扇贝剥离设备喷嘴内部流场的仿真分析与参数优化

王家忠，李秋实，弋景刚，姜海勇，刘江涛
（河北农业大学机电工程学院，河北保定 071001）

摘要：本课题依托国家海洋公益性行业科技专项。由于采用水射流技术进行扇贝剥离加工有加工质量好；闭壳肌剥离完整；清洁卫生；加工原料易获得等诸多优点，故利用水射流技术对海湾扇贝闭壳肌剥离进行研究分析，以期得出一种新型的扇贝闭壳肌加工模式。由于喷嘴为该剥离设备的关键部件，而喷嘴参数变化会对流场速度分布产生影响。因此本文利用扇贝剥离加工的窄角扇形喷嘴内部流场的二维数学模型，将加工用窄角扇形喷嘴网格模型用 quad-dominated（四边形占优）形式进行划分。并通过 FLUENT 流体计算软件，采用标准 κ-ε 湍流模型对窄角扇形喷嘴内部流场进行了仿真，通过分析喷嘴锥角、出口直径、出口长度等变化对出口处流场速度分布影响，得出适用于水射流加工扇贝的喷嘴的最优参数组合。

关键词：水射流；窄角扇形喷嘴；内部流场；仿真分析；参数优化

文章篇号：1673-9078(2014)1-143-146

Numerical Analysis of Water Jet Processing Nozzles' Internal Flow Field

WANG Jia-zhong, LI Qiu-shi, YI Jing-gang, JIANG Hai-yong, LIU Jiang-tao
(Mechanic and Electronics College, Agriculture University of Hebei, Baoding 071001, China)

Abstract: The subject relies on "The National Marine Public Industry Science And Technology Project". Water jet technology for scallops shelling processing has many advantages: high processing quality; sanitary and safety; material is easy to obtain. Research on the bay scallop in adductor muscle processing was to obtain a new type of scallop in shell adductor muscle processing mode, and water jet on scallop processing was discussed. The nozzle is critical component in shelling equipment, and nozzle parameters would affect the flow velocity distribution. Based on 2-D flow mathematical model, quad-dominated grid was divided. The narrow-angle fan nozzle's internal flow field was simulated by standard turbulence model. The influence on nozzle velocity distribution such as cone angle, outlet diameter, outlet length were analyzed. After comprehensive analysis, the optimal parameter combination of the nozzle for water jet processing were obtained.

Key words: water jet; narrow-angle fan nozzle; internal flow field; simulation analysis; nozzle parameter optimization

扇贝是一种营养成分极高的海产品。扇贝虽然味美，经济价值极高，但由于其生理构造的特殊性，很难打开和剥离，给机械加工带来种种不便，于是人们开始利用超高压、热震等方法来获取贝柱[1~2]，但加工效果并不尽如人意。

本文采用水射流技术来进行扇贝加工，利用纯水通过高压发生设备和特定形状的喷嘴产生高速射流来进行扇贝闭壳肌的剥离和加工。由于其极高的流速使得水射流具有足够的能量来对材料进行清洗、剥层、切割，并且在其加工的过程中不损伤其他材料。与此同时，水射流技术在医药生物技术上也有诸多应用，利用水射流技术制成的水刀可用来进行外科手术，可针对病灶部位进行清除，同时降低出血量和减少手术时间[3~4]。查阅文献和实验表明，利用窄角扇形喷嘴喷射出的具有一定均匀压力的水流对新鲜扇贝组织进行冲击，利用各组织之间的附着力不同而将扇贝闭壳肌以及周围的包裹着的脏器从贝壳上分别剥离下来，从而达到将扇贝各部分精确分离的目的。同时水射流扇贝剥离中所用的加工介质为水，十分容易获取，设备投入少。

喷嘴是形成水射流的直接元件，它的性能直接影响水射流的穿透性能[5]。因此，研究喷嘴的喷射特性对提高水射流加工系统的加工性能至关重要。窄角扇形喷嘴为异型喷嘴，喷嘴内的液流经过喷嘴前端的导向板表面形成扇形射流。射流经过导向板后基本没有扩散[6]。

实验表明，窄角扇形喷嘴符合加工要求，故在本文中，扇贝闭壳肌加工采用窄角扇形喷嘴。经实验研究发现窄角扇形喷嘴具有以下优点：

（1）能产生具有一定冲击力的扁平扇形喷雾；

（2）喷雾分布均匀，液滴大小中等边界界定十分清楚；

收稿日期：2013-09-02

基金项目：国家海洋公益性行业科技专项(201205031)；河北省科技支撑项目(10221013，12271008D)

作者简介：王家忠（1970-），男，博士，研究方向：特种加工

（3）适合需要均匀高打击力的应用。



图 1 窄角扇形喷嘴纯水喷射图

Fig.1 Injection scheme of narrow-fan-nozzle

本文利用 FLUENT 仿真软件，对本实验的扇贝加工所用喷嘴内部流场进行数值模拟，以其内部流场状态和出口处水射流射出速度分布为研究目标，确定喷嘴参数对其影响，并优化喷嘴结构，最后通过实验验证仿真结果，以期得到最优试验效果。

1 水射流的数学模型

由于水射流中水的流动属于自由射流，而理想流体是真实流体的一种近似模型，在建模过程中通过建立理想流体的力学方程来对其进行数学描述。

在直角坐标系中，理想流体的运动学方程为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial \rho u}{\partial x}+\frac{\partial \rho v}{\partial y}+\frac{\partial \rho w}{\partial z}=0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+f_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+f_y$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial w}{\partial x}+f_z$$

假定射流场处于完全湍流状态，因此选取标准的 $k-\varepsilon$ 方程模型，标准方程 $k-\varepsilon$ 模型的湍动能 k 和耗散率 ε 方程如下：

（1）k 方程

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_k$$

（2）ε 方程

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

注：G_k-为由于平均速度梯度引起的湍动能；G_b-为由于浮力引起的湍动能；$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$-常量，FLUENT 默认为 1.44,1.92，$C_{3\varepsilon}$-主流方向同重力方向垂直时，有 $C_{3\varepsilon}=0$；$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$-k 方程和 ε 方程的湍流 prandtl 数，实验中，选取 $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 分别为 1.0 和 1.3；S_k, S_ε, Y_M-当流动为不可压时均为 0。湍流速度 μ_ε 由下式确定 $\mu_\varepsilon=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon}$ 其中 C_μ 为常量，实验中，选取 C_μ 为 0.09[7]。

2 喷嘴物理模型与网格划分

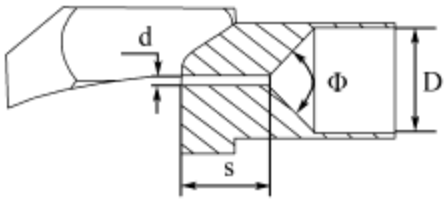


图 2 窄角扇形喷嘴物理结构

Fig.2 The physical structure of narrow-fan-nozzle

图 2 为窄角扇形喷嘴内部结构的物理模型。假设窄角扇形喷嘴内部介质为不可压缩纯水。工作状态液流从窄角扇形喷嘴右端流入，经由收缩段后由左端喷出。在此工作过程中，液流在喷嘴内部做湍流流动。

窄角扇形喷嘴的主要参数包括：喷嘴入口直径 D、喷嘴出口直径 d、出口长度 s、喷嘴锥角 φ。当 s、d、φ 均确定时，喷嘴入口直径 D 也可确定。同时当射流压力，射流角度一定时，喷嘴喷射液流对物体的打击性能由喷嘴射流截面积和流速决定。故在本文中仅考虑喷嘴锥角 φ、喷嘴出口长度 s、以及出口直径 d 对流速的影响。

由于计算流体力学分析第一步也是最重要的一步是将计算区域离散化，即对分析对象连续的控制方程进行离散处理，将描述流动的偏微分方程转化为节点上的代数方程组[8]。这也就是我们通常所说的划分网格。在本文中将利用前处理软件 ICEM CFD 进行窄角扇形喷嘴非结构化网格的划分。在处理窄角扇形喷嘴模型网格时，网格单元采用 2-D 单元模型，网型为 Quad-dominated（四边形占优）网格形式，划分尺寸为 0.05，划分后总共生成 17968 个网格。

在计算该流体模型时，采用非耦合式求解器，选取标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型模型，喷嘴内部流场为单一相流，主相为液态纯水。该模型的相变、传热等均忽略不计。在该模型中射流入口速度为 v=Q/A，其中 Q=60 L/min。射流出口的相对静压为零。射流及其出口周围的介质均为水，常温(20 ℃)下其密度为 1000 kg/m^3，运动粘度为 1.003×10^{-6} m^2/s。

3 FLUENT 数值模拟结果

3.1 喷嘴锥角 φ 对流速的影响

在本文中采用市售窄角扇形喷嘴参数进行仿真优

化，经测量得其喷嘴出口长度 s 为 6 mm，出口直径 d 为 1 mm。锥角为 120°。以该参数为基准，当锥角变化时其入口直径随锥角变化如表 1 所示：

表 1 喷嘴锥角 φ 与入口直径（mm）关系

Table 1 Relationship between nozzle inlet diameter and the cone angle

锥角	40°	60°	80°	100°
直径	3.18	4.46	6.03	7.88

窄角喷嘴内部流场，出口处速度分布如图 3 所示。

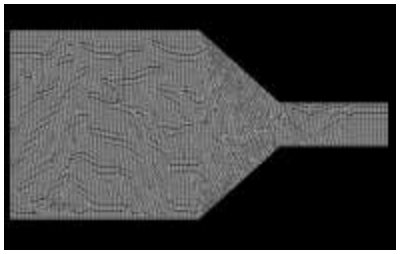


图 3 窄角扇形喷嘴网格划分

Fig.3 The mesh generation of narrow-fan-nozzle

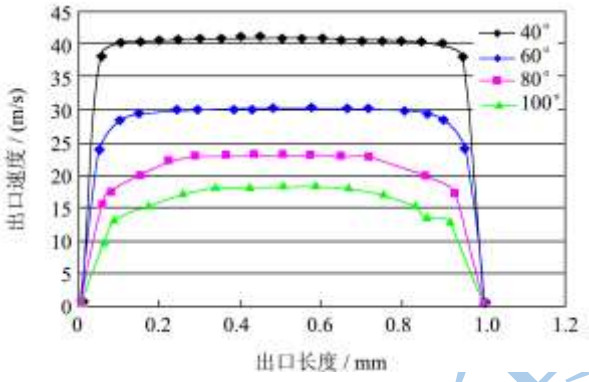


图 4 不同锥角下窄角扇形喷嘴出口速度分布

Fig.4 Velocity Distribution of the Nozzle Exit

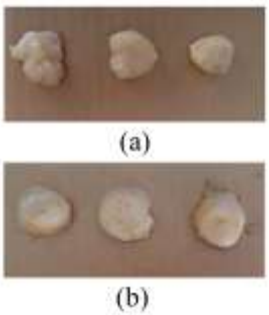


图 5 不同流速下扇贝闭壳肌剥离效果

Fig.5 Blast injury of scallop adductor muscle

从图 3 可知，在喷嘴内部，速度等值线成对称分布，并且越靠近喷嘴出口对称轴其速度值越高。通过实验可知，窄角扇形喷嘴出口处速度分布随喷嘴锥角的增大而减小。通过计算比较 40°~100°锥角下喷嘴出口处的速度可知（如图 4 所示），当喷嘴为 60°以下的锥角时，速度曲线分布平滑，在轴心处速度分布均匀，其出口处速度曲线在 0.1 mm 至 0.9 mm 的范围内几乎为一条水平直线；当喷嘴锥角大于 60°时，轴心处速度曲线开始出现弯折，速度分布出现跳变。同时，由于锥角变大导致出口速度降低，使得该锥角下的喷嘴产生的射流不适于扇贝加工。

通过计算和试验发现，当喷嘴锥角小于 60°即上图所示 40°锥角下窄角扇形喷嘴出口速度达到 40.815 m/s。在此速度下，扇贝闭壳肌表面有明显水射流冲击伤口（如图 5a 所示）。而当射流速度在 30 m/s 左右时，扇贝闭壳肌剥离完整，无明显破碎伤痕（如图 5b 所示）。因此，当窄角扇形喷嘴锥角为 60°时最佳。

3.2 出口长度 s 对流速的影响

表 2 不同长度下出口速度变化

Table 2 Outlet velocity changes under different lengths

出口长度 s	2 mm	4 mm	6 mm
出口速度 v	31.30 m/s	31.40 m/s	30.60 m/s

由上表可知，不同长度对窄角喷嘴内部流场几乎不构成影响，其出口速度几乎无变化。

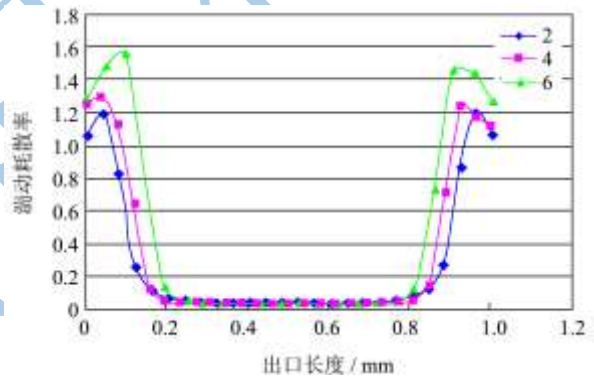


图 6 不同出口长度下出口湍动耗散率

Fig.6 Turbulent dissipation rate at different uutlet lengths

不同出口长度下出口处的湍动耗散率分布如图 6 所示，该图反映了在出口长度变化的情况下出口处的湍动耗散率变化。在出口中心处射耗散率趋于平稳，其值均在 0.03 左右，但是在喷嘴内壁处湍流强度出现了跳变，其湍动耗散率增至 1.15。湍动耗散率表示的是湍流能量损失的大小，耗散率越大，能量损失越大。因此当出口长度过长时，其湍动耗散率值将过大，从而影响出口处速度分布。同时当出口长度过还将增加加工难度以及材料的浪费。出口长度过短使喷嘴出口处强度降低，缩短喷嘴使用寿命。因此，窄角扇形喷嘴出口长度以 4 mm 左右为宜。

3.3 出口直径 d 对流速的影响

当锥角 φ=60°入口直径 D=4.46 mm，出口长度 s=4 mm 时，其出口直径变化后喷嘴内部流场数值如图 7

所示：

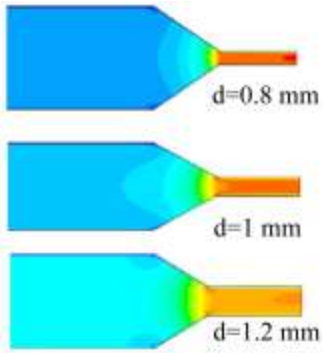


图 7 不同出口直径下喷嘴出口速度云图

Fig.7 Nozzle velocity flow field at different outlet diameters

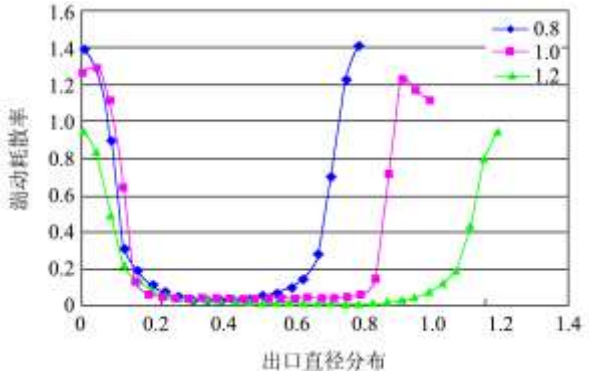


图 8 不同出口直径下喷嘴出口处湍动耗散率

Fig.8 Turbulent dissipation rate at different outlet diameters

如图 7 所示，当窄角扇形喷嘴出口直径为 0.8 mm 时，出口处速度场分布不均，并在出口处出现了高速区域。并且出口直径越小，其加工难度越高，喷嘴加工成本也相应提高。当出口直径为 1.2 mm 时，其出口流速场也出现流速分布不均匀状态。当喷嘴直径为 1 mm 时，其速度场云图分布均匀。

图 8 为不同出口直径下湍动能耗散率图通过该图可知，出口直径越小，喷嘴内壁处湍动耗散率越大，即能量损耗也越大。当喷嘴出口直径为 1.2 mm 时，其耗散率较低，但是其出口流速也较低。当出口流速为 1 mm 时，管壁处湍动耗散率介于直径为 0.8 mm 和 1.2 mm 的管壁之间，其速度场分布均匀，无高速核区。因此，出口直径为 1mm 时较为合适。

4 结论

利用 FLUENT 流体计算软件，采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型对窄角扇形喷嘴内部流场进行了仿真，分析了喷嘴参数变化对流场速度分布影响，得到以下结论：

（1）锥角对喷嘴出口射流流速的影响较大，并且锥角越小，出口流速越高。经计算分析适用于扇贝加工的窄角扇形喷嘴锥角以 60°为最佳；

（2）出口长度对出口射流流速的影响不大，在改变出口长度对出口流速几乎没有影响。但是出于能量损耗和喷嘴使用寿命考虑，长度在 4 mm 左右最为合适；

（3）出口直径对射流流速影响也较大，出口直径过小，加工难度大，加工成本高；出口直径过大，出口射流流速降低，不适用于扇贝加工，因此，出口直径为 1 mm 时为最好；

（4）综上所述，喷嘴参数变化将影响喷射性能，因此喷嘴参数的合理配置至关重要，合理的参数配置可以优化喷嘴加工性能。窄角扇形喷嘴的最优配置如表 3 所示。

表 3 窄角扇形喷嘴最优配置

Table 3 Optimum allocation of narrow-fan-nozzle

名称	D/mm	d/mm	φ/°	S/mm
参数值	4.46	1	60	4

参考文献

[1] H He, R M Adams, D F Farkas, et al. Use of High-pressure Processing for Oyster Shucking and Shelf - life Extension [J]. Journal of food science, 2002, 67(2): 640-645

[2] Willis E D. Scallop Processing [P]. USA, 3662431, 1972-05-16

[3] Hreha P, Hloch S, Magurova D, et al. Water Jet Technology Used in Medicine [J]. Tec. Gazette., 2010, 17(2): 237-240

[4] Koichi Tatsumi, Noriya Uedo, Ryu Ishihara, 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

[5] 吕华.雷玉勇.杨振,等.喷嘴内轮廓形状对水射流动态特性影响研究[J].煤矿机械,2011,32(6):92-95
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

[6] 任小增.高压水射流清洗用扇形喷嘴的结构及磨损研究[D].中南大学,2009

[7] 王福军.计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用[M]北京:清华人学出版社,2004

[8] 李鹏飞,徐敏义,王飞飞.精通 CFD 工程仿真与案例实战[M].人民邮电出版社,2011

现代食品科技