

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-11

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20260818001

新型能源体系下海水冰浆应用研究进展及展望

武振菁^{1,2} 李先庭²

(1 天津城建大学能源与安全工程学院 天津 300384; 2 清华大学建筑学院 北京 100084)

摘要 在国家“双碳”目标与海洋强国战略背景下,海水冰浆作为一种高效的冷量载体,在冷藏保鲜、海水淡化、海水源热泵及可再生能源消纳等领域展现出广阔的应用前景,但其制备、应用与综合利用的系统性综述尚不多见。本文围绕海水冰浆的制备方法、典型应用场景、技术进展及产业化挑战进行系统梳理与评述。在制备方面,海水冰浆可有效消纳海上风电、光伏及LNG冷能等可再生能源与余冷资源;在应用方面,冷冻冷藏领域应用最为成熟,已在远洋渔船实现初步规模化应用,而海水淡化与海水源热泵领域虽通过循环优化提升了系统性能,但控制复杂性及运行稳定性仍待突破。当前,海水冰浆的产业化进程整体偏缓,主要受限于海水腐蚀性、冰浆制备和输送稳定性不足以及多工艺耦合集成方案缺乏等瓶颈。在此基础上,本文提出海水冰浆与可再生能源消纳相结合、以冷—淡水—盐矿联产联供为核心的综合利用新方向,为海水冰浆技术在新型能源体系中的规模化应用提供新思路与参考。

关键词 海水冰浆;综合利用;应用场景;技术瓶颈

中图分类号: TB61¹2;TK02

文献标识码: A

Research Progress and Prospects for Seawater Ice Slurry Comprehensive Utilization in New Energy System

Wu Zhenjing^{1,2} Li Xianting²

(1. School of Energy and Safety Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Against the backdrop of China's "Dual Carbon" goals and the "Maritime Power" strategy, seawater ice slurry, as a highly efficient cold energy carrier, has demonstrated broad application prospects in fields such as cold storage and preservation, seawater desalination, seawater-source heat pumps, and renewable energy integration. However, systematic reviews on its preparation, application, and comprehensive utilization are scarce. This review provides a systematic review and critical assessment of the preparation methods, typical application scenarios, technological advances, and industrialization challenges of seawater ice slurries. In terms of preparation, seawater ice slurry can effectively accommodate renewable energy sources and waste cold resources, including offshore wind power, photovoltaic power, and LNG cold energy. Regarding applications, the cold storage sector is the most mature, with preliminary large-scale deployments in ocean-going fishing vessels. Although cycle optimization has effectively improved system performance in seawater desalination and seawater-source heat pump applications, challenges in control complexity and operational stability remain. The slow industrialization of seawater ice slurry stems primarily from seawater corrosion, insufficient stability in ice slurry preparation and transportation, and a lack of multi-process coupled integration schemes. Building on this analysis, this study proposes a comprehensive utilization strategy that couples seawater ice slurry with renewable energy utilization for the joint production of cooling, fresh water, and salt minerals, providing a new pathway for the large-scale application of this technology in new energy systems.

Keywords seawater ice slurry; comprehensive utilization; application scenarios; technical bottleneck

在“碳达峰碳中和”的国家战略背景下,构建清洁低碳、安全高效的新型能源体系已成为我国经济

社会发展的核心议题。海水冰浆作为一种由液态海水基液与微细悬浮冰晶构成的固液两相混合流体,

收稿日期:2026-08-18;修回日期:2026-09-23;录用日期:2026-09-24

责任编辑:王亚薇

基金项目:国家重点研发计划(2024YFB2408700)资助项目。(The project was supported by the National Key R&D Program of China (No. 2024YFB2408700).)



移动阅读

因其独特的物理特性而备受关注。受盐分结晶动力学特性的影响,海水冰晶呈现出显著的多孔微观形貌,这不仅赋予了其优异的流动特性,更使其兼具高储能密度与卓越的换热性能,成为一种极具潜力的绿色蓄能介质。

在当前能源转型的关键期,海水冰浆综合利用的优势尤为突出:一是助力清洁能源高效消纳。其制备过程可直接耦合海上风电、光伏及沿海 LNG (liquefied natural gas) 冷能等多元化能源,有效平抑可再生能源的波动性,实现绿电的就地高效转化与消纳,对“十五五”时期国家可再生能源发展中非电利用目标起到有力的支撑作用;二是践行资源节约集约利用。原料直接取自储量丰富的海洋资源,全过程无需消耗宝贵的淡水资源,从根本上支持了水资源节约保护的国家战略,兼顾了显著的生态效益与经济可行性;三是服务于海洋经济高质量发展。通过将海洋能转化为冷能、热能、淡水、盐矿等多维资源,海水冰浆综合利用技术服务海洋新兴产业,符合发展新质生产力的要求,有望成为沿海地区产业转型升级的新引擎。

虽然海水冰浆在蓄冷储能、冷冻冷藏、海水淡化

及海水源热泵等领域的应用前景广阔,但在产业化进程中仍面临诸多挑战。特别是在服务岸、岛、深远海用能需求和实现绿色低碳循环发展的大目标下,如何攻克系统稳定运行、集成优化等关键科学与技术瓶颈,实现海水冰浆的低碳、高效、规模化综合利用,已成为产学研各界关注的焦点,也是培育壮大海洋战略性新兴产业的重要方向。

近年来,国内外学者围绕冰浆的基础特性与应用开展了大量研究^[1-2],相关研究成果归纳总结于表 1。由表 1 可知,现有研究主要聚焦于淡水冰浆及配置液冰浆的制备方法、流动特性与应用场景等方面。然而,上述研究的应用多局限于单一功能系统,对海水冰浆的系统性研究鲜有报道,尤其缺乏对其在国家能源服务体系中综合利用的深入探讨。鉴于此,本文从海水冰浆综合利用的视角出发,系统梳理其基础特性与应用场景的研究进展,深入剖析现有制备技术的特点与面临的瓶颈问题,并重点探讨在近远海差异化能源禀赋条件下海水冰浆综合利用的新模式与发展趋势,以期相关政策制定、技术路线选择及工程示范应用提供科学参考与理论支撑。

表 1 冰浆领域代表性综述文献对比
Tab.1 Comparison of review literature of ice slurry

文献	溶液种类	研究主题	主要研究内容
Zheng Peibo 等 (2026) ^[3]	海水、乙二醇水溶液、纳米流体水溶液(石墨烯/Al ₂ O ₃)	冷藏保鲜	1)冰浆作为水产品保鲜介质的有效性及其理化性质。 2)阐明冰浆保鲜的机制;强调冰浆与其他保鲜技术(臭氧、辐照)协同应用的潜力。 3)揭示冰浆在冷链物流中制备系统复杂、成本高等挑战,未来应探索与其他技术协同。
Zhou Zhijie 等 (2024) ^[4]	纯水、盐水、乙醇/乙二醇/丙二醇水溶液等	制备应用	1)梳理高含冰率冰浆制备技术,以及高含冰率对冰浆物性、流动特性的影响。 2)高含冰率可应用于冷链物流、管道清管/除垢、高储冷密度场景,同时具有高输送能耗与冰堵等挑战。
Wang Qian 等 (2024) ^[5]	乙醇/丙二醇/乙二醇水溶液、盐水	制备及保鲜应用	1)梳理冰浆制备方法,并分析不同制备方法的优势与挑战(如易结冰堵塞、设备易损、能耗高等)。 2)结合果蔬预冷需求,评估不同制备方法 with 果蔬预冷工程适配性与可行性。
Wang Jihong 等 (2019) ^[6]	乙醇/丙二醇水溶液、盐水、纳米流体水溶液	流动传热特性	1)冰浆在系统典型部件(管道、管件、阀门、泵、换热器)中流动与传热特性。 2)探讨冰浆在冷却系统中安全运行与最优工况。
M. Kauffeld 等 (2019) ^[7]	乙醇水溶液、盐水	制备应用	1)梳理冰浆技术的发展历史,包含制备、储存、浓度测量、冰晶生长控制等。 2)研究冰浆应用中能耗、浓度测量、冰晶生长控制、无刮削的可靠制冰技术等方方面面面临的问题,并展望未来在储能、热泵、冰浆清管、灭火等领域的应用。
M. Kauffeld 等 (2010) ^[8]	纯水、盐水、乙醇/乙二醇/丙二醇水溶液等	应用	1)论述冰浆作为载冷剂/相变介质的优势。 2)总结冰浆在建筑供冷、食品工业保鲜、医疗低温保护等领域的应用。

1 海水冰浆的应用场景

1.1 冷冻冷藏保鲜

冰作为一种天然的蓄冷介质,其在冷冻冷藏保鲜领域的应用历史悠久,最早可追溯至距今约 4 700 年

的古埃及时代,彼时人们已开始利用高山冰雪来保存水果^[7];而中国关于冰保鲜技术的记载亦出现于距今约 3 000 年的先秦时期。随着现代社会对食品保鲜品质要求的日益严苛,冰浆技术凭借其高效蓄冷、优异传热及便捷输运等特性,已被广泛应用。相较

于传统的片冰和块冰,冰浆不仅拥有极高的储能密度,其微小的冰晶粒径更赋予了流体优异的流动性与换热性能,制冷能力高达传统片冰、块冰的5~6倍^[9]。此外,冰浆质地柔软细腻,在冷却过程中能有效避免对鱼类^[10]、水果^[5]等娇嫩食材造成机械损伤,因此在冷冻冷藏行业得到了广泛应用。尤为值得注意的是,在海洋捕捞与水产运输领域,海水冰浆因其理化性质与海洋鱼类更为匹配,展现出比淡水冰浆更为卓越的保鲜效果^[11]。

1.2 海水淡化

海水淡化技术主要基于相变分离与膜分离两大原理。其中,相变淡化涵盖了多效蒸馏、多级闪蒸、机械蒸汽压缩等蒸发法及冷冻淡化技术;膜分离技术则主要包括反渗透、正向渗透及电渗析等。在众多的淡化路径中,冷冻淡化技术不仅能够高效获取低盐度的固态冰晶,还能同步副产高浓度的卤水资源,实现了盐分的梯级分离。相较于蒸发法,冷冻淡化技术的理论能耗极低,系统运行能耗仅约为蒸发法的14.3%^[12];同时,由于低温运行环境,该技术表现出优异的缓蚀性能与抗结垢特性,可大幅降低系统维护成本^[13]。目前,海水冷冻淡化工艺主要分为直接冷冻法与间接冷冻法两大类(系统形式如图1所示)^[14],且依据制冷方式与冰晶形成方式的不同,可进一步细分为多种具体工艺(图2)^[15-16]。综合对比各类技术路线,间接冷冻法在系统稳定性与能效方面展现出更为显著的优势,然而受限于系统稳定性等关键技术的瓶颈,该技术目前尚未实现大规模的产业化应用^[17]。

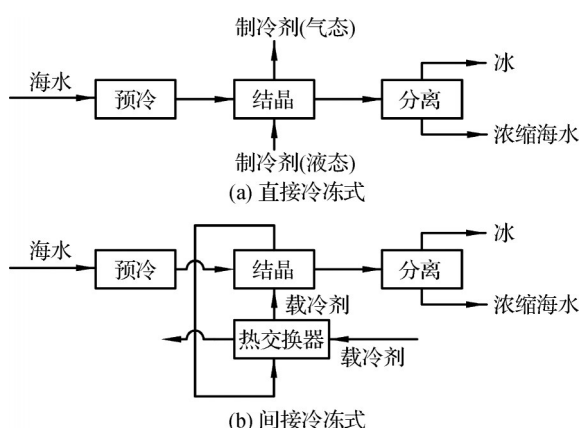


图1 冷冻淡化系统原理

Fig.1 Principle of freezing desalination system

1.3 海水源热泵

在全球能源结构加速向清洁化、低碳化转型的大背景下,亟需成熟、高效、稳定的热能转换技术。

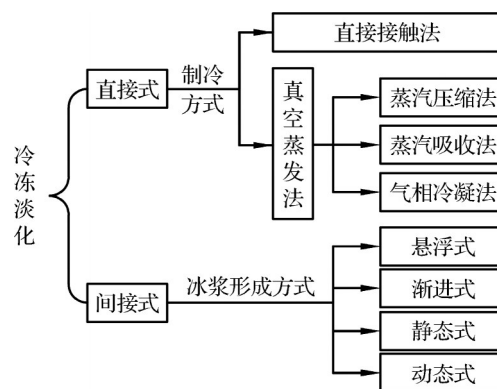


图2 冷冻淡化技术

Fig.2 Freezing desalination technology

其中,热泵技术彻底突破了传统化石能源的低效利用模式,能够以少量高品位电能或余热为驱动,从自然资源与低品位废热中提取热量,实现稳定高效的制冷、供暖与热水供应功能^[18]。

由于海水具有可再生、清洁、热储量大、全年温度波动小的天然特性,海水源热泵系统展现出极高的商业开发价值和规模化应用潜力^[19-20]。然而在海水温度偏低的海域,严寒期海平面易出现浮冰^[21]。依据取水方式的不同,海水源热泵系统主要划分为开式与闭式2种形式。在开式系统中,海水结冰风险激增且影响取水效率与管路畅通;而在闭式系统中,无论采用螺旋盘管、毛细管箱还是叉排管束式换热器^[22],结冰工况均会导致换热器传热效率显著下降(图3),严重时还可能引发设备损坏或运行中断,极大限制了系统在寒冷地区的推广应用。因此,有效缓解或解决海水结冰问题,已成为当前海水源热泵领域亟待突破的关键技术。海水源热泵提取海洋热能通过生成可流动的海水冰浆替代传统密实固体冰,有效突破了原有技术的应用局限,显著拓宽了其适用场景,为极寒及严寒沿海地区的清洁供热提供了创新解决方案。

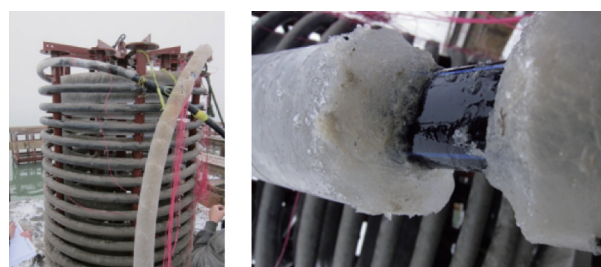


图3 换热器结冰状况^[23]

Fig.3 Icing of seawater heat exchanger^[23]

1.4 综合利用

目前,海水冰浆在冷藏保鲜、海水淡化及海水源

热泵等领域的研究多集中于单一功能的应用探索,尚未形成产业化的综合应用体系。有学者提出将海水冷冻淡化与蓄冷相结合的耦合系统(desalination-ice storage coupling system, DIS),在实验室条件下完成了系统性能测试并进行了经济性分析^[24]。研究表明,该系统利用过冷水制备冰浆,以淡化冰作为蓄冷介质,实现了海水淡化与蓄冷的耦合运行。系统在谷电时段制冰蓄冷,其系统性能系数(coefficient of performance, COP)为3.41,虽然该COP值略低于传统反渗透淡化与空调制冷独立设置的系统形式,但凭借淡化与蓄冷的双重功能,项目回收期为3.38年,较传统系统缩短了37.6%。此外,在不同地区的案例模拟中发现,峰谷电价差较大的地区,该耦合系统(DIS)的经济优势更为显著。综上所述,海水冰浆综合利用的探索表明,在适配场景下将海水淡化与蓄冷等功能进行集成耦合,可有效提升系统整体经济性,为海水冰浆的产业化应用奠定基础。

2 海水冰浆的制备方法

根据制冰原理的不同,现有的冰浆制备技术主要包括机械刮削法、流化床法、直接接触法、真空法和过冷法等,各类冰浆制备技术在系统能耗、稳定性、适用场景呈现差异化特征^[25]。

2.1 直接接触法

直接接触法制备冰浆是将不溶于制备冰浆原液的低温制冷/载冷介质与原液直接接触,通过二者充分的热交换,使原液结冰,后利用密度差或离心力实现该介质与冰晶的分离^[26],其制取流程如图4所示。根据直接接触法的制备原理,该方法具有传热效率高、冰晶细小均匀、无传热壁面热阻等优点,制备冰浆含冰率约40%~50%,但需要可靠的低温制冷/载冷介质的分离与回收系统。为保证系统高效且环保地运行,制冷/载冷介质需要具备易于分离、良好的热物性、稳定的化学性等特点。

2.2 真空法

真空法制冰浆根据三相点原理,海水经喷嘴喷出进入真空罐,随着罐内气体被抽出,罐内压力急剧下降,海水沸点降低并在真空环境中发生闪蒸吸热,剩余海水温度降低,在真空罐底形成微小的冰晶颗粒,从而形成冰浆^[27],含冰率约为20%~100%,其系统图如图5所示。

2.3 机械刮削法

机械刮削法是采用机械式挤压、切削、刮削等方法,将冰晶从传热壁面分离,后与液态溶液混合形成

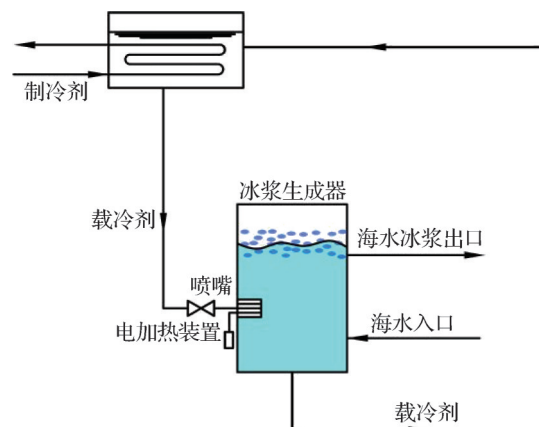


图4 直接接触法制冰技术

Fig.4 The direct contact method ice-making technology

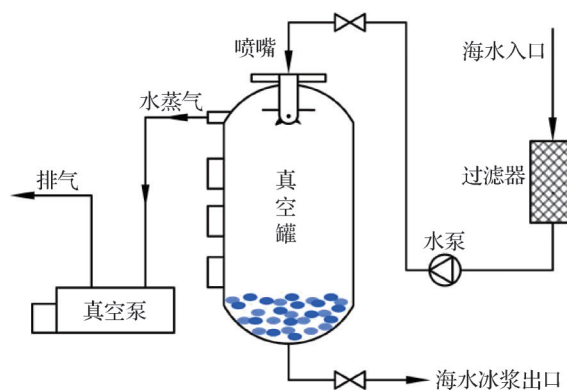


图5 真空法制冰技术

Fig.5 The vacuum method ice-making technology

冰浆的制备方法,含冰率约为30%~60%,如图6所示。产生冰浆的刮削式冰浆生成器是该系统的重要部件,直接影响系统性能,因其结构简单、性能稳定,成为早期得到商业应用的制冰方式^[28]。

2.4 流化床法

类似上述机械刮削法的外力作用,流化床法取冰浆是依靠冰浆发生器中处于流化状态的颗粒对

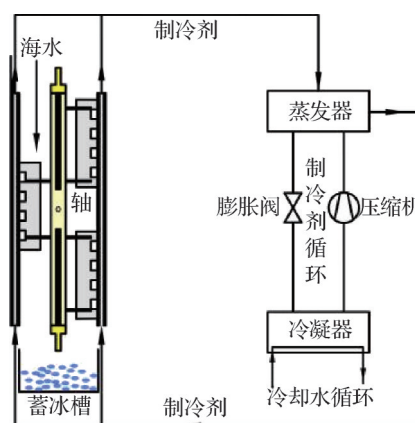


图6 机械刮削法制冰技术^[29]

Fig.6 The mechanical scraping method ice-making technology^[29]

传热壁面产生的碰撞作用,将传热壁面处微小冰晶分离形成冰浆^[30],其流程如图7所示。

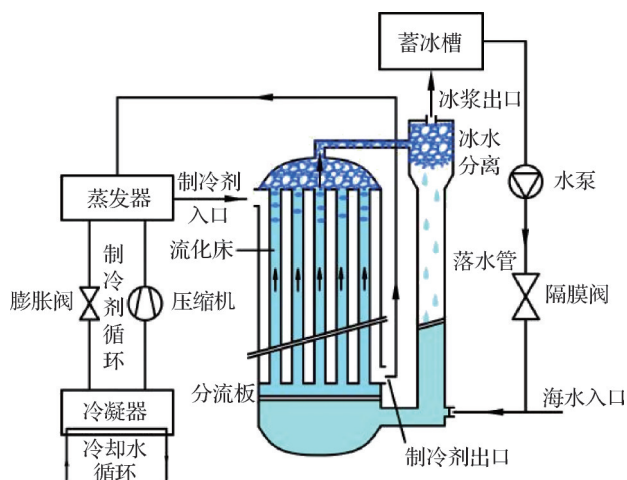


图7 流化床制冰技术

Fig.7 The fluidized bed ice-making technology

2.5 过冷水法

过冷水法制冰原理是利用海水与低温制冷/载冷介质不断换热,形成低于海水冰点温度的液态过冷海水,但海水处于过冷态时并不稳定,受到外部条件扰动即可解除其过冷态,形成海水冰浆^[31],制备含冰率可达70%,如图8所示。

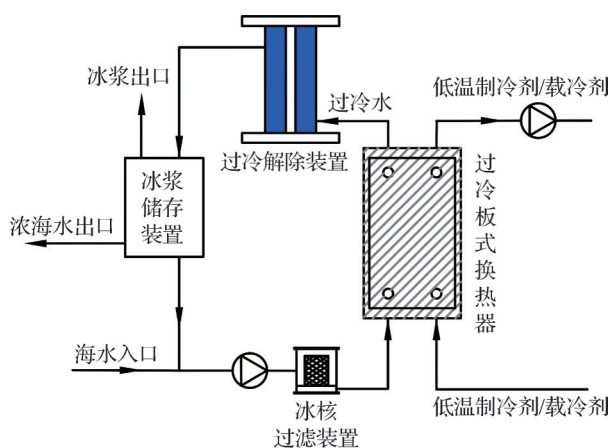


图8 过冷水法制冰技术

Fig.8 The supercooling water dynamic ice-making technology

针对不同制备技术,其工艺特点如表2所示。目前应用较广的机械刮削法(常用于小型渔船)无冰堵风险;而过冷水法虽因超声波的引入显著改善了结晶性能,备受关注,但冰堵仍是亟待解决的关键问题。

3 海水冰浆研究进展

3.1 海水冰浆基础研究进展

海水冰浆的基础物理化学性质是决定其制备工

表2 海水冰浆制备方法特点

Tab.2 Characteristics for preparation method of seawater ice slurry

制备方式	特点
直接接触法	传热效率极高、含冰率高;制冷剂喷嘴易堵、适配海水制冷剂
真空法	传热效率高且含冰率高;真空度难以保持、系统复杂成本高、喷嘴易结冰而发生冰堵
机械刮削法	制备结构简单、无冰堵风险;刮板损耗大、需耐腐蚀、造价高
流化床法	传热效率高;管内存在冰堵风险、控制难度大
过冷水法	系统构成简单且效率高;冰堵风险高、控制难度大

艺、储存输运及换热应用效果的关键参数,直接制约着系统的流动传热特性与储能效率。与常规单相流体类似,海水冰浆的密度、导热系数、比定压热容及动力黏度等热物性参数,显著影响相变过程中的传热速率与储能密度;同时,其相变温度与相变潜热也是评估蓄冷/释能效率的核心指标。由于海水冰浆属于液-固两相流体,其热物性随固相含冰率的变化呈非线性动态变化。目前,针对海水冰浆物性的直接研究相对较少,现有文献常采用混合模型,基于固液相占比计算等效物性参数。在既往研究中,学者多采用氯化钠(NaCl)溶液的热物性来近似替代海水^[32],不同NaCl质量分数下的物性参数如表3所示。

然而,实际海水的组分远比NaCl溶液复杂,且海水盐度受海域及取水深度影响波动较大。为此,相关标准将海水盐度(S)为35 g/kg的海水定义为标准海水,其主要化学成分如表4所示^[33]。受复杂组分影响,海水的密度、动力黏度、比定压热容及导热系数随盐度的变化规律较为复杂,相关物性图谱已在文献中给出^[34]。此外,不同学者基于实验数据提出了不同海水盐度下海水凝固点温度(T_p)的计算关联式,如表5所示。对比分析表明,海水的密度、黏度及比热容与同质量分数NaCl溶液具有较好的一致性,但海水的导热系数略高于文献中NaCl溶液数据。在实际工程计算中海水冰浆的物性参数通常可根据含冰率,结合海水与冰的物性图表进行加权计算,物性引起误差较小。此外,值得注意的是,有学者在使用过冷法制备冰浆时发现,随着过冷度的升高,过冷溶液的稳定性显著下降。当过冷度为2℃,海水的稳定性远低于NaCl溶液的稳定性,表明使用NaCl溶液代替海水进行实验研究将引起显著误差^[35],因此对于海水冰浆成核机理及冷冻淡化效果等方面的实验研究应慎重选择NaCl溶液进行代替。

在微观形态方面,海水冰浆中冰晶颗粒的粒径

主要分布在20~200 μm之间。研究表明,采用超声波辅助的过冷法制备冰浆,可显著降低成核所需的过冷度,且制得的冰晶颗粒更加细小均匀,流变特性更优^[36]。

表 3 NaCl 溶液物性^[32-33]
Tab.3 Physical properties of sodium chloride solution^[32-33]

NaCl 质量分数 $w/\%$	密度	比定压热容	动力黏度	导热系数	凝固点
	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$c_p/[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$	$\mu/(\text{mPa}\cdot\text{s})$	$\lambda/[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	$T_p/^\circ\text{C}$
2.0	1 015.9	4.02	1.85	0.570 4	-1.2
3.5	1 028.0	3.99	1.91	0.569 6	-2.1
5.0	1 040.0	3.90	1.97	0.568 5	-2.9
5.0	1 039.0	3.90	2.02	0.552 0	-3.0
7.88	1 061.0	3.77	2.34	0.548 0	-5.0
10.0	1 078.3	3.68	2.60	0.546 0	-6.5

表 4 标准海水成分组成
Tab.4 Composition of main components of standard seawater

溶质	质量占比/%
钠离子, Na^+	1.078 4
镁离子, Mg^{2+}	0.128 4
钙离子, Ca^{2+}	0.041 2
钾离子, K^+	0.039 9
硫酸盐, SO_4^{2-}	0.271 2
氯离子, Cl^-	1.935 3
其他微量溶质	0.005 6
水, H_2O	96.500 0

表 5 不同海水盐度范围海水凝固点温度^[33]
Tab.5 Seawater freezing point in different seawater salinity range^[33]

海水盐度范围	表达式
$4<S<40$	$T_p = -0.0575S + 1.710523S^{\frac{3}{2}} - 2.154996^{-4}S^2 - 7.53^{-4}p$
$10<S<60$	$T_p = -0.036 - 0.0499S - 0.000112S^2$
$15<S<40$	$T_p = -0.0137 - 0.05199S - 0.00007225S^2$

注: S 为海水盐度, g/kg ; p 为压力, 10 kPa 。

3. 2 海水冰浆应用研究进展

3. 2. 1 冷冻冷藏

相较于淡水冰浆,海水冰浆凭借其更低的冰点、更高的传热效率及更低的物理损坏率,被视为一种更为理想的冷冻冷藏介质^[37]。目前,海水或 NaCl 溶液为原液的含盐冰浆在冷藏保鲜领域的应用已引起国内外学者的广泛关注,相关研究成果如表 6 所示。针对高附加值海产品,海水冰浆含有的低浓度盐分还能有效维持水产品细胞渗透压平衡,从而保持组

织结构完整并减少汁液流失,显著延长货架期^[3,8]。V. Losada 等^[38]早期发现远洋鱼类捕捞后的保鲜过程,对于冷冻前的预处理环节海水冰浆保鲜效果显著优于片冰。此外,相关实验同样证实海水冰浆相比片冰可提升海产品保鲜效果与时长^[39-40]。在对比碎冰、淡水冰浆与海水冰浆 3 种冷藏介质的实验中,海水冰浆组的海产品 pH 值维持在更理想范围,且总挥发性盐基氮和菌落总数均显著降低^[41]。此外,将电子束辐照技术与海水冰浆耦合,也被证明能显著改善对虾的保鲜品质^[42]。针对海水冰浆保鲜中食品摄取盐分的问题,研究表明冰浆盐浓度控制在 2%~3% 的区间内^[43],既能确保最大化保鲜效果,又可避免过量盐分侵入。

整体上,针对海水冰浆保鲜效果的评价体系已趋于完善,涵盖了微生物指标、理化特性及感官品质等多维度的主客观评价参数。现有研究表明,应用海水冰浆虽能有效维持保鲜食品品质,但为进一步强化食品安全保障并突破保鲜极限,将海水冰浆与各类杀菌技术进行结合应用,将是未来高附加值食品保鲜领域极具潜力的发展方向。

3. 2. 2 海水淡化

在冷冻法海水淡化应用中,特定盐度的海水经过冷冻处理后,会经历成核、结晶及晶体生长过程,同时海水盐分会被排出至剩余液相,部分盐分形成盐包被裹挟在冰晶之间,最终形成由低盐浓度固态冰晶与高盐浓度海水组成的海水冰浆^[47]。随着持续的相变过程,液态海水的盐浓度会升高,对应的海水冰点会逐步下降;固态冰晶融化后相较海水初始盐浓度会得到有效降低,达到脱盐效果,但大量固态冰晶的表面和内部会附着夹带细小盐包^[48]。受此影响,单次冻融循环的脱盐率极限为 64. 3%^[49]。为获

表6 含盐冰浆保鲜冷藏效果
Tab.6 Preservation efficacy of seawater ice slurry

保鲜产品	冰浆种类	冰浆温度/℃	保鲜时长/d	提升效果
大黄鱼 ^[44]	w=3.3% NaCl溶液+臭氧处理	-1.5	21	比片冰延长9天
养殖多宝鱼 ^[40]	S=33海水+臭氧处理	-1.5	21	—
竹荚鱼 ^[39]	S=33海水	-1.5	15	比片冰延长10天
海鲈鱼 ^[43]	S=35%海水	-3.2	25	—
比目鱼 ^[45]	w=23.15%±0.15% NaCl溶液	-21	90	相较空冷方式更优
南美对虾 ^[46]	w=3.5% NaCl溶液+臭氧处理	-2.5	7	—
沙丁鱼 ^[38]	S=33海水	-1.5	60	比片冰延长1个月

得高脱盐率的淡化水,冷冻法生成的冰浆需经过固液分离、洗涤等后处理工序。研究发现,采用离心分离—发汗洗涤—二次离心分离的组合工艺,可显著去除盐分,脱盐率提升至95.05%^[13],但发汗工艺的引入会带来因融化引起的能耗增加,可通过优化工艺将融化热进行回收,提高系统整体性能。此外,利用间接式冷冻淡化技术(如动态过冷水法)制备冰浆,经重力或离心力分离,产水盐度可满足0.05%的饮用水标准^[50]。现有冷冻法单位能耗介于1~140 kW·h/m³之间^[12],与传统反渗透海水淡化技术(0.3~4 kW·h/m³)和多效蒸馏技术(5.7~9.0 kW·h/m³)的能耗水平相比,冷冻法在能耗方面表现出一定的节能潜力,但尚不足以支撑其实现产业化应用。

冷冻法海水淡化凭借低能耗潜力、缓蚀及抗结垢等显著优势备受关注。然而,传统工艺高度依赖蒸汽压缩制冷循环维持低温相变环境,高品位电能的消耗导致系统运行能效受限,制约了其大规模工程应用。为突破能耗瓶颈,实现淡化过程的低碳高效运行,将海水冰浆制备与多元清洁能源深度耦合已成为当前研究热点:一方面,利用液化天然气(liquefied natural gas, LNG)释放的冷能作为冷源,实现能源的梯级利用^[51];另一方面,利用海上风电与光伏等可再生能源驱动系统运行^[52]。因此,多能互补模式不仅降低了制冰成本,还解决了可再生能源的消纳与储能难题,是提升冷冻淡化技术经济竞争力并推动其产业化的关键路径。

3.2.3 海水源冰浆热泵

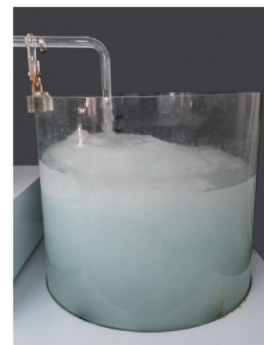
海水源热泵系统凭借对可再生海洋能的高效利用及较高的系统能效,在沿海城市供冷与供热领域发挥着重要作用。实际运行中系统COP在供冷工况下介于3~6之间,在供热工况下则处于2~4的区间。从实际工程应用历程来看,该技术早期主要推广于北欧等发达国家或地区,随后逐渐扩展至中国等亚洲国家^[22]。工程实践表明,在供热模式下,由于海水

取水温度常接近冰点,系统面临显著的结冰风险。为解决海水源热泵的结冰问题,可将开式/闭式系统产生密实的冰层转化为制备流动性良好的海水冰浆。基于过冷法构建的新型海水源冰浆热泵系统(图9),是目前与海水源热泵适配性最强的技术路线。该系统通过主动破除海水的过冷状态,诱导其发生相变形成固液两相混合的冰浆^[31]。这一技术革新不仅有效规避了海水源热泵系统冰堵风险,显著提升了系统的运行可靠性,还实现了对海水相变潜热的高效提取,兼顾了环保效益与经济性^[53]。

虽然海水源冰浆热泵技术在运行稳定性及换热性能方面表现突出,为海洋热能的规模化利用奠定



(a) 海水源冰浆热泵系统



(b) 海水冰浆

图9 海水源冰浆热泵系统

Fig.9 Seawater source ice slurry heat pump system

了坚实基础,但目前该技术未实现广泛应用。现有的系统模型构建与运行性能优化尚有较大提升空间。未来,伴随工艺技术的迭代升级,亟需开展更为深入的工程化应用研究,以推动该技术的落地与推广。

4 海水冰浆存在问题与新型热点

4.1 现存问题

海水冰浆在“制备—储存—输运—利用”的全链条中,均面临系统经济性与稳定性的双重挑战。首先,海水的高腐蚀性导致海水预处理成本、设备造价及系统维护费用高昂^[35],但随着抗腐蚀材料的研发与工艺升级,这一系列问题将逐步缓解。其次,海水冰浆中冰晶粒径细小,系统控制复杂且冰堵风险高,严重限制了其产业化应用。此外,现有系统多局限于冷藏保鲜或海水淡化等单一场景,功能集成度低,缺乏与可再生能源的耦合及冷、热、淡水、盐的多维梯级利用规划。

针对全链条中的关键瓶颈——冰堵,其主要发生于制备与输运阶段,核心影响参数为含冰率。在制备阶段,高含冰率工况微小冰晶更易发生逃逸,若换热器温差过大,极易引发冰堵。对此,可通过优化设备结构、精准控制过冷度、合理设置固液分离、辅助再热融化或高盐度溶液消融等方式加以解决。在输运阶段,固液两相因密度差易发生分层,冰晶团聚进而导致冰堵。虽然海水中的钠、氯离子能抑制冰晶生长,使其粒径更小、表面更光滑,从而改善流动特性并降低团聚风险,但在高含冰率工况下,输运冰堵隐患依然存在。为此,可通过优化输运速度、在极限输运距离处进行固液搅拌混合、在风险点位实施消融等策略予以应对。

4.2 新型热点

随着可再生能源进入扩量提质的新阶段,其对国家能源安全、海洋强国等国家战略的支撑作用日益凸显。国家在“十五五”期间将持续加快近海海上风电建设,并大力推进深远海基地布局。然而,如何提升可再生能源非电利用规模并高效就地消纳可再生绿电,已成为提升能源供给效率的关键。为此,国家积极倡导海上可再生电力与海洋油气、海水淡化、海洋牧场及海底算力等业态的融合发展,探索建设“海上能源岛”,打造绿色能源综合开发新模式。

目前,受地理资源禀赋影响,海水冰浆作为蓄冷介质应用于沿海及深远海区域,可消纳沿海或海上丰富的可再生能源,通过构建“电转冰”等新型系统^[52],服务于远洋捕捞业冷藏保鲜,受到广泛关注。

此外,值得注意的是,前文提及的海水冰浆在单一应用场景下存在明显的局限性,难以支撑大规模的产业化应用。鉴于低温工况下管道的腐蚀速率与结垢程度均显著低于海水淡化等高温工况,未来有望探索海水冰浆的“水冷同输”模式,“水冷同输”模式的核心在于利用海水冰浆在低温输送过程中同时承载冷量与淡化原水的双重功能,构建一种冷-水联供的协同机制,以推动海水冰浆蓄冷与海水淡化技术的耦合应用,从而实现工程化突破与产业化发展。在此背景下,海水冰浆的角色正从单一的蓄冷介质,向集蓄冷储能、海水淡化、盐矿提取于一体的复合功能载体转变。面对深远海风光电消纳挑战,利用绿电制备流态海水冰浆,不仅能为百万吨级远洋渔船提供需求冷量^[54],更在经济性与碳减排效益上优于电力并网与电制氢模式;若结合电池储能,还可有效降低弃风率并提升电池效率^[52]。

结合海水淡化与蓄冷技术的成熟应用,并伴随海水提钾、提溴工艺升级和提铀技术的突破,海水冰浆的新型研究热点正加速向海水资源综合利用领域拓展。通过多级制备工艺,海水冰浆可同步实现海水淡化、渔业保鲜及区域供热(冷),并副产浓缩卤水以利于海洋盐矿提取。在场景适配方面,针对深远海绿电富集区,海水冰浆可作为绿电消纳的重要载体服务于“海上能源岛”,重点满足海底算力中心及远洋渔业的大规模冷能需求,兼顾海上淡水供应与海洋盐矿提取;针对近海区域,需综合权衡电力外送与就地制冰消纳的效益,以精准匹配沿海绿电供给与城市用能需求;而在LNG冷能充裕的沿海港口,应优先就地梯级利用冷能制备海水冰浆,以满足零碳园区工业、数据中心及冷链物流基地的冷能需求,并兼顾城市淡水与工业用水供应以及海洋盐矿提取。未来,随着多学科核心技术的突破与新型产业链的构建,应聚焦提升系统稳定性、强化工艺集成与促进新兴产业对接,推动海水冰浆技术的规模化应用,为海洋能源的高效综合利用提供具有广阔应用潜力的解决方案。

5 总结

本文系统梳理了海水冰浆的多元化应用场景及其制备工艺,重点阐述了在冷冻冷藏、海水淡化及海水源热泵等领域的最新研究进展。通过深入分析海水冰浆的基础热物性特征,进一步剖析了当前技术利用中面临的关键问题与制约因素。在此基础上,结合近海与深远海差异化的能源禀赋,前瞻性地提出了海水冰浆的综合利用新模式,旨在为未来海洋

能源的高效转化与多能互补提供理论依据与技术参考。

本文受天津市科技重大专项与工程计划课题(24ZXTKSN0040)资助。(The project was supported by Tianjin Science and Technology Planning Project (No. 24ZXTKSN0040).)

参考文献

- [1] Yu Sirui, Song Mengjie, Li Xianting, et al. A comprehensive review on cold energy storage: Research status and performance optimization of ice storage technology [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2026, 235: 116929.
- [2] Zhan Haoxiang, Yuan Xiaolei, Wang Yu, et al. Advances in ice thermal energy storage for low-carbon and flexible cooling systems [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2026, 239: 117124.
- [3] Zheng Peibo, Xie Jing, Lan Weiqing. An effective way to preserve aquatic products: slurry ice and its properties[J]. *Food Research International*, 2026, 229: 118516.
- [4] Zhou Zhijie, Zhang Guanhu, Lu Wei, et al. Review on high ice packing factor (IPF) ice slurry: Fabrication, characterization, flow characteristics and applications[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 81: 110378.
- [5] Wang Qian, Wang Yunfeng, Li Ming, et al. Ice slurry preparation methods and their applicability to fruit and vegetable precooling systems: a critical review [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2024, 157: 60–72.
- [6] Wang Jihong, Battaglia F, Wang Shugang, et al. Flow and heat transfer characteristics of ice slurry in typical components of cooling systems: a review[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 141: 922–939.
- [7] Kauffeld M, Gund S. Ice slurry-history, current technologies and future developments [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2019, 99: 264–271.
- [8] Kauffeld M, Wang M J, Goldstein V, et al. Ice slurry applications [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2010, 33(8): 1491–1505.
- [9] Qiu Yue, Song Jixuan, Zhang Baofang, et al. Energy-efficient chilling and storage of beef using slurry ice: Assessing of chilling efficiency and quality changes [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2025, 174: 127–137.
- [10] Yu Tao, Du Qun, Chen Mingbiao, et al. Research progress of mobile cold storage using ice slurry [J]. *Energy Storage and Saving*, 2023, 2(3): 503–512.
- [11] Sidqy R, Pamitran A S, Setiadi D A, et al. Seawater ice slurry for shrimp cooling using scraper blade ice slurry generator[C]//AIP Conference Proceedings, 2020, 2227: 020002.
- [12] Janajreh I, Zhang Hongtao, El Kadi K, et al. Freeze desalination: current research development and future prospects[J]. *Water Research*, 2023, 229: 119389.
- [13] Shishiny A M, Kader A M, Ahmed S, et al. An investigation of a proposed freezing desalination system integrating sweating effect and a centrifugal-based brine rejection technique [J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 353: 128390.
- [14] Yedmel M A, Nasser eddine A, Hoang H M, et al. Experimental study of the performance of a heat exchanger for a new desalination-cooling technique using ice slurry: a proof of concept [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 250: 123479.
- [15] Kalista B, Shin H, Cho J, et al. Current development and future prospect review of freeze desalination [J]. *Desalination*, 2018, 447: 167–181.
- [16] Xie Xingxiang, Chen Yangui, Dai Leyang, et al. A review of indirect freezing desalination: Key parameters, experimental research, and numerical modeling [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2025, 322: 101070.
- [17] Ayaz M, Namazi M A, Din M A U, et al. Sustainable seawater desalination: Current status, environmental implications and future expectations [J]. *Desalination*, 2022, 540: 116022.
- [18] Zheng Jinfu, Qin Qixiang, Yu Huili, et al. Structural parameter optimization of capillary heat exchanger for a novel seawater source heat pump system using subsea tunnel seepage seawater[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2026, 294: 130602.
- [19] Jia Xin, Chen Hu, Yang Yingxia, et al. Research on integrative optimization operation of seawater heat pump, photovoltaic, and cross-seasonal heat storage systems [J]. *Renewable Energy*, 2025, 246: 122864.
- [20] Su Chang, Madani H, Liu Hua, et al. Seawater heat pumps in China, a spatial analysis[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 203: 112240.
- [21] Wang Luhang, Wang Chunli, Xu Chunwen, et al. Techno-economic evaluation of a seawater source heat pump system with auxiliary heat source in cold region of China [J]. *Energy and Buildings*, 2024, 311: 114178.
- [22] Wang Luhang, Xu Chunwen, Wang Chunli, et al. Prospects and challenges of seawater source heat pump utilization in China: a systematic review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, 210: 115247.
- [23] Zheng Wandong, Ye Tianzhen, You Shijun, et al. The thermal performance of seawater-source heat pump systems in areas of severe cold during winter [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 90: 166–174.

- [24] Lan Wenchao, Liu Xi, Xie Meina, et al. Experimental analysis of freezing desalination using gravity and centrifugal methods with economic evaluation of coupled freezing desalination and ice storage system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 315: 118743.
- [25] Hamid M, Song Mengjie, Hadibi T, et al. Research progress and challenges in the preparation and application of ice-making technology [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, 223: 115996.
- [26] 王凌士, 张学军, 王晓蕾, 等. LNG冷能用于气体直接接触法制取冰浆研究[J]. *低温工程*, 2012(2): 26–30. (Wang Lingshi, Zhang Xuejun, Wang Xiaolei, et al. Study on ice slurry production by air direct contact method on basis of utilizing LNG cold energy [J]. *Cryogenics*, 2012 (2): 26–30.)
- [27] 孟欣宇, 张庆钢, 林华曦, 等. 冰浆技术及领域应用的研究进展[J]. *制冷*, 2024, 43(6): 62–69. (Meng Xinyu, Zhang Qinggang, Lin Huaxi, et al. Research progress of ice slurry technology and field application [J]. *Refrigeration*, 2024, 43(6): 62–69.)
- [28] 陈二雄, 宋文吉, 肖睿, 等. 连续型壁面刮削式制冰系统制冰性能研究[J]. *流体机械*, 2026, 54(3): 1–9. (Chen Erxiong, Song Wenji, Xiao Rui, et al. Research on the ice-making performance of continuous-type wall-scraping ice-making system [J]. *Fluid Machinery*, 2026, 54(3): 1–9.)
- [29] 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. (Liu Shengchun, Sun Zhili, Dai Baomin, et al. *Ice slurry technology and applications* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2017.)
- [30] 孙靖, 韩克鑫, 谢春刚, 等. 基于LNG冷能的液固流化床海水制冰淡化[J]. *现代化工*, 2020, 40(7): 197–201. (Sun Jing, Han Kexin, Xie Chungang, et al. Freezing desalination of seawater in liquid/solid fluidized bed by utilizing LNG cold energy [J]. *Modern Chemical Industry*, 2020, 40(7): 197–201.)
- [31] Yang Bin, Zhang Weiling, Zhou Minghao, et al. Experimental investigation on thermal performance of seawater source ice slurry heat pump system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 280: 128370.
- [32] Gao Penghui, Li Zhiyong, Yan Fuchun, et al. Study on flow and heat transfer characteristics of salt solution ice slurry [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2024, 159: 1–16.
- [33] Melinder A, Ignatowicz M. Properties of seawater with ice slurry use in focus [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2015, 52: 51–58.
- [34] Melinder Å. Properties and other aspects of aqueous solutions used for single phase and ice slurry applications [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2010, 33(8): 1506–1512.
- [35] Lan Wenchao, Liu Xi, Xie Meina, et al. Theoretical and experimental analysis of sea ice centrifugal desalination and supercooled water production for slurry ice [J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 352: 128272.
- [36] Wang Zhen, Li Baoguo, Luo Quanguan, et al. Research on energy saving of ultrasonic wave in the process of making sea-slurry ice [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 247: 114541.
- [37] Lyu Fei, Zhu Rongrong, Tang Wei, et al. Progress of ice slurry in food industry: application, production, heat and mass transfer [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, 57(2): 842–855.
- [38] Losada V, Barros-Velázquez J, Aubourg S P. Rancidity development in frozen pelagic fish: Influence of slurry ice as preliminary chilling treatment [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2007, 40(6): 991–999.
- [39] Losada V, Piñeiro C, Barros-Velázquez J, et al. Inhibition of chemical changes related to freshness loss during storage of horse mackerel (*Trachurus trachurus*) in slurry ice [J]. *Food Chemistry*, 2005, 93(4): 619–625.
- [40] Campos C A, Losada V, Rodríguez Ó, et al. Evaluation of an ozone – slurry ice combined refrigeration system for the storage of farmed turbot (*Psetta maxima*) [J]. *Food Chemistry*, 2006, 97(2): 223–230.
- [41] Liu Tianyu, Liu Jing, Wang Panpan, et al. Effect of slurry ice on quality characteristics and microbiota composition of Pacific white shrimp during refrigerated storage [J]. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2023, 14: 100792.
- [42] Liu Chang, Pan Yunyun, Li Yongyong, et al. The effect of electron beam irradiation combined with slurry ice on physicochemical parameters and bacterial communities of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during refrigerated storage [J]. *Food Control*, 2024, 158: 110264.
- [43] Ntzimani A, Angelakopoulos R, Semenovoglou I, et al. Slurry ice as an alternative cooling medium for fish harvesting and transportation: Study of the effect on seabass flesh quality and shelf life [J]. *Aquaculture and Fisheries*, 2023, 8(4): 385–392.
- [44] Zhao Yanan, Lan Weiqing, Shen Jinling, et al. Combining ozone and slurry ice treatment to prolong the shelf-life and quality of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) [J]. *Lwt*, 2022, 154: 112615.
- [45] Kwon G Y, Lee J B, Park H E, et al. Slurry ice freezing enhances quality retention in frozen flounder (*Paralichthys olivaceus*) during storage [J]. *Applied Food Research*,

- 2025, 5(2): 101327.
- [46] Zhao Yating, An Jun, Wang Yanbo, et al. Mechanistic insights into ozone-slurry ice synergy for preserving the quality of *Litopenaeus vannamei* during chilled storage[J]. Food Chemistry, 2026, 499: 147318.
- [47] Lan Wenchao, Liu Xi, Ye Kai, et al. Comprehensive thermodynamic and economic analysis of an LNG cold energy recovery system using organic Rankine cycle and freezing-centrifugal desalination for power and water cogeneration [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 461: 142677.
- [48] Yuan Han, Sun Kunyuan, Wang Kunwei, et al. Ice crystal growth in the freezing desalination process of binary water-NaCl system[J]. Desalination, 2020, 496: 114737.
- [49] Chen Jun, Wu Jianjian, Xu Jiafeng, et al. Experiments and insights of desalination by a freezing/thawing method at low subcooling [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2020, 28(12): 3011–3017.
- [50] Chen Dong, Zhang Chaosheng, Rong Hongwei, et al. Experimental study on seawater desalination through supercooled water dynamic ice making [J]. Desalination, 2020, 476: 114233.
- [51] Xie Chungang, Zhang Lingpin, Liu Yanhui, et al. A direct contact type ice generator for seawater freezing desalination using LNG cold energy [J]. Desalination, 2018, 435: 293–300.
- [52] Li Fuchao, Lin Wenye, Wang Jiaying, et al. Development and multi-objective optimization of a novel power-to-ice system for offshore renewable energy penetration [J]. Applied Thermal Engineering, 2026, 293: 130285.
- [53] 宋文吉, 黎福超, 陈明彪, 等. 过冷法海水冰浆制备系统能耗特性分析[J]. 新能源进展, 2023, 11(6): 491–498. (Song Wenji, Li Fuchao, Chen Mingbiao, et al. Energy consumption characteristics analysis of seawater ice slurry generation system using supercooling method [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2023, 11(6): 491–498.)
- [54] 黎福超, 陈明彪, 杜群, 等. 基于流态冰浆蓄冷的深远海风电就地消纳[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(12): 3730–3739. (Li Fuchao, Chen Mingbiao, Du Qun, et al. Research on in-situ remote offshore wind-power consumption based on ice-slurry cold storage [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(12): 3730–3739.)

通信作者简介

李先庭,男,教授,清华大学建筑学院,010-62785860, E-mail: xtingli@tsinghua.edu.cn。研究方向:节能高效的冷热设备与系统,室内空气环境的营造理论与方法。

About the corresponding author

Li Xianting, male, professor, School of Architecture, Tsinghua University, 86-10-62785860, E-mail: xtingli@tsinghua.edu.cn. Research fields: energy-efficient heating and cooling equipment and systems, theoretical foundations and methodologies for indoor air in built environment.