

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0053-05

离轴抛物面镜加工技术

王 健^{1,2} 郭隐彪¹ 雷向阳² 许 乔² 陈贤华² 王 哲¹ 侯 晶²

(¹ 厦门大学机电工程系, 福建 厦门 361005; ² 成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041)

摘要 介绍离轴抛物面镜通常的几种加工流程和适用范围。详细介绍了基于超精密磨削技术和小工具数控抛光技术加工离轴抛物面镜的加工过程。着重介绍超精密磨削加工离轴抛物面镜的设备、加工原理,分析了其中误差的产生来源和工艺参数的选择。简要介绍了小工具数控抛光(CCOS)加工离轴抛物面镜和离轴抛物面镜的干涉检测。通过分析一块 $\phi 160$ mm的离轴抛物面镜的参数和加工量确定了使用该加工过程。介绍了加工使用的主要参数;通过加工达到面形精度 PV 值 $0.2 \mu\text{m}$ 。实验结果表明,采用超精密磨削技术和小工具数控抛光技术加工离轴抛物面镜是一种行之有效的加工方法。

关键词 光学制造;抛物面镜;超精密磨削;离轴;数控抛光

中图分类号 TN205 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0053

Machining of Off-Axis Parabolic Mirror

Wang Jian^{1,2} Guo Yinbiao¹ Lei Xiangyang² Xu Qiao²

Chen Xianhua² Wang Zhe¹ Hou Jing²

(¹ Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

² Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu, Sichuan 610041, China

Abstract There are several methods for machining different kinds of off-axis parabolic mirrors. A progress based on fine grinding and computer controlled optical surfacing (CCOS) are presented in this article. Machine and grinding principle of fine grinding are introduced, also the error source and choosing the parameters for grinding are analyzed. CCOS for polishing off-axis parabolic mirror and optical testing it with interferometer are briefly introduced. An experiment on a parabolic mirror of 160 mm diameter is carried out and the obtained surface contour is $0.2 \mu\text{m}$ (perk-to-valley). The results of experiment show that fine grinding combined with CCOS is an effective machining method for off-axis parabolic mirror.

Key words optical fabrication; parabolic mirror; fine grinding; off-axis; computer controlled optical surfacing

1 引 言

抛物面镜可将平面波前无像差地转换为球面波前,或反过来将球面波前变为平面波前,在光学系统中有着广泛的用途。轴对称的抛物面镜在设计上中心必然存在挡光区域,因此离轴的抛物面镜更加受到使用者的青睐。但离轴抛物面镜的加工困难一直是阻碍其广泛应用的原因。

对于延性材料的离轴抛物面镜,比如铜,其加工是用金刚石车床直接车削加工出所需表面。加工方法是元件离轴安装在旋转主轴上,抛物面的对称轴仍然是元件加工时的旋转轴,金刚石刀具差补运动

走出抛物面的母线轨迹,完成元件的车削加工。所加工元件的大小受制于金刚石车床的大小、元件的大小和元件的离轴量。

对于脆性材料的离轴抛物面镜,如光学玻璃,现有的加工途径主要有两种:一种是首先加工一个大的轴对称抛物面镜,然后将所需的镜面作为离轴抛物面镜从大口径轴对称抛物面镜上截取下来。这样可以一次加工多个相同的离轴抛物面镜。但这种做法只适合加工较小口径的离轴抛物面镜。另一种加工方法是直接研磨抛光离轴抛物面镜,这有利于加工更大口径和离轴量的元件,主要的困难来源于研

磨和抛光非轴对称表面的加工过程。

对于非球面度小的元件,通常首先抛光加工成最接近球面,此时再加工到非球面的加工量还有数微米。剩下的工作可以一边干涉检测或刀口检测,一边直接用修正抛光完成。这种元件的加工难度较小。

对于非球面度大的元件,即使加工为最接近球面,也还有数十微米甚至数百微米的偏差,这样的元件,用抛光修正的方法,加工量太大,修正速度慢。用局部研磨修正的办法去除速度会加快,但检测存在一定困难。

针对大非球面度的离轴抛物面镜的加工情况,本文选择使用超精密磨削的方法,直接将离轴抛物面镜磨削到面形精度微米量级,然后使用小工具数

控抛亮全面,最后在干涉检测的指导下进行修抛到最终精度。该方法最关键要解决的是离轴抛物面磨削加工到微米量级的面形精度。

2 超精密磨削加工离轴抛物面

2.1 磨削加工设备和加工原理

磨削加工采用的超精密磨削机床为MAGERLE公司的MFP-125.65.65型磨床,如图1所示。机床采用XYZ三个直线坐标轴实现运动,另有一个砂轮主轴。X和Y轴为全封闭的液体静压导轨,Z轴为预加压的单列滚柱导轨,砂轮轴采用高负载超精密轴承。

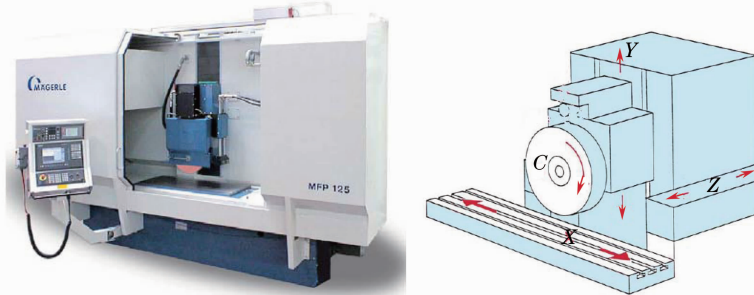


图1 超精密磨削机床“MFP-125.65.65”及运动结构

Fig.1 Appearance and structure of high precision aspheric grinder “MFP-125.65.65”

机床各坐标轴的分辨率达到 $0.1\ \mu\text{m}$,砂轮主轴具有高刚度和低振动,使用 $\phi 400\ \text{mm}$ 的砂轮,砂轮线速度可以达到 $50\ \text{m/s}$ 。

磨削过程中,砂轮按光栅扫描的方式加工全面,

每到达一个X和Z坐标确定的固定位置都相应有Y轴的高度,整个行走路径的圆弧包络产生所需的离轴抛物面表面^[1],加工原理如图2所示。

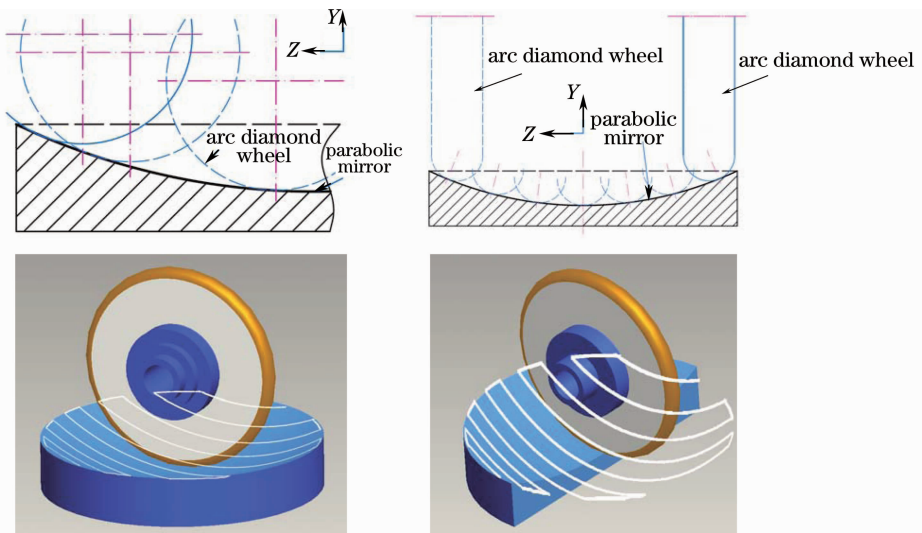


图2 圆弧砂轮磨削加工离轴非球面原理

Fig.2 Principles of grinding off-axis parabolic mirror with arc diamond wheel

2.2 砂轮修整

为了保证磨削加工精度及加工效率,必须保证

金刚石砂轮在加工中处于良好的加工状态。因此砂轮表面的修整及检测方法是影响砂轮磨削性能的重

要因素。

使用圆弧金刚石砂轮磨削离轴抛物面。在磨削前,对于具有高精度要求的圆弧金刚石砂轮,采用GC杯状砂轮修整器进行修整。这样能较好地保证砂轮的磨粒状态,易于得到较高的砂轮圆弧形状精

度,有较好的修形、修锐效果^[2,3]。修整装置和修形原理如图3所示。修整过程中,GC砂轮提供往复纵向送进运动、摆动及自身的旋转运动,金刚石圆弧砂轮进行旋转运动和进给运动。

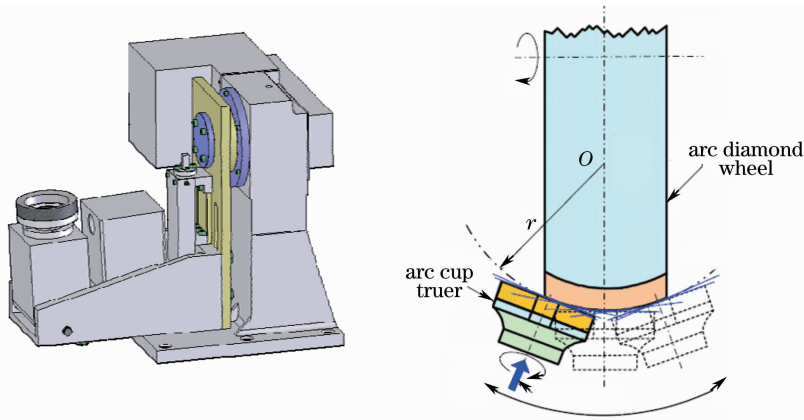


图3 砂轮修整器及其运动

Fig. 3 Truer appearance and truing movement

2.3 磨削在位测量

磨削后的表面形状精度无法用干涉仪等光学方法检测,如果抛光后再做干涉测量则难以分离抛光过程对形状精度的影响。直接测量磨削表面需要使用高精度三坐标测量机或类似 Taylor Hobson 的轮廓仪产品,才能达到微米量级的轮廓测量精度。

本文直接利用超精密磨削机床的高精度运动,采用电感测微仪和 DGC-8ZG/A 接触式测头(标称精度 $0.12 \mu\text{m}$)在机床上在位测量磨削表面,测量用传感器如图4所示。

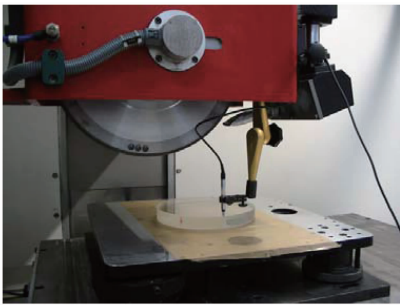


图4 磨削机床在位测量

Fig. 4 Measurement on precision aspheric grinder

接触式在位测量除了依靠机床的运动精度外,关键要做好测量轨迹的规划、测量结果的拟合和测头误差的补偿。综合上述因素,经实验标定,在位测量精度达到 $2 \mu\text{m}$ 。

2.4 磨削加工误差分析

磨削加工的误差根据误差的来源可以区分为3大类^[4]。低频误差在全面上出现一两次,中频误差

的尺度大约在 $0.1 \sim 10 \text{ mm}$,在元件上会反复出现多次。高频误差的空间尺度更小,频率更高。磨削加工的误差来源主要是下面的几个方面。

温度稳定性误差是低频误差的重要来源,室温 1°C 的变化会导致砂轮和工件间的相对位置变化 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 。为了减少温度的影响必须首先要精密控制房间温度,其次要在磨削加工前对机床进行必要的预热,并且要减少磨削加工过程的时间周期。

机床导轨的运动直线度误差也会带来元件加工的低频误差。

机床刚度的影响最为复杂,它将同时影响3个频段的误差。对于一定的机床,减少刚度对加工过程的影响,可以通过选择合适的加工参数来实现。最常改变的加工参数是磨削的深度和砂轮移动的速度,当磨削深度大、砂轮移动速度快时,有利于提高加工效率,缩短加工周期,但这也导致磨削过程机床的受力增大。使用不同粒度的砂轮同样存在这种现象,粒度小的砂轮,材料去除能力低,在使用同样加工参数的情况下,相比大粒度的砂轮的受力更大,但表面质量更好。因此粗粒度砂轮容易得到更好的表面形状精度。这些细微的受力情况差别对于微米量级的面形精度来说,其影响都是不可忽视的,这是刚度对低频误差的影响。而机床由于受力和刚度,在不同加工条件下产生共振和振动则影响元件的中高频误差。圆弧金刚石砂轮本身的轮廓度误差在经过修整器修整后仍然有 $1 \sim 3 \mu\text{m}$ 。当这个误差是沿砂

轮宽度方向分布时,由于加工离轴抛物面的不同部分是使用砂轮宽度方向上的不同位置,该误差将导致元件的低频误差。而当这个误差是沿砂轮圆周方向分布时,在使用砂轮转速 2500 r/min,砂轮移动速度 100 mm/min 的情况下,圆弧砂轮的轮廓度误差将导致元件上产生高频误差。尺度沿着砂轮行走方向周期为 0.04 mm。而如果砂轮转速 1200 r/min,砂轮移动速度为 4000 mm/min,元件上误差尺度沿着砂轮行走方向周期为 3.3 mm,就是中频误差。

由于整个离轴抛物面元件是通过砂轮运动位置的包络来形成的,那么砂轮包络运动的划分和控制精度就影响着包络运动的精度。这称为程序差补误差,主要涉及到两个参数:一个是光栅包络运动中每两条光栅间的距离,此参数一般设置为 1 mm,其导致的中频误差的周期即为 1 mm,高度与所使用球面砂轮的圆弧半径有关,按圆弧半径 90 mm 计算,误差的高度为 $1.4 \mu\text{m}$ 。如果使用圆弧半径 50 mm 的砂轮,误差的高度为 $2.5 \mu\text{m}$ 。另一个是砂轮在沿一条光栅路径运动时,是以直线差补的形式来形成曲线的,那么差补线段的划分精度同样影响到加工精度。如果所加工元件的曲率半径为 1000 mm,差补线段长度为 1 mm 时,所产生的误差高度为 $0.1 \mu\text{m}$,显然此误差可以忽略,因为它会被研磨在砂轮圆度误差导致的磨削周期性误差中。

同时,砂轮主轴的轴向、径向、同步和非同步运动误差亦是高频误差产生的主要原因。

从上面的误差分析可以得到以下结论:

砂轮粒度的选择将会影响到加工表面的质量和面形精度。选择粗粒度砂轮有利于减小机床受力情况,减小机床刚度对元件面形精度的影响,得到更好的面形加工结果,但表面质量会下降。选择细粒度砂轮则刚好有相反的效果。因此最后一道加工的砂轮粒度的选择并没有一个普遍适用的型号,而是要根据所使用机床的实际情况,结合后续抛光对面形误差和表面质量的不同修正能力,来确定所使用砂轮的粒度。现在所确定砂轮的金刚砂粒度为直径 $15 \mu\text{m}$,所造成的表面破坏深度为 $10 \mu\text{m}$ 左右。

在加工程序的设计上,从温度稳定对机床变形的影响方面考虑要缩短整个加工过程的时间周期,加快磨削加工进给的速度,而从加工速度对刚度的影响看则应降低加工进给的速度。在光栅路径的密度选择上也同样涉及到平衡加工时间长度和产生残留包络误差大小的问题。

3 离轴抛物面的小工具数控抛光加工和干涉检测

磨削之后,元件具有了一定的离轴抛物面形状精度,但表面仍然非光学表面,无法使用干涉仪进行光学检测,由于形状上已经是非球面,也不适合使用大口径沥青盘进行抛光,因为大口径沥青盘容易使元件形状向球面趋势发展。因此使用 $\phi 35 \text{ mm}$ 的沥青盘,通过 CCOS 的驻留时间控制,实现对整个表面全面均匀去除。这样在基本保证形状精度不改变的前提下,去除磨削产生的表面和亚表面缺陷,得到可进行光学干涉测量的表面。

离轴抛物面的光学干涉测量原理光路图和实际测量光路见图 5。

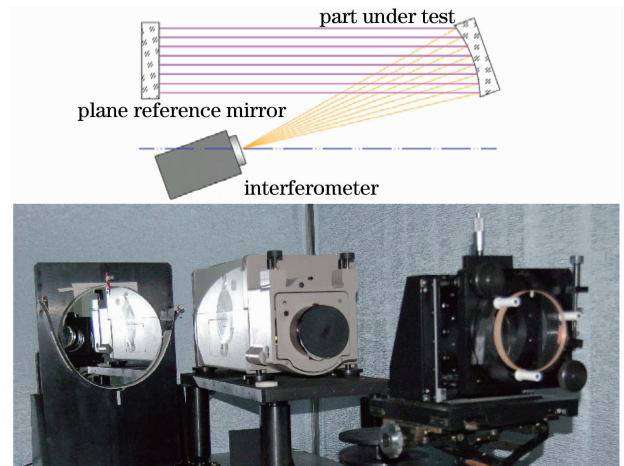


图 5 典型的离轴抛物面镜干涉测量布局
Fig. 5 Classic layout of interferometric measurement of an off-axis parabolic mirror

加工的最后阶段是根据干涉检测的结果,使用小工具数控抛光修抛离轴抛物面镜面形,达到最终元件的面形精度要求。

4 实 验

实验加工一块石英材料的离轴抛物面,离轴量为 150 mm,镜面直径 160 mm。非球面方程为

$$y^2 = 1500x. \quad (1)$$

如果采用加工大口径轴对称抛物面镜后截取部分作为元件的加工方法,那么轴对称抛物面镜的直径至少为 460 mm。这将极大地增加加工周期和成本,显然是行不通的。因此采用直接加工离轴抛物面镜的加工路线。

分析其最接近球面到离轴抛物面的加工量可

知,其最接近球面半径为 797.455 mm。加工为球面后,再加工为非球面的去除量分布如图 6 所示。

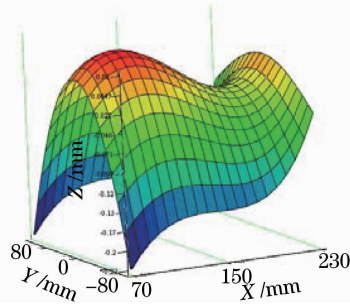


图 6 由球面加工到离轴抛物面的去除余量分布

Fig. 6 Material removal map

图中 X 轴和 Y 轴表示元件上的不同位置,Z 轴表示对应位置上球面加工到非球面的去除量。从图 6 可知若为边长 160 mm 的方形口径,最大加工量 0.25 mm。如取圆形口径,最大加工量约为 0.2 mm。

鉴于上面对加工量的分析,采用超精密磨削机床,直接磨削加工离轴抛物面形状,使磨削形状的精度控制在微米量级,随后用小工具数控抛光的方式去除磨削表面残留的表面和亚表面破坏层,最后修整面形,达到元件的最终要求。

磨削加工中,最后一道磨削所采用的是粒度 15 μm 金刚石微粒的圆弧金刚石砂轮,磨削深度 5 μm ,砂轮的转速为 2000 r/min,砂轮的运动速度为 100 mm/min,磨削路径的间隔为 0.5 mm,磨削的步长为 1 mm。磨削后采用在位测量方式的测量结果为面形精度 PV 值 5 μm 。结果如图 7 所示。

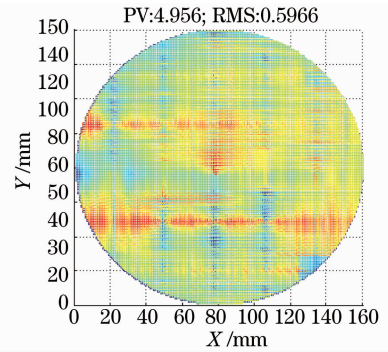


图 7 磨削加工后测量结果

Fig. 7 Measure result of surface shape after grinding

磨削加工后,采用 5 轴小工具数控抛光机床首先抛亮全面,随后边做干涉检测边修抛,抛光结果如图 8 所示。最终面形精度达到 PV 值 0.2 μm 。整个加工过程历时 1 个月。

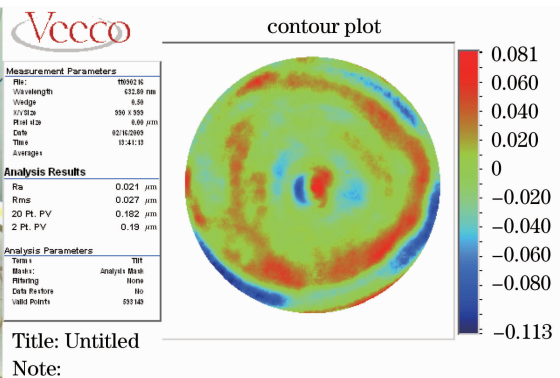
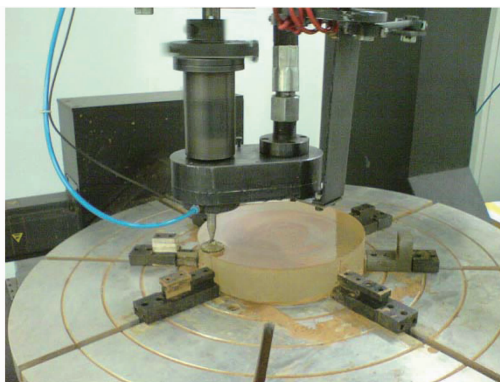


图 8 小工具数控加工和干涉测量结果

Fig. 8 CCOS polishing and final measure result

5 结 论

超精密磨削技术借助高机械运动精度和高控制精度,可以达到微米量级的任意面形磨削加工轮廓精度。采用超精密磨削技术结合小工具数控抛光的方法,可以有效加工大非球面度离轴抛物面镜。除离轴非球面外,此加工流程也适用于其他大非球面度的非球面元件。

参 考 文 献

1 Huang Hao. Research on High Precision Machining and

Measuring Technology of Wedge Aspheric Surface[D]. Xiamen: Xiamen University, 2008, 20~26
 黄 浩. 高精度楔形非球面制造及测量技术研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2008, 20~26
 2 Jiawang Yan, Katsuo Syoji, Tsunemoto Kuriyagawa. A new diamond turning method for fabrication of convex aspheric surface on hard brittle material[C]. *The 10th International Conference on Precision Engineering, Yokohama Japan*, 2001; 254~258
 3 J. Slavicek, J. G. Bdlinger. Design and application of self optimizing damper for increasing machine tool performance[C]. *Proc. 9th MTDR*, 1969; 71~80
 4 J. Ruckman, E. Fess, C. Pollicove. Computer simulation and experimental validation of errors on contour ground surfaces[J]. *Optical Fabrication and Testing (OFT)*, 2000, OMA; 8~10