郭上榜,李 蕾,叶文杰,等.面向高固厌氧消化的参数化 CFD 搅拌优化框架建立与应用 [J]. 中国环境科学, 2025,45(12):6694-6705.
Guo S B, Li L, Ye W J, et al. Development and application of an integrated parametric CFD modeling framework for stirring optimization in high-solids anaerobic digestion systems [J]. China Environmental Science, 2025,45(12):6694-6705.

面向高固厌氧消化的参数化 CFD 搅拌优化框架建立与应用

郭上榜,李 蕾*,叶文杰,韩林沛,徐 鹏,彭绪亚 (重庆大学,三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 400045)

摘要: 采用计算流体动力学(CFD)模拟技术,建立了一套参数化搅拌优化框架,系统探究了机械-气动协同搅拌对高固厌氧消化反应器混合传质特性的影响及机制.该框架整合描述物料流变行为的幂律模型、多相流模型及定量优化准则,以典型高固体浓度(TS=15%)为具体应用对象,先后建立单相流及多相流数值模型,定量评估了 4 种桨型结构(二折叶桨式/圆盘涡轮式/锚式/单螺带式)、3 级转速梯度(20.00, 60.00, 100.00r/min)下的流场分布特征.结果表明,单螺带桨在 60.00r/min 工况下可减少 81.49%死区体积,且液相平均剪切应力(4.42Pa)低于微生物絮体破坏阈值(5.00Pa).耦合气体倾斜射流搅拌后,采用 30°喷嘴倾角可使气含率提升至 24.20%(较垂直喷射提高 4.27 倍);将喷嘴孔径优化至 10.00mm 可实现液相高速区占比与气泡数密度的协同控制.最终构建的底部对称双喷嘴-单螺带桨协同搅拌系统,可使混合均匀度指数提升 14.75%、能耗降低 28.95%.基于上述针对 TS=15%体系的成功应用与流场分析,本研究建立了微生物活性维持与流体力学优化的定量匹配准则.该参数化 CFD 框架可通过输入特定物料的实测流变参数,推广应用于评估不同含固率体系下的搅拌效果,为高固厌氧消化反应器设计提供了普适性的参数化优化方法和理论依据.

关键词: 高固厌氧消化；计算流体动力学；搅拌；参数化优化；非牛顿流体
中图分类号: X705 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2025)12-6694-12

Development and application of an integrated parametric CFD modeling framework for stirring optimization in high-solids anaerobic digestion systems. GUO Shang-bang, LI Lei*, YE Wen-jie, HAN Lin-pei, XU Peng, PENG Xu-ya (Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China). *China Environmental Science*, 2025,45(12)：6694~6705

Abstract: A parametric stirring optimization framework was established using computational fluid dynamics (CFD) simulations to systematically investigate the effects and mechanisms of mechanical-pneumatic synergistic stirring on the mixing and mass transfer characteristics of high-solid anaerobic digesters. This framework integrated a power-law model to describe the rheological behavior of the material, a multiphase flow model, and quantitative optimization criteria. Utilizing a typical high-solid concentration (TS = 15%) as a specific case, single-phase and multiphase numerical models were developed to quantitatively evaluate the flow field distribution under four types of impellers (double-pitched blade turbine, disk turbine, anchor, and single helical ribbon) and three rotational speeds (20.00, 60.00, and 100.00r/min). The results indicated that the dead zone volume was reduced by 81.49% with the single helical ribbon impeller at 60.00r/min, while the average liquid-phase shear stress (4.42Pa) remained below the microbial floc destruction threshold of 5.00Pa. Furthermore, when inclined gas jet stirring was coupled, a nozzle inclination angle of 30° was found to increase the gas holdup to 24.20%, representing a 4.27-fold improvement over vertical jetting. The nozzle orifice diameter was optimized to 10.00mm to achieve synergistic control over the high-speed liquid-phase region ratio and bubble number density. Ultimately, a bottom-symmetric dual-nozzle-single helical ribbon impeller synergistic stirring system was constructed, which increased the mixing uniformity index by 14.75% and reduced energy consumption by 28.95%. Based on the successful application and flow field analysis of the TS=15% system, quantitative criteria for matching microbial activity maintenance with fluid dynamics optimization were established. This parameterized CFD framework can be extended to evaluate mixing effects in systems with varying solid content by incorporating material-specific rheological parameters, providing a universal optimization method and a theoretical foundation for the design of high-solid anaerobic digestion reactors.

Key words: high solid anaerobic digestion; computational fluid dynamics; agitation; parametric optimization; non-Newtonian fluid

我国作为农业生产大国,平均每年产生 40.00 亿 t 畜禽粪便和近 8.65 亿 t 秸秆[1-2],其高有机质含量赋予这类固体废物显著的资源化潜力.厌氧消化(AD)因具有“减污-降碳-产能”三位一体的技术优势[3],已成为我国种养废物资源化的重要路径.种养废物的含固率可高达 20%~90%[4],相比湿

收稿日期: 2025-05-15
基金项目: 国家科技部重点研发计划项目(2023YFC3905802);重庆市技术创新与应用发展专项(CSTB2023TIAD-KPX0084)
* 责任作者, 教授, lileich17@cqu.edu.cn

式消化,采用高固厌氧消化(HSAD)处理种养废物,具有容积效率高、沼液产量低、有机负荷高、能耗低等显著优势[5-6].然而,高黏度的发酵浆体导致流变特性复杂化,诱发传质效率下降、局部死区形成等瓶颈问题[7].研究表明,当含固率超过 12%时,反应器内死区体积占比可达 22.40%~46.66%[8-10],这不仅阻碍底物与微生物的有效接触,还会抑制产甲烷菌群的电子传递效率.大量研究表明,充分混合可以增加生物可降解有机物与微生物之间的接触,提高干式厌氧消化系统中的沼气产量[11-12],显著提升系统宏观层面的传质效果[13],而沼气再循环作为气动搅拌的核心手段,不仅能通过提升气含率改善气液传质混合[14],更被证实可增强 CO_2 与微生物接触,降低氢分压,从而促进氢营养型及同型产乙酸微生物的生长[15].搅拌被认为对传质优化存在积极影响,但传统手段难以原位获取高固体系下的流场分布与剪切应力数据,制约着反应器搅拌形式及相关运行参数的优化进程.

计算流体动力学(CFD)技术为突破上述瓶颈提供了新契机.该技术通过数值模拟可精准解析反应器内多相流运动规律,已成功应用于机械搅拌桨叶类型[16]、层数[17]、尺寸[18-20]、搅拌速度[21]及时间[22]等参数的选择与优化.此外,还有改进气动搅拌中气体引流装置[23-24]、设计参数[25-26]、安装角度[27],以及确定沼气料液水力搅拌时的最佳搅拌速度[28]等场景的应用报道.值得注意的是,现有研究多聚焦单一搅拌模式的流场模拟,高固系统中机械搅拌与气动搅拌的耦合是强化传质的有效方法[29],但相关研究存在明显空白.因此,发展多搅拌模式协同的传质强化策略已成为提升 HSAD 效能的关键突破口.

在此背景下,本研究拟通过 CFD 模拟技术对种养废物高固发酵反应器的搅拌模式提出一套参数化优化框架,并以典型高固体浓度(TS=15%)为基准案例进行应用验证.具体而言,首先通过桨型优选与转速优化建立机械搅拌基础参数;进而针对机械搅拌下的速度死区,设计加压沼气循环系统实现定向气动扰动;最后通过喷气角度与喷嘴孔径的协同调控,实现反应器死区面积缩减与单位能耗传质效率的同步优化.本研究旨在通过对 TS=15%的基准案例的流场特性分析,建立普适性的评价与优化准则,从而为高固厌氧消化反应器设计提供参数化优化方法和理论依据.

1　模型建立

1.1　几何模型

基于实际反应罐的结构参数,在 Design Modeler 中建立了等比例的罐体三维模型,如图 1 所示.罐体主体直径为 160.00mm,总高度为 280.00mm,内部搅拌系统由高度为 230.00mm、轴径为 10.00mm 的搅拌轴支撑.针对高黏度发酵液的混合需求,基于不同桨叶的流场特性与高黏度流体特性之间的互补关系,分别构建了二折叶桨式、圆盘涡轮式、锚式与单螺带式搅拌桨进行对比分析[12],不同桨型的几何参数如图 1b 所示.喷嘴部分采用长 20.00mm 的圆柱结构,沿轴向对称布置于罐底壁面.在 0°~90°的倾角范围调节喷嘴安装方位,并设置小、中、大 3 种喷孔孔径(5.00,10.00,15.00mm)开展参数化研究,基于前期 Fluent 流场仿真优化结果,将气体喷射速度精准维持在 0.80m/s 的最优值,该设定适用于所有运行工况.

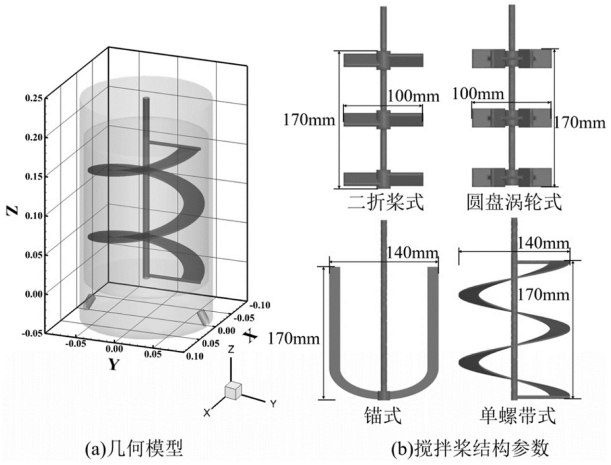


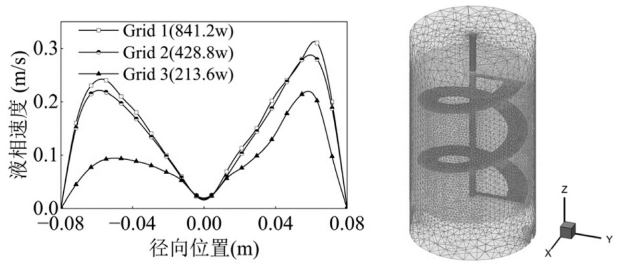
图 1　发酵罐的几何模型和搅拌桨结构参数示意

Fig.1　Geometric model of the fermenter and schematic diagram of the structural parameters of the stirring impeller

1.2　网格划分

本研究以整个反应器为研究对象,采用数值模拟方法对其内部流场进行仿真分析.采用 ICEM 软件进行网格划分,主要采用非结构四面体网格,将反应器划分为包含搅拌桨的旋转域与其余静止域,对搅拌轴、桨叶、气体喷嘴以及静止域和旋转域交界面处进行局部网格加密,以提高关键部位的数值模拟精度.

为进一步验证网格划分方案的合理性,本研究针对搅拌器在转速 60.00r/min, 系统压力 101325.00Pa 的工况下,分别采用 841.20 万(Grid 1)、428.80 万(Grid 2)和 213.60 万(Grid 3)个网格进行了数值模拟,重点对比了不同网格密度下液相径向速度分布的差异(图 2a).通过系统分析发现,在靠近搅拌桨叶右侧边缘区域(r=0.06m),细网格(Grid 1)液相速度最大可达 0.31m/s,此时粗网格(Grid 3)液相最大速度仅为 0.21m/s,两者存在显著差异,相对误差达 32.26%.这表明粗网格因局部分辨率不足,难以准确捕捉高梯度区域的流动细节.相比之下,中等网格(Grid 2)与细网格(Grid 1)的径向速度曲线几乎完全重合,相对误差不超过 5.00%,说明此时网格加密对结果的改善已可忽略.因此,综合考虑计算精度与计算时间,最终选择网格数为 428.80 万个的 Grid 2 网格作为计算模型,既保证了计算结果的准确性,又显著提高了计算效率.针对不同搅拌方式,虽然网格数量存在一定差异,但均控制在 420.00 万个左右.最终网格分布见图 2b.



(a) 网格无关性分析 (b)网格划分

图 2 网格无关性分析和网格划分

Fig.2 Grid independence analysis and mesh discretization

1.3 数学模型

1.3.1 机械搅拌下的单相流模型 机械搅拌下只考虑发酵液,不考虑时间变化的影响,其流体流动连续性方程及动量方程如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho u)=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho u u)=-\nabla p-\mu\nabla^2 u+\rho g \tag{2}$$

式中:ρ 为流体密度,kg/m^3;u 为速度矢量,m/s;p 为流体单位面积上的作用力,Pa;μ 为流体的动力黏度,Pa·s.

1.3.2 耦合搅拌下的 Euler−Euler 双流体模型 针对耦合搅拌工况建立气液两相流模型,采用 Euler−Euler 模型进行数值模拟[30].模型中设定液相为连续相,气相为离散相且不可压缩[31].假设两种流体相分别为 p 和 q,其相 q 的连续性方程和动量方程的具体表达式如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_q\rho_q\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_q\rho_q u_q\right)=0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_q\rho_q u_q\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_q\rho_q u_q u_q\right)=\sum F_q \tag{4}$$

式中:α_q 为相 q 的体积分数,且满足 $\alpha_q+\alpha_p=1$;ρ_q 为相 q 的密度,kg/m^3;u_q 为相 q 的速度矢量,m/s;ΣF_q 为相 q 所受的合力,N/m^3.

1.3.3 湍流模型 本研究采用 LDV−2+Pro 旋转式数字黏度计测定 TS=15%发酵液的流变特性.通过稳态剪切实验及数据拟合发现,该发酵液属于非牛顿流体,呈现剪切变稀特性,其表观黏度采用幂律模型描述,通过式(5)拟合得到关键流变参数 K 和 n(其中 n=0.20,K=7.36Pa·s^n),作为后续数值模拟的输入值.

$$\eta=K\gamma^{n-1} \tag{5}$$

式中:η 为表观黏度,Pa·s; K为稠度系数,Pa·s^n;γ为剪切速率,s^{-1};n 为流变指数.

雷诺数(Re)定义见式(6),代入实验测得参数,经计算 Re<1000,故选择层流模型进行数值模拟.

$$Re=\frac{\rho N^{2-n}D^2}{K} \tag{6}$$

式中:N 为叶轮转速,s^{-1};D 为反应器直径,m.

1.3.4 群体平衡模型 群体平衡模型(PBM)是一种用于描述和预测颗粒、气泡或液滴等分散相在连续相中随时间变化的动态行为的数学模型[32].由于液相是非牛顿流体,其性质复杂,在通气混合过程中,气泡发生破裂并聚结,因此采用 CFD−PBM 耦合方法来计算气泡大小的变化[33].

(1)聚并频率模型 采用 Chen 等[34]提出的气泡聚结模型进行模拟,通过式(7)~(9)来计算气泡的聚并速率.

$$a\left(V_i,V_j\right)=\omega_{\mathrm{ag}}\left(V_i,V_j\right)P_{\mathrm{ag}}\left(V_i,V_j\right) \tag{7}$$

$$\omega_{\mathrm{ag}}\left(V_i,V_j\right)=\frac{\sqrt{2}\pi}{4}\varepsilon^{\frac{1}{3}}\left(d_i+d_j\right)^2\left(d_i^{2/3}+d_j^{2/3}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{8}$$

$$P_{\mathrm{ag}}=exp\left\{-c_1\frac{\left[0.75\left(1+x_{ij}^2\right)\left(1+x_{ij}^3\right)\right]^{\frac{1}{2}}}{\left(\rho_2/\rho_1+0.5\right)^{\frac{1}{2}}\left(1+x_{ij}\right)^3}We_{ij}^{\frac{1}{2}}\right\} \tag{9}$$

式中:$a(V_i,V_j)$为颗粒体积为 V_i 和 V_j 的颗粒之间的聚

集速率,m^3/s;$\omega_{ag}(V_i,V_j)$为颗粒体积为 V_i 和 V_j 的颗粒之间的碰撞频率,s^{-1};$P_{ag}(V_i,V_j)$为颗粒体积为 V_i 和 V_j 的颗粒碰撞后成功聚集的概率;ε 为能量耗散率,m^2/s^3;d_i和d_j为颗粒 i、j 的直径,m;c_1为经验常数;x_{ij}为颗粒 i、j 的直径比;We_{ij}为韦伯数,即惯性力与表面张力的比值.

(2)破碎速率模型　采用 Chen 等[34]的气泡破碎模型进行模拟,该模型表示如下:

$$\Omega_{\mathrm{br}}\left(V,V'\right)= 0.9238\varepsilon^{\frac{1}{3}}d^{-\frac{2}{3}}\alpha\int_{\xi_{\min}}^{1}\frac{\left(1+\xi\right)^2}{\xi^n}\exp\left(-b\xi^m\right)\mathrm{d}\xi \tag{10}$$

$$b=12\left[f^{\frac{2}{3}}+\left(1-f\right)^{\frac{2}{3}}-1\right]\sigma\rho^{-1}\varepsilon^{-\frac{2}{3}}d^{-\frac{5}{3}}\beta^{-1} \tag{11}$$

式中:$\Omega_{br}(V,V')$为气泡破碎速率,即体积为 V 的气泡破碎成体积为 V'的气泡的速率,s^{-1};ξ 为气泡破碎过程中某一中间状态;f为破碎前后气体体积的比例.

1.4　边界条件及模拟方法

本研究针对两种不同搅拌工况建立差异化数值模型:机械搅拌工况下,采用多重参考系法(MRF)处理搅拌桨旋转问题,将反应器划分为旋转域和静止域,两者间交界面采用 Interface 类型,确保旋转域与静止域的流场数据通过插值传递,避免流场不连续,两相间的作用力只考虑曳力的影响,同时忽略气泡变形对曳力的影响,最终选用 Schiller−Naumann 模型[35].选择稳态压力基求解器,求解器采用 Couple 格式.湍动能和湍动能耗散均采用一阶迎风格式,动量方程、体积分数方程采用二阶迎风格式.设定收敛残差为 10^{-3},对模型进行混合初始化,开始计算.

耦合搅拌工况下,先采用 MRF 进行稳态模拟得到机械搅拌的流场分布,在稳态结果的基础上改用滑移网格法(SM)进行瞬态模拟通气条件下的气液两相流场分布,以确保数值模拟的高准确性并获取气相的详细流场信息[36].气体喷嘴设为速度入口,反应器顶部采用排气边界条件,采用有限体积法离散控制方程,压力−速度耦合选用 Phase Coupled SIMPLE 算法,动量方程、体积分数、湍动能及湍流耗散率均采用一阶迎风格式离散.通过瞬态模拟监测叶轮扭矩随时间的变化规律,当其不再随时间变化时,认为计算达到收敛.

1.5　模型结果可靠性分析

由于当前缺乏与本研究反应器结构完全一致的实验研究支撑,本研究严格遵循几何相似性原则,选取 Amiraftabi 等[33]报道的结构相似的气液搅拌反应器进行模型校验.

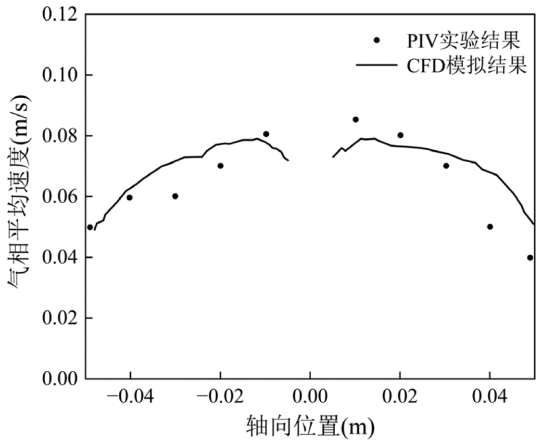


图 3　PIV 实验和 CFD 模拟的初始气体平均流速对比

Fig.3　Comparison of initial average gas flow velocities between PIV experiments and CFD simulations

该基准实验通过粒子图像测速技术(PIV)获取了纯水介质中叶轮旋转与气泡运动耦合作用下瞬态流场的高精度实验数据.验证过程中,首先按文献尺寸精确重建几何模型,并采用前文选用的数学模型与数值方法展开计算.在与文献中 PIV 测量位置一致的轴向截面上,提取气体平均流速分布的模拟结果,发现与 PIV 实验数据呈现较好的一致性(图 3),二者演变趋势吻合且相对误差不超 5%,证实了本文所构建数值模型的可靠性.

1.6　计算方法

均匀性指数(UI)是用于定量评估多相体系混合均匀程度的关键指标,其数值范围在 0~1 之间,越接近 1 表示混合效果越差,定义见式(12).

$$\mathrm{UI}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\left|v_i-\overline{v}\right|V_i\right)}{\sum_{i=1}^{n}\left(v_i\cdot V_i\right)} \tag{12}$$

式中:n 为网格数量;v_i 为第 i 个网格中的速度大小,m/s;$\overline{v}$ 为反应器内的平均流速,m/s;V_i 为第 i 个网格的体积,m^3.

搅拌功率是搅拌器向流体传递的机械功率,是衡量搅拌过程能量输入的关键参数,直接影响混合效率、传质速率和能耗成本,其由搅拌器的扭矩和转速决定,见式(13).

$$P = 2\pi NM \tag{13}$$

式中:N 为搅拌转速;M 为搅拌器旋转时产生的力矩.

2 结果与讨论

2.1 搅拌桨型对液相流场分布的影响

在 60.00r/min 的搅拌转速下,Fluent 求解生成的不同桨型轴向截面的流场分布如图 4a 所示.不难发现,二折叶桨叶与圆盘涡轮式桨叶虽能通过高速剪切实现局部剧烈混合,但其速度场呈现显著的局域性特征——桨区产生的速度场沿径向向外呈显著衰减趋势,导致远离桨叶的流体几乎无法被有效扰动.这种特性使得二者对高黏度非牛顿流体的混合效率受限,易形成分层或局部死区.这一现象与向闯等[37]的模拟研究相吻合,印证了二折叶搅拌桨与六折叶涡轮式搅拌桨并不适用于混合高黏度非牛顿流体.相比之下,锚式桨叶与单螺带桨叶因其长搅拌翼的几何特性展现出独特优势[12],其中锚式桨叶紧贴容器壁,避免高黏流体在壁面挂料,同时驱动物料沿径向缓慢流动,扩大混合范围;单螺带桨采用螺旋形桨叶通过连续轴向抬升与重力回流的协同作用,实现反应器内物料的全局循环,两者在高黏度流体混合中展现出显著优势.Winkler 等[38]同样发现与斜叶桨相比,配备螺旋叶轮的发酵罐混合更加均匀,减少了物料分层.

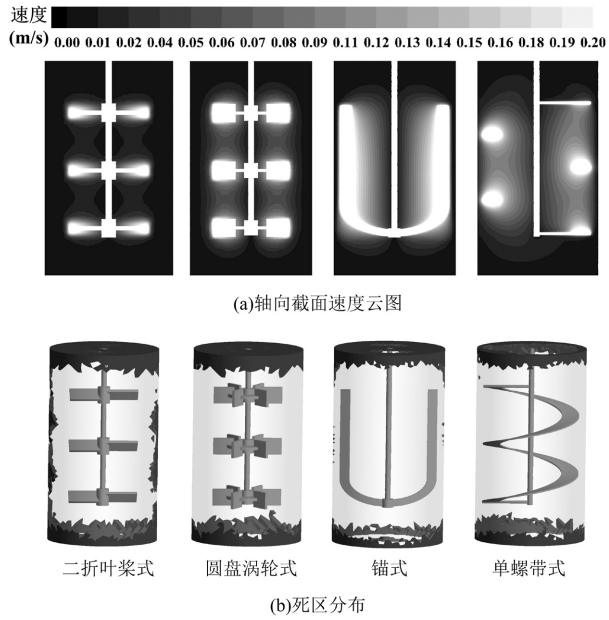


图 4 不同桨型的轴向截面速度云图和死区分布

Fig.4 Axial cross-sectional velocity contours of different impeller types and distribution of dead zones

根据前人研究,将反应器流场速度低于 0.0010m/s 的部分标记为死区,该区域的对流传质效率接近零[39].各反应器的全局死体积分布如图 4b 所示,阴影区域表示速度小于 0.0010m/s 未能混合均匀的死区.可以发现,流体在二折叶桨式搅拌桨的作用下,混合效果并不理想,在反应器上下部以及壁面均存在大量未有效混合的区域,导致死区占比高达 37.06%;圆盘涡轮式搅拌桨和锚式搅拌桨两者的混合效果接近,主要在反应器的上下部及壁面附近存在少许死区,死区占比分别为 21.58%和 18.20%;单螺带搅拌桨凭借较优的轴向循环,壁面附近基本实现有效混合,仅在上下部拐角处存在少量死区,死区占比仅为 6.86%,表现出较优的混合均匀性.

2.2 搅拌转速对液相流场分布的影响

为确定单螺带搅拌桨的优化转速,本研究选取 20.00,60.00 和 100.00r/min 三组转速进行对比分析.通过 Fluent 数值模拟获取了各转速下的流场分布特征,如图 5a 所示.在固定桨叶几何构型条件下,尽管转速提升显著改变了搅拌强度,但流场的宏观涡旋结构保持稳定.值得注意的是,随着转速从 20.00r/min 增至 100.00r/min,剪切作用增强,流体界面更新速率提高,高速流动区域占比从 0.00%增至 11.91%,死区占比从 4.31%缩小至 1.02%,流体混合效率显著提升.这一现象表明,转速提升通过强化流体扩散与动量传递,有效改善了流场的动态混合性能.

取反应器内 x=−0.08~0.08m、y=0.00m、z=0.09m 处的径向直线(搅拌桨轴向中心位置处)作为监测线,对 20.00,60.00 和 100.00r/min 三种转速下的径向速度分布进行对比分析,见图 5b.结果表明:在该监测线范围内,不同转速工况下的径向速度均呈现典型轴对称分布特征,其速度场沿径向呈现先升后降的单峰形态.值得注意的是,随转速从 20.00r/min 提升至 100.00r/min 时,速度峰值位置保持稳定,但峰值强度显著增强,液相平均流速从 0.03m/s 增至 0.16m/s;近壁面区域速度梯度增大,动量传递效率提高.该现象揭示了转速提升通过强化离心效应,有效改善了流体的径向混合动力学特性[40].

剪切力水平与搅拌转速呈显著正相关,但是高转速带来的高剪切速率会破坏微生物絮凝体结构[41],因此有报道指出高转速下的充分混合反而造

成了反应器沼气产量的下降[12].规则流场的剪切敏感性研究表明,微生物细胞可承受的最大剪切力阈值为 5.00Pa[42].Fluent 模拟数据显示(图 5c),20.00r/min、60.00r/min、100.00r/min 工况下反应器平均剪切力分别为 2.22,4.42 和 6.03Pa,综合考虑混合效果及微生物生长条件,60.00r/min 既满足流场混合需求,又能将剪切力控制在微生物耐受范围内,为本研究最佳转速.

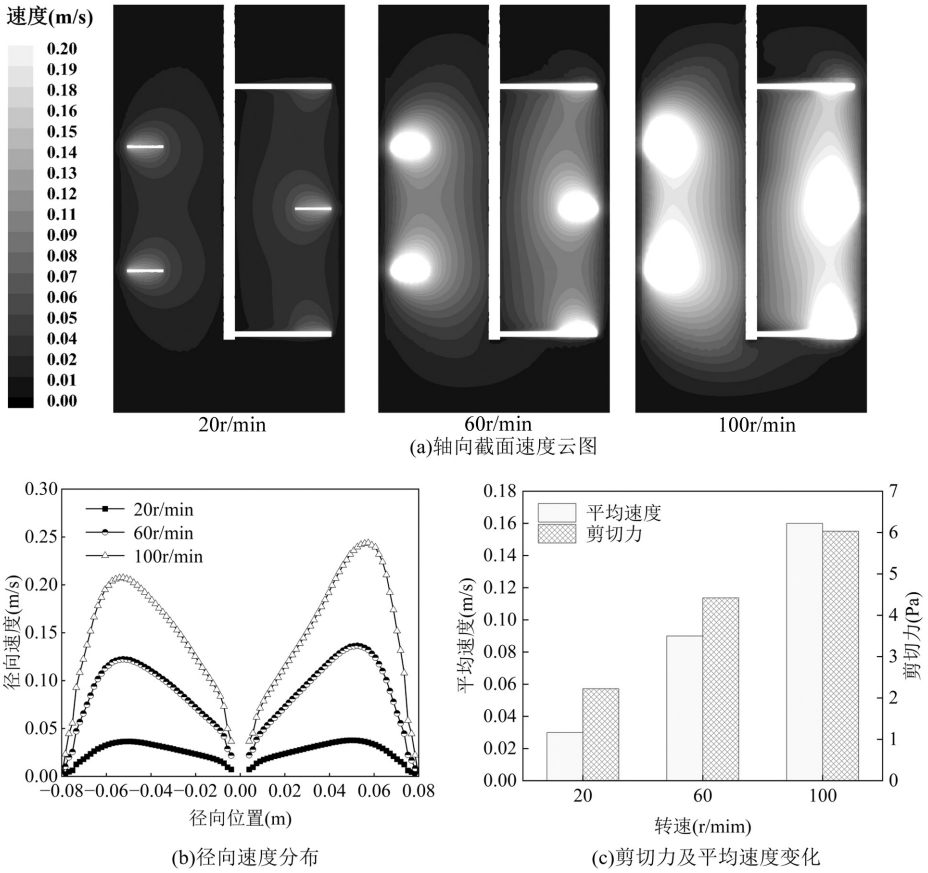


图 5　不同转速下反应器的流场特性分析

Fig.5　Analysis of the reactor flow field characteristics at different rotational speed

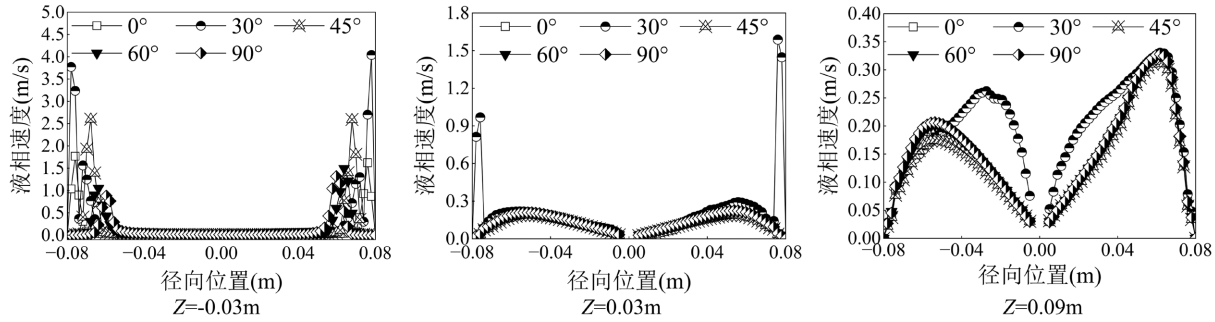
综合上述分析表明,采用单螺带桨(60.00r/min)可使反应器死区体积降低至 6.86%,但死区仍集中于壁面拐角.由于高固物料的非牛顿特性,单纯依靠机械剪切难以完全消除几何边界的流动阻滞效应.为此,本研究提出机械-气动协同扰动策略:通过底部射流产生的气液湍动,定向冲击壁面死区并强化轴向物质传递.该策略需重点解决气液两相流的空间匹配问题,即射流角度与孔径的优化将直接影响气泡分布与机械能传递效率.下文将系统揭示喷气参数对相间作用机制的调控规律.

2.3　喷气角度对气液两相流场分布的影响

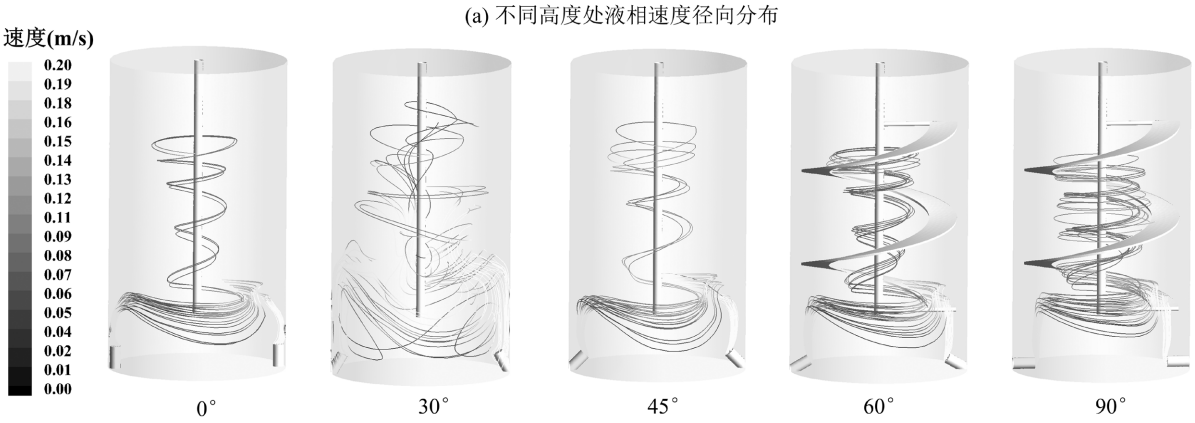
2.3.1　液相速度　在恒定转速 60.00r/min、气体表观速度 0.80m/s 条件下,通过调节气体喷嘴与反应器壁面之间的夹角 α 以探究不同喷射角度对液相流场的影响,在轴向剖面上选择了三个关键位置进行分析,分别是:Z=−0.03m(喷嘴出口)、Z=0.03m(桨叶下部作用区)、Z=0.09m(桨叶中心),对应的液相速度分布情况见图 6a.模拟结果显示:液相速度随轴向高度增加逐渐降低,主要由于气泡在上升过程中为克服高黏度物料对其显著阻力作用,消耗了自身所携带的动能和浮力势能,导致能量损失增大,表现为湍动能耗散率增加[43],气液能量交换效率下降.

入射气体冲击显著提升喷嘴附近液相速度,速度峰值位置随喷嘴倾角增大逐渐远离壁面.当倾角为 30°时,液相速度出现二次峰值,表明气体动能高效传递至液相,体系混合强度增强.在桨叶下部作用区及桨叶中心处,除 30°倾角外,其他工况下径向速度分布基本重合,说明高黏物料抑制了气体向该区域的传递,

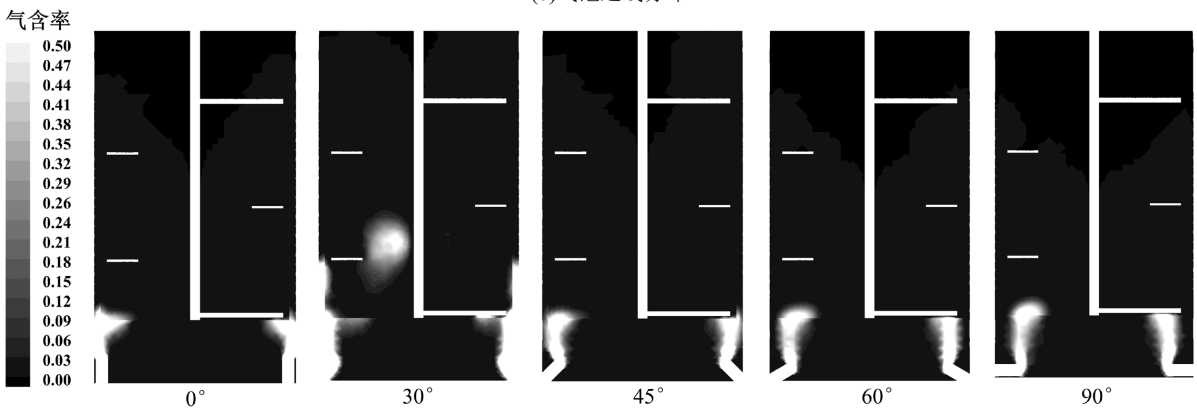
上部流场主要由搅拌桨扰动主导.仅在 30°倾角下,气体沿壁面扩散至此处,壁面附近液相速度再次达到峰值,说明该工况下气泡上升过程对物料的持续带动效应.与未通气工况相比(图 5b),增设气体喷嘴后,Z=0.09m 处液相速度峰值由之前的 0.14m/s 显著提升至 0.33m/s,其中,30°倾角工况下速度峰值区从桨叶尖端向搅拌轴扩展,表明壁面扩散气体在桨叶剪切作用下与物料高效混合,进一步优化能量传递.



(a) 不同高度处液相速度径向分布



(b)气泡迹线分布



(c)轴向截面气含率分布

项目	喷气角度				
	0°	30°	45°	60°	90°
总气含率(%)	5.67	24.20	7.34	8.80	9.82
UI	0.61	0.52	0.60	0.61	0.61

(d)气液两相特征参数比较

图 6 不同喷气角度下反应器气液两相流场特性分析

Fig.6 Analysis of gas-liquid two-phase flow field characteristics in the reactor under different jet angles

2.3.2 气体迹线分布 图 6b 展示了气体喷嘴不同安装角度下气泡运动轨迹的分布规律.模拟结果表明:当 α 取 0°、45°、60°、90°时,气泡群脱离喷嘴后初始阶段保持竖直直线运动,进入搅拌区后受剪切失稳作

用,逐渐演化为轴向螺旋上升模式.同时随着喷嘴角度的增加,搅拌轴附近的螺旋上升运动更加显著.而当 α=30°时,形成高强度气体射流,与搅拌桨旋转流场产生强空间耦合效应.这种差异可能是由于气泡脱离喷嘴的初始位置不同所导致.李凯旋等[44]指出气泡初始位置不同,气泡的形变和运动情况均各不相同.气泡距离搅拌轴越近,所受液体流动的作用力就越大,气泡的形变就越明显,从而快速融入三维流场主导的螺旋运动.可以看出 α=30°时,由于气泡初始位置紧贴壁面远离搅拌轴核心区域,其上升至桨叶下方作用区才受到桨叶的剪切作用发生形变失稳,导致气泡轨迹呈现显著的空间无序性,这种多尺度湍动效应通过动量传递的级联过程,促使流场有效作用域向反应器全域扩展,构建了独特的射流−搅拌协同流场结构,可以有效促进反应器内气液两相的传质与混合过程.而其他工况下,随着喷嘴角度从 0°增加至 90°,气泡初始上升位置逐渐靠近搅拌轴,更早受液相流场作用,螺旋运动在搅拌轴附近愈发显著.

2.3.3　气含率分布　气含率是指气液两相中气相所占的体积分数,是反映气液反应器内气液分散特性的重要参数.图 6c 对比了不同喷气角度下反应器内的气含率分布特征.可以发现,喷嘴角度的选择显著影响气含率的分布,30° 工况下总气含率高达 24.20%,其他喷射角度下总气含率不超 10.00%,表明其他喷射条件下气相扩散效率较低.这主要是由于物料黏度较高,气相在反应器内扩散较为困难,主要聚集在喷嘴附近区域,入射气体基本只能上升至搅拌轴底部,仅气体喷嘴与壁面呈 30°倾角时,气体沿壁面迁移能力增强,可扩散至桨叶下部作用区,并通过搅拌强制对流向反应器中心输运.然而受高黏物料流阻影响,该区域形成局部气泡富集现象,延长气泡停留时间,从而提升了气液传质性能[45].图 6d 列出了气体喷嘴不同安装角度下均匀度指数 UI 的变化,数据显示气体喷嘴与壁面夹角从 0°增至 90°,UI 基本上维持稳定,仅 α=30°时 UI 降至 0.52,说明此参数下有效改善了气液混合均匀性,进而优化传质效果.

2.4　喷嘴孔径对气液两相流场分布的影响

2.4.1　液相速度　基于 Fluent 数值模拟方法,获取了不同孔径条件下轴向截面液相速度流场分布特征,如图 7a 所示.可以发现,在相同气动搅拌装置下,不同孔径对应的速度梯度分布形态存在差异性.5.00mm 工况下,物料的混合情况并不理想,气体喷射并没有很明显改善液相速度分布,这可能是由于物料黏度大,小孔径喷嘴下,气体喷射过程中为克服喷嘴处的压力消耗了大量动能,致使初始气体速度较小,依靠浮力上升的气泡动能也较小,传递给物料后不足以使之运动[20],最终该工况下高速区占比仅为 5.58%,液相平均速度 0.12m/s.Wang 等[46]研究表明,扩大管道直径可减少压力损失.当孔径增加至 10.00mm 时喷嘴附近局部压降有所下降,使气体动能可以更高效地传递至液相,液相高速区域占比高达 18.89%,此时入射气体对周围物料的扰动作用更加明显,该孔径下气泡在上升过程中将大部分动能传递给物料,液相平均速度为 0.19m/s,同时在搅拌桨的剪切作用下,物料沿轴向上下循环表现出更好的混合效果,反应器混合效率更高.然而随着喷嘴孔径继续增加至 15.00mm,气相上升区域及中心轴处液相高速区域占比(14.92%)及平均速度(0.16m/s)均有所下降,物料流动性并没有随之得到相应改善,这是因为大孔径下导致气体分布分散化,局部能量密度下降,削弱了对物料的扰动作用.

2.4.2　气泡数密度分布　图 7b 展示了借助 CFD−PBM 耦合数值模拟方法得到不同喷嘴直径条件下气泡尺寸数密度分布函数的变化规律.在恒定气体入射速度条件下,气泡数密度分布函数随气泡直径 D_b 增大呈现非单调性变化特征:当处于 D_b 低值区间时,数密度随直径增加而上升;当 D_b 超过临界阈值后,数密度则呈现显著衰减趋势.进一步对比不同孔径工况发现:小孔径(5.00mm)条件下,整体数密度显著降低,表明该孔径下气体喷射动能输入不足,难以有效破碎气泡.由于大尺寸气泡破碎需要更高的能量阈值,未被破碎的大气泡主导分布,导致小气泡生成效率降低.随着孔径的增加,数密度分布函数峰值幅值显著提升,说明气泡破碎机制逐渐占据主导地位.Zhang 等[47]之前的研究证实了这一现象,他们发现增加喷射器喉部直径可强化气泡破碎过程,气液界面比表面积随之增加,体积传质系数显著提升.这表明高数密度分布特征能够有效扩大气液接触面积,从而优化反应器内的传质效率.10.00mm 孔径工况下,数密度分布函数达到峰值最大值,表明此参数下反应器混合效率处于最优状态,破碎与聚并机制达到动态平衡.

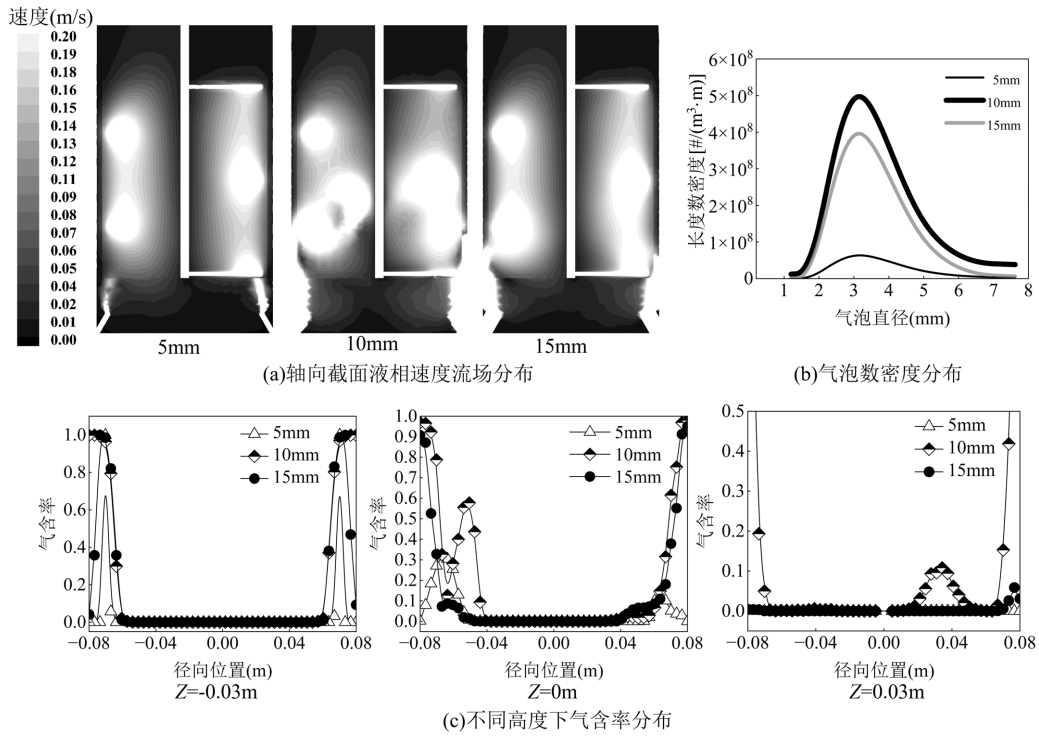


图 7 不同喷嘴孔径下反应器气液两相流场特性分析

Fig.7 Analysis of gas−liquid two−phase flow field characteristics in the reactor under different nozzle diameters

2.4.3 气含率分布 沿轴向截面分别选取 3 个特征高度位置:Z=−0.03m(喷嘴出口)、Z=0.00m(搅拌轴末端)及 Z=0.03m(桨叶下部作用区),获取不同喷嘴孔径条件下的气含率沿径向分布特性,如图 7c 所示.模拟结果显示:各孔径工况下反应器内不同轴向高度的气含率沿径向分布趋势基本一致,即气含率沿径向呈现“两边高、中间低”的分布趋势,在喷气口附近($|r|$=0.06~0.08m)达到最大值,反应器中心区域基本为零.其中,随着喷组孔径的增加,峰值区域会发生横向拉伸,其原因是进气管孔径越大,所形成的初始气泡数量越多,随着径向高度的增加,气相分散趋广.其中,在喷嘴出口截面处,各孔径工况下气含率均达到径向分布峰值,但小孔径(5.00mm)条件下,两侧喷嘴区域气含率显著偏低且分布范围狭窄.这表明小孔径因气体喷射动能不足,抑制了气泡的径向扩散作用.在搅拌轴末端截面处,气泡受搅拌轴扰动作用向径向扩散.其中,10.00mm 孔径工况下气含率呈现二次峰值特征,表明气泡高效分散,气液接触面积显著增加,动量传递效率提升;而 15.00mm 孔径工况下气泡扩散效果减弱,气体分布相对集中.在桨叶下部作用区截面处,仅 10.00mm 孔径工况下气泡能够迁移至桨叶附近区域,并在桨叶剪切作用下实现二次扩散,从而将动量传递至更广泛的物料区域.随着轴向高度增加,10.00mm 孔径下气含率始终维持较高水平,通过扩大气液接触面积,显著增强动量传递效率,这一特性对高固含量体系尤为重要.Ankush 等[48]指出,黏度增加会增强动能耗散效应,而均匀的气泡分布可通过持续能量输入维持物料运动稳定性,避免局部死区形成.

2.5 搅拌形式对反应器内流体流动特性的影响

为进一步定量评估反应器内物料混合效率,本研究采用均匀度指数 UI、液相平均速度及搅拌功率作为评价指标.其中,液相平均速度反映混合强度,速度越高混合越强;UI 表征混合均匀性,理想混合状态 UI=0.表 1 对比了优化后不同搅拌模式的性能参数:与传统单螺带机械搅拌相比,机械−气动协同搅拌系统表现出显著优势:液相平均速度从 0.09m/s 增至 0.19m/s,增幅达 111.11%,混合强度显著提升;UI 值从 0.61 降至 0.52,表明混合均匀性显著改善;搅拌功率从 0.38W 降至 0.27W,实现了能耗效率优化.上述改进源于反应器底部增设 30° 倾角、10.00mm 孔径气体喷嘴的设计.该结构通过高速气流在液相中形成局部射流,增强了流场动能,同时气动扰动与机械搅拌的协同作用减少了搅拌桨需提供的能量,从而降

低了机械搅拌负荷,在节能条件下有效提升混合强度.

表 1　不同搅拌形式下反应器指数对比

Table 1　Comparison of reactor indices under different agitation configurations

项目	UI	液相平均流速(m/s)	搅拌功率(W)
机械搅拌	0.61	0.09	0.38
机械−气动协同搅拌	0.52	0.19	0.27

2.6　启示与展望

本研究针对高固种养废物厌氧消化体系,基于 CFD 模拟构建了一套参数化的搅拌优化框架.该框架在结构、建模方法等方面具备明确的通用性逻辑.尽管本研究当前是以特定含固率(15%)作为基准案例进行完整模型验证与深度优化,但其框架设计具有高度的灵活性与可移植性.首先,框架中的关键流变参数(稠度系数 K 和流变指数 n)作为可修改的输入变量,能够精准表征不同含固率所导致的物料流变特性差异.对于不同于本研究的其他含固率体系(如 5%、10%、20%、30%等),研究者只需通过实验测定目标体系的流变曲线,拟合获得相应的幂律模型参数 K 及 n,将其输入本框架即可进行模拟计算与优化分析.其次,框架的基本结构,包括网格生成规则、求解器设置及多相流 Eulerian−Eulerian 模型等均独立于含固率,适用于任意含固率条件下的厌氧消化体系模拟.未来研究可应用此框架,输入不同含固率物料对应的实验流变参数,系统验证其在更宽含固率范围内的预测能力与优化适用性,并深入探索含固率变化对最优搅拌参数的影响规律.本方法框架为高固厌氧消化反应器的节能、高效设计与运行,提供了具有广泛移植性的理论基础和实用工具.

尽管本研究建立了上述框架,且前期研究中报道了充分的证据链阐述充分的混合与适宜的流体条件是高效厌氧消化不可或缺的物理基础,但模拟结果若能经进一步的实验验证将更有力的支撑其后续实际应用.鉴于此,未来可将本优化结果作为关键输入,指导后续实验室规模的厌氧消化反应器开发及运行.通过系统监测搅拌优化前后反应器流动特性及运行效能的变化,不仅可验证本研究提出的优化混合策略对实际厌氧消化性能的提升效果,量化其工程应用价值,还可为模型框架的调整提供反馈.

3　结论

3.1　桨型结构影响高固体系混合性能.相较于小直径二折叶桨,大直径单螺带桨可使反应器死区体积减少 81.49%.机械搅拌死区主要分布于壁面拐角区域.搅拌转速由 20.00r/min 提高至 100.00r/min 时,平均流速从 0.03m/s 增至 0.16m/s,转速超过 60.00r/min 后剪切应力将超出微生物絮体耐受阈值,故选择 60.00r/min 作为最优工况.

3.2　喷气角度为 30°时,总气含率提升至 24.20%,较垂直喷射工况提高逾 4 倍.该角度下气泡分布均匀性与液相速度均达到峰值.

3.3　喷嘴孔径从 5.00mm 增至 10.00mm 时,液相高速区占比升至 18.89%,气泡数密度增加;孔径继续增大至 15.00mm 时,液相高速区占比下降 21.02% (18.89%~14.92%), 平均流速降低 15.8%(0.19~0.16m/s),因此 10.00mm 为孔径最优值.

3.4　在反应器底部对称布置 2 个 10.00mm、30°倾角喷嘴后,液相平均流速提升 1.10 倍,混合均匀度指数改善 14.75%,搅拌功率降低 28.95%.该方案通过定向扰动壁面死区与优化能量传递路径,在保障产甲烷菌活性的前提下,显著提升高固非牛顿体系的混合效率.

参考文献:

[1] 李　貌,周嘉良,丁国春,等.畜禽粪便好氧堆肥雌激素降解调控研究进展 [J]. 中国环境科学, 2024,44(7):3879−3891.
Li M, Zhou J L, Ding G C, et al. Research progress on the regulation of estrogen degradation during aerobic composting of livestock manure [J]. China Environmental Science, 2024,44(7):3879−3891.

[2] 耿　涛,赵立欣,姚宗路,等.水热炭强化秸秆厌氧发酵产甲烷效能及作用机制 [J]. 中国环境科学, 2024,44(8):4415−4424.
Geng T, Zhao L X, Yao Z L, et al. Efficiency and mechanism of hydrochar in enhancing methane production from anaerobic fermentation of straw [J]. China Environmental Science, 2024,44(8): 4415−4424.

[3] 周滢月,张　智,李　蕾,等.底物对厌氧消化系统 EPS 产生及起泡的影响 [J]. 中国环境科学, 2023,43(8):4046−4056.
Zhou Y Y, Zhang Z, Li L, et al. Effects of substrate on EPS production and foaming in anaerobic digestion systems [J]. China Environmental Science, 2023,43(8):4046−4056.

[4] Aravani V P, Sun H Y, Yang Z Y, et al. Agricultural and livestock sector's residues in Greece & China: Comparative qualitative and quantitative characterization for assessing their potential for biogas production [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2022,154: 111821.

[5] Li W L, Gupta R, Zhang Z K, et al. A review of high-solid anaerobic digestion (HSAD): From transport phenomena to process design [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2023,180:113305.

[6] 王 攀,杨鑫玉,郑 义,等.厨余垃圾厌氧发酵失稳调控及微生物群落分析 [J]. 中国环境科学, 2022,42(4):1770-1779.
Wang P, Yang X Y, Zheng Y, et al. Regulation of instability and microbial community analysis during anaerobic fermentation of kitchen waste [J]. China Environmental Science, 2022,42(4):1770-1779.

[7] Silva J, Arias-Torres L, Carlesi C, et al. Use of nanobubbles to improve mass transfer in bioprocesses [J]. Processes, 2024,12(6):1227.

[8] Agborambang M E, Fujiwara M, Bhatia P, et al. CFD simulation of the mixing process and performance evaluation of a two-way flow Chinese dome digester [J]. Biosystems Engineering, 2024,240:77-89.

[9] Neuner T, Meister M, Pillei M, et al. Optimizing mixing efficiency of anaerobic digesters with high total solids concentrations using validated CFD simulations [J]. Biochemical Engineering Journal, 2024,208:109320.

[10] Agborambang M E, Fujiwara M, Bhatia P, et al. Characterization of mixing by CFD simulation and optimization of mixing frequency to break scum and enhance methane yield in chinese dome digester [J]. BioEnergy Research, 2022,16(3):1902-1912.

[11] Liu Y Q, Chen J J, Song J, et al. Adjusting the rheological properties of corn-straw slurry to reduce the agitation power consumption in anaerobic digestion [J]. Bioresource Technology, 2019,272:360-369.

[12] Singh B, Szamosi Z, Simenfalvi Z. State of the art on mixing in an anaerobic digester: A review [J]. Renewable Energy, 2019,141:922-936.

[13] Mao L W, Tsui T H, Zhang J X, et al. Mixing effects on decentralized high-solid digester for horticultural waste: Startup, operation and sensitive microorganisms [J]. Bioresource Technology, 2021,333: 125216.

[14] Sasidhar K B, Somasundaram M, Ekambaram P, et al. A critical review on the effects of pneumatic mixing in anaerobic digestion process [J]. Journal of Cleaner Production, 2022,378:134513.

[15] Duarte M S, Sinisgalli E, Cavaleiro A J, et al. Intensification of methane production from waste frying oil in a biogas-lift bioreactor [J]. Renewable Energy, 2021,168:1141-1148.

[16] Hoseini S S, Najafi G, Ghobadian B, et al. Impeller shape-optimization of stirred-tank reactor: CFD and fluid structure interaction analyses [J]. Chemical Engineering Journal, 2021,413: 127497.

[17] Hu Y Y, Zheng X H, Zhang S H, et al. Investigation of hydrodynamics in high solid anaerobic digestion by particle image velocimetry and computational fluid dynamics: Role of mixing on flow field and dead zone reduction [J]. Bioresource Technology, 2021,319:124130.

[18] Thakur H, Verma N K, Dhar A, et al. Investigation of continuous stirred tank reactors for improving the mixing in anaerobic digestion: A numerical study [J]. Results in Engineering, 2023,19:101317.

[19] 胡玉瑛,王 鑫,张世豪,等.基于 CFD 的卧式高固厌氧消化混合策略优化 [J]. 环境工程学报, 2022,16(6):1933-1943.
Hu Y Y, Wang X, Zhang S H, et al. Optimization of mixing strategy for horizontal high-solid anaerobic digestion based on CFD [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022,16(6):1933-1943.

[20] 向 闯.垂直流厌氧消化处理厨余垃圾时物料流变与传热特性 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020.
Xiang C. Rheology and heat transfer characteristics of materials during kitchen waste treatment by vertical flow anaerobic digestion [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

[21] Fang X, Li X R, Li X J, et al. Characterization and quantitively analysis on the high solid anaerobic digestion in the large scale Stirred Tank Reactor [J]. Renewable Energy, 2025,241:122326.

[22] Li Z Z, Li H Y, Wang R Y, et al. Effect of typical impeller configurations on particle morphology evolution during vanadium crystallization process [J]. Separation and Purification Technology, 2025,361:131287.

[23] 杨学志.基于CFD的气体分散器对全混厌氧发酵搅拌影响数值模拟 [J]. 中国沼气, 2022,40(3):73-79.
Yang X Z. Numerical simulation of the influence of gas disperser on mixing in completely mixed anaerobic fermentation based on CFD [J]. China Biogas, 2022,40(3):73-79.

[24] Wei P, Uijttewaal W, Spanjers H R, et al. Optimising flow and mixing in a full-scale gas-mixed anaerobic digester by integrating sludge rheological data using computational fluid dynamics [J]. Chemical Engineering Journal, 2023,468:143647.

[25] Wang H R, Ohta M, Anzai H, et al. Computational fluid dynamics simulation to investigate diffuser outlet factors in anaerobic membrane bioreactors treating wastewater [J]. Sustainability, 2023,15(15):11959.

[26] Ahmmed M S, Jensen M B, Kofoed M V W, et al. Hydrodynamic analysis of full-scale in-situ biogas upgrading in manure digesters [J]. Water Research, 2021,203:117528.

[27] Li L L, Wang K, Wei L L, et al. CFD simulation and performance evaluation of gas mixing during high solids anaerobic digestion of food waste [J]. Biochemical Engineering Journal, 2022,178:108279.

[28] 黄如一,黄正昕,冉 毅,等.利用 CFD 多相流模型优化设计沼气料液搅拌流场的方法研究 [J]. 中国沼气, 2019,37(5):57-63.
Huang R Y, Huang Z X, Ran Y, et al. Study on the method of optimizing the design of biogas slurry mixing flow field using CFD multiphase flow model [J]. China Biogas, 2019,37(5):57-63.

[29] Rocamora I, Wagland S T, Villa R, et al. Dry anaerobic digestion of organic waste: A review of operational parameters and their impact on process performance [J]. Bioresource Technology, 2020,299:122681.

[30] Chen X Y, Yao J J, Jiang S C, et al. An improved CFD modeling approach applied for the simulation of gas-liquid interaction in the ozone contactor along with structure optimization [J]. Chemical Enginnering Journal, 2020,384:123322.

[31] Chen S Y, Ouyang Y, Vandewalle L A, et al. CFD analysis on hydrodynamics and residence time distribution in a gas-liquid vortex unit [J]. Chemical Enginnering Journal, 2022,446:132812.

[32] Li S, Yang R Q, Wang C L, et al. CFD-PBM simulation on bubble size distribution in a gas-liquid-solid flow three-phase flow stirred tank [J]. ACS Omega, 2022,7(2):1934-1942.

[33] Amiraftabi M, Khiadani M, Mohammed H A, et al. CFD-PBM and experimental investigation of a shear thinning fluid in a gas-liquid tank agitated by a helical ribbon impeller [J]. Separation and

Purification Technology, 2021,272:118855.

[34] Chen S Y, Lang X J, Kourou A, et al. Enhancing CO_2 capture efficiency: Computational fluid dynamics investigation of gas−liquid vortex reactor configurations for process intensification [J]. Chemical Engineering Journal, 2024,493:152535.

[35] 师毓辉,邢继远,姜雪晗,等.基于 PBM 的离心式叶轮内气泡破碎合并数值模拟 [J]. 化工学报, 2024,75(5):1816−1829.
Shi Y H, Xing J Y, Jiang X H, et al. Numerical simulation of bubble breakup and coalescence in a centrifugal impeller based on PBM [J]. CIESC Journal, 2024,75(5):1816−1829.

[36] Li A Q, Yao Y Y, Tang X Y, et al. Experimental and computational investigation of chaotic advection mixing in laminar rectangular stirred tanks [J]. Chemical Engineering Journal, 2024,485:149956.

[37] 向　闯,李莉莉,王　琨,等.固态发酵反应器流场数值分析及搅拌参数优选 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021,53(5):65−71.
Xiang C, Li L L, Wang K, et al. Numerical analysis of flow field and optimization of agitation parameters in solid−state fermentation reactor [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021,53(5):65−71.

[38] Winkler J, Neuner T, Hupfauf S, et al. Impact of impeller design on anaerobic digestion: Assessment of mixing dynamics, methane yield, microbial communities and digestate dewaterability [J]. Bioresource Technology, 2024,406:131095.

[39] Vesvikar M S, AI−Dahhan M. Flow pattern visualization in a mimic anaerobic digester using CFD [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2005,89(6):719−732.

[40] 任娅南.深浅槽组合型机械密封热流固耦合分析 [D]. 兰州:兰州理工大学, 2024.
Ren Y N. Thermo−fluid−solid coupling analysis of combined deep and shallow groove mechanical seal [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2024.

[41] Chook K Y, Aroua M K, Gew L T. Enzyme biocatalysis for sustainability applications in reactors: A systematic review [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2023,62(28):10800−10812.

[42] Strobl F, Duerkop M, Palmberger D, et al. High shear resistance of insect cells: the basis for substantial improvements in cell culture process design [J]. Scientific Reports, 2021,11(1):9413.

[43] 邸传君.固体颗粒对鼓泡反应器中气泡运动行为影响机制与传质强化 [D]. 青岛:青岛科技大学, 2024.
Di C J. Influence mechanism of solid particles on bubble motion behavior and mass transfer enhancement in a bubble column reactor [D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2024.

[44] 李凯旋,李政权,张博群,等.浮选气泡在搅拌槽中运动与变形数值模拟 [J]. 中国有色冶金, 2024,53(5):123−131.
Li K X, Li Z Q, Zhang B Q, et al. Numerical simulation of motion and deformation of flotation bubbles in a stirred tank [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024,53(5):123−131.

[45] Liu Y D, Guo J H, Li W P, et al. Investigation of gas−liquid mass transfer and power consumption characteristics in jet−flow high shear mixers [J]. Chemical Engineering Journal, 2021,411:128580.

[46] Wang J X, Han X Y, Zhang H Z, et al. Simulation and experimental investigation on the static mixer of natural gas mixed with hydrogen [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025,99:1−14.

[47] Zhang M H, Bao F R, Li R S, et al. Computational investigation on the flow and mass transfer properties inside ejector of loop reactor based on CFD−PBM simulation [J]. Powder Technology, 2023,428:118869.

[48] Ankush, Sengupta B, Singh S, et al. Role of bulk viscosity on the flow physics past a rotating cylinder [J]. Physics of Fluids, 2025,37(1): 015147.

作者简介：郭上榜(2001−),女,山西忻州人, 重庆大学硕士研究生,主要研究方向为固体废物污染控制与资源化.202317021020@stu.cqu.edu.cn.