

# 纳米颗粒固液二相冲击射流数值计算模型研究

马颖辉 姜 芳 徐学锋

北京林业大学工学院, 北京 100083

**摘要** 基于计算流体动力学(CFD)分析软件Fluent,针对含纳米颗粒固液二相冲击射流,提出了一个新的基于等效粘度的多相流模型,并在不同纳米颗粒浓度下与不考虑固液相间相互作用的离散相模型(DPM)和考虑固液相间相互作用的DPM进行了对比,研究了三种模型对工作面的动压、径向速度和轴向速度、喷嘴的出口速度、轴线的动压和速度等参量的影响,给出了三种模型的适用范围。研究表明,当纳米颗粒体积分数不超过10%时,可以使用等效粘度模型代替不考虑固液相间相互作用的DPM进行计算,最后给出了不同偏差率所适应的计算模型。

**关键词** 材料;射流技术;纳米颗粒;等效粘度;离散相模型;流体体积模型

**中图分类号** TG580.692; TP391.9

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP52.031601

## Study on Numerical Calculation Models for Solid-Liquid Two-Phase Impinging Jet with Nanoparticles

Ma Yinghui Jiang Fang Xu Xuefeng

School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

**Abstract** Based on Fluent which is a computational fluid dynamics (CFD) analysis software, a new hybrid multiphase flow model is proposed based on the equivalent viscosity for the solid-liquid two-phase containing nanoparticles impinging jet flow, and it is compared with the discrete phase model (DPM) considering interactions and no interaction. It demonstrates the comparative analysis of the calculations of three models under different solid concentrations, and meanwhile, illustrates the effects that three models have on, in terms of radial velocity, axial velocity and dynamic pressure of the work-plane, and outlet velocity of the nozzle as well as dynamic pressure and velocity of the axis, thus providing the scope of application of the three models. The research results show that when the volume fraction of nanoparticle is less than 10%, the model with equivalent viscosity, which replaces the DPM without the consideration of interaction, can be used for calculation. Finally appropriate computational model is proposed based on the scope of deviation rate.

**Key words** materials; fluid jet technology; nanoparticles; equivalent viscosity; discrete phase model; volume of fluid model

**OCIS codes** 120.4640; 120.4610; 350.4238

## 1 引言

纳米颗粒射流抛光技术是一种超光滑表面加工技术,通过抛光液冲击工件表面对工件进行加工,目前应用比较广泛,发展前景良好<sup>[1-3]</sup>。射流抛光中流场和颗粒运动轨迹对材料表面去除率和表面质量有重要的影响,目前的研究主要以不含纳米颗粒的纯水射流为主,也会使用磁流变抛光液<sup>[4]</sup>,施春燕等<sup>[5]</sup>对射流喷嘴的不同结构和几何参数对射流的影响进行了仿真,发现喷嘴出口直径一般在0.8~1 mm为最佳,长径比为4时有较好的射流特性。施春燕等<sup>[6]</sup>还通过构建不同喷射距离的射流抛光模型,利用数值计算对不同的模型进行了研究,比较和分析不同喷射距离模型的数值计算结果,得出喷嘴距离工件表面的距离为口径的10倍至

收稿日期: 2014-09-01; 收到修改稿日期: 2014-09-18; 网络出版日期: 2015-01-23

基金项目: 国家自然科学基金(51275050)、中央高校基本科研业务费专项资金(yx2013-02)

作者简介: 马颖辉(1992—),男,硕士研究生,主要从事固液二相冲击射流流场分布及颗粒运动等方面的研究。

E-mail: 616898220@qq.com

导师简介: 姜 芳(1972—),女,博士,副教授,主要从事复合材料动态损伤和流体力学数值模拟等方面的研究。

E-mail: jf0620@bjfu.edu.cn(通信联系人)

12倍左右为最优化的喷射距离,能达到最佳材料去除效率。罗银川等<sup>[7]</sup>从理论上分析了冲击射流流场的特点,对影响射流流场分布的参数进行了定量计算,发现工件壁面上的压强和速度与出口压强和速度成正比关系,同时当冲击距离大于口径的9.6倍时,工件壁面压强和速度随着冲击距离的增大而减小。考虑射流抛光系统的误差影响因素,施春燕等<sup>[8]</sup>研究了射流抛光材料去除量的波动不稳性,得出影响因素主要有压力波动、磨粒浓度不均、流体的紊动等因素。目前基于计算流体动力学(CFD)的数值模拟计算中多相流模型采用的是流体体积(VOF)模型,对于加入纳米颗粒的射流抛光研究非常少,且在应用CFD进行数值计算时,当抛光液中的纳米颗粒的体积分数不超过总溶液的10%时,通常直接选用软件中自带的离散相模型(DPM)<sup>[9-13]</sup>,该模型将流体视作连续介质而将纳米颗粒视作离散介质。

本文针对纳米颗粒射流抛光数值计算,提出了一种新的多相流计算模型,并与软件中自带的两种模型进行了比较,共采用三种模型:每计算一步考虑一次颗粒对连续相作用的DPM(模型A)、不考虑固液相间相互作用的DPM(模型B)、基于等效粘度理论<sup>[14]</sup>新提出的等效VOF模型(模型C)。分析了不同纳米颗粒体积分数三种模型对喷嘴出口速度、工作面动压、轴线速度等的影响,并以不考虑固液相间相互作用的DPM为基准,计算了各种模型间的相对偏差,为不同颗粒体积含量的射流抛光多相流模型选择提供了一个有效的依据。

## 2 几何建模

选用锥柱形喷嘴,采用垂直入射,射流抛光的几何模型如图1所示,其中, $D$ 为喷嘴入口处直径, $d$ 为喷嘴出口处直径, $L$ 为喷嘴的总长度, $\alpha$ 为喷嘴入口直径收缩段的收缩角, $L_1$ 为喷嘴收缩段的长度, $L_2$ 为喷射高度<sup>[15]</sup>,各个参数取值如表1所示。

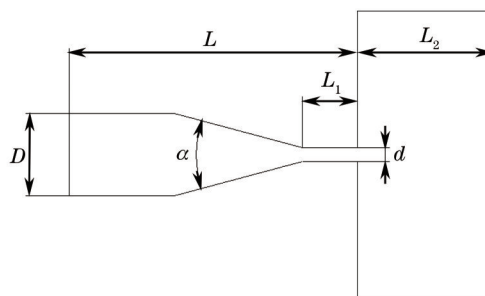


图1 喷嘴射流物理模型

Fig.1 Fluid jet polishing model

表1 模型参数

Table 1 Model parameters

$D$	$L$	$L_1$	$d$	$L_2$	$\alpha$
6 mm	21 mm	4 mm	1 mm	10 mm	30°

用GAMBIT软件建模,采用四边形网格,同时为了提高数值模拟结果的准确性,在喷嘴出口处和工件表面处对网格进行了局部加密。

## 3 参数与计算模型设定

抛光液为含纳米颗粒的水溶液,包含流相和固相,流相视为连续介质,满足相应的连续性方程、运动方程、能量方程和本构方程。水的密度为 $1000 \text{ kg/m}^3$ ,粘度为 $0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ;纳米颗粒为SiC颗粒,颗粒直径为 $0.0005 \text{ mm}$ ,密度为 $3500 \text{ kg/m}^3$ ,参考大气压强为 $101325 \text{ Pa}$ ,抛光液为不可压缩流体,故采用分离式求解器,湍流模型选择 $k-\varepsilon$ 模型,其中 $k$ 为紊流脉动动能(J), $\varepsilon$ 为紊流脉动动能的耗散率(%),流场计算方法采用基于非结构网格的SIMPLEC算法,设置迭代时间步长为 $1 \times 10^{-5} \text{ s}$ <sup>[16-17]</sup>。

边界条件:入口边界为压力入口,压强为 $1 \text{ MPa}$ ;出口边界为压力出口,压强为 $0.1 \text{ MPa}$ ;对称轴为轴边界条件;工件和喷嘴壁面均为无滑移固体壁面,近壁区采用标准壁面函数法处理。

多相流模型选择以下三种:每计算一步考虑一次颗粒对连续相作用的DPM;不考虑固液相间相互作用

的DPM;等效粘度VOF模型三种模型。

基于混合律理论提出的等效粘度VOF模型,是将加入颗粒的抛光液看作是密度和粘度发生改变的一种新的抛光液,其密度按体积混合率表示如下:

$$\rho_m = \alpha_p \rho_p + (1 - \alpha_p) \rho_f, \quad (1)$$

式中  $\rho_p$  为颗粒的密度,  $\rho_f$  为流体密度,  $\rho_m$  为新抛光液的等效密度,  $\alpha_p$  为纳米颗粒所占体积分数。

新抛光液的等效粘度为<sup>[18-19]</sup>

$$\eta = \left(1 + \frac{5}{2} \alpha_p\right) \eta_0, \quad (2)$$

式中  $\eta_0$  为水的粘度。

#### 4 数值模拟结果分析

利用CFD软件Fluent6.3.26,采用水射流VOF模型和上述三种多相流模型计算了抛光液中纳米颗粒体积分数为0.1%、0.2%、0.5%、1%、2%、3%、4%、5%、6%、7%、8%、9%、10%共13种工况下的工作面的动压、径向速度和轴向速度、轴线的速度和动压以及喷嘴的出口速度等参量值。以颗粒体积分数为0.1%情况为例,计算结果如图2(a)~(f)所示。

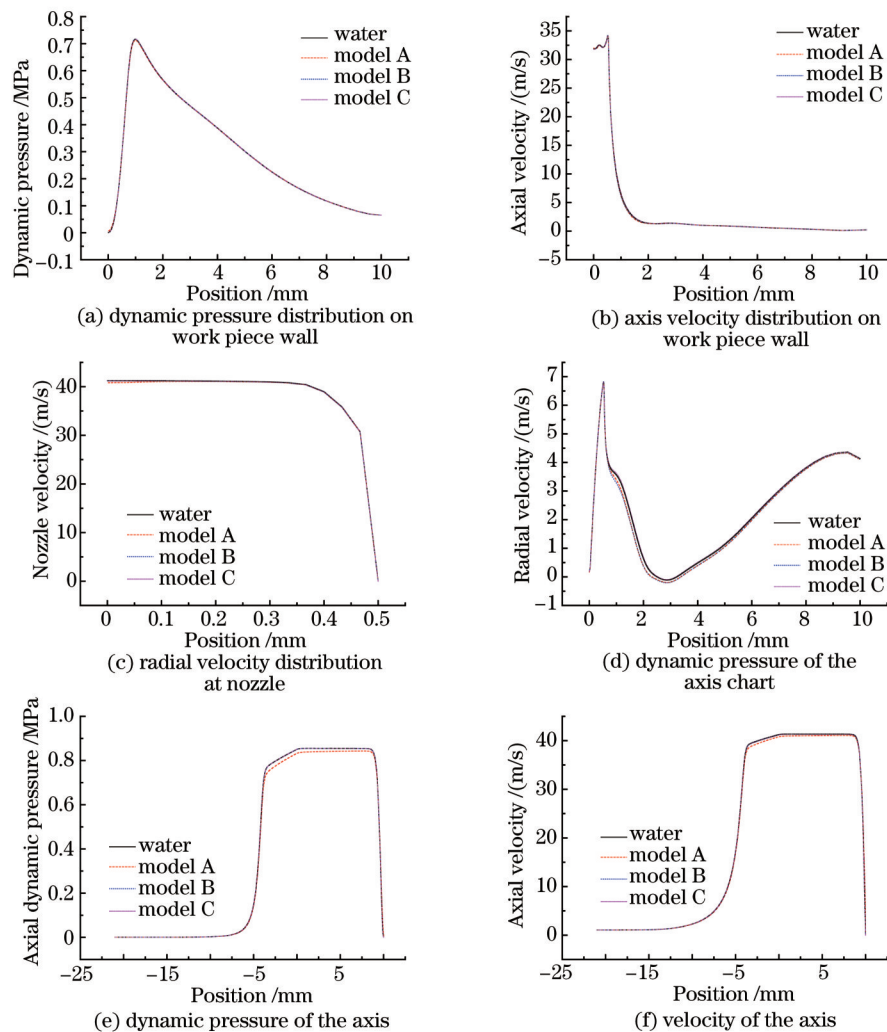


图2 颗粒体积分数0.1%的对比图

Fig.2 Comparison of particle volume fraction of 0.1%

从图2可以看出,在加入颗粒体积分数很低为0.1%的情况下,各个模型下的目标参数分布与纯水模型的结果基本一致,同时也与以往的研究得出的结论一致,说明模型的建立以及数值模拟过程的正确性<sup>[20-22]</sup>。

4种多相流模型在不同颗粒体积分数下的工作面动压峰值、喷嘴出口靠近轴心速度、轴线动压峰值和轴线速度峰值分别如图3(a)~(d)所示。

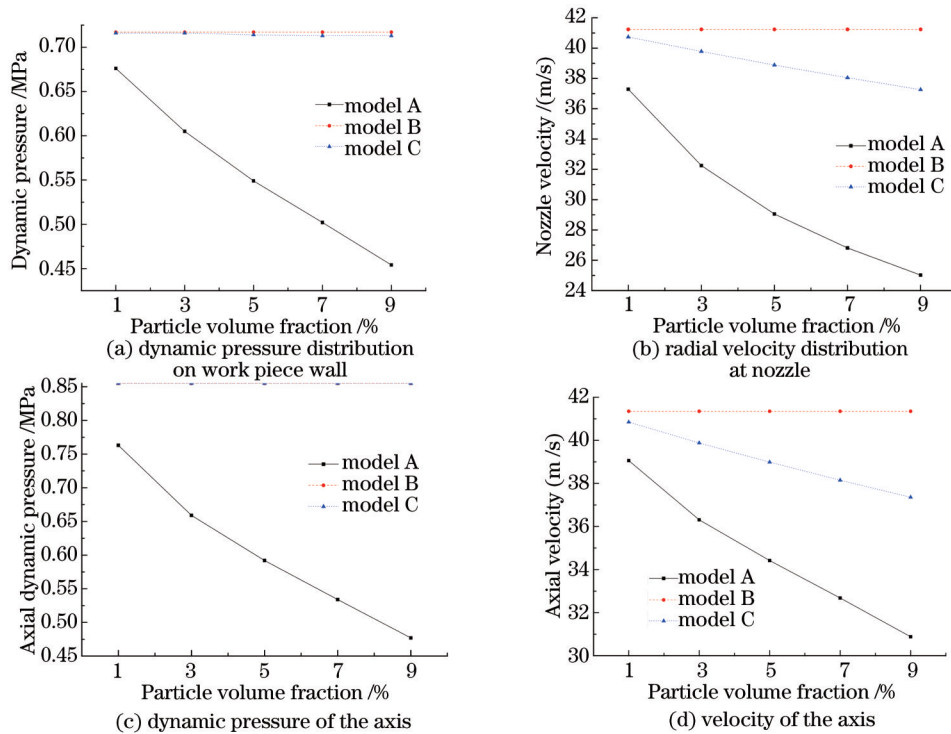


图3 不同颗粒含量不同多相流模型对应的参量计算值

Fig.3 Computing parameters of different particle content and different multiphase flow model

由图2和图3可见,对工作面动压和轴线动压而言,应用模型B与模型C计算结果几乎相等,采用模型A时,其值相对上述两个模型计算结果降低很多,且随着颗粒体积分数的增加而呈递减趋势。在颗粒体积分数只有0.1%时,三种模型计算结果相近,对喷嘴出口速度和轴线速度而言,应用模型C的计算结果要低于应用模型B的计算结果,另外两个参量的变化趋势与工作面动压和轴线动压的变化趋势相似。

再以模型B的4个参量的计算值为基准,得到不同颗粒体积分数对应的模型A和模型C的计算偏差值分别如图4和图5所示。

由图4和图5可知,在颗粒体积分数为1%以下时,三种模型计算结果差异率低于10%,随着加入颗粒浓度的增加,模型之间的差距逐渐增大。颗粒体积分数在5%以内时,采用模型A和模型C,二者的计算结果偏差在5.7%以内,颗粒体积分数达10%,计算结果偏差在10.5%以内。对于每计算一步考虑一次颗粒对连续相

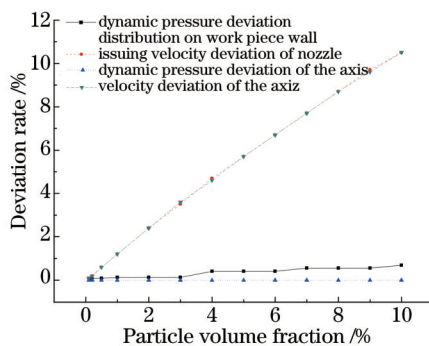


图4 等效粘度VOF模型相对不考虑颗粒间相互作用的DPM偏差比较图

Fig.4 Chart of deviation comparison between equivalent viscosity VOF model and the DPM model without consideration of the interaction

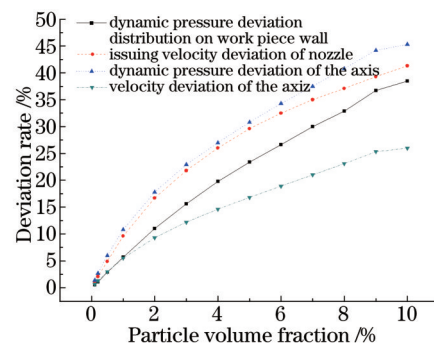


图5 考虑颗粒间相互作用的DPM相对不考虑颗粒间相互作用的DPM偏差比较图

Fig.5 Chart of deviation comparison between the DPM with consideration of the interaction and the DPM without consideration of the interaction

作用的DPM,其相对偏差值明显高于模型C。当颗粒体积分数在1%以下时,目标参量的偏差值在10%以内。当颗粒体积分数达到3%时,目标参量的偏差值到达20%,随着颗粒体积分数增加至DPM限定极限10%,目标参量的偏差最高达40%以上。

## 5 结 论

针对应用CFD数值模拟时,当颗粒体积分数低于10%时通常选用DPM多相流模型进行计算的背景,研究了选用DPM数值不考虑固液相间相互作用、DPM考虑颗粒对连续相作用和等效粘度VOF三种多相流数值模拟对含纳米颗粒射流抛光数值模拟结果的影响。

1) 基于混合律理论提出了等效粘度VOF多相流模型。

2) 当纳米颗粒体积分数不超过1%时,三种模型计算结果接近;在纳米颗粒体积分数不超过10%的情况下,采用等效粘度VOF模型和不考虑固液相间相互作用的DPM计算其结果差异不超过10%,因而,在上述两种情况下可用等效粘度VOF模型替代DPM,以提高计算效率。

3) 当纳米颗粒体积分数在1%~3%时,在可接受偏差率为20%的前提下可选用等效粘度VOF模型;当颗粒体积分数超过3%,尤其超过5%时计算偏差明显加大,建议选用考虑颗粒对连续相作用的DPM。

上述结论是基于CFD数值模拟的结果,其准确性还需要通过实验进一步验证。

## 参 考 文 献

- 1 O W FAHNLE. Fluid jet polishing of optical surfaces[J]. Applied Optics, 1998, 37(28): 6671-6673.
- 2 O W FAHNLE. Fluid jet polishing: removal process analysis[C]. SPIE, 1999, 3739: 68-77.
- 3 Zhang Yong, Wang Xing, Zhang Feihu. Review of nanoparticle colloid jet machining technology[J]. Aeronautical Science & Technology, 2013, 20(3): 65-67.  
张 勇,王 星,张飞虎. 纳米胶体射流抛光技术综述[J]. 航空科学技术, 2013, 20(3): 65-67.
- 4 Bai Yang, Zhang Feng, Deng Weijie, *et al.*. Preparation of magnetorheological polishing fluid and its polishing stability [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0416001.  
白 杨,张 峰,邓伟杰,等. 磁流变抛光液的配制及其抛光稳定性[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0416001.
- 5 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.
- 6 Shi Chunyan, Yuan Jiahu, Wu Fan, *et al.*. Analysis and optimization of jet distance in fluid jet polishing by CFD[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(9): 2419-2422.  
施春燕,袁家虎,伍 凡,等. 基于CFD的射流抛光喷射距离的分析和优化[J]. 光子学报, 2009, 38(9): 2419-2422.
- 7 Luo Yinchuan, Li Xiulong, Zhang Yang, *et al.*. Analysis of flow field characteristics in fluid jet polishing[J]. Optical Technique, 2014, 40(4): 376-380.  
罗银川,李秀龙,张 扬,等. 射流抛光中流场特性研究[J]. 光学技术, 2014, 40(4): 376-380.
- 8 Shi Chunyan, Yuan Jiahu, Wu Fan, *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.
- 9 Fu Biwei, Zhao Jiang, Wang Bin, *et al.*. Nozzle structure on the influence of the injection ability[J]. Cleaning World, 2013, 29(1): 15-18.  
付必伟,赵 江,王 斌,等. 喷嘴结构对射流特性的影响[J]. 清洗世界, 2013, 29(1): 15-18.
- 10 Shi Chunyan, Yuan jiahu, Wu Fan, *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.
- 11 Ma Zhanlong, Liu Jian, Wang Junlin. Material removal mechanism and influence factor of fluid jet polishing[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(6): 1206-1211.  
马占龙,刘 健,王君林. 射流抛光材料去除机理及影响分析[J]. 应用光学, 2011, 32(6): 1206-1211.
- 12 Hui Fang, Peiji Gou, Jingchi Yu. Optimization of the material removal in fluid polishing[J]. Opt Eng, 2006, 45(5): 1-6.

- 13 Silvia M, Booij, Hedser Van Brag. Nanometer deep shaping with fluid jet polishing[J]. *Opt Tng*, 2002, 41(8): 1926–1931.
- 14 Lin Jianzhong. Fluid– Solid Two– Phase Coherent Vortex Flow and Hydrodynamic Stability[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.  
林建忠. 流–固两相拟序涡流及稳定性[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- 15 Han Yu, Li Jianchang. Nozzle selection for vacuum liquid jet spray based on fluent simulation[J]. *Vacuum*, 2012, 49(6): 19–23.  
韩 宇, 李建昌. 基于 FLUENT 模拟分析的真空下液体射流喷嘴的选型[J]. *真空*, 2012, 49(6): 19–23.
- 16 Spezialec G, Thangam S. Analysis of an RNG based turbulence model for separated flow[J]. *Int J Engrg Sci*, 1992, 30(10): 1379–1388.
- 17 Patanker S V, Spalding D B. A calculation procedure for heat mass and momentum transfer in three dimensional parabolic flows[J]. *Int J heat Mass Transfer*, 1972, 15(10): 1787–1806.
- 18 C P Lowe, D Frenkel. Short–time dynamics of colloidal suspensions[J]. *Physical Review E*, 1996, 54(3): 2704–2712.
- 19 C P Lowe, A J Masters. The viscoelastic response of Brownian suspensions[J]. *Journal of Chemical Physics*, 1999, 111(18): 8708–8719.
- 20 Zhang Linghua, Zhang Yong, Zhang Feihu. Numerical simulation of nanoparticle colloid jet machining nozzle[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2011, 47(2): 7–11.  
张玲花, 张 勇, 张飞虎. 纳米颗粒胶体射流抛光喷嘴的流场仿真研究[J]. *航空精密制造技术*, 2011, 47(2): 7–11.
- 21 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. 射流抛光多相紊流流场的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(1): 6–10.
- 22 Xiang Wenying, Lu Yiyu, Li Xiaohong. The analyse of numerical simulation of abrasive water jets submerged[J]. *Journal of Sichuan University*, 2008, 45(4): 929–934.  
向文英, 卢义玉, 李晓红. 淹没磨粒射流场模拟计算分析[J]. *四川大学学报*, 2008, 45(4): 929–934.

栏目编辑: 史 敏