

表面喷丸强化处理对 TC11 钛合金疲劳性能的影响

李卫¹, 严世榕², 张乐¹

(1.湖南信息职业技术学院, 长沙 410200; 2.福州大学, 福州 350100)

摘要:目的 改善 TC11 钛合金的抗疲劳性能。方法 采用喷丸表面强化工艺对 TC11 钛合金进行了表面强化处理, 研究了喷丸强化处理、喷丸+二次喷丸强化处理对 TC11 钛合金试样表面粗糙度、残余应力、显微组织及疲劳性能的影响。结果 喷丸处理能够在试样表层引入厚度约 230 μm 的残余压应力场, 但同时导致试样表面粗糙度值增加。喷丸后进行表面二次喷丸, 试样表面残余压应力值和残余压应力峰值提高, 但残余压应力峰值的位置和残余压应力层的厚度变化不大。二次喷丸对试样表面起到一定程度的修复作用, 使试样表面粗糙度值降低。喷丸后试样表层组织发生明显的塑性变形, 晶粒变细, 而喷丸+二次喷丸处理可使试样表层组织得到进一步细化。喷丸处理后, 试样的疲劳强度由 480 MPa 提高至 540 MPa, 提高了 12.5%, 二次喷丸使试样的疲劳强度提高至 570 MPa, 在喷丸的基础上继续提高了 5.5%。结论 喷丸后对试样表面进行二次喷丸对表层残余应力场的影响不大, 二次喷丸主要通过降低试样表面粗糙度值和细化试样表层组织, 使试样的疲劳强度得到进一步提高。

关键词: 钛合金; 二次喷丸; 表面粗糙度; 残余应力; 金相组织; 疲劳强度

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)03-0172-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.03.026

Effects of Surface Shot Peening Strengthening on Fatigue Property of TC11 Titanium Alloy

LI Wei¹, YAN Shi-rong², ZHANG Le¹

(1.Hunan College of Information, Changsha 410200, China; 2.Fuzhou University, Fuzhou 350100, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the fatigue resistance of titanium alloy. The surface strengthening process of shot peening was used for surface strengthening treatment of TC11 titanium alloy. Effects of shot peening strengthening, shot peening+second shot peening strengthening on surface roughness, residual stress, microstructure and fatigue resistance of TC11 titanium alloy sample were studied. The shot peening treatment could introduce nearly 230 μm thick compressive residual stress field to the sample surface, but meanwhile increase the roughness value of sample surface. After second shot peening, both the surface residual compressive stress and peak residual compressive stress increased, while the location of peak compressive residual stress and thickness of compressive residual stress layer showed little change. The second shot peening had certain repair effect on the sample surface and decrease surface roughness value of the samples. The surface tissue was subject to obvious plastic deformation after shot peening, and the grain size was refined. Compared with the samples after shot peening, shot peening+second shot peening could further refine the sample surface organization. After shot peening, fatigue strength of the samples increased from 480 MPa to 540 MPa by 12.5%; after the second shot peening, the fatigue strength of the samples increased from 540 MPa to 570 MPa by 5.5%. The second shot peening has little influence on

收稿日期: 2016-10-17; 修订日期: 2016-11-31

Received: 2016-10-17; Revised: 2016-11-31

基金项目: 湖南省教育厅研究课题 (15C0977); 湖南省科技厅研究课题 (2013FJ3019)

Fund: Supported by the Department of Education of Hunan Province (15C0977); the Department of Science & Technology of Hunan Province (2013FJ3019)

作者简介: 李卫 (1982—), 男, 副教授, 从事零件表面强化技术及表面完整性研究。

Biography: LI Wei (1982—), Male, Associate professor, Research focus: parts surface strengthening technology and surface integrity.

residual stress field of the surface, it improves the fatigue strength of titanium alloy mainly by reducing the surface roughness value and refining surface organization of the samples.

KEY WORDS: titanium alloy; second shot peening; surface roughness; residual stress; metallographic structure; fatigue strength

钛合金因具有密度小、比强度高、耐高温等优异性能,在航空工业中被广泛应用于飞机和发动机构件上^[1]。TC11 钛合金是我国自主研发的一种综合性能良好的高温钛合金,在 500 °C 的温度下具有优异的热强性能,目前主要用于制造航空发动机叶片、压气盘、鼓筒等零件^[2]。然而,由于钛合金的表面缺口敏感性高,在复杂的服役环境中,易产生疲劳裂纹。据统计,90% 以上的航空钛合金的结构失效与疲劳有关。因此,疲劳断裂成为钛合金在航空工业领域应用中的重要隐患之一^[3-4]。

提高钛合金的抗疲劳性能是有效防止其疲劳失效的直接途径。由于疲劳断裂一般始于零件表面^[5],采用合理的表面强化工艺可有效提高钛合金的抗疲劳性能。近年来,国内外专家学者已围绕提高钛合金的表面质量进行了大量研究。目前,工程上常用的表面强化工艺主要有:喷丸、滚压、离子注入、化学和电化学处理、激光处理等^[6-11]。其中,表面喷丸强化工艺是当前应用最广泛的表面强化工艺,其特点为工艺简单、成本低、适应性广、强化效果好。喷丸强化通过在零件表面引入残余压应力场,可以抵消疲劳载荷中的部分拉应力,并使零件表面产生加工硬化,可有效提高钛合金的疲劳极限,尤其对高强度钛合金的强化效果更为显著。研究表明,随着喷丸强度的提高,残余压应力场的深度和最大残余压应力深度均呈逐渐增加趋势^[12]。然而过高的喷丸强度导致喷丸后工件表面的粗糙度增大,甚至使工件表面产生微裂纹,不利于疲劳寿命的提高^[13]。

为充分发挥喷丸强化的有利作用,同时降低喷丸后不利因素对钛合金疲劳寿命的影响,本文采用喷丸、喷丸+二次喷丸表面强化处理方法对 TC11 钛合金进行了表面强化处理,通过对比分析研究喷丸强化对 TC11 钛合金抗疲劳性能的影响。

1 材料与试验方法

试验材料为 TC11 钛合金,其主要化学成分(以质量分数计)为:Ti 88.121%,Al 6.323%,Mo 3.427%,Zr 1.577%,Si 0.294%,Fe 0.043%。其力学性能为:屈服强度 940 MPa,抗拉强度 1050 MPa。试样的热处理采用双重退火,950 °C 退火 1 h,530 °C 退火 6 h。根据 GB 3075—82《金属轴向疲劳试验方法》,将钛合金棒材加工为如图 1 所示的疲劳试样。

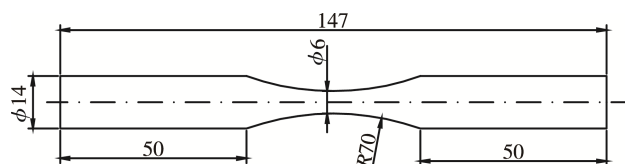


图 1 疲劳试样的形状与尺寸

Fig.1 The shape and size of the fatigue test sample

疲劳试样分为 3 组。第一组试样未作表面强化处理。第二组试样采用直径为 1 mm 的铸钢丸以 0.3 mmA 的喷丸强度进行 2 h 的表面喷丸强化处理。第三组试样首先采用直径为 1 mm 的铸钢丸以 0.3 mmA 的喷丸强度进行 2 h 的喷丸强化,然后采用直径为 0.5 mm 的铸钢丸以 0.2 mmA 的喷丸强度进行 1 h 的表面二次喷丸处理。喷丸结束后,分别对 3 组试样进行表面粗糙度、残余应力、显微组织测试及疲劳试验,研究不同喷丸状态下试样的表面粗糙度、残余应力、显微组织和疲劳强度的变化。

2 结果与分析

2.1 不同喷丸状态下试样表面粗糙度的变化

喷丸结束后,采用 TR-200 便携式表面粗糙度仪对 3 组试样的表面粗糙度值进行了测量。测量结果如图 2—4 所示。测得第一组试样的表面粗糙度值 $Ra=1.18 \mu\text{m}$,第二组试样的表面粗糙度值 $Ra=3.21 \mu\text{m}$,第三组试样的表面粗糙度值 $Ra=1.98 \mu\text{m}$ 。测量结果表明,喷丸后试样的表面粗糙度值增加明显,其主要原因为在高强度喷丸强化的过程中,弹丸对试样表面具有强

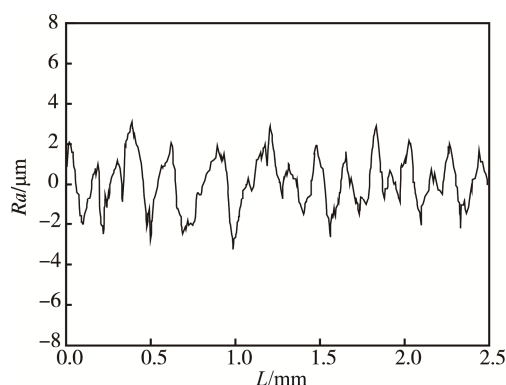


图 2 未喷丸试样的表面粗糙度测量结果 ($Ra=1.18 \mu\text{m}$)

Fig.2 The surface roughness measurement result of unshot peening specimen ($Ra=1.18 \mu\text{m}$)

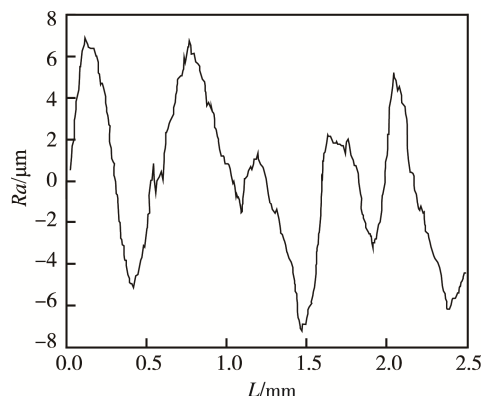


图3 喷丸后的表面粗糙度测量结果 ($Ra=3.21\ \mu\text{m}$)

Fig.3 The surface roughness measurement results of shot peening specimen ($Ra=3.21\ \mu\text{m}$)

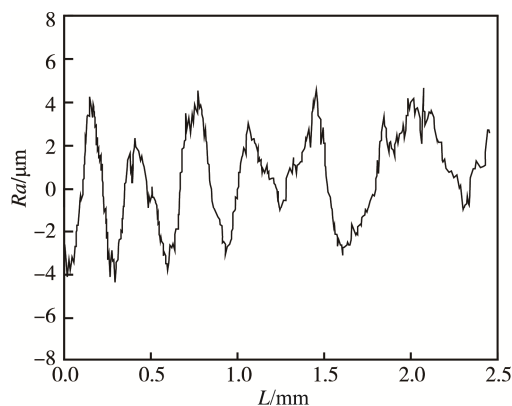


图4 喷丸+二次喷丸后的表面粗糙度测量结果 ($Ra=1.98\ \mu\text{m}$)

Fig.4 The surface roughness measurement results of shot peening and second shot peening specimen ($Ra=1.98\ \mu\text{m}$)

烈的冲击作用,试样表面易形成凹坑。二次喷丸中采用的弹丸粒径较小,对试样表面凹坑与凹坑之间的突起部分起到研磨的作用,试样凹凸不平的表面得到修复,试样的表面粗糙度值降低。

2.2 不同喷丸状态下试样表层残余应力的变化

利用PSPC-MSF3M型应力分析仪配合电化学剥层法对第二组、第三组试样喷丸后的残余应力进行了测量。残余应力的测量采用侧倾固定 ψ 法, ψ 角度分别为 0° 、 15° 、 30° 和 45° 。采用Cu靶辐射,X光管电压为27 kV,电流为7 mA。测得喷丸后各组试样表层残余应力沿深度方向的分布如图5所示。

从图5可以看出,喷丸后第二组试样和第三组试样表层均产生残余压应力层。随着层深的增加,残余压应力呈先增大后减小的趋势,残余压应力层的厚度约为 $230\ \mu\text{m}$ 。其中,第二组试样喷丸后,表面残余压应力值为 $361\ \text{MPa}$,残余压应力的最大值为 $492\ \text{MPa}$;第三组试样最表面的残余压应力值为 $382\ \text{MPa}$,表层残余压应力峰值为 $511\ \text{MPa}$ 。这表明,在一次喷丸的基础上,通过二次喷丸进一步提高了TC11钛合对残余压应力峰值的位置影响不大。喷丸产生的残余

金试样表面的残余压应力值和残余压应力峰值,但是压应力场不仅可以抵消疲劳载荷中的拉应力水平,而且可以抑制疲劳裂纹的萌生和扩展速率,这是残余压应力提高材料疲劳强度的主要机理^[14]。

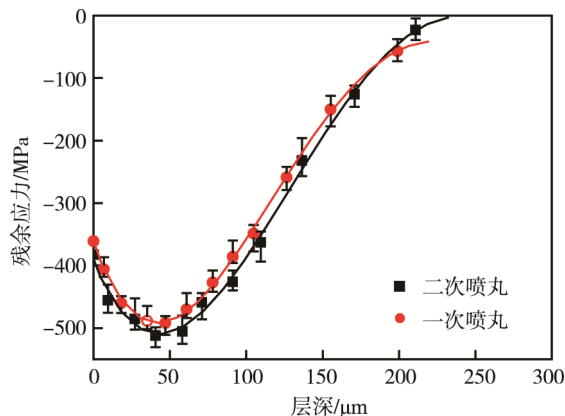


图5 不同喷丸状态下试样表层残余应力沿层深的分布

Fig.5 The distribution of residual stress of specimens under different shot peening states

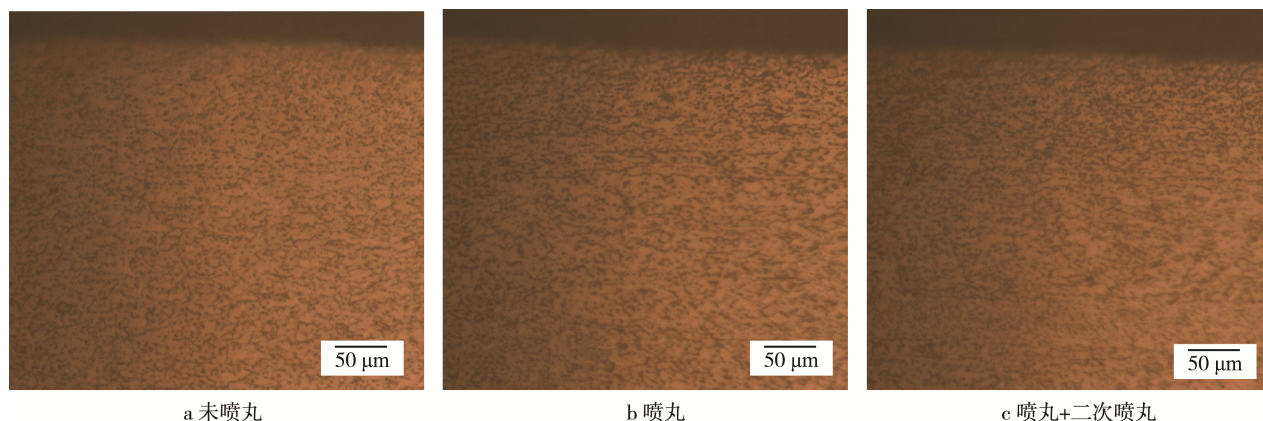
2.3 不同喷丸状态下试样表层显微组织的变化

采用线切割加工工艺对未喷丸试样、喷丸试样、喷丸+二次喷丸试样取样,依次用 $400^\#$ 、 $600^\#$ 、 $800^\#$ 、 $1000^\#$ 和 $1200^\#$ 的水砂纸打磨,然后在金相抛光机上对试样横截面进行细抛,直至试样表面无划痕。使用OLYMPUS-BX41M型金相显微镜对试样横截面的金相组织进行了观察。从图6a可以看出,对于未喷丸的试样,试样各位置的 α 相和 β 相组织分布均匀。喷丸后,由于试样表面反复受弹丸高速冲击作用,表层组织发生明显的塑性变形,从图6b可以看出,试样表层组织晶粒变细,晶界模糊。从图6c可以看出,喷丸后对试样进行表面二次喷丸,使试样表层组织进一步得到细化。在弹丸高速冲击作用下,近表层组织破碎明显,晶粒尺寸较小,组织致密度高(图中虚线以上区域)。在试样表层由外向里,晶粒尺寸逐渐增大,并逐渐过渡至与表层以下组织的晶粒无明显差异。从图6c可以明显看出,喷丸+二次喷丸处理后,材料表层晶粒细化的区域范围更大。对比图6b和图6c可以得出:喷丸后对试样表面进行二次喷丸,可进一步细化表层组织,但是对表层以下的组织影响不大。

2.4 对疲劳性能的影响

根据GB 3075—82《金属轴向疲劳试验方法》,采用PLD-100KN型电液伺服疲劳试验机对未喷丸试样、喷丸试样、喷丸+二次喷丸后的试样分别进行了拉-压疲劳试验,试验温度为室温,条件应力循环次数为 2×10^6 次,试验加载频率为5 Hz,应力比 $R=-1$ 。

图7为不同喷丸状态下试样的最大循环应力-疲劳寿命($S-N$)曲线。试验结果表明,未喷丸试样的疲劳



a 未喷丸

b 喷丸

c 喷丸+二次喷丸

图 6 不同喷丸状态下试样表层金相组织

Fig.6 The microstructure of specimens under different shot peening states

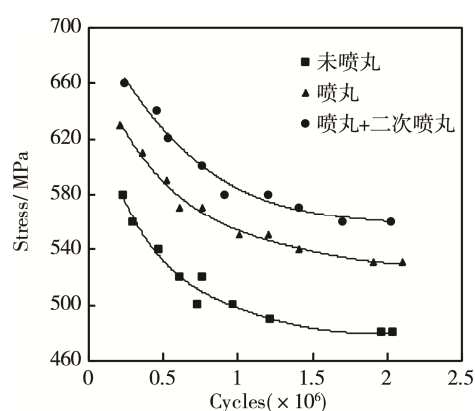


图 7 不同喷丸状态下试样的 S-N 曲线

Fig.7 The S-N curves of specimens under different shot peening states

极限 σ_{-1} 为 480 MPa, 喷丸处理后, 试样的疲劳极限 σ_{-1} 为 540 MPa, 喷丸后试样的疲劳强度提高了 12.5%。采用喷丸+二次喷丸对试样进行表面强化处理后, 试样的疲劳强度为 570 MPa, 使试样的疲劳强度在一次喷丸的基础上继续提高了 5.5%。

相比单次喷丸, 喷丸+二次喷丸的主要优点在于, 一方面, 二次喷丸中采用的弹丸粒径较小, 对喷丸后试样凹凸不平的表面起到修复作用。TC11 钛合金为一种高强度合金, 对表面应力集中敏感性高, 二次喷丸使试样的表面粗糙度值由 $3.21 \mu\text{m}$ 降低至 $1.98 \mu\text{m}$, 降低了试样表面的应力集中程度, 从而使试样的疲劳强度得到明显提高。另一方面, 二次喷丸后, 近表层残余压应力值提高, 试样表层组织得到明显细化。当材料表面无明显应力集中时, 试样表层较大的残余压应力有助于疲劳裂纹源向内部转移, 使材料的疲劳性能得到改善。

根据王敏^[15]、高玉魁^[16]等人的研究成果, 材料表层组织的晶粒细化是位错运动、孪晶形成和交割共同作用的结果。在对 TC11 钛合金试样喷丸强化的过程中, 弹丸以高速撞击试样表面, 试样表面反复发生塑性变形, 使试样表层的晶粒发生破碎, 位错增加,

晶粒的细化能够增加组织位错运动的阻力, 阻碍交变载荷作用下组织的往复滑移, 降低裂纹萌生和扩展的速率, 从而提高材料的疲劳强度。提高喷丸强度可以增加晶粒细化的程度和材料表层的残余压应力值, 从而使材料的疲劳程度得到大幅提高。但并不是喷丸强度越大越好, 过大的喷丸强度不仅会导致试样表面的粗糙度值升高, 表面应力集中程度增加, 而且易使试样表面产生疲劳裂纹等缺陷, 降低材料的整体力学性能。二次喷丸对试样表层残余应力场的影响不大, 其对试样疲劳强度提高的主要机制在于降低了试样表面的粗糙度值和细化了试样的表层组织。

3 结论

1) 喷丸处理在试样表层引入残余压应力场, 同时试样表面粗糙度值增加。采用喷丸+二次喷丸表面强化处理方法能够对试样表面起到修复作用, 有效降低试样的表面粗糙度值, 并使试样表层组织进一步细化, 残余压应力值略有提高。

2) 喷丸强化处理使 TC11 钛合金试样疲劳强度由 480 MPa 提高至 540 MPa, 提高了 12.5%; 喷丸后对试样表面进行二次喷丸, 使 TC11 钛合金的疲劳强度在喷丸的基础上提高至 570 MPa, 提高了 5.5%。二次喷丸提高钛合金疲劳强度的主要机制为降低了试样表面粗糙度值及细化了表层组织。

参考文献:

- [1] 高霁, 宋德阳, 冯俊文. 工艺参数对钛合金熔覆 CBN 涂层几何形貌的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(1): 77—80.
GAO Ji, SONG De-yang, FENG Jun-wen. Influence of Processing Parameters on Geometrical Features of CBN Coatings by Cladding on Titanium alloy Surface [J]. Surface Technology, 2015, 44(1): 77—80.
- [2] "Aeronautical Manufacture Engineering Handbook" Edits

- Committee. Aeronautical Manufacture Engineering Handbook[M]. Beijing: Aerospace Industry Press, 1997: 235—237.
- [3] KIM H, KIM J. Region-based Shape Descriptor Invariant to Rotation Scale and Translation. *Signal Processing: Image Communication*, 2000, 16(1/2): 87—93.
- [4] 陶春虎, 刘庆琰, 曹春晓, 等. 航空用钛合金零件的失效及其预防[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
TAO Chun-hu, LIU Qing-quan, CAO Chun-xiao, et al. Failure and Prevention of Aeronautical Titanium Alloy [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
- [5] 何伯林, 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—146.
HE Bo-lin, DENG Hai-peng. Research Status and Development Trend of Surface Integrity [J]. 2015, 44(9): 140—146.
- [6] 赵艳丽, 王强, 杨庆祥等. 喷丸工艺参数对 A-100 高强度钢残余应力场的影响[J]. *金属热处理*, 2013, 38(8): 10—13.
ZHAO Yan-li, WANG Qiang, YANG Qing-xiang, et al. Effect of Shot Peening Parameters on Residual Stress Fields of A-100 High Strength Steel[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2013, 38(8): 10—13.
- [7] 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): 3737—3747.
- [8] TSUJI N, TANAKA S, TAKASUGI T. Effect of Combined Plasma-carburizing and Deep-rolling on Notch Fatigue Property of Ti-6Al-4V Alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 499(1/2): 482—488.
- [9] 张彩珍, 杨健, 魏磊, 等. 航空发动机钛合金叶片喷丸强化残余应力研究[J]. *表面技术*, 2016, 45(4): 208—212.
ZHANG Cai-zhen, YANG Jian, WEI Lei, et al. Shot Peened Residual Stress of Aeroengine Titanium Alloy Blades [J]. *Surface Technology*, 2016, 45(4): 208—212.
- [10] CAO Zi-wen, XU Hai-ying, ZOU Shi-kun, et al. Investigation of Surface Integrity on TC17 Titanium Alloy Treated by Square-spot Laser Shock Peening[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2012, 25: 650—656.
- [11] 杜东兴, 刘道新, 孟保利, 等. 前处理与超音速火焰喷涂金属陶瓷涂层对 TC21 钛合金疲劳性能的影响[J]. *中国科学: 技术科学*, 2013, 43(5): 545—553.
DU Dong-xing, LIU Dao-xin, MENG Bao-li, et al. Effects of Pretreatment and HVOF Sprayed Cermet Coating on Fatigue Properties of TC21 Titanium Alloy[J]. *Sci China Tech Sci*, 2013, 43(5): 545—553.
- [12] 冯宝香. TC4-DT 钛合金喷丸强化研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
FENG Bao-xiang. Analysis of TC4-DT Titanium Alloy by Shot Peening[D]. xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009.
- [13] 夏明莉, 刘道新, 杜东兴. 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(8): 1349—1358.
XIA Ming-li, LIU Dao-xin, DU dong-xin. Effects of Shot Peening on Surface Integrity Properties of TC4 Titanium Alloy [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2012, 31(8): 1349—1358.
- [14] 高玉魁. 喷丸对 Ti-10V-2Fe-3Al 钛合金拉-拉疲劳性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(1): 60—63.
GAO Yu-kui. Influence of Shot Peening on Tension-Tension Fatigue Properties in Ti-10V-2Fe-3Al Titanium Alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(1): 60—63.
- [15] 王敏, 蔺成效, 马彩霞. Ti-6Al-4V 钛合金表面纳米化机制研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2011, 35(5): 60—63.
WANG Min, LIN Cheng-xiao, MA Cai-xia. Mechanism of Surface Nanocrystallization of Ti-6Al-4V Alloy [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2011, 35(5): 60—63.
- [16] 高玉魁. 喷丸强化对 TC4 钛合金组织结构的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2010, 39(9): 1536—1539.
GAO Yu-kui. Effect of Shot Peening on Microstructure of TC4 Titanium Alloy [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2010, 39(9): 1536—1539.