極性反転パルスによる放電加工特性の向上*

夏 恒^{*1}, 国 枝 正 典^{*2}Improvement of Machining Characteristics with
Polarity-Changed Pulse in EDM Processes

Heng XIA and Masanori KUNIEDA

In this paper, a new type of discharge current waveform, named polarity-changed pulse, is proposed in order to improve the machining characteristics in the EDM process. The principle of the method is to alter the polarity so that a greater instantaneous removal rate of the workpiece can be obtained, since the removal rates of the anode and cathode change with the development of the plasma arc. The polarity of the workpiece is set to positive when the discharge takes place, and then the polarity is changed to negative at a certain time after the discharge ignition. At first the removal amount of the workpiece and the tool wear ratio with respect to the polarity-changed pulse were calculated on the basis of the experimental results obtained with the conventional pulse. The removal rate and tool wear ratio were then investigated when the polarity-changed pulse was used. It is found from both experimental and calculated results that the use of polarity-changed pulse can decrease the tool wear ratio and increase the workpiece removal rate.

Key Words: Electrical Discharge Machining, Plasma, Tool Wear, Electrode Polarity, Removal Amount, Instantaneous Removal Rate, Discharge Current Waveform

1. 緒言

放電加工においては、パルス幅やパルス波形が加工特性に大きな影響を与える。例えばパルス幅についてみると、図1に示す通常の矩形波パルスを用いた場合、一般にパルス幅が短い時には工作物を陽極とする正極性加工の方が電極の工作物に対する消耗率が小さく有利である。しかし、パルス幅が長い時には逆に、工作物を陰極とする逆極性加工が有利であることが知られている。このような現象は、絶縁破壊直後とある時間が経過した後とではプラズマの状態に変化がある、と考えることによって初めて説明できる。

Zingerman⁽¹⁾なども指摘しているように、液中のアーク放電では絶縁破壊とともにプラズマは急速に膨張するといわれている。そしてそれに伴って、陽極と陰極へのエネルギー配分が変化する⁽²⁾⁽³⁾。このことがパルス幅によって電極消耗率が変化する原因のひとつと考えられている。また、パルス幅の増加とともに、陽極である電極

へのカーボンの付着量が増え、その保護作用によって電極消耗率が減少する⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾こともひとつの原因であると報告されている。そこで、Bruyn⁽⁷⁾はプラズマが膨張してもプラズマ中の電流密度が一定値を保つように、図2に示すような台形波の放電電流を用いると、除去量や電極消耗率の面で向上が見られたことを報告している。また、小林ら⁽⁸⁾は様々にパルス波形を変えて、パルス波形と加工特性の関係を実験的に調べた。なお元木ら⁽⁹⁾はコンデンサ放電による幅の短いパルスを矩形波に重畳して加工を行い、重畳するタイミングによって加工特性が変化することを報告している。以上の例はすべて、プラズマの状態や陽極へのカーボンの付着量が経時的に変化することを考慮して、パルス幅やパルス波形が加工特性に及ぼす影響を調べたものである。

そこで本研究においても、陽極と陰極の除去速度の比率が経時的に変化する現象に着目する。そして、次のような新しいパルス波形を考案し、加工速度を増大させ、電極消耗率を小さくすることを目的とする。すなわち、一回の放電において、加工液の絶縁破壊直後は工作物を陽極とし、一定時間経過後、プラズマを消沈させることなく一瞬のうちに極性を反転させる方法である。こうし

* 原稿受付 平成6年4月14日。

*1 准員, 東京農工大学大学院 (〒184 小金井市中町2-24-16)。

*2 正員, 東京農工大学工学部。

図1 通常のトランジスタ放電回路の電圧と電流波形

図2 プラズマ中の電流密度が一定値を保つような台形波の放電電流⁽⁷⁾

て、除去を工作物側に片寄せ、電極側の消耗を軽減させることができると考えられる。

ところで、ワイヤ放電加工の仕上げ加工において表面粗さを向上させるため、一回の放電ごとに電極と工作物の極性を反転させる研究が報告されている⁽¹⁰⁾。しかしこの方法は、一般の放電加工と同じく一回の放電が終了した後、極間のプラズマの完全な消沈を待って次の放電を発生させる。従って、この方法は、極性の異なる独立した放電が交互に連続している点で、本研究の原理とは全く異なっている。

2. 極性反転パルスの原理

図3は、陽極と陰極共に銅を用いた場合の、陽極と陰極の一パルス当たりの除去量とパルス幅との関係である。図よりパルス幅 t_e が短い領域では陽極の方が陰極よりも除去量が大きく、パルス幅が長くなると逆に陰極の除去量の方が大きくなることから、図中の陽極の除去曲線 W_A と、陰極の除去曲線 W_C の t_e についての微係数は、絶縁破壊から t_0 秒経過したときの陽極と陰極の除去速度の瞬時値を表す。こうして求めた陽極と陰極の除去速度の変化を図4に示す。図4より、絶縁破壊直後は工作物を陽極とし、 t_0 秒

図3 パルス幅に対する陽極と陰極の除去量の変化

図4 陽極と陰極の除去速度の変化

後に工作物の極性をプラスからマイナスに、プラズマを消沈させないように瞬時的に反転すれば、常に工作物の除去速度の瞬時値は電極のそれを上回る。

本研究では、図1のような極性を反転しない矩形波パルスを通常パルスと呼び、図5に示すように一回の放電の途中で極性を反転させたパルスを反転パルスと呼ぶ。また、反転パルスについて、工作物の極性をプラスからマイナスに反転する時刻を反転時刻 t_{e0} 、一回の放電の持続時間をパルス幅 t_e と定義する。

以上の例は電極と工作物の材料が同じ場合であるが、一般には電極と工作物の材料は異なる。その場合、電極と工作物の材料の熱物性値の違いが除去速度の違いに影響を及ぼす⁽⁴⁾。従って、工作物をプラスとする正極性加工の場合と、工作物をマイナスとする逆極性加工の場合についてそれぞれ、電極と工作物の除去速度の瞬時値の変化を調べる必要がある。図6はそれらを模式的に示したものである。逆極性の場合と正極性の場合の電極の除去速度をそれぞれ $V_{T(+)}$ 、 $V_{T(-)}$ 、工作物の除去速度をそれぞれ $V_{W(-)}$ 、 $V_{W(+)}$ とする。このとき一般に $V_{T(+)}$ と $V_{T(-)}$ の変化を表す曲線が交差する時点 t_{T0} は、 $V_{W(-)}$ と

図5 本研究で考案した極性反転パルスの電圧と電流波形

$V_{w(+)}$ の変化を表す曲線が交差する時点 t_{w0} とは一致しない。

ここで、正極性から逆極性に反転するパルスによって得られる一パルス当たりの理論的な除去量及び電極消耗率について説明する。時刻 0 から t_{e0} までは工作物の極性はプラスであるため、工作物の除去量はまず $V_{w(+)}$ 曲線に沿って増大し、 t_{e0} に至るまでの工作物の除去量は $\int_0^{t_{e0}} V_{w(+)} dt$ となる。 t_{e0} 秒以降は工作物の極性をプラスからマイナスに反転させるため、除去量は $V_{w(-)}$ 曲線に従って増大し、パルスが終了する時刻 t_e までにさらに $\int_{t_{e0}}^{t_e} V_{w(-)} dt$ だけ除去される。従って、極性反転パルスによる工作物の一パルス当たりの除去量 W_w は式(1)で表される。同様に電極の一パルス当たりの除去量 W_T が式(2)のように求められるので、 W_T と W_w の比をとることにより電極消耗率 R は式(3)のようになる。

$$W_w = \int_0^{t_{e0}} V_{w(+)} dt + \int_{t_{e0}}^{t_e} V_{w(-)} dt \quad (1)$$

$$W_T = \int_0^{t_{e0}} V_{T(-)} dt + \int_{t_{e0}}^{t_e} V_{T(+)} dt \quad (2)$$

$$R \equiv \frac{W_T}{W_w} \quad (3)$$

以上の式を用い、反転時刻 t_{e0} をパラメータとしてシミュレーションを行うと、反転時刻に対する工作物の除去量及び電極消耗率の変化が求められる。これより、工作物の除去量の最大値を与える最適な反転時刻と、電極消耗率の最小値を与える最適な反転時刻が求められるが、一般には両者は一致しない。

図6 電極と工作物の除去速度の瞬時値の変化の模式図

3. 極性反転パルスの有効性の確認

提案した極性反転パルスの有効性は、極性の反転を行うことによって、プラズマの成長が影響を受けないことを前提としている。極性の反転を行う瞬間にアークプラズマが消沈してしまうとすれば、図5に示す一つの反転パルスは極性とパルス幅の異なる独立した二つの放電パルスと考えられ、本研究の原理から予想される加工特性の向上は得られないはずである。

そこで、極性反転パルスの有効性とプラズマが消沈しないという前提が妥当であるか否かを調べるため、陽極と陰極の除去速度を示す図4の実験データを用いて、反転パルスを用いた加工による工作物の除去量と電極消耗率をシミュレーションする。そして、その結果を反転パルスを用いた実際の加工結果と比較する。なお、ここでは問題を簡単にするため、電極と工作物の材料は共に銅とした。

3・1 工作物の除去量及び電極消耗率のシミュレーション結果 シミュレーションは、極性の反転を行う瞬間にプラズマが全く消沈しないと仮定した場合と、完全に消沈すると仮定した場合の二通りについて行った。

3・1・1 プラズマが消沈しない場合 まず、電極と工作物の極性を反転する瞬間にプラズマが全く消沈しないと仮定する。その場合、工作物の除去量及び電極消耗率の変化は式(1)と(3)で表される。ここで、電極と工作物の材料が等しいことから、図6の $V_{w(+)}$ と $V_{T(+)}$ 曲線、 $V_{w(-)}$ と $V_{T(-)}$ 曲線は各々一致する。そして、前者には図4の V_A を、後者には図4の V_C を用いる。

パルス幅が $30 \mu s$ と $50 \mu s$ の場合について、反転時刻 t_{e0} をパラメータとして工作物と電極の一パルス当たりの除去量をシミュレーションした結果を図7に示す。

図7 プラズマが消沈しないと仮定した場合の一パルス当たりの除去量のシミュレーション結果

図9 プラズマが消沈すると仮定した場合の一パルス当たりの除去量のシミュレーション結果

図8 プラズマが消沈しないと仮定した場合の電極消耗率のシミュレーション結果

図10 プラズマが消沈すると仮定した場合の電極消耗率のシミュレーション結果

図において反転時刻が0というのは初めから極性を反転した場合、すなわち逆極性での通常加工の場合を示している。また、パルス幅が30 μsで反転時刻が30 μs、及びパルス幅が50 μsで反転時刻が50 μsというのは、極性の反転は行わずに正極性での通常加工を行った場合を示している。図7の結果より、工作物の除去量が極大を示す最適反転時刻が存在することが分かる。

また、電極消耗率を図7から求めた結果を図8に示す。図より、電極消耗率が極小を示す最適反転時刻が存在することが分かる。工作物の除去量に対する最適反転時刻と電極消耗率に対する最適反転時刻は、電極と工作物に用いる材料が同じであるから当然一致する。また、今回用いた加工条件では、最適反転時刻は放電持続時間が30 μsの場合と50 μsの場合とも12 μsと同じになっている。

3・1・2 プラズマが消沈する場合 次に極性を反転する瞬間にプラズマが完全に消沈してしまうと仮定

した場合の工作物の除去量及び電極消耗率についてシミュレーションを行った。このとき、工作物の除去量 W_{w0} と電極の除去量 W_{T0} 、及び電極消耗率 R_0 はそれぞれ次の式で表わされる。

$$W_{w0} = \int_0^{t_{e0}} V_{w(+)} dt + \int_0^{t_{e0}-t_{e0}} V_{w(-)} dt \quad (4)$$

$$W_{T0} = \int_0^{t_{e0}} V_{T(+)} dt + \int_0^{t_{e0}-t_{e0}} V_{T(-)} dt \quad (5)$$

$$R_0 \equiv \frac{W_{T0}}{W_{w0}} \quad (6)$$

パルス幅が30 μsと50 μsの場合の、除去量と電極消耗率シミュレーション結果を各々図9と図10に示す。図より工作物の除去量については極大を示す最適反転時刻が存在するが、電極消耗率については極性を反転

させると必ず大きくなり、極小値が存在しないことが分かる。

3・2 工作物の除去量及び電極消耗率の実験結果

極性の反転を行う瞬間にプラズマは消沈しないことと、極性反転パルスの有効性を確認するため、実際に極性反転パルスを用いて加工実験を行い、反転時刻 t_{e0} を変化させて電極と工作物の一パルス当たりの除去量と電極消耗率の変化を求めた。

3・2・1 実験条件 電極径が工作物より小さいと、加工深さの増大とともに加工間隙の状態が変化するため、電極と工作物共に直径8mmの丸棒を用い、突き合わせで加工を行った。パルス幅以外の加工条件は表1に示す通りである。電極と工作物の一パルス当たりの除去量は、精密電子天秤で測定した加工前後の重量の差をパルスカウンタで測定した放電回数で割って求めた。

3・2・2 工作物の除去量と電極消耗率 加工実験から求めた一パルス当たりの工作物の除去量の反転時刻に対する変化を図11に示す。図より、除去量が極大値を取る最適反転時刻が存在することが分かる。また電極消耗率についての結果を図12示す。図から、電極消耗率についても最適反転時刻が存在することが分かる。また、図11と図12の比較から、実験結果においても工作物の除去量が極大となる時刻と電極消耗率が極小となる時刻は一致しており、その最適反転時刻は $20\mu s$ であることが分かる。しかも、その最適反転時刻はパルス幅 $30\mu s$ のときと $50\mu s$ のときで同じである。

表1 実験条件

peak current i_e	20A
open voltage V_0	120V
duty factor	0.4
dielectrics	VITOL V-2 (S&O Co.)

図11 電極と工作物の除去量の実験結果

図12 電極消耗率の実験結果

図13 極性反転パルスの理想的な電流波形と実際の電流波形

3・3 考察 実験結果を3.1節のシミュレーション結果と比較すると、反転を行う瞬間にプラズマが消沈しないと仮定した場合のシミュレーション結果と傾向が一致していることが分かる。このことから、極性の反転を行う瞬間にプラズマが消沈しないことが確認された。また、実際に極性反転パルスを用いると、適当な反転時刻を選ぶことによって工作物の除去量が増大し、電極の除去量が低減する効果があることが確認された。

シミュレーション結果と実験結果では最適反転時刻が正確には一致しない原因は以下のように考えられる。放電回路にインダクタンスなどが存在するため、極性を反転する際の実際の電流波形は図5に示した理想的な電流波形とは異なり(図13参照)、反転が瞬間的には行われていない。つまり、反転時に放電電流の絶対値が減少する期間が生じる。そうすると放電プラズマの温度が低下し、電子とイオンの再結合によってプラズマがわずかであるが消沈してしまうと考えられる。しかし、今回のシミュレーションでは簡単のため、プラズマは極性の反転を行う瞬間に全く消沈しないと仮定したことが正確には一致しない原因であると思われる。

図14 電極消耗率のシミュレーション結果（銅-鋼）

図15 電極消耗の実験結果（銅-鋼）

4. 電極に銅、工作物に鋼を用いた場合の電極消耗率

前章では、電極と工作物の両方に銅を用いて、極性反転パルスの効果を実験的に確認した。次に、放電加工で最も一般的な、電極が銅、工作物が鋼の場合について極性反転パルスによる電極消耗率の低減効果を調べた。

4・1 シミュレーション結果 はじめに、銅対銅の場合と同様に極性を反転させない通常パルスを用い、正極性の場合と逆極性の場合それぞれについて経時的な $V_{T(-)}$ 、 $V_{T(+)}$ 、 $V_{W(+)}$ 、 $V_{W(-)}$ の変化を実験的に求め、(3)式を用いて反転パルスの場合の電極消耗率をシミュレーションした。パルス幅が $20 \mu s$ の場合の結果を図14に示す。結果から、電極消耗率が極小値を取る最適反転時刻が存在することが分かる。

4・2 実験結果 次に、反転パルスを用い、パルス幅が $20 \mu s$ 、 $30 \mu s$ 、 $50 \mu s$ の三通りの場合について、反転時刻と電極消耗率の関係を調べた結果を図15に示す。実験は表1の条件を用いて行った。特に図

15の中のパルス幅 $20 \mu s$ の曲線を図14のシミュレーション結果と比較すると、定性的には同様の傾向を示す。すなわち、反転パルスを用いると電極消耗率は小さくなること、また電極消耗率に対する最適反転時刻が存在することが分かる。

5. 結言

本研究では、放電の進行に伴うプラズマの変化によって生じる陽極と陰極の除去速度の変化を利用して、加工速度を大きくし、電極消耗率を小さくすることを目的として、一回の放電の途中で電極と工作物の極性を反転させる反転パルスを提案した。また、反転パルスを用いて加工を行い、その効果について検証した。得られた結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 極性反転時にプラズマが消沈しない、との仮定の下で、反転パルスの効果をシミュレーションした結果は実験結果とほぼ一致したことから、反転時のプラズマの消沈は少ないことが分かった。
- 2) 通常パルスでの加工と比較して、反転パルスを用いて適切な反転時刻を選ぶと工作物の除去量は大きくなり、電極消耗率が小さくなる。
- 3) 工作物の除去量を最大にしたり、電極消耗率を最小にする最適反転時刻が存在する。

また、具体的な電極と工作物の材料の組合わせについて、正極性加工と逆極性加工の場合の電極と工作物の各々の経時的な除去速度を求めておけば、加工速度や電極消耗率に対する最適反転時刻の理論値はシミュレーションを行うことによって求められる。

本研究の遂行にあたり実験装置について㈱ソディックのご協力を得た。また、元卒論生（現㈱テクノ菱和）山下年樹氏には実験において多大なご協力を得た。ここで、紙面を借りて厚くお礼申し上げる。

文献

- (1) Zingerman, A.S., Soviet Phys. Tech. Phys. 1(1956), 992.
- (2) Motoki, M. and Hashiguchi, K., Annals of the CIRP, 14 (1967), 485.
- (3) 木本・田宮・平田, 電気学会雑誌, 89-964 (1969), 133.
- (4) 元木・李・谷村, 電気学会雑誌, 87-943 (1967), 793.
- (5) 向山・緒方, 電気加工学会誌, 17-34 (1984), 13.
- (6) 夏・近藤・国枝・西脇, 第3回電気加工学会全国大会講演論文集, (1993-11), 9.
- (7) H.E. De Bruyn, Annals of the CIRP, 16 (1968), 183.
- (8) 小林・大泉, 電気加工学会誌, 8-16 (1975), 20.
- (9) 元木・猪飼, 電気加工学会誌, 10-19 (1977), 24.
- (10) 真柄・弥富・小林, 電気加工学会誌, 24-48 (1991), 45.