

# 射流抛光中抛光液黏度对材料去除函数的影响

孙鹏飞\*, 张连新, 李建, 王中显, 周涛

中国工程物理研究院机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621000

**摘要** 抛光液黏度是影响射流抛光(FJP)效果的重要因素,针对硬脆光学元件射流抛光中对抛光液黏度缺乏系统研究的现状,研究了抛光液黏度变化对材料去除函数的影响。建立射流抛光连续相、离散相模型和磨损模型,计算不同黏度下磨粒运动轨迹,分析磨料颗粒撞击速度矢量随黏度的变化规律。配置不同黏度相同质量分数的抛光液,结合BK7工件静态采斑实验研究与塑性磨损理论计算,获得不同黏度下的材料去除函数,分析黏度对去除函数的影响机制,并进一步研究由此引起的工件表面粗糙度变化。结果表明:随着抛光液黏度增大,材料去除函数的去除深度减小、去除形状及去除范围保持不变,这有利于降低工件表面粗糙度。该研究扩展了现有光学元件射流抛光材料去除理论,对实际抛光液黏度调控具有理论指导意义。

**关键词** 光学加工; 射流抛光; 抛光液; 黏度; 材料去除

中图分类号 TH162.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1222003

## Influence of Polishing Slurry Viscosity on the Material Removal Function for Fluid Jet Polishing

Sun Pengfei\*, Zhang Lianxin, Li Jian, Wang Zhongyu, Zhou Tao

*Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics,  
Mianyang, Sichuan 621000, China*

**Abstract** The viscosity of the polishing slurry is an important parameter during the fluid jet polishing (FJP) of optical elements. Polishing slurry viscosity in the FJP of hard and brittle optical components has not been extensively investigated. This study therefore investigates the influence of viscosity on the material removal function in the FJP process. The physical models of continuous-phase, discrete-phase, and erosion processes are also proposed for FJP. Pathlines of abrasive particles with different viscosities are calculated, and the variation rule of impact velocity vector of abrasive particles with viscosity is analyzed. Using the polishing slurries with different viscosities but the same mass fraction, the effect of viscosity on material removal function is obtained by combining the static mining-spot experiment with plastic-wear theory for a BK7 optical glass workpiece. The influence of viscosity on the material removal function and the influence on the surface roughness after uniform polishing are evaluated. The results indicate that as the slurry viscosity increases, the form of the material removal function and the material removal range remain the same, whereas the material removal depth decreases exponentially and the surface roughness of the optical elements is improved. Results of this study expand the knowledge of FJP material removal mechanisms and have theoretical significance regarding the control of polishing slurry viscosity.

**Key words** optics fabrication; fluid jet polishing; polishing slurry; viscosity; material removal

**OCIS codes** 220.4610; 240.5450

## 1 引 言

随着空间光学、高功率激光及军事等应用领域的不断发展,现代光学系统对高精度非球面和自由曲面等复杂型面光学元件的需求逐步增大<sup>[1]</sup>,传统抛光技术难以满足这类光学元件的加工要求。研究

人员对新型的非球面抛光技术进行了大量研究<sup>[2]</sup>,其中,较有代表性的技术之一是射流抛光技术<sup>[3]</sup>。射流抛光是将射流加工与计算机控制确定性抛光(COSS)技术有机结合,利用混有磨粒的抛光液输送至喷嘴加速,形成柔性射流束,将其作用于工件表面产生材料去除,进一步通过控制射流压力、方向及

收稿日期: 2018-06-04; 修回日期: 2018-07-11; 录用日期: 2018-07-27

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

\* E-mail: pfsun2016@163.com

驻留时间等定量修正待加工工件的面形。相比于其他非球面抛光技术,射流抛光具有边缘效应弱、亚表面损伤低、无热效应及对工件表面形状适应性强等优点,在复杂型面光学元件抛光中有着独特的优势。

研究射流抛光材料去除机理,获得稳定可控材料去除函数是建立抛光工艺控制模型、获得高精度面形的必要条件<sup>[4]</sup>。为此,国内外研究学者围绕射流抛光材料去除机理在理论与实验等方面开展了大量研究。Fähnle 等<sup>[5]</sup>指出射流抛光的入射压力较低,磨粒与工件的碰撞是产生材料去除的关键因素,抛光液基液对材料去除近无贡献。方慧等<sup>[6]</sup>通过纯水射流与磨粒射流对比实验证明了上述观点,并进一步研究了入射角度、入射压力、入射距离和驻留时间等射流工艺参数对材料去除率的影响。李兆泽等<sup>[7]</sup>从脆塑转变临界切削深度理论出发,认为射流抛光材料去除为塑性剪切去除,并分析了磨料种类、粒径和浓度等参数对材料去除率的影响。施春燕等<sup>[8]</sup>基于计算流体动力学理论,研究了入射距离与抛光材料去除的影响。香港理工大学的Cao 等<sup>[9]</sup>将塑性去除理论与流体数值仿真相结合,获得了磨粒、工件材料参数与材料去除率之间的函数关系。

现有射流抛光材料去除机理研究主要围绕射流工艺参数、工件与磨粒参数,针对抛光液黏度的研究相对较少。射流抛光中抛光液的基液通常由水、添加剂和分散剂组成,实际加工中使用添加剂和分散剂的种类和含量不同均会引起抛光液的黏度变化<sup>[10]</sup>,改变材料去除函数,会影响射流抛光效果。本文研究抛光液黏度变化对光学元件射流抛光材料去除函数的影响,首先阐述连续相、离散相数学模型以及磨粒冲蚀磨损模型,在此基础上建立多相射流有限元计算模型,计算不同黏度下的流场分布、磨粒运动轨迹以及射流去除函数,再搭建射流抛光实验平台,结合工艺实验验证仿真分析结果,探究黏度对材料去除函数的影响机制。

## 2 磨料水射流数学模型

射流抛光的基本原理如图 1 所示,抛光液流经喷嘴加速后形成射流束,卷吸周围空气并冲击工件表面产生材料去除,属于典型的气-固-液多相流问题<sup>[11]</sup>。建立能够精确描述多相流运动的数学模型是计算分析黏度对抛光材料去除函数影响的关键,包含用以描述液体与气体速度分布的连续相

模型、用于计算磨粒运动轨迹的离散相模型(DPM)和用于计算材料去除函数的磨损模型三部分。

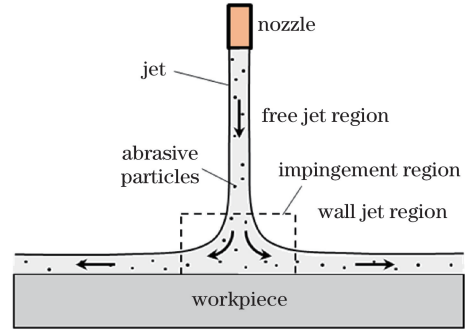


图 1 射流抛光原理图

Fig. 1 Schematic of fluid jet polishing

### 2.1 连续相模型

在射流抛光过程中,可假设抛光液及空气为不可压缩流体,且其温度与密度保持恒定。根据不可压缩形式 Navier-Stokes 方程,可得到连续相控制方程<sup>[12]</sup>:

$$\rho_f \left( \frac{\partial \mathbf{u}_f}{\partial t} + \mathbf{u}_f \nabla \mathbf{u}_f \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u}_f + \mathbf{f}, \quad (1)$$

式中, $\rho_f$ 为流体密度, $\mathbf{u}_f$ 为流体速度, $t$ 为时间, $p$ 为流体压力, $\mu$ 为流体动力黏度, $\mathbf{f}$ 为外力。冲击射流中流体的实际雷诺数远高于层流雷诺数,在流体相控制方程中须加入湍流模型。针对冲击射流中边界层区域雷诺数与流束区域雷诺数相差较大、雷诺数范围宽的特点,在连续相控制方程加入  $k-\omega$  剪切应力运输(SST)湍流模型,以提高求解精度。通过求解上述连续相控制方程,可得到磨料射流中连续相的速度场及压力场分布,为后续磨粒运动求解提供初始条件。

### 2.2 离散相模型

射流束可分为自由射流区、冲击区和壁面射流区,其中,冲击区是发生材料去除的主要区域。在射流的冲击区内,射流由沿喷嘴轴向流动急速改变为平行于工件表面流动,存在较大的压力梯度与速度梯度。根据多相流动力学,磨粒在射流束的携带下的运动方程可表达为<sup>[13]</sup>

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_m + \mathbf{F}_p + \mathbf{F}_B + \mathbf{F}_S + \mathbf{F}_M, \quad (2)$$

式中, $m_p$ 为颗粒质量, $\mathbf{u}_p$ 为颗粒速度, $t$ 为时间, $\mathbf{F}_d$ 为曳力, $\mathbf{F}_m$ 为附加质量力, $\mathbf{F}_p$ 为压力梯度力, $\mathbf{F}_B$ 表示由黏性流体惯性引起的 Basset 力, $\mathbf{F}_S$ 表示由流体速度梯度引起的 Saffman 力, $\mathbf{F}_M$ 表示由颗粒旋转引起的 Magnus 力。由于射流抛光使用的磨粒粒径通

常为  $\mu\text{m}$  级甚至亚  $\mu\text{m}$  级,在该尺度下,颗粒受到的附加质量力  $\mathbf{F}_m$ 、压力梯度力  $\mathbf{F}_p$  以及 Basset 力  $\mathbf{F}_B$  可近似忽略,(2)式可简化为

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_M, \quad (3)$$

$$\begin{cases} \mathbf{F}_d = 3\pi\mu d_p (\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p) (1 + 3Re/16) \\ \mathbf{F}_s = 1.61d_p^2 \sqrt{\rho_p \mu} (\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p) \frac{\partial \mathbf{u}_f}{\partial y} \\ \mathbf{F}_M = \frac{1}{8} \pi d_p^3 \rho_f \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p) \\ Re = \frac{d_p \rho_f |\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p|}{\mu} \end{cases}, \quad (4)$$

式中,  $d_p$  为磨粒直径,  $\rho_p$  为磨粒密度,  $\boldsymbol{\omega}$  为磨粒旋转速度,  $Re$  为颗粒雷诺数。射流抛光中磨粒质量分数通常低于 10%, 可根据(3)式和(4)式, 结合控制方程(1)式求解得到连续相速度场及压力场分布, 通过离散相模型求解得到磨粒的运动轨迹, 获得磨粒与工件表面的碰撞速度以及磨粒质量分数空间分布, 并将其作为磨损模型的数据输入进而求解射流抛光材料去除函数。

### 2.3 磨损模型

磨料射流产生的材料去除函数可以看作是一定时间和一定区域内射流束携带的每个磨粒产生材料去除量之和。假定喷嘴出口速度为  $\mathbf{u}_0$ , 基于离散相模型可计算得到磨粒与工件的碰撞速度  $\mathbf{u}_p$ 、碰撞角度  $\theta$ 。射流抛光的去除函数  $Q(x)$  可表达为<sup>[9]</sup>

$$Q(x) = \frac{3k_p C u_0 t \pi d_n^2}{2\rho_p d_p^3} f(x) E, \quad (5)$$

$$f(x) = A \exp\left(-\frac{1}{2} \left|\frac{x}{B}\right|^\lambda\right), \quad (6)$$

式中:  $k_p$  为实际参与材料去除的磨粒比例系数, 表征磨粒与工件表面的接触概率<sup>[9]</sup>;  $C$  为磨粒质量分数;  $d_n$  为喷嘴出口直径;  $f(x)$  为射流束内磨粒分布函数;  $A$  为幅值;  $B$  和  $\lambda$  为特征系数;  $E$  为单个磨粒的材料去除量。已有文献表明, 射流抛光中的材料去除方式为塑性去除, 不存在脆性去除。在假设磨粒为球形刚体的前提下, 根据 Oka 塑性去除模型<sup>[14]</sup>,  $E$  可表示为

$$E = K (H_v)^{k_1} \left(\frac{u_p}{u'}\right)^{k_2} \left(\frac{d_p}{d'}\right)^{k_3} g(\theta), \quad (7)$$

$$g(\theta) = (\sin\theta)^{n_1} [1 + H_v (1 - \sin\theta)]^{n_2}, \quad (8)$$

$$\begin{cases} n_1 = s_1 (H_v)^{q_1} \\ n_2 = s_2 (H_v)^{q_2} \end{cases}, \quad (9)$$

式中:  $K$  为比例系数;  $H_v$  为工件维式硬度, 单位为

GPa;  $u'$ ,  $d'$  分别为参考速度与参考粒径;  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  及  $k_3$  为幂指数系数。以上各参数需要根据实际实验中磨粒与工件参数确定。在离散相模型计算获得磨粒运动轨迹的基础上, 结合实际实验工况确定各项系数, 依据(5)~(9)式即可计算得到射流抛光材料去除函数。

## 3 仿真建模与计算

### 3.1 仿真模型及参数设置

以喷嘴轴线与工件表面法向重合的垂直入射方式为研究对象, 基于 2 节所述数学模型在 Fluent 软件中建立如图 2 所示仿真模型。入口边界条件设为速度入口, 出口边界条件设为压力出口, 工件表面设置为壁面边界条件。定义喷嘴出口直径为 1 mm, 入射距离为 10 mm, 射流入射速度为 30 m/s, 抛光粉材料为氧化铈, 粒径为 1  $\mu\text{m}$ , 质量分数为 4%。已有文献表明, 甘油与水均为牛顿流体, 其任意比例的混合物依然是牛顿流体, 流体黏度在抛光过程中可近似视为常数。因此, 拟采用 5 种不同比例的甘油和水混合物作为抛光液基液, 改变抛光液黏度用于研究黏度对材料去除的影响, 具体黏度参数如表 1 所示。

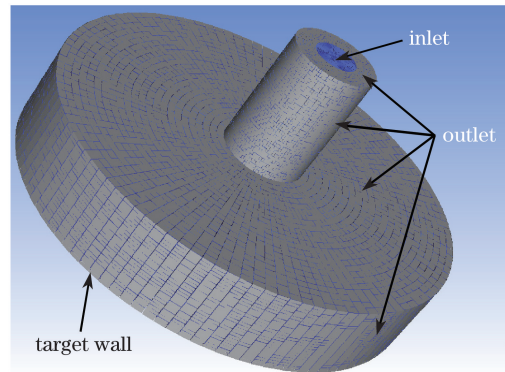


图 2 仿真模型网格划分与边界条件

Fig. 2 Mesh division and surface boundary of simulation model

表 1 抛光液参数

Table 1 Polishing slurry parameters

Number	Volume ratio of water and glycerol	Viscosity / (mPa·s)
1#	10:0	1.01
2#	10:1	1.34
3#	10:2	1.75
4#	10:3	2.24
5#	10:4	2.82

### 3.2 计算结果与分析

在固定入射速度为 30 m/s 的情况下,按表 1 参数分别设置液体黏度,计算获得不同黏度下的速度场分布以及磨粒运动轨迹。在抛光液黏度为 1.01 mPa·s、入射速度为 30 m/s 情况下的射流速度分布以及磨粒运动轨迹如图 3 所示。磨粒速度分布与射流速度总体分布相似,在射流束中心与工件表面交点的位置形成速度为零的“驻点”。

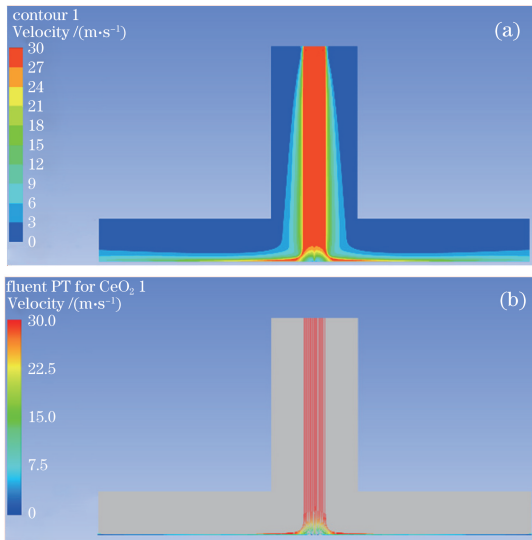


图 3 抛光液黏度为 1.01 mPa·s,入射速度为 30 m/s 时的计算结果。(a)流体速度分布;(b)磨粒运动轨迹

Fig. 3 Calculation results under 1.01 mPa·s polishing slurry viscosity and 30 m/s incident velocity conditions. (a) Velocity of liquid; (b) pathlines of abrasive particles

分析 DPM 模型计算结果,定义磨粒速度方向与工件表面的夹角为磨粒碰撞角度,以驻点为中心,定义驻点坐标为 0,工件表面路径获得的不同黏度下磨粒与工件的碰撞速度、碰撞角度分布如图 4 所示。磨粒撞击工件的速度分布同流体速度分布类似,在驻点处为 0,往两侧先增大后减小,且撞击速度均比射流入射速度低,说明磨粒运动受射流冲击区内边界层剧烈的速度梯度影响而减速。此外,对比相同入射速度下不同黏度的情况,随着黏度的增大磨粒撞击工件速度逐渐降低,磨粒与工件的碰撞角度的分布基本不变,在驻点处最大,往两侧逐渐减小并趋近于 0°。进一步分析磨粒最大撞击速度与抛光液黏度之间的关系,结果如图 5 所示。随着黏度的增大,磨粒最大撞击速度近似呈线性衰减,这是因为黏度增大引起冲击区内速度梯度增大,进而导致磨粒减速行为加剧。相比于 1# 抛光液,5# 抛光液黏度约增大了 180%,对应的磨粒最大碰撞速度

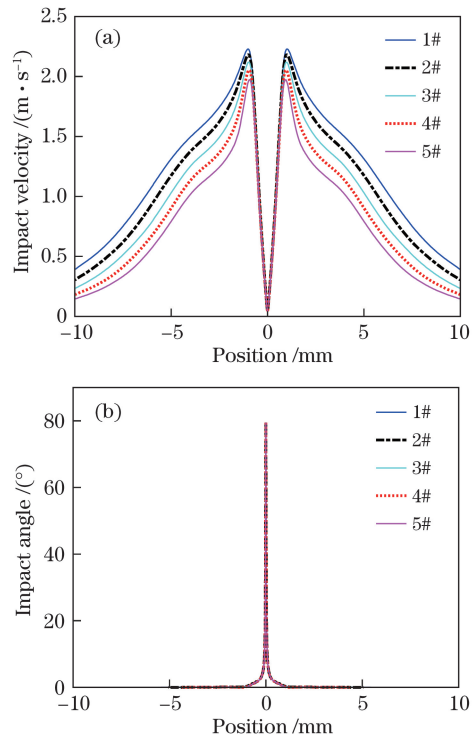


图 4 不同黏度离散相模型计算结果对比。

(a)磨粒碰撞速度分布;(b)磨粒碰撞角度分布

Fig. 4 Comparison of calculation results of DPM under different viscosity conditions. (a) Velocity distribution of abrasive particles; (b) angle distribution of abrasive particles

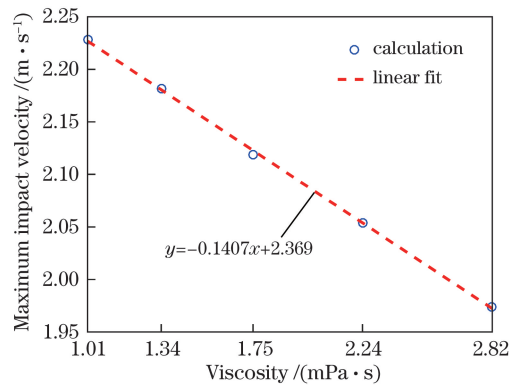


图 5 抛光液黏度对磨粒最大碰撞速度的影响

Fig. 5 Influence of the polishing slurry viscosity on the maximum impact velocity of abrasive particles

约减小为 1# 抛光液的 88.5%。

基于上述磨粒碰撞速度和碰撞角度计算结果,可根据(5)~(9)式进一步分析黏度对材料去除函数的影响。根据已有文献<sup>[15-16]</sup>,塑性去除模型中的  $s_1$ 、 $s_2$  等主要受磨粒材料、形状、粒径和工件材料属性的影响,磨粒分布函数参数主要受喷嘴结构和入射速度的影响,在仅改变抛光液黏度的情况下,可认为这些系数项保持不变。根据前述仿真计算结果,

不同黏度下颗粒碰撞角度保持不变。因此,受黏度影响的主要有磨粒碰撞速度  $u_p$  以及实际参与材料去除的磨粒比例系数  $k_p$ , 材料去除率与两者均呈正相关。一方面,根据前文仿真结果,黏度增大将引起磨粒碰撞速度  $u_p$  减小;另一方面,从物理含义上, $k_p$  反映磨粒与工件碰撞接触概率,随着黏度增大,磨粒与工件之间的润滑加强,可能导致磨粒碰撞接触概率降低,进而引起  $k_p$  减小。综合上述两方面原因,黏度增大将引起材料去除率降低。以上是针对材料去除与黏度之间关系的定性分析,还需要结合实际采斑实验验证上述分析结果,并定量分析黏度对各项系数以及材料去除函数的影响规律。

## 4 射流抛光实验研究

### 4.1 实验方案

在前文分析黏度对材料去除率的影响趋势基础上,在如图 6 所示的射流抛光系统上进行抛光实验研究。抛光液放置于带有匀化装置的储液罐中,经

由供压泵输送至喷嘴加速形成射流束,冲击工件表面并产生材料去除,最后由回收泵输送回储液罐,循环往复对工件进行连续抛光。通过调节供压泵转速可改变喷嘴出口流量,以达到调节射流束入射速度的目的。利用喷嘴前端串联的流量计实时测量管路流量,根据喷嘴口径即可计算获得实际射流束入射速度。

按照表 1 参数配置 5 种不同比例的甘油和水混合物作为抛光液基液,均添加平均粒径  $1\ \mu\text{m}$ 、质量分数 4% 的氧化铈抛光粉,获得 5 种黏度不同的射流抛光液。整个实验过程在  $20\ ^\circ\text{C}$  恒温洁净间中完成,实测抛光液温度波动最大范围为  $\pm 2\ ^\circ\text{C}$ ,可近似认为实验过程中抛光液黏度保持不变。实验中射流束垂直入射速度为  $30\ \text{m/s}$ 、入射距离为  $10\ \text{mm}$ 、喷嘴口径为  $1\ \text{mm}$ ,使用的工件材料为典型硬脆光学材料 BK7,尺寸为  $20\ \text{mm}\times 20\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$ 。采用上述 5 种规格抛光液在 BK7 工件上分别进行静态采斑实验,抛光斑的采斑时间均为  $4\ \text{min}$ 。

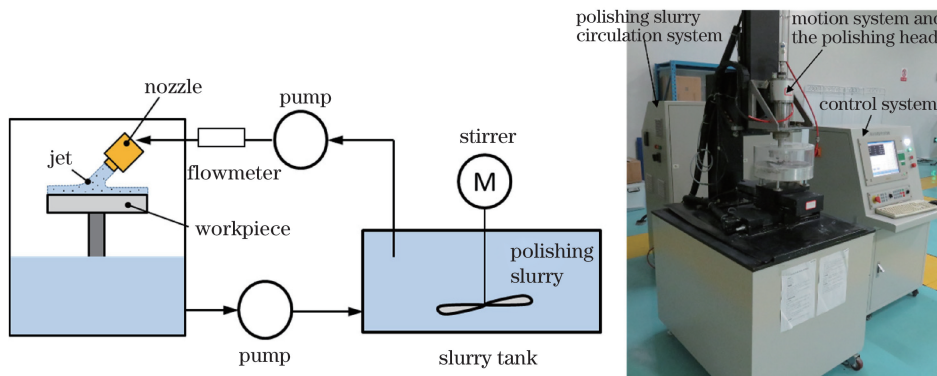


图 6 射流抛光系统结构示意图(左)与实物图(右)

Fig. 6 Schematic (left) and labeled photo (right) of fluid jet polishing system

### 4.2 分析与讨论

利用白光干涉仪测量各抛光斑面形,其中使用 1# 抛光液获得的抛光斑如图 7 所示。各抛光斑均是回转对称型,以中心点取各抛光斑径向路径,获得相应路径上的一维截线材料去除函数分布。同时根据实验中的工况,确定磨损模型主要参数<sup>[15]</sup>以及磨粒分布函数主要参数<sup>[16]</sup>,如表 2 所示,根据实验结果确定比例系数  $k_p$ ,计算相应工况下的材料去除函数  $Q$ 。不同黏度抛光液情况下,采斑实验与理论计算获得的材料去除函数分布对比图如图 8 所示。

在不同的抛光液黏度下,材料去除函数均呈“W”型分布,理论计算与实验获得的材料去除函数分布总体吻合情况较好,证明了上述磨损模型

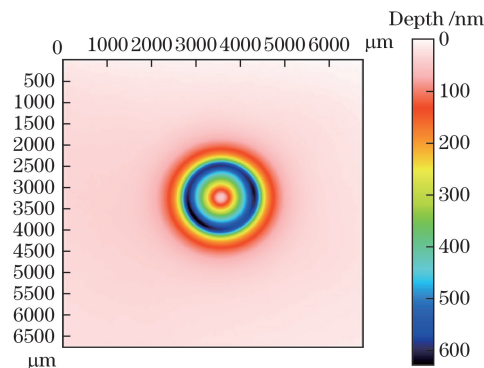


图 7 入射速度为  $30\ \text{m/s}$ 、1# 抛光液条件下的抛光斑

Fig. 7 Polishing spot under 1# polishing slurry with  $30\ \text{m/s}$  incident velocity

的正确性。同时也注意到在使用 4# 和 5# 高黏度抛光液情况下,理论计算结果与实验结果存在一定

表 2 磨损模型参数表

Table 2 Parameters of the erosion model

Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value
$u_0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	30	$s_2$	2.8	A	3.13
$t / \text{s}$	240	$q_1$	0.14	B	$1 \times 10^{-3}$
$d_n / \text{mm}$	1	$q_2$	-1	$\lambda$	2
$\rho_p / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2330	$k_1$	-0.12	$u' / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	104
$d_p / \mu\text{m}$	1	$k_2$	$0.23 H_v^{0.038}$	$d' / \mu\text{m}$	326
$C / \%$	4	$k_3$	0.19		
$s_1$	0.71	K	65		

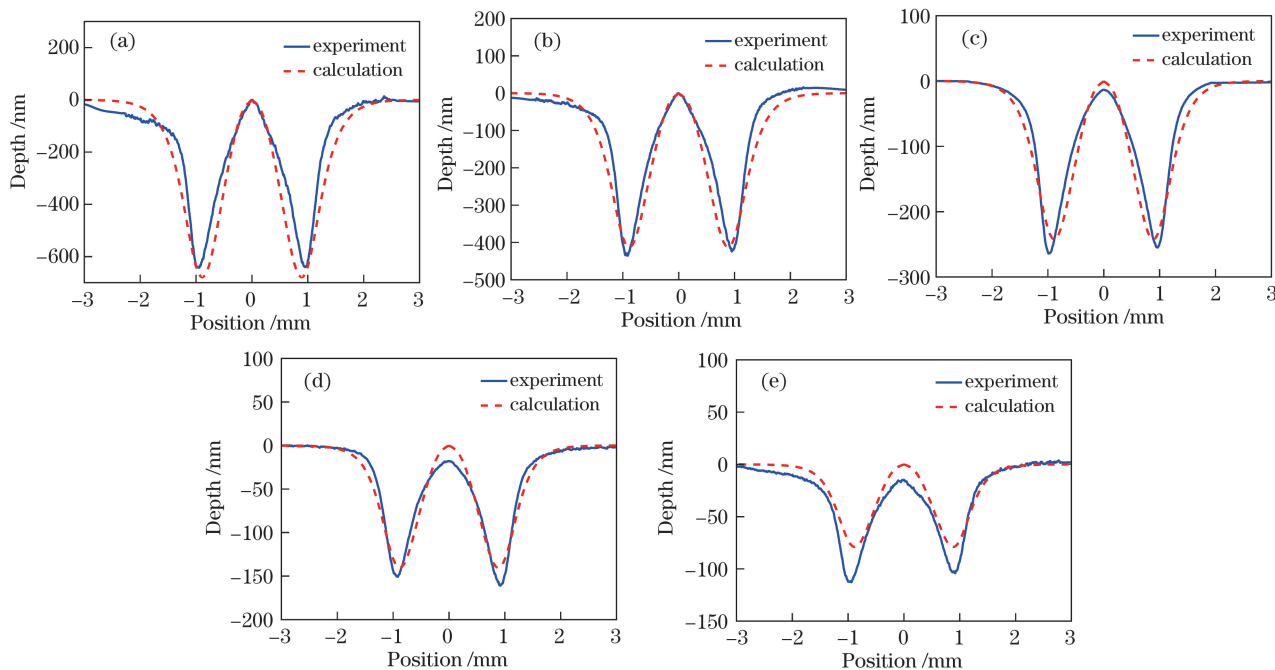


图 8 不同黏度抛光液下材料去除函数实验与计算结果对比。(a) 1# 抛光液;(b) 2# 抛光液;  
(c) 3# 抛光液;(d) 4# 抛光液;(e) 5# 抛光液

Fig. 8 Comparison between the material removal functions obtained by experiments and calculation under different polishing slurry viscosity conditions. (a) 1# polishing slurry; (b) 2# polishing slurry; (c) 3# polishing slurry; (d) 4# polishing slurry; (e) 5# polishing slurry

偏差,实验中去除函数中心的材料去除量不为 0,这可能是由高黏度情况下去除深度较小,材料去除函数受工件初始面形及加工误差等方面的影响增大所致。

进一步分析计算与实验结果,实际参与材料去除的磨粒比例系数与黏度之间的关系如图 9 所示。随着黏度增大, $k_p$  近似呈指数型衰减,5# 抛光液对应的  $k_p$  衰减至 1# 抛光液的 14%,说明抛光液黏度增大将增强磨粒与工件表面之间的润滑,导致磨粒与工件碰撞接触几率降低,材料去除效率减小,这验证了前文中的定性分析结果。随后研究不同黏度下材料去除函数特征量的变化规律,黏度对最大去除

深度的影响如图 10(a)所示,随着黏度增大,实验所得最大去除深度从 642 nm 衰减至 117 nm,衰减幅度达 81.8%,近似呈指数型衰减,说明黏度增大导致材料去除效率减小。另一方面,黏度对“W”型去除函数中峰值去除间距的影响示意图如图 10(b)所示,理论计算所得峰值去除间距保持不变,实验结果与理论计算的相对偏差值在  $\pm 4\%$  以内,说明抛光液黏度变化对材料去除函数形态以及材料去除范围的影响较小。

在获得抛光液黏度对材料去除函数影响规律的基础上,进一步研究上述材料去除函数变化对射流抛光表面粗糙度的影响。以尺寸为  $20 \text{ mm} \times$

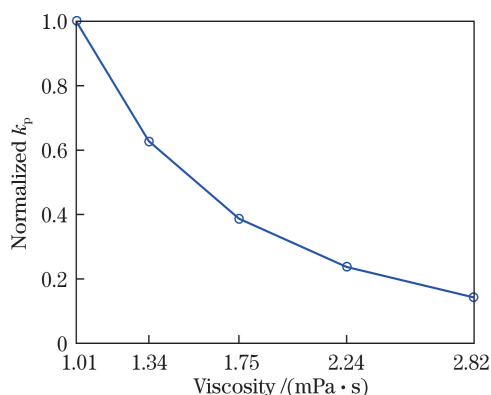


图 9 实际参与材料去除的磨粒比例系数随黏度变化规律  
Fig. 9 Variation law of wear-particle proportion coefficient with viscosity change in material removal

20 mm×10 mm、初始粗糙度  $R_a$  为 1 nm 的 BK7 工件为加工对象,在 30 m/s 入射速度、10 mm 距离垂直入射、3 mm/min 扫描速度及 0.25 mm 进给步长的情况下,分别使用前述 5 种规格抛光液对工件进行 X-Y 均匀扫描加工。观察抛光液黏度变化对工件表面粗糙度  $R_a$  值的影响,使用 1# 与 5# 抛光液加工后获得的工件表面形貌如图 11 所示,表面粗糙度  $R_a$  值随黏度的变化规律如图 12 所示。随着黏度增大,工件表面粗糙度  $R_a$  值从 7.778 nm 降至 1.445 nm,下降了约 81.4%,下降趋势与材料去除率降低趋势相近,均呈指数型降低,说明黏度增大虽然降低了材料去除率,影响加工效率,但同时也提高了加工精度。实际抛光过程中,在粗抛阶段可选择低

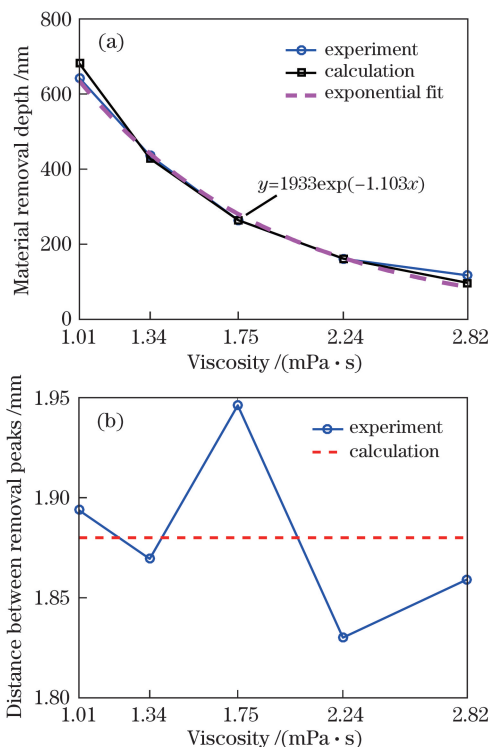


图 10 去除函数特征量随黏度变化规律。  
(a)最大去除深度;(b)去除函数峰值间距

Fig. 10 Variation law of characteristic quantity of removal function for different viscosities. (a) Maximum material removal depth; (b) distance between removal peaks

黏度抛光液,以提高加工效率;精抛阶段则可适当提高抛光液黏度,以提升加工表面精度。

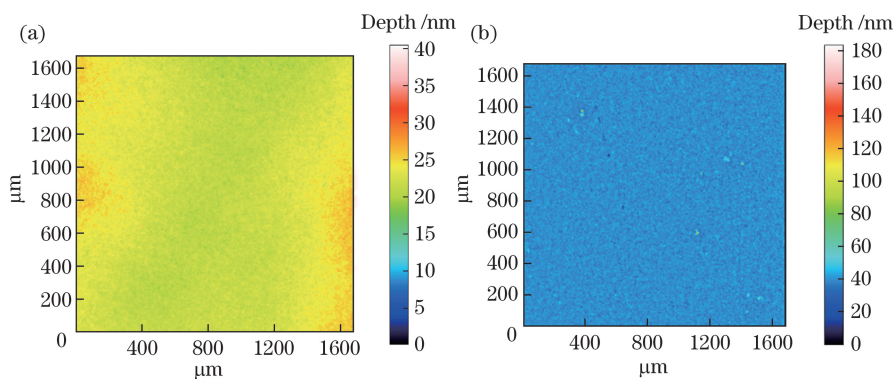


图 11 使用不同黏度抛光液均匀抛光后的工件表面粗糙度对比。  
(a) 1# 抛光液,  $R_a=7.778$  nm; (b) 5# 抛光液,  $R_a=1.445$  nm

Fig. 11 Comparison of surface roughness of workpieces after uniform polishing using different polishing slurry viscosities.  
(a) 1# polishing slurry,  $R_a=7.778$  nm; (b) 5# polishing slurry,  $R_a=1.445$  nm

## 5 结 论

在建立射流抛光数学模型的基础上,结合仿真计算与实验研究了抛光液黏度对射流抛光材料塑性

去除的影响。研究发现:增大抛光液黏度导致射流冲击区速度梯度增大,降低了磨粒撞击速度,最大碰撞速度随黏度近似呈线性减小趋势,碰撞角度则基本保持不变;同时,磨粒与工件表面之间的润滑作用

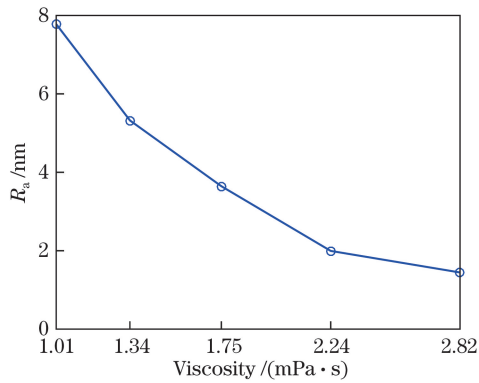


图 12 抛光液黏度对工件表面粗糙度的影响

Fig. 12 Influence of slurry viscosity on the surface roughness of workpieces

增强,磨粒冲蚀磨损过程中参与去除的磨粒比例降低。在这两方面因素共同作用下,随着抛光液黏度的增大,光学元件射流抛光材料去除函数呈现出总体形状保持不变、去除深度近似呈指数型降低及去除范围保持不变的变化特征。进一步的均匀抛光工艺实验结果表明,黏度增大引起的材料去除函数变化有利于降低射流抛光表面粗糙度,提高工件表面质量。为此,在实际抛光过程中,可合理调制抛光液比例成分、调控抛光液黏度;粗抛阶段可选择低黏度抛光液,以提高面形收敛效率;精抛阶段可根据表面粗糙度与黏度之间的指数型关系,结合粗抛结果适当提高抛光液黏度,从而提升抛光精度至满足实际工艺需求。

## 参 考 文 献

- [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像差的研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0522001.
- [2] Yuan J L, Wu Z, Lü B H, *et al.* Review on ultra-precision polishing technology of aspheric surface[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(23): 167-177.  
袁巨龙, 吴喆, 吕冰海, 等. 非球面超精密抛光技术研究现状[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(23): 167-177.
- [3] Lü L, Ma P, Zhu H, *et al.* Effect of material removal function on surface shape error correction in fluid jet polishing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(4): 0416003.  
吕亮, 马平, 朱衡, 等. 水射流抛光去除函数对面形误差修正的影响 [J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0416003.
- [4] Shi C Y, Yuan J H, Wu F, *et al.* Research of errors analysis and material removal stability in fluid jet polishing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0112012.  
施春燕, 袁家虎, 伍凡, 等. 射流抛光误差分析与材料去除稳定性研究 [J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0112012.
- [5] Fähnle O W, Brug H, Frankena H J. Fluid jet polishing of optical surfaces[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(28): 6771-6773.
- [6] Fang H, Guo P J, Yu J C. Analysis of material removal mechanism in fluid jet polishing by finite element method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(2): 218-223.  
方慧, 郭培基, 余景池. 液体喷射抛光技术材料去除机理的有限元分析[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2): 218-223.
- [7] Li Z Z. Study on Abrasive Jet Polishing Technology[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011: 29-32.  
李兆泽. 磨料水射流抛光技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2011: 29-32.
- [8] 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.
- [9] Cao Z C, Cheung C F. Theoretical modelling and analysis of the material removal characteristics in fluid jet polishing[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2014, 89: 158-166.
- [10] Wang R J, Wang C Y, Wen W, *et al.* Experimental study on a micro-abrasive slurry jet for glass polishing[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 89(1): 451-462.
- [11] Fang H, Guo P J, Yu J C. Research on material removal mechanism of fluid jet polishing[J]. *Optical Technique*, 2004, 30(2): 248-250.  
方慧, 郭培基, 余景池. 液体喷射抛光材料去除机理的研究 [J]. *光学技术*, 2004, 30(2): 248-250.
- [12] Beaucamp A, Namba Y, Freeman R. Dynamic multiphase modeling and optimization of fluid jet polishing process[J]. *CIRP Annals*, 2012, 61(1): 315-318.
- [13] Guo L J. Two phase and multiphase fluid dynamics[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002: 340-360.  
郭烈锦. 两相与多相流动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 340-360.
- [14] Oka Y I, Okamura K, Yoshida T. Practical



- estimation of erosion damage caused by solid particle impact: part 1: effects of impact parameters on a predictive equation[J]. *Wear*, 2005, 259(1): 95-101.
- [15] Oka Y I, Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: part 2: mechanical properties of materials directly associated with erosion damage[J]. *Wear*, 2005, 259 (1): 102-109.
- [16] Balz R, Mokso R, Narayanan C, *et al.* Ultra-fast X-ray particle velocimetry measurements within an abrasive water jet[J]. *Experiments in Fluids*, 2013, 54(3): 1476.