

# 高温合金和钛合金材料的橡胶轮数控抛光试验\*

## Experiment of Rubber Wheel CNC Polishing for Superalloy and Titanium Alloy

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 陈宇飞 崔伟 李勋 陈志同 李秀琴

**[摘要]** 提出一种针对高温合金和钛合金的橡胶轮抛光工艺,采用数控机床控制含有磨料的橡胶轮对工件进行抛光。通过具体数控抛光试验,测量采用不同加工参数条件下工件表面粗糙度和去除深度,得到适合于高温合金和钛合金抛光加工的参数及条件,使表面粗糙度小于  $0.2\mu\text{m}$ ,可满足航空航天领域高温合金和钛合金工件表面要求。

**关键词:** 抛光 橡胶轮 高温合金 钛合金

**[ABSTRACT]** Hand-polishing process is the main polishing process for the superalloy and titanium alloy. This article puts forward a polishing process for superalloy and titanium alloys. The rubber wheels containing abrasive polish the workpiece controlled by CNC machines. We design several experiments using different parameters and then measure the surface roughness and removal depth of the workpiece; Finally, get suitable polishing parameters for superalloy and titanium alloy, the surface roughness of which is smaller than  $0.2\mu\text{m}$ . It can meet the requirements of the surface roughness in the aerospace industry.

**Keywords:** Polishing Rubber wheels Superalloy Titanium alloy

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.S2.146

随着航空航天工业的发展,高温合金材料和钛合金类材料的加工越来越成为加工行业的重点及难点<sup>[1-2]</sup>。现代航空器、航天器中发动机的关键部件如叶片、整体叶轮等零件大部分采用这两种材料制造。但高温合金导热性差、易产生加工硬化,钛合金导热系数低、化学活性高、弹性模量小<sup>[3-5]</sup>。这些材料特性使得其加工难度很大,一直为制造业中的难点。

目前对高温合金和钛合金材料的抛光加工主要由工人手工完成,抛光加工是一个复杂的作业过程,有许多因素影响抛光加工效果<sup>[6-8]</sup>。手工抛光车间的工作环境恶劣,产生的微小颗粒也危害工人的健康;同时人工抛光效率低,对工人的依赖程度较大,抛光过程中抛光操作者通过触觉、力觉和视觉实时人为地感知抛光程

度,容易产生人为误差,因此抛光效果往往因抛光工人的熟练程度而不同<sup>[9-10]</sup>。因此迫切要求采用自动化的抛光技术,提高抛光加工的效率 and 表面质量<sup>[11-12]</sup>。

本文针对高温合金和钛合金的数控抛光工艺,在数控铣床或磨床上采用含有氧化铝磨料的 240# 橡胶轮对高温合金和钛合金进行数控抛光,替代工人手工抛光操作,可提高加工质量的稳定性,改善工人劳动环境。

### 1 试验设备及试件

常见的抛光用橡胶轮如图 1 所示,由内含磨料的橡胶和硬质合金杆组成,与其他抛光工具相比,橡胶轮刚性好,抛光精度高,易于修整。

图 2 是橡胶轮修整方法,当抛光加工一段时间后,橡胶轮圆周表面会有磨损,需要重新修整才能继续使用。试验前采用  $n=1000\text{r/min}$  的转速使橡胶轮与砂轮对



图1 橡胶抛光轮

Fig.1 Rubber polishing wheel

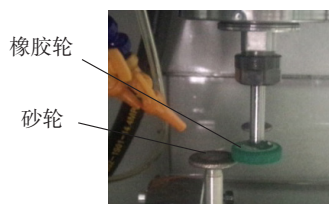


图2 橡胶抛光轮修整

Fig.2 Repair of rubber polishing wheel

\* 中航工业集团公司 2013 年预算增量项目资助。

磨,将橡胶轮修整成合适的形状。

本试验采用立式三轴数控磨床,通过数控程序控制橡胶轮的轨迹对工件进行抛光。抛光加工过程类似于磨削加工,但抛光工具使用柔性的抛光轮,加工参数也与磨削加工不同。

抛光前试件表面如图3所示,表面刀纹清晰可见。本试验采用平面鼓形砂轮磨削加工后的试件作为抛光试件,其加工方式与曲面磨削加工方式相同,以便进一步研究曲面抛光效果。

如图4所示,抛光的走刀轨迹垂直于磨削刀纹,试件抛光前 $y$ 向表面粗糙度为 $0.2\sim 0.3\mu\text{m}$ , $x$ 向表面粗糙度为 $0.6\sim 0.8\mu\text{m}$ ,表面纵向刀纹清晰可见。抛光后分别测量垂直于走刀轨迹的 $y$ 向表面粗糙度和平行于走刀轨迹的 $x$ 向表面粗糙度值,选取其中较大的量作为衡量表面质量的标准。

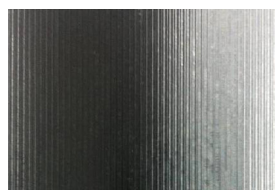


图3 抛光前试件

Fig.3 Specimen before polishing

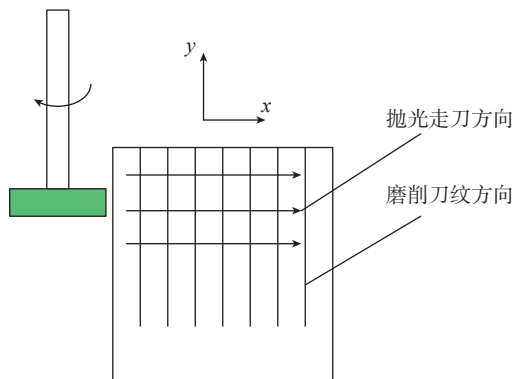


图4 抛光轨迹示意图

Fig.4 Schematic diagram of polishing track

## 2 高温合金和钛合金抛光参数试验

表面质量和去除深度与抛光参数中抛光线速度 $v_c$ 、进给量 $f$ 、预压量 $a_p$ 密切相关<sup>[13-15]</sup>。试验选取不同的抛光线速度 $v_c$ 、进给量 $f$ 、预压量 $a_p$ 分别对高温合金和钛合金试件进行试验,对测量抛光后的去除深度 $h$ 和表面粗糙度数 $R_a$ 进行分析。

### 2.1 高温合金试件不同抛光参数试验

本试验不使用切削液,采用塑胶气管喷气对橡胶轮进行冷却。

#### 2.1.1 抛光线速度与高温合金抛光质量及去除深度关系

采用直径 $d=20\text{mm}$ ,粒度为240#的橡胶抛光轮,在 $f=300\text{mm}/\text{min}$ , $a_p=0.15\text{mm}$ 的条件下,分别采用 $628\text{m}/\text{min}$ 、 $502\text{m}/\text{min}$ 、 $377\text{m}/\text{min}$ 、 $250\text{m}/\text{min}$ 进行试验。

从图5可以看出,当抛光线速度 $v_c$ 处于 $250\sim 500\text{m}/\text{min}$ 区间时,表面粗糙度随着抛光线速度增大而减小,表面质量变好;当 $v_c$ 超过 $500\text{m}/\text{min}$ 时,表面粗糙度 $R_a$ 随着抛光线速度 $v_c$ 增大而急剧增大。原因是抛光线速度过大,温度较高,引起橡胶轮表面烧伤硬化,使得表面质量变差。

当抛光线速度 $v_c$ 增大时,去除深度 $h$ 也增大,当抛光线速度 $v_c$ 处于 $377\sim 500\text{m}/\text{min}$ 时,去除深度 $h$ 相对比较稳定,此时去除深度 $h$ 在 $6\mu\text{m}$ 左右,适用于高温合金材料的抛光加工;当抛光线速度 $v_c$ 超过 $500\text{m}/\text{min}$ 时,去除深度 $h$ 随 $v_c$ 增加而急剧增大,原因是抛光线速度增大,引起温度升高,橡胶轮表面烧伤硬化,抛光机理改变,形成了类似砂轮磨削的效果,使得表面材料大量去除,此时表面质量较差,工具与材料迅速磨损,不适用于工业加工生产。

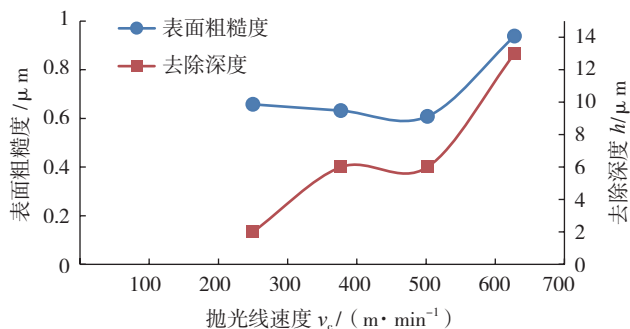


图5 抛光线速度对高温合金表面粗糙度和去除深度的影响

Fig.5 Effect of polishing speed on superalloy surface roughness and removal depth

#### 2.1.2 进给量与抛光质量及去除深度关系

采用直径 $d=20\text{mm}$ ,粒度为240#的橡胶抛光轮,在 $n=8000\text{r}/\text{min}$ 、 $a_p=0.15\text{mm}$ 的条件下,分别采用 $1000\text{mm}/\text{min}$ 、 $800\text{mm}/\text{min}$ 、 $600\text{mm}/\text{min}$ 、 $300\text{mm}/\text{min}$ 的进给量进行试验。

由图6曲线可以看出,进给量 $f$ 对表面粗糙度影响较大,当进给量 $f$ 从 $300\text{mm}/\text{min}$ 逐渐增大至 $800\text{mm}/\text{min}$ 时,试件的表面粗糙度逐渐降低;当进给量 $f$ 大于 $800\text{mm}/\text{min}$ 时,进给量 $f$ 增大时表面粗糙度增大。原因是进给量过大时,试件表面抛光不完全,有磨削留下的残余刀纹,进给量 $f$ 过小时抛光去除量较大,磨料与工件反复作用产生划伤与硬化,使得表面粗糙度增加,表面质量变差。

当进给量 $f$ 增大时,去除深度 $h$ 逐渐减小。原因是橡胶轮有一定弹性,且去除能力较弱,进给量较大时,橡

胶轮与试件表面接触时间较短,无法去除深层材料。

### 2.1.3 预压量与抛光质量及去除深度关系

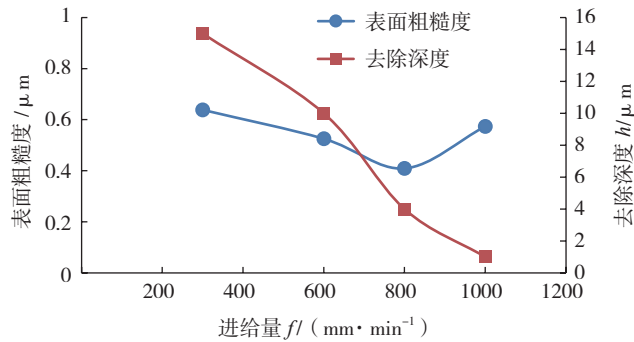


图6 进给量对高温合金表面粗糙度和去除深度的影响  
Fig.6 Effect of feed on superalloy surface roughness and removal depth

采用  $d=20\text{mm}$ , 粒度为 240# 的橡胶抛光轮, 在转速为  $8000\text{r/min}$ , 进给量为  $800\text{mm/min}$  的条件下, 选取预压量  $a_p$  为  $0.05\text{mm}$ 、 $0.1\text{mm}$ 、 $0.15\text{mm}$ 、 $0.2\text{mm}$  4 个参数进行试验。

表面粗糙度随着预压量增加而增大, 在预压量  $a_p$  于  $0.1\sim 0.15\text{mm}$  时表面质量比较稳定; 当预压量  $a_p$  大于  $0.15\text{mm}$  时, 表面粗糙度迅速升高, 表面质量变差。原因是预压量增大压力过大, 接触面积较大, 不利于散热冷却, 导致橡胶轮与试件表面烧伤变性, 表面质量变差。

由图 7 (b) 曲线可以看出, 当预压量  $a_p$  小于  $0.1\text{mm}$  时, 随着预压量  $a_p$  增加, 去除深度  $h$  增加; 当预压量  $a_p$  大于  $0.1\text{mm}$  时, 随着预压量  $a_p$  增加去除深度  $h$  趋于稳定。

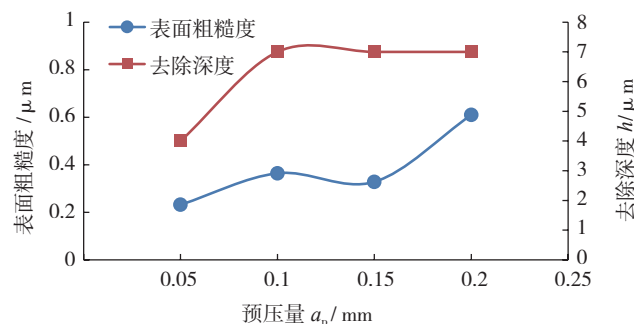


图7 预压量对高温合金表面粗糙度和去除深度的影响  
Fig.7 Effect of compression on superalloy surface roughness and removal depth

## 2.2 钛合金试件不同抛光参数试验

针对钛合金导热性差, 钛元素金属活性大的特点, 选用水基切削液辅助加工, 避免钛合金加工时表面起火花引起烧伤。

### 2.2.1 抛光线速度与钛合金抛光质量及去除深度关系

采用  $d=21.5\text{mm}$ , 粒度为 240# 的橡胶抛光轮, 在  $f=600\text{mm/min}$ ,  $a_p=0.1\text{mm}$  的条件下, 分别采用  $5000\text{r/min}$ 、 $10000\text{r/min}$ 、 $15000\text{r/min}$ 、 $20000\text{r/min}$  (抛光线速度  $v_c = \pi nd/1000$ ) 的转速进行试验。

由图 8 可以看出, 当抛光线速度  $v_c$  处于  $353\sim 705\text{m/min}$  区间时, 表面粗糙度  $R_a$  随着抛光线速度  $v_c$  增大而增大, 表面质量变差; 当  $v_c$  超过  $705\text{m/min}$  时, 表面粗糙度  $R_a$  随着抛光线速度  $v_c$  增大而急剧增大, 当  $v_c$  超过  $1060\text{m/min}$  时表面粗糙度  $R_a$  又开始减小。

当抛光线速度  $v_c$  增大时, 去除深度  $h$  也增大, 当抛光线速度  $v_c$  处于  $353\sim 705\text{m/min}$  时, 去除深度相对比较稳定, 此时去除深度在  $15\mu\text{m}$  左右, 适用于钛合金材料的抛光加工; 当抛光线速度  $v_c$  超过  $705\text{m/min}$  时, 去除深度  $h$  随抛光速度  $v_c$  增加而增大, 当抛光线速度达到  $1000\text{m/min}$  时达到峰值又开始降低。原因是抛光线速度过高, 引起温度升高, 表面局部烧伤工具迅速磨损, 抛光轮去除能力降低, 去除深度减小。

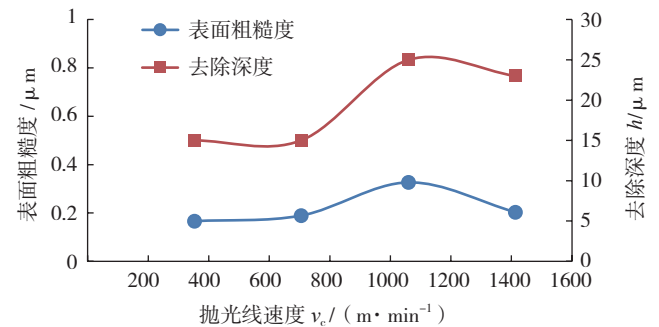


图8 抛光线速度对钛合金表面粗糙度和去除深度的影响  
Fig.8 Effect of polishing speed on titanium alloy surface roughness and removal depth

### 2.2.2 进给量与抛光质量及去除深度关系

采用  $d=21.5\text{mm}$ , 粒度为 240# 的橡胶抛光轮, 在  $n=10000\text{r/min}$ ,  $a_p=0.1\text{mm}$  的条件下, 分别采用  $300\text{mm/min}$ 、 $600\text{mm/min}$ 、 $900\text{mm/min}$  的进给量进行试验。

由图 9 曲线可以看出, 当进给量  $f$  从  $300\sim 900\text{mm/min}$  逐渐增大时, 试件的表面粗糙度  $R_a$  逐渐增大。原因进给量  $f$  较快时, 试件表面抛光不完全, 去除深度小, 有磨削留下的残余刀纹, 所以表面粗糙度较大。

当进给量  $f$  增大时, 去除深度  $h$  逐渐减小。原因是橡胶轮有一定弹性, 且去除能力较弱, 进给量较大时, 橡胶轮与试件表面接触时间较短, 无法去除深层材料。

### 2.2.3 预压量与抛光质量及去除深度关系

采用  $d=21.5\text{mm}$ , 粒度为 240# 的橡胶抛光轮, 在  $n=10000\text{r/min}$ 、 $f=300\text{mm/min}$  的条件下, 选取预压量  $a_p$  为  $0.05\text{mm}$ 、 $0.1\text{mm}$ 、 $0.2\text{mm}$ 、 $0.3\text{mm}$  4 个参数进行试验。

由图 10 可以看出, 在预压量  $a_p$  小于  $0.1\text{mm}$  时,

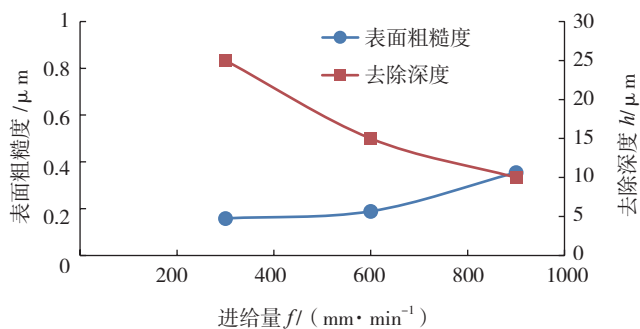


图9 进给量对钛合金表面粗糙度和去除深度的影响

Fig.9 Effect of feed on titanium alloy surface roughness and removal depth

表面粗糙度随着压缩量的增加而减小; 预压量  $a_p$  大于 0.1mm 时表面粗糙度  $R_a$  迅速升高, 表面质量变差, 原因是当压力过大时, 接触面积较大, 不利于散热冷却, 导致橡胶轮与试件表面烧伤变性, 表面质量变差。

当预压量  $a_p$  小于 0.1mm 时, 预压量  $a_p$  增加, 去除深度  $h$  减小; 当预压量  $a_p$  大于 0.1mm 时, 预压量  $a_p$  增加去除深度  $h$  增加。

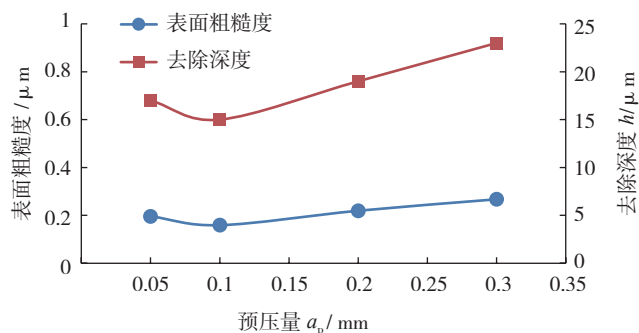


图10 预压量对钛合金表面粗糙度和去除深度的影响

Fig.10 Effect of compression on titanium alloy surface roughness and removal depth

### 3 结论

本文总结了 240# 橡胶轮抛光高温合金和钛合金的两个试验。重点研究了试件抛光后的表面粗糙度和抛光去除量与抛光参数的关系。试验结论对之后抛光高温合金和钛合金叶轮叶片等复杂曲面零件有一定参考价值。

(1) 抛光环境对抛光效果有很大影响, 抛光高温合金不使用切削液, 使用空气冷却可以大大提高抛光效率; 抛光钛合金应使用水基切削液以避免表面烧伤。

(2) 抛光线速度对表面粗糙度有很大影响, 对于高温合金, 适当提高抛光线速度可以降低表面粗糙度。当抛光线速度大于 502m/min 时, 抛光线速度增大表面粗糙度升高, 抛光高温合金时应使抛光线速度小于 502m/

min; 对于钛合金, 较低和较高的抛光线速度可以得到较好的抛光光质量, 橡胶轮抛光加工钛合金时应使抛光线速度大于 1060m/min 或小于 705m/min。

(3) 进给量对去除深度有很大影响, 进给量较大时, 去除深度过小, 不能去除上一道工序磨削的加工刀纹; 进给速度过小时, 去除深度较大, 表面被反复加工, 也会产生表面缺陷等, 使表面粗糙度增加。对于高温合金, 选择 600~800mm/min 的进给量时去除深度为 4~10  $\mu\text{m}$ , 适合高温合金的抛光加工; 对于钛合金, 进给量 300~600mm/min 时, 去除深度 15~25  $\mu\text{m}$  且表面粗糙度小于 0.2  $\mu\text{m}$ , 适合钛合金抛光加工。

(4) 抛光轮的预压量与抛光线速度和进给量相比, 对表面质量和去除深度影响较小。使用橡胶轮抛光时可结合试件刚性和橡胶轮磨损情况综合选择抛光预压量。

### 参考文献

- [1] 陈志同, 陈宇飞. 一种圆周阵列曲面结构同步加工装置: 103223634A[P]. 2013-07-31.
- [2] 周子同, 陈志同, 蒋理科, 等. 钛合金 TB6 铣削加工硬化实验. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(1): 135-140.
- [3] 何克红. 汽轮机叶片并联抛光机系统的研制 [D]. 上海: 东华大学, 2007.
- [4] 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. 计算机集成制造系统, 2012, 18(6): 1209-1214.
- [5] 张佳丽, 发动机叶片五坐标数控抛光机总体设计与研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [6] 李小彪, 史耀耀, 段继豪. 叶片数控砂带抛光关键技术研究. 制造业自动化, 2011, 33(19): 113-115.
- [7] 黄云, 黄智. 砂带磨削的发展及关键技术. 中国机械工程, 2007, 18(18): 2263-2267.
- [8] 吴海龙. 航空发动机精锻叶片数控砂带磨削工艺基础研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [9] 宋剑锋, 姚英学, 谢大纲. 超精密气囊工具抛光方法的研究. 华中科技大学学报, 2007(S1): 104-107.
- [10] 陈庆延. 螺旋曲面砂带抛光工艺方法及专用数控抛光机研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2009.
- [11] 王纯. 振动抛光技术的研究与比较. 淮海工学院学报, 1996(2): 5-9.
- [12] 荣列润. 超精密研磨抛光方法. 航空精密制造技术, 2005, 41(2): 4-8.
- [13] PRESTON F W. The theory and design of plate glass polishing. Journal of the Society of Glass Technology, 1927(11): 214-256.
- [14] YI A Y, HEZLOP M, POL T. A computer controlled optical pin polishing machine. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 146(2): 156-162.
- [15] LIU C W, DAI B T, TSENG W T, et al. Modeling of the wear mechanism during CMP. J. Electrochem. Soc., 1996, 143(2): 716-721.

(责编 宇军)