



基于 JKR 模型的饲料调质器特性与仿真分析

王 斌^{1*}, 杨文浩¹, 庄 狄², 姜伟忠², 张 俊¹, 汪敏捷¹

(1. 上海海洋大学工程学院, 上海 201306;

2. 布勒(常州)机械有限公司, 江苏 常州 213332)

摘要: 为研究草鱼养殖饲料颗粒在调质过程中的运动规律和黏结状况, 并优化饲料调质条件, 开展了基于 Hertz-Mindlin with JKR 模型的草鱼养殖饲料颗粒 EDEM 仿真分析。首先, 进行了草鱼饲料颗粒的离散元理论研究, 并建立了调质颗粒的湿黏模型; 其次, 通过建立调质轴转速和桨叶安装角度两因素仿真对照组, 分析了调质轴转速和桨叶安装角对饲料调质效果的影响; 根据饲料调质特性需求, 进行了转轴转速和桨叶安装角的最优搭配; 并通过理论计算与仿真分析。结果显示, 当调质器转轴转速 $n=250$ r/min、桨叶安装角 $\theta=30^\circ$ 时, 草鱼饲料颗粒不易黏附腔体内壁, 物料混合均匀, 可获得最佳调质效果。研究表明, 饲料调质器调质效果与桨叶安装角度和转轴转速密切相关。本研究可为饲料厂家生产不同种类饲料优化调质效果提供理论依据和参考。

关键词: JKR 模型; 饲料; 转轴转速; 桨叶安装角度; 调质器; 离散元

中图分类号: S 963

文献标志码: A

饲料是水产养殖的物质基础, 正朝着集约化、多样化、产业化方向发展。2023 年全国饲料总产量达到了 32 162.7 万 t, 比去年增长 6.6%^[1]。在饲料加工环节中, 调质是非常重要的环节, 是影响饲料颗粒质量的关键步骤^[2-3]。研究饲料调质特性可以优化不同饲料颗粒的混合效果, 提高饲料的营养价值, 从而减少饲料的投入量, 降低饲料系数和成本。研究饲料特性时, 需要对饲料颗粒与饲料颗粒之间以及饲料颗粒与调质设备之间的相互作用进行分析^[4-7]。

由于养殖饲料颗粒微小, 难以进行宏观运动分析, 国内外学者大多采用仿真方法进行分析, 彭飞等^[8]建立了 Hertz-Mindlin with bonding 模型, 并采用三因素五正交旋转组合实验法分析了填充率、调质轴转速、桨叶安装角度对调质效果的影响程度, 无法直观了解到不同影响因素对工作状

态下调质器腔体内部饲料分布和饲料黏结的影响状况。黏附颗粒在科学与工程领域的许多领域都引起了学者极大的兴趣, 从灰尘到药物成分, 从黏土矿物到食品加工, 黏着力使颗粒的集体行为变得复杂。JKR 理论模型可靠地预测了湿黏颗粒接触半径与力的关系。Chen 等^[9]还分析了 Hertz 和 JKR 模型中的接触几何误差, 推导出精准的接触质心。罗迎九等^[10]建立了矿石和土壤的 JKR 颗粒湿黏模型, 研究叶片形状、数量和位置对槽式双轴螺旋洗矿机性能的影响。邬备等^[11]利用 EDEM 离散元软件, 选取 JKR 接触模型对生猪饲料进行参数标定, 结果表明, JKR 模型标定离散元参数更准确, 能较好地模拟饲料的物料性状。目前, 国内外关于 JKR 模型应用多聚焦于沙土矿石颗粒和饲料颗粒离散元参数标定, 在饲料加工中未出现使用 JKR 接触模型模拟饲料调质加工环节, 相

收稿日期: 2024-03-28 修回日期: 2024-05-07

资助项目: 国家重点研发计划“海洋农业与淡水渔业科技创新”专项 (2024YFD2402000); 上海市水产动物良种创制与绿色养殖协同创新中心项目 (2021 科技 02-12)

通信作者: 王斌 (照片), 从事渔业工程装备研究, E-mail: ycitwangbin@126.com



比其他接触模型, JKR 模型考虑湿黏饲料颗粒之间的黏结力, 计算结果更准确, 更接近真实生产加工情况。本研究旨在建立 Hertz-Mindlin with JKR 饲料湿黏模型, 考虑饲料颗粒之间的黏结力, 分析饲料调质器中不同特性饲料颗粒的运动和进行 EDEM 仿真实验。通过双因素模拟实验, 根据草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*) 饲料颗粒的本征特性, 分析调质器桨叶安装角 (与水平方向的夹角)、调质轴转速对饲料调质混合效果和调质器腔体内饲料颗粒分布及黏结情况的影响。该研究为深入了解饲料调质器的工作原理和优化饲料混合工艺提供了参考。

1 材料与方 法

1.1 数值模型理论

草鱼饲料在调质腔内的运动受到多种确定性和不确定性因素的影响。其中确定性因素包括饲料颗粒所受的重力和离心力, 可以精确计算; 不确定性因素包括颗粒同时与几个颗粒发生碰撞, 无法用理论方法计算。目前, 对影响颗粒运动的因素及其作用的研究较少, 且难以进行定量计算, 因此使用离散元理论分析颗粒运动特性。

微观视角下饲料颗粒调质过程中受力包括重力 F_G 、颗粒与桨叶接触力 F_J 、桨叶提供的离心力 F_C 、向心阻力 F_B 以及综合作用力 F_X (图 1)。

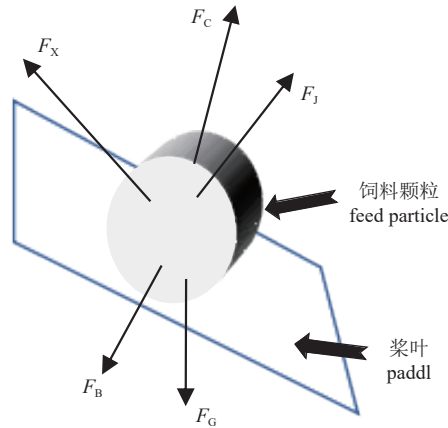


图 1 饲料颗粒受力分析

Fig. 1 Analysis of the force acting on feed particles

综合饲料颗粒所受的确定性和不确定性因素, 可得饲料颗粒运动轨迹方程:

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = F_G + F_C + F_B + F_J + F_X \quad (1)$$

式中, v_p 为颗粒速度 (m/s); m_p 为颗粒质量 (g)。

水产养殖饲料含水量较高, 饲料颗粒之间会存在黏附作用。EDEM 中的 Hertz-Mindlin 模型难以全面分析草鱼饲料之间的作用力。因此, 使用考虑凝聚力的接触模型 Hertz-Mindlin with JKR, 能更全面地计算草鱼饲料间作用力^[12-14]。JKR 接触理论是 Hertz 接触理论的延伸, 认为黏连作用仅存在与接触面上 (图 2)。如果颗粒间没有黏连, 两个颗粒接触面半径为 a_0 , 由 Hertz 接触理论给出; 如果颗粒间存在黏连, 则接触面半径 $a > a_0$, 由 JKR 接触理论给出。

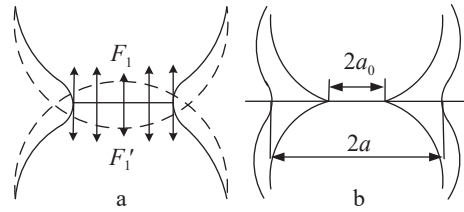


图 2 JKR 接触理论中颗粒间接触示意图

(a) 在接触面上有黏结力 F_1 和 F_1' , 虚线为不考虑变形时颗粒表面所在的位置; (b) a 为考虑黏连力的接触面半径, a_0 为不考虑黏连力的 Hertz 接触面半径。

Fig. 2 Interparticle contact in JKR

(a) on the contact surface, there exist adhesive forces F_1 and F_1' , while the dashed lines represent the positions of the particle surfaces without deformation considerations; (b) a denotes the contact radius considering adhesive forces, while a_0 represents the Hertz contact surface radius without considering adhesive forces.

该模型考虑了接触区内的范德华力的影响, 并使用 Johnson-Kendall-Roberts 理论计算饲料间法向弹性接触力 F_{JKR} , 其计算模型:

$$F_{JKR} = -4 \sqrt{\pi \gamma E^* a^3 / 2} + \frac{4E^*}{3R^*} a^3 \quad (2)$$

$$\delta_n = \frac{a^2}{R^*} - \sqrt{\frac{4\pi \gamma a}{E^*}} \quad (3)$$

式中, γ 为饲料颗粒的表面能 (mJ/m²); E^* 为等效弹性模量 (Pa); a 为接触面半径 (mm); R^* 为等效接触半径 (mm); δ_n 为法向重叠量。

其中:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} + \frac{(1-\nu_j^2)}{E_j} \quad (4)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \quad (5)$$

式中, E_i 、 E_j 为饲料颗粒 i 和 j 的弹性模量 (Pa); ν_i 、 ν_j 为饲料颗粒 i 和 j 的泊松比; R_i 、 R_j 为饲料颗粒 i 和 j 的半径 (mm)。

当饲料颗粒表面能量 γ 为 0 时, 则式 (2) 中

F_{JKR} 可简化为 Hertz 模型中的接触力 F_{Hertz} , 具体:

$$F_{Hertz} = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

饲料与调质器内腔的接触力满足 Hertz-Mindlin 无滑移接触模型。其中, F_n 包括法向弹性力 F_{cn} 和法向阻尼力 F_{dn} , 公式:

$$F_{cn} = -k_n \delta_n^{3/2} n \quad (7)$$

$$F_{dn} = -\eta_n v_n \quad (8)$$

$$k_n = \frac{4}{3} E_{ij} \sqrt{R_{ij}} \quad (9)$$

$$\eta_n = \sqrt{\frac{5}{4} k_n m_{ij} \delta_n^{1/2}} \cdot \frac{2 \ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \quad (10)$$

式中, E_{ij} 为等效弹性模量 (Pa); R_{ij} 为等效直径 (mm); m_{ij} 为等效质量 (g); n 为法向单位向量; k_n 为法向刚度系数; η_n 为法向阻尼系数, e 为恢复系数。

1.2 调质器结构模型

单轴桨叶式饲料调质器包括进料口、进料螺旋、调质器外壁、调质转轴、桨叶、调质腔、出料口等部件。桨叶安装在调质主轴上, 各桨叶安装角度均可单独调整 (图 3), 以满足不同调质过程的角度需求, 该调质器结构参数如表 1 所示。

1.3 饲料与仿真参数

某草鱼颗粒配合饲料主要成分为米糠 (40%)、麸皮 (40%)、豆饼 (10%) 和鱼粉 (10%)。以 4 种颗

粒来流分别表示 4 种不同组成成分的颗粒, 并以单位时间内生成的颗粒数来表示饲料颗粒的成分含量, 所设置的仿真参数如表 2 所示。

表 3 为所设置的调质转轴转速、桨叶安装角度、颗粒的本征参数 (如泊松比、剪切模量、密度等)、颗粒之间以及颗粒与设备间的恢复系数、静摩擦系数和滚动摩擦系数等^[15-20]。

2 结果

2.1 双因素分析

不同的水产养殖饲料具有不同的本征参数, 其调质特性也会根据饲料特性而改变。影响调质器饲料调质混合效果的主要因素: ①调质转轴转速。转速过低会导致物料在腔体下方沉积, 而转速过快则产生的离心力过大, 使物料都黏附在腔体内壁上; ②调质转轴桨叶安装角。从颗粒力学角度分析, 安装角与轴向平行, 物料混合效果越

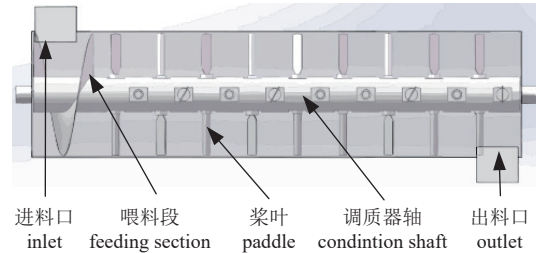


图 3 调质器及其简化模型

Fig. 3 Simplified model of the conditioner

表 1 调质器结构参数

Tab. 1 Structural parameters of the conditioner

参数 parameter	数值 value	参数 parameter	数值 value
腔体外径/mm outer diameter of the cavity	360	转轴直径/mm transmission shaft diameter	100
腔体长度/mm length of the cavity	1400	转轴长度/mm transmission shaft length	1390
壁厚/mm thickness	2	桨叶径向间隔/mm propeller blades radial spacing	65
进出料口尺寸/mm size of inlet and outlet	200×120	桨叶轴向间隔/(°) propeller blades axial spacing	90

表 2 仿真参数设置

Tab. 2 Simulation parameter settings

参数 parameter	数值 value	参数 parameter	数值 value
颗粒尺寸/mm particle size	2	仿真时长/s simulation duration	4
颗粒流速/(m/s) particle velocity	1	转轴转速/(r/min) rotational speed of the shaft	150~400
颗粒生成速度/(pcs/s) particle generation rate	100 000	桨叶安装角度/(°) blade installation angle	30~75

表 3 草鱼饲料颗粒参数

Tab. 3 Parameters of *C. idella* feed particles

类型 type	参数 parameter	数值 value
物料参数 material parameters	泊松比 Poisson's ratio	0.4
	剪切模量/MPa shear modulus	1.1
	密度/(kg/m ³) density	780
颗粒间接接触参数 particle indirect contact parameters	静摩擦系数 static friction coefficient	0.31
	恢复系数 restitution	0.23
	动摩擦系数 dynamic friction coefficient	0.16
颗粒与设备 particles and equipment	静摩擦系数 static friction coefficient	0.45
	恢复系数 restitution	0.40
	动摩擦系数 dynamic friction coefficient	0.02

好, 但送料效果一般。反之, 安装角与轴向垂直, 物料混合效果和送料效果最差。

2.2 区域分析

工作状态下调质器腔体内饲料分布含量不均, 为对调质效果进行有效分析, 可将调质器腔体桨叶划分为 3 个 Group, 将调质器腔体分为前段、中段和后段, 并分别对这 3 个 Group 内的颗粒速度和颗粒充盈量进行分析。通常情况下, 为达到更好的调质效果, 饲料需要在腔体内停留足够长的时间, 从而提高熟化程度和混合效果。因此, Group1 和 Group2 中的饲料运动速度相对较小, 饲料滞留量相对较多。为分析草鱼饲料在腔体内的分布情况, 在调质器腔体内部做 8 个截面(图 4), 分别命名为 X=1, 2, ..., 8, 截面厚度为 20 mm。

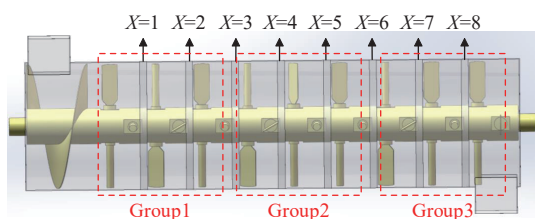


图 4 腔体内桨叶 Group 划分及截面分布情况

Fig. 4 Group division and cross-sectional distribution of blades in the cavity

2.3 不同转轴转速工况调质分析

极限转速工况下的调质分析 在 $n=150$ r/min 和 $n=400$ r/min 极限转速工况下, 且桨叶安装角分别为 $\theta=30^\circ$ 和 $\theta=75^\circ$ 时的调质效果对比结果显示, 当 $n=150$ r/min 时, 草鱼饲料在 2 种桨叶安装角下无法充分搅动混合物料, 使得饲料颗粒大部分都沉积黏结在腔体前端底部(图 5)。主要原因为转轴

转速过低, 无法提供足够的离心力来翻动饲料。当 $n=400$ r/min 时, 饲料颗粒大都黏附在腔体内壁表面, 造成饲料混合和输送效果不佳, 且难以清洗。主要原因为调质转轴转速提供给饲料颗粒的离心力过大, 造成颗粒呈大曲率半径方式运动。其中, 当 $n=150$ r/min 和 $\theta=30^\circ$ 时调质效果最差。由截面 $X=1$ 、 $X=2$ 、 $X=3$ 和 $X=4$ 可以看出, 腔体前半部分堆积大量草鱼饲料, 后 4 个截面只出现少量饲料, 越靠近出料口处草鱼饲料含量越少(图 6)。

中间转速工况下的调质分析 对 200、250、300 和 350 r/min 的 4 种中间转速对照组进行分析, 对比相同桨叶安装角下的不同转速的调质效果, 并从中优选出该草鱼饲料的最优调质转速。以 $X=4$ 时截面饲料颗粒分布情况为例, 当桨叶角度 $\theta=30^\circ$ 、转轴转速 $n=250$ r/min 时饲料调质效果最佳(图 7)。相比之下转轴转速 $n=200$ r/min 时截面中饲料含量有 80% 堆积在腔体左侧内壁上(图 7-a), 随着转轴转速的增加, 饲料颗粒受到的向心力增大, 则颗粒运动半径增大, $n=300$ r/min 时饲料颗粒开始出现黏附内壁的情况, $n=350$ r/min 时饲料几乎全部黏附在调质器腔体内壁上。随着转轴转速的增加, 饲料颗粒的运动速度也增加, 底部饲料滞留量逐渐减少, 腔体内壁饲料颗粒黏附量增多。

当转轴转速 $n=250$ r/min 时, 观察 4 种桨叶安装角度下截面 $X=4$ 时饲料颗粒分布对比情况(图 8)。其中 4 种颗粒的颜色分别表示草鱼颗粒配合饲料不同的组成成分, 仿真过程中会出现不同成分饲料颗粒的黏结堆积情况。桨叶安装角度 $\theta=30^\circ$ 时, 饲料颗粒堆积最少, 黏结最少。转轴转速 $n=250$ r/min 时, 安装角 $\theta=75^\circ$ 的饲料颗粒大量聚集在腔体左侧底部, 与安装角 30° 、 45° 和 60° 比较,

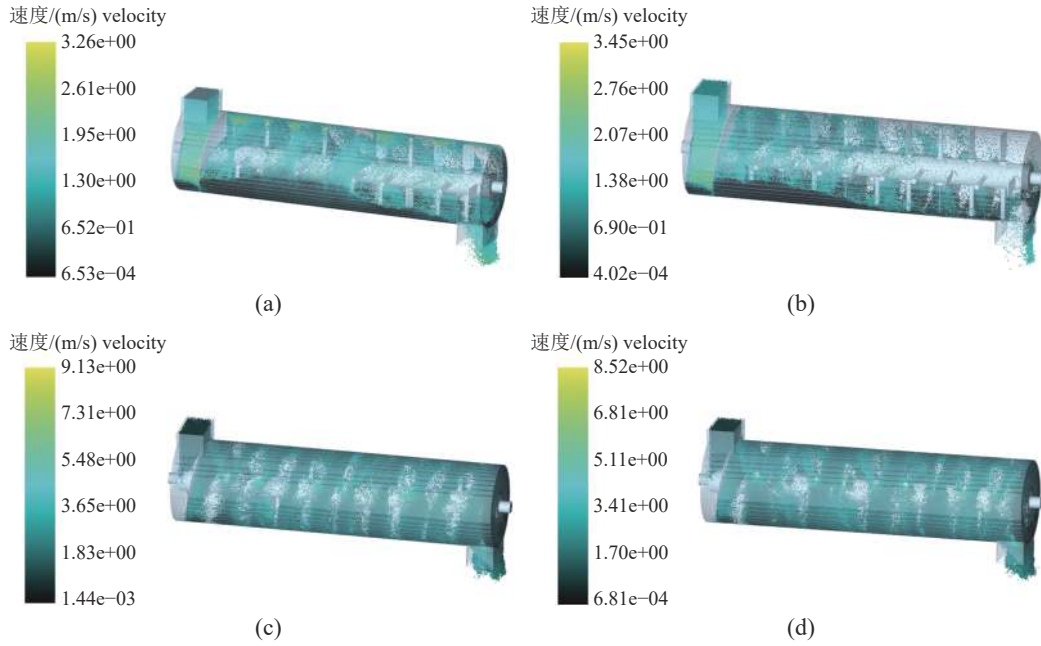


图 5 草鱼饲料调质效果及分布情况

(a) 桨叶安装角度为 30°, 转轴转速为 150 r/min, (b) 桨叶安装角度为 75°, 转轴转速为 150 r/min, (c) 桨叶安装角度为 30°, 转轴转速为 400 r/min, (d) 桨叶安装角度为 75°, 转轴转速为 400 r/min.

Fig. 5 Effects and distributions of feed conditioning for *C. idella*

(a) $\theta=30^\circ$ and $n=150$ r/min, (b) $\theta=75^\circ$ and $n=150$ r/min, (c) $\theta=30^\circ$ and $n=400$ r/min, (d) $\theta=75^\circ$ and $n=400$ r/min.

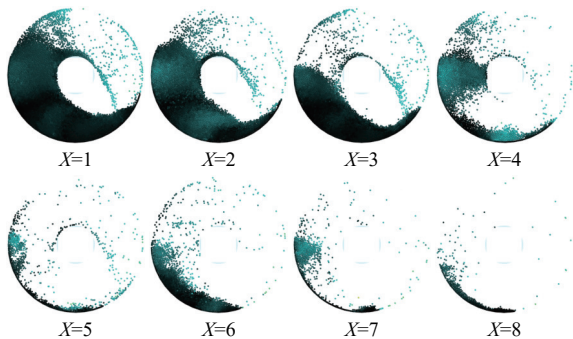


图 6 $\theta=30^\circ$ 和 $n=150$ r/min 工况下 8 个截面饲料颗粒分布情况

Fig. 6 Distribution of feed particles in 8 sections under $\theta=30^\circ$ and $n=150$ r/min working conditions

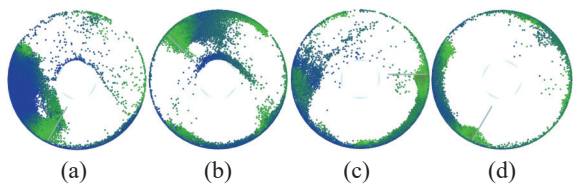


图 7 $\theta=30^\circ$ 不同转速工况下截面 X=4 时饲料分布情况 (a) 转轴转速 200 r/min, (b) 转轴转速 250 r/min, (c) 转轴转速 300 r/min, (d) 转轴转速 350 r/min.

Fig. 7 Feed distribution at cross-section X=4 under different rotational speeds at $\theta=30^\circ$

(a) $n=200$ r/min, (b) $n=250$ r/min, (c) $n=300$ r/min, (d) $n=350$ r/min.

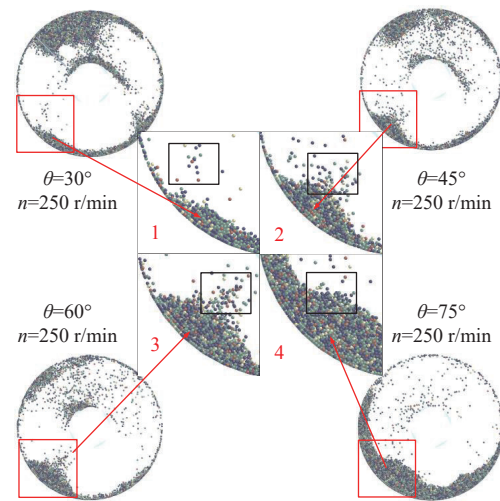


图 8 $n=250$ r/min 不同角度工况下截面 X=4 时饲料分布情况

1.堆积最少、黏结最少, 2.堆积较少、黏结较多, 3.堆积较多、黏结较多, 4.堆积最多、黏结较少。

Fig. 8 Feed distribution at cross-section X=4 under different angle at $n=250$ r/min

1. minimal stacking, minimal adhesion, 2. minimal stacking, moderate adhesion, 3. moderate stacking, moderate adhesion, 4. maximal stacking, minimal adhesion.

$\theta=75^\circ$ 时, 调质器输送效果最差。随着桨叶安装角度的增加, 饲料颗粒的输送效率降低, 底部饲料

滞留量逐渐增多。因此, 为达到最佳的调质效果, 需根据饲料的调质需求选择最优的桨叶安装角和调质转轴转速。

2.4 不同桨叶安装角工况调质分析

为保证调质器的饲料调质效果, 要求在饲料调质器正常工作时急停, 腔体内饲料分布理想状况为两端堆积物料少, 中间堆积物料多, Group2 的速度小于 Group3 的速度。为进一步确定该草鱼饲料调质最佳桨叶安装角度, 对各桨叶安装角下各 Group 中颗粒运动速度和饲料充盈量进行分析。

图 9 为桨叶安装角度为 30° 的工况下, 符合理想工作状态速度要求的转速 200 和 250 r/min 的 3 个 Group 的速度对比。转速 $n=200$ r/min 时, Group2 速度在 1 m/s 上下浮动, 而 Group3 速度在 1.1 m/s 上下浮动, Group3 速度高于 Group2 速度。转速 $n=250$ r/min 时, Group2 中饲料颗粒运动速度

趋于 1.2 m/s, Group3 中饲料颗粒运动速度在 1.1~1.2 m/s 小幅波动。当桨叶安装角 $\theta=60^\circ$ 和 $\theta=75^\circ$ 时, 8 组仿真结果均显示 Group2 中饲料颗粒运动速度均高于 Group3 中饲料颗粒运动速度, 调质效果欠理想。

对 16 组不同桨叶安装角 θ 和转轴转速 n 组合下的各 Group 中草鱼饲料颗粒充盈量进行了比较。理想工作状态下, Group2 饲料充盈量应高于 Group1 和 Group3 中的饲料充盈量(图 10)。桨叶安装角 $\theta=30^\circ$ 和 $\theta=45^\circ$ 时, Group 饲料充盈量分布较理想; 而安装角 $\theta=60^\circ$ 和 $\theta=75^\circ$ 时, Group 饲料充盈量分布欠理想。当安装角 $\theta=30^\circ$ 时, 饲料充盈量分布较安装角 $\theta=45^\circ$ 时的饲料颗粒分布更理想。综上所述, 当桨叶安装角 $\theta=30^\circ$ 和调质转轴转速 $n=250$ r/min 时的组合工况下, 草鱼饲料颗粒的调质性能表现最佳。

2.5 实验验证

取仿真调质效果最佳的参数组合, 转轴转速 $n=250$ r/min 和桨叶安装角度 $\theta=30^\circ$, 进行 15 s 仿真和在可视调质器实验台架上进行测试(图 11)。测试对象为草鱼饲料, 为减少误差, 相同条件下进行 3 次实验, 分别为实验 A、B 和 C, 每次实验设备运行时长为 30 s, 物料进料速度为 4.7 t/h, 流速为 1 m/s。工作状态时转轴旋转饲料由桨叶抛起, 均匀分布在腔体内壁上(图 11-a)。急停状态下看出饲料在腔体底部堆积, 分布均匀(图 11-b)。

稳定运行后第 15 s 急停设备, 观察腔体内饲料堆积分布情况, 通过测量 15 s 内进料量和出料量, 计算其差值, 得出第 15 秒急停时刻腔体内饲料含量, 与第 15 秒时仿真调质器腔体内饲料含量对比。仿真实验与 3 次实验调质器腔体内饲料含量对比结果显示, 第 15 秒时仿真调质器腔体内饲料含量为 10.92 kg, 实验 A、B 和 C 腔体内饲料含量分别为 10.37、12.13 和 9.95 kg, 3 次实验腔体内饲料含量平均值为 10.82 kg, 与仿真时腔体内饲料含量基本相同(图 12)。

3 讨论

3.1 转轴转速对饲料调质效果的影响

转轴转速为草鱼饲料颗粒提供在腔体内运动所需动能和离心力。转轴转速 n 从 150 r/min 增大到 400 r/min 时, 饲料颗粒运动速度最大达到 2 m/s, 颗粒在腔体内停留时间短至 1.5 s, 饲料熟化

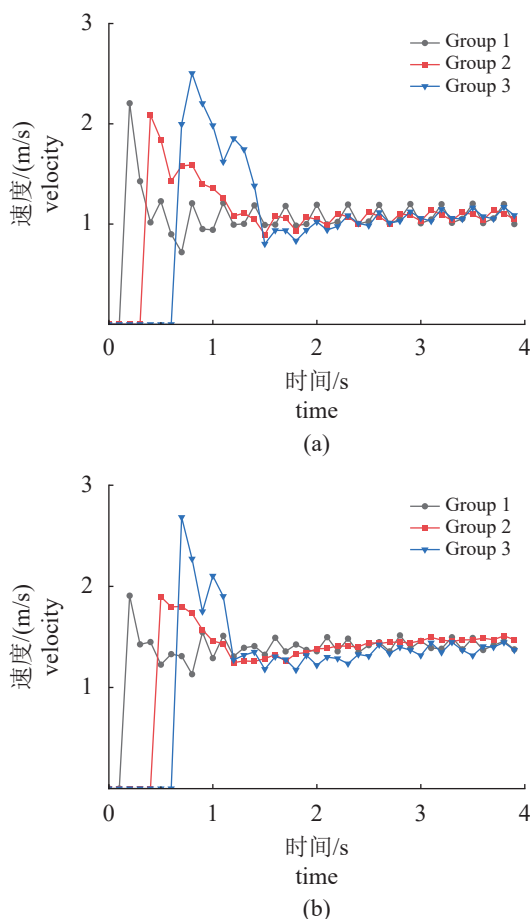


图 9 草鱼饲料 $\theta=30^\circ$ 时 Group 的速度

Fig. 9 Velocity of *C. idella* feed particles in different group under $\theta=30^\circ$ downward

(a) $n=200$ r/min, (b) $n=250$ r/min.

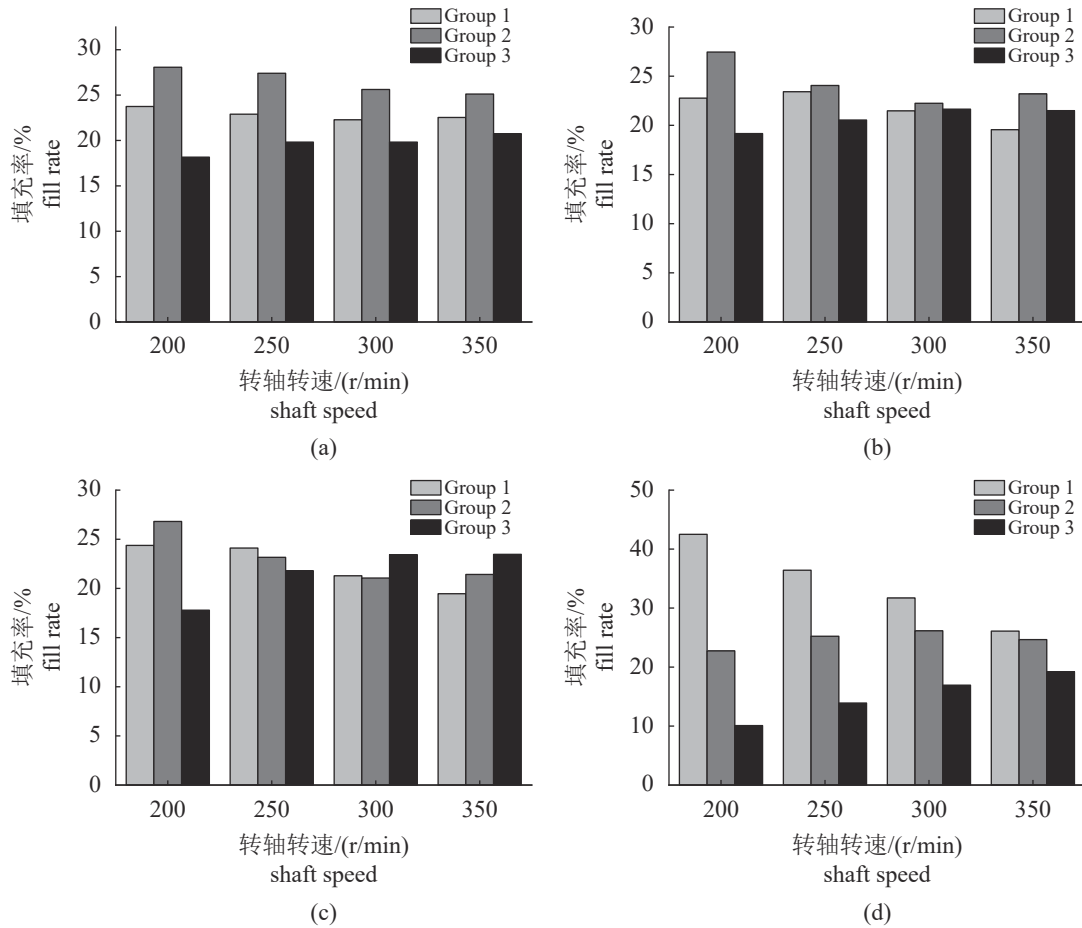


图 10 各 Group 中饲料充盈量对比

(a) 桨叶安装角度 30°, (b) 桨叶安装角度 45°, (c) 桨叶安装角度 60°, (d) 桨叶安装角度 75°。

Fig. 10 Comparison of feed content of each group

(a) $\theta=30^\circ$, (b) $\theta=45^\circ$, (c) $\theta=60^\circ$, (d) $\theta=75^\circ$.

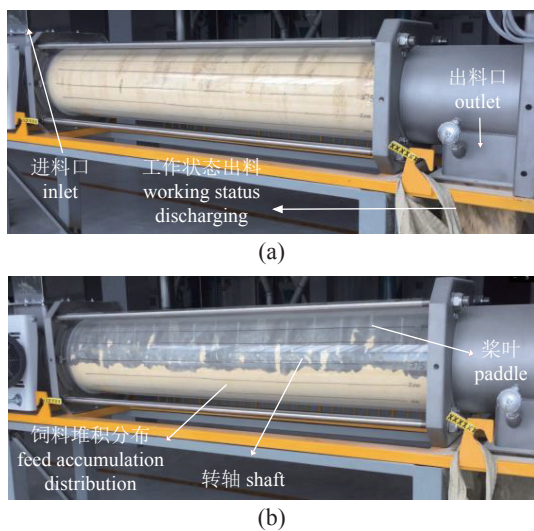


图 11 调质器实验台架

(a) 工作状态, (b) 急停状态。

Fig. 11 Conditioner production test

(a) working status, (b) emergency stop status.

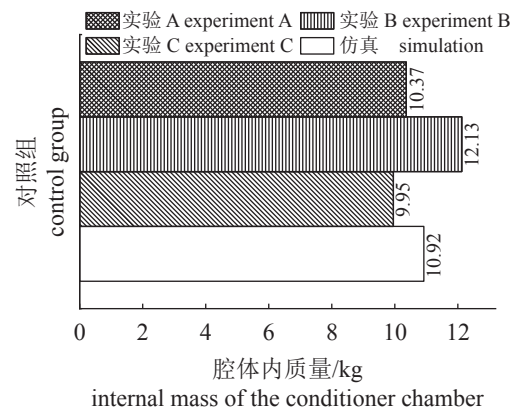


图 12 仿真与实验含量对比

Fig. 12 Comparison of simulation and experimental filling rates

程度和混合效果不佳; 离心力越大, 饲料颗粒运动曲率半径大, 草鱼饲料黏附腔体内壁量多, 饲料残留量增加。

3.2 桨叶安装角度对饲料调质效果的影响

桨叶安装角 θ 从 30° 增大到 75° , 草鱼饲料颗粒受到的径向分力和法向分力减小, Group1 中饲料充盈量从 22% 增长到 42%, 腔体前端底部滞留量增多。当桨叶安装角与水平方向平行和垂直时, 饲料调质输送能力均不足。

3.3 实验分析

实验与仿真设置进料量为 4.7 t/h, 待设备运行稳定后, 仿真时调质器腔体内饲料含量为 10.92 kg, 与实验时调质器腔体内饲料含量为 10.82 kg 基本一致。通过对比仿真值和实验值, 验证了仿真实验的有效性。

4 结论

饲料调质器调质效果与转轴转速和桨叶安装角密切相关, 因此, 需根据饲料种类和调质需求的改变, 为特定的某种饲料选择最优转轴转速与桨叶安装角搭配。根据上述仿真结果分析, 当转轴转速 $n=250$ r/min、桨叶安装角 $\theta=30^\circ$ 时, 该草鱼饲料颗粒不易黏附于腔体内壁, 且饲料混合均匀, 调质效果最佳。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 中国饲料工业协会, 2023 年全国饲料发展概况 [EB/OL]. (2024-02-06)[2024-11-19]. http://www.china-feed.org.cn/hyfx/hyfx_erji/202402/t20240206_437711.htm.
China Feed Industry Association, Analysis on China feed production situation in 2023[EB/OL]. (2024-02-06)[2024-11-19]. http://www.chinafeed.org.cn/hyfx/hyfx_erji/202402/t20240206_437711.htm. (in Chinese).
- [2] Cutlip S E, Hott J M, Buchanan N P, *et al.* The effect of steam-conditioning practices on pellet quality and growing broiler nutritional value[J]. *Journal of Applied Poultry Research*, 2008, 17(2): 249-261.
- [3] Thomas M, van der Poel A F B. Fundamental factors in feed manufacturing: towards a unifying conditioning/pelleting framework[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2020, 268: 114612.
- [4] 李军国, 刘子奇, 张嘉琦, 等. 缓沉性水产膨化饲料加工工艺参数优化 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(4): 308-315.
<https://www.china-fishery.cn>
- [5] Li J G, Liu Z Q, Zhang J Q, *et al.* Optimization of the process parameters for slow-sinking extruded aquatic feed[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(4): 308-315 (in Chinese).
- [5] 陈计远, 王粮局, 王红英, 等. 鱼膨化饲料热风干燥动力学模型及湿热特性 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(14): 317-322.
Chen J Y, Wang L J, Wang H Y, *et al.* Drying kinetic model and hygrothermal characteristics of fish extruded feed during hot air drying[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(14): 317-322 (in Chinese).
- [6] 陈计远, 王红英, 金楠, 等. 饲料原料粉体流动特性预测模型 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 312-318.
Chen J Y, Wang H Y, Jin N, *et al.* Prediction model of flow properties of feed material powder[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(21): 312-318 (in Chinese).
- [7] 陈啸, 孔丹丹, 王红英, 等. 基于本构模型的颗粒饲料成型特性研究 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 267-275.
Chen X, Kong D D, Wang H Y, *et al.* Analysis of forming properties based on pellet feed forming constitutive model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(23): 267-275 (in Chinese).
- [8] 彭飞, 方芳, 王红英, 等. 基于 CFD-DEM 的饲料调质器物料运动模拟与试验 [J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 355-363.
Peng F, Fang F, Wang H Y, *et al.* Numerical simulation and experiment on raw material in feed conditioner based on coupled CFD-DEM[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(12): 355-363 (in Chinese).
- [9] Chen J, Kregel D, Nishiura D, *et al.* A force-displacement relation based on the JKR theory for DEM simulations of adhesive particles[J]. *Powder Technology*, 2023, 427: 118742.
- [10] 罗迎九, 涂福泉, 吴维崧, 等. 槽式双轴螺旋洗矿机叶片结构优化 [J]. 矿山机械, 2024, 52(2): 44-48.
Luo Y J, Tu F Q, Wu W S, *et al.* Optimization of blade structure of trough-type double-shaft screw washer[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2024, 52(2): 44-48 (in Chinese).

- Chinese).
- [11] 邬备, 钱怀源, 黄天赐, 等. 基于 EDEM 的生猪粥料离散元模型参数标定 [J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(3): 726-736.
- Wu B, Qian H Y, Huang T C, *et al.* Calibration of discrete element model parameters of pig porridge based on EDEM[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2023, 45(3): 726-736 (in Chinese).
- [12] Zhou J C, Zhang L B, Hu C, *et al.* Calibration of wet sand and gravel particles based on JKR contact model[J]. *Powder Technology*, 2022, 397: 117005.
- [13] Borodich F M, Galanov B A, Suarez-Alvarez M M. The JKR-type adhesive contact problems for power-law shaped axisymmetric punches[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2014, 68: 14-32.
- [14] 曹波, 李文辉, 王娜, 等. 基于 JKR 模型的湿式滚抛磨块离散元参数标定 [J]. 表面技术, 2019, 48(3): 249-256.
- Cao B, Li W H, Wang N, *et al.* Calibration of discrete element parameters of the wet barrel finishing abrasive based on JKR model[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(3): 249-256 (in Chinese).
- [15] 王卫国, 周小泉, 刘凡, 等. 单轴桨叶式饲料调质器国内外概况 [J]. 饲料工业, 2012, 33(1): 8-11.
- Wang W G, Zhou X Q, Liu F, *et al.* Technology advancement of single shaft paddle feed conditioners at home and abroad[J]. *Feed Industry*, 2012, 33(1): 8-11 (in Chinese).
- [16] 袁军亭, 张浩然, 杨琛, 等. 基于堆积试验的草鱼饲料离散元参数标定 [J]. 制造业自动化, 2022, 44(12): 61-67.
- Yuan J T, Zhang H R, Yang C, *et al.* Calibration of discrete element parameters of grass carp feed based on repose angle test[J]. *Manufacturing Automation*, 2022, 44(12): 61-67 (in Chinese).
- [17] Kong X R, Liu J, Yang T Y, *et al.* Numerical simulation of feed pellet breakage in pneumatic conveying[J]. *Biosystems Engineering*, 2022, 218: 31-42.
- [18] 牛智有, 孔宪锐, 沈柏胜, 等. 颗粒饲料破损离散元仿真参数标定 [J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 132-140,207.
- Niu Z Y, Kong X R, Shen B S, *et al.* Parameters calibration of discrete element simulation for pellet feed attrition[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(7): 132-140,207 (in Chinese).
- [19] 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 S Q, Ding W M, Zhao S Q, *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).
- [20] 郭三琴, 万鹏, 杨俊, 等. 基于离散元的鱼饲料仿真参数标定与试验 [J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(6): 286-295.
- Guo S Q, Wan P, Yang J, *et al.* Discrete element based calibration and test of simulation parameters for fish feed[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2022, 41(6): 286-295 (in Chinese).

Simulation analysis of feed conditioner characteristics based on the JKR model

WANG Bin ^{1*}, YANG Wenhao ¹, ZHUANG Di ², JIANG Weizhong ², ZHANG Jun ¹, WANG Minjie ¹

(1. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Buhler (Changzhou) Machinery Co., Ltd., Changzhou 213332, China)

Abstract: An EDEM simulation analysis of *Ctenopharyngodon idella* feed pellets based on the Hertz-Mindlin with JKR model was carried out to study the movement and binding conditions of *C. idella* feed pellets during the conditioning process and optimize feed conditioning conditions. Firstly, a wet sticky model of feed pellets was established using the discrete element theory. Secondly, the impact of conditioning shaft rotational speed and impeller blade installation angle on feed conditioning effect was analyzed by establishing a simulation control group of two factors, conditioning shaft rotational speed and impeller blade installation angle. Then, according to the feed conditioning characteristics requirements, the optimal combination of shaft rotational speed and impeller blade installation angle was determined. Finally, the conclusion was reached through theoretical calculation and simulation analysis: when the conditioning machine's shaft rotational speed was 250 r/min and impeller blade installation angle was 30°, respectively. The feed pellets were not easily attached to the chamber wall, the materials could mix evenly, and the best conditioning effect could be obtained. The results indicated that the conditioning effect of feed conditioner was closely associated with the blade installation angle and the rotational speed of the shaft. This study can offer a theoretical foundation and guidance for feed manufacturers in optimizing and improving conditioning effects.

Key words: JKR model; feed; shaft speed; blade installation angle; conditioner; discrete element

Corresponding author: WANG Bin. E-mail: ycitwangbin@126.com

Funding projects: National Key Research and Development Program of China "Marine Agriculture and Freshwater Fisheries Technological Innovation" Special Project (2024YFD2402000); the Program for Shanghai Collaborative Innovation Center for Cultivating Elite Breeds and Green-culture of Aquaculture Animals (2021-KJ-02-12)