

# 喷丸结合振动光整加工工艺对钛合金 疲劳性能的影响

陈玉娟, 布紫叶, 靳军胜

(河北科技学院, 河北 保定 071000)

**摘 要:** 目的 提高钛合金的疲劳性能。方法 采用喷丸结合振动光整加工工艺对 TC4 钛合金进行了表面加工处理。对未加工试样、经过喷丸处理后的试样和经过喷丸与振动光整加工工艺处理后的试样, 分别进行了表面粗糙度、表面层残余应力测试, 并对三种状态下的试样进行了旋转弯曲疲劳试验。对比了不同工艺处理后试样的表面粗糙度、表层残余应力及疲劳强度。结果 与喷丸工艺相比, 采用喷丸结合振动光整加工工艺对试样进行处理后, 试样的表面残余压应力值提高了 39 MPa, 残余压应力峰值、残余压应力层的厚度略有降低。喷丸结合振动光整加工工艺在不明显改变试样残余压应力场的条件下, 使试样的表面粗糙度得到大幅降低。疲劳试验结果表明, 喷丸工艺使 TC4 钛合金的疲劳强度提高了 16.3%, 喷丸结合振动光整加工工艺使 TC4 的疲劳强度提高了 23.8%, 比喷丸后 TC4 钛合金的疲劳强度高出 7.5%。结论 在喷丸工艺的基础上, 喷丸结合振动光整加工工艺通过改善 TC4 钛合金的表面完整性, 使 TC4 钛合金的疲劳强度得到进一步提高。

**关键词:** 喷丸; TC4 钛合金; 振动光整加工; 表面粗糙度; 残余应力; 疲劳强度

**中图分类号:** TG668 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)11-0062-05

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.11.009

## Influence of Shot Peening Combined with Vibration Finishing on Fatigue Performance of TC4 Titanium Alloy

CHEN Yu-juan, BU Zi-ye, JIN Jun-sheng

(Hebei College of Science and Technology, Baoding 071000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve the fatigue performance of titanium alloy. Process of shot peening combined with vibratory finishing was used for surface treatment of TC4 titanium alloy. The surface roughness and residual stress of the surface layer were tested respectively for raw specimen, specimen subject to shot blasting as well as that subject to shot blasting and vibratory finishing. The rotating bending fatigue test was conducted for the specimens under the three conditions. The surface roughness, residual stress and fatigue strength were compared for specimens subject to different treatment. Compared with single shot peening process, the surface residual compressive stress value increased by 39 MPa after shot peening combined with vibratory surface finishing while peak value and layer thickness of the compressive residual stress reduced slightly. The test results showed that the shot peening combined with vibratory surface finishing could

收稿日期: 2016-03-22; 修订日期: 2016-04-23

Received: 2016-03-22; Revised: 2016-04-23

作者简介: 陈玉娟 (1974—), 女, 硕士, 高级讲师, 研究方向表面工程与技术。

**Biography:** CHEN Yu-juan(1974—), Female, Master degree, Senior lecturer, Research focus: surface engineering and technology.

greatly reduced the surface roughness of the specimen without changing the residual compressive stress field obviously. The fatigue test results indicated that fatigue strength of TC4 titanium alloy increased by 16.3% after shot peening and by 23.8% after shot peening combined with vibratory surface finishing, which was 7.5% higher than that subject to shot peening. On the basis of shot peening process, shot peening combined with vibratory finishing further improves the fatigue strength of TC4 titanium alloy by improving the surface integrity.

**KEY WORDS:** shot peening; TC4 titanium alloy; vibration surface finishing; surface roughness; residual stress; fatigue strength

钛合金是航空航天工业中重要的金属材料,主要用于制造发动机前轴颈、叶片和前机匣等关键构件。在飞机飞行过程中,受大气气流、发动机振动等因素的影响,疲劳失效成为航空钛合金主要的失效形式<sup>[1]</sup>。提高钛合金的疲劳性能可增加航空结构件的使用寿命。在材料发生疲劳失效的过程中,疲劳源一般始于表面,因此提高零件的表面完整性对提高零件疲劳抗力具有重要作用。表面完整性是指零件表面粗糙度、表面形貌、表面层残余应力和微观组织等表面状态的完好程度,是决定零件抗疲劳性能的重要因素<sup>[2-4]</sup>。为满足航空钛合金结构件长寿命、高可靠性和高安全性的设计要求,工程上采用各种表面强化工艺(如喷丸、滚压、热处理等)对钛合金进行表面处理以改善其表面完整性。其中,喷丸工艺以成本低、效果好、适应性广等优势在航空航天领域应用广泛。其主要原理是利用弹丸对试样的高速冲击,使试样产生强烈塑性变形,从而在试样表层引入残余压应力场。残余压应力可以抵消部分外界交变载荷,抑制疲劳裂纹的萌生和扩展,同时使裂纹源由试样表面转向内部,进而有效提高材料的疲劳强度<sup>[5-8]</sup>。然而研究发现<sup>[9]</sup>,喷丸后零件的表面粗糙度值增大,且表面容易产生缺陷,导致材料表面完整性下降,不利于材料疲劳寿命的提高。

为进一步提高喷丸后钛合金的疲劳强度,本文从改善零件的表面完整性角度出发,采用喷丸结合振动光整加工工艺对 TC4 钛合金进行表面处理,即首先采用喷丸工艺对钛合金进行表面强化,使钛合金表面产生显著的残余压应力场,喷丸后,采用振动光整加工工艺对试样进行表面振动光整加工处理,降低试样的表面粗糙度,细化表面形貌,综合改善钛合金的表面完整性。振动光整加工是将游离态的颗粒磨具和工件置于振动设备的容器内,通过激振器使容器产生周期性振动,使容器内的磨具

与工件之间产生复杂的相对运动,一方面,磨具始终对零件表面进行碰撞、滚压,改善零件表面层物理力学性能;另一方面,磨具对零件表面实现微量切削,降低零件表面粗糙度,实现磨具对工件表面的精密加工<sup>[10]</sup>。

## 1 试样制备与试验方法

试验材料为 TC4 钛合金,化学成分(以质量分数计为:Al 6.06%, V 3.92%, Fe 0.3%, C 0.013%, N 0.014%, H 0.0014%, O 0.15%, Ti 余量。材料的屈服强度  $\sigma_{0.2}=983$  MPa, 抗拉强度  $\sigma_b=1027$  MPa, 延伸率  $\delta=18.5\%$ , 断面收缩率  $\psi=41\%$ 。

采用机械加工方法将 TC4 钛合金棒材加工成旋转弯曲疲劳试样,试样加持部位的直径为 12 mm, 缺口圆弧半径为 25 mm, 最小断面直径为 7.5 mm, 形状和尺寸如图 1 所示。试样在真空炉内 ( $1\times 10^{-3}$  Pa) 进行  $760\text{ }^{\circ}\text{C}\times 60\text{ min}$  的真空退火处理。将退火后的试样分作三组,第一组不作任何加工处理;第二组试样采用 Pr Trat 4G7 4Sm 气动式数控喷丸机进行喷丸处理(其中弹丸材料为铸钢丸,弹丸直径 0.4 mm, 喷丸强度 0.3 mmN, 喷射角度  $90^{\circ}$ , 覆盖率  $\geq 100\%$ , 喷丸时间 2 h);第三组试样先进行喷丸处理(喷丸时间和强度与第二组试样相同),喷丸后将试样置于振动光整机进行 1 h 的振动光整加工处理。

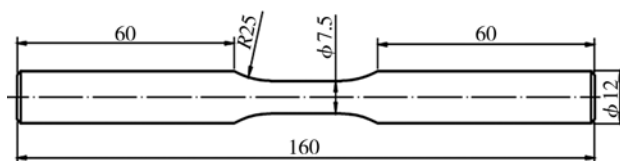


图 1 疲劳试样的形状和尺寸

Fig.1 Schematic diagram of shape and size of the fatigue specimen

为了分析喷丸结合振动光整加工工艺对 TC4 钛

合金疲劳性能的影响,对未处理试样、经过喷丸处理的试样和经过喷丸与振动光整加工工艺处理后的试样进行旋转弯曲疲劳试验。疲劳试验采用单试样法,试验在 PQ-6 型旋转弯曲疲劳试验机上进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 表面粗糙度

表面粗糙度是研究喷丸后表面完整性的重要指标。在试样表面得到强化的同时,由于弹丸对试样表面的连续撞击,试样原始表面也变成由大量弹坑组成的包络面,使喷丸后试样表面的粗糙度值增大<sup>[11-12]</sup>。喷丸强度越大,喷丸后表面粗糙度值越高。表面粗糙度的增大会造成试样表面产生微观缺口效应,表面应力集中系数随之增高,疲劳强度降低。

采用 JB-6C 触针式表面粗糙度仪对试样加工前后的表面粗糙度进行测试。由于在疲劳试验中试样一般在中间位置断裂,为此表面粗糙度的测试在靠近试样中间的位置进行测量。在靠近试样中间的不同位置测量 3 次并求取平均值,以降低环境、人为等因素对测量结果造成的误差。采用轮廓算术平均偏差  $R_a$  对表面粗糙度进行表征。表面粗糙度的测量结果如表 1 所示。测得喷丸前试样的表面粗糙度的范围为 0.812~1.212  $\mu\text{m}$ ,单独采用喷丸工艺对试样加工后,试样的表面粗糙度为 3.3~5.0  $\mu\text{m}$ ,喷丸加工后,试样的表面粗糙度值明显增大;经过喷丸与振动光整加工工艺处理后,测得试样表面粗糙度值为 0.912~1.324  $\mu\text{m}$ ,基本恢复至喷丸前水平。

表 1 试样加工前后的表面粗糙度

Tab.1 Surface roughness of the specimen before and after processing

序号	表面粗糙度值 $R_a/\mu\text{m}$		
	未处理	喷丸	喷丸+振动光整加工
1	0.812	4.421	0.998
2	1.125	3.925	0.912
3	1.109	3.337	1.324
4	0.859	5.021	1.135
5	0.981	4.689	1.217
6	1.212	4.158	1.094
7	0.997	3.598	1.142
8	1.136	4.775	1.268
9	1.183	4.207	1.077

使用 JCM-6000 扫描电子显微镜对经过不同工艺处理后试样的表面形貌进行了观察与对比,见图 2。从图 2 可以看出,经过喷丸处理后的试样,表面弹坑明显;经过喷丸与振动光整加工工艺处理后,试样表面弹坑基本消失,表面均匀平滑。

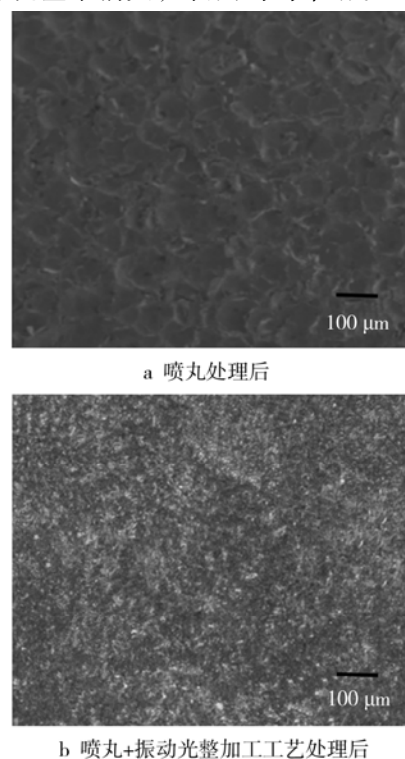


图 2 不同工艺处理后试样的表面形貌对比

Fig.2 The contrast of surface morphology of samples after different processing

### 2.2 残余应力

喷丸处理在试样表层引入的残余压应力可以抵消部分拉应力,降低有效拉应力幅值,使裂纹扩展的最大“有效拉应力”降低,并且迫使疲劳裂纹源萌生于次表层,使材料的疲劳强度提高。将加工后的试样逐层电解,使用 X-350A 型 X 射线应力测试仪对试样表层各深度的残余应力进行测试(管电压 22 kV,管电流 6 mA,测量方法采用测倾固定  $\psi$  法,  $\psi$  角选  $0^\circ \sim 45^\circ$ ,  $\text{CuK}\alpha$  辐射,衍射晶面为 (213)),得到残余应力沿试样层深的分布如图 3 所示。

从图 3 可以看出,喷丸处理后试样表层残余应力的分布特征与喷丸结合振动光整加工工艺处理后试样表层残余应力的分布特征基本相同,试样最表面为残余压应力,随着深度的增加,残余压应力呈先增大后减小的趋势。二者均在试样表层引入了显著的残余压应力场。不同的是,喷丸工艺处理后,试样最表面残余压应力值为 692 MPa,残余压应力

峰值为 850 MPa, 残余压应力层的厚度约 0.339 mm; 经过喷丸与振动光整加工工艺处理后, 试样最表面残余压应力值为 731 MPa, 残余压应力峰值为 829 MPa, 残余压应力层深度约 0.338 mm。与喷丸工艺相比, 经过喷丸与振动光整加工工艺处理后, 试样最表面的残余压应力值提高了 39 MPa, 试样表层残余压应力的峰值、残余压应力层的厚度略有减小。这是因为在振动光整加工过程中, 振动光整加工机中的磨具反复对试样表面进行微量磨削, 在降低试样表面粗糙度的同时, 去除了试样表面的微量材料, 而从图 3 可以看出, 喷丸后试样表面的残余压应力在表层的分布趋势为先增大后减小, 由于试样表面微量材料的去除, 表层以下部位的材料暴露于最表面, 因此残余压应力层的厚度出现减小, 残余压应力峰值的深度向试样表面方向移动。但是, 由于振动光整加工属于精加工范畴, 加工余量小, 因此对试样表层残余压应力场的影响并不显著。从图 3 可以看出, 喷丸后残余应力在试样表层的分布与经过喷丸和振动光整加工工艺处理后残余应力在试样表层的分布基本一致。

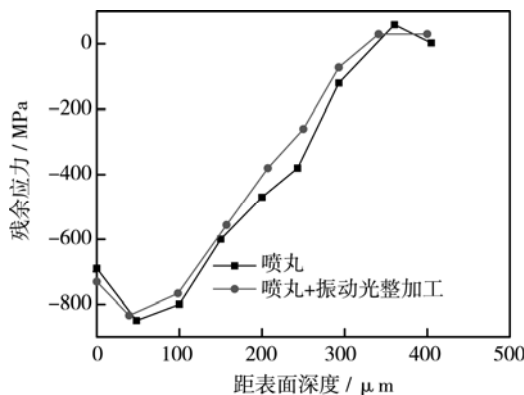


图 3 不同工艺处理后试样表层的残余应力分布

Fig.3 Distribution of surface residual stress of samples after different process

## 2.3 疲劳强度

研究表明<sup>[13-16]</sup>, 在喷丸强度较低时, 由于零件表面粗糙度值变化不大, 残余压应力使裂纹源由零件表面转移至次表面, 因此残余压应力对疲劳强度起主导作用; 在喷丸强度较高时, 零件表面粗糙度值也随之大幅增加, 零件表面产生应力集中, 裂纹源易在表面产生。按照 GB/T 4337—2008《金属材料疲劳试验旋转弯曲方法》, 在室温条件下, 采用单试样法测试了试样  $2 \times 10^6$  周次的条件疲劳强度。经过不同表面处理后各组试样的  $\sigma-N$  曲线如

图 4 所示。

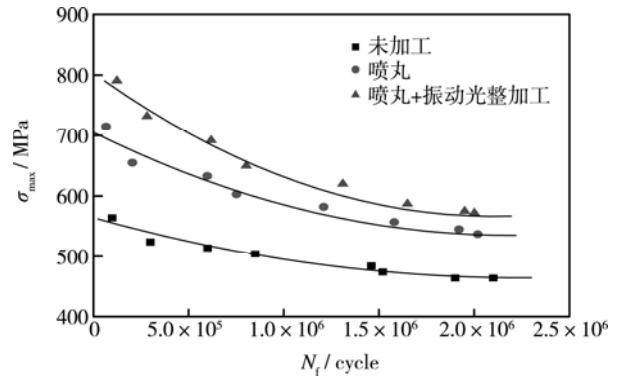


图 4 不同工艺条件下的  $\sigma-N$  曲线

Fig.4  $\sigma-N$  curves under different technical conditions

根据疲劳统计学方法, 计算出未加工试样的疲劳强度为 465 MPa, 经过喷丸处理后试样的疲劳强度为 541 MPa, 疲劳强度提高了 16.3%。经过喷丸与振动光整加工工艺处理后试样的疲劳强度为 576 MPa, 比未加工试样的疲劳强度提高了 23.8%, 在喷丸的基础上, 使试样的疲劳强度进一步提高了 7.5%。

喷丸处理在试样表层引入的残余压应力场对试样的疲劳性能起到重要的积极作用, 然而由于钛合金的高周疲劳对表面的应力集中比较敏感, 喷丸处理虽然在试样表层引入显著的残余压应力场, 但同时由于表面粗糙度增大明显, 限制了疲劳强度的进一步提高。试样在经过喷丸与振动光整加工处理后, 在不明显改变表层残余压应力场的条件下, 大幅降低了试样的表面粗糙度值, 试样的表面粗糙度基本恢复至喷丸前的水平, 从而有效解决了喷丸处理后零件因零件表面粗糙度值过大引起的应力集中问题, 使试样的疲劳强度获得了进一步的提高。

## 3 结语

1) 喷丸后 TC4 钛合金试样表面粗糙度值增加。喷丸后对试样进行振动光整加工处理, 使试样表面弹坑消失, 细化了表面形貌, 试样的表面粗糙度值基本恢复至喷丸前水平。

2) 喷丸后对试样进行振动光整加工处理, 使试样表面残余压应力值提高了 29 MPa, 但是残余压应力峰值、残余压应力层的厚度略有降低。振动光整加工对喷丸后试样表层的残余压应力场影响不大。

3) 喷丸使 TC4 钛合金试样的疲劳强度提高了

16.3%，喷丸结合振动光整加工工艺使 TC4 钛合金试样的疲劳强度提高了 23.8%。喷丸结合振动光整加工工艺通过对表面完整性的综合改善，可显著提高钛合金的疲劳抗力。

#### 参考文献：

- [1] 夏明莉, 刘道新, 杜东兴, 等. 喷丸强化对 TC4 钛合金表面完整性及疲劳性能的影响[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(3): 1349—1358.  
XIA Ming-li, LIU Dao-xin, DU Dong-xing, et al. Effect of Shot Peening on Surface Integrity and Fatigue Properties of TC4 Titanium Alloy[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(3): 1349—1358.
- [2] 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 Bo-lin, DENG Hai-peng. Research Status and Development Trend of Surface Integrity[J]. Surface Technology, 2015, 44(9): 140—152.
- [3] 何少杰, 杨文玉, 郭步鹏. 机加工表面残余应力及其疲劳寿命评价的研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(6): 120—132.  
HE Shao-jie, YANG Wen-yu, GUO Bu-peng. Research Progress on Evaluation of Surface Residual Stress and Fatigue Life of Machined Products[J]. Surface Technology, 2015, 44(6): 120—132.
- [4] 陈雷, 吕泉, 马艳玲, 等. 表面完整性对航空发动机零件疲劳寿命的影响分析[J]. 航空精密制造技术, 2012, 48(5): 47—55.  
CHEN Lei, LYU Quan, MA Yan-ling, et al. Analysis of Effect of Surface Integrity on Aero Engine Parts Fatigue Life Failure[J]. Aviation Precision Manufacture Technology, 2012, 48(5): 47—55.
- [5] 李世平, 刘道新, 李瑞鸿, 等. 喷丸强化与表面完整性对 TC21 钛合金疲劳性能的影响[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(12): 1921—1926.  
LI Shi-ping, LIU Dao-xin, LI Rui-hong, et al. Influence of Shot Peening and Surface Integrity on Fatigue Properties of TC21 Titanium Alloy[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(12): 1921—1926.
- [6] 刘道新, 何家文. 经不同表面改性处理的钛合金的微动疲劳和微动磨损行为对比研究[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(1): 13—17.  
LIU Dao-xin, HE Jia-wen. Comparative Study on the Fretting Fatigue and Fretting Wear Behavior of Titanium Alloy Subject to Various Surface Modifications[J]. Tribology, 2005, 25(1): 13—17.
- [7] GAO Yu-kui. Surface Modification of TA2 Pure Titanium by Low Energy High Current Pulsed Electron Beam Treatments[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(17): 7455—7460.
- [8] BAGHERIFARD S, FERNANDEZ PARIENTE I, GHELICHI R, et al. Fatigue Properties of Nano crystallized Surfaces Obtained by High Energy Shot Peening[J]. Procedia Engineering, 2010, 2: 1683—1690.
- [9] 王欣, 胡仁高, 胡博, 等. 喷丸强化对 GH4169 合金孔结构高温低周疲劳性能的影响[J]. 中国表面工程, 2015, 28(6): 7—12.  
WANG Xin, HU Ren-gao, HU Bo, et al. Effect of Shot Peening on High-temperature Low-cycle Fatigue Property of GH4169 Super Alloy with Hole Structure[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(6): 7—12.
- [10] 杨乾华. 振动抛光钛合金叶片的实验研究[J]. 航空精密制造技术, 2006, 42(3): 14—16.  
YANG Qian-hua. Experiment Studies on Polishing Ti-alloy Blade by Three Dimensions Vibration[J]. Machinery Design & Manufacture, 2006, 42(3): 14—16.
- [11] 李鹏, 刘道新, 关艳英. 喷丸强化对新型 7055-T7751 铝合金疲劳性能的影响[J]. 机械工程材料, 2011, 39(1): 86—93.  
LI Peng, LIU Dao-xin, GUAN Yan-ying. Effect of Shot Peening on Fatigue Property of New Aluminum Alloy 7055-T7751[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2011, 39(1): 86—93.
- [12] BAGHERIFARD S, GHELICHI R, GUAGLIANO M. Numerical and Experimental Analysis of Surface Roughness Generated by Shot Peening[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(18): 6831—6840.
- [13] 包俊成, 赵捷, 王志奇, 等. 表面强化对 30CrMnSiA 钢疲劳性能的影响[J]. 机械工程材料, 2010, 34(6): 71—73.  
BAO Jun-cheng, ZHAO Jie, WANG Zhi-qi, et al. Influence of Surface Strengthening on Fatigue Property of 30CrMnSiA Steel[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2010, 34(6): 71—73.
- [14] GAO Y K, WU X R. Experimental Investigation and Fatigue Life Prediction for 7475-T7351 Aluminum Alloy with and without Shot Peening Induced Residual Stresses [J]. Acta Materialia, 2011, 59(9): 737—747.
- [15] 高玉魁. 表面强化对 A-100 钢带孔构件疲劳性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(5): 160—164.  
GAO Yu-kui. Influence of Local Surface Strengthening on Fatigue Properties of Components with Holes of an A-100 Steel[J]. Transaction of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(5): 160—164.
- [16] KAWAGOISHI N, NAGANO T, MORIYAMA M, et al. Improvement of Fatigue Strength of Maraging Steel by Shot Peening[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2009, 24(12): 1431—1436.