低消耗放電加工における陽光柱の電界強度と電流密度

正員 元 木 幹 雄 (同志社大)

正員 上 出 諭 吉 (鉄鋼短期大)

1. ま え が き

本論文は液中の微小ギャップに過渡アークを反覆して金属を加工する、放電加工における陽光柱の電界強度と電流密度を求めた成果を報告するものである。

液中の過渡アーク放電については、放電加工に関連して、ある程度の研究がなされているが^{(1)~(7)}、現象が液体中の微小ギャップに発生し、しかも短時間の放電の反覆に伴う現象であるので種々の測定が困難であり、なお不明な点が多い。

放電加工は金属加工の工業分野で広範に応用されており、更に数値制御付ワイヤカット放電加工機の出現は放電加工の普及に拍車をかけ、応用分野は非常な勢いで拡大発展している現状である。しかし、本加工法の基盤となるべき液中微小ギャップの過渡アークや放電加工機構など基礎的現象の解明は不十分である。本研究は液中微小ギャップ過渡アークの特性を明らかにする点に役立ち、ひいては放電加工機構の究明にも貢献するであろう。

本研究における放電条件としては、白灯油中で銅を工具電極として逆極性接続のもとにアーク電流 4~13.7 A、アーク時間 100 μ s および 200 μ s の反覆放電で焼入鋼を低消耗放電加工する低消耗放電加工条件を採用した。その理由は、低消耗放電加工では反覆放電におけるアーク時間を比較的長く設定するので、過渡

アークは準定常状態にあると考えられるからである。なお、このような放電条件において陽光柱の電界強度、電流密度、導電率などの陽光柱のパラメータを求めた研究は見あたらない。

2. 測定方法

過渡アークを反覆する放電加工回路は、第1図に示すように高低二電源方式を採用した。スイッチ素子としてパワートランジスタ Tr_L および Tr_H を使い、両トランジスタのベースへ同時にパルス発振器 PG より方形波のパルス電流を流した。図の右の電源は補助高圧電源 V_H であって、この電圧を電極ギャップに印加して加工液の絶縁を破壊し、左側の低圧電源 V_L より主アーク電流をギャップに供給した。

両トランジスタのオン・オフによりアーク時間 200 μ s および 100 μ s、衝撃係数 50% の方形波の電流波形を持った過渡アークを放電ギャップに反覆した。補助高圧電源の電圧 V_H は 85~450 V であって、点弧後の電流は可変抵抗 R_H により常に 1.2 A になるようにした。低圧主電源 V_L は 85 V であって、抵抗 R_L

第1図 放電加工回路

Fig. 1. Schematic diagram of electrical discharge machining.

Field Strength and Current Density of Positive Column in Electrical Discharge Machining with the Low Electrode Wear. By Mikio Motoki, Member (Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Doshisha University) & Yukichi Kamide, Member (Department of Electrical Engineering, Iron and Steel Technical College).

元木幹雄：正員，同志社大学工学部教授

上出諭吉：正員，鉄鋼短期大学助教授

によってアーク電流が4~13.7 Aになるように制御した。陽極になる工具電極 E は、直径 30 mm, 中心に加工液を噴出させる直径 7 mm の穴をあけた銅を用い、陰極の被加工電極 W は SK 4 焼入鋼を使用し、極性はいわゆる逆極性である。また加工液は白灯油であり、工具電極の内孔より液を流出させた。

電極 E の自動送給は平均ギャップ電圧を入力とする油圧サーボ機構により、高圧側の電圧 V_H がギャップに確実に印加されるようにギャップの長さを自動制御した。すなわち、ギャップの長さが短過ぎると、 Tr_H がオン状態になってギャップの電圧が零から立上り、 V_H に達するまでに破壊が起こるので、このようなことのないように留意した。実際には、ギャップの電圧波形をオシロスコープで常に観測しながら油圧サーボの送給を設定した。第2図 (a) はギャップの電圧波形で V_H の存在は明らかである。(b) 図はこのときの電流波形で、抵抗 4.2 m Ω の円板形分流器⁽⁸⁾により測定したものである。

アーク電圧の測定はギャップの長さの変化に対するアーク電圧の変化が少ないため、コンパレータアンプを使用して変化分を拡大してオシロスコープによって測定し、アーク時間 200 μ s の放電に対してはその中央値になる時刻 100 μ s における値を求めた。

陽光柱の電界強度を求めるには、加工中のギャップの長さを測定する必要がある。そのため反覆放電を継続して電極表面全体が凹凸のある放電加工面になった後、油圧サーボの動作を放電加工の停止と同時に止め、しかるのち、そのままの状態ですばらく電極 E の内孔より加工液を噴出してギャップに存在する加工くずを除去してから、電極 E を徐々に送給して電極間が短絡するまでの距離を電極 E に取付けた 0.001 mm 目盛ダイヤルゲージにより読取った。本方法では、放電加工停止時の最短ギャップ長を測定していることになる。反覆放電の中での1回の放電によって形成される放電こん周辺の盛り上がり高さは、凹凸のある電極表面の最高の凸部より低いと考えられるので、ギャップ長測定に放電こん周辺の盛り上がり高さは影響しないと思われる。

電極 W の表面に形成される放電こん跡の測定には、放電こんがほとんど重なり合うことのないように、加工時間を非常に短くして放電回数を 20 回程度に制限した。この方法には第3図の回路を使用した。図において分流器 R_s の出力を整形して、雑音によるミスカウントを避けるために、放電時間と同じ時間に設定した単安定回路を通し、これを AND 回路の入力とし、他のもう一つの入力 PG の出力を加えた。

第2図 電圧波形(a), 電流波形(b)

Fig. 2. Voltage waveshape (a), current waveshape (b).

第3図 放電停止回路

Fig. 3. Schematic diagram of stop discharge.

AND 回路の出力をカウンタにより計数して、所定の数においてカウンタの出力によって PG の発振を停止した。

陽光柱の電流密度を求めるための放電こん半径の測定は、アーク電圧の測定時刻が 100 μ s であり、その時刻の電流密度が問題になるのでアーク時間 100 μ s の過渡アークを別に反覆して、鏡面にみがいた電極 W の表面に散在する放電こんの径を倍率 100 倍の読取顕微鏡で測定した。

3. 実験結果

〈3.1〉 陽光柱の電界強度 以上のような実験方法によって、電流 I が 4~13.7 A の過渡アークを V_H を変えてギャップに反覆した。放電加工では、放電により除去される金属微粒子と加工液の炭化微粒子とによって加工液が懸濁し、加工前の状態とかなり変わるので、一定の I と V_H のもとにしばらく放電加工を実施してから V_H とギャップの長さ l との関係を求めて第4図に示した。図から明かなように V_H - l 特性は直線状になり、 l の値は V_H が 85~450 V に対し 4.5~38 μ m で非常に小さい値である。 I によって l が変わるの、ギャップにおける加工くず濃度の変化に基づくものであると考えられる。

l が変わると I が同じでも、当然アーク電圧 v_a が

第4図 補助高電圧 V_H とギャップの長さ l との関係

Fig. 4. Relation between auxiliary high voltage V_H and gap length l .

第5図 アーク電流に対する l と v_a の関係
Fig. 5. l versus v_a .

変化する。電極間電圧は点弧直後にギャップ破壊電圧 V_H より急激に低下し、おおむね $20 \sim 30 \mu s$ 程度以後は比較的一定値に落ち着き準定常状態を示すので、ここではアーク電圧の測定時刻を放電時間の中央、すなわち放電開始より $100 \mu s$ の時点においた。

第4図からわかるように、同じ V_H においても電流が増加すれば l が大となるので、 v_a も大きくなる。時刻 $100 \mu s$ における v_a は $4 \sim 13.7 A$ において $17 \sim 21 V$ 程度である。

かくして、第4図と v_a の測定結果より v_a-l 特性が得られ、その結果を第5図に示した。図から明らかなように、一般に l の変化に対する v_a の変化は小さ

第6図 陽光柱の電界強度

Fig. 6. Field strength of positive column.

く、かつその程度は電流が小さいほど大きく、電流が増せば少なくなる。

図の直線の傾斜が時刻 $100 \mu s$ における陽光柱の電界強度 F を示すことになり、その結果を第6図に示した。液中の微小ギャップに $4 \sim 13.7 A$ の過渡アークを反覆したときの陽光柱の F は、図示のように $150 V/cm$ 以上の高い値になり、また I によって大きく変わることがわかった。 I の増大と共に F が低下することは気中アークの場合と同様であるが⁽⁹⁾、その値は概して気中放電に比べて高く、 $4 A$ では $300 V/cm$ 以上の値になる。

放電加工における陽光柱の電界強度がこのように高いのは、液体中の放電であるため陽光柱の膨張が抑制され、金属蒸気プラズマの圧力が高いことに基因するものと思われる。

〈3・2〉 陽光柱の電流密度 前述の F は放電開始後の時刻 $100 \mu s$ における値であるので、陽光柱の電流密度も同じ時刻において求める必要がある。よって、前述の実験とは別にアーク時間 $100 \mu s$ の放電を反覆して実験を行なった。測定はまず陰極電流密度を測定し、次に陽光柱の電流密度が陰極の電流密度に等しいと仮定して陽光柱電流密度を推定した。

周知のように、電極間に1回の過渡アークを発生させると、電極点付近の金属は溶融飛散して電極表面に1個の円形の放電こんを残す。

V_H と I を変えて、陰極 W に形成される放電こん半径 R を測定し第4図の関係をを使って、 I をパラメータとして R と l の関係を求めたのが第7図である。放電こんの大きさには $15 \sim 20\%$ のばらつきがあるため、多数の試料を繰返し放電こん半径を測定してその平均値をとった。それぞれの電流値において、 R は l に対して一定でなく、 R を最大にする l が存

第 7 図 l と放電こん半径 R との関係Fig. 7. Relation between l and radius R of crater.

第 8 図 陽光柱の電流密度

Fig. 8. Current density of positive column.

在する。

I が 4~13.7 A において、 l の値が 4.5~38 μm であるのに対して R は 50~130 μm にもなるので、放電加工のような液中の微小ギャップの過渡アーク放電の放電柱形状は、その長さより直径の方がはるかに大なることがわかる。従って、この場合の陽光柱の形状は円柱状というよりも、むしろ円板状の形状になると考えられる。

陰極点の電流密度 j は、放電こん面積を S とすれば次式により計算できる。

$$j = I/S \quad (1)$$

第 8 図は第 7 図と (1) 式より求めた l と j との関係であり、 j は $2.5 \sim 4.5 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ の範囲である。 I が小さければ電流密度は高くなる傾向がある。一般に j はアーク時間を短くすると更に高くなり、 $10^6 \sim 10^7$ のオーダー^{(10)~(12)}にも達する。

従来、アーク放電における陰極点の電流密度に対し

第 9 図 半無限固体の熱伝導

Fig. 9. Conduction of heat in semi-infinite solid.

ては、陰極表面に形成される放電こん跡と光学的方法の二通りの測定法があった^{(13)~(15)}。しかし、放電こん測定による方法では、アーク時間が長いと熱伝導により電極近傍の溶融部分が増え⁽¹⁶⁾、その結果、放電こんは陰極点より大きくなり、逆にアーク時間が短過ぎると電極点全域が溶融するまでに至らず、放電こんは陰極点より小さくなるおそれがある。従って、放電こん跡より陰極点の電流密度の測定には、かなりの誤差が含まれる場合が予想される。

上記の問題を概略的に検討するため、陰極点表面に形成される溶融域の半径の概算を行なった。いま半径 a なる円板状の熱源が第 9 図に示すように半無限固体の表面に現われたとすると、時間 t における任意の点の温度 θ は Carslaw 氏らによって次式で与えられる⁽¹⁷⁾。

$$\begin{aligned} \theta(r, z, t) = & \frac{aq}{2K} \int_0^\infty J_0(\lambda r) J_1(\lambda a) \\ & \times \left[e^{-\lambda z} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{z}{2(k t)^{1/2}} - \lambda(k t)^{1/2} \right\} \right. \\ & \left. - e^{\lambda z} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{z}{2(k t)^{1/2}} + \lambda(k t)^{1/2} \right\} \right] \frac{d\lambda}{\lambda} \quad (2) \end{aligned}$$

ただし、 $\operatorname{erfc}[x]$: 補誤差関数, $q = Q/\pi a^2$:

熱入力密度, Q : 熱入力, $k = K/\rho c$: 温度

拡散率, K : 熱伝導率, c : 比熱, ρ : 密度,

J_0, J_1 : 零次および一次のベッセル関数

ゆえに、半無限固体表面上の任意の点の温度 θ は (2) 式において $z=0$ とすると (3) 式ようになる。

$$\begin{aligned} \theta(r, 0, t) = & \frac{aq}{K} \int_0^\infty J_0(\lambda r) J_1(\lambda a) \\ & \times \operatorname{erf}[\lambda(k t)^{1/2}] \frac{d\lambda}{\lambda} \quad (3) \end{aligned}$$

いま、 $\Theta = Q/\pi a K$: 飽和温度, $T = \pi a^2/k$: 基準時間, $r_0 = r/a$, $t_0 = t/T$, $\theta_0 = \theta/\Theta$, $\alpha = a\lambda$ として (3) 式を無次元化すると次式を得る。

第1表 熱源半径 a と溶融半径 r' との比較Table 1. Comparison of radius a of heat source with radius r' of molten zone.

$I(A)$	$a(=R)(\mu m)$	$\theta(^{\circ}C)$	$T(\mu s)$	$r(\mu m)$
4.0	56	7,410	1,840	52
7.9	80	10,900	3,820	77
11.5	110	12,290	7,230	102
13.7	129	13,100	9,940	118

$$\theta_0 = \int_0^{\infty} J_0(\alpha r_0) J_1(\alpha) \operatorname{erf}(\alpha \pi^{1/2} t_0^{1/2}) \frac{d\alpha}{\alpha} \dots\dots\dots (4)$$

(4)式より半無限固体の表面上に半径 a なる円形の面熱源が与えられたときの、任意の時刻における半無限固体表面上の任意の点の温度を知ることができる。

よって、(4)式を使って前述の放電こん測定による電流密度測定に関する問題を検討した。ここでは計算の便宜上、放電こん半径 R を熱源の半径 a に等しいとして、計算機による(4)式の計算結果を基にして、 a と溶融半径 r' との比較をした。 $t=100\mu s$ における結果を第1表に示した。ただし、熱伝導の計算における電極 W の熱的な定数として、SK 材の高温における熱伝導率、比熱および密度の実測値が見あたらないため、できるだけこれに近い条件のデータとして、同じ結晶構造の純鉄 (γ 鉄) の $1,000^{\circ}C$ における熱伝導率、比熱の実測値⁽¹⁸⁾ならびに格子定数⁽¹⁹⁾から算出した密度の値を採用し、 $C=0.162 \text{ cal/g}\cdot\text{deg}$, $K=0.065 \text{ cal/cm}\cdot\text{s}\cdot\text{deg}$, $\rho=7.63 \text{ g/cm}^3$, $k=0.0526 \text{ cm}^2/\text{s}$ とし、温度 θ としては電極が融点に達しても溶解するには潜熱を必要とすることを考慮して修正融点⁽²⁰⁾ $1,940^{\circ}C$ を採用し、表面温度が θ になる溶融半径 r' を求めた。また熱入力 Q としては、放電加工ではギャップの長さが非常に短いので、陽光柱よりの損失は少なく⁽²¹⁾ギャップ電力の大部分は陽陰両極で消費されると考えられるので、電力の半分が陰極に投入されるとして $0.24 I v_0/2 \text{ (cal/s)}$ を陰極入力として概算した。

表より a と r' がほぼ等しくなるので、この結果を考慮すると溶融に基づいて電極表面に形成された放電こん半径はだいたい熱源半径に等しいと推定でき、放電こん跡より陰極点電流密度を求めるに際しての熱伝導による誤差はそれほど大きな値にならないことがわかる。かくして第8図に示した陰極点の電流密度はほぼ妥当な値を示しているものと思われる。

本研究における過渡アークの放電形状は、前にも述べたように厚さの薄い円板状と考えられ、また放電加工における放電こん直径は陽光柱直径と等しいとする

第10図 陽光柱の導電率

Fig. 10. Conductivity of positive columnn.

文献⁽¹⁾もあるので、陰極点電流密度が、すなわち陽光柱電流密度であると想定した。

本論文は低消耗放電加工における陽光柱の電流密度を求めることを目的とするものであるので、以上の考察より、 $4\sim 13.7 \text{ A}$, $100\mu s$ における陽光柱の j は $2.5\sim 4.5 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ であるとみなせる。ただし、この値は準定常的と考えられる $100\mu s$ における値であり、点弧直後の電流密度はもっと高いオーダーにあるはずである。

次に、陽光柱の導電率 σ は j と F より次式で与えられる。

$$\sigma = j/F \dots\dots\dots (5)$$

この式により各々の電流値について、 l に対する σ を求めると第10図のようになる。図より、本研究における液中の微小ギャップの過渡アークの陽光柱の導電率は $0.9\sim 2.2 \times 10^2 \text{ S/cm}$ 程度でかなり高い値になり、陽光柱の温度の高いことを示唆している⁽³⁾。

4. む す び

銅対焼入鋼の低消耗放電加工における液中過渡アーク放電の陽光柱の電界強度と電流密度を求めた。反覆放電における過渡アークが、準定常状態に達していると思われる時刻 $100\mu s$ の陽光柱の電界強度は、アーク電流 $4\sim 13.7 \text{ A}$ で 150 V/cm 以上の値になり、電流の小さいときは非常に高く 4 A で 300 V/cm 以上になるが、電流の増加によりかなり低下する。この傾向は気中放電の場合と同様であるが、その値は相当高い。

また、時刻 $100\mu s$ における放電こんの半径は、半無限固体に対する円板熱源の熱伝導計算の概算結果、熱源半径にほぼ等しいと考えられ、更に陰極点電流密

度が陽光柱電流密度と等しいとして、陽光柱の電流密度を求めた結果、電流 4~13.7 A で $2.5\sim 4.5\times 10^4$ A/cm² の値になった。陽柱光の導電率はギャップの長さや電流によっても変わるが、およそ $0.9\sim 2.2\times 10^2$ S/cm でかなり高い値である。

本研究には鉄鋼短期大学電気工学科の池野教授より御支援を賜った。また熱伝導の計算には同志社大学計算機センターの計算機を使用し、同大学電気工学科の戸高助教授の協力を得た。付記して謝意を表す。
(昭和 53 年 11 月 16 日受付, 同 54 年 12 月 10 日再受付)

文 献

- (1) A. S. Zingerman: "Propagation of a Discharge Column", *Soviet Phys.-Tech. Phys.*, **1**, 992 (1957)
- (2) B. N. Zolotikh: "On Physical Processes of Electrical Discharge Machining", *Electrospark Machining of Metals (in Russian)*, **1**, 38 (1957)
- (3) L. S. Palatnik & A. N. Liulickev: "Investigation of the Temperature in the Vapor Phase Occurring During the Electrical Spark Treatment of Metals", *Soviet Phys.-Tech. Phys.*, **3**, 1178 (1958)
- (4) P. K. Eckmand & E. M. Williams: "Plasma Dynamics in an Arc Formed by Low-Voltage Sparkover of Liquid Dielectric", *Appl. Sci. Res.*, Section B, **8**, 299 (1960)
- (5) T. O. Hockenberry & E. M. Williams: "Dynamic Evaluation of Events Accompanying the Low-Voltage Discharge Employed in EDM", *IEEE Trans. Industr. Gen. Applic.*, **IGA-3**, 302 (1967)
- (6) F. V. Dijk, et al.: "Some Results of Physical Research in EDM", *Proc. ISEM*, **4**, 68 (1974)
- (7) L. Chincholle: "Metal Removal and Adaptive Control in EDM", *ibid.*, **5**, 57 (1977)
- (8) 元木: 放電応用装置, p. 145 (昭 41) 日刊工業
- (9) 電気学会編: 放電ハンドブック, p. 148 (昭 49) 電気学会
- (10) 倉藤・増沢: 「超硬合金の放電による微細加工」, 電気加工学会誌, **2**, 1 (昭 43-3)
- (11) M. Motoki & K. Hashiguchi: "Energy Distribution at the Gap in Electric Discharge Machining", *Annals CIRP*, **14**, 485 (1966)
- (12) F. V. Dijk & R. Snoey: "A theoretical and experimental study of the main parameters governing the electro-discharge machining process", *Mecanique* N 301-302-Janvier-Fevrier, p. 10, (1975)
- (13) 窪野: 「定常アーク放電中の陰極表面の電流密度に関する理論的検討」, 電学論 A, **96**, 55 (昭 51)
- (14) V. I. Rakhavskii: "Experimental study of the dynamics of cathode spots development", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **PS-4**, 81 (1976)
- (15) G. W. McClure: "Plasma expansion as a cause of metal displacement in vacuum-arc cathode spots", *J. Appl. Phys.*, **45**, 2078 (1974)
- (16) 木本・田宮・平田: 「水中電極低消耗放電加工の検討」, 電気加工学会誌, **1**, 47 (昭 43)
- (17) H. S. Carslaw & J. C. Jaeger: "Conduction of heat in solid", 2nd Ed. p. 264 (1959) Oxford
- (18) 日本金属学会編: 金属データブック, p. 289 (昭 49) 丸善
- (19) 日本金属学会編: 鉄鋼便覧, p. 1770 (昭 37) 丸善
- (20) 谷口: 材料と加工, p. 112 (昭 49) 共立出版
- (21) A. S. Zingerman & D. A. Kaplan: "Electric Erosion of an Anode as a Function of Interelectrode Distance", *Soviet Phys.-Tech. Phys.*, **3**, 361 (1959)