

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.08.009

水射流贻贝单边脱壳装备喷嘴 内流场数值仿真研究*

胡静艳, 谭锦凌, 李振华*

(浙江海洋大学 船舶与机电工程学院, 浙江 舟山 316022)

摘要:针对目前国内半壳贻贝加工方法生产效率低、加工环境差、贝肉品质低等问题,提出了一种新型的水射流贻贝单边脱壳方法,并对水射流脱壳装备中喷嘴进行了数值模拟。使用 ICEM-CFD 软件建立了喷嘴内流场的二维模型,并进行了网格划分;利用 FLUENT 软件,选择合理的计算区域和边界条件、采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,对喷嘴内流场的速度、压力、及湍动能耗散率进行了计算,获得了水射流单边脱壳装备中喷嘴的最佳结构参数。研究结果表明:喷嘴收缩角、出口直径对喷嘴出口流速的影响较大,圆柱段长度对出口流速几乎无影响;喷嘴收缩角、出口直径、圆柱段长度变化时,喷嘴出口处湍动能耗散率在轴线两侧维持为一恒定值,在近壁面处急剧增加。喷嘴结构参数的确定为推动水射流贻贝单边脱壳技术的发展提供了重要参考价值。

关键词:水射流;导向板式扇形喷嘴;Fluent;数值模拟;收缩角;出口直径;圆柱段长度

中图分类号:TH122;TS254.3

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)08-0828-05

Numerical simulation of nozzles' internal flow field of water jet single-side shucking

HU Jing-yan, TAN Jin-lin, LI Zhen-hua

(School of Ship and Mechanical and Electrical Engineering,
Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: Aiming at the problem of low production efficiency, poor processing environment and low quality of semi-shell mussel, a new water jet single-side shucking method was introduced and numerical simulation of the water jet processing nozzle was carried out. Two-dimensional model of the nozzle's internal flow field was established and trellis partition were computed by ICEM-CFD software. The velocity, pressure and turbulent energy dissipation rate of the nozzle were calculated choosing the reasonable calculation area and boundary conditions and using the standard $k-\varepsilon$ turbulence model to obtain the best structural parameters of the water jet shelling equipment nozzle with FLUENT. The results indicate that the influence of contraction angle and outlet diameter of the nozzle on the outlet velocity is larger. However, the cylindrical length has little effect on the outlet velocity. When the nozzle contraction angle, outlet diameter and the length of cylindrical section change, the turbulent energy dissipation rate of the nozzle outlet maintains a constant value on both sides of the axis, and increases sharply at the near wall. The determination of the structure parameters of the nozzle provides important reference value for the development of water jet single-side shucking method.

Key words: water jet; guide plate type fan-shaped nozzle; Fluent; numerical simulation; contraction angle; the outlet diameter; the length of the cylindrical section

收稿日期:2018-01-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51205359);浙江省公益性技术应用研究社会发展项目(2014C33086)

作者简介:胡静艳(1991-),女,内蒙古赤峰人,硕士研究生,主要从事水产机械工程方面的研究。E-mail:hujingyan910116@126.com

通信联系人:李振华,女,教授,硕士生导师。E-mail:lizh760905@zjou.edu.cn

0 引言

我国作为世界上主要贝类出口国,获得半壳贻贝的方式主要通过人工脱壳获得。人工脱壳方法加工环境差、产品质量低,因此,新型半壳贻贝获得方法的研发迫在眉睫^[1-3]。

水射流技术因其具有加工成本低、加工材料广、冷切割、无机械应力、切割面光滑平整等诸多优点,而被广泛用于机械制造、汽车、航空航天、军工、食品等领域。喷嘴作为水射流技术的核心元件之一,其性能的优劣将直接影响水射流的工作效率。实验表明,导向板式扇形喷嘴可产生平坦均匀的扁平射流、射流致密性好、液滴大小中等、边界界定清晰、畅通口径较大、不易堵塞等优点^[4-8]。目前,王家忠等^[9]利用水射流技术剥离海湾扇贝贝柱的研究,已取得较好的试验效果。

本研究将水射流技术应用于贻贝单边脱壳,利用 FLUENT 仿真软件,对水射流贻贝单边脱壳装备所用导向板式扇形喷嘴的内流场水流动情况进行模拟分析。

1 流场基本理论

本研究中喷嘴内水的流动为不可压缩连续流动,因而需满足流体流动的连续方程和动量守恒方程:

连续方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho \omega}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ —密度; t —时间; μ —速度矢量; u, v, ω —速度矢量 μ 在 x, y, z 方向的分量。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} + \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + f_z \quad (4)$$

本研究喷嘴中的水射流是粘性流体,其在喷嘴内的流动具有不可压缩、与外界没有热量交换的性质,因此,它遵循连续方程和动量方程这两个控制方程^[10-11]。

2 模型与方法

2.1 喷嘴结构模型

本研究所用喷嘴结构模型以常见市售导向板式扇

形喷嘴为参考,其典型结构模型如图 1 所示。

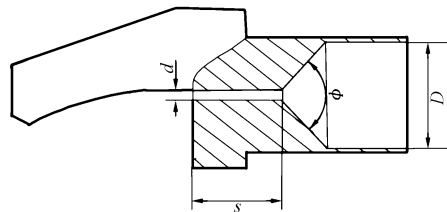


图1 导向板式扇形喷嘴结构模型图

其结构参数包括:喷嘴入口直径 $D = 4.822 \text{ mm}$ 、喷嘴出口直径 $d = 1 \text{ mm}$ 、圆柱段长度 $s = 3 \text{ mm}$ 、喷嘴收缩角 $\varphi = 65^\circ$ 。其中,通过确定 s, d, φ 的值,可确定入口直径 D 。当射流压力,射流角度一定时,喷嘴喷射液流对物体的打击性能取决于喷嘴射流截面积和速度,因此,本文仅考虑喷嘴收缩角 φ 、喷嘴圆柱段长度 s 、出口直径 d 对内部水流动的影响。

2.2 网格模型与网格无关性验证

2.2.1 网格模型

本研究所用导向板式扇形喷嘴属于轴对称结构,为减少仿真的计算量,笔者选取轴向截面作为计算域。本文前处理中对3个变量下的13组模型进行网格划分,现仅以典型模型(即 $D = 4.822 \text{ mm}, d = 1 \text{ mm}, s = 3 \text{ mm}, \varphi = 65^\circ$) 为例进行详细说明及下文的网格无关性验证。利用 ICEM-CFD 软件对喷嘴典型模型的内流场进行网格划分,网格划分如图 2 所示。

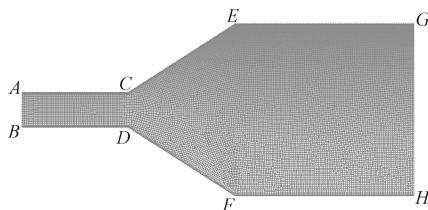


图2 导向板式扇形喷嘴内流场网格划分

网格单元选择 2-D 单元模型,网格类型选择 Quad-dominated(四边形占优),网格划分尺寸为 0.05,生成网格总数为 15 961。

2.2.1 网格无关性验证

网格无关性是 CFD 数值计算中需要特别注意的问题。网格数过小不能满足计算精度要求,网格数过多可能导致负体积生成,且减慢模拟计算运行速度,使得计算机容易死机,影响正常计算,因此进行网格无关性验证是数值模拟中不可或缺的环节^[12]。

本研究对典型模型网格数及其 0.8、1.4、1.8 倍网格数 4 组模型进行模拟分析,不同网格数各变量计算值如表 1 所示。

表 1 不同网格数下各变量计算值

网格数	最大压力 /Pa	最大速值(出口处) /($m \cdot s^{-1}$)	最大湍动能耗散率 /($m^2 \cdot s^{-3}$)
12 768	2.42e+05	24.48	0.94 e+06
15 961	3.57 e+05	27.20	1.06 e+06
22 345	3.79 e+05	28.56	1.11 e+06
28 279	3.85 e+05	29.46	1.17 e+06

具体方法为:网格划分方法不变,以经验网格数为基准,增加不同倍数的网格数量(即减小或增大网格尺寸),通过观测最大出口处速度值,最大压力值以及最大湍动能耗散率变化情况来看验证本次模拟是否与网格数无关。

根据表 1 数据可以看出,当网格数小于 15 000 时,各检测项目值与高网格数存在较大差异;而当网格数大于 15 000 时,各检测项目值变化且差值均在在 1.5% 以内,可认为本研究所选网格数为 15 961 达到网格无关性要求。

2.3 Fluent 仿真模型

2.3.1 数值模拟方法及参数设置

利用 Fluent 对模型求解计算时,湍流模型选取标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,该模型的相变、传热等均忽略不计。喷嘴内部流场为单一相流,主相为液态纯水。近壁面处理采用标准壁面函数,求解器采用压力基求解器,求解方法采用 SIMPLEC 压力-速度耦合算法,压力插值采用 second-order 格式,动量采用二阶迎风格式,湍动能、湍流耗散率选择一阶迎风格式。

根据公式 $I = 0.16Re^{-\frac{1}{8}}$ 、 $Re = vd/\gamma$, 其中, $Q = 5.57 \text{ L/min}$, 入口速度 v (可求), 常温 ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) 下水密度为 1000 kg/m^3 , 运动粘度为 $1.003 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 分别计算各组参数下 Re 数及湍流强度。质量和动量选项设置为无滑移,粗糙度选项设置为光滑。初始条件设定中,静压选项选择自动值,其值大小为 3 MPa 。模拟类型为稳态模拟,模型设置为湍流,最大迭代步数设定成为 1 000 步。有关模型其他各项均采用默认设置^[13-15]。

2.3.2 边界条件的设定

本研究所用导向板式扇形喷嘴模型中,设定 GH 为喷嘴入口,边界条件为速度入口,入口处速度值可由公式 $V = Q/A$ 计算获得。AB 为喷嘴出口,边界条件为压力出口,设定出口压力 $P = 101\ 325 \text{ Pa}$ 。CE、DF、FH、EG 均为无滑移边界壁面,如图 2 所示。

3 流场仿真结果分析

本研究对求解结果通过 CFD-post 软件处理后,获得不同条件下的喷嘴内流场的压力云图、速度云图、速度矢量图、出口处垂直轴线方向的速度曲线图以及湍动能耗散率曲线,并比较分析各组参数下出口处速度及湍动能耗散率情况,利用 Origin 软件进行各变量下不同参数仿真的数据处理及曲线绘制^[16-17]。

3.1 喷嘴收缩角 φ 变化对内流场的影响

当出口直径 $d = 0.8 \text{ mm}$ 、圆柱段长度 $s = 3 \text{ mm}$ 一定时,入口直径变化如表 2 所示。

表 2 喷嘴收缩角 φ 与入口直径 D 的关系

收缩角 $\varphi/(^\circ)$	35	50	65	80	95
入口直径 D/mm	2.892	3.797	4.822	6.035	7.548

笔者对收缩角 (φ) 分别为 95° 、 80° 、 65° 、 50° 、 35° 时 5 个模型进行模拟分析及对比。喷嘴出口速度曲线及湍动能耗散率曲线对比如图 (3,4) 所示。

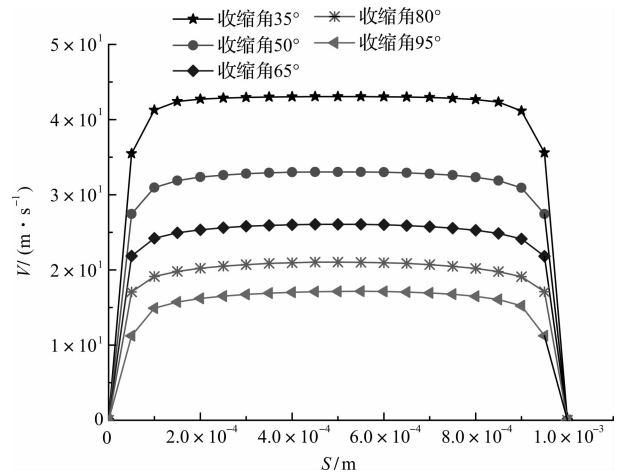


图 3 收缩角变化时喷嘴速度曲线图

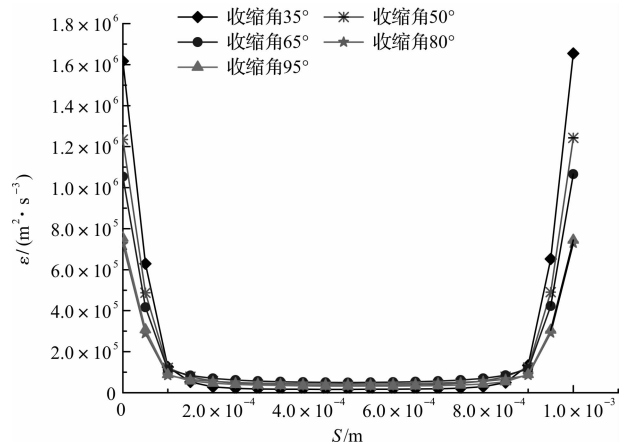


图 4 收缩角变化时喷嘴湍动能耗散率曲线图

由图 3 可以看出:喷嘴出口处速度等值线以喷嘴长轴为对称轴呈对称分布,离轴越近速度越大;出口处速度最大值随喷嘴收缩角的增大而减小。通过比较收缩角为 35°、50°、65°、80°、95°喷嘴出口处的速度可知,当喷嘴收缩角为 35°~65°时,出口速度在 0.1 mm~0.9 mm 范围内速度曲线几乎呈直线,说明轴心处速度分布均匀,这有利于壳肉分离;当喷嘴收缩角为 80°、95°时,在 0.1 mm~0.9 mm 范围内速度曲线呈弧线,说明轴心处速度分布不均匀,难以保证脱壳效果。出口处最大速度值随收缩角增大而减小,速度过小将不能达到本研究所要求的脱壳效果,因此排除 80°、95°收缩角。

由图 4 可以看出:喷嘴收缩角变化时,出口处湍动能耗散率在 0.1 mm~0.9 mm 范围内为一恒定值,但在近内壁处湍动能耗散率急剧增大,近内壁处湍动能耗散率随收缩角的减小而增大;比较收缩角为 35°、50°、65°的湍动能耗散率,65°的最小,说明湍动能损失较小,有利于射流打击力均匀分布,进而使得脱壳效果更好。综合考虑收缩角为 65°较合适。

3.2 喷嘴出口直径 d 变化对内流场的影响

当收缩角 $\varphi = 65^\circ$ 、入口直径 $D = 4.822$ mm、圆柱段长度 $s = 3$ mm 时,完成出口直径在 0.8 mm、0.9 mm、1.0 mm、1.1 mm 下 5 个模型喷嘴内部流场数值模拟,喷嘴出口速度曲线、湍动能耗散率曲线及喷嘴内流场的压力云图对比如图(8,9)所示。

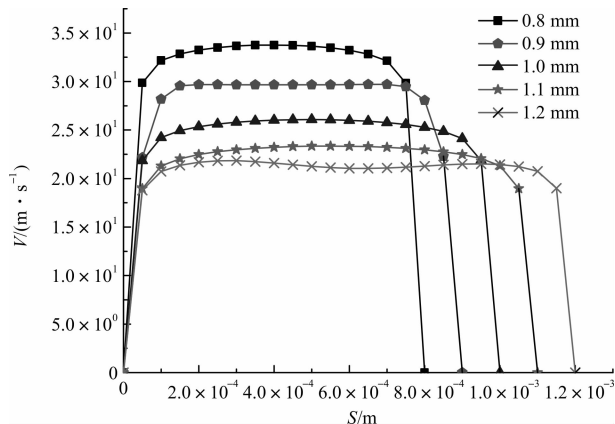


图 5 出口直径变化时速度曲线图

由图 5 可以看出:出口直径为 1.2 mm 时速度曲线出现明显凹陷,说明速度波动较大,这会造成射流打击力分布不均匀,在剥离闭壳肌的过程中容易造成贝肉断面不平整甚至破坏贝肉完整性,因此出口直径为 1.2 mm 不作考虑。

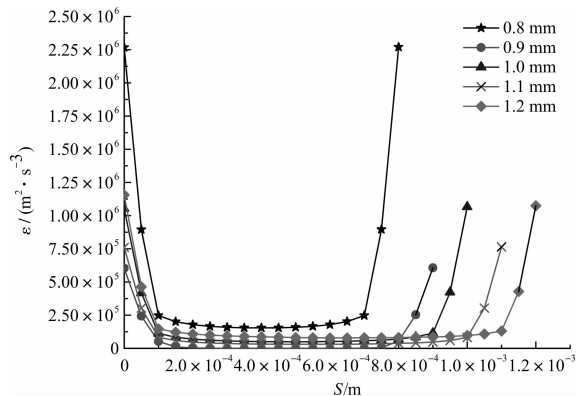


图 6 出口直径变化时湍动能耗散率曲线图

由图 6 可以看出:当出口直径为 0.8 mm 时,喷嘴近壁处湍动能耗散率过大,即湍动能损失过大,也不予考虑。

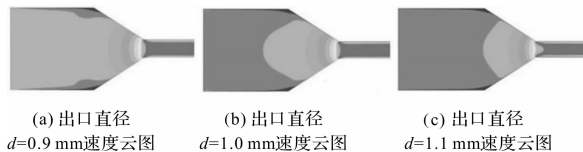


图 7 不同出口直径下喷嘴内流场速度云图

比较出口直径为 0.9 mm、1.0 mm 与 1.1 mm 的压力云图,当喷嘴出口直径为 1.1 mm 时,收缩段起始处速度值波动较大;而出口直径为 1.0 mm 的速度分布更均匀、稳定,这有利于贻贝壳肉分离。出口直径过小导致射流出射速度过大,脱壳时将破坏贝肉完整性,且较小出口直径喷嘴的加工难度和成本都会很高。综合考虑喷嘴出口直径为 1.0 mm 比较合适。

3.3 喷嘴圆柱段长度 s 变化对内流场的影响

当收缩角 $\varphi = 65^\circ$ 、入口直径 $D = 4.822$ mm、出口直径 $d = 1.0$ mm 时,对圆柱段长度分别为(s)为 1 mm、3 mm、6 mm 条件下 3 个模型进行模拟分析及对比,得到喷嘴出口速度曲线及湍动能耗散率曲线对比,如图(8,9)所示。

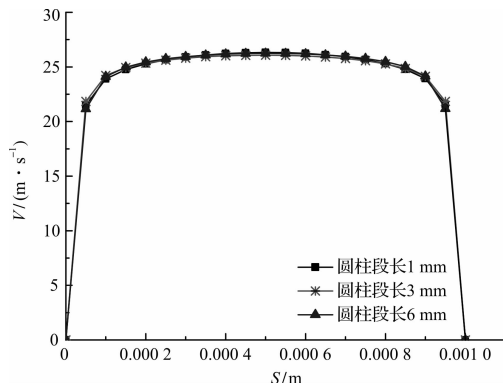


图 8 圆柱段长度变化时喷嘴速度曲线图

由图 8 可以看出:圆柱段长度变化对喷嘴出口速度几乎无影响。

据喷嘴在不同圆柱段长度下出口处湍动能耗散率分布可知:圆柱段长度越小湍动能耗散率越大,在出口轴心处湍动能耗散率趋于平稳,在近内壁处湍流强度出现了跳变。比较喷嘴圆柱段长度为 1 mm 与 3 mm 时的湍

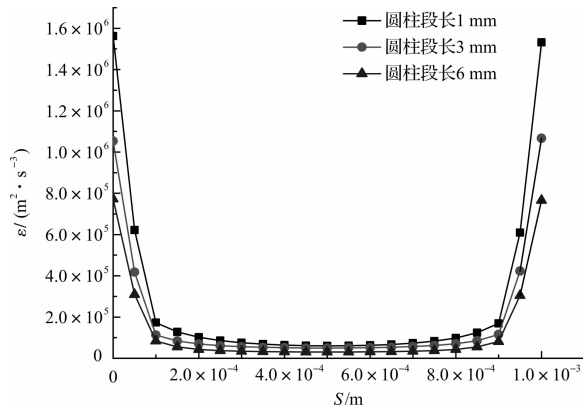


图9 圆柱段长度变化时湍动能耗散率曲线图

动能耗散率发现其值增加了 $300\,000\text{ m}^2/\text{s}^{-3}$, 说明其湍动能损失较大。此外, 圆柱段长度过长将增加加工难度以及产生材料的浪费, 圆柱段长度过短将导致喷嘴出口处强度降低、缩短使用寿命, 综合喷嘴圆柱段长度最适值为 3 mm 。

4 结束语

本研究利用 Icem-CFD 软件对导向板式扇形喷嘴进行了模型的建立及网格的划分, 通过 FLUENT 软件对喷嘴内流场在不同收缩角、不同出口直径以及不同圆柱段长度条件下水流动情况进行仿真, 分析比较了各变量下不同参数模型的速度、湍动能耗散率变化情况, 最终得出适合水射流贻贝单边脱壳装备中喷嘴的最优参数。结论如下:

(1) 收缩角对喷嘴出口流速的影响较大, 且出口速度随收缩角的减小而增大。湍动能耗散率在喷嘴出口近壁面处增大, 近轴线附近维持一恒定值, 经分析得到导向板式扇形喷嘴的收缩角为大小 65° ;

(2) 出口直径对出口流速影响较大, 出口速度随出口直径减小而增大。但出口直径过小使得加工难度大、成本高, 出口直径过大使出口流速降低, 不能达到脱壳的目的。湍动能耗散率在喷嘴出口近壁面处增大, 近轴线附近维持一恒定值, 喷嘴直径过小将导致湍动能耗散率过大, 经仿真分析得到导向板式扇形喷嘴出口直径的最适值为 1 mm ;

(3) 圆柱段长度对出口速度几乎无影响。湍动能耗散率在喷嘴出口近壁面处增大, 近轴线附近维持一恒定值, 且喷嘴圆柱段直径越小, 湍动能耗散越大, 从能量损耗和喷嘴使用寿命考及材料成本等方面考虑, 本研究所

用导向板式扇形喷嘴圆柱段长度在 3 mm 最为合适。

参考文献 (References):

- [1] 王敏. 超高压对贻贝脱壳及品质的影响[D]. 杭州: 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 2012.
- [2] 段伟文, 罗伟. 贻贝的加工利用研究进展[J]. 渔业现代化, 2013, 40(3): 51-55.
- [3] DANIEL E M, STEVE G H. Oyster shucking technologies: Past and present[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2010, 41(3): 223-232.
- [4] 雷玉勇, 陶显中. 水射流技术及工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
- [5] HREHA P, HLOCH S, MAGUROVA D, et al. Water jet technology used in medicine [J]. *Tec. Gazette*, 2010, 17(2): 237-240.
- [6] TATSUMI K, UEDO N, ISHIHARA R, et al. A water-jet videoendoscope may reduce operation time of endoscopic submucosal dissection for early gastric cancer [J]. *Digestive Diseases and Sciences*, 2012, 57(8): 2122-2129.
- [7] LV Hua, LEI Yu-yong, YANG Zhen, et al. Simulation of dynamic performance of impulsive water jet nozzle based on SIMULINK[J]. *Coal Mine Machinery*, 2011, 32(6): 92-95.
- [8] CHEN Ke, ZHAO Kai, YOU Yun-xiang. Numerical study on flow structure of a shallow laminar round jet[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University, Science*, 2017, 22(3): 257-264.
- [9] 解秋阳. 水射流剥离海湾扇贝闭壳肌的试验研究与样机设计[D]. 保定: 河北农业大学机电工程学院, 2015.
- [10] 沙毅. 流体力学[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 2016.
- [11] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [12] 冯静安, 王卫兵. 基于网格无关性与时间独立性的数值模拟可靠性的验证方法[J]. 石河子大学学报: 自然科学版. 2017, 35(1): 52-56.
- [13] 任小增. 高压水射流清洗用扇形喷嘴的结构及磨损研究[D]. 长沙: 中南大学机电工程学院, 2009.
- [14] 张洋凯, 苗思思, 李长鹏, 等. 前混合磨料水射流喷嘴外流场磨料加速过程研究[J]. 流体机械, 2017(8): 29-32.
- [15] 朱红钧. FLUENT15.0 流场分析实战指南[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015.
- [16] AMINI G. Liquid flow in a simplex swirl nozzle[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2016(79): 225-235.
- [17] LI S H, LI M H, DU X. In 16V265H locomotive diesel engine nozzle flow field simulation analysis[J]. *Advanced Materials Research*, 2014(983): 368-373.

[编辑: 李辉]

本文引用格式:

胡静艳, 谭锦波, 李振华. 水射流贻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): $\diamond - \diamond, \diamond$.

HU Jing-yan, TAN Jin-lin, LI Zhen-hua. Numerical simulation of nozzles' internal flow field of water jet single-side shucking[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018, 35(8): $\diamond - \diamond, \diamond$.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>