

负极性电火花加工时的电极损耗机理及 积碳层的减损作用研究

刘蜀阳, 黄玉美

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西西安 710048)

摘要: 本文基于场致发射理论,对负极性电火花加工时电极材料的损耗情况及极间做功能量进行了研究,设计并分别进行了不同工艺参数下紫铜电极和 A3 # 钢电极单孔负极性电火花加工对比实验.实验研究表明:相同工艺参数下,紫铜电极比 A3 # 钢电极加工时的极间放电能量大,加工效率高且电极材料的损耗率低;表面积碳层对紫铜电极材料有着良好的减损作用,而对 A3 # 钢电极则作用甚微;且对紫铜电极而言,在保证有效消电离的情况下,极间有效放电时间比越高,加工效率越高,电极的损耗率越低,而相应的积碳层对电极材料的减损率则减小.

关键词: 电火花加工; 电极损耗; 积碳层

中图分类号: TB131 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 04-0654-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.04.006

The Study on the Wear Mechanism of Electrode Materials in Negative EDM Process and the Effect of Carbon Deposition Layer

LIU Shu-yang, HUANG Yu-mei

(The Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Based on the field-emission theory, the wear of electrode materials and the work energy were studied, and the single-hole EDMing contrast experiments with different process parameters were designed and carried out. The analysis on experimental results show that, copper electrode has the higher discharging energy, higher machining efficiency but lower material wear comparing with A3 # steel ones; the carbon deposition layer on the end surface plays a better role in reducing the wear of copper electrode while has little effect on A3 # ones; and to copper electrode, the bigger ratios of valid discharging time will be helpful to improve the machining efficiency, lower the wear of electrode, but the wear-reducing function of carbon deposition layer will recede either.

Key words: EDM; wear of electrode material; carbon deposition layer

1 引言

自从1943年前苏联科学家 Dr B R Lazarenko 和 Dr N I Lazarenko 发明了电火花加工技术以来,作为特种加工技术的一种,尽管其发展历史较短,目前已经广泛应用于模具、电子和汽车工业等制造领域,特别是在一些超硬材料、细长孔、深窄槽及微细加工领域发挥着不可替代的作用.由于其加工时主要是依靠电场力与局部热场作用来实现材料加工,作为对等的一极,工具电极也会同时受到不同程度的腐蚀.而且电极的损耗多集中在棱角、型面及边沿部位,其损耗程度对成型精度、加工质量和加工效率都有着直接影响.分析和研究电极损耗已成为从事电火花加工的工程技术人员的一个重要课题.

1979年, Jeswami^[1]就采用量纲分析的方法对如何预测电火花加工中的刀具磨损进行了研究,并提出了基于等式方程的工具电极腐蚀量预测模型.1989年, Patel 等人^[2]对工具阳极的材料蚀除进行了研究,并给出了以输入功率为边界条件的电极损耗模型,其研究认为加工过程中产生于阳极材料表面的热量服从高斯分布热.众多学者^[3~9]的研究认为具有大的峰值电流和长的放电脉冲时间的电流会导致较高的材料损耗,而阳极表面产生的碳层沉积越多将有助于降低电极的损耗.大多数研究成果都是基于单因素实验的经验公式与定性分析.由于影响电火花加工效果的因素很多,如机床输入功率、放电参数、环境介质及工件与电极的理化性能等,且存在较复杂的耦合关系,想要准确把握极间放电的放电行

为并进行系统性地详细描述是比较困难的,这也是大多数研究采用统计学方法的原因^[10,11]。

在电火花加工的放电周期中,种种迹象表明极间通道中存在大量极性离子团的积聚,众多学者的研究成果均认为,在放电通道中运动并引起材料切除的绝大多数是负极上发出的自由电子。而且电火花加工时在放电端面上的熔融痕迹表明,热作用是材料切除的主要作功机理,但正负极上的形貌差别进一步说明做功能量的来源与方式是不同的。现代关于冷热电子发射的场致发射理论的提出与完善^[12],特别是 Fowler-Nordleim 方程^[13]、Richardson-Schottky 方程^[14]和 Murphy-Good 方程^[15]的提出,为分析极间做功能量的量化关系提供了理论基础。如果将电火花加工过程视为工件电极对工具电极的加工,则引起电极损耗可以采用分析极间做功能量的统计分析方法进行研究。为了提高 EDM 加工的效率与加工精度和更好的优化加工工艺,研究工具电极损耗的影响参数及预测有着重要的理论价值和实践意义。

本文主要基于场致发射理论,分析了引起电极材料损耗的做功能量形式与影响参数,并建立了电极损耗率的理论预测方程。研究中,我们设计了不同工艺参数下的单孔加工实验,并以紫铜电极和 A3 # 钢电极为例分别对极间实时放电参数与电极损耗量进行了测量;通过对不同电极材料和不同加工工艺参数下加工效率与电极损耗率的对比分析,研究了极间做功能量的差异及其影响因素,并分析了影响电极损耗率的原因;重点研究了不同电极材料表面上的积碳层的差异性,并对其减损率大小进行了分析。

2 单孔负极性 EDM 中的电极损耗机理与预测

基于场致发射理论我们认为:负极性加工时,电子在工具电极端面材料中流过,在放电点附近克服了材料表面壁垒而逸出,电子在其运动轨迹上克服材料电阻和材料表面壁垒做功,并全部转化为热量。由于放电时间很短,热传导作用可以忽略,即引起电极表面损耗的热能有两个来源:表面电子流流动的电阻热和电子表面逸出功的转化热。我们前期的研究表明电阻热在总热量中所占的比重很小,可以认为产生电极材料损耗的主要是逸出功转化热。

为简化分析,提出如下假设:

(1)不考虑电极间表面平行度误差对放电间距的影响,即认为电极端面与工件表面平行。

(2)不考虑电极材料缺陷对放电电流的影响,即认为电极体材料均匀且各向同性,。

(3)由于放电脉冲时间很短,可忽略热传导及环境温度变化对电子逸出功的影响,即在整个放电加工期

间,电子的逸出功函数 Φ 为一常数。

(4)由于在单放电脉冲周期内,采用优化工艺的极间放电电场的建立时间 $t_3 \ll T_{on}$ 。即对电极损耗主要发生在正常放电阶段 $[t_3, T_{on}]$ 。

(5)由于发射电子逸出时的表面壁垒层仅为 1~2 个原子半径^[12],占极间放电距离的比例几近于零,即可认为场致发射电子从放电表面上逸出时的初速度为零。

则在单位孔 EDM 加工时间 T_p 内的某 t 时刻,从电极表面上逸出的电子数可计算为:

$$Ne_t = I_t \cdot A_s = (\pi/4) \cdot I_t \cdot D^2/e \quad (1)$$

式中: I_t 为 t 时刻极间电流大小(A); e 为单个电子的带电量且 $e = 1.6 \times 10^{-19}$ (C); A_s 为 t 时刻极间放电面积 (mm^2),根据假设(1)有, $A_s = \pi \cdot (D/2)^2$,这里 D 为电极的直径(mm)。

根据假设(3)与(4),在 EDM 时间 T_p 内电极表面逸出电子产生的转化热可计算为:

$$E_e = \int_0^{T_p} Ne_t \cdot \Phi_w \cdot dt$$

式中: Φ_w 为电极材料的功函数(eV)。

将式(1)代入上式并考虑到在抬刀周期 T_{kr} 和放电间隙 T_{off} 内 $I_t = 0$,可得到:

$$E_e = (\pi/4) \cdot D^2 \cdot \Phi \cdot \int_0^{T_p} I_t \cdot dt \approx \frac{\pi}{4} \cdot \frac{T_{kl}}{T_{kl} + T_{kr}} \cdot \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \cdot T_p \cdot \frac{D^2 \cdot \Phi_w \cdot \overline{I_e^{(-)}}}{e} \quad (2)$$

式中: $\overline{I_e^{(-)}}$ 为负极性加工 T_p 时间内的极间平均放电电流(A)。

如果这些能量全部用于电极材料的温升且不考虑热传导的影响,则在负极性 EDM 过程中电极的理论损耗质量可计算为:

$$\Delta m^{(-)} = E_e / (C_w \cdot \Delta T)$$

式中: C_w 为电极材料的比热容 ($J \cdot g^{-1} \Delta T^{-1}$); ΔT 为电极材料的当量熔融温度差(K),与环境压强有关。

将式(2)代入上式得到:

$$\Delta m^{(-)} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{T_{kl}}{T_{kl} + T_{kr}} \cdot \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \cdot T_p \cdot \frac{D^2 \cdot \Phi_w}{C_w \cdot \Delta T \cdot e} \cdot \overline{I_e^{(-)}} \quad (3)$$

定义负极性加工时的单位时间电极损耗率: $\eta_m^{(-)} = \Delta m^{(-)} / T_p$,并将式(3)代入得到:

$$\eta_m^{(-)} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{T_{kl}}{T_{kl} + T_{kr}} \cdot \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \cdot \frac{D^2 \cdot \Phi_w}{C_w \cdot \Delta T \cdot e} \cdot \overline{I_e^{(-)}} \quad (4)$$

3 单孔 EDM 电极损耗对比实验设计

为了定性分析 EDM 加工过程中电极材料的损耗情况,我们设计了如下的单孔加工对比实验,其加工过程

示意图如图1所示。

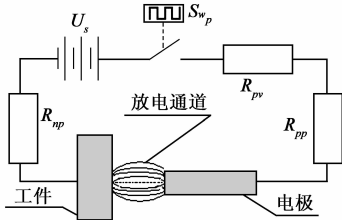


图1 单孔电火花负极性加工放电回路。其中： S_{wp} ---脉冲开关； U_s ---脉冲放电管电压(V)； R_{pp} ---工具电极端回路电阻(Ω)； R_{wp} ---工件电极端回路电阻(Ω)； R_{pv} ---放电管的内阻。

相关实验参数与主要设备型号如下：

机床型号：AGIE CHARMILLES SE2；

输入功率： $P_m = 10\text{kW}$ ；基准放电电压： $V_b = -110\text{V}$ ；

极间介质：煤油

电极材料及尺寸：紫铜/A3#钢， $\varphi = 8\text{mm}$ ， $L = 70\text{mm}$ ；

工件材料及尺寸：45#钢， $\varphi = 80\text{mm}$ ， $h = 3.5\text{mm}$ ；

加工的单孔直径： $D = 8\text{mm}$ ，孔深： $H = 3.5\text{mm}$ ；

霍尔传感器：CSM015NPT；

数据采集仪：NEC RA 2300。

为了定量评估极间做功能量的大小，在实验中分别采用数据采集仪和霍尔电流传感器对放电间隙的电压和放电电流的变化进行了实时监测，设置采集仪每 $1\mu\text{s}$ 对极间电压与电流值进行一次数据记录。取某一时刻前的连续1000个离散监测电压与电流的平均值作为该点的采样值，并在连续的十个抬放刀周期内进行50次均匀采样。而且为了提高采样数据的置信度，采样区间选择自EDM的稳定放电阶段，且每次采样实验重复三次。

由于AGIE的EDM机床其基准放电电压 $V_b = -110\text{V}$ ，数据采集仪所测得的电压值实际上是极间放电点的实时电位值 V_e ，极间的电压降可计算为：

$$U_e = V_e - (-1)^p \cdot 110(\text{V}) \quad (5)$$

同样，在采用霍尔电流传感器CSM015NPT测极间电流 I_e 时，输出信号实际上是副边的感应电压值 $V_{SN}(\text{V})$ ，两者间的转换关系为：

$$I_e = \frac{48}{0.625} \cdot (-1)^p \cdot (2.5 - V_{SN}) \quad (6)$$

其中： p 为与EDM极性相关的指数，且：

$$p = \begin{cases} 0, & \text{正极性加工时} \\ 1, & \text{负极性加工时} \end{cases}$$

则基于式(4)对极间放电时的极大与极小电极损耗率可以做出如下预测：

忽略极间场致发射电场的建立过程且放电通道形貌完全相同且绝对纯净，则取 $V_{SN} = 0$ 并将式(2)代入式(4)可得到 $\eta_m^{(-)}$ 的理论极大值为：

$$\begin{aligned} \eta_m^{(-)} \Big|_{\max} &= \frac{\pi}{4} \cdot \frac{T_{kl}}{T_{kl} + T_{kr}} \cdot \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \\ &\cdot \frac{D^2 \cdot \Phi_w}{C_w \cdot \Delta T \cdot e} \cdot \frac{48}{0.625} \cdot (-1)^p \cdot (2.5 - V_{SN}) \\ &= 48\pi \cdot \frac{T_{kl}}{T_{kl} + T_{kr}} \cdot \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \cdot \frac{D^2 \cdot \Phi_w}{C_w \cdot \Delta T \cdot e} \end{aligned} \quad (7)$$

而如果忽略材料的晶格缺陷和能量在电极表面的累积，假设电极表面的损耗完全由场致电子转化功引起表面熔融产生，则 $\eta_m^{(-)}$ 的理论极小值可计算为：

$$\begin{aligned} \eta_m^{(-)} \Big|_{\min} &= \frac{\pi}{4} \cdot \frac{D^2 \cdot \Phi_w}{C_w \cdot \Delta T \cdot e} \cdot \frac{48}{0.625} \cdot (-1)^p \cdot (2.5 - \overline{V_{SN}}) \\ &= 19.2\pi \cdot \frac{D^2 \cdot \Phi_w}{C_w \cdot \Delta T \cdot e} \cdot (\overline{V_{SN}} - 2.5) \end{aligned} \quad (8)$$

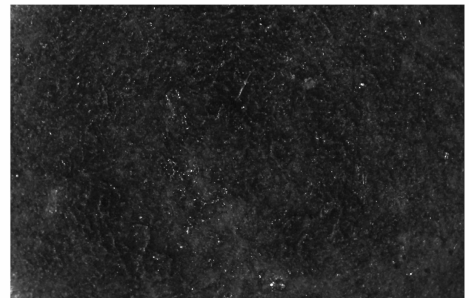
其中 $\overline{V_{SN}}$ 为极间电流采样的均值。则实际电极单位时间损耗率 $\eta_m^{(-)} \Big|_{*}$ 理论上应介于二个极值之间，即：

$$\eta_m^{(-)} \Big|_{\min} < \eta_m^{(-)} \Big|_{*} < \eta_m^{(-)} \Big|_{\max} \quad (9)$$

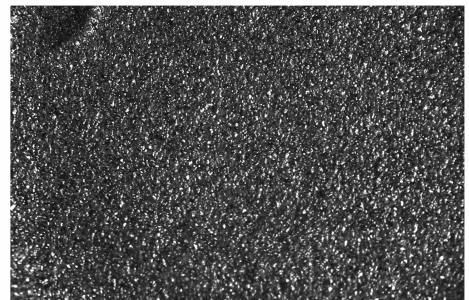
4 单孔负极性 EDM 实验结果分析

图2是负极性EDM单孔加工后的电极端面形貌图，被加工的工件材料均为45#钢，其中图2(a)中的工具电极材料为紫铜，而图2(b)中的工具电极材料为A3#钢。

采用CSM015NPT霍尔传感器和NEC RA 2300数据采集仪进行极间放电电压与电流的实时监测与数据采集界面，其中的感应电压值 $V_{SN}(\text{V})$ 由信道2输入，极间放电点的实时电位值 V_e 由信道6输入。采样数据段长度为10个抬放刀周期，时间窗的宽度为1个放刀周期，按前述方法进行数据处理，具体的实验工艺参数与数



(a) 紫铜电极端面



(b) A3#钢电极端面

图2 负极性加工时的电极端面形貌图

据记录如表 1 中所示。

对实验结果的分析与讨论如下:

(1)不论是紫铜基体还是 A3# 钢基体,电极端面都存在明显的热作用痕迹,热作用层浅而均匀.但 A3# 钢电极表面较为粗糙,而紫铜电极表面则较为光滑,说明后者受热后的表面熔融程度更均匀。

(2)加工后电极端面覆盖有一层白色的“灰”,经检测并分析认为是极间煤油介质被放电击穿时电离出的游离态碳粒子在电极表面的聚集.对 A3# 钢电极表面而言,其积碳层可用软布轻轻拭除即露出其本体材料;但对紫铜电极表面,软布擦拭后其表面积碳层依然存在.这表明电离出的流离碳与 A3# 钢电极表面主要是吸附作用,而在紫铜电极表面上则可能产生了较深层次的键合作用。

(3)加工同样深度的通孔,两种材料电极的加工效率相差较大,由表 1 中可知加工同样的通孔,两者的加工效率比为:

$$\lambda_{\text{Cu}}/\lambda_{\text{Fe}} = \frac{\Delta m_w/T_{\text{Cu}}}{\Delta m_w/T_{\text{Fe}}} = \frac{T_{\text{Fe}}}{T_{\text{Cu}}} = \frac{523\text{h}31'}{30\text{h}32'} \approx 17.16$$

即负极性 EDM 时,紫铜电极的加工效率约为 A3# 钢电

极的 17 倍。

(4)工具电极的单位时间损耗率对比,同样由表 1 中可知:

$$\eta_{\text{Cu}}/\eta_{\text{Fe}} = \frac{\Delta m_{\text{Cu}}/T_{\text{Cu}}}{\Delta m_{\text{Fe}}/T_{\text{Fe}}} = \frac{0.115}{3.493} \cdot \frac{523\text{h}31'}{30\text{h}32'} \approx 0.565$$

即负极性 EDM 时,紫铜电极的单位时间损耗比 A3# 钢电极要低,仅为其一半不到。

在同样的加工制度下,对同样材料上加工同样深度的通孔,采用不同工具电极材料出现这样的差别,说明材料自身的特性是决定其损耗率差别的主要因素。

对每次实验中的实时监测数据,我们均按前述方法进行了 150 次的均值抽样,根据式(1)、式(2)并利用 Microsoft EXCEL 软件工具,可以做出负极性加工时的抽样极间压降均值 \bar{U}_e 分布图和抽样极间放电电流均值 \bar{I}_e 分布图,将对应的 \bar{U}_e 和 \bar{I}_e 相乘则可以得到对应的抽样极间放电能量均值 \bar{P}_e 分布图。

图 3(a)、(b)、(c)分别是紫铜电极负极性加工时 150 个抽样极间压降均值 $\bar{U}_e|_{\text{Cu}}$ 、放电电流均值 $\bar{I}_e|_{\text{Cu}}$ 和放电能量均值 $\bar{P}_e|_{\text{Cu}}$ 的分布图。

表 1 负极性单孔 EDM 实验数据表

组号	材料		脉冲(μs)		电压测值 (V)	平均电压 (V)	电流 V_{sn} 值 (V)	平均 V_{sn} 值 (V)	加工时间	平均加工时间	电极损耗 (g)	平均损耗 (g)
	工具	工件	T_{on}	T_{off}								
1	Cu	45#	10	3.2	-87.8763	-90.4951	2.5621	2.5523	30h58'	30h32'	0.122	0.115
					-92.9260		2.5379		29h44'		0.105	
					-90.6829		2.5570		29h50'		0.118	
2	A3#	45#	10	3.2	-99.9969	-97.9721	2.5119	2.5086	472h53'	523h31'	3.318	3.493
					-97.7586		2.5100		562h05'		3.613	
					-96.1609		2.5040		535h34'		3.548	
3	Cu	45#	10	5.6	-91.6885	-92.3746	2.5245	2.5203	38h09'	42h16'	0.123	0.126
					-91.7673		2.5232		40h16'		0.124	
					-93.6681		2.5132		48h23'		0.131	
4	A3#	45#	10	5.6	-98.2395	-100.1025	2.5102	2.5072	724h51'	688h23'	4.023	3.947
					-101.9173		2.5035		671h49'		3.915	
					-100.1506		2.5079		668h30''		3.903	

注:(1)放电管数 $n=7$,放电间隙 0.08mm,安全间隙 0.18mm;(2)电极转速:0 r/min;(3)抬放刀周期为: $T_{kl}=0.8(\text{s})$, $T_{kr}=0.6(\text{s})$ 。

图 4(a)、(b)、(c)分别是 A3# 钢电极负极性加工时 150 个抽样极间压降均值 $\bar{U}_e|_{\text{Fe}}$ 、放电电流均值 $\bar{I}_e|_{\text{Fe}}$ 和放电能量均值 $\bar{P}_e|_{\text{Fe}}$ 的分布图。

由图 3 和图 4 对比分析可见:

(1)信道中存在的环境噪声对抽样极间放电电流的影响较大,且基本上为反向附加(非放电时间 $\bar{I}_e \leq 0$)。图 3(a)和图 4(a)对比可知,与 A3# 钢电极相比,紫铜电极加工时系统中存在的噪声干扰更大.采用表 1 中的采样 $\bar{I}_e^{(-)}$ 数据计算得到:

$$\bar{I}_e^{(-)}|_{\text{Cu}} = 4.01664(\text{A}) \gg \bar{I}_e^{(-)}|_{\text{Fe}} = 0.66048(\text{A})$$

即紫铜电极加工时的极间平均放电电流 $\bar{I}_e^{(-)}$ 比 A3# 钢电极加工时要大的多;

(2)由系统的输入功率分析可知,当采样时刻的 $\bar{U}_e^{(-)} \geq 100(\text{V})$ 时,即可视为有效放电加工阶段.由图 3(b)和图 4(b)的对比可知,与 A3# 钢电极相比,紫铜电极加工时的极间有效放电时间更多.采用表 1 中的采样 $\bar{U}_e^{(-)}$ 数据计算得到:

$$\bar{U}_e^{(-)}|_{\text{Cu}} \approx 19.5049(\text{V}) > \bar{U}_e^{(-)}|_{\text{Fe}} \approx 12.0979(\text{V})$$

即在相同的加工参数下,紫铜电极加工时的极间平均放电电压 $\bar{U}_e^{(-)}$ 比 A3# 钢电极加工时略大;

(3)极间平均放电能量 $\bar{P}_e^{(-)}$ 的对比上,分别对紫铜电极和 A3# 钢电极加工时的采样 $\bar{I}_e^{(-)}$ 和 $\bar{U}_e^{(-)}$ 求取乘积计算得到:

$$P_e^{(-)}|_{\text{Cu}} \approx 202.5184 \gg P_e^{(-)}|_{\text{Fe}} \approx 78.5426$$

结合不同材料电极加工效率的不同 ($T_{\text{Cu}}^{(-)} = 30\text{h}32'$

$\ll T_{\text{Fe}}^{(-)} = 523\text{h}31'$), 可以认为: 正是这种做功能量上的巨大差别导致了紫铜电极的加工效率远高于 A3# 钢电极.

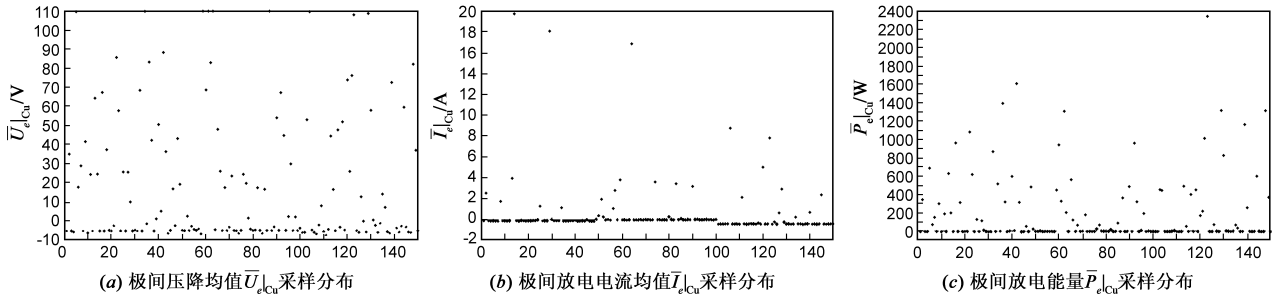


图3 紫铜电极负极性EDM加工150次抽样点的极间平均放电能量分布

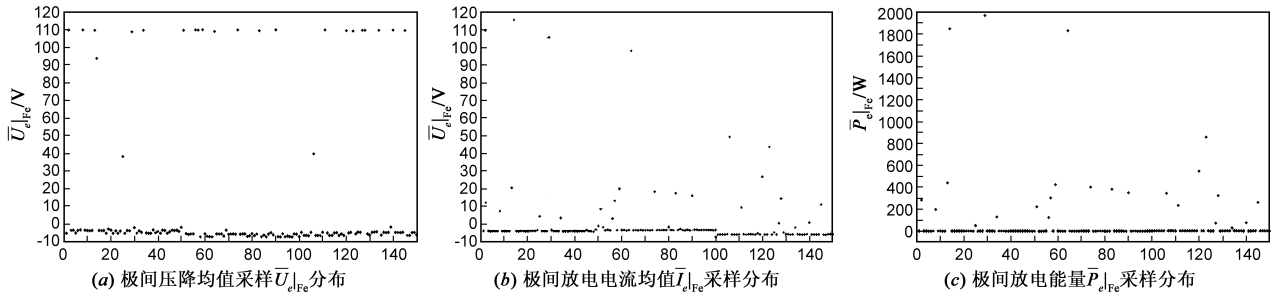


图4 A3#钢电极负极性EDM加工150次抽样点的极间平均放电能量分布

5 实验结果分析与积碳层对电极的减损作用分析

采用表1中的第一组工艺实验数据, 分别对单孔负极性 EDM 时的电极损耗进行相关测算如下.

当电极材料为紫铜时, 已知:

$$C_{\text{Cu}} = 0.39(\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \Delta T^{-1}), \Phi_{\text{Cu}} = 4.65(\text{eV})$$

我们前期的实验及研究发现, EDM 过程中负极表面的当量熔融温度差 $\Delta T \approx 1150\text{K}$ ^[16]. 将相关数据代入式(7)和(8)可分别计算如下:

$$\eta_m^{(-)}|_{\text{Cu}}^{\max} = 48\pi \cdot \frac{0.8}{0.8+0.6} \cdot \frac{10}{10+3.2} \cdot \frac{(8 \times 10^{-3})^2 \cdot 4.65}{0.39 \cdot 1150} \approx 43.316 \times 10^{-6}(\text{g/s})$$

$$\eta_m^{(-)}|_{\text{Cu}}^{\min} = 19.2\pi \cdot \frac{(8 \times 10^{-3})^2 \cdot 4.65}{0.39 \cdot 1150} \cdot (2.5523 - 2.5) \approx 2.093 \times 10^{-6}(\text{g/s})$$

当电极材料为 A3# 钢时, 已知:

$$C_{\text{Fe}} = 0.46(\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \Delta T^{-1}), \Phi_{\text{Fe}} = 4.5(\text{eV});$$

采用表1中的第二组加工工艺参数进行测算. 将相关数据代入式(7)和(8)可分别计算如下:

$$\eta_m^{(-)}|_{\text{Fe}}^{\min} = 48\pi \cdot \frac{0.8}{0.8+0.6} \cdot \frac{10}{10+3.2} \cdot \frac{(8 \times 10^{-3})^2 \cdot 4.5}{0.46 \cdot 1150} \approx 35.54 \times 10^{-6}(\text{g/s})$$

$$\eta_m^{(-)}|_{\text{Fe}}^{\min} = 19.2\pi \cdot \frac{(8 \times 10^{-3})^2 \cdot 4.5}{0.46 \cdot 1150} \cdot (2.5086 - 2.5)$$

$$\approx 0.282 \times 10^{-6}(\text{g/s})$$

而由表1中的实验数据可知, 实际的电极损耗率为:

$$\eta_m^{(-)}|_{\text{Cu}}^* = \frac{\Delta m_{\text{Cu}}^{(-)}}{T_{\text{Cu}}^{(-)}} = \frac{0.115\text{g}}{30\text{h}32'} \approx 1.046 \times 10^{-6}(\text{g/s})$$

$$\eta_m^{(-)}|_{\text{Fe}}^* = \frac{\Delta m_{\text{Fe}}^{(-)}}{T_{\text{Fe}}^{(-)}} = \frac{3.493\text{g}}{523\text{h}31'} \approx 1.853 \times 10^{-6}(\text{g/s})$$

对比计算结果发现, A3# 电极的损耗情况很好的符合了预测规律(9), 即:

$$\eta_m^{(-)}|_{\text{Fe}}^{\min} < \eta_m^{(-)}|_{\text{Fe}}^* < \eta_m^{(-)}|_{\text{Fe}}^{\max}$$

但紫铜电极的损耗情况却比预测要小的多, 甚至低于预测损耗的极小值:

$$\eta_m^{(-)}|_{\text{Cu}}^* < \eta_m^{(-)}|_{\text{Cu}}^{\min} < \eta_m^{(-)}|_{\text{Fe}}^{\max}$$

针对负极性 EDM 时紫铜电极的极低损耗率, 结合对图2中电极端形貌与现象分析, 我们认为, 表面积碳层的存在是紫铜电极损耗减小的主要原因. 对 A3# 钢材料而言, 其组织为碳元素在铁基体中的饱和固溶体, 在放电结束急速降温时, 游离态的碳原子与电极表面间仅由于静电作用产生吸附作用. 而在下一次放电阶段 T_{on} 到来时, 由于真空通道的出现, 这一碳层又大部分在静电力作用下从表面剥离. 故加工结束后 A3# 钢表面的碳粘附层可用软布轻轻拭除, 没有证据表明有碳原子对基体的渗入发生, 如图2(b)所示; 而对紫铜电极材料而言, 其基体中基本不含有碳元素, 在高温下铜也较为活跃, 在放电脉冲间隙, 容易与环境中带负电的

游离碳粒子发生化合在表面生成较牢固的碳保护层。这一碳保护层在放电间隙 T_{off} 中产生而在下一次放电阶段 T_{on} 中被熔蚀,部分代替并直接降低了紫铜电极的损耗。故紫铜电极表面的碳层结合牢固且几乎覆盖了整个电极的加工端面,如图 2(a) 所示。

由前述计算结果,可以求得 A3# 钢电极的实际损耗量占预测损耗范围的百分比为:

$$\begin{aligned}\zeta_{\text{Fe}}^{(-)} &= \frac{\eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Fe}}^* - \eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Fe}}^{\min}}{\eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Fe}}^{\max} - \eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Fe}}^{\min}} \times 100\% \\ &= \frac{1.853 - 0.282}{35.54 - 0.282} \times 100\% \approx 4.456\%\end{aligned}$$

假设没有碳层作用时,紫铜电极的损耗量占预测范围的百分比与 A3# 钢电极相同,即:

$$\zeta_{\text{Cu}}^{(-)} = \zeta_{\text{Fe}}^{(-)} \approx 4.456\%$$

则积碳层对紫铜电极的减损率可计算为:

$$\begin{aligned}\lambda_{\Delta\text{Cu}}^{(-)} &= \frac{\zeta_{\text{Cu}}^{(-)} \cdot (\eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Cu}}^{\max} - \eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Cu}}^{\min}) - \eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Cu}}^*}{\zeta_{\text{Cu}}^{(-)} \cdot (\eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Cu}}^{\max} - \eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Cu}}^{\min})} \times 100\% \\ &= \frac{(43.316 - 2.093) \cdot 4.456\% - 1.046}{(43.316 - 2.093) \cdot 4.456\%} \times 100\% \\ &\approx 43.056\%\end{aligned}$$

可见,积碳层的存在有效保护了电极表面,特别是对紫铜电极,与相同尺寸的 A3# 钢电极相比,积碳层的存在减少了约 43% 的单位时间电极损耗。

为了进一步验证负极性 EDM 电极损耗机理并比较工艺参数变化对电极损耗的影响,我们还设计了另一组对比实验,其相关工艺参数及得到的实验结果如表 1 中的第三组和第四组实验记录所示。同上计算过程,将相关参数代入可得到如下结果。

紫铜电极的理论损耗率预测极值分别为:

$$\eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Cu}}^{\max} = 48\pi \cdot \frac{0.8}{0.8 + 0.6} \cdot \frac{10}{10 + 5.6} \cdot \frac{(8 \times 10^{-3})^2 \cdot 4.65}{0.39 \cdot 1150} \approx 36.652 \times 10^{-6} (\text{g/s})$$

$$\eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Cu}}^{\min} = 19.2\pi \cdot \frac{(8 \times 10^{-3})^2 \cdot 4.65}{0.39 \cdot 1150} \cdot (2.5203 - 2.5) \approx 0.812 \times 10^{-6} (\text{g/s})$$

紫铜电极的实际损耗率为:

$$\eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Cu}}^* = \frac{\Delta m_{\text{Cu}}^{(-)}}{T_{\text{Cu}}^{(-)}} = \frac{0.126\text{g}}{42\text{h}16'} \approx 0.828 \times 10^{-6} (\text{g/s})$$

比较可知: $\eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Cu}}^{\min} < \eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Cu}}^* < \eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Cu}}^{\max}$, 虽然符合预测规律(9),但显然有 $\eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Cu}}^* \approx \eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Cu}}^{\min}$ 。

A3# 钢电极的理论损耗率预测极值为:

$$\eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Fe}}^{\max} = 48\pi \cdot \frac{0.8}{0.8 + 0.6} \cdot \frac{10}{10 + 5.6} \cdot \frac{(8 \times 10^{-3})^2 \cdot 4.5}{0.46 \cdot 1150} \approx 30.072 \times 10^{-6} (\text{g/s})$$

$$\eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Fe}}^{\min} = 19.2\pi \cdot \frac{(8 \times 10^{-3})^2 \cdot 4.5}{0.46 \cdot 1150} \cdot (2.5072 - 2.5) \approx 0.236 \times 10^{-6} (\text{g/s})$$

A3# 钢电极的实际损耗率为:

$$\eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Fe}}^* = \frac{\Delta m_{\text{Fe}}^{(-)}}{T_{\text{Fe}}^{(-)}} = \frac{3.947\text{g}}{688\text{h}23'} \approx 1.593 \times 10^{-6} (\text{g/s})$$

比较可知: $\eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Fe}}^{\min} < \eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Fe}}^* < \eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Fe}}^{\max}$, 很好的符合了预测规律(9),且可以求得 A3# 钢电极的实际损耗量占预测损耗范围的百分比为:

$$\begin{aligned}\zeta_{\text{Fe}}^{(-)} &= \frac{\eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Fe}}^* - \eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Fe}}^{\min}}{\eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Fe}}^{\max} - \eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Fe}}^{\min}} \times 100\% \\ &= \frac{1.593 - 0.236}{30.072 - 0.236} \times 100\% \approx 4.455\%\end{aligned}$$

所占百分比与第二组工艺参数结果极其接近。同样假设没有碳层作用时,紫铜电极的损耗量占预测范围的百分比与 A3# 钢电极相同,即:

$$\zeta_{\text{Cu}}^{(-)} = \zeta_{\text{Fe}}^{(-)} \approx 4.455\%$$

则积碳层对紫铜电极的减损率可计算为:

$$\begin{aligned}\lambda_{\Delta\text{Cu}}^{(-)} &= \frac{\zeta_{\text{Cu}}^{(-)} \cdot (\eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Cu}}^{\max} - \eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Cu}}^{\min}) - \eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Cu}}^*}{\zeta_{\text{Cu}}^{(-)} \cdot (\eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Cu}}^{\max} - \eta_m^{(-)} \Big|_{\text{Cu}}^{\min})} \times 100\% \\ &= \frac{(36.652 - 0.812) \cdot 4.455\% - 0.828}{(36.652 - 0.812) \cdot 4.455\%} \times 100\% \\ &\approx 48.142\%\end{aligned}$$

即在第二组加工工艺下,与相同尺寸的 A3# 钢电极相比,紫铜电极表面积碳层的存在减少了约 48% 的单位时间电极损耗。两种工艺参数下的紫铜电极 EDM 实验计算结果对比可知:与第二组工艺相比,第一组工艺下的加工效率高 ($30\text{h}32' < 42\text{h}16'$), 电极损耗率低 ($0.115\text{g} < 0.126\text{g}$), 而相应积碳层对电极的减损率也较小 ($43.056\% < 48.142\%$)。

6 结论

(1) 本文基于场致发射理论,提出了负极性 EDM 的电极材料损耗机理,推导了电极损耗的能量方程,并给出了其损耗率的理论极大值与极小值计算公式。

(2) 不同工艺参数下的单孔 EDM 对比实验结果表明:表面热熔蚀是电极材料损耗的主要做功形式,且煤油介质电离后产生的游离态碳会在电极表面粘附聚集。这一积碳层对 A3# 钢材料而言仅为静电吸附,但对紫铜电极材料而言则会在高温下产生化学键合,并在表面上生成较牢固的碳保护层。

(3) 在相同的加工工艺参数下,与 A3# 钢电极相比,紫铜电极加工时的有效放时间更长 [$19.5049(\text{V}) > \approx 12.0979(\text{V})$], 极间放电能量更大 [$202.5184(\text{W}) \gg 78.5426(\text{W})$], 而电极的损耗率更低 [$1.046 \times 10^{-6} (\text{g/s}) < 1.853 \times 10^{-6} (\text{g/s})$]。

(4) 不同电极 EDM 加工实验数据的分析表明:表面积碳层对负极性 EDM 时的紫铜电极存在良好的减损作用,而对 A3# 钢电极则作用甚微。两组工艺参数下的紫

铜电极实际损耗与理论损耗的计算结果对比表明,积碳层的存在分别减少了 43.056% 和 48.142% 的紫铜电极材料损耗。

(5) 两组不同工艺参数下的紫铜电极单孔 EDM 实验对比表明,在保证有效消电离的情况下,极间有效放电时间比 $[10/(10+3.2) > 10/(10+5.6)]$ 越高,加工效率越高 ($30h32' < 42h16'$),电极的损耗率越低,而相应的积碳层对电极材料的减损率则减小 ($43.056% < 48.142%$)。

参考文献

- [1] M L Jeswani. Dimensional analysis of tool wear in electrical discharge machining[J]. *Wear*, 1979, 55(1): 153 - 161.
- [2] M R Patel, M A Barrufet, P T Eubank, D D DiBitonto. Theoretical models of the electrical discharge machining process II the anode erosion model[J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, 66(9): 4104 - 4111.
- [3] Xia H. Study on Factors Affecting Electrode Wear Ratio and Improvement of Machining Characteristics in EDM Process [D]. Dissertation of Tokyo University of Agriculture and Technology, 1995. 73. (in Japanese)
- [4] Xia H, Hashimoto H, Kunieda M, Nishiwaki N. Measurement of energy distribution in continuous EDM process[J]. *Japan Society for Precision Engineering*, 1996, 62(8): 1141 - 1145. (in Japanese)
- [5] Natsu W, Kunieda M, Nishiwaki N. Study on influence of inter-electrode atmosphere on carbon adhesion and removal amount [J]. *International Journal of Electrical Machining*, 2004, (9): 43 - 50.
- [6] Motoki M, Lee C, Nakajima M. Research on electrode erosion caused by transient arc discharge in dielectric liquid[J]. *Journal of The Japan Society of Electrical Machining Engineers*, 1968, 2(3): 48 - 56. (in Japanese)
- [7] Ikai T, Hashiguchi K. Heat input for crater formation in EDM [A]. *Proceedings of the International Symposium for Electro Machining-ISEM[C]*. Lausanne: Switzerland, 1995. 163 - 170.
- [8] Mohri N, Suzuki M, Furuya M, Saito N. Electrode wear process in electrical discharge machining[J]. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 1995, 44(1): 165 - 168.
- [9] Kunieda M, Kobayashi T. Clarifying mechanism of determining tool electrode wear ratio in EDM using spectroscopic measurement of vapor density[J]. *Materials Processing Technology*, 2004, (149): 284 - 288.
- [10] Kunieda M, Lauwers B, Rajurkar K P, Schumacher B M. Advancing EDM through fundamental insight into the process [J]. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 2005, 54(2): 64 - 87.

- [11] Norliana M A, Darius G S, Md F B. A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, 47(7-8): 1214 - 1228.
- [12] 廖复疆. 微型真空电子器件和太赫兹辐射源技术进展 [J]. *电子学报*, 2003, 31(9): 1361 - 1364.
LIAO Fujiang. Micro-vacuum electron devices and terahertz vacuum sources [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(9): 1361 - 1364. (in Chinese)
- [13] Fowler R H, Nordheim L W. Electron emission in intense electric fields[J]. *Proceedings of the Royal Society of London (Series A)*, 1928, 119(781): 173 - 181.
- [14] Murphy E L, Good R H. Thermionic emission, field emission and the transition region[J]. *Physical Review*, 1956, 102(6): 1464 - 1473.
- [15] Hare R H, Hill R M, Budd C J. Modeling charge injection and motion in solid dielectrics under high electric field[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1993, 26(7): 1084 - 1093.
- [16] 刘蜀阳, 黄玉美. 基于场致发射理论的 EDM 平板电容模型及其参数研究[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(17): 141 - 149.
LIU Shuyang, HUANG Yumei. A plate-capacitor model of EDM process based on field electron emission theory and simulink study on its parameters[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(17): 141 - 149. (in Chinese)

作者简介



刘蜀阳 女, 1976 年 11 月出生, 四川资阳人。1998 年毕业于江汉石油学院电信系, 其后在江汉石油管理局沙市钢管厂从事项目电气控制方面的工作, 2006 年毕业于太原科技大学机械电子工程系, 主要从事粒子群优化算法的工作, 并于 2007 年在西安理工大学攻读博士, 现为博士研究生, 主要从事电火花数控机床方面的研究。E-mail: hanliuyang@sina.com



黄玉美 女, 1941 年 11 月出生, 河南人。教授, 博士生导师, 日本精机学会会员。西安交通大学机械制造专业毕业, 现任西安理工大学机械自动化研究所所长。主要从事数控机床、机器人、检测装置的研究与开发。E-mail: hymxaut@163.com