研 究

チタン合金の高能率放電加工に関する研究*

宇野義幸** 岡田 晃** 中島利勝** 高木 俊***

High Efficient Electrical Discharge Machining of Titanium Alloy

Yoshiyuki UNO, Akira OKADA, Toshikatsu NAKAJIMA and Takashi TAKAGI

Abstract

The factors which make titanium alloy difficult to EDM are experimentally investigated, analyzing the shape of crater generated by a single discharge, the pile-up time of workpiece, the waveform of successive discharge current, the shape of debris and so on. Then the condition for high efficient electrical discharge machining of titanium alloy is recommended. Main conclusions obtained in this study are as follows:

- (1) The pile-up generated by a single discharge in titanium alloy is higher than that in steel, and the pile-up time is also longer.
- (2) The removal volume of crater generated by a single discharge in titanium alloy is larger than that in steel, which agrees with the conventional theory that the lower product of melting point and the thermal conductivity of material leads to easier EDMing.
- (3) The metal removal rate is lower and the electrode wear is larger for titanium alloy under the conventional EDM condition as compared with those for steel, since the frequent short-circuit results in the unstability of machining.
- (4) High efficient and low electrode wear electrical discharge machining of titanium alloy is possible by decreasing the duty factor, since the resting duration is enough for pile-up of workpiece and the machining becomes stable.

* 第2回電気加工学会全国大会(平成4年11月18日)にて発表

** 岡山大学工学部

*** (株)イビデン

1. 緒 言

チタン材料は、比重が小さく強度が鉄鋼並みであるため比強度が大きい。特にチタン合金は実用合金中最大の比強度を有する。また耐熱性、耐食性にも優れており、その特性から航空・宇宙産業、原子力産業、海洋開発、医療材料など多くの分野で用いられている。しかし、チタン材料を切削加工する場合は、これらの優れた特性が原因で工具寿命が短くなるといったトラブルが発生しやすく、代表的な難削材として知られている。

これに対して放電加工は、放電現象に伴う熱と圧力によって工作物表面を熔融蒸発させて加工を行うもので、工作物の硬度、引張り強度、靱性などの機械的性質にほとんど左右されないため、従来の機械加工では困難であった高硬度難削材に広く利用されている。しかし放電加工においてもチタン材料は電極消耗が大きく、難加工であるといわれている。

一般に異なる工作物に対する放電加工特性は、加工に必要とされる最低エネルギー密度に左右され、それは材料の融点 θ_m と熱伝導率 λ の積 $\theta_m \cdot \lambda$ に比例することが明らかにされている¹⁾。この点から考えると、チタン材料は鉄鋼材料に比べて $\theta_m \cdot \lambda$ が小さく、実際に単発放電実験においては加工性が良い。しかし、連続放電実験では電極消耗が大きく、加工速度も小さくなる。

本報告では、チタン材料が難加工となる要因を単発放電における放電痕形状の解析、盛り上り量および盛り上り時間の測定、連続放電における放電電流波形、加工くずの観察等を基に検討し、低消耗・高能率加工への指針を明らかにしている。

2. 実験方法

実験は、トランジスタ放電回路の単発放電装置を備えたNC放電加工機で行われた。図1は実験装置の概略を示す。工具電極には直径5mmのグラファイトおよび銅棒を用いた。また、単発放電実験を行う場合には、電極先端を約40度の円錐状に成形して使用した²⁾。盛り上り時間測定実験および連続放電実験では端面をラップ加工し表面を平滑に整えた。工作物としては純チタン、Ti-6Al-4V合金 およびSKD11を用いた。Ti-6Al-4V合金は、工業的に用いられるチタン合金の約80%を占めており、熱処理性、加工性、溶接性など全般的に安定した性質を有している。純チタン、Ti-6Al-4V合金（以下チタン合金と表す）およびSKD11はそれぞれ

図1 実験装置の概略

600℃, 700℃, 830℃で1時間の焼鈍を行った。加工液には灯油系加工液((株)KHS: VITOL 2, 比抵抗 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上)を用いた。加工条件は無負荷電圧120V, 放電電流 $I_p = 4 \sim 60 \text{A}$, 放電時間 $\tau_p = 4 \sim 300 \mu\text{s}$, Duty Factor = 5~50%, 極性は正, 逆両極性で行った。実験時の放電電流, 放電電圧はデジタルオシロスコープによりその波形を記録し解析に用いた。単発放電痕形状, 放電加工面粗さは, 触針式表面検査機によって測定し, 走査型電子顕微鏡での観察も行った。さらに, 適宜EPMAによる分析も行った。体積電極消耗率は実験前後の重量差から比重により算出した。この際グラファイト電極の計量は加工液の油分の混入による誤差をなくするために, 真空炉中で十分に乾燥させた後に行った。

3. 実験結果および考察

3.1 単発放電痕形状の解析

図2は, チタン合金およびSKD11に生成された単発放電痕形状を示すものである。実験条件は放電電流 $I_p = 40 \text{A}$, 放電時間 $\tau_p = 40 \mu\text{s}$ である。図より明らかなようにチタン合金の表面にはしわのような形状が観察される。特にGr(+)の電極条件で多く発生している。しかしSKD11の場合には放電

図2 単発放電痕のSEM写真

痕表面は滑らかでこのようなしわは全く確認できない。また、純チタンにおいても同様の形状がみられた。このような形状は、熱により一度溶融した材料がゆっくり冷却され凝固する場合に発生したものと考えられる。すなわちチタンの場合、鉄と比較すると熱伝導率が低いことと沸点が高いことにより、工作物が溶融状態である割合が大きく、それが低い熱伝導率のためにゆっくりと冷却され、体積収縮によりこのような形状になるものと考えられる。

図3は、放電痕盛り上り高さ H_2 と放電痕深さ H_1 との比 H_2/H_1 を示したものである。図より明らかなように、Cu(+)の電極条件では盛り上りの割合が最も大きく、特にチタン合金の場合には放電痕深さの62%も盛り上る。一方、Gr(-)の場合はかなり小さく、SKD11の場合で8%である。また、いずれの電極条件においても、SKD11に比べるとチタン材料の方が盛り上りの割合が大きいことが分かる。

図4は、放電痕深さ H_1 と放電痕内径 D_1 との比 H_1/D_1 を表したものである。この値が大きいほど底の深いクレータとなること

を示しており、Gr(-)、Cu(-)の順に大きく、逆極性の場合は相対的に小さいことが分かる。また、いずれの電極の条件においてもSKD11に比べ、チタン材料の方が底の深い放電痕形状になることが分かる。

3.2 盛り上り時間の測定

単発放電実験において、放電を行った後はほとんどの場合、電極と工作物は短絡している。これは放電痕の盛り上りにより工具電極と工作物が互いに接触しているためである。この現象を利用して放電痕の盛り上り時間（短絡時間）の測定を試みた。盛り上り時間は極間距離に左右されるので、ここでは極間距離を単発放電実験で得られた盛り上り高さ H_2 と等しい値に設定し、間隙を固定した状態

図3 放電痕盛り上り高さ H_2 と放電痕深さ H_1 との比 H_2/H_1

図4 放電痕深さ H_1 と放電痕内径 D_1 との比 H_1/D_1

図5 放電痕盛り上り実験における放電電圧および放電電流波形の記録例

図6 放電時間 τ_p と盛り上り時間 t_s との関係

で単発放電を行った。この際、電極と工作物間の電圧波形をオシロスコープにより記録する。その記録例を図5に示す。本加工機には接触感知用として工具電極と工作物が接触していない場合には、約5Vの電圧が負荷されている。図より明らかなように放電前は120Vの無負荷電圧 E_0 がかけられているが、放電が開始されると放電電圧は E_p となり放電時間 τ_p の間、維持される。放電が終了するとしばらくの間（工具電極と工作物が接触していない間）は、 E_s (5V)がかかっているが、短絡が生ずると両極間の電圧は0となる。ここで放電開始時間から短絡が生じるまでの時間 t_s を盛り上り時間と定義する。

図6は、放電時間 τ_p と盛り上り時間 t_s の関係を示すものである。図中破線は $t_s = \tau_p$ の場合すなわち放電時間終了と同時に短絡する場合を示す。図より明らかなように放電時間中に短絡が発生するわけではなく、放電終了後しばらくして短絡が発生している。すなわち盛り上りは放電終了後も増加し続ける³⁾ことが分かる。放電時間 τ_p が増加するにつれて、盛り上り時間 t_s も当然増加するが、放電時間 τ_p に対する盛り上り時間 t_s の割合(t_s / τ_p)は放電時間が大きくなるほど小さくなる。またチタン合金とSKD11を比較すると、チタン合金のほうが盛り上り時間は長くなっていることが分かる。

図7は放電時間と平均盛り上り速度との関係を示すものである。ここで平均盛り上り速度は、盛り上り高さを盛り上り時間で除した値である。放電時間が長くなるほど平均盛り上り速度は小さくなる。放電時間が短い場合には、電流密度が大きいのでエネルギー密度が大きく、さらに加工液および工作物の沸騰による衝撃力が大きいいため、平均盛り上り速度が大きくなると考えられる。これに対し放電時間が長くなると放電柱半径が大きくなり、エネルギー密度が小さくなり、平均盛り上り速度が小さくなると考えられる。また、チタン合金の平均盛り上り速度はSKD11に比べると小さいことが分かる。

図7 平均盛り上り速度と放電時間との関係

図8 放電痕形状の模式図

3.3 単発放電における加工特性

図8は、放電痕形状を模式的に示したものである。ここで熱により溶融する部分の形状を球の一部と見なすと、放電痕凹み部分の体積 V_L は近似的に次式で表せる⁹⁾。

$$V_L = (1/6) \cdot \pi H_1 \{ 3 (D_1/2)^2 + H_1^2 \} \quad (1)$$

さらに放電痕盛り上り部分体積 V_H を底辺 $(D_3 - D_1)/2$ 、高さ H_2 の三角形断面の回転体(D_3 :放電痕外径、 D_2 :放電痕盛り上り部直径)であると考え、次式で近似し、 V_L から V_H をさしひいた値を除去体積 V_R とする。

$$V_H = 1/8 \cdot \pi H_2 (D_3^2 - D_1^2) \quad (2)$$

$$V_R = V_L - V_H \quad (3)$$

一般に異なる工作物に対する放電加工特性については、工作物の融点 θ_m と熱伝導率 λ の積 $\theta_m \cdot \lambda$ が小さい材料が加工されやすいといわれている。図9は、加工条件を放電電流 $I_p = 40A$ 、放電時間 $\tau_p = 40\mu s$ と一定として、本研究に用いた工作物の $\theta_m \cdot \lambda$ ⁶⁾と放電痕除去体積 V_R との関係を示す。いずれの電極極性の条件においても $\theta_m \cdot \lambda$ の値の大きい銅、SKD11に比べ、 $\theta_m \cdot \lambda$ の小さい純チタン、チタン合金の方が除去体積 V_R が大きく、従来の理論に対応していることが分かる。

以上の結果より、チタン材料は鉄鋼材料に比べると放電痕の盛り上りが大きく、盛り上に要する時間も長いものの放電痕除去体積が大きく、単発放電実験から見るかぎり

図9 $\theta_m \cdot \lambda$ と放電痕除去体積 V_R との関係

では加工性が良いと言える。

3.4 連続放電における加工特性

チタン合金の連続放電における時間当りの平均放電エネルギー p に対する加工速度 $\dot{R}$ を図10に示す。ここでのデューティ・ファクタ（以下D. F.と略記）は50%とした。図(a)から明らかなように、エネルギー増加に伴い加工速度 $\dot{R}$ は増加する。特に電極極性がCu(+), Gr(-)の条件では加工速度が大きい。しかし図(b)より純チタン、チタン合金の加工速度 $\dot{R}$ はSKD11の半分以下であることが分かる。他の電極の条件においても同様の結果が得られた。

図11は、電極をグラファイトとして比較的電極消耗の小さい逆極性で放電電流 I_p 、放電時間 τ_p を変化させたときのチタン合金およびSKD11の体積電極消耗率 W を示したものである。放電時間 τ_p の長い領域では両者とも消耗は小さくなる。しかしSKD11がほとんど0に近い値を示すのに対し、チタン合金はかなり大きい値を示しており、このような条件では実用的には不適当であると考えられる。

図12は、チタン合金の連続放電実験において、生じた加工くずの形状を示すものである。図より、

図10 単位時間当りの放電エネルギー p と加工速度 $\dot{R}$ との関係

図11 チタン合金およびSKD11の体積電極消耗率 W

図12 加工くずのSEM写真およびTiK α およびCuK α 像

図13 連続放電実験における放電電圧および放電電流波形 (D. F. =50%)

SKD11の加工くずがほとんど完全な球状であるのに対し⁶⁾、チタン合金の加工くずは、変形したものや断片状のものが多く見られる。これらの加工くずは、TiK α 、CuK α 像から主に工作物のチタン合金から生じたものであることが分かる。このような差は加工くずの生成機構の違いに起因するものと考えられる。すなわち、SKD11の場合には、一度完全に熔融蒸発した金属が再凝固し、表面張力によって球状になるのに対し、チタン合金の場合には工作物の熔融が不完全なまま飛散し凝固するのではないと思われる。

図13は、連続放電実験時の放電電圧および放電電流の波形を示すものである。加工条件は放電電流 $I_p=40A$ 、放電時間 $\tau_p=100\mu s$ で、D. F.の設定値は50%である。SKD11の場合は、実際の値がほぼ50%であるのに対して、チタン合金の場合、波形がとんでいるために設定値よりかなり小さくなっていることが分かる。

以上のことから、チタン合金の場合は、単発放電痕の盛り上りが大きいことと盛り上がり時間が長いことにより短絡が発生しやすいために無効放電が多くなり、加工状態の不安定を招き、D. F. が低下するために加工速度が低下すると考えられる。

3.5 デューティ・ファクタと加工の安定性

上述の考察から、チタン合金の連続放電を安定した能率のよいものにするには、十分な休止時間を与えることが必要であると考えられる。つまり、一発の放電の後、その放電による放電痕の盛り上がり部分が完全に形成されてから次の放電が生じるように放電時間および放電休止時間を制御する必要があると考えられる。図14は、D. F. を変化させたときの加工速度 $\dot{R}$ と体積電極消耗率 W を示したものである。一般に鉄鋼材料の場合、D. F. を上げると加工速度は大きくなるが、図(a)より明らかなようにチタン合金の場合、加工速度は、D. F. が大きいほど大きいわけではなく、放電時間 τ_p によって加工速度が最大となるD. F. が存在する。放電時間によって放電痕の盛り上りの大きさ、盛り上がりの時間が異なりそれに応じた休止時間を与えることで安定した加工状態が得られ、加工速度が増加すると考えられる。一方、図(b)より明らかなように電極消耗はD. F. が小さいほど小さい傾向を示す。これは、D. F. が小さいほど放電状態が安定したものとなり、なおかつ単位時間当りの加熱冷却回数が減少するので、電極消耗も小さくなると考えられる。これらの結果により適当な加工条件を選択すれば、低消耗でSKD11に劣らない加工速度を得ることができることが分かる。

図15は、D. F. =10%としたときのチタン合金の放電電圧および放電電流波形を示す。先ほどの図8と比較するとこの場合は、確実に設定値どおりの波形が得られ、短絡の少ない良好な加工状態であることが分かる。

図16は、電極消耗の比較的小さい、逆極性、放電時間 $\tau_p=300\mu s$ の条件でD. F. と加工速度 $\dot{R}$ お

図14 各デューティ・ファクタにおける加工速度 $\dot{R}$ および電極消耗率 W と放電時間 τ_p との関係

図15 連続放電実験における放電電圧および放電電流波形 (D. F. = 10%)

図16 デューティ・ファクタと加工速度 $\dot{R}$ および電極消耗率 W との関係

よび体積電極消耗率 W との関係を示したものである。図から明らかなようにこのような条件では、D. F. を下げることによって加工速度が増加し、電極消耗をおさえることができる。特に図中のD. F. = 10%としたときの体積電極消耗率は、2.4%とかなり小さい。また、銅電極を用いた別の加工実験によれば逆極性、放電電流 $I_p=4A$ 、放電時間 $\tau_p=100\mu s$ 、D. F. = 25%の条件下で $W=0.55\%$ と無消耗に近い結果も得られている。これらは、仕上げ加工用の条件として使用できると考えられる。

4. 結 論

チタン合金が放電加工において難加工となる原因を実験的に検討し、低消耗、高能率放電加工が可能となることを明らかにした。本研究で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 単発放電における放電痕の盛り上りは鉄鋼材料よりもチタン合金の方が大きい。さらに盛り上りに要する時間もチタン合金の方が長い。
- (2) 単発放電における放電痕除去体積は鉄鋼材料よりもチタン合金の方が大きく、融点と熱伝導率の積が小さい材料ほど加工されやすいとする従来の説に対応する。
- (3) 連続放電になると、チタン合金は鉄鋼材料に比べ加工速度が小さく電極消耗が大きくなる。チタン合金が難加工となるのは、放電痕の盛り上りが大きく、盛り上る時間が長いために短絡が発生しやすく、加工が不安定になるためである。
- (4) デューティ・ファクタを下げ、十分な休止時間を与えることによって加工状態を安定にし、チタン合金の低消耗・高能率加工が可能となる。

最後に実験にあたって便宜を図っていただいた(株)ソディック、(株)神戸製鋼所ならびに岡山理科

大学分析センターに謝意を表する。

参考文献

- 1) 斎藤長男：放電加工のしくみと100%活用法，技術評論社(1979)56.
- 2) 宇野義幸，遠藤 修，中島利勝：単発放電痕生成機構に関する基礎的研究，電気加工学会誌，25，49(1991)9.
- 3) 木本康雄：電気・電子応用精密加工，オーム社(1982)36.
- 4) 井上 潔：放電加工の原理，未踏加工技術協会(1979)11.
- 5) 草道英武：金属チタンとその応用，日刊工業新聞社(1983)59.
- 6) 2)に同じ

(1993年 6 月10日受付)