依つてこの鋼板の差動曲線の異常部は焼入不完全なる部分であることが分つた。なお完全に焼入焼戻された均一状態にある他の鋼板ではかかる差動曲線の異常変化は認められなかつた。18枚の供試鋼板の中、上述のものとはほぼ同一の異常を呈したのは3枚でそのほか極く小範囲に異常範囲の存在したもの2枚あつて他は概ね均一性を有した。この焼入不完全の原因としては1800×800 mm 鋼板を加熱するに際しこれらの異常鋼板は何れも炉の入口に位置していたため焼入温度が低かつたか或は焼入に際し炉を開口したとき温度が降下して焼入が不完全になつたものと思われる。

このようにして鋼板上に測定用電磁石を移動せしめてブラウン管上で差動曲線を観測することにより簡単に鋼板に於ける熱処理不均一部を検出することが出来る。かかる不均一部が存在するときは鋼板の内部歪も大きく従つて時期割れを起す可能性が大である。よつてこの方法により鋼板を検査するときは簡単に現場的に割れ発生の可能性を有する鋼板を鑑別することが出来る。

5. 総 括

以上の実験結果を総括すると次の如くである。

1. 鋼板に於ける熱処理状況の検査を現場にて簡単に行うため鋼板上に測定用電磁石を移動せしめて標準鋼板と試験鋼板との磁気履歴曲線の差を陰極線オシログラフ装置のブラウン管上に明視せしめる方法を考案完成した。
2. この方法により不完全焼入鋼板を簡単に検出し得られ、時期割れ可能性を有する熱処理鋼板を摘出することが出来た。

註：一 (1953, 1月12日受付)

- 1) この鋼板は今次大戦中、航空機搭乗員の防弾鋼板として用いられたものである。
- 2) 鈴木益広, 金属材料の電磁気探傷法。
- 3) T. Spooner, Proc. Amer. Soc. Test. Materials. 27 (1927) 241.
- 4) H. Lange, K. W. I. Eisenforschung. 21 (1939) 105
- 5) F. Förster, Z. Metallk. 32 (1940) 134, 33 (1941) 97
- 6) 石原, 日本金属学会誌, 8 (1940) 243

直進型放電加工に關して 621.9:537.52

正 会 員 前 田 禎 三

Researches on the electric-spark-machining with non-vibrating electrode

Teizo Maeda

When electric-spark-machining is carried out with the circuit of Lazarenko (fig. I), assuming that the chipped mass of work piece machined by a single spark-discharge is proportional to the discharge energy of capacitor $C(V_s^2 - V_c^2)/2$, the machining speed u and the mean working current I_{mean} are given by next formulae;

$$u = (k' V_o^2 / R) \nu^2 / \ln \{1 / (1 - \nu)\}$$

$$I_{\text{mean}} = (V_o / R) \nu / \ln \{1 / (1 - \nu)\},$$

here V_s is the voltage, at which the spark discharge is initiated; V_c is the voltage that the discharge ceases, and $V_c \ll V_s$; $\nu = V_s / V_o$; k' is the function of C . From these formulae, the higher the source voltage V_o is, and the smaller the resistance R is (unless the arc-discharge takes place,), the greater the machining speed becomes. And when $\nu = 0.715$, i. e. when $I_{\text{mean}} = 0.57 I_o$ (I_o is the short current), u gets the maximum value. With above formulae, by using ν as a parameter, the relation of u - I_{mean} is obtained, and when V_o , C and ν are kept respectively to the same value, it is known

that $u \propto I/R$. In fig. 4 and 5 that show the relation of $u-I_{\text{mean}}$, the above theory coincides with the experimental results. Fig. 6 shows the relation of $u-1/R$, which gives the good coincidence of the theory and the experiments, too. Fig. 7 shows that the smaller the sectional area of electrode is, the greater the machining speed becomes, but the electrode consumption grows. So it is judged that the electrode with wall-thickness of 1.5 mm is suitable. In fig. 8 it is understood that the greater the capacity C is, the greater the machining speed becomes. Table 1 shows that for the electrode material, brass is the best and cast iron follows, when the work material is steel.

I 緒 言

Lazarenko の回路 (図 1) により放電加工をする場合、電極と加工物の間に火花放電を行わ

Fig. 1 Schematic diagram of Circuit of Spark Cutting Machine.

R: resistor. C: Capacity
E: electrode W: work piece
F: dielectric fluid bath
L, r: inductance and resistance of discharge circuit.

せるのに、電極を振動して接触開離をさせることが必ずしも必要ではない。すなわち電極・加工物間の電圧に対し、両者の間隔が充分小さくなると誘電液の絶縁は破壊し、コンデンサ C に蓄えられた電荷は火花放電により消費され、その際加工物は微少量加工される。この瞬間から電源によりコンデンサは再び充電され、その間に電極を進めて電極加工物間の間隔が放電前の値に戻るならば、第 2 回目の放電が起り加工物はまた微少量削られる。この操作を繰返してゆくと引続いて加工が行える訳である。ここで述べる (無振動) 直進型放電加工では、電極を振動させないから、電極の振動のために余分の動力も要らず、振動部分に起り勝ちな故障や磨耗がない外、加工精度も振動型に比べ高くできる等の長所をもつが、電極の送りを自動化するためには、電極・加工物間の距離の関係を精密に一定に保つべく複雑な電極送り自動装置が必要とされるので装置全体が高価なものとなる嫌はあ

る。筆者は直流電動機と電子管リレーを用いて比較的簡単な自動送り装置を考案し、試作し、割合好結果を収めた。この試作装置を用いて厚さ 3 mm のばね鋼に放電孔明け加工実験を行い、併せて直進型放電加工現象を解析し、比較検討を行つた。

II 目 的

放電孔明け加工速度を早くするための条件と加工精度を良くするための条件を理論的に実験的に決定することである。今回は加工速度を早くすることにのみ目標をおいた。

III 加工現象の解析

図 1 に示す Lazarenko の回路は直流電源、 R 及び C からなる充電回路と C , E , W からなる放電回路とから成立している。(放電回路における L は導線が形成するインダクタンスで、殊更に加えたものでない)

1) 充電回路特性

C の電圧 0 の状態で電源 V_0 のスイッチを入れ R を通して充電し、時間 t における C の電圧を V , そのときの充電電流を I とすると

$$V = \{1 - \exp(-t/CR)\} V_0 \dots \dots \dots (1)$$

$$I = V_0 \{ \exp(-t/CR) \} / R = I_0 \exp(-t/CR) \quad (2)$$

ここに I_0 は短絡電流である。次に放電開始電圧を V_s , 放電閉鎖電圧を V_c とすると、放電間隔すなわち放電周期 τ は

$$\tau = CR \ln \{ (V_0 - V_c) / (V_0 - V_s) \} \dots \dots \dots (3)$$

2) 放電過程

放電回路において L , C , r , の大きさの関係で放電型式は振動型となつたり、非振動型となつたりする。しかし放電加工においては導線の太さを太くし、長さも出来るだけ短くして抵抗 r

を極力小さくして行うので、振動型放電が行われていると考えられる¹⁾。今単一放電により破壊される加工物の量を G とすると、これは a. V_s ; b. C ; c. r ; d. L ; e. 誘電液 (加工液); f. 電極及び加工物の材質; g. 電極形状; 等により定まるが、c 項以下の因子を同一に保つものとする

$$G = G(V_s, C) \dots\dots\dots (4)$$

東大・鳳博士が報告されている如く²⁾、また筆者の研究室における研究結果³⁾より G はコンデンサの放電エネルギー $E = C(V_s^2 - V_c^2)/2$ に比例するものと考えたと

$$G = kC(V_s^2 - V_c^2) \dots\dots\dots (5)$$

ただし k は C と共に単純に増加するかん数と考える。すなわち

$$k = k(C) \dots\dots\dots (6)$$

次に放電開始電圧 V_s は誘電液、電極・加工物の材質、形状等が同じ場合には放電間隙 x のかん数となる。すなわち

$$V_s = V_s(x) \dots\dots\dots (7)$$

3) 電極および加工物共にその断面積 a が充分小さくて単一放電毎に加工物が平行に深さ y だけ破壊し去られてゆくと考えうる場合(図2a)

Fig. 2

最初に簡単のため電極は侵されないものと仮定する。加工物の密度を ρ とすると

$$y = G/\rho a = \left. \begin{aligned} & (k/\rho a) C(V_s^2 - V_c^2) = k'C \\ & (V_s^2 - V_c^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots (8)$$

電極の送り速度を u とし、定常状態の加工が進んでいるものとする。すなわち放電間隙 $\bar{x}$ において、その放電電圧 V_s に達して放電し、その瞬間に加工物は $\bar{y}$ だけ削られ、 τ 秒後に電極間

隙は $\bar{x}$ に電圧は V_s に回復しているような場合である。この場合には $\bar{x} = \bar{x} + \bar{y} - u\tau$ 、すなわち

$$\bar{y} = u\tau \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{また(7)より } V_s = V_s(\bar{x}) \dots\dots\dots (10)$$

$$\left. \begin{aligned} & (1) \text{より } [1 - \exp\{-(\tau + t_c)/CR\}]V_o = V_s \\ & t_c = CR \ln\{V_o/(V_o - V_s)\} \end{aligned} \right\} \dots\dots (11)$$

$$(8) \text{より } \bar{y} = k'C(V_s^2 - V_c^2) \dots\dots\dots (12)$$

したがって $V_s(x)$, $k'(C)$ のかん数形が分れば(9)~(12)なる関係式より、与えられた u に対し τ , $\bar{x}$, $\bar{y}$, V_s が求められる。正根ならばそのような状態の加工が行えることになる。

$$(11) \text{より } \tau = CR \ln\{V_o/(V_o - V_s)\} - t_c \dots\dots (13)$$

(9) (12) (13) より

$$\begin{aligned} u = & k'(V_s^2 - V_c^2)/R[\ln\{V_o/(V_o - V_s)\} \\ & - t_c/CR] \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

次に平均加工電流 I_{mean} すなわち充電電流の平均値を求めると (2)より

$$\begin{aligned} I_{mean} = & \int_{t_c}^{\tau+t_c} I dt / \tau = \int_{t_c}^{\tau+t_c} V_o \exp(-t/CR) \cdot \\ & dt / \tau = CV_o \cdot \exp(-t_c/CR) \cdot \{1 - \exp(-\tau/CR)\} / \tau \end{aligned}$$

$$(11) \text{から } V_s - V_c = \exp(-t_c/CR) \cdot$$

$$\{1 - \exp(-\tau/CR)\} V_o$$

$$\text{ゆえに } I_{mean} = (V_s - V_c)/R \cdot [\ln\{V_o/(V_o - V_s) - t_c/CR\}] \dots\dots\dots (15)$$

通常 t_c , V_c は τ , V_s に比べ小さいので、これらの項を無視し、 $V_s = \nu V_o$ とおくと (14) (15) は更に簡単となる。

$$u = (k' V_o^2 / R) \cdot \nu^2 / \ln\{1/(1 - \nu)\} \dots\dots\dots (14')$$

$$I_{mean} = (V_o / R) \cdot \nu / \ln\{1/(1 - \nu)\} \dots\dots\dots (15')$$

(14') より電源電圧 V_o を大きくすることは加工速度を大きくするのに非常に有効であり、またアーク放電にならない限り抵抗 R を小さくすることも効果のあることが分る。さらに(14)または(14')により u は V_s または ν のかん数となつていたので加工速度 u は V_s または ν によつても左右される。

そこで V_s または ν に対する u の極値を調べてみる。もし $du/dV_s = 0$ ($d\nu/d\nu = 0$) で $d^2u/dV_s^2 < 0$ ($d^2u/d\nu^2 < 0$) となるような $V_s, (\nu)$ の

値があれば、その様な条件で加工を行えば加工速度が最大になる。

$$(44') \text{ より } du/d\nu = (k'V_0^2/R) \cdot 2\nu/\ln\{1/(1-\nu)\} \cdot \\ \{1-\nu/2(1-\nu)\ln\{1/(1-\nu)\}\} = 0$$

これを解いて $\nu=0$ または $\nu=0.715$ を得る。このうち $\nu=0.715$ は $d^2u/d\nu^2 < 0$ となるので、この場合に極大値となる。このときの

$$u_{\max} = 0.408 k'V_0^2/R \dots\dots\dots (46)$$

$$I_{\text{mean}} = \mu(V_0/R) = \mu I_0 \quad \text{と} \quad \text{おいて}$$

$$\mu = \nu/\ln\{1/(1-\nu)\} = 0.57 \dots\dots\dots (47)$$

となる。すなわち可動線輪型直流電流計のよみが短絡電流 I_0 の約 60% を示すときに最大加工速度が得られることが分る。

なお V_0, C が同一の場合、 ν すなわち μ を同じにして加工を行うとき (44') より $u \propto \frac{1}{R}$ なる関係が求まる。すなわち加工速度が抵抗値 R に反比例する。

4) 電極および加工物の断面積が大きくて、単一放電により破壊される部分が加工物の表面の一局部 a に限られる場合 (図・2b)

この場合は加工物の断面積を A とすると、3) の場合の送り速度 u と加工深さ y をそれぞれ a/A 倍して考えれば (図・2c)、全く同様の議論が成立つ。

5) 加工開始時の過途現象

i) 時間 $t=0$ において、 C の電圧 $V=V_0$ で、これに相当する絶縁破壊間隙 $x=x_0$ まで電極が進んだときに放電し $y=y_0=G(V_0, C)/\rho x$ だけ削られる。したがって電極間隙 $x=x_0+y_0$ に大きくなる。そこで次の放電を起すため電極が進められ、

ii) $t=t_1$ において $V=V_1=[1-\exp\{-(t_1+t_c)/CR\}]V_0$ 、又電極間隙 $x_1=x_0+y_0-ut_1$ となり、 $V_1=V_s(x_1)$ ならば放電し $y=y_1=G(V_1, C)/\rho x$ だけ削られ、この瞬間に $x=x_1+y_1$ となる。そこで次の放電を起すために電極が更に進められ

iii) $t=t_1+t_2$ において、 $V=V_2=[1-\exp\{-(t_2+t_c)/CR\}]V_0$ 、 $x_2=x_1+y_1-ut_2$ となり、 $V_2=V_s(x_2)$ ならば放電し $y_2=G(V_2, C)/\rho a$ だけ削り取られ $x=x_2+y_2$ となる。この様な操作

を繰返して

iiii) $t=\Sigma t_n$ において、 $V=V_n=[1-\exp\{-(t_n+t_c)/CR\}]V_0$ 、 $x_n=x_{n-1}+y_{n-1}-ut_n$ となり、 $V_n=V_s(x_n)$ ならば放電し $y_n=G(V_n, C)/\rho a$ だけ削られ $x=x_n+y_n$ となる。

今もし $n \rightarrow \infty$ において $x_n \rightarrow \bar{x}$ なる有限確定値に収束するならば、すなわち $\lim_{n \rightarrow \infty} y_{n-1}/t_n = u$ ならば安定な加工を続けることができる。この収束のための条件は $V_s(x)$ と $y=G(V_s, C)/\rho x$ のかん数形に関係するが、電極の送り速度 u が (46) で与えられる $u_{\max}$ 以下ならば満足されるはずである。この収束の証明はできるが、紙面の都合で省略する。

以上の経過は図に表わすと事柄が非常に明瞭になる。図 3 はこれを示す。

Fig. 3

6) 以上の議論では電極は全然減らないものと仮定したが、単一火花放電が振動的なものであると C の両端の電圧の極性が逆になる期間もあり、この期間では逆に電極の方が削られる。また放電の瞬間に削られた加工物の微粒が電極に向つて突進し、そのため電極が侵されることも考えられるので、電極も減ることの影響を考慮に入れる必要がある。そこで今、電極の消耗速度を u_0 とし、送り速度を u_f で表わして、有効電極送り速度 $u=u_f-u_0$ で処理するならば今迄の理論がそのまま当てはまる。

7) 破壊深さ関係式として (8) 式が実験的にも或程度確められているが、更に一般性をもたせて $y=k'C^a(V_s-V_0)^b$ を採用した場合、微量の省略を行うと

$$\beta \ln\{1/(1-\nu)\} = \nu/(1-\nu) \dots\dots\dots (48)$$

を満足する ν で $u_{\max}$ を得る。たとえば $\beta=1.5$ の場合 $\nu=0.535$ のときに、また $\beta=2.5$ の場合には $\nu=0.800$ のときに加工速度が最大となる。それぞれの場合の μ の値は約 0.7 および 0.5 である。

IV 実験結果

直進型放電加工においても振動型のもと同様その加工性を左右する因子が幾つかあり、これらの諸因子の影響は上の理論的考察により明らかとなつた訳であるが、実験結果と比較して理論の裏附を行つた。

1) 平均加工電流 I_{mean} の大きさの影響

Fig. 4 Effect of Mean Working Current.

図4、図5 にその例を示す。何れも電極として外径 8 mm、肉厚 1.5 mm の黄銅の中空円筒の標準型電極を用いた場合で、その他の加工条件は図に記入した通りである。何れも実測値と比べ理論曲線が大体満足すべき結果を示している。なお図4では自動送りにした場合と手動で行つた場合と比較し、両者がよく一致して

Fig. 5 Effect of Mean Working Current

いるので、試作の自動送り装置も大体満足すべきものであることが分る。

2) 抵抗 R の大きさの影響

Fig. 6 Effect of Resistance R

図6に実験結果を示す。電極は標準型電極を用いた。図より V_0 , C , μ が同じ場合には所要加工時間が抵抗 R に比例することが分り加工速度が R に反比例すると云う理論的考察に一致する。なお図中の矢印は電源電圧に補正を加えたことを示す。

3) 電極の肉厚の影響

Fig. 7 Effect of Electrode-wall Thickness

電極の外径が 8 mm で肉厚を色々に変えた場合の所要加工時間と電極の消耗を調べた結果を図7に示す。これは前に報告した機械振動型の場合⁴⁾と全く同様で、電極の肉厚は 1.5 mm 位が適当であると判断できるので、肉厚 1.5 mm を以て標準型とした。

4) コンデンサの容量 C の影響

C の大きさのみを変えて所要加工時間と電極の

Fig. 8 Effect of Capacity C

消耗を実測した結果を図8に示す。電極は標準型である。結果は今迄発表されている結果と同様で C の大きい方が加工速度は早くなるが、電極の消耗には変りがない。

またこの図より k' のかん数形が定まる。

5) 電極の材質の影響

電極材質に黄銅、鑄鉄、銅、アルミニウム、

Table 1. Effect of the sorts of electrode-materials on necessary working time and electrode consumption.

work material : Steel (for spring) 3 mm thick; dielectric fluid : petrol; electrode size : $8 \phi \times 1.5$ mm thick; $R=18$ ohm; $C=152 \mu F$; a) when $V_0=108$ volt and mean working current I is 3 ampere,

electrode material	necessary working time	electrode consumption	
		length	weight
brass	9 min.	1.6 mm	0.45 gr.
cast iron	22.5 min.	7.2 mm	1.75 gr.
copper	67 min.	9.3 mm	2.70 gr.
drill-rod	Work piece could not be machined.		

b) when $V_0=115$ volt and $I=1$ ampere,

brass	15.8 min.	1.5 mm	0.40 gr.
cast iron	42 min.	7.8 mm	1.9 gr.
copper	130 min.	10.9 mm	3.1 gr.
aluminum	124 min.	167 mm	12 gr.
mild steel	Work piece could not be machined.		

鋼を用いて放電加工性の比較を行つた結果を表1に示す。結果は今迄に広く報告されているものと同様で、黄銅、鑄鉄が鋼製加工物に対し好結果を示した。これに反し鋼製の電極では全然加工が行えなかつた。電極材質の如何なる性質が放電加工性に影響を及ぼすのか、今の所全く不明で、これは将来の興味ある研究課題である。

V 総 括

以上理論的考察を実験結果と比較した結果大体満足すべきものであることが分り、放電加工速度を早めるためには

1. 平均加工電流を短絡電流の約 60% 位に保つて加工する。
2. アーク放電を起さない限り抵抗 R を小さくする。
3. コンデンサ容量 C を大きくする。
4. 電極に黄銅または鑄鉄を用いる（加工物が鋼の場合）。
5. 電源電圧 V_0 を大きくする。

等を実行すればよい。

最後にこの研究を行うに当り種々有益な御教示を賜つた東大の大越諄、福井伸二、倉藤尚雄の三博士及び表面工学研究会の諸学兄に対し心から謝意を表すると共に、終始熱心に実験とデータ整理に当つて頂いた中山日出雄君に対し厚く感謝する。
(1952, 12月12日受付)

参 考 文 献

- 1) E. M. Williams; Theory of Electric Spark Machining; Electrical Engineering; March, 1952
- 2) 鳳誠三郎; 放電加工法 (第1部・概論) マシナリー 1953, 6月号
- 3) 石原達也, 斎藤錦治; 放電加工法の研究 (東大卒論) 1953, 3月
- 4) 前田禎三; 機械振動型自動放電加工に関して, 精養学会誌, 19巻, 8号, 1953