

基于制取流体冰的液-液雾化液滴粒径分布研究

梁坤峰,高春艳,王 林
(河南科技大学,河南 洛阳 471003)

摘 要:采用数理统计方法研究不同实验工况下雾化液滴的粒径分布规律,研究发现:在不同实验工况下,雾化液滴的粒径大小均呈现一定的分布形式,且随喷射流量的增大,粒径分布的中位径总体变化呈减小趋势;通过 Pearson χ^2 拟合优度检验,液滴粒径分布假设为 Rosin-Rammler 分布函数时,其显著性水平在所有实验工况内均达到 0.01;基于 Rosin-Rammler 分布密度函数计算出不同实验工况下 4 种粒径的质量分数,喷射流量为 50 mL/min 时液滴粒径集中在 0.7 ~ 1.0 mm 之间。

关 键 词:流体冰;液-液雾化;粒径分布;Pearson χ^2 拟合;分布函数

中图分类号:TB657.1;O359 文献标识码:A

引 言

通过喷射器的液-液雾化形式具有结构简单紧凑、无运动部件、传质效率高等优势,受到广泛关注,并已成功应用在化学、化工、生物、环境等行业中^[1~6]。以制取流体冰为背景而提出的一种新型流化制冰技术-液-液循环流化床,是液-液雾化在制冰与空调领域的应用拓展^[4]。由于液-液雾化形成液滴的粒径大小影响流化床内相间传热面积、颗粒冰的粒径分布及其流变特性^[5],因此,研究液-液雾化粒径分布特征及其分布函数,为合理预测与控制雾化液滴的粒径分布,满足液-液循环流化制冰床良性运行要求具有重要意义。

液-液雾化形成液滴的过程是一个动态的和随机的现象,所形成液滴的大小具有不确定性,但在大量的实验条件下,液滴粒径的大小又呈现统计规律性。液滴粒径的传统描述方法难以全面准确地把握液滴的粒径信息,如液滴粒径在那个范围内出现的几率最大,液滴粒径的范围有多大等。目前常用粒径分布的概念描述液滴的粒径信息,并有表格法、图形法和经验分布函数法等^[7]。经验分布函数法通

通过对数据内、外差值、拟合以及比较可以很好地预测实际过程的液滴粒径分布而受到格外关注,其模型已从单参数、两参数发展到多参数模型^[7~8]。但是由于单参数模型过于简单,多参数模型虽有很高的预测精度,却受实验限制难以准确确定多个参数,因此,当前应用较好的仍是两参数模型,如 Normal、Log-Normal 和 Rosin-Rammler 分布函数等^[8]。

本研究运用数理统计的方法考察了不同常态实验工况下液-液雾化形成液滴的粒径分布,提出了可以表征粒径分布的数字特征及经验分布函数,通过拟合优度检验的方法进行了优选,并基于分布函数的特征参数分析获得了液滴粒径分布的变化规律。

1 实验研究

1.1 实验装置

液-液循环流化床制冰实验系统原理如图 1 所示,由图可知,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。实验过程中,实验流体分 2 路进入 6 000 mm × 40 mm 的圆形流化床,循环载冷液体(变压器油,常态实验时关闭制冷机)经过制冷机的蒸发器换热,并经离心油泵、过滤器和齿轮流量计进入流化床,通过阀门调节其实验流速,在变压器油的温度降低过程中,为了避免喷头内残留的水分堵塞喷孔,将四通控制阀调节到进气状态并一直保持到变压器油的温度达到预定值,之后制冰过程开始,首先打开增压泵抽取水箱的水,使其在水路进行一定时间的蓄压,然后切换四通控制阀,将其调整到进水状态,水增压后从孔径为 0.22 mm 的喷头直接喷入载冷液体中雾化形成液滴,水的流量由玻璃转子流量计(LZJ-10)读取,当流量达到预定的实验点时,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

收稿日期:2010-07-14; 修订日期:2010-08-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50906021);河南省科技攻关资助项目(102102210162);河南省自然科学基金研究计划基金资助项目(2009A470002)

作者简介:梁坤峰(1975-)男,河南新郑人,河南科技大学副教授。

以 30 帧/s 的频率进行连续拍摄,拍摄时间为 3 s,水的体积流量变化范围为 5 ~ 50 mL/min,循环载冷液体的流速为 0.18 m/s,测试温度为 22 ℃,获得距离喷嘴 0 ~ 50 mm 高度内不同实验工况下的液滴形成过程的 100 幅照片。

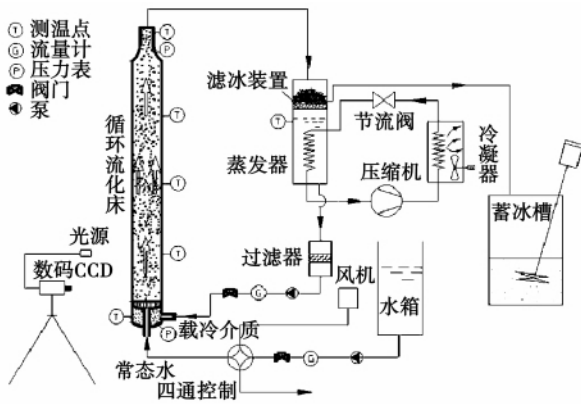


图 1 液-液循环流化床实验装置原理

1.2 流体冰晶展示

图 2 为流体冰晶形成及其状态示意图。由图 (a) 可知,作为射流相的水从喷嘴处喷入充满循环流动载冷液体的流化床内,在喷嘴上方会形成一个连续的射流,在周围流动的载冷液体的作用下,射流上部发生破碎形成一个个液滴(水滴),形成液滴的球形度较好,但其粒径大小并不一致,形成液滴的粒径存在均匀性问题,具有一定的分布特征。图(b)展示了流化床所制备的流体冰晶经过过滤之后的状况,冰晶呈颗粒状,其粒径大小不一,冰晶冻结状态也不一致。由图(c)清晰地看出冰颗粒的粒径具有大小差异,并且冰颗粒的相变状态也并不一致,完全冻结的冰颗粒其粒状特征明显,色泽均匀,而没有完全冻结的冰晶颗粒松软,容易破裂,色泽比较透明,表明冰晶内部有液态水。

2 液滴粒径分布的统计分析

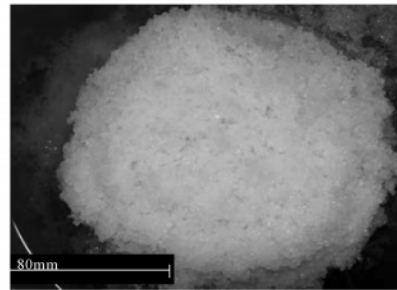
2.1 粒径分布的数字特征

采用图像处理方法对每个测试工况进行液滴粒径的测量,根据每个工况的液滴粒径信息,经过统计分析绘制盒状图,如图 3 所示,图中横坐标的实验号依次代表水的流量从小到大的不同工况,纵坐标表示粒径的大小取值。对不同实验工况所获得的盒状图进行分析,可以粗略的掌握样本液滴的粒径分布情况,如样本粒径的中值,倾斜度,离散度(均匀性),置信区间的信息等。由图可知,不同流量工况

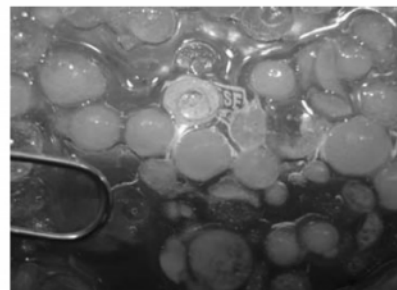
下液滴粒径的中值是不同的,而且从盒的上下边界线与中值的距离来看,所有流量工况中,有一半以上的工作样本粒径的分布存在较大倾斜度;置信区间代表样本中值估计的准确程度,从图中凹口的大小可以看出不同的流量工况下,样本粒径中值的估计准确度并不一致;此外,根据样本数据的取值区间,可知随着流量的增大,样本粒径的取值区间总体上具有减小的趋势。由此表明流化床制冰过程中,液-液雾化形成液滴的粒径具有显著分布特征,其粒径大小、均匀性等方面随实验条件的变化而发生改变。



(a) 低温液-液雾化现象



(b) 制备的冰晶颗粒



(c) 不同状态的冰晶颗粒

图 2 冰晶照片

2.2 粒径分布函数的拟合优度检验

对于液滴的粒径分布研究,虽然研究者通过对实验数据的归纳分析,提出了许多有意义的经验分布,但是针对具体的问题,属于何种经验分布,尚难确定,故需要对总体分布类型做出判断。文中采用一种常用的非参数检验方法-总体分布的 χ^2 拟合优

度检验法, 又称 Pearson χ^2 准则^[7], 用来检验总体是否服从任何一个预先给定的分布。基本思路是把样本得到的各组实测频数与由假定总体服从的分布计算出的理论频数相比较, 在大样本场合, 经验分布函数是总体理论分布函数的一个很好的近似, 如果总体服从某个已知分布的假定为真, 则实测频数与理论频数的差异不应太大, 否则, 否定总体服从某个已知分布的假设。

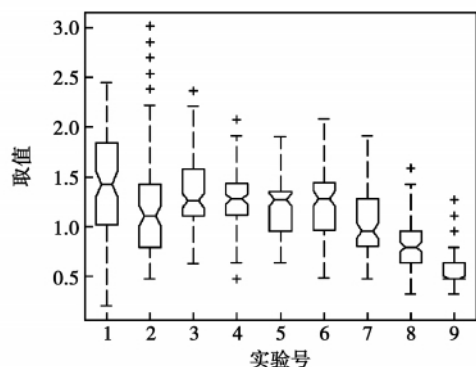


图3 样本液滴粒径的盒状

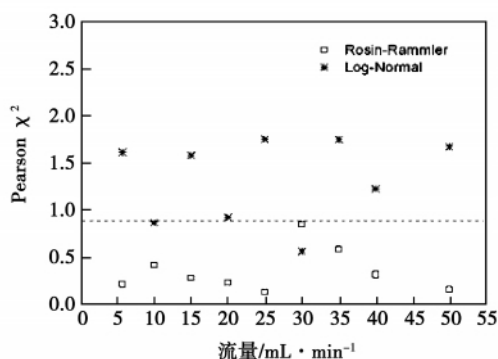


图4 粒径分布的拟合优度检验

根据拟合优度检验法, 得到两种经验分布函数假定下, 不同流量工况的统计量 χ^2 , 如图4所示, 图中的虚线代表采用 Pearson χ^2 检验时 χ^2 分布在 (6, 0.01) 处的取值, 即 $\chi_{0.01}^2(6)$ 。由图可知, 假设粒径分布为 Rosin-Rammler 分布函数时, 在整个实验流量范围内, 其 χ^2 均处于虚线以下, 其显著性水平达到 0.01, 表明假设的分布是可以接受的, 或不能拒绝的; 假设为 Log-Normal 分布函数时, 可以接受的只有两个工况。因此根据 Pearson χ^2 准则的判断标准, 液-液雾化形成液滴的粒径分布采用 Rosin-Rammler 分布函数能够准确地描述液滴的粒径分布, 该结论与文献 [4] 采用回归方法的分析结果一致。

3 基于 Rosin-Rammler 分布函数的粒径分析

Rosin-Rammler 分布函数表达式为:

$$F(d) = \exp\left[-\left(\frac{d}{\bar{d}}\right)^m\right] \quad (1)$$

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

通过式(1)可得到 Rosin-Rammler 分布函数的密度函数为:

$$f(d) = \frac{m}{d} \times d^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{d}{\bar{d}}\right)^m\right] \quad (2)$$

由密度函数, 可以求得任意两个分布粒径之间液滴重量所占总液滴重量的百分比为:

$$F(d_2) - F(d_1) = \int_{d_1}^{d_2} f(d) d(d) \quad (3)$$

3.1 液滴的粒径分布特征

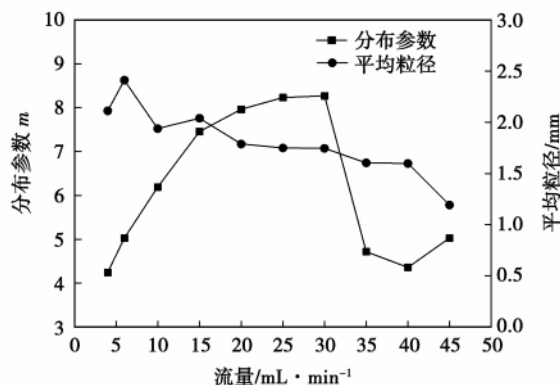


图5 液滴的粒径分布特征

图5给出了液滴粒径分布的分布参数 m 与平均粒径的变化规律, 分布参数表征液滴粒径分布的均匀性^[5], m 越大, 液滴粒径分布越均匀。由分布参数的变化规律可知, 在低喷射流量下, 射流向上运动惯性力较小, 易于在两相界面上形成扰动, 发生二次破碎, 形成体积更小的卫星液滴, 使雾化液滴的粒径不均匀; 随着喷射流量的增大, 射流向上运动的惯性力逐渐增大, 卫星液滴的形成逐渐减少, 液滴粒径大小逐渐均匀。但随着喷射流量达到 25~30 mL/min 区域之后, 雾化形成的液滴数量急剧地增多, 开始进入多液滴形成区域, 由于液滴向上运动的惯性力不足以使之快速地分散在周围的液体介质中, 液滴碰撞继而聚并的几率增大, 液滴粒径分布均匀性

反而变差,但是随着喷射流量的进一步增加,雾化液滴数量增多的同时其向上运动的惯性力足以使液滴及时地分散在周围的液体介质中,因此液滴粒径分布的均匀性又有所改善。

由平均粒径的变化规律可知,在喷射流量较小时,液滴中位径随流量的增大而变大,达到 5 mL/min 后液滴中位径随喷射流量的增大而减小,并且在此后的所有流量范围内都呈现液滴中位径随喷射流量的增大而减小的趋势。该结论在文献 [1] 中对液-液雾化的研究中也提出了类似的结论。究其原因在于随着喷射流量的增大,射流的运动惯性力逐渐增强,射流液体与周围的载冷液体介质形成的两相界面受到扰动的强度也在增强,从而促进了射流液体的破碎,并使其形成数量更多、体积更小的液滴。

3.2 液滴粒径的区间分析

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,根据文献 [9] 的计算结果,制冰过程要求液滴的粒径在 1.0 mm 以下。由式 (2) 和式 (3) 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 和 0.5 mm 时,其质量分数曲线,结果如图 7 所示。由图可知,在喷射流量小于 35 mL/min 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 和 0.5 mm 的液滴质量分数不超过 5%,但是随着喷射流量的增大,超过 40 mL/min 区域,液滴的粒径小于 1.0、0.8 和 0.7 mm 的质量分数迅速增大,在喷射流量为 50 mL/min 时,其质量分数分别达到 92%、54% 和 31%,而液滴粒径小于 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。

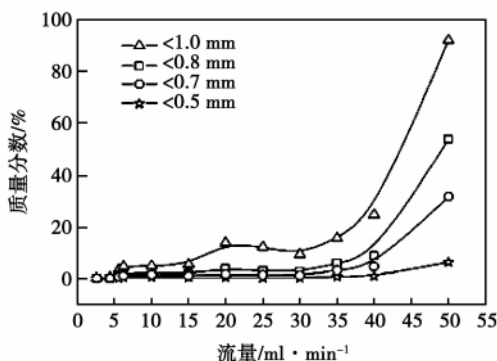


图 6 小于给定粒径的液滴的质量分数

4 结 论

(1) 研究发现,不同常态实验工况下雾化液滴的样本粒径,其中值、倾斜度、均匀性都是不同的,样本粒径呈现一定的分布形式,且随着喷射流量的增大,粒径分布的中位径总体变化趋势是减小的。

(2) 通过 Pearson χ^2 拟合优度检验的方法,发现假设为 Rosin-Rammler 分布函数时,统计量 χ^2 的值均达到 0.01 的显著性水平,故在整个实验流量范围内, Rosin-Rammler 分布函数能够准确地描述液滴的粒径分布。并基于 Rosin-Rammler 函数的分布参数,获得液滴粒径分布的中位径和均匀性变化规律。

(3) 根据 Rosin-Rammler 分布密度函数,计算出各常态实验工况下,液滴粒径分别小于 1.0、0.8、0.7 和 0.5 mm 时的质量分数曲线,发现形成液滴的粒径主要集中在 0.7 ~ 1.0 mm 之间。

参考文献:

- [1] CRAMER C, FISCHER P, WINDHAB E J. Drop formation in a co-flowing ambient fluid [J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59 (15): 3045 - 3058.
- [2] SOLEYMANI A, LAARI A, Turunen. Simulation of drop formation in a single hole in solvent extraction using the volume-of-fluid method [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2008, 86 (7): 731 - 738.
- [3] RAMA R N V, BAIRD M H I, HRYMAK A N, et al. Dispersion of high-viscosity liquid - liquid systems by flow through SMX static mixer elements [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62 (23): 6885 - 6896.
- [4] PENG Z B, YUAN Z L, LIANG K F, et al. Ice slurry formation in a co-current liquid-liquid flow [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2008, 16(4): 552 - 557.
- [5] 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): 1935 - 1942.
- [6] 曹建明. 喷雾学研究的国际进展 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2005, 25(1): 82 - 87.
- [7] 丁正生. 概率论与数理统计应用 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2003.
- [8] MACIAS G A, CUERDA C E M, DIAZ D M. Application of the Rosin-Rammler and Gates-Gaudin-Schuhmann models to the particle size distribution analysis of agglomerated cork [J]. Materials Characterization, 2004, 52(2): 159 - 164.
- [9] 彭正标, 梁坤峰, 袁竹林. 液-液射流雾化的数值模拟与实验研究 [J]. 热能动力工程, 2007, 22(2): 205 - 212.

(陈 滨 编辑)

bustion test system with a riser having a diameter of 100 mm and a height of 3000 mm. The test results show that when the average oxygen concentration is 34.4% or the local oxygen concentration is 75.3%, a stable combustion without any superheating can be accomplished. The NO_x contained in the flue gas of the Longkou-originated coal accounts for 89.3% ~ 90.3 of the total NO_x emissions while that of the Shuozhou-originated coal occupies only 30.0%. By optimizing the air distribution, the concentration of CO, NO_2 and NO_x in the flue gas can be reduced to 45%, 94% and 89% respectively. **Key words:** fluidized bed, O_2/CO_2 , combustion at a high oxygen concentration, pulverized coal

基于制取流体冰的液-液雾化液滴粒径分布研究 = **Study of the Liquid Drop Diameter Distribution of a Liquid-liquid Atomization Based on Preparation of Slurry Ice** [刊, 汉] LIANG Kun-feng, GAO Chun-yan, WANG Lin (Henan University of Science and Technology, Luoyang, China, Post Code: 471003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(4). - 457 ~ 460

The process to form liquid drops through a liquid-liquid atomization is regarded as a dynamic and random phenomenon. The sizes of the liquid drops thus formed are uncertain and under the condition of a great many tests, however, the liquid drop diameters assume a statistical regularity. To study the diameter distribution regularity under different test conditions, the mathematical statistic method was used to conduct an analysis. It has been found that under different test conditions, the particle diameters of the atomized liquid drops assume a certain distribution form and with an increase of the jet flow rate, the change in the medium diameter of the particle diameter distribution as a whole shows a descending tendency. Through a Pearson χ^2 fitting dominancy test, when the liquid drop particle diameter distribution is supposed to perform the Rosin-Rammler distribution function, the significance level under all the test conditions will invariably attain 0.01. The mass fraction at four particle diameters under different test conditions were calculated based on the Rosin-Rammler density distribution function. When the jet flow rate was 50 mL/min, the liquid drop particle diameters were centralized in a range of 0.7 ~ 1.0 mm. **Key words:** slurry ice, liquid-liquid atomization, particle diameter distribution, Pearson χ^2 fitting dominancy test, distribution function

热光伏发电系统水冷散热特性研究 = **Study of the Characteristics of a Water-cooled Heat Dissipating Device in a Thermophotovoltaic Power Generation System** [刊, 汉] YANG Tao, HAN Yu-ge, TAN Hong, XUAN Yi-min (College of Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, China, Post Code: 210094) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(4). - 461 ~ 465

Designed was a set of water-cooled heat dissipating device to control the operating temperature of photovoltaic cells. On this basis, the variation law governing the cell temperature and the pressure loss of the heat dissipating device at