

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0040-04

大型非球面数控小工具抛光技术的中高频差的抑制

房 凯 伍 凡 万 勇 建 范 斌

(中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要 数控小工具技术(CCOS)是目前大型非球面光学零件抛光中很重要的一种加工方式。数控小工具加工模型建立在普林斯顿(Princeton)假设基础之上,通过计算机控制小工具在工件表面的驻留时间及其他参数来实现工件表面材料的精确去除。在实际工作中发现,运用 CCOS 技术加工过的镜面上总会出现比较严重的中高频差(周期 ≤ 33 mm),并且不易消除。设计一种被动式应力盘来解决这一问题,利用 ANSYS 软件模拟该柔性抛光盘在加工中的变形情况,计算出抛光效果最好时两个变形层的厚度。这种柔性抛光盘在 $\phi 420$ mm $f/2$ 的非球面实验件的抛光中运用,经过约 3 h 的平滑,消除了大部分中高频差并且非球面面形精度保持比较理想。

关键词 非球面光学;数控小工具技术;被动式应力盘;中高频差

中图分类号 TQ171.6 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0040

Smoothing the Ripples in Polishing Aspheric Optical Surfaces with Computer Controlled Optical Surface Technology

Fang Kai Wu Fan Wan Yongjian Fan Bin

(Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

Abstract Computer controlled optical surface (CCOS) technology is a very important method to fabricate large aspheric optical surfaces. Computer numerical controlled small tool technology is based on Princeton hypothesis. It used a small lap which travels over the work-piece surface. By accurately controlling the dwell time and other parameters, a prescribed amount of material can be removed at each point on the surface. There is the problem in the process of manufacturing. Aspheric optical elements, which fabricated using computer controlled optical surface technology, almost have medium high-frequency (≤ 33 mm period) errors on their surfaces, and very difficult to remove. A flexible tool is fabricated in order to deal with the problem. The transmutation of the flexible tool has been simulated. The thickness of the two kind of flexible material has been calculated by the simulation. The flexible tool had been used in the manufacture process of $\phi 420$ mm $f/2$, paraboloidal mirror. After three hours of smoothing with the flexible tool, almost all medium high-frequency errors have been removed, and the precision of aspheric optical surface isn't destroyed.

Key words aspheric optics; computer controlled optical surface; flexible tool; medium high-frequency error

1 引 言

非球面光学零件在应用方面有诸多优点,在光学系统中能够很好地矫正多种像差,改善成像质量,提高系统鉴别能力,实现大视场和建立体积小且重量轻的光学系统^[1]。

在大型非球面的加工中,经典的加工方式:正盘细磨到最接近球面,然后在抛光阶段进行非球面化。当遇到高陡度的非球面时,在抛光阶段非球面化将

大大延长加工周期。并且传统加工方式在精抛光阶段修抛非对称误差时,容易使工件球面化。数控小工具(CCOS)加工技术^[2~5]利用计算机控制一个比被加工工件小得多的研磨头或抛光头在工件表面上移动,通过控制磨头与工件间的相对运动速度,压力以及磨头在表面某一区域的停留时间实现对材料去除量的控制,它可以很好地克服传统加工方式中遇到的问题。CCOS 加工方式可以在细磨阶段就实现

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60808017)资助课题。

作者简介: 房 凯(1979—),男,硕士研究生,主要从事光学数控加工技术方面的研究。E-mail: fangkai66@hotmail.com

导师简介: 伍 凡(1957—),男,研究员,博士生导师,主要从事先进光学制造和检测技术等方面的研究。

E-mail: wufan@ioe.ac.cn

非球面化,所以大大缩短了后期抛光周期。由于磨盘较小、定位和定量修抛精确,所以局部修抛能力很强,在修抛非对称误差时效率很高,并且球面化的影响很小。

尽管 CCOS 加工技术有很多优势,但是它也有自身的缺点。在实际加工中发现,由于磨盘吻合度、运动轨迹、自转公转等因素的影响,在精抛光阶段面形达到一定精度时会出现比较严重的中高频误差,这些误差是细磨和抛光阶段积累出来的。因为 CCOS 磨盘和运动方式的限制很难去除这些中高频差;经典方法用整盘平滑虽然有较好的效果,但是球面化效果严重,大大破坏面形精度,使加工周期延长。

本文结合实际工程任务,依托本单位自行研制的 $\phi 800$ mm CCOS 加工设备,设计被动式应力盘来解决 CCOS 抛光过程中出现的中高频差问题,丰富 CCOS 加工技术手段。

2 CCOS 加工方式

计算机控制光学加工技术是用计算机控制一个小磨头(直径通常小于工件直径的 $1/4$)对光学零件进行研磨或抛光,通过控制磨头在工件表面的驻留时间及磨头与工件间的相对压力来控制材料的去除量。描述光学表面成形最成功的模型是 Princeton 假设,即

$$\Delta Z(x, y) = kP(x, y)V(x, y), \quad (1)$$

式中 $\Delta Z(x, y)$ 为磨头与工件接触区域中某点 (x, y) 单位时间内的材料去除量; $P(x, y)$ 为磨头与工件在对应点处的相对压力; $V(x, y)$ 为磨头与工件在对应点处的相对运动速度; k 为与加工过程有关的比例常数(温度、磨头材料等)。

假设 $D(x, y)$ 为磨头的驻留时间函数,它表示磨头在点 (x, y) 处的驻留时间。这样,磨头在工件表面以不同的速度移动时工件表面材料去除量的分布函数 $E(x, y)$ 与 $D(x, y), R(x, y)$ 的关系为

$$E(x, y) = \iint R(x, y)D(x - \xi)(y - \eta)d\xi d\eta. \quad (2)$$

(2)式表明在 CCOS 加工过程中,材料的去除量等于小磨头工作函数 $R(x, y)$ 与其驻留时间 $D(x, y)$ 沿其运动路径的卷积,这就是 CCOS 加工过程中最重要的理论依据。

3 被动式应力盘设计

传统数控小工具的细磨盘采用金属盘,抛光盘采用沥青盘,都属于刚性磨盘,变形能力几乎没有,

磨盘的面形又只能按照工件的最接近球面半径来做,所以对于非球面的工件面形来说刚性磨盘的吻合度不是很理想,再加上是采用行星运动方式(行星运动方式及其去除函数如图 1 和图 2 所示),造成了工件表面各点的去除率出现差异。经过细磨到抛光数个加工周期的积累,面形达到一定精度时中高频差就显现出来了。

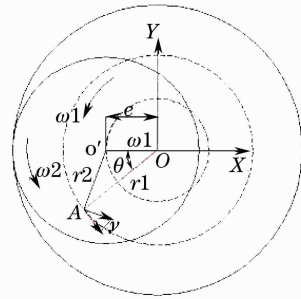


图 1 CCOS 行星运转模型

Fig. 1 Planet model of CCOS

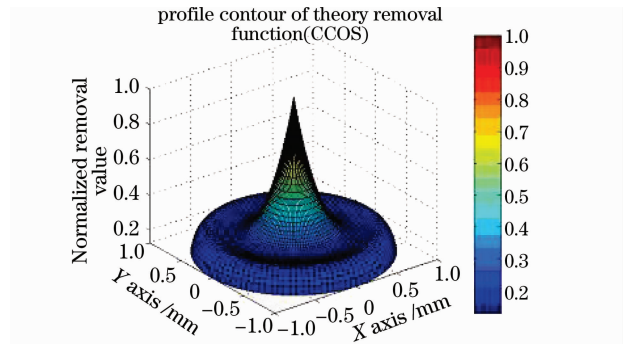


图 2 CCOS 去除函数分布图

Fig. 2 Material removal function of CCOS

被动式应力盘可以较好地解决磨盘和镜面的吻合度问题。它主要由刚性基底、两个变形层和聚胺脂抛光层组成。刚性基底面形为球面,球面半径等于待加工非球面最接近球面半径,将变形层和抛光依次粘接到基底上^[6~8],被动半刚性磨盘结构示意图如图 3 所示。

被动半刚性磨盘的实物如图 4 所示,其变形层和聚胺脂抛光层的厚度由 ANSYS 模拟软件仿真计

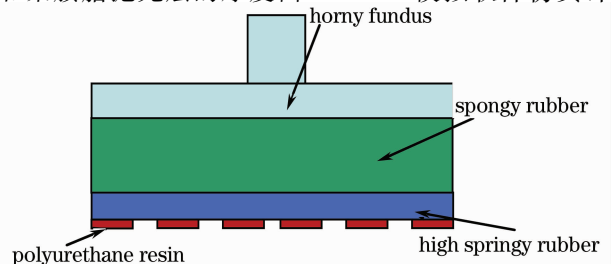


图 3 被动式应力盘结构示意图

Fig. 3 Sketch map of passive semi-rigid tool

算得出。具体模拟过程如下:将抛光盘边缘与工件发生最大非球面度的位置重合(一般是镜面 0.7 带处),对抛光盘施加载荷使其发生变形与工件非球面吻合,与此同时抛光盘表面根据工件表面的中高频误差发生变形与之吻合。如图 5 所示,A,B 两点位于抛光盘两端, δ_A, δ_B 分别代表非球面变形后两端所受应力,称为大周期变形应力;C,D 代表中高频差的峰值位置和谷值位置, δ_C, δ_D 代表其变形后所受应力,称为小周期变形应力。为了使被动式应力盘达到最好的抛光效果,即最大限度地消除中高频差的同时保持非球面面形,反映到理论模型上为: $\delta_C - \delta_D$ 要尽可能大, $\delta_A - \delta_B$ 要尽可能小,即在各种条件约束下使 $(\delta_A - \delta_B) / (\delta_C - \delta_D)$ 达到最小。在 ANSYS 软件仿真通过给定约束条件:非球面和最接近球面的理论公式、镜面和被动式应力盘口径、中高频差的周期和幅值、变形材料的弹性模量和泊松比、变形材料厚度范围。通过计算得出当 $(\delta_A - \delta_B) / (\delta_C - \delta_D)$ 达到最优值时两个变形层材料的厚度,仿真结果如图(6)所示。

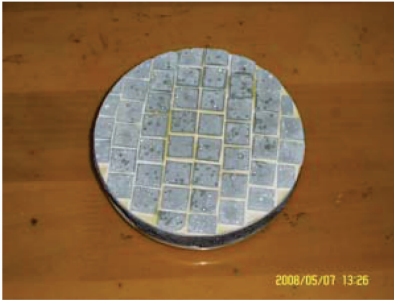


图 4 被动式应力盘实物

Fig. 4 Passive semi-rigid tool

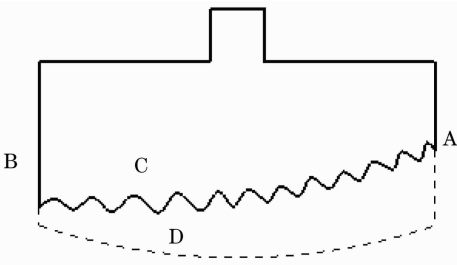


图 5 被动式应力盘变形示意图

Fig. 5 Sketch map of semi-rigid tool distortion

为了确定抛光压力 p 与面形误差频率 ξ_i 之间的相互关系,将被加工零件的表面 s 表示为不同频率傅里叶分量的叠加,即

$$s = \sum_i u_i \cos(2\xi_i \pi x),$$

则抛光压力 p ^[9,10]

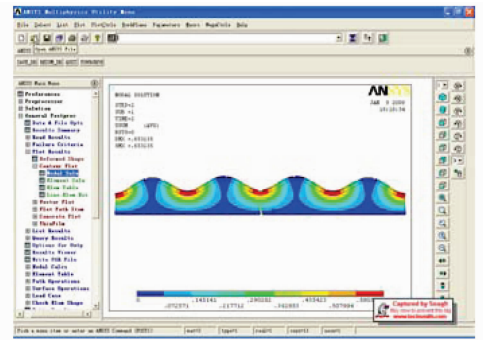


图 6 ANSYS 对磨盘变形模拟分析

Fig. 6 Analyzing result of tool distortion

$$p = q_0 + \sum_i \frac{S_i}{1/D(2\pi\xi_i)^4 + 1/D_s(2\pi\xi_i)^2 + 1/K_C}, \quad (3)$$

式中 $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$, $D_s = \frac{Eh}{2(1+\nu)}$, q_0 为外加载荷, K_C 为抛光层的抗压刚度, D 为变形层抗弯刚度, D_s 为变形层横向剪切刚度, u_i 为不同频率误差的幅值, h 为变形层厚度, E 为杨氏模量, ν 为泊松比。

4 被动式应力盘应用及实验结果

实验中选择的两种弹性材料参数为:橡胶发泡材料(大周期变形层) $E = 0.0067$ GPa, $\nu = 0.57$;高弹力橡胶层(小周期变形层) $E = 0.0072$ GPa, $\nu = 0.52$,经过变形分析后计算出最佳厚度分别为 12 mm 和 1.5 mm。

$\phi 420$ mm $f/2$ 的抛物面镜利用 CCOS 技术加工,当精度达到峰谷值 $PV = 0.25\lambda$ 左右时从干涉仪检测结果可以看到比较严重的中高频差。利用上述分析方法做出的 $\phi 150$ mm 被动式应力盘对其进行平滑,在平滑抛光大概 3 h 后就可以看到比较明显的变化:中高频差明显消除,同时面形精度没有被破坏。平滑前后面形误差如图 7 所示,平滑前面形精

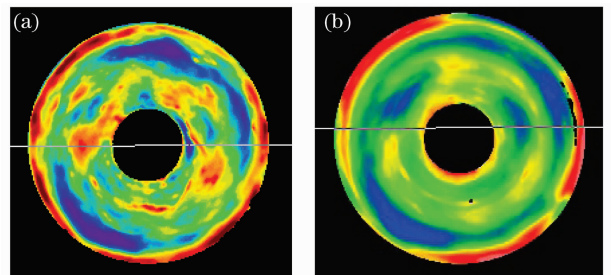


图 7 面形误差。(a)平滑前面形误差;(b)平滑后面形误差

Fig. 7 Surface error. (a) before smoothing; (b) after smoothing

度为 $PV=0.255\lambda$ ($\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$), 均方根 $RMS=0.035\lambda$; 平滑后面形精度为 $PV=0.236\lambda$, $RMS=0.031\lambda$ 。

5 结 论

在基于 CCOS 加工技术的大口径非球面的加工过程中, 出现中高频差是不可回避的问题, 传统的刚性小工具磨盘很难解决这一问题。实验证明利用 ANSYS 软件设计的被动式应力盘在精抛光后期可以较好地平滑掉绝大部分中高频差, 同时保证面形精度不被破坏。刚性磨盘和柔性抛光盘相结合的加工方式丰富了 CCOS 技术的加工手段。

参 考 文 献

- 1 Yang Li. Advanced Optical Manufacture Technology [M]. Beijing: Science Press, 2001
杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001
- 2 Wang Quandou. Study on computer controlled manufacturing technology of off-axis aspherics [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chines Academy of Scieces, 2000, 1~3
王权陡. 计算机控制离轴非球面制造技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2000, 1~3
- 3 Yu Jingchi, Zhang Xuejun, Sun Xiafei *et al.*. On the technology of computer controlled optical surfacing[J]. *Optical Technique*, 1998, **5**(3): 6~8
余景池, 张学军, 孙侠菲等. 计算机控制光学表面成形技术综述[J]. 光学技术, 1998, **5**(3): 6~8
- 4 Zhang Xuejun, Weng Zhicheng, Zhang Zhongyu *et al.*. Manufacturing and testing of two off-axis aspherical mirrors[C]. *SPIE*, 2001, **4451**: 118~125
- 5 Cheng Haobo, Zhang Xuejun, Zheng Ligong *et al.*. Optimizing the moving-orbit for off-axis aspheric manufacturing and testing [J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(2): 247~249
程灏波, 张学军, 郑立功等. 离轴非球面加工、检测轨迹优化研究[J]. 光学技术, 2003, **29**(2): 247~249
- 6 J. H. Burge, B. Anderson, S. Benjamin *et al.*. Development of optimal grinding and polishing tools for aspheric surfaces[C]. *SPIE*, 2001, **4451**: 153~164
- 7 P. K. Mehta, P. B. Reid. A mathematical model for optical smoothing prediction of high-spatial frequency surface errors[C]. *SPIE*, 1999, **3786**: 447~459
- 8 R. A. Jones. Computer simulation of smoothing during computer controlled optical polishing [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(7): 1162~1169
- 9 P. K. Mehta, R. E. Hufnagel. Pressure distribution under flexible polishing tools 21 Conventional aspheric optics [C]. *SPIE*, 1990, **1303**: 178~188
- 10 M. T. Tuell, J. H. Burge, B. Anderson. Aspheric optics: smoothing the ripples with semi-flexible tools[J]. *Opt. Eng.*, 2003, **41**(7): 1473~1474