

硬脆非球面光学镜精密磨削与自适应控制方法

胡德金

上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240

摘要 针对硬脆非球面光学镜硬度高、型面特殊、加工面积大、加工质量要求高的特点,提出了一种基于法向跟踪的、以圆筒形砂轮端面进行磨削的非球面范成精密加工方法。在此基础上,进一步设计了智能化的实时检测与自适应控制方法。应用这些方法实现了磨削运动轨迹的精确控制、砂轮磨损的自动补偿、磨削压力的自动控制、工艺参数的自动调节。实验结果表明:以圆筒砂轮端面进行磨削的、基于法向跟踪的非球面范成精密磨削法可以保证非球面的面形精度,砂轮磨损实时检测与自适应控制方法能提高加工质量和效率。

关键词 光学制造; 非球面光学镜; 法向跟踪; 精密磨削; 实时检测; 自适应控制

中图分类号 TG584 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0722004

Precision Grinding and Adaptive Control Method for Hard and Brittle Aspheric Optical Mirror

Hu Dejin

School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract For hard and brittle aspheric optical mirror with characteristics of high hardness, special profile, large processing area and high processing quality requirement, a generating grinding method for aspheric surface based on the normal tracking and grinding with cylindrical grinding wheel end is developed. Based on this, intelligent real-time detection and adaptive control method are designed. Applying these methods, the precise control of the grinding motion track, automatic compensation of grinding wheel wear, automatic control of grinding pressure and automatic adjustment of process parameters are realized. Experimental results show that the method for generating precision grinding of aspheric surfaces which is grinded with cylindrical grinding wheel end and based on normal tracking can ensure the accuracy of the aspheric surfaces. The real time detection of grinding wheel wearing and adaptive control method can improve the machining quality and efficiency.

Key words optical fabrication; aspheric optical mirror; normal tracking; precision grinding; real-time detection; adaptive control

OCIS codes 220.1250; 220.4610; 220.4830; 220.5450

1 引 言

非球面光学器件是天文宇宙探测、激光核聚变、空间相机、大型望远镜、航空航天天线等系统中的核心部件。为了保证非球面器件的综合物理性能,人们越来越多地使用光学玻璃、微晶玻璃及 SiC 等材料,但这些硬脆材料加工非常困难,加工一片 800 mm 直径的 SiC 非球面器件需要长达数月时间。

对于有色金属、部分晶体的非球面器件加工可以采用金刚石超精密车削来完成;而对于 SiC、光学玻璃等硬脆材料的非球面加工,主要采用磨削、研磨、离子束抛光、磁流变抛光等组合方法加工。

磨削加工具有效率高、精度高的优点,通过精密磨削加工使非球面器件的面形精度接近最终加工要求,从而减少抛光工艺阶段的加工余量,达到提高面形精度和表面质量的同时提高加工效率。对于光学玻璃、SiC 等硬脆非球面器件的精密磨削加工来说,磨削装备和磨削方法的设计、磨削工艺参数和砂轮磨粒磨料的

收稿日期: 2016-01-28; **收到修改稿日期:** 2016-03-04

基金项目: 机械系统与振动国家重点实验室课题(MSVZD201515)

作者简介: 胡德金(1947—),男,硕士,教授,主要从事精密加工、特种加工与装备自动化方面的研究。

E-mail: djhu@sjtu.edu.cn

选择、磨削过程的控制等对加工精度、加工效率和表面质量有较大的影响。国内外众多科技工作者把精密磨削技术作为硬脆非球面器件加工的重要手段来研究。

精密磨削成形的研究工作涉及以下几方面的工作:1)高刚度、高精度磨削机床的设计和研制,包括磨削系统所需的温控、防微震、低扰动系统的设计与控制;2)非球面成形拓扑与数控策略,包括非球面补偿算法与控制;3)非球面高精度在位测量技术;4)工具控制技术等^[1]。

为提高大中型非球面的磨削精度,提高非球面的加工效率,文献[2]运用多体系统理论,建立非球面磨削成形的统一误差模型,将所有趋势项误差转化为砂轮对刀误差以及砂轮形状误差进行补偿,并建立实用补偿模型,从而解决了轴对称非球面磨削中的精度控制问题。针对球面光学件加工中存在的问题,文献[3]分析了用轨迹成型法加工球面光学零件的原理,以及影响工件面形误差的因素,并推导出机床调整机构消除误差的公式。对凹状轴对称非球面器件加工多数采用圆弧砂轮或圆柱砂轮的部分圆弧来磨削。文献[4]应用圆弧砂轮,通过 x 、 y 轴联动和误差补偿技术来实现回转非球面的精密磨削加工。表面裂纹和表面粗糙度是非球面光学元件精密磨削的重要质量指标,光学玻璃等脆性材料有很大的脆性,在磨削过程中易产生微裂纹,甚至破碎。Bifano T G等^[5]认为脆性材料的塑性去除能有效提高加工表面质量,实现脆性材料塑性域精密磨削加工的条件是:砂轮单个磨粒的最大切削深度应小于脆性材料的临界切削厚度。文献[6]对光学非球面超精密磨削技术和表面加工质量控制技术进行了理论分析和实验研究,计算了临界切削深度。为解决大直径非球面 SiC 反射镜加工过程中材料去除效率与加工精度之间的矛盾,文献[7]提出了组合加工技术,对一块 2040 mm 直径非球面 SiC 反射镜进行研磨。以其中 1 次加工周期为例介绍了组合加工技术在大直径非球面 SiC 反射镜加工过程中的应用。经过 1 次完整的组合加工过程,工件表面面形误差峰谷值(PV)由 $8.72\ \mu\text{m}$ 收敛至 $4.91\ \mu\text{m}$,均方根值(RMS)由 $0.91\ \mu\text{m}$ 收敛至 $0.52\ \mu\text{m}$ 。文献[8]采用摆臂轮廓仪检测超大直径反射镜的基本原理,结合实例对直径为 2040 mm 的同轴抛物面 SiC 反射镜进行了摆臂轮廓检测,检测精度均方根为 $0.46\ \mu\text{m}$,与干涉仪检测结果对比偏差 $0.03\ \mu\text{m}$ 。该技术与加工机床集成实现了反射镜的在位检测。但是,该检测手段不能实现磨削过程的实时检测,也就是无法利用其检测数据来实现砂轮磨损的实时补偿。为了改善光学反射镜表面粗糙度,文献[9]应用固着磨料研磨方法,并从微观物理机制和人工神经网络 2 个不同角度分别研究表面粗糙度的形成与量化性的预测,给光学加工工艺提供了确定性与量化性的预测,使得固着磨料工艺加工 SiC 反射镜的表面粗糙度预测准确性提高了一个台阶。本文针对这种硬脆材料非球面镜型面特殊、加工面积大、加工精度高、表面粗糙度好的加工特点,在磨削过程中,砂轮损耗大、补偿困难的难点,研究了加工质量好、加工效率高的新方法。

2 非球面精密范成磨削法及原理

轴对称非球面与球面的区别在于非球面只有 1 根对称轴、球面有无数根对称轴,球面上每 1 点的半径都是相等的,而非球面母线上每 1 点的曲率半径是不相等的。如果 1 个凹状的轴对称非球面母线在某一坐标平面内呈单调上升,在这样的非球面中可以存放无数个不同直径的球,每一直径的球与非球面之间只有 1 条相接触的圆周线,该圆周线上任何 1 点切线的垂直线既是该球的法线、也是非球面的法线,与旋转轴的交点就是球的球心,交点与切点之间的连线就是球的半径,也是非球面曲率半径的一部分。因此,可以应用范成法球面磨削的方法来磨削非球面。

2.1 凹状球面范成摆动磨削原理

文献[10-11]提出了一种定中心范成摆动球面精密磨削方法。如图 1 所示,以较小直径的杯形或圆桶形砂轮的端面进行磨削,磨削出 1 条环状的球面带,再通过砂轮主轴绕球心的摆动就可以磨削出一定宽度的回转球面。在图 1 中,待磨削凹状球面工件以速度 n_1 绕坐标系 $Oxyz$ 的 y 轴做低速旋转运动,砂轮主轴中心线与 y 轴的交点 O' 为被磨球面的球心,砂轮轴上的砂轮磨具以速度 n_2 做高速旋转运动,并绕 O' 点在 xOy 平面内成一定交叉角做往复摆动,只要控制砂轮磨具的摆动半径 R ,就可以加工出所需尺寸的球面工件。因为砂轮磨具的旋转中心线与球面母线法线始终保持重合,这样,砂轮摆动运动、工件的旋转运动、砂轮磨具高速旋转运动等运动的合成所形成的曲面是一个回转球面,即中心线在同一平面内相交的两旋转运动的合成就形成 1 个回转球面。

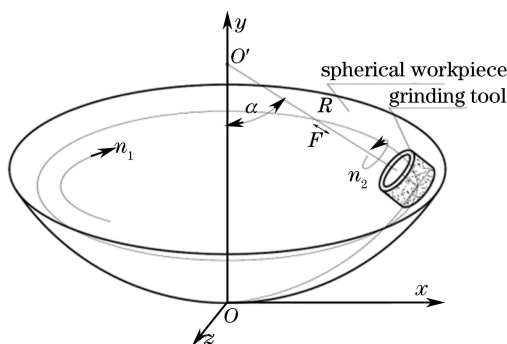


图 1 展成摆动磨削凹球面原理图

Fig. 1 Diagram of generating swing grinding concave spherical

2.2 基于法向跟踪的非球面范成磨削法及原理

应用上述原理可以实现轴对称非球面的精密磨削。旋转抛物面是典型的非球面,只要控制圆筒形砂轮磨具旋转中心线与非球面母线上磨削点的法线保持重合,通过工件绕对称轴的旋转就可以形成旋转非球面。设旋转抛物面母线方程为:

$$y = px^2, \quad (1)$$

设抛物线 K 绕 y 轴旋转 1 周所形成的旋转抛物面顶点为工件坐标系 $Oxyz$ 的原点 O ,如图 2 所示。

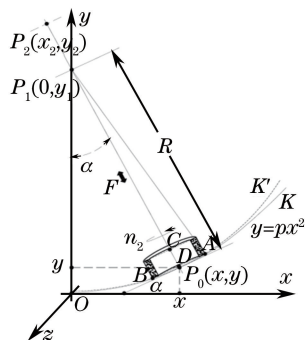


图 2 抛物面磨削原理图

Fig. 2 Diagram of paraboloid grinding

抛物线 K 上点 $P_0(x, y)$ 切线倾角 α 为:

$$\alpha = \operatorname{arccot}(y') = \operatorname{arccot}(2px), \quad (2)$$

做抛物线 K 上点 $P_0(x, y)$ 的法线,根据曲率半径公式,抛物线 K 上点 $P_0(x, y)$ 的曲率半径为:

$$|P_0P_2| = \frac{1}{2p} \sqrt{[1 + (2px)^2]^3}, \quad (3)$$

取 $P_0(x, y)$ 点法线与 y 轴的交点 $P_1(0, y_1)$ 为圆心,以 $|P_0P_1|$ 为半径做圆弧 K' 。由法线方程可求得圆弧 K' 圆心 $P_1(0, y_1)$ 在 y 轴上的坐标值,即:

$$y_1 = y + \frac{x}{y'} = y + \frac{1}{2p}, \quad (4)$$

设 $P_1(0, y_1)$ 为圆心的圆半径 $|P_1P_0| = R$,则:

$$R^2 = (y_1 - y)^2 + (x_1 - x)^2, \quad (5)$$

将 $x_1 = 0$ 和(4)式代入(5)式中得:

$$R = \frac{1}{2p} \sqrt{1 + (2px)^2}, \quad (6)$$

比较(3)式和(5)式,可以看出,圆弧 K' 与抛物线 K 相切点 P_0 的圆弧半径 R 小于抛物线曲率半径 $|P_0P_2|$, 于是,可以选择适当直径的砂轮磨具、采用范成摆动磨削球面的方法来磨削旋转抛物面(即通过无数个不同半径的球面来拟合所需的非球面)。与球面磨削不同的是,磨削非球面时,砂轮主轴的摆动半径 R 、摆动角度

α 、圆弧 K' 的圆心 $P_1(0, y_1)$ 随 x 变化而变化,至此,实现抛物面磨削的运动控制过程如下:

- 1) 通过(1)式 x 自变量确定 y ;
- 2) 通过(2)式确定磨削主轴摆动角度 α ;
- 3) 通过(4)式确定摆动中心在 y 轴上坐标 y_1 ;
- 4) 通过(6)式确定磨削主轴摆动半径 R 。

由上分析可见,砂轮主轴的旋转中心线与抛物面上磨削点的法线始终保持重合,磨削点的运动轨迹始终在抛物面母线上,这就从原理上保证了磨削精度。上述原理同样适用于轴对称双曲面、椭圆面等非球面的精密磨削加工。

3 硬脆非球面精密磨削的自适应控制

面形精度、表面质量和磨削效率是非球面器件精密磨削的主要技术要求,磨削加工阶段的面形精度和表面质量对后续表面抛光质量和效率具有重要影响。除磨削装备几何精度和工作精度外,砂轮磨削性能、磨削工艺参数等都是影响磨削质量和磨削效率的关键因素。

3.1 磨削精度的自动检测与砂轮磨损补偿

对于较大直径的非球面器件,由于被磨工件直径比砂轮直径要大得多,其面积相差数十倍或上百倍,反复磨削的时间长。毫无疑问,即使采用金刚石砂轮,砂轮磨损也是不可忽视的。由于砂轮磨损量的不确定性,使得磨削后非球面的面形精度就不可确定,因此,在位或实时检测技术和砂轮磨损补偿等技术是提高硬脆非球面器件磨削精度和效率的重要手段。在图 2 所示的直角三角形 ΔP_1DA 中,有:

$$\begin{cases} |P_1A|^2 = (|P_1C| + |CD|)^2 + |AD|^2 \\ |P_1C| = \sqrt{|P_1A|^2 - |AD|^2} - |CD| \end{cases}, \quad (7)$$

式中: $|P_1C|$ 是磨削主轴沿法线方向的运动参数, $|CD|$ 是圆筒形砂轮长度, $|AD|$ 是圆筒形砂轮半径。因为圆弧 K' 与非球面母线 K 在 P_0 相切,所以 $|P_1A| = |P_1P_0| = R_t$, 即:

$$|P_1C| = \sqrt{R_t^2 - |AD|^2} - |CD|, \quad (8)$$

式中, R_t 是非球面当前磨削点实际磨削半径。

磨削采用的是等直径的圆筒形砂轮,式中圆筒形砂轮半径 $|AD|$ 可视为常数。从(8)式可知,砂轮磨损使圆筒形砂轮长度 $|CD|$ 变短,从而使非球面当前磨削点的磨削半径 R_t 变小,这意味着磨削点偏离了理论非球面母线轨迹。要保证非球面磨削精度不受砂轮磨损的影响,就必须增加磨削主轴沿法线方向的运动距离 $|P_1C|$ 来补偿砂轮长度的磨损。因此,通过直接检测 $|P_1P_0|$ (即 R_t) 的变化就可以判断砂轮的磨损大小。

图 3 为实时检测原理和检测装置图,图 3(a)为检测原理图,图 3(b)为检测装置图。在磨削主轴的内部设计了一套检测装置,该检测装置既可以随磨削主轴作 F_1 进给运动,也可以在磨削主轴内作独立的 F_2 运动。为了实现磨削过程中面形精度的实时检测,设计了如图 3 所示的磨削与检测一体化的电主轴^[12],图中,圆筒形砂轮磨具①与磨削主轴的中空旋转轴④直接连接,检测传感器②通过连接杆③与安装在电主轴上端的控制器⑤连接,控制器内装有精密的光栅尺。控制器⑤通过连接杆③推动检测传感器②作上下 F_2 运动。在中空旋转轴④中通有压缩空气,以排除磨削液和磨削产物对检测精度的影响。检测传感器②的检测分辨率为 0.001 mm,检测系统重复检测精度小于等于 0.005 mm。

在磨削过程中,每隔一定的时间间隔进行检测,当检测传感器与被磨削表面接触时,控制器记录下当前磨削点的 $|P_1P_0|$, 即 R_t , 并与式(5)式计算的理论 R 值进行比较,如果 $R_t < R$, 说明砂轮磨具已经磨损,需补偿,设其差值为 Δw , 并代入(7)式中:

$$|P_1C| = \sqrt{R_t^2 - |AD|^2} - |CD| + \Delta w, \quad (9)$$

即增加了 $|P_1C|$ 的运动距离,实现了砂轮磨损的实时补偿。

3.2 磨削压力自适应控制

在磨削过程中,进给量大,磨削压力大,表面易产生裂纹、甚至破碎。进给量小,磨削压力小,磨削效率就低,因此合理控制磨削压力是关键。在磨削的最初阶段,由于磨削主轴系统存在一定的弹性变形,砂轮端面

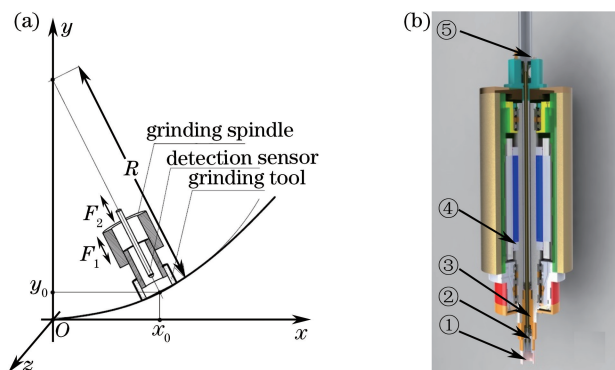


图 3 (a) 磨削实时检测原理图; (b) 装置图

Fig. 3 Principle diagram of real-time detection for grinding; (b) diagram of the device

的磨削压力 P 与材料的去除速率 $v(t)$ 、进给速率 $f(t)$ 或进给量之间保持同步增大关系(图 4 中的 $a-b$ 段)。但随着进给速率 $f(t)$ 或进给量的进一步增大,材料去除速率 $v(t)$ 并未同步增加,而磨削压力 P 却明显增加(图 4 中的 $b-c$ 段),这说明磨削去除量小于进给量,可能进入了崩碎切削域。在磨削压力 P 曲线上的 b 点可能是一个转折点。虽然直接实时检测磨削压力 P 比较困难,但是可以通过磨削主轴电机电流变化来观察,或通过进给伺服电机扭矩 T 变化来检测。由于磨削主轴电机功率都比较大,对磨削压力 P 变化的反映不是很明显。而进给伺服电机扭矩 T 的变化对磨削压力 P 的变化反映则比较明显。

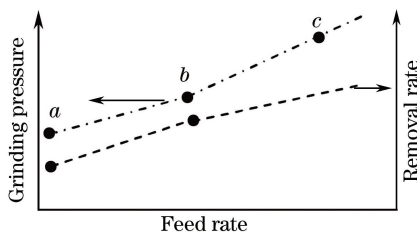


图 4 进给速率、磨削压力与去除速率的关系图

Fig. 4 Relationship among feed rate, grinding pressure and removal rate

一般情况下,推动磨削主轴进给的轴向推力 F 可按下式计算:

$$F = T \times (2\pi \times \eta) / \ell, \tag{10}$$

式中: F 是轴向推力, T 是伺服电机扭矩, η 是传动效率, ℓ 是滚珠丝杠导程。轴向推力 F 扣除空载阻力后与砂轮端面面积的比值可基本确定为磨削压力 P ,在某一时间段磨削压力 P 曲线斜率如果大于进给速率 $f(t)$ 曲线斜率(图 4 中的 $b-c$ 段),说明磨削压力 P 在逐渐增大,此时就应该降低进给速率 $f(t)$,使磨削压力 P 降低,避免表面裂纹的产生。磨削压力 P 曲线上的 b 点可视为进给速率 $f(t)$ 控制的阈值点。这一阈值点要根据砂轮的磨削性能、被磨削表面材料性能等磨削实验来确定。

3.3 磨削工艺参数自动调节

提出的基于法向跟踪、以圆筒形砂轮端面磨削非球面的方法是一种以球面磨削方法为基础来实现的。在磨削过程中,摆动磨削方向始终是从非球面顶点往边缘方向进行,箭头方向为砂轮主轴的摆动进给方向。根据所提出的非球面磨削原理,在磨削过程中,非球面母线上磨削点的法线既属于球面也属于非球面,球面球心始终在对称轴上,球面半径始终小于非球面上当前磨削点的曲率半径。虽然在磨削过程中,圆筒形砂轮端面整个圆环参与了对非球面表面的磨削,但是决定非球面表面磨削精度的只是通过图 5(①是非球面工件,②是待磨削表面,③是圆筒形砂轮,④是检测传感器,⑤是当前磨削球面,⑥是已磨削非球面)中非球面磨削点 P_0 的、在圆筒形砂轮③上是 1 条弧线,在非球面上表现的是已磨削非球面⑥和当前磨削球面⑤之间相交的一条圆周线,如果砂轮主轴摆动速率足够慢,则非球面上呈现的是 1 条间距足够小的向上延伸的“阿基米德螺线”。摆动速率慢、磨削深度小,磨削精度虽然较好,但磨削效率太低。

为了达到一定的磨削效率,可以提高摆动进给速率。但是,如果砂轮主轴摆动进给周期与非球面工件转

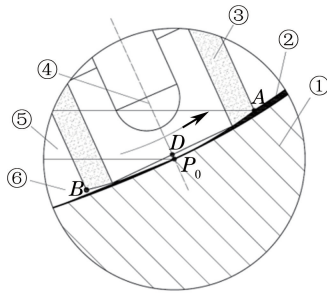


图 5 非球面精密磨削局部放大图

Fig. 5 Partial enlarged diagram of aspheric surface precision grinding

速之间存在固定的速比,其结果是在非球面上就会出现 1 条间距较大的“阿基米德螺线”。反复磨削的次数越多,“阿基米德螺线”的深度就越深,这就影响了面形精度和表面粗糙度。因此,在控制过程中,随机调整非球面工件旋转周期,或砂轮主轴摆动进给周期,使砂轮主轴摆动的起始点在工件圆周上不断变化,这样在提高摆动进给速率、提高磨削效率情况下,可以避免“阿基米德螺线”现象发生。

4 磨削实验

硬脆非球面精密磨削实验在自主开发的 JDS-B6050 非球面精密磨削装备上进行(图 6)。

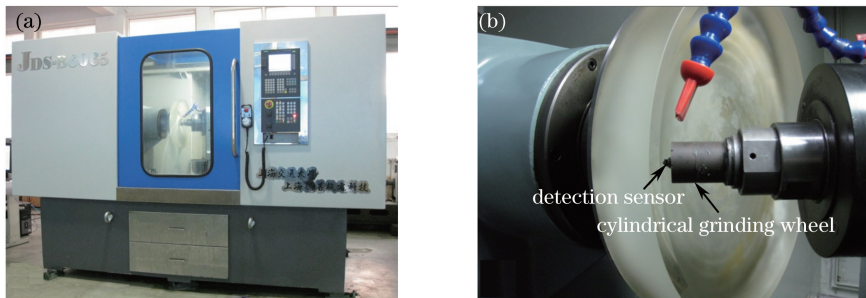


图 6 (a) 实验装备; (b) 非球面母线精度在位检测

Fig. 6 (a) Experiment equipment; (b) on-line testing of aspheric surface accuracy

实验参数如下:

- 非球面工件材料:K9 光学玻璃
- 非球面毛坯尺寸: $\Phi 350 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$
- 砂轮主轴转速:6000 r/min
- 非球面工件转速:5~10 r/min
- 圆筒形砂轮直径: $\Phi 40 \text{ mm}$
- 圆筒形砂轮材料:陶瓷+金刚石
- 检测分辨率:0.001 mm
- 粗糙度仪为德国 Mahr 公司的 MarSurf PS1

非球面母线方程为:

$$y = \frac{1}{4}px^2 \quad (p = 0.0058), \quad (11)$$

为了提高磨削效率,首先,按图 1 凹状球面磨削方法对 K9 平面玻璃进行粗磨,磨削球面半径为 370 mm,磨削出深度约 35 mm 的凹状球面。然后,按图 2 建立工件坐标系,加工程序按(1)、(2)、(4)、(8)式进行编程。磨削过程始终从非球面顶点到边缘方向进行,这样,磨削主轴摆动角度 α 、磨削主轴摆动半径 R 、磨削主轴摆动中心在 y 轴上坐标 y_1 在磨削过程中都是单方向运动,避免了各运动机构返程误差对磨削精度的影响。磨削实验分粗磨、半精磨和精磨 3 个阶段进行。

1)粗磨:砂轮粒度 60,每次循环进给深度 $3\ \mu\text{m}$,磨削出非球面顶点深度至 40 mm 左右,磨削后表面粗糙度 R_a 为 $2.5\ \mu\text{m}$;

2)半精磨:砂轮粒度 120,每次循环进给深度 $2\ \mu\text{m}$,磨削出非球面顶点深度至 41 mm 左右,磨削后表面粗糙度 R_a 为 $0.5\ \mu\text{m}$;

3)精磨:砂轮粒度为 200,每次循环进给深度 $0.5\ \mu\text{m}$,磨削出非球面顶点深度至 41.5 mm,磨削后表面粗糙度 R_a 为 $0.2\ \mu\text{m}$ 。

最后,停机对非球面水平方向母线进行检测,共检测 9 个点,每个点重复检测 3 次,取中间值,检测结果如表 1 所示。表中, R 为理论计算值, R_{ta} 、 R_{tb} 、 R_{tc} 为 3 次实测值, R_t 为实测平均值。从检测数据上看,重复检测精度在 $4\ \mu\text{m}$ 以内,实测值 R_t 与理论计算值 R 之间的偏差随着摆动角度增大而增加,这主要受磨削装备摆动机构传动精度的影响,提高各运动机构的运动精度,可以进一步提高磨削精度。

表 1 非球面精密磨削实验检测数据

Table 1 Testing data of aspheric surface precision grinding experiment

mm

Parameter	Value								
x	0	20.00	40.00	60.00	80.00	100.00	120.00	140.00	160.00
y	0	0.58	2.32	5.22	9.28	14.50	20.88	28.42	37.12
α	0	3.319	6.617	9.871	13.061	16.172	19.188	22.097	24.891
y_1	344.828	345.408	347.148	350.048	354.108	359.328	365.708	373.248	381.948
R	344.828	345.407	347.140	350.009	353.986	359.035	365.111	372.164	380.140
R_{ta}	344.830	345.409	347.141	350.007	353.979	359.017	365.101	372.143	380.113
R_{tb}	344.829	345.410	347.141	350.009	353.981	359.017	365.105	372.145	380.113
R_{tc}	344.828	345.410	347.141	350.009	353.981	359.011	365.101	372.147	380.113
R_t	344.829	345.410	347.141	350.009	353.977	359.017	365.081	372.145	380.113

5 结 论

提出的轴对称非球面范成精密磨削方法使砂轮主轴旋转中心线与非球面母线上磨削点的法线始终保持重合,砂轮磨具旋转中心的运动轨迹不存在误差,从原理上保证了磨削精度。圆筒形砂轮端面进行非球面磨削,磨削力方向与磨削主轴的旋转中心线和非球面磨削点法线重合,磨削稳定性好,可以获得良好的表面粗糙度。圆筒形砂轮端面进行非球面磨削,提高了磨削比,直径不会变化,无需对砂轮做任何修整,砂轮长度磨损通过实时检测实现自动补偿,可以长时间持续磨削,减少了辅助时间,提高了磨削效率。

实时检测传感器检测点与非球面母线上磨削点重合,避免了检测点与磨削点的位置偏差,提高了检测精度,可以实现微米级的面形精度检测,为后续表面抛光打下了良好基础。

参 考 文 献

- Xu Qiao, Wang Jian, Ma Ping, *et al.*. Progress of advanced optical manufacturing technology[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(12): 3098-3105.
许 乔, 王 健, 马 平, 等. 先进光学制造技术进展[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(12): 3098-3105.
- Kang Nianhui, Li Shengyi, Zheng Ziwen. Error model and compensation technology of aspheric grinding based on multibody system theory[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(4): 143-149.
康念辉, 李圣怡, 郑子文. 基于多体系统理论的非球面磨削误差模型与补偿技术[J]. 机械工程学报, 2008, 44(4): 143-149.
- Piao Chenghao, Gao Wenxin, Cai Li. Precision analysis of precisely grinding machining machine for locus shaping method [J]. Optical Technology, 1999(1): 54-57.
朴承镐, 高文信, 蔡 立. 轨迹成型法精密磨削加工机床的精度分析[J]. 光学技术, 1999(1): 54-57.
- Han Chengshun, Dong Shen. Study on ultra-precision grinding of large optical aspherical elements[J]. Opto-Electronic Engineering, 2003, 30(6): 43-46.
韩成顺, 董 申. 超精密磨削大型光学非球面器件的研究[J]. 光电工程, 2003, 30(6): 43-46.
- Bifano T G, Dowand T A, Scattergood R O. Ductile-regime grinding: A new technology for machining brittle materials

- [J]. Journal of Engineering for Industry, 1991, 113(2): 184-189.
- 6 Cheng Yanjiang, Hu Zhonghui, Ma Wensheng, *et al.*. Research on the quality control of ultra-precision grinding of aspheric surface[J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(B12): 222-226.
程延江, 胡忠辉, 马文生, 等. 光学非球面超精密磨削质量控制技术研究[J]. 宇航学报, 2006, 27(B12): 222-226.
 - 7 Liu Zhenyu. Grinding 2 m diameters aspheric SiC mirror with multi-mode optimization technique[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s1): s122005.
刘振宇. 应用组合加工技术加工 2 m 口径非球面碳化硅反射镜[J]. 光学学报, 2015, 35(s1): s122005.
 - 8 Xiong Ling, Luo Xiao, Liu Zhenyu, *et al.*. Measurement of 2 m SiC asphere mirror based on swing arm profilometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1212002.
熊 玲, 罗 霄, 刘振宇, 等. 2 m 量级 SiC 非球面反射镜的摆臂轮廓检测[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1212002.
 - 9 Wang Xu, Zhang Binzhi. Study on the artificial neural network of the RB-SiC mirror surface roughness fabricated with the fixed abrasive technology[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s1): s122006.
王 旭, 张斌智. 固着磨料加工高精度碳化硅反射镜粗糙度的人工神经网络研究[J]. 光学学报, 2014, 34(s1): s122006.
 - 10 Hu Dejin. Principle and control method for precisely grinding quadratic rotated conicoid[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(13): 178-183.
胡德金. 二次旋转曲面精密磨削原理与运动控制方法研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(13): 178-183.
 - 11 胡德金. 一种密封环内球面数控精密磨削装置与磨削方法: 中国, CN102744666B[P]. 2014-11-19.
 - 12 胡德金, 郁 翔, 李 峰, 等. 精密磨削与检测一体化电主轴: 中国, CN104551981A[P]. 2015-04-29.