

混粉超声振动对电火花加工 Ti-6Al-4V 表面结构及力学特性的影响

张云鹏, 孙广标, 张安洲

(西北工业大学, 陕西 西安 710072)

摘要: 研究混粉超声振动对电火花加工 Ti-6Al-4V 表面结构及力学特性的影响, 对传统电火花加工、混粉电火花加工及混粉超声振动电火花加工后 Ti-6Al-4V 试件的表面粗糙度、表面残余应力和显微硬度进行了测量, 采用 SEM 对 3 种加工方法的加工试件表面重熔层及微裂纹进行了观察, 采用能谱分析仪对加工表面进行了能谱分析, 探讨了 Al 粉、SiC 磨料超声振动对电火花加工表面结构和力学性能的影响机理。结果表明, 在混粉电火花加工基础上, 工作液中加入 20 g/L 的 SiC 颗粒, 电极施加轴向超声振动, 可使电火花加工表面粗糙度值 R_a 降低 0.5 μm 、重熔层厚度减薄 40 μm 、表面残余应力降低 50 MPa、表面显微硬度由 7650 MPa 提高到 9870 MPa。

关键词: 钛合金; 超声振动; 表面结构; 残余应力; 显微硬度

中图分类号: TG661

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2014)01-0189-05

钛合金 Ti-6Al-4V 因具有比强度高、抗腐蚀性好、高温力学性能优越、生物相容性等优点, 是航空、航天、海洋开发及医疗器械等领域应用最广泛的一种钛合金^[1,2]。随着钛合金在各领域应用的逐步扩大, 对钛合金加工件的表面质量及力学性能的要求也越来越高, 针对钛合金材料的加工技术和表面改性的研究也备受瞩目, 并已取得一些研究成果^[3,4]。

Ti-6Al-4V 采用机械加工方法加工时存在刀具温度高、刀尖磨损严重、零件变形等问题^[5], 尽管电火花放电加工方法 (EDM) 在加工 Ti-6Al-4V 钛合金时可解决上述问题, 但加工后表面重熔层、微裂纹及表面残余应力影响钛合金产品的疲劳强度和使用寿命。因此, 改善电火花加工钛合金的表面结构和力学特性是电火花加工方法应用在钛合金加工上所面临的巨大挑战^[6]。

混粉电火花加工方法可改善电火花加工的表面质量, 但加工效率较低。在提高电火花加工效率方面, 国内外学者利用超声加工 (USM)、超声电火花复合加工方法 (EDM/USM) 对钛合金进行了实验研究。台湾学者 Lin 等人^[7]对超声放电复合加工 Ti-6Al-4V 进行了研究, 表明超声辅助作用可明显提高电火花加工的效率, 降低重熔层的厚度。D. Kremer 等人^[8]研究发现, 电极的超声振动有利于工作液的循环, 缩短加工时间, 放电间隙中压力的变化提高了电火花加工的效

率。Di Shichun^[9]等人研究了超声作用在电火花加工微小孔时的效率, 发现电极的超声振动可使加工效率提高 4 倍左右。Chen 等人^[10]用去离子水作介质对 Ti-6Al-4V 合金进行了电火花加工, 结果表明钛合金的去除率显著提高, 而电极的损耗也明显降低。

本实验针对钛合金电火花加工存在表面质量差等问题, 提出混粉工作液超声振动放电复合加工方法, 研究混粉工作液的超声振动对钛合金电火花加工后表面粗糙度、残余应力、重熔层、表面微裂纹、显微硬度的影响。

1 实验

本实验是在常规电火花加工 Ti-6Al-4V 的基础上, 在煤油工作液中混入 15 g/L 的 Al 粉和 20 g/L 的 SiC 粉, 同时给电极施加一个超声机械振动 (振荡频率 f 为 24 kHz, 振幅 0.03 mm), 使工作液中 SiC 磨料冲击工件表面, 实现放电、超声复合加工作用。在混粉电火花加工的基础上, 对比研究 SiC 磨料的加入及超声振动作用对 Ti-6Al-4V 加工表面粗糙度、残余应力、表面硬度的影响。

本实验装置是在 DM7551 数控电火花成型机床上进行改造而成的, 机床主轴安装超声振动旋转装置, 振动频率 f 为 24 kHz, 振幅 A 为 0.03 mm, 电极转速

收稿日期: 2013-01-05

基金项目: 大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室研究基金 (JMTZ201103)

作者简介: 张云鹏, 男, 1976 年生, 博士, 讲师, 西北工业大学机电学院, 陕西 西安 710072, 电话: 029-88492852, E-mail: yunpeng_zhang@nwpu.edu.cn

300 r/min, 同时在煤油工作液中混入 SiC、Al 微粉, 实验原理见文献[7]所示。

实验材料为 Ti-6Al-4V 钛合金(直径 10 mm), 化学成分(质量分数, %): C 0.01、Al 6.0、V 4.2、Fe 0.04、O 0.09、N 0.01, 900 °C 退火处理, 硬度为 3480 MPa; 试件尺寸为 10 mm × 10 mm, 表面经磨削处理。测量仪器: Talysurf i120 型轮廓仪、HXS-1000AK 型显微硬度计、M9-CSPM4000 扫描电子显微镜等。实验条件如表 1 所列。

2 结果与讨论

2.1 混粉超声振动对电火花加工表面粗糙度的影响

2.1.1 表面粗糙度对比实验结果

图 1 为常规电火花、混粉电火花、混粉超声振动电火花加工 Ti-6Al-4V 钛合金的表面粗糙度对比实验结果。从图中可明显看到, 3 种加工方法中表面粗糙度都随脉冲宽度、峰值电流的增大而增大, 这是因为脉冲宽度和峰值电流的增大使单次放电能量增大, 从而在试件表面产生的电腐蚀凹坑深度变大, 导致表面粗糙度增大。通过对比可知, 图 1a 采用常规电火花方法粗糙度最大, 图 1b 混粉电火花加工的表面粗糙度较常规电火花降低 20%左右, 图 1c 是在工作液中增加 SiC 磨料, 同时电极做轴向振动, 可看出粗糙度在混粉电火花加工的基础上再降低 0.5 μm。同时实验中还发现, SiC 粉超声振动作用可使混粉电火花加工的效率明显提高。

2.1.2 导电 Al 粉作用机理分析

导电铝粉的加入使得两极间电场发生畸变, 如图 2 所示。假设铝粉是球形的, 由于介质球在电场中会被极化, 球面上会出现束缚电荷, 如图 2b 所示。根据电子学原理可知^[10], 该束缚电荷在球内产生的电场与外加电场 E_0 方向相反, 在球外产生的电场方向如图所

示, 因而, 束缚电荷所产生的电场与外电场叠加以后, 使得实际电场偏离原来的均匀电场, 如图 3c 所示。实际电场的最大值出现在铝介质球与煤油沿外加电场方向的交界处, 即图中的 A、B 两点, 其值为:

$$E_{\max} = \left[1 + 2 \left(\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1} \right) \right] E_0 \quad (1)$$

式中, ε_1 —煤油的相对介电系数; ε_2 —铝粉的相对介电系数; E_0 —外加均匀电场强度。

由于铝粉微粒是导体, 在静电场的计算中可认为它的介电系数 ε_2 无穷大, 因而有 $E_{\max} \approx 3E_0$ 。即导电铝粉的加入使得工作液中的实际电场强度最大增大 3 倍, 当电极的超声振动使得两极间隙达到煤油的击穿间隙 3 倍时, 铝粉颗粒处最大的实际电场强度已达到煤油的击穿电场, 从而在无数的铝粉颗粒处由于桥接作用而产生火花放电, 细化了放电能量, 使工件表面的电蚀凹坑深度变小, 起到降低表面粗糙度的作用。

表 1 实验条件

| Table 1 Experimental Condition | |
|---|--------------------|
| Work condition | Description |
| Electrode | Copper (12 mm) |
| Electrode revolution/r·min ⁻¹ | 300 |
| Dielectric fluid | Kerosene |
| Power supply voltage/V | 90 |
| Peak current, I_p /A | 3, 6, 9, 12, 15 |
| Polarity (workpiece) | Negative (-) |
| Working time/min | 10 |
| Pulse duration, t_i /μs | 100, 200, 300, 400 |
| Pulse-off time, t_o | $t_i \times K$ |
| Duty factor (K) | 1.5 |
| Amplitude of ultrasonic/μm | 30 |
| Abrasive grain | SiC (3 μm) |
| Conductor powder | Al (5 μm) |
| Concentration of powder/g·L ⁻¹ | Al: 15, SiC: 20 |

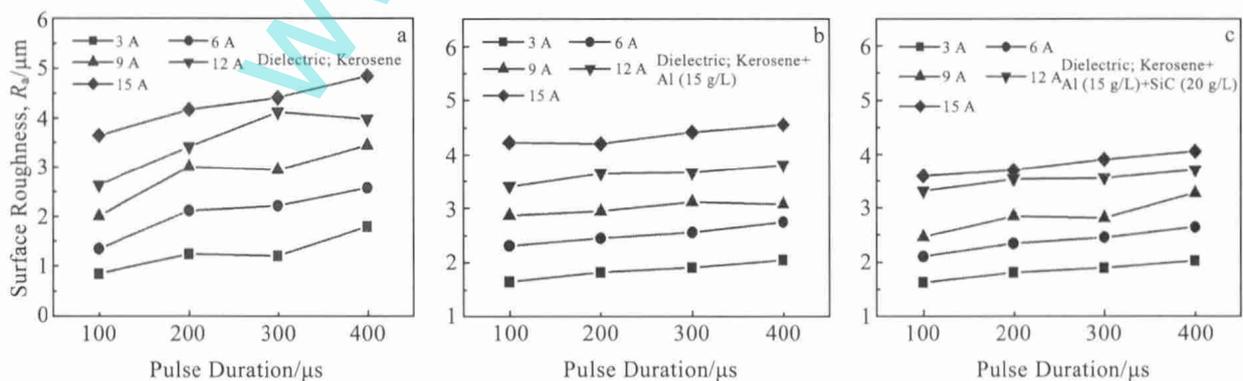


图 1 表面粗糙度与脉宽的关系

Fig.1 Surface roughness versus pulse duration for various peak currents: (a) conventional EDM, (b) powder mixed EDM, and (c) powder mixed EDM+USM

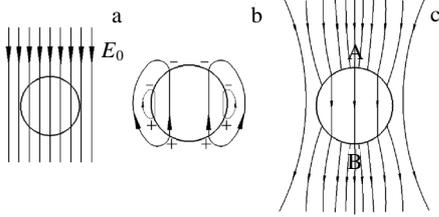


图 2 均匀电场的畸变

Fig.2 Aberration of uniform electric field: (a) uniform external electric field, (b) electric field of bound charge and (c) actual electric field

2.1.3 超声振动引起工作液扰动及 SiC 颗粒的冲击作用

电极端面随超声振动的瞬时位移方程为：

$$y(t) = A \cdot \sin(2\pi ft) \tag{2}$$

式中， A —超声振幅； f —超声振动频率。

对上式求导，可得电极端面的速度方程：

$$v(t) = \frac{dy}{dt} = 2\pi f A \cos(2\pi ft) \tag{3}$$

采用 ANSYS 中的 FLOTRAN 单元分析计算超声振动对工作液流场的影响，将超声振幅 $A=0.03 \text{ mm}$ ，频率 $f=24 \text{ kHz}$ 代入上式，同时考虑煤油的运动黏度为 $1.5 \text{ mm}^2/\text{s}$ ，密度为 $0.8 \text{ g}/\text{cm}^3$ ，利用流体动量守恒计算流体作用在工件壁面上的作用力，通过计算可得到电极振动分别为向上和向下速度最大时，放电间隙内的流场分布如图 3 所示。

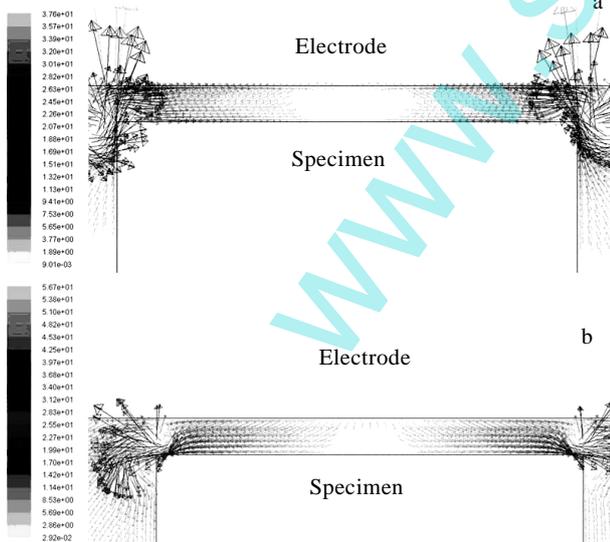


图 3 超声振动下间隙中工作液流场分布

Fig.3 Flow field distribution of working liquid in the gap by the maximum upward ultrasonic vibrate velocity of electrode (a) and the maximum downward ultrasonic vibrate velocity of electrode (b)

由工作液的流场分布图可看出，当电极向上运动时，工件周围的工作液会填充到放电间隙内，在试件表面出现流速最大点，最大速度为 37.6 m/s ；当电极向下运动时，放电间隙中的工作液会被挤压出去，在试件表面外侧出现速度最大点，最大速度可达 56.7 m/s 。

经过上述分析，在超声振动影响下，工作液会做紊流流动，超声振动将两极间隙之间的工作液挤压出去的作用大于将周围工作液吸收回两极间隙之间的作用，SiC 磨料在工作液的作用下对工件表面起到冲击作用，有利于表面粗糙度和力学性能的改变。

2.2 混粉超声振动对加工表面力学性能的改变

2.2.1 混粉超声振动对表面重熔层的控制作用

电火花放电加工的缺点是会在材料表面形成一层重熔层，影响材料的力学性能^[11]。图 4 为电火花加工、混粉电火花加工及混粉超声电火花加工 Ti-6Al-4V 试件的截面 SEM 照片。从图中可看出，常规电火花加工后表面重熔层厚度为 $110 \mu\text{m}$ ，混粉电火花加工的表面重熔层厚度为 $80 \mu\text{m}$ ，混粉超声振动电火花加工的表面重熔层厚度为 $40 \mu\text{m}$ 。这是因为，Al 粉的加入使得放电能量减小，从而使重熔层厚度得到控制；当 SiC 磨料和超声振动加入后，高速扰动的含 SiC 工作液对工件表面进行冲刷，使工件表面上一部分熔融的金属被冲走，从而进一步减薄重熔层厚度。

2.2.2 混粉超声振动对表面残余应力的改善

图 5 为 3 种加工方法的试件表面残余应力测量值。由图中可知，残余应力值随着与表层距离的增大而减小，直到重熔层与基材相接处，残余应力接近于零。

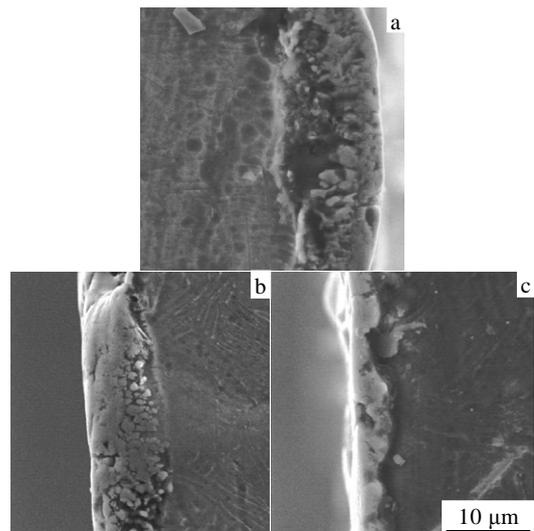


图 4 试件截面 SEM 照片 ($I_p=9 \text{ A}$, $t_i=200 \mu\text{s}$)

Fig.4 Cross section images of specimen machined by conventional EDM (a), powder mixed EDM (b), and powder mixed EDM+USM (c)

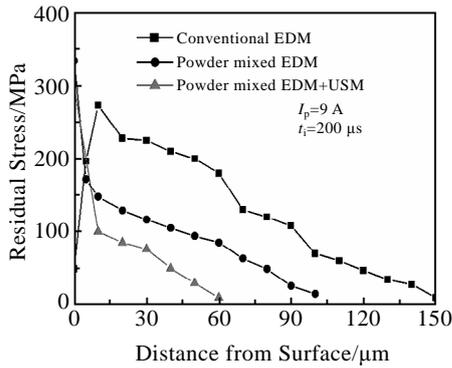


图 5 不同加工方法的表面残余应力分布

Fig.5 Distribution of surface residual stress with different machining method

这说明，残余应力主要分布在重熔层中，而混粉及超声作用对控制重熔层有积极作用，因此对残余应力值起到一定的控制作用^[12,13]。

由测量结果可知，Al 粉的加入使表面残余拉应力降低了近 100 MPa，这是因为混粉电火花加工的放电能量小，从而使试件表面与内部温度梯度较小，内外层在冷却过程中由于收缩差别导致的应力就降低了。而 SiC 磨料对试件表面的振动冲击作用使试件表面产生塑性变形，在试件表面产生残余压应力，抵消了放电产生的部分残余拉应力，从而使试件表面残余拉应力值再降低 50 MPa 左右。

2.2.3 混粉超声振动对表面裂纹的影响

由图 5 可知，传统电火花加工的最外表面处残余拉应力值较小，是因为该处残余应力水平已超过钛合金的断裂强度 1400 MPa，导致材料表面产生裂纹，从而释放部分残余拉应力，如图 6a 所示。而混粉电火花加工和混粉超声振动电火花加工，因表面残余应力较小，所以表面没有明显微裂纹的出现，如图 6b 和 6c 所示。因此，混粉及超声振动作用，在降低 Ti-6Al-4V 表面重熔层厚度的同时，降低了材料表面的残余拉应力，也使表面微裂纹得到有效控制，从而改善钛合金材料的表面力学性能，提高其疲劳强度。

2.3 混粉超声振动对表面硬度的影响

经电火花加工后在钛合金表面形成一层致密的耐磨重熔层，表 2 所列为 3 种加工方法加工的试件表面显微硬度测量值。传统电火花加工后，钛合金表面硬度为 7500 MPa，较基体硬度提高了 100%，工作液中混入铝粉后加工的钛合金表面硬度为 7650 MPa，变化不大，但工作液中混入 SiC 磨料同时电极附加超声振动后，加工的钛合金表面硬度为 9870 MPa，相对于基体硬度提高了近 200%。

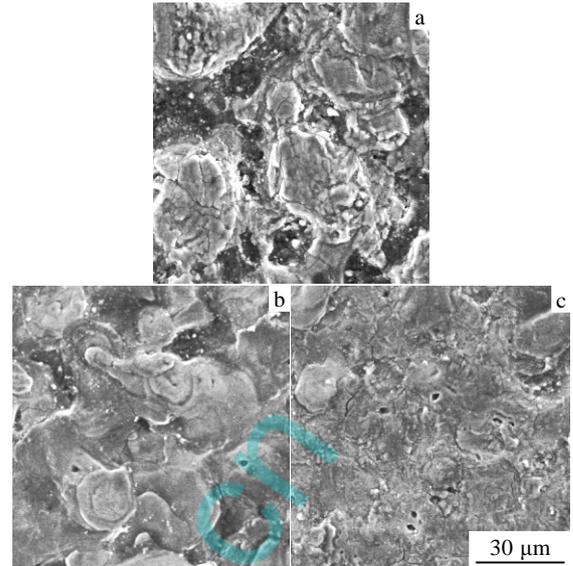


图 6 加工表面微裂纹($I_p=3 A, t_i=100 \mu s$)

Fig.6 Surface crack of specimen machined by conventional EDM (a), powder mixed EDM (b), and powder mixed EDM + USM (c)

表 2 表面显微硬度测量值

| Table 2 Measurement of surface hardness | | | |
|---|-------------|---------|------------------|
| Machining method | $t_i/\mu s$ | I_p/A | Hardness, HV/MPa |
| Conventional EDM | 100 | 9 | 7500 |
| Powder Mixed EDM | | | 7650 |
| Powder Mixed EDM+USM | | | 9870 |
| Matrix | | | 3480 |

图 7 是钛合金试件表面的能谱分析结果。由图中可看出，图 7b 中 Si、C 元素的含量较图 7a 中的高，这是因为当煤油工作液中混入 SiC 后，在超声振动作用下与工件表面发生碰撞，部分 SiC 颗粒残留在加工表面，在重熔凝固的过程中形成硬质相，从而使表面显微硬度提高，改善了钛合金的耐磨性。

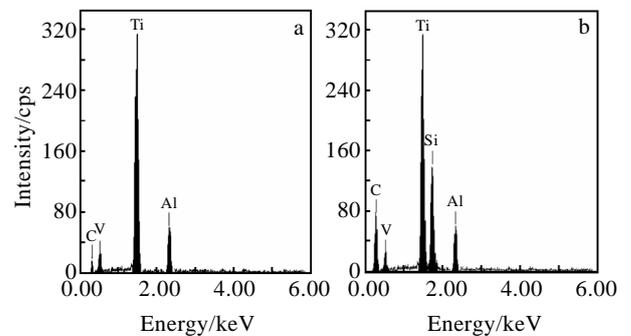


图 7 加工表面 EDS 分析

Fig.7 EDS analysis of surface machined by powder mixed EDM (a) and powder mixed EDM + USM (b)

3 结 论

1) 在 Al 粉浓度为 15 g/L 的混粉电火花加工基础上, 给旋转的电极施以 24 kHz 的超声振动, 同时在煤油工作液中加入 20 g/L 的 SiC 颗粒, 实现混粉电火花与超声加工的复合, 使钛合金的加工表面粗糙度值再降低 0.5 μm 左右。

2) 超声振动可引起工作液高速流动, 带动含 SiC 颗粒的工作液对材料表面进行冲击, 使混粉电火花加工表面重熔层厚度减薄 40 μm , 表面残余拉应力降低 50 MPa, 有效控制了表面微裂纹的产生, 使钛合金材料表面力学性能得到改善。

3) SiC 颗粒在超声作用下对钛合金表面的机械强化作用, 以及放电过程中钛合金表面 SiC 的残留, 使钛合金表面的显微硬度由混粉电火花加工的 7650 MPa 提高到 9870 MPa, 从而改善钛合金表面的耐磨性。

参考文献 References

- [1] Huang Boyun(黄伯云), Li Chenggong(李成功) *et al.* *China Materials Engineering Canon Vol 5(中国材料工程大典第五卷)*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 471
- [2] Lin Cui(林 翠), Liu Feng(刘 枫) *et al.* *Journal of Aeronautical Materials(航空材料学报)*[J], 2008, 28(5): 50
- [3] Lian Feng(连 峰). *Modern Manufacturing Engineering(现代制造工程)*[J], 2012(2): 18
- [4] Jiao Lei(焦 磊), Qiao Shengru(乔生儒) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2010, 39(12): 2091
- [5] Haron C H C, Jawaid A. *Materials Processing Technology*[J], 2005, 166: 188
- [6] Kao J Y, Tsao C C, Wang S S *et al.* *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2010, 47(1): 395
- [7] Yan Chong Lin, Biing Hwa Yan *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2000, 104: 171
- [8] Kremer D, Lhiaubt C, Moisan A. *Annals of the CIRP*[J], 1991, 40(1): 211
- [9] Di Shichun, Chi Guanxin. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2002, 120: 101
- [10] Chen S L, Yan B H, Huang F Y. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 1999, 87: 107
- [11] Li Minghui(李明辉). *The Theoretical Basis of EDM(电火花加工理论基础)*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1989: 335
- [12] Wang Che-Chung, Chow Han-Ming *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2009, 209: 4134
- [13] Yao Xiaofei(姚小飞), Xie Faqin(谢发勤) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2012, 41(9): 1539

Effect of Mixed Powder Ultrasonic Vibration on Surface Structure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V in Electro-Discharge Machining

Zhang Yunpeng, Sun Guangbiao, Zhang Anzhou

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The effect of mixed powder ultrasonic vibration on the surface structure and the mechanical properties of Ti-6Al-4V in Electro-Discharge Machining (EDM) were studied. The surface roughness, the residual stress and the micro hardness of Ti-6Al-4V samples machined by conventional EDM, powder mixed EDM (PMEDM) and combination process of powder mixed EDM with ultrasonic machining (PMEDM+USM) were measured, respectively. The recast layers and the surface cracks of samples machined by EDM, PMEDM and PMEDM+USM were observed by SEM, the quantitative analysis of each element of samples machined by PMEDM and PMEDM+USM was performed by energy spectrum analyzer. The effect mechanism of added Al and SiC powder in kerosene and ultrasonic vibration of electrode on the surface structure and the mechanical properties of Ti-6Al-4V machined by PMEDM+USM were also discussed. The results show that the surface structure and the mechanical properties of Ti-6Al-4V are improved by PMEDM+USM. With under the effects of the electrode ultrasonic vibration and SiC added in kerosene, the surface roughness decreases by R_a 0.5 μm , the recast layer reduces by 40 μm , the surface residual stress decreases by 50 MPa, and the surface hardness increases from 7650 to 9870 MPa than PMEDM.

Key words: titanium alloy; ultrasonic vibration; surface structure; residual stress; micro hardness

Corresponding author: Zhang Yunpeng, Ph. D., Lecturer, School of Mechatronics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-88492852, E-mail: yunpeng_zhang@nwpu.edu.cn