

弹性磨头气驱主轴的磨抛接触特性研究*

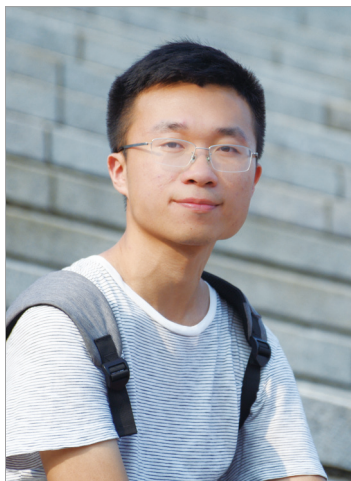
陈登铃, 彭云峰, 曾鑫龙, 孟清辉, 李陈磊

(厦门大学航空航天学院, 厦门 361102)

[摘要] 针对复杂形状工件磨抛的问题,设计了一种配有弹性磨头的小体积、高转速的气驱主轴。建立了该主轴磨抛加工过程的理论去除函数模型,并通过了试验验证。结果表明,仿真和试验得到的去除函数高度吻合,且均接近高斯型,属于理想的去除函数。在此基础上,采用气驱磨抛主轴与弹性树脂磨头进行了磨抛试验,探究了各个主要工艺参数对工件表面质量的影响。磨抛后工件表面粗糙度 R_a 由 $3.588\mu\text{m}$ 降至 $0.401\mu\text{m}$,证明该气驱主轴可用于高精度磨抛,并为复杂形状工件的高速磨抛提供了一定的理论依据。

关键词: 气驱主轴; 高转速; 弹性小磨头; 磨抛加工; 去除函数; 接触分析

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.05.046



陈登铃

硕士研究生,主要研究方向为精密制造。

主轴作为机床的核心部件之一,其加工特性是影响机床精度的关键因素^[1]。目前,对主轴的研究主要集中于电主轴的加工特性上。钱木等^[2]对磨抛电主轴和水润滑电主轴进行了深入研究。Huang等^[3]比较了气动轴承和滚珠轴承对电主轴动态性能的影响。Liu^[4]和Wang等^[5]分别对电主轴的热误差进行了预测和特性分析。电主轴有效简化了机床主轴系统的传动和结构,显著提高了机床的运动精度、灵敏度与运行稳定性^[6]。然而,采用电机驱动的主轴大多体积大、制造成本高,并且电机内置的绕组和定子容易引起机床热变形,增大加工误差^[4-5]。相比之下,空气主轴是在没有热源的室温环境中,由压缩空气驱动,故不会产生因大幅温升而引起热误差,保证了加工稳定性。在小扭矩、低载荷的磨抛中,采用气驱主轴可以有效降低成本^[7-8]。

弹性磨抛的去除机理在国内外也已经有广泛的研究,Zeng等^[9]提出了一种结合工艺参数修正的Preston方程模型,用于预测弹性磨具与钴铬合金的材料去除率。Pan等^[10]建立了弹性磨具在多种运动模式下的去除函数模型。然而,现有的磨抛工艺特性研究大多基于机械主轴、电主轴及大型机床,并且多采用直径较大的砂轮或气囊^[9-11],其适用范围受到限制,无法加工复杂结构工件。

因此,针对复杂结构工件的弹性磨抛,设计了一种体积小、重量轻、转速高的柔性气驱主轴,其结构如图1所示^[12]。该主轴安装于六轴工业机器人末端,并装夹有弹性球形磨头,具备良好的空间可达性。该主轴的高转速特点,使之能达到与大型砂轮或气囊相近的磨抛效果。本文建立该主轴磨抛加工过程的理论去除函数模型,并通过试验

* 基金项目:福建省科技计划项目(2017H0036);
国家自然科学基金(51675453)。

验证。在此基础上,采用气驱磨抛主轴与弹性磨头进行磨抛试验,探究各个主要工艺参数对工件表面质量的影响。

理论去除函数分析

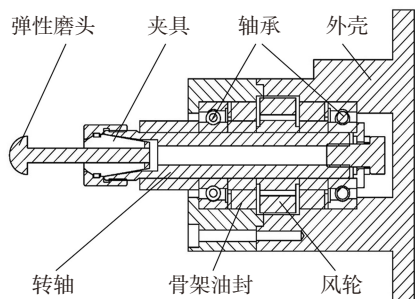
表面磨抛去除函数受多种因素影响,为简化材料去除模型,采用 Preston 方程来描述材料去除量与工艺参数之间的关系。Preston 方程将除速度和压力外的其他因素的影响归为比例常数 k ,建立了材料去除量与压力、速度之间的线性关系。基于 Preston 方程,材料去除函数^[13-14]可表示为:

$$dz/dt=kpv \tag{1}$$

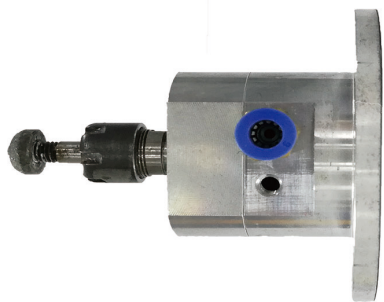
式(1)中, k 为去除系数; z 为加工过程中的材料去除量; v 为工件表面某一点的瞬时速度; p 为该点的磨抛压力。其中, p 和 v 是关于点坐标 (x, y) 和时间 t 的函数。

那么,单位时间内的去除函数可以表示为:

$$TIF(x, y) = k \int_0^t p(x, y, t) v(x, y, t) dt \tag{2}$$



(a) 内部结构图



(b) 实物图

图1 气驱主轴

Fig.1 Diagram of air spindle

1 磨抛速度

磨头的材料采用具有一定弹性的树脂碳化硅,它和工件之间的接触模型如图2所示。其中, $A(x, y)$ 是磨抛接触区域中的任意一点; v_A 是点 A 的合速度; ω 是磨头的角速度; O 是弹性磨头的球心; O_1 是圆形接触区域的中心; R 是弹性磨头的半径; θ 是进动角,并定义 l 为弹性磨头的下压量。

由于在计算机控制表面去除中大多采用静态去除函数,因此本文也是在进给速度 $v_f=0$ 的情况下,顶点生成磨抛斑。

根据几何关系,点 A 的速度分量可以表示为:

$$v_r = \omega \times l_{O_1 A} = \begin{pmatrix} |\omega| [(R-l)\sin\theta - y\cos\theta] \\ |\omega| x\cos\theta \\ |\omega| x\sin\theta \end{pmatrix}^T \tag{3}$$

由此,可得到点 A 的合成速度是:

$$|v_A| = \sqrt{(v_{rx})^2 + (v_{ry})^2} = \sqrt{[|\omega| (R-l)\sin\theta - y\cos\theta]^2 + (|\omega| x\cos\theta)^2} \tag{4}$$

2 基于赫兹接触理论的压力分布分析

在理想条件下,弹性磨头与工件接触区的压力应均匀分布。但事实上,由于树脂材料的特性,树脂弹性

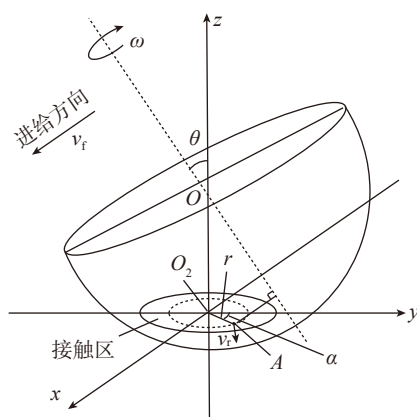


图2 磨削接触模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of precession grinding tool

变形与磨抛下压量产生的压力在接触区域内并不均匀,而且变形量较小,因而采用赫兹接触理论来分析接触区域的压力^[15-16]。

在赫兹接触理论中,接触应力的分布是高度局部化的,随着接触距离的增加,接触应力迅速减小^[17]。根据赫兹接触理论,将磨抛过程简化为弹性磨头与刚性工件的接触问题,其接触区域可用椭圆来表示。因此,接触压力分布可表示为:

$$P = P_0 \left[1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2 \right]^m \tag{5}$$

$$P_0 = \frac{3F_n}{2\pi ab} \tag{6}$$

式中, P_0 为接触区域中心的压力; m 为压力分布系数,可通过试验估算,一般情况下 $m=1$ 。 F_n 为接触应力,接触区域的大小由椭圆方程 $(x/a)^2 + (y/b)^2 = 1$ 定义,其中, a 和 b 可由试验获得。

综合式(4)~(6),可推得单个进动方向下的理论去除函数为:

$$H(x, y) = k \times \frac{3F_n}{2\pi ab} \left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} \right)^m$$

$$\int v_A(x, y) dt \tag{7}$$

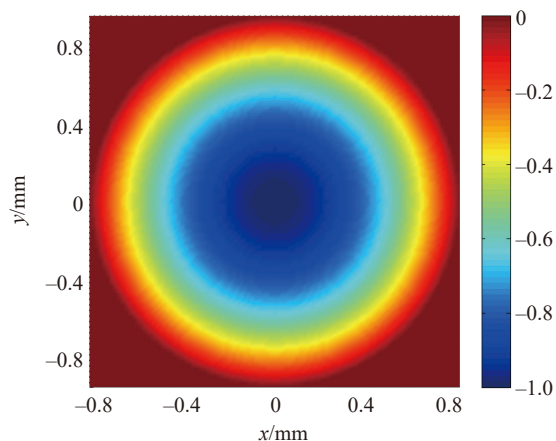
3 理论去除函数仿真

去除函数的仿真条件见表1。由于比例常数只影响去除函数的幅值和去除效率,因此对仿真数据进行了归一化处理。将4个进动方向去除函数叠加后的仿真结果如图3所示,其中去除函数的形状是需要特别注意的关键特征。结果表明,仿真得到的去除函数为椭球状,且呈明显的高斯型曲面特性。

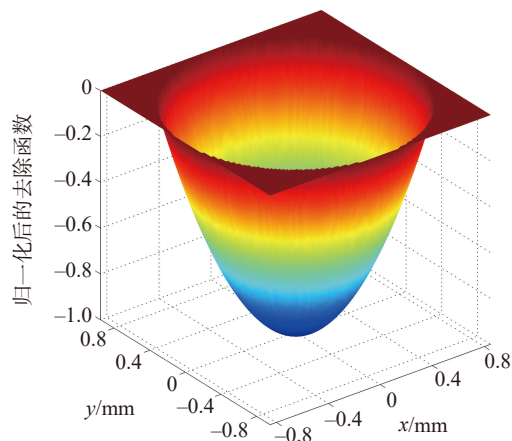
表1 去除函数仿真条件

Table 1 Simulation conditions of removal function

磨头直径 / mm	进动角 / (°)	磨削深度 / μm	主轴转速 / (r·min ⁻¹)
20	30	50	20000



(a) 俯视图



(b) 三维着色曲面图

图3 去除函数仿真结果

Fig.3 Simulation results of static TIF

试验

为了验证理论去除函数模型的正确性,在图4所示的试验平台上进行了多组磨抛试验。试验平台主要包含 EPSON A901S 机器人、气驱系统、气驱主轴、控制器等。其中,气驱主轴通过进气管与空气压缩机相连。经水过滤、供油、调压处理后,将 0.20MPa 的空气压力送入气驱主轴。此时,用胜利 VC6234P 型光电转速计测得气驱主轴稳定时的空载转速为 20000r/min 左右。气驱主轴安装于机器人末端,由机器人控制气驱主轴的进动角和磨抛路径。试验中选用了多种粒度的碳化硅树脂弹性磨头,其原因是树脂弹性磨头的磨粒呈半固定锥形,在磨抛过程中,树脂弹性磨头能保持一定的磨抛压力,降低

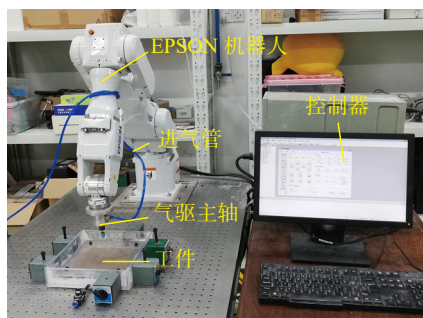


图4 试验平台

Fig.4 Experiment equipment

对工件的划伤,提高磨抛效率。同时,高回弹性也使得树脂弹性磨头在加工过程中的实际加工深度小于预先设定的加工深度,从而补偿了机器人的细微位置精度误差。去除函数的试验条件见表2。

为了进一步探究气驱主轴的磨抛特性,还进行了多组不同工艺参数下的磨抛试验。设置磨削深度为 50 μm ,主轴转速为 18000r/min,工件材料选用铝合金,其表面粗糙度 R_a 为 3.588 μm 。其余磨抛试验条件,见表3。

磨抛工件表面的去除函数曲线由 Taylor-Hobson PGI1240 轮廓仪测量,工件表面粗糙度由 Mitutoyo

SJ-210 表面粗糙度仪测量。为保证试验数据的准确性,对每组试验结果进行了多次测量,并取平均值分析。

结果与讨论

1 去除函数

试验和仿真获得的沿着进给方向即 x 方向的去除特性曲线见图5。由于参数 k 值的不确定性,试验数据也进行了归一化处理。从图5中可以看出,仿真和试验得到的去除函数高度吻合,并且都接近于高斯型,属于理想的去除函数。产生略微差别的主要原因是实际磨削过程中,树脂磨头的弹性分布不均匀,且磨具表面微孔存在堵塞现象,造成了磨削机

表2 去除函数试验条件

Table 2 Experimental conditions of the removal function

工件材料	磨头直径 / mm	磨粒目数	进动角 / ($^{\circ}$)	研磨时间 / s	磨削深度 / μm	主轴转速 / ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)
铝合金	20	400#	30	10	50	20000

表3 不同工艺参数试验条件

Table 3 Experimental conditions of different process parameters

磨粒目数	进动角 / ($^{\circ}$)	研磨时间 / min	进给速度 / ($\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
400#	0, 10, 20, 30, 40	1	—
120#, 200#, 400#	30	1, 2, 3, 4	—
120#, 200#, 400#	30	—	5, 10, 20, 40

理的变化,使得实际磨削的去除量略小于仿真去除量,并且不如仿真曲线平滑^[18-19]。由此可见,本文建立的理论去除函数模型基本正确,并且所研制的气驱主轴是实现高精度磨抛的一种工具或者方法。

2 进动角对去除函数的影响

图6为不同进动角下的去除特性曲线。从图6中可以看出,当进动角为0时,去除函数并不均匀,原因在于此时磨头的磨削线速度较小,磨削区域温度较高,磨头会产生烧伤和过度磨损的现象^[20]。随着进动角的增大,磨削线速度也随之增大,单位时间内参与磨削的磨粒增多,单个磨粒的切削量变小,且切削速度高于工件表面材料的塑性变形速度,当表层材料还未变形时就被磨粒切除,故而磨粒在金属表面的划痕变浅,工件表面质量提升,即去除函数曲线更加光滑平顺且呈明显的高斯分布。但进动角并不是越大越好,当进动角过大时,将会加大主轴的变形,影响主轴的刚度而导致加工误差增加。

3 研磨时间对工件表面质量的影响

试验结果如图7所示,采用不同目数的磨头,随着磨抛时间的增加,工件的表面粗糙度也随之降低。原因在于,弹性磨具与工件接触时产生弹性变形,同时对工件施加磨抛压力,足够长的磨抛时间有利于磨头的充分回复,提升磨抛效果。对于较高目数的磨头,磨抛时间的增加,有利于增加工件单位面积上的磨削磨粒数量,使得工件产生的滑痕数量提升,同时塑性变形减少,从而获得较好的表面质量。但随着磨抛时间继续增加,磨抛效果的提升有所减缓,是因为当前主轴转速较快,去除效率较高,工件可去除量随时间增加开始下降,因此表面质量提升变缓。

4 进给速度对工件表面质量的影响

试验结果如图8所示,对于120#和200#的磨头,降低进给速度,有利于工件表面质量的提升。原因

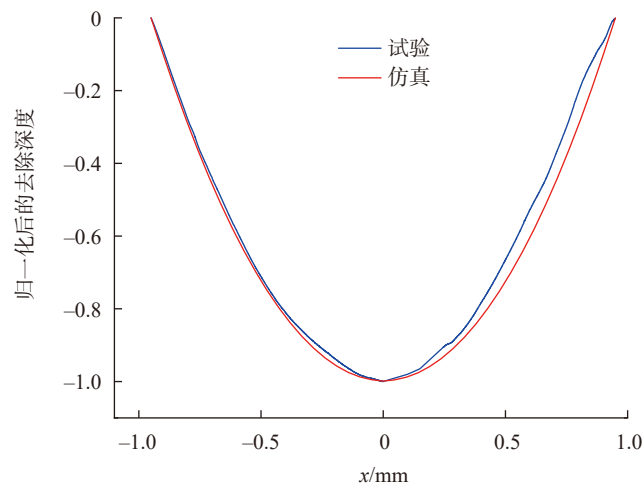


图5 仿真与试验去除函数对比图

Fig.5 Simulation and experimental results of static TIF

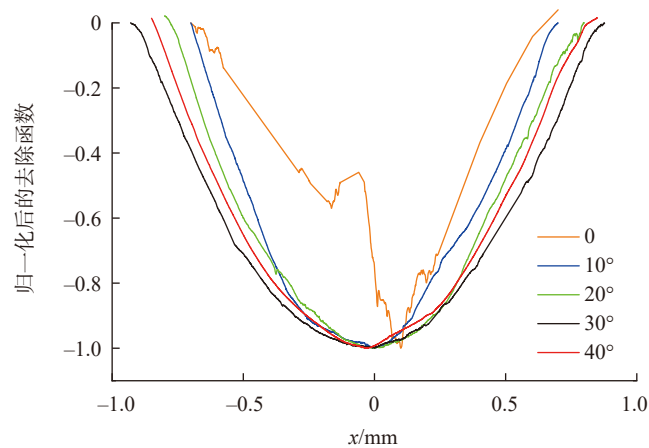


图6 进动角对去除函数的影响

Fig.6 Effect of precession angle on TIF

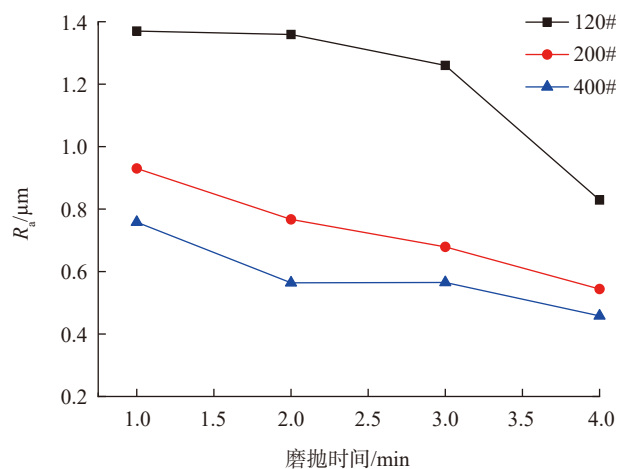


图7 磨抛时间对表面质量的影响

Fig.7 Effect of grinding time on surface quality

在于,磨抛时过快的进给速度将产生较大的材料去除量和较为严重的热量,影响磨抛质量。由于高速磨削时,高目数的磨头在单位时间内参与切削的磨粒数很多,本节试验条件设置的磨削深度较小,材料在很短的时间内已被去除,因此进给速度对400#的磨头磨削效果的提升影响不大。从整体来看,降低进给速度有利于提升加工效果,但过低的进给速度将降低磨削效率,因此需要兼顾磨削效率与工件表面质量,选择合适

的进给速度。

5 表面形貌分析

磨抛后的工件表面形貌通过Keyence VHXS550E 电子显微镜观察。在30°进动角、5μm/s进给速度、4min磨抛时间下,120#、200#和400#弹性磨头磨抛得到的工件表面形貌如图9所示。从图9中可以看出试样表面在磨抛前有着严重的划痕和隆起,磨抛后工件的变形材料被去除,磨粒在试样表面产生轻微、均匀且致密的磨痕。随着弹性磨头目数的增

加,材料表面的塑性流动和犁犁现象得到进一步缓解,表面不平度降低,但仍有轻微皱叠和犁痕^[21-22]。综上可知,选择合适的加工参数,如目数相对较高的磨头、合适的进给速度等,有利于获得良好的表面形貌和加工质量。

结论

本文设计了一种体积小、转速高的柔性气驱主轴,并对该主轴的磨抛接触特性进行了仿真分析和试验研究。在此基础上得出以下结论,首先,通过仿真和试验得到的去除函数高度吻合,并且均接近高斯型,属于理想的去除函数;其次,在400#弹性磨头、30°进动角和5μm/s进给速度的条件下,应用设计的主轴磨抛后的工件表面粗糙度 R_a 降至0.401μm。证明了所设计的弹性磨头气驱主轴可用于高精度磨抛,并为复杂形状工件的高速磨抛提供了一定的理论依据。

参考文献

[1] 齐向阳. 机床主轴静-动-热特性及其对主轴变形的影响规律研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
 QI Xiangyang. Study on the static-dynamic-thermal characteristics of spindle of machine tool and its effects on deformation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
 [2] 钱木, 蒋书运. 高速磨削用电主轴结构动态优选设计[J]. 中国机械工程, 2005, 16(10): 864-868.
 QIAN Mu, JIANG Shuyun. Dynamic optimization of a high speed motorized spindle[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(10): 864-868.
 [3] HUANG H, YIN L, ZHOU L B. High speed grinding of silicon nitride with resin bond diamond wheels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 141(3): 329-336.
 [4] LIU Z, WEI C, LI D S, et al. Theoretical analysis and experimental study on thermal stability of high-speed motorized spindle[J]. Industrial Lubrication Tribology, 2017, 69(4): 1049-1065.
 [5] WANG B M, MEI X S, WU Z X, et al. Dynamic modeling for thermal error in motorized spindles[J]. International Journal of

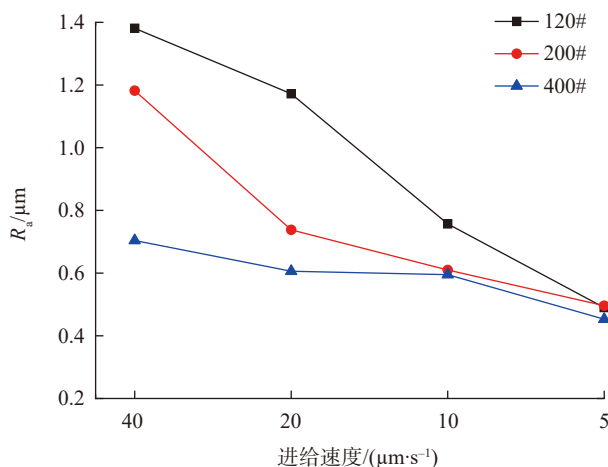


图8 进给速度对工件表面质量的影响
 Fig.8 Effect of feed rates on surface quality

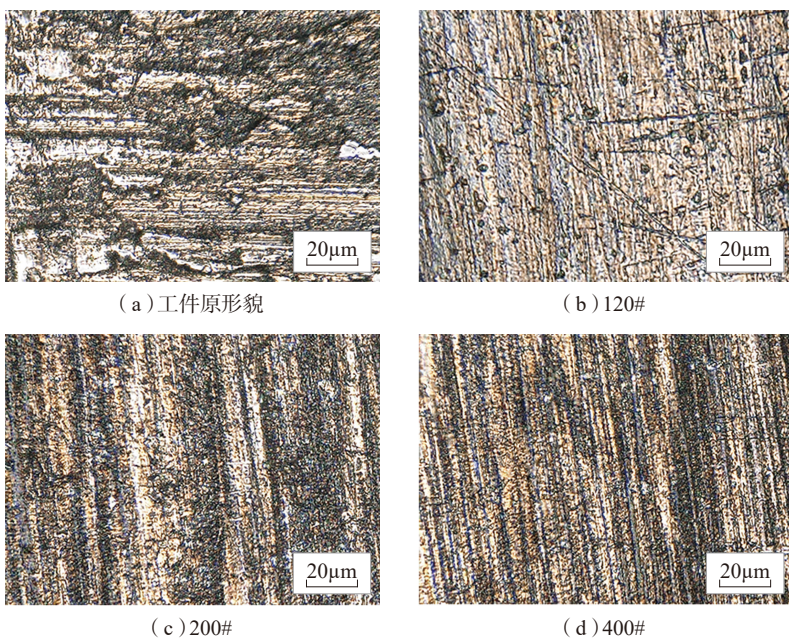


图9 磨抛后表面形貌对比
 Fig.9 Comparison of grinding surface morphologies

- Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(5-8): 1141-1146.
- [6] ABELE E, ALTINTAS Y, BRECHER C. Machine tool spindle units[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(2): 781-802.
- [7] AN C H, ZHANG Y, XU Q, et al. Modeling of dynamic characteristic of the aerostatic bearing spindle in an ultra-precision fly cutting machine[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 50(4): 374-385.
- [8] LI W, ZHOU Z X, XIAO H, et al. Design and evaluation of a high-speed and precision microspindle[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(5-8): 997-1004.
- [9] ZENG S Y, LIAM B. 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.
- [10] PAN R, WANG Z Z, WANG C J, et al. Research on control optimization for bonnet polishing system[J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2014, 15(3): 483-488.
- [11] ZHU Y S, LU W Z, SUN Y L, et al. Grinding characteristics in high-speed grinding of boron-diffusion-hardened TC21-DT titanium alloy with vitrified CBN wheel[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(5-8): 1269-1277.
- [12] 陈登铃, 彭云峰, 曾鑫龙. 高转速气驱研抛装置设计及研抛特性研究[J]. 航空制造技术, 2019, 62(9): 53-58.
- CHEN Dengling, PENG Yunfeng, ZENG Xinlong. Design and research on polishing characteristics of high speed pneumatic polishing device[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(9): 53-58.
- [13] PRESTON F. The theory and design of plate glass polishing machines[J]. Glass Technology, 1927, 11: 214-256.
- [14] PAN R, ZHONG B, CHEN D J, et al. Modification of tool influence function of bonnet polishing based on interfacial friction coefficient[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 124: 43-52.
- [15] BARBER J, CIAVARELLA M. Contact mechanics[J]. International Journal of Solids & Structures, 2000, 37: 29-43.
- [16] YE K, LI L, ZHU H P. A note on the Hertz contact model with nonlinear damping for pounding simulation[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2010, 38(9): 1135-1142.
- [17] CHEN J B, FANG Q H, ZHANG L C. Investigate on distribution and scatter of surface residual stress in ultra-high speed grinding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(1-4): 615-627.
- [18] HUANG H, YIN L, ZHOU L B. High speed grinding of silicon nitride with resin bond diamond wheels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 141(3): 329-336.
- [19] SOORAJ V S, RADHAKRISHNAN V. Fine finishing of internal surfaces using elastic abrasives[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2014, 78: 30-40.
- [20] CHEN W Y, ZHANG H X, FU X Z, et al. Temperature measurement and burn mechanism of stainless steel 1Cr11Ni2W2MoV in grinding[J]. Materials Science Forum, 2012, 723: 433-438.
- [21] 于兴展. 弹性磨具磨抛加工中磨抛参数与磨抛效果相关性的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- YU Xingzhan. Study in the correlation between grinding parameters and grinding result of flexible abrasive[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.
- [22] DAI J B, DING W F, ZHANG L C, et al. Understanding the effects of grinding speed and undeformed chip thickness on the chip formation in high-speed grinding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(5-8): 995-1005.

通讯作者: 彭云峰, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事精密工程及其智能化共性研究, E-mail: pengyf@xmu.edu.cn.

Study on Contact Characteristics of Air Spindle With Small Elastic Grinding Tool

CHEN Dengling, PENG Yunfeng, ZENG Xinlong, MENG Qinghui, LI Chenlei

(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

[ABSTRACT] To solve the problem of grinding complex shaped workpieces, a small volume and high speed air spindle with small elastic grinding tool was designed. The theoretical removal function model of the spindle was established and verified by experiments. The results show that the removal functions obtained by simulation and experiments are highly consistent and close to Gaussian-like shape, which belongs to the ideal removal function. On this basis, the spindle with the elastic resin grinding tool was used for grinding experiments, and the influence of the main process parameters on the surface quality of the workpiece was explored. The surface roughness of the workpiece after grinding decreases from 3.588 μm to 0.401 μm , which proves that the air spindle can be used for high-precision grinding, and provides theoretical basis for high-speed grinding of complex shaped workpiece.

Keywords: Air spindle; High speed; Small elastic grinding tool; Grinding and polishing process; Tool influence function; Contact characteristics

(责编 思齐)