

# 被动半刚性磨盘在平滑中频误差中的应用\*

汉语<sup>1,2</sup>, 伍凡<sup>1</sup>, 万勇建<sup>1</sup>, 房凯<sup>1</sup>

(1. 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 介绍了一种去除中频误差的有效工具——被动半刚性磨盘。被动半刚性磨盘由刚性基底、变形层、薄板层以及抛光层组成。这种特殊的夹层式结构使磨盘在平滑过程中具有高滤波特性,因而能够有效去除中频误差。基于弹性力学和滤波器理论,分析了被动半刚性磨盘的平滑机理,讨论了磨盘基本参数和误差频率之间的相互关系。以一块表面具有明显中频误差的抛物面镜为实验件,对被动半刚性磨盘的平滑能力进行验证,经过 2 个周期(共计 75 min)的平滑后,中频误差得到了有效抑制。

**关键词:** 光学加工; 被动半刚性磨盘; 应力分析; 中频误差; 非球面

**中图分类号:** TQ171.6      **文献标志码:** A      **doi:**10.3788/HPLPB20102202.0319

强光光学系统对光学元件表面质量的要求极其严格,不仅要求达到很高的面形精度,而且对中频误差(波纹度误差)也提出了控制要求。中频误差是强激光系统中引发非线性自聚焦的重要原因,对激光系统的安全运行存在着很大的危害,必须将其控制在一定范围内。目前国内外大口径、高精度非球面光学元件的加工主要采用计算机控制光学表面成型技术(CCOS),虽然该方法具有高精度、高效率以及不受面形误差分布影响等优点,但是由于 CCOS 技术的子口径修磨加工特性以及该技术所采用的刚性磨头与被加工零件表面不吻合等原因,导致了利用 CCOS 技术所获得的非球面光学元件表面通常带有明显的中频误差<sup>[1-4]</sup>。对于中频误差的处理,通常采用的方法是用与被加工非球面顶点曲率半径和口径相近的胶盘对工件表面进行平滑,这种方法利用沥青的流动性来保证工件表面与胶盘的吻合,因而只适用于相对口径较小的非球面的平滑。对于大相对口径非球面来讲,仅凭沥青的流动性已无法保证镜面和胶盘的吻合,若仍用这种方法进行平滑,则势必对镜面原有面形造成较大破坏,甚至导致加工过程的反复。本文介绍了一种新型的中频误差平滑工具——被动半刚性磨盘。基于弹性力学理论,推导出被动半刚性磨盘作用下工件表面抛光压力分布;运用滤波器理论,对磨盘的幅频特性进行了讨论;最后通过实验验证了被动半刚性磨盘平滑中频误差的有效性。

## 1 被动半刚性磨盘的结构

被动半刚性磨盘由刚性基底、变形层、金属薄板以及抛光层构成<sup>[5-7]</sup>,其结构如图 1 所示。之所以采用这种特殊的夹层式结构,是为了使磨盘在被动变形的同时,具有足够的刚度,这样才能在尽量不破坏原有面形的同时,尽可能去除中频误差。被动半刚性磨盘中,刚性基底传递外加载荷,变形层为薄板层的变形提供了空间。

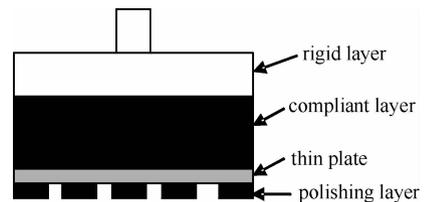


Fig. 1 Structure of passive semi-rigid tool  
图 1 被动半刚性磨盘结构示意图

## 2 被动半刚性磨盘的应力分析

根据弹性力学理论中的 Mindlin-Timoshenko 模型,考虑横向剪应力的弹性薄板的变形满足下列微分方程组<sup>[8-10]</sup>

$$\begin{cases} \nabla^2 \Phi = -\frac{q}{D} \\ \nabla^2 w = -\Phi - \frac{q}{D_s} \\ \nabla^2 \Psi - \frac{2D_s}{(1-\nu)D} \Psi = 0 \end{cases} \quad (1)$$

\* 收稿日期:2009-05-20; 修订日期:2009-10-26

基金项目:国家自然科学基金项目(60808017)

作者简介:汉语(1980—),男,博士,主要从事先进光学加工和检测技术研究; ccgj00311222@yahoo.com.cn.

式中:  $q$  为薄板受到的总的外加载荷;  $w$  为考虑横向剪切应力的薄板挠度;  $D$  为抗弯刚度;  $D_s$  为横向剪切刚度;  $\nabla^2$  为拉普拉斯算子;  $\nu$  为泊松比;  $\Phi = \nabla \cdot \boldsymbol{\varphi}$ ,  $\Psi = (\nabla \times \boldsymbol{\varphi})_z$ ,  $\boldsymbol{\varphi}$  为旋转矢量。假设薄板中任意一点  $P$  变形后位置为  $P_1$ , 则旋转矢量  $\boldsymbol{\varphi}$  定义为由  $P$  点在  $xy$  平面内的投影点指向  $P_1$  点在  $xy$  平面内的投影点的矢量, 如图 2 所示。

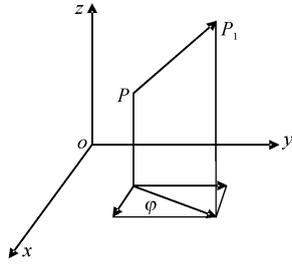


Fig. 2 Rotation vector

图 2 旋转矢量

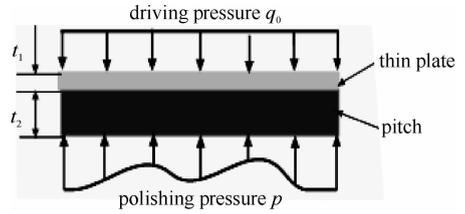


Fig. 3 Sketch map of the lap strain

图 3 磨盘受力示意图

磨盘的受力情况如图 3 所示, 在外加载荷  $q = p - q_0$  的作用下, 弹性薄板产生变形  $w$ , 同时抛光层(沥青)在挤压作用下产生挤压变形  $w_c$ , 若磨盘与被加工零件表面  $s$  吻合, 则抛光层的挤压变形可以表示为  $w_c = s - w$ 。抛光层的挤压变形与抛光压力成正比, 即

$$p = K_c w_c = K_c (s - w) \quad (2)$$

式中:  $K_c$  为抛光层的抗压刚度。

为了确定抛光压力与工件表面空间频率之间的相互关系, 将被加工零件的表面  $s$  表示为不同频率分量  $s_i$  的叠加, 本文中为了便于计算和表述, 只考虑一种简单的 1 维情况, 即

$$s = \sum_i s_i = \sum_i u_i \cos(2\xi_i \pi x) \quad (3)$$

式中:  $u_i$  为振幅;  $\xi_i$  为空间频率。

将式(1)~(3)联立, 可以求得抛光压力

$$p = q_0 + \sum_i \frac{s_i}{1/D(2\pi\xi_i)^4 + 1/D_s(2\pi\xi_i)^2 + 1/K_c} \quad (4)$$

式中:  $D(2\pi\xi)^4$  项对应板的弯曲变形;  $D_s(2\pi\xi)^2$  项与横向剪切变形相对应。当薄板变形以弯曲变形为主时, 抛光压力  $p$  与空间频率  $\xi$  的四次方成正比且与工件表面法线方向保持同向, 因而能够优先去除面形误差中的高频分量; 当薄板变形以横向剪切变形为主时, 抛光压力方向与工件表面法线方向异向, 这样会对工件表面原有面形造成很大破坏并且平滑过程也是不稳定的。因此在理想的状态下, 我们希望薄板的变形以弯曲变形为主。令  $D(2\pi\xi)^4 \geq D_s(2\pi\xi)^2$ , 将  $D = Eh^3/12(1-\nu^2)$ ,  $D_s = Eh/2(1+\nu)$  代入式(4), 得到薄板弯曲变形和剪切变形的临界厚度

$$h = \frac{\sqrt{6(1-\nu)}}{2\pi\xi} \quad (5)$$

当薄板厚度大于临界厚度时, 薄板变形以弯曲变形为主, 反之则以横向剪切变形为主。由式(5)可知, 空间频率与薄板的临界厚度成反比, 空间频率越高, 薄板临界厚度越小, 二者关系如图 4 所示。

### 3 磨盘的幅频特性

令  $\eta = \sum_i \frac{1}{1/D(2\pi\xi_i)^4 + 1/D_s(2\pi\xi_i)^2 + 1/K_c}$ , 则式(4)简化为

$$p = q_0 + \eta s \quad (6)$$

根据普林斯顿假设, 某一点的材料去除量与该点的压力、驻留时间以及相对速度成正比, 当其它参数保持不变时, 可以用压力的分布来表示材料去除量的分布。因此式(6)可以表示为

$$\eta = \frac{p - q}{s} = \frac{k(p - q)}{ks} = \frac{s'}{ks} \Rightarrow \frac{s'}{s} = k\eta \quad (7)$$

式中:  $s$  和  $s'$  均为空间频率的函数,  $s'$  代表薄板层在  $p$  和  $q_0$  的共同作用下产生的变形,  $s'$  中  $k p$  为工件表面的材料去除量;  $k q_0$  为常数, 因而  $s'$  与工件表面的材料去除量具有相同的频率。若将磨盘视为一个滤波器,  $s$  视为输

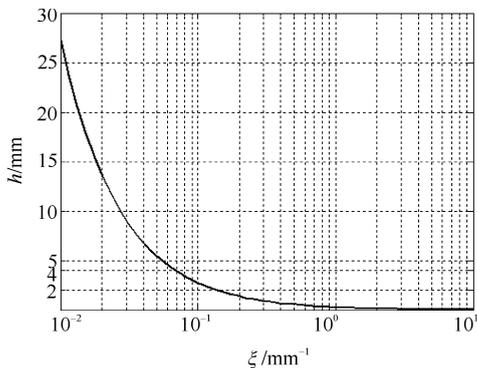


Fig. 4 Breakpoint of thin plate thickness between flexural deformation and transverse deformation, as a function of spatial frequency

图 4 薄板弯曲变形与剪切变形的临界厚度

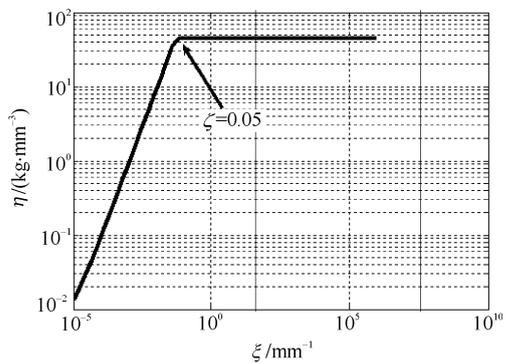


Fig. 5 Characteristic of amplitude-frequency response

图 5 幅频特性曲线

入信号,  $s'$  视为输出信号, 则根据电子学中的滤波器理论可知,  $k\eta$  恰好与幅频特性的概念相一致, 因为  $k$  为常数, 所以可以用  $\eta$  表示磨盘的幅频特性。假设工件表面的面形误差频率以  $\xi=0.05 \text{ mm}^{-1}$  为主, 则根据式(5)可以求得薄板层以弯曲变形为主的临界厚度  $t_1=6 \text{ mm}$ , 绘出磨盘的幅频特性曲线, 如图 5 所示。由该图可知, 磨盘具有高通滤波特性, 输入信号中频率较高的分量能够顺利通过该滤波器, 即输出信号主要由输入信号中的高频分量构成。而在平滑过程中工件表面的材料去除量与  $s'$  具有相同的频率, 也就是说工件表面的材料去除量以原有面形中的高频分量为, 因此被动半刚性磨盘具有良好的平滑能力。

### 4 加工实例

利用计算机控制光学表面成型技术加工一块  $\phi 418 \text{ mm}$  的  $f/2$  抛物面反射镜(凹面), 其干涉仪检验结果如图 6(a) 所示, 虽然面形误差已经收敛到峰值(PV)误差  $0.24\lambda$ , 均方根(RMS)误差  $0.03\lambda$ , 但是其表面带有明显的中频误差。功率谱密度计算结果表明, 工件表面的误差频率主要在  $0.12 \text{ mm}^{-1}$  左右, 根据式(5)求得薄板层的临界厚度  $t_1=2 \text{ mm}$ 。粘接  $\phi 150 \text{ mm}$  被动半刚性磨盘, 实物如图 7 所示 ( $t_1=2 \text{ mm}, t_2=6 \text{ mm}$ ), 利用该磨盘对工件表面进行平滑处理, 2 个周期共计 75 min 后, 中频误差去除效果明显。平滑后的干涉检验结果如图 6 (b) 所示, 面形 PV 误差为  $0.249\lambda$ , 略有增大, RMS 误差  $0.03\lambda$ , 基本保持不变。

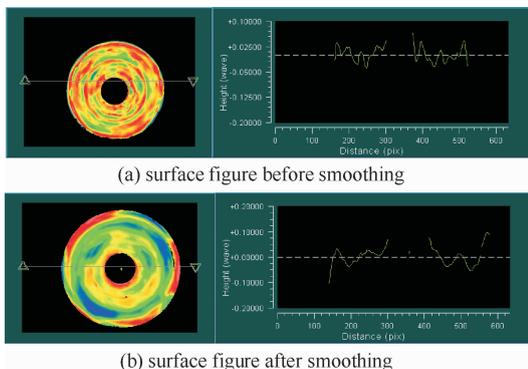


Fig. 6 Surface figures before and after smoothing

图 6 面形误差分布



Fig. 7 150 mm passive semi-rigid lap

图 7 150 mm 被动半刚性盘

### 5 结论

理论分析和实验结果均表明, 被动半刚性磨盘在去除中频误差过程中有着良好的应用前景。使用被动半刚性磨盘对光学元件进行平滑处理, 可以实现中频误差的有效去除, 同时对原有面形不会造成很大破坏。作为一种新型的平滑工具, 被动半刚性磨盘的平滑工艺、磨盘材料的选择、抛光层的粘接方法仍需在大量实验的基础上进一步完善, 后续研究工作将围绕以上几个方面展开。

### 参考文献:

[1] 张蓉竹. ICF 系统光学元件高精度波前检测技术研究[D]. 成都: 四川大学, 2003: 21-31. (Zhang Rongzhu. Studies on high-accuracy wave-front test techniques of optical components in ICF. Chengdu: Sichuan University, 2003: 21-31)

- [2] 余景池, 张学军, 孙侠菲, 等. 计算机控制光学表面成型技术综述[J]. 光学技术, 1998, **5**(3): 6-8. (Yu Jingchi, Zhang Xuejun, Sun Xiafei, et al. On the technology of computer controlled optical surfacing. *Optical Technology*, 1998, **5**(3): 6-8)
- [3] Kim S W, Jee M K. Evolution of surface characteristics in material removal simulation with sub-aperture tools[C]//Proc of SPIE. 2002, **4411**: 112-119.
- [4] Jones R A. Computer simulation of smoothing during computer-controlled optical polishing[J]. *Appl Opt*, 1995, **34**(7): 1162-1169.
- [5] Michael T T, James H B, Anderson B. Aspheric optics; smoothing the ripples with semi-flexible tools[J]. *Opt Eng*, 2002, **41**(7): 1473-1474.
- [6] Burge J H, Anderson B, Benjamin S, et al. Development of optimal grinding and polishing tools for aspheric surfaces[C]//Proc of SPIE. 2001, **4451**: 153-164.
- [7] Mehta P K, Hufnagel R E. Pressure distribution under flexible polishing tools. 1-Conventional aspheric optics[C]//Proc of SPIE. 1990, **1303**: 178-188.
- [8] 苗天德, 程肠钧. 关于弹性板弯曲变形的 Reissner 理论[J]. 应用数学和力学, 1980, **1**(2): 221-235. (Miao Tiande, Cheng Changjun. On the Reissner theory of bending of an elastic plate. *Applied Mathematics and Mechanics*, 1980, **1**(2): 221-235)
- [9] Mehta P K, Reid P B. A mathematical model for optical smoothing prediction of high-spatial frequency surface errors[C]//Proc of SPIE. 1999, **3786**: 447-459.
- [10] 徐之纶. 弹性力学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979. (Xu Zhilun. Elasticity. Beijing: People's Education Press, 1979)
- [11] Simon H, Barry V V. Signals and Systems[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.

## Research on mid-frequency errors smoothing with a passive semi-rigid lap

Han Yu<sup>1,2</sup>, Wu Fan<sup>1</sup>, Wan YongJian<sup>1</sup>, Fang Kai<sup>1</sup>

(1. *Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 350, Chengdu 610209, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

**Abstract:** Most aspheric optical elements fabricated using computer controlled optical surfacing (CCOS) technology have mid-frequency errors on their surfaces. These errors come about because of the small tools removal characteristic and the misfit between rigid tools and aspheric surface. A passive semi-rigid tool, which can smooth ripple errors efficiently, is introduced in this paper. The tool is composed of a rigid layer, a compliant layer and a polishing layer. The passive tool works like a high-pass filter, smoothing the ripple out without damaging the surface figure. The expression of polishing pressure under the lap is deduced based on elastic plate theory. The relationship between the basic parameters of the lap and error frequency is also discussed. To testify the smoothing ability of the passive lap, a 418 mm,  $f/2$  concave paraboloidal mirror is fabricated with small rigid tools. After two cycles (75 min), most of the mid-frequency errors are smoothed out.

**Key words:** optical fabrication; passive semi-rigid lap; strain analysis; mid-frequency errors; aspheric optics