

文章编号 1004-924X(2004)06-0566-04

红外线聚光非球面透镜的单点金刚石镜面切削方法

谢 晋¹, 耿安兵², 熊长新², 吴新建²

(1. 华南理工大学 机械工程学院, 广东 广州 510640; 2. 华中光电技术研究所, 湖北 武汉 430074)

摘要:根据硬脆性材料的延性域加工机理和面形误差补偿加工方法,研究了圆弧形和平头形刀具的单点金刚石延性域切削方法,在加工中直接获得了镜面切除面;并利用数控技术进行误差补偿,克服了因加工试验、刀具磨损、机械振动、热变形等造成的加工误差导致的非球面的面形精度降低和表面粗糙度恶化。并将该方法用于采用圆弧形刀具对红外线聚光的 70 mm 非球面透镜进行单点金刚石切削实验中。试验结果表明面形误差补偿加工方法可以进一步消除加工误差,将非球面的面形精度 PV 值从微米级(1.23 μm)提高到亚微米级(0.36 μm)的程度,表面粗糙度 R_a 从亚微米级(0.27 μm)改善到超亚微米级(0.04 μm)的范围。

关键词:非球面;硬脆性材料;面形精度;误差补偿

中图分类号: TG506 **文献标识码:** A

Single-point diamond mirror turning of infrared aspheric lens

XIE Jin¹, GENG An-bing², XIONG Chang-xin², WU Xin-jian²

(1. College of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Huazhong Research Institute of Electro Optics, Wuhan 430074, China)

Abstract: According to the ductile-mode machining principle of hard-brittle material and error compensation turning method, the ductile-mode turning method of aspheric surface of infrared lens is mainly discussed, which is concerning arc diamond tool and straight diamond tool, in order to directly obtain mirror cutting surface. The error compensation turning method is introduced to eliminate the influence of tool wear, machine librations and thermal distortion, etc. on the surface roughness and form accuracy. An experiment for a single-point diamond turning of germanium lens of 70 mm was carried out by the use of error compensation turning method. The result shows that it may improve aspheric form accuracy PV from 1.23 mm to 0.36 mm, and surface roughness R_a from 0.27 mm to 0.04 mm.

Key words: aspheric surface; hard-brittle material; form accuracy; error compensation

1 引言

光学透镜的非球面化是提高红外线聚光系

统的光学性能和使系统小型化的关键技术。传统的研磨和抛光不仅效率低,而且抛光液对环境污染。目前,国内已经开始在加工设备和技术等方面针对非球面的单点金刚石精密切削加工开始了

收稿日期:2004-04-22;修订日期:2004-10-29.

基金项目:国防科工委十五计划预研项目;留学回国人员科研启动基金资助项目。

深入的研究^[1],大多仅涉及金属部件和模具。但是,对光损伤小的单晶硅等硬脆性材料因加工时容易产生裂纹裂隙而无法得到应用。此外,在实际加工中机械振动和刀具的状态等极大地影响到加工精度^[2],无法达到所期望的镜面加工精度。因此,本文分析光学非球面产品在实际应用中所需的面形精度和讨论单点金刚石切削原理的同时,通过实验研究面形误差补偿加工方法。其目的就是提高红外线聚光透镜的面形精度和降低表面粗糙度,最终实现镜面切削加工。

2 光学非球面的面形精度

光学非球面的加工可分为模具成形法和切除加工法两种。模具成形法是利用模具的非球面模面将可塑化材料注射或模压后一次形成光学非球面零件,取代低效率和高成本的切削、磨削、抛光等直接切除加工方法。但是,模具的非球面模面需要进行切除加工。

光的反射和折射要求非球面产品的表面粗糙度 R_a 要小于光波长的 $1/10$,而面形精度(PV值)不能大于 R_a 的 10 倍^[3],即达到微米级、亚微米级乃至纳米级的范围。一些主要的光学非球面零件的面形精度,如图 1 所示^[4]。从图中可以看到光学非球面零件正在向小型高精度化和大型高精度化方面发展。

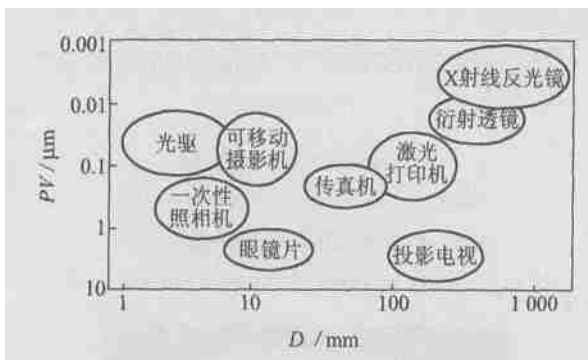


图 1 光学非球面直径与面形精度(PV值)
Fig. 1 Form accuracy vs diameter of aspheric parts

3 单点金刚石精密切削方法

单点金刚石切削加工是在精密数控机床上同时控制 x 和 y 两轴的运动,将旋转工件切除成轴对称非球面,如图 2 所示。利用单点金刚石刀具

可以镜面切削用于激光反射的非球面铜镜面。但是,为了实现硬脆性材料的镜面切除加工就要求材料的切除深度始终保持在临界延性模式(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在工作状态稳定的情况下能够控制工件进给量在微米级甚至亚微米级以下的范围。

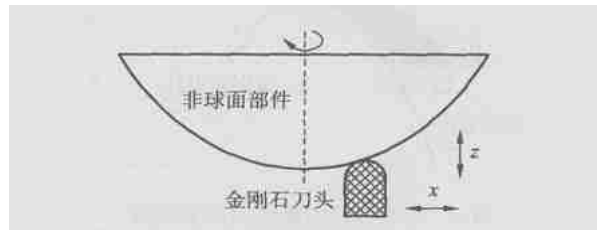


图 2 单点金刚石切削示意图
Fig. 2 Single diamond turning of spheric surface

目前的研究表明,利用圆弧形刀具进行的圆弧包络线单点金刚石切削法能够应用于硬脆性材料的非球面切削中^[4],但是,要获得镜面切削,刀具的进给量必须非常小($< 1 \sim 2 \mu\text{m}/\text{rev}$),这就会消耗非常长的切削时间,导致单点金刚石的急剧磨耗。为此,将刀具设计成平头形刀具,进行直线包络线切削,它可以较大幅度地加大刀具的进给量($20 \mu\text{m}/\text{rev}$),提高非球面单晶硅镜头的加工效率,其非球面表面粗糙度可达到 16 nm ,表面形状精度可达到 $1.36 \mu\text{m}$ ^[5]。

4 光学非球面的面形误差补偿加工方法

机床的运动误差、工具的磨损、加工力和加工热引起的变形、三维坐标系与加工点的漂移、工具形状的测试误差等原因造成了设计形状与加工形状的差异,无法实现高精度的面形精度和超低的表面粗糙度。为了消除这些因数的影响,使其与设计值的形状误差缩小到 $1 \mu\text{m}$ 以下,往往需要进行反复多次的面形误差修正,即面形误差补偿加工,才能达到目标面形精度。

为此,在对红外线聚光的非球面透镜加工实验中,采用圆弧刀具进行单点金刚石切削试验。圆弧金刚石刀具的切削原理图如图 3 所示。切除厚度 a 可以沿着刀刃向尖端方向逐渐减小到非常小的程度,可以实现延性域精密切削。本研究

中的进给量 f 设定为 $2.5 \mu\text{m}/\text{rev}$ 。实验条件如表 1 所示。为了改善非球面面形的加工精度,建立了面形误差补偿加工系统。

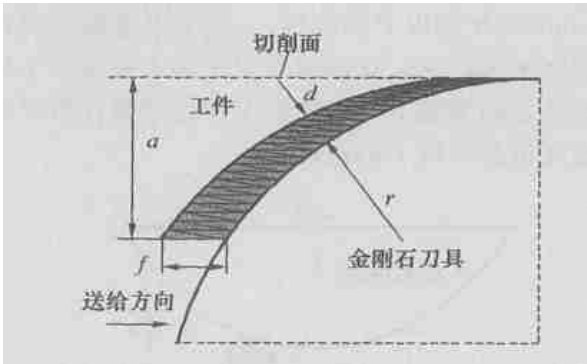


图 3 圆弧刀具的精密切削原理图
Fig. 3 Precision cutting principle for arc tool

表 1 试验条件

Tab. 1 Experiment conditions

数控机床	Nanoform 250
面形精度测试仪	第 2 系列表面光度仪
工件	单晶锗
非球面直径	70 mm
金刚石刀具半径 r	1.5 mm
刀具前角	- 25°
工件转速	2 000 r/ min
切深 a	2 μm
进给速度	5 mm/ min

红外线锗透镜的非球面理论面形方程式为:

$$z(x) = \frac{c \times x^2}{1 + \sqrt{1 - (K + 1) \times c^2 \times x^2}} + \sum_{i=1}^n A_i \times x^i, \quad (1)$$

其中,非球面的理论面形参数取为: $c = 4.922\ 713 \times 10^{-3}$ 、 $K = 1.476\ 979$ 、 $A_4 = 8.144\ 790 \times 10^{-9}$ 、 $A_6 = -1.886\ 900 \times 10^{-13}$ 和 $A_8 = 87.237\ 380 \times 10^{-16}$ 。

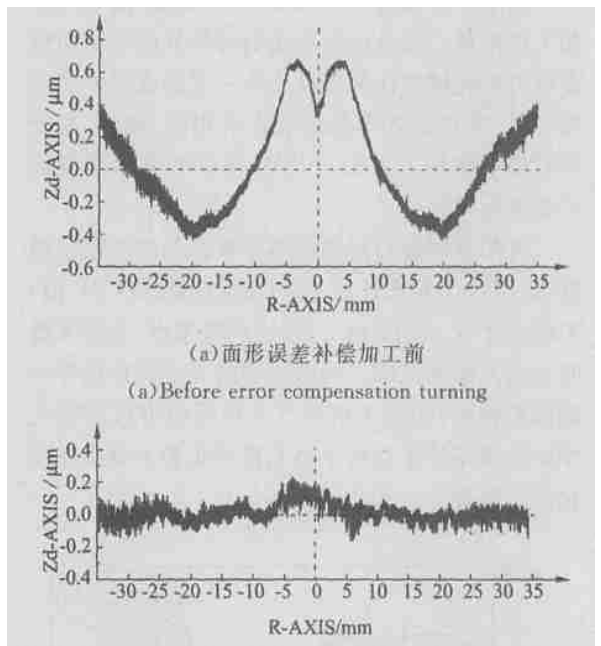
加工后的面形误差 Z_d 作为评价非球面加工精度的指标,即实际检测面形值与理论值的差。 PV 值为面形误差的峰谷值。单晶锗透镜非球面的检测采用接触式检测方法,如图 4 所示。

初期的数控程序加工的非球面面形精度(PV 值)为 $1.23 \mu\text{m}$,表面粗糙度(R_a)为 $0.27 \mu\text{m}$,如图 5(a)所示。为了修正以上所述的多种原因造成的误差,利用非球面的面形误差补偿加工程序,进行两次面形误差补偿加工,最终将非球面的面



图 4 非球面的检测
Fig. 4 Testing of aspheric surface

形精度提高到 $0.36 \mu\text{m}$,表面粗糙度改善到 $0.04 \mu\text{m}$,如图 5(b)所示,实现了非球面单晶锗透镜的直接镜面切削加工,其镜面如图 6 所示。



(a) 面形误差补偿加工前
(a) Before error compensation turning
(b) After error compensation turning

图 5 红外线透镜的非球面面形误差

Fig. 5 Form accuracy of infrared aspheric lens

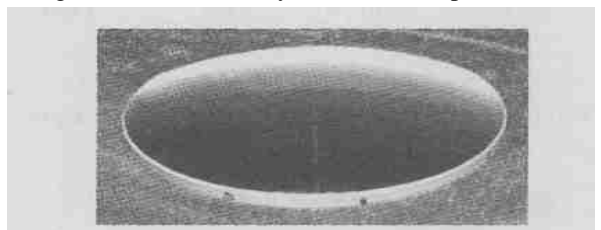


图 6 非球面单晶锗透镜的镜面切削表面

Fig. 6 Mirror machined surface of aspheric germanium lens

5 结 论

利用超精密数控机床,硬脆性材料延性域加工原理和面形误差补偿加工方法进行单点金刚石切削可以省去传统的研磨和抛光,直接实现高精

度红外线聚光非球面镜头的镜面精密加工。实验结果表明采用面形误差补偿加工方法可以将非球面镜头的面形精度 PV 值从 $1.23 \mu\text{m}$ 的微米级提高到 $0.36 \mu\text{m}$ 的亚微米级,表面粗糙度 R_a 从 $0.27 \mu\text{m}$ 的亚微米级改善到 $0.04 \mu\text{m}$ 的超亚微米级程度。

参考文献:

- [1] 罗松保,张建明.非球面曲面光学零件超精密加工装备与技术[J].光学精密工程,2003,11(1):75-77.
LIO S B, ZHANG J M. Ultraprecision machining equipment and technology of aspheric optics[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003,11(1):75-77. (in Chinese)
- [2] 尹自强,李圣怡.超精密车削下刀具相对振动的辨别[J].光学精密工程,2002,10(5):497-503.
YIN Z Q, LI S H Y. Identification of relative vibration in ultra-precision turning[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002,10(5):497-503. (in Chinese)
- [3] TOYAMA T. Development of ultra-precision grinder for machining aspheric surface[J]. *Toyota Machinery Report*, 1992,32(3):8-18.
- [4] YOSHIZUMI K. Ultrahigh accurate 3-D Profilometer using atomic force probe[J]. *Journal of the Society of Grinding Engineers*, 2001,45(12):562-565.
- [5] 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.
- [6] 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):561-565.
- [7] YOSHIZUMI K. Ultrahigh accurate 3-D profilometer using atomic force probe[J]. *Journal of the Society of Grinding Engineers*, 2001,45(12):562-565.

作者简介:谢晋(1963-),男,山西榆次人,华南理工大学副教授,工学博士,主要研究方向为精密加工及特种加工。