

# 后混合磨料水射流除鳞喷嘴内部流场数值模拟

刘国勇<sup>1)</sup>✉, 王宽宽<sup>1)</sup>, 陈欣欣<sup>2)</sup>, 董栗明<sup>1)</sup>, 朱冬梅<sup>1)</sup>, 张少军<sup>1)</sup>

1) 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083 2) 中国航天科工集团公司六院六〇一所, 呼和浩特 010076  
✉ 通信作者, E-mail: gy\_liu666@ustb.edu.cn

**摘 要** 基于 CFD 多相流欧拉模型, 针对后混合式磨料水射流除鳞喷嘴中磨料与水混合均匀性差、射流能量利用率低的缺点, 应用 Fluent 软件对磨料侧进式、切进式和平行多射流式 3 种进料方式的喷嘴进行三维数值模拟, 通过喷嘴内部流场速度矢量图分析了 3 种进料方式下高压水与磨料的作用机理, 并通过磨料体积分数云图比较了流场的均匀性。结果表明: 与磨料侧进式喷嘴相比, 磨料切进式和平行多射流式喷嘴能够改善磨料与水的混合效果, 使流场内磨料分布均匀。但切进式喷嘴会增加喷嘴内部的磨损, 需要采用更耐磨的材料。与前两种喷嘴相比, 平行多射流式喷嘴可得到磨料与水最好的混合均匀性, 实际应用中还可以根据需要对水射流的流量及作用方式进行调节。

**关键词** 后混合; 磨料水射流; 均匀性; 进料方式; 数值模拟  
**分类号** TG142.71

## Numerical simulation of internal flow field for post-mixed abrasive water jet descaling nozzle

LIU Guo-yong<sup>1)</sup>✉, WANG Kuan-kuan<sup>1)</sup>, CHEN Xin-xin<sup>2)</sup>, DONG Li-ming<sup>1)</sup>, ZHU Dong-mei<sup>1)</sup>, ZHANG Shao-jun<sup>1)</sup>

1) School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China  
2) The 601<sup>st</sup> Institute, the 6<sup>th</sup> Academy, China Aerospace Science and Industry, Hohhot 010076, China  
✉ Corresponding author, E-mail: gy\_liu666@ustb.edu.cn

**ABSTRACT** For the shortcomings, such as low efficiency of jet energy and poor uniformity of water and abrasive in the post-mixed abrasive water jet descaling nozzle, three kinds of structures of the nozzle were put forward: the side feed nozzle, the tangential feed nozzle, and the parallel multi-jet nozzle. Based on the CFD Eulerian multiphase flow model, the 3-dimensional numerical simulation of the three kinds of structures was conducted with the FLUENT software. And the acting mechanism of the high-pressure water with the abrasive was analyzed through the velocity vector of the flow field inside the nozzle. The uniformity of the flow field was compared by analyzing the volume fraction contours of abrasive. Results show that compared with the side feed nozzle, the tangential feed nozzle and the parallel multi-jet nozzle can improve the mixing effect and obtain a rather uniform abrasive distribution. Whereas, the tangential feed nozzle can augment the internal wear of the nozzle, which needs a kind of more wear-resistant material. Compared with the former two structures, the mixing effect of the parallel multi-jet nozzle is perfect and the water jet flow as well as the acting mode could be adjusted according to the need in practical application.

**KEY WORDS** post-mixing; abrasive water jet; uniformity; feeding method; numerical simulation

磨料水射流 (abrasive water jet, AWJ) 技术是二十世纪八十年代迅速发展起来的一种新型高效水射流<sup>[1]</sup>。磨料射流以水为载体, 磨料微粒被高压水加速。由于磨料的加入, 大大提高了射流的冲击力和磨削

力<sup>[2]</sup>。磨料射流以其独特的优势在工业清洗、除锈及切割方面有着广泛的应用。目前, 已逐渐采用磨料水射流除鳞系统代替酸洗除鳞系统对冷轧带钢进行除鳞。喷嘴是磨料水射流除鳞的关键部件之一, 其作用

是将高压低流速射流转化为低压高流速的射流,喷嘴的结构在很大程度上影响着高压水与磨料混合的均匀性,从而影响除鳞效果<sup>[3-4]</sup>。

后混合磨料水射流的工作原理是从高压泵流出的高压水通过喷嘴而形成高速流,由于水射流束对周围空气的卷吸作用,在混合腔内将形成一定的真空度,从而使磨料与混合腔之间的供料管内产生了一定的压力差。磨料在此压力差的作用下被抽吸到混合腔内,并与水射流发生强烈的湍动扩散和掺混,再通过磨料喷嘴喷出而形成磨料射流,其原理图如图1所示<sup>[5]</sup>。由于水射流直径小,而磨料与水的速度相差很大,磨料粒子很难进入高速水射流中心得到充分加速,导致两相流混合不均匀,射流的能量利用率低,影响了磨料水射流优越性的充分发挥。目前对于后混合磨料水射流的研究大多是通过实验的手段,例如杨新乐等对磨料水射流喷嘴进行了二维数值模拟,比较分析了前混合式和后混合式喷嘴的特性<sup>[6]</sup>。熊佳等对后混合磨料水射流喷嘴内部流场进行了二维数值模拟,分析了混合腔长度和内锥角对速度场的影响<sup>[7]</sup>。万继伟等对后混式高速水射流超细粉碎技术进行了深入了解,利用数值计算和粉碎实验相结合的方法,研究了多相混合射流相间的混合机理和加速特性<sup>[8]</sup>。但是这些数值模拟采用二维模型进行简化模拟不仅不准确,精度也受到限制。本文对后混合磨料水射流除鳞喷嘴的磨料进料方式改进,利用Fluent软件建立三维仿真模型,分别对侧进式喷嘴、切进式喷嘴以及平行多射流式喷嘴进行了模拟仿真,为工程设计及应用提供了理论依据。

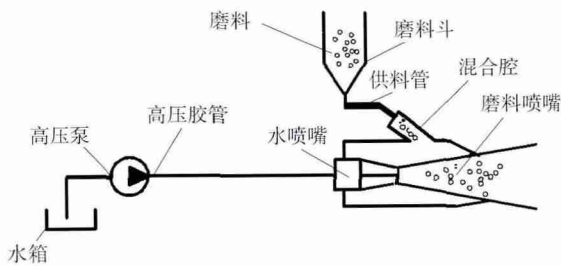


图1 后混合式高压水喷砂除鳞的原理图  
Fig.1 Schematic diagram of the post-mixed high-pressure abrasive water jet for descaling

## 1 模型建立及控制方程

### 1.1 喷嘴混合物理模型

常见的后混合磨料水射流除鳞喷嘴在侧面只有一个入口,由于结构具有不对称性,就必然会产生流场的非对称性。因此,提出一种改进的侧进式喷嘴结构:将单侧入口改为对称双侧入口,磨料从两侧对称的入口进入,中间为高压水入口。这是由于如果采用磨料中进式,两侧的高压水进入后很难对磨料产生卷吸作用,

反而低速磨料粒子不易进入射流中心。后混合磨料水射流磨料进入混合腔是靠高速水流在混合腔内引起的负压卷吸作用,所以将中间高压水入口伸入到混合腔内部,设计喷嘴物理模型如图2所示。磨料入口到混合腔左边界的距离为 $L$ ,磨料入口直径为 $d_4$ ,倾斜角为 $\theta$ ,混合腔内腔直径为 $d_2$ ,收缩段锥角为 $\alpha$ ,出口段长度为 $l_1$ ,直径为 $d_1$ 。参考前混喷嘴相关理论及公式<sup>[9]</sup>,结合后混喷嘴特点,设计了喷嘴混合腔的基本几何参数,如表1所示。

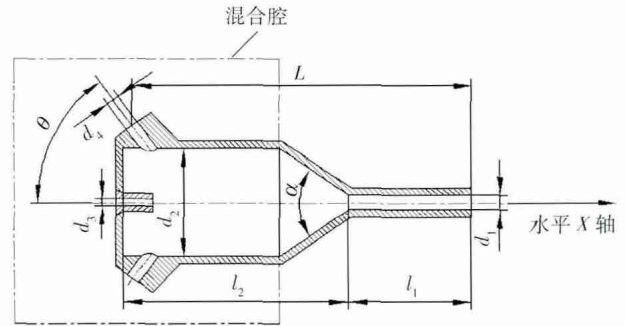


图2 喷嘴物理模型  
Fig.2 Physical model of the nozzle

表1 喷嘴的几何参数

Table 1 Geometric parameters of the nozzle						mm
$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$l_1$	$l_2$	
2.8	12	1	3	25	35	

### 1.2 流体控制方程

采用标准 $\kappa$ - $\varepsilon$ 方程湍流模型,该模型是建立在湍流动能 $\kappa$ 及其耗散率 $\varepsilon$ 的输运方程基础之上的半经验模型<sup>[10]</sup>。 $\kappa$ 、 $\varepsilon$ 的输运方程如式(1)~(2)所示。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\kappa u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_\kappa, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} (G_\kappa + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} + S_\varepsilon. \quad (2)$$

式中 $t$ 为时间; $\rho$ 为流体密度; $x_i$ 、 $x_j$ 分别为 $i$ 、 $j$ 方向坐标; $u_i$ 为 $i$ 方向流速; $\mu$ 为流体的动力黏度; $\mu_t$ 为湍流黏性系数; $\sigma_\kappa$ 、 $\sigma_\varepsilon$ 分别为与湍动能 $\kappa$ 和耗散率 $\varepsilon$ 对应的Prandtl数; $G_\kappa$ 为平均速度梯度引起的湍动能 $\kappa$ 的产生项; $G_b$ 为浮力引起的湍动能 $\kappa$ 的产生项; $Y_M$ 为可压湍流中脉动扩张的贡献; $S_\kappa$ 、 $S_\varepsilon$ 为用户根据计算工况定义的源项; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数。湍流黏性系数 $\mu_t$ 通过 $\kappa$ 和 $\varepsilon$ 计算得到(3)式:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon}. \quad (3)$$

式中 $C_\mu$ 为经验常数。

1.3 喷嘴的仿真模型

采用 Gambit 前处理软件建立喷嘴混合腔三维模型,如图 3(a) 所示,并且生成有限元网格如图 3(b) 所示. 由于模型网格的类型与尺度直接影响到数值模拟结果的精度、稳定性以及耗用的 CPU 时间,所以通过网格切分手段减小非结构网格的数量,并尽可能使用较多结构网格.

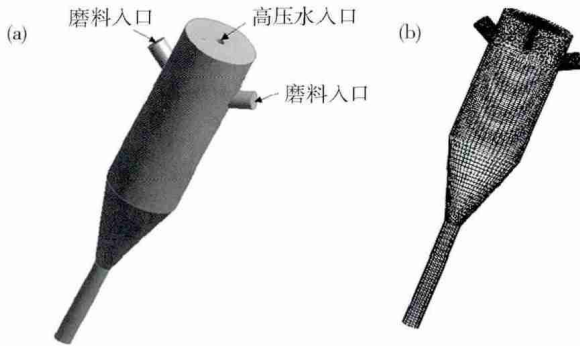


图 3 喷嘴示意图. (a) 几何模型; (b) 有限元网格模型

Fig.3 Schematic of the nozzle: (a) geometrical model; (b) finite grid model

边界条件及数值处理,基于如下假设:

- (1) 忽略磨粒的不规则影响,将磨粒看作理想小球;
- (2) 磨料入口处磨料颗粒均匀分布;
- (3) 忽略磨料颗粒间的相互作用;
- (4) 水为理想的不可压缩流体,将磨料与水混合形成的浆料看作为连续相.

边界条件设置如下:

- (1) 入口边界条件: 均为速度入口,中间为高压水入口,设定速度为  $120 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 两侧为磨料与水混合的浆液入口,其中磨料的速度为  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,与磨料混合的水的速度为  $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,磨料的体积分数为 0.3;

- (2) 出口边界条件: 下端为磨料喷嘴出口,为压力出口,压力值为  $101325 \text{ Pa}$ .

- (3) 壁面边界条件: 壁面采用无滑移边界条件,近壁面区域采用标准壁面函数法计算.

考虑到水、空气和磨料三相之间的相互作用的流动特点,模拟计算中采用欧拉模型,其中水为基本相,磨料和空气为第二相. 选用  $\kappa-\epsilon$  湍流模型,离散方程求解采用一阶迎风格式及 SIMPLE 算法,并根据收敛情况适当调节亚松弛因子对离散方程进行了求解,其他参数默认. 初始化后整个流场域为空气,即空气体积分数为 100%.

其他仿真参数如表 2 所示<sup>[11]</sup>.

1.4 仿真结果与分析

图 4 为喷嘴内部流场速度矢量图. 由图可知,磨料粒子进入混合腔与中心轴位置的高速水射流相互干

表 2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

水密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	水黏度/ ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ )	磨料密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	磨料黏度/ ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ )	磨料百分 比/%	磨料颗粒 直径/mm
998.2	0.001	2660	0.00175	30	0.1

扰掺杂. 根据湍流流体力学,会产生波动,并在接触区形成漩涡,这种漩涡带来的卷吸作用使磨料粒子不断被吸入高速水射流中,低速的磨料粒子被高速水射流不断加速,到混合腔的后半段时两者基本达到同一速度. 经由收缩段加速后形成磨料水射流,但磨料粒子与水射流的速度差太大,部分磨料粒子在卷吸到水射流表面时又被弹开,导致磨料粒子撞向混合腔内壁,磨料粒子在与混合腔内壁碰撞以后速度反向,再次与水射流混合,因此从图中可以看到,在水射流与混合腔内壁之间的区域,磨料粒子存在上下两种径向分速度,磨料粒子这种来回反弹是除了卷吸作用以外的另一种混合方式.

图 5 为喷嘴内部流场磨料体积分数分布云图,高速水射流进入混合腔后,卷吸喷嘴内的空气而形成局部负压,低速磨料以一定的径向速度与水平的高速水射流接触,造成比较大的冲击,使得喷嘴内湍流强度大,磨料在喷嘴内部聚集在某一个局部区域,导致磨料与水混合不均匀.

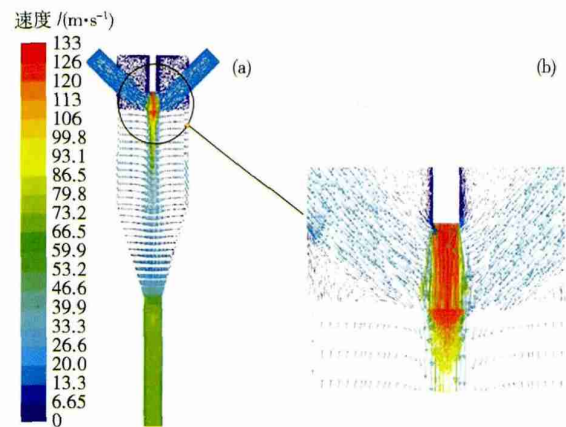


图 4 喷嘴内部流场速度矢量图. (a) 整体轴向截面; (b) 局部放大图

Fig.4 Velocity vector of the flow field inside the nozzle: (a) overall axial section; (b) partial enlarged figure

2 改进喷嘴的数值模拟

由于后混合磨料水射流,高压水射流具有直径小、速度高的特点,未经过高速水流进行初步加速的磨料粒子很难进入其内部得到充分加速. 所以射流能量的利用率低,影响了磨料水射流优越性的充分发挥. 因此,需要对后混合式磨料水射流除鳞喷嘴进行结构的改进.

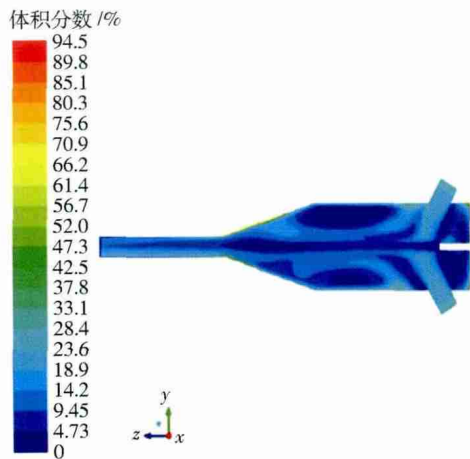


图 5 磨料体积分数云图

Fig. 5 Contours of the abrasive volume fraction

### 2.1 磨料切进式喷嘴

#### 2.1.1 仿真模型建立

磨料入口直径与高压水入口直径不变,将磨料侧进式改为磨料切进式.利用 Gambit 前处理软件创建喷嘴三维模型,几何模型结构示意图及网格划分结构模型如图 6 所示.

#### 2.1.2 仿真结果与分析

图 7 (a) 为磨料入口截面的磨料体积分数云图,由图可知,由于磨料沿混合腔切向进入,避免了与高速水射流直接冲击,同时减少了磨料之间的相互碰撞,但磨料从壁面到中心轴的分布是逐渐减少的,中心位置有一定量的磨料存在.由图 7 (b) 轴向截面的磨料体积分数云图可知,磨料粒子与高速水流的混合液在进入收缩段时已基本混合均匀.因此该结构与侧进式喷嘴相比,混合效果有一定改进.

由图 8 可知,由于高压水射流引射作用,磨料沿混

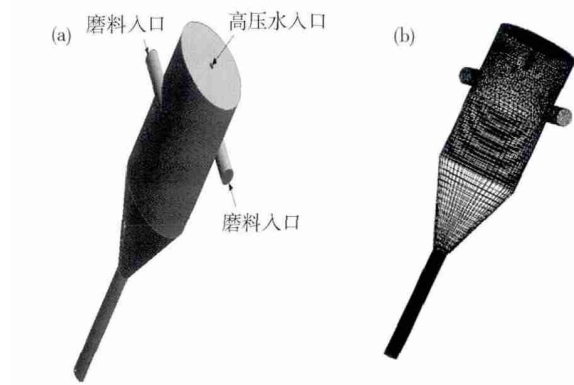


图 6 磨料切进式喷嘴示意图. (a) 几何模型; (b) 有限元网格模型

Fig. 6 Schematic of the tangential feeding nozzle: (a) geometrical model; (b) finite grid model

合腔切线方向进入混合腔时,一边旋转,一边前进,避免直接与高速水射流发生冲击,减弱了磨料粒子的反弹效果,使磨料与水射流得以更充分的混合,同时也减少了磨料粒子相互碰撞,从而可以提高磨料射流的除鳞能力.但切进式喷嘴会增加喷嘴内壁的磨损,所以需要采用更耐磨的材料.由于磨料粒子沿切向进入混合腔,有利于磨料粒子与水射流的混合,因此切进式喷嘴的混合性能要好于侧进式喷嘴.

### 2.2 磨料平行多射流式喷嘴

#### 2.2.1 仿真模型建立

在磨料入口位置周围布置了四个对称且平行的高压水入口,此模型结构尺寸均与上述模型相同.几何模型结构示意图及网格划分结构模型如图 9 所示.

#### 2.2.2 仿真结果与分析

由图 10 可知,多股水射流的引射作用强,而磨料射流直径相对较大,卷吸磨料的能力强,磨料与水的混

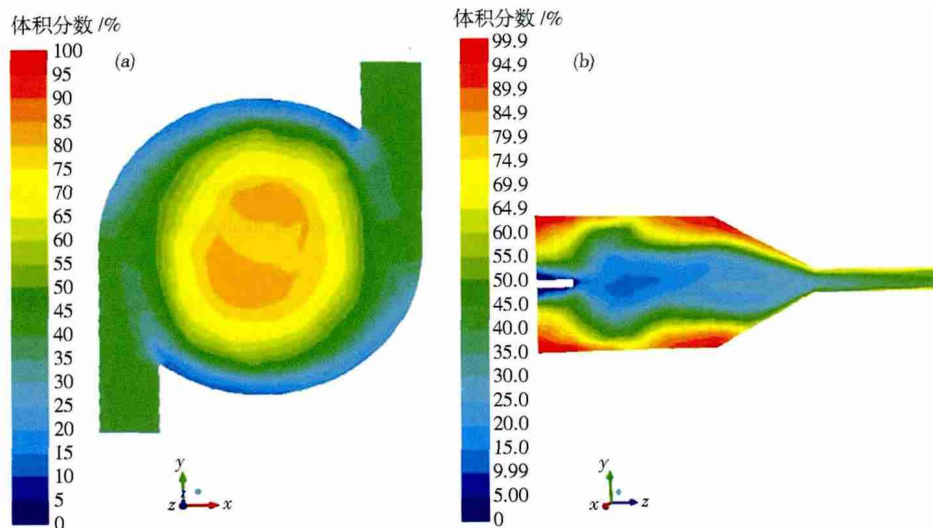


图 7 磨料体积分数云图. (a) 磨料入口截面 (b) 轴向截面

Fig. 7 Contours of the abrasive volume fraction: (a) abrasive inlet section; (b) axial section



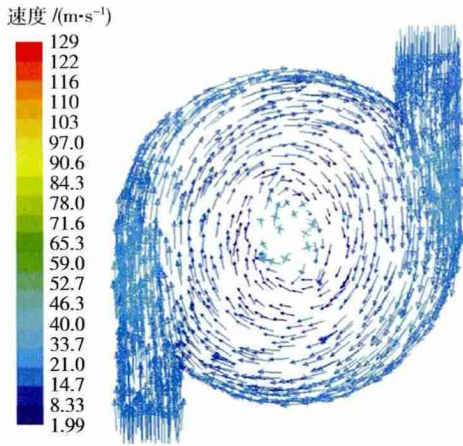


图 8 喷嘴内部流场速度矢量图

Fig. 8 Velocity vector of the flow field inside the nozzle

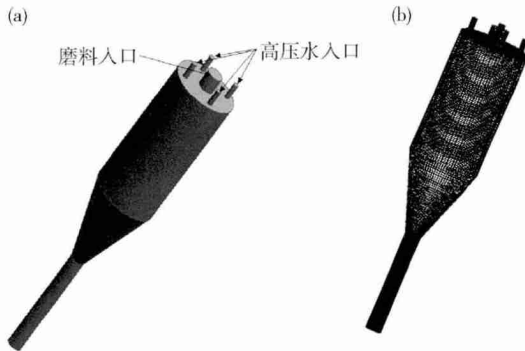


图 9 磨料平行式喷嘴示意图。(a) 几何模型; (b) 有限元网格模型

Fig. 9 Schematic of the parallel feeding nozzle: (a) geometrical model; (b) finite grid model

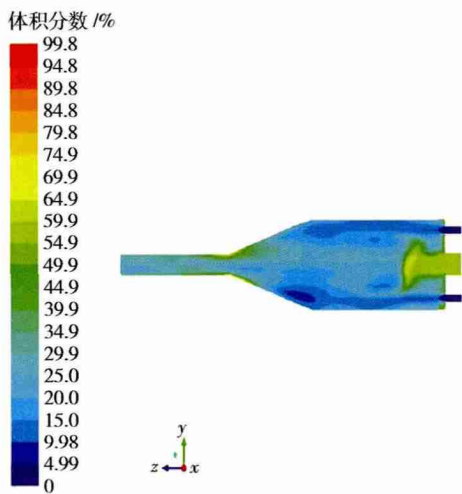


图 10 磨料体积分数云图

Fig. 10 Contours of the abrasive volume fraction

合效果有了明显的改善,出口截面磨料分布相当均匀,4个对称布置的平行水入口很好地冲散了聚集在端面附近的磨料,使磨料在喷嘴内分布比较均匀,混合效果比较理想.实际工作中还可以根据需要对水射流的流

量及作用方式进行调节.

由图 11 可知,由于在磨料入口位置对称布置了 4 股平行的水射流,这 4 股平行的高速水射流单独引起的负压卷吸作用分布均衡,磨料粒子从中心位置进入混合腔,在周围 4 股水射流的引射作用下,磨料粒子开始发散,与四周的水射流混合并加速,很快达到相近速度.而 4 股水射流在各自引起的卷吸作用下也发生混合,由于各个水射流的初始速度相同,使得这一混合过程非常迅速,最终磨料粒子与水混合达到同一速度,经由收缩段加速喷出.

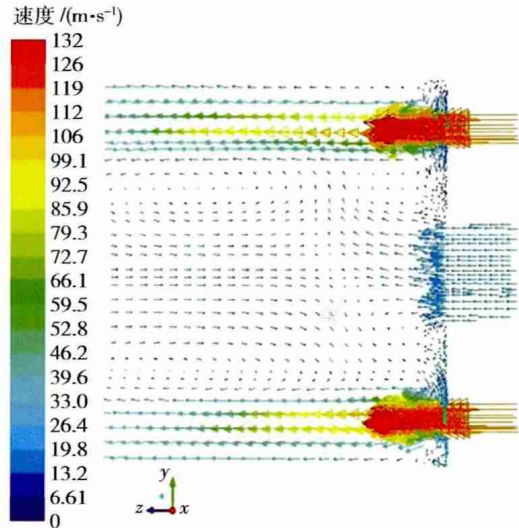


图 11 喷嘴内部流场局部速度矢量图

Fig. 11 Velocity vector of the local flow field inside the nozzle

### 3 结论

(1) 侧进式喷嘴,采用磨料从喷嘴侧面对称位置进入混合腔,磨料粒子与高速水流直接接触,有些磨料被水射流直接带走,有些磨料飞溅到混合腔壁面,再反弹到水射流表面.由于水射流直径小、速度高,磨料很难进入水射流中心,流场混合不均匀,降低了水对磨料的能量传输效率.

(2) 切进式喷嘴,由于高压水射流引射作用,磨料沿混合腔切线方向进入混合腔时,一边旋转,一边前进,使磨料与水射流得以更充分地混合,同时也减少了磨料粒子相互碰撞,从而可以提高磨料射流的除鳞能力.但切进式喷嘴会增加喷嘴内部的磨损,因此,需要采用更耐磨的材料.

(3) 平行多射流式喷嘴,多股水射流的引射作用强,而磨料射流直径相对较大,卷吸磨料的能力强,磨料与水混合均匀性最好,实际工作中还可以根据需要对水射流的流量及作用方式进行调节.

### 参 考 文 献

[1] Ren J X. *Physical Cleaning*. 1st Ed. Beijing: Chemical Industry Press 2000

- (任建新. 物理清洗. 1版. 北京: 化学工业出版社, 2000)
- [2] Cui M S, Sun J J. *High Pressure Water Jet Technology*. 1st Ed. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1993: 73  
(崔谟慎, 孙家骏. 高压水射流技术. 1版. 北京: 煤炭工业出版社, 1993: 73)
- [3] Xue S X. *High Pressure Water Jet Technologies and Applications*. Beijing: Machinery Industry Press, 1998  
(薛胜雄. 高压水射流技术与应用. 北京: 机械工业出版社, 1998)
- [4] Ning Y L, Hu S G. Research progress of abrasive water jet. *Lubr Eng*, 2002, 1: 79  
(宁原林, 胡寿根. 磨料射流的研究进展. 润滑与密封, 2002, 1: 79)
- [5] Zhao Y Z, Gao F Y, Wang C L, et al. Experimental research on the mechanism of cutting materials with rear fixed abrasive efflux. *J Changshu College*, 2004, 18(2): 50  
(赵永赞, 高凤阳, 王春雷, 等. 基于后混合式磨料水射流切割技术机理的探讨. 常熟高专学报, 2004, 18(2): 50)
- [6] Yang X L, Zhang Y L, Wu C X, et al. Simulation research on flow field of abrasive jet in nozzle under condition of different mixing methods. *J Liaoning Tech Univ Nat Sci*, 2008, 27(6): 915  
(杨新乐, 张永利, 武春晓, 等. 不同混合方式下磨料射流喷嘴内流场仿真. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2008, 27(6): 915)
- [7] Xiong J, Lei Y Y, Yang Z F, et al. Visual research of flow field in the nozzle of abrasive water jet based on FLUENT. *Lubr Eng*, 2008, 33(6): 51  
(熊佳, 雷玉勇, 杨志峰, 等. 基于 FLUENT 的磨料水射流喷嘴内流场的可视化研究. 润滑与密封, 2008, 33(6): 51)
- [8] Wan J W, Niu Z M, Liao W L, et al. Mixing mechanism of multi-phase flow and acceleration performance in single inlet rear-mixed jet flow crushing. *CIESC J*, 2013, 64(7): 2418  
(万继伟, 牛争鸣, 廖伟丽, 等. 单进口后混式射流粉碎中多相流混合机理及加速特性. 化工学报, 2013, 64(7): 2418)
- [9] Ma Y J, Liang Z, Chen Z. Design of nozzle in abrasive jet for cutting drill pipe. *Mach Des Manuf*, 2009(5): 24  
(马艳洁, 梁政, 陈卓. 磨料射流切割钻杆的喷嘴设计. 机械设计与制造, 2009(5): 24)
- [10] Liu S L, Zheng Q. *Computational Fluid Dynamics*. 1st Ed. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1998  
(刘顺隆, 郑群. 计算流体力学. 1版. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1998)
- [11] Yue X A. *Basis of the Liquid-Solid Two Phase Flow*. 1st Ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996  
(岳湘安. 液-固两相流基础. 1版. 北京: 石油工业出版社, 1996)