極低濃度電解液を用いた環境対応電解加工による 超硬合金微細軸の形成

澁谷直城*, 夏 恒*

Fabrication of Tungsten Carbide Alloy Micro-Pin with Environment-Responsive ECM using Ultralow-Concentration Electrolyte

Naoki SHIBUYA and Wataru NATSU

Abstract

In this paper, we describe a method of obtaining tungsten carbide alloy pins with diameters from 14 to 60 μm in 11 to 12 min by electrochemical machining (ECM) with an ultralow-concentration electrolyte. To improve the machining accuracy, workpiece rotation and ultrasonic washing during machining were adopted. It was found that thinner pins with better axial symmetry were obtained with such rotation and ultrasonic washing. Furthermore, the effect of electrolyte concentration was investigated using NaNO_3 aqueous solution. It was found that the adhesion of by-products to pins was reduced using NaNO_3 aqueous solution over a certain concentration and that the machining speed was improved by increasing current through an increase in electric conductivity.

Key words : ECM, micro-pin, tungsten carbide alloy, mineral water, ultrasonic washing, electrolyte concentration

1. 緒言

通信機器や医療機器といった精密機器の小型化、高性能化に伴い、それに対応する高精度な微細加工技術の発展が求められている。これらの精密機械部品の中でも、微細軸は微細工具や微細金型部品などへの応用範囲が広い。ここで例えば放電加工などの工具消耗を伴う加工法で高アスペクト比の微細穴を加工する場合に工具として用いる微細軸においては、より電極径が小さくアスペクト比が高いことが求められる¹⁾。微細軸の加工法としては、旋削加工、放電加工、超音波加工、研削加工などの方法が提案されている²⁻⁷⁾。各加工法では次のような長所と短所が挙げられる。旋削加工は高い加工速度が得られるが、工作物の材

料が真鍮等の快削材に限定され、超硬合金の加工は困難である²⁾。放電加工では、WEDG法³⁾、加工穴を利用した放電微細軸成形法⁴⁾、回転する加工軸を工具方向へ送り加工を行う走査放電加工⁵⁾などが提案されている。これらの放電加工技術は、導電性材料であれば硬度によらず高精度の加工が可能であるが、工具消耗による加工精度の低下を招き、加工速度も遅い。また、超音波加工は遊離砥粒を用いた機械的加工法であるため非導電性材料の加工が可能であり、滑らかな加工面が得られるが加工速度が遅い。また、工作物に砥粒を工具で押し付けて加工を行うため、工具摩耗が生じる⁶⁾。研削加工では、工作物を両端で把持し二頭の砥石を対向させて加工を行うことにより直径 1 μm までの微細軸の製作を行った例が報告されている⁷⁾が、これ以外の手法では加工力が

*東京農工大学工学・大学院工学府機械システム工学専攻
(〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16)

大きいため高アスペクト比の微細軸の成形は困難である。

一方、電解加工の加工原理は化学反応による電解作用であるため、熱的加工や機械的加工が持つ問題を克服でき、工具消耗が生じず、金属材料であれば硬度によらず加工が可能である。また、電解加工で超硬合金を加工する場合、電解液として NaOH 水溶液を用いることで、超硬合金の成分である WC の除去が可能になる⁸⁾。微細軸の形成においても、実際に酸性やアルカリ性の電解液を用いることで短時間に微細軸が得られている^{9) 10)}。しかし、酸性やアルカリ性の電解液は劇物であり、作業員への危険、および廃液による環境問題を伴う。これらの問題を解決するために、筆者らはこれまでに電解加工により超硬合金の微細加工を行うための電解液として、中性電解液の使用を試みた¹¹⁾。その結果、超硬合金の微細軸の形成において、電解液として NaNO_3 水溶液を用いることで、短時間にアスペクト比の高い微細軸が得られることを報告している。また、更なる環境負荷低減を目的として、低コストで容易に入手可能なミネラルウォーターの使用も試みられている¹²⁾。しかし、加工形状の再現性が低く、また、局所的な電流の集中により均一な軸径を持つ微細軸の製作は困難である。この原因として加工時に工作物に付着する極間生成物が電流の流れを妨げていることが考えられた。そこで本報では、加工中の加工軸の回転と超音波の付与による極間生成物の付着の抑制が加工形状に与える影響を調査した。また、電解液の濃度が生成物の付着や加工形状に与える影響を検討するため、ミネラルウォーターと同様の中性電解液であり、濃度の変更が容易に可能な NaNO_3 水溶液を使用し、加工特性を調査した。

2. 実験装置

微細軸形成に用いた実験装置の概略を Fig.1 に示す。超硬軸を回転させる主軸は三軸変位テーブルに固定され、工具として使用されているステンレス板に対して XYZ 方向への位置決めが可能である。さらに、本加工では超音波洗浄機を加工槽として利用する。加工中の工作物の回転と超音波

の付与は、極間生成物と工作物に付着した生成物の除去効果が期待できる。また、工作物の回転は軸の周上を均一に加工し、超硬軸の真円度を向上させるためにも効果的であると考えられる。ここで、軸先端のみを加工するため、Fig.2 に示すように工具は工作物と対向し、工具下面と工作物先端が同一面上にあるように配置した。実験に使用したミネラルウォーターの物性値を Table 1 に、含有成分を Table 2 に示す。

Fig.1 Set-up for fabricating a micro-pin

Fig.2 Position of workpiece and tool

Table 1 Physical properties of mineral water used in experiments

Electric conductivity [S/m]	0.014
pH	7
Water hardness	33.1

Table 2 Compositions of mineral water (mg/100mL)

Na	1.25
Ca	0.85
K	0.10
Mg	0.29

3. 工作物の回転と超音波洗浄による生成物付着の抑制

本実験では電解液としてミネラルウォーターおよび NaNO_3 水溶液を用いた超合金の電解加工を試みており, その加工原理は以下に示す通りである. 電解液を NaCl と NaOH の混合液として超合金を直流電流で加工する場合, Co は(1)式により CoCl_2 として溶出する⁸⁾. また, WC はまず(2)式, および(3)式により陽極酸化されて絶縁性の WO_3 となる. そして, (4)式に示す化学反応で WO_3 が NaOH と反応して Na_2WO_4 となって溶出する. これらの反応は同様に Na イオンを含むミネラルウォーターおよび NaNO_3 を用いた場合も同様であると考えられる. 本研究では, NaOH を含まない電解液を用い, 生成された WO_3 の軸への付着を軸の回転と超音波洗浄の物理的作用によって抑制する.

Table 3 に示す条件の下, 生成物の付着の抑制条件を変えて定電流で加工を行った. 抑制条件は, 軸の回転と超音波洗浄の両者がない場合と, 両者を併用した場合の2つとし, 軸の回転と超音波洗浄による生成物の付着の抑制効果を調査した. なお, 本実験で使用した超合金の Co の含有率は10~13%である. Fig.3 に加工結果を示す. Fig.3 より, どちらの条件の場合でも同様に白色の生成物が付着していることがわかる. この生成物が前述した WO_3 であると考えられる. ただし, 両者の比較より軸の回転と超音波を付与することで, 生成物の付着が抑制できていることがわかる.

Table 3 Machining conditions

Electrolyte	Mineral water
Machining current [mA]	50
Machining time [min]	8
Rotation frequency [rpm]	2850
Electrodes distance [μm]	350
Workpiece material	ϕ 300 μm WC alloy
Tool material	t2 SUS304

(a) Without rotation and ultrasonic washing

(b) With rotation and ultrasonic washing

Fig.3 By-products adhesion to pin surface under different conditions

生成物の付着抑制による加工精度の向上

4. 1 工作物の回転と超音波洗浄による加工精度の向上

前章より, 軸の回転と超音波洗浄による生成物の付着の抑制を確認することができた. 本章では, 軸の回転と超音波洗浄が, 加工形状に与える影響について示す. Table 3 に示す条件の下, 次に示す生成物の付着の抑制条件を変えて定電流で加工を行った. 抑制条件は, 軸の回転と超音波洗浄なし, 回転のみ, 超音波洗浄のみ, 両者を併用した4つとした. なお電解液温度は室温 (約 20℃) とした.

生成物の付着の抑制条件を変えたそれぞれの加工結果を Fig.4(a)~(d)に示す. なお, Fig.4 に示す軸は加工後に超音波洗浄によって生成物を除去した状態である. Fig.4 より, (a)の回転と超音波洗浄なし場合と(b)の軸の回転のみの場合で, 工具角部と対向した部分の軸径が不均一になっていることがわかる. これは, 極間生成物や軸への生成物の付着を十分に抑制できなかったため, 電流が工具角部に集中し, 局部的に加工が進行したためであると考えられる. また, Fig.4(a)では軸が回転していないにもかかわらず, 加工軸の中心軸に対し, 工具と対向していない面も加工されている. これは極間距離が比較的大きい当該の部

分にも加工電流が流れたためであると考えられる。一方、Fig.4(c)の超音波洗浄のみの場合は、軸径がほぼ均一になっている。これは、超音波洗浄により生成物の付着が抑制され、電流が局部的に集中しなかったためであると考えられる。しかし、Fig.4(c)の軸にはわずかに偏心が見られる。これは工具電極との極間距離が狭い部分で、より大きな電流が流れ、加工量が大きくなったためであると考えられる。最後に、Fig.4(d)の軸の回転と超音波洗浄の両者を併用した場合は、軸径もほぼ均一であり、偏心も見られない。これは、軸の回転による偏心の抑制と超音波洗浄による生成物付着の抑制の両者の相乗効果によるものであると考えられる。以上より、定電流、加工時間も同じなので、各条件の加工量が同一と考えられるが、軸の回転や超音波洗浄によって、加工形状が異なることがわかる。

Fig.4 Micro-pin fabricated under different conditions

4. 2 電解液の温度変化による超音波洗浄の除去効果

超音波洗浄は洗浄物と洗浄液の組み合わせにより最適洗浄温度が異なり、液温をある程度まで上昇させて使用した方が高い効果が得られる¹³⁾。また、電解液（洗浄液）の温度は一般的には20～50℃の間で設定されることが多く、電解液温度の変化に伴い電気伝導率も変化し、加工速度に影響を与える可能性がある。そこで、Table 3 に示す条件の下、加工開始時の電解液温度を変えて定電流で加工を行った。加工中は常に軸の回転と超

音波洗浄を併用した。なお、電解液温度は超音波洗浄機に内蔵された加熱器で上昇させ、設定温度に達した時点で加工を開始した。また、加工中の超音波洗浄により電解液温度は上昇するが、いずれの設定温度で加工した場合も5℃前後の温度上昇であった。

加工時の初期温度変化による軸径の変化をFig.5に示す。横軸は軸先端部からの距離を示している。Fig.5より、電解液温度が高いほど、全体の軸径が小さくなっていることがわかる。これは、温度が高い場合、超音波洗浄効果の向上、また、電気伝導率の増加により、軸において工具と対向した部分の加工量が増加したためであると考えられる。ここで、電解液温度が50℃の場合、工具角部と対向した部分の軸径が不均一になっていることがわかる。これは電解液の温度が高すぎて、超音波洗浄効果が低下したためであると考えられる。超音波洗浄の洗浄液に水を用いた場合、約50℃で最も高い洗浄効果が得られる¹³⁾。洗浄効果に影響を与える超音波の音圧は、以下に記す理由により、液温により変化する最適な液温範囲がある。理由1：液温の上昇により溶存気体の量が減少し、超音波の減衰が小さくなる。理由2：液温の上昇により水蒸気が増え、超音波の減衰が大きくなる。理由3：洗浄液の温度を高くすることで表面張力が低下し、洗浄効果が上がる。本実験では加工中の超音波洗浄による温度上昇により、最適温度を超えてしまった可能性がある。これにより、極間生成物や軸への付着生成物の抑制効果が低下し、工具角部へ電流が集中したため、

Fig.5 Relationship between temperature and pin diameter

局部的に加工が進行したと考えられる。以上より、加工精度、加工速度を考慮した場合、本実験条件では 40°C が電解液の最適温度であると考えられる。

4. 微細軸の形成

加工中に生成物の付着の抑制を行わない場合、局部的に加工が進行した軸径のより小さい部分で軸が破断し、軸先端部が脱落する¹²⁾。そのため、脱落後の軸先端部はテーパ状になり、均一な軸径を持つ微細軸の形成は困難である。しかし、4 章の結果より軸の回転と超音波洗浄による生成物の付着の抑制を行えば、局所的な加工を抑制し軸全体を均一に加工できるため、さらなる軸径の微細化が期待できる。そこで、Table 3 に示す条件の下、加工開始時の電解液温度を 20°C とし定電流で加工を行った。

例として本実験で得られた最も微細な軸を Fig.6 に、加工時間による軸径の変化を Fig.7 に示す。なお、軸径は軸先端部を測定した。Fig.6 より、局所的な加工の進行は見られず微細軸が形成できていることがわかる。加工後の軸先端部はテーパ状になっているが、このテーパは局所的な加工で軸先端部が脱落した場合に比べ小さく、軸の回転と超音波洗浄を用いない場合に比べ十分に

Fig.6 Micro-pin fabricated by machining time of 11.8 min

Fig.7 Relationship between machining time and pin diameter

均一な軸径が得られている。また、Fig.7 より加工時間が長くなるほど軸径が小さくなっていることが確認できる。本実験では加工開始時の温度で評価を行っているため、加工中の電解液温度の変化により加工速度や加工形状が変化する可能性がある。そのため、加工中の温度を制御することで、さらに微細な軸の形成も期待できる。

5. 電解液濃度と生成物の付着の関係

前章より、ミネラルウォーターを用いた超硬合金の微細軸形成において、加工中の軸の回転と超音波の付与により微細軸の形成が可能であることがわかった。また、3, 4 章において述べたように、加工中の軸の回転と超音波洗浄により、加工精度が向上することがわかったが、軸に付着する生成物を完全に除去することはできていない。さらに、電解液成分、および電解液濃度が生成物の付着に及ぼす影響は明らかになっておらず、両者を変更することで生成物の付着状況が変化する可能性がある。また、Fig.7 より、軸径約 $15\mu\text{m}$ の微細軸を得るには 10 分以上の加工時間を要する。この加工速度が遅い原因は、電解液として用いるミネラルウォーターの電気伝導率が低く、供給電流が制限されてしまうことにある。電解液の電気伝導率は電解液の濃度によって変化する。そこで本章では、ミネラルウォーターによる電解加工の問題点を明らかにし、対策を講じるため、ミネラルウォーターと同様の中性電解液である NaNO_3 水溶液を使用し、電解液濃度が生成物の付着状況、および加工速度に与える影響を調査した。

電解液濃度を 0.1%, 1.0%, 10% と変化させ、定電流で加工を行った。最大電圧 120V の定電流電源を使用した際に、ミネラルウォーターを用いた場合の供給可能電流が 100mA である。これに対し、 NaNO_3 水溶液を用いた場合はミネラルウォーターに比べ電気伝導率が高く、十分に高い電流を供給可能であるため、4 倍の値である 400mA に設定した。その他の加工条件は Table 3 と同様であり、加工中の生成物の付着の抑制については、ミネラルウォーターを用いた場合と同様の効果が得られるよう、軸の回転と超音波洗浄を併用した。各濃度により加工した軸の観察結果を Fig.8 に

示す。なお、Fig.8 に示した軸は加工形状の観察のために同様の軸径を持つ軸を抜粋したため、加工時間は異なっている。Fig.8(b), (d), (f)は加工後に超音波洗浄により生成物を除去した状態である。また、加工時間による軸径の変化を Fig.9 に、軸径の測定箇所を Fig.8 中の破線で示す。ただし、濃度 0.1%の場合は加工途中で軸が破断するため、軸径の変化は示していない。Fig.8 より、濃度が低いほど軸の表面に白色の生成物が付着しているが、濃度 10%の場合には生成物の付着は見られないことがわかる。また、濃度が高いほど均一な軸径を持つ軸が得られていることがわ

Fig.8 Micro-pin fabricated under different concentration and machining time

Fig.9 Relationship between machining time and pin diameter under different concentration

かる。電解加工では突部や角部に電流が集中しやすく、濃度が低い場合、軸先端部や工具角部と対向した軸根元への電流の集中がさらに支配的になるためであると考えられる。しかし、Fig.4(d)に示したミネラルウォータを用いた場合に得られた軸と Fig.8(b)に示す濃度 0.1%で得られた軸を比較すると、濃度 0.1%を用いた場合はミネラルウォータと比較的濃度の近い電解液であるにもかかわらず、均一な軸径が得られていない。また、Fig.8(d)に示す濃度 1.0%でもテーパ状の軸が得られていることから、軸形状や生成物の付着には、軸の回転や超音波洗浄のみが影響を及ぼすのではなく、電解液の違いにより、電解作用や生成物が異なると考えられる。Fig.9 からは、加工時間が長くなるほど軸径が小さくなっていることが確認できる。また、電解液濃度 10%の場合、加工時間約 3 分で軸径約 10μm の軸が得られており、加工速度も飛躍的に向上できていることがわかる。

6. 結言

作業上の安全性および廃液による環境負荷低減を目的として、電解液にミネラルウォータおよび NaNO_3 水溶液を利用した電解加工を行い、超硬合金の微細軸の形成において以下の知見が得られた。

- 加工中に軸の回転、超音波洗浄を行うことで、極間生成物、軸に付着する生成物を抑制することができ、軸径が均一で偏心の小さい軸の形成が可能である。
- 電解液温度は超音波洗浄、および電気伝導率に影響を与え、加工速度および加工形状に対しての最適温度が存在する。
- 生成物の付着の低減を促進させ、加工時間を長くすることで、局所的な加工による軸先端部の脱落を防止し、軸径の微細化が可能である。
- 電解液として NaNO_3 水溶液を用いた場合、電解液濃度が高いほど生成物の付着が抑制される。低濃度で加工を行う場合は、生成物の付着を抑制するための新たな対策が必要である。

- ・ 電解液として NaNO_3 水溶液を用いた場合、電解液濃度の増加に伴う電気伝導率の増加により供給可能電流が増加し、均一な軸径を持つ微細軸を短時間で形成可能である。

謝辞

本研究は科研費 (23360064) の助成を受けたものである。

参考文献

- 山下弘之, 西川隆敏: 精密加工に関する研究 (第 8 報) 高アスペクト比の微細穴加工法の検討, 広島県立西部工業技術センター研究報告, No.44(2001), pp.16-19.
- 李和樹, 取出優, 山田高三, 荒木秀一郎: 旋削加工による微細軸の創成に関する研究, 砥粒加工学会誌, Vol.51, No.11(2007), pp.657-661.
- T. Masuzawa, M. Fujino, Wire Electro Discharge Grinding for Micro-machining, Annals of the CIRP, Vol.34/1, (1985), pp.431-434.
- M. Yamazaki, T. Suzuki, N. Mori, M. Kunieda: EDM of micro-rods by self-drilled holes, Journal of Materials Processing Technology, Vol.149 (2004), pp.134-138.
- 谷貴幸, 後藤啓光, 李珠瓊, 毛利尚武: 走査放電加工による微細軸形成法, 電気加工学会誌, Vol.43, No.104(2009), pp.187-193.
- 江頭快, 谷口智哉, 西村桂, 土屋八郎, 宮崎眞: 超音波加工による微細軸形状の製作, 砥粒加工学会誌, Vol.50, No.11(2006), pp.649-653.
- 成瀬哲也, 上原嘉宏, 渡邊裕, 片平和俊, 林偉民, 大森整, 三石憲英, 伊藤伸英, 山本幸治: ELID マイクロファブ리케이션におけるマイクロツールの開発 (第 5 報: マイクロツールの高能率加工—その 2—), 砥粒加工学会誌, Vol.50, No.5(2006), pp.285-290.
- T. Masuzawa, M. Kimura, Electrochemical Surface Finishing of Tungsten Carbide Alloy, Annals of the CIRP, Vol.40/1, pp.199-202.
- Y. M. Lim, S. H. Kim, An electrochemical fabrication method for extremely thin cylindrical micropin, International Journal of Machine Tools and Manufacture 41, (2001), pp.2287-2296.
- S. H. Choi, S. H. Ryu, D. K. Choi, C. N. Chu, Fabrication of WC micro-shaft by using electrochemical etching, The International Journal Advanced Manufacturing Technology, (2007), pp.682-687.
- N. Shibuya, Y. Ito, W. Natsu: Research on ECM Conditions for Micro-pin Fabrication of Tungsten Carbide Alloy, International Symposium on Green Manufacturing and Applications 2011, (2011).
- Y. Yang, W. Natsu, W. Zhao: Realization of eco-friendly electrochemical micromachining using mineral water as an electrolyte, Precision Eng., 35,(2011), pp.204-213.
- A.S.Bebchuk et al., All Union Conf.Ultrasonics, Dom Tekhniki, Moscow (1957).

(2011年12月27日受付)