

文章编号 1004-924X(2015)09-2497-09

大口径 SiC 离轴非球面的高效磨削加工

殷龙海^{1,2*}, 王孝坤¹, 李龙响^{1,2}, 李丽富¹, 张志宇¹, 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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:研究了空间遥感器用大口径 SiC 离轴非球面的超声复合磨削加工工艺。分别对磨削原理、金刚石砂轮结合剂选择、机床选取、磨削参数设定等进行了分析,并设计和规划了磨削工艺流程。基于逆向工程原理建立了高精度离轴非球面模型,创立了激光跟踪仪精磨阶段在线测量大口径离轴非球面的工艺。结合工程实践对一口径为 700 mm×700 mm 的 SiC 高次离轴非球面元件进行了逆向工程建模和超声磨削加工试验,并利用激光跟踪仪进行了在线检测。经过 3 个周期(每个周期 4 h)的修磨,其面形精度 PV 值和 RMS 值分别由 45.986 μm 和 7.949 μm 收敛至 12.181 μm 和 2.131 μm;与三坐标测试结果进行对比,其 PV 值和 RMS 值的偏差分别为 0.892 3 μm 和 0.312 8 μm。实验显示,提出的磨削工艺实现了大口径 SiC 离轴非球面的快速精确磨削,其加工精度、效率以及表面质量都有了很大的提高。

关键词:光学制造;SiC 离轴非球面;快速磨削;超声复合磨削;在线检测

中图分类号:TN305.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152309.2497

Fast grinding of large SiC off-axis aspheric surface

YIN Long-hai^{1,2*}, WANG Xiao-kun¹, LI Long-xiang^{1,2}, LI Li-fu¹,
ZHANG Zhi-yu¹, 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. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: ylh761208@163.com

Abstract: A fast ultrasonic grinding for SiC off-axis large aspheres used in space remote sensors was researched. The principle of grinding, the selection of diamond grinding wheel bond, the selection of machine tool, and setting grinding parameters were analyzed, and the grinding process was designed. A high precise model of off-axis aspheric surfaces was established on the basis of the principle of reverse engineering, and the online testing method in fine grinding state for a large off-axis aspheric mirror by a laser tracker was established. Combination with an engineering example, the model of a

收稿日期:2014-11-14;修订日期:2014-12-30.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. O8663NJ090);国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2011CB0132005);国家自然科学基金重点项目(No. 61036015);国家自然科学基金资助项目(No. 51305422)

large SiC off-axis asphere with the aperture of $700\text{ mm} \times 700\text{ mm}$ was established by the reverse engineering principle, and it was grinded by ultrasonic method and measured by the laser tracker. After 3 cycles (4 hours per cycle of grinding), the PV value ($45.986\ \mu\text{m}$) and RMS value ($7.949\ \mu\text{m}$) of the surface error are reduced to $12.181\ \mu\text{m}$ and $2.131\ \mu\text{m}$, respectively. As compared with three coordinate testing results, the errors of PV value and RMS value are $0.8923\ \mu\text{m}$ and $0.3128\ \mu\text{m}$, respectively. It concludes that the grinding technology realizes fast and high precise grinding for the SiC off-axis large asphere and improves its machining precision, efficiency, and surface quality.

Key words: optical fabrication; SiC off-axis asphere; fast grind; ultrasonic grinding; online testing

1 引言

离轴三反消像散(Three Mirror Astigmat, TMA)系统不仅可以改善像质,而且可以减小光学系统的尺寸和重量,因此离轴非球面光学元件被广泛应用于各种空间遥感技术中^[1]。随着空间遥感技术的快速发展,其研制周期越来越短,因此如何对空间遥感器的核心元件(离轴反射镜)进行快速高效的加工和检测已经成为非球面光学元件研制的首要任务。

近年来, SiC 材料由于具有较高的弹性模量、适中的密度、较小的热膨胀系数、较高的导热系数等优异特性而被广泛应用到空间遥感器上^[2-3]。但是 SiC 本身属于一种陶瓷材料,其脆性很高、硬度极高、对缺陷敏感、抗热震和冲击性能较低。利用 SiC 材料作为镜体材料无疑增加了大中型离轴非球面反射镜的加工难度。其中,大中型离轴非球面磨削阶段的去除量最大,因此其磨削加工的风险很高。非球面的高精度磨削要求机床各轴的静态刚度在 $75\text{ N}/\mu\text{m}$ 以上,直线轴在 $0.1\ \mu\text{m}$ 以下、转动轴有 $1''$ 的重复定位精度,而且机床必须配有砂轮实时监控和补偿装置。目前,只有英国 Cranfield 大学的 SHORE 等为加工下一代超大口径地基天文望远镜的拼接子镜所研制的 BOXTM 磨床可以达到上述要求^[4]。该机床可以将口径 1 m 的玻璃平面反射镜加工成非球面镜,其面形精度达到 $1\ \mu\text{m}$,不过还未见它加工 1 m 量级 SiC 反射镜的报道。

通常加工大口径离轴非球面反射镜时首先要计算出最接近的球面曲率半径,然后按最接近半径磨削出球面,最后通过研磨和抛光加工出符合要求的非球面。为了缩短离轴非球面的研制周期,近年来人们开始采用直接磨削的方法在磨削阶段加工出符合非球面方程的非球面,以便大大

缩短非球面加工研磨阶段的加工时间。

本文研究了空间遥感器的关键元件大口径 SiC 离轴非球面的快速磨削加工,建立了高精度离轴非球面模型,采用超声复合磨削工艺,磨削过程中利用 FARO 激光跟踪仪进行在线检测。对某工程项目 $700\text{ mm} \times 700\text{ mm}$ 的 SiC 高次离轴非球面的磨削实验证明,其磨削效率和磨削精度都有了显著的提高。

2 SiC 反射镜超声磨削原理及工艺

2.1 SiC 反射镜超声复合磨削原理

传统的超声加工是利用超声波作为动力,推动磨料以极高的速度冲击工件表面,被加工区域的材料在磨料打击下损坏并脱落,原理如图 1 所示。这种超声加工方式效率较低,不适于大去除量加工。为提高磨削效率,本文采用近年来发展迅速的超声复合加工方式对 SiC 反射镜进行了磨削加工。

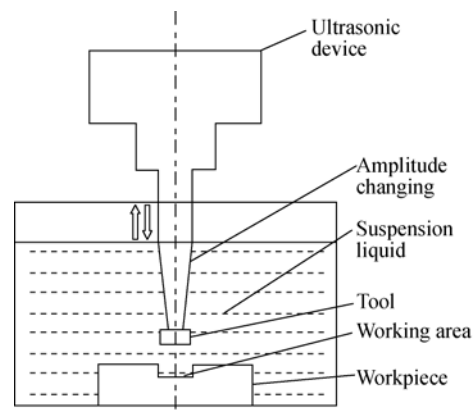


图 1 传统超声加工原理

Fig. 1 Principle of traditional ultrasonic fabricating method

SiC 反射镜超声复合磨削原理如图 2 所示。该方法在传统砂轮磨削的过程中增加了轴向高频

振动,不仅提高了砂轮的自锐(磨削过程中产生的磨屑黏附于砂轮的孔隙中因振动而脱离),而且使材料在高频振动下发生疲劳破坏,加速了材料的去除。在 SiC 反射镜超声磨削加工时,如果采用合适的加工参数,材料去除模式中不仅有脆性断裂,还存在着塑性流动,并且在超声加工中可以大大提高脆/塑转变时的临界切削深度。由此可见,在保证表面质量和加工精度的条件下,超声复合磨削加工能极大地提高加工效率^[5-9]。

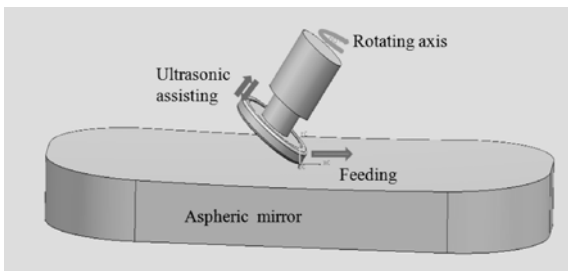


图 2 超声复合磨削原理

Fig. 2 Principle of ultrasonic grinding

2.2 SiC 非球面反射镜磨削工艺及机床选取

大中型 SiC 质反射镜镜面的磨削过程较为复杂并具有风险性,需要设计合理的磨削工艺流程。图 3 为大中型 SiC 非球面反射镜的磨削流程图。

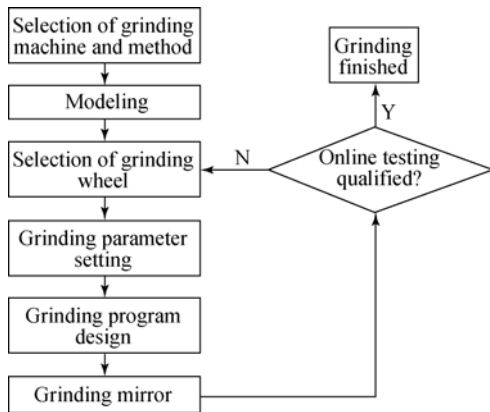


图 3 SiC 反射镜镜面的磨削流程图

Fig. 3 Flow chart of SiC mirror grinding

SiC 反射镜的磨削机床要有较高的刚度和精度,英国 Cranfield 大学的 BOXTM磨床造价极高,同时由于 SiC 加工后的微小颗粒具有很高的渗透性,磨削在线测量系统容易受到污染,因此 BOXTM并不适用于 SiC 镜面铣磨。另外,国外一些光学冷加工专业厂家生产的铣磨设备主要针对

同轴非球面设计,不适于大口径离轴非球面的加工。

为完成大口径 SiC 离轴非球面的磨削,这里定制了德国 DMG 公司的 ULTRASONIC100-5 加工中心,机床参数如表 1 所示,结构简图如图 4 所示。该设备将传统磨削和超声振动完美结合起来,是当今世界超声复合磨削工业化程度最高的设备之一。它虽然不是为光学冷加工专门设计的,但是通过建立高精度的非球面磨削模型、设计合理的砂轮形状、选择相应的砂轮参数以及采用最优的进给参数及刀具路径规划,可以对 SiC 非球面反射镜进行快速精密磨削。该设备通过采用集成的带连续过程监控软件 ADC(智能化适应性调节)和 ACC(声学控制技术)的 Siemens-840D 控制系统使得五轴加工具有极高的性能,监控软件在加工过程中可以根据主轴扭矩自动调整进给量,大大降低了 SiC 非球面反射镜磨削的风险性。

表 1 ULTRASONIC100-5 机床参数

Tab. 1 Specifications of ULTRASONIC100-5 machine

	Travel	Resolution	Positioning
X axis	1 000 mm	1 μm	8 μm
Y axis	1 000 mm	1 μm	8 μm
Z axis	1 000 mm	1 μm	8 μm
B axis	-30~180°	0.001°	4"
Rotary C axis	360°	0.001°	4"

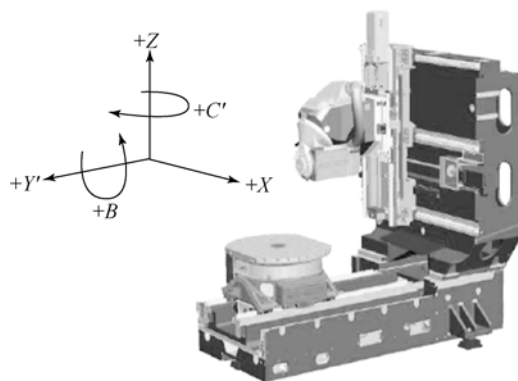


图 4 ULTRASONIC100-5 结构简图

Fig. 4 Schematic diagram of ULTRASONIC100-5

2.3 反射镜模型的建立

ULTRASONIC100-5 加工中心磨削 SiC 反射镜的过程实际是数控系统控制磨削工具(金刚

石砂轮)按照插补点运动的过程。因此反射镜模型的精度是最终磨削精度的决定因素之一。

利用建模软件可以快速建立球面反射镜模型,但离轴非球面模型的建立相对复杂。离轴非球面的母镜为回转对称的同轴非球面,离轴非球面与母镜的几何关系如图 5 所示。

设回转对称轴(光轴)为 z 轴,以非球面的顶点作为坐标原点,则非球面方程可表述为:

$$z = \frac{cS^2}{1 + [1 - (K+1)c^2S^2]^{1/2}} + A_1S^4 + A_2S^6 + A_3S^8 + \dots, \quad (1)$$

其中: $S^2 = x^2 + y^2$; c 为顶点曲率, $c = 1/R_0$ (R_0 为顶点曲率半径); K 为二次曲面常数, $K = -e^2$ (e 为二次曲面的偏心率); A_1, A_2, A_3, \dots 为非球面变形系数。

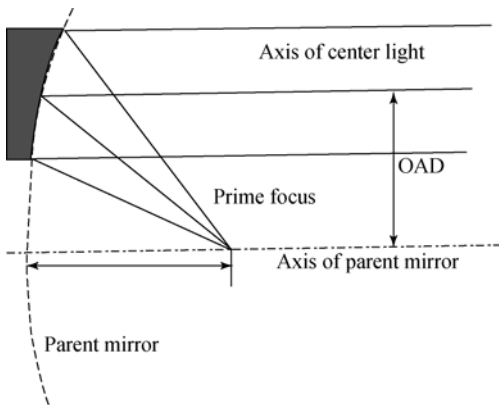


图 5 离轴非球面与母镜的几何关系图

Fig. 5 Relation between off-axis aspheric mirror and its parent mirror

非球面母线用多项式表示为:

$$Z(x) = B_1x^2 + B_2x^4 + B_3x^6 + B_4x^8 + B_5x^{10} + B_6x^{12} + B_7x^{14} + B_8x^{16} + \dots, \quad (2)$$

式中: $B_j (j=1, 2, \dots)$ 为多项式系数。根据非球面方程(1)能够推导出多项式系数值。

根据式(2)中的多项式系数值,利用 UG 软件可以绘制出非球面的母线,母线绕光轴旋转即得到非球面模型,但受 UG 软件建模精度的影响,该模型的精度一般在 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 。为提高模型精度,本文借鉴逆向工程的建模方法创建了另外一种离轴非球面建模方法。逆向工程是利用三坐标测量仪或其它测量设备扫描产品外形得到产品外形离散点的空间坐标,然后经过数据处理、曲面拟合、三维建模来进行产品的设计和 optimization。本文利用

VB 编程软件根据非球面方程(1)编写程序,采用插值算法计算非球面^[10]。首先计算出符合非球面方程(1)的母镜模型,然后根据离轴非球面的镜面参数包括镜面尺寸、离轴量(OAD)、离轴角等拟合出符合要求的理论离轴非球面,如图 6 所示。

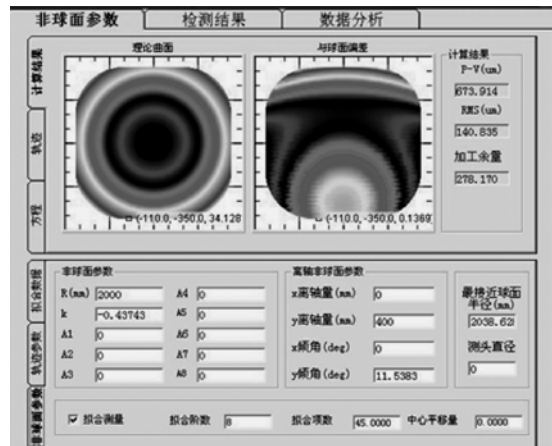


图 6 逆向工程获取离轴非球面

Fig. 6 Off-axis asphere obtained by converse strategy

离轴非球面的拟合精度可以达到 $0.1 \mu\text{m}$ 甚至更高。理论上离轴非球面是由包含 xyz 坐标的空间点阵组成,点的密度决定面型拟合精度,根据精度需要和镜面尺寸确定点的密度,再进行计算得到含有该点阵的 dat 数据文件。利用 UG 软件强大的曲面造型功能读取 dat 数据文件,在 UG 拟合的过程中选取高于非球面方程级次的拟合阶数拟合出非球面模型。按照反射镜的外形几何尺寸在该非球面模型基础上建模并进行坐标变换就可得到用于磨削的非球面模型,如图 7 所示。

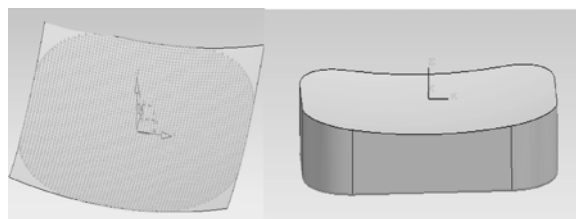


图 7 利用 UG 生成的非球面

Fig. 7 Asphere built by UG

2.4 金刚石砂轮结合剂选择

金刚石砂轮结合剂一般有树脂、陶瓷和金属 3 种,其结合能力和耐磨性能力依次减弱。根据 SiC 材料的性能和砂轮结合剂的特性,SiC 反射镜在粗磨、半精磨和精磨阶段分别采用树脂、陶瓷和

金属材料的金刚石砂轮结合剂。

粗磨阶段的去除余量最大,磨削风险性很高,因此既要考虑磨削安全又要兼顾磨削效率。采用树脂结合剂的砂轮有一定的弹性和极好的自锐性,结合超声振动可以采用大吃刀量缓进给的磨削方式,在提高磨削效率的同时可把风险降到最低。

采用陶瓷结合剂的砂轮的结合强度较高,几何形状保持性较好又具有多孔结构,工作时不宜发热及堵塞。应用在 SiC 反射镜磨削的半精磨阶段,砂轮性能可以得到充分发挥。

SiC 反射镜在精磨结束后要达到磨削要求的精度,对于 1 m 口径的 SiC 反射镜,其面形的波峰波谷值即 PV 值要在 $10\ \mu\text{m}$ 左右,达到上述精度后研磨工序所需的时间会成倍减少。精磨阶段砂轮的每转去除量很小,但是对于 1 m 口径的 SiC 反射镜其总的体积去除量很大,这就要求精磨阶段的砂轮要具有极好的耐磨性。这里定义磨削比为:

$$G = \frac{\Delta V_g}{\Delta V_s}, \quad (3)$$

其中: ΔV_g 表示单位时间工件的去除量, ΔV_s 表示单位时间砂轮的磨损量。由式(3)可得 G 值越大,砂轮磨损越慢。SiC 超硬材料磨削砂轮的磨损直接决定最终的磨削精度,因此本文在 SiC 反射镜的精磨阶段选用磨削比值最高的金属结合剂类金刚石砂轮。

根据磨削的不同阶段选择不同种类的砂轮结合剂不仅可以降低风险、提高效率,而且可以提高磨削精度。

2.5 离轴 SiC 非球面反射镜的磨削参数

因为 SiC 材料的独特性,磨削各阶段的参数选择须进行一系列加工实验。在粗磨阶段参数选择以提高去除效率为主,精磨阶段还要考虑面形精度和表面粗糙度。加工实验时主轴的超声频率为 15~20 kHz,磨削参数如表 2 所示。

表 2 磨削参数

Tab. 2 Grinding parameters

Grinding stage	Grinding deep/mm	Feed rate/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	Tool speed/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	Mirror speed/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)
Coarse grinding	0.5~0.8	800	5 000	20
Semi finish grinding	0.1~0.15	1 000	6 000	25
Finish grinding	0.02~0.08	1 200	6 500	30

2.6 离轴 SiC 非球面反射镜磨削

大型离轴非球面反射镜磨削时,不能把工件按离轴量放置在工作台上以类似同轴反射镜的方式进行车削式加工,因为机床的工作台尺寸及其加工范围不能满足此种加工方式。

通过 UG 建模进行坐标平移可以把反射镜模型的镜面几何中心作为加工坐标系的原点,那么离轴非球面的加工就演化成自由曲面的加工。自由曲面的加工需要利用加工设备四轴以上的联动功能,类似机械冷加工的自由曲面加工。离轴非球面反射镜模型建立后,转入 UG 软件的加工模块选择加工方式,导入进给参数并规划最优刀具轨迹进行切削仿真,如图 8 所示。

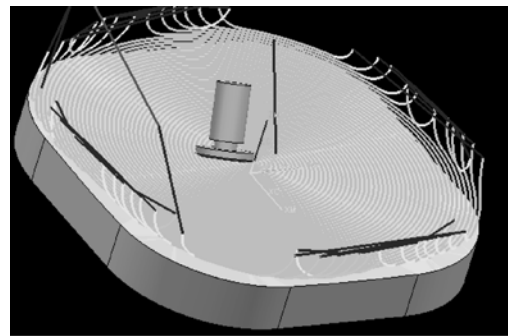


图 8 刀具轨迹优化图

Fig. 8 Optimized tool path

仿真正确无误后就可在 ULTRASONIC 100-5 加工中心进行后处理生成加工程序,即数控机床通用 G 代码和 M 代码程序。图 9 所示为利用加工程序对 700 mm×700 mm 口径离轴 SiC 非球面反射镜进行磨削的实际场景。

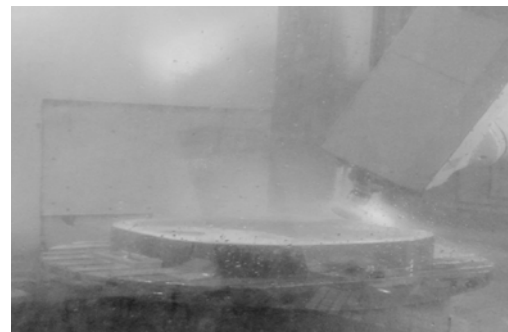


图 9 离轴 SiC 非球面的超声磨削加工

Fig. 9 SiC asphere fabricated by ultrasonic grinding

2.7 离轴 SiC 非球面反射镜磨削的在线检测

反射镜精磨后需测量面形精度,由于砂轮磨

损的影响,精磨后的面形精度不易达到要求,因此根据面形检测结果对反射镜进行修磨是比较可行的方案。ULTRASONIC100-5 加工中心的 Renishaw 测量模块只能测量简单的尺寸和形位误差,不能直接测量非球面的面形误差,如果采用手工记录测量点的空间坐标的方法,检测时间和数据处理的时间对于 1 m 口径的反射镜至少需要 8 h。

非球面反射镜的面形精度可以利用三坐标测量仪进行检测,检测精度较高,但是在磨削大口径非球面反射镜过程中使用三坐标测量仪存在很多困难:第一,非球面反射镜必须从加工机床的工作台上转移到三坐标测量仪的检测工作台上,而且在转移过程中非球面反射镜要整体清理干净;第二,检测完成的非球面反射镜需要重新精密装卡定位到磨削机床的工作台上,工件的复位精度要求为 $10\ \mu\text{m}$ 。上述过程必定耗费大量的时间并增加了风险,因此本文利用激光跟踪仪对磨削过程中的非球面反射镜面形进行在线测量。

激光跟踪仪利用双频激光测距和高精度角度测量系统精密测量靶球相对跟踪仪坐标原点的空间位置,激光跟踪仪和计算机直接通信保存靶球(CCR)的空间坐标,根据靶球中心的空间坐标、靶球直径和反射激光的角度就可以计算出被测接触点的空间坐标。利用激光跟踪仪实时跟踪检测的特点就可以对离轴非球面反射镜镜面进行多点取样测量^[11],其测量原理如图 10 所示。

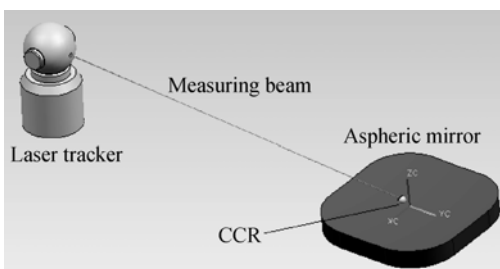


图 10 激光跟踪仪测量原理图

Fig. 10 Principle of laser tracker testing

激光跟踪仪测量反射镜镜面的测量点阵以 (X, Y, Z) 坐标形式保存成 dat 数据文件,对该数据文件处理后拟合出磨削后的离轴非球面的误差面形。根据误差面形对反射镜面进行修磨达到磨削要求,图 11 为实际在线测量图。



图 11 SiC 非球面反射镜磨削在线检测图

Fig. 11 SiC asphere tested on line

激光跟踪仪的高精度选项-干涉仪(IFM)的最大允许误差为 $2\ \mu\text{m} + L \cdot 0.4\ \mu\text{m}/\text{m}$,其中 L 为激光跟踪仪与待测物体之间的距离。检测时激光跟踪仪与待测非球面反射镜的距离一般可以控制在 2 m 以内,因此测量误差可以控制在 $3\ \mu\text{m}$ 以内。激光跟踪仪能够精确、快速地完成非球面研磨和粗抛光阶段面形的测量。此外,由于跟踪仪需要测量两个角度和一个距离,如果激光跟踪仪测量的特征基本上是沿着光速通路的方向,角度编码器的移动将会很小,其测量精度将会大幅提高。因此,测试时跟踪仪的主机出光孔基本沿着镜面方向安置,这样角度编码器引入的误差将会很小,检测精度将会显著提升。

3 大口径 SiC 离轴非球面反射镜快速磨削实例

本文以某离轴三反工程项目的第三反射镜为实例进行快速高效超声磨削。图 12 所示为该反射镜的外形尺寸,非球面为高次非球面,二次曲面常数 $K = -0.667$,高次项系数 $A_3 = -4.34 \times 10^{-21}$,离轴量 $H = 300\ \text{mm}$,顶点曲率半径 $R = 3\ 839.6\ \text{mm}$,它与球面偏离 $100\ \mu\text{m}$,反射镜最大回转直径为 800 mm。

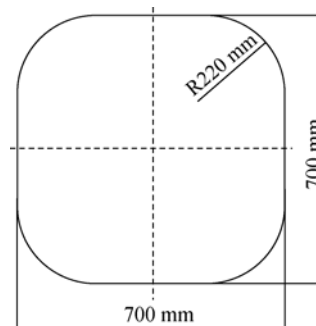
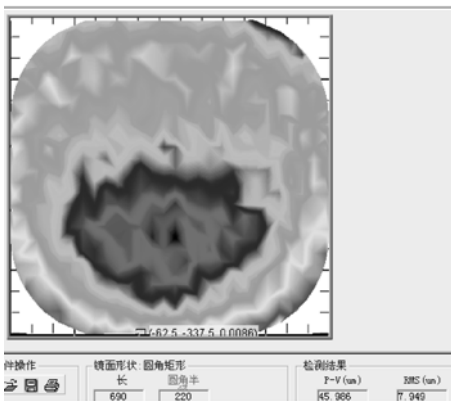


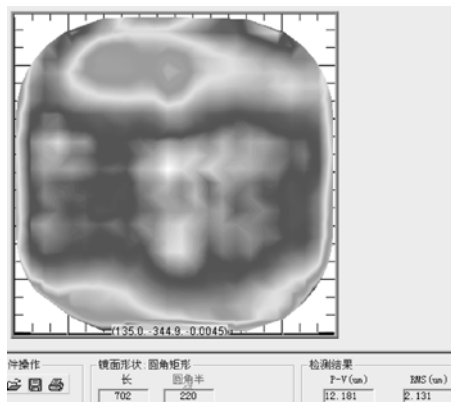
图 12 反射镜外形尺寸图

Fig. 12 Geometrical dimension of mirror



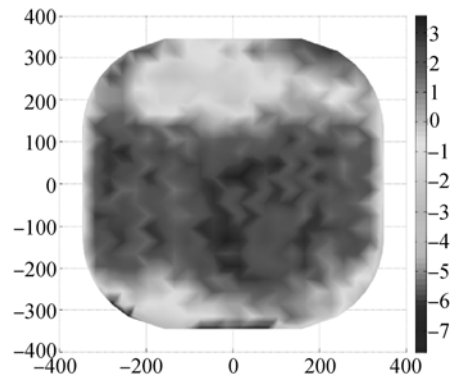
(a)第一周期磨削后面形图

(a)Surface error after first grinding



(b)磨削完成后面形图

(b)Surface error after last grinding



(c)磨削完成后三坐标测量面形图

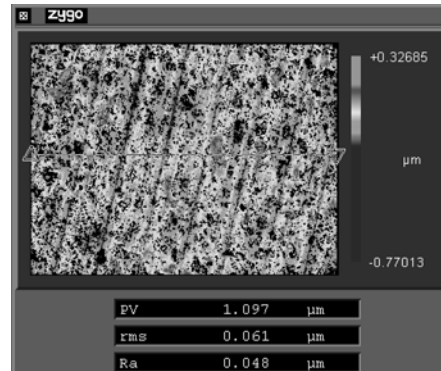
(c) Surface error after last grinding tested by ZEISS prism navigator

图 13 非球面反射镜的面形

Fig. 13 Surface figures of aspheric mirror

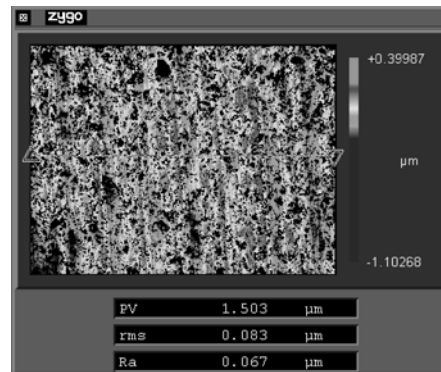
经过一个周期磨削后反射镜的面形精度如图 13(a)所示,波峰波谷值(PV)为 45.986 μm ,均方根值(RMS)为 7.949 μm 。PV 值接近 46 μm ,如果不继续进行超声磨削而直接研磨到 10 μm 左

右需要 50 h。因此利用 FARO 激光跟踪仪进行在线测量,并对该离轴非球面反射镜进行第二周期的超声磨削。图 13(b)所示为经过 3 个周期(每个周期为 4 h)超声磨削后的面形精度,PV 值达到 12.181 μm ,RMS 值为 2.131 μm 。



(a)超声磨削后表面粗糙度

(a)Surface roughness after ultrasonic grinding



(b)普通磨削后表面粗糙度

(b)Surface roughness after general grinding

图 14 非球面反射镜的表面粗糙度

Fig. 14 Roughnesses of aspheric mirror

为验证在线检测的精确性,磨削完成后利用 ZEISS 公司生产的三坐标测量机重新测量面形精度,测量结果如图 13(c)所示。三坐标测量机的 PV 值为 11.288 7 μm ,RMS 值为 1.818 2 μm ,误差分布和激光跟踪仪所测结果基本一致,其 PV 值与 RMS 值的偏差分别为 0.892 3 μm 和 0.312 8 μm 。超声磨削后镜面粗糙度的检测结果如图 14(a)所示,其 PV 值为 1.097 μm ,RMS 值为 0.061 μm ;不加超声磨削后粗糙度的检测结果如图 14(b)所示,其 PV 值为 1.503 μm ,RMS 值为 0.083 μm 。超声磨削后,其表面破坏层也有了明显改观,利用磁流变斑点抛光技术对超声磨削前后的光学表面进行了测试,其破坏层由

10 μm 降至到 5 μm 。实验结果显示,超声复合磨削不仅效率高,而且加工表面质量好,破坏层更小。此外,对砂轮磨损进行了测量和分析,如图 15 所示,对比分析可得:超声磨削后砂轮磨损率降低了一倍,其寿命得到了有效的提高。如果利用在线检测的方法对该反射镜继续进行超声磨削,PV 值可以收敛至 10 μm 以下,不过考虑到磨削下表面破坏层深度为 5 μm ,继续超声磨削已不具有工程意义。

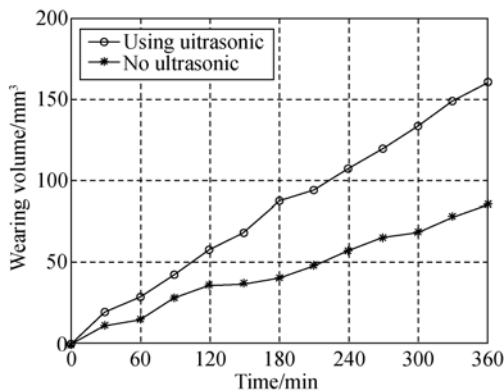


图 15 加超声前后砂轮磨损对比图

Fig. 15 Wear contrast before and after ultrasonic grindings

参考文献:

- [1] 陈伟,丁亚林,惠守文,等. 推扫式航空遥感器像面调焦机构设计[J]. 中国光学,2012,5(1):30-34.
CHEN W,DING Y L,HUI SH W, *et al.*. Design of image plane focusing structure for push-scan aerial remote sensing instrument [J]. *Chinese Optics*, 2012,5(1):30-34. (in Chinese)
- [2] 康健,宣斌,谢京江. 表面改性碳化硅基底反射镜加工技术现状[J]. 中国光学,2013,6(6):824-833.
KANG J,XUAN B,XIE J J. Manufacture technology status of surface modified silicon carbide mirrors [J]. *Chinese Optics*, 2013,6(6):824-833. (in Chinese)
- [3] 赵汝成,包建勋. 大口径轻质 SiC 反射镜的研究与应用[J]. 中国光学,2014,7(4):552-558.
ZHAO R CH,BAO J X. Investigation and application of large scale lightweight SiC mirror [J]. *Chinese Optics*, 2014,7(4):552-558. (in Chinese)
- [4] SHORE P,MORANTZ P,LUO X, *et al.*. Big optiX ultraprecision grinding/measuring system [J]. *SPIE*,2005,59650Q:1-8.

4 结 论

本文研究了大口径 SiC 离轴非球面反射镜的磨削加工效率和磨削精度。选用非专用光学铣磨设备,利用超声辅助,建立了大口径 SiC 离轴非球面反射镜磨削流程。借鉴逆向工程对离轴非球面进行建模,模型精度达到 0.1 μm 。根据非球面模型利用 DMG-ULTRASONIC100-5 加工中心超声辅助磨削 700 mm \times 700 mm 的 SiC 高次离轴非球面。采用 FARO 激光跟踪仪在 SiC 非球面反射镜的精磨阶段对离轴非球面进行在线测量,测量结果显示:修磨,磨削后 PV 值为 11.288 7 μm ,RMS 值为 1.818 2 μm 。基于逆向工程建立了非球面磨削模型,利用超声辅助磨削,有效地实现了大口径 SiC 离轴非球面的快速精确磨削,其加工精度、效率以及表面质量都有了很大的提高,为非球面后续的超精加工节省了大量的时间,且利用 FARO 激光跟踪仪进行在线测量节省了工期、降低了成本。

- [5] PEI Z J, FERREIRA P M, KAPOOR S G, *et al.*. Rotary ultrasonic machining for face milling of ceramics [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*,1995,35(7):1033-1046.
- [6] PEI Z J, FERREIRA P M. Modeling of ductile-mode material removal in rotary ultrasonic machining [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*,1998,38(10-11):1399-1418.
- [7] ZHOU M, WANG X J, NGOI B K A, *et al.*. Brittle-ductile transition in the diamond cutting of glasses with the aid of ultrasonic vibration [J]. *Journal of Materials Processing Technology*,2002, 121(2-3):243-251.
- [8] GAN J, WANG X, ZHOU M, *et al.*. Ultraprecision diamond turning of glass with ultrasonic vibration [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2003, 21 (12): 952-955.
- [9] LIU K, LI X P, RAHMAN M, *et al.*. Study of ductile mode cutting in grooving of tungsten carbide with and without ultrasonic vibration assistance [J]. *The International Journal of Advanced Man-*

ufacturing Technology, 2004,24(5-6):389-394.

- [10] 郑立功. 离轴非球面 CCOS 加工过程关键技术的研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2003.

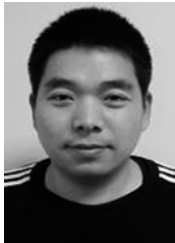
ZHENG L G. *Study on the Key Technique of CCOS Fabricating for Off-axis Aspheric Mirrors* [D]. Beijing: Graduate School of the Chinese

Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)

- [11] 王孝坤. 激光跟踪仪检验非球面面形的方法[J]. 光子学报,2012,41(4):379-383.

WANG X K. Measurement of aspherical surfaces by laser tracker [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(4):379-383. (in Chinese)

作者简介:



殷龙海(1976—),男,山东金乡人,博士研究生,主要从事光学加工和检测的研究。E-mail:ylh761208@163.com

导师简介:



张学军(1968—),男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,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

(版权所有 未经许可 不得转载)