

应用组合加工技术加工 2 m 口径非球面碳化硅反射镜

刘振宇

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 为解决大口径非球面碳化硅反射镜加工过程中材料去除效率与加工精度之间的矛盾, 提出使用组合加工技术进行加工。介绍了组合加工技术的基本原理与数学模型。通过与经典计算机控制表面成形技术(CCOS)加工技术进行对比, 说明了组合加工技术的优势。结合工程实例, 对一块 2040mm 口径非球面碳化硅反射镜进行研磨。以其中一次加工周期为例介绍了组合加工技术在大口径非球面碳化硅反射镜加工过程中的应用。经过一次完整的组合加工过程, 工件表面面形误差峰谷(PV)值由 $8.72\ \mu\text{m}$ 收敛至 $4.91\ \mu\text{m}$, 均方根(RMS)值由 $0.91\ \mu\text{m}$ 收敛至 $0.52\ \mu\text{m}$, 证明了组合加工技术的有效性。

关键词 光学制造; 组合加工技术; 大口径非球面; 碳化硅反射镜

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s122005

Grinding 2 m Diameters Aspheric SiC Mirror with Multi-Mode Optimization Technique

Liu Zhenyu

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

Abstract Use multi-mode optimization technique to improve material remove efficiency and precision. Introduced principal theory and mathematical model of multi-mode optimization technique. Compared with traditional computer controlled optical surfacing (CCOS) technique, we introduce the advantage of multi-mode technique. In the last, we grind a SiC mirror using multi-mode technique. Take SiC mirror with caliber of 2040 mm as an example to introduce how the multi-mode technique applied in grind large aspheric SiC mirror. After a complete multi-mode process, peak valley (PV) of the surface converges from $8.72\ \mu\text{m}$ to $4.91\ \mu\text{m}$ and root mean square (RMS) of the surface converges from $0.91\ \mu\text{m}$ to $0.52\ \mu\text{m}$, which demonstrates the validity of the multi-mode technique.

Key words optical fabrication; multi-mode technique; large aspheric mirror; SiC mirror

OCIS codes 120.4610; 220.4610; 220.5450; 220.1250

1 引 言

近年来,随着空间对地观测、深空探测和天文观测等领域的迅速发展,大口径非球面反射镜的需求不断增加。碳化硅材料具有比刚度大、热膨胀系数小、尺寸稳定性高等一系列优秀的物理特性,以碳化硅作为镜体材料的反射镜在现代光学系统中得到了日益广泛的应用^[1]。

计算机控制光学表面成形技术(CCOS)是高精度大口径非球面光学元件制造的主要方法,该技术的基本思想是用计算机控制一个口径远小于非球面工件的小磨头对光学元件进行研抛,通过改变驻留时间分布实现光学表面面形误差的确定性去除^[2]。目前,该技术已成功应用于多项大口径非球面反射镜加工。为进一步提升成像质量和提高空间分辨率,下一代光学系统对非球面反射镜口径的要求不断提升^[3]。但是,随着反射镜口径的增大,其偏离量增大,材料去除量急剧增加,尤其是对于碳化硅反射镜而言,碳化硅材料具有高硬度,化学性质稳定的特点,对材料去除效率提出了更高的要求。因此,如何在保证加工精度的同时提升材

收稿日期: 2015-02-15; 收到修改稿日期: 2015-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(61036015)

作者简介: 刘振宇(1985—),男,博士,助理研究员,主要从事高精度光学制造方面的研究。E-mail: lzyth1985@163.com

料去除效率是大口径非球面碳化硅反射镜加工过程中必须解决的问题。为提升大口径非球面反射镜加工效率,美国 Arizona 大学光学加工中心的 Kim 等^[4-5]提出了计算不同磨头组合抛光的方法,并且成功应用于 GMT 主镜的加工。长春光学精密机械与物理研究所的李俊峰等^[6-7]提出了多工位同时加工的组合加工技术。国内其他研究人员也对大口径非球面反射镜加工进行了较为深入的研究^[8-11]。本课题组对大口径非球面反射镜多磨头组合加工技术进行了研究,并在 2013 年公开发表的文献中对多磨头组合加工技术进行了介绍,通过仿真试验验证了多磨头组合加工技术的有效性。

本文主要研究将多磨头组合加工技术应用于大口径非球面反射镜实际加工过程中。根据实际加工需求,对组合加工过程中磨头尺寸选择、磨头组合选择等工艺参数进行研究。并使用组合加工技术对 2 m 口径非球面碳化硅反射镜进行研磨阶段加工,得到了较好的加工结果。

2 组合加工技术简介

对于大口径非球面工件而言,加工方面的难点主要在于解决加工效率与加工精度之间的矛盾。随着非球面反射镜口径的增大,反射镜表面积成指数型增大,材料去除量迅速增加,因此需要更大的研抛盘进行加工。另一方面,随着研抛盘的口径的增大,其对小尺度面形误差的修正能力减小,同时,在非球面工件加工过程中,非球面表面曲率半径不断变化,磨头口径越大,与工件表面吻合性越差,导致去除函数变形,降低面形收敛效率。组合加工技术旨在加工过程中建立较好的加工策略,较好地解决材料去除效率与面形收敛效率的矛盾。

2.1 组合加工技术基本思想

CCOS 技术的加工原理是使用计算机控制一个小磨头,沿特定的路径在光学表面运动,通过控制路径上各点处驻留时间实现面形误差的确定性去除。经典 CCOS 技术中,输入条件为定量的面形误差分布数据与一个磨头的去除函数(通过数学模型计算或试验测量获得),通过一个数学模型求解满足加工后面形均方根(RMS)误差最小的驻留时间分布指导加工。加工结束后再次检测面形,重复上述过程最终获得所需面形。

经典 CCOS 过程中,加工人员通常根据经验选择磨头,若面形误差尺度较大,则使用较大口径磨头,若面形误差为局部小尺度误差则使用较小口径磨头进行加工。该加工方式对加工人员经验依赖较大,无法保证稳定性,而且在每次驻留时间求解过程中仅考虑单个磨头的去除函数,无法建立加工过程中前后联系,容易导致重复去除,降低加工效率。

组合加工技术的基本思想是在一次优化过程中对多个磨头的驻留时间分布同时进行求解,通过大、小磨头组合的方式同时进行优化。尺度较大的低频面形误差由材料去除效率高的大口径磨头进行去除,小口径磨头对小尺度局部面形误差进行去除,因此使用组合加工技术可以保证加工效率的同时实现全频段面形误差一致收敛。

经典 CCOS 技术实现过程为“面形检测、驻留时间计算、加工、再次进行面形检测”的串联迭代过程,在该过程中每次驻留时间计算仅针对当次循环有效,没有建立前后加工方案之间的联系。组合加工技术是通过“面形检测,多去除函数驻留时间同时计算,根据计算结果依次使用相应的磨头进行加工,再次进行检测”这一过程实现的。与经典 CCOS 技术相比,组合加工技术是一个并联计算、串联加工的过程。组合加工技术中虽然加工过程仍然是串联过程,但是由于在驻留时间求解过程中同时考虑到多个磨头的去除函数,因此能够建立全局加工策略,加工过程中各磨头的加工方案相互联系,彼此互补,各磨头有针对性的处理相应面形误差,最终实现材料去除效率与面形收敛效率的同时提升。经典 CCOS 流程图与组合加工技术流程图对比如图 1 所示。

2.2 组合加工数学模型及求解

经典 CCOS 技术中,光学元件表面材料去除是通过磨头去除函数沿规划好的路径在工件表面运动实现的,这是一个卷积过程,其数学表达式为

$$E(x, y) = R(x, y) \otimes D(x, y), \quad (1)$$

式中 $E(x, y)$ 为工件表面材料去除函数, $R(x, y)$ 为磨头去除函数, $D(x, y)$ 为驻留时间,其中 $E(x, y)$ 可通过面形测量获得,其值为工件表面面形误差分布,去除函数 $R(x, y)$ 可根据磨头运动方式建立数学模型计算或通过工艺试验获得,则驻留时间求解问题变为反卷积问题。关于驻留时间求解问题国内外研究人员提出过多种数学模型并应用于实际项目中,具体有卷积迭代法、傅里叶变化法、矩阵代数法等。本文选用矩阵方程

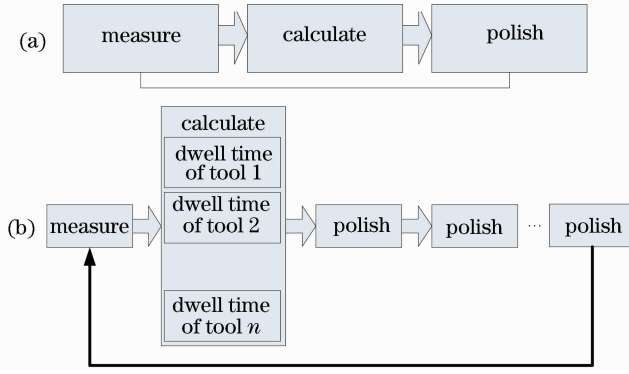


图 1 (a) 经典 CCOS 技术流程图; (b) 组合加工技术流程

Fig. 1 (a) Classical CCOS process; (b) multi-mode technique process

的数学模型,该模型具有矩阵运算的特点,便于对多个磨头去除函数的组合进行计算。

磨头在驻留点 $A(x_d, y_d)$ 处驻留时间为 $D(x_d, y_d)$ 时,对去除范围内的点 $B(x_i, y_i)$ 处材料去除量为:

$$E(x_i, y_i) = R(x_d, y_d; x_i, y_i)D(x_d, y_d), \quad (2)$$

式中 $R(x_d, y_d; x_i, y_i)$ 根据除函数 $R(x, y)$ 中点 B 驻留点 A 相对位置确定。假设工件上规划驻留点数量为 M , 面形由 N 个数据点表征,则磨头遍历所有驻留点对点 B 的总材料去除为:

$$E(x'_i, y'_i) = \sum_{k=1}^M R(x_k, y_k; x'_i, y'_i)D(x_k, y_k), \quad (3)$$

D 为磨头在各驻留点处驻留时间分布。则 CCOS 加工数学模型有卷积计算转变为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1M} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_N & r_{N2} & \cdots & r_{NM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_M \end{bmatrix}, \quad (4)$$

引入符号表示为:

$$\mathbf{E} = \mathbf{R} \times \mathbf{D}, \quad (5)$$

式中 \mathbf{R} 为函数去除矩阵,大小为 $N \times M$, 其中元素 r_{ij} 代表第 j 个驻留点对第 i 个数据点的单位时间材料去除量。 \mathbf{E} 为面形误差的向量形式, e_i 为第 i 个去除点处的面形误差, d_i 为第 i 个驻留点处的驻留时间。通过上述推导,加工模型转变为矩阵方程的求解过程。

对于组合加工而言,面形误差是通过多个磨头进行去除的,因此做如下扩展(以两个磨头组合为例):

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1M_1} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2M_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_N & r_{N2} & \cdots & r_{NM_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_{M_1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r'_{11} & r'_{12} & \cdots & r'_{1M_2} \\ r'_{21} & r'_{22} & \cdots & r'_{2M_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r'_{N1} & r'_{N2} & \cdots & r'_{NM_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d'_1 \\ d'_2 \\ \vdots \\ d'_{M_2} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

对于任一面形误差的数据点而言,其材料去除可以通过合并磨头 1 与磨头 2 的材料去除进行计算,因此可将矩阵方程(6)式转变为

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1M_1} & r'_{11} & r'_{12} & \cdots & r'_{1M_2} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2M_1} & r'_{21} & r'_{22} & \cdots & r'_{2M_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_N & r_{N2} & \cdots & r_{NM_1} & r'_{N1} & r'_{N2} & \cdots & r'_{NM_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_{M_1} \\ d'_1 \\ d'_2 \\ \vdots \\ d'_{M_2} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

符号表达式为:

$$\mathbf{E} = (\mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_2) \times (\mathbf{D}_1 \cdot \mathbf{D}_2)^T. \quad (8)$$

通过求解矩阵方程(7)式即可获得磨头 1 与磨头 2 的驻留时间分布 $\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2$, 由于在同一方程内对驻留时间求解, 因此面形误差各点处材料去除是由磨头 1 与磨头 2 共同实现的, 若方程存在精确解, 则该解应满足磨头 1 与磨头 2 的材料去除量之和等于面形误差 e , 即磨头 1 与磨头 2 的材料去除必定是互补关系。

实际加工过程中要求驻留时间解非负, 并且由于对多个磨头驻留点进行合并, 驻留点数量与数据点数量通常不一致, 矩阵方程(7)式为欠定或超定方程, 必须放弃精确求解的思路, 寻求最佳非负近似解。采用 Tikhonov 正则化方法对方程进行求解, 该方法通过对矩阵方程正则化后进行最小二乘求解, 能够获得相对稳定和精确的解。

3 研磨试验

结合工程实例, 使用组合加工技术对一非球面碳化硅反射镜进行了研磨试验, 以验证组合加工技术对非球面碳化硅反射镜加工的有效性。非球面反射镜直径为 2040 mm, 实物如图 2 所示。

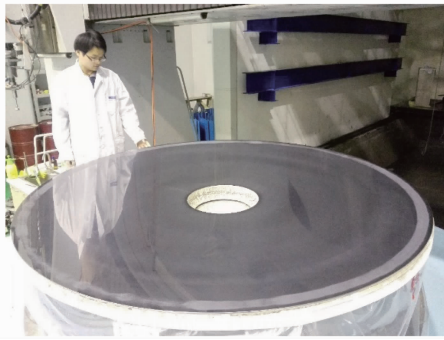


图 2 2040 mm 直径非球面碳化硅反射镜实物图

Fig. 2 Actual picture of 2040 mm diameter aspheric SiC mirror

3.1 去除函数库与试验设备

非球面反射镜加工过程中, 磨头选择是最重要的工艺参数之一, 磨头的尺寸、运动方式, 材质等因素均会对去除函数产生影响, 实际应用组合加工技术时难以对所有磨头组合进行分析, 因此, 需要结合实际加工情况建立合理的去除函数库, 利用组合加工技术从去除函数库中选取最优组合进行加工。非球面反射镜的加工难点之一是工件表面各点处曲率半径不断变化, 磨头与工件表面不吻合, 导致去除函数变形, 影响加工精度。通常使用口径远小于工件的磨头进行加工, 通过磨头自身在研抛过程中的变形与磨损实现不同位置处与工件之间的吻合。

试验过程中建立的去除函数库包含做平转动运动的 4 种磨头: 直径 300 mm 钢磨头、直径 200 mm 钢磨头、直径 100 mm 碳化硅磨头、直径 60 mm 碳化硅磨头。随着磨头口径的增大, 磨头与工件表面的不吻合度

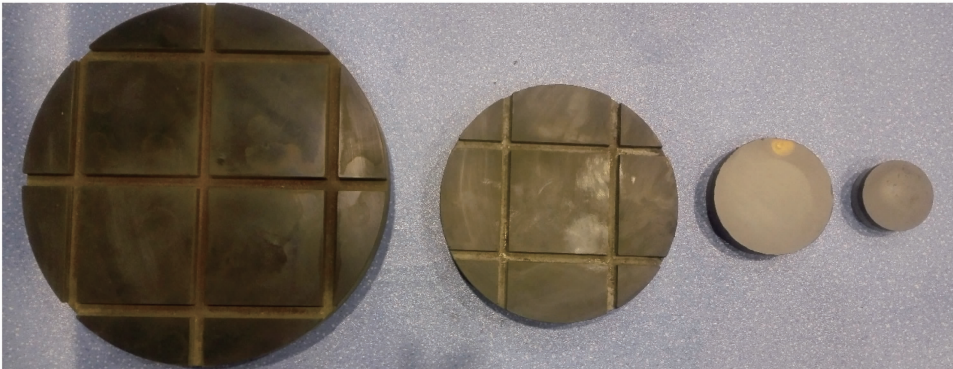


图 3 加工试验磨头实物图

Fig. 3 Actual picture of grinding pad

增加,因此直径 300 mm,200 mm 磨头选择钢材质,钢的硬度低于碳化硅,在研磨过程中更易产生磨损,提高其与工件接触部分吻合度。各磨头实物图如图 3 所示(由左到右依次为 300 mm、200 mm 钢磨头,100 mm、60 mm 碳化硅磨头)。

加工试验所使用的加工设备是 FSGJ-4500 非球面数控加工中心,可加工直径为 4500 mm。图 4 为分别通过 FSGJ-4500 机床使用大、小磨头加工 2040 mm 口径非球面碳化硅反射镜实物图。FSGJ-4500 主轴部分可通过更换磨头实现使用不同磨头进行加工。

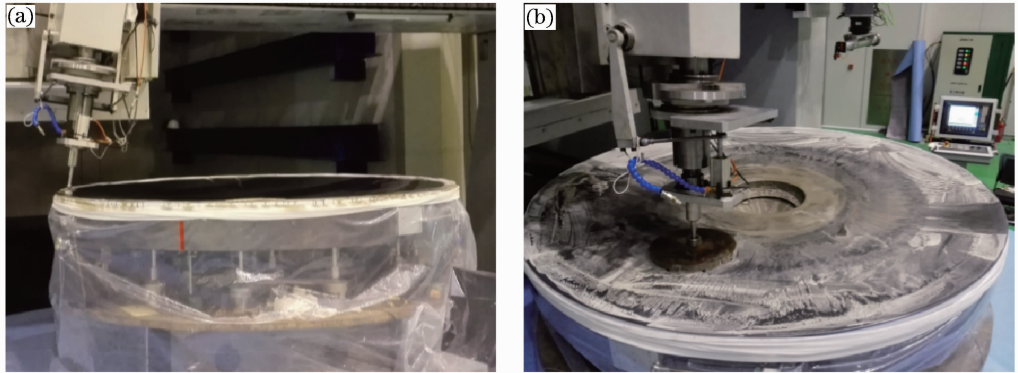


图 4 FSGJ-4500 加工 2040 mm 口径非球面碳化硅反射镜实物图。(a) 100 mm 磨头加工过程;
(b) 300 mm 磨头加工过程

Fig. 4 Picture of grinding 2040 mm SiC aspheric mirror with FSGJ-4500. (a) 100 mm tool grinding;
(b) 300 mm tool grinding

3.2 加工试验

大口径非球面反射镜的加工是一个多周期迭代收敛的过程,选取其中一个周期对组合加工技术在大口径非球面反射镜研磨过程中的应用进行分析。图 5 为 2040mm 非球面碳化硅反射镜加工过程中某一加工周期检测结果。其面形误差峰谷(PV)值为 $8.72 \mu\text{m}$,RMS 为 $0.91 \mu\text{m}$ 。

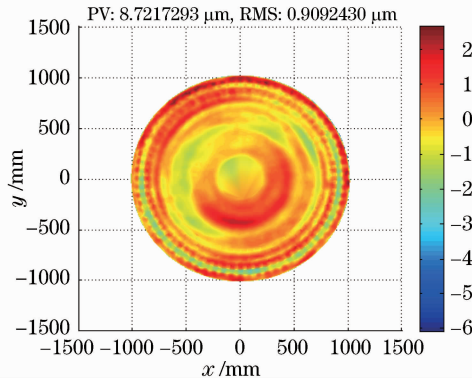


图 5 初始面形

Fig. 5 Original surface

为验证组合加工技术有效性,使用经典 CCOS 技术对单个磨头驻留时间进行求解,结果如表 1 所示。

表 1 经典 CCOS 技术驻留时间求解结果

Table 1 Classical CCOS technique dwell time simulation result

| Tool /mm | 300 | 200 | 100 | 60 |
|--------------------------------|-------|--------|--------|---------|
| Initial RMS / μm | | | 0.909 | |
| Calculated RMS / μm | 0.683 | 0.669 | 0.364 | 0.174 |
| RMS convergence /% | 24.89 | 26.40 | 59.96 | 80.86 |
| Dwell time /min | 453.2 | 1037.7 | 3817.0 | 10368.0 |

将去除函数库中去除函数分为大、小两部分,大磨头包括 300 mm 钢磨头,200 mm 钢磨头,小磨头包括 100 mm 碳化硅磨头,60 mm 碳化硅磨头。对不同大小磨头的组合进行组合加工驻留时间求解,结果如表 2 所示。

表 2 组合加工驻留时间求解结果

Table 2 Multi-mode dwell time simulation result

| Tool /mm | 300+100 | 300+60 | 200+100 | 200+60 |
|--------------------------------|---------|--------|---------|--------|
| Initial RMS / μm | | | 0.909 | |
| Calculated RMS / μm | 0.358 | 0.345 | 0.319 | 0.310 |
| RMS convergence /% | 60.92 | 62.05 | 64.91 | 65.90 |
| Dwell time big /min | 180.6 | 269.1 | 204.7 | 593.1 |
| Dwell time small /min | 2292.7 | 4210.1 | 4530.7 | 4070.0 |
| Dwell time total /min | 2473.3 | 4479.2 | 4735.4 | 4663.1 |

比较表 1 与表 2 的加工结果可看出,使用经典 CCOS 技术时,大磨头加工时间较短,但是面形收敛效率较低,小磨头面形收敛效率较高,但是加工时间较长。使用组合加工技术能够较好的解决这一矛盾,在较短的时间内获得较好的面形收敛效率。分析比较组合加工技术中不同磨头组合优化结果,选取 300 mm 钢磨头与 100mm 碳化硅磨头用于实际加工,与其他组合相比,该组合的总驻留时间更少,而面形收敛效率相差不大,因此适合实际加工。

图 6 为 300 钢磨头与 100 碳化硅磨头组合加工虚拟加工结果母线示意图。

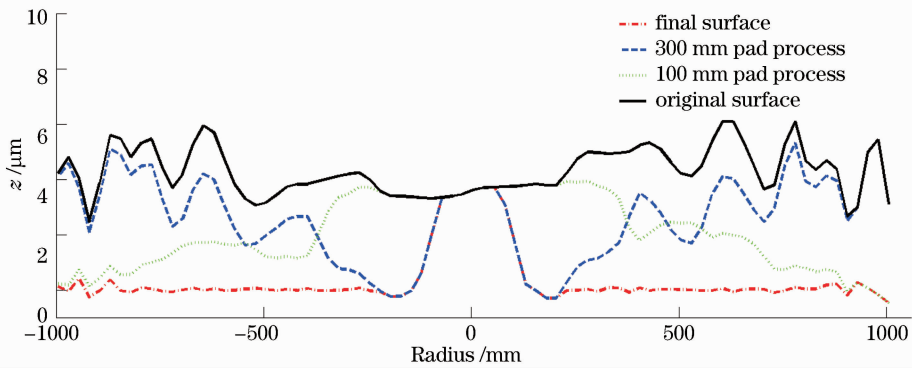


图 6 组合加工虚拟加工结果母线示意图

Fig. 6 Residual profile of two tools using multi-mode technique

由图 6 可以看出,300 mm 钢磨头与 100 mm 碳化硅磨头在虚拟加工过程中材料去除形成互补,最终实现了总体面形误差收敛的结果。图 7 为 300 mm 磨头实际加工后面形误差,PV 为 $8.65 \mu\text{m}$,RMS 为 $1.11 \mu\text{m}$ 。图 8 为 300 mm 钢磨头加工后再使用 100 mm 碳化硅磨头加工面形误差,PV 为 $4.91 \mu\text{m}$,RMS 为 $0.52 \mu\text{m}$ 。

通过实际加工结果可以看出,实际加工结果与理论计算结果有一定偏差,偏差的产生主要有两个原因:1) 试验使用反射镜为工程项目主镜,不适合做去除函数试验,因此,使用数学模型计算理论的去除函数与实际去

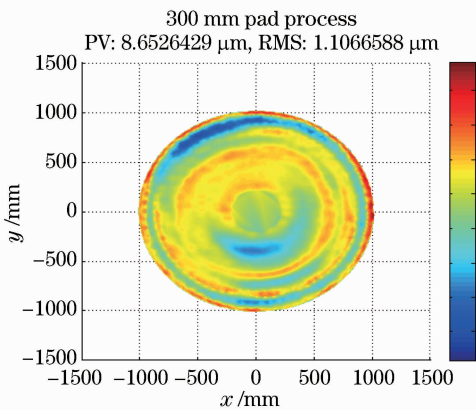


图 7 300 mm 钢磨头加工后面形误差

Fig. 7 Error map of the mirror after grinding with 300 mm steel pad

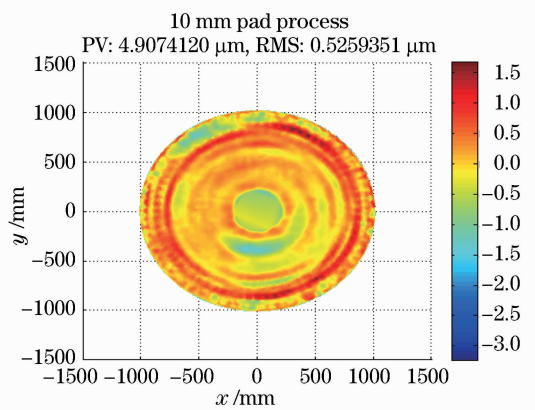


图 8 100 mm 碳化硅磨头加工后面形误差

Fig. 8 Error map of the mirror after grinding with 100 mm SiC pad

除函数有一定差别;2)磨头研磨过程中磨头磨损、温度变化,磨料浓度变化等工艺参数复杂耦合,影响去除函数稳定性,因此导致实际加工结果与理论值产生一定偏差。因此,建立稳定的去除函数库是进一步工作之一。

总结试验过程中多个周期的加工试验发现,使用组合加工技术总加工时间远远小于单独使用小磨头加工时间,同时,面形收敛效率高于大磨头,因此,使用组合加工技术能够有效提高大口径非球面反射镜加工效率。

4 结 论

组合加工技术对经典 CCOS 加工技术进行了扩展,将原来的串联加工过程变为并联计算,串联加工的过程,综合了小磨头收敛效率高、大磨头材料去除效率高的优点,形成优势互补。使用组合加工技术对 2040 mm 口径非球面碳化硅反射镜进行加工试验,仿真结果与实际加工结果证明,使用组合加工技术能够获得较高的材料去除效率并保证面形收敛精度,有效解决大口径非球面碳化硅反射镜加工过程中加工精度与材料去除效率之间的矛盾。为提升大口径非球面反射镜加工效率提供了有效的解决方案。

为进一步提升组合加工技术的确定性,下一步研究方向是提升去除函数稳定性,建立更全面、准确的去除函数库。

参 考 文 献

- Zhang Feng. Combined type polishing of silicon modification layer on silicon carbide mirror for space camera[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0716001.
张 峰. 空间相机碳化硅反射镜表面硅改性层的组合式抛光[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0716001.
- R A Jones. Computer controlled polisher demonstration[J]. Appl Opt, 1980, 19(12): 2072-2076.
- J Nelson, G H Sanders. The status of the Thirty Meter Telescope project[C]. SPIE, 2008, 7012: 70121A.
- Dae Wook Kim, Sug-Whan Kim, James H Burge. Non-sequential optimization technique for a computer controlled optical surfacing process using multiple tool influence functions[J]. Opt Express, 2009, 17(24): 21850.
- James H Burge, Dae Wook Kim, Hubert M Martin. Process optimization for polishing large aspheric mirrors[C]. SPIE, 2014, 9151: 91512R.
- Xuan Bin, Xie Jingjiang, Song Shumei. Application of multi-mode combined polishing to optical manufacturing[J]. Opt Precision Eng, 2011, 19(1): 41-50.
宣 斌,谢京江,宋淑梅. 多模式组合抛光技术在光学加工中的应用[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(1): 41-50.
- Li Junfeng, Xie Jingjiang, Song Shumei. Zonal error removal for large aspheric with multi-mode combined manufacture technique[J]. Opt Precision Eng, 2010, 18(7): 1460-1467.
李俊峰,谢京江,宋淑梅. 应用多模式组合加工技术修正大口径非球面环带误差[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(7): 1460-1467.
- Pang Zhihai, Fan Xuewu, Chen Qinfang, *et al.*. Influence of surface-profile error of larger mirror on aberrations characteristics of optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0422002.
庞志海,樊学武,陈钦芳,等. 大口径反射镜面形误差对光学系统像差特性的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422002.
- Li Longxiang, Deng Weijie, Zhang Binzhi, *et al.*. Dwell time algorithm for large aperture optical element in magnetorheological finishing [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0522001.
李龙响,邓伟杰,张斌智,等. 大口径光学元件磁流变加工驻留时间求解算法[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0522001.
- Jiao Xiang, Zhu Jianqiang, Fan Quantang, *et al.*. Temperature difference analysis and control methods in precision finishing of large-aperture optical component[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1116001.
焦 翔,朱健强,樊全堂,等. 大口径光学元件精密加工温差分析及控制方法[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1116001.
- Li Zhongxuan, Chen Xue, Zhang Lei, *et al.*. Design of cartwheel flexural support for a large aperture space mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0622003.
李宗轩,陈 雪,张 雷,等. 大口径空间反射镜 Cartwheel 型柔性支撑设计[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0622003.

栏目编辑: 韩 峰