

研究论文

DOI: 10.11949/0438-1157.

载体填充率对气-液-固流动与氧传质效能的影响

许彬^{1,2}, 任杰辉^{1,2*}, 张涛³, 彭倩², 韩刘冰², 惠佳瑶¹, 程文^{1,2}

(¹ 西安理工大学旱区水工程生态环境全国重点实验室, 陕西 西安 710048; ² 西安理工大学生态环境与化工学院, 陕西 西安 710048; ³ 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 基于欧拉三流体模型、颗粒动力学理论、群体平衡模型 (population balance model, PBM) 等建立了气-液-固三相 CFD-PBM 耦合模型, 并结合曝气充氧性能实验, 探索了载体填充率对气液固流动特性及氧传质效能的影响机制。结果表明, 载体填充率显著影响了多相湍动参数分布与传质性能。在填充率为 20% 条件下流化速度和湍动能均较高, 使得固相分布较为均匀, 流化性能最佳; 载体填充率与气泡平均直径呈显著负相关关系 ($R=-0.787$), 而与小气泡 (0.27~1.02 mm) 占比呈显著正相关关系 ($R=0.991$), 最高占比可达 79.15%; 随着载体填充率增加, 氧传质参数 (k_La 、 $STOE$ 、 E 等) 均呈降低趋势, 其中 k_La 由 $(15.05\pm0.24) \text{ h}^{-1}$ 降至 $(11.39\pm0.26) \text{ h}^{-1}$ 。综合表明, 20%~30% 填充率条件系统传质性能与流化性能均最佳, 为反应器设计与运行提供重要依据。

关键词: 气-液-固; CFD-PBM; 湍动; 载体填充率; 氧传质

中图分类号: TQ021.1

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-10

Influence of carrier filling rate on gas - liquid - solid flow characteristics and oxygen transfer performance

XU Bin^{1,2}, REN Jiehui^{1,2*}, ZHANG Tao³, PENG Qian², HAN Liubing², XI Jiayao¹, CHENG Wen^{1,2}

(¹ State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaaxi, China; ² School of Ecological Environment and Chemical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaaxi, China; ³ Powerchina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, Shaaxi, China)

Abstract: A gas-liquid-solid three-phase CFD-PBM coupled model was developed based on the Eulerian three-fluid model, the kinetic theory of granular flow and the population balance model (PBM). Combined with aeration oxygenation performance experiments, this study investigated the influence mechanism of carrier filling rate on flow characteristics and oxygen mass transfer efficiency. The results indicate that the carrier filling rate significantly affects the distribution of multiphase turbulent parameters and mass transfer performance. At a filling rate of 20%, both the fluidization velocity and turbulent kinetic energy are relatively high, resulting in the most uniform solid-phase distribution and the best fluidization performance. A significant negative correlation was observed between the carrier filling rate and the average bubble diameter ($R=-0.787$), while a significant positive correlation was found between filling rate and the proportion of small bubbles (0.27~1.02mm) ($R=0.991$). with the highest proportion reaching 79.15%. As the carrier filling rate increased, oxygen mass transfer parameters (k_La , $STOE$, E ,

收稿日期: 2026-02-12 修回日期: 2026-04-29

通信作者: 任杰辉(1990—), 男, 博士, 讲师, rjh_xaut@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(52206210); 陕西省教育厅服务地方专项计划项目(24JE016)

引用本文: 许彬, 任杰辉, 张涛, 彭倩, 韩刘冰, 惠佳瑶, 程文. 载体填充率对气-液-固流动与氧传质效能的影响[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1–10

Citation: XU Bin, REN Jiehui, ZHANG Tao, PENG Qian, HAN Liubing, XI Jiayao, CHENG Wen. Influence of carrier filling rate on gas - liquid - solid flow characteristics and oxygen transfer performance[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1–10

etc.) showed a decreasing trend; specifically, $k_L a$ decreased from $(15.05 \pm 0.24) \text{ h}^{-1}$ to $(11.39 \pm 0.26) \text{ h}^{-1}$. In summary, a filling rate of 20%~30% achieves the optimal balance between mass transfer and fluidization performance, providing an important basis for reactor design and operation.

Keywords: gas-liquid-solid; CFD-PBM; turbulence; carrier filling rate; oxygen mass transfer

引 言

流化床生物膜反应器 (fluidized bed biofilm reactor, FBBR) 因具有传质性能高、污泥产率其低、抗冲击负荷强等优势, 在高浓度有机废水及氨氮废水处理中展现出显著优势^[1,2], 其处理核心是在空气 (气相) 的曝气剪切作用下附着微生物的悬浮载体 (固相) 与空气 (气相)、污水 (液相) 充分混合接触, 悬浮载体表面的微生物利用废水中污染物和氧分子 (来自空气) 完成自身代谢, 实现污水处理的目的^[3]。影响 FBBR 性能的因素包括生物量、反应器结构、进水参数、载体填充率 (TCL) 等^[4]。在污水生物处理反应器中, 悬浮载体颗粒表面的微生物是实现污水处理的核心, 而 TCL (悬浮载体颗粒的堆积体积与反应器有效容积的比值) 直接决定生物量大小, 并影响气液固三相流化性能 (流速、湍动能、气泡直径等参数) 及系统能耗^[5], 过高易引起流化不均及载体沉积, 影响微生物与污水和空气接触程度, 并降低氧传质速率; 过低则降低反应器内生物量大小, 影响污水处理效能^[6,7]。因此, 从气-液-固三相流动和氧传质的角度优化 TCL 参数至关重要。然而, 关于 TCL 如何影响宏观流场结构和氧传质效能, 目前仍缺乏系统的定量认识^[8-10]。

准确获取生物膜反应器内多相流动参数是优化 TCL 的基础。计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 已成为模拟复杂多相流动的强有力工具^[11,12], 在优化反应器结构设计及运行方面取得一些成果。Li 等^[13]通过欧拉-欧拉-DPM 耦合模型模拟揭示了反应堆内部的气液固流动特性以及微气泡技术与浆液气泡柱反应器的增强机制, 但在微气泡强化传质中未考虑气泡的动态行为, 导致模拟与真实流体行为存在偏差。卢玉成等^[14]基于欧拉-欧拉多相流 VOF 模型模拟搅拌釜内气液相界面变化和固相分散行为, 但在高转速下忽略了气泡的聚并与破裂过程, 导致无法准确预测气泡的运动和气固相间的相互作用, 从而影响整体的搅拌效果。群体平衡模型 (population balance model, PBM) 通过描述气泡的聚并与破碎行为使得气相计算更符合

实际, 并可计算气泡直径分布^[15-17]。一些研究采用 CFD-PBM 耦合模型计算气-液-固三相流动行为^[18,19], 发现 CFD 与 PBM 模型耦合显著提升了气-液-固三相的模拟精度, 但这些研究中固相颗粒的大小往往较小 ($50 \sim 500 \mu\text{m}$)。此外, 现有 CFD-PBM 耦合模型的应用多聚焦于高温高压工业浆态床反应器, 固相为微米级催化剂颗粒, 针对污水生物处理系统内厘米级颗粒是否适用有待进一步验证^[20,21]。

之前的研究已针对曝气强度、曝气器结构对 FBBR 流化与传质的影响开展了相关研究^[22,23], 但针对 TCL 这一核心设计参数, 尚未开展 TCL、多相流场结构、氧传质效能的协同机制研究。因此, 基于欧拉三流体模型、Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型、颗粒动力学理论 (kinetic theory of granular flow, KTGF)、PBM 等理论建立气-液-固三相流动的 CFD-PBM 耦合模型, 结合实验数据验证模型的适用性及准确性。利用构建的耦合模型模拟四种载体填充率 (10%、20%、30% 和 40%) 下 FBBR 内流化速度、固相体积分数、气泡直径大小、湍动程度等流化参数, 阐明 TCL 对多相流动行为的影响。通过实验研究分析 TCL 对曝气充氧性能的影响, 计算体积氧传质系数 (volumetric oxygen mass transfer coefficient, $k_L a$)、标准氧传质速率 (standard oxygen mass transfer rate, $SOTR$)、标准氧传质效率 (standard oxygen mass transfer efficiency, $SOTE$)、氧利用率 (E) 和动力效率 (SAE), 评估 FBBR 的曝气充氧性能。结合多相流动模拟结果, 利用统计学方法揭示多相流动与氧传质间的作用关系。研究可为 FBBR 优化设计及高效运行提供科学的理论支撑。

1 理论与方法

1.1 多相流模型

欧拉三流体模型将气相、液相和固相均视为连续介质, 通过质量和动量守恒方程描述各相的流动和相互作用^[24,25], 在模拟计算气-液-固三相流动方面具有明显优势。模型理论方程主要包括质量平

衡方程和能量方程,具体如下。

质量平衡方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla(\rho_q \alpha_q \vec{\mu}_q) = 0 \quad (1)$$

气相、液相和固相三相的动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i \alpha_i \vec{\mu}_i) + \nabla(\rho_i \alpha_i \vec{\mu}_i \vec{\mu}_i) = -\alpha_i \nabla P + \nabla \cdot \left[\alpha_i \mu_{eff,i} \left(\nabla \vec{\mu}_i + (\nabla \vec{\mu}_i)^T \right) \right] + F_{i,j,k} + \rho_i \alpha_i g \quad (2)$$

采用欧拉三流体模型进行模拟,其中空气、废水和悬浮载体分别为气相、液相和固相,三相被看作为连续相。固相动量利用KTGF模型处理,KTGF模型中选择Gidaspow模型、Lun-et-al模型和based-ktgf模型分别处理颗粒黏度、固体压力、摩擦压力,

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g f_i) + \nabla(\alpha_g \mu_b f_i) = & \sum_{j,k}^{j \geq k} \left(1 - \frac{1}{2} \delta_{j,k} \right) \eta_{ijk} c_{j,k} \alpha_g f_i \alpha_g f_k \nu_i / (v_j \nu_k) \\ & x_i - 1 \geq (x_j + x_k) \geq x_i + 1 \\ -\alpha_g f_i \sum_{k=1}^M c_{ij} \alpha_g f_k / \nu_k + & \sum_{k=1}^M n_{ij} b_k \alpha_g f_k \nu_i / \nu_k - b_i \alpha_g f_i \end{aligned} \quad (3)$$

Luo模型可用于计算气泡的聚并过程,Luo and Lehr模型可较好的计算气泡破碎过程^[30,31]。在FBBR系统中,从曝气孔出射的气泡群在上升运动过程存在气泡聚并与破碎现象。因此,根据已有研究^[3,22,23]结果,利用Luo模型和Luo and Lehr模型分别处理FBBR内的气泡聚并与破碎过程,其中表面张力设置为0.073 N/m,临界韦伯数设置为0.1。

$$P_{ag} = \exp \left\{ -c_e \frac{\left[\frac{0.75(1 + \xi_{ij}^2)(1 + \xi_{ij}^3)}{(\rho_g/\rho_l + \gamma)(1 + \xi_{ij})^3} \right]^{1/2} \left(\frac{\rho_l d_i \vec{u}_{ij}}{\sigma} \right)^{1/2}} \right\} \quad (4)$$

$$\Omega(V, V') = K \int_{\xi_{min}}^1 \frac{(1 + \xi)^2}{\xi^n} \exp(-b \xi^m) d\xi \quad (5)$$

1.3 物理模型与边界条件

FBBR装置的主体直径0.236 m,高度0.708 m,有效水深0.650 m,有效工作容积为26 L;曝气盘共设有65个气孔,孔径为0.27 mm,孔间距为10 mm,曝气强度 $5.77 \text{ m}^3 \cdot (\text{h} \cdot \text{m}^3)^{-1}$,装置的三维结构和尺寸如图1(a)所示。采用Gambit 2.4软件建立物理模型结构,利用非结构化网格(Hex/Wedge)对物理模型进行网格划分。通过网格无关性(网格数102440~379020)分析对比发现,当网格数量 ≥ 243360 时,网格数量增加对结果的影响可忽略(变化率 $<0.1\%$)。因此,网格数量为243360较为合适,划分结果如图1(b)所示。进口边界选择速度入口边界,壁面采用Wall边界,反应器的顶部与空气接触,出口边界选择Outflow,仅空气从顶面流出。

颗粒堆积极限设为0.63,详细的设置参考之前的研究^[26]。根据已有的研究成果^[26,27],利用Tomiya模型、Gidaspow模型及Schiller-naumann-pb模型分别处理气-液、液-固及气-固两相流动的曳力,保证模型计算的精度。根据Reynolds数Re大小,判断流体流动属于紊流^[28,29],采用Realizable k- ϵ 模型处理圆孔射流过程中紊动问题,方程中经验常数 C_2 (湍流耗散率方程)、湍动能普朗特数、湍流耗散率普朗特数分别设为1.9、1.0和1.2。

1.2 PBM模型

PBM模型可用于描述系统中气泡的聚并与破碎过程,使得气相流动更符合实际的流动,其方程为

1.4 模拟细节与验证

根据已有研究成果^[22,23],采用Fluent软件建立了CFD-PBM耦合模型。由于Fluent不能模拟方形载体,方形载体被假设为直径0.01m的球形载体(与污水密度相近,密度为 $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)。气相的速度进口边界流速设置为 $11.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (相当于曝气强度为 $5.77 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 水),初始的湍动能和湍动耗散率被设置为 $0.47 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 和 $2700 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ 。压力方程通过PRESTO方法进行离散,动量和湍流采用一阶迎风格式,而体积分数的离散则使用QUICK方法。时间步长设置为0.001 s,模拟气-液-固三相流动特性,计算至各项参数趋于稳定为止。为考察TCL的影响,设置10%、20%、30%和40%四种填充率条件。

为验证所构建的耦合模型的可靠性与适用性,以Rampure等^[32]的固含率实验数据为基准进行对比验证,利用本研究的模拟方法构建Rampure等^[32]的实验装置仿真模型。结果表明,构建的模型模拟值与实验值的分布规律基本一致,吻合程度控制在15%以内(图2),表明模型能够用于获取FBBR系统中的气-液-固三相流动参数。

1.5 清水曝气充氧性能分析方法

曝气充氧性能是评价污水处理生物反应器的关键参数^[33-35]。本研究在气液固三相流动参数获取的基础上,利用混合液相(无微生物存在条件)中氧的质量平衡方程^[23],即双膜理论模型计算确定 $k_L a$ 。氧的质量平衡方程可表达为

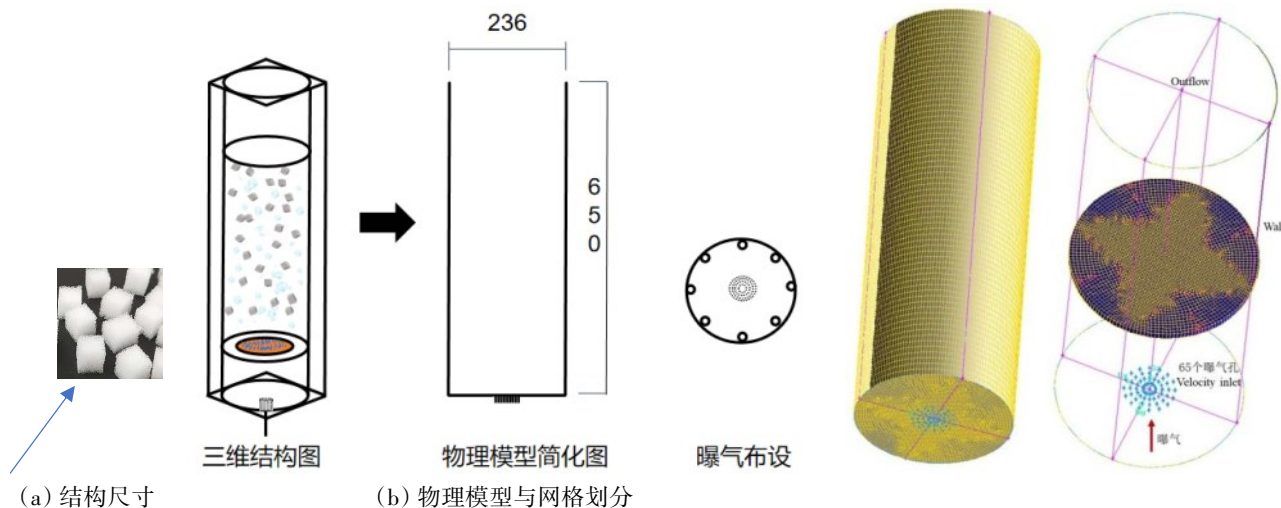


图1 反应器结构尺寸、物理模型与网格划分(单位 mm)

Fig.1 Structural dimensions of reactor dimensions, Physical Model, and Mesh Division (Unit: mm)

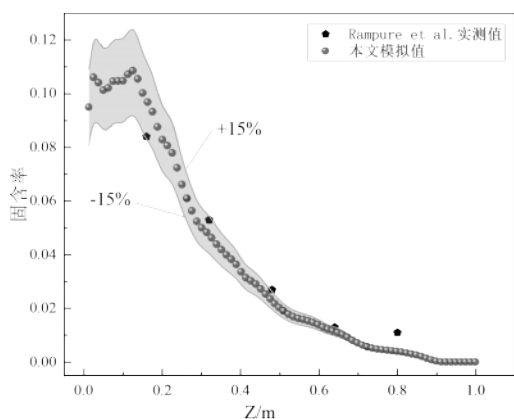


图2 轴向固含率模拟值与实测值对比(X=0 m, Y=0 m)

Fig.2 Comparison of simulation and experimental axial solid holdup (X=0 m, Y=0 m)

$$\frac{dC}{dt} = k_L a_{(T)} \cdot (C^* - C_t) \quad (6)$$

$$k_L a = k_L a_{(T)} \cdot 1.024^{(20-T)} \quad (7)$$

利用四通道溶解氧仪测定四种载体填充率条件下氧浓度分布,拟合氧浓度与时间的关系,计算确定 $k_L a(T)$, 并利用公式(7)将其值转化为 20℃ 条件下的 $k_L a$ 。参考之前的研究^[23], 计算确定 $SOTE$ 、 $SOTR$ 、 E 和 SAE 参数值, 评价氧传质效能。

1.6 统计学分析方法

采用 SPSS 软件(SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 中的 Pearson 相关性分析方法评估各因子之间的相关性及其显著性水平。当 $|r| \geq 0.8$ 时, 表示因子之间具有强相关性; 当 $0.3 \leq |r| < 0.8$ 时, 表示因子之间存在弱相关性; 当 $|r| < 0.3$ 时, 表示因子之间不存在显著相关性。当 $p \leq 0.01$ 时, 表示相关性极显著; 当 $0.01 < p \leq$

0.05 时, 表示相关性显著; 当 $p > 0.05$ 时, 表示相关性不显著。主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)用于分析 TCL、多相流动及氧传质特性间的关系。

2 结果与讨论

2.1 三相流化速度特性分析

TCL 影响了气-液-固三相径向速度分布, 且流化速度呈现气相 > 液相 > 固相的规律(图 3)。受到曝气孔布设的影响, 气相速度主要集中在柱体中心区域, 最大速度出现中心轴区域 ($-0.038 \text{ m} \sim 0.038 \text{ m}$); 液相和固相在气相剪切作用下具有向上流动的趋势, 且液相速度和固相速度明显低于气相速度; 液相和固相速度分布规律相似, 在柱体中心出现较高速度峰值, 在壁面两侧出现两个较小的速度峰值, 该规律与气相剪切和表面张力影响有关。较高 TCL 改变了装置内气液固三相的流化速率。在 TCL=10% 条件 $Z=0.20 \text{ m}$ 和 $Z=0.40 \text{ m}$ 径向气相最大速度分别为 $0.55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 当 TCL 增加至 20% 时, 气相速度降至 $0.49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 随着 TCL 持续增加, 固相阻力明显增加, 尽管径向中心线的气相速度增加, 但固相流化速率呈降低趋势, 不利用悬浮载体与气相和液相充分混合接触。低 TCL (10%) 条件固相载体含量较少, 较高气相速度使得液固两相速度明显较高; 在填充率 20% 条件气相速度小于 10%、30% 和 40% 填充率条件, 液-固两相的流化速度高于填充率 30% 和 40% 条件, 主要由于该

条件下曝气剪切能量较多转化为液-固流化速度, 促进气-液-固三相更好的充分接触。

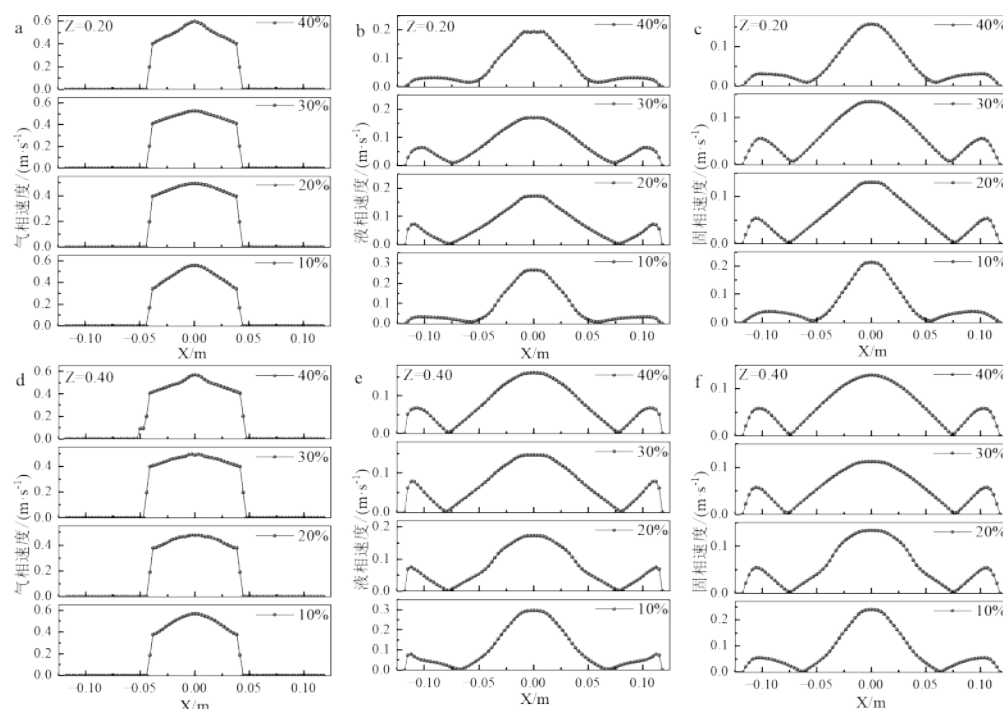


图3 气-液-固三相的径向瞬时速度分布,(a~c)为 $Z=0.20$ m截面的速度;(d~f)为 $Z=0.40$ m截面的速度

Fig.3 Radial instantaneous velocity distributions of the gas-liquid-solid three-phase flow under four carrier filling rates, (a~c) represents the velocity distribution at $Z=0.20$ m; (d~f) represents the velocity distribution at $Z=0.40$ m.

TCL影响了固相在反应器中的分布结果,且在较高TCL条件反应器底部明显出现固相堆积现象(图4)。当TCL=10%时,固相在柱体中分布较分散,底部仅有少量堆积,且部分区域固相体积分数较低,表明流化不充分;当TCL增至20%时,固相在轴向与径向上分布较为均匀,底部无明显沉积,流化效果较好;随着TCL持续增加,底部沉积现象明显增加,尤其在TCL=40%条件底部形成明显沉积层,其厚度约占反应器总高的1/3,表明该填充率条

件下固相流化性能较差。 $Z=0.20$ m与 $Z=0.40$ m两个径向上的固相体积分数分布均呈现多峰形态,峰值出现在柱体中心及近壁区(图5),这与液-固两相流化速度分布密切相关。与其他TCL条件固相分布相比,在TCL=20%条件在不同高度上的固相体积分数分布较为均匀, $Z=0.20$ m截面的平均固相体积分数为0.25。综合固相体积分数和流化速度分布结果,在TCL=20%条件气-液-固三相的流化性能较佳,30%条件次之。

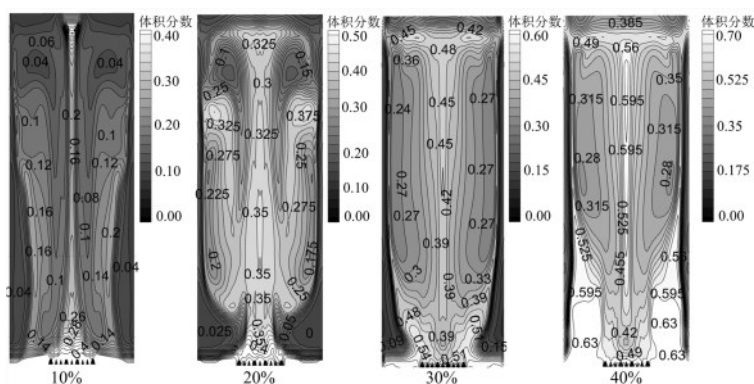


图4 不同TCL下固相体积分数分布云图

Fig.4 Contour plots of solid phase volume fraction distribution under different carrier filling rates

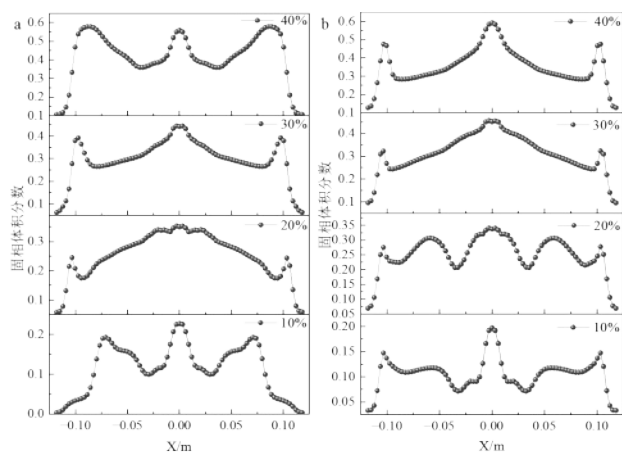


图5 径向(X)固相体积分数分布结果

Fig.5 Distribution of radial (X) solid phase volume fraction

注:(a)Z=0.20m,Y=0位置 (b)Z=0.40m,Y=0位置

2.2 流体湍动程度分析

湍动能与湍流粘度是表征系统混合与剪切程

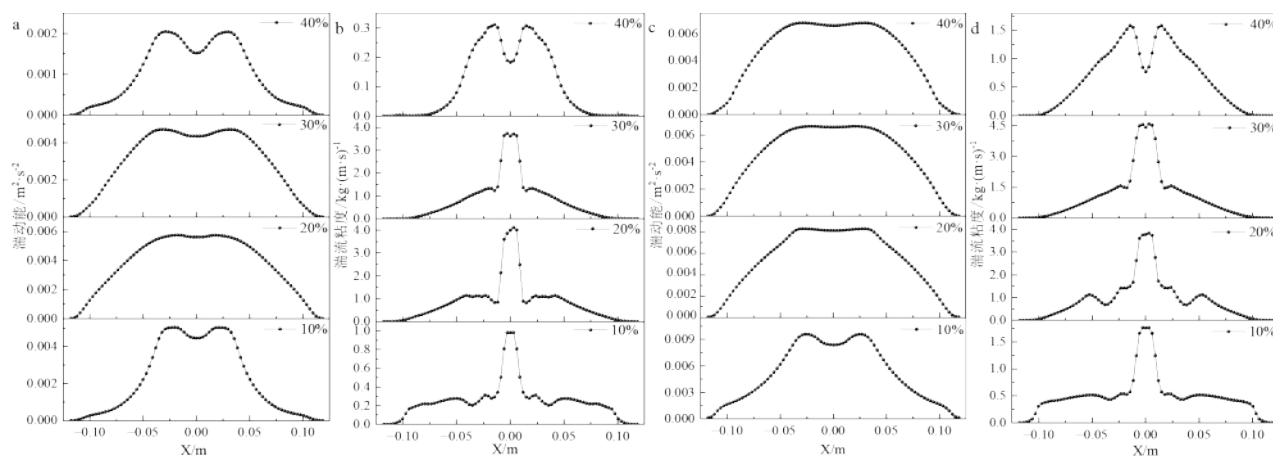


图6 四种TCL条件湍动能和湍流粘度径向分布(Z=0.20 m和Z=0.40 m)

Fig.6 Radial Distribution of Mixture Turbulent Kinetic Energy and Turbulent Viscosity under Four Carrier Filling Rates

注:(a)Z=0.20m,Y=0 (b)Z=0.40m,Y=0

2.3 流动形态分析

四种TCL条件流体流动形态均呈现典型的循环流型,如图7所示。柱体中心区域在曝气剪切作用下形成上升主流流态,到达顶部后受到表面张力影响向壁面两侧扩散,扩散壁面受到壁面影响流体在壁面两侧形成两个明显涡流,在流体回流到底部后受到曝气剪切又流向中心,从而构成了实现气-液-固三相接触与混合的循环主体路径。随着TCL的增加,主流中心区域的宽度呈现先增后减的变化,在TCL20%和30%条件下主流中心区域宽度最大,分别约为0.052 m和0.063 m。由于当TCL较低时,相同曝气强度下液固相的流化速度较大,且固相对气相的阻碍越小,主流中心区域的宽度越小;

度的关键参数,结果如图6所示。四种TCL条件径向湍动能和湍流粘度分布均呈现对称结构,其中湍动能分布呈现“双峰”结构(即“驼峰”状),而湍流粘度呈中心高、边缘递减的“火箭”状。这些结果与气-液-固三相相互作用和中心曝气剪切有关。湍动能与湍流粘度均在TCL=20%条件达到最大值。随着TCL持续增加,湍动能呈先升高后降低的趋势,与气相径向速度分布规律相反。由于在低TCL条件固相流化不充分,导致紊动程度较弱;当TCL为20%时,载体与废水充分混合,固相流化性能较好;随着固相TCL增加,需达到同一流化效果所需的曝气剪切力较高。因此,当TCL≥20%条件呈现湍动能与湍流粘度呈降低趋势。综上可得,TCL=20%条件流体的湍动程度较高,有利于物质的传递。

当TCL增加至同一曝气强度下能带动固相体积分数最大时,固相对气相的阻碍高于低TCL,主流中心区域的宽度增加;当TCL高于气相曝气剪切所能带动的最大固相体积分数时,固相将出现沉积现象,影响气相和液相流化通道,因而主流中心区域的宽度降低。填充率20%与30%条件大尺寸涡流集中于柱体中间两侧壁面附近,有助于实现装置主体范围的流体充分混合,而填充率10%和40%条件下涡流位置上移且尺寸减小,表明整体循环强度与混合能力的下降。因此,综合流化速度、湍动程度及流体流化可以发现,TCL为20%~30%条件流体的流化性能较佳,有助于提升多相混合及物质传递。

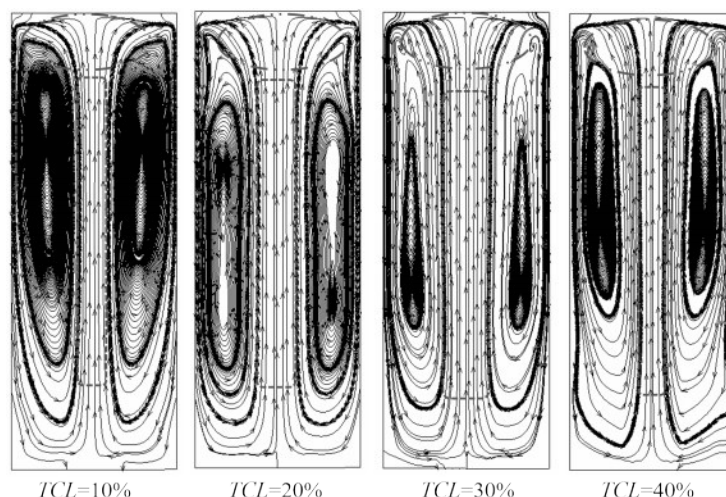


图7 不同TCL条件流体流型分布结果:箭头表示流动方向

Fig.7 Distribution of fluid flow pattern under different TCL: Arrows represent the flow direction

2.4 气泡大小分布

气泡尺寸分布是衡量反应器内气液传质界面的关键参数,气泡平均直径(d_{p0})及尺寸占比分布如图8(a)。气泡平均直径与TCL呈显著负相关关系($p < 0.01$, $R = -0.787$)。当载体填充率从10%增至40%时,气泡平均直径由2.24 mm降至1.61 mm,而小气泡(直径0.27~1.02 mm)占比呈现增加趋势,在填充率为40%的条件小气泡占比高达79.15%(图8(e))。由于较高TCL下气泡的阻力增加,流化性能降低,导致气泡聚并与破碎的概率降低。该结果表明较高TCL有利于形成并维持更小、更分散的气泡群。综合以上结果可以得出,20%~30%的TCL在创造较小气泡的同时,保障了最佳的流化与混合状态,在增大传质界面与维持系统高效混合之间可能取得较佳效果。

2.5 氧传质效能及其与多相流动协同机制分析

k_La 、 $SOTR$ 、 $SOTE$ 、 E 和 SAE 与TCL呈显著负相关($p < 0.01$, $R \leq -0.906$),如图9所示。随着TCL增加,氧传质效率(k_La 和 $SOTR$)和传质效能($SOTE$ 、 E 和 SAE)均呈降低趋势,当填充率由10%降至40%时, k_La 由 $(15.05 \pm 0.24) h^{-1}$ 降至 $(11.39 \pm 0.26) h^{-1}$, $SOTE$ 由 $(25 \pm 0.42) \%$ 降至 $(20 \pm 0.45) \%$,表明较高TCL条件下流化性能较差导致氧传质效率与效能降低。气泡直径和流体湍动程度是影响氧传质的两个关键参数,其中气泡直径越小,气液相界面积越大,氧的传质越快。此外,湍动程度越大,流化性能越好,氧的传质也越快。根据流场参数和传质参数可以得出,在FBBR系统中相同曝气参数条件湍动程度是

主导氧传质的主要因子,气泡直径次之。利用统计学分析了TCL、流动与传质的关系,如图10所示。TCL与液-固两相流速大小(L-V和S-V)、气泡平均直径、 $SOTR$ 、 $SOTE$ 、 kLa 、 E 和 SAE 呈显著负相关关系,与湍动能和湍流粘度呈正相关关系。随着TCL增加,液相和固相流化性能较差,导致多相流动性不佳,使得氧传质效能下降。

因此,从流场和传质两个角度分析得出,20%~30%TCL条件形成的多相流动特性改善了系统的氧传质效能,对反应器高效运行较为有利。然而,由于研究时间及作者能力有限,目前并未将多相流动、氧传质与微生物代谢耦合计算,导致模型仅限于流场单一模型,未来将致力于建立氧的跨尺度传质模型和微生物代谢模型,实现流动、传质与代谢同步高保真预测。

3 结论

(1)建立并验证了适用于FBBR系统厘米级悬浮载体的气-液-固三相CFD-PBM耦合模型。气-液-固三相流动的CFD-PBM耦合模型,可准确预测FBBR内厘米级悬浮载体的多相流化速度、湍动程度、气泡大小等关键参数,模型预测偏差控制在15%以内。

(2)TCL影响了气-液-固三相的流化性能。填充率20%条件液-固两相的流化速度高于填充率30%和40%条件,且湍动程度(湍动能峰值达 $0.0058 J \cdot kg^{-1}$)较大,使得固相分布较为均匀(沉积量少);填充率20%条件载体流化性能最佳,填充率

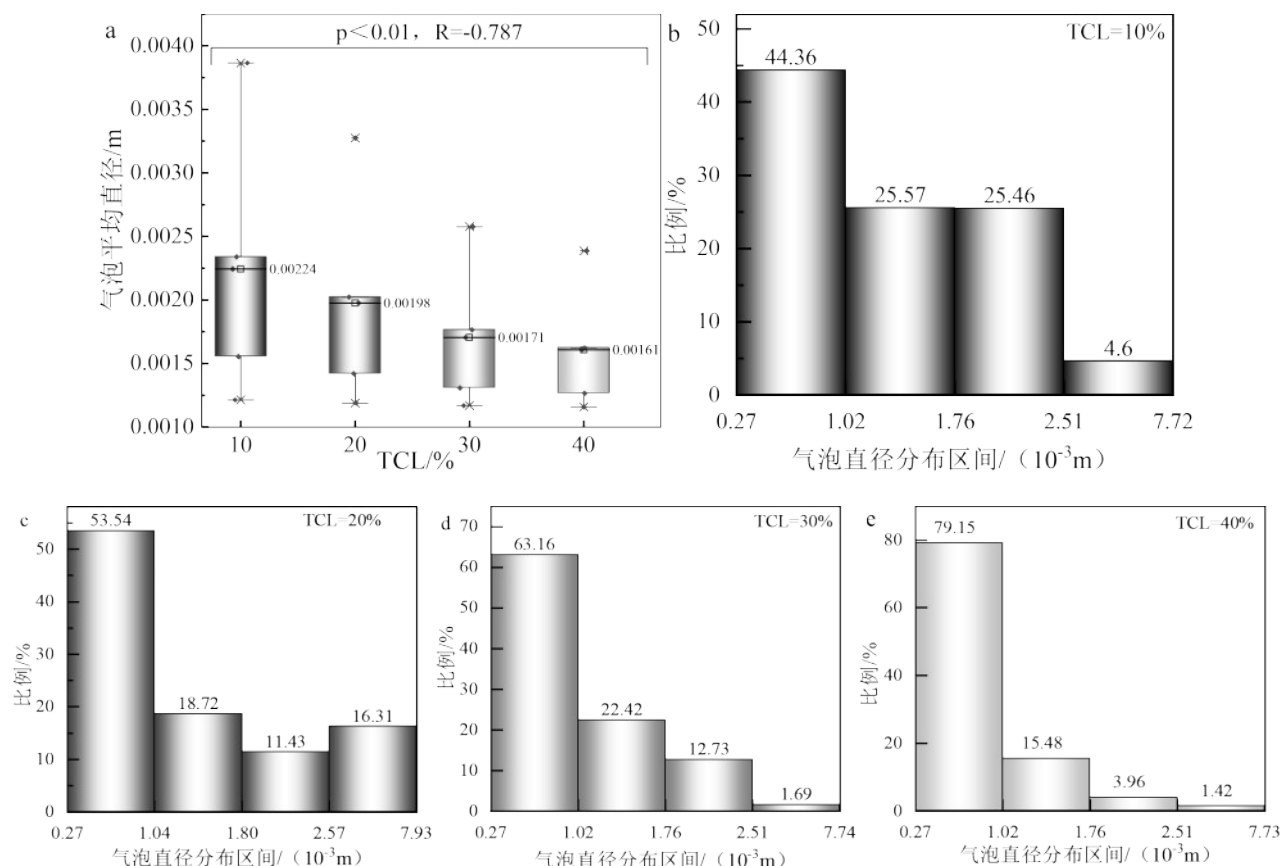


图8 气泡直径分布区间中气泡数量占比分布

Fig.8 Distribution of proportion of the number of bubbles in each bubble diameter distribution

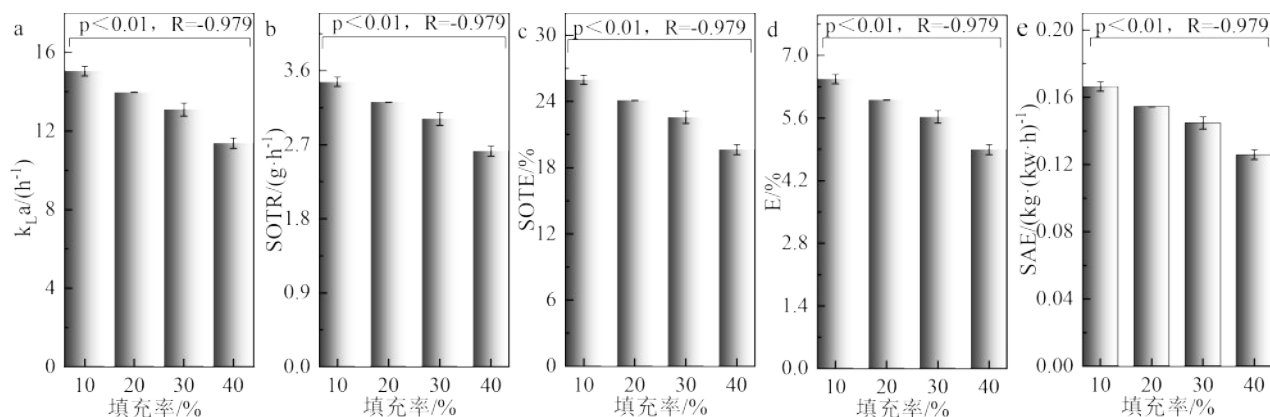


图9 不同载体填充率条件氧传质过程中主要参数分布状况

Fig.9 Distribution of main parameters on oxygen mass transfer under different carrier filling rate

30%条件次之;小气泡占比与TCL呈现显著负相关关系。

(3)TCL、流化性能与氧传质呈现显著相关性。TCL与氧传质($k_L a$ 、 $SOTR$ 、 $SOTE$ 、 E 和 SAE)和多相流化性能均呈现显著负相关关系;在填充率20%~30%条件FBBR系统流化性能和氧传质效率分布较为有利于装置系统的高效运行。

符号说明

- a ——为气液相界面面积, m^2
- $b(v)$ ——气泡的破碎函数
- c_e ——Luo聚并模型经验常数
- $c(v, v')$ ——气泡的聚并函数
- d_i ——碰撞气泡中大气泡的直径, m
- F_{ijk} —— i 、 j 和 k 三相界面作用力, N

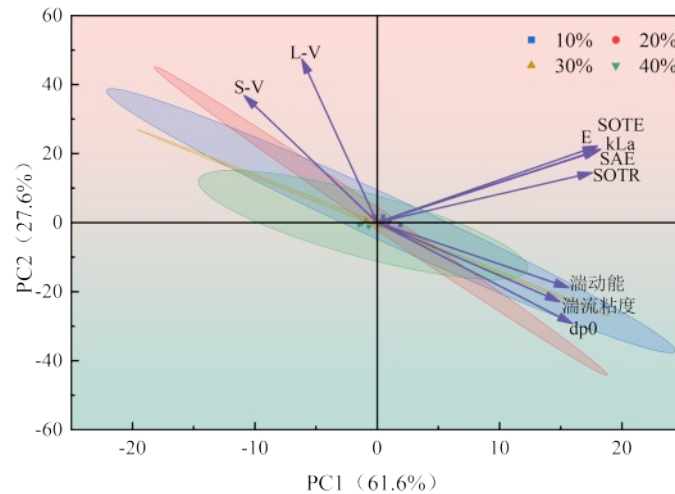


图10 载体填充率、多相流动及氧传质特性间PCA分析

Fig.10 PCA Analysis of the relationships among carrier filling rate, multiphase flow and oxygen mass transfer characteristics

- f_i ——第*i*组分的体积分数
 K ——Luo-Lehr破碎模型速率常数
 p ——压 Pa
 p_{ag} ——气泡碰撞后的聚并效率
 p_s ——固体粒子碰撞产 Pa 的固体压 Pa
 u_{ij} ——碰撞气泡间的相对速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 α_i ——第*i*相的体积分数
 γ ——气液两相密度修正系数
 ε_g ——反应器整体平均气相体积分
 ξ ——湍流涡旋与母气泡的直径
 $\vec{\mu}_i$ ——第*i*相的速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 μ_{eff} ——相的有效粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
 ρ_i ——第*i*相的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
 σ ——气液界面张力, $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
 $\Omega(V, V')$ ——体积为*V*的母气泡破碎生成体积为*V'*的子气泡的破碎速率, s^{-1}

bioreactors: an experimental investigation[J]. Chemical Engineering Science, 2025, **305**: 121146.

- [5] Li H L, Zhang Q L, Zeng M, et al. Insights into gas flow behavior in venturi aerator by CFD-PBM model and verification of its efficiency in sludge reduction through O_3 aeration[J]. Journal of Water Process Engineering, 2023, **54**: 103960.
- [6] Sadeghi M, Sontti S G, Zheng E Z, et al. Computational fluid dynamics (CFD) simulation of three - phase non - Newtonian slurry flows in industrial horizontal pipelines[J]. Chemical Engineering Science, 2023, **270**: 118513.
- [7] Zhou R T, Yang N, Li J H. CFD simulation of gas-liquid-solid flow in slurry bubble columns with EMMS drag model[J]. Powder Technology, 2017, **314**: 466-479.
- [8] Li L, Zhang Q, Li X Y, et al. Optimization of gas distributor to improve flow characteristics in a particular slurry bubble column reactor using CFD-PBM coupled method[J]. Powder Technology, 2024, **448**: 120244.
- [9] 邹帆, 于清江, 董喜贵, 等. MBBR载体填充率对水体修复效果的影响及底物降解动力学研究[J]. 工业用水与废水, 2024, **55** (2): 41-46.
 Zou F, Yu Q J, Dong X G, et al. Effect of MBBR carrier packing ratio on water remediation efficiency and substrate degradation kinetics[J]. Industrial Water & Wastewater, 2024, **55**(2): 41-46.
- [10] 范辉, 高燕宁, 刘克成, 等. 生物载体缓解管式膜 MBR 工艺中的膜污染[J]. 净水技术, 2023, **42**(2): 103-108.
 Fan H, Gao Y N, Liu K C, et al. Membrane fouling mitigation in tubular membrane MBR process with biocarriers[J]. Water Purification Technology, 2023, **42**(2): 103-108.
- [11] Reiss C, Gerschenfeld A, Colin C. Boiling-flow multiphase CFD simulations for nuclear reactor conditions without interfacial area transport equation[J]. Nuclear Engineering and Design, 2024, **428**: 13453.
- [12] Wang G C, Cai W F, Yang C Y, et al. Multi-scale CFD study of multiphase flow in structured sinusoidal corrugated sheets packings[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2023, **199**: 515-529.
- [13] Li Y H, Zhang X Y, Liu S Y, et al. Gas-liquid-solid flow characteristics in a pilot-scale microbubble-enhanced slurry

参考文献

- [1] 彭锦玉, 李振邦, 张坤乾, 等. 前置臭氧-生物流化床工艺用于水厂提质改造[J]. 中国给水排水, 2024, **40**(12): 94-100.
 Peng J Y, Li Z B, Zhang K Q, et al. Application of pre-ozone and biological fluidized bed in updating and transformation of waterworks[J]. China Water & Wastewater, 2024, **40**(12): 94-100.
- [2] Wang L F, Yuan C, Yang K, et al. Bio-wax carriers exhibit a competitive edge in developing biofilms under varying shear stresses: Integrating growth models and biological information[J]. Journal of Water Process Engineering, 2025, **69**: 106841.
- [3] 任杰辉. 好氧流化床生物膜反应器中多相流动传质与污水处理机制研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
 Ren J H. Mechanism of multiphase flow mass transfer and wastewater treatment in aerobic fluidized bed biofilm reactor[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [4] Sanogo B, Essid A, Tauleigne B, et al. Exploring the impact of proteins and surfactant on oxygen mass transfer in gas-liquid

- bubble column reactor[J]. *Fuel*, 2026, **409**: 137856.
- [14] 卢玉成, 黄涛, 罗亚军, 等. 水悬浮造粒搅拌釜内气液固三相混合特性CFD模拟[J]. *化工进展*, 2025, **44**(8): 4556–4566.
Lu Y C, Huang T, Luo Y J, et al. CFD modeling of gas-liquid-solid mixing characteristics in stirred tank for water-suspension granulation[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2025, **44**(8): 4556–4566.
- [15] 毛宁轩, 万小维, 鞠杰, 等. 工业气固流化床内流场的CFD-PBM数值模拟和结构优化[J]. *化工进展*, 2024, **43**(S1): 13–20.
Mao N X, Wan X W, Ju J, et al. Numerical simulation and structural optimization of flow field in industrial gas-solid fluidized beds based on CFD-PBM[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2024, **43**(S1): 13–20.
- [16] 陈春林, 陈凤阳, 刘启鸿, 等. 基于CFD-PBM耦合模型的搅拌釜内多相流动特性研究[J]. *中国有色冶金*, 2025, **54**(5): 144–155.
Chen C L, Chen F Y, Liu Q H, et al. Multiphase flow characteristics in stirred tanks based on CFD-PBM coupling model[J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2025, **54**(5): 144–155.
- [17] 邢继远. CFD-PBM框架下旋流式微泡发生器气泡动力学行为[J]. *化学工程*, 2024, **52**(3): 59–65.
Xing J Y. Bubble dynamics in micro-bubble generator with swirl flow based on CFD-PBM framework[J]. *Chemical Engineering (China)*, 2024, **52**(3): 59–65.
- [18] 沈宪琨, 贾志勇, 蓝晓程, 等. CFD-PBM耦合模型用于浆态床反应器的研究进展[J]. *化工进展*, 2025, **44**(8): 4408–4418.
Shen X K, Jia Z Y, Lan X C, et al. Progress on CFD-PBM coupled model for slurry reactors[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2025, **44**(8): 4408–4418.
- [19] Zang H Y, Hu S W, Liu X H, et al. Applying a CFD-PBM approach to modeling the flow behavior in pressurized bubbling fluidized beds[J]. *Powder Technology*, 2025, **452**: 120541.
- [20] Guo K, Wang T, Li J. CFD simulation of gas-liquid-solid three-phase flow in a slurry bubble column with different solid particles[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **317**: 524–537.
- [21] Zhou X, Ma Y, Li J. CFD-PBM simulation of bubble size distribution in a gas-liquid-solid slurry bubble column[J]. *Powder Technology*, 2020, **367**: 602–613.
- [22] Ren J H, Pei Y, Zhou X P, et al. CFD-PBM simulations the effect of aeration rates on hydrodynamics characteristics in a gas-liquid-solid aerobic fluidized bed biofilm reactor[J]. *Powder Technology*, 2024, **443**: 119963.
- [23] Ren J H, Peng Q, Meng J, et al. Optimization of aerator design for enhanced multiphase fluidization performance and oxygen transfer efficiency[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2025, **201**: 107443.
- [24] Li W L, Zhong W Q. CFD simulation of hydrodynamics of gas-liquid-solid three-phase bubble column[J]. *Powder Technology*, 2015, **286**: 766–788.
- [25] 祝赫, 张仪, 齐娜娜, 等. 欧拉-欧拉双流体模型中颗粒黏性对液固散式流态化的影响[J]. *化工学报*, 2024, **75**(9): 3103–3112.
Zhu H, Zhang Y, Qi N N, et al. Effect of particle viscosity in two-fluid model on homogeneous liquid-solid fluidization under Euler-Euler framework[J]. *CIESC Journal*, 2024, **75**(9): 3103–3112.
- [26] Zhou X H, Ma Y L, Liu M Y, et al. CFD-PBM simulations on hydrodynamics and gas-liquid mass transfer in a gas-liquid-solid circulating fluidized bed[J]. *Powder Technology*, 2020, **362**: 57–74.
- [27] Pan H, Chen X Z, Liang X F, et al. CFD simulations of gas-liquid-solid flow in fluidized bed reactors: a review[J]. *Powder Technology*, 2016, **299**: 235–258.
- [28] 马永丽, 刘明言, 胡宗定. 气液固流化床流动介尺度模型研究进展[J]. *化工学报*, 2022, **73**(6): 2438–2451.
Ma Y L, Liu M Y, Hu Z D. Development of flow mesoscale modeling of the gas-liquid-solid fluidized beds[J]. *CIESC Journal*, 2022, **73**(6): 2438–2451.
- [29] 董亮, 曾涛, 刘少北, 等. 四边形折流式膜生物流化床内填料浓度及液相流场特性研究[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(11): 4139–4149.
Dong L, Zeng T, Liu S B, et al. The characteristics of packing fraction and liquid phase flow field in a quadrilateral baffled membrane biological fluidized bed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(11): 4139–4149.
- [30] Luo H A, Svendsen H F. Theoretical model for drop and bubble breakup in turbulent dispersions[J]. *AIChE Journal*, 1996, **42**(5): 1225–1233.
- [31] Lehr F, Millies M, Mewes D. Bubble-Size distributions and flow fields in bubble columns[J]. *AIChE Journal*, 2002, **48**(11): 2426–2443.
- [32] Rampure M R, Buwa V V, Ranade V V. Modelling of gas-liquid/gas-liquid-solid flows in bubble columns: experiments and CFD simulations[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2003, **81**(3/4): 692–706.
- [33] Saraswat A, Fraile A, Gedupudi S, et al. A comprehensive review of experimental and numerical studies on liquid metal-gas two-phase flows and associated measurement challenges[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2025, **213**, 111104.
- [34] Wu X T, Li C H, Luo X Q, et al. Description of phase separation motion in gas-liquid two-phase flow[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2024, **181**: 104998.
- [35] Guo H, Ma Y L, Sun Y, et al. Gas-liquid mass transfer and reaction characteristics of gas-liquid-solid circulating micro-fluidized bed[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, **503**: 158249.