

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.04.005

# 喷嘴压力对非淹没空化流场影响的研究

陈振国,王海峰,刘伯轩

(南京工业大学机械与动力工程学院,江苏南京 211816)

**摘要:**为了了解非淹没射流对大型工件的处理效果,课题组提出并设计了一种新型的非淹没人工射流,该方式可以适应各种场合工件的处理。在理论上,由淹没状态下的汽、液两相流变为非淹没状态下的气、汽、液三相流,采用外围低压水与内喷嘴高压水的结合,形成了人工淹没环境结构;通过该结构,使用 FLUENT 软件,实现了非淹没喷嘴空化效果的判断与预测;并通过模拟结果,分析了不同压力对空化流场的影响。结果表明:随着压力的升高,流场的轴向速度、轴向动压强以及汽相体积分数有着明显的提高。该非淹没喷嘴可产生较强的空化效果,且对入口压力较为敏感。

**关键词:**空化喷嘴;非淹没;空化水射流;三相流;FLUENT 软件

中图分类号:TP69;TG17 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2019)04-0025-05

## Influence of Nozzle Pressure on Flow Field of Non-Submerged Cavitation Jetting

CHEN Zhenguo, WANG Haifeng, LIU Boxuan

(School of Mechanical and Power Engineer, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

**Abstract:** To understand the effect of non-submerged jet on large workpieces, a new type of non-submerged artificial jet was proposed and designed, which could be well adapted to the processing of workpieces in various occasions. On the basis of theory, the three-phase flow of gas, vapor and liquid in non-submerged state was changed from the two-phase flow of vapor and liquid in submerged state. The structure of artificial submerged environment was formed by the combination of peripheral low pressure water and internal nozzle high pressure water. Through this structure and using Fluent software, the judgment and prediction of cavitation effect of non-submerged nozzle were realized. The influence of different pressure on cavitation flow field was analyzed by simulation results. The results show that with the increase of pressure, the axial velocity, axial dynamic pressure and vapor volume fraction of the flow field increase significantly. Therefore, the non-submerged nozzle can produce strong cavitation effect and is sensitive to the inlet pressure.

**Keywords:** cavitation nozzle; non submerged; cavitation water jet; three phase flow; FLUENT

空化射流技术最早起源于采矿业,是能量转换及利用的一种形式。该技术主要用于开采中的清洗和冲刷,因其高效、安全和便捷等特性,近几年来得到迅猛发展<sup>[1-3]</sup>。例如应用于石油开采领域的空化射流钻井技术,就是在钻头或钻杆上增加一个附加的空化装置,用来直接或辅助机械破岩,提高钻井速度<sup>[4-5]</sup>。之后该项技术又扩展到喷丸强化<sup>[6]</sup>等领域。

空化喷嘴是空化射流产生空化的主要部件,设计出空化性能良好的喷嘴是国内外学者研究的重点。

Soyama<sup>[7-8]</sup>提出了一种复合型非淹没空化喷嘴,课题组对该种喷嘴结构进行改进,新的结构与前人的实验结构进行对比,证明了改进具有合理性。结合不同入口压力下水流场的流动状态,为该种结构进一步探究提供一定的基础。

### 1 基本模型与求解方法

#### 1.1 几何模型

课题组以 Soyama 和 Marcon 等<sup>[9-10]</sup>所做的经典实验为基础,采用有较好空化射流效果的角型喷嘴,并结

收稿日期:2019-01-02;修回日期:2019-04-25

第一作者简介:陈振国(1994),男,安徽蚌埠人,硕士研究生,主要研究方向为过程装备现代设计方法。E-mail:1218573525@qq.com

合刘伯轩等<sup>[11]</sup>所做的结构对喷嘴进行优化设计,之后对相关的数值模拟研究。改进前后的喷嘴结构如图1所示。喷嘴内部通入高压高速水,外围通入低压低速水,使得高速水在低速水的包围下形成仿淹没环境;并发生剪切,从而在射流的边界层处产生漩涡,促进空化现象的发生。空化产生的效应使得空化射流在环保、生化、钻探、清洗及切割等行业得到了广泛应用。

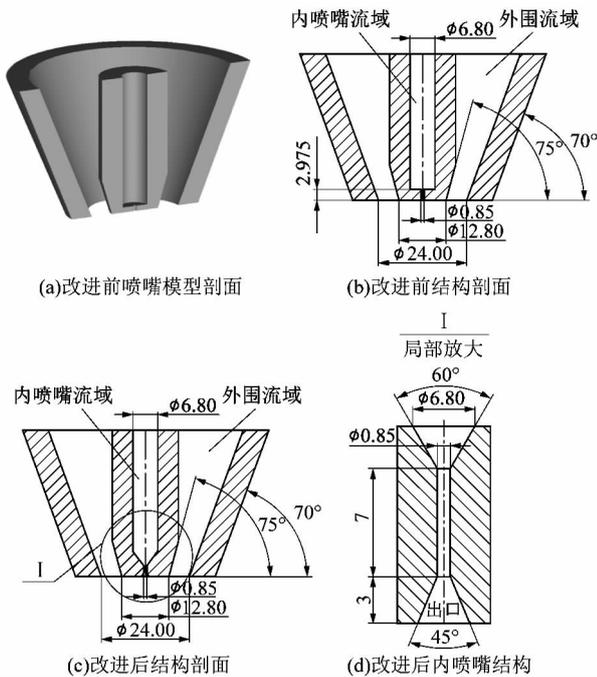


图1 改进前后喷嘴结构对比

Figure 1 Comparison of nozzle structure before and after improvement

1.2 网格划分

将设计后的非淹没式喷嘴几何模型导入ICEM中,进行网格划分,模型全部采用四边形结构化网格。在该模拟中,计算域包括高速内喷嘴流场、低速外围流场以及射流喷入空气中的流场。因该种喷嘴是轴对称结构,为节约资源以及计算时间,故简化为二维轴对称模型。为提高计算过程中的稳定性以及精度,对圆柱段以及扩散段位置进行局部的网格加密,网格图如图2所示。

1.3 边界条件

非淹没式喷嘴内外射流入口设为压力入口,典型工况下的喷嘴入口压力为30 MPa,外围入口压力为80 kPa。外部射入空气流场边界设为压力出口,其表压值为0,即为大气压力。固体壁面部分满足无滑移条件,在近壁面区域,使用标准壁面函数进行求解。

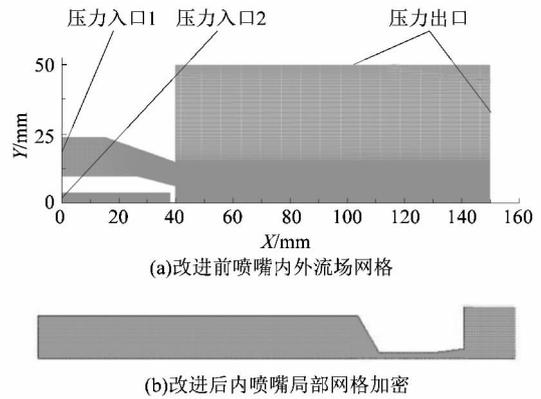


图2 改进前后喷嘴的网格图

Figure 2 Grid of nozzles before and after improvement

1.4 求解方法

针对气、汽、液三相复杂流动模拟,选择SIMPLEC压力-速度算法,耦合求解器对压力方程和动量方程进行求解,能够对计算有更好的鲁棒性和更好的收敛性。采用Standard对压力进行离散,采用QUICK对空间进行离散,其它则采用一阶迎风格式进行离散求解。

2 数学模型

非淹没空化水射流是属于气、汽、液三相的复杂流动问题,因此需要选择适合的湍流模型和空化模型。

2.1 湍流模型

湍流是空化射流的一种显著特征,因此,选用一个合适的湍流模型是非常重要的。通过比较,发现RNG模型在模拟流速有突变的流场中有很好的精度。在模拟中加入低雷诺数的黏性效应<sup>[12]</sup>,使得模拟结果更加精确。

湍动能  $\kappa$  方程:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + P_\kappa - \rho \epsilon \quad (1)$$

耗散率  $\epsilon$  方程:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{\kappa} (c_1^* P_\kappa - c_2 \rho \epsilon) \quad (2)$$

其中:

$$c_1^* = c_1 - \frac{\eta(1 - \frac{\eta}{\eta_0})}{1 + \beta \eta^3} \quad (3)$$

$$\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{\frac{1}{2}} \frac{\kappa}{\epsilon} \quad (4)$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

式中:  $c_1 = 1.42, c_2 = 1.68, c_\mu = 0.0845, \eta_0 = 4.377, \beta =$

0.012;  $P_\kappa$  为速度梯度引起的总压生成项;  $\mu_i$  为湍动黏度;  $\kappa$  为湍动能;  $\sigma_\kappa$  为与湍动能对应的 Prandtl 数;  $\varepsilon$  为湍动能耗散率;  $\sigma_\varepsilon$  为与湍动能耗散率对应的 Prandtl 数;  $c_1^*$  为耗散率方程产生项系数;  $E_{ij}$  为主流的时均应变率。

## 2.2 Zwart 空化模型

在汽化的过程中,由于汽相的体积分数增加,而且伴随着气泡核位置密度的减小,Zwart 在前人基础上对空化方程中汽相的体积分数项进行了修正<sup>[13]</sup>,用  $\alpha_{\text{nuc}}$  ( $1 - \alpha_v$ ) 替代了凝聚方程中的  $\alpha_v$ 。

当  $P \leq P_v$  时,即流场压力小于等于汽化压力时,发生蒸发过程,公式为:

$$R_e = F_{\text{vap}} \frac{3\alpha_{\text{nuc}}(1 - \alpha_v)\rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \left( \frac{P_v - P}{\rho_l} \right)}. \quad (6)$$

当  $P > P_v$  时,即汽相向液相转变,发生凝结过程,公式为:

$$R_c = F_{\text{cond}} \frac{3\alpha_v\rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \left( \frac{P - P_v}{\rho_l} \right)}. \quad (7)$$

式中:  $R_B$  为气泡半径,值为  $10^{-6}$  m;  $\alpha_{\text{nuc}}$  为气核的体积分数,数值为  $5 \times 10^{-4}$ ;  $\alpha_v$  为汽相体积分数;  $F_{\text{vap}}$  为蒸发系数;  $F_{\text{cond}}$  为凝聚系数;  $P$  为流场压力;  $P_v$  为汽化压力;  $R_e$  为蒸气生产率;  $R_c$  为蒸气凝结率;  $\rho_v$  和  $\rho_l$  分别为汽相密度和液相密度。

## 3 结果分析

分别采用普通喷嘴和新型角型喷嘴进行数值计算,通过分析典型工况下的压力场和汽相体积分数,判断结构改进的效果。进而分析不同内喷嘴入口压力对新型角型喷嘴流场的影响。

### 3.1 典型工况下改进前后流场的分析比较

图3为内喷嘴入口压力为30 MPa时,沿喷嘴轴线方向内、外流场压力分布曲线图。从图中可以看出,改进后的结构在内喷嘴有非常明显的负压,这是因为收缩段的存在,使压力降低明显早于改进前的喷嘴。喷嘴的喉部圆柱段负压值最低,最大负压出现在喉部圆柱段靠近扩散段附近,在扩散段液体压力逐渐增加直到喷出喷嘴,此时液体恢复至环境大气压。液体流经喷嘴时,因压力变化且存在较长的负压区,当压力低于当前温度液体的饱和蒸气压时就会发生空化现象,相比于改进前的结构空化效果更好。

图4为内喷嘴入口压力为30 MPa时,喷嘴改进前后流场内汽相体积分数分布图,从图中数据可以看出,改进后的喷嘴最大汽相体积分数能达到0.94,大于改

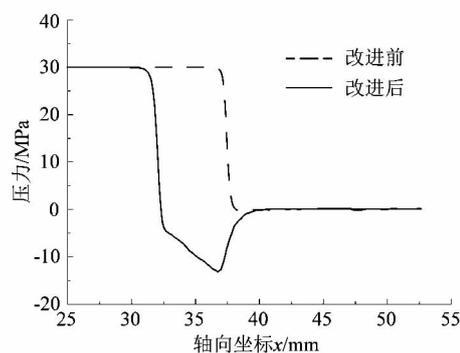


图3 喷嘴轴线方向流场压力分布曲线  
Figure 3 Flow field pressure distribution curve in axial direction of nozzle

进前的0.85。从云图可知,改进后的喷嘴,空化分布的范围更广,在扩散段壁面处达到最大,之后呈现锥形扩散。并且改进后的喷嘴整体汽相体积分数明显大于之前,特别是在外部流场区域,因此可确定改进后喷嘴空化效果更好。

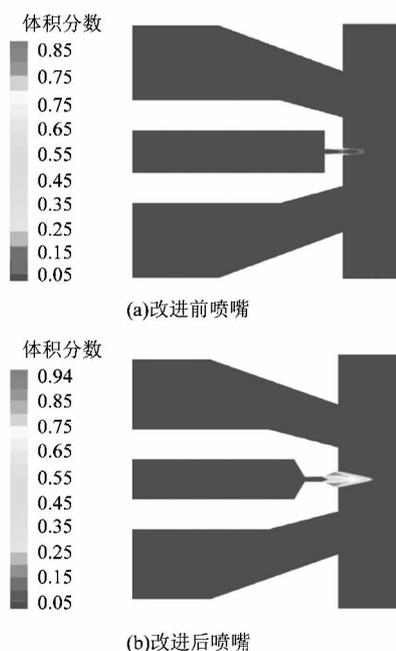


图4 喷嘴汽相体积分数分布图  
Figure 4 Distribution diagram of vapor phase volume fraction of nozzle

### 3.2 内喷嘴入口压力对改进后流场的影响

图5是内喷嘴不同入口压力条件下的轴向速度曲线图。从图中可看出,不同的入口压力,速度分布规律基本相同,都有相同的趋势。当水流从收缩段进入喉管的位置时,速度迅速增大,并在扩张段时达到最大值,随后由于高速水流与外围低速水流发生剪切,形成

了阻力,射流轴向速度逐渐减小,在一段平缓区后,迅速下降。

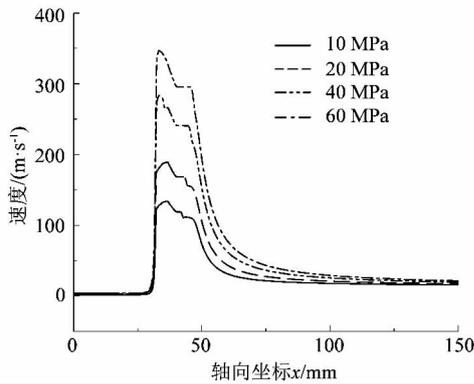


图 5 内喷嘴不同入口压力下轴向速度曲线

Figure 5 Axial velocity curves under different inlet pressures of internal nozzles

图 6 是内喷嘴不同入口压力条件下动压力曲线图。由图可知,不同的入口压力,流场动压力分布规律基本相同。在整个流场上,出现 2 次峰值的位置,一次是在内喷嘴的收缩段位置,另一次是在水流射出喷嘴后一定距离的位置。角型喷嘴拥有较大的低压覆盖区,包括喉管处、扩张段以及外界自由水域,能够提供较为充足的低压作用时间,使得空泡充分地发育。水流从收缩段进入喉管后,流速增大,动压力随之增加;再从扩张段进入外流域,高速水流与外围低速水流发生剪切,产生漩涡,使得该区域内产生低压区域,促使动压力达到另一个峰值。

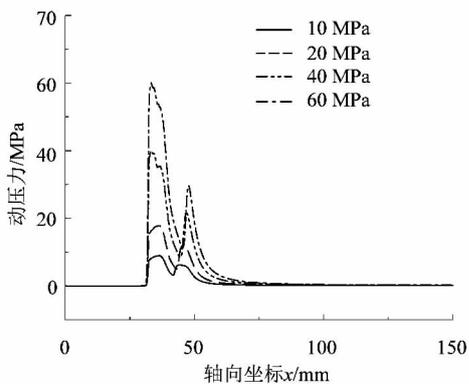


图 6 内喷嘴不同入口压力下动压力曲线

Figure 6 Dynamic pressure curve of different inlet pressure of internal nozzle

为了准确得出轴心最大速度和最大动压力随内喷嘴入口压力的变化,增加数据组数,分别模拟计算入口压力为 5,10,20,25,30,35,40,45,50 和 60 MPa 时的

工况。如图 7 所示,随着压力的增大,其轴心最大速度逐渐增大。如图 8 所示,随着压力的增大,其最大动压力逐渐增大。但相比之下,发现轴心最大速度的增长随着压力的增加有所放缓,而动压力则持续增大。

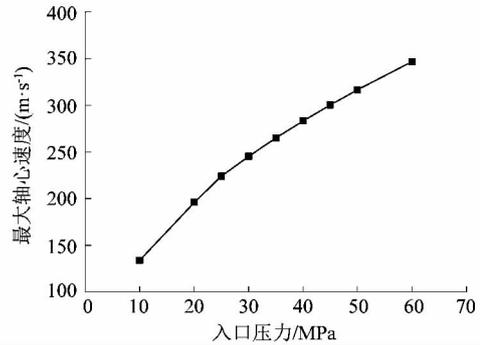


图 7 内喷嘴不同入口压力下最大轴心速度曲线

Figure 7 Maximum axis velocity curve under different inlet pressure of internal nozzle

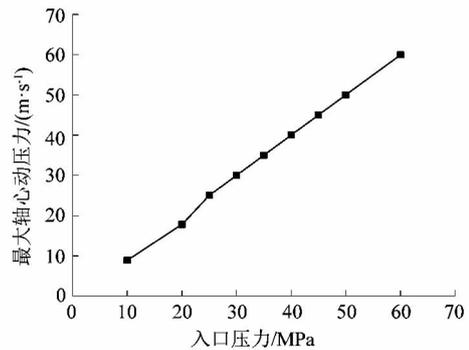


图 8 内喷嘴不同入口压力下最大轴心动压力曲线

Figure 8 Maximum axial dynamic pressure curve under different inlet pressure of internal nozzle

图 9 是压力分别为 10,20,40 和 60 MPa 时的汽相体积分数分布图,表现出汽相在喉管与扩张段处的分布状态。由图可知,随着内喷嘴入口压力的增大,靠近扩张段附近的汽相体积分数不断增加,且距离扩张段出口位置越来越远,呈现放射状分布,并逐渐减小。从 10 到 60 MPa,起初空化形成位于收缩段与喉管交界处,并随着压力的增加逐渐扩散到整个喉管靠近壁面的位置,直到与扩张段形成汽相连结。因此可以得出,随着内喷嘴入口压力的增大,流域内产生更好的空化效果。

#### 4 结语

课题组基于非淹没空化水射流模型,先是分析比较普通喷嘴与新型角型喷嘴的结构性能,再分析改进后的喷嘴在内喷嘴不同入口压力的影响:

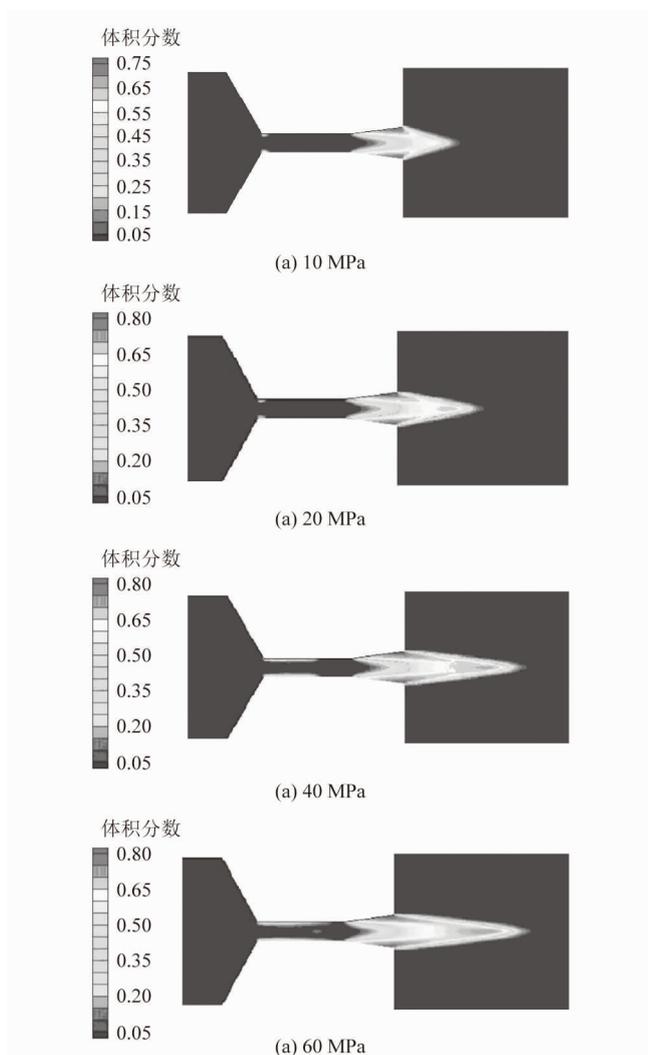


图9 内喷嘴不同入口压力下汽相体积分数分布  
Figure 9 Vapor volume distribution map under different inlet pressure of internal nozzle

1) 从流域内压力以及汽相分布图可以看出,角型内喷嘴有着更好的空化效果,且空化区域更加均匀、广泛。

2) 由于有收缩段与扩张段的存在,使得内喷嘴有着更广泛的影响区域,随着入口压力的增大,轴心速度

与轴心动压力都逐渐增大,但速度的增加要相对平缓,且两者都在收缩段与喉管交界处达到峰值。但速度在外流域有一段等速区域,而动压力在距离喷嘴出口一定距离达到另一个峰值,这2个特性促进了空化的形成。

3) 空化的形成起始于喉管与收缩段的连接部位,随着入口压力的增加,沿着喉管壁面逐渐延展到扩张段。整个流域内,入口压力越大,空化分布越广泛,且在扩张段,空化呈现放射状,随着出口距离的增加越来越小。

#### 参考文献:

- [1] 沈忠厚. 水射流理论与技术[J]. 中国安全科学学报, 1999, 9(增刊1): 89.
- [2] 王瑞和, 倪红坚. 高压水射流破岩机理研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2002, 26(4): 118-122.
- [3] 胡静艳, 谭锦凌, 李振华. 水射流胎贝单边脱壳装备喷嘴内流场数值仿真研究[J]. 机电工程, 2018, 35(8): 828-832.
- [4] 王建杰, 陈立宇, 杨夏明, 等. 空化水射流的研究进展[J]. 精密成形工程, 2016, 8(5): 158-160.
- [5] 李根生, 沈忠厚. 空化射流及其在钻井工程中的应用研究[J]. 石油钻探技术, 1996, 24(4): 51-54.
- [6] 吉春和, 张新明. 高压水射流喷丸强化技术[J]. 轻工机械, 2007, 25(4): 109-111.
- [7] SOYAMA H. Introduction of compressive residual stress using a cavitating jet in air [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2004, 126(1): 123-128.
- [8] SOYAMA H. Improvement of fatigue strength by using cavitating jets in air and water [J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(16): 6638-6641.
- [9] SOYAMA H, KIKUCHI T, NISHIKAWA M, et al. Introduction of compressive residual stress into stainless steel by employing a cavitating jet in air [J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(10): 3167-3174.
- [10] MARCON A, MELKOTE S N, CASTLE J, et al. Effect of jet velocity in co-flow water cavitation jet peening [J]. Wear, 2016, 360/361: 38-50.
- [11] 刘伯轩. 非淹没空化水射流多相流动特性数值模拟研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2018: 44-49.
- [12] 郝毓雅, 张志强. 不同湍流模型下空中加油吊舱尾流场对比分析[J]. 现代机械, 2018(3): 73.
- [13] 罗亮, 尤宝. 基于Zwart模型的化工离心泵空化性能数值模拟[J]. 石油化工设备, 2017, 46(1): 25.

(上接第24页)

- [4] 王维. 4SWO-1.2型船式水力挖藕机的研制[D]. 南京: 南京农业大学, 2009: 1-5.
- [5] 何枫, 谢峻石, 杨京龙. 喷嘴内部流道型线对射流流场的影响[J]. 应用力学学报, 2001, 18(4): 114-119.
- [6] VASILEV O A, MININ S N, SHIPOPSKIKH A V. Investigation of the flow structure in nozzles with a throat section of constant height [J]. Fluid Dynamics, 1991, 25(6): 944-949.
- [7] MCCARTHY M J, MOLLY N A. Review of stability of liquid jets and

the influence of nozzle design [J]. Chemical Engineering Journal, 1974, 7(1): 1-2.

- [8] 管志川, 陈庭根, 胡永宏, 等. 长圆形出口喷嘴射流特性的实验研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1993, 17(5): 42-46.
- [9] 李久生, 马福才. 喷嘴形状对喷洒水滴动能的影响[J]. 灌溉排水, 1997, 16(2): 1-6.
- [10] 赵欣. 异形喷嘴射流特性的实验研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2005: 12.