研 究

放電加工の電極消耗*

元木 幹雄** 佐藤 隆一*** 橋口 清人*** 徳山 赫洪***

Electrode Erosion in Electric Discharge Machining

Mikio MOTOKI, Ryuichi SATO, Kiyoto HAHIGUCHI, Kakuki TOKUYAMA

An erosion mechanism of the electric discharge machining process has been studied on a view-point of a cathode phenomena. The T-F theory was applied to the electron emission from a cathode in this method and the electron current density at a cathode spot was calculated from that theory and the McKeown's relation. Then the energy distribution between the gap electrodes was found to be mainly decided by the positive ion current density at a cathode.

The electrode erosion of various materials was measured. It became clear from the results that the electrode erosion per one discharge is dependent on three elements of energy, discharging duration and its thermal property. The kind of the tool electrode materials has a relatively small effect upon machining speed while the erosion of the tool electrode is widely changed by its thermal property.

The negative half cycle of the oscillatory discharging current in a condenser discharge was rectified by using a silicon power rectifier, but the erosion ratio of electrodes was not improved so much and in some cases it became worse than that by the oscillatory current.

1. ま え が き

放電加工法は周知のように、絶縁性液体中における極短ギャップ電極間の過渡アーク放電にともなう電極消耗現象を金属材料の精密加工に応用したものであるから¹⁾、被加工材料の消耗と同時に相手側の加工電極の方も消耗することは避けられない事実である。しかも加工電極の消耗が比較的激しく、かつその成形に手数のかかることが放電加工の欠点になつてゐる。

加工機構については種々の説が発表されているが、かかる液中大電流過渡アーク放電の電極消耗現象に関してはいまだ明確でない点が多い。消耗機構を究明することは単に加工速度の向上に役立つのみならず加工電極の消耗防止にも貢献する。従来は加工速度に関連して被加工材料についてもつばら研究されたが、加工電極側に立つて考察することも必要である。

加工電極の研究は電極材料と回路その他の電氣的分野との二つに大別される。材料については加工速度の高速化よりむしろ耐消耗性材料を見出すことが課題になり、また成形の容易さを考慮に入れると低融点金属も興味のある電極材料である。電氣的な方面ではギャップ・エネルギーの大部分を被加工材料に集中させ、放電形式としていわゆる陽極アークにするような条件を求めることが要求される。それにはアーク放電における電極間のエネルギー配分およびその成因を知らなければならない。

2. 消耗エネルギー

放電加工は液中過渡アーク放電の反覆によつて加工を行なうのであるが、この場合の1回の放電におけるギャップ・エネルギー W は(1)式のごとく三つに分けて考えられる。

$$W = W_a + W_c + W_l \quad (1)$$

ただし W_a : 陽極エネルギー W_c : 陰極エネルギー W_l : アーク柱の損失エネルギーエネルギー W_a は陽極を衝撃する電子によるものであ

* 本論文の1部は昭34精機学会秋季大会および昭35, 4月精機学会関西支部講演会にて講演

** 同志社大学工学部 正会員

*** //

*** 三菱造船株式会社

り、エネルギー W_c は陰極に衝突する陽イオンによつて運ばれる。一般に被加工材料を陽極、加工電極を陰極として結線するから、放電電流が非振動の時は W_a が加工に役立つエネルギー、 W_c は加工電極の消耗エネルギーになる。

損失エネルギー W_l は比較的小さく、ギャップ長 $10 \sim 100 \mu$ でギャップ・エネルギーの $2 \sim 11\%$ である²⁾。極性効果の著しい $W_a \gg W_c$ なる加工条件に持つて行くと、加工速度は大となり、かつ加工電極の消耗も減少する。すなわちギャップのエネルギー配分が加工速度および加工電極の消耗に密接に関連する。

放電において陰極に形成された電極点の電流密度 j は (2) 式で与えられる。

$$j = j_e + j_p \quad (2)$$

ただし j_e : 電子電流密度

j_p : 陽イオン電流密度

陽イオンが陰極点にエネルギーを伝達するから、消耗エネルギー W_c については陽イオン電流密度 j_p が問題になる。コンデンサ充放電方式の放電加工では電流密度 j は $10^5 \sim 10^7$ amp/cm² のオーダーでありギャップ長の小さなほど大きくなる。実験によつて電流密度 j を求めると、それより陽イオン電流密度 j_p および電子電流密度 j_e を決定することが出来る。

陰極点表面の電界強度 F と陽イオン電流密度 j_p および電子電流密度 j_e は次の 2 式を満足する。

Mckeown の式³⁾

$$F^2 = 7.57 \times 10^5 V_c^{1/2} \left[\frac{m_p}{m_e} \right]^{1/2} j_p - j_e \quad (3)$$

ただし F : 電界強度 (volt/cm)

V_c : 陰極降下 (volt)

m_p : 陽イオンの質量 (g)

m_e : 電子の質量 (g)

アーク放電における電子放出の式 (T-F理論)⁴⁾⁵⁾

$$j_e = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{4\pi m_e k T}{h^3} A(T, \epsilon) D(F, \epsilon) d\epsilon \quad (4)$$

ただし h : Planck の定数

k : Boltzman の定数

ϵ : 電子エネルギーとフェルミ準位との差

ϕ : 陰極の仕事関数

$A(T, \epsilon) = \ln[1 + \exp(-\epsilon/kT)]$

$D(F, \epsilon) = \exp[-6.85$
 $\times 10^7 (\phi - \epsilon)^{3/2} v(y)/F]$

$v(y)$: Nordheim の楕円関数⁶⁾

$y = 3.79 \times 10^{-4} F^{1/2} / \phi$

銅陰極についてコンデンサ C : $10 \mu F$, 放電開始電圧 : 125 volt, 加工液 : 灯油の条件では j : 10^6 amp/cm² に

なる。よつて V_c : 10 volt, ϕ : 4.0 volt, T : $2868^\circ K$ (沸点), $x = j_e/j$ として電界強度 F と x との関係を示すと図 1 のごとくなる。図の曲線 (1) は Mckeown の式, (2) は電子放出の式より求めたものである。図の曲線の交点 A が陰極点の電界 F と x とを与える。すなわち F : 2.4×10^7 volt/cm, x : 0.32 である。

図 1 陰極点の電子電流密度/全電流密度

j_p/j は (2) 式より

$$j_p/j = 1 - x$$

$$= 0.68$$

(5)

となり陰極電流の 68% が陽イオン電流であることが明らかになった。この陽イオンにより陰極点にエネルギーが伝達され電極は消耗する。

陰極点の入力密度 p_c は accommodation coefficient を 1 にすると次式で示される。⁵⁾

$$p_c = j_p (V_i + V_c - \phi) \text{ watt/cm}^2 \quad (6)$$

ただし V_i : 陽イオンの電離電圧 (volt)

V_c : 陰極降下 (volt)

ϕ : 陰極の仕事関数 (volt)

V_i : 7.7 , ϕ : 4.0 , V_c : 10 を (6) 式に代入すると

$$p_c = 13.7 j_p \text{ watt/cm}^2 \quad (7)$$

となる。 j_p は 6.8×10^5 amp/cm² であるから

$$p_c = 9.4 \times 10^6 \text{ watt/cm}^2 \quad (8)$$

である。この時の陰極点の面積 S はクレータ面積に等しいと考えると 2.3×10^{-4} cm² であるから、陰極入力 P_c は (9) 式で示される。

$$P_c = S \cdot p_c \\ = 2.6 \times 10^3 \text{ watt} \quad (9)$$

ギャップ入力 P は実測によると 5.4×10^3 watt となり、放電柱の損失 P_l を 0.3×10^3 watt とすると陽極入力 P_a は (10) 式のごとくなる。

$$P_a = P - (P_c + P_l)$$

$$=2.5 \times 10^3 \text{ watt} \quad (10)$$

以上の結果から陰極へは陽極と同程度の入力があることが分かる。陰極材料が熱電子放出型であるかまたは仕事関数が小さいと電子放出が容易となり電子電流密度 j_e が大となるので、加工エネルギー W_a は消耗エネルギー W_c に比して大きくなる。ギャップ長が短くなると j_e が大となる傾向にあるから、やはりエネルギーは陽極に片寄り同様な効果がある。加工液も絶縁耐力の高い方がよい。要するにギャップ・エネルギーの配分は加工速度および加工電極の消耗を左右する重要な因子になり、その配分は陰極よりの電子放出状態によつて変わる。このほか陽極が高沸点材料の時は低沸点材料の陰極の消耗は陽極点温度の影響を受けるようである。消耗機構については陰極

λ: 熱伝導率 (CGS 単位), a: 温度伝導率 (CGS 単位), T_m : 融点 ($^{\circ}\text{C}$)

図 2 各種電極の比消耗量

現象の究明がきわめて重要である。

3. 電極消耗量

放電加工の加工電極材料としてはつぎのような条件が要求される。

- (1): 加工速度大, (2): 電極消耗量小, (3): 成形容易, (4): 安価, (5): 加工面良

これらの条件をすべて満足する材料はいまの所ない。

種々の材料を加工電極として超硬合金を加工した時の加工電極の消耗量 E および超硬合金の加工量 M を測定した。ただし計数放電管により放電回数を求め、平均として 1 回の放電による消耗量として E および M を測定した。加工条件は下記のごとくである。

コンデンサ C : $12.5 \mu\text{F}$, 放電開始電圧 V : 100 volt , 放電回路の導線の抵抗: $1.8 \text{ m}\Omega$, 放電回路のインダクタンス: $0.95 \mu\text{H}$, 加工液: 灯油, 放電回数: $10 \sim 30$ 万回, 被加工材料: 超硬合金 G_1 。

図 2 は純金属および黄銅を加工電極とした時の比消耗量 (体積) を示すものである。ただし四六黄銅の消耗量を 100 とした。図より明らかなように、加工条件を一定にすると加工電極の消耗は材料の熱的性質によつて大勢が決まるようである。またアーク放電にお

表 1

(1) 純金属及び黒鉛

材 料	タングステン	銀	金	銅	コバルト	アンチモン	黒鉛	亜鉛	鉛	カドミウム	蒼鉛
比加工量	95	94	91	90	86	66	65	56	53	52	50
比消耗量	25	41	57	45	77	366	3	244	423	313	469

(2) 合 金

(a) 黄 銅

材 料	Cu-Zn 60-40	Cu-Zn 65-35	Cu-Zn 70-30	Cu-Zn 80-20	Cu-Zn 90-10	アルミ 黄銅	快 黄銅	削 銅	高 黄銅	力 銅	ネーブル 黄銅
比加工量	100	93	87	71	68	109	100	93	93	93	93
比消耗量	100	82	75	68	65	96	105	103	96	96	96

(b) その他の合金

材 料	鋳鉄	洋白	磷青銅	クロム銅	銀銅	カドミウム銅	シルジウム銅	砲金	ベリリウム銅	Zn 合金 (ZAC)	Zn 合金 (ZAM)
比加工量	80	102	88	80	86	102	77	71	70	59	49
比消耗量	55	39	78	54	47	37	68	111	114	157	157

(c) 粉末製品

材 料	Ag-W 30 70	Ag-W 35 65	Ag-W 50 50	Ag-W 70 30	Ag-W* 35 65	Cu-W 25 75	Cu-W 30 70	Ag-Ni 86 14
比加工量	123	123	122	107	128	107	110	85
比消耗量	9	9	10	23	9	15	15	74

ただし Ag-W : * 印は混合法, その他は置換法によって作られたものである

Ag-Ni 71 29	Ag-Ni 60 40	Ag-CdO 94 6	Ag-CdO 90 10	Ag-CdO 86 14	Ag-Gr 95 5	Ag-Gr 91 9	Ag-Gr 85 15	Ag-WC 61 39
97	107	104	101	106	93	84	70	110
68	60	52	46	42	97	114	161	17

Ag-WC 52 48	Ag-WC 39 61	Ag-WC 35 65	Ag-Cu-Gr 90 7 3	Cu-Fe-Gr 81 5 4	Fe-Cu-Gr 83 15 2	超 硬 G ₁	超 硬 G ₂	銅-黒鉛 子
113	125	124	99	68	79	99	100	91
13	12	13	91	90	96	23	24	124

けるギャップ・エネルギー W が一定であつても放電時間が変わると消耗量 E も変化するから⁷⁾⁸⁾, 結局エネルギーを一定にすると消耗量 E は材料の熱的性質と放電時間とによつて定まると考えるのが妥当である。

表 1 も同様な比消耗量(体積)と比加工量(体積)とを示すものである。加工条件は図 1 と同じ。四六黄銅対超硬合金の場合の消耗量 E ($1.74 \times 10^{-7} \text{ cm}^3$) および加工量 M ($0.73 \times 10^{-7} \text{ cm}^3$) をそれぞれ 100 としてある。表より明かなように比加工量は加工電極の材質により 50~128 の範囲内で変化するのに対し, 比消耗量は 3~469 の範囲で大きく変動する。

これについてはつぎのように考えられる。すなわち, 加工条件を一定にすると (1) 式のギャップ・エネルギー W および損失エネルギー W_L がほぼ一定となり, したがつて

$$W_g + W_L \approx \text{一定} \quad (8)$$

となる。(8)式において加工電極の材質を変えても加工エネルギー W_g はあまり変わらないから加工量の変化は比較的小さく, 消耗エネルギー W_L の方は変化が小さくてもそのエネルギーによつて決まる加工電極の消耗量は材料の熱的性質によつて大きく変化するから以上のごとき結果になる。

よつて加工電極材料の研究は加工速度を格段に向上する材料を求めるとよりも, 速度を低下することなく, 消耗の少ない耐消耗性材料を探すことが自ら明らかである。また加工電極の成形しやすさを考慮に入れると, 融点の低い鑄造容易な金属は放電消耗は激しいけれども電極材料の一方面を与えるものである。

4. 極性消耗

コンデンサ C の放電回路は通常振動条件を満足するので放電開始電圧が比較的高いと, 図 3 にその 1 例を示すように放電電流は振動性になる。図では第 2 半波までで

$C: 30 \mu\text{F}$, 放電開始電圧: 110~120V,
加工液: 灯油, 電極: 黄銅対超硬合金

図 3 放電電流波形

図 4 正極性放電回路

あるがさらに電圧を高くすると第 3 半波, 第 4 半波とアーク放電は続く。ゆゑに加工電極を負, 被加工材料を正の極性に結線しても第 2 半波では極性が反転する。

従来放電加工に関し

ては放電電流波形の負の半波のために加工電極が著しく消耗すると言われていた。

極性効果による電極消耗量を検討するために、電力用シリコン整流体(三菱電機 SR-200型)を図4のごとく放電回路に接続し、負の半波(第2半波)を抑制して消耗量 E と加工量 M を整流体のない振動性電流の場合と比較した。

図5 超硬合金の加工量

図6 黄銅の消耗量

図5および図6は四六黄銅対超硬合金の場合で、図の直線(1)は振動性電流(第2半波まで)、(2)は整流体で非振動にした時のデータである。ただし放電開始電圧は150volt、加工液は灯油である。シリコン整流体で整流すると負の半波に相当するエネルギーが電極間に供給されないから、黄銅、超硬合金とも1回の放電による消耗は少なくなる。この時加工量 M がほとんど減少しないで消耗量 E のみが非常に小さくなると、電極消耗比 E/M は大幅に改善されたことになる。

図では加工量 M は89%に減少するに反し、消耗量 E は74%になるから消耗比は振動時の83%になり、ある程度消耗比改良の効果がある。しかし黄銅対軟鋼では、図7および図8に示すように、被加工材料の軟鋼が負の半波の影響を著しく受け加工量 M は整流前の約半分すなわち53%になるに反し、消耗量 E は74%にしかないから、消耗比はかえって前より悪くなる。

図7 軟鋼の加工量

図8 黄銅の消耗量

表2はその他の電極材料の組み合わせで同様に実験した結果を示すものである。

以上の測定結果から、振動性アーク電流の負の半波を阻止してもかならずしも電極消耗比は改善されるとは限らないし、材料の組み合わせいかんでは前よりも悪くなる場合もあると結論できる。また消耗比が改良されてもある程度の効果があるのみで格段に良くなることはない。この点については日立造船の木本氏も同様な報告をしている⁹⁾。

表 2

	銅 E(μ g)	超 硬 M(μ g)	消耗比 (%) (重量比)	銅 E(μ g)	軟 鋼 M(μ g)	消耗比 (%) (重量比)
振 動	0.83	1.23	67	0.63	0.83	76
非 振 動	0.75	1.11	67	0.43	0.65	66

	Ag-W E(μ g)	超 硬 M(μ g)	消耗比 (%) (重量比)	Ag-W E(μ g)	軟 鋼 M(μ g)	消耗比 (%) (重量比)
振 動	0.35	1.85	19	0.22	1.15	19
非 振 動	0.31	1.68	18	0.20	0.72	23

	Cu-W E(μ g)	軟 鋼 M(μ g)	消耗比 (%) (重量比)	Zn合金(ZAC) E(μ g)	軟 鋼 M(μ g)	消耗比 (%) (重量比)
振 動	0.31	0.81	38	1.16	1.51	77
非 振 動	0.27	0.61	44	0.79	0.83	95

要するに通常の加工条件のもとでは陰極に対する消耗エネルギー W_c が比較的大なるために、単なる極性効果のみによつて加工電極の消耗を激減させることはできない。負の半波では被加工材料が陰極となり、この時の電子放出によつて効果の有無が決定される。

5. む す び

放電加工の電極消耗現象を加工電極の立場より考察した。本加工法は液中過渡アーク放電による電極消耗を応用した材料加工法であるから、一方の電極のみ極度に消耗し他方はほとんど消耗しないことを要求するのは非常に難しい問題である。加工電極の消耗防止には放電エネルギーを被加工材料に集中させるか、与えられた熱エネルギーに対して消耗の非常に少ない材料を見出すことが必要である。

陽極は電子、陰極は陽イオンが主としてエネルギーを与える。アーク放電における T-F 理論から陰極点の陽イオン電流密度を求め、ギャップ入力の配分を計算した。加工電極の消耗および加工速度に関しては陰極現象の究明がきわめて重要である。

電極材料の研究は加工速度より消耗量に重点を置くべきであり、加工条件を一定にすると加工電極の材質を変えても陽極と陰極に対するエネルギー配分を著しく変化さ

せることは困難である。

振動性アーク電流の負の半波を阻止しても、電極消耗比改良の効果はあまりない。材料の組み合わせによつては逆効果にもなる。被加工材料が陰極になった時(第2半波)の電子放出によつて左右される。

本研究には東京大学工学部鳳誠三郎先生、倉藤尚雄先生および三菱電機研究所斎藤長男氏より貴重な御意見をいただいた。付記して謝意を表す。(1960, 12月22日 受付)

文 献

- 1) 鳳, 倉藤: 放電加工, コロナ社(昭29), 元木: 電気学会雑誌, **80** (昭35) 639.
- 2) A. S. Zingerman, D. A. Kaplan: Soviet Physics-Technical Physics, **3** (1958) 361.
- 3) S. S. Mckeown: Phys. Rev., **34** (1929) 611.
- 4) W. W. Dolan, W. P. Dyke: Phys. Rev., **95** (1954) 327, E. L. Murphy, R. H. Good: Phys. Rev., **102** (1956) 1464.
- 5) T. H. Lee: J. Appl. Phys., **30** (1959) 166.
- 6) R. E. Burgess, H. Kromer, J. M. Houston: Phys. Rev., **90** (1953) 515.
- 7) ЗАЕКТРОИСКРОВАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ, **1** (1957) 65.
- 8) 木本, 田宮: 機械と工具, **4**, No. 8 (昭35) 61, 木本: 日立造船技報, **21**, No. 2 (昭35) 23
- 9) 木本: 精密機械, **26** (昭35) 601.