

射流抛光高斯型去除函数的快速生成方法

李建, 张连新, 孙鹏飞, 王中昱, 柯瑞

中国工程物理研究院机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 提出了一种快速生成高斯型去除函数的实验方法。通过研究倾斜定点入射方式下射流束中心与工件的交点和材料去除形貌之间的关系,得到了对应高斯型去除函数的喷嘴高度范围。在确定的工艺参数条件下,添加主轴旋转运动,得到了对应高斯型去除函数的喷嘴高度。对高斯型抛光斑进行了对称性分析和动态去除实验。结果表明,以高斯斑为基础的动态去除过程具有较高稳定性,能满足超精密光学加工的要求,同时也证明了该方法的高效性和可靠性。

关键词 光学制造; 射流抛光; 快速生成; 实验方法; 去除函数; 高斯型

中图分类号 TH162+.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0722002

Fast Generation Method of Gaussian-Shaped Removal Function of Fluid Jet Polishing

Li Jian, Zhang Lianxin, Sun Pengfei, Wang Zhongyu, Ke Rui

*Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang, Sichuan 621900, China*

Abstract A kind of experimental method for quickly forming the Gaussian-shaped removal function is proposed. The corresponding nozzle height range of Gaussian-shaped removal function is obtained by the investigation of the relationship between the material removal appearance and the intersection point of the fluid jet center and the workpiece under the tilt fixed-point incidence mode. As for the definite process parameters, the corresponding nozzle height of Gaussian-shaped removal function is obtained by the addition of the rotary motion of the principal axis. The symmetry of the Gaussian-shaped polishing spot is analyzed and the dynamic removal experiment is conducted. The results show that the dynamic removal process based on Gaussian spots possesses a good stability, which can meet the demand of the ultra-precision optical manufacture and also can confirm the efficiency and reliability of this method.

Key words optical fabrication; fluid jet polishing; fast forming; experimental method; removal function; Gaussian-shape

OCIS codes 220.4610; 220.5450

1 引 言

随着空间光学、高功率激光等的不断发展,现代光学系统对高精度非球面、自由曲面等复杂形面光学元件的需求逐步扩大^[1],对光学元件的加工及装调也提出了日益严苛的要求^[2]。射流抛光(FJP)作为一种新型超精密加工技术,在光学元件的高精度、高洁净度及低亚表面损伤加工方面具有广阔的应用前景及重要的研究意义^[3]。FJP利用具有初始压力

的抛光液介质(通常情况下为磨料与水的混合物或纯水)流经喷嘴而形成射流束,射流束以一定速度到达材料表面,利用磨料或水对材料的剪切力而达到去除作用。与传统抛光技术及其他超精密加工技术相比,FJP的主要特点与优势体现在以下三方面^[4]。首先,由于射流束的压力较低(通常为 0.2~2 MPa),因此在加工过程中不会引入新的材料亚表面缺陷。其次,抛光工艺中的“刀具”为循环柱状射流,不存在接触式抛光中的刀具磨损问题,从而能保

收稿日期: 2018-01-02; 收到修改稿日期: 2018-02-08

基金项目: 国家自然科学基金(61605181)、中国工程物理研究院超精密加工重点实验室基金(ZZ15002)

作者简介: 李建(1990—),男,博士,工程师,主要从事磁流变抛光及射流抛光工艺方面的研究。

E-mail: lijianhust2007@163.com

证去除函数的稳定性,易于控制面形精度;且其去除率较低,能获得较高的表面加工精度。另外,FJP中射流束的尺寸通常较小(一般直径为0.2~2 mm),不易受工件形状及位置的限制,从而可加工多种复杂曲面,特别是针对高陡度、小曲率半径的工件及细长管件,利用射流束可以避免机械干涉而深入工件内部,进行内表面的加工并获得较高的加工精度。

虽然FJP有诸多优点,但常规的人射方法产生的抛光斑具有明显劣势。垂直入射条件下,抛光斑的中间区域会存在一个凸起,从截面上看,抛光斑呈现“W”型,这种抛光斑用于光学表面加工容易带来高频误差。而斜入射所产生的抛光斑呈现“弦月”型,此种去除函数不具备严格对称性,加工过程中难以精确控制去除量。作为一种确定性的抛光方法,FJP首先要解决的问题是如何获得能满足光学加工要求的去除函数。

高斯型分布去除函数具有良好的对称性,且最大去除量的坐标点和抛光过程中的实际控制点重合,使得抛光过程中的误差控制更易实现,其已成为迄今为止可达到最优去除效果的函数分布形态。国内外学者也在FJP光斑的优化方面进行了大量研究。Booij^[5]通过喷嘴内部来复线结构获得了中心去除量最大的去除函数,但由于其形状不规则,稳定性不足,在实际操作中难以实现。郭培基等^[6]通过旋转工件获取了中心去除量最大的去除函数,但该方法从机械运动学的角度来说并不可行。Fang等^[7]设计了一种通过垂直冲击的多位置合成获得高斯型去除函数的方法,但该方法因难以精确控制驻留时间而没有得到广泛应用。

Booij等^[8]提出了一种斜入射旋转的扫掠方法,抛光过程中将喷嘴置于以一定的角速度进行旋转的回转轴上,起到将斜入射抛光斑进行旋转合成的目的,选定合适的入射角度将抛光斑扫掠优化为典型的对称高斯型,该方法也成为了去除函数优化调控中最为普遍的手段。但该方法基于计算机理论仿真,并没有给出在实际加工中能快速找到对应高斯型去除函数的加工参数的实验方法。而在实际加工过程中,磨料的种类、硬度,抛光液的浓度、粘度以及喷嘴孔径、喷射压力等条件复杂多样,故仿真过程中难以准确确定模型的参数及边界条件,且仿真过程较为繁琐。因此,通过仿真来确定实际的加工参数并不可取。李兆泽^[9]提出了一种采用多点实验法生成高斯型去除函数的方法,但并未给出具体的实现方案。张学成等^[10]对不同角度的冲击进行了仿真,

指出当喷嘴倾斜并围绕射流束的滞止点匀速旋转冲击时,所获得的加工斑点将呈中心去除量最大的对称型分布。但滞止点是理论上流速为零的点,实际工况中很难通过仿真准确计算出滞止点的位置。

本文在总结前人研究工作的基础上,结合实验分析,提出了一种简单可靠的FJP高斯型去除函数的实验生成方法,并利用实验得到的高斯型去除函数对应的加工参数,进行了动态去除实验,验证了以所提方法为基础的加工过程的稳定性。

2 生成高斯型去除函数的条件分析

2.1 关键工艺参数的确定

常规入射方式产生的材料去除形貌如图1所示。图1(a)所示为垂直入射方式的示意图及产生的去除函数形态。由于射流的压力偏低,材料去除主要以剪切去除为主,因此不同区域的去除量主要受射流束剪切速度的影响。在垂直入射方式下,射流束与材料的接触点为滞止点,剪切速度为零,因此中心基本无材料去除,材料去除形貌的截面为“W”型。图1(b)所示为45°斜入射时形成的“弦月”型去除形貌,虽然其内部无凸起,但是这种形貌不具备严格对称性,实际加工中难以精确控制“月牙”的开口方向,工艺规划过于复杂。

斜入射旋转扫掠形成高斯型去除函数的原理示意图如图2所示,其中 d 为路径圆的直径, h 为喷嘴距工件的高度, ω 为转速。图2(a)所示为斜入射喷嘴绕竖直方向作回转运动冲击工件的示意图。图2(b)所示为图2(a)对应的材料去除示意图,虚线圆弧为由射流束与工件表面的交点所形成的路径,仅取了6个点的材料去除作为示意,实际中的材料去除应是沿虚线圆弧连续去除。

在入射角度、抛光液浓度及入射压力等条件一定的前提下,射流束在工件表面形成的路径圆的直径 d 为关键的工艺参数之一。但是,在实际的加工过程中,无法直接测量和控制 d ,而 d 又直接与喷嘴距工件的高度 h 相对应。因此,寻找不同工艺参数条件下合适的直径 d 并转化为确定相同条件下的喷嘴高度 h 。喷嘴高度 h 将直接反映在机床的坐标轴上,因此对运动控制而言更加简单可靠。

2.2 定点斜入射的材料去除规律

去除函数的形貌与工艺参数如射流压力、入射距离、抛光液浓度及喷嘴结构等参数具有一定的映射关系^[11-12]。为了了解斜入射定点去除所形成的抛光斑的特点,采用质量分数为8%的C1663号CeO₂

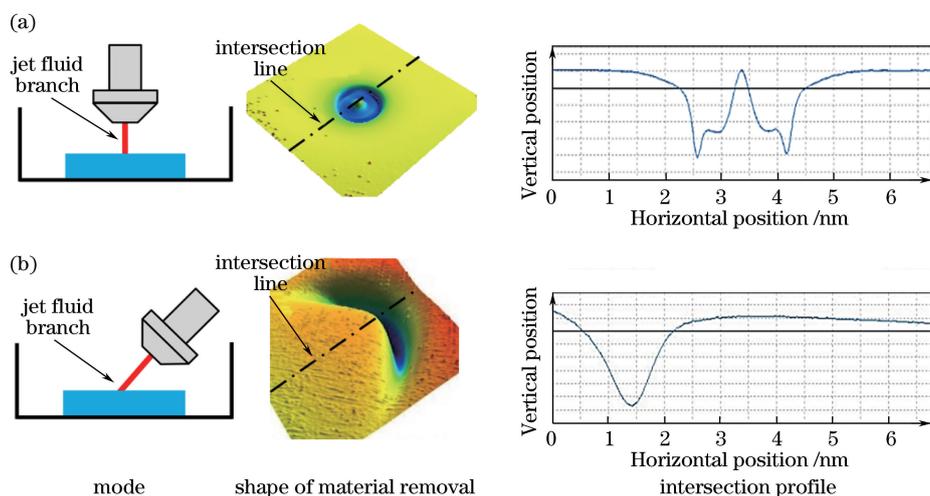


图 1 常规定点入射方式产生的去除函数形态。(a)垂直入射;(b)斜入射

Fig. 1 Morphology of removal function generated by normal fixed-point incidence modes. (a) Vertical incidence; (b) oblique incidence

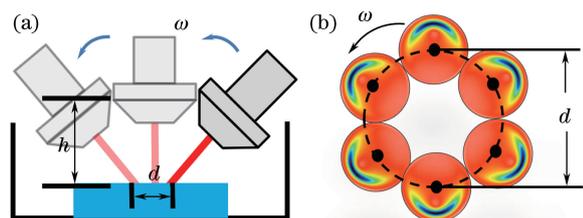


图 2 原理示意图。(a)斜入射旋转扫掠;(b)材料去除

Fig. 2 Schematic of principle. (a) Rotary sweeping under oblique incidence; (b) material removal

抛光液,入射压力为 1 MPa,喷嘴口径为 1 mm,喷嘴高度为 10 mm,分别以不同的入射角度(75°,60°,45°),进行 2 min 的定点采斑实验,结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,与 90°垂直入射形成的“W”型抛光斑相比,倾斜一定角度后,入射方向前方的材料去除量大大幅度减小。从三维图中可以看出,75°和 60°入射点的后方有明显的材料凸起,可以推断凸点即为各入射角度对应的滞止点^[13]。并且,随着倾斜

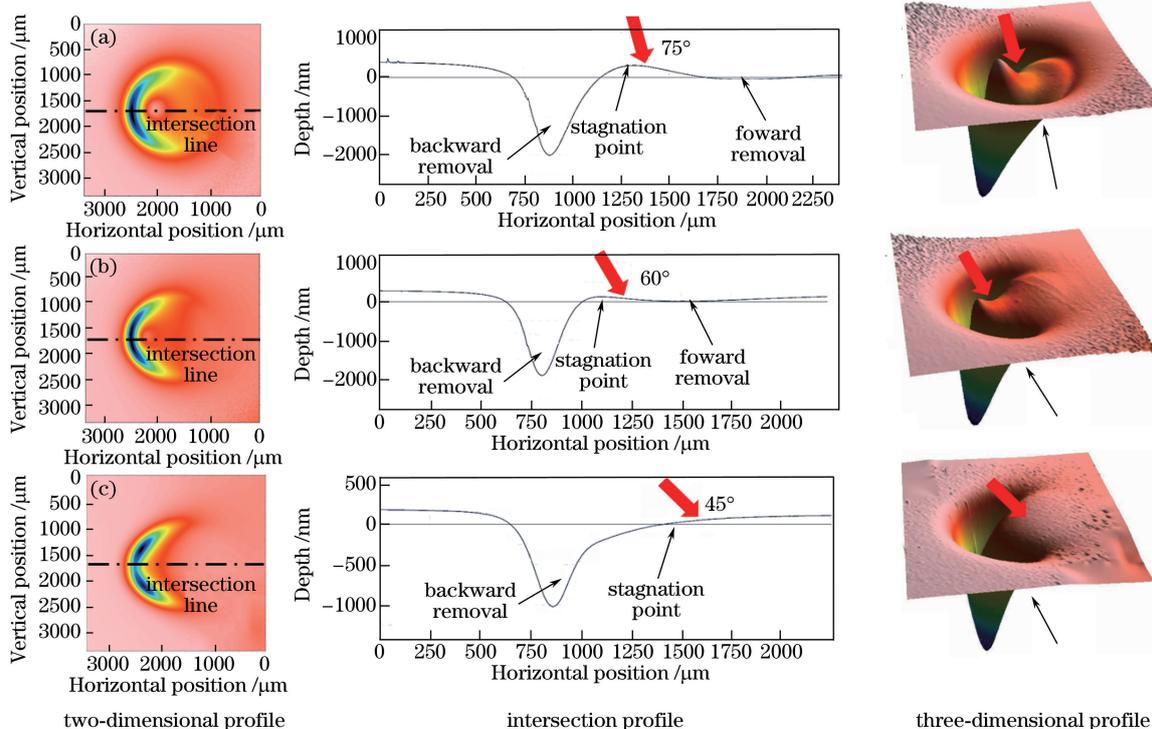


图 3 不同的入射角度下的定点采斑结果。(a) 75°;(b) 60°;(c) 45°

Fig. 3 Spot-taking results at fixed point under different incidence angles. (a) 75°; (b) 60°; (c) 45°

角度的进一步增大,入射方向前端的材料去除量进一步减小。在 45°入射情况下,由于入射方向前端的材料去除量过小,滞止点的位置不明显。

2.3 高斯型材料去除对应的喷嘴高度范围

避免盲目实验,同时能用尽量少的采斑次数确定高斯型材料去除对应的喷嘴高度,首先应确定喷嘴高度可能处于的范围。以 45°斜入射为例,喷嘴高度处于不同位置时材料去除的形貌示意图如图 4 所示。

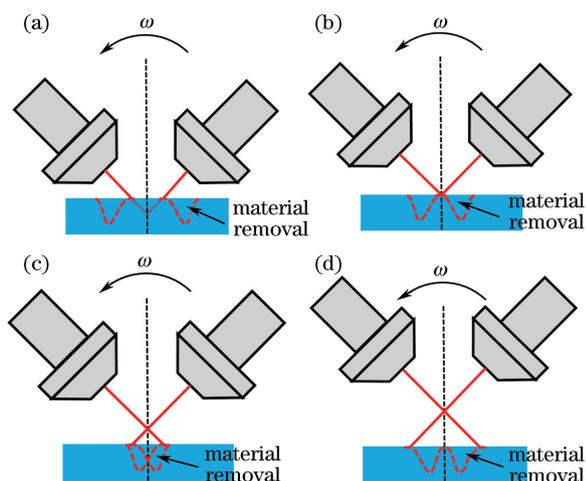


图 4 交点在不同位置的斜入射材料去除的示意图。

(a)位于工件表面下方;(b)位于工件表面;(c)位于工件表面上方;(d)位于工件表面上方且材料去除无重叠

Fig. 4 Schematic of material removal under oblique incidence for intersection point at different positions.

(a) Beneath workpiece surface; (b) on workpiece surface; (c) above workpiece surface; (d) above workpiece surface and no overlap of material removal

如图 4(a)所示,当射流束与回转轴线的交点位于工件表面下方时,旋转扫掠过程中材料去除量基本没有重叠,整体材料去除呈现环状。当射流束与回转轴线的交点位于工件表面时,如图 4(b)所示,只有材料去除较少的一侧有部分重叠,整体材料去除仍呈现环状。进一步提高喷头高度,当射流束与回转轴线的交点位于工件表面上方时,如图 4(c)所示,材料去除较深的部分开始重叠,整体材料去除有可能呈现高斯型。继续提高喷头高度,当射流束与回转轴线的交点离工件表面上方较远时,如图 4(d)所示,两侧的材料去除出现分离,整体材料去除呈现环状。根据以上分析可初步得出,射流束与回转轴线的交点应位于工件表面上方,且离工件表面的距离不应过大。

2.4 材料去除形貌的理论计算方法

为验证定性分析的准确性,建立了体旋转扫掠

算法以求解旋转扫掠后的材料去除形貌。算法以 45°入射形成的单个抛光斑为基础,示意图如图 5 所示。 O 点在沿射流束方向的接近材料去除区域的边缘处, O_0 在另外一侧的边缘处。当喷嘴的高度发生变化时,旋转扫掠的轴线应位于对称线上(图 5 中的点画线)。

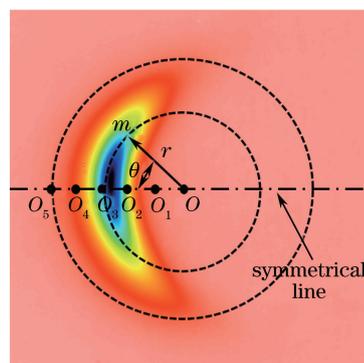


图 5 旋转扫掠法求解去除形貌的示意图

Fig. 5 Schematic of rotary sweeping method used for calculating material removal profile

假设无旋转斜入射的采斑时间为 t ,回转中心为 O 点,以 O 点为原点建立极坐标系。假设点 m 的坐标为 (r, θ) , r 为点 m 到点 O 的距离, θ 为点 m 到点 O 的连线与对称线的夹角。定义该点 m 的去除深度函数为 $Z(r, \theta)$,由于 FJP 的去除深度与驻留时间成正比,故可定义单位时间的去除深度为 $z(r, \theta) = Z(r, \theta)/t$ 。若在此工艺参数条件下进行喷嘴转速为 n 的旋转扫掠加工,则得到的喷嘴旋转一圈所需的时间为 $1/n$,这段时间内该点对工件材料的去除量为

$$V_r = z(r, \theta) \cdot \frac{1}{n}. \quad (1)$$

点 m 旋转形成的去除函数为中心对称的周长为 $2\pi r$ 的圆环,故可取极坐标系中任一角度截面建立 (r, d') 坐标系,其中 d' 为该处的去除深度。可得到点 m 在旋转扫掠加工中形成的去除深度,该去除深度在 (r, d') 坐标系中为

$$d_r(r) = \frac{z(r, \theta)}{2\pi r} \cdot \frac{1}{n}. \quad (2)$$

对于距回转中心为 r 的圆环,其在 (r, d') 坐标系中的总去除深度为圆环上所有点对应的去除深度之和,即为对(2)式的环路积分,可写为

$$D_r(r) = \oint \frac{z(r, \theta)}{2\pi r} \cdot \frac{1}{n} \cdot dS, \quad (3)$$

式中 S 为积分环路的弦长。

利用白光干涉仪对无旋转斜入射形成的去除函

数进行提取,所得到的数据为 1024×1024 的离散矩阵,因此需对(3)式的连续数学模型进行离散化处理。即对于距回转中心为 r 的圆环,将沿环路的积分离散为圆环上有限个数据点 $m_1, m_2, m_3, \dots, m_k$ (k 为数据点的个数)所对应的深度的和,可写为

$$D_r = \sum_{i=1}^k \frac{z(r_i, \theta_i)}{2\pi r} \cdot \frac{1}{n} \cdot \Delta S, \quad (4)$$

式中 ΔS 为数据点 m_i 在圆环上的弦长。又由于 FJP 中去除函数的面积较小且数据点的分布较为密集,因此可进行近似:

$$\Delta S \approx \frac{2\pi r}{k}. \quad (5)$$

于是得到离散后 (r, d') 坐标系中总体去除深度

的分布函数为

$$D_r(r) = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k \left[z(r_i, \theta_i) \cdot \frac{1}{n} \right]. \quad (6)$$

利用 MATLAB 软件对白光干涉仪采集的数据进行处理,以 45° 入射抛光斑的中心截面上的一系列点为回转中心,进行体去除形貌的计算(取 O 和 O_5 之间均匀分布的 6 个点,即 $O, O_1, O_2, O_3, O_4, O_5$, 如图 5 所示),得到在 (r, d') 坐标中的去除函数,如图 6 所示,其中 paramount center 表示去除函数中心凸起的峰值点。由于去除函数是回转对称的,故计算过程中只取横坐标的一半,实际的去除函数曲线是图 6 所示曲线相对于纵坐标的对称形貌。

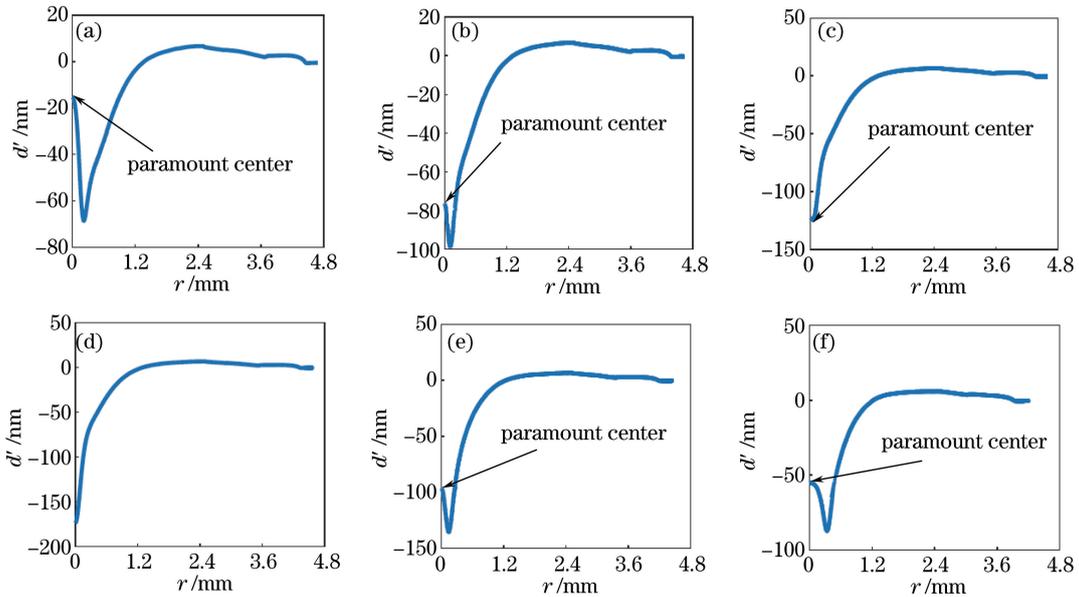


图 6 半截面线。(a)回转轴位于 O 点;(b)回转轴位于 O_1 点;(c)回转轴位于 O_2 点;(d)回转轴位于 O_3 点;(e)回转轴位于 O_4 点;(f)回转轴位于 O_5 点

Fig. 6 Semi-profiles. (a) Rotational axis at O ; (b) rotational axis at O_1 ; (c) rotational axis at O_2 ; (d) rotational axis at O_3 ; (e) rotational axis at O_4 ; (f) rotational axis at O_5

图 6 所示为回转中心从 O 逐渐过渡到 O_5 点时去除函数的变化过程,可以看出,以 O_2, O_3 为中心进行回转得到的去除函数曲线已基本接近高斯型,过渡到 O_4 和 O_5 点以后,中间部分又出现尖峰,因此可以判断能形成高斯型去除函数的回转轴心应位于 O 点左侧,对应于图 4(c)所示的情况,证明了定性分析的正确性。

3 高斯型去除函数的快速生成实验方法

根据前文的分析,设计了斜入射的实验装置,其结构如图 7 所示,主要包含可拆卸式的红宝石测头、

标准锥和固定的喷嘴,喷嘴的斜入射角度为 45° 。标准锥和测头端点分别记为 A, B 。装置装配好后通过触碰法检测 A, B 两点之间的高度差,记为 Δz 。

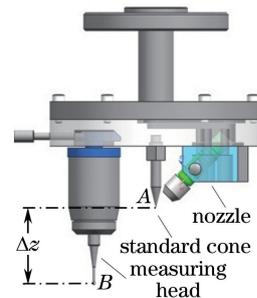


图 7 FJP 喷头的结构示意图

Fig. 7 Structural diagram of jet nozzle

图 8 所示为喷嘴位置和角度的校准照片。标准锥位于主轴的回转轴线上,调整喷嘴的角度和方向,使射流束刚好经过标准锥的顶点 A 以进行校准。此时标准锥的端点 A 即为射流束与回转轴线的交点。实验过程中先利用测头测量工件的表面高度,记录此时对应的机床 Z 轴坐标 z_1 。根据相对位置关系, Z 轴高度调整为 $(z_1 - \Delta z)$ 时射流束与 Z 轴的交点应正好位于工件表面。



图 8 喷嘴位置和角度校准

Fig. 8 Adjustment for position and angle of jet nozzle

基于前文分析,高斯型去除函数对应的喷嘴高度范围较小,通过实验寻找高斯斑对应的喷嘴高度 h 的过程可规划如下:

- 1) 预先标定红宝石测头与标准锥端点 A 的相对位置差 Δz ;
- 2) 用测头测量工件表面,记录此时 Z 轴对应的坐标 z_1 ;
- 3) 将 Z 轴下降至 $z_2 = z_1 - \Delta z$,此时射流束与 Z 轴的交点正好位于工件表面;
- 4) 进行回转采斑实验,设回转采斑时间为 t ,实验过程中 t 可根据材料的去除率设定;
- 5) 采斑完成后,将主轴高度上升 Δh ,为保证实验结果精确, Δh 不宜过大,然后重复步骤 4)~5),直至采集完第 9 个斑;
- 6) 对每个去除函数的形态进行分析。

实验过程中各参数见表 1。

采斑后工件整体面形的测量结果如图 9 所示,采斑顺序为从左至右、从上至下,按采斑顺序对抛光斑进行编号。由于 FJP 光斑的尺寸一般较小(直径约为 3 mm),采斑件的初始面形精度较高,因此在分析抛光斑的形态时初始面形误差可以忽略不计。

FJP 光斑尺寸较小,且斑内陡度相对较高,因此激光干涉仪无法准确分析出抛光斑的形态,可利用白光干涉仪进行分析。斑 1~9 的面形及中心截面轮廓如图 10 所示。

表 1 多点采斑实验参数

Table 1 Parameters for multi-spot-taking experiment

Parameter	Content
Base fluid	Deionized water
Type of abrasive	CeO ₂
Mass fraction of slurry / %	8
Jet pressure /MPa	1
Fluctuation of pressure	<±1%
Jet angle / (°)	45
Diameter of jet hole /mm	1
Initial nozzle height /mm	10
Dwelling time for each spot t /s	60
Rising height for each spot Δh / μ m	50
Size of workpiece / (mm×mm×mm)	20×20×10
Height difference Δz /mm	41.968

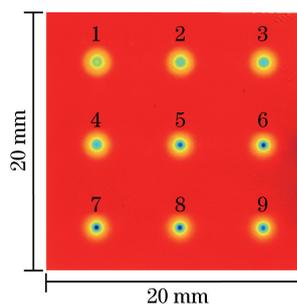


图 9 采斑件的面形测量结果

Fig. 9 Results of surface shape measurement of spot-taking workpiece

从图 10 可以看出,只需经过有限的实验次数(本实验为 5 次)便可得到高斯型去除函数所对应的喷嘴高度。随着喷头高度逐渐增大,抛光斑的形态由“W”型逐渐收敛至高斯型。到第 9 个斑时,抛光斑的底部变得平滑,成为类似截顶的高斯型,中间区域稍有凸起。可以推测,若继续抬高喷头位置,抛光斑底部将出现凸起,截面轮廓将类似于 4 号抛光斑的。同时,也可以注意到,5~8 号抛光斑均为高斯型,只是去除深度有所不同,这说明形成高斯型抛光斑时对应的喷头高度并不是某个具体值,而是一个区间。在实际加工过程中,可将喷嘴高度设置在该段区域的中间,在一定程度上保证材料的去除形态为高斯型。

4 高斯型去除函数的形态分析及动态验证

以 6 号斑为例对实验获得的高斯型去除函数进行特性分析。选取该抛光斑的南北(N-S)、东西(W-E)、西北东南(NW-SE)及东北西南(NE-SW)四个方向上过中心点的剖面线进行对比分析,结果如图 11 所示。

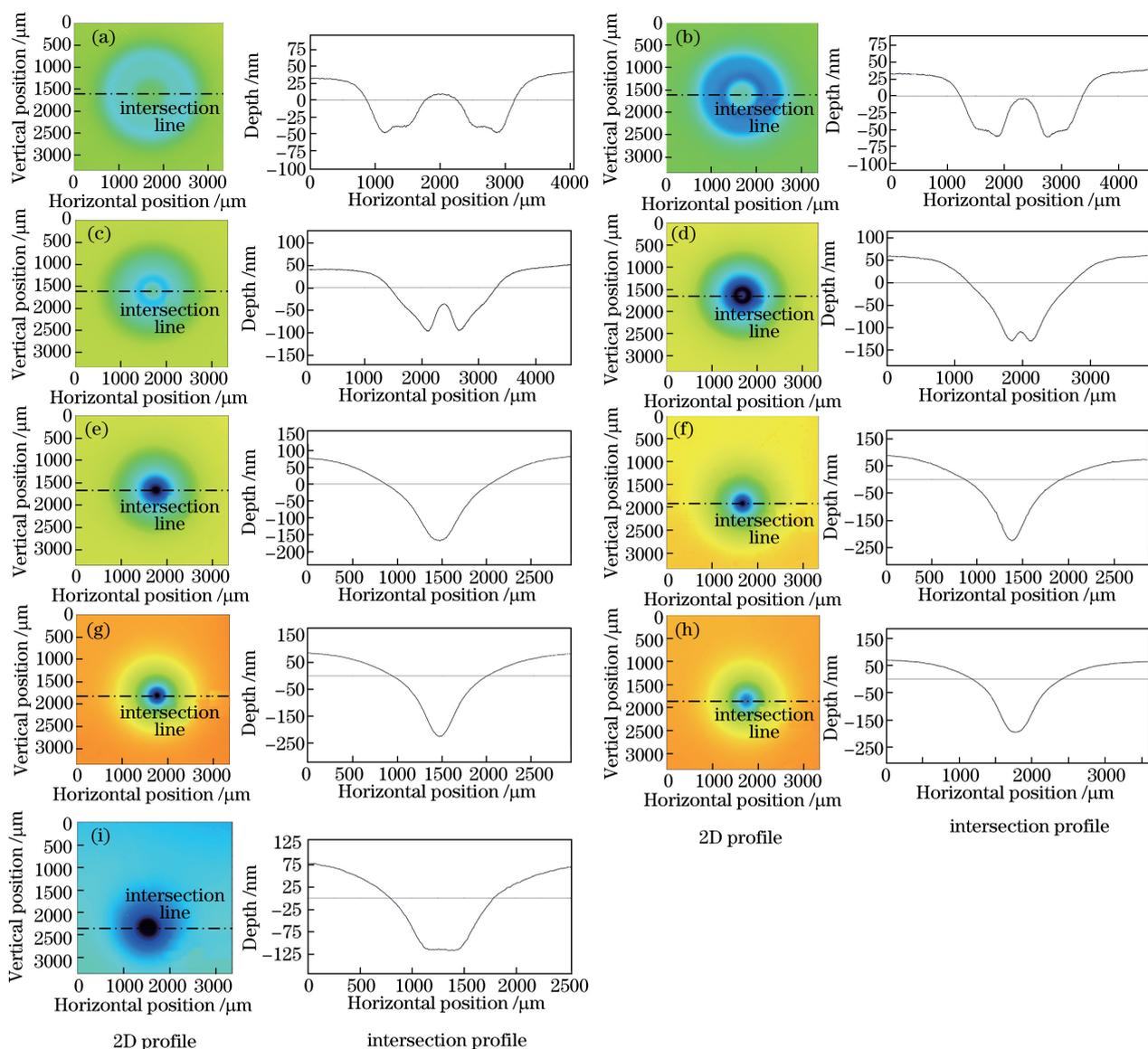


图 10 不同斑的面形及中心截面轮廓。(a) 1号;(b) 2号;(c) 3号;(d) 4号;(e) 5号;(f) 6号;(g) 7号;(h) 8号;(i) 9号
 Fig. 10 Surface shapes and intersection profiles of different spots. (a) No. 1; (b) No. 2; (c) No. 3; (d) No. 4;
 (e) No. 5; (f) No. 6; (g) No. 7; (h) No. 8; (i) No. 9

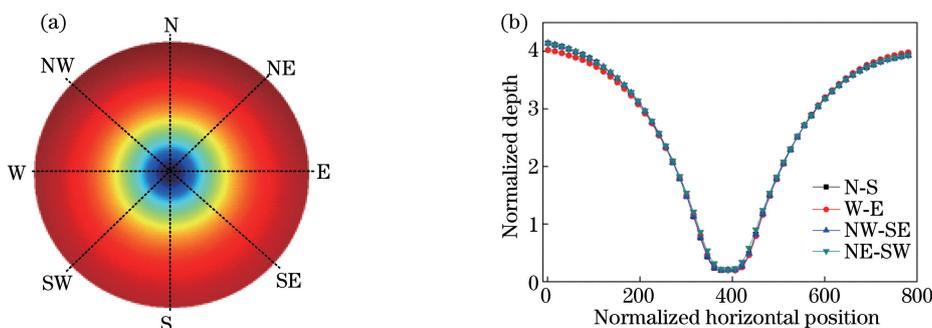
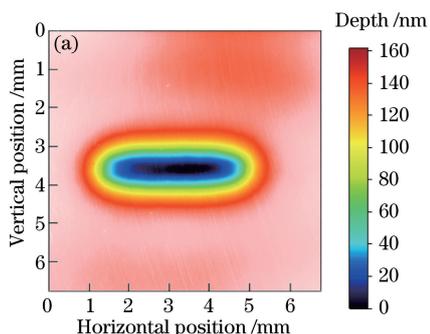


图 11 6号抛光斑不同方向剖面轮廓的对比。(a)位置示意图;(b)剖面轮廓

Fig. 11 Comparison among intersection profiles of spot No. 6 along different directions. (a) Position diagram; (b) profile
 无量纲化处理后,各个方向轮廓的平均最大深度为 3.9,四条剖面轮廓的最大差值为 0.18,故最大
 相对误差约为 4.6%。
 以 6号抛光斑对应的主轴高度 z_6 及表 1 中的

工艺参数进行动态去除实验,喷嘴以 3 mm/min 的速率作匀速直线运动,在工件表面加工出了一条直线沟槽,如图 12 所示。

取沟槽不同位置的剖面线进行对比,结果如图



13 所示。

5 条剖面线的平均最大深度约为 120 nm,最大深度差为 8 nm,得到动态去除过程中的相对误差为 6.7%。

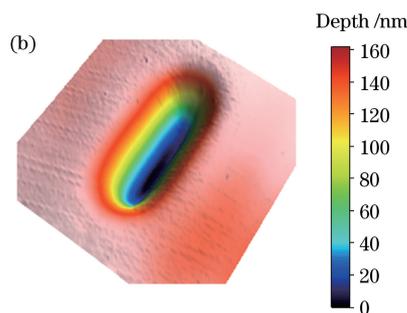


图 12 基于 6 号斑对应参数加工的直线沟槽。(a)二维;(b)三维

Fig. 12 Straight groove processed based on the corresponding parameters of spot No. 6

(a) Two-dimension; (b) three-dimension

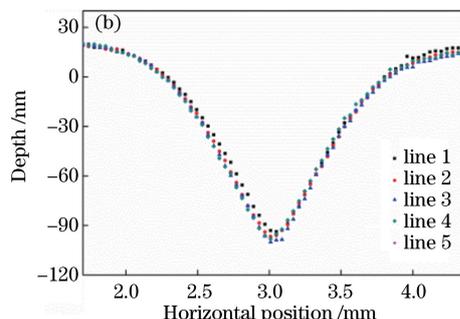
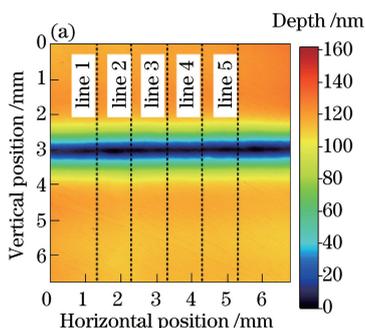


图 13 直线沟槽不同位置处的剖面线对比。(a)位置示意图;(b)剖面线

Fig. 13 Comparison among intersection lines at different positions of straight groove. (a) Position diagram; (b) section line

考虑到机床运动误差和压力波动及抛光液粘度变化等随机因素的影响,沟槽深度相对误差在 7% 以内的动态稳定性基本能满足超精密光学抛光的需求。

的喷嘴高度处于一个区间范围内。在此范围内,材料去除的形态相似,但总体去除量有所差异。在实际加工过程中,将喷嘴高度取为该区间的中间值,在一定程度上可提高材料去除形态的稳定性。

5 结 论

参 考 文 献

为提高 FJP 的工艺效率,提出了一种快速获得高斯型去除函数的实验方法。在分析斜入射定点去除所形成的抛光斑形态与入射点的关系的基础上,设计了实验装置,并通过多点旋转扫掠方法在有限实验次数下获得了高斯型去除函数,确定了对应的工艺参数,有效提高了 FJP 的工艺效率,主要结论如下。

- [1] Pang Z H, Fan X W, Ma Z, *et al.* Free-form optical elements corrected aberrations of optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0522001.
庞志海, 樊学武, 马臻, 等. 自由曲面校正光学系统误差的研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0522001.
- [2] Wang C C, Zou G Y, Pang Z H, *et al.* Analysis on development error of segmented mirror optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1122005.
王臣臣, 邹刚毅, 庞志海, 等. 拼接主镜光学系统展开误差的分析[J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 1122005.
- [3] Fang H. Fluid jet polishing technology[D]. Suzhou: Soochow University, 2004: 8-12.

1) 随着倾斜角度的增大,FJP 形成的材料去除形貌将由“W”型逐渐转变为“弦月型”,射流方向前方的材料去除量将显著减少,说明颗粒竖直方向的运动速度在材料去除过程中也发挥着重要的作用。

2) 在一定条件下,形成高斯型去除函数时对应

- 方慧. 液体喷射抛光技术[D]. 苏州: 苏州大学, 2004: 8-12.
- [4] Fahnle O W, Brug H V. Fluid jet polishing: removal process analysis [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3739: 68-77.
- [5] Booij S M. Fluid jet polishing-possibilities and limitations of a new fabrication technique[D]. Delft: Delft University of Technology, 2003.
- [6] Guo P J, Fang H, Yu J C. Research on material removal mechanism of fluid jet polishing[J]. Laser Journal, 2008, 29(1): 25-27.
郭培基, 方慧, 余景池. 液体喷射抛光技术研究[J]. 激光杂志, 2008, 29(1): 25-27.
- [7] Fang H, Guo P J, Yu J C. Optimization of the material removal in fluid jet polishing[J]. Optical Engineering, 2006, 45(5): 053401.
- [8] Booij S M, Brug H V, Fahnle O W. Computational model for prediction of shaping with FJP and experimental validation[C]. Optical Fabrication and Testing, 2002, 76: OTuB1.
- [9] Li Z Z. Study on abrasive jet polishing technology [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011: 43-46.
李兆泽. 磨料水射流抛光技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2011: 43-46.
- [10] Zhang X C, Dai Y F, Li S Y, *et al.* Analysis of material removal mechanism in magnetorheological jet polishing by CFD[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2007, 29(4): 110-115.
张学成, 戴一帆, 李圣怡, 等. 基于CFD的磁射流抛光去除机理分析[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(4): 110-115.
- [11] Li Z Z, Li S Y, Dai Y F, *et al.* Effects of various parameters on material removal rate and the footprint in abrasive jet polishing process[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(21): 2532-2535.
李兆泽, 李圣怡, 戴一帆, 等. 磨料射流抛光中各工艺参数对材料去除率及抛光区形貌的影响[J]. 中国机械工程, 2008, 19(21): 2532-2535.
- [12] Shi C Y, Yuan J H, Wu F, *et al.* Influence analysis of impact angle on material removal profile in fluid jet polishing[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(2): 513-517.
施春燕, 袁家虎, 伍凡, 等. 冲击角度对射流抛光中材料去除面形的影响分析[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 513-517.
- [13] Dong Z Y. Fluid jet mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2005: 34-37.
董志勇. 射流力学[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 34-37.