

文章编号: 0253-4339(2012)01-0060-05

doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2012.01.060

改进型真空制冰系统的性能研究

时竞竞 刘道平 余守杰 彭富裕

(上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093)

摘要 为了降低真空制冰系统对真空度的要求,提出了在水中加入中介物质的方法,并建立了真空蒸发性能测试系统。采用浓度为26%的氨水为中介物质溶液,对真空下溶液的蒸发温度特性进行了实验研究,分析了对系统的影响。实验结果表明,在相同的初始温度和真空条件下,氨水的降温速率和降温范围明显高于蒸馏水,且在高于水的三相点压力时有冰晶形成;随着真空度的降低,氨水的降温幅度逐渐减小,但仍远大于蒸馏水,说明在相同的蒸发温度下,氨水对真空度的要求远低于蒸馏水。

关键词 热工学; 真空制冰; 真空度; 中介物质; 氨

中图分类号: TQ051.4; TQ085⁺.43

文献标识码: A

Performance Study on Improved Vacuum Ice Slurry Making Equipment

Shi Jingjing Liu Daoping Yu Shoujie Peng Fuyu

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

Abstract To improve the vacuum degree requirement of the vacuum ice slurry making equipment, the intermediary substance was proposed to add to water. A performance test system was established to study vacuum evaporation characteristics experimentally using ammonia water with concentration of 26% as the intermediary substance solution and the influence of ammonia on ice slurry production was analyzed. The results show that the cooling rate and temperature's drop range of ammonia water are significantly higher than distilled water with the same initial temperature and vacuum degree. Moreover, ice crystal can be formed above the pressure of water's triple point in ammonia water. With the decrease of vacuum degree, the temperature's decreasing scope of ammonia gradually diminishes, but still much larger than that of distilled water, which indicates that ammonia water's requirement for the vacuum degree to achieve the same evaporation temperature is much lower.

Keywords Pyrology; Vacuum ice slurry making; Vacuum degree; Intermediary substance; Ammonia

冰浆是由水溶液和冰晶粒子组成的泥浆状悬浊液,具有蓄冷能力大、流动性强、较快的供冷速率和较好的温度调解特性等特点。由于冰浆良好的传热与冷却特性,使得换热器的流量、水泵的能耗及相应的管道、设备尺寸等大大减小,从而降低了初投资与运行费用。冰浆可以广泛用于蓄冷空调、工业生产、食品的加工保存、换热器和管道的内部清洗、手术医疗和扑灭火灾等领域^[1-3],并具有重要的现实意义。

当前,制备冰浆的方式主要有过冷水式动态制冰、刮削式制冰、下降液膜式制冰、直接接触式制冰、流化床式制冰、真空制冰等^[4-7]。其中,大多制冰方式主要依靠热传导的方式,而真空制冰主要通过液体闪蒸带走自身热量,达到冻结的效果,克服了传统制冰方式易结冰或冰堵、换热效率低、

设备结构复杂、对温度控制要求高、载冷剂的选择范围狭窄和容易老化等问题,具有巨大优势,是目前生产冰浆的理想方法之一。

由于冰浆在日常生产生活当中的重要作用,以及真空制冰方式的相对优势,加强真空冰浆制备的研究受到了国内外的重视。B S Kim等^[8]说明了水喷射蒸发真空冰浆制备的原理,重点研究单个液滴的蒸发特性。Isao Satoh等^[9]研究了水滴的真空蒸发特性与初温、直径大小、真空度的关系。陈光明、张绍志等^[10-11]先后建立了水滴的闪蒸降温数学模型,对真空冰浆制备过程的理论方程分别进行了无因次化。刘伟民等^[12]研究了水滴在不同绝对压力($p=200\sim 800\text{Pa}$)下的闪发过程,同时测定了水滴内部不同位置的降温过程。章学来等^[13]采用数值计算软件处理数据得出经验公式。但是现有的真空冰浆

制备系统依然存在运行真空度较高的问题,因此这里引入了中介物质对真空制冰系统加以改进,进行了真空蒸发性能研究实验台系统的设计、选型、搭建,研究加入代表性中介物质氨后,水溶液真空蒸发降温特性的变化,旨在找出降低对真空制冰系统运行真空度的要求的方法,降低真空泵的负荷及真空室的承压,改善系统的运行性能,从而在探索和完善真空制冰方面,提出改进的措施及方向。

1 工作原理及实验系统设计

1.1 运行原理

改进型真空制冰系统^[4]主要采用中介物质来改善真空制冰系统的性能。作为冰浆制备的中介物质,在水中的溶解性要好,且具有较大的溶解潜热。在相同压力下中介物质的气化温度要低于水,在低真空压力下中介物质会先于水发生闪发。

原理介绍:在高于水的三相点压力下,中介物质水溶液发生闪发,这时的闪发气体主要是低沸点组分中介物质,由于中介物质溶液整体处于过热状态,闪发会在液滴内部和外部同时进行,有效的强化了液滴的闪蒸强度,传热传质效率大幅提高。中介物质闪蒸带走大量的热量,使水溶液的温度降低,有效的强化了预冷作用,甚至有部分水会结晶成冰。该闪发过程的真空压力高于水的三相点压力,即降低了系统运行真空度,减小了对真空泵的负荷要求;该压力下闪发气体的比体积相对较小,相应也提高了真空泵的抽气效率。

1.2 实验系统组成

自行设计搭建的实验台如图1所示,该实验装置主要由真空发生系统、温度和压力测量系统、数据采集系统等组成。

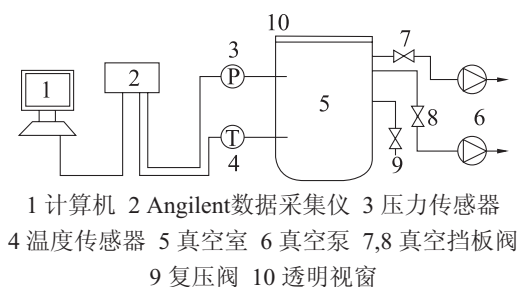


图1 真空蒸发性能实验台系统图

Fig.1 Vacuum evaporation experimental system

真空发生系统包括真空室和真空泵。真空室用于制冰,顶部采用钢化玻璃材料做透明视窗,便于观察实验过程;壳体材料为奥氏体型不锈钢,内部直径304mm,真空室桶壁下端焊接三块角铁放

上开有透气孔的平板用以放置容器。为了调节抽气速率,系统设计了两个抽气口,分别连接两台抽速不同的真空泵。真空泵是型号为2XZ-4和2XZ-1的直连旋片式真空泵,采用KF16真空挡板阀防止真空泵油倒流;通过开停抽速不同的真空泵和真空阀来对真空室压力进行控制,从而控制真空度。

测压装置选用上海天沐自动化仪表有限公司生产的NS-F型压力变送器,绝对压力范围0~10kPa,综合精度0.05%,输出信号4~20mA;温度传感器采用PT100铂电阻,精度1%,耐腐蚀,灵敏度高,布置在真空室的壁面上,用来测量真空室内气体温度和水温的变化。数据采集设备选取Agilent安捷伦34970A数据采集器,可配置成20~120个通道,可测量交直流电流、电阻、频率和周期,以及由热电偶、热电阻和热敏电阻提供的温度直流和交流电压,标准HP-IB和RS232接口;数据采集通过接口与电脑连接,通过仪器自带的程序形成图表,功能满足实验要求,方便快捷。

1.3 实验内容

选用浓度为26%的氨水作为中介物质溶液,氨水和蒸馏水的起始温度设定为15℃,进行如下三组实验。

实验一:分别取15mL的蒸馏水和浓度为26%的氨水,初温分别为15℃。将氨水和蒸馏水同时放入真空室内的平板上,固定好铂电阻,盖上玻璃罩,开启真空泵,保持真空室内的压力不低于1.5kPa。

实验二:做一组蒸馏水的真空蒸发降温实验,作为参照对象。

a.取150mL初始温度为15℃的蒸馏水,测量其在绝对压力不低于1kPa条件下的降温特性。

b.取150mL初始温度为15℃的蒸馏水,测量其有冰晶生成时的最低压力。

实验三:研究不同的真空度压力下氨水的蒸发温度特性。取初始温度为15℃、浓度为26%的氨水溶液,测量其在绝对压力不低于1kPa、5kPa、10kPa的压力下的蒸发特性。

2 结果与分析

2.1 氨水和蒸馏水的蒸发特性比较

实验一过程中氨水和蒸馏水的温度变化如图2所示。在相同真空压力下,氨水的降温速率明显大于蒸馏水。在压力维持在绝对压力1.5kPa以上时,蒸馏水温度最低降至11.4℃,氨水温度最低降

至 -20.6°C ，并且氨水中有冰晶形成，如图3所示。
蒸馏水的温度远高于冰点 0°C ，没有冰晶生成。

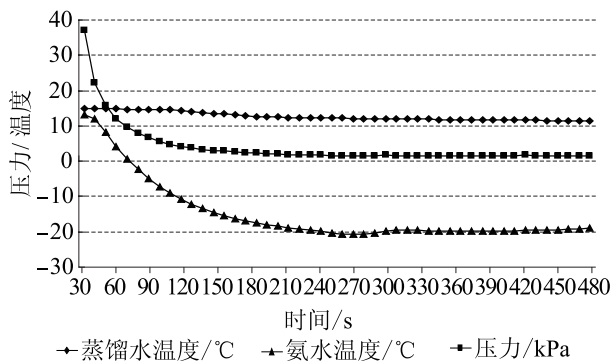


图2 蒸馏水和氨水在不低于1.5kPa绝对压力下的蒸发温度特性

Fig.2 Evaporation temperature's characteristics of distilled water and ammonia water above the absolute pressure 1.5kPa



图3 氨水在不低于1.5kPa绝对压力下闪发形成的冰浆

Fig.3 Ice slurry formed with ammonia water flashed above the absolute pressure 1.5kPa

根据以上实验数据可知，在真空冰浆制备系统中加入氨后，大大增强了真空制冰系统闪发强度，在高于水的三相点压力(611Pa)的条件下，有冰晶形成。可见在真空冰浆制备系统中加入氨后，降低了真空冰浆制备系统对真空度的要求，并且温度达到 -20.6°C ，远低于纯水的冰浆温度 0°C 。

2.2 蒸馏水的真空蒸发特性

实验二中方案a的实验结果如图4所示。实验过程中蒸馏水的最低温度为 6.6°C ，随着抽气时间的增加，水温基本不变，实验过程中没有冰晶生成。

方案b的实验结果如图5所示。实验过程中真空室内的绝对压力降至600Pa左右，此时(如图5所示，在第1290s时刻)水开始大量闪发，蒸馏水的温度迅速降低，蒸馏水表面有冰层生成。该现象符合水的三相点理论(水的三相点压力611Pa)。

由此可见，纯水的大量闪发需要较高的真空度条件。

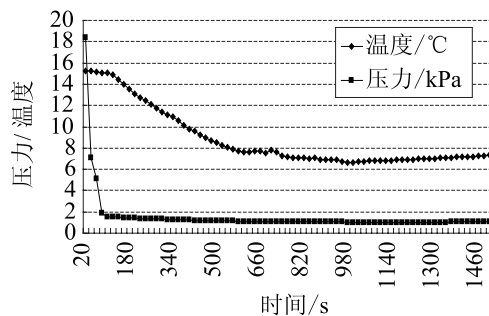


图4 蒸馏水在不低于1kPa绝对压力下的蒸发温度特性

Fig.4 Evaporation temperature's characteristics of distilled water above the absolute pressure 1kPa

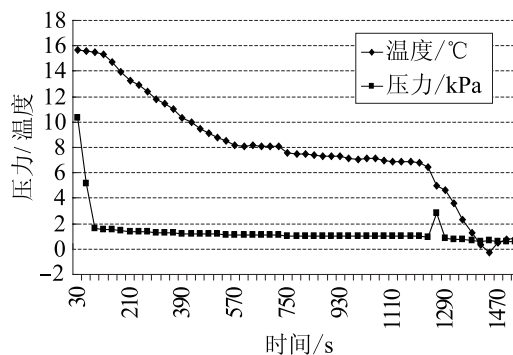


图5 蒸馏水中有冰晶生成的蒸发温度特性及压力曲线

Fig.5 Evaporation temperature's characteristics and pressure of distilled water with ice crystal formed

2.3 氨水的真空蒸发特性

实验三中，当绝对压力不低于1kPa的压力下的实验数据如图6所示。实验过程中，氨水温度在第440s时降至 -20°C ，降温速率明显比水快。氨水的温度最低降至 -23°C ，并且有冰晶生成。

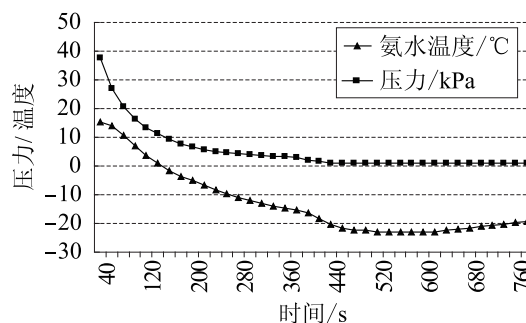


图6 浓度为26%的氨水在不低于1kPa绝对压力下的蒸发温度特性

Fig.6 Evaporation temperature's characteristics of ammonia water with concentration of 26% above the absolute pressure 1kPa

在绝对压力不低于5kPa的压力下，实验数据如图7所示。实验过程中，氨水的最低温度为 -12.2°C ，氨水中没有冰晶生成。

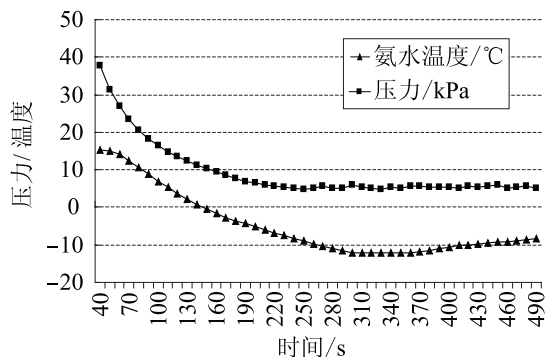


图7 浓度为26%的氨水在不低于5kPa绝对压力下的蒸发温度特性

Fig.7 Evaporation temperature's characteristics of ammonia water with concentration of 26% above the absolute pressure 5kPa

在绝对压力不低于10kPa的压力下，实验数据如图8所示。实验过程中氨水的最低温度为-5.9℃，氨水中没有冰晶生成。

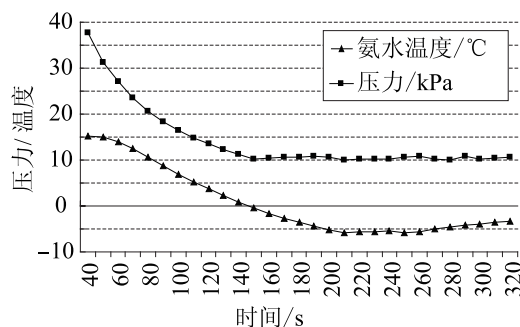


图8 浓度为26%的氨水在不低于10kPa绝对压力下的蒸发温度特性

Fig.8 Evaporation temperature's characteristics of ammonia water with concentration of 26% above the absolute pressure 10kPa

对比可知氨水的真空蒸发温度跟真空压力关系紧密，真空度越高，氨水的降温速率和降温幅度越明显。真空度不够高时，氨水中不会有冰晶生成。浓度为26%的氨水即使在10kPa的低真空压力下，也可以降至-5.9℃，低于纯水的三相点温度0℃，可见同等真空条件下氨水的真空蒸发降温效果远远优于蒸馏水。另一方面，要降低到相同的蒸发温度，氨水对真空度的要求远低于蒸馏水。所以在纯水加入中介物质氨后对真空冰浆制备系统的真空度要求大大降低，有效的减小了真空泵的负荷，和对真空泵极限压力的要求。较低的真空度压力下，闪发蒸汽的比体积较小，真空泵在相同的抽速下，闪发蒸汽的实际质量抽速大大提高，对真空冰浆制备系统的能效比的提高有重要的促进作用。

3 结论

针对真空冰浆制备系统中加入中介物质氨进行改进，设计了一套真空蒸发性能研究实验台系统，并进行实验研究，得出以下结论。

1) 加入中介物质氨后，在相同的真空度压力下，氨水的降温速率远远高于蒸馏水的降温速率。

2) 要达到相同的蒸发温度，氨水对真空度的要求远低于蒸馏水。

实验研究结果表明改进型真空制冰系统减小了对真空度的要求，但加入中介物质后，可能存在水溶液凝固点降低，不利于冰晶的形成和中介物质的腐蚀性问题，对其进一步的深入研究将推进真空制冰的实用化，提高冰浆的生产效率与能效比。如何选取恰当的中介物质，扬其长避其短，是今后研究的重要方向。

本文受上海市重点学科建设项目(S30503)资助。(The project was supported by Shanghai Key Discipline Construction (No.S30503).)

参考文献

- [1] Ise H, Tanino M, Kozawa Y. Ice storage system in Kyoto station building[C]//Information Booklet for the Technical Tour of the Fourth Workshop of IIR Ice Slurry Working Party, 2001, (13):6-11.
- [2] J Quarini. Ice-pigging to reduce and remove fouling and to achieve clean-in-place[J]. Applied Thermal Engineering, 2002, (22):747-753.
- [3] M Kauffeld, M J Wang, V Goldstein. Ice slurry applications[J]. International Journal of Refrigeration, 2010, (33):1491-1505.
- [4] 余守杰, 刘道平, 张琳. 冰浆制备系统的研究及改进[J]. 低温与超导, 2010, 38(7):40-42. (Yu Shoujie, Liu Daoping, Zhang Lin. Research and amelioration of ice slurry making equipment[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2010, 38(7): 40-42.)
- [5] Mueller Corporation. Avalanche ice harvester/chiller. Mueller Corporation Handbook [EB/OL]. <http://chinagold001.com/gold/1/1/Mueller.pdf>.
- [6] Follett Corporation. Ice making apparatus: European, WO2005/086666A2[P]. 2005-09-22.
- [7] Roger P Brunner. Ice making apparatus: US, US2002/0193759A1[P]. 2005-09-08.
- [8] Kim B S, Shin H T, Lee Y P, et al. Study on ice slurry production by water spray[J]. International Journal of Refrigeration, 2001, (24):176-184.
- [9] Isao Satoh, Kazuyoshi Fushinobu, Yu Hashimoto. Freezing of a water droplet due to evaporation—heat

- transfer dominating the evaporation-freezing phenomena and the effect of boiling on freezing characteristics[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2002, (25): 226-234.
- [10] 张绍志, 王剑锋, 陈光明. 水制冷系统闪蒸器特性的理论分析[J]. *低温工程*, 2000, (3): 12-18. (Zhang Shaozhi, Wang Jianfeng, Chen Guangming. Theoretical analysis of the flash vaporizer in a refrigeration system using water as refrigerant [J]. *Cryogenics*, 2000, (3): 12-18.)
- [11] 张绍志. 真空下二元冰晶形成过程分析[C]//中国工程热物理学会传热传质学学术会议论文集, 2000: 344-350.
- [12] 刘伟民, 毕勤成, 杨冬, 等. 低压闪蒸液滴温度与相变过程的研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2005, 13 (4): 381-387. (Liu Weimin, Bi Qincheng, Yang Dong, et al. Study on temperature and phase change of water droplet in the process of flash under low pressure[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2005, 13 (4): 381-387.)
- [13] 葛轶群, 章学来, 刘剑宁, 等. 二元冰真空制备技术分析与研究[J]. *暖通空调*, 2007, 37 (3): 10-14. (Ge Yiqun, Zhang Xuelai, Liu Jianning, et al. Analysis and study of binary ice vacuum making technique[J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2007, 37 (3): 10-14.)

作者简介

时竞竞, 女(1987-), 硕士在读, 上海市杨浦区军工路516号上海理工大学第一办公楼309室, 200093, 13918531960, jingjing1128x@126.com。研究方向: 蓄冷技术及装置。

About the author

Shi Jingjing (1987-), female, Master, Room 309, The first office building, University of Shanghai for Science and Technology, Jungong Road No.516, Yangpu District, Shanghai, China, 200093, 13918531960, jingjing1128x@126.com. Research fields: Technology and equipment of cold storage.