

研究论文

液液雾化特性与粒径分布规律

梁坤峰, 彭正标, 袁竹林, 凡凤仙
(东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 液液雾化过程是液液循环流化床的关键技术之一, 在流化床常态实验装置上, 采用快速摄像与图像处理相结合的方法, 获得了实验流量范围内液滴形成过程的图像以及形成液滴的粒径信息, 运用数学分布函数对液滴的粒径分布进行了研究。研究表明, 各流量工况下, 液滴的粒径分布与 Rosin-Rammler 分布符合得较好; 在实验流量范围内, 形成液滴的区域有单液滴形成区域、过渡区域和多液滴形成区域, 且液滴中位径的总体趋势是减小的, 当水的流量为 $50 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 形成液滴的粒径主要集中在 $0.7 \sim 1.0 \text{ mm}$ 之间; 在单液滴形成区域和多液滴形成区域, 液滴粒径的均匀性先减小后增大, 中位径呈减小趋势, 但在多液滴形成区域两者的变化幅度较小, 在过渡区域, 液滴粒径的均匀性与中位径基本不变。研究结果可为液液循环流化床基于设计粒径的要求合理选取运行流量提供可靠依据。

关键词: 液液循环流化床; 液液雾化; 液滴; 粒径分布

中图分类号: TQ 027.3⁺5

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2007) 08-1936-08

Atomization and drop-size distribution of liquid-liquid systems

LIANG Kunfeng, PENG Zhengbiao, YUAN Zhulin, FAN Fengxian

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: Drop formation in liquid-liquid atomization processes is one of the key techniques of liquid-liquid circulating fluid bed (CFB). A high resolution digital camera and image processing were used to investigate the process of drop formation in a normal CFB experimental system. The photos and sizes of drops in the whole flux range were obtained from experiments, and the distribution function was used to analyze the drop-size distribution (DSD). Experimental results indicated that DSD from a specific flux was in good agreement with Rosin-Rammler distribution function, and the areas of drop formation were divided into single drop formation section, transition section, and multiple drop formation section. It was found that with increasing flux, the uniformity of drops decreased at first and then increased and the median diameter of drops always decreased in both single drop formation section and multiple drop formation section. The uniformity and median diameter of drops in the multiple drop formation section changed insignificantly, whereas they remained unchanged in the transition section. And the diameters of drops formed were mostly between 0.7 mm and 1.0 mm while the flux of water was $50 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$. The research results provide a reasonable flux range of drop formation for practical operation of CFB based on the design demand of particle-size.

Key words: liquid-liquid circulating fluid bed; liquid-liquid atomization; drop; drop-size distribution

2006-09-04 收到初稿, 2006-11-11 收到修改稿。

联系人: 袁竹林。第一作者: 梁坤峰 (1975—), 男, 博士研究生, 讲师。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2004CB217707); 教育部高等学校博士点专项科研基金项目 (20060286034)。

Received date: 2006-09-04.

Corresponding author: Prof. YUAN Zhulin. **E-mail:** zlyuan@seu.edu.cn

Foundation item: supported by the National Basic Research Program of China (2004CB217707) and the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education, Ministry of Education of China (20060286034).

引 言

流体冰是近年新发展起来的一种新冰种，具有流动性、换热性能好和可用泵进行输送等优点，在制冷空调、化工、医疗等用冷场合的应用前景非常广阔，流体冰的制取与应用在制冰界引起广泛关注^[1-7]。液液循环流化床是以制取流体冰为背景而提出的一种新型流化制冰技术^[5,7]，其原理是将水直接喷入与之不相溶的另一种低温载冷液体中，喷入的水雾化成细小的水滴与循环液体一起向床的上方流动，水滴与周围低温载冷液体直接接触换热，在流动过程中被冻结成冰颗粒，流出床体后通过过滤装置与低温载冷液体分离，从而获得流体冰。液液雾化形成细小水滴增大了两种液体的接触表面积，极大地强化了两相间的传热与传质过程，该方法将具有高效传热传质能力的流化床技术引入制冰领域，充分发挥了多相流动与传热的重要作用。

液液循环流化床技术的关键问题之一是控制液液雾化形成液滴的粒径分布。液液雾化问题由来已久，但由于应用背景较少，研究内容多集中在低速层流液液雾化方面，对液滴形成条件、液滴粒径分布、射流内部速度分布、界面形状等基础问题进行了研究^[8-15]。液液雾化形成液滴过程涉及惯性力、浮力、曳力、界面张力的相互作用，问题非常复杂，虽有不少研究成果可供参考，但是针对具体工程问题，控制液液雾化形成液滴的粒径分布依然存在困难，因此研究流化床内液液雾化特性及其形成液滴的粒径分布规律对于液液循环流化床制冰方法的实现具有重要意义。

本文基于特定工程应用背景，建立液液循环流化床常态实验系统，采用快速摄像与图像处理相结合的方法，获得了实验流量范围内液液雾化形成液滴过程的图像以及形成液滴的粒径信息。运用数学分布函数考察了形成液滴的粒径分布，分析了液滴粒径的均匀性和尺寸变化特征，并探讨了液液循环流化床制冰过程中液液雾化的实际运行流量区域。

1 实验系统

液液循环流化床实验系统如图 1 所示。流化床主体由高 2000 mm、厚 5 mm 的有机玻璃管制成，流化床底部的中心轴线处设置 1 个喷头，喷头采用圆形喷孔，内径 0.22 mm、外径 0.5 mm，喷头以下 300 mm 处为另一种液体的进口，管内径 30

mm，进口方向与流化床主体相垂直。在流化床的拍照高度，设置 400 mm×400 mm×400 mm 的采光室，上部不封闭，靠近玻璃管的一侧开 80 mm×45 mm 的透光口。

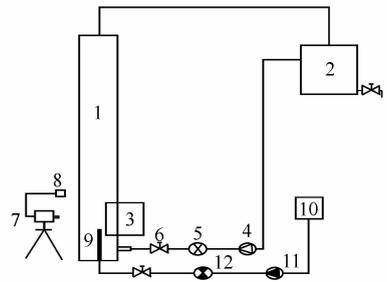


图 1 液液循环流化床实验系统

Fig. 1 Testing system of liquid-liquid CFB

- 1—fluid bed; 2—water and oil segregator;
- 3—lighting chamber; 4—centrifugal oil pump;
- 5—gear meter; 6—valve; 7—CCD-camera;
- 8—light source; 9—nozzle; 10—water tank;
- 11—pressure pump; 12—glass rotameter

实验过程中，实验流体分 2 路进入流化床，一路为变压器油，另一路为水（加入红色颜料，以增大图像对比度），变压器油首先由离心油泵（YG50-100）、油过滤器进入流化床，采用齿轮流量计（LC-40）测量流量，通过阀门将其调节到实验点，待流动稳定之后，打开增压泵（12wz-8）抽取水箱的水，水增压后从喷头直接喷入床内，水的流量由玻璃转子流量计（LZJ-10）读取，用阀门将流量调节到实验点时，打开采光室上部的强光源，光线通过透光口将床内液滴形成过程反射到数码相机，数码相机以每秒 30 帧的频率进行连续拍摄，记录距离喷孔 0~50 mm 高度内液滴的形成过程。实验工况如表 1 所示。其中， $Q_{v,p}$ 为水的体积流量， \bar{v}_c 为变压器油在喷头处的平均流速， f 为连续拍摄的照片数， ρ_c 为变压器油的密度。

表 1 实验工况

Table 1 Test condition

$Q_{v,p}/\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$	\bar{v}_c $/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	f	ρ_c $/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
2.6, 4.4, 5.7, 6.2, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50	0.18	100	895

2 实验结果

图 2 为液液单孔雾化过程形成液滴示意图，由

图可知，作为分散相的水从喷头处喷入充满变压器油的流化床内，喷入的水在流动的变压器油的作用下，雾化形成水滴（后文统一用液滴），形成的液滴聚集在流化床的中心，并具有粒径的大小差异。

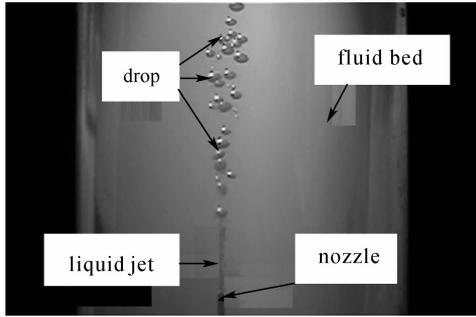


图 2 液液雾化现象示意图

Fig. 2 Schematic diagram of liquid-liquid atomization

2.1 不同工况下液液雾化特性

图 3 为 12 个实验流量工况下，连续拍摄的 4 幅液液雾化过程形成液滴的照片。由图可以看出同一工况的不同时刻，形成液滴的位置和粒径大小的

动态变化情况。水的流量为 $2.6 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ 时，液滴在喷孔端部形成，且每个液滴的粒径差别较小，但液滴形成的频率很低；水的流量在 $4.4 \sim 15 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ 工况下时，形成液滴的位置变化均较大，原因是在此流量范围内，受周围液体流动的影响，喷入水的惯性力不足以维持射流稳定断裂，在固定位置形成液滴，由此导致形成液滴的粒径大小差异变化较大，即粒径均匀性发生变化；随着流量的增大，达到 $20 \sim 30 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ 时，形成液滴的位置比较固定，液滴粒径的变化也很小；当流量大于 $35 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ 之后，从图 3 (j) ~ (l) 可以看出，由于水喷射的惯性力足够大，水喷入周围液体中，形成一个喷射锥角，水与周围液体之间的速度差较大，两相界面受到周围液体的强烈扰动，界面不能保持完整外形，出现湍动、掺混使一些小的液滴在两相交界面形成，射流再向上发展，多个液滴在射流主体内部同时产生，液滴形成的位置比较稳定，形成的频率很大，液滴之间的碰撞聚并作用增强，粒径大小的差异变化也较大。

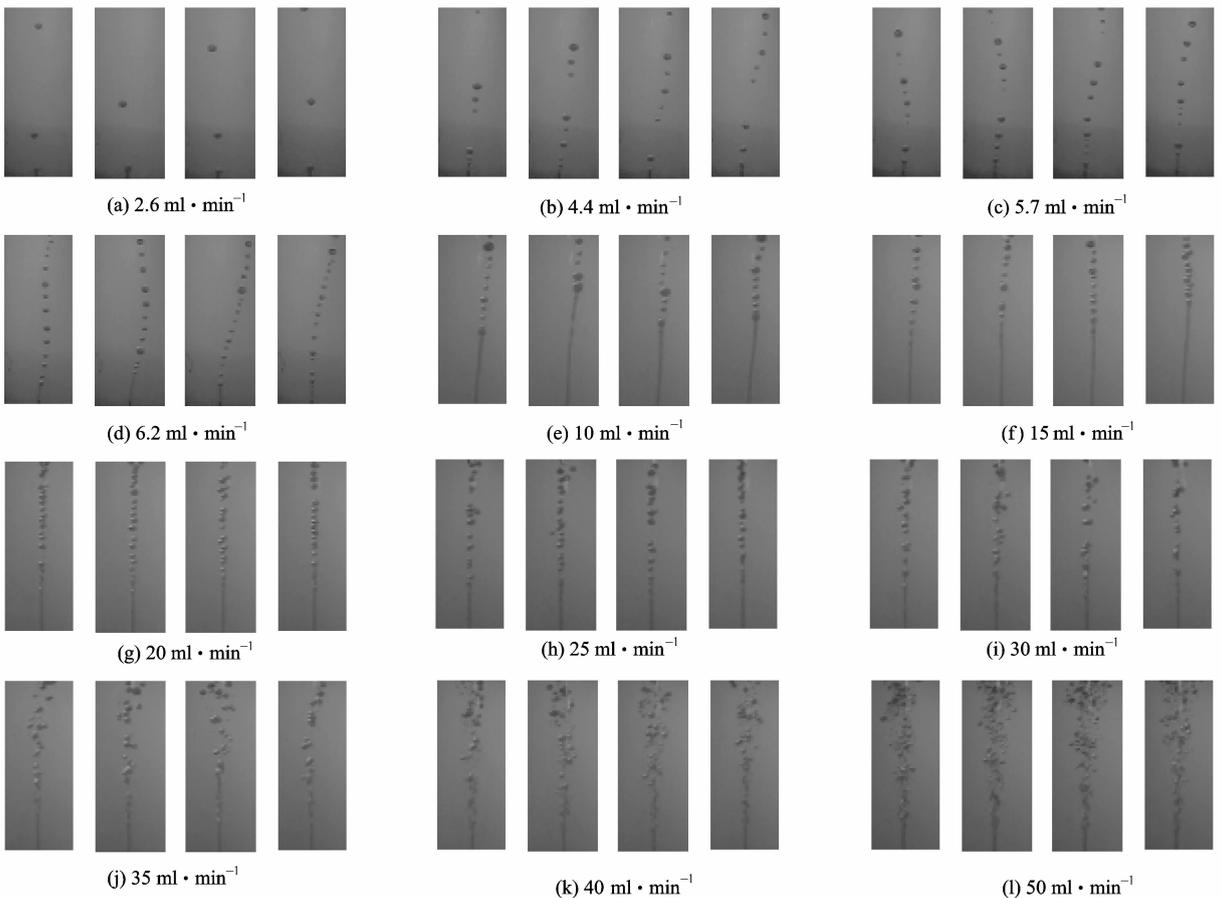


图 3 不同流量下的液液雾化过程

Fig. 3 Liquid-liquid atomization under different flow rates

2.2 液液雾化特性的变化趋势

对比 12 个流量工况的液滴形成过程，可以发现，水的流量较小时，在喷孔端部形成一个个液滴，如图 3 (a) 所示，当在 $4.4 \sim 15 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ 之间变化时，喷孔上部会有一个射流出现，随流量的增大，射流的高度也在增大，此时，液滴的形成是由于射流受到周围液体的扰动，断裂成一个个液滴，形成液滴的频率虽然在增大，但依然是以单个液滴的形式随周围液体流动，液滴之间没有碰撞发生。当流量增大到 $20 \sim 30 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ 时，液滴的形成有两种方式共存，即射流断裂成一个个液滴和一个大液滴分裂成多个小液滴，如图 3 (g) ~ (h) 所示，在这个流量区域内，液滴的形成方式由形成单液滴向形成多个液滴转变。当流量大于 $35 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ 时，两相在界面处的作用剧烈，液滴的形成主要依靠界面的湍动和周围液体的掺混作用，形成液滴的数量很大。因此，在实验流量范围内，液液雾化过程形成液滴的流量区域可以分为单液滴形成区域、过渡区域和多液滴形成区域。

3 图像处理与粒径信息提取

由上面对实验结果的定性分析可知，液液雾化

过程在流量变化时，所形成液滴的粒径大小和均匀性有不同程度的差异，为了定量研究这种变化，需要得到不同工况下形成液滴的粒径信息。本文采取图像处理的方法对液滴粒径大小进行量化。

由于液液雾化过程两相间的表面张力较大，液滴一旦形成，很快收缩成球形，通过图像处理的方法获得液滴粒径信息时，认为形成的液滴均为球形。图 4 是不同流量工况下，经过图像处理之后的液液雾化过程，将原始图像进行灰度处理，调整其灰度等级，提高图像的信噪比，经过处理的图像，液滴与环境的对比鲜明，在液滴边缘利用灰度差，对液滴进行边缘检测，可以获得液滴直径在水平方向上的像素差值。

液滴粒径信息获取的方法如图 5 所示，测量 ΔX_i 、 ΔX 、 D ，采用式 (1) 计算液滴的粒径

$$d_i = \frac{\Delta X_i D}{\Delta X} \quad (1)$$

式中 ΔX_i 为单个液滴在水平方向上的像素差； ΔX 为管道两侧边界在水平方向上的像素差； D 为可见管径的实际尺寸，mm。

由于实验过程在拍照区域采用暗室，因此实际可见管径要比真实管径小，需要对实验管径的宽度

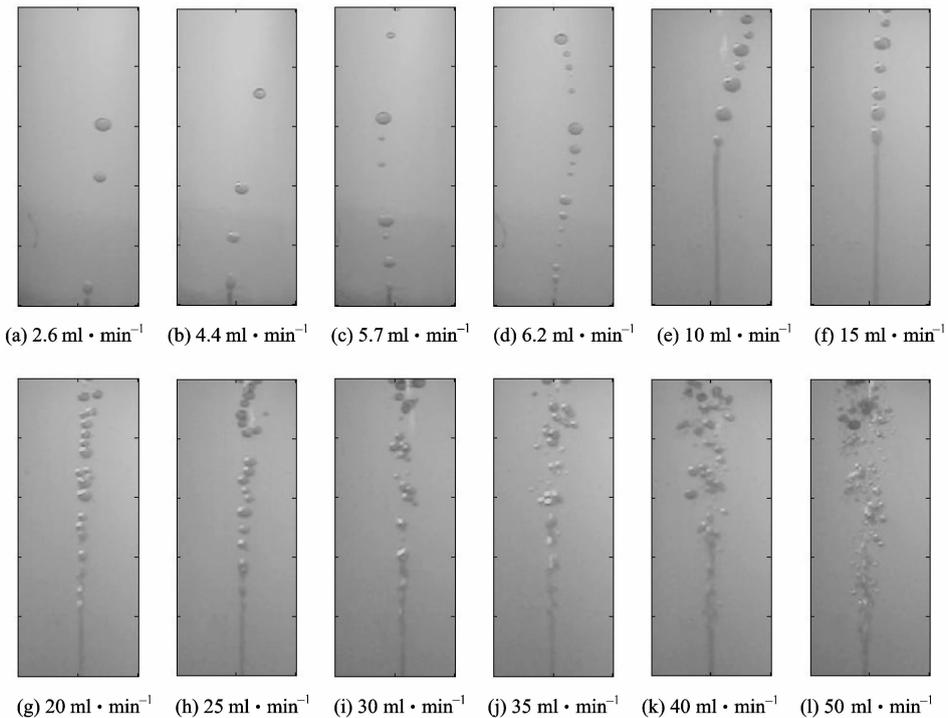


图 4 图像处理不同流量下的液液雾化过程

Fig. 4 Liquid-liquid atomization under different flow rates after image processing

进行标定, 在每个工况进行拍照之前, 拍摄一张壁面贴上标尺的照片, 标定时, 将标尺的刻度与可见管径进行对比, 取 3 次结果的平均值作为可见管径的实际尺寸。

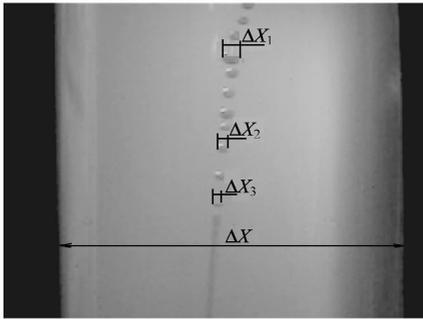


图 5 粒径测量原理图

Fig. 5 Schematic diagram of drop-size measurement

4 实验结果分析

4.1 粒径分布理论

粒径分布常用数学函数法表示, 应用较为广泛的有正态分布函数、对数分布函数、Rosin-Rammler 分布函数^[16], 经过对 3 种分布函数的比较, 发现采用 Rosin-Rammler 分布函数研究液液雾化形成液滴的粒径分布是最有效的方法, 其分布表达式为

$$F(d) = \exp[-(d/\bar{d})^m] \quad (2)$$

式中 $F(d)$ 为分布函数 (筛上累计质量分数); d 为粒径尺寸; \bar{d} 为特征尺寸, 取 $F(d) = e^{-1} \approx 0.368$ 时的粒径值; m 为分布参数 (均匀性系数), 表征液滴粒径分布的均匀性。

将式 (2) 改写成

$$\ln(-\ln F(d)) = m \ln d - m \ln \bar{d} \quad (3)$$

式 (3) 表明如果液滴粒径分布能够符合 Rosin-Rammler 分布模型, 在双对数 $\ln d$ 与 $\ln(-\ln F(d))$ 坐标系下, 所绘制的粒径分布曲线的回归曲线为一条直线, m 为直线的斜率, 可用回归曲线的相关系数判断液滴粒径分布与 Rosin-Rammler 分布函数的符合情况。

通过式 (2) 可得到 Rosin-Rammler 分布函数的密度函数为

$$f(d) = \frac{m}{d} \times d^{m-1} \exp[-(d/\bar{d})^m] \quad (4)$$

由密度函数可以求得任意两个分布粒径之间液滴质量所占总液滴质量的百分比

$$F(d_2) - F(d_1) = \int_{d_1}^{d_2} f(d) dd \quad (5)$$

4.2 粒径分布函数

对实验流量范围内的 12 个工况进行液滴粒径测量, 每个工况取 100 个液滴, 采用图像处理方法获得雾化过程形成液滴的粒径信息。根据液滴粒径信息计算 12 个流量工况下, 各粒径范围对应的筛上累计质量分数, 如表 2 所示。

根据 Rosin-Rammler 分布函数的要求, 由式 (2) 以及表 2 中的数据, 可以得到不同流量下在双对数坐标系中液滴粒径分布散点图及回归曲线, 如图 6 所示。由图 6 及表 3 中回归直线的相关系数 R^2 可知, 不同流量工况下回归直线的线性回归良好, 能较好地符合 Rosin-Rammler 分布函数。表 3 列出了所有实验流量工况下, 回归直线的表达式和 Rosin-Rammler 分布函数表达式。

4.3 粒径分布均匀性

图 6 给出了双对数坐标下 Rosin-Rammler 分布函数关系曲线, 由图可知, 在单液滴形成区域, 回归直线斜率有先减小后增大的趋势, 即流量在 $2.6 \sim 10 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ 范围内增大时, 回归直线的斜率很快减小, 但增大至 $15 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 斜率又迅速增大; 当液滴的形成从单液滴向多液滴转变时, 液滴粒径分布的回归直线斜率变化很小; 到了多液滴形成区域, 其回归直线斜率的变化趋势是先减小后增大, 与单液滴时相近, 只是其变化的幅度比单液滴形成区域要小得多。

综合分析图 6 中回归直线斜率随流量变化的规律, 得到实验流量范围内液滴粒径分布均匀性关系图, 如图 7 所示。图中纵坐标采用 Rosin-Rammler 分布函数的分布参数, 即回归直线斜率。在单液滴形成区域, 液滴的形成要受到惯性力、浮力 (方向向下)、周围液体阻力的影响, 水的流量较小时, 主要克服周围液体阻力和浮力的作用, 形成频率较小, 分布均匀性较好; 当流量增大, 射流速度增大, 液滴离开孔口的惯性力会增大, 形成大液滴之后, 出现卫星液滴^[13] (粒径很小的液滴), 分布均匀性减小; 流量继续增大, 惯性力大于周围液体阻力和浮力, 形成液滴的方式是射流断裂形成一个个液滴, 这种方式形成的液滴受周围液体扰动的影响很大, 分布均匀性也在减小^[14], 但是射流的流速越大, 周围液体扰动的影响减弱, 分布均匀性又会增大, 因此出现分布参数先减小后增大的现象。在

表 2 液滴的筛上累计质量分数

Table 2 Up accumulating mass percent of drops

$Q_{v,p}$ /ml · min ⁻¹	d/mm	$F(d)/%$	$Q_{v,p}$ /ml · min ⁻¹	d/mm	$F(d)/%$	$Q_{v,p}$ /ml · min ⁻¹	d/mm	$F(d)/%$
2.6	1.63	0.952	10	0.85	0.969	30	1.05	0.879
	1.83	0.900		1.11	0.922		1.26	0.771
	2.05	0.724		1.68	0.685		1.38	0.505
	2.25	0.537		2.41	0.360		1.59	0.261
	2.55	0.232		2.88	0.083		1.85	0.046
	2.64	0		3.02	0		2.09	0
4.4	1.48	0.955	15	1.11	0.909	35	0.81	0.928
	1.85	0.841		1.41	0.751		1.15	0.687
	2.21	0.482		1.85	0.327		1.35	0.432
	2.41	0.285		2.04	0.157		1.55	0.251
	2.51	0.139		2.26	0.042		1.69	0.085
	2.64	0		2.37	0		1.91	0
5.7	1.21	0.929	20	0.94	0.974	40	0.61	0.979
	1.51	0.815		1.31	0.596		0.91	0.741
	1.95	0.552		1.57	0.345		1.19	0.470
	2.23	0.342		1.75	0.182		1.31	0.304
	2.38	0.146		2.01	0.040		1.47	0.108
	2.45	0		2.07	0		1.59	0
6.2	0.95	0.965	25	0.95	0.961	50	0.45	0.973
	1.31	0.832		1.25	0.759		0.58	0.848
	1.88	0.468		1.41	0.471		0.71	0.582
	2.11	0.314		1.74	0.095		0.85	0.332
	2.28	0.177		1.85	0.037		1.01	0.132
	2.43	0		1.90	0		1.27	0

表 3 Rosin-Rammler 分布函数与回归直线表达式及其相关系数

Table 3 Correlation coefficient and expression of Rosin-Rammler distribution function and regression

$Q_{v,p}$ /ml · min ⁻¹	Expression of distribution function	Expression of regression	R^2	$Q_{v,p}$ /ml · min ⁻¹	Expression of distribution function	Expression of regression	R^2
2.6	$F(d) = \exp[-(d/2.48)^{7.76}]$	$y = 7.76x - 6.822$	0.9952	20	$F(d) = \exp[-(d/1.36)^{6.25}]$	$y = 6.07x - 2.803$	0.9671
4.4	$F(d) = \exp[-(d/2.32)^{7.1}]$	$y = 7.08x - 5.951$	0.9947	25	$F(d) = \exp[-(d/1.365)^{6.63}]$	$y = 6.60x - 2.769$	0.9943
5.7	$F(d) = \exp[-(d/2.1)^{4.61}]$	$y = 4.68x - 3.506$	0.9925	30	$F(d) = \exp[-(d/1.48)^{5.78}]$	$y = 5.75x - 2.408$	0.9822
6.2	$F(d) = \exp[-(d/2.05)^{4.32}]$	$y = 4.33x - 3.018$	0.9963	35	$F(d) = \exp[-(d/1.47)^{4.66}]$	$y = 4.73x - 1.634$	0.9972
10	$F(d) = \exp[-(d/2.39)^{3.48}]$	$y = 3.48x - 2.870$	0.9964	40	$F(d) = \exp[-(d/1.28)^{5.14}]$	$y = 6.22x - 2.357$	0.9829
15	$F(d) = \exp[-(d/1.81)^{4.93}]$	$y = 4.93x - 2.898$	0.9994	50	$F(d) = \exp[-(d/0.84)^{5.32}]$	$y = 4.84x - 1.274$	0.9779

多液滴形成区域，分布参数亦呈现先减小后增大的趋势，只是其变化的趋势没有单液滴形成区域显著，原因在于流量较小时，多个液滴同时形成后，液滴不能很快分散到周围液体中，液滴之间碰撞产生聚并的概率很大，使液滴粒径的差别较大，分布均匀性较小，当流量增大，两相间界面作用增强，液滴之间碰撞产生聚并的概率在增大，但是液滴在周围油的作用下互相分离的趋势也在增强，其分布

均匀性又有所增大。在过渡区域，受到射流断裂形成液滴、液滴碰撞产生聚并以及周围液体对液滴分散作用的综合影响，使得分布参数基本不变。

4.4 粒径变化特征

图 8 给出了不同流量下液滴中位径的变化趋势。由图可见，随着流量的增大，液滴粒径总的趋势是减小的，在单液滴形成区域，液滴粒径减小很快，过渡区域粒径变化不大，到多液滴形成区域液

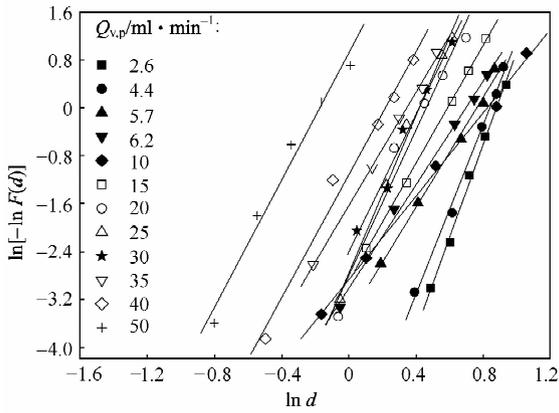


图 6 双对数坐标下 Rosin-Rammler 分布函数关系曲线

Fig. 6 Rosin-Rammler distribution function under double logarithmic coordinates

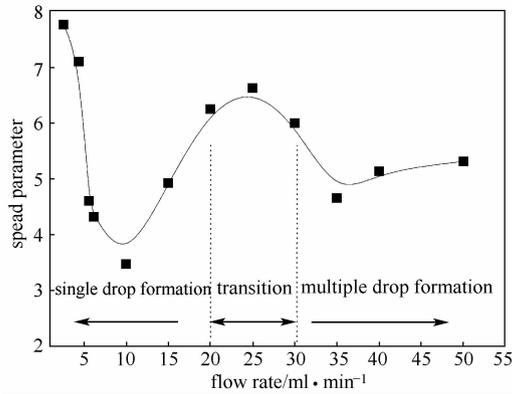


图 7 液滴的粒径分布均匀性

Fig. 7 Uniformity of drop-size distribution

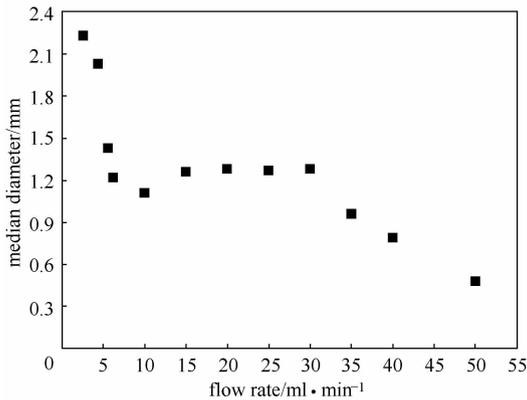


图 8 液滴的中位径

Fig. 8 Median diameter of drops

滴粒径亦呈现减小趋势，只是其变化趋势与单液滴形成区域相比要小得多。

液液循环流化床两相间的传热与传质强化受液

滴的粒径大小影响很大^[7]，根据文献 [7] 的计算结果，制冰过程要求液滴的粒径在 1.0 mm 以下。由式 (4)、式 (5) 计算了实验流量范围内，液滴的粒径分别小于 1.0、0.8、0.7、0.5 mm 时，其质量分数曲线，结果如图 9 所示。在单液滴形成区域和过渡区域，液滴的粒径小于 1.0 mm 的质量分数不超过 20%，粒径小于 0.8、0.7、0.5 mm 的液滴质量分数不超过 5%；在多液滴形成区域，液滴的粒径小于 1.0、0.8、0.7 mm 的质量分数迅速增大，在水的流量为 50 ml·min⁻¹ 时，其质量分数分别达到 92%、54% 和 31%，而液滴的粒径小于 0.5 mm 的质量分数仅为 6%，此时形成液滴的粒径主要集中在 0.7 ~ 1.0 mm 之间。

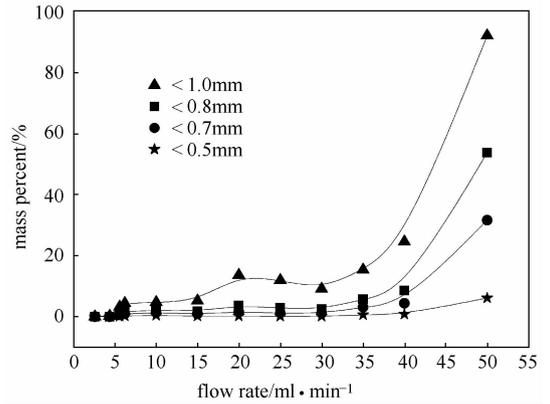


图 9 小于给定粒径的液滴的质量分数

Fig. 9 Mass percent of drops less than certain size under different flow rates

液液雾化形成的液滴在不同的流量工况下，其粒径的大小与均匀性是变化的，掌握液滴的粒径分布规律是液液雾化研究的重要目标之一，图 7、图 8 的曲线变化规律揭示了随分散相流量的变化，液液雾化过程中所形成液滴的粒径分布的规律性。所揭示的粒径分布变化规律一方面为液液循环流化床制冰过程中水的流量范围选取提供了依据，另一方面为其他液液介质组合的雾化研究给出了方向性的指导。

5 结 论

(1) 各流量工况的不同时刻，液液雾化过程中液滴形成的位置是动态变化的，水的流量小于 15 ml·min⁻¹ 时的各流量，其变化要比流量大于 20 ml·min⁻¹ 时的剧烈。

(2) 在实验流量范围内，液液雾化形成液滴过程的特性发生变化，水的流量小于 15 ml·min⁻¹

时,形成的液滴以单个液滴的形式随周围液体流动,液滴之间没有碰撞,随着流量的增大,达到 $20\sim 30\text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,液滴形成的方式由形成单液滴向形成多个液滴转变,当流量大于 $35\text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,射流同时形成多个液滴,液滴之间的碰撞、聚并增强。因此随着分散相实验流量的增大,液液雾化形成液滴的过程具有单液滴形成区域、过渡区域和多液滴形成区域,这个现象与一种液体在空气中的雾化具有一定的相似性。

(3) 在分散相的各流量工况下,液滴的粒径分布与 Rosin-Rammler 分布符合较好,用该分布函数对液滴的粒径均匀性和中位径变化特征进行分析,发现在单液滴形成区域和多液滴形成区域,液滴的粒径均匀性先减小后增大,中位径呈减小趋势,但多液滴形成区域的变化幅度较小,在过渡区域,液滴的粒径均匀性与中位径基本不变。

(4) 通过分布密度函数计算出各流量工况下,液滴的粒径分别小于 1.0 、 0.8 、 0.7 、 0.5 mm 时的质量分数曲线,发现粒径小于 0.5 mm 的液滴,其质量分数在整个流量范围内最大不超过 6% ,粒径小于 1.0 、 0.8 、 0.7 mm 的液滴,其质量分数在单液滴形成区域和过渡区域,均不超过 20% ,在多液滴形成区域则迅速增大,当水的流量为 $50\text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,分别达到 92% 、 54% 和 31% ,此时形成液滴的粒径主要集中在 $0.7\sim 1.0\text{ mm}$ 之间。

References

- [1] Akio Saito. Recent advances in research on cold thermal energy storage. *International Journal of Refrigeration*, 2002, **25** (2): 177-189
- [2] Wijesunder N E, Hawlader M N A, Chan Wee Boon Andy, et al. Ice-slurry production using direct contact heat transfer. *International Journal of Refrigeration*, 2004, **27** (5): 511-519
- [3] Shina H T, Lee Y P, Jurng J. Spherical-shaped ice particle production by spraying water in a vacuum chamber. *Applied Thermal Engineering*, 2000, **20** (5): 439-454
- [4] Meewisse J W, Infante Ferreira C A. Validation of the use of heat transfer models in liquid solid fluidized beds for ice slurry generation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, **46** (19): 3683-3695
- [5] Yuan Zhulin (袁竹林). A new method of dynamic ice-making & the study on high efficiency ice storage system. *Study and Usage of Energy* (能源研究与利用), 2004 (4): 36-40
- [6] Gregor P Henze, Moncef Krarti, Michael J B. Guidelines for improved performance of ice storage systems. *Energy and Buildings*, 2003, **35** (2): 111-127
- [7] Liang Kunfeng (梁坤峰), Peng Zhengbiao (彭正标), Yuan Zhulin (袁竹林). Exergy analysis of ice-making process for liquid-liquid circulating fluidized bed. *Journal of Southeast University* (东南大学学报), 2006, **36** (5): 774-779
- [8] Scheele G F, Meister B J. Drop formation at low velocities in liquid-liquid systems. *AIChE J.*, 1969, **15** (7): 700-712
- [9] Gonzalez-Mendizabal D, Olivera-Fuentes C, Guzman J M. Hydrodynamics of laminar liquid jets. Experimental study and comparison with two models. *Chemical Engineering Communication*, 1987, **56** (2): 117-129
- [10] Richards John R, Beris Antony N, Lenhoff Abraham M. Steady laminar flow of liquid-liquid jets at high Reynolds numbers. *Physics of Fluids*, 1993, **A5** (7): 1703-1717
- [11] Richards J R, Lenhoff Abraham M, Beris Antony N. Dynamic breakup of liquid-liquid jets. *Physics of Fluids*, 1994, **6** (8): 2640-2655
- [12] Richards J R, Beris Antony N, Lenhoff Abraham M. Drop formation in liquid-liquid systems before and after jetting. *Physics of Fluids*, 1995, **7** (11): 2617-2630
- [13] Zhang Xiaoguang. Dynamics of drop formation in viscous flows. *Chemical Engineering Science*, 1999, **54** (12): 1759-1774
- [14] Cramer Carsten, Fischer Peter, Erich J Windhab. Drop formation in a co-flowing ambient fluid. *Chemical Engineering Science*, 2004, **59** (15): 3045-3058
- [15] Pankaj Doshi. Deformation and breakup of liquid-liquid threads, jets, and drops [D]. USA: Purdue University, 2003
- [16] Macias Garcia A, Cuerda Correa Eduar do M, Diaz Diez M A. Application of the Rosin-Rammler and Gates-Gaudin-Schuhmann models to the particle size distribution analysis of agglomerated cork. *Materials Characterization*, 2004, **52** (2): 159-164