

# 航空发动机钛合金叶片喷丸强化残余应力研究

张彩珍, 杨健, 魏磊, 李跃辉, 吕建勋, 陈林洪

(西安航空动力股份有限公司, 西安 710021)

**摘要:**目的 研究航空发动机钛合金叶片残余应力场,掌握叶片喷丸后和使用后的残余应力分布规律,为评估叶片的安全性和可靠性提供依据,为预测叶片剩余寿命提供数据支持。方法 利用X射线衍射技术测试并研究航空发动机钛合金风扇叶片和压气机叶片喷丸后表面残余应力场、喷丸后残余应力沿层深的分布规律和使用后的残余应力衰减规律。结果 喷丸后风扇叶片残余应力的90%分布在-600~-800 MPa,其残余应力均值为-682 MPa;压气机叶片残余应力的90%分布在-500~-700 MPa,其残余应力均值为-603 MPa。喷丸后风扇叶片和压气机叶片的表面残余应力约为-610 MPa,在次表面层11  $\mu\text{m}$ 和13  $\mu\text{m}$ 处存在一个最大残余压应力,分别为-739 MPa和-683 MPa,随后残余压应力随着深度的增加而逐渐减小。风扇叶片使用300 h后应力分布在-460~-720 MPa,使用600 h后应力分布在-430~-700 MPa;压气机叶片使用300 h后应力分布在-470~-670 MPa,使用600 h后应力分布在-360~-620 MPa。结论 喷丸后钛合金叶片表面存在较大的残余压应力且分布较为均匀;喷丸后钛合金叶片残余压应力随层深的增加先增大后减小,残余应力场深度约为50  $\mu\text{m}$ ;使用后的钛合金叶片残余应力有衰减趋势,而且随着使用时间的增加,残余压应力衰减量逐渐增加。

**关键词:**钛合金; 风扇叶片; 压气机叶片; 残余应力; X射线衍射分析; 喷丸

**中图分类号:** TG668; TG115.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-3660(2016)04-0208-05

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.04.035

## Shot-peened Residual Stress of Aeroengine Titanium Alloy Blades

ZHANG Cai-zhen, YANG Jian, WEI Lei, LI Yue-hui, LYU Jian-xun, CHEN Lin-hong

(Xi'an Aero-engine PLC, Xi'an 710021, China)

**ABSTRACT:** **Objective** The residual stress field of aeroengine titanium alloy blades was studied, and the residual stress distribution of blades after shot peening and after use was mastered, in order to provide a basis for evaluating the safety and reliability of the blades, and to provide data support for predicting the residual life of the blades. **Methods** The surface residual stress field after shot peening, the residual stress distribution along the deep layer, and the residual stress of aeroengine fan blades and compressor blades after use were studied using X-ray diffraction technology. **Results** After shot peening, about 90% of residual stress of the fan blades was distributed in the range of -600~-800 MPa, and the average residual stress value was about -682 MPa. About 90% of residual stress distribution of the compressor blades was distributed in the range of -500~-700 MPa, and the average residual stress was about -603 MPa. After shot peening, the surface residual stress of the fan blade and compressor blade was about -610 MPa, and there was a maximum residual stress in the subsurface layer, the values were -739 MPa at 11  $\mu\text{m}$  and -683 MPa at

收稿日期: 2015-12-01; 修订日期: 2015-12-30

Received: 2015-12-01; Revised: 2015-12-30

作者简介: 张彩珍(1975—),女,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为残余应力及疲劳性能等。

**Biography:** ZHANG Cai-zhen(1975—), Female, Master graduated student, Senior engineer, Research focus: residual stress and fatigue property.

13  $\mu\text{m}$ , respectively, and then the residual stress decreased gradually with increasing depth. The residual stress distribution of the fan blades was  $-460 \sim -720$  MPa after using for 300 hours, and  $-430 \sim -700$  MPa after using for 600 hours. The residual stress distribution of the compressor blades was  $-470 \sim -670$  MPa after using for 300 hours, and  $-360 \sim -620$  MPa after using for 600 hours. **Conclusion** The residual compressive stress of Titanium alloy blade after shot peening first decreased and then increased with the increase of the layer depth, and the depth of the residual stress field was about 50  $\mu\text{m}$ . The residual stress of titanium alloy blade after use showed an attenuation trend, and the residual compressive stress attenuation increased gradually with the increase of using time.

**KEY WORDS:** titanium alloy; fan blade; compressor blade; residual stress; X-ray diffraction analysis; shot peening

钛合金具有优异的比刚度、比强度、抗高温性能和抗腐蚀性能,对振动载荷及冲击载荷作用下裂纹扩展的敏感性低,因此在现代航空发动机中的用量越来越大<sup>[1-2]</sup>。钛合金零件在加工成形过程中都将引起残余应力,残余应力的存在对其疲劳强度、抗脆断能力、抗应力腐蚀开裂及形状尺寸的稳定性有着重要影响<sup>[3-5]</sup>。历史上许多灾难性破坏事故大多是由零部件结构中的残余应力引起的<sup>[6-7]</sup>,据统计,在发动机零部件的失效事件中,叶片的损坏和失效占70%左右,因此研究航空发动机叶片的残余应力非常必要。

目前航空航天工业主要利用喷丸强化来改善零件的疲劳性能和提高应力腐蚀开裂抗力,从而提高零件的可靠性和耐久性<sup>[8-10]</sup>。通过喷丸强化<sup>[11]</sup>使叶片表层发生塑性变形,形成一定厚度的强化层。强化层内形成较高的残余压应力,叶片承受载荷时可以抵消一部分拉应力,从而提高叶片的疲劳强度。但喷丸残余压应力在疲劳过程中并不是稳定的<sup>[12]</sup>,在一定的应力场和温度场的单独或共同作用下,残余应力会发生衰减。国内外有关钛合金叶片喷丸后残余应力场的分布规律和叶片使用后残余应力衰减规律的研究鲜有报道。针对这种情况,本文通过X射线衍射技术<sup>[13-15]</sup>对钛合金叶片喷丸后残余应力场以及使用后的残余应力衰减规律进行研究分析,掌握其残余应力分布状况及衰减规律,对于确保钛合金叶片的安全性和可靠性有着非常重要的意义,并最终达到有效预测叶片剩余寿命的目的。

## 1 实验

实验用叶片为某型发动机风扇叶片和压气机叶片,叶片测试位置为叶身部位。

采用XStress-3000应力测定仪测试残余应力,依据GB/T 7704—2008进行检测,其主要参数为:侧倾法、Ti靶、管电压20 kV、管电流7 mA、衍射晶面(110)、无应力衍射角 $137.4^\circ$ 、弹性模量110 GPa、泊松比0.33、曝光时间25 s、准直器尺寸 $\phi 2$  mm、在倾角

$\pm 30^\circ$ 范围内选取5个 $\Psi$ 角。

实验分别测试了风扇叶片和压气机叶片喷丸后表面残余应力、喷丸后深度方向残余应力分布、使用300 h和600 h后的表面残余应力。

## 2 结果和讨论

### 2.1 新叶片喷丸后残余应力场分布

图1和图2为风扇叶片和压气机叶片喷丸后表面残余应力场的分布。通过电解抛光对喷丸叶片进行剥层处理,测试深度残余应力,图3为风扇叶片和压气机叶片喷丸后残余应力场沿层深的分布规律。

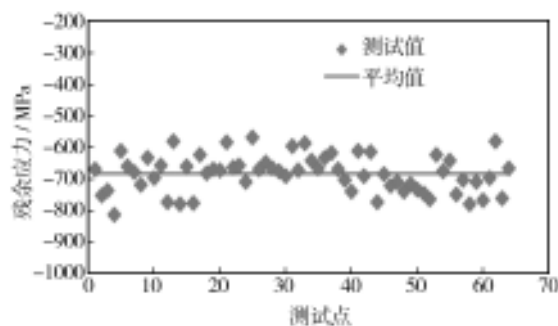


图1 风扇叶片喷丸后残余应力分布

Fig. 1 The residual stress distribution of fan blades after shot peening

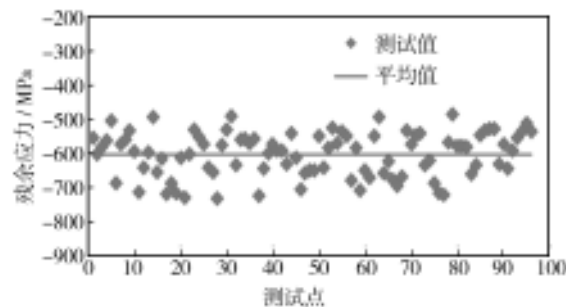


图2 压气机叶片喷丸后残余应力分布

Fig. 2 The residual stress distribution of compressor blades after shot peening

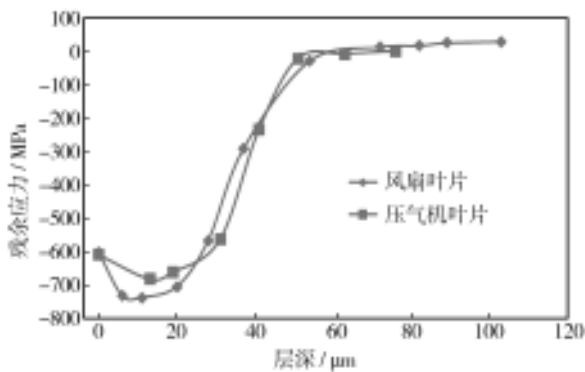


图3 叶片残余应力沿层深分布曲线

Fig. 3 Residual stress distribution of blades along the layer depth

由图1和图2可以看出,通过喷丸工艺在叶片表面形成了残余压应力场,可以有效提高叶片的抗疲劳性能。通过统计分析,喷丸后风扇叶片残余应力的90%左右分布在-600~-800 MPa,残余应力均值约为-682 MPa;喷丸后压气机叶片残余应力的90%左右分布在-500~-700 MPa,残余应力均值约为-603 MPa。本文引入分布标准偏差,用来衡量数据分布的分散程度<sup>[16]</sup>,标准偏差可通过下式计算:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

式中: $S$ 为标准偏差, $n$ 为测试测试点, $i=1 \sim n$ , $x_i$ 为测试值, $\bar{x}$ 为 $n$ 次测试的平均值。

通过计算可以得到风扇叶片残余应力测试的标准偏差为58.2 MPa,相对标准偏差约为8.5%;压气机叶片残余应力测试的标准偏差为64.2 MPa,相对标准偏差约为10.6%。由此表明,喷丸后叶片试样表面残余应力分布较为均匀,风扇叶片较压气机叶片更为均匀,这是因为压气机叶片相比风扇叶片而言形状尺寸较小,而叶型表面曲率较大,影响了喷丸效果。

由图3可以看出,喷丸后风扇叶片和压气机叶片的表面残余应力约为-610 MPa;在次表面层残余压应力随深度的增加而增大,在距离表面一定距离处存在一个最大值,最大残余应力分别为-739 MPa和-683 MPa,此处的深度分别为11 μm和13 μm;随后残余应力随着深度的增加而逐渐减小,残余应力场深度约为50 μm。叶片中残余压应力的存在可以阻碍材料疲劳裂纹的萌生和扩展,因此可以有效的提高其疲劳性能。

## 2.2 叶片使用后残余应力分析

图4和图5为风扇叶片和压气机叶片使用300 h

和600 h后的表面残余应力场的分布。可以看出,风扇叶片使用300 h后应力分布在-460~-720 MPa;使

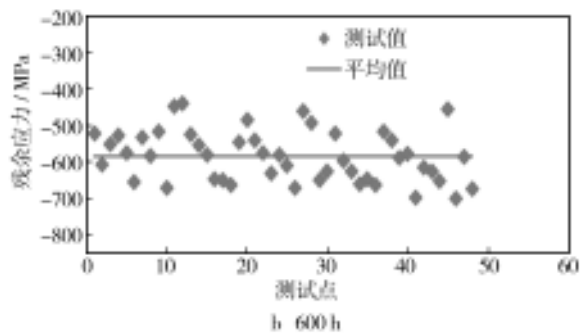
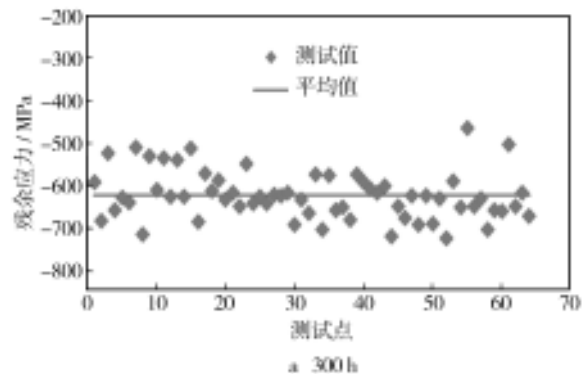


图4 风扇叶片使用300 h和600 h残余应力分布

Fig. 4 The residual stress distribution of fan blades after using for 300 hours and 600 hours

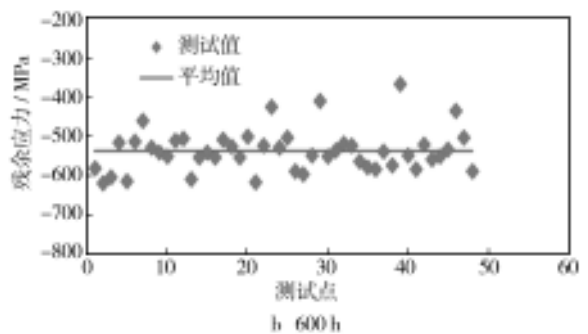
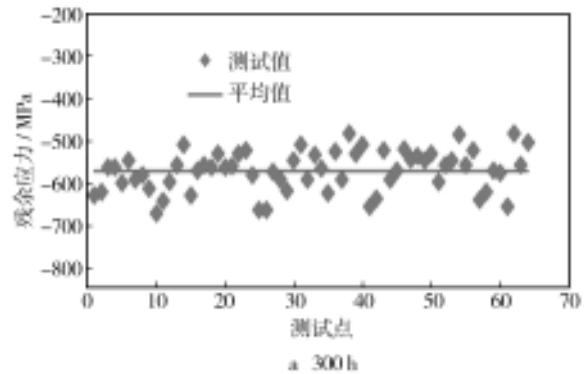


图5 压气机叶片使用300 h和600 h残余应力分布

Fig. 5 The residual stress distribution of compressor blades after using for 300 hours and 600 hours

用 600 h 后应力分布在  $-430 \sim -700$  MPa; 压气机叶片使用 300 h 后应力分布在  $-470 \sim -670$  MPa, 使用 600 h 后应力分布在  $-360 \sim -620$  MPa。

### 2.3 叶片使用前残余应力的衰减规律

根据测试结果, 采用平均压应力、最小压应力、最大压应力来研究分析叶片喷丸后和使用后应力衰减规律, 如图 6 所示。与喷丸后的残余应力相比, 叶片使用 300 h 后和 600 h 后平均压应力、最小压应力、最大压应力都有不同程度的衰减。

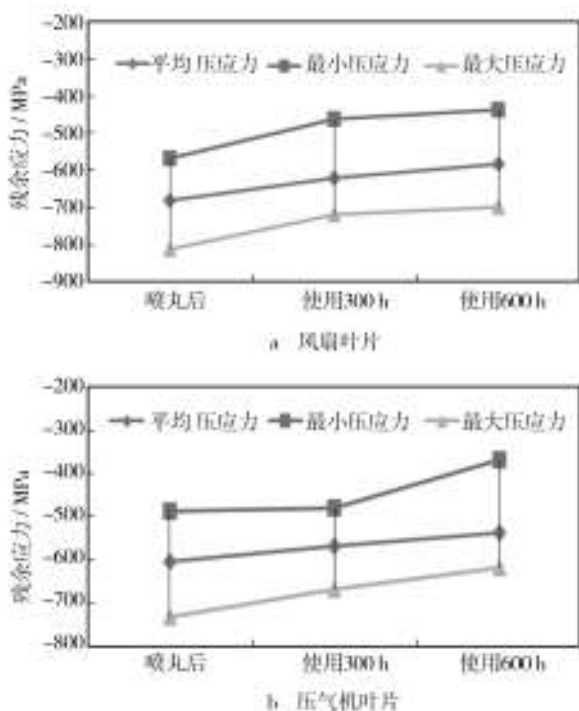


图6 风扇叶片和压气机叶片残余应力随使用时间的衰减趋势

Fig. 6 The decay of residual stress of fan blades and compressor blades with using time

对风扇叶片而言, 与喷丸后残余应力相比, 使用 300 h 后平均压应力衰减了 60 MPa, 最小压应力衰减了 100 MPa, 最大压应力衰减了 90 MPa, 最大衰减量占喷丸残余应力的 15% 左右; 使用 600 h 后平均压应力衰减了 100 MPa, 最小压应力衰减了 130 MPa, 最大压应力衰减了 110 MPa, 最大衰减量占喷丸残余应力的 20% 左右。

对压气机叶片而言, 与喷丸后残余应力相比, 使用 300 h 后平均压应力衰减了 40 MPa, 最小压应力衰减很少, 最大压应力衰减了 70 MPa, 最大衰减量占喷丸残余应力的 12% 左右; 使用 600 h 后平均压应力衰减了 70 MPa, 最小压应力衰减了 120 MPa, 最大压应

力衰减了 115 MPa, 最大衰减量占喷丸残余应力的 20% 左右。

可以看出随着发动机叶片使用时间的增加, 残余压应力衰减量逐渐增加。

### 3 结论

1) 喷丸后钛合金叶片表面存在较大的残余压应力且分布较为均匀。较大的残余压应力能提高叶片的抗疲劳性能, 增加叶片的使用寿命。

2) 喷丸后钛合金叶片残余压应力随层深的增加先增大后减小, 残余应力场深度约为 50  $\mu\text{m}$ 。

3) 与喷丸后的残余应力相比, 使用后的钛合金叶片残余应力有衰减趋势, 而且随着叶片使用时间的增加, 残余压应力衰减量逐渐增加。

### 参考文献

- [1] 王乐安, 唐祥松, 刘强. TC11 钛合金叶片模锻工艺分析[J]. 材料工程, 1994(5): 24—25.  
WANG Le-an, TANG Xiang-song, LIU Qiang. Analysis on Die Forging Technology of Titanium Alloy TC11 Blade[J]. Material Engineering, 1994(5): 24—25.
- [2] LU Jin-wen, GE Peng, ZHAO Yong-qing. Recent Development of Effect Mechanism of Alloying Elements in Titanium Alloy Design[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(4): 0775—0779.
- [3] 张定铨. 残余应力对金属疲劳强度的影响[J]. 理化检验—物理分册, 2002, 38(6): 231—235.  
ZHANG Ding-shuan. Effect of Residual Stress on Fatigue Strength[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2002, 38(6): 231—235.
- [4] 李富凯. 残余应力场中材料的疲劳行为[J]. 西安矿业学院学报, 1998, 18(2): 154—157.  
LI Fu-kai. Fatigue Behavior of the Material in Remanent Stress Field[J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 1998, 18(2): 154—157.
- [5] 付学义, 刘莉. 残余应力的危害及对策[J]. 包钢科技, 2006, 32 增刊: 82—84.  
FU Xue-yi, LIU Li. Harmfulness of Residual Stress and Countermeasures[J]. Science & Technology of Baotou Steel (Group) Corporation, 2006, 32(Z1): 82—84.
- [6] 许占显. 用检测残余应力方法预报航空件突变断裂的可行性[J]. 航空制造技术, 2004(5): 56—61.  
XU Zhan-xian. Feasibility for Predicting Discontinuous Fracture of Aeronautical Part by Using the Residual Stress



- Detecting Method[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2004(5): 56—61.
- [7] 陈会丽, 钟毅, 王华昆. 残余应力测试方法的研究进展[J]. 云南冶金, 2005, 34(3): 52—54.
- CHEN Hui-li, ZHONG Yi, WANG Hua-kun. Research Progress of the Method for Residual Stress Measurement[J]. Yunnan Metallurgy, 2005, 34(3): 52—54.
- [8] 高玉魁. TC18 超高强度钛合金喷丸残余压应力场的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 39(11): 1209—1212.
- GAO Yu-kui. Residual Compressive Stress Field in TC18 Ultra-high Strength Titanium Alloy by Shot Peening[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 39(11): 1209—1212.
- [9] 李瑞鸿, 刘道新, 张伟, 等. 喷丸强化与表面完整性对 300M 钢疲劳性能的影响[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(9): 1418—1423.
- LI Rui-hong, LIU Dao-xin, ZHANG Wei, et al. Influence of Shot Peening and Surface Integrity on the Fatigue Properties of 300M Steel[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(9): 1418—1423.
- [10] 汝继刚, 李超, 王亮, 等. 喷丸强化对 7A12 铝合金微观组织和疲劳性能的影响[J]. 航空材料学报, 2013, 33(6): 51—56.
- RU Ji-gang, LI Chao, WANG Liang, et al. Effect of Shot Peening on Microstructure and Fatigue Life of 7A12 Aluminum[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013, 33(6): 51—56.
- [11] 王仁智. 金属材料的喷丸强化原理及其强化机理综述[J]. 中国表面工程, 2012, 25(6): 1—9.
- WANG Ren-zhi. Overview on the Shot Peening Principle and Its Strengthening Mechanisms for Metallic Materials[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(6): 1—9.
- [12] 高玉魁. 超高强度钢喷丸表面残余压应力在疲劳过程中的松弛规律[J]. 材料热处理学报, 2007, 28(8): 102—105.
- GAO Yu-kui. Shot-peened Surface Residual Stress Relaxation during Fatigue for Ultra-high Strength Steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2007, 28(8): 102—105.
- [13] 邹家生, 潘浩, 刘川, 等. 大型核电厚壁结构 X 射线衍射法残余应力测试[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2013, 27(6): 532—535.
- ZOU Jia-sheng, PAN Hao, LIU Chuan, et al. Detection of Residual Stress in Large Nuclear Thick-walled Structure using X-Ray Diffraction Technology[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 27(6): 532—535.
- [14] 陈玉安, 周上祺. 残余应力 X 射线测定方法的研究现状[J]. 无损检测, 2001, 23(1): 19—22.
- CHEN Yu-an, ZHOU Shang-qi. The State of the Art of the Study on Residual Stress Measurement by X-Ray Analysis[J]. NDT, 2001, 23(1): 19—22.
- [15] 张定铨, 何家文. 材料中残余应力的 X 射线衍射分析和作用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1999.
- ZHANG Ding-shuan, HE Jia-wen. X Ray Diffraction Analysis and Effect of Residual Stress in Materials[M]. Xi'an: Xi'an Jiao Tong University Press, 1999.
- [16] 冯昌瑾. AISI403 钢电站汽轮机叶片喷丸残余应力分布[J]. 理化检验—物理分册, 2013, 49: 526—527.
- FENG Chang-jin. Residual Stress Distribution of AISI403 Steel Power Station Turbine after Shot Peening Treatment[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2013, 49: 526—527.

(上接第 202 页)

- HOU Shi-yong. Welding Repair of the Safety Valve Disc[J]. Journal of Inner Mongolia Electric Power Technology, 2000(3): 22—23.
- [10] 章华. 带热补偿和弹性补偿密封面的高温高压弹簧安全阀: CN, 104482261A[P]. 2015-04-01.
- ZHANG Hua. Sealing Surface with Thermal Compensation and Elastic Compensation of High Temperature and High Pressure Relief Valve Spring: CN, 104482261A[P]. 2015-04-01.
- [11] 万永康, 张素英. 阀门磨削维修机床: CN, 102615568A[P]. 2012-08-01.
- WAN Yong-kang, ZHANG Su-ying. Valve Grinding Maintain by Machine Tool: CN, 102615568A[P]. 2012-08-01.
- [12] 孔令新. 新型安全阀阀座研磨机构研制[J]. 石油化工设备, 2012(S1): 42—45.
- KONG Ling-xin. Mechanism Research of New Type Safety Valve Seat Grinding[J]. Journal of Petrochemical Equipment, 2012(S1): 42—45.
- [13] MARADIA A. Super-finished Surfaces Using Meso-micro EDM[J]. Procedia CIRP, 2013(62): 157—162.
- [14] NECHACHE P S. Finishing with Ultrasonic and Magnetic Assistance in Electrochemical Micro-machining[J]. Electrochimica Acta, 2009(54): 6022—6027.
- [15] OHMORI H T. Mirror Surface Grinding of Silicon Wafers with Electrolytic Inprocess Dressing[J]. Ann CIRP, 1990, 39(1): 329—332.
- [16] CREMERS J. Validated Sizing Rule Against Chatter of Relief Valves during Gas Service[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2001, 14(6): 261—265.