

文章编号 1004-924X(2016)增-0428-10

有机玻璃曲面的柔性抛光机理与试验

赵吉宾^{1*}, 尹东^{1,2}

- (1. 中国科学院沈阳自动化研究所 装备制造技术研究室, 辽宁 沈阳 110016;
2. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 为了提高有机玻璃的表面精度, 基于机器人自动化研抛方法, 建立了研磨抛光过程的材料去除模型。首先, 运用有限元方法, 分析研究了柔性抛光盘与工件接触区域内的压力分布, 基于普林斯顿材料去除理论, 建立了柔性抛光盘沿规划轨迹进给时材料去除模型。通过仿真, 分析了研抛压力, 抛光盘旋转速度, 进给速度对材料去除率的影响规律。然后, 研究了扫描路径下轨迹间距对材料去除均匀性的影响规律, 得到了最优的轨迹间距。最后, 对有机玻璃进行研磨抛光试验, 验证了材料去除模型的正确性。试验结果表明: 选取合理的加工参数, 运用最优的轨迹间距, 可以获得无光学缺陷, 表面粗糙度达 $Ra=0.01\ \mu\text{m}$ 的高精度透明件。利用材料去除理论模型可以指导实际曲面研磨抛光加工过程。

关键词: 有机玻璃; 曲面研抛; 柔性抛光盘; 表面材料去除; 轨迹间距

中图分类号: TG580.68/TG580.692 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0428

Mechanism and experiment of flexible polishing for freeform surface of plexiglass

ZHAO Ji-bin^{1*}, YIN Dong^{1,2}

- (1. *Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 110016, China;*
2. *College of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China*)

* *Corresponding author, E-mail: jbzhaob@sia.cn*

Abstract: To improve surface accuracy of organic glass, a material removal model for the grinding and polishing process is set up based on the method for robot automation and polishing. **Method:** firstly, analyze and study the pressure distribution within the region where the flexible polishing disk contacts with the workpiece by adopting the Finite Element Method, and establish the material removal model when the polishing disk feeds materials along the planned area based on the Princeton's material removal theory; secondly, analyze the impact of polishing pressure, rotation speed of the polishing disk and feed speed on the material removal rate, and then study the impact of track pitch under the scanning path on the material removal evenness to obtain the optimal track pitch; finally, carry out a grinding and polishing experiment in the organic glass to verify correctness of the material removal model. **Results:** reasonable processing parameter and optimal track pitch can help to obtain the high-accuracy clear parts with surface roughness (Ra) of $0.01\ \mu\text{m}$ and without any optical defects. **Conclu-**

收稿日期: 2016-05-10; 修订日期: 2016-06-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51375476)

sion; the material removal theory is of guiding significance to practical surface grinding and polishing process.

Key words: organic glass; surface polishing; flexible polishing disk; surface material removal; track pitch

1 引 言

随着全球工业的飞速发展,对复杂曲面表面质量以及加工效率的要求越来越高,其精密制造技术成为各国关注的焦点。然而研抛加工仍主要依靠传统的手工研抛方法,费时费力,对操作人员的技能要求较高。机器人自动化研磨抛光,通过对控制方法和加工工艺的研究,能准确的控制研抛过程中的加工工艺参数,极大提高加工质量和效率。有机玻璃作为一种高分子聚合物,具有质轻、价廉、易于成型等优点,被广泛应用于仪器仪表零件、汽车车灯、光学镜片、航空机窗等。作为一种软性材料,在表面光整加工中,对施加在表面的研抛力更加敏感,相对于其他材料,对力的均匀性要求更高。尤其是飞机座舱盖作为复杂曲面零件,在研抛过程中,为了保证有机玻璃材料去除的均匀性,提高表面加工精度,对控制方法和加工工艺提出了更高要求。

为了满足复杂曲面精加工低成本,短周期和高精度的要求,各国学者对研抛加工的自动化,智能化进行了大量研究。从 20 世纪 90 年代开始,日本、德国、美国等工业发达国家开始将工业机器人应用于模具的自动化研抛^[1-3]。目前,大部分学者都是基于 Preston 假设来研究抛光过程中的材料去除^[4-7],研究涉及研抛控制方法,工艺优化等方面。在研抛自动化工艺优化方面,正交试验方法是分析主要工艺参数对材料去除率和表面粗糙度的影响规律的常用方法^[8]。结合赫兹接触理论对自动化研抛过程中接触压力分布进行分析研究,同时考虑曲面曲率变化对压力分布的影响,建立接触区域内压力分布模型^[9],然而赫兹接触理论并不适用于所有的接触类型,对于一些特殊的接触类型(如大变形接触)就需要重新进行分析研究。用磁流变抛光替代研磨工序并直接衔接磨削的新工艺流程,能有效的避免这类问题^[10]。此外,从运动学和几何学的角度出发^[11-12],分析主要

工艺参数对表面质量均匀性影响,是提高研抛后的表面质量的有效途径。在控制方法方面,设计包括运动规划和人机界面的完整机器人控制系统软件^[13],开发研抛机器人的控制系统对整个研抛过程至关重要^[14]。研抛控制系统能够实现对加工路径的有效跟踪和研抛的定压控制。将机器人离线路径规划与在线力控制结合^[15-16],精确控制材料的去除量,保证材料去除的均匀性。

从目前的技术来看,虽然复杂曲面精密加工已经取得了很大进展,但是在大型复杂曲面研抛方面还需要做大量研究。同时由于复杂曲面各个区域的曲率变化,抛光工具与工件曲面不能完全吻合也不利于工件表面质量的提高。针对目前工业领域所需零部件结构的复杂性,迫切需要研发集多种加工技术于一体的综合抛光技术,提高加工精度和加工效率。

本文通过分析曲面研抛过程中柔性抛光盘的工作特性,从理论上研究研抛接触区域研抛压力分布不均对材料去除深度的影响,建立了抛光盘研抛时的去除函数深度轮廓模型,通过试验仿真研究了可控研抛工艺参数对柔性抛光盘去除的影响规律,验证了所建立的去深度模型的正确性。

2 抛光盘工作特性分析

如图 1 所示为抛光盘与曲面工件表面接触简图。采用半径为 R 的抛光盘以一定的研抛压力和旋转速度对工件表面进行抛光。由于抛光盘主轴垂直于工件表面研抛时,抛光盘中心处材料去除近似为零,因此在实际研抛时,将抛光盘主轴与工件表面接触点法线设定成一定夹角 α 。其中抛光盘旋转角速度为 ω ,沿轴线施加的压力为 F ,机器人进给速度为 v_f ,接触区域法向力大小近似为:

$$F_n = F \cos \alpha \quad (1)$$

根据弹塑性力学理论及赫兹接触理论,可知

抛光盘与自由曲面的接触为三维椭圆赫兹接触,接触区域为椭圆形,因此,接触区域的压力分布也不是均匀分布,而是满足赫兹椭圆压力分布模型^[16]:

$$p(x, y) = -p_0 * \left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2 - \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}, \quad (2)$$

式中: p_0 为接触区域中心点处的最大接触压强,大小近似为:

$$p_0 = \frac{5F_n}{2\pi ab}, \quad (3)$$

其中: F_n 为接触区域法向合力, a 、 b 为接触椭圆区域长、短轴半径。

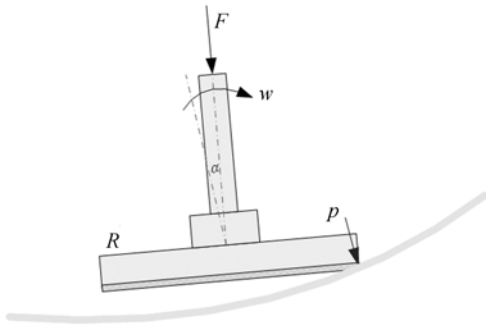


图1 抛光盘与曲面接触示意图

Fig.1 Contact type of polishing pad and surface

采用的抛光盘基体为弹性海绵橡胶,具有一定的柔顺性,当受力较小时就会产生大的变形,不能够满足弹塑性赫兹接触理论。基于上述对抛光盘特性的分析,首先应用有限元方法对抛光盘接触区域压力分布进行分析,仿真结果如图2所示。

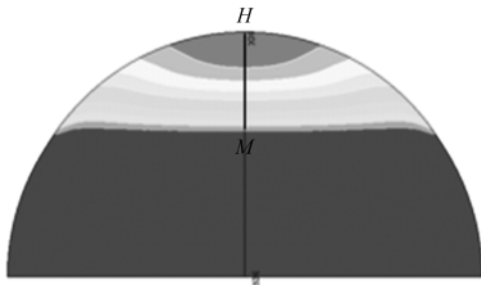


图2 接触区域压力分布仿真

Fig.2 Contact area pressure distribution simulation

由仿真结果可知,当接触压力较小时接触区域压力分布是不符合赫兹接触理论模型的,同时将接触压强沿路径MH进行映射,如图3所示,

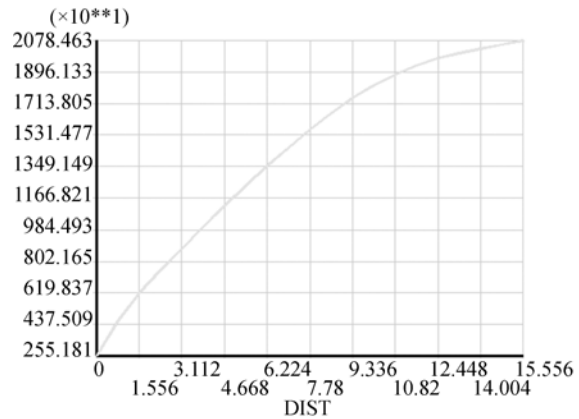


图3 将压强沿路径MH映射的曲线

Fig.3 Pressure mapping curve along the path of MH

并应用最小二乘法对数据拟合可得接触压强表达式为:

$$P(x) = a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \quad (0 \leq x \leq L), \quad (4)$$

式中: L 为沿 x 方向接触长度。

对于平面工件,接触长度 L 的大小仅与材料特性、研抛压力等有关。然而曲面研抛时,接触长度不仅与材料特性、压力有关,而且还与研抛曲面表面曲率有关。因此,基于对平面接触压力分布的分析,引入了压强系数 p_0 :

$$p_0 = \frac{c}{H_v} \rho, \quad (5)$$

曲面研抛时,接触区域内的压强分布可表示为:

$$P(x) = \frac{c\rho}{H_v} (a_2 x^2 + a_1 x + a_0) \quad (0 \leq x \leq L), \quad (6)$$

3 抛光盘材料去除深度轮廓建模

目前,描述研抛工具去除成型最常用的仍是Preston在1927年提出的Preston假设,即:研抛材料去除率与研抛压力和研抛工具线速度成正比:

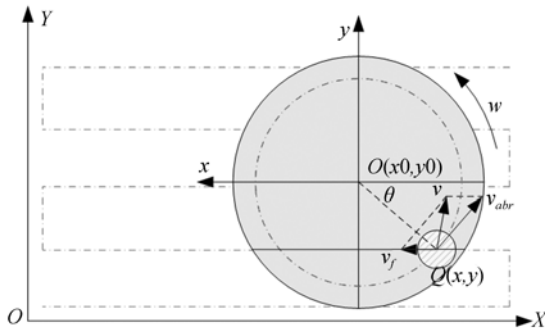
$$\frac{dh(x, y)}{dt} = k_{abr} \times p(x, y) \times v(x, y), \quad (7)$$

式中: k_{abr} 为比例常数; $p(x, y)$ 为接触区域研抛压力; $v(x, y)$ 为接触区域某一点的线速度。

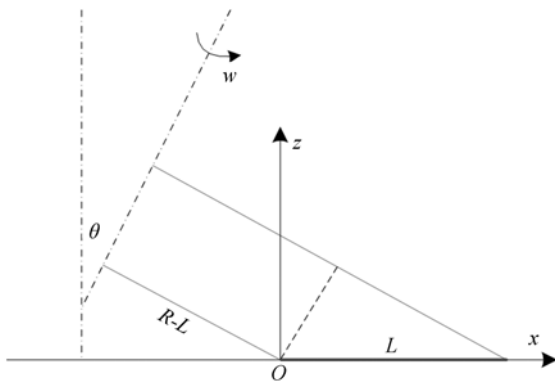
对式(7)两边同时积分并归一化可得抛光盘去除函数为:

$$h(x, y) = \int_0^t k_{abr} p(x, y) v(x, y) dt \quad (8)$$

以 Preston 理论和赫兹接触理论为基础,针对抛光盘沿直线轨迹研抛时的运动进行分析,并建立其去除函数模型。



(a)抛光盘沿直线扫描轨迹运动
(a) Polishing pad moved along scanning path



(b)抛光盘速度分析简图
(b) Velocity analysis diagram of polishing pad

图 4 抛光盘接触区域速度分布

Fig. 4 Contact area velocity distribution analysis of polishing pad

实际研抛加工过程,机器人末端抛光盘进给速度相对旋转速度较慢,其主要作用是改变加工路径,使研抛后表面纹理呈无序性和均匀性,对材料的去除均匀性有着一定的影响,但与旋转速度相比较小,对速度进行分析时可以忽略其对相对速度大小的影响:

$$v = \sqrt{v_{abr}^2 + v_f^2 - 2v_{abr}v_f \cos(\pi - \theta)} \quad (9)$$

图 4(a)所示为抛光盘沿 Zigzag 直线研抛轨迹抛光时接触区域速度分布。抛光盘沿直线进给研磨抛光,进给方向为 x 方向,抛光盘上接触区域内一点 $Q(x, y)$ 处由抛光盘旋转产生的线

速度为 v_{abr} ,抛光盘进给速度为 v_f ,则点 Q 处抛光盘和工件表面的相对线速度为 v_{abr} 与 v_f 的合成 v ,即:

$$v = \sqrt{v_{abr}^2 + v_f^2 - 2v_{abr}v_f \cos(\pi - \theta)} \quad (9)$$

由于进给速度相对旋转速度较小,研究过程中,可以忽略其对相对速度的影响,即:

$$v \approx v_{abr} = \omega \sqrt{R^2 - (R - L + x \cos \alpha)^2} \quad (10)$$

抛光盘旋转时,圆环上各点的速度近似相等,则把式(6)、(10)代入式(8)后,可得抛光盘的去除函数为:

$$h(y) = \frac{k\omega\rho}{v_f} \int_0^{\sqrt{R^2 - y^2 - R + L}} (a_2 x^2 + a_1 x + a_0) \cdot \sqrt{y^2 + (R - L + x \cos \alpha)^2} dx \quad (11)$$

式中: k 为与材料物理化学特性相关的系数,为常量纲; $y \leq \sqrt{R^2 - (R - L + x)^2}$

式(11)为垂直于进给方向研抛表面去除轮廓形状理论曲线方程。由式(11)可知,去除深度与抛光盘速度、法向力、曲面曲率和材料特性等有关。

4 研抛轨迹间距对材料去除深度的影响

抛光的机理是一个累积的过程去除。抛光的材料去除量与研抛力、相对线速度、抛光时间等有关。用扫描路径进行研抛加工时,位于相邻两条平行轨迹重叠区域的点的材料去除量是两次加工去除量的和。重叠区域与非重叠区域的工件表面材料去除轮廓不同,两者的差距越小,材料的去除均匀性越好,工件表面的加工精度越高。扫描路径研磨抛光,相邻路径最优的轨迹间距为:

$$f_{最佳} = \sqrt{-\frac{2b_0}{b_1}} \quad (12)$$

$f(\text{mm})$ 为轨迹间距。

在扫描路径下,通过仿真研究了轨迹间距与材料去除均匀性的关系,获得了研抛最优的轨迹间距,如图 5 所示。

仿真结果显示,当轨迹间距过大或者过小时,材料去除均匀性差,表面加工精度低,当轨迹间距为 $f = \sqrt{\frac{2b_0}{b_1}}$ 时,得到均匀的材料去除率和高精

度的加工表面。仿真结果与理论结果相一致。

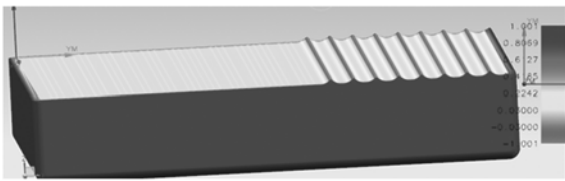


图 5 不同抛光轨迹间距下的材料去除仿真

Fig. 5 Simulation of material removal using different polishing pathspacing

5 试验与分析

5.1 实验方案

试验在 KUKA30-3 型 6 轴机器人研抛实验平台上进行,如图 6 所示。抛光盘通过六维力/力矩传感器与机器人末端进行连接,抛光盘的旋转速度由气动马达控制,额定转速可达 1 250 rpm。抛光盘直径为 50 mm,可以方便的黏结砂纸,砂纸为 3M 公司的碳化硅砂纸(磨粒直径 $60 \mu\text{m}$),磨粒分布均匀,排列紧密。



图 6 透明件加工

Fig. 6 Transparent workpiece grinding process

分别以平面和曲面透明件工件的研抛为例,研究沿直线扫描的等行间距轨迹研抛时研抛压力、抛光盘旋转速度和进给速度对平面和曲面透

明件表面去除深度轮廓形状的影响规律。

5.2 实验结果与分析

研抛后,采用超声测厚仪测量工件表面垂直于抛光轨迹方向上等间距点的去除深度值,并拟合绘制相应的截面轮廓曲线,如图 8~10 所示。图 7 所示为抛光盘主轴在不同的倾斜角度下,研抛压力与抛光盘下压深度之间的关系,随着抛光盘下压深度的增大,抛光力也随之增大,近似成二次多项式分布,验证了研抛压力与抛光盘压缩深度之间的非线性关系。

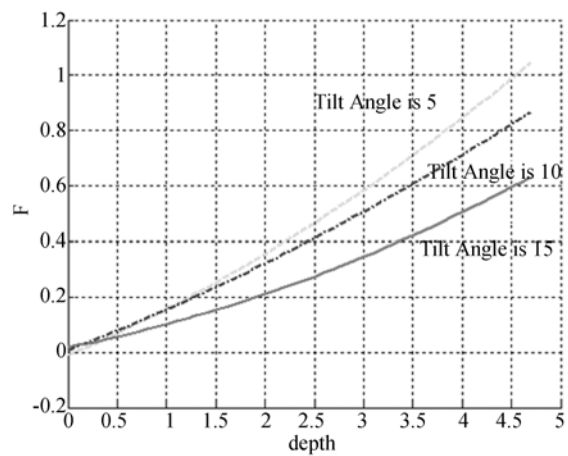


图 7 研抛压力与下压深度的关系

Fig. 7 Relation curve of polishing press and depth

图 8~10 所示分别为垂直于研抛轨迹方向表面去除轮廓随研抛压力、旋转速度和进给速度的变化曲线。

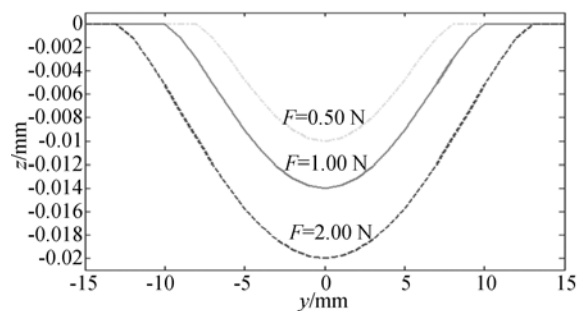


图 8 研抛压力对表面去除轮廓的影响

Fig. 8 Removal depth of surface for various F

由图 8~10 仿真试验结果可以看出:研抛工具的去除深度和宽度随研抛压力的增大而变深、变大;去除深度随工具转速的增大而增大,而去除

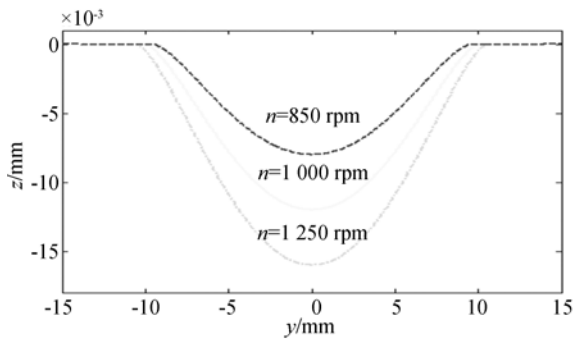


图 9 研抛主轴转速对去除轮廓的影响

Fig. 9 Removal depth of surface for various n

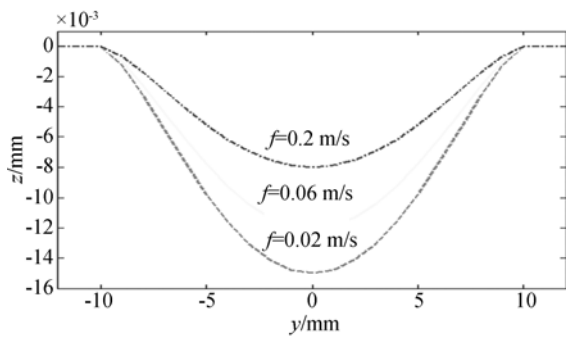


图 10 机器人进给速度对去除轮廓的影响

Fig. 10 Removal depth of surface for various v_f

宽度几乎不变;去除深度随机器人进给速度的增大而减小,而去宽不变。仿真试验结果需要实际的研抛实验进行验证,但可以指导实际加工参数的设置。

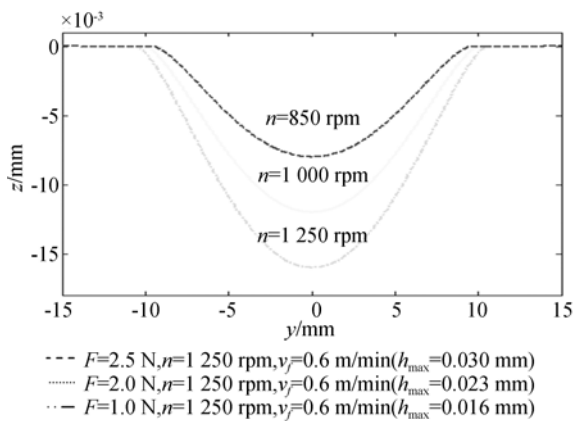


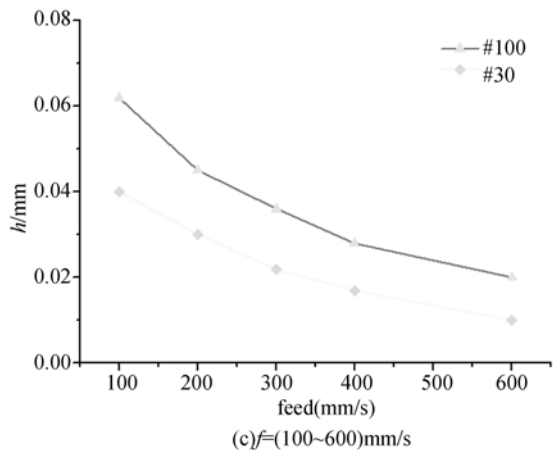
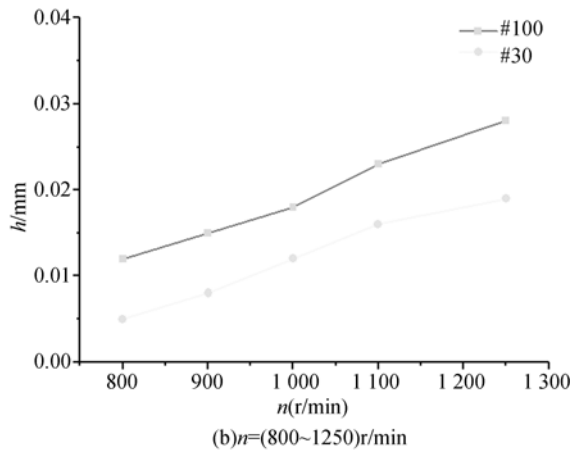
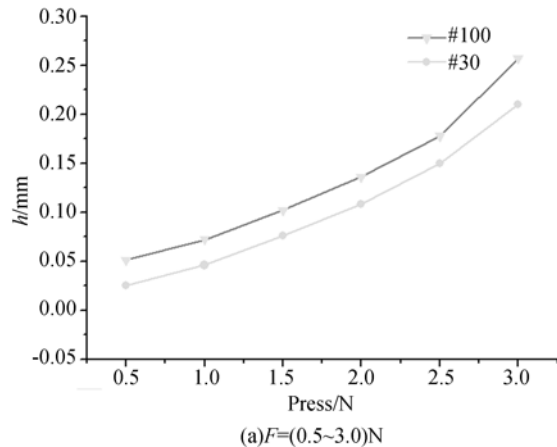
图 11 不同压力试验下去除轮廓曲线

Fig. 11 Experimental measured results for various F

图 11 所示分别为研磨后应用三坐标测量仪检测的工件表面垂直于进行方向的去除轮廓曲线。虚线之间为加工后的工件表面轮廓曲线,曲

线的波动是由于被研抛材料较软;虚线外波动是由于工件表面的平整度的原因所致。由实际研磨加工试验检测结果与理论去除轮廓曲线模型对比可知二者是相吻合的,即验证了理论模型的正确性。

应用等间距扫描研抛轨迹,分别在平面和曲面透明件上进行研磨和抛光加工试验,加工参数分别为 $F=1.5\text{ N}, n=1\ 250\text{ rpm}, v_f=0.5\text{ m/min}$ 。



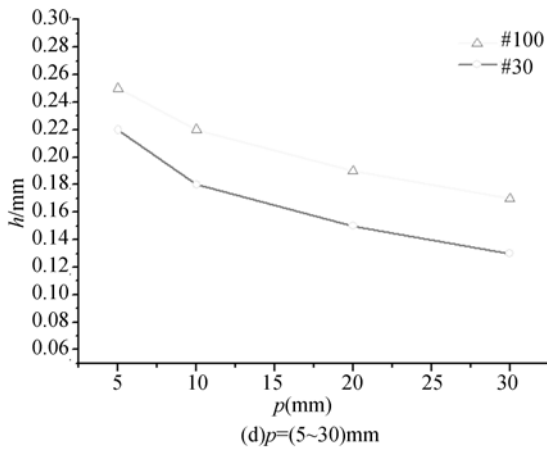


图 12 研抛工艺参数对材料去除深度的影响

Fig. 12 Material removal depth effect of polishing process parameters

如图 12(a)、(b)、(c)和(d)所示分别为单因素实验条件下,不同的研抛压力、工具转速、进给速度、研抛轨迹行间距循环加工 8 次后的表面材料去除深度变化曲线。其中,砂纸磨粒直径为 $30\ \mu\text{m}$,抛光盘主轴倾斜角度为 10° ,冷却液为水,试验样件为曲率变化缓慢的透明件。

由图 12 可以看出:在除研抛压力以外其他研抛参数一定的情况下,工件表面材料去除深度随研抛压力的增大而增加;在研抛压力相同的情况下,磨粒直径越大,材料去除深度也就越大,去除能力也就越强。在除工具转速以外其他研抛参数一定的情况下,工件表面材料去除深度随工具转速的增大而增加;转速相同的情况下,磨粒越粗,材料去除深度越大,去除能力也越强。在除进给速度以外其他研抛参数一定的情况下,工件表面材料去除深度随机器人末端进给速度的增加而减小;机器人进给速度相同的情况下,磨粒越粗,材料去除深度越大,去除能力也越强。在除研抛轨迹间距以外其他研抛参数一定的情况下,工件表面材料去除深度随研抛轨迹间距的增大而减小;轨迹间距相同,磨粒直径越大,去除能力越强,材料去除深度也就越大。

研抛压力是影响材料去除深度的主要因素,图 13 所示为不同的研抛压力对工件表面粗糙度的影响规律曲线。应用光学轮廓仪对工件表面进行检测,图 14 所示为研磨后透明件表面形貌检测图。

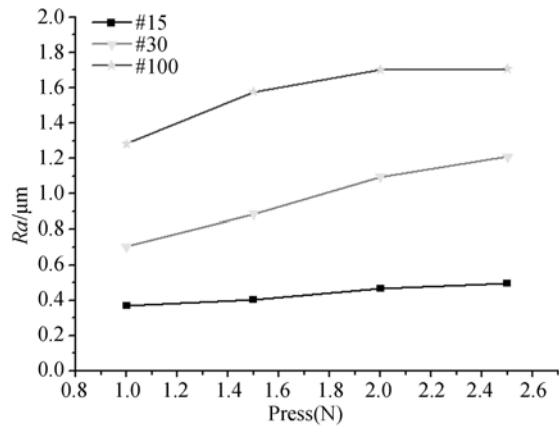
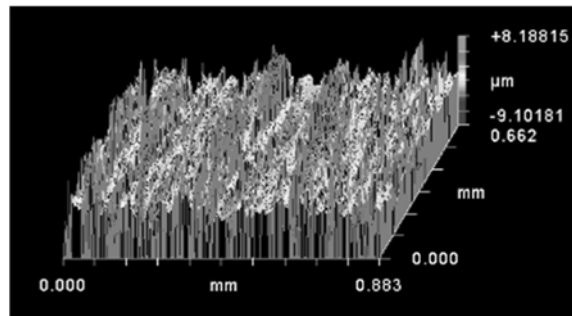
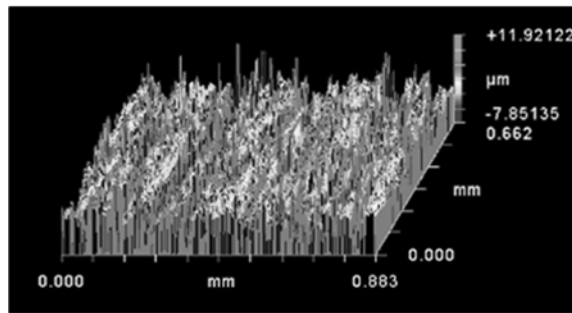
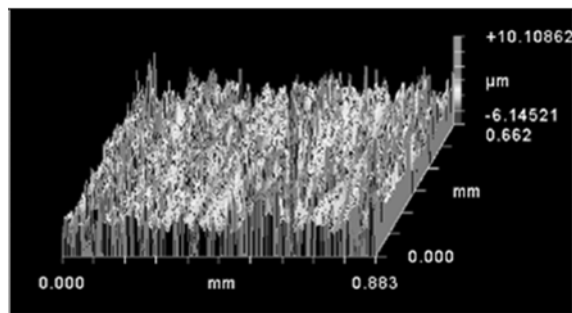
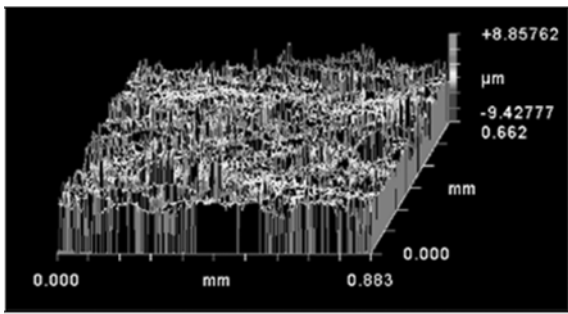


图 13 透明件表面粗糙度随研抛压力的变化

Fig. 13 Surface roughness changing curve with polishing pressure

(a) $F=2.5\ \text{N}$ (b) $F=2.0\ \text{N}$ (c) $F=1.5\ \text{N}$



(d) $F=1.0\text{ N}$

图 14 研磨后的透明件表面形貌

Fig. 14 Surface morphology after grinding of transparent part

由图 13 和图 14 分析可知,不同磨粒条件下,研抛压力越大,工件表面材料去除深度越大,表面粗糙度也就越大,表面材料去除的均匀性也就越差。因此,合适的研抛压力有利于保证表面加工精度和质量。

对平面和曲面透明件进行研抛加工试验,选取的加工参数为:研抛工具(圆形橡胶抛光盘和羊毛毡)、抛光膏(3M 抛光液 PN81235)、研抛压力(1 N)、主轴转速(1 250 r/min)、进给速度(600 mm/s)、主轴倾角(10°)、轨迹间距(10 mm)。研抛轨迹选择等间距扫描轨迹,对工件进行交错抛光加工。

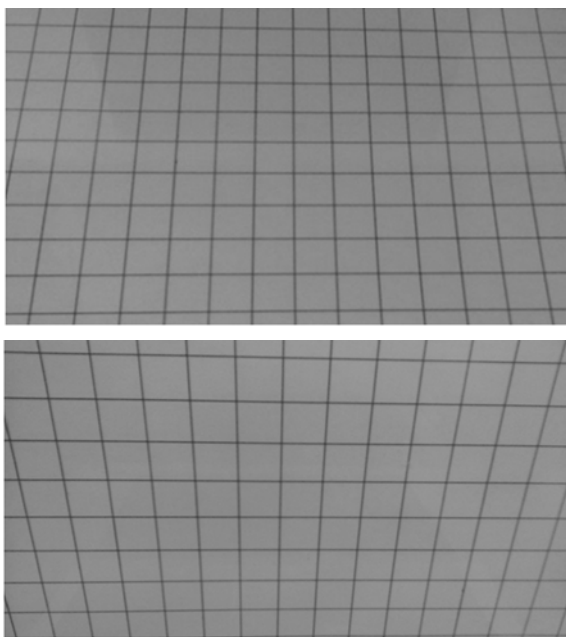
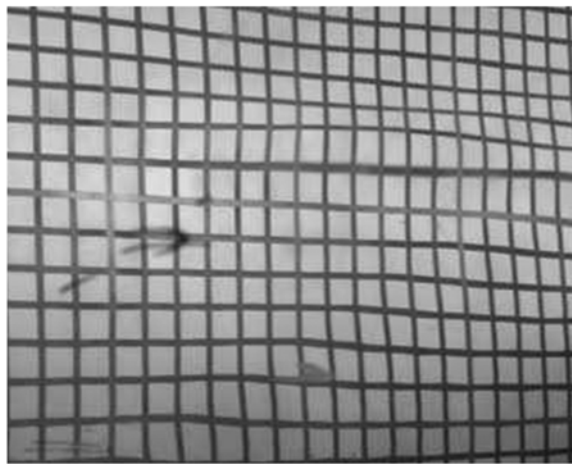


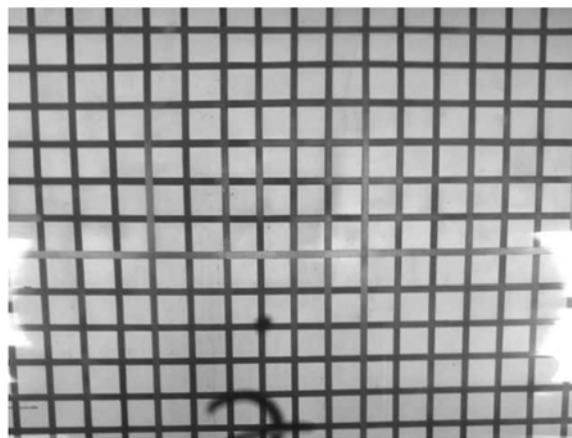
图 15 研抛后的平面透明件

Fig. 15 Polished flat transparent workpiece

图 15 所示为研抛后的平面透明件应用方格检测方法从不同角度拍摄的图片,图片中无变形方格,并且方格清晰。图 16(a)所示为研抛后存在光学缺陷的曲面透明件,清晰地看到变形方格,但透光率较好。图 16(b)所示为研抛后无光学缺陷的曲面工件,无变形方格存在,且方格清晰。



(a)研抛后存在光学缺陷的曲面透明件
(a)The polished free-form surface transparent workpiece with Optical defects



(b)研抛后无光学缺陷的曲面透明件
(b)The polished free-form surface transparent workpiece without Optical defects

图 16 研抛后的曲面透明件

Fig. 16 Polished free-form surface transparent workpiece

应用光学轮廓仪对加工后的透明件进行检测,图 17(a)和图 17(b)所示分别为平面和曲面透明件抛光后的检测结果图。由结果可知,加工后的透明件表面已达较高精度,表面粗糙度达到 $Ra=0.01\ \mu\text{m}$ 级别,满足了加工结果的各项需求。

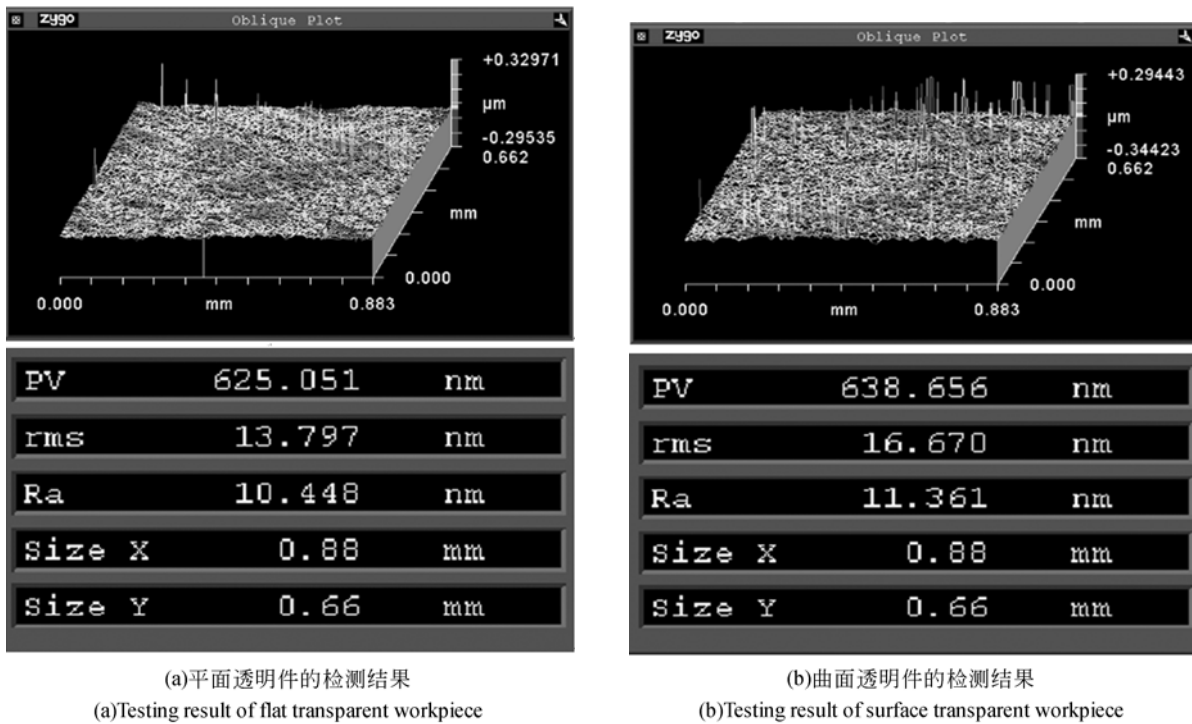


图 17 抛光后的检测结果

Fig. 17 Testing result after polishing

6 结 论

本文基于弹塑性力学理论和赫兹接触理论,分析了柔性抛光盘的工作特性,应用有限元方法进行仿真分析,建立了抛光盘在接触时的压力分布模型。针对透明件的研抛过程,基于 Preston 方程建立了抛光盘研磨抛光透明件时的材料去除轮廓方程。在扫描路径下,分析了轨迹间距与材

料去除均匀性之间的关系,并通过仿真获得了最优的轨迹间距。通过仿真和试验的方法分析了不同的研抛加工参数分别对去除轮廓的影响规律,结果表明:去除深度随研抛压力、旋转速度的增加而增大,随进给速度的增大而减小。通过实际透明件研抛试验加工,获得了无光学缺陷,表面粗糙度达到 $R_a=0.01 \mu\text{m}$ 的平面和曲面透明件,验证了理论模型的正确性,同时也证实了研究的可行性和潜在的使用价值。

参考文献:

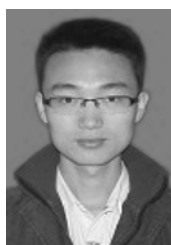
- [1] TAKEUCHI Y, ASAKAWA N, GE D F. Automation of polishing work by an industrial robot [J]. *JSME International Journal*, 1993, 36 (4): 556-561.
- [2] FUSAOMI N, SHO Y, AKIMASA O, et al.. Development of CAM system based on industrial robotic servo controller without using robot language [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2013, 29: 454-462.
- [3] DOMROES F, KREWET C, KUHLLENKOETTER B. Application and analysis of force control strategies to deburring and grinding [J]. *Modern Mechanical Engineering*, 2013, 3: 11-18.
- [4] DONG Z C, CHENG H B. Study on removal mechanism and removal characters for SiC and fused silica by abrasive diamond pellets [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2014, 85: 1-13.
- [5] 李静,赵吉宾,关丽荣,等. 球形抛光工具的研抛工艺研究[J]. *航空精密制造技术*, 2015, 51(6): 5-8.
- [6] LI J, ZHAO J B, GUAN L R, et al.. Process research of spherical polishing tool [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2015, 51 (6): 5-8. (in Chinese)
- [6] WANG G L, WANG Y Q, XU Z X. Modeling and analysis of the material removal depth for stonepol-

- ishing [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(5): 2453-2463.
- [7] 唐瓦, 邓伟杰, 郑立功, 等. 离子束抛光去除函数计算与抛光实验[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1): 31-39.
TANG W, DENG W J, ZHENG L G, *et al.*. Calculation of removal function of ion beam figuring and polishing experiment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 31-39. (in Chinese)
- [8] 樊成. 光学曲面确定性抛光的面型精度控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
FAN C. *Investigation on Control of Surface Form Accuracy for Deterministic Polishing of Optical Part Surfaces* [D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)
- [9] ROSWELL A, Xi F F, LIU G J. Modelling and analysis of contact stress for automated polishing [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, 46: 424-435.
- [10] 石峰, 戴一帆, 彭小强, 等. 磁流变抛光消除磨削亚表面损伤层新工艺[J]. *光学精密工程*, 2010, 01: 162-168.
SHI F, DAI Y F, PENG X Q, *et al.*. Removal of subsurface damage in grinding by magnetorheological finishing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 01: 162-168. (in Chinese)
- [11] 黄玉钊. 六自由度打磨机器人张量积曲面轨迹规划仿真[J]. *计算机仿真*, 2015, 32(7): 348-351.
HUANG Y C. Trajectory Planning Simulation of Six Freedom Degrees Polishing Robots Tensor Product Surface [J]. *Computer Simulation*, 2015, 32(7): 348-351. (in Chinese)
- [12] 张恩忠, 赵继, 冀世军, 等. 基于正交与插值算法的精密抛光平台综合误差建模与补偿[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(12): 3422-3429.
ZHANG E ZH, ZHAO J, JI SH J, *et al.*. Comprehensive error modeling and compensation for precision polishing platform based on orthogonal experiment and interpolation algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(12): 3422-3429. (in Chinese)
- [13] 刘志新. 研抛大型自由曲面微小机器人控制系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
LIU ZH X. *Research on a Small Robot Control System for Polishing of Large Freeform Surface* [D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- [14] 李疆. 多轴机器人运动控制系统的研究与开发[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
LI J. *Research and Development on The Control System of Multi-axis Robot* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)
- [15] 杨林, 赵吉宾, 李论, 等. 有机玻璃研磨抛光机器人力控制研究[J]. *机械设计与制造*, 2015, 04: 105-107.
YANG L, ZHAO J B, LI L, *et al.*. A study of grinding and polishing robot force control for plexiglass [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2015, 04: 105-107. (in Chinese)
- [16] 张雷, 袁楚明, 周祖德, 等. 模具曲面抛光时表面去除的建模与试验研究[J]. *机械工程学报*, 2002, 38(12): 98-102.
ZHANG L, YUAN CH M, ZHOU ZH D, *et al.*. Modeling and experiment of material removal in polishing on mold curved surfaces [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(12): 98-102. (in Chinese)

作者简介:



赵吉宾(1970—)男, 山东济南人, 研究员, 博士生导师。1996年于合肥工业大学获得学士学位, 2000年于山东大学获得硕士学位。2004年于中国科学院获得博士学位。主要研究方向为激光加工技术、视觉测量技术、智能制造技术等方面。E-mail: jbzhaosia@sia.cn



尹东(1990—)男, 山东泰安人, 硕士研究生。2014年于青岛科技大学获得学士学位, 主要研究方向为机器人自动化研抛技术、机器人运动轨迹规划。E-mail: yindong@sia.cn