

# 超声加工滚压力对钛合金表层特性的影响

李凤琴<sup>1,2</sup>, 赵波<sup>1</sup>

(1.河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454003;  
2.河南工程学院 安全工程学院, 郑州 451191)

**摘要:** **目的** 研究钛合金超声滚压加工中的不同工艺参数对表层特性指标的影响, 得到最佳工件表面质量的加工参数。**方法** 运用超声滚压加工技术, 采用一维超声振动滚压装置和 CA6140B/A 型号的车床对钛合金 TC4 进行试验, 并结合赫兹接触理论建立滚压力与残余应力的理论模型。采用 ABAQUS 仿真分析滚压力对残余应力的影响。**结果** 对比分析发现, 仿真结果的变化趋势和试验结果相同, 即在其他加工参数不变的条件下, 表面残余应力随着滚压力的增加, 呈现先增大后减小的趋势, 在静压力 600 N 时的残余应力值最大。通过超景深和粗糙度仪测得, 超声滚压力 600 N 时, 表面粗糙度达到最小, 在 500~800 N 时能获得较好的表明质量, 超过 800 N 后会对表面产生损伤, 出现裂纹。由显微硬度仪测得, 表面硬度和硬化程度则随着滚压力的增加而不断升高, 说明表面硬度越大时, 表面粗糙度并不是越小。通过金相组织图和 XRD 物相分析发现, 随着滚压力的增大, 塑性变形程度增加,  $\beta$ -Ti 衍射峰越来越弱, 晶粒细化程度越来越明显。**结论** 超声滚压力工艺参数在一定范围内会产生良好的加工效果。该研究为超声滚压钛合金材料奠定了理论基础。

**关键词:** 钛合金; 超声滚压; 表层特性; 残余应力; 有限元仿真; 塑性变形

中图分类号: TG302 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2019)10-0034-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.10.004

## Effect of Ultrasonic Processing Burnishing Pressure on Titanium Alloy Surface Properties

LI Feng-qin<sup>1,2</sup>, ZHAO Bo<sup>1</sup>

(1.School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;  
2.School of Safety Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the effects of different process parameters on the surface properties of titanium alloy in the ultrasonic burnishing process, to obtain the processing parameters of the best workpiece surface quality. By the ultrasonic processing technology, Titanium alloy TC4 was tested with one-dimensional ultrasonic vibration burnishing device and CA6140B/A lathe and the theoretical model of ultrasonic burnishing pressure and residual stress was established on the basis of the Hertz theory. Then, the effect of different ultrasonic burnishing pressure on residual stress was simulated by the ABAQUS

收稿日期: 2019-08-08; 修订日期: 2019-10-04

Received: 2019-08-08; Revised: 2019-10-04

基金项目: 国家自然科学基金 (51475148, U1604255)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51475148, U1604255)

作者简介: 李凤琴 (1979—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为精密超精密加工、超声振动表面技术加工。

**Biography:** LI Feng-qin (1979—), Female, Doctor, Research focus: precision and ultra-precision machining, ultrasonic vibration surface technology processing.

通讯作者: 赵波 (1956—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为再制造工程、精密制造装备。邮箱: zhaob@hpu.edu.cn

**Corresponding author:** ZHAO Bo (1956—), Male, Doctor, Professor, Research focus: precision machining theory and equipment. E-mail: zhaob@hpu.edu.cn

software. Through comparative analysis, the variation trend of the simulation results was the same as the experiment results. When other processing parameters were constant, the surface residual stress first increased and then decreased with the increase of the burnishing pressure, and the residual stress was the largest at 600 N burnishing pressure. The surface roughness measured by super depth of field and roughness meter reached a minimum when the burnishing pressure was 600 N, and the quality could be better when the burnishing pressure was 500~800 N, and surface damage and cracks occurred when the burnishing pressure was over 800 N. The surface hardness and the degree of hardening measured by the microhardness tester increased with the increment of the burnishing pressure, indicating that the surface hardness was not smaller when the surface hardness was larger. Through the analysis on metallographic structure and XRD phase, the degree of plastic deformation increased with the increment of burnishing pressure, and the weaker the  $\beta$ -Ti diffraction peak was, the more refined the grain refinement was. The ultrasonic burnishing pressure parameters can produce good processing effect in a certain range, which provides theoretical basis for ultrasonic burnishing of titanium alloy materials.

**KEY WORDS:** titanium alloy; ultrasonic rolling; surface properties; residual stress; finite element simulation; plastic deformation

钛合金 TC4 作为一种  $\alpha+\beta$  双相合金, 具有比强度高、耐蚀性强、耐热性好等优点, 常作为航空航天工业中使用的重要材料<sup>[1-4]</sup>。但因其导热性差、弹性模量小、粘性大等缺点, 钛合金是一种典型的难加工材料, 在加工过程中塑性变形严重, 使得已加工表面存在加工硬化现象, 降低了材料的表面质量, 严重影响零件的使用性能和寿命<sup>[5]</sup>。

超声滚压加工技术是对难加工材料行之有效的办法之一, 它将超声滚压和静载滚压两种工艺结合起来<sup>[6-7]</sup>, 实现对金属表面高速撞击和传统滚压处理。在两者共同作用下, 使金属表面发生塑性变形、晶粒细化, 产生残余压应力, 降低表面粗糙度, 提高表层硬度, 改善加工工件的表层特性, 从而提高材料的抗疲劳性能。

Bozdana 等<sup>[8-9]</sup>提出的超声滚压是基于传统滚压的新型表面强化方法, 与常规滚压相比, 超声滚压强化后的 Ti-6AL-4V 具有更大的残余压应力值和压应力分布范围、更大的加工硬化程度、更低的表面粗糙度。S. Thamizhmanii 等<sup>[10]</sup>对滚压后的 TC4 钛合金表面粗糙度和表面硬度进行了研究, 结果表明, 表面粗糙度随着滚压量的增加而减小, 随着主轴转速的增加而先减小后增加, 表面硬度随着滚压量、主轴转速和进给速度的增加而增大。李礼等<sup>[11-12]</sup>也进行了钛合金 TC4 超声深冷滚压加工的研究, 分析不同滚压力对 TC4 加工表面形貌及表面粗糙度的影响规律, 研究发现, 当滚压力过大时, 会使加工表面产生不均匀塑性变形。以上研究表明, 超声滚压工艺对钛合金材料表层特性有重要影响, 但是研究还不系统, 在一定程度上限制了超声滚压加工的应用。对 TC4 表层特性影响最大的工艺参数是滚压力<sup>[13]</sup>, 其在很大程度上决定了加工效果, 但对 TC4 表层特性的机理研究还比较少。

因此, 本论文利用超声滚压技术对 TC4 钛合金

材料进行处理, 通过对比不同滚压力(其余参数不变)下钛合金表层特性的变化规律, 了解不同超声滚压力对加工效果的影响。

## 1 工件表层超声滚压力学机理

超声滚压加工中, 预定静压力和振动冲击力耦合作用于加工材料表面, 在表层及表层下一定范围内产生弹塑性变形, 使得材料表层组织结构变得紧密, 以增强材料表面的整体性能。

针对圆柱(工具头)和圆柱(工件)之间的滚压力, 利用赫兹弹性接触理论<sup>[14-15]</sup>进行分析, 在超声滚压过程中(如图 1 所示), 工具头半径  $R_1$ , 长度为  $b$ , 工件半径  $R_2$ , 两圆柱相互滚压, 轴线平行, 产生接触面为幅宽  $2h$  的弹塑性变形带状域。假定接触压力  $F(x)$

在半圆上分布, 假设  $F(x) = f_{\max} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{h}\right)^2}$ , 则从  $-h$  到  $h$  上的超声滚压力  $F_1$  为:

$$F_1 = \int_{-h}^h F(x) dx = \frac{\pi h f_{\max}}{2} = P_s + P_t = P_s + ma \quad (1)$$

式中,  $P_s$  是预定静压力,  $P_t$  是振动冲击力,  $m$  为滚柱质量,  $a$  为滚柱加速度。

由图 1 可知, 超声冲击时滚柱位移方程为:

$$y(t) = A \sin(\omega t) = A \sin(2\pi f t) \quad (2)$$

式中,  $A$  为超声纵向振动的振幅 ( $\mu\text{m}$ );  $\omega$  为超声振动的角频率;  $f$  为超声振动的频率 (kHz)。把此方程求两次导数代入 (1) 式可得滚压力:

$$F_1 = P_s + P_t = P_s + ma = P_s + \rho b R_1^2 (2\pi f)^2 A \sin(2\pi f) \quad (3)$$

式中,  $\rho$  是 TC4 钛合金密度, 如果接触域的幅宽  $2h$  与  $R_1$ 、 $R_2$  相比很小, 那么各圆柱接触面附近的状态与半无限体表面幅宽  $2h$  的带状域受分布压力  $F(x)$  的作用情况很相似, 为平面应变状态。

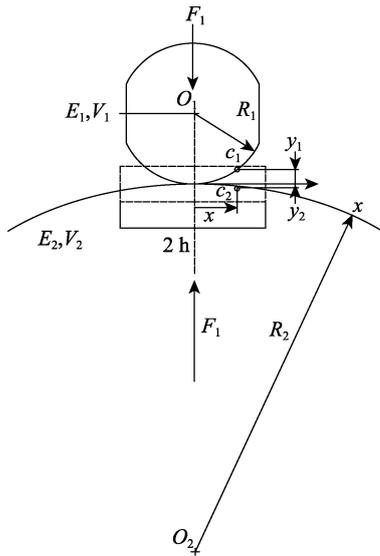


图1 超声滚压接触力学示意图

Fig.1 Schematic diagram for ultrasonic burnishing contact mechanics

载荷的位移  $(V_y)_{y=0}$  由平面应力应变状态的弹性方程算得:

$$(V_y)_{y=0} = \varepsilon - \frac{1-\nu^2}{E} \frac{f_{\max}}{h} x^2 = \varepsilon - \frac{2F_1}{\pi h^2} \frac{1-\nu^2}{E} x^2 \quad (4)$$

式中,  $\varepsilon$  是原点处的位移, 两个圆柱上任一点  $C_1$ 、 $C_2$  的位移  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  由公式 (4) 可得:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \varepsilon_1 - \frac{2F_1}{\pi h^2} \frac{1-\nu_1^2}{E_1} x^2 \\ \delta_2 &= \varepsilon_2 - \frac{2F_1}{\pi h^2} \frac{1-\nu_2^2}{E_2} x^2 \end{aligned} \quad (5)$$

由图1可知, 从X轴到  $C_1$ 、 $C_2$  的距离  $y_1$ 、 $y_2$  为:

$$\begin{aligned} y_1 &= R_1 - \sqrt{R_1^2 - x^2} \approx \frac{x^2}{2R_1} \\ y_2 &= R_2 - \sqrt{R_2^2 - x^2} \approx \frac{x^2}{2R_2} \end{aligned} \quad (6)$$

而接触  $C_1$ 、 $C_2$  点间的接近量  $L(x)$  为:

$$\begin{aligned} L(x) &= (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + \frac{x^2}{2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) - \\ &\quad \frac{2F_1}{\pi h^2} \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) x^2 \end{aligned} \quad (7)$$

假定圆柱接触面变为平面,  $L(x)=\delta$  (=定值), 即有  $x^2$  的系数为零, 可知带状域幅宽  $h$  为:

$$h = \sqrt{\frac{4F_1}{\pi} \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)} \times \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)} \quad (8)$$

由公式 (2) 和 (7) 可得工件表面的残余压应力  $\sigma$  为:

$$\sigma = \frac{F_1}{S} = \frac{F_1}{2hb} = \frac{F_s + \pi b \rho R_1^2 (2\pi f)^2 A \sin(2\pi f)}{4b \sqrt{\frac{F_1 R_1 R_2}{\pi (R_1 + R_2)} \times \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)}} \quad (9)$$

## 2 工件表层超声滚压残余应力仿真模型

本文通过 ABAQUS 软件建立了工件表层超声滚压压力的三维有限元模型。圆柱形滚压头直径为 10 mm, 宽度为 5 mm; TC4 钛合金工件直径为 50 mm, 仿真长度为 20 mm。图2是模型装配图及 300、600、800 N 滚压力下的仿真计算结果。

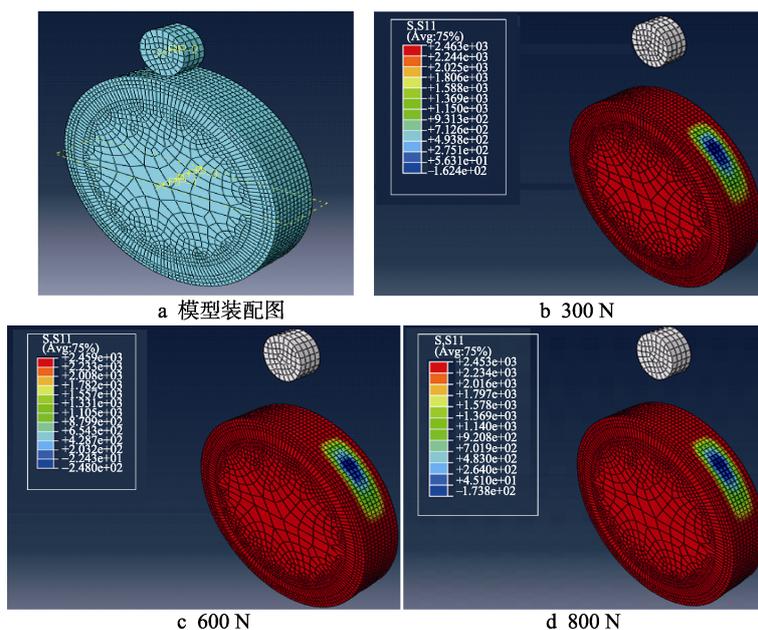


图2 不同超声滚压力下残余应力仿真图

Fig.2 Simulation diagram for residual stress under different ultrasonic burnishing pressure: a) assembly diagram of model; b) 300 N; c) 600 N; d) 800 N

从工件表层超声滚压力仿真结果可以看出,在不同超声滚压条件下,随着滚压力的增大,TC4 工件表层的残余应力先上升达到一个最大峰值点,而后逐渐下降。原因是残余应力与作用的滚压力大小有关,同时滚压过程的温度也是一个重要的影响因素,残余应力随滚压温度的上升而呈下降趋势。在滚压力作用较小时,工件滚压产生的热量较低,残余应力受滚压力的影响进一步上升。但是随着超声滚压力进一步增大,工件表层形成大量的摩擦热量集聚,导致表面温度升高,原子更容易向平衡状态转变,从而致使残余应力数值呈现下降趋势。

从图 3 可以看出,仿真结果的变化趋势和试验结果相同,即在其他加工参数不变的条件下,表面残余应力随着滚压力的增加,呈现先增大后减小的趋势。在超声滚压力 600 N 时,试验值和仿真值都达到最大值,误差为 6.7%。这是因为,超声滚压加工和残余应力测量都存在一定误差,仿真结果出现误差是必然的,在仿真结果变化趋势正确的前提下,在此范围内的误差是可以接受的。

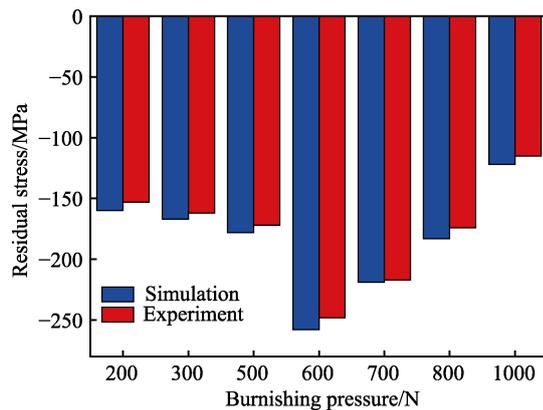


图 3 残余应力仿真与试验结果对比分析  
Fig.3 Comparative analysis of residual stress simulation and test results

### 3 试验部分

#### 3.1 试验装置

超声滚压加工试验装置如图 4 所示。超声滚压加工是在传统滚压加工中增加了超声振动,使滚压刀头产生高频振动,在高频滚压作用下,刀头与旋转工件表面相互接触,工件表面形成一定的弹性和塑性变形,使加工表面晶粒细化,降低表面粗糙度,产生残余应力,改善精车 TC4 后工件的表层特性,提高加工硬度,改善工件表层特性,提高材料的抗疲劳性能。

#### 3.2 试验方法

加工试件选取 CBN 刀片(型号 DCMT-11T302-60),车削加工成直径 50 mm、长 320 mm 的 TC4 棒料。加工设备采用一维超声振动滚压装置和型号

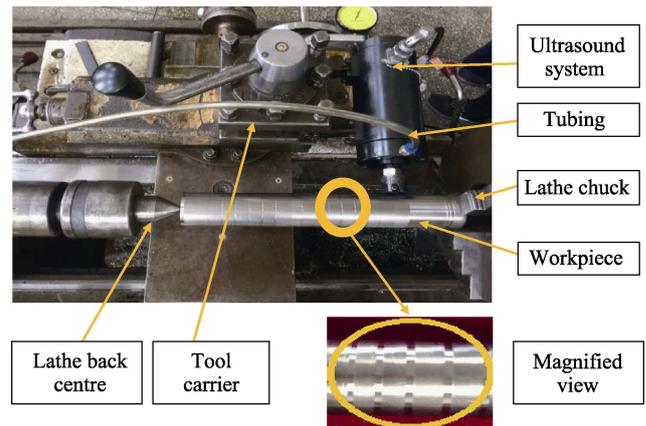


图 4 超声滚压加工试验装置  
Fig.4 Ultrasonic burnishing machining device

CA6140B/A 的车床。滚压头选择直径为 10 mm、长度为 5 mm 的硬质合金滚柱。在滚压加工时,保持加工参数,如车床主轴转速、进给量、振动频率、输出振幅不变,分别为 160 r/min、0.11 mm/r、28 kHz、8  $\mu$ m。改变静压力为 100、200、300、400、500、600、700、800、1000 N。

## 4 结果与讨论

### 4.1 超声滚压力对表面形貌和粗糙度的影响

超声滚压时,工件在滚压力和超声波振动冲击力作用下,表层发生弹塑性变形,出现削峰填谷的现象。图 5 为不同超声滚压力下,超声滚压试件的表面形貌。其中,图 5a 为车削后滚压前试件的表面,从图中可以看出,车削刀痕深而密集,缺陷较多,表面极其不平整。图 5b、c 分别为超声滚压力 100、300 N 时,超声滚压试件的表面形貌,随着滚压力的增大,车削痕迹在一定程度上有所减弱,因为静压力较小,车削痕迹并没有完全消失,但明显比滚压前的表面质量好。图 5d、e 分别为超声滚压力 500、700 N 时,超声滚压试件的表面形貌,相比前两幅滚压加工图,可以看到车削痕迹已经明显被滚压平整,获得较光滑的表面质量。图 5f 为超声滚压力为 1000 N 时的加工表面形貌,由图可以看出,其表面比滚压前表面光滑,但是和滚压力 500、700 N 时的超声滚压相比,表面出现了裂纹,这说明滚压力过大会对表面产生损伤,形成表面缺陷。

用 2206B 型表面粗糙度仪测量车削及滚压后的试件表面粗糙度,测量 10 次并取平均值,得到车削后的试件表面粗糙度为 0.8875  $\mu$ m,不同静压力下超声滚压试件的表面粗糙度如图 6 所示。从图中可以看出,静压力对已加工表面粗糙度的影响很大,随着滚压力的增大,呈现先减小后增大的趋势,并且在 600 N 时,表面粗糙度达到最小值,但都小于车削条件下的表面粗糙度值。这是超声频振动系统作用的结果。振

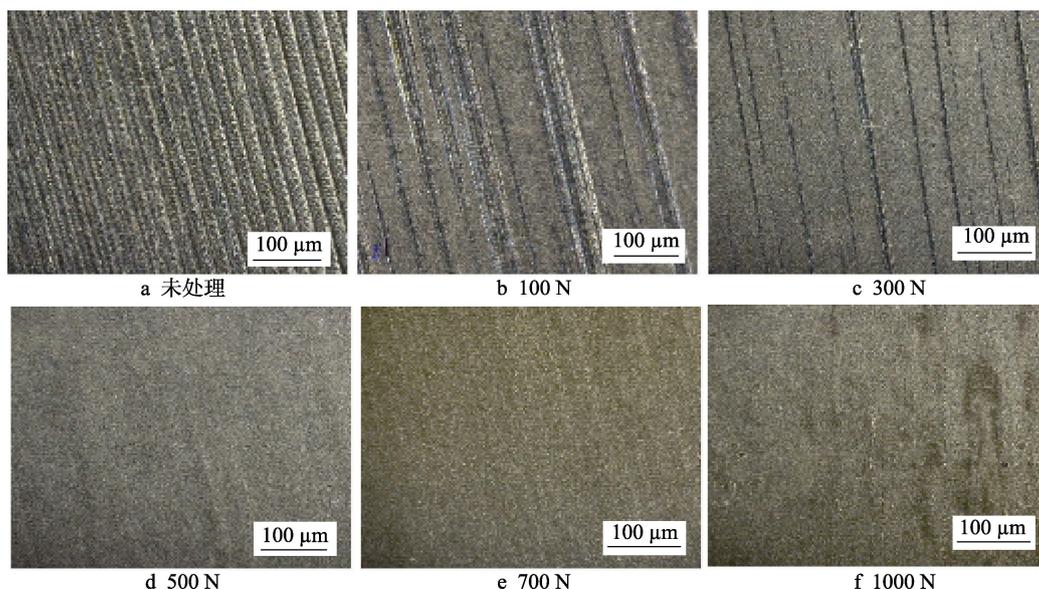


图5 不同超声滚压力下试件表面形貌

Fig.5 Surface topography of test specimens under different ultrasonic burnishing pressure: a) unprocessed; b) 100 N; c) 300 N; d) 500 N; e) 700 N; f) 1000 N

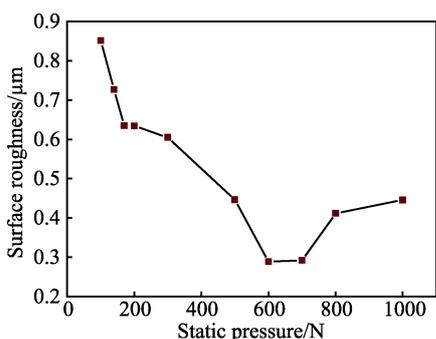


图6 不同超声滚压力下试件表面粗糙度

Fig.6 Surface roughness of test specimens under different burnishing pressure

幅一定时的超声滚压,在动态冲击的作用下能减少摩擦,而当静压力过大时,减摩作用减弱,会对材料表面造成损伤。此外,过大的静压力加重超声滚压系统的负载,使滚压过程不能平稳进行,进而使表面粗糙度增加。当静压力过小时,车削痕迹没有完全消失,不能很好地起到削峰填谷的效果,在静压力 100~200 N 时,表面粗糙度值降低不明显。

#### 4.2 超声滚压力对表层塑性变形和晶粒细化的影响

试验用工件材料为轧制态的  $\alpha+\beta$  型钛合金。图 7

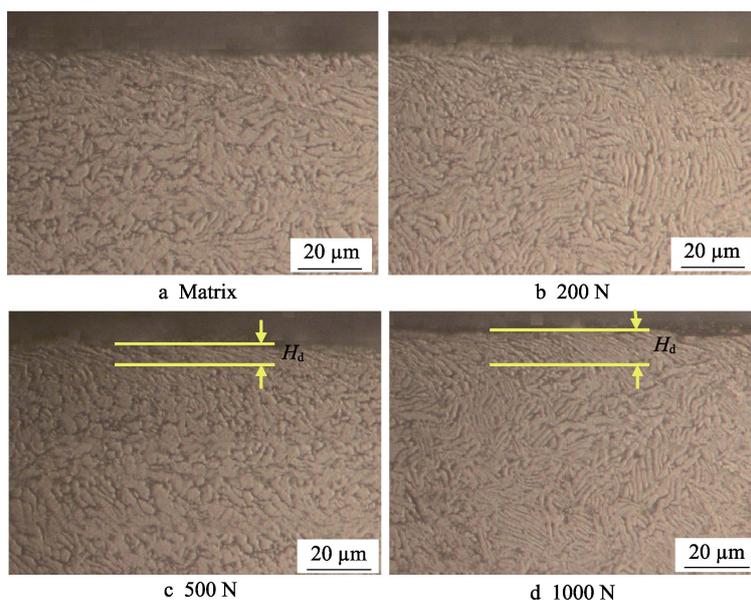


图7 不同超声滚压力下的塑性变形的金相组织图

Fig.7 Metallographic structure diagram of plastic deformation under different ultrasonic burnishing pressure: a) matrix; b) 200 N; c) 500 N; d) 1000 N

为不同超声滚压力下滚压 2 遍后的钛合金 TC4 塑性变形的金相组织图。图 7a 是基体金相组织图，组织为网篮状。图 7b—d 分别是超声滚压力为 200、500、1000 N 时的塑性变形金相组织图。从图中可以看出，在 200 N 时，观察不到明显的塑性变形特征，随着静压力的增大，塑性变形的特征越来越明显，达到 1000 N 时就更加明显，微细晶粒越来越多。这是因为，材料表层的塑性变形是导致晶粒细化的原因，但不同的静压力和反复的动态冲击力导致材料表层的塑性变形程度不同，进而导致晶粒细化程度不同。静压力增大时，塑性变形量增加，位错密度大量增殖并发生滑移、积累、重排，形成较多的位错墙和位错盘结，把宽大晶粒进行分离，形成新的细小晶粒。

图 8 为不同超声滚压力下 TC4 合金试件表面的 XRD 图谱。在未经超声滚压的参照试件表面图谱里，经物相分析发现，大部分为  $\alpha$ -Ti 衍射峰，并且  $2\theta$  在大约  $40^\circ$  的位置出现了  $\beta$ -Ti 衍射峰<sup>[16-17]</sup>，说明试件原始组织由大量  $\alpha$  相和少量  $\beta$  相组成，随着滚压力的增加， $\beta$ -Ti 衍射峰逐渐弱化。这是因为，材料表面在静压力和动态冲击力作用下发生塑性变形，产生应力应变，当应力积累到一定程度时，应力诱发的晶粒会被拉长，从而导致衍射峰随着滚压力的增大越来越弱化，晶粒细化程度越来越高。

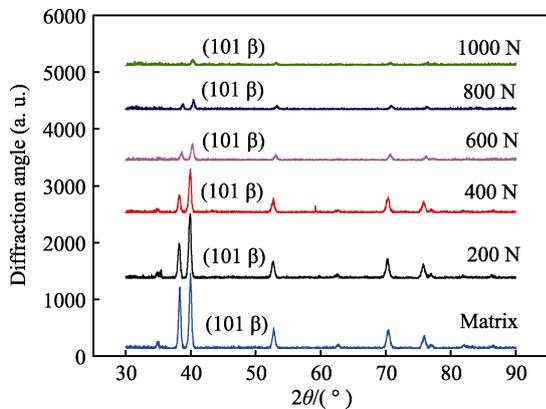


图 8 不同超声滚压力下试件表面 X 射线衍射图谱  
Fig.8 Surface X-ray diffraction pattern of test specimens under different ultrasonic burnishing pressure

### 4.3 超声滚压力对残余应力的影响

超声滚压过程中，材料表层由于受到反复的超声冲击和静压力共同作用，产生塑性变形、晶粒细化以及位错密度增加，从而产生残余压应力，提高材料疲劳性能。图 9 所示为试件表层在超声振动辅助加工下，静压力在 100~1000 N 时产生的残余压应力的变化规律。从图中可以看出，残余压应力值随着静压力的增大，出现先增大后减小的趋势，在静压力 600 N 时最大，为 -258 N，之后随着静压力的增大又呈现直线下降趋势，在 1000 N 时为 -122 N。说明静压力 600

N 时的晶粒细化程度最高，随着静压力的增大，温度升高，压应力表面受损产生晶体缺陷，晶粒尺寸有增大趋势，因而压应力下降。

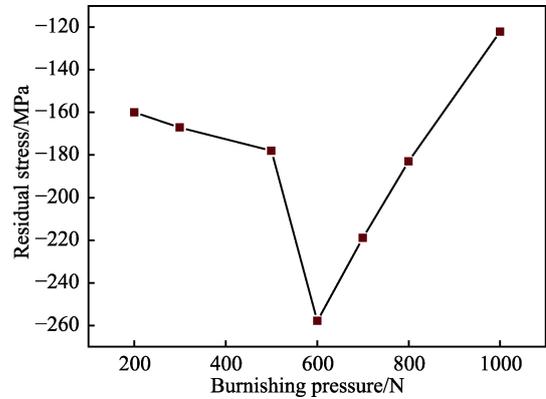


图 9 不同超声滚压力下试件表层残余应力  
Fig.9 Surface residual stress under different ultrasonic burnishing pressure

### 4.4 超声滚压力对表层硬度的影响

取未经滚压加工的钛合金 TC4 棒料进行显微硬度测量，测量 10 次，平均值为 479.7HV，测量的试件基体材料表面硬度 (HV) 如表 1 所示。

表 1 钛合金 TC4 基体表面硬度

**Tab.1 Surface hardness of titanium alloy TC4 matrix**

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Value (HV)	434	497	507	453	468	492	480	487	478	501

在研究滚压静压力对表面硬度及硬化程度的影响时，选用 100~1000 N 的加工工艺参数。图 10 中，滚压加工后试件表面的硬度和硬化程度随静压力的增大而不断升高，在 100~200 N 和 800~1000 N 时，试件表面硬度和硬化程度的升高缓慢，压力在 200~800 N 时，表面硬度和硬化程度升高的速度加快。

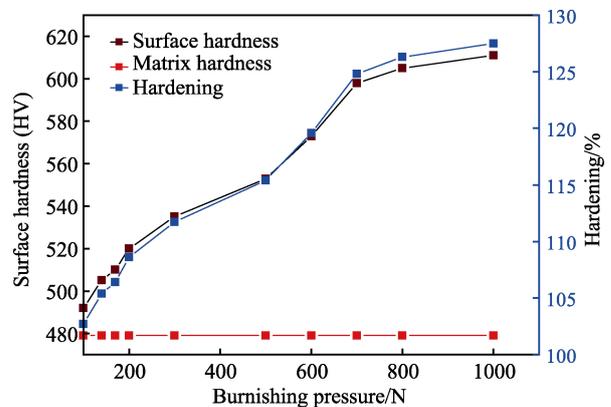


图 10 不同超声滚压力下试件表层硬度和硬化程度  
Fig.10 Surface hardness and hardening degree of test specimens under different burnishing pressure

这是因为 200~800 N 的静压力下, 试件表面产生较大塑性变形, 晶粒尺寸急剧减小, 显微硬度迅速升高。而在静压力较小时产生的塑性变形不大, 晶粒细化程度较小, 以致于显微硬度升高缓慢。在静压力达到 1000 N 左右时, 晶粒尺寸已经趋于稳定, 所以硬化程度增加也比较缓慢。

## 5 结论

1) 基于赫兹接触理论, 分析了工件表层超声滚压的力学机理, 建立了超声滚压力与残余应力关系模型, 采用 ABAQUS 软件分析了超声滚压力对残余应力的影响, 并对模型的准确性进行了试验验证。

2) 超声滚压工件的表面粗糙度小于普通车削工件的表面粗糙度, 随着超声滚压力的增大, 呈现先减小后增大的趋势, 在 600 N 时表面粗糙度达到最小值, 超声滚压力在 500~800 N 时能获得较好的表面质量。

3) 随着超声滚压力的增大, 塑性变形量增加, 表面晶粒变细。TC4 原始组织中大部分为  $\alpha$ -Ti 衍射峰, 在  $2\theta$  大约  $40^\circ$  的位置出现了  $\beta$ -Ti 衍射峰, 滚压力越大,  $\beta$ -Ti 衍射峰越弱, 说明了晶粒细化程度越来越高, 这与金相组织图分析的结果一致。

4) 超声滚压工件的表面硬度和硬化程度随超声滚压力的增大而不断升高, 说明表面硬度越大时, 表面粗糙度并不是越小。超声滚压力在 200~800 N 时, 表面硬度和硬化程度升高的速度加快。在 100~200 N 和 800~1000 N 时, 工件表面硬度和硬化程度的升高速度相对缓慢。

## 参考文献:

- [1] ELLYSON B, BROCHU M, BROCHU M. Characterization of bending vibration fatigue of SLM fabricated Ti-6Al-4V[J]. *International journal of fatigue*, 2017, 2(5): 25-34.
- [2] MOHSAN A U H, LIU Zhan-qiang, PADHY G K. A review on the progress towards improvement in surface integrity of Inconel 718 under high pressure and flood cooling conditions[J]. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2017, 91(3): 107-125.
- [3] SINGH R, KHAMBA J S. Investigation for ultrasonic machining of titanium and its alloys[J]. *Journal of materials processing technology*, 2007, 183(2/3): 363-367.
- [4] 杨勇进, 张晓云, 孙志华, 等. TC4 钛合金厚板电偶腐蚀与防护研究[J]. *装备环境工程*, 2016, 13(4): 149-156. YANG Yong-jin, ZHANG Xiao-yun, SUN Zhi-hua, et al. Galvanic corrosion and protection of TC4 titanium alloy thick plate[J]. *Equipment environmental engineering*, 2016, 13(4): 149-156.
- [5] 赵振业. 高强度合金抗疲劳应用技术研究与发展[J]. *中国工程科学*, 2005, 7(3): 90-94. ZHAO Zhen-ye. Investigation and development status of the application technology to improve fatigue behavior of high strength alloys[J]. *Engineering science*, 2005, 7(3): 90-94.
- [6] LI Lun, LI Shu-juan, TANG Ao-fei, et al. Vibration cutting analysis of axially moving diamond wire saw excited by transverse ultrasonic wave[J]. *Acta armamentarii*, 2014, 35(10): 1651-1658.
- [7] JATINDER K, KHAMBA J S, MOHAPATRA S K. An investigation into the machining characteristics of titanium using ultrasonic machining[J]. *International journal of machining and machinability of materials*, 2008, 3(1/2): 143-161.
- [8] BOZDADA A T, GINDY N N Z. Comparative experimental study on effects of conventional and ultrasonic deep cold rolling processes on Ti-6Al-4V[J]. *Materials science and technology*, 2008, 24(11): 1378-1384.
- [9] BOZDADA A T, GINDY N N Z, LI H. Deep cold rolling with ultrasonic vibrations a new mechanical surface enhancement technique[J]. *International journal of machine tools and manufacture*, 2005, 45(6): 713-718.
- [10] THAMIZHMANI S, OMAR B B, SAPARUDIN S, et al. Surface roughness investigation and hardness by burnishing on titanium alloy[J]. *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*, 2008, 28(2): 139-142.
- [11] LI Li, ZHU You-li, LV Guang-yi, et al. Study on ultrasonic deep rolling surface mechanical enhancement technique of TC4 titanium alloy[J]. *Journal of materials engineering*, 2008, 10(11): 68-74.
- [12] LV Guang-yi, ZHU You-li, LI Li. The effect of ultrasonic deep rolling on surface topography and surface roughness of TC4 titanium alloy[J]. *China surface engineering*, 2007, 20(4): 38-41.
- [13] ALTENBERGER I, NOSTER U, BOYCEB L, et al. Effects of mechanical surface treatment on fatigue failure in Ti-6Al-4V: Role of residual stresses and foreign object damage[J]. *Materials science forum*, 2002, 404: 457-462.
- [14] 李培昌. 典型赫兹接触问题的有限元分析[C]//黑龙江省机械工程学会年会论文集. 哈尔滨: 黑龙江省机械工程学会, 2002: 435-442. LI Pei-chang. Finite element analysis of typical hertz contact problems[C]//. *Proceedings of the annual meeting of heilongjiang mechanical engineering society*. Haerbin: Heilongjiang Provincial Mechanical Engineering Society 2002: 435-442.
- [15] 侯寅. 基于赫兹接触应力分布的面齿轮传动弯曲应力有限元分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009. HOU Yin. Finite element analysis of bending stress of face gear drive on the basis of hertz contact stress distribution [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [16] 王锦. TC4 钛合金超声冲击表面纳米化及高温退火组织与性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018. WANG Jin. The study of nanocrystallization and properties on the surface of TC4 titanium alloy after ultrasonic impact treatment and high temperature annealing[D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2018.
- [17] 莱茵斯 C, 皮特皮斯 M. 钛与钛合金[M]. 陈振华, 等译. 北京: 化学工业出版社, 2005: 1-9. RHINES C, PITTS M. Titanium and titanium alloy[M]. CHEN zhen-hua, et al. translate Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 1-9.