

非球面气囊抛光的材料 均匀去除研究*

王 朋¹, 叶斯哲², 张 昊¹, 回长顺¹

(1. 天津航技术物理研究所, 天津 300308;

2. 中国科学院海西研究院厦门稀土材料研究所, 厦门 361021)

[摘要] 对气囊抛光非球面表面材料去除均匀性进行了研究。根据 Preston 方程, 分析了抛光磨头与零件转速比对去除函数分布的影响, 并采用定点抛光试验对分析结果进行验证。在定点抛光表面去除速率分析的基础上, 通过优化抛光磨头进给速度、合理控制驻留时间, 实现材料表面均匀去除。采用该方法, 对一口径为 150mm 的非球面进行抛光试验, 抛光后面形误差趋势保持不变, 功率谱密度高频分量明显降低, 实现了对表面材料的均匀去除。

关键词: 超精密; 光学加工; 非球面; 均匀去除; 气囊抛光

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.09.068



王 朋

工学博士, 香港理工大学博士后, 高级工程师。主要从事光学超精密加工与检测技术研究。主持并参与多个项目关键光学零部件的研制工作, 获得专利 10 余项。

光学系统应用非球面可以提高系统成像质量、简化系统结构, 因此非球面光学零件越来越受到光学设计人员的青睐。随着超精密加工技术的发展, 非球面的加工效率和精度也在逐步提升, 含有高精度非球面光学元件的光学系统已广泛应用于航空、航天、国防及民品等各个领域^[1-2]。

目前, 非球面光学表面的加工方法主要有铣磨抛光法、单点金刚石车削法和模压法等^[2-3]。其中模压法适用于大批量的生产, 但是可模压的材料受限, 而其模压模具非球面的制造也依赖于单点金刚石车削或者抛光; 单点金刚石车削在红外晶体和有色金属反射镜的加工中得到了广泛应用, 其可以获得亚微米级的表面面形精度和纳米级的表面粗糙度, 但是受到加工参数、材料、刀具和机床振动等因素的影响, 在被车削表面会残留有规律性的刀痕微纳结构, 进而诱发

衍射和散射效应, 在短波和多光谱光学系统中需要对此类表面进行进一步的光滑处理, 消除刀痕, 而抛光是最为常用的光滑处理方法, 由于单点金刚石车削非球面已经达到很高的精度, 因此在抛光过程中往往不希望破坏面形精度; 抛光法是应用最广泛的非球面加工方法, 气囊抛光、磁流变抛光、计算机控制小磨头抛光等都可应用于非球面的加工。一般情况下, 非球面抛光的目的是去除精磨表面损伤层达到光学表面的要求, 同时对抛光过程进行“确定性”控制, 进而使得面形精度持续收敛直到满足指标要求, 因此对于面形收敛控制的研究一直较为普遍^[4-6]。随着超精密铣磨技术的发展, 铣磨面形精度已经控制的非常高, 抛光时则不希望对面形精度进行破坏。因此, 与单点金刚石车削高精度非球表面的抛光光滑处理类似, 如何在此类高精度面形非球面基底抛光过程中使材料均匀

* 基金项目: 天津市自然科学基金重点项目 (17JCZDJC38600)。

去除并尽量保持面形精度不变或者少成为当前研究的热点之一。

本文以常用的气囊抛光为例,以非球面的抛光工艺为研究对象,对气囊抛光运动过程和材料去除特性进行分析,在此基础上提出对零件材料均匀去除的控制方法并进行试验验证。

气囊抛光原理及材料去除模型的建立

气囊抛光是近十几年来发展起来的一种“确定性”抛光技术,是采用充有一定压力气体的球形气囊,自转的同时在工件表面运动实现高精度面形的抛光^[7-8]。本文采用的是 Optotech ASP 200 型三轴数控抛光机并应用气囊抛光头进行试验,理论分析也基于此设备。

1 气囊抛光原理

气囊抛光运动过程如图1所示。抛光头在以 ω_2 自转的同时,摆一定角度 β ,以适当的面积和压力接触零件,保证气囊自转轴和被加工零件的接触面的中心点处的切线始终保持垂直。同时,被加工工件随着主轴以 ω_1 自转的同时在水平方向(X 轴)和竖直方向(Z 轴)按一定的速度和

轨迹移动,保证气囊抛光头沿被加工表面的母线由边缘到中心进给运动。图1(a)为气囊抛光头在被加工表面边缘位置,图1(b)为气囊抛光头在被加工表面中心位置。气囊抛光头与工件接触区域为不同环带的合成,此时其对面形的修整作用主要取决于抛光气囊在不同环带时的材料去除特性、不同环带的抛光磨头的驻留时间(即磨头进给速度)以及磨头与工件相对位置,并保持恒定的接触面积及压力。

2 气囊抛光运动分析

气囊抛光非球面的过程可以简化为图2所示的运动方式。为了方便分析抛光头与零件相对运动情况,将直角坐标系固定于工件中心 O_1 ,工件的自转运动可视为工件固定,抛光头绕工件中心 O_1 的公转运动,其公转角速度为 ω_1 。假设气囊与零件接触圆的半径为 ρ , O_2 为其圆心, O_1O_2 距离为 e ,抛光头的自转速度为 ω_2 。假设抛光接触区域内任一点 A ,其距离工件中心 O_1 的距离为 r , AO_1 与 X 轴的夹角为 θ , A 点与中心 O_2 的距离为 r_1 。 V_1 为 A 点相对 O_1 的公转线速度(即当前点零件自转线速度), V_2 为 A 点自转线速度,因

为抛光头相对工件的抛光运动可认为是小磨头公转运动与自转运动的合成的结果,因此 A 点速度 V 可表示为:

$$\begin{cases} \vec{V} = \vec{V}_1 + \vec{V}_2 \\ V_1 = r \cdot \omega_1 \\ V_2 = r_1 \cdot \omega_2 \end{cases} \quad (1)$$

根据三角关系,将各个参数代入式(1),可得到 A 点的相对运动速度表达式为:

$$V(r, \theta) = \sqrt{r^2(\omega_1^2 + \omega_2^2) + e^2\omega_2^2 + 2\omega_1\omega_2r^2} \quad (2)$$

$$\sqrt{-2re(\omega_2^2 + \omega_1\omega_2)\cos\theta}$$

气囊抛光材料去除也可以用 Preston 方程进行描述,则材料去除量可以表示为:

$$R(x, y) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{KP}{T} \int_0^T V(x, y, t) dt \right] \quad (3)$$

式中, P 为抛光压力; K 为系数。

$$dt = \frac{d\theta}{\omega_1} \quad (4)$$

抛光头在此环带上的抛光去除函数为:

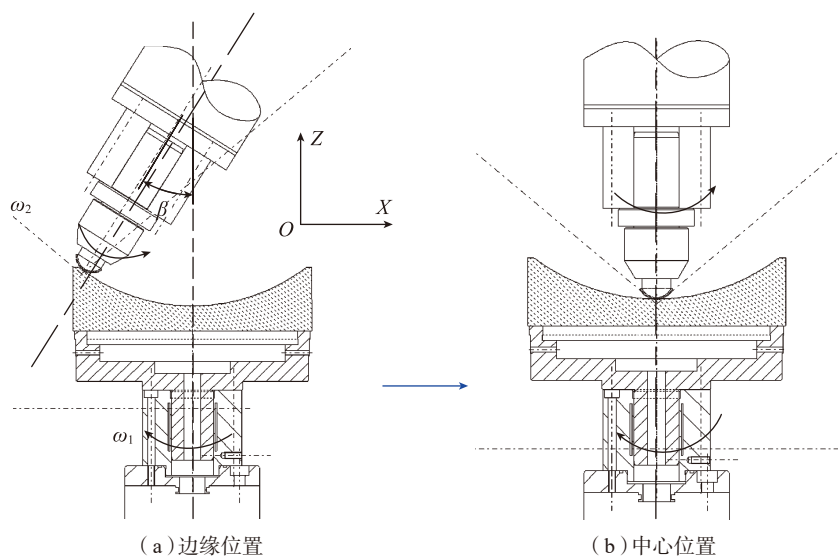


图1 气囊抛光示意图

Fig.1 Schematic of bonnet polishing

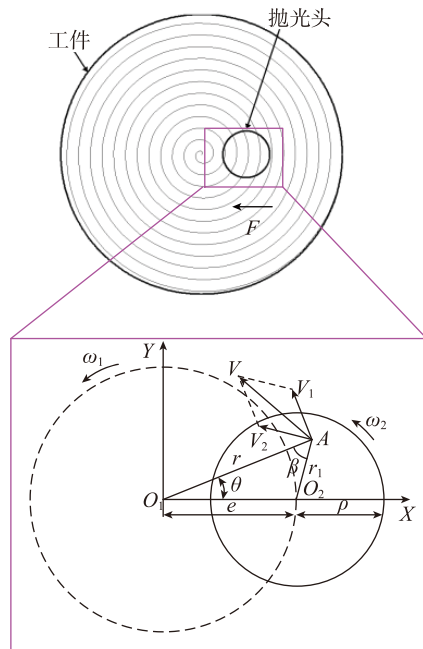


图2 气囊磨头抛光运动示意图

Fig.2 Schematic diagram of movement of bonnet polishing

$$R(r) = \frac{KP}{2\pi\omega_1} \int_{-\theta_0}^{\theta_0} V(r, \theta) d\theta \quad (5)$$

式中,

$$\begin{cases} \text{当 } e < \rho \text{ 且 } r \leq \rho - e, \theta_0 = \pi; \\ \text{当 } e < \rho \text{ 且 } r \leq e - \rho, \theta_0 = 0; \\ \text{当 } |e - \rho| \leq r \leq |e + \rho|, \\ \theta_0 = \arccos\left(\frac{r^2 + e^2 - \rho^2}{2re}\right) \end{cases}$$

气囊抛光去除函数的仿真分析

根据上文得到的材料去除函数,应用 Matlab 软件编程进行计算机模拟,得到不同环带的材料去除曲线,进而对去除特性进行分析,并能够得到使材料均匀去除的驻留时间函数特性。

1 气囊抛光材料去除特性

使用计算机进行模拟,即可知小磨头沿着光学零件径向进给从中心

至边缘处各个环带的相对去除量,各环带处去除量曲线的包络线即为零件全口径相对去除量。令 m 为工件与气囊的转速比,即:

$$m = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (6)$$

由于实际抛光过程中,气囊抛光头的自转轴和被加工表面接触面中心点处的切线始终保持垂直,且抛光接触面积远小于零件面积,因此为了便于计算,这里以平面进行分析。取直径为 50mm 的平面为例进行仿真分析,设置参数如表 1 所示。不同参数下得到的结果如图 3 所示。

从图 3 可知,模拟结果均为材料去除量在零件中心附近趋于极大值,向边缘延伸去除量逐渐减小;同时距工件中心越近,曲线越趋于陡峭,距工件边缘越近,曲线越趋于平缓;当 m 取负值时,去除量极大值与极小值的比值小于当 m 取正值时的情况,

因此当两者转向相同,零件更趋于均匀去除,转向相反时零件中心面形处更容易出现凹坑。

对比抛光头处于某一固定环带处(非中心处)两者的去除函数曲线可知,去除函数曲线宽度即为抛光磨头接触宽度;当磨头与工件转向相反时(m 为负),材料去除函数的最高点并不位于磨头旋转中心处,而当两者转向相同时,材料去除函数的最高点位于磨头旋转中心处,更接近高斯

表1 材料去除仿真分析参数
Table 1 Parameters of material removal simulation

序号	m	r/mm
1	1	3
2	-1	6.47
3	5	6.28
4	1/5	5.55

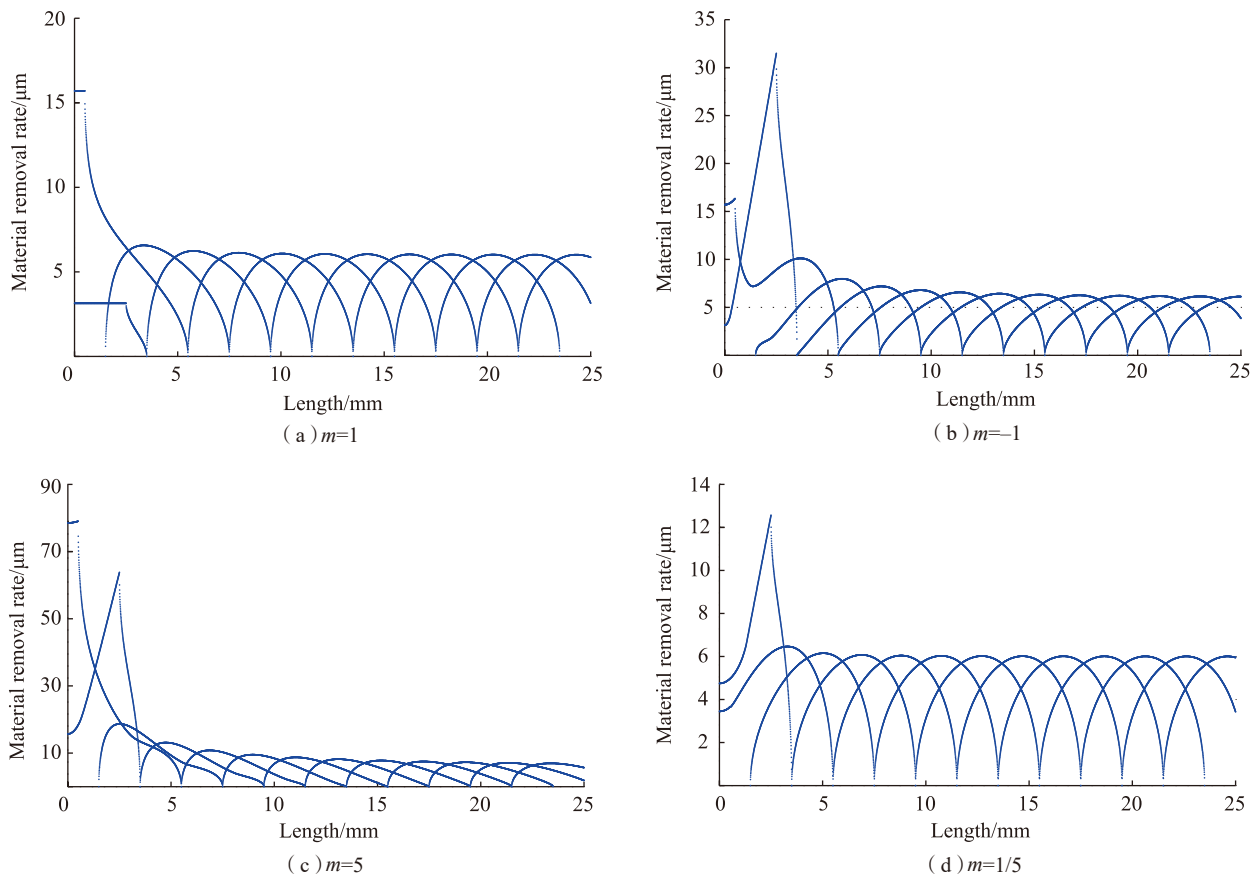


图3 抛光头去除函数模拟

Fig.3 Material removal simulation of bonnet polishing

分布。由此可推断,在转速相等条件下,如果磨头与工件转向相同,对于零件整个面形的控制更有利,更容易通过控制小磨头在各环带处的驻留时间实现对零件材料的均匀去除。

对比图3(c)和(d)可知,当二者的转速不一致时,工件转速高于磨头转速,整体材料去除率曲线更陡峭,且在固定环带处材料去除函数最高点不位于磨头旋转中心处,不利于面形修整;当工件转速小于或等于磨头转速,整体材料去除率曲线相对更平缓,有利于材料均匀去除。

2 去除特性试验验证

为验证理论计算结果,使用Optotech ASP 200 数控三轴联动抛光机床对光学零件开展抛光材料去除量试验。抛光头与零件接触区直径5mm,在零件口径内分别沿径向选取 e 为5mm、12mm、20mm的3个固定位置进行抛光。抛光参数为工件轴转速 $\omega_1=600\text{r/min}$,抛光磨头粘接聚氨酯转速 $\omega_2=600\text{r/min}$,抛光时抛光头无进给运动,抛光时间分别为60s和120s。试验结果应用ZYGO激光干涉仪进行测试分析,结果如图4所示。

在工件自转作用下抛光头的定点抛光运动为对工件环带材料的均匀去除。抛光60s后距零件中心5mm处环带深度约 0.2Wave @ $\text{Wave}=632.8\text{nm}$,距中心12mm处环带深度约 0.17Wave ,距中心20mm处环带深度约 0.15Wave 。抛光120s后距零件中心5mm处环带深度约 0.43Wave ,距中心12mm处环带深度约 0.31Wave ,距中心20mm处环带深度约 0.28Wave 。对比理论计算去除函数与实际测量面形,查看固定环带上的材料去除曲线可知,去除量峰值处于磨头中心处,材料去除量沿着磨头接触区的径向向外逐渐减小,至接触边缘处去除量降至0。查看不同环带的材料去除量,可以看出靠近零件中心处去除量最大,沿着零件

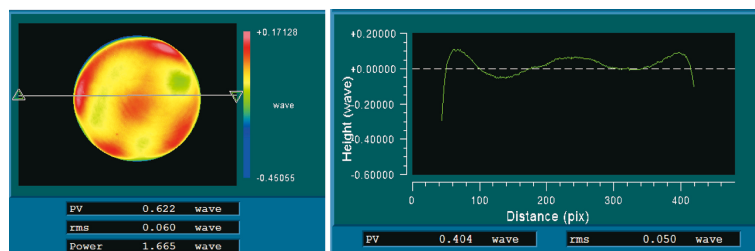
径向向外去除量逐渐减小,越靠近边缘,减小幅度越小。综上,不同环带去量大小与前述理论计算的曲线虽有少许差异,但整体趋势一致,理论计算与实际测量结果基本吻合。

3 抛光头进给速度拟合

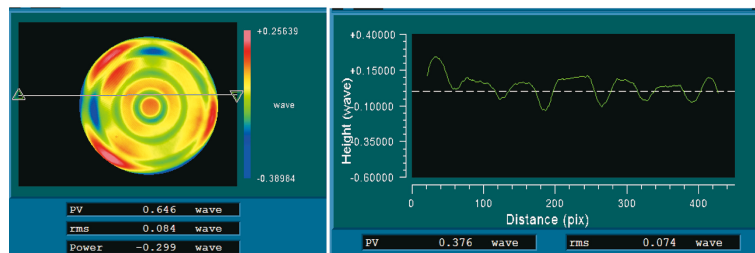
以零件中心未抛光处为基准原点,分别对60s及120s试验测量面

形数据作平移处理,如图5所示。图5中分别给出了抛光60s和120s时的曲线和最大值。分别对这几组材料去除量最大值数据取平均值并沿测量中心折叠处理,得到沿径向分布的3组数据,如图6所示。

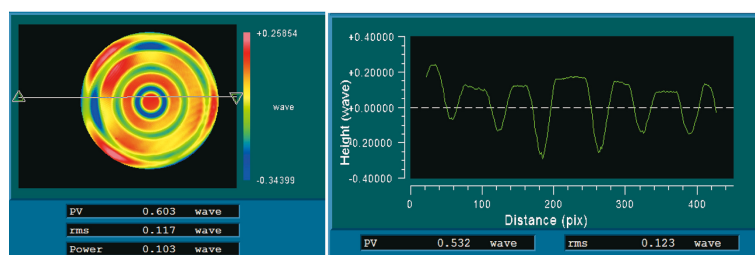
为了实现材料的均匀去除,则零件上去除函数和驻留时间的卷积为



(a) 原始表面特征



(b) 抛光60s面形轮廓曲面



(c) 抛光120s面形轮廓曲面

图4 气囊抛光试验结果

Fig.4 Interference test results of bonnet polishing experiments

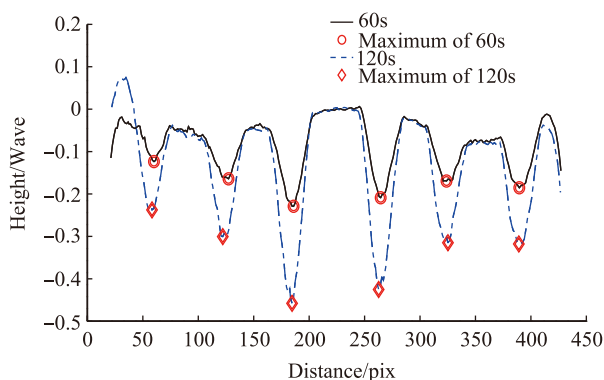


图5 环带抛光数据处理

Fig.5 Measured data of bonnet polishing experiments

定值。抛光过程中驻留时间是通过进给速度控制的,驻留时间与进给速度成反比。因此通过分析,为了实现均匀去除,进给速度的趋势与材料去除趋势一致。为了得到全口径材料去除分布曲线,进而得到抛光磨头径向进给速度,对上述数据进行拟合。定义 $F(x)$ 为径向进给速度函数,表达式为:

$$F(x) = ((A_1x + A_2)A_3)^{-1} \quad (7)$$

式中, x 为径向长度; A_1 为形状系数; A_2 为修正系数; A_3 为去除深度系数。

利用该式对测量数据进行拟合,黑色实线为3组空心圆符数据拟合曲线,蓝色虚线为3组十字数据拟合曲线,两式中仅 A_3 去除深度系数不同,可以看出曲线趋势符合测量数据。此曲线所示即为抛光磨头的径

向进给速度曲线。

上述分析试验中表面类型为平面,能够容易实现接触面积保持一致,在实际非球面加工中,由于非球面各点的曲率半径不同,各点的接触面积很难保持一致,需要进行微调。但是如前所述,抛光时气囊自转轴与接触中心点发现重合,且非球面曲率半径远大于气囊半径,因此在一般非球面抛光时,由于接触区域曲率半径变化不大,可忽略不计。对高陡度非球面抛光时,由于接触区域曲率半径变化较大,将需要进一步计算处理。

非球面抛光验证

根据上述理论推导进行试验验证,对完成精密铣磨的 $\phi 150\text{mm}$ 非球面主反射镜开展抛光试验,如图 7

所示,零件表面面形表达式如式(8)所示,其参数见表 2。

$$z = \frac{cx^2}{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2x^2}} + Ax^4 + Bx^6 + Cx^8 + \dots \quad (8)$$

式中, c 为顶点曲率, $c=1/R_0$ (R_0 为顶点曲率半径); k 为二次曲线系数, A 、 B 、 C ……为高次项系数。

试验参数为 $\omega_1=600\text{r/min}$, $\omega_2=600\text{r/min}$,接触区域直径 5mm ,抛光时间分别为 60min 、 120min 各测量一次。图 8 (a) 为试验前后零件面形误差曲线,可以看出抛光后非球面面

表2 非球面镜面形参数

Table 2 Aspheric parameters of test mirror

R_0/mm	k	A	B	C
210.812	-1	0	-8.76×10^{-9}	-5.45×10^{-13}

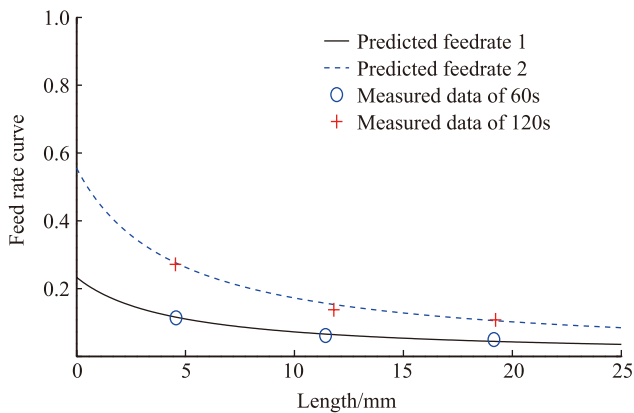


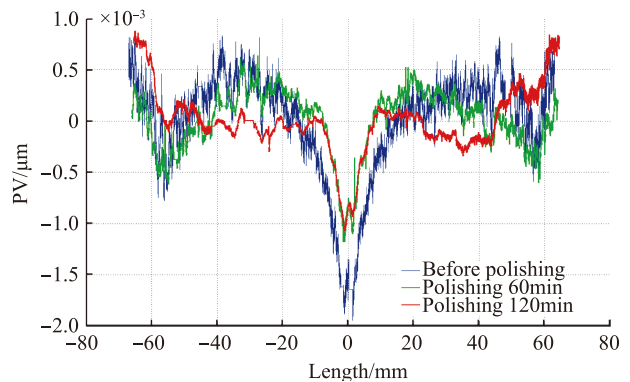
图6 磨头径向进给速度拟合

Fig.6 Fitted curve of bonnet feed rate

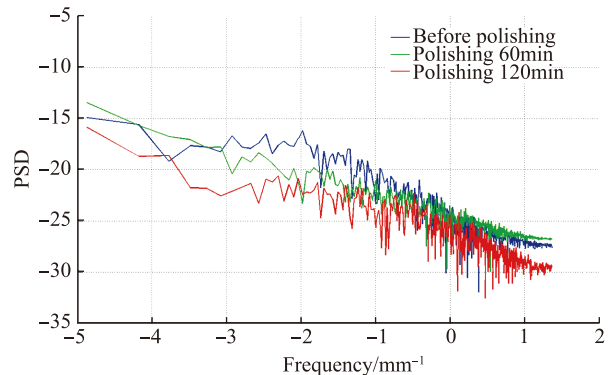


图7 非球面抛光试验

Fig.7 Polishing process of aspherical surface



(a) 抛光前后非球面面形曲线对比



(b) 抛光前后功率谱密度变化情况

图8 非球面面形抛光前后对比

Fig.8 Testing results of aspherical surface texture before and after polishing

形未出现较大变化,整体面形趋势保持不变。图 8 (b) 为零件抛光前后面形测量结果的一维功率谱密度分布^[9],可以看出抛光前由于零件表面粗糙度较差,高频分量较高,抛光后期高频分量明显降低,说明零件表面微观形貌得到较大改善;对于气囊小磨头抛光中最为关注的中频分量,抛光后并未增加,说明抛光后零件面形未显著改变,磨头对于零件整体材料去除函数较稳定,实现了均匀去除,有利于后续面形修抛。

结论

本文通过分析气囊小磨头在抛光过程中的运动方式,建立了材料去除模型,计算了小磨头在零件不同环带处的材料去除特性及相对去除率,并通过试验对计算曲线进行了验证,依据试验数据计算得出小磨头径向进给速度曲线。最后基于上述理论依据,开展对非球面反射镜的抛光试验验证,试验结果显示在抛光口径内,抛光前后面形基本一致,零件整体材料去除函数比较稳定,实现了均匀去除,有利于后续面形修抛。

但本文只探讨了驻留时间的情况,对于压力控制,抛光磨头在不同

位置时的材料去除等仍需进行大量的理论和试验研究。

参考文献

[1] 李圣怡,戴一帆,等.大中型光学非球面镜制造与测量新技术[M].北京:国防工业出版社,2011.

LI Shengyi, DAI Yifan, et al. New technology for manufacturing and measurement of large and middle-scale aspheric surfaces[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.

[2] 王毅,倪颖,余景池.小型非球面数控抛光技术的研究[J].光学精密工程,2007,15(10):1527-1533.

WANG Yi, NI Ying, YU Jingchi. Computer-controlled polishing technology for small aspheric lens[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(10): 1527-1533.

[3] ZHANG S J, TO S. A theoretical and experimental investigation into multimode tool vibration with surface generation in ultra-precision diamond turning[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture 2013, 72(1): 32-36.

[4] 王朋,杜雪,回长顺.金刚石车削表面微纳结构的气囊抛光改进[J].光学学报,2015,35(3):0322001.

WANG Peng, SUET To, HUI Changchun. Improvement of the diamond turned surface texture by bonnet polishing process[J]. Acta

Optica Sinica, 2015, 35(3): 0322001.

[5] LI Z Z, WANG J M, PENG X Q, et al. Removal of single point diamond-turning marks by abrasive jet polishing[J]. Applied Optics, 2011, 50(16): 2458-2463.

[6] ZHANG W, ZENG Z G, WU F. Zonal error removal for large aspheric by manipulator[J]. Optical Technique, 2012, 38(3): 273-278.

[7] 王春锦,郭隐彪,王振忠,等.光学元件气囊抛光系统动态去除函数建模[J].机械工程学报,2013,49(17):19-25.

WANG Chunjin, GUO Yinbiao, WANG Zhenzhong, et al. Dynamic removal function modeling of bonnet tool polishing on optics elements[J]. Journal of Mechanical Engineer, 2013, 49(17): 19-25.

[8] WALKER DD, FREEMAN R, MORTON R, et al. Use of the 'precession' (TM) process for prepolishing and correction 2D & 2 1/2 D form[J]. Optics Express, 2006, 14(24): 11787-11795.

[9] 王伟,徐敏,李洪玉,等.大口径导光板抛光及其功率密度分析[J].红外与激光工程,2013,42(4):982-987.

WANG Wei, XU Min, LI Hongyu, et al. Polishing of large-aperture mirror and analysis of power spectral density[J]. Infrared and Laser Engineer, 2013, 42(4): 982-987.

通讯作者:王朋,E-mail:wpeng605@126.com。

Uniform Material Removal of Aspherical Surface by Bonnet Polishing

WANG Peng¹, YE Sizhe², ZHANG Hao¹, HUI Changshun¹

(1. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China;

2. Xiamen Institute of Rare-Earth Materials, Haixi Institute, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China)

[ABSTRACT] The uniformity of material removal of aspheric polishing process using bonnet is studied in this paper. The influence of rotational velocity of bonnet and workpiece on distribution of material removal is analyzed according to Preston Law and a series of fix polishing experiments are conducted. Accordingly, a uniform material removal method is proposed by modifying contact time and optimizing feed rate of polishing bonnet. The quartz aspheric polishing experiment shows that form error keeps stable and the high-frequency of PSD decreases dramatically. It means that the method proposed in this paper leads to material removal in a uniform way.

Keywords: Ultra-precision; Optical manufacture; Aspheric surface; Uniform removal; Bonnet polishing

(责编 逸飞)