

砂布轮抛光工艺参数对 TC4 表面粗糙度影响规律的研究与分析

淮文博^{1,2}, 唐 虹², 李 虹¹

(1. 西安理工大学 高等技术学院, 陕西 西安 710082; 2. 西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 砂布轮有较大柔性, 可用于复杂曲面抛光。为了掌握砂布轮抛光工艺参数对 TC4 表面粗糙度的影响规律, 提高抛光质量, 通过单因素试验分析了工艺参数对表面粗糙度的影响规律, 利用正交试验结果建立了表面粗糙度预测模型, 验证了模型的显著性; 通过响应面法分析了工艺参数对表面粗糙度的耦合影响规律, 并对工艺参数进行了优化; 航空发动机叶片抛光试验表明, 粗糙度预测模型和优化的工艺参数可以实现理想高效的抛光效果。

关键词: 砂布轮; 抛光; 表面粗糙度; 参数优化

中图分类号: V232.4 文献标志码: A 文章编号: 1006-4710(2017)02-0226-07

Research on and analysis of influence of process parameters on surface roughness of TC4 by abrasive cloth wheel polishing

HUAI Wenbo^{1,2}, TANG Hong², LI Hong¹

(1. School of High Vocational Education, Xi'an University of Technology, Xi'an 710082, China;

2. College of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Abrasive cloth wheels with great flexibility can be used for complex surface polishing. In order to grasp the influence of the law of polishing process parameters on the TC4 surface roughness and improve the polishing quality, the process parameters influence law was analyzed through the single factor experiment. The surface roughness prediction model is established based on orthogonal test results and verified to be of significance. Process parameters coupling with the influence law of the surface roughness are analyzed with the process parameters optimized by the response surface method. Finally, blade polishing experiments show that the ideal polishing results can be achieved by the prediction model and optimized process parameters.

Key words: abrasive cloth wheel; polishing; surface roughness; parameter optimization

抛光技术是降低航空发动机叶片表面粗糙度、提高叶片抗疲劳性能的关键工艺方法。为使磨具和抛光表面随型切触, 高效均匀地去除叶片表面铣削残留高度, 实现叶片自适应性抛光, 提高抛光效率和均匀性, 文献[1]提出用砂布轮作为抛光磨具, 通过试验研究了工艺参数对抛光力的影响规律。高速转动的砂布轮有很大弹性, 与电流体、磁流体、磨料流等非接触抛光工艺^[2-5]相比, 具有成本低^[6]、抛光效率高^[1]等优点; 与气囊^[7,8]相比位置精度易于控制; 与砂带相比体积小、结构简单^[9], 能有效避免干涉。但是, 目前还未掌握表面粗糙度随砂布轮抛光工艺

参数的变化规律, 还不能对其准确预测和控制。

学术界针对表面粗糙度预测开展了大量研究工作。YONG^[10]在铣削试验基础上建立了 PCD 刀片铣削 nHAP 的表面粗糙度模型, 利用 Minitab 软件优化获得最小表面粗糙度的工艺参数。HO 等^[11]采用自适应模糊遗传算法建立了铣削表面的粗糙度预测模型。HANAFI^[12]等利用人工神经网络法研究了车削 PEEK cf30 时切削速度、切削深度、进给速度等工艺参数对表面粗糙度的耦合作用, 并建立了表面粗糙度预测模型。ZHAO^[13]针对砂带抛光, REDDY^[14]等针对端铣陶瓷, 都利用响应面法建立

了表面粗糙度预测模型。WANG^[15]针对单晶金刚石刀具车削铝合金,采用回归分析法建立了表面粗糙度预测模型。BIGERELLE^[16]利用分形函数模拟磨削表面的方法,有效预测了砂带磨削离合器齿轮表面粗糙度,减少了试验次数。GIVI^[5]等在磁辅助抛光铝中,采用正交试验法建立了粗糙度变化值预测模型^[5]。在这些方法中,响应面法与神经网络算法、遗传算法、信噪比设计方法相比,具有较高的精度和拟合效率^[13,18]。

钛合金具有热稳定性好、热强度高、耐腐蚀、抗磨损性好等优点,在航天航空领域被广泛使用^[18]。为掌握抛光工艺参数对 TC4 表面粗糙度的影响规律,本文先后通过单因素试验、正交试验、响应面法分析了主要工艺参数对表面粗糙度的影响规律,建立了粗糙度预测模型,对工艺参数进行优化;最后,通过 TC4 航空发动机叶片抛光试验验证了粗糙度预测模型和优化的工艺参数。

1 抛光工艺参数及试验平台

转速为 ω 的砂布轮在抛光中受工件表面挤压而变形,沿半径方向最大变形量称为压缩量^[1],用 a_p 表示;砂布轮沿压缩量 a_p 方向作用于工件的力称为抛光力,用 F 表示^[20-21],如图 1 所示。

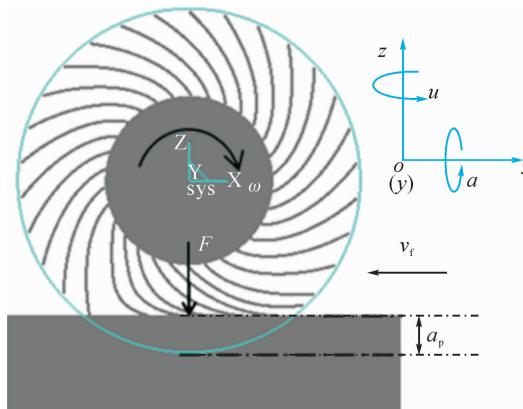


图 1 抛光原理图
Fig. 1 Polishing principle

试验采用 6 块规格为 $100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的 TC4 试件,用量程为 10 Kg 的电阻应变式力传感器测量抛光力 F ,用型号为 CHB/A 的 Contronix 数字显示仪表显示测量数据;用百分表找正 TC4 试件抛光表面,使其呈水平;每块试件正反面分别被划分为 3 个抛光区域,因此 6 个试件共有 36 个区域用于本文单因素和正交抛光试验;抛光前用 Mar Surf XR 20 粗糙度测试仪垂直于铣削轨迹测量的各抛光区域的表面粗糙度(5 次测量)平均值在 $1.13 \mu\text{m} \sim$

$1.46 \mu\text{m}$ 之间。

针对 TC4 特点,砂布轮磨料选用绿色碳化硅(Green SiC, GC)。抛光机床为五轴联动数控专用抛光机^[8],如图 2 所示。等参数线法生成的抛光轨迹具有较高的抛光效率^[22],因此本试验采用等参数线法生成抛光轨迹。抛光机床磨头主轴沿 x 反方向以速度 v_f 作进给运动^[1](见图 1)。

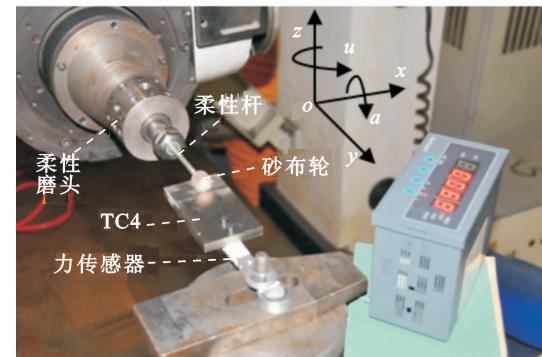


图 2 抛光试验
Fig. 2 Polishing test

由上述分析可知砂布轮抛光的主要工艺参数有转速 ω 、压缩量 a_p 、进给速度 v_f 。由文献[1]已知,转速 ω 和压缩量 a_p 决定了抛光力 F 的大小,即 $F = f(\omega, a_p)$ 。因此,本为中的主要工艺参数为:抛光力 F 、压缩量 a_p 、进给速度 v_f 。

2 单工艺参数对表面粗糙度的影响规律

2.1 粒度对表面粗糙度的影响

为研究粒度对工件表面粗糙度的影响,试验选用砂布轮尺寸规格为: $8.5 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ (初始半径 $r_0 \times$ 厚度 L),在粒度规格内选取粒度值为 $80^\#$ 、 $180^\#$ 、 $240^\#$ 、 $320^\#$ 、 $400^\#$ 、 $600^\#$ 分别抛光随机选取的 6 个抛光区域,每个区域各抛光三次;进给速度 $v_f = 0.5 \text{ m/min}$,主轴转速 $\omega = 6000 \text{ r/min}$,压缩量 $a_p = 1 \text{ mm}$ 。

图 3 为粒度对表面粗糙度的影响规律示意图。

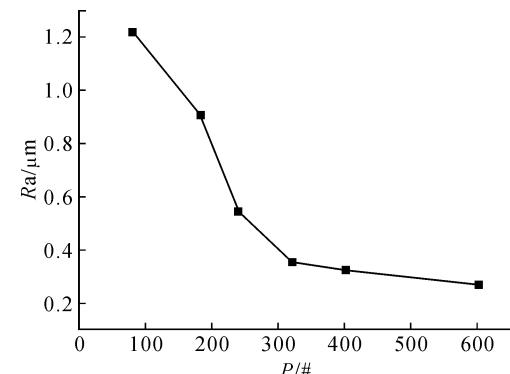


图 3 粒度对表面粗糙度的影响规律
Fig. 3 Effect of particle size on the surface roughness

从图3可看出,表面粗糙度随着粒度的增大而减小。这是因为随着粒度增大,砂布轮单位表面积的磨粒增多,参与抛光的磨粒增多,单颗磨粒未变形切削厚度变小,抛光表面塑性变形减小,因此粗糙度降低。

2.2 进给速度对表面粗糙度的影响

选用进给速度 v_f 分别 0.1 m/min、0.3 m/min、0.5 m/min、0.7 m/min、0.9 m/min 并分别对试件 5 个抛光区域各抛光三次;砂布轮规格 8.5 mm × 14 mm/320[#],主轴转速 $\omega = 6000$ r/min,压缩量 $a_p = 1$ mm。

由图4可看出,表面粗糙度随着进给速度的增加而增加,原因是随着进给速度的增加,单颗磨粒通过滑擦、耕犁等方式去除材料的体积增加,未变形切削厚度增加,砂布轮与工件接触区域的磨粒负荷增大,工件表面塑性变形增大,导致表面粗糙度增大。

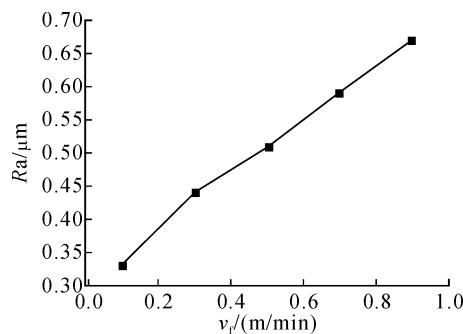


图4 进给速度对粗糙度的影响规律

Fig. 4 Effect of feed rate on the surface roughness

2.3 抛光力对表面粗糙度的影响

为了研究抛光力对 TC4 表面粗糙度的影响,选用 F 分别为 0.5 N、1 N、1.5 N、2 N、2.5 N,分别对试件 5 个抛光区域各抛光三次;砂布轮规格 8.5 mm × 14 mm/320[#],主轴转速 $\omega = 6000$ r/min, $v_f = 0.5$ m/min。

当转速一定的情况下,压缩量 a_p 是影响抛光力的关键参数^[1],改变压缩量可以实现抛光力 F 的改变,通过力传感器可以观察 F 的大小。

由图5可知,随着抛光力的增大,砂布轮与工件表面的接触更加充分,有效抛光面积增大,参加抛光的磨粒数量增加,从而导致表面质量和抛光效率都有所提高,表面粗糙度下降。当抛光力继续增大时粗糙度也增大,这是因为:当抛光力继续增大时砂布轮压缩量逐渐接近最大值,砂布轮柔性减小刚性增大,导致抛光力大小不稳定,砂布轮出现跳动现象,

造成抛光表面质量不均匀;此外,抛光力增大,会使砂布轮与工件之间的摩擦力增大,工件表面温度升高,使工件表面产生塑性变形,还容易引起磨粒脱落;这些因素都会导致工件表面粗糙度增大。

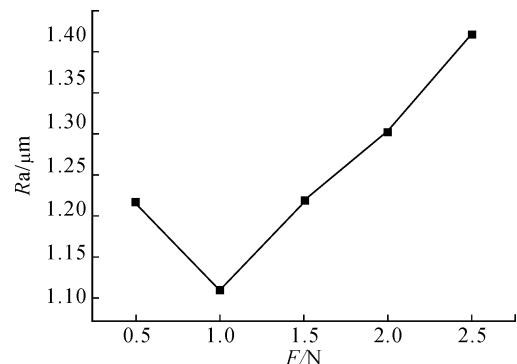


图5 抛光力对表面粗糙度的影响

Fig. 5 Effect of polishing force on the surface roughness

3 工艺参数对表面粗糙度耦合作用规律

为进一步研究三个工艺参数对表面粗糙度的耦合作用,借助 Design-Expert 软件设计正交实验进行研究。

3.1 正交实验设计及粗糙度预测模型

根据上文对工件表面粗糙度的影响因素分析,实验以抛光过程中的粒度、进给速度以及抛光力为自变量,以工件表面粗糙度为因变量,根据响应面法中的 BBD(Box-Behnken Design)原理设计试验,试验方案和结果如表1所示。砂布轮规格 8.5 mm × 14 mm/180[#]、8.5 mm × 14 mm/320[#]、8.5 mm × 14 mm/600[#];转速 $\omega = 6000$ r/min。试验在上述 TC4 试件上选取的未抛光的 17 个抛光区域开展。

依据表1的实验结果,由 Design-Expert 软件计算出的表面粗糙度的二阶预测模型为:

$$R_a = 0.88495 - 6.30689 \times 10^{-4} P - 0.38161F - 0.355v_f + 2.85714 \times 10^{-5} PF + 2.29167 \times 10^{-4} Pv_f + 0.024375Fv_f + 3.9229 \times 10^{-7} P^2 + 0.1228F^2 + 0.23469v_f^2 \quad (1)$$

单位抛光面积参与抛光的磨粒数与进给速度 v_f 和粒度 P 有关,与抛光表面形状无关;抛光力的主要影响参数是转速 ω 和压缩量 a_p ,不论对平面还是曲面,只要转速相同、压缩量相同,则抛光力相同^[1],又因抛光力是影响表面粗糙度的主要因素^[21]。综上所述,不论对平面还是曲面,公式(1)都基本适合。

表 1 抛光工艺参数的 BBD 设计及结果
Tab. 1 BBD design and results for polishing process parameters

序号	P / #	F / N	v_t / (m/min)	R_a / μm
1	180	1.5	0.9	0.436
2	180	1.5	0.1	0.471
3	390	2.5	0.9	0.546
4	390	1.5	0.5	0.365
5	390	2.5	0.1	0.521
6	600	2.5	0.5	0.485
7	390	1.5	0.5	0.366
8	390	0.5	0.1	0.521
9	180	0.5	0.5	0.534
10	390	0.5	0.9	0.507
11	390	1.5	0.5	0.361
12	390	1.5	0.5	0.362
13	600	1.5	0.9	0.404
14	390	1.5	0.5	0.363
15	600	1.5	0.1	0.362
16	180	2.5	0.5	0.543
17	600	0.5	0.5	0.452

3.2 粗糙度预测模型的显著性

可采用方差分析、残差分析以及预测值与实际值比较等办法检验预测模型的显著性,如表 2 所示。置信系数为 95%。在 F 检验法中,模型的统计量 $F = 3321.04 > F_{0.01}(4, 24) = 4.22$,这表明该预测模型是非常显著的;模型的失拟性检验值 $F = 0.25 < 4$,表明模型失拟不显著;模型的显著性检验与失拟性检验结果表明:该回归模型不但在试验点上能与试验结果很好地拟合,而且在整个试验范围内都能与试验值很好地拟合。

表 2 表面粗糙度预测模型的方差分析

Tab. 2 Variance analysis of surface roughness prediction model

误差源	平方和	自由度	均方值	统计量	概率值
模型	0.087	9	9.702E-3	3321.04	< 0.000 1
A-P	9.870E-3	1	9.870E-3	3378.53	< 0.000 1
B-F	8.201E-4	1	8.201E-4	280.73	< 0.000 1
C-v	4.050E-5	1	4.050E-5	13.86	0.007 4
AB	1.440E-4	1	1.440E-4	49.29	0.000 2
AC	1.482E-3	1	1.482E-3	507.37	< 0.000 1
BC	3.802E-4	1	3.802E-4	130.16	< 0.000 1
A^2	1.260E-3	1	1.260E-3	431.35	< 0.000 1
B^2	0.063	1	0.063	21733.91	< 0.000 1
C^2	5.937E-3	1	5.937E-3	2032.17	< 0.000 1
残差	2.045E-5	7	2.921E-6		
失拟性	3.250E-6	3	1.083E-6	0.25	0.856 7
纯误差	1.720E-5	4	4.300E-6		
总合	0.087	16			

采用残差分析对预测模型进行诊断。如图 6 所示,残差基本分布在一条直线上,而且集中在直线的中间位置,这表明模型的残差分布属于正态分布;如图 7 所示,预测值的残差点落在水平带状区域,没有

呈现明显的规律;图 8 表明,预测值与测量值基本符合,模型的预测效果是良好的。这些表明测量数据和预测模型是可靠的。

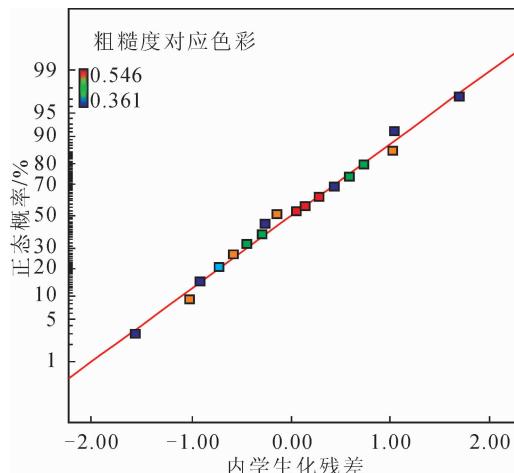


图 6 残差分布
Fig. 6 Normal plot of residuals

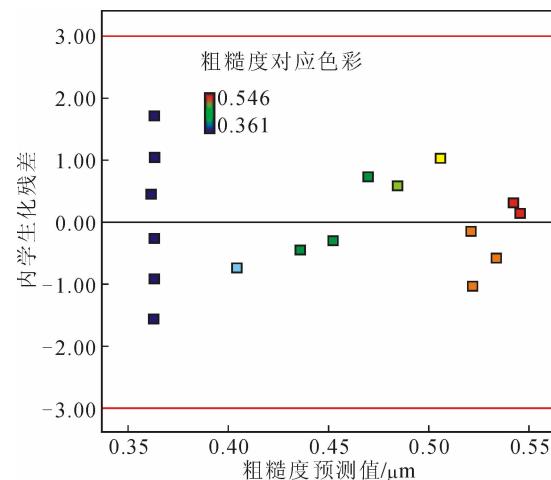


图 7 残差与响应值
Fig. 7 Plot of residuals vs predicted response

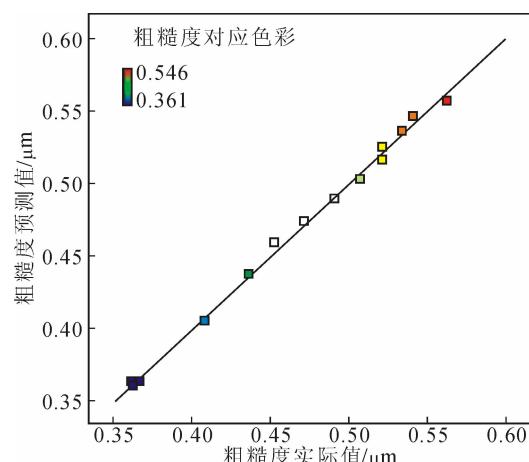


图 8 预测值和试验值比较
Fig. 8 Comparison of predicted values and experimental results

3.3 工艺参数对粗糙度耦合作用规律分析

图9为粗糙度与工艺参数的响应面之间的关系图。

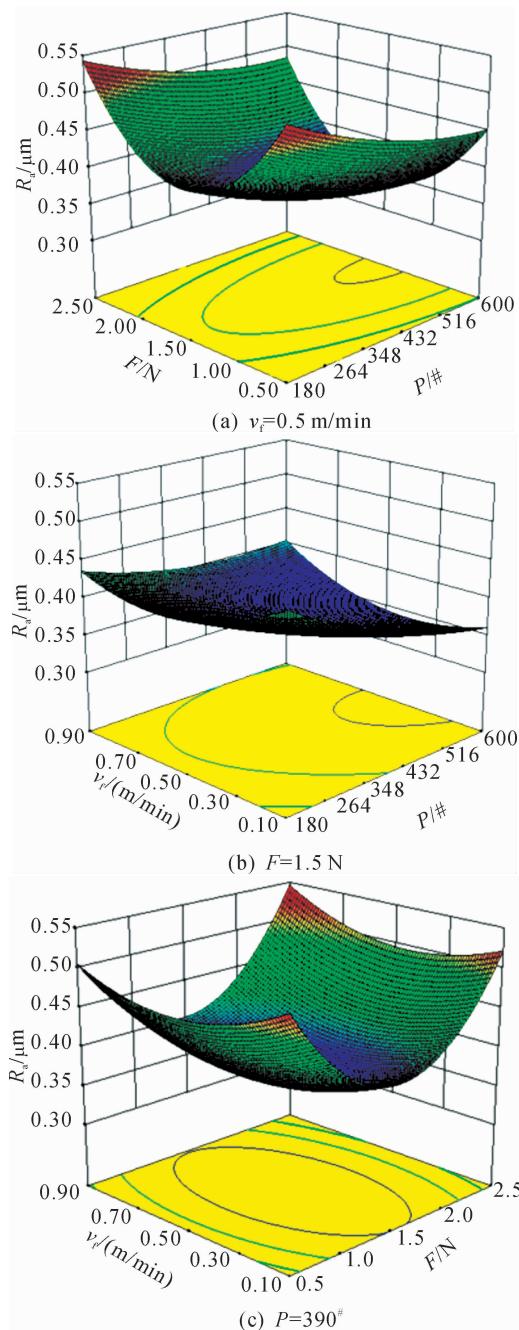


图9 粗糙度与工艺参数的响应面

Fig. 9 Response surface between roughness and process parameters

图9(a)表明:抛光力由小增大时表面粗糙度减小,当抛光力继续增大时表面粗糙度增大。这是因为抛光力是由转速和压缩量产生,抛光力越大则压缩量越大,砂布轮和抛光表面接触更加紧密,参加抛光的磨粒数量增加,单颗磨粒的未变形切削厚度减少,表面粗糙度减小^[18];但是,当抛光力过大时砂布轮压缩量达到最大值,砂布轮和抛光表面几乎刚性

接触,造成抛光力不均匀,砂布轮产生振动,导致抛光不均匀,表面粗糙度增大。表面粗糙度随着粒度增大而减小,这是因为当粒度增加,磨粒体积变小,参加抛光的磨粒数量增加,单颗磨粒的未变形切削厚度减小,因此粗糙度减小。

图9(b)表明:随着进给速度的增加表面粗糙度增大。这是因为当进给速度增加,在单位时间单位抛光面积内参加抛光的磨粒数量减少,单颗磨粒未变形切削厚度变大,抛光表面塑性变形加剧,表面粗糙度增大;粒度对抛光表面粗糙度的影响规律同上。

图9(c)表明:当进给速度减小、粒度增大时表面粗糙度减小;进给速度和粒度对表面粗糙度的影响机理同上。

3.4 抛光试验

通过响应面可得优化的工艺参数组合: $P = 600\#$, $F = 1.45\text{ N}$, $v_f = 0.39\text{ m/min}$, $R_a = 0.3421\mu\text{m}$ 。

为验证模型和优化参数的可靠性,用优化的抛光工艺参数对材料为TC4的整体叶盘叶片作抛光试验。抛光前后,按照图10所示的测量位置,在A、B两个叶片随机地选取5个点位,用便携式粗糙度测量仪,垂直于抛光轨迹测量粗糙度,将测量结果的平均值为最终测量结果。

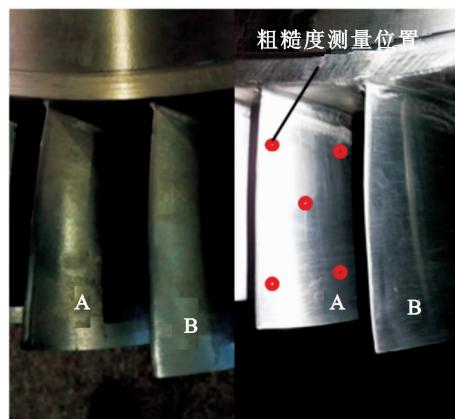


图10 抛光前后效果对比

Fig. 10 Comparison about blade surface before and after polishing

A、B两个叶片在抛光前的粗糙度分别为 $1.246\mu\text{m}$ 、 $0.946\mu\text{m}$;抛光后A、B叶片粗糙度分别为 $0.346\mu\text{m}$ 、 $0.3416\mu\text{m}$,与粗糙度预测值 $0.3421\mu\text{m}$ 基本符合。

单个叶片的抛光时间约 $46\sim48\text{ min}$,手工抛光约 $56\sim60\text{ min}$,效率比手工抛光提高约20%。

抛光试验结果表明:优化抛光工艺参数可有效地降低表面粗糙度,粗糙度预测模型是可靠的。

4 结 论

- 1) 采用单因素试验法分析了砂布轮抛光工艺参数对表面粗糙度的影响规律及机理;
- 2) 通过正交试验结果建立了粗糙度预测模型,并对模型的可靠性进行了检验;
- 3) 利用响应面法获取了最佳工艺参数组合;
- 4) 通过叶片抛光试验证明了预测模型和优化的工艺参数是可靠的;
- 5) 本文试验材料是TC4,所得结论局限于TC4材料。

参考文献:

- [1] 淮文博,唐虹,史耀耀,等. 砂布轮柔性抛光力的建模与参数优化[J]. 航空学报,2016,37(11): 3535-3545.
HUAI Wenbo, TANG Hong, SHI Yaoyao, et al. Modelling and parameters optimization of flexible polishing force for abrasive cloth wheel[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(11): 3535-3545.
- [2] WANG Y Q, YIN S H, HUANG H, et al. Magneto-rheological polishing using a permanent magnetic yoke with straight air gap for ultra-smooth surface planarization[J]. Precision Engineering, 2015, 40(1): 309-317.
- [3] 韩光超,赵甲,甘春明,等. 磁场辅助软质工具游离磨粒抛光工艺研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2014, 42(5): 52-56.
HAN Guangchao, ZHAO Jia, GAN Chunming, et al. Research on polishing technology of abrasive and free abrasive Field aided control[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2014, 42(5): 52-56.
- [4] LEE E S, LEE S G, CHOI W K, et al. Study on the effect of various machining speeds on the wafer polishing process [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 27(10): 3155-3160.
- [5] GIVI M, TEHRANI A F, MOHAMMADI A. Polishing of the aluminum sheets with magnetic abrasive finishing method [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 61(9-12): 989-998.
- [6] LI M, LYU B H , YUAN J L, et al. Shear-thickening polishing method[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2015, 94(7): 88-99.
- [7] PAN R, WANG Z Z, WANG C J, et al. Research on control ptimization for bonnet polishing system [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(3): 483-488.
- [8] ZENG S Y, BLUNT L. Experimental investigation and analytical modelling of the effects of process parameters on material removal rate for bonnet polishing of cobalt chrome alloy [J]. Precision Engineering, 2014, 38(2): 348-355.
- [9] 段继豪,史耀耀,张军锋,等. 航空发动机叶片柔性抛光技术[J]. 航空学报,2012, 33(3): 573-578.
DUAN Jihao, SHI Yaoyao, ZHANG Junfeng, et al. Flexible polishing technology for blade of aviation engine [J]. Acta Aeronaut Astronaut Sin, 2012, 33 (3): 573-578.
- [10] YONG Y, KULKARNI S S, RYS M, et al. Development of a surface roughness model in end milling of nHAP using PCD insert [J]. Ceramics International, 2012, 38(8): 6865-6871.
- [11] HO W H, TSAI J T, LIN B T, et al. Adaptive network-based fuzzy inference system for prediction of surface roughness in end milling process using hybrid Taguchi-genetic learning algorithm [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(2): 3216-3222.
- [12] HANAFI I, KHAMLICHI A, CABRERA F M, et al. Prediction of surface roughness in turning of PEEK cf30 by using an artificial neural network[J]. Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers, 2012, 29(5): 337-347.
- [13] ZHAO T, SHI Y Y, LIN X J, et al. Surface roughness prediction and parameters optimization in grinding and polishing process for IBR of aero-engine[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74(5-8): 653-663.
- [14] REDDY M M, GORIN A, ABOU-EL-HOSSEIN K A. Surface roughness prediction in the end milling parameters of Aluminum nitride ceramic by response surface methodology [J]. Advanced Materials Research, 2012, 154: 626-633.
- [15] WANG H X, LI D, DONG S. Surface roughness prediction model for ultraprecision turning Aluminum alloy with a single crystal diamond tool[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 15(2): 153-156.
- [16] BIGERELLE M, HAGEGE B, EI MANSORI M. Mechanical modelling of micro-scale abrasion in superfinish belt grinding[J]. Tribology International, 2008, 41 (11): 992-1001.
- [17] 窦毅芳,刘飞,张为华. 响应面建模方法的比较分析 [J]. 工程设计学报,2007,14(5): 359-363.
DOU Yifang, LIU Fei, ZHANG Weihua. Research on comparative analysis of response surface methods [J]. Journal of Engineering Design, 2007,14(5): 359-363.
- [18] 任敬心. 磨削原理 [M]. 北京:电子工业出版社, 2011: 322.
- [19] 淮文博,张立新,王荪馨,等. 砂布轮柔性抛光力影响参数敏感性分析 [J]. 制造业自动化,2016, 38 (9):

92-95.

HUAI Wenbo, ZHANG Lixin, WANG Sunxin, et al. The sensitivity analysis of influence parameters of flexible polishing force for abrasive wheel [J]. Manufacturing Automation, 2016, 38(9): 92-95.

[20] 淮文博. 工艺参数对砂布轮柔性抛光力影响规律的分析[J]. 航空精密制造技术, 2016, 52(4): 24-27.

HUAI Wenbo. Process parameters influence law analysis on flexible polishing force for abrasive wheel [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2016, 52(4): 24-27.

[21] 李小彪, 史耀耀, 赵鹏兵, 等. 航空发动机叶片砂带抛光力控制技术[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(6):

1209- 1214.

LI Xiaobiao, SHI Yaoyao, ZHAO Pengbing, et al. Polishing force control technology of aero-engine blade in belt polishing [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(6): 1209-1214.

[22] 蔺小军, 杨艳, 吴广, 等. 面向叶片型面的五轴联动柔性数控砂带抛光技术研究[J]. 航空学报, 2015, 36(6): 2074-2082.

LIN Xiaojun, YANG Yan, WU Guang, et al. The research of flexible polishing technology of five-axis NC abrasive belt for blade surface [J]. Acta Aeronaut Astronaut Sin, 2015, 36(6): 2074-2082.

(责任编辑 王卫勋)

(上接第 225 页)

[13] 吴佳妮, 邱立存. 混沌电力系统的模糊滑模控制 [J]. 中国科技信息, 2013(10): 156-157.

WU Jiani, QIU Licun. Fuzzy sliding mode control of chaotic power system [J]. China Science and Technology Information, 2013(10): 156-157.

[14] 王鹤, 李耀峰, 张守龙, 等. 基于自适应 Terminal 滑模的混沌振荡控制 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(3): 152-157.

WANG He, LI Yaofeng, ZHANG Shoulong, et al. Chaotic oscillation control based on adaptive terminal sliding mode [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(3): 152-157.

[15] 刘美菊, 朴在林, 吴秀华. 同步发电机混沌振荡的模糊滑模变结构控制 [J]. 电力自动化设备, 2009, 29(7): 85-88.

LIU Meiju, PIAO Zailin, WU Xiuhua. Fuzzy sliding mode variable structure control for chaos oscillation of synchronous generator [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7): 85-88.

[16] 王少夫. 电力系统混沌振荡分析及其自适应控制 [D]. 南昌: 南昌大学, 2012.

南昌: 南昌大学, 2012.

WANG Shaofu. Analysis and adaptive control of chaotic oscillation in power system [D]. Nanchang: Nanchang University, 2012.

[17] 卢强, 梅生伟, 孙元章. 电力系统非线性控制 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

[18] 朱志宇, 蔡立勇, 刘维亭. 基于 Melnikov 方法的电力系统混沌振荡参数计算 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(3): 41-45.

ZHU Zhiyu, CAI Liyong, LIU Weiting. Computation of chaotic oscillation parameter in electrical power system based on Melnikov method [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(3): 41-45.

[19] POLYCARPOU M M, IOANNOU P A. A robust adaptive nonlinear control design [C]// American Control Conference. the Westin St. Francis Hotel, San Francisco, California, 1993: 1365-1369.

[20] IOANNOU P A, SUN J. Robust adaptive control [M]. New Jersey: Prentice-Hall PTR, 1996.

(责任编辑 周 蓉)