ニッケル粉末混入放電加工における アルミニウム青銅の表面特性

宇野義幸* 岡田 晃* 山田知彦* 林 泰弘* 田淵義晨**

Surface Integrity in EDM of Aluminum Bronze with Nickel Powder Mixed Fluid

Yoshiyuki UNO, Akira OKADA, Tomohiko YAMADA,
Yasuhiro HAYASHI and Yoshiaki TABUCHI

Abstract

Aluminum bronze which has high corrosion resistance, high strength and easy castability is recently expected as a new plastic mold or a shell mold core material in place of steel conventionally used. On the other hand, it is reported that the EDMed surface with metal powder mixed fluid has smaller surface roughness and higher resistance to corrosion. From these points of view, EDM characteristics of aluminum bronze were experimentally investigated in the first place. Then, EDM with nickel powder mixed fluid for smoother surface roughness and higher surface integrity was proposed and evaluated. Main conclusions obtained in this study are as follows:

- (1) The metal removal rate in EDM of aluminum bronze is approximately the same as that of steel, and no electrode wear EDM is possible.
- (2) The EDMed surface with nickel powder mixed fluid has a smaller surface roughness than that in conventional EDM with kerosene type fluid.
- (3) Resolidified layer containing nickel can be generated and the thickness of the layer becomes larger and uniform with an increase of nickel powder concentration in machining fluid.
- (4) The EDMed surface with nickel powder mixed fluid becomes harder than that with kerosene type fluid and it has high resistance to sand abrasion.

1. 緒 言

一般に金型材には鋼材が用いられているが、製品の多様化にともなって金型の作製方法、型材も多様化している。最近では、プラスチック成形用金型、シェルモールド用金型として、従来の鋼材にかわり銅合金やアルミニウム合金が一部使用さ

れている^{1),2)}。さらに、高強度で耐食性、铸造性などに優れたアルミニウム青銅の使用も検討されている。しかしながらアルミニウム青銅の放電加工特性についての報告はほとんどなく、その解明が求められている。

また金型の寿命改善のためには従来より窒化処理、クロムメッキ、ニッケルリンメッキ等の表面処理が行われており³⁾、特にシェル用金型におい

* 岡山大学工学部

** (株)ミタックス

ては耐食性、耐摩耗性の向上を図るために、金型表面にニッケルメッキを施す方法が採られている。しかしメッキ層と母材の密着性の点で問題があるといわれている。いっぽう粉末混入した加工液を用いた放電加工においては、加工面の耐食性、耐摩耗性が向上する^{4),5)}と報告されており、ニッケルメッキにかわる放電加工による表面処理技術が考えられる。

そこで本研究ではアルミニウム青銅の放電加工特性を実験的に解明し、さらに加工液中にニッケル粉末を混入し加工面粗さを向上させるとともに、加工面に耐食性に優れたニッケル含有層を形成することを試みた。

2. 実験方法

実験はトランジスタスイッチング式のNC放電加工機により行った。図1にその概略を示す。工作物にはアルミニウム青銅3種AIBC3((株)ミタックス製 MS24)を用いた。表1にその化学成分を示す。アルミニウム青銅は従来より主に船舶用部品の材料として広く用いられているものの一つである。電極には直径15mmの銅棒を用いた。また加工液には灯油系加工液と、それにニッケル粉末を混入したニッケル粉末混入加工液(Nickel Powder Mixed Fluid: 以下NPMFと記す)を用いた。後者に使用したニッケル粉末の粒度は#3000(粒径約 $5\mu\text{m}$)である。なお両者の比抵抗を測定したところ、灯油系加工液の比抵抗は $1.23 \times 10^6 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ 、NPMF(40g/l)のそれは $1.43 \times 10^3 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ であった。NPMFを用いた加工では、ニッケル粉末の沈殿を防ぐためにポンプ、攪拌機によって加工液を循環、攪拌させた。

3. アルミニウム青銅の放電加工特性

まずアルミニウム青銅の放電加工特性について検討を行った。この際の加工条件を表2に示す。

図2はパルス幅を変化させたときの加工速度の変化を示す。比較のために同一条件で冷間金型鋼SKD11を加工した場合の結果についても示す。図より明らかなように両者ともパルス幅の増加と

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Chemical composition of AIBC 3

	Cu	Al	Fe	Ni	Mn	Zn	Sn	Si	Pb
(%)	Bal.	10.1	4.8	4.6	0.9	0.3	0.005	0.005	0.005

Table 2 Machining conditions

Polarity	Electrode : (+)
Discharge current	$I_p = 30\text{A}$
Pulse duration	$\tau_p = 4 \sim 100 \mu\text{s}$
Duty factor	D.F. = 50%
Machining Fluid	Kerosene

Fig.2 Relationships between removal rate and pulse duration

ともに加工速度は増加し、パルス幅 $30\mu\text{s}$ 付近で最大となる。またいずれのパルス幅においても、アルミニウム青銅はSKD11と同等の加工速度となっていることがわかる。

図3は電極消耗率とパルス幅の関係を示す。図よりSKD11と比較するとアルミニウム青銅の場合の電極消耗率はパルス幅の短い場合多少大きく、パルス幅の長い場合には小さくなっている。また

Fig.3 Relationships between electrode wear and pulse duration

Fig.4 Micrographs of crater

Fig.5 Pile-up height and crater depth

両者ともパルス幅の増加とともに電極消耗率は減少し、パルス幅 $100\mu\text{s}$ で両者ともその値は 1% 以下となっている。加工後の両電極を観察したところ、電極端面には加工液の熱分解によって生じたカーボンが付着しており、それによって低消耗が可能となったといえる⁶⁾。また、パルス幅がさらに長い条件では電極無消耗加工も可能となると考えられる。

以上のように、通常の放電加工条件においてアルミニウム青銅は、従来の金型材とほぼ同様の放電加工特性を示すことが明らかとなった。

4. ニッケル粉末混入放電加工

4.1 単発放電

次にニッケル粉末混入加工液中で放電加工を行うことにより、面粗さの改善およびニッケル含有層の形成を試みた。まず単発放電実験を行い、ニッケル粉末濃度が放電痕形状に及ぼす影響について

検討した。

図4は加工液のニッケル粉末濃度を変化させて単発放電を行った際の、放電痕写真を示す。なおこの際の加工条件は、正極性で放電電流 $I_p=40\text{ A}$ 、パルス幅 $\tau p=40\mu\text{s}$ とした。図より通常の灯油系加工液(0 g/l)では中央部分が大きく窪んでいるように見える。そしてニッケル粉末混入率の増加とともに放電痕はきれいな多重円状になっていき、凹凸が小さくなっていることがわかる。

図5は単発放電における放電痕深さ H_1 と放電痕高さ H_2 の和 H_1+H_2 、およびそれと放電痕の盛り上がり部分の直径 D との比 $(H_1+H_2)/D$ を示したものである。図より明らかなようにニッケル粉末濃度の増加とともに放電痕深さ H_1 が小さくなり、 40 g/l の場合は灯油系加工液の場合の約 $1/3$ となっている。また盛り上がり高さ H_2 はニッケル粉末濃度の増加とともにやや減少している。 $(H_1+H_2)/D$ は相対的な起伏の激しさを示して

Fig.6 Section of craters

Fig.7 Relationship between gap distance and nickel powder concentration

いるが、放電痕直径はあまり変化しないため、 $(H_1 + H_2)/D$ の値もニッケル粉末濃度の増加とともに減少し、40g/lでは灯油系加工液の場合の半分程度と起伏が緩やかになっていることがわかる。

図6は灯油系加工液とNPMF(40g/l)を用いて単発放電を行った際の断面写真である。放電痕上部に黒く見えるのが再凝固した部分である。灯油系加工液における放電痕は中央部分が深くなっており、放電によって溶融除去されたことが確認できる。そして再凝固部分はほとんど認められない。これに対してNPMFを用いた場合には、材料はほとんど除去されておらず、溶融した部分はほとんど表面に残っていることがわかる。このため前述のように粉末混入液では除去量の少ない起伏の緩やかな放電痕を形成するといえる。

次に放電の際の極間距離の測定を行った。図7は加工液のニッケル粉末濃度を変化させたときの極間距離の変化を示す。加工液中にアルミニウム

粉末やシリコン粉末を混入すると極間距離が増大することが報告されているが⁹⁾、本実験の場合も同様に加工液中のニッケル粉末濃度の増加にともない極間距離が増大することがわかる。ニッケル粉末濃度15g/l程度までは極間距離は急激に増加し、それ以降は徐々に増加率は小さくなる。そして40g/l混入した時点で、極間距離は約180 μ mとなり、未混入の場合の約12倍となる。すなわち加工液に粉末を混入することにより、加工液の比抵抗が小さくなることや電界中の微粒子の配列の影響^{7),8)}をうけるために極間距離が増大する。その結果、放電の際に加工液の気化膨張にともなって工作物に作用する衝撃力が小さくなり⁹⁾、前述のように凹凸の少ない放電痕が形成されるものと考えられる。以上の結果からニッケル粉末を加工液に混入することによって、連続放電においても粗さの小さい良好な加工面が生成されると推測される。

4.2 加工面粗さの向上

ニッケル粉末混入加工液を用いて、粉末混入が加工特性に及ぼす影響について検討を行った。本加工における加工条件を表3に示す。この際電極

Table 3 Machining conditions in EDM with NPMF

Polarity	Electrode : (-)
Discharge current	$I_p = 3A$
Pulse duration	$\tau_p = 2 \mu s$
Duty factor	D.F. = 10%
Machining Fluid	NPMF

Fig.8 Relationship between removal rate and nickel powder concentration

Fig.9 Relationship between surface roughness and nickel powder concentration

Fig.10 Micrographs and profiles of EDMed surface

に X - Y 平面内で円形の揺動運動 (6.2sec/cycle, $r=150 \mu m$) を与え、ニッケル粉末の循環、拡散を促進させた。

図8はアルミニウム青銅のニッケル粉末混入加工における加工速度とニッケル粉末濃度の関係を示す。図より明らかなように、ニッケル粉末濃度を変化させても加工速度は $0.08 mm^3/min$ とほぼ一定であることがわかる。前述の単発放電では未混入の場合のほうが単発放電の除去量は大きかったが、この図に見られるように連続放電では粉末

の有無によらず、加工速度が一定であるのは、粉末混入によって放電が分散し⁹⁾、非常に安定した加工状態が得られる⁹⁾ ためであると考えられる。

図9は、ニッケル粉末濃度の変化に対する加工面の10点平均粗さを示したものである。図よりニッケル粉末濃度の増加とともに加工面粗さは減少することがわかる。40g/l 混入した場合には約 $1.7 \mu m$ となり、灯油系加工液 (0g/l) の場合の約 $1/2$ となる。放電加工面は放電痕の集積によって形成されるため、単発放電痕形状が表面粗さに大きく

Fig.11 Section of EDMed surface for various nickel powder concentrations

影響することを考慮すると、前述の図5の傾向とよい一致を見せている。

図10は、加工面写真と断面曲線示す。灯油系加工液の場合、加工表面の放電痕形状は乱れており、加工面の起伏を激しくする原因となっている。いっぽうNPMF(40g/l)を用いて加工を行った場合、表面はきれいな円形の放電痕の集積になっており、凹凸の少ない滑らかな面を形成していることがわかる。

図11は、ニッケル粉末混入濃度を变化させた場合の加工断面写真である。再凝固層の状態を明確にするため断面には腐食を施している。灯油系加工液の場合では再凝固層は表面に数 μm しか存在せず、その下部に約10 μm の厚さの熱影響層が存在していることがわかる。しかしニッケル粉末混入濃度を増加させるにしたがって再凝固層が厚みを増し、均一になっていくことがわかる。また、一般に再凝固層には溶融部分の急冷却によりマイクロクラックが発生するが、NPMFを用いて加工を行った場合ではマイクロクラックは確認されず、良好な加工面を形成していることがわかる。

4.3 加工面の改質

以上のように、加工液にニッケル粉末を混入することによって加工面粗さは向上し、加工表面にはマイクロクラックの存在しない均一な再凝固層が形成されることが明らかとなった。この再凝固層は一度溶融し、加工液により冷却され再凝固した部分であるため、加工液のニッケル粉末を含む合金層を形成しているものと推測される。そこで次に加工表面の成分分析を行った。

図12は、アルミニウム青銅母材、灯油系加工液中で加工を行った場合の熱影響層およびNPMF中で加工を行った場合の再凝固層のEPMA分析結果である。図より灯油系加工液中で加工を行った場合での加工表面の成分は母材とほとんど変化がないが、ニッケル粉末混入加工液を用いた場合の再凝固層では銅のピークが低下し、それに代わってニッケルのピークがかなり増加しており、母材に比べニッケルが多量に含まれていることがわかる。

図13は、加工液中のニッケル粉末濃度と加工表面のニッケルの含有率の関係を示す。加工表面のニッケル含有率の測定は発光分光分析により行った。図より明らかなように、加工液中のニッケル

$I_p=3A$, $\tau p=2\mu s$, D.F.=10%

Fig.12 EPMA of surface layers

Fig.13 Relationship between nickel content rate in resolidified layer and nickel powder concentration

Fig.14 Vickers hardness of surface layers

粉末濃度の増加とともに加工表面層のニッケル含有率は急激に増加している。これはニッケル粉末濃度の増加によって、ニッケルの含有した再凝固層が厚みを増して均一になるとともに、再凝固層に含まれるニッケル自体の含有量も増加しているためであると考えられる。アルミニウム青銅の成分から考慮すると、ニッケルはアルミニウムと結

Fig.15 Schematic diagram of sand abrasion test apparatus

合し合金化している可能性が非常に高く、さらに放電による急冷却によって結晶粒が微細化された構造をしていると推測される。

図14は、加工表面のビッカース硬度を示す。ニッケル粉末混入加工液の場合の再凝固層の硬さは母材の約2倍、灯油系加工液の表面層の約1.4倍となることがわかる。このように、ニッケル粉末混入放電加工によって、従来の加工面よりも高硬度な表面層を形成することが可能となった。

一般にシェルモールドの製作では、金型内にシェル砂を高速に充填させるため、その際の砂による摩耗が、型形状崩れの大きな要因となる。そこでニッケル粉末混入放電加工によって形成されたニッケル層のシェル砂に対する耐摩耗性を調べるために、砂摩耗試験を行った。図15は、砂摩耗試験の

Fig.16 Results of sand abrasion test

概略を示す。図に示すように二つの試料を対向させて、その間隙を5mmに固定する。摩耗試験面（放電加工面）はシェル砂の噴出方向に対して30°傾いており、 $1.96 \times 10^5 \text{ Pa}$ の圧力で60秒間シェル砂(FTA60)を吹き付ける。この試験条件は実際のシェル砂充填数万サイクルに相当する。

図16に砂摩耗試験の結果を示す。縦軸の摩耗深さは、摩耗箇所の最大深さを表す。図より明らかなように、母材と比較すると放電加工面の摩耗は小さいことがわかる。そしてニッケル粉末混入放電加工による加工面はさらに摩耗が小さく、母材の場合の7割以下となっている。以上のように表面に形成されたニッケル合金層は耐摩耗性が向上することが明らかとなった。

5. 結 論

本研究ではアルミニウム青銅の放電加工特性を解明するとともに、ニッケル粉末混入加工液を用い、加工面の改質について検討を行った。本研究で得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) アルミニウム青銅の加工速度は鋼材と同程度であり、電極無消耗加工も可能である。
- (2) ニッケル粉末混入放電加工における加工面粗

さは、従来の灯油系加工液を用いた場合よりも小さくなる。

- (3) 加工表面にはニッケルを含有する再凝固層を形成することができ、その厚さは加工液中のニッケル粉末濃度の大きいほうが厚く均一となる。
- (4) ニッケル粉末混入加工液を用いた場合の加工面は、灯油系加工液の場合よりも硬度が高く、耐砂摩耗性も大きい。

最後に本研究を遂行するにあたって、便宜を図って頂きました(株)ソディックに謝意を表します。

参考文献

- 1) 熊谷 敦：プラスチック成型用金型材料，型技術，10，8 (1995) 49.
- 2) 山田定男：アルミニウム合金，型技術，8，12 (1993) 45.
- 3) 日原政彦：金型寿命における管理技術と最近の動向，型技術，12，1 (1997) 97.
- 4) 斎藤長男，毛利尚武，成宮久喜，河津秀俊，尾崎好雄，小林和彦，恒川好樹：粉末混入加工液による放電仕上げ加工，電気加工学会誌，25，49 (1991) 58.
- 5) 宮谷保太郎，山崎雄司，上田順弘，佐藤幸弘，増井清徳：シリコン粉末添加放電加工による加工面の機能性向上，電気加工技術，19，62 (1995) 21.
- 6) 鈴木政幸，毛利尚武，斎藤長男，武沢英樹：放電加工における電極低消耗の研究（第一報）－放電除去現象の観察－，電気加工学会誌，26，52 (1992) 47.
- 7) 須田 孝，佐田登志夫：放電加工の極間における導体粒子の挙動，電気加工学会誌，7，14 (1974) 19.
- 8) 森 正裕，國枝正典：放電ギャップ中の加工くずの挙動に関する研究，1992年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(1992) 279.
- 9) 宇野義幸，岡田 晃，亀川 出：粉末混入放電加工における表面生成機構の研究，電気加工学会誌，29，62 (1995) 9.

(1997年7月22日受付)