

储热储冷多场景应用专刊



冰蓄冷系统制冰与融冰技术研究综述

张波¹, 瞿楠², 王文科¹, 荣金利¹, 刘粦¹, 张童¹, 何沐然², 李超¹, 童莉葛^{2,3},
罗春欢^{2,3}

(¹北京京能恒星能源科技有限公司, 北京 100142; ²北京科技大学能源与环境工程学院, 北京 100083; ³北京科技大学顺德创新学院, 广东 佛山 528399)

摘要: 全球能源消耗持续增长, 温室气体排放加剧, 使得建筑领域面临巨大的节能减排压力。暖通空调系统作为建筑能耗的主要部分, 在夏季高峰时段的用电负荷可占建筑总能耗的70%, 对电网稳定运行构成严峻挑战。冰蓄冷技术作为一种高效的相变储能解决方案, 其核心在于利用夜间低谷电力制冰蓄冷, 在日间高峰时段融冰供冷, 从而将电力负荷从峰值时段转移至谷值时段, 有效缓解电力系统的峰谷差问题, 并带来显著的经济效益与环境效益。本文立足于制冰储冷与融冰释冷技术, 对主流技术路径进行了系统的梳理与比较。静态制冰结构简单但存在因冰层增厚导致热阻增大的效率瓶颈。动态制冰通过引入扰动生产冰浆以克服此缺陷。融冰技术主要聚焦于盘管系统, 分为内融冰与外融冰两种模式, 分析了其传热机制、性能差异及扰动的强化效果与副作用。本文对制冰与融冰技术进行了关联性的系统梳理与比较, 深化了对盘管融冰过程中冰层破碎、密度反转与引入空气搅拌等扰动对融冰过程传热强化的物理机制与影响, 为冰蓄冷系统的优化设计、运行策略制定及推广应用提供了重要的理论依据和工程参考价值。此外, 本文进一步探讨了冰蓄冷系统作为优质柔性储能单元, 在参与电网需求侧响应及虚拟电厂协同运行等方面的价值与应用前景。

关键词: 冰蓄冷; 相变储能; 制冰技术; 融冰技术

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0103

中图分类号: TK 124

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 03-1109-10

Review on ice making and ice melt technology of ice storage system

ZHANG Bo¹, QU Nan², WANG Wenke¹, RONG Jinli¹, LIU Shen¹, ZHANG Tong¹, HE Muran²,
LI Chao¹, TONG Lige^{2,3}, LUO Chunhuan^{2,3}

(¹Beijing Jingneng Stellar Energy Technology Co., Ltd, Beijing 100142, China; ²School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; ³Shunde Innovation School, University of Science and Technology Beijing, Foshan 528399, Guangdong, China)

Abstract: The continuous growth of global energy consumption and the intensification of greenhouse gas emissions have made the building sector a key battleground for energy conservation and emission reduction. As a core component of building energy consumption, HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) systems can account for up to 70% of total building energy consumption during peak summer electricity demand periods, not only

收稿日期: 2026-01-31; 修改稿日期: 2026-03-05。

基金项目: 广东省国际科技合作项目 (2023A0505050157)。

第一作者: 张波 (1974—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为集中供冷方向, E-mail: 13321138110@163.com; 通信作者: 童莉葛, 教授/博士生导师, 研究方向为制冷与低温、新型储能技术, E-mail: tonglige@me.ustb.edu.cn。

引用本文: 张波, 瞿楠, 王文科, 等. 冰蓄冷系统制冰与融冰技术研究综述[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 1109-1118.

Citation: ZHANG Bo, QU Nan, WANG Wenke, et al. Review on ice making and ice melt technology of ice storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 1109-1118.

increasing building operating costs but also posing a severe challenge to the stable operation of regional power grids. Ice storage technology, as an efficient phase change energy storage solution, utilizes off-peak electricity at night to produce and store ice, which is then melted during peak daytime hours to provide cooling, thereby achieving peak shaving and valley filling of power loads. This not only alleviates the pressure of peak-valley differences on the power grid but also reduces building operating costs and carbon emissions, offering significant economic and environmental benefits. This article systematically reviews and compares ice-making and ice-melting technologies. In terms of ice-making technology, static ice-making is widely used due to its simple structure and low equipment cost, but it faces the bottleneck of increased thermal resistance as the ice layer thickens, leading to decreasing ice-making efficiency over time. Dynamic ice-making, by introducing mechanical or fluid disturbance to produce ice slurry, effectively overcomes the shortcomings of static ice-making. Among these methods, the scraping method, with its high ice-making efficiency, stable ice slurry quality, and low operation and maintenance costs, has become the mainstream technical approach. In terms of ice-melting technology, coil-based systems represent the core application form, which are divided into internal melting and external melting modes: internal melting melts the ice layer from the inside out by introducing hot water or hot air into the coil, which is fast but prone to local overheating of the ice layer; external melting melts the ice layer through external fluid scouring, which is more uniform but has relatively lower heat transfer efficiency. In addition, the article deeply analyzes the heat transfer enhancement mechanisms of ice layer fragmentation, density inversion, and air stirring disturbance on the ice melting process, as well as potential side effects such as increased energy consumption. Through this review of ice-making and ice-melting technologies, this article deepens the understanding of the physical mechanisms in the coil ice melting process, providing an important theoretical basis and engineering reference for the optimization design, operation strategy formulation, and promotion of ice storage systems, which is of great significance for advancing energy conservation and emission reduction in the building sector. Furthermore, this paper explores the potential value and application prospects of ice storage systems as high-quality flexible energy storage units in participating in grid demand-side response and coordinated operation with virtual power plants, expanding the theoretical framework for their role in building a new power system.

Keywords: ice storage; phase change energy storage; ice making technology; ice melt technology

全球能源消耗的持续上升加剧了温室气体排放与全球变暖^[1]。建筑领域消耗了全球能源供应的 34%，其碳排放占总量的 15%，而化石燃料等传统能源仍在支撑着其日益增长的采暖与降温需求^[2]。其中，暖通空调系统是建筑能耗的主要部分^[3-5]，商业建筑能耗约占城市总能耗的 25%^[6]，其空调负荷具有高度可调性，在特定时段可占建筑总能耗的极高比例，这直接加剧了电力系统的峰值负荷，导致

电网在高峰时段面临巨大压力，而在低谷时段电力过剩。

为应对日益增长的能源需求与实现温控目标所要求的建筑领域大规模减排，冰蓄冷等相变储能技术已成为重要的研究和应用方向。其核心在于利用夜间廉价的低谷电制冰蓄冷，于日间高峰时段融冰供冷，从而将电力负荷从峰值转移至谷值，有效缓解电力系统的峰谷差问题^[7]。该技术的应用价值已

通过多维度研究验证:一方面,其卓越的削峰填谷能力带来了显著的经济与环境效益^[9]。针对不同建筑类型的系统分析表明^[9-12],相比传统空调系统,冰蓄冷系统的运行功耗与二氧化碳排放可分别降低4.59%与17.8%^[13],其全负荷功耗成本最大可降低32.65%^[14],且通过利用峰谷电价差可有效提升项目的经济回报^[9]。另一方面,冰作为储冷介质具有成本低廉、环境友好的先天优势。冰蓄冷系统使用寿命长,且其COP通常高于常规空调系统,这使其成为应对电力波动、替代传统电池储能的可行方案之一^[15-16]。

尽管冰蓄冷技术在建筑节能与电力系统调峰领域已取得显著进展,但在应用中仍存在冰堵频发、系统响应滞后、经济性差等工程难题。本文立足于从制冰储能到融冰释冷的视角,系统梳理主流制冰与融冰技术,综述了静态、动态制冰方式与内外两种融冰技术。本文的创新点在于:①从冰块与冰浆两种产品角度对制冰、融冰方式与机制进行了梳理与比较;②梳理了冰层破碎、水的密度反转与扰动强化等物理过程对冰盘管式融冰的影响;③指出了当前外融冰技术中扰动强化的负面影响,并提出了一种无氧扰流外融冰方式;④介绍了冰蓄冷技术在增加负荷侧需求响应、虚拟电厂等方面的应用拓展。

1 蓄冰系统储冷过程制冰方式分类及其特性

1.1 静态制冰及其储冷特性

静态制冰主要分为盘管制冰与封装式冰球制冰两类,其核心特征是在蓄冰槽内通过换热壁面与外部冷源进行间接换热实现制冰,结构简单、控制方便。其制冰机制本质上是基于热传导的冰层生长过程,冰层在壁面静态附着并增厚,随着厚度增加,冰层自身的导热热阻显著增大,导致总传热热阻上升、传热效率衰减,进而严重制约制冰效率与系统COP^[17]。静态冰层堆积进一步加剧了热阻与效率衰减问题。

尽管存在效率瓶颈,静态制冰技术因其对初投资敏感、控制便捷且在负荷波动较小的场景中仍具工程价值而被保留应用^[17]。然而,其整体效率受限的问题(如COP偏低、制冰速度慢、负荷响应滞后)日益凸显,这也促使了以克服此热阻缺陷、实现更

高效与响应速度为目标的动态制冰技术的发展。

1.2 动态制冰及其储冷特性

动态制冰是相对于静态制冰发展而来的一类高效制冰技术,其核心在于引入主动的物理扰动或状态控制,以直接破坏或防止冰层的静态形成与累积,从而从根本上克服了静态制冰因冰层增厚导致的换热效率下降、制冰速度慢等瓶颈问题。动态制取冰浆的方法主要包括过冷法、流化床法、壁面刮削法、真空法、直接接触法等方法^[18],其中,从冷却方式看,前三种属于间接冷却,后两种属于直接冷却。

(1) 过冷法。过冷法制冰是通过调控工质流态与温度,使其在过冷状态下被触发结晶以生成冰浆的技术^[19]。其机制是一个“过冷积累-触发释放-结晶生长”的动态过程,关键在于精确控制过冷度的维持与结晶触发时机,既要确保结晶启动,又要防止换热器内提前冰堵,以保障系统连续稳定运行,其流程原理如图1所示。

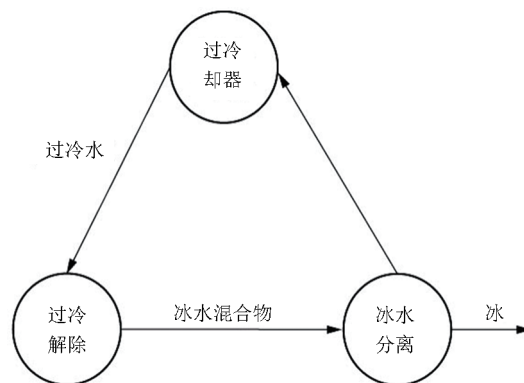


图1 过冷法制冰基础原理图

Fig. 1 Basic principle diagram of supercooling ice making

与静态制冰相比,过冷法通过“过冷触发-连续结晶”的动态机制,有效避免了冰层增厚导致的热阻累积问题^[17],实现了冰浆的高效连续制取,尤其适用于对制冰速率和系统稳定性有较高要求的场景。然而,其核心瓶颈在于换热器内部提前结晶导致的冰堵风险,严重制约了系统效率与稳定性。当前研究前沿聚焦于表面改性与参数优化两大方向,通过降低冰晶附着力与精准控制结晶触发时机,以实现系统的稳定高效运行。

(2) 直接接触式。为了克服过冷法制取冰浆的缺点并提高传热效率,直接接触法采用制冷剂与液

体直接接触的方式制取冰浆^[20],如图2所示。该技术通过制冷剂与液体的直接接触,保证了较高的换热效率^[21]。其核心在于省去了传统静态制冰中的换热管壁面,理论上可实现更高的传热效率与更连续的制冰过程^[22],该方法主要分为液-液直接接触式与气-液直接接触式两大类。

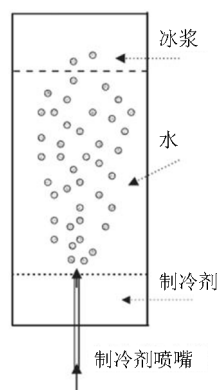


图2 气液直接接触简图

Fig. 2 Schematic diagram of gas-liquid direct contact

在液-液直接接触模式中,通常选用与水互不相溶、密度大于水的低温液体(如氟利昂类制冷剂^[23]、氟油或乙二醇水溶液)作为载冷剂。载冷剂经喷嘴喷入水体,通过强烈的对流换热与蒸发带走热量,使水结晶成冰晶,形成冰浆。该模式换热效率高,但仍面临喷嘴冰堵、载冷剂与水分离困难等挑战^[22]。相比之下,气-液直接接触模式采用低温气体作为载冷剂,通过形成气泡实现快速传热。气体易于从液相分离,有效规避了液体分离与冰堵问题,更具环保与防堵优势,但其气体传热系数相对较低,系统能耗受风机或压缩机影响较大。

尽管直接接触式制冰在实验室研究与示范工程中展现出巨大潜力,但其工业化应用仍受限于制冷剂分离难度与局部冰堵风险^[24]。当前的应对策略主要集中在优化喷嘴布局与雾化模式,以及开发高效的相分离器,以提升系统的稳定性与经济性^[21]。在具备峰谷电价政策的地区,该技术通过合理的蓄冰容量控制,可在数年内实现投资回收,在区域供冷、烘焙冷却等特定场景中展现出应用价值。

(3) 真空式。真空式动态制冰技术是在密闭低压环境中,利用水的蒸发吸热实现冰晶生成的制冰方法。其核心在于水的沸点随压力降低而下降,当系统压力降至水的饱和蒸汽压(如0℃时约611 Pa)

以下时,水闪蒸并带走汽化潜热,使水温降至冰点以下而固化结晶^[24],其制冰系统简图如图3所示。与过冷法或直接接触法不同,该方法无需外部制冷剂,而是通过调控压力与湿度诱导水自身相变,理论上避免了换热壁面热阻与冰堵风险^[19],但其工业化受限于真空维持的高能耗与严苛的气密性要求。

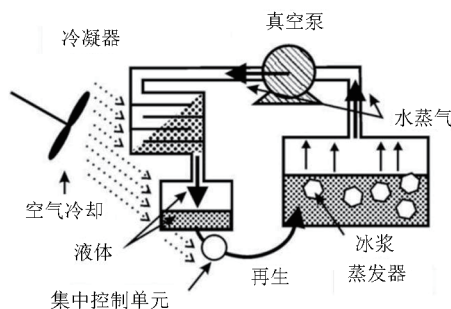


图3 真空式制冰系统简图

Fig. 3 Schematic diagram of vacuum ice making system

其机理是“压力调控-蒸发吸热-结晶”的耦合过程:系统通过抽气降压触发水闪蒸,水温迅速下降;当过冷水受扰动或接触晶核时,便迅速结晶成冰浆。为提高效率,可通过引入除湿单元或利用液化天然气气化废冷来辅助,以减少真空泵负荷、降低整体能耗^[25]。然而,实际运行中微泄漏易导致真空度下降、能耗剧增,且蒸发界面结霜、流道堵塞等问题影响系统长期稳定性。

该技术目前仍处于小规模试验与示范阶段。维持高真空度所需的高能耗与严苛的气密性要求,使其单位制冰能耗通常高于传统机械压缩式系统,经济竞争力受限。因此,它更适用于具备天然低温冷源(如LNG废冷利用)的特殊工业场景。其未来的规模化应用,关键在于能否在显著降低真空维持能耗、并切实提升系统长期运行稳定性方面取得实质性突破。

(4) 刮削法。刮削式制冰通过旋转刮刀对换热壁面进行持续刮削,避免冰层堆积及热阻增大,以提升制冰效率^[19],与依赖相变或压力调控的制冰路径形成互补。其设计形式多样(图4),通过制冷剂与水的逆向或顺向流动,配合刮削使冰晶不断生成与脱离,最终形成冰浆或片状冰^[19]。相比静态制冰,该技术以物理扰动打破热阻瓶颈,显著加快制冰速度并提升冰浆浓度,适用于食品冷链、商业空调等高要求场景。

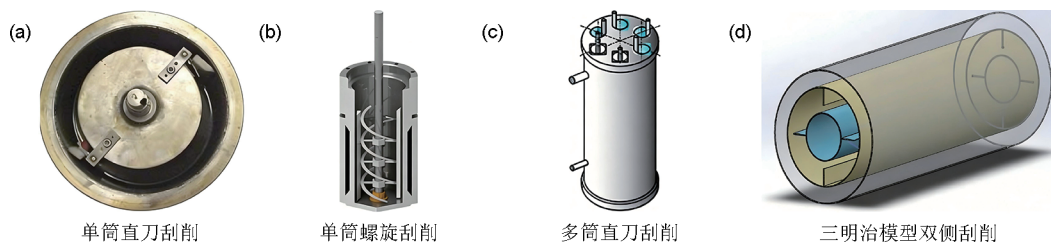


图4 多种刮削式制冰器
Fig. 4 Multiple scraper-type ice makers

其物理机制为“换热强化-冰层破坏-冰晶脱落”的动态循环：制冷剂在管内蒸发使外壁水膜结晶，随冰层增厚、热阻上升，刮刀通过剪切力破坏冰层结构，将冰晶刮离壁面，维持壁面低冰层状态以保障传热稳定^[19]。结构上包括单筒直刀、单筒螺旋、多筒直刀及三明治模型双侧刮削等形式，通过优化刮刀排布与运动方式提升刮削效率与制冰能力。刮刀材质、刃口、转速与间隙等参数直接影响刮削效果与能耗，需通过参数优化平衡制冰速率与设备磨损。

该技术成熟度较高，已在食品冷链、商业空调等领域实现商业化，运行稳定且无需处理工质分离或高能耗真空维持。然而，其发展受限于机械刮刀易磨损、维护成本高及高湿环境可能出现的效率下降等问题。未来技术方向集中于开发耐磨材料、优化智能控制算法，以进一步提升其经济性与广泛适用性。

1.3 制冰技术储冷性能综合比较

静态制冰依赖冰层-壁面导热，冰层增厚致热阻累积、传热效率与COP衰减，且冰层附着恶化热阻，整体效率受限。动态制冰通过破坏冰层堆积避免热阻问题，提升能效与响应能力。其中，过冷法以系统简单、高换热系数与连续制冰为核心，换热效率优但易冰堵，需参数优化；直接接触式凭借无中间传热阻力与低成本占优，COP达1.25~3.5，泵送功率降83%，适合区域供冷、烘焙冷却，但依赖防冰堵设计；真空式具有无热阻与无冰堵优势，试点COP2.5~3.5，但高能耗真空与气密性要求削弱经济性，仅适用于LNG废冷等特殊场景；刮削式在“技术成熟度、运行稳定性与维护成本”维度表现突出，制冰率50%~70%、COP约2.43，结构紧凑易集成，已在食品冷链与商业空调广泛应用。典型制冰技术实验数据对比见表1。

表1 动态制冰技术对比
Table 1 Comparison of ice-making technology

技术名称	原理	优点	缺点	制冰率	COP
过冷法	水冷却至过冷态后通过触发产生冰晶	系统简单、换热系数大、可连续制冰	存在冰堵问题	30%~50%	3.0~4.5
直接接触法	制冷剂与水直接接触换热	传热效率高	制冷剂分离困难	40%~60%	3.5~5.0
真空法	真空环境下水蒸发冷却制冰	成冰稳定性好	真空能耗高、系统气密性要求高	20%~40%	2.5~3.5
刮削法	旋转刮刀刮除冰层	制冰效率高、可连续运行	机械部件易磨损	50%~70%	3.0~4.0

2 蓄冰系统释冷过程融冰方式及特性

从融冰特性的角度来看，冰浆作为一种动态蓄冷介质，其融冰过程本质上是悬浮冰晶的相变释冷，融冰物理机制直接，得益于冰晶的均匀混合，其热响应迅速且不存在显著的密度分层与局部换热不均问题，这构成了其在实际工程应用中的核心优势。相比之下，以盘管为代表的静态蓄冰系统，其融冰过程涉及静止附着于换热管壁的冰层消融，其融冰速率、温度分布及能效受热质传递、冰层演化等多因素耦合影响，技术机理更为复杂。本部分将聚焦讨论盘管式系统融冰方式。在盘管蓄冰系统

中，冰层在换热管外壁的静态生长决定了其独特的融化行为，根据热源作用位置主要可分为内融冰与外融冰两种基本模式，其机理如图5所示。这两种模式在热量输入方式、传热强化路径及冰层动态演变规律上均存在根本性差异，构成了后续分析的核心基础。

2.1 内融冰技术及其释冷特性

内融冰技术的核心机制是高温载冷剂在盘管内通过热传导与自然对流，与管外附着冰层进行换热，驱动其从内向外逐步融化^[20]。初始阶段，较大的温差使换热强度达到峰值，冰层自内壁开始消融。随着融冰推进，冰层减薄并在浮力作用下偏心

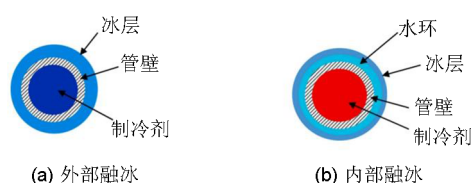


图5 两种典型融冰机理

Fig. 5 Two typical ice melting mechanisms

漂移,与盘管底部接触、破碎,直至完全脱离。这一过程伴随固液界面的动态演化,水的密度在 4°C 附近的反转现象显著影响自然对流方向与强度,进而作用于热质传递效率。对于水平盘管,冰层偏心漂移会在管底形成极薄水膜以维持导热,而在管顶则因水空间扩大增强自然对流,两者协同使管壁热通量在大部分融冰期内保持稳定^[27]。当冰层融化至临界厚度时,会经历“冰破碎点”这一关键转折,冰壳碎裂后,残余冰块在水箱内的剧烈浮动可显著增强扰动与对流换热。

Samah等^[28]通过可视化实验研究了冰的生长与分离,评估了流速与表面润湿性对冰附着与脱落的影响,为开发无移动组件的冰浆生产方法提供了依据。此外,基于温度转换法的多维数值模拟被广泛应用于内融冰过程的理论评价,相关研究证实了冰层偏心融化与破碎后浮动是提升融冰效率与冷却功率的关键因素^[29-30]。值得注意的是,水在 4°C 附近的密度反转现象对内融冰过程有重要影响^[28]。这种非线性密度分布会导致融冰过程中自然对流方向发生转变,从而影响热质传递效率。Dekhil等^[31]的微观模拟进一步揭示了密度反转与自然对流在蓄冰单元内的双重作用:既加速冰形成前的降温,又抑制冰层生长,并在融化阶段显著加速冰层消融。因此,准确表征水密度随温度变化的特性,对完善内融冰的热工模型与性能预测至关重要。

2.2 外融冰技术及其释冷特性

外融冰技术的核心机制在于换热介质直接进入蓄冰槽,与附着于盘管外表面的冰层进行对流及相变换热,驱动冰层从外向内逐步消融。初始阶段,换热介质与冰层外表面的温差最大,热流密度达到峰值,冰层自外表面开始融化。随着融冰推进,冰层局部减薄并在浮力与流体剪切力作用下发生位移,逐渐与盘管壁脱离接触。当冰层融化至临界厚度时,与换热表面的接触完全中断,最终在自然对流作用下破碎、完全消融。值得注意的是,冰中气

泡的存在会显著改变其融化特性。气泡冰的形成会改变冰晶生长形态、增加界面粗糙度,气泡尺寸越大,对自然对流的扰动越显著,从而影响传热效率。通过引入空气搅拌扰动,例如燃气鼓风机或气体吹制装置,可在冰水界面产生微通道效应与增强湍流,有效提升外融冰效率,相关研究表明,在特定气体流量下可使冻结速率大幅提升。在底部进气搅拌的运行条件下,能够更高效地形成合理的温度分层,且适当提高水流速有助于进一步优化温度场的均匀性。

融冰初期以固液界面热传导为主,随着冰层减薄,水-冰界面的自然对流逐渐成为主导传热机制^[32]。王绍宇等^[33]基于焓-孔隙率模型的数值模拟证实,释冷阶段由自然对流驱动的多尺度涡旋结构能持续强化热量输运,使蓄冰单元完全融化时间显著缩短。尽管空气搅拌扰动展现出通过增强界面扰动以提升传热效率的潜力^[34],但目前对于气泡尺寸、气体流速与传热效率之间的量化关联机制仍缺乏系统性研究。

2.3 融冰过程性能比较与优化方向

盘管融冰系统凭借其运行可靠及维护成本低的优势,已成为当前蓄冷工程的主流技术。内融冰与外融冰是其两种主要模式,二者在换热界面与传热路径上存在根本差异,其性能比较如表2所示。内融冰由管内载冷剂驱动冰层自内向融化,但管外静水层会随融冰进程不断增厚,形成显著的导热热阻,导致释冷速率非线性衰减及后期供水温度升高。相比之下,外融冰利用空调回水等方式直接冲刷冰层外表面,实现了自外向内的融化,有效规避了静水层热阻累积,从而能提供更为平稳的释冷曲线与持续低温的冷水。值得注意的是,部分外融冰系统为提高换热效率会向蓄冰槽内鼓入空气进行搅拌扰动,但会引入两个负面影响:一是增加了水中溶解氧浓度,加剧了金属管道及设备的腐蚀风险^[35];二是鼓风机运行时产生的热量会经压缩气体进入蓄冰池,造成额外的冷量损失。

为了延缓腐蚀,增加设备的使用年限,研究发现通过合理布置射流喷嘴的位置和角度,可以在槽内形成有效的循环流场,实现与外融冰过程的协同优化。Yang等^[36]评估气液流场分布对传热系数的影响发现最高平均传热系数可达自然对流的3~5倍。Liu等^[37]发现,气泡流融冰虽能强化传热,但流量从

表 2 盘管式内融冰与外融冰性能对比		
Table 2 Performance comparison of internal and external ice melting in coil-type systems		
比较维度	内融冰	外融冰
传热机制	高温载冷剂在盘管内通过热传导与自然对流，驱动冰层自内向外逐步融化	换热介质直接冲刷冰层外表面，驱动冰层自外向内融化
热量输入位置	盘管内部	蓄冰槽内部，冰层外表面
主导传热过程	初始阶段以固液界面热传导为主；随着融冰推进，水-冰界面的自然对流作用增强	融冰初期以热传导为主，后期对流逐渐成为主导
释冷曲线特性	释冷速率非线性衰减，后期供水温度升高	提供更平稳的释冷曲线与持续低温的冷水
关键技术瓶颈/挑战	1. 管外静水层热阻：随融冰进程不断增厚，是限制效率的主要瓶颈。	1. 搅拌扰动副作用：为提高效率鼓入空气搅拌，会增加水中溶解氧浓度，加剧系统腐蚀风险；同时鼓风机产热会造成额外冷量损失
	2. “冰破碎点”：冰壳碎裂后残余冰块浮动可增强换热，但过程控制复杂	2. 气泡影响：冰中气泡会改变冰晶形态与界面粗糙度，扰动自然对流，影响传热
优化与强化方向	3. 水的密度反转：4℃附近的密度反转现象显著影响自然对流方向与热质传递效率	3. 量化设计难题：气泡尺寸、气体流速与传热效率间的关联机制缺乏系统性研究
	1. 利用冰层偏心融化与破碎后的浮动强化扰动与对流换热	1. 开发无氧或低氧扰流技术，在强化换热的同时，尽可能减少腐蚀与冷损
适用场景	2. 在数值模型中准确表征水的密度反转特性，以优化热工模型与性能预测	2. 优化喷嘴布局，以形成合理温度分层，提升温度场均匀性
	3. 优化载冷剂流量与温度控制策略，以延缓静水层增厚	3. 深入研究气泡动力学，建立气体参数与传热强化的量化关系，为设计提供依据
	适用于系统结构相对封闭、对水质管理要求严格，且允许释冷速率有一定衰减的场景	适用于对供水温度稳定性要求高、可接受增设辅助搅拌设备，并需应对腐蚀防护的场景

0.5 L/min 增至 2.0 L/min 时融化效率下降 58.0%，因此必须综合考虑流场分布对融冰的影响。

3 冰蓄冷技术在智慧能源系统中的应用拓展

随着电力系统向清洁、柔性、智能化方向加速转型，电网侧对灵活、可调、快速响应的分布式资源需求日益迫切。冰蓄冷系统作为一种储能系统，因其固有的负荷双向调节能力、大规模储能潜力及成熟的工程基础，已不再局限于建筑本体的热管理范畴。冰蓄冷技术作为关键的柔性负荷调节环节，深度融入负荷侧需求响应与虚拟电厂等智慧能源体系，在提升电网运行灵活性、促进可再生能源消纳等方面，具有储能价值与应用潜力。

3.1 冰蓄冷在负荷侧需求响应中的应用

冰蓄冷系统作为典型的热储能单元，其核心功能在于通过相变材料的潜热特性实现能量的时空转移，本质上具备双向调节电网负荷的能力。在商业建筑场景中，该系统不仅能利用分时电价机制进行削峰填谷^[38-39]，更可通过主动响应电网调度指令，动态调整蓄/释冷功率，成为需求响应项目的关键

参与者^[40]。系统的控制策略是实现高效响应的核心。通过模型预测控制算法，结合建筑热负荷预测、电网实时电价信号及冰槽蓄冰状态，可在满足室内热舒适度的前提下，动态优化蓄冰速率与融冰功率。在电网负荷高峰时段，系统可通过提高融冰速率释放冷量，减少常规制冷机组的运行功率；而在电价低谷或电网负荷低谷时段，则加大蓄冰功率，将电能转化为冷能存储。强化学习算法的应用进一步提升了系统的自适应能力，通过持续学习建筑负荷模式与电网信号特征，优化控制策略以最大化经济效益与电网服务价值。

为削减工业园区峰值用电功率，陈东文等^[41]将广州某工业企业的空调系统改造为水蓄冷空调系统，研究发现整个全寿命周期内水蓄冷空调系统相比于常规空调系统能够节约 238.3 万元的费用。欧阳娟娟等^[42]设计的专业足球场冰蓄冷系统的全年平均设计能效比为 4.0，冷站全年单位冷量电费成本低于 0.15 元/kWh，实现了电力移峰填谷、节约了运行费用。

3.2 冰蓄冷在虚拟电厂中的应用

虚拟电厂作为聚合分布式资源参与电力市场的高阶形态，通过物联网与云平台技术，将区域内分

散的冰蓄冷系统、光伏、储能电池及电动汽车等资源整合为统一调度的能源集群,其中冰蓄冷系统凭借其大容量、长周期的储能特性,成为虚拟电厂中关键的“柔性冷负荷”节点^[43-44]。以商业建筑场景为例,多个建筑的冰蓄冷系统可通过智能终端实时采集蓄冰量、融冰速率及建筑热负荷数据,经云端平台聚合形成“虚拟冷库”,其响应时间覆盖小时级至日级,与电网调峰、调频需求高度匹配。张宁宇^[39]构建了基于多模式协同与智能控制的动态供冷系统,通过夜间纯蓄冰、蓄冰-供冷复合及纯融冰与基载供冷多模式灵活切换,有效解决了传统空调系统峰荷突出的问题。

在协同优化层面,冰蓄冷系统与光伏的联动可有效解决消纳难题:白天光伏出力高峰时,系统利用富余电力制冰,将电能转化为冷能存储;傍晚光伏出力下降、电网负荷攀升时,通过融冰释放冷量,减少常规制冷机组的电力消耗^[45]。与电池储能的协同则形成成本与响应速度的互补:冰蓄冷以较低成本实现长周期负荷平移,电池储能则凭借毫秒级响应速度满足瞬时功率平衡需求,二者结合可有效降低虚拟电厂综合投资成本。

4 总结与展望

本文系统总结了冰蓄冷系统中制冰与融冰技术的研究现状,涵盖了从制冰方法到系统分类、从静态到动态系统的多元化技术路径,并梳理了当前多种技术的机制与应用现状,总结了研究中存在的问题。主要结论如下:

(1) 静态蓄冰系统结构可靠但释冷效率受限于冰层与换热壁面间不断增大的热阻,释冷速率呈现非线性衰减;动态冰浆系统则利用高比表面积的悬浮冰晶实现了快速均匀的释冷,但系统复杂性与高投资制约了其广泛应用。

(2) 冰浆系统在释冷均匀性与热响应速度上优于盘管系统,因其避免了固定的换热界面热阻。然而,盘管系统(尤其内融冰)凭借成熟的技术、低维护成本及对水质的宽松要求,仍是当前工程应用中的主流选择。

(3) 在盘管系统中引入扰动(如空气搅拌)可有效打破传热热阻、提升融冰效率。但扰动也带来副作用,如增加溶解氧加剧腐蚀,以及鼓风设备自身产热导致的冷量损失。

(4) 冰蓄冷技术通过高效的负荷转移与能量存储能力,在参与需求响应与虚拟电厂运行中展现出显著优势。其作为优质的柔性储能单元,不仅提升了电网运行的灵活性与可再生能源的消纳水平,也为用户带来了直接的经济效益。

在未来的研究与应用中,开发无氧或低氧扰流技术是提升外融冰系统性能的关键方向之一。此类技术旨在通过优化扰动方式,在强化冰水混合、降低垂直方向温度分层的同时,尽可能减少因鼓入空气所导致的水中溶解氧升高,从而有效缓解系统腐蚀风险与额外的冷量损失,为实现更高效、更耐久且更经济的盘管蓄冷系统提供新的技术路径。面向我国“双碳”战略目标,冰蓄冷技术作为关键的柔性调节资源与储能手段,其发展具有重要战略价值。通过规模化应用与智慧化协同,该技术不仅能大幅提升建筑能效、降低碳排放,更能有效支撑高比例可再生能源接入电网,增强电力系统的灵活性与韧性。因此,深化冰蓄冷在新型能源系统中的集成应用研究,是推动能源结构清洁转型、实现建筑与电力行业协同减排的关键路径之一。

参考文献

- [1] ALIZADEH M, SADRAMELI S M. Development of free cooling based ventilation technology for buildings: Thermal energy storage (TES) unit, performance enhancement techniques and design considerations-A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 58: 619-645. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.168.
- [2] KAUKO H, PINEL D, GRAABAK I, et al. Assessing the potential of seasonal thermal storage for local energy systems: Case study for a neighborhood in Norway[J]. *Smart Energy*, 2022, 6: 100075. DOI:10.1016/j.segy.2022.100075.
- [3] AKEIBER H, NEJAT P, MAJID M Z A, et al. A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 60: 1470-1497. DOI:10.1016/j.rser.2016.03.036.
- [4] DEVAUX P, FARID M M. Benefits of PCM underfloor heating with PCM wallboards for space heating in winter[J]. *Applied Energy*, 2017, 191: 593-602. DOI:10.1016/j.apenergy.2017.01.060.
- [5] YOUNG B A, FALZONE G, WEI Z H, et al. Reduced-scale experiments to evaluate performance of composite building envelopes containing phase change materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 162: 584-595. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.160.
- [6] 王楠, 高正浩, 蒋思宇, 等. 基于多时间尺度深度学习的商业建筑非侵入式负荷分解方法[J/OL]. *南方电网技术*, 1-11[2025-12-22]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20250820.1551.008>.

- WANG N, GAO Z H, JIANG S Y, et al. Multi-time-scale deep learning method for commercial building non-intrusive load disaggregation[J/OL]. *Southern Power System Technology*, 1-11 [2025-12-22]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20250820.1551.008>.
- [7] MOMENI M, ASKAR S, FARTAJ A. Thermal performance evaluation of a compact two-fluid finned heat exchanger integrated with cold latent heat energy storage[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 230: 120815. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120815.
- [8] RAHGOZAR S, DEGHAN M, POURRAJABIAN A, et al. Economic feasibility of ice storage systems for office building applications: A climate sensitivity analysis[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 45: 103712. DOI:10.1016/j.est.2021.103712.
- [9] 曾浩然, 孙长富. 冰蓄冷在酒店项目中的应用及能耗分析[J]. *上海节能*, 2022(12): 1613-1617. DOI: 10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2022.12.021.
- ZENG H R, SUN C F. Application of ice storage in hotel projects and energy consumption analysis[J]. *Shanghai Energy Conservation*, 2022(12): 1613-1617. DOI: 10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2022.12.021.
- [10] XU Y F, MA X, HASSANIEN R H E, et al. Performance analysis of static ice refrigeration air conditioning system driven by household distributed photovoltaic energy system[J]. *Solar Energy*, 2017, 158: 147-160. DOI:10.1016/j.solener.2017.09.002.
- [11] ARCURI B, SPATARU C, BARRETT M. Evaluation of ice thermal energy storage (ITES) for commercial buildings in cities in Brazil[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 29: 178-192. DOI: 10.1016/j.scs.2016.12.011.
- [12] 吴庆, 王文武, 周奕昕, 等. 某电网办公楼冰蓄冷空调系统设计及经济性分析[J]. *安徽建筑*, 2025, 32(5): 94-96.
- WU Q, WANG W W, ZHOU Y X, et al. Design and economic analysis of ice storage air conditioning system in an office building of a power grid[J]. *Anhui Architecture*, 2025, 32(5): 94-96.
- [13] HOSEINI RAHDAR M, EMAMZADEH A, ATAIE A. A comparative study on PCM and ice thermal energy storage tank for air-conditioning systems in office buildings[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 96: 391-399. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.11.107.
- [14] SANAYE S, HEKMATIAN M. Ice thermal energy storage (ITES) for air-conditioning application in full and partial load operating modes[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2016, 66: 181-197. DOI:10.1016/j.jrefrig.2015.10.014.
- [15] CHONG L W, WONG Y W, RAJKUMAR R K, et al. Hybrid energy storage systems and control strategies for stand-alone renewable energy power systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 66: 174-189. DOI:10.1016/j.rser.2016.07.059.
- [16] LI G L, HAN Y H, LI M, et al. Study on matching characteristics of photovoltaic disturbance and refrigeration compressor in solar photovoltaic direct-drive air conditioning system[J]. *Renewable Energy*, 2021, 172: 1145-1153. DOI: 10.1016/j.renene.2021.03.110.
- [17] 董凯军, 冯自平, 郑瑞芸, 等. 冰浆潜热输送矿井空调设计及其经济分析[J]. *制冷与空调*, 2011, 25(1): 1-6.
- DONG K J, FENG Z P, ZHENG R Y, et al. Design and economic analysis of mine air-conditioning system using ice slurry for latent-heat transportation[J]. *Refrigeration & Air Conditioning*, 2011, 25(1): 1-6.
- [18] 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. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124008.
- [19] HU R, ZHANG C, ZHANG X L, et al. Research status of supercooled water ice making: A review[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 347: 118334. DOI:10.1016/j.molliq.2021.118334.
- [20] 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. DOI:10.3969/J.ISSN.1005-9180.2024.06.0014.
- MENG X Y, ZHANG Q G, LIN H X, et al. Research progress of ice slurry technology and field application[J]. *Refrigeration*, 2024, 43(6): 62-69. DOI:10.3969/J.ISSN.1005-9180.2024.06.0014.
- [21] ZHENG P B, XIE J, LAN W Q. An effective way to preserve aquatic products: Slurry ice and its properties[J]. *Food Research International*, 2026, 229: 118516. DOI:10.1016/j.foodres.2026.118516.
- [22] GAO Y G, LUO J Q, FANG F, et al. On the stability of nanofluid ice slurry produced via impinging stream method under thermal and phase-change cycles[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 52: 103725. DOI:10.1016/j.csite.2023.103725.
- [23] 张尧康, 苏林, 董凯军, 等. RC318 直接接触制冰特性实验研究[J]. *暖通空调*, 2019, 49(6): 126-130.
- ZHANG Y K, SU L, DONG K J, et al. Experimental study on ice slurry production using direct contact heat transfer of RC318 refrigerant and water[J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2019, 49(6): 126-130.
- [24] 黄河源, 范明升. 真空制冰的工作原理与选型设计[J]. *制冷与空调*, 2017, 17(9): 83-86. DOI:10.3969/j.issn.1009-8402.2017.09.021.
- HUANG H Y, FAN M S. Vacuum ice works design and selection[J]. *Refrigeration and Air-Conditioning*, 2017, 17(9): 83-86. DOI: 10.3969/j.issn.1009-8402.2017.09.021.
- [25] TIAN B, WU Y M, WANG N B, et al. Experimental study of a direct-cooled supercooled water dynamic ice storage system: Stability and performance optimization[J]. *Journal of Energy Storage*, 2026, 146: 120119. DOI:10.1016/j.est.2025.120119.
- [26] 禹承昆, 潘东风, 王浩, 等. 内融冰与外融冰结合的盘管式冰蓄冷系统设计[J]. *科技创新与应用*, 2023, 13(13): 150-152, 156. DOI: 10.19981/j.CN23-1581/G3.2023.13.035.
- YU C K, PAN D F, WANG H, et al. Design of coil ice storage system combining internal melting with external melting[J]. *Technology Innovation and Application*, 2023, 13(13): 150-152, 156. DOI:10.19981/j.CN23-1581/G3.2023.13.035.
- [27] 刘月琴, 张元明, 吕超, 等. 盘管式蓄冰槽传热性能研究综述[J]. *制冷与空调*, 2020, 20(6): 68-72, 78.

- LIU Y Q, ZHANG Y M, LV C, et al. A review for research on heat transfer performance of coiled ice storage tank[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2020, 20(6): 68-72, 78.
- [28] SAMAH W, CLAIN P, RIOUAL F, et al. Investigation of ice detachment by a liquid jet on various submerged surfaces for the development of ice slurry generators without mechanical scraping [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236: 121463. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2023.121463.
- [29] KWASI-EFFAHA C C, OKPAKO O. Comprehensive review of emerging trends in thermal energy storage mechanisms, materials and applications[J]. Frontiers in Energy Research, 2025, 13: 1651471. DOI: 10.3389/fenrg.2025.1651471.
- [30] GUO X X, XU X Y, WANG Z X, et al. Research progress on the performance enhancement technology of ice-on-coil energy storage[J]. Energies, 2025, 18(7): DOI:10.3390/en18071734.
- [31] 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. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2021.116866.
- [32] XU X Y, CHANG C, GUO X X, et al. Experimental and numerical study of the ice storage process and material properties of ice storage coils[J]. Energies, 2023, 16(14): DOI: 10.3390/en16145511.
- [33] 王绍宇, 杨艳霞, 刘海玉. 自然对流对竖直蓄冰盘管蓄冷-释冷循环过程的调控机制[J]. 农业工程学报, 2026, 42(1): 312-321.
- WANG S Y, YANG Y X, LIU H Y. Regulatory mechanism of natural convection in the charging - discharging thermal cycle of a vertical ice-on-coil unit[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2026, 42(1): 312-321.
- [34] DING Z L, JIANG Z L, WANG J M, et al. The heat transfer enhancement of low temperature airflow foam effect in the ice storage charging process[J]. Energy and Buildings, 2019, 204: 109477. DOI:10.1016/j.enbuild.2019.109477.
- [35] 刘江涛, 张波, 滕跃, 等. 北京市某商务区能源站蓄冰盘管腐蚀问题分析 [J]. 节能, 2023, 42(6): 54-56. DOI: 10.3969/j. issn. 1004-7948.2023.06.015.
- LIU J T, ZHANG B, TENG Y, et al. Corrosion analysis of ice storage coil in an energy station of a business district in Beijing [J]. Energy Conservation, 2023, 42(6): 54-56. DOI: 10.3969/j. issn.1004-7948.2023.06.015.
- [36] YANG X, WANG Q Y, LIU Y, et al. Flow characteristics and heat-transfer enhancement of air agitation in ice storage air conditioning systems[J]. Energies, 2022, 15(16): DOI: 10.3390/en15165918.
- [37] LIU Z X, ZHANG X, SONG M J, et al. Experimental study on heat transfer characteristics of ice melting processes under point-source bubble flows[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, 159: 108112. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108112.
- [38] 杨进学, 乙乙轩. 亚洲金融大厦冰蓄冷系统设计及经济性分析[J]. 制冷与空调, 2021, 21(10): 1-6, 25.
- YANG J X, LI Y X. Design and economic analysis of ice storage system in AFC[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2021, 21(10): 1-6, 25.
- [39] 张宁宇. 冰蓄冷系统在大型商业综合体的应用研究[J]. 中国房地产业, 2025(28): 126-129. DOI: 10.3969/j. issn. 1002-8536.2025.28.031.
- ZHANG N Y. Research on the application of ice storage system in large commercial complex[J]. Real Estate Information of China, 2025(28): 126-129. DOI: 10.3969/j. issn. 1002-8536.2025.28.031.
- [40] 滕跃, 刘钊, 王文科, 等. 冰蓄冷空调技术在电网调峰中的应用[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(12): 166-169. DOI: 10.19981/j. CN23-1581/G3.2023.12.039.
- TENG Y, LIU Z, WANG W K, et al. Application of ice storage air conditioning technology in peak regulation of power grid[J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13(12): 166-169. DOI:10.19981/j. CN23-1581/G3.2023.12.039.
- [41] 陈东文, 刘育权, 李勇, 等. 用于削减工业园区用电功率峰值的蓄冷空调系统的规划建模与优化[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 94-100.
- CHEN D W, LIU Y Q, LI Y, et al. Planning, modeling and optimizing of cold-storage air-conditioning system for reducing peak load of industrial park[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 94-100.
- [42] 欧阳娟娟, 许杰. 高效冰蓄冷系统在某专业足球场项目的应用[J]. 制冷, 2025, 44(4): 27-35. DOI:10.3969/J. ISSN. 1005-9180.2025.04.0007.
- OUYANG J J, XU J. The application of high-efficiency ice storage and cooling system in a professional football stadium project[J]. Refrigeration, 2025, 44(4): 27-35. DOI: 10.3969/J. ISSN. 1005-9180.2025.04.0007.
- [43] 乔鹏龙, 孙育英, 逢秀峰, 等. 冰蓄冷系统参与虚拟电厂日前调度的优化方法与应用潜力研究[J]. 暖通空调, 2025, 55(S1): 112-118.
- QIAO P L, SUN Y Y, PANG X F, et al. Optimization method and application potential of ice storage system participating in virtual power plant day-ahead dispatching[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2025, 55(S1): 112-118.
- [44] 米增强, 张文彦, 贾雨龙. 柔性负荷虚拟电厂下冰蓄冷空调的优化控制策略 [J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 15-20, 27. DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.11.003.
- MI Z Q, ZHANG W Y, JIA Y L. Optimal control strategy of ice storage air conditioning under flexible load virtual power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 15-20, 27. DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.11.003.
- [45] 王奎, 余梦, 张海静, 等. 面向光伏消纳和冰蓄冷空调群低碳需求响应的新型配电系统多时间尺度优化策略[J]. 发电技术, 2025, 46(2): 284-295. DOI:10.12096/j.2096-4528.pgt.24096.
- WANG K, YU M, ZHANG H J, et al. Multi-time scale optimization strategy for new distribution system oriented to photovoltaic consumption and low carbon demand response of ice storage air conditioning groups[J]. Power Generation Technology, 2025, 46(2): 284-295. DOI:10.12096/j.2096-4528.pgt.24096.