放電電極消耗を利用した極小径工具半球形状の成形

水谷勝己*, 江頭 快**, 村田一夫*, 伊東正則***

Fabrication of Hemispherical Tool Tip of Ultra Small Diameter via Electrode Wear Phenomenon in EDM

Katsumi MIZUTANI, Kai EGASHIRA, Kazuo MURATA and Masanori ITOH

Abstract

In this paper, we clarify EDM conditions for shaping a hemispherical tool tip (ball end) via the electrode wear phenomenon. Electrodischarge drilling in brass wire with a rotating tool of tungsten or cemented carbide using an RC circuit and an oil-type working fluid was carried out under various conditions of parameters such as polarity, open-circuit voltage, capacitance, tool feed speed and tool feed. The results obtained are as follows. (1) Rough machining, where the tool is the anode and the wire is the cathode, followed by fine machining, where the tool is the cathode and the wire is the anode, enables the fabrication of hemispherical tool tips of 10 μm and 20 μm diameters with a shape error of 3%. (2) When ball-end shapes can be fabricated in rough machining, the experimental relation $v h^p = c$ (v : tool feed speed, h : tool feed, p and c : characteristic constants) is found. (3) Estimative v - h relations for fabricating ball-end shapes of various diameters can be derived from the v - h relation experimentally obtained for a certain diameter and the geometrical relation obtained on the basis of the assumption that these shapes are realized when a hemispherical cavity is produced in the wire.

Key words: EDM, ultra-small-diameter tool, ball end, electrode wear phenomenon, tungsten, cemented carbide

1. 緒 言

マイクロ機械構造の加工は半導体製造技術を応用したフォトファブリケーションやLIGAプロセスなどによって行われる¹⁾。しかし、他方では切削や研削の機械的加工法によって行うことも試みられている^{2)~7)}。それらの狙いは、切削や研削の三次元形状創成に対する自由度が高いことを生

かし、加工形状の微小化を追求することによって集積化が進む電子機械や光学機械分野などからの期待に応えようとするものであると推察される。

筆者らも同様な考えのもとに直径が20 μm の極小径ボールエンドミルを作製し、黄銅の加工を行った⁸⁾。そのボールエンドミルは棒状の素材からワイヤ放電研削(WEDG)⁹⁾などによって成形するもので、所定径の円柱にすること、その先端を半球にすること、半球先端に刃を付けることから成っている(Fig.1)。このうちの先端半球形状の成形は放電の電極消耗を利用したものであり、形状が電極の移動軌跡として定められる他の部分とは異なり複雑で未解明の点が多く存在している。

* 近畿大学生物理工学部 (〒649-6493 和歌山県那賀郡打田町西三谷 930)

** 京都工芸繊維大学工芸学部 (〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町)

*** 近畿大学大学院生物理工学研究科 (〒649-6493 和歌山県那賀郡打田町西三谷 930)

Fig.1 Tool fabrication process

Table 1 Properties of tool materials used here

	Tungsten	Cemented carbide
Grain size μm	-	0.6
Thermal conductivity $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	174	65
Melting point $^{\circ}\text{C}$	3680	1495(Co) 2900(WC)
Density g/cm^3	19.3	14.05

そこで、本研究では放電電極消耗を利用した先端の半球形状の成形に焦点を定め、良好な半球形状成形の条件を検討することとした。

2. 実験方法

実験に供した工具材料はタングステンおよび超硬合金(コバルトの含有量は約 15%)である。それらの主な特性を Table 1 に示す。また、加工機には微細放電加工機 (MG-ED72, 松下電器産業(株)製)を用いた。微細放電加工機の WEDG によって工具を所定直径の軸に成形し (Fig.1(a), (b)), 次に、それを電極として黄銅ワイヤ(直径 $100\mu\text{m}$)に穴加工を行うことにより工具先端を消耗させ半球を形成させる (Fig.1(c))。穴加工の条件は Table 2 のごとくである。

3. 実験結果と考察

3.1 電極消耗に及ぼす極性の影響

まず、直径が $20\mu\text{m}$ のタングステン工具に対し、

Table 2 EDM conditions for rounding tool tip

Electrodischarge circuit	RC circuit
Wire material	Brass
Tool material	Tungsten, Cemented carbide
Tool diameter	$10\text{--}40\mu\text{m}$
Rotation speed of tool material	3000rpm
Polarity	Tool(+) Wire(-), Tool(-) Wire(+)
Open-circuit voltage	60V
Capacitance	Stray capacitance, 220pF , 3300pF
Tool feed speed	$< 200\mu\text{m}/\text{s}$
Dielectric working fluid	Oil (Mitsui EDS)

Fig.2 Tool tip wear after EDM where tool is (a) anode and (b) cathode

コンデンサ容量を 3300pF 、工具送り速度を $200\mu\text{m}/\text{s}$ 、送り量を $40\mu\text{m}$ で、工具とワイヤの極性を変えて穴加工することにより、極性の影響を調べた。結果の一例を Fig.2 に示す。工具の極性を正とした方がよく消耗して半球形状に近いものが得られたが、その表面は工具極性を負にしたものに比べて相当粗いものであった。そのため、工具を陽極としコンデンサ容量を小さくしての荒加

工、および、工具を陰極とした仕上げ加工の二段階で行うこととした。

3.2 半球形状を得るための加工条件

本節では工具を陽極とした荒加工において半球形状を得るための加工条件を調査する。今の場合、加工条件として細かく設定可能なものは工具送り速度 v と送り量 h であり、それらを変化させた。工具径 $d=20\mu\text{m}$ のタングステンに対し 220pF のコンデンサ容量のもとで、 $v=35\mu\text{m/s}$ とし h を変えたときの工具形状を Fig.3 に示す。工具電極先端部の形状は h の小さいときに扁平で、 h が大きくなると角部がより多く消耗するため半球に近づくが、 h を過度に大きくすると肩部がより多く消耗した先尖りとなるものであった。同様に、 h を一定として v を変化させた場合においても調査を行い、得られた工具形状を扁平、半球、先尖りの三つのタイプに分類してそれらの v - h 上での分布を求めた。結果を Fig.4 に示す。半球状を得た h または v の範囲は狭い。そこで、タングステン、超硬合金の両材料について半球形状を示した時の v と h の関係を調べたところ Fig.5 のごとく求められた。これらの図から、 v が大きいときには、 v が小さいときに比べて小さい h で、すなわち工具長さをあまり減少させずに半球状に出来ることがわかる。しかし、 v が大きいときには半球状を得る曲線の傾き $|\Delta v / \Delta h|$ も大きいことより正確な h の設定が必要とされる。

さらに、Fig.5 から、次式で近似される半球状を呈する v と h の実験的關係が得られた。

Fig.4 Distribution of three kinds of tool tips in v - h relations

Fig.3 Tool tips after EDM at various tool feeds h

$$vh^p = c \quad (1)$$

ここで、 p と c は定数である。今の条件の下では、 p はタングステンに対しては 0.822、超硬合金に対しては 0.530 と求められた。タングステンに比べて融点や熱伝導率が低い超硬合金では、データ点が図の右側に位置し、同じ v に対して大きな h 、すなわち大きな工具消耗を示すものとなっている。

Fig.5 Relationship between tool feed speed and tool feed for hemispherical tool tip

Fig.6 Relative linear wear of tool to wire at various tool feed speeds

このように、電極の消耗が半球形状形成の v - h 関係に影響を与えていると考え、電極消耗長さ比 (工具(+))の消耗長さ/黄銅ワイヤ(-)の消耗長さ)を調べた。これを工具送り速度 v との関係で Fig.6 に示す。ここでのワイヤの消耗長さは、加工穴の深さとして加工後の工具放電部分長さ (例えば Fig.2 の l) と放電ギャップ ($2\mu\text{m}$ とした) の和として求めた。また、図中の矢印を付けたデータ点は半球状を得たときのもので、他は、扁平、先尖りのものである。さらに、Fig.6 にはタングステンに対する計算結果も併せて示しているが、これについては後述する。同図から明らかのように v の増加につれて相対的に工具の消耗が減少している。この原因として、山崎らが軸穴同時マイクロの放電加工で指摘しているように¹⁰⁾、速い送り速度による放電ギャップの狭小と温度上昇、加工油からのカーボンの分解と陽極への付着が陽極の消耗を抑えているものとみられる。したがって、式(1)の p , c の値は電極消耗に影響を与える条件の変化によっては変る可能性がある。

3.3 仕上げ加工後の半球形状精度

粗加工で工具先端を半球形状に成形した後、極性を工具-, ワイヤ+に反転し、浮遊容量にして仕上げ加工を行った。工具の形状を極力変化させないようにするため工具送り速度は $v = 0.5\mu\text{m/s}$ と低速にしている。仕上げ加工された直径 $10\mu\text{m}$ および $20\mu\text{m}$ のタングステン工具先端を Fig.7 に示す。それぞれの拡大図を円テンプレートと比較することで求めた形状誤差は、 $0.3\mu\text{m}$, 3% (直径 $10\mu\text{m}$ に対して), $0.6\mu\text{m}$, 3% (直径 $20\mu\text{m}$ に対

(a) $d=10\mu\text{m}$, $v=0.5\mu\text{m/s}$ and $h=15\mu\text{m}$ (b) $d=20\mu\text{m}$, $v=0.5\mu\text{m/s}$ and $h=22.5\mu\text{m}$

Fig.7 Tool tips after finish machining

(a) start of discharge (b) flattened tip (c) hemisphere

Fig.8 Schematic illustration showing rounding process of tool tip

して)であった。

4. 半球形状形成過程の定式化

工具先端形状が扁平から半球へと変化する過程は Fig.8 に模式的に示すごとく、①角部がより多く消耗する、②両極の対面形状が做う、ことに支配され、③消耗の少ない陰極が半球状のくぼみとなる送り量 h のときに工具先端が半球状になると想定される。すなわち、工具先端が半球となった状態では、工具直径を d 、放電ギャップを g 、陰極に対する陽極の体積消耗率を γ として、陰極の消耗体積 A は、

$$A = \pi (d + 2g)^3 / 12$$

陽極の消耗体積 B は、

$$B = \pi d^2 (h - g) / 4 - \pi d^3 / 12$$

また、体積消耗率 γ ($=B/A$) は、

$$\gamma = \frac{d^2}{(d+2g)^3} [3(h-g)-d] \quad (2)$$

で表されるため、 γ が定まれば、 h は概ね求められる。この γ は Fig.6 に示されるごとく v の増加につれ減少するものであろう。ここでは、 γ と v の関係を実験的に求めることはせず、半球形状を得るときの v - h の関係を用いた場合に、 γ がどのように表現されるのかを示す。式(1)とそれを得たときの値、 $d=d_0$, $p=p_0$, $c=c_0$, $g=g_0$ を用いると式(2)の γ は v の関数として以下のごとく表される。

$$\gamma = \frac{d_0^2}{(d_0+2g_0)^3} [3(c_0/v)^{1/p_0} - (d_0+3g_0)] \quad (3)$$

この妥当性の定量的検討のため、式(3)の γ と式(2)を用いて h 、さらには両電極の電極消耗長さ (陽極: $h \cdot g_0$ / 陰極: $d_0/2 + g_0$) を計算し、それらの比を実験で得られたものと比較した。 $d_0 = 20\mu\text{m}$ のタングステン工具について、 $p_0 = 0.822$, $c_0 = 565.87$, $g_0 = 2\mu\text{m}$ とした場合の電極消耗長さ比の計算値を Fig.6 に併記する。計算値と半球形状を得たときの実験値とを比較すると、送り速度の小さいところで若干の差が存在するもののほぼ一致している。そのもとで、式(3)から求められる電極消耗に及ぼす p_0 の影響の概略は、 $g_0 = 0\mu\text{m}$, γ は 1 より十分大きいとすることにより、

$$v\gamma^{p_0} \approx c_0 (d_0/3)^{-p_0}$$

となる。すなわち、 p_0 が大きくなれば、消耗率 (陽極消耗) の速度依存性は小さく、また、消耗し難くなる。

以上の検証は同一の工具径についてである。式(2)、式(3)を用いれば、異なる径についての v - h 関係を次のように求めることが出来る。

$$v(h-a)^{p_0} = bc_0 \quad (4)$$

ここで、 a と b は以下のごとくである。

$$a = \frac{1}{3}(d+3g) + \frac{1}{3} \left(\frac{d+2g}{d_0+2g_0} \right)^3 \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 (d_0+3g_0)$$

Fig.9 Tool feed speed at which hemispherical tool tip can be obtained ($h=40\mu\text{m}$)

$$b = \left(\frac{d+2g}{d_0+2g_0} \right)^{3p_0} \left(\frac{d_0}{d} \right)^{2p_0}$$

この妥当性検証のため、工具送り量 h を $40\mu\text{m}$ の一定とし工具径 d を変えて半球形状を得るときの送り速度 v を求めた。Fig.9 にタングステン工具の実験と計算の両場合についての v と d の関係を示す。いずれの場合においても半球形状を得るときの v は d とともに増加している。そして、実験値に近い計算値は、 d が $10\mu\text{m}$ のときは $g \approx 3\mu\text{m}$, d が $20\mu\text{m}$ や $30\mu\text{m}$ のときは $g \approx 2\mu\text{m}$ の場合に得られ、3.2 節で述べた速い送り速度による放電ギャップの減少に対応するものとなっている。一方、 d が $40\mu\text{m}$ では v の実験値は計算値より大きなものであった。これは、 $d=40\mu\text{m}$ になるとワイヤ曲率 (線径 $100\mu\text{m}$) の影響を無視できず、両極の初期対向面を平面对平面と考えた場合よりも工具を余分に送り込む必要があり、その量を補正する v の増加を必要とした事が原因となっていると考えられる。

以上を総合すると式(4)で示される本定式化は行った実験の範囲では有効であるとみなされる。

5. まとめ

放電の電極消耗現象の利用によるタングステンや超硬合金の極小径工具先端の半球形状形成条件を、RC 放電回路、油加工液、工具回転の微細放電加工において検討し以下の結果を得た。

(1) 工具を陽極、黄銅ワイヤを陰極とした粗加工お

よび逆の極性でコンデンサ容量を浮遊容量とした仕上げ加工によって、直径が $10\mu\text{m}$ から $30\mu\text{m}$ の工具先端に形状誤差 3% 程度の半球を形成した。

- (2) 粗加工において半球形状を得る時の工具送り量 h と工具送り速度 v の間に次の実験的な関係が存在した。

$$vh^p = c$$

これは、ワイヤ陰極に対する工具の消耗が v の増加につれ減少することの反映であり、超硬合金ではタングステンに比べて小さな p となっている。

- (3) 種々の工具径に対しての半球形状工具先端成形の v - h 関係は、その実現は消耗の少ない陰極が半球状になるときであるとして幾何学的に定められる関係および一つの工具径に対する上記の実験的關係を用いて推定できる。

謝辞

本研究の実験には門前 圭氏 (近畿大学学生, 現在、ユニアデックス(株)) の協力を得た。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、藤田博之：マイクロ・ナノマシン技術入門，工業調査会 151 (2003)
- 2) 和田紀彦，正木 健：微細ダイヤモンド工具を用いたマイクロ研削法の開発 (第2報) —マイクロシリンドリカルレンズ加工への適用—，精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 51 (2003)

- 3) 澤田 潔，河合知彦，蛇原健三，酒井田康宏：空気軸受層流化の研究—切削加工によるサブミクロンピッチ格子の製作—，精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 357 (2003)
- 4) 仙波卓弥，吉嶺 裕，高橋幸博：マイクロ研削用・微小ダイヤモンド電鑄工具に対するツルーイングとドレッシング技術の開発，砥粒加工学会学術講演会講演論文集 165 (2004)
- 5) 小林裕一，柴田順二，鈴木 亨，森田伸也，石川惣一，大森 整，林 偉民：マイクロレンズアレイ金型の超精密切削加工 (第1報) —斜軸切削加工法による試み—，精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 177 (2004)
- 6) 後藤隆司，渡辺健志，小向日工，後藤 勇，神 雅彦，村川正夫：マイクロエンドミル加工に関する基礎的研究，精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 219 (2004)
- 7) 山崎 実，鈴木岳美，谷村俊之，大橋修平，国枝正典：マイクロ放電加工による微細工具の開発，精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 588 (2003)
- 8) 江頭 快，水谷勝己：放電成形された極小径ボールエンドミルによる切削加工，精密工学会誌，69, 10, 1449 (2003)
- 9) 増沢隆久：微細放電加工，精密工学会誌，57, 6, 963 (1991)
- 10) 山崎 実，森 紀年，鈴木岳美，国枝正典：軸穴同時マイクロ放電加工法の研究，精密工学会誌，69, 7, 944 (2003)

(2005 年 7 月 11 日受付)