

文章编号: 0253-2239(2009)03-0811-07

空间光学元件超精密气囊抛光去除特性研究

李洪玉¹ 张 伟¹ 于国或²

(¹ 哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001; ² 英国国家超精密光学表面实验室, UK LL17 0JD)

摘要 为得到空间光学元件超光滑表面,对超精密气囊抛光方法的去除特性进行了理论和实验研究。以 Preston 方程为基础,应用运动学原理建立了气囊抛光“进动”运动的材料去除模型,针对抛光气囊工具的物理特性,按照 Hertz 接触理论对去除模型进行了修正;利用计算机仿真的方法,分析了几个主要工艺参数对“进动”抛光运动去除特性的影响规律,并在超精密光学数控抛光机上进行了正交实验;仿真和实验结果吻合较好,总结得到 4 点气囊抛光方法中重要的结论,给出了“进动”角与压缩量的取值范围,以此得到了面型精度 RMS 值为 0.024λ ($\lambda = 0.6328\mu\text{m}$) 的超光滑表面,为开展光学元件气囊抛光工艺研究提供依据。

关键词 空间光学;气囊抛光;去除特性;Preston 方程;Hertz 接触理论

中图分类号 TH161;TQ171 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092903.0811

Removing Characteristics of Ultraprecise Bonnet Polishing on Spatial Optics Elements

Li Hongyu¹ Zhang Wei¹ Yu Guoyu²

¹ *Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China*

² *Ultra Precision Surfaces, OPTIC Technium, Ffordd William Morgan, StAsaph Business Park, North Wales, LL17 0JD, UK*

Abstract Theoretical and experimental research on removing characteristics of ultraprecise bonnet polishing methods are made to get an ultra-smooth surface for optical elements. A material removing model of bonnet polishing processional motion is established according to kinematic principle based on Preston equation. The model is modified in terms of Hertz contact theory using the physical characteristics of polishing bonnet tools. The affect of several main technological parameters to removing characteristics of processional polishing motion is analyzed by means of computer simulation, and an orthogonal test is made on an ultraprecise numerical control polishing machine. The simulation results fit well with test results and four important conclusions on bonnet polishing technology are obtained. The span of processional angle and decrement is provided and an ultraprecise smooth surface with $\text{RMS} = 0.024\lambda$ figure precision is achieved, which provides theoretical foundation to research on bonnet polishing technology of optical elements.

Key words space optics; bonnet tool polishing; removal function; Preston function; Hertz contact theory

1 引 言

空间光学技术的快速发展,光学非球面元件越来越多地应用在光学系统中^[1,2],这对光学元件的加工技术提出了更加严格的要求,非球面元件的制造水平直接影响到一个国家空间光学技术的发展,

近年来,新原理的研磨、抛光方法不断出现^[3~5]。超精密气囊抛光技术是 20 世纪 90 年代伦敦光学实验室提出的一种新的光学加工方法^[6],它通过计算机控制抛光气囊相对工件的压力、速度及驻留时间实现对光学元件的抛光加工,最终得到满足精度要

收稿日期: 2008-09-17; 收到修改稿日期: 2008-10-17

基金项目: 国家 863 计划资助课题。

作者简介: 李洪玉(1978—),男,讲师,博士研究生,主要从事光学元件超精密加工与检测等方面的研究。

E-mail: hongyuli@hit.edu.cn

导师简介: 张 伟(1962—),男,教授,博士生导师,目前主要从事空间光电信息获取、空间目标测量、光学元件超精密加工与检测等方面的研究。E-mail: wzhang@hit.edu.cn

求的非球面面形,解决了传统数控抛光方法中抛光头不能很好地和工件吻合的缺点,是一种高效、高精度的确定性加工方法,尤其适用于曲面加工。

从 90 年代开始,伦敦光学实验室 D. D. Walker 等人对气囊抛光方法进行研究^[7~10],主要包括气囊抛光的驻留时间控制算法、抛光路径规划以及气囊抛光工艺可扩展性研究,并取得了一定成果,但目前该项技术尚处于发展阶段,有关气囊抛光机理和去除特性的研究未见报道。气囊抛光去除特性的确定是驻留函数求解算法的基础^[11],也是影响加工效率和误差收敛的关键因素,本课题组近年来在一台数控气囊抛光机上展开研究,取得了一定的进展。本文基于 Preston 假设和 Hertz 接触理论,通过数值仿真与实验相结合的方法,对气囊抛光去除特性进行了研究。

2 气囊抛光去除模型的建立

光学表面抛光受多种因素影响,在一定的假设条件下,可以用 Preston 方程描述气囊抛光材料去除量与各种工艺参数的关系^[12]。Preston 方程中,将速度和压力以外的一切因素的作用全部归为一个比例常数,这样就建立了材料去除量、压力和瞬时速度的线性关系。

$$dz/dt = k \cdot v \cdot p \quad (1)$$

式中 k 为比例常数,它与被抛光材料、抛光膜层材料、抛光粉种类、抛光液浓度、PH 值以及抛光温度有关; v 为工件表面某一点的瞬时抛光速度, p 为抛光压力, v 和 p 都是关于位置坐标 (x, y) 和时间 t 的函数。

定义去除函数 $R(x, y)$ 为不作移动时抛光气囊在单位时间 T 内的平均材料去除量,即

$$R(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta Z_r(x, y, t) \cdot dt \quad (2)$$

式中 $\Delta Z_r(x, y, t)$ 为单位时间内的材料去除量。当压力及其它工艺条件不变的情况下,抛光气囊的去除函数与相对运动速度 v_p 成正比,所以求得抛光盘覆盖区域内各点的相对运动速度 v_p 随转角 θ 的变化规律之后,在公转一周内对其积分后即可得到抛光气囊覆盖区域内材料去除量的分布函数,也就是抛光气囊的去除函数。公转周期为 $T = 2\pi/\omega_0$,加工过程中压强 p 均匀恒定,因此去除函数为

$$R(r) = \frac{1}{T} \int_0^T k \cdot p(x, y) \cdot v(x, y) = \frac{kp}{2\pi} \int_{-\theta_0}^{\theta_0} v(x, y) \cdot d\theta \quad (3)$$

2.1 去除特性的数学建模

图 1 是抛光头“进动”示意图,图 2 为抛光接触区内任意一点的速度合成,抛光气囊绕自身轴线的旋转速度为 ω_0 ,绕工件法线的旋转速度为 ω , O 点为圆形抛光接触区的圆心, $P(x, y)$ 点为抛光接触区内任意接触点,进动角为 ρ ,设气囊压缩量为 d ,抛光气囊的半径为 R ,由进动运动的几何关系,可得抛光接触面内的速度分量。

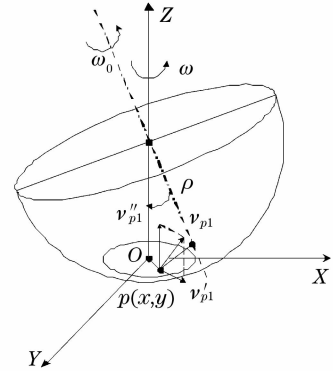


图 1 抛光头“进动”的空间运动示意图

Fig. 1 Sketch of space movement of polishing

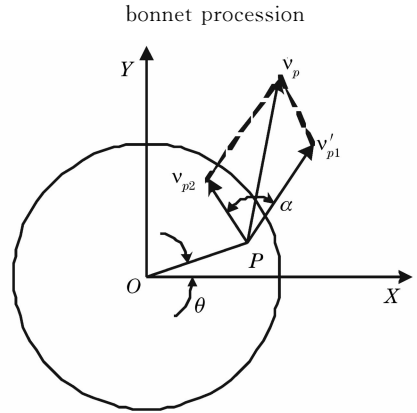


图 2 抛光接触区内任意点的速度关系

Fig. 2 Velocity relation of any point in polishing

$$v'_{p1} = 2 \cdot \cos\rho \cdot (R - d)^{-1} \times \sqrt{s \cdot (s - \alpha) \cdot (s - \beta) \cdot (s - \gamma)} \cdot \omega_0, \quad (4)$$

式中

$$\begin{aligned} \alpha &= [(R - r)^2 + x^2 + y^2]^{1/2}; \\ \beta &= (R - d) \cdot (\cos\rho)^{-1}; \\ \gamma &= \{y^2 + [(R - d) \cdot \tan\rho - x]^2\}^{1/2}; \\ s &= \frac{1}{2} \alpha \cdot \beta \cdot \gamma. \end{aligned} \quad (5)$$

$$v_{p2} = r \cdot \omega$$

$$v_p = \sqrt{(v'_{p1})^2 + (v_{p2})^2 + 2\cos\alpha \cdot v'_{p1} \cdot v_{p2}} \quad (6)$$

将(6)式代入式(3)式,即可利用计算机仿真得到气

气囊抛光的去除函数,对于去除函数,最重要的是它的形状, k 值主要影响去除函数的幅值,反应去除效率的高低,进行计算机仿真时通过归一化处理可以不必考虑 k 值的大小。

2.2 Hertz 接触理论对去除模型的修正

以上去除模型的推导是假设气囊为理想的气囊,即与工件接触时,对工件表面的压力可看作是气囊的充气压力,接触区的压强均匀分布,但实际上,所使用的气囊从物理机械特性上分析,不能看作是理想气囊。因此,气囊对抛光接触区的压力由材料本身弹性变形和充气压力两者共同作用产生。可以将充气的气囊模拟为弹簧系统,不充气时的弹性系数与其物理机械特性有关;充气的气囊弹性系数不但与其物理机械特性有关,还与充气压力的大小有关。因此,在不同的充气压力下,弹性系数是不同的。对于相等的压缩量,在不同的充气压力下,对抛

光接触区所施加的载荷也不同,当压缩量不大的情况下,可以按照 Hertz 接触理论求解抛光接触区的压力分布^[13,14],该理论是由 Hertz1882 年首先提出的,压力分布如下

$$p(x, y) = p_0 \left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}\right)^m \quad (7)$$

式中平均压力 $p_0 = (n + 1)ke/\pi ab$; 抛光面积被认为是椭圆形接触区的边界所围成的区域,由接触区的椭圆方程 $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$ 确定; m 为压力分布系数; 于是气囊抛光过程中, Preston 方程可以修正为

$$H(r, \theta) = \int K_p \frac{(m + 1)ke}{\pi ab} \times \left(1 - \frac{r^2 \cos^2(\theta)}{a^2} - \frac{r^2 \sin^2(\theta)}{b^2}\right)^m V(r, \theta) \cdot dt \quad (8)$$

m 可通过实验估算,一般情况下 m 取 1,当 $r = 0$, $\theta = 0$ 时可通过实验得到接触区的面积和中心去除深度,从而得到 K_p 。

表 1 实验条件

Table 1 Experiment conditions

Workpiece material	Diameter of bonnet	Charged pressure of bonnet	Cover material of polishing caput	Mean particle size of polishing liquid	Relative concentration of polishing liquid	Test time of each point	Indoor temperature
BK7	40mm	1bar	polyurethane	2 μ m	1.03	10s	20 $^{\circ}$ C

3 气囊定点抛光去除特性分析

为分析气囊“进动”抛光的去除特性,首先按照 Hertz 接触理论对定点抛光去除特性进行研究。假设图 1 中,抛光头只做旋转运动,即 $\omega = 0$ 。通过在一台超精密气囊抛光机上进行实验,可以确定(7)式中的 a 和 b ; 实验条件如表 1 所示。考虑气囊抛光机各自由度的实际范围,实验中分别取 $\rho = 5^{\circ}, 15^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}$ 。图 3 为定点加工的实验测量结果,不同角度下椭圆抛光区的尺寸如表 2,从结果可以看出,定

点抛光时,去除函数为一椭圆区域,这和 Hertz 接触理论是吻合的;图 4 是不同角度定点加工的去除特性的实验曲线, ρ 越小,去除函数越不均匀。

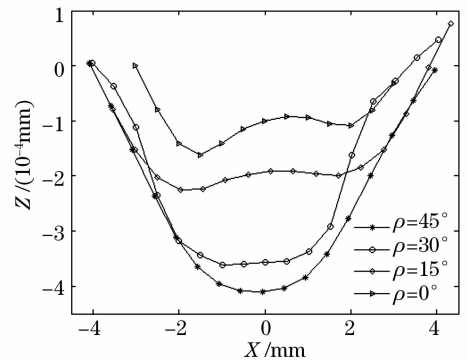


图 4 定点抛光去除特性的实验曲线

Fig. 4 Experimental curve of fixed-point polishing removing characteristics

表 2 不同角度下椭圆抛光区的尺寸

Table 2 Size of elliptical polishing zone at different angle

angle	5 $^{\circ}$	15 $^{\circ}$	30 $^{\circ}$	45 $^{\circ}$
a /mm	6.1	7.9	8.1	8.0
b /mm	4.8	5.7	7.2	6.9

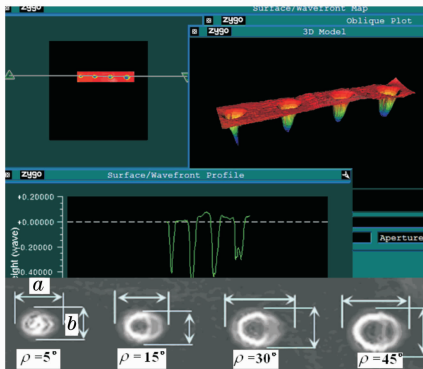


图 3 定点抛光的实验测量结果

Fig. 3 Measurement results of fixed-point polishing

确定了不同 ρ 值椭圆抛光区的 a 和 b 的大小后,由去除特性的数学推导结果,可以通过计算机仿真

的方法分析定点抛光的去除特性,数值仿真时进行了归一化处理。假设抛光气囊直径为 40 mm,压缩量为 0.3 mm,转速为 500 r/min,图 5 是定点抛光

去除特性的仿真结果,可以看出:进动角为零时,去除函数的中心为零,随着进动角的增大,去除函数的中心与边缘趋于均匀。

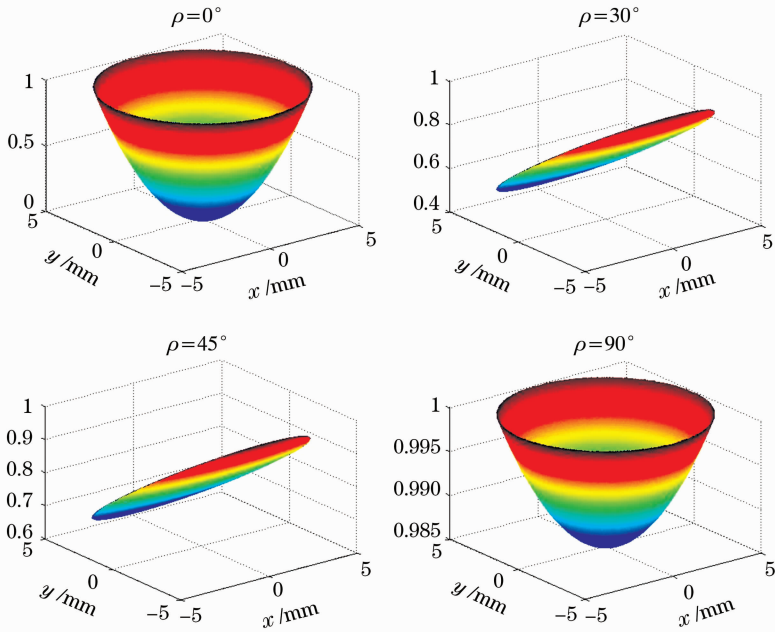


图 5 不同进动角定点抛光去除特性的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of fixed-point polishing removing characteristics

4 “进动”抛光去除特性的仿真与实验

4.1 仿真分析

通过以上对定点抛光的分析,可以更好地研究

“进动”抛光的去除特性。通过实验确定相同条件下定点抛光椭圆抛光区的 a 和 b , 结合以上建立的气囊“进动”抛光的数学模型,通过 matlab 软件,对气

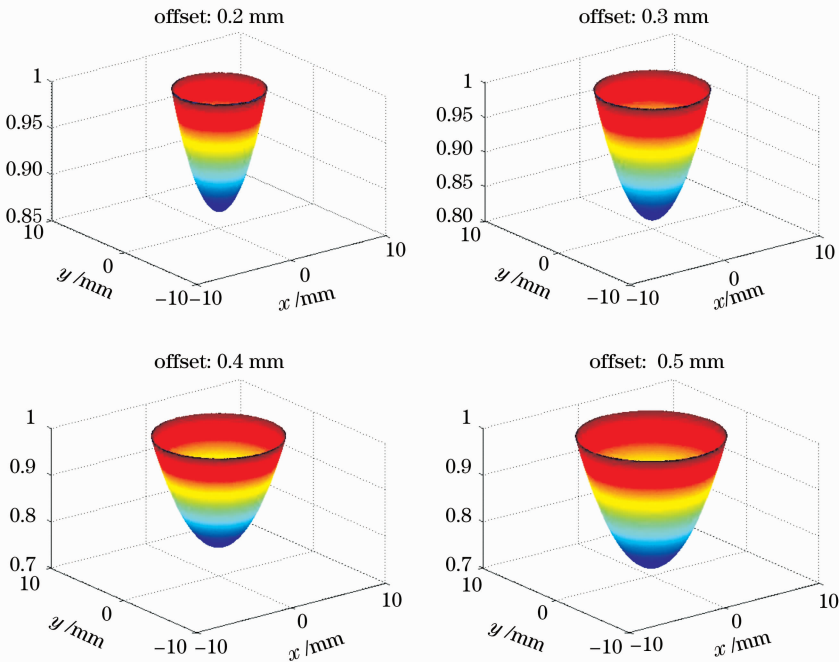


图 6 进动角为 15°时,不同压缩量的去除特性

Fig. 6 Removing characteristics of different decrement at 15° procession angle

囊“进动”抛光运动进行仿真。图 6 是进动角为 15° 时,不同压缩量的去除特性,假设抛光气囊直径为 40 mm,转速为 500 r/min,仿真结果进行了归一化处理。由于高斯函数的特殊性质^[15],去除特性越接近高斯分布,越有利于面形平滑。图 7 给出了压缩量为 0.3 mm 的去除函数仿真结果与高斯函数的比较,可以看出,仿真得到的去除函数与理想的高斯函数非常接近。仿真结果表明可以看出,“进动”运动抛光去除函数是近似的高斯分布,避免了传统抛光运动去除函数中心出现高频峰值的缺点,进动角越大去除函数越均匀;气囊过程中,压缩量越大去除量越大,但越大中心与抛光边缘去除量相差也越大,越容易产生高频信息。

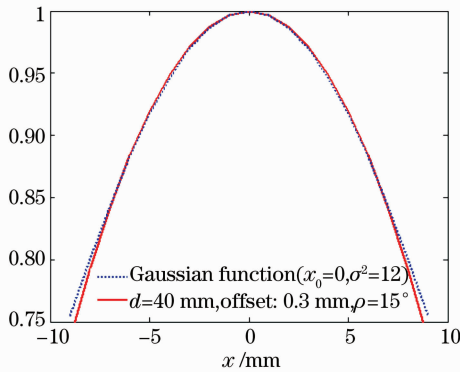


图 7 去除函数仿真结果与高斯函数的比较

Fig. 7 Comparison of simulation results of removing function and Gauss function

4.2 实验研究

针对以上数值仿真结果,进行了气囊“进动”抛光工具去除特性的正交实验,为了使结果可靠,实验在同一块工件上进行,实验条件见表 1。

图 8 是去除特性正交实验测量结果,结果中 5×5 个测试点的每一行为同一进动角的去除特性,

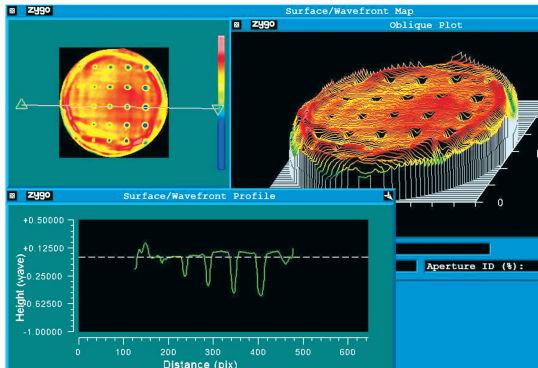


图 8 去除特性正交实验测量结果

Fig. 8 Orthogonal test results of removing characteristics

每一列为同一压缩量的去除特性,由于抛光机本身自由度的限制,实验中进动角小于 25° 。

图 9 是相同条件下不同进动角的去除特性实验曲线,可以看出,进动角越大,去除特性越均匀,当进动角超过 20° 时,去除特性曲线渐渐畸变,这是因为进动角越大,气囊的变形越严重,造成对材料的去除越不均匀,考虑到抛光头的实际几何形状与在机器各自自由度的范围,进动角取 $10^\circ \sim 20^\circ$ 较为合适;图 10 是相同条件下不同压缩量的去除特性实验曲线,可以看出,压缩量从 0.1 mm 至 0.5 mm 时,去除量逐渐变大,当压缩量超过 0.5 mm 后,去除特性曲线发生畸变,并且去除效率有所降低,一方面是由于压缩量超过一定范围后导致气囊变形,另一方面,增大压缩量气囊弹性变形产生的压力也随之增大,有效抛光的抛光份颗粒会随之减少。因此,在选用相同条件下进行加工时,压缩量的选则不应超过 0.5 mm。图 11 是实验所得去除函数与理想高斯函数的比较,实验曲线的气囊压缩量为 0.3 mm,进动角为 15° ,可以看出,气囊抛光的去除函数与理想的高斯分布比较接近。

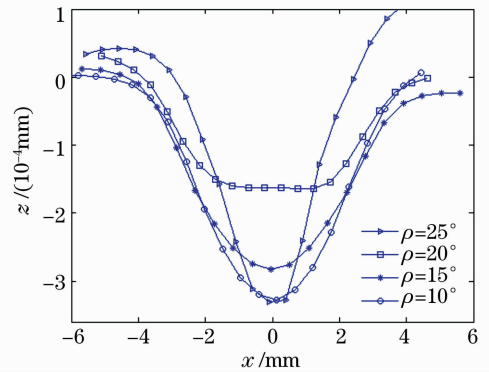


图 9 不同进动角去除特性的实验曲线

Fig. 9 Experimental curves of removing characteristics at different processional angles

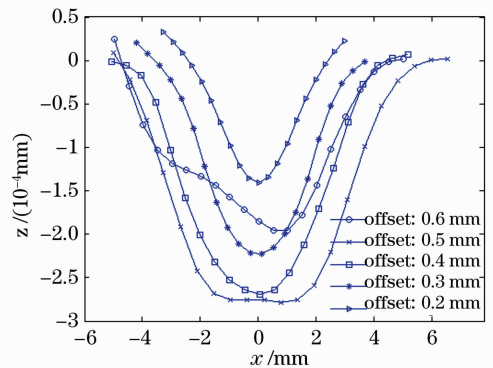


图 10 不同压缩量的去除特性的实验曲线

Fig. 10 Experimental curves of removing characteristics at different decrements

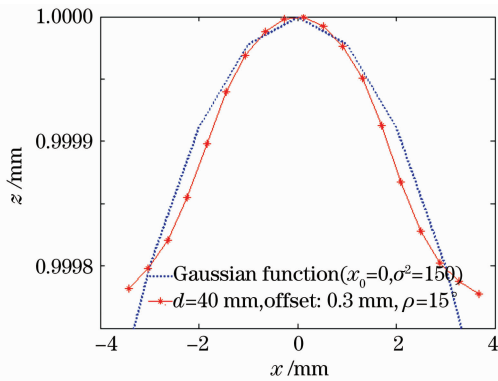


图 11 去除函数实验结果与高斯函数的比较
Fig. 11 Comparison of experimental results of removing function and Gauss function

依据以上所得结果,对一块直径 150 mm 的 BK7 玻璃平面进行了抛光实验,进动角取 15°,压缩量为 0.3 mm,其他实验条件同表 1,抛光过程如图 12 所示,经过大约 79 min 的抛光,面形精度 RMS 值达到 0.024 λ,抛光实验测量结果如图 13 所示。

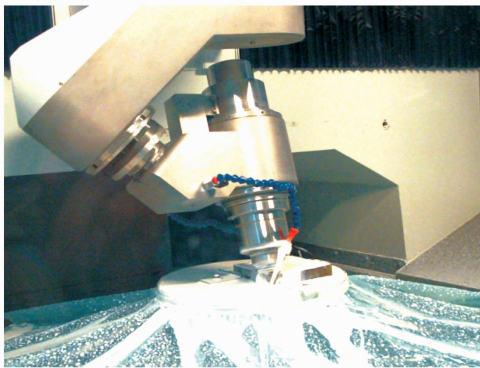


图 12 气囊抛光过程
Fig. 12 Process of bonnet polishing

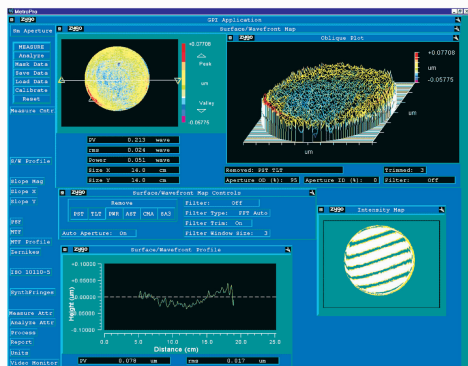


图 13 抛光实验测量结果(RMS 值为 0.024 λ)
Fig. 13 Measurement results of polishing experiment (RMS: 0.024 λ)

5 结 论

气囊抛光技术是未来空间光学系统中非球面元件的主要加工方法,很多关键技术有待深入研究,气囊抛光去除特性的研究是驻留函数求解算法的基础,本文基于 Preston 假设和 Hertz 接触理论,建立了气囊抛光“进动”运动的材料去除模型,并通过实验进行了验证,得出以下结论:

- 1) 气囊定点抛光加工区域为一椭圆,“进动”运动抛光的去除函数是近似的高斯分布;
 - 2) 进动角越大,去除越均匀,但进动角超过一定范围时,气囊的变形严重,考虑到抛光头的实际几何形状与在机器各自由度的运动范围,进动角取 10°~20°较为合适;
 - 3) 气囊压缩量越大去除量越大,但去除特性越不均匀,且气囊变形的影响越大,压缩量的选择不应超过 0.5 mm;
 - 4) 压力和旋转速度基本不影响去除特性的形状,但影响去除效率,且去除效率随压力变化是先增大后减小,这是因为压力增大,有效抛光的抛光份颗粒会随之减少。
- 以上结论可以更好地把握气囊抛光的去除特性,为工艺参数的选择提供指导,提高加工效率和面形精度,为进一步开展光学元件气囊抛光工艺研究提供依据。

参 考 文 献

- 1 Yang Huajun, Hu Yu, Xie Kang. Optimization design for aspheric collimation system of high-power semiconductor laser beam[J]. *Chinese. J. Lasers*, 2007, **34**(12):1607~1612
杨华军,胡 渝,谢 康. 大功率导体激光束非球面准直系统的优化设计[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12):1607~1612
- 2 Zhang Fengsheng. Numerical computation for propagation of Gaussian beam through aspheric system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1):179~184
张凤生. 非球面系统中高斯光束传输的数值模拟[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1):179~184
- 3 Dai Yifan, Zhou Lin, Xie Xuhui *et al.*. Deterministic figuring in optical machining by ion beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6):1132~1137
戴一帆,周 林,谢旭辉 等. 应用离子束进行光学镜面确定性修形的实现[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6):1132~1137
- 4 Xiaokun Wang, Lihui Wang, Longhai Yin *et al.*. Measurement of large aspheric surfaces by annular subaperture stitching interferometry [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(11): 645~648
- 5 Chen Jianping, Shen Lincheng. Model and control technology for machining large K-K diameter optical aspheric mirror[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(12):1705~1710
陈建平,沈林成. 大口径非球面加工建模与控制技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12):1705~1710

- 6 R. G. Bingham, D. D. Walker *et al.*. A novel automated process for aspheric surfaces[C]. *SPIE*, 2000, **4093**: 445~450
- 7 D. D. Walker, A. Beaucamp, D. Brooks *et al.*. Novel CNC polishing process for control of form and texture on aspheric surfaces[C]. *SPIE*, 2002, **4767**: 99~106
- 8 D. D. Walker, A. Beaucamp, D. Brooks *et al.*. New results from the precessions polishing process scaled to larger sizes[C]. *SPIE*, 2004, **5494**: 71~81
- 9 D. D. Walker, A. Beaucamp, V. Doubrovski *et al.*. Automated optical fabrication — first results from the new “Precessions” 1.2 m CNC polishing machine[C]. *SPIE*, 2006, **6273**: 91~98
- 10 D. D. Walker, A. Baldwin, R. Evans *et al.*. A quantitative comparison of three grolishing techniques for the precessions TM process[C]. *SPIE*, 2007, **6671**: H1~H9
- 11 Quantang Fan, Jiangqiang Zhu, Bao'an Zhang. Effect of the geometry of workpiece on polishing velocity in free annular polishing [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(5): 298~300
- 12 Wang Guilin. A Study on Key Techniques in Ultra-Precision Lapping and Polishing for Optical sic Materials[D]. Changsha: University of defense technology, 2002. 55~56
王贵林. 光学材料超精密研抛关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2002. 55~56
- 13 Gao Bo. Development of Bonnet Tool Polishing Apparatus and Research[D]. Harbin: Harbin institute of technology, 2005. 55~57
高波. 气囊抛光实验样机研制及其关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005. 55~57
- 14 K. L. Johnson. Contact mechanics [M]. Beijing: Higher Education Pres, 1992. 72~77
- 15 Chen hua, Li Taoshen, Jinchuang. A Method for image spectrum restoration property analysis based on Gaussian function [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 424~430
陈华, 李陶深, 赵进创. 基于高斯函数假设的图像频谱恢复特性分析方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 424~430