セラミックスの放電加工*

中村 守**

EDM of Ceramics / Mamoru NAKAMURA

Key words: bending strength, crater, electroconductive structural ceramics, electro-discharge machining, strength degradation, surface damage, surface roughness, Weibull modulus

1. はじめに

近年、構造材料の性能に対する要求の高度化に対応して、在来の金属材料では対応の困難な過酷な使用環境、使用条件に耐え得る材料として、高性能構造用セラミックスの開発が熱心に行われている。

構造用セラミックスの加工は、一般に、ダイヤモンド砥石による研削により行われているが、複雑形状部材の加工コストは非常に高く、セラミックスの利用拡大を妨げる大きな要因となっている。そのため、簡便な加工法の確立が望まれている。

一方、セラミックスには、一部のほう化物や炭化物のように、金属並みの良好な電気伝導性を有する材料も存在する。また、絶縁体材料に対して一定割合以上の導電性材料を複合化することによっても、かなりの導電性を有する複合焼結体を得ることが可能である。

そして、近年は、構造用材料として優れた特性を有する多くの種類の導電性セラミックスも市販されている。そこで、それらに対して、導電性高硬度材料を比較的簡単に加工できる放電加工法の適用が、ワイヤカットを中心に試みられ、複雑形状の加工に対する適用の面で、研削加工等に比較しての、放電加工の優位性が示され、加工除去速度や加工面粗さ等も報告されている。しかし、形彫り放電加工の報告例は比較的小ない^{1)~9)}。さらに、導電性セラミックスの特性を生かした、放電加工用電極としての利用も試みられている¹⁰⁾。

ところで、セラミックスはぜい性材料であるため、表面損傷が部材強度に大きく影響する。そのため、セラミックスの加工では、表面損傷の影響を除くために鏡面研磨仕上を行うことが多い。しかし、研磨工程はコストが高いだけではなく、前工程での表面損傷の性質や程度と研磨除去量の関係によっては、部材強度が十分に回復しないことも多い。従って、加工による表面損傷の性質や程度を把握することは重要である¹¹⁾。

ここでは、矩形状パルスの電圧を発生させるトランジスタ方式の形彫り放電加工機による、市販されている4種類の導電性セラミックスの放電加工について述べる。そして、各々の材料の加工除去プロセス、加工特性及び加工損傷による被加工材の強度劣化挙動について比較する。さらに、被加工材セラミックスの成分や機械的熱的特性と、加工特性や強度劣化挙動との関係、及び被加工材強度の「ばらつき」についても述べる。

2. 加工プロセスと加工特性

表1に、被加工材として用いた導電性構造用セラミックスの特性を示す。各々の材料に導電性を付与している成分は、反応焼結炭化けい素の場合は遊離けい素、サイアロン-窒化チタン複合焼結体の場合は窒化チタン、ジルコニア-炭化ニオブ複合焼結体の場合は炭化ニオブ、ほう化ジルコニウム基複合焼結体の場合はほう化ジルコニウムである。

図1に、各々の材料の代表的な単発放電痕のSEM像を示す。放電痕の外観は明らかに異なっており、これは材料の除去プロセスの差異、すなわち高温挙動の差に起因していると考えられる。例えば、高温で熔融

* 原稿受付 平成3年3月12日

** 正会員 名古屋工業技術試験所（名古屋市北区平手町1-1）

表1 導電性構造用セラミックスの諸特性

	被加工材導電性セラミックス			
	SiC	sialon/TiN	ZrO ₂ /NbC	ZrB ₂
密度 (g/cm ³)	3.1	4.0	6.5	4.1
曲げ強度 (MPa)	458	855	1292	396
ビッカース硬さ (GPa)	20	14.4	13.8	24.7
破壊じん性 (MN/m ^{3/2})	5	5.4	7.8	4.0
ヤング率 (GPa)	400	339	272	459
ボアソン比	0.17	0.24	0.29	0.15
熱伝導率 (W/(m・K))	167	25	4.2	40
熱膨張係数 (10 ⁶ /°C)	4	5.1	9.4	5.5
比熱 (J/(g・K))	0.63	0.54	0.39	0.59
電気抵抗 (Ω・cm)	8×10 ⁻²	7×10 ⁻⁴	6×10 ⁻³	1×10 ⁻⁴

(材料名は以下のように略記する)

反応焼結炭化けい素: SiC

サイアロン-窒化チタン複合焼結体: sialon/TiN

ジルコニア-炭化ニオブ複合焼結体: ZrO₂/NbCほう化ジルコニウム基複合焼結体: ZrB₂

被加工材: ほう化ジルコニウム基複合焼結体
加工条件: Duty factor $D=50\%$

図2 放電加工条件が加工面粗さに及ぼす影響

放電条件: 電流波高値 $I_p=6$ A, パルス幅 $\tau_p=30$ μ s

図1 各種セラミックスの単発放電痕の比較

不明りょうであり、放電痕の状態が大きく異なっている。また、ほう化ジルコニウム基複合焼結体の場合は、他の材料では見られなかったボアの形成が認められ、材料の溶融過程において、発生したガスがボアを形成したと考えられる。

図2は、放電加工条件が被加工面の表面粗さに及ぼす影響を、Duty factorが50%での加工について、等粗さ線図の形で示したものである。電流波高値とパルス幅が小さく、1パルス当たりのエネルギーが小さいほど、表面粗さは明らかに小さくなっている。なお、そのような加工条件では、除去速度は小さくなるので、仕上加工段階に入ってから、そのような条件を選択すべきであると考えられる¹¹⁾。

3. 加工による強度劣化

曲げ試験片の最大の引張応力が発生する面を放電加工した後、3点曲げ強度を室温で測定して、放電加工による平均強度の劣化を評価した結果を、放電加工面粗さの測定結果とともに、図3, 4, 5に示す。

パルス電流波高値とパルス幅が小さく、1パルス当たりの放電エネルギーが小さい加工条件で、さらに Duty factor を小さくして加工された材料ほど、強度劣化が軽微なことが分かるが、劣化挙動は被加工材の種類に大きく依存していることも明らかである。特に、ジルコニア-炭化ニオブ複合焼結体の強度は、加工条件に非常に敏感で、加工条件によっては加工中の部材の破損も起こる。これは、表1に示した

するジルコニア、ほう化ジルコニウムが主成分である材料と、分解が支配的なサイアロン、炭化けい素が主成分である材料では、前者では溶融再凝固層の形成が明りょうであり、表面には材料の凝固収縮によって発生したと考えられるき裂が観察され、後者ではそれが

加工条件：パルス幅 $\tau_p = 30 \mu s$, Duty factor $D = 50\%$

図3 放電加工時の電流波高値が被加工材強度に及ぼす影響

加工条件：電流波高値 $I_p = 6 A$, パルス幅 $\tau_p = 30 \mu s$

図5 放電加工時の Duty factor が被加工材強度に及ぼす影響

加工条件：電流波高値 $I_p = 6 A$, Duty factor $D = 50\%$

図4 放電加工時のパルス幅が被加工材強度に及ぼす影響

ように、この材料が、他の材料に比べて熱膨張係数が大きく、熱伝導率が小さいという、急熱急冷によって、大きな熱応力が発生しやすい特性を有しているためと考えられる。このような材料においては、加工除去速度をある程度犠牲にしても、放電加工条件の選択は、慎重に行われなければならない。

また、表面粗さと異なり、Duty factor の強度劣化挙動に対する影響が大きいことも顕著である。これは、表面粗さが、基本的には個々の放電によって形成される放電痕の形状で決定されるのに対して、強度劣化は加工時に発生する応力により、加工面及びその近傍に発生するき裂等の損傷によって、引き起こされるためと考えられる。

4. 被放電加工材の信頼性

セラミックスの強度の「ばらつき」は、構造部材の信頼性を左右する重要な要因であり、多くの場合、部材の破損確率とそこに発生する最大応力の関係は、ワイブル分布関係で表され、ワイブル係数で特徴づけられる。

図6は、#400 ダイヤモンド砥石による研削材と、加工による強度劣化が軽微な条件で放電加工した材料の曲げ強度分布をワイブルプロットしたものである。

注意深く放電加工された材料の強度は研削材に近くなり、そのワイブル係数は、研削材と同程度か又は大きくなる。構造部材の設計基準が、実使用条件下での非常に低い破損確率を前提にしていることから、放電加工された導電性セラミックス工業用部材は、ダイヤモンド砥石による研削材と、同程度の強度を有する部材として取り扱うことができる。

被加工材：ジルコニア炭化ニオブ複合焼結体

●放電加工材：ワイブル係数 $m=26$, 平均強度 $\sigma_1=0.9$ GPa

加工条件：電流波高値 $I_p=1$ A, パルス幅 $\tau_p=2$ μ s, Duty factor $D=10\%$

○研削加工材：ワイブル係数 $m=9$, 平均強度 $\sigma_1=1.29$ GPa

加工条件：レジソナント #400 ダイヤモンド砥石による研削

図6 被放電加工材の強度分布の研削材との比較

5. ま と め

セラミックスに対する放電加工は、近年、各種の構造用導電性セラミックスが市販されるようになったことから、複雑形状部材を比較的容易に加工できる加工法として、その有利さが認められ、利用の拡大が図られている。

しかし、構造用セラミックスには、多くの場合、他の材料では対応できない特殊な特性が期待されているため、材料特性に対する要求は過酷で多様である。し

たがって、導電性セラミックスの場合も、材料としての特性が優れていることが、工業的利用の拡大における前提条件となる。現在は、導電性セラミックスの材料特性の一層の改善と、多様な要求に答えられる多様な導電性セラミックスの開発が、より一層望まれる段階にあると考える。

文 献

- 1) 中村 守, 久保勝司, 平井幸男: RB-SiC の放電加工, 窒素協会誌, 92 (1984) 305.
- 2) 万波和夫, 酒井恒蔵, 奥宮正太郎: ZrB₂ 複合焼結体の放電加工, 窒素協会誌, 94 (1986) 214.
- 3) 齋藤長男, 毛利尚武: セラミックスのワイヤ放電加工, 電気加工技術, 10, 30 (1986) 1.
- 4) 中村 守, 金山公三, 兼松 渉, 平井幸男: セラミックスの放電加工 (第2報)—— β -サイアロン-窒化チタン複合焼結体の放電加工, 日本セラミックス協会学術論文誌, 96 (1988) 901.
- 5) N. F. Petrofes and A. M. Gadalla: Electrical Discharge Machining of Advanced Ceramics, Ceramics Bull., 67, (1988) 1048.
- 6) W. König, D. F. Dauw, G. Levy and U. Panten: EDM - Future Step towards the Machining of Ceramics, Ann. CIRP, 37, (1988) 1.
- 7) M. Ramulu: EDM Sinkers Cutting of a Ceramic Particulate Composite, SiC-TiB₂, Advanced Ceramic Materials, 3, (1988) 324.
- 8) M. Nakamura, K. Kanayama and Y. Hirai: Electro-Discharge Machining of Transformation Toughened ZrO₂-NbC Ceramic Composite, Materials and Mfg. Processes., 4, (1989) 425.
- 9) W. König, D. F. Dauw, G. Levy and U. Panten: Funkenerosives Schneiden und Senken technischer Keramik, Werkstatt u. Betrieb, 123, 1, (1990) 73.
- 10) 武藤一夫, 藤井保明, 久保のぼる, 二村昭二: 高速・高精度形彫り放電加工用セラミックス炭素複合電極の開発, 電気加工学会誌, 23, 45 (1989) 13.
- 11) M. Nakamura, K. Kanayama, Y. Hirai, S. Ito and K. Kubo: Surface Damage in Electro-Conductive Structural Ceramics Caused during Electro-discharge Machining (EDM), Proc. Int. Symp. Electro-Machining (ISEM-9), Nagoya, (1989) 271.