

# 光学非球面磨削中的圆弧砂轮修整误差分析

林晓辉, 王振忠, 郭隐彪, 姜涛, 张东旭

(厦门大学 机电工程系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 针对光学非球面磨削加工中对圆弧砂轮修整精度要求比较高的特点, 采用 GC 杯形砂轮修整器对圆弧砂轮进行修整, 并分析杯形砂轮修整器几何误差和原理误差。在此基础上, 讨论了各种误差对圆弧砂轮的修整及对非球面加工的影响程度, 确定修整器定位倾斜误差是影响圆弧砂轮修整的主要因素, 特别是对圆弧半径的影响。针对定位倾斜误差因素进行了砂轮修整实验, 结果表明定位倾斜情况下拟合的圆弧半径残差较大且残差分布与理论分析一致。非球面加工实验显示定位倾斜情况下的工件面形误差分布情况与理论分析一致。修整器调正后再次进行加工, 结果呈现不同的面形误差分布且误差减小了, 验证了定位倾斜误差对非球面加工的影响。

**关键词:** 机械制造工艺与设备; GC 杯形砂轮修整器; 圆弧砂轮修整; 误差分析; 非球面磨削  
**中图分类号:** TG743      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1093(2013)01-0060-06

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.01.011

## Truing Error Analysis of Arc Wheel in Optical Aspheric Grinding

LIN Xiao-hui, WANG Zhen-zhong, GUO Yin-biao, JIANG Tao, ZHANG Dong-xu

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

**Abstract:** Aimed at high accurate truing of arc wheel in optical aspheric grinding, a GC cup truer was adopted for the arc wheel truing, and the truer's geometric error and principle error were analyzed. The effects of all errors on the arc wheel truing and optical aspheric grinding were discussed. It was found that the positioning tilt error was the main error in the arc wheel truing. Truing experiment results show that the residual error of fitting radius is bigger and its distribution coincides with theoretical analysis. The optical work-piece surface error distribution is also similar to theoretical analysis in the aspheric grinding. After anti-tilting, the experiment results show that the surface error distribution is changed and the surface accuracy is improved.

**Key words:** manufacture technique and equipment; GC cup truer; arc wheel truing; error analysis; aspheric grinding

## 0 引言

高精度大尺寸光学元件, 特别是非球面元件, 可用于惯性约束聚变的(ICF)的巨型激光装置。这些光学元件对面形精度和表面粗糙度都有很高的要求<sup>[1-2]</sup>。精密磨削是决定加工工件的形状精度、表

面粗糙度和表面加工质量的主要手段。由于平行的磨削加工方式具有较高的加工效率和加工稳定性, 使之适合于加工高精度的非球面透镜。不过, 由于采用圆弧砂轮加工, 砂轮的形状精度及其尺寸精度对工件表面精度及加工轨迹计算将直接影响光学工件的表面精度, 因此, 砂轮的修整精度变得尤为重要。

收稿日期: 2012-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51075343); 国家科技重大基金专项(2011ZX04004-061)

作者简介: 林晓辉(1985—), 男, 博士研究生, E-mail: lxhgogle@gmail.com;

郭隐彪(1962—), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: guoyb@xmu.edu.cn

根据不同的砂轮及工件类型,单晶金刚石、金刚石滚轮、ELID 在线电解修整、电火花修整、杯形修整、激光修锐技术等被提出并加以应用<sup>[3-5]</sup>。国内外很多学者对砂轮修整技术进行了深入的研究。文献[6]设计和制造了一种电火花修整机构,利用该机构修整砂轮并加工非球面,取得不错的效果。文献[7]主要讨论了杯形砂轮修整器修整金刚石砂轮,并用 3D 测量技术测量磨粒高度和其对磨削性能的影响。文献[8]分析了修整强度对修整效率及加工的影响。文献[9]中提到开发了配套超精密平面磨床使用的杯形修整器,分析了机械误差影响,并完成了修整实验、砂轮表面测量和半径拟合处理。文献[10]分析了砂轮修整中水平与垂直两个方向的直线度误差,并通过仿真获得主要影响因素。对比各种修整方式所能达到的磨粒状态、形状精度、表面粗糙度及修整效率等指标,在成形修整方面,GC 杯形砂轮修整技术是比较理想的修整技术。而大多文献是对杯形砂轮的修整机理、修整性能的研究,而对于圆弧砂轮的修整误差分析以及其对非球面加工的影响则研究得较少。为此,本文基于杯形砂轮的修整方式,对影响圆弧砂轮修整的各种误差因素进行了分析,针对主要的影响因素进行了实验。

## 1 GC 杯形砂轮修整

GC 杯形砂轮修整过程是从杯形砂轮上脱落下来的磨粒对金刚石磨粒和结合剂的冲击以及研磨作用产生修整效果,既可以修形,也同时可以修锐,已有研究表明,对于各修整方式所能达到的磨粒状态、形状精度、表面粗糙度及修整效率等指标,在成形修整方面,杯形砂轮修整技术是比较理想的工作方式。利用杯形修整技术,能得到直线度非常高的砂轮截面,同时进行修锐。如果利用这一特性,就能修整出任意凸形截面,易于得到较高的砂轮形状精度。对于圆弧砂轮修整,被修整圆弧金刚石砂轮只进行旋转运动;杯形砂轮修整器提供摆动和修整进给运动,还进行杯形砂轮自身的旋转运动,往复运动同样由机床工作台提供。杯形砂轮修整方式如图 1 所示。

## 2 修整误差

在使用杯形砂轮修整圆弧砂轮的过程中,修整误差将影响到圆弧砂轮的表面质量及圆弧半径,从而在加工非球面过程中将这些误差复写到非球面工件表面,因此有必要对修整误差进行分析。修整误

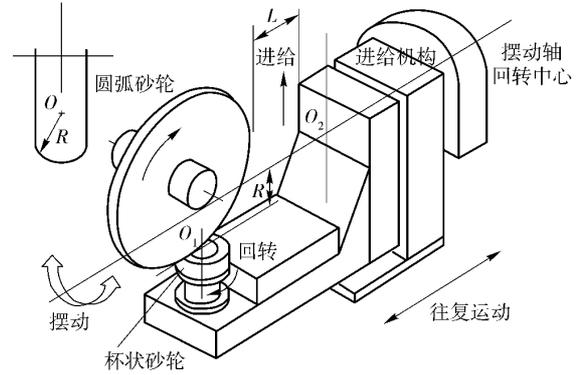


图 1 杯形砂轮修整方式

Fig. 1 Arc wheel truing using GC cup truer

差一般可分为几何误差和原理误差。

### 2.1 几何误差

#### 2.1.1 杯形砂轮廓形误差

用杯形砂轮修整圆弧砂轮时,若进给量过大或摆动速度过快,容易引起杯形砂轮振动,会在杯形砂轮表面留下周期性振纹。振纹误差为正弦函数

$$\delta(x) = A \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda_c}\right), \quad (1)$$

式中:  $A$  为误差幅值;  $\lambda_c$  为误差波长。

设杯形砂轮角速度为  $\omega_c$ , 中心半径为  $r_c$ , 则可以将振纹误差函数变换为

$$\delta(t) = A \sin\left(\frac{2\pi\omega_c r_c t}{\lambda_c}\right) = A \sin\left(\frac{\pi^2(D_1 + D_2)n_c t}{60\lambda_c}\right), \quad (2)$$

式中:  $D_1$ 、 $D_2$  分别为杯形砂轮的内外直径;  $n_c$  为杯形砂轮的转速;  $\lambda_c$  为杯形砂轮廓形误差波长。

由于修整砂轮时,修整器沿水平方向移动,修整与未修整时间间隔设为  $\Delta t$ 。经过时间  $\Delta t$  后,由于杯形砂轮廓形直接复写在砂轮表面,故有:

$$\frac{\pi^2 n_1 R}{15\lambda_a} = \frac{\pi^2(D_1 + D_2)n_c}{60\lambda_c}, \quad (3)$$

式中:  $n_1$  为修整器摆动转速;  $R$  为修整半径;  $\lambda_a$  为圆弧砂轮的廓形误差波长。

可得砂轮轮廓误差波长

$$\lambda_a = \frac{4Rn_1}{(D_1 + D_2)n_c} \lambda_c. \quad (4)$$

所以由杯形砂轮廓形误差引起的圆弧砂轮廓形误差为

$$\delta'(x) = A \sin\left(\frac{\pi(D_1 + D_2)n_c}{2Rn_1\lambda_c} x\right). \quad (5)$$

#### 2.2.2 不重合误差

不重合误差包括回转中心摆动轴与杯形砂轮摆

动轴不重合和由于对刀引起砂轮圆弧中心轴与杯形砂轮摆动轴不重合。回转中心摆动轴与杯形砂轮摆动轴不重合误差是由于修整器零件精度不够或装配引起的,即出现结构偏心。如图 2 所示,杯形砂轮摆动轴与回转中心摆动轴存在偏心距  $a$ 。若要修整的圆弧半径为  $R$ ,则实际修整的圆弧半径为  $R' = \sqrt{R^2 + a^2}$ 。

由于存在偏心距,修整后的砂轮圆弧中心并不在砂轮宽度中心,偏心距为  $a$ 。

对刀引起砂轮圆弧中心轴与杯形砂轮摆动轴不重合误差是由于对刀时使得砂轮圆弧中心与杯形砂轮摆动轴存在偏心距,即出现对刀偏心。如果回转中心摆动轴与杯形砂轮摆动轴重合,则修整后的砂轮圆弧中心不在砂轮宽度中心,偏心距为  $a'$ ,修整半径不变,仍为  $R$ 。如图 2 所示。

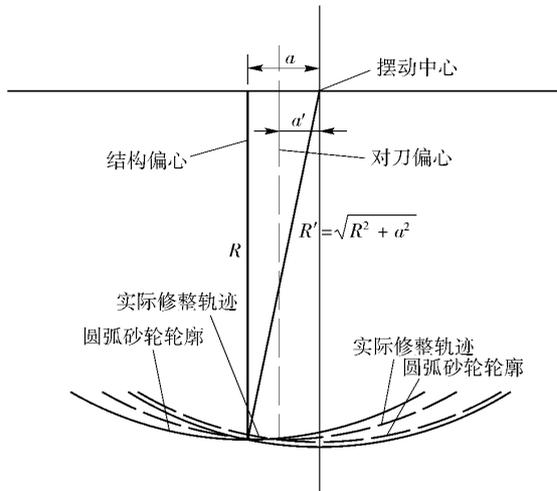


图 2 不重合误差示意图

Fig. 2 Sketch of misalignment error

### 2.2.3 定位倾斜误差

这种误差是由于修整器定位时产生的。如图 3 所示,杯形砂轮圆弧中心与摆动中心存在夹角  $\theta$ ,修整时,杯形砂轮的修整轨迹相对于原来轨迹也偏转了  $\theta$  角。将原坐标系  $A$  原点设在回转中心处,坐标

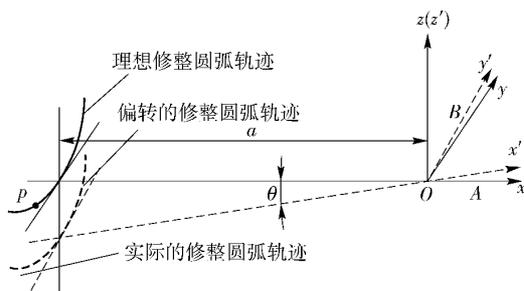


图 3 定位倾斜误差示意图

Fig. 3 Sketch of positioning tilt error

系  $B$  是实际修整时的坐标系。修整中心与回转中心距离为  $a$ ,坐标系  $B$  与坐标系  $A$  存在夹角  $\theta$ ,且绕着  $Z$  轴旋转,故它们之间的旋转矩阵为

$$T(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

同一点  $p$  在两个坐标系  $A$  和  $B$  中描述

$${}^A p = T(z, \theta) {}^B p. \quad (7)$$

在坐标系  $B$  中的修整轨迹方程可表示为

$$\begin{cases} z_B^2 + y_B^2 = R^2, \\ x_B = -a. \end{cases} \quad (8)$$

通过坐标变换,可以得到在坐标系  $A$  的修整轨迹方程:

$$\begin{cases} z_A^2 + (\cos\theta y_A - \sin\theta x_A)^2 = R^2, \\ \cos\theta x_A + \sin\theta y_A = -a. \end{cases} \quad (9)$$

由于测量半径轨迹是沿着砂轮周向方向,故要将偏转的修整轨迹投影到砂轮周向方向的平面上。

$$z_A^2 + \frac{(\sin\theta a + y_A)^2}{\cos^2\theta} = R^2. \quad (10)$$

由 (10) 式可以看出,实际修整轨迹为椭圆,且存在偏心,偏心距为  $a\sin\theta$ 。曲线上各点到椭圆中心距离为

$$R' = \sqrt{R^2 - \tan^2\theta y^2}. \quad (11)$$

故这种情况下修整出来的砂轮存在偏心,且根据公式,只有在中心处圆弧半径为  $R$ ,其他地方的圆弧半径都小于  $R$ 。

## 2.2 原理误差

由于圆弧砂轮圆周速度不同使得修整中的杯形修整砂轮对金刚石砂轮的切削量不同,存在修整误差。图 4 为圆弧砂轮修整点速度变化情况。从图中几何关系可以得到砂轮修整点圆周速度变化量为

$$\Delta v = 2\pi n \left( \sqrt{R^2 - x_0^2} - \sqrt{R^2 - x^2} \right). \quad (12)$$

圆弧砂轮圆周速度变化引起修整误差可表达为

$$\delta = k \Delta t \Delta v, \quad (13)$$

式中:  $x_0$  为 1/2 砂轮宽度;  $x$  为修形点到砂轮中心的距离;  $k$  为砂轮修形系数;  $n$  为砂轮转速。

## 3 修整误差分析

针对砂轮廓形误差,如果正确的设置好修整参数,如进给量和修整摆动速度等参数,杯形砂轮的振纹误差是很小的。根据修整参数,复写到砂轮上的误差波长相当小,对加工影响并不大。

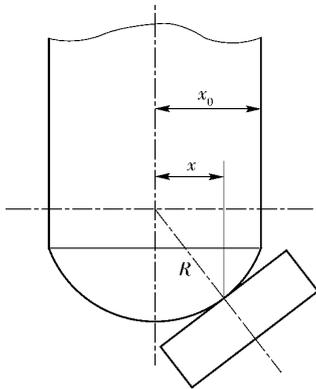


图 4 砂轮修形点速度变化

Fig. 4 Effect of arc wheel speed on cup truing

根据上述分析,对于砂轮圆弧半径而言,修整速度不同引起的误差是不可避免的,这是由修整原理引起的,不过其对圆弧半径的影响是很小的,且可采用补偿的方法进行修正。如果仅仅是偏心问题,只要偏心的区域不在加工范围内,那么实际上对加工并无影响,但如果是半径偏差问题,由于采用最小二乘圆方法拟合半径,故必然存在误差,特别是定位倾斜误差,实际修整的轨迹是椭圆,其误差值将更大。另外根据(5)式,复写在圆弧砂轮上的误差波长与R的大小有关,若R的数值一直变化,将引起误差波长的变化,从而导致杯形砂轮与圆弧砂轮的振动更加明显,进而影响到圆弧砂轮的表面质量。

在采用光栅式平行磨削的加工方式下,圆弧半径误差对非球面面形精度影响甚大。表1列出了各种修整误差的对比。从表1可以看出,杯形砂轮轮廓误差和原理误差对圆弧半径几乎没影响,而不重合误差与定位倾斜误差对圆弧半径有影响,相比于不重合误差,定位倾斜误差使得修整后的轨迹并非圆,通过最小二乘拟合后使得圆弧半径误差变大。故从圆弧半径误差方面考虑,定位倾斜误差是修整圆弧砂轮的最主要影响因素。

表 1 各种修整误差对比

Tab. 1 Comparison of different truing errors

误差类型	偏心	圆弧轨迹	影响砂轮表面质量
杯形砂轮廓形误差			有
不重合误差	结构偏心	是	是
	对刀偏心	是	是
定位倾斜误差	是	否	有
原理误差		否	

根据以上的分析结果,安装定位误差引起的修整轨迹为椭圆,故采用最小二乘圆方法拟合后,中间的实际圆弧半径将大于拟合半径,而两边圆弧半径将小于拟合半径,故半径误差分布将主要在中间和两边,最终将导致面形误差显现出中间低,两边高的形状,如图5所示。由数学关系可知,对于回转元件的加工方式,即沿母线加工方式,则由半径误差 $\Delta r$ 引起的C点误差函数<sup>[11]</sup>为

$$f(x) = \sqrt{(r + \Delta r)^2 - x^2} - \sqrt{r^2 - x^2} \quad (14)$$

式中:r为非球面基础半径; $\Delta r$ 为半径误差。

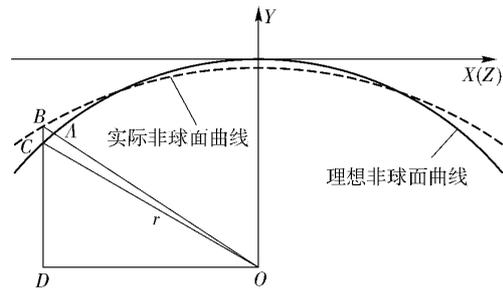


图 5  $\Delta r$  误差原理图

Fig. 5 Error of wheel arc radius

对于矩形元件的光栅式加工方式,则由 $\Delta r$ 引起的C点误差函数为

$$f(x, z) = \sqrt{(r + \Delta r)^2 - \rho(x, z)^2} - \sqrt{r^2 - \rho(x, z)^2} \quad (15)$$

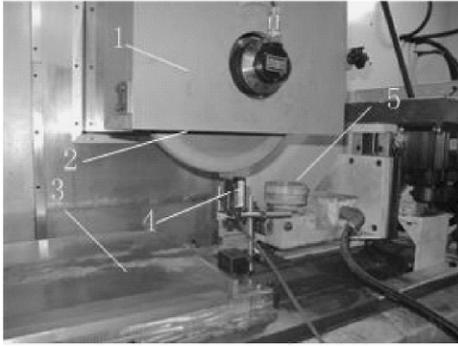
式中 $\rho(x, z)$ 为加工点到非球面中心距离。

#### 4 修整与加工实验

根据以上的分析结果,定位倾斜误差极大的影响非球面加工面形精度,在磨削阶段,面形精度主要指面形误差峰谷(PV)值。为了验证分析结果,进行了修整与加工实验。

实验分为两部分:砂轮修整和轴对称非球面加工。砂轮修整采用GC杯形砂轮修整方式,修整后利用激光非接触传感器采集圆弧半径数据,再利用最小二乘圆方法拟合圆弧半径。轴对称非球面加工在数控高精度卧轴矩台平面磨床上加工,采用光栅式、平行磨削方式加工。实验设备如图6所示。

经过测量,摆动中心与圆弧中心夹角为 $0.0573^\circ$ 。如图7所示,被修整砂轮型号为D15A,实线为定位倾斜情况下的经过最小二乘圆方法拟合的残差值,虚线为定位未倾斜的残差值。从图7中可以看出,定位倾斜情况下残差值明显较大,且在中间和两边的残差值较大,与上述分析结果一致。



1 为 2MK1760 数控高精度卧轴矩台平面磨床; 2 为金刚石砂轮; 3 为 BK7 玻璃工件; 4 为 KEYENCE LK-G10 非接触传感器; 5 为杯形砂轮修整器

图 6 加工与检测设备

Fig. 6 Grinding and measurement device

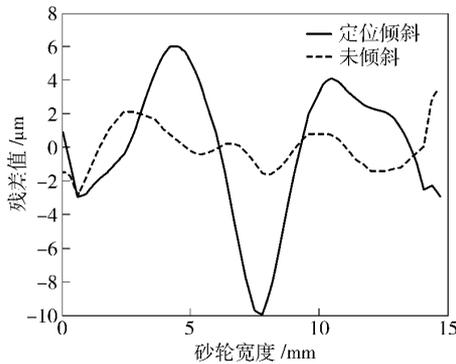


图 7 拟合半径残差值

Fig. 7 Residual error of fitting radius

加工实验先利用定位倾斜情况下修整的砂轮加工轴对称非球面,非球面方程见(16)式,非球面参数如表 2 所示。分别测量两种砂轮圆弧半径,其中 D15A 是细砂轮。测得 D151 和 D15A 砂轮圆弧半径分别为 87.6874 mm 和 32.6082 mm。

$$y(x, z) = -\frac{C(x^2 + z^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)C^2(x^2 + z^2)}} - \sum_{i=1}^n a_i(x^2 + z^2)^i, \quad (16)$$

式中:  $C = 1/r$ ;  $a_i, k$  为非球面系数。

表 2 非球面表面参数

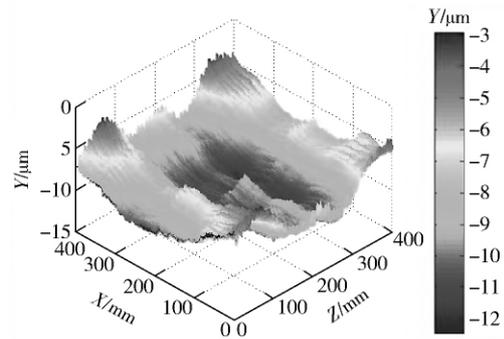
Tab. 2 Aspherical surface parameters

参数	$r/\text{mm}$	$a_1$	$a_2 \sim a_6$	$k$
数值	4 200	$4.3433 \times 10^{-10}$	0	-2.180 72

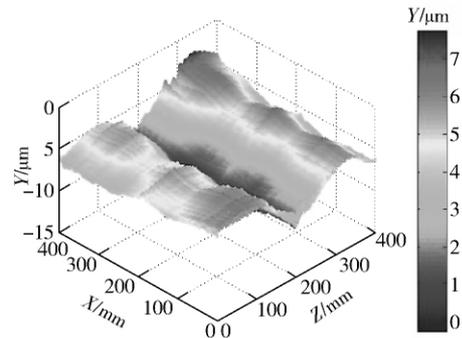
加工完后为得到工件的面形误差,采用的方法是:测量数据的获得是用非接触式传感器在工件  $X$  轴和  $Z$  轴方向各采集若干条数据,测量轨迹为矩形

非球面的理想轨迹,得到的数值即为面形误差。数据处理方法为将这些数据去除奇异项,平滑处理,插值拟合和去倾斜处理,最终得到整个工件的面形误差。

图 8 为 D151 和 D15A 砂轮加工的误差面形拟合结果图,根据两次加工结果,可以看出两次加工误差面形一致,中间低,两边高。基本与以上的理论分析结果一致。



(a) D151 砂轮, PV=9.5  $\mu\text{m}$ ; RMS=1.8  $\mu\text{m}$   
(a) D151 wheel, PV=9.5  $\mu\text{m}$ ; RMS=1.8  $\mu\text{m}$



(b) D15A 砂轮, PV=8.02  $\mu\text{m}$ ; RMS=1.51  $\mu\text{m}$   
(b) D15A wheel, PV=8.02  $\mu\text{m}$ ; RMS=1.51  $\mu\text{m}$

图 8 非球面加工误差面形

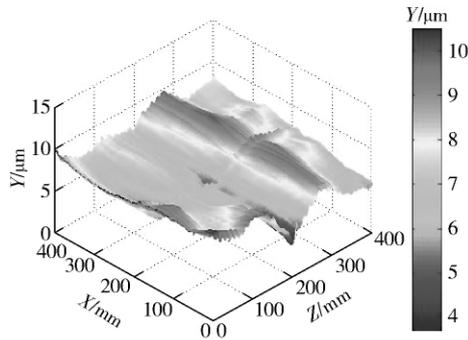
Fig. 8 Surface error

调正修整器位置, D15A 和 D151 修整砂轮,然后再次进行加工,得到如图 9 所示的加工结果,可以看出相对于之前的加工, PV 值减小了,且不再呈现出前两次的面形分布。

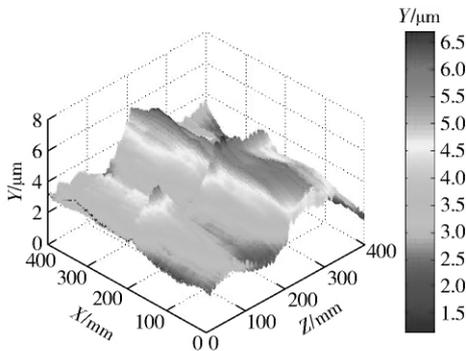
## 5 结论

1) 分析了杯形砂轮修整圆弧砂轮的误差,包括杯形砂轮廓形误差、不重合误差、定位倾斜误差和原理误差。分别分析了各种误差对修整砂轮的影响程度,认为定位倾斜误差是最主要的误差因素。

2) 针对主要误差因素,对定位倾斜误差的情况进行了修整和加工实验。修整实验表明拟合半径残差分布与理论一致,且相对于未倾斜的情况残差值比较大。加工实验进一步验证了定位倾斜误差修整



(a) D151 砂轮, PV=6.75  $\mu\text{m}$ ; RMS=1.05  $\mu\text{m}$   
 (a) D151 wheel, PV=6.75  $\mu\text{m}$ ; RMS=1.05  $\mu\text{m}$



(b) D15A 砂轮, PV=5.53  $\mu\text{m}$ ; RMS=1.04  $\mu\text{m}$   
 (b) D15A wheel, PV=5.53  $\mu\text{m}$ ; RMS=1.04  $\mu\text{m}$

图 9 再次加工的非球面面形

Fig. 9 Surface error without positioning tilt error

的圆弧砂轮对加工面形误差的影响。修正前加工得到的面形误差分布与理论分析一致,而修正后再次加工得到的面形误差分布与修正前的面形误差分布不再一致,且 PV 值分别下降了 28.9% 和 31%。定位倾斜误差确实对加工面形误差有重大影响。

### 参考文献(References)

- [1] Cheung C F, Lee W B. A theoretical and experimental investigation of surface roughness formation in ultra-precision diamond turning [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2000, 40: 979 - 1002.
- [2] Chen M J, Li D, Dong S. Research on a large depth-to-diameter ratio ultra-precision aspheric grinding system [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 129: 91 - 95.
- [3] Zhang C, Shin Y C. A novel laser-assisted truing and dressing technique for vitrified CBN wheels [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2002, 42: 825 - 835.
- [4] Wang Y, Zhou X J, Hu D J. An experimental investigation of dry-electrical discharge assisted truing and dressing of metal bonded diamond wheel [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, 46: 333 - 343.
- [5] Xie J, Tamaki J. Computer simulation of sub-micron-scale precision truing of a metal-bonded diamond grinding wheel [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008, 48: 1111 - 1119.
- [6] 陈明君,董申,张飞虎,等. 超精密非球曲面磨削系统中砂轮修整技术的研究 [J]. *兵工学报* 2002, 23(2): 238 - 241.  
CHEN Ming-jun, DONG Shen, ZHANG Fei-hu, et al. Wheel truing technique in ultra-precision aspheric grinding system [J]. *Acta Armamentarii*, 2002, 23(2): 238 - 241. (in Chinese)
- [7] Syoji K, Zhou L, Matsui S. Studies on truing and dressing of diamond wheels: measurement of protrusion height of abrasive grains by using a stereo pair and the influence of protrusion height on grinding performance [J]. *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering*, 1990, 24(2): 124 - 129.
- [8] Huang H. Effects of truing/dressing intensity on truing/dressing efficiency and grinding performance of vitrified diamond wheels [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 117: 9 - 14.
- [9] 王振忠,郭隐彪,黄浩,等. 先进光学磨削中杯形修整技术开发及应用 [J]. *金刚石与磨料磨具工程* 2009, (1): 18 - 22  
WANG Zhen-zhong, GUO Yin-biao, HUANG Hao, et al. Development and application of cup truer in advanced optical grinding [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2009, (1): 18 - 22. (in Chinese)
- [10] Hwang Y, Kuriyagawa T, Lee S K. Wheel curve generation error of aspheric micro-grinding in parallel grinding method [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, 46: 1929 - 1933.
- [11] 黄浩,郭隐彪,王振忠,等. 轴对称非球面加工误差分离与补偿技术 [J]. *机械工程学报* 2005, 41(12): 177 - 180.  
HUANG Hao, GUO Yin-biao, WANG Zhen-zhong, et al. Error separation and compensation technology of axisymmetric aspheric machining [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(12): 177 - 180. (in Chinese)