オンザマシン表面改質技術の形彫り放電加工への適用*

田村武夫** 前田大地***

Application of On-the-Machine
Surface Modification Technology to EDM

Takeo TAMURA and Daichi MAEDA

Abstract

As a method of processing cemented carbide, sinking electrical discharge machining (EDM) is generally used. However, typical surface defects, such as cracks, microcraters and recast layers, lead to decreased surface integrity and may result in an inadequate tool life. Currently, the recast layer is removed by polishing. However, this process requires a long machining time, causing a high production cost of metal molds. Therefore, it is desirable to eliminate these surface defects. Thus, an on-the-machine surface modification technology in EDM, for the complete elimination of surface defects, was developed in this study. The surface defects are eliminated using a sinking electrical discharge machine in which surface integrity machining for EDM (SIME process) is introduced after applying a finishing processing. The SIME process is carried out by applying voltage to the constant gap between the electrode and the workpiece in deionized water. It can be considered that a recast layer including cracks is selectively eliminated by the dissolution of cobalt through the electrolytic action during the SIME process. As a result, the surface defects generated by EDM could be completely eliminated by incorporating the SIME process into EDM.

Key words: cemented carbide, EDM, surface defects, surface modification

1. 緒 言

高速度鋼よりも約 2 倍硬い超硬合金は、耐摩耗性や耐熱性に優れている。超硬合金を成形する方法として、一般的に放電加工や研削加工が用いられている。しかしながら、超硬合金を放電加工すると、加工面にはクラック、微小穴および溶融再凝固層などの表面欠陥が発生し、材料の表面健全性を低下¹⁾させ、金型などの早期破損の要因となっている。そのためこれらの表面欠陥はできるだけ除去されることが望ましい。このような背景から最近では、切削加工による超硬合金への直彫り²⁾が進んでいる。これは切込みを小さくしたときに、超硬合金が延性モードになることにもとづいてい

る。

ところで放電加工によって生成された表面欠陥を除去する方法として、酸化現象を用いた表面改質法が提案³⁾されている。この方法は超硬合金の高温酸化現象を利用したもので、欠陥を含む表面層を酸化させることにより、表面は多孔質ではなく離性に優れた層に変化する。その後、酸化層はワイヤブラシなどで簡単に除去することができる。酸化層除去後の加工面は、クラックレスな状態に改質される。次に、ワイヤ放電加工された超硬合金微細穴に形成された表面欠陥を除去する方法として、酸化処理による表面改質と流動研磨とを組み合わせた複合研磨法が開発⁴⁾されている。しかしながら、酸化現象を用いた表面改質法は超硬合金を高温に加熱することが不可欠であり、炭化タンゲステン粒子の粗大化など熱による負の影響も懸念される。

* 電気加工学会全国大会(2012)にて発表

** 新潟大学工学部 (新潟市西区五十嵐 2 の町 8050)

*** (株)日立産機システム

次に、表面欠陥を完全に除去する別のアプローチとして、ワイヤ放電加工によるオンザマシン表面改質技術が提案⁵⁾されている。この方法では、ワイヤ放電加工機上で超硬合金を成形するとともに、表面改質が達成される。ワイヤ放電加工による荒加工、仕上げ加工に引き続き、Surface integrity cut (SI cut) というプロセスを導入することにより、熔融再凝固層に存在するクラックや微小穴などの表面欠陥は除去され、クラックレスな面に改質される。SI cut は、工作物とワイヤとの間に作用する特異な電解を利用している。

そこで本研究では、形彫り放電加工においても、SI cut に近い環境を設定することによって、加工面をクラックや微小穴の存在しないクラックレスな状態に改質することができるものと考えている。ここでは、オンザマシン表面改質技術を形彫り放電加工へ適用するための条件や改質面の評価などについて述べる。

2. 実験方法と表面改質工程

2.1 実験方法

本研究では、市販されている(株)タンガロイ製超硬合金 D20 を用いた。これは JIS 規格 V 種に相当し、その化学組成は、WC90%,Co7%および(TaC+TiC) 3%(wt%)である。主成分である炭化タングステン WC の平均粒径は、約 1.1 μ m である。仕上げ放電加工後、新しいプロセスを導入することによって、表面欠陥は、形彫り放電加工機上で除去される。このプロセスを Surface integrity machining for EDM (以下 SIME と表記する)と呼ぶ。一連の実

Fig. 1 Experimental apparatus

Fig. 2 Circuit diagram for EDM or SIME

験は、三菱電機(株)の形彫り放電加工機 DIAX-EA8 を用いて行った。次に、SIME 中に放電が発生しているかどうかを検出するために、電流波形を測定した。電流センサーにはログスキー型電流センサー (POWER ELECTRONIC MEASUREMENTS 製)CWT(感度 20mV/A)を用い、得られた信号は、デジタル・オシロスコープ(IWATSU 製, DS-8607)を介してパーソナルコンピュータに取り込んだ。次に、SIME 工程では結合材であるコバルトの溶出が予想される。そのため、SIME 面のコバルト量を定性的に評価するために、X 線マイクロアナライザー(島津製作所製, EPMA-8705)による分析も行った。さらに、SIME によって改質された材料の強度を評価するために、抗折力試験を実施した。試験は JIS R 1601 に準拠して、3 点曲げで行った。試験片は、24x8x4mm の直方体形状であり、24x8mm の面に所望の条件で放電加工や SIME を行い、その面を検査面とした。試験機には、(株)島津製作所製 万能試験機 RH-10 型を用いた。試験片にできるだけ衝撃荷重が作用しないように、油圧を調節して荷重増加速度は 15-22N/s の間に収まるように配慮した。

2.2 表面改質工程

Fig.1 は、放電加工と SIME に使用した実験装置を、Fig.2 は回路図をそれぞれ示す。SIME 工程では、加工液に脱イオン水を使用するため、加工機のテーブル上に加工槽を新たに取付けた。今回、SIME は電源や関数発生器などを周辺に配置して、放電加工機の電源とは切り離して行った。しかし、放電加工機の電源をそのまま用いても SIME は実行できる。放電加工または SIME は、スイッチにより切り替えられる。第一段階として、加工槽に放電加工油(日石三菱(株)製ダイヤモンド EDF-K)を

満たし、放電加工を行う。Table 1 は加工条件を示す。荒加工した後、熔融再凝固層の厚さやクラック深さを減少させるために仕上げ放電加工が行われる。放電加工は、荒および仕上げ加工ともに電極(－)で行った。これは、形彫り放電加工ではできるだけ正確に電極の形状を工作物へ転写することが必要であり、電極(－)にすることで電極の消耗が抑えられること⁶⁾と、電解にもとづく SIME の原理に起因している。仕上げ放電加工後、仕上げ電極と工作物は油で汚染されているため、アセトンを用いて脱脂を行った。第二段階では、脱イオン水で満たされた加工槽内で仕上げ電極をそのまま使用して SIME を実施する。SIME 工程において、一回でも放電が発生すれば、加工面には新たに熔融再凝固層が形成され、場合によってはクラックも発生する。ここでは工作物と電極とのギャップは、 $50\mu\text{m}$ と一定に保ち、無負荷電圧は 88V に設定した。その結果、ギャップが大きかったため、SIME 工程において、工作物と電極との間に放電が誘発されることはなかった。しかし、SI cut のギャップである $15\mu\text{m}$ に設定すると、SIME 面に単発放電痕が見られることもあった。SIME 工程の開始時では脱イオン水の導電率は、 $20\mu\text{S}/\text{cm}$ と比較的大きく設定した。これは加工屑の排出性が悪い SIME 工程に配慮したものであり、SIME 中、導電率はほとんど一定であった。電解作用によって、クラックを含む熔融再凝固層はコバルトの溶出や水酸化コバルトとなって選択的に除去されるものと考えている。

3. オンザマシン表面改質機構

Fig.3 はオンザマシン表面改質機構を模式的に示す。これは実際の放電加工断面を走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察した結果にもとづいている。Fig.3(a) に示すように、クラックなどの表面欠陥は熔融再凝固層内に存在している。また、多くの空隙が熔融再凝固層と母材との界面に見られる。したがって、熔融再凝固層の母材への密着性は悪い⁷⁾ものと考えている。クラックは主に熔融再凝固層内に留まり、母材まで進展していない。表面層と空隙は、これらのクラックによってつながっている。SIME 工程において、熔融再凝固層は直接的に電解作用を受けるものの、脱イオン水は熔融再凝固層と母

Table 1 Conditions of EDM and SIME

	Roughing	Finishing	SIME
Power supply	DC transistor circuit		
Open circuit voltage [V]	88	88	88
Discharge current [A]	5	1	<0.2
Pulse duration [μs]	2	2	2
Off time [μs]	32	32	32
Electrode	Copper		
Gap [μm]			50

Fig. 3 On-the-machine surface modification mechanism in SIME

材の界面にも供給される。Fig.3(b)に示すように、陽極である工作物では、選択的にコバルトはイオンとなって溶出し、場合によっては OH^- イオンと反応してコバルト水酸化物になる。その結果、界面にあったコバルトは、結合材としての機能を失うこ

となる。SIME 工程では電極と工作物とは対向しており、SIME によって生ずる加工屑はそのまま工作物に残留することになる。その結果、その後の電解作用は阻害されることとなり、表面改質は不十分な状態となる。この対策として、加工槽近くにノズルを設置し、そこから脱イオン水を加工面に向けて噴射させるとともに、一定時間(たとえば 3 分)間隔で電極を引き上げ、Fig.3(c)に示すように、工作物に形成されつつある加工屑を樹脂製ブラシで強制的に除去することにした。最終的には、SIME 面に凝着している加工屑を除去することによって、加工面には炭化タングステン粒子群が現れる。また、SIME による加工時間が短いと熔融再凝固層が残留し、逆に長いとピットが形成され、コバルト欠乏層が厚くなる。したがって、適正な時間で SIME 工程を終了させることが大切である。

4. 実験結果と考察

4.1 放電加工面と抗折力

Fig.4 は形彫り放電加工面を示す。SEM により加工面を観察し、COMPO 像として表示している。この面は、Table 1 に示した仕上げ条件で加工されたものである。加工面には白い破線で囲んだように数多くのクラックや微小穴が入っている。ほぼ全面にわたってクラックが入っているものの、網目型クラックではない。小さな放電エネルギーで加工したため、一つのクレータの大きさが $15\mu\text{m}$ 程度と小さい。断面観察から、この条件では母材までクラックは進展していないものと判断している。

ぜい性材料である超硬合金の抗折力は、正規分布⁸⁾にはならない。破壊現象は、材料の最も弱いところにてきた損傷が支配的となるため、ここではワイブル分布により抗折力を評価した。Fig.5 はワイブル確率紙に抗折力と破壊確率との関係を示す。○印は納入材、△印は放電加工材の抗折力をそれぞれ示す。納入材は、焼結したままのものを、放電加工材は Table 1 に示した仕上げ条件で加工したものである。同じ条件で 6 回、試験を行っている。たとえば破壊確率 50%の抗折力を比較すると、納入材が 2230MPa であるのに対して、放電加工材は 1150MPa と大きく低下している。納入材の強度を 1 とすると、放電加工材は約 0.52 となり、表面健全

Fig. 4 Surface subjected to EDM

Fig. 5 Relationship between transverse rupture strength and fracture probability due to EDM

Fig. 6 Crack propagating into base metal

性が大きく損なわれる。抗折力試験の際に、Fig.4 に示したクラックや微小穴が破壊の起点として作用し、強度を大きく低下させているものと考えている。

Table 1 に示した放電加工条件では、荒加工にお

いても放電エネルギーは小さく設定されている。そこで、より大きなエネルギーで荒加工した場合の加工断面を観察した。Fig.6 は、放電加工された断面の COMPO 像を示す。加工条件として、放電電流は 20A、放電持続時間は 5 μ s に設定した。電極の極性は(－)である。表面層は、熔融再凝固層で覆われている。この層は明らかに WC 粒子群からなる母材とは異なる。放電クラックは熔融再凝固層を越えて母材にまで進展している。熔融再凝固層直下には、白線で囲んだ領域に粒内クラックが観察される。SIME も SI cut 同様に、熔融再凝固層を選択的に除去し加工面をクラックレスに改質する工程である。したがって、Fig.6 に示す母材にまでクラックが進展している加工面に SIME を適用しても表面改質、すなわちクラックレス化は達成できないものと考ええる。

4.2 SIME 面

2.2 節で述べたように、仕上げ放電加工後、加工液を放電加工油から脱イオン水に切り替えて SIME が行われる。Fig.7 は、仕上げ放電加工後に SIME を実施して得られた面を示す。Table 1 の SIME 条件で、10 分 SIME 工程を実施し、加工面に付着した加工屑を除去することで得られた SEM 像である。明らかに、加工面は完全に炭化タングステン粒子群に覆われている。Fig.4 に示した微小穴やクラックなどの表面欠陥は、観察されずにクラックレスな面に改質されていることがわかる。また、一部ではあるが白い破線で囲まれた領域に、加工屑が残留している。このような加工屑の残留は、SIME 時間の延長や加工屑の排出方法を工夫することによって解決できるものと考えている。

4.3 放電加工と SIME 工程における電流波形

Fig.7 に示した SIME 面には、クラックや微小穴などの表面欠陥は存在していなかった。しかし、SIME 中に 1 回でも放電が発生すれば、条件によってそこにはクラックが発生することになる。そこで SIME 工程では、電解のみが作用していることを立証するために、電流波形を調べることにした。比較するために、はじめに放電加工時に得られた電流波形を Fig.8 に示す。放電電流は 5A で、放電持続時間は 10 μ s であった。図からわかるように、放電加工時には電流のピークが観察され、放電が

Fig. 7 Surface obtained by SIME

Fig. 8 Current waveform obtained in EDM

Fig. 9 Current waveform obtained in SIME

頻繁に発生している。

一方、SIME 工程における電流波形を同様に測定した。Fig.9 はその電流波形を示す。Fig.8 と Fig.9 とともに、電流センサーの感度は同じ値に設定されている。ここでは明瞭な電流波形を取得しなかったため、関数発生器で与えるオンタイムは 30 μ s に設定した。図から 1A を超えるような電流は観察されなかった。電流波形から、0.2A 未満の小さな電流がオンタイムの間、規則的に流れていることがわかる。SIME 工程の間、ランダムに電流波形を観察

(a) EDMed surface and SIME surface

(b) Cobalt distribution using EPMA

Fig. 10 Cobalt distribution on a SIME surface

した結果, Fig.9 と同様な波形が得られた. このように, SIME 工程では電解作用のみが起きているものと判断している.

4.4 SIME 面のコバルト分布

Fig.10 は, SIME 面の SEM 像と同じ場所でのコバルト分布をそれぞれ示す. はじめに Table 1 に示す荒加工条件で平面を作製し, 続いて円筒電極を用いて仕上げ放電加工と SIME を実施した. したがって, 加工面には放電加工面と SIME 面が混在している. Fig.10(a)は, 放電加工面と SIME 面の境界を白い破線で示す. SIME 面は放電加工面よりも平坦でなめらかになっている. Fig.10(b)は EPMA を用いて得られたコバルト分布を示す. この図において, 暖色系カラーはその地点においてコバルトが豊富に分布していることを意味する. SIME 面全体にわたって, コバルト量は放電加工面よりも少ないことがわかる. 断面観察から, このコバルト欠乏層の厚さは, 約 $2\mu\text{m}$ 程度と薄いことがわかった. SIME 境

(a) Typical debris generated during SIME

(b) Tungsten distribution in area A by EPMA

Fig. 11 Typical debris and tungsten distribution

界外にコバルト欠乏層が存在することは, 円筒電極から少し離れたところにも電解が作用したことを示している.

4.5 SIME によって生成された加工屑

3 章で予測した表面改質機構を検証するために, SIME 工程で得られる加工屑を調べた. ここではノズルから噴流のみを与え, ブラッシングなしで 6 分間, SIME を行い, 工作物に残留している加工屑を SEM 観察した. Fig.11(a)は, SIME 中に生成された典型的な加工屑を示す. 四角の破線で示すように, 加工屑はブロック状に網目パターンを形成していることがわかる. 図中の破線で囲まれた領域を EPMA によるタングステンの面分析を行った. Fig.11(b)に示すように, 明らかにタングステンが検出されたことから, 加工屑は WC 粒子群で構成されている. なお同時にコバルト分布も調べたが,

領域内においてコバルト量は非常に少なかった。

4.6 SIME 材の抗折力

Fig.5 に示したように、放電加工することによって表面健全性は損なわれ、抗折力は大きく低下した。ところで SIME は表面改質工程であり、Fig.7 に示したように SIME 面はクラックレスな状態に改質される。そこで、SIME によって改質された材料の抗折力を評価した。Fig.12 はワイブル確率紙に抗折力と破壊確率との関係を示す。○印は納入材、◇印は SIME 材の抗折力をそれぞれ示す。たとえば破壊確率 50%の抗折力を比較すると、納入材が 2230MPa であるのに対して、SIME 材は 2060MPa となった。納入材の強度を 1 とすると、SIME 材は 0.92 となり、抗折力は放電加工材の 0.52 から大幅に回復する。しかしながら、Fig.10 で示したように SIME 表面にはコバルト欠乏層が存在する。結合材であるコバルトが脱落することによって、表面層は硬くてもろい状態になっている。このことがクラック感受性を高め、抗折力のわずかな低下につながったものと考えている。このように仕上げ工程に SIME を導入することは、表面健全性の観点から有意義なものであると考える。

5. SIME 工程の金型製作への適用

5.1 金型製作工程

本研究で提案している SIME 工程を簡単な金型製作に適用してみる。Fig.13 は工作物と電極の幾何学的配置を示す。はじめに工作物は放電加工油の中で円錐電極を用いて放電加工された。ここでは Table 1 に示した加工条件をそのまま採用した。荒加工に続く仕上げ放電加工後、加工液は加工槽から排出される。工作物と電極はアセトンを用いてきれいに洗浄した。次に、SIME 工程では、加工槽は脱イオン水で満たされる。工作物(+)と電極(-)との間のギャップは 50 μ m と一定に保たれる。同様に Table 1 の条件で SIME を 10 分間行い、150s 毎にブラッシングを実施し、加工屑の排出を積極的に行った。

5.2 機械的に研磨された放電加工面

Fig.14 は放電加工面を直接研磨したときに得られた仕上げ面を示す。Fig.13 に示した金型の底面を観察し、COMPO 像で示している。ここでは研磨は

遊離砥粒を用いて行った。粒径 3 μ m のダイヤモンドペーストを含むスラリーが工作物と電極との間に供給される。円錐電極は一定の回転数で回っており、研磨時間は 60 分である。図において、破線の楕円領域に炭化タングステン粒子が破壊された粒子割れが観察される。これらのクラックは放電加

Fig. 12 Relationship between transverse rupture strength and fracture probability due to SIME

Fig. 13 Manufacturing of simple die

Fig. 14 Electrical discharge machined surface polished by loose abrasives

工時に形成されたものであり, 金型の寿命低下につながるものと考えている. また, 個々の WC 粒子はかなり平坦であり, 研磨面はほぼ準鏡面状態に仕上げられている. したがって残留クラックを除去するためには, さらに全面にわたって 1-2 μ m, 相似形に掘り込むことが必要になる. このように放電加工面を機械的に直接研磨しても, 研磨面全体をクラックレスにすることは難しい.

5.3 SIME 工程後の金型表面

SIME 後, 金型の側面と底面を SEM 観察し, その様子を Fig.15 に示す. この図において, 側面は上部に, 底面は下部にそれぞれ示す. いずれも SIME 面に付着していた加工屑を除去した後に得られたものである. 側面ならびに底面ともに完全に WC 粒子群によって覆われている. 放電加工面に存在していたクラックや微小穴などの表面欠陥は見られなかった. さらに, 底面の観察から WC の粒子割れは SIME 面には存在していない. この事実から, 放電加工された超硬合金の表面健全性は, 仕上げ放電加工後に SIME 工程を導入することによってほぼ回復するものと考えている.

6. 結 論

ワイヤ放電加工機上で超硬合金を成形後, SI cut という後工程を導入して表面改質を行う技術を, 形彫り放電加工へ適用した結果, 以下の結論が得られた.

- (1) 形彫り放電加工後, 表面改質すなわち SIME 工程を導入することによって, 放電加工によって形成されたクラックなどの表面欠陥は完全に除去される.
- (2) 納入材の抗折力を 1 とすると, 0.52 まで低下した放電加工材の抗折力は, SIME 工程によってクラックレスな加工面に改質されることで 0.92 まで回復する.
- (3) SIME 工程における電解作用の結果, SIME 面のコバルト含有量は, 放電加工面より大きく低下することから, 表面改質機構は, コバルトの溶出にもとづくものである.
- (4) SIME 工程を簡単な金型製作に適用した結果, 金型全体をクラックレスに表面改質することができた.

Fig. 15 Side wall and bottom surface obtained after SIME

参考文献

- 1) C.J.Heuvelman : Summary Report on the CIRP Cooperative Research on Spark-Erosion Machining of Cemented Carbides, Annals of the CIRP, Vol.29, No.2(1980), pp.541-544.
- 2) 島津勝貴: 金型超硬材の直彫りに向けた検討, 型技術, Vol.28, No.6(2013), pp.43-45.
- 3) 田村武夫, 山田 仁: 酸化現象を利用した超硬合金放電加工面の改質—加工変質層除去機構の解明—, 精密工学会誌, Vol.65, No.10(1999), pp.1502-1506.
- 4) 田村武夫, 山谷研一: 超硬合金微細穴の複合研磨に関する研究, 電気加工学会誌, Vol.40, No.95(2006), pp.177-183.
- 5) 田村武夫, 金子倉之介: ワイヤ放電加工におけるオンザマシン表面改質技術の開発, 電気加工学会誌, Vol.46, No.111(2012), pp.14-22.
- 6) 増井清徳, 谷村 毅: 超硬合金の放電加工特性—CIRP 共同研究—, 電気加工学会誌, Vol.11, No.2(1978), pp.126-140.
- 7) B.Lauwers, J.-P.Kruth and W.Eeraerts : Wear Behaviour and Tool Life of Wire-EDM-ed and Ground Carbide Punches, Annals of the CIRP, Vol.54, No.1(2005), pp.163-166.
- 8) 鈴木 壽: 超硬合金と焼結硬質材料, 丸善(1986), pp.154-157.

(2014年4月1日受付)