

## 电脉冲处理对钛合金超精密切削的影响

吴红兵<sup>1,2</sup>, 史云龙<sup>1</sup>, 杜雪<sup>3</sup>, 熊瑞斌<sup>4</sup>, 石松<sup>5</sup>

(1. 浙江大学 宁波理工学院 机电与能源工程学院, 浙江 宁波 315100;

2. 浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315100;

3. 香港理工大学 超精密加工国家重点实验室, 香港 999077;

4. 宁波职业技术学院, 浙江 宁波 315800; 5. 天津津航技术物理研究所, 天津 300308)

**摘要:** 钛合金材料由于难加工性限制其在各种工业领域的应用。为了改善钛合金材料 Ti6Al4V 在超精密切削过程中的加工性能, 采用电脉冲处理的方法对钛合金材料进行了处理。电脉冲处理改变了钛合金的微观结构和力学性能, 经其处理后的钛合金材料弹性模量、硬度及塑性等均有一定程度的降低。对电脉冲处理后的钛合金材料进行超精密切削实验, 结果表明电脉冲处理能够降低钛合金超精密切削过程中的切削力, 同时还可以提高钛合金材料在超精密切削后的表面质量。研究结果证明了电脉冲处理可以作为一种有效改善钛合金加工性能的处理方法。

**关键词:** 钛合金; 电脉冲处理; 超精密切削; 力学性能

**中图分类号:** TH161 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0220002

## Effects of electropulsing treatment on ultra-precision cutting of titanium alloy Ti6Al4V

Wu Hongbing<sup>1,2</sup>, Shi Yunlong<sup>1</sup>, Du Xue<sup>3</sup>, Xiong Ruibin<sup>4</sup>, Shi Song<sup>5</sup>

(1. College of Mechanical and Energy Engineering, Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China;

2. Zhejiang Provincial Key Lab of Part Rolling Technology, Ningbo 315100, China;

3. State Key Laboratory in Ultra-precision Machining Technology, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077,

China; 4. Ningbo Polytechnic, Ningbo 315800, China; 5. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China)

**Abstract:** Titanium alloy is well known with difficult machinability, which limits its application in many fields unavoidably. In the current study, electric pulse treatment (EPT) was firstly employed to treatment the titanium alloy. The microstructure and mechanical properties had been changed after the treatment. It is found that EPT technology can improve plasticity of titanium alloy, and the hardness, elasticity modulus and yield stress of titanium alloy will decrease after EPT. The result of cutting test proves that the EPT can decrease the cutting force and improve the surface quality.

**Key words:** titanium alloy; electric pulse treatment; ultra-precision cutting; mechanical properties

收稿日期: 2015-06-18; 修订日期: 2016-01-15

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY16E050008); 宁波市自然科学基金(2015A610091)

作者简介: 吴红兵(1979-), 男, 副教授, 博士, 主要从事难加工材料切削加工方面的研究。Email:wuhongbing79@126.com

通讯作者: 熊瑞斌(1975-), 男, 副教授, 博士, 主要从事加工技术方面的研究。Email:xiongruibin1975@126.com

## 0 引言

钛合金材料具有很多优良的性能,如高比强度、耐腐蚀性、较好的生物相容性及高温强度,因此被广泛应用于航空航天、生物医学、体育、建筑等行业。同时,由于钛合金还具有低导热性,高温时较高的化学活性,给加工过程带来极大的困难,属于典型的难加工材料<sup>[1]</sup>。国内外许多学者在钛合金的加工性方面已经做了大量的研究工作<sup>[2-5]</sup>。若要成功实现钛合金超精密切削过程,必须深入地理解钛合金材料的切削机理和提高其加工性。

近年来,电脉冲处理作为一种有效的方法在改善金属材料的性能方面得到较高的重视<sup>[6-10]</sup>。电脉冲处理与传统的热处理方式不同,电脉冲通过脉冲电流的作用可以导致材料组织及晶粒发生改变,达到提高性能的目的。参考文献[8]中采用电脉冲处理提高了钛合金材料的成形性。参考文献[9-10]采用电脉冲处理细化钛合金 TiAl<sub>3</sub> 晶粒尺寸达到改变力学性能的目的。文中采用电脉冲处理来改变钛合金的力学性能,达到改善钛合金加工性能及提高超精密加工的质量。

## 1 电脉冲实验

电脉冲实验采用的钛合金材料为 Ti6Al4V;试样为圆柱形棒料,尺寸为直径 14 mm,长度 120 mm。电脉冲发生器的原理及电脉冲实验装置如图 1 所示。实验中的电脉冲波形为三角波。具体的钛合金材料电脉冲实验的参数如表 1 所示。

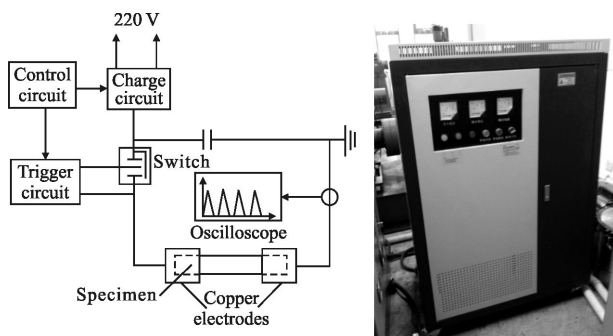


图 1 电脉冲发生器原理图及实验装置

Fig.1 Schematic diagram of electro-pulse generator and experimental device of EPT

表 1 电脉冲处理的参数

Tab.1 Parameters of EPT

Parameter	Value
Material	Ti6Al4V
Frequency of EPT/Hz	700
Voltage/V	3.72
Pulse time/ $\mu$ s	82.5
Temperature/ $^{\circ}$ C	600
Treatment time/min	10

## 2 电脉冲处理的结果分析

### 2.1 钛合金微结构

钛合金材料经过 EPT 处理后的微结构如图 2 所示。光学图片采用 LEICA DMLM 光学显微镜拍得。从图中可知,钛合金拉伸棒料的晶粒尺寸经过电脉冲处理后变小。

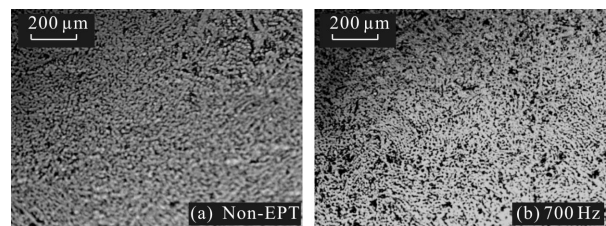


图 2 钛合金材料微结构光学图片

Fig.2 Optical images of titanium alloy material microstructure

### 2.2 EPT 对钛合金力学性能的影响

为了研究电脉冲处理对钛合金力学性能的影响规律,对电脉冲处理后的钛合金进行了压缩实验。试样尺寸为直径 3 mm,长度 6 mm。压缩速度为 0.2 mm/min,应变为 0.1。

硬度测试采用 Mitutoyo 硬度测试仪。测量时在每个试样上取 3 个点,加载力为 500 N,硬度值为 3 个点的平均值。表 2 为钛合金材料经过电脉冲处理后

表 2 钛合金材料的力学属性变化

Tab.2 Changes of mechanical properties of Ti6Al4V

	No-EPT	Frequency 700 Hz
Yield strength/MPa	895.4	724.2
Hardness/HV	329.8	307.1
Elastic modulus/GPa	69.9	49.54

各种力学性能参数的对比。从表 2 中可知,钛合金材料的硬度、屈服强度及弹性模量经过电脉冲处理后均有所降低。

### 3 超精密切削加工对比

#### 3.1 表面精选

图 3(a)、(b)分别为钛合金未经 EPT 处理及经过 EPT 处理后进行超精密切削加工获得的表面形貌。可以看出,经过电脉冲(700 Hz)处理后的钛合金超精密加工获得的表面质量均好于未处理前。表面粗糙度值测量位置距试样中心点 6 mm。

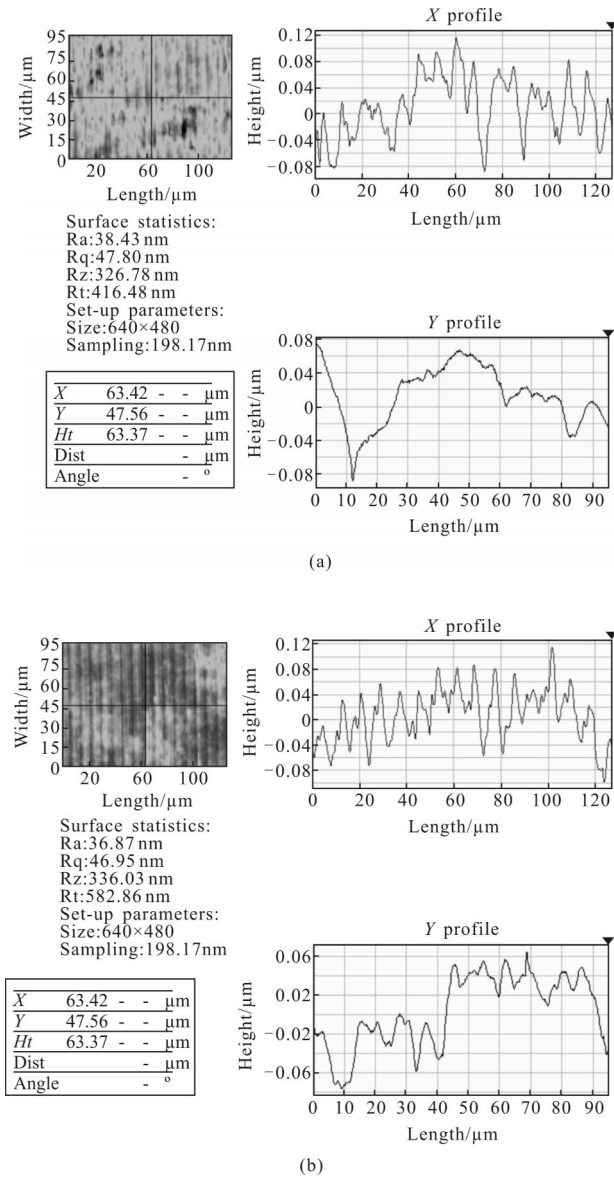


图 3 表面粗糙度对比

Fig.3 Comparison of surface topography

图 4(a)、(b)分别为钛合金经过 EPT 处理和未经过 EPT 处理的试样在超精密切削过程中获得的切削力曲线。图 4 表明电脉冲处理在钛合金的超精密加工中起着重要作用,采用电脉冲处理能显著降低切削力。平均主切削力值分别为 0.68 N 和 0.47 N。电脉冲频率为 700 Hz 时,切削力相比未用电脉冲时降低了 25%左右。

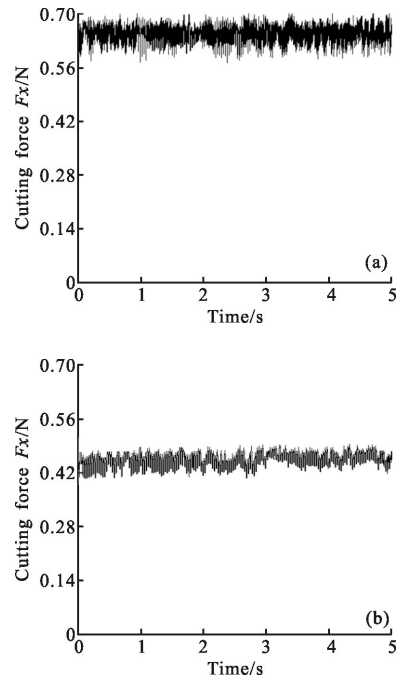


图 4 切削力对比

Fig.4 Comparison of cutting force

### 4 结论

钛合金材料广泛应用各种工程领域,然而难加工性制约了其发展和应用。为了改善钛合金的加工性,文中尝试采用电脉冲处理来提高钛合金的力学性能。通过电脉冲处理,钛合金的硬度、弹性模量及屈服强度均有所降低。钛合金材料的组织结构及力学性能发生了改变,其塑性得到较大的提高。经过 EPT 处理后的钛合金材料在超精密切削时可以获得更好的切削质量。

#### 参考文献:

[1] Ayed Y, Germain G, Ammar A, et al. Tool wear analysis and improvement of cutting conditions using the high-pressure water-jet assistance when machining the Ti17

- titanium alloy [J]. *Precision Engineering*, 2015, 42 (15): 294–301.
- [2] Li Junqi, Zhang Yunlong, Su Jun, et al. Turning of DOE Ge single crystal with micro-circle diamond tool [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 3053–3058. (in Chinese) 李军琪, 张云龙, 苏军, 等. 微圆弧金刚石刀具车削锗单晶衍射元件[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(11): 3053–3058.
- [3] Wu Hongbing, Wang Peng. Simulative and experimental investigation on ultra-precision cutting of titanium alloy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3988–3993. (in Chinese) 吴红兵, 王朋. 钛合金超精密切削过程的数值模拟与实验分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 3988–3993.
- [4] Yang D, Liu Z Q. Surface topography analysis and cutting parameters optimization for peripheral milling titanium alloy Ti–6Al–4V [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2015, 51: 192–200.
- [5] Wang Yi, Yu Jingchi. Compensation method for ultra precision turning error of high relative aperture surface based on coefficients of Zernike polynomial [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 724–728. (in Chinese) 王毅, 余景池. 基于泽尼克多项式系数的大相对孔径表面超精密车削误差的补偿方法 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 724–728.
- [6] Zhu R F, Jiang Y B, Guan L, et al. Difference in recrystallization between electropulsing-treated and furnace-treated NiTi alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 658: 548–554.
- [7] Huang Y Y, Cheng X, Fan H B, et al. Crystallization of a Ti –based bulk metallic glass induced by electropulsing treatment[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2016, 23: 69–73.
- [8] Ye X X, Wang L S, Tse Z T H, et al. Effects of high-energy electro-pulsing treatment on microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of Ti–6Al–4V alloy [J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2015, 49: 851–860.
- [9] Ye X X, Tse Z T H, Tang G Y, et al. Influence of electropulsing globularization on the microstructure and mechanical properties of Ti–6Al–4V alloy strip with lamellar microstructure [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 622: 1–6.
- [10] Wang Fuchi, Huo Dongmei, Li Shukui, et al. Inducing TiAl<sub>3</sub> in titanium alloys by electric pulse heat treatment improves mechanical properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 550: 133–136.