導電性アルミナ系セラミックスの放電加工特性

顔 炳 華 蔡 徳 昌

台湾国立中央大学機械系

J. Japan Inst. Metals, Vol. 58, No. 12 (1994), pp. 1467-1472

Electrical Discharge Machining Characteristics of Conductive Alumina Based Ceramics

Biing Hwa Yan and Der Chun Tsai

Department of Mechanical Engineering, National Central University, Taiwan, ROC

In order to reveal the electrical discharge machining characteristics of electrical conductive alumina based ceramics, a series of EDM tests are carried out. The following main results are obtained. (1) The surface roughness of ceramics machined with negative polarity is larger than that with positive polarity. (2) When machining ceramics with small current, compared with positive polarity, the material removal rate of negative polarity is larger and the electrode wear ratio is smaller. But when machining with large current, the relation is reversed. (3) When machining with short pulse and negative polarity, the recast layer is thinner and almost no crack is observed because of the impact force caused between the workpiece and electrode is larger than positive polarity. (4) Compared with normal EDM, material removal rate machined with orbital motion of an electrode is higher, but the surface roughness and the electrode wear ratio are worse. But when the orbital distance of an electrode increases, the surface roughness and the electrode wear ratio are improved remarkably.

(Received August 23, 1993)

Keywords: electrical conductive alumina based ceramics, electrical discharge machining, polarity, material removal rate, electrode wear ratio

I. 緒 言

セラミックス材料が高硬度、高耐摩耗、高強度および高耐熱性という長所があるため、非常に苛酷な環境下でも利用できるが、その反面、硬脆性材料に属し、通常の機械的加工法では加工性が悪く、ダイヤモンド工具を用いる以外、ほとんど加工不能といってもよい欠点がある。そのため、機械部品としての応用は加工可能な形状の制約や加工コストの増加が大きな問題となっている。しかし、最近、耐摩耗性、耐食性および耐熱性の機械部品やプラスチック射出成形用型材としてセラミックスの使用が多くなっているため、容易な加工技術の確立が望まれている。

放電加工は高エネルギー密度を利用し、材料の機械的性質にほとんど影響されない加工法であるため、セラミックス材料の加工法として期待されている。しかし、これに関する研究報告⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾はまだ十分とは言えない。そこで本報では、型彫放電加工機を用い、TiCを添加した導電性アルミナ系セラミックスを対象材として異なる極性の放電加工実験を行い、加工速度、加工面あらさ、電極消耗率および表面変質層などの観点からセラミックスの放電加工特性について検討した。また、加工特性の改善に有効であるといわれる電極を揺動しながらの放電加工法⁽⁵⁾⁽⁶⁾をも行い、セラミックスの放電加工特性に対する影響について調べた。

II. 供試材料および実験方法

実験に供した加工材料は12 mm×4 mm×12 mmに仕上げた市販されている30 mass%のTiCを添加した導電性アルミナ系セラミックスである。Table 1にその材料の機械的および物理的性質を示す。また、工具電極は底面寸法3 mm×12 mmに仕上げた電解銅である。実験はトランジスタ制御付コンデンサ放電回路の型彫放電加工機を用いてFig. 1に示すように、被加工材と工具電極を直交させて行った。また、一部の実験では工具電極を被加工物に対し、揺動しながらの放電加工をも行った。なお、加工液は通常のケロシンである。実験条件はTable 2に示す。

Table 1 Physical and mechanical properties of test material.

Melting point (K)	2473
Density (kg/m ³)	3980
Thermal conductivity (W/m·K)	21
Electrical resistivity (10 ⁻² /Ω·m)	10 ²
Tension strength (MPa)	882
Hardness (mHV)	3000

Fig. 1 Schematic orbit motion of electrode.

Table 2 Electrical discharge machining conditions.

Work condition	Work parameter
Workpiece	Ceramics ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{mass}30\% \text{TiC}$)
Electrode	Cu
Workpiece size(mm)	$12^{\text{t}} \times 12^{\text{w}} \times 4^{\text{t}}$
Electrode size(mm)	$40^{\text{t}} \times 12^{\text{w}} \times 3^{\text{t}}$
Polarity	positive and negative
Voltage(V)	90
Peak current(A)	0.2~6
Pulse duration(μs)	5~300
Duty factor	Automatic control
Dielectric	Kerosene
Dielectric flow rate(l/h)	6
Orbit motion mode	Linear motion(0, 0.5, 1.0, 1.5 mm)
Work time(S)	9×10^2

Ⅲ. 実験結果および考察

1. セラミックスの放電加工特性に対する極性の影響

金属材料の放電加工では、工具電極を陽極、被加工物を陰極にする逆極性加工、および工具電極を陰極、被加工物を陽極にする正極性加工は極間に供給するエネルギーの配分が異なる⁽⁷⁾⁽⁸⁾と言われ、放電加工特性の相違が生じる。これに関する

研究がすでいくつか報告された⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾。しかし、金属材料と比べ、融点、熱伝導率および比抵抗率などの物理的性質がかなり異なるセラミックス材料の放電加工では、極性による影響がいまだに不明な点が多い。そこで、まず TiC 添加の導電性アルミナ系セラミックス材料に対し、5~300 μs の異なるパルス幅、3 A の放電電流で放電したとき、正、逆極性加工による表面あらさへの影響について調べた。Fig. 2 は放電加工後の表面あらさの比較を示す。図から、逆極性加工の表面あらさが正極性加工のものよりも大きいことがわかる。また、逆極性加工の表面あらさがパルス幅の増加に伴って急激に悪化する傾向に対し、正極性加工の場合では、パルス幅による影響が比較的小さくなっていることがわかる。

なお、同一放電条件で、正、逆極性放電加工後のセラミックスの表面状態を一例として Fig. 3 に示す。図より逆極性放電加工の表面に粒状の再凝固物が多く付着しているのに対し、正極性加工の方は再凝固物が少なく、比較的平滑な表面となっている。このような原因は主として逆極性放電加工時、陰極にしたセラミックス表面の放電点のエネルギー密度がより高く、十分な加工熱で表面を比較的大きな溶融規模で除去できるが、これに対し、正極性放電加工の場合ではエネルギー密度が比較的に小さいため、融点の高いセラミックスを大規模に溶融できず、表面が比較的平滑な状態となる。また、図に示すように、いずれの極性加工においても、放電加工面上に多くの空孔と亀裂が存在する。特に正極性加工の場合では、パルス幅の増大に伴って亀裂が多くなることも確認された。

一方、異なる放電条件で放電したときの加工速度について調べてみると、Fig. 4(a), (b) に示すように、いずれの極性においても放電電流の増加にしたがって加工速度が大きくなる。また、0.2 A の微小電流の放電加工(a)では、逆極性放電の加工速度が正極性の放電より大きくなっているが、6 A 電流で放電加工(b)すると、逆極性放電加工の方が反対に小さくなる。この理由は次のように考えられる。すなわち、微小電流で放電すると、放電エネルギーが小さく、融点の高いセラミックスをエネルギー密度の低い正極性放電加工で加工すると、材料が微小規模でしか除去できない。そのため、エネルギー密度の高い逆極性放電加工より加工速度が小さくなる。ところが、金属材料と異なり、セラミックスが硬くて脆い材料であるため、放電加

Fig. 2 Effect of polarity on the surface roughness of electrical conductive ceramics.

Fig. 3 Micrographs of work surface of electrical conductive ceramics after machining in different conditions.
($I_p=3$ A, $\tau_p=5\sim300$ μ s)

工のような熱作用による加工法では、表面の除去が熔融だけによるのではなく、急熱・急冷による熱応力で表面亀裂が生じて材料を除去されることも考えられる。6 A のような比較的大きな電流を用いて、かつエネルギー密度の高い逆極性放電加工で加工すると、亀裂による材料除去の比率が大きくなり、加工屑の形状も通常の金属放電加工のように球状ではなく、破片状のものが多くなり、狭い極間からの排除が一層困難となる。そのため、正極性放電加工に比べ、放電が不安定となり、加工速度

の低下をもたらすと思われる。

なお、6 A の電流を用いて放電加工するとき、いずれの極性においても、パルス幅が極小のとき、加工速度がかなり小さいが、パルス幅の増加にしたがって加工速度が急増し、あるパルス幅で最高値となる。しかし、パルス幅がさらに増加すると加工速度がかえって遅くなる。この理由は Singh ら⁽¹²⁾の推論によると、パルス幅が極小のとき、極間に供給されたエネルギーの大部分が絶縁破壊に消耗されたので、実際に材料の熔融に消

Fig. 4 Effect of polarity on workpiece removal rate of electrical conductive ceramics.
(a) $I_p = 0.2 \text{ A}$, (b) $I_p = 6 \text{ A}$

耗されたエネルギー量が少ない。そのため、加工速度がかなり小さい。一方、パルス幅値の増加にしたがい、蒸発と熔融が安定的な平衡状態を保ち、加工速度も増大する傾向となる。したがって、各供給エネルギーにおいて最高の加工速度を得るためには、適当なパルス幅が存在するはずである。勿論、パルス幅が大き過ぎると、熔融層が厚く、また放電点の拡大によるエネルギー密度が低下して十分な爆発力で除去できず、凹凸の激しい再凝固層となり、そのため、加工速度を低下させることも重要な原因と考えられる。

なお、一発の放電エネルギーの大きさがほぼ放電電流とパルス幅の積に比例するので、放電加工面を形成するとき、休止時間と放電電流を一定にしても、パルス幅の増加にしたがって放電エネルギーが増大し、セラミックス表面の亀裂発生 の規模も大きくなり、遂に巨大な破裂が生じ、大きな破片が極間に残留することもしばしばある。そのため、放電加工の進行に悪影響を及ぼす。また、場合によって放電不能な状態となる可能性もある。Fig. 4(b)に逆極性加工の曲線がパルス幅 $200 \mu\text{s}$ 以上の部分を示さなかったのはこの理由によるものである。

一方、極性による電極消耗率の影響に関してはFig. 5(a), (b)に示すように、小電流放電の場合(a)では、逆極性加工の方は電極消耗率が小さいが、6 A の電流で放電すると(b)、正極性加工の方が小さい。また、いずれの極性においても放電パ

Fig. 5 Effect of polarity on relative electrode wear ratio of electrical conductive ceramics.
(a) $I_p = 0.2 \text{ A}$, (b) $I_p = 6 \text{ A}$

ルス幅の増加に伴って電極消耗率が小さくなるが、パルス幅 $\tau_p = 100 \mu\text{s}$ 以上になると、その差がほとんど認められない。

2. セラミックス放電の材料除去機構

前述のように、セラミックス材料の放電加工時、放電加工面上に微細な亀裂と空孔が多く生じることが観察された。このようなことは主としてセラミックスの放電加工面上に数 μs ~ 数百 μs のような極短時間内に数千度の高熱を受け、またすぐに急冷され、熱応力が生じて表面に引張応力、その内部に圧縮応力を生じたためである。これらの微細亀裂が主として再凝固層の表面に生じたが、放電エネルギーの状態によって表面からある程度の深さまでに伝播する。また、場合によって、Fig. 6(a)に示すように、これらの亀裂が連結してミクロ的破壊となることも観察された。すなわち、通常の金属材料の放電と異なり、セラミックスを放電加工した場合、材料の除去機構は放電柱で生じた衝撃力による溶融材の除去だけではなく、蒸発による空孔の生成および亀裂伝播の連結によるミクロ的破壊が材料除去速度を促進させるものと考えられる。しかし、ある放電エネルギー以上になると、亀裂が大き過ぎ、簡単に連結するため、マクロ的破壊となることもしばしばあると思われる。Fig. 6(b)およびFig. 6(c)に示すように、表面の一部が大きな破片として除去され、加工面が悪化し、遂に放電不能な状態と

a)

b)

c)

Fig. 6 Typical fractured surface of electrical conductive ceramics when machining in negative polarity.
($I_p=6$ A, $\tau_p=300$ μ s)

なるのはこの原因によるものと考えられる。

ところが、Fig. 7(a), (b)に示すように、電流 $I_p=3$ A、パルス幅 $\tau_p=20$ μ s の条件を用いて正、逆極性で放電したセラミックス試片の断面状態からわかるように、逆極性放電の場合(b)、再凝固層がほとんどなく、亀裂も見当たらないのに対し、正極性放電の方(a)は再凝固層が厚く残留し、また、その中に微細亀裂が顕著に存在することが確認された。その理由はFig. 8に示す放電時の極間に生じた衝撃力から推測できる。すなわち、小パルスでの逆極性放電の場合、工作物上の放電痕

(a) Positive polarity

(b) Negative polarity

Fig. 7 Effect of polarity on the cross section microstructures of electrical conductive ceramics.
($I_p=3$ A, $\tau_p=20$ μ s)

Fig. 8 Effect of polarity on the impact force.

の大きさが比較的に小さく、エネルギー密度が高いため、大きな衝撃力で薄い溶融層(金属材料に比べ、セラミックスの熱伝

導率がかなり低い(ため、熔融層が薄い)を完全に除去することができのに対し、正極性放電の場合、十分な衝撃力がなく、熔融層の一部が再凝固層として残留すると考えられる。ただし、パルス幅が大きくなるにしたがって逆極性加工の衝撃力が急速に低下するため、その効果が少なくなる。なお、この場合に示した衝撃力が単発放電のときに生じた瞬時圧力ではなく、連続放電しながら、一定のサンプリングタイムで検出した衝撃力の平均値である。Fig. 8 に示すように、高くても 4.5×10^{-2} N しかないが、セラミックスの熱伝導性が非常に悪い(ため、放電痕の直径が大きくても数十 μm しかないことから考えると、そのときの放電柱の爆圧力が数 100 MPa にもなっていることが推測される。一方、前田氏の論文⁽¹³⁾によると、放電加工圧力が金属材料の表面を塑性したり破壊したりするほど小さくなくても、最大値が数 10 kg/mm² があると指摘された。なお、本文では極間に生じた衝撃力の測定法としては、試片を載せたロードセルで検出された電圧をアンプによって拡大してデータレコーダに記録し、校正線図によって換算する。

3. 揺動加工による影響

金属材料の放電加工では、工具電極の揺動による放電加工特性の改善が可能であることが知られている。その理由としては型彫り放電加工のとき、寄せ加工のため、側面の極間距離が増大し、加工屑の排出が改善できる。または電極の揺動によって放電点および加工屑の集中状態を減少できることなどによるものと考えられる。セラミックスは金属材料に比べ電気的抵抗がかなり高い(ため、放電可能な極間距離が比較的小さく、加工屑の排出は困難と思われる。したがって、工具電極の揺動による放電加工特性の改善が期待される。Fig. 9 は電流 $I_p=3$ A、パルス幅 $\tau_p=100$ μs の条件で、工具電極を揺動しながら放電したとき、揺動距離が放電加工特性に及ぼす影響を示す。図中の円形は通常の放電加工(無揺動の放電加工)によって得られた結果を示す。これを基準として比べてみると、揺動距離が 0.5 mm の場合、無揺動の放電加工より加工速度が40%ほど増大したが、表面あらさ、特に電極消耗率がかなり悪化した。しかし、揺動距離の増大に伴い、加工速度の改善効果が少なくな

り、表面あらさおよび電極消耗率の改善が顕著となる。特に揺動距離 1.5 mm の場合では、無揺動の放電加工に比べ、加工速度がほぼ同程度であるが、表面あらさおよび電極消耗率が約半分と改善されたことがわかる。上述のことから、セラミックスの放電加工においては、工具電極を揺動しながらの放電加工法が加工精度の改善にとって非常に有効な手段であることが確認された。

IV. 結 言

導電性アルミナ系セラミックス材料を放電加工するとき、異なる極性の放電による加工特性への影響について調べた。得られた結果は次のようになる。

- (1) 逆極性放電加工後の表面あらさが正極性加工よりも大きくなる。
- (2) 微小電流の放電加工では、逆極性放電の加工速度が正極性加工より大きい(が、大電流で放電すると、逆極性加工の方が反対に小さくなる。また、微小電流で放電する場合、逆極性加工の電極消耗率が小さい(が、大電流で放電すると、正極性加工の方が小さくなる。
- (3) 小パルス幅での逆極性放電加工の場合、極間に生じた衝撃力が大きい(ため、再凝固層が薄く、亀裂も見当たらないの)に対し、正極性加工の再凝固層が厚く残留し、またその中に微細亀裂が顕著に存在することが確認された。
- (4) 通常の放電加工に比べ、工具電極を揺動しながらの放電加工は、加工速度が大きく改善された(が、表面あらさ、特に電極消耗率も増大する。しかし、揺動距離を増大すると、加工速度が若干低下する(が、表面あらさおよび電極消耗率が大幅に改善できる。

文 献

- (1) 斎藤長男：ファインセラミックスの精密加工，工業調査会，(1990)，227.
- (2) 斎藤長男，毛利尚武：ファインセラミックスの放電加工および超音波加工，電気加工技術，Vol. 13，No. 40 (1989)，18.
- (3) 三宅雅也，竹内久雄：放電可能なセラミックス，セラミックス，21 (1986)，719.
- (4) W. König, D. F. Dauw: Annals of the CIRP, 37 (1988), 623.
- (5) 向山芳世監修：型彫・ワイヤ放電加工マニュアル，大河出版，(1989)，154.
- (6) 佐藤敏一：特殊加工，養賢堂出版，(1981)，29.
- (7) 電気加工学会関西支部編：放電加工の理論と技術，養賢堂出版，(1972)，18.
- (8) 元木幹雄，佐藤隆一，橋口清人，徳山赫淇：精密機械，27 (1961)，193.
- (9) 木本保夫，田宮勝恒，平田勝己：日立造船技報，28 (1967)，81.
- (10) 顔 炳華，謝 福田：軽金属，42 (1992)，645.
- (11) 顔 炳華，劉 弘松：軽金属，43 (1993)，227.
- (12) U. P. Singh, P. P. Miller and W. Urquhart: Proceeding of ISEM-9, (1989)，337.
- (13) 前田禎三：精密機械，29 (1963)，432-435.

Fig. 9 Effect of orbit distance on the material removal rate, surface roughness and electrode wear ratio.