 到不锈钢螺帽基体上,螺帽基体安装在直径为

基金项目:国家自然科学基金(51235004、51375179)、福建省自然科学基金(2015J01629)、漳州市自然科学基金(ZZ2016J32)、漳州职业技术学院科技项目(ZZY1706)资助

作者简介:吴海勇(1985一),男,福建龙海人,博士,讲师,研究方向为 高效精密加工。

通讯作者: 吴海勇, E-mail: haiyongwu@126.com

360 mm、厚度为 50 mm 的铝盘砂轮上,砂轮带动 单颗金刚石磨粒旋转,工件用蜂蜡加热后粘接在夹 具板上,工作台带动工件进给运动。声发射传感器 安装在夹具板上,通过凡士林耦合工件-夹具板-传 感器的结合部位,以减少声发射信号的衰减。声发 射传感器安装在工件旁,通过前置放大器将电压信 号放大,再通过信号采集卡采集声发射信号,最后 通过计算机进行信号数据处理。试验采用美国物理 声学公司生产的 MICRO-II 型数字声发射检测仪。 使用 PCI-2-PAC 的四通道信号采集系统采集数据, 采样频率为 10 MHz,采样带宽为 1 kHz~1 MHz, 门槛电压为 50 dB,浮动门宽 6 dB,前置放大器增 益为 20 dB,采样长度为 15 K,模拟滤波器带宽为 1 kHz~1 MHz。









单颗金刚石磨粒划擦无氧铜速度为 20 m/s,进 给速度为 10 m/min,划擦深度分别为:10、20、30、 40 μm。在此试验参数下,单颗金刚石磨粒在无氧 铜表面形成单道无干涉的划痕。试验使用元素六 (Element Six)公司品级为 SDB1125、粒度为 20/30 的单晶金刚石。无氧铜的物理机械性能见表 1。

表 1 工件材料的物理机械性能 Table 1 Mechanical and physical performances of workpiece materials

	materials					
材 料	密度 /(g/mm³)	熔点 /℃	延伸	表面	显微	抗拉
			率	粗糙度	硬度	强度
			/%	/µm	/MPa	/MPa
Cu	8.9	1083	25	1.907	1176	380
-						

### 2 试验结果

不同切深下的声发射特征参数值如表 2 所示。 从表 2 可知,随着切削深度的增加,计数值、能量 值、持续时间、幅值、RMS 值均随着切深的增加显 著增加。这是由于随着切深的增加,工件材料被去 除的体积逐渐增大,工件材料受到磨粒耕犁和切削 深度逐渐增加,材料塑性变形程度加剧,声发射信 号及各特征参数均有较大幅度的增加。

表 2 不同切深下的声发射特征参数值 Table 2 AE characteristic parameters of different scratching depths

切深 <i>a<sub>p</sub> /µm</i>	上升 时间 /μs	计数	PAC-能量 /(10 <sup>-12</sup> V·s)	持续 时间 /μs	幅值 /dB	RMS /V
10	331	361	860	4949	80	0.028
20	625	331	1210	5505	83	0.032
30	725	413	1950	6361	87	0.058
40	1016	297	2650	6719	88	0.066

不同切深下的声发射时域特征信号如图 2 所示。由图 2 可见,随着切深的增加,声发射信号最大振幅分别达到了 0.05、0.07、0.1 和 0.22 V,振幅 包络曲线越加密集,包络面积也呈现明显增加趋势。材料去除体积的增加加剧了无氧铜塑性变形,声发射信号强度迅速增加,其最大振幅亦随之增大。





## 3 时间序列建模

单颗金刚石磨粒划擦无氧铜是一个复杂的非 平稳随机过程,工件材料在划擦过程中受到磨粒的 滑擦、耕犁和切削,切深的不同导致声发射信号各 异,切深的变化与声发射信号特征有着必然的因果 联系。并且随着切深的增加,声发射信号是非平稳 的,即均值、方差不是常数,自协方差不是时间间 隔 r 的函数<sup>[10]</sup>。因此,可以采用时间序列法对不同 切深划擦过程中的声发射信号进行数据处理。对数 据进行平稳化处理之后,在不同切深下,单颗金刚 石磨粒划擦无氧铜的声发射信号满足自回归 AR(p) 模型:

 $x_t - \varphi_1 x_{t-1} - \varphi_2 x_{t-2} - \dots - \varphi_p x_{t-p} = a_t$   $t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  (1) 式中,  $x_t \, \times \, x_{t-1} \, \times \, x_{t-2}, \dots \, x_{t-p}$ 为平稳化后的测量值,  $\varphi_1 \, \times \, \varphi_2 \, \dots \, \varphi_p$ 为参数,  $a_t$ 是白噪声, p为阶数。

#### 3.1 时间序列的平稳化

从上述试验结果可知,单颗金刚石磨粒划擦无 氧铜声发射信号产生的时间序列历程中,其声发射 信号曲线随着时间的变化而变化,并且振幅随机波 动。因此采用趋势项法建立不同切深下的声发射信 号时间序列模型。采用多项式最小二乘拟合法对该 趋势项进行提取,使划擦声发射信号的非平稳时间 序列回归于确定的多项式曲线上,将此多项式曲线 剔除,再对剩下的随机特征的平稳时间序列进行建 模。

#### 3.2 模型识别与参数估计

不同切深下无氧铜声发射信号时间序列模型的识别主要通过求解模型阶数 *p* 值,使其能充分反映划擦过程中不同切深下的声发射信号特征。模型参数的估计主要是对式(1)中的 *φ*<sub>1</sub>、*φ*<sub>2</sub>等参数的确定,可以采用最小二乘法确定建立相应的自回归AR 模型。对于一个具有 *N* 个数据点的 *p* 阶 AR 模型,令:

$$Y = [x_{p+1} \ x_{p+2} \ \cdots \ x_N]^{\mathrm{T}}, \quad \phi = [\varphi_1 \ \varphi_2 \ \cdots \ \varphi_p]^{\mathrm{T}},$$
$$W = [a_{p+1} \ a_{p+2} \ \cdots \ a_N]^{\mathrm{T}},$$
$$X = \begin{bmatrix} x_p \ x_{p-1} \ \cdots \ x_1 \\ x_{p+1} \ x_p \ \cdots \ x_2 \\ \cdots \\ x_{N-1} \ x_{N-2} \ \cdots \ x_{N-p} \end{bmatrix} \circ$$

则有:

$$Y = X\phi + W \tag{2}$$

对于一个估计的**ø**,要求残差平方和为最小,

即 $\frac{d(W'W)}{d\hat{\phi}}=0$ 。因此,求得参数 $\phi$ 的最小二乘估计

#### $\hat{\boldsymbol{\phi}} = (\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X})^{-1}\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}$ (3)

#### 3.3 模型定阶

对于 AR 模型,模型成立的前提条件是 *a*<sub>t</sub> 是白 噪声,因此通过检验时间序列总残差 *a*<sub>t</sub> 是否为白噪 声以验证其适用性。对 AR 模型阶数的确定应根据 试验和理论分析进行综合考虑,若阶数过低不能准 确反映模型过程的声信号特征;阶数过高计算量过 大,建模过程过于复杂。模型的定阶方法有很多, 较为常用的是最佳准则函数法,即定义一个准则函数,利用该准则函数要综合考虑用某一模型拟合时对原始数据的接近程度和模型中所含待定参数的个数两方面的因素,按照准则函数的取值来确定时间序列模型的优劣。进行适用性检验常用的方法有最小信息准则(Akaike Information Criterion, AIC)法、最小预报误差准则(Fi-nal Predietion Error, FPE)法和贝叶斯准则法(Bayesian Information Criterion, BIC)等。本文采用 FPE 准则法检验不同切深下声发射信号的特征时间序列,对于 N 个声发射信号数据点的 p 阶 AR 模型, FPE 准则函数为

$$FPE(p) = \sigma_{a}^{2} \frac{N+p}{N-p}$$
(4)

式中:  $\sigma_a^2$ 为残差方差; p为模型阶次; N为序列样本的个数。FPE(p)是模型阶次 p的函数,当 (N+p)/(N-p)随着 p的增大而增大,而模型残差方差随着 p的增大而减小,当模型阶数 p超过时间序列的最佳模型阶次  $p_0$ 时,残差方差 $\sigma_a^2$ 会随之减小。因此,取 FPE(p)最小时的模型阶次 p为 AR 模型的最佳阶次,即:

$$FPE(p_0) = \min_{p \in \mathcal{P}} FPE(p) \tag{5}$$

式中, n<sub>k</sub>为模型阶数的上界,取值上一般不超过 N/3~N/2。图 3 所示为单颗金刚石磨粒划擦无氧铜 声发射信号特征(a<sub>p</sub>=40 µm)的 FPE 准则适用性检 验。由图可知, FPE 曲线在 AR 模型阶次为 4 时, 其自相关系数达到了较小值 7.01×10<sup>9</sup>,之后 FPE 值有所上升并波动,在 AR 阶次为 10 的时候达到最 小值 6.9×10<sup>9</sup>,由于阶次过高导致模型的计算量过 大、过于复杂。因此,本文选择 AR 模型阶次为 4。





#### 3.4 AR 模型的建立与解析

根据上述对 AR 模型阶次的定阶,本文取 AR(4) 模型。建立不同划擦切深下的声发射信号特征 AR 模型就必须计算出 AR 模型的参数,计算 AR 模型 参数的算法主要有自相关法、Burg 算法、协方差法、 改进的协方差法和最大似然估计法等方法<sup>[10]</sup>。本文 采用 Burg 算法估计不同切深下的声发射特征信号 的 AR 模型,并根据式(3)确定模型中不同切深下的 声发射信号特征的变化信息参数,则可以得到不同 切深下的声发射信号 AR 模型:

切深  $a_p=10$  µm 的 AR 模型为:  $x_t+0.4395x_{t-1}-0.06693x_{t-2} 0.2853x_{t-3}-0.2431x_{t-4}=a_t$ 切深  $a_p=20$  µm 的 AR 模型为:  $x_t+0.4957x_{t-1}+0.009919x_{t-2} 0.2255x_{t-3}-0.1997x_{t-4}=a_t$ 切深  $a_p=30$  µm 的 AR 模型为:  $x_t+0.5269x_{t-1}+0.06947x_{t-2} 0.173x_{t-3}-0.1683x_{t-4}=a_t$ 切深  $a_p=40$  µm 的 AR 模型为:  $x_t+0.5282x_{t-1}+0.08617x_{t-2} 0.1447x_{t-3}-0.1488x_{t-4}=a_t$ 

通过上述 AR 模型的建立与分析可知,金刚石 磨粒在不同切深下划擦无氧铜的声发射信号特征, 均可以用相应的 AR 模型进行表征。不同划擦切深 和声发射 AR 模型参数之间的关联特性进一步分析 如下:提取不同切深下的 AR 模型参数,构造如式 (6)所示的多维特征向量:

的声发射信号 AR 模型特征向量,如表 3 所示。

表 3 不同切深下的声发射 AR 模型特征向量 Table 3 Eigenvectors of AR model for AE signals of different scratching depths

$\phi_{ap}$	$\varphi_0$	$arphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$arphi_4$
$\phi_{\!10}$	1	0.439 5	-0.066 93	-0.285 3	-0.243 1
$\phi_{20}$	1	0.495 7	0.009 919	-0.225 5	-0.199 7
$\phi_{30}$	1	0.526 9	0.069 47	-0.173	-0.168 3
$\phi_{40}$	1	0.528 2	0.008 617	-0.144 7	-0.148 8

通过表 3 中声发射的特征向量与切深进行拟 合,可得到 AR 模型的特征向量与切深之间的关系 基本满足线性关系 *φ*=*t*+*ka<sub>p</sub>*,如图 4 所示,随着切 深的增加,AR 模型的各个特征向量基本也随之增 加,曲线的斜率 *k* 均较为平缓。结合试验结果(表 2)和 AR 模型分析可知,单颗金刚石磨粒划擦无氧 铜时,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 AR 模型的各特征向量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,无氧铜工件

表 4 线性拟合关系参数表 Table 4 Parameter table of linear fitting relations

	5				
拟人状性关系	t		k		白田子桃 p2
拟管线性大系	值	标准差	值	标准差	日相大性K
$\varphi_1 = t + ka_p$	0.423 25	0.023 79	0.002 97	0.000 868 7	0.781 21
$\varphi_2 = t + ka_p$	-0.066 28	0.022 88	0.002 86	0.001 3	0.655 79
$\varphi_3 = t + ka_p$	-0.325 7	0.014 03	0.004 74	0.000 512 2	0.965 81
$\varphi_4 = t + ka_p$	-0.268 55	0.010 35	0.003 14	0.000 377 9	0.957 85



图 4 声发射信号 AR 模型特征向量与切深之间的关系 Fig.4 The relationship between AR model characteristic vectors and scratching depths

材料塑性变形程度加剧,声发射信号的特征参数及 其 AR 模型的特征向量与划擦切深呈线性正效应关 系。此外,进一步分析可知,对于同一金刚石磨粒, 由于金刚石磨粒的强度和硬度远大于无氧铜的强 度和硬度,划擦过程中金刚石磨粒的磨损对声发射 信号的影响基本上可以忽略不计,因此,通过建立 合适阶次的声发射时间序列 AR 模型,可实时分析 金刚石磨粒的划擦深度。

线性拟合关系各个参数数值如表 4 所示,参数 t、k 的标准差满足在较低的范围内,自相关性 R<sup>2</sup> 表明,线性拟合的关系式体现了 AR 模型特征向量 与切深之间的关系,这表明合适阶次的 AR 模型可 较好地表征单颗金刚石磨粒划擦无氧铜的声发射 信号特征。

## 4 结论

(1) 划擦切深的增加使无氧铜工件材料去除体 积随之增大,声发射信号的特征参数和最大振幅亦 随之而增大。

(2) 在不同切深下的声发射信号平稳化后,确 定合理的时间序列模型阶次和识别参数,可建立不 同切深下合理的时间序列 AR 模型,可较好地表征 单颗金刚石磨粒划擦无氧铜的声发射信号特征。 (3) 时间序列 AR 模型的各个特征向量与切深 基本呈线性正效应关系,合适的 AR 模型可实时分 析金刚石磨粒的划擦切深。

#### 参考文献

- LAI M, ZHANG X D, FANG F Z. Study on critical rake angle in nanometric cutting[J]. Applied Physics A, 2012, 108(4): 809-818.
- [2] ZHANG L, ZHAO H, GUO W, et al. Quasicotinuum analysis of the effect of tool geometry on nanometric cutting of single crystal copper[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(2): 682-694.
- [3] PEI Q X, LU C, LEE H P. Large scale molecular dynamics study of nanometric machining of copper[J]. Computational Material Science, 2012, 65: 29-36.
- [4] DING X, Jarfors A E W, Lim G C, et al. A study of the cutting performance of poly-crystalline oxygen free copper with single crystalline diamond micro-tools[J]. Precision Engineering, 2012, 36(1): 141-152.
- [5] 李政材,王江全,沈剑云.超声振动辅助单晶硅划片的锯切力研究
  [J]. 声学技术, 2016, 36(4): 331-335.
  LI Zhengcai, WANG Jiangquan, SHEN Jianyun. Study of sawing force in ultrasonic vibration assisted monocrystalline silicon dicing[J]. Technical Acoustics, 2016, 36(4): 331-335.
- [6] 吴海勇,黄辉,徐西鹏. 单颗金刚石划擦 Ta12 W 的试验研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(5):635-645.
  WU Haiyong, HUANG Hui, XU Xipeng. Experimental Study for single diamond grit scratching of Ta12W[J]. Tribology, 2015, 35(5): 635-645.
- [7] WU H Y, HUANG H, JIANG F, et al. Mechanical wear of different crystallographic orientations for single abrasive diamond scratching on Ta12 W[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2016, 54: 260-269.
- [8] 张昊,杨京,程建春,等.利用支持向量机的磨削声发射检测技术
  [J]. 声学技术, 2013, 32(6): 153-154.
  ZHANG Hao, YANG Jing, CHENG Jianchun, et al. A grinding acoustic emission monitoring technique based on support vector machine[J]. Technical Acoustics, 2013, 32(6): 153-154.
- [9] 成建国,毛汉领,黄振峰,等.金属材料声发射信号特征提取方法
   [J]. 声学技术, 2008, 27(3): 309-314.
   CHENG Jianguo, MAO Hanling, HUANG Zhenfeng, et al. AE signal feature extraction method of metal materials[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(3): 309-314.
- [10] 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.

YANG Shuzhi. Engineering application of time series analysis[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2007.