

文章编号 1004-924X(2017)08-2090-08

利用声发射信号时频特征在线监测慢走丝线切割加工表面粗糙度

王 艳^{1*}, 王健波¹, 王 强¹, 熊 巍², 贺独醒¹

(1. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093;

2. 上海理工大学 材料科学与工程学院, 上海 200093)

摘要:针对慢走丝线切割加工(WEDM-LS)时因温度高、切缝窄等因素造成的加工过程难以监测的问题,利用声发射检测技术对占空比可调脉冲的慢走丝线切割加工过程进行在线监测。首先利用小波包能谱算法将 AE 信号分解到 8 个独立的频段上:分别为 W1~W8,且频率依次降低;然后提取各频段上的能量特征,研究其与加工工件表面粗糙度值之间的相关性。试验结果表明:W8 频段的能量与表面粗糙度值之间具有较高的相关性,该频段的能量与脉冲放电能量均随着脉冲信号占空比的增大而增大,且加工表面粗糙度值也随之逐渐增大。最后通过回归分析得到了反应材料表面粗糙度值与 W8 频段能量占比关系的数学预测模型,该模型的预测结果与实际测得的表面粗糙度值误差仅为 3.51%。说明该模型具有较高的预测精度,可用于加工表面粗糙度的在线监测。

关键词:慢走丝线切割加工;声发射;表面粗糙度;小波包

中图分类号:TP206+.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172508.2090

On-line monitoring of WEDM-LS surface roughness by utilizing time-frequency characteristics of AE signal

WANG Yan^{1*}, WANG Jian-bo¹, WANG Qiang¹, Xiong Wei², HE Du-xing¹

(1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Materials Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

* Corresponding author, E-mail: yanwang909909@163.com

Abstract: Aiming at the problem that monitoring of Wire Electrical Discharging Machining-Low Speed (WEDM-LS) process is difficult because of high temperature, narrow kerf and other factors, Acoustic Emission (AE) was adopted to implement on-line monitoring of WEDM-LS process with adjustable duty ratio pulse. Firstly, AE signal was decomposed into eight independent frequency bands by energy spectrum algorithm of wavelet packet, respectively being W1~W8 and frequency reduces in sequence; then energy characteristic of all frequency bands was extracted to research the relativity be-

收稿日期:2017-02-09;修订日期:2017-04-17.

基金项目:江苏省创新创业项目(No. 2012055)

tween it and surface roughness value of machining work-piece. Experimental results show that energy of W8 frequency band is highly related to surface roughness value and energy of this frequency band and pulse discharge energy increase with increase of pulse duty ratio, and roughness value of machining surface increases with it gradually. Finally, a mathematical prediction model between the surface roughness value and the energy in W8 frequency band was established via regression analysis, and error was only 3.51% between prediction result and surface roughness actually measured. It can be illustrated that this model has high prediction precision for online monitoring of machining surface roughness.

Key words: WEDM-LS; acoustic emission; surface roughness; wavelet packet

1 引言

慢走丝电火花线切割加工(Wire Electrical Discharging Machining-Low Speed, WEDM-LS)是特种加工技术的一种。与传统利用机械力或机械能来切除材料的加工技术不同, WEDM-LS主要利用电极丝和工件之间的脉冲放电来去除材料,其具有加工精度高、加工表面质量好等优点。因此在航空航天、汽车和模具等制造业中得到了广泛应用^[1]。WEDM-LS是一个受多因素影响的复杂过程,对其加工过程进行监测有利于进一步研究脉冲放电加工机理。然而,由于脉冲时间短、切缝窄且放电区域温度高等问题的存在,难以对其加工过程进行监测,常规的检测设备也很难靠近加工区域。声发射检测技术是以检测到的声信号作为判断依据,与被测工件的接触程度要求不高,克服了线切割加工温度高、安装困难等问题^[2],可用于监测慢走丝线切割加工过程。

声发射是指材料受外力或内力作用产生变形或断裂,以弹性波的形式释放出应变能的现象。金属材料内部晶格的位错、晶界滑移或者内部裂纹的产生及发展均会产生声发射现象^[3]。不少学者将声发射技术应用于加工状态的实时监测中:毕果等人将声发射检测应用于金刚石磨粒划擦试验以实时表征脆性材料的去除过程^[4],居志兰等人在固结磨料化学机械抛光中实时测量声发射信号以对工艺参数进行优化^[5]。另外,国内外学者对声发射技术在电火花线切割加工中的应用也进行了研究。Yoshiaki Akematsu等人利用声发射技术研究了单脉冲放电情况下碳纤维复合材料的去除机理,根据声发射(Acoustic Emission, AE)信号分析了不同工艺参数下,碳纤维复合材料的

电火花加工基本特征^[6]。Muto K等人通过分析声发射信号特征值与脉冲放电过程中放电位置之间的关系,对脉冲放电位置进行在线监测^[7]。上海理工大学杨林等人通过计算声发射信号的均方根值预测放电蚀坑深度^[8]。

上述文献通过分析AE信号研究了脉冲放电加工过程,但对AE信号与线切割加工表面粗糙度值之间的关系研究的较少。表面粗糙度值对工件有着重要的意义,它直接影响零件配合的稳定性、耐磨性和抗腐蚀性。目前测量加工表面粗糙度值的常用方式是在不同时间段将机床停机,对工件进行离线测量,由于每次测量均需要停机和重新装夹工件,其加工效率比较低。考虑到对慢走丝线切割加工表面粗糙度进行在线监测可大大提高加工效率,本文将AE检测技术应用于占空比可调脉冲的慢走丝线切割加工中,利用不同的占空比脉冲参数对06Cr25Ni20不锈钢进行慢走丝线切割加工试验,并在试验过程中利用AE技术对加工过程进行在线监测。

本文采用傅里叶变换和小波包能谱算法将AE信号分解到不同的频率段上,以各频段上的能量占比为特征参量,进而研究了AE信号与线切割加工表面粗糙度值之间的关系。

2 基于AE信号时频特征建立WEDM-LS表面粗糙度值模型

表面粗糙度是衡量慢走丝线切割加工质量的一项重要工艺指标,而对表面粗糙度值影响较大的是单个脉冲的放电能量。随着脉冲放电能量的变大,每次放电后均会在工件表面留下既大又深的凹坑,从而降低了线切割加工的表面质量。表

面粗糙度值与放电能量间的关系可表示为^[9]:

$$Ra = K_r i^{0.4} t^{0.3}, \quad (1)$$

式中: t 为单脉冲放电时间; i 为峰值电流; K_r 为加工常数。由上式可知, 慢走丝线切割加工表面粗糙度值正比于峰值电流与脉冲放电时间的乘积, 即表面粗糙度值正比于单脉冲放电能量。此外, 脉冲放电能量还会影响材料内部的应力应变分布, 进而影响线切割加工过程中采集到的 AE 信号的能量分布。因此, 通过建立线切割加工表面粗糙度值与 AE 信号能量之间的关系可获得线切割加工过程中表面粗糙度值的变化趋势。

2.1 AE 信号时频特征理论分析

慢走丝线切割加工过程一般分为电离击穿、脉冲放电、金属熔化和汽化、汽泡扩展、金属抛出及消电离几个阶段^[10]。每个过程既相互独立又相互搭接, 由于每次脉冲放电时间极其短暂, 故根据 AE 信号随时间的分布状态不能很好地区分每个加工阶段。另外慢走丝线切割加工是多因素影响的复杂过程, 线切割加工过程中除有材料受热应力作用产生的 AE 信号外, 还有机床运行、工作液系统、人为操作等因素产生的干扰信号。因此仅仅从时域范围内描述 AE 信号难以很好地揭示信号特征, 需要进一步分析 AE 信号的频率结构。傅里叶变换是信号频谱理论的基础, 它架起了信号从时域到频域变换的桥梁, 而傅里叶反变换则实现了信号从频域到时域的转换, 二者之间的变换关系可用式(2)表示^[11]:

$$\begin{cases} X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \\ x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) j^{2\pi ft} df \end{cases}, \quad (2)$$

式(2)中: $x(t)$ 和 $X(f)$ 分别表示时域信号和频域信号。利用傅里叶变换分析 WEDM-LS 中的 AE 信号可以获得 AE 信号随频率的分布状态, 以此可探究 AE 信号与表面粗糙度值之间的关系。

2.2 时频特征与表面粗糙度值关系建立

傅里叶变换虽然能直观地描述 AE 信号随频率的分布状态, 但无法得出各频段内能量所占具体比重。利用小波包能谱算法可对 AE 信号频带进行多次划分, 把各频段上的能量百分比作为特征参量对慢走丝线切割加工过程进行在线监测。

2.2.1 小波包基本理论

小波包是小波变换在概念上的推广, 其实质是一个函数族, 利用该函数族可构造出规范的正交基库, 而小波正交基是该库中的一组。若已知小波函数和正交尺度函数, 则尺度关系可表示为^[12]:

$$\begin{cases} \phi(t) = \sqrt{2} \sum_k h_{0k} \phi(2t-k) \\ \varphi(t) = \sqrt{2} \sum_k h_{1k} \phi(2t-k) \end{cases}, \quad (3)$$

式中: h_{0k} 和 h_{1k} 是滤波器系数, 将式(3)进一步作二尺度推广, 可得:

$$\begin{cases} \omega_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in Z} h_{0k} \omega_n(2t-k) \\ \omega_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in Z} h_{1k} \omega_n(2t-k) \end{cases}. \quad (4)$$

将式(4)中的 n 设为零, 联立式(3)和式(4)可得:

$$\begin{cases} \omega_0(t) = \phi(t) \\ \omega_1(t) = \varphi(t) \end{cases}. \quad (5)$$

则式(5)建立的函数集合 $\{\omega_n(t)\}_{n \in Z}$ 可称为由 $\omega_0(t) = \phi(t)$ 确定的小波包。

2.2.2 小波包分解

小波包分解是将信号在不同的频带上进行多次划分, 以提高信号的时频分辨率。 $\{\omega_n(t)\}_{n \in Z}$ 是关于 h_k 的小波包族, 定义其分解如下:

$$\begin{cases} W_j = U_{j-1}^1 = U_{j-2}^2 \oplus U_{j-1}^3 \\ U_{j-1}^2 = U_{j-2}^4 \oplus U_{j-2}^5 \\ U_{j-1}^5 = U_{j-2}^6 \oplus U_{j-2}^7 \end{cases}, \quad (6)$$

式中: n 和 j 都为正整数, 由式(6)可得到小波子空间 W_j 的各种分解如下:

$$\begin{cases} W_j = U_{j-1}^2 \oplus U_{j-1}^3 \\ W_j = U_{j-2}^4 \oplus U_{j-2}^5 \oplus U_{j-2}^6 \oplus U_{j-2}^7 \\ \dots \\ W_j = U_{j-k}^{2^k} \oplus U_{j-k}^{2^{k+1}} \oplus \dots \oplus U_{j-k}^{2^{k+1}} \oplus U_{j-k}^{2^{k-1}} \\ \dots \\ W_j = U_0^{2^j} \oplus U_0^{2^{j+1}} \oplus \dots \oplus U_0^{2^{j+1}-1} \end{cases} \quad (7)$$

W_j 空间分解的子空间序列可以写作 $U_{j-1}^{2^l+1} m$, $m=0, 1, \dots, 2^n-1$; n 为正整数。

在小波包分解过程中, 若分解层数较少, 则计算速度较快, 但是频段的分辨率较低; 反之, 如果分解层数太多, 虽然频段的分辨率提高了, 但分析

速度却降低了。综合考虑,本文采用三层小波包分解,图 1 为三层小波包的分解过程。图中 (i, j) 代表第 i 层第 j 个节点($i=0, 1, 2, 3; j=0, 1, 2 \dots 6, 7$),其中 $(0, 0)$ 代表原始信号, $(1, 0)$ 为第一层的高频系数, $(1, 1)$ 为第一层的低频系数,其他依次类推。

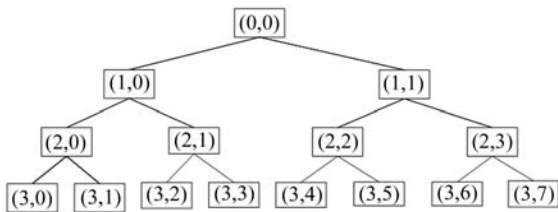


图 1 三层小波包分解结构示意图

Fig. 1 Structure of three layer wavelet packet decomposition

2.2.3 小波包能谱

小波包能谱是以能量形式展示小波包分解, AE 信号经小波包三层分解后从低频到高频每个频段上的能量可表示为^[13]:

$$E_j = \int |S_{3j}(t)|^2 dt = \sum_1^n |x_{jk}|^2, \quad (8)$$

式(8)中: $E_j(j=0, 1, \dots, 7)$ 为第三层第 j 个节点 S_{3j} 对应的能量; $x_{jk}(k$ 为正整数) 为重构信号的离散点幅值; n 为采样点数, 线切割加工表面粗糙度值与各节点能量之间的模型, 如式(9)所示:

$$Ra = Km \sum_{i=0}^7 \lambda_i E_i, \quad (9)$$

式(9)中: $\lambda_i(i=0, 1, \dots, 7)$ 为各节点能量相关系数; Km 为加工常数。由式(9)可知, AE 信号经小波包三层分解后各节点的能量与线切割加工表面粗糙度值之间均具有一定的相关性, 但无法定量得出相关性的大小。

接下来需借助试验研究 AE 信号能量与线切割加工表面粗糙度值之间的相关程度。

3 慢走丝线切割加工 AE 信号采集试验

3.1 试验装置

为定量研究 AE 信号在各频段的能量分布与线切割加工表面粗糙度值之间的相关程度, 进行

了相关的慢走丝线切割加工试验, 试验装置如图 2 所示。试验在苏州三光科技股份有限公司 DK7625P 型号的慢走丝线切割机床上进行, 工件材料为不锈钢 06Cr25Ni20($\Phi 60 \times 10$ mm)。检测装置和信号处理装置分别采用 KISTLER 公司的 8152B221 型 AE 传感器和 5125 型 AE 压电耦合器, 耦合系数为 10, 采集装置是自带相应采集卡的 PC 电脑, 采集频率为 100 kHz。

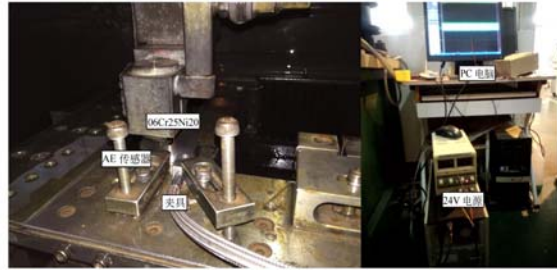


图 2 慢走丝加工声发射在线监测试验装置

Fig. 2 Test apparatus of on-line monitoring in WEDM-LS

3.2 线切割加工脉冲参数设置

本试验分 5 次进行, 其中前 4 次脉冲周期均为 $20 \mu s$, 占空比分别为 30%、40%、50% 和 60%, 第 5 次为验证试验, 具体加工参数如表 1 所示。

表 1 慢走丝线切割加工脉冲参数

Tab. 1 Pulse parameters of WEDM-LS

试验序号	占空比	脉宽 $T_{on}/\mu s$	脉间 $T_{off}/\mu s$	主电源电压 U/V	峰值电流 I/A
1	30%	6	14	15	20
2	40%	8	12	15	20
3	50%	10	10	15	20
4	60%	12	8	15	20
5	50%	15	15	9	30

4 试验数据处理与分析

4.1 AE 信号频谱分析

图 3 为 WEDM-LS 过程中采集到的 AE 原始信号波形, 可见 AE 原始信号由一系列不同频率和模式丰富的信号组成, 具有随机性和瞬态性。因此难以从原始信号中直接获取 AE 信号的时频特征, 需要对 AE 信号作进一步处理。

利用傅里叶变换能够将 WEDM-LS 试验过

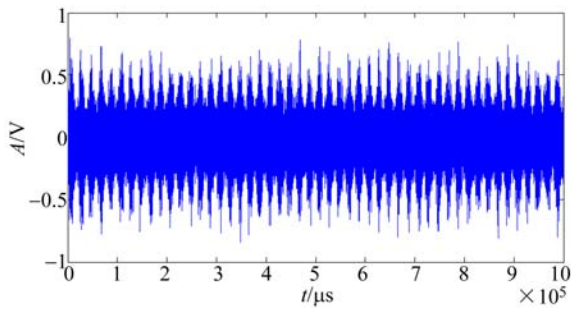
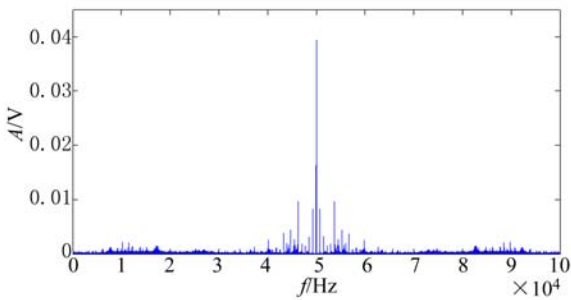


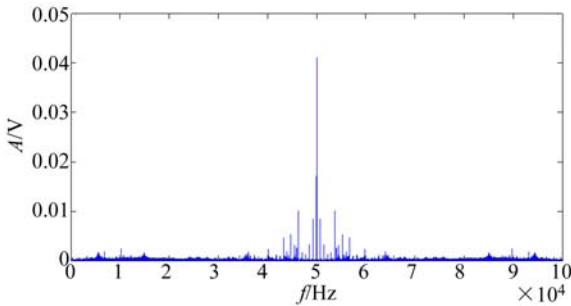
图 3 AE 原始信号波形

Fig. 3 Original waveform of AE signal



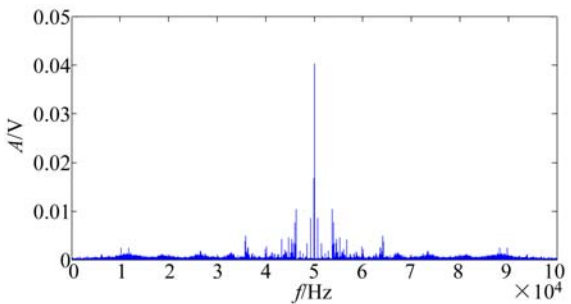
(a) 30% 占空比脉冲参数的声发射信号频谱图

(a) Frequency spectrum of AE signal on 30% duty-cycle pulse



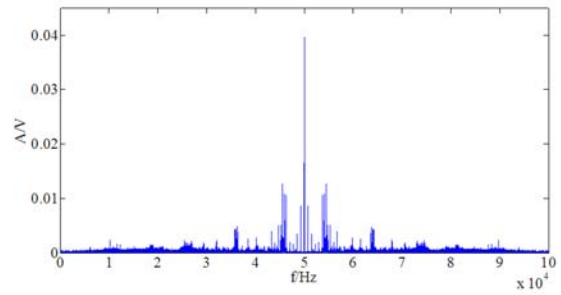
(b) 40% 占空比脉冲参数的声发射信号频谱图

(b) Frequency spectrum of AE signal on 40% duty-cycle pulse



(c) 50% 占空比脉冲参数的声发射信号频谱图

(c) Frequency spectrum of AE signal on 50% duty-cycle pulse



(d) 60% 占空比脉冲参数的声发射信号频谱图

(d) Frequency spectrum of AE signal on 60% duty-cycle pulse

图 4 各占空比脉冲参数下声发射信号频谱图

Fig. 4 Frequency spectra of AE signals on different duty-cycle pulses

程中采集到的 AE 信号从时域变换到频域,进而在局部范围内直观描述 AE 信号随频率的分布规律。图 4 为在各占空比脉冲参数下,AE 信号经傅里叶变换后得出的频谱图。由于采集到的声发射信号的采样频率为 100 kHz,根据奈奎斯特采样定理可知,只有 0~50 kHz 内的信号才是被采样的有效信号,且频谱图关于 50 kHz 对称,因此分析频谱图时只需考虑 0~50 kHz 内的频谱。

分析图 4 可知:各占空比脉冲参数下的声发射信号能量均集中在 45~50 kHz 的频率范围内,并在频率为 50 kHz 时出现最大幅值,约为 0.04 V。50 kHz 附近的声发射信号主要是材料在放电产生的高温作用下发生熔化或汽化而产生的,此时声发射信号的能量较大且分布比较集中。随着放电脉冲信号占空比的增大,在 20~30 kHz 频率范围内的 AE 信号能量分布的不均匀程度也逐渐增大。AE 信号能量分布的均匀性直接反映了脉冲放电能量的稳定性,若脉冲放电能量不稳定则会导致每次放电过后材料蚀除凹坑的尺寸大小不均匀,进而会对工件表面粗糙度值造成直接影响。

4.2 AE 信号能量与表面粗糙度值相关性分析

虽然 AE 信号的频谱图能直观描述信号随频率的分布状态,但无法看出各频率段内能量所占比重的具体情况。本文利用小波包能谱算法分析 AE 信号在各频段的能量占比与线切割加工表面粗糙度值之间的相关程度,把各频段上的能量百分比作为特征参量对慢走丝线切割加工过程进

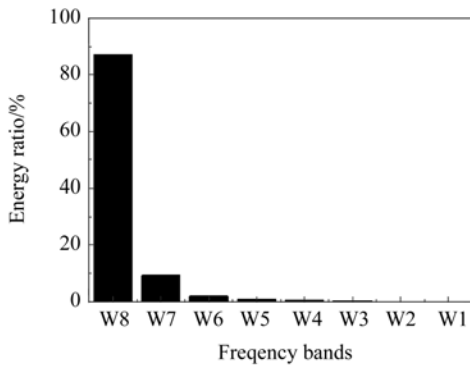


图 5 第三层小波包分解能谱

Fig. 5 Energy spectra of the third layer wavelet packet decomposition

行在线监测。在 MATLAB 中编写程序,利用 2.2 节所描述的小波包基本理论及小波包能谱算法对试验采集到的 AE 信号进行小波包分解,从第一层逐层分解到第三层,由于每个频带会被分为两段,到第三层时,则整个频带被分为 8 段,同时可得出各频段的能量占比。图 5 为 60% 占空比脉冲参数 AE 信号经小波包三层分解后各频段的能量随频率的分布状态。

由前文可知,采样到的有效频率为 50 kHz,故 8 个频段每个频段的宽度应为 6 250 Hz。表 2 为不同占空比脉冲参数下 AE 信号经小波包三层分解后第三层各频段的频率范围及能量占比情况。

表 2 AE 信号第三层各频段的能量占比

Tab.2 Energy ratios of AE signal of each band on the third layer

占空比	各频段能量占总能量的百分比情况/(%)							
	W8 (0~6250Hz)	W7 (6250~12500Hz)	W6 (12500~18750Hz)	W5 (18750~25000Hz)	W4 (25000~31250Hz)	W3 (31250~37500Hz)	W2 (37500~43750Hz)	W1 (43750~50000Hz)
30%	61.58	26.84	5.31	3.88	1.24	0.9	0.15	0.1
40%	67.3	24.17	5.02	1.75	1.19	0.42	0.09	0.05
50%	75.73	17.75	3.66	1.52	0.87	0.36	0.07	0.04
60%	81.34	12.37	2.71	1.49	0.64	0.35	0.06	0.04

通过分析表 2 中的数据可以看出,在不同脉冲占空比时,各频段的能量都不同,其中频段 W5 到频段 W8 内的能量占比较大,其它频段由于所占能量比值较小,可忽略不计。通过进一步分析可知,随着脉冲占空比的增大,频段 W5(18750 Hz ~ 25000 Hz)内的能量从 3.88% 下降到 1.49%,降幅为 61%,这说明脉冲参数变化对该频段 AE 信号的影响比较显著;频段 W7(6250 Hz ~ 12500 Hz)和 W6(12500 Hz ~ 18750 Hz)内的能量变化也非常明显,其子空间内能量从 26.84% 下降到 12.37%,降幅为 53%;W6 子空间能量从 5.31% 下降到 2.71%,降幅为 48%,而频段 W8 内的能量则从 61.58% 增长到 81.34%,增幅为 32%。

根据以上分析可知,W5 频段的能量随脉冲参数的变化最为显著,即 W5 频段的能量与脉冲参数之间的相关性最高,因此通过分析 W5 频段上的能量变化趋势可对慢走丝线切割加工过程中脉冲参数的变化进行在线监测。

脉冲参数的变化不仅会影响 AE 信号在各频

段的能量分布,而且会影响脉冲放电能量,从而影响慢走丝线切割加工工件的表面粗糙度值。图 6 为线切割加工工件表面粗糙度值与 AE 信号在各频段上的能量分布状态随脉冲信号占空比变化的趋势图。

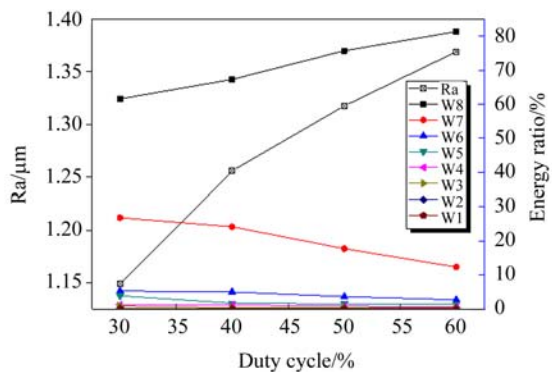


图 6 表面粗糙度值与 AE 信号各频段能量变化趋势
Fig. 6 Changing trends of Ra & energy of AE signal in different frequency bands

分析图 6 可知:随着脉冲信号占空比的增大,较高频段 W1~W7 的能量占总能量的比重均呈

下降的趋势,而低频段 W8 的能量比重则逐渐上升,信号在各频段的能量分布由分散变得集中,即信号能量由高频段向低频段移动。通常,高频分量较低频分量对材料的损伤及组织变化更为敏感,具体表现为材料损伤程度越大,高频分量衰减越严重。当脉冲信号占空比增大即脉冲宽度增大时,单脉冲放电能量将增加,产生的热量也随之增加,则材料因高温产生的组织变化更明显,此时,信号的高频分量出现衰减,将导致信号低频段所占能量占比增大,即信号能量由高频段向低频段移动。图 7 为加工表面粗糙度值随 W8 频段能量占比变化的曲线。

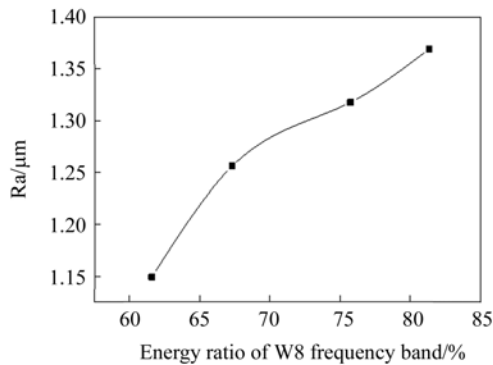


图 7 不同 W8 频段能量占比下的加工表面粗糙度值
Fig. 7 Surface roughness values under different energy ratios on W8 frequency band

由图 6、7 可知,加工表面粗糙度值与 W8 频段的能量变化趋势一致,它们均随着脉冲信号占空比的增大而增大,由此可知,W8 频段的能量占比与线切割加工表面粗糙度值之间的相关程度较高。因此,若建立两者之间的对应关系,则可以根据在线检测到的 W8 频段的能量占比对加工表面的粗糙度值进行预测。在 MATLAB 中利用曲线拟合工具拟合图 8 中的数据,得出的拟合方程为:

$$Ra = 0.765 2e^{0.718 2x}, \quad (10)$$

参考文献:

- [1] 何广敏,赵万生,董衍善,等. 电火花加工几何精度的影响因素分析及其实验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2000,32(4):42-45.
HE G M, ZHAO W SH, DONG Y SH, *et al.*. Factors having effect on geometric precision during

式中 x 为 W8 频段能量占比。在置信区间为 95% 时确定系数(R-square)为 0.98,方差(SSE)为 3.577×10^{-4} 。

为验证拟合方程的预测精度,做了一组验证试验,即表 1 中的第 5 次试验。该次试验实际测得的加工表面粗糙度 Ra 为 $1.557 6 \mu\text{m}$,实际测得的 W8 频段能量占比为 93.99%。根据式(10)得到的粗糙度预测值 Ra 为 $1.502 9 \mu\text{m}$,预测误差仅为 3.51%。这说明该模型可用来在线预测不锈钢 06Cr25Ni20 的加工表面粗糙度,同时也验证了小波包能谱算法能准确提取慢走丝线切割加工中 AE 信号的时频特征,且能对加工表面粗糙度进行在线监测。

5 结 论

针对慢走丝线切割加工时因温度高、切缝窄等因素造成的加工过程难以监测的难题,本文将 AE 检测技术应用于慢走丝线切割加工过程,并利用傅里叶变换和小波包能谱算法分析了 AE 信号的时频特征。算法分析和在线检测试验结果表明:(1)经傅里叶变换后,AE 信号从时域变换到频域,分析 AE 信号频谱分布规律可知,在慢走丝线切割加工过程中,当材料在高温作用下发生熔化或汽化时,声发射信号的能量较大,且分布较集中。(2)采用小波包能谱算法分析 AE 信号能量在各频段的变化规律后发现,W5 频段的能量随脉冲参数的变化最为显著,因此 W5 频段上的能量变化趋势可反映慢走丝线切割加工过程中脉冲参数的变化状态。(3)线切割加工工件表面粗糙度值随 W8 频段的能量占比的增大而增大,通过回归分析得到的工件表面粗糙度值的预测误差仅为 3.51%,说明采用小波包能谱算法能准确地对慢走丝线切割加工工件表面粗糙度进行在线监测。

- EDM [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2000, 32(4): 42-45. (in Chinese)
[2] DAHMENE S, YAACOUBI M, MOUNTASSIR M, *et al.*. On the modal acoustic emission testing of composite structure[J]. *Journal Metrics*, 2016 (7): 446-452.
[3] 姜晨,李郝林. 基于声发射信号的精密外圆切入磨削时间评估算法及试验研究[J]. 机械工程学报,

- 2014,50(5):194-200.
- JIANG CH, LI H L. Algorithm and experiment of estimation of time of precision cylindrical plunge grinding based on acoustic emission signal [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(5): 194-200. (in Chinese)
- [4] 毕果,郭昕乾,孙邦信,等. 利用状态信号特征识别BK7玻璃的去除性能[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(10):394-399.
- BI G, GUO X Q, SUN ZH J, *et al.*. Recognition of removal performance of BK7 glass by taking advantages of status signal features[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10):394-399. (in Chinese)
- [5] 居志兰,朱永伟,王建彬,等. 抛光介质对固结磨料化学机械抛光水晶的影响[J]. *光学精密工程*, 2013,21(4):955-962.
- JU ZH L, ZHU Y W, WANG J B, *et al.*. Effect of slurries on chemical mechanical polishing of decorative glasses by fixed-abrasive pad[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(4):955-962. (in Chinese)
- [6] YOSHIKI A, KAZURO K. Effect of gap region medium on acoustic emission wave by single pulse discharge[J]. *Optical Society of America*, 2006, 10(4):23-27.
- [7] MUTO K, SHIOTA Y, FUTAMURA S. Study on observation of EDM processing and monitoring of discharging point with acoustic emission[C]. *Proceedings of the ICEM*, 1989:301-304.
- [8] 王艳,杨林,丁成才,等. 基于圆台形热传导模型的慢走丝线切割加工仿真与试验[J]. *中国机械工程*, 2015,26(5):598-605+619.
- WANG Y, YANG L, DING CH C, *et al.*. Simulation and experiments of WEDM-LS based on truncated cone-shaped thermal conduction model[J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(5): 598-605+619. (in Chinese)
- [9] 赵亚利.慢走丝线切割机床脉冲基准信号发生器的研究与设计[D].南昌:南昌大学,2009.
- ZHAO Y L. *The study and design on pulse standard signal generator for LSWEDM* [D]. Nanchang: Nanchang University,2009. (in Chinese)
- [10] 杨晓冬,滕庆.移动热源作用下电火花线切割加工电极丝三维温度场模拟[J].*电加工与模具*,2011(6):7-11.
- YANG X D, TENG Q. 3D temperature field simulation of wire electrode in WEDM under the moving heat source [J]. *Electromachining & Mould*, 2011(6):7-11. (in Chinese)
- [11] 喻俊馨,王计生,黄惟公.小波包分析在刀具声发射信号特征提取中的应用[J].*数据采集与处理*, 2005,20(3):346-350.
- YU J X, WANG J SH, HUANG W G. Wavelet package analysis to picking-up characteristics of AE signal of tools [J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2005, 20(3): 346-350. (in Chinese)
- [12] 贺银芝,沈松,应怀樵,等.小波包分解及其能量谱在发动机连杆轴承故障诊断中的应用[J].*振动工程学报*,2001,14(1):72-75.
- HE Y ZH, SHEN S, YING H Q, *et al.*. Application of wavelet packet decomposition and its energy spectrum on the fault diagnosis of reciprocation machinery[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2001,14(1):72-75. (in Chinese)
- [13] 邓扬,丁幼亮,李爱群.基于小波包分析的拉索损伤声发射信号特征提取[J].*振动与冲击*,2010,29(6):154-158+242.
- DENG Y, DING Y L, LI A Q. Feature extraction of acoustic emission signals for cable damage based on wavelet packet analysis[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(6): 155-158+242. (in Chinese)

作者简介:



王健波(1990—),男,江苏南通人,2013年于徐州工程学院获得学士学位,2016年于上海理工大学获得硕士学位,主要从事特种加工技术的研究。
E-mail:15721092081@163.com

导师简介:



王艳(1969—),女,上海人,博士,教授,1998年于上海交通大学获得硕士学位,2006年于浙江大学获得博士学位,2012年南京航空航天大学博士后出站,主要从事精密加工、特种加工技术的研究。E-mail:yanwang909909@163.com