DOI:10.20176/j.cnki.nxdz.20260902

气固流化床流动-换热研究进展:表征与颗粒-内构件调控

李建涛[1,2],张文洁[1,2],马 倩[1,2],李诗娇[1,2],林春芸[1,2],唐 渊[1,2],卢春喜[3*]

(1.宁夏大学 化学化工学院,宁夏 银川 750021;
2.宁夏大学 煤炭高效利用与绿色化工国家重点实验室,宁夏 银川 750021;
3.中国石油大学(北京) 重质油全国重点实验室, 北京 102249)

摘 要:气固流化床反应器被广泛用于石油化工、煤化工和生物化工等领域,分析其多相流动特性与换热规律,对该设备的结构设计、性能调控及工业放大均具有重要意义。流化床多相流动特性与换热行为的表征方法主要包括实验测量、数值模拟及机器学习方法。阐述不同表征方法在流化床的流型识别、参数预测及反应过程优化中的研究现状;梳理颗粒物理性质与内构件结构对流化床多相流动与换热的影响规律,明确颗粒形貌及内构件的作用机制。结果表明,混合颗粒体系-内构件耦合协同是同步提升流化床多相流动均匀性与传热效率的重要路径,但该类耦合体系存在颗粒分级混合与内构件构型协同调控难度大、两相耦合界面参数不匹配、多尺度数学模型封闭困难等问题。未来可通过多尺度机理耦合、数据驱动模型构建等方法,实现对流化床多相流动特性与换热规律的精准高效表征,从而为流化床精准设计和操作优化提供新思路。

关键词:气固流化床;多相流动;换热;表征方法;颗粒物理性质;内构件
分类号:(中图)TQ022.3 **文献标志码:**A

气固流化床具备优异的传热、传质性能,被广泛用于石油化工、煤化工和生物化工等领域[1]。在煤炭清洁利用[2]、矿物分选[3]、催化转化[4-5]、生物质利用[6]及药品生产[7]等工业过程中,气固流化床可实现大批量物料连续化处理,具有反应高效与运行稳定等优势,尤其适用于多元颗粒体系、复杂操作工况下的连续作业。准确把握流化床内复杂流体动力学行为与换热规律,对于流化床的设计研发、性能优化及工业放大均具有重要意义[8]。气固流化床内两相接触频繁、相界面复杂多变,流化床整体换热效果依赖于颗粒物理性质和内构件结构。颗粒物理性质(包括形貌、粒径及密度等),会改变床层膨胀高度、气泡演化行为与颗粒运动轨迹,进而直接影响床内多相流动状态、气固两相接触效率、流化稳定性与混合程度;优化内构件形式、布置方式及操作条件等,能够抑制气泡过度增长,避免颗粒偏析现象,进一步改善流化质量。因此,流化床内多相流动特性与换热规律的表征方法至关重要。文中围绕气固流化床内多相流动与换热表征方法、颗粒物理性质影响规律及内构件优化展开论述,梳理该领域关键科学问题与技术瓶颈,以期为高性能流化床换热系统的设计与智能化运行提供参考。

1 气固流化床流动-换热特性表征

气固流化床内流体动力学研究主要聚焦气体与固体颗粒的流动规律,包括床层压力变化,气固两相分布、运动速度与流向,固体颗粒质量流率,气泡演化行为及颗粒团聚等[9]。在气固流化床运行过

收稿日期:2026-06-16
基金项目:国家自然科学基金地区科学基金资助项目(22568035);宁夏自然科学基金资助项目(2026AAC030128);宁夏大学研究生创新基金资助项目
作者简介:李建涛(1993—),男,副教授,博士,博士研究生导师,主要从事流态化与多相流过程强化研究,(电子信箱)jtli@nxu.edu.cn。
*通信联系人:卢春喜(1963—),男,教授,博士,博士研究生导师,主要从事过程强化与石油化工过程装备研究,(电子信箱)lcx725@sina.cn。
引用格式:李建涛,张文洁,马倩,等.气固流化床流动-换热研究进展:表征与颗粒-内构件调控[J].宁夏大学学报(自然科学版中英文),2026,47(5):406-420.

程中，明确其中流体动力学特性，对于确保流化床高效运行与精准调控具有重要意义[10]。对于气固流态化系统中两相行为的实验测量，主要有侵入式和非侵入式[11]方法。为了高效预测不同操作条件下气泡和颗粒的行为[12]，数值模拟方法展现出巨大潜力，其核心在于从局部、整体平均分析转向全局系统性分析。其中，欧拉-欧拉模型和欧拉-拉格朗日模型[13]在气固流化床流动与换热特性研究中被广泛应用。数值模拟方法能够求解基于物理定律的控制方程，为分析气固流化床流动与换热机制提供了强大工具。然而，对于这些机理模型，无论是因引入本构关系而降低精度的欧拉-欧拉模型，还是计算成本极高的欧拉-拉格朗日模型，都需在精度与计算效率之间进行权衡[14]。为了突破这一瓶颈，数据驱动方法应运而生，并展现出巨大潜力。机器学习（machine learning，ML）并不试图直接构建复杂物理方程，而是基于海量实验数据或数值模拟结果学习，在保证较高预测精度的同时，显著降低计算成本与建模难度，从而实现对复杂流动及换热过程的快速预测与高效评估[15]。文中从实验方法、数值模拟和机器学习 3 方面论述气固流化床的表征方法（图 1）。

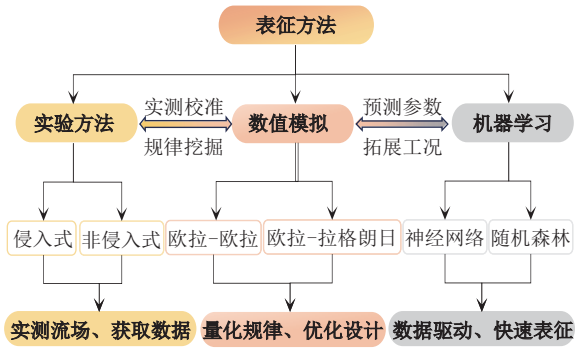


图 1　气固流化床表征方法的内容框架

Fig. 1　Framework of characterization methods for gas-solid fluidized beds

1.1　实验方法

1.1.1　侵入式测量　侵入式测量以采样法与探针法为主。探针法能够采集流化床内流动的波动信号，常用探针有电容探针、光纤探针、电阻探针及电导探针，并配有温度传感器、压力传感器等。

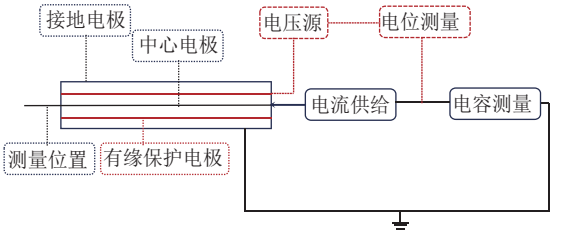
颗粒运动特性是评估流化床流化质量的关键指标。多元颗粒的混合程度能够直观反映颗粒在流化床内的分散均匀性[16]。采样法具有直接、准确测量优势，是定量表征气固流化床内颗粒混合程度与偏析行为的常用手段，被广泛用于不同工况下混合、分离效果评价研究[6, 17]。该方法的原理：在设定的流化条件下，使用采样管定点分层采集流化床内不同径向、轴向位置的颗粒样品；对采集样品进行筛分、分选与称重，或结合粒度分析仪精确测定不同组分颗粒的质量分数或体积分数；通过对比各采样点颗粒组成差异，量化混合均匀度，从而清晰反映多元颗粒体系中颗粒的混合、分层或偏析程度。该方法可为分析操作参数对流化混合行为的影响、优化工艺条件及验证数值模拟结果，提供直接、可靠的实验依据。

气泡行为对流化床内流体动力学、气固两相接触效率与反应选择性有显著影响；床层温度则是传热及传质过程中的关键参数。因此，精准测量气泡的尺寸、频率、上升速度、形态、演化及床层温度，是流化床流动及传质传热研究的关键。为直接、准确获得流化床局部区域气泡参数与温度，通常在床层安装各类侵入式测量探针，通过探针原位采集压力、介电、光强和温度信号，实现对气泡演化行为与床层换热特性的表征。其中，压力探针记录气泡、颗粒交替通过测量截面时的压力波动[18-19]。提取压力脉动信号，可解析气泡的频率、上升速度、合并与破裂规律。电容探针则利用固相与气相之间的介电常数差异，实时监测电容变化，快速识别气泡与颗粒相界面，进而精准捕获气泡的尺寸、分布与局部区域含气率[20-24]。光纤探针则基于光强反射原理[10]，利用颗粒与气泡对光的反射差异，区分气固两相界面，从而获得瞬时气泡尺寸、局部区域颗粒浓度及气泡演化行为[25]。温度传感器（热电偶）可实时监测流化床局部温度场。在流化床层布设多组温度传感器，并根据热流量与温度差计算床层-壁面换热系数，可为分析气固两相接触动力学与换热特性提供可靠的温度基准数据[8, 26-27]。多种侵入式测量探针形貌见图 2。

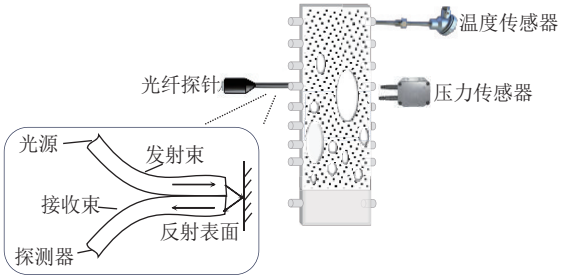
然而，侵入式探针对流化床原有气泡形态会造成扰动，改变流场流动状态，导致测量结果产生系统性偏差。非侵入式测量技术从根本上规避了这一缺陷，可在不干扰流化床层流动前提下，捕获真实流场分布与气泡行为信息。

1.1.2　非侵入式测量　非侵入式测量主要包括可视化与层析成像等表征技术，如数字图像分析（digital image analysis，DIA）、电容层析成像（electrical capacitance tomography，ECT）及电阻层析成像（electrical resistance tomography，ERT）等，可在不干扰流化床流动状态前提下，实现对气泡行为、颗粒浓度分布及流型演变的原位观测与定量分析。

气固流化床内气固相体积分数、气泡行为、压



(a) 电容探针



(b) 其他探针

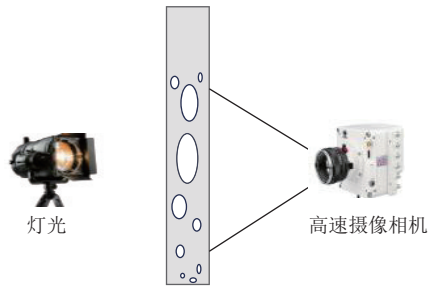
图2 各类侵入式探针

Fig. 2 Various intrusive probes

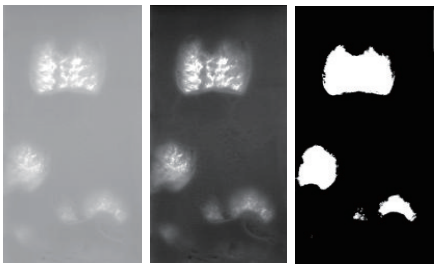
力特性及温度分布等核心参数,直接决定流化床流化质量、传热传质效率及运行稳定性。因此,为了研究上述核心参数的变化规律,国内外研究者采用非侵入式测量技术开展大量研究[6,28-30]。其中,DIA是一种非侵入式光学测量方法,通过高速摄像机连续采集流化床内气泡与颗粒的流动图像,再结合图像处理算法,精准识别气泡轮廓,进而提取气泡的尺寸、形态、分布及运动速度等瞬态信息。因此,DIA在完全不干扰床层原有流动结构与气泡形态前提下,实现了对流动参数的定量表征[31],不仅避免了侵入式探针可能带来的测量偏差,还可在较大操作范围内捕获气泡的时空演化特征。若将DIA与粒子图像测速法联合,还可提升粒子图像测速法的精度[32]。图3呈现了图像采集系统的搭建与DIA的处理过程。

ECT是一种成熟的二维成像技术,常被用于表征流化床内复杂流场特性[33-34]。通常,在流化床内壁布置多组电极,测量不同电极的电容信号以得到局部区域介电常数的分布情况,进而获得流化床层截面颗粒浓度、气泡演化特征与颗粒偏析动力学等信息。电容体积层析成像(electrical capacitance volume tomography, ECVT)是ECT的三维扩展,可直接重建流化床内流场三维体积图像,获得气固相体积分数、速度场等关键参数,更适配复杂三维流动体系的机理分析与反应过程优化[35]。

ERT具备实时监测气相和固相(绝缘)动态变化的能力[36],能够定量表征床层固相颗粒浓度分布。因此,通过ERT能够精准划分固定床、过渡流



(a) 流化床实验装置侧视图



(b) DIA技术处理图像

图3 实验装置及DIA处理过程

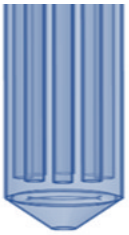
Fig. 3 Experimental setup and DIA procedure

化及完全流化3种流动状态。此外,采用ERT结合数学方程等算法,可重建流化床层截面含气率的分布图像[37-38],从而清晰揭示床层含气率的动态演化规律。

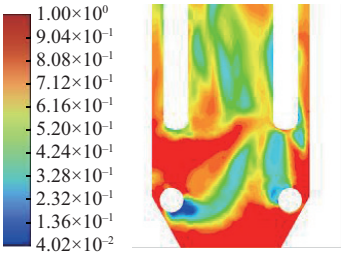
为实现对流化床流动与换热特性的高效预测,以双流体模型(two-fluid model, TFM)与计算流体动力学-离散元法(computational fluid dynamics-discrete element method, CFD-DEM)为代表的数值模拟方法快速发展,已成为气固流化床工程设计的重要工具。

1.2 数值模拟方法

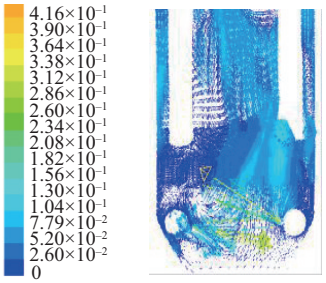
随着计算机技术迅猛发展,数值模拟方法不断革新,已成为高效、间接探究流化床流动与换热机制的有力工具。其中,应用最广泛的当属欧拉-欧拉模型和欧拉-拉格朗日模型。欧拉-欧拉模型是当前气固流化床数值模拟的主流方法:将气、固两相定义为连续相流体,通过整体求解流化床流动、传质传热问题,分析流化床内复杂流动与气固相间相互作用特征[39]。欧拉-拉格朗日模型采用拉格朗日法处理离散相,追踪每一个气泡或固体颗粒的运动轨迹;而连续相则使用欧拉方法计算,能够同时对颗粒运动与周边流场特征进行描述[40]。数值模拟方法能够捕获流化床层全流场信息,突破了实验测量局限,是剖析气泡和颗粒动态演化的重要手段,可表征和解析流化床内多相流动特性(图4),进而为流化床的设计与结构优化提供重要参考依据。



(a) 流化床局部示意图



(b) 固含率(体积分数)分布图



(c) 流线图(体积分数)

图 4　数值模拟方法表征流化床内多相流动

Fig. 4　Characterization of multiphase flow in fluidized beds via numerical simulation

在 TFM 中，将气相和固相均看作相互渗透的连续介质，通过独立求解两相的质量方程和动量守恒方程，再引入曳力、压力及颗粒应力等相互作用模型，实现两相耦合，进而对流化床内气泡演化、颗粒循环、床层膨胀及相分布等流动特性[33, 41-44]与换热特性[42, 45]进行数值模拟。但是，TFM 采用平均化方法处理流动参数，会丢失微观信息。为了弥补这一缺陷，需引入从颗粒团模型中获得的本构关系来描述相间动量、热量交换。因此，欧拉-欧拉模型的准确性，在很大程度上依赖于基础研究得出的本构关系的正确性[45-46]。

当表观气速大于最小流化速度或最小鼓泡速度时，多余气体以气泡形式通过流化床层，并在沿流化床层上升过程中发生破碎和聚并行为。单纯 TFM 无法自主描述气泡的聚并和破碎特征，而采用耦合群体平衡模型(population balance model, PBM)可构建气泡的聚并与破碎动力学方程。与传统测量方法(单颗粒追踪模式)相比，该方法能够更精准表征气泡的动态演化过程，适用于研究某一类“群体”的数量分布变化，比如颗粒粒径、气泡尺寸[47-48]。当前研究聚焦单一 Geldart 颗粒(A、B、C、D)的二维冷态流化特征，而针对宽粒径、异形颗粒的热态二维流化床体系研究较为匮乏。

欧拉-拉格朗日离散颗粒模型，能够从微观尺度揭示颗粒团更新模型的内在作用机理。CFD-DEM 在气固流化床的复杂流动特性研究中被广泛应用。DEM 采用颗粒追踪算法，把每个颗粒都当成独立计算单元，实时求解颗粒的空间位置、受力状态、碰撞行为、运动速度与轨迹[49]。与其他模型相比，CFD-DEM 无需预先假设颗粒团的存在形式、粒径尺度及更新频率，而是通过精确计算颗粒-颗粒、颗粒-流体间的相互作用力，使颗粒团的生成、演化与更新过程在数值计算过程中自然呈现[50-53]。但由于该方法的计算成本较高，现有研究多通过粗颗粒替代真实颗粒方法降低计算成本，但目前粗粒化缩放标准尚不统一。

1.3　机器学习(ML)

在实验方法和数值模拟方法面临计算精度、效率及成本等多重因素制约背景下[54]，以数据驱动为核心的间接表征方法快速兴起[55-56]，这为多相流建模与反应过程优化提供了全新技术路径。其中，以 ML 为代表的人工智能技术，被广泛用于颗粒速度、流量及床层流动均匀性等关键参数的精准预测中，尤其在复杂流动特性表征[57]、测量精度提升[57-58]、传热传质强化[59]等关键场景中展现出不可替代的优势。ML 算法分为有监督学习、半监督学习和无监督学习 3 种，其中，在监督学习框架下，神经网络和随机森林是处理回归与分类任务的主流算法；而神经网络是监督学习中最具代表性的方法[60-61]。

人工神经网络(artificial neural network, ANN)和深度神经网络(deep neural network, DNN)模型具备多层非线性映射拟合能力，当以表观气速、颗粒粒径、床层高度等参数为输入变量时，可实现对流化压降、换热系数等关键特性参数的预测。该类模型无需构建相间传递过程的复杂物理方程，在海量流化床数据条件下的预测速度远大于 CFD 数值模拟方法。ANN 模型可从大量实验数据中学习数据特征规律，在预测系统响应、流化转变点及压降等关键指标方面，具有良好的适应性和智能求解能力。例如，以已知参数(表观气速、颗粒粒径、床层高度、含固率)为输入变量，选择标签真值(最小流化速度、膨胀比、曳力系数、流场参数)训练神经网络，可实现对颗粒流动特性及反应物浓度分布的预测[58-59]。DNN 是一类性能优异的机器学习模型，由多层网络结构、非线性激活单元构成，具备自动特征学习机

制。该模型通过多层互连神经元,高效分析复杂数据并做出预测;以流场图像、瞬态数据为标签,训练模型识别气泡、颗粒团;或以时序流场序列为标签,训练模型预测未来时刻流场演化过程[15, 62]。

物理信息神经网络(physics-informed neural network, PINN)在全连接神经网络的数据损失基础上,引入流体控制方程的残差约束,将流体物理守恒定律嵌入网络训练过程,实现少量标签数据与物理先验知识共同驱动建模。模型总损失包括数据拟合损失与物理残差损失两部分:数据拟合损失用于约束网络预测值贴近实测数据;物理残差损失则将网络预测值代入对应的气固两相连续性方程及动量守恒方程,通过最小化方程残差法使其趋近于零,进而保障模型预测值具有物理一致性与合理性[63]。随机森林属于集成算法,将多个弱模型(分类回归决策树)聚合成一个强预测模型。该算法依托带标签数据集训练集成决策树模型,适用于参数预测、产率回归、特征重要性分析和工况分类等研究[58]。

ML 预测模型包含超参数集,需通过参数寻优使模型性能达到最优。目前,贝叶斯优化已成为超参数优选的高效方法,相较于网格搜索与随机搜索,具有较高的寻优效率[64]。尽管 ML 预测模型在多相流研究中展现出巨大应用潜力,但仍存在数据依赖性强、可解释性不足等问题。因此,有必要在现有研究基础上,构建多模型耦合的智能建模体系,从而为多相流的精准表征提供可靠技术支撑。

2 颗粒物理性质对气固流化床流动-换热特性的调控机制

在气固流化床中,气泡行为和颗粒混合程度是表征流化质量与影响换热特性的重要因素。气泡作为流化床中的核心载体,其尺寸分布、上升速度及产生频率等,直接影响床层的膨胀特性及颗粒更新频率。通过调控气泡行为(如抑制大气泡生成、促进气泡均匀分布),可改善颗粒的流化质量;而颗粒物理性质(粒径、密度及形状)是决定流化状态的基础,也是影响多相流流动和换热效率的核心因素。因此,文中重点阐述颗粒物理性质对床层流态化行为、气泡演化行为、颗粒混合程度及换热特性的影响规律及作用机制(图 5)。

2.1 单一颗粒体系

单一颗粒的粒径、密度及形貌等物理性质,对气固鼓泡流化床换热器的换热性能有显著影响[15]。粒径较小的颗粒通常具有较大的比表面积,有利于强化传热,提高换热系数,但也易造成床层流动阻力上升;反之,粒径较大的颗粒虽可降低床层阻力,但因其比表面积减小而削弱换热效果。Yusuf 等[65]采用欧拉-欧拉模型进行模拟研究,发现换热系数随着表观气速升高、颗粒尺寸增大而降低。Hou 等[66]采用 CFD-DEM 进行模拟研究,结果显示,随着颗粒粒径增大,对流换热强度显著增强,而颗粒接触导热的贡献率呈下降趋势。这一现象源于颗粒粒径增大时,壁面颗粒更新速率加快,增大了对流边界层的扰动作用;同时,颗粒与壁面接触点数量减少、接触热阻增大。上述两种效应相互竞争,共同调控体系总换热系数的变化。Bisognin 等[67]通过模拟证实,相比于颗粒密度,颗粒尺寸对流化床换热特性起主导作用。Ozkaynak 等[68]的进一步研究结果显示,颗粒密度并非影响气固流化床换热特性的关键因素。Xu 等[69]以单一球形颗粒为研究对象进行实验,发现颗粒粒径显著调控气泡动力学,即颗粒粒径越大,气泡尺寸越大,气泡合并现象越明显,气泡上升速度越快及分布越不均匀。除颗粒粒径外,床层的流动特性对颗粒形状亦表现出高敏感性。

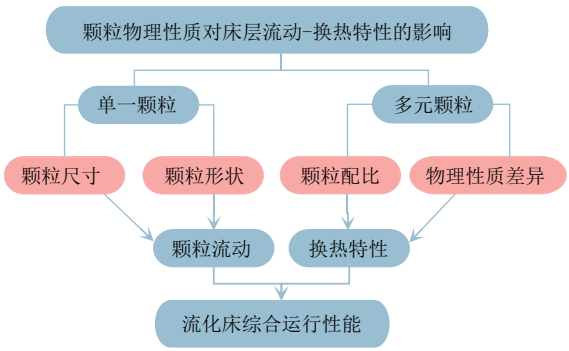


图 5 颗粒物理性质对床层流动-换热特性影响的内容框架

Fig. 5 Framework illustrating the effects of particle properties on bed flow and heat-transfer characteristics

现有研究中采用多种颗粒几何模型,其中,圆柱体、椭球体及凹凸多面体均为非球形颗粒(图 6)。与球形颗粒相比,非球形颗粒在流化过程中更易发生架桥效应,且其几何形态难以被精准表征与可控制备。

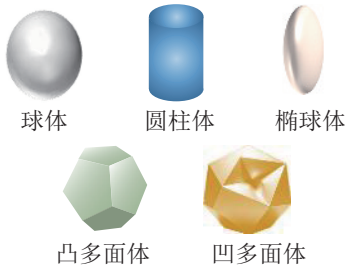


图 6 颗粒形貌汇总

Fig. 6 Summary of particle morphology

首先，颗粒形状是影响流化质量的关键因素。Shrestha 等[51]采用 CFD-DEM 对比椭球体（长宽比为 0.5～2.0）与球体颗粒的流化行为差异。结果显示，椭球体颗粒体系中气泡存在明显侧向漂移，气泡轨迹沿床层中心线两侧广泛分布，而球体颗粒体系中气泡主要沿中心线运动；椭球体颗粒体系中气泡等效直径更大、形状更不规则，气泡频率与上升速度均低于球体颗粒体系，且气泡频率随着颗粒长宽比偏离 1.0 而降低；气泡分裂与聚合机制高度依赖颗粒形状，椭球体颗粒体系气泡破裂后产生的小气泡数量较少。Wen 等[70]的研究结果显示，当颗粒球形度从 1.00 降至 0.63 时，最小流化速度显著降低；非球形颗粒床层膨胀高度明显高于球形颗粒；圆柱状长径比大于 3.0 的颗粒易发生床层堵塞现象。Varghese 等[71]对比 4 种不同球形度颗粒（球形、圆柱状、扁圆形、长椭圆形）的流化特性，发现非球形颗粒的最小流化速度显著低于球形颗粒；床层膨胀比随着颗粒球形度降低而升高，其中，圆柱状颗粒床层膨胀比最高。Hamidipour 等[5]以非球形 Geldart B 类沙粒进行实验，发现在鼓泡阶段，气泡上升速度随着表观气速升高而增大，进而推动颗粒沿壁面快速运动，缩短了颗粒停留时间；当进入湍动流化时，气泡趋于稳定，气泡上升速度不再增加，颗粒倾向在壁面区域停留，使颗粒间接触时间增加。Xu 等[72]对多面体颗粒进行大规模模拟研究，通过构建消息传递接口与统一计算设备架构相耦合的多图形处理器分布式 DEM 框架，实现了高精度接触力学建模；该模型可精准描述颗粒间接触行为。Xu 等[73]首次提出基于深度学习与模拟-实验融合的非球形颗粒追踪策略，即采用 DEM 生成合成数据，进行掩码区域卷积神经网络的训练；该策略仅通过对少量真实图像微调，即可快速、高精度地实现对长方体、椭球体等非球形颗粒图像的识别、分割、追踪与速度场重建。Huang 等[74]采用 CFD-DEM 进行实验，发现非球形颗粒形状显著调控气力输送过程中的摩擦起电行为，且静电效应与颗粒形态的耦合作用决定了流态稳定性与气力输送性能。

其次，颗粒形状可显著调控床层的有效导热率。Gan 等[52]对椭球形颗粒的传热特性进行研究，发现因颗粒间接触效率优化，椭球形颗粒的导热通量更高，对流传热通量更低；长椭球形颗粒在流化状态下的对流传热系数显著优于球形、扁椭球形颗粒。Miao 等[75]通过颗粒解析直接数值模拟方法，揭示多孔椭球形颗粒形状、入射角度、孔隙率与雷诺数对动量传递和换热特性的耦合作用机制。结果显示，雷诺数主导整体流场与换热变化，孔隙率对流动和换热的调控作用在高雷诺数工况下尤为显著，颗粒形状与入射角度存在临界耦合效应。

单一颗粒粒径虽然对流化床流动与换热特性具有显著调控作用，但实际工业流化床多为多元颗粒混合体系，其流动与换热特性的耦合作用机制不能直接使用单一颗粒体系得出的结论。基于此，文中聚焦多元颗粒混合体系，深入剖析多组分颗粒的气固耦合换热机理与流动调控机制。

2.2　多元颗粒体系

Geldart A 类细颗粒易发生团聚，在低表观气速下呈现散式流态化，但在高表观气速下易发生气泡聚并和破裂现象，导致床层呈现聚式流态化。对于 Geldart B 类颗粒体系，气泡起始速度大，鼓泡流态化特征显著；气泡生成、聚并与破裂导致床层流动不均匀。但若向上述单一颗粒体系中加入少量细粉，会显著改变颗粒间的相互作用力，从而既能在低表观气速下促进颗粒团聚，也能在高表观气速下改变气泡分布与乳化相气体滞留量，进而调控床层整体流化行为。多元颗粒体系相关研究，对气固流化床的流化与换热分析至关重要，现有研究也多通过小颗粒填充大颗粒间隙、大颗粒抑制小颗粒团聚手段，达到改善流化效果的目的[76-77]。图 7 为二元球形颗粒流化床体系，其床层由两种粒径（400、100 μm）、不同密度的颗粒混合组成。

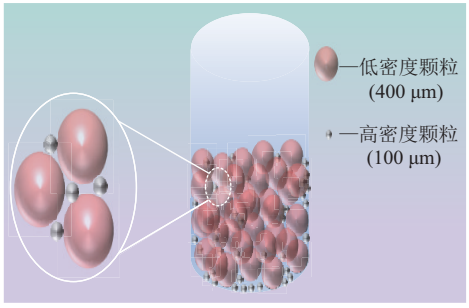


图 7　二元颗粒流化床体系

Fig. 7　Binary gas-solid fluidization system

当流化床内均为球形颗粒时，细粉的引入会增大流化状态与堆积状态下固相体积分数的差值，为颗粒运动提供更大的自由空间，进而提升颗粒分散度；而颗粒分散度提升是改善其换热性能的核心驱动因素[78]。冯玉立等[79]的研究结果显示，第二种颗粒的引入会增加颗粒体系内部不均匀性，加强颗粒间的碰撞与摩擦作用，可驱动二元颗粒体系呈现分层或混合状态；二元颗粒体系的能量耗散水平显著高于单一颗粒体系；颗粒的粒径配比、质量分数及

激振参数会显著调控体系的能耗水平。Niu等[25]对多元颗粒床层进行研究,发现在低表观气速下细粉的添加会促进颗粒团聚,而在高表观气速下细粉的添加显著提高了气泡的体积分数;在流型从鼓泡向湍流转变过程中,气泡频率跃升;相较于纯流化催化裂化(fluid catalytic cracking, FCC)体系,多元颗粒体系中气泡弦长分布更窄,团聚颗粒的径向净速度呈现"中心高、近壁趋近于零甚至反向"的分布规律,且颗粒团聚频率整体低于FCC体系。Chai等[80]研究含Geldart B、A颗粒的沸腾流化床,发现密相区固相质量随着细颗粒质量增加而增大;在中心区域固相质量较大,而少量细颗粒对气相与密相区固相之间的相互作用影响有限。Lu等[81]研究大差异Geldart A、D二元混合颗粒体系,发现颗粒速度与气泡尺寸分布均优于单一颗粒体系。Xu等[69]通过实验发现,Geldart A颗粒(A-煤粉)可显著抑制气泡合并、减小气泡尺寸及改善床层颗粒均匀性。孔行健等[82]的实验结果显示,密相区颗粒平均粒径越小,床层表观气速越大、温度越高、冷热颗粒间的换热系数越大。Yu等[78]通过相关实验、CFD-DEM模拟与理论分析得出,细粉添加可显著提升床层-壁面换热系数与床层温度均匀性,且换热系数随着细粉体积分数呈"火山型"变化,即大量细粉的引入反而导致体系内流动-换热性能劣化。Talebi等[83]的研究结果显示,含大量细粉、大粒径颗粒体系的流化难度大且换热系数低。这是因为细粉形成的团聚体虽然能在一定程度上提升流化稳定性,但会削弱换热效果。Hu等[47]采用PBM模拟研究循环流化床中混合Geldart A、B颗粒体系,发现该体系呈现显著介尺度非均匀流动特性,其中,颗粒以稀相悬浮与密相颗粒团共存形式分布;颗粒团生长与破碎主导床层流动结构;颗粒团尺寸分布是决定气固曳力、含固率及核-环流动的关键因素。Du等[33]的研究结果显示,当混合体系内含有质量分数为15%细颗粒时,气固相间作用力显著变化。Du等[84]研究含有不同质量Geldart A、B颗粒混合体系的流化特性,发现混合体系流化行为与单组分颗粒体系存在显著差异,且含质量分数为10% Geldart A颗粒体系的二元体系流化质量更优。

颗粒形状直接影响其在床内的运动状态与混合均匀性,进而改变体系换热特性。但对于包含球形、非球形颗粒混合体系的换热研究,在实验与数值模拟方面均较少,缺乏系统化的理论支撑。近年来,已有大量研究聚焦球形-非球形颗粒混合体系的流动行为,进一步证实了颗粒形状对流化特性的重要调控作用[52]。

首先,只有当非球形颗粒的混合质量分数小于50%时,才能达到改善床层流化质量的目的[52]。Fu等[85]通过实验探究磁铁矿分别与沙子、煤矸石、煤颗粒组成的二元混合体系,发现当磁铁矿质量分数大于50%时,添加粒径更大或相当的其他颗粒,对最小流化速度影响很小;而当磁铁矿质量分数小于50%时,添加粒径更大或相当的其他颗粒,会导致最小流化速度发生显著变化。Talebi等[83]通过实验证实,将Geldart C类超细煤粉添加至非球形Geldart A类磁铁矿体系,煤粉颗粒通过与磁铁矿表面的吸附作用显著加强了颗粒间相互作用,从而改善颗粒流动特性,提升了床层流化均匀性。Zhou等[86]提出了以Geldart A类磁铁矿颗粒与Geldart C类超细煤粉形成的复合体系为新型重介质,并揭示细粉添加对密相膨胀行为与流型转变的调控机制。Bai等[30]通过引入第二种组分调节流化床密度来实现煤与杂质分离;探究了Geldart B、D类二元颗粒体系的流动特性。实验结果显示,气泡尺寸与上升速度随着床高、多余气体的速度增大而增大,且当第二种组分的质量分数为54%时,气泡最小、流态最均匀。Wan等[20]采用电容探针实时测定气固流化床中等粒径、不同密度二元颗粒的瞬时混合行为,发现颗粒混合程度随着混合时间呈对数增长并趋于稳态;提高表观气速、减小颗粒密度比,可显著改善混合程度,缩短混合时间;床层中心区域混合程度优于壁面;稳态下密度大的颗粒浓度沿轴向递减;高表观气速可抑制颗粒分层现象。

生物质因来源广泛、低碳环保,是极具潜力的清洁固体燃料。但因生物质流化过程易出现沟流现象及流化性能变差问题,常将其与惰性颗粒掺混形成二元混合体系,其中,圆柱状颗粒的长径比对流化质量影响显著。Zhu等[6]的实验结果显示,当生物质掺混质量分数大于25%时,床层因颗粒松散堆积、沟流发展而出现流化失效,且二元混合体系流化速度随着生物质掺混质量增加而增大。Korkerd等[87]采用圆柱状木屑、甘蔗渣与球形硅砂进行实验,通过CFD-DEM模拟发现,颗粒尺寸差异是决定混合效率的核心因素;硅砂粒径减小会增大颗粒间碰撞概率,促进流化强度提升,进而增强颗粒对流换热;圆柱状生物质颗粒的截面取向是影响其曳力系数的关键因素。Wen等[70]开发了机器学习辅助的图像分析方法,并发现圆柱状生物质颗粒长径比增加会显著降低混合指数,导致流化均匀性降低。

相较于单一颗粒体系，多元颗粒体系在流化过程中展现出优异的流动与混合特性。不同粒径、密度和形貌颗粒在流动中相互作用、相互约束，能够有效抑制大颗粒沉积与小颗粒扬析现象，进而调控气泡生成、长大与破碎过程，避免颗粒在床层局部区域发生偏析与分层现象，从而提升流化稳定性与传热传质效率。

3　内构件对气固流化床流动-换热特性的调控

尽管多元颗粒混合能够提升流化床流动均匀性与传热性能，但当床层中出现物理性质差异较大的颗粒时，仅依靠优化操作参数与颗粒配比，不能完全抑制颗粒偏析与局部区域出现死区现象，难以实现整体均匀流化与稳定传热。在此背景下，引入内构件成为强化颗粒混合、抑制颗粒分层偏析及提升流化均匀性的关键途径。

内构件可以调控流型，促进气泡均匀分布，加强颗粒循环及径向混合程度，显著抑制局部区域出现死区、沟流与换热不均等现象[88]。近年来，通过优化内构件设计实现流化床高效换热，已成为提升床层温度均匀性与系统热效率的重要技术途径。文中结合国内外研究成果，根据内构件的安装布置方式，梳理典型内构件的应用与研究进展（图 8）；根据不同排布类型内构件的结构特点，探究不同排布方式内构件对流化床流化质量和换热效率的影响规律。

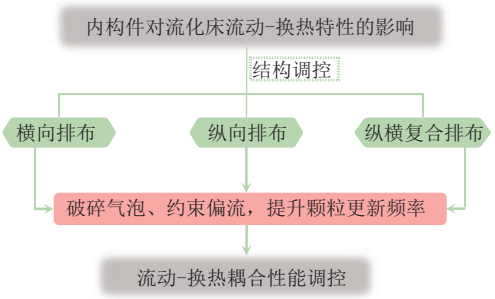


图 8　内构件对流化床流动-换热特性的影响

Fig. 8　Effects of internals on flow and heat-transfer characteristics in fluidized beds

3.1　横向内构件

内构件的核心作用之一是通过物理干预方式优化流化床内流体力学行为，为强化换热奠定基础，但不同结构内构件的调控机制各有侧重。横向内构件沿流化床径向水平布设，是调控床内气泡生长、促进气泡破碎最常用的结构形式。大量研究围绕各种挡板、筛板和管束类横向构件展开。

挡板主要包括百叶窗式挡板、单（多）旋导流挡板、波纹挡板及“Crosser”格栅等结构形式[89]。采用横向排布方式布置内构件，能够重构轴向气固相流场，优化密相、稀相分布，改善流化均匀性，是提升流化床流动稳定性与流化质量的常用调控方式。时瑶等[90]通过在流化床内安装旋转筛盘式挡板，切割破碎大气泡、削弱床层压力脉动及增强床层稳定性，从而协同优化流化床流动特性与气固换热性能。图 9 为两类挡板型内构件的结构示意图。

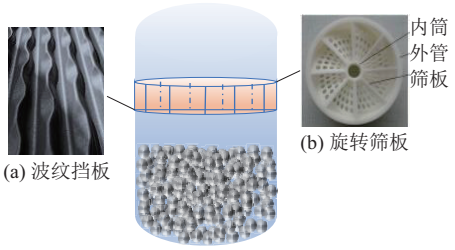


图 9　流化床内横向内构件

Fig. 9　Horizontal internal in gas-solid fluidized beds

赵碧丹等[91]通过计算流体动力学-离散单元法-浸入边界法（computational fluid dynamics-discrete element method-immersed boundary method，CFD-DEM-IBM），揭示倾斜挡板内构件可有效调控流场分布，且挡板倾斜角度对流化床返混效果影响显著。白士玉等[92]采用多相颗粒单元（multiphase particle-in-cell，MP-PIC）法，模拟工业级甲醇制烯烃湍动流化床，发现双层网状格栅能够抑制大气泡生长，均衡颗粒分布，抑制气固相反向返混行为，提升气固相接触效率，优化催化剂停留时间，从而使系统流化更稳定、反应更充分。

水平管束属于兼具流化调控与原位换热功能的横向内构件，常被用于优化流化床换热器性能。除常规圆管外，椭圆形管、U形管等异形换热管被广泛开发、应用。杨世亮等[93]通过大涡模拟-离散单元耦合方法（large eddy simulation-discrete element method，LES-DEM），研究不同横向埋管排布方式对流化床密相颗粒流动及埋管磨损的影响。结果显示，横向埋管促进局部区域颗粒循环流动，错列排布方式促使床内颗粒分布更均匀，管束排布方式对埋管磨损程度有显著影响。Sakr 等[94]针对水平椭圆形管换热器进行实验，进一步拓展了内构件形式。研究结果显示，水平椭圆形管束能够提升流化床换热性能，且错列排布方式下流化床换热性能优于顺排方式；流化床换热效率随着流化速度增大、颗粒粒径减小而提升；推导的经验公式可准确预测管束换热特性，证实异形管内构件可提升浸没式换热器的换热效率。Blaszczuk 等[95]研究大型鼓泡流

化床,发现水平管束换热性能随着颗粒粒径减小、颗粒悬浮密度与流化速度增大而提升;细颗粒体系下床层换热性能最优,有效提高了整体换热性能。Bao等[96]构建加压流化床水平管束换热模型,发现水平管束在强化换热的同时,对局部区域流场产生一定约束。因此,需优化管间距离与布管方式,以避免气泡在管束下方聚集并形成局部低热流区域。Córcoles等[97]对内置水平管束流化床进行三维数值模拟研究。结果显示,对于Geldart B类颗粒体系,内置水平管束能够显著提升局部区域换热能力,且管束区域的换热系数明显高于无管束自由床。田文栋等[98]的研究结果显示,在内旋流流化床内水平横向埋管,可增强颗粒的径向与轴向循环,提升床层温度均匀性,有效抑制床层局部区域过热现象。

3.2 纵向内构件

纵向内构件平行于床体轴向竖直布置,通过竖向分割床体空间,实现对流场与流化分区的调控。相较于横向内构件,纵向内构件侧重约束气体径向窜流,限制气泡横向聚并。近年来,纵向内构件在改善大床径流化床偏流问题、提升颗粒分布均匀性方面得到广泛研究与应用[99-105]。

内构件数量和轴向隔栅布置方式直接影响流场均匀性与气泡破碎效果。合理构型内构件能够弱化流动束缚、提高气固两相横向混合效率。Soria-Verdugo等[99]的研究结果显示,采用纵向挡板将床层划分为多个子区域,能有效提升床层局部区域的混合效率,避免出现气固短路现象;同时,采用纵向挡板,可增强床内湍流扰动、增大气固接触面积及消除局部区域温度死角,进而有效优化床层温度分布,提升气固相间换热与床体-壁面换热性能。Wardag等[100]通过在气固流化床内安装垂直波纹壁内构件显著提升其换热效率,这是因为波纹壁结构增强了边界层扰动,进而提高了气固相接触效率。Xu等[101]设计新型纵向开孔曲面板,通过曲面与帽孔结构剪切破碎气泡、抑制气泡附壁聚集,从而显著改善流化床流动均匀性,提升了气相对流换热效率。

纵向管式内构件是流化床内最常用的床体-壁面换热强化构件(图10),其核心作用是增加换热面积、加强近壁面区域流体扰动。李伟栋等[42]对内埋单根换热管流化床进行数值模拟研究,发现单根换热管可显著强化床内对流换热,且管壁左右两侧局部换热系数的变化幅度远大于上下两侧。Schillinger等[102]采用X-射线断层扫描方法研究流化床内垂直换热管束。结果显示,内置的垂直换热管束能够调控气泡行为,进而显著提升整体换热效率与

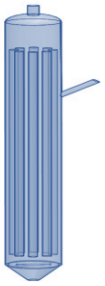


图10 纵向管式内构件

Fig. 10 Vertical tubular Internals

排热能力。同时,方形-圆形复合管束排布结构实验,验证了内构件排布方式是床层换热性能的核心影响因素。Taofeeq等[103]的研究结果显示,立式管状内构件可调控气固流化床的流型、流型转变速度及各流型下表观气速区间,有效破碎气泡,改善流化均匀性。这说明纵向内构件调控效果受管径、排布方式和固相颗粒物理性质共同制约。Lü等[104]开展纵向内构件实验,结果显示,纵向内构件能有效优化床内气固相流动结构,其数量对分离效率有显著影响;纵向内构件能将大粒径颗粒循环流拆解为多股小循环流场,增大气固相混合程度、接触效率及床层整体流动稳定性。Helmi等[105]采用粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)与数字图像分析(digital image analysis, DIA)相结合方法进行研究。结果显示,垂直内构件对流化床流动结构影响显著,通过抑制颗粒横向运动,促进床内形成核-环速度分布,进而显著提升床体-壁面含固率。

但在气固流化床中,单一方向或单一内构件的调控效果有限,仍存在流化死区、颗粒返混剧烈及温度分布不均匀等问题。现有研究逐步采用纵-横复合排布内构件来提高流化床流动与传热特性。大量研究结果显示,复合排布内构件能够协同优化流场结构与流化性能,进而强化气固相间传热传质,均衡床层温度。Mathew等[106]设计纵向排布与径向延伸的同轴杆式复合内构件,通过改变该构件的排布间距、径向延伸宽度,调控流化床流化和换热特性。研究结果显示,纵横交叉排布构件,可有效破碎床内气泡,抑制气泡聚并长大,降低床层膨胀比与床高波动比,显著提升流化指数、床体-壁面换热性能,从而使流化状态更均匀、流化运行更稳定。

因此,优化内部挡板结构并合理搭配纵横式内构件布置,可从多维角度提升流化床流动-换热性能:一方面,内构件可破碎大气泡,均衡气固相分布,避免床层局部区域过热,稳定床层整体温度;另一方面,内构件能够扰动近壁区域气固两相流动,

增大贴壁颗粒混合程度，提高颗粒与壁面的接触效率，破坏壁面热边界层，提升床体-壁面换热系数，最终同步实现气固流型可控、换热效率提升与装置运行稳定性增加。

4　结语

系统梳理近年来气固流化床流动-换热方面的研究进展，聚焦表征方法、颗粒物理性质及内构件的影响：表征方法趋向于“实验-模拟-机器学习”协同发展；重点对比单一颗粒和混合颗粒体系的流动-换热性能，发现混合颗粒体系可灵活调控流化床层密度、流化均匀性及气泡行为，有效抑制气泡过快增大、流动偏流与沟流现象，显著提升流化床的分离、反应效率与操作弹性；混合颗粒-内构件耦合，具有显著强化流动与换热的潜力。该领域未来的发展方向与机遇如下。

1）高效数值模拟方法与机器学习（machine learning，ML）融合。目前，已经构建了多种描述气固鼓泡流化床流动、传热传质过程的数学模型。但在实际工况下，这些模型难以捕捉流化床内复杂流化、颗粒-颗粒及颗粒-气体之间的相互作用等信息，导致预测结果与实际存在一定偏差。当处理大规模、长时序及多分散体系时，传统数值模拟方法的计算成本高、收敛难度大，难以满足工业全流程快速预测的需求。因此，需完善流动-换热基础数据库，将ML与传统数值模拟方法相结合；利用ML能够快速预测流动特征、床体-壁面换热系数与流型转变规律的优势，构建高精度、低计算成本及全流程覆盖的动态模拟体系。

2）颗粒形状和混合模式对传热的影响。颗粒的形貌与混合模式是影响流化床换热性能的关键因素。非球形颗粒与球形颗粒混合、不同Geldart类别颗粒混合，会显著改变气泡行为、颗粒与壁面的更新频率、床层空隙率，进而影响床体-壁面换热性能与流化运行稳定性。然而，目前对颗粒的形状、混合比例、粒径差与密度差的协同作用机制仍不明确，尤其缺乏非球形颗粒混合体系下换热量化模型研究。因此，深入揭示颗粒形状及混合方式对流化均匀性、颗粒停留时间及换热特性的影响规律，建立更具普适性的换热关联模式，是未来该领域的重要研究方向。

3）流化床及其内构件结构优化设计。传统流化床在处理大粒径、密度差异较大的多元颗粒体系时，易出现颗粒分层、偏析，局部区域死区及气泡过度增长等现象，导致其换热效率与寿命降低。通过设计结构合理的换热器及内构件，可有效破碎气泡，强化径向混合，抑制颗粒分层，减少流化床局部区域磨损，进而大大提升流化床换热性能。二元颗粒体系与内构件耦合，能够协同强化流场调控、抑制颗粒偏析、提高气固相接触效率并优化颗粒混合行为，可为气固流化床高效、稳定运行提供重要优化思路与改进空间。未来研究应围绕提高流化质量、强化传热与提升设备稳定性这3大目标，开展新型内构件结构及其参数、布置方式的系统优化研究。

参考文献：

[1] 武强，章凯，王帅．旋流流化床内的流动及传热特性[J]．中国粉体技术，2021，27(3)：16-24.

[2] 林龙沅，陈海焱，张明星，等．气流磨超细粉碎循环流化床锅炉脱硫灰的试验研究[J]．中国粉体技术，2010，16(6)：44-46.

[3] 杨益，蔡勇，向舒，等．固硫剂粉体多级分选模拟设备的开发与应用[J]．中国粉体技术，2014，20(4)：13-16.

[4] Li Jiantao, Yao Xiuying, Liu Lu, et al. Bed-to-wall heat transfer in a gas-solid fluidized bed with external solids circulation: Modified packet renewal model[J]. Powder Technology, 2021, 383: 19-29.

[5] Hamidipour M, Mostoufi N, Sotudeh-Gharebagh R, et al. Experimental investigation of particle contact time at the wall of gas fluidized beds[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(15): 4349-4357.

[6] Zhu Xiaoli, Song Guosheng, Shi Zhixin, et al. Fluidization of biomass and inert particle mixtures in a pseudo 2D pressured fluidized bed[J]. Powder Technology, 2025, 453: 120676.

[7] 张晓阳，应泽华，郭抒博，等．固体分散体制备技术及质量控制研究进展[J]．中国粉体技术，2024，30(2)：96-112.

[8] 李建涛，姚秀颖，刘璐，等．气固流化床外取热器内流动和换热特性分析[J]．化工学报，2020，71(7)：3031-3041.

[9] 金涌，祝京旭，汪展文，等．流态化工程原理[M]．北京：清华大学出版社，2001：1-20.

[10] Jin Weixing, Song Yuzhen, Li Lingyu, et al. An improved method to process the data of optical fiber signals for identifying the instantaneous flow structure in a gas-solid fluidized bed[J]. Powder Technology, 2025, 452: 120475.

[11] Zhu Xiaoli, Dong Pengfei, Zhu Zhiping, et al. Effects of pressure on flow regimes transition velocities and bubble properties in a pilot-scale pressurised circulat-

ing fluidised bed[J]. Chemical Engineering Journal, 2021,410:128438.

[12] 赵子琴,袁尚科,燕亚龙,等. 旋风分离器数值计算及性能实验分析[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2016,37(4):447-451.

[13] Zhu Litao, Ouyang Bo, Lei He, et al. Conventional and data-driven modeling of filtered drag, heat transfer, and reaction rate ingas-particle flows [J/OL]. AIChE Journal, 2021, 67(8): e17299. https://doi.org/10.1002/aic.17299.

[14] Hu Shanwei, Liu Xinhua. A CFD-PBM-EMMS integrated model applicable for heterogeneous gas-solid flow[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 383: 123122.

[15] Prajapati C, Nadda M, Singh K, et al. Coupled deep neural network model with CFD for predicting the heat transfer coefficient in fluidized beds[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2025,64(17):8893-8907.

[16] Fu Zhijie, Zhu J, Barghi S, et al. Mixing and segregation behavior in an air dense medium fluidized bed with binary mixtures for dry coal beneficiation[J]. Powder Technology, 2020,371:161-169.

[17] 李凌宇,金伟星,吴兆龙,等. 环流流化床内大差异二元颗粒的流动机制研究[J]. 化工学报, 2026,77(1):328-345.

[18] Sheng Tao, Fan Xiaoqiang, Yang Yao, et al. Bubble characterization in the gas-solid fluidized bed using an intrusive acoustic emission sensor array[J]. Chemical Engineering Journal, 2022,446:137168.

[19] 李建涛,李智,卢春喜. 催化裂化密闭快分系统封闭罩内流场优化[J]. 中国粉体技术, 2017,23(3):73-80.

[20] Wan Zhen, Lu Youjun, Wang Hao. Instantaneous mixing characteristics of binary mixtures differing in density in a gas–solid fluidised bed[J]. Particuology, 2020,53:63-71.

[21] Wan Zhen, Wang Hao, Lu Youjun. Quantitative measurement of hydrodynamics in a binary fluidized bed by capacitance probes [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2024,63(14):6297-6312.

[22] Huang Jikai, Lu Youjun, Wang Hao. A new quantitative measurement method for mixing and segregation of binary-mixture fluidized bed by capacitance probe [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 326: 99-108.

[23] Huang Jikai, Lu Youjun, Wang Hao. Minimum bubbling fluidization velocity in a supercritical water fluidized bed acquired by the dual-capacitance probe method [J]. Chemical Engineering Science, 2019, 199: 359-370.

[24] 李红民,周涛,王鹏,等. 应用于流化床的电容探针测量系统[J]. 天津大学学报, 2005,38(10):923-926.

[25] Niu Li, Huang Yahang, Chu Zhimin, et al. Identification of mesoscale flow in a bubbling and turbulent gas-solid fluidized bed[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019,58(19):8456-8471.

[26] Lin Chunyun, Li Jiantao, Zhang Lei, et al. Bed-to-wall contact dynamics in a gas-solid fluidized bed with downward solid movement[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2024,63(32):14326-14332.

[27] Faraj F H, Ali J M, Najim S T, et al. Nano-iron oxide coating for enhanced heat transfer in gas-solid fluidized bed systems [J]. ChemEngineering, 2024,8(1):9.

[28] Yuan Zemin, Huang Zhong, Ma Suxia, et al. Experimental investigation on the effect of superficial gas velocity on bubble dynamics properties of B particles in gas-solid fluidized bed reactor using digital image analysis technique[J]. Fuel,2023,348:128617.

[29] Laverman J A, Roghair I, Annaland M V S, et al. Investigation into the hydrodynamics of gas-solid fluidized beds using particle image velocimetry coupled with digital image analysis[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2008,86(3):523-535.

[30] Bai Tianzi, Sun Zeneng, Guo Ziang, et al. Bubble dynamics in a binary gas-solid fluidization system of geldart B and geldart D particles[J]. Chemical Engineering Science, 2022,258:117771.

[31] 刘继坤,包若凝,蓝兴英,等. 微纳米气泡及其气-液界面特性[J]. 化工学报, 2026,77(1):1-15.

[32] Banaei M, Dellaert R, Deen N G, et al. Borescopic particle image velocimetry in bubbling gas-solid fluidized beds[J]. Particuology, 2019,43:66-75.

[33] Du Shanlin, Li Qian, Cai Weihua. Prediction and evaluation of binary particle fluidization in gas-solid fluidized bed[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 488:151024.

[34] Yang Zhenghao, Li Jianping, Jin Ziheng, et al. The coupling mechanism of bubble dynamics, wake vortex evolution and binary particle segregation in a fluidized bed[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 523: 168355.

[35] Rasel R K, Sines J N, Marashdeh Q, et al. Cross-plane acquisitions in electrical capacitance volume tomography [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(19):8767-8774.

[36] Liu Jincheng, Xing Yaowen, Gui Xiahui. Hydrody-

namics of fluidized bed flotation column: Experimental and statistical analysis[J]. Particuology, 2025, 100: 14-26.

[37] Liu Jincheng, Meng Wenlong, Zhang Yiqing, et al. Insight into bubble hydrodynamic characteristics in the freeboard region of fluidized bed flotation columns[J]. Chemical Engineering Science, 2025,316:121926.

[38] Liu Jincheng, Zhang Yiqing, Yin Qinglin, et al. Experimental study of hydrodynamic characteristics in three-phase coarse particle fluidized flotation column [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 500: 157443.

[39] Wang Lian, Chu Xihua. Validation of an improved two-fluid model with particle rotation for gas-solid fluidized bed[J]. Particuology, 2023,81:149-161.

[40] Zhou Lianyong, Ma Huaqing, Liu Zihan, et al. Development and verification of coarse-grain CFD-DEM for nonspherical particles in a gas-solid fluidized bed[J/OL]. AIChE Journal, 2022,68(11):e17876. https://doi.org/10.1002/aic.17876.

[41] Xiong Qingang, Xu Fei, Ramirez E, et al. Modeling the impact of bubbling bed hydrodynamics on tar yield and its fluctuations during biomass fast pyrolysis[J]. Fuel, 2016,164:11-17.

[42] 李伟栋,李菊香.浅层单管气-固流化床内对流换热的数值模拟[J].工业炉,2013,5(35):49-58.

[43] Yu Yaxiong, Lu Feng, He Xuan, et al. Segregation of binary particles in gas-solid fluidized bed[J]. Frontiers of Chemical Science and Engineering, 2024, 18(6):68.

[44] 王贵方,孔双祝,李建,等.二元颗粒在气固流化床内流动、混合特性的数值模拟(Ⅰ):轴向/径向流场分布特性[J].过程工程学报,2025,25(4):354-363.

[45] Bisognin P C A, Fusco J M, Soares C N. Heat transfer in fluidized beds with immersed surface: Effect of geometric parameters of surface[J]. Powder Technology, 2016,297:401-408.

[46] 孔大力,王帅,罗坤,等.流化床生物质气化过程的CFD-DEM模拟研究[J].力学与实践,2022,4(44):834-843.

[47] Hu Shanwei, Liu Xinhua. A CFD-PBM-EMMS integrated model applicable for heterogeneous gas-solid flow[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 383: 123122.

[48] Tan H S, Salman A D, Hounslow M J. Kinetics of fluidized bed melt granulation—II: Modelling the net rate of growth[J]. Chemical Engineering Science, 2006,61(12):3930-3941.

[49] Wang Xiaoshan, Rhodes M J. Determination of particle residence time at the walls of gas fuidized beds by discrete element method simulation [J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58(2003):387-395.

[50] Jin Nani, Hu Shanwei, Liu Xinhua, et al. A neural network method for characterizing particle clusters in gas - solid fluidized beds[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2024,63(38):16598-16608.

[51] Shrestha S, Kuang Shibo, Yu Aibing, et al. Particle shape effect on bubble dynamics in central air jet pseudo-2d fluidized beds: A CFD-DEM study[J]. Chemical Engineering Science, 2019,201:448-466.

[52] Gan Jieqing, Zhou Zongyan, Yu Aibing. Particle scale study of heat transfer in packed and fluidized beds of ellipsoidal particles[J]. Chemical Engineering Science, 2016,144:201-215.

[53] Lu Weiqin, Tang Xueyu, Niu Weixin, et al. Experimental and numerical investigation of the fluidization dynamics in a geldart D+B binary particle system[J]. Powder Technology, 2026,470:122036.

[54] Shu Hang, Liu Xuejiao, Chen Xi, et al. Rapid prediction of the flow fields of fluidized beds with the varying flow regimes by coupling CFD and machine learning [J]. Chemical Engineering Science, 2025, 312: 121635.

[55] 申奥,马梅,高乐,等.人工智能在材料发现中的应用[J].宁夏大学学报(自然科学版中英文),2026,47(2):116-157.

[56] 李顺,彭浩然,符秀丽.数据驱动的高熵碲化物组分高通量理论设计与性能预测[J].宁夏大学学报(自然科学版中英文),2026,47(3):263-272.

[57] GUO Qiang, YE Mao, YANG Wuqiang, et al. A machine learning approach for electrical capacitance tomography measurement of gas-solid fluidized beds [J/OL]. AIChE Journal, 2019, 65(6): e16583. https://doi.org/10.1002/aic.16583.

[58] Lai Yutong, Peng Ci, Hu Weipeng, et al. Adaptive optimization random forest for pressure prediction in industrial gas-solid fluidized beds[J]. Powder Technology, 2025,453:120607.

[59] Fu Yanhong, Wang Song, Xu Xuan, et al. Particle flow characteristics in a gas-solid separation fluidized bed based on machine learning[J]. Fuel, 2022,314: 123039.

[60] Brunton S L, Noack B R, Koumoutsakos P. Machine learning for fluid mechanics[J]. Annual Review of

Fluid Mechanics, 2020,52(1):477-508.

[61] Sharma P, Chung W T, Akoush B, et al. A review of physics-informed machine learning in fluid mechanics[J]. Energies, 2023,16(5):2343.

[62] Zhong Hanbin, Yu Xiaodong, Zhang Juntao, et al. Predicting spatiotemporal distributions in a bubbling fluidized bed for biomass fast pyrolysis using convolutional neural networks[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2024,63(8):3744-3754.

[63] Iannello S, Friso A, Galvanin F, et al. A hybrid physics-machine learning approach for modeling plastic-bed interactions during fluidized bed pyrolysis [J]. Energy & Fuels, 2025,39:4549-4564.

[64] Zhang Wenbiao, Cheng Xufeng, Hu Yonghui, et al. Online prediction of biomass moisture content in a fluidized bed dryer using electrostatic sensor arrays and the random forest method [J]. Fuel, 2019, 239: 437-445.

[65] Yusuf R, Halvorsen B, Melaaen M C. An experimental and computational study of wall to bed heat transfer in a bubbling gas-solid fluidized bed[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2012,42:9-23.

[66] Hou Qunfu, Zhou Zongyan, Yu Aibing. Computational study of the effects of material properties on heat transfer in gas fluidization[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012,51(35):11572-11586.

[67] Bisognin P C A, Bastos J C S C M, Meier H F A, et al. Influence of different parameters on the tube-to-bed heat transfer coefficient in a gas-solid fluidized bed heat exchanger[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification,2020,147:107693.

[68] Ozkaynak T F, Chen J C. Emulsion phase residence time and its use in heat transfer models in fluidized beds [J]. AIChE Journal, 1980,26(4):544-550.

[69] Xu Yangfan, Wang Dan, Dong Liang, et al. A comparative investigation on bubble dynamics in gas-solid separation fluidized bed using geldart A, B, D and geldart A-particle [J]. Advanced Powder Technology, 2024,35(10): 104637.

[70] Wen Yihao, Niu Haosen, Zhu Boyu, et al. Measuring fluidization behaviors of monodisperse non-spherical particles and binary mixtures of spheres with cylinders[J]. Advanced Powder Technology, 2025, 36(1): 104755.

[71] Varghese M M, Devan C P, Masram S M, et al. Experimental investigation of the behavior of non-spherical particles in a small-scale gas-solid fluidized bed [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2024,95: 102493.

[72] Xu Jiayu, Zhang Shuai, Zhang Yong, et al. Large-scale multiple-GPU DEM simulation of polyhedral particle systems[J]. Powder Technology, 2026, 472: 122132.

[73] Xu Jiayu, Zhang Shuai, Ge Wei. An efficient non-spherical particle tracking strategy based on deep-learning and simulation-experiment integration [J]. Powder Technology, 2026,468:121681.

[74] Huang Fayuan, Kuang Shibo, Zou Ruiping, et al. Characterization of non-spherical particle tribocharging during horizontal pneumatic conveying [J]. Applied Mathematical Modelling, 2025,140: 115894.

[75] Miao Haishan, Zhang Hao, An Xizhong, et al. Combined effects of particle shape, incident angle and porosity on momentum and heat transfer between spheroids and fluids[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022,197:123341.

[76] Pardo P, Anxionnaz-Minvielle Z, Rougé S, et al. $Ca(OH)_2/CaO$ reversible reaction in a fluidized bed reactor for thermochemical heat storage [J]. Solar Energy, 2014,107:605-616.

[77] Roßkopf C, Haas M, Faik A, et al. Improving powder bed properties for thermochemical storage by adding nanoparticles[J]. Energy Conversion and Management, 2014,86:93-98.

[78] Yu Yaxiong, Lu Feng, Bai Haolong, et al. Effect of fines addition on heat transfer performance in gas-solid fluidized bed: An integrated experimental, simulation, and theoretical study[J]. Chemical Engineering Journal, 2023,476:146806.

[79] 冯玉立,赵先琼,龙慧,等. 垂直激振条件下二元颗粒的能量损耗[J]. 中国粉体技术, 2019,25(4):12-17.

[80] Chai Xuesen, Wang Anyu, Fu Zhijie, et al. Identification of the flow structure of dense phase in a gas-solid fluidized bed reactor in bubbling fluidization regime with geldart B+A particles [J]. Chemical Engineering Science, 2025,308:121424.

[81] Lu Jidong, Flamant G, Snabre P. Towards a generalized model for vertical walls to gas-solid fluidized beds heat transfer—I. Particle convection and gas convection [J]. Chemical Engineering Science, 1993, 48 (13):2479-2492.

[82] 孔行健,孙国刚,王茂辉. 大差异颗粒双组分流化床颗粒传热实验[J]. 石油学报(石油加工), 2009,25 (6):790-795.

[83] Talebi E, Morgenstern L, Würth M, et al. Effect of particle size distribution on heat transfer in bubbling fluidized beds applied in thermochemical energy storage [J]. Fuel, 2023,344: 128060.

[84] Du Bing, Fan L S, Wei Fei, et al. Gas and solids mixing in a turbulent fluidized bed [J]. AIChE Journal, 2002,48(9):1896-1909.

[85] Fu Zhijie, Zhu J, BARGHI S, et al. Minimum fluidization velocity of binary mixtures of medium particles in the air dense medium fluidized bed [J]. Chemical Engineering Science, 2019,207:194-201.

[86] Zhou Chenyang, Zhao Yuemin, Liu Chengguo, et al. Fluidization expansion of novel generation dense medium and flow regime transition in gas-solid separation fluidized bed [J]. Fundamental Research, 2023,5(2):756-766.

[87] Korkerd K, Zhou Zongyan, Zou Ruiping, et al. Numerical investigation of mixing and heat transfer of mixed biomass and silica sand particles in a bubbling fluidized bed combustor [J]. Powder Technology, 2024,433:119262.

[88] 许子豪,夏明许,白洋,等. 基于圆形翅片正交设计排布的双流道液冷板散热性能优化[J]. 宁夏大学学报(自然科学版中英文), 2026,47(3):240-250.

[89] 徐荣升,王德武,王若瑾,等. 添加纵向内构件的摇摆流化床气固流动规律[J]. 化工进展, 2025,44(7):3781-3793.

[90] 时瑶,王德武,赵斌,等. 旋流筛板式气固挡板流化床内压力脉动特性[J]. 过程工程学报, 2019,19(1):91-101.

[91] 赵碧丹,代伊杨,王军武,等. CFD-DEM-IBM方法探究流化床倾斜挡板内构件受力特性[J]. 化工学报, 2024,75(1):255-267.

[92] 白士玉,汪显盼,潘海涛,等. 双层格栅对工业MTO反应器流动特性影响的MP-PIC模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2025,49(4):153-160.

[93] 杨世亮,罗坤,房明明,等. 不同管排方式下三维鼓泡床内气固流型及埋管磨损的LES-DEM研究[J]. 工程热物理学报, 2014,35(7):1338-1342.

[94] Sakr R Y, Abd-Rabboh M A, Mandour M M, et al. Experimental investigation of heat transfer from elliptic tubes heat exchanger immersed in a fluidized bed [J]. Heat and Mass Transfer, 2022,58(12):2047-2065.

[95] Blaszczuk A, Pogorzelec M, Shimizu T. Heat transfer characteristics in a large-scale bubbling fluidized bed with immersed horizontal tube bundles [J]. Energy, 2018,162:10-19.

[96] Bao Zhongkai, Duan Lunbo, Wu Ke, et al. An investigation on the heat transfer model for immersed horizontal tube bundles in a pressurized fluidized bed [J]. Applied Thermal Engineering, 2020,170:115035.

[97] Córcoles J I, Díaz-Heras M, Coy P D N, et al. 3-D numerical simulation of the heat transfer of a fluidized bed with a horizontal tube bundle and geldart d particles [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024,225:125406.

[98] 田文栋,郝金华,魏小林,等. 内旋流流化床换热埋管的传热特性[J]. 燃烧科学与技术, 2000,6(4):296-299.

[99] Soria-Verdugo A, Cano-Pleite E, Panahi A, et al. Partitioning of a wide bubbling fluidized bed with vertical internals to improve local mixing and bed material circulation [J]. Powder Technology, 2022, 408: 117771.

[100] Wardag A N K, Larachi F A. Heat transfer efficiency in gas-solid fluidized beds with flat and corrugated walls [J]. Chemical Product and Process Modeling, 2024,19(5):795-807.

[101] Xu Rongsheng, Wang Ruojin, Wu Banghua, et al. Simulation of bubble behavior characteristics in a rolling fluidized bed with the addition of longitudinal internal members [J]. Processes, 2024,12(6):1130.

[102] Schillinger F, Maurer S, Wagner E C, et al. Influence of vertical heat exchanger tubes, their arrangement and the column diameter on the hydrodynamics in a gas-solid bubbling fluidized bed [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2017,97:46-59.

[103] Taofeeq H, Al-Dahhan M. Investigation of the effect of vertical immersed tube diameter on heat transfer in a gas-solid fluidized bed [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019,135:546-558.

[104] Lü Bo, Deng Xiaowei, Luo Zhenfu, et al. Impact of vertical internals on the hydrodynamics and separation performance of a gas-solid separation fluidized bed [J]. Powder Technology, 2020,360:577-587.

[105] Helmi A, Velarde I C, Gallucci F, et al. Hydrodynamics of dense gas-solid fluidized beds with immersed vertical membranes using an endoscopic-laser PIV/DIA technique [J]. Chemical Engineering Science, 2018,182:146-161.

[106] Mathew R K, Begum K M M S, Anantharaman N. Hydrodynamic studies on fluidized beds with internals: Experimental and ANN approach [J]. Powder Technology, 2014,264:423-429.

Review of Flow and Heat Transfer in Gas-Solid Fluidized Beds: Characterization and Regulation through Particle Properties and Internals

LI Jiantao[1,2], *ZHANG Wenjie*[1,2], *MA Qian*[1,2], *LI Shijiao*[1,2], *LIN Chunyun*[1,2], *TANG Yuan*[1,2], *LU Chunxi*[3*]

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;
2. State Key Laboratory of High-efficiency Utilization of Coal and Green Chemical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, College of Chemical Engineering and Environment, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: Gas-solid fluidized-bed reactors are widely applied in petrochemical, coal chemical, biochemical and other industries. Characterizing their multiphase flow behaviors and heat-transfer laws is of vital importance for the design, performance optimization, and industrial scale-up of the reactors. The principal methods for characterizing multiphase flow and heat transfer in fluidized beds include experimental measurements, numerical simulations, and machine learning. This review summarizes the current research progress in the application of these methods to flow regime identification, parameter prediction, and process optimization in fluidized beds. The effects of particle properties and internals on multiphase flow and heat transfer are also systematically discussed, with particular emphasis on the mechanisms by which particle morphology and internals influence fluidized-bed performance. The review indicates that the synergistic coupling of mixed-particle systems with internals is an important strategy for simultaneously improving flow uniformity and heat-transfer efficiency in fluidized beds. However, several challenges remain, including the coordinated regulation of particle segregation and mixing with internals configuration, the mismatch of parameters at the gas-solid-internal interfaces, and the difficulty of achieving closure in multiscale mathematical models. In the future, multiscale mechanistic coupling and data-driven model development may enable the accurate and efficient characterization of flow behavior and heat transfer characteristics in fluidized beds, thereby providing new strategies for their precise design and optimized operation.

Key words: gas-solid fluidized beds; multiphase flow; heat transfer; characterization methods; particle properties; internals

(责任编辑 高继红)