

研究论文

DOI: 10.11949/0438-1157.

内加热-外循环颗粒包覆流化床冷模实验与模拟研究

田宇, 兰蕊, 刘荣正, 杨旭, 刘兵, 邵友林, 刘马林

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要: 流化床-化学气相沉积 (FB-CVD) 颗粒包覆技术广泛应用于化工、环境和核能等领域。其中, 颗粒循环、孔口沉积、局部热边界和包覆区停留时间分布之间的耦合, 是制约反应器放大、运行和包覆一致性的主要因素。针对以上挑战, 本研究提出新型内加热-外循环 (Internal Heating-External Circulation, IH-EC) 流化床包覆系统。首先搭建新型IH-EC流化床二维冷模实验装置, 基于异色颗粒示踪方法和CFD-DEM模拟, 详细考察中路-环路气速、床底锥角、底部间隙和中心加热体高度的影响规律, 并提出FB-CVD过程新型综合评价指标。结果表明, IH-EC流化床可形成稳定的“中心上升-顶部扩散-环隙下降-底部回流”颗粒循环过程, 并指出 $U_c=7.5$ m/s、 $U_a=3.0$ m/s、 15° 床底锥角、20 mm 底部间隙和20 cm 加热体高度构成本文颗粒物性和反应器条件下的最优参数组合。研究结果拓展了流态化学学科研究范畴, 也为内加热-外循环FB-CVD包覆反应器设计优化提供参考。

关键词: 流化床; 化学气相沉积; 颗粒包覆; 内加热-外循环; 颗粒循环; CFD-DEM

中图分类号: TQ 028.8

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-19

Experimental and numerical cold-model study of internal heating and external circulation fluidized bed for particle coating

TIAN Yu, LAN Rui, LIU Rongzheng, YANG Xu, LIU Bing, SHAO Youlin, LIU Malin

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Fluidized bed-chemical vapor deposition (FB-CVD) is widely used for particle coating in the chemical, environmental, and nuclear industries. However, the complex coupling among particle circulation, nozzle accretion, local thermal boundary conditions, and the residence-time distribution within the coating zone remains a major challenge affecting reactor scale-up, operational stability, and coating uniformity. To address these issues, a novel internally heated fluidized bed with external particle circulation was proposed. Quasi-two-dimensional cold-model experiments, differently colored particle tracing, and computational fluid dynamics - discrete element method (CFD-DEM) simulations were combined to establish a new comprehensive performance evaluation criterion for the fluidized bed. The effects of the central and annulus gas velocities, bed-bottom cone angle, bottom clearance, and central heating element height were systematically investigated. The results demonstrate that the proposed configuration can maintain a stable particle circulation pattern characterized by central upward transport, top spreading, annulus downward motion, and bottom return flow. Based on the experimental and numerical results, the

收稿日期: 2026-07-20 修回日期: 2026-08-23

通信作者: 刘马林(1982-), 男, 博士, 教授, liumalin@tsinghua.edu.cn

第一作者: 田宇(1999-), 男, 博士研究生, tianyu22@mails.tsinghua.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(22478220, U2541253); 国家高层次人才计划(青年项目)(20224723061)

引用本文: 田宇, 兰蕊, 刘荣正, 杨旭, 刘兵, 邵友林, 刘马林. 内加热-外循环颗粒包覆流化床冷模实验与模拟研究[J]. 化工学报, XXXX, XX (XX): 1-19

Citation: TIAN Yu, LAN Rui, LIU Rongzheng, YANG Xu, LIU Bing, SHAO Youlin, LIU Malin. Experimental and numerical cold-model study of internal heating and external circulation fluidized bed for particle coating[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(X): 1-19

optimal parameters for the particle properties and reactor conditions investigated were identified as a central gas velocity of 7.5 m/s, an annulus gas velocity of 3.0 m/s, a bed-bottom cone angle of 15° , a bottom clearance of 20 mm, and a central heating element height of 20 cm. These findings expand the scope of fluidization research, and provide a fundamental design reference for the optimization of newly proposed internally heated FB-CVD coating reactors with external particle circulation.

Keywords: fluidized bed; chemical vapor deposition; particle coating; internal heating-external circulation; particle circulation; CFD-DEM

引 言

流化床-化学气相沉积(fluidized bed chemical vapor deposition, FB-CVD)颗粒包覆技术广泛应用于化工、环境和核能等领域。在核能领域,高温气冷堆采用三结构各向同性(tri-structural isotropic, TRISO)燃料颗粒,其热解碳层和碳化硅层共同提供裂变产物屏障与结构支撑^[1,2]。在TRISO燃料颗粒制备过程中,燃料核芯颗粒通常需要在流化状态下逐层沉积热解碳、碳化硅等包覆层,以获得致密、多层且完整的包覆层。流化床-化学气相沉积具有气固接触充分、传热传质效率高和颗粒表面持续更新等特点,已用于颗粒包覆、催化剂制备、功能颗粒表面改性,是制备此类核燃料颗粒的重要工艺^[3,4]。与固定床或静态沉积方式相比,流化床内颗粒持续运动,有利于减弱局部过度沉积并提高颗粒间包覆循环的一致性。然而,FB-CVD过程同时耦合气固两相流动、颗粒循环、表面反应、孔口沉积、外部热量输入控制和副产物输运等过程,难以解耦研究,因此反应器结构设计与放大仍面临挑战。

目前FB-CVD包覆反应器的核心难点之一,是颗粒循环行为与局部反应环境难以协同调控。颗粒需要在反应区内获得足够且相对均匀的更新频率和停留时间,以降低颗粒间包覆层厚度差异;同时,反应气体入口、孔口附近和高温区域又容易发生局部沉积、堵塞或副反应,从而改变气体分布和床层稳定性。对于外加热或壁面加热流化床,热量需要穿过床层传递至颗粒群,局部温度场与颗粒循环路径之间存在耦合。对于入口附近反应活性较高的体系,温度、反应物浓度和颗粒更新速率的不匹配还可能加剧孔口沉积和包覆不均匀。因此,在维持稳定流化的同时调控颗粒循环时间、有效停留时间分布和局部热环境,是FB-CVD反应器结构优化的关键问题。

将颗粒循环组织与内部加热有序分解和耦合,

是改善FB-CVD颗粒循环更新和局部反应环境匹配的新思路。传统Wurster型流化床通过在床层中心设置薄壁导流筒,将颗粒上升区和环隙下降区相对分隔,使颗粒形成“中心上升-顶部扩散-环隙下降-底部再进入”的循环路径。导流筒内为喷雾区,而外壁面起热干燥作用。已有文献中,学者采用正电子发射颗粒追踪技术(positron emission particle tracking, PEPT)^[5]、计算流体力学-离散元耦合方法(computational fluid dynamics-discrete element method, CFD-DEM)^[6,7]和循环时间模型^[8]等研究手段发现,Wurster型流化床中的颗粒循环时间、喷雾区或包覆区停留时间分布以及区域间交换频率会显著影响颗粒涂覆过程的均匀性。此外,导流筒结构、底部间隙和床体几何结构会改变喷动稳定性、颗粒循环速率和颗粒在包覆区的停留行为^[9-11];学者采用蒙特卡洛(Monte Carlo)方法^[12,13]、实验流动与包覆均匀性研究^[14,15]、连续包衣^[16]和多物理场耦合^[17-19]模型研究进一步表明,颗粒循环历史和停留时间分布会传递到包覆层厚度均匀性评价中。这些研究说明,仅用平均循环时间难以完整表征颗粒更新质量,循环时间分布、区域停留时间分布、旁路循环、低速死区和粒径分层行为同样需要纳入评价。

传统Wurster型流化床主要面向喷雾包衣、干燥和制粒过程,中心导流构件主要用于组织颗粒循环,并限定颗粒与喷雾的接触区域。对于FB-CVD颗粒包覆过程,包覆质量还强烈依赖反应温度、局部热量输入和前驱体物质输入的耦合。已有CFD-DEM、多尺度分析和喷动床研究能够解析流化床内颗粒循环、停留时间分布、碰撞、沉积以及传热传质过程,表明流动结构、颗粒停留行为和热质传递之间存在显著相互作用。因此,对于FB-CVD颗粒包覆反应器,仅将导流筒作为被动流动整形构件仍可能不足;若将循环组织功能与内部热源相结合,可在反应器内部形成更可调的循环-加热耦合区域。

基于上述思路,本文提出一种内加热-外循环

(Internal Heating-External Circulation, IH-EC) 流化床。该结构借鉴传统内循环流化床、导流筒喷动流化床和 Wurster 型流化床对颗粒循环路径的组织方式,但中心构件并非单纯的薄壁导流筒,而是具有一定厚度、温度可调的中心加热体。需要指出的是,本文冷态试验未启用中心构件加热,数值模型也不涉及能量方程、反应动力学和沉积,因此本文直接检验的是冷态流体动力学,而不包括加热或包覆性能。

内加热-外循环流化床的结构设计不能只判断颗粒能否被流化,而应识别何种气速分配和几何参数能够同时满足三类约束。第一,颗粒需要形成连续循环,以避免床层底部或近壁区域长期滞留;第二,颗粒进入包覆区的时间分布需要足够集中,以降低不同颗粒之间的循环更新差异;第三,单次通过包覆区的停留时间要足够长,包覆区内颗粒量要足够多,提高单次包覆成效,最终提高整体包覆效率。为此,本研究将循环时间分布、包覆区停留时间、包覆区颗粒占比、未循环颗粒占比和流化床死区面积比同时纳入评价,以获得面向后续 FB-CVD 包覆过程研究的综合评价指标。

本研究首先建立透明拟二维(pseudo-two-dimensional, pseudo-2D)冷模 IH-EC 流化床装置,采用异色颗粒示踪和高速摄像方法,实验研究内加热-外循环流化床内的颗粒流化与循环行为;同时采用 CFD-DEM 方法开展数值模拟,与典型实验结果相互验证。研究颗粒稳定循环、包覆区有效停留时间分布等变化规律;进一步考察床底锥角和中心加热体底部间隙对颗粒循环的影响;最后考察中心加热体高度对颗粒循环-包覆行为的影响。本文通过实验与模拟相结合,阐明在给定的颗粒物性、反应器几何条件下,操作参数和结构参数对内加热-外循环流化床颗粒循环行为的调控规律,并为后续 FB-CVD 颗粒包覆反应器的结构优化提供冷态实验数据参考。

1 实验和模拟方法

1.1 流化床几何装置设计

本文基于内加热-外循环流化床结构设计,建立透明拟二维冷模内加热-外循环流化床装置。装置包括有机玻璃床体、中路与环路分区供气单元、置于床层中心的中心加热体以及高速图像采集系

统。装置实物及结构示意图见图 1,几何参数汇总见表 1。与传统 Wurster 型流化床不同,中心加热体设有加热与保温结构,因此具有一定内部结构设计。本文聚焦冷态实验研究,暂不考虑中心加热体提供热量的功能,仅用于考察其几何位置和结构尺寸对颗粒循环的影响。

实验时中路气流将颗粒夹带进入中心加热体限定的颗粒上升通道。颗粒穿越包覆区后在床层顶部横向扩散,并沿外侧环隙下降,随后由底部再次返回包覆区。由此可见,中路气速、环路气速和反应器结构均可能改变颗粒进入包覆区的概率以及完成一次循环所需的时间。冷态实验的目的,是在排除传热与反应效应的条件下确认该结构能否形成可重复的稳定颗粒循环,并为数值模拟验证提供定量依据。

1.2 实验中循环识别与示踪测量方法

实验采用直径约 2 mm、密度为 2.6 g/cm³ 的全透明玻璃珠作为床料,装填质量为 225 g。为追踪单颗粒循环轨迹,加入一颗与主体颗粒粒径、密度相同的黑色示踪颗粒,使用高速相机(S-motion AOS 型)从床体正面连续记录其运动过程,相机帧率为 1000 fps。

本文将示踪颗粒由底部进入中心上升区并通过参考平面①的时刻记为一次循环的起点,如图 2 所示。当该颗粒依次通过平面②、平面③、平面④,并再次通过参考平面①时,定义为完成一次循环。相邻两次通过参考平面①的时间差记为循环时间 t_{cycle} ,连续通过平面①和平面②的时间差记为单次包覆区停留时间 t_{RTD} 。对每一工况,在流化状态稳定后连续记录多个循环时间进行统计,得到平均循环时间及其波动范围,用于比较气速、中心加热体结构和底部间隙高度等参数对颗粒循环行为的影响。

为减少偶然偏差,示踪颗粒的循环识别采用同一判据:只有当示踪颗粒依次完成底部回流、中心上升、顶部扩散、环隙下降和底部再进入过程时,才记为有效循环;若颗粒在视野边界附近短时遮挡,且无法确认其是否通过参考平面,则该片段不用于计算循环时间。平均循环时间反映完整更新周期,包覆区停留时间反映颗粒在包覆区的局部接触时长,每次均有效测量 50 次,取平均值。

1.3 CFD-DEM 数值方法

本文采用 CFD-DEM 方法描述内加热-外循环流化床内的气固两相流动。计算框架由

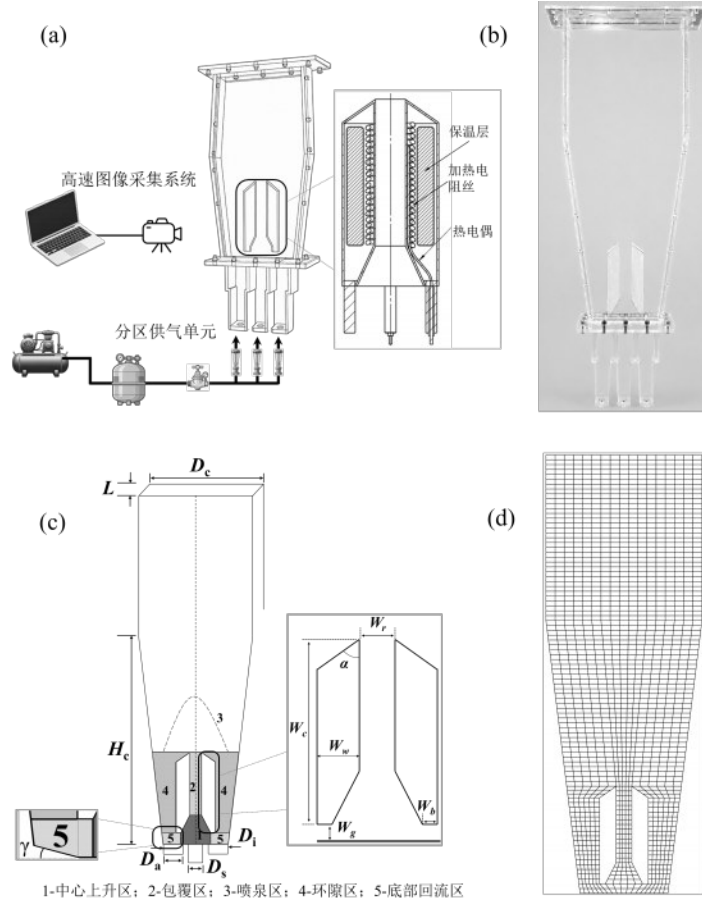


图1 拟二维内加热-外循环流化床实验装置与计算模型:(a)实验系统及中心加热体;(b)透明拟二维床体;(c)反应器尺寸和区域划分;(d)模拟计算网格

Fig. 1 Experimental apparatus and computational model of the pseudo-2D internal heating-external circulation fluidized bed: (a) experimental system and central heating element; (b) transparent pseudo-2D bed; (c) reactor dimensions and region definitions; (d) computational mesh

OpenFOAM、LIGGGHTS 和 CFDEM coupling 组成: OpenFOAM 以欧拉框架求解气相^[20-22], LIGGGHTS 以拉格朗日框架求解颗粒^[23], 气固两相通过 CFDEM coupling 实现双向耦合^[24]。气相采用局部体积平均的不可压缩 Navier-Stokes 方程描述, 并按不可压牛顿层流模型求解。考虑颗粒占据体积后, 气相连续性方程和动量方程可写为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \mathbf{u}_g) &= 0 \\ \frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g \mathbf{u}_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \mathbf{u}_g \mathbf{u}_g) &= -\varepsilon_g \nabla p + \nabla \cdot (\varepsilon_g \boldsymbol{\tau}_g) + \varepsilon_g \rho_g \mathbf{g} + \mathbf{S}_p \end{aligned} \quad (1)$$

其中 ε_g 为局部气相空隙率; ρ_g 为气体密度; $\mathbf{u}_g$ 为气速; p 为气相压力; $\mathbf{g}$ 为重力加速度; $\boldsymbol{\tau}_g$ 为气相应力张量; $\mathbf{S}_p$ 为颗粒相对气相的动量源项。局部空隙率由颗粒在 CFD 网格单元内的占据体积计算:

$$\varepsilon_g = 1 - \frac{\sum_i V_{i, \text{cell}}}{V_{\text{cell}}} \quad (3)$$

其中 V_{cell} 为 CFD 网格单元体积, $V_{i, \text{cell}}$ 为颗粒 i 在该网格单元内所占体积。气相应力张量可写为:

$$\boldsymbol{\tau}_g = \mu_g \left[\nabla \mathbf{u}_g + (\nabla \mathbf{u}_g)^T \right] + \left(\lambda_g - \frac{2}{3} \mu_g \right) (\nabla \cdot \mathbf{u}_g) \mathbf{I} \quad (4)$$

其中 μ_g 为气体动力黏度, λ_g 为气体体积黏度, $\mathbf{I}$ 为单位张量。CFDEM 在耦合步内将 LIGGGHTS 中的颗粒位置信息映射到 OpenFOAM 网格, 从而更新气相求解所需的固含率分布。

颗粒相采用离散元方法求解, 其平动和转动满足牛顿运动定律; 颗粒间接触力按软球模型计算^[25]。

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = m_i \mathbf{g} + \mathbf{F}_{d,i} + \sum_j (\mathbf{F}_{n,ij} + \mathbf{F}_{t,ij}) \quad (5)$$

$$I_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} = \sum_j \mathbf{M}_{ij} \quad (6)$$

式中, m_i 、 v_i 、 I_i 和 $\boldsymbol{\omega}_i$ 分别为颗粒 i 的质量、平动速

表1 拟二维内加热-外循环流化床几何参数

Table 1 Geometric parameters of the pseudo-2D internal heating-external circulation fluidized bed

参数	数值
床体宽度 D_c / mm	320
床底宽度 D_i / mm	180
床体厚度 L / mm	15
锥形段高度 H_c / mm	560
中路进气通道宽度 D_s / mm	40
环路进气通道宽度 D_a / mm	60
中心加热体顶角 α / (°)	55
中心加热体上升区宽度 W_r / mm	32
中心加热体底部宽度 W_b / mm	12
中心加热体宽度 W_w / mm	34
中心加热体高度 W_e / cm	10(E), 15, 20(E)
中心加热体底部间隙高度 W_g / mm	10, 15, 20(E), 25, 30
床底锥角 γ / (°)	0(E), 10(E), 15(E), 20

注:表中标注“(E)”的数值为多参数组合条件下实验验证所采用的参数值。

度、转动惯量和角速度; $\mathbf{F}_{d,i}$ 为气相作用于颗粒 i 的曳力; $\mathbf{F}_{n,ij}$ 和 $\mathbf{F}_{t,ij}$ 分别为颗粒-颗粒或颗粒-壁面接触时的法向和切向接触力; $\mathbf{M}_{ij}$ 为切向接触力产生的力矩。颗粒间及颗粒与壁面间的碰撞采用 Hertz 接触模型描述。

气固曳力采用 Gidaspow 模型:稀相区使用 Wen-Yu 关联式,密相区使用 Ergun 关联式,并按局部空隙率切换^[26-28]。对于颗粒 i ,气相作用于颗粒的

曳力定义为:

$$\mathbf{F}_{d,i} = \frac{V_{p,i} \beta}{1 - \varepsilon_g} (\mathbf{u}_g - \mathbf{v}_i) \quad (7)$$

式中, $V_{p,i}$ 为颗粒 i 体积, $\mathbf{v}_i$ 为颗粒 i 的平动速度, β 为气固相间动量交换系数。

$$\beta = \begin{cases} 150 \frac{(1 - \varepsilon_g)^2 \mu_g}{\varepsilon_g d_p^2} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon_g) \rho_g |\mathbf{u}_g - \mathbf{v}_i|}{d_p}, & \varepsilon_g \leq 0.8 \\ \frac{3}{4} C_D (1 - \varepsilon_g) \varepsilon_g^{-2.65} \frac{\rho_g |\mathbf{u}_g - \mathbf{v}_i|}{d_p}, & \varepsilon_g > 0.8 \end{cases} \quad (8)$$

其中, d_p 为颗粒直径, C_D 为曳力系数。颗粒雷诺数和曳力系数分别为:

$$Re_p = \frac{\varepsilon_g \rho_g d_p |\mathbf{u}_g - \mathbf{v}_i|}{\mu_g} \quad (9)$$

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}), & Re_p < 1000 \\ 0.44, & Re_p \geq 1000 \end{cases} \quad (10)$$

颗粒相对气相的反作用力以动量源项形式加入气相动量方程:

$$\mathbf{S}_p = -\frac{1}{V_{\text{cell}}} \sum_i \mathbf{F}_{d,i} \quad (11)$$

在本文中 CFD-DEM 模型用于冷态气固流动与颗粒循环行为分析,通过记录颗粒穿越特征截面或进入指定区域的时间序列,可计算颗粒循环时间、包覆区停留时间分布、包覆区颗粒占比和速度场,进而分析中路-环路供气条件和结构参数对流化稳

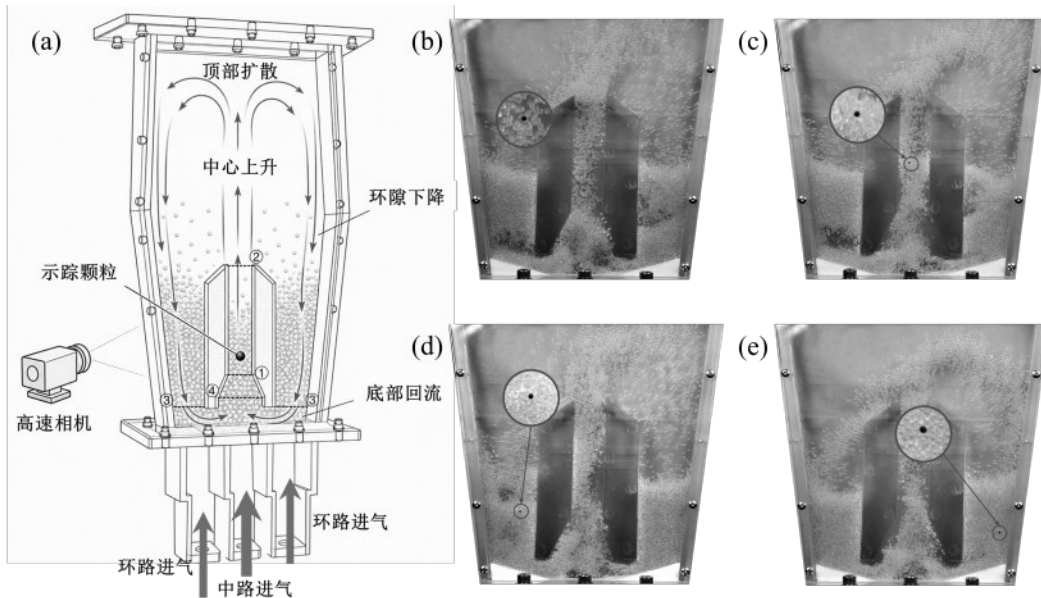


图2 异色示踪颗粒循环测量方法:(a)循环识别参考平面;(b-e)示踪颗粒不同时刻的位置

Fig. 2 Circulation measurement using a colored tracer particle: (a) reference planes for cycle identification; (b-e) tracer-particle positions at different times

定性的影响。

1.4 实验和模拟条件设置

实验中采用压缩空气为气源,并通过中气和回路通道分别供气,装填量为 225 g(对应颗粒数量约为 2.06×10^4 ,用于 CFD-DEM 模拟颗粒数对应)。CFD-DEM 计算域按照拟二维冷模实验装置建立。模拟气相为空气(密度取 1.225 kg/m^3),动力黏度取 $1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。颗粒相采用直径和密度与实验相同的玻璃珠,CFD 步长 $4 \times 10^{-5} \text{ s}$,DEM 步长 $4 \times 10^{-6} \text{ s}$ 。模拟中边界条件设置方面,中气入口和回路入口均采用固定速度入口,床体顶部采用压力出口;气相壁面采用无滑移边界;颗粒与壁面之间的碰撞由 DEM 壁面接触边界处理,且前后壁不采用周期边

界。颗粒初始装填于床层底部,重力方向与实验装置一致。各工况模拟时长均为 20 s。为消除初始装填与加速过渡带来的误差,本文以 5 ~ 20 s 作为统计窗口,在颗粒循环达到稳态后采集数据,采样间隔与 CFD 步长一致。

首先在反应器床底锥角固定为 0° ,底部间隙固定为 20 mm,中心加热体高度固定为 20 cm,采用 CFD-DEM 模拟考察中气速度 U_c (central gas velocity)和回路辅助气速 U_a (annulus gas velocity)对颗粒流化-包覆行为的影响,确定较优气速参数。气速模拟以最小喷动气速为基准,围绕该基准条件设置中气速度 U_c 和回路气速 U_a 组合,共 45 个操作工况。模拟设置如表 2 所示。

表 2 CFD-DEM 数值模拟中气-回路气速工况设置

Table 2 Operating conditions for central and annulus gas velocities

序号	中气速度 $U_c/(\text{m/s})$	回路气速 $U_a/(\text{m/s})$	床底锥角 γ	模拟时长/s	工况序列
1	4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0	1.0	0°	20	C4p0_A1p0 ~ C8p0_A1p0
2	4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0	1.5	0°	20	C4p0_A1p5 ~ C8p0_A1p5
3	4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0	2.0	0°	20	C4p0_A2p0 ~ C8p0_A2p0
4	4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0	2.5	0°	20	C4p0_A2p5 ~ C8p0_A2p5
5	4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0	3.0	0°	20	C4p0_A3p0 ~ C8p0_A3p0

注: Case-1-1 ~ Case-1-9 指 C4p0_A1p0 ~ C8p0_A1p0, 依次类推, Case-5-1 ~ Case-5-9 指 C4p0_A3p0 ~ C8p0_A3p0

固定气速条件($U_c=7.5 \text{ m/s}$, $U_a=3.0 \text{ m/s}$),进一步探究反应器结构参数对颗粒流化循环的影响。设置床底锥角、中心加热体底部间隙和中心加热体

高度三个结构变量,在固定气速下开展模拟研究。模拟设置见表 3。

表 3 CFD-DEM 数值模拟反应器结构工况设置

Table 3 Simulation conditions for reactor structural parameters

序号	变量	中气速度 $U_c/(\text{m/s})$	回路气速 $U_a/(\text{m/s})$	床底锥角 γ	底部间隙/mm	中心加热体高度/cm	工况序列
1	床底锥角	7.5	3.0	10°	20	20	10deg_Angle
2	床底锥角	7.5	3.0	15°	20	20	15deg_Angle
3	床底锥角	7.5	3.0	20°	20	20	20deg_Angle
4	底部间隙	7.5	3.0	15°	10	20	10mm_Gap
5	底部间隙	7.5	3.0	15°	15	20	15mm_Gap
6	底部间隙	7.5	3.0	15°	20	20	20mm_Gap
7	底部间隙	7.5	3.0	15°	25	20	25mm_Gap
8	底部间隙	7.5	3.0	15°	30	20	30mm_Gap
9	加热体高度	7.5	3.0	15°	20	10	10cm_Height
10	加热体高度	7.5	3.0	15°	20	15	15cm_Height
11	加热体高度	7.5	3.0	15°	20	20	20cm_Height

Note: Case-6-1 ~ Case-6-3 指 10deg_Angle ~ 20deg_Angle, Case-7-1 ~ Case-7-5 指 10mm_Gap ~ 30mm_Gap, Case-8-1 ~ Case-8-3 指 10cm_Height ~ 20cm_Height

实验设置中路气量为260 SLM(入口气速约7.5 m/s),两侧环路气量各设置为160 SLM(入口气速约3.0 m/s),考察床底锥角和中心加热体高度对颗粒循环行为的影响。实验过程中保持供气条件和颗粒条件不变,床底锥角设置为 0° 、 10° 和 15° ,中心加热体高度设置为10 cm和20 cm,共形成6组工况,见表4,主要用于评价结构参数变化对循环时间和包覆区停留时间的影响。每组工况通过异色颗粒示踪法记录颗粒进入、离开包覆区和完成循环的时刻,并以平均循环时间和包覆区停留时间表征颗粒循环强度,用于验证数值模拟结果。

1.5 网格无关性验证

为检验计算结果对网格分辨率的敏感性,分别

表4 冷态实验操作参数

Table 4 Operating parameters for the cold-model experiments

序号	床底锥角 γ	中心加热体高度/cm	中路气量/ SLM	单侧环路气量/ SLM
1	0°	10	260	160
2	0°	20	260	160
3	10°	10	260	160
4	10°	20	260	160
5	15°	10	260	160
6	15°	20	260	160

采用 coarse (2304 cells)、medium (4653 cells) 和 fine (8544 cells) 三种网格,在 C7p5_A3p0 工况设置下进行计算,并选取平均循环时间、包覆区平均停留时间、颗粒平均循环次数和未循环颗粒占比作为评价指标。以 medium 网格为基准,coarse 网格下上述四项指标的绝对相对误差依次为 2.96%、5.15%、3.66% 和 0.92%, fine 网格下则依次为 2.00%、5.41%、3.17% 和 3.95%,差别均较小,而 fine 网格的单元数增至 coarse 网格的约 3.7 倍,计算耗时大大增加。因此,综合计算精度和效率,后续模拟采用 medium 网格。

2 结果与讨论

2.1 模型验证

为验证当前 CFD-DEM 方法模拟的合理性,本文从实验-模拟同工况对比和文献对比两个方面进行定量模型验证。

2.1.1 实验对比验证 实验与模拟保持相同几何结构、颗粒床料参数和供气条件,即床底锥角为 15° ,中心加热体高度为20 cm,中心加热体底部间隙为20 mm 的结构工况,并分别统计平均循环时间和平均包覆区停留时间。

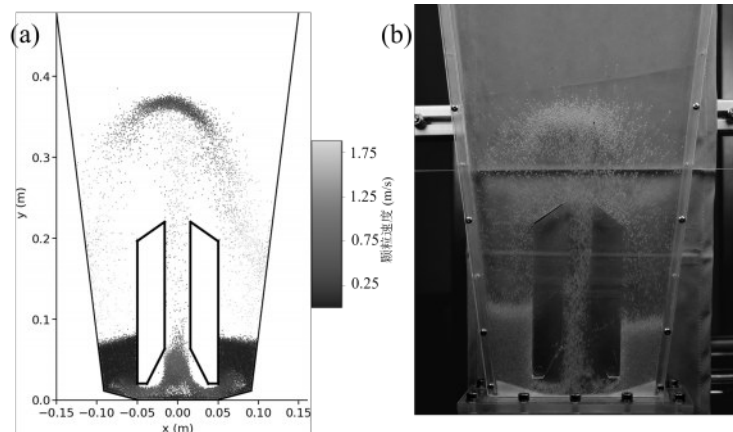


图3 CFD-DEM模拟与冷态实验颗粒流型对比:(a)数值模拟结果(剖面图);(b)冷态实验结果(正面图)

Fig. 3 Comparison of particle flow patterns between CFD-DEM simulations and cold-model experiments: (a) numerical simulation (cross-sectional view); (b) cold-model experiment result (front view)

为验证数值模型对颗粒流型的预测能力,将 CFD-DEM 模拟得到的瞬时颗粒分布与冷态实验中的典型流型进行对比,结果如图3所示。模拟结果能够再现实验中观察到的主要流动特征:中路气流主要提供包覆区颗粒上升所需的夹带能力,环路气流用于维持外侧环隙区颗粒回流和底部疏松;颗粒

在中心加热体之间形成明显的中心上升通道,并在上部区域向两侧扩散;离开包覆区后,颗粒沿外侧环隙区域回落,并在底部重新进入中心上升区,从而构成典型内循环流动。同时,模拟和实验均显示底部两侧存在相对密集的颗粒滞留区,说明该结构下颗粒回流与再进入过程并非完全均匀,而受到中

心加热体底部几何和局部气固作用的共同影响。为进一步验证模型对颗粒循环行为的定量预测能力,在相同操作和结构参数下($U_c=7.5$ m/s、 $U_a=3.0$ m/s),定量对比实验与模拟结果,如表5所示。实验中 $\overline{t_{\text{cycle}}}$ 为2.82 s,模拟值为2.78 s;实验 $\overline{t_{\text{RTD}}}$ 为0.250 s,模拟值为0.278 s,吻合均较好。对比结果表明

CFD-DEM数值模拟较好捕捉了实验中的中心喷动、侧向回流、顶部扩散和底部回流等关键流型特征,所采用的气固耦合模型能够准确描述拟二维内加热-外循环流化床中的颗粒循环流化行为,可用于后续不同气速和结构参数下颗粒循环-包覆行为分析。

表5 实验与模拟颗粒循环行为定量对比

Table 5 Quantitative comparison of experimental and simulated particle circulation behavior

中路气速 U_c / (m/s)	单侧环路气速 U_a / (m/s)	床底锥角 γ	底部间隙 / mm	加热体高度 / cm	$\overline{t_{\text{cycle}}} / \text{s}$		$\overline{t_{\text{RTD}}} / \text{s}$	
					实验	模拟	实验	模拟
7.5 (260 SLM)	3.0 (160 SLM)	15°	20	20	2.82	2.78	0.250	0.278

2.1.2 文献对比验证 文献对比验证以Li等^[29]基于CFD-DEM研究喷雾流化床颗粒循环时间分布与包覆均匀性的结果为参照,检验模型对颗粒循环行为的预测能力。验证算例根据文献^[29]报道的拟二维流

化床几何尺寸、颗粒物性及供气条件建立,重点比较不同流化气速下颗粒循环时间概率密度分布的形态及变化趋势。

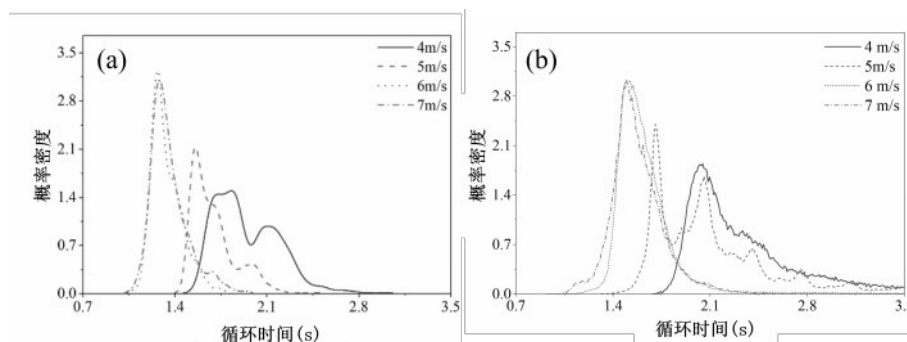


图4 颗粒循环时间概率密度分布:(a)文献结果^[29];(b)本文CFD-DEM模型结果

Fig. 4 Probability density of particle circulation time: (a) literature result^[29]; (b) present CFD-DEM result

文献对比结果如图4所示。与文献中的颗粒循环时间概率密度分布相比,本文计算结果在整体变化规律上具有较好一致性。随着流化气速由4 m/s增大至7 m/s,循环时间分布主峰总体向短时间方向移动,说明气速升高后颗粒完成一次循环所需时间缩短;其中4 m/s条件下循环时间主要分布在较长时间区间,曲线呈现较宽分布和明显右侧拖尾,而5 m/s时主峰已向左移动,表明颗粒循环速度得到提高。进一步提高气速至6 m/s和7 m/s后,概率密度曲线明显变窄,主峰高度增加,循环时间主要集中在约1.4~1.7 s范围内,反映出高气速下颗粒循环时间离散性降低,循环过程趋于稳定。可见本文模型能够较好捕捉颗粒循环时间随流化气速升高而缩短、分布由宽变窄以及高气速下循环趋于稳定的主要规律,验证了模拟结果在颗粒循环行为预测方面的合

理性。

2.2 针对循环-包覆性能的流化床新型综合评价指标

颗粒在内加热-外循环流化床中依次经历包覆区上升、环路下降和底部再进入。为比较不同操作与结构参数,本文从循环完整性、循环一致性、包覆区接触行为和低速滞留四个方面建立循环-包覆综合评价指标 I_{CRH} 。

颗粒循环时间、循环时间分布和循环速率已用于表征Wurster型流化床和导流筒喷动床中的颗粒更新行为,并与包覆过程的颗粒经历一致性密切相关^[5,8,9]。为评价循环完整性,定义颗粒平均循环次数 $\overline{n_{\text{cir}}}$,即模拟时长内单颗粒发生的平均循环次数;定义未循环颗粒占比 f_{nc} ,即模拟时长内未发生循环的颗粒占颗粒总数的比值;定义颗粒单次循环时间

t_{cycle} 和平均循环时间 $\overline{t_{\text{cycle}}}$; 定义流化床死区面积比 A_{DZ} , 即死区面积占流化颗粒域面积的比值, 用于判断低速滞留区域, 本文将局部空间网格内颗粒平均速度为 0 的区域定义为死区^[30]。各指标的量纲和优化方向不同, 采用极差归一化后构建综合评价指标^[31], 计算方法如下。

$$f_{\text{nc}} = \frac{N_{\text{no-cycle}}}{N_{\text{total}}} \times 100\% \quad (12)$$

$$\overline{t_{\text{cycle}}} = \frac{1}{N_{\text{cycle}}} \sum_{k=1}^{N_{\text{cycle}}} t_{\text{cycle},k} \quad (13)$$

$$S_{\text{cir}} = \frac{\overline{n_{\text{cir}}} - \min(\overline{n_{\text{cir}}})}{\max(\overline{n_{\text{cir}}}) - \min(\overline{n_{\text{cir}}})} \quad (14)$$

$$S_{\text{nc}} = 1 - \frac{f_{\text{nc}} - \min(f_{\text{nc}})}{\max(f_{\text{nc}}) - \min(f_{\text{nc}})} \quad (15)$$

$$S_{\text{cycle}} = 1 - \frac{\overline{t_{\text{cycle}}} - \min(\overline{t_{\text{cycle}}})}{\max(\overline{t_{\text{cycle}}}) - \min(\overline{t_{\text{cycle}}})} \quad (16)$$

$$S_{\text{DZ}} = 1 - \frac{A_{\text{DZ}} - \min(A_{\text{DZ}})}{\max(A_{\text{DZ}}) - \min(A_{\text{DZ}})} \quad (17)$$

循环一致性指标定义为:

$$I_{\text{PF}} = (S_{\text{cir}} + S_{\text{nc}} + S_{\text{cycle}} + S_{\text{DZ}})/4 \quad (18)$$

已有 PEPT、CFD-DEM 和耦合包覆模型研究表明, 包覆区或喷雾区的停留时间分布是连接流动结构与包覆均匀性的重要流体动力学指标^[5, 7, 19]。为评价包覆区接触行为, 定义颗粒循环时间变异系数 CV_{cycle} , CV_{cycle} 越小表示颗粒循环时间分布越均匀; 定义颗粒包覆区单次停留时间 t_{RTD} 和平均停留时间 $\overline{t_{\text{RTD}}}$, 即颗粒穿越包覆区的单次用时和平均用时; 定义包覆时间占比 R , 即颗粒位于包覆区的时间与循环时间的比值; 定义包覆区颗粒占比 ϕ_{w} , 即包覆区内颗粒占颗粒总数的百分比。各指标的归一化计算如下。

$$CV_{\text{cycle}} = \frac{\sigma(t_{\text{cycle}})}{\overline{t_{\text{cycle}}}} \quad (19)$$

$$\overline{t_{\text{RTD}}} = \frac{1}{N_{\text{RTD}}} \sum_{k=1}^{N_{\text{RTD}}} t_{\text{RTD},k} \quad (20)$$

$$R = \frac{\overline{t_{\text{RTD}}}}{\overline{t_{\text{cycle}}}} \times 100\% \quad (21)$$

$$S_{\phi} = \frac{\phi_{\text{w}} - \min(\phi_{\text{w}})}{\max(\phi_{\text{w}}) - \min(\phi_{\text{w}})} \quad (22)$$

$$S_{\text{CV}} = 1 - \frac{CV_{\text{cycle}} - \min(CV_{\text{cycle}})}{\max(CV_{\text{cycle}}) - \min(CV_{\text{cycle}})} \quad (23)$$

$$S_{\text{RTD}} = \frac{\overline{t_{\text{RTD}}} - \min(\overline{t_{\text{RTD}}})}{\max(\overline{t_{\text{RTD}}}) - \min(\overline{t_{\text{RTD}}})} \quad (24)$$

$$S_{\text{R}} = \frac{R - \min(R)}{\max(R) - \min(R)} \quad (25)$$

包覆一致性指标定义为:

$$I_{\text{CT}} = (S_{\phi} + S_{\text{CV}} + S_{\text{RTD}} + S_{\text{R}})/4 \quad (26)$$

最终循环-包覆综合评价指标定义为:

$$I_{\text{CRH}} = \frac{I_{\text{PF}} \times I_{\text{CT}}}{\max(I_{\text{PF}} \times I_{\text{CT}})} \quad (27)$$

需要注意的是, 若某指标最大值等于最小值, 则该指标在计算中取值为 1。 I_{CRH} 越接近 1, 表示该工况在循环稳定、包覆区有效停留和颗粒占比之间具有更好的综合表现。

2.3 气速对颗粒循环-包覆行为的影响

2.3.1 对颗粒循环强度的影响

本文对 45 个中路-环路气速组合进行 CFD-DEM 模拟。提取循环时间分布、平均循环时间 $\overline{t_{\text{cycle}}}$ 、未循环颗粒占比 f_{nc} 、颗粒平均速度 $\overline{v_{\text{p}}}$ 、颗粒平均循环次数 $\overline{n_{\text{cir}}}$ 、包覆区停留时间分布 t_{RTD} 、包覆区颗粒占比 ϕ_{w} 、流化床死区面积比 A_{DZ} 等指标, 分别评价循环完整性、循环一致性及包覆区单次停留行为。

颗粒循环时间模拟结果如图 5 所示, 可以发现, 低环路气速下, 循环时间分布更易出现宽分布和长尾, 说明部分颗粒虽然被中路气流夹带, 但难以稳定完成环隙下降和底部再进入。随着 U_{a} 升高, 分布主峰向短循环时间区间移动, 长周期事件减少, 表明环路气流对底部再进入和环隙回流具有直接促进作用。当 U_{c} 与 U_{a} 协同提高时, 循环时间分布进一步收窄, 表明颗粒循环的一致性增强。

颗粒循环时间、平均循环次数和颗粒平均速度随中路与环路气速的变化如图 6 所示, 低气速条件下颗粒循环不足, 床层存在明显滞留。以 $U_{\text{a}}=1.0 \text{ m/s}$ 为例, 当 U_{c} 由 4.0 m/s 增至 8.0 m/s 时, $\overline{n_{\text{cir}}}$ 由 0 增至 1.03, $\overline{v_{\text{p}}}$ 由 0.038 m/s 增至 0.082 m/s , A_{DZ} 由 55.06% 降至 6.79% 。尽管提高 U_{c} 增强了中心上升区的颗粒夹带, 但环路回流不足仍限制了全床连续循环的形成。

流化气速对颗粒循环和死区的影响如图 7 所示, 提高 U_{a} 可显著减少未循环颗粒和低速滞留区。固定 U_{c} , U_{a} 由 1.0 m/s 提高至 3.0 m/s 可使系统由弱循环转向稳定循环。 $U_{\text{c}}=4.0 \text{ m/s}$ 时改变环路气速, $\overline{n_{\text{cir}}}$ 由 0 增至 2.11, f_{nc} 从 100% 降至 15.04% , $\overline{t_{\text{cycle}}}$ 由 $U_{\text{a}}=1.5 \text{ m/s}$ 时的 13.30 s 降至 4.47 s , A_{DZ} 由 55.06% 降至 0.76% , $\overline{v_{\text{p}}}$ 由 0.038 m/s 增至 0.200 m/s ; 在 $U_{\text{c}}=6.0 \text{ m/s}$ 时改变环路气速, $\overline{n_{\text{cir}}}$ 由 0 增至 4.73, f_{nc} 从 100% 降至

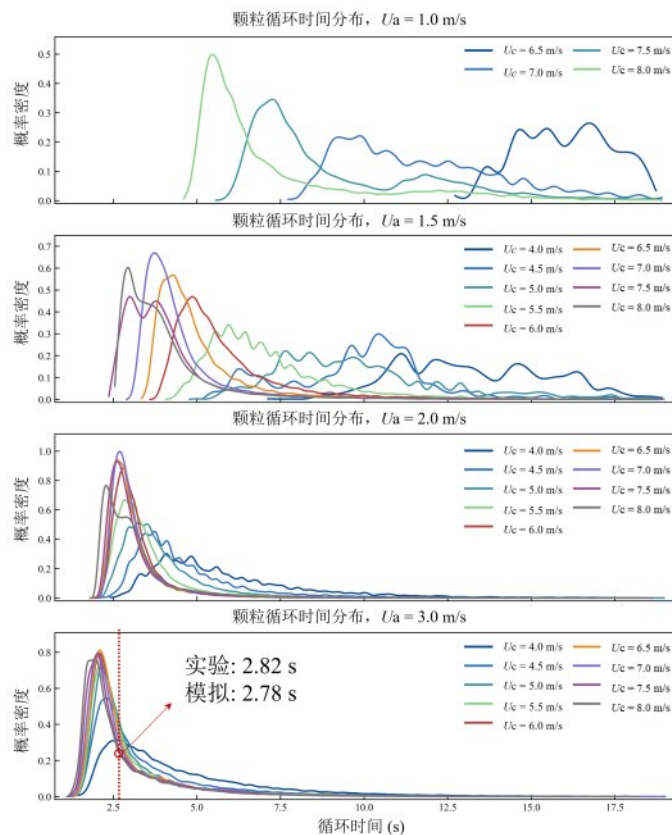


图5 中路与环路气速对颗粒循环时间概率密度分布的影响

Fig. 5 Effects of central and annulus gas velocities on the probability density of particle circulation time

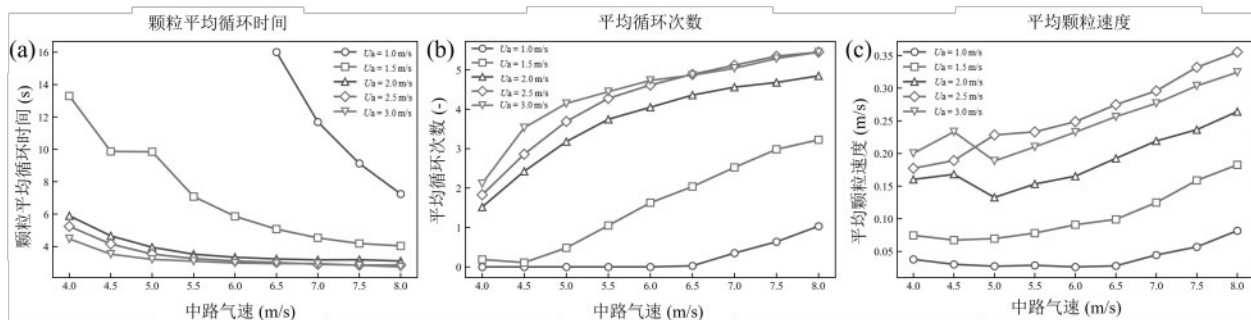


图6 中路与环路气速对颗粒流动特征参数的影响:(a)平均循环时间;(b)平均循环次数;(c)颗粒平均速度

Fig. 6 Effects of central and annulus gas velocities on particle-flow characteristics: (a) mean circulation time; (b) mean circulation count; (c) mean particle velocity

2.84%, $\overline{t_{\text{cycle}}}$ 由 5.86 s 降至 2.98 s, A_{DZ} 由 20.27% 降至 0.21%, $\overline{v_p}$ 由 0.026 m/s 增至 0.233 m/s; 在 $U_c=8.0$ m/s 时改变环路气速, $\overline{n_{\text{cir}}}$ 由 1.03 增至 5.45, f_{nc} 从 32.31% 降至 0.29%, $\overline{t_{\text{cycle}}}$ 由 7.24 s 降至 2.74 s, A_{DZ} 由 6.79% 降至 0.07%, $\overline{v_p}$ 由 0.082 m/s 增至 0.324 m/s。上述变化表明, 环路气速的作用并非简单增强床层扰动, 而是通过改善环隙回流和底部再进入条件, 减少底部及近壁区域低速滞留。在环路回流较充分时, 提高 U_c 主要增强包覆区的上升夹带和颗粒更新频率。

当 $U_a=2.5$ m/s 时, U_c 由 4.0 m/s 增至 8.0 m/s, $\overline{n_{\text{cir}}}$ 由 1.83 增至 5.44, $\overline{t_{\text{cycle}}}$ 由 3.53 s 缩短至 2.84 s。与此同时, $\overline{t_{\text{RTD}}}$ 由 0.264 s 降至 0.189 s。因此, 提高 U_c 增加的是颗粒循环频率, 而非单次包覆区停留时间。

综上, 中路气流与环路气流分别控制上升夹带和下降回流, 两者具有互补作用。 U_c 不足时, 颗粒难以持续进入上升通道; U_a 不足时, 颗粒易在环隙或底部滞留。只有两股气流相互匹配, 才能形成连续且稳定的循环路径。

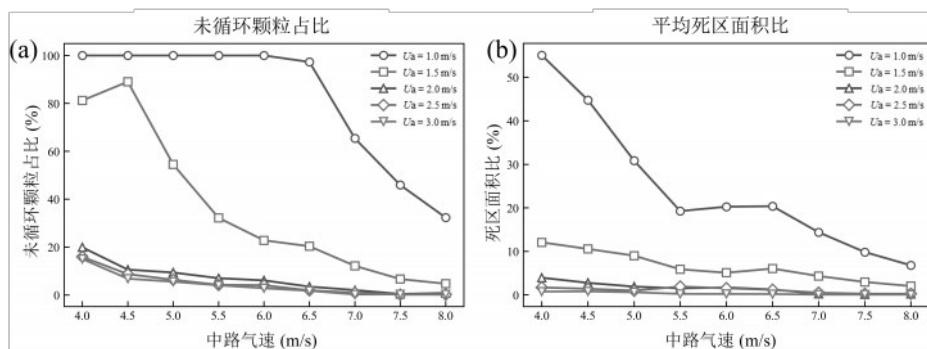


图7 中路与环路气速对(a)未循环颗粒占比和(b)流化床死区面积比的影响

Fig. 7 Effects of central and annulus gas velocities on (a) non-circulating particle fraction and (b) dead-zone area fraction

2.3.2 包覆区停留时间分布 包覆区停留时间分布进一步揭示了气速调节的权衡关系。PEPT和颗粒循环模型表明,循环路径与时间尺度共同决定颗粒对特定区域的访问频率^[5, 6, 8]。Wurster型流化床包覆研究表明,循环时间和区域停留时间分布是理解颗粒更新与包覆均匀性的关键指标^[13, 18]。颗粒包覆

区停留时间分布结果如图8所示,呈现出与循环时间分布相似的气速响应特征。低气速时,停留时间分布较宽并伴有明显长尾。随着气速提高,分布逐渐收窄,长停留事件减少,包覆区停留时间一致性增强。

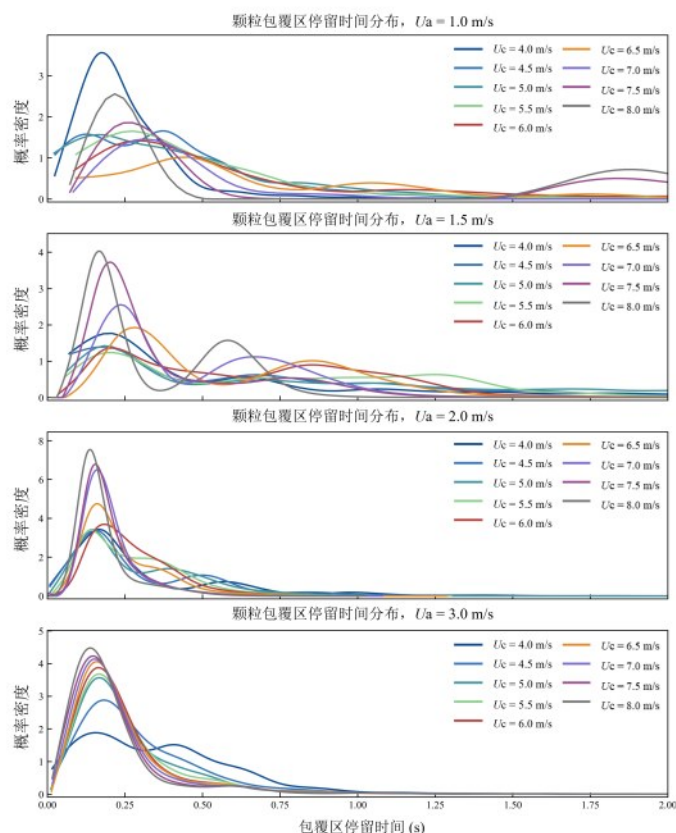


图8 中路与环路气速对包覆区停留时间分布的影响

Fig. 8 Effects of central and annulus gas velocities on the residence-time distribution in the coating zone

中路与环路气速对包覆区平均停留时间的影响模拟结果如图9所示,当 $U_a=1.5$ m/s时, $\overline{t_{RTD}}$ 随 U_c 呈非单调变化: U_c 由4.0 m/s增至8.0 m/s, $\overline{t_{RTD}}$ 由

0.693 s先增至0.897 s,随后降至0.349 s。该结果说明,在弱循环向稳定循环过渡的过程中,局部停留可能同时受到上升夹带、底部供料和颗粒再进入的

影响。低风速下的长停留还可能来自局部滞留,不能直接解释为更优的包覆更新。 $U_a=2.0$ m/s时, U_c 由4.0 m/s增至8.0 m/s, $\overline{t_{RTD}}$ 由0.313 s降至0.179 s。与此同时, $\overline{t_{cycle}}$ 也随 U_c 升高而缩短,说明颗粒并未脱离循环,而是以更高频率完成更新。单次停留时间的降低应结合循环次数和死区面积共同评价。 $U_a=3.0$ m/s时, U_c 由4.0 m/s增至8.0 m/s, $\overline{t_{RTD}}$ 由0.374 s

降至0.218 s。该变化与较强中心夹带和环隙回流条件下颗粒更新加快相一致,但不能单独证明包覆效果得到改善。

综上,增大 U_c 和 U_a 均可强化颗粒运动,但作用侧重不同: U_c 主要控制中心上升夹带, U_a 主要改善环隙下降和底部回流。风速选择需在循环完整性、颗粒更新频率和包覆区单次停留之间权衡。

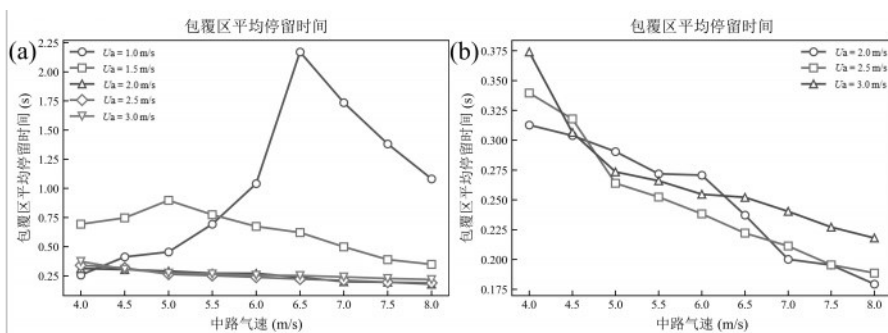


图9 中路与环路风速对包覆区平均停留时间的影响:(a)全工况结果;(b)局部放大

Fig. 9 Effects of central and annulus gas velocities on mean residence time in the coating zone: (a) all operating conditions; (b) magnified view

2.3.3 包覆区颗粒占比 进一步分析包覆区颗粒占比 φ_w 的变化趋势,如图10所示。不同于循环次数和颗粒平均速度, φ_w 不直接反映颗粒更新频率,而侧重描述颗粒在包覆区内的空间分布。因此, φ_w 可用于判断循环强化是否伴随包覆区颗粒占有率下降,并为综合评价颗粒循环与包覆区接触行为提供依据。

由图10可知, φ_w 总体随 U_c 升高而下降,而 U_a 主要改变其数值水平。 $U_a=1.0$ m/s时, φ_w 始终处于最低水平,由 $U_c=4.0$ m/s下的约4.80%降至 $U_c=8.0$ m/s下的约3.02%。当 U_a 提高至1.5~3.0 m/s后,环隙回流对包覆区的颗粒补给增强,低 U_c 条件下 φ_w 约为8%~11%;随着 U_c 继续升高,各 U_a 条件下的 φ_w 均逐步降低。该趋势表明,增强中心上升气流提高了颗粒更新和循环通量,同时缩短了颗粒在包覆区内的瞬时驻留。高 U_c 区间的 φ_w 约5%~7%,说明环路供料只能部分补偿颗粒快速离开包覆区造成的占有率降低。

2.3.4 流化床死区面积比 通过CFD-DEM可以获得速度场分布以及死区分布。典型工况下的速度场和死区分布如图11所示。低风速时,底部、环隙及壁面附近存在连续低速区;提高中路或环路风速均可缩小死区,但协同调节更为有效。当 $U_c=4.0$ m/s、 $U_a=1.0$ m/s时, f_{nc} 为100%, A_{DZ} 为55.06%,低速区从

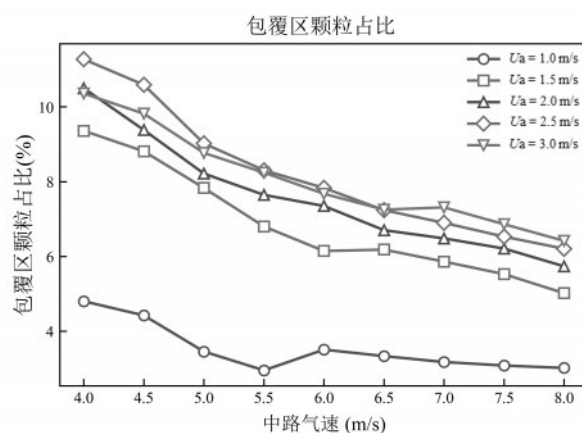


图10 中路与环路风速对包覆区颗粒占比的影响

Fig. 10 Effects of central and annulus gas velocities on mean fraction of particles in the coating zone

环隙延伸至底部,中路射流不足以建立连续循环。当 $U_c=8.0$ m/s、 $U_a=3.0$ m/s时, f_{nc} 降至0.29%, A_{DZ} 降至0.07%,大范围滞留基本消失,流化床底部仍有零散残余区域。该变化说明,提高 U_c 增强包覆区上升夹带,提高 U_a 改善环隙区颗粒回流和底部再入,使颗粒由“局部运动”转向“全床参与”。需要指出的是,即使在高风速条件下,模拟中仍可能存在局部低速区。这些区域多与颗粒底部再入、近壁回流或反应器几何结构有关。

2.3.5 综合评价指标对比分析 综合研究结果,根

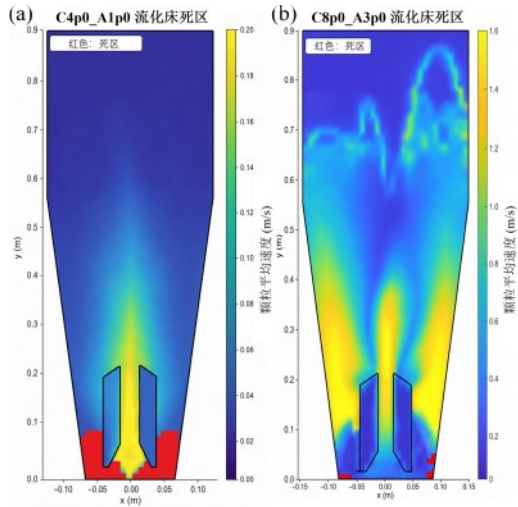


图 11 典型工况下 $z=7.5$ mm 截面的流场和死区分布 (红色区域为死区): (a) C4p0_A1p0; (b) C8p0_A3p0

Fig. 11 Flow fields and dead-zone distributions at the $z = 7.5$ mm cross-section under typical conditions (red regions denote dead zones): (a) C4p0_A1p0; (b) C8p0_A3p0

据 2.2 节建立的综合评价指标计算了 I_{CRH} 数值, 如图 12 和表 6 所示。可以看出 $U_c=7.5$ m/s、 $U_a=3.0$ m/s 兼顾较小的死区面积、合理的包覆区有效停留占比和稳定循环, I_{CRH} 最高, 因此将该组合作为后续结构参数比较的冷态基准工况。

2.4 反应器结构参数对颗粒循环-包覆行为的影响

2.4.1 床底锥角 床底锥角连接中路、环路与底部回流区, 直接影响颗粒再入过程。为考察几何过渡作用, 在其余参数不变的条件下比较 0° (无锥角基

表 6 I_{CRH} 排名前 8 的气速组合

Table 6 Top 8 gas velocity combinations of I_{CRH} value

工况	CV_{cycle}	$\overline{t_{RTD}}/s$	R	I_{CRH}
C7p5_A3p0	0.550	0.227	7.99%	1.000
C8p0_A3p0	0.551	0.218	7.95%	0.976
C7p0_A3p0	0.554	0.240	8.17%	0.961
C6p5_A3p0	0.543	0.252	8.56%	0.949
C6p0_A3p0	0.553	0.255	8.54%	0.931
C6p5_A2p5	0.433	0.222	7.37%	0.901
C7p0_A2p5	0.431	0.211	7.28%	0.900
C7p5_A2p5	0.446	0.196	6.86%	0.888

注: 仅在本工况集合内归一化

准) 以及 10° 、 15° 和 20° 四种锥角。研究结果如图 13 所示。引入床底锥角后, 循环时间分布仍为单峰, 主峰位于约 2 s。与无锥角结构相比, $10^\circ \sim 20^\circ$ 锥角下的主峰位置变化较小, 仅峰高和长尾略有调整。 $\overline{t_{cycle}}$ 由无锥角时的 2.84 s 降低至有锥角结构下的 2.76 ~ 2.79 s, $\overline{n_{cir}}$ 则随锥角增大由 5.28 提高至 5.47。以 15° 锥角为例, 流化床死区已经被消除, 实验和模拟结果如图 14 所示。在 $10^\circ \sim 20^\circ$ 范围内, $\overline{t_{cycle}}$ 和 $\overline{n_{cir}}$ 的变化幅度均较小, 循环时间分布曲线也基本重合。该结果表明, 床底锥角的主要作用是改善底部几何过渡和局部再进入条件, 而非大幅提高整体循环强度。该趋势与导流构件通过改变几何过渡和循环路径来调节颗粒停留的已有结果一致^[32]。

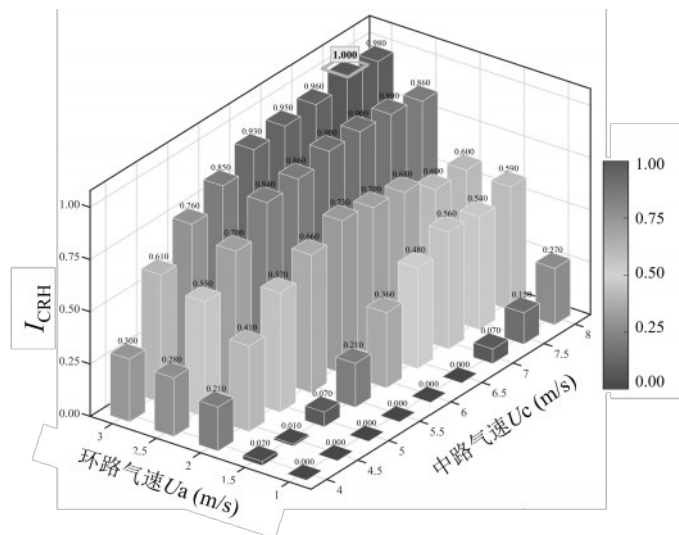


图 12 中路与环路气速组合的 I_{CRH} 分布

Fig. 12 I_{CRH} distribution for combinations of central and annulus gas velocities

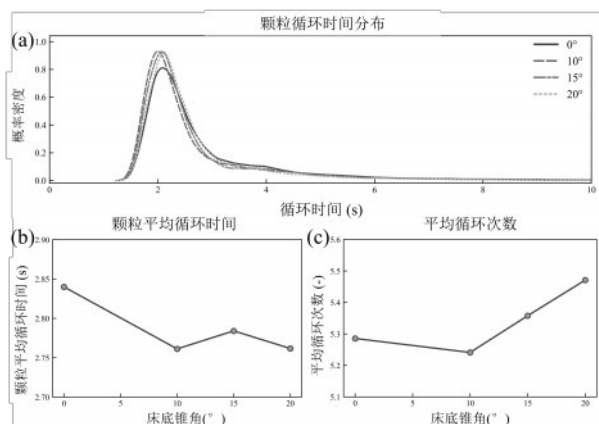


图13 床底锥角对颗粒循环特征参数的影响:(a)循环时间分布;(b)平均循环时间;(c)平均循环次数

Fig. 13 Effects of bottom cone angle on particle circulation characteristics: (a) circulation time distribution; (b) mean circulation time; (c) mean circulation count

颗粒包覆区停留时间分布如图15所示,不同锥角下的停留时间分布均集中在0.1~0.2 s,曲线基本重合。床底锥角由0°增大至20°时, $\overline{t_{\text{RTD}}}$ 由0.227 s增至0.281 s,而 φ_w 由5.15%增至5.40%,随后降至5.17%。这组相反变化说明,床底锥角改善底部回流再入后,单次停留略有增加,但包覆区瞬时颗粒

占有率变化不大。综上可以得出,15°锥角在缩小底部死区、维持连续循环和延长包覆区单次停留之间取得较好平衡,可作为后续结构比较的冷态基准。

2.4.2 底部间隙高度 底部间隙高度决定颗粒由环路返回中路时的有效通道面积和局部阻力。为分析其影响,研究10、15、20、25和30 mm五种间隙,结果如图16所示。根据结果可知,10 mm间隙下的循环时间分布主峰移向3.2~3.3 s,说明过窄通道限制了底部再入。15 mm间隙下的峰值位于约2.2~2.3 s;间隙增至20~30 mm后,峰值向短时间区移动,其中20 mm间隙的分布最集中。由此可见,底部间隙过窄和过宽均不利于循环一致性。

进一步定量分析可知10 mm间隙下 $\overline{t_{\text{cycle}}}$ 为3.68 s,15 mm间隙下 $\overline{t_{\text{cycle}}}$ 降至2.96 s,20 mm间隙下达到最小值2.78 s,25 mm间隙下 $\overline{t_{\text{cycle}}}$ 为2.85 s,30 mm间隙下 $\overline{t_{\text{cycle}}}$ 为3.26 s。10、15、20、25和30 mm间隙下的 $\overline{n_{\text{cir}}}$ 分别为4.10、5.01、5.35、5.11和4.37。20 mm间隙对应最短的平均循环时间和最高的平均循环次数,说明适中的底部间隙高度更有利于组织颗粒回流再入。

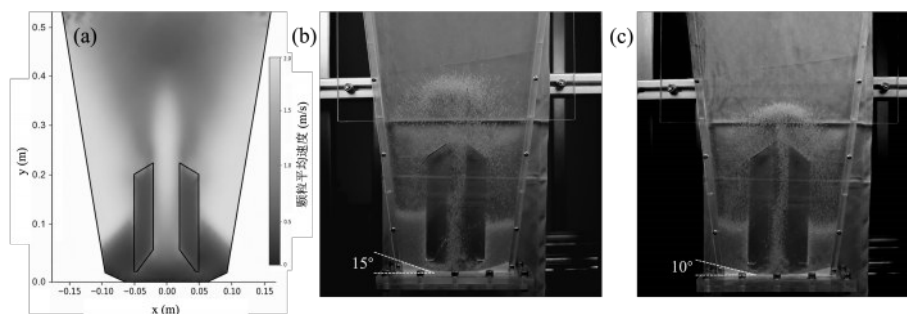


图14 床底锥角对死区消除和颗粒流型的影响:(a)15°锥角下的死区消除效果;(b)15°锥角下的颗粒流型实验结果;(c)10°锥角下的颗粒流型实验结果

Fig. 14 Effects of bottom cone angle on dead-zone elimination and particle flow patterns: (a) dead-zone elimination at 15°; (b) particle flow pattern at 15°; (c) particle flow pattern at 10°

包覆区停留时间分布如图17所示。10 mm间隙下的停留时间分布向0.75~1.25 s延伸。10、15、20、25和30 mm间隙下的 $\overline{t_{\text{RTD}}}$ 分别约为0.642、0.410、0.278、0.221和0.198 s; $\overline{t_{\text{RTD}}}$ 随间隙增大持续下降。过小间隙带来的长停留更可能包含通过受限和局部滞留贡献。10 mm间隙下较长的 $\overline{t_{\text{RTD}}}$ 并未对应更好的整体循环,表明单一停留指标受到局部滞留放大。20 mm间隙则在循环连续性和包覆区驻留之间保持相对均衡。

包覆区颗粒占比 φ_w 结果如图18所示。 φ_w 随底

部间隙增大而单调升高:10、15、20、25和30 mm间隙下分别为4.73%、4.91%、5.40%、5.81%和6.17%。然而,30 mm间隙同时表现为平均循环时间增大、循环次数降低和单次停留时间缩短。因此,较高 φ_w 并不等同于循环和停留行为同步改善,综合评价指标结果如表7所示,可见20 mm间隙的 I_{CRH} 最高,为考察范围内最佳底部间隙高度。

2.4.3 中心加热体高度 中心加热体高度改变颗粒在中路上升段的运动路径以及离开加热体顶部后的扩散空间。为比较路径长度与单次停留之间

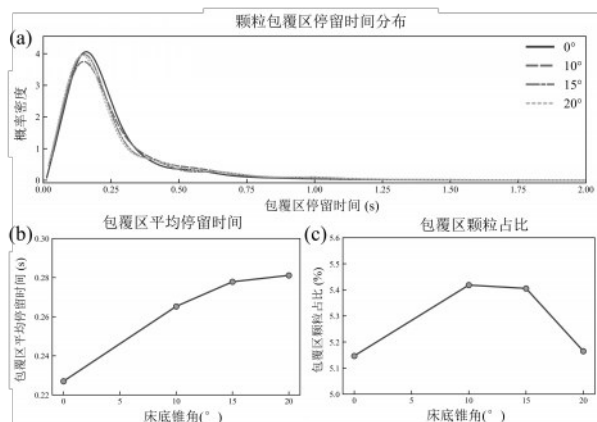


图15 床底锥角对包覆区(a)停留时间分布、(b)平均停留时间和(c)颗粒占比的影响

Fig. 15 Effects of bottom cone angle on (a) residence-time distribution, (b) mean residence time and (c) mean fraction of particles in the coating zone

的关系,本文比较10、15和20 cm三种工况,结果如图19所示。10 cm高度下的循环时间分布峰值位于约1.6~1.8 s;高度增至15和20 cm后,峰值分别移至约1.9~2.0 s和2.1~2.2 s。该变化表明,加热体升高延长了中心上升段和完整循环路径。进一步

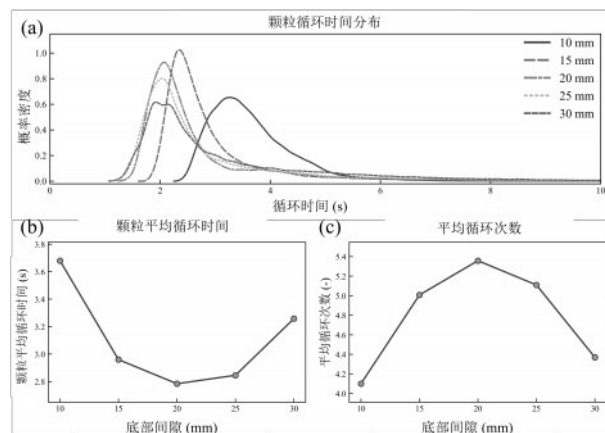


图16 底部间隙高度对(a)颗粒循环时间分布、(b)平均循环时间和(c)平均循环次数

Fig. 16 Effects of central-heating-element-to-bottom gap on (a) particle circulation time distribution, (b) mean circulation time, (c) mean circulation count

定量比较分析表明,10 cm高度下 $\overline{t_{\text{cycle}}}$ 最低,约为2.15 s,15 cm高度下 $\overline{t_{\text{cycle}}}$ 约为2.45 s,20 cm高度下约为2.78 s;10、15和20 cm高度下的 $\overline{n_{\text{cir}}}$ 分别约为7.40、6.30和5.35。随着高度增加,循环路径延长,单位时间内的循环次数相应降低。

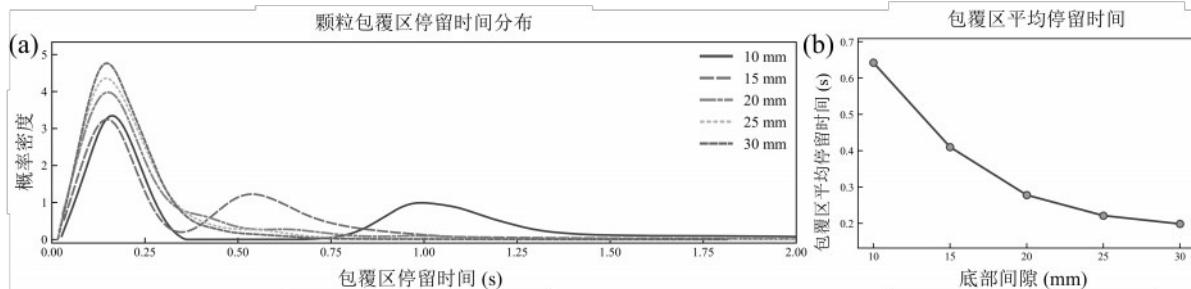


图17 底部间隙高度对(a)包覆区停留时间分布和(b)平均停留时间的影响

Fig. 17 Effects of central-heating-element-to-bottom gap on (a) residence-time distribution and (b) mean residence time in the coating zone

颗粒包覆区停留时间分布如图20所示。10 cm高度下包覆区停留时间分布峰值位于约0.06~0.18 s, $\overline{t_{\text{RTD}}}$ 仅为约0.172 s;15 cm高度下,峰值位于约0.10~0.22 s, $\overline{t_{\text{RTD}}}$ 升至约0.220 s;20 cm高度下,峰值位于约0.18~0.30 s, $\overline{t_{\text{RTD}}}$ 增至约0.278 s。相应地, φ_w 也随中心加热体高度升高而增加,由10 cm时的约2.41%提高至15 cm时的约3.95%,并在20 cm时达到约5.40%。这表明较高中心加热体能够延长颗粒在包覆区内的运动路径,提高包覆区内颗粒占有率和单次接触时间。

10 cm中心加热体高度对应更短的循环时间和

更多循环次数,但包覆区停留时间和 φ_w 较低;20 cm中心加热体高度则以较长的循环时间换取更长的单次停留和更高的包覆区颗粒占比。因此选取20 cm作为考察范围内最优中心加热体高度。

以上研究结果基于冷态颗粒循环与停留行为,适用于直径2 mm、密度2.6 g/cm³玻璃珠和拟二维冷态装置。然而热态条件下的热工水力特性需要考虑温度和物性变化^[33,34],后续需引入床层温度场和三维反应器放大。此外,TRISO颗粒包覆过程中,包覆层的连续沉积会改变颗粒性质,进而影响颗粒受力和流化,需要进一步耦合CVD反应动力学和颗粒

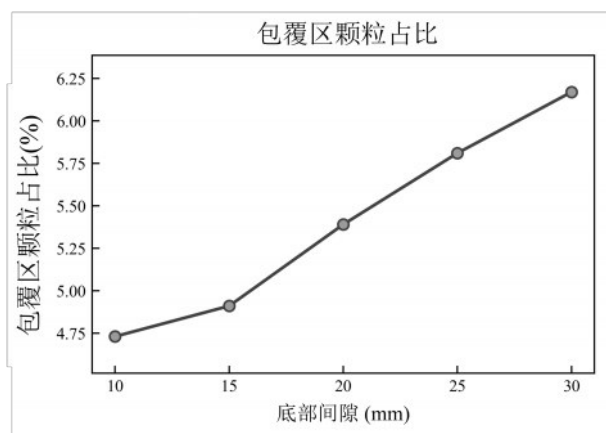


图 18 底部间隙高度对包覆区颗粒占比的影响

Fig. 18 Effects of central-heating-element-to-bottom gap on mean fraction of particles in the coating zone

表 7 不同底部间隙的 I_{CRH} Table 7 I_{CRH} values at different bottom gaps

工况	CV_{cycle}	$\overline{t_{RTD}}/s$	R	I_{CRH}
10mm_Gap	0.685	0.642	17.45%	0.000
15mm_Gap	0.413	0.410	13.86%	0.568
20mm_Gap	0.552	0.278	9.98%	1.000
25mm_Gap	0.552	0.221	7.77%	0.229
30mm_Gap	0.613	0.198	6.09%	0.122

注:仅在本工况集合内归一化

表面沉积模型,使颗粒属性随沉积动态更新^[35-37]。近期美国橡树岭实验室开展的喷动流化床-化学气相沉积(SFB-CVD)研究,将室温粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)获得的流动特征与实验室尺度SFB-CVD制备的热解炭包覆层性能相关联,为建立冷态流动结构与热态沉积质量之间的联系提供了参考^[38]。本研究后续应进一步分析冷态 I_{CRH} 与包覆层质量之间的对应关系。只有冷态循环-包覆评价与热态包覆质量建立可验证联系后,该内加热-外循环FB-CVD反应器的结构参数和操作窗口才能进一步用于放大设计。

3 结论

本文采用冷态实验与CFD-DEM数值模拟相结合的方法,研究了新型内加热-外循环颗粒包覆流化床中操作参数和结构参数对颗粒循环-包覆行为的影响。主要结论如下。

1. 本文提出的新型内加热-外循环颗粒包覆流化床,能在冷态条件下形成“中心上升-顶部扩散-环隙下降-底部回流”的颗粒循环路径。中心加热

体不仅可组织颗粒循环,也为后续在颗粒循环路径中引入内部热量输入提供了结构基础。

2. 本文采用的CFD-DEM方法可以定量捕捉颗粒循环、包覆区停留时间等关键参量,据此提出FB-CVD颗粒包覆流化综合评价指标,可以用于包覆工艺中流态化状态的参数评估。

3. 中路气速和环路气速对颗粒循环具有互补作用。 U_c 主要控制中心上升夹带, U_a 主要改善环隙下降和底部再进入过程。 $U_c=7.5$ m/s、 $U_a=3.0$ m/s为本文考察范围内最佳操作气速。

4. 结构参数的影响均呈现非单调趋势。 15° 床底锥角可减小底部滞留并维持连续回流;20 mm底部间隙在循环时间、循环次数和包覆区停留之间取得较好平衡;20 cm中心加热体高度虽延长循环时间并降低循环频率,但提高了包覆区单次停留时间和颗粒占比,为本文考察范围内冷态最佳结构参数。

5. 本文给出的最佳结构和操作参数针对的是当前颗粒物性和反应器几何条件下拟二维冷态系统,实际热态条件下的包覆工艺参数选择仍需通过三维模拟及传热、反应与沉积实验进一步验证。

符号说明

- A_{DZ} ——流化床死区面积比, %
- C_D ——曳力系数
- CV_{cycle} ——颗粒循环时间变异系数
- D_a ——环路进气通道宽度, mm
- D_c ——床体宽度, mm
- D_i ——床底宽度, mm
- D_s ——中路进气通道宽度, mm
- d_p ——颗粒直径, m
- $F_{d,i}$ ——气相作用于颗粒 i 的曳力, N
- $F_{n,j}$ ——颗粒 i 与接触对象 j 之间的法向接触力, N
- $F_{t,j}$ ——颗粒 i 与接触对象 j 之间的切向接触力, N
- f_{nc} ——计算时间内未完成循环的颗粒比例, %
- g ——重力加速度矢量, $m \cdot s^{-2}$
- H_c ——锥形段高度, mm
- I ——单位张量
- I_{CRH} ——循环-包覆综合评价指标
- I_{CT} ——颗粒包覆一致性评价指标
- I_i ——颗粒 i 的转动惯量, $kg \cdot m^2$
- I_{PF} ——颗粒循环一致性评价指标
- L ——床体厚度, mm
- M_{ij} ——切向接触力产生的力矩, $N \cdot m$
- m_i ——颗粒 i 的质量, kg

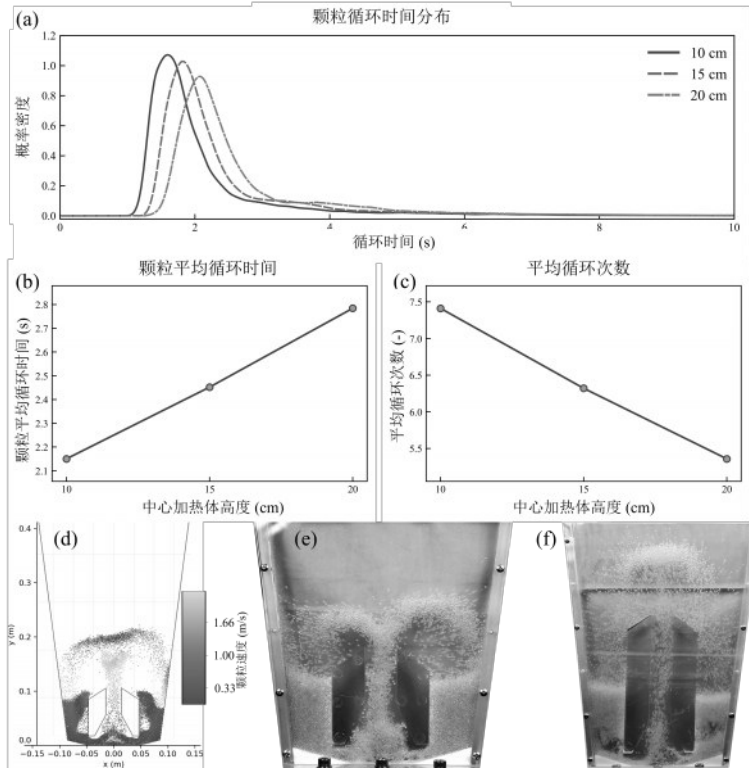


图19 中心加热体高度对颗粒循环和流化行为的影响:(a)循环时间分布;(b)平均循环时间;(c)平均循环次数;(d)10 cm模拟流型;(e)10 cm实验流型;(f)20 cm实验流型

Fig. 19 Effects of central heating element height on particle circulation and fluidization behaviors: (a) circulation time distribution; (b) mean circulation time; (c) mean circulation count; (d) simulation flow pattern at 10 cm; (e) experimental flow pattern at 10 cm; (f) experimental flow pattern at 20 cm

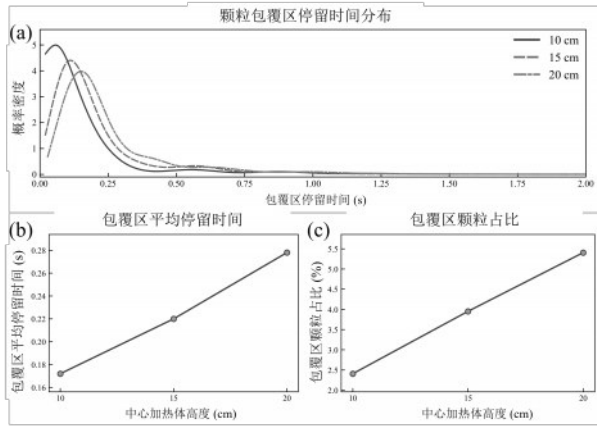


图20 中心加热体高度对包覆区(a)停留时间分布、(b)平均停留时间和(c)颗粒占比的影响

Fig. 20 Effects of central heating element height on (a) residence-time distribution, (b) mean residence time and (c) mean fraction of particles in the coating zone

N_{cycle} ——有效循环事件数
 $N_{\text{no-cycle}}$ ——模拟时间内未完成循环的颗粒数
 N_{RTD} ——有效包覆区停留事件数
 N_{total} ——颗粒总数
 $\overline{n_{\text{cir}}}$ ——计算时间内单颗粒平均循环次数

p ——气相压力, Pa
 R ——平均包覆区停留时间与平均循环时间之比, %
 Re_p ——颗粒 Reynolds 数
 S_{cir} ——颗粒平均循环次数的归一化得分
 S_{cycle} ——颗粒平均循环时间的归一化得分
 S_{CV} ——颗粒循环时间变异系数的归一化得分
 S_{DZ} ——流化床死区面积比的归一化得分
 S_{nc} ——未循环颗粒占比的归一化得分
 S_p ——颗粒相对气相的动量源项, $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$
 S_R ——包覆时间占比的归一化得分
 S_{RTD} ——颗粒平均包覆区停留时间的归一化得分
 S_{φ} ——包覆区颗粒占比的归一化得分
 t ——时间, s
 t_{cycle} ——颗粒单次循环时间, s
 $\overline{t_{\text{cycle}}}$ ——颗粒平均循环时间, s
 t_{RTD} ——颗粒单次包覆区停留时间, s
 $\overline{t_{\text{RTD}}}$ ——颗粒平均包覆区停留时间, s
 U_a ——环路气速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 U_c ——中路气速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 $\mathbf{u}_g$ ——气相速度矢量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 V_{cell} ——CFD 网格单元体积, m^3

$V_{i,cell}$ ——颗粒 i 在 CFD 网格单元内所占体积, m^3
 $V_{p,i}$ ——颗粒 i 的体积, m^3
 $\mathbf{v}_i$ ——颗粒 i 的平动速度矢量, $m \cdot s^{-1}$
 $\overline{v_p}$ ——颗粒平均速度, $m \cdot s^{-1}$
 W_b ——中心加热体底部宽度, mm
 W_c ——中心加热体高度, cm
 W_g ——中心加热体底部间隙高度, mm
 W_r ——中心加热体上升区宽度, mm
 W_w ——中心加热体宽度, mm
 x ——横向坐标, m
 y ——竖直坐标, m
 z ——床体厚度方向坐标, mm
 α ——中心加热体顶角, $^\circ$
 β ——气固相间动量交换系数, $kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$
 γ ——床底锥角, $^\circ$
 ε_g ——局部气相空隙率, —
 λ_g ——气体体积黏度, $Pa \cdot s$
 μ_g ——气体动力黏度, $Pa \cdot s$
 ρ_g ——气体密度, $kg \cdot m^{-3}$
 $\sigma(t_{cycle})$ ——颗粒单次循环时间的标准差, s
 τ_g ——气相应力张量, Pa
 φ_w ——包覆区颗粒占比, %
 ω_i ——颗粒 i 的角速度矢量, $rad \cdot s^{-1}$
下角标
 cell——CFD 网格单元
 cir——循环次数
 CRH——循环-包覆综合评价指标标识
 CT——颗粒包覆一致性评价指标标识
 CV——变异系数
 cycle——颗粒循环事件
 i ——颗粒编号, $i = 1, 2, \dots$
 j ——与颗粒 i 接触的颗粒或壁面编号
 p——颗粒或颗粒相
 PF——颗粒循环一致性评价指标标识
 RTD——包覆区停留时间

参考文献

- [1] Verfondern K, Nabielek H, Kendall J M. Coated particle fuel for high temperature gas cooled reactors[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2007, **39**(5): 603–616.
- [2] Snead L L, Nozawa T, Katoh Y, et al. Handbook of SiC properties for fuel performance modeling[J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, **371**(1/2/3): 329–377.
- [3] Liu M L, Liu R Z, Liu B, et al. Preparation of the coated nuclear fuel particle using the fluidized bed-chemical vapor deposition (FB-CVD) method[J]. Procedia Engineering, 2015, **102**: 1890–1895.
- [4] Liu R Z, Liu M L, Chang J X, et al. An improved design of TRISO particle with porous SiC inner layer by fluidized bed-chemical vapor deposition[J]. Journal of Nuclear Materials, 2015, **467**: 917–926.
- [5] Li L, Rasmuson A, Ingram A, et al. PEPT study of particle cycle and residence time distributions in a Wurster fluid bed[J]. AIChE Journal, 2015, **61**(3): 756–768.
- [6] Li L, Remmelgas J, van Wachem B G M, et al. Residence time distributions of different size particles in the spray zone of a Wurster fluid bed studied using DEM-CFD[J]. Powder Technology, 2015, **280**: 124–134.
- [7] Jiang Z C, Bück A, Tsotsas E. CFD – DEM study of residence time, droplet deposition, and collision velocity for a binary particle mixture in a Wurster fluidized bed coater[J]. Drying Technology, 2018, **36**(6): 638–650.
- [8] Crites T, Turton R. Mathematical model for the prediction of cycle-time distributions for the Wurster column-coating process [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2005, **44**(14): 5397–5402.
- [9] Altzibar H, Lopez G, Estiati I, et al. Particle cycle times and solid circulation rates in conical spouted beds with draft tubes of different configuration[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, **52**(45): 15959–15967.
- [10] Guo J N, Liu D Y, Ma J L, et al. Particle circulation and coating in a Wurster fluidized bed under different geometries[J]. Powder Technology, 2024, **433**: 119223.
- [11] Plawsky J L, Littman H, Paccione J D. Design, simulation, and performance of a draft tube spout fluid bed coating system for aerogel particles[J]. Powder Technology, 2010, **199**(2): 131–138.
- [12] KuShaari K, Pandey P, Song Y X, et al. Monte Carlo simulations to determine coating uniformity in a Wurster fluidized bed coating process[J]. Powder Technology, 2006, **166**(2): 81–90.
- [13] Rieck C, Bück A, Tsotsas E. Monte Carlo modeling of fluidized bed coating and layering processes[J]. AIChE Journal, 2016, **62** (8): 2670–2680.
- [14] Luštrik M, Šibanc R, Srčič S, et al. Characteristics of pellet flow in a Wurster coater draft tube utilizing piezoelectric probe[J]. Powder Technology, 2013, **235**: 640–651.
- [15] Luštrik M, Dreu R, Šibanc R, et al. Comparative study of the uniformity of coating thickness of pellets coated with a conventional Wurster chamber and a swirl generator-equipped Wurster chamber[J]. Pharmaceutical Development and Technology, 2012, **17**(3): 268–276.
- [16] Hampel N, Bück A, Peglow M, et al. Continuous pellet coating in a Wurster fluidized bed process[J]. Chemical Engineering Science, 2013, **86**: 87–98.
- [17] Šibanc R, Srčič S, Dreu R. Numerical simulation of two-phase flow in a Wurster coating chamber and comparison with experimental results[J]. Chemical Engineering Science, 2013, **99**: 225–237.
- [18] Jiang Z C, Rieck C, Bück A, et al. Modeling of inter- and intra-particle coating uniformity in a Wurster fluidized bed by a coupled CFD-DEM-Monte Carlo approach[J]. Chemical Engineering Science, 2020, **211**: 115289.
- [19] Börner M, Bück A, Tsotsas E. DEM-CFD investigation of particle residence time distribution in top-spray fluidised bed granulation [J]. Chemical Engineering Science, 2017, **161**: 187–197.
- [20] Tsuji Y, Kawaguchi T, Tanaka T. Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed[J]. Powder Technology, 1993, **77**

- (1): 79–87.
- [21] Deen N G, Van Sint Annaland M, Van der Hoef M A, et al. Review of discrete particle modeling of fluidized beds[J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, **62**(1/2): 28–44.
- [22] van der Hoef M A, van Sint Annaland M, Kuipers J A M. Computational fluid dynamics for dense gas – solid fluidized beds: A multi-scale modeling strategy[J]. *Chemical Engineering Science*, 2004, **59**(22/23): 5157–5165.
- [23] Kloss C, Goniva C. LIGGGHTS – open source discrete element simulations of granular materials based on LAMMPS[C]// *Supplemental Proceedings: Materials Fabrication, Properties, Characterization, and Modeling*. New York, USA: John Wiley & Sons, Ltd., 2011: 781–788.
- [24] Hager A, Kloss C, Goniva C. Combining open source and easy access in the field of DEM and coupled CFD–DEM: LIGGGHTS®, CFDEM®coupling and CFDEM®workbench[M]// *28th European Symposium on Computer Aided Process Engineering*. Amsterdam: Elsevier, 2018: 1699–1704.
- [25] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. *Géotechnique*, 1979, **29**(1): 47–65.
- [26] Wen C Y, Yu Y H. A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity[J]. *AIChE Journal*, 1966, **12**(3): 610–612.
- [27] Ergun S, Orning A A. Fluid flow through randomly packed columns and fluidized beds[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1949, **41**(6): 1179–1184.
- [28] Gidaspow D. *Multiphase flow and fluidization: Continuum and kinetic theory descriptions*[M]. San Diego; New York; Boston; London: Academic Press, 1994.
- [29] Li H, Liu D Y, Ma J L, et al. Influence of cycle time distribution on coating uniformity of particles in a spray fluidized bed by using CFD–DEM simulations[J]. *Particuology*, 2023, **76**: 151–164.
- [30] Sánchez-Prieto J, Soria-Verdugo A, Briongos J V, et al. Stagnant regions estimation in fluidized beds from bed surface observation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, **281**: 109–118.
- [31] Vafaei N, Ribeiro R A, Camarinha-Matos L M. Normalization techniques for multi-criteria decision making: Analytical hierarchy process case study[C]// *Technological Innovation for Cyber-Physical Systems*. Cham: Springer International Publishing, 2016: 261–269.
- [32] 邓爱明, 何玉荣, 唐天琪. 含导流板喷雾流化床内颗粒包覆过程热质传递特性模拟研究[J]. *化工学报*, 2026, **77**(4): 1742–1754.
- Deng A M, He Y R, Tang T Q. Numerical study on heat and mass transfer characteristics of particle coating in a spray fluidized bed with draft plates[J]. *CIESC Journal*, 2026, **77**(4): 1742–1754.
- [33] Korkerd K, Soanuch C, Zhou Z Y, et al. Correlation for predicting minimum fluidization velocity with different size distributions and bed inventories at elevated temperature in gas–solid fluidized bed [J]. *Advanced Powder Technology*, 2022, **33**(3): 103483.
- [34] Sau D C, Mohanty S, Biswal K C. Minimum fluidization velocity at elevated temperature in tapered fluidized bed[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2008, **47** (12): 2391–2394.
- [35] Wood B J, Sanjurjo A, Tong G T, et al. Coating particles by chemical vapor deposition in fluidized bed reactors[J]. *Surface and Coatings Technology*, 1991, **49**(1/2/3): 228–232.
- [36] Petti D A, Buongiorno J, Maki J T, et al. Key differences in the fabrication, irradiation and high temperature accident testing of US and German TRISO-coated particle fuel, and their implications on fuel performance[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2003, **222**(2/3): 281–297.
- [37] Yan Z F, Jiang L, Tian Y, et al. Multi-scale study of fluidized bed-chemical vapour deposition process in nuclear fuel coated particle fabrication for high-temperature gas-cooled reactor: A review[J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2025, **103**(4): 1502–1517.
- [38] Conry B, Montoya K I, Heldt R S, et al. Linking spout fluidization hydrodynamics to pyrolytic carbon deposition characteristics in a fluidized bed chemical vapor deposition reactor[J]. *Chemical Engineering Science*, 2026, **334**: 124319.