高速放電加工の研究*

— 単一放電の実験 —

倉 藤 尚 雄** 向 山 芳 世***

Study on the High Speed Electrical-discharge Machining

—Experimental Study on the Single Discharge—

Hisao KURAFUJI, Yoshitsugu MUKOYAMA

We studied the influence of discharge current-shape in condenser discharge machining. In order to change the height and width of discharge pulse, resistance and inductance were inserted in the discharge circuit. Then the erosion efficiency increased and electrode wear decreased considerably. It was also found that from the result of single discharge or slow repetition discharge we can assume the high repetition phenomena.

1. 緒 言

放電加工は従来の切削、研削等の機械力による加工法に比較して、多くの利点があり、そのためにこれらの加工法の分野を侵蝕している。また近時新しく発展した他の加工法、たとえば電解加工法と組合わせて使用する方法も好結果を得ており、ますます用途が増している。しかし加工速度が小さい、加工電極の消耗が大きい、加工面の疲労限が低下する等の欠点がある。

現在広く使用しているコンデンサ放電方式の加工速度を増すには、電源電圧を高くする、コンデンサ容量を大きくする、放電繰返し数を増す等が考えられるが、加工面のあらさ、電極消耗を考慮すると、必ずしも最善の方法ではない。そこで放電パルスの形を変え、加工能率を向上させ、同時に電極消耗を減少させようと考え、放電回路に抵抗とインダクタンスを挿入し、放電パルスの高さおよび幅を変えた。この方法は放電ひん度が数回ないし 10 数回/秒の範囲で実験されているが²⁾、本稿ではこの方法をまず単一放電に近い、ごくゆっくりした放電繰返しのとき行なって、加工量をあげ、電極消耗を減少できることを確かめ、この結果を比較的早い放電繰返しの加工に応用して、単一放電の際の加工現象から、放電ひん度の大きいときの加工現象が予測できることを明らかにした結果を報告する。

2. 実験第 1 (ゆっくりした放電繰返しの実験)

2.1 実験装置および方法

図 1 に実験装置を示す。これは立て形フライス盤を改造した放電加工機である。 R_0 は電源保護のためのしゅう動抵抗 (15Ω , $500\mu\text{H}$) で、コンデンサ C は $10\mu\text{F}$ の MP コンデンサ 10 個を並列に接続して使用した。 R_1 は付加抵抗で、インダクタンスを少なくするためにカーボンバイル ($100\times 100\times 13\text{mm}\times 26\text{枚}\times 4\text{列}$) を用い、付加インダクタンス L_1 は抵抗を少なくするために、 100mm^2 の銅線を $220\text{mm}\phi$ のファイバーに巻いたもので、 $87\mu\text{H}$ のときの抵抗は $3.52\text{m}\Omega$ である。放電回路も 100mm^2 の銅線で、全長 2.32m 、抵抗は $0.555\text{m}\Omega$ 、直列インダクタンスは $2.0\mu\text{H}$ である。導線の接続は 0.5mm の銅板を使用して、接触抵抗を少なくするようにした。加工電極は $9\text{mm}\phi$ の中実四六黄銅棒の端面を、No. 400~800 の紙やすりで磨き、放電が加工電極の全面に分散して行なわれるように、半径約 200mm の丸味をつけた。被加

図 1 実験装置 (実験第 1)

* 昭和37年10月精機学会秋季大会学術講演会および昭和37年11月日本機械学会、精機学会連合山梨地方講演会において発表。

** 正会員 東京大学工学部

*** 正会員 山梨大学工学部

図 2 放電回路のインダクタンスと加工量

図 4 放電回路の抵抗と加工量

図 3 放電回路のインダクタンスと電極消耗率

図 5 放電回路の抵抗と電極消耗率

工物は 5 mm の軟鋼板を平面研削 (面のあらさ $H_{\text{max}}=3\mu$) したものである。加工液は白灯油で、大きさ $90\times 300\times 80\text{mm}$ の加工槽に約 2 l 入れて用いた。放電電流測定用の分流器 R_2 は、放射状で、 $1.2\text{mm}\phi$ の Fe-Cr 線 40 本を用い、抵抗は $1.85\text{m}\Omega$ 、時定数 $7.3\times 10^{-7}\text{sec}$ である。電圧、電流波形の測定は岩崎 シンクロスコープ SS5051 で行なった。

実験は充電回路のスイッチ S を入れ、コンデンサ C を充電して、S を切り、加工電極を被加工物に近づけて放電させる。放電が終わったら加工電極を離し、再び S を入れる。この操作を手動で 200 回繰り返す、化学天秤で

秤量した。同一条件で 3 回実験を行なったが、その差はあまり多くなかったため、その算術平均値を実験結果とした。加工量、電極消耗量共に放電 1 発当りの重量で、電極消耗率は電極消耗量/加工量である。加工電極、被加工物および加工液は 200 回の放電ごとに新しいものに取換えた。充電後放電させるまでの時間は 3sec 程度で、コンデンサの電圧降下は $3\text{V}/5\text{min}$ であるから問題にならない。

2.2 実験結果

R_1 を一定にして、 L_1 を変化させた場合、放電 1 発当りの加工量は図 2 のごとく、 L_1 の増すにつれて増加し、 $26\mu\text{H}$ 付近で max になり、以後減少している。 $R_1=0\sim$

図 6 実験装置 (実験第 2)

90mΩ の範囲では R_1 に関係なく同じ傾向を示している。電極消耗量は L_1 の増すにつれて減少するが、減少の度合は R_1 が大きいほどゆるやかである。その結果電極消耗率は図 3 のごとく、 L_1 の小さいときは急激に減少しているが、41μH 付近からあまり変化がない。 L_1 を一定にして、 R_1 を変えた場合の加工量は図 4 のように、 R_1 が 20~50mΩ の範囲に最大値が存在するようにもみられるが、 L_1 の場合のように明確ではない。電極消耗量は R_1 の増加につれて減少しており、電極消耗率は電極消耗量に似た傾向を示す。放電面のあらさは L_1 の増加につれて増加し、 R_1 の場合は加工量に似た傾向を示すが、明確ではなく、 $H_{\max}$ 40μ 前後の値である。

3. 実験第 2 (やや早い放電繰返しの実験)

実験第 1 は放電繰返しが、10sec に 1 程度のごくゆっくりしたものであった。この結果を毎秒 100 回の放電で確かめた。このため交流 50 サイクルで作動する磁石と板ばねを用いて、加工電極を振動させ、加工電極が上昇すると、コンデンサが電源に接続して充電し、下降するときに放電する装置を作った。そこで規則的な放電を毎秒 100 回繰返すようになっている。加工電極の送りは放電電圧波形をシンクロスコープで観察しながら、所定の放電繰返し数で

放電が行なわれ、かつ放電後加工電極が被加工物に接触しないように注意し、手で行なった。実験の諸元は実験第 1 と同一である。実験は同一加工電極で、新しい被加工物に 30sec ずつ 3 個所に放電を行ない、その算術平均値を求めた。加工液は約 2 l で、1 回の実験ごとに、一昼夜放置して、加工くずなどが沈澱した上澄液を使用した。

3.2 実験結果

実験結果は、実験第 1 とほぼ同様に R_1 が一定の場合

表 1 実験結果 (実験第 2)

$R_1=0$				$L_1=0$			
$L_1(\mu\text{H})$	$W(\mu\text{g})$	$E(\mu\text{g})$	$E/W(\%)$	$R_1(\text{m}\Omega)$	$W(\mu\text{g})$	$E(\mu\text{g})$	$E/W(\%)$
0	14.0	14.7	105	0	14.0	14.7	105
6	14.5	13.4	92	10	15.5	15.3	99
13	15.7	12.1	77	20	14.0	13.1	94
26	16.3	12.2	75	30	13.5	10.9	81
41	14.7	11.0	75	40	11.9	10.1	85
87	12.3	7.7	60	90	10.0	7.3	66

$R_1=20\text{m}\Omega$				$L_1=13\mu\text{H}$			
$L_1(\mu\text{H})$	$W(\mu\text{g})$	$E(\mu\text{g})$	$E/W(\%)$	$R_1(\text{m}\Omega)$	$W(\mu\text{g})$	$E(\mu\text{g})$	$E/W(\%)$
0	14.0	13.1	94	0	15.7	12.1	77
6	14.8	13.3	90	10	16.3	12.4	76
13	16.0	11.7	73	20	16.0	11.7	73
26	16.5	11.2	68	30	15.5	10.3	66
41	16.2	9.7	58	40	15.3	9.2	60
87	13.7	7.1	52	90	13.8	6.4	46

$R_1=40\text{m}\Omega$				$L_1=26\mu\text{H}$			
$L_1(\mu\text{H})$	$W(\mu\text{g})$	$E(\mu\text{g})$	$E/W(\%)$	$R_1(\text{m}\Omega)$	$W(\mu\text{g})$	$E(\mu\text{g})$	$E/W(\%)$
0	11.9	10.1	85	0	16.3	12.2	75
6	13.9	9.7	70	10	16.9	11.7	69
13	15.3	9.2	60	20	16.5	11.2	68
26	16.7	9.2	55	30	16.8	10.3	61
41	15.8	9.0	57	40	16.7	9.2	55
87	14.7	6.6	45	90	15.4	5.9	38

$R_1=90\text{m}\Omega$				$L_1=87\mu\text{H}$			
$L_1(\mu\text{H})$	$W(\mu\text{g})$	$E(\mu\text{g})$	$E/W(\%)$	$R_1(\text{m}\Omega)$	$W(\mu\text{g})$	$E(\mu\text{g})$	$E/W(\%)$
0	11.0	7.4	67	0	12.3	7.7	60
6	11.5	5.2	45	10	14.0	7.2	52
13	13.8	6.4	46	20	13.7	7.1	52
26	15.4	5.9	38	30	14.0	6.8	49
41	15.0	5.6	37	40	14.7	6.6	45
87	13.8	4.8	35	90	13.8	4.8	35

$V=105\text{V}$, $C=100\mu\text{F}$

被加工物：軟鋼，加工電極：四六黄銅，加工液：灯油

は、 L_1 の増加につれて加工量は増し、 L_1 が $26\mu\text{H}$ 付近にその max があり、以後減少しているが、電極消耗量が実験第 1 の場合に比較して少なく、この結果電極消耗率はやや減少している。 L_1 が一定の場合も、電極消耗量が少なく、したがって電極消耗率が小さい。これらの結果を表 1 に示す。

4. 実験第 3 (比較的早い放電繰返しの実験)

4.1 実験装置および方法

実験第 1 の回路を実用機 (Sparkle PD-302) に取りつけ、その電極自動制御機構を利用して、毎秒 300 回程度の放電繰返しひん度の実験を行ない、実験第 1 の結果を確かめた。このときはサーボ送りに、短絡時電極をジャンプさせる装置を併用し、放電電圧波形を観測しながら、放電が一番安定するように、加工機の送りを調整した。充電抵抗 (R_0) は予備実験を行ない、放電が比較的安定で、加工量が max になる抵抗値を実験に使用する諸元のもとで求め ($R_0=6\Omega$)、これを使用した。このときの R_0 のインダクタンスは 250mH である。

実験は同一加工電極で、新しい被加工物に 3 分間の加工を 3 個所に行ない、その算術平均値を結果とした。加工液は加工槽に 30l くらい入れ、加工時間 100 分ごとに濾過装置を通して使用した。放電繰返し数の測定は、デカトン計数装置で行なった。

表 2 実験結果 (実験第 3)

$R_1=0\text{m}\Omega$				$R_1=30\text{m}\Omega$			
$L_1(\mu\text{H})$	$W(\mu\text{g})$	$E(\mu\text{g})$	$E/W(\%)$	$L_1(\mu\text{H})$	$W(\mu\text{g})$	$E(\mu\text{g})$	$E/W(\%)$
0	9.5	10.4	107	0	9.2	7.4	80
6	12.6	11.0	87	6	13.8	7.3	53
13	14.5	7.3	50	13	15.3	6.9	45
$R_1=10\text{m}\Omega$				$R_1=40\text{m}\Omega$			
$L_1(\mu\text{H})$	$W(\mu\text{g})$	$E(\mu\text{g})$	$E/W(\%)$	$L_1(\mu\text{H})$	$W(\mu\text{g})$	$E(\mu\text{g})$	$E/W(\%)$
0	9.5	8.8	90	0	10.0	8.3	83
6	13.5	8.8	65	6	13.5	7.4	55
13	15.3	7.7	50	13	15.0	6.9	46
$R_1=20\text{m}\Omega$				$R_1=90\text{m}\Omega$			
$L_1(\mu\text{H})$	$W(\mu\text{g})$	$E(\mu\text{g})$	$E/W(\%)$	$L_1(\mu\text{H})$	$W(\mu\text{g})$	$E(\mu\text{g})$	$E/W(\%)$
0	9.8	8.3	85	0	8.0	5.0	63
6	14.4	7.8	54	6	12.1	5.9	49
13	15.6	7.5	48	13	13.3	5.7	43

$V=105\text{volt}$, $C=100\mu\text{F}$

被加工物：軟鋼，加工電極：四六黄銅，加工液：灯油

4.2 実験結果

実験結果を表 2 に示す。 $L_1=13\mu\text{H}$ 以上では放電が不安定となり加工が困難になるので、 $13\mu\text{H}$ で止めた。放電が安定している範囲では、加工量、電極消耗量とも実験第 1，第 2 の場合とほぼ同じ傾向を示すが、電極消耗量が実験第 2 よりさらに減少しており、その結果電極消耗率は小さい。加工面あらさは、実験第 2，第 3 の場合共実験第 1 と同じ傾向を示すが、 $H_{\text{max}} 50\mu$ 前後で少しあらかくなる。

5. 考察

放電加工の消耗機構は、放電の発生に伴って陰極に陽イオン、陽極に電子が衝突して、電極面にエネルギーが伝達され、放電点付近が加熱溶融蒸発する。この溶融部分が加工時に発生する衝撃力の作用で、電極間に飛散して消耗が起きるものと考えられている³⁾⁴⁾。この場合放電点の温度は 7000°K 以上の高温になり⁵⁾、熱の拡がる速度は有限量で、放電持続時間に無関係とすると、放電点の軸方向および半径方向の熱の伝達は次の式で与えられる。

$$x = \alpha \sqrt{k t}$$

$$k = \frac{\lambda}{c \gamma}$$

x = 熱源が与えられた点からの距離 (cm)

k = 温度伝導率 (cm^2/s)

α = 電極の熱物理的性質による定数

λ = 熱伝導率 ($\text{cal}/\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$)

c = 比熱 ($\text{cal}/\text{g} \cdot ^\circ\text{C}$)

γ = 比重 (g/cm^3)

したがって、電極の材質およびギャップは供給されるエネルギーが一定の場合には、放電点の溶融体積が放電持続時間の関数となる。溶融可能なエネルギーを供給しつづけられる限り、溶融体積は大きくなる。

放電回路に挿入した付加抵抗 R_1 と、付加インダクタンス L_1 による、放電電流波形の高さと幅を計算し、実測値と共に図 7，8 に示す。放電が始まる直前のコンデンサ電圧を V_{c0} ，放電回路電流を i ，放電回路のインダクタンスを L ，放電回路の抵抗を R とすると、

図 7 放電回路のインダクタンスと放電パルスの関係

図 8 放電回路の抵抗と放電パルスの関係

$R^2 < \frac{4L}{c}$ の振動電流の場合,

$$i = \frac{2V_{c0}}{\sqrt{\frac{4L}{c} - R^2}} e^{-\alpha t} \sin \beta t$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{Lc} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$$

となる。

電流が最大値に達するまでの時間を t_m 、電流の最大値を i_m とすると

$$t_m = -\frac{\varphi}{\beta} + \frac{n\pi}{\beta}$$

$$i_m = \frac{V_{c0}}{\sqrt{\frac{L}{c}}} e^{-\frac{\alpha}{\beta} \varphi}$$

図 9 実験第 1, 2, 3 の加工量の比較

図 10 実験第 1, 2, 3 の電極消耗率の比較

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\beta}{\alpha}$$

となる⁶⁾。

この場合放電回路の定数は,

$$R = r_l + r_c + r_s + r_t + r_e + r_d + r_a + r_i \quad (\text{m}\Omega)$$

r_l : 導線の抵抗, r_c : コンデンサ内部抵抗, r_s : 分流器の抵抗, r_t : 接続部の接触抵抗, r_e : 加工電極および被加工物の抵抗, r_d : 放電柱の抵抗, r_a : 付加抵抗, r_i : 付加インダクタンスの抵抗,

$$L = l_l + l_c + l_s + l_e + l_r + l_a \quad (\mu\text{H})$$

l_l : 導線のインダクタンス, l_c : コンデンサ内部インダクタンス, l_s : 分流器のインダクタンス, l_e : 加工電極および被加工物のインダクタンス, l_r : 付加抵抗のイン

図 11 実験第 1, 2, 3 の加工量の比較

図 12 実験第 1, 2, 3 の電極消耗率の比較

ダクタンス, l_a : 付加インダクタンス

であり, R の中 r_a , r_t を除く合計を $\leq 50 \text{ m}\Omega$, L の中 l_a を除く合計を $2.5 \mu\text{H}$ として計算した。計算値, 実測値共に大体同じ傾向で, L_1 の増加につれて, 放電パルスの高さは急激に減少し, $L_1=26 \mu\text{H}$ 付近からゆるやかになる。幅は逆に L_1 の増加につれて増加する。 R_1 の増加によって高さは減少するが, 非常にゆるやかで, 幅はほとんど変化がない。これらの結果 L_1 の小さいとき,

すなわちパルスが短く高いとき, 単位時間に流入するエネルギーが大きいため, 大部分は蒸発に使用され, 溶融が少ない。逆にパルス幅が非常に長く, 高さが低いときは, 小さいエネルギーで長時間加熱するので, 熱の伝導が良く, 大きい体積の金属が溶融する。しかし蒸発が少ないので, 衝撃力が小さく, せっかく溶融した部分を, 飛散させられないので, 加工量が少ない。このことは L_1 の大きいときの方が, 加工面のあらさが大きい結果からも証明できる。すなわち十分飛散されない溶融部分が放電痕の周囲にもりあがって, 残留凝固し面をあらくする。その中間のパルス幅のとき, すなわち発生した衝撃力によって溶融部分が完全に除去されるようなときに, 最大加工量が得られる。

黄銅電極で, 軟鋼加工の場合, 早い放電繰返しときは, 電極消耗が少ないのは, 主として加工電極側に黒いものが付着し, その表面状態が変わることと, 熱変質層が異なるために電子放出が変化する。このために両極へのエネルギー配分が変わり, 電極消耗が減少すると考えられる⁷⁾。放電面のあらさの差異は放電痕の重なりが原因で, 単一放電では重なりが少ないため放電痕の深さに近い値が, 多数回繰返した放電では重なりが多いから, あらさは大きくなる。

6. 結 言

以上によりコンデンサ放電方式において, 放電回路の抵抗およびインダクタンスを適値に選ぶと, 加工能率をあげ, 電極消耗を減少できることがわかった。

この結果を実験が比較的簡単な単一放電で行ない, 単一放電の加工現象を知ることにより, 放電繰返しひん度の大きい加工現象の類推が可能である。

(1964, 7月15日受付)

文 献

- 1) 倉藤尚雄: 精密機械, 29巻10号別冊 (1963) 9.
- 2) 木本保夫: 電気学会誌, 80巻858号 (1960) 90.
- 3) 元木幹雄他: 電気学会誌, 82巻881号 (1962) 167.
- 4) 木本保夫: 電気学会誌, 81巻878号 (1961) 1877.
- 5) L. S. Palatnik & A. N. Liulichv: Soviet Physic-Technical Physics 1, (1958) 818.
- 6) 鳳, 倉藤: 改訂放電加工, コロナ社 (1961) 40.
- 7) 元木幹雄他: 溶接界, 13巻8号 (1961) 471.