

文章编号:0253-4339(2019)03-0124-08
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.03.124

多壁碳纳米管作用下乙醇溶液静态闪蒸特性实验研究

章学来 贾潇雅 王章飞 郑钦月 甘伟 韩兴超 Jotham Muthoka Munyalo

(上海海事大学蓄冷技术研究所 上海 201306)

摘 要 为研究用于工业真空制备二元冰的最佳工况,本文基于静态闪蒸理论,设计并搭建了一套固体吸附条件下乙醇溶液真空闪蒸制冰实验系统。在同一初始压力下(100 Pa),研究了不同乙醇浓度、环境温度和多壁碳纳米管尺寸对静态闪蒸制冰特性的影响。结果表明:乙醇的添加在防止重结晶的同时可以降低蒸馏水真空闪蒸制冰的过冷度,较高浓度的乙醇溶液不利于闪蒸制冰,5%质量浓度的乙醇溶液闪蒸特性稳定,可将蒸馏水过冷度降低 60.62%,较适合静态闪蒸制冰;随着环境温度升高,闪蒸室内溶液闪蒸量增大,随着环境温度从 10℃升至 20℃,闪蒸率从 25.45%增至 44.04%。较低的环境温度有利于真空闪蒸制冰;随着添加多壁碳纳米管粒径的减小,乙醇溶液过冷度减小,当多壁碳纳米管外径为 5~18 nm 时,真空闪蒸的含冰率相对于 5%质量浓度的乙醇溶液提高 51.45%,相对于蒸馏水提高 38.22%。过冷度相对于 5%质量浓度的乙醇溶液降低 24.36%,相对于蒸馏水降低 70.21%,对于减小蒸馏水过冷度和提高含冰率效果显著。

关键词 乙醇溶液;真空;蒸发;过冷度;含冰率

中图分类号:TK124;TB657 文献标识码:A

Experimental Study of Ethanol Solution Vacuum Flash Characteristics Under the Effect of Multi-walled Carbon Nanotube

Zhang Xuelai Jia Xiaoya Wang Zhangfei Zheng Qinyue Gan Wei
Han Xingchao Jotham Muthoka Munyalo

(Institute of Cool Storage Technology, Shanghai Maritime University, Shanghai, 201306, China)

Abstract To study the optimum operating condition of industrial ice making, an experimental system of the vacuum flash of ethanol solution under adsorption was designed based on the theory of flash evaporation. Under the same initial flash pressure (100 Pa), the effects of concentration, environment temperature, and size of multi-walled carbon nanotube (MWCNT) on the flash properties were studied. The results indicated that adding ethanol could not only avoid recrystallization but also decrease the supercooling degree of water. Higher concentrations were found to be adverse to the flash process. The flash property of 5% mass concentration of ethanol was stable, and the supercooling degree of water could be decreased by as much as 60.62%. With the rise in the environment temperature, the flash rate increased as the flash rate increased from 25.45% to 44.04% for an increase in the environment temperature from 10℃ to 20℃. Thus, lower environment temperatures were shown to be beneficial to the flash process. With the decrease in the practical size of MWCNT, the supercooling of the MWCNT-ethanol solution decreased. The ice packing factor (IPF) of the solution to which 5-18 nm MWCNT was added was 51.45% higher than that of the 5% mass concentration ethanol and 38.22% higher than that of water. The supercooling degree of the solution was 24.36% smaller than that of ethanol and 70.21% smaller than that of water, which shows the MWCNT-ethanol solution has a significant effect on reducing the supercooling degree of water and improving the IPF.

Keywords ethanol solution; vacuum; evaporation; supercooling degree; ice packing factor(IPF)

冰浆作为新型蓄冷材料,具有较高的蓄冷密度、较快的释冷速度、良好的流动性和换热性,在食品、医疗、工业冷却等领域应用广泛^[1-3]。所有制冰方式中,真空制备冰浆是一种环境友好型的制冰方式^[4]。孙冰洁^[5]对真空喷雾法制取冰浆系统进行理论分析及模拟计算,设计出能够实现连续制取冰浆的真空制冰浆系统。徐爱祥^[6]分析了在不同粒径尺寸和真空环境压力下,液滴表面温度的变化规

基金项目:国家自然科学基金(51376115)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51376115).)

收稿日期:2018-03-26;修回日期:2018-06-04

律及特点,并提出一种带夹层真空室的新型捕冷方式,结果表明,该新型捕冷方式能够有效捕集水蒸气,并能增强制冰效果。时竟竞等^[7]在水中加入氨水,对真空下溶液的蒸发温度特性进行实验研究,发现氨水对制冰系统真空度的要求远低于蒸馏水。刘曦等^[8]从理论上论证了非等温结晶动力学模型 Jeziorny 法和 Mo 法用于描述冰浆结晶行为的可行性。章学来等^[9]基于实验并通过模型分析了真空制冰水滴结冰过程的影响因素,为二元冰真空制备的优化设计提供了理论基础。

从微观结构来看,水在结冰过程中,水分子之间以氢键结合在一起^[10],在没有添加剂的情况下,氢键的结合就没有阻力,冰晶可以自由生长,因此冰晶生长迅速而坚硬,形成块状,流动性,不能形成冰浆^[11]。添加含有羟基(—OH)的醇类化合物,具有良好的亲水性,可以与水分子形成氢键^[12],使冰晶对水分子的引力减小,形成细小的冰晶。但它们的分子较小,只能一定程度地影响冰粒的继续长大,当含冰率(ice packing factor, IPF)升高时,不能完全阻止冰晶在容器壁上生长,可能是由于浓度引起的。但如果一味地提高醇类化合物的质量浓度,结冰温度会急剧下降,这会降低制冷系统效率^[13]。黄亮等^[14]设计了一套悬垂液滴的真空闪蒸可视化实验装置,研究了乙醇溶液液滴的降压闪蒸特性。研究表明乙醇溶液的浓度越高,液滴的凝固点越低,液滴结晶所需时间越长;一定质量浓度的乙醇溶液可以提高液滴结晶时闪蒸室的压力,降低了对系统真空度的要求。Zhang Xuelai

等^[15]研究发现乙醇的添加可以抑制冰晶堆积结块,乙醇添加剂能使溶液获得低于 0℃ 的温度,质量浓度越高,温度越低。实验中为防止冰晶重结晶,在用于闪蒸的蒸馏水中加入乙醇,选择合适的乙醇质量浓度不仅可以获得较高的成冰率,也不会降低系统效率。

制冰过程中,过高的过冷度容易导致制冰效率降低和能量损耗,故需要降低水的过冷度以加速结冰过程。因此,对水的过冷度可能有影响的诸多因素如流速、冷却时间、换热材料种类及其结构、杂质、添加剂及外界因素等都已进行了研究^[16-17]。而碳纳米管由于较高的导热导电性能,被作为材料添加剂广泛使用^[18-20]。杨波等^[21]研究发现水基单壁、多壁碳纳米流体能够强化基液工质导热性能;单壁碳纳米流体粘度不稳定,多壁碳纳米流体粘度较稳定,多壁碳纳米管(multi-walled carbon nanotubes, MWCNT)更适用于纳米流体强化传热。

为防止冰晶重结晶,同时减小闪蒸制冰系统能耗,降低溶液闪蒸过程中的过冷度,探究用于工业真空制备二元冰的最佳工况,本文以乙醇溶液为基液,添加了不同粒径的纳米材料,设置了不同环境温度的工况,探究了乙醇质量浓度、环境温度和纳米粒子的粒径对静态闪蒸特性的影响。

1 实验装置和方法

1.1 实验装置

本文搭建的二元冰真空制备动态实验系统如图 1 所示。实验系统主要包括:

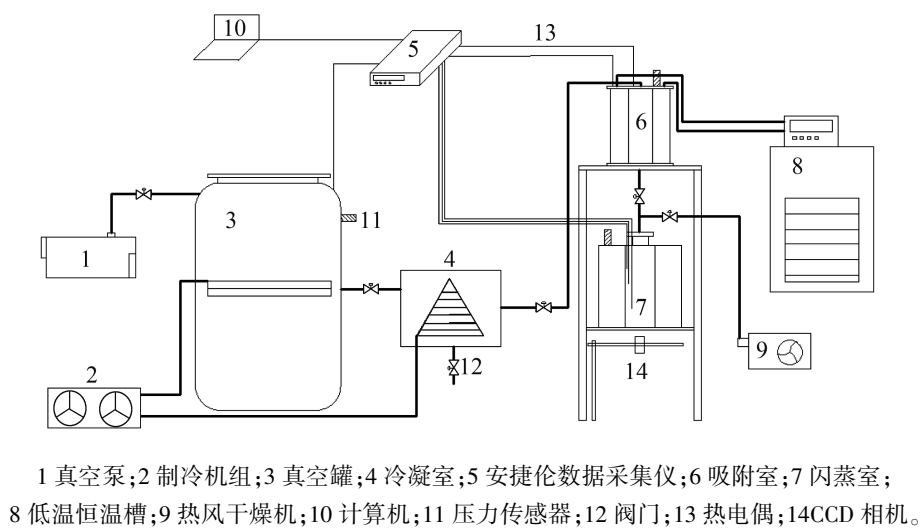


图 1 二元冰真空制备动态实验系统

Fig.1 Dynamic experimental system of making ice slurry in vacuum

1)真空创建及维持设备:真空泵、真空罐、冷凝室、吸附室等。本系统采用双级旋片式真空泵(型号

为 2X-30A 型)。吸附室内的吸附剂为 13x 沸石分子筛(球状颗粒物,质量为 10 kg)。

2)冷却装置:制冷机组、冷却盘管(设置在真空罐和冷凝室内)、低温恒温槽(型号 DC6515,测温范围-65~100 ℃,温度波动态±0.05 ℃)。

3)闪蒸室:闪蒸室内装有铠装 T 型热电偶(测温范围均为-200~500 ℃,精度 A 级,响应时间≤3 s),测点布置如图 2 所示。

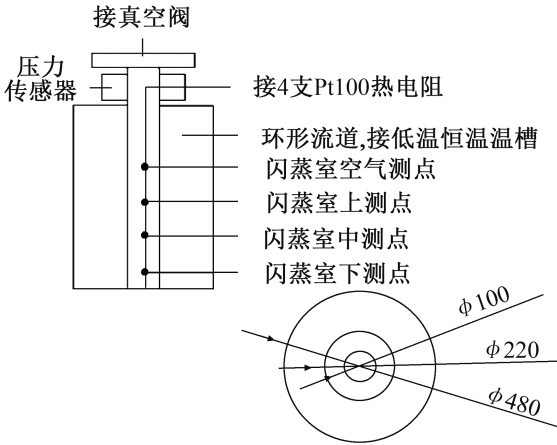


图 2 闪蒸室
Fig.2 Flash chamber

4)数据采集处理设备:安捷伦数据采集仪、压力传感器和电脑等。

闪蒸过程中温度测量情况如图 3 所示。通过闪蒸实验发现:铠装热电偶的上测点和中测点闪蒸溶液温度步冷曲线基本一致,但下测点有时会存在不同,原因在于闪蒸过程剧烈、快速,液体表面迅速结冰,而下测点仍处于液体状态。因此实验数据将从上测点和中测点选择。

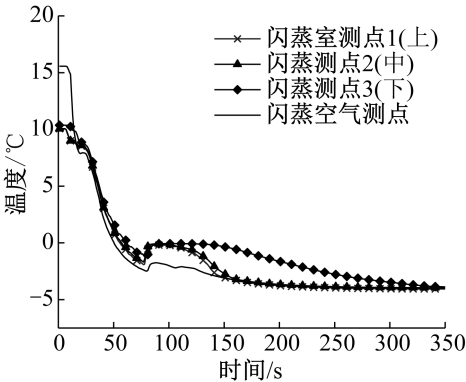


图 3 真空闪蒸室热电阻测点步冷曲线
Fig.3 Temperature curve of thermal resistance measuring points in vacuum flash chamber

1.2 实验前的准备

- 1)热电偶校准。
- 2)实验系统吹扫和检漏。系统管路吹扫采用高

压氮气清扫管道内的灰尘、焊渣及其它管道垃圾等杂质。真空闪蒸制冰系统需要保持良好的密封性,从而保证制冰实验的可行性、准确性。检漏方法采用静态升压法,检测系统压力升高值是否满足系统真空度要求。本实验预设系统压力为 100 Pa,将真空稳压罐、冷凝室作为整体进行真空检漏。检测时,各部件连接阀门全开,当真空泵压力抽到 100 Pa,关闭真空泵、与稳压罐间相连的阀门,测试制冰时间内系统压力的变化。满足实验要求后开始实验。

3)溶液的配制。实验上海阿拉丁生化科技股份有限公司生产的碳纳米管,规格参数如表 1 所示,分散剂选取十六烷基三甲基溴化铵(hexadecyl trimethyl ammonium bromide, CTAB)。基液为蒸馏水,为配制均匀分散的 MWCNT 乙醇流体,先在蒸馏水中添加质量分数为 0.05%的 MWCNT 和 0.1%的 CTAB,然后用 SY-200 超声波震荡仪对其进行震荡分散,由于震荡过程中溶液会升温,故设置震荡周期为震 5 s,停 5 s,循环震荡 200 次,最高温度≤60 ℃。为防止震荡高温导致乙醇挥发,待纳米溶液冷却至室温,再加入不同质量的无水乙醇。

表 1 工业级 MWCNT 颗粒性质				
Tab.1 The property of industrial grade MWCNT particle				
外径/ nm	内径/ nm	长度/ μm	比表面积/ (m ² /g)	纯度/%
8~15	3~5	30~50	400	>90
20~40	5~10	10~30	200	>90
>50	5~15	10~20	120	>90

1.3 实验步骤

- 1)将配置好的溶液倒入闪蒸室,并将闪蒸室接入实验系统;
- 2)密封系统,关闭闪蒸室水蒸气出口处密封阀,开启真空泵和冷却机组(蒸发温度已预设好),对真空罐、冷凝室和吸附室抽真空,同时开始采集系统压力、温度数据;
- 3)当真空罐压力降至 100 Pa 时,关闭真空泵,待系统压力稳定后,打开闪蒸室水蒸气出口密封阀,闪蒸过程开始,直至闪蒸液体温度恒定;
- 4)实验结束,停止数据测量;恢复系统常压,对闪蒸室内液相部分进行称量,根据质量守恒定律,倒入一定量的高温水,融化闪蒸室内的冰晶后计算其成冰量,从而得出含冰量;
- 5)采用热风机对系统进行吹干后,分别改变乙醇溶液质量浓度、闪蒸室水套温度(环境温度)和纳米粒子添加剂的粒径 3 种因素对二元冰生成的影响。

1.4 静态闪蒸制冰实验优劣评价参数及测量

真空闪蒸法制取的冰浆具有良好的流动性、高热值等优良特性,潜热值的决定因素是冰浆的含冰率,且含冰率还会影响冰浆的流动性,故含冰率是评价闪蒸制冰优劣特性的一个参数。含冰率测量方法为:待一组闪蒸制冰实验结束,静态闪蒸室中溶液是冰水混合物状态,此时需要立即取出冰水混合物中的水,通过电子天平称重得出数值,记为 m_1 ,则闪蒸室剩余的即为冰水混合物中的冰。由于本实验中加装精确测温的 Pt100 热电阻(固定不可拆),致使这部分冰无法完整取出,因此这部分冰的质量将通过称量 100 g 热水倒入闪蒸室,使冰完全融化后进行称量,记为 m 。故成冰量 $m_2 = (m - 100) \text{ g}$ 。因此含冰率是经过闪蒸制冰,100 g 溶液中成冰量占比,用式(1)计算。而过冷度取值对应步冷曲线中过冷阶段出现的最低点与达到相变蓄冷阶段最大差值,可查温度数据表得出。

$$\text{IPF} = \frac{m_2}{100} \times 100\%$$

(1)

同时,冰浆制备过程中存在过冷现象,过冷度越大,成冰需要输入的冷量更多,会造成制冰过程的能耗增加。因此过冷度也是评价闪蒸制冰优劣特性的主要参数。

2 结果分析与讨论

2.1 乙醇质量浓度对制冰过程的影响

蒸馏水的真空闪蒸步冷曲线如图 4 所示,蒸馏水在真空下的闪蒸过程分为液相降温阶段、液相过冷阶段、成核阶段和相变平台阶段。打开闪蒸室阀门的瞬间,压力骤降,闪蒸室内压力降至水的三相点 611 Pa 之下,部分水闪蒸成为水蒸气,这一相变过程中大量的汽化潜热被带走,导致闪蒸室内温度骤降,内部剩余液体凝结成冰。而乙醇溶液的闪蒸与蒸馏水闪蒸的差异在于同一温度下,乙醇的饱和蒸汽压力>水的饱和蒸汽压力,所以会先于蒸馏水闪蒸成为气态。实验研究了同一初始温度(10℃)下,不同质量浓度的乙醇溶液的闪蒸情况,并与蒸馏水的闪蒸进行对比。随着乙醇质量浓度的增大,乙醇溶液的闪蒸特性发生了较大改变。

图 5 所示为 4%、5%、6%质量浓度乙醇溶液的闪蒸步冷曲线。图 6 所示为 10%、15%、20%质量浓度乙醇溶液的闪蒸步冷曲线及吸附室压力。

由图 5 可知,5%质量浓度的乙醇溶液,其闪蒸过程和水的闪蒸过程类似,都是随着压力降低,经过一次过冷后成核结冰,而当质量浓度继续增大后,如图

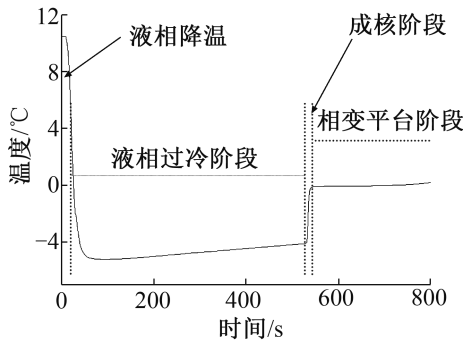


图 4 蒸馏水的真空闪蒸步冷曲线
Fig.4 Temperature curve of water's vacuum flash

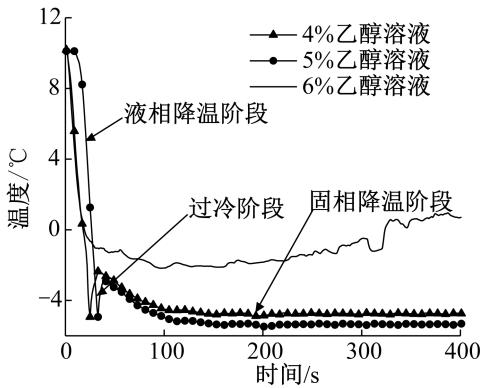


图 5 4%、5%、6%质量浓度乙醇溶液的闪蒸步冷曲线
Fig.5 Temperature curve of ethanol solution flash with the mass fraction of 4%、5%、6%

6(a)所示,乙醇溶液闪蒸过程中的温度曲线出现大规模的波动,即闪蒸过程中出现多次过冷现象,通过对闪蒸过程的录像进行观察也验证了多次过冷成核现象的发生。分析认为,随着闪蒸室内压力的降低,部分乙醇先于水闪蒸并带走大量汽化潜热,导致闪蒸室内温度降低,溶液表面成核结晶,从而阻碍了闪蒸室底部溶液的闪蒸,此时,吸附室依然在不断地吸附闪蒸产生的蒸汽,而表面冰层下的乙醇由于其较高的饱和蒸汽压力更容易闪蒸,导致冰面上部真空环境压力远低于下部溶液压力,故冰层破碎,之后溶液继续闪蒸,降温结冰,此现象如此反复进行,在乙醇溶液闪蒸的温度曲线上表现为多次波动。由图 6(b)可知,吸附室的压力变化曲线中每次的压力峰值基本都伴随着闪蒸室中一次过冷现象的结束,同样也验证了上述分析。由此可见,质量浓度较大的乙醇溶液较难稳定结冰,并不适合做闪蒸材料。不同浓度乙醇溶液的闪蒸制冰实验数据如表 2 所示,5%质量浓度的乙醇溶液含冰率虽略低于蒸馏水,但其过冷度相对于蒸馏水降低了 60.62%,在防止重结晶的前提下可稳定结冰,较适合选作静态闪蒸的材料。

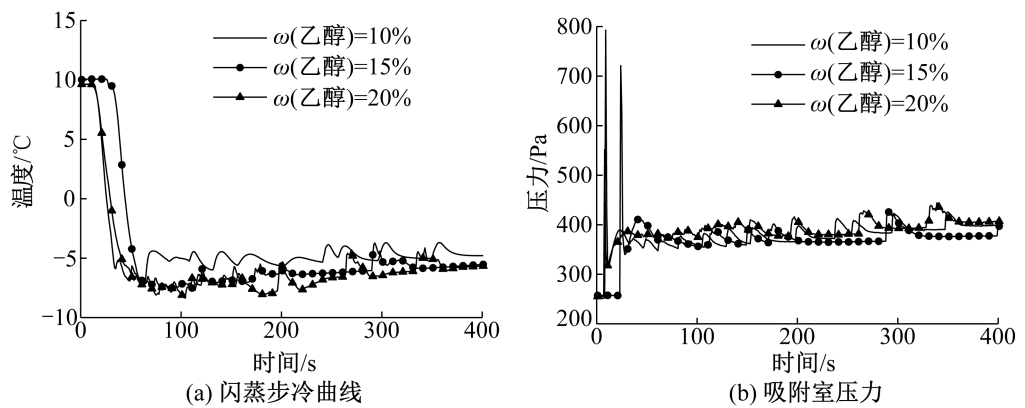


图 6 10%、15%、20%质量浓度乙醇溶液的闪蒸步冷曲线及吸附室压力

Fig.6 Temperature curve of flash and pressure curve in adsorption chamber of ethanol solution with the mass fraction of 10%、15%、20%

为确定最佳闪蒸浓度,在 $w(\text{乙醇})=5\%$ 的基础上研究了质量浓度为 4% 和 6% 的乙醇溶液闪蒸实验。如图 5 所示,当 $w(\text{乙醇})=6\%$ 时,依然出现温度波动,且实验结束后无冰晶形成。当降低质量浓度至

4% 时,闪蒸过程中过冷度为 $2.576\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对于 4% 的质量浓度,5% 质量浓度的乙醇可将闪蒸过程的过冷度降低 $0.556\text{ }^{\circ}\text{C}$ (27.52%),闪蒸率也提高了 3.25%。可见质量浓度 5% 为最佳闪蒸浓度。

表 2 不同浓度乙醇溶液的闪蒸制冰实验数据统计

Tab.2 Flash experiment data of ethanol solution with different mass fraction

实验工况	溶液剩余量/g	成冰量/g	闪蒸量/g	过冷最低点温度/°C	过冷结束点温度/°C	过冷度/°C	闪蒸率/%	含冰率/%
$w(\text{乙醇})=4\%$	59.12	16.23	24.65	-4.943	-2.367	2.576	24.65	16.23
$w(\text{乙醇})=5\%$	57.00	17.55	25.45	-4.936	-2.916	2.020	25.45	17.55
蒸馏水	59.41	19.23	21.36	-5.220	-0.090	5.130	21.36	19.23

2.2 环境温度对制冰过程的影响

选取 5% 质量浓度的乙醇溶液作为闪蒸材料,不同环境温度下闪蒸步冷曲线及闪蒸压力如图 7 所示,不同初始温度的乙醇溶液闪蒸制冰实验数据统计结果如表 3 所示。由图 7(a) 可知,随着环境温度的升

高,乙醇溶液闪蒸过程中温度波动程度增大,即发生过冷现象的次数增加,闪蒸特性不稳定。只有当环境温度为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,闪蒸后的溶液具有 17.55% 的含冰率,其他环境温度下均无冰晶生成。分析认为,环境温度的升高使水和乙醇的饱和蒸气压力升高,闪蒸过

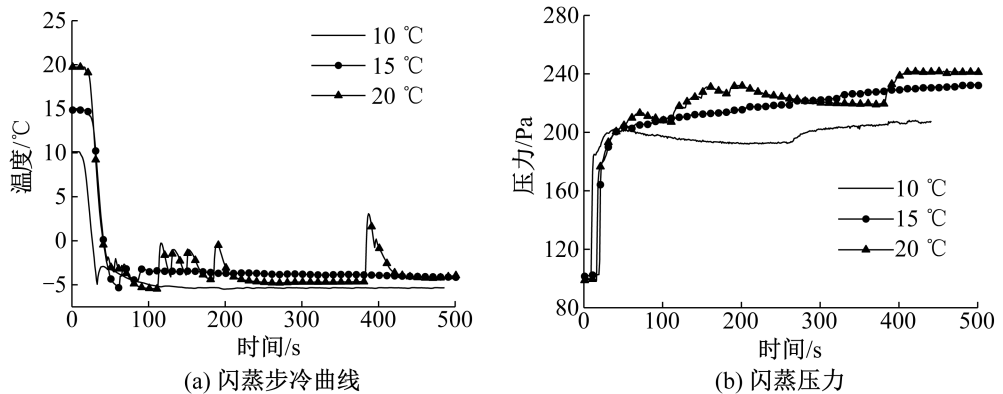


图 7 不同初始温度下乙醇溶液的闪蒸步冷曲线及闪蒸压力

Fig.7 Temperature curve and pressure curve of ethanol solution flash under different initial temperature

程更为剧烈,而闪蒸过程带走的汽化潜热<水套向闪蒸室内溶液散热量,成冰的热负荷增大,最后导致无冰生成。对照闪蒸压力曲线图 7(b)和表 3 发现,闪蒸结束的平衡压力随着环境温度的升高而升高,这一变化同样验证了上述分析。随着环境温度的升高,闪

蒸室内溶液的闪蒸量增大,随着环境温度从 10 ℃ 升至 20 ℃,闪蒸率从 25.45%增至 44.04%。环境温度为 15 ℃ 和 20 ℃ 时,水套的散热>闪蒸过程中带走的汽化潜热,导致无冰生成,故较低的环境温度有利于真空制冰。

表 3 不同初始温度的乙醇溶液闪蒸制冰实验数据统计

Tab.3 Flash experiment data of ethanol solution with different initial temperature

实验工况/℃	溶液剩余量/ g	成冰量/ g	闪蒸量/ g	过冷最低点 温度/℃	过冷结束点 温度/℃	过冷度/ ℃	闪蒸率/%	含冰率/%
10	57.00	17.55	25.45	-4.936	-2.916	2.02	25.45	17.55
15	63.65	0	36.35	—	—	—	36.35	0
20	55.96	0	44.04	—	—	—	44.04	0

2.3 MWCNT 尺寸对制冰特性的影响

为改良闪蒸溶液的导热性能,进一步降低过冷度,选取 5% 质量浓度的乙醇溶液为基液,水套温度为 10 ℃,添加了不同尺寸的 MWCNT,配置成 MWC-

NT-乙醇溶液,其闪蒸过程的步冷曲线及闪蒸压力如图 8 所示,添加不同尺寸 MWCNT 的乙醇溶液实验数据统计结果如表 4 所示。

表 4 添加不同尺寸 MWCNT 的乙醇溶液闪蒸制冰实验数据统计

Tab.4 Flash experiment data of ethanol solution with different MWCNT sizes

实验工况	溶液剩余量/ g	成冰量/ g	闪蒸量/ g	过冷最低点 温度/℃	过冷结束点 温度/℃	过冷度/ ℃	闪蒸率/%	含冰率/%
外径 8~15 nm	37.97	26.58	35.45	-4.562	-3.034	1.528	35.45	26.58
外径 20~40 nm	50.60	18.32	20.21	-5.337	-3.268	2.069	20.21	18.32
外径 ≥50 nm	47.77	20.12	25.36	-5.363	-3.069	2.294	25.36	20.12
蒸馏水	59.41	19.23	21.36	-5.220	-0.090	5.130	21.36	19.23

由图 8 可知,添加不同尺寸 MWCNT 的溶液温度和压力变化趋势基本一致,随着 MWCNT 粒径的减小,过冷度降低,分析认为,对于相同质量的 MWC-

NT,质量越小,其在单位体积溶液中分散的数量越大,MWCNT 在溶液闪蒸制冰过程中扮演着成核剂的角色,降低了成核的能量位垒,使成核率增大,同质量

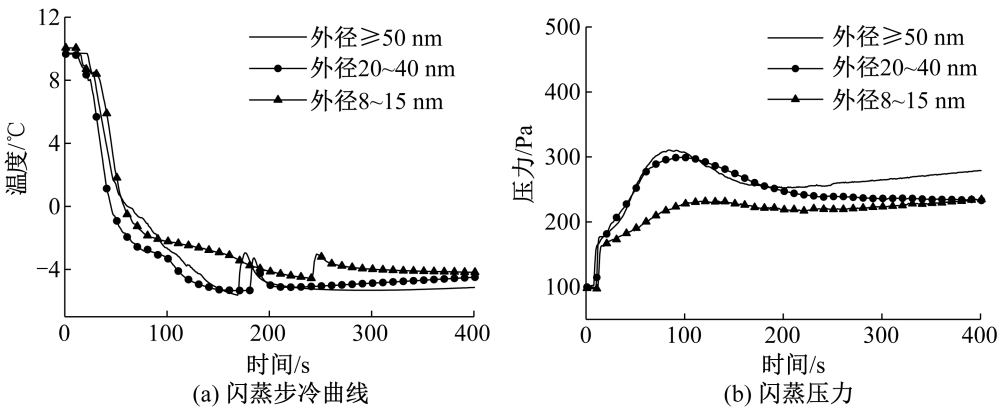


图 8 添加不同尺寸 MWCNT 的闪蒸步冷曲线及闪蒸压力

Fig.8 Temperature curve and pressure curve of flashing with different MWCNT size

下粒径小的纳米粒子相比其他浓度能提供异相成核的基体越多,加快了溶液凝固,过冷的减少效果更明显。MWCNT 的添加对于 5% 质量浓度的乙醇溶液过冷度减小的作用并不明显,分析认为,闪蒸过程剧烈,随着闪蒸室内压力降低,主要以池内沸腾的方式进行,在闪发蒸汽气泡形成与脱离表面时造成液体对壁面的强烈冲击和扰动,所以对同一种液体来说,沸腾传热的传热分系数要大得多,溶液各部分热交换较充分,故 MWCNT 对促进流体传热的作用较小。含冰率与 MWCNT 的粒径无线性关系,添加粒径 ≥ 50 nm 的 MWCNT 时,乙醇溶液的含冰率最高,相对于 5% 质量浓度乙醇溶液提高 51.45%,相对于蒸馏水提高 38.22%。过冷度相对于 5% 质量浓度的乙醇溶液降低 24.36%,相对于蒸馏水降低 70.21%。

3 结论

本文基于静态闪蒸理论,设计并搭建了一套固体吸附条件下乙醇溶液真空闪蒸制冰实验系统,探究用于工业真空制备二元冰的最佳工况。在同一初始压力下(100 Pa),研究了不同乙醇质量浓度、环境温度和 MWCNT 尺寸对静态闪蒸制冰特性的影响。得到如下结论:

1) 乙醇的添加在防止重结晶的同时可以降低蒸馏水真空闪蒸制冰的过冷度,较高质量浓度的乙醇溶液不利于闪蒸制冰,5% 质量浓度的乙醇溶液闪蒸特性稳定,可将蒸馏水过冷度降低 60.62%,较适合静态闪蒸制冰。

2) 随着环境温度的升高,闪蒸室内溶液的闪蒸量增大,随着环境温度从 10 °C 升至 20 °C,闪蒸率从 25.45% 增至 44.04%。较低的环境温度有利于真空闪蒸制冰。

3) 随着 MWCNT 粒径的减小,MWCNT-乙醇溶液过冷度降低,添加外径为 5~18 nm MWCNT 的溶液真空闪蒸的含冰率相对于 5% 质量浓度乙醇溶液提高 51.45%,相对于蒸馏水提高 38.22%。过冷度相对于 5% 质量浓度乙醇溶液降低 24.36%,相对于蒸馏水降低 70.21%,其减小蒸馏水过冷度和提高含冰率效果显著。

参考文献

[1] 刘曦,郑闽锋,葛周天,等. 真空法制备冰浆中冰晶粒径特性的实验研究[J]. 制冷学报, 2017, 38(4): 94-101. (LIU Xi, ZHENG Minfeng, GE Zhoutian, et al. Experimental study on the particle size characteristics of ice crystals prepared by vacuum method[J]. *Journal of Refrigeration*, 2017, 38(4): 94-101.)

eration, 2017, 38(4): 94-101.)

[2] 董凯军,刘腾庆,陈照杰,等. 冰浆潜热输送矿井空调系统火用分析研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(10): 113-116. (DONG Kaijun, LIU Tenqing, CHEN Zhaojie, et al. Analysis on fire use of ice slurry latent heat conveying mine air conditioning system[J]. *Coal Technology*, 2017, 36(10): 113-116.)

[3] 郝玲,刘圣春,杨旭凯,等. 动态冰浆的应用及制取方法的现状及展望[J]. 制冷与空调(北京), 2014, 14(11): 1-10. (HAO Ling, LIU Shengchun, YANG Xukai, et al. The application of dynamic ice slurry and the present situation and prospect of the method of preparation[J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2014, 14(11): 1-10.)

[4] 黄河源,范明升. 真空制冰的工作原理与选型设计[J]. 制冷与空调(北京), 2017, 17(9): 83-86. (HUANG Heyuan, FAN Mingsheng. Working principle and selection design of vacuum ice making[J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2017, 17(9): 83-86.)

[5] 孙冰洁. 真空法制备冰浆的数值模拟和理论研究[D]. 济南: 山东大学, 2013. (SUN Bingjie. Numerical simulation and theoretical research on the preparation of ice pulp by vacuum method [D]. Jinan: Shandong University, 2013.)

[6] 徐爱祥. 新型真空液滴制冰特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010. (XU Aixiang. Research on the ice characteristics of new vacuum droplet system[D]. Changsha: Central South University, 2010.)

[7] 时竞竞,刘道平,余守杰,等. 改进型真空制冰系统的性能研究[J]. 制冷学报, 2012, 33(1): 60-64. (SHI Jingjing, LIU Daoping, YU Shoujie, et al. Research on the performance of improved vacuum ice system[J]. *Journal of Refrigeration*, 2012, 33(1): 60-64.)

[8] 刘曦,庄焜煜,黄成,等. 真空法动态制冰的非等温结晶动力学[J]. 化工学报, 2017, 68(8): 3071-3081. (LIU Xi, ZHUANG Kunyu, HUANG Cheng, et al. The non-isothermal crystallization kinetics of the dynamic process of vacuum method[J]. *CIESC Journal*, 2013, 68(8): 3071-3081.)

[9] 章学来,刘小微,吴云云. 真空制冰水滴结冰过程影响因素分析[J]. 化工学报, 2012(增刊 2): 64-68. (ZHANG Xuewen, LIU Xiaowei, WU Yunyun. Analysis of the influence factors of the freezing process of the vacuum ice water droplet[J]. *CIESC Journal*, 2012(Suppl.2): 64-68.)

[10] 金从卓,赵莲晋,马腾跃,等. 真空喷雾法制取冰浆的理论分析研究[J]. 流体机械, 2011, 39(5): 61-65. (JIN Congzhuo, ZHAO Lianjin, MA Tengyue, et al. The theoretical analysis of ice slurry by vacuum spray method [J]. *Fluid Machinery*, 2011, 39(5): 61-65.)

- [11] 蒋立仁. 化学键[M]. 北京: 科学出版社, 1998. (JIANG Liren. Chemical bond [M]. Beijing: Science Press, 1998.)
- [12] 艾伯特·梅兰. 工业溶剂手册[M]. 孔德琨, 陈志武, 徐辉远, 译. 北京: 科学出版社冶金工业出版社, 1984. (MEILAN Albert. Industrial solvent manual [M]. KONG Dekun, CHEN Zhiwu, XU Huiyuan, Translation. Beijing: Science Press Metallurgical Industry Press, 1984.)
- [13] 周保法, 涂益新, 吕树申. 冰泥浆式冷量储运系统参数的理论研究[J]. 制冷与空调(北京), 2001, 1(4): 40–44. (ZHOU Baofa, TU Yixin, LYU Shushen. Theoretical study on the parameters of ice slurry cooling storage and transportation system [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2001, 1(4): 40–44.)
- [14] 黄亮, 章学来. 乙醇溶液液滴降压闪蒸特性[J]. 化工学报, 2016, 67(9): 3762–3767. (HUANG Liang, ZHANG Xuelai. The characteristics of liquid droplet drop in ethanol solution [J]. CIESC Journal, 2016, 67(9): 3762–3767.)
- [15] ZHANG Xuelai, LI Yue, WANG Youli, et al. Experimental study on the characteristics of ethanol solution's vacuum flash under adsorption condition [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 116: 648–654.
- [16] 孙始财, 樊栓狮, 梁德青. 气体水合物超声结晶实验[J]. 制冷学报, 2004, 25(4): 10–14. (SUN Shicai, FAN Shuanshi, LIANG Deqing. Ultrasonic crystallization experiment of gas hydrate [J]. Journal of Refrigeration, 2004, 25(4): 10–14.)
- [17] 王葳, 张绍志, 陈光明, 等. 超声波对水的过冷度影响的实验研究[J]. 制冷学报, 2003, 24(1): 6–8. (WANG Wei, ZHANG Shaozhi, CHEN Guangming, et al. Experimental study on the effect of ultrasonic waves on the overcooling of water [J]. Journal of Refrigeration, 2003, 24(1): 6–8.)
- [18] KUZUMAKI T. Processing of carbon nanotube reinforced aluminum composite [J]. Journal of Materials Research, 1998, 13(9): 2445–2449.
- [19] CURRAN S A, AJAYAN P M, BLAU W J, et al. A composite from poly (m-phenylenevinylene-co-2,5-dioctoxy-p-phenylenevinylene) and carbon nanotubes: a novel material for molecular optoelectronics [J]. Advanced Materials, 1998, 10(14): 1091.
- [20] LU J P. Elastic properties of carbon nanotubes and nanoropes [J]. Physical Review Letters, 1997, 79(7): 1297–1300.
- [21] 杨波, 王姣, 刘军. 碳纳米流体强化传热研究[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(5): 21–23. (YANG Bo, WANG Jiao, LIU Jun. Research on enhanced heat transfer of carbon nanofluids [J]. Strong Laser and Particle Beam, 2014, 26(5): 21–23.)

通信作者简介

章学来, 男, 教授, 上海海事大学蓄冷技术研究所, 13127992577, E-mail: xlzhang@shmtu.edu.cn。研究方向: 相变储能技术及二元冰真空制备。

About the corresponding author

Zhang Xuelai, male, professor, Institute of Cool Storage Technology, Shanghai Maritime University, +86 13127992577, E-mail: xlzhang@shmtu.edu.cn. Research fields: phase change energy storage and ice slurry.

(上接第 123 页)

- [28] BURGESS C J C. A tutorial on support vector machines for pattern recognition [J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 1998, 2(2): 1–47.
- [29] 曾天翔. 电子设备测试性及诊断技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 1995: 44–46. (ZENG Tianxiang. Electronic equipment testing and diagnostic techniques [M]. Beijing: Navigate Industrial Press, 1995: 44–46.)

通信作者简介

韩华, 女, 讲师, 上海理工大学能源与动力工程学院,

13611880360, E-mail: happier_han@126.com。研究方向: 制冷空调新技术及故障诊断, 空调净化技术, 能源利用及强化换热。

About the corresponding author

Han Hua, female, lecturer, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, +86 13611880360, E-mail: happier_han@126.com. Research fields: new technology and fault detection and diagnosis (FDD) for HVAC & R systems, air purification technology, energy utilization and heat transfer enhancement.