

文章编号: 1001-4322(2013)09-2270-05

大口径光学元件气囊抛光工具刚度可控性*

王振忠¹, 潘 日¹, 郭隐彪¹, 张东旭¹, 谢银辉¹, 王 健²

(1. 厦门大学 物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 为保证气囊抛光过程中抛光运动的高稳定性和均匀材料去除率,对气囊抛光非球面过程中气囊工具刚度的可控性进行了研究。通过分析气囊抛光大口径光学元件时工具的受力情况,计算了气囊工具刚度,并分析了气囊抛光工具刚度对抛光时材料去除的影响及气囊工具刚度的影响因素。设计了气囊工具刚度控制算法并进行模拟试验,仿真结果表明,在刚度标准值根据加工要求设定以后,即可通过调节工件对气囊工具的反作用力,使得气囊抛光大口径光学元件过程中气囊工具刚度可控。

关键词: 大口径光学元件; 气囊抛光; 工具刚度; 可控性

中图分类号: TG701 **文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB20132509.2270

气囊抛光技术已成功应用于大口径非球面的抛光,并得到良好的效果^[1-4]。目前关于气囊抛光技术研究的文献主要集中在运动控制、工艺研究等方面,如:高波等^[5]开发了气囊抛光试验机并报道了相应的进动运动控制技术;宋剑锋等^[6]进行了气囊抛光曲面光学元件的工艺研究;计时鸣等^[7]将气囊抛光技术与工业机器人结合并应用于模具自由曲面的抛光;潘日等^[8-9]开发了大口径非球面元件可控气囊抛光系统并针对该系统进行大口径轴对称非球面的气囊抛光进动运动控制研究。由于气囊抛光设备主要工作原理是进动控制,加工运动需要 3 个直线轴与 2 个旋转轴组成五轴联动控制,从机床结构特点上分析,气囊工具的旋转摆臂刚度制约着机床整体性能,直接影响机床的加工精度。对于新兴的气囊抛光加工技术,鲜有文献提出相应的控制策略来选择合适的抛光路径、抛光工具位置和位姿来提高抛光时的工具刚度,从而提高气囊抛光精度。因此,为实现对抛光过程中材料去除的稳定性和可控性,本文对气囊抛光非球面光学元件过程中气囊工具刚度的可控性进行了研究。

1 气囊工具刚度计算模型

图 1 为气囊抛光工具的模型图,气囊抛光工具包含气囊自转轴 z_2 及两个虚拟旋转轴 z_3, z_4 ,三轴相交于气囊球心 O ,且 z_4 轴与其他两个轴夹角始终为 45° ,抛光过程中两个虚拟旋转轴 z_3, z_4 通过电机带动对应的关节 J_1, J_2 旋转进行进动,以控制气囊自转轴 z_2 在空间的位置, P_0 为气囊自转轴与气囊的交点的空间位置坐标。对抛光时气囊工具进行分析可知,两个虚拟旋转轴对应的关节可以视为抛光工具中唯一的柔性源,忽略关节摩擦及气囊工具装配时各连杆或关节产生的变形,对于两个虚拟旋转轴对应的关节 J_1, J_2 ,认为除了绕转轴的扭矩引起变形外,其余各方向的力和力矩由机械构件承受,因此,抛光时气囊工具所受工件反作用力及其对两个虚拟旋转轴对应的关节产生的等效力矩如图 2 所示。



Fig. 1 Model of bonnet tool
图 1 气囊抛光工具模型

假设 F 是气囊工具在静止状态下所受的外力,为图 2 中工件的反作用力 M 和气囊工具重力 G_g 的合力; T_1, T_2 分别为外力 F 作用在关节 J_1, J_2 的等效力矩; α 为抛光点切线与水平方向的夹角; J^T 为机构的运动学雅可比矩阵的转置,与机构的位姿相关。由图 2 可知,抛光时气囊工具所受外力及各关节的输入力矩与外力的关系为

$$F = [0, M\sin\alpha, M\cos\alpha - G_g]^T \tag{1}$$

* 收稿日期:2012-11-02; 修订日期:2013-04-03
基金项目:国家自然科学基金项目(51075343);厦门市科技计划项目(3502Z20113007);厦门大学研究生基础创新科研基金项目(201212G011)
作者简介:王振忠(1981—),男,博士,从事精密加工装备及系统控制研究; wangzhenzhong@xmu.edu.cn.

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_1 \\ \mathbf{T}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{J}^T \mathbf{F} \tag{2}$$

由于抛光工具为串联机构,根据文献[10]中串联结构的雅可比矩阵的确定方法,可迅速得到气囊工具的雅可比矩阵

$$\mathbf{J} = [\mathbf{S}_1 \times (\mathbf{P}_c - \mathbf{R}_1), \quad \mathbf{S}_2 \times (\mathbf{P}_c - \mathbf{R}_2)] \tag{3}$$

式中: $\mathbf{S}_i (i=1,2)$ 为气囊工具两个虚拟旋转轴对应的关节 J_1, J_2 的轴线方向; $\mathbf{R}_i (i=1,2)$ 为关节 J_1, J_2 的空间位置坐标; \mathbf{P}_c 为 P_0 点的位置坐标。这些都可以根据大口径非球面表面方程、抛光点的空间位置在控制算法中求得。

以气囊工具球心为坐标原点建立坐标系,如图 3 所示。根据图 3 可得

$$\mathbf{S}_1 = [0, 0, 1]^T \tag{4}$$

$$\mathbf{S}_2 = \left[\frac{\sqrt{2}}{2} \sin(\phi + \theta_A), -\frac{\sqrt{2}}{2} \cos(\phi + \theta_A), \frac{\sqrt{2}}{2} \right]^T \tag{5}$$

$$\mathbf{R}_1 = [0, 0, L_1]^T \tag{6}$$

$$\mathbf{R}_2 = \left[\frac{\sqrt{2}}{2} L_2 \sin(\phi + \theta_A), -\frac{\sqrt{2}}{2} L_2 \cos(\phi + \theta_A), \frac{\sqrt{2}}{2} L_2 \right]^T \tag{7}$$

式中: L_1, L_2 为两个旋转关节到气囊球心的长度; θ_A 为从上一个抛光点到下一个抛光点气囊工具进动过程中气囊工具 z_3 轴旋转的角度; ϕ 为气囊工具 z_3 轴旋转前 z_4 轴在 Oxy 平面的投影与 y 轴负方向的夹角。

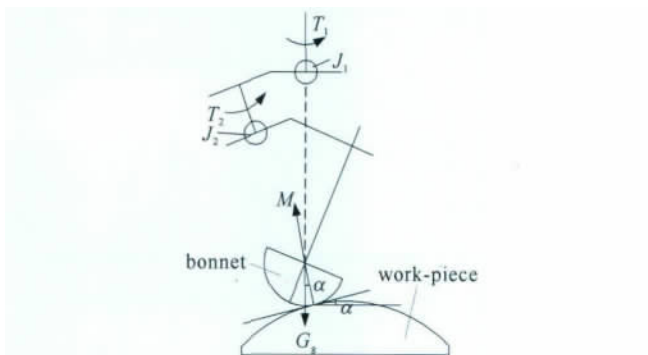


Fig. 2 External force and its equivalent torque work on bonnet tool

图 2 气囊工具抛光所受外力及等效力矩

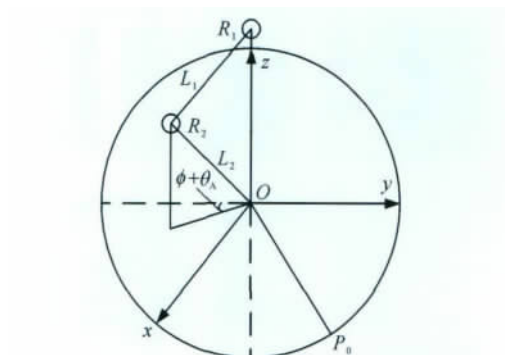


Fig. 3 Position of joints of bonnet tool

图 3 气囊工具关节位置

在材料力学研究中,有一种通过功和能来联系弹性体和应力、应变方法称为功能原理,根据功能原理,可以获得旋转关节受到扭矩情况下的变形能

$$U = \frac{\mathbf{T}^2 l}{2GI_p} \tag{8}$$

式中: U 为关节连杆的变性能; T 为关节连杆所受的扭矩; l 为关节连杆的长度; G 为关节连杆的剪切弹性模量; I_p 为关节连杆截面的极惯性矩值。根据式(8)可得抛光时,气囊工具两个旋转关节的变性能

$$U = U_1 + U_2 = \frac{\mathbf{T}_1^2 l_1}{2GI_p} + \frac{\mathbf{T}_2^2 l_2}{2GI_p} \tag{9}$$

式中: U_1 和 U_2 分别为关节 J_1, J_2 连杆的变性能; l_1 和 l_2 分别为关节 J_1, J_2 连杆的长度。气囊工具刚度和气囊工具变性能之间为反比关系,即刚度越大变性能越小,刚度越小变性能越大,而气囊工具变性能更能直观反应气囊工具在抛光时候的力学特性以及变形。

2 可控性分析

2.1 气囊工具刚度对抛光的影响

气囊工具刚度对抛光的影响,主要通过对抛光接触区的作用来表现,体现在气囊工具变形导致的气囊压缩量或者气囊对工件的作用力的变化上。而气囊压缩量或者气囊对工件的作用力(改变气囊充气压力)变化对于抛光接触区(抛光接触区形状及应力分布)的影响可通过 ANSYS 仿真得到,如图 4,5 所示。以半球形气囊与玻璃平面作为仿真对象,考虑到两者的对称性,建立 1/2 实体模型进行分析,仿真模型建立及参数选择参考文

献[11]进行设置。图 4 所示为气囊半径 $R=80$ mm、压缩量 $H=1$ mm 以及进动角为 25° 时,气囊充气压力 p 在 $0\sim 0.4$ MPa 变化时,抛光接触区形状和应力分布。图 5 为在气囊不变形即充气压力 $p=0$ 的条件下,固定气囊半径 $R=80$ mm、进动角为 25° , H 在 $0.5\sim 2.5$ mm 变化时,气囊压缩量对抛光接触区形状和应力分布的影响。

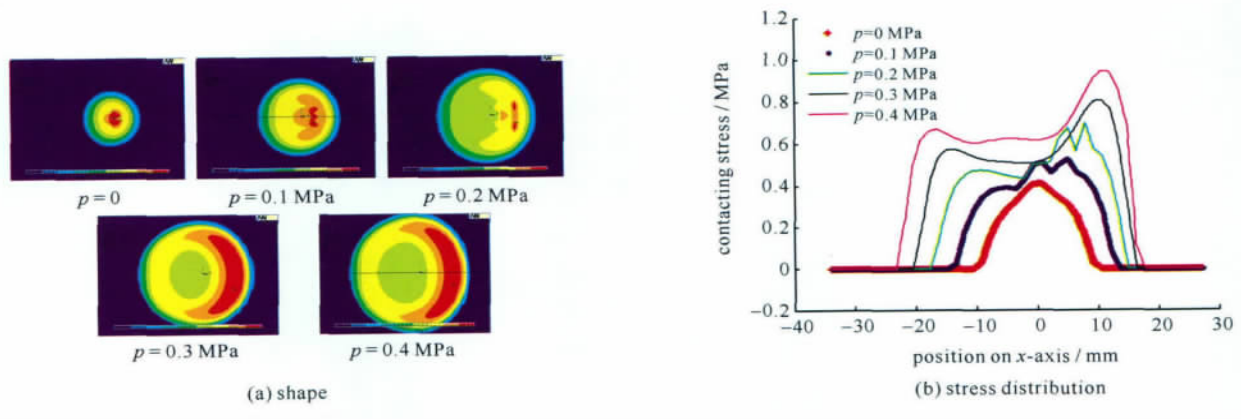


Fig. 4 Shape and stress distribution of contacting area under different pressure

图 4 不同压力作用下抛光接触区形状及应力分布情况

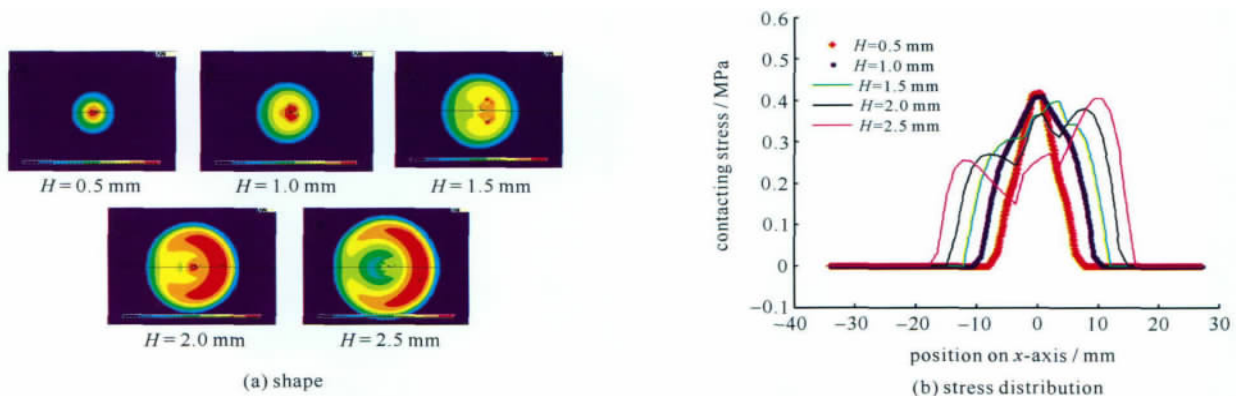


Fig. 5 Shape and stress distribution of contacting area under different compression of bonnet

图 5 不同压缩量作用下接触区面积及应力分布情况

在气囊抛光中,抛光接触区的形状及其应力分布对于材料去除区域和去除量的控制具有重要意义。只有气囊抛光接触区的形状及接触区的应力分布呈现或者接近规则分布的时候容易实现对于材料去除区域和去除量的控制。由图 4,5 可以看出,气囊压缩量和气囊充气压力只有在一定的范围时,气囊抛光接触区的形状及接触区的应力分布才是呈现规则分布的。在精抛光中,要实现对于材料去除区域和去除量的控制,必须控制气囊压缩量和气囊充气压力。而气囊工具刚度会直接导致压缩量或者气囊对工件压力的变化,因此,需要对抛光时气囊工具的刚度进行控制,以达到抛光接触区可控的目的。

2.2 影响因素

由式(2)~(9)知,气囊刚度主要受气囊工具的空间位置以及工件对气囊的反作用力 F 的影响,根据上述式(2)~(9)进行仿真,得到刚度与气囊空间位置、工件对气囊工具的反作用力 F 的关系如图 6,7 所示。

图 6 的 5 条曲线分别代表气囊工具在大口径非球面一个截面上平均分布的 5 个抛光点上时(图中点 1~5),气囊工具在以工件抛光点局部法线为中心,以进动角度为倾角在 $0\sim 360^\circ$ 变化时刚度的变化情况,由图可以看出,气囊工具刚度随抛光点的位置变化而变化,并且在同一抛光点上时,刚度随气囊工具倾角的变化呈非线性变化趋势。图 7 的 5 条曲线分别代表气囊工具在大口径非球面一个截面上平均分布的 5 个抛光点上,工件对气囊工具反作用力在 $0\sim 500$ N 变化时,刚度的变化情况,刚度随抛光点的位置变化明显,而在同一抛光点上时,刚度随工件对气囊工具反作用力的变化亦呈非线性变化趋势。

气囊抛光的进动运动控制采用最有效率控制算法,该算法的核心思想是^[9]:利用控制算法保持抛光时各抛光点进动角不变的情况下,使得进动过程中两个转角的绝对值和最小,即 z_3 和 z_4 轴转过的角度的绝对值和取

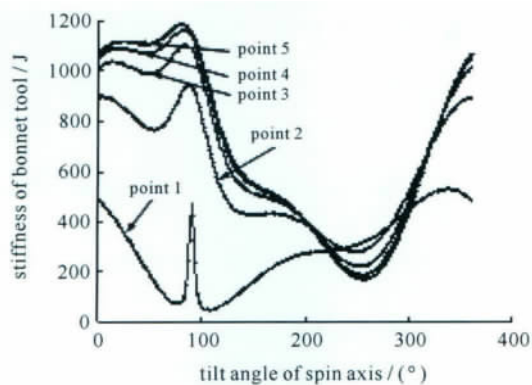


Fig. 6 Relationship between stiffness and space position of bonnet tool

图 6 刚度与气囊工具空间位置关系图

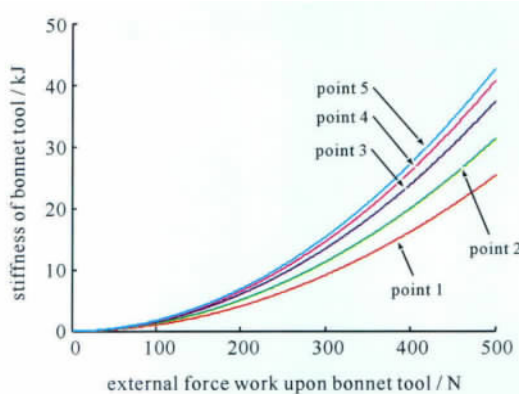


Fig. 7 Relationship between stiffness and reacting force on bonnet tool

图 7 刚度与工件的反作用力的关系

最小值时,这样可以减少工艺时间提高抛光效率。由于在最有效率算法运动控制的情况下,气囊工具空间位置可以确定,因此,只能通过调节气囊工具对工件压力的大小来调节工件对气囊工具的反作用力,进而控制抛光时气囊工具的刚度。

2.3 仿真分析

由气囊工具刚度对抛光的影响分析中可知,气囊工具刚度只有在一定范围内才不影响气囊抛光接触区的形状及应力分布。因此,设计如图 8 所示的气囊工具刚度可控性流程。

气囊工具刚度控制算法的设计思想是:绘制出最有效率算法控制下,气囊抛光轴对称非球面各抛光点时气囊工具的刚度曲线,并根据气囊工具刚度曲线上的各点值设置刚度标准值,刚度标准值为刚度曲线上所有刚度值的平均值,而后根据上个步骤中得到的外力可调整范围进行力迭代补偿,使得气囊工具刚度曲线更加均匀,符合控制要求,达到刚度可控性的目的。

根据该算法调控前后,气囊工具刚度的曲线如图 9 所示。图 9 中仿真结果表明,在外力调控下,气囊刚度可以实现可控性。在刚度标准值根据加工要求设定以后,即可通过调节工件对气囊工具的反作用力,使得气囊抛光大口径轴对称非球面过程中,气囊工具更加稳定,以实现可控抛光中材料去除的可控性。

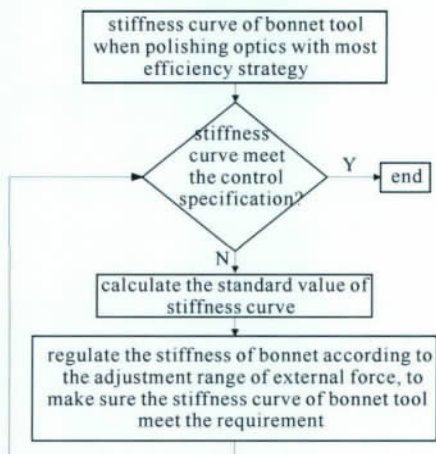


Fig. 8 Flow chart of stiffness control algorithm of bonnet tool

图 8 气囊工具刚度控制算法流程

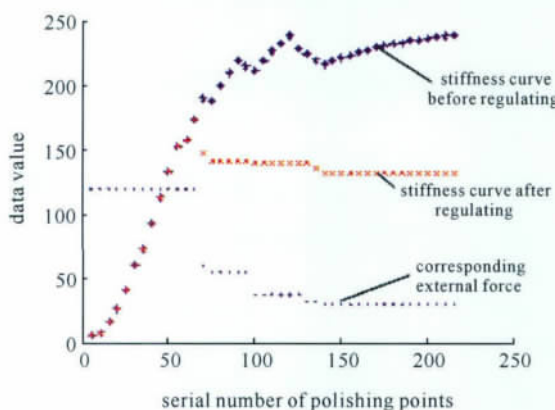


Fig. 9 Comparison of stiffness of bonnet tool before and after regulating and its corresponding force

图 9 气囊工具刚度调控前后比较及对应的作用力

3 结论

本文计算了气囊工具抛光大口径非球面时的刚度,并在 ANSYS 仿真软件中研究气囊工具刚度对抛光的影响,结果表明气囊工具刚度通过影响抛光时抛光接触区的形状及应力分布来影响抛光中材料去除的可控性。通过模拟试验研究气囊工具刚度的影响因素,得出气囊工具的空间位置及抛光时工件对气囊的反作用力对气囊抛光大口径轴对称非球面过程中的刚度有较大的影响。最后,设计气囊工具刚度控制算法,计算最有效率抛光方式下气囊工具的刚度曲线,并根据曲线设置刚度标准值,而后通过调节工件对气囊工具的反作用力对气囊

工具刚度进行控制。仿真结果证明了该算法的正确性,使得抛光大口径轴对称非球面过程中气囊工具的刚度实现可控性,从而达到抛光中材料去除可控性的目的。

参考文献:

- [1] Walker D, Beaucamp A, Bingham R, et al. Precessions process for efficient production of aspheric optics for large telescopes and their instrumentation[C]//Proc of SPIE. 2002, **4842**:73-84.
- [2] Walker D, Brooks D, King A, et al. The ‘Precessions’ tooling for polishing and figuring flat, spherical and aspheric surfaces[J]. *Optical Express*, 2003, **8**(11):958-964.
- [3] 侯晶,许乔,雷向阳,等.基于 Marangoni 界面效应的数控化学抛光去除函数的研究[J].强激光与粒子束, 2005, **17**(4):555-558. (Hou Jing, Xu Qiao, Lei Xiangyang, et al. Removal function of computerized numerical controlled chemical polishing based on the Marangoni interface effect. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(4):555-558)
- [4] 王健,鄢定尧,李洁,等.非球面聚焦透镜数控加工技术研究[J].强激光与粒子束, 2003, **15**(10):951-954. (Wang Jian, Yan Dingyao, Li Jie, et al. Computer controlled optical surfacing aspherical lens. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(10):951-954)
- [5] 高波,姚英学,谢大纲,等.气囊抛光进动机构的建模与仿真[J].机械工程学报, 2006, **42**(2):101-104. (Gao Bo, Yao Yingxue, Xie Dagang, et al. Movement modeling and simulation of precession mechanism for bonnet tool polishing. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, **42**(2):101-104)
- [6] Song Jianfeng, Yao Yingxue, Xie Dagang, et al. Effects of polishing parameters on material removal for curved optical glasses in bonnet polishing[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, **21**(5):29-33.
- [7] 计时鸣,金明生,张宪,等.应用于模具自由曲面的新型气囊抛光技术[J].机械工程学报, 2007, **43**(8):2-6. (Ji Shiming, Jin Mingsheng, Zhang Xian, et al. Novel gasbag polishing technique for free-form mold. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, **43**(8):2-6)
- [8] 潘日,杨炜,王振忠,等.大口径非球面元件可控气囊抛光系统[J].强激光与粒子束, 2012, **24**(6):1344-1348. (Pan Ri, Yang Wei, Wang Zhenzhong, et al. Controlled bonnet polishing system for large aspheric lenses. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(6):1344-1348)
- [9] 潘日,王振忠,郭隐彪,等.大口径轴对称非球面气囊抛光进动运动建模及控制[J].机械工程学报, 2012, **48**(11):183-190. (Pan Ri, Wang Zhenzhong, Guo Yinbiao, et al. Movement modeling and control of precession mechanism for bonnet tool polishing large axisymmetrical aspheric lenses. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2012, **48**(11):183-190)
- [10] 黄真,孔令富,方跃法.并联机器人机构学理论与控制[M].北京:机械工业出版社, 1997. (Huang Zhen, Kong Lingfu, Fang Yuefa. Mechanism theory and control of parallel robot. Beijing: China Machine Press, 1997)
- [11] Pan Ri, Wang Zhenzhong, Wang Chunjin, et al. Optimization of key technological parameters in bonnet polishing using FEA[J]. *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, 2012, **33**(5):373-382.

Controllability of stiffness of bonnet tool polishing large aspheric lenses

Wang Zhenzhong¹, Pan Ri¹, Guo Yinbiao¹, Zhang Dongxu¹, Xie Yinhui¹, Wang Jian²

(1. Department of Physics and Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China)

Abstract: The controllability of stiffness of bonnet tool polishing large aspheric lenses was studied, aiming to ensure the high stability and uniform removal rate of bonnet tool in polishing process. After analyzing the force situation of bonnet tool when polishing large aspheric lenses, the stiffness of the bonnet tool was calculated, and then influencing factors of stiffness of bonnet tool and the effects brought by stiffness of bonnet in polishing process were discussed. After that, control algorithm of bonnet tool was designed and simulated experiments were carried out, the results revealed that the controllability of stiffness of bonnet tool in polishing process could be achieved, which verified the correctness of the control algorithm.

Key words: large aspheric lenses; bonnet polishing; stiffness; controllability