

文章编号 1004-924X(2011)06-1199-08

平转动大磨头加工大口径非圆形球面的粗磨试验

罗 霄^{1,2*}, 郑立功¹, 张学军¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院 光学
系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:提出了用于大口径非圆形球面反射镜研磨和抛光的平转动大磨头加工技术,该技术基于平转动小磨头计算机控制光学表面成形技术,通过增大磨头口径的方式来提高其材料去除效率。针对大口径磨头比较突出的边缘效应,通过低阶拟合以及高阶补偿相结合的方法,在虚拟加工算法中引入边缘效应的影响,保证材料去除效率提高的同时具有一定的面形收敛率,从而有效地缩短加工周期。最后对一块 1 100 mm×800 mm 的体育场形 SiC 坯料进行了加工试验,共进行 22 轮加工,总加工时间约 51 h,面形从 122 μm(PV)收敛至 5.9 μm(PV)。与传统小磨头加工技术相比,效率提高了 1 倍以上,实现了大口径非圆形球面在粗磨阶段的高效去除。

关键词:大口径反射镜;边缘效应;光学加工;粗磨

中图分类号:TQ171.684 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20111906.1199

Grinding experiments of large non-circular spheres by large laps with orbital tool motion

LUO Xiao^{1,2*}, ZHENG Li-gong¹, ZHANG Xue-jun¹

(1. *Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

* *Corresponding author, E-mail: pb02009061@163.com*

Abstract: A large tools with orbital tool motion was adopted to upgrade the processing efficiency of the small tools with orbital tool motion based on Computer Controlled Optical Surfacing(CCOS) technology by enlarging the lap size. The edge effect that is common for large laps was simulated and compensated by combination of the first order approximation and the high order compensation to improve the convergence rate and to maintain better removal efficiency. Therefore, the processing periods were shortened effectively. A round square of 1 100 mm×800 mm SiC mirror was grinded with this method. After 22 runs of 55 hours in all processing, the overall surface error is 122 μm PV before and 5.9 μm PV after the process. Comparing with that of previous small lap technology, the efficiency is im-

收稿日期:2010-09-13;修订日期:2010-10-27.

基金项目:国家自然科学基金资助重点项目(No. 61036015)

proved by a factor of at least 2.

Key words: large mirror; edge effect; optical fabrication; coarse grinding

1 引言

非圆形的光学工件在大口径拼接主镜的天文望远镜^[1-2]和离轴三反非球面(TMA)等离轴系统中有着广泛应用,其外形主要有六边形、矩形、扇形、体育场形等。在大口径光学表面的加工中,需要去除大量的材料来使得面形不断收敛,这就要求采用的加工方法必须具有很高的材料去除效率,同时,其几何外形的特点要求这种方法必须具备非圆形光学表面的加工能力,目前常用的光学加工方法很难同时满足上述要求。

非圆形球面常见于采用拼接子镜的球面主镜反射式望远镜中,如 SALT, SPOT, LAMOST 等^[3-4],其形状为正六边形,与圆形较为接近,因此可以在镜坯的外围粘结辅件,将镜面补充为圆形后采用传统球面加工方式,在加工到 1~2 个波长精度之后,卸下辅件,采用磁流变或者粒子束等加工方式,将反射镜加工到需要的精度,这种方法可以很好地满足这类大口径球面的加工问题,但对于不容易补充为圆形的如体育场形、圆角矩形等形状的大口径球面,运用起来较为困难。目前国内对于这类反射镜,多采用计算机控制光学表面成形技术(CCOS)技术来加工,但受材料去除效率的限制,对大口径的光学表面而言并不是一种经济的加工方式^[5-7]。

本文介绍了一种在平转动小磨头的 CCOS 技术基础之上,通过增大磨头尺寸来提高加工效率的新方法,并围绕在大磨头加工中比较突出的边缘效应问题,做了集中讨论。首先,利用磨头的静力平衡方程求解大磨头在露边情况下的压力分布的一阶拟合。然后,使用去除函数加权的方法补偿磨头压力的高阶分布引起的“急塌边”现象,从而提高了单次加工的面形收敛率。最后,利用一块 1 m 量级的反应烧结的体育场形 SiC 工件做了相关的加工试验,并给出了试验结果。

2 平转动大磨头的基本原理

平转动大磨头技术是在小磨头的基础上发展

而来的,其原理与目前广泛使用的 CCOS 相同,是根据定量的面形检测数据,在加工过程控制模型的基础上,用计算机控制一个磨头,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,最终得到满足精度要求的光学表面。

计算机控制光学表面成形技术的理论基础是 Preston 在 1927 年提出的 Preston 方程^[8],他指出材料去除效率正比于磨盘和镜面之间的压力和速度,可以表述为:

$$dz(x, y) = kpvdt, \quad (1)$$

其中 $dz(x, y)$ 为镜面上 (x, y) 点的材料去除量, v 是磨头和镜面之间的相对速度,而 p 是磨头和镜面之间的压力,磨头的去除函数 $R(x, y)$ 定义为在磨头位置不变的情况下,镜面上的点 (x, y) 在单位时间 t 内的去除量的和,有:

$$R(x, y) = \lim_{i \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^i \Delta z(x, y, t) dt, \quad (2)$$

平转动的磨头的运动方式是一种平动,磨头上任意一点做半径为 e 的圆周运动,图 1 所示,是对手工研抛光学表面磨头的运动过程的模拟。由于磨头上任意点相对于镜面之间的相对速度均相等, Preston 方程中的 P, V, K 为常数,因此去除函数的积分简化为磨头覆盖时间的积分,可以表示为:

$$R(x, y) = \lim_{i \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^i \Delta z(x, y, t) dt = KP V \frac{1}{t} \int_0^i dt = KP V \frac{\theta}{\pi}$$

$$\theta = \begin{cases} 0 (r > R + e) \\ \arccos\left(\frac{r^2 + e^2 - R^2}{2 \times r \times e}\right) (R - e < r < R + e) \\ \pi (r < R - e) \end{cases} \quad (3)$$

其中 R 为磨头半径, e 为磨头的偏心距离,平转动大磨头技术的去除函数是一个中间高边沿低的近高斯分布,如图 2 所示。根据光学加工经验,这种类型的去除函数对于光学表面的面形收敛是有利的。磨头的材料去除效率,即在单位时间内的材料去除量 dV_{oi} ,可以表述为对去除函数做面积积分,公式如下:

$$dV_{ol} = \iint_{A_m} R(x, y) dA = \alpha A_1$$

$$\alpha = (1 - \eta)^2 + \int_{1-\eta}^{1+\eta} \epsilon \arccos\left(\frac{\epsilon^2 + \eta^2 - 1}{2\epsilon\eta}\right) d\epsilon, \eta = \frac{e}{R} \quad (4)$$

其中 A_1 为磨头面积, η 为磨头偏心率, 当磨头偏心率保持不变时, 单位时间的去除量与磨头的面积成正比, 因此通过增大磨头口径的方式, 也就是采用平转动大磨头技术, 可以显著地提高材料去除效率, 适用于大口径的光学表面的加工。

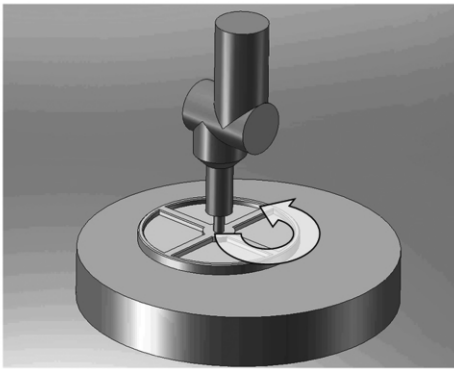


图 1 平转动运动方式示意图

Fig. 1 Schematic of lap with orbital tool motion

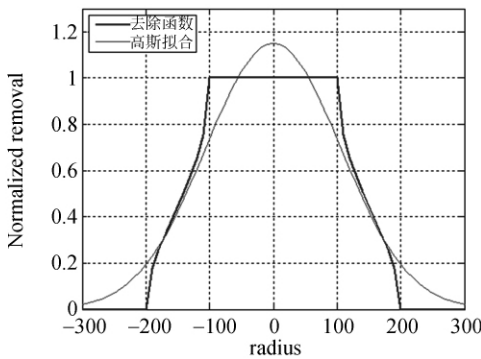


图 2 平转动方式的去除函数

Fig. 3 Working function of lap with orbital tool motion

3 磨头露边时压力分布的低阶近似

在磨头和镜面充分吻合而且磨头全部位于镜面内部的情况下, 磨头对镜面的压力均匀分布, 但当磨头部分露出镜面时, 磨头与镜面之间的压力分布发生变化, 通过对磨头进行静力分析, 利用基本的静力学平衡方程, 可以计算出磨头下压力分布的一阶近似^[9]。

表示磨头一阶压力分布为 $p(x, y)$, 并令当压力为负值时, 取磨头压力为零, 可以表示为:

$$\begin{cases} p = ax + by + c \\ \text{if } (p < 0) \text{ then } p = 0 \end{cases} \quad (5)$$

磨头对镜面的压力均处于垂直于镜面方向, 因此可以得到 3 个静力学方程:

$$\begin{cases} \iint_S p dS = F \\ \iint_S px dS = 0 \\ \iint_S py dS = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中 F 为磨头对镜面施加的压力和, S 为镜面上被磨头覆盖的面积, (x, y) 为数据点位置, 利用这 3 个静力学方程, 可以求解得到一阶压力分布的 3 个参数 a, b, c , 得到磨头对镜面压力分布的一阶拟合。

与圆形工件相比, 非圆形工件磨头露边时覆盖区域边界复杂, 边界是由圆弧和直线组成的闭合曲线, 同时需要考虑负压力的情况, 不能采用解析的方法给出压力分布的精确解。以图 3 所示体育场形工件为例, 磨头在镜面上的覆盖区域可以出现图 4~6 的 3 种情况, 公式 6 中的积分面积 S 边界情况多变, 且同时需要考虑压力小于 0 的情况, 因此不能得到精确的解析解。

对于非圆形镜面边界复杂的问题, 本论文采用计算几何的方法, 求解得到镜面被磨头覆盖的面积边界, 之后采用牛顿-柯西迭代法对公式 6 做积分求解, 得到磨头压力的一阶分布。采用这种方法, 首先需要将镜面边界简化为直线与圆弧

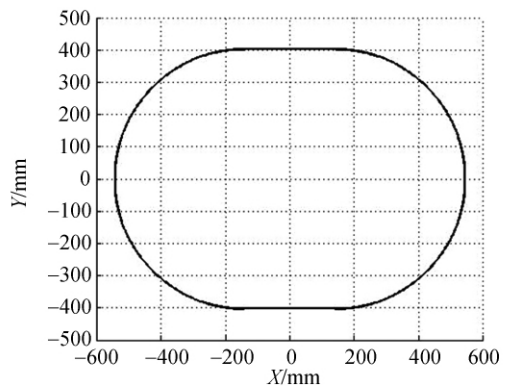
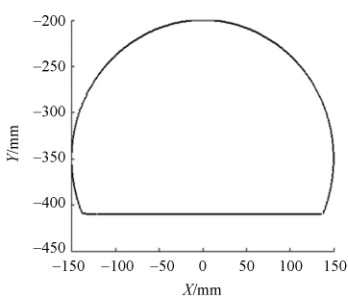


图 3 用于加工试验的 1 100 mm×800 mm 体育场形工件的边界

Fig. 3 Boundary of mirror for experiment

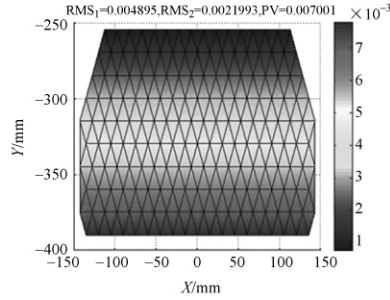
的组合,由于常见的反射镜一般有圆形、扇形、矩形、六边形、体育场形等,边界均为直线和圆弧组成,满足这一简化,而其它二次曲线或者高阶曲

线,都可以由多条圆弧或直线拟合。用于本次加工试验的体育场形反射镜的边界如图 3 所示,图 4~6 显示磨头处于镜面不同位置的计算结果。



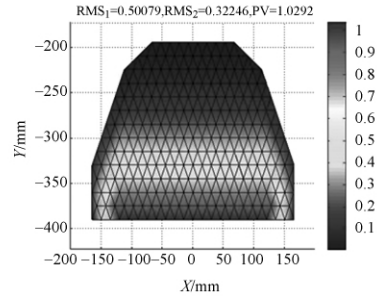
(a) 覆盖边界

(a) Area covered by lap



(b) 压力分布

(b) Pressure distribution

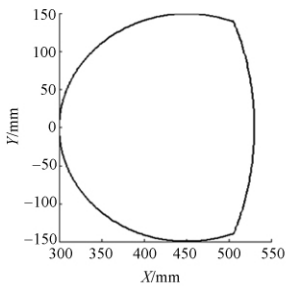


(c) 去除函数

(c) Remove function

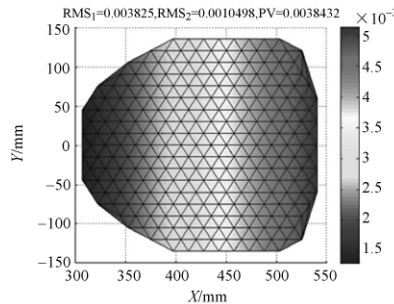
图 4 磨头处于图 3(0, -350)位置时的计算结果

Fig. 4 Calculation results when lap is at (0, -350) in Fig. 3



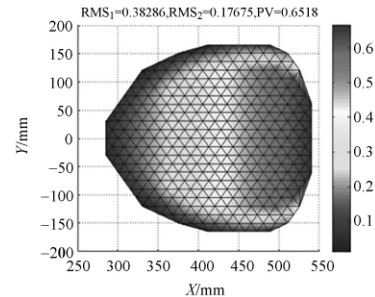
(a) 覆盖边界

(a) Area covered by lap



(b) 压力分布

(b) Pressure distribution

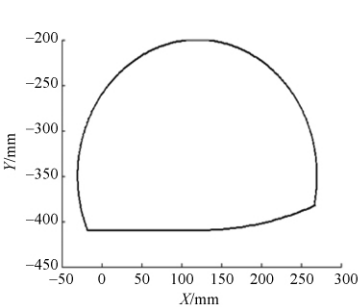


(c) 去除函数

(c) Remove function

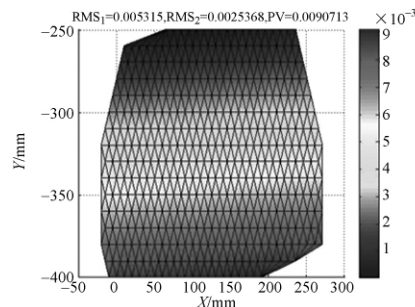
图 5 磨头处于图 3(450, 0)位置时的计算结果

Fig. 5 Calculation results when lap is at (450, 0) in Fig. 3



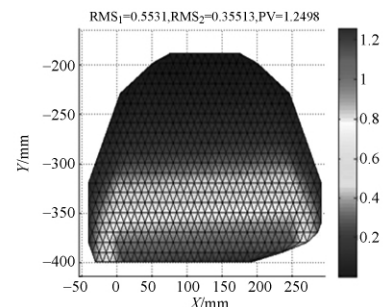
(a) 覆盖边界

(a) Area covered by lap



(b) 压力分布

(b) Pressure distribution



(c) 去除函数

(c) Remove function

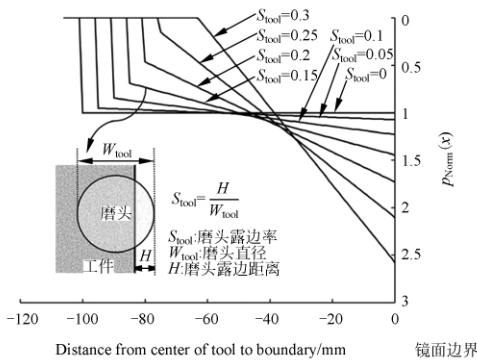
图 6 磨头处于图 3(125, -350)位置时的计算结果

Fig. 6 Calculation results when lap is at (125, -350) in Fig. 3

4 磨头压力高阶分布的简化处理

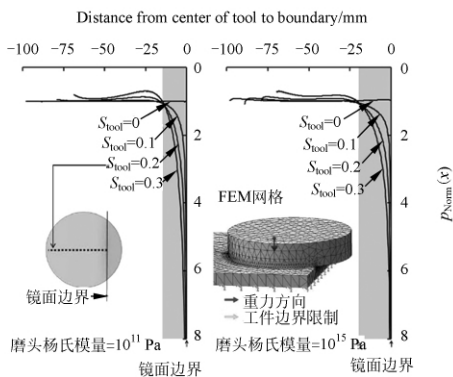
由于磨头并非完全刚性,因此当磨头部分探出镜面时,受磨头和镜面之间不均匀压力的影响,磨头必然发生形变,反过来影响磨头与镜面之间的压力分布,进而形成高阶的压力分布。高阶分布的基本特点是在靠近镜面边沿的区域压力分布急剧增加,如图 7 所示,从而引起光学加工中常见的塌边现象,在光学加工中,如果发生塌边,则需要去除整个面才能修正面形,材料去除量大,所需加工时间长,是光学工艺人员关注并尽量避免的^[10]。

如图 7 所示,有限元分析结果显示,边沿位置压力急剧上升部分的宽度与磨头露边的多少几乎无关,因此,在磨头尺寸及加工路径基本不变时,



(a) 一阶拟合

(a) First order approximating



(b) 有限元模拟结果

(b) Results from FEA analysis

图 7 磨头处于不同露边位置时的压力分布^[10]

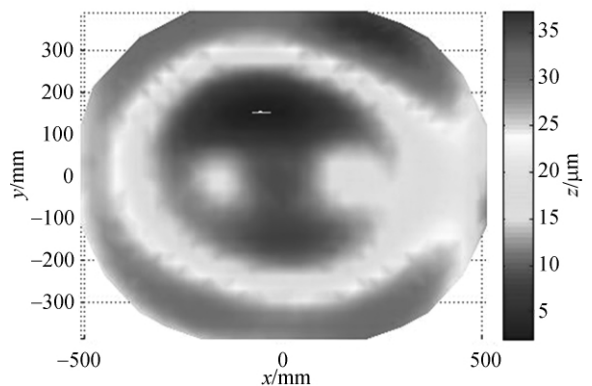
Fig. 7 X-profiles of pressure distribution

可以将高次分布视作镜面面形数据点与镜面边界之间距离的函数,通过构造一个与该距离相关的权重函数的方法,可以一定程度上模拟加工中对镜面光学表面靠近边沿区域压力大引起的材料过度去除,也就是“急塌边”现象。根据压力分布的特点,可以采用对去除函数加权的方法来模拟边缘的过度去除,本文提出权重函数为:

$$\omega = \begin{cases} k \left(1 - \frac{d_m}{a}\right)^n + 1; & (d_m < a) \\ 1; & (d_m \geq a) \end{cases} \quad (7)$$

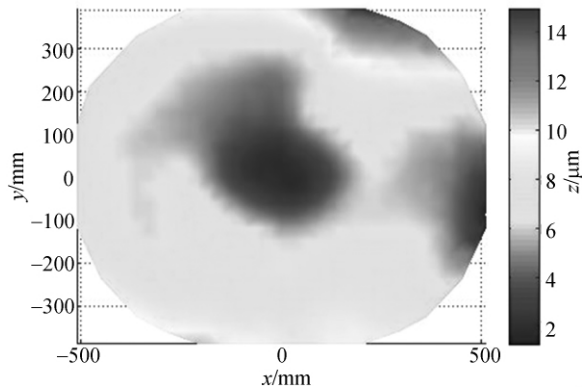
受边沿压力突变影响的宽度为 a ,即图 7 中灰色区域的宽度,对于距边界距离大于 a 的区域,取权重为 1,而对于与边界小于 a 的区域,则去除量随数据点距边界的距离减小而上升,在边界上达到最大,根据试验得到的数据,受边界影响的区域的宽度 a 大约为磨头直径的 $1/4$,以 $\Phi 300$ mm 磨头为例, $a \approx 75$ mm,取 $k=0.8, n=2$ 可使得模拟值略大于实际测量得到的去除量,可以尽量避免塌边现象的发生。

如图 8 所示,即使在靠近边沿处已经有较严重塌边的情况下,在靠近边沿处仍然有较大量的材料去除。如图 9 所示,理论计算去除量与实际测量去除量的区别除面形平滑作用外,主要表现在边沿处的过度去除,通过施加权重函数后,程序可以很好地模拟边沿的过度去除,从而在生成加工程序时即加以补偿,达到控制“急塌边”现象的目的。

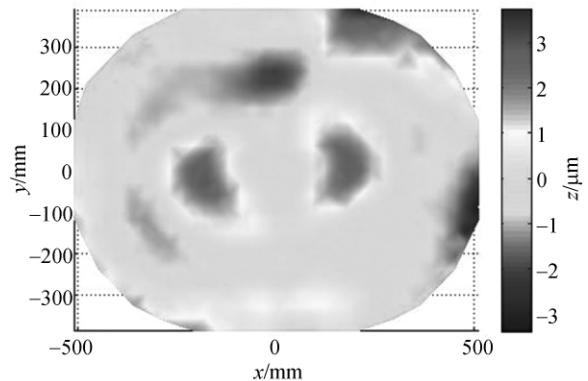


(a) 实际误差面形

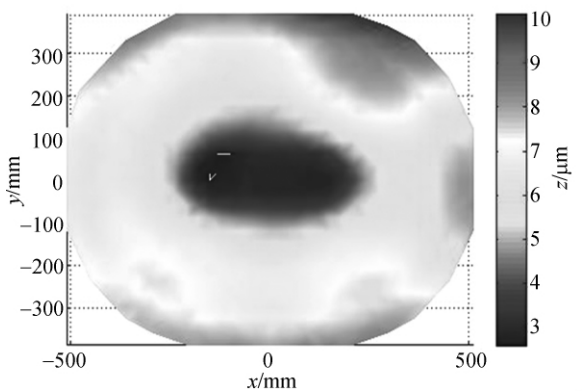
(a) Error map



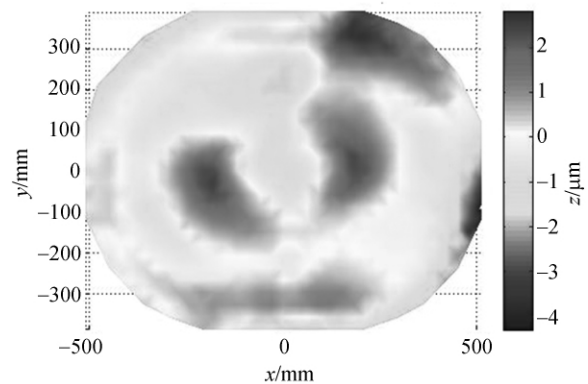
(b) 实际测量去除量
(b) Tested remove map



(b) 没有加权处理数据
(b) Without weight function



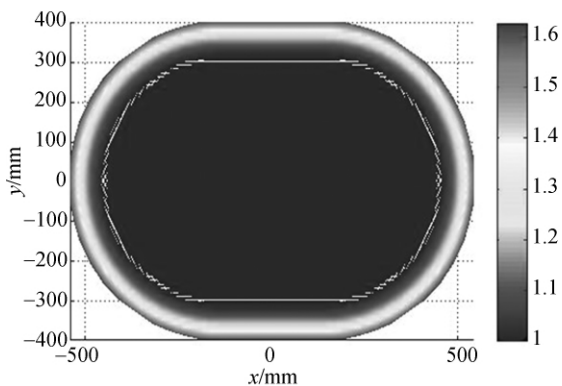
(c) 理论计算去除量
(c) Simulated remove map



(c) 加权处理后的数据
(c) With weight function

图 8 实测误差面形及实测去除分布与理论计算去除分布

Fig. 8 Remove maps of both tested and simulated



(a) 权重函数
(a) Weight function

图 9 加权函数, 及采用加权函数前后的理论计算去除量与实测值的偏差

Fig. 9 Weight function and the difference between test and simulation results of remove maps with and without weight functions

5 加工试验

本实验中对一块 $1100\text{ mm} \times 800\text{ mm}$ 的反应烧结 SiC 坯料进行了粗磨加工试验, 加工过程中磨料为金刚石散粒, 在面形处于不同精度时, 分别选用 $50 \sim 60, 14 \sim 28, 4 \sim 8\ \mu\text{m}$ 的粒度。加工磨头的尺寸为 $\Phi 400\text{ mm}$, 平转动的偏心值为 50 mm 。磨头的加工面采用多块直径为 $\Phi 30\text{ mm}$ 的 SiC 圆片拼接而成, 这种结构不仅可以保证磨头和镜面之间的充分吻合, 同时也可以保证磨料可以畅通地在圆片之间的缝隙中流动, 使得各磨片都具有充足且较为均匀的磨料。

本次加工总共 22 个加工循环,平均单次加工时间 2 h,面形精度从 $122\ \mu\text{m}$ PV 收敛至 $6\ \mu\text{m}$ PV,平均收敛率为 0.128,如图 10 所示,最终精度达到 $5.9\ \mu\text{m}$ PV,加工前后的误差面形如图 11 所示,总共加工时间为 2 周,而如果采用小磨头加工,加工时间将在一个月以上,因此与小磨头技术相比,平转动的大磨头效率的提升效果是显著的。

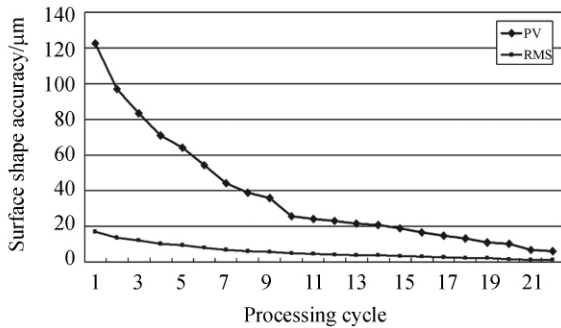
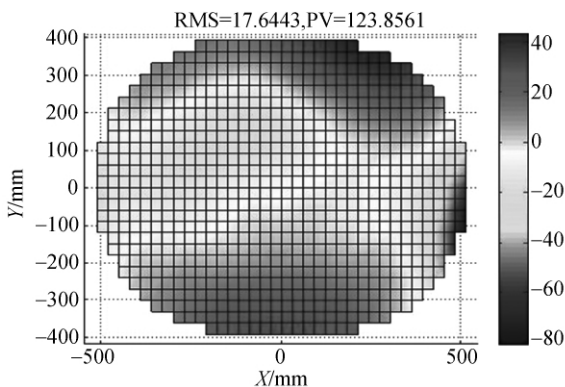


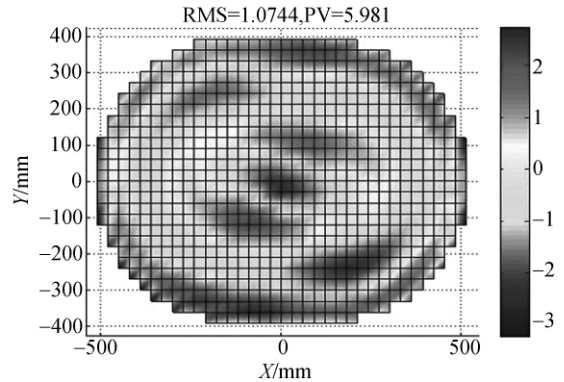
图 10 22 次加工的面形收敛图

Fig. 10 Convergence of mirror in 22 processing cycles



(a) 粗磨前

(a) Before coarse grinding



(b) 粗磨后

(b) After coarse grinding

图 11 粗磨完成后与加工初期镜面面形对比

Fig. 11 Error maps of mirror before and after coarse grinding processes

6 结 论

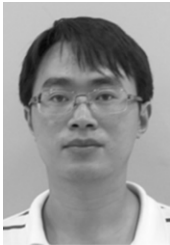
本论文提出了采用平转动大磨头技术解决传统平转动小磨头技术加工大口径体育场形球面加工效率的新方法,并对大磨头加工中比较突出的边缘效应做了集中讨论。通过对磨头露边时低阶压力分布的低阶拟和以及对磨头压力的高阶分布引起的“急塌边”现象做简化的权重补偿,完成了对平转动大磨头加工中边缘效应在计算机虚拟加工算法中的计算模拟,从而提高了单次加工的收敛率。最后,利用一块 $1\ 100\ \text{mm} \times 800\ \text{mm}$ 的反应烧结 SiC 坯料完成了加工试验。与目前广泛使用的小磨头技术相比,本方法将粗磨阶段的加工效率提高 1 倍以上,材料去除效率大幅度提高,对于提高大口径非圆形球面的加工效率,缩短加工周期,具有重要意义。

参考文献:

- [1] STAHL H P. JWST mirror technology development results [J]. *SPIE*, 2007, 6671.
- [2] BRUNE E, DIERICKX P, GILMOZZI R, *et al.*. Progress of ESO's 100-m OWL optical telescope design [J]. *SPIE*, 2004, 5382:159-168.
- [3] HAGOPIAN J, BUDINOFF J, DEAN B, *et al.*. Fabrication and test of spherical primary optical telescope (SPOT) segments, in optical fabrication and testing [J]. *OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2010)*, paper OWF2P.
- [4] SEMENOV A P, ABDULADYROV M A, IGNATOY A N. Fabrication of blanks, figuring, polishing, and testing of segmented astronomic mirrors for SALT and LAMOST projects [J]. *SPIE*, 2004, 5494:31-38.

- [5] 王权陡,余景池,张学军,等. 数控抛光中不同运动方式下小抛光盘抛光特性之比较[J]. 光学 精密工程,1999,7(5):73-79.
WANG Q D, YU J CH, ZHANG X J, *et al.*. Polishing performance comparison of small polishing pad worked in different motion model in computer controlled optical polishing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999,7(5):73-79. (in Chinese)
- [6] 郑立功,张学军,张峰. 矩形离轴非球面反射镜的数控加工[J]. 光学 精密工程,2004,12(1):113-117.
ZHENG L G, ZHANG X J, ZHANG F. NC surfacing of two off-axis aspheric mirrors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(1):113-117. (in Chinese).
- [7] JONES R A. Computer controlled optical surfacing with orbital tool motion [J]. *Opt. Eng.*, 1986,25:785-790.
- [8] PRESTON F. The theory and design of plate glass polishing machines[J]. *J. Soc. Glass Tech.*, 1927, IX:14-256.
- [9] ROBLEDO S. Edge effects with the Preston equation for a circular tool and work piece [J]. *Appl. Op.*, 2004,43:1250-1254.
- [10] KIM D W, PARK W H, KIM S W, *et al.*. Parametric modeling of edge effects for polishing tool influence functions [J]. *Opt. Express*, 2009,17(7):5656-5665.

作者简介:



罗 霄(1982—),男,湖北宜昌人,博士研究生,2006年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事光学加工和机械设计等方面的研究。E-mail: pb02009061@163.com



郑立功(1969—),男,吉林长春人,博士,研究员,主要从事先进光学制造等方面的研究。E-mail: zhenglg@ciomp.ac.cn

导师简介:



张学军(1968—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,中科院百人计划获得者,主要从事先进光学制造和空间光学系统等方面的研究。E-mail: zxj@ciomp.ac.cn