

文章编号: 0253-2239(2010)02-0513-05

冲击角度对射流抛光中材料去除面形的影响分析

施春燕^{1,2} 袁家虎¹ 伍 凡¹ 万勇建¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 冲击角度会影响冲击射流的动力特性,对射流抛光的材料去除面形和去除量大小有重要的影响。利用计算流体动力学理论进行了冲击角度对射流抛光中材料磨蚀的影响的仿真和实验研究,分析了冲击角度对冲击射流特性的影响,结合实验研究,基于射流厚度、壁面速度和压力等几个方面分析了冲击角度对材料去除面形的影响,得到了材料去除分布与冲击角度的去除模型的关系描述公式,其材料去除面形分布与实际抛光面形能很好的符合。

关键词 光学加工;射流抛光;冲击角度;材料去除

中图分类号 TH74;TP60 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103002.0513

Influence Analysis of Impact Angle on Material Removal Profile in Fluid Jet Polishing

Shi Chunyan^{1,2} Yuan Jiahu¹ Wu Fan¹ Wan Yongjian¹

(¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Impact angle influences the characteristic of impinging jet and material removal distribution in fluid jet polishing, it is important for precise optics polishing to research the material removal model influence. Simulations are done by Computational Fluid Dynamics for fluid jet polishing with different impact angles, and experiments are carried out. The results of experiments and simulations show that the material is removed by particles impinging wear and wall movement erosion, and the influence of impact angle in material removal distribution is induced by the jet thickness, velocity and pressure distribution on work piece wall. Based on impinging jet theory, the mathematical expression of material removal distribution and impinging angle removal model are deduced. Comparing the impinging angle material removal model and the experiment removal profile, it is found that the impinging angle removal model is exact.

Key words optics fabrication; fluid jet polishing; impinging angle; material removal

1 引 言

随着科学技术的发展,人们对光学系统提出了许多新的要求,光学系统中采用非球面不仅能提高系统性能,还能简化系统结构。鉴于对非球面光学元件的需求,对非球面光学加工技术的完善、发展和创新势不容缓^[1~3]。射流抛光技术是近几年发展起来的一种新型的光学加工技术,与传统的散粒磨料磨削抛光不同,它是通过射流冲击工件表面产生的冲击作用和壁面流动产生的剪切力作用来实现材料的去除。材料的去除率主要与射流的冲击力和剪切

力有关,还受磨粒特性、抛光液浓度、射流距离、射流压力、工件材料特性等影响^[4~7]。

按冲击角度(射流与冲击面的夹角)的不同,射流抛光可分为垂直射流抛光和斜冲击射流抛光。垂直射流抛光是射流垂直冲击到工件壁面,由于射流的轴对称性,得到的工件抛光面形呈对称性的圆环状分布^[6]。对于斜冲击射流抛光,其射流特性比垂直冲击射流特性表现更为复杂,冲击压力与壁面速度不对称分布,射流周围的厚度分布也不一样,材料的磨蚀分布会因冲击角度的不同而显现得不一样。

收稿日期: 2009-03-14; 收到修改稿日期: 2009-04-15

基金项目: 青年科学基金(60808017)资助课题。

作者简介: 施春燕(1984—),男,博士研究生,主要从事先进光学制造技术方面的研究。E-mail: yancshi@163.com

导师简介: 袁家虎(1967—),男,研究员,博士生导师,主要从事先进光学制造技术方面的研究。E-mail: jhyuansz@163.com

材料去除分布的准确表达是抛光工艺控制模型的基础,本文基于计算流体动力学理论,结合射流抛光的特点,从数值仿真和实验研究两方面研究冲击角度对射流抛光中材料磨蚀的影响。

2 仿真分析

为研究冲击角度 θ 对冲击射流特性和抛光效果的影响,基于计算流体动力学(CFD)分析对不同冲击角度的射流抛光过程进行仿真^[8]。斜冲击射流具有一个对称面,为简化计算模型,分别构建了冲击角度分别为 $90^\circ, 70^\circ, 60^\circ, 50^\circ, 45^\circ, 40^\circ$ 和 30° 二维射流抛光模型。射流抛光的仿真模型按实验实际参数进行设置,喷嘴出口直径 $d=1$ mm,通过计算分析得出喷射

距离(喷嘴距工件的距离)为喷嘴口径的 10 倍左右最合适,即喷射距离 $H=10$ mm,入口压力设置为 0.8 MPa,出口压力设置为 0.101 MPa,采用 SIMPLEX 算法对射流抛光模型进行数值模拟^[9]。

图 1 是不同冲击角度的冲击射流流场分布,而图 2 是不同冲击角度的冲击射流在工件壁面上的速度,图 3 是压力分布。从图 1、图 2 和图 3 是可以看出,冲击角度对射流特性的影响是多方面的,射流流场分布、轴线两侧射流厚度分布、工件壁面上的速度分布和压力分布都受冲击角度的影响。对于垂直冲击射流,射流流场、射流厚度、速度和压力都呈对称性分布;随着冲击角度的减小,射流流场表现更为复杂,射流厚度、速度和压力的分布越来越不平衡。

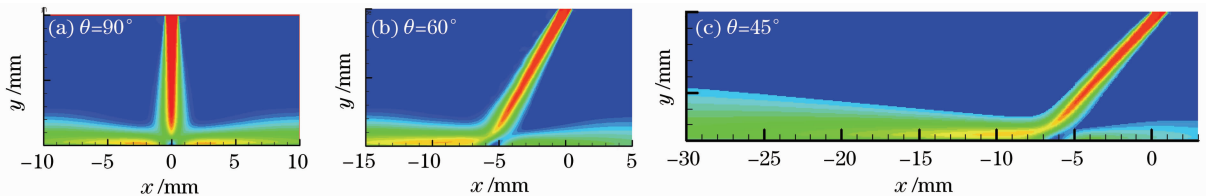


图 1 不同冲击角度模型的射流流场分布

Fig. 1 The flow field with different impact angles

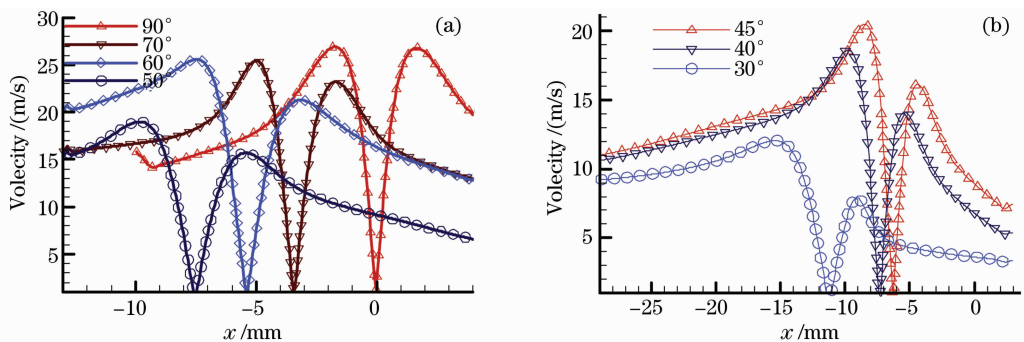


图 2 不同冲击角度模型的工件壁面速度分布

Fig. 2 Velocity distributions on work piece wall with different impact angles

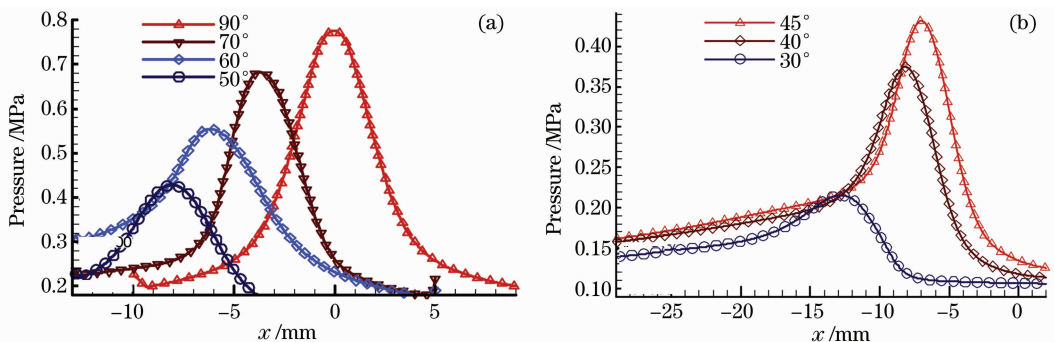


图 3 不同冲击角度模型的工件壁面压力分布

Fig. 3 Pressure distributions on work piece wall with different impact angles

射流冲击到工件壁面上时,有个速度为零值的滞止点,滞止点处流线应和壁面正交,当冲击角度不为 90° 时,该点不在射流轴线的延长线上,而在流线

弯曲程度较大的一侧(即流线弯曲角度较大的一侧),如图 2 所示的速度零值点分布。滞止点偏离射流轴心的距离称为偏心距, Schaner 和 Eustis^[10] 给

出理想射流的偏心距为

$$\frac{S}{H} = 0.154 \cot \theta. \quad (1)$$

其中 H 为冲击距离,即喷嘴到工件的距离; θ 为冲击角度。喷嘴与工件的距离很近,在喷嘴口径较小的情况下,可近似认为整个射流头部的速度分布为均匀的。此时,对于远离碰撞点处的流动,生成射流的厚度和入射射流厚度的关系为^[11]

$$h_1 = \frac{1}{2} h_0 (1 + \cos \theta), \quad (2)$$

$$h_2 = \frac{1}{2} h_0 (1 - \cos \theta), \quad (3)$$

其中 h_0 为入射射流的厚度,由于冲击距离比较小,射流扩散很小,入射射流的厚度可近似为喷嘴口径, h_1, h_2 为生成射流两侧的厚度。

3 材料磨蚀实验分析

为研究冲击角度的对材料去除面形的影响,分别采用了 $90^\circ, 70^\circ, 60^\circ$ 和 45° 的冲击角度进行射流抛

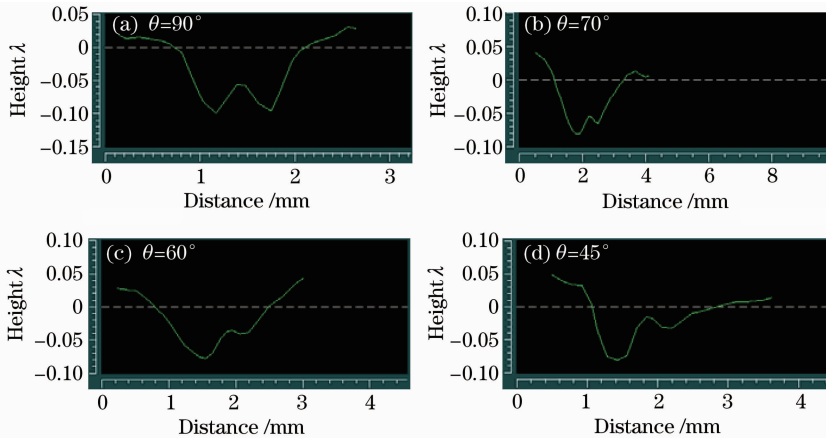


图 4 不同冲击角度的抛光材料去除面形

Fig. 4 The profiles of polishing region with different impact angles

4 冲击角度对去除面形的磨蚀影响分析

射流抛光过程中,工件受射流的冲击力和剪切力的作用。由于低压纯水射流不会对材料实现去除^[7],所以射流抛光过程中材料的去除是受抛光液中的磨粒对材料的作用。比较图 3 和图 4 可知,材料去除量在流线弯曲程度较小的一侧较多,材料去除分布受冲击角度的影响主要体现在射流厚度、壁面速度和压力几个方面。

4.1 壁面速度和压力

在整个工件壁面上,比较射流两侧速度与材料去除量可知,速度越大一侧,材料去除量越多,如图 2 和图 4 所示。I. Finnie^[13] 对金刚砂粒子以 20°

光实验。实验使用自行研制的射流抛光机床和控制系统,使混有磨料的抛光液经泵加速后,从喷嘴射向工件壁面,并与工件发生碰撞和作用,从而对工件表面进行抛光,在抛光过程中,抛光液流回到收集器,以循环往复利用。实验所用工件为平面 K9 玻璃,抛光液是用氧化铈与水按质量比为 1:20 混合而成的。喷嘴采用锥柱型结构^[12],口径为 1 mm,冲击距离 $H=10$ mm,工作压力为 0.8 MPa。

当抛光时间 15min 后,用激光干涉仪对抛光区进行测量,得到如图 4 所示的材料面形曲线图,其中纵坐标为材料的面形高度($\lambda=632.8$ nm)。从图可以看出,当射流垂直工件壁面时,在抛光液与工件表面相互作用范围内,材料去除量呈环状结构分布,以中心顶点为圆心的同一径向位置处,沿圆周的去除量近似相等,抛光区中心部分材料去除量不是最大,抛光区域整个面形呈 W 形状分布;随着冲击角度的减小,材料去除分布不再呈环状对称的 W 形状分布,去除面形呈越来越明显的弯月形状分布,实验结果与文献^[4~6]相似。

的冲击角度对钢板的磨蚀研究,得出材料的去除量与速度的关系为

$$\Delta Z \propto u^2, \quad (4)$$

其中 u 为磨粒速度,这个模型与 I. Finnie 的实验符合。在以工作压力为 0.4 MPa 进行抛光实验,在 20 min 后检测观察到材料几乎没有去除。实验现象证实存在一个材料去除的最小能量的临界速度值,当大于临界速度运动时,才能对材料磨蚀去除。磨粒的速度可以分解为水平及垂直分量,前者对切削起作用而后者使粒子透入靶面。如果垂直速度小于临界值,即粒子掠过靶面,不会产生材料去除。磨粒速度的垂直分量对工件壁面的作用可用剪切压力来表示。当磨粒与壁面接触时,材料的去除不仅与壁面速度大小有关,还与剪切压力有关。假定临界速度为 u_k ,根据

Preston 方程,材料去除量与压力成正比关系^[14],则材料的去除量与剪切压力和速度的关系为

$$\Delta Z \propto p(x, \theta) [u(x, \theta) - u_k]^2 \propto \frac{\tau(x, \theta)}{f} [u(x, \theta) - u_k]^2. \quad (5)$$

其中 $p(x, \theta)$, $u(x, \theta)$ 分别为压力和速度在壁面上与冲击角度相关的分布函数; τ 为壁面剪切应力; f 为摩擦系数。

4.2 射流厚度

对于非垂直射流,射流厚度在轴线两侧是不一样的。流线弯曲程度较小的一侧,射流厚度较大,磨粒在这一侧数目较多。虽然浓度在两侧一样,但由于磨粒在壁面射流过程中的沉积作用,导致流线弯曲程度较小的一侧磨粒与壁面接触作用的数目和概率更大,在这一侧材料去除量就多。假设材料去除量与射流厚度是成正比的,结合(2)式、(3)式和(5)式,材料去除量与射流厚度的关系可表示为

$$\Delta Z_1 = K\tau(x, \theta) [u(x, \theta) - u_k]^2 (1 + \cos \theta), \quad (6)$$

$$\Delta Z_2 = K\tau(x, \theta) [u(x, \theta) - u_k]^2 (1 - \cos \theta), \quad (7)$$

其中 ΔZ_1 , ΔZ_2 分别为流线弯曲程度较小的一侧和流线弯曲程度较大的一侧的材料去除量[如图 1(c)所示], K 是比例因子,它由除速度、压力和厚度外

的其他所有因素决定。

根据 Beltaos 理论^[10],工件壁面上的剪切应力分布可近似表示为

$$\tau(x) = \tau_{\max} \left\{ 0.18 \frac{H}{x} - \left(0.18 \frac{H}{x} + 9.43 \frac{x}{H} \right) \exp\left[-114\left(\frac{x}{H}\right)^2\right] \right\}. \quad (8)$$

其中 τ_{\max} 是壁面剪切应力最大值。

综合以上理论推导和假设,可根据实际实验条件对磨料磨蚀材料后的面形进行计算。由于工件壁面上的射流速度分布复杂,没有明确的公式对其表述,速度值采用图 2 的仿真值,采用某一假定的速度临界值进行计算归一化的去除面形,探讨冲击角度对材料去除面形的影响。图 5 是冲击角度分别为 90° , 70° , 60° 和 45° 时的材料去除面形图,比较图 4 和图 5 可知,不同冲击角度的材料去除面形轮廓曲线与实验抛光面形基本符合。表明材料去除分布与冲击角度的关系的推导和假设是符合实验现象的。冲击角度的不同影响射流轴线两侧的速度和厚度分布,可认为材料的去除量与射流厚度、壁面速度的平方和剪切压力成比例关系,轴线两侧的去分布与冲击角的余弦函数有关。

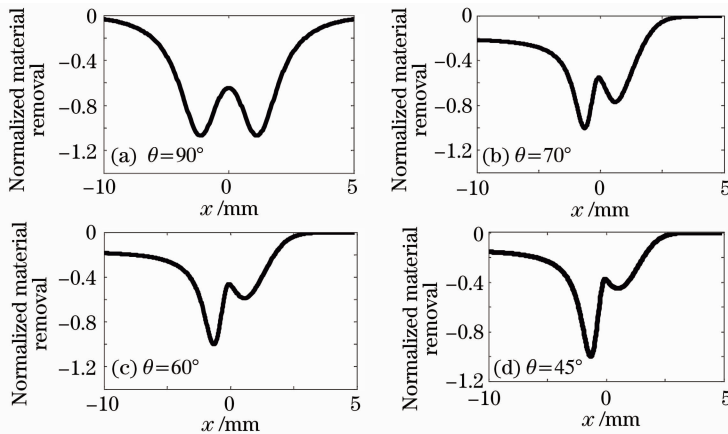


图 5 不同冲击角度的抛光去除面形轮廓曲线

Fig. 5 Model profiles with different impact angles

5 结 论

本文基于计算流体动力学理论对不同冲击角度的射流抛光模型进行了仿真模拟,分析了冲击角度对冲击射流的射流特性的影响,通过理论分析冲击角度多方面对材料去除的影响,得到了材料去除量分布与冲击角度的去除模型的关系描述公式,其材料去除面形分布与实际抛光面形能很好地符合,说明冲击角度对材料去除面形的影响的理论推导和假设是符合实验现象的。

但由于冲击射流特性的复杂性,工件壁面上的

速度、压力与冲击角度的关系还无法用数学公式描述出来,临界去除速度值的大小还不确定,需进一步通过大量的理论和实验研究,来确定它们的近似解析表达式。

参 考 文 献

- 1 Cui Xiangqun, Gao Bilie, Wang Daxing *et al.*. A new polishing technology for large diameter and deep aspherical mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 402~407
- 崔向群,高必烈,汪达兴等.一种大口径大非球面度天文镜面磨制新技术[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3): 402~407
- 2 Chen Jianping, Shen Lincheng. Model and control technology for

- machining large-diameter optical aspheric mirror[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1705~1709
- 陈建平, 沈林成. 大口径非球面镜加工建模与控制技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1705~1709
- 3 Jun Ma, Zhishan Gao, Rihong Zhu *et al.*. Problems on fabrication of computer-generated holograms for testing aspheric surfaces[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(1): 70~73
- 4 O. W. Föhnle, Hedser van Brug, H. J. Frankena. Fluid jet polishing of optical surfaces[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(28): 6671~6673
- 5 O. W. Föhnle, Fluid jet polishing: removal process analysis[C]. *SPIE*, 1999, **3739**: 68~77
- 6 Hui Fang, Peiji Guo, Jingchi Yu. Optimization of the material removal in fluid jet polishing[J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**(5): 1~6
- 7 Silvia M. Booi, Hedser van Brug. Nanometer deep shaping with fluid jet polishing[J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(8): 1926~1931
- 8 Shi Chunyan, Yuan Jiahu, Wu Fan *et al.*. Numerical simulation of turbulent flow field in Fluid jet polishing[J]. *High power laser and particle beams*, 2009, **21**(1): 6~10
- 施春燕, 袁家虎, 伍凡等. 射流抛光多相紊流场的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(1): 6~10
- 9 Wan Fujun. Analysis of Computational Fluid Dynamics [M]. Beijing: Tsing Hua University Press, 2004, 63~91
- 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004, 63~91
- 10 Dong Zhiyong. Jet mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2002, 33~54
- 董志勇. 射流力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002, 33~54
- 11 Lü Hongsheng, Zeng Xinwu. Continuum Mcchanics (middle volume) [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press. 1999. 149~151
- 吕洪生, 曾新吾. 连续介质力学(中册)[M]. 国防科技大学出版社, 1999, 149~151
- 12 Shi Chunyan, Yuan Jiahu, Wu Fan *et al.*. Design the nozzle of fluid jet polishing [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(12): 131~135
- 施春燕, 袁家虎, 伍凡等. 射流抛光喷嘴的设计[J]. *光电工程*, 2008, **35**(12): 131~135
- 13 Ramesh Padavala. Failure mechanisms in impact erosion of ductile materials[D]. USA: West Virginia University, 2004, 12~13
- 14 Yang Li. Advance optics fabrication technology [M]. Beijing: Science Press, 2001, 48~49
- 杨力. 先进光学制造技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2001, 48~49