

# 光学非球面的超精密加工技术及非接触检测

谢 晋

(华南理工大学 机械工程学院, 广东 广州 510640)

**摘 要:** 针对亚微米级及亚微米级以下的光学硬脆性非球面器件难加工问题, 分析了光学非球面的形状精度和应用, 讨论了其超精密加工原理和方法及非接触检测手段. 结果表明, 精密数控机床、硬脆性材料延性域加工原理和超精密检测是光学非球面超精密加工的技术保证.

**关键词:** 非球面; 超精密加工; 光学器件; 非接触检测; 单点金刚石切削; 弧形金刚石砂轮  
**中图分类号:** TG 58      **文献标识码:** A

长期以来, 光学球面镜头存在色像差的问题, 如图 1(a) 所示. 要构成高性能的光学系统, 往往采用多枚镜头. 20 世纪 30 年代, 为了消除这种色像差, 研究人员提出并发明了非球面镜头, 如图 1(b) 所示. 但是, 几个世纪以来的传统切削、磨削和抛光方法无法加工非球面产品, 而只有利用数控机床才能有效地实现非球面的加工. 19 世纪 70 年代至 80 年代, 应用于投影仪、显微镜、照相机、CD 读写装置和激光加工机等领域的民用光学产品开始朝着高性能、大口径化和小型化等方向快速发展, 工业上开始生产非球面光学部件. 目前, 一些主要的非球面光学器件及其应用领域如表 1 所示, 从该表中可以看出, 大部分光学非球面器件材料为难加工的硬脆性材料.

在光学系统的应用中, 光的反射和折射要求非球面的形状精度达到光波长的  $1/10$  左右<sup>[1]</sup>, 特别是, 应用于航空和军事领域中的光学系统要求非球面具有较高的形状精度. 因此, 光学非球面超精密加工及超精度测试已经受到许多研究者的关注. 例如, OPTICAM 中心已经将 CNC 技术应用到精密光学器件的生产中, 自动进行有选择性的非球面粗加工、精细加工和最终抛光加工, 从而大幅度地降低了生产成本.

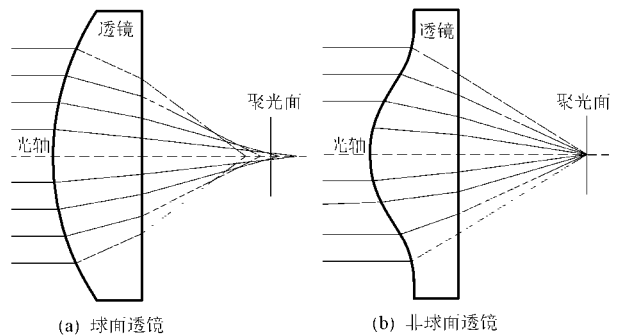


图 1 球面和非球面透镜的光学性能

Fig. 1 Optical performance of spheric and aspheric lens

表 1 光学非球面器件的材料及应用

Table 1 Optic aspheric materials and its application

非球面类型	材料	应用领域
普通镜头	光学玻璃	显微镜、CD/DVD、投影仪
红外线镜头	单晶硅、单晶硅	夜视镜、医用内视镜、激光加工
普通反射镜	铝合金、铜、磷青铜	激光加工机、大型显示器
注射模具	陶瓷、镍合金	激光打印机
椭圆柱体反射镜	石英玻璃、碳化硅	X 射线系统

国内也已经开始引进超精密加工机床来加工国防、航空等高科技领域所急需的高精度非球面零件. 由于超精密磨削涉及的技术比较复杂, 国内花巨资购买的砂轮系统还没有得到有效的使用<sup>[2]</sup>. 虽然中国航空精密机械研究所成功地研制了 Nanosys-300 球面曲面超精密复合加工系统<sup>[2]</sup>, 但是, 加工精度、砂轮精密修整、非球面成形机理以及非球面的超精密检测等诸多关键技术的研究都没有详细的报道.

收稿日期: 2003-10-22

作者简介: 谢晋(1963-), 男, 博士, 副教授, 主要从事磨削及精密加工的研究. E-mail: jinxie@scut.edu.cn

实际上,目前我国光学非球面的加工技术和质量检测仍处在初级阶段.本文中主要介绍和分析最新研究和开发的非球面的超精密加工机理、方法和测试技术及其特点.

## 1 光学非球面部件的制作工艺

光学非球面的成型加工大体可分为模具成形法和切除加工法两种.模具成形法是在非球面模具上用可塑化材料注射或模压,形成有非球面的光学部件;而切除加工是利用切削、磨削和抛光将工件直接切除成非球面.模具成形法适应大批量生产,但很难保证非球面形状的高精度.注射和模压成形用的镀膜模具通常采用单点金刚石切削,但对于陶瓷等超硬模具,切削就变得非常困难.因此,采用磨削加工法,可大大缩短加工工期.

非球面光学镜头按制作工艺可分为玻璃镜头、塑化镜头、微型镜头和复合镜头<sup>[3]</sup>.其中,玻璃镜头主要在耐热非球面模具中将玻璃材料加温到软化温度 400~700 再模压成形.塑化镜头是利用镀膜硬质钢模具将非球面注射成形.微型非球面镜头是在超精密机床上将树脂材料直接加工成形后再抛光,或者在球面模具中注射树脂再加热硬化.复合非球面镜头是在非球面模具与球面镜头之间注入紫外线树脂,然后用紫外线照射使其硬化成形.

## 2 非球面的切除加工方法及特点

无论是注射成形/模压成形所需的模具还是高精度光学非球面部件,都必须采用切削、磨削和抛光直接进行切除加工.切削加工主要采用单晶金刚石刀具,磨削加工主要采用金刚石砂轮,而抛光主要采用游离磨料.每一种方法都是在工件表面沿着非球面的三维坐标轨迹对工件逐渐进行切除加工.一般是先在数控机床上将非球面形状加工成型,然后在保持形状精度不变的情况下将其抛光,减小其表面粗糙度<sup>[4]</sup>.但是,这种游离磨料抛光方式会消耗大量的加工时间,无法进行规模生产.美国 Precitech Inc. 公司生产的超精密多轴自由曲面加工机床不需抛光就可以使光学非轴对称非球面零件的加工精度达到亚微米级乃至纳米级的范围<sup>[5]</sup>.近来,全部省去游离磨料抛光方式进行直接切削或磨削来达到最终的形状精度和表面粗糙度,即利用延性域加工原理进行镜面切削和镜面磨削的研究已经取得了许多新的进展.

### 2.1 非球面超精密加工机床的构造

最新的研究结果表明,为了实现硬脆性材料的精密切除加工就要求材料的切除深度始终保持在临界延性域(ductile-mode)切深以下的范围,一般要求亚微米级以及亚微米级以下.这也就是要求加工机床能够控制工件进给量在微米级甚至亚微米级以下.

采用空气静压和油静压轴承配制高精度(直线度,表面粗糙度)摩擦系数小的 V-V 滚动滑道和高精度(圆柱度,圆心度)传动杆可以使导向机构到达 10~20 nm 以内的波动<sup>[3]</sup>.图 2 中所示的为空气差压圆柱立轴的工作结构图.空气静压轴承可以使低速运动时无震动.利用  $d_1, d_2, p$  能够进行克单位的力调节,可以达到与水平结构一样的纳米级的微小波动.工件回转轴最合适采用空气静压形式,安装内置电机可以消除传递转动带的振动,可以达到轴方向和径向方向小至 10 nm 的偏心振幅.

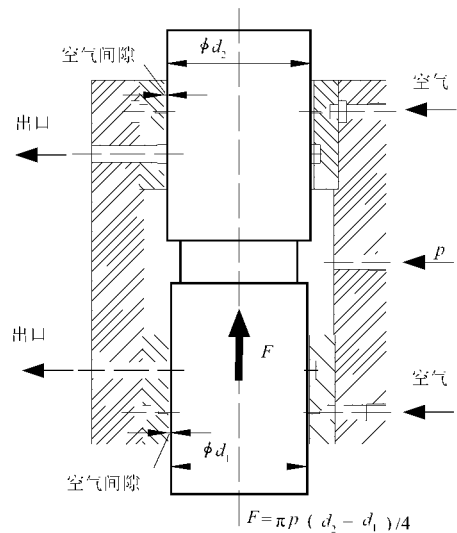


图 2 空气静压轴的工作原理

Fig. 2 Working principle of air-pressure axis

### 2.2 单点金刚石切削

单点金刚石切削是在精密数控机床上同时控制  $x$  和  $y$  两轴的运动,将旋转工件切除成非球面体,如图 3(a) 所示.通常应用于加工激光反射的非球面铜镜面和塑化玻璃非球面金属模具.

最近的研究表明,弧形单晶金刚石刀具的圆弧包络线切削法可以应用到硬脆性材料的非球面超精密切削中<sup>[6]</sup>,但是,必须要求金刚石刀具进给量非常小(小于  $1 \sim 2 \mu\text{m}/r$ ),这就会花费非常长的切削时间,导致单晶金刚石刀具的急剧磨损.然而,平面形单晶金刚石刀具的直线包络线切削法在加工非球面

单晶硅镜头时可以较大幅度地加大金刚石刀具进给量(20 $\mu\text{m}/\text{r}$ ),提高加工效率,其非球面的表面粗造度达到16nm,形状精度(PV值)可达到1.36 $\mu\text{m}$ <sup>[7]</sup>.

### 2.3 弧形金刚石砂轮磨削加工

在磨削加工方面,无论对于硬脆性材料还是金属材料,采用弧形金刚石砂轮在一定的行走轨迹和修整条件下都可以在数控机床上实现非球面的成形加工.最新研发的几种弧形金刚石砂轮成型磨削方法可以大致分为交叉磨削法、平行磨削法、倾斜磨削法、球面砂轮磨削法和斜轴圆柱砂轮磨削法<sup>[8~10]</sup>,分别如图3(b),(c),(d),(e)和(f)所示.

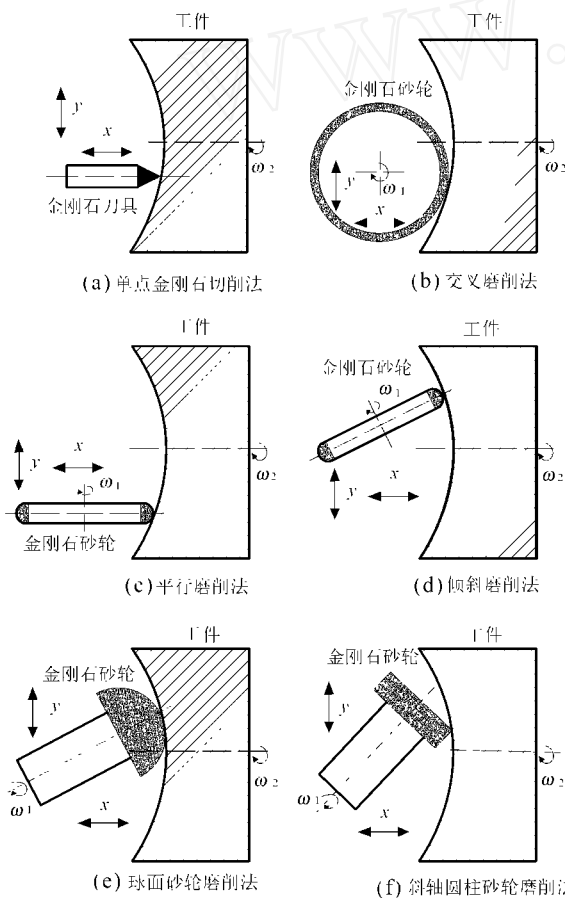


图3 光学非球面成形加工方法

Fig.3 Form machining methods of optical aspheric surface

交叉磨削法的加工表面粗造度较差,为此,将砂轮轴旋转90 $^\circ$ 使砂轮周速与工件速度方向平行进行磨削,即采用平行磨削法.实验结果表明,平行磨削法比交叉磨削法能获得更好的表面加工质量<sup>[9]</sup>.倾斜磨削法是将砂轮轴倾斜一定角度适用于加工更深的凹形非球面.球面砂轮磨削法是利用砂轮球面按照非球面的运动轨迹与工件点接触进行磨削加工,它能使球面的砂轮均衡磨损,形状精度可达到

0.089 $\mu\text{m}$ <sup>[10]</sup>,但球面砂轮成形修整比较困难.斜轴圆柱砂轮磨削法<sup>[9]</sup>是采用小直径砂轮加工很深的凹面,主要用于光通讯,医疗器件等3mm以下的小口径非球面的加工.

### 3 光学非球面的形状精度

光学非球面器件的形状精度要求在几到几十厘米的范围内达到1 $\mu\text{m}$ 以下<sup>[11]</sup>.图4表示了一些应用于不同领域的非球面光学器件的尺寸大小及其必要的加工精度.可以看到非球面光学部件正在向小型高精度化和大型高精度化方面发展.但是,现有的加工工具,加工工艺及加工设备常常无法保证更小或更大尺寸的产品达到高精度.这主要是因为以下原因造成了设计形状与加工形状的差异.

- (1) 机床的运动误差和切削刀具/金刚石砂轮的磨损;
- (2) 非球面中心和外围的不同加工条件;
- (3) 切削刀具/磨削砂轮的形状测试误差;
- (4) 加工形状的检测误差;
- (5) 三维坐标系与加工点的漂移;
- (6) 加工力引起的变形和加工热产生的热变形.

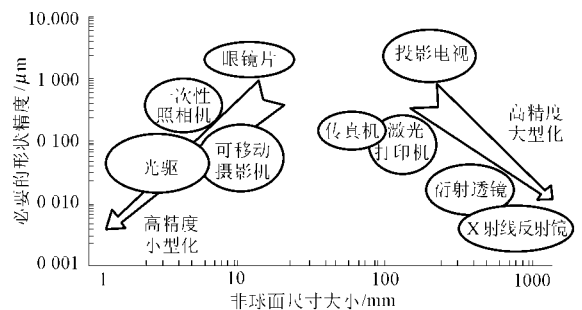


图4 光学非球面的尺寸与形状精度

Fig.4 Optic aspheric size and its form accuracy

为消除这些因素的影响,使其与设计值的形状误差缩小到1 $\mu\text{m}$ 以下,往往利用被加工的非球面形状的检测信息进行多次的误差修正.非球面加工中可能需要几十次的测试和修正才能达到目标精度,也就是说,没有高精度的测试手段也就无法加工出高精度的光学非球面器件.但是,传统的三维测试仪的测试精度只能达到5 $\mu\text{m}$ ,而且大多只能检测球面和平面<sup>[13]</sup>.因此,最近非接触三维形状测试手段已经可以在行走精度为0.1 $\mu\text{m}$ 的水平面上检测垂直方向精度为0.05 $\mu\text{m}$ 以下的非球面的形状精度<sup>[11,12]</sup>.

## 4 非球面的非接触测试仪

通常,非球面的加工形状测试主要采用接触式测定方式.它的动态测试范围较大,但容易损伤工件表面,特别不易检测断口,且超硬材料易损伤探头.因此,非接触三维形状测试的研究开始得到了广泛的重视.但是,非接触测试无法检测到陡峭的斜面,且非球面材料的颜色和反射率也会产生散乱导致数据误差.针对这些问题,最近研制的光干涉形状测试仪,激光形状测试仪和原子力探针测试仪能够在纳米级范围内检测非球面的三维形状.

### 4.1 非接触光干涉三维形状测试仪

非接触光干涉三维形状测试构造如图 5(a) 所

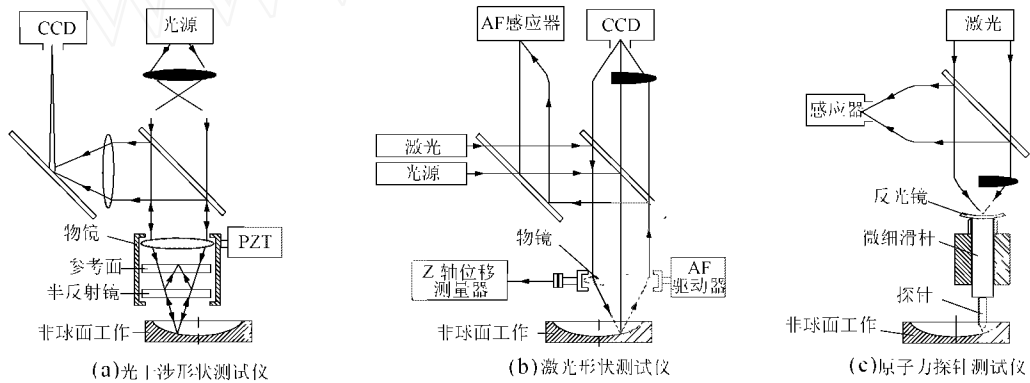


图 5 非球面的非接触检测方法

Fig. 5 Non-contact measurement method of aspheric surface

### 4.2 非接触激光三维形状测试仪

非接触激光测试构造如图 5(b) 所示.激光通过显微镜镜筒,从物镜的一端开始向光轴中心聚焦,再由工件反射后经物镜返回,在聚焦 AF 感应器聚焦成像.然后,通过移动物镜使激光点最小且达到光轴心确定垂直方向的位置.此时,将聚焦点的  $xyz$  坐标以线性形式输入到计算机,获取非球面表面的三维形状数据.测试精度直接取决于工作台面向工件聚焦的移动精度.

此外,在非接触激光显微镜上安装微分干涉光学系统,利用可视光能够检测出数纳米级的凸凹程度,并且可以在  $1\text{ nm}$  的范围内定量地评价表面粗糙度.非接触激光三维形状测试仪 NH-3SP 的水平面的测试精度为  $1 + 5L/120\mu\text{m}$  ( $L$  为测量长度);垂直方向的测量精度在  $10\text{ mm}$  以内为  $1\mu\text{m}^{[13]}$ .

### 4.3 原子力探针测试仪

原子力探针测试构造图如图 5(c) 所示.这种方法是根据原子间排斥力通常保持一致的原理,利用

示.其原理是采用白色光源在半反射镜上分叉到测试表面和参照镜,再反射回来结合于半反射镜,当光路差相等时发生干涉<sup>[12]</sup>.白色光的干涉性较小,能够在很小的范围内产生干涉条纹,因此,通过采集的光的干涉强度驱动干涉计的垂直光轴方向,使之能够调节到干涉条纹的零位置.利用这种原理,垂直移动参照镜观察测试面上的 CCD 各点的干涉条纹,确定其等光路位置,然后在水平方向的测试面上进行一定速度的扫描,最终检测出非球面的高度数据.

若在白色干涉计中处理干涉强度并进行频域解析,不仅能够检测粗糙面及断口面,而且还能够检测超精密加工的工件表面.白色干涉计测试仪的横向行走精度一般为  $0.6\mu\text{m}$ ,垂直移动精度可达  $10\text{ nm}$ .

探针与物体的原子间排斥力的作用接近测试表面,从而确定非球面表面的三维形状<sup>[11]</sup>.在测试装置上,将重  $0.2\text{ mg}$  的微型空气滑道用弹簧悬挂,用安置的反射镜对具有波长稳定性的激光进行聚光,采集反射光的聚焦误差信号,驱动垂直方向的步进空气滑道,使误差信号接近于零,最终确定垂直方向的坐标.因为原子力探针测试的原子间排斥力仅有  $30\text{ mg}$ ,所以对测试面几乎没有损伤,近似于非接触检测.最大的特点是测试精度不受材质、反射率和表面粗糙程度的影响.但是,测量精度与测量范围和测量面角度有关<sup>[11]</sup>.例如,水平测量范围的精度,  $100\text{ mm}$  以下为  $0.05\mu\text{m}$ ,  $100 \sim 200\text{ mm}$  之间为  $0.1\mu\text{m}$ ,  $200 \sim 400\text{ mm}$  之间为  $0.3\mu\text{m}$ ;测量面倾斜角度的精度,  $30^\circ$  以下为  $0.01 \sim 0.05\mu\text{m}$ ,  $30^\circ \sim 45^\circ$  之间大于等于  $0.1\mu\text{m}$ ,  $45^\circ \sim 60^\circ$  之间大于等于  $0.3\mu\text{m}$ .

## 5 结束语

光学非球面加工正朝着高精度大型化和高精度小型化方向发展.精密数控机床、硬脆性材料延性域

加工原理和非接触精度检测是光学非球面加工形状精度达到亚微米级及亚微米级以下的技术保证。此外,超精密加工和高精度检测在开拓高增值的复杂光学自由曲面以及特殊形状液晶光导板的模具加工方面将会发挥先导作用。

#### 参考文献:

- [1] Tanaka K. Recent trend of aspheric processing technology [J]. *Science of Machine*, 2002, 54(3): 11 - 20.
- [2] 罗松保, 张建明. 非球面的超精密加工与测量技术的研究 [J]. *制造技术与机床*, 2003, 494(9): 58 - 61.
- [3] Toyama T. Development of ultra-precision grinder for machining aspheric surface [J]. *Toyota Machinery Report*, 1992, 32(3): 8 - 18.
- [4] Suzuik H, Hara S, Matsunaga H. Study on aspherical surface polishing using a small rotating tool-development of polishing system [J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 1993, 59(10): 1713 - 1718.
- [5] 李荣彬, 杜雪, 张自辉, 等. 光学自由曲面的超精密加工技术及应用 [A]. 2003 年机械工程学会年会论文集 [C], 深圳: 机械工程学会, 2003. 15 - 19
- [6] Suzuik H, Kitajima T, Okuyama S. Study of precision cutting of axi-symmetric aspherical surface-effect of tool errors on workpiece form accuracies and its compensation methods [J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 1999, 65(3): 401 - 405.
- [7] Yan J, Syoji K, Kuriyagawa T. Fabrication of large-diameter single-crystal silicon aspheric lens by straight-line enveloping diamond-truing method [J]. *Journal of the Japan society for Precision Engineering*, 2002, 68(4): 1067 - 1071.
- [8] Zhou Z, Nagakawa T. New grinding methods for aspheric mirrors with large curvature radii [J]. *Annals of the CIRP*, 1992, 31(1): 335 - 338.
- [9] Kuriyagawa T, Sepasy M S, Syoji K. A new grinding method for aspheric ceramic mirrors [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 62(2): 387 - 392.
- [10] Saeki M, Kuriyagawa T, Syoji K. Machining of aspherical molding dies utilizing parallel grinding method [J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 2002, 68(4): 1067 - 1071.
- [11] Yoshizumi K. Ultrahigh accurate 3-D profilometer using atomic force probe [J]. *Journal of the Society of Grinding Engineers*, 2001, 45(12): 562 - 565.
- [12] Matsushita H. Non-contact 3D imaging surface structure analyzer using interferometry [J]. *Journal of the Society of Grinding Engineers*, 2001, 45(12): 566 - 569.
- [13] Miura K. Three-dimensional measuring equipment with a laser probe [J]. *Journal of the Society of Grinding Engineers*, 2001, 45(12): 558 - 561.

## Super-precision Machining and Non-contact Measurement of the Aspheric Surface of Optic Parts

Xie Jin

(College of Mechanical Engineering, South China Univ. of Tech., Guangzhou 510640, Guangdong, China)

**Abstract:** Aiming at the difficulty in machining the optic part with aspheric surface, which is of high hardness/ brittleness and is up to the accuracy of submicrometer or below submicrometer, this paper analyzes the form accuracy and the application of the aspheric surface, the relevant fabrication principle and process, as well as the non-contact measurement means. The results indicate that the super-precision machining of aspheric surface technically depends on precision numerically-controlled machine tools, the ductile-mode machining principle of hard and brittle materials, and the super-precision measurement.

**Key words:** aspheric surface; super-precision machining; optic part; non-contact measurement; single-point diamond cutting; arc diamond grinding wheel