XXXX

冰浆流动过程中冰晶演化行为研究进展

严　谱，邢美波，陈红兵*，王子彦
（北京建筑大学环境与能源工程学院，北京 100044）

摘　要：冰浆输运与换热过程中，冰晶持续发生生长、融化、熟化、团聚、破碎及空间迁移，其粒径、形态和局部浓度的动态变化直接影响浆体流变、流动阻力、堵塞风险及相变换热性能，但不同演化过程之间的竞争关系及多因素耦合作用尚缺乏统一认识。围绕冰浆流动过程中的冰晶演化问题，梳理了以2000—2026年为主的相关实验、数值及理论研究，比较了冰晶粒径、形态和空间分布的主要实验表征方法及多尺度数值模拟方法，并从冰浆自身物性、参数条件、管道几何与界面边界以及多因素耦合等方面归纳冰晶演化规律。重点分析了含冰率、粒径及粒径分布、冰晶形态和添加剂对颗粒碰撞、界面黏结及相变过程的影响，以及定常与非定常流动、截面形状、弯曲和旋流结构、壁面界面特性对冰晶迁移、分层、团聚与破碎和壁面滞留的调控机制。综合分析表明，冰晶的净演化方向并非由单一含冰率、粒径或流速决定，而是热力学相变、颗粒相互作用和流体动力过程相互竞争的结果，不同参数组合可使粒径分布和空间分布呈现不同演化趋势；平均含冰率能够反映体系总体固相水平，但不足以单独表征输运失稳和堵塞风险，局部浓度富集、颗粒速度及团聚或滞留状态具有更直接的表征意义；提高含冰率、增强流动扰动或引入二次流能够改善潜热利用和颗粒分布，但同时可能改变流动阻力、颗粒碰撞及壁面作用，因此换热强化与安全输运之间存在明显的工况依赖和耦合权衡。现有研究在非球形冰晶动态表征与模型描述、复杂几何区域局部堵塞判据以及界面调控技术的长周期稳定性方面仍存在不足。

关键词：冰浆；冰晶演化；含冰率；固液两相流；相变传热
doi：10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0646
中图分类号：TK 02；TB 64　　文献标志码：A　　文章编号：2095-4239（XXXX）XX-1-13

Research Progress on Ice Crystal Evolution Behavior During Ice Slurry Flow

YAN Pu, XING Meibo, CHEN Hongbing*, WANG Ziyan
(School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: During ice slurry transport and heat-transfer processes, ice crystals continuously undergo growth, melting, Ostwald ripening, aggregation, breakage, and spatial migration. The resulting changes in particle-size distribution, crystal morphology, and local solid concentration directly affect slurry rheology, flow resistance, blockage risk, and phase-change heat transfer. However, the competition among these evolution processes and their dependence on operating conditions remain insufficiently understood. Experimental, numerical, and theoretical studies published mainly from 2000 to 2026 are reviewed, covering experimental

收稿日期：2026-07-23；修改稿日期：2026-10-01。
基金项目：北京市自然科学基金—朝阳创新联合基金项目（L259040）。
第一作者：严谱（2003—），男，硕士在读，主要从事多元冰浆性能研究，E-mail：19855146041@163.com；通信作者：陈红兵（1977—），男，教授，博士生导师，研究方向：低碳建筑与可再生能源利用技术，E-mail：chenhongbing@bucea.edu.cn。
引用本文：严谱, 邢美波, 陈红兵, 等. 冰浆流动过程中冰晶演化行为研究进展[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-13.
Citation：YAN Pu, XING Meibo, CHEN Hongbing, et al. Research Progress on Ice Crystal Evolution Behavior During Ice Slurry Flow[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-13.

characterization, multiscale modeling, intrinsic slurry properties, hydrodynamic conditions, pipeline geometry, interfacial boundaries, and multi-factor coupling. Particular attention is given to the effects of ice packing factor (IPF), particle size and size distribution, crystal morphology, and additives on particle collision, interfacial adhesion, phase change, and ripening, as well as to the influences of steady and unsteady flows, cross-sectional geometry, curved and swirling configurations, and wall properties on crystal migration, stratification, aggregation-breakage, and wall retention. The available evidence indicates that the net evolution of ice crystals results from competition among thermodynamic phase change, particle interactions, and hydrodynamic processes rather than from any single parameter such as IPF, particle size, or flow velocity. Consequently, different combinations of operating conditions may lead to distinct particle-size and spatial distributions. Average IPF characterizes the overall solid content but is insufficient by itself to assess transport instability and blockage risk; local concentration enrichment, particle velocity, aggregation state, and particle retention provide more direct indications of local flow deterioration. Under appropriate operating conditions, increasing IPF, enhancing flow disturbance, or introducing secondary flows may improve latent-heat utilization and particle redistribution, but these measures can simultaneously increase flow resistance and alter particle-wall interactions. Heat-transfer enhancement and safe transport therefore exhibit a pronounced operating-condition-dependent trade-off mediated by ice crystal evolution. Remaining research gaps mainly concern the dynamic characterization and modeling of non-spherical ice crystals, generalized criteria for local blockage in complex pipeline geometries, and the long-term stability of interfacial regulation strategies under repeated flow and phase-change conditions.

Keywords: Ice slurry; ice crystal evolution; ice content; solid-liquid two-phase flow; phase-change heat transfer

在全球能源结构转型与“双碳”目标的驱动下，储能技术已经成为了提升能源利用率的关键[1]。在冷能管理领域，相变储冷技术因其高储能密度成为削峰填谷的重要技术[2]。在现有相变材料中，冰浆凭借其高达334 kJ/kg的潜热值与优异的流动性能，克服了传统相变材料在能量提取与远程输运中的难题，使其广泛应用于冷链、节能建筑及跨季节储能等领域[3-6]。

冰浆是由平均粒径不超过1 mm的冰晶颗粒悬浮于连续相溶液构成的固液两相体系，其流变、输运及相变换热性能与冰晶颗粒状态密切相关[7-8]。静态储存条件下，冰晶主要受表面能驱动发生奥斯特瓦尔德熟化，伴随浮力分层团聚[9]。流动工况中，冰晶颗粒碰撞促进团聚，流体剪切和湍流扰动又可使团聚体破碎，换热过程还会引起冰晶生长或融化，三者共同作用决定了冰浆的宏观工程性能[10-11]。相较于静态熟化，流动剪切与相变传热的耦合作用使冰晶演化机制更为复杂，也是当前工程应用中亟待明确的核心问题。

从作用机制看，冰晶演化主要受到热力学、流体参数及固液界面作用共同控制。过冷度和界面能差异影响成核、生长、融化及熟化；颗粒相对运动、剪切和湍流改变碰撞、团聚与破碎过程，浮力、曳力及局部二次流则推动冰晶迁移并形成非均匀浓度分布；颗粒及壁面界面特性进一步影响碰撞后的黏结和壁面滞留。各过程的相对强弱共同决定冰晶粒径、形态及空间分布，并进一步影响浆体流变、流动阻力、堵塞风险和相变换热性能。

围绕上述竞争性演化过程及其影响机制，学者开展了广泛的实验观测与数值模拟研究。显微或高速成像、聚焦束反射测量以及局部浓度和速度测量等方法能够从不同尺度获得粒径、形态和空间分布信息，部分研究表明较强流动剪切可使破碎作用占优；但高含冰率条件下的颗粒遮挡使流场内部三维

瞬态结构和接触黏结过程难以直接观测[7,12-14]。目前用于冰浆冰晶演化研究的主要实验表征方法及其适用范围见表1。

表1　冰浆冰晶演化主要实验表征方法及其特点

Table 1　Main experimental characterization methods for ice crystal evolution in ice slurry

表征方法	主要表征参数	可识别的演化行为	主要优势	主要局限
显微/高速成像[12,14]	粒径、形态、空间分布	生长/融化、团聚/破碎、迁移与分层	可直接观察冰晶及流动状态	高IPF下颗粒遮挡严重，受可视流道及二维成像限制
聚焦束反射测量（FBRM）[14]	颗粒尺度分布及时间变化	粒径演化、团聚/破碎	可进行在线连续测量	测量结果并非直接等同于真实粒径和形态
在线取样测量[14]	局部IPF	迁移、分层及局部聚集	可获得不同位置局部浓度	侵入式测量可能扰动流场，浓度与速度难以同步获取
超声多普勒测速（UDV）[14]	固相速度分布	颗粒迁移及固液相对运动	非侵入式，可获取速度剖面	测得的是固相速度，对测试条件较敏感
电阻层析成像（ERT）[7,14]	截面浓度分布、流型	分层、迁移、局部浓度极化	非侵入、时间分辨率较高	受连续相电导率及电极条件限制
磁共振成像（MRI）[7,14]	局部浓度、速度及内部结构	迁移、分层及空间结构	非侵入，可获取内部空间信息	设备昂贵、系统复杂，冰浆应用研究较少

实验观测的局限推动了多尺度数值方法的发展。Herschel-Bulkley模型主要描述冰浆宏观非牛顿流变特性，Euler-Euler双流体模型用于预测两相空间分布，群体平衡模型可进一步表征粒径分布及团聚与破碎演化，热浸没边界—晶格玻尔兹曼方法则能够解析颗粒碰撞及相变边界等介观过程[15-19]。不同方法的表征尺度和适用范围见表2。尽管多尺度建模与实验观测相关研究不断深入，但多重物理场耦合下冰晶动态平衡的调控规律依然缺乏系统梳理，严重制约了冰浆系统的规模化应用。

表2　冰晶演化研究的多尺度数值模拟方法对比

Table 2　Comparison of Multi-Scale Numerical Simulation Methods for Ice Crystal Evolution Research

模拟尺度	代表模型 / 算法	能表征的关键特征	局限性
宏观流变	Herschel-Bulkley 模型	冰浆非牛顿流特性、屈服应力、剪切稀化规律	无法反映颗粒相的空间分布
连续多相	欧拉-欧拉双流体模型	两相间相互作用、相分布特征	难以捕获冰晶粒径动态演化
粒径群体	耦合群体平衡模型	颗粒粒径分布时空演化、团聚、破碎规律	对非球形冰晶适配性差
介观数值	热浸没边界-晶格玻尔兹曼法	单颗粒碰撞、相变边界演化	计算成本高，难以适用于大尺度流场

针对当前研究存在的局限，本文围绕冰浆流动换热过程中的冰晶演化行为开展系统性综述。以ScienceDirect为主要文献来源平台，重点检索2000年至2026年4月公开发表的研究，英文关键词主要包括“ice slurry”“ice crystal”和“ice particle”，并通过Web of Science和中国知网进行补充检索，中文关键词主要包括“冰浆”“冰晶”和“冰颗粒”。筛选文献重点涉及流动与换热条件下冰晶粒径和形态变化、团聚与破碎、生长与融化、空间迁移及其流动传热效应；对于流变、熟化及多相流基础理论，则根据论述需要补充2000年以前的代表性研究。按照主要控制因素，将相关研究归纳为冰浆物性、流体参数条件以及管道几何与界面边界三类，并进一步讨论多个因素共同作用下的冰晶演化。

已有综述多从冰浆制备与应用、高含冰率输运或典型部件流动换热等角度展开，对流动过程中粒径、形态、团聚—破碎及空间迁移等演化过程的系统关联相对有限。代表性综述与本文研究重点的比较见表3。

在此基础上，本文从冰浆自身物性、流体参数特性及管道几何边界三个影响维度，梳理不同因素对冰晶团聚、破碎、生长、融化及迁移等演化过程的作用，进一步分析冰晶微观演化与流动稳定性、堵塞风险及换热性能之间的联系，并对冰浆系统的安全输运与换热强化研究方向提出展望，为低温储冷系统的高效稳定运行提供理论参考。

1　冰浆特性对冰晶演化行为的影响

冰浆自身物性决定了冰晶演化的基础条件。含

表3 代表性冰浆综述与本文研究重点

Table 3 Comparison of research focuses between representative ice slurry reviews and the present review

文献	年份	含冰率	研究内容
Wang等[14]	2019	未限定	综述制冷系统典型部件（管道、管件、阀门、泵和换热器）中冰浆的流动与换热表征，涵盖实验测量、解析计算和数值模拟，并讨论安全运行与优化。
Wang等[3]	2024	未限定	重点评述刮壁、过冷、流化床、直接接触和真空等冰浆制备方法，以及流动与换热特性和果蔬预冷应用。
Song等[7]	2024	以低含冰率研究为主，兼及高含冰率应用	系统介绍冰浆制备方法、浓度测量方法、流动与换热特性及多领域应用。
Zhou等[20]	2024	>30%	专门综述高IPF冰浆的制备、物性与表征、流动特性及冷链物流和管道清洗等应用，并讨论提高IPF的方法及高IPF冰浆的工程应用挑战。
本文	2026	未限定	系统讨论流动与换热过程中的冰晶演化，并从冰浆物性、流体参数、管道几何与界面边界及多因素耦合分析其对流变、阻力、堵塞和换热的影响。

冰率、冰晶粒径及形态影响颗粒接触、碰撞和空间迁移，添加剂则可通过改变液相热力学性质、成核过程及固液界面作用调节冰晶生长与黏结。本章从含冰率IPF（Ice Packing Factor）、冰晶粒径与形态以及添加剂三个方面分析其对冰晶演化的影响。

1.1 含冰率

IPF通常指冰浆中冰晶质量与总质量的比值，是衡量固相浓度的核心参数，直接决定了浆体内冰晶的平均间距与碰撞概率。工程上通常将IPF低于10 wt%归为低浓度区间，10~30 wt%为常规运行区间，高于30 wt%为高浓度区间，阈值会随粒径、添加剂与工况略有偏移。常用的IPF计算方法见表4。

表4 IPF的基准与计算方法

Table 4 Main methods for determining ice fraction in ice slurry

公式名称	基准	核心公式
密度法[21]	冰质量分数	$X_{is}=\frac{\rho_{ice}(\rho_{cf}-\rho_{is})}{\rho_{is}(\rho_{cf}-\rho_{ice})}$
密度法[22]	冰体积分数	$\phi_{ice}=\frac{\rho_{sol}-\rho_{slu}}{\rho_{sol}-\rho_{ice}}\times 100$
浓度差法[23]	冰质量分数	$X_{IS}=\frac{C_S(T)-C_0}{C_S(T)}$
混合量热法[24]	冰质量分数	$c=\frac{-m_wC_w(T_{fin}-T_{ini})-m_{sl}C_s(T_{fin}-T_e)}{m_{sl}\cdot L/100}$
多组分量热法[25]	冰质量分数	$IPF=\frac{(T_h-T_e)C_wm_h-(T_e-T_b)(C_om_o+C_sm_s+C_wm_w)}{\left[(T_d-T_b)(C_i-C_w)+\Delta H_i\right](m_w+m_o+m_s)}$
几何定义法[26-27]	冰体积分数	二维：$IPF=\frac{n\pi \hat{D}_p^2}{4\hat{H}\hat{L}}$；三维：$IPF=\frac{n\pi \hat{D}_p^3}{6\hat{H}^2\hat{L}}$

从冰晶演化角度看，IPF本质上控制着颗粒碰撞与黏结的频率。静态储存中，高IPF会提升颗粒接触概率，促进冰晶在接触点黏结，储存8 h时黏聚力达到峰值，逐步形成三维冰晶网络，增大启动阶段的屈服应力[28]。但在流动工况下，IPF的核心作用是决定流态转变与阻力特性。Rayhan等[23]通过管路压降测试发现，当IPF处于10~15 wt%区间时，冰晶碰撞频率显著上升，冰浆会从牛顿流体转变为带屈服应力的Herschel-Bulkley非牛顿流体，流动阻力随IPF升高呈指数增长。实际输运中IPF并非均匀分布，颗粒的径向迁移会导致局部浓度极化。Asaoka等[24]的实验观测显示，即使系统平均IPF仅发生2.6wt%的波动，层流区也会出现明显的压降震荡，其原因是局部高浓度区的冰晶频繁碰撞团聚，形成团聚层，又在流体剪切作用下不断解体与重构，这也是长距离输送中瞬时堵塞的核心机理。

传热特性方面，IPF同样通过改变冰晶数量与接触状态调控演化行为。低IPF范围内提升浓度，单位体积内冰晶数量增加、有效换热面积增大，过冷释放效率显著提升；Du等[29]的实验结果表明，IPF从1.0%升至4.0%时，过冷释放效率从74.7%

提升至97.2%，残余过冷度降至0.1 K以下。但当IPF超过30%时，冰晶团聚速率将远超剪切破碎速率，离散冰晶快速聚集形成不规则碎冰块，堵塞风险大幅上升，此时传统欧拉-欧拉双流体模型因忽略颗粒快速黏结与局部浓度极化，普遍低估冰浆的临界堵塞流速，无法满足高浓度工况下安全运输的设计需求[20]。因此，IPF的影响不能仅由体系平均浓度判断，还应结合局部浓度分布和颗粒团聚状态进行评价。

1.2　冰晶粒径、分布与形态

冰晶粒径既是生长、熟化、团聚和破碎等过程共同作用的结果，也会反过来影响颗粒碰撞、空间分布及相变换热。相较于单一初始粒径，粒径分布在输运过程中的动态变化更能反映冰晶演化特征。不同研究采用平均粒径、索特平均直径d_{32}等不同指标，进行定量比较时应注意粒径定义及测量方法的差异。

静态储存条件下，冰晶主要受奥斯特瓦尔德熟化驱动，小冰晶逐渐融化而大冰晶生长，表现为平均粒径增大及粒径分布变化，其演化速率还受到溶质浓度、过冷度和含冰率等因素影响[9,28]。

与静态熟化不同，管内流动会引入团聚与剪切破碎的竞争。蔡玲玲等[12]在水平管实验中发现，较强剪切可促进大颗粒或团聚体破碎，使粒径分布向较小尺度迁移；若同时存在过冷释放等相变过程，冰晶生长又可能抵消部分破碎效应[30]。因此，冰晶粒径的净变化取决于熟化、生长、团聚与破碎等过程的相对强弱。代表性研究的工况及粒径分布变化见表5。

表5　不同工况下冰晶粒径及粒径分布演化规律

Table 5　Evolution of ice crystal size and particle-size distribution under different conditions

文献	工况	粒径	结论	主导演化过程
Pronk等[9]	冰悬浮液绝热储存；不同溶质浓度、冰相分数和搅拌条件	平均晶体尺寸、粒径分布	平均尺寸随时间增加，分布展宽；提高溶质浓度使熟化减缓	奥斯特瓦尔德熟化
Matsumoto等[28]	IPF 10%~30%；过冷度1、3 K；储存1~12 h	平均粒径、粒径分布	平均粒径随储存时间增加；较低过冷度及较高IPF下粒径较大	熟化、黏结/团聚
蔡玲玲等[12]	u=1.0~2.5 m/s；质量含冰率10%~30%；$d_{32,i}$=350~550 μm	d_{32}、粒径分布	湍流下分布向小粒径侧移动；质量含冰率10%时，u由1.0增至2.5 m/s，Δd_{32}由16.1增至34.6 μm	剪切破碎占优
Du等[30]	水平直管过冷释放，CFD-PBM	冰晶直径	计算范围内过冷度每增加1 K，冰晶粒径约增加50 μm	相变生长

注：不同研究的粒径定义、测量方法和工况不完全一致，表中保留原文粒径指标，仅用于归纳演化趋势，不作绝对数值的直接横向比较。

粒径分布的变化又会反馈至颗粒输运和换热。Kamyar等[31]发现，U形弯管中粒径增大对压降的影响随流速而变化：低流速下压降增加，而较高流速下则呈相反趋势，说明粒径效应具有明显的工况依赖性。Suzuki等[26]的颗粒尺度模拟还表明，较小冰晶有利于提高壁面换热，而颗粒黏附形成团聚体后有效尺度增大，换热能力下降。由此可见，工程调控的重点不应只是获得较小的初始冰晶，而应控制输运过程中粒径分布的持续演化，使其兼顾悬浮稳定性、流动阻力和相变换热需求。

除尺寸外，冰晶形态也是描述颗粒状态的重要参数。Pronk等[9]指出实际冰晶并非理想规则颗粒，且储存过程中形态会逐渐发生变化，其模拟结果表明颗粒高径比的改变可影响熟化速率。Kumano等[32]观察到，过冷溶液释冷生成的冰晶具有复杂的枝晶结构，并可在搅拌过程中发生破碎；AFP和PVA均能细化冰晶，但AFP体系中的冰晶较PVA体系呈现更明显的针状特征，表明不同添加剂对冰晶表面的选择性作用能够改变其生长方向和最终形貌。

冰晶形态还可能通过改变颗粒在流场中的运动与空间分布进一步影响输运和换热。Suzuki等[26]采用热浸没边界—晶格玻尔兹曼方法研究冰浆流动时指出，圆形颗粒假设难以完全代表实际冰晶；其初步非圆形颗粒计算表明，随着椭圆颗粒趋于扁平，其流动平衡位置逐渐远离加热壁面，相应冷却性能降低。另一方面，Kumano等[33]的管流实验发现，AFP在减小冰晶尺寸的同时可显著抑制流动过程中的颗粒团聚，而PVA虽然能够抑制冰晶长大，却未表现出同等程度的流动防团聚效果，说明冰晶的流动行为并不能仅由平均粒径解释。不过，该研究并未将粒径、形态及界面作用的贡献独立区分，目前仍缺乏流动条件下冰晶形态动态变化的直接实验观测，以及形态参数与碰撞、团聚和破碎速率之间的

定量关系。

总体而言，粒径与形态共同影响冰晶的迁移、颗粒相互作用及传热过程。现有研究对粒径演化的认识相对充分，而非球形冰晶的动态表征及其对团聚、破碎和迁移行为的定量影响仍缺乏直接证据。

1.3 添加剂类型与浓度

添加剂通过改变液相物性、调控固液界面作用或提供异相成核位点，可从冰晶成核、生长到团聚的全过程施加干预，是当前主动调控冰晶演化的主流手段[34]。结合添加剂的主要作用对象及已有研究结果，本文将常见冰浆添加剂概括为本体调控型、成核模板型和吸附抑制型三类，如表6所示。需要指出的是，部分添加剂可能同时具有多种调控作用，其分类仅反映本文所讨论的主要机制。

表6 常见冰浆添加剂类型

Table 6 Common Types of Ice Slurry Additives

主要调控机制	添加剂
本体调控型	氯化钠、氯化钙、氯化镁、双乙酸钠、蔗糖
成核模板型	Al_2O_3纳米颗粒、氧化石墨烯纳米颗粒、石墨烯纳米颗粒、Fe_3O_4纳米颗粒
吸附抑制型	十二烷基苯磺酸钠、乙醇、丙二醇、十二烷基硫酸钠、尿素、抗冻蛋白、聚乙烯醇、油酸钠

本体调控型添加剂主要通过改变液相热力学性质、水分子活度及氢键网络影响平衡凝固温度和过冷状态，同时部分离子还可能表现出界面特异性作用。Liu等[35]与Sidqy等[36]的研究表明，随着无机盐质量分数的升高，溶液冻结温度显著下降，过冷度相应增大；同时在动态输运中，强剪切流场会进一步打破流体的亚稳态，促进冰晶提前成核。Wu等[37]进一步指出，不同离子在固液界面的行为存在差异，可对冰晶生长和重结晶产生不同影响。与此同时，提高溶质浓度还会改变体系潜热及流变性质，因此其调控效果需要结合储能密度和输运性能综合评价。

吸附抑制型添加剂主要利用界面吸附、微液膜形成或晶界钉扎等方式，在冰晶表面形成物理或化学阻隔层以抑制重结晶。Zhao等[38]发现，尿素分子可在冰晶接触界面诱导形成连续的微液膜，有效降低颗粒间的黏结强度。Asaoka等[39]量化了乙醇的调控阈值，表明当其质量分数超过5%时，可维持冰晶的离散状态；但高浓度醇类同样会升高体系黏度，诱发流场畸变。此外，Kumano等[32-33]的研究证实，AFP和PVA均能够减小冰晶尺寸并抑制储存过程中的粒径增长，但二者对晶体形态及流动团聚的影响存在差异，其中AFP表现出更明显的流动防团聚作用。因此，添加剂对冰晶演化的调节不仅取决于能否抑制粒径增长，还与其对晶体形态和颗粒界面作用的影响有关。

成核模板型添加剂主要利用晶格匹配效应为冰晶提供异相成核核心，降低成核势垒并改善粒径分布的均匀性。异相成核理论表明，成核基体与冰晶的晶格匹配度越高，接触角越小，临界成核能就越低，越容易生成大量细小均匀的冰晶[40-41]。当纳米颗粒与管内复杂流场耦合时，调控效果会进一步提升。Gao等[42]针对水基石墨烯纳米流体冰浆在水平圆管内流动的特性研究揭示，纳米颗粒的引入可强化液相湍流强度，改变冰晶的径向分布。在较高的入口流速与IPF下，纳米颗粒引发的微对流抑制了冰晶在圆管上壁面的分层与聚集现象，促使非均相流动向准均相流动演变，并在IPF为10%、壁面热流密度为8 kW/m²的计算条件下，石墨烯纳米流体冰浆的换热系数较纯水冰浆约提高9%，较纯水约提高15%。

综上，添加剂可通过调节液相热力学性质、成核过程及固液界面作用改变冰晶的生成、生长和团聚行为，但其效果受到浓度、流动剪切及冰晶初始状态等条件制约。现有研究对强剪切和多循环工况下添加剂调控效果的长期稳定性仍缺乏充分验证。

2 流体参数对冰晶演化的影响

冰浆自身物性奠定了冰晶演化的热力学基础，而流动产生的剪切作用则是驱动冰晶团聚与破碎动态平衡的核心外部动力。定常流场中，流速通过改变湍流扩散与浮力的相对强弱，决定冰晶的空间分布形态与演化方向；非定常流场则通过周期性改变速度和剪切分布打破原有受力平衡，可促进颗粒重新分布并强化换热。

2.1 定常流

定常流指流场内流速、压力、含冰率、冰晶粒径分布等参数不随时间变化的流动状态。其中，流

速直接调控流场剪切强度，决定了冰浆流态和冰晶分布。根据流速与含冰率的耦合匹配关系，如图1所示，水平直管内冰晶流动依次呈现均匀悬浮流、非均匀悬浮流、移动床流与静止床流四种典型流态[43]。高流速下，增强的湍流扩散和颗粒弥散可削弱浮力引起的上浮分层，促使大尺度冰晶破碎并趋于均质化悬浮[12]；低流速下，剪切作用衰减，冰晶易在管顶分层聚集[43-45]。当流速过低时，局部高浓度区的冰晶易发生聚集并逐渐向移动床或静止床状态转变，从而增加冰堵风险，因此临界流速可作为评价冰浆安全输送的重要参数。Wu等[46]采用Euler两流体模型研究冰源热泵系统中水平直管和90°弯管内冰浆的临界流速，并以管内最小冰颗粒速度降至0 m/s或局部最大冰体积分数达到52%作为冰堵判据。在此基础上，针对所研究的冰源热泵输送系统建议，入口流速可在最不利工况临界流速的基础上提高20%，以留出安全裕量[46]。该安全裕量来源于特定系统的数值研究，其适用性仍受冰晶粒径、固相浓度、管道尺度及构型等工况因素影响。

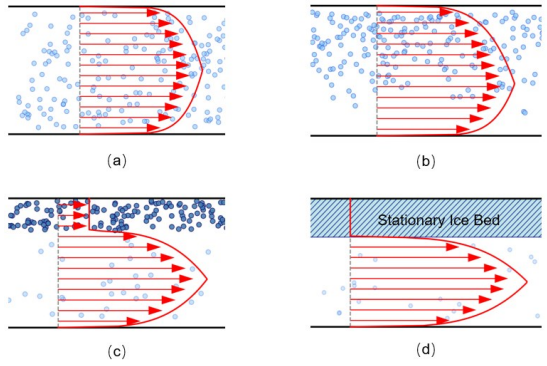


图1　水平管路内冰浆的四种典型流态示意图：(a) 均匀悬浮流；(b) 非均匀悬浮流；(c) 移动床流；(d) 静止床流

Fig. 1　Schematic Diagram of Four Typical Flow Regimes of Ice Slurry in Horizontal Pipelines: (a) Uniform Suspended Flow; (b) Non-uniform Suspended Flow; (c)Moving Bed Flow; (d)Stationary Bed Flow

2.2　非定常流

非定常流是指流场中至少存在一个空间位置的流体力学特征参数随时间发生变化的流动状态。Mi等[47]采用欧拉多相流模型对脉动冰浆流动的数值模拟显示，冰浆平均速度与压降之间存在相位滞后，且滞后程度随脉动频率、进口冰晶体积分数及管径的增大而升高。

脉动流对冰浆输运和换热的调控具有明显的工况依赖性，强化幅度受脉动频率、速度振幅、冰晶粒径、冰体积分数及平均流速共同影响，Cai等[48]采用Euler-Euler多相流模型研究了水平管内冰浆的脉动流动与换热特性。结果表明，周期性速度扰动可改变管内速度、温度及冰体积分数分布，并通过减薄热边界层强化换热；在其研究范围内，周期平均换热系数较稳态最高提高34.32%。但该研究主要关注冰浆的流动、相变与换热过程，尚未直接表征冰晶团聚与破碎动力学，因此脉动扰动对冰晶团聚体结构及粒径分布的具体作用仍需进一步实验验证。

总体来看，定常流速通过改变颗粒悬浮、迁移及局部浓度分布划定冰浆稳定输运的基本边界；脉动流则通过周期性改变流场速度和剪切特征，可促进颗粒重新分布并强化换热。但目前相关研究仍有不足：还没有能准确对应流速与冰晶团聚、破碎速率的通用理论模型，多数固液相间耦合仍依赖经验关联式；脉动流如何改变冰晶微观形态也缺少直接的实验观测证据，同时脉动调控的实际能耗与防堵收益之间的综合权衡也缺乏系统评估。

3　几何边界对冰晶演化的影响

管道几何边界并不直接改变冰晶自身的热力学性质，而是通过约束颗粒运动空间，并改变局部速度梯度、湍流强度、离心力、二次流及颗粒与壁面接触条件，进一步调节冰晶的迁移、碰撞、团聚与破碎以及相变过程。因此，评价不同管道结构时，不宜仅比较压降或换热系数，而应关注其如何改变冰晶空间分布、粒径演化和壁面滞留，尤其是局部高含冰率区域的形成与消散。

3.1　截面形状

水平输运过程中，冰晶受浮力作用易向管道上部迁移，截面形状则通过改变颗粒横向运动空间和局部流场调节其浓度分布。Yadav等[49]比较圆管与椭圆管发现，椭圆管内冰晶分布的非均匀程度较低，且该差异随粒径增大而增强；非等温条件下，冰晶融化又会削弱浮力引起的上下分层。Tutunchian等[50]进一步发现，圆管中冰晶主要在顶部富集，而平边椭圆管（Flat-Sided Oval Pipe，FSOP）中高浓度区域向两侧重新分布。上述结果表明，截面形状可通过改变冰晶的横向迁移路径调

节局部富集区域，其典型分布特征如图2所示。

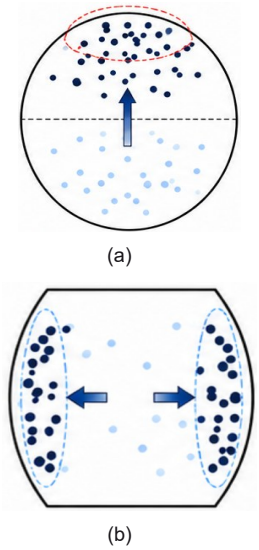


图2 圆管与平边椭圆管中冰晶横向迁移及典型富集位置示意图：(a)圆管顶部富集；(b)平边椭圆管两侧富集

Fig. 2 Schematic of ice-crystal lateral migration and typical accumulation locations in circular and flat-sided oval pipes: (a) accumulation near the top of a circular pipe; (b) lateral accumulation in a flat-sided oval pipe

但非圆截面并不能消除浮力及颗粒相互作用。Suzuki等[27]在方形通道模拟中发现，冰晶仍会受浮力作用向上壁偏聚；考虑颗粒黏附后，冰晶可形成团簇并改变其空间分布。因此，截面效应主要体现为对颗粒迁移和局部含冰率的调控，而粒径和团聚状态仍受到流动及界面作用共同影响。

此外，流动方向会改变浮力与主流的相对关系。竖直狭缝通道实验表明，在恒热流、冰质量分数0~30%的研究范围内，上升流的换热系数较下降流高6%~14%[51-52]，说明即使截面不变，重力方向仍可通过改变固液滑移影响冰晶输运。总体而言，现有截面研究对浓度分布的证据较充分，但针对粒径及团聚与破碎演化的直接研究仍较少。

为进一步比较不同截面边界对冰晶分布及冰浆输运性能的影响，表7汇总了具有明确圆管对照基准的代表性研究。由于不同研究采用的基液、含冰率、颗粒尺度、流速及热边界条件并不一致，表中仅保留各研究内部相同或对应工况下的相对比较结果，不对不同文献之间的绝对数值进行直接排序。

综上，非圆截面对冰浆性能的影响并不存在单一优势方向。椭圆及平边椭圆截面可通过改变颗粒横向迁移路径减弱圆管中的顶部富集，而附加压降相对有限；进一步引入截面扭曲后，旋流和二次流能够强化颗粒重分布及相变换热，但流动阻力也可能显著增加。因此，不同截面结构的评价需要同时考虑冰晶空间分布、流动阻力和相变过程，而不能仅依据换热系数或输送能力的单一增幅判断其优劣。

3.2 管道构型

弯曲、螺旋和周期扰动结构通过改变流线曲率及局部剪切，引入离心力和二次流，从而进一步影响冰晶迁移及粒径演化。其中，90°弯头和正弦波纹流道分别代表曲率诱导与周期扰动两类典型构型，其对冰晶重分布及局部流动结构的影响如图3所示。

弯头是目前具有较直接颗粒动力学证据的典型结构，不仅会改变颗粒空间分布，还会改变团聚与破碎之间的竞争关系。Tian等[54]采用CFD-PBM研究90°弯头发现，离心作用和二次流使冰晶向外壁富集、内壁浓度降低；同时弯头处团聚和破碎均增强，但破碎强化更明显，使平均粒径在弯曲区域的增长暂时受到抑制。连续弯曲还存在流场继承效应。Rezaei等[55]发现，相邻U形弯头产生方向相反的二次流，两弯间距会影响颗粒重新分布及后续融

表7 典型非圆截面管道与圆管中冰浆输运特性的直接比较

Table 7 Direct comparison of ice slurry transport characteristics between representative non-circular and circular tubes

文献	基准	工况	冰晶分布	流动阻力	换热或输运性能
Yadav等[49]	椭圆管AR=1.5与等截面积圆管	等温：冰体积分数10%，u=2.25~3.25 m/s	相同流量下椭圆管冰晶分布非均匀程度较低	椭圆管压降约比圆管高3%~6%	非等温工况下椭圆管冰晶融化程度较低
Tutunchian等[50]	FSOP，L/H=1与等水力直径圆管	10.3 wt%乙醇溶液；冰质量分数10%、15%	圆管顶部富集；FSOP颗粒向两侧对称重分布	FSOP压降分别增加约1.6%、1.3%	湿周增加63.7%，输送能力约提高75%
Zhou等[53]	扭曲椭圆管 a/b=2.78，S/D=5与圆管	10.3 wt%乙醇溶液；v_{in}=1.5 m/s、d_s=0.1 mm等；入口含冰率$\alpha_{s,in}$=10%	旋流/二次流改变IPF空间分布并加快融化	该结构摩擦因子约为圆管4倍	平均努塞尔数较圆管提高约12.21%

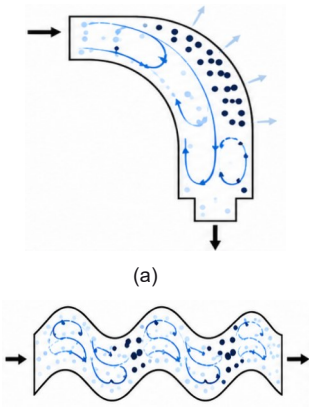


图3　典型管道构型对冰晶重分布及局部流动结构的影响示意图：(a)90°弯头；(b)正弦波纹流道

Fig. 3　Schematic of the effects of representative pipeline configurations on ice-crystal redistribution and local flow structures: (a) 90° elbow; (b) sinusoidal corrugated channel

化过程。螺旋盘管则可持续产生二次流，Cai 等[56]发现其使颗粒浓度发生径向重分布，且提高入口速度和冰体积分数后，截面浓度分布趋于均匀；二次流同时改变内、外壁附近冰晶的融化过程。类似地，扭曲椭圆管产生的旋流和二次流能够削弱浮力分层并促进冰晶融化[53]。Rayhan 等[57]的实验也表明，螺旋管中的冰浆较圆管更易形成均匀流态，并在冰质量分数 3%~21% 的实验范围内，湍流条件下螺旋管相较圆管可获得约 25% 的减阻率，但其研究主要反映宏观流型变化，尚不足以直接说明团聚体发生破碎。

T 形接头则主要改变固相在不同支路中的分配。Kumano 等[58]发现，在较低支路流量比下，支管 IPF 低于入口值，随着支路流量比增加逐渐接近入口 IPF，而主管 IPF 变化相对较小。因此，分支结构会导致冷量和颗粒浓度重新分配，并可能形成不同的局部输运状态。

波纹和凹穴等局部微结构主要通过改变近壁二次流和低速区影响颗粒迁移及相变。Mi 等[59]发现，增大正弦波纹高度能够强化冰晶质量传递，但同时扩大低速区和流动死区；凹穴管中，增大凹穴高度、半径及数量会促进冰晶融化，同时增加阻力[60]；外向螺旋波纹管在较大波高下形成明显二次流，使冰晶浓度分布更加均匀并促进融化[61]。因此，局部扰动结构设计需要兼顾横向混合与低速滞留区的形成。

对于窄流道，还需考虑颗粒尺度与流道尺寸的匹配。Zhou 等[62]在钎焊板式换热器实验中发现，当冰晶尺寸超过 1.83 mm 后压降明显增加，并指出应避免过大颗粒引起堵塞风险。复杂管路优化不仅要关注平均换热或阻力，还应控制局部 IPF 及大颗粒形成。

3.3　界面特性

与几何构型主要改变冰晶所处流场不同，壁面材料和表面状态直接影响异相成核、冰晶黏附及壁面冰层生长。目前相关直接证据主要来自冰浆发生器和过冷器研究。为直观说明不同壁面界面特性对冰晶黏附、滞留及脱离行为的影响，易黏附壁面与低黏附/疏冰壁面下冰晶的典型界面行为如图 4 所示。

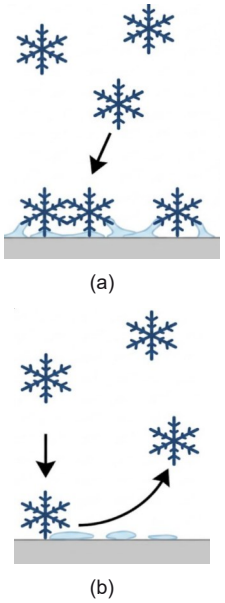


图4　壁面界面特性对冰晶黏附、滞留与脱离行为的影响示意图：(a) 易黏附壁面；(b) 低黏附/疏冰壁面

Fig. 4　Schematic of the effects of wall interfacial properties on ice-crystal adhesion, retention and detachment: (a) ice-adhesive surface; (b) low-adhesion/icephobic surface

降低壁面异相成核和冰黏附倾向有利于延缓壁面结冰，但其效果仍受到流速、热负荷及涂层耐久性的共同制约。Brooks 等[63]采用低表面能、低粗糙度尼龙螺旋管进行连续制冰。尼龙表面降低冰晶黏附倾向，而其较低热导率又减缓壁面冰生长，使流体能够较容易地将形成的冰带离壁面，从而扩大连续制冰运行范围。Carbonell 等[64]进一步研究了疏

冰涂层过冷器，发现多种涂层均能提高可稳定维持的过冷度，其中部分涂层相较未涂层表面具有明显改善。界面调控主要作用于“成核、黏附、持续生长、脱离”过程。相比过冷器中的初始结冰研究，针对流动冰浆中已有冰晶反复碰撞壁面后的黏附概率、剪切脱落以及长期冲蚀条件下涂层性能衰减，目前仍缺乏充分的定量研究。

管道几何与界面边界主要通过重塑局部流场和颗粒与壁面间作用改变冰晶迁移、团聚与破碎及黏附，其效果还受到IPF、粒径和流动条件共同制约。

4 多因素耦合作用下的冰晶演化

实际输运与换热过程中，冰浆物性、热力学条件、流动状态及管道边界并非独立作用，而是共同改变相变驱动力、颗粒碰撞与黏结、流体剪切及空间迁移。因此，单因素研究所得规律通常具有明确的适用工况，冰晶演化不能视为各因素作用的简单线性叠加。现有研究涉及的主要因素组合见表8。

表8 冰晶演化多因素耦合研究汇总

Table 8 Summary of multi-factor coupling research on ice crystal evolution

文献	耦合因素	研究对象
Kumano等[32]	添加剂、溶质浓度	冰晶尺寸、形态
Du等[30]	过冷度、冰体积分数、流速	冰晶粒径增长
Kamyar等[31]	初始粒径、流速	流动阻力、颗粒输运
Suzuki等[26]	IPF、粒径	碰撞、团聚及空间分布
Cai等[48]]	脉动参数、粒径、冰体积分数	流动、相变及换热
Tian等[54]	IPF、流速、管道曲率	粒径、局部浓度及二次流

物性与热力学条件首先共同决定冰晶生成和生长的基础状态。Kumano等[32]发现，AFP和PVA均可减小生成冰晶尺寸，但其调控效果随溶质浓度改变，说明添加剂作用受到基液条件制约。Du等[30]同时考察过冷度、入口冰体积分数和流速后发现，过冷度对冰晶粒径增长作用较显著，而冰晶数量及管内停留时间也会影响单颗粒生长程度。由此可见，相变条件、颗粒数量和有效演化时间共同决定粒径的净变化，仅依据过冷度或流速难以判断最终演化方向。

颗粒状态与流动条件的耦合则主要体现为碰撞、团聚、破碎和迁移之间的竞争。Kamyar等[31]发现，U形弯管中粒径对压降的影响方向会随流速改变；Suzuki等[26]的颗粒尺度研究表明，在固定IPF下改变粒径会同步改变颗粒数量、碰撞频率及空间分布，而颗粒黏附形成团簇后又会改变其有效尺度和换热行为。非定常流动同样受到颗粒初始状态制约，Cai等[48]的研究显示，脉动参数的作用随冰晶粒径和冰体积分数而变化。上述结果说明，IPF、粒径、界面黏结与流场共同决定冰晶的分散与团聚状态，不宜将某一参数的单独变化直接对应于固定的宏观响应。

定量结果表明，不同参数对冰晶演化的影响程度存在明显差异。蔡玲玲等[12]在同一实验平台下比较流速、IPF和初始粒径的影响，在各自考察范围内三者分别使进出口平均粒径差Δd_{32}增加18.5、9和31 μm，说明不同参数引起的粒径响应幅度并不相同。管道几何边界则进一步改变上述耦合作用的空间位置和强度。Tian等[54]的90°弯头研究表明，入口流速、含冰率和弯曲半径共同影响二次流及冰晶分布，当90°弯头中IPF由15%增至35%时，冰晶粒径增长速率提高约9%，而弯头二次流会阶段性减缓粒径增长。因此，几何结构主要通过重塑局部流场，使含冰率、粒径和流速的作用在空间上重新分配，而非独立决定冰晶的演化方向。

总体而言，现有研究表明冰晶演化具有明显的多因素工况依赖性，其本质是热力学相变、颗粒相互作用和流体动力过程之间的竞争。当前研究仍以逐参数变化或参数组合比较为主，对不同因素交互作用强度缺乏独立定量表征，对冰晶形态及团聚—破碎速率的同步测量也较有限。因此，后续研究应重点加强多参数条件下冰晶状态的动态表征与耦合建模，建立运行参数、冰晶微观演化与局部输运稳定性之间的定量联系。

5 结 论

本文围绕冰浆流动输运与换热过程中的冰晶演化行为，从冰浆自身物性、流场动力学特性、管道几何边界三个维度系统梳理了国内外研究进展，归纳了各因素对冰晶演化的作用机制及其耦合关系，主要结论如下：

（1）冰晶的净演化方向取决于多种演化过程相对速率的竞争，而非单一控制参数的直接响应。不同热力学和流动条件会改变各演化过程的相对强弱，使粒径、形态及团聚状态呈现明显的工况依赖性。现有研究尚缺乏对不同演化过程相对速率的统

一定量描述，尤其非球形冰晶条件下的团聚、破碎及相变耦合模型仍需完善。

（2）冰浆输运失稳具有明显的局部性，平均IPF不足以单独表征堵塞风险。局部浓度富集、颗粒速度下降、团聚体形成及壁面滞留等状态与压降波动和堵塞更直接相关，因此安全输运评价应由平均固相含量向局部浓度、颗粒速度及团聚状态等多参数联合表征转变。复杂几何区域下的局部失稳与临界堵塞判据仍需进一步明确。

（3）换热强化与安全输运通过冰晶演化相互耦合，并存在内在权衡。提高含冰率、增强流动扰动或引入二次流等措施虽可改善潜热利用和颗粒分布，但也可能增加流动阻力及颗粒与壁面作用。因此，冰浆系统优化应综合考虑IPF、粒径与形态、流动状态、管道结构及界面性质，建立兼顾换热性能和长期输运稳定性的合理运行窗口，并加强长周期冻融、剪切及壁面冲蚀条件下的实验验证。

基于上述研究现状，后续可重点结合动态形貌表征，将非球形冰晶形态参数引入团聚、破碎及相变模型并开展实验校核；针对弯头、截面突变等复杂几何区域，可进一步联合表征局部浓度、颗粒速度及压降波动，建立临界堵塞判据；同时加强多参数耦合条件下冰晶演化的定量研究，以明确不同因素的相对作用及交互影响。

参 考 文 献

[1] ZHANG D H, WANG J Q, LIN Y G, et al. Present situation and future prospect of renewable energy in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 76: 865-871.

[2] TIAN Q Q, HE G G, WANG H, et al. Simulation on transportation safety of ice slurry in ice cooling system of buildings[J]. Energy and Buildings, 2014, 72: 262-270.

[3] WANG Q, WANG Y F, LI M, 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.

[4] ZHANG Y P, ZHOU G B, LIN K P, et al. Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook [J]. Building and Environment, 2007, 42(6): 2197-2209.

[5] 周文政,章学来,顾杰,等.相变储能材料的研究及应用进展[J].应用化工,2024,53(10):2508-2511.
ZHOU W Z, ZHANG X L, GU J, et al. Research and application progress of phase change energy storage materials[J]. Applied Chemical Industry, 2024, 53(10): 2508-2511.

[6] 傅德坤,宋文吉,陈明彪,等.跨季节蓄冷技术及在设施农业应用的经济性分析[J].储能科学与技术,2021,10(6):2385-2391.
FU D K, SONG W J, CHEN M B, et al. Cross-seasonal cold storage technology and economic analysis of its application in facility agriculture[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(6): 2385-2391.

[7] SONG H, VERDIN P, ZHANG J. Research Developments and Applications of Ice Slurry[J]. Energies, 2024, 17(20): 5213.

[8] FERNÁNDEZ-SEARA J, DIZ R, UHÍA F J, DOPAZO J A. Experimental analysis on pressure drop and heat transfer of a terminal fan-coil unit with ice slurry as cooling medium[J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(6): 1095-1104.

[9] PRONK P, INFANTE FERREIRA C A, WITKAMP G J. A dynamic model of Ostwald ripening in ice suspensions[J]. Journal of Crystal Growth, 2005, 275(1-2): e1355-e1361.

[10] AHMADKERMAJ H, MADDAHIAN R, MAEREFAT M. Effect of Swirl on Thermal and Hydraulic Properties of Ice Slurry Flow[J]. Heat Transfer Engineering, 2021, 42(9): 764-786.

[11] 韩爽,唐艺芳,徐丹.基于CFD-PBM耦合模型的冰浆水平直管内冰晶颗粒流动特性研究[J].资源信息与工程,2026,41(2):99-104.
HAN S, TANG Y F, XU D. Study on flow characteristics of ice crystal particles in horizontal straight pipe of ice slurry based on CFD-PBM coupling model[J]. Resource Information and Engineering, 2026, 41(2): 99-104.

[12] 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(5):131-138.
CAI L L, MI S, LIU Z Q. Experimental study on ice crystal particle size evolution during ice slurry flow[J]. Journal of Refrigeration, 2023, 44(5): 131-138.

[13] 郝达云,王悦,王晓春.冰浆在水平圆管过渡区内流动特性的影响因素[J].制冷学报,2025,46(4):106-113+121.
HAO D Y, WANG Y, WANG X C. Influencing factors of flow characteristics of ice slurry in transition region of horizontal circular pipe[J]. Journal of Refrigeration, 2025, 46(4): 106-113+121.

[14] WANG J, BATTAGLIA F, WANG S, 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.

[15] HERSCHEL W H, BULKLEY R. Konsistenzmessungen von Gummi-Benzollösungen[J]. Kolloid-Zeitschrift, 1926, 39(4): 291-300.

[16] ISHII M. Thermo-fluid dynamic theory of two-phase flow[M]. Paris: Eyrolles, 1975.

[17] RAMKRISHNA D. Population balance: theory and applications to particulate systems in engineering[M]. San Diego: Academic Press, 2000.

[18] 于宏鑫,王宁波,田博,等.冰浆蓄冰槽蓄冷与释冷特性模拟分析[J].制冷与空调,2024,24(12):82-88.
YU H X, WANG N B, TIAN B, et al. Simulation analysis on cold storage and release characteristics of ice storage tank with ice slurry[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2024, 24(12): 82-88.

[19] FENG Z G, MICHAELIDES E E. The binary lattice Boltzmann equation (LBE) and its application to particulate flows[J]. Journal

of Fluids Engineering, 2004, 126(5): 810-817.

[20] ZHOU Z J, ZHANG G H, LU W, LUO M H, WU Z G. Review on high ice packing factor (IPF) ice slurry: Fabrication, characterization, flow characteristics and applications[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 81: 110378.

[21] MI S, CAI L L, MA K B, 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(A): 11-20.

[22] MORIMOTO T, KOMIYA Y, ISHIGAKI T, et al. Experimental investigation of the effects of solute concentration on flow patterns and rheological properties of ice slurry[J]. International Journal of Refrigeration, 2026, 181:23-32.

[23] RAYHAN F A, YANUAR, PAMITRAN A S. Effect of ice mass fraction on ice slurry flow for cold energy storage application[J]. Energy Reports, 2020, 6: 790-794.

[24] ASAOKA T, TAJIMA A, KUMANO H. Experimental investigation on inhomogeneity of ice packing factor in ice slurry flow[J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 70: 33-41.

[25] WANG H, XIE B S, CAO P H, et al. Flowable oil-water phase change ice slurry for cold energy storage[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2025, 65: 103934.

[26] SUZUKI K, KAWASAKI T, ASAOKA T, et al. Numerical simulations of solid-liquid and solid-solid interactions in ice slurry flows by the thermal immersed boundary-lattice Boltzmann method[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 157: 119944.

[27] SUZUKI K, KUROIWA T, ASAOKA T, YOSHINO M. Particle-resolved simulations of ice slurry flows in a square duct by the thermal immersed boundary-lattice Boltzmann method[J]. Computers and Fluids, 2021, 228: 105064.

[28] MATSUMOTO K, KUBOTA H, UMEHARA Y, EHARA K, SAKAMOTO J, UEDA J, SATO K. Investigation on cohesive force of ice particles in ice slurry for long-term ice storage[J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 90: 156-162.

[29] DU Q, CHEN M B, LIN W Y, et al. Investigation on the supercooling release process in swirling flow crystallizer for supercooled ice slurry generation system[J]. Journal of Energy Storage, 2026, 141: 119234.

[30] DU Q, CHEN M B, SONG W J, et al. Investigation on the evolution of ice particles and ice slurry flow characteristics during subcooling release[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 209: 124008.

[31] KAMYAR A, AMINOSSADATI S M, LEONARDI C R, et al. Flow characterisation of monopropylene glycol ice slurry through a horizontal U-bend: A numerical approach[J]. European Journal of Mechanics / B Fluids, 2020, 82: 93-105.

[32] KUMANO H, MORIMOTO T, TANAKA K, et al. Effects of solutes and additives on ice growth prevention in ice slurry production[J]. International Journal of Refrigeration, 2024, 168: 389-398.

[33] KUMANO H, MORIMOTO T, MIKAMI S, et al. Study on effects of anti-freeze protein and polyvinyl alcohol on the production and flow behavior of ice slurry[J]. International Journal of Refrigeration, 2024, 167: 23-34.

[34] 王子彦,邢美波,张中天,等.添加剂对冰浆品质影响的研究进展[J].低温与超导,2024,52(6):28-34.
WANG Z Y, XING M B, ZHANG Z T, et al. Research progress on effect of additives on ice slurry quality[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2024, 52(6): 28-34.

[35] LIU S C, HAO L, RAO Z M, ZHANG X X. Experimental Study on Crystallization Process and Prediction for the Latent Heat of Ice Slurry Generation Based Sodium Chloride Solution[J]. Applied Energy, 2017, 185: 1948-1953.

[36] SIDQY R, PAMITRAN A S. Experimental Study on Ice Slurry Generations with Sodium Chloride Solution-based Concentrations and Flow-rates[J]. Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 2020, 72(2): 56-64.

[37] WU S W, ZHU C Q, HE Z Y, et al. Ion-Specific Ice Recrystallization Provides a Facile Approach for the Fabrication of Porous Materials[J]. Nature Communications, 2017, 8: 15154.

[38] ZHAO Y J, LI Z N, UTAKA Y, et al. Adhesion characteristics of ice in urea aqueous solution for efficient slurry formation in cold storage[J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 100: 335-342.

[39] ASAOKA T, ENDO Y. Experimental study on absorption ice slurry generator with ethanol solution as the refrigerant[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 162: 120333.

[40] ZOU L G, ZHANG X L, LIU W, LIU L. Experimental Study on the Preparation of Binary Ice by Additives Enhanced Vacuum Flash Evaporation[J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 131: 473-482.

[41] 徐爱祥.冰晶动力学行为与粒径分布演化规律研究[D].中南大学, 2014. XU A X. Study on dynamic behavior and particle size distribution evolution of ice crystals[D]. Changsha: Central South University, 2014.

[42] GAO Y, NING Y, XU M, WU C, MUJUMDAR A S, SASMITO A P. *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.

[43] BORDET A, PONCET S, POIRIER M, GALANIS N. Flow visualizations and pressure drop measurements of isothermal ice slurry pipe flows[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 99: 595-604.

[44] ZHANG P, SHI X J. Thermo-fluidic characteristics of ice slurry in horizontal circular pipes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 89: 950-963.

[45] 李智永.盐溶液冰浆相变过程中的流动及传热特性研究[D].中国矿业大学, 2023. LI Z Y. Study on flow and heat transfer characteristics of salt solution ice slurry during phase change[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.

[46] WU T, ZHU N, HU Z, LUO Z, HU P, LEI F. Numerical study on critical flow velocity of ice slurry in the pipe of ice source heat pump system[J]. Energy and Built Environment, 2024, 5: 607-614.

[47] MI S, CAI L L, LUO C. Analysis on flow resistance of two-phase ice slurry in pulsating flow[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2022, 186: 485-496.

[48] CAI L L, MI S, LUO C, LIU Z Q. 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.

[49] YADAV S K, ZIYAD D, KUMAR A. Numerical investigation on isothermal and non-isothermal ice slurry flow in horizontal elliptical pipes[J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 97: 196-210.

[50] TUTUNCHIAN O, ABBASALIZADEH M, KHALILIAN M, MIRZAEI I, RAMEZANPOUR A. Numerical simulation of ice slurry fluid flow characteristics and transport capability in the Flat-Sided Oval Pipe [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2025, 215: 109976.

[51] NIEZGODA- ŻELASKO B. Heat transfer in the melting of ice slurry during flow in a vertical slit channel[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2024, 153: 111133.

[52] KUCHMACZ J, NIEZGODA-ŻELASKO B. Ice slurry flow through a vertical slit channel[J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 128: 34-42.

[53] ZHOU Z J, WU Z G, ZHANG G H, LU W. Numerical study on heat transfer of ice slurry in twisted elliptical tubes[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 107: 114944.

[54] TIAN B, WU Y M, WANG N B, LIU L, YU H X, GUO Y H, SHAO S Q. Numerical investigation on the flow characteristics and the evolution of ice slurry in 90° elbow pipe by CFD-PBM coupled approach[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2025, 167: 109337.

[55] REZAEI M, PAKRAVAN H A. Numerical study of ice slurry flow and heat transfer in successive U-bends as part of tubular heat exchangers[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 191: 108357.

[56] CAI L L, MI S, LUO C, LIU Z Q. Numerical investigation of hydraulic and heat transfer characteristics of two-phase ice slurry in helically coiled tubes[J]. Energy and Buildings, 2022, 256: 111773.

[57] RAYHAN F A, YANUAR. Rheological behavior and drag reduction characteristics of ice slurry flow in spiral pipes[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2020, 20: 100734.

[58] KUMANO H, KOBAYASHI T, MORIMOTO T, ASAOKA T. Experimental study on flow characteristics of ice slurry through a T-junction Part Ⅱ: Turbulent flow[J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 116: 82-88.

[59] MI S, GENG S, CAI L L, XU C. Investigation on the thermal-fluidic characteristics of ice slurry in sinusoidal corrugated plate heat exchangers[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 55: 104176.

[60] BEKRI S, PAKRAVAN H A. *Dimpled tubes for efficient ice slurry thermo-hydraulics: a numerical investigation on geometrical configurations*[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 279: 127889.

[61] CAI L L, ZOU J, MI S, LUO C, XU C. The optimization of ice slurry flow and heat transfer performances in outward helically corrugated tubes with response surface methodology and genetic algorithm[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 278(Part D): 127385.

[62] ZHOU Z J, ZHANG G H, LU W, WU Z G, DOU B L, CUI S J. Experimental study on phase change heat transfer, energy consumption and entropy production characteristics of sucrose ice slurry in brazed plate heat exchanger[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2025, 65: 103937.

[63] BROOKS S, QUARINI G, TIERNEY M, YUN X, LUCAS E. Conditions for continuous ice slurry generation in a nylon helical coiled heat exchanger[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2020, 15: 100427.

[64] CARBONELL D, SCHUBERT M, FRANDSEN J R, et al. Development of supercoolers for ice slurry generators using icephobic coatings[J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 144: 90-98.