

离心和抽滤对高盐度海冰脱盐的影响

胡 涛

烟台大学土木工程学院, 山东 烟台

收稿日期: 2026年4月28日; 录用日期: 2026年5月25日; 发布日期: 2026年6月15日

摘 要

海水淡化过程中产生的浓海水(海水经淡化处理后被浓缩的部分)处理不当, 会对生态环境造成破坏。本研究通过对模拟浓海水进行处理, 研究了浓海水冻融过程中冰不同形态(整块冰、粉碎冰)及外部环境条件影响下对浓海水中TDS和盐度的影响。结果表明, 在 -20°C 下冷冻浓海水, 待结冰体积为40%时取出, 在前期融化过程中, 粉碎冰中TDS和盐度去除率优于自然融化融化(63.91%和68.49%)去除的效果, 去除率提高了8.34%和7.73%。离心融化中TDS和盐度的去除率优于抽滤融化(72.50%和76.58%), 且去除率比自然融化提高了12.28%和9.87%。两种融化方式对离子去除效率依次为粉碎-离心融化 > 粉碎-抽滤融化 > 自然冰融化。为冻融法海水淡化的应用提供数据支持。

关键词

浓海水, 离心融化, 抽滤融化, 粉碎

Effects of Centrifugation and Suction Filtration on the Desalination of High-Salinity Sea Ice

Tao Hu

School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai Shandong

Received: April 28, 2026; accepted: May 25, 2026; published: June 15, 2026

Abstract

Improper disposal of concentrated seawater (the concentrated portion produced during seawater desalination) can cause ecological damage. In this study, simulated concentrated seawater was treated to investigate the effects of different ice forms (intact ice, crushed ice) and external environmental conditions on the removal of total dissolved solids (TDS) and salinity during the freeze-

thaw process. The concentrated seawater was frozen at -20°C , and the ice was harvested when the ice volume reached 40%. During the early melting stage, the TDS and salinity removal rates from crushed ice were higher than those achieved by natural melting of intact ice (63.91% and 68.49%, respectively), with increases of 8.34% and 7.73%. The TDS and salinity removal rates obtained by centrifugal melting were superior to those obtained by suction filtration melting (72.50% and 76.58%, respectively), and they were 12.28% and 9.87% higher than those of natural melting. The ion removal efficiency of the different treatments followed the order: crushed ice-centrifugal melting > crushed ice-suction filtration melting > natural ice melting. This study provides data support for the application of freeze-thaw desalination.

Keywords

Concentrated Seawater, Centrifugal Melting, Suction Filtration Melting, Crushed Ice

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球范围内，海水淡化厂每天产生约 1.245 亿立方米的浓海水，这些浓海水被当作废物直接排放至海洋中[1]。排放的浓海水具有高盐度、高热量特点[3]。长期的直接排放使浓海水对近海生态环境产生严重影响[5]。浓海水中含有丰富的矿物质，妥善处理浓海水不仅能保护环境，还能回收浓海水中的资源。

冷冻浓缩作为新兴废水处理技术，可同步去除污染物并回收资源。该技术利用水的液-固相变，冰晶在单向传热表面以树枝状或柱状垂直生长，使溶质以盐胞或盐通道形式被截留，粘附力与表面张力导致杂质难以靠重力脱离[7]；而破碎、洗涤和循环等工序进一步增加了冷冻脱盐的难度[8]。尽管改变结冰条件可提升脱盐率和制冰率[9]-[12]，但效果并不显著。Beier 等[13]的研究则表明，海冰融化过程的脱盐效果优于冻结过程。

冰体内盐胞形态及盐通道连通性对除盐效率至关重要[14]。融化时，溶质通过逐渐连通的盐胞与盐通道迁出冰体[16]。自然融冰虽简单，但脱盐效果差、效率低[17]。振荡融化能使冰晶与盐水分离，微波融化利用选择性加热膨胀盐水并打开盐通道[18]。Tang 等人[19]将微波与离心结合取得了良好脱盐效果。然而，单一融化工艺的强化作用有限。离心融化利用离心力排出盐胞和盐通道中的盐水，并克服表面张力去除附着液[20][21]。Wei 等人[7]发现冰层厚度越小净化效果越好，但离心融化在促进盐胞融化和打开通道方面存在不足。抽滤融化通过真空抽吸和挤压活塞，以较少步骤改善产水水质[22]。在渐进冷冻技术中，冰体破碎可打破盐胞以促进盐分溶出[19]，但其促进效果尚不明确。

为此，本研究探索了在粉碎与两种融冰方式结合，将盐胞及盐通道暴露同时加速物质融出。并测量了一系列参数以融出效率(E)、去除率(R)和融出率(M)表示脱盐效果。并对比分析了不同融盐周期的脱盐效果。并进行了理论能耗计算，以期为高盐度海冰脱盐提供理论参考。

2. 材料和方法

2.1. 实验海水表征与制备

本研究使用的化学药剂为氯化钠(NaCl)，氯化钾(KCl)，氯化钙(CaCl_2)，六水氯化镁($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)，硝酸(HNO_3)，盐酸(HCl)，氧化镧(La_2O_3)均购自国药集团，硫酸钠(Na_2SO_4)购自科密欧，规格均为 AR。

模拟浓海水的配置：称取 41.66 g 的氯化钠、1.35 g 氯化钾、1.91 g 氯化钙、20.38 g 六水合氯化镁和 7.12 g 硫酸钠于 1 L 纯净水中充分搅拌溶解，混合均匀。

主要水质参数见表 1。

Table 1. Main parameters of concentrated seawater

表 1. 浓海水主要参数

水质参数	电导率	TDS	盐度	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
单位	ms/cm	g/l	‰	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L
含量	90.30	44.26	64.47	0.71	18.69	0.69	2.41	34.28	4.82

2.2. 实验装置

采用渐进式冷冻对浓海水进行冷冻处理，实验装置如图 1(a)所示。将玻璃反应器(直径 10 cm，高 25 cm)的四周和底部由内到外依次用保温棉和聚乙烯泡沫包裹，且缝隙用聚氨酯泡沫填缝剂填充，以确保结冰过程自上而下单向进行。实验冷源由可控低温冰箱(BC/BD-519 HEX, Haier, Qingdao, China)提供，其体积为 550 L，最低制冷温度可达-40℃，温度波动±0.2℃。

粉碎后的冰体如图 1(b)所示，实验所用的可调速过滤式离心机如图 1(c)所示，型号为 ZOT-YN-SG01，转速 0~2800 r/min 连续可调。抽滤装置主要包括藤原一级 550D 的真空泵、AMS2106 热式气体质量流量计和 SORFA 真空式过滤容器，如图 1(d)所示，其中真空泵抽气流量为 0~96 L/min，气体流量计范围为 0~100 L/min，真空过滤容器容积为 1000 ml。

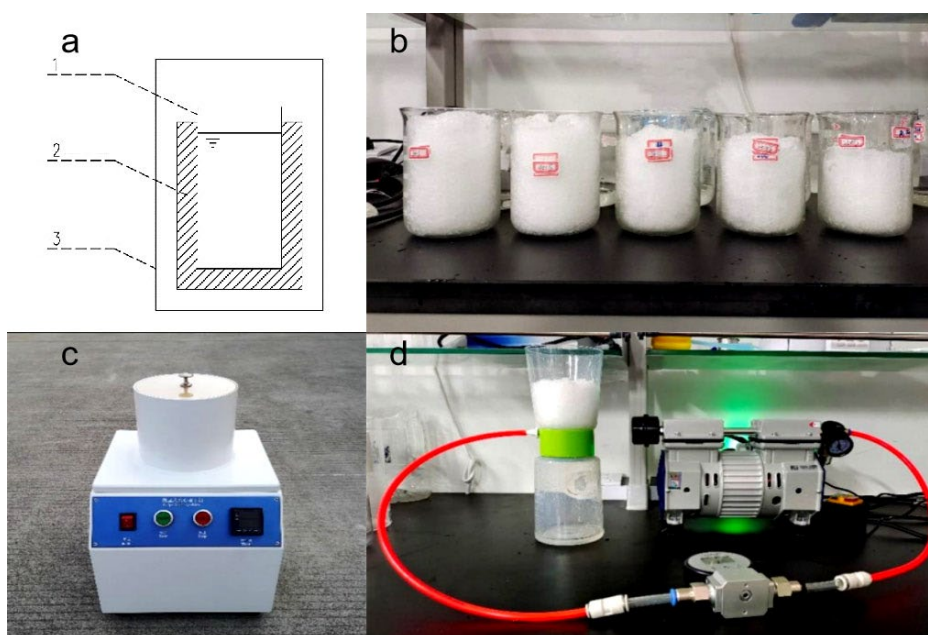


Figure 1. (a) 1-glass barrel; 2-EPS insulation material; 3-low temperature test chamber; (b) crushed ice body; (c) centrifuge; (d) filter machine

图 1. (a) 中 1-玻璃桶；2-EPS 保温材料；3-低温实验箱；(b) 粉碎后冰体；(c) 离心机；(d) 抽滤机

2.3. 实验方法

为了探究融冰过程中冰不同形态与不同外部环境影响下对浓海水中典型离子去除的影响，将实验分

为两部分：整块冰与粉碎冰融化实验、粉碎冰在抽滤或离心环境中融化实验。

2.3.1. 不同冰形态融化实验

为研究融冰过程中冰的不同形态融化方式对浓海水中典型离子去除的影响，设计如下实验：量 1 L 浓海水于反应器中并放入可控低温冰箱中在 4℃ 下预冷，满足先决条件后置于温度为 -20℃ 的低温试验箱中，待结冰体积为 40% 时取出，并冰水分离。将浓海水分为两组，一组冰体进行粉碎处理，另一组不做任何处理，并在室温(20℃)下融化。因为大部分盐分在融化早期溶出，所以将前期融化过程细化为六部分，每一部分为冰体积的 5%，共融化冰体体积的 30%，剩下的 70% 为一个整体，分别记为 R1、R2、R3、R4、R5、R6 和 RS，分别测量样品的体积和离子含量。

2.3.2. 不同融化条件下融化实验

将浓海水冷冻处理后的冰体进行粉碎处理，一组放在抽滤装置中进行低流量(20 L/min)的抽滤融化(粉碎 - 抽滤)，另一组放在过滤式离心机中进行低转速(500 r/min)的离心融化(粉碎 - 离心)。

2.4. 数据分析

为研究不同融化方式对浓海水中典型离子的融出效率，用融出效率 E 来表示 TDS (g/L) 和盐度(‰) 的融出效率：

$$E = \frac{m_w}{t_w} \quad (1)$$

式中， m_w 为融水中各离子的质量(mg)， t_w 为每次融水所需要的时间(min)。

为研究不同融化方式对浓海水中典型离子的融出效果，用融出率 M 来表示 TDS (g/L) 和盐度(‰) 的融出效果：

$$M = \frac{m_w}{m_i} \quad (2)$$

式中， m_w 为融水中各离子的质量(mg)， m_i 为冰体中各离子的质量(mg)。

为研究不同融化方式的去除效果，用去除率 R 来表示 TDS (g/L) 和盐度(‰) 去除效果：

$$R = \frac{s_c - s_i}{s_c} \quad (3)$$

式中， s_i 为融化后剩余冰体中各离子的浓度(mg/L)， s_c 为原水中各离子的质量(mg/L)。

3. 结果与讨论

3.1. 不同融冰方式对融出效率的影响

融出效率表示在一定时间内的脱盐速度，速度越快，效率越高，则在工艺流程中越节能。碎冰、粉碎 - 离心和粉碎 - 抽滤都能加速海冰中 TDS 和盐度的融出。考虑到海冰的去除速度，对两种融冰方式的融冰效率和每份融水的盐度及 TDS 做了对比分析(图 2)。

融冰过程中自然融冰效率缓慢上升，平均融出效率为 TDS: 0.074 (mg/min) 盐度: 0.108 (mg/min)。随着融化的进行在外力作用下融出效率比自然融冰下明显提高，与自然融冰相比，在 R1 中粉碎 - 离心融化 TDS 和盐度融化效率提高了 38.03 倍和 37.04 倍，粉碎 - 抽滤融化提高了 22.97 倍和 22.97 倍。将粉碎 - 离心融化与粉碎 - 抽滤融化对比，粉碎 - 离心融化在 R1~R4 中促进效果更好。粉碎 - 离心融化中 TDS 和盐度平均融出效率为 0.968 (mg/min) 和 1.437 (mg/min)，粉碎 - 抽滤融化中 TDS 和盐度平均融出效率为 0.481 (mg/min) 和 0.719 (mg/min)。结果表明粉碎 - 离心融化中 TDS 和盐度的平均融出效率是粉碎 - 抽滤

融化的 2.012 倍和 1.999 倍。上述数据表明粉碎 - 离心融化对融出效率有显著贡献。

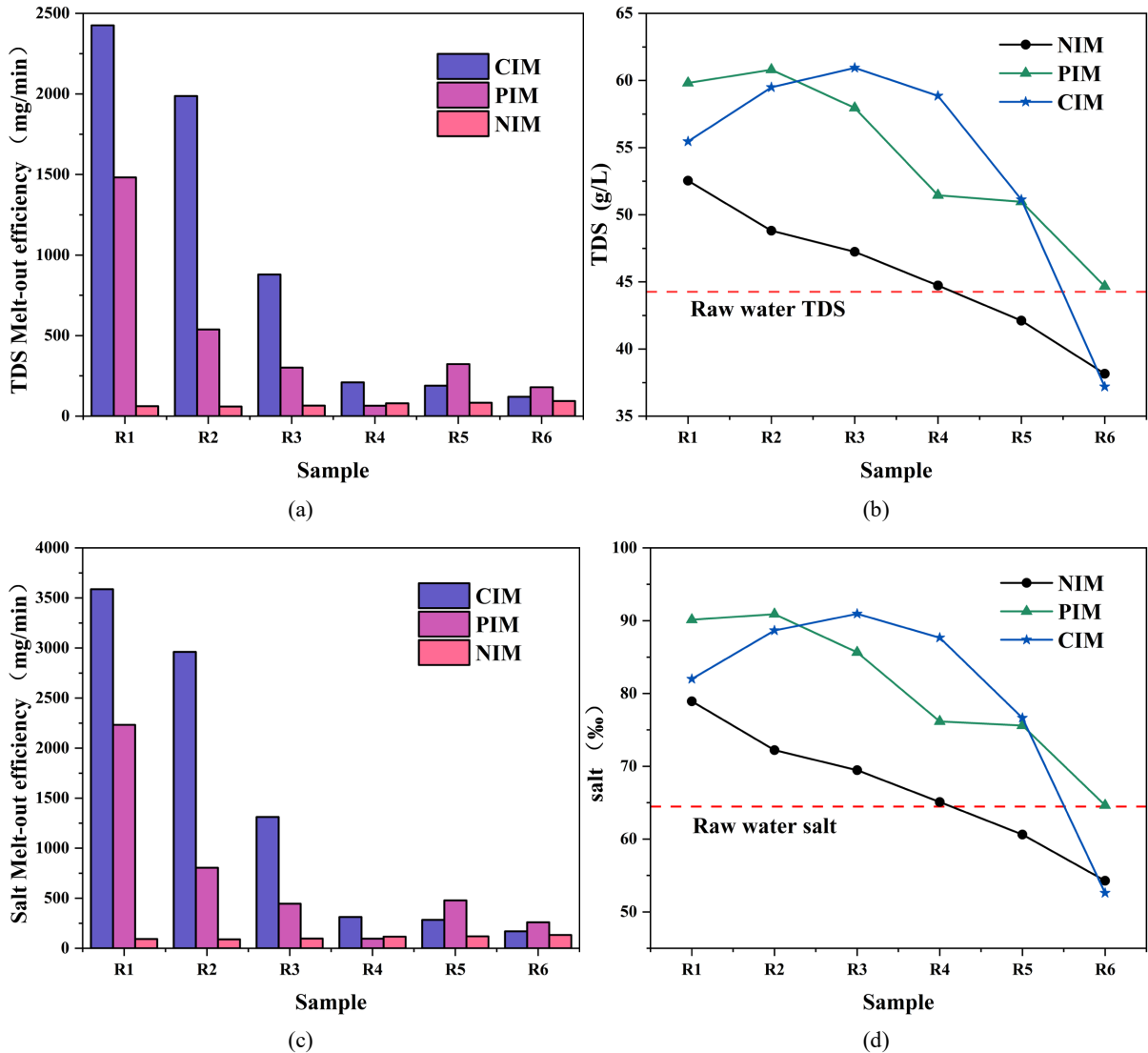


Figure 2. (a) and (b) represent the leaching efficiency of TDS and salinity; (c) and (d) represent the salinity and TDS per fraction of meltwater

图 2. (a)、(b) 表示 TDS 和盐度的融出效率 (c)、(d) 每份融水的盐度及 TDS

在自然融化过程中，随着融化效率的下降，各份融水中 TDS 和盐度也逐渐降低。表明 TDS 和盐度在融冰前期优先融出。当融冰率为 5% (R1) 时，两种融冰方式的融出效率 12.65 (mg/min)、37.61 (mg/min)。为当融冰率为 15% (R3) 时，两种融冰方式融水 TDS 为 47.24 g/L、51.77 g/L，盐度分别为 69.46‰、77.03‰，均高于初始浓度(44.26 g/L, 64.47‰)。在粉碎 - 离心融化和粉碎 - 抽滤融化过程中，随着融化效率的下降，各份融水中 TDS 和盐度也逐渐降低。当融冰率为 5% (R1) 时，两种融冰方式的融出效率 492.56 (mg/min)、306.41 (mg/min)。为当融冰率为 25% (R5) 时，两种融冰方式融水 TDS 为 51.13 g/L、50.97 g/L，盐度分别为 76.64‰、75.6‰，均高于初始浓度(44.26 g/L, 64.47‰)。结果表明，粉碎、粉碎 - 离心和粉碎 - 抽滤都能增加 TDS 和盐度的融出效率，促进效果依次是粉碎 - 离心大于粉碎 - 抽滤大于粉碎，并在融化前期将大部分溶质融出。自然融冰从 R5 开始融出的 TDS 和盐度小于原始浓度，粉碎冰则一直高于原始浓度。

表明碎冰在前 30%融化中能持续促进物质融出，自然融化则在 R5 时停止促进效果。

随着冰层厚度的增加，浓缩物的迁移距离和阻力增大[7]。仅靠重力作用，物质的融出不仅缓慢而且低效。但是通过粉碎将冰体内部的盐胞和盐通道暴露在冰体表面，其中浓缩物质随着冰融水一起融出从而加速物质融出，明显减少了物质在迁移通道中停留与迁移的时间。而且冰粒粒径越小处理效果越好[19]。同时，部分冰块在粉碎过程中由于机械能转化为内能被融化以自由水形式滞留在碎冰缝隙中，在后续工艺流程中被优先融出。

3.2. 不同融冰方式对离子融出的影响

为了探讨两种融冰方式对海冰融出率和去除率的影响，绘制了两种融冰方式中 TDS 和盐度的去除率(图 3(a)、图 3(b))和融出率(图 3(c)、图 3(d))图。粉碎-离心融化和粉碎-抽滤融化中。粉碎-离心融化融出率先上升后下降，在融冰率为 15%(R3)时 TDS 和盐度融出率达到最大，为 12.73%和 13.55%，粉碎-抽滤融化在融冰率为 10%(R2)时 TDS 和盐度融出率达到最大，为 12.51%和 13.34%。再次证明海冰中 TDS 和盐度在融化早期优先融出。

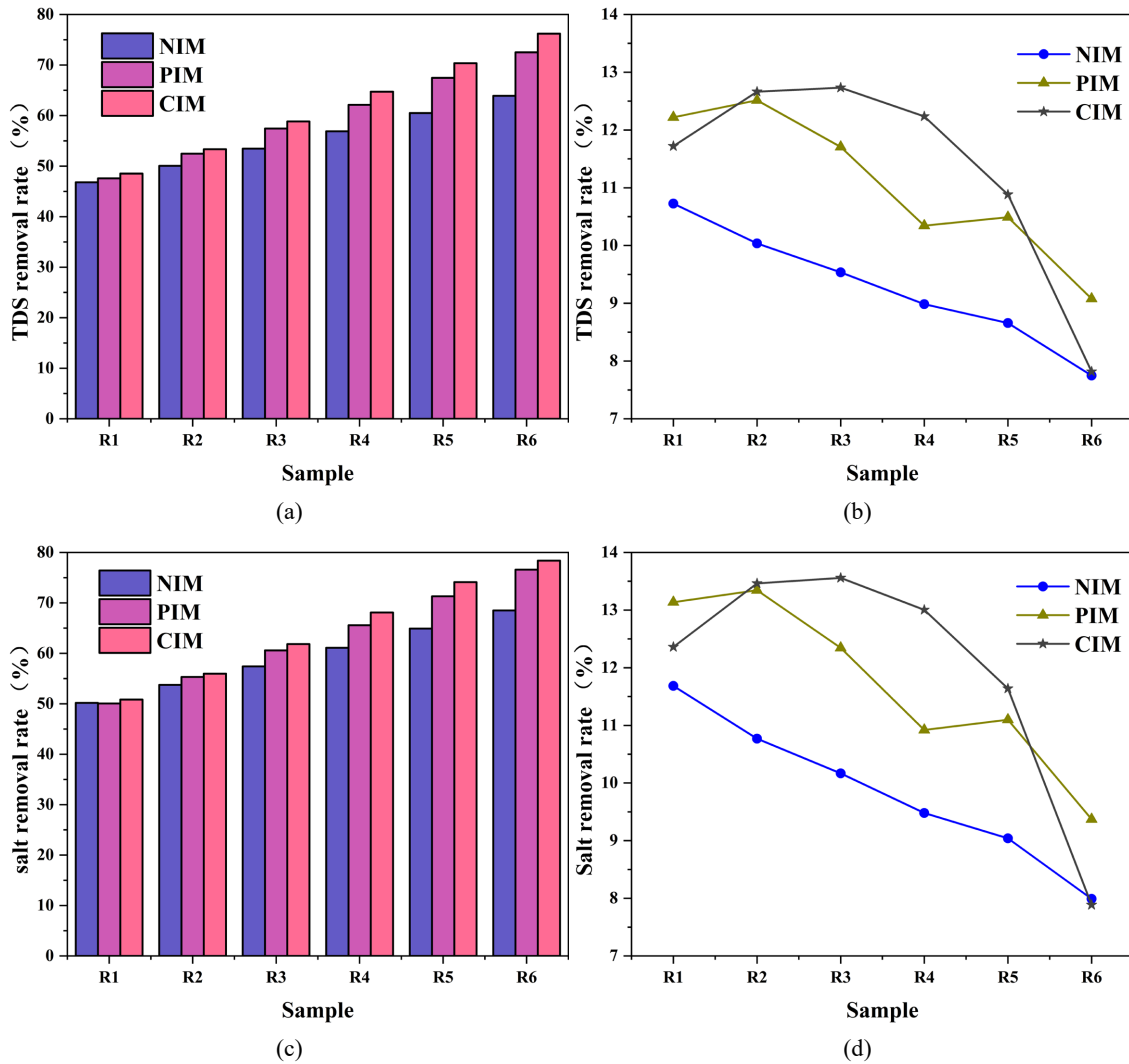


Figure 3. (a), (b) removal rates, (c), (d) melting rates
图 3. (a)、(b) 去除率, (c)、(d) 融出率

当融冰率为 5% (R1) 时, 自然融冰、粉碎 - 离心融化和粉碎 - 抽滤融化对 TDS 和盐度去除率分别为 46.80% 和 50.18%、48.53% 和 50.83%、47.57% 和 50.07%。当融冰率为 30% (R6) 时, 自然融冰、粉碎 - 离心融化和粉碎 - 抽滤融化对 TDS 和盐度去除率分别为 63.91% 和 68.50%、76.20% 和 78.36%、72.50% 和 76.57%, 粉碎 - 离心融化中 TDS 和盐度去除率比自然融化提高了 12.28% 和 9.87%。抽滤融化中 TDS 和盐度去除率比自然融化提高了 8.59% 和 8.08%。离心融化和抽滤融化都能更好促进物质融出, 且粉碎 - 离心融化的去除效果比抽滤融化更好。

粉碎虽然促进了物质融出, 但我们发现在粉碎冰的融化过程中由于温度较低, 静置一段时间后碎冰会重新冻结成较大缝隙的碎冰结合体从而限制物质融出。且盐袋中盐水有很大的表明张力[23]。外力的作用能改善这种情况。抽滤融化中前期较高的融出率是由于抽滤融化过程中的气体流动能产生泵吸作用, 使处于碎冰缝隙及暴露的盐胞和盐通道中因冰结构导致不易流出的融水流出冰体。同时由于气体不断穿过碎冰缝隙, 与碎冰和其中的溶质快速碰撞从而使温度快速上升[12], 加快了融冰速度。此外, 抽滤融化也能加速碎冰内部与环境的热量交换, 这是由于抽滤泵使气体高速穿过碎冰, 同时明显加快碎冰内部融化速度与物质融出。

碎冰中融水存在形式分为结合水和自由水两类。结合水包括毛细结合水, 间隙水和内部水[24]。自由水与冰晶相互作用力弱, 易于被离心力克服而分离, 因而前期融出率较高。后续融化过程中碎冰粒径越来越小, 冰的粘附强度与冰面积有关[25], 且树枝状冰晶逐渐消失, 其中的盐通道及盐胞逐渐暴露, 使得结合水被进一步去除。

4. 结论

通过室内模拟实验首先将模拟浓海冰粉碎后融化并与自然融化对比, 然后在粉碎基础上引入抽滤融化并与离心融化做对比。研究了粉碎 - 离心和粉碎 - 抽滤工艺对 TDS 和盐分融出的促进作用。结论归纳如下:

(1) 粉碎 - 离心和粉碎 - 抽滤均能在融冰前期将大部分 TDS 和盐分融出。当融冰率为 25% 时, 两种融冰方式融水 TDS 为 51.13 g/L、50.97 g/L, 盐度分别为 76.64‰、75.6‰, 均高于初始浓度(44.26 g/L、64.47‰)。

(2) 粉碎对浓海冰中 TDS 和盐度的融出效率有显著提升, 粉碎 - 离心和粉碎 - 抽滤能进一步提升此效果, 且粉碎 - 离心促进效果大于粉碎 - 抽滤。在融冰率 5% 时冰融水中 TDS 和盐度融出效率分别为自然融化的 38.03 倍和 37.04 倍。

(3) 粉碎 - 抽滤和粉碎 - 离心均提升了去除率, 且粉碎 - 离心促进作用优于粉碎 - 抽滤。当融冰率达到 30% 时, 粉碎 - 离心融冰 TDS 和盐度去除率达到 76.20% 和 78.36%, 比自然融冰提高了 12.28% 和 9.87%。

参考文献

- [1] Kumar, A., Naidu, G., Fukuda, H., Du, F., Vigneswaran, S., Drioli, E., *et al.* (2021) Metals Recovery from Seawater Desalination Brines: Technologies, Opportunities, and Challenges. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **9**, 7704-7712. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c00785>
- [2] Jeon, J. and Kim, M. (2019) CO₂ Storage and CaCO₃ Production Using Seawater and an Alkali Industrial By-Product. *Chemical Engineering Journal*, **378**, Article ID: 122180. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122180>
- [3] van Wyk, S., van der Ham, A.G.J. and Kersten, S.R.A. (2020) Analysis of the Energy Consumption of Supercritical Water Desalination (SCWD). *Desalination*, **474**, Article ID: 114189. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114189>
- [4] Miller, S., Shemer, H. and Semiat, R. (2015) Energy and Environmental Issues in Desalination. *Desalination*, **366**, 2-8. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.11.034>
- [5] Elsaid, K., Sayed, E.T., Abdelkareem, M.A., Baroutaji, A. and Olabi, A.G. (2020) Environmental Impact of Desalination Processes: Mitigation and Control Strategies. *Science of the Total Environment*, **740**, Article ID: 140125.

- <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140125>
- [6] Golden, K.M., Eicken, H., Heaton, A.L., Miner, J., Pringle, D.J. and Zhu, J. (2007) Thermal Evolution of Permeability and Microstructure in Sea Ice. *Geophysical Research Letters*, **34**, L16501. <https://doi.org/10.1029/2007gl030447>
- [7] Wei, J., Chen, P., Pan, Y., Fang, Z., Fu, T., Zhang, J., *et al.* (2023) Centrifugation Forced Ice-Concentrate Separation to Enhance Suspension Freezing Desalination Performance. *Desalination*, **566**, Article ID: 116919. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116919>
- [8] Najim, A. (2022) A Review of Advances in Freeze Desalination and Future Prospects. *npj Clean Water*, **5**, Article No. 15. <https://doi.org/10.1038/s41545-022-00158-1>
- [9] Barma, M.C., Peng, Z., Moghtaderi, B. and Doroodchi, E. (2021) Freeze Desalination of Drops of Saline Solutions. *Desalination*, **517**, Article ID: 115265. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115265>
- [10] Chen, D., Zhang, C., Rong, H., Wei, C. and Gou, S. (2020) Experimental Study on Seawater Desalination through Supercooled Water Dynamic Ice Making. *Desalination*, **476**, Article ID: 114233. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114233>
- [11] Liu, M., Wu, D., Tsolakis, A. and Gao, W. (2021) A Waste Cryogenic Energy Assisted Freshwater Generator for Marine Applications. *Desalination*, **500**, Article ID: 114898. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114898>
- [12] Mountadar, S., Guessous, M., Rich, A., Karmil, F.Z., Belghiti, H.E.A., Siniti, M., *et al.* (2019) Desalination of Spent Ion-Exchange Resin Regeneration Solutions by Suspension Freeze Crystallization. *Desalination*, **468**, Article ID: 114059. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.06.025>
- [13] Beier, N., Segó, D., Donahue, R. and Biggar, K. (2007) Laboratory Investigation on Freeze Separation of Saline Mine Waste Water. *Cold Regions Science and Technology*, **48**, 239-247. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2006.12.002>
- [14] Yuan, H., Sun, K., Wang, K., Zhang, J., Zhang, Z., Zhang, L., *et al.* (2020) Ice Crystal Growth in the Freezing Desalination Process of Binary Water-NACL System. *Desalination*, **496**, Article ID: 114737. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114737>
- [15] Zhang, Y., Zhao, C., Ren, F., Wang, X., Sun, X., Zou, Y., *et al.* (2023) Treatment of Compressed Leachate from Refuse Transfer Stations by Freeze-Melt Method. *Waste Management*, **164**, 181-190. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.04.015>
- [16] Luo, C., Chen, W. and Han, W. (2010) Experimental Study on Factors Affecting the Quality of Ice Crystal during the Freezing Concentration for the Brackish Water. *Desalination*, **260**, 231-238. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.04.018>
- [17] Zhang, Y., Wang, X., Zhao, T., Wang, X., Liu, Y. and Zhao, C. (2024) Promotional Effects of Ultrasound and Oscillation on Sea Ice Desalination. *Separation and Purification Technology*, **347**, Article ID: 127622. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127622>
- [18] Tang, W., Tao, J., Wang, J., Liu, C. and Zhang, H. (2018) Sea Ice Desalination under Gravity Using Microwave Heating. *Desalination*, **430**, 159-164. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.12.054>
- [19] Tang, W., Shi, P., Wang, J. and Zhang, H. (2019) Sea Ice Centrifugal Desalination Based on Microwave Heating. *Desalination*, **449**, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.10.007>
- [20] Erlbeck, L., Rädle, M., Nessel, R., Illner, F., Müller, W., Rudolph, K., *et al.* (2017) Investigation of the Depletion of Ions through Freeze Desalination. *Desalination*, **407**, 93-102. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.12.009>
- [21] Petzold, G. and Aguilera, J.M. (2013) Centrifugal Freeze Concentration. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, **20**, 253-258. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.05.010>
- [22] Rashad, M.I., Faiad, H.A., Ghonim, A.T., Ahmed, S. and Farahat, M.A. (2023) Single-Stage Freezing Desalination Study with Slurry Pressing Piston and Enhanced Vacuum for Brine Extraction. *Desalination*, **566**, Article ID: 116947. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116947>
- [23] Maykut, G.A. and Light, B. (1995) Refractive-Index Measurements in Freezing Sea-Ice and Sodium Chloride Brines. *Applied Optics*, **34**, 950-961. <https://doi.org/10.1364/ao.34.000950>
- [24] Wei, H., Gao, B., Ren, J., Li, A. and Yang, H. (2018) Coagulation/flocculation in Dewatering of Sludge: A Review. *Water Research*, **143**, 608-631. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.029>
- [25] Matsumoto, K. and Kobayashi, T. (2007) Fundamental Study on Adhesion of Ice to Cooling Solid Surface. *International Journal of Refrigeration*, **30**, 851-860. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2006.11.009>