チタンの形彫放電加工特性

小原治樹*, 八並哲史*, 羽多野正俊*

Study of electrical discharge machining of titanium

Haruki OBARA, Tetsuji YATSUNAMI and Masatoshi HATANO

Abstract

Titanium is frequently used in medical instruments. Medical instruments have complicated shapes and it is desirable to machine them by electrical discharge machining. However usually the EDM (except WEDM) of titanium is not stable, and medical instruments should not be contaminated by the tool electrode material during EDM. In this paper, we describe EDM test results of titanium in dielectrics of oil and water using a tool electrode of copper and titanium. A titanium tool electrode is used to avoid contamination of the titanium workpiece. Test results show that the EDM of titanium using the copper tool electrode in the water is more stable than in the oil, and has a low electrode wear ratio. Analyzed results on the copper tool electrode surface show that the reason for the low electrode wear ratio of the copper electrode in water is the adhesion of titanium transferred from the workpiece. The EDM of titanium using the titanium tool electrode in water has a 10% electrode wear ratio and is possible to use in machining of medical instruments.

Keywords: EDM, Titanium

1. 結論

チタンは医療用金属に多用される。このような用途ではその形状が複雑であるため、形彫放電を用いた加工が望まれるが、岡田等の報告¹⁾にあるように加工が不安定になり易い。ここでは医療用チタンの放電加工を目的とするが、チタンを生体埋込み金属として用いる場合には、ワーク表面に銅などの電極材料が転移すると拒絶反応を引き起こすから、チタン表面の汚染が問題となる。従って、もしチタン電極を用いてチタンを加工することができれば、電極による汚染がない加工が可能になると考えられる。本論文ではこれを考慮しつつ、油中、水中において銅電極、チタン電極を用いてチタンを加工した場合の放電加工特性について調査した結果を報告する。

2. 油中加工の特性

2.1 銅電極を用いた油中加工の特性

最初に銅電極によるチタン（純チタン2種、TP340H）の油中加工特性を調査した。放電加工機は(株)牧野フライス製作所製のEDGE2-A8である。当初、鉄系材料の加工条件をベースにした加工を試みたが、休止時間制御のパラメータがTiと鉄系材料では大きく異なるようであり、休止時間制御が動作しすぎて加工が困難であったため、休止時間制御を無効にし、安定な加工ができるようにサーボ電圧等を調整した。電極はφ10mmの銅電極を用い、ジャンプ動作(速度250mm/min, 距離1mm, 放電0.3s, ジャンプ0.5s)を併用した。通常の鉄系材料の場合と異なり、電極面が中凹みとなる現象が観察された。これは加工屑の堆積によるものと考えられたため、吹きかけ加工を併用した。

図1は吹きかけ加工で噴射圧力を変えた場合の電極形状を示す。圧力を増すと中凹みの程度は減少し、同時に電極消耗率も減少した。これ以降の実験では全て0.01MPaの吹きかけ加工を用いた。

* 富山大学工学部 (〒930-8555 富山市五福 3190)

Fig.1 Tool electrode shape after EDM with flushing

(τ_{on} 145 μ s τ_{off} 132 μ s I_p 21.4A)

図2は休止時間を変えた場合の加工速度と電極の体積消耗率を示す。電源電圧(無負荷電圧)は190Vとした。岡田等の報告にも見られるように、休止時間 τ_{off} が短く100 μ s未満では加工不安定になった。電極(+)の場合に対し、電極(-)の場合は加工速度が最大30%程度増加する。また電極消耗率は電極(+)では10%程度であるが、電極(-)では5%程度に改善されることが分かる。

(a) Machining speed

(b) Electrode wear ratio

Fig.2 Influence of interval time (Electrode Cu in oil, I_p 21.4A)

図3はデューティ比50%一定として電極(-)で電流ピーク値 I_p と放電時間 τ_{on} を変えた場合の加工特性を示す。各電流ピーク値で加工速度最大となる放電時間があり、それ以上に放電時間が増すと加工速度は低下する。電極消耗率は放電時間

(a) Machining speed

(b) Electrode wear ratio

Fig.3 Influence of discharge duration and peak current
(Electrode Cu(-) DF 50%) Fig.4 Influence of discharge duration and peak current on
surface roughness (Electrode Cu(-) DF 50%)

とともに低下し、最小で2%程度の値が得られた。しかし放電時間が過大では放電不安定になるため、放電時間の長さには限界がある。

図4はこのときの面粗さ特性であり、鉄系材料の場合と同様に、放電時間と電流ピーク値が増すほど面粗さは劣化する。

2.2 チタン電極を用いた油中加工の特性

Tiの汚れを避けるにはTiの工具電極を用いたTiの加工がもっとも望ましい。油中でTi電極を用

いてTiを加工するため、良好な加工条件を探索した。電極は1辺が11mmの正方形断面のチタン電極を用いた。銅電極を用いたTi加工条件をベースに加工を試みたが、安定に加工できる範囲が極めて狭く、放電時間が $70\mu\text{s}$ 以上では短絡が起こりやすく加工は困難であった。また、電極消耗率は100%程度であり、集中放電が多いため、ほとんど使用に耐えないことが判明した。

3. 水中加工の特性

3.1 銅電極を用いた水中加工の特性

銅電極を(+)としてTiを水中(水道水、添加剤なし、 $1.5 \times 10^4 \Omega\cdot\text{cm}$)で放電加工した場合の特性を図5と図6に示す。電源電圧は190Vであるが漏れ電流のため印加電圧は100V~150Vに低下した。図5は休止時間を変えた場合であり、水中加工であるにもかかわらず、電極消耗が小さく、3%程度の値が得られた。図5には、電極を(-)とした場合の結果を1点のみ示してある。電極消耗率は2%程度の値を示しているが、加工は不安定であり、電極(+)の場合に比べて加工速度が数分の1以下である。よって以下の実験は電極

(a) Machining speed

(b) Electrode wear ratio

Fig.5 Influence of interval time (Electrode Cu in water)

(+)で行った。

図6はデューティ比50%一定として、放電時間と電流ピーク値を変えた場合である。図3の油中加工とほぼ類似の加工特性であり、放電時間が長いほど電極消耗率が低下する。図3の場合と比べ、放電休止時間と放電時間の広い範囲で加工は安定していた。

図7に放電時間と電流ピーク値を変えた場合の面粗さ特性を示す。面粗さは一般に放電時間を増すと増加するが、この場合にはある程度以上放電時間を増すと面粗さが逆に改善されている。

(a) Machining speed

(b) Electrode wear ratio

Fig.6 Influence of discharge duration
(Electrode Cu(+), DF 50%)

Fig.7 Influence of discharge duration and peak current on
surface roughness (Electrode Cu(+), DF 50%)

図8にこのときの加工面の状況を示す。放電時間が $129\mu\text{s}$ に比べ、 $360\mu\text{s}$ の加工面は面粗さがよいが、放電痕が大きく、表面が溶融していることが分かる。このことから放電時間が長い場合には、鉄系材料の垂鏡面加工の場合と同様に、加工面が除去されずに溶融したため面粗さが良くなったと考えられる。

Fig.8 Machined surface of titanium
(DF 50%, I_p 21.4A)

一般に水中加工では電極に付着する炭素が存在しないため、低消耗加工は困難である。しかし図6の、水中でのCu(+)-Ti加工では2%程度の消耗率が得られた。この理由を知るために、加工後の電極表面の元素濃度を調べ、油中加工の場合と比較した。図9にEDS分析結果を示す。上の2つの図の左端の山はX線の直接反射によるもの、右隣の山が炭素、Vの山はバナジウムでなく TiK_{β} によるものと思われる。油中のCu(-)-Ti加工では炭素

(a) Cu(-) electrode in oil (b) Cu(+) electrode in water
Fig.9 Analyzed electrode surface after machining
(DF 50%, τ_{on} 360 μs , I_p 21.4A)

が工具電極に多く付着しているが、水中のCu(+)-Ti加工ではTiが多く付着している。このことから、油中加工では電極表面に炭素が付着して低消耗となるが、水中加工ではTiが工具電極に付着して低消耗加工になったことが分かる。

3.2 チタン電極を用いた水中加工の特性

図10に水中でTi工具電極を(+)として休止時間を変えた場合の加工速度と電極消耗率を示す。鉄系材料やこれまでの結果と異なり、休止時間を増すと電極消耗率が低下する現象が見られる。このときの最小の電極消耗率は10%以下の値を示した。この程度の消耗率であればチタンを工具電極としてチタンを放電加工することは実際に使用可能と思われる。

Fig.10 Influence of interval time in case on Ti-Ti machining

また図11に電流ピーク値と放電時間を変えた場合の加工特性を示す。各電流ピーク値で加工速度が最大になる放電時間があること、またこの放電時間で電極消耗率が最小になることが分かる。この電極消耗率が最小となる領域以上に放電時間を増すと加工が不安定になる傾向が見られた。

図12はこのときの加工面粗さであり、電流ピー

ク値による大きな違いは見られない。放電時間が $20\mu\text{s}$ 以下の領域で、加工面に集中放電が発生しやすい状況が見られた。

Fig.11 Influence of discharge duration and peak current

3.3 純水加工の特性

水を加工液とした場合、比抵抗が低いとリーク電流の影響で、無負荷電圧が低下する。このため、放電面積が増加すると加工が不安定になる可能性がある。そこで、比抵抗の大きな蒸留水を用いて加工を行い、その特性を水道水($1.5 \times 10^4 \Omega\text{cm}$)の場合と比較した。蒸留水は2日ほど放置して比抵抗

が落ち着いてから用いた。このときの比抵抗値は $10 \times 10^4 \Omega\text{cm}$ であった。以下では水道水を用いた加工を水加工、蒸留水を用いた加工を純水加工と呼び区別する。

図13に水加工と純水加工の放電電圧波形、電流波形を示す。印加電圧は電源電圧190Vに対して、水中加工の場合は130V程度、純水加工の場合は170V程度に低下している。なお、休止時間の間、純水加工では電圧がほぼ0になっているが、水中加工では0にならない。

チタン工具電極を(+)とし、休止時間を変えた時の純水加工の特性を、水中加工の場合と比較し、図14に示す。加工速度、体積消耗率ともに純水加工の加工特性は水加工と同様であるが、水加工の8%に比べて純水加工の消耗率は15%程度と大きな値になった。印加電圧及びサーボ電圧の違いが原因とも考えられたが、それによる違いは認められなかった。水加工の場合には電解性の加工が付加されるが加工速度にほとんど変化がないのでその影響でもないと思われる。

Fig.13 Discharge voltage and current form
($I_p 21.4\text{A}$, $\tau_{on} 31\mu\text{s}$)

Fig.14 Influence of interval time in case of Ti-Ti machining

4. 加工面の分析

チタンを生体埋め込み材として使用する場合には、加工面の重金属の混入は許されない。Ti-Ti 加工では汚染は考えられないが、Cu-Ti 加工でも銅電極の転移が無ければ、その方が加工特性は良好であるから望ましいと言える。そこで、これまでに加工した加工面の元素濃度を調べた。図 15 にその結果を示す。上から順に O, Cu, V, Ti を示す。

Ti 電極を用いた加工の場合には Cu 元素など他の金属元素は誤差の範囲以下であり、含まれていない。銅電極を使用した場合には加工面にわずかに

Fig.15 Analyzed result of work piece surface

ながら Cu 元素の付着が見られる。医療用チタンの加工には Cu 電極は不適當であり、チタンを工具電極とした加工が必要であると考えられる。

5. 結論

銅電極とチタン電極を用いた油中、水中におけるチタンの形彫り放電加工特性について調べ、以下の結果を得た。

- 1) 油中の銅電極を用いた加工では、電極 (+) に比べて電極 (-) の方が加工速度、電極消耗率ともに優れている。また、放電時間を増すと電極消耗率は 2% 程度まで改善できる。しかし、放電時間過大や休止時間過小では、加工が安定せず、加工可能範囲は狭い。
- 2) 油中のチタン電極を用いた加工はほとんど使用できない。
- 3) 水中の銅電極 (+) での加工は、加工可能範囲が広く、安定で電極消耗率 2% 程度まで可能である。低消耗となるのは、電極表面に Ti が付着し消耗を抑えるためと推測される。電極 (-) の場合、消耗率は良好であるが、加工は不安定である。
- 4) 水中のチタン電極を用いた加工においては、電極消耗率 10% 以下の加工が可能である。休止時間を長くすると、電極消耗率は減少する。各電流値で電極消耗率が最小となる放電時間があり、その時間を超えると加工も不安定になる。加工可能な放電時間範囲は銅電極の加工よりも狭い。この方法は、医療用チタンの加工法として使用可能である。

謝 辞

本研究を行うにあたり、加工機のご便宜をいただいた(株)牧野フライス製作所殿、テスト試料を提供いただいた同社、浜田恭一殿に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 宇野義幸, 岡田晃, 中島利勝, 高木俊: チタン合金の高エネルギー放電加工に関する研究, 電気加工学会誌 Vol.27, No.56(1994), pp.1-11.

(2005 年 4 月 5 日受付)