

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-08

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20260520001

基于计算流体力学与群体平衡耦合模型的超声波促晶器冰晶演化规律研究

王海凡¹ 田博² 于宏鑫² 邵双全²

(1 华中科技大学中欧清洁与可再生能源学院 武汉 430074; 2 华中科技大学能源与动力工程学院 武汉 430074)

摘要 针对超声波促晶器内过冷水相变过程不明确的问题,基于欧拉-欧拉(Euler-Euler)多相流模型、种群平衡模型(population balance model, PBM)和用户自定义函数(user-defined function, UDF),建立 CFD-PBM 耦合模型(computational fluid dynamics-population balance model, CFD-PBM),模拟旋流式超声波促晶器中过冷水的流动、成核与冰晶生长过程。结果表明:出口含冰率随超声功率增加先升高后趋于稳定,部分高功率工况出现小幅下降;在 200~450 W 范围内,较优功率随流量增加而提高。超声频率升高会增强热效应并降低出口含冰率,在 20~40 kHz 区间内较低频率更有利于促晶。旋流结构可延长过冷水停留时间,强化冰水混合与过冷解除。综合出口含冰率、热损失和超声传递损耗,确定较优运行参数为功率 360 W、频率 25 kHz。研究结果可为动态蓄冰系统中促晶器设计提供参考。

关键词 超声波促晶;CFD-PBM 耦合模型;过冷水;冰晶演化;动态蓄冰

中图分类号: TB611.1;TB657.5

文献标识码: A

Ice-Crystal Evolution Mechanisms in Ultrasonic Crystallization Accelerator Based on CFD-PBM Coupled Models

Wang Haifan¹ Tian Bo² Yu Hongxin² Shao Shuangquan²

(1. China-EU Institute for Clean and Renewable Energy, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract To elucidate the phase-transition process of the supercooled water inside an ultrasonic crystallization accelerator, a coupled computational fluid dynamics-population balance model (CFD-PBM) is established by combining a Euler-Euler multiphase flow model, a population balance model (PBM), and a user-defined function. This model is adopted to numerically simulate the fluid flow, nucleation, and ice-crystal growth within a swirling ultrasonic crystallization accelerator. The simulation results reveal that the ice volume fraction at the outlet increases firstly and then stabilizes with the increasing ultrasonic power, accompanied by a slight decline under several high-power operational conditions. At 200–450 W, the optimal ultrasonic power increases with the flow rate. Increasing the ultrasonic frequency intensifies the thermal effect while reducing the volume fraction of ice at outlet: the lower frequencies between 20 and 40 kHz are more favorable for ice crystallization. The swirling structure prolongs the residence time of supercooled water, strengthens the ice-water mixing, and accelerates the supercooling elimination. By comprehensively considering the volume fraction of ice at outlet, heat loss, and ultrasonic transmission loss, the optimal operational parameters are determined to be an ultrasonic power of 360 W and a frequency of 25 kHz. The findings of this study can provide theoretical guidelines for the structural design of crystallization accelerators in dynamic ice thermal-storage systems.

Keywords ultrasonic nucleation; CFD-PBM coupled model; supercooled water; ice crystal evolution; dynamic ice storage

收稿日期:2026-05-20;修回日期:2026-06-22;录用日期:2026-07-14 责任编辑:王亚薇

基金项目:国家自然科学基金项目(52576012)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52576012).)



移动阅读

近年来,随着国家生产力和人民生活水平的提高,我国电力需求持续增长,碳排放量也随之不断增加。面对全球变暖与气候变化的挑战,我国积极推行“双碳”目标,加快调整能源结构,大力发展可再生能源发电。虽然可再生能源发电在降低碳排放方面具有显著作用^[1],但受到天气和日光的制约,存在“波动性”和“间歇性”等问题,容易从电力供给侧导致城市输配电能力与用户需求在时空上难以匹配^[2-3]。另一方面,随着我国城镇化进程加快,建筑能耗居高不下,建筑运行能耗占全国能源消费总量的22%,其中制冷通风能耗高达45%^[4]。而建筑空调系统的运行能耗具有显著的周期性与随机性,给电网带来了巨大的随机波动性负荷,进一步加剧了电力供需侧矛盾^[5-6]。因此,发展高效的储能调峰技术,成为提升电网稳定性与能源利用效率的关键路径之一。

冰蓄冷技术作为一种成熟的物理储能方式,可将电力负荷从高峰时段转移至夜间低谷,实现“削峰填谷”,有效缓解电网压力^[7-9]。在各类冰蓄冷系统中,动态蓄冰技术因传热效率高、释冷速率快而备受关注。其核心在于利用冰浆作为储能介质,实现冷量的高效存储与运输^[10-12]。冰浆的流动与传热特性受晶体浓度、流速、相变等多因素影响,其复杂的固液两相流特性成为研究重点。在蓄冰过程中,水的密度反转及自然对流对冰层生长具有显著影响。Chang Chun等^[13]通过实验与数值模拟发现,水在冷却过程中存在密度反转现象,导致蓄冰过程中上下表面冰层生长不均匀。此外,M. A. Dekhil等^[14]对比了纵向翅片与径向翅片对潜热蓄冰单元性能的影响,结果表明,纵向翅片在强化传热方面效果更优,可显著加快凝固与熔化速率。在冰浆应用方面,Lü Fei等^[15]系统综述了冰浆在食品冷链中的多种生产工艺及其在水产、畜禽、果蔬等领域的保鲜效果,为冰蓄冷技术在食品冷链中的推广提供了理论依据。这些研究为优化冰蓄冷系统设计、提高蓄冷与释冷效率提供了重要的理论支撑和实践指导。

在动态蓄冰系统中,如何实现稳定、高效的过冷解除过程是技术关键之一。常用的过冷解除方法包括机械冲击法与超声波法。机械冲击法虽然装置简单,但存在冰晶粒径不均、易在冲击面堆积板结等问题,影响系统长期稳定运行。相比之下,超声波促晶法利用声空化效应,可在水中诱发局部高压高温场,显著提升成核率,生成细密、均匀的冰晶,冰浆品质更优,更适用于高效蓄冷系统。目前,超声波促晶的研究多集中于微观机理与参数实验。Gao Penghui等^[16]通过液滴冻结实验分析了超声频率对成核自由

能的影响。A. Vancleef等^[17]在连续结晶器中研究了流速与超声作用时间对成核速率的影响。Hu Rui等^[18]则实验研究了超声功率与过冷度对冰晶生成的影响规律。

然而,由于实验手段难以捕捉冰晶在流动过程中的动态演化行为,超声波促晶的宏观过程仍不明确,制约了其在工程系统中的优化设计与稳定运行。此外,传统CFD(computational fluid dynamics,计算流体力学)方法在模拟冰晶演化方面存在局限,尚未形成能够准确描述超声作用下冰晶成核、生长与分布的综合模型。因此,本文基于固液成核理论与超声波空化机理,构建CFD-PBM(computational fluid dynamics-population balance model,CFD-PBM)耦合模型,对旋流式超声波促晶器内过冷水的流动与相变过程进行数值模拟,系统研究超声功率与频率对出口含冰率、冰晶粒径分布及温度场的影响,旨在揭示超声波促晶的宏观机制,为过冷水动态蓄冰系统中促晶器的优化设计提供理论依据。

1 问题描述与研究方法

1.1 控制方程

1.1.1 固液成核与生长模型

对于一个半径为 r 的球形晶核,其成核过程的总吉布斯自由能 ΔG 可表示为:

$$\Delta G = \Delta G_i + \Delta G_v = 4\pi r^2 \sigma + \frac{4\pi r^3 \Delta g}{3} \quad (1)$$

式中: ΔG 为晶核形成过程的总吉布斯自由能,J; ΔG_i 为固-液界面自由能,J; ΔG_v 为体积自由能,J; r 为晶核半径,m; σ 为固-液界面张力,N/m; Δg 为单位体积吉布斯自由能变化,J/m³。

在过冷条件下, $\sigma > 0$ 、 $\Delta g < 0$,因此 ΔG 存在最大值 ΔG_c ,即临界晶核形成自由能;其对应的晶核半径为临界半径 r_c 。令 ΔG 对 r 的一阶导数为0,并将所得临界半径代入式(1),可得式(2)~式(4):

$$\frac{d(\Delta G)}{dr} = 0 \quad (2)$$

$$r_c = \frac{2\sigma}{\Delta T \Delta s_f} \quad (3)$$

$$\Delta G_c = \frac{16\pi\sigma^3}{3(\Delta g)^2} \quad (4)$$

式中: ΔT 为过冷度,K; Δs_f 为单位体积凝固熵变,J/(m³·K)。

晶簇吉布斯总自由能 ΔG 随半径 r 变化如图1所示,过冷态中晶核半径 r 须超越临界值 r_c 方能自发生长并引发相变。均相成核速率是量化该过程的关键参数^[19]:

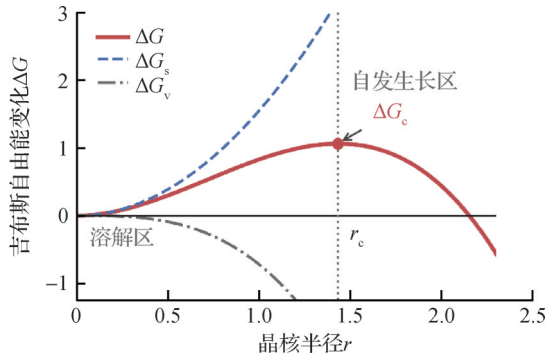
$$I = 10^{42} \exp \left[-\frac{\Delta G_c + \Delta G_d}{k_B T} \right] \quad (5)$$

式中: I 为均相成核速率, $\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$; ΔG_c 为临界晶核形成自由能, J ; ΔG_d 为固-液界面扩散活化能, J ; k_B 为玻耳兹曼常数, $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; T 为液相热力学温度, K 。

$$\exp \left[-\frac{\Delta G_d}{k_B T} \right] \approx 0.01 \quad (6)$$

因此,结合式(4)~式(6)有:

$$I = 10^{40} \exp \left[-\frac{16\pi\sigma^3}{3(\Delta s_f \Delta T)^2 k_B T} \right] \quad (7)$$



ΔG_s 晶簇表面自由能变化; ΔG_v 晶簇体积自由能变化。

图1 晶簇吉布斯总自由能 ΔG 随半径 r 变化

Fig.1 Variation of total Gibbs free energy ΔG with cluster radius r

基于 R. Hickling^[20] 的空化理论,并结合式(7)的成核速率模型,可由式(8)对超声促晶过程进行理论描述:

$$I = 10^{40} \exp \left[-\frac{16\pi\sigma^3}{3(\Delta s_f \Delta T)^2 k_B T} \right] \cdot \frac{4}{3} \pi R_p^3 t_p F(P_e, f) \quad (8)$$

式中: R_p 为塌缩气泡等效半径, m ; t_p 为高压区域持续时间, s ; P_e 为超声功率, W ; f 为超声频率, Hz 。

依据超声波空化理论,超声空化形成的局部高压区域可促进过冷水成核。

$$R_{\min}^3 + \frac{2\sigma_p R_{\min}^2}{p_0} - \frac{32\sigma_p^3}{27p_0(p_0 - p_A)} = 0 \quad (9)$$

$$R_{\max} = \frac{2(p_A - p_0)}{3\omega} \left(\frac{2}{\rho p_A} \right)^{\frac{1}{2}} \left[1 + \frac{2(p_A - p_0)}{3p_0} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

$$F(P_e, f) = \frac{1}{2} A \left[\frac{1}{R_{\min}^2} - \frac{1}{R_{\max}^2} \right] \quad (11)$$

式中: $R_{\min}$ 和 $R_{\max}$ 分别为空化气泡在声压压缩阶段的最小半径和稀疏阶段的最大半径, m ; σ_p 为气泡表面张力, N/m ; A 为与液体物性和空化核数量有关的经验系数, $\text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,水取 $A=10^{-15} \text{ m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; p_0 为流体静压, Pa ; p_A 为声压振幅, Pa ; ω 为超声波角频率, rad/s ,且 $\omega=2\pi f$; ρ 为过冷水密度, kg/m^3 ; $F(P_e, f)$ 为单位体积过冷水在功率 P_e 和频率 f 作用下单位时间内产生的有效塌缩气泡数, $\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

式(9)用于求解气泡受外界压力和表面张力共同作用时的压缩极限,式(10)用于估算气泡在超声稀疏阶段可达到的膨胀尺度。由式(10)可知, f 通过 $\omega=2\pi f$ 影响 $R_{\max}$,进而影响式(11)中的 $F(P_e, f)$ 。因此,虽然式(11)右端未直接出现 f ,频率对空化效应的影响已通过 $R_{\max}$ 间接体现^[21]。式(7)中的 I 表示仅由过冷度控制的均相成核速率,式(8)中的 I 表示考虑超声空化作用后的等效成核速率;式(8)的修正项用于表征空化气泡溃灭产生的局部高压、高温和微射流对成核能垒的降低作用。

1.1.2 种群平衡模型(PBM)

除成核过程外,超声促晶装置内同时发生着冰晶的生长与演化。CFD软件内置的 Euler-Euler 多相流模型难以精确刻画此类涉及相变与颗粒演化的复杂过程。相比之下,PBM能够对流动过程中因成核、生长、团聚及破碎等机制引起的颗粒数量、尺寸与分布变化进行有效描述^[22]。其控制方程可表示为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [n(V, t)] + \nabla \cdot [un(V, t)] + \nabla_v \cdot [G_v n(V, t)] = \\ \frac{1}{2} \int_0^V a(V - V', V') \cdot n(V - V', t) n(V', t) dV' - \\ \int_0^\infty a(V, V') n(V, t) n(V', t) dV' + \\ \int_{\Omega_0} pg(V') \beta \langle V | V' \rangle n(V', t) dV' - g(V) n(V, t) \end{aligned} \quad (12)$$

边界条件和初始条件为:

$$n(V, t) = n_v; \quad n(V = 0, t) G_v = n_0 \quad (13)$$

式中: V 和 V' 分别为当前颗粒体积和积分变量表示的母颗粒体积, m^3 ; t 为时间, s ; $n(V, t)$ 为以颗粒体积为内坐标的群体数密度函数, m^{-6} ; u 为速度矢量, m/s ; G_v 为体积生长速率, m^3/s ; $a(V - V', V')$ 为团聚核函数, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $g(V)$ 为破碎频率, s^{-1} ; p 为单个母颗粒破碎后产生的子颗粒数,无量纲; $\beta \langle V | V' \rangle$ 为子颗粒体积分布概率密度, m^{-3} ; Ω_0 为允许产生体积 V 子颗粒的母颗粒体积积分域; n_v 为初始群体数密度函数, m^{-6} ; n_0 为成核速率, $\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$,其值等于式(8)中的 I 。式(12)左端第3项为生长项,右端前2项为团聚项,后2项为破碎项。破碎主要由局部剪切、湍流扰动或颗粒碰撞引起;本文工况下未观察到明显破碎现象,后续主要分析成核与生长过程。体积生长速率 G_v 可通过颗粒等效半径 L 的径向生长速率 G 表示,关系如下:

$$G_v = 4\pi L^2 G \quad (14)$$

式中: L 为颗粒等效半径, m ; G 为颗粒径向生长速率, m/s 。对于冰晶生长率,根据 P. Pronk^[23] 提出的过冷度计算模型,有:

$$G = \frac{K_A}{3K_V \rho_s H_s} \cdot \Delta T \quad (15)$$

式中: K_A 和 K_V 分别为冰晶的面积因子与体积因子, 均为无量纲, 球形冰晶满足 $K_A/K_V=3$; h 为传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; ρ_s 为冰的密度, kg/m^3 ; H_s 为冰的相变潜热, J/kg ; ΔT 为过冷度, K 。

1.1.3 能量方程与超声热效应

为描述过冷水相变过程中的传热与潜热释放, 本文采用含相变源项的能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho h_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u h_m) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_L + S_q \quad (16)$$

式中: h_m 为混合相比焓, J/kg ; k 为导热系数, $W/(m \cdot K)$; S_L 为冰水相变潜热体积源项, W/m^3 ; S_q 为超声热效应体积源项, W/m^3 。

超声热效应的能量可占超声总输出的 10%~30%, 不可忽略。因此, 通过 UDF (用户自定义函数, user-defined function) 向流场中加入随传播深度变化的体积热源项, 其微元吸热量表示为:

$$\delta q = 2\alpha I_w dV \cdot dt \quad (17)$$

式中: dV 为声波作用区域内的流体微元体积, m^3 ; dt 为微元时间, s ; δq 为超声热效应在 dV 和 dt 内产生的热量, J ; α 为吸声系数, m^{-1} ; I_w 为超声强度, W/m^2 。

其中, 吸声系数 α 按下式计算:

$$\alpha = 0.26f^{1.1} \quad (18)$$

式中: f 为超声频率, kHz ; 经验系数 0.26 的单位为 $m^{-1} \cdot kHz^{-1.1}$, 使 α 的单位为 m^{-1} 。由式 (17) 可得超声热效应体积源项 $S_q = \delta q / (dV \cdot dt) = 2\alpha I_w$ 。

1.2 CFD-PBM 耦合框架

本文流场采用 Euler-Euler 多相流模型描述冰水两相运动, 相间动量交换主要通过曳力项体现。PBM 用于求解冰晶数量密度函数及粒径分布演化, 成核速率和生长速率分别由前述固液成核模型和冰晶生长模型给出。超声空化作用通过修正成核速率进入 PBM, 超声热效应通过体积热源项进入能量方程。为模拟促晶器内超声作用下过冷水的成核与生长过程, 并对比不同参数下冰晶体积分数及粒径的演变, 本研究通过 UDF 将前述推导的成核速率 I 、冰粒生长速度 G 和超声热源项 S_q 嵌入 Fluent 求解过程, 进而与 Euler-Euler 多相流模型进行耦合。耦合机制如图 2 所示: 首先, Euler-Euler 模型提供流场中冰晶相的体积分数、速度与温度分布; 随后, PBM 基于这些流场信息计算冰晶的成核、生长过程, 获得其粒径及分布; 最后, 将计算得到的索特平均直径与相间曳力修正系数反馈回 Euler-Euler 模型, 完成双向耦合的完整迭代循环。超声空化效应主要通过降低成核能

垒、提高成核速率进入 PBM 方程; 超声热效应则通过体积热源项进入能量方程, 改变局部温度场和过冷度, 进而影响冰晶生长速率及出口含冰率。

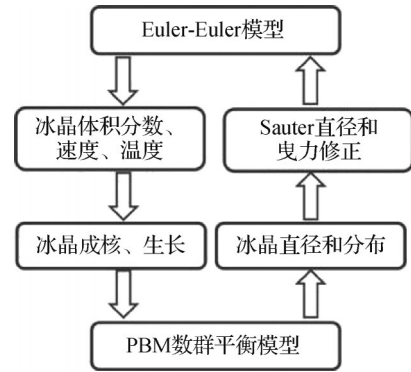


图2 CFD-PBM耦合原理

Fig.2 CFD-PBM coupling principle

2 网格独立性验证与模型验证

2.1 网格独立性验证

本研究以外置旋流式超声波促晶器为对象, 其几何结构如图3(a)所示, 罐体直径为 200 mm, 高度为 400 mm。促晶器主要由罐体、中心绕柱、切向入口、出口和底部超声振子区域组成。其中, 中心绕柱用于增强旋流并延长过冷水在装置内的停留时间, 切向入口用于形成旋转流动, 出口用于排出完成过冷解除后的冰浆, 底部超声振子区域用于施加超声空化作用。为重点研究超声促晶的核心物理过程, 排除无关因素干扰, 本文作如下简化假设: 促晶器外壁按绝热处理; 冰晶近似为非弹性光滑球形颗粒; 促晶器内温度和压力变化范围较小, 冰水两相按各向同性连续介质处理; 促晶器体积较小且底部超声振子均匀分布, 因此空化气泡在计算域内近似均匀分布。模型入口设置为给定流量入口和给定过冷水进口温度, 出口设置为压力出口, 壁面采用无滑移绝热边界条件, 初始条件设定为计算域内充满单相过冷水, 初始温度与入口温度一致。影响模型输出结果的主要参数包括入口流量、进口温度、超声功率、超声频率、吸声系数、成核速率和冰晶生长速率等。为保障模拟计算的精度与可靠性, 需进行网格独立性验证。针对结构较为规则的超声波促晶器模型, 采用四面体单元对其进行离散, 并在罐体进出口区域实施局部网格加密, 如图3(b)所示, 同时在绕柱壁面附近设置边界层以提高近壁区模拟精度。为验证网格无关性, 在相同工况下对网格数量由约 15 万递增至 65 万的 6 组模型进行模拟, 并监测出口温度变化。如图3(c)所示, 结果表明当网格数超过 46.8 万后, 出口温

度波动小于 $\pm 1\%$,故后续模拟均采用超过50万的网格数量以保证计算精度。

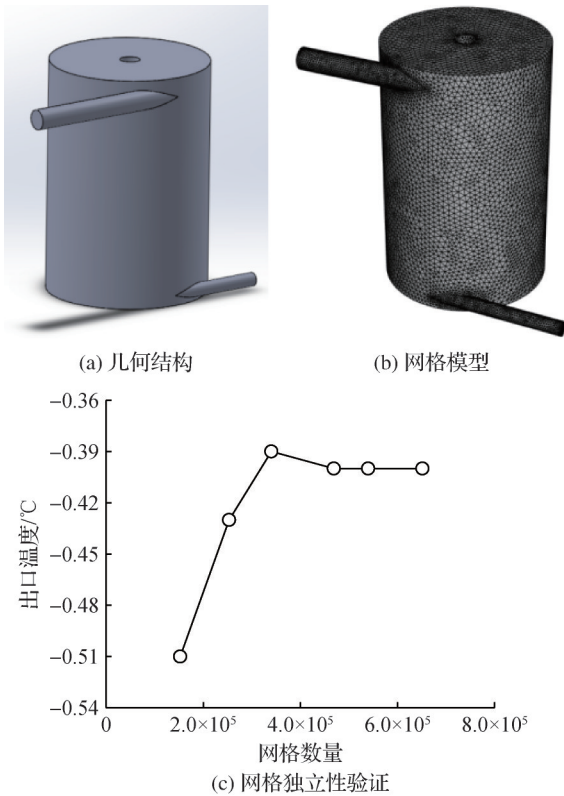


图3 超声波促晶器几何结构、网格模型与网格独立性验证
Fig.3 Geometric structure, mesh model, and mesh independence verification of the ultrasonic crystallization accelerator

2.2 模型验证

为验证模型可靠性,本文依据Hu Rui等^[18]实验工况进行模拟:促晶器直径为12.5 cm、高为39 cm,超声功率为900 W、频率为28 kHz,入口流量为2.363 m³/h,进口温度为-1.2~-0.7 °C。由于出口温度数值接近0 °C,相对误差对微小偏差较为敏感,因此本文主要采用绝对偏差评价模型验证结果,如图4所示。模拟值与实验值的绝对偏差均小于0.01 °C,且二者变化趋势一致,说明模型能够较好反映该工况下的温度响应规律。误差可能来自模型简化、超声能量等效处理及实验测量误差。

3 结果与讨论

3.1 超声参数对空化效应的影响研究

超声波的功率 P_e 和频率 f 是调控空化气泡尺寸与数量的关键参数,直接影响过冷水的促晶效果。模型验证表明,对于过冷度为1.1 °C的工况,180 W超声已可实现有效促晶。因此,本研究选取功率为200~450 W、频率为20~40 kHz的参数开展模拟。图5

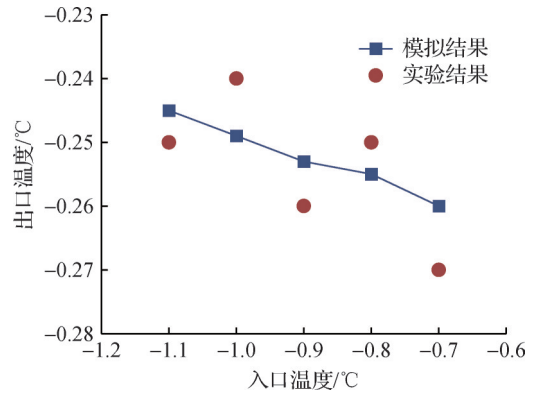


图4 不同进口温度下模拟结果与实验结果对比

Fig.4 Comparison between simulated and experimental results under different inlet temperatures

(a)和图5(b)所示为由式(9)~式(11)计算得到的超声参数对空化气泡的影响规律:随着功率增大或频率降低,空化气泡的最大半径和数量均增加,表明空化效应增强,气泡在更大半径下溃灭时释放更高的能量密度,从而提升促晶效率。如图5(c)所示,相比频率,功率对气泡数量的影响更为显著。因此,针对不同过冷水流量优选超声参数,对优化促晶过程具有重要意义。

3.2 超声功率对促晶器内过冷解除过程的影响

基于CFD-PBM耦合模拟,研究了超声功率200~450 W对促晶过程的影响,如图6所示。结果表明,高功率区间出口含冰率变化幅度较小,部分工况下降幅约为0.01%~0.03%。功率不足时空化作用弱,促晶不充分,功率过高则热效应导致部分冰晶融化。模拟确定最佳功率随流量增加而提高,2.4 m³/h时约300 W,3.6 m³/h时约450 W,说明需根据流量调节功率以维持适宜空化强度,从而确保过冷充分解除,提升蓄冰效率。当功率继续增大时,空化促晶作用增强所带来的含冰率提升与超声热效应引起的冰晶融化逐渐达到平衡,因此出口含冰率趋于稳定。

图7所示为相同流量下不同超声功率对促晶器内温度场与冰晶分布的影响。随着功率增大,平均温度升高,过冷解除更充分,局部含冰率上升,这与图6趋势一致。温度与含冰率呈中心高、边缘低,上部高、下部低的分布特征,旋流结构通过增强径向混合和延长过冷水停留时间,提高了过冷水与超声作用区域的接触程度;超声场则通过空化效应促进成核。二者协同作用,使过冷解除过程更加充分,促晶器内温度场和含冰率分布更加均匀。

超声功率的差异对冰晶生长行为及粒径分布具有显著影响。图8所示为超声功率分别为200、300、400、450 W时,促晶器内部冰晶的粒径分布。结果表

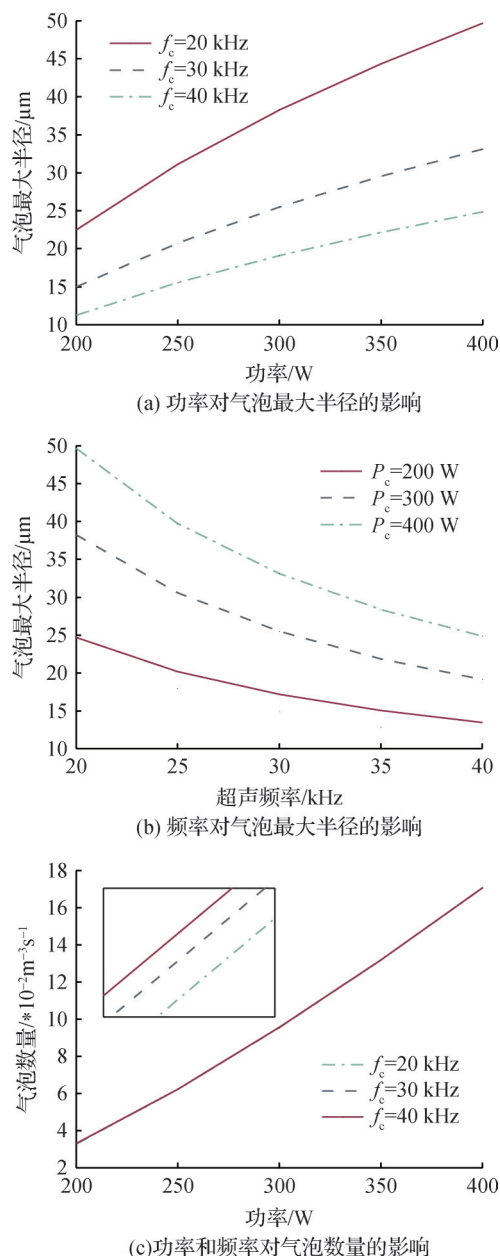


图5 超声参数对空化效应的影响

Fig.5 Effects of ultrasonic parameters on cavitation

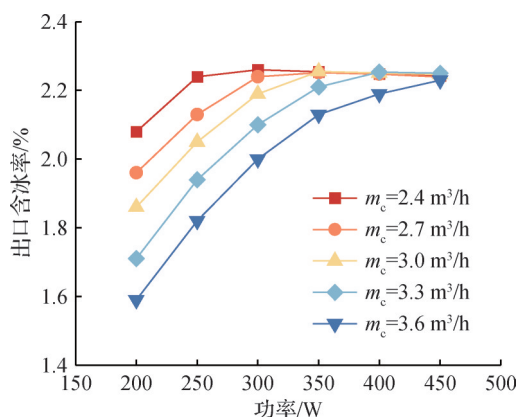

 图6 不同超声功率对出口含冰率的影响($f=25 \text{ kHz}$)

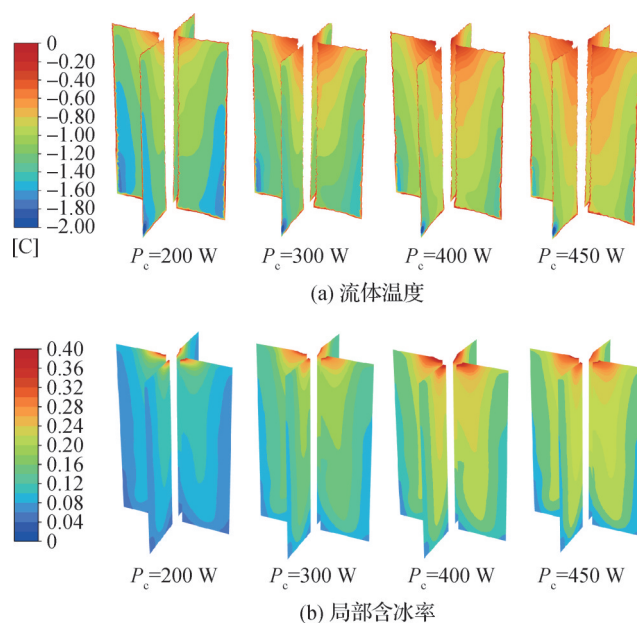
 Fig.6 Effect of ultrasonic power on outlet ice fraction ($f=25 \text{ kHz}$)


图7 不同超声功率下的流体温度与局部含冰率

Fig.7 Fluid temperature and local ice fraction under different ultrasonic powers

明,冰粒粒径主要集中在 $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ 区间内。随着超声功率升高,大粒径冰晶所占比例逐渐降低。依据 PBM 模拟结果,不同工况下冰晶平均粒径依次为 0.170 、 0.159 、 0.145 、 0.138 mm ,呈现逐步减小趋势。其原因在于:较高超声功率可强化空化效应,单位时间内形成更多初始微小冰晶。粒径在 $0 \sim 0.05 \text{ mm}$ 区间的冰晶占比分别为 3.17% 、 6.13% 、 10.61% 和 12.25% ,随功率提升明显增大。由此可见,在较高超声功率条件下,冰水相变过程释放的潜热更多用于空化效应以促进成核并生成大量细小冰晶,而较少用于过冷度驱动的冰晶长大过程。因此,更易形成结构细密的冰浆,不仅可提升冰浆的流动与换热性能,还能缓解冰浆储存过程中的板结问题,有助于实现高效、快速的释冷过程。

3.3 超声频率对促晶器内过冷解除过程的影响

图9所示为在超声功率 $P_c = 400 \text{ W}$ 时,不同入口流量下频率对出口含冰率的影响。模拟结果表明,选用 20 kHz 以上的超声频率即可满足促晶需求。在本研究设定的入口水温为 -1.9°C 、流量为 $2.4 \sim 3.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 条件下,当超声功率达到 350 W 时,促晶器均能实现良好的过冷解除效果,且在系统设计流量为 $3.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 时效果最优。因此,综合过冷解除效果、热损失及实际超声传递损耗3方面因素,最终确定选用功率为 360 W 、频率为 25 kHz 的超声波促晶器作为系统的过冷解除装置。但本文频率模拟范围为 $20 \sim 40 \text{ kHz}$,尚不能判断 20 kHz 以下是否存在更优频率。更低频率下的促晶效果还需结合换能器效率、声场

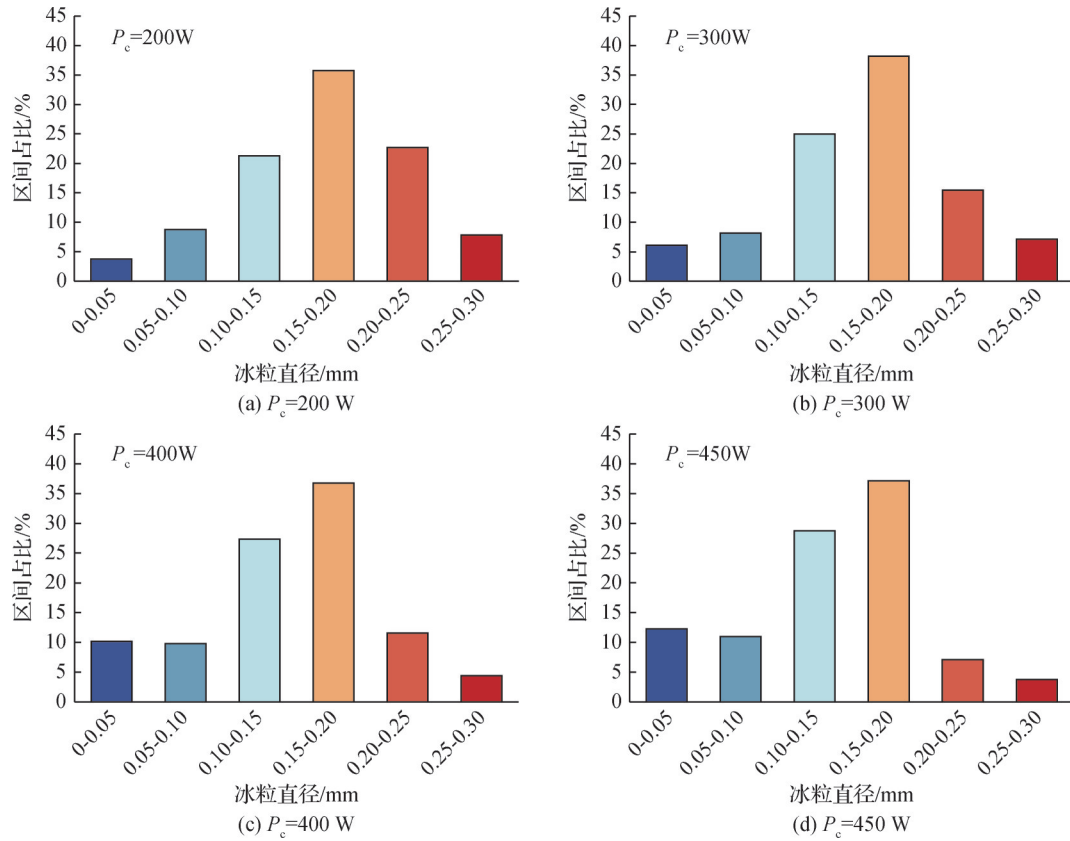
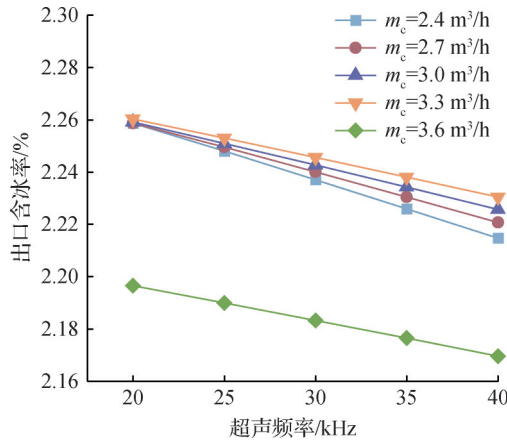


图8 不同超声功率下的冰晶粒径分布

Fig.8 Ice crystal size distribution under different ultrasonic powers

稳定性和实验验证进一步研究。

图9 不同超声频率对出口含冰率的影响($P_c=400\text{ W}$)Fig.9 Effect of ultrasonic frequency on outlet ice fraction
($P_c=400\text{ W}$)

4 结论

本文基于固液成核理论与超声空化机理,建立了CFD-PBM耦合模型,对旋流式超声波促晶器内过冷水的流动、成核及冰晶生长过程进行了数值模拟,系统研究了200~450 W的超声功率与20~40 kHz的频率对出口含冰率、冰晶粒径分布及温度场的影响。

得到结论如下:

1) 超声功率对促晶效果具有显著影响。出口含冰率随功率的增大呈先上升后趋于稳定的趋势,部分高功率工况出现约0.01%~0.03%的小幅下降。在300~400 W区间内达到较优值。功率过低时空化作用弱、成核不充分;功率过高则超声热效应增强,导致部分冰晶融化,反而降低含冰率。在流量为2.4~3.6 m^3/h 区间内,最佳功率随流量的增加而提高。

2) 超声频率对促晶效果的影响相对较小,但频率升高会增强热效应,不利于维持较高的出口含冰率。在20 kHz以上即可实现有效促晶,为降低热损失,宜选用较低频率。

3) 旋流结构可有效延长过冷水在装置内的停留时间并增强冰水混合,使过冷水在超声场中获得更充分的空化作用,从而促进成核与过冷释放,并有助于形成更均匀的温度场与冰晶分布。

参考文献

- [1] Yang Guanglei, Zhang Guoxing, Cao Dongqin, et al. China's provincial-level sustainable energy transition requires accelerating renewable energy technological innovation[J]. Energy, 2024, 288: 129672.
- [2] Ali H M, Rehman T U, Arıcı M, et al. Advances in

- thermal energy storage: Fundamentals and applications [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2024, 100: 101109.
- [3] Zhang Ziyu, Ding Tao, Zhou Quan, et al. A review of technologies and applications on versatile energy storage systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 148: 111263.
- [4] 蔡伟光, 于艳辉, 刘源. 中国城乡建设领域碳排放研究报告(2024年)[J]. 建筑, 2025(2): 56–63. (Cai Weiguang, Yu Yanhui, Liu Yuan. Research report on carbon emissions in urban and rural construction in China (2024) [J]. Construction and Architecture, 2025(2): 56–63.)
- [5] Utama C, Troitzsch S, Thakur J. Demand-side flexibility and demand-side bidding for flexible loads in air-conditioned buildings [J]. Applied Energy, 2021, 285: 116418.
- [6] Li Zeyang, Sun Zhe, Meng Qinglong, et al. Reinforcement learning of room temperature set-point of thermal storage air-conditioning system with demand response [J]. Energy and Buildings, 2022, 259: 111903.
- [7] Wu Sike, Zhou Cheng, Doroodchi E, et al. Techno-economic analysis of an integrated liquid air and thermochemical energy storage system [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 205: 112341.
- [8] Olabi A G, Onumaegbu C, Wilberforce T, et al. Critical review of energy storage systems[J]. Energy, 2021, 214: 118987.
- [9] Kebede A A, Kalogiannis T, Van Mierlo J, et al. A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 159: 112213.
- [10] Barthwal M, Dhar A, Powar S. The techno-economic and environmental analysis of genetic algorithm (GA) optimized cold thermal energy storage (CTES) for air-conditioning applications[J]. Applied Energy, 2021, 283: 116253.
- [11] Yang K S, Chao Yunsheng, Hsieh C H, et al. A novel hybrid ice storage design applicable for commercial showcase with refrigerator and freezer [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 68: 107898.
- [12] Tang Hong, Wang Shengwei. Life-cycle economic analysis of thermal energy storage, new and second-life batteries in buildings for providing multiple flexibility services in electricity markets[J]. Energy, 2023, 264: 126270.
- [13] Chang Chun, Xu Xiaoyu, Guo Xinxin, et al. Experimental and numerical study of ice storage and melting process of external melting ice coil [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 77: 109961.
- [14] Dekhil M A, Simo Tala J V, Bulliard-Sauret O, et al. Numerical analysis of the performance enhancement of a latent heat storage shell and tube unit using finned tubes during melting and solidification [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 192: 116866.
- [15] Lü 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.
- [16] Gao Penghui, Cheng Bo, Zhou Xingye, et al. Study on droplet freezing characteristic by ultrasonic [J]. Heat and Mass Transfer, 2017, 53(5): 1725–1734.
- [17] Vancleef A, Van Gerven T, Thomassen L C J, et al. Ultrasound in continuous tubular crystallizers: parameters affecting the nucleation rate [J]. Crystals, 2021, 11(9): 1054.
- [18] Hu Rui, Liu Xinyu, Zhang Xuelai. Experimental study on supercooled water release supercooled state for generating ice crystals[J]. Journal of Molecular Liquids, 2023, 375: 121277.
- [19] Kurz W, Fisher D J, Rappaz M. Fundamentals of solidification [M]. 5th ed. Switzerland: Trans Tech Publications, 2023.
- [20] Hickling R. Nucleation of freezing by cavitation in sub-cooled bismuth and gallium [J]. Nature, 1965, 207(4998): 742.
- [21] Leighton T G. The Acoustic Bubble [M]. London: Academic Press, 1994.
- [22] Ramkrishna D. Population balances: theory and applications to particulate systems in engineering [M]. San Diego: Academic Press, 2000.
- [23] Pronk P. Fluidized bed heat exchangers to prevent fouling in ice slurry systems and industrial crystallizers[D]. Delft: Delft University of Technology, 2006.

通信作者简介

邵双全,男,博士,教授,华中科技大学能源与动力工程学院, 13520177661, E-mail: shaoshq@hust.edu.cn。研究方向: 高效热泵环境控制理论与技术、物理-数据混合驱动系统建模、制冷空调系统智能控制、数据中心风冷/液冷与热回收、复合能源系统构建与优化。

About the corresponding author

Shao Shuangquan, male, Ph. D., professor, School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, 86-13520177661, E-mail: shaoshq@hust.edu.cn. Research fields: high-efficiency heat pump and environmental control technologies, physics-data hybrid-driven system modeling, intelligent control of refrigeration and air-conditioning systems, air cooling/liquid cooling and heat recovery for data centers, and integrated energy system design and optimization.