

非球面垂直磨削法的砂轮误差分析与实验研究

陈冰^{1,2}, 胡红禄³, 钟一星³, 李时春¹, 邓朝晖¹, 赵清亮⁴

(1. 湖南科技大学 智能制造研究院, 湘潭, 411201;

2. 湖南科技大学 难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室, 湘潭 411201;

3. 湖南科技大学 机电工程学院, 湘潭 411201;

4. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对垂直磨削法中砂轮误差对超精密磨削非球面加工质量的影响, 通过对多种砂轮误差的逐一理论分析, 阐述了各种砂轮误差对非球面磨削加工质量的影响状况, 并对部分砂轮误差进行校正和补偿, 以提高磨削加工质量。最后, 通过非球面磨削加工实验验证了砂轮误差分析及其补偿的正确性。该研究为非球面超精密磨削加工中砂轮误差的分析和补偿提供经验和思路。

关键词: 砂轮误差; 超精密磨削; 非球面磨削加工质量; 校正和补偿

中图分类号: TG161

Analysis and experimental research of wheel errors in cross grinding aspherical surfaces

Chen Bing^{1,2}, Hu Honglu³, Zhong Yixing³, Li Shichun^{1,2}, Deng Zhaohui^{1,2}, Zhao Qingliang⁴

(1. Hunan University of Science and Technology, Intelligent Manufacturing Institute of HNUST, Xiangtan 411201;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of High Efficiency and Precision Machining of Difficult-to-Cut Material, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201;

3. Hunan University of Science and Technology, College of Mechanical and Electrical Engineering, Xiangtan, 411201;

4. Harbin Institute of Technology, School of Mechatronics Engineering, Harbin, 150001)

Abstract: To research the influence of wheel errors on ultra-precision grinding aspherical surface quality, every kind wheel error was analyzed in theory, the influence of wheel errors on ultra-precision grinding aspherical surface quality was expounded, and some kind wheel errors were corrected and compensated to improve the surface quality. Finally, grinding experiment was carried out to verify the correctness of correction and compensation. The research provide references and ideas for correcting and compensating wheel error in ultra-precision grinding aspherical surfaces.

Key words: Wheel error; Ultra-precision grinding; aspherical surface quality; Correction and compensation

0 引言

目前, 针对非球面的超精密磨削方法有很多种, 需要综合分析各自的优缺点, 并结合机床设备自身的特点选取合适的磨削方法。目前, 比较常用的有交叉(垂直)磨削法、平行磨削法、倾斜磨削法、展成磨削法、球头砂轮磨削法和法向磨削法^[1]。

基金项目: 湖南科技大学难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室开放基金 E21755

作者简介: 陈冰, 1986 年生人, 男, 讲师, 超精密磨削加工方向. E-mail: chenbing@hnust.edu.cn

以上的几种非球面磨削加工方法,各有优劣。其中,垂直磨削法虽然在加工凹面时对砂轮直径限制比较大,砂轮的直径须小于工件非球面中磨削点的最小曲率半径,且不适合大坡度非球面的磨削加工。但是,垂直磨削法安装使用方便,刀具轨迹比较简单,只需要两轴联动即可完成非球面的磨削加工。因此,垂直磨削法广泛应用于非球面磨削加工中。然而,非球面磨削加工过程中,受机构、控制、环境和人为等误差因素的影响,磨削加工后工件表面质量的稳定性较差,这些误差的存在将直接影响工件的加工精度。因此,研究各种误差对磨削加工结果的影响是至关重要的。

新加坡国立大学M. Sazedur Rahman等^[2]研究了交叉轴磨削球面光学玻璃的在位测量面形精度及其补偿加工技术,误差补偿技术大大提高了球面的面形精度,但补偿后的面形误差仍然比较大。美国Moore nanotech 公司的Yazid E. Tohme等^[3]在磨削加工系统中搭载在位检测设备,实现砂轮磨损误差及机床重复度误差的补偿加工技术。然而,此磨削加工系统中的砂轮尺寸较小,只适合微小尺寸非球面的超精密磨削加工。湖南大学尹韶辉教授等^[4-6]分析了磨削加工过程中砂轮的X及Y向对刀误差、磨损误差等对面形精度的影响,并提出了砂轮安装误差的修正方案以及磨损误差的在线检测及其误差补偿技术。华南理工大学谢晋教授等^[7-10]采用数控包络磨削法加工非球面,指出圆弧形金刚石砂轮截面圆弧轮廓度直接决定着磨削后工件的面形精度,并提出了砂轮截面圆弧轮廓度的误差补偿技术方案。厦门大学郭隐彪等^[11-13]采用平行磨削法磨削加工大型离轴非球面,对磨削加工过程中的砂轮圆弧截面轮廓度误差、机床系统误差进行分离分析,并提出误差补偿技术方案。

国内外学者对非球面磨削加工误差进行了分析和补偿研究,然而,针对垂直磨削法非球面砂轮误差的系统性分析和补偿的研究较少。本文针对垂直磨削法中砂轮误差,通过理论分析阐述了各种砂轮误差对磨削加工质量的影响状况,通过磨削加工实验验证了砂轮误差分析及其补偿的正确性。

1 垂直磨削法

交叉磨削法(Cross grinding),如图1所示,又称垂直磨削法,是一种常规、简单易行的磨削方法,适用于大口径非球面的超精密磨削加工。安装砂轮的竖直工具主轴与工件主轴呈 90° 夹角,磨削时工件主轴在与砂轮主轴轴向垂直的平面内做插补运动,砂轮沿非球面加工轨迹由工件外侧至中心运动实现磨削加工^[1]。

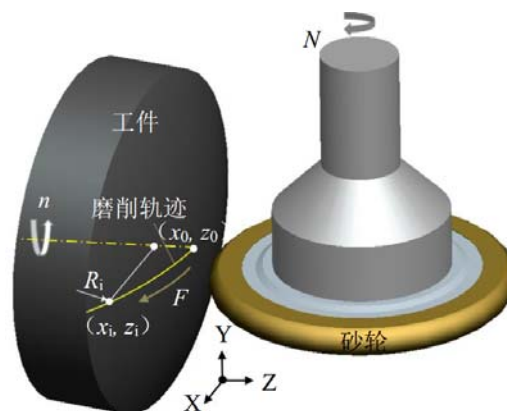


图1 垂直磨削法
Fig.1 Cross grinding

2 砂轮的误差分析与补偿

砂轮的尺寸误差、安装误差、形状误差等会严重影响非球面的磨削加工质量，尤其会降低非球面的面形精度。因此砂轮误差的分析与补偿是非球面超精密磨削成型的关键。

2.1 砂轮的圆度和偏心误差

砂轮的圆度和偏心误差是砂轮的制造的安装过程中必然存在的误差，如图2所示，是由于砂轮圆周上存在的突出点和砂轮轴心线与主轴轴心线不一致引起的。将导致磨削加工过程中，砂轮上突出点和突出圆弧最先参与磨削加工。由日本茨城大学(Ibaraki University)L. Zhou等^[14]的研究结果可知，这些高度不一致的突出点和突出圆弧在磨削单晶硅时会增大工件表面粗糙度。由于砂轮与工件的接触区域在垂直磨削法中为砂轮截面圆弧顶点处的一小段圆弧，因此圆度和偏心误差为砂轮上一固定磨削圆的误差。砂轮的圆度和偏心误差难以补偿，只能通过砂轮精密修整^[15]使磨粒突出高度均匀、一致来降低，偏心误差可以通过精密修整消除。

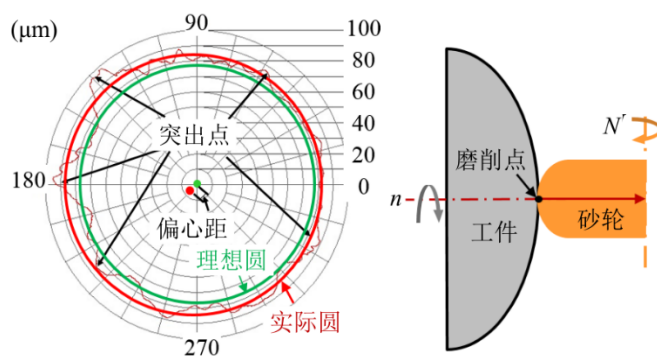


图2 圆度和偏心误差分析

Fig.2 Analysis of roundness and eccentricity errors

2.2 砂轮的截面圆弧形状误差

砂轮的截面圆弧形状误差是砂轮制造过程中截面圆弧的实际轮廓曲线偏离理想轮廓曲线而产生的，如图3所示。由于在垂直磨削法中，只有砂轮截面圆弧的顶点区域参与磨削，因此，砂轮的截面圆弧形状误差不会对非球面磨削表面质量产生影响。

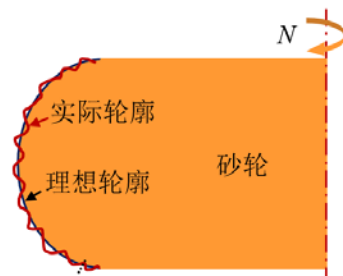


图3 砂轮截面圆弧轮廓误差

Fig.3 Form error of wheel profile

2.3 砂轮的磨损误差

砂轮的磨损误差是由于磨削过程中砂轮的损耗引起的，分为单次磨损误差和多次磨损误差，两种误差均会增大非球面的面形误差。在垂直磨削法的单次磨削过程中，随着磨削轨迹曲线插补运动的进行，工件材料从边缘到中心依次去除，砂轮也发生相应的磨损，砂轮直径

从工件边缘的磨削伊始到工件中心的磨削结束时逐渐减小,导致加工后非球面的面形误差从边缘到中心依次增大,如图4所示。在砂轮磨损量大的垂直磨削法中,砂轮的磨损误差可通过建立砂轮直径与磨削比的关系,重新生成误差补偿加工曲线,实现砂轮磨损误差补偿。在垂直磨削法的多次磨削过程中,砂轮的磨损会导致砂轮径向尺寸逐渐减小,转变为尺寸误差对非球面磨削质量的影响。

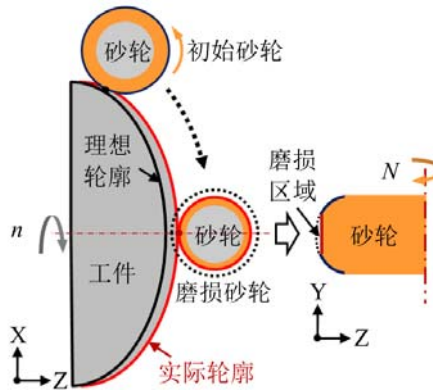


图4 砂轮的磨损误差

Fig.4 Effect of wear mode of wheel on form accuracy

2.4 砂轮的对刀误差

砂轮的对刀误差是在对刀过程中产生的不可避免的误差,包括砂轮水平方向X向对刀误差和垂直方向Y向对刀误差,砂轮X向和Y向对刀误差指的是工件主轴中心线与参与磨削砂轮圆弧中心线的在两个方向上偏离距离,如图5所示。

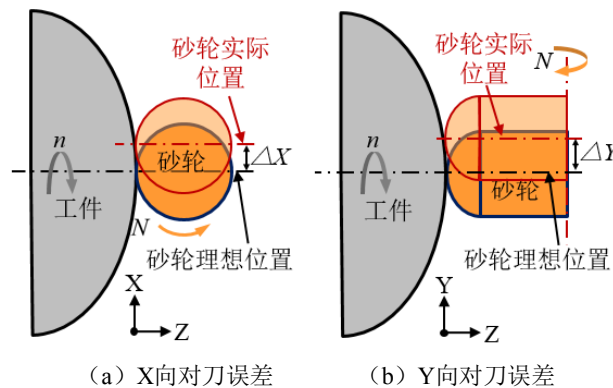


图5 砂轮的对刀误差

Fig.5 Tool setting error of wheel

误差轮廓曲线是实际非球面曲线与理想非球面曲线相减所得到的误差曲线。在垂直磨削法中的砂轮X向对刀误差,依据砂轮与工件的运动轨迹终点位置可分为不及中心和过中心两种情况,不及中心是指磨削加工路径的终点未到达砂轮圆弧轴心线,过中心指磨削加工路径的终点超过砂轮圆弧中心线;以垂直磨削凸球面为例,当砂轮X向对刀误差不及中心时,误差曲线存在由工件外缘至中心先减小后增大的趋势,如图6 (a)中误差线所示;当砂轮X向对刀误差过中心时,误差曲线由工件外缘至中心单向减小,如图6 (b)中误差线所示。而对于凹面工件所对应的情况恰好相反。

当运动轨迹终点不及中心时,砂轮的X向对刀误差对加工后工件面形精度的影响分为两个阶段,第一阶段由实际运动轨迹的影响,此时 $x_f > \Delta x$, , 第二阶段是由砂轮磨削圆圆弧影响,此时 $x_f < \Delta x$ 。其面形精度的影响规律为:

$$\begin{cases} \Delta e_i = f(x_i - \Delta x) - f(x_i) & x_i > \Delta x \\ \Delta e_i = \sqrt{R_s^2 - x_i^2} - f(x_i) & x_i < \Delta x \end{cases} \quad (1)$$

125 式中 $f(x)$ 为非球面方程; R_s 为砂轮磨削圆半径, mm。

当运动轨迹终点过中心时, 由6 (b) 可知, 砂轮的X向对刀误差对加工后工件面形精度有单一的影响趋势。其面形精度的影响规律为:

$$\Delta e_i = f(x_i + \Delta x) - f(x_i) \quad (2)$$

130 依据以上分析可知, 砂轮的X向对刀误差会严重降低磨削后工件的面形精度, 必须对其进行误差补偿以提高工件的面形精度。可通过垂直磨削法加工试刀件后, 进行测量分析的方法来完成X向对刀误差的补偿。其具体步骤如下:

(1) 采用垂直磨削法对小口径的凸球面工件进行磨削加工;

135 (2) 利用如图7所示在位测量设备进行在位测量, 提取工件表面形貌上的数据点 (x'_i, z'_i) , 并校正测量数据的倾斜度, 依据如图6中误差曲线随X坐标的变化趋势来判断是

(3) 标记工件形貌数据点的对称中心坐标为 (x'_a, z'_a) , 取以试刀件检测边缘为起点到中心一段圆弧的数据点, 对这些数据点进行圆拟合计算出拟合圆的中心坐标 (x'_o, z'_o) , 则X向对刀误差为: $\Delta x = |x'_o - x'_a|$

140 (4) 依据不及中心或过中心以及磨削加工运动轨迹方向, 确定X向对刀位置坐标的基础上加或减 Δx 。

(5) 完成X向对刀误差补偿, 重新磨削加工。

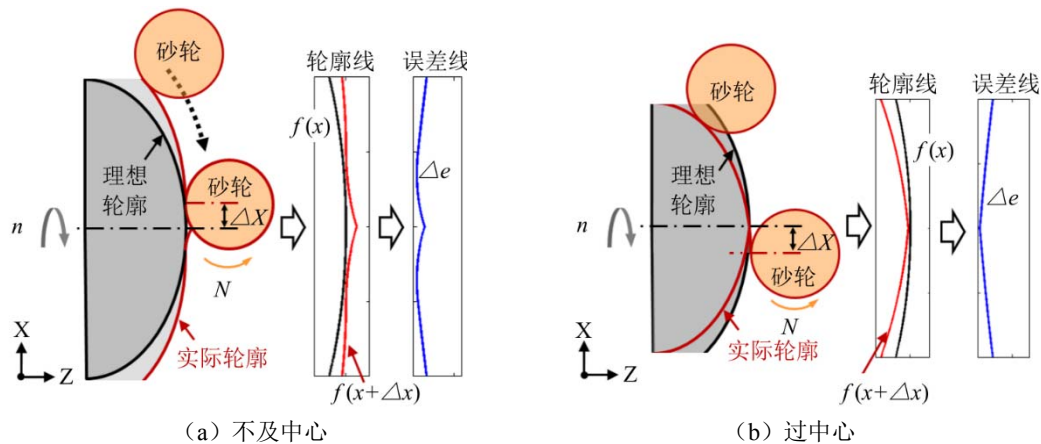


图 6 X 向对刀误差及对加工形状精度的影响

Fig.6 Effect of X direction tool setting on form accuracy

145

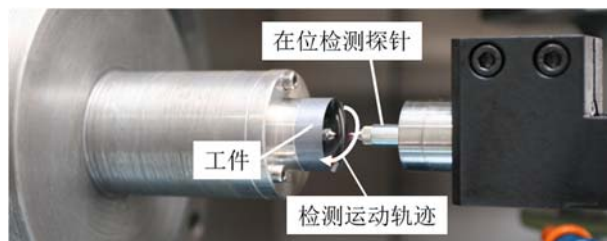


图 7 在位测量设备

Fig.7 On-machine measuring system

150 垂直磨削法中, 砂轮Y向对刀误差分为中心上和中心下两种情况, 砂轮的Y向对刀误差采用合理的修整方法修整后自动得到修正^[15]。

2.5 砂轮的尺寸误差

砂轮的尺寸误差是由于测量和砂轮长时磨损引起的,是指砂轮的测量尺寸小于或者大于实际尺寸,以凸球面为例,若砂轮的测量尺寸 R_s (垂直磨削法中为砂轮的最大半径) 大于实际尺寸 R_s' , 由于非球面上各点的圆心与砂轮磨削圆圆心中心距恒定, 即 $a=R_s+R_w$, 导致加工后的非球面上各点的实际圆弧半径 R_w' 大于理想圆弧半径 R_w , 如图8所示, 反之小于理想圆弧半径。需要特别注意的是, 对于球面, 砂轮尺寸误差会改变磨削后工件的球面半径; 对于非球面, 由于砂轮尺寸误差的存在, 磨削后工件表面上各点的曲率半径均发生改变, 导致实际磨削轮廓偏离磨削轮廓, 严重降低工件的面形精度。

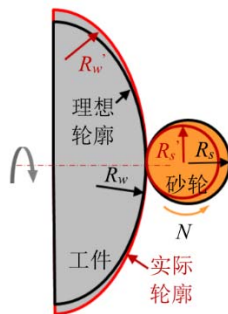


图8 砂轮尺寸误差对工件形状精度的影响

Fig.8 Effect of radius error of wheel on form accuracy

砂轮尺寸误差的补偿方法是在Y向安装误差和X向安装误差补偿后, 再次磨削加工小凸球面试刀件, 采集加工后试刀件上的数据点, 对其进行圆拟合, 计算出试刀件球面半径 R_w' , 进而补偿砂轮圆弧尺寸:

$$\Delta R_s = |R_w' - R_w| \quad (3)$$

依据 $a=R_s+R_w$, 若 $R_w'>R_w$, 则砂轮圆弧半径加上 ΔR_s , 反之, 减去 ΔR_s 。

2.6 其他误差

除上述各类误差会影响工件的加工精度外, 可能影响工件的加工精度还有机床运动误差和砂轮轴的跳动误差。机床的运动误差会影响其加工形状精度, 砂轮轴的跳动误差会扩展砂轮圆度误差对表面粗糙度带来的影响。因此, 生产中应该选用高精度的数控机床以提高磨削后工件的表面质量。

3 磨削加工实验

采用凸非球面磨削加工实验的方法来验证垂直磨削法误差补偿磨削加工后获得表面质量的状况, 实验平台如图9所示, 磨削用工艺参数如表1所示。

磨削前采用文献[15]所述的在位精密修整方法对圆弧形金刚石砂轮进行精密修整, 并依据上述的补偿方法分别完成砂轮对刀误差和尺寸误差的补偿, 磨削后利用如图7所示的机床自带接触式在位检测设备测量工件的面形精度, 采用Taylor hobson PGI 1240探针轮廓仪检测工件的表面粗糙度, 并用Quanta 200型扫描电子显微镜观察磨削后表面的微观状态。磨削加工实验条件如下: Moore nanotech 350FG磨床: 三轴联动, 工件主轴和磨削主轴高精度气浮主轴, 最高转速10000rpm, 采用Sigma CB-2001RGB型动平衡仪调整后动平衡量可控制在2nm以内, 机床X、Y、Z三直线轴进给分辨率1nm, 定位精度1nm, 最大行程分别为X: 350mm, Y: 150mm, Z: 300mm。金刚石砂轮: 圣戈班 Winter, D7树脂基结合剂, 浓度号C100,

直径：75mm，厚度：6mm，修整后D7砂轮圆弧半径4mm，圆弧轮廓误差小于 $<4\mu\text{m}$ ，圆度误差 $<1.5\mu\text{m}$ ，修整方法见文献[15]。单晶硅：直径20mm，厚度10mm，凸非球面。冷却液：水基冷却液。在位面形精度检测设备：雷尼绍公司，接触式测量，分辨率1nm。

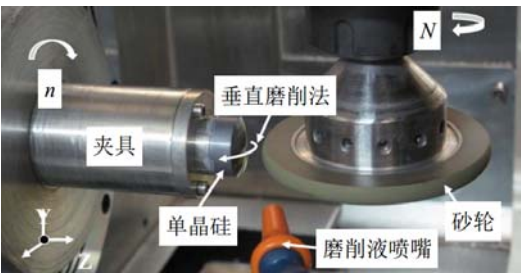


图 9 磨削加工实验设备平台
Fig.9 Cross grinding system

表 1 磨削加工工艺参数
Tab. 1 Grinding parameters

	磨削深度 (μm)	进给速度 (mm/min)	砂轮转速 (rpm)	工件转速 (rpm)	加工次数
粗磨	5	20	6000	173	2
半精磨	2	10	6000	173	1
精磨	2	4	6000	173	1
光磨	0	4	6000	173	1

4 磨削实验结果分析

采用凸非球面磨削加工实验的方法来验证垂直磨削法误差补偿磨削加工后获得表面质量的状况，实验平台如图9所示，磨削用工艺参数如表1所示。

图10为垂直磨削法磨削加工后非球面的扫描电镜形貌图。图11为磨削后非球面的表面粗糙度检测结果。从图10中可以看出，磨削后，塑性域去除占据主导地位，存在局部的破碎，可以清晰的看到磨削沟槽。由图11可知，非球面的表面粗糙度 R_a ： $0.0158\mu\text{m}$ 。这是由于修整后，砂轮的回转误差和偏心误差得到降低和修正，其磨粒突出高度均匀和一致，进而获得纳米级表面质量和塑性域主导的去除方式。而塑性域和脆性域共存的去除方式是由于成型砂轮磨削加工非球面时，圆弧刀痕叠加处和砂轮截面圆弧顶点处的材料磨削去除机理不同引起的。

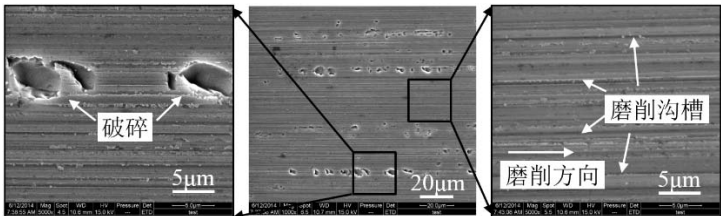


图10工件表面SEM图
Fig.10 SEM photos of ground aspherical surface

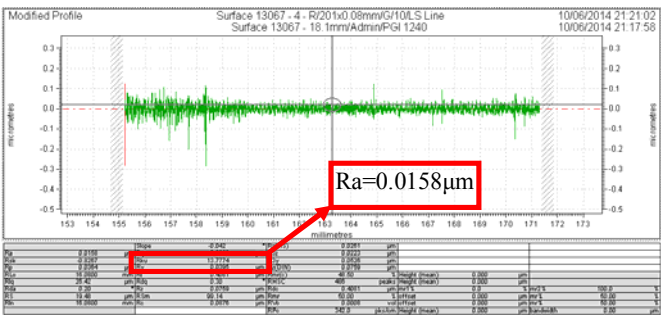


图11 表面粗糙度检测结果

Fig.11 Roughness of ground aspherical surface

图12为磨削加工后非球面的面形精度，垂直磨削法加工后非球面的面形精度PV为235nm，表明经过上述砂轮的尺寸误差和对刀误差的校正和补偿后，获得了较小的面形误差。

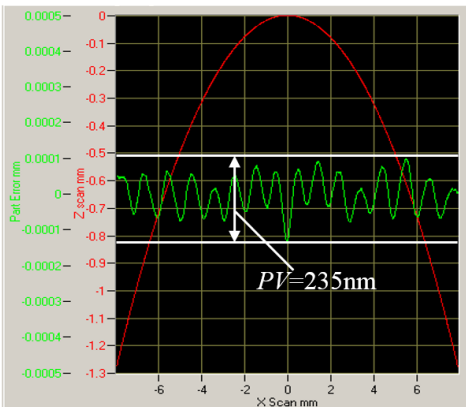


图12 磨削后单晶硅的面形精度

Fig.12 Form accuracy of ground aspherical surface

5 结论和展望

- (1) 通过砂轮误差的分析，表明砂轮的误差会增大磨削后非球面的表面粗糙度和面形误差，尤其会严重降低非球面的面形精度，进而可能会降低光学元件的光学性能。
- (2) 针对部分砂轮误差，提出了校正或者补偿的技术方案，并通过实验验证补偿后非球面可获得较小的面形误差。
- (3) 在砂轮磨损量大的单次非球面垂直磨削法中，基于磨削比的砂轮磨损误差补偿技术将在后续的研究中进行，进而进一步提高非球面的磨削加工质量。

[参考文献] (References)

[1] 李洪亮. 微小球面和非球面元件的纳米级磨削加工技术研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2011.

[2] Tohme Y E. Grinding aspheric and freeform micro-optical molds [C]/MOEMS-MEMS 2007 Micro and Nanofabrication.International Society for Optics and Photonics, 2007: 64620K-64620K-8.

[3] Rahman M S, Saleh T, Lim H S, et al. Development of an onmachine profile measurement system in ELID grinding for machining aspheric surface with software compensation[J].International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008,48(7): 887-895.

[4] Chen F, Yin S, Huang H, et al. Fabrication of small aspheric moulds using single point inclined axis grinding[J]. Precision Engineering, 2015, 39: 107-115.

[5] Chen F J, Yin S H, Huang H, et al. Profile error compensation in ultra-precision grinding of aspheric surfaces with on-machine measurement[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(5): 480-486.

[6] Xu Z, Yin S, Chen F, et al. Two-axis ultrasonic vibration transducer driven by single actuator and its application in precision polishing[J]. International Journal of Abrasive Technology, 2015,7(1): 1-13.

- 235 [7] Xie J, Li Q, Sun J X, et al. Study on ductile-mode mirror grinding of SiC ceramic freeform surface using an elliptical torusshaped diamond wheel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 222: 422-433.
- [8] Lin X H, Wang Z Z, Guo Y B, et al. Research on the error analysis and compensation for the precision grinding of large aspheric mirror surface[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(1-4): 233-239.
- 240 [9] Xie J, Zheng J H, Zhou R M, et al. Dispersed grinding wheel profiles for accurate freeform surfaces[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(6): 536-542.
- [10] Xie J, Zhou R M, Zhong Y G. 3D distribution of envelope trace heights related to ground surface smoothness in CNC grinding of free-form surface[J]. International Journal of Machining and Machinability of Materials, 2010, 8(3-4): 408-416.
- 245 [11] Lin X H, Wang Z Z, Guo Y B, et al. Research on the error analysis and compensation for the precision grinding of large aspheric mirror surface[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(1-4): 233-239.
- [12] Jiang C, Guo Y, Li H. Parallel grinding error for a noncoaxial nonaxisymmetric aspheric lens using a fixture with adjustable gradient[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(1-4): 537-545.
- 250 [13] 柯晓龙, 郭隐彪, 王振忠, 等. 圆弧金刚石砂轮精密修形与精度评价技术[J]. 厦门大学学报 (自然科学版), 2013, 6: 013.
- [14] Zhou L, Tian Y B, Huang H, et al. A study on the diamond grinding of ultra-thin silicon wafers[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2012, 226(1): 66-75.
- 255 [15] Chen B, Guo B, Zhao Q. On-machine precision form truing of arc shaped diamond wheels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 223: 65-74