

文章编号 1004-924X(2018)10-2516-11

球面上微透镜阵列超精密慢伺服 加工精度影响因素的研究

孙 豪, 起建立, 林泽钦, 王素娟*, 颜志涛

(广东工业大学 机电工程学院 广东省微纳加工技术与装备重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要:超精密慢伺服车削可加工出高精度的连续和非连续自由曲面,但是在微透镜阵列的加工过程中,不同位置的透镜加工精度也不同,个别子透镜的质量降低可能引起整个功能部件的失效。为了研究曲面上微透镜阵列超精密慢伺服加工精度的影响因素,本文采用实验的方法分析基面几何形状和子透镜位置对球面上微透镜阵列慢伺服车削加工精度的影响,通过在三种不同球径的基面上加工微透镜阵列,并使用 Bruker GT-X 白光干涉仪测量所加工的基面和微透镜阵列,分析了不同基面上不同位置的子镜表面粗糙度和形状精度的变化趋势。实验结果表明,同一基面上不同位置的子透镜,慢伺服车削加工表面微观形貌不同,表面粗糙度和形状精度也不同;基面的几何形状也会影响子镜的加工精度,当基面球径从 50 mm 增大至 150 mm 时,外圈子镜的表面粗糙度从 75.78 nm(Ra)变小为 69.08 nm(Ra)。在超精密慢伺服加工微透镜阵列过程中,必须考虑基面几何形状和子透镜位置两个因素对加工精度的影响,这将有助于提高微透镜阵列加工精度的一致性并保证微透镜阵列功能的有效性。

关键词:微透镜阵列;慢刀伺服;表面粗糙度;形状精度

中图分类号:TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182610.2516

Factors affecting the machining precision of a micro-lens array on a spherical surface in slow tool servo machining

SUN Hao, QI Jian-li, LIN Ze-qin, WANG Su-juan*, YAN Zhi-tao

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Micro-Nano Manufacturing technology and Equipment, School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

* Corresponding author, E-mail: grace.wangsj@gdut.edu.cn

Abstract: Ultra-precision slow tool servo (STS) machining can directly generate high-precision continuous and discontinuous freeform surfaces. However, in the fabrication of a micro-lens array (MLA) by STS, a single lens achieves different levels of quality. In addition, the low quality of a single lens may induce the failure of the entire functional component. To study the factors affecting the machining precision of an MLA on a spherical surface in STS, an experimental investigation was conducted. Specifically, the effects of the geometries of the base surface and position of a single lens on the machining precision of an MLA were examined. In the experiments, an MLA was machined by STS into three spherical surfaces having different radii, and Bruker GT-X was used to measure the base surface and micro

收稿日期:2018-01-09;**修订日期:**2018-03-16.

基金项目:国家自然科学基金联合基金资助项目(No. U1601202);广东省自然科学基金资助项目(No. 2015A030312008);广东省科技研发资助项目(No. 2015B090921007)

lenses. The effects of the base surface and lens positions on the surface roughness and form error of a single lens were studied. Experimental results show that the position of the single lens changes the surface topography, surface roughness, and form accuracy of the lenses on the same base surface. In addition, the geometrical information of the base surface changes the machining precision. When the radii of base surfaces are increased from 50 to 150 mm, the surface roughness of the outer circle lens decreases from 75.78 to 69.08 nm (Ra). Therefore, considering the effect of the base surface and lens position on machining precision in the ultra-precision STS machining of MLAs is necessary. This may contribute to improving the precision consistency of MLAs and ensuring proper component function.

Key words: Micro-Lens Array (MLA); Slow Tool Servo (STS); surface roughness; form accuracy

1 引 言

微透镜阵列是由结构尺寸在微米级的子透镜组成的阵列结构,具有小单元、高集成度、光学性能好的特点。微透镜阵列按功能可分为折射型微透镜阵列和衍射型微透镜阵列;按基面形状可分为平面型微透镜阵列和曲面型微透镜阵列;按照子透镜的形状可分为圆形、正方形和六边形;按照开口方式分为矩形、圆形及蜂巢型排列^[1]。

随着科学技术的发展,微透镜阵列被应用于越来越多的各个领域。在民用领域,微透镜阵列用于照明上的可提高光的亮度和均匀性^[2],在视觉成像上可极大的提高镜头的分辨率^[3],在医学美容方面也有相应的应用;在军事上被用于导弹制导、移动目标实时跟踪定位、测速等方面^[1];在工业及科学研究上,被用于波前诊断、红外探测、超精密光学仪器以及器件质量评价等方面。例如,平面微透镜阵列是用于光线波前诊断的 Shack-Hartmann 传感器的核心元件,子透镜可将入射波聚焦于焦平面上,只要分析焦平面上的焦斑,就可分析入射波的波前特性^[4]。

由于微透镜阵列在各个领域广阔的应用前景,关于微透镜阵列的加工和制造技术也获得了极大的发展。目前,微透镜阵列的加工方法可分为特种加工和机械加工方法两种。特种加工方法虽然能够加工出符合普通光学使用要求的微透镜阵列,但是加工工序复杂、周期长、成形效率略低、成本过高。而超精密机械加工借助刀具的锋利度、高硬度和耐磨性,可实现微透镜阵列的一次性加工,获得亚微米级的形状精度和纳米级的表面粗糙度^[5],因此具有高效率、高精度、柔性化及经

济实用的特点,已成为当今国内外微透镜阵列加工的主要加工方法。微透镜阵列的超精密机械加工方法主要包括金刚石快刀伺服车削(Fast Tool Servo, FTS)、金刚石慢刀伺服车削(Slow Tool Servo, STS)和微铣削(Micro Milling)。

快刀伺服单点金刚石车削加工方法能够实现高频、高精度的往复运动,其缺点在于行程很小,限制了加工范围,并且滞后问题会造成跟踪性下降,主轴位置估计误差会引起加工轮廓混淆^[6]。国内外对于 FTS 加工微透镜阵列的研究主要包括:平面微透镜阵列 FTS 加工工艺^[7]、几何误差的误差量辨识和补偿算法^[8];平面微透镜阵列 FTS 加工表面生成机理^[9]、加工精度预测^[10]和形状误差评价^[11]等。

微铣削且具有可加工自由曲面的优点,常用来加工复杂面形的微透镜阵列^[12]。与单点金刚石车削技术相比,微铣削技术还面临着许多技术挑战^[13],其材料去除机理和表面生成机理都较为复杂,而影响其加工精度的因素也更多。日本 Yan JW 等人使用金刚石球头铣刀加工平面上微透镜阵列,研究材料(无氧铜和 RB-Sic)对所加工的微结构表面粗糙度、形状精度和刀具磨损的影响^[14]。台湾 Chen CC 等人使用超精密铣削在平面上加工 5×5 的微透镜阵列,研究刀具轨迹生成算法和刀具安装误差的补偿方法^[15]。Sebastian Scheiding 等人使用铣削和 FTS 金刚石车削分别加工微透镜阵列,并对两种方法进行了对比。结果显示,铣削加工的微透镜表面粗糙度 53.260 nm (PV)、7 nm(rms);FTS 车削加工的微透镜其表面粗糙度为 44.323 nm(PV)、4 nm(rms)。结果表明,FTS 车削加工的微透镜阵列的表面质量更加符合红外到可见光波长的光学成像所需的偏差^[16]。

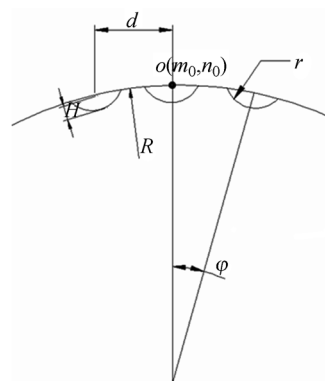
与 FTS 相比, STS 的主要优势在于加工行程较大, 可加工起伏更大的复杂曲面。不足之处在于动态响应能力较低、加工效率较低。STS 是对车床主轴与 Z 轴均进行控制, 使机床主轴变成位置可控的 C 轴, 机床的 X、Z、C 三轴在空间构成了柱坐标系^[17]。

国外的微透镜超精密机械加工方法相比于国内的研究起步早, 发展速度也较快。美国俄亥俄州立大学 Li L 和 Yi A Y 成功的加工出复光学元件, 该曲面上有微棱镜阵列、微孔径阵列和微透镜阵列^[18]。日本 Mukaida M 和 Yan JW 使用慢刀伺服在单晶硅上加工平面微透镜阵列, 研究材料的相移和切削力的变化^[19]。国内国防科技大学关朝亮等人研究了平面微透镜阵列 STS 加工刀具半径补偿方法, 建立伺服轴执行能力限制曲线, 还针对表面创成原理、刀具设计、轨迹规划和精度分析等方面开展研究^[20]。天津大学 Liu XL 等人研究加工误差对平面微透镜阵列形状误差的影响^[21], 发现微透镜阵列加工的形状误差分布是非对称的, 中心部分的子透镜几何误差最小, 对角线上的误差最大。哈尔滨工业大学的徐礼威等人运用慢刀伺服车削的加工方法, 对平面、曲面微透镜阵列进行仿真和实验加工分析, 得到了测量表面粗糙度的 Sa 值分别为: $0.0178 \mu\text{m}$, $0.0109 \mu\text{m}$, $0.0147 \mu\text{m}$, $0.0519 \mu\text{m}$ 的平面矩形排布阵列、平面六边形排布阵列、曲面环形排布阵列、曲面蜂巢状排布阵列微透镜阵列^[1]。

综上所述, 目前国内外对于微透镜阵列的超精密加工大都集中于平面上微透镜阵列的加工工艺与方法, 而对于曲面的微透镜阵列的研究相对较少。其中, 已有学者研究发现慢伺服加工微透镜阵列过程中, 子透镜位置的不同会造成加工精度的变化, 但是这些研究也大部分是针对平面上微透镜阵列的加工, 考虑加工参数、透镜位置、分布模式等, 而忽略了基面几何形状的影响。因此, 本文将主要研究曲面上微透镜阵列慢伺服加工精度的因素, 考虑基面几何形状和子透镜位置对透镜的表面粗糙度和形状精度的影响。通过实验的方法, 在不同球径的球面上加工微透镜阵列, 建立基面形状、透镜位置与透镜加工误差(表面粗糙度和形状误差)之间的关系。

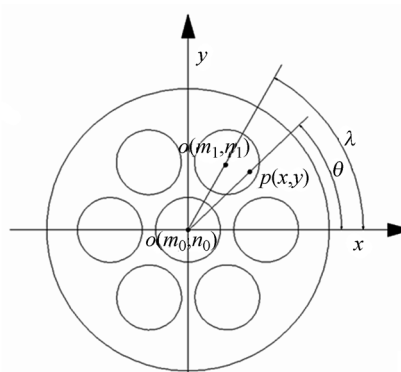
2 微透镜阵列工件设计

设计的微透镜基本数据包括: 基面(球面)半径 R , 子镜球径 r , 子镜中心间距 d , 子镜球冠高 H 。如图 1 所示, 基面上微透镜阵列的子镜球位置可以认为是基面中心在径向和轴向旋转角度 (φ, λ) 得到, 而各子镜的表面可以看成子镜球面与基面相交得到。首先, 对基面坐标进行区域划分, 各区域使用相应的子镜球心坐标进行距离判断, 如果基面坐标与各个子镜中心球坐标的距离小于子球半径, 则该点使用子球面坐标, 否则使用基面坐标。



(a) 正视图

(a) Front view



(b) 俯视图

(b) Top view

图 1 微透镜阵列设计图

Fig. 1 Design of micro lens array

假设基面上任意一点 p 在 x - y 平面的坐标为 (x, y) , 基面半径为 R 径向相邻子镜间间距为 l , 则 p 点在径向的区域编号为 m , m 可以通过式

(1) 进行计算:

$$\begin{cases} d = \sqrt{x^2 + y^2} \\ m = \left[\frac{R}{l} \arcsin \frac{d}{R} + 0.5 \right] \end{cases} \quad (1)$$

同样,基面上任意一点 p 处轴向子镜的区域编号 n , θ 为点在 x - y 平面与 x 轴的夹角,则周向所属区域 n 可以用式(2)进行计算。

$$\begin{cases} \theta = \arctan \left(\frac{y}{x} \right) \\ n = \left[\frac{N\theta}{2\pi} + 0.5 \right] \end{cases} \quad (2)$$

由公式(1)和(2)得到 m 和 n 后,设 N 为每一圈的子镜个数,则子镜的中心坐标所在方位可以用式(3)进行计算:

$$\begin{cases} \varphi = \frac{tm}{R} \\ \lambda = \frac{2\pi n}{N} \end{cases} \quad (3)$$

其中 φ 为径向方位角, λ 为周向方位角,各子镜的球心坐标可以通过中心子镜球心坐标进行相关的坐标变换得到,计算方程如式(4), (5)。

$$\begin{cases} h = R + r - H \\ d = h \cos \varphi \end{cases} \quad (4)$$

其中: r 为子镜球半径; H 为球冠高; h 为中心子镜球心坐标 z 值; d 为球心坐标与 z 轴的距离。

$$\begin{cases} x_i = d \cos \lambda \\ y_i = d \sin \lambda \\ Z_i = h \sin \varphi \end{cases} \quad (5)$$

其中 (x_i, y_i, z_i) 就是各子镜球心坐标,得到任意点 p 所在区域的子镜球心坐标后,对 p 点和球心坐标进行距离计算如式(6)。

$$\begin{cases} Z_0 = \sqrt{R^2 - x^2 - y^2} \\ D = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (Z_0 - Z_i)^2} \end{cases} \quad (6)$$

算出距离 D 后,就可以通过式(7)计算出任意 (x, y) 对应的 z 坐标值,即,如果 (x, y) 属于子镜范围,则对应的 z 坐标值为子镜坐标值,如果属于基面,则 z 为基面坐标值。

$$z = \begin{cases} Z_0 - \sqrt{r^2 - (x - x_i)^2 - (y - y_i)^2} & D \leq r \\ Z_0 & D > r \end{cases} \quad (7)$$

假设基面半径为 50 mm,子镜轴向中心间弧长为 1 mm,子镜轴向间隔角度为 60° ,子镜球半径为 4 mm,子镜球冠高为 20 μm ,其三维模型如图 2 所示。

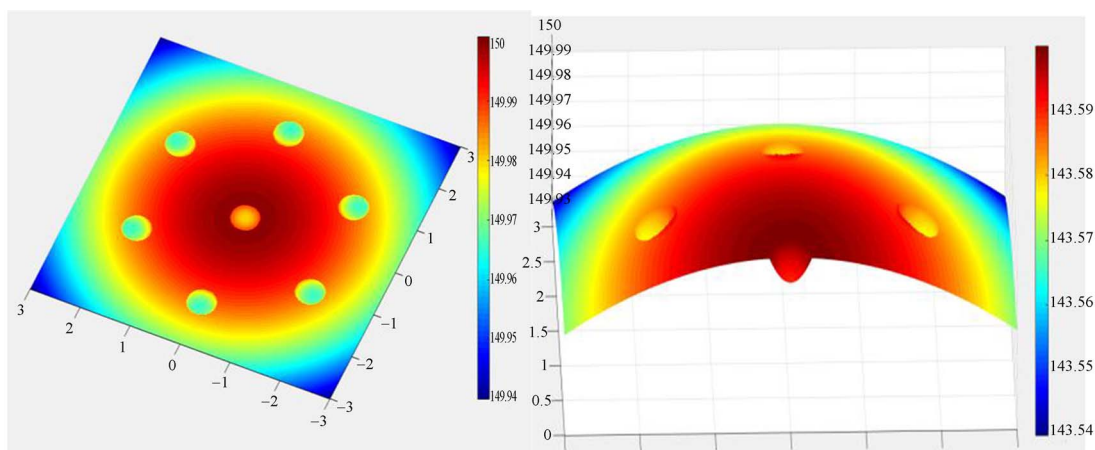


图 2 工件设计三维模型图(基面半径 50 mm)

Fig. 2 Three-dimensional design diagram of the component (R50 mm base surface)

3 实 验

3.1 实验设备

实验采用的加工机床为美国的 Moore 350FG 超精密自由曲面加工机床,机床外形如图 3(a)所示。该机床的主轴最高转速为 10 000 r/

min, x, y, z 方向的导轨行程分别为 350 mm、150 mm、350 mm。加工零件的面形精度 $\leq 0.15 \mu\text{m}$, 表面粗糙度 $\leq 3 \text{ nm}(Ra)$ 。慢伺服加工方式下, X, Y, Z 轴的联动,利用 Z 轴的摇摆提供高度的灵活性,实现复杂自由曲面的加工(如图 3(b))。

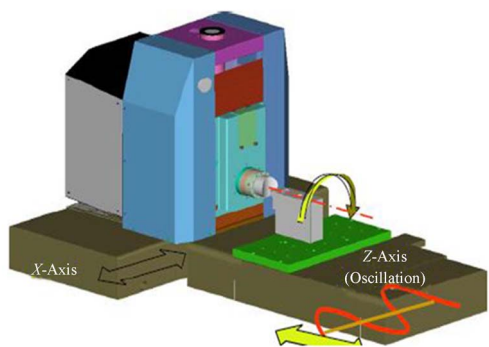
微透镜阵列测量采用的是 Bruker GT-X 型白光干涉仪(图 4),放大倍数可从 0.5~200 倍,

数据能输出到 MATLAB 等其他分析软件中进行分析。基面形状精度的评定采用 Taylor Hobson PGI 1240 型轮廓仪(图 5)。



(a) 机床外形

(a) Profile of machine tool



(b) 慢伺服加工方法示意图

(b) Schematic diagram of slow servo machining

图 3 Moore 350FG 型超精密自由曲面加工机床
Fig. 3 Moore 350FG Ultra-precision freeform surface machining machine

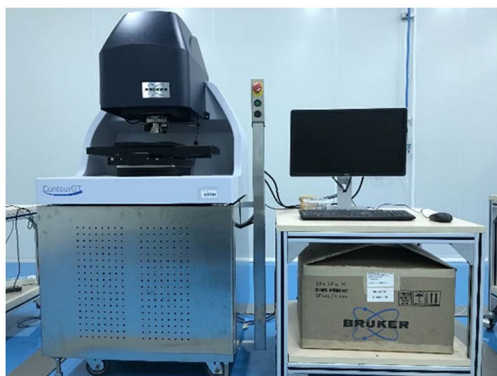


图 4 Bruker GTX 型白光干涉仪

Fig. 4 Bruker GTX type white light interferometer



图 5 Taylor Hobson PGI 1240

Fig. 5 Taylor Hobson PGI 1240

3.2 实验设计

本次实验需在 X-Z 轴模式下车削加工基面,然后在慢伺服模式下进行微透镜阵列加工。为了避免刀具加工微透镜阵列时出现干涉和过切的现象,并保证轮廓上各点都能被加工,粗、精加工,刀具选用韩国的 CHAMP 品牌刀具,参数如表 1 所示。

表 1 刀具参数

Tab. 1 Geometrical parameters of diamond cutting tool

加工步骤	品牌/型号	前角 / (°)	后角 / (°)	包角角 / (°)	刀尖半 径/mm
基面加工	CHAMP/XF-150971	0	10	30	0.996 9
透镜加工	CHAMP/XF-160910	0	15	30	0.055

工件材料为 Goodfellow 公司的 Al6061 型铝合金铝棒。工件样品为直径 20 mm、长度 30 mm 的圆柱形样品,一共 3 件,基面为球面,球半径分别为 50 mm, 100 mm 和 150 mm。

实验的主要参数:主轴转速 2 000 r/min,进给速度 10 mm/min,Z 方向步进为 5 μ m。慢伺服加工微透镜阵列时,加工参数如表 2 所示。

表 2 微透镜阵列精加工切削参数

Tab. 2 Finishing parameters for machining of micro-lens array

基面半径 /mm	角度增量 / (°)	每转进给量 / μ m	指令周期 /ms
50	1	10	1
100	1	10	1
150	1	10	1

3.3 实验分析

使用 GT-X 白光干涉仪对工件进行测量,用白光干涉仪分别测量基面和不同位置的子透镜(中心子镜,外圈子镜)的表面形貌和表面粗糙度值。

球径分别为 50 mm、100 mm、150 mm 的 3 个基面测量结果如图 6 所示,其表面粗糙度 Ra 值

分别为 23.364 nm、13.878 nm 和 7.769 5 nm,基面的实际球径分别为:50.078 mm,100.02 mm 和 150.251 mm。在相同的金刚石刀具和相同的加工条件下,单点金刚石车削加工的球面(基面)可获得纳米级的表面粗糙度(R_a),而其形状精度的相对误差都小于 0.1%(见表 3)

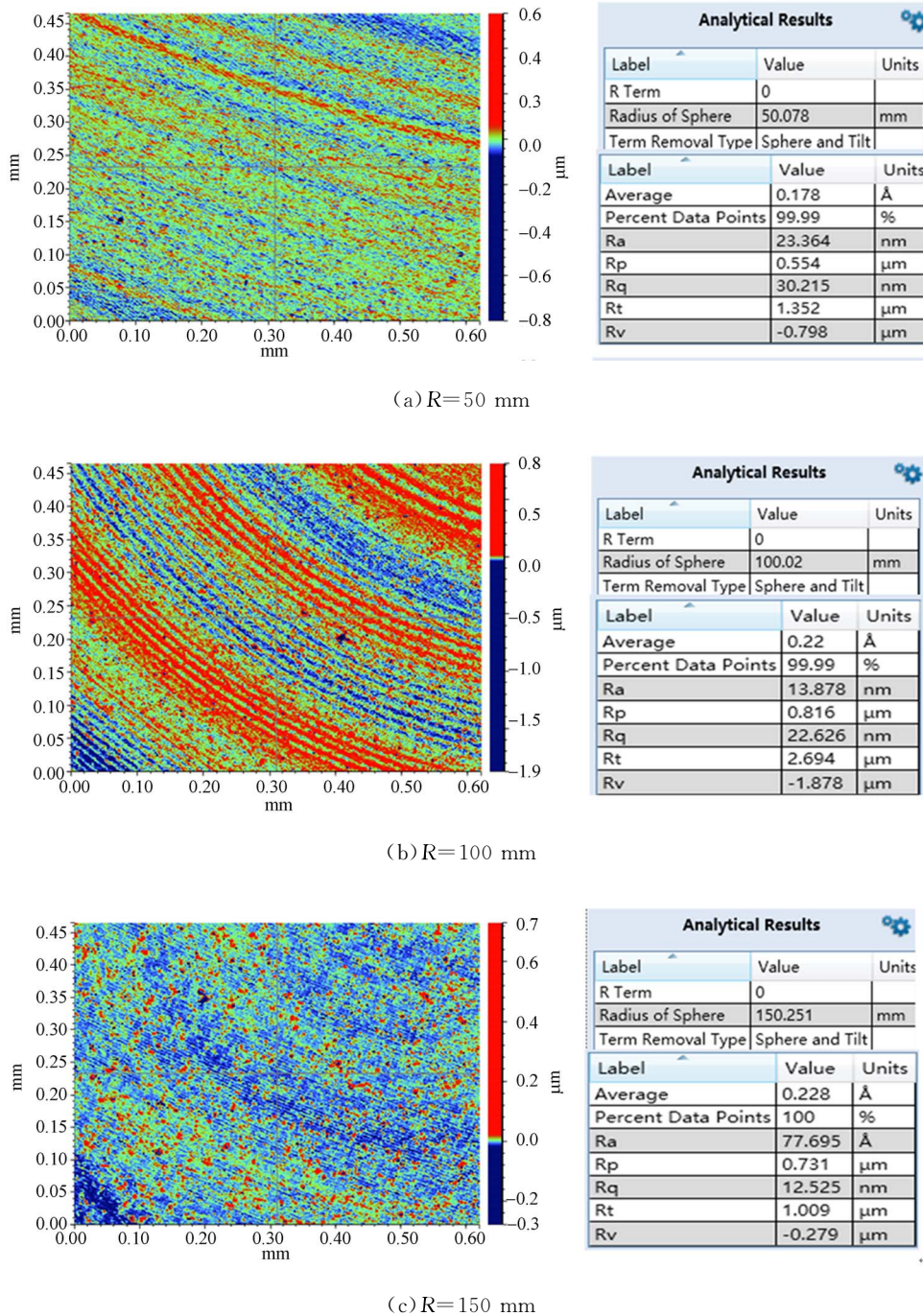


图 6 不同基面的表面粗糙度测量结果

Fig. 6 Measured surface roughness of on three different base surfaces

表 3 基面加工形状误差分析

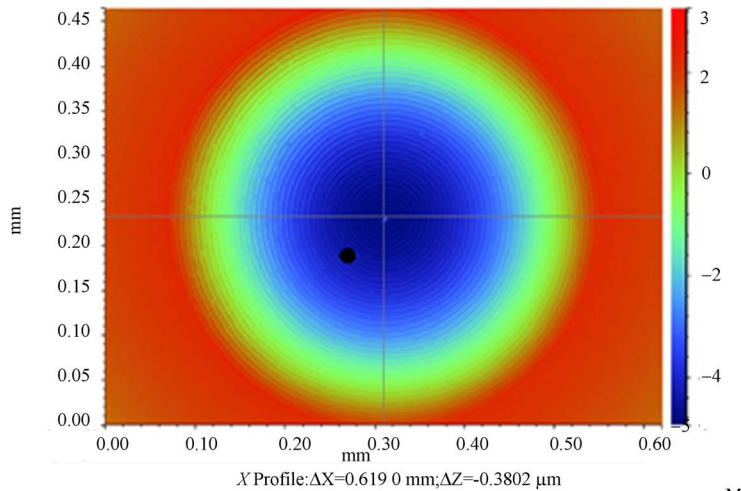
Tab. 3 Shape error of three base surfaces

基面半径理论值/mm	测量值/mm	绝对误差/mm	相对误差/%
50	50.024 9	0.024 9	0.049 8
100	100.030 5	0.030 5	0.030 5
150	149.853 1	0.148 7	0.099

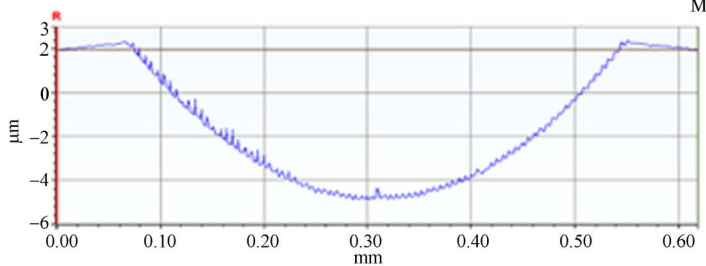
子镜的测量采用 GT-X 白光干涉仪进行测量,选用 10 倍的放大倍数,保证 99% 以上的取样率。图 7 所示为基面半径为 50 的中心子镜和外圈子镜的三维微观形貌图。图 8 所示为基面半径 50 mm、100 mm、150 mm 的工件中心子镜和外圈

子镜的表面粗糙度测量结果。

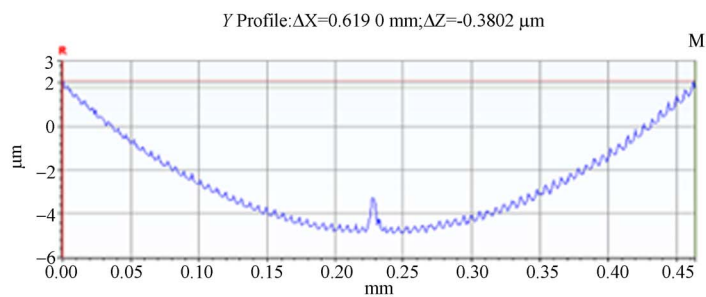
图 7 所示为球径 50 mm 的基面上中心透镜和外子镜测量三维微观形貌图。从图中可以看出,相同基面上不同位置的子透镜其三维微观形貌不同,这是由于切削痕迹引起的。去除子透镜的形状后,获得三维微观形貌和表面粗糙度值如图 8 所示。比较图 8(a)~(c)和图 8(d)~(f)的测量结果可知,相同加工条件下,同一基面上不同位置的子镜表面微观形貌和粗糙度值都不同,外圈子镜的表面粗糙度(Ra)小于中心子镜的。这是由于慢伺服加工时,子透镜的加工轨迹和表面生成机理都与其所在位置相关,导致三维表面微观形貌和表面粗糙度不同,如图 8(a)和图 8(d)。



Analytical Results		
Label	Value	Units
Percent Data Points	99.91	%
Ra	2.01	μm
Rp	3.262	μm
Rq	2.271	μm
Rt	8.192	μm
Rv	-4.93	μm



Analytical Results		
Label	Value	Units
Percent Data Points	99.91	%
Ra	2.01	μm
Rp	3.262	μm
Rq	2.271	μm
Rt	8.192	μm
Rv	-4.93	μm



Analytical Results		
Label	Value	Units
Percent Data Points	99.91	%
Ra	2.01	μm
Rp	3.262	μm
Rq	2.271	μm
Rt	8.192	μm
Rv	-4.93	μm

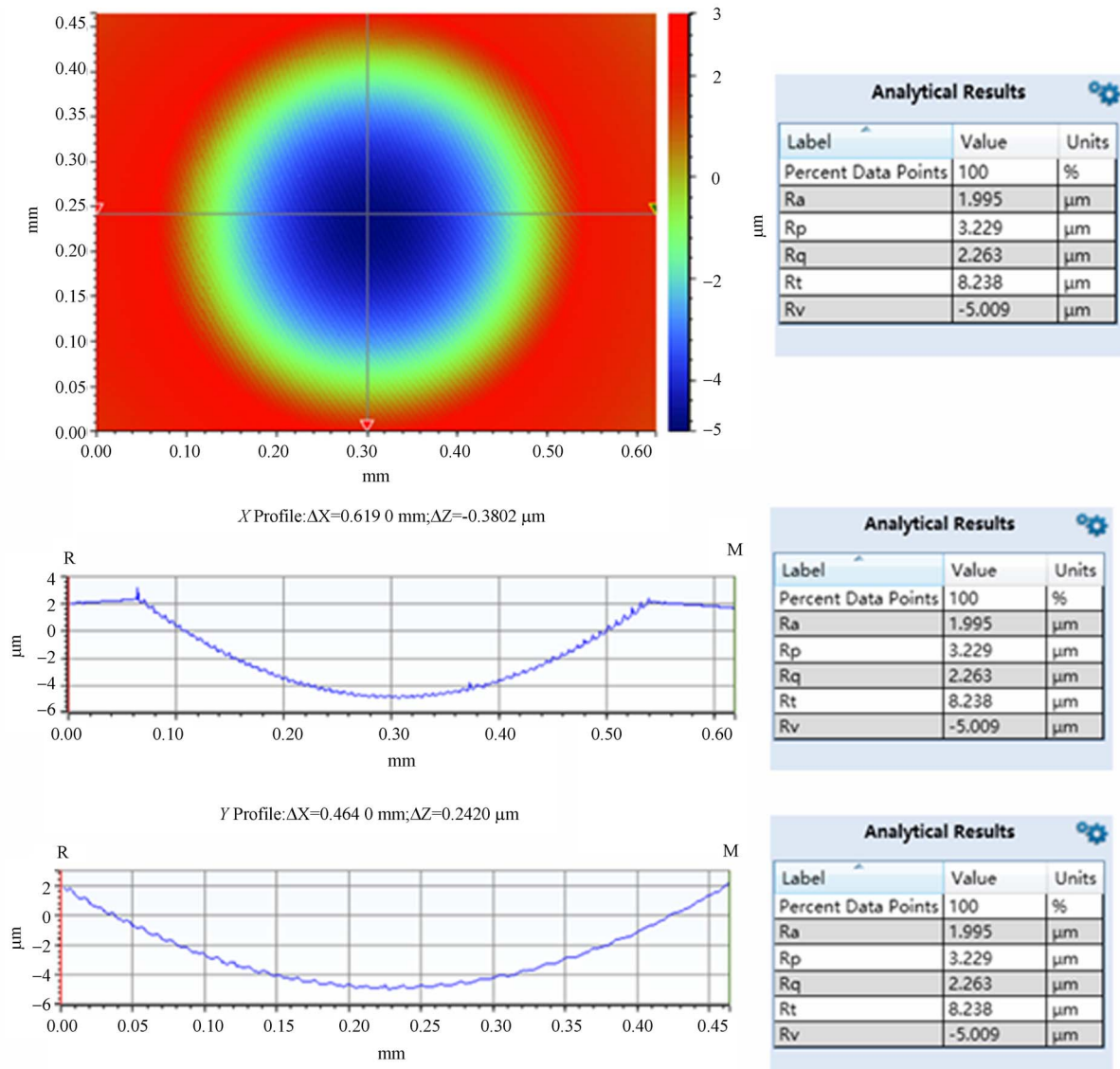


图 7 相同基面(球半径 50 mm)上不同位置子镜的表面三维微观形貌:中心子镜和外圈子镜

Fig. 7 3-D surface topographies of single lens on the same base surface (R50 mm) with different positions: central sub-lens and outer circle lens

另外,当基面半径从 50 mm 增大为 100 mm 和 150 mm 时,中心位置子透镜表面粗糙度值变化不大,这是由于中心位置子透镜不受基面形状的影响,并且其表面生成机理相同、三维微观形貌相似,见图 8(a)~(c)。然而比较图 8(d)~(f)可以看出,第一圈子镜的表面粗糙度(Ra)随着基面半径的增大而变小。其原因在于,偏离工件中心位置的子透镜,基面局部位置的几何特征会影响其表面生成。已有研究发现,机床运动误差是引起平面上微透镜阵列慢伺服加工精度不一致的原因之一^[21],因此基面几何形状的不同会改变子透镜与工件中心的相对位置,从而影响子透镜表面

生成和表面粗糙度,使得基面半径越大即基面曲率越平缓,子透镜的表面质量越好。

同时,测量并评价所加工子透镜曲率半径值,与曲率半径设计值进行对比,研究不同基面不同位置的子透镜的形状误差,如表 4 所示。从表中可以看出,相同加工条件下,不同基面上相同位置子透镜的几何精度不同,而相同基面上不同位置的子透镜几何精度也不同。比较表 4 中的数据可以看出,同一基面上中心子透镜的形状误差比外圈子镜小;随着基面半径的增大,中心子镜的形状误差随之减小,而外圈子镜的形状误差则随之变大,其原因在于外圈子镜的形状误差是子镜本身加工误差和基面形状误差的合成。

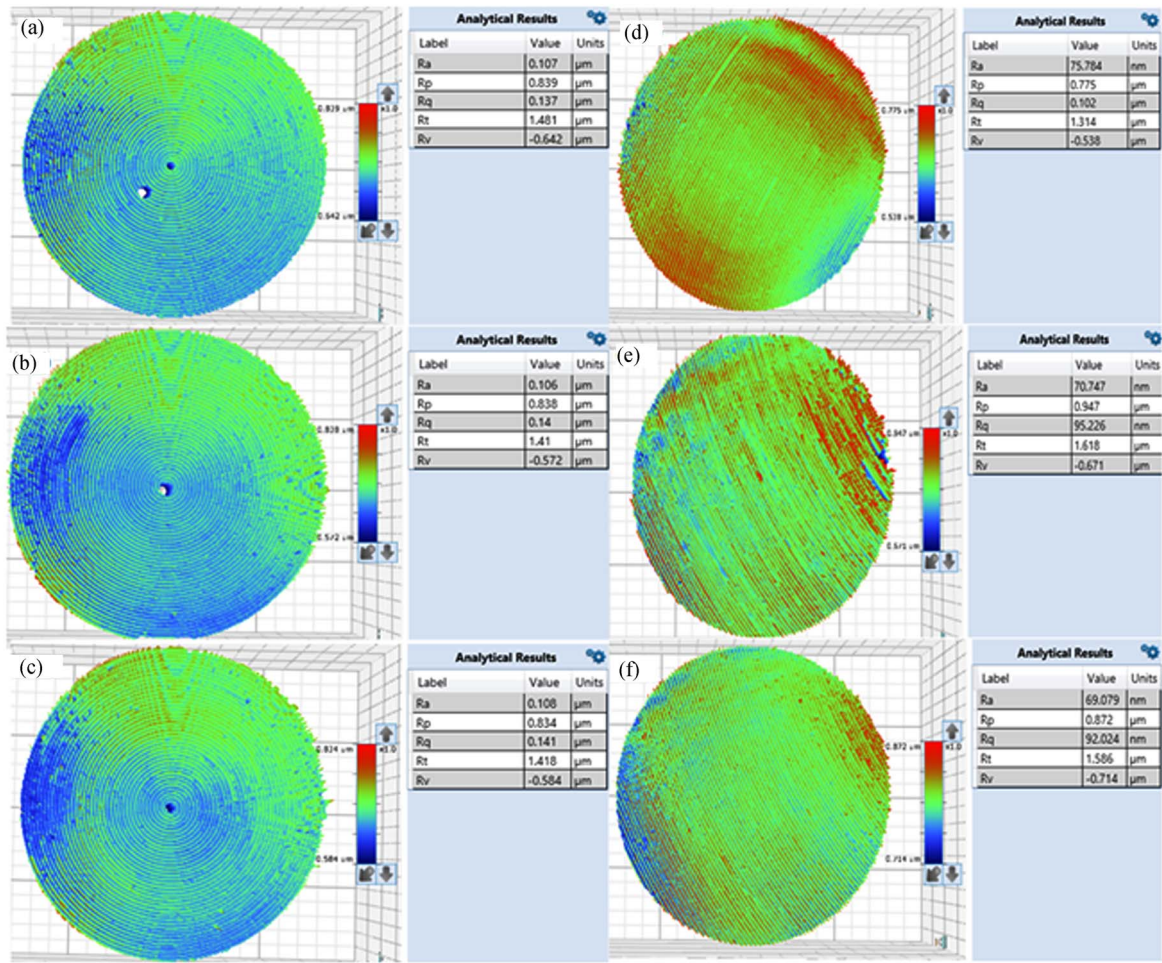


图 8 不同基面不同位置子镜测量结果:(a~c)基面 $R=50\text{ mm}$, $R=100\text{ mm}$, $R=150\text{ mm}$ 的中心子镜;(d~f) 基面 $R=50\text{ mm}$, $R=100\text{ mm}$, $R=150\text{ mm}$ 的外圈子镜

Fig. 8 Measurement results of the lenses on different positions on different base surfaces: (a-c) The center lenses on the base surface with spherical radius $R=50\text{ mm}$, $R=100\text{ mm}$, $R=150\text{ mm}$; (d-f) The outer circle lenses on the base surface radius is $R=50\text{ mm}$, $R=100\text{ mm}$, $R=150\text{ mm}$

表 4 子透镜加工形状误差分析

Tab. 4 Form error analysis of machined lenses

基面半径 /mm	子透镜位置	曲率半径 理论值/mm	测量值 /mm	绝对误差 /mm	相对误差 /%
50	中心子镜	4.000	4.072	0.072	1.800
	第一圈		3.922	0.078	1.950
100	中心子镜	4.000	3.958	0.042	1.050
	第一圈		3.917	0.083	2.075
150	中心子镜	4.000	4.038	0.038	0.950
	第一圈		3.888	0.112	2.800

4 结 论

本文研究球面上微透镜阵列慢伺服加工中,基面几何形状和子透镜位置对子透镜表面粗糙度和形状精度的影响。通过在 3 个不同球径(50 mm, 100 mm, 150 mm)的基面上慢伺服金刚石车削加工微透镜阵列,比较中心位置和外圈位置子透镜的表面粗糙度和形状精度,可以看出:同一基面上,不同位置的子透镜表面微观形貌不同,表面粗糙度值也不同;中心子透镜的表面粗糙度值(Ra)和形状误差都低于外圈子透镜,即中心子透镜表面质量较好;不同基面上相同位置的子透镜具有相似的表面微观形貌,但是表面粗糙度值不同。随着基面球径的增大,中心位置子透镜的表面粗糙度值受基面影响较小,但是形状误差随之增大;基面的几何形状也

会影响子镜的加工精度,当基面球径从 50 mm 增大至 150 mm 时,外圈子镜的表面粗糙度从 75.78 nm(Ra)变小为 69.08 nm(Ra),外圈位置的子透镜表面粗糙度和形状误差都随之减小。

本文的实验成果将为微透镜阵列慢伺服加工机理的研究提供基础,为球面微透镜阵列的加工参数的选择提供指导依据,对加工精度的提高提供帮助,并有助于建立微透镜阵列慢伺服加工误差分布图以及加工误差补偿方法,并提高微透镜阵列加工精度的一致性保证其功能性。

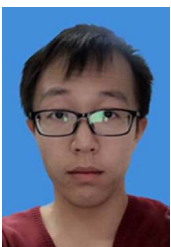
对于以上的结论和规律,尚无系统的理论研究对该规律进行精确的描述,以对球面微透镜阵列慢刀伺服加工的切削参数的确定进行指导,所以在现有数据的基础上,需要结合现有理论,研究基面几何形状和子透镜位置变化对加工精度的影响规律。

参考文献:

- [1] 徐礼威. 微透镜阵列超精密切削加工技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
XU L W. *Research on ultra-precision machining technology of micro-lens arrays* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [2] 谢晋, 江宇宁, 卢阔, 等. 微拱形阵列导光板快速热压成型与微光学应用[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(9): 2421-2427.
XIE J, JIANG Y N, LU K, *et al.*. A rapid hot embossing of micro-arch array LGP and micro-optics application [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(9): 2421-2427. (in Chinese)
- [3] 孟繁斐, 步敬. 集成成像系统中高填充率微透镜阵列的设计与加工[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(8): 2130-2138.
MENG F F, BU J. Design and fabrication of high filling rate micro-lens array in integrated imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(8): 2130-2138. (in Chinese)
- [4] 朱成昌, 伍凡, 曹学东, 等. 基于 Hartmann-Shack 波前检测原理的微透镜阵列焦距测量[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(5): 1122-1128.
ZHU X CH, WU F, CAO X D, *et al.*. Focal length measurement of micro-lens array based on the principle of hartmann-shack wave front detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1122-1128. (in Chinese)
- [5] 陈远流. 面向微结构阵列的超精密切削加工与测量关键技术研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2014.
CHEN Y L. *Research on the key technology of ultra-precision machining and measuring for micro-structure array* [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [6] LU X D, TRUMPER D L. Spindle rotary position estimation for fast tool servo trajectory generation [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, 147: 1362-1367.
- [7] 李荣彬, 张志辉, 王素娟, 等. 微结构光学元件快速伺服刀架加工技术研究[J]. 纳米技术与精密工程, 2005, 3(3): 216-221.
LI R B, ZHANG ZH H, WANG S J, *et al.*. Research on the machining technology of the micro-structure optical element tool holder for fast tool servo [J]. *Nanotechnology and precision Engineering*, 2005, 3(3): 216-221. (in Chinese)
- [8] YU D P, HONG S G, WONG Y S. Profile error compensation in fast tool servo diamond turning of micro-structured surfaces [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2012(52): 13-23.
- [9] 丁焯琪, 罗善明, 常雪峰, 等. 微透镜阵列快刀伺服车削进刀路径生成与优化研究[J]. 现代制造工程, 2016(7): 61-66.
DING H Q, LUO SH M, CHANG X F, *et al.*

- Research on the Path generation and optimization of the micro-lens array in the tool-cutting machining [J]. *Modern manufacturing engineering*, 2016 (7):61-66. (in Chinese)
- [10] KONG L B, CHENG C F. Modeling and characterization of surface generation in fast tool servo machining of micro-lens arrays [J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2012(63): 957-970.
- [11] 王贵林,朱登超,戴一帆. 复杂光学表面的快刀伺服加工特性与路径规划[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(15): 175-180.
WANG G L, ZHU D CH, DAI Y F. The characteristics and path planning of fast tool servo machining for complex optical surfaces [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47 (15): 175-180. (in Chinese)
- [12] 杨忆. 微透镜阵列铣削加工研究[D]. 北京理工大学, 2015.
YANG Y. *Research on micro-lens array milling* [D]. Beijing:Beijing Polytechnic University, 2015.
- [13] EKKARD B, LUTZ A. Ball-end milling of free-form surfaces for optical mold inserts [C]. *Proceedings of ASPE*, 2004.
- [14] YAN J, ZHANG Z, KURIYAGAWA T, *et al.*. Fabricating micro-structured surface by using single crystalline diamond end mill [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010, 51(9-12): 957-964.
- [15] CHEN C C, HUANG C Y, CHENG Y C, *et al.*. Ultra precision diamond milling of aspheric micro-lens arrays [J]. *Proc of SPIE*, Vol. 8769 87693Q-1.
- [16] SEBASTIAN S, YI A Y, ANDREAS G, *et al.*. Diamond milling or turning for the fabrication of micro-lens arrays: comparing different diamond machining technologies [J]. *SPIE*, 2011, 7927.
- [17] 关朝亮,铁贵鹏,尹自强. 光学阵列器件的慢刀伺服车削加工技术[J]. *国防科技大学学报*, 2009, 31(4):31-35+47.
GUAN ZH L, TIE G P, YIN Z Q. Slow tool servo machining technology for optical array devices [J]. *Journal of National Defense University of Science and Technology*, 2009, 31(4): 31-35+47. (in Chinese)
- [18] LI L, YI A Y. Development of a 3D artificial compound eye [J]. *Opt Express*, 2010, 18(17): 18125-18137.
- [19] MUKAIDA M, YAN J W. Ductile machining of single-crystal silicon for micro-lens arrays by ultra-precision diamond turning using a slow tool servo [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2016,11:004.
- [20] 关朝亮. 复杂光学曲面慢刀伺服超精密车削技术研究[D]. 国防科技大学博士学位论文, 2010.
GUAN ZH L. *Research on the ultra-precision machining technology of complex optical curved slow tool servo* [D]. Thesis of the University of Defense Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [21] LIU X L, ZHANG X D, FANG F Z, *et al.*. Influence of machining errors on form errors of micro-lens arrays in ultra-precision turning [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2015, 96: 80-93.

作者简介:



孙 豪(1994—),男,湖南常德人,硕士,主要从事超精密加工表面微观形貌方面的研究。E-mail: Halo_sunhao@163.com

通讯作者:



王素娟(1978—),女,江西萍乡人,副教授,硕士生导师,2001年于哈尔滨理工大学获得学士学位,2004年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,2011年于香港理工大学获得哲学博士学位,主要从事超精密加工装备研发和加工机理的研究。E-mail: grace.wangsj@gdut.edu.cn