

# 基于 CFD 的射流抛光喷射距离的分析和优化\*

施春燕<sup>1,2</sup>, 袁家虎<sup>1</sup>, 伍凡<sup>1</sup>, 万勇健<sup>1</sup>

(1 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:**分析了喷射距离对射流抛光效果的影响,基于计算流体力学进行了喷射距离的分析和优化.通过构建射流抛光不同喷射距离的物理模型,采用能更好地处理流线弯曲程度较大的流动的 RNG  $k-\epsilon$  紊流模型应用于射流抛光的数学建模,使用 SIMPLEC 算法对射流模型进行数值计算,得到了不同模型的射流抛光冲击射流流场及工件壁面上的冲击压力、紊动强度、壁流速度分布.根据射流抛光对冲击射流特性的要求,比较和分析不同喷距模型的数值仿真结果,结果显示,射流抛光最优化喷距范围为喷嘴口径的 10 倍至 12 倍之间.

**关键词:**光学加工;射流抛光;计算流体力学;喷射距离

**中图分类号:** TP60; TH74

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2009)09-2419-4

## 0 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、发展和创新则势不容缓.射流抛光技术(Fluid Jet Polishing)是由荷兰 Delft 大学的 O W Fahnle 等人于 90 年代末提出的一种新型的光学加工技术<sup>[1-3]</sup>,与传统的抛光技术相比,射流抛光技术具有能加工任意曲面形状的光学元件、抛光精度高、易控制和加工成本低等许多优点,适合于加工各种形状的非球面光学元件,在光学表面加工领域中已取得了一定的应用和发展.它是利用由喷嘴喷出的混有磨料粒子的高速抛光液作用于工件表面,通过磨料粒子的高速碰撞和剪切作用来实现材料去除的目的<sup>[4]</sup>.

在光学加工中,工艺参数的控制对抛光效果和加工精度有重大的影响,进行工艺参数的优化工作是研究一种抛光技术的重要课题.射流抛光过程中存在很多参数控制,如射流喷射角度、喷射距离、喷射压力和磨粒浓度等,它们都会对材料的去除和抛光效果产生影响.其中射流特性与喷射距离密切相关,喷射距离的大小通过影响射流特性从而影响射流抛光效果.本文结合冲击射流理论研究喷射距离对抛光效果的影响作用,为确定其最优化工艺参数,基于计算流体力学(Computational Fluid Dynamic, CFD)理论,对射流抛光过程中不同喷射

距离的模型进行数值计算和分析,得出各个参数的优化值和范围<sup>[5]</sup>.

## 1 喷射距离的影响分析

射流抛光的实验装置图如图 1,使混有磨料的抛光液经泵加速后,从喷嘴射向工件表面,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.

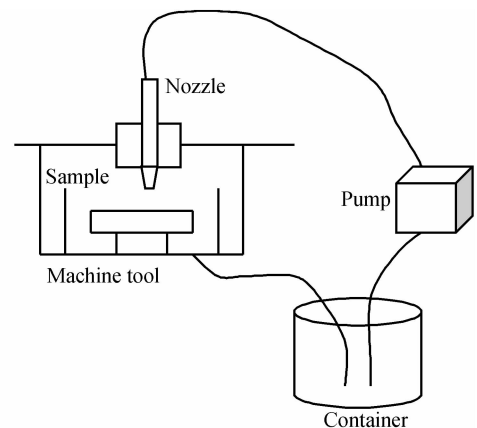


图 1 射流抛光实验装置  
Fig. 1 The FJP setup

喷射距离对冲击射流的一些特性有重要的影响,根据射流理论,射流的轴线速度随着喷射距离的增大而减小,它们的关系<sup>[6]</sup>

$$u_m/u_0 = 6.2d/y \quad (1)$$

式(1)只适用于  $y \geq 6.2d$ , 式中  $u_m$  为轴线速度,  $u_0$  为喷嘴出口轴线速度,  $d$  为喷嘴口径,  $y$  为喷射距离.当喷射距离小于  $6.2d$  时,射流轴线速度几乎没有变化,射流在这一段区域内,形成一段压力、流速均不变的等速核.由于抛光液与外部静止气体的吸附和混杂作用,使得射流束沿出射方向逐渐扩

\* 青年科学基金(60808017)资助

Tel: 028-85100723-17

Email: yancshi@163.com

收稿日期: 2008-08-06

修回日期: 2009-01-14

散,随着喷射距离的增加,射流束扩散的越大,射流特征半厚度与喷射距离之间的关系为<sup>[6]</sup>

$$b = cy \tag{2}$$

式中  $c$  为比例常数. 对于射流抛光,射流扩散的越大,对射流抛光效果越不利,这是因为,扩散越大,射流越不稳定,射流断面上的速度分布也越不均匀,而且,根据射流抛光材料去除的特点,为得到有利的去除函数,要求冲击在工件壁面上的射流断面不要过大<sup>[7]</sup>.

## 2 模型的建立

为研究喷射距离对抛光效果的影响,本文根据计算流体动力学理论对射流抛光过程的流场进行了数值计算. 描述紊流模型的标准  $k-\epsilon$  模型在科学研究及工程实际中得到了最为广泛的检验和成功应用,但应用于弯曲壁面流动或弯曲流线流动时会产生一定的失真,因此,本文采用能更好地处理流线弯曲程度较大的流动的 RNG $k-\epsilon$  模型<sup>[9]</sup>.  $k$  为湍动能,  $\epsilon$  表示湍动耗散率,在笛卡尔坐标系下,不可压缩流体二维流动 RNG $k-\epsilon$  模型的运动方程可写成

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u^2) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla u) + S \tag{3}$$

式中,  $\rho$  为流体密度;  $u$  为速度矢量;  $P$  为流体压力,  $S$  为广义源项. RNG $k-\epsilon$  模型的对流-扩散方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k + \rho \epsilon \tag{4}$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}) + \frac{C_{1\epsilon}^*}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \tag{5}$$

式中,

$$C_\mu = 0.0845, \alpha_k = \alpha_\epsilon = 1.39;$$

$$C_{1\epsilon}^* = 1.42 - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}; \eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\epsilon};$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}); \mu_{\text{eff}} = \mu + \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon};$$

$$\eta_0 = 4.37, \beta = 0.012, C_{2\epsilon} = 1.68.$$

射流抛光的流场具有轴对称性,可把其模型简化为二维模型. 本文分别取喷射距离  $y = 5d, 6.2d, 8d, 10d, 12d, 15d$  和  $20d$  建了不同的模型进行数值计算. 图 2 是射流抛光的物理模型,喷嘴出口直径  $d = 1 \text{ mm}$ ,  $H$  为不同的喷射距离,设置入口压力为  $0.8 \text{ MPa}$ ,出口压力设置为  $0.101 \text{ MPa}$ ,采用 SIMPLEC 算法对射流抛光模型进行数值模拟<sup>[10]</sup>.

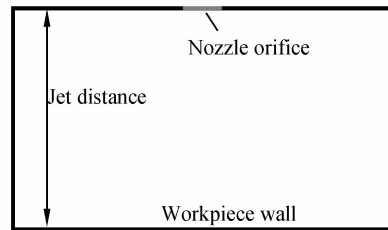


图 2 射流抛光物理模型  
Fig. 2 FJP physics model

## 3 计算结果的分析 and 优化

图 3 是冲击射流不同喷射距离模型的流场分布,从图 3 可以看出,射流冲击到工件壁面后,整个冲击射流流场可以分为三个区域:自由射流区、冲击区和壁面射流区. 冲击区的流场范围大致从  $0.2 \sim 0.3y$  高度处起,至下游进入附壁射流区处  $x/d = 2.0$  止<sup>[5]</sup>. 从图 3 可以看出,由于抛光液与外部静止气体的吸附和混杂作用,使得射流沿前进方向逐渐扩散,而射流中间部分仍保持有紧密的等速核. 从图 3(a) 和 (b) 可以发现,由于喷射距离  $y \leq 6.2d$ ,射流冲击到壁面后,等速核还没有消失,在喷射距离  $y \geq 8d$  时,等速核才会在冲击区消失. 在等速核消失后,随着喷射距离的增大,射流扩散的越大,如图 3(e)、(f) 和 (g). 由上面分析可知,射流扩散的越大,对射流抛光效果越不利. 所以,从射流流场分析来看,喷射距离不宜过大,由流场图可知,喷距应该控制在  $12d$  以内.

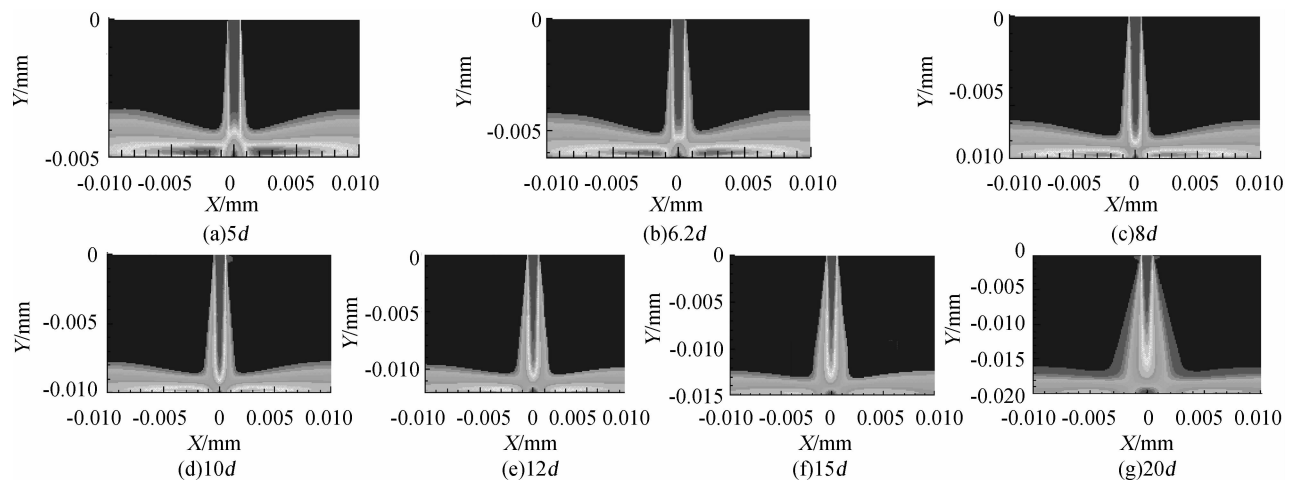


图 3 不同喷射距离的冲击射流流场分布  
Fig. 3 Flow field of impinging fluid jet with different jet distance

图 4 是不同喷射距离模型的压力、紊动强度及速度分布图,这些分布图都是在相同初始条件下仿真得来的.从图 4 可以看出,随着喷射距离的增加,工件壁面上的压力、紊动强度和速度都呈下降趋势.

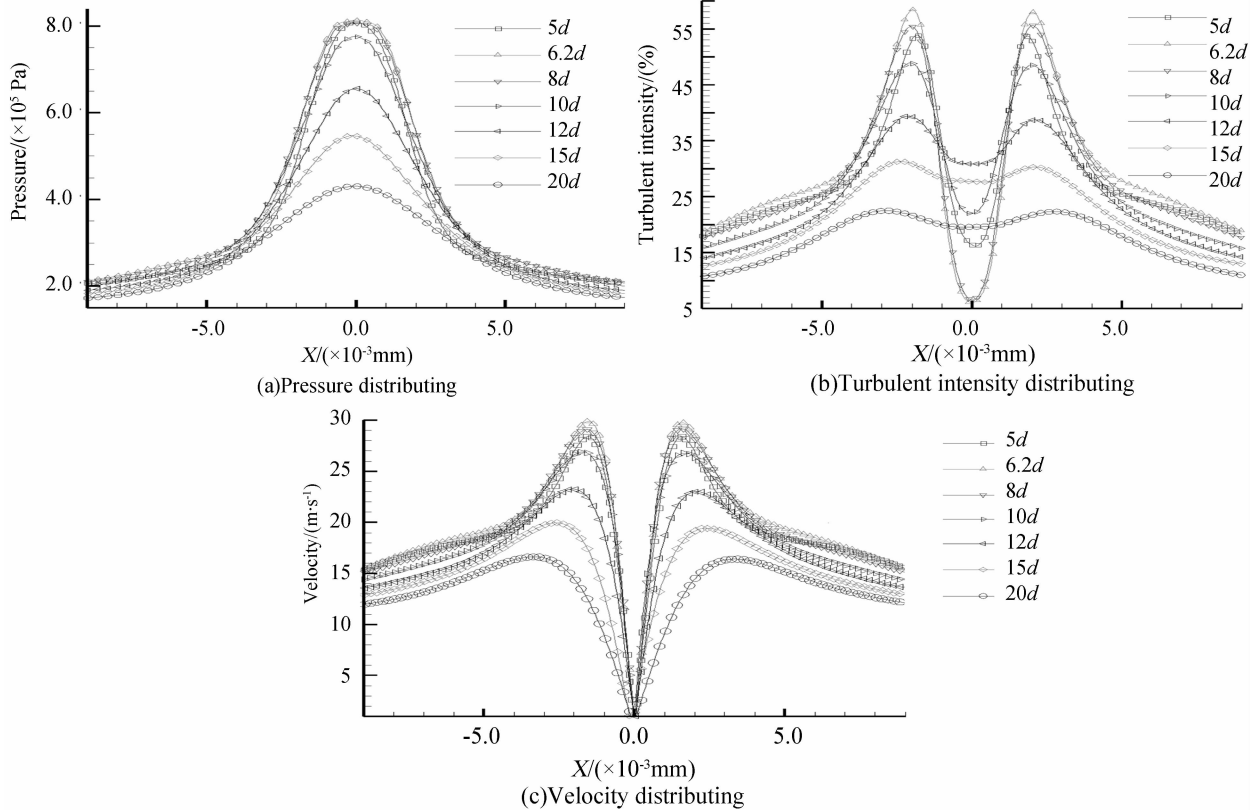


图 4 工件壁面上的射流参数分布

Fig. 4 Parameters' distributing of fluid jet on the wall

射流抛光材料去除主要与射流的冲击力和剪切力有关<sup>[11]</sup>,因此,工件壁面上的冲击压力和速度越大,材料的去除越有效.从图 4(a)和(c)可知,冲击压力和速度随喷射距离的增加而较小.当喷射距离很大时,虽然可以通过调整施加给射流的喷射压力来提高工件壁面上的冲击压力和壁流速度,但考虑到射流的稳定性等因素,喷射距离不宜过大.

对于射流抛光,喷嘴射出的射流雷诺数  $Re$  一般在 20 000~80 000 之间,当  $Re > 2 000$  时可判断为紊流,所以射流抛光是紊动射流过程.紊动强度越大,说明抛光液的流动越不稳定,在冲击区表现为流体微团之间的碰撞与掺混越激烈,甚至回流更多,对抛光效果越不利.因此,射流抛光过程应要求冲击射流的紊动强度越小越好,这样随流体运动的磨粒运动越规则,对材料的去除则表现更加均匀性.从图 4(b)可知,当喷射距离小于  $10d$  时,冲击射流在工件壁面上的紊动强度分布很尖锐,不利于进行射流抛光.因此,从对紊动强度分布的要求来看,喷射距离应取大于  $10d$  的范围.

根据分析可知,喷射距离在  $10d \sim 12d$  范围,对

在喷射距离大于  $8d$  后,即在等速核消失后,压力、紊动强度和速度随着喷射距离的增加减小的很快,在喷距为  $20d$  时,压力、紊动强度和速度几乎是喷距为  $5d$  时的一半.

射流抛光最为有利.这个最优化喷射距离与文献[4, 12]中提出的  $6 \sim 10$  mm 的优化喷距不同,文献[4, 12]是以某一口径的喷嘴通过取不同喷距的实验结果比较分析得出的,没有考虑到喷嘴口径对喷距的影响,因此文献[4, 12]中的结果是某一特定喷嘴口径的喷距优化值,对其它口径的不具有普适性.本文的喷距优化值是结合计算流体动力学和射流抛光理论,以喷嘴口径为参数,通过对不同模型的计算结果比较分析得出来的.

## 4 结论

本文结合冲击射流和射流抛光理论,分析了喷射距离对射流抛光的影响,并利用计算流体力学软件,构建了射流抛光的物理模型,计算出了冲击射流不同喷射距离模型的流场、冲击压力、壁面紊动能和壁面速度分布.通过对流场、冲击压力、壁面紊动能和壁面速度的分析,得出了射流抛光的最优化喷射距离为喷嘴口径的 10 倍至 12 倍左右.

### 参考文献

- [1] FÄHNLE O W, HEDESER V B FRANKENA H J. Fluid jet polishing of optical surfaces [J]. *Appl Opt*, 1998, 37(28),

- 6671-6673.
- [2] SILVIA M. BOOIJ, HEDESER V B, MANDEEP SINGH, *et al.* Nanometer accurate shaping with fluid jet polishing [C]. *SPIE*, 2001, **4451**: 222-232.
- [3] FÄHNLE O W. Fluid jet polishing: removal process analysis [C]. *SPIE*, 1999, **3739**: 68-77.
- [4] FANG Hui. Study on computer-controlled fluid jet polishing [D]. Suzhou: Soochow University, 2007.  
方慧. 数控液体喷射抛光技术[D]. 苏州: 苏州大学, 2007.
- [5] SHI Chun-yan, YUAN Jia-hu, 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.
- [6] DONG Zhi-yong. Jet mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2002.  
董志勇. 射流力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [7] SHI Chun-yan, YUAN Jia-hu, 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.
- [8] LIU Dan, HUANG Hui-jie. Optical Quality Measurement of Target Lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 926-929.  
刘丹, 黄惠杰. 靶镜光学质量检测技术的研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5): 926-929.
- [9] SPEZIALE C G, THANGAM S. Analysis of an RNG based turbulence model for separated flows [J]. *Int J Engng Sci*, 1992, **30**(10): 1379-1388.
- [10] van DOORMAL J P, RAITHBY G G. Enhanceme of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows[J]. *Numerical Heat Transfer*, 1983, **7**: 147-163.
- [11] MA Zhen, LI Ying-cai. Study on optical centering of aspheric mirror by interferometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7): 1455-1458.  
马臻, 李英才. 非球面干涉定心方法研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(7): 1455-1458.
- [12] FANG Hui, GUO Pei-ji, YU Jing-chi. Effect on material removal rate of fluid jet polishing by several parameters[J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(4): 440-442.  
方慧, 郭培基, 余景池. 液体喷射抛光时各工艺参数对材料去除量的影响[J]. *光学技术*, 2004, **30**(4): 440-442.

## Analysis and Optimization of Jet Distance in Fluid Jet Polishing by CFD

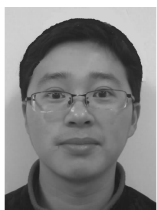
SHI Chun-yan, YUAN Jia-hu, WU fan, WAN Yong-jian

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

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

**Abstract:** The jet distance influences on the effect and precision of fluid jet polishing are analyzed. Based on the theory of Computational Fluid Dynamics, seven physics models with different jet distance are established. According to the characteristic of fluid jet polishing compared with kinds of fluid models, it is found that the RNG  $k-\epsilon$  model is more suited to the fluid jet model because the RNG  $k-\epsilon$  model can calculate the crooked badly streamlines' model. Then, these impinging models of fluid jet polishing with the SIMPLEC algorithm are simulated, the continuity fluid field, impinging pressure, turbulent intensity and wall velocity distributing of different jet distance models are gained. The demand of impinging jet characteristic to fluid jet polishing is analyzed. By researching the distributing of continuity fluid field, impinging pressure, turbulent intensity and wall velocity, it is found that the optimization value of jet distance is ten to twelve times of the diameter of nozzle.

**Key words:** Optics fabrication; Fluid jet polishing; Computational fluid dynamics; Optimization of jet distance



**SHI Chun-yan** is a Ph. D. degree candidate at Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, and his current research interest focuses on advanced optical machining for aspheric surfaces.