

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.04.004

异形喷嘴与圆锥形喷嘴水射流流场对比研究

刘家禹^{1,2}, 王艾伦^{1,2}, 蔡金², 蒋斌^{1,2}

(1. 中南大学 轻合金研究院, 湖南 长沙 410083;
2. 中南大学 高性能复杂制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410083)

摘要:针对目前水射流作业中存在的效率低的问题,课题组对射流关键装置喷嘴的结构进行研究。采用了传统圆锥形喷嘴的最优尺寸参数,设计了2种新型异形喷嘴结构;通过SolidWorks建立了喷嘴的三维模型,利用FLUENT仿真软件模拟了3种喷嘴在不同入口速度条件下的流场情况。仿真结果表明:正方形喷嘴的射流离开喷嘴后射速最快,射流凝聚性最好,等速核最长,更适合于淹没射流下的作业。

关键词:异形喷嘴;射流速度;等速核;FLUENT仿真软件

中图分类号:TP69 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2019)04-0019-07

Comparison of Water Jet Flow Field Between Non-Circle Nozzles and Conical Nozzles

LIU Jiayu^{1,2}, WANG Ailun^{1,2}, CAI Jin², JIANG Bin^{1,2}

(1. Light Alloy Research Institute, Central South University, Changsha 410083, China;
2. State Key Laboratory of High Performance and Complex Manufacturing, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In view of the problem of low efficiency in current water jet operations, the nozzle structure of jet critical device was studied. The optimal size parameters of traditional conical nozzles were adopted to design two new types of special-shaped nozzles. A 3d model of the nozzle was established by SolidWorks, and FLUENT software was used to simulate the flow field of the three nozzles under different inlet velocities. The simulation results show that the square nozzle has the fastest jet speed when the jet leaves the nozzle. Square nozzles have the best jet cohesion and the longest constant velocity core. Square nozzles are more suitable for the operation under submerged jets.

Keywords: special-shape nozzles; jet velocity; constant velocity core; FLUENT

高压水射流技术是近年来发展十分迅猛的一门新兴技术。随着目前清洗作业和采矿作业的不断发展,高压水射流技术也在这些作业领域得到了越来越广泛的应用^[1-3]。目前这种高压水射流技术主要的应用有非淹没射流状态下的轮船和汽车的清洗作业、园林喷灌作业、陆地非固结矿床的采矿作业等;有淹没射流状态下的深海采矿作业、水产果蔬的采集作业等。但是对现有的淹没射流状态下的高压水射流作业方式,许多作业人员均反映作业效率较低,通常需要大幅度提高射流供压设备的功率以实现更高压力的射流冲击来提高作业的效率。该问题的主要原因和技术难点在于

喷头射流^[4]的压力在介质环境中随射流喷射距离增大而迅速减小,在射流方向上的沿程阻力损失导致在射流到达所需作业目标时已经压力不足,不能将污物分离或者将采集目标剥离下来,无法实现预期的作业目标。

针对这一问题,有学者对圆形喷嘴出口长度与长径比、进出口收缩角及内部流线等喷嘴结构进行对比优化,但是改进的效果不明显^[5-6]。从近年来喷嘴研究的进展得知,异形喷嘴在某些场合比普通喷嘴性能优越^[7]。管志川等^[8]首先对矩形出口喷嘴的射流特性进行了研究,发现优化后的喷嘴的水力结构得到了改

收稿日期:2019-01-25;修回日期:2019-04-10

基金项目:湖南省科技创新计划:新型智能超声挖藕机研发(2018NK2062)。

第一作者简介:刘家禹(1994),男,湖南益阳人,硕士研究生,主要研究方向为喷嘴流场分析。E-mail:779587897@qq.com

善。李久生^[9]利用面粉法研究喷嘴形状对喷洒水滴动能的影响,发现在相同压力下方形喷嘴形成的水滴动能大于同流量的圆形喷嘴,在满足一定水滴总动能要求时,方形喷嘴可在比圆形喷嘴低的压力下工作,从而达到节能的目的。美国的科美腾爱华达公司研制的异形喷嘴,锐边的平面防止空气卷裹射流。事实上,由于对空气漩涡的消除,具有锐边平面的射流在较大靶距条件下保持了射流的凝聚性和超常的效率。试验证明磨料射流切割采用异形喷嘴比传统的圆柱形喷嘴性能有较大提高,同时异形喷嘴可以降低水射流的压力和功率^[10]。

对于异形喷嘴的研究,由于其结构的特殊性和较低的使用率,目前有关异形喷嘴与圆锥形喷嘴的对比仿真分析较少。尤其在异形喷嘴内部结构的设计中缺少对喷嘴收缩段结构的考虑,而在圆锥形喷嘴的研究中,喷嘴收缩段已被发现为影响喷嘴加速的最主要因素。因此,将异形喷嘴与收缩段结构结合将是异形喷嘴研究设计的必然趋势。

1 喷嘴模型

1.1 喷嘴的三维模型

课题组着重研究喷孔形状在不同入口速度条件下对喷嘴的流速、压强等射流特性的影响。为了便于日后的喷嘴加工及实际应用,研究对象选取异形喷嘴中已有较多应用的正三角形喷嘴与正方形喷嘴。此外,选择圆锥形喷嘴作为参照物,进行对比研究。为了充分利用圆锥形喷嘴收缩段对射流的收缩效果,本文的异形喷嘴采用了与传统圆锥形喷嘴一样的收缩段结构。

在对比研究过程中,为了尽可能地排除喷嘴内部结构对射流特性的影响,各喷嘴除了喷孔形状不同外,其余结构参数包括喷孔截面积、长径比、收缩角和粗糙度等均相同。

3种喷嘴的相同参数取值如下:取出口段长度 L 为30 mm;收缩角 α 为 13° ;喷嘴入口段长度对仿真结果无影响,在具体设计时可以再修改,暂定为2 mm。在面积相等的原则下,正三角形喷嘴的内切圆直径最小。为了便于计算,以正三角形喷嘴内切圆面积为基准,取正三角形喷嘴出口段内切圆直径 $d_d = 10$ mm,则正三角形喷嘴出口段截面积 $S_v = 129.9$ mm²,因此圆锥形喷嘴出口段截面直径 $d_d \approx 12.9$ mm,正方形喷嘴出口段内切圆直径 $d_w \approx 11.4$ mm。而圆锥形喷嘴的入口截面直径和正三角形、正方形喷嘴的入口内切圆直

径分别为 $D_d \approx 25.8$ mm, $D_v = 20$ mm 和 $D_w = 22.8$ mm。3种喷嘴的三维模型如图1所示。

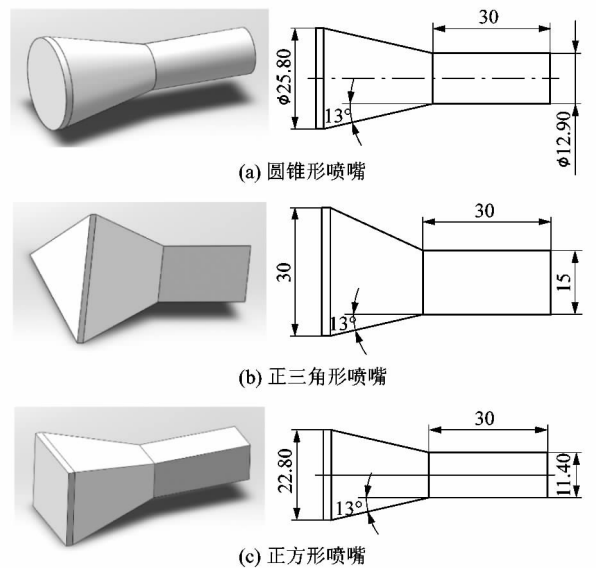


图1 喷嘴示意图

Figure 1 Schematic diagram of nozzle

1.2 喷嘴流场的数学模型

为了简化数值模拟,笔者将流体假定为连续不可压缩的理想流体,并且在假设喷嘴中没有热传导发生,因此在计算中不要求解能量方程。

1) 对于不可压缩流体的连续性方程在空间直角坐标系中的表达式为:

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

式中: ρ 为流体的密度, v_x , v_y 和 v_z 分别是流体在 x , y 和 z 方向上的速度分量。

2) 对于不可压缩流体的 N-S 方程(描述黏性不可压缩流体动量守恒的运动方程)在空间直角坐标系中的表达式为:

$$\left. \begin{aligned} f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) &= \frac{dv_x}{dt}; \\ f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) &= \frac{dv_y}{dt}; \\ f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) &= \frac{dv_z}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: f_x , f_y 和 f_z 分别是 x , y 和 z 方向上单位质量流体的体积力; v_x , v_y 和 v_z 分别为流体在 x , y 和 z 方向上的速度; $\frac{dv_x}{dt}$, $\frac{dv_y}{dt}$ 和 $\frac{dv_z}{dt}$ 分别为流体在 x , y 和 z 方向上的加速度; p 是压力; ν 是运动黏度,亦是动量扩散系数。

1.3 喷嘴流场的湍流模型

为了研究在不同入口速度条件下,3种喷嘴各自的射流特性,课题组设置了5.0,7.5,10.0,12.5和15.0 m/s共5个速度,分别在5组速度条件下对3种喷嘴进行流场仿真分析。在5组速度条件下,若最小速度条件下的流场雷诺数大于临界雷诺数,那么其余速度条件下的流场雷诺数也一定大于临界雷诺数。因此以最小速度5.0 m/s来计算流场的雷诺数。得到3种喷嘴的雷诺数分别为: $Re_w = 114\ 000$, $Re_v = 100\ 000$ 和 $Re_d = 129\ 000$ 。因为3种喷嘴的雷诺数均远大于各自的临界雷诺数,因此3种喷嘴中流体流动状态均为湍流,所以采用湍流模型进行数值模拟分析。在湍流模型中,可实现型湍流模型相比于其它的湍流模型更适合于自由流动、腔道流动和边界层流动,对于圆口射流,能够给出更好的射流扩张。所以选取可实现型 κ - ε 2方程模型进行数值模拟分析,湍流动能方程 κ 和扩散方程 ε 为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\kappa) \frac{\partial}{\partial x_j}((\rho\kappa u_j)) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa}) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j}] + G_\kappa + G_b - \rho\varepsilon + S_\kappa; \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{\kappa + \sqrt{\nu\varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon. \quad (4)$$

式中: μ_j 是湍流黏度; μ_t 是涡流黏度; G_κ 是由平均速度梯度引起的湍流动能; G_b 是由浮力产生的湍流动能; S_κ, S_ε 是用户定义的源项; S 是平均应变速率张量; $C_{3\varepsilon} = \tanh |v/u|$; $C_1 = \max[0.43, \eta/(\eta+5)]$; $\eta = Sk/\varepsilon$; $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$; $\mu_i = \rho C_\mu k^2/\varepsilon$ 。 (5)

与其它湍流模型不同的是,在“可实现型”湍流模型中, C_μ 是平均切应变率的函数,而不再是常数了。

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S k U^* / \varepsilon}.$$

其中: $U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \Omega'_{ij}\Omega'_{ij}}$; $\Omega'_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - 3\varepsilon_{ijk}\omega_k$; $A_0 = 4.04$, $A_S = \sqrt{6} \cos \Phi$; $\Phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W)$, $W = \frac{2\sqrt{2}S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{S^3}$, $S_{ij} = \frac{1}{2}(\frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j})$ 。

式中: S_{ij} 为平均速度应变率张量; Ω'_{ij} 为平均旋转速度张量; $\bar{\Omega}_{ij}$ 是在以角速度 ω_k 旋转的旋转坐标系中得到的平均旋转速率张量。

由浮力产生的湍流动能可表示为:

$$G_b = g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}. \quad (6)$$

由平均速度梯度引起的湍流动能可表示为

$$G_k = -\rho \overline{\mu'_i \mu'_j} \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i}. \quad (7)$$

式中: Pr_t 是能量的湍流普朗特数; g_i 是*i*方向上的重力矢量,取值0.85。

考虑到正三角形和正方形喷嘴的几何特征,3种喷嘴均采用三维求解器,而非二维求解器。求解器需要考虑重力的影响,并采用压力速度耦合算法,而离散格式则采用二阶迎风格式。其中,经验常数 $C_{1\varepsilon}, C_2$ 的取值分别为1.44和1.90;湍流普朗常数 σ_κ 和 σ_ε 的取值分别为1.0和1.2。

3种喷嘴的外部流场均设计为正方形,流场宽和高均为0.2 m,长取1.0 m,保证水射流能够在流场中充分发展。将喷嘴壁面设定为绝热壁面,喷嘴中没有热传导发生。流场中介质设为水,为了模拟实际情况,外部流场上边界假设离水面距离为0.4 m,取静压力为4 kPa;下边界假设离水面距离为0.6 m,取静压力为6 kPa;4个侧面中心离水面距离为0.5 m,取静压力为5 kPa。喷嘴的边界条件参数如表1所示。

表1 边界条件参数

Table 1 Boundary condition parameters

喷嘴入口速度/(m·s ⁻¹)	外流场压力/kPa		
	上边界	下边界	侧面边界
5.0,7.5,10.0,12.5,15.0	4	6	5

喷嘴入口速度值分别设为5.0,7.5,10.0,12.5和15.0 m/s;湍流指定方法选择湍流强度和水力直径。水力直径的计算公式为:

$$D_H = 4 \frac{A}{\chi}. \quad (8)$$

式中: A 是液流的有效截面积,m²; χ 是液流的湿周(流体与固体壁面所接触的截面周长),m。

3种喷嘴入口的水力直径分别是:

$$D_{Hd} = 25.8 \text{ mm}, D_{Hv} = 20.0 \text{ mm}, D_{Hw} = 22.8 \text{ mm}.$$

湍流强度公式为:

$$I = \frac{u'}{u} = 0.16 (Re_H)^{-\frac{1}{8}}. \quad (9)$$

式中 Re_H 是根据水力直径所计算的雷诺数。

3组喷嘴在不同入口速度条件下的湍流强度如表2所示。

表2 不同入口速度下各喷嘴湍流强度
Table 2 Turbulence intensity of each nozzle at different inlet speeds

喷嘴类型	湍流强度				
	入口速度	入口速度	入口速度	入口速度	入口速度
	5.0 m/s	7.5 m/s	10.0 m/s	12.5 m/s	15.0 m/s
圆锥形	3.67	3.49	3.37	3.28	3.20
正方形	3.73	3.55	3.42	3.33	3.25
三角形	3.94	3.73	3.61	3.53	3.44

2 喷嘴流场仿真结果分析

2.1 3种喷嘴的射流特性

为了研究在不同入口速度条件下,3种喷嘴各自的射流特性,在前面章节课题组设置了5组速度,分别在5组速度条件下对3种喷嘴进行流场仿真分析。不同喷嘴的射流最大速度和轴心最大速度随入口速度变化的关系如图2所示。

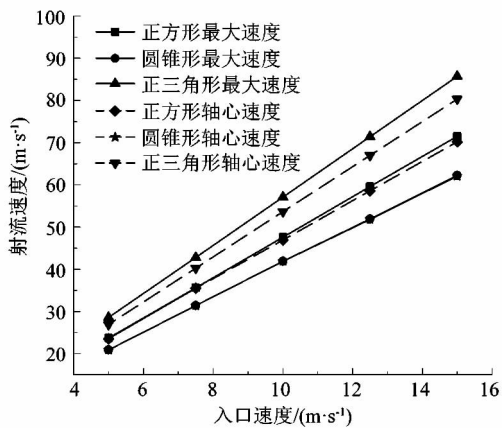


图2 喷嘴射流速度随入口速度变化

Figure 2 Jet velocity of nozzle changes with inlet velocity

3种喷嘴在5组不同的入口速度下,正三角形喷嘴的射流最大速度以及轴心速度都是最大的,且射流的最大速度要明显大于轴心最大速度。圆锥形喷嘴的射流最大速度和轴心最大速度基本相同,在3种喷嘴的射流中最小。正方形喷嘴的射流最大速度略大于轴心最大速度。

为了比较3种喷嘴射流最大速度和轴心最大速度位置的不同,在5组入口速度条件下,以3种喷嘴射流流场中的射流速度最大位置生成了横截面的速度云图。因为5组条件下的结果相似,仅展示在入口速度为15 m/s时,3种喷嘴射流的截面速度云图,如图3所示。

从3种喷嘴射流的截面速度云图中我们可以看

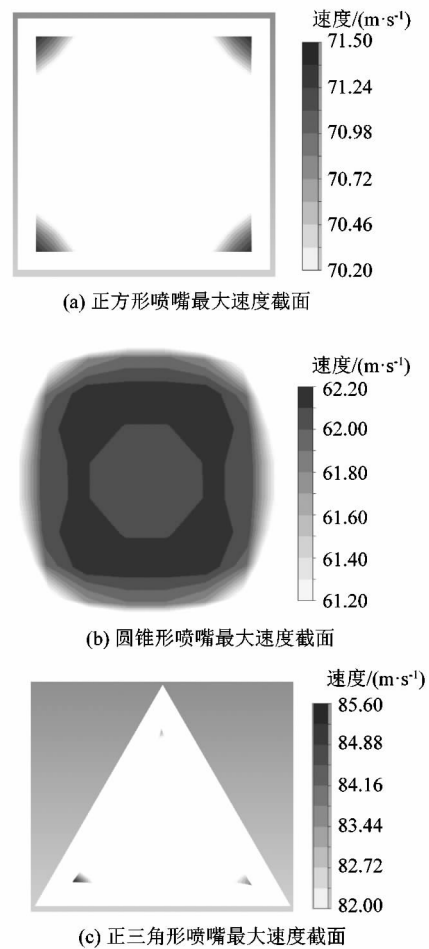


图3 喷嘴最大射流速度位置截面

Figure 3 Section of maximum jet velocity position of nozzle

出,正方形喷嘴射流的最大速度出现在喷嘴的4个顶角处,该截面位置位于喷嘴出口段起始2.00 mm处,在4个顶角的位置上达到了射流的最大速度;正三角形喷嘴射流的最大速度出现在喷嘴的左下角的顶角处,该截面位置位于喷嘴出口段起始0.72 mm处,在左下角的顶角处达到了射流的最大速度;而圆锥形喷嘴射流的最大速度出现在喷嘴出口段26.00 mm处,与轴心速度的大小基本相同,大小差值仅有0.01 m/s。其它速度条件下的射流情况相同。正方形喷嘴与正三角形喷嘴射流出现顶角速度大于轴心速度的现象,与2种喷嘴各自的几何形状有关。如图4所示,正方形喷嘴和正三角形喷嘴的收缩段棱边与出口段棱边的夹角要大于收缩段的收缩角。在顶角位置,较大的收缩角对射流的加速效果更强。并且,正三角形喷嘴棱边夹角要大于正方形喷嘴棱边夹角,加速效果更明显,它的顶角的最大速度也明显大于它的轴心速度。

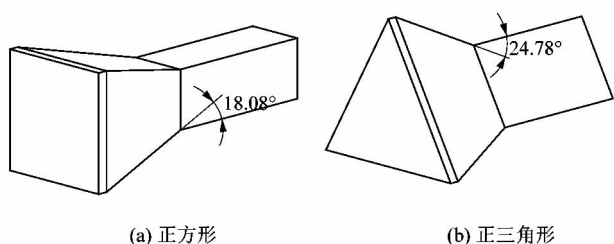


图4 喷嘴棱边夹角示意图

Figure 4 Included angle of edge of nozzle

2.2 喷嘴在不同入口速度下的轴心压力仿真结果及分析

对3种喷嘴设置相同的5组入口速度条件,分析同种喷嘴根据入口速度的不同射流特性的变化。3种喷嘴在5组速度条件下随射流距离增加的轴心压力变化趋势如图5所示。

2.3 喷嘴在相同入口速度下的轴心速度仿真结果分析

对3种喷嘴设置相同的5组入口速度条件,分析比较不同喷嘴在相同入口速度条件下的射流特性。5组速度条件下3种喷嘴的射流特性对比如图6所示。

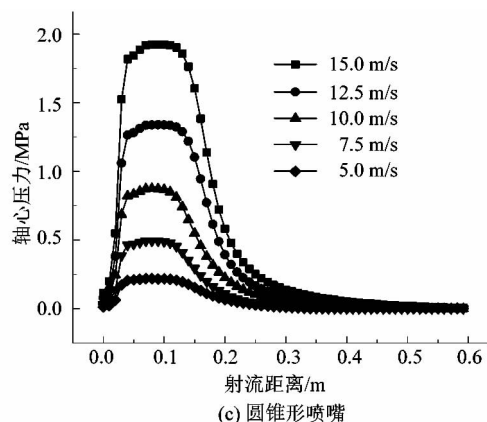
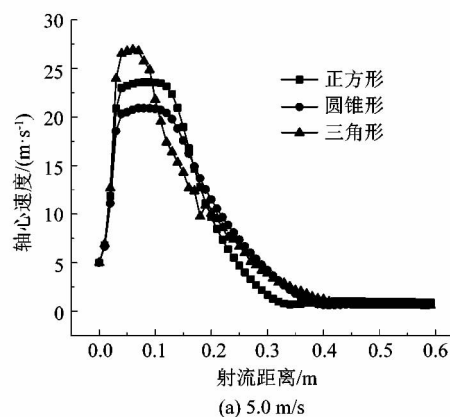
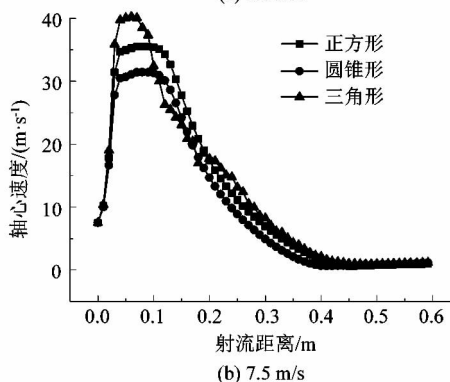


图5 不同入口速度下轴心压力变化图

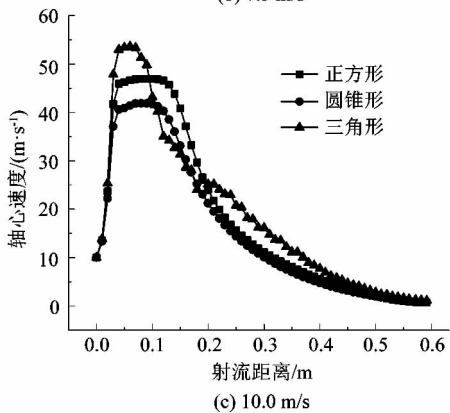
Figure 5 Variation of axial pressure at different inlet velocities



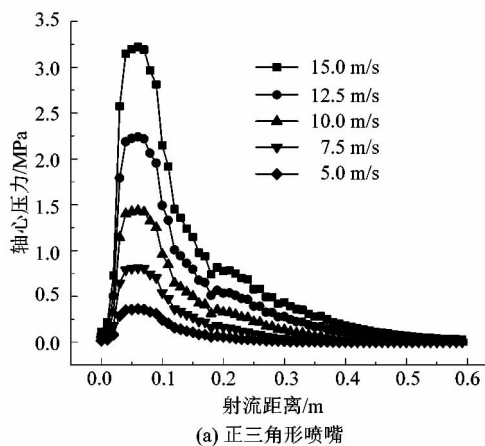
(a) 5.0 m/s



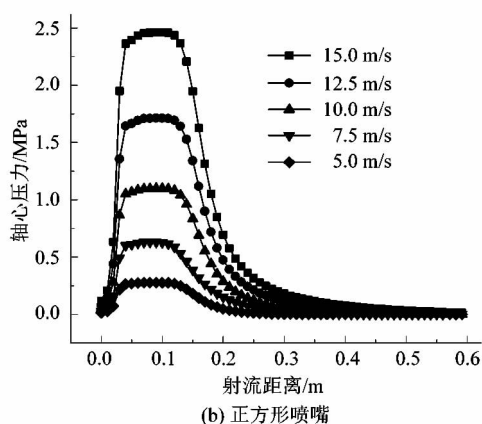
(b) 7.5 m/s



(c) 10.0 m/s



(a) 正三角形喷嘴



(b) 正方形喷嘴

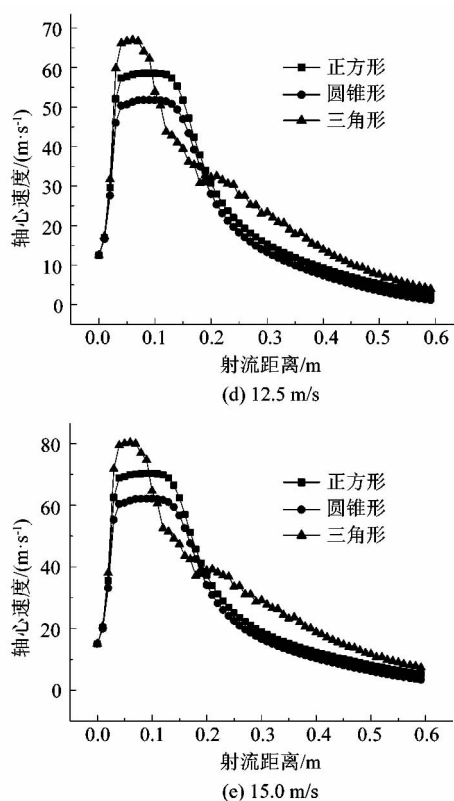


图6 不同喷嘴轴向速度变化图

Figure 6 Axial velocity variations of different nozzles

从5组入口速度条件下3种喷嘴的射流速度变化图中可以看出,射流在正三角形喷嘴中的加速最快,加速效果最好,轴心速度最大;而正方形喷嘴和圆锥形喷嘴对射流的加速效果基本相同。3种喷嘴的射流的主要加速段都是喷嘴收缩段,正三角形喷嘴和正方形喷嘴的射流最大速度均在喷嘴收缩段与出口段交界处出现,位于射流的顶角处。而在喷嘴出口段中,射流顶角的速度越来越小,轴心速度还在不断变大。可以假设,喷嘴出口段结构本身对射流没有加速效果,主要依靠射流的外部流体不断与轴心流体发生能量交换,加速轴心射流速度。

在5组入口速度条件下,正三角形喷嘴的轴心最大速度都是最大的,正方形喷嘴的轴心最大速度大于圆锥形喷嘴。在5组入口速度条件下,3种喷嘴的射流等速核长度基本保持不变,不会因为入口速度的增大而变长。正方形喷嘴射流的等速核长度与圆锥形喷嘴射流的等速核长度基本相同,而正三角形喷嘴射流的等速核长度明显要短于另外2种喷嘴。这与上节对射流轴心压力分析的结果一样,正方形喷嘴和圆锥形喷嘴的射流的凝聚性要更好一些。

3 结论

课题组将正方形、圆锥形和正三角形3种喷嘴作为研究对象,通过FLUENT仿真软件进行数值模拟,得到了3种喷嘴在不同的入口速度条件下的速度、压力等数据,经过对比分析后得到了以下结论:

1) 在相同的入口速度条件下,正三角形喷嘴的射流最大速度明显大于轴心速度,射流最大速度出现在射流的顶角处而非轴心处。正方形喷嘴的射流最大速度略大于轴心最大速度,正方形喷嘴射流的最大速度出现在射流4个顶角处。圆锥形喷嘴的轴心最大速度和射流的最大速度基本相同,在3种喷嘴的射流中都是最小的。

2) 随着入口速度的增大,3种喷嘴在喷嘴内的轴心压力与射流速度均越来越大。在5组入口速度条件下,正三角形喷嘴的轴心压力和射流速度都是最大的,正方形喷嘴次之,圆锥形喷嘴最小。

3) 3种喷嘴射流的等速核长度不会随着入口速度的增大而增长,正方形喷嘴和圆锥形喷嘴的射流等速核长度接近,而正三角形喷嘴的射流从喷嘴中喷出后,速度迅速减小,甚至一度小于圆锥形喷嘴射流速度。可以看出正方形喷嘴和圆锥形喷嘴的射流的凝聚性要比正三角形喷嘴好很多。

4) 正三角形喷嘴和正方形喷嘴的射流最大速度出现在顶角处的现象的原因是:尽管3种喷嘴的收缩段收缩角都是 13° ,但2种喷嘴的收缩段棱边与出口段棱边的夹角要大于收缩段的收缩角,在顶角位置,较大的收缩角对射流的加速效果要更加强。并且,正三角形喷嘴棱边夹角要大于正方形喷嘴棱边夹角,加速效果更强。

5) 3种喷嘴射流的加速段主要发生在喷嘴收缩段,喷嘴出口段结构本身对射流没有加速效果,主要依靠射流的外部流体不断与轴心流体发生能量交换,加速轴心射流速度。

尽管正三角形喷嘴对射流的加速效果最好,但射流从喷嘴喷出后射速迅速减小,甚至小于圆锥形喷嘴。而正方形喷嘴射流凝聚性好,射速快,等速核长,更适合于淹没射流中的水射流作业。

参考文献:

- [1] 任建新. 物理清洗[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 115-161.
- [2] 冯雅丽, 李浩然. 深海矿产资源开采与利用[M]. 北京: 海军出版社, 2004: 5-19.
- [3] 杨年浩, 倪福生, 孙丹丹. 高压水射流技术发展及其在疏浚工程中的应用[J]. 采矿技术, 2006, 6(1): 67-72.