

离心研磨加工钛合金表面粗糙度的试验研究

吕春兰

(吉林化工学院 信息与控制工程学院, 吉林 132022)

摘 要: **目的** 探究离心研磨自动化加工工艺对钛合金表面粗糙度的影响。**方法** 选取了影响离心研磨加工效果的主要工艺参数(磨料材质、磨料粒径、滚筒转速), 并使用单因素试验法对 TC21 钛合金进行了离心研磨加工试验。以表面粗糙度为评价指标对工艺参数进行了分析和优化。采用优化后的工艺参数对 TC21 钛合金进行了表面离心研磨加工, 在此基础上研究了表面二次细化加工对 TC21 钛合金表面粗糙度的影响, 并对比了加工前后工件的表面粗糙度值和表面形貌。**结果** 确定了较优的离心研磨 TC21 钛合金的工艺参数, 即: 磨料材质选用氧化铝, 磨料粒径为 5 mm, 滚筒转速为 240 r/min。采用优化后的工艺参数进行了离心研磨加工试验, TC21 钛合金表面粗糙度值由 1.412 μm 低至 0.513 μm ; 表面二次细化加工后, 工件表面粗糙度值由 0.513 μm 降至 0.267 μm , 加工纹理和缺陷消失。**结论** 采用优化后的工艺参数对 TC21 钛合金取得了较好的离心研磨加工效果, 结合表面二次细化加工, 使 TC21 钛合金表面粗糙度值降低两级, 并修复了表面缺陷, 验证了使用离心研磨工艺加工 TC21 钛合金的可行性。

关键词: 钛合金; 离心研磨; 表面二次细化; 单因素试验法; 表面粗糙度; 表面形貌

中图分类号: TG580.68 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)06-0213-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.06.032

Experimental Research on Surface Roughness of Titanium Alloy by Centrifugal Grinding Process

LYU Chun-lan

(College of Information & Control Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, China)

ABSTRACT: **Objective** To explore the influence of centrifugal grinding automation processing technology on surface roughness of titanium alloy. **Methods** Single factor experiments were conducted using the main process parameters affecting grinding results. The process parameters were analyzed and optimized by selecting surface roughness as the evaluation index. Using the optimized process parameters, this paper conducted the experiment of surface grinding on TC21 titanium alloy. On this basis, the influence of surface secondary refining process on surface roughness of TC21 titanium alloy was studied, and the surface roughness and surface topography of the workpiece before and after processing were compared. **Results** The experiments determined the optimal parameters of centrifugal grinding TC21 titanium alloy: alumina as abrasive material, abrasive particle size of 5 mm, and drum rotation speed of 240 r/min. After processing with the optimized parameters, the surface rough-

收稿日期: 2016-01-28; 修订日期: 2016-05-26

Received: 2016-01-28; Revised: 2016-05-26

基金项目: 吉林省教育厅项目(20140352)

Fund: Supported by Foundation of Jilin Educational Committee (20140352)

作者简介: 吕春兰(1968—), 女, 副教授, 研究方向为精密加工与自动化加工技术。

Biography: LYU Chun-lan(1968—), Female, Associate professor, Research focus: precision machining and automation technology.

ness of the workpiece decreased from $1.412\ \mu\text{m}$ to $0.513\ \mu\text{m}$; after surface secondary refining processing, the surface roughness of the workpiece decreased from $0.513\ \mu\text{m}$ to $0.267\ \mu\text{m}$. Besides, the texture and defects disappeared. **Conclusion** Good experimental results were obtained under the optimized processing conditions. In combination with the surface secondary refining processing, the surface roughness of TC21 titanium alloy fell by two levels, and surface defects were fixed. The experimental results verified the feasibility of centrifugal grinding processing on TC21 titanium alloy.

KEY WORDS: titanium alloy; centrifugal grinding; surface secondary refining; single factor experiment; surface roughness; surface topography

钛合金具有密度小、强度高、力学性能好、耐腐蚀、耐高温等优异性能,在航空航天领域具有良好的发展前景^[1-2]。随着航空工业的快速发展,对钛合金材料的需求日益增多,同时对其表面质量的要求也越来越高。钛合金由于韧性高,加工时易产生加工硬化,是一种典型的难加工材料^[3]。传统的磨削加工由于磨削力大、温度高,易对加工表面产生烧伤,且加工后钛合金的表面粗糙度和波纹度较高,这将对零件的配合精度及疲劳强度产生不利影响,使得零件性能无法满足重要零件的使用要求^[4-6]。

针对钛合金的表面加工,尤其是精密加工与超精密加工,国内外研究人员进行了大量的研究,研究主要集中于砂轮磨削、砂带磨抛、磁研磨抛光以及磨料流抛光等方面^[7]。文献[8]探讨了化学铣切工艺对钛合金表面粗糙度的影响,化铣后钛合金表面粗糙度值 Ra 可达到 $0.8\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 。文献[9]研究了氧化铝砂带和碳化硅砂带对 TC4 耐热钛合金表面完整性的影响,研究结果表明氧化铝砂带能够获得更小的表面粗糙度值。文献[10]利用磁研磨法很好地解决了航空发动机用钛合金弯管内表面抛光的难题。文献[11]采用超声振动精密加工技术对飞机钛合金紧固件大孔实现了高质、高效、低成本的加工,加工后孔表面粗糙度值 Ra 接近 $0.8\ \mu\text{m}$ 。文献[12]采用磨料流加工方法对 TC4 钛合金进行了表面磨抛加工,加工后表面粗糙度值 Ra 为 $2\ \mu\text{m}$ 左右。TC21 钛合金是我国自行研制的一种高强度、高韧性的两相钛合金,在航空工业中用于制造飞机构件和部件^[13-14]。本文将离心研磨加工技术应用于 TC21 钛合金的表面精密加工,该技术为典型的自动化加工技术,具有自动化程度高、加工时温升小和自适应性好等优点。

本文通过试验对离心研磨加工钛合金的工艺参数进行了优化,采用优化后的工艺参数对 TC21 钛合金进行进一步的离心研磨加工试验,并研究了

表面二次细化加工对工件表面粗糙度的影响。

1 离心研磨加工的机理分析

离心研磨工艺的加工原理如图 1 所示,设备主要由呈对称布置的 4 个滚筒和 1 个公转轮盘组成,加工时将工件连同磨料、磨液置于密封的滚筒中,轮盘在公转的同时,滚筒沿相反方向作自转运动。合理的工艺参数是取得最佳研磨加工效果的必要条件。重要的研磨工艺参数有加工介质特性(磨料材质、形状、尺寸、硬度等)、介质装入量、滚筒转速、传动比以及加工时间等。氧化铝和碳化硅因具有较强的耐磨性和耐冲击性,在离心研磨加工中使用较多。当磨块粒径较大时,加工中与工件表面接触的颗粒数减少,磨块与工件之间的压强增大,材料去除率增大;反之当磨块粒径较小时,加工的材料去除率减小。规定公转轮盘的转速为 N ,滚筒转速为 n ,当 $N \neq 0, n = 0$ 时,滚筒内介质呈曲面形态(图 2a),磨料与工件之间主要为正压力作用,切削作用很弱;当 $N \neq 0, n \neq 0$ 时,滚筒在公转的同时产生自转运动(自转运动与公转运动方向相反),滚筒内介质呈“S”形曲面形态(图 2b),滚筒内介质形成一强制滑移流动层,在滑移流动层内,磨料对工件表面产生强烈的碰撞、挤压与摩擦,工件表

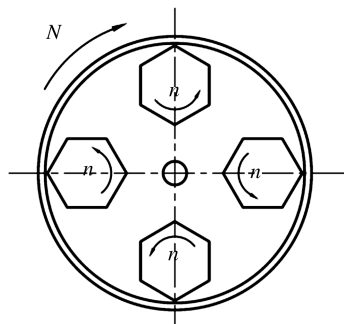


图 1 离心研磨工艺的加工原理

Fig.1 The processing principle of centrifugal grinding process

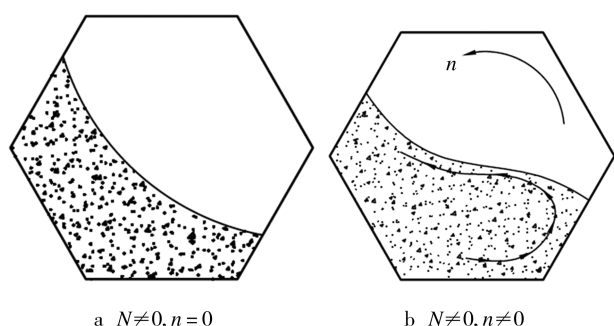


图 2 不同转速下滚筒内加工介质的运动形态

Fig.2 The motion form of processing medium in the drum under different rotational speeds

面的粗糙度值逐渐降低, 直至满足加工要求^[15-17]。

2 离心研磨加工 TC21 钛合金的工艺参数优化

为得到较优的离心研磨加工 TC21 钛合金的工艺参数, 以表面粗糙度为评价指标, 采用单因素试验法研究不同工艺参数下离心研磨加工对 TC21 钛合金表面粗糙度的影响。

工件为 TC21 钛合金板材, 尺寸为 100 mm×20 mm×5 mm。试验设备为东邦钢机株式会社的 TAB-14 卧式行星研磨机, 传动比 $n/N=1$ 。磨料选用球体氧化铝和球体碳化硅。将工件和磨料加入滚筒中至滚筒容积的 60%, 加入水至滚筒容积的 70% 左右。为避免加工过程中工件和工件之间因相互碰撞而出现磕伤现象, 试验中每个滚筒内放置 1 个试样。

2.1 磨料材质对表面粗糙度的影响

离心研磨工艺要求磨料具有较高的耐磨性及耐冲击性。氧化铝和碳化硅是离心研磨加工中常用的磨料, 其中氧化铝的密度为 3.62 g/cm^3 , 碳化硅的密度为 3.2 g/cm^3 , 因二者质量不同, 加工中对工件的冲击力及磨削力有明显差别。在转速为 180 r/min 的条件下, 分别用粒径为 2 mm 的氧化铝磨料和碳化硅磨料对 TC21 钛合金进行了加工试验。采用 NDT120 便携式表面粗糙度仪对工件加工前后的表面粗糙度进行了测量, 使用 Matlab 软件对试验数据进行了整理与分析, 不同材质的磨料对 TC21 钛合金表面粗糙度的影响如图 3 所示。

在加工的初始阶段 (约 0~15 min), 由于工件表面粗糙, 凸峰较大, 磨料对工件表面的磨削作用

强烈, 在该段时间内工件表面的材料去除量大, 因此表面粗糙度值下降明显。随着加工的进行, 工件表面的凸峰、加工刀痕不断被磨平, 磨料与工件表面的接触面积增大, 使单位面积的摩擦力减小, 磨料对工件表面的磨削作用变弱, 表面粗糙度值的变化趋于平缓、均匀。从图中可以看出, 氧化铝磨料的加工效果优于碳化硅磨料, 在同样的加工时间内, 能够获得更低的表面粗糙度值。

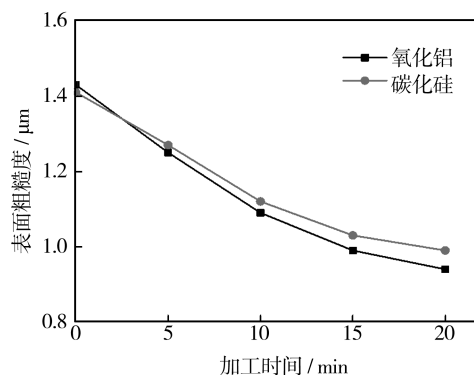


图 3 磨料材质对表面粗糙度的影响

Fig.3 The influence of abrasive materials on surface roughness

2.2 磨料粒径对表面粗糙度的影响

磨料粒径影响磨料与工件表面之间的正压力和摩擦力。在磨料总质量一定时, 减小磨料粒径, 则磨料数量增多, 同时磨料与工件表面的接触点增多, 磨料对工件表面的磨削效果更加均匀, 但是粒径过小的磨料对工件表面的冲击力和剪切力不足, 使加工效率严重降低。而粒径过大的磨料由于所携带的能量较大, 磨料对工件的冲击作用和磨削作用强烈, 加工效果难以控制。设定滚筒转速为 180 r/min, 分别选择粒径为 2、3、5、8 mm 的氧化铝磨料对 TC21 钛合金进行了加工试验。试验结果如图 4 所示。从图中可以看出, 粒径为 5 mm 的磨料

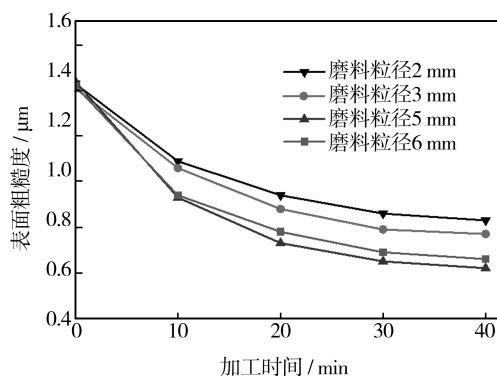


图 4 磨料粒径对表面粗糙度的影响

Fig.4 The influence of abrasive size on surface roughness

加工效果最好,而粒径为2 mm和3 mm的磨料加工效果明显差于粒径为5 mm和8 mm的磨料加工效果。这表明在加工的初始阶段,粒径过小的磨料存在加工困难现象,适当增大磨料粒径有利于提高加工效率。

2.3 滚筒转速对表面粗糙度的影响

选用粒径为5 mm的氧化铝磨料,分别设定滚筒转速为120、180、240、300 r/min,研究了滚筒转速对TC21钛合金表面粗糙度的影响。图5为不同转速下TC21钛合金表面粗糙度值随加工时间的变化。从图中可以看出,不同转速下的加工效果差别很大。转速为120 r/min时的加工效果最差,原因主要为在转速较低条件下,磨料对工件表面的磨削力小,加工效率低。随着转速的提高,加工效率提高明显。但是当 $N=300$ r/min时,工件表面粗糙度值在30 min时达到最小,在加工时间为40 min时,表面粗糙度值反而增大。原因为转速过高时,磨料对零件表面的碰撞、磨削剧烈,加工均匀性差,在加工时间较长时表面质量下降。当转速为240 r/min,加工时间为40 min时,加工效果最佳。

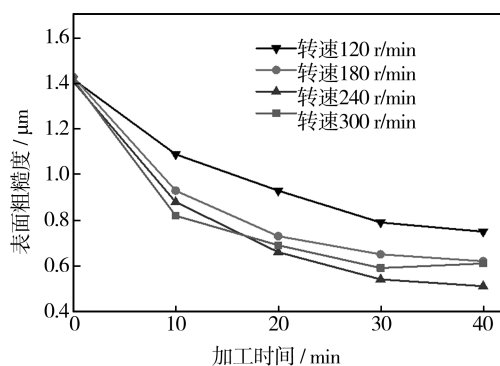


图5 滚筒转速对表面粗糙度的影响

Fig.5 The influence of drum rotation speed on surface roughness

3 表面二次细化加工

使用粒径为5 mm的氧化铝磨料,在滚筒转速为240 r/min的条件下,对TC21钛合金进行了离心研磨加工。加工40 min后,工件的表面粗糙度值 R_a 由 $1.412 \mu\text{m}$ 降低至 $0.513 \mu\text{m}$ 。在此基础上,使用粒径为3 mm的磨料对工件进行了表面二次细化处理,不同加工时间下工件的表面粗糙度值如图6所示。从图中可以看出,经过二次细化加工,工

件的表面粗糙度值进一步减小,表面粗糙度值降低至 $0.267 \mu\text{m}$ 。在加工时间超过15 min后,由于工件表面的粗糙度值已经很小,磨料与工件表面之间主要为相对滑擦作用,磨削作用很弱,表面粗糙度值变化很小。使用BCM-200E型精密光学显微镜观察了加工前后工件的表面形貌,放大200倍后的表面形貌见图7。从图7中可以看出,加工前工件表面纹理较深,存在缺陷;加工后工件表面平整光滑,加工纹理和表面缺陷消失,工件表面质量提高明显。

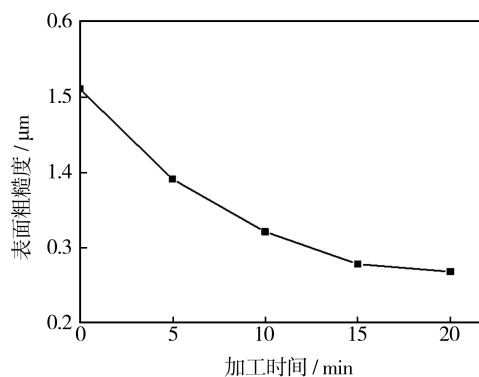
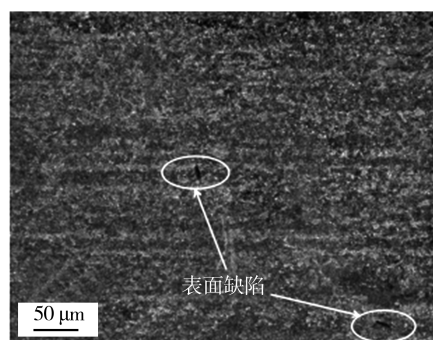
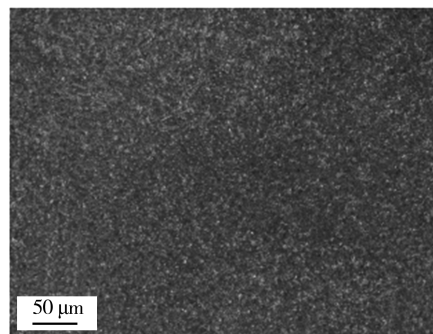


图6 二次细化加工中表面粗糙度随加工时间的变化

Fig.6 Change of surface roughness with the processing time in the secondary refining processing



a 加工前



b 加工后

图7 研磨加工前后工件的表面形貌(200×)

Fig.7 Surface topography of workpiece before and after grinding (200×): a) before processing, b) after processing

4 结论

1) 通过试验对加工的主要工艺参数进行了优化, 确定了离心研磨加工 TC21 钛合金较优的工艺参数, 即: 磨料材质选用氧化铝, 磨料粒径为 5 mm, 滚筒转速为 240 r/min。

2) 采用优化后的工艺参数对 TC21 钛合金进行了研磨加工, 并结合表面二次细化处理, 使 TC21 钛合金表面粗糙度值由 $1.412\ \mu\text{m}$ 降至 $0.267\ \mu\text{m}$, 表面粗糙度下降两级, 加工效果显著。

3) 离心研磨工艺有效消除了工件表面的加工纹理和缺陷, 验证了使用离心研磨工艺加工 TC21 钛合金的可行性。

参考文献

- [1] 王振霞, 陈丽红, 单小林, 等. TC4 表面等离子 Ni 改性层摩擦磨损研究[J]. 表面技术, 2015, 44(1): 92—96.
WANG Zhen-xia, CHEN Li-hong, SHAN Xiao-lin, et al. Study on Friction and Wear of Plasma Ni Modified Layer on Surface of TC4[J]. Surface Technology, 2015, 44(1): 92—96.
- [2] 韩世波, 徐冰, 廖善联, 等. 飞机用钛合金结构件高效精密加工技术[J]. 钛工业进展, 2015, 32(3): 35—38.
HAN Shi-bo, XU Bing, LIAO Shan-lian, et al. High Precision Machining Technology for Aircraft Titanium Alloy Parts[J]. Titanium Industry Progress, 2015, 32(3): 35—38.
- [3] 张而耕, 朱州, 张体波. 超硬纳微米 PVD 涂层技术在刀具领域的应用及研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(4): 89—96.
ZHANG Er-geng, ZHU Zhou, ZHANG Ti-bo. Research Progress and Application of Superhard Nano-Micron PVD Coating Technology in the Cutting Manufacturing Area[J]. Surface Technology, 2015, 44(4): 89—96.
- [4] 李长河, 孟广耀, 蔡光起. 砂轮约束磨粒喷射精密光整加工有效性实验验证[J]. 农业机械学报, 2007, 38(1): 141—144.
LI Chang-he, MENG Guang-yao, CAI Guang-qi. Experimental Verification of Validity on Abrasive Jet Precision Finishing with Grinding Wheel as Restraint[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(1): 141—144.
- [5] 陈伟, 唐火红, 骆敏舟, 等. 基于离散单元法的砂轮磨料粉体流动性研究[J]. 包装工程, 2015, 36(7): 67—70.
CHEN Wei, TANG Huo-hong, LUO Min-zhou, et al. Flow Performance of Grinding Wheel Abrasive Powder Based on Discrete Element Method[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(7): 67—70.
- [6] 屠振密, 朱永明, 李宁, 等. 钛及钛合金表面处理技术的应用及发展[J]. 表面技术, 2009, 38(6): 76—78.
TU Zhen-mi, ZHU Yong-ming, LI Ning, et al. Applications and Advances on Surface Treatment for Titanium and Titanium Alloy[J]. Surface Technology, 2009, 38(6): 76—78.
- [7] 周文慧. 钛合金复杂型面零件弹性轮磨抛技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
ZHOU Wen-hui. Research on the Polishing of Complex Surface of Titanium Alloy Parts with Elastic Wheels[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [8] 赵永岗, 张春刚, 王辉, 等. 化学铣切在钛合金加工中的研究及应用[J]. 表面技术, 2009, 38(6): 83—86.
ZHAO Yong-gang, ZHANG Chun-gang, WANG Hui, et al. Research and Application of Chemical Milling Processing for Titanium Alloy[J]. Surface Technology, 2009, 38(6): 83—86.
- [9] AXINTE D A, KRITMANOROT M, AXINTE M, et al. Investigations on Belt Polishing of Heat-resistant Titanium Alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 166(3): 398—404.
- [10] 邓超, 韩冰, 陈燕. 磁研磨法对钛合金弯管内表面的抛光研究[J]. 航空制造技术, 2015(3): 61—63.
DENG Chao, HAN Bing, CHEN Yan. Study of Inner Surface Polishing of Titanium Alloy Elbow Pipe by Magnetic Abrasive Finishing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(3): 61—63.
- [11] 张德远, 刘静. 飞机紧固孔超声振动精密加工技术研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(4): 421—424.
ZHANG De-yuan, LIU Jing. Study on Ultrasonic Vibration Precision Machining Technology of Aircraft Fastener Holes[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(4): 421—424.
- [12] AROLA D, RAMULU M. Material Removal in Abrasive Water Jet Machining of Metals Surface Integrity and Texture[J]. Wear, 1997, 210: 50—58.
- [13] FEI Y H, ZHOU L, QU H L, et al. The Phase and Microstructure of TC21 Alloy[J]. Materials Science and Engineering(A), 2008, 49(1/2): 166—172.
- [14] 高玉魁. 喷丸强化对 TC21 高强度钛合金疲劳性能的影响[J]. 金属热处理, 2010, 35(8): 30—32.
GAO Yu-kui. Influence of Shot Peening on Fatigue Property of TC21 Titanium Alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2010, 35(8): 30—32.
- [15] 杨鹏海, 江帆, 凌程祥. 行星研磨过程中磨削生热机制的研究[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2015, 14(2): 76—80.
YANG Peng-hai, JIANG Fan, LING Cheng-xiang. Study on Heat Generated by Friction in Planetary Milling Process[J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition), 2015, 14(2): 76—80.
- [16] 赵秋乐. 磨料流抛光机及其工艺参数研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
ZHAO Qiu-le. Study on the Abrasive Flow Polishing Machine and Its Process Parameters[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [17] UHLMANN E, DOITS M, SCHMIEDEL C. Development of a Material Model for Visco-elastic Abrasive Medium in Abrasive Flow Machining[J]. Proceed CIRP, 2013(8): 351—356.