DOI: 10.3901/JME.2019.05.232

放电加工极间等离子体伏安特性与间距建模研究*

李淑娟¹ 辛彬¹ 杨宇祥¹ 路雄¹ 李言¹
蒋百灵² 贾祯¹ 李玉玺³

- (1. 西安理工大学机械与精密仪器工程学院 西安 710048;
2. 西安理工大学材料科学与工程学院 西安 710048;
3. 西安现代控制技术研究所 西安 710065)

摘要: 放电加工中, 工具电极和工件间的间距确定是该类加工方法中的难点, 间距过大, 导致放电加工过程停止, 间距过小, 则会产生短路或者工件表面烧伤等。因此, 获得合理的放电加工过程的极间间距范围, 并精确的描述其模型成为关键。以 N 型单晶 Si 的放电加工为背景, 分析了极间绝缘介质被击穿后放电通道中等离子体伏安特性曲线的变化趋势, 从理论上证明了放电通道可等效为纯电阻模型。通过最小二乘拟合得到等效电阻率与极间间距的模型, 进一步推出极间间距与电压、电流的数学模型。在试验的基础上结合 3σ 检验法对模型进行验证, 结果表明, 所建立的模型可以描述实际加工过程中的极间间距。

关键词: 放电加工; 极间间距; 建模; 伏安特性

中图分类号: TG661

Investigation of Plasma Volt-ampere Characteristics and Gap Modeling of EDM

LI Shujuan¹ XIN Bin¹ YANG Yuxiang¹ LU Xiong¹ LI Yan¹
JIANG Bailing² JIA Zhen¹ LI Yuxi³

- (1. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xian 710048;
2. School of Material Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xian 710048;
3. Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an 710065)

Abstract: During electric discharge machining (EDM), it is difficult for to determine the gap between tool electrode and workpiece, the large gap results in half of discharge machining, and small gap results in short circuit or faults such as surface burning of workpiece. The reasonable range and model of the gap between electrodes during discharge process is the key. As N type single crystal silicon for example, the variation trend of V-A characteristic curve of the plasma in discharge channel after the dielectric between electrodes breaks down are analyzed, theoretically demonstrates that the discharge channel is equivalent to a pure resistance model. A mathematic model between equivalent electrical resistivity and gap between electrodes is obtained through least square fitting. The model of gap between electrodes and voltage and current is tested based on experiment by combining 3σ test, the experiment result shows that the established gap model between electrodes can describe the gap between electrodes during actual machining process.

Key words: EDM; interelectrode gap; modeling; volt-ampere characteristics

0 前言

半导体材料是导电性能介于金属和绝缘体之间的一类特殊材料群体^[1], 因其特殊的物理化学和电学特性而在电子工业领域和光伏产业领域成为不可

或缺的结构材料。单晶 Si 是应用最为广泛的半导体材料, 但单晶 Si 材料的高硬度、高脆性、低断裂韧性使其很难加工, 在传统机械加工时效率低、表面质量差、易崩碎等^[2], 因此采用新工艺和方法对单晶 Si 进行高效高质加工成为研究热点。放电加工 (Electric discharge machining, EDM)^[3-4]是利用浸没在绝缘介质中的工具电极和工件之间不断的脉冲放电蚀除工件的一种非传统加工方法。放电加工因无宏观加工应力、能量密度高^[5]、加工不受材料硬度

* 国家自然科学基金(51575442)、陕西省自然科学基金(2016JZ011)和陕西省教育厅基金(2014SZS10-Z01)资助项目。20180312 收到初稿, 20180916 收到修改稿

限制等特点, 在脆硬材料加工中应用广泛^[6-12]。

由于 EDM 是一种典型的复杂非线性多参数时变系统^[13-14], 为了确保系统的稳定性, 使工件的加工精度、表面粗糙度、材料去除率、表层损伤等达到加工要求, 就要求 EDM 设备具有较完善的极间间距检测和控制系统。而 EDM 的放电机理非常复杂, 通常受到受附着力、气穴现象、短路现象等众多因素影响^[15-16], 给检测和控制带来了相当大的难度。根据电极和工件间的不同间距, 可将 EDM 放电状态分为: 空载、正常火花放电、过渡电弧、稳定电弧、短路^[17-19]等五种, 每种放电状态对应不同的电压电流波形。RAJURKAR 等^[20]提出根据检测的间隙电压与预设电压进行比较来辨识放电状态。BEHRENS 等^[21]监测极间特征电压值与已知电压阈值比较辨别放电状态。采用电压阈值法对极间间距进行检测的还有 DAUW 和 WONG 等^[22-24]。该方法虽然简单, 但需要进行大量的试验, 且对于稳定和过渡电弧放电的阈值确定较困难; 另外所确定的电压阈值没有通用性, 对于不同的加工条件需要根据具体情况确定与之相应的电压阈值。

EDM 正常放电波形存在击穿延迟现象, 有击穿延迟现象的放电是正常火花放电, 无击穿延迟的放电属于电弧放电^[25]。HAN 等^[26]提出在基于晶体管恒定脉冲发生器的微电火花加工中利用平均击穿延迟时间来监测间隙距离并进行伺服进给控制的方法。EDM 中火花放电状态下辐射频率在 1 MHz 以上, 而在电弧放电状态下辐射频率则在 0.5 MHz 以下^[27]; BHATTACHARYYA 等^[28]采用射频信号检测法, 根据在放电间隙的不同射频信号特征对应不同的间隙放电状态对间隙距离进行监测。对 EDM 间隙距离进行识别的方法还有小波变换检测法^[29]、模糊识别法^[30]、神经网络识别法^[31-32]。

上述方法均无法准确检测出极间间距, 导致后续的控制只能根据试验数据采用人工智能的方法进行极间间距预估来控制电极进给。由于没有精确的数学模型, 仅依靠反复试验获得的数据进行处理来估计间距, 误差大, 控制精度低。本文以 N 型单晶 Si 的 EDM 为背景, 分析极间等离子体伏安特性, 建立其极间间距数学模型, 并对模型进行验证。

1 EDM 极间伏安特性分析

为了便于分析放电回路的伏安特性, 采用自行设计的 EDM 试验设备, 如图 1 所示。主要由脉冲

电源、机械装置及光电测距仪组成, 并且各部分相互独立, 无干扰及耦合现象。脉冲电源的电压调节范围为 90~110 V, 脉宽调节范围为 24~100 μs , 脉间占空比范围为 3~12。机械装置由大理石机座及立柱、X、Y 水平方向工作台及 Z 向工作台、精密滚珠丝杠副、驱动电机及联轴器等部件组成, 工作台 Z 轴的进给分辨率为 0.1 μm , 定位精度为 300 mm 行程最大误差 ± 0.02 mm, 重复定位精度不超过 ± 0.04 mm。光电测距仪由安装在 Z 向工作台上的精密光栅传感器及电感测微仪组成, 光栅传感器用于读取位移数值, 电感测微仪则用于确定 Z 轴工作台位移的零基准点。工件为 30 mm 长、直径 25.4 mm 的圆柱形 Si 棒, 绝缘工作液介质为电火花专用油, Si 棒安装于卡盘上。信号采集设备采用 Tektronix DPO 2014B 四通道数字荧光示波器。

图 1 EDM 试验设备

1.1 EDM 等效电路

在 EDM 加工中, 当电极和工件之间的间距达到一定距离(几十 μm)时, 在脉冲电源的作用下绝缘工作液介质被击穿形成放电回路, 放电回路可以用图 2 所示电路等效, 放电回路形成后电极和工件之间形成高温等离子通道, 同时伴随强烈的放电现象, 工件被极间产生的瞬时高温所蚀除, 电极也有一定的蚀除(称为电极损耗)。

图 2 EDM 等效电路

1.2 EDM 极间电压与回路电流同步采集

当绝缘工作液介质被击穿形成放电回路,极间电压和回路电流将成为加工过程中的反馈信号,为了研究加工过程中放电回路的伏安特性,必须对反馈信号进行不失真的同步采集,本文设计了如图3所示的采集电路。

图3 采集电路

为了采集回路电流并对放电回路不产生影响,在放电回路中靠近脉冲电源负极的一侧串联一只阻值为 $0.1\ \Omega$ 的精密采样电阻。因为极间间隙电压无法直接测量,因此示波器1通道测量的是间隙电压、工件电压和采样电阻电压之和。示波器通道2测量采样电阻两端的电压,进一步换算成回路电流。EDM 极间电压和回路电流波形如图4所示。

图4 EDM 电压电流波形

1.3 EDM 极间电压与回路电流分析

根据图4将单脉冲放电分为:击穿延时、火花放电以及电弧放电阶段。火花放电阶段极间电压逐渐下降而电流迅速增大,呈现出明显的负阻抗特性,而且火花放电发生在绝缘工作液介质刚刚击穿的一瞬间,因此火花放电属于不稳定的暂态过程。电弧放电阶段极间电压与回路电流都基本保持不变。由于电弧放电阶段电流很大,因此会产生瞬时高温(几千度甚至上万度)和强烈的发光现象,EDM 的放电过程从暂态的火花放电转变成稳态的电弧放电。

极间电压和回路电流的伏安特性曲线如图5所示,从图中可见伏安特性曲线能准确描述 EDM 单脉冲放电各阶段的特征。

图5 EDM 伏安特性曲线

2 EDM 极间间距建模

当 EDM 由火花转变成电弧放电后,放电通道的位形处于平衡状态,此时放电通道的直径基本保持不变,同时极间电压与回路电流也都基本保持不变,极间绝缘工作液介质由绝缘态变成等离子体。

2.1 EDM 极间阻抗模型分析

放电通道是由数量大体相等的带正电和带负电粒子、以及中性粒子组成的等离子体,阴极和阳极之间的距离非常小,只有几个电子自由程,所以通道等离子区的尺寸几乎等于极间间距。由于电极端面平行于工件表面,二者之间充有绝缘工作液介质,因此极间存在平板电容。当极间绝缘工作液介质被击穿,等离子在极间高速运动过程中受到一定的阻碍,因此极间存在电阻。当绝缘工作液介质被击穿后,整个放电回路的电流瞬间增大,根据电磁感应定律,极间有一定的电感存在,但是当放电通道扩展到位形平衡时,极间电压与回路电流保持不变,此时电感在极间相当于导线可认为电感不存在。而平板电容的电流主要由极间的电压变化率所决定,因此电容跨接在电极与工件之间。结合上述分析可将 EDM 极间等效为图6所示的电路阻抗模型。

图6 EDM 极间阻抗模型

根据图6所示的电路阻抗模型,可将EDM极间阻抗 Z 表示为

$$Z(\omega) = \frac{R}{1 + (R\omega C)^2} - j \frac{R^2 \omega C}{1 + (R\omega C)^2} \quad (1)$$

极间绝缘工作液介质被击穿前,电极端面和工件表面以及中间的绝缘工作液介质恰好组成平板电容,平板电容两端电压响应为

$$u_c(t) = U \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \quad (2)$$

式中, U 为脉冲电源电压, τ 为时间常数,当 $t=\tau$ 时 $u_c(t)=0.63U$, τ 可表示为

$$\tau = R_T C \quad (3)$$

式中, R_T 为回路总电阻; C 为平板电容的容值。

调整电极位置,使电极与工件接触,此时短路状态下测得回路总电阻为 $R_T = 4.5 \Omega$ 。将单脉冲放电波形击穿延时阶段的上升沿放大,其波形如图7所示。分析可得时间常数 $\tau = 1.8 \times 10^{-6} \text{ s}$,根据式(3)可得工作液介质被击穿前的电容值 $C = 4 \times 10^{-7} \text{ F}$ 。

图7 电压上升沿波形

当极间工作液介质击穿形成放电通道后,由绝缘态变成导电性能良好的等离子导体,其介电性能遭到破坏,假设此时极间电容为 C_d ,因此有

$$C_d < C = 4 \times 10^{-7} \text{ F} \quad (4)$$

在试验过程中使用脉冲电源,其脉冲宽度和间隔分别为 $100 \mu\text{s}$ 和 $400 \mu\text{s}$,空载波形如图8所示。

在综合考虑快速傅里叶变换后的最大频率和频率分辨率因数之后,对图8所示电源空载波形进行快速傅里叶变换,采样点数为125 000,采样频率为500 MHz,傅里叶变换波形如图9所示。

由图9可知,频率在4 000 Hz以上的分量比较小,为此对4 000 Hz以上的信号不做相关处理。在EDM正常放电阶段,图6所示的电路阻抗模型相当

图8 电源波形

图9 傅里叶变换波形

于脉冲电源的一个负载,将脉冲电源的基波频率、一次谐波频率、极间最大电容 C_d 分别代入式(1)

$$Z(2000) = \frac{R}{1 + 6.4 \times 10^{-7} R^2} - j \frac{8 \times 10^{-4} R^2}{1 + 6.4 \times 10^{-7} R^2} \quad (5)$$

$$Z(4000) = \frac{R}{1 + 2.56 \times 10^{-6} R^2} - j \frac{1.6 \times 10^{-3} R^2}{1 + 6.4 \times 10^{-7} R^2} \quad (6)$$

在EDM稳定电弧放电阶段,极间的电阻为几欧姆左右,因此式(5)、(6)可化简为

$$Z = R \quad (7)$$

公式(3)中电压与电流的相位角差为

$$\varphi = \text{Arctg} \frac{\frac{R^2 \omega C}{1 + (R\omega C)^2}}{\frac{R}{1 + (R\omega C)^2}} = R\omega C \quad (8)$$

$$\varphi = 0.092^\circ \left| \begin{matrix} \omega = 2000 \text{ Hz} \\ R = 2 \Omega \end{matrix} \right. \quad (9)$$

$$\varphi = 0.18^\circ \left| \begin{matrix} \omega = 4000 \text{ Hz} \\ R = 2 \Omega \end{matrix} \right. \quad (10)$$

由式(9)、(10)可以看出,电流与电压的相位夹角非常小。通过上述综合分析可知,在EDM稳定电弧放电阶段极间阻抗可等效成纯电阻。

2.2 EDM极间等离子体通道压降分析

EDM正常放电阶段的极间等离子体通道等效

为纯电阻后, 图 3 所示的采集电路简化为图 10。

图 10 EDM 简化电路

由图 10 所示分压关系可得极间等效电阻(等离子体通道)的电压 u 为

$$u = U - u_{R_X} - u_{R_S} \quad (11)$$

式中, U 为示波器 1 通道采集电压; u 为极间等效电阻(等离子体通道)的电压; u_{R_X} 为工件等效电阻的电压; u_{R_S} 为采样电阻的电压。

单脉冲放电对工件和电极的蚀除量非常小, 且极间热量来不及扩散, 因此可忽略温度对电极和工件等效电阻的影响。采用短路测试法对半导体材料的等效电阻进行测量, 使电极与工件材料紧密接触, 测试电路如图 11 所示。

图 11 EDM 短路测试电路

采样电阻上的压降除以采样电阻的阻值即可得到回路电流 i , 因此半导体的等效电阻为

$$R_X = \frac{U - iR_S}{i} \quad (12)$$

根据公式(12)在短路状态下可求出半导体的等效电阻, 采样电阻的阻值已知。因此极间等效阻抗(等离子体通道)电压由式(11)改为

$$u = U - i(R_X + R_S) \quad (13)$$

2.3 EDM 极间间距 d 的推导

根据极间等离子体通道的电压与回路电流, 等离子体通道的等效电阻表示为

$$R = \frac{u}{i} \quad (14)$$

其中的 u 为极间等效电阻电压, i 为回路电流。而根据电阻的本质定义式

$$R = \rho \frac{d}{s} \quad (15)$$

式中, ρ 为等离子体通道的电阻率, d 为等离子体区的通道长度, 等离子体区的尺寸很小, 总共只有几个电子自由程, 所以等离子体区的通道长度几乎等于极间距离, s 为等离子体区放电通道的横截面积, 而不是电极与工件的正对面积。结合式(14)、(15)式可得

$$d = \frac{us}{i\rho} \quad (16)$$

等离子体通道的电阻率 ρ 跟介质的离化程度有很大的关系^[33], 而且等离子体通道的电阻率测量非常困难。当极间绝缘工作液介质被击穿, 放电通道在很短的时间内(几微秒内)完成扩展, 放电通道的直径稳定在最大值附近^[34-35], 且极间间距越大放电通道的直径也越大。那么在 EDM 稳定电弧放电阶段, 其放电通道的横截面积基本保持不变。在这里做如下处理, 将式(16)改写成式(17)

$$d = \frac{u}{i \frac{\rho}{s}} \quad (17)$$

再令

$$\frac{\rho}{s} = \kappa \quad (18)$$

κ 称为等离子体通道的等效电阻率。结合式(17)、(18)可得 EDM 极间间距 d 的表达式

$$d = \frac{u}{i\kappa} \quad (19)$$

3 等离子体通道等效电阻率 κ 的确定

根据 EDM 极间间距模型, 在实验过程中给定不同的 d 值, 结合同步采集得到的极间电压 u 和回路电流 i 进一步确定不同 d 值对应的 κ 值。

3.1 EDM 试验

试验采用棒状紫铜电极, 电极直径为 10 mm。工件材料为 N 型单晶 Si, N 型单晶 Si 参数如表 1 所示。极间间距从 10~70 μm , 每次增加 10 μm 。

当间距大于 70 μm 时, 不再出现放电现象。

表 1 N 型单晶 Si 参数

N 型单晶 Si	直径(1 英寸)	生长方式	直拉单晶(CZ)
Si 片厚度/mm	5	掺杂类型	掺硼
晶向	<111>	电阻率/($\Omega \cdot \text{cm}$)	0.1
熔点/ $^{\circ}\text{C}$	1 410	沸点/ $^{\circ}\text{C}$	2 355
密度/(g/cm^3)	2.33		

电源的脉宽和脉间分别为 100 μs 和 400 μs 。由于 EDM 的随机性, 因此每组间距试验 30 次, 试验数据如表 2 所示。对表 2 中的试验数据进行最小二乘拟合, 拟合曲线如图 12 所示。等离子体通道的平均等效电阻率 κ_{ave} 与极间间距 d 最小二乘

拟合的方差分析结果如表 3 所示, 表 3 中方差分析结果的误差平方和(SSE)为 0.071 58, 这个值越接近于 0, 说明表达式拟合更好, 数据预测也越成功; 确定系数(R-square)为 0.998 6, 该值越接近于 1, 说明拟合值与试验值有着高度的相关性; 校正系数(Adj R-square)为 0.998 3, 说明试验数据的 0.17% 不能用此拟合表达式来解释; 方均根误差(RMSE)为 0.119 6, 说明拟合表达式与真实值的偏差程度, 其值越小, 则拟合程度越高。等离子体通道平均等效电阻率 κ_{ave} 与极间间距 d 的函数关系为式(20)。

$$\kappa_{\text{ave}} = 0.6439d^{-0.78} \quad (20)$$

表 2 EDM 试验数据

间距/ μm	10		20		30		40		50		60		70	
	u/V	i/A	u/V	i/A	u/V	i/A	u/V	i/A	u/V	i/A	u/V	i/A	u/V	i/A
κ_{min}	0.103 785		0.059 301		0.043 279		0.036 398		0.030 065		0.027 015		0.024 691	
	18.7	18.6	21.1	17.8	23.2	17.6	24.3	17.4	25.4	17.2	26.6	16.8	28.8	16.6
κ_{max}	0.114 774		0.064 176		0.046 598		0.036 696		0.031 007		0.027 889		0.025 861	
	20	18	22.3	17.4	24	17.2	25.1	17.1	26.4	17	27.8	16.6	29.6	16.4
κ_{ave}	0.109 279		0.061 174		0.044 226		0.036 389		0.029 750		0.027 598		0.025 003	
	19.5	18.2	21.5	17.7	23.4	17.4	24.9	17.2	25.7	17.1	27.4	16.7	29.3	16.5

表 3 方差分析结果

SSE	R-square	Adj R-square	RMSE 均方根误差
误差平方和(和方差)	确定系数	校正系数	(标准差)
0.0715 8	0.998 6	0.998 3	0.119 6

图 12 κ 与 d 的关系曲线

根据式(19)、(20)可得到 EDM 极间间距

$$d = \left(\frac{u}{0.6439i} \right)^{\frac{1}{0.78}} \quad (21)$$

3.2 等离子体通道等效电阻率 κ 的分析

等离子体通道等效电阻率 κ 由等离子体通道电阻率 ρ 与等离子体放电通道的横截面积 s 的比决定。在一定的极间间距下, 当放电通道达到平衡时, 极

间电压、回路电流以及等离子体通道的直径保持恒定。等离子体通道的电阻率 ρ 与离子浓度、离子的运动速度有很大关系。极间电流主要是由等离子体中的带电粒子高速运动产生的, 高速运动的带电粒子与介质中的其他中性粒子或分子碰撞而产生更多的带电粒子, 导致带电粒子的数目雪崩式的增加。当初始间距较小时, 极间只有几个电子自由程的距离, 在该距离内带电粒子加速运动的速度被限制, 没有足够的动能与更多的中性粒子或分子进行碰撞, 导致极间宏观上的电导率较小, 电阻率 ρ 较大; 当极间间距增大时, 带电粒子有足够的距离加速, 从而获得足够的动能与极间中性粒子或分子进行碰撞, 导致更多的带电粒子产生, 因此间距较大时极间电导率较大, 电阻率 ρ 较小; 但是当极间距离继续增大时, 极间等离子体通道的离化程度已经达到饱和状态, 其离化率不随极间间距的变化而变化, 这时等离子体通道的离化和复合将达到动态平衡, 因此电阻率 ρ 基本保持不变。等离子体通道的电阻率 ρ 与极间间距 d 的定性关系如图 14 所示。

等离子体通道的横截面积 s 随着极间间距的增大而增大^[34], 这是因为: 放电通道内部的等离子体温度极高, 因此放电通道产生一个向外的压力, 该压力导致放电通道向外扩展, 而放电通道内部的电流将产生磁场, 因此放电通道又受到磁场力的约束,

图 13 ρ 与 d 的关系曲线

这种效应称为箍缩效应, 当放电通道未达到平衡状态时, 内部的压力梯度大于磁场的约束力, 二力之差将导致放电通道继续向外扩展, 当放电通道的内部压力与磁场力平衡时, 放电通道的直径保持稳定不变。当极间距离增大时, 放电通道的电流有小幅下降, 磁场力减小, 因此放电通道会向外扩展, 最终导致放电通道横截面积 s 增大, 放电通道横截面积 s 与极间间距 d 的定性关系如图 14 所示。

图 14 s 与 d 的关系曲线

综合上述分析, 当极间间距 d 较小时, 等离子通道的电阻率 ρ 较大, 而等离子通道直径较小, 因此 κ 值较大; 随着极间间距 d 的增大, 等离子通道的电阻率 ρ 逐渐变小, 而直径逐渐变大, 因此 κ 值变小; 而随着极间间距 d 的继续增大, 等离子通道的电阻率 ρ 将不随极间间距的增大而增大, 但是通道直径会随着极间间距的增大而进一步增大, 导致了等离子通道的等效电阻率 κ 随着极间间距 d 的增大而幂率下降, 且下降的速率在逐渐变小。

3.3 EDM 极间间距模型验证

为了验证 EDM 极间间距模型的正确性, 采用单脉冲放电形式, 在固定极间间距的条件下对模型进行验证。脉冲电源的脉宽为 100 μs , 脉间为 400 μs 。其中极间间距从 10 μm 到 70 μm , 每次增加 10 μm 。将每组极间间距下同步采集得到的等离子体通道压降与回路电流代入 EDM 极间间距模型, 可计算出极间间距 d , 每组间距试验 30 次。根据误差理论, 采用 3σ 检验法对试验数据进行分析, 3σ 检验

法又称莱因达检验法, σ 为标准差

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{(n-1)}} \quad (22)$$

其中 $n \geq 25$, 对某个观测数据 x_i 若其残差 v_i 满足

$$v_i = |x_i - \bar{x}| \geq 3\sigma \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (23)$$

则观测数据 x_i 为粗大误差, 其中 $\bar{x}$ 为观测数据 x_i 的均值

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (24)$$

表 4 列出了实际间距、模型计算得到间距的最小值、最大值、平均值和每组间距下的 σ 值。

表 4 模型验证数据

实际间距/ μm	模型计算间距/ μm	模型计算平均间距 $\bar{x}$	σ
10	8.756 9	10.103 4	1.188 7
	11.939 8		
20	17.316 2	19.433 4	1.231 4
	21.347 5		
30	28.068 8	29.483 4	1.189 6
	30.229 0		
40	37.257 6	39.561 4	1.213 2
	41.567 3		
50	47.911 9	49.971 2	1.196 7
	51.519 1		
60	59.667 4	60.968 6	1.207 9
	62.659 9		
70	68.168 7	71.084 0	1.206 4
	73.048 2		

以模型计算间距为横轴, 实际间距为纵轴建立直角坐标系, 将模型计算间距的最小值、最大值和平均值标于图 15 中。从图 15 中可以看出模型计算间距的最小值、最大值和平均值分布在 $\pm 3\sigma$ 内, 其中 σ 取表 4 中的最小值, 模型计算间距没有粗大误差。

图 15 模型计算值分布关系

4 结论

(1) 在 EDM 极间电压与回路电流同步采集的基础上, 分析了 EDM 极间电压与回路电流伏安特性曲线, 通过伏安特性曲线可以得出 EDM 过程中不存在无光放电与辉光放电, 而是以火花放电与电弧放电为主要放电形式。火花放电处于一种过渡形式的不稳定放电状态。

(2) 通过对 EDM 极间状态分析, 将极间等离子体放电通道等效为电阻与极间电容并联的电路模型, 推导出电路模型的阻抗表达式, 在傅里叶变化的基础上, 分析脉冲电源基波与谐波对电路模型阻抗的影响, 得出极间电容对阻抗的贡献可以忽略不计, 且极间电压与电流的相位角差也可忽略。因此将电路模型简化为纯电阻模型。

(3) 建立了 EDM 极间距离 d 与极间电压、回路电流以及等离子体通道等效电阻率 κ 的数学模型, 通过试验确定了 κ 与 d 的函数关系。定性分析解释了 κ 随 d 增大而幂率下降的原因。

(4) 以单脉冲放电试验结合 3σ 检验法对试验结果进行分析, 模型计算间距的最小值、最大值和平均值分布在 $\pm 3\sigma$ 内, 因此所建立的 EDM 极间间距模型正确可靠。

(5) 实际加工过程中可根据实时采集的极间电压与电流结合极间间距模型对间距进行预估, 而且还可为 EDM 极间间距的准确控制提供可行的参考方法。

参 考 文 献

- [1] EZUGWU E O, WANG Z M. Titanium alloys and their machinability—A review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 68(3): 262-274.
- [2] IBRAHIM G A, HARON C H C, GHANI J A. The effect of dry machining on surface integrity of titanium alloy Ti-6Al-4V ELI[J]. Journal of Applied Sciences, 2009, 9(1): 121-127.
- [3] KUNIEDA M, LAUWERS B, RAJURKAR K P, et al. Advancing EDM through fundamental insight into the process[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2005, 54(2): 64-87.
- [4] KATSUSHI F, DAISUKE H. Condition monitoring in concurrent micro-hole electrical discharge machining with electrode feeding devices employing AZARASHI (seal) mechanism[J]. Procedia CIRP, 2014, 14: 424-429.
- [5] YAN B H, TSAI H C, HUANG F Y. The effect in EDM of a dielectric of a urea solution in water on modifying the surface of titanium[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(2): 194-200.
- [6] CHEN Haoran, LIU Zhidong, HUANG Rajuan, et al. Study of the mechanism of multi-channel discharge in semiconductor processing by WEDM[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2015, 32: 125-130.
- [7] YOSHIYUKI U, AKIRA O, YASUHIRO O, et al. Wire EDM slicing of monocrystalline silicon ingot[C]//Proceedings of ASPE 2000 Annual Conference Volume, 2000: 172-175.
- [8] PUERTAS I, LUIS C J, VILLA G. Spacing roughness parameters study on the EDM of silicon carbide[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 164-165(10): 1590-1596.
- [9] LUIS C J, PUERTAS I, VILLA G. Material removal rate and electrode wear study on the EDM of silicon carbide[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 164-165(10): 889-896.
- [10] NIRDESH O, TIM H, FLORIAN Z, et al. Major parameters affecting the electric discharge machining of non-conductive SiC[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture Micro Manufacture, University of freibury, Rabino Azc'arate and Stefan Dimov, 2013: 978-981.
- [11] JI Renjie, LIU Yonghong, ZHANG Yanzhen, et al. High-speed end electric discharge milling of silicon carbide ceramics[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2011, 26(8): 1050-1058.
- [12] YU Bohuai, LEE Hsiangkuo, LIN Yangxin, et al. Study of wire electrical discharge machining for poly-silicon[C]. //Asian Symposium for Precision Engineering and Nanotechnology 2009, 2009: 170-174.
- [13] ZHOU Ming, HAN Fuzhu, MENG Xianyi, et al. Analysis and control of electrical discharge machining(EDM) process[C]// IEEE, 2009: 164-168.
- [14] ZHOU Ming, HAN Fuzhu, SOICHIRO I. A time-varied predictive model for EDM process[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(15): 1668-1677.
- [15] MUSLIM M, KIMIYUKI M. A new method for monitoring micro-electric discharge machining processes[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(3-4): 446-458.
- [16] MUSLIM M, TAKAYUKI T, KIMIYUKI M. A new approach on the determination of ease of machining by EDM processes[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(7-8): 746-760.
- [17] SNOEYS R, DAUW D F, KRUTH J P. Survey of EDM adaptive control in electro discharge machining[J].

- Journal of Manufacturing Systems, 1983, 2(2): 147-164.
- [18] KUNIEDA M, LAUWERS B, RAJURKAR K P, et al. Advancing EDM through fundamental insight into the process[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2005, 54(2): 64-87.
- [19] KATSUSHI F, DAISUKE H. Condition monitoring in concurrent micro-hole electrical discharge machining with electrode feeding devices employing AZARASHI(seal) mechanism[J]. Procedia CIRP, 2014, 14: 424-429.
- [20] RAJURKAR K P, WANG W M, LINDSAY R P. A new model reference adaptive control of EDM[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 1989, 38(1): 183-186.
- [21] BEHRENS A W, GINZEL J, BRUHNS F L. Threshold technology and its application for gap status detection[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149(1-3): 310-315.
- [22] DAUW D F, SNOEYS R, DEKEYSER W. Advanced pulse discriminating system for edm process analysis and control[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 1983, 32(2): 541-549.
- [23] SNOEYS R, DAUW D, KRUTH J P. Improved adaptive control system for EDM processes[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 1980, 29(1): 97-101.
- [24] WONG Y S, EDKINS M, NOBLE C F. An investigation of the power output and gap voltage during electrical discharge machining using microcomputer-based instrumentation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1987, 27(2): 191-214.
- [25] RAJURKAR K P, WANG W M. Improvement of EDM performance with advanced monitoring and control systems[J]. Journal of manufacturing science and engineering, 1997, 119(4B): 770-775.
- [26] HAN Fuzhu, WACHI S, MASANORI K. Improvement of machining characteristics of micro-EDM using transistor type isopulse generator and servo feed control[J]. Precision Engineering, 2004, 28(4): 378-385.
- [27] BHATTACHARYYA S K, EL-MENSHAWY M F. Monitoring and controlling the EDM process[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1980, 102(3): 189-194.
- [28] BHATTACHARYYA S K., EL-MENSHAWY M F. Monitoring the EDM process by radio signals[J]. International Journal of Production Research, 1978, 16(5): 353-363.
- [29] YU S F, LEE B Y, LIN W S. Waveform monitoring of electric discharge machining by wavelet transform[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 17(5): 339-343.
- [30] TARNG Y S, TSENG C M, CHUNG L K. A fuzzy pulse discriminating system for electrical discharge machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997, 37(4): 511-522.
- [31] KAO J Y, TARNG Y S. A neural-network approach for the on-line monitoring of the electrical discharge machining process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 69(1): 112-119.
- [32] PAJAK E, WIECZOROWSKI K. Classification of discharges in electrocontact discharge machining (ECDM) by means of neural networks[J]. VDI BERICHTE, 1998, 1405: 225-232.
- [33] LI Minghui. EDM theoretical basis[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1989.
- [34] KOJIMA A, NATSU W, KUNIEDA M. Spectroscopic measurement of arc plasma diameter in EDM[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 57(1): 203-207.
- [35] CHANG Weijie, CHEN Yuanlong, ZHANG Jianhua, et al. Single pulse discharge channel expansion laws of EDM[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(9): 208-212.

作者简介: 李淑娟(通信作者), 女, 1968 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为硬脆材料的加工机理及控制、制造过程建模、优化和控制。

E-mail: shujuanli@xaut.edu.cn