

液-液循环流化制冰床流化特性研究^{*}

梁坤峰¹ 高春艳¹ 王 林²

(1. 河南科技大学车辆与动力工程学院, 洛阳 471003; 2. 河南科技大学规划与建筑工程学院, 洛阳 471003)

【摘要】 基于图像采集与处理方法实验研究了液-液循环流化制冰床的流化特性,发现颗粒的聚团、分散、粘连和聚并4个典型流化特征,获得了颗粒的沿程粒径分布,基于弗劳德准则数 Fr 揭示了颗粒流化特征与液-液循环流化床流化状态的相关性,讨论了流化床散式流化状态的参数区域。结果表明,颗粒的流化特征和沿程粒径分布随液-液循环流化床高度、运行参数及参数组合的变化而发生改变;距液-液循环流化床底部 0.50 m 高度内首先发生颗粒的聚团流化,受颗粒相变程度影响,进而在流化床 0.50 m 高度以上形成颗粒的聚并、粘连和分散流化,但颗粒聚并形成更大颗粒的现象不可避免;液-液循环流化床的流化状态由弗劳德准则数判别,并与颗粒的流化特征相对应,其理想的流化状态——散式流化主要发生在分散液体流量较小、循环液体流速和温度较低的区域。

关键词: 流体冰 液-液循环流化床 流化特性 运行参数 图像分析

中图分类号: TB657.1; TQ051.1⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)05-0210-06

Fluidization Characteristics of Liquid – liquid Circulating Fluidized Bed for Fluid Ice Production

Liang Kunfeng¹ Gao Chunyan¹ Wang Lin²

(1. College of Vehicle and Motive Power Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China

2. College of Architectural Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract

Fluidization characteristics of drops or ice particles in liquid – liquid circulating fluidized bed (LLCFB) for fluid ice production were experimentally studied by means of image gathering and processing. Four typical fluidization characteristics were defined; they were the diffuseness, convergence, adhesion and coalescence of particles. Particles size distributions along the height of LLCFB were obtained. The relativity was revealed between particles fluidization characteristics and fluidization states of LLCFB based on Froude number, Fr and the range of operating parameters combination was discussed which could achieve particulate fluidization states of LLCFB. The results show that the variations of particles fluidization characteristics and sizes distributions are presented by the effect of the height, operating parameters and their combination. The particles diffuseness firstly happened at the bottom of LLCFB, 0.50 m, under the influence of particles phase change which further led to the convergence, adhesion and coalescence of particles at the other heights, but the phenomena that larger particles formed due to the coalescence of particles must occur. Fluidization states were estimated by Fr calculation and directly affected by particles fluidization characteristics, its perfect fluidization states and particulate fluidization were mainly appeared at some range of operating parameters, such as smaller volume flow-rate of dispersive liquid and lower velocities and temperature of cycle liquid coolant.

Key words Fluid ice, Liquid – liquid circulating fluidized bed, Fluidization characteristic, Operation parameters, Image analysis

收稿日期: 2011-04-11 修回日期: 2011-05-23

^{*} 国家自然科学基金资助项目(50906021)、河南省科技攻关项目(102102210162)和河南省自然科学研究计划项目(2009A470002)

作者简介: 梁坤峰,副教授,博士,主要从事流体冰制取与应用研究, E-mail: liangkunfeng@sohu.com

引言

近年来，直接接触式制取流体冰的技术得到了越来越多的重视^[1~3]。而液-液直接接触式制取流体冰系统基于循环流化床技术，将水(分散液体)喷入循环流动的非相溶冷媒(循环液体)中制取流体冰，两种液体直接接触换热具有很高的换热系数，极易获得流体冰，且制取的冰晶粒子粒径较大，便于从冷媒中分离出来，受到格外重视^[2]。

液-液循环流化床基于液-固循环流化床^[4]的散式流化特征发展而来，其理想的流化状态是颗粒(液滴或颗粒状冰晶)随循环液体的流动而均匀膨胀，使所有颗粒与低温冷媒接触的机会均衡，确保流化床中多相传热与传质的均匀进行^[5]。关于分散液体破碎形成液滴机理的研究已发现^[6~8]，形成液滴的粒径并不均匀，符合某种粒径分布特征，并受运行参数的影响。但是液-液循环流化床内这些粒径不同的液滴在流化过程中，受低温循环液体的携带，其相变的同时亦可能发生相互碰撞，如果颗粒外壳冻结后硬度较差，则碰撞后能聚并成更大的颗粒，且颗粒粒径越大，其流动性越差，与其他颗粒碰撞的机会又会增加，形成更大的颗粒，这种情况非常不利于流化床的良性运行，因此液-液循环流化床的流化特性是新型制冰技术的关键环节，对其进行研究具有重要意义。

本文建立液-液循环流化床制取流体冰实验台，采用图像采集与处理系统，获得制冰过程中循环流化床不同高度上颗粒的流化特征图片和颗粒的粒径信息，研究流化床运行参数及其组合对颗粒沿程的流化特征影响，分析颗粒流化特征与流化床流化状态的相关性，讨论流化床散式流化状态的参数区域。

1 实验系统

1.1 实验装置

液-液循环流化床实验系统原理图如图 1 所示，整个实验系统由 3 部分组成：流化床系统、制冷机和实验测量系统。制冰过程在流化床内部进行，分散液体(水)在循环液体(25 号变压器油)中破碎形成细小液滴，液滴与循环液体一起流动换热，液滴发生相变形成冰颗粒，在滤冰器内循环液体与冰颗粒分离，冰颗粒被送入蓄冰容器，循环液体回到蒸发器内，在蒸发器内降温冷却后，重新进入流化床，实现循环流动。实验过程中，数码相机(Nikon-5000 型)以 30 帧/s 的频率对距离喷嘴(流化床底部) 0.05、0.50、1.00 m 高度上颗粒的状态进行连续拍摄。具体实验工况如表 1 所示。

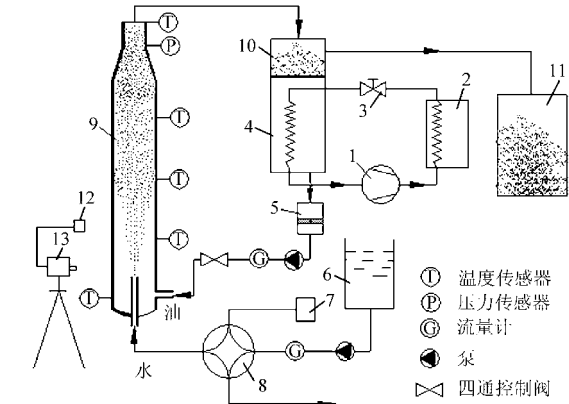


图 1 液-液循环流化床实验系统原理图

Fig. 1 Schematic of liquid-liquid CFB testing system

1. 压缩机 2. 冷凝器 3. 节流阀 4. 蒸发器 5. 过滤器 6. 水箱 7. 压气机 8. 四通控制阀 9. 流化床 10. 滤冰器 11. 蓄冰槽 12. 光源 13. 数码 CCD

表 1 实验工况
Tab. 1 Test conditions

参数	数值
快速摄像帧数 N_f	100
流化床内径 D_3/mm	40
流化床测试段高度 H_1/mm	2 000
喷孔直径 d_0/mm	0.22
连续拍摄时间 t/s	3
循环液体入口温度 $T_{e,\text{in}}/^\circ\text{C}$	-3, -5, -7, -10
循环液体入口流速 $v_{e,\text{in}}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.15, 0.20, 0.25, 0.30
分散液体流量 $G_{p,\text{out}}/\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$	10, 30, 50, 70, 100

1.2 实验现象

根据流化床不同高度上颗粒流化的实验照片发现，液滴形成后受到载冷液体的携带作用向上运动，其相变、运动过程随实验工况的变化表现出不同的特征，但总体来看，有 4 种典型的流化特征，分别定义为聚团、粘连、聚并和分散，具体的流化特征形式如图 2 所示。颗粒的聚团指颗粒在流化过程中由于运动速度的变化，使颗粒在某一空间位置积聚较多的颗粒，颗粒之间并没有真正的接触，如图 2a 圆圈处所示。但是，颗粒发生聚团之后，颗粒之间碰撞的机会增大，颗粒碰撞产生的结果受颗粒自身的相变程度、运动能力以及运动轨迹的影响，可能产生颗粒的粘连、聚并和分散。颗粒的粘连指聚团颗粒发生碰撞，由于存在颗粒的表面冰层，且碰撞的力量较大，使颗粒一旦接触，粘连成颗粒团一起向上运动，如图 2b 圆圈处所示；颗粒的聚并是由于颗粒没有发生相变或者是颗粒的表面冰层较薄，颗粒碰撞使其发生合并，成为更大的颗粒，如图 2c 圆圈处所示；而颗粒的分散则是颗粒在向上流化过程的同时具有一

定的径向运动趋势,颗粒之间无相互作用,如图 2d 圆圈处所示。

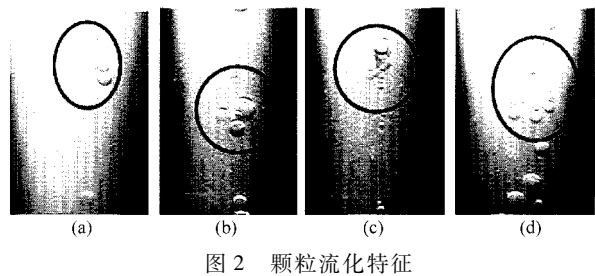


图 2 颗粒流化特征

Fig. 2 Fluidization characteristics of drops or ice particles

(a) 聚团 (b) 粘连 (c) 聚并 (d) 分散

液滴形成后在流化床内流动和换热,当其温度降到结冰点时,发生相变,并最终冻结成颗粒状冰晶,离开流化床的颗粒包括完全相变和未完全相变的冰晶,图 3 为流化床制取的颗粒状冰晶的状态,从图中可看到颗粒状冰晶的粒度特征、冻结状态等信息。实验测量中发现颗粒状冰晶与循环液体分离后,具有颗粒完全冻结、未完全冻结和相互粘连状态特征。完全冻结时不会发生粘连,粒状特征明显,色泽亮白;未完全冻结时色泽透明,内部有液态水,易破裂形成糊状;而粘连的颗粒状冰晶虽冻结程度较深,但易将循环液体包容在内部。

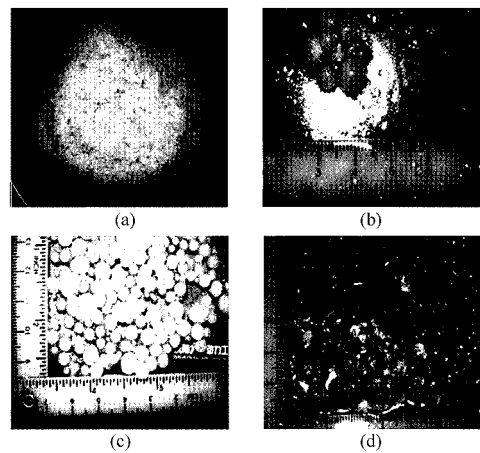


图 3 颗粒状冰晶状态

Fig. 3 State of ice particles

(a) 颗粒流体冰 (b) 粘连状态

(c) 分散冻结状态 (d) 聚并未完全冻结状态

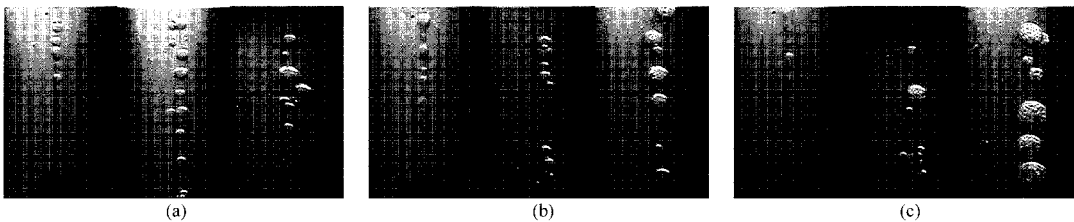


图 4 不同分散液体流量时的颗粒流化状态 ($v_{c,in} = 0.30 \text{ m/s}$, $T_{c,in} = -5^\circ\text{C}$, $d_0 = 0.22 \text{ mm}$)

Fig. 4 Particles fluidization states under the different volumes flow-rate of dispersive liquid

(a) $G_{p,out} = 50 \text{ mL/min}$ (b) $G_{p,out} = 70 \text{ mL/min}$ (c) $G_{p,out} = 100 \text{ mL/min}$

2 颗粒流化特性

2.1 运行参数的影响

2.1.1 分散液体流量

图 4 为改变分散液体流量时流化床 3 个高度上颗粒的流化状态,图 4a~4c 的左、中、右图分别对应流化床 0.05、0.50、1.00 m 高度处下面 0.05 m 长度范围(以下同)。由图可知,在 0.05 m 高度上随分散液体流量增大,射流破碎形成液滴的位置在增高,呈现单颗粒特征,颗粒之间无相互作用;在 0.50 m 高度上,3 种分散液体流量工况对应颗粒的分散、聚团与粘连特征,分散液体流量为 70、100 mL/min,颗粒的粒径与初始粒径相比,出现了较大的颗粒粒径,该高度上有颗粒聚并现象发生;然而在 1.00 m 高度上,颗粒的粒径均显著增大,出现了更多的大颗粒,表明在 0.50~1.00 m 高度内颗粒聚并的现象更为严重。由此可见,随着分散液体流量增大,不但形成了较大的初始颗粒,同时在流化过程中颗粒之间的相互作用也明显增强,颗粒的聚团和聚并现象增多,形成了更大的颗粒。

2.1.2 循环液体流速

图 5 为改变循环液体流速时流化床 3 个高度上颗粒的流化状态。由图可知,在 0.05 m 高度上随循环液体流速增大,射流破碎形成液滴的位置降低,并呈现单颗粒特征,颗粒之间无相互作用;在 0.50 m 高度上,循环液体流速为 0.15、0.20 m/s 时,颗粒具有明显的聚团特征,而循环液体流速为 0.30 m/s 时,单颗粒特征较为显著,但是其粒径与初始粒径相比明显增大,该流速工况下已发生颗粒聚并现象;在 1.00 m 高度上,3 种流速工况都出现了大颗粒,表明颗粒在 0.50~1.00 m 高度内均发生了颗粒的聚并,且随循环液体流速的增大,颗粒聚并的机会也在增加。由此可见,随着循环液体流速增大,在流化过程中颗粒之间的相互作用明显增强,颗粒的聚团和聚并现象增多,形成了更大的颗粒。但是流速较小(如 0.15 m/s)时颗粒流化的分散特征比较明显,此工况下颗粒在相同高度内停留时间较长,颗粒相变

程度较深,其表面冰层较厚,颗粒的聚团仅使少量颗粒发生聚并,更多的颗粒碰撞后反弹致使颗粒从流化床中心区域向近壁面区域运动,出现颗粒分散流化特征,有效避免颗粒的聚团和聚并现象发生,利于实现液-液循环流化床的散式流化。

2.1.3 循环液体温度

图 6 为改变循环液体温度时流化床 3 个高度上颗粒的流化状态。由图可知,在 0.05 m 高度上随循环液体温度增高,射流破碎位置降低而形成液滴的粒径增大,亦呈现单颗粒特征,颗粒之间无相互作用;在 0.50 m 高度上,循环液体温度为 -3°C 、 -7°C 时,颗粒具有明显的聚团特征,而循环液体温度为 -10°C 时,单颗粒特征较为明显,但是其粒径与初始粒径相比明显增大,该温度工况下已发生颗粒聚并现象;而在 1.0 m 的高度上,循环液体温度为 -3°C 时,具有明显的颗粒聚并特征,而循环液体温度为 -7°C 、 -10°C 时,颗粒的粒径与 0.50 m 高度时相比变

化不大,表明在 0.50 ~ 1.00 m 高度内有较少的颗粒聚并现象,其分散特征比较明显。由此可见,随着循环液体温度降低,虽然射流破碎形成较大粒径的初始颗粒,但颗粒在流化过程中其相互作用则明显较少,颗粒的聚团和聚并现象均发生在 0.05 ~ 0.50 m 之间,在流化床 0.50 m 高度以上易出现颗粒分散特征。因此,如果颗粒能在有限高度内完成相变或颗粒外壳冻结程度较深,颗粒间的相互作用以颗粒的聚团和分散特征为主,能有效减少颗粒聚并现象的发生。

综合上述关键运行参数对颗粒流化特征影响的分析,单一运行参数影响沿程的颗粒流化特征。具体表现为分散液体流量较大时颗粒的聚团和聚并现象明显增加;循环液体流速较低时颗粒以分散流化特征为主,而循环液体流速较高时颗粒仍以聚团和聚并特征为主;随循环液体温度降低,颗粒的分散特征明显增强。

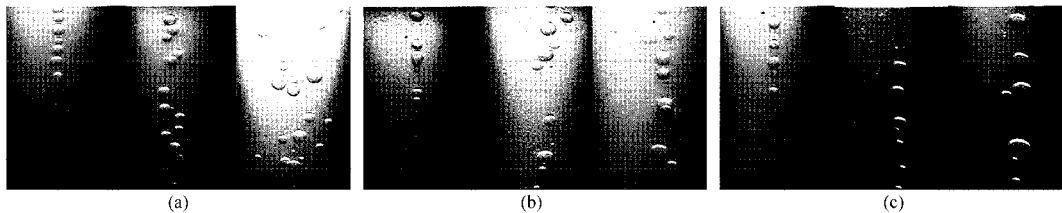


图 5 不同循环液体流速时的颗粒流化状态 ($G_{p,out} = 50\text{ mL/min}$, $T_{c,in} = -7^{\circ}\text{C}$, $d_0 = 0.22\text{ mm}$)

Fig. 5 Particles fluidization states under the different velocities of cycle liquid coolant

(a) $v_{c,in} = 0.15\text{ m/s}$ (b) $v_{c,in} = 0.20\text{ m/s}$ (c) $v_{c,in} = 0.30\text{ m/s}$

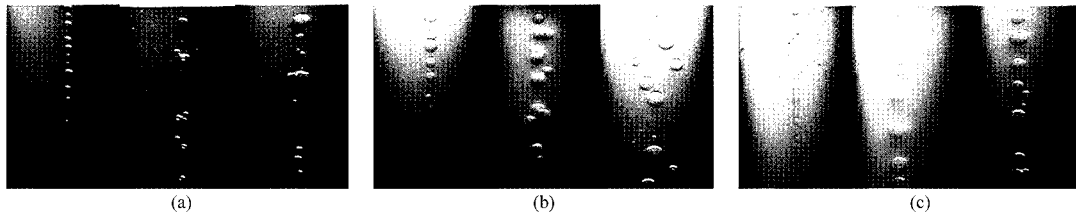


图 6 不同循环液体温度时的颗粒流化状态 ($v_{c,in} = 0.15\text{ m/s}$, $G_{p,out} = 50\text{ mL/min}$, $d_0 = 0.22\text{ mm}$)

Fig. 6 Particles fluidization states under the different temperatures of cycle liquid coolant

(a) $T_{c,in} = -3^{\circ}\text{C}$ (b) $T_{c,in} = -7^{\circ}\text{C}$ (c) $T_{c,in} = -10^{\circ}\text{C}$

2.2 沿程粒径分布

颗粒流化过程沿程粒径分布采用颗粒的频率分布表征,频率分布(相对频数) f 为粒径 d_p 至 $d_p + \Delta d_p$ 之间的粒子数目 ΔM 占颗粒样本总数目 M 的百分数,定义为

$$f = \frac{\Delta M}{M} \times 100\% \quad (1)$$

流化床内颗粒的粒径信息获取方法是基于图像采集与处理技术得到不同工况下的液滴粒径信息^[9],而流化床出口处流体冰的粒径信息通过实测方法获取。

图 7 为不同参数组合下颗粒沿程粒径分布直方

图,每幅图给出了流化床 4 个高度上颗粒的粒径分布,分别为 0.05、0.50、1.00 m 和流化床出口处。由图可知,颗粒沿程粒径分布随流化床运行参数组合的改变而发生变化;选取的 4 种参数组合工况,其颗粒沿程粒径分布均向粒径增大的方向移动,表明颗粒在流化过程中必然发生聚并的现象,形成更大的颗粒。原因是颗粒按照一定的粒径分布形成后,在流化床内的运动规律具有显著差异,粒径较小的颗粒主要受循环液体的携带作用,运动范围较小,运动轨迹比较一致;而粒径较大的颗粒运动范围较大,运动轨迹也比较复杂,易发生聚团流化现象,颗粒间碰撞的机会增多,一旦颗粒相互碰撞,则增大了颗

粒聚并现象的发生,易形成更大的颗粒,同时受颗粒自身的相变程度影响,亦可能出现颗粒的粘连与分散流化特征。因此,液-液循环流化床运行参

数组合不仅影响颗粒形成时的粒径分布以及颗粒流化过程中的相变程度^[2],也直接影响流化床内颗粒流化特征。

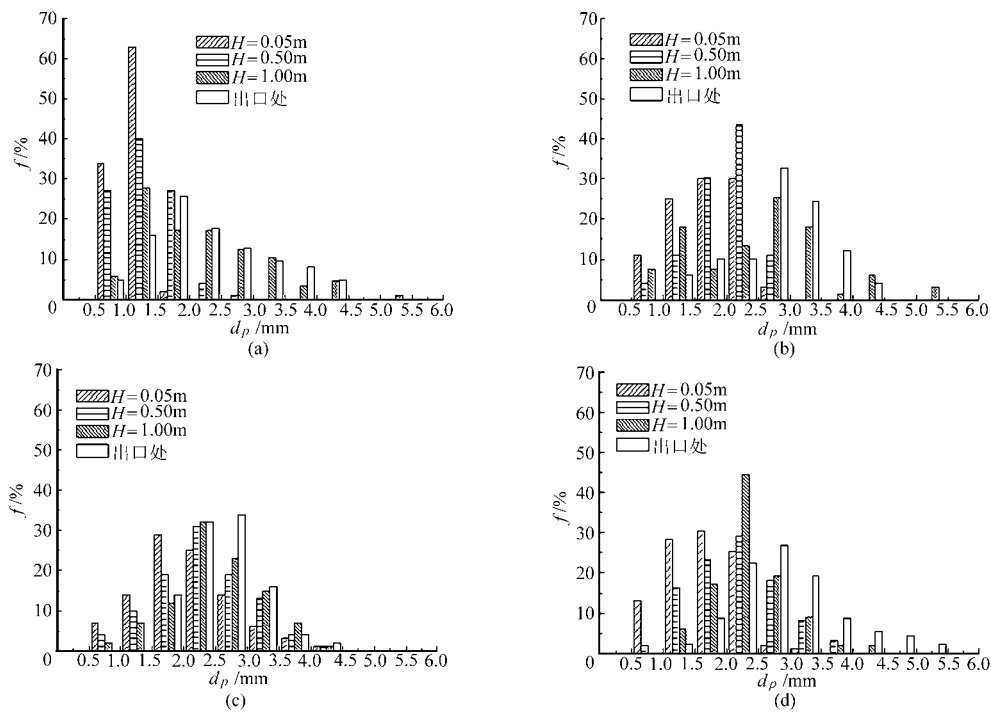


图 7 不同参数组合下颗粒沿程粒径分布

Fig.7 Particles sizes distributions along the height under the different operating parameters combination
(a) $T_{c,in} = -7^{\circ}\text{C}$, $v_{c,in} = 0.30\text{ m/s}$, $G_{p,out} = 30\text{ mL/min}$ (b) $T_{c,in} = -7^{\circ}\text{C}$, $v_{c,in} = 0.30\text{ m/s}$, $G_{p,out} = 70\text{ mL/min}$
(c) $T_{c,in} = -7^{\circ}\text{C}$, $v_{c,in} = 0.20\text{ m/s}$, $G_{p,out} = 30\text{ mL/min}$ (d) $T_{c,in} = -5^{\circ}\text{C}$, $v_{c,in} = 0.20\text{ m/s}$, $G_{p,out} = 30\text{ mL/min}$

2.3 流化床流化状态

流化床的流化状态通常用散式流化与聚式流化表征,Wilhelm 和郭慕孙根据弗劳德准则数大小判别流化状态^[5],弗劳德准则数 Fr 表达式为

$$Fr = \frac{U^2}{d_p g}$$
 (2)

式中 U ——颗粒表观流速

d_p ——颗粒直径 g ——重力加速度

当颗粒处于临界流化状态时,有 $U = U_t$, U_t 为临界流化速度^[5]。此时,若 $Fr > 1.3$,则为聚式流化; $Fr < 0.13$,则为散式流化。达到流化状态时弗劳德准则数越小,流化床稳定性越好。但当弗劳德准则数大于 0.13 且小于 1.3 时,属于不确定区,两种流化状态都有可能。

图 8 为运行参数影响流化床流化状态图,图中根据不同参数组合时计算出的流化床弗劳德准则数进行流化状态的划分,图中黑色方块表示实验测试点,实线表示分散液体流量,其箭头方向代表分散液体流量增大。由图可知,图中的两条虚线将运行参数组合划分为 3 个区域,A 区代表流化床的聚式流化状态, $Fr > 1.3$; B 区代表流化床的不确定区, $0.13 < Fr < 1.3$; C 区代表流化床的分散流化状态,

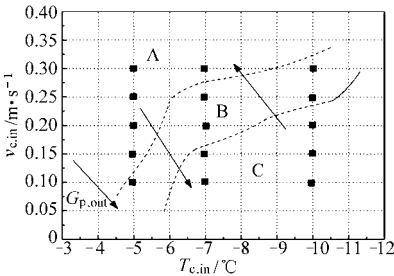


图 8 运行参数与流化状态关系图

Fig.8 Effect of parameters on fluidization states

$Fr < 0.13$;并分别对应颗粒的聚并、粘连和分散流化特征。由此表明颗粒的不同流化特征直接影响流化床的流化状态,且流化床的理想流化状态——分散流化主要发生在分散液体流量较小、循环液体流速和温度较低的区域。原因在于该区域内颗粒形成时的粒径较小,颗粒在流化床内的停留时间较长,颗粒的相变程度较深,虽然有颗粒的聚团流化特征,但是颗粒碰撞之后,不易发生粘连和聚并现象。

3 结论

(1)液-液循环流化床内有颗粒的聚团、分散、粘连和聚并 4 种典型流化特征,颗粒的流化特征主要受流化床运行参数影响而发生变化,且随流

化床高度的增加亦发生转变,沿程表现不同的流化特征。

(2)颗粒的聚团流化特征首先发生在距流化床底部 0.50 m 高度内。颗粒的聚团流化增大了颗粒间的碰撞机率,受颗粒相变程度的影响,进而在流化床其他高度上形成颗粒的聚并、粘连和分散流化特征,并最终影响颗粒状冰晶的状态。

(3)获得了液-液循环流化床 4 个高度上的颗粒粒径分布图,沿高度方向颗粒的粒径分布均向粒

径增大的方向移动,表明颗粒聚并形成更大颗粒的现象不可避免;但不同的流化床运行参数组合,对沿程颗粒粒径分布的影响趋势不同。

(4)基于弗劳德准则数判别了流化床的流化状态,得到了流化床的聚式流化、不确定以及分散流化状态的运行参数组合区域,其分别与颗粒的聚并、粘连和分散流化特征相对应,且流化床的理想流化状态——分散流化主要发生在分散液体流量较小、循环液体流速和温度较低的区域。

参 考 文 献

- 1 Thongwik S, Vorayos N, Kiatsiriroat T, et al. Thermal analysis of slurry ice production system using direct contact heat transfer of carbon dioxide and water mixture [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2008, 35(5): 756 ~ 761.
- 2 Peng Zhengbiao, Yuan Zhulin, Liang Kunfeng, et al. Ice slurry formation in a concurrent liquid-liquid flow [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2008, 16(4): 552 ~ 557.
- 3 张学军, 田新建, 郑克晴, 等. 气体直接接触式制取冰浆实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2010, 31(12): 1 997 ~ 2 000.
Zhang Xuejun, Tian Xinjian, Zheng Keqing, et al. Research on the ice slurry generator using the direct contact heat transfer of gas and water solution [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, 31(12): 1 997 ~ 2 000. (in Chinese)
- 4 Lan Qingdao, Bassi Amarjeet, Zhu Jingxu, et al. Continuous protein recovery from whey using liquid-solid circulating fluidized bed ion-exchange extraction [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2002, 78(2): 157 ~ 163.
- 5 吴占松, 马润田, 汪展文. 流态化技术基础及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 3 ~ 21.
- 6 梁坤峰, 彭正标, 袁竹林, 等. 液-液雾化特性与粒径分布规律 [J]. *化工学报*, 2007, 58(8): 1 935 ~ 1 942.
Liang Kunfeng, Peng Zhengbiao, Yuan Zhulin, et al. Atomization and drop-size distribution of liquid-liquid systems [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2007, 58(8): 1 935 ~ 1 942. (in Chinese)
- 7 王朝晖, 廖振方. 针板电极荷电液体射流不稳定性分析 [J]. *农业机械学报*, 2009, 40(8): 86 ~ 91.
Wang Zhaohui, Liao Zhenfang. Analysis of instability for charged liquid jets with the needle-plate electrodes [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(8): 86 ~ 91. (in Chinese)
- 8 王贞涛, 岑旗钢, 宋晓宁, 等. 双流体荷电雾化的 PDA 实验 [J]. *农业机械学报*, 2008, 39(10): 80 ~ 84.
Wang Zhentao, Cen Qigang, Song Xiaoning, et al. Experiment of twin-fluid charged spray by PDA [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(10): 80 ~ 84. (in Chinese)
- 9 梁坤峰, 高春艳, 王林. 液-液循环流化床液滴形成特性实验研究 [J]. *农业机械学报*, 2011, 42(8): 228 ~ 234.
Liang Kunfeng, Gao Chunyan, Wang Lin. Drop formation characteristic of liquid-liquid circulating fluidized bed [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(8): 228 ~ 234. (in Chinese)