

钛合金薄壁叶片喷丸变形的研究

徐鲲濠^{1,2}, 张超³, 高玉魁¹, 黄小波¹, 王瑞^{1,3}

(1. 同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092;
2. 无锡透平叶片有限公司 工艺研究所, 无锡 214174; 3. 空军勤务学院, 徐州 221000)

摘要: **目的** 研究喷丸工艺对钛合金薄壁叶片变形的影响, 找到解决喷丸变形的办法。**方法** 对钛合金薄壁叶片进行喷丸强化, 采用三坐标测定喷丸前后叶片的尺寸变化情况。**结果** 在喷丸强度和覆盖率一致的前提下, 采用不同的路径对叶片进行喷丸后, 叶片的变形趋势和变形量没有很大差异。叶片进行喷丸后, 采用相同的喷丸强度对叶片进行二次喷丸, 叶片几乎不发生变形, 需要采用更高的喷丸强度进行二次喷丸才可以使叶片发生变形。在喷丸之前对叶片进行真空去应力, 虽然叶片表面的残余应力有相应减少, 但与不进行真空去应力的叶片相比, 喷丸变形情况没有发生太大的改变。**结论** 可采用喷丸前预变形和喷丸校正的方法解决喷丸变形的问题, 使得叶片喷丸后的尺寸达到图纸的要求。

关键词: 喷丸; 变形; 残余应力; 薄壁; 钛合金叶片

中图分类号: TG668 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)04-0069-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.04.012

Deformation Influence of Shot Peening on Thin-wall Titanium Alloy Blade

XU Kun-hao^{1,2}, ZHANG Chao³, GAO Yu-kui¹, HUANG Xiao-bo¹, WANG Rui^{1,3}

(1. School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Wuxi Turbine Blade Co., Ltd, Technology Research Institute, Wuxi 214174, China;
3. Air Force Logistics College, Xuzhou, 221000, China)

ABSTRACT: **Objective** To research the deformation influence of shot peening on thin-wall titanium alloy blade and find methods to resolve the deformation problems about shot peening. **Methods** Thin-wall titanium alloy blade was shot peened and the size and dimension of blade were measured. **Results** The deformation value and tendency were basically the same with various shot peen paths if the intensity and coverage were the same. Blade showed nearly no deformation if the intensity of the second shot peening was the same as the first shot peening. The intensity of the second shot peening must be higher than that of the first shot peening in order to cause deformation of the blade. The surface residual stress of the blade decreased after vacuum distressing, but the deformation value and tendency were basically the same as those of the blade that did not undergo vacuum distressing. **Conclusion** Based

收稿日期: 2016-03-02; 修订日期: 2016-03-23

Received: 2016-03-02; Revised: 2016-03-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(11372226); 航空科学基金项目(2014ZE38008); 中央高校基本科研业务费专项资金资助

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (11372226), Aeronautical Science Foundation of China (2014ZE38008) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities

作者简介: 徐鲲濠(1986—), 男, 博士研究生, 中级工程师, 主要研究方向钛合金的表层改性。

Biography: XU Kun-hao (1991—), Male, Ph. D. candidate, Intermediate engineer, Research focus: surface layer modification of Titanium alloy.

通讯作者: 高玉魁(1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为表面改性与疲劳断裂等。

Corresponding author: GAO Yu-kui (1973—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: surface modified technique, fracture and fatigue.

on the situation of blade deformation after shot peening, pre-deformation and shot peening straightening methods were recommended to make the size and dimension of blade meet the requirement of drawing.

KEY WORDS: shot peening; deformation, residual stress; thin-wall; titanium alloy blade

由于钛合金具有比重小、比强度高、耐腐蚀性能好等优点,主要用来减轻结构质量和提高推重比,广泛应用于制造高性能航空发动机风扇、压气机轮盘、叶片等重要零件^[1-3]。目前在航空航天工业上主要利用喷丸强化来改善钛合金零件的抗疲劳性能和提高其微动疲劳抗力,从而提高飞机零部件的表面完整性、可靠性和耐久性^[4-6]。航空钛合金薄壁叶片作为典型的薄壁结构零件,一般都具有壁薄、弯扭、宽弦和刚性差等特点^[7],使得叶片在喷丸加工过程中极易产生加工变形,其尺寸一旦超出图纸的要求,就有可能面临报废的风险。喷丸造成的变形主要是因为大量的丸粒撞击作用汇总起来产生一个延伸的塑性层,在表面层一定的区域内引起局部的塑性变形,从而使零件发生弯曲^[8-13]。在零件的喷丸工艺应用中,喷丸强化和喷丸引起的变形均需要考虑,两者均满足要求才能达到真正的强化效果^[14-15]。

本文通过对某典型钛合金薄壁叶片进行喷丸,摸索钛合金叶片的喷丸变形规律,并在此基础上能够掌握与控制叶片的变形趋势,为此类钛合金叶片喷丸的尺寸控制提供理论依据,确保最终尺寸能满足图纸要求,进而促进钛合金叶片喷丸技术的应用。

1 试样制备与试验方法

试验采用某钛合金薄壁叶片,该叶片长为 620 mm,叶身为 530 mm,材料为 TC4 钛合金,叶片的实物图如图 1 所示。喷丸前叶片的最后一道机加工序为叶片表面的抛磨加工。钛合金叶片的喷丸区域如图 2 所示。具体喷丸参数如表 1 所示。对于 S1 区域,即叶身区域,采用低强度玻璃丸喷丸工艺;对于 S2 区域,即叶根区域,采用铸钢丸高强度喷丸。

采用 S4CPLUS M2400 型气动式机器人喷丸机进行叶片喷丸,丸料、喷丸强度和覆盖率的要求如表 1 所示。采用 X350A 型 X 射线应力仪测试叶片表面的残余应力,测试条件:管电压 28 kV,管电流 8 mA, Cu-K α 辐射,准直管直径 2 mm,衍射面 (213), 2 θ 扫描范围 137°~145°,扫描步距 0.1°,时间常数 2 s,应力常数 -277 MPa/(°)。采用 GLOBAL7107 型三坐标测量仪测量喷丸前后叶片的尺寸,叶片测量档位如图 3 所示。



图 1 钛合金风扇叶片实物图

Fig. 1 Physical diagram of titanium alloy fan blade

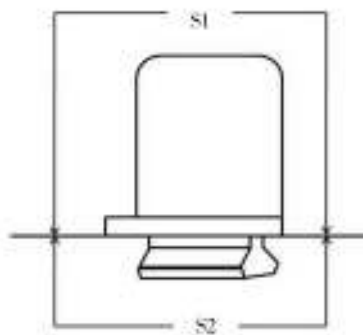


图 2 叶片喷丸强化区域

Fig. 2 The shot peening area of blade

表 1 叶片喷丸参数

Tab. 1 The shot peening parameters of blade

喷丸部位	丸料型号	喷丸强度/mm	试片类型	表面覆盖率/%
S2	S110 铸钢丸	0.18 ~ 0.23	A	≥100
S1	BZ25 玻璃丸	0.23 ~ 0.41	N	≥100

本次试验采用叶片三坐标喷丸前后的变化来表征叶片的喷丸变形。结合图 4,三坐标的变化与变形关系的规定如下,如果后一种状态与前一种状态拟合后的三坐标相减:1) $\Delta Y > 0$,则叶片向背弧弯曲变形, $\Delta Y < 0$,则叶片向内弧弯曲变形;2) $\Delta X > 0$,则叶片向出气边弯曲变形, $\Delta X < 0$,则叶片向进气边弯曲变形;3) $\Delta R > 0$,则叶片向顺时针扭转变形, $\Delta R < 0$,则叶片向逆时针扭转变形。



图 3 三坐标测量档位
Fig. 3 Measuring cross section of three coordinate

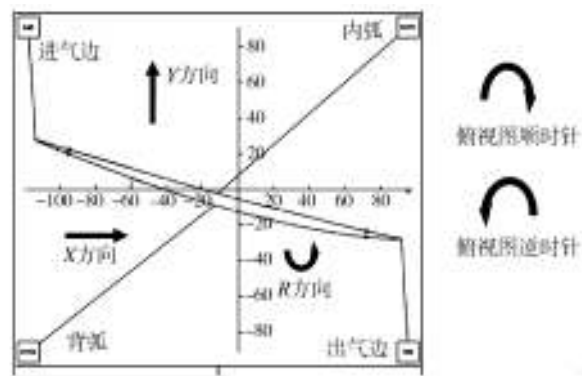


图 4 三坐标测试方位示意图
Fig. 4 Schematic diagram of the three coordinate measurement

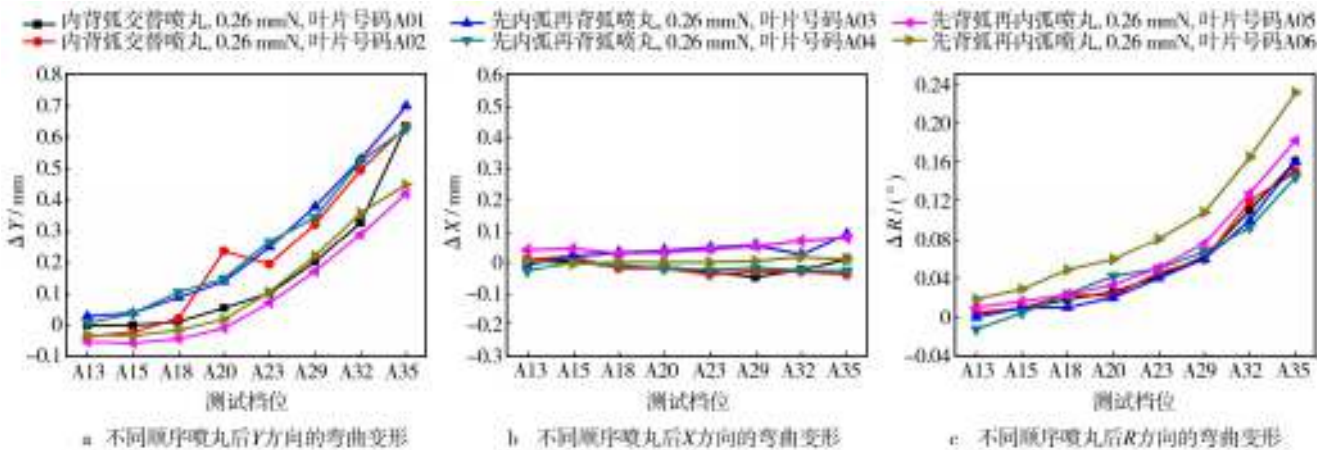


图 5 不同喷丸路径对叶片变形的影响
Fig. 5 Effects of different shot peening paths on the deformation of the blade:
a) bending deformation of Y direction after shot peening in different sequence, b) bending deformation of X direction after shot peening in different sequence, c) bending deformation of R direction after shot peening in different sequence

2.2 二次喷丸对叶片变形的影响

除了喷丸路径等因素外,喷丸强度对叶片变形有着重要的影响。图 6 为叶片经过 0.22 mmN (0.38 mmN) 一次喷丸后,仍采用 0.22 mmN (0.38 mmN) 对型面背弧进行二次喷丸的变形结果。由图 6 可以看

2 结果与分析

2.1 不同的喷丸路径对叶片变形的影响

喷丸路径决定了叶片不同部位的强化顺序,以不同的喷丸路径(即先内弧再背弧喷丸、先背弧内弧喷丸或者内背交替喷丸)对叶片进行喷丸,叶身的喷丸强度为 0.26 mmN,喷丸后叶片的变形情况如图 5 所示。由图 5a 可以看出,无论按照何种喷丸路径,ΔY 均大于 0,即叶片发生了由内弧向背弧的弯曲变形,而且相同喷丸强度的叶片变形大小具有较好的一致性。叶片喷丸后发生的弯曲变形与喷丸路径的关系不大。从图 5a 也可以看出,变形量随着档位的增加而增加,喷丸变形存在型面下部向型面上部扩大的趋势。由图 5b 可以看出,ΔX 变化量不大,均在±0.1 mm 以内,即喷丸对叶片 X 方向上的弯曲变形影响很小。在 X 方向上未出现变形量随档位的增加而增加的现象。由图 5c 可以看出,无论按照何种喷丸路径,ΔR 均大于 0,即叶片发生了顺时针的扭转变形。而且相同喷丸强度的叶片变形大小具有较好的一致性。叶片喷丸后发生的扭转与喷丸路径的关系不大。

出,如果二次喷丸采用的强度和一次喷丸相同,则叶片几乎不发生弯曲变形和扭转变形。

对叶片先以 0.26 mmN 的低强度喷丸,再以 0.41 mmN 的较高强度对叶片内弧(背弧)进行二次喷丸,喷丸后叶片的变形规律如图 7 和图 8 所示。叶片内弧 0.41 mmN 二次喷丸后 ΔY 和 ΔR 曲线具有较好的

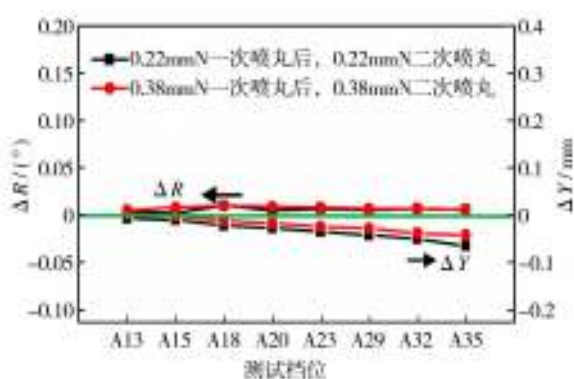


图6 两次相同强度喷丸后叶片弯曲变形(Y方向)和扭转变形

Fig. 6 Blade bending deformation (Y direction) and torsional deformation after two shot peening processes with the same intensity

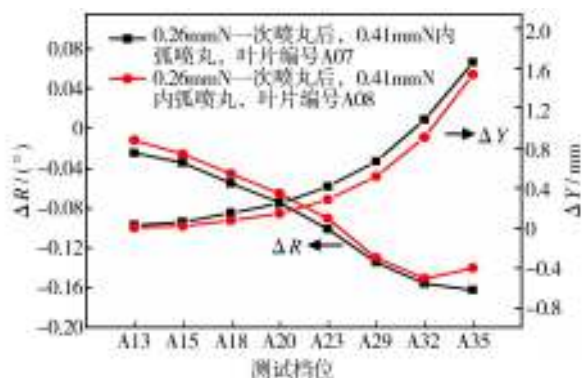


图7 型面内弧二次喷丸与弯曲变形(Y方向)和扭转变形的关系

Fig. 7 Blade bending deformation (Y direction) and torsional deformation after two shot peening processes on concave airfoil

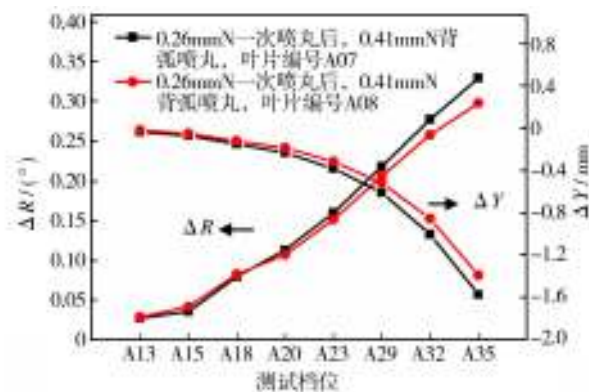


图8 型面背弧二次喷丸与弯曲变形(Y方向)和扭转变形的关系

Fig. 8 Blade bending deformation (Y direction) and torsional deformation after two shot peening processes on convex airfoil

一致性,叶片内弧(背弧)经 0.41 mmN 二次喷丸后 ΔY 均大于 0(小于 0), ΔR 均小于 0(大于 0),证明型面内弧(背弧)二次喷丸后发生了逆时针扭转变形(顺时针扭转变形)和向背弧的弯曲变形(向内弧的弯曲变形)。如果通过喷丸的方法使叶片向预想的方向进行变形,则其喷丸强度一定要大于一次喷丸的强度。

上述现象可以通过变形抗力增大原理进行分析。当叶片在低强度喷丸后(比如 0.22 mmN),叶片发生了变形。此时叶片的变形抗力随着叶片发生变形而增大,因此再用相同的喷丸强度对叶片进行喷丸,叶片受到变形抗力增大的影响几乎不发生变形。如果需要叶片继续进行变形,则需供给叶片更高的喷丸强度。

2.3 喷丸前真空去应力对叶片变形的影响

钛合金叶片在抛磨后应进行真空去应力,然后再进行喷丸工序。为掌握抛磨后和去应力后叶片表面的残余应力状态,对叶片分别在两种工序后的残余应力进行测量。检测位置如图 9 所示,分别为凸台上部的叶身区域(B1、B2、B3、N1、N2、N3 点),凸台与叶身

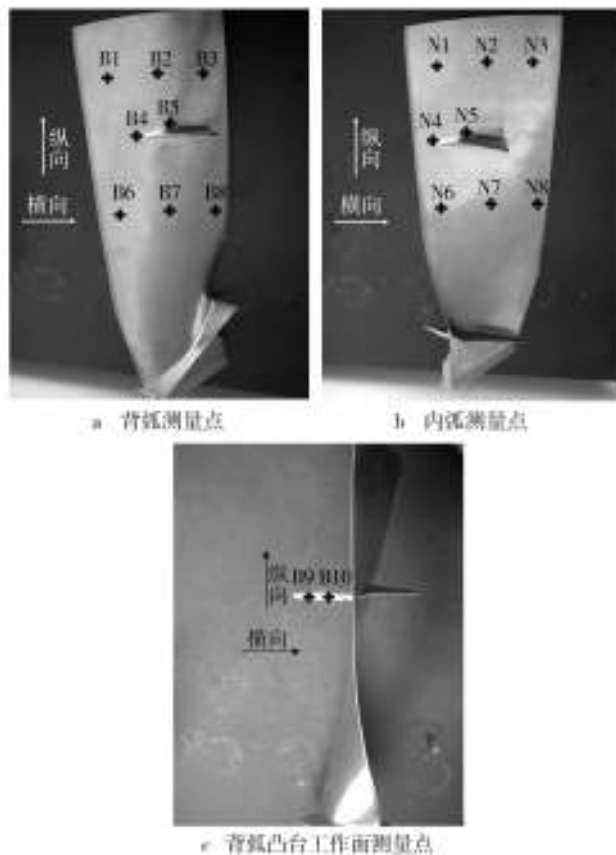


图9 残余应力测试位置

Fig. 9 The position of residual stress test points; a) convex test point, b) concave test point, c) test point of convex lug workface

交接区域(B4、B5、N4、N5 点),凸台下部的叶身区域(B6、B7、B8、N6、N7、N8),背弧凸台的工作面区域(B9、B10)。测试各个点在叶片表面纵横向的残余应力。检测结果如表 2 和表 3 所示,抛磨后叶片表面的残余应力呈现出各向异性的状态,即垂直抛磨方向为相对较大残余压应力,平行抛磨方向为相对较小的残余压应力或拉应力水平。真空去应力后叶片表面的应力显著下降,应力水平很低。由图 10 可以看出,无论喷丸之前叶片是否真空去应力,以 0.26 mmN 喷丸后, ΔY 均大于 0,即叶片发生了由内弧向背弧的弯曲变形, ΔR 均大于 0,即叶片发生了顺时针的扭转变形,即由背弧向内弧的扭转变形。喷丸前是否真空去

表 2 抛磨后叶片表面的残余应力检测结果
 Tab.2 The residual stress results of blade surface after polishing

测量点	残余应力/MPa		测量点	残余应力/MPa	
	σ_x	σ_z		σ_x	σ_z
B1	-37	-156	N1	-68	-275
B2	-59	-133	N2	39	-281
B3	-87	-180	N3	-161	-174
B4	-17	-52	N4	3	-125
B5	-16	—	N5	32	—
B6	-67	-140	N6	-95	-173
B7	-13	-100	N7	-92	-68
B8	-48	-295	N8	-72	-131
B9	-42	-203			
B10	-98	-292			

注:正值代表残余拉应力,负值代表残余压应力, σ_x 表示横向残余应力, σ_z 表示纵向残余应力。

表 3 真空去应力(550 ℃×2 h)后叶片表面的残余应力检测结果
 Tab.3 The residual stress results of blade surface after vacuum disstressing

测量点	残余应力/MPa		测量点	残余应力/MPa	
	σ_x	σ_z		σ_x	σ_z
B1	-70	-46	N1	-21	-42
B2	40	-71	N2	-54	-73
B3	63	10	N3	-43	-68
B4	-24	-55	N4	16	-34
B5	-47	—	N5	8	—
B6	3	25	N6	-34	-56
B7	14	-61	N7	3	-47
B8	-11	-10	N8	24	6
B9	6	31			
B10	-37	-16			

注:正值代表拉应力,负值代表残余压应力, σ_x 表示横向残余应力, σ_z 表示纵向残余应力。

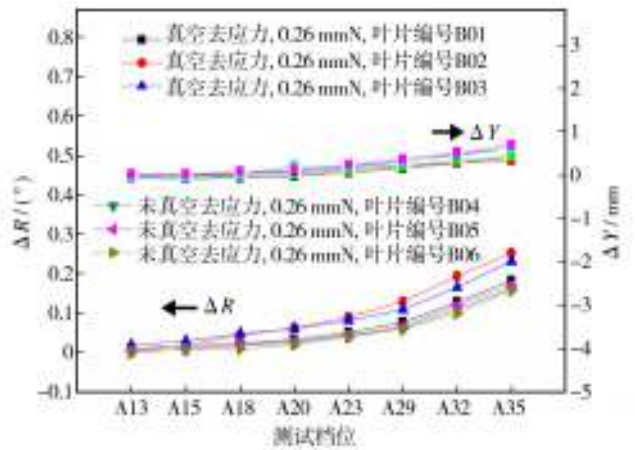


图 10 真空去应力对叶片弯曲变形(Y 方向)和扭转变形(R 方向)的影响

Fig.10 The influence of vacuum stress on blade bending deformation (Y direction) and torsional deformation(Z direction)

应力对叶片的变形影响不大。原因可能是抛磨后叶片表面的残余应力层深相对较浅,在喷丸过程中容易松弛,其释放的残余应力对叶片的变形影响较小。

2.4 喷丸变形的解决方法

1) 喷丸前反变形。由于叶片喷丸后发生变形的量相对稳定,因此机加工后可留出预变形余量,喷丸所产生的变形量与机加工的预留量中和,使得喷丸后叶片的尺寸在公差范围以内。

2) 喷丸校正(二次喷丸)。对于喷丸后某些叶片尺寸超差的问题,利用已有的数据和经验,对叶片的局部区域进行二次喷丸,使其往公差范围内靠近,需要注意的是,二次喷丸的问题需要得到客户认可。因此喷丸的数据库极其重要,目前世界上的知名喷丸强化与喷丸成型企业均有强大的数据库为后盾,为达到预定的工艺要求奠定了坚实的基础。

3 结论

1) 如果喷丸强度和覆盖率一致,钛合金薄壁叶片的喷丸变形不受喷丸路径的影响。

2) 如果二次喷丸强度与第一喷丸强度相同,叶片不会发生变形。如果采用二次喷丸的方法对叶片进行尺寸校正,则二次喷丸强度需高于一次喷丸强度。

3) 喷丸前对叶片进行真空热处理后,叶片的喷丸变形规律与未真空热处理相比没有发生变化。

4) 解决钛合金薄壁叶片喷丸变形的问题可采用预变形、喷丸校正的方法。

参考文献

- [1] 陈恳. 超塑用 TC4 钛合金板材在某型飞机上的应用[J]. 航天制造工程, 1997(12): 18—19.
CHEN Ken. TC4 Titanium Alloy Plate Formed by Super Plastic Process Applied in a Certain Type of Aircraft[J]. Aerospace Manufacturing Engineering, 1997(12): 18—19.
- [2] LI M Q, XIONG A M. New Model of Microstructure Evolution During Isothermal Forging of the Ti-6Al-4V Titanium Alloy[J]. Mater Sci Technol, 2002, 18(2): 212—214.
- [3] 聂蕾, 李付国, 方勇. TC4 合金等温成型过程模拟与组织预测[J]. 宇航材料工艺, 2002(5): 45—49.
NIE Lei, LI Fu-guo, FANG Yong. Simulation and Structure Prediction of TC4 Titanium Alloy in Isothermal Forming[J]. Aerospace Materials Technology, 2002(5): 45—49.
- [4] 高玉魁. 表面完整性理论与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
GAO Yu-kui. Surface Integrity Theory and Its Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [5] 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. The Shot Peening Effects of Ti-10V-2Fe-3Al Titanium Alloy on Tensile Fatigue Property[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(1): 60—63.
- [6] GAO Yu-kui. Effect of Shot-peening on Microstructure of TC4 Titanium Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(9): 1536—1539.
- [7] 刘继伟, 李杰光, 赵明, 等. 航空发动机薄壁叶片加工变形误差补偿技术研究[J]. 机械设计与制造, 2009(10): 175—177.
LIU Ji-wei, LI Jie-guang, ZHAO Ming, et al. Deformation Error Compensation of Manufacturing Thin-wall Blade[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2009(10): 175—177.
- [8] 李国祥. 喷丸成形[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
LI Guo-xiang. Shot Peening Forming[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1982.
- [9] HORWATH J A. Effect of Shot Peening Variables on Bending Fatigue[M]. Oxford: Pergamon Press, 1982: 229—235.
- [10] NIKU-LARI A. Shot Peening Proc of CSP-1[M]. Oxford: Pergamon Press, 1982.
- [11] CARY P E. History of Shot peening Proc of ICSP1[M]. Oxford: Pergamon Press, 1982.
- [12] 《航空制造工程手册》总编委会. 航空制造工程手册飞机钣金工艺[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992.
General Editorial Board of Aeronautical Manufacturing Engineering Handbook. Aeronautical Manufacturing Engineering Handbook of Aircraft Sheet Metal Forming Process[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1992.
- [13] 马泽恩. 计算机辅助塑性成形[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1995.
MA Ze-en. Computer Aided Plastic Forming[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University press, 1995.
- [14] GRASTY L V. Shot Peen Forming[D]. Cambridge: Cambridge University, 1992.
- [15] EDWARDS J D. Shot Peen Forming: The Effect of Constraint[D]. Cambridge: Cambridge University, 1995.
- (上接第 68 页)
- [9] 高玉魁, 姚枚, 邵培革. 金属疲劳极限与静强度的相关性[J]. 机械强度, 2001, 23(1): 15—18.
GAO Yu-kui, YAO Mei, SHAO Pei-ge. Relativity of Fatigue Limit of Metals with Their Tensile Property[J]. Journal of Mechanical Strength, 2001, 23(1): 15—18.
- [10] 李向斌, 王仁智. 喷丸强化对材料旋转弯曲疲劳强度影响的定量研究[J]. 材料工程, 1995(10): 26—28.
LI Xiang-bin, WANG Ren-zhi. Quantitative Investigation of Influence of Shot Peening upon the Rotating Bending Fatigue Strength of Material[J]. Materials Engineering, 1995(10): 26—28.
- [11] 王仁智. 表面喷丸强化技术[J]. 中国表面工程, 1991(1): 36—48.
WANG Ren-zhi. Shot Peening Strengthening Technology[J]. China Surface Engineering, 1991(1): 36—48.
- [12] 高玉魁, 李向斌, 殷源发. 超高强度钢的喷丸强化[J]. 航空材料学报, 2003(10): 132—135.
GAO Yu-kui, LI Xiang-bin, YIN Yuan-fa. Shot Peening on Ultra · high Strength Steels[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003(10): 132—135.
- [13] 高玉魁. 高强度钢喷丸强化残余应力场特征[J]. 金属热处理, 2003, 28(4): 42—44.
GAO Yu-kui. Characteristics of Compressive Residual Stress Fields in High-strength Steel Caused by Shot Peening[J]. Metal Heat Treatment, 2003, 28(4): 42—44.
- [14] 李金魁, 姚枚, 王仁智. 喷丸残余应力场特征值规律的研究[J]. 应用科技, 1990(4): 30—36.
LI Jin-kui, YAO Mei, WANG Ren-zhi. Research of Shot Peening Residual Stress Characteristic Value[J]. Applied Science and Technology, 1990(4): 30—36.
- [15] 李瑞鸿. 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. 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.