

# 消除轻质反射镜“压印效应”的技术研究

钟显云 徐清兰 范斌

(中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

**摘要** 随着航天技术的发展, 轻质反射镜的研究正朝着径厚比更大、轻量化更高的趋势发展。然而, 当轻质镜面形精度峰谷(PV)值低于  $0.1\lambda$  时, 镜面面形会明显产生波浪形的“压印效应”。重力及磨头压力所引入的“压印效应”已成为轻质结构反射镜高精度加工的技术壁垒。通过有限元 Ansys 软件仿真分析, 采取从轻质镜结构内部施加反向压强的方法, 消除轻质镜面抛光区域由于磨头压力及重力作用产生的镜面弹性形变, 在满足普林斯顿去除函数方程条件下消除轻质镜面的“压印效应”。由仿真结果得到浸入充气式方法不但能消除“压印效应”, 反射镜抛光面面形精度更优于重力状态。

**关键词** 光学制造; 压印效应; 有限元仿真; 浸入式

**中图分类号** TG580.23<sup>+</sup>3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0722002

## Study on Elimination of "Imprinting Effect" of Lightweight Reflector

Zhong Xianyun Xu Qinglan Fan Bin

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

**Abstract** With the development of aerospace technology, research of lightweight reflector is focusing on the mirrors with a larger radius to thickness ratio and higher lightweighting. However, when the surface accuracy of lightweight mirrors, such as PV values of below  $0.1\lambda$ , mirror surface will obviously shows "imprinting effect" like the wave. The "imprinting effect" derives from the gravity and the pressure of polishing head has become a barrier for high-precision processing of lightweight reflector. It is mainly researched a new way that fills air into the inside of mirrors to resist the elastic deformation resulting from the pressure of polishing head. The simulation result shows that the immersion charge-method can eliminate the "imprinting effect", and the shape accuracy of mirrors is also much better than that caused by gravity.

**Key words** optical fabrication; imprinting effect; finite element simulation; immersion method

**OCIS codes** 220.4610; 220.5450; 230.4040

## 1 引言

近几年,随着航天技术的发展,具有高强度、低变形和高反射率的功能材料(如熔石英、ULE、微晶和 SiC 等)在该领域得以迅速应用<sup>[1,2]</sup>。为追求光学系统的集光能力和分辨能力,并节约制造与发射成本,一般通过采用轻质大尺寸非球面光学元件来提高系统成像质量,且镜面的厚度越来越薄,即主镜的径厚比越来越高<sup>[3~5]</sup>。目前,轻质结构反射镜轻量化的形式主要有三角形、扇形、蜂窝形、圆形及异性孔形等。不同的轻量化结构对轻质镜的减重程度、

结构刚度、转动惯量、温度特性、材料去除率及自重变形等特征产生不同的影响<sup>[6]</sup>。受大口径非球面更高轻量化趋势的影响,轻质镜的装卡与高精度加工方法成了亟待解决的问题。

## 2 “压印效应”的理论分析

目前,高精度轻质反射镜的光学加工方法主要有小磨头(CCOS),磁流变(MRF)及能动磨盘(CCAL)等抛光技术<sup>[7~9]</sup>。然而,为减少轻质反射镜面的中高频误差,一般采用大口径磨盘,即能动磨

收稿日期: 2011-02-21; 收到修改稿日期: 2011-04-11

作者简介: 钟显云(1986—),男,硕士,研究实习员,主要从事先进光学加工方面的研究。

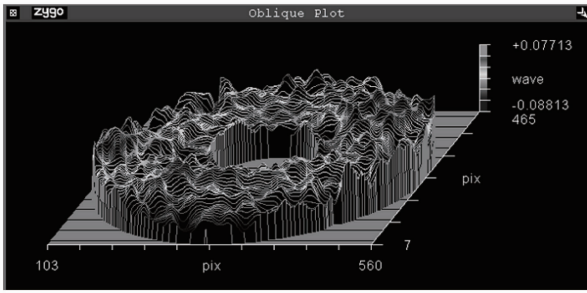
E-mail: zhongxianyun1599@yahoo.com.cn

盘抛光技术对工件进行初步抛光,再采用小磨头对工件进行局部修抛以提高面形精度<sup>[10,11]</sup>。根据普林斯顿假设和线性理论推导,材料去除率函数可表达为

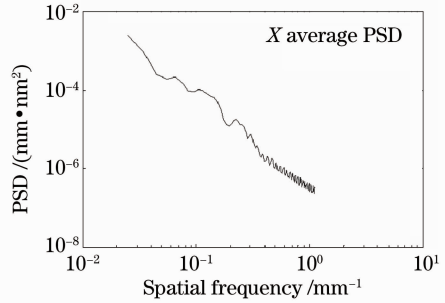
$$\frac{dh}{dt} = KPV,$$

式中  $h$  为去除量,  $t$  为时间,  $V$  为速度,  $P$  为压强,  $K$  为系数。在加工过程中,轻质镜反射面承受的压强  $P$  主要为磨头压力。相对于 CCOS 抛光技术,采用 CCAL 技术抛光时,镜面承受更大压力,弹性变形更

为明显。镜面在磨头压力及重力作用下,结构内部筋支撑区域镜面的弹性变形较孔区域镜面的弹性变形较低,因此,筋支撑区域的镜面去除量较孔区域镜面更多。镜面外力释放后,筋支撑区域凹陷下去,孔区域凸起,当抛光镜面面形达到较高精度时,镜面呈现波浪形。在外加压力作用下,由于轻质镜镜面各点弹性变形不一致而导致高精度抛光后面形呈现波浪形的现象称之为“压印效应”。图 1 为采用 CCAL 加工后,“压印效应”比较明显的非球面轻质镜。



(a) PV: 0.164 λ; RMS: 0.02 λ



(b) one-dimensional average power spectral density (PSD)

图 1 CCAL 加工的蜂窝状轻质镜(ULE)

Fig. 1 Honeycomb lightweight mirror (ULE) polished by CCAL method

### 3 抑制“压印效应”的研究方法

重力及磨头压力所引入的“压印效应”已成为轻质结构反射镜高精度加工的技术壁垒。以下采用有限元 Ansys 分析软件,对以一口径为 φ300 mm 的蜂窝状轻质镜进行分析。轻质镜内部筋的边长为 30 mm,厚度为 3 mm,反射面为球面,曲率半径为 1558 mm,抛光面及筋厚度为 3 mm,其材料为熔石英,如图 2 所示,其性能参数如表 1 所示<sup>[12,13]</sup>。

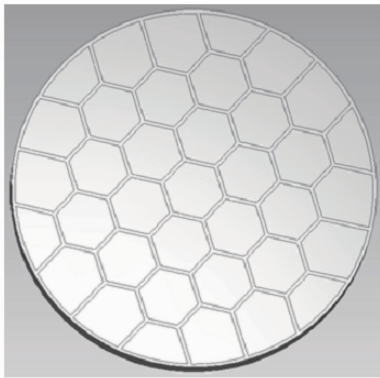


图 2 φ300 蜂窝状轻质镜(熔石英)

Fig. 2 φ300 honeycomb lightweight mirror (fused silica)

抛光时,反射镜背部采用九点法线约束支撑,侧面四点采用切向约束。抛光磨盘为全口径,施加相对压强为 1500 Pa,如图 3 所示。该轻质镜重力变形

表 1 熔石英材料的属性参数

Table 1 Material properties of fused silica

Parameter	Value
Density / (g/cm <sup>3</sup> )	2.19
Young's modulus /GPa	72
Poisson's ratio	0.17
Coef. of thermal expansion /k <sup>-1</sup>	0.5×10 <sup>-6</sup>
Coef. of thermal conductivity /[W/(m·k)]	1.4×10 <sup>-6</sup>

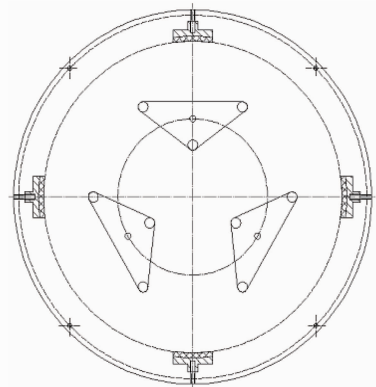


图 3 轻质镜约束示意图

Fig. 3 Restriction schematic of lightweight mirror 及施加磨头压力变形分析结果如图 4,5 所示。由磨头压力变形分析结果可以看出外加压力导致轻质镜

孔区域的过量弹性变形是“压印效应”的主要原因，因此，本文主要探讨采用从轻质镜内部施加反向压强以抑制“压印效应”的技术方法。

消除轻质反射镜“压印效应”的平台设计方法主要有内腔式与浸入式。内腔充气就是直接对轻质结构反射镜的各个蜂窝状内腔施加反向压强，反射镜面在重力，磨头压力及充气压力的作用下达达到平衡，消除了磨头压力的“压印效应”，抛光装置结构简单。然而，内腔气体同时会对圆周壁及支撑面产生压强，圆周壁及支撑面的变形会对结构内部筋产生反向拉力，进而引起反射镜面的变形<sup>[14,15]</sup>。通过仿真分析，如图5所示，抛光时，磨头压强(15 g/cm<sup>2</sup>)会对轻质反射镜面明显产生压印变形，峰谷(PV)值为155.2 nm，均方根(RMS)值为87.4 nm。

采用内腔充气方式，当对各个蜂窝内腔施加的压

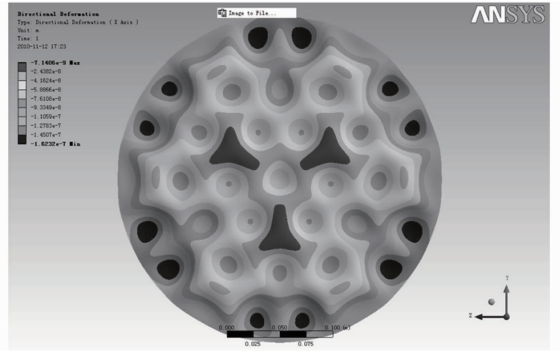


图5 “压印效应”变形

强为1650 Pa时，反射镜的蜂窝界面明显平滑了很多，但整个反射镜面面形精度并没有很大提高，PV值为127.6 nm，RMS值为64.3 nm，如表2所示，镜面变形如图6(a)所示。

浸入式充气方法是将整个抛光工件浸入于密封气缸内，对轻质结构反射镜内腔、外缘及底板同时施加压强，该方法不但消除了反射镜面的“压印变形”，同时保证圆周壁及支撑面的受力平衡。通过对浸入式充气方式抛光技术进行分析，得到浸入式最理想充气压强为1650~1700 Pa，充气压强为1650 Pa时，反射镜面面形精度为PV值为10.7 nm，RMS值为3.1 nm，面形精度优于重力变形状态(PV值为16 nm，RMS值为9.2 nm)，如表3所示，镜面变形如图6(b)所示。此加工方法不仅能消除“压印效应”，也能满足基于普林斯顿去除函数的材料去除方程，最终设计的浸入式充气平台如图7所示。

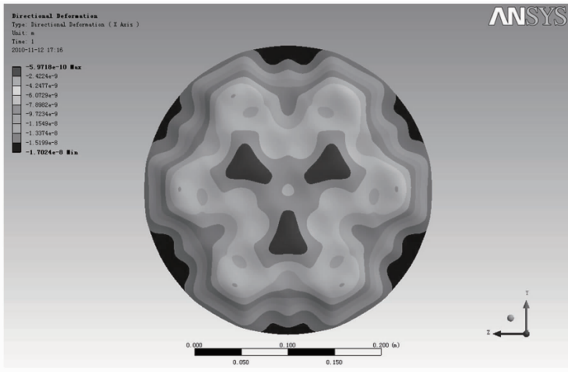


图4 重力变形

Fig. 4 Deformation by gravity

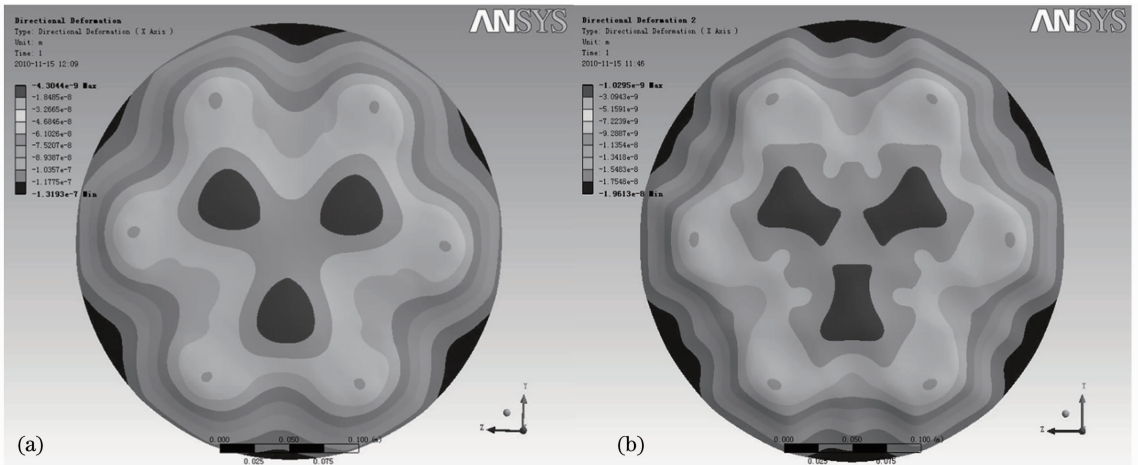


图6 反向充气有限元仿真分析。(a)内腔充气式镜面变形，(b)浸入式镜面变形

Fig. 6 Finite element simulation of reverse-charge methods. (a) mirror deformation by inner-cavity charge method, (b) mirror deformation by immersion charge method

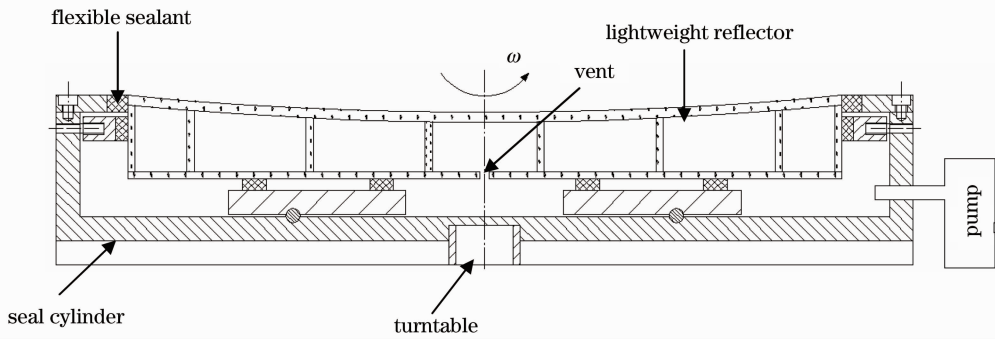


图 7 浸入充气式设计平台

Fig. 7 Design platform of immersion charge method

表 2 充入不同压强时镜面变形(内腔充气式)

Table 2 Mirror deformation of different pressure (inner-cavity charge method)

	Gravity deformation	Imprinting effect deformation	1450 Pa	1500 Pa	1550Pa	1600 Pa	1650 Pa	1700 Pa	1750 Pa
			PV /nm	16	155	127.7	127.6	127.6	127.6
RMS /nm	9.2	87	67	66.1	65.5	64.9	64.3	63.7	63.1

表 3 充入不同压强时镜面变形(浸入充气式)

Table 3 Deformation of different pressure (immersion charge method)

	Gravity deformation	Imprinting effect deformation	1450 Pa	1500 Pa	1550Pa	1600 Pa	1650 Pa	1700 Pa	1750 Pa
			PV /nm	16	155	22.2	18.5	15.0	12.2
RMS /nm	9.2	87	12.6	10.3	7.64	5.25	3.1	2.2	3.6

## 4 结 论

本文对高精度轻质反射镜在抛光过程中产生的“压印效应”进行了理论分析,并通过 Ansys 软件,研究了内腔式与浸入式两种反向充气方式来平衡磨头压力的方法,仿真结果表明两种方式都能抑制抛光过程的“压印效应”,但浸入式更为合理。仿真结果表明,采用浸入式充气后不但能消除磨头压力所引入的“压印效应”,面形精度更优于重力变形状态。浸入式反向充气方法不但能应用于大口径非球面轻质镜的高精度面形加工,还能进一步推动高轻量化轻质镜的结构形态的技术研究。然而,浸入充气式密封装置结构设计难度大,恒定充气压强及磨头压力控制系统精度要求高,转台速度、磨盘变形量,磨盘摆动角度等工艺参数与加工高精度轻质反射镜的关系复杂,因此,要将浸入充气式消除“压印效应”技术方法付诸实践有待于进一步的实验抛光研究。

## 参 考 文 献

1 William Kordonski, Aric Shorey, Arpad Sekeres. New

magnetically assisted finishing method: material removal with magnetorheological fluid jet[C]. *SPIE*, 2003, **5180**: 107~114

2 Li Yang. Modern Optical Manufacturing Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2008. 85~134

杨力. 现代光学制造工程[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 85~134

3 Julius Yellowhair, Peng Su, Matt Novak *et al.*. Fabrication and testing of large flats[C]. *SPIE*, 2007, **6671**: 667107

4 Bryan K. Smith, J. H. Burge, H. M. Martin. Fabrication of large secondary mirrors for astronomical telescopes[C]. *SPIE*, 1998, **3134**: 51~61

5 J. H. Burge. Fizeau interferometry for large convex surfaces [C]. *SPIE*, 1995, **2536**: 127~138

6 Cheng Haobo. Research on lightweight technology for large aperture aspheric mirrors [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2004, **4**(2): 26~28

程灏波. 光学非球面反射镜轻量化制造技术[J]. *光学与光电技术*, 2004, **4**(2): 26~28

7 D. Anderson, H. Martin, J. Burge *et al.*. Rapid fabrication strategies for primary and secondary mirrors at steward observatory mirror laboratory[J]. *SPIE*, **2199**: 199~209

8 Fan Bin, Wan Yongjian, Chen Wei *et al.*. Manufacturing features comparing between computer control active-lap and computer control optical surface for large aspheric optics[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 128~132

范斌, 万勇建, 陈伟等. 能动磨盘加工与数控加工特性分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 128~132

- 9 Fan Bin, Wan Yongjian, Ynag Li *et al.*. Manufacturing model research of active lap or large aspheric mirrors [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(12): 59~62  
范斌, 万永建, 杨力等. 大型非球面主镜能动磨盘加工模型[J]. *光电工程*, 2005, **32**(12): 59~62
- 10 Li Yand, Minyou Chen, Yougjian Wan *et al.*. Neural network based intelligent control for active stressed lap optical polishing process[C]. *SPIE*, 2009, **7282**: 72823
- 11 Yang Zhi. Study on Specification and Analysis of Frequency Band Errors in Deterministic Optical Maching[D]. National University of Defense Technology, 2008  
杨智. 确定性光学加工频带误差的评价与分析方法研究[D]. 国防科学技术大学博士学位论文, 2008
- 12 Zhou Xusheng, Li Shengyi, Dai Yifan *et al.*. Correcting errors in definite area: a new mechod for controlling mid-spatial-frequency errors in optical surface[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(11): 1668~1673  
周旭升, 李圣怡, 戴一帆等. 光学表面中频误差的控制方法—确定区域修正法[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(11): 1668~1673
- 13 Wang Fuguo, Yang Hongbo, Zhao Wenxing *et al.*. Lightweight design and analysis of a 1.2 m SiC primary mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(1): 85~91  
王富国, 杨洪波, 赵文兴等. 1.2 m SiC主镜轻量化设计与分析[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(1): 85~91
- 14 Feng Shulong, Zhang Xin, Weng Zhicheng *et al.*. Study on support way of large aperture mirror with flat rear surface [J]. *Optical Technique*, 2009, **17**(1): 85~91  
冯树龙, 张新, 翁志成等. 大口径平背主镜支撑方式的选择[J]. *光学技术*, 2004, **30**(6): 679~681
- 15 Liu Guoqing, Ma Wenli. The finite element anlasis for large-aperture lightweight mirror mount [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, **28**(5): 14~17  
刘国庆, 马文礼. 大口径轻质镜支撑的有限元分析[J]. *光电工程*, 2001, **28**(5): 14~17