研 究

ピーリング工具を用いた微細放電加工

－ ピーリング工具の提案と実加工の試み －

李 珠瓊*, 後藤啓光**, 谷 貴幸**
武沢英樹†, 毛利尚武*, 増沢隆久††

Micro-Electrical Discharge Machining with a Peeling Tool

－ Study on the characteristics of peeling tool －

Lee Ju Kyung*, Hiromitsu GOTOH**, Takayuki TANI**
Hideki TAKEZAWA†, Naotake MOHRI* and Takahisa MASUZAWA††

Abstract

While micro electrical discharge machining is gaining greater importance in industry and research circles, there remain persistent difficulties with the handling of the microtool. In this study, we propose the “peeling tool” method to overcome tool handling difficulties. This new method is based on separately coating a micro pin or micro wire electrode with a low melting temperature (LMT) alloy before machining in order to form a thick shank for easy holding. The coated pin electrode is then held in a conventional collet chuck. As machining progresses, the LMT alloy coat is easily melted and the micro pin or the micro wire is peeled effectively for microhole drilling. We discuss the production of peeling tools and their application to microhole machining.

Key words: Micro-EDM, Microhole, Micro pin, Peeling tool

1. 緒論

放電加工法は非接触加工であるため、被加工物の硬度にかかわらず高精度な加工を行うことが出来る。そのため、近年は微細加工分野において大きな期待がもたれている。

微細創成加工においては切刃を有する微細軸工具が必要であるが、多くの場合、これらの微細工具は工作機械の主軸に把持して用いられる。この際には、主軸チャックが把持する工具直径は一般的に直径 0.5mm 程度が限界である。微細放電加工の場合は 0.1mm 程度のワイヤを把持して微小穴を開けるダイレクトドライブ方式²⁾もあるがむし

ろ例外的というべきである。

一般的には工具切刃部より直径の大きなシャンク部を有する段付き工具が用いられ、切削の場合はこの段付き工具の製作は工具を取り付ける以前に行われる（外段取り）のが一般的である。放電加工の場合は直径の大きな電極を保持した後に機上にて微細軸放電成形が行われる場合が多い。その代表は WEDG 工程³⁾である。その他に、微小ワイヤ工具をパイプに挿入した後、チャックで把持して平面や穴を対向工具とした逆放電法⁴⁾やスリット中心走査加工⁵⁾などが提案されている。また、微細軸瞬時成形法⁶⁾やタンデム方式⁷⁾などもある。

これらの手法においては、本来の工具機能に適したタングステンなどの材料に対して、適当な直径から機上での除去加工によって微細工具形状を創成する必要がある。このために、軸成形においては効率の著しく低い加工処理になっている。さらには、微細な軸を直接把持するチャック直径には限界がある。本研究では、マイクロ加工用の微

* 東京大学工学部（東京都文京区本郷 7-3-1）

** 筑波技術大（茨城県つくば市天久保 4-3-15）

† 工学院大学（東京都八王子市犬目町 139）

†† 増沢マイクロ加工技術コンサルティング（相模原市相模大野 3-11-17）

細軸（ワイヤ）を除去が容易な材料で被覆した複合工具を作製し、後工程で外周部を除去して工具部を露出して得られるピーリング工具による加工を行う一連の工程を提案する。本報告では上記の方法の実行過程を検討し、その効果について述べる。

2. ピーリング工具の構想

本章ではピーリング工具の構想について述べる。「ピーリング工具」は、微小直径工具を異種材料で被覆した複合構造の工具である。

ピーリング工具の構造を Fig.1 に示す。ピーリング工具はマイクロ加工に用いられる微小直径の切り刃部（コア）とこれを取り巻く把持部（クラッド）から構成される複合被覆工具である。この被覆工具を加工機主軸に把持した後、クラッド部分を機上で除去して所望の長さのコア材料を露出させ、マイクロ工具として利用する。その際、用いられる切り刃部の材料には、放電加工の場合は、高融点あるいは高熱伝導率のタングステン、モリブデン、銅 などを利用する。一方、被覆部には低融点合金、金属圧粉体などを用いる。

ピーリング複合工具の製作工程では鋳造、電鋳、蒸着、引抜き工程などが適用される。一方、その工具の先端の所望する長さを露出するための加工法には、放電加工、レーザ加工、中高温液体への浸漬などがある。

本研究で提案するピーリング複合工具のクラッド部分は把持を容易にする他に本来の実加工直前まではマイクロ工具（コア部分）を保護する役割を果たす。

3. ピーリング工具による微細加工の試行

前章に述べたピーリング工具の効果を実験によって以下に確認する。プロセス全体は、ピーリ

Fig.1 Structure of peeling tool

ング複合工具の製作工程とピーリング工程、ピーリング工具による微細放電加工工程とからなる。

3.1 異種材被覆工具の作製

第1工程として、微細工具をコアとし、その周囲をクラッド材料で包埋する工程について述べる。本試行では被覆法として低融点合金による鋳造法を用いる。クラッド材料としての市販低融点合金のうち入手可能な材料で最も融点が高いu-alloy47（融点47℃）を用いた。用いた低融点合金の主な成分と物性値⁸⁾を Table 1 に示す。

Table 1 physical properties and main components on Low melting temperature Alloy

Material properties				
Material			u-alloy47	
Melting point (°C)			47	
specific heat (kJ/kg·K)			0.147	
heat conductivity (W/m·K)			7.98	
Main components				
Bi (45%)	Pb (20%)	In (20%)	Sn (10%)	Cd (5%)

片持ち構造金型による試行

先ず、アルミニウム材料による鋳造用金型を製作した。この金型はコア線材の位置基準としての溝を有する割型構造になっている。Fig.2 に示すように試作1号金型は、直径0.5mm および0.1mmのコア線材を直径3mmのパイプ内でクラッド材料を包埋する設計になっている。最初は、コア材料として直径0.5mm および0.1mmのタングステンワイヤを用いた。

Fig.2 Structure of mold dies for peeling tool

鋳造工程においては、割型的一方に、予め心材（コア）を溝に沿って位置あわせして固定した後、両型を合わせて金型を垂直に立て約50℃に予熱した。次に、金型のパイプ部に約50℃に昇温溶融

したクラッド材料をスポイトを用いて注入した。冷却後に両型を開いてピーリング複合工具を取り出す。

(a) Bottom view of the peeling tool
(core diameter: 0.5mm and 0.1)

(b) EDS analysis (core diameter: 0.1mm)

Fig.3 SEM image of the peeling tool and EDS analysis

このような構造の金型を用いてコア材料として直径 0.5mm および 0.1mm の線材の被覆を試みた。それぞれの直径に合わせて溝の直径を 0.5mm および 0.1mm とした。得られた複合工具の円柱底面から見た SEM 像および EDS 分析結果を Fig.3 に示す。

コアとなるタングステンワイヤの外周部を低融点合金が確かに被覆していることがわかる。しかもこの場合、隙間は観察されなかった。

3.2 浸漬除去法を用いたピーリングプロセス

本節では次段の工程として上記被覆工具に所望の長さのコア材料を露出させるピーリング工程について述べる。

本研究で作製したピーリング工具の外周部には低融点合金を利用しているため、容易に除去可能である。まず、被覆材料であるクラッド材料の融点が水の沸点よりも低いことを利用して、数十℃に昇温した水に被覆工具を必要長さだけ浸漬してクラッド材料を水中に溶解滴下させた。

さらにまた、クラッド部分をより滑らかに滴下除去してコア部分を露出するために、超音波洗浄機を利用した。超音波洗浄機の加工槽に温水を浸して溶解したクラッド材料の除去処理を行った。

これら方法により容易にピーリングが実施された。昇温した水に浸漬してコアを約 4mm 露出する際の所要時間は 1 分程度であり、超音波洗浄機を用いた場合の所要時間は 30 秒程度であった。Fig.4 は超音波洗浄機を利用して浸漬除去したピーリング工具を示す。

Fig.4 Immersion removal method using an ultrasonic cleaning instrument

次に、今回の試行実験においては最終段で放電穴開け加工を行うため、放電加工法を用いたピーリングを試みた。

3.3 放電加工法を用いたピーリングプロセス

3.3.1 段付加工

ピーリング複合工具はハンドリングの都合上、

コア工具の先端部を観察するに必要な直径までクラッド外周部の一部を除去して直径を段階的に縮小する場合がある. Fig.5 に示すように直径 0.1mm (d) のタングステンをコアとした直径 3.0mm (D) の複合工具に対して, 予め直径 1mm の穴を穿った厚さ 0.1mm ステンレス板(SUS 304)に対して油中放電加工を行った.

Fig.5 Jogging process of the peeling tool

加工条件は無負荷電圧 120V, ピーク電流 10A, 放電電流パルス幅 4 μ s, デューティファクター50%, 電極極性 (+)である. 加工に 8 分 30 秒を要した. 加工された部位は直径 0.8mm 長さ 2.0mm であった. 加工後の穴直径は 1.12mm(H)で約 120 μ m 程度拡大した.

3.3.2 ピーリング加工

次に Fig.6 に示すように先端部が細くなった上記段付き複合工具を電極として厚さ 0.1mm のステンレス板に対して直接に穴加工を行った. 加工条件は無負荷電圧 120V, ピーク電流 1A, 放電電流パルス幅 4 μ s, デューティファクター5%, 電極極性 (-)である. 電極下降量を 1.0mm に設定した.

この結果, クラッド部分は非常に消耗が大きく, コア部分に対応する小さい穴が加工された. 加工時間は約 1 分 30 秒を要した. コアの先端部は 0.3mm 消耗し, 加工された穴直径は 0.16mm 程度 (H_1)であった.

Fig.7 にはこのピーリングプロセスにおける電極降下量を加工時間に対してプロットして示す.

このピーリングプロセスは, 直径 0.1mm のタングステンのコアと消耗率の極端に異なる低融点金属との複合電極による加工であり, 加工の当初は, プレーットの加工およびタングステンの消耗加工が加工速度をほとんど律則している. タングステンコア部分が対向するステンレス板を貫通した後は, プレーットの厚さは 0.1mm 程度であるから, 低融点合金の消耗が電極降下速度を決めていると考えられる.

Fig.6 Peeling process of the peel tool

Fig.7 Relationship between the electrode displacement and machining time during peeling process

Fig.8(a)は段付加工後の電極の SEM 像であり, Fig.8(b)はピーリング加工を経て露出したコアを示す. 露出したコアの先端部近傍には表面に若干クラッド材料が付着し, 放電痕も観察される. しかしながらプレート貫通後に露出したコアの円柱部側面にはほとんど放電痕が見られない.

ここに述べた複合工具のピーリング工程では, 対向するプレートへも同時に穴加工がなされる. この場合, プレート表面のクラッド対向面は数 μ m 程度除去される. 触針式表面粗さ計 (東京精密社製) を用いてクラッド直径 1mm の加工面に対して約 0.8mm 間を走査し, 測定を行った. 見掛けの表面粗さは 3 μ m Ra 程度であった. 加工物表面の性状を確保するためには, 予め加工物上面に極く薄い保護板を載せるなどの対策が必要となる. また, 先に述べたように, 消耗クラッド材料の加工粉を介した 2 次放電によると見られる数十 μ m 程度の穴の拡大が観察された. さらに, ピーリングと穴開け加工の双方に最適な条件が一致するとは限らない.

従って精密な穴加工を実現するには, 改めて, 上記ピーリング工程を経て得られた微細軸工具を用いた微細穴放電加工が必要である.

(a) SEM image of the joggled part

The extension image of core surface after the peeling process

(b) SEM image of the core part after peeling (core diameter: 0.1mm)

Fig.8 Operation of the peeling machining

3. 4 ピーリング工具を用いた微細穴加工の試み

微細工具電極は直径 3mm の複合工具から放電ピーリング工程によって得られた長さ 1.0mm, 直径 0.1mm のタングステン電極によって厚さ 0.1mm のステンレス板 (SUS304) に対する穴開け加工を実施した. その概略図を Fig.9 に示す.

Fig.9 Hole machining process with the peeling tool

加工条件は無負荷電圧 120V, ピーク電流 1A, 放電電流パルス幅 2μs, デューティファクター 50%, 電極極性 (+)である. 貫通加工に 1 分 20 秒を要した. 測定した加工穴直径は 0.11mm (H_2) であり, 複合工具のコア部分は 0.45mm 程度 ($\Delta\ell$) 消耗した. Fig.10 は微細穴開け加工の適用および加工後の工具の先端部の写真である.

最後に, 直径 0.05mm のピーリングワイヤによる穴あけ放電加工の結果について述べる.

この場合, 極細線ワイヤであること, しかもボ

ビンに巻かれた市販のワイヤを用いているために, これまでの片持ち構造金型では直芯が得られない.

そこで, Fig.11 に示すように水平に張った細線ワイヤの両端に 10N 程度の張力を付与して保持する機構を採用した. 複合工具の円柱底面を SEM 観察および EDS 分析を実行した結果タングステン直径 0.05mm の場合も隙間は観察されなかった.

得られたピーリング工具の先端部を Fig.12 に示す. クラッド部分の直径は 1mm である. ピーリング加工後, コア先端は 40μm 程度消耗する.

(a) Front view of the machined hole

An amount of consumption after hole machining

(b) Tool tip after hole machining

Fig.10 Application of the peeled electrode to micro hole machining

Fig.11 Structure of a mold die for a thinner peeling tool

油中放電加によって板厚 0.1mm のステンレス板に穿った穴の SEM 像を Fig.13 に示す. 加工条件は直径 0.1mm の場合と同じである. 加工した穴の直径は 70μm, 加工時間は 37 秒である.

Fig.12 SEM image of the peeled core of 0.05mm

Fig.13 Result of microhole machining

4. 結論

本研究では、物性値が異なる異種材被覆工具の外周部を把持し、容易に除去可能な外周部を除去して、工具となる切刃部分を所望の長さ露出（ピーリング）して、加工を行う「ピーリング工具」を提案した。

被覆材料として低融点合金を採用し、微細工具の周囲を鋳造被覆した。得た複合工具の段付加工、ピーリング加工、穴開け加工の各工程を実施した結果、提案するピーリング工具は微細加工に極めて容易に適用できることが判明した。

各工程における加工時間は条件の最適化により、さらに短縮すると思われる。

本試行においては、用いたクラッド材料の融点が極めて低いために作業は容易であるが、分解蒸発成分の安全性を別途考慮する必要がある、無鉛ハンダなど、より安全な材料を検討する必要がある。

さらに、本試行においては、提案するプロセスの有効性を確認するためであるから、型精度には大きな注意を払ってはいない。特に最終段の穴あけ加工において軸を回転しないのであれば、軸位置の計測が加工位置精度を決定する。直径が0.1mm程度以下の細線をコアとする場合は、クラッドの中心軸との位置合わせに細心の注意を要する。ここに提案したピーリング工具を用いるならば、放電微細加工のみならず、微細電解加工や微細機械加工など、従来工具把持に困難を来した微細工具への展開が容易となる。

参考文献

- 1) 増沢隆久：やさしいマイクロ加工技術，日刊工業新聞社
- 2) 毛利尚武，森田博充，齋藤長男：電極ダイレクトドライブ方式による細穴放電加工機の開発，精密工学会誌，Vol.58.No.12(1992)，pp.2063-2068
- 3) T.Masuzawa, M.Fujino, K.Kobayashi, T.Suzuki：Wire Electro-Discharge Grinding for Micro-Machining, Annals of the CIRP, 34/1(1985), pp.431-434
- 4) 山崎実，鈴木岳美，森紀年，国枝正典：加工穴を利用下微細放電加工法の研究，精密工学会誌，Vol.72, No.5(2006)，pp. 657-661
- 5) N.Mohri, T.Tani：Micro-pin Electrodes Formation by Micro-Scanning EDM-Process, Annals of the CIRP. Vol.55, No. 1(2006)，pp. 175-178
- 6) 武沢英樹，毛利尚武，古谷克司：単発放電による微細電極の瞬時成形（第1報）-先端微細化現象と成形電極の応用-，精密工学会誌，Vol.67, No.8(2006)，pp.1299
- 7) 南久，増井清徳，塚原秀和，萩野秀樹：亜鉛電極による高能率微細放電加工，第5回生産加工・工作機械部門講演論文集(2004)，pp297-298
- 8) 武沢英樹，小久保博高，毛利尚武，堀尾健一郎：低融点合金を用いた単発放電に関する研究，Vol.42 No.99(2008)，pp5-11
- 9) 増沢隆久：マイクロ放電加工，精密工学会誌，Vol. 68, No. 2(2002)，pp.180

(2008 年 7 月 10 日受付)