文章编号：0253-4339(2013)01-0030-05
doi：10.3969/j.issn. 0253-4339. 2013. 01. 030

冰浆在蓄冰槽中的贮存特性研究进展

赵美　于航

（同济大学机械与能源工程学院　上海　201804）

摘　要　冰浆贮存是工程应用中经常遇到的问题，冰浆在蓄冰槽中的贮存特性对于冰浆的高效利用有着重要影响。目前冰浆在蓄冰槽中贮存的主要问题是：冰堆积分布不均匀，蓄冰槽不能充分利用。这里对国内外在冰浆贮存方面的研究成果进行汇总，分别从特性、模型和实验研究三个方面进行总结，分析产生冰浆贮存不均匀的原因和影响因素，采用摄像法来分析冰浆贮存的特性。结果表明：溶液、添加剂、冰浆入口含冰率和流量，以及贮存时间等是影响冰浆贮存特性的主要因素。

关键词　冰浆贮存；特性；模型；实验研究

中图分类号：TB61+1　　**文献标识码**：A

Review of Ice Slurry Storage in the Ice Storage Tank

Zhao Mei　Yu Hang

(College of Mechanical and Energy Engineering, Tongji University, Shanghai, 201804, China)

Abstract　Ice slurry storage in the storage tank often occurs in practical projects. The ice slurry storage characteristics have an important influence on the ice slurry application. The main problem of ice slurry storage is the nonuniformity and the low utilization of ice slurry storage tank. The research achievements about ice slurry storage reported in domestic and international literatures were collected and summarized from the aspects of characteristics, model and experimental study. It is found that image method is often used to analyze ice slurry storage characteristics and the main influence factors on the storage characteristics are solution, additives, ice slurry IPF (ice packing factor) and flow rate at the entrance and storage time. The analysis of the present situation of ice slurry storage provides references to the further research.

Keywords　ice slurry storage; characteristics; model; experimental study

冰浆式蓄冰由于采用了具有流动性、可泵送的冰浆作为蓄冷介质，大大提高了整个系统的灵活性而受到广泛关注。瑞士Egolf[1]描述了冰浆的基本特性：冰浆是由液态水和具有平均特征直径不超过1mm的冰晶粒子组成的浆状混合物。冰浆含有高密度潜热冰晶粒子，又具有流动性，因此其换热性能较好，释冷速率较高，在食品[2-3]、医疗[4]、建筑空调[5-6]，矿井降温[7]等行业被广泛应用。

须指出冰浆储存问题提出的背景是在无搅拌的情况下，冰浆在贮存过程中冰堆积分布不均匀，进而导致蓄冰槽的利用率降低。国内外学者对冰浆的制备[8-10]、流动、传热特性和压降[11-13]等方面开展了大量深入细致的研究，得到很多有意义的结果。关于冰浆贮存的研究主要集中于蓄冰槽中冰晶粒子演变的物理机理、影响因素、提高蓄冰槽有效容积利用率的方法等方面。

1 冰浆贮存特性

国内外学者从机理上分别研究了冰粒子粒径发展变化及其影响因素。图1[14]是含冰率分别为25%和50%的冰浆在蓄冰槽中的贮存状态。无搅拌时，因冰粒子上浮，槽内冰浆分布不均匀。

(a) IPF=25%　　(b) IPF=50%

图1 不同IPF（含冰率）时冰浆贮存状态[14]

Fig.1 The state of ice slurry storage in different IPF

国外学者还对冰晶粒径的演变进行了深入研究。ASHRAE RP1166[15]从分子尺度入手，用结晶动力学进行研究，指出贮存在蓄冰槽中的冰粒子即使处于热平衡状态时仍然存在驱动势，即最小吉布斯自由能。在Gibbs-Thomson效应和Ostwald熟化效应作用下，小冰粒子不断融化变小，大冰粒子逐渐长大。Gibbs-Thomson效应是粒子粗化和颗粒生长的热动力基础；而Ostwald熟化效应是含有离散第

收稿日期：2012年7月30日

二项的两相混合物中的扩散过程，其推动势在于冰粒子之间不同的曲率。P. Pronk[16-17]等人从结晶动力学方面的研究指出冰浆贮存过程中，冰粒子由于受到磨损、团聚和Ostwald熟化作用的影响，引起粒径分布发生变化，Ostwald熟化效应是冰粒子直径增大的主要原因，并实验验证了溶液浓度和溶液类型对熟化率的影响。

在冰晶粒子演化影响因素方面，唐恒[18]等人从冰晶的结构入手分析了溶液类型和添加剂对冰晶生长的影响，结果表明：极强性的无机化合物，在水中电离成阴离子和阳离子，破坏了水分子原有的稳定结构，阻碍冰晶的生长；含有羟基的醇类化合物能在一定程度上限制冰晶的生长，但由于分子较小，限制作用有限，并且溶液浓度增大导致蒸发温度也越大，降低了系统的效率。亲水又亲油的表面活性剂具有良好的阻碍冰晶生长的效果。张鹏分析了表面活性剂抑制冰晶生长和冰晶凝聚的作用原理[19]，指出抗冻蛋白(AFPs)通过吸附于冰晶表面而阻止冰晶生长。此外，通过重结晶的抑制，可以很好地防止冰晶的凝聚而形成更大的冰晶。Inada[20]和吕树申[21]分别研究了硅烷偶联剂和聚乙烯醇，发现它们防止冰晶凝聚的作用类似于AFPs。Akiya[22]研究并指出聚氧三油酸山梨坦(商品名为吐温系列)在浓度为1‰就可以生成含冰率30%以上的流动的冰浆，而且冰晶的外形规则统一，没有明显的聚集现象发生。

2 冰浆贮存模型

冰浆贮存过程是一个综合了流体流动、渗流与冰晶物理变化的复杂过程，冰浆的贮存模型多为简化模型。

Yoshiyuki[23]、Masayuki[24-25]等人对过冷水在圆柱型蓄冰槽中的贮存特性进行了详细的探讨，认为冰浆贮存过程实际是冰晶粒子逐渐上浮并堆积形成一个“富冰层”的过程。蓄冰开始阶段冰粒子漂浮在蓄冰槽中，如图2(a)。由于冰水之间的密度差，冰粒子形成了如图2(b)所示的富冰层。在富冰层上表面只有水渗透到富冰层中，富冰层沿水平方向扩散。同时，随着水渗透到富冰层中，冰粒子在富冰层上表面堆积，富冰层向蓄冰槽底部发展。当富冰层达到蓄冰槽的底部后，如图2(c)，冰粒子逐渐积累在初始水面上，富冰层厚度进一步增加。两位学者使用了相同的模型，认为富冰层形成了一个在一段时间内结构不变的多孔介质体，冰堆积的过程中冰浆中的水在多孔介质中渗流，图3为该模型的示意图。作者将模型计算的结果与实验结果进行了比较，发现结果吻合较好，该模型对蓄冰槽设计有很大的帮助。

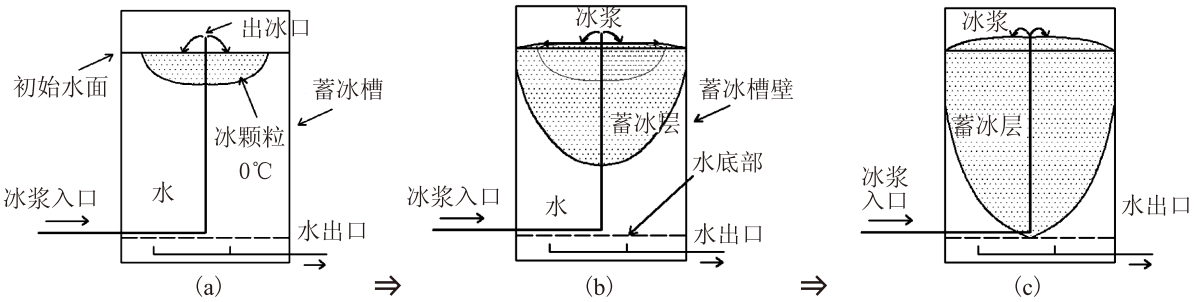


图2 冰浆贮存过程中富冰层的发展示意图[25]

Fig.2 Schematic vertical view of ice storage process in a tank

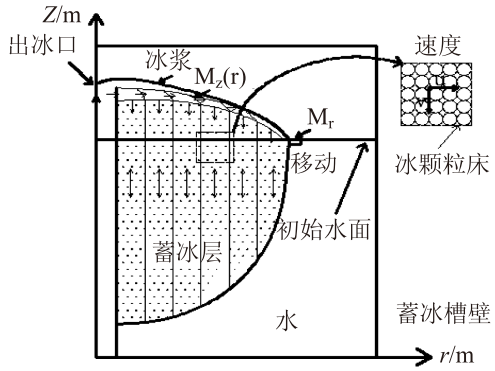


图3 富冰层分布模型[25]

Fig.3 Model of ice rich layer distribution

青春耀[26]等人在前期实验的基础上，考虑到实际冰蓄冷系统蓄冰时进入蓄冰槽的入口冰浆是一种固液两相流体，且固相含量一般不超过10%，采用两相流模型中的离散相模型作为计算模型，模拟了冰浆在不同参数条件下的贮存过程，从冰浆注入蓄冰槽初始阶段的非稳态模拟中得到相应的冰浆堆积的动态特性，从理论上预测随后冰浆堆积过程的发展方向。作者指出：随着贮存过程进行，冰粒子数目增大，蓄冰槽内混合溶液流体的性状也必然发生变化，流体的湍流状态及粒子的受力状态也将不可避免的发生变化，相应的模型将需要进行改进。

3 相关实验研究

3.1 冰晶粒径

已有的研究中均采用显微镜成像法和图像处理法来观察和测量冰晶粒子形状、尺寸和分布。Pronk[16]等人用显微镜拍摄了冰晶在蓄冰槽贮存过程中冰粒子粒径的演变过程，如图4。利用显微镜拍摄的投影照片计算冰晶粒子的Feret直径，并用Feret直径来描述冰晶粒径的变化。ASHRAE RP 1166[15]介绍了显微镜成像的图像分析方法的过程，并介绍了用来描述冰晶粒子形状和尺寸变化的参数——面积、周长、Feret直径、延伸率、圆度和紧实度。ASHRAE采用主成分分析法(PCA)分析显微镜图片，进而确定含冰率和渗透率。然而，ASHRAE也指出用显微镜拍照法还存在问题，用显微镜拍摄的照片是冰晶粒子的二维投影，由于不是全方位的分析，导致部分信息流失。此外，实际工程应用中，用图像分析来估测含冰率的准确性不高，当冰浆分布不均匀时，冰粒子之间的重叠导致很难准确得到渗透率。

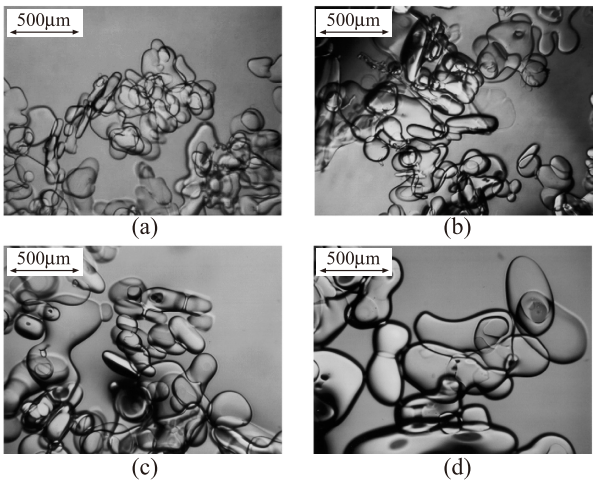


图4 冰浆贮存过程中冰粒子的发展示意图[16]

Fig.4 Schematic view of ice crystals during ice slurry storage process

Hayashi[27]等人介绍了一种基于冰和水之间导电率的不同来检测冰浆团聚现象的测量系统，实验装置如图5所示。实验发现冰粒子会冻结在一起形成较大的冰团，低浓度的添加剂可以有效的减少或抑制冰浆的这种团聚现象。该方法定性地描述了冰浆在贮存过程的团聚现象，但对于电阻输出值和团聚率未给出定量值。

Pronk[16]通过实验证明，不同的添加剂及其浓度对冰粒子的作用是不相同的，10%的蔗糖溶液中冰粒子熟化速度比10%的乙二醇溶液更快；随着氯化钠溶液浓度的减小，冰浆熟化率增大；此外，实验表明入口冰浆含冰率越高，冰粒子的平均Feret直径越大。Pronk用添加浓度为0.15%聚三油酸山梨坦的溶液进行实验，发现这种表面活性剂几乎不影响冰粒子Feret直径的增加；然而Simth和Schwartzberg[28]的实验表明在浓度为10%的蔗糖溶液中添加浓度为0.001%~0.05%的明胶溶液可以明显减弱冰粒子的增大趋势。

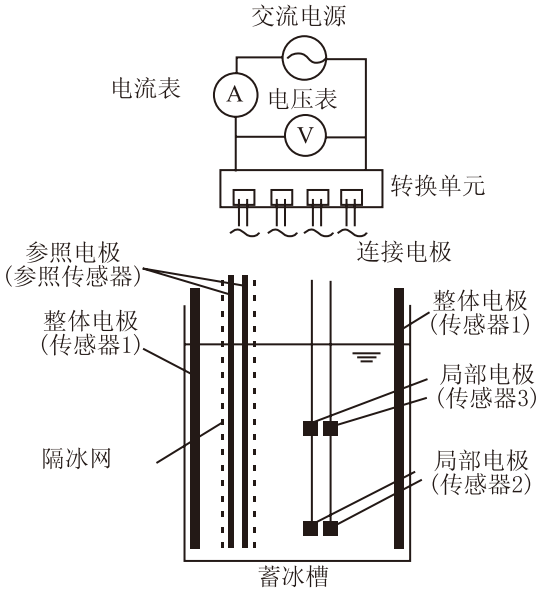
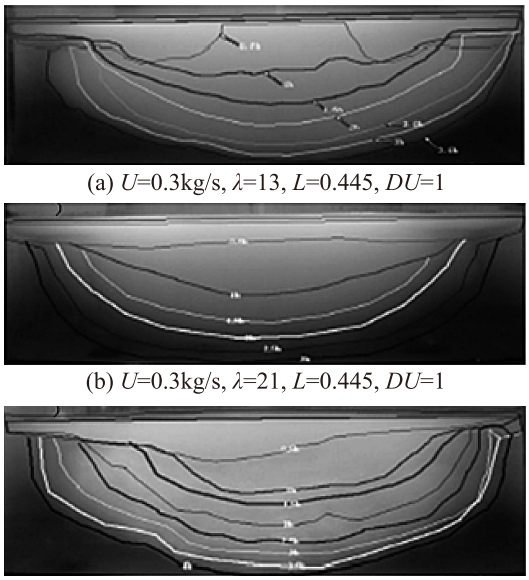


图5 测量系统实验台示意图[27]

Fig.5 Schematic diagram of measurement electrodes

3.2 富冰层



(a) U=0.3kg/s, λ=13, L=0.445, DU=1

(b) U=0.3kg/s, λ=21, L=0.445, DU=1

(c) U=0.3kg/s, λ=3.5, L=0.445, DU=1

图6 不同入口冰浆含冰率下富冰层时变的堆积过程[29]

Fig.6 The photos of ice rich layer profile in different IPF

富冰层直接影响蓄冰槽的容积利用。以往的研究中均采用拍摄法记录富冰层的形成及发展动态

过程。通过大量观察发现，冰浆堆积过程中富冰层与液体交界面的形状近似弧形，呈基本对称状，其对称轴为蓄冰槽的中心轴。图6是在不同入口冰浆含冰率条件下拍摄的一组富冰层发展形态的照片。

青春耀[29]等人引入理论沉降速率来表征冰浆堆积时的均匀程度。富冰层实际平均沉降速率与理论沉降速率的比值越接近于1，富冰层实际沉降速率越接近于理论沉降速率，富冰层堆积越均匀。Masayuki[25]等人用蓄冰槽侧壁处富冰层的厚度L_{min}与富冰层中心轴处富冰层厚度L_{max}的比值L_{min}/L_{max}描述富冰层的分布情况。当$L_{min}/L_{max}\leqslant 1$时，富冰层的分布呈尖锐锥形，蓄冰槽的有效利用率很低；当$L_{min}/L_{max}=1$时，富冰层轮廓接近圆柱形，蓄冰槽利用率很高。Yoshiyuki[23]等人采用轴中心处富冰层的沉降速率v_{il}与富冰层的理想沉降速率$v_{il(ideal)}$的比值来描述富冰层的发展轮廓。该比值越接近于1，富冰层在蓄冰槽中的分布越均匀，在横截面上扩展越充分；该比值越大，富冰层形状越长越窄。

4 结论

冰浆贮存是一个多因素相互作用的复杂过程，已有研究成果表明溶液类型和浓度、表面活性剂的类型和溶液、冰浆入口含冰率和流量，以及贮存时间等是影响冰浆储存特性的主要因素。然而对于冰浆贮存这一复杂过程的研究仍然存在着一些问题值得进一步研究。

1）针对冰浆贮存均匀性问题，有关学者做过相关的研究，但是由于研究侧重点不同，并没有得到统一的均匀性的含义，也没有得到可以将均匀性定量化分析的方法。因此，今后的研究中有必要确定冰浆贮存均匀性含义，并找到有效定量化分析均匀性的方法。

2）目前对蓄冰槽内冰浆贮存的状态多是用摄像法来确定，但是采用透明有机玻璃作为蓄冰槽的材质必然导致冷量损失严重，误差较大。因此，发展在线的测量冰浆贮存状态的方法是今后值得研究的课题之一。

3）从冰浆贮存模型角度出发，建立适用于不同形状蓄冰槽，不同出冰口布置情况的模型有待研究。

参考文献

[1] Peter W, Egolf M K. From physical properties of ice slurries to industrial ice slurry application[J].International Journal of Refrigeration, 2005, 28(1): 4-12.

[2] 蔡新梅，宋文吉，冯自平.基于冰浆蓄冷的几种制冷冷藏陈列柜的实验研究[J].制冷学报，2011，32(4)：63-66.(Cai Xinmei, Song Wenji, Feng Ziping. Experimental study on ice slurry vertical open display cabinet with central refrigeration[J].Journal of Refrigeration, 2011, 32(4): 63-66.)

[3] Medina I, Gallardo J M, Aubourg S P. Quality preservation in chilled and frozen fish products by employment of slurry ice and natural antioxidants[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2009, 44(8): 1467-1479.

[4] Brooker R F, Zvara D A, Velvis H, et al. Topical ice slurry prevents brain rewarming during deep hypothermic circulatory arrest in newborn sheep[J].Journal of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia, 1997, 11(5): 591-594.

[5] 方贵银，邢琳，杨帆.动态冰浆蓄冷空调系统及特性[J].电力需求侧管理，2005，7(6)：48-52.(Fang Guiyin, Xing Lin, Yang Fan. Dynamic ice slurries storage systems and its characteristics[J].Power Demand Side Management, 2005, 7(6): 48-52.)

[6] Yau Y H, Lee S K. Feasibility study of an ice slurry-cooling coil for HVAC and R systems in a tropical building[J]. Applied Energy, 2010, 87(8): 2699-2711.

[7] 董凯军，冯自平，郑瑞芸，等.冰浆潜热输送矿井空调设计及其经济分析[J]. 制冷与空调，2011，25(1)：1-6.(Dong Kaijun，Feng Ziping, Zheng Ruiyun, et al. Design and economic analysis of mine air-conditioning system using ice slurry for latent-heat transportation[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2011, 25(1): 1-6.)

[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 Revue International Du Froid, 2001, 24(2): 176-184.

[9] Stamatiou E, Meewisse J W, Kawaji M. Ice slurry generation involving moving parts[J]. International Journal of Refrigeration Revue International Du Froid, 2005, 28(1): 60-72.

[10] 谢若非.过冷法制备冰浆的控制参数研究[D].上海: 同济大学, 2012.

[11] Bellas J, Chaer I, Tassou S A. Heat transfer and pressure drop of ice slurries in plate heat exchangers[J].Applied Thermal Engineering, 2002, 22(7): 721-732.

[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，2005，26(4):1-5.(He Guogeng, Wang Zhongheng. Review of study on flow and heat transfer of ice slurry[J]. Journal of Refrigeration, 2005, 26(4):1-5.)

[13] 刘永虹.冰浆流动特性和传热性能的研究[D].上海: 同济大学, 1997.

[14] 马春红，青春耀，宋文吉，等.冰浆在蓄冰池中的贮存与融化研究进展[J]. 低温工程，2010，1: 60-64.（Ma

Chunhong, Qing Chunyao, Song Wenji, et al. Review of ice slurry storage and melting in ice storage tank[J]. Cryogenics, 2010, 1: 60-64.)

[15] ASHRAE EP 1166. Behavior of Ice Slurry in Thermal Storage Systems[S].

[16] Pronk P, Hansen T M, Infante Ferreira C A, et al. Time-dependent behavior of different ice slurries during storage[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(1): 27-36.

[17] Pronk P, Infante Ferreira C A, Witkamp G J. Effects of long-term ice slurry storage on crystal size distribution [C]// Proceedings of the Fifth Workshop on Ice Slurries of the International Institute of Refrigeration. Stockholm，Sweden, May 30-31, 2002.

[18] 唐恒, 章学来, 王海民.基于冰晶结构的二元冰蓄冷系统中添加剂的研究[J].制冷空调与电力机械, 2005, 26(1):33-35.（Tang Heng, Zhang Xuelai, Wang Haimin. Study on the additive in binary ice thermal storage system based on the structure of ice crystal[J]. Refrigeration Air Conditioning and Electric Power Machinery, 2005, 26(1):33-35.）

[19] 张鹏.溶液动态制冰的理论和实验研究[D].浙江: 浙江大学, 2006.

[20] Inaba H, Inada T, Hodhe A,et al. Preventing agglomeration and growth of ice particles in water with suitable additives [J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(1): 20-26.

[21] Shu-shen L, Inada T, Akira Y. Microscale study of poly(vinyl alcohol) as an effective for inhibiting recrystallization in ice slurries[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(5): 563-569.

[22] Akiya T. Prevention of Agglomeration of Ice Slurry by Addition of Surfactant[C]//The 5th International Symp. on Sep. Tech., Korea and Japan.

[23] Yoshiyuki K, Naoki A, Masayuki T. Study on ice storing characteristics in dynamic type ice storage system by using supercooled water：Effects of the supplying conditions of ice-slurry at deployment to district heating and cooling system[J].International Journal of Refrigeration, 2005, 28(1): 73-82.

[24] Masayuki T, Yoshiyuki K. Ice-water two-phase flow behavior in ice heat storage systems[J].International Journal of Refrigeration, 2001, 24(7): 639- 651.

[25] Masayuki T, Yoshiyuki K, Kunio H, et al. Prediction of ice storage process in dynamic-type ice storage system[C] //10th International Conference on Thermal Engineering and Thermo- grammetry, 1997: 321-326.

[26] 青春耀, 肖睿, 宋文吉, 等. 冰浆在蓄冰槽内的动态蓄冰过程模拟[C]// 2009中国工程热物理学会(燃烧学)学术年会, 2009.

[27] Kanetoshi H, Ken K. A method for measuring ice slurry particle agglomeration in storage tanks[S]. ASHRAE Transactions 106 CPA Feb 5-9, 117-123, 2002.

[28] Simth C E, Schwartzberg H G. Ice crystal size changes during ripening in freeze concentration[J].Biotechnol Prog, 1985, 1(2): 111-120.

[29] 青春耀, 肖睿, 宋文吉 等.冰浆在蓄冰槽内的蓄冰特性及其均匀度研究[J]. 低温与超导, 2009(5): 41-46.（Qing Chunyao, Xiao Rui, Song Wenji, et al. Study on ice slurry storing characteristics and its uniformity in ice storage tank[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2009(5): 41-46.

通信作者简介

赵美，女(1987－)，硕士研究生，上海同济大学机械与能源工程学院，18801963892，E-mail：zhaomei8766@163.com。研究方向：冰蓄冷技术。

About the corresponding author

Zhao Mei（1987－), female, master, College of Mechanic and Energy Engineering, Tongji University, 18801963892, E-mail: zhaomei8766@163.com. Research fields: ice storage technology.