

文章编号 1004-924X(2012)10-2123-09

使用优化的固着磨料磨盘全口径 加工碳化硅反射镜

王 旭

(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)

摘要:为提高碳化硅非球面反射镜的加工质量,对加工中涉及的固着磨料工艺去除函数进行了研究。在早期的实验中测试了圆形丸片的去除函数,引入填充因子的概念来评价实验所获得的去除函数,定量获得了丸片结构与填充因子之间的关系。为了提高填充因子和磨盘的加工特性,根据圆形丸片的实验结果优化了磨头的结构并基于 Matlab 软件模拟了新型磨头的去除函数。在全口径范围考察了磨头工作的稳定性,并在相同加工参数条件下完成了固着磨料和散粒磨料的加工实验。为了对理论模拟和实验结果进行比较,引入结构相似度指数的概念来评价全口径反射镜去除量模拟结果与实验结果之间的相似程度。结果显示,实验得到的结构相似度指数达到了 0.425 7,证明优化后的固着磨料磨头在大口径碳化硅反射镜加工方面极有应用前景。

关键词:光学加工;碳化硅;非球面反射镜;固着磨料;丸片;填充因子;结构相似度指数

中图分类号:TH703;TN305 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122010.2123

Fabrication of SiC mirror in full aperture with optimized fixed abrasive polishing pad

WANG Xu

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: wangxu-308@163.com

Abstract: To improve the fabricating quality of a SiC aspheric mirror, this paper researched the removal function in fixed abrasive technology involved in the mirror fabrication. The removal function was tested in the earlier round-pellet polishing pad, then a filling factor was introduced to evaluate the removal function obtained from the experiments and the relation between round-pellet pad structure and filling factor was established. To improve the filling factor and the characteristic of polishing pad, the pad structure was optimized according to the experimental results of the round-pellet pad. The removal function of the new polishing pad was simulated by MATLAB. A stability experiment in the full aperture was performed, and the both fixed abrasive and slurry abrasive polishing experiments

收稿日期:2012-05-25;修订日期:2012-07-01.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2011CB01320005);科技部国际合作项目(No. 2011DFA50590)

were conducted under the same fabricating conditions. Finally, the Structural Similarity Index (SSI) was introduced to evaluate the similarity between simulations and experiments for the removal of large aperture mirror, and the best SSI of multi-square-pellet pad is 0.425 7. The comparison results are acceptable and positive, which shows that the optimized fixed abrasive polishing pad is highly promising for fabrication of large aperture SiC mirrors.

Key words: Optical polishing; SiC; aspherical reflector; pellet; fixed abrasive; filling factor; structural similarity index

1 引言

新一代对地观察光学信息收集系统不仅要有更高的地面分辨率,还要具有较宽的覆盖宽度,这就要求光学系统具有大口径、离轴并且高度轻量化等特性。大口径光学反射镜是光学遥感成像相机的关键光学元件,因此加工具有以上特性的光学反射镜非常重要。

反应烧结碳化硅具有极高的硬度和良好的结构稳定性,是制造大口径反射镜的优良材料^[1]。然而,这种良好特性却增大了它的加工难度,尤其是加工大口径碳化硅反射镜时,其极高的硬度使加工碳化硅比加工光学玻璃等材料难得多。

使用散粒磨料加工碳化硅反射镜是传统加工工艺较为常用的方法,也是相对成熟的加工方法。早期有很多学者从微观角度详细研究了使用散粒磨料进行硬脆材料微研磨的加工方法,尤其是研究了加工机理以及加工过程中从脆性去除转为塑性去除的临界条件,另外还有很多学者对其亚表面破坏层进行了研究^[2-3]。由于受加工环境的影响,传统的散粒磨料工艺会导致加工精度不稳定、加工效率低(效率约为加工玻璃的十分之一到二十分之一)以及加工成本过高。

相对散粒磨料工艺,固着磨料工艺则能较好地解决上述问题。固着磨料工艺是在 20 世纪 70 年代发展起来的加工工艺,与散粒磨料工艺相比,它在加工效率、加工精度及温度稳定性、加工成本以及与数控加工设备良好的兼容性等方面有着很大的优势^[4]。因此,固着磨料工艺逐渐成为研究重点。David F. Edwards 和 P. Paul Hed 详细研究了固着金刚石磨料的精密研磨机理,他们发现大多数加工情况下塑性去除是主要的去除方式^[5]。美国 3M 公司的工程师们成功地把固着磨料工艺商业化^[6-7]。波士顿大学的 Thomas Bifa-

no 也证明了利用固着磨料工艺的柔性去除特性可加工出高精度的陶瓷非球面反射镜^[8]。

碳化硅非球面反射镜的加工希望能在镜面上任意一点去除定量的材料,这就是常说的确定性加工。为了能够接近确定性加工的效果,固着磨料工艺的去除函数就成为了本课题组的研究重点。固着磨料工艺去除函数的特性与丸片特性、丸片的相对位置分布以及磨头的加工运动方式密切相关。本文将固着磨料工艺与 CCOS (Computer Controlled Optical Surfacing) 技术相结合,基于平转动运动方式,引入 rms 曲线距离及填充因子等参数多角度优化并评价了所获得的去除函数,其主要目的是使其形状更接近类高斯形状,从而有利于反射镜面形的快速收敛^[9-10]。另外,考察了新型磨头去除函数的长时间加工稳定性及效率,文中给出了定量的对比结果。

2 圆形丸片磨盘抛光实验

2.1 先期实验描述

这里将早期实验^[11-12]中所使用的丸片规格列于表 1 中。

表 1 丸片规格参数
Tab. 1 Specifications of pellet

丸片规格	参数值
结合剂材料	树脂
内磨料	金刚石
浓度	25%
金刚石所占体积比	6.25%
硬度(JB1192-71)	中软
磨料粒度	5 μm
直径	10 mm
厚度	5 mm
表面形状	平面

相邻两个丸片的中心距设置为 10 mm, 偏心距设置为 9 mm, 这些参数在参考文献[12]中进行了详细优化。图 1 是抛光盘的实物图, 由 7 个丸片构成。

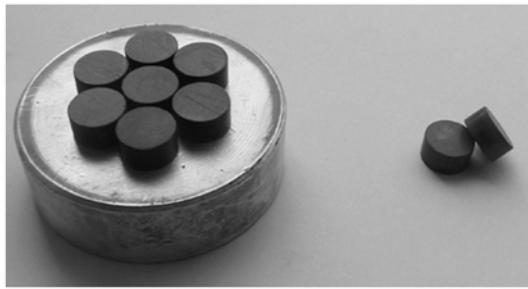
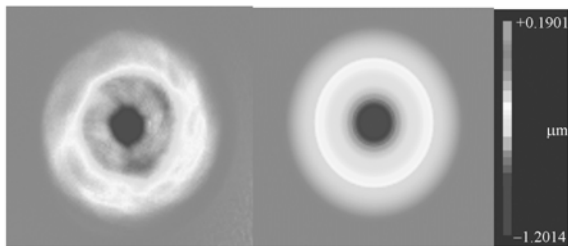


图 1 圆形丸片实物图
Fig. 1 Picture of round-pellets

为了获得抛光盘的去除函数, 使用抛光磨头在一块由本实验室自行烧制的碳化硅反射镜上进行了定点加工, 对比加工前后的面形来获得去除量的分布情况。磨头以平转动模式工作, 加工主轴转速为 200 r/min, 加工时间为 360 s, 加工压强为 0.1 MPa。实验使用 ZYGO 公司的 MetroPro 测量软件。根据实验条件, 对加工模型进行了模拟并且导入到测量软件中。对比结果如图 2, 3 所示。



(a) 实验去除函数 (b) 理论去除函数
(a) Experimental removal function (b) Theoretical removal function

图 2 实验去除函数与理论去除函数的 surface/wavefront map 比较
Fig. 2 Comparison of surface/wavefront map between experimental and theoretical removal functions

为了评价图 3 中理论去除曲线和实验去除函数曲线的关系, 引入了 rms 曲线距离的概念。式 (1) 为描述此概念的方程:

$$D_{rms} = \| f_1 - f_2 \| = ((f_1 - f_2)^T (f_1 - f_2))^{1/2}, \quad (1)$$

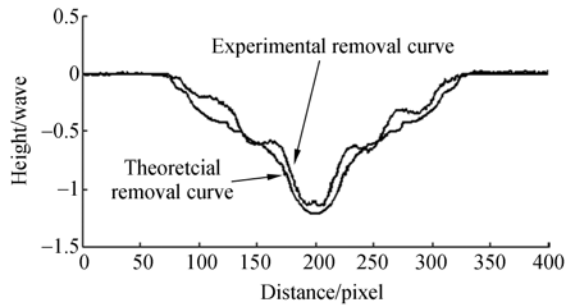


图 3 理论去除函数与实际去除函数的母线比较
Fig. 3 Generatrix comparison between theoretical and experimental removal functions

根据图 3 的数据, 两条曲线的 rms 距离为 $D_{rms} = 0.0849 \mu\text{m}$, 即两条曲线的偏差为 $0.0849 \mu\text{m}$ 。

图 3 中, 实验去除曲线最小值的绝对值要比理论值小, 这主要是由磨头丸片的自锐能力较差引起的。在加工过程中, 丸片内磨损的金刚石颗粒不能及时脱落, 那么, 新的金刚石颗粒就不能参与加工, 故达不到理论计算的结果, 最终导致丸片的加工效果不太理想。为了能够使磨损的金刚石颗粒及时脱落, 在制作树脂结合剂的时候应该适当降低结合剂的结合能力和丸片的硬度, 使金刚石颗粒刚好能在部分磨损的时候脱落。虽然这样做降低了磨料利用率, 但明显提高了材料的去除率。

2.2 填充因子

由图 3 可知去除函数曲线并不光滑, 在局部位置有多个极大值和极小值, 这种现象称为“台阶”效

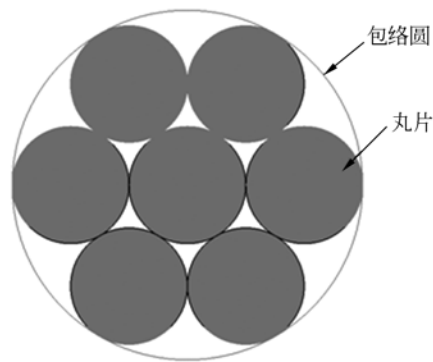


图 4 填充因子示意图
Fig. 4 Sketch of filling factor

应, 因此这里引进填充因子来评价这种现象。填充因子定义为丸片的工作接触面积与外围丸片形成的包络圆面积之比, 如图 4 所示。方程为:

$$\mu = \frac{S_{\text{contact}}}{S_{\text{contour}}} \quad (2)$$

在传统的加工工艺中,沥青抛光盘为圆形,在不开槽的特殊情况下,它的填充因子 $\mu=100\%$ 。

根据图 1 中 7 个丸片的分布,7 丸片抛光盘的填充因子为 $\mu=77.78\%$ 。同理,4 丸片抛光盘的填充因子为 $\mu=68.65\%$ 。图 5 为圆形沥青盘、7 丸片抛光盘、4 丸片抛光盘的模拟去除函数。

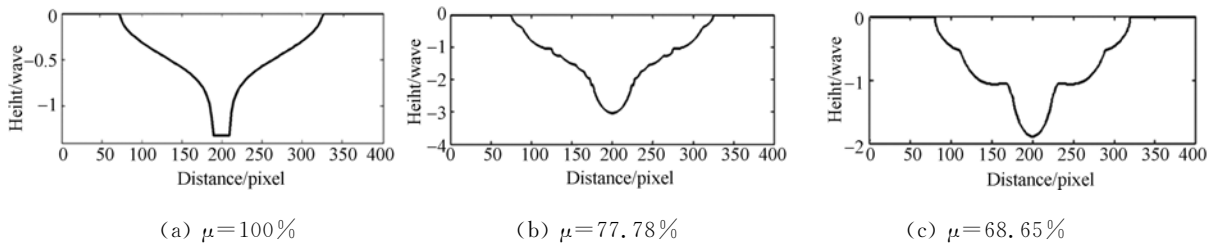


图 5 填充因子与台阶效应的关系

Fig. 5 Relationship between filling factor and “step” effect

台阶效应反应的是抛光盘的空间频率误差。在加工碳化硅反射镜的时候,磨头的空间频率能够复制到反射镜的表面。因此,较小的台阶效应是获得良好光学表面的关键,提高填充因子是减弱台阶效应的有效手段。

为了评价模拟的去除函数与最佳拟合高斯函数之间的偏差,根据公式(1),计算了 3 种不同去除函数的 rms 值。去除函数在计算前先归一化,归一化过程分为两步:第一步,去除函数分布区域(垂直投影所占的面积)的归一化,即要把计算的 3 个去除函数的有效分布区域进行统一,使全部有效数据都分布在单位圆内;第二步是去除函数峰值的归一化,即去除函数各点数据除以峰值,使得各点数据分布在 $0\sim 1$ 。图 6 为对比结果。图 6 中的 a,b,c 3 点分别对应着图 5(a),(b),(c)的情况。

坏的空间频率首先被淘汰。与图 5(b)相比,图 5(a)中传统的抛光盘去除函数有较低的空间频率但其均方根误差略高一些。如果使用图 5(b)中的去除函数加工工件,虽然会引入较小的空间频率误差,但却使得面形收敛相对较快。因此,只需平衡空间频率误差与 rms 值,7 丸片抛光盘的去除函数会拥有较好的加工特性。

3 方形丸片抛光实验

3.1 优化抛光盘的去除函数模拟

使用带有明显台阶效应的圆形丸片磨头加工一块碳化硅反射镜,加工后表面的波纹度现象清晰。为了优化去除函数的工作特性,提高填充因子是关键,即目标是增加抛光盘的有效工作面积并且使去除函数的形状接近高斯分布。

由于圆形丸片磨头并不是获得较高填充因子的最好结果,为了获得较高的填充因子必须提高单位面积内丸片与工件的接触面积,那么就必须在一定程度上减少丸片间的空隙,因此丸片间的边缘必须保持平行。基于上述原则,选择三角形丸片、方形丸片和六边形丸片作为考察对象来开展验证实验,寻找最佳丸片形状。制作了分别由三角形、方形、六边形丸片组成的磨头,相邻丸片间距均保持在 1 mm。使用 3 种磨头分别加工碳化硅反射镜。实验结果表明:三角形、方形丸片组成的磨头加工效果无明显差别,但六边形丸片组成的磨头中心部分及其对应的镜面部分磨损相对

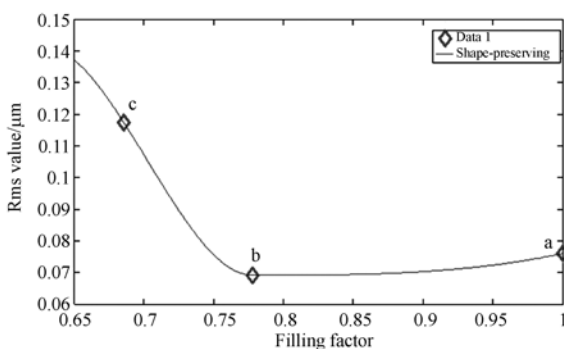


图 6 均方根误差与填充因子的关系

Fig. 6 Rms error vs. filling factor

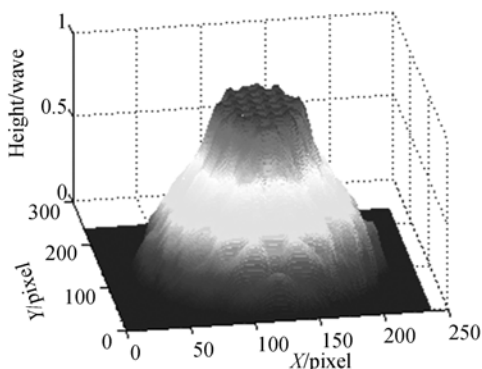
显然,图 5(c)由于其较高的均方根误差和较

较为严重。经分析认为六边形丸片磨头呈蜂窝状,间隙结构不利于冷却液、润滑液流动,因此造成丸片表面磨损程度不同,从而导致加工效果不一致。对于三角形多丸片磨头而言,三角形结构的丸片制造困难,次品率较高,制作成本较高,不利于日后大规模的使用。因此,本文选择方形多丸片结构作为最优结构磨头。由于从理论和实验角度分别对三角形、方形、六边形丸片组成的磨头进行比较的过程并不是本文的侧重点,因此只给出相应的结论。方形多丸片结构有着其他形状丸片所不具备的优势:首先,方形固着磨料丸片相对容易制造,这能够降低生产成本;其次,通过适当优化调整方形丸片间的间距,冷却液和润滑剂可以很容易地从丸片间流通,有利于获得较好的光学表面质量^[7]。

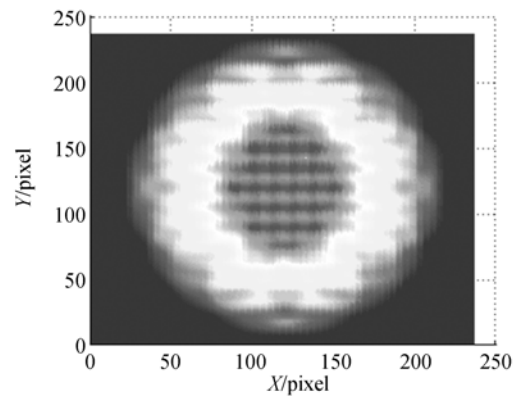
模拟计算方形多丸片磨头去除函数的步骤可分为两部分:

第一步,在平转动的运动模式中模拟了单一方形丸片去除函数的形状。由于使用积分的方法来计算去除函数较为麻烦,因此选取离散的方法来计算。首先,把单一方形丸片的表面分为 $n \times n$ 个数据点;然后计算并分析每个点的运动轨迹,以此方法计算 n^2 个数据点;最后,将所有数据点的运动轨迹相叠加,形成最终的单一方形丸片三维去除函数。当然,结果也是离散形式的。

第二步,由于每个单一方形丸片去除函数具有线性叠加的特性,那么其去除函数可以根据各自所在位置直接叠加成方形多丸片的合成去除函数。形成的离散去除函数要经过滤波及平滑来得到最终的去除函数。使用上述方法获得的去除函数结果如图 7 所示。



(a) 3D simulation



(b) 2D simulation

图 7 方形多丸片抛光盘的模拟去除函数

Fig. 7 Simulation removal function of multi-square-pellet polishing pad

3.2 优化抛光盘去除函数的测试实验

在实验过程中,加工参数诸如丸片尺寸、位置、偏心距等设置成与模拟使用的参数相同。实验在本所自行研制的加工中心上完成,该加工中心最大加工工件尺寸为 1 200 mm,具有五轴联动功能,定位精度为 $5 \mu\text{m}$,气缸最大气压为 0.5 MPa,主轴最高转速为 210 r/min,磨头最大偏心距为 10 mm。图 8 是方形多丸片的实物图。

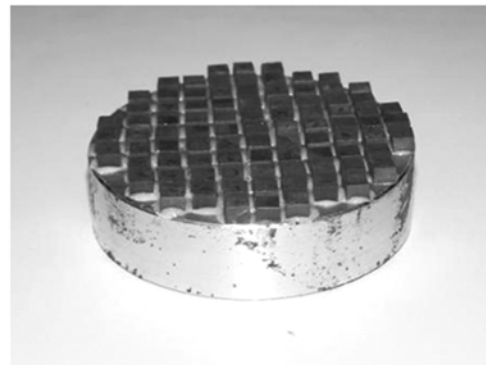


图 8 方形多丸片抛光盘实物图

Fig. 8 Picture of multi-square-pellet polishing pad

实验前,准备一块能够进入干涉仪测量范围的碳化硅反射镜。首先保存了加工实验前的反射镜面形数据,与此同时标记并记录了反射镜的位置、转角等参数,接下来在一固定点加工反射镜。图 9 是实验过程图。

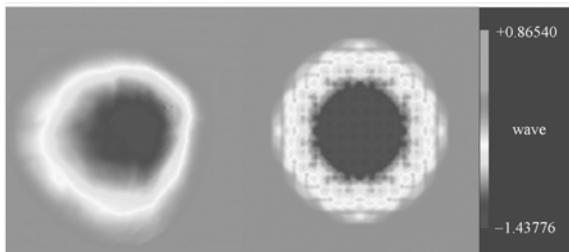
待加工结束后,实验工件固定于标记好的位置,并使用干涉仪测量。这样通过两次测量结果的差值获得了最终的方形多丸片抛光盘的去除函



图 9 方形多丸片抛光盘加工碳化硅反射镜

Fig. 9 Polishing SiC mirror with multi-square-pellet polishing pad

数。经多此测量,求其平均结果。去除函数的实验与模拟结果如图 10 所示。



(a) 实验去除函数 (b) 理论去除函数

(a) Experimental removal function (b) Simulated removal function

图 10 方形多丸片抛光盘去除函数分布图

Fig. 10 Removal function pictures with multi-square-pellet pad

通过对图 2(a)与图 10(a)的简单比较发现,在改变丸片的形状和分布后,增加了填充因子,使

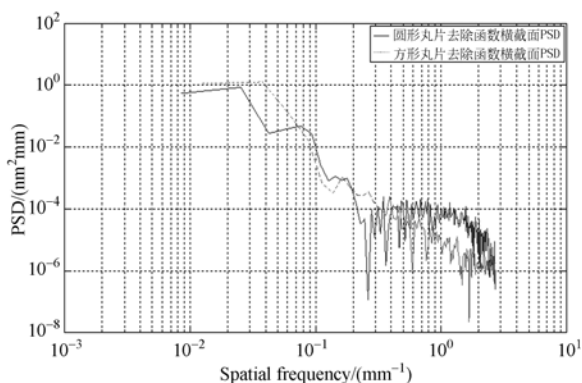


图 11 去除函数横截面 PSD 分布对比

Fig. 11 PSD distribution of cross section of removal function

得台阶效应有所减弱,去除函数的轮廓更为平滑。

为了更加量化的对比,分别计算了图 2(a)与图 10(a)去除函数横截面的 PSD 分布曲线,结果如图 11 所示。

由图 11 可知,空间频率在 $0.5 \times 2 \text{ mm}^{-1}$ 部分,图 2(a)的圆形丸片去除函数的中高频成分要多于图 10(a)。因此,图 10(a)去除函数的低频部分比图 2(a)更为平滑,这样减少了加工过程引入的中高频误差。

3.3 优化抛光盘的全口径抛光实验

为了测试和优化抛光盘在长时间加工过程中的去除函数稳定性,使用方形多丸片抛光盘实际加工了一块碳化硅工件。反射镜表面为平面,长为 205 mm,宽为 125 mm。材料为反应烧结碳化硅,实物图如图 12 所示。

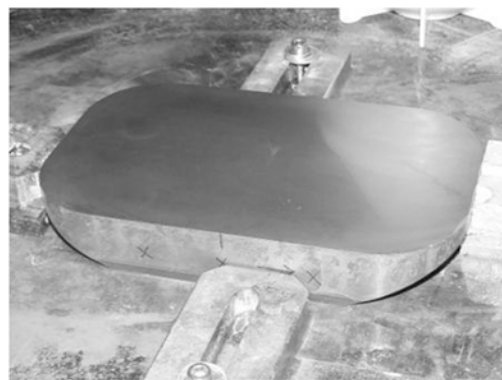


图 12 碳化硅反射镜实物图

Fig. 12 Picture of SiC mirror

整个加工实验同样在自行研制的加工中心完成。所使丸片的金刚石颗粒直径为 $7 \mu\text{m}$,最大工作压强为 0.5 MPa,优化后的偏心距为 9 mm,最大转速为 200 r/min。

实验步骤为:

(1) 首先由干涉仪测量碳化硅反射镜的初始面形,测量结果保存为 DAT 文件。

(2) 将 DAT 文件导入到自行研制的软件 ASM(Asphere Surface Manufacture)中,然后输入加工结果诸如反射镜尺寸、加工轨迹、抛光盘直径、加工偏心距,加工控制文件则由 ASM 软件根据输入的参数自行生成^[13-14]。

(3) 加工控制文件控制 UMAC 系统加工碳化硅反射镜。

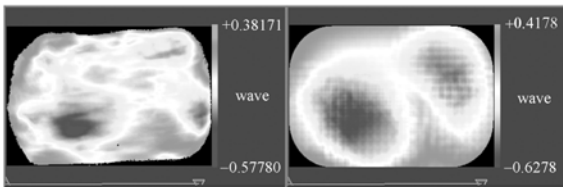
(4) 当全口径反射镜加工完成后,使用干涉仪测量软件中的“Subtract Sys Err”功能来获得

去除量分布。

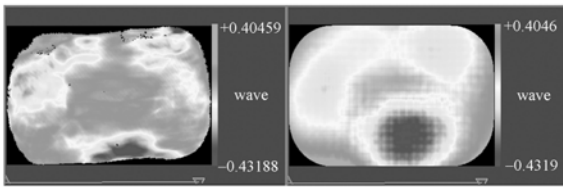
(5) 在 MATLAB 中,理想的去除量分布由加工控制文件与理想去除函数共同生成。理想的去除量分布与实际去除量分布的误差值则反映了方形多丸片抛光盘的去除函数稳定性。

(6) 重复步骤(1)来取得下一组数据,经以上步骤测试了方形多丸片抛光盘在长时间加工过程中的去除函数稳定性。

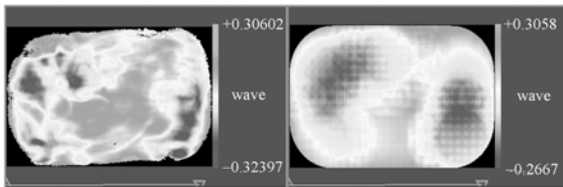
根据以上实验步骤获得一系列实验结果,图 13(a),(c),(e)分别为不同加工阶段的测量结果。



(a)实测去除量分布图 (b)模拟去除量分布图
 (a)Measured removal map (b)Simulation removal map
 (surface error rms=0.22λ, λ=0.632 8 μm)



(c)实测去除量分布图 (d)模拟去除量分布图
 (c)Measured removal map (d)Simulation removal map
 (surface error rms=0.112λ, λ=0.632 8 μm)



(e)实测去除量分布图 (f)模拟去除量分布图
 (e)Measured removal map (f)Simulation removal map
 (surface error rms=0.063λ, λ=0.632 8 μm)

图 13 碳化硅反射镜去除量分布图

Fig. 13 Removal maps of polishing SiC mirror

图 10(a)的实验结果不如图 2(a)的理想,这主要是因为方形多丸片抛光盘中使用了近 100 个丸片。在加工过程中,每个丸片的金刚石颗粒的大小,浓度,丸片的修整特性并不能严格的一致,因此发生缺陷的概率要比使用 7 个圆形丸片的抛

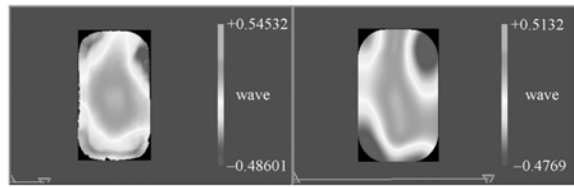
光盘大,最终也导致了实验获得的去除函数在中心对称方面并不是十分理想。

分析图 13(a),(b),(c),(d),(e),(f)中的细节可知,实验结果与模拟的分布并不十分一致,但从全口径角度来看,二者分布还是很接近的。对比结果显示,方形多丸片抛光盘在长时间加工过程中保持了较好的自锐性。抛光盘的去除函数基本保持在特定状态,特别是在加工口径较大的碳化硅反射镜的时候。

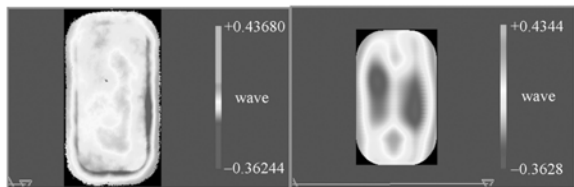
3.4 散粒磨料工艺对比实验

为了获得直观的比较,使用散粒磨料工艺在同一尺寸的碳化硅反射镜上重复了实验。实验过程没有加入额外的磨料,其目的是考察数量相同的散粒磨料的加工能力。实验步骤与丸片实验的相同。

选取两个有代表性的结果,显示在图 14 中。



(a)实测去除量分布图 (b)模拟去除量分布图
 (a)Measured removal map (b)Simulation removal map
 (surface error rms=0.176λ, λ=0.632 8 μm)



(c)实测去除量分布图 (d)模拟去除量分布图
 (c)Measured removal map (d)Simulation removal map
 (surface error rms=0.041λ, λ=0.632 8 μm)

图 14 碳化硅反射镜的去除量分布图

Fig. 14 Removal maps of polishing SiC mirror

图 14(a),(b)有着很好的相似度,但图 14(c),(d)的情况则很差。这种差异性说明了尽管散粒磨料工艺有着较高的加工精度,但在长时间加工过程中很难保持稳定。如果保持稳定,就需不断地加入散粒磨料和润滑剂。加料过程需要加工者具有一定的经验,加入比例合适的磨料与润滑剂(在本实验中润滑剂为水)才能获得良好的加工效果。如果磨料过多,则有过多的磨料互相

碰撞、摩擦导致磨料的有效工作数量减少,间接引起加工效率降低;而如果润滑剂过多,则磨料容易被润滑剂冲走,同样导致磨料的有效工作数量减少,加工效率降低。但若使用固着磨料,则不会出现上述问题。

3.5 结构形似度指数的计算

为了定量分析加工结果,引入图像结构相似指数的概念^[15]来评价模拟与实验结果之间的关系。对于模拟结果和实验结果而言,结构相似指数越大,他们之间就越相似。

结构相似指数方程为:

$$SSIM(x, y) = \frac{2(\mu_x \mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}, \quad (3)$$

其中: μ_x, μ_y 是离散数据的平均强度; σ_x, σ_y 是标准差。常数 C_1 用来避免当 $\mu_x^2 + \mu_y^2$ 接近零时引起的结果不稳定,常数 C_2 用来避免当 $\sigma_x^2 + \sigma_y^2$ 接近零时引起的结果不稳定。 σ_{xy} 由下式表示:

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y).$$

图 13,图 14 的结构相似指数由式(3)所计算,结果如表 2 所示。

表 2 表面分布矩阵的结构相似指数表

Tab.2 Structural similarity index of surfacing distributing matrix

Fixed abrasive			Slurry abrasive	
Fig. 13(a,b)	Fig. 13(c,d)	Fig. 13(e,f)	Fig. 14(a,b)	Fig. 14(c,d)
0.425 7	0.351 2	0.303 7	0.418 6	0.251 4

参考文献:

- [1] CHOYKE W J, FARICH R F, HOFFMAN R A. SiC, a new material for mirrors 1: high power-lasers; 2: VUV applications[J]. *Appl. Opt.*, 1976, 15(9):2006-2007.
- [2] GOLINI D, JACOBS S D. Physics of loose abrasive microgrinding[J]. *Appl. Opt.*, 1991, 30(19):2761-2777.
- [3] LAMBROPOULOS J C, XU S, FANG T. Loose abrasive lapping hardness of optical glasses and its interpretation[J]. *Appl. Opt.*, 1997, 36(7):1501-1516.
- [4] GILLMAN B E, JACOBS S D. Bound-abrasive polishers for optical glass[J]. *Appl. Opt.*, 1998, 37

由表 2 中的指数结果可知,散粒磨料去除函数的形状较不稳定,这主要是由加工环境的不受控因素引起的,而固着磨料的方形多丸片抛光盘的加工稳定性相对较好,尤其是在长时间加工中。

4 结 论

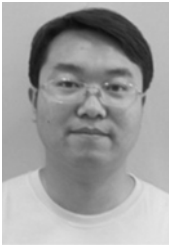
本文引入填充因子来评价圆形丸片抛光盘的去除函数,定量地获得了丸片结构与填充因子之间的关系。基于填充因子,优化了丸片结构,获得方形多丸片的结构。然后,在 MATLAB 中模拟了全新的抛光盘去除函数,结合理想去除函数与 ASM 软件生成的加工控制文件,获得了去除量分布图。根据模拟出的实验参数,进行了方形多丸片抛光盘去除函数及其实际去除量分布的实验,并以此测试了长时间加工过程中新型结构抛光盘的去除稳定性。为了对比固着磨料的实验结果,在相同加工参数条件下又使用散粒磨料进行加工实验。最后,引入结构相似指数的概念来评价全口径反射镜的去除量模拟结果与实验结果之间的相似度。相似度比较结果显示,方形多丸片抛光盘的结果不仅比散粒磨料工艺高而且也更为稳定。最终的结果表明,方形多丸片抛光盘在加工大口径碳化硅反射镜方面有良好的应用前景。

(6):3498-3504.

- [5] EDWARDS D F, HED P P. Optical glass fabrication technology. 1: fine grinding mechanism using bound diamond abrasives[J]. *Appl. Opt.*, 1987, 26(21):4670-4676.
- [6] FLETCHER T D, DRONEN B, GOBENA F T, et al. Fixed abrasive flat lapping with 3M trizact diamond tile abrasive pads[C]. *Presented at Optifab 2003, Rochester, New York, May 2003.*
- [7] FLETCHER T, GOBENA F, ROMERO V. Diamond fixed abrasive lapping of brittle substrates [C]. *Presented at the OSA Optical Fabrication & Testing Topical Meeting, Rochester NY, 2004.*
- [8] BIFANO T, YI Y, KAHL W K. Fixed abrasive grinding of CVD SiC mirrors[J]. *Precision Engi-*

- neering, 1994, 16(2):109-116.
- [9] JONES B A. Optimization of computer controlled polishing[J]. *Appl. Opt.*, 1977, 16(1):218-224.
- [10] JONES R A. Fabrication of small nonsymmetrical aspheric surfaces[J]. *Appl. Opt.*, 1979, 18(8):1244-1246.
- [11] WANG X, ZHANG X J. Theoretical study on removal rate and surface roughness in grinding RB-SiC mirror with a fixed abrasive[J]. *Appl. Opt.*, 2009, 48(5):904-910.
- [12] 王旭,张峰,张学军. 固着磨料抛光碳化硅反射镜的去除函数[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5):951-957.
- WANG X, ZHANG F, ZHANG X J. Removal function of computer controlled polishing SiC mirror with fixed abrasive[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):951-957. (in Chinese)
- [13] ZHANG X J, ZHANG ZH Y, LI Z L. Manufacturing and testing of 1-m class SiC aspherical mirror[J]. *SPIE*, 2007, 6721:672109.
- [14] ZHENG L G, ZHANG X J. Novel resistance iterative algorithm for CCOS[J]. *SPIE*, 2006, 6288:62880N.
- [15] ZHOU W, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4):600-612.

作者简介:



王 旭(1982—),男,辽宁沈阳人,博士,助理研究员,主要从事光学精密加工与检测方面的研究。E-mail: wangxu-308@163.com

●下期预告

多角度偏振辐射计星上积分球结构设计及检测

宋茂新*,杨本永,袁银麟,洪 津

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 光学遥感中心,安徽 合肥 230031)

为满足星载多角度偏振辐射计六孔径同时定标及全光路定标的要求。首先,根据辐射计光路特点和结构约束设计了六出孔椭球形积分球定标源,并对其辐射输出的一致性、均匀性及偏振特性进行检测。结果表明,积分球成对开孔输出一致性优于 99.5%,面均匀性优于 99%,偏振度低于 1%。满足多角度偏振辐射计的辐射定标需求。