

内置螺旋挡板流化床颗粒停留时间分布

都艺伟, 吴新*, 刘道洁, 李军辉

(东南大学能源热转换及其过程控制测控教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要: 采用脉冲示踪法在内置螺旋挡板冷态鼓泡流化床上研究了螺旋挡板、加料速率、流化风速、颗粒粒径和床料高度对颗粒在流化床内停留时间分布的影响。结果表明, 颗粒停留时间的无量纲方差从无螺旋挡板时的 0.558 减小到有螺旋挡板时的 0.085, 螺旋挡板可有效抑制颗粒返混, 增大颗粒运动的平推流趋势; 加料速率增大为约 2 倍时, 停留时间减小为约 50%, 流动更趋向于平推流; 床料高度增加, 颗粒返混加剧, 颗粒平均停留时间及无量纲方差均增大, 颗粒运动向全混流靠近; 随流化风速增大, 颗粒平均停留时间变长; 实验范围内, 颗粒粒径对颗粒停留时间分布影响不大。

关键词: 螺旋挡板; 流化床双床结构; 颗粒; 停留时间分布

中图分类号: TQ021.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2018)03-0484-07

Residence Time Distribution of Particles in Fluidized Bed with Spiral Internal

Yiwei DU, Xin WU*, Daojie LIU, Junhui LI

(Key Laboratory of Energy Conversion and Process Control of Ministry of Education,
Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: Effects of spiral internal, solid feeding rate, fluidized gas velocity, particle size and bed height on the particle residence time distribution were investigated in a cold bubbling fluidized bed using the tracer technique. The results showed that the dimensionless variance of particle residence time reduced from 0.558 without spiral internal to 0.085 with a spiral internal, indicating that the spiral internal helped restrain the back mixing of particles and made the flow approach the plug flow. When the solid feeding rate was doubled, the residence time of particles decreased by approximately 50% and the flow was closer to plug flow. As the increased bed height caused severe back mixing, both average residence time and dimensionless variance increased and the solid flow tended to be complete stirred flow. The average residence time of particles extended with the increasing of fluidized gas velocity. Particle size had a little effect on the residence time distribution under present experimental conditions.

Key words: spiral internal; dual fluidized bed; particle; residence time distribution

1 前言

流化床干燥机在干燥领域应用广泛, 各种机型存在一定不足: 振动流化床干燥机结构复杂、振动部件易损坏; 离心流化床干燥机的转鼓能耗大、维修困难; 搅拌流化床干燥机的搅拌装置耗能多、易损坏; 卧式流化床干燥机占地面积大、床料返混粘结严重; 立式流化床干燥机不能连续干燥并存在严重的沟流、腾涌。内置螺旋挡板流化床双床结构可连续进出料, 无运动部件, 结构简单紧凑、能耗低、故障率低, 且可使颗粒运动更均匀

一致, 用作流化床干燥器有显著优势, 结构如图 1 所示, 可根据工艺需要选择外壁或中心进出料。床体内的螺旋通道及布风板上的导向风帽可使物料沿螺旋通道均匀一致向前运动; 两层床体叠加的结构使颗粒在流化床内的停留时间加倍; 正常运行时, 流化风先经过下层床体对由上层床体落下的床料进行干燥, 温度较高、湿度较低的流化风再经过上层床体对刚进入流化床的湿颗粒进行预干燥, 充分利用流化风的温度和干度, 明显减小能耗。流化床内螺旋挡板结构可有效抑制颗粒返混^[1], 并使颗粒在流化床内的停留时间分布更均匀, 对颗粒物料

收稿日期: 2017-09-08, 修回日期: 2017-10-26

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(编号: 2016YFB0600602)

作者简介: 都艺伟(1991-), 女, 山东省烟台市人, 硕士研究生, 动力工程专业, E-mail:1559318059@qq.com; 吴新, 通讯联系人, E-mail:wuxin@seu.edu.cn.

引用格式: 都艺伟, 吴新, 刘道洁, 等. 内置螺旋挡板流化床颗粒停留时间分布. 过程工程学报, 2018, 18(3): 484-490.

Du Y W, Wu X, Liu D J, et al. Residence Time Distribution of Particles in Fluidized Bed with Spiral Internal (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2018, 18(3): 484-490, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.217329.

在流化床内均匀干燥十分有益。陈德明^[2]发现通过在流化床内增设水平内构件可使气泡破裂，消除节涌，形成均匀稳定的流化状态。

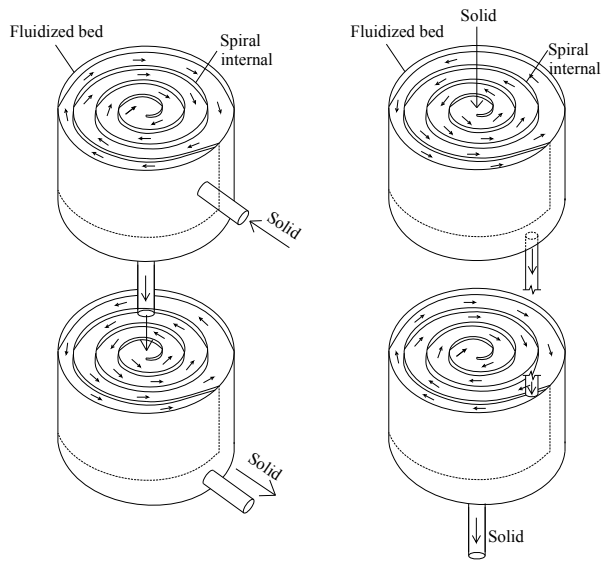


图 1 螺旋挡板流化床双床结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of dual fluidized bed with spiral internals

颗粒的停留时间是流化床的重要参数。流化床干燥器中固体颗粒的停留时间决定物料干燥程度和均匀性，流化床反应器中固体颗粒的停留时间显著影响反应程度与产品质，研究流化床内固体颗粒停留时间分布 (Residence Time Distribution, RTD)很有必要。鼓泡流化

床中气速、床料高度、粒径、物料流率对颗粒停留时间分布有重要影响^[3]；毛元夫等^[4]研究了加料速率、流化气、喷动气及压力等因素对原煤颗粒在喷动流化床内停留时间的影响；振动强度、气速、进料流率影响振动流化床内颗粒的停留时间分布^[5]；叶世超等^[6]研究了固体循环率、流化床室数、进料速率及侧线产品抽出率对固体返料气流-流化组合干燥器内停留时间分布的影响；不少学者采用计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD)中的欧拉-欧拉模型^[7-9]和欧拉-拉格朗日模型^[10,11]研究流化床内的固体颗粒停留时间分布。已有学者^[12]研究了有无螺旋挡板内构件时连续进出料流化床内颗粒的干燥动力学特性，但关于内置螺旋挡板流化床内颗粒停留时间分布的系统研究较少。本工作通过实验研究了内置螺旋挡板流化床单床内颗粒的停留时间分布，分析了螺旋挡板内构件、加料速率、流化风速、粒径及床料高度对颗粒停留时间分布的影响。

2 实验

2.1 实验材料

实验中以 Geldart B 类颗粒玻璃微珠(唐山保东玻璃制品有限公司)为物料，主要成分为 SiO₂。由 S3500 激光粒度分析仪(美国 Microtrac 公司)测得 3 种不同尺寸玻璃微珠的粒径分布，得到平均粒径。采用下行法测得各种颗粒的临界流化风速。实验物料参数如表 1 所示。

表 1 实验物料参数
Table 1 Properties of materials used in experiment

Material	Mean diameter, $d_p/\mu\text{m}$	Density, $\rho_s/(\text{kg}/\text{m}^3)$	Apparent density, $\rho_a/(\text{kg}/\text{m}^3)$	Minimum fluidization velocity, $U_{mf}/(\text{m}/\text{s})$
Glass bead	577	2500	1500	0.28
Glass bead	469	2500	1500	0.24
Glass bead	343	2500	1500	0.18

2.2 实验设备

实验在冷态鼓泡流化床系统(图 2)中进行，系统主要由 V-0.6/8 空气压缩机(浙江盛源空压机制造有限公司)、HF-1NF 冷冻式干燥机(临安汇发机械设备有限公司)、LZB-40 空气转子流量计(上海天川仪表厂)、G5M-0.75S2-1A 变频器(杭州安川电气有限公司)、卧式电动机(苏州欧邦精密机电有限公司)、流化床床体等设备组成。考虑到螺旋挡板流化床双床结构的对称性，只研究外壁进料中心底部卸料的单床结构(图 1 左上)，流化床床体由无色透明有机玻璃制成，内径 160 mm。螺旋挡板与布风板一同固定，形成的螺旋通道宽 18 mm，总长度为 0.95 m。布风板上沿螺旋通道中轴线均匀布置 39 个导向风帽，每个风帽开 6 个孔，小孔直径为 1.2 mm，设计小孔风速

为 35 m/s，布风板的开孔率为 0.0132。

2.3 实验方法

采用脉冲示踪法^[3,13]测定颗粒停留时间分布，从物料中筛出稍大粒径的颗粒染色后作为示踪颗粒，既可通过筛分方法回收物料中的示踪颗粒，又可通过颜色观察示踪颗粒运动状况。实验前在流化床内加入一定量物料，送入流化风，床料充分流化后，开始由螺旋加料器以某一速率加料，同时打开卸料阀门卸料并监测卸料速率，调节加料速率，当加料速率等于卸料速率时流化达到稳定状态，床内的持料量基本不变，此时在尽可能短的时间内(约 1~2 s)加入一定量的示踪颗粒(约占床内持料质量的 4%)，计时并同时从卸料管处取样，每隔 30 s 取样一次，直至取样杯中不再出现示踪颗粒，停止实验。将

取样杯中的颗粒筛分称量,得到每份样品中示踪颗粒的浓度,每种工况重复3次,取平均值计算示踪颗粒浓度

随时间的分布,得到停留时间分布.

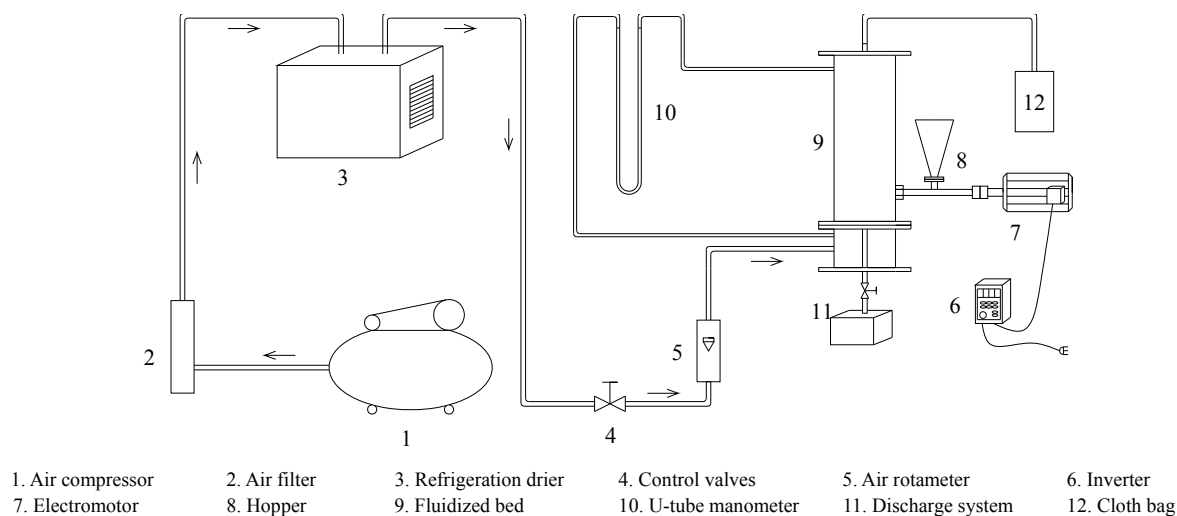


图2 实验装置系统图

Fig.2 The experimental setup system

2.4 实验数据处理

在 t_i 时刻, 样品中的示踪颗粒浓度 $c(t_i)$ 为示踪颗粒质量 m_{tracer} 占全部颗粒质量 m_{total} 之比:

$$c(t_i) = m_{\text{tracer}} / m_{\text{total}} \quad (1)$$

示踪颗粒停留时间分布的概率密度函数 $E(t)$:

$$E(t_i) = \frac{c(t_i)}{\sum_{i=1}^n c(t_i) \Delta t_i} \quad (2)$$

颗粒的平均停留时间 $t_m(\text{min})$ 和颗粒停留时间分布的方差 $\sigma_t^2(\text{min}^2)$ 能描述颗粒停留时间分布:

$$t_m = \sum_{i=1}^n t_i E(t_i) \Delta t_i \quad (3)$$

$$\sigma_t^2 = \sum_{i=1}^n (t_i - t_m)^2 E(t_i) \Delta t_i \quad (4)$$

式中, t_i 为第 i 次取样时间(min), c 为样品中示踪颗粒的浓度(%), $E(t_i)$ 为颗粒 RTD 概率密度函数(min^{-1}), Δt_i 为第 i 个时间间隔(min), n 为取样总次数.

定义无量纲时间 θ :

$$\theta = t / t_m \quad (5)$$

无量纲概率密度函数 $E(\theta)$ 和无量纲方差 σ_θ^2 如下:

$$E(\theta) = t_m E(t) \quad (6)$$

$$\sigma_\theta^2 = \sigma_t^2 / t_m^2 \quad (7)$$

方差 σ_t^2 可表征取样所得颗粒的停留时间与平均停

留时间 t_m 的离散程度. $\sigma_\theta^2=0$ 时流动为平推流, 物料无任何返混, 所有颗粒停留时间相同; $\sigma_\theta^2=1$ 时流动为全混流, 物料完全混合, 物料浓度处处相同; 无量纲方差 σ_θ^2 可反映颗粒流动与平推流和全混流的接近程度.

为验证实验数据的可靠性, 考察每组概率密度函数 $E(t)$ 的归一性. 将 $E(t)$ 对时间 t 积分, 得到颗粒停留时间分布的分布函数 $F(t)$, 其值为颗粒停留时间小于 t 的概率.

$$F(t) = \int_0^t E(t) dt = \sum_{i=1}^n E(t_i) \Delta t_i \quad (8)$$

定义 $t_{0.9}$ 为回收流化床中 90% 的示踪颗粒所需的时间(min), 则

$$F(t_{0.9}) = 0.9 \quad (9)$$

$t_{0.9}$ 可由 $F(t)$ 曲线图得到.

3 结果与讨论

各实验工况的加料速率 $G_s(\text{kg/h})$ 、流化风速 $U(\text{m/s})$ 、床料高度 $H(\text{cm})$ 、颗粒粒径 $d_p(\mu\text{m})$ 及通过 RTD 曲线计算的颗粒平均停留时间和方差如表 2 所示. 图 3~7 中颗粒停留时间分布的分布函数 $F(t)$ 表明每组数据均满足归一性要求, 实验数据可靠.

3.1 螺旋挡板对颗粒 RTD 的影响

$G_s=3.6 \text{ kg/h}$, $U=0.28 \text{ m/s}$, $H=3.8 \text{ m}$, $d_p=343 \mu\text{m}$ 时螺旋挡板对颗粒 RTD 的影响如图 3 所示. 由图可知, 无

螺旋挡板时 RTD 达到峰值时间较早, 峰值较低, 且时间跨度大拖尾严重. 这是因为示踪颗粒进入床内后, 大部分颗粒运动到卸料口的路程较短, 造成停留时间迅速达到峰值, 但由于颗粒返混程度较高, 造成部分颗粒停留时间延长, 表现为 RTD 拖尾严重. 存在螺旋挡板时 RTD 曲线出现峰值时间推迟, 但峰值明显提高且时间跨度窄. 这是由于颗粒的运动路径受螺旋通道的限制, 只能沿螺旋通道向前运动最后到达卸料口, 运动路程延长, 故出现峰值晚, 在螺旋通道及导向风帽的综合引导作用

下, 颗粒的返混显著减少, 使颗粒更一致地向前运动, 颗粒的停留时间分布更集中. 有无螺旋挡板时颗粒的平均停留时间分别为 9.3 和 10.4 min, 相差不大, 但由图 3(b)知, 有无螺旋挡板时 90%的颗粒流出流化床所需时间 $t_{0.9}$ 分别为 12.3 和 22.3 min, 可知有螺旋挡板时颗粒的停留时间分布更集中. 由表 2 可知, 有无挡板时两者的无量纲方差分别为 0.085 和 0.558, 差异显著. 螺旋挡板有效抑制了颗粒返混, 很大程度促成了颗粒呈平推流运动, 与 Babu 等^[1]的研究结果一致.

表 2 各实验工况下颗粒平均停留时间及方差
Table 2 Average residence time and variance of particles under different conditions

No.	Spiral internal	Feeding rate, $G_s/(\text{kg/h})$	Fluidization velocity, $U/(\text{m/s})$	Bed material height, H/cm	Particle diameter, $d_p/\mu\text{m}$	Mean residence time, t_m/min	Variance of residence time, σ_t^2/min^2	Dimensionless variance, σ_θ^2
1	With	1.5	0.28	3.8	343	20.4	46.0	0.111
2	With	3.6	0.28	3.8	343	9.3	7.4	0.085
3	With	7.8	0.28	3.8	343	4.8	1.2	0.051
4	With	3.6	0.32	3.8	343	9.8	8.1	0.085
5	With	3.6	0.39	3.8	343	10.5	13.9	0.125
6	With	3.6	0.39	5.5	343	22.2	126.1	0.255
7	With	3.6	0.39	3.8	577	12.1	17.4	0.118
8	Without	3.6	0.28	3.8	343	10.4	60.8	0.558
9	With	3.6	0.39	3.8	469	11.5	16.4	0.124
10	With	3.6	0.39	4.7	343	14.1	45.0	0.226

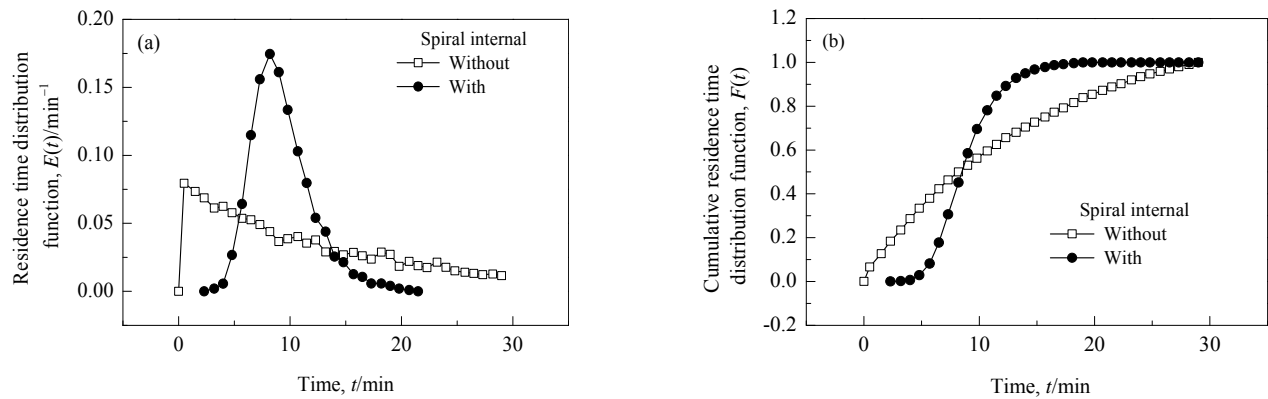


图 3 螺旋挡板对颗粒停留时间分布的影响
Fig.3 Influence of a spiral internal on residence time distribution of particles

3.2 加料速率对颗粒 RTD 的影响

加料速率是影响固体颗粒 RTD 的重要因素. $U=0.28$ m/s, $H=3.8$ m, $d_p=343$ μm , 有挡板时加料速率对颗粒 RTD 的影响如图 4 所示, 随加料速率增大, RTD 峰值出现越早且越高, 时间跨度越小, 加料速率为 1.5, 3.6 和 7.8 kg/h 时示踪颗粒几乎全部流出所用时间分别为 39.8, 20.7 和 9.8 min, 可见加料速率增至约为原来的 2 倍时, 停留时间减小为原来的约 50%. 这是因为随加料速率增大, 颗粒沿前进方向的迁移速率增大, 相同的路程, 运动时间缩短, 表现为 RTD 峰值更高、时间跨度更窄, 颗粒在流化床内 RTD 更集中, 停留时间更短. 由表 2 可知, 加料速率为 1.5, 3.6 和 7.8 kg/h 时, 颗粒的平均停留

时间 t_m 依次为 20.4, 9.3 和 4.8 min, 无量纲方差 σ_θ^2 依次为 0.111, 0.085 和 0.051, 随加料速率增大, t_m 和 σ_θ^2 变小, 表明 RTD 更均匀, 颗粒运动更趋向于平推流($\sigma_\theta^2=0$).

3.3 流化风速对颗粒 RTD 的影响

采用导向风帽, 流化风除将颗粒流化外, 还产生推力, 推动颗粒整体沿着螺旋通道向前运动. 流化风速对颗粒停留时间分布影响很大, 流化风速控制为临界流化风速的约 2 倍, 既可实现鼓泡流化床状态又不使床层过分膨胀而引起不稳定流化. 流化风速对颗粒停留时间的影响存在争议, 高巍等^[3]研究认为在一定的流化风速范围内($4U_{mf}\sim 6U_{mf}$)鼓泡流化床中 Geldart B 颗粒的停留时间分布受流化风速影响不大; Babu 等^[1]发现单组分均匀

粒径颗粒在流化床内的平均停留时间随流化风速增大而减小;王锐思等^[5]研究发现在内置水平管的振动流化床内,减小入口流化风速可使颗粒停留时间分布相对集中。

$G_s=3.6$ kg/h, $H=3.8$ m, $d_p=343$ μ m, 有挡板时不同流化风速下的颗粒停留时间分布见图5。由图5(a)可知,随流化风速增大,RTD 峰值变小且出峰时间变晚,时间跨度变宽,分布曲线的拖尾现象更明显。结合表2可知,流化风速为0.28, 0.32 和 0.39 m/s 时,颗粒的平均停留时间分别为9.3, 9.8 和 10.5 min,无量纲方差分别为0.085, 0.085 和 0.125,即随流化风速增大,颗粒停留时间增加。

流化风速由0.28 m/s 增大到0.32 m/s, 方差不变;流化风速由0.32 m/s 增大到0.39 m/s 时,方差明显增大。这是由于风速较大时,流化风给颗粒的推力大,使其较快向前运动,在流化床内的停留时间变短;但流化风速会使颗粒的运动更剧烈,颗粒间碰撞更强,且风速增大使床层的膨胀率增大,床层空隙率增大,会导致颗粒的返混程度加剧,颗粒不能及时排出流化床,在床内的停留时间延长。随风速增大,返混效果起主导作用,颗粒平均停留时间变长,RTD 分布方差增大,颗粒流动状态远离平推流,RTD 曲线拖尾明显。

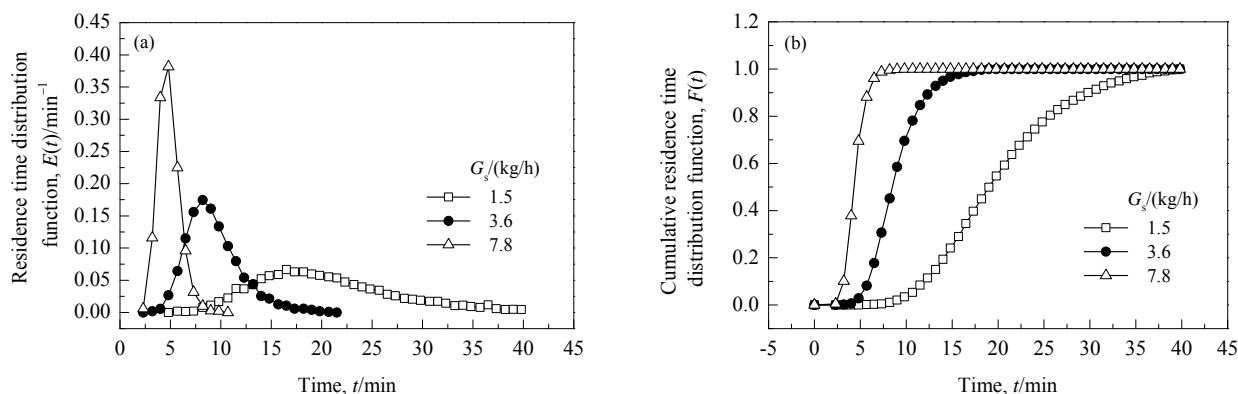


图4 有挡板时不同加料速率(G_s)下的颗粒停留时间分布

Fig.4 Residence time distribution and cumulative residence time distribution of particles with spiral internal at different solid feeding rates (G_s)

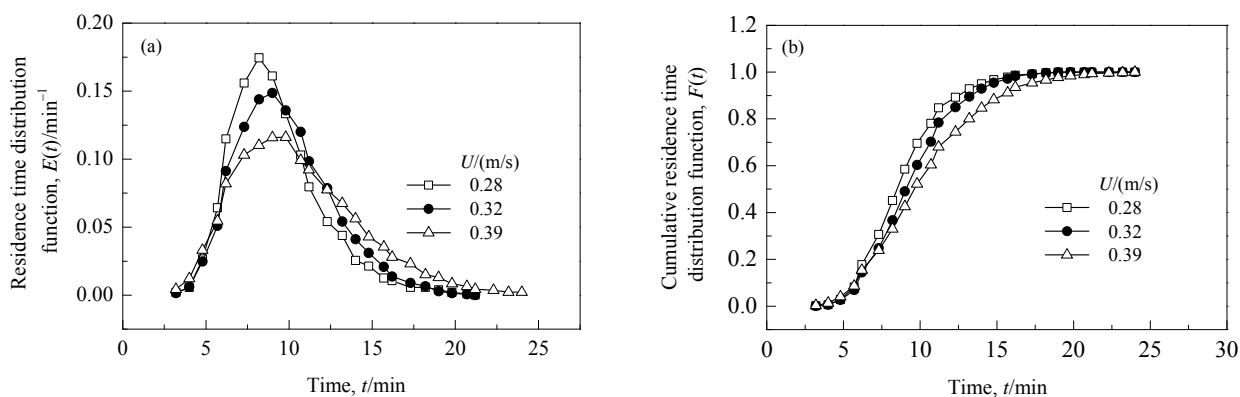


图5 有挡板时不同流化风速(U)下的颗粒停留时间分布

Fig.5 Residence time distribution and cumulative residence time distribution of particles with spiral internal at different fluidized gas velocities (U)

3.4 颗粒粒径对颗粒 RTD 的影响

使用平均粒径为577, 469 和 343 μ m 的床料,用粒径比其稍大的玻璃微珠为示踪颗粒,二者粒径不同但其它性质均相同,方便筛分,也避免颗粒其它性质影响实验结果。 $G_s=3.6$ kg/h, $U=0.39$ m/s, $H=3.8$ m, 有挡板时颗粒粒径对颗粒 RTD 的影响如图6所示,随颗粒粒径增大,颗粒 RTD 峰值略有降低、出峰时间稍有延迟、时

间跨度稍微变宽,曲线形状相似。由表2可知,粒径为343, 469 和 577 μ m 时,颗粒平均停留时间分别为10.5, 11.5 和 12.1 min,无量纲方差分别为0.125, 0.124 和 0.118,随颗粒粒径增大, t_m 略有增加, σ_θ^2 变化较小。这是由于保持流化风速不变,随颗粒粒径增大,流化床内的湍流程度减小,气体携带作用相应减小,颗粒被携带出流化床变得困难,RTD 曲线出峰略晚峰值略低,停留时间变

长, 而粒径对颗粒流动状态向平推流靠近的程度基本无影响。

3.5 床料高度对颗粒 RTD 的影响

待实验取样杯中不再出现踪颗粒, 同时停止加料和卸料, 关闭流化风, 床料恢复静止状态并维持一段时间后, 测床料高度。床料高度反映床内持料量, 对流化床内颗粒停留时间分布有重要影响。床料高度的选择既要保证流化床内不发生腾涌^[4], 又要充分高于风帽高度且满足料层膨胀后颗粒不越过螺旋挡板。 $G_s=3.6 \text{ kg/h}$, $U=0.39 \text{ m/s}$, $d_p=343 \mu\text{m}$, 有挡板时不同床料高度下的颗

粒停留时间分布见图 7, 由图 7(a)可知, 随床料高度增加, RTD 峰值明显减小且出峰时间明显后移, 有明显的拖尾。这是由于床料高度增加后, 颗粒纵向运动空间增大, 形成了更大的气泡, 大气泡破碎带来剧烈的扰动, 使颗粒充分混合, 同时大气泡形成和破碎使颗粒的返混加剧, RTD 曲线拖尾严重, 颗粒的停留时间分布更分散。床料高度由 3.8 cm 增至 4.7 cm 再至 5.5 cm, 颗粒平均停留时间由 10.5 min 增至 14.1 min 再增至 22.2 min, 无量纲方差由 0.125 增至 0.226 再至 0.255, 表明颗粒在流化床内的运动向全混流变化。

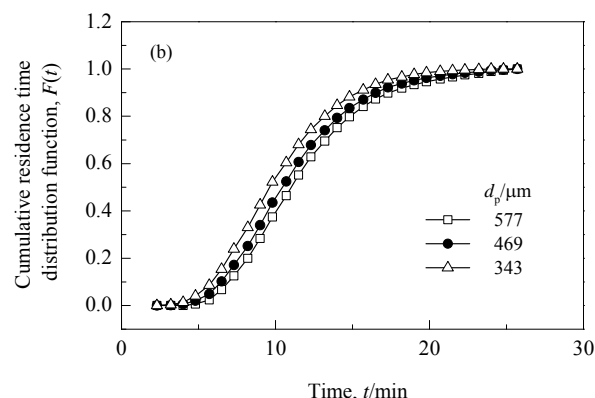
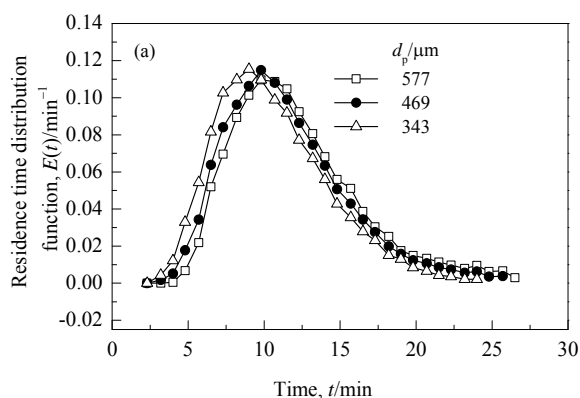


图 6 有挡板时不同粒径(d_p)下的颗粒停留时间分布

Fig.6 Residence time distribution and cumulative residence time distribution of particles with spiral internal at different particle sizes (d_p)

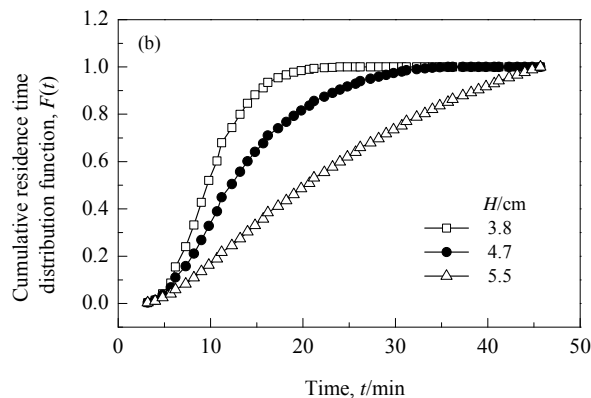
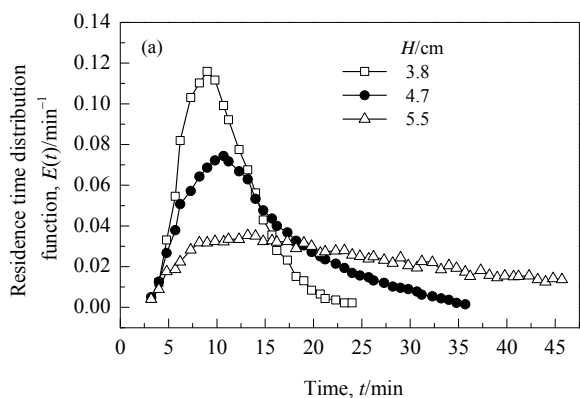


图 7 有挡板时不同床料高度(H)下的颗粒停留时间分布

Fig.7 Residence time distribution and cumulative residence time distribution of particles with spiral internal at different bed heights (H)

4 结论

在内置螺旋挡板的鼓泡流化床中考察了螺旋挡板、加料速率、流化风速、颗粒粒径、床料高度对颗粒停留时间分布的影响, 得到如下结论:

(1) 螺旋挡板对抑制颗粒返混作用显著。有螺旋挡板时, 颗粒停留时间的无量纲方差 $\sigma_b^2 \leq 0.255$, 无螺旋挡

板时, 无量纲方差 $\sigma_b^2=0.558$, 螺旋挡板内构件可使颗粒流动更趋向于平推流。

(2) 加料速率与床料高度对颗粒停留时间分布影响显著, 流化风速和颗粒粒径为颗粒停留时间分布的次要影响因素。颗粒平均停留时间和无量纲方差均随床料高度增加而增大, 减小床料高度可减弱颗粒返混, 从而使颗粒停留时间分布更均匀; 加料速率增大, 颗粒平均停

留时间与无量纲方差均减小,颗粒运动更趋向于平推流。

参考文献:

- [1] Babu M P, Setty Y P. Residence Time Distribution of Solids in a Fluidized Bed [J]. *Can. J. Chem. Eng.*, 2008, 81(1): 118–123.
- [2] 陈德明. 钛精矿颗粒在内构件流化床内停留时间特性的研究 [J]. *钢铁钒钛*, 2007, 28(4): 6–11.
Chen D M. Research on Residence Time of Panzhihua Ilmenite Particle in a Fluidized Bed with Inner Structural Parts [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2007, 28(4): 6–11.
- [3] 高巍, 张聚伟, 汪印, 等. 连续进出料鼓泡流化床颗粒停留时间分布 [J]. *过程工程学报*, 2012, 12(1): 9–13.
Gao W, Zhang J W, Wang Y, et al. Residence Time Distribution of Particles in a Bubbling Fluidized Bed with Their Continuous Input and Output [J]. *Chin. J. Process Eng.*, 2012, 12(1): 9–13.
- [4] 毛元夫, 陈明强, 颜涌捷. 连续运转的加压喷动流化床内颗粒停留特性 [J]. *化工冶金*, 1998, 19(2): 135–139.
Mao Y F, Chen M Q, Yan Y J. Particle Residence Time in a Continuous Pressurized Spout Fluidized Bed [J]. *Engineering Chemistry & Metallurgy*, 1998, 19(2): 135–139.
- [5] 王锐思, 叶世超, 范辞冬, 等. 内置水平管振动流化床停留时间分布模型 [J]. *化学反应工程与工艺*, 2010, 26(5): 399–405.
Wang R S, Ye S C, Fan C D, et al. Mathematical Model of the Residence Time Distribution in Vibration Fluidized Bed with Inner-horizontal Tubes [J]. *Chemical Reaction Engineering and Technology*, 2010, 26(5): 399–405.
- [6] 叶世超, 陈晓东. 固体返料气流-流化组合干燥器停留时间分布的研究 [J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2000, 32(1): 17–20.
Ye S C, Chen X D. The Residence Time Distribution for Compound Dryer of Flash and Fluidization with Circulating Systems [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2000, 32(1): 17–20.
- [7] Zou Z, Zhao Y L, Zhao H, et al. Hydrodynamic and Solids Residence Time Distribution in a Binary Bubbling Fluidized Bed: 3D Computational Study Coupled with the Structure-based Drag Model [J]. *Chem. Eng. J.*, 2017, 321: 184–194.
- [8] Zou Z, Zhao Y L, Zhao H, et al. Numerical Analysis of Residence Time Distribution of Solids in a Bubbling Fluidized Bed Based on the Modified Structure-based Drag Model [J]. *Particuology*, 2017, 32(3): 30–38.
- [9] Hua L N, Wang J W, Li J H. CFD Simulation of Solids Residence Time Distribution in a CFB Riser [J]. *Chem. Eng. Sci.*, 2014, 117(9): 264–282.
- [10] Luo K, Fan W, Yang S, et al. Numerical Investigation of the Time-related Properties of Solid Phase in a 3D Spout-fluid Bed [J]. *Chem. Eng. J.*, 2015, 267: 207–220.
- [11] Han Q, Yang N, Zhu J, et al. Onset Velocity of Circulating Fluidization and Particle Residence Time Distribution: A CFD-DEM Study [J]. *Particuology*, 2015, 21(4): 187–195.
- [12] Srinivasakannan C, Shoaibi A A, Balasubramanian N. Continuous Fluidized Bed Drying with and without Internals: Kinetic Model [J]. *Chem. Biochem. Eng. Q.*, 2012, 26(2): 97–104.
- [13] 王勤辉, 骆仲决, 倪明江, 等. 循环流化床内颗粒停留时间分布 [J]. *燃烧科学与技术*, 2001, 7(4): 221–225.
Wang Q H, Luo Z Y, Ni M J, et al. Particle Residence Time Distribution in a Circulating Fluidized Bed [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2001, 7(4): 221–225.
- [14] 许国良, 黄文迪. 粒径对气固流化床操作特性的影响 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 1996, (1): 17–19.
Xu G L, Huang W D. The Effects of Particle Size on the Operating Characteristics of Gas-Solid Fluidized Beds [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 1996, (1): 17–19.