

正极性电火花加工的损耗机理及其参数分析

刘蜀阳, 韩志宏

(景德镇陶瓷学院机械电子工程系, 江西景德镇 333403)

摘 要: 本文基于场致发射电子对阳极表面材料的溅射能量分析, 研究了引起正极性电火花加工时阳极材料的损耗机理, 并给出了正极性加工时电极损耗率的理论极大值与极小值方程. 设计并进行了不同工艺参数下紫铜电极和 A3 # 钢电极单孔电火花加工对比实验, 实验表明: 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, 加工效率对比上前者是后者的极的 75 倍多, 但电极材料的损耗率对比上, 前者是后者的近 10 倍; 不同工艺参数下, 极间有效放电时间和放电能量越大, 加工效率越高, 相应的电极的损耗率也增加, 但损耗率的增加程度要远小于加工效率的提高程度.

关键词: 电火花加工; 电极损耗; 做功能量; 电子溅射

中图分类号: TB131 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)12-2489-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.12.022

The Study on the Mechanism of Electrode Wear in Positive EDM Process and Its Effective Parameters Analysis

LIU Shu-yang, HAN Zhi-hong

(School of Mechanical & Electronic Engineering, Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen, Jiangxi 333403, China)

Abstract: Through the sputtering power analysis of field-emission electrons which hit on the end surface of positive electrode in single discharging pulse, the material wear mechanism of positive electrical discharging machining (short in EDM) process was studied, and theoretical prediction equations of maximum and minimum material wear ratio of electrodes were deduced too. A series of single-hole EDM experiments were designed and the experimental results show that, the mean discharging power produced by the electrode of copper is nearly 75 times higher than that of A3 # steel when the other processing parameters are the same, and material wear ratio of the former is almost 10 times than that of the latter; both the machining efficiency and the material wear ratio of electrode increase with the improvement of valid work time and the pulse discharging power, and the increasing degree of machining efficiency is more significant than that of the material wear ratio of tool electrode.

Key words: electrical discharge machining; material wear of electrode; work energy; electron sputtering

1 引言

多数实验表明, 通常情况下正极性电火花加工时的加工效率要大大高于负极性加工, 是最常用的加工方式. 但由于加工过程中的电极损耗对提高加工的尺寸精度和表面质量, 特别是在仿形加工时对模具的使用寿命与加工成本有着重要的影响. 故研究正极性加工时电极的损耗机理与影响参数对提高提高电火花加工的效率与加工质量和更好的优化加工工艺, 有着重要的理论价值与现实意义.

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]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^[3,4]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.

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,特别是 Fowler-Nordleim 方程^[5]、Richardson-Schottky 方程^[6]和 Murphy-Good 方程^[7]的提出,为分析极间做功能量的量化关系提供了理论基础.

基于场致发射理论与 EDM 过程的分析可知,加工的能量主要来源于在极间电场作用下的负极表面的场致电子发射.发射电子克服了负极表面壁垒后,在极间电场中被加速,先是击穿极间介质并在极间形成一高温高热的放电通道,最后喷射在阳极表面并被俘获.所以在正极性上的做功能量来源于发射电子对电极表面的溅射能.当然作为放电回路中一部分,电流在电极体中的流动也会在其表面附加一定的电阻热^[8,9].

由于电火花加工时极间放电通道的影响因素较多且存在较为复杂的耦合关系,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都对加工的效果与电极损耗产生影响,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,这也是大多数的研究成果都是基于单因素实验的经验公式与定性分析并采用统计学方法的原因^[10,11].

从能量分布的角度分析电极的损耗是比较精确的,且从统计学的角度对要放电能量的分布进行测量也是较为容易的.本文主要通过对场致发射电子对阳极电极表面的溅射能量分析,建立了引起阳极材料损耗的做功能量方程,并对电极的损耗率进行理论预测.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 # 钢电极为例分别对进行了极间实时放电参数与电极损耗量测量;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.

2 单孔 EDM 电极损耗对比实验设计

图 1 为单孔正极性电火花加工时的放电回路示意图,其中, S_w 为脉冲开关; U_s 为脉冲放电管电压(V); R_T 为工具电极端回路电阻(Ω); R_w 为工件电极端回路电阻(Ω); R_V 为放电管的内阻(Ω).

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: $V_b = 100\text{V}$ (正极性);

极间介质: 煤油;

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

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

加工的单孔直径: $D = 8\text{mm}$;

孔深: $H = 3.5\text{mm}$;

霍尔传感器: CSM015NPT;

数据采集仪型号: NEC RA 2300.

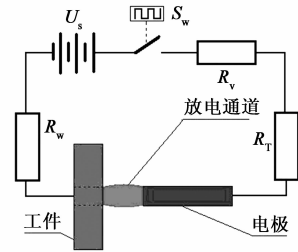


图1 单孔正极性EDM放电回路

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 $2\mu\text{s}$ 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,并在连续的十个拾放刀周期内进行 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 机床正极性基准放电电压 $V_b = 100\text{V}$,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_c ,极间的电压降可计算为:

$$U_c = (110 - V_c) \quad (\text{V}) \quad (1)$$

同样,在采用霍尔电流传感器 CSM015NPT 测极间电流 $J(\text{A})$ 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:

$$J = \left| \frac{48}{0.625} \cdot (2.5 - V_{SN}) \right| \quad (\text{A}) \quad (2)$$

3 单孔正极性 EDM 中的电极损耗机理模型

为简化分析,在研究中我们进行了如下假设:

(1) 电极端面与工件表面平行.

(2) 电极体材料均匀且各向同性.

(3) 由于放电脉冲时间很短,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) 在单放电脉冲周期内,极间放电电场的建立时间 $t_3 < T_{on}$. 即电极损耗主要发生在正常放电阶段 $[t_3, T_{on}]$.

(5) 场致发射电子从放电表面上逸出时的初速度为零.

则在单位放电脉冲 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:

$$Ne_t = J_t \cdot A_s = (\pi/4) \cdot J_t \cdot D^2/e \quad (3)$$

式(3)中: J_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).

则在整个 EDM 时间 T_p 内电极表面逸出电子产生的入射电子溅射能可计算为:

$$E_s = \int_0^{T_p} U_t \cdot N e_t \cdot e \cdot dt$$

将式(3)代入上式得到:

$$E_s = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \int_0^{T_p} U_t \cdot J_t \cdot dt \quad (4)$$

考虑到在抬刀周期 T_{kr} 和放电间隙 T_{off} 内 $J_t = 0$, 可得到:

$$E_s = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \frac{T_{kl}}{T_{kl} + T_{kr}} \cdot \frac{1}{T_{on} + T_{off}} \cdot T_p \cdot \int_0^{T_m} U_t \cdot J_t \cdot dt \quad (5)$$

则在正极性 EDM 过程中电极的理论损耗质量可计算为:

$$\Delta m^{(+)} = \mu_w \cdot E_s / E_w \quad (6)$$

式中: μ_w 为电极材料的摩尔质量(g/mol); E_w 为电极材料的结合键能(J/mol).

将式(1)、式(2)和式(5)代入式(6), 可以得到:

$$\Delta m^{(+)} = 19.2\pi \cdot D^2 \cdot \frac{T_{kl}}{T_{kl} + T_{kr}} \cdot \frac{1}{T_{on} + T_{off}} \cdot T_p \cdot \int_0^{T_m} (110 - V_e^{(+)}) \cdot (2.5 - V_{SN}^{(+)}) \cdot dt \quad (7)$$

根据式(2)的转换关系, $(2.5 - V_{SN}^{(+)})$ 的单位为(A).

若测得整个加工时间 T_p 内的 $\overline{U_e^{(+)}}$ 和 $\overline{J_e^{(+)}}$, 则式(5)可改写为:

$$E_s \approx \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot T_p \cdot \overline{U_e^{(+)}} \cdot \overline{J_e^{(+)}} \quad (8)$$

式中: $\overline{U_e^{(+)}}$ 为正极性加工 T_p 时间内的极间平均放电电压(V), 其值可由测得的放电点平均是电位 $\overline{V_e^{(+)}}$ 值代入式(1)中求得; $\overline{J_e^{(+)}}$ 为其极间平均放电电流(A), 其值可由测得的极间平均 $\overline{V_{SN}^{(+)}}$ 值代入式(2)中求得.

将式(1)、式(2)和式(9)代入式(8), 则得到:

$$\Delta m^{(+)} \approx 19.2\pi \cdot D^2 \cdot \frac{\mu_w}{E_A} \cdot T_p \cdot (110 - \overline{V_e^{(+)}}) \cdot (2.5 - \overline{V_{SN}^{(+)}}) \quad (9)$$

式(9)中: $\overline{V_{SN}^{(+)}}$ 为实测计算出的正极性加工 50 单位区间 V_{SN} 均值, 同样根据式(2)的转换关系, $(2.5 - \overline{V_{SN}^{(+)}})$ 的单位为(A).

定义正极性 EDM 时的电极材料损耗率:

$$\eta_m^{(+)} = \Delta m^{(+)} / T_p \quad (10)$$

则基于上述讨论, 对极间放电时的极大与极小电

极损耗率可预测如下:

(1)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, 即取 $V_e^{(+)} = 0$, $V_{SN} = 0$, 则将其式(7)代入式(10)得到 $\eta_m^{(+)}$ 的理论极大值为:

$$\begin{aligned} \eta_m^{(+)} |^{\max} &= 19.2\pi \cdot D^2 \cdot \frac{T_{kl}}{T_{kl} + T_{kr}} \cdot \frac{1}{T_{on} + T_{off}} \cdot \frac{\mu_w}{E_A} \\ &\quad \cdot \int_0^{T_m} (110 - V_e^{(+)}) \cdot (2.5 - V_{SN}^{(+)}) \cdot dt \\ &= 5280\pi \cdot D^2 \cdot \frac{T_{kl}}{T_{kl} + T_{kr}} \cdot \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \cdot \frac{\mu_w}{E_A} \quad (11) \end{aligned}$$

(2)如果忽略环境温度对电极表面材料键合强度的影响, 即假设引起电极材料切除的做功能量只有入射电子的表面溅射能, 则将式(9)代入式(10)得到得到 $\eta_m^{(+)}$ 的理论极小值为:

$$\eta_m^{(+)} |^{\min} \approx 19.2\pi \cdot D^2 \cdot \frac{\mu_w}{E_A} \cdot (110 - \overline{V_e^{(+)}}) \cdot (2.5 - \overline{V_{SN}^{(+)}}) \quad (12)$$

实际电极单位时间损耗率 $\eta_m^{(+)} |^*$ 理论上应介于二个极值之间, 即:

$$\eta_m^{(+)} |^{\min} < \eta_m^{(+)} |^* < \eta_m^{(+)} |^{\max} \quad (13)$$

4 实验结果分析与积碳层对电极的减损作用分析

图 2 为应用 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} 由信道 1 输入, 极间放电点的实时电位值 V_e 由信道 2 输入. 图中的采样数据段长度为 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据记录如表 1 中所示.

对实验结果的分析与讨论如下:

(1)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:

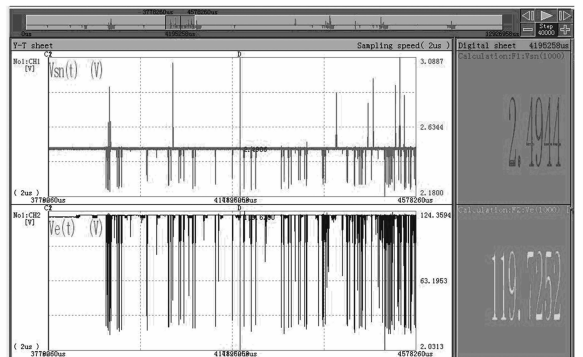


图2 实时监测与数据采集

$$\lambda_{\text{Cu}}/\lambda_{\text{Fe}} = \frac{\Delta m_w/T_{\text{Cu}}}{\Delta m_w/T_{\text{Fe}}} = \frac{T_{\text{Fe}}}{T_{\text{Cu}}} = \frac{272\text{h}02\text{min}}{3\text{h}37\text{min}} \approx 75.22$$

即正极性加工同样深度的通孔,紫铜电极的加工效率要远远高于 A3 # 钢电极,约为后者的 75 倍。

(2) 电极的单位时间损耗率对比上,同样由表 1 中

可知:

$$\eta_{\text{Cu}}/\eta_{\text{Fe}} = \frac{\Delta m_{\text{Cu}}/T_{\text{Cu}}}{\Delta m_{\text{Fe}}/T_{\text{Fe}}} = \frac{0.090}{0.679} \cdot \frac{272\text{h}02\text{min}}{3\text{h}37\text{min}} \approx 9.97$$

即正极性 EDM 时,紫铜电极比 A3 # 钢电极的单位时间损耗率高近 10 倍。

表 1 正极性单孔 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} (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	86.8387	86.3201	2.3962	2.3962	3h25min	3h36min	0.098	0.091
					82.9796		2.3935		3h28min		0.091	
					89.1418		2.3986		3h56min		0.078	
2	A3 #	45 #	10	3.2	96.5706	96.2638	2.4852	2.4842	251h26min	272h01min	0.622	0.678
					97.8077		2.4825		287h27min		0.768	
					94.4130		2.4851		277h11min		0.649	
3	Cu	45 #	10	5.6	88.4941	88.3763	2.4108	2.4118	4h41min	4h53min	0.099	0.099
					86.1606		2.4177		4h37min		0.101	
					90.4745		2.4067		5h18min		0.093	
4	A3 #	45 #	10	5.6	98.6068	99.2959	2.5052	2.4859	352h06min	341h44min	0.778	0.758
					99.5066		2.4938		324h28min		0.731	
					99.7738		2.4585		348h35min		0.764	

采用表 1 中的第一组工艺实验数据,分别对单孔正极性 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: $\mu_{\text{Cu}} = 63.5(\text{g/mol})$;基于假设条件(2),紫铜电极表面材料的金属结合键能可取 $E_{\text{Cu}} = 176.52 \pm 2.38(\text{kJ/mol})$. 将相关数据分别代入式(11)和(12)中可计算得到:

$$\eta_{\text{Cu}}^{(+)} \Big|_{\text{Cu}}^{\max} = 5280\pi \cdot (8 \times 10^{-3})^2 \cdot \frac{10}{10 + 3.2} \cdot \frac{0.8}{0.8 + 0.6} \cdot \frac{63.5}{176.52 \times 10^3} \approx 165.3224 \times 10^{-6}(\text{g/s})$$

$$\eta_{\text{Cu}}^{(+)} \Big|_{\text{Cu}}^{\min} \approx 19.2\pi \cdot (8 \times 10^{-3})^2 \cdot \frac{63.5}{176.52 \times 10^3} \cdot (110 - 86.32) \cdot (2.5 - 2.3961) \approx 3.4167 \times 10^{-6}(\text{g/s})$$

当电极材料为 A3 # 钢时,已知: $\mu_{\text{Fe}} = 56(\text{g/mol})$;考虑到 A3 # 电极在有 C-键的存在,其表面材料的结合键能可取 $E_{\text{Fe}} \approx 75 \pm 17(\text{kg/mol})$. 将相关数据分别代入式(11)和(12)中可计算得到:

$$\eta_{\text{Fe}}^{(+)} \Big|_{\text{Fe}}^{\max} = 5280\pi \cdot (8 \times 10^{-3})^2 \cdot \frac{10}{10 + 3.2} \cdot \frac{0.8}{0.8 + 0.6} \cdot \frac{56}{92 \times 10^3} \approx 279.7383 \times 10^{-6}(\text{g/s})$$

$$\eta_{\text{Fe}}^{(+)} \Big|_{\text{Fe}}^{\min} \approx 19.2\pi \cdot (8 \times 10^{-3})^2 \cdot \frac{56}{92 \times 10^3} \cdot (110 - 96.2637) \cdot (2.5 - 2.4843) \approx 0.5068 \times 10^{-6}(\text{g/s})$$

而由表 1 中的实验数据可知,实际的电极损耗率

为:

$$\eta_{\text{Cu}}^{(+)} \Big|_{\text{Cu}}^* = \frac{\Delta m_{\text{Cu}}^*}{T_{\text{Cu}}^*} = \frac{0.09\text{g}}{3\text{h}37\text{min}} \approx 6.9124 \times 10^{-6}(\text{g/s})$$

$$\eta_{\text{Fe}}^{(+)} \Big|_{\text{Fe}}^* = \frac{\Delta m_{\text{Fe}}^*}{T_{\text{Fe}}^*} = \frac{0.679\text{g}}{272\text{h}02\text{min}} \approx 0.6933 \times 10^{-3}(\text{g/s})$$

对比计算结果发现,紫铜电极与 A3 # 电极的损耗情况均符合式(13)的预测规律,即:

$$\eta_{\text{Cu}}^{(+)} \Big|_{\text{Cu}}^{\min} < \eta_{\text{Cu}}^{(+)} \Big|_{\text{Cu}}^* < \eta_{\text{Cu}}^{(+)} \Big|_{\text{Cu}}^{\max}$$

$$\eta_{\text{Fe}}^{(+)} \Big|_{\text{Fe}}^{\min} < \eta_{\text{Fe}}^{(+)} \Big|_{\text{Fe}}^* < \eta_{\text{Fe}}^{(+)} \Big|_{\text{Fe}}^{\max}$$

但显然与紫铜电极相比,A3 # 钢电极的实际损耗情况却比预测的损耗率极大值要小得多. 由前述计算结果,可以分别求得紫铜电极和 A3 # 钢电极的实际损耗量占预测损耗范围的百分比分别为:

$$\zeta_{\text{Cu}}^{(+)} = \frac{\eta_{\text{Cu}}^{(+)} \Big|_{\text{Cu}}^* - \eta_{\text{Cu}}^{(+)} \Big|_{\text{Cu}}^{\min}}{\eta_{\text{Cu}}^{(+)} \Big|_{\text{Cu}}^{\max} - \eta_{\text{Cu}}^{(+)} \Big|_{\text{Cu}}^{\min}} \times 100\%$$

$$= \frac{6.9124 - 3.4167}{165.3224 - 3.4167} \times 100\%$$

$$\approx 2.1591\%$$

$$\zeta_{\text{Fe}}^{(+)} = \frac{\eta_{\text{Fe}}^{(+)} \Big|_{\text{Fe}}^* - \eta_{\text{Fe}}^{(+)} \Big|_{\text{Fe}}^{\min}}{\eta_{\text{Fe}}^{(+)} \Big|_{\text{Fe}}^{\max} - \eta_{\text{Fe}}^{(+)} \Big|_{\text{Fe}}^{\min}} \times 100\%$$

$$= \frac{0.6933 - 0.5068}{279.7383 - 0.5068} \times 100\%$$

$$\approx 0.0668\%$$

对上述预测方程的建立进行分析,可知实际损耗率占预测损耗率范围百分比值 $\xi^{(+)}$ 的大小,实际上反映了实际有效放电点时占理论放电时间的多少. 实验中结果表明,在电极损耗率对比上,紫铜电极的损耗率

比 A3 # 钢电极大的多.由前面的计算结果可知:

$$\eta_m^{(+)} \Big|_{\text{Cu}}^* / \eta_m^{(+)} \Big|_{\text{Fe}}^* = 6.9124/0.6933 \approx 9.97$$

紫铜电极的损耗率是 A3 # 钢电极近 10 倍.我们认为产生这种差别的原因是因为正极性电极端面材料的切除主要发生在放电脉冲结束时,此时由于作用于电极表面的高压消失,环境介质对极间通道的涌入将引起表面熔融组织的冲刷切除.而与 A3 # 钢材料相比,紫铜比的当量熔融温度点要低的多,在同样的放电能量下,紫铜电极表面的组织熔融程度更高,故其损耗率也高.

但参考两者在加工效率比:

$$T_{\text{Fe}}/T_{\text{Cu}} = 272\text{h}02\text{min}/3\text{h}37\text{min} \approx 75.22$$

紫铜电极的加工效率是 A3 # 电极的 75 倍多,紫铜电极的 EDM 加工能力更加优良也是不言而喻的.

为了进一步验证正极性 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:

$$\eta_m^{(+)} \Big|_{\text{Cu}}^{\max} = 5280\pi \cdot (8 \times 10^{-3})^2 \cdot \frac{10}{10 + 5.6} \cdot \frac{0.8}{0.8 + 0.6} \cdot \frac{63.5}{176.52 \times 10^3} \approx 139.8882 \times 10^{-6} (\text{g/s})$$

$$\eta_m^{(+)} \Big|_{\text{Cu}}^{\min} \approx 19.2\pi \cdot (8 \times 10^{-3})^2 \cdot \frac{63.5}{176.52 \times 10^3} \cdot (110 - 88.3764) \cdot (2.5 - 2.4117) \approx 2.6577 \times 10^{-6} (\text{g/s})$$

紫铜电极的实际损耗率为:

$$\eta_m^{(+)} \Big|_{\text{Cu}}^* = \frac{\Delta m_{\text{Cu}}^{(+)}}{T_{\text{Cu}}^{(+)}} = \frac{0.098}{4\text{h}52\text{min}} \approx 5.59364 \times 10^{-6} (\text{g/s})$$

比较可知: $\eta_m^{(+)} \Big|_{\text{Cu}}^{\min} < \eta_m^{(+)} \Big|_{\text{Cu}}^* < \eta_m^{(+)} \Big|_{\text{Cu}}^{\max}$, 符合式 (13) 预测规律.

两组加工工艺参数下的紫铜电极的加工效率比为:

$$\frac{\Delta m/T_{1\text{Cu}}}{\Delta m/T_{2\text{Cu}}} = \frac{4\text{h}52\text{min}}{3\text{h}37\text{min}} \approx 1.3456$$

相应两组加工工艺参数下的紫铜电极的损耗率比为:

$$\frac{0.090/3\text{h}37\text{min}}{0.098/4\text{h}52\text{min}} = \frac{0.090}{0.098} \cdot \frac{4\text{h}52\text{min}}{3\text{h}37\text{min}} \approx 1.2358$$

可见,第一组加工工艺参数下紫铜电极的加工效率比第二组工艺参数下提高了 34.56%,而电极的损耗率只增加了 23.58%.

同样,第二组工艺参数下 A3 # 钢电极的理论损耗

率预测极值分别为:

$$\eta_m^{(+)} \Big|_{\text{Fe}}^{\max} = 5280\pi \cdot (8 \times 10^{-3})^2 \cdot \frac{10}{10 + 5.6} \cdot \frac{0.8}{0.8 + 0.6} \cdot \frac{56}{92 \times 10^3} \approx 236.7012 \times 10^{-6} (\text{g/s})$$

$$\eta_m^{(+)} \Big|_{\text{Fe}}^{\min} \approx 19.2\pi \cdot (8 \times 10^{-3})^2 \cdot \frac{56}{92 \times 10^3} \cdot (110 - 99.2958) \cdot (2.5 - 2.4858) \approx 0.3381 \times 10^{-6} (\text{g/s})$$

第二组工艺条件下 A3 # 钢电极的实际损耗率为:

$$\eta_m^{(+)} \Big|_{\text{Fe}}^* = \frac{\Delta m_{\text{Fe}}^{(+)}}{T_{\text{Fe}}^{(+)}} = \frac{0.757}{314\text{h}43\text{min}} \approx 0.6154 \times 10^{-3} (\text{g/s})$$

比较可知: $\eta_m^{(+)} \Big|_{\text{Cu}}^{\min} < \eta_m^{(+)} \Big|_{\text{Cu}}^* < \eta_m^{(+)} \Big|_{\text{Cu}}^{\max}$, 符合式 (13) 预测规律.

两组加工工艺参数下 A3 # 钢电极的加工效率比为:

$$\frac{\Delta m/T_{1\text{Fe}}}{\Delta m/T_{2\text{Fe}}} = \frac{314\text{h}43\text{min}}{272\text{h}02\text{min}} \approx 1.2562$$

相应两组加工工艺参数下 A3 # 钢电极的电极损耗率为:

$$\frac{0.679/272\text{h}02\text{min}}{0.757/314\text{h}43\text{min}} = \frac{0.679}{0.757} \cdot \frac{314\text{h}43\text{min}}{272\text{h}02\text{min}} \approx 1.1267$$

可见,第一组加工工艺参数下 A3 # 钢电极的加工效率比第二组工艺参数下提高了 25.62%,而电极的损耗率只增加了 12.67%.

上述对比实验表明,不论对紫铜电极还是 A3 # 电极,与第二组工艺参数相比,采用第一组中工艺加工时,电极损耗率的增加程度远小于加工效率的增加程度,第一组工艺参数比较好.

5 结论

(1) 本文通过场致发射电子对阳极电极表面的溅射能量分析,提出了引起阳极材料损耗的做功能量方程,并给出了电极材料损耗率理论预测极大值与极小值的计算公式.

(2) 研究表明,在相同的加工工艺参数下,紫铜电极的损耗率比 A3 # 钢电极大的多,前者是后者的近 10 倍,但由于其具有更高的加工效率比,前者的 EDM 加工能力更加优良.

(3) 不同工艺参数下的单孔正极性 EDM 实验表明,极间有效放电时间和放电能量越大,加工效率越高,相应的电极的损耗率也增加,但损耗率的增加程度要远小于加工效率的提高程度.

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] Mukund R Patel, Maria A Barrufet, Philip T Eubank, Daryl D DiBitonto. Theoretical models of the electrical discharge machining process. II. The anode erosion model[J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, 66(12): 4104 – 4111.
- [3] Mohri N, Suzuki M, Furuya M, Saito N. Electrode wear process in electrical discharge machining [J]. *Annals of the CIRP*, 1995, 44(1): 165 – 168.
- [4] Kunieda M, Kobayashi T. Clarifying mechanism of determining tool electrode wear ratio in EDM using spectroscopic measurement of vapor density [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 149(1 ~ 3): 284 – 288.
- [5] Fowler RH, Nordheim LW. Electron emission in intense electric fields[J]. *Proceedings of the Royal Society*, 1928, 119(3): 173 – 181.
- [6] Murphy EL, Good RH. Thermionic emission, field emission, and the transition region [J]. *Physical Review*, 1956, 102(6): 1464 – 1473.
- [7] Hare RW, Hill RM, Budd CJ. Modeling charge injection and motion in solid dielectrics under high electric field [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1993, 26(7): 1084.
- [8] 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 [J]. *机械工程学报*, 2011, 4(17): 141 – 149.
LIU Shu-yang, HANG Yu-mei. Plate-capacitor model of electrical discharge machining process based on field electron emission theory and its parameters analysis [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 17(4): 141 – 149. (in Chinese)
- [9] 刘蜀阳, 黄玉美. 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 [J]. *电子学报*, 2012, 4(4): 654 – 660.

LIU Shu-yang, HANG Yu-mei. The study on the wear mechanism of electrode materials in negative EDM process and the effect of carbon deposition layer [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 4(4): 654 – 660. (in Chinese)

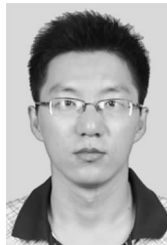
- [10] Kunieda M, Lauwers B, Rajurkar KP, Schumacher BM. Advancing EDM through fundamental insight into the process [J]. *Annals of the CIRP*, 2005, 54(2): 64 – 87.
- [11] Shuyang Liu, Yumei Huang, Yan Li. A Plate capacitor model of the EDM process based on the field emission theory, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, 51(7): 653 – 659.

作者简介



刘蜀阳 女, 1976 年 11 月出生于四川资阳, 博士, 研究领域: 特种加工、智能控制.

E-mail: hanliuyang@163.com



韩志宏 男, 1975 年 7 月出生于山西太原, 博士, 研究领域: 摩擦学理论及工业应用.

E-mail: hanzlod@sina.cn