

基于Fluent的水射流式鱼去鳞仿真分析

夏伟伟¹, 马骏骁¹, 张旭^{1*}, 温保岗¹, 芦金石¹, 王慧慧^{1,2}

¹大连工业大学辽宁省海洋食品加工技术与装备重点实验室, 辽宁 大连

²大连工业大学国家海洋食品工程技术研究中心, 辽宁 大连

Email: 1781200523@qq.com, *zhangxu_dlut@163.com

收稿日期: 2020年9月9日; 录用日期: 2020年9月23日; 发布日期: 2020年9月30日

摘要

针对鱼类原料水射流式去鳞设备射流参数不合理、准确性差、去鳞效率低下等问题, 本文建立了鲤鱼模型并利用Fluent软件对水射流式鱼体去鳞进行了仿真模拟, 建立了鱼体去鳞的力学性能评判指标, 分析了射流压力、射流靶距和射流入射角的变化对鱼体去鳞的力学性能评判指标影响趋势, 结果表明, 在试验给定射流参数范围内, 当射流压力9 MPa, 射流入射角20°, 射流靶距100 mm, 此时受力均匀性、有效打击比和最大打击力最优, 为鱼类原料水射流式去鳞设备提供理论方法和技术支持。

关键词

去鳞, 水射流, 仿真分析, Fluent, 鲤鱼

Simulation Analysis of Fish Descaling Based on Fluent Water Jet

Weiwei Xia¹, Junxiao Ma¹, Xu Zhang^{1*}, Baogang Wen¹, Jinshi Lu¹, Huihui Wang^{1,2}

¹Key Laboratory of Marine Food Processing Technology and Equipment of Liaoning Province, Dalian Polytechnic University, Dalian Liaoning

²National Marine Food Engineering Technology Research Center, Dalian Polytechnic University, Dalian Liaoning

Email: 1781200523@qq.com, *zhangxu_dlut@163.com

Received: Sep. 9th, 2020; accepted: Sep. 23rd, 2020; published: Sep. 30th, 2020

Abstract

Aiming at the problems of unreasonable jet parameters, poor accuracy, and low descaling effi-

*通讯作者。

ciency of fish raw material water jet descaling equipment, this paper established a carp model, and simulated the water jet descaling using fluent software, and established the mechanical performance evaluation index of fish body descaling. The influence trend of the changes of jet pressure, jet target distance and jet incident angle on the mechanical performance evaluation index of fish body descaling is analyzed. The results show that within the given jet parameter range of the test, when the optimal jet parameters of scales are jet pressure 9 MPa, jet incidence angle 20°, and jet target distance 100 mm; at this time the uniformity of force, effective strike ratio and maximum strike force are the best, which provided theoretical methods and technical support for fish raw water jet descaling equipment.

Keywords

Descaling, Water Jet, Simulation Analysis, Fluent, Carp

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来我国淡水鱼加工市场迅速增长, 淡水鱼的前处理工序繁多, 其中去鳞加工是鱼原料加工的关键工序, 同时也是整个工序中的技术难点[1]。随着淡水鱼加工量的大幅增长, 具体高质量和大批量加工能力的去鳞方法和设备成为行业的亟需势。目前加工企业广泛采用的鱼去鳞方式主要有滚筒式去鳞[2]、辊刷式去鳞[3]和水射流式去鳞[4]。相对于其他两种方式, 水射流式去鳞具有去鳞率高、加工速度快的优点。但仍存在一定不足, 水射流式去鳞的参数较多, 而鱼类原料大小种类不一, 水射流去鳞的优化参数组合困难。当水射流去鳞工艺参数设置不合理时, 将出现去鳞效果不佳、鱼体表皮损伤、鱼尾/鱼鳍损伤等问题, 影响鱼去鳞加工的合格率和外观品质等。水射流去鳞效果与鱼体受到射流打击力特性密切相关, 因此有必要分析水射流参数与鱼体受到射流打击力的关系。

Fluent 是分析水射流仿真的常用软件, 经常用于工程、农业、食品等领域[5] [6] [7] [8]物料表面清洗去渍过程的仿真分析。李仁杰等[9]对比鱼去鳞过程的试验和仿真结果, 验证了采用 Fluent 模拟鱼去鳞过程的仿真精度, 为本文研究提供了方法参考。

本文基于 Fluent 建立水射流去鳞的流固耦合分析模型, 分析水射流参数变化对鱼体表面应力分布的影响趋势, 建立鱼去鳞效果的力学特性评价指标, 探讨去鳞工艺参数优化的准则, 为鱼类原料水射流式去鳞工艺优化提供参考。

2. 模型与方法

以鱼体受水射流冲击后的应力分布作为主要参考来评定鱼去鳞过程的受力情况。因此本文采用流固耦合计算方法, 该方法一般用在流体与固体间存在强烈的相互作用时, 对流体流场与固体应力应变的考察, 本文采用单向流固耦合进行仿真分析。单向流固耦合分析过程主要包括: 流场仿真和结构仿真, 每个过程都包括建立几何模型, 网络划分, 参数设置, 求解和后处理。

2.1. 模型建立

本文在研究鱼体定向上选取了鲤鱼作为研究对象, 鲤鱼长轴方向上呈长纺锤形, 横截面呈楔形, 鱼

背厚度大于腹背厚度, 鱼体重心靠近鱼头部分, 本文鲤鱼模型参照李仁杰[10]等方法经过对众多鲤鱼样本的体型参数进行测量, 经过对大量鲫鱼样本的体型参数进行测量, 得到鲫鱼形态参数如表 1 所示; 根据表 1 利用 Solid Works 建立鲫鱼近似三维模型如图 1 所示, 通过企业调研和多种喷嘴的比较发现扇形喷嘴喷射比较均匀, 适用于去鳞工作, 根据鲤鱼的体型特征, 25°扇形喷嘴与其它相比, 可以较好的对鲤鱼鱼体进行覆盖。所以选择扇形喷嘴作为喷嘴模型, 其孔径为 2.4 mm, 喷射角度为 25°。以上述鲤鱼和喷嘴模型为基础建立 Fluent 流场仿真模型如图 2 所示。

Table 1. Morphological parameter measurement of crucian

表 1. 鲫鱼形态参数测量

形态参数	样本数	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数
体长/mm	30	201.9	232.6	217.8	8.50	3.90%
体高/mm	30	41.4	50.2	46.2	2.80	6.06%
体宽/mm	30	72.9	102.4	90.1	6.00	6.70%

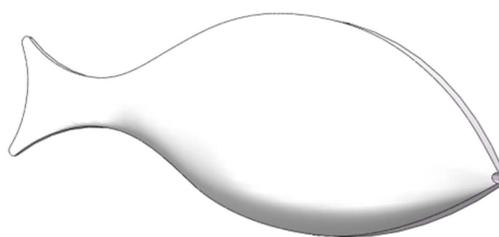


Figure 1. Carp model

图 1. 鲤鱼模型

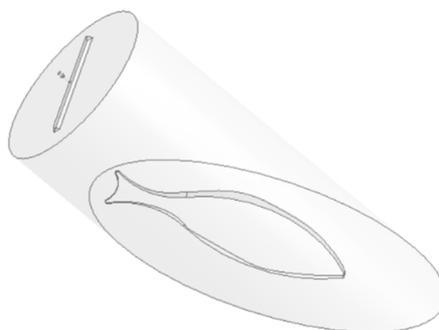


Figure 2. Fluent flow field simulation model

图 2. Fluent 流场仿真模型

2.2. 网络划分

采用 Ansys Fluent 自带的网格划分软件 Icem 对射流流场进行六边形网格进行划分, 除各个入口、出口交接处做加密化处理, 其它流场部分采用自动网络划分[11], 流场模型的网格划分如图 3 所示。

2.3. 参数设置

选用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型对整个气液两相流场进行模拟仿真, k 值为 0.3, ε 值为 38.08 选择稳流, 设置空气为基本相, 水为第二相; 选择非稳态离散求解器, 入口边界定义为压力入口, 设定水体积分数为 1; 外流场边界条件也采用压力边界, 出口压力为一个标准大气压, 设定回流体积分数为 0; 喷嘴壁面定义为无滑移壁面, 采用 PISO 算法对压力和速度进行耦合求解计算[6]。

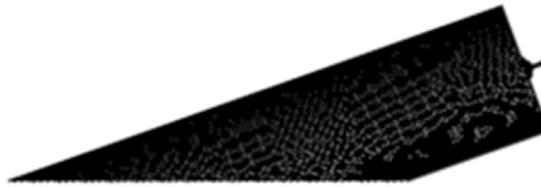


Figure 3. Meshing model
图 3. 网格划分模型

2.4. 水射流去鳞原理

水射流鱼去鳞的原理如图 4 所示。上方喷嘴喷射经由水泵加压后的压力水以一定角度打击鱼体表面，随着鱼被水平输送，水射流的剪切作用使鱼鳞从鱼体表面上剥离[12]。当输送速度一定时，鱼去鳞效果与水射流参数(射流压力、靶距和入射角)有关。

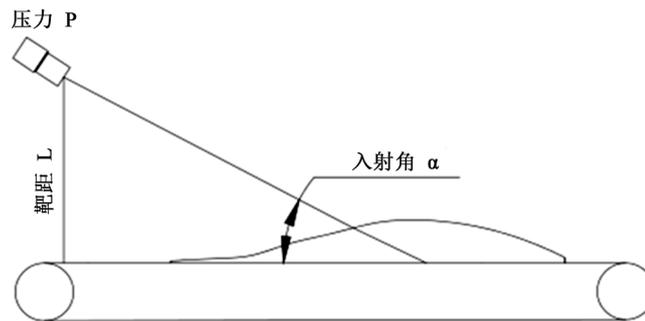


Figure 4. Principle diagram of water jet descaling
图 4. 水射流鱼去鳞原理图

3. 仿真与结果分析

3.1. 仿真方案

以射流压力、射流靶距和射流入射角 3 个参数分别进行单因素仿真试验。试验方案如表 2 所示。

Table 2. Single factor test protocol
表 2. 单因素试验方案

分组	试验编号	固定条件	试验条件	
第 1 组	1			9
	2	射流入射角 20° 射流靶距 100 mm	射流压力(MPa)	10
	3			11
	4			12
第 2 组	6			100
	7	射流压力 9 MPa 射流入射角 20°	射流靶距(mm)	130
	8			160
	9			190
11			20	
第 3 组	12	射流压力 9 MPa 射流靶距 100 mm	射流入射角(°)	25
	13			30
	14			35

3.2. 仿真结果

当射流入射角和靶距一定时($\alpha = 20^\circ$ 、 $L = 100$ mm), 射流压力 8 MPa、9 MPa、10 MPa、11 MPa 应力云场如图 5 所示, 从图 5 可以看出, 随着射流压力的增加, 鱼体所受的最大等效应力上升, 这是因为压力增加, 鱼体受到的打击力变大, 从而最大等效应力变大; 当射流入射角和射流压力一定时($\alpha = 20^\circ$ 、 $P = 9$ MPa), 射流靶距 100 mm、130 mm、160 mm、190 mm 应力云场如图 6 所示, 从图 6 可以看出, 随着射流靶距的增加, 鱼体所受的最大等效应力下降, 这是因为由于空化作用, 随射流靶距减少, 射流打击力会增大, 最大等效应力大; 当射流压力和靶距一定时($P = 9$ MPa、 $L = 100$ mm), 射流入射角 20° 、 25° 、 30° 、 35° 应力云场如图 7 所示, 从图 7 可以看出, 随着射流入射角的增加, 最大等效应力先变大后变小, 存在一个最大值, 因为当射流角度变小时, 虽然射流打击力的垂直分量变小, 但射流打击力的水平分量变大。

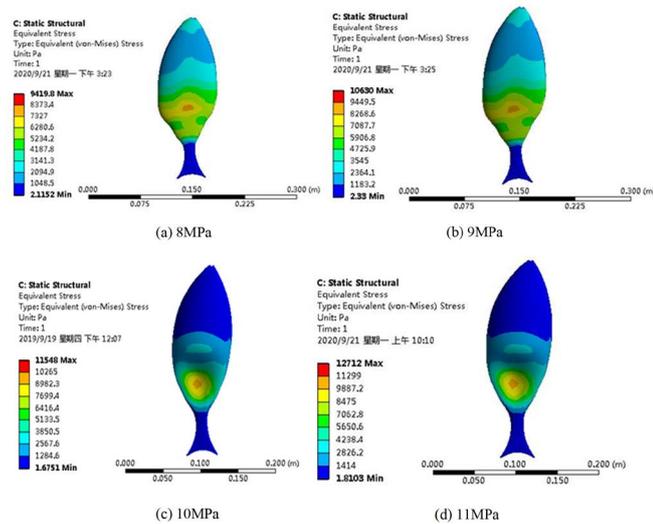


Figure 5. Stress cloud diagram under different jet pressure
图 5. 不同射流压力下应力云图

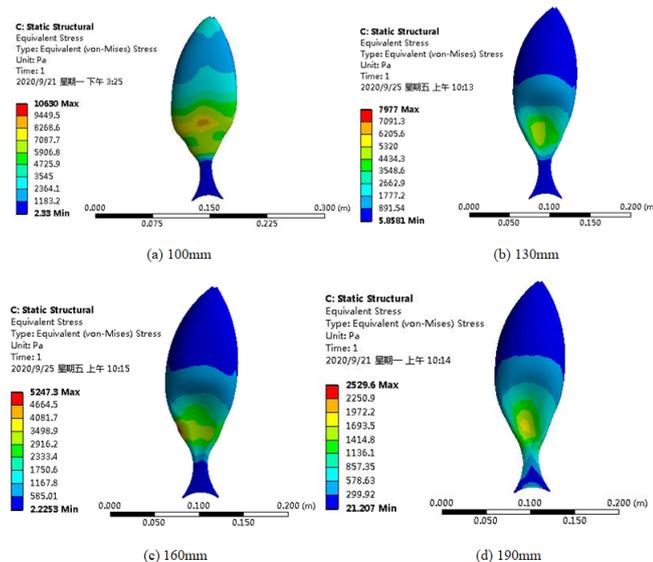


Figure 6. Stress cloud diagram under different target distances
图 6. 不同靶距下应力云图

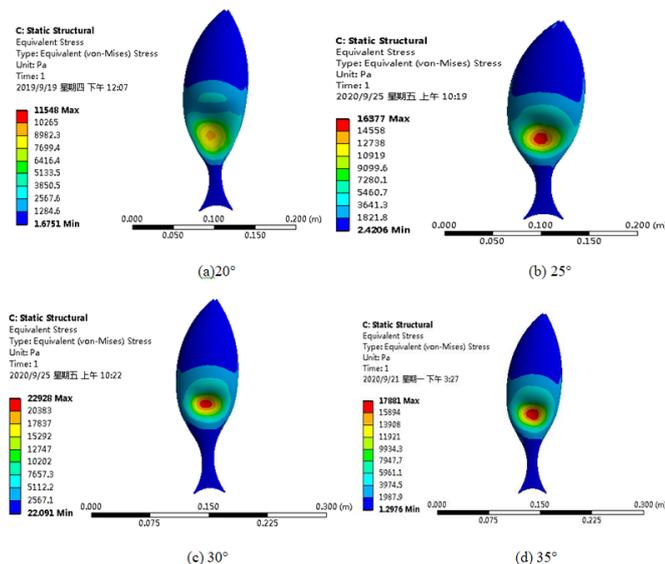


Figure 7. Stress cloud diagram at different jet incident angles
图 7. 不同射流入射角下应力云图

3.3. 力学性能指标建立

水射流去鳞过程可视为射流系统相对静止，鱼体沿着其轴向水平线性往复移动，在此过程中水射流部分的打击在鱼体表面进行去鳞作业。水射流去鳞的力学性能可用鱼体受力均匀性、最大打击力、有效打击比 3 个指标来衡量[13]。

受力均匀性采用鱼体表面的应力最大的径向切线上的 Von-Mises 等效应力分布曲线表示鱼去鳞过程受力的均匀性，其中该曲线的变化趋势越平缓，鱼体表面在去鳞过程中受力的均匀性越好。

最大打击力采用鱼体表面受到的最大 Von-Mises 等效应力表示最大打击力。最大 Von-Mises 等效应力变化应折中，使得去鳞率程度高且对鱼体的表面损伤小。

有效打击比在射流压力一定的情况下，以鱼体受到的打击力与射流参数方案能提供的总打击力比值来衡量该方案的射流利用水平，有效打击比越大说明射流参数方案的能耗有效利用率越高。按下式计算有效打击比。

$$\eta = F_{\text{鱼体}} / F_{\text{总}} \tag{1}$$

式中， η ——有效打击比，%；

$F_{\text{鱼体}}$ ——鱼体受到的打击力，N；

$F_{\text{总}}$ ——射流参数方案提供的总打击力，N。

3.4. 受力均匀性的影响因素分析

固定射流入射角和射流压力($\alpha = 20^\circ$ 、 $P = 9 \text{ MPa}$)、射流入射角和射流靶距($\alpha = 20^\circ$ 、 $L = 100 \text{ mm}$)、射流压力和射流靶距($P = 9 \text{ MPa}$ 、 $L = 100 \text{ mm}$)，分别建立鱼体表面径向等效应力分布曲线随射流靶距、射流压力及射流入射角变化曲线如图 8、图 9、图 10 所示。

由图 8、图 9、图 10 可知，射流压力、射流入射角和射流靶距的等效应力分布曲线均呈中间向两端平稳降低的规律，射流压力、射流入射角和射流靶距的变化基本不影响鱼体表面径向等效应力分布趋势。选取中间 2/3 段(-30 mm, 30 mm)曲线的应力数据，射流压力一定时($P = 9 \text{ MPa}$)，射流靶距 100 mm、130 mm、

160 mm、190 mm 时的等效应力最大变化率分别为 12.9%，9.4%，7.6%，4.5%，在给定的水射流参数取值范围内，随着射流靶距减少，鱼体受力均匀性下降；射流靶距一定时(射流靶距 $L = 100$ mm)，射流压力 8 MPa、9 MPa、10 MPa、11 MPa 时的等效应力最大变化率分别为 15.4%，12.7%，15.2%，15.3%，在给定的水射流参数取值范围内，随着压力变化，鱼体受力均匀性基本不变；射流压力、射流靶距一定时 ($P = 9$ MPa、 $L = 100$ mm)，射流入射角 20° 、 25° 、 30° 、 35° 时的等效应力最大变化率分别为 12.7%，25.0%，25.3%，26.5%，在给定的水射流参数取值范围内，随着射流入射角的增加，鱼体受力均匀性下降。其中，射流方案 $P = 9$ MPa、 $L = 100$ mm、 $\beta = 20^\circ$ 的受力均匀性最好。因此设定射流参数时，在满足提供足够的水射流喷射打击力的同时，应尽量采用较小的射流靶距和射流压力，以提高鱼体受力的均匀性。

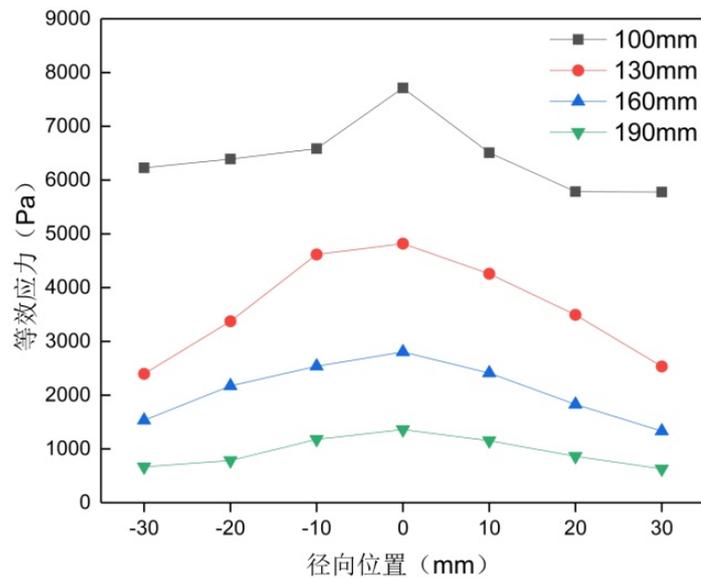


Figure 8. Radial equivalent stress distribution curve of fish body surface under different target distances
图 8. 不同射流靶距下鱼体表面径向等效应力分布曲线

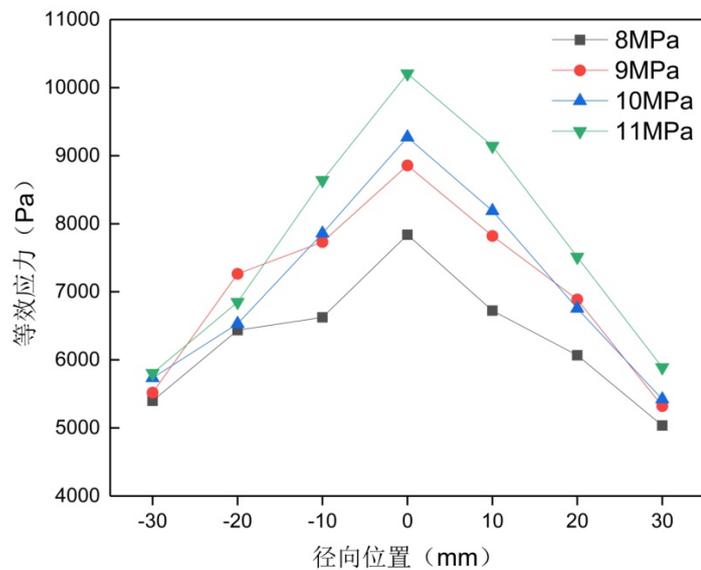


Figure 9. Radial equivalent stress distribution curve on fish body surface under different inlet pressures
图 9. 不同射流压力下鱼体表面径向等效应力分布曲线

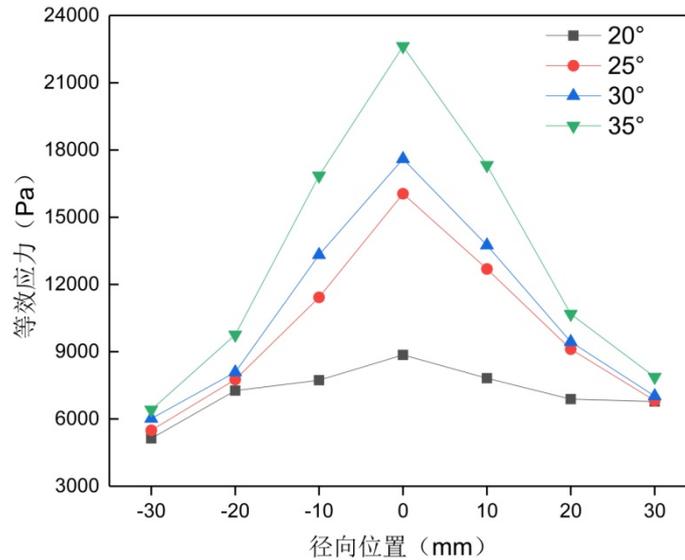


Figure 10. Radial equivalent stress distribution curve on the fish body surface under different jet incident angles
图 10. 不同射流入射角下时鱼体表面径向等效应力分布曲线

3.5. 最大打击力的影响因素分析

固定射流入射角($\alpha = 20^\circ$)的条件下,分别建立最大 Von-Mises 等效应力随射流压力和射流靶距的变化曲线,如图 11、图 12 所示。

从图 11、图 12 可知,在射流入射角一定时,最大 Von-Mises 等效应力随射流靶距增大下降,在相同射流靶距下,射流压力越大,最大 Von-Mises 等效应力越大;最大 Von-Mises 等效应力随射流压力增加上升,在相同射流压力下,射流靶距越小,最大 Von-Mises 等效应力越大。因此采用较小射流靶距和较大射流压力的参数组合可获得采用较大射流靶距和较小射流压力组合同样的射流打击力效果,增大射流压力将提高射流打击力,为了保证足够的打击力,应选择尽量小的射流靶距。

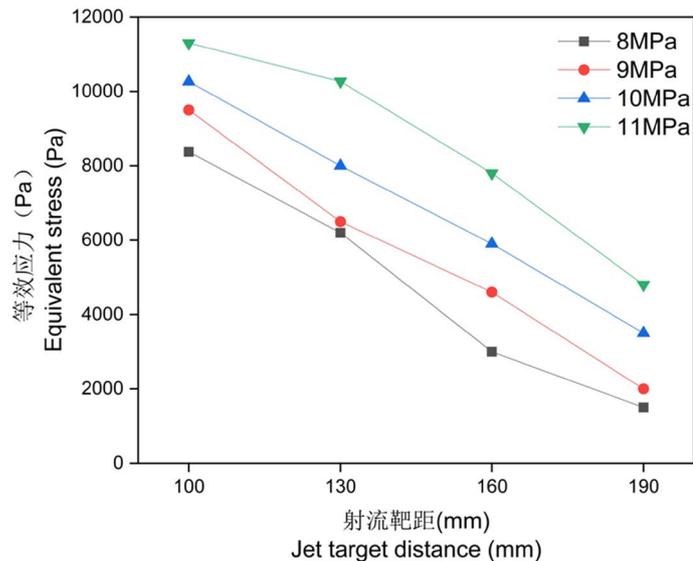


Figure 11. Variation trend of maximum Von-Mises equivalent stress with target distance
图 11. 最大 Von-Mises 等效应力随射流靶距的变化趋势

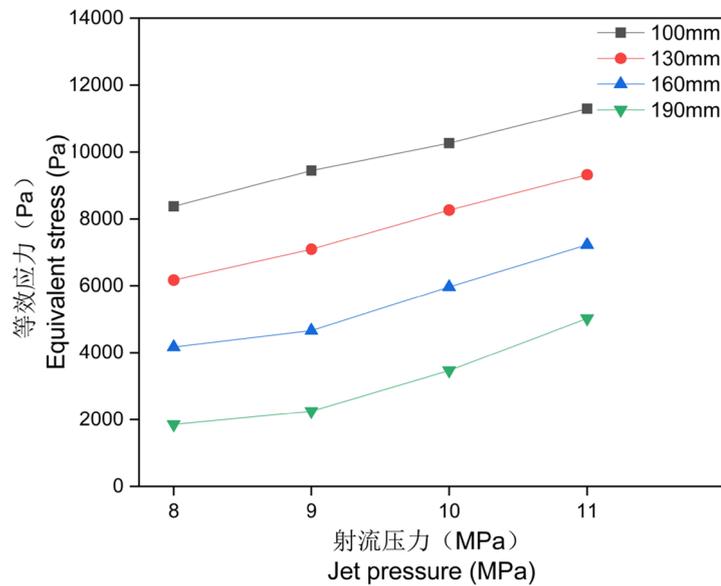


Figure 12. The variation trend of the maximum Von-Mises equivalent stress with the inlet pressure
图 12. 最大 Von-Mises 等效应力随射流压力的变化趋势

3.6. 有效打击比的影响因素分析

固定射流压力($P = 9 \text{ MPa}$)的条件下, 分别建立有效打击比随射流靶距和射流入射角的变化曲线, 如图 13、图 14 所示。

由图 13、图 14 可知, 在射流压力一定时, 有效打击比随着射流靶距和射流入射角的增加, 有效打击比都是下降趋势; 射流距离固定时, 射流入射角越小, 有效打击比越大; 射流入射角固定时, 射流靶距越小, 有效打击比越大; 其中仿真方案 $P = 9 \text{ MPa}$ 、 $L = 100 \text{ mm}$ 、 $\beta = 20^\circ$ 的有效打击比最大, 即为 97.3%, 说明该方案的能耗有效利用率最大。

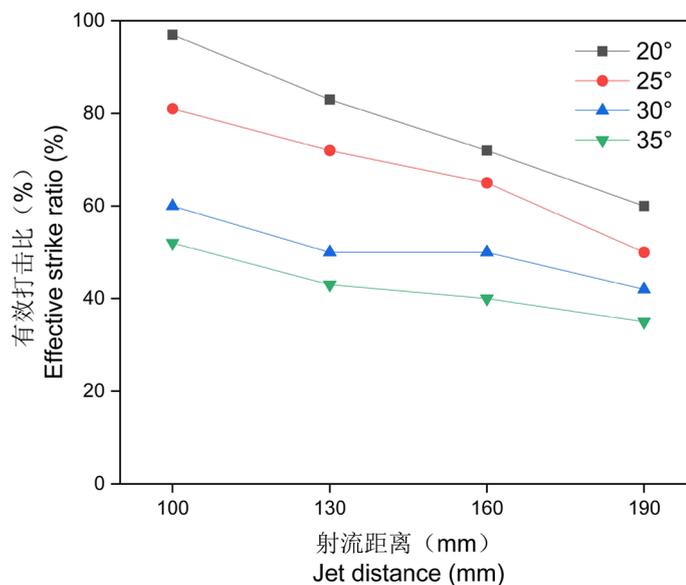


Figure 13. The effective blow ratio vs. jet distance
图 13. 有效打击比随射流距离的变化曲线

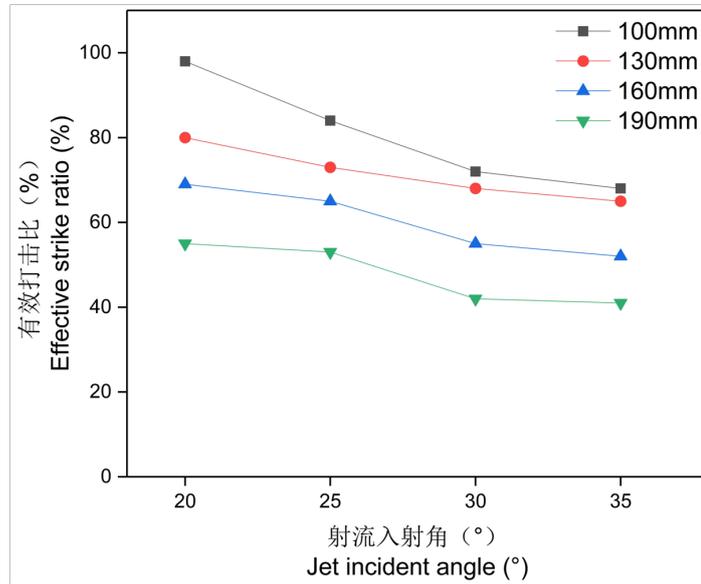


Figure 14. The effective blow ratio vs. jet incident angle

图 14. 有效打击比随射流入射角的变化曲线

3.7. 射流参数优化

水射流最佳工艺要求是鱼体要有比较好的受力均匀性、比较高的有效打击比、适中的最大打击力；在选取水射流去鳞最优参数组合时，应将受力均匀性、有效打击比和最大打击力 3 项指标进行综合考虑，综合上述 3 个指标，通过对各参数组合下的力学特性分析，在试验给定的射流参数范围内，当射流压力 9 MPa，射流入射角 20°，射流靶距 100 mm，鱼体受力均匀性、有效打击比、最大打击力最优，因此在试验给定射流参数范围内，选择该组参数作为水射流去鳞的最佳射流组合较为合适。

4. 结论

1) 根据水射流去鳞原理，基于 Fluent 建立水射流去鳞的流固耦合分析模型，实现了连续的鱼腹背定向清洗。

2) 经单因素研究，采用较小的射流靶距和射流压力，可以提高鱼体受力的均匀性；采用较小射流靶距和较大射流压力的参数组合，可获得采用较大射流靶距和较小射流压力组合同样的射流打击力效果；有效打击比随着射流靶距和射流入射角的增加均呈下降趋势。

3) 当射流压力 9 MPa，射流入射角 20°，射流靶距 100 mm 时，鱼体受力均匀性、有效打击比和最大打击力最优，为鱼类原料水射流式去鳞设备提供了参考。

4) 本研究的局限性在于：单一对鲤鱼模型为仿真实验对象，后续可增加其它鱼类对比研究，流场模拟采用的是扇形喷嘴单点喷射方式，后续可对空间多点式水射流去鳞技术进行研究。

基金项目

国家重点研发计划项目(2018YFD0400800); 辽宁省自然科学基金项目(20180551017 和 20180550792)。

参考文献

- [1] 李玲, 宗力, 王玖玖, 等. 大宗淡水鱼加工前处理技术和装备的研究现状及方向[J]. 渔业现代化, 2010, 37(5): 43-46, 71.

-
- [2] 杨映辉, 吴新红. 一种滚筒去鳞机[P]. 中国专利, CN211298273U, 2020-08-21.
- [3] 牟伟丽, 孙大鹏, 张道旭, 李建利. 一种去鱼鳞装置[P]. 中国专利, CN204393223U, 2015-06-17.
- [4] 徐茂森, 黄斌, 郑水华. 一种环形水射流鱼鳞去除装置[P]. 中国专利, CN110558364A, 2019-12-13.
- [5] 李占鹏, 赵立玉, 梅中华. 船舶高压水射流除锈过程有限元仿真分析[J]. 广东造船, 2020, 39(1): 64-67.
- [6] 李海建, 龙芋宏, 谢勇君, 唐文斌. 基于 FLUENT 的槽型轨道清洗射流的参数优化仿真分析[J]. 机床与液压, 2019, 47(19): 125-130.
- [7] 王朋. 钢丝绳清洗机结构设计及射流流场模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 济南大学, 2013.
- [8] 于洋, 陶向前, 李若兰, 李博, 林彬. 基于有限元的枸杞烘干机结构参数优化与分析[J]. 农机化研究, 2021, 43(1): 234-240.
- [9] 李仁杰, 李小辰, 张旭, 等. 水产类原料清洗去杂的水射流实验装置设计[J]. 机械工程与技术, 2019, 8(5): 365-375.
- [10] 李仁杰. 基于水射流典型淡水鱼类去鳞关键技术及装备研发[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连工业大学, 2020.
- [11] 褚聪, 戴勇, 沈明, 葛满, 叶见领, 袁巧玲. 基于 Fluent 仿真的强约束磨粒射流抛光特性[J]. 表面技术, 2016, 45(6): 198-204.
- [12] 刘庭成, 范晓红. 高压水射流清洗机射流打击力的研究分析[J]. 清洗世界, 2008, 24(12): 26-29.
- [13] 孙跃. 基于水射流的海参深度清洗技术及装备设计[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连工业大学, 2019.