研究論文

回転する電極を用いた Ti-6Al-4V 合金の
微小放電加工

顔 炳華*・劉 弘松**

Small electrical discharge machining of Ti-6Al-4V alloy
with rotating electrode

Biing Hwa YAN* and Hong Song LIU**

In order to reveal the small electrical discharge machining (EDM) characteristics of Ti-6Al-4V alloy with rotating electrode, a series EDM tests are carried out. Attaching importance to surface roughness, the discharge current must be small, but when it under the range of 0.2 A, even though it is more smaller, the surface roughness can not be in expectation of improvement. When the electrode is negative polarity, the work surface will be stuck with carbon to make a clear-out crater profile of discharge point. Machining the Ti-6Al-4V alloy in the small discharge current, the material removal rate increases with the increasing of pulse duration, but there is no effect on the work surface.

Keywords: Ti-6Al-4V alloy, electrical discharge machining, removal rate, surface roughness, rotating electrode

(Received October 26, 1992)

1. 緒 言

チタン合金は比重が軽く、比強度、耐食性および耐熱性などの点で優れている軽金属であるため航空産業だけでなく、自動車、石油探勘用管材、深海潜水艦、生体用材料およびメガネフレームなどに幅広く使われている。しかし、化学的な活性が高く、他材料に較べ熱伝導率が低く、切削加工時、熱集中現象が起り、工具摩耗を激増させるため加工精度の確保が難しく、典型的な難削材とみなされている¹⁾。特に肉薄や細長いチタン合金部品の加工においては、切削抵抗による形状変形が避けられない。また、チタン合金は磁性がなく、肉薄や小物の加工物の固持が困難であるため研磨加工にも難点がある。一方、放電加工が材料の機械的性質による影響がなく、難削材のチタン合金の加工方法として期待されているが、これに関する研究報告が少ない^{2)~6)}。特にチタン合金の加工面精度重視の場合、微小放電エネルギーで加工しなければならないが、その放電加工の特性について、

いまだに不明な点が多い。そこで、本報では、最も多く使用されている Ti-6Al-4V 合金を試験材とし、また銅を電極材として二次元的に揺動しながら、微小放電エネルギーで放電加工実験を行い、加工速度および表面あらさなどの特性について調べ、検討する。

2. 実験方法

実験に使用した加工材は Fig. 1 に示す組織をもつ直径 8 mm の市販の Ti-6Al-4V 合金である。放電加工実験の実施前に試片を鏡面に近いポリッシング処理をし、アセトン液中で超音波洗浄、また精密電子秤で重量を測定した。また、加工電極材は銅を使用した。その前処理法は Ti-6Al-4V 合金試片と同じ方法で行った。なお、実験は Table 1 に示す加工条件で、型彫り放電加工機を用いて行ったが、加工方式としては通常の放電加工と異なり、加工電極を二次元的に揺動しながら放電加工実験を行った。

* 国立中央大学機械工程研究所 (台湾)。Department of Mechanical Engineering, National Central University (Chungli, Taiwan).

** 国立中央大学大学院 (台湾)。Graduate Student, National Central University (Chungli, Taiwan).

Fig. 1 Microstructure of Ti-6Al-4V alloy.

Table 1 Experiment conditions

work condition	work parameter
workpiece	Ti-6Al-4V
electrode	Cu
workpiece size	$\phi 12.7 \times 10$
electrode size	$\phi 8 \times 40$
polarity	positive, negative
discharge voltage (V)	150
discharge current (A)	0.05~24
pulse duration (μ s)	2~50
dielectric	kerosene
dielectric flow rate	6l/h
machine head	rotating
work time (min)	60

3. 実験結果および考察

3.1 微小エネルギー放電の意義

放電加工は高エネルギー密度による溶融加工法である。したがって、加工物に加えるエネルギー量の大小によって加工状態が異なる。また、他の機械的加工法と違って放電加工の進行は工具と被加工物が非接触で、かつ狭い電極間で行うため、エネルギーの分配および加工屑の排除などが加工状態の良否に影響を及ぼす。特に微小エネルギーで放電する場合、絶縁破壊までに至る極間距離がきわめて狭いため極間の現象が一層に複雑となり、材料の除去機構が同じでも除去規模や加工面の構成が異なる状態である。一例として Fig. 2 に示すように、パルス幅 5μ s、電流 24 A と 0.05 A で放電した加工例を示す。大電流放電では放電加工面が溶融され、また厚い再凝固層によって構成されているが、小電流放電の場合になると加工表面が小さな放電痕でランダムに分布していることがわかる。すなわち、大電流放電の場合では放電エネルギーが大きく、放電熱が加工表面よりかなりの深

Fig. 2 Effect of discharge current on the surface of Ti-6Al-4V alloy ($I_p=24$ A, 0.05 A, $\tau_p=5 \mu$ s)

Fig. 3 Effect of discharge current on the electrode surface ($I_p=24$ A, 0.05 A, $\tau_p=5 \mu$ s)

さと広さまでに拡散して大規模の材料除去挙動を行うのに対し、小電流放電では熱の伝播が狭い範囲に止まり、材料の除去規模が小さく、表面あらさがよくなる。このような結果が Fig. 3 に示す銅電極の表面状態からも同様にみられる。通常、加工電極の表面状態がそのまま加工物に転写するので、電極の表面精度が高いほど、より良好な加工面が得られる。したがって、微小放電エネルギーが精密放電加工の可能性を高めることにもつながると思われる。しかし、前述のように、微小エネルギーで放電加工を行うとき、極間距離がきわめて狭いため、適切な放電加工方式および加工条件の選定が重要である。

3.2 加工電極を揺動する Ti-6Al-4V 合金の放電加工

生産現場での鉄系金属、たとえば炭素鋼や SKD 系列材料の放電加工は生産効率を考慮しなければならないため、通常、数 A ～ 数 10 A のような比較的大きな電流で加工することが多い。この場合、放電電流の増加に伴い加工速度が高くなり、放電加工面も荒くなる。言い換えれば、加工面精度重視の場合、低い電流で放電すればよい。ただし、前述のように放電電流が小さくなると極間距離が非常に狭くなるため、加工屑の排除が一層に困難となり、加工面精度の改善に限度がある。

加工電極を二次元的に揺動する放電が極間距離を拡大しながら放電加工を行うため、加工屑の排除に有益であり、また、加工状態の改善にも有効であるといわれる⁷⁾。

Fig. 4 Schematic rotating motion of electrode.

Fig. 5 Comparison of work surface of Ti-6Al-4V alloy in different small discharge current with rotating electrode.

しかし、Ti-6Al-4V合金の熱伝導率が通常の炭素鋼の約1/4~1/6しかない⁸⁾。また、小電流での放電加工特性が必ずしも通常の鉄鋼材料に類似するとは限らない。そこで、加工電極をFig. 4に示すような揺動パターンで揺動しながら放電加工を試みた。

Fig. 5は加工電極の極性を陽極とした場合（以下Cu(+)とする）、加工電極を二次元的に揺動しながら通常の加工電流より比較的小さい電流で3.6 ks放電したTi-6Al-4V合金の表面あらさを示す。放電電流の減少に伴い表面あらさが小さくなるが、電流が0.1 A以下のように、かなり小さい領域になるとその差がほとんどないことがわかる。すなわち、ある電流値以下の領域になると放電電流を小さくしても加工面の改善が期待できない。また、パルス幅による影響もみられない。一方、同加工条件での加工速度の曲線図をみると、Fig. 6に示すように、放電電流が0.2 A以下となると電流が異なっても加工速度がほとんど変わらない。また、1.5 Aでの放電の場合、パルス幅の増加にしたがって加工速度が急速に上

Fig. 6 Comparison of removal rate of Ti-6Al-4V alloy in different small discharge current with rotating electrode.

昇する傾向であるが、他の小電流の場合では加工速度がほとんど変わらない。これらの実験結果から、低エネルギーでのTi-6Al-4V合金の放電加工では、表面あらさが一定となる電流値が加工速度一定となる電流値に比べやや小さく、またパルス幅の影響がないことがわかる。

Fig. 7はFig. 5と同加工条件で放電して得られたTi-6Al-4V合金の放電加工面の状態である。1.5 Aで放電したとき加工面が熔融され、再凝固の状態を呈する。特にパルス幅が15 μs以上になると再凝固層が厚く、加工面がかなり荒くなっている。これに対し、放電電流が0.2 A以下の場合では再凝固層がかなり浅く、加工面も細かい状態となっている。また、そのときの加工電極の表面状態を観察してみると、Fig. 8に示すように電流1.5 A、パルス幅50 μsと15 μsおよび電流0.2 A、パルス幅50 μsのときだけが荒く、他の加工電極面が比較的平滑である。

ところが、Fig. 5と同加工条件で加工電極の極性を陰極（以下Cu(-)とする）に変えた場合、Fig. 9に示すように放電電流1.5 Aのときだけ表面あらさがCu(+)のときより大きくなるが、他の小電流では両極性間の差がそれほどないことがわかる。また、この場合で得られた放電加工面がCu(+)のときと比較してみると加工面全体が黒く呈し、Fig. 10に示すように、放電加工液よりの熱分解炭素が多く付着していることがわかる。しかし、この炭素層を丁寧に拭き、またアセトン液中で超音波洗浄してみると加工面全体がCu(+)のときより光沢性がよい。Fig. 11はCu(-)で、異なる条件で放電したときのTi-6Al-4V合金の表面状態である。図より、パルス幅および放電電流が小さくなるほど加工面上の放電痕が明瞭に呈することがわかる。なお、このときの加工電極の表面状態を観察してみると、Fig. 9から類推されるように、高電流域および高パルス幅のとき、Cu(+)で放

Fig. 7 Micrographs of work surface of Ti-6Al-4V alloy after machining in different conditions.

Fig. 8 Micrographs of electrode surface after machining in different conditions.

電の電極面より荒くなっていた。

上述のように、加工電極の極性を Cu(-)とした場合の放電加工面が Cu(+)のと比較してみると加工面上の

Fig. 9 Effect of negative polarity of rotating electrode on work surface of Ti-6Al-4V alloy in different discharge current.

Fig. 10 Micrograph of stuck carbon on the work surface of Ti-6Al-4V alloy when machining in negative polarity of electrode.

放電痕が明瞭に呈することがわかる。この原因については次のように考えられる。すなわち、実験に使用された放電加工液が主として炭素と水素の化合物によって構成されるので、放電加工の進行時に放電柱中の加工液が高熱によって分解され、負に帯電する炭素が陽極性の加工物に付着しやすく炭素膜を形成する。このような炭素膜がいったん形成されると Fig. 12に示すように放電点が加工物の表面ではなく、炭素膜上に点在するので加工面に対する放電熱の衝撃および伝播が緩和され、放電熱の影響が比較的狭い範囲に止まる。また、極間の爆圧衝撃力による影響が比較的小さいため材料の除去規模が小さく、加工面上に生じた放電痕の輪郭も明瞭となる。これに対し、加工電極の極性を Cu(+)とした場合、陰極性の加工物に炭素膜の形成ができないため放電点が直接に加工面上に形成し、放電熱による表面の熔融状態が激しく、材料の除去規模も比較的大きい。そのため、放電点

Fig. 11 Effect of discharge current and pulse duration on work surface of Ti-6Al-4V alloy when machining in negative polarity of electrode.

の形状が乱れ、また再凝固層も厚く、加工面が荒くなりやすい。

4. 結 言

Ti-6Al-4V 合金を供試材として加工電極を二次元的に揺動しながら微小放電エネルギーで放電加工実験を行い、加工速度、加工面あらさおよび極性による影響などについて調べた。得られた結果は次のようになる。

(1) Ti-6Al-4V 合金の放電加工時、加工面精度重視の場合、放電電流を小さくすべきである。

(2) 放電電流がかなり小さい領域になると、電流の大きさによる表面あらさの影響がほとんどない。すなわち、ある電流値以下になると、放電電流を小さくしても加工面の改善が期待できない。

(3) Ti-6Al-4V 合金を微小放電エネルギーで放電する場合、程度が小さくてもパルス幅の増加に伴い、加工速度が大きくなる。しかし、表面あらさに対し、パルス

Fig. 12 Comparison of material removal mechanism in different polarity.

幅による影響がみられない。

(4) 微小放電エネルギーで放電する場合、加工電極の極性を Cu(-) としたときの加工面が Cu(+) で放電した加工面と比較してみると炭素膜が付着しやすく、加工面上に生じた放電痕の輪郭が明瞭に呈することがわかる。

本実験の遂行は中華民国国家科学委員会の補助金 (NSC81-0405-E-008-07) によって行われたので、こゝで感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 狩野勝吉：難削材の切削加工技術，工業調査会，(1989)，202～204.
- 2) 財満鎮雄，平山 武：軽金属，**14** (1964)，48.
- 3) 財満鎮雄，平山 武，加茂 進：軽金属，**14** (1964)，269.
- 4) 財満鎮雄，平山 武，加藤信吾：軽金属，**15** (1965)，241.
- 5) 財満鎮雄，野村秀夫，大須賀俊彦：軽金属，**18** (1968)，210.
- 6) 顔 炳華，謝 福田：軽金属，**42** (1992)，644.
- 7) 向山芳世編：形彫・ワイヤ放電加工マニュアル，大河出版，(1989)，154～157.
- 8) 草道英武，村上陽太郎，木村啓造，和泉 修編：金属チタンとその応用，日刊工業新聞社，(1990)，144～145.