

淹没前混合磨料射流的数值分析

刘少义, 胡东, 唐川林, 裴江红

(湖南工业大学 水射流研究所, 湖南 株洲 412008)

摘要: 利用 CFD 方法对淹没条件下前混合磨料射流流场进行了数值模拟, 研究了喷嘴内外液固两相流的速度规律。仿真结果表明: 磨料水射流在淹没条件下的耗散较大, 磨料粒子速度最大值出现在一定喷距处; 对于圆柱、圆锥、锥直型 3 种不同形式喷嘴, 以锥直型喷嘴效果更优; 仿真结果与实验结果基本一致。

关键词: 磨料射流; 数值模拟; 淹没射流; 多相流

中图分类号: TH137

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2008)04-0102-03

The Numerical Analysis of Mixed AWJ Before Submerged

Liu Shaoyi, Hu Dong, Tang Chuanlin, Pei Jianghong

(Research Institute of Water Jet, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

Abstract: Using computational fluid dynamics method to simulate the mixed AWJ before submerged, the velocity regulation of liquid-solid two phase jet flow are analyzed. The simulation results show that energy dissipation of submerged AWJ is great and the axis velocity is affected by abrasive flow and jet velocity. Meanwhile, among the simulated cylinder, cone and shape nozzles, the shape nozzle is the best. Simulation and experiment results show a good consistency.

Key words: AWJ; numerical simulation; submerged jet; multiphase flow

磨料射流以其独特的工艺性, 越来越受到人们的重视, 其研究领域也在不断扩展^[1,2]。对于淹没条件下磨料射流的研究, 由于其为多相流, 而目前多相流的理论还不能解释磨料水射流的流动特点, 同时, 磨料水射流的高速高压性, 直接利用实验手段很难测量磨料水射流在喷嘴内外的速度分布^[3], 基于理论模型基础上的数值仿真分析是一种行之有效的方法, 也取得了一些成果^[4,5]。

本文基于 Fluent 软件, 对淹没磨料射流进行了初步的数值模拟, 分析了淹没条件下磨料射流的基本特性 (包括射流束出口速度、磨料速度等), 分析了影响淹没磨料射流水下切割性能的喷嘴结构、最优靶距等, 为进一步的实验研究提供参考。

1 数学模型

假定射流流场为完全湍流流动, 本文采用 Fluent

软件、应用标准 $k-\epsilon$ 模型进行计算。在模型中湍动耗散率 ϵ 和湍动动能 k 是 2 个基本未知量, 与之相对应的输运方程为^[6]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_{kj} + S_k; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{2\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon, \quad (2)$$

$$\text{式中: } \epsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial u_i'}{x_i} \right); \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon};$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j};$$

收稿日期: 2008-05-05

作者简介: 刘少义 (1980-), 男, 山东临沂人, 湖南工业大学硕士研究生, 主要研究方向为高能束加工技术。

G_k 为平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项;
 G_b 为浮力影响引起的湍动能 k 的产生项;
 Y_M 为可压湍流脉动扩散的贡献;
 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 C_μ 为经验常数;
 σ_k 、 σ_ε 为与 k 和 ε 对应的湍流 Prandtl 数;
 S_k 、 S_ε 为用户定义的源项; μ 为动力粘性系数;
 μ_t 为湍动粘度系数, t 表示湍流流动的影响;
 ρ 为流体密度; u 为时均速度;

i 、 j 、 k 为张量中的指标符号, 其取值范围为 (1, 2, 3), 张量的具体约定可详见文献[7]。

假定流体不可压, 且不考虑用户自定义的源项时, $G_b=0$, $Y_M=0$, $S_k=0$ 、 $S_\varepsilon=0$ 。据 Launder 等人的推荐值以及后来的实验验证^[8], 取 $C_{1\varepsilon}=1.44$ 、 $C_{2\varepsilon}=1.92$ 、 $C_\mu=0.99$ 、 $\sigma_k=1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon=1.3$ 。

2 流场仿真及结果分析

2.1 网格划分及边界条件

计算域为喷嘴内外流场。为便于计算, 考虑流场的对称性, 计算域取流场一半, 利用有限元结构网格对整个计算域进行网格划分, 并对喷嘴出口处进行网格加密。取喷口向里 18 mm 为坐标原点, 取对称轴为轴, 与对称轴垂直的方向为方向, 如图 1 所示。

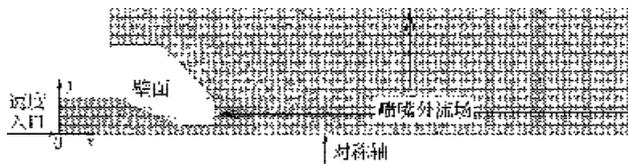


图 1 喷嘴内外流场模型

Fig. 1 Mesh model of the internal and exterior nozzles

计算域采用速度入口条件, 假定时均速度均匀分布, $u=U_0$, $v=0$ (v 为径向速度); 出口采用压力出口条件, 即在出口截面上给定环境压力, 由于考虑实际淹没深度较小, 取值标准大气压力; 下边界采用轴对称条件; 固壁采用无滑移绝热固壁条件。

材料特性设置: 标准库中选择。磨料为石榴石, 粒径 0.1 mm, 密度为 2 300 kg/m³, 流量为 40 g/min; 水的密度为 1 × 10³ kg/m³, 粘度为 0.001 Pa · s。

模型中涉及到的磨料颗粒与水的耦合作用采用离散相模型。

2.2 喷嘴结构对淹没磨料射流流场影响的仿真研究

前混合磨料水射流系统中认为磨料与水进入喷嘴前已经充分混合, 喷嘴的作用是通过喷嘴内锥面的收缩, 将高压水的压力能转化为动能, 向外喷出形成高速水射流。而对于典型喷嘴结构主要由圆柱、圆锥、锥直型喷嘴 3 种。

2.2.1 圆锥、锥直型喷嘴对射流性能的影响规律

圆锥、锥直型喷嘴结构示意图见图 2。

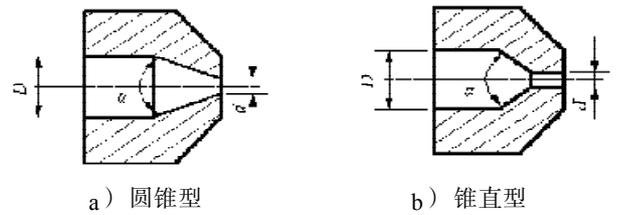
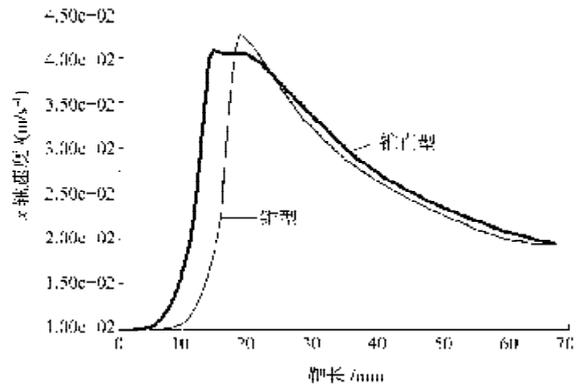


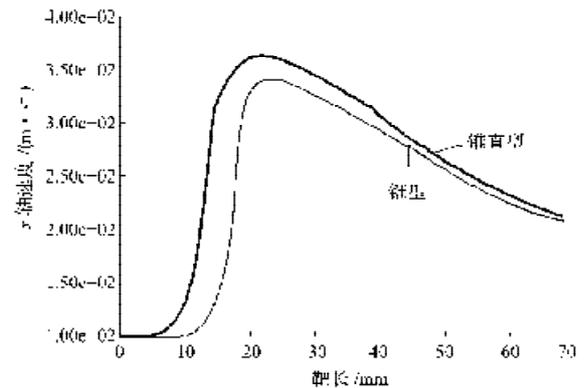
图 2 喷嘴结构示意图

Fig. 2 Structure sketch of nozzles

图 3 为 2 种喷嘴结构射流束及磨粒轴心速度。



a) 射流束轴心速度变化规律



b) 磨粒轴心速度变化规律

图 3 2 种喷嘴结构射流束及磨粒轴心速度

Fig. 3 Axial velocity of jet flow and abrasive from two nozzles structure

图 3 中 a) 为入口速度 $u=100$ m/s 射流轴心速度及磨料粒子加速过程的仿真结果。

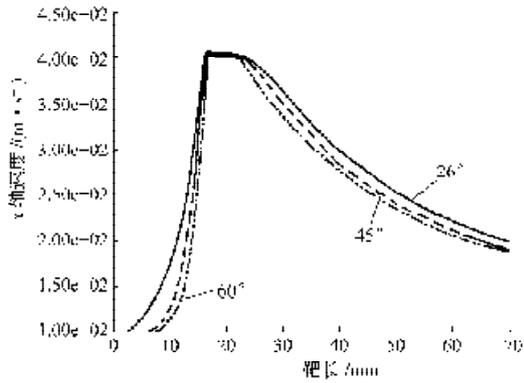
从仿真结果图 3 中 b) 可看出, 对于圆锥型喷嘴, 在较短射程内具有一定优势, 主要是由于圆锥型喷嘴具有圆滑的过渡, 流线性好, 提高了射流的内聚力, 但一段距离后较锥直型衰减快, 考虑对于射流束及磨料粒子的加速作用可看出, 锥直型喷嘴更优。

2.2.2 锥直型喷嘴不同内锥角度的影响

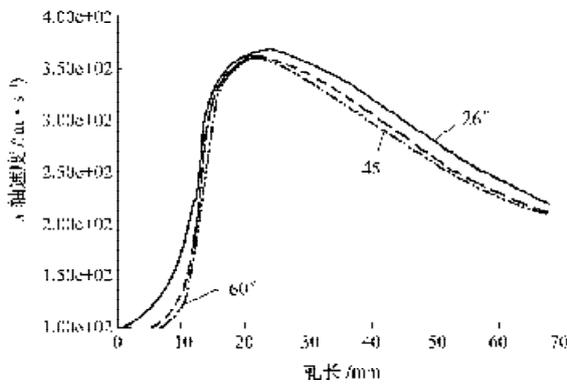
实验对入口速度为 $u=100$ m/s, 喷嘴锥角分别为 26°、45°、60° 的锥直型喷嘴内外流场进行了数值模拟。

从仿真结果图 4 可看出: 一定的喷嘴锥角能有效改善射流束及磨料粒子的运动情况, 26° 内锥角喷嘴

相比 45°、60° 内锥角喷嘴，磨料粒子与射流混合并加速的效果更好。



a) 射流束轴心速度变化规律



b) 磨料轴心速度变化规律

图 4 3 种内锥角射流束及磨料轴心速度

Fig. 4 Axial velocity of jet flow and abrasive from three taper angles

2.3 磨粒及射流束出口速度分析

为了对淹没条件下前混合磨料射流出口速度分布有更全面的认识，仿真分析了一定喷嘴结构下射流束轴向、截面速度分布及磨粒加速变化规律。

入口直径 8 mm，出口直径 2 mm，喷嘴内锥角 45°，入口速度 $u=100$ m/s，仿真结果如图 5 所示。

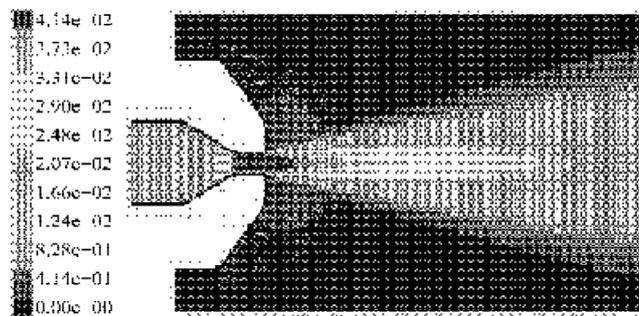


图 5 喷嘴内外流场速度分布

Fig. 5 Velocity distribution of internal and exterior flow field in the nozzle

从图 6 可看到在不同靶距下的横截面轴向速度分布，在靠近喷嘴的地方，水柱在垂直方向上的速度衰

减最快，主要是喷嘴近的地方流速相当大，湍流量大，与周围静压力的作用，速度下降幅度最明显。

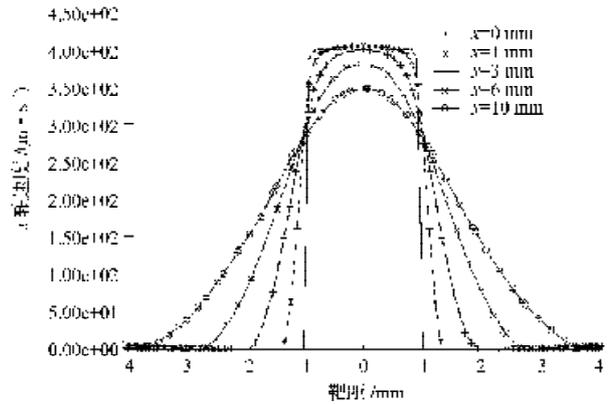
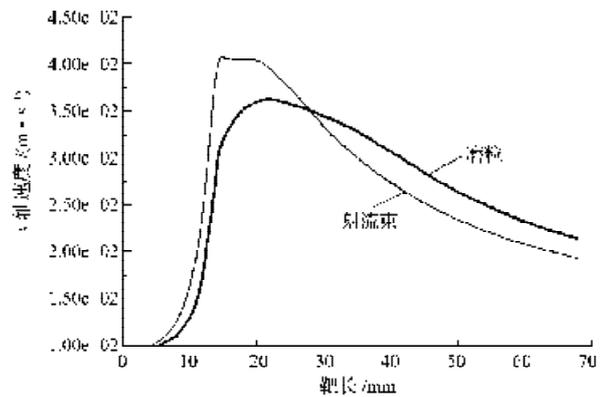


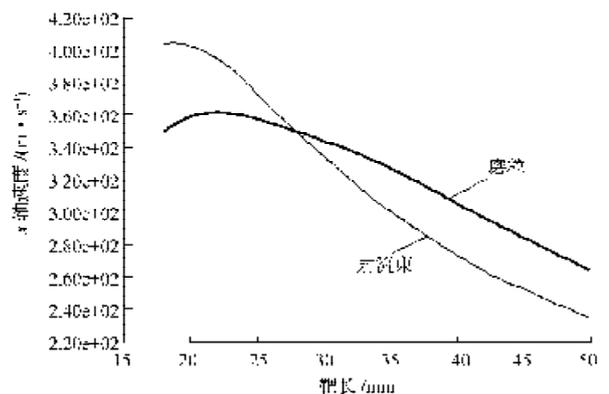
图 6 射流横截轴向速度

Fig. 6 Jet axial transverse velocity

图 7 为磨粒经过喷嘴的加速过程。



a) 射流束及磨料轴心轴向速度变化



b) 喷嘴外轴心轴向速度变化

图 7 射流束及磨料轴心轴向速度

Fig. 7 Axial velocity of jet flow and abrasive

从仿真结果可以看到，磨粒加速及衰减规律与射流束变化规律不一致，射流束在出口后便很快衰减，而磨料粒子还有一段加速过程，且衰减速度较射流束慢，这也就是磨料射流最优靶距不是越近越好的原因之一。 (下转第 108 页)