

文章编号: 0253-4339(2009)01-0007-07

## 液-液循环流化床动态制冰特性

彭正标 陈 磐 何张陈 徐 峰 袁竹林

(东南大学能源与环境学院 南京 210096)

**摘 要** 建立了液-液循环流化床制取流体冰的热态试验装置, 在多工况条件下对该新技术的动态制冰特性进行了试验研究。通过对所获得的冰晶颗粒进行粒径的测量与统计整理, 分析了冰晶粒径分布, 并对影响冰晶尺寸的关键因素进行了探讨; 通过计算机实时记录循环系统各测点温度, 对载冷介质的沿程温变进行了分析; 最后考察平衡工况下喷水量与载冷油介质循环量的关系。结果表明, 所获得的冰晶粒径呈离散性分布, 主要集中在1mm~2mm区间; 冰晶粒径与载流介质流量、喷水量及喷嘴内径密切相关, 体现为随载流介质流量降低而减小, 随喷水量增加呈先增大后减小的变化趋势, 在喷水量为120mL·min<sup>-1</sup>时达到最大值, 在喷嘴内径较小时, 冰晶粒径明显减小; 流化床内载流介质温升梯度沿床高而减小; 载流介质循环量随喷水量的增加呈先增大后减小的变化趋势。在液-液雾化中形成体积微小的雾化液滴, 是提高系统运行经济性有效的途径。

**关键词** 热工学; 流体冰; 实验研究; 动态制冰特性

**中图分类号**: TK122; TQ026.7

**文献标识码**: A

## Dynamic Behavior of Ice Production in Liquid-liquid Circulating Fluidized Bed

Peng Zhengbiao Chen Pan He Zhangchen Xu Feng Yuan Zhulin

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

**Abstract** An experimental apparatus was set up based on the liquid-liquid circulating fluidized bed for ice slurry generation, and the dynamic behavior of this new ice making system was experimentally investigated under different conditions. Ice crystals produced under each condition were measured and the data measured were analyzed. The critical factors that strongly influenced the ice crystal size were discussed. The variation in temperature of the carrier fluid was explored in real time by a data acquisition system. The relationship between the dispersed phase flow rate and the circulated continuum flow rate was analyzed. The results show that the size distribution of the ice crystals displays non-uniform and mainly congregates in the range of 1-2mm. The ice crystal size rests significantly on carrier flow rate, jet velocity and inner diameter (ID) of the spray nozzle. It decreases with the decrease of the carrier flow rate and reaches the maximum at an intermediate flow rate of the dispersed phase of 120 mL·min<sup>-1</sup>. At smaller ID of the spray nozzle, the ice crystal size decreases clearly. The increase of the carrier temperature gradient decreases along the bed. In addition, the carrier circulating rate increases first but then decreases with the increase of the jet flow rate.

**Keywords** Pyrology; Ice slurry; Experimental study; Dynamic behaviors of ice making

冰蓄冷技术是缓解电网电力供需矛盾, 实现“削峰填谷”的重要措施<sup>[1~3]</sup>。传统的冰蓄冷方法(封装式、盘管式)由于存在冰层附着在固体传热面上恶化传热的问题, 制冰能耗大, 制冰效率低<sup>[4]</sup>。近20年来, 流体冰技术的产生和应用引起了蓄冷界的广泛重视。流体冰<sup>[5]</sup>(或冰浆、可泵冰, Ice Slurry)通常是由直径小于1mm的冰晶颗粒与水(纯水或掺有冰点抑制剂)构成的混合物。由于冰晶颗

粒微小, 大大增加了换热表面积, 且在制冰过程中实现完全流动换热, 有效地避免了冰层热阻问题, 因此制冰效率得到了很大的提高。实际应用表明, 制取流体冰性能系数COP可比制取块冰提高近1倍<sup>[6]</sup>。此外, 流体冰还具有如下优良的应用特性: 蓄能密度巨大, 传热性能好; 流动性能好, 可以直接用泵输送, 蓄冷(冰)罐安放位置灵活; 融冰特性优良, 制冷效率高; 非常适合应用于蓄冷空调<sup>[7]</sup>。

基金项目: 教育部高等学校博士点专项科研基金资助项目(20060286034) (The project was supported by the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (20060286034).)

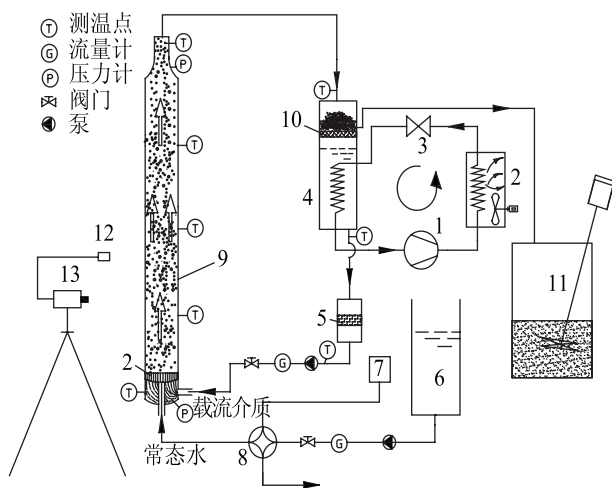
作者联系方式: E-mail: znbiu@sina.com

收稿日期: 2008年5月13日

关于流体冰制取方法的研究是流体冰技术发展与应用的关键问题<sup>[8]</sup>。目前,国内外对流体冰技术的研究已十分广泛,制取流体冰的方法主要有机械刮削法<sup>[9~10]</sup>、过冷水法<sup>[11~12]</sup>、直接接触法<sup>[13~14]</sup>以及真空法<sup>[15]</sup>等。前两种方法已商业实用化,其它的则基本处于实验研究阶段,但运行连续稳定且经济的流体冰制取方法至今仍未出现<sup>[8]</sup>。因此,开发一种设备简单、运行稳定且性能高效的流体冰制取装置在当前具有重要意义。液-液循环流化床制取流体冰是最新提出的一种制冰技术,该技术结合液-液雾化理论,同时将高效传热传质的流态化技术引入制冰领域。这里针对该新型技术,搭建了试验研究平台,在多工况条件下完成了流体冰冰晶制取的热态试验,研究了该制冰新技术的动态制冰特性,获得了相应的规律。

## 1 实验研究

### 1.1 实验装置



1 压缩机 2 冷凝器 3 节流阀 4 蒸发器/油箱 5 过滤器  
6 水箱 7 风机 8 四通装置 9 循环流化床 10 滤冰装置  
11 流体冰储蓄箱 12 泛光源 13 数码CCD

图1 液-液循环流化床动态制冰系统简图

Fig.1 Schematic diagram of liquid-liquid circulating fluidized bed for ice slurry production

图1为液-液循环流化床制取流体冰技术的系统简图,图2为对应的试验台实物照片。采用将水高压喷入非溶载冷液体中,雾化形成细小水滴。由于床内两相流密度相近,液滴与载冷流化介质(非溶液体)一般呈散式流化态<sup>[16]</sup>,流动中直接接触换热,液滴快速冻结而生成冰晶。液-液雾化形成的细小液滴大大增加了两相接触表面积,且与载冷介

质在散式流化态中直接接触换热,有效地避开了传统制冰方法中冰层热阻问题,极大地强化了床内多相流动与换热,使制冰效率得到显著提高。此外,将所获取细小冰粒与水(纯水或含有冰点抑制剂)混合,即可获得任意含冰率(IPF)的流体冰。而过冷法制取冰浆中经过一次冷却后的含冰率只有2%,要达到一定的含冰率,水泵的能耗将大大增加。而且,制冰装置中采用雾化技术,由于相间界面张力作用使所形成的液滴一般为较规则的球形颗粒,因此,最终获得的冰粒表面圆滑,与机械刮削式制冰法相比,大大减小了形成冰浆后冰粒发生聚集硬化的几率。



(a)



(b)

图2 试验装置及制冷机实物图

Fig.2 Photos of the experimental facility and the refrigeration system

试验系统包括集雾化与制冰为一体的循环流化床以及制冷装置。流化床由高2m、内径40mm的有机玻璃管制成,其底部有两个入口,一个是安置

喷头的接口；另一个为载流循环介质入口，在喷嘴下方300mm处，内径30mm，进口方向与流化床主体垂直。喷针的位置至关重要，装置中对喷针位置的设计一方面在喷射周围形成稳定的载流介质层流形态，弱化离散液滴横向运动，以削弱液滴间碰撞-聚并现象；另一方面，延长雾化液滴在床内的停留时间，以保证液滴与载冷流化介质换热充分，从而获得冻结完全的冰粒。

制冷装置用来冷却经流化床体后升温的循环流化介质。在蒸发器入口处设置了三层滤网(最小孔径100 $\mu\text{m}$ )，以分离循环油介质与试验所获得的冰晶颗粒。整套制冷装置被放置在约4m高度处，以减小油介质进入蒸发器时的流速，避免因冲击液面而产生大量小气泡。这些气泡在干扰试验测量的同时，严重地影响流化床与蒸发器内多相流动与换热的特性。

载冷流化介质的流动特性以及热物性对该制冰系统至关重要。经过大量试验测试与比较，最终采用25号变压器油作为载冷循环流化介质。常态下其密度为895 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，粘度为0.179 $\text{kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$ ，导热系数为0.124 $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ ，比热容为1.8 $\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$ ，凝点低于 $-45^\circ\text{C}$ ， $-10^\circ\text{C}$ 时其粘度为2.685 $\text{kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$ ，不易燃，透明、无悬浮物和机械杂质。

## 1.2 实验方法

表1 试验工况参数

Tab.1 Experimental parameters

工况参数	值
环境液体压力 $P_o$ / MPa	6
喷嘴内径 $D_0$ / mm	0.12 0.22 0.4
油介质循环流量 $G_{c,in}$ / ( $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ )	0.2~0.6
油介质进床温度 $T_{c,in}$ / $^\circ\text{C}$	-5~-16
喷水量 $G_{p,out}$ / ( $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ )	10~160

在制冰装置中，两个入口形成并列的两路(见图1)：低温变压器油流动的油路及雾化水流动的水路。油路中，经制冷装置冷却后的变压器油在离心油泵的作用下，自蒸发器流经过滤器，最后流入制冰床内。待床内载冷油介质流动稳定后，打开增压泵，从水箱中抽出环境温度下的水，增压后的水由喷针喷出，雾化成细小液滴与低温油介质一起向床的上游流动。此时，打开采光室上部的强光源(2 $\times$ 1300W)，利用高分辨率数码相机

(Nikon公司产)，分别在0.0m、0.55m、1.25m三个高度处进行床内离散颗粒流动状态的拍摄。在床高0m、0.5m、1.0m、1.5m处布置测温点(Pt100铂热电阻，精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ )，利用计算机数据采集系统(Agilent34970A)实时监测系统中各点温度变化。试验工况的其它相关参数如表1所示。

## 2 实验结果与讨论分析

实验结果表明，在载冷油介质温度 $T_{c,in} \leq -5^\circ\text{C}$ 下，制冰装置均能连续稳定地获得冻结完全的冰晶颗粒。与传统的静态制冰系统相比(蒸发温度低于 $-10^\circ\text{C}$ ，且随制冰量的增加而降低)，该制冰装置体现出明显的优越性。图3展示了其中一组实验工况条件下所获得的冰晶颗粒。

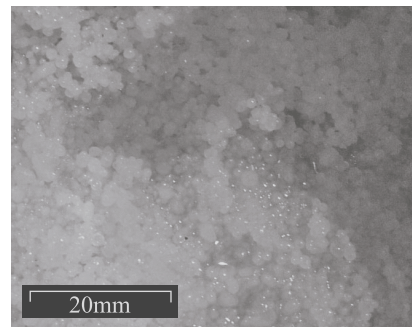


图3 实验获得的冰晶颗粒

( $T_{c,in} = -8.1^\circ\text{C}$ ,  $P_o = 6 \text{ MPa}$ ,  $D_0 = 0.4 \text{ mm}$ )

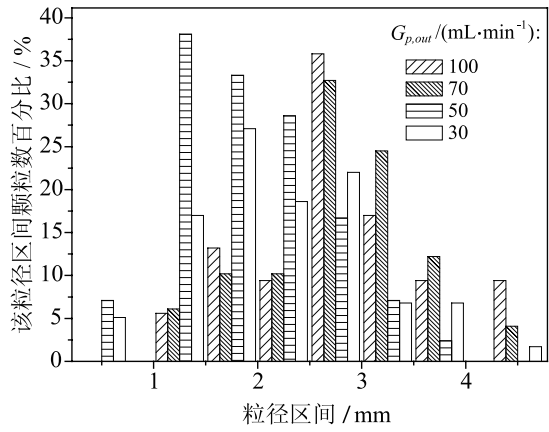
Fig.3 Ice crystals produced in experiments

( $T_{c,in} = -8.1^\circ\text{C}$ ,  $P_o = 6 \text{ MPa}$ ,  $D_0 = 0.4 \text{ mm}$ )

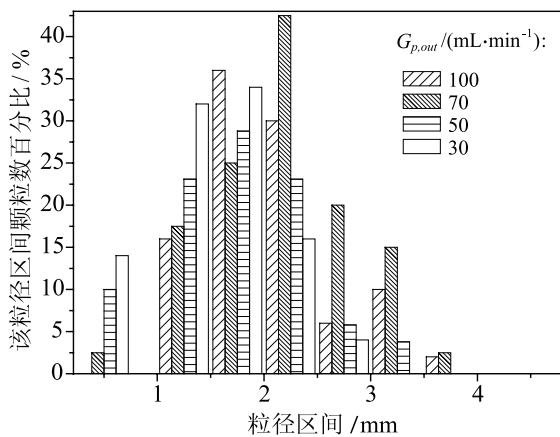
### 2.1 冰晶粒径分布

冰晶颗粒的粒径及其分布是影响流体冰流变特性的关键因素<sup>[7]</sup>。对所获得的冰晶颗粒进行粒径的测量，应用近似罗辛-拉姆勒(Rosin-Rammler)分布对冰晶粒径进行了整理：把冰晶粒径区间分成8段，(0,0.99)、(1,1.49)、(1.5,1.99)、(2,2.49)、(2.5,2.99)、(3,3.49)、(3.5,3.99)、(4,4.99)，然后统计粒径落在该区间中的冰晶数占取样冰晶总数的百分比。

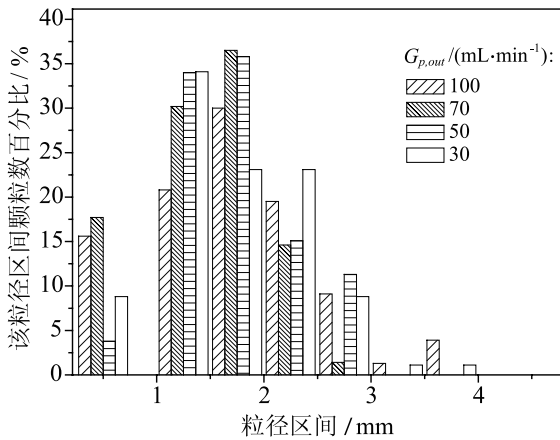
图4(a)~(c)中为 $T_{c,in} = -7^\circ\text{C}$ 时不同冷油介质流量下所获得冰晶颗粒的粒径分布。可以看出，冰粒尺寸呈离散性分布。许多学者对液-液雾化现象进行了研究，文献[18]、[19]对雾化机理以及雾化液滴尺寸及分布进行了分析。液-液雾化过程是一个随机与复杂的过程，射流破碎以及液滴的形成受到多种因素的影响，如：周围循环油介质流动的扰



(a)  $G_{c,in}=0.42\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$



(b)  $G_{c,in}=0.33\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$



(c)  $G_{c,in}=0.25\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$

图4 不同工况条件下冰晶粒径分布  
( $P_0=6\text{MPa}$ ,  $T_{c,in}=-7^\circ\text{C}$ ,  $D_0=0.12\text{mm}$ )

Fig.4 Size distribution of the ice crystals at different conditions when  $P_0=6\text{MPa}$ ,  $T_{c,in}=-7^\circ\text{C}$  and  $D_0=0.12\text{mm}$

动、喷射惯性力、升力、两相流动相间曳力、界面张力等。同时，雾化液滴在床内与载冷油介质流动换热过程中，由于碰撞而引起的液滴聚并与破碎现象也将导致液滴粒径的变化。而制冰流化床内为

液滴、载冷油、冰晶以及未冻结完全的冰水混合物等多相形成的复杂流动体系，颗粒间相互碰撞规律极其复杂，发生聚并或破碎的几率亦受到多种因素的影响。以上两方面的原因导致最终所获得的冰晶粒径呈高度离散性分布。而从图4中又可以发现冰粒尺寸分布随工况的不同而呈现出一定的统计规律性：在载流介质流量最大为 $0.42\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，冰粒尺寸分布散度最大，但随着载流介质流量的降低，分布趋于集中与均匀，在油介质流量最小为 $0.25\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ ，冰晶粒径主要分布在 $1\text{mm}\sim 2\text{mm}$ 区间，如图4(c)所示。同时，对比图4(a)~(c)还可以发现，随着载冷油介质流量的降低，各喷速工况下粒径分布峰值向左偏移，表明冰粒平均尺寸随载冷介质流量的降低而减小。这是因为在喷速保持不变而载冷油介质流量降低时，一方面两相流动相对速度变大，雾化液滴粒径变小<sup>[18]</sup>；另一方面，液滴所受到的携带曳力变小，其在床内流过相同高度的时间变长，能够与载冷油介质充分换热后冻结成冰晶颗粒，聚并现象得到削弱<sup>[20]</sup>，从而减小冰晶颗粒出床尺寸。

## 2.2 喷水量的影响

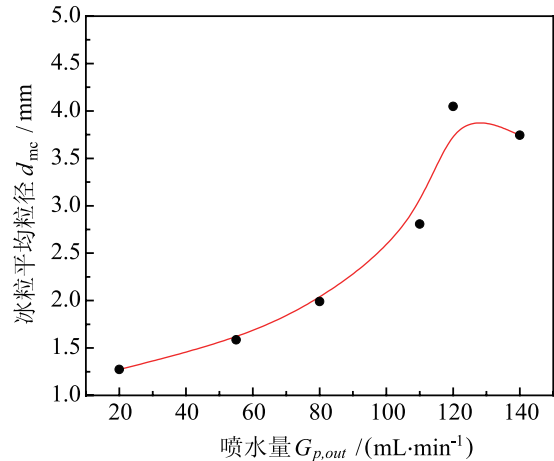


图5 冰晶平均粒径随喷速的变化趋势  
( $P_0=6\text{MPa}$ ,  $D_0=0.4\text{mm}$ )

Fig.5 Effects of the jetting-velocity on the mean ice crystal size ( $P_0=6\text{MPa}$ ,  $D_0=0.4\text{mm}$ )

图5所示为平衡工况下试验所获得的冰晶颗粒平均粒径( $d_{mc}$ )随喷水量( $G_{p,out}$ )的变化趋势。可以看出，在相同的油介质流量下，冰晶平均粒径随喷速增加呈先增大继而减小的变化趋势，在 $G_{p,out}=120\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 时，冰晶粒径达到最大。在油介质流量保持不变时，增大喷速，液滴向上运动惯性力变大，其在载冷介质中流动时间变短，导致在流化床下游，大部分液滴仍维持液态，促进了液滴之间的

碰撞-聚并；但同时随着喷速的继续增大，雾化形成的液滴粒径越来越小<sup>[21-22]</sup>，小液滴冻结成冰晶所需冷量低，在之后的流动换热过程中聚并现象又得到削弱。在 $G_{p,out}=120\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 时，两者达到平衡，此时冰晶粒径相应地达到最大值。

### 2.3 喷嘴内径的影响

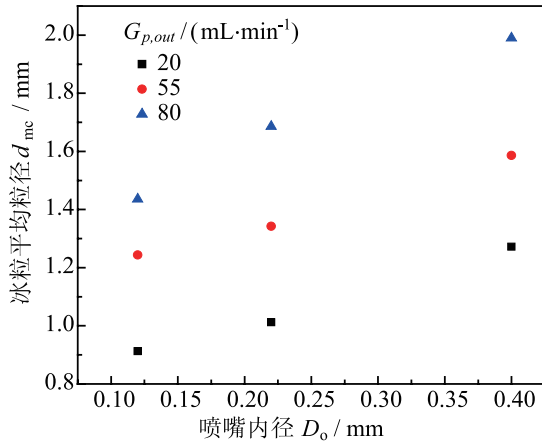


图6 喷嘴内径对冰晶粒径的影响

( $P_0 = 6\text{MPa}$ ,  $G_{c,in} = 0.22\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Fig.6 Effects of the spray nozzle diameter on the mean ice crystal size ( $P_0 = 6\text{MPa}$ ,  $G_{c,in} = 0.22\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ )

图6所示不同喷水量时喷嘴内径对实验所获取冰粒尺寸的影响规律。可以看出，在相同的喷水量下，随着雾化喷嘴内径的减小，所获得冰晶粒径明显减小。在喷水量保持不变，而减小喷嘴口径时，射流喷射雷诺数增大，相间耦合作用加剧，且射流界面曲率变大以及界面径向收缩作用，导致射流更易断裂雾化<sup>[18,23-24]</sup>，所形成的雾化液滴粒径减小，在强化相间换热的同时，极大地削弱了液滴运动过程中碰撞-聚并现象<sup>[20]</sup>，故最终所获得的冰晶尺寸减小。同时，从图6中还可以看出，在喷嘴内径减小时，冰晶粒径随喷水量增加而增大的幅度减小。这是因为在喷嘴内径较小时，增大喷水量，射流喷射雷诺数增大的幅度变大，更有利于达到高速湍流雾化形态<sup>[18]</sup>，形成较小的雾化液滴，而使实验最终获得的冰晶粒径减小。

### 2.4 床内载冷油介质沿程温变

图7为流化床内载冷油介质沿程(每间隔0.5m高度)的温度变化，记录了循环系统从开始运行到达到平衡的整个过程。在喷水大约20分钟(1150s)后，系统达到平衡，流化床内各点的温度基本上维持不变。此时载冷油的入床温度在 $-8.1^\circ\text{C}$ 左右，载

冷油的流量为 $0.42\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ ，喷水量为 $80\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。由图可见，载冷油介质温度沿床高而升高。在床的下游，油介质温度变化最大，但随着高度的增加，温升梯度减小，在高度1.0m以上，油温变化极小。这与理论上是符合的，在床的下游，喷嘴出口上方，液滴温度及其流动速度均处于最大值，较大的相间温差以及较强的相间耦合作用，都促进了液滴与冷油间剧烈的热交换。而沿着床高随着大部分液滴冻结成冰，相间温差减小，在高度1.0m以上，相间热交换量几乎为0。同时，由于在临近测点1处，试验装置中开了个观察口以拍摄低温下液-液雾化形态，由于环境温度的干扰，该处温度波动较大。

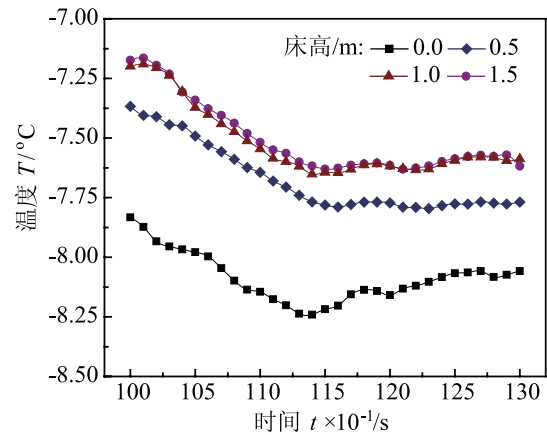


图7 床内载冷油介质沿程温变

( $P_0 = 6\text{MPa}$ ,  $G_{p,out} = 80\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $T_{c,in} = -8.1^\circ\text{C}$ ,  $G_{c,in} = 0.42\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Fig.7 Variation in oil temperature in the circuit ( $P_0 = 6\text{MPa}$ ,  $G_{p,out} = 80\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $T_{c,in} = -8.1^\circ\text{C}$ ,  $G_{c,in} = 0.42\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ )

### 2.5 平衡工况下喷水量与油介质循环量关系

图8为系统平衡运行时，喷水量与载冷油介质流量的对应关系。由图可见，随着喷水量的增加，载冷介质循环量呈先增大后减小的变化趋势。一方面喷水量增加，将导致雾化液滴粒径变小<sup>[18-19]</sup>，小液滴冻结所需冷量少，更易冻结，且削弱了床内液滴碰撞-聚并现象<sup>[20]</sup>，故制冰床内不再需要较低的环境温度。而在制冷机制冷量保持不变，载冷介质流量增大时，将导致蒸发器进出口油介质温变减小，从而达到床内载流介质较高的平衡温度。但另一方面，增加喷水量，意味着更多的液态水相变成冰晶，所需的冷量同时也在增加，所以要求床内有较低的冷源温度，故在喷水量大于 $100\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 后，载冷介质流量转而呈减小的变化趋势，以提供床内较低的环境温度。

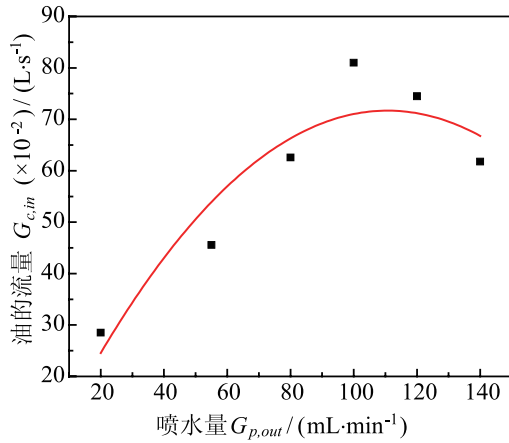


图8 平衡工况中喷水量与载冷介质流量的关系  
( $P_0 = 6\text{MPa}$ ,  $D_0 = 0.4\text{mm}$ )

Fig.8 Relationship of the flow rates between the injection and carrier fluid ( $P_0 = 6\text{MPa}$ ,  $D_0 = 0.4\text{mm}$ )

由以上分析可知,液-液雾化过程中产生的小液滴一方面形成体积微小的出床冰晶颗粒,再一方面强化了制冰床内相间流动换热,削弱了床内液滴碰撞-聚并的不利情形,使制冷机制冷性能系数COP显著提高,同时,也减少载冷油介质的循环量,节省该制冰装置初投资。故可以初步推断,液-液雾化形成体积微小的雾化液滴,是提高该制冰装置运行经济性的有效途径之一。

### 3 结论

建立了液-液循环流化床制取流体冰新技术的热态试验装置,在多工况条件下进行了流体冰冰晶制取研究,获得以下结论:

- 1) 在载冷循环油介质入床温度低于 $-5^\circ\text{C}$ 时,该制冰装置均能连续稳定地形成冻结完全冰晶颗粒;
- 2) 冰晶颗粒的粒径呈高度离散性分布,主要集中在 $1\text{mm}\sim 2\text{mm}$ 区间,且随着载流介质流量的降低,分布峰值向左偏移,分布趋于集中均匀;
- 3) 冰晶平均粒径与喷水量、载冷介质流量及喷嘴内径密切相关,随载流介质流量降低而减小,随喷水量增加呈先增大后减小的变化趋势,在喷水量为 $120\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 时达到最大值,在喷嘴内径较小时,冰粒尺寸明显变小;
- 4) 载冷介质温度沿床高而升高,但温升梯度减小;平衡工况下,系统载冷介质循环量随喷水量的增加呈先增大后减小的变化趋势;
- 5) 液-液雾化过程形成体积微小的液滴,是提高该制冰装置运行经济性有效的途径之一。

### 参考文献

- [1] 张永铨.我国蓄冷技术的现状及发展[C].杭州:中国制冷学会2007学术年会论文集,2007:785-789. (Zhang Yongquan. The existing condition and development of the cool storage technique in china [C]. Hangzhou: Proceeding of Annual Conference of the Chinese Association of Refrigeration, 2007: 785-789.)
- [2] Wang R Z, Li Y. Perspectives for natural working fluids in china [J]. Int. J. Refrigeration, 2007, 30(4): 568-581.
- [3] Zhang Y P, Zhou G B, Lin K P, et al. Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook [J]. Building and Environment, 2007, 42(6): 2197-2209.
- [4] 冯自平.流态化动态冰蓄冷技术及其先进性[J].智能建筑与城市信息, 2007, 3:28-31. (Feng Ziping. The technology of dynamic cold-storage by fluidized ice slurry and its advancement [J]. Intelligent Building & City Information, 2007, 3: 28-31.)
- [5] Egolf P W. Ice slurry: a promising technology[R]. Technical Note on Refrigerating Technologies, IIR/IIF Paris, France, 2004:1-3.
- [6] 袁竹林.制取流体冰新方法 & 高效冰蓄冷研究[J].能源研究与利用, 2004, 4:36-40. (Yuan Zhulin. A new method of dynamic ice-making & the study on high efficiency ice storage system [J]. Study and Usage of Energy, 2004, 4: 36-40.)
- [7] 章学来.二元冰技术的最新进展[J].制冷空调与电力机械, 2006, 27(3): 1-7. (Zhang Xuelai. Latest development for binary ice technology [J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2006, 27(3): 1-7.)
- [8] Egolf P W, Kauffeld M. From physical properties of ice slurries to industrial ice slurry applications [J]. Int. J. Refrigeration, 2005, 28(1): 4-12.
- [9] Stamatioua E, Meewisseb J W, Kawaji M. Ice slurry generation involving moving parts [J]. Int. J. Refrigeration, 2005, 28(1): 60-721.
- [10] Meewisse J W. Fluidized bed ice slurry generator for enhanced secondary cooling systems [D]. DELFT: Delft University of Technology, 2004.
- [11] 曲凯阳, 江亿.不锈钢表面上静止过冷水结冰随机性的实验研究[J].制冷学报, 2000, 4: 8-12. (Qu Kaiyang, Jiang Yi. Experimental study on randomness of supercooled water icing on a surface of stainless steel [J]. Journal of Refrigeration, 2000, 4: 8-12.)
- [12] 何国庚, 王忠衡.冰浆流体流动与换热研究综述[J].制冷学报, 2005, 4(26):1-5. (He Guogeng, Wang Zhongheng. Review of study on flow and heat transfer of ice slurry [J]. Journal of Refrigeration, 2005, 4(26): 1-5.)
- [13] Wijesundera N E, Hawlader M N A, Andy C W B. Ice slurry production using direct contact heat transfer [J]. Int.

- J. Refrigeration, 2004, 27(5): 511-519.
- [14] 章学来, 李瑞阳, 郁鸿凌. 直接接触式蓄冷传热特性的试验研究[J]. 制冷学报, 2002, 2: 5-9. (Zhang Xuelai, Li Ruiyang, Yu Hongling. An experimental study of heat transfer characteristic on direct contact thermal storage system [J]. Journal of Refrigeration, 2002, 2: 5-9.)
- [15] Shina H T, Lee Y P. Spherical-shaped ice particle production by spraying water in a vacuum chamber [J]. Appl. Therm. Eng. 2000, 20(5): 439-454.
- [16] 黎强. 流态化原理及应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994. (Li Qiang. Principles and Applications of Fluidization [M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 1994.)
- [17] Kitanovski A, Vuarnoz D, Ata-Caesar D, et al. The fluid dynamics of ice slurry [J]. Int. J. Refrigeration, 2005, 28(1): 37-50.
- [18] 梁坤峰, 彭正标, 袁竹林. 液-液雾化特征与粒径分布规律[J]. 化工学报, 2007, 58(9): 1457-1463. (Liang Kunfen, Peng Zhengbiao, Yuan Zhulin. Atomization and drop-size distribution of liquid-liquid systems [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2007, 58(8): 1935-1942.)
- [19] Richards J R, Beris A N, Lenhoff A M. Drop formation in liquid-liquid systems before and after jetting [J]. Phys. Fluid, 1995, 7(11): 2617-2630.
- [20] 彭正标, 梁坤峰, 袁竹林. 循环流化床制取流体冰液滴碰撞-聚并实验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007, 37(5): 826-832. (Peng Zhengbiao, Liang Kunfeng, Yuan Zhulin. Experimental study on collision-coalescence of drops formation in circulating fluidized bed for ice slurry production [J]. Journal of Southeast University, 2007, 37(5): 826-832.)
- [21] 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]. 热能与动力工程, 2007, 22(2): 205-212. (Peng Zhengbiao, Liang Kunfeng, Yuan Zhulin. Numerical simulation and experimental study of liquid-liquid jet flow atomization [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2007, 22(2): 205-212.)
- [22] 彭正标, 梁坤峰, 袁竹林. 液-液循环流化床制取流体冰的雾化机理实验[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007, 37(3): 457-463. (Peng Zhengbiao, Liang Kunfeng, Yuan Zhulin. Experimental study on mechanism of drops formation in liquid-liquid circulating fluidized bed for ice slurry [J]. Journal of Southeast University, 2007, 37(3): 457-463.)
- [23] Carsten C, Peter F, Erich J W. Drop formation in a co-flowing ambient fluid[J]. Chem. Eng. Sci., 2004, 59(15): 3045-3058.
- [24] Richards J R, Lenhoff A M, Beris A N. Dynamic breakup of liquid-liquid jets[J]. Phys. Fluid, 1994, 6(8): 2640-2655.