

文章编号:1001-2060(2024)03-0150-08

二次进气角度对流化床接收器中颗粒流动特性的影响

朱子昂¹, 朱丽云¹, 李安俊², 王振波¹

(1. 中国石油大学(华东) 新能源学院, 山东 青岛 266580; 2. 山东科技大学 机械电子工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:为了探究不同二次进气角度对流化床太阳能颗粒接收器内颗粒流动特性的影响,采用了欧拉-欧拉双流体模型与非均质过滤曳力模型(filtered)耦合的数值计算方法,数值模拟了30°,45°和60°3种二次进气角度下接收器内颗粒浓度及颗粒速度的分布。结果表明:与均匀曳力模型(Gidaspow和Wen-Yu)相比,非均质过滤曳力模型计算结果与实验结果具有较好的一致性;在3种二次进气角度下,颗粒沿径向均呈现出边壁附近的颗粒体积分数高于中心区域的“环-核”非均匀径向分布,且两侧壁面的颗粒流向中心区域形成循环,同时伴随着颗粒团聚现象;相比于二次进气角度30°和60°,当二次进气角度为45°时,二次进气入口截面颗粒分布相对均匀,且不存在颗粒返混回二次进气入口的现象。

关键词:流化床颗粒接收器;气固两相流动;二次风入口;数值模拟

中图分类号:TK513 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2024.03.019

[引用本文格式]朱子昂,朱丽云,李安俊,等.二次进气角度对流化床接收器中颗粒流动特性的影响[J].热能动力工程,2024,39(3):150-157. ZHU Zi-ang, ZHU Li-yun, LI An-jun, et al. Influence of secondary aeration angle on particle flow characteristics inside fluidized bed particle receivers[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(3): 150-157.

Influence of Secondary Aeration Angle on Particle Flow Characteristics inside Fluidized Bed Particle Receivers

ZHU Zi-ang¹, ZHU Li-yun¹, LI An-jun², WANG Zhen-bo¹

(1. College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao, China, Post Code: 266580;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong University of Science and Technology,
Qingdao, China, Post Code: 266590)

Abstract: In order to investigate the influence of different secondary aeration angles on the particle flow characteristics inside solar fluidized bed particle receivers, a numerical calculation method that couples the Eulerian-Eulerian two-fluid model with a heterogeneous filtered drag force model was employed to simulate the distribution of particle concentration and velocity in the receiver under the three secondary aeration angles of 30°, 45° and 60°. The results indicate that compared with the homogeneous drag models (Gidaspow and Wen-Yu), the calculation result filtered drag model agrees well with the experimental result; under the three secondary aeration angles, the particles in the receiver exhibits the “core-annular” heterogeneous radial distribution with dilute center and dense wall in the receiver, and particles on the sidewalls circulate towards the central area, demonstrating significant particle aggregation; when the secondary aeration angle is 45°, compared to the aeration angle of 30° and 60°, the particle distribution on

收稿日期:2023-07-27; 修订日期:2023-08-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51806248)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (51806248)

作者简介:朱子昂(2000-),男,中国石油大学(华东)硕士研究生。

通信作者:朱丽云(1987-),女,中国石油大学(华东)副教授。

the section of inlet of the secondary aeration region exhibits greater uniformity, without particle back-mixing to the aeration inlet.

Key words: fluidized bed particle receivers, gas-solid two phase flow, secondary aeration inlet, numerical simulation

引言

太阳能塔式发电技术(STP)是一种效率高、储热性能好的太阳能发电技术,它利用定日镜将太阳光反射聚集到中央接收器上,再通过传热流体将太阳辐射能转化为热能^[1],然后直接或间接加热水产生蒸汽来驱动汽轮机发电。近年来,STP由于其高效率、低运行成本和可规模化的发展潜力等优点而迅速发展^[2-3]。STP系统中的传热流体主要有空气、熔融盐、蒸汽和颗粒。其中,颗粒作为传热介质具有耐高温性、密封性要求不高、热损失小、成本低和储热时间长等优点。因此,采用固体颗粒作为传热介质的太阳能吸热器,在STP领域具有广阔的发展前景。在颗粒吸热器的诸多应用中,相比于幕帘式^[4-5]、气固逆流式^[6-7]和水平式流化床^[8-11]等其他类型颗粒接收器,流化床颗粒接收器具有以下优点:(1)壁面对床层的传热系数较大,颗粒混合均匀,出口温度较高;(2)采用鼓泡态可以减少流化气体的使用,进而减小能量损失;(3)通过调节流化气速,可以更容易地控制颗粒流量。

流化床颗粒接收器最先由Flamant等人^[12]提出,实验采用透明管道,压缩空气从底部流化,结果表明,其传热效率在20%~40%范围内。在后续对上升式鼓泡流化床接收器的研究过程中,Flamant等人^[13-14]采用SiC颗粒作为介质,进行了单管的中低温实验以及高温实验,实验结果表明,颗粒出口温度为450~600 K,颗粒体积分数为0.25~0.35,壁面与床层的传热系数达到了500 W/(m²·K)。由此可见,太阳能颗粒接收器的传热效率与颗粒的流动方式及接收器内颗粒分布密切相关。颗粒接收器内气固流动状态与流化速度^[15]和颗粒循环量^[16]等操作参数有关。另外,当改变流化床接收器的送风结构,其内部气固流动状态也会发生变化^[17-18]。但是,在实验中为了确保颗粒持续稳定流动、便于颗粒团聚^[19],加装了二次进气结构,但涉及到二次进气角

度对流动的影响没有被细致研究。

本文在Boissiere等人^[20]的实验基础上,基于欧拉-欧拉方法,采用双流体模型和过滤曳力模型对不同进气角度下流化床颗粒接收器内气固流动状态及其颗粒团聚行为进行研究,深入分析二次进气对接收器内气固流动行为的影响,以期为气固流化床颗粒接收器的设计、优化和改进提供参考。

1 数值模型及参数设定

1.1 几何模型及网格划分

参考Boissiere等人^[20]的实验装置建立流化床颗粒接收器模型,并且为了降低计算成本,只计算单根提升管,具体模型结构及尺寸如图1所示。为了探究二次进气角度对颗粒分布的影响,在0.5~2.0 m的不同轴向位置处以及二次进风入口共设置5组不同位置采样点。

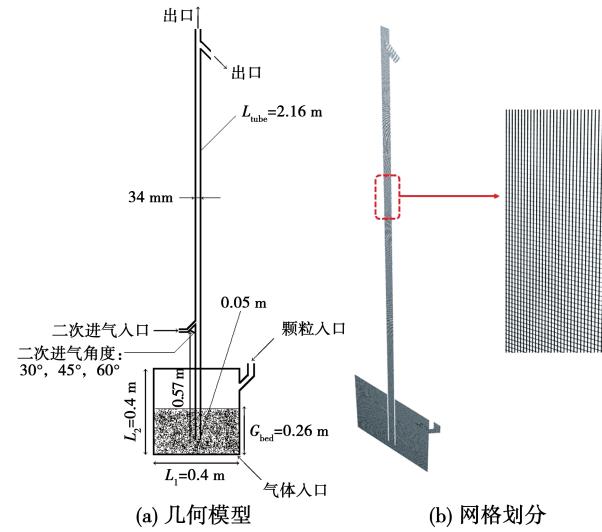


图1 流化床颗粒接收器几何模型及网格划分

Fig. 1 Geometric model and mesh division of fluidized bed particle receivers

管长2.16 m,管径34 mm,管口与流化床底部的距离为5 cm。底部为矩形鼓泡流化床,截面积0.4 m×0.4 m,宽度为0.32 mm,在沿管高0.57 m处设置一直径为1.5 mm的二次风入口。采用

ANASY FLUENT 19.2 软件中的 Meshing 对计算模型进行网格划分。

1.2 数学模型

欧拉 - 欧拉双流体模型包含了两相的质量、动量和能量守恒方程。

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \mathbf{u}_g) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \mathbf{u}_s) = 0 \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_g, \varepsilon_s$ — 气、固相体积分数; ρ_g, ρ_s — 气、固相密度, kg/m^3 ; $\mathbf{u}_g, \mathbf{u}_s$ — 气、固相速度矢量, m/s 。

单元体内气相和固相的体积分数之和为 1, 公式为:

$$\varepsilon_s + \varepsilon_g = 1 \quad (3)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g \mathbf{u}_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \mathbf{u}_g \mathbf{u}_g) = -\varepsilon_g \nabla p_g + \varepsilon_g \rho_g g$$

$$+ \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_g + \beta_{gs}(\mathbf{u}_s - \mathbf{u}_g) \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s \mathbf{u}_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \mathbf{u}_s \mathbf{u}_s) = -\varepsilon_s \nabla p_s + \varepsilon_s \rho_s g$$

$$+ \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_s + \beta_{gs}(\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_s) \quad (5)$$

式中: p — 压力, Pa ; g — 重力加速度, m/s^2 ; β_{gs} — 气固交换系数; $\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}$ — 增加的源项; $\boldsymbol{\tau}_g, \boldsymbol{\tau}_s$ — 气相和固相的应力张量。

颗粒动力学理论 (KTGF) 方程:

$$\boldsymbol{\tau}_g = \varepsilon_g \boldsymbol{\mu}_g (\nabla \mathbf{u}_g + \nabla \mathbf{u}_g^T) + \varepsilon_g \left(\lambda_g - \frac{2}{3} \mu_g \right) (\nabla \cdot \mathbf{u}_g) \mathbf{I} \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\tau}_s = \varepsilon_s \boldsymbol{\mu}_s (\nabla \mathbf{u}_s + \nabla \mathbf{u}_s^T) + \varepsilon_s \left(\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) (\nabla \cdot \mathbf{u}_s) \mathbf{I}$$

$$(7)$$

式中: \mathbf{I} — 单位应力张量; $\boldsymbol{\mu}_g, \boldsymbol{\mu}_s$ — 气相和固相的剪切粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; λ_g, λ_s — 气相和固相体积粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

颗粒温度方程:

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s \Theta) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \mathbf{u}_s \Theta) \right] =$$

$$(-\nabla p_s \mathbf{I} + \boldsymbol{\tau}_s) : \nabla \mathbf{u}_s + \nabla \cdot (k_s \nabla \Theta) - \gamma_s + \varphi_{gs} \quad (8)$$

式中: Θ — 颗粒湍动的动能, m^2/s^2 ; γ_s — 能量的碰撞耗散; φ_{gs} — 气固两相之间的能量交换; k_s — 能量耗散。

过滤 (filtered) 黏力模型:

$$\beta_{\text{Filtered}} = (1 - H_{\text{3D}}^{\text{two}}) \beta_{\text{gs}, \text{micro}} \quad (9)$$

$$\beta_{\text{gs}, \text{micro}} = \frac{3}{4} C_D \frac{\varepsilon_s \varepsilon_g \rho_g | \mathbf{u}_g - \mathbf{u}_s |}{d_s} \varepsilon_g^{-2.65} \quad (10)$$

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{\varepsilon_g Re} [1 + 0.15(\varepsilon_g Re^{0.687})], & Re < 1000 \\ 0.44, & Re > 1000 \end{cases} \quad (11)$$

式中: β_{Filtered} — 黏力系数; $\beta_{\text{gs}, \text{micro}}$ — 微观黏力系数; $(1 - H_{\text{two}}^{\text{3D}})$ — 黏力修正系数, $H_{\text{two}}^{\text{3D}}$ — 气相体积分数和无量纲滑移速度的函数; C_D — 阻力系数; d_s — 固相颗粒直径, mm 。

1.3 边界条件和数值算法

模拟介质颗粒相为 SiC 颗粒, 流化气体为空气, 流体物性及相关参数设置见表 1。采用速度入口边界条件并给定进口速度以及颗粒相的体积分数; 壁面边界条件为气体无滑移、颗粒滑移系数为 0.85; 出口采用压力出口边界条件。采用 SIMPLE 算法建立相间耦合关系, 压力插补格式选用 PRESTO!, 差分选择 QUIK 格式。

表 1 数值求解过程参数设定

Tab. 1 Parameters setting in numerical solution process

参 数	数 值
颗粒粒径/mm	0.064
颗粒密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	3 210
初始堆料颗粒体积分数	0.43
气体粘度/ $\text{Pa} \cdot \text{s}$	1.8×10^{-5}
气体密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1.225
流化风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.12
时间步长/s	0.000 1

1.4 数值模拟结果验证

1.4.1 模型验证

图 2 为不同黏力模型下时均颗粒体积分数轴向分布模拟结果与实验结果^[21] 的对比。由图可知, 与均质黏力模型 (Gidaspow 和 Wen-Yu) 相比, filtered 黏力模型的模拟结果与实验结果有更好的一致性, 说明可以采用 filtered 黏力模型来准确预测接收器内颗粒轴向分布。

1.4.2 网格无关性验证

为了减少计算误差, 选取 25 558, 56 310, 100 366, 224 592, 352 519 共 5 组不同数量网格下的颗粒平均体积分数分布, 来检验网格数量对计算结果的影

响,具体情况如表2所示。

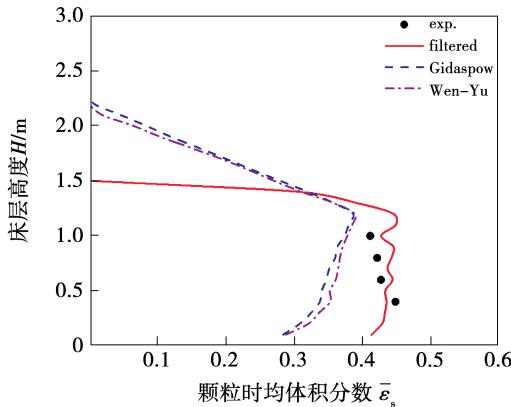


图2 不同曳力模型和实验颗粒时均体积分数对比

Fig. 2 Comparison between simulation result and experimental result of time-averaged particle volume fraction of different drag models

表2 网格无关性验证

Tab. 2 Mesh independence verification

网格数量	网格尺寸/mm	颗粒时均体积分数
25 558	3 × 3	0.358 19
56 310	2 × 2	0.371 11
100 366	1.5 × 1.5	0.384 22
224 592	1 × 1	0.390 45
352 519	0.8 × 0.8	0.392 73

图3 为颗粒平均体积分数随网格数的变化图。

由图3可知,随着网格数量增加,颗粒平均体积分数先快速增大,当网格数量大于224 592后平均体积分数基本不变。考虑计算时间及成本,最终选择网格数为224 592。

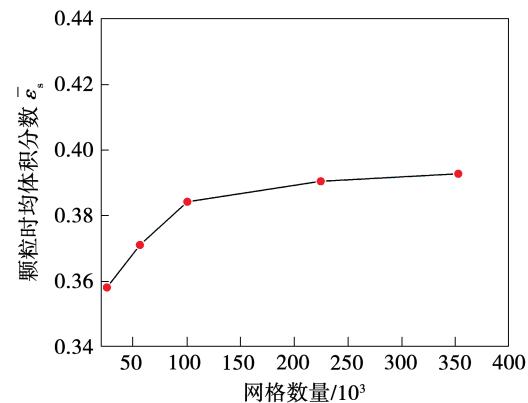


图3 颗粒时均体积分数 $\bar{\varepsilon}_s$ 随不同

网格数下的变化
Fig. 3 Variation of time-averaged particle volume fraction $\bar{\varepsilon}_s$ with different numbers of meshes

2 气固流动特性

2.1 瞬时颗粒体积分数分布

图4为不同二次进气角度下18 s ~ 20 s时间段内接收器中颗粒体积分数分布。

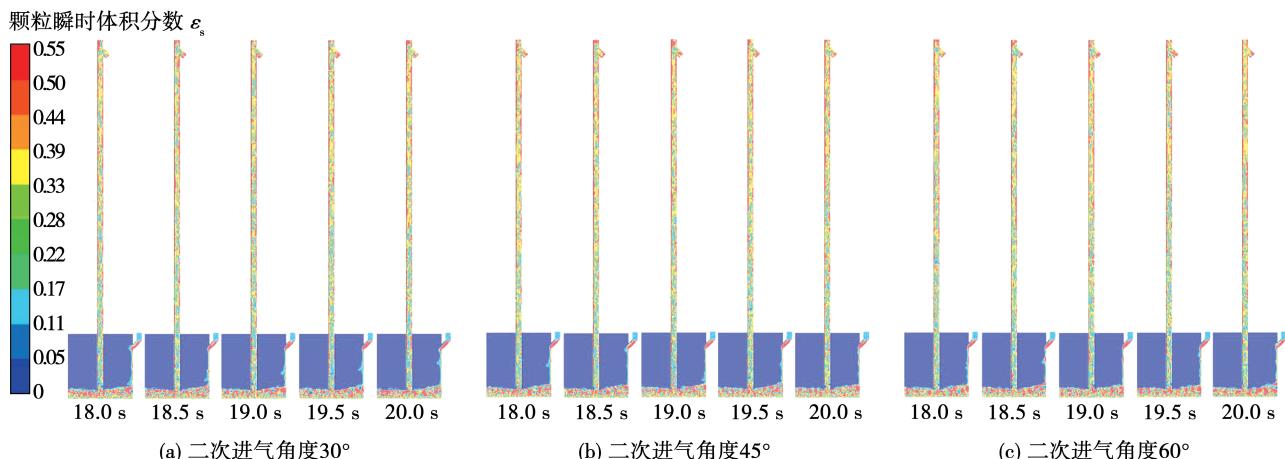


图4 在18 ~ 20 s内接收器中颗粒瞬时体积分数分布

Fig. 4 Distributions of particle volume fraction in receiver from 18 s to 20 s

由图 4 可知,在接收器内颗粒以稀疏相和团聚物形式共存。在径向方向上,颗粒在接收器内呈现明显的不均匀分布;在中心区域,颗粒以稀疏相形式为主,颗粒体积分数较小;由于边壁效应,颗粒以团聚物形式聚集在边壁区,边壁区颗粒体积分数较大,且当团聚物较大时在重力作用下甚至向下流动;在轴向方向上,颗粒平均体积分数仍呈现底部小,上部大的不均匀分布,一方面是边壁效应会导致颗粒聚集在边壁区,另一方面是气体运行到上部动能逐渐损失,对颗粒的夹带能力下降,导致颗粒在提升管上部聚集,即颗粒体积分数呈现底部小上部大的分布规律。

2.2 颗粒时均体积分数分布

2.2.1 轴向分布

图 5 为 3 种二次进气角度下接收器内颗粒时均体积分数的轴向分布。由图 5 可知,3 种二次进气角度下的颗粒时均体积分数沿轴向整体呈现底部小、上部大的不均匀分布。但在二次进气附近颗粒体积分数略有减小,其他轴向位置颗粒体积分布基本不变,说明二次进气主要影响其附近区域的颗粒分布。

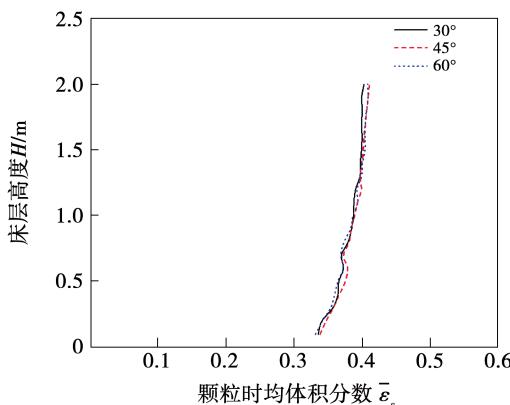


图 5 颗粒时均体积分数的轴向分布

Fig. 5 Axial distribution of time-averaged particle volume fraction

2.2.2 径向分布

图 6 为不同二次进气角度时颗粒时均体积分数分布。可以看出,沿轴向整体呈现底部小、上部大的分布;沿径向边壁附近的颗粒体积分数高于中心区

域的体积分数。但是,当二次进气角度为 30° 时,中心区域颗粒体积分数更小,颗粒径向分布更不均匀;当二次进气角度为 60° 时,在二次进气管内会存在颗粒堆积现象,容易堵塞二次进气,不利于接收器内颗粒向上稳定提升。

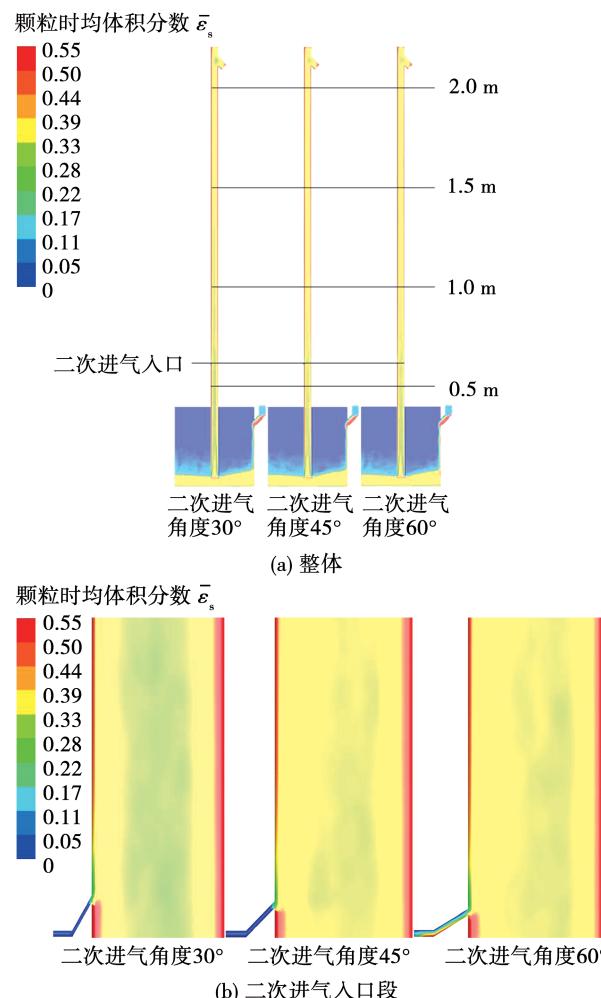


图 6 颗粒时均体积分数分布

Fig. 6 Distributions of time-averaged particle volume fraction

不同轴向位置处的颗粒时均体积分数的径向分布曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出,除二次进气附近截面,3 种二次进气角度下采样截面上颗粒径向分布曲线呈现为“U”型的“环 - 核”非均匀分布,受二次进气角度影响较小;当二次进气角度为 30° 时,中心时均体积分数最小、颗粒分布最不均匀,二次进气角度为 60° 和 45° 时颗粒体积分数径向分布差别不大。

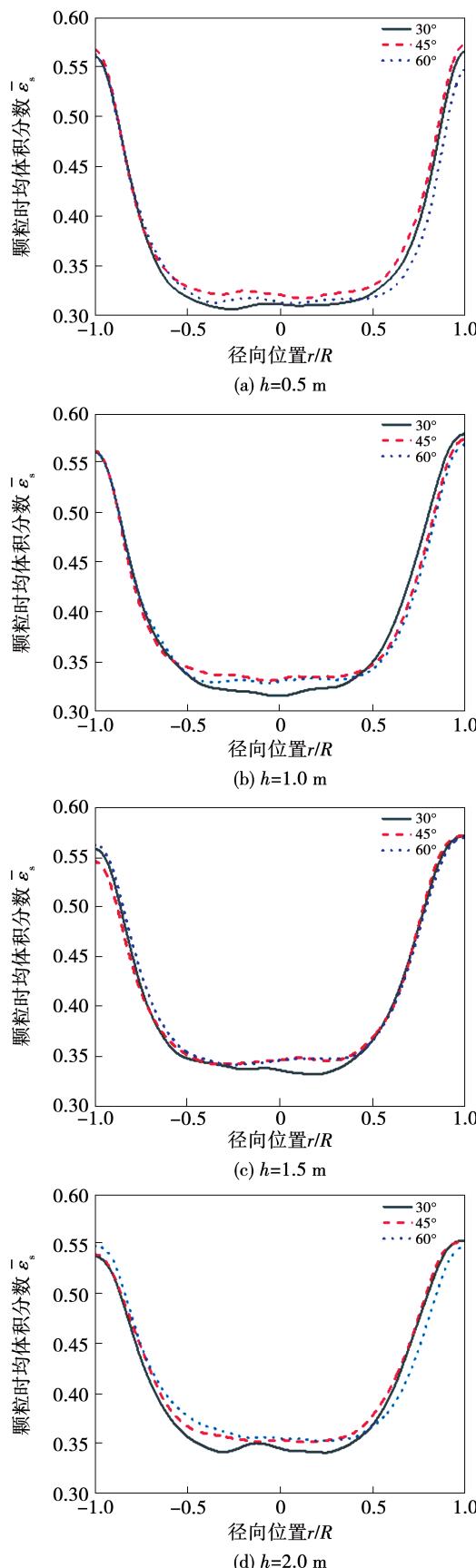


图7 不同轴向位置处颗粒时均体积分数的径向分布曲线
Fig. 7 Radial distribution curves of time-averaged particle volume fraction in different axial positions

图8 为不同二次进气风速下二次进气截面的颗粒时均体积分数分布。

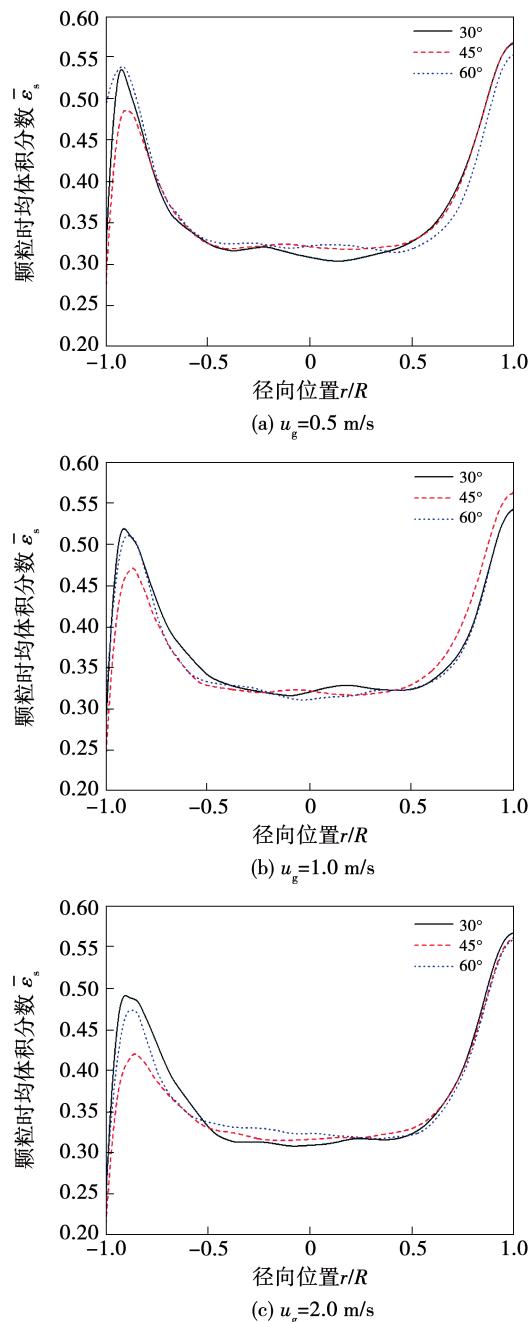


图8 不同二次进气风速下二次进气截面的颗粒时均体积分数径向分布曲线

Fig. 8 Radial distribution curves of time-averaged particle volume fraction on the section of secondary aeration under different secondary aeration air velocities

从图8可以看出,靠近二次进气端,二次进气角度为60°时颗粒体积分数最大,二次进气角度为45°

时颗粒体积分数最小,说明二次进气角度为45°时二次进气对颗粒作用最强,径向分布更均匀,而30°和60°时的二次进气风力较弱;远离二次进气端,颗粒体积分数先升高再降低,最终仍呈现为“环-核”分布,但是二次进气角度为60°时右侧近壁面颗粒体积分数最大值小于30°和45°时的颗粒体积分数最大值,并且此时有颗粒进入二次进风入口。

由图8还可知:在 u_g 为0.5,1.0和2.0 m/s时二次进气截面颗粒径向分布规律基本相似;随着二次进气速度增大,3种二次进气角度下靠近二次进气端颗粒体积分数逐渐减小;二次进气角度为45°时颗粒体积分数仍最小,沿径向颗粒体积分数分布更均匀,说明当风速变化后二次进气最佳角度仍为45°。

2.3 颗粒速度分布

颗粒相的空间分布与颗粒速度密切相关。图9为颗粒体积分数着色下的颗粒速度矢量分布。速度矢量由图中不同的箭头方向呈现,表示颗粒运动的方向。

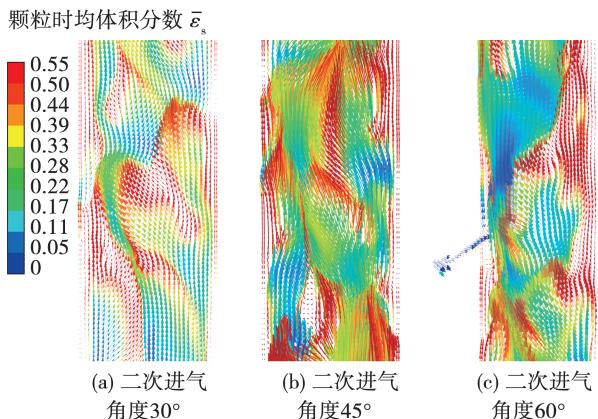


图9 颗粒体积分数着色下的颗粒速度矢量

Fig. 9 Particle velocity vectors distribution colored by particle volume fraction

由图9可见,明显的颗粒团聚结构和循环特征。颗粒由底部流化风带动向上运动,并在二次进气的加速作用下在床层内扩散。颗粒在壁面处聚集,形成贴壁带状颗粒团,导致气体对颗粒的曳力减小,在重力作用下颗粒返混,沿壁面向下运动^[22-24]。两侧壁面的颗粒流向中心区域,然后在气流的带动下向上运动,从而完成循环。更大的搅动导致近管壁面附近的热颗粒被管中心的冷颗粒取代的频率更高,

即颗粒的更新率更高。颗粒团在气泡的作用下不断循环,与热表面的接触时间缩短,有利于对流换热^[25-27]。当二次进气角度为60°时,有颗粒进入二次进气口。

3 结论

采用欧拉-欧拉双流体模型和非均匀过滤(filtered)曳力模型,研究了不同二次风进气角度下流化床颗粒接收器内颗粒的分布和流动行为,得出:

- (1) 流化床颗粒接收器内颗粒呈现明显的团聚结构和循环特征。
- (2) 颗粒在边壁区以团聚物形式存在,在中心以稀疏相形式存在,并呈现边壁大、中心小的“环-核”分布,有利于边壁区颗粒传热。
- (3) 从颗粒时均体积分数的径向分布和发展趋势来看,二次进气角度为45°时在不同二次进气风速下,接收器内颗粒体积分数径向分布相对均匀,且不存在颗粒进入二次进气管现象。

参考文献:

- [1] HO C K ,IVERSON B D . Review of high-temperature central receiver designs for concentrating solar power [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2014,29:835 - 846.
- [2] JU X,XU C,HU Y,et al. A review on the development of photovoltaic/concentrated solar power (PV-CSP) hybrid systems[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells,2017,161:305 - 327.
- [3] TANG N,ZHANG Y,NIU Y,et al. Solar energy curtailment in China: Status quo, reasons and solutions[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2018,97:509 - 528.
- [4] KIM K,MOUJAES S F,KOLB G J. Experimental and simulation study on wind affecting particle flow in a solar receiver[J]. Solar Energy,2010,84(2):263 - 270.
- [5] HO C K,CHRISTIAN J M,ROMANO D,et al. Characterization of particle flow in a free-falling solar particle receiver[J]. Journal of Solar Energy Engineering,2017,139(2):021011.
- [6] MILLER D C. Heat transfer characteristics of a novel fluidized bed for concentrating solar with thermal energy storage[M]. Golden: Colorado School of Mines,2017.
- [7] MILLER D C,PFUTZNER C J,JACKSON G S. Heat transfer in counterflow fluidized bed of oxide particles for thermal energy storage[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2018,126:730 - 745.
- [8] GOMEZ-HERNANDEZ J,GOZALES-GOMEZ P Á,TAO N S,et al. Design of a solar linear particle receiver placed at the ground level[C]//AIP Conference Proceedings: AIP Publishing,2018,

- 2033(1):170005.
- [9] GOMEZ-HERNANDEZ J, GONZALEZ-GOMEZ P Á, SANCHEZ-GONZALEZ A, et al. Integration of a solar linear particle receiver with a gas turbine [C]//AIP Conference Proceedings: AIP Publishing, 2019, 2126(1):060004.
- [10] GOMEZ-HERNANDEZ J, GONZALEZ-GOMEZ P A, BRIONGOD J V, et al. Technical feasibility analysis of a linear particle solar receiver[J]. Solar Energy, 2020, 195:102–113.
- [11] SANCHEZ-GONZALEZ A, GOMEZ-HERNANDEZ J. Beam-down linear Fresnel reflector; BDLFR [J]. Renewable Energy, 2020, 146:802–815.
- [12] FLAMANT G. Theoretical and experimental study of radiant heat transfer in a solar fluidized bed receiver [J]. AIChE Journal, 1982, 28(4):529–535.
- [13] FLAMANT G, GAUTHIER D, BENOIT H, et al. Dense suspension of solid particles as a new heat transfer fluid for concentrated solar thermal plants: On-sun proof of concept [J]. Chemical Engineering Science, 2013, 102:567–576.
- [14] FLAMANT G, GAUTHIER D, BENOIT H, et al. A new heat transfer fluid for concentrating solar systems: Particle flow in tubes [J]. Energy Procedia, 2014, 49:617–626.
- [15] BOUNACEUR A, BEZIAN J J, DE RYCK A, et al. Experimental design of a fluidized bed solar receiver with direct absorption of concentrated solar radiation [C]//High and Low Concentration for Solar Electric Applications III; SPIE, 2008, 7043:141–150.
- [16] ANSART R, GARCIA-TRNANES P, BOISSIERE B, et al. Dense gas-particle suspension upward flow used as heat transfer fluid in solar receiver; PEPT experiments and 3D numerical simulations [J]. Powder Technology, 2017, 307:25–36.
- [17] MATSUBARA K, KAZUMA Y, SAKURAI A, et al. High-temperature fluidized receiver for concentrated solar radiation by a beam-down reflector system [J]. Energy Procedia, 2014, 49:447–456.
- [18] MATSUBARA K, SAKAI H, KAZUMA Y, et al. Numerical modeling of a two-tower type fluidized receiver for high temperature solar concentration by a beam-down reflector system [J]. Energy Procedia, 2015, 69:487–496.
- [19] 江凯军. 气固逆流式太阳能粒子吸热器流动传热机理与结构优化设计研究[D]. 北京:华北电力大学(北京), 2022.
JIANG Kai-jun. Gas-solids countercurrent flow particle solar receiver mechanism of flow and heat transfer and structure opti-
- mized design investigation [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2022.
- [20] BOISSIERE B, ANSART R, GAUTHIER D, et al. Experimental hydrodynamic study of gas-particle dense suspension upward flow for application as new heat transfer and storage fluid [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2015, 93 (2): 317–330.
- [21] ADNAN M, SUN J, AHMAD N, et al. Comparative CFD modeling of a bubbling bed using a Eulerian-Eulerian two-fluid model (TFM) and a Eulerian-Lagrangian dense discrete phase model (DDPM) [J]. Powder Technology, 2021, 383:418–442.
- [22] YANG J, ZHU J. Cluster identification using image processing [J]. Particuology, 2015, 23:16–24.
- [23] 王勤辉,高琼,石惠娴,等.循环流化床中的颗粒团形成、结构及其运动[J].浙江大学学报(工学版),2006,40(1):118–122.
WANG Qin-hui, GAO Qiong, SHI Hui-xian, et al. Formation, structure and motion of clusters in circulating fluidized bed [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2006, 40(1):118–122.
- [24] 陈宇航,卢仕兵,胡军军,等.循环流化床提升管中团聚物的结构及发展过程[J].南京师范大学学报(工程技术版),2020,20(3):15–21.
CHEN Yu-hang, LU Shi-bing, HU Jun-jun, et al. Structure and development of clusters in the circulating fluidized bed riser [J]. Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology Edition), 2020, 20(3):15–21.
- [25] CHALERMSINSUWAN B, PIUMSOMBOON P, GIDASPOW D. Kinetic theory based computation of PSRI riser: Part I—Estimate of mass transfer coefficient [J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(6):1195–1211.
- [26] CHALERMSINSUWAN B, PIUMSOMBOON P, GIDASPOW D. Kinetic theory based computation of PSRI riser: Part II—Computation of mass transfer coefficient with chemical reaction [J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(6):1212–1222.
- [27] BENOIT H, LOPEZ I P, GAUTHIER D, et al. On-sun demonstration of a 750 °C heat transfer fluid for concentrating solar systems: Dense particle suspension in tube [J]. Solar Energy, 2015, 118:622–633.

(丛敏 编辑)