

鼓泡式鱼类清洗机管路湍流数值模拟与优化

Numerical simulation and optimization of piping turbulence in bubbling fish cleaner

李 路¹ 张志明¹ 吴文锦²

LI Lu¹ ZHANG Zhi-ming¹ WU Wen-jin²

汪 兰² 熊光权² 石 柳²

WANG Lan² XIONG Guang-quan² SHI Liu²

(1. 华中农业大学工学院, 湖北 武汉 430070;

2. 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北 武汉 430064)

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China;

2. Institute of Agricultural Products Processing and Nuclear Agriculture, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan, Hubei 430064, China)

摘要:采用 Fluent 软件对鼓泡管路中的分流管内部流场进行数值模拟, 选用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型模拟分流管上每个喷气口气体的流速分布图, 当分流管长为 40 cm 时, 每个喷气口气体的流速相近, 产生的气泡均匀、可控。通过对分流管上的喷气孔径、孔距等相关参数进行数值模拟, 使用 Mixture 多相流模型、扩展的标准 $k-\epsilon$ 湍流模型模拟不同气流速度对气体体积分数、湍流动能、湍流耗散率的影响。结果表明: 气流流速与气体体积分数、湍流动能、湍流耗散率具有正相关性, 当鼓泡管路中参考气流速度 8 m/s、喷气孔径 6 mm、喷气孔径间距 70 mm 时, 湍流动能转化比最高(67.7%)。验证实验表明: 清洗时间、气流流量、清洗量对鲫鱼表面和腹腔的清洗效果影响显著, 当清洗时间 170 s、气流流量 145 L/min、清洗量 1.5 kg 时, 清洗效果达 92 分。

关键词:鼓泡式; 鱼类清洗机; 湍流模型; 湍流动能

Abstract: First, Fluent software was used to numerically simulate the internal flow field of the shunt tube in the bubbling line, and standard $k-\epsilon$ turbulence model was applied to simulate the velocity profile of each vent gas on the manifold. The results showed that 40 cm was the opportune length of the shunt tube to

基金项目:国家重点研发计划(编号:2018YFD0700903-2); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(编号:107-110419101)

作者简介:李路, 男, 华中农业大学副教授, 博士。

通信作者:吴文锦(1982—), 男, 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所副研究员, 硕士。

E-mail: 272081603@163.com

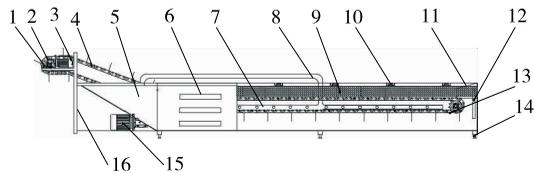
收稿日期:2019-11-21

obtain the similar flow rate of each gas jet, and the uniform and controllable bubbles. Then, the Mixture multiphase flow model and the extended standard $k-\epsilon$ turbulence model were used to simulate of the jet aperture and the hole spacing on the shunt tube. The results showed that the gas flow rate was positively related to the turbulence kinetic energy, gas volume fraction and turbulent dissipation rate. The highest turbulent flow energy conversion ratio (67.7%) was harvested when the jet aperture was 6 mm and the hole spacing was 70 mm, on the condition of 8 m/s as the reference airflow velocity in the bubbling pipeline. The cleaning results displayed the significant effects of these factors on the cleaning effect of the surface and enterocoelia of crucian. When the cleaning time was 170 s, the air flow rate was 145 L/min, and the cleaning amount was 1.5 kg, the cleaning efficiency was as high as 92.

Keywords: the bubble type fish cleaner; turbulence model; turbulence kinetic energy

鱼类加工一般包括分级、除磷、去内脏、清洗、配料及包装, 其中清洗是关键环节。现有的清洗设备主要针对蔬菜、水果或硬壳海鲜等^[1-3], 专门针对鱼类的清洗设备较少。目前鱼类的清洗机有滚筒式、高压水射流式、毛刷式、鼓泡式。滚筒式清洗机主要通过清洗滚筒在电机和传动齿轮的作用下进行绕中心轴转动, 筒内壁均匀分布毛刷, 但清洗量小, 对鱼体损伤大; 高压水射流式清洗机通过撑开装置将鱼体撑开, 去除内脏及黑膜后, 加压后的水通过喷嘴喷头转换成水射流对鱼体进行冲刷, 但耗水

量大,而且对内脏软组织残渣清洗效果差;毛刷式清洗机采用的是“在夹具作用下清洗”,通过光感传感器检测到鱼体,毛刷下降清洗鱼体,在夹具的作用下鱼体不会下滑,但无法有效清洗内脏软组织残渣。鼓泡式清洗机(图1)具有清洗量大、清洗范围广、节水、对产品损伤小等优点,鼓泡管路作为清洗机的关键部件,对其设计进行优化有利于提高鱼类清洗机的清洗效果。



1. 齿轮 2. 轴承座 3. 电机 4. 链条式传送带 5. 机壳 6. 污浊度检测装置 7. 分流管 8. 主流管 9. 侧网格 10. 横支架 11. 斜坡板 12. 水位检测装置 13. 导轨 14. 支撑座 15. 旋涡风机 16. 机架

图1 鼓泡式清洗机结构示意图

Figure 1 Schematic diagram of bubbling cleaning machine

目前,清洗设备的优化设计主要有流体流场数值模拟^[4-5]和试验分析^[6-7]两大方法。计算流体动力学 CFD (computational fluid dynamics) 技术因能较全面地获得流场数据,且具有流场数据可视化的优势,得到了广泛应用。而试验分析主要通过逐一调整样机的结构参数进行清洗,以清洗效果为指标选出最优结构参数,该方法结果直观,但成本较高。Mixture 多相流模型可用于两相流或多相流(流体或颗粒),求解混合物的动量方程,并通过相对速度来描述离散相。Mixture 多相流模型也可用于没有离散相相对速度的均匀多相流,当求解变量的个数小于完善的多相流模型时,该模型可与完善的多相流模型相媲美。

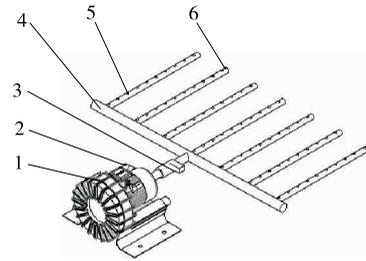
试验拟采用 Fluent 提供的 Mixture 多相流模型对鱼类清洗机的核心部件——鼓泡管路进行数值模拟,优化鼓泡管路结构参数,并使用优化后的结构参数搭建试验平台进行验证,旨在提高鱼类清洗机的清洗效率与清洗质量。

1 鼓泡管路流场数值模拟

1.1 鼓泡管路结构及工作原理

如图2所示,鼓泡管路包括风机、主流管和分流管。旋涡风机将空气以一定的速度鼓入主流管,经过分流管上若干个喷气孔形成大量具有一定压力、大小不一的气泡,利用气泡气蚀机理对鱼类进行清洗^[8-10]。

气泡气蚀作用:在含有许多气泡的液体中,当气泡爆炸性生长或塌陷时,会产生巨大的瞬时压强。在爆炸性生长的气泡周围会产生除剪切力外的强吸力,强吸力将



1. 旋涡风机 2. 分流阀 3. 流量计 4. 主流管 5. 喷气孔 6. 分流管

图2 鼓泡管路结构示意图

Figure 2 Schematic diagram of the bubbling pipeline structure

颗粒从表面提起并吸向气泡以达到清洁效果;当气泡从喷气孔生成后,随着气泡的上升、变形,气泡的体积不断膨胀直至破碎(塌陷),在气泡破碎(塌陷)的同时产生巨大的瞬时压强,从而破坏固体表面,产生气蚀现象。有学者^[11]通过实测得出,游移型气泡溃灭时,靠近固体壁面处的微射流速度可达 70~180 m/s,在固体表面的冲击压力可达 140~180 MPa,该冲击力完全可以清洗掉固体表面的污染物。当液体中的气泡不断产生、膨胀、破碎(塌陷)时,在气泡塌陷期间产生巨大的脉冲压力连续不断地作用于鱼体表面,可有效清除鱼体表面的污物。

鼓泡管路的关键结构参数包括喷气孔径 R 、喷气孔径间距 L 和管长 L_r ,同时还包括气流量^[12-14]。喷气孔径 R 、喷气孔径间距 L 、管长 L_r 以及气流流量对气泡大小、多少和均匀性都有重要影响,但这些参数无法直接确定,通常是经过试验或者基于流体力学的理论分析确定。采用 Fluent 15.0 软件对不同结构参数的鼓泡管路进行相流数值模拟,依据结果对鼓泡管路进行优化设计。Fluent 进行数值模拟在一定程度上弥补了理论分析和试验测试的不足,节约了设计时间,减少了试验费用同时容易获取流场中数据以及实现流场可视化的优势,被广泛应用于流场分析^[15]。

1.2 多相流模型的选择

试验对鼓泡管路内、外部流场进行数值模拟,涉及空气和水两种介质。Fluent 软件包含 3 种多相流模型: Euler 模型、VOF 模型、Mixture 模型^[16]。

由于 Mixture 模型具有计算稳定性好,计算时间快等优点,故选用 Mixture 模型作为多相流模型,其连续性方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) \nabla \times (\rho_m \bar{v}_m) = 0. \quad (1)$$

Fluent 数据库中提供了多种湍流模型^[17-18],如标准 $k-\epsilon$ 模型、RNG $k-\epsilon$ 模型和 Realizable $k-\epsilon$ 模型等。试验适宜用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型,该模型可清晰地模拟鼓泡管道内、外部的流场情况。

标准 $k-\epsilon$ 模型为双方程模型,是在单方程模型基础上,引入一个湍流耗散率 ϵ ,由湍流动能 k 输运方程和湍流耗散率 ϵ 方程组成。湍流动能 k 是一个关于湍动黏度 μ_t 的函数;该模型包含 lauder 和 spalding。模型中的 ϵ 定义为:

$$\epsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \quad (2)$$

湍流动能 k 定义为:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3)$$

因此,标准 $k-\epsilon$ 模型的输运方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_m + S_k, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon, \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}; \\ G_b = \rho g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}; \\ \beta = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}; \\ Y_m = 2\rho \epsilon M_i^2; \\ M_i = \sqrt{j} k / a^2; \\ a = \sqrt{\gamma R T}, \end{cases} \quad (6)$$

式中:

G_k ——由平均速度梯度引起的湍动能;

G_b ——由浮力影响引起的湍动能;

Y_m ——可压缩湍动能膨胀对总耗散率的影响;

$C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}$ ——经验常数,取 $C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_{3\epsilon} = 0.09$;

$\sigma_k, \sigma_\epsilon$ ——湍动能和湍流耗散率对应的普朗数,取

$\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$;

Pr_t ——湍动普朗特数,取 $Pr_t = 0.85$;

g_i ——重力加速度在 i 方向上的分量, m/s^2 ;

β ——热膨胀系数;

M_i ——湍动马赫数;

a ——声速, m/s 。

1.3 数值模拟方案

根据 ANSYS Fluent 流体动力学数值模拟要求,将鼓泡管路和清洗水槽等结构进行简化。数值模拟分为两部分:① 对分流管长度进行数值模拟,根据模拟结果进行优化改进,使分流管上每个喷气口气体的流速尽可能相同或存在的差值在可接受范围内。② 在上述研究的基

础上,对分流管上的喷气孔径、孔距等相关参数进行数值模拟。使用 Mixture 多相流模型、扩展的标准 $k-\epsilon$ 湍流模型进行模拟不同气流速度对气体体积分数、湍流动能、湍流耗散率的影响规律。结合实际情况,选出最优结构参数。

用三维软件 SolidWorks 2017 构造模型,使用 ANSYS ICEM CFD 进行结构网格划分,对于细长管道适合于划分成四边形网格,由于四边形网格具有单元较少,计算划分时间较少等优势。将生成的网格导入到 CFD 中施加边界条件进行求解计算。采用有限体积积分法,应用 Simple 算法进行求解。

计算域进气口采用稳定、匀速的速度入口 (Velocity-Inlet),气相体积分数为 1;采用压力出口 (Pressure Outlet);固体壁面,不考虑壁面对内部流场的影响。

1.4 数值模拟结果分析及结构改进

若忽视温度变化的影响,在喷气孔径 $R = 3 \text{ mm}$,喷气孔径间距 $L = 7 \text{ cm}$,管长度 $L_r = 100 \text{ cm}$ 时,采用标准 $k-\epsilon$ 模型计算气液两相流产生的湍流动能。为了更好、更详细地对比模拟流场区域,选取某根分流管路轴向切面为分析对象。如图 3 所示,分流管在水下 30 cm,喷气出口处的大气压强为 2 943 Pa,由于管内气体压力分布不均匀,导致气体在每个喷气孔出口的压力不一致,进而影响每个喷气孔出口处气流速度。因喷气孔出口处气流速度的不同,会直接影响气泡的大小、多少以及均匀性,使气泡的产生状态具有不可控性,对清洗效率有较大的影响,故各个喷气孔出口处气流速度尽量保持一致,才能使产生的气泡具有均匀性,清洗效果更好。因此,对鼓泡管路

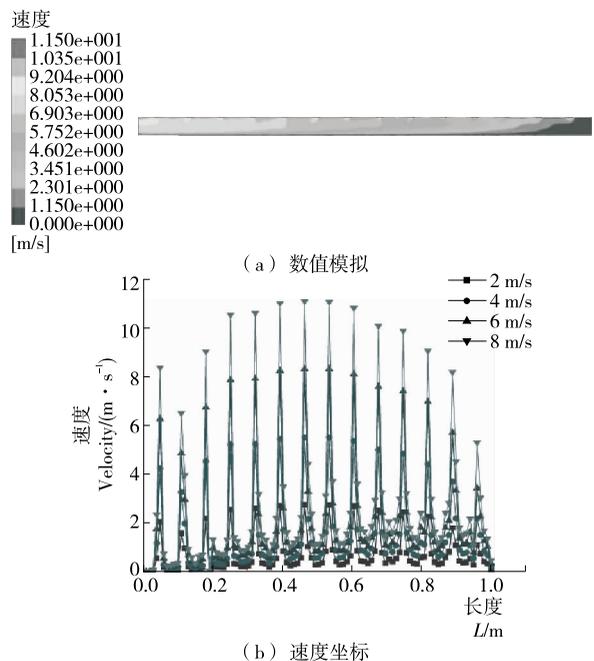


图 3 分流管速度数值模拟和速度坐标图
Figure 3 Shunt tube speed simulation and speed graph

中的分流管进行进一步的设计改进,通过数值模拟不同长度管道,将分流管管道长度缩短为 40 cm。由图 4 可知,改进后的分流管上的喷气孔出口处气流流速趋于一致。

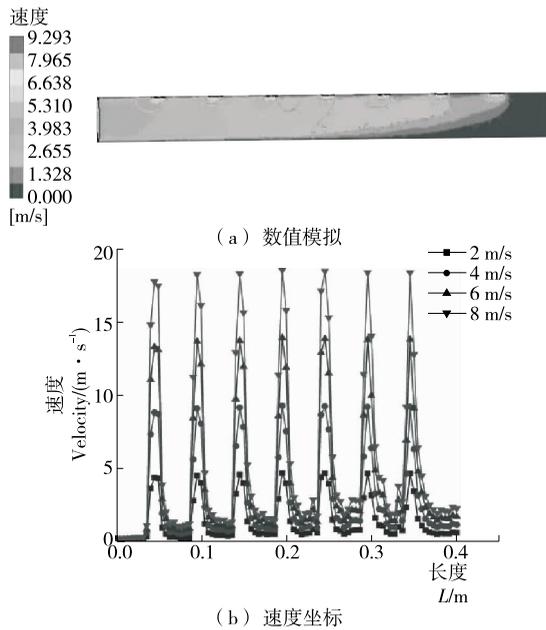


图 4 改进后的分流管速度数值模拟和速度坐标图
Figure 4 Improved shunt tube speed simulation and velocity graph

为了更直观、可视化地分析气流速度对气液场中气体体积分数的影响规律,将模拟结果所得的数据通过 Origin 9.1 进行描点作图,研究垂直高度为 30 cm,间距为 7 cm,喷气孔出口气流速度分别为 2, 4, 6, 8, 10 m/s 时,不同垂直高度水平面处气体体积分数的分布图如图 5 所示。由图 5 可知,清洗水槽中气体体积分数随气流速度的增加逐渐上升。当垂直高度为 10~30 cm 时,气体体积分数与气流流速呈正相关。当接近液面附近时,气体体积分数增加率急剧上升,由于当气泡从喷气孔生成后,随着气泡的上升、变形,气泡体积不断膨胀直至破碎(塌

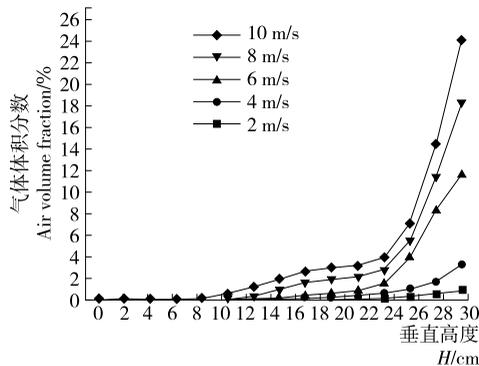


图 5 不同气流流速在轴向切面处气体体积分数分布
Figure 5 Distribution of gas volume fraction at different axial flow rates at axial section

陷),导致清洗槽液面附近的水发生剧烈的晃动,大气中的空气会立即补充气相的不足,气体体积分数急剧上升。

在设计鼓泡管路时首要考虑的是如何提高气、液两相的湍流动能。湍流动能的大小可侧面反映不断溃灭的气泡所产生的坍塌能量^[12]。气体在液体中的体积分数和气泡坍塌产生的能量具有一定的相关性。

由图 6 可知,随着气流流速的增加,气流流速和湍流动能呈正相关,在喷气孔上方的液面,由于气流和气泡破裂爆炸的共同作用,湍流动能和湍流耗散率均达到峰值,二者具有一定的相关性^[19]。湍流耗散率越大,表示单位质量两相流体混合越剧烈,传质越充分。

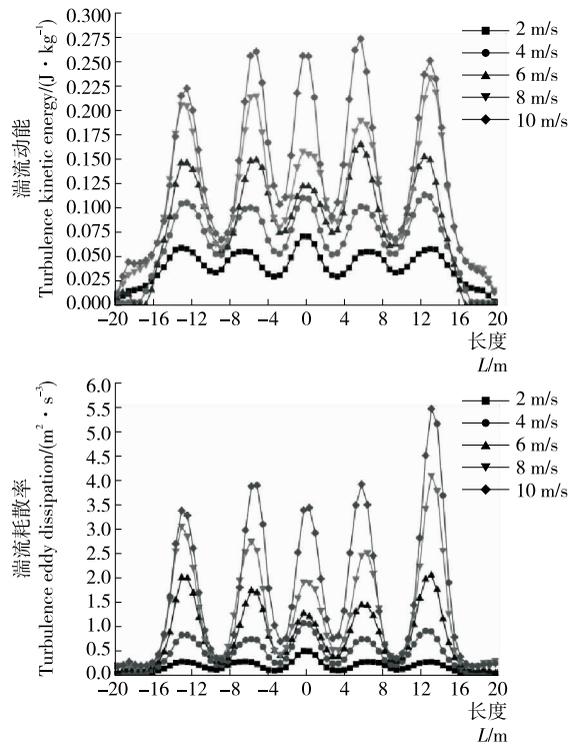


图 6 不同气流速度在液面的湍流动能和湍流耗散率
Figure 6 The turbulent flow energy and turbulent dissipation rate of different gas flow rates at the liquid level

湍流动能表达式为:

$$k = 1/2 \overline{\mu'_1 \mu'_1} = 1/2 (\overline{\mu'^2_r} + \overline{\mu'^2_z} + \overline{\mu'^2_\varphi}) \quad (7)$$

其中, μ'^2_r 、 μ'^2_z 、 μ'^2_φ 分别为径向、轴向和切向速度。游移型气泡湮灭,靠近固体壁面处的微射流速度可分解为径向、轴向和切向速度。

通过分析不同气流流速下的垂直高度气体体积分数、液面处湍流动能和湍流耗散率分布情况可知,气流流速为 2 m/s 时,气体体积分数、湍流动能和湍流耗散率较低,水面波动低,气液两相混合不剧烈。气流流速为 10 m/s 时,气体体积分数、湍流动能和湍流耗散率较高,

气流分布不均匀,气液两相混合剧烈,因此,清洗槽内气流速度应控制在 2~10 m/s。

由图 7 可知,选定气流速度 8 m/s 作为参考,在 40 cm 的分流管中,当喷气孔径间隔为 6 cm 时,湍流动能有明显的上升趋势,出现峰值,此时喷气孔在分流管上的分布均匀性最好,为湍流动能的形成提供了有利条件。当孔径 $R=12$ mm,喷气孔径间隔 $L=3,4,5$ cm 时,湍流动能明显低于正常情况下的水平。因喷气孔数量和气流流量的增加,喷气孔喷出的气体在液体中形成了气流柱,带走了大部分动能,因此液面处的湍流动能明显低于正常水平。

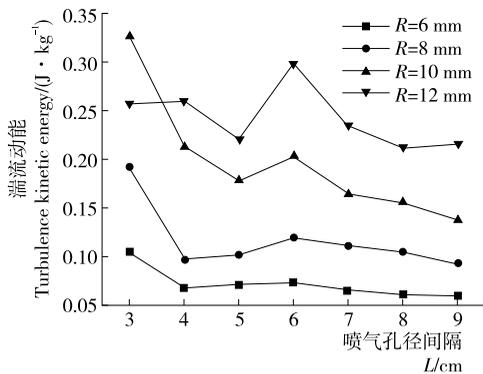


图 7 不同结构参数下液面处的湍流动能分布

Figure 7 Distribution of turbulent flow energy at the liquid surface under different structural parameters

由图 8 可知,在喷气孔气流速度不变的情况下,随着喷气孔间隔的增加,孔径数量和分流管进口气体的气流流量呈递减趋势。由图 9 可知,当孔径间隔为 7 cm 时,湍流动能的转化率出现峰值。不同的结构中,孔径为 6 mm,孔径间隔为 7 cm 的湍流动能转化率最高。结合图 7 可知,孔径为 6 mm,孔径间隔为 7 cm 的湍流动能处于峰值之下,但下降缓慢。图 6 表明气流流量在一定范围内增加,湍流动能与其呈正相关。综上,喷气口径 $R=$

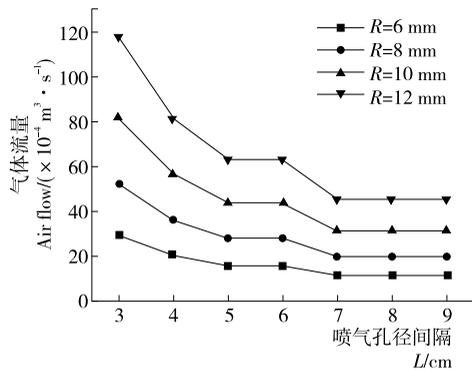


图 8 不同结构参数下分流管的气流流量

Figure 8 Diverter airflow under different structural parameters

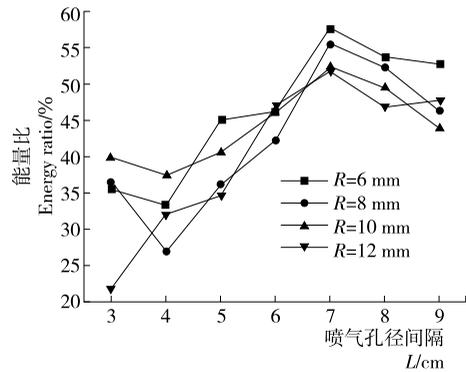


图 9 不同结构参数下湍流动能与流量的比值

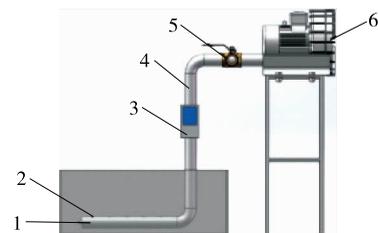
Figure 9 Ratio of turbulent flow energy to flow under different structural parameters

6 mm,喷气孔径间隔 $L=7$ cm、管长 $L_r=40$ cm 为最优鼓泡管路结构。

2 试验验证与分析

2.1 试验装置

根据鼓泡管路的数值模拟结果,结合实际情况确定最优结构参数,搭建如图 10 所示的试验平台,包括风机、分流口和气体流量计等结构。因分流管浸没在清洗水槽中,无法使用现有测量工具在水下进行测量喷气口附近的气流速度。通过对气体流量计数值的控制,可以得到通道内部速度分布数据^[20]。



1. 分流管 2. 喷气孔 3. 气体流量计 4. 主流管 5. 分流阀 6. 风机

图 10 试验平台

Figure 10 Test platform

2.2 评价指标

试验以鲫鱼为验证鱼类,每条鱼重量在 0.25~0.30 kg。根据鱼类加工工艺流程,将鲜活鲫鱼除磷、去内脏以及去鱼鳃等处理,再进行清洗试验。

目前鱼类清洗行业没有统一的清洗效果判断标准,多是通过肉眼观察清洗后鱼体是否残留鱼鳞、血水、内脏残留物等杂质来定性评判清洗效果。因此,制定如表 1 所示的鱼类清洗效果评分标准表,评分越高说明清洗效果越好。

2.3 正交试验结果与分析

以清洗时间、气流流量、清洗量为影响因素,设计 $L_9(3^4)$

表 1 评分标准表

Table 1 Factors and levels of orthogonal test

项目	标准	评分
内脏	较多残留物	0~5
	少量可见残留物	6~10
	无可见残留	10~15
鱼鳞残留量	5~6 片	0~5
	3~4 片	6~10
	0~2 片	10~15
颜色	暗淡有血水	0~5
	较亮有血丝	6~10
	鲜亮无血丝	10~15
血水颜色	暗红色	0~5
	鲜红色	6~10
	淡红色	10~15
内脏残留物	大量残留物(鱼肠、鱼胆、鱼油)	0~5
	少量残留物(鱼肠)	6~10
	无可见残留物	10~15
黑膜	大面积片状覆盖	0~5
	小面积条状覆盖	6~10
	微量残留	10~15
整体清洁度	表面光泽、均匀、摸起来发滑	0~10

表 3 正交试验结果

Table 3 Results of orthogonal test

试验号	A	B	C	空列	清洗效果评分
1	1	1	1	1	84.7
2	1	2	2	2	90.6
3	1	3	3	3	85.2
4	2	1	2	3	90.3
5	2	2	3	1	90.3
6	2	3	1	2	86.6
7	3	1	3	2	90.4
8	3	2	1	3	91.2
9	3	3	2	1	91.8
k_1	86.8	88.5	87.6		
k_2	89.1	90.8	90.9		
k_3	91.2	87.9	88.6		
R	4.4	2.9	3.3		

表 4 正交试验数据分析

Table 4 Analysis of orthogonal test data

方差来源	离差平方和	自由度	均方差	F	P
A	27.749	2	13.874	171.055	0.006
B	13.376	2	6.688	82.452	0.012
C	17.982	2	8.991	110.849	0.009
误差	1.620	2	0.810		
总和	59.269	8			

的正交试验^[21]。试验因素与水平见表 2,试验结果见表 3。

由表 4 可知,A、B、C 对综合指标的影响显著($P < 0.05$),其影响顺序为 $A > C > B$,与直观分析结果一致。因此,最优清洗组合参数为 $A_3B_2C_2$,即清洗时间 170 s、气流量 142 L/min,清洗量 1.5 kg,该条件下的清洗效果评分为 92 分,清洗后的鲫鱼可满足包装要求。

3 结论

从仿真结果可见,鼓泡管路中气流速度与气液两相流的气体体积分数、湍流动能、湍流耗散率呈正相关性。鼓泡管路的孔距、孔径等结构参数对气泡大小、均匀性及能量转换具有较大影响。试验表明,清洗时间、气流量、清洗量对鱼类的洗净率影响显著。试验只对单个鼓

表 2 试验因素与水平

Table 2 Factors and levels of orthogonal test

水平	A 清洗时间/s	B 气流量/(L·min ⁻¹)	C 清洗量/kg
1	60	90	1.0
2	100	142	1.5
3	170	192	2.0

泡管路进行了数值模拟与试验,没有对多管路进行数值模拟,其适用范围有局限性。由于试验清洗装置结构较简单,传感器种类和数量较少,难以对仿真结果进行定量验证。后续可对多管路清洗流场或单鼓泡管路气液固三相流场的特性进行研究。

参考文献

[1] 燕平梅,李爱秀,吴凯晋.超声波气泡清洗对鲜切豇豆生化指标的影响[J].农产品加工: 学刊,2010(2): 70-72, 74.
 [2] 李忠新,杨军,韩小军,等.6QX-800 型气泡式干果清洗机的研制[J].新疆农机化,2008(6): 37-38.
 [3] 滕桂君,弋景刚,李娜,等.一种清洗海湾扇贝装置的设计[J].机械工程与自动化,2006(6): 15-17.
 [4] 蔡子金,李军庆,张庆文,等.CFD 在搅拌罐性能研究和生化过程放大中的应用[J].食品与机械,2013,29(6): 108-112.
 [5] 肖浩飞,周美华.曝气池内气液两相流 CFD 模拟[J].安徽农业科学,2010,38(4): 1 955-1 957.
 [6] BUTZ P, FERNANDEZ A, LINDAUER R, et al. Influence of ultra pressure processing on fruit and vegetable products[J]. Journal of Food Engineering, 2003, 56(2): 233-236.

(下转第 120 页)

于真空冷冻干燥设备的自动控制,实现干燥过程的自主自动运行。

参考文献

- [1] 李新建, 王辉, 彭菲菲. 真空冷冻干燥糯米方便粥的工艺研究[J]. 食品工业, 2019, 40(1): 74-78.
- [2] 陈健旋. 响应面法优化超声辅助提取佛手瓜多糖工艺[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2017, 48(2): 171-177.
- [3] WU Xiao-fei, ZHANG Min, BHANDARI Bhesh. A novel infrared freeze drying (IRFD) technology to lower the energy consumption and keep the quality of *Cordyceps militaris*[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2019, 54: 34-42.
- [4] JIA Yang-yang, KHALIFA Ibrahim, HU Lan-lan, et al. Influence of three different drying techniques on persimmon chips' characteristics: A comparison study among hot-air, combined hot-air-microwave, and vacuum-freeze drying techniques[J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 118: 67-76.
- [5] DUAN Xu, ZHANG Min, MUJUMDAR Arun S. Microwave freeze drying of sea cucumber (*Stichopus japonicus*) [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 96(4): 491-497.
- [6] 贺素艳, 李云飞. 冻干工艺中升华结束点和残余水分测量方法简述[J]. 真空与低温, 2002, 8(3): 135-139.
- [7] 李晓斌. 运用图像处理技术在线监测真空冻干果蔬含水率[D]. 晋中: 山西农业大学, 2013: 3-4.
- [8] 刘飞, 王云, 李春华, 等. 茶叶干燥技术研究现状及展望[J]. 中国农学通报, 2015, 31(6): 210-215.
- [9] 陈锐鸿. 在线动态称重系统开发及质量采集算法研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(3): 94-98.
- [10] 金作徽, 翟志强, 张若宇, 等. 基于支持向量回归的核桃在线称重系统[J]. 食品与机械, 2018, 34(7): 90-92, 126.
- [11] 汪安, 吴扬, 刘权. 针刺式谷物含水率检测仪设计[J]. 食品与机械, 2016, 32(9): 67-70.
- [12] 黄良瑾, 叶范年. 冻干过程在线称重与在线显微观察初探[C]// 第八届全国冷冻干燥学术交流会. 上海: [出版者不详], 2005: 132-133.
- [13] 李晓斌, 崔清亮, 张静, 等. 用颜色测量法在线监测真空冻干香蕉含水率[J]. 食品科技, 2016, 41(5): 296-299.
- [14] 徐振方, 侯燕, 孟艳花. 间歇式微波真空干燥试验设备及其自动化监测系统研究[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2008, 29(6): 69-71.
- [15] 崔清亮, 郭玉明, 郑德聪. 冷冻干燥物料水分在线测量系统设计及试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(4): 91-96.
- [16] 张湘楠, 姚雪东, 黄勇, 等. 盘式热风与红外联合干燥机设计与试验[J]. 农机化研究, 2019(1): 253-257.
- [17] 丁莹. 萝卜远红外干燥的试验研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2009: 20-25.
- [18] 朱文学. 食品干燥原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 15-19.
- [19] 苏秀榕, 徐静, 向怡卉, 等. 水发刺参的冷冻干燥技术研究[J]. 食品科学, 2008, 29(10): 277-280.
- [20] 段续. 海参微波一冻干联合干燥工艺与机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009: 32-35.
- [21] 吴娟, 马强, 程美蓉, 等. 远红外辅助热泵干燥鳙鱼片工艺[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2011, 29(5): 87-91.
- [13] 李海亮, 汪春, 胡军, 等. 气力式水稻穴盘成型机气流分配室流场仿真与优化设计[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 94-101.
- [14] 陈育辉. 水汽浴与超声波技术在蔬菜洁净加工中的应用研究[J]. 现代农业装备, 2008(12): 44-46.
- [15] 田济扬, 白丹, 于福亮, 等. 基于 Fluent 软件的滴灌双向流道灌水器水力性能数值模拟[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 65-71.
- [16] 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: 92-101.
- [17] 张德胜, 施卫东, 张华, 等. 不同湍流模型在轴流泵性能预测中的应用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 66-71.
- [18] 丛国辉, 王福军. 湍流模型在泵站进水池漩涡模拟中的适用性研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 31-35.
- [19] 陈永刚, 阎秋生. 鸡蛋清洗喷雾系统中喷嘴的模拟优化[J]. 食品与机械, 2015, 31(5): 100-103.
- [20] 陈钰. 基于速度分布控制的涡轮流量计优化设计[D]. 杭州: 中国计量学院, 2015: 55-60.
- [21] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2005: 34-65.

(上接第 115 页)

- [7] 郭俊先, 努尔夏提, 梁勤安. 滚筒式饲用甜菜清洗机的清洗机理研究[J]. 农业机械, 2005(6): 95-96.
- [8] BURFOOT D, LIMBURN R, BUSBY R. Assessing the effects of incorporating bubbles into the water used for cleaning operations relevant to the food industry[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2017, 52(8): 1 894-1 903.
- [9] AGARWAL A, NG W J, YU Liu. Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment[J]. Chemosphere, 2011, 84(9): 1 175-1 180.
- [10] CHAHINE G L, KAPAHI A, CHOI J K, et al. Modeling of surface cleaning by cavitation bubble dynamics and collapse [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 29(6): 528-549.
- [11] 李根生, 沈晓明, 施立德, 等. 空化和空蚀机理及其影响因素[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1997, 21(1): 97-101.
- [12] 李中华, 王德成, 刘贵林, 等. 气流分配式排种器 CFD 模拟与改进[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 64-68.