323 単発放電による微細軸瞬時成形プロセスの解明

Rapid Formation process of Thinner Electrode Through a Single Discharge

○非 武沢 英樹 (埼玉大学), 正 毛利 尚武 (東京大学),
 非 伊藤 義郎 (長岡技術科学大学), 正 堀尾 健一郎 (埼玉大学)
 Hideki Takezawa, Saitama University, 255 Shimo-okubo, Saitama
 Naotake Mohri, The University of Tokyo
 Ito Yoshiro, Nagaoka University of Technology
 Horio Kenichiro, Saitama University

In single discharge machining of a 0.1mm tungsten electrode with 30 to 50A discharge current and several hundreds of microseconds duration, a needle of 20 to 40 μ m in diameter has been made instantaneously. To understand this phenomenon, a stroboscopic imaging system with a Q-switched Nd:YAG laser is used to observe the dynamical change of the electrode during and after the discharge pulse. In the oil, the electrode shape could not be observed. The gap during discharge can not be observed due to dark, round image of a bubble formed by the discharge. The laser beam is thought to be reflected and/or refracted at the bubble's surface. Some approaches has been tried so as to without generating a bubble. An effective method is putting a thin layer of oil film on the workpiece. As a result of observation of the gap region, the formation of a needle-shaped electrode with a single discharge occurs in the interval from 100 to 350 μ s after the discharge stops.

Key words : a single discharge, a thin electrode, electrode wear, YAG laser,

1. はじめに

直径0.1mm程度のタングステン細線電極を用いた単発放電により,加工後の電極先端に図1に示すような微細な軸が瞬時に成形できることを見いだしてきた¹⁾。これまでに,成形電気条件や電極材料および相手材料の組み合わせの影響,加工液による影響を考察して,成形メカニズムについていくつかのモデルを検討してきた。しかしながら,電極の微細化が単発放電中のいつの時点で起こっているのか明確でないために電極先端が微細化するメカニズム,特に電極先端に作用する力を特定できないでいる。そこで,単発放電中および放電直後の極間現象を直接観察することにより,電極先端が微細化するタイミングの特定および成形プロセスの解明を目指した実験を行った。放電中の極間の観察には,これまでX線やセリウムを背光として用いた方法^{2) 3)}が報告されているが,今回はYAGレーザーを背光としたイメージング法を用いた⁴⁾。油中及び工作物上に油膜を塗布した単発放電における極間現象の観察結果および単発放電の入力エネルギーと電極消耗量の関係について述べる。

2. 実験装置と加工条件

極間を観察した装置の概略を図2に示す。放電回路は,直流電源をFETでスイッチングして極間に電圧を印加する回路を自作した。FETの駆動信号には,ファンクションジェネレータ(F/G)からの1 μ s信号を入力した。今回の実験では放電開始の極間距離の設定を極力小さくしたため(数 μ m),電圧印加とほぼ同時に放電が開始した。よって,F/Gから出力されるパルス幅が放電パルス幅と概ね一致する。観察実験では,パルス幅を400 μ sと固定した。表1に単発放電条件を示す。この条件で,電極先端が微細化することを予備実験で確かめている。背光に用いたYAGレーザーは,波長532nmの第2高調波を用いて,ICCDカメラの直前に532nmの波長だけを通過するバンドパスフィルターを設置した。レーザーの発光と放電の発生およびカメラの露光タイミングをDelay Generator (Stanford Research Systems: DG535)で同期を取り,放電開始後の所望するタイミングで極間の撮影を行った。用いたYAGレーザーの特性を表2に示す。本装置では,

Fig.1 Formed electrode with the tungsten wire by a single discharge

ICCDカメラからの画像メモリを保存する時間が必要なことに加えてYAGレーザーの発光周期の制限により,1回の単発放電において放電中あるいは放電直後の観察は1画面だけである。そのため,撮影タイミングを変更して同一電気条件での実験を繰り返し行った。

3. 極間の観察と成形メカニズムの推察

3-1. 油中単発放電の極間観察

観察装置のガラス層に放電加工油を満たして単発放電を行い,放電中の極間現象の観察を行った。使用した電極は直径0.1mmのタングステン,工作物にはカッターの刃を用いた。1回の単発放電における観察では,3枚の撮影を1セットとした。①加工前の状態,②放電中あるいは放電後の任意の時間の極間現象,③放電後2分程度経過した状態の3画像である。油中単発放電における,放電開始後50 μ sの極間の状態を観察した例を図3に示す。中央の写真に見られるように気泡に遮られて電極先端形状を観察することができなかった。これは,レーザー光が気泡の表面で反射,屈折して気泡中に入射することができないためと考える。そこで,気泡中にレーザー光を入射する工夫,あるいは気泡の発生を防ぐ工夫を検討したところ,工作物表面に油膜を塗布した単発放電でも電極先端が微細化することがわかった。

Table 1 The single discharge machining conditions

Peak current	ie = 30A
Open voltage	ui = 100V
Polarity	Electrode(-)
Pulse duration	400 μ s

Table 2 The specifications of the Nd:YAG laser

Repetition rate	10 Hz
Energy	480 mJ
Pulse width	5 ~ 7 ns
Jitter	$\pm$ 0.5ns

Fig.2 Schematic diagram of an experimental device

3-2. 油中単発放電の極間観察

油膜塗布法による単発放電の極間現象の観察を行った。使用した電極は直径0.1mmのタングステン、工作物には炭素鋼を用いた。放電開始後10 μ sから放電終了後400 μ sまで、数十 μ s間隔で観察を繰り返した。観察は前節と同様、1回の実験において3つの撮影を行った。油膜塗布法では、気泡の発生はなかったが、放電開始直後に工作物表面の油膜の噴き出しが観察された。放電開始後300 μ s以後は、油の噴き出しが納まり電極先端形状が観察できるようになった。放電終了直前（放電開始後400 μ s）の電極先端形状を観察したところ、電極先端は丸い形状であった。そのため、放電終了後の極間観察を続けた。図4に、放電開始後475 μ s（放電終了後75 μ s）の極間観察写真を示す。中央の写真に見られるように、この時点においても電極先端形状は丸い形状をしている。図5には、放電開始後535 μ s（放電終了後135 μ s）の観察写真を示す。中央の電極先端形状は、図4中央の電極先端形状と比較して先端が細くなっている。放電終了後400 μ sまでの一連の観察により、電極先端が微細化するタイミングは放電終了後100 μ sから350 μ sの間であることがわかった。

さらに、図4の放電開始後475 μ sと放電終了2分後の電極先端位置に注目すると、放電終了2分後の先端の方が上方に位置する。これより、電極先端は放電終了後も消耗を続けながら先端が微細化したことがわかる。よって、微細軸は溶融物が引きのばされて細長くなったのではないと考えられる。成形した微細軸の断面観写真を図6に示す。写真A部に示す太った外側の箇所は溶融再凝固層であった。一方、最先端部を拡大して観察したところ、A部に示す溶融再凝固層とは異なり、数 μ m程度の大きさの細かな結晶粒が観察できた。以上の観察結果より、微細軸成形プロセスを推察すると、先端に形成された溶融部が軸根元側に移動することにより溶け残った電極の芯が露出することで成形すると考えられる。

(1) Before machining (2) 50 μ s after the discharge starts (3) 2min after discharge

Fig.3 The photographs of the discharge phenomena (in the oil)

(1) Before machining (2) 475 μ s after the discharge starts (3) 2min after discharge

Fig.4 The photographs of the discharge phenomena (with the oil film)

(1) Before machining (2) 535 μ s after the discharge starts (3) 2min after discharge

Fig.5 The photographs of the discharge phenomena (with the oil film)

4. 放電入力エネルギーと電極消耗量

前節で示したように、微細軸が成形されるタイミングは放電終了後100 μ sから350 μ sの間である。電極の消耗量は同一条件であってもかなりばらつくが、1回の単発放電実験での最終消耗長さと、それ以前の計測時点における瞬時消耗長さとの差はほぼ一定している。各測定タイミング（放電終了直後から放電終了後350 μ sまで）における消耗長さと、形状変化が収まった最終的な消耗長さとの差を図7にまとめる。図中の各点はそれぞれ別の単発放電実験から得られた値を示している。

ところで、放電終了後は極間には電圧は印可されてなく電流も流れていない。図7は、外部からエネルギーの入力がないにもかかわらず電極の消耗が進行していることを示している。一方、同一条件による気中放電での（一）極側の消耗量は、油中の消耗量の1/10程度になる。さらに、細線突合わせ単発放電により電極消耗量を測定したところ、両極の消耗量の合計は620 μ mであった。放電による入力エネルギーは0.38Jであるのに対して、直径0.1mmのタングステンを620 μ m分だけ常温から蒸発させるのに必要なエネルギーは0.52Jである。放電の入力エネルギーが全て材料の消耗に使われたと仮定しても、それを上回る量の材料が消耗していることになる。これらのことは、比熱や蒸発潜熱などの物性値が高温高圧下では大きく異なるか、あるいは油がある場合は放電終了後に何らかの反応が進行しているなどの理由が考えられ、今後の課題として残る。

5. まとめ

単発放電による微細軸瞬時成形の成形タイミングの特定を目指してYAGレーザーを背光に用いたイメージングシステムにより極間現象の観察を行った。実験では、放電終了後100～350 μ sの間で微細軸が成形された。極間観察と微細軸の断面観察の結果より、微細軸成形のプロセスは、溶融部が軸根元側に移動することで溶け残った電極の芯が露出することで成形すると考えられる。細線電極の単発放電における消耗量は、放電の入力エネルギー以上に消耗している計算となった。この結果は、計算に用いた物性値の影響、または極間での反応などが考えられる。

謝辞 本研究の一部には、平成13年度文部省科学研究費（基盤研究(A)(1)11305053）を用いました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 武沢英樹ほか：単発放電による微細電極の瞬時成形（第1報）、精密工学会誌、67,8(2001)1299.
- 2) 藤本良三ほか：電極消耗現象の観測、電気加工学会誌、6,11(1972)48.
- 3) 池田光知：単発放電により細線に発生した気泡の挙動について、電気加工学会誌、6,11(1972)12.
- 4) Kiyoku S., et al., "Effects of Laser Pulse Shape on Jet-like Plasma Formation in Laser Ablation of Metals under Atmosphere at High Fluence" Proceedings of LPM 2000, Proc. of SPIE (2000)102.

Fig.6 SEM photographs on cross section of the formed electrode

Fig.7 The change of the electrode wear length