特 集 号

研究論文

Ti-6Al-4V 合金の放電加工特性

顔 炳華*・謝 福田*

Electrical discharge machining characteristics of Ti-6Al-4V alloy

Biing Hwa YAN* and Fu Ten SHIEH*

In order to reveal the electrical discharge machining (EDM) of titanium alloy, a series EDM tests on commercial product Ti-6Al-4V with graphite and copper used as the tool electrode materials were carried out at different parameters such as discharge current and pulse duration. The relationships between these factors and material removal rate, surface roughness, enlargement and heat-affected layer were investigated. The following main results were obtained. From the view point of metal removal rate using graphite electrode with negative polarity is remarkably larger than the copper electrode. But from the view point of surface roughness copper electrode is better than graphite electrode. The thickness of heat-affected layer increases with increasing pulse duration and discharge current, especially, when the pulse duration is large enough, the heat-affected layer becomes severely.

Keywords: Ti-6Al-4V alloy, electrical discharge machining, electrode material, removal rate, heat-affected layer

(Received June 10, 1992)

1. 緒 言

チタン合金の実用化はニッケル系超耐熱合金と同じ、まだ歴史が浅いが、比重がわずか4.5、引張強さが材種によって240~1180 N/mm²、融点が1658~1678°C、比強度、耐食性および耐熱性などの点で優れる軽金属である。目下、航空機のエンジンや機体、ロケット、自動車、石油探勘用管材、深海潜水艦、生体用人工骨、入歯およびメガネフレームなどに広く使われているが、靱性が高く、また、他材料に較べ熱伝導率が低く、銅材の60分の1しかないため、典型的な難削材の一つとみなされている。

放電加工が材料の機械的性質による影響がないため、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く^{1)~4)}、その放電加工の特性についても、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、グラファイトおよび銅を電極材として用いて放電加工実験を行い、加工速度、加工面あらさ、加工拡

大量および表面変質層について検討した結果を報告する。

2. 供試材および実験方法

実験に供した加工材は市販されているTi-6Al-4V合金で、Fig. 1に示す組織写真のように、 α 相と β 相が共存する典型的な両相材である。また素材が引抜き加工によって製造した棒材であるため、結晶粒が引抜き方向に長く伸ばされている。しかし、放電加工が局所の熔融除去加工法であるため、材料の融点や熱伝導率が変わらない以上、結晶の方向性や形状による影響が少ないと考えられる。

なお、実験はTable 1に示すような加工条件で、型彫り放電加工機を用いて行った。

3. 実験結果および考察

3.1 極性による加工速度への影響

Fig. 2はグラファイトを加工電極とし、異なる極性で放電したときの加工速度の比較である。図より、グラフ

* 国立中央大学機械工程研究所 (中華民国台湾省)。

Department of Mechanical Engineering, National Central University (Taiwan)。

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

Table 1 Electrical discharge machining conditions

test item condition	material removal rate, surface roughness	enlargement
voltage (V)	150	150
current (A)	3~24	12
pulse duration (μ s)	30~200	5~200
dielectric	kerosene	kerosene
electrode material	graphite, copper	graphite, copper
dielectric flow rate (l/min)	20	20
electrode size (mm)	$\phi 8 \times 40$	$\phi 8 \times 40$
machining time (min)	30	piercing 2 mm thickness of Ti-6Al-4V alloy

ファイトの極性を陽極とした場合（以下 Gr(+)とする），その加工速度が陰極（以下 Gr(-)と表す）のときに比べ，約十分の一しかない。一方，銅を加工電極として放電する場合，Fig. 3 に示すように，陽極とした場合（以下 Cu(+)とする）の加工速度が陰極とした場合（以下 Cu(-)と表す）より速い。また，いずれの極性においても両加工電極材とも最初の段階では，加工速度がパルス幅の増大に伴って増加するが，あるパルス幅値以上となると，かえって小さくなる。特に電流が大きくなる場合，この傾向が非常に顕著である。このことは通常の鉄系金属材料の放電加工においてもよく見られる^{5),6)}。すなわち，加工速度の変化が単発の放電エネルギー（ほぼ放電電流×パルス幅）の大きさとは必ずしも一義的な関係となっていない。この理由は次のように考えられる。すなわち，パルス幅の増加に従い，一発のエネルギーが増大したが，放電痕の拡大に伴うエネルギー密度の低下および溶融層厚さの増加のため，極間の爆圧力が溶融層を完全に除去できない。また，そのときの加工屑が比較

Fig. 2 Effect of polarity on the metal removal rate with graphite electrode.

Fig. 3 Effect of polarity on the metal removal rate with copper electrode.

的に大きいため，排除されにくく，材料の除去速度を低下させた。また，極間に生じた爆圧力の作用時間が放電パルスの大きさに関係なく，ほぼ一定となっているため⁷⁾，放電パルス幅が長いほど，極間爆圧力の作用時間と放電パルス幅との比が小さくなる。そのため，加工速度が放電エネルギーの増加に伴わず，かえって小さくなる。これについて，加工深さと加工時間との関係で表すと一層明瞭である。一例としてグラファイト Gr(-)の電極を用いて放電電流 $I_p=12$ A，パルス幅 $\tau_p=5\sim 200$ μ s で放電したときの Ti-6Al-4V 合金の加工深度と加工時間の関係を示せば，Fig. 4 のようになる。図より，パルス幅が小さいとき，加工深度と加工時間が直線的な関係になっているが，パルス幅が 50 μ s となると，放電加工時間 27 min で，加工速度が明顯に遅くなり始める傾向となる。パルス幅が大きく 100 μ s となると，ただ 6 min 経つだけで放電加工速度が遅くなる。パルス幅がさらに増大して 200 μ s となると，エネルギー量が最も大きいにも拘らず加工速度がかなり低下していることがわか

Fig. 4 Influence of pulse duration on the machined depth.

Fig. 5 Relationship between surface roughness and pulse duration with graphite electrode.

る。

なお、電極材質で比較する場合、銅よりもグラファイト電極の方が加工速度がはるかに大きいことがわかる。

3.2 放電表面あらさとパルス幅の関係

上述のようにグラファイトおよび銅を電極材として用い、Gr(+)およびCu(-)の極性で放電した場合、材料除去速度が非常に小さく、加工速度重視の観点から、実用上に困難があると思われる。したがって、以下では、G(-)およびCu(+)を加工電極としたときの実験結果について討論し、G(+)およびCu(-)の実験結果を省略する。

Fig. 5にグラファイト電極Gr(-)を用いて異なる電流で放電したとき、表面あらさとパルス幅の関係を示す。図より、放電電流およびパルス幅の増加に伴い、表面あらさが増大するが、放電電流6A以下の場合では、パルス幅50μs以上となると表面あらさが一定となり、安定な放電状態で加工進行していることが推測される。このような傾向がFig. 6に示す銅Cu(+)の場合も同じである。ただし、両電極材料で比較する場合、銅を用い

Fig. 6 Relationship between surface roughness and pulse duration with copper electrode.

Fig. 7 Influence of pulse duration on the electrode surface of graphite and copper ($I_p=24$ A, $\tau_p=5-200$ μs).

た方が加工表面あらさがはるかに小さく、グラファイト電極の場合の約半分しかないことがわかる。

そのときの電極の放電表面状態を一例として示せば、Fig. 7のようになる。図より、パルス幅が小さい($\tau_p=5$ μs)とき、いずれの電極材料でもその表面が平滑であるが、パルス幅が大きく、 $\tau_p=100$ μs以上となると、グラファイト電極の表面が極間の爆圧力によって剝落され、またはボイドの形態となる。これに対し、銅の場合は溶解して再凝固の形態を呈する。一方、Ti-6Al-4V合金の放電加工面については、Fig. 8に示すようにい

Fig. 8 Influence of pulse duration on the surface of titanium alloy ($I_p=24$ A, $\tau_p=5\text{--}200$ μs).

れのパルス幅においても、銅よりもグラファイト電極で放電した方がTi-6Al-4V合金の表面に大きなクレータが生じて、比較的に大きな爆圧力が生じたことが推測される。

3.3 Ti-6Al-4V合金の放電拡大量

放電加工時に生じた加工屑が排除途中に、再び工作物と放電現象を起こすことは二次放電といわれる。それによって、工作物が所定寸法より拡大され、程度差があっても、形状精度が低下することが避けられない。

Ti-6Al-4V合金の放電加工においても、二次放電による加工拡大の発生が考えられる。これについて調べるため、2 mm厚さのTi-6Al-4V合金を放電電流 $I_p=12$ A、パルス幅 $\tau_p=30\text{--}200$ μs で、グラファイト Gr(−) および銅 Cu(+)を用いて貫通放電加工実験を行った。Fig. 9にその結果を示す。図より、いずれの電極材を用いても、入口の加工拡大量が約出口の2倍となっている。また、電流一定の場合、パルス幅の増加に伴い、拡大量が大きくなる。前述のように、放電エネルギーが放電電流とパルス幅の積に比例する。電流一定の場合、パルス幅が増加すると単発放電エネルギーも大きくなる。したがって、放電加工の拡大量は単発エネルギーの大小と密接な関係を持つと考えられる。なお、両加工電極材で比較すると、グラファイト電極の方は銅の約2倍の拡大量となっている。

Fig. 9 Influence of pulse duration on the enlargement.

Electrode Cu(+) $I_p=24$ A

Fig. 10 Influence of pulse duration on the heat-affected layer of titanium alloy.

Fig. 11 Microstructure of heat-affected layer ($I_p = 24$ A, $\tau_p = 200$ μ s).

3.4 Ti-6Al-4V 合金の放電変質層

放電加工は熱作用による材料除去で、放電点の温度が8000~12000°Cにもなるといわれる。したがって、放電点の材料表面が急熱で蒸発され、その直下の材料が熔融状態となり、爆圧力によって吹き飛ばされる。融点以下の層が急熱・急冷によって変質層として残留する。この変質層が厚いほど、部品として使うとき問題となる。また、除去する二次加工に手間がかかる。したがって、Ti-6Al-4V 合金の放電変質層の生成状態およびこれを放電加工のとき、いかにして薄くすることは重要な課題である。Fig. 10は銅Cu(+)を電極として電流 $I_p = 24$ A, $\tau_p = 5, 100, 200$ μ s で放電したときのTi-6Al-4V 合金の変質層の状態である。図よりパルス幅5 μ s のとき、Ti-6Al-4V 合金の表面上に母材と異なる薄い層が残留するが、パルス幅の増大に伴い、この層が厚くなることかわかる。ただし、パルス幅100 μ s 以下の場合では、この変質層が付着物のような形態で存在し、その直下の領域が母材と同じ組織を呈する。この付着物のようなものは爆圧力によって除去できず、熔融材の再凝固物である。一方、パルス幅200 μ s となると、明らかに母材と異

Fig. 12 Hardness distribution of heat-affected layer.

なる組織層が約500 μ m ほどの厚さで存在する。この変質層の全貌およびマイクロビークスで測った硬さの変化について示せば、Fig. 11およびFig. 12のようになる。図より、Ti-6Al-4V 合金の放電表面の硬さが最も高く、内部にいくに従って硬度が減少し、表面から約500 μ m のところに母材と同じ程度となる。

上述のようにパルス幅が短いとき、変質層が薄くなる理由は、短パルス放電では放電点のエネルギー密度が高く、Ti-6Al-4V 合金の表面材料が急熱によって蒸発された。また、その場合、熱伝導の時間が非常に短いため熔融層の生成が薄く、極間爆圧力によって比較的容易に除去できる。したがって、加工後の残留変質層が薄くなる。これに対し、長パルス放電では熔融層が厚く、極間爆圧力による除去が困難である。そのため変質層が大きくなる。

4. 結 言

Ti-6Al-4V 合金は他の金属材料に比べ熱伝導率が低く、切削加工時、熱集中によって大きな工具摩耗を生じやすいため、典型的な難削材の一つである。

放電加工は材料の機械的性質による影響がなく、Ti-6Al-4V 合金の加工方法として期待されている。本実験ではTi-6Al-4V 合金の放電加工特性について調べるため、最も多く使われている市販のTi-6Al-4V 合金を試験材とし、グラファイトおよび銅などの電極材を用いて放電加工実験を行った。得られた結果を次のようになる。

(1) Ti-6Al-4V 合金の放電加工時、加工速度を重点にする場合、グラファイト電極Gr(-)を使用すべきである。また、加工条件としては低 I_p 、高 τ_p の条件よりも高 I_p 、低 τ_p を選択すべきである。

(2) いずれの電極材料を用いても放電加工速度が I_p あるいは τ_p の増加に伴い、直線的な関係になってい

い。

(3) 放電加工面のあらさが I_p および τ_p のいずれの増加に伴い、大きくなる。また、加工面精度重視の場合では銅電極を使用すべきである。

(4) Ti-6Al-4V 合金の加工変質層が I_p あるいは τ_p の増加に伴い、厚くなる。特にパルス幅がある一定値以上になると変質層が急激に増大する。

本実験の遂行は国家科学委員会の補助金 (NSC 80-0422-E-008-01) によって行われたので、ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 財満鎮雄, 平山 武: 軽金属, **14** (1964), 48.
- 2) 財満鎮雄, 平山 武, 加茂 進: 軽金属, **14** (1964), 269.
- 3) 財満鎮雄, 平山 武, 加藤信吾: 軽金属, **15** (1965), 241.
- 4) 財満鎮雄, 野村秀夫, 大須賀俊彦: 軽金属, **18** (1968), 210.
- 5) K. K. B, Hon and S. C, Li: International Symposium for Electro-Machining (ISEM-9), (1989), 322~323.
- 6) 谷村 毅, 他 7 名: 電気加工技術, **12** (1988), 18.
- 7) 宇野義幸, 遠藤 修, 中島利勝: 電気加工学会誌, **49** (1991), 11.