電解放電加工による鋼の高速穴あけ

久保田 護* 田村 祐二*

High Speed Drilling of Steel Plate with Electro-Chemical-Discharge Machining

by Mamoru KUBOTA and Yūji TAMURA

Study on steel plate drilling with electro-chemical-discharge machining (ECDM) is carried out experimentally by a machine employed for the experiment with a single phase full-wave rectified 100 Hz generator. Electrolyte of NaCl or NaNO₃ 20% water solution is fed through a hole of graphite electrode by an air pressure of 10 kgf/cm². Concluding from the results obtained ECDM can drill a hole with high feed speed of 10-80 mm/min. In ECDM electrochemical removal proceeds with extremely high current density and to it electrodischarge removal of high speed EDM is added, consequently ECDM has higher feed speed than that of mere ECM or EDM.

1. ま え が き

電解放電加工とは電解加工と放電加工を組合せた複合加工であって、この組合せ方により種々の方法があり得る。電解加工で荒取りしたのち放電加工で仕上げる作業を1台の機械で行なう電解放電加工機は、すでに10年あまり前に製作されている¹⁾。しかしこれは複合加工としての電解放電加工を行なったわけではない。

グラファイトの回転電極とパルス性の電流を用いる放電電解研削盤は成形研削などに実用化された²⁾。

* 茨城大学工学部

これは電解に伴って発生し陽極面に固着して加工を妨げる酸化膜を微細な放電によって除去して加工を進める方法とされている。そのほか放電加工において薄い電解液を用いて加工速度を上げ電極消耗を減らす方法も発表されている³⁾。

しかし上記の方法は回転電極式電解加工にわずかな放電を加えたもの、および普通の放電加工にわずかな電解を付け足したものであって、加工特性の改善には成功しているけれども、除去機構の点からすれば、前者は電解、後者は放電による加工である。

また電解液の一種である水ガラスの水溶液を用いる放電加工は切断に実用されており、これを電解放電加工 (ECDM) と呼ぶ者もある⁴⁾。しかしこの方法は放電による除去が主であって、わが国では放電切断と呼ばれている。

ところが1971年にエロージョン 化学加工という名で発表された方法^{5), 6)}は放電による除去も電解による除去も多量であり、従来の電解加工や放電加工より著しく高い送り速度が得られるとされている。この加工法の詳細は不明であったが1974年になって電気加工学会とチェコスロバキヤの機械化自動化研究所 (VUMA) との機関誌交換のおかげでやゝ詳しい報告⁷⁾が入手できた。これでは20~30%の濃い電解液を用いているが、同様な単相全波整流電源で3%前後の食塩水中で放電加工を行ない、加工面あらさを良くし表面変質層を少なくする類似の加工法も研究されている⁸⁾。

一方、放電加工においては上記の方法と同様な単相全波整流電源を用いる高速放電加工が開発されている^{9)~11)}。この放電加工に電解作用を追加すればさらに高い加工速度が得られるのが当然と思われる。本論文では電解による除去も放電による除去も同時に進行させて高い送り速度を得る電解放電加工の実験結果を述べ、高速送りの可能な理由を考察する。

2. 電解放電加工における除去速度

電解放電加工における除去速度 V_{ECD} は電解による除去速度 V_{EC} と放電による除去速度 V_{ED} の和と考えられる。

$$V_{ECD} = V_{EC} + V_{ED} \quad \dots\dots\dots (1)$$

V_{ECD} : 電解放電加工の除去速度 [g/min]

V_{EC} : 電解による除去速度 [g/min]

V_{ED} : 放電による除去速度 [g/min]

V_{EC} についてファラデーの法則が適用されるとすれば

$$V_{EC} = k_{EC} I_{EC} \quad \dots\dots\dots (2)$$

k_{EC} : ファラデーの法則によって定まる定数で鋼が2価で溶解する場合には $0.017 \text{ g/A} \cdot \text{min}^{12)}$

I_{EC} : 電解電流の平均値 [A]

放電による除去速度 V_{ED} は實際上電流に比例するとみなせる。

$$V_{ED} = k_{ED} I_{ED} \dots\dots\dots (3)$$

V_{ED} : 放電による除去速度〔g/min〕

k_{ED} : 放電加工の実際で定まる係数〔g/A・min〕

I_{ED} : 放電電流の平均値〔A〕

k_{ED} の値はパルスエネルギー、パルス幅、デューティファクタなどによって変わるが、通常の放電加工では0.05～0.1 g/A・min であり^{13), 14)}, 単相全波整流電源による高速加工では0.20 g/A・min に達する^{15), 16)}。

電解放電加工では

$$V_{ECD} = k_{ECD} I_{ECD} \dots\dots\dots (4)$$

V_{ECD} : 電解放電加工速度〔g/min〕

k_{ECD} : I_{ED} と I_{EC} の比によって変わる係数〔g/A・min〕

I_{ECD} : 電解放電電流の平均値で電解電流と放電電流の平均値の和になる〔A〕

$$I_{ECD} = I_{EC} + I_{ED} \dots\dots\dots (5)$$

I_{ED} と I_{EC} の比を m とすると

$$I_{ED} = m I_{EC} \dots\dots\dots (6)$$

(1)～(6)から

$$k_{ECD} = \frac{k_{EC} + m k_{ED}}{m + 1}$$

$k_{EC} = 0.017$ g/A・min , $k_{ED} = 0.20$ g/A・min とすると

$$k_{ECD} = \frac{0.20 m + 0.017}{m + 1} \text{ [g/A・min]}$$

よって (4)は

$$V_{ECD} = \frac{0.20 m + 0.017}{m + 1} I_{ECD} \text{ [g/min]}$$

電解加工、放電加工、電解放電加工における電流 I と除去速度 V の関係の概念を図1に示す。直線0 A上では放電がおこらず($m=0$)電解による除去だけになる。

曲線AB上では電流の増大につれて m が増大し曲線の傾きは k_{ED} に近づく。

3. 電解放電加工の実験

電解放電加工の実験のため平面研削盤を利用し、送りハンドルを手動または電動で回して上下送りを与えた。装置の概略を図2に示す。なお300～750 Aの実験には超音波加工機を同じ方式に改造したものをを用いた(図3)。

電源は50 Hzの交流を单相全波整流したもので、電解を加えるため正極性すなわち工具電極が負に限定される。半波整流の電源でも加工できるが、流せる電流が小さく最大加工速度は全波整流のさいの60%程度にとどまる。

電極材料として黄銅や銅を使うと消耗がはげしく、また短絡をおこしやすいので、放電加工用のグラファイトを使用した。電極の穴から噴出させる電解液の流量が十分あれば、電解加工と同様に定速送りで加工できる。

極間電圧の平均値が15 V以下で送り速度が4 mm/min以下のときは放電がおこらない。また電圧が臨界値(20%食塩水るとき約30 V)を越えると放電の状態が急に変わりアークが持続して加工部は急速に加熱され、加工できなくなる。

電解液中の放電は電解焼入れの場合のように電解液と電極の間でも、放電加工のように電極と電極の間でもおこる。電解液を極間に流しながら工具電極で加工する場合は間げきが小さく0.1 mm以下であるので、たいてい電極と電極の間で放電する。この放電

図1 加工電流と除去速度の関係

図2 電解放電加工装置の略図

図3 電解放電加工装置

は電圧によって次の三つの形になる。

(1) 低電圧(10～15 V)では微弱な火花を発生し、音はほとんどなく電極のエロージョンは認められない。

(2) 20～25 Vではパルスごとに断続する放電がおこり電解放電加工の状態になる。

(3) 30 V以上ではアークが連続し極間抵抗は急減し大電流が流れる。

高速送りの電解放電加工は(2)の状態で行なわれる。

3.1 食塩水による加工

電解放電加工の特性は使用する電解液の性質に左右される。食塩水は電解の機構が単純であるので基本的な研究に便利である。本実験においては主として20%水溶液を用いた。濃度と温度したがって導電率が小さいときは低い送り速度で短絡することになる。

一定面積の加工で定電圧定速送りのとき電解だけがおこるなら電流密度と送り速度は直線関係になり、高い電流密度たとえば 120 A/cm^2 以上では電流効率が下がるとされている¹⁷⁾。しかしそれ以上に電流を流し放電のおこっている状態で加工するなら、電流あたりの除去速度は電解加工より放電加工のほうが大きいから、電流効率が上昇したようになるはずである。

実際に単相全波整流の電圧を30 Vに保ち、工作物と電極の端面を向き合わせて直径3 mmの軟鋼およびオーステナイトステンレス鋼の棒の先端を定速送りで除去したときの電流と送り速度の関係は図4のようになって電流効率が一度下がってから上昇するような形になる。

軟鋼の電解でFeが2価で溶けるとしてファラデーの法則により計算した直線にくらべると、電流密度 100 A/cm^2 までは計算と実験の値が一致し(効率100%)、これより高い電流密度では電流効率が低下している。ところが火花の発生する区域(電流密度 250 A/cm^2 以上)では電流効率が向上したような形になり、 $300 \sim 400 \text{ A/cm}^2$ の範囲における曲線の傾きはファラデー効率200%の場合に相当する。

ステンレス鋼の加工の場合でも電流密度の低い範囲(150 A/cm^2 以下)では、Feが3価で溶けるとした計算値と実験値がよく一致し、火花が発生する電流密度域では曲線の傾きが大きくなって電流効率が増大したようになる。これは前述のように放電加工では電流あたりの除去量が電解加工より大きいことで説明され、電解放電加工による除去は電解による除去と放電による除去の単純和とみなしてよいようである。

加工くずは電解によるスラッジと放電による加工粉になる。加工粉は大部分が直径 $0.02 \sim 0.3 \text{ mm}$ の球状で、直径 0.05 mm 前後のものが多い(図5)。放電しているときのグラファイト電極の消耗率は端面消耗長さで4～8%であっ

図4 加工電流と送り速度の関係

図5 加工くずの形状

図6 穴あけ電流と送り速度の関係

た。

軟鋼板に深さ 10 mm の穴をあける実験では、外径 4 mm、内径 1.5 mm のグラファイト電極を用い、15℃、20 % の食塩水を 10 kgf/cm² の圧力で送った。このときの電流および電流密度と加工速度との関係を図 6 に示す。この場合の電流密度とは電流を穴の断面積で割った値である。電圧は一定の 20 V に保ち、電極に定速送りと与えた。送り速度が 5 mm/min 以下では電解加工の状態であり、穴のテーパは大きい、あらさは $R_{\max}$ 10 μ m 以下である。送り速度 5 ~ 10 mm/min では微細な放電が発生するけれども加工面は電解加工の状態に近い。送り速度 15 ~ 25 mm/min のときは電解放電加工が正常に進行し、はげしい火花が極間から飛び出す。あらさは約 50 μ m で穴のテーパは 1/200 程度である。送り速度が 25 mm/min を越えると火花の実体である熔融金属粒が穴の入口、出口、内面に付着し、あらさは約 100 μ m になる。送り速度を 40 mm/min 以上になると電極が短絡しグラファイトは赤熱し破損するが多い。

定電圧であっても送り速度によって電解加工の状態と電解放電加工の状態になるのは、送り速度を高めると極間が狭くなり放電が発生するからである。

周知のように電解加工における平衡加工間けきは送り速度に反比例する¹⁸⁾。電圧 20 V、NaCl 濃度 20 % で送り速度が 3 mm/min のときの間けきの値が 0.288 mm であるならば電解加工の状態であるが¹⁹⁾、送り速度を 20 mm/min にすれば 0.0432 mm となるので電解加工の状態にとどまらず放電が発生することになる。

3.2 硝酸ソーダ水溶液による加工

食塩水を用いる電解放電加工は、機械や工作物がさびやすく、また比較的低速の加工では穴の入口のだれとテーパが大きい。硝酸ソーダを用いるとこの点が改善される。

実験は食塩水の場合と同様にして同じ寸法の電極（外径 4 mm、内径 1.5 mm、長さ 30 mm の円筒）を 10 mm だけ送り込んだ。工作物は炭素工具鋼 SK5 で、電解液は 20℃ の 20 % 硝酸ソーダ水溶液である。

電圧 20 V で送り速度が 5 mm/min 程度のときは放電が発生するけれども加工面は電解加工の状態と

図7 送り深さによる電流の変化

図8 送り速度と中心部の突起の高さの関係

なり黒色を呈する。加工精度は食塩水の場合よりもよい。送り速度を 10 mm/min 以上にすると電解放電加工の状態となるが、食塩水を用いる場合と違って加工深さにつれて電流が直線的に増大する(図7)。これは発生ガスが少ないため絶縁してない工具の側面を通して流れる電流が食塩水の場合より大きいためと考えられる。

食塩水の場合には電圧を 2.5 V 以上にすると連続放電になり加工できないが、硝酸ソーダの場合は 25~35 V で加工できる。送り速度が大きいほど穴の中心部に残る突起が大きい

ので(図8)液の流入が妨げられ加工くずの排出が困難になって加工速度の限界に達する。

最大送り速度は電圧に依存し、連続アークにならない限り電圧が高いほど大きくなる(図9)。しかし加工面はあらくなりオーバカットも大になる。穴の入口の間げき(穴の直径と電極の直径の差の1/2)と電圧との関係を図10に示す。

電極消耗は低速送り(5 mm/min 以下)では認められない。送り速度が 10 mm/min を越え放電がはげしくなると急増する(図11)。

図9 加工電圧と最大送り速度の関係

図10 加工電圧と入口間げきの関係

図11 送り速度と電極消耗率の関係

加工精度、加工面あらさ、電極消耗、消費電力を総合的に考えると、硝酸ソーダを用いる電解放電加工は送り速度 10 mm/min 程度で行なうがよい。精度とあらさの問題を無視するなら 80 mm/min を越える速度でも穴あけができる。

4. 高速送りが可能な理由

電解放電加工法が放電加工や電解加工よりすぐれている点は高速送りが可能なことである。前述のように電流あたりの除去量は放電加工のほうが電解加工より大きいので、電解放電加工の電流あたり除去量は放電加工より小さくなる。電力あたりの除去量はあらさの大きな高速放電加工で最も大きく、あらさが小さくなるにつれて電解加工と同程度またはそれ以下になり、同程度のあらさなら電解加工のほうが単位電力による除去量が大になる。要するに放電による除去量も電解による除去量も電力あたりで考えれば大差がない。したがって電解放電加工において高速送りが可能なことは単位加工面積に送れる電力が大きいことにほかならない。

放電加工においては工作物と対向している電極の全面積のうち、ある時刻に放電で電流が流れている部分の面積は極めて小さく、前記の実験のように細い電極であっても 1 % 以下である。放電後には気泡が発生するけれども電解液の流速が大きいので気泡は滞留せずに外周へ流れ、正面加工間げきの大部分は電解液で満たされている。放電が飛んでいる間であっても電極間げきには 20～30 V の電圧がかかっており、間げきは 0.1 mm 以下と推測されるので、数 100 A/cm² の極めて高い電流密度で電解電流が流れる。すなわち電解放電加工中の電解電流密度は高い電圧と狭い間げきのおかげで通常の電解加工の数倍になり得る。

電解放電加工を電解について考えると、電極間げきの一部で放電が発生するほど高い電圧、小さい間げきにおける高電流密度電解加工をしているのであり、放電について考えると絶縁耐力の小さい媒体を介する放電のため電圧の割にはひろい間げきで放電し、このため加工くずの排除がよく、導体粉を用いる高速放電加工と似た結果になるようである。また高速放電加工のあらい面をたえず電解によって平滑化する効果がある。

極限的な高電流密度の電解加工と高速放電加工が合わさるため、電解放電加工では電解加工でも放電加工でも得られない高速送りが可能になる。

放電現象が電解作用に与える影響や電解に伴う現象が放電に与える影響については、まだ明らかでない。

5. む す び

濃い電解液と単相全波整流電源を用いる電解放電加工を試み、次の結果を得た。

- 1) 食塩水を用いる電解放電加工では鋼の穴あけで 40 mm/min の送り速度が得られる。

2) 硝酸ソーダ水溶液による電解放電穴あけは、加工精度、面あらし、電極消耗、消費電力の条件を総合的に考えて、送り速度10 mm/min程度で行なうがよい。上記の制限を無視するなら80 mm/minを越える速度でも穴あけができる。

3) 電解放電加工で高速送りが可能なのは、極限的な高電流密度の電解と放電による除去が同時に進行するからである。

(1977. 1. 29 受付)

参 考 文 献

- 1) 井上 潔, 渋谷 巖: 電解放電加工法 (ECDM) について, 機械と工具, 7巻8号 (1963) 8
- 2) 井上 潔, 清水明彦, 米花一好: 放電電解研削盤, 日本機械学会誌, 71巻594号 (1968) 890
- 3) 木本保夫, 田宮勝恒, 平田勝己: 水中電極低消耗放電加工の検討, 電気加工学会誌, 1巻2号 (1968) 45
- 4) J. Staněk: Electromachining, Development trends, ISEM-4 (1974) 107
- 5) Л.З.Токарь: Достижения новаторов в области электрофизических и электрохимических способов обработки, Машиностроитель, 5 (1971) 29
- 6) А.К.Журавский: Семинар по размерной электрохимической обработке материалов, Вестник машиностроения, 11 (1971) 84
- 7) Nová elektrická metoda obrábání, Trend, 1 (1974) 27
- 8) А.Н.Меркурьев, О.В.Същянко, А.Г.Барков: Некоторые особенности совмещенной электрохимической и электроэрозионной обработки материалов, Электронная обработка материалов, 3 (1969) 7
- 9) 倉藤尚雄, 須田 孝: 高速放電加工の研究, 電気加工学会誌, 3巻4号 (1969) 22
- 10) 須田 孝, 仁志田昇司, 佐田登志夫: 高速液流による放電加工の加工速度向上, 電気加工学会誌, 4巻7号 (1970) 1
- 11) 須田 孝, 手島正之, 佐田登志夫: 水を加工液とする高速放電加工の添加剤による効果, 電気加工学会誌, 5巻9号 (1971) 26
- 12) 佐藤敏一: 電解加工と化学加工, 朝倉書店 (1970) 34
- 13) 斎藤長男, 小林和彦, 大泉敏郎: 放電加工の研究 (第12報) 特殊波形による放電加工, 昭和47年度精機学会秋季大会学術講演前刷 (1972) 439
- 14) 三菱放電加工機用新形電源シリーズカタログ (1976)
- 15) 10)と同じ, 6

- 16) 11) に同じ, 29
- 17) 12) に同じ, 225
- 18) 電気加工ハンドブック, 日刊工業(1970) 137
- 19) 同上, 138