

刺参饵料搅拌投放一体机设计与试验

杨玉娥¹ 刘光辉¹ 韩佳岐¹ 宁立镇¹ 张 岩²

(1. 济南大学机械工程学院, 济南 250022; 2. 山东省渔业互保协会, 济南 250022)

摘要: 针对刺参养殖过程人工投饵劳动强度大、饵料混合均匀性差及投放精度低等问题,本文设计了一种搅拌投放一体式刺参投饵机,集成饵料搅拌、投放及行进功能。在搅拌装置优化方面,采用45°下推式四斜叶搅拌桨与半圆管扰流板搅拌槽组合结构,通过流场分析探究海泥颗粒含量的分布均匀性。试验结果表明,当搅拌桨转速为100 r/min时,海泥颗粒含量为51.25%,与标准值相差1.25个百分点,饵料均匀性优于人工搅拌(海泥颗粒含量约为40%)。在投放装置优化方面,基于水动力学计算,对比分析了锥形扩散喷嘴、突变锥形扩散喷嘴、锥形无扩散喷嘴及锥形圆柱扩散喷嘴性能,并通过正交试验确定锥形扩散喷嘴为最优结构;优化后喷嘴饵料覆盖面积比例为90%,平均投饵射程达4.38 m,投饵速度稳定在0.3 kg/s。在投饵距离4 m的条件下,饵料海泥颗粒含量为48.52%,与标准值相差1.48个百分点,满足饵料搅拌均匀与投饵性能的养殖需求。根据搅拌装置和投饵装置需求设计了行进装置以保证该投饵机在养殖区内正常使用。该刺参投饵机可有效替代人工投饵,降低劳动强度,提高饵料混合均匀性和投放效率,为养殖作业机械化和未来智能化升级奠定了基础。

关键词: 刺参养殖; 投饵机; 饵料搅拌; 饵料投放; 喷嘴

中图分类号: S969.31+1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)08-0161-12 OSID: 

Design and Experiment of Integrated Machine for Stirring and Delivery Sea Cucumber Bait

YANG Yu'e¹ LIU Guanghui¹ HAN Jiaqi¹ NING Lizhen¹ ZHANG Yan²

(1. School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Ji'nan 250022, China

2. Shandong Fishery Mutual Insurance Association, Ji'nan 250022, China)

Abstract: Aiming at the problems of high labor intensity of manual feeding, poor uniformity of feed mixing and low feeding accuracy in the process of sea cucumber breeding, an integrated sea cucumber feeding machine for stirring and feeding was designed, which integrated the functions of feed stirring, delivery, and moving. In terms of the optimization of the stirring device, a combined structure of a 45° downward-pushing four-inclined blade stirring paddle and a semi-circular tube deflector plate stirring tank was adopted. The uniformity of the distribution of sea mud particle content was explored through flow field analysis. The test results showed that when the stirring paddle speed was 100 r/min, the sea mud particle content was 51.25%, which was 1.25 percentage points lower than the standard value. The uniformity of the feed was superior to that of manual stirring (the content of sea mud particles was approximately 40%). In terms of the optimization of the placement device, based on hydrodynamic calculations, the performances of conical diffuser nozzles, abrupt conical diffuser nozzles, conical non-diffuser nozzles and conical cylindrical diffuser nozzles were compared and analyzed, and the conical diffuser nozzle was determined to be the optimal structure through orthogonal experiments. The proportion of the optimized nozzle bait coverage area was 90%, the average feeding range reached 4.38 m, and the feeding speed was stable at 0.3 kg/s. Under the condition of a feeding distance of 4 m, the content of sea mud particles in the feed was 48.52%, which was 1.48 percentage points lower than the standard value, meeting the aquaculture requirements for uniform feed mixing and feeding performance. According to the requirements of the stirring device and the feeding device, a traveling device was designed to ensure the normal use of the feeding machine in the breeding area. This sea cucumber feeding machine can effectively replace

manual feeding, reduce labor intensity, improve the uniformity of feed mixing and feeding efficiency, which can lay a foundation for the mechanization of aquaculture operations and future intelligent upgrades.

Key words: sea cucumber breeding; feeding machine; feed stirring; feed delivery; nozzle

0 引言

水产养殖业正逐步转向科技创新驱动的发展模式,产业目标从单纯追求产量增长转变为注重质量效益提升与可持续发展^[1-3]。养殖方式也呈现多样化趋势,包括池塘、围堰、工厂化及网箱等多种模式^[4-6]。在刺参工厂化育苗过程中,传统人工投饵存在饵料混合不均、投喂量控制不精确及分布不均匀等问题,亟需研发新型投饵装备,以提高投喂精确性与均匀度。

国内外水产养殖投饵装备主要发展方向为单体集中式自动投饵系统、移动式投饵装置与网箱养殖精准投饵系统(如网箱投饵船与固定式自动投饵装置)^[7-8]。在工厂化单体集中式自动投饵系统方面,挪威 AKVA 集团的网箱控制系统(Cage control system, CCS)自动投饵系统利用离心风机产生高速气流,使饵料达到临界流化速度,经多通道分流后在目标育苗池上方形成均匀抛洒轨迹^[9]。中国水科院渔机所开发了一种气动式投饵系统^[10],该装置通过螺旋下料与气压输送系统,实现了精准、高效的多池塘同步投喂。在工厂化移动式投饵装置方面,芬兰 Arvo-tec 公司(Arvo-tec Oy)开发了陆基循环水养殖投饵机器人^[11],该中央控制系统集成轨道移动与定量下料功能,实现了全域精准自动投饵。任同军等^[12]研发了轨道式投喂系统,采用双车间布局,通过滑轨移动装置为多列育苗池自动投饵。在工厂化网箱式养殖机构方面,王文豪等^[13]提出了一种基于投饵装置的刺参水下投饵方法,该设备采用多层吊笼结构,每层沿轴向线性排列投饵孔,通过垂直贯穿各层的投饵管实现逐层定量投喂。孔宪锐等^[14]设计了一种网箱适配型气送式投饲系统,该装置以高压气流为动力,利用叶轮卸料器精准下料并配合四通装置定向导料,最后经专用管道实现多网箱养殖区域的定时定量投喂,解决了集约化网箱养殖中投饲劳动强度大、精准度低的难题。

国外水产养殖自动化投喂设备技术先进,但难以适应我国近海工厂化养殖的生态复杂性。相比之下,国内刺参养殖投饵相关研究薄弱,机械化水平低,与当前水产科技创新的发展理念^[15]存在较大差距。

综上所述,为提升刺参养殖投饵效率与机械化水平,本文设计一种投饵机,以适应水产养殖高质量

与可持续发展的需求^[16]。借鉴跨车间滑轨移动给料及网状投饵机中锥形喷头与引射器结构,重点对行进、搅拌及喷嘴装置进行优化设计,包括整机结构与关键参数设计;通过均匀性分析优选饵料搅拌组件,保障饵料混合质量;优化喷嘴参数并开展投饵试验,评估喷嘴类型、射程及饵料混合液浓度对投饵效果的影响,以验证该投饵系统在实际应用中的可行性。

1 投饵机整体结构与工作原理

1.1 整体结构与主要参数

如图 1 所示,投饵机作业环境为两侧各设有 60 个育苗池的通道。投饵机在通道内移动并进行饵料投放,投饵射程需在 3 ~ 5 m 范围内,以保证饵料能到达育苗池正中心设置的循环泵位置。通过对刺参养殖基地实地调研,为满足刺参幼苗营养需求,刺参幼苗生长所需饵料应为粉末状海泥与水的混合液^[17],规定饵料混合液投放标准为海泥与水质量比 1:1,即饵料海泥颗粒含量标准值为 50%,标准饵料物理性质参数如表 1 所示。一座刺参育苗棚设有 120 个育苗池,每个育苗池单次投饵量为 50 ~ 1 000 g。由于不同育苗池内幼参生长状况不同,因此单次投饵量间存在较大差异。为满足整个育苗棚内至少一次的投饵量,规定单个育苗池每次投饵量 500 g 进行计算。

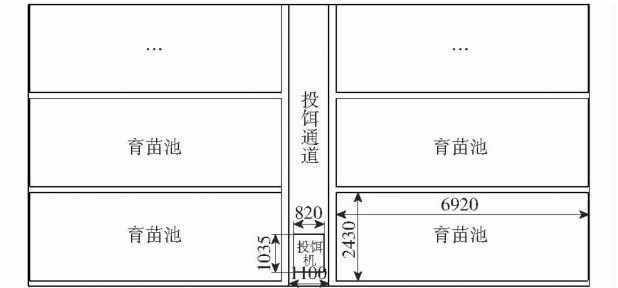


图 1 投饵环境示意图

Fig. 1 Schematic of feeding environment

表 1 饵料物理性质参数

Tab. 1 Physical property parameters of feed

参数	数值
海泥密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 776
海泥粒径/ μm	106
海泥含量/%	50
混合液黏度/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	3.33×10^{-3}
混合液密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 200

投饵机结构如图 2 所示,主要包括饵料搅拌装置、饵料投放装置和行进装置。

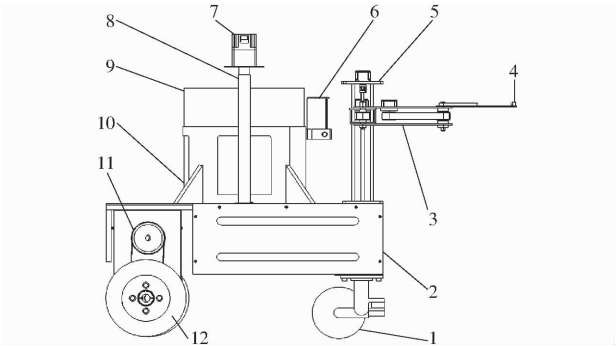


图 2 投饵机结构
Fig.2 Structure of feeding device

1. 减震式万向轮 2. 机架 3. 折叠式伸缩机构 4. 喷嘴 5. 滚珠丝杆模组 6. 泥浆泵 7. 搅拌电机 8. 搅拌电机支撑架 9. 搅拌槽 10. 搅拌槽底座 11. 驱动轮同步带轮 12. 驱动轮

饵料搅拌装置由搅拌槽、搅拌桨、底座以及搅拌架组成,搅拌槽采用平底圆柱形,高度与直径均为 450 mm。将搅拌槽壁面加设 4 块半径为 22.5 mm 的半圆管形扰流板。选择 45°下推式四斜叶搅拌桨,桨叶直径 270 mm、宽度 20 mm。搅拌架设计为门型结构,上端与下端垂直安装且总高度可调。

饵料投放装置由 24 V 泥浆泵、投饵管、锥形扩散喷嘴以及折叠式伸缩机构组成。折叠式伸缩机构由滚珠丝杆模组与伸缩机构组成,选择 SUFR1204-3 型滚珠丝杠,丝杆长度 450 mm。两级同步带传动改变投饵角度,经过滚珠丝杆及折叠式伸缩机构可控制喷嘴投饵高度和角度,实现投饵方向多变,投饵角度灵活可控。

行进装置由整机机架、驱动轮以及减震式万向轮组成。动力源选择和利时 24 V 80LCB075 型低压伺服电机,动力传递选择铝合金 BF 型同步带轮。投饵机主要参数见表 2。

表 2 投饵机主要参数

Tab.2 Main parameters of feeding machine

参数	数值
喷嘴高度/mm	920
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 534×820×1 178
机架尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 035×780×250
低压伺服电机电压/V	24
BF 型同步带轮/(mm×mm)	Φ120×40

1.2 工作原理

投饵机主要用于刺参饵料预加工与饵料投放,依据对刺参养殖基地实地调研确定其基本工作流程:将海泥与海水按照一定比例加进搅拌装置,对海泥与海水进行搅拌,形成浓度均匀且符合养殖投放标准的饵料混合液;饵料投放装置通过

投饵管将饵料混合液吸入,使用投放装置将饵料混合液精准投放育苗池。行进装置用于承载搅拌与投饵机构,并按指令沿投饵通道运行,实现定点投饵。

2 饵料搅拌装置搅拌均匀性分析

2.1 固-液搅拌悬浮临界转速

固-液搅拌悬浮临界转速是搅拌容器内固体颗粒全部处于悬浮状态时搅拌桨所需的最小转速^[18]。悬浮临界转速与固体颗粒本身尺度、几何形状以及密度、液体浓度、液体黏度等相关,并与搅拌桨结构形状有关。

根据 Zwietering 关联式^[19]

$$n_c = \left\{ \frac{\pi(D^2 - T^2)}{2.2T^3 \left[1 + \frac{0.16(D^2 + T^2)}{T^2} \right]} \right\}^{\frac{g}{9(\rho_s - \rho)} d_s^{0.1} T^{0.2} f(c)}$$

(1)

其中 $f(c) = 0.35(1 - c)^{\frac{1}{3}}$

(2)

- 式中
- n_c ——悬浮临界转速,r/min

n_1 ——实际搅拌转速,r/min

n_2 ——参考转速,r/min

D ——槽体直径,m

T ——搅拌桨直径,m

d_s ——固体颗粒粒径,m

ρ_s ——固体颗粒密度,kg/m³

c ——质量浓度,kg/m³

g ——重力加速度,m/s²

ρ ——液体密度,kg/m³

得 $n_c = 67$ r/min,由于部分固体颗粒粒径超过 106 μm,为确保所有固体颗粒完全悬浮,将临界悬浮转速按 1.5 倍安全系数提升为 100.5 r/min,并以 100 r/min 作为搅拌桨设计的基准转速。

2.2 均匀性分析

为探究 45°下推式四斜叶搅拌桨与半圆管形状扰流板搅拌槽搅拌组合机构饵料搅拌均匀性变化规律,综合上述内容,选择搅拌装置在搅拌桨转速为 75、100、125、150、175 r/min 进行饵料搅拌仿真分析,并寻找合理的试验取样区域。

为研究饵料搅拌过程的均匀性变化规律,引入局部海泥颗粒含量概念,将其定义为搅拌槽内某一点或某一截面海泥颗粒平均含量。首先选取沿 Y 轴方向高度分别为 130、70、10、-60、-115 mm 的 5 个圆形横截面作为取样面(以搅拌桨末端为零点),绘制搅拌槽内各相体积占比图和圆形横截面图,如图 3 所示。然后借助 Fluent 软件^[20],获取各取样截

面的局部颗粒含量及海泥体积分数分布趋势。最后根据各取样截面的局部颗粒含量计算各截面基于面积加权的平均颗粒含量。

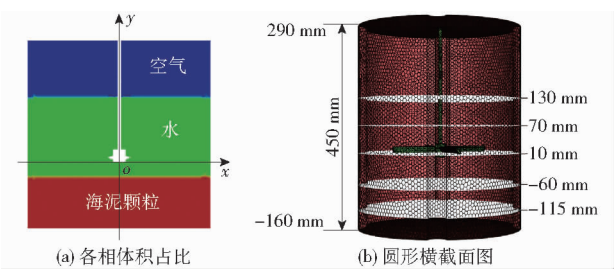


图 3 搅拌槽模型
Fig. 3 Stirring tank model

根据搅拌槽中海泥局部颗粒含量变化趋势并结合海泥体积分数变化云图(图 4),经分析可知,搅拌时搅拌槽底部海泥在 45°下推式搅拌桨产生的“双循环”轴向流作用下发生悬浮,实现海泥与水的充分、均匀混合。

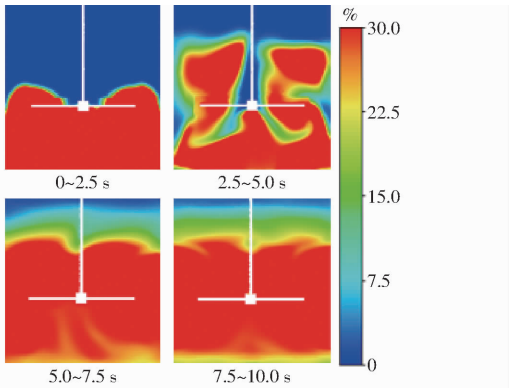


图 4 海泥体积分数变化云图

Fig. 4 Cloud maps of variation in volume fraction of sea mud

通过仿真得到不同转速条件下搅拌槽内不同高度横截面的海泥局部颗粒含量分布,结果如图 5 所示。由图 5 可知,在其他参数保持一致的条件下,随着横截面高度增加,海泥局部颗粒含量呈逐渐下降

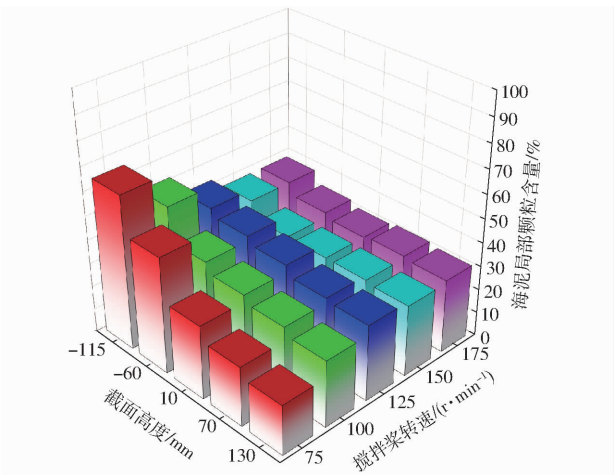


图 5 不同转速下圆形横截面海泥局部颗粒含量

Fig. 5 Local particle content of circular cross-section sea mud at different rotating speeds

趋势;在高度 70 ~ 130 mm 区间内,当搅拌桨转速为 75 r/min 时,海泥局部颗粒含量变化率为 16%;转速为 100 r/min 时,变化率为 9.7%;其余 3 个转速条件下,变化率均约为 3%,表明颗粒含量变化趋于稳定。基于该分布特性,为保障取样代表性与数据可靠性,并且为了保证投饵管入口处的海泥局部颗粒含量均匀且符合海泥颗粒含量标准值要求,选择该稳定区间作为搅拌试验的取样区域。

通过对饵料搅拌装置理论计算与仿真模拟,系统分析了混合均匀性。结果表明,装置临界转速确定为 100 r/min,并据此给出了转速取值的参考范围;同时明确有效取样区域为 70 ~ 130 mm。为保证饵料投放效果,还需对饵料投放装置进行优化设计。

3 饵料投放装置喷嘴设计

3.1 投饵喷嘴设计

投饵喷嘴是刺参饵料投饵装置关键部件,喷嘴结构对投饵效果至关重要。锥形喷嘴结构参数主要包括入口段长度 L_1 、入口直径 D_1 、收缩段长度 L_2 、收缩角 α_1 、喉管长度 L_3 、喉管直径 d 、喷射角 α_2 、喷射段长度 L_4 。锥形喷嘴结构如图 6 所示。

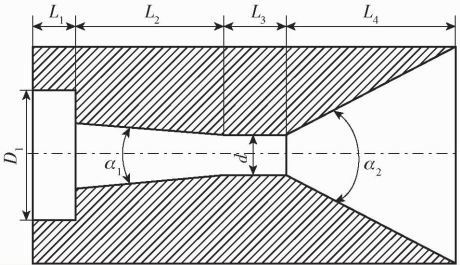


图 6 锥形喷嘴结构

Fig. 6 Conical nozzle structure

锥形喷嘴水动力设计参数包括射流流量、流速等,为计算得到喷嘴水动力参数,需对一定条件下的因素进行理想化处理^[21-22]:假设刺参饵料不可压缩,且密度为理想液体($\rho = 1\ 200\text{ kg/m}^3$,温度为 15℃);投饵管道内流体流速稳定且无阻碍。根据射流理论,对连续射流,取喷嘴出口内外 2 个截面运用伯努利方程,忽略高度差影响,得

$$\frac{P_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} \tag{3}$$

式中 P_1 、 P_2 ——喷嘴出口截面内外静压力,Pa
 v_1 、 v_2 ——喷嘴出口截面内外流体平均流速, m/s

ρ_1 、 ρ_2 ——喷嘴出口截面内外流体密度,kg/m³
在所取 2 个截面间应用连续方程可得

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 \tag{4}$$

其中

$$\begin{cases} A_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} \\ A_2 = \frac{\pi d_2^2}{4} \end{cases} \quad (5)$$

式中 A_1 ——喷嘴流道内横截面积, m^2
 A_2 ——喷嘴流道外横截面积, m^2
 d_1 ——喷嘴流道内横截面直径, m
 d_2 ——喷嘴流道外横截面直径, m

对于工程应用水射流, 因为横截面积快速收缩 ($d_1 > d_2$), 并假设 $\rho_1 = \rho_2$ 。由式(3) ~ (5) 可得

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(P_2 - P_1)}{\rho \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 \right]}} \quad (6)$$

根据式(6)可知, 流速增大源于截面积收缩导致的流动加速, 具体表现为在通道截面积收缩的情况下, 流体速度随压力的降低而增加。当流体密度恒定 ($\rho_1 = \rho_2$) 且截面压缩比 $\frac{d_2}{d_1} < 1$, 式(6)可简化为工程常用形式

$$v_2 = \sqrt{\frac{2P}{\rho}} \quad (7)$$

式中 P ——射流压力, MPa
已知射流流速 v , 可用 $Q = vA$ (A 为喷嘴流道横截面积, Q 为实际流量) 算出射流流量、喷嘴直径以及压力间关系, 即

$$d = \sqrt{\frac{4Q_i}{\pi \sqrt{\frac{2P}{\rho}}}} \quad (8)$$

式中 Q_i ——理论射流流量, L/min
 d ——喷嘴出口直径, mm

由于式(8)中为比实际值大的理论流量, 因此将实际流量 Q_1 与理论流量 Q_i 之比定义为流量系数 μ , 得

$$Q_1 = \mu Q_i \quad (9)$$

式中 μ 表示喷嘴能量传递效率, 喷嘴射流时常取 0.60 ~ 0.62, 根据式(7)、(8)得 $d = 0.64 \sqrt{\frac{Q_1}{\pi \sqrt{\frac{2P}{\rho}}}}$ 。

当水射流流经管道或喷嘴时, 射流会产生能量消耗, 因此应考虑流量系数 μ , 流量系数越大, 能量传递效率越高, 相反则越低。

综上所述, 考虑到射流压力以及射流流量等消耗, 结合现有对锥形喷嘴研究表明, 喷射段喷射角 α_2 取 $10^\circ \sim 60^\circ$, 喷嘴喉管长度 L_3 取 1.5 ~ 14 mm, 收缩角 α_1 取 13.5° 。因此, 设计喷嘴结构参数为入口段长度 L_1 为 3 mm、入口直径 D_1 为 4 mm、收缩段长度

L_2 为 5 mm、收缩角 α_1 为 13.5° 、喉管长度 L_3 为 4 mm、喉管直径 d 为 2 mm、喷射角 α_2 为 60° 、喷射段长度 L_4 为 5 mm。

3.2 最优喷嘴类型仿真

为探究不同类型喷嘴效果, 以锥形扩散喷嘴、突变锥形扩散喷嘴、锥形无扩散喷嘴、锥形圆柱扩散喷嘴 4 种为模型, 将 4 种不同类型喷嘴置于相同仿真环境中, 设置相同入口压力为 4.65 MPa、出口压力为 0.1 MPa (常温下水的饱和蒸气压为 3 540 Pa), 选择相同的数值模型进行模拟计算^[23-25]。喷嘴内流场速度云图与轴向流速变化曲线如图 7、8 所示。

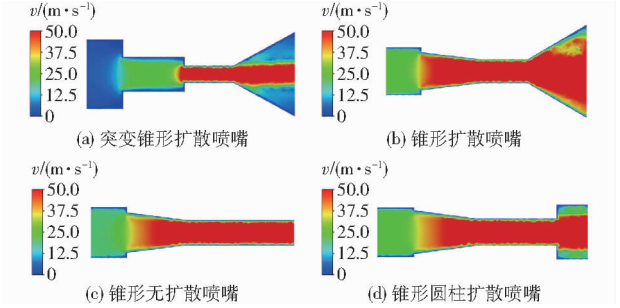


图 7 不同类型喷嘴内流场速度云图
Fig. 7 Velocity cloud diagrams of internal flow fields of different types of nozzles

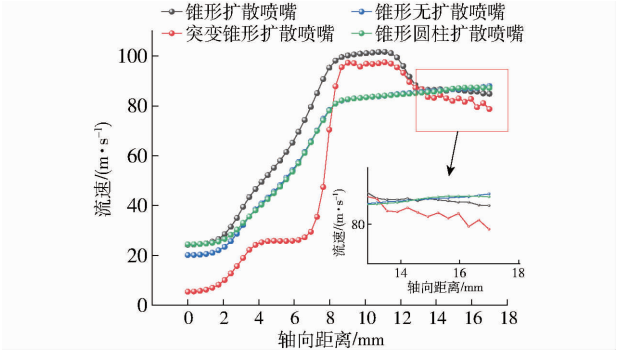


图 8 轴向流速变化曲线
Fig. 8 Axial flow velocity variation curves

由图 7 可得, 4 种类型喷嘴射流影响区域均发生在喷嘴喉管与喷射段的缩颈处。如图 7a、7b 所示, 当高速流体流向喷嘴扩散段时, 流场会随着高速射流轴向中心向两侧扩散, 最终消散。其中锥形扩散喷嘴高速射流影响区域最广泛, 基本充满整个喷嘴出口, 突变锥形扩散喷嘴入口处以及出口处存在大范围的低速区, 不利于射流在喷嘴内部的加速作用。如图 7c、7d 所示, 锥形无扩散喷嘴与锥形圆柱扩散喷嘴由于结构类型上与锥形扩散喷嘴类似, 因此喷嘴内流场存在大范围的高速射流区域, 锥形圆柱扩散喷嘴在喷嘴出口处存在小范围的低速区。

轴向距离是指沿喷嘴轴线方向长度。根据图 8 所示, 4 种喷嘴内部速度变化趋势基本一致, 射流流速均沿轴向逐渐增大, 由低速发展至高速。由于喷

射效果主要取决于喷射段速度,而突变锥形扩散喷嘴在该区间的流速明显较低,因此首先排除。结合图 9 可知,锥形扩散喷嘴在出口处形成了更广泛的高速区域,有助于饵料被有效地喷射至规定位置。因此,综合流动特性与喷射性能,锥形扩散喷嘴为较优选择。

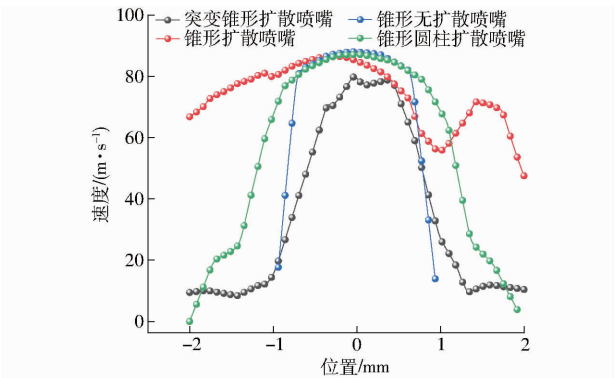


图 9 不同喷嘴出口处的速度分布
Fig. 9 Velocity distribution at different nozzle outlets

综上所述,锥形扩散喷嘴具有独特的扩散段结构,可形成更广泛的高速区分布、更高的轴向流速及更大的射流动能,射流性能优异,最适合饵料投放装置的应用需求。根据仿真结果,初步选择锥形扩散喷嘴,为满足投饵需要,需对锥型扩散喷嘴结构参数进一步优化设计。

3.3 锥形扩散喷嘴结构参数单因素试验设计与分析

3.3.1 喷射角对射流效果的影响

为加强锥形喷嘴的射流效果,提高投饵效率,开展喷射角对射流效果影响的单因素试验。

当入口直径 D_1 取 4 mm、入口段长度 L_1 为 3 mm、收缩角 α_1 取 13.5°、喉管直径 d 为 2 mm、喉管长度 L_3 为 4 mm、喷射段长度 L_4 为 5 mm 时,喷射角 α_2 分别取 60°、50°、40°、30°进行喷嘴射流效果仿真研究。根据结构参数建立模型进行 4 种不同喷射角 α_2 对喷嘴射流效果的仿真分析。

不同喷射角条件下,仿真模拟得到的锥形扩散喷嘴内流场速度云图与轴向流速曲线如图 10、11 所示。在其余条件相同,喷射角不同的情况下,图 10a ~ 10d 喷嘴入口段云图颜色相似,表明改变喷射角对喷嘴入口段流速影响较小。收缩段与喉管段云图高速区影响范围一致,云图颜色变化区域集中在喷射角处,从速度云图可看出,喷射角为 50°时高速区影响范围最广,基本充满整个喷射段。喷射角为 60°时高速区影响范围最小,喷射角为 40°与 30°时高速区影响范围基本一致,喷射角高速区影响范围由大到小依次为 50°、30°、40°、60°。

由图 11a 可知,相同条件下,改变喷射角,喷嘴射流轴向流速变化趋势相同,但收缩段与喉管处流

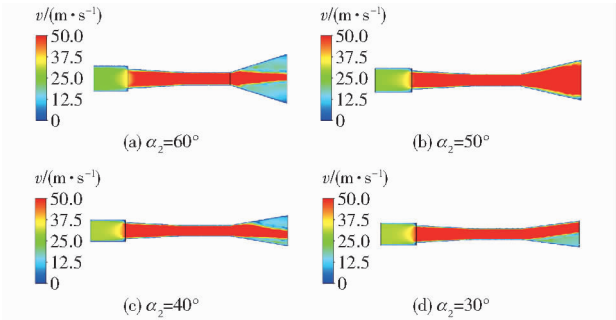


图 10 不同喷射角喷嘴内流场速度云图
Fig. 10 Velocity cloud diagrams of internal flow field in nozzles with different spray angles

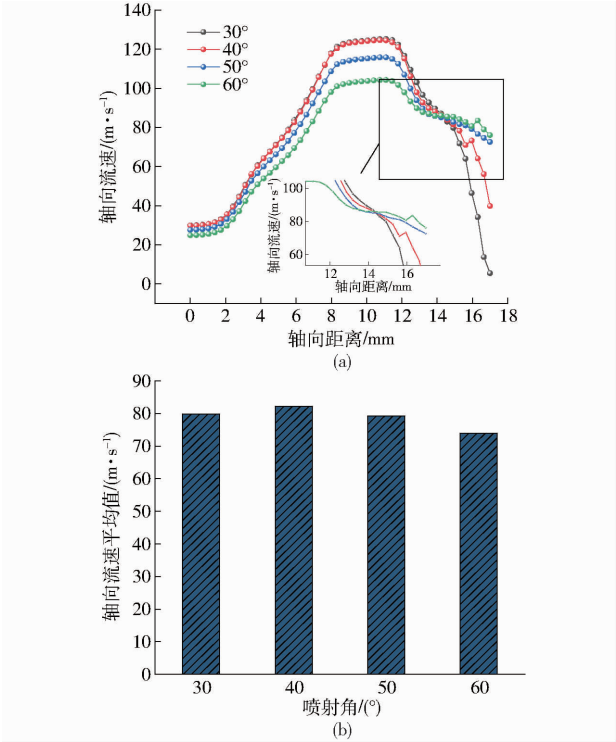


图 11 不同喷射角喷嘴轴向流速与平均值
Fig. 11 Axial velocity curves of nozzles with different injection angles and their average values

速存在较大差异,射流流速由大到小依次为 30°、40°、50°、60°。各喷射角在喷射段内的射流流速变化幅度差异显著,由大到小依次为 60°、50°、40°、30°,原因在于喷射角度方向不一致。图 10 显示,30°喷射角因方向指向右上方,致使其轴线上射流量小;反之,其余 3 种喷嘴轴线上射流量充足,从而导致了最终的流速差异。

由图 11b 可知,4 种喷嘴射流轴向流速平均值变化较小,流速由大到小依次为 40°、30°、50°、60°,喷射角 α_2 为 40°时喷嘴轴向流速最大,最大值为 82.12 m/s,喷射角 α_2 为 60°喷嘴轴向流速最小,最小值为 73.96 m/s,误差为 9.9%。综上所述,当喷射角 α_2 为 40°时,射流轴向流速平均值最大,为喷嘴喷射角设计参数提供参考。因喷射角 60°下的轴向

流速偏低且高速区范围偏小,不满足喷射性能要求,因此排除该水平。

3.3.2 喉管长度对海泥颗粒含量的影响

在入口直径 D_1 取 4 mm、入口段长度 L_1 为 3 mm、压缩比为 ε 为 2.53、喉管直径 d 为 2 mm、喷射段长度 L_4 为 5 mm、喷射角 α_2 为 30° 时,喉管长度 L_3 分别取 3、4、5、6 mm 4 个水平进行喷嘴海泥颗粒含量仿真研究,每个水平进行 5 次重复试验。根据结构参数建立模型进行 4 种不同喉管长度 L_3 对喷嘴海泥颗粒含量影响的仿真分析。试验结果如表 3 所示,方差分析如表 4 所示。

表 3 不同喉管长度下海泥颗粒含量

Tab.3 Content of marine mud particles in different throat pipe lengths					
喉管长度/mm	海泥颗粒含量/%				
	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4	试验 5
3	32.18	32.74	32.38	32.63	31.98
4	32.96	32.43	33.11	32.7	32.86
5	33.03	32.83	32.76	32.47	32.51
6	32.94	32.82	32.58	32.78	32.45

表 4 喉管长度方差分析

Tab.4 Analysis of variance for throat pipe length				
方差来源	平方和	自由度	均方	F
因素	0.534	3	0.178	2.74
误差	1.035	16	0.065	
总和	1.569	19		

查表得 $F_{0.05}(3,16) = 3.24, F < F_{0.05}(3,16)$, 可得喉管长度对海泥颗粒含量无显著影响。

3.3.3 压缩比对海泥颗粒含量的影响

在入口直径 D_1 取 4 mm、入口段长度 L_1 为 3 mm、喉管长度 L_3 为 4 mm、喉管直径 d 为 2 mm、喷射段长度 L_4 为 5 mm、喷射角 α_2 为 30° 时,压缩比 ε 分别取 2.03、2.28、2.53、2.78 4 个水平进行喷嘴海泥颗粒含量仿真研究,每个水平进行 5 次重复试验。根据结构参数建立模型进行 4 种不同压缩比 ε 对喷嘴海泥颗粒含量影响的仿真分析。试验结果如表 5 所示,方差分析如表 6 所示。

表 5 不同压缩比下海泥颗粒含量

Tab.5 Content of sea mud particles with different compression ratios					
压缩比	海泥颗粒含量/%				
	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4	试验 5
2.03	32.99	33.37	33.52	33.04	33.53
2.28	32.61	32.97	33.44	33.35	32.69
2.53	33.09	33.11	32.75	32.75	32.48
2.78	32.87	32.84	32.78	32.89	32.84

表 6 压缩比方差分析

Tab.6 Analysis of variance for compression ratio				
方差来源	平方和	自由度	均方	F
因素	0.677	3	0.226	3.22
误差	1.122	16	0.070	
总和	1.799	19		

查表得 $F_{0.05}(3,16) = 3.24, F < F_{0.05}(3,16)$, 可得压缩比对海泥颗粒含量无显著影响。

3.4 锥形扩散喷嘴结构参数正交试验设计与分析

对锥形扩散喷嘴进行结构参数正交试验设计。以养殖池海泥颗粒含量为主要指标,鉴于入口直径 D_1 、喉管直径 d 、喷射角 α_2 是调控流场能量输运、颗粒吸入与分离行为的关键流体动力特性,本研究将其选为试验因素,每个因素取三水平进行正交试验设计。选用正交试验 $L_{27}(3^{13})$ 进行正交试验。正交试验因素水平如表 7 所示,正交试验结果如表 8 所示, A 、 B 、 C 为因素水平值。

表 7 正交试验因素水平

水平	因素		
	入口直径/mm	喉管直径/mm	喷射角/($^\circ$)
1	5	1.5	50
2	6	2.0	40
3	7	2.5	30

正交试验方差分析见表 9,通过 F 检验可知,投饵装置饵料喷洒均匀性的主要影响因素为喉管直径,其余影响因素对饵料喷洒均匀性影响不显著。由于试验指标是海泥颗粒含量,越接近标准海泥颗粒含量越好,交互作用对结果影响不显著。所以最优方案为 $A_1B_3C_3$,即入口直径 D_1 取 5 mm、喉管直径 d 取 2.5 mm、喷射角 α_2 取 30° ,海泥含量最接近标准海泥颗粒含量(50%)。

4 刺参投饵机试验

依据优化设计的刺参饵料搅拌投放一体机结构参数,设计加工样机,进行试验研究。为节约成本、提高投饵效果,主要进行了不同转速、不同类型喷嘴对投饵效果的影响试验;同时,根据实际应用需求还对不同射程和不同饵料混合物浓度进行了投饵试验。

为更加直观地观察搅拌槽内饵料沉淀情况以及搅拌时流体变化,搅拌槽采用透明亚克力材料制作。由于搅拌桨长时间浸在海水中,为延长搅拌桨寿命,选择不锈钢 316 材料制作,搅拌电机选择 120 W 无刷电机,设有调速器可进行电机调速,调速范围为 0 ~ 500 r/min,电机额定转矩为 3.15 N·m。

表 8 正交试验设计与结果

Tab.8 Orthogonal experiment design and results

试验 序号	因素									海泥颗粒 含量/%
	<i>A</i>	<i>B</i>	$(A \times B)_1$	$(A \times B)_2$	<i>C</i>	$(A \times C)_1$	$(A \times C)_2$	$(B \times C)_1$	$(B \times C)_2$	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	22
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	42
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	35
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	29
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	33
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	38
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	37
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	58
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	44
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	28
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	35
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	32
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	37
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	39
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	43
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	42
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	26
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	36
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	29
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	34
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	33
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	32
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	35
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	30
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	42
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	38
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	57
K_1^2	114 244	84 100	53 992. 74	126 025	88 804	93 636	94 864	97 344	104 329	986
K_2^2	101 124	99 856	110 224	90 000	115 600	129 600	120 409	119 716	117 649	
K_3^2	108 900	144 400	125 316	109 561	121 104	102 400	109 561	107 584	102 400	
<i>Q</i>	36 029. 78	36 484. 00	36 171. 11	36 176. 22	36 167. 56	36 181. 78	36 092. 67	36 071. 56	36 042. 00	
<i>S</i>	22. 52	476. 74	332. 81		160. 3	259. 93		99. 04		

表 9 正交试验方差分析					
Tab.9 Orthogonal experiment variance analysis					
方差来源	离差平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
<i>A</i>	22. 52	2	11. 26	0. 27	0. 771 4
<i>B</i>	476. 74	2	238. 37	5. 65	0. 026 7 *
<i>C</i>	160. 30	2	80. 15	1. 90	0. 215 3
<i>AB</i>	359. 11	4	89. 78	2. 13	0. 173 6
<i>AC</i>	246. 22	4	61. 56	1. 46	0. 301 9
<i>BC</i>	123. 11	4	30. 78	0. 73	0. 594 6
误差	337. 77	8	42. 22		

注：* 表示影响显著(0. 01 ≤ *P* < 0. 05)。

4.1 不同转速投饵试验

为探究高度 70 ~ 130 mm 区间海泥含量能否满足投饵标准,设置搅拌桨转速为 75、100、125、150、175 r/min 进行试验,选择距离搅拌槽底部高度 70 ~

130 mm 区间进行取样,记录取样数据。由图 12 可知,随着搅拌桨转速增大,海泥含量不断升高,以临界悬浮转速为标准,转速低于 100 r/min 时,海泥含量距离标准值相差 16. 75 个百分点,转速为

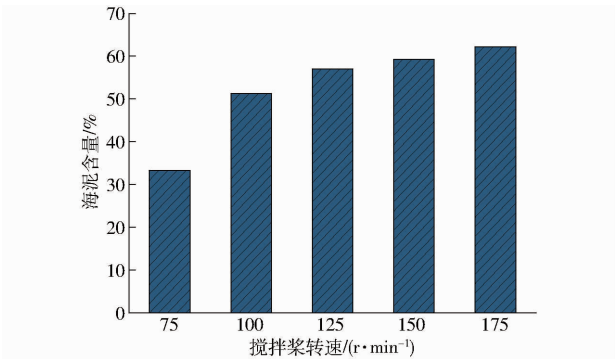


图 12 不同转速下海泥含量

Fig. 12 Sea mud content at different rotational speeds

100 r/min 时,海泥含量距离标准值相差 1.25 个百分点,证明高度 70 ~ 130 mm 区间满足投饵管入口处海泥含量均匀的要求。但随着转速增大,取样区间中海泥含量逐渐上升,说明在底部的海泥颗粒发生上浮,导致上端取样区间的海泥含量上升。

综合比较 5 种转速下海泥含量可知,45°下推式四斜叶搅拌桨与半圆管形状扰流板搅拌槽搅拌组合机构,当搅拌桨转速为 100 r/min 时,海泥含量为 51.25%,搅拌效果好,功率消耗 40 W,节约能源,经济效益更高。

4.2 不同喷嘴类型投饵试验

在 3.2 节最优喷嘴仿真分析结果得出锥形扩散喷嘴更符合饵料投放需求,从饵料覆盖面积和投饵射程验证锥形扩散喷嘴是否为最优喷嘴类型。根据实际养殖需求,喷嘴工作射程应为 3 ~ 5 m;在此射程下,单次喷射中,至少有 60% 的饵料应分布于以理论落点为中心、直径为 0.3 m 的圆形靶区内。

(1) 饵料覆盖面积

在投饵操作过程中,需将饵料精准投放至育苗池中间位置,这有利于饵料在池中形成循环。从流体动力学与物质扩散原理角度看,在饵料投放瞬间,其覆盖面积越大,越能加速在水体中的循环扩散进程。基于此,饵料覆盖面积可被视作衡量投饵装置性能的核心要素之一。

为更好地观察与测算饵料喷射覆盖面积,采用纸张印迹法。操作时,在喷嘴射流方向铺设一层吸水性良好的纸张。开启喷嘴,射流冲击纸张,水的渗透作用会在纸张上留下覆盖印迹。待纸张干燥,将印迹描绘在坐标纸上,通过统计坐标纸方格数量估算覆盖面积。图 13 为试验标靶纸。

由图 14 可知,锥形扩散喷嘴覆盖面积比例高达 90.0%,锥形无扩散喷嘴仅为 25.9%,二者相差 64.1 个百分点。因此可认为喷嘴优化结果对饵料覆盖面积提升具有积极作用。

(2) 投饵射程

投饵作业时,需将饵料均匀投放至育苗池中间位置处。这是由于育苗池正中心位置设置有循环泵,该循环泵能驱动整个育苗池内的海水形成循环流动。将饵料精准投放至中间位置,饵料便可借助海水循环,均匀扩散至整个育苗池,可提升幼参的摄食效率,有利于幼参生长发育。

刺参育苗池长 6.92 m,因此投饵射程范围为 3 ~ 5 m 即可,超出此范围则不利于循环流动。设计每种喷嘴试验次数为 5 次,共 20 次射程试验取平均值。投饵距离试验结果如图 15 所示。

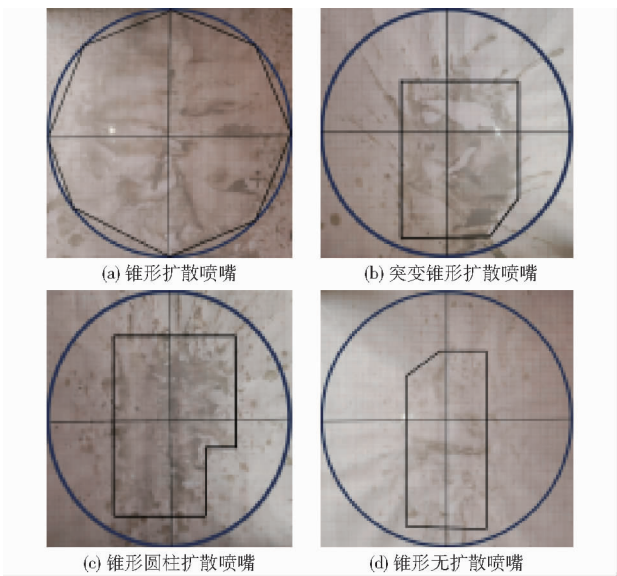


图 13 试验标靶纸

Fig. 13 Target test paper

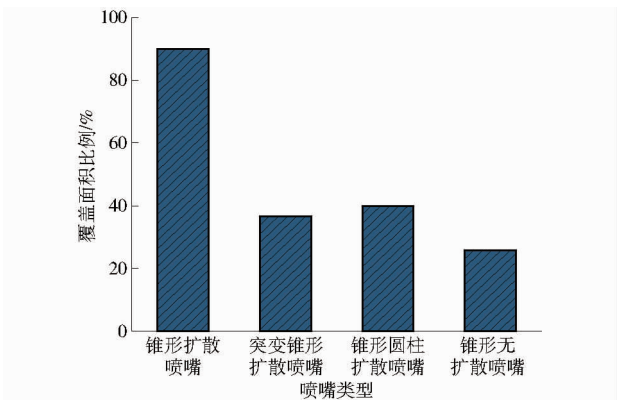


图 14 标靶覆盖面积

Fig. 14 Target coverage area

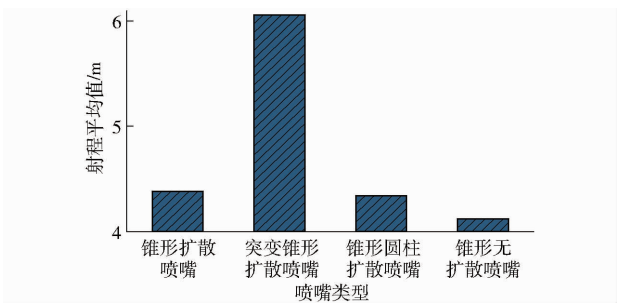


图 15 喷嘴射程平均值

Fig. 15 Average nozzle range

由图 15 可知,突变锥形扩散喷嘴试验值最高(均值达 6.06 m),显著超出刺参幼苗摄食适宜的 3 ~ 5 m 射程范围,不利于幼苗摄食。锥形扩散喷嘴平均射程 4.38 m,锥形圆柱扩散平均射程 4.34 m,锥形无扩散平均射程 4.12 m,三者均值均处于 3 ~ 5 m 合理区间内。

4.3 不同射程投饵试验

对饵料覆盖面积最优锥形扩散喷嘴进行饵料投放均匀性试验分析。试验方法为:测出空白纸张质

量 M_1 为 21.2 g, 喷嘴投饵后对湿标靶进行称量得到质量 M_2 , 将标靶自然晾干后进行称量得质量 M_3 。投饵饵料混合液质量为 M_2 与 M_1 之差 C_1 , 海泥质量为 M_3 与 M_1 之差 C_2 。两差值之比则为海泥含量。

采用上文所述等效替代法, 以喷嘴距离标靶 3.5、4、4.5 m 为投饵距离, 每个距离进行 5 次重复试验取平均值, 分析最优投饵距离。试验结果如图 16 所示。

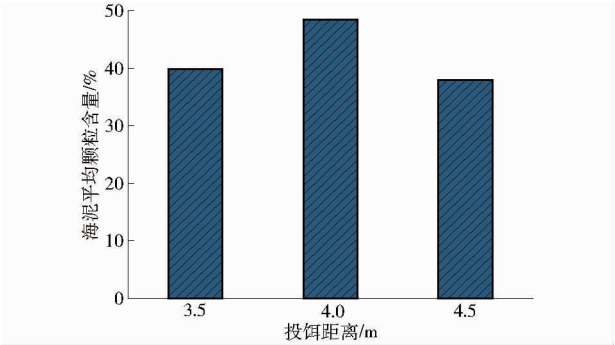


图 16 海泥平均颗粒含量

Fig. 16 Average particle content of sea mud

由图 16 可知, 选用不同投饵距离 (3.5、4.0、4.5 m) 时测得海泥平均颗粒含量为 39.96%、48.52%、37.96%, 分析得: 当投饵距离为 3.5 m 时, 由于使用的是锥形扩散喷嘴 (其平均射程为 4.38 m), 此距离相对较近。加之锥形射流尚未充分扩散, 致使射流冲击动能较大, 大部分饵料未能附着于标靶, 因此测得的海泥颗粒含量较少。当投饵距离为 4.5 m 时, 此时该距离相对于饵料射流平均射程 (4.38 m) 较远, 导致射流射程未能达到投饵距离, 因此标靶覆盖面积小, 饵料附着在标靶上的质量小, 导致海泥颗粒含量较少。当投饵距离为 4 m 时, 海泥平均颗粒含量为 48.52%, 与海泥含量标准值 50% 相差 1.48 个百分点。海泥含量在投饵后略有下降, 可归因于测量误差与饵料在机械结构中的沉积、损耗等因素, 故而该分析符合实际情况。

综上所述, 当投饵距离为 4 m 时, 海泥平均颗粒含量接近标准海泥颗粒含量, 因此选择投饵距离为 4 m 进行投饵作业, 符合饵料均匀性要求且满足饵料浓度要求, 可以达到实际投饵作业要求。

4.4 不同饵料混合物浓度投饵试验

为进一步验证投饵装置可靠性与实用性, 保持前文所述试验条件不变, 采用控制变量法, 通过改变饵料与海水比例进而改变饵料混合液浓度, 然后对投饵距离以及投饵速度进行试验。其中投饵速度以搅拌槽中饵料液面下降 100 mm, 体积约为 0.02 m³ 所用时间为计算标准。选用饵料混合液浓度为 50%、60%、70%, 浓度越高表示海泥颗粒含量越高, 饵料

混合液状态越黏稠。试验结果如图 17 所示。

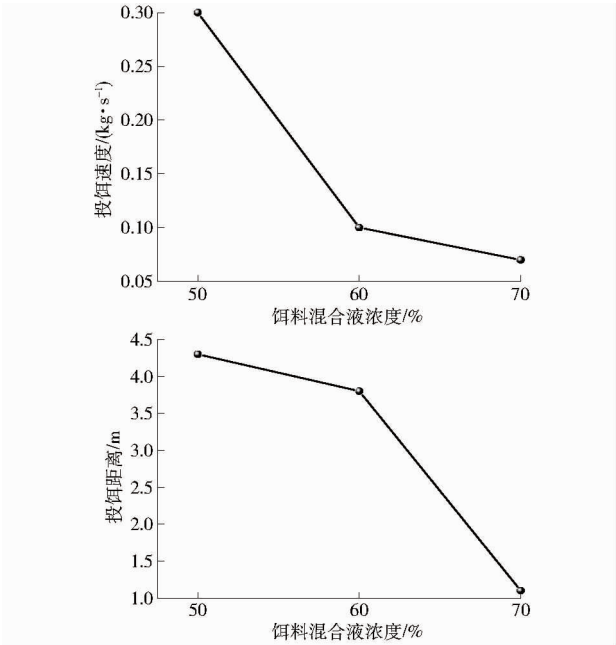


图 17 不同饵料混合液浓度下投饵速度与投饵距离变化曲线

Fig. 17 Curves changes in feeding speed and feeding distance under different concentrations of bait mixture solutions

由图 17 得知, 当其余试验条件不变, 投饵速度与投饵距离随着饵料混合物浓度上升均出现下降趋势。投饵速度最大值 0.3 kg/s 与最小值 0.07 kg/s 相差 77%, 差距较大, 说明改变饵料混合物浓度会极大地降低投饵速度。投饵距离最大值 4.3 m 与最小值 1.1 m 之间相差 74%, 差距较大, 说明改变饵料混合物浓度会极大地降低投饵距离。饵料混合物浓度对投饵效果造成了很大影响, 所以搅拌均匀很有必要。综上所述, 在实际养殖中应保证合适的饵料混合物浓度, 提高投饵效率以及投饵位置准确性。

5 结论

(1) 以悬浮临界转速 $n_c = 100$ r/min 为基准, 设置了 5 种搅拌桨转速。搅拌系统采用 45° 下推式四斜叶搅拌桨与半圆管形扰流板相结合配置。通过对不同转速下搅拌槽内海泥在圆形横截面上的局部颗粒含量分析可知, 在高度 70 ~ 130 mm 区间内, 局部颗粒含量趋于稳定。为使试验区间海泥含量满足投饵管入口处海泥含量均匀的要求, 开展不同转速下的投饵试验, 结果表明, 当搅拌桨转速为 100 r/min 时, 试验样品中海泥含量为 51.25%, 与标准值 50% 相差 1.25 个百分点, 饵料分布均匀性满足养殖作业要求。结合海泥体积分数分布云图, 明确了局部颗粒含量变化趋势。

(2) 对 4 种喷嘴内部轴向流速的模拟分析进行

选型,确定锥形扩散喷嘴为最优结构。经单因素试验和正交试验优化其结构参数,得出最佳组合为入口直径 D_1 为 5 mm,喉管直径 d 为 2.5 mm,喷射角 α_2 为 30°。

(3)进行搅拌桨、搅拌槽等关键零部件选型和投饵样机试验。结果表明:优化后锥形扩散喷嘴饵

料覆盖面积比例为 90%,平均投饵射程为 4.38 m,投饵速率为 0.3 kg/s。在投饵距离 4 m 处,海泥颗粒含量为 48.52%,与标准含量 50% 相差 1.48 个百分点。变浓度投饵试验进一步表明,饵料混合物浓度需严格符合标准要求,且投饵前需充分搅拌均匀,以保证投饵效果良好。

参 考 文 献

[1] 刘世晶,李国栋,刘晃,等. 中国水产养殖装备发展现状[J]. 水产学报,2023,47(11):190–203.
LIU Shijing, LI Guodong, LIU Huang, et al. Current development status of aquaculture equipment in China[J]. Journal of Fisheries of China, 2023, 47(11): 190–203. (in Chinese)

[2] 吴侃侃,李青生,黄海萍,等. 我国深远海养殖现状及发展对策[J]. 海洋开发与管理, 2022, 39(10): 11–18.
WU Kankan, LI Qingsheng, HUANG Haiping, et al. Deep-sea aquaculture progress and development measures in China[J]. Ocean Development and Management, 2022, 39(10): 11–18. (in Chinese)

[3] 陈燕婷,杨求华,刘燕飞,等. 福建海参本土化育苗发展现状及对策分析[J]. 中国水产,2024(1):76–79.
CHEN Yanting, YANG Qihua, LIU Yanfei, et al. Current status and countermeasures of localized seedling rearing of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) in Fujian Province[J]. China Fisheries, 2024(1): 76–79. (in Chinese)

[4] 史兵,赵德安,刘星桥,等. 工厂化水产养殖智能监控系统设计[J]. 农业机械学报,2011,42(9):191–196.
SHI Bing, ZHAO Dean, LIU Xingqiao, et al. Design of intelligent monitoring system for aquaculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011, 42(9): 191–196. (in Chinese)

[5] 刘晃,黄文超,崔璨. 中国深远海养殖产业发展形势与对策[J]. 船舶工程,2024,46(5):16–25.
LIU Huang, HUANG Wenchao, CUI Can. Development situation and countermeasures of Chinese deep-sea aquaculture industry [J]. Ship Engineering, 2024, 46(5): 16–25. (in Chinese)

[6] 董双林,董云伟,黄六一,等. 迈向远海的中国水产养殖:机遇、挑战和发展策略[J]. 水产学报, 2023, 47(3): 1–11.
DONG Shuanglin, DONG Yunwei, HUANG Liuyi, et al. Toward offshore aquaculture in China opportunities, challenges and development strategies[J]. Journal of Fisheries of China, 2023, 47(3): 1–11. (in Chinese)

[7] XU Q, WU P L, HUANG D J, et al. Sea ranching feasibility of the hatchery-reared tropical sea cucumber single tuberculosis moth salamander in an inshore coral reef island area in south China sea (Sanya, China) [J]. Frontiers in Marine Science, 2022,9: 918158.

[8] 尹宝全,曹闪闪,傅泽田,等. 水产养殖水质检测与控制技术研究进展分析[J]. 农业机械学报,2019,50(2):1–13.
YIN Baoquan, CAO Shanshan, FU Zetian, et al. Review and trend analysis of water quality monitoring and control technology in aquaculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 1–13. (in Chinese)

[9] ALANÄRÄ A. The use of self-feeders in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) production[J]. Aquaculture, 1996, 145(1–4): 1–20.

[10] 陈晓龙,田昌凤,杨家朋,等. 高密度养殖池塘自动气力投饲机的设计试验[J]. 渔业现代化, 2016, 43(5): 18–22.
CHEN Xiaolong, TIAN Changfeng, YANG Jiapeng, et al. Research on pneumatic automatic feeding machine for intensive pond aquaculture[J]. Fishery Modernization, 2016, 43(5): 18–22. (in Chinese)

[11] MUTUM D, AMOM M J, CHELLA M P, et al. Artificial intelligence in fisheries and aquaculture: a next-gen fish farming system[R]. Ludhiana: IIPSeries, 2024.

[12] 任同军,李泽群. 一种轨道式刺参育苗用投饵装置: CN209572844U [P]. 2019–11–05.

[13] 王文豪,张宁,李秀梅,等. 一种池塘养殖刺参饵料投喂方法: CN109006598A [P]. 2018–12–18.

[14] 孔宪锐,张卿,李洪波,等. 淡水鱼圈养模式气送式投饲系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(8):152–160.
KONG Xianrui, ZHANG Qing, LI Hongbo, et al. Design and experiment of pneumatic feeding system for freshwater fish in Juanyang mode[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 152–160. (in Chinese)

[15] 郭子淳,黄家悻,王水传,等. 智能投饵船研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):385–396,404.
GUO Zichun, HUANG Jiayi, WANG Shuichuan, et al. Research and prospect of intelligent bait-dropping boat [J]. Transactions of the Chinese society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.1): 385–396,404. (in Chinese)

[16] 赵思琪,丁为民,赵三琴,等. 基于 EDEM–Fluent 的气动式鱼塘投饲机性能优化[J]. 农业机械学报,2019,50(9):130–139.
ZHAO Siqi, DING Weimin, ZHAO Sanqin, et al. Performance analysis and optimization of pneumatic fishpond feeder based on EDEM–Fluent coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 130–139. (in Chinese)

[17] 邱天龙. 刺参生态苗种繁育关键技术原理研究与应用[D]. 广州:中国科学院研究生院(海洋研究所), 2013.
QIU Tianlong. Research and application of key technical principles of sea cucumber (*Apostichopus japonicus selenka*) ecological seed breeding[D]. Guangzhou: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), 2013. (in Chinese)

[18] 张翠勋,李晓光,杨锋苓,等.半圆管挡板搅拌槽内的固液悬浮[J].有色金属(冶炼部分),2023(6):87-94.
ZHANG Cuixun, LI Xiaoguang, YANG Fengling, et al. Solid-liquid suspension in semi-circular-tubular baffled stirred tank[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(6): 87-94. (in Chinese)

[19] ARMENANTE P M, NAGAMINE E, SUSANTO J. Determination of correlation to predict the minimum agitation speed for complete solid suspension in agitated vessels[J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 1998, 76(3): 413-419.

[20] 石鑫,杨豫新,牛长河,等.基于 Fluent 分析的棉田废地膜秸秆分离装置设计[J].江苏农业学报,2023,39(4):1062-1071.
SHI Xin, YANG Yuxin, NIU Changhe, et al. Design of separation device for waste film and straw in cotton field based on Fluent analysis[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2023, 39(4): 1062-1071. (in Chinese)

[21] 陈正寿,黄璐云,杜炳鑫,等.超高压水射流喷头水动力特性研究[J].爆炸与冲击,2022,42(5):158-171.
CHEN Zhengshou, HUANG Luyun, DU Bingxin, et al. Insight of hydrodynamic characteristics related to ultra-high pressure water jet rust removal sprayers[J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(5): 158-171. (in Chinese)

[22] 王新坤,薛子龙,徐胜荣,等.双喷嘴负压反馈射流喷头水力性能研究[J].农业机械学报,2019,50(11):278-284.
WANG Xinkun, XUE Zilong, XU Shengrong, et al. Hydraulic performance of negative pressure feedback jet sprinkler with double nozzles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 278-284. (in Chinese)

[23] DONG W Q, YAO L G, LUO W L. Numerical simulation of flow field of submerged angular cavitation nozzle[J]. Applied Sciences, 2023, 13(1): 613.

[24] 时凤霞,赵健,孙晓光,等.气液两相射流表面清洗流场数值模拟[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(3):960-970.
SHI Fengxia, ZHAO Jian, SUN Xiaoguang, et al. Numerical simulation of surface cleaning flow field for gas-liquid two-phase jet[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(3): 960-970. (in Chinese)

[25] 占凯,张思,唐伟,等.气液两相射流破岩流场数值模拟[J].科学技术与工程,2022,22(23):10034-10041.
ZHAN Kai, ZHANG Si, TANG Wei, et al. Numerical simulation of rock breaking flow field by gas-liquid two-phase jet[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(23): 10034-10041. (in Chinese)

(上接第 140 页)

[16] 权龙哲,佟金,曾百功,等.玉米根茬铲切刀具的滑切刃曲线优化设计[J].农业工程学报,2011,27(12):13-17.
QUAN Longzhe, TONG Jin, ZENG Baigong, et al. Optimization design of sliding cutting edge curve of corn rootstalk cutting tool[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 13-17. (in Chinese)

[17] 黄新平,徐瑞华,黄广杰,等.铲筛组合式生姜收获机设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(5):309-318.
HUANG Xinping, XU Ruihua, HUANG Guangjie, et al. Design and experiment of combined shovel-screen ginger harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5): 309-318. (in Chinese)

[18] 薛向磊,郑航,叶云翔,等.定刀滑切式榨菜收获机设计与试验[J].中国农机化学报,2023,44(6):48-55.
XUE Xianglei, ZHENG Hang, YE Yunxiang, et al. Design and test of a fixed knife sliding cutting mustard harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(6): 48-55. (in Chinese)

[19] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007:914.

[20] 庞声海.关于滑切理论与滑切角的选用[J].华中农学院学报,1982(2):64-69.

[21] 王小波.基于离散元法仿生深松铲的设计与试验研究[D].成都:四川农业大学,2023.
WANG Xiaobo. Design and experimental study of biomimetic deep loose shovel based on discrete element method[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[22] 赵淑红,赵国鹏,冷明新,等.与深松铲互作锯齿式灭茬刀设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(4):151-162.
ZHAO Shuhong, ZHAO Guopeng, LENG Mingxin, et al. Design and testing of serrated stubble-breaking blade with interactiontype with subsoiler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 151-162. (in Chinese)

[23] 彭海涛.叶菜有序收获机割台仿形系统研究[D].镇江:江苏大学,2021.
PENG Haitao. Research on header profile system of orderly harvester for leafy vegetables[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. (in Chinese)

[24] 史宇亮,陈新予,陈明东,等.甘薯起垄整形机犁铧式开沟起垄装置设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(10):16-25.
SHI Yuliang, CHEN Xinyu, CHEN Mingdong, et al. Design and experiment on ploughshare furrowing ridging device of sweet potato ridging shaping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 16-25. (in Chinese)

[25] 高健,张晓苏,陈新予.基于 EDEM 的甘薯起垄整形机镇压整形装置设计与试验[J].农业工程,2024,14(11):95-99.
GAO Jian, ZHANG Xiaosu, CHEN Xinyu. Design and experiment of sweet potato ridge shaping machine suppression and shaping device based on EDEM[J]. Agricultural Engineering, 2024, 14(11): 95-99. (in Chinese)