

贻贝高压水射流清洗喷嘴流场仿真

Flow field simulation and experiment of mussel high pressure water jet cleaning nozzle

谢 飞 袁跃峰 王佳胜

XIE Fei YUAN Yue-feng WANG Jia-sheng

(浙江海洋大学海洋工程装备学院, 浙江 舟山 316022)

(College of Ocean Engineering Equipment, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316022, China)

摘要:目的:解决贻贝传统清洗方式存在的耗水量大、清洗效果差的问题。方法:通过 Solidworks 软件建立不同结构参数的轴向扇形喷嘴几何模型,分别在 Fluent 软件中设置参数后,对射流内外流场的速度和含水率进行数值计算。结果:喷嘴的喷射角越大,射流外流场流速的衰减速度越快,含水率越低;喷嘴的等效直径越大,射流外流场流速的衰减速度越慢,含水率越高;射流靶距过大或过小,均会影响外射流在 XY 平面的流速均匀性。结论:喷射角为 65° ,等效直径为 2 mm 的轴向扇形喷嘴,在射流压力为 11 MPa、靶距为 90 mm 时,更适合贻贝外壳的射流清洗。

关键词:贻贝;轴向扇形喷嘴;高压水射流;射流参数;仿真

Abstract: **Objective:** It solves the problems of large water consumption and poor cleaning effect existing in the traditional cleaning method of mussels. **Methods:** The geometric models of Axial fan-nozzle with different structural parameters were established by Solidworks software. After setting the parameters in fluent software, the velocity and water content of the internal and external flow fields of the jet were numerically calculated. **Results:** The larger the spray angle of the nozzle was, the faster the decay velocity of the flow field of the jet was, and the lower the water content was. The larger the equivalent diameter of the nozzle was, the slower the velocity decay of the jet flow field and the higher the water content was. If the jet target distance was too large or too small, the velocity uniformity of the outer jet in the XY plane would be affected. **Conclusion:** The axial fan-shaped

nozzle with a jet angle of 65° and an equivalent diameter of 2 mm is more suitable for jet cleaning of mussel shells when the jet pressure is 11 MPa and the target distance is 90 mm.

Keywords: mussel; axial fan-nozzle; high pressure water jet; jet parameters; fluent simulation

2020 年中国贻贝养殖产量高达 88.6 万 $t^{[1]}$ 。成熟贻贝表面附着有藤壶、钙沉积物、淤泥、贻贝足丝基盘等顽固的附着污物,现有的振动冲淋式、滚筒回转式、喷淋气泡式清洗方法清洗效果差且存在耗水量高、占地面积大等问题^[2]。高压水射流技术因节能、高效、环保等特点被广泛应用于金属表面处理、切割、零部件清洗等领域。喷嘴是高压水射流清洗系统的执行元件,扇形喷嘴可产生均匀的扁平狭带状射流,相较于普通的圆柱形喷嘴,具有射流致密性好、射流打击力均匀、覆盖面积广的特点。影响射流流场性能的内部参数主要有喷嘴的喷射角和等效直径;外部射流参数主要有射流压力和清洗靶距,射流内、外部参数的合理匹配与否,将直接决定着射流清洗效果和效率^[3-4]。

胡静艳等^[5]使用 Fluent 软件对贻贝水射流脱壳技术进行了研究,确定了导向板喷嘴的最佳结构尺寸。孙跃^[6]基于流固耦合的数值模拟方法,确定了海参清洗的射流参数优选组合。刘亨凡^[7]使用 Fluent 软件分析得出了扇形喷嘴结构参数和外部射流参数变化对甘草药材清洗效果的影响。目前,高压射流清洗技术在水产贝类清洗领域的研究较少,针对扇形喷嘴的研究也未能从市售喷嘴结构尺寸出发进行分析研究。

研究拟将高压水射流技术应用于贻贝表壳清洗除污领域,在测绘建模得出市售标准轴向扇形喷嘴几何模型的基础上,使用 Fluent 软件对不同喷射角、等效直径的轴向扇形喷嘴进行仿真,并分析各尺寸喷嘴在不同射流压力和靶距下对射流性能的影响,得到不同喷射角、出口直

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2019YFD0900901-1);

嵊泗县贻贝产业链提升发展若干技术研究项目

作者简介:谢飞,男,浙江海洋大学在读硕士研究生。

通信作者:袁跃峰(1976—),男,浙江海洋大学副教授,博士。

E-mail: yuanyuefeng@126.com

收稿日期:2022-07-02 **改回日期:**2022-10-11

径、射流压力和靶距下的射流速度和含水率曲线,最后对仿真所得最佳参数组合进行实验验证,以期为贻贝高压水射流清洗设备喷嘴的选型和空间布置提供依据。

1 仿真前处理

1.1 射流基本方程

射流流动的水为不可压缩的黏性流体,且为连续稳态流动,需要满足连续性方程和动量守恒方程^[8-10]。

连续性方程为:

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

式中:

u, v, w —— x, y, z 3 个方向的速度分量, m/s。

射流介质为不可压缩的黏性流体,则动量守恒方程(N-S 纳维—斯托克方程)为:

$$f_x - \frac{1}{\rho} \times \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (2)$$

$$f_y - \frac{1}{\rho} \times \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (3)$$

$$f_z - \frac{1}{\rho} \times \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}. \quad (4)$$

贻贝壳壳的高压水射流清洗属于气液两相流运动,由雷诺数计算式 $R_e = \frac{\rho v D}{\mu}$ 估算,各类型扇形喷嘴在不同清洗参数下其雷诺数均 $> 2\,300$,因此射流属于高度湍流,则湍动能方程和耗散率方程为^[11-12]:

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M, \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \quad (6)$$

式中:

G_k ——平均速度梯度变化湍动能;

G_b ——浮力引起的湍动能;

Y_M ——可压缩湍流脉动对耗散的影响;

$C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}$ ——常数,其值分别为 1.44, 1.92, 0.09;

$\sigma_k, \sigma_\epsilon$ ——湍动能和湍流常数,其值分别为 1.0, 1.3。

1.2 建立几何模型

合理的流体域模型是进行数值模拟的前提,轴向扇形喷嘴的结构参数主要有喷嘴总长度 L 、入口直径 D 、入口段长度 l_1 、收缩角 β 、收缩段长度 l_2 、出口直径 d 、V 型

切槽半角 α 。试验使用的轴向扇形喷嘴内表面为半球面,其出口由 V 型切槽与半球面相贯形成,经测绘,仿真所用扇形喷嘴的喷嘴总长度 L 、入口直径 D 、入口段长度 l_1 、收缩角 β 均为定值。V 型切槽半角 α 和出口直径 d 是喷嘴选型的主要结构参数,V 型切槽半角 α 在 $10^\circ \sim 50^\circ$ 区间与喷射角 θ 的大小呈减函数关系;出口直径 d 的大小与收缩段长度 l_2 长短呈负相关关系。仿真所用轴向扇形喷嘴结构如图 1 所示^[13]。

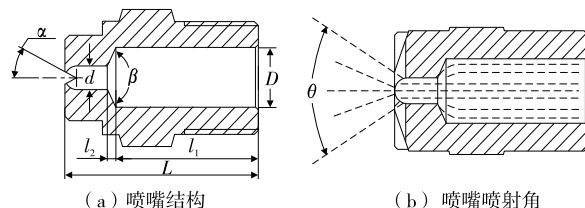


图 1 轴向扇形喷嘴
Figure 1 Axial fan-nozzle

不同喷射角喷嘴的 V 型切槽半角 α 可根据式(7)计算得出^[14]:

$$\theta = 188.67 - 7.27\alpha + 0.119\alpha^2 - 7.99 \times 10^{-4}\alpha^3, \quad (7)$$

式中:

θ ——喷嘴喷射角, $^\circ$ 。

根据仿真流场形态可对 V 型切槽半角进行调整,使仿真得出的射流喷射角与实际射流喷射角一致。由于轴向扇形喷嘴出口为狭长的空间椭圆,所以射流过流直径不等于喷嘴出口直径,目前行业内均使用喷嘴的等效直径来表示射流过流直径,试验所用轴向扇形喷嘴的尺寸参数见表 1,根据表内数据建立不同尺寸参数喷嘴的几何模型。

根据轴向扇形喷嘴的尺寸和射流流场特点,绘制喷嘴总长度 L 为 23 mm,入口直径 D 为 7 mm,入口段长度 l_1 为 17 mm,收缩角 β 为 60° ,V 型切槽半角 α 和出口直径为表 1 中尺寸的喷嘴内流体域模型;设定喷嘴外流场

表 1 轴向扇形喷嘴的结构尺寸对照(部分)

Table 1 Comparison of structural dimensions of axial fan-nozzle

喷嘴型号	V 型切槽半角/ $^\circ$	等效直径/mm	出口直径/mm
(65°,03)	26.43	1.1	1.6
(65°,06)	26.43	1.6	2.5
(65°,10)	26.43	2.0	3.0
(65°,15)	26.43	2.4	3.8
(65°,20)	26.43	2.8	4.4
(25°,10)	48.38	2.0	2.2
(50°,10)	32.80	2.0	3.2
(80°,10)	21.30	2.0	3.6
(95°,10)	17.14	2.0	3.8

为直径 150 mm, 长度 200 mm 的圆柱; 在喷嘴内流场和外流场之间设置一个三棱柱过渡区, 以更好地连接扇形射流内、外流场。

1.3 网格划分

使用 Fluent Meshing 软件对射流内、外流场几何模型进行网格划分, 为得到准确的仿真结果, 对喷嘴收缩段和喷嘴出口处等射流速度变化较大的部分进行局部网格细化, 采用四面体和六面体相结合以六面体为主导的网格划分方法, 射流内流场网格大小设置为 0.5 mm, 外流场网格大小设置为 4 mm, 划分产生 298 620 网格单元。以喷射角为 65°, 等效直径为 2 mm 的喷嘴为例, 流场网格划分如图 2 所示。

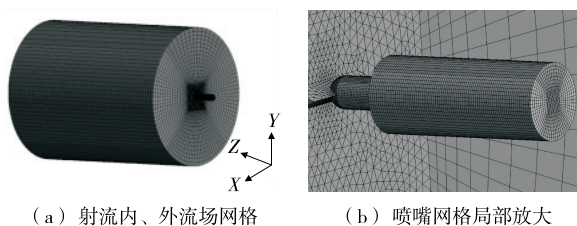


图 2 流场网格划分

Figure 2 Grid division of flow field

1.4 参数设置

贻贝在射流清洗过程中, 水与空气之间产生剧烈的动量交换, 形成的扇形射流是气液两相射流, 使用流体体积 (VOF) 多相流模型进行数值模拟。设定环境介质空气为主相, 射流介质水为次相。射流介质为市政自来水, 空气与水之间的表面张力系数设为 72 mN/m, 其余项保持默认值^[15-17]。湍流模型使用 Realizable $k-\epsilon$ 模型, 设定喷嘴入口为压力入口, 喷嘴壁面和外流场尽头为无滑移壁面, 其余面为压力出口。选择 SIMPLE 求解器, 迭代残差精度设置为 10^{-3} , 全局初始化后, 迭代步数设定为 5 000 步进行计算^[18-19]。

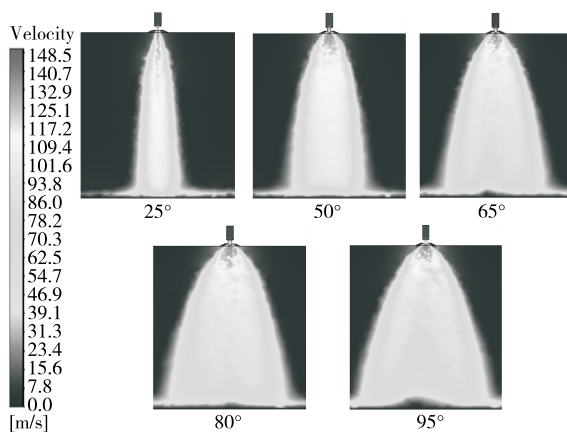
2 仿真结果与分析

根据贻贝清洗经验, 确定喷嘴自身尺寸参数和外部射流参数仿真范围。设计在喷嘴喷射角为 25°, 50°, 65°, 80°, 95°; 喷嘴等效直径为 1.1, 1.6, 2.0, 2.4, 2.8 mm; 射流压力为 1, 6, 11, 16, 21 MPa; 靶距为 10, 50, 90, 130, 170 mm 下进行仿真。挑选特征参数组合导入 Fluent 软件中进行计算, 分析其对扇形射流内、外流场的影响。

2.1 喷嘴喷射角对流场的影响

图 3 为不同喷射角下仿真得到的射流内、外流场速度云图, 导出 XZ 射流平面中心轴 Z 轴上的数据, 绘制不同喷射角下扇形射流的速度和含水率曲线。

由图 4 可知, 在喷嘴等效直径和外部射流参数相同的情况下, 不同喷射角喷嘴的内流场流速和出口峰值速



射流压力 11 MPa, 喷嘴等效直径 2 mm

图 3 不同喷射角下射流速度云图

Figure 3 Cloud chart of jet velocity at different injection angles

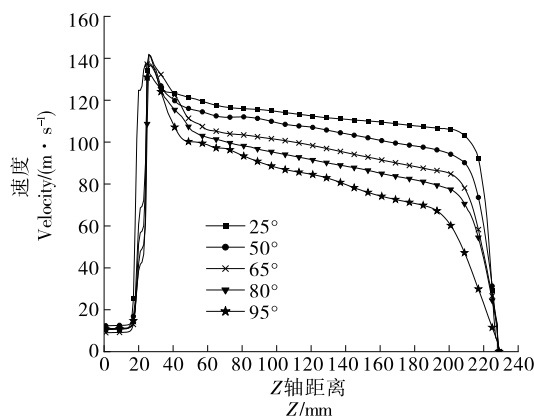


图 4 不同喷射角下射流速度曲线

Figure 4 Jet velocity curve at different injection angles

度基本相同; 喷嘴收缩段的加速性能随喷射角的增大而变差; 外流场流速的衰减速度随喷射角的增大而加快。当射流自靶距 20 mm 处冲击到距外流场尽头 20 mm 的壁面时, 喷射角为 25°, 50°, 65°, 80°, 95° 的射流速度分别衰减约 87%, 81%, 81%, 74%, 67%。

定义贻贝清洗时射流速度为 90~100 m/s。流速过大, 射流产生的打击力大于贻贝壳承压能力, 贻贝清洗碎壳率增加; 流速过小, 射流产生的打击力小于污物剥离的临界力, 扇形射流无法有效除污。由图 4 可知, 喷射角为 65° 的喷嘴产生的射流在靶距为 20 mm 时速度衰减至 110 m/s, 随后在靶距为 60~200 mm 时, 流速仍保持在 85~105 m/s, 有效清洗范围相较于其他喷射角喷嘴更广。

射流在扇形喷嘴狭缝高速喷出后, 射流压强迅速减小为大气压, 由于开尔文-亥姆霍兹不稳定性导致空气和水之间发生剧烈的质量和动量转移, 周围的空气将连续的射流分散成细小液滴。将外流场 XY 截面水的体积

含量和该截面面积之比定义为含水率,含水率反映射流液滴被破碎雾化的程度,雾化程度越低,射流的动能越大,速度衰减越缓慢,清洗效果越好^[20-21]。

由图 5 可知,不同喷射角喷嘴产生的射流在靶距 10 mm 范围内含水率均发生急剧下降;在 30~70 mm 范围内,不同喷射角喷嘴产生的射流含水率有所差异,含水率随喷射角的增大而减小,喷嘴的喷射角越大,射流含水率越低。综合考虑喷嘴的有效清洗范围及清洗效果,喷射角为 65° 的扇形喷嘴应用于贻贝清洗更佳。

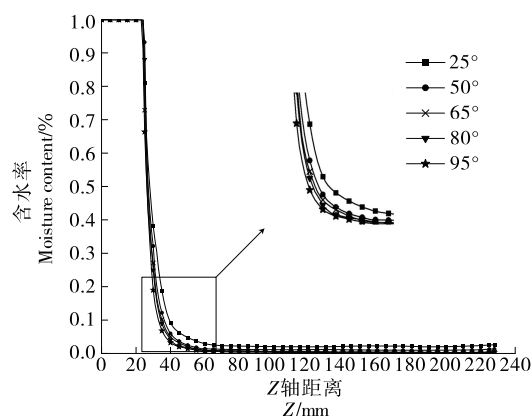


图 5 不同喷射角下射流 Z 轴含水率曲线

Figure 5 Water content curve of jet Z axis under different injection angles

2.2 喷嘴等效直径对流场的影响

如图 6 所示仿真得到的射流场速度云图。导出 XZ 射流平面中心轴 Z 轴上的数据,绘制不同等效直径喷嘴下的射流速度和含水率曲线。

由图 7 可知,在外部射流参数和喷嘴喷射角相同的情况下,不同等效直径喷嘴产生的射流内场流速不同,内场流速随等效直径的增大而加快。射流自喷嘴出口

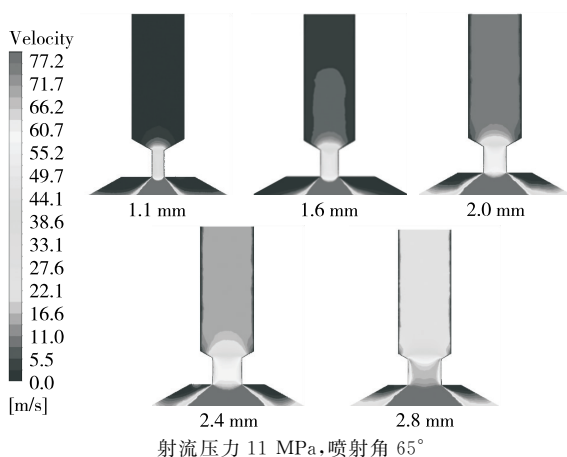


图 6 不同等效直径下射流速度云图

Figure 6 Cloud chart of jet velocity under different equivalent diameters

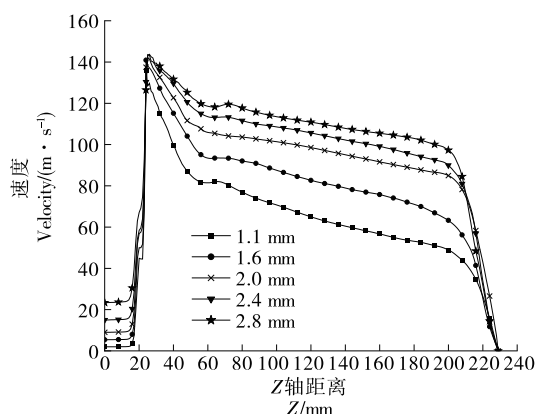


图 7 不同等效直径下射流速度曲线

Figure 7 Jet velocity curve under different equivalent diameters

喷出后,外场流速的衰减速度也有较大差异,外场流速的衰减速度随喷嘴等效直径的增大而变缓。等效直径为 1.1, 1.6, 2.0, 2.4, 2.8 mm, 射流自靶距 20 mm 处冲击到距外场尽头 20 mm 的壁面时,射流速度分别衰减了约 83%, 79%, 78%, 66%, 59%。

由图 7 可知,喷嘴等效直径大小和射流含水率高低呈正相关关系,即喷嘴等效直径越大,射流含水率越高;喷嘴等效直径越小,射流含水率越低。在外部射流参数相同的环境下,等效直径越大,清洗耗水量越大,结合不同等效直径喷嘴的射流速度衰减情况和含水率情况,考虑到贻贝射流清洗效果和耗水量,等效直径为 2 mm 的扇形喷嘴更适合贻贝的清洗。

2.3 射流压力对流场的影响

由图 9 可知,同一喷嘴在不同射流压力下,喷嘴的外场场尺寸基本保持不变,导出 XZ 射流平面中心轴 Z 轴的数据,绘制不同射流压力下的速度和含水率曲线。

由图 10 可知,不同射流压力下射流速度随射流压力

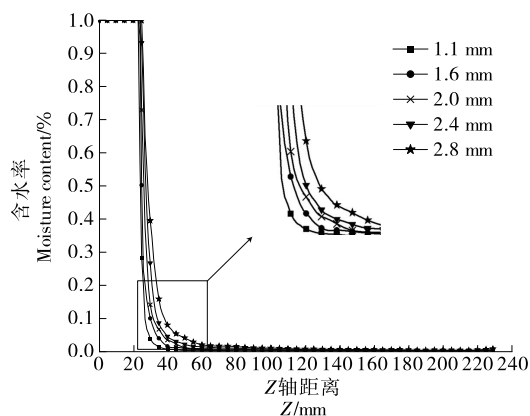


图 8 不同等效直径下射流 Z 轴含水率曲线

Figure 8 Water content curve of jet Z axis under different equivalent diameters

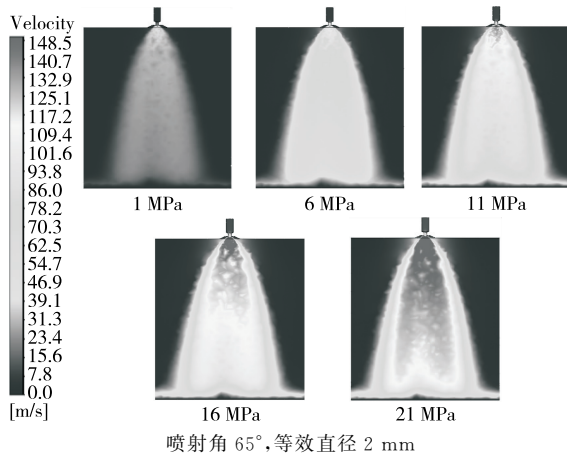


图 9 不同射流压力下射流速度云图

Figure 9 Cloud chart of jet velocity under different jet pressures

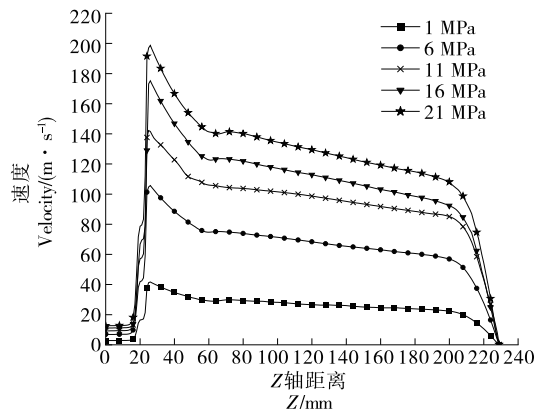


图 10 不同射流压力下射流速度曲线

Figure 10 Jet velocity curve under different jet pressures

的变大而显著增加,当射流压力为 1, 6, 11, 16, 21 MPa 时,射流峰值速度分别为 41.5, 105.5, 142.1, 175.1, 198.7 m/s, 根据射流流速计算式 $v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{1000}}$ 计算射流流速理论值,得出仿真数值与理论数值误差仅为 2.5% 左右,说明仿真数据可信。不同射流压力的射流速度衰减趋势基本一致,在靶距 10 mm 范围内,射流流速均迅速衰减到峰值速度的 80% 左右,喷嘴收缩段加速性能随射流压力的增加而变好。

由图 11 可知,不同射流压力的喷嘴在靶距 10 mm 范围内含水率均发生急剧下降并随着射流压力的增大而减小。在喷嘴确定的情况下,射流压力越大,对整个射流清洗系统的要求就越高,清洗耗水越多,综合考虑射流清洗流速、系统成本和射流清洗耗水量等要求,射流压力为 11 MPa 时进行贻贝清洗效能最优。

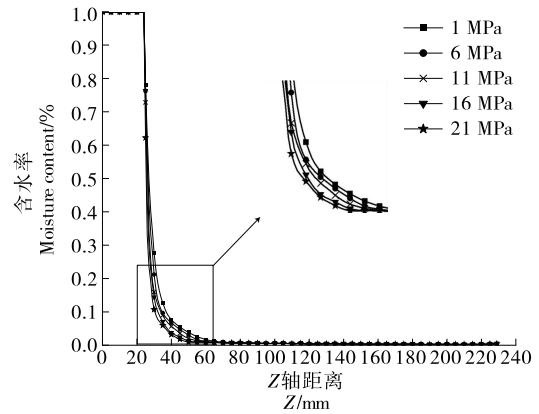


图 11 不同射流压力下射流 Z 轴含水率曲线

Figure 11 Water content curve of jet Z axis under different jet pressures

2.4 靶距对流场的影响

由图 12 可知,射流覆盖面积随靶距的增大而显著增大,导出各靶距对应 XY 射流覆盖面上长轴的数据,绘制不同靶距下的速度和含水率曲线。

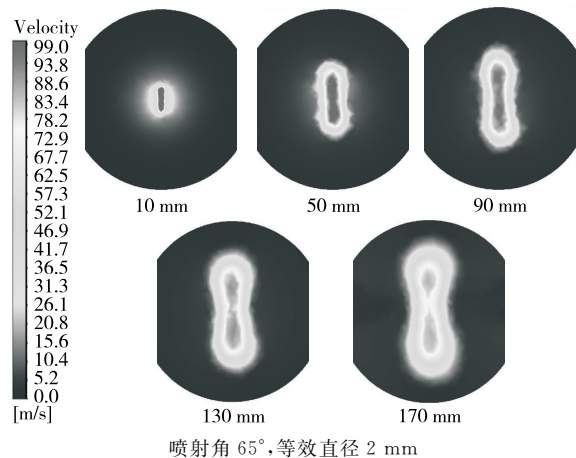


图 12 不同靶距下射流速度云图

Figure 12 Cloud chart of jet velocity at different target distances

由图 13 可知,靶面上射流速度随靶距的增大而减小,靶距过大或过小,均会对相应靶面径向速度分布均匀性产生影响。当靶距为 10, 50, 130, 170 mm 时,其靶面径向方向中间出现明显凹凸波动曲线,说明在此靶面上速度出现较大波动,不利于贻贝表壳清洗。当靶距为 90 mm 时,相应靶面径向方向其速度曲线几乎呈直线,说明在此靶距上速度分布均匀,这会使得射流除污更加均匀,清洗效果更好。故靶距为 90 mm 时,贻贝清洗效果更好、更稳定。

2.5 射流清洗试验

使用等效直径为 2 mm,喷射角为 65°的扇形喷嘴,在射流压力为 11 MPa,靶距为 90 mm 下对贻贝表壳进行

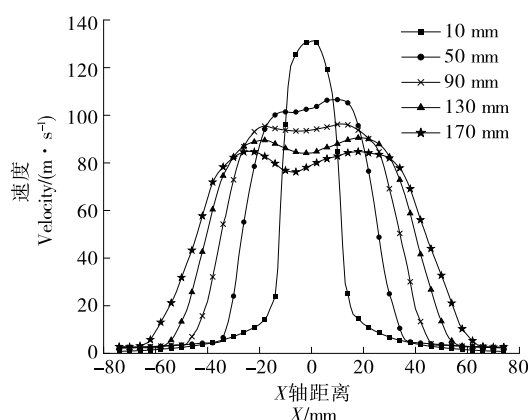


图 13 不同靶距下射流速度曲线

Figure 13 Jet velocity curve at different target distances

射流清洗试验。仿真试验表明,经高压水射流清洗,贻贝表壳的钙沉积物、足丝基盘等顽固附着物被较好去除,贻贝壳无破损,仿真结果可靠有效。

3 结论

(1) 喷嘴喷射角大小对扇形射流外流场流速衰减快慢以及含水率高低有显著影响,喷嘴喷射角越大,射流外流场流速的衰减速度越快,含水率越低。根据贻贝表壳清洗要求,喷嘴喷射角为 65° 时,其贻贝清洗效果和清洗速度更优。

(2) 喷嘴等效直径大小对扇形射流内、外流场流速衰减速度和含水率高低具有显著影响,喷嘴等效直径越大,射流外流场流速的衰减速度越慢,含水率越高。在其他射流参数相同的情况下,等效直径越大,贻贝清洗耗水量越多,考虑贻贝清洗的节能节水要求,喷嘴等效直径为 2 mm 时,更加适合贻贝清洗。

(3) 射流压力主要对外流场射流峰值流速和含水率有较大影响,对外流场射流流速衰减快慢影响不大。射流压力大小与外流场峰值流速大小呈正相关关系,与外流场含水率高低呈负相关关系。射流压力越大,射流清洗系统成本越高,经过分析,射流压力为 11 MPa 时,更加适合贻贝清洗。

(4) 靶距对相应靶面径向速度分布均匀性影响较大。靶距过大,径向速度分布均匀性变差;靶距过小,扇形射流有效清洗范围过小。考虑贻贝清洗效果和清洗效率,贻贝射流清洗时靶距取 90 mm 为宜。

参考文献

[1] 农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021: 17-24.
Fishery and Fishery Administration Bureau of the Ministry of Agriculture and Rural Areas. China fishery statistics yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2021: 17-24.

[2] 程海, 袁跃峰, 李德然. 叶片式贻贝清洗设备的结构设计仿真分析[J]. 机电工程, 2020, 37(10): 1 236-1 239, 1 256.
CHENG H, YUAN Y F, LI D R. Structural design and simulation analysis of blade type mussel cleaning equipment[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37 (10): 1 236-1 239, 1 256.

[3] 薛胜雄. 高压水射流技术工程[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2006: 200-450.
XUE S X. High pressure water jet technology engineering [M]. Hefei: Hefei University of Technology Press, 2006: 200-450.

[4] 梁博健, 高殿荣. 高压扇形喷嘴结构参数的优化[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(1): 69-75.
LIANG B J, GAO D R. Optimization of structural parameters of high pressure fan nozzle[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(1): 69-75.

[5] 胡静艳, 谭锦凌, 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): 828-832.
HU J Y, TAN J L, LI Z H. Numerical simulation study on the flow field in the nozzle of water jet mussel unilateral shelling equipment [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(8): 828-832.

[6] 孙跃. 基于水射流的海参深度清洗技术及装备设计[D]. 大连: 大连工业大学, 2019: 18-37.
SUN Y. Deep cleaning technology and equipment design of sea cucumber based on water jet [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019: 18-37.

[7] 刘亨凡. 基于甘草清洗的高压水射流扇形喷嘴仿真研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016: 25-44.
LIU H F. Simulation study of high pressure water jet fan nozzle based on licorice cleaning [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016: 25-44.

[8] KOU B, HOU P, HOU X. Research on the influence of external parameters of fan-type nozzle on water jet performance[J]. Shock and Vibration, 2020, 2 020: 1-16.

[9] 陈亮. 高压水射流扇形喷嘴内外流场仿真分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010: 26-38.
CHEN L. Simulation analysis of internal and external flow field of high pressure water jet fan nozzle[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2010: 26-38.

[10] 王国志, 周万阳, 邓斌, 等. 基于 CFD 的扇形喷嘴不同切割结构研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(33): 146-149, 154.
WANG G Z, ZHOU W Y, DENG B, et al. Study on different cutting structures of fan nozzle based on CFD [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(33): 146-149, 154.

[11] 康施为, 倪向东, 齐庆征, 等. 气吸滚筒式棉花精密排种器流场数值模拟与试验[J]. 农机化研究, 2021, 43(5): 140-146.
KANG S W, NI X D, QI Q Z, et al. Numerical simulation and experiment of flow field of air suction drum type cotton precision seed metering device [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(5): 140-146.

(下转第 169 页)

- DAI J J, WU C H, XIAO L Z, et al. Study on the inhibiting effects of the aqueous extract from different mulberry organizations on the α -glucosidase[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(5): 466-469.
- [34] 柏绿山, 杨秀丽, 柏英庭. 食叶草功能性茶叶及其制备方法: 201710075060.3[P]. 2017-05-31.
- BAI L S, YANG X L, BAI Y T. Edible dock functional tea and preparation method thereof: 201710075060.3[P]. 2017-05-31.
- [35] 柏绿山, 杨秀丽, 柏英庭. 食叶草植物奶及其制备工艺: 201610102419.7[P]. 2016-02-25.
- BAI L S, YANG X L, BAI Y T. Edible dock plant milk and its preparation technology: 201610102419.7[P]. 2016-02-25.
- [36] 李晓苹. 食叶草种植 开启健康新模式[J]. 中国高科技, 2019 (1): 45.
- ZHU X P. Edible dock planting opens a new mode of health[J]. China High-tech, 2019(1): 45.
- [37] 柏绿山, 杨秀丽. 食叶草植物蛋白营养保健香烟及制造方法: 201810339996.7[P]. 2018-09-14.
- BAI L S, YANG X L. Edible dock plant protein nutrition health cigarettes and manufacturing method thereof: 201810339996.7[P]. 2018-09-14.
- [38] 朴美子, 单凌越, 金玉兰. 一种食叶草提取物及其在制备拮抗内毒素的药物和保健品中的应用: 201910322066.5[P]. 2019-08-06.
- PIAO M Z, SHAN L Y, JIN Y L. The invention relates to an extract of edible dock and its application in preparation of antagonistic endotoxin drugs and health care products: 201910322066.5[P]. 2019-08-06.
- [39] 郭长合. 一种植物源食叶草含片及其制备方法: 201810572191.7 [P]. 2018-06-06.
- GUO C H. The invention relates to a plant edible leaf grass lozenge and a preparation method thereof: 201810572191.7 [P]. 2018-06-06.
- [40] 杨秀丽, 柏绿山. 食叶草植物蛋白营养含片及其制备方法: 201810549734.3[P]. 2018-05-31.
- YANG X L, BAI L S. Edible dock plant protein nutritional lozenges and preparation method thereof: 201810549734.3 [P]. 2018-05-31.
- [41] 新华社. “健康中国 2030”规划纲要[C/OL]// 全国中医药治未病养生康复学术交流大会暨期刊图书编辑与信息专业委员会 2016 年年会. (2016-12-08) [2022-05-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=ZYYH201612001004&DbName=CPFD2017>.
- Xinhua News Agency. "Health China 2030" planning outline[C/OL]// National Academic Exchange Conference on Chinese Medicine for Treating and Rehabilitating Health and Health and the 2016 Annual Meeting of Journal Book Editing and Information Professional Committee. (2016-12-08) [2022-05-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=ZYYH201612001004&DbName=CPFD2017>.
-
- (上接第 86 页)
- [12] NIE B, WANG H, LI L, et al. Numerical investigation of the flow field inside and outside high-pressure abrasive waterjet nozzle[J]. Procedia Engineering, 2011, 26: 48-55.
- [13] 张晓东, 董志国, 郝鹏飞, 等. 扁平扇形喷嘴设计及试验研究[J]. 机械设计与研究, 2008, 24(1): 89-92.
- ZHANG X D, DONG Z G, HAO P F, et al. Design and experimental research of flat fan nozzle[J]. Mechine Design & Research, 2008, 24(1): 89-92.
- [14] 张新铭, 罗晴, 洪光, 等. 高压水扇形喷嘴结构参数对内部流场影响的数值模拟[J]. 热能动力工程, 2012, 27(3): 301-306.
- ZHANG X M, LUO Q, HONG G, et al. Numerical simulation of the influence of structural parameters of high pressure water fan nozzle on internal flow field [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2012, 27(3): 301-306.
- [15] 王文靖, 蒋仲安, 陈举师, 等. 不同结构喷嘴内外流场的数值模拟分析[J]. 煤矿安全, 2013, 44(11): 162-165.
- WANG W J, JIANG Z A, CHEN J S, et al. Numerical simulation analysis of internal and external flow fields of nozzles with different structures[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44 (11): 162-165.
- [16] 吴光中. Fluent 基础入门与案例精通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 4-21.
- WU G Z. Fluent basic introduction and case mastery[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012: 4-21.
- [17] 崔松. 自驱动清洗汽车装置动力系统设计及扇形喷嘴研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019: 23-32.
- CUI S. Power system design and fan-shaped nozzle research of self driving cleaning vehicle device[D]. Huainan: Anhui University of Technology, 2019: 23-32.
- [18] 米国强, 黄志刚, 胡淑珍, 等. 基于 Fluent 的螺旋榨油机压榨段流场仿真[J]. 食品与机械, 2021, 37(3): 85-88.
- MI G Q, HUANG Z G, HU S Z, et al. Flow field simulation of the press section of a screw oil press based on fluent[J]. Food & Machinery, 2021, 37(3): 85-88.
- [19] 杨雨, 邱涛. 导板式扇形喷嘴清洗射流流场的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(3): 243-247.
- YANG Y, QIU T. Numerical simulation of cleaning jet flow field of guide plate fan nozzle[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(3): 243-247.
- [20] GUHA A, BARRON R M, BALACHANDAR R. An experimental and numerical study of water jet cleaning process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(4): 610-618.
- [21] 李喆, 王国志, 邓颖海, 等. 扇形喷嘴的射流特性研究[J]. 机床与液压, 2016, 44(1): 104-107.
- LI Z, WANG G Z, DENG Y H, et al. Study of characteristics of Fan jet nozzle[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44(1): 104-107.