

# 离心研磨工艺对 Ti-6Al-4V 钛合金 表面组织性能的影响

陈光忠<sup>1</sup>, 何志坚<sup>1</sup>, 杨岳<sup>2</sup>

(1. 湖南信息职业技术学院, 长沙 410200; 2. 中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410083)

**摘要:** 目的 改善 Ti-6Al-4V 钛合金的组织性能。方法 使用离心研磨工艺对 Ti-6Al-4V 钛合金进行表面处理, 通过显微硬度计、X 射线应力分析仪、金相显微镜, 对不同加工时间下试样表层的显微硬度、残余应力、金相组织进行测试。结果 离心研磨加工后, Ti-6Al-4V 钛合金表面的显微硬度得到提高, 试样最表面的显微硬度随加工时间的延长呈现逐渐增大的趋势, 加工时间为 40 min 时, 显微硬度达到最大值 385HV, 比试样基体硬度值提高了 55HV; 在加工深度方向上, 随着深度的增加, 显微硬度值逐渐降低, 在深度为 400  $\mu\text{m}$  附近, 显微硬度值已与基体硬度值相差不大, 并且基本不再下降。加工完成后, 试样表面产生了有益的残余压应力, 最大残余压应力值为 436 MPa。金相组织分析结果表明, 试样表层组织形成了剧烈塑性变形层, 其深度约 40  $\mu\text{m}$ , 在变形层内, 组织的晶粒得到明显细化。结论 离心研磨抛光工艺对 Ti-6Al-4V 钛合金表面组织性能改善效果明显, 验证了使用该工艺对 Ti-6Al-4V 钛合金进行表面强化的可行性。

**关键词:** Ti-6Al-4V; 离心研磨; 显微硬度; 残余应力; 金相组织; 变形层

**中图分类号:** TG356.28

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-3660(2016)01-0101-05

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.01.016

## Influence of Centrifugal Grinding Process on Surface Microstructure Properties of Ti-6Al-4V Titanium Alloy

CHEN Guang-zhong<sup>1</sup>, HE Zhi-jian<sup>1</sup>, YANG Yue<sup>2</sup>

(1. Hunan College of Information, Changsha 410200, China;

2. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To improve the microstructure properties of Ti-6Al-4V titanium alloys. **Methods** In this paper, the surface of Ti-6Al-4V titanium alloy was treated by centrifugal grinding process. The microhardness, residual stress and microstructure of specimen surface were analyzed by using microhardness tester, X-ray stress analyzer and metallographic microscope. **Results** The test results showed that when the processing was completed, the microhardness got increased, the microhardness on the sample presented a gradually increasing trend with the extension of processing time, when the processing time reached 40 min, the micro-

收稿日期: 2015-10-21; 修订日期: 2015-11-05

Received: 2015-10-21; Revised: 2015-11-05

基金项目: 湖南省科技厅研究课题(2013FJ3019); 湖南省教育厅研究课题(14C0825)

Fund: Supported by the Department of Science & Technology of Hunan Province (2013FJ3019) and the Department of Education of Hunan Province (14C0825)

作者简介: 陈光忠(1968—), 男, 湖南人, 副教授, 主要从事零件表面强化技术及表面完整性的研究。

Biography: CHEN Guang-zhong(1968—), Male, from Hunan, Associate professor, Research focus: parts surface strengthening technology and surface integrity.

hardness reached a maximum of 385 HV, improved by 55 HV than the sample matrix's microhardness. In the direction of processing depth, the microhardness value gradually reduced with the increase of depth. At the depth of 400  $\mu\text{m}$ , the microhardness value no longer decreased, and was close to the matrix microhardness. The residual stress was generated on the surface of workpiece after processing and the maximum residual stress was 436 MPa. The microstructure analysis results showed that the workpiece surface tissue produced severe plastic deformation layers, the depth of which was about 40  $\mu\text{m}$ , the grain was fined obviously within the deformation layer. **Conclusion** The centrifugal grinding process significantly improved the microstructure properties of Ti-6Al-4V titanium alloy and validated the feasibility of this processing for strengthening the surface of Ti-6Al-4V titanium alloy.

**KEY WORDS:** Ti-6Al-4V; centrifugal grinding; microhardness; residual stress; microstructure; deformation layer

钛合金由于具备强度高、密度小、耐高温、耐蚀等优异性能,已成为航天航空、汽车制造、医疗等领域不可或缺的重要材料,尤其在航空航天领域,钛合金的使用量已成为衡量其先进性的重要标志<sup>[1-2]</sup>。以美国 F-22 战机为例,钛合金用量约占 41%,其中 86% 以上为 Ti-6Al-4V 钛合金<sup>[3]</sup>。但在实际应用中,钛合金存在耐磨性差、疲劳强度低等缺陷,限制了对进一步的开发和应用<sup>[4]</sup>。

材料的疲劳破坏一般始于表面,通过采用相应技术对材料表面进行强化处理,可提高材料的表面质量,对提高材料的疲劳性能具有重要意义<sup>[5]</sup>。根据零件的工程需求不同,常用的表面强化技术主要有表面机械硬化处理<sup>[6-8]</sup>(喷丸、滚压、表面冷作硬化等)、表面涂装<sup>[9-10]</sup>(机械涂装、电涂装、化学涂装等)、表面热处理<sup>[11]</sup>(渗碳、渗氮、淬火等)及电火花表面处理<sup>[12-13]</sup>(电火花沉积、电火花合金化、激光表面处理等)等技术。但是,无论是传统的喷丸、滚压,还是近年来新出现的电火花合金化、激光表面处理等新技术,都普遍存在工艺复杂、成本高、效率较低的缺点。

离心研磨工艺,以提高零件的表面质量为主要目的,具有设备成本低、加工效率高、生产工艺简单等优势。该技术在海外起步较早且发展成熟,已广泛应用于军工及民用产品的加工与制造<sup>[14]</sup>。近年来国内对该工艺的研究主要集中于零件表面去毛刺及降低表面粗糙度<sup>[15]</sup>,而对离心研磨工艺改善材料组织性能的研究相对较少。针对钛合金耐磨性差、疲劳强度低的缺点,本文以航空工业中常用材料 Ti-6Al-4V 钛合金为实验对象,利用离心研磨工艺对其进行表面强化处理,研究离心研磨工艺对 Ti-6Al-4V 钛合金组织性能的影响,为同行研究人员及后续研究者提供参考。

## 1 加工原理

离心研磨工艺,是将被加工零件、磨料和化学剂

置于密闭的容器内,加工时容器做高速旋转运动,容器内处于游离状态的磨料和被加工零件之间产生复杂的相对运动,在强大离心力作用下,磨料对被加工零件表面产生微量切削、碰撞及滚压等作用,从而实现去除零件表面毛刺、降低零件的表面粗糙度及改善零件表面层物理力学性能等目的。

## 2 实验

材料为  $\alpha$ - $\beta$  型双相钛合金 Ti-6Al-4V,材料组成(以质量分数计)为:Al 6.0%,V 3.9%,Fe 0.17%,N 0.01%,C 0.03%,H 0.01%,O 0.15%,Ti 余量。试样尺寸为 20 mm×60 mm×5 mm,加工表面为 20 mm×60 mm。实验前,试样在 600 °C 的真空炉中退火 2 h,以消除试样内部的初始应力。

实验在卧式离心研磨机(图 1)上进行。设备共 4 个滚筒,呈行星式布置,滚筒最大转速为 180 r/min。磨料尺寸是影响加工效率及表面质量的主要因素之一,磨料尺寸过大,易对零件表面造成磕伤、碰伤;磨料尺寸过小,加工效率低,为此本实验选用斜圆柱棕刚玉磨料(8 mm×16 mm)。实验后,分别使用显微硬度计、X 射线应力分析仪、金相显微镜对 Ti-6Al-4V 钛合金试样的显微硬度、残余应力及金相组织进行测试分析。



图 1 离心研磨机

Fig. 1 Centrifugal grinding machine

### 3 结果与分析

#### 3.1 显微硬度

硬度可以表征材料的软硬程度。通过提高材料的表面硬度,可改善材料的耐磨损性能。使用 DHV-1000 型数显显微维氏硬度计测量试样的显微硬度,加载载荷为 500 g,保持时间为 15 s,取 3 次测量的平均值为最终测试结果。

不同加工时间下 Ti-6Al-4V 钛合金试样表面显微硬度的测试结果如图 2 所示。由图中可以看出,经过离心研磨加工,试样表面的显微硬度有了显著的提高,试样表面显微硬度值随着加工时间的延长逐渐增大,在加工的前 20 min 内,显微硬度值提高的幅度较大;此后,显微硬度值随着加工的进行提高的幅度开始逐步下降;在加工时间为 40 min 时,显微硬度值达到最大。试样表面显微硬度值的提高表明试样表层材料发生了塑性变形,其原因主要为:加工过程中磨料在强大的离心力作用下,反复对试样表面产生强烈的冲击碰撞及滚压作用;当磨料对试样的作用力超过试样材料的屈服极限时,试样表层材料产生塑性变形,使试样表层材料产生加工硬化,硬度值随之提高。在加工的初始阶段,塑性变形较易发生,试样表面硬度提高较为明显,随着加工的进行,在已有塑性变形的基础上,试样表面获得进一步塑性变形的难度逐渐增大,显微硬度提高的幅度逐渐变小。在整个加工过程中,磨料对试样的最大作用力是一定的,当加工时间超过 30 min 后,试样表层材料的塑性变形基本趋于饱和,此后显微硬度值变化很小。

对加工硬化层的深度进行分析。对加工时间为 40 min 的试样,使用维氏显微硬度计测量不同横截面

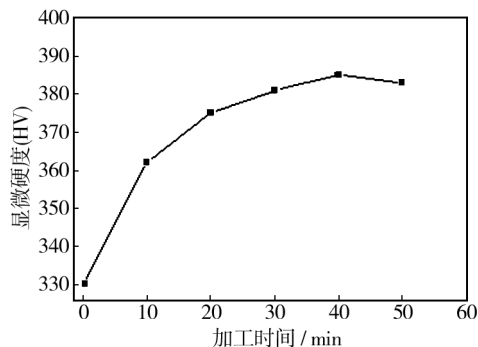


图2 不同加工时间下试样表面的显微硬度

Fig. 2 The microhardness of the surface of the specimen under different processing time

处的显微硬度,距加工表面不同深度处的显微硬度值如图 3 所示。由图 3 得出结论:试样最表面的显微硬度值最大,其值为 385HV,比基体组织的 330HV 高出约 55HV;在距加工表面 150  $\mu\text{m}$  的范围内,显微硬度值近似以直线下降,此后随着深度的增加,显微硬度值下降速率明显变缓。在深度约 400  $\mu\text{m}$  附近,试样的显微硬度值已与基体的显微硬度值相差不大,表明加工硬化层的深度约为 400  $\mu\text{m}$ 。

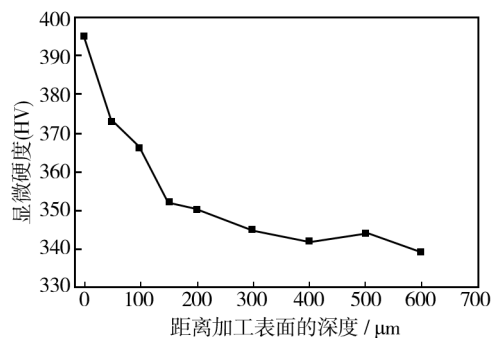


图3 表面层不同深度处的显微硬度

Fig. 3 The surface microhardness at different depths

#### 3.2 残余应力

试样表层材料的塑性变形产生了有益的残余压应力。采用日本 X-7000S 型 X 射线应力分析仪对加工后试样的残余应力进行测试,取 3 次测量的平均值为最终测试结果。不同加工时间下试样表层的残余压应力大小如图 4 所示。

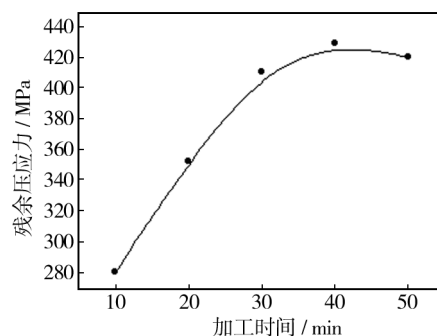


图4 不同加工时间下试样表层的残余压应力

Fig. 4 The residual compressive stress on the surface of the specimen under different processing time

从图中可以看出,试样表面残余压应力因加工时间不同而差别很大。残余压应力随加工时间呈逐渐增大趋势,当加工时间超过 30 min 后,残余压应力的变化幅度不大。其原因主要为:一方面,残余压应力源于组织的塑性变形,经过长时间的加工,试样表层组织的塑性变形已基本趋于饱和;另一方面,磨料对

试样表面存在切削作用。当到达某一时间点后,二者之间基本趋于平衡,此时试样表面的残余应力值达到最大值。由图中可以看出,工件表面的最大残余压应力值约为 436 MPa。

材料在交变载荷作用下,表层的残余压应力与外加应力产生叠加效应,总应力水平降低,阻碍疲劳裂纹的萌生和扩展,材料的疲劳极限得到提高。

### 3.3 金相组织

采用 OLYMPUS PMG3 研究型倒置式金相显微镜对试样加工前后的金相组织进行观察与分析。制样要求为:采用线切割工艺将各试样切开,使用金相镶嵌机镶嵌试样,首先依次使用 200<sup>#</sup>,400<sup>#</sup>,600<sup>#</sup>,800<sup>#</sup>,1000<sup>#</sup>粒度的砂纸打磨试样的横截面至光滑,其次在金相抛光机上将横截面抛光至镜面无划痕,使用配置好的腐蚀剂对横截面(2% (体积分数,下同) HF+4% HNO<sub>3</sub>+94% H<sub>2</sub>O) 腐蚀 10~20 s。离心研磨加工前后试样横截面上的金相组织如图 5 所示。

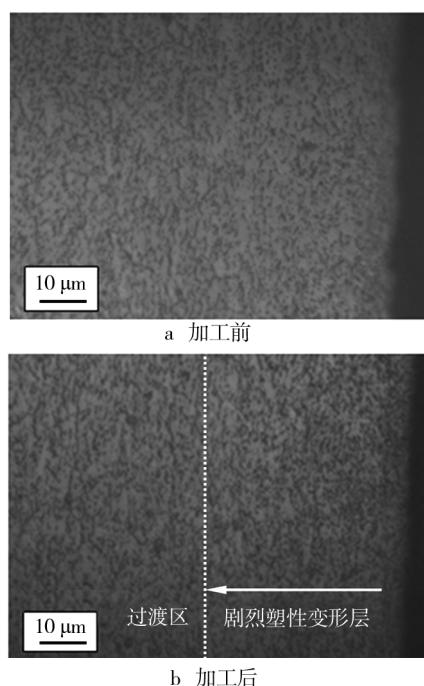


图 5 试样加工前后的金相组织

Fig. 5 Microstructure of the specimen before and after processing

材料显微硬度的变化趋势与材料显微组织的变化密切相关,材料显微硬度的增加是材料组织形变强化和晶粒细化共同作用的结果。由图 5 可以看出,与未加工试样相比,离心研磨加工后的试样表面产生了剧烈的塑性变形层和过渡区。在剧烈塑性变形层内,组织的晶粒尺寸明显变小,晶粒排列致密,其深度约

为 40 μm;在过渡区域内,晶粒尺寸呈梯度变化,距加工表面越远,组织塑性变形量越小,加工硬化程度逐渐减小,晶粒尺寸逐渐恢复至与基体相同。这与显微硬度值在深度方向上的变化趋势相吻合。

组织晶粒的细化和材料表面强度的提高都有助于改善材料的抗疲劳性能。一方面,在细化的晶粒之间,组织的缺陷较少,疲劳裂纹不易萌生;另一方面,细化的晶粒抑制了裂纹的扩展,且易使裂纹的扩展方向发生改变,有利于疲劳强度的提高。

## 4 结论

为改善 Ti-6Al-4V 钛合金的组织性能,使用离心研磨工艺对其进行了加工实验,验证了使用该工艺对 Ti-6Al-4V 钛合金进行表面强化的可行性。

1) 经过离心研磨加工,Ti-6Al-4V 钛合金的表面显微硬度值由初始的 330HV 提高至 385HV,提高了 55HV;在加工深度方向上,塑性变形层的深度约为 400 μm。

2) 工件表面产生残余压应力,最大残余压应力值为 436 MPa。

3) 对试样的金相组织分析表明,试样表层组织产生了剧烈的塑性变形层,在塑性变形层内,晶粒尺寸明显变小,剧烈塑性变形层的深度约为 40 μm。

## 参考文献

- [1] SCHUTZ R W, WATKINS H B. Recent Developments in Titanium Alloy Application in the Energy Industry[J]. Materials Science and Engineering, 1998, A243:305—315.
- [2] 彭昂,毛振东. 钛合金的研究进展与应用现状[J]. 船电技术, 2012, 32(10):57—60.  
PENG Ang, MAO Zhen-dong. Review on the Research Progress and Application of Titanium Alloys[J]. Marine Electric Technology, 2012, 32(10):57—60.
- [3] 田唐永. TC4 钛合金喷丸强化组织与性能研究[D]. 大连:大连理工大学, 2012.  
TIAN Tang-yong. Microstructures and Properties of TC4 Titanium Alloy Treated by Shot Peening[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [4] 屠振密,朱永明,李宁,等. 钛及钛合金表面处理技术的应用及发展[J]. 表面技术, 2009, 38(6):76—78.  
TU Zhen-mi, ZHU Yong-ming, LI Ning, et al. Applications and Advances on Surface Treatment for Titanium Alloy[J]. Surface Technology, 2009, 38(6):76—78.



- [5] 何柏林,邓海鹏. 表面完整性研究现状及发展趋势[J]. 表面技术,2015,44(9):140—152.  
HE Bai-lin, DENG Hai-peng. Research Status and Development Trend of Surface Integrity [J]. Surface Technology, 2015, 44(9): 140—152.
- [6] 陈国清,田唐永,张新华,等. Ti-6Al-4V 钛合金陶瓷湿喷丸表面强化微观组织与疲劳性能[J]. 中国有色金属学报,2013,23(1):122—127.  
CHEN Guo-qing, TIAN Tang-yong, ZHANG Xin-hua, et al. Microstructure and Fatigue Properties of Ti-6Al-4V Titanium Alloy treated by Wet Shot Peening of Ceramic Beads [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(1): 122—127.
- [7] 李礼,朱有利,吕光义,等. TC4 钛合金超声深滚表面强化技术的研究[J]. 材料工程,2008(11):68—74.  
LI Li, ZHU You-li, LYU Guang-yi, et al. Study on Ultrasonic Deep Rolling Surface Mechanical Enhancement Technique of TC4 Titanium Alloy [J]. Material Engineering, 2008(11): 68—74.
- [8] JIANG X P, MAN C S, SHEPARD M J, et al. Effects of Shot-peening and Re-shot-peening on Four-point Bend Fatigue Behavior of Ti-6Al-4V [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 468/470: 137—143.
- [9] 王少朋,李争显,杜继红. 钛合金表面等离子喷涂材料的研究进展[J]. 表面技术,2013,42(5):93—97.  
WANG Shao-peng, LI Zheng-xian, DU Ji-hong. Research Progress in Plasma Spray Coating Materials on the Titanium Alloy Substrates [J]. Surface Technology, 2013, 42(5): 93—97.
- [10] CAI Fei, ZHOU Chun-gen, WANG Na. Wear Behavior of Low-pressure Plasma-sprayed AlCuFe Quasicrystalline Coating on Titanium Alloy [J]. Vacuum, 2006, 81(1): 85—90.
- [11] 周伟,毛小南,葛鹏,等. 钛合金板材火焰加热淬火强化试验研究[J]. 表面技术,2009,38(2):17—18.  
ZHOU Wei, MAO Xiao-nan, GE Peng, et al. Study on the Flame Heating Quench Strengthen of Titanium Alloy Plate [J]. Surface Technology, 2009, 38(2): 17—18.
- [12] 张二亮,张平,蔡志海,等. 不同气氛下电火花沉积钛合金涂层的组织性能[J]. 中国表面工程,2011,24(6):28—34.  
ZHANG Er-liang, ZHANG Ping, CAI Zhi-hai, et al. Microstructure and Properties of Titanium Alloy Coating Prepared by Electric Spark Deposition Under Different Atmospheres [J]. Chinese Surface Engineering, 2011, 24(6): 28—34.
- [13] 项坤,王维,杨光,等. 钛合金单道激光熔覆工艺的研究[J]. 表面技术,2013,42(1):91—104.  
XIANG Kun, WANG Wei, YANG Guang, et al. Study on Titanium Alloy Single Track Laser Cladding Process [J]. Surface Technology, 2013, 42(1): 91—104.
- [14] GILLESPIE L. Mass Finishing Handbook [M]. US: Industrial Press, 2006.
- [15] 位义双. 轴承圆柱滚子快速批量倒圆工艺及材料微观去除机理研究[D]. 无锡:江南大学,2012.  
WEI Yi-shuang. Study on Quick Batch Rounding of Bearing Cylindrical Rollers and Its Material Removal Mechanism [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012.

(上接第 68 页)

- [26] LEYLAND A, MATTHEWS A. On the Significance of the  $H/E$  Ratio in Wear Control: a Nanocomposite Coating Approach to Optimised Tribological Behaviour [J]. Wear, 2000, 246(1/2): 1—11.
- [27] GORBATKIN S M, RHOADES R L, TSUI T Y, et al. Hard Boron-oxide Thin-film Deposition Using Electron-cyclotron-resonance Microwave Plasmas [J]. Applied Physics Letters, 1994, 65(21): 2672—2674.
- [28] ZHANG S, WANG H L, ONG S E, et al. Hard yet Tough Nanocomposite Coatings—Present Status and Future Trends [J]. Plasma Processes and Polymers, 2007, 4(3): 219—228.

(上接第 79 页)

- [29] YOON E S, SINGH R A, OH H J, et al. The Effect of Contact Area on Nano/Micro-scale Friction [J]. Wear, 2005, 259(7): 1424—1432.
- [30] SINGH R A, YOON E S, KIM H J, et al. Enhanced Tribological Properties of Lotus Leaf-like Surfaces Fabricated by Capillary Force Lithography [J]. Surface Engineering, 2007, 23(3): 161—164.
- [31] SAHOO R R, BISWAS S K. Frictional Response of Fatty Acids on Steel [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2009, 333(2): 707—718.