

冰浆存蓄含冰率优化研究进展

时国华^{1,2}, 周文博¹, 王玉乔¹, 傅豪杰¹

(1. 华北电力大学动力工程系, 保定 071003;

2. 华北电力大学河北省低碳高效发电技术重点实验室, 保定 071003)

摘要: 提升蓄冰槽内含冰率可有效提高冰浆蓄冷技术的经济性, 有助于推进我国集中供冷和冷热联供的发展。为此, 本文在回顾和总结冰浆蓄冷机理和冰浆蓄冷模型的基础上, 分析了冰浆存蓄含冰率的关键影响因素, 总结了提高蓄冰槽内含冰率的方法, 并对大规模冰浆蓄冷的研究趋势进行了展望。研究结果表明: 冰浆存储过程中 Ostwald 熟化和团聚作用会增大冰晶粒径, 不利于富冰层的均匀堆积, 应削弱 Ostwald 熟化和团聚效应以提升含冰率; 在 Tanino 模型基础上, 实验验证了利用 Ergun 方程可准确预测跨季节冰浆蓄冷的含冰率; 制备冰浆时添加冰点抑制剂、蓄冰槽内设置搅拌器、提高蓄冰槽入口冰浆流量、减小入口冰浆含冰率等措施有利于蓄冰槽内富冰层的均匀堆积, 提高蓄冰槽内含冰率; 短期冰浆蓄冷优先选用圆柱体蓄冰槽, 跨季节冰浆蓄冷优先选用地下梯台型蓄冰槽。本文研究成果有助于推进跨季节大规模冰浆蓄冷的实施应用。

关键词: 含冰率优化; 冰浆; 蓄冰槽; 冰浆蓄冷机理; 富冰层

中图分类号: TB61 + 1; TB64

文献标识码: A

DOI: 10.16711/j.1001-7100.2024.04.005

Research progress on optimization of ice packing factor in ice slurry storage

Shi Guohua^{1,2}, Zhou Wenbo¹, Wang Yuqiao¹, Fu Haojie¹

(1. Department of Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Hebei Key Laboratory of Low Carbon and High Efficiency Power Generation Technology,
North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Increasing the ice packing factor (IPF) in the ice storage tank can effectively improve the economy of the ice slurry storage technology and contribute to the development of centralized cooling and cold-heat cogeneration in our country. Based on the review and summary of the mechanism and model of ice slurry storage, this paper analyzed the key influencing factors of IPF in ice slurry storage, summarized the methods to increase the IPF in the ice storage tank, and the research trend of large-scale ice slurry storage was looked forward. The research results show that the Ostwald ripening and aggregation effects during the ice slurry storage process will increase the size of ice crystals, which is not conducive to the uniform accumulation of the ice-rich layer, so the Ostwald ripening and aggregation effects should be weakened to improve the IPF. Based on the Tanino model, it is experimentally verified that the Ergun equation can accurately predict the IPF of seasonal ice slurry storage. Measures such as adding ice point inhibitors during ice slurry preparation, setting agitators in the ice storage tank, increasing the ice slurry flow rate at the entrance of the ice storage tank, and reducing the IPF at the entrance of the slurry are beneficial to the uniform accumulation of the ice-rich layer in the ice storage tank and improve the IPF in the ice storage tank. For short-term ice slurry storage, cylindrical ice storage tanks are preferred, while for seasonal ice slurry storage, underground stepped ice storage tanks are preferred. The research results of this article are helpful for the implementation and application of large-scale seasonal ice slurry storage.

Keywords: Ice packing factor optimization, Ice slurry, Ice storage tank, Ice slurry storage mechanism, Ice-rich layer

1 引言

“双碳”目标的提出为我国清洁能源的发展

带来了新机遇^[1], 可再生能源大规模并网。成熟储能技术的规模化发展是兼顾我国经济发展、双碳目标、电力系统安全稳定的重要手段。其中, 冰

收稿日期: 2024-01-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3802401)、河北省重点研发计划项目(20376201D)资助。

作者简介: 时国华(1980-), 男, 副教授, 主要从事清洁能源利用及节能技术研究。

蓄冷技术是在建筑用冷和工业用冷领域实现新能源消纳、平衡电网负荷、经济低碳供冷的有效方法。

冰蓄冷技术可分为动态冰蓄冷技术和静态冰蓄冷技术。与传统采用冰球或冰盘管的静态冰蓄冷技术相比,以冰浆为关键介质的动态冰蓄冷技术(简称冰浆蓄冷技术)有以下优势:(1)传热效率高、制冰速度快;(2)融冰速度快;(3)制冷系统能效比高、能耗较低;(4)整体经济性更优。冰浆是一种含有悬浮冰晶的冰水混合物,其中的冰晶粒径不超过 1 mm ^[2],又被称为流态冰、泵送冰、二元冰等,具有高密度潜热(冰-水相变潜热值为 335 kJ/kg),所以,冰浆既可以作为冷量载体的换热介质,又可以作为冷量存储的储冷介质,释冷速率较快。以用于建筑空调用户的冰浆蓄冷供能系统(见图1)为例,Wang等人^[3]的研究表明:冰浆蓄冷系统的运行费用只占水蓄冷的 $2/3$,而蓄能密度则是水蓄冷的4倍以上,并具有转移50%峰值电负荷的潜力。此外,改变蓄冰槽的尺寸大小可满足用户短期或跨季节蓄冷的需求。因此,冰浆蓄冷技术作为一种经济高效的储能技术,在建筑空调、矿井降温、食品保鲜、手术医疗、消防灭火^[4]等领域有着广阔的应用前景。

国内外学者已对冰浆技术进行了较为广泛的研究,主要集中在冰浆制备^[5]、流动压降^[6-11]和传热特性^[12-16]等方面,但关于蓄冰槽内冰浆动态存储及存储优化的研究仍十分有限。然而,在冰浆存储过程中常出现冰层堆积分布不均匀、不够紧实导致蓄冰槽内含冰率(Ice Packing Factor,简称IPF)不高和蓄冰槽体积过大等问题,使冰浆蓄

冷技术难以推广实施。对于冰浆在蓄冰槽内的动态存储研究可以有效分析上述问题出现的成因,有助于提升蓄冰槽内含冰率。因此,本文以蓄冰槽内含冰率为讨论核心,从冰浆蓄冷机理和冰浆蓄冷模型的系统分析出发,揭示可行的冰浆存储含冰率优化方法,以利于减小蓄冰槽容积和降低冰浆蓄冷的成本,并为后续冰浆存储研究提供研究方向。

2 冰浆蓄冷机理

在冰浆输运和存储过程中,冰晶颗粒形态会发生变化,冰晶的富集容易导致泵送困难和冰层堆积不均匀等问题,从而影响蓄冷时冰浆的流动和蓄冰槽的整体含冰率。为此,学者们对冰浆存储机理开展理论和实验研究,探究冰晶尺寸变化机制及其对冰浆存储含冰率的影响。

针对冰浆存储的微观层面,Pronk等人^[17,18]结合动力学理论对冰浆存储过程中的物理现象进行了实验研究,认为当冰浆在设有机机械搅拌的蓄冰槽中存储时,冰晶的尺寸分布变化主要由三种机制造成,即Ostwald熟化、团聚和磨损,如图2所示。Ostwald熟化是指受晶体表面能的影响,大冰晶会逐渐变大,而小冰晶则会慢慢消融,冰晶平均粒径增大,最终形成更大的圆盘状晶体,不利于冰浆的流动和均匀堆积。Pronk等人^[18]进一步指明,对于含有添加剂(氯化钠、乙二醇、乙醇和丙二醇)的冰浆,Ostwald熟化是冰晶粒径增大的根本原因。团聚是指在外力作用(如压力、重力等)下,若干冰晶粘附结合,形成一个更大的冰晶,这

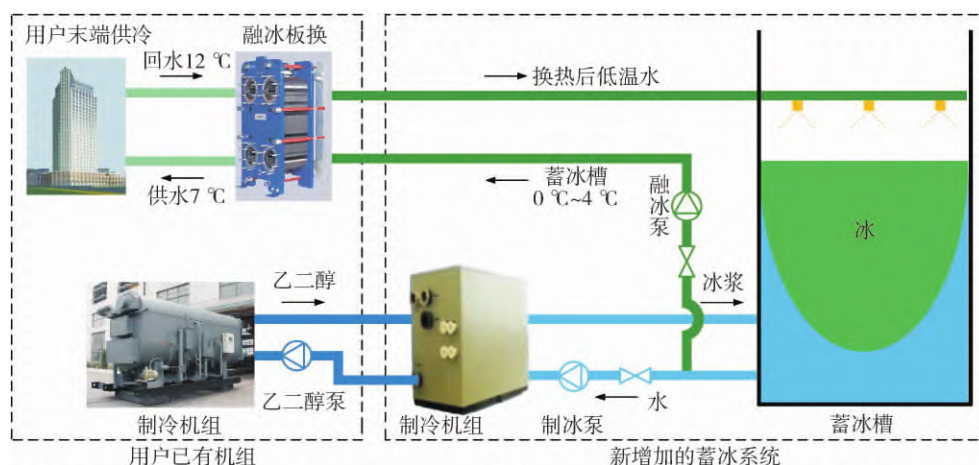
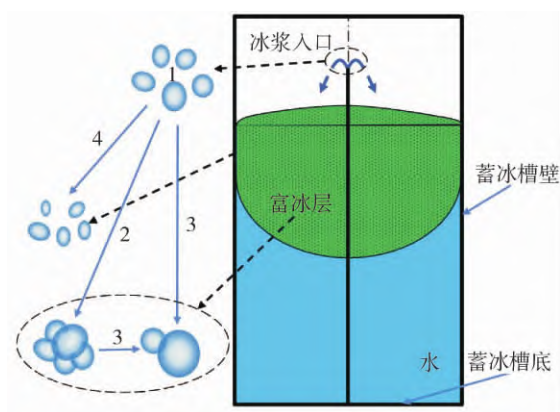


图1 空调用冰浆蓄冷系统

Fig.1 Ice slurry storage system for air conditioning

不仅增大了冰浆的表观直径,还降低了冰浆的换热性能。磨损则是由于蓄冰槽内的机械搅拌,冰晶与其他固体(如搅拌器、蓄冰槽壁面或其他冰晶)碰撞,导致冰晶粒径减小,这有助于冰浆的均匀存储,提高蓄冰槽内含冰率。因此,削弱 Ostwald 熟化和团聚,增强磨损,有助于增加蓄冰槽内含冰率,提升冰浆蓄冷性能。



1—成核; 2—团聚; 3—Ostwald 熟化; 4—磨损

图2 冰浆存储过程冰晶演化示意图

Fig. 2 Schematic diagram for evolution of ice crystals during ice slurry storage



(a) 日本高砂热学工业株式会社



(b) 中国科学院广州能源研究所

图3 冰浆在不同含冰率(IPF)时的存储状态

Fig. 3 Storage states of ice slurry at different IPF

在 Ostwald 熟化、团聚和磨损三种机制作用下,蓄冰槽内冰晶尺寸变化的宏观表征是冰浆的富集和分层。图3(a)和图3(b)分别给出了含冰率为50%(日本高砂热学工业株式会社,蓄冰槽无搅拌^[19])和55%(中国科学院广州能源研究所^[19],蓄冰槽无搅拌)时的冰浆存储状态。从实验结果可以看出,在没有搅拌的情况下,冰浆分布不均匀,冰晶形成的富冰层漂浮在蓄冰槽顶部,对于蓄冰槽内部的冰浆,在上部富冰层重力和下部水浮力的作用下也会发生团聚和 Ostwald 熟化现象,降低了冰浆存储含冰率。因此,为了保证冰浆的蓄冷量,削弱 Ostwald 熟化和团聚作用,实际工程应用中需要采取一定措施和方法^[18,20],使冰浆存储更加均匀,如考虑在蓄冰槽中加装搅拌装置,加强磨损机制作用,但这会增加应用成本,而且对于容积较大的蓄冰槽,不易布置搅拌器,且相邻搅拌器间距和每个搅拌器叶片数量对蓄冰槽内含冰率提升的定量影响仍需深入探究。

Matsumoto 等人^[21]实验研究了冰浆存储过程蓄冰槽内部内聚力和渗透率的变化,结果表明,随着存储时间的增加,冰晶粒径变大,孔隙率减小,而渗透率则先减小后增大,内聚力与渗透率呈负相关关系,内聚力在存储8 h时达到最大值(实验存储时间12 h),内聚力的增大使冰晶更加紧实,进而提升冰浆蓄冷性能。这也说明,冰浆蓄冷过程中存在使含冰率最高的最佳存储时间。文献^[21]从分析内聚力的微观角度出发,建立了无量纲内聚力计算式,可为蓄冰槽内含冰率优化提供存储时间确定的理论指导。

3 冰浆蓄冷模型

由于蓄冰槽内(尤其是大型蓄冰槽)冰浆动态存储的多工况实验复杂且费时,所以需要利用成本较低、工况便于调整的数值计算对冰浆存储过程进行模拟研究,以指导冰浆蓄冷优化及实际工程应用落地。本文对国内外现有的冰浆蓄冷数学模型进行分析。

3.1 ICEPAK 模型

Stewart 等人^[22,23]开发了 ICEPAK 计算程序,其可用于模拟长方体蓄冰槽中富冰层的堆积状态和冰晶数量。但此模型存在一些不足,一是该模型是参照类似冰浆的物质(沙子)而得到的,二是

该模型将冰浆视为柱状颗粒物,这些与实际存在较大偏差;三是应用范围较受限,只适用于给定蓄冷量时,计算出冰口位于底部且最多有四个出冰口的长方体蓄冰槽的最小体积。

3.2 Tanino 模型

Tanino^[24,25]和 Kozawa 等人^[26]针对圆柱形蓄冰槽,实验和模拟研究了采用过冷法制造的冰浆在蓄冰槽内的存储特性。研究表明,冰浆存储实际是冰晶逐渐上浮然后堆积形成富冰层的过

程。在冰浆存储初始阶段,由于冰与水之间的密度差,冰晶漂浮在蓄冰槽液面顶部,如图 4(a)所示。随着冰浆存储时间的推移,冰晶逐步形成了如图 4(b)所示的富冰层。在富冰层上表面只有水渗透到富冰层中,富冰层沿径向扩散。同时,随着水渗透到富冰层中,冰晶在富冰层上表面堆积,富冰层沿轴向向蓄冰槽底部发展。当富冰层达到蓄冰槽底部后,如图 4(c),冰浆逐渐积累在初始水面上,进一步增加了富冰层厚度。

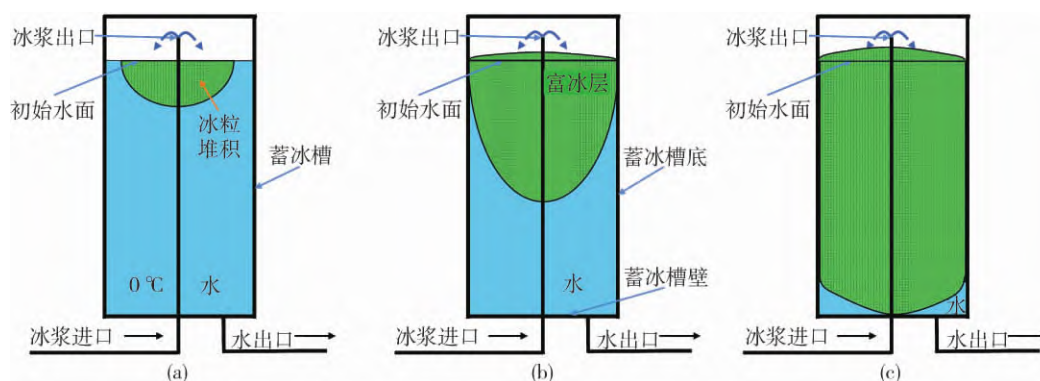


图4 冰浆在蓄冰槽内的存储过程

Fig. 4 The storage process of ice slurry in ice storage tank

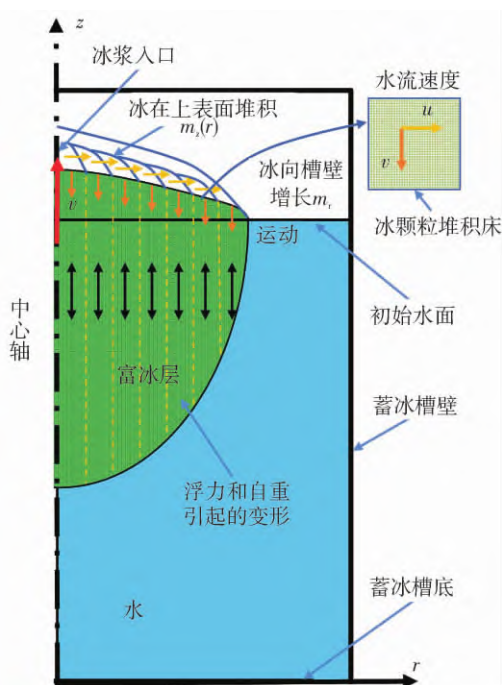


图5 蓄冰槽内富冰层多孔介质模型

Fig. 5 Ice-rich layer porous media model in ice storage tank

Tanino 和 Kozawa 均认为富冰层是一个在一段时间内结构保持稳定的多孔介质体,冰晶堆积过程中冰浆中的水在多孔介质体中渗流。相应的

冰浆蓄冷物理模型示意图如图 5 所示。Tanino 模型主要包括质量守恒方程和富冰层内水渗流的连续性方程。根据质量守恒定律,富冰层上表面堆积冰浆的质量守恒方程为:

$$\varphi G \Delta t = \sum_{r=0}^r m_z(r) + m_r \quad (1)$$

式中: φ 为富冰层含冰率,%; G 为入口冰浆质量流速, kg/s ; $m_z(r)$ 为富冰层上表面在 Δt 时间内轴向上堆积的冰量, kg ; m_r 为富冰层在 Δt 时间内径向上堆积的冰量, kg 。

富冰层内水渗流的连续性方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

式中: u 和 v 分别是在径向(r)和轴向(z)上通过富冰层的渗透水速度, m/s ,其可由达西定律确定:

$$u = -\frac{\kappa}{\mu_l} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (3)$$

$$v = -\frac{\kappa}{\mu_l} \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\kappa}{\mu_l} \rho_l g \quad (4)$$

式中: P 为富冰层压差, Pa ; g 为重力加速度, m/s^2 ; k 为富冰层中水的渗透率, m^2 ; μ_l 为水的动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; ρ_l 为水的密度, kg/m^3 。

蓄冰槽内富冰层的压力边界条件为:

$$\begin{cases} P = P_0 & \text{富冰层和大气的交界面} \\ P = P_0 - \rho_l gh & \text{富冰层和水的交界面} \\ \frac{dP}{dr} = 0 & \text{富冰层轴向方向} \end{cases} \quad (5)$$

由于 Tanino 模型应用达西定律计算渗透水流速,只适用于低冰浆流速 ($Re < 10$) 的蓄冰场景。此外,此模型仅通过 $0.33 \sim 0.92 \text{ kg/s}$ 冰浆流量时动态富冰层堆积轮廓进行了实验验证,尚缺少与蓄冰槽内富冰层含冰率的实验验证。

3.3 Ergun 方程的应用

随着跨季节高效蓄冷需求的出现,需要有合适的模型来实现不同冰浆流速蓄冰场景下富冰层内含冰率的准确预测。为此,笔者利用雷诺数适用范围更广的半经验公式 Ergun 方程^[27]来衡量冰浆存储时的富冰层含冰率:

$$\frac{|P|}{L} = \frac{150\mu_l(1-\varepsilon)^2}{D_p^2\varepsilon^3}v + \frac{1.75\rho_l(1-\varepsilon)}{D_p\varepsilon^3}v^2 \quad (6)$$

式中: L 为冰层厚度, m ; ε 为富冰层孔隙率,孔隙率与含冰率满足 $\varphi + \varepsilon = 1$; v 为富冰层内水流流速, m/s ; D_p 为冰晶平均粒径, m 。

当流体以层流通过富冰层时,式(6)可进一步简化为 Blake-Kozeny 方程:

$$\frac{|P|}{L} = \frac{150\mu_l(1-\varepsilon)^2}{D_p^2\varepsilon^3}v \quad (7)$$

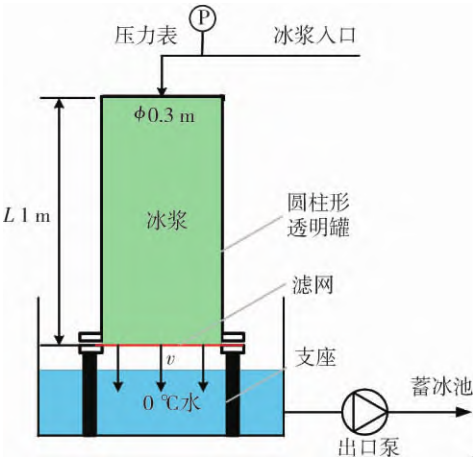


图 6 本文所建实验台流程图

Fig.6 Flow chart of the experimental bench in this study

为验证利用 Ergun 公式计算富冰层内含冰率的合理性,笔者搭建实验台(图 6)进行了实验验证。实验过程中从透明圆形储罐上方通入一定流量和含冰率的冰浆,储罐底部不封口,利用法兰设

置出口滤网,达到“排水留冰”的效果;待储罐内充满冰浆,入口通入 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷水,同时控制冰层压降达到所需数值,待罐内冰浆处于相对稳定的多孔介质状态,记录此时储罐出口水流流速,计算水流雷诺数;利用称重法测量储罐内冰浆含冰率,得到冰层含冰率。实验所得富冰层的含冰率与模型计算结果对比如表 1 所示。

表 1 模型计算含冰率与实验含冰率对比

Tab.1 The comparison between theoretical IPF and experimental IPF

| 压降 /Pa | 流速 /(m/s) | Re | 模型计算 含冰率 | 实验 含冰率 | 相对 偏差 |
|-----------|---------------|-------|-------------|-----------|----------|
| 20 000 | 0.015 01 | 2 513 | 0.573 | 0.570 | 0.7% |
| 22 000 | 0.015 11 | 2 530 | 0.582 | 0.576 | 1.4% |
| 24 000 | 0.014 6 | 2 437 | 0.594 | 0.596 | 0.5% |
| 26 000 | 0.014 57 | 2 439 | 0.602 | 0.610 | 2.0% |

由表 1 可知,不同富冰层压降下,由 Ergun 方程计算所得含冰率与实测含冰率的最大相对偏差为 2.0%,且富冰层内水流雷诺数远大于 10 (Re 在 2 500 左右),这表明 Ergun 方程可用于研究冰浆流速较大的蓄冰场景,准确预测该场景下蓄冰槽内的含冰率。

3.4 蓄冷系统热平衡模型

Yamada 等人^[28]从热平衡的角度对冰浆存储特性进行模拟,如图 7 所示,热平衡公式如下:

$$Q_1 - (Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5) = Q_6 + Q_7 + Q_8 \quad (8)$$

式中: Q_1 为制冷机产生的冷量, kJ ; Q_2 为通过壁面从周围空气输入的热量, kJ ; Q_3 为通过液体表面从周围空气输入的热量, kJ ; Q_4 为通过管道从周围空气输入的热量, kJ ; Q_5 为循环泵的热量输入, kJ ; Q_6 为储罐内水溶液显热, kJ ; Q_7 为冰的显热, kJ ; Q_8 为冰融化潜热, kJ 。

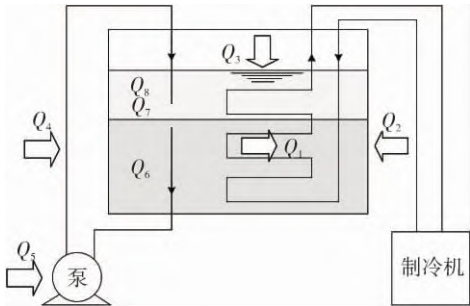


图 7 存储模型中的热平衡示意图

Fig.7 Heat balance in the simulation model of storage

基于式(8)能够较好地描述冰浆蓄冷系统的整体性能,文献[28]从系统热平衡角度研究了蓄冷量基本相同但冰浆存储时间不同(4 h、6 h、8 h)的三种运行模式对系统性能的影响,结果表明,存储时间为4 h的运行模式对其目标系统(图7)更有利。然而,该热平衡模型假设蓄冰槽中冰浆均匀分布,并没有考虑富冰层堆积的不均匀性。

4 冰浆存蓄含冰率优化

国内外学者从冰浆蓄冷机理、冰浆蓄冷模型等方面探究冰晶尺寸变化机制、蓄冰槽容积选择、冰浆存储过程富冰层轮廓预测、冰浆蓄冷系统运行优化等问题,对如何解决蓄冰槽含冰率不高的问题提供了一定理论指导,同时结合冰浆存储实验得到了提高冰浆存蓄含冰率的一些方法,例如提升冰浆冰晶质量、冰浆存蓄调控以及蓄冰槽几何结构等。冰浆存蓄含冰率的优化有利于提高蓄冰槽蓄冷能力,降低其建造成本。

4.1 提升冰晶质量

刘曦等人^[29]采用乙二醇水溶液制取冰浆(二元冰浆),实验研究表明,当含冰率超过16.8%时,含冰率越大,冰晶平均粒径增大越显著,如含冰率由16.8%提高至21.2%,冰晶平均粒径由47.3 μm 增至62.6 μm 。蔡玲玲等人^[30]实验制备

的纯水冰浆含冰率为10%~30%,其冰晶初始粒径为350~550 μm ,当冰浆流速由1.0 m/s增至2.5 m/s时,管道进出口冰浆冰晶平均粒径差由16.1 μm 增至34.6 μm ,但其冰晶粒径仍远大于添加了凝固点抑制剂的二元冰浆的冰晶粒径。可见,与纯水冰浆相比,二元冰浆冰晶粒径小,形状接近球状,这有助于后续冰浆的均匀存储和蓄冰槽内含冰率的提升。

Kasza等人^[31]研究了冰晶形状对冰浆流动性能的影响。图8显示了平滑球状和不平滑树突状两类冰晶的流动特性。图8(a)表明由纯水在搅拌机中制成的树突状冰晶极易堵塞漏斗,堵塞后冰浆中仅有水流入烧杯。Kasza等人^[31]在载液中添加凝固点抑制剂来平滑冰晶表面粗糙度,削弱Ostwald熟化和团聚效应,并在冰浆制备过程中对冰晶采用额外的热融平滑处理,由图8(b)可见,光滑的球状冰晶很容易通过漏斗流入烧杯而不发生堵塞。显然,在冰浆存蓄过程中,光滑的冰晶有利于富冰层的均匀堆积,可减少蓄冰槽出口发生堵塞的概率。因此,在冰浆蓄冷实际应用中,可通过添加剂来抑制溶液冰点,减缓冰晶生成速度,形成的二元冰浆冰晶粒径较小且形状光滑,有利于提升蓄冰槽内含冰率。

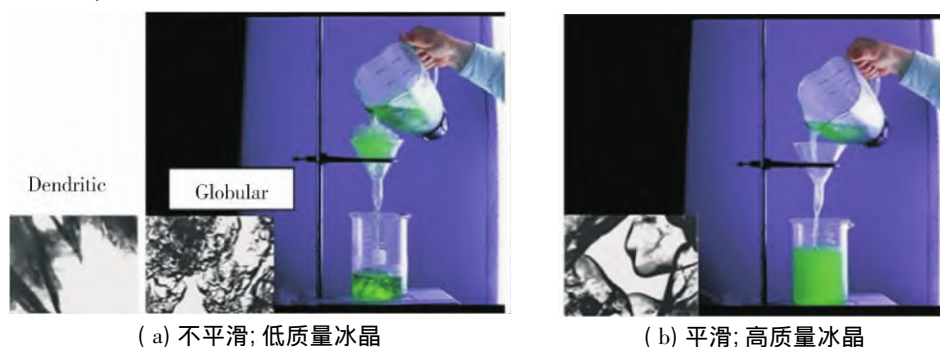


图8 树突状和球状冰晶冰浆的流动性能

Fig. 8 The flow performance of spherical and dendritic ice particle slurries

由于冰晶粘附在蓄冰槽壁面会影响蓄冰时冰浆流动导致富冰层分布不均匀,致使含冰率降低,因此,为了提高含冰率,需要削弱冰晶粘附现象。Matsumoto等人^[32]使用含水量较高的水/硅油乳液在不锈钢容器内制备冰浆,实验结果表明,此类冰浆不会粘附在容器内壁面。Lu等人^[33]则制备了一种石蜡微乳液作为冰浆的新型介质,冰浆形

成过程中没有冰晶附着在壁面上,且冰晶光滑、流动性能好,有利于提高富冰层的均匀性和含冰率;此外,经过300次热循环实验后,该石蜡微乳液仍然完全透明,未有相分离现象,这表明该石蜡微乳液可稳定高效地用于冰浆存蓄。

4.2 冰浆存蓄调控

青春耀、马春红等人^[34,35]实验研究了入口冰

浆流量、入口冰浆含冰率、初始液面高度、进水口布置等参数对蓄冰槽内含冰率的影响。研究发现,富冰层的形成受入口冰浆流速、入口冰浆固相含量(即入口冰浆含冰率)、初始液面高度及出冰方式的影响,其中出冰方式的影响最弱。增大入口冰浆流量和减小入口冰浆含冰率有利于富冰层堆积的均匀性,而减小初始液面高度对最终堆积的均匀程度影响不大。因此,为了有效利用蓄冰槽容积,冰浆存蓄时应提高蓄冰槽入口冰浆流量,同时减小入口冰浆含冰率,从而提高富冰层堆积的均匀度及密实程度,增大蓄冰槽内含冰率。赵美等人^[36]则通过正交实验方差分析发现,入口冰浆流量对富冰层含冰率影响最显著,入口冰浆含冰率次之,蓄冰槽初始液面高度影响最小。笔者则通过2.2中的实验研究发现,在蓄冰槽出口处设置滤网,有助于蓄冰槽整个横截面均匀“排水留冰”,可有效提高蓄冰槽内含冰率。

4.3 蓄冰槽几何结构

蓄冰槽几何形状种类较多,圆柱体^[24-26]蓄冰槽结构稳定性高,设计工艺简单,对材料的强度要求相对较低;方体蓄冰槽^[22,23]相同几何容积下,与圆柱体蓄冰槽相比,在拐角处受力不均,结构稳定性变差,故,若要达到圆柱体蓄冰槽所具有的结构稳定性,方体蓄冰槽壁厚及所用材料量均会增加,导致投资成本增加。因此,建议选用经济性更优的圆柱体蓄冰槽^[37]。Tanino 等人^[25]利用圆柱体蓄冰槽进行蓄冰实验,冰浆存蓄系统如图 9 所示,结果表明,通过合理设计,圆柱体蓄冰槽能够有效利用已有空间,满足蓄冷要求。

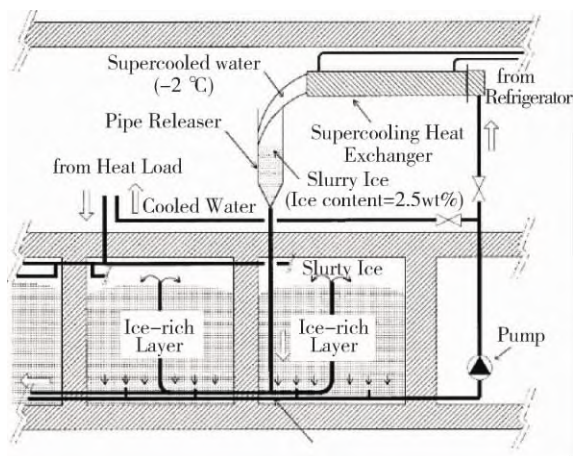


图9 圆柱体蓄冰槽冰浆存储系统

Fig. 9 Cylinder ice storage tank ice slurry storage system

上述圆柱体和方体蓄冰槽通常适用于短期蓄冷,且大多建造于地面之上。在双碳目标背景下,大规模蓄冷是我国“十四五”现代能源体系中重要的调峰储能技术之一。对于跨季节大规模冰浆蓄冷,综合考虑存蓄含冰率、节约用地、保温、结构稳定等因素,建议采用如图 10 所示的地下梯台型蓄冰槽。缓坡的设置有助于结构稳定,缓坡比例一般为 1:2,可根据实际土质进行调整。地下梯台型蓄冰槽顶部应加装保温浮盖,根据式(6)和式(7),选用的保温浮盖应具有较高的强度和重量,以提高富冰层压差 P ,进而增加蓄冰槽内含冰率。目前关于地下蓄冰槽的研究极少,几何结构对蓄冰槽内含冰率的优化规律尚不明朗,而且跨季节蓄冰槽如何布置进冰管道(数量、位置)才能提高蓄冰槽含冰率等问题亟需深入研究。

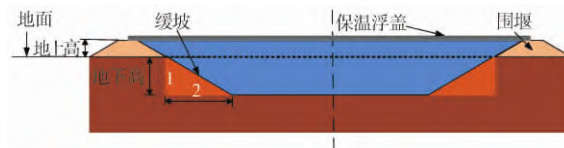


图 10 大容积地下蓄冰槽截面示意图

Fig. 10 Schematic diagram of big volume ice storage tank underground

5 结论与展望

冰浆存蓄是一项集合冰晶物理变化、流体流动、水流渗流的综合问题。本文从冰浆蓄冷机理和蓄冷模型角度出发分析蓄冰槽内含冰率优化的方法和暂存问题。结合蓄冰机理和实验研究,可以得到一些蓄冰槽含冰率的优化措施:采用添加冰点抑制剂形成的二元冰浆进行存储,可削弱 Ostwald 熟化和团聚效应,使其冰晶粒径变小,形状接近球状,表面光滑,有利于富冰层的拓展延伸;在蓄冰槽内设置搅拌器,增强冰晶磨损;提高蓄冰槽入口冰浆流量,减小入口冰浆含冰率,可提高富冰层堆积的均匀度及密实程度,增大蓄冰槽内含冰率。但对问题实质性的解决仍有以下几个方面亟待解决:

(1) 蓄冰槽内搅拌器的合理布置。综合考虑摩擦产热热融平滑冰晶和磨损机制,深入研究搅拌器布置(数量、相邻间距)和搅拌器叶片形状及数量对富冰层内冰晶均匀分布与蓄冰槽内含冰率优化的影响。

(2) 完善冰浆存储过程中蓄冰槽内富冰层轮廓的动态预测。构建不同应用场景下蓄冰槽内含冰率计算模型,构建富冰层轮廓与蓄冰槽内含冰率之间的关系。

(3) 形成蓄冰槽设计准则。利用实验和数值研究手段,探究蓄冰槽几何结构、进冰管道布置(位置、数量)对蓄冰槽内含冰率提升的影响规律,指导蓄冰槽的工程建设。

参考文献

- [1] 国家能源局. “十四五”现代能源体系规划[M]. 北京: 中国计划出版社, 2022.
- [2] Egolf P W, Kauffeld M. From physical properties of ice slurries to industrial ice slurry applications[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(1): 4–12.
- [3] Wang M J, Kusumoto N. Ice slurry based thermal storage in multifunctional buildings[J]. Heat and Mass Transfer, 2001, 37(6): 597–604.
- [4] 刘圣春, 孙志利, 代宝民, 等. 《冰浆技术及应用》[M]. 天津: 天津大学出版社, 2017.
- [5] 曹世楠, 张卫义, 刘阿珍. 冰浆冰蓄冷方法发展现状分析[J]. 中国新技术新产品, 2021(05): 65–67.
- [6] 王继红, 张腾飞, 王树刚, 等. 竖直管道内冰浆流体流动特性的数值模拟[J]. 制冷学报, 2012, 33(02): 42–46.
- [7] 梁坤峰, 杜军恒, 王林. 90°弯管内冰浆流动特性数值模拟[J]. 低温与超导, 2012, 40(01): 62–68.
- [8] Wang J, Wang S, Zhang T, et al. Mathematical and experimental investigation on pressure drop of heterogeneous ice slurry flow in horizontal pipes[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2017(108): 2381–2392.
- [9] 刘圣春, 宋明, 代宝民, 等. 管道内冰浆流动压降特性模拟和实验研究[J]. 制冷学报, 2018, 39(02): 61–67.
- [10] 张盛世, 赵彦杰, 李兆宁. 尿素溶液制备冰浆的流动特性研究[J]. 制冷学报, 2021, 42(01): 149–159.
- [11] 张页, 孙志高, 刘行, 等. 固相颗粒粒径对浆体流变特性影响的实验研究[J]. 制冷学报, 2022, 43(02): 125–133.
- [12] LI Yanbo, Wang Shugang, Wang Jihong, et al. CFD study of ice slurry heat transfer characteristics in a straight horizontal tube[J]. Procedia Engineering, 2016(146): 504–512.
- [13] Sha M, Cai L, Ma K, et al. Investigation on flow and heat transfer characteristics of ice slurry without additives in a plate heat exchanger[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018(127): 11–20.
- [14] 邹良旭, 马非, 孟昭男, 等. 基于群体平衡模型的冰浆流动与传热特性数值研究[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(12): 1459–1465.
- [15] Cai L, Mi S, Luo C, et al. Numerical investigation on heat and mass transfer characteristics of ice slurry in pulsating flow[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022(189): 122722.
- [16] Gao Y, Ning Y, Xu M, et al. Numerical investigation of aqueous graphene nanofluid ice slurry passing through a horizontal circular pipe: Heat transfer and fluid flow characteristics[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2022(134): 106022.
- [17] Pronk P, Ferreira C, Witkamp G J. Effects of long-term ice slurry storage on crystal size distribution[C]. The 5th Workshop on Ice Slurries of the IIR, Stockholm (Sweden), 2002.
- [18] Pronk P, Hansen T M, Ferreira C A I, et al. Time-dependent behavior of different ice slurries during storage[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(1): 27–36.
- [19] 青春耀. 冰浆固相含量测量及蓄融冰动态特性研究[D]. 广州: 中国科学院广州能源研究所, 2009.
- [20] 唐艺芳, 刘志强, 王肖肖, 等. 搅拌对冰浆存储冰晶粒径演化的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(05): 1376–1383.
- [21] Matsumoto K, Kubota H, Umehara Y, et al. Investigation on cohesive force of ice particles in ice slurry for long-term ice storage[J]. International journal of refrigeration, 2018(90): 156–162.
- [22] Stewart J W E, Gute G D, Saunders C K, et al. Modeling the ice-filling and ice-melting processes of thermal energy storage tanks[J]. ASHRAE Transactions: Research, 1995, 101(1): 56–65.
- [23] Stewart J W E, Gute G D, Saunders C K. Ice-melting and melt water discharge temperature characteristics of packed ice beds for rectangular storage tanks[C]. ASHRAE Transactions: Research, 1995.
- [24] Tanino M, Kozawa Y. Prediction of Ice Storage Process in Dynamic-type Ice Storage System[J]. Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 1997, 14(1): 87–95.
- [25] Tanino M, Kozawa Y. Ice-water two-phase flow behavior in ice heat storage systems[J]. International journal of refrigeration, 2001, 24(7): 639–651.

- [26] Kozawa Y, Aizawa N, Tanino M. Study on ice storing characteristics in dynamic - type ice storage system by using supercooled water [J]. International journal of refrigeration, 2005, 28(1): 73 - 82.
- [27] Ergun S. Fluid flow through packed columns [J]. Chemical Engineering Progress, 1952, 48(2): 89.
- [28] Yamada M, Fukusako S, Kawanami T. Performance analysis on the liquid - ice thermal storage system for optimum operation [J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(2): 267 - 277.
- [29] 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 + 109.
- [30] 蔡玲玲, 米沙, 刘志强. 冰浆流动过程中冰晶粒径演化规律的实验研究 [J]. 制冷学报, 2023, 44(05): 131 - 138.
- [31] Kasza K, Hayashi K. Ice slurry cooling research: effects of microscale ice particle characteristics and freezing point - depressant additives on ice slurry fluidity [J]. ASHRAE Trans, 2001, 107(1): 346 - 351.
- [32] Matsumoto K, Sonoda S. Continuous ice slurry formation by using W/O emulsion with higher water content [J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(5): 874 - 882.
- [33] Lu L, Sun Z. Ice slurry formation and ice crystal growth by using paraffin microemulsion [J]. International journal of refrigeration, 2021(130): 434 - 440.
- [34] 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, 37(05): 41 - 46.
- [35] 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(01): 60 - 64.
- [36] 赵美, 于航. 冰浆贮存的均匀性研究 [J]. 制冷学报, 2014, 35(1): 98 - 102.
- [37] 张茜, 王宇, 安允, 等. 动态冰浆系统安装与调试技术 [J]. 洁净与空调技术, 2021, 112(04): 16 - 18.

(上接第13页)

(2) 基于单线集成的高密度信号总线(168 通道/ $\Phi 100$ mm) 能够为超导量子计算机工作提供所需的气密性、高密度超低温高密度微波互连系统。

(3) 基于带状线集成的高密度信号总线(320 通道/ $\Phi 100$ mm) 扩大量子超导量子计算机的规模、减少噪声和提高稳定性, 未来还需突破柔性带状材料工艺、更高密度的芯片封装、超小连接器微组装、低温微波源集成等技术。

(4) 基于光纤集成的高密度信号总线, 具有隔绝热噪声的先天优势, 相比前两代通道体积极小, 具有极易扩展到大规模量子比特计算功能的优势。未来还需解决低温光电材料及信号转换、低温器件集成、芯片封装等技术。

参考文献

- [1] 付振宇, 刘凌旗, 陈羽臻, 等. 量子计算技术发展路线与趋势分析 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16(8): 813 - 819.
- [2] 张珂. 超导量子器件制备技术及工艺研究 [D]. 南京: 南京大学, 2017.
- [3] 杨真. 超导量子比特器件制备与测控 [D]. 南京: 南京大学, 2019.
- [4] 汪冰, 刘俊夫, 秦智晗, 等. 浅谈超导量子比特封装与互连技术的研究进展 [J]. 电子封装, 2023, 23(10): 100207.
- [5] Rosenberg D, Weber S J, Conway D, et al. Solidstate qubits: 3D integration and packaging [J]. IEEE Microwave Magazine, 2020, 21(8): 72 - 85.
- [6] 汪书娜, 余慧勤, 原蒲升, 等. 低温互联柔性线的研制 [J]. 低温与超导, 2022, 50(7): 85 - 96.
- [7] Jin Y R, Zheng D N. The road to long coherence time superconducting quantum bits [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(34): 3935 - 3946.
- [8] Oliver W D, Welander P B. Materials in superconducting quantum bits [J]. 2017, 62(34): 3935 - 3946.
- [9] 于杰平, 王丽. 中美量子计算研发现状对比分析及启示 [J]. 世界科技研究与发展, 2022, 44(1): 35 - 45.
- [10] 郭光灿, 陈以鹏, 王琴. 量子计算机研究进展 [J]. 南京邮电大学学报, 2020, 40(5): 3 - 10.
- [11] Gong M, Wang S Y, Zha C, et al. Quantum walks on a programmable two - dimensional 62 - qubit superconducting processor [J]. Science, 2021, 372(6545): 948 - 952.
- [12] Huang H L, Wu D C, Fan D J, et al. Superconducting quantum computing: A review [J]. Science China, 2020, 63(8): 59 - 90.