doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.016

基于 CFD－DEM 耦合的膨化颗粒饲料气力输送机理数值分析

王　昱[1]　刘佳豪[1]　罗毅智[2,3]　周星星[2]　欧一志[1]　齐海军[2]　袁　余[2]

（1.华南农业大学工程学院，广州 510642；2.广东省农业科学院设施农业研究所，广州 510640；
3.农业装备技术全国重点实验室，广州 510642）

摘要：气力输送是水产饲喂的主要方式之一，然而目前气力输送过程中颗粒运动机理尚不清晰，以致气力输送系统的作业效率难以提升。本文以膨化颗粒饲料为对象，采用 CFD－DEM 气固耦合数值分析方法，构建双弯管颗粒饲料气力输送过程的数值分析模型，采用 Box－Behnken 响应曲面法量化分析喂料速率、入口风速、弯管数对颗粒饲料料气输送比、出口速度和悬浮程度的影响。方差分析结果显示：喂料速率显著影响料气输送比。各因素对颗粒饲料末端速度影响由强到弱为入口风速、弯管数、喂料速率，各因素对颗粒饲料悬浮程度影响由强到弱为入口风速、喂料速率、弯管数。入口风速与颗粒的出口速度和颗粒在竖直方向的坐标、标准差成正比，当喂料速率小于 35 g/s 时入口风速对料气输送比无显著影响。随着入口风速提高，颗粒的出口速度提高，颗粒悬浮程度上升，表明气力输送系统的输送性能增强。当入口风速为 20 m/s、喂料速率为 27.232 g/s、无弯管时，料气输送比为 0.966，颗粒出口速度为 12.48 m/s，竖直方向坐标为 －3.944 mm，标准差为 8.805 mm。研究结果为提升气力输送系统的效率和优化设计提供了理论依据。

关键词：颗粒饲料；气力输送；CFD－DEM 耦合；数值分析

中图分类号：S969.31　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)07-0180-10　　**OSID**：

Numerical Analysis of Pneumatic Conveying Performance of Expanded Pellet Feed Based on CFD－DEM Coupling

WANG Yu[1]　LIU Jiahao[1]　LUO Yizhi[2,3]　ZHOU Xingxing[2]　OU Yizhi[1]　QI Haijun[2]　YUAN Yu[2]

(1. *College of Engineering*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*
2. *Institute of Facility Agriculture*, *Guangdong Academy of Agricultural Sciences*, *Guangzhou* 510640, *China*
3. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology*, *Guangzhou* 510642, *China*)

Abstract: Pneumatic conveying is one of the main methods in the field of aquatic feeding. However, the mechanism of particle movement in the pneumatic conveying process is not fully understood at present, making it challenging to improve the operational efficiency of the pneumatic conveying system. The CFD－DEM gas-solid coupling numerical analysis method was utilized to construct a model for the pneumatic conveying process of granular feed, specifically focusing on systems with double bends. Additionally, the Box－Behnken response surface method was employed to quantitatively analyze the effects of inlet wind speed, feeding rate, and the number of bends on various parameters, including the ratio of granular feed material conveyed, the exit speed of particles, and the degree of levitation. The results of the sensitivity analysis indicated that the factors influencing the model response indexes in descending order of importance were as follows: inlet wind speed, feeding rate, and the number of bends. Specifically, the inlet wind speed was directly proportional to the velocity of the particle outlet and influenced the vertical coordinates and standard deviation of the particles. Notably, the inlet wind speed

收稿日期：2024－12－12　修回日期：2025－02－20

基金项目：广东省农业科学院科技创新战略计划项目(ZX202402)、国家自然科学基金项目(62405066)、农业装备技术全国重点实验室(华南农业大学)开放基金项目(SKLAET－202407)、猪禽种业全国重点实验室 PI 团队自主选题项目(GDNKY－ZQQZ－K25)、广州市基础与应用基础研究项目(2025A04J5269)和科技创新战略(农业科研主力军建设)专项(R2023PY－JX013)

作者简介：王昱(1987—)，女，副教授，博士，主要从事结构优化设计方法与智能农机装备研究，E-mail：yu-wang@scau.edu.cn

通信作者：罗毅智(1995—)，男，助理研究员，博士，主要从事智慧农业技术和工业化水产养殖智能化装备研究，E-mail：luoyizhi@gdaas.cn

did not significantly affect the material-air transport ratio when the feeding rate was below 35 g/s. As the inlet wind speed increased, both the exit velocity of particles and the degree of particle suspension were risen, suggesting an enhancement in the conveying performance of the pneumatic conveying system. Under optimal conditions, specifically, an inlet wind speed of 20 m/s, a feeding rate of 27.232 g/s, and a system without elbows－the material-air conveying ratio reached 0.966, the exit velocity of particles was 12.48 m/s, the vertical coordinate of particles was －3.944 mm, and the standard deviation was 8.805 mm. The findings can provide a theoretical foundation for improving the efficiency of pneumatic conveying systems and optimizing their design.

Key words: pelleted feed; pneumatic conveying; CFD－DEM coupling; numerical analysis

0　引言

根据 2023 年农业农村部统计，国内水产养殖产量为 5 812 万吨，相比 2022 年水产养殖生产总量增长 247 万吨[1]。庞大的产量得益于水产养殖的产业链升级，工厂化水产养殖模式能降低养殖面积，抵御恶劣的养殖环境，近年来在我国迅速兴起[2－3]。膨化颗粒饲料由于具有适口性好、转化率高、便于储存等优点，成为水产养殖主流的饲料。饲料费用和雇工费用是水产养殖的主要支出[4]，合适的投料方式对水产养殖降本增效有重要作用。气力输送是渔业领域主要投喂形式之一[5－6]，对物料的减损、绿色运输、精准投料，加快推进我国农业物料投送有重要作用，渔用颗粒饲料在气力输送过程中的运动机理是颗粒饲料气力输送特性研究基础。

长距离气力输送装置由于气力输送过程中颗粒的运动机理尚不清晰，入口风速、喂料速率和管道布置与输送距离及喂料速率不匹配，导致颗粒沉积运输从而堵塞管道，管道风速过大和弯管配置不合理时则引发颗粒破碎率高、管道磨损严重问题。在气力输送系统中，物料通过气流的曳引与裹挟作用实现传输，由于管道内风速的不同引起颗粒悬浮程度低和输送距离短，喂料速率过快会导致气流不稳定。管道物料流经弯管段时，由于物料运动轨迹的急剧改变，导致物料与弯管内壁发生频繁撞击从而破碎。因此，研究气力输送中颗粒的运动特性，可减小颗粒破碎，提高气力输送装置使用寿命，为后续设备的结构优化提供参考。

研究气力输送过程中颗粒运动问题常用试验分析法与数值计算法，试验分析法能较为直观地观察物料在气力输送过程中的运动状态，而数值计算法能准确模拟颗粒的运动轨迹和管道内的流场分布[7－10]。随着 CFD－DEM（Computational fluid dynamics－Discrete element method，计算流体动力学-离散元法）耦合方法的快速发展[11－14]，国内外学者对输送管道规格、气流速度、颗粒物料形貌和体积分数占比等因素气力输送过程中颗粒运动机理进行了研究。文献[15－29]集中研究输送管道直径、形状、弯管半径、料气输送比和风速对气力输送系统性能的影响，并研究了管道内颗粒的运动特性、流场特性和压力的损失特性，但并未量化分析众多影响因素对颗粒气力输送性能的影响。

为量化分析各因素对颗粒气力输送性能的影响，本文建立膨化颗粒饲料的离散元模型，构建双弯管颗粒饲料气力输送过程的数值模型。采用 Box－Behnken 响应曲面法量化分析喂料速率、入口风速、弯管数对料气输送比、出口速度和悬浮程度的影响，并分析各响应指标对影响因素的敏感度。

1　材料与方法

1.1　膨化颗粒饲料参数

选用膨化颗粒饲料为试验对象，颗粒饲料属椭球形散粒体物料，饲料间几乎无粘结现象，采用离散元数值分析仿真软件 EDEM 分析，选用 Hertz－Mindlin no slip 模型模拟颗粒饲料流动特性。数值模型需输入颗粒饲料基本物理参数、接触力学参数，基本物理参数包括颗粒饲料形状尺寸及密度、弹性模量、泊松比和含水率；接触力学参数包括碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数。随机选取 100 粒饲料，颗粒饲料基本参数如表 1 所示。颗粒饲料与接触材料的接触参数根据文献[30]提出的标定方法进行标定，结果如表 2 所示。

表 1　膨化颗粒饲料基本参数

Tab.1　Basic parameters of pellet feed

参数	数值	测量方法
平均百粒质量/g	0.68	直接测量
含水率/%	9.41	卤素法
质量密度/(kg·m^{-3})	704.05	排沙法
尺寸(长×宽×厚)/(mm×mm×mm)	3.40×2.95×3.04	直接测量

1.2　颗粒饲料三维模型

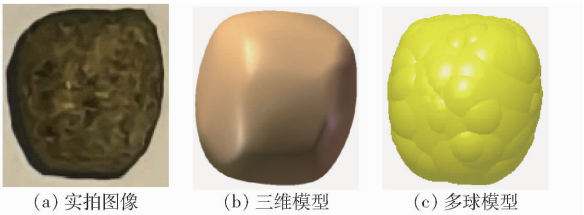
颗粒饲料尺寸差异较小，选取具有代表性的颗粒饲料样本，利用手持自定位 3D 激光扫描仪（SIMSCAN 30 型）进行逆向重构。将建立的颗粒饲

表 2 颗粒饲料与接触材料部分参数

Tab. 2 Partial parameter values for pellet feed and contact material

项目	参数	数值
颗粒饲料	泊松比	0.381
	密度/(kg·m^{-3})	704
	剪切模量/Pa	1.97×10^{7}
有机玻璃	泊松比	0.4
	密度/(kg·m^{-3})	1 385
	剪切模量/Pa	1.60×10^{8}
颗粒饲料-颗粒饲料	静摩擦因数	0.531
	动摩擦因数	0.110
	碰撞恢复系数	0.279
颗粒饲料-有机玻璃	静摩擦因数	0.455
	动摩擦因数	0.236
	碰撞恢复系数	0.322

料三维模型作为颗粒模板导入 EDEM 中,使用多个颗粒填充颗粒模板,构建颗粒饲料的离散元多球模型。多球模型光滑度为 2,最小填充颗粒的半径为 1 mm,采用半径为 1.0 ~ 1.6 mm 球状颗粒填充,颗粒饲料的实拍图像、三维模型和多球模型如图 1 所示。



(a) 实拍图像 (b) 三维模型 (c) 多球模型

图 1 颗粒饲料图像与模型

Fig. 1 Pellet feed multi-ball model

1.3 颗粒饲料气力输送系统组成及工作原理

颗粒饲料气力输送系统主要由风机、文丘里管、星型卸料器、料斗、压力变送器和透明有机玻璃管组成,如图 2 所示。虚线内为颗粒运动特性的监测区域,采用高速摄像机拍摄。在颗粒饲料气力输送系统运行过程中,颗粒饲料由星型卸料器旋转从料斗排出落入文丘里管。风机在进风口产生稳定气流进入文丘里管入口,颗粒饲料在文丘里管加速区实现气固混合,加速区的高速气流带动颗粒饲料从文丘里管出口排出。颗粒饲料在水平管道中通过长距离输送,通过管道出口排至指定目标鱼池,完成投料过程。

在颗粒饲料气力输送过程中,管道直径、管道长度、进气口速度、颗粒-气体质量比、喂料速率等结构参数和工作参数直接影响气力输送系统的工作性能。根据颗粒输送理论,输送管道进气口速度 v_i 可表示为[15]

$$v_i = k_l\sqrt{\rho_p} + k_d L \tag{1}$$

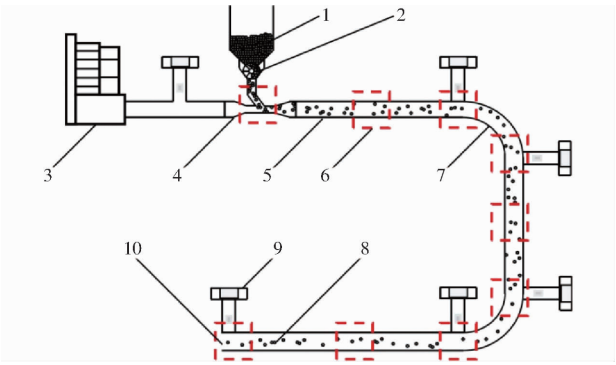


图 2 颗粒气力输送系统结构示意图

Fig. 2 Pellet pneumatic conveying system schematic

1. 料斗 2. 星型卸料器 3. 风机 4. 文丘里管 5. 透明有机玻璃管 6. 数据采集区域 7. 弯管 8. 颗粒饲料 9. 压力变送器 10. 管道出口

式中 k_l——颗粒粒径系数

ρ_p——颗粒密度,mg/m^3

k_d——物料特性系数

L——管道长度,m

颗粒粒径为 1 ~ 10 mm 时,粒径系数为 16 ~ 20,颗粒饲料当量直径为 2.5 ~ 3.5 mm,粒径系数取 16;物料特性系数为 2×10^{-5} ~ 5×10^{-5},输送距离一般不超过 100 m,忽略物料特性系数对入口风速的影响。为保证裕量[31],取管道入口风速为 15 m/s。

料气输送比是衡量气力输送系统输送效率的重要指标,公式为

$$\psi = \frac{m}{M} \tag{2}$$

其中

$$M = \rho_i v_i \frac{\pi D^2}{4} \tag{3}$$

式中 ψ——料气输送比

m——单位时间饲料输送质量,kg/s

M——单位时间气体输送质量,kg/s

ρ_i——空气密度,本研究在标准大气压下进行,取 1.185 kg/m^3

D——输送管道直径,m

由式(2)、(3)可得

$$D = \sqrt{\frac{4m}{\pi\psi\rho_i v_i}} \tag{4}$$

本研究探究喂料速率、入口风速和弯管数对气力输送系统性能的影响。预试验选取喂料速率范围为 5 ~ 40 g/s,梯度为 5 g/s,共 8 组试验,结果表明当喂料速率大于 35 g/s 时,饲料在文丘里管内产生了堵塞现象,因此,取优化设计的喂料速率为 30 g/s。

饲料在气力输送系统中为稀相运输,料气输送比取值范围 0.1 ~ 1.3[15, 32],管道直径设置为 45 mm,计算得料气输送比为 1.1。

1.4　CFD－DEM 数学模型

离散元法和计算流体力学二相流耦合方法能分析颗粒在流场的运动状态，近年来在农业工程领域得到了广泛应用。饲料以固体的形式落入气力输送系统，并以一定速度排出。在分析区域内，饲料颗粒受到复杂流场的影响，饲料的运动状态对流场产生作用力，因此采用 CFD－DEM 研究颗粒饲料的运动。

在气力输送系统中，气体被认为是不可压缩的，颗粒的运动遵循牛顿第二定律。对于 CFD－DEM 二相流模型，湍流运动遵循质量和动量守恒定律[33]。

2　气力输送仿真模型

2.1　颗粒饲料气力输送台架

为研究颗粒饲料气力输送系统的输送性能和颗粒运动特性，搭建了空气辅助变量输送系统试验台，如图 3 所示。试验台由便携式计算机、电机、风机、文丘里管、星型卸料器、料斗、压力变送器、透明有机玻璃管、高速摄像机、补光灯、控制器和台架组成。压力变送器安装在文丘里管进气口、输送管道出口、弯道入口和弯道出口，用于实时监测管道内的压力变化。高速摄像机拍摄颗粒的运动状态。系统工作时，由控制器控制电机和风机功率。控制器调节风机功率，改变风机提供的入口风速。通过调节星型卸料器驱动电机功率，控制星型卸料器的旋转速度改变颗粒的喂料速率，从料斗带动定量的颗粒饲料进入文丘里管下料管，落入加速区在管内混合后进入输送管道，最终完成投饲作业。

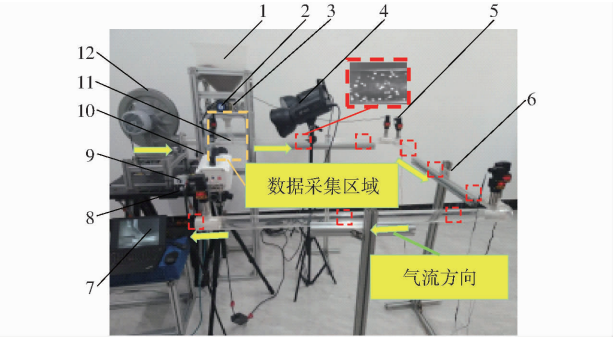


图 3　颗粒气力输送系统试验台架

Fig. 3　Pellet pneumatic conveying system test stand

1. 料斗　2. 电机　3. 星型卸料器　4. 补光灯　5. 压力变送器　6. 透明有机玻璃管　7. 便携式计算机　8. 电机控制器　9. 风机控制器　10. 高速摄像机　11. 文丘里管　12. 风机

2.2　颗粒饲料气力输送仿真试验

2.2.1　CFD－DEM 数值模型参数设置

本研究采用 Fluent 2022R1 和 EDEM 2022 对气固两相流进行数值模拟。在 Solidworks 中建立气力输送系统几何模型，导入 ICEM 软件进行网格划分，设置管道入口、文丘里管下料管入口为 inlet，管道出口为 oulet，网格单元尺寸为 9 mm，EDEM 中网格单元尺寸为最小填充颗粒半径的 3 倍，颗粒气力输送系统网格结构如图 4 所示。

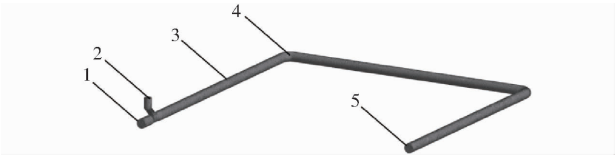


图 4　颗粒气力输送系统网格结构图

Fig. 4　Pellet pneumatic conveying system grid structure

1. 管道入口　2. 文丘里管下料管入口　3. 输送管道　4. 弯管　5. 管道出口

由于 $k-\varepsilon$ 模型具有可靠的精度，能够准确计算流场的湍流，本研究采用 $k-\varepsilon$ 模型模拟连续相的流体运动。颗粒饲料含水率低，在气力输送中无粘结，采用 Hertz－Mindlin no slip 模型离散相的颗粒运动。Fluent 和 EDEM 的计算时间步长分别为 4×10^{-4} s 和 2×10^{-6} s，Fluent 每个时间步的迭代步数为 20。为详细提取颗粒运动信息，设置 EDEM 每 0.001 s 保存一次数据。使用配备 i9 13900KF 处理器、256 GB 内存和 NVIDIA RTX 4090 的工作站进行计算，每组仿真试验的计算时间约为 8 h。

2.2.2　文丘里管入口速度

气力输送系统运行过程中，饲料从料斗落入星型卸料器旋转进入文丘里管入口，颗粒饲料经过自由落体和叶片的拍打作用已获取了一定的初速度。对整个气力输送过程进行计算会导致网格数量增大，大大降低了计算效率。为提高计算效率，将颗粒运动初始点设置在文丘里管入口处。颗粒从星型卸料器排出时，受叶片拍击和重力影响，在水平 X 方向做匀速直线运动，竖直 Y 方向做匀加速直线运动，加速度为 g。如图 5 所示，为准确标定饲料初速度，采用高速摄像机以 2 000 f/s 拍摄图像，虚线为颗粒群的运动轨迹，气力输送系统的入口风速为15 m/s，喂料速率为 30 g/s，颗粒的初速度计算式为

$$\begin{cases} S = v_x t \\ H = v_y t + \dfrac{1}{2} g t^2 \end{cases} \tag{5}$$

式中　S——颗粒水平运动距离，m

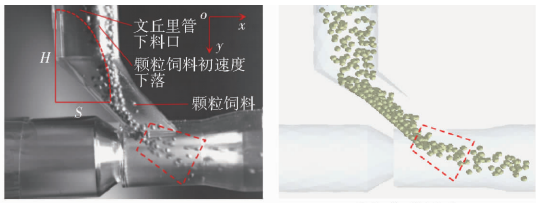
H——颗粒竖直运动距离，m

v_x——颗粒水平初速度，m/s

v_y——颗粒竖直初速度，m/s

t——颗粒运动时间，s

g——重力加速度，m/s^2



(a) 高速摄像机拍摄图像 (b) 仿真试验

图 5 颗粒初速度标定

Fig. 5 Particle initial velocity calibration

2.2.3 颗粒稳定输送时间

在入口风速 15 m/s、双弯管、30 g/s 的条件下仿真,得到 0.2、0.8、1.2、1.6 s 的管道出口处 300 mm 统计区域的颗粒数量,如图 6 所示。0.65 s 首个颗粒运动至统计区域,0.65 ~ 1.0 s 在统计区域内的颗粒逐步增加,1.0 ~ 2.5 s 在统计区域内的颗粒数量趋于稳定并在 100 ~ 350 颗之间动态浮动(振荡时长保持 1.5 s,垂直位移为 225 颗,振幅为 125 颗,即认为气力输送系统达到动平衡状态),如图 7 所示。为保证不同结构模型都能达到动平衡,设置每组仿真时长为 1.2 s,即仿真 3 000 步。在 0.1 ~ 1.2 s 内统计通过文丘里管喉管的颗粒质量为单位时间饲料输送质量 m。

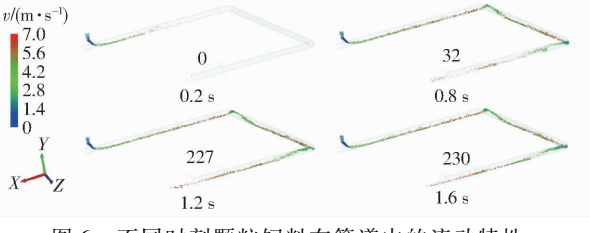


图 6 不同时刻颗粒饲料在管道中的流动特性

Fig. 6 Flow characteristics of granular feed in pipes at different simulation times

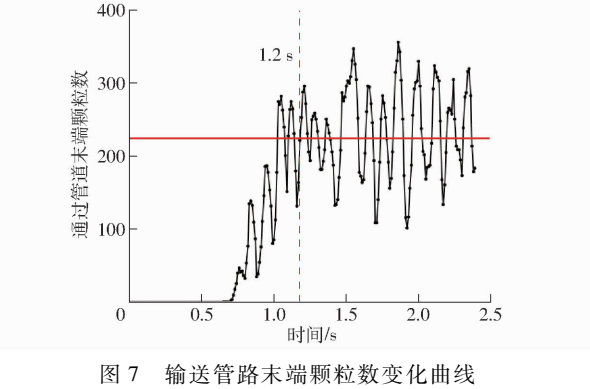


图 7 输送管路末端颗粒数变化曲线

Fig. 7 Variation curve of particle number at outlet of conveying pipeline

2.3 数值模型验证

为验证标定的颗粒饲料离散元参数和 CFD - DEM 数值模型的准确性,进行了与数值模型相同条件的台架试验。以管道内的压降、颗粒饲料在管道内不同区间的速度、管道出口颗粒饲料的 Y 轴坐标平均值、标准差为参考值,在文丘里管入口设置入口风速为 15 m/s,喂料速率为 30 g/s 条件下进行试验。通过压力变送器监测 6 个区域的压力,高速摄像机监测 9 个区域内颗粒速度和颗粒坐标,仿真试验与台架试验结果对比图如图 8 所示。

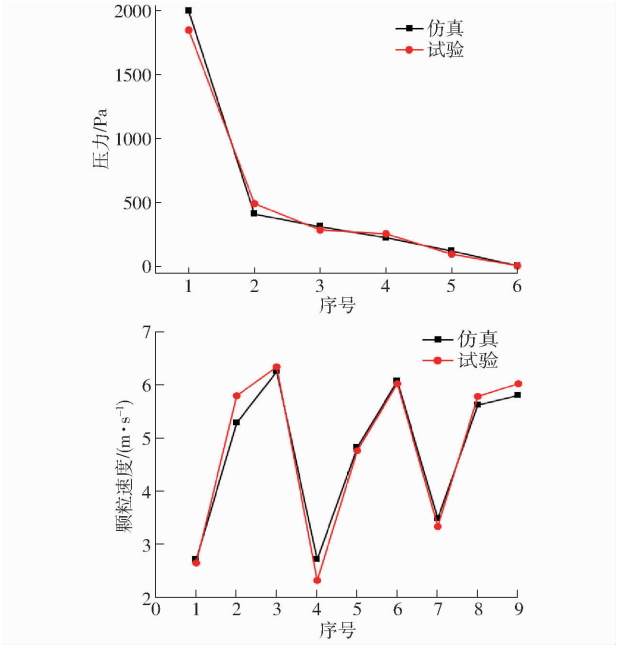


图 8 不同监测点仿真与试验压力、颗粒速度对比曲线

Fig. 8 Comparison of simulated and experimental pressure and particle velocity at different monitoring points

物理试验料气输送比、颗粒出口平均速度、出口颗粒在竖直方向坐标平均值和标准差分别为 1.04、6.02 m/s、-9.05 mm 和 9.42 mm,仿真试验料气输送比、颗粒出口平均速度、出口颗粒在竖直方向坐标平均值和标准差分别为 1.06、5.80 m/s、-9.38 mm 和 8.85 mm,相对误差分别为 0.19%、3.65%、3.53% 和 6.46%。不同监测点压力的相对误差分别为 7.42% ~ 20.24%,颗粒速度的相对误差为 2.26% ~ 8.97%。使用叶片式风速仪(希玛 AS856 型,量程 45 m/s)测量出口风速,物理试验与仿真试验的相对误差为 5.96%。结果表明:气力输送系统 CFD - DEM 数值模型可靠,可进行下一步关键参数优化试验。

3 颗粒饲料气力输送 Box - Behnken 仿真试验

3.1 Box - Behnken 试验因素水平

为了提高气力输送系统的输送性能,对气力输送关键参数进行优化。气力输送系统的关键结构参数有文丘里管结构参数、管径、喂料速率、入口风速、弯管数、弯管角度等。文丘里管的结构参数根据前人研究[20,33-34]设置,管道采用水平放置。根据气力

输送系统的工作工况，选取喂料速率 ω、入口风速 ξ、弯管数 ρ 作为试验因素，弯管角度为 90°。

3.2　Box－Behnken 试验响应指标

输送效益、输送距离、饲料破碎率是评价气力输送系统投饲性能的重要指标。料气输送比 ψ 能评价气力输送系统的输送效益，本研究定义为单位时间饲料输送质量和文丘里管入口气体质量的比值，以公式(2)计算。ψ 越大，气力输送系统的输送效益越高。

颗粒饲料在管道出口处的速度能反映高速气流对饲料的加速性能，饲料获取的动能越大，气力输送系统的输送距离越大。EDEM 软件后处理功能可统计每个颗粒的运动速度，颗粒的平均速度计算式为

$$\bar{v} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} v_i \tag{6}$$

式中　$\bar{v}$——颗粒平均速度，m/s

v_i——颗粒速度，m/s

n——颗粒数

稀相运输颗粒悬浮在气流中，具有速度快、压力低等特点，能有效防止颗粒在管道底部堆积堵塞[35]和减小颗粒与管道壁面碰撞导致的颗粒破碎。用管道出口处颗粒饲料在竖直 Y 方向坐标的平均值 $\bar{Y}$ 和标准差 Y_{SD} 表征饲料的悬浮程度，$\bar{Y}$ 约接近 0，Y_{SD} 越大表示悬浮程度越高。$\bar{Y}$ 越小则表示颗粒沉积输送，加速管道的磨损腐蚀，Y_{SD} 较小时颗粒堆积在同一区域运动，加大了颗粒碰撞的概率从而导致颗粒破碎，计算式为

$$\begin{cases} \bar{Y} = \dfrac{1}{n}\displaystyle\sum_{i=1}^{n} Y_i \\ Y_{SD} = \left[\displaystyle\sum_{i=1}^{n} \dfrac{(\bar{Y} - Y_i)^2}{n-1}\right]^{\frac{1}{2}} \end{cases} \tag{7}$$

式中　Y_i——颗粒在竖直 Y 方向上坐标，mm

综上，将料气输送比 ψ、颗粒出口平均速度 $\bar{v}$、出口颗粒在竖直方向坐标平均值 $\bar{Y}$、标准差 Y_{SD} 作为评价指标。设计三因素三水平，共 17 组仿真试验，采用 Design-Expert 10 对试验结果进行分析。

3.3　方差分析和回归模型建立

对喂料速率 ω、入口风速 ξ、弯管数 ρ 进行了 17 组仿真试验，试验因素与编码如表 3 所示，试验结果如表 4 所示。并建立了 4 个响应指标的回归方程，方差分析如表 5 ~ 8 所示，表中 A、B、C 为因素编码值。

如表 5 所示，料气输送比 ψ 的二次回归模型 $P<0.01$，表明该模型极显著。失拟项 P 值大于 0.05，说明模型拟合的二次回归方程能准确反映 ψ 与 ω、ξ、ρ 之间的关系。仅有 A 对 ψ 影响极显著，其他项均不显著。从方差分析的结果可以得到 ψ 的回归模型

表 3　Box－Behnken 试验因素与编码

Tab.3　Box－Behnken test factors and codes

编码	因素		
	喂料速率 ω/(g·s^{-1})	入口风速 ξ/(m·s^{-1})	弯管数 ρ
－1	10	14	0
0	20	17	1
1	30	20	2

表 4　Box－Behnken 试验方案与结果

Tab.4　Box－Behnken test program and results

试验号	因素			响应指标			
	ω/(g·s^{-1})	ξ/(m·s^{-1})	ρ	ψ	$\bar{v}$/(m·s^{-1})	$\bar{Y}$/mm	Y_{SD}/mm
1	10	14	1	0.359	7.67	－7.712	8.208
2	30	14	1	0.979	6.98	－11.386	6.306
3	10	20	1	0.358	12.11	－2.222	9.186
4	30	20	1	0.988	11.61	－5.186	8.308
5	10	17	0	0.361	10.85	－2.599	8.995
6	30	17	0	1.058	10.19	－6.802	7.747
7	10	17	2	0.362	8.97	－4.636	7.564
8	30	17	2	1.076	8.32	－10.125	6.786
9	20	14	0	0.716	8.00	－9.439	6.802
10	20	20	0	0.717	12.59	－3.559	8.834
11	20	14	2	0.709	6.40	－11.022	5.958
12	20	20	2	0.702	9.91	－3.043	8.403
13	20	17	1	0.721	9.73	－4.993	8.253
14	20	17	1	0.712	9.70	－4.874	8.351
15	20	17	1	0.683	9.61	－3.956	8.245
16	20	17	1	0.706	9.76	－4.264	7.842
17	20	17	1	0.732	9.97	－3.962	7.068

表 5　料气输送比方差分析

Tab.5　ANOVA for material-gas transport ratio

来源	平方和	均方	F	P
模型	0.89	0.099	143.51	<0.000 1 **
A	0.89	0.89	1 283.96	<0.000 1 **
B	5.00×10^{-7}	5.00×10^{-7}	7.25×10^{-4}	0.979 3
C	1.13×10^{-6}	1.13×10^{-6}	1.63×10^{-3}	0.968 9
AB	2.50×10^{-5}	2.50×10^{-5}	0.036	0.854 4
AC	7.23×10^{-5}	7.23×10^{-5}	0.10	0.755 6
BC	1.60×10^{-5}	1.60×10^{-5}	0.023	0.883 2
A^2	1.41×10^{-3}	1.41×10^{-3}	2.04	0.196 3
B^2	1.95×10^{-3}	1.95×10^{-3}	2.83	0.136 4
C^2	1.99×10^{-3}	1.99×10^{-3}	2.88	0.133 3
残差	4.83×10^{-3}	6.90×10^{-4}		
失拟	3.48×10^{-3}	1.16×10^{-3}	3.43	0.132 4
纯误差	1.35×10^{-3}	3.38×10^{-4}		
总和	0.90			

注：** 表示差异极显著($P\leqslant0.01$)，下同。

$$\psi = 0.71 + 0.33A + 0.000\,25B - 0.000\,375C + 0.002\,5AB + 0.004\,25AC - 0.002BC - 0.018A^2 - 0.022B^2 + 0.022C^2 \quad (8)$$

如表 6 所示,颗粒出口平均速度 $\bar{v}$ 的二次回归模型 $P<0.01$,表明该模型极显著。失拟项 P 值大于 0.05,说明模型拟合的二次回归方程能准确反映 $\bar{v}$ 与 ω、ξ、ρ 之间的关系。该模型一次项 A、B、C 影响均极显著,交互项 BC 和平方项 B^2、C^2 影响显著,其他项不显著。各因素对颗粒出口平均速度影响主次顺序为 B、C、A。从方差分析的结果可以得到 $\bar{v}$ 的回归模型

$$\bar{v} = 9.75 - 0.31A + 2.15B - C + 0.047AB + 0.002\,5AC - 0.27BC + 0.098A^2 - 0.26B^2 - 0.27C^2 \quad (9)$$

表 6 颗粒出口平均速度方差分析

Tab. 6 ANOVA of average particle export velocity

来源	平方和	均方	F	P
模型	46.64	5.18	160.89	<0.000 1 **
A	0.78	0.78	24.26	0.001 7 **
B	36.85	36.85	1144.22	<0.000 1 **
C	8.06	8.06	250.26	<0.000 1 **
AB	9.03×10^{-3}	9.03×10^{-3}	0.28	0.612 9
AC	2.50×10^{-5}	2.50×10^{-5}	7.76×10^{-4}	0.978 6
BC	0.29	0.29	9.05	0.019 7 *
A^2	0.040	0.040	1.26	0.299 5
B^2	0.28	0.28	8.80	0.020 9 *
C^2	0.31	0.31	9.50	0.017 8 *
残差	0.23	0.032		
失拟	0.15	0.052	2.91	0.164 8
纯误差	0.071	0.018		
总和	46.86			

注:* 表示差异显著(0.01 < P < 0.05),下同。

表 7 出口颗粒在竖直方向坐标平均值 $\bar{Y}$ 方差分析

Tab. 7 ANOVA of mean values of coordinates of exported particles in Y-direction

来源	平方和	均方	F	P
模型	138.01	15.33	21.29	0.000 3 **
A	33.33	33.33	46.29	0.000 3 **
B	81.59	81.59	113.30	<0.000 1 **
C	5.16	5.16	7.17	0.031 6 *
AB	0.13	0.13	0.18	0.688 2
AC	0.41	0.41	0.57	0.473 4
BC	1.10	1.10	1.53	0.256 1
A^2	2.34	2.34	3.25	0.114 4
B^2	9.11	9.11	12.65	0.009 3 **
C^2	3.30	3.30	4.58	0.069 6
残差	5.04	0.72		
失拟	4.06	1.35	5.50	0.066 5
纯误差	0.98	0.25		
总和	143.05			

如表 7 所示,出口颗粒在竖直方向坐标平均值 $\bar{Y}$ 的二次回归模型 $P<0.01$,表明该模型极显著。失拟项 $P>0.05$,说明模型拟合的二次回归方程能准确反映 $\bar{Y}$ 与 ω、ξ、ρ 之间的关系。其中,A、B、B^2 影响极显著,C 影响显著,其余项均不显著。根据回归模型的系数可知,各因素对出口颗粒在竖直方向坐标平均值的影响主次顺序为 B、A、C。从方差分析的结果可以得到 $\bar{Y}$ 的回归模型

$$\bar{Y} = -4.41 - 2.04A + 3.19B - 0.8C + 0.18AB - 0.32AC + 0.52BC - 0.75A^2 - 1.47B^2 - 0.88C^2 \quad (10)$$

表 8 出口颗粒在竖直方向坐标标准差 Y_{SD} 方差分析

Tab. 8 ANOVA of standard deviation of coordinates of exported particles in Y-direction

来源	平方和	均方	F	P
模型	12.52	1.39	5.95	0.014 1 *
A	2.89	2.89	12.35	0.009 8 **
B	6.95	6.95	29.73	0.001 0 **
C	1.68	1.68	7.19	0.031 5 *
AB	0.26	0.26	1.12	0.324 8
AC	0.055	0.055	0.24	0.641 8
BC	0.043	0.043	0.18	0.682 1
A^2	0.11	0.11	0.47	0.513 9
B^2	0.053	0.053	0.23	0.649 7
C^2	0.49	0.49	2.09	0.191 4
残差	1.64	0.23		
失拟	0.51	0.17	0.60	0.648 9
纯误差	1.13	0.28		
总和	14.15			

如表 8 所示,出口颗粒在竖直方向坐标标准差 Y_{SD} 的二次回归模型 $P<0.05$,表明该模型显著。失拟项 $P>0.05$,说明模型拟合的二次回归方程能准确反映 Y_{SD} 与 ω、ξ、ρ 之间的关系。其中,A、B 影响极显著,C 影响显著,其余项均不显著。根据回归模型的系数可知,各因素对出口颗粒在竖直方向坐标标准差的影响主次顺序为 B、A、C。从方差分析的结果可以得到 Y_{SD} 的回归模型

$$Y_{SD} = 7.95 - 0.6A + 0.93B - 0.46C + 0.26AB + 0.12AC + 0.1BC + 0.16A^2 - 0.11B^2 - 0.34C^2 \quad (11)$$

3.4 气力输送关键参数优化

基于响应面仿真试验建立的模型对气力输送关键参数进行优化。优化准则为:料气输送比最大,管道出口颗粒平均速度最大,出口颗粒在竖直方向坐标平均值为 0,对应的标准差最大。

$$\begin{cases} \max\ \psi(A,B,C) \\ \max\ \bar{v}(A,B,C) \\ \overline{Y}=0 \\ \max\ Y_{SD}(A,B,C) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1\leqslant A\leqslant 1 \\ -1\leqslant B\leqslant 1 \\ -1\leqslant C\leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{12}$$

通过求解回归方程得到最优参数：喂料速率 $\omega=27.232$ g/s，入口风速 $\xi=20$ m/s，弯管数 $\rho=0$，对应的响应指标为：料气输送比 $\psi=0.943$，颗粒平均速度 $\bar{v}=12.503$ m/s，颗粒 Y 方向平均坐标 $\overline{Y}$ 和标准差 Y_{SD} 分别为 -4.799 mm 和 8.537 mm，仿真验证试验获得的 ψ、$\bar{v}$、$\overline{Y}$、Y_{SD} 分别为 0.966、12.48 m/s、-3.944 mm、8.805 mm，两者相对误差分别为 2.44%、0.18%、17.82% 和 3.14%。说明本文得到的模型参数准确性高，可为气力输送关键参数设置提供参考。

4　气力输送性能分析

4.1　入口风速对模型响应值的影响

由表 5～8 方差分析可知，入口风速对料气输送比 ψ 无影响，但极显著影响 $\bar{v}$、$\overline{Y}$ 和 Y_{SD}。由于文丘里管对喉管的吸附作用减小了下料口阻塞[33]，喂料速率较小时入口风速对料气输送比 ψ 影响较小。但随着入口风速增大，气体速度与颗粒速度的差值增大，固体颗粒在流场中所受的 Saffman 升力和 Magnus 升力增大[15]，提升了颗粒的悬浮程度。当入口速度未达到颗粒的悬浮速度时，颗粒出口速度较小，大部分颗粒在底部沉积运输。颗粒的出口速度较小即表明颗粒在流场中获取的动能较少，增长输送距离后将降低输送效率或者堵塞管道。沉积运输时颗粒在管道底部滚动碰撞，加快了管道磨损，减少管道的使用寿命。提高流场速度，颗粒被快速运动的流场赋予动能获得了较快的运动速度，颗粒出口速度提高，受到的升力大于自身重力在管道中悬浮运动。

以仿真试验第 10 组为例，在管道出口处取 300 mm 的长方体统计区域，监测 1.0 s 时刻所有颗粒的出口速度，管道出口处颗粒的速度能有效反映流场对颗粒的加速性能，如图 9 所示。以仿真试验第 6 组、第 9 组和第 10 组为例，均为无弯管直线输送，3 组仿真试验颗粒在管道出口 100 mm 的二维坐标如图 10 所示，随着入口速度的提高，颗粒在管道出口处的运动趋于完全悬浮。从图中可以看出，颗粒在管道中的 Y 轴平均坐标与其标准差成正比，平均坐标越小，颗粒低速悬浮运输并在管道底部堆积，此时颗粒 Y 轴坐标标准差较小，颗粒的悬浮程度低。提高流场速度，底部的颗粒受升力作用大部分悬浮至空中，运动至管道顶部的颗粒数量显著增加，颗粒群团簇现象显著消失，颗粒在管道中悬浮运输。

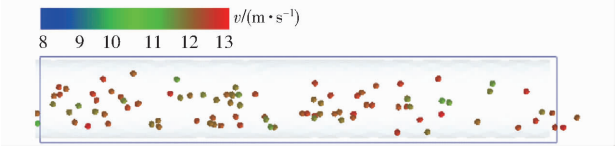


图 9　第 10 组输送管道出口处颗粒运动示意图

Fig. 9　Schematic of particle motion at outlet of conveying pipe in Group 10th

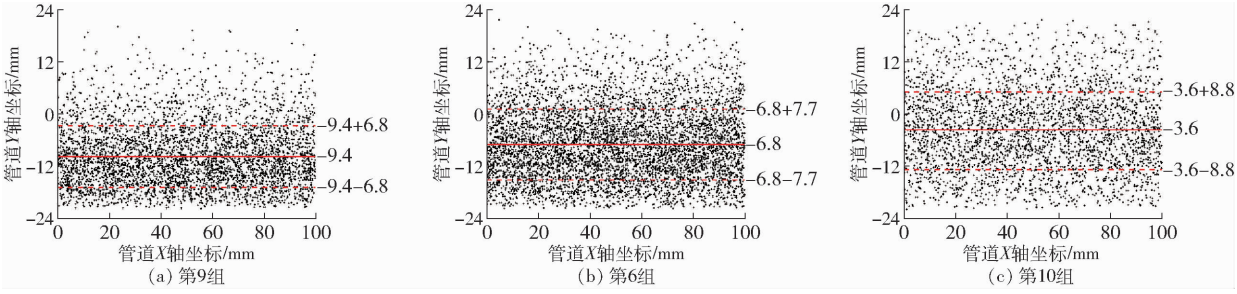


图 10　第 9 组、第 6 组、第 10 组管道出口处颗粒分布情况

Fig. 10　Particle distributions at outlet of Group 9th, Group 6th and Group 10th pipes

4.2　喂料速率对模型响应值的影响

单位时间内的输送效率是衡量气力投饲系统的重要指标，喂料速率是影响输送效率的关键因素。本研究所设计气力输送系统管道直径、入口风速、料气比分别为 45 mm、15 m/s、1.1，通过预试验可得本研究最大的喂料速率应取 30 g/s。当增大喂料速率为 35 g/s 时，颗粒在文丘里管下料口堵塞，喂料量急剧降低，这与仿真试验监测到的现象一致。

由表 5～8 方差分析可知，喂料速率对响应值 ψ、$\bar{v}$、$\overline{Y}$ 和 Y_{SD} 均有极显著影响。在一定范围内（本研究为 10～30 g/s），文丘里管下料管无逆流现象，颗粒受自重作用掉落至文丘里管的喉管加速区进入管道，喂料速率与料气输送比为线性关系。当喂料速率增大时，单位时间内在管道内运动的颗粒增多，颗粒间的碰撞与摩擦增加，消耗了颗粒的动能，降低了颗粒的运动速度。管道颗粒较多时颗粒所占据的空

间体积增大,导致气流通过颗粒层的阻力增加,为了克服阻力,消耗更多气体动能推动颗粒运动,入口风速不变情况下,颗粒速度降低。仿真试验结果表明,在喂料速率较小时,颗粒在管道中主要受流体作用力影响,流体作用下颗粒更容易扩散运动并提高悬浮率。随着喂料速率增加,稠密颗粒加剧了颗粒间的强互锁咬合效应[11],促使颗粒间形成明显团簇效应,使之主要受重力作用在管道底部滚动运输。并且稠密颗粒群的存在加剧了气流流场分布的不均匀性,颗粒群在管道底部堆积时,管道底部区域的气流速度降低,进一步阻碍颗粒的运动。

因此,在设计气力输送系统时应充分考虑喂料速率对颗粒输送性能的影响。

4.3 弯管对模型响应值的影响

在气力输送系统中,由于地形限制不可避免地需要使用弯管适应地形的变化。本研究为探究弯管对气力输送性能的影响,分别对直管输送、单弯管输送和双弯管输送 3 种弯管布置工况进行了仿真试验。由表 5 ~8 方差分析可知,弯管数对 $\bar{v}$、$\overline{Y}$、Y_{SD}有显著影响,对 ψ 无显著影响。

在气力输送过程中,受颗粒间和颗粒与流体间复杂相互作用,产生的涡流结构是影响颗粒运动的主要因素,而弯管会引起气流的涡流和湍流,影响气流速度和稳定性。涡流和湍流会增加气流的能量耗散,降低气流速度,并导致气流方向的不稳定。弯管导致气流受到阻碍,从而产生压力损失。当弯管数越多时,压力损失也会相应增大,影响输送效率。当颗粒流经弯管时与管壁发生碰撞,损失大量速度与能量,导致颗粒的出口速度降低和颗粒悬浮率降低,同时碰撞增加管道的磨损和颗粒的破碎。

在设计气力输送系统时应尽量减少弯管的使用,减小管道压降、管道磨损和颗粒破碎率。为避免上述不良影响,建议研究人员在弯管处安装侧向补气起旋装置[36],该方法能有效缓解管道磨损和颗粒破碎率问题,实现颗粒悬浮运输。

5 结论

(1)设计了管道直径为 45 mm、入口风速为 15 m/s、料气输送比为 1.1 的颗粒饲料气力输送系统。基于 CFD - DEM 方法建立双弯管颗粒饲料气力输送过程的数值模型,4 项响应指标中相对误差为 0.83% ~ 8.97%,出口风速的相对误差为 5.96%,颗粒饲料管道内的运动一致。结果表明:气力输送系统 CFD - DEM 数值模型可靠。

(2)根据 Box - Behnken 试验设计方法,以喂料速率 ω、入口风速 ξ、弯管数 ρ 为因素,料气输送比 ψ、颗粒出口平均速度 $\bar{v}$、出口颗粒在竖直方向坐标平均值 $\overline{Y}$、标准差 Y_{SD}为响应指标,设计了三因素三水平的仿真试验。对气力输送系统关键参数进行优化。ψ、$\bar{v}$、$\overline{Y}$ 和 Y_{SD} 的相对误差分别为 2.44%、0.18%、17.82% 和 3.14%,可对后续设备的结构优化提供参考。

(3)研究喂料速率 ω、入口风速 ξ、弯管数 ρ 对 ψ、$\bar{v}$、$\overline{Y}$、Y_{SD}的影响规律。入口风速对料气输送比 ψ 无影响,ω、ρ 为定值时,ξ 显著提高 $\bar{v}$、$\overline{Y}$ 和 Y_{SD}。当喂料速率增大 ψ 也显著增大,$\bar{v}$、$\overline{Y}$ 和 Y_{SD}显著减小。弯管数对 ψ 无显著影响,当弯管数增加时 $\bar{v}$、$\overline{Y}$ 和 Y_{SD}显著降低。

参 考 文 献

[1] 农业农村部渔业渔政管理局公布 2023 年全国渔业经济统计公报[J]. 中国水产, 2024(7):12 - 13.

[2] 张宝龙, 赵子续, 曲木, 等. 工厂化水产养殖现状分析[J]. 养殖与饲料, 2020(1):31 - 34.
ZHANG Baolong, ZHAO Zixu, QU Mu, et al. Analysis of the current situation of factory aquaculture[J]. Animals Breeding and Feed, 2020(1):31 - 34. (in Chinese)

[3] 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):188 - 201.
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):188 - 201. (in Chinese)

[4] 雷高辉, 刘峰, 董小宁, 等. 水产养殖智能投饵技术研究进展[J]. 饲料工业, 2024,45(14):132 - 144.
LEI Gaohui, LIU Feng, DONG Xiaoning, et al. Research progress of intelligent feeding technology in aquaculture[J]. Feed Industry, 2024,45(14):132 - 144. (in Chinese)

[5] 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)

[6] 唐荣, 沈逸, 许鹏, 等. 池塘养殖全自动精准投饲系统设计与应用[J]. 农业工程学报, 2021,37(9):289 - 296.
TANG Rong, SHEN Yi, XU Peng, et al. Design and application of the automatic precision feeding system of pond aquaculture[J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(9):289 - 296. (in Chinese)

[7] 赵宏波, 何进, 郑智旗, 等. 少免耕播种机条带型行间侧抛清秸防堵装置研究[J]. 农业机械学报, 2020,51(12):24 - 34.
ZHAO Hongbo, HE Jin, ZHENG Zhiqi, et al. Strip tillage inter-row residue side-throwing device of no/minimum-till seeder for anti-blocking and seedbed-cleaning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(12):24 - 34. (in Chinese)

[8] 赵宏波，何进，李洪文，等. 条带式旋切后抛防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2018,49(5):65－75.
ZHAO Hongbo, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of strip rotary-cut-throw anti-blocking implement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(5):65－75. (in Chinese)

[9] ZHAO Hongbo, HUANG Yuxiang, LIU Zhengdao, et al. Applications of discrete element method in the research of agricultural machinery: a review[J]. Agriculture, 2021,11(5):425.

[10] ZHANG Shilin, ZHAO Hongbo, WANG Xuezhen, et al. Discrete element modeling and shear properties of the maize stubble-soil complex[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023,204:107519.

[11] 杨晔峰，韦桐忠，王胤. 基于多分散非球颗粒 CFD－DEM 的沉积物排放扩散特性研究[J]. 水科学进展，2024,35(4):669－679.
YANG Yefeng, WEI Tongzhong, WANG Yin. A study on the sediment dispersion characteristics based on the polydisperse non-spherical particle CFD－DEM model[J]. Advances in Water Science, 2024,35(4):669－679. (in Chinese)

[12] 于文端，丁万涛，王承震，等. 基于 CFD－DEM 方法的泥水平衡盾构排屑效率影响因素敏感度[J]. 科学技术与工程，2024,24(19):8052－8061.
YU Wenduan, DING Wantao, WANG Chengzhen, et al. Sensitivity analysis of factors influencing the cuttings discharged ratio in slurry shield based on CFD－DEM method[J]. Science Technology and Engineering, 2024,24(19):8052－8061. (in Chinese)

[13] 鲍国丞，张振东，杨晓微，等. 基于康达效应的玉米小区收获机除杂装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2024,55(10):234－243.
BAO Guocheng, ZHANG Zhendong, YANG Xiaowei, et al. Design and experiment of separating impurities device for corn plot test harvester based on Coanda effect[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(10):234－243. (in Chinese)

[14] KONG Xianrui, LIU Jing, YANG Tianyuan, et al. Numerical simulation of feed pellet breakage in pneumatic conveying[J]. Biosystems Engineering, 2022,218:31－42.

[15] 雷小龙，廖宜涛，张闻宇，等. 油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验[J]. 农业机械学报，2017,48(3):57－68.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Wenyu, et al. Simulation and experiment of gas-solid flow in seed conveying tube for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(3):57－68. (in Chinese)

[16] 温翔宇，贾洪雷，张胜伟，等. 基于 EDEM－Fluent 耦合的颗粒肥料悬浮速度测定试验[J]. 农业机械学报，2020,51(3):69－77.
WEN Xiangyu, JIA Honglei, ZHANG Shengwei, et al. Test of suspension velocity of granular fertilizer based on EDEM－Fluent coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(3):69－77. (in Chinese)

[17] 高筱钧，徐杨，杨丽，等. 基于 DEM－CFD 耦合的文丘里供种管供种均匀性仿真与试验[J]. 农业机械学报，2018,49(增刊):92－100.
GAO Xiaojun, XU Yang, YANG Li, et al. Simulation and experiment of uniformity of venturi feeding tube based on DEM－CFD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(Supp.):92－100. (in Chinese)

[18] 高炜鹏，谢永和，李德堂，等. 基于 CFD－DEM 耦合的养殖工船自动投饲机的研制与实验[J]. 饲料工业，2024,45(10):10－18.
GAO Weipeng, XIE Yonghe, LI Detang, et al. Development and experiment of automatic feeding machine for breeding vessels based on CFD－DEM coupling[J]. Feed Industry, 2024,45(10):10－18. (in Chinese)

[19] 牛智有，江善晨，孔宪锐，等. 膨化颗粒饲料碰撞破碎特性分析与离散元模拟仿真[J]. 农业机械学报，2023,54(8):371－380.
NIU Zhiyou, JIANG Shanchen, KONG Xianrui, et al. Impact breakage characteristics and discrete element simulation of extruded pellet feed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(8):371－380. (in Chinese)

[20] SUN Zhenjiao, CHEN Lianjun, GAO Kang, et al. Additional pressure loss coefficient of pneumatic conveying of moist-mixed materials for shotcrete based on CFD－DEM method[J]. Journal of Building Engineering, 2023,76:107242.

[21] 刘浩，马瑞，孙雪峰，等. CFD－DEM 方法研究下降管结构对颗粒流动的影响[J]. 农业工程学报，2024,40(13):205－213.
LIU Hao, MA Rui, SUN Xuefeng, et al. Effect of down-tube structure on particle flow by CFD－DEM method[J]. Transactions of the CSAE, 2024,40(13):205－213. (in Chinese)

[22] ZHOU Jiawei, XU Yaojie, GUO Xiaole, et al. Numerical simulations on the flow regime characteristics of horizontal pneumatic conveying using CFD－DEM[J]. Powder Technology, 2024,438:119641.

[23] ZHAO Pengfei, GAO Xiaojun, SU Yuan, et al. Investigation of seeding performance of a novel high-speed precision seed metering device based on numerical simulation and high-speed camera[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024,217:108563.

[24] 高筱钧，王世同，吴晓鹏，等. 播种机气送式集排器增压管内种子流运移特性研究[J]. 农业机械学报，2023,54(增刊1):47－56，75.
GAO Xiaojun, WANG Shitong, WU Xiaopeng, et al. Seed flow migration characteristics in booster tube of gas-fed collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(Supp.1):47－56, 75. (in Chinese)

[25] SCHNORR F E A, LIMA N C, FRANKLIN E M. Resolved CFD－DEM simulations of the hydraulic conveying of coarse grains through a very-narrow elbow[J]. Powder Technology, 2022,395:811－821.

(下转第 199 页)

[22] 夏俊芳，张朋，苑宏文，等. 水稻秸秆离散元柔性模型参数标定与试验验证[J]. 农业机械学报，2024，55(9)：174－184.
XIA Junfang，ZHANG Peng，YUAN Hongwen，et al. Calibration and verification of flexible rice straw model by discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(9)：174－184.（in Chinese）

[23] 张喜瑞，胡旭航，刘俊孝，等. 香蕉秸秆离散元仿真粘结模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(5)：121－130.
ZHANG Xirui，HU Xuhang，LIU Junxiao，et al. Calibration and verification of bonding parameters of banana straw simulation model based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(5)：121－130.（in Chinese）

[24] XIA Y，KLINGER J，BHATTACHARJEE T，et al. An experiment-informed discrete element modelling study of knife milling for flexural biomass feedstocks[J]. Biosystems Engineering，2023，236：39－53.

[25] XIA Y，NAVAR R，TASNIM Z，et al. The role of flexural particles in the shear flow of pine residue biomass：an experiment-informed DEM simulation study[J]. Powder Technology，2024，440：119771.

[26] ZHANG Z，MEI F，XIAO P，et al. Discrete element modelling and simulation parameters calibration for the compacted straw cube[J]. Biosystems Engineering，2023，230：301－312.

[27] LI X，ZHAO J，KWAN J S H. Assessing debris flow impact on flexible ring net barrier：a coupled CFD－DEM study[J]. Computers and Geotechnics，2020，128：103850.

[28] HAN J，SHEN K，GUO Y，et al. Discrete element simulations of flexible ribbon-like particles[J]. Powder Technology，2023，429：118950.

[29] LIU L，JI S. Ice load on floating structure simulated with dilated polyhedral discrete element method in broken ice field[J]. Applied Ocean Research，2018，75：53－65.

[30] 李涛，王振华，翟改霞，等. 苜蓿草植株离散元模型建立与参数标定[J]. 农业机械学报，2024，55(增刊2)：187－199.
LI Tao，WANG Zhenhua，ZHAI Gaixia，et al. Establishment and parameter calibration of discrete element model of alfalfa plant[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(Supp.2)：187－199.（in Chinese）

（上接第 189 页）

[26] SUN Zhenjiao，CHEN Lianjun，MA Hui，et al. Study on flow characteristics of vertical pneumatic conveying of stiff shotcrete materials based on CFD－DEM[J]. Powder Technology，2024，439：119716.

[27] SUN Zhenjiao，CHEN Lianjun，MA Guanguo，et al. An experimental study on the elbow pressure drop and conveying stability of pneumatic conveying for stiff shotcrete based on response surface methodology[J]. Processes，2023，11(5)：1574.

[28] ZHOU Mengmeng，WANG Shuai，KUANG Shibo，et al. CFD－DEM modelling of hydraulic conveying of solid particles in a vertical pipe[J]. Powder Technology，2019，354：893－905.

[29] CHEN Lianjun，MA Hui，GAO Kang，et al. Experimental study on the flow characteristics of horizontal pneumatic conveying of stiff shotcrete[J]. Journal of Building Engineering，2023，73：106765.

[30] 吴孟宸，丛锦玲，闫琴，等. 花生种子颗粒离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业工程学报，2020，36(23)：30－38.
WU Mengchen，CONG Jinling，YAN Qin，et al. Calibration and experiments for discrete element simulation parameters of peanut seed particles[J]. Transactions of the CSAE，2020，36(23)：30－38.（in Chinese）

[31] 李继伟，袁文胜，翟欢乐，等. 气力输送技术在农业机械中的应用[J]. 中国农机化学报，2023，44(1)：85－92，115.
LI Jiwei，YUAN Wensheng，ZHAI Huanle，et al. Application of pneumatic conveying in agricultural machinery[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2023，44(1)：85－92，115.（in Chinese）

[32] 常金丽，张晓辉. 2BQ－10 型气流一阶集排式排种系统设计与试验[J]. 农业工程学报，2011，27(1)：136－141.
CHANG Jinli，ZHANG Xiaohui. Design and test of one-step centralized type pneumatic seeding system[J]. Transactions of the CSAE，2011，27(1)：136－141.（in Chinese）

[33] MA Haolin，ZHAO Chunjiang，YANG Shuo，et al. Research on a new-designed Venturi ejector and dazomet particle motion characteristics for dilute-phase pneumatic conveying systems based on CFD－DEM[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2023，213：108240.

[34] 林礼群，王志勇. 工船养殖颗粒饲料气力输送系统参数优化[J]. 船舶工程，2020，42(增刊2)：51－55.
LIN Liqun，WANG Zhiyong. Parameter optimization of feed pneumatic conveying system for aquaculture vessel[J]. Ship Engineering，2020，42(Supp.2)：51－55.（in Chinese）

[35] 纪云. 喷浆物料长距离管道气力输送特性研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2019.
JI Yun. Research on pneumatic conveying characteristics of spraying materials in long distance pipeline[D]. Xuzhou：China University of Mining and Technology，2019.（in Chinese）

[36] 尚坤，李永祥，宋海豪，等. 基于气固耦合散粮旋流输送弯管流场特性研究[J]. 包装工程，2024，45(5)：180－187.
SHANG Kun，LI Yongxiang，SONG Haihao，et al. Field flow characteristics of grain particle swirl conveying bend based on gas-solid coupling[J]. Packaging Engineering，2024，45(5)：180－187.（in Chinese）