

“双碳”背景下制冰新技术研究进展

李晓燕, 矫佳伟, 丁奕涵, 王天娜

(哈尔滨商业大学 能源与建筑工程学院, 哈尔滨 150028)

摘要: **目的** 总结“双碳”背景下制冰新技术的研究进展, 为研发更加低碳高效的制冰技术提供参考。**方法** 重点对二氧化碳跨临界制冰技术、真空闪蒸制冰技术和太阳能吸附式制冰技术3种制冰新技术的研究进展进行综述。**结论** 二氧化碳跨临界制冰技术、真空闪蒸制冰技术和太阳能吸附式制冰技术具有低碳、节能等优点, 可对冷链运输、人工冰场等领域起到积极作用, 在“双碳”背景下具有较好的应用前景。在此基础上, 如何保证制冰系统稳定性、提高制冰效率是未来主要的研究方向。

关键词: 低碳; 节能; 冷链运输; 制冰

中图分类号: TB485.3; TS205.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)23-0245-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.23.030

Research Progress of New Ice-making Technology in the Context of "Dual Carbon"

LI Xiao-yan, JIAO Jia-wei, DING Yi-han, WANG Tian-na

(School of Energy and Architectural Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

ABSTRACT: The work aims to summarize the new research progress of new ice-making technology in the context of "Dual Carbon", providing reference for the development of more low carbon and efficient ice-making technology. A review was carried out on the research progress of three new ice-making technologies, namely, carbon dioxide transcritical ice-making technology, vacuum flash ice-making technology and solar adsorption ice-making technology. The carbon dioxide transcritical ice-making technology, vacuum flash ice-making technology and solar adsorption ice-making technology have the advantages of low carbon and energy saving, which can play a positive role in cold-chain transportation, artificial ice rink and other fields, and has a good application prospect in the context of "Dual Carbon". On this basis, how to ensure the stability of ice-making system and improve the efficiency of ice production is the main research direction in the future.

KEY WORDS: low-carbon; energy saving; cold-chain transportation; ice-making

随着经济和人口的不断增长,我国碳排放量日益增加。在“双碳”政策的背景下,如何减少对环境的影响,开发低碳的制冰技术成为了当今学界的研究重点之一。目前,我国制冰技术已应用于冷链运输、商超餐饮、远洋捕捞、人工冰场等领域^[1-4]。传统的制冰技术在制冰过程中能耗较大,制冰效率较低,并且目前制冰系统采用的R22、R134a、R404a等制冷剂,全球变暖潜能值(GWP值)普遍较高,导致温室气体排放量增加,全球变暖程度加剧,采用氨为制冷剂,若出现制冷剂泄漏,则会导致爆炸、中毒等安全问题,

因此,研究安全性好且低碳高效的制冰技术具有重要的现实意义。

二氧化碳跨临界制冰技术、真空闪蒸制冰技术、太阳能吸附式制冰技术区别于传统制冰技术,使用低碳环保的制冷剂无毒性,可有效减少碳排放和其他污染物的产生。同时真空闪蒸制冰技术、二氧化碳跨临界制冰技术制冰速度更快、效率更高,太阳能吸附式制冰技术以太阳能为动力源,具有噪声小、节能环保等特点。

本文重点综述二氧化碳跨临界制冰技术、真空闪

霜制冰技术以及太阳能吸附式制冰技术 3 种制冰新技术的研究进展。总结 3 种制冰新技术的优势及不足,并针对其当前存在的问题提出改进方法,以期为进一步研究更加低碳高效的制冰技术提供参考。

1 低碳制冰新技术

二氧化碳跨临界制冰技术、真空闪蒸制冰技术和太阳能吸附式制冰技术作为 3 种低碳制冰新技术,具有低碳、环保的特点,可减少制冰过程中对环境的影响和能源的消耗。有望在未来广泛应用于制冰行业,为我国实现“双碳”目标做出贡献。

1.1 二氧化碳跨临界制冰

二氧化碳是一种天然、无毒、来源广泛的制冷剂^[5],不会损害臭氧层,且臭氧消耗潜能(ODP)值为 0,全球变暖潜能值较低(GWP 值为 1)^[6],故二氧化碳跨临界制冰技术发展前景广阔。二氧化碳跨临界制冰技术主要是利用二氧化碳作为制冷剂时的优良特性,在二氧化碳跨临界制冰系统中,二氧化碳气体被压缩成跨临界状态的流体后,流入气体冷却器放热,再经过节流装置降压后,沿管路输送到冰场制冰区域,随着压力的降低二氧化碳制冷剂迅速蒸发吸热,达到制冰目的。目前二氧化碳跨临界制冰技术主要应用于人工冰场。2022 年在国家重点研发计划“科技冬奥”专项支持下^[7],天津大学马一太、田华教授团队研制了高效全显热回收板壳式换热器、油气液高效分离器,构建了多模块移动冰场测试平台,自主研发了二氧化碳跨临界直接蒸发式制冰系统,并首次应用在冬奥会短道速滑、花样滑冰等 5 块冰场中。实现了更均匀化冰温,以及更快速工况调控,其冰场冻结速度远高于其他传统制冰方式,综合能效和冰温指标均实现国际领先。刘楷^[8]通过分析首都体育馆 2022 年冬季奥运会采用的二氧化碳跨临界直接蒸发冰场的案例,得出制冷系统存在运行压力高、压差大,部件承压较高等问题,但二氧化碳直接蒸发冰场比使用乙二醇作为载冷剂的冰场冻结速度更快,节能效果更好。

1.2 真空闪蒸制冰

真空闪蒸制冰技术是一种新型制冰技术,其以水为制冷剂,无毒且清洁环保。在制冰过程中首先使闪蒸系统保持一定程度的真空,然后注入高压饱和的水,由于水在较低的压强下,沸点降低,会迅速沸腾,因此,闪发小部分水通过直接接触换热使大部分水迅速凝固成冰晶,其制冰效率高于传统制冰方式^[9],制取的流化冰在食品冷链运输等领域应用前景广阔。真空闪蒸制冰系统可由流化冰的生成方式及系统维持真空的方式分为 2 类。按流化冰的生成方式分类,可为喷射式和搅拌式,目前研究主要针对喷射式真空闪蒸制冰技术展开。按系统维持真空的方式分类共有 3

种类型,分别是冷凝式、吸附式、吸收式,其中冷凝式应用最为广泛。Shin 等^[10]首次研究了真空法制备冰浆的理论基础,并在真空室内对单个液滴的蒸发结晶进行了理论分析和实验研究,实验结果表明,在真空绝热容器中制取的流化冰,冰晶较小、结构均匀、质量更好。Zou 等^[11]对真空闪蒸制冰技术的相关研究进行了总结,得出真空闪蒸制冰系统结构简单,运行操作方便,但在闪蒸过程中系统会产生较多的水蒸气,使得系统的真空度维持困难,传热效果降低,同时在制冰过程水的过冷导致系统所需制冰温度更低,制冰效率下降,能耗增加。

1.3 太阳能吸附式制冰

太阳能吸附式制冰技术通过吸附床收集太阳能并将其转化为热能,通过脱附和吸附 2 个过程,产生制冰所需的低温。该技术以太阳能为动力,相较于传统制冰技术可以降低能耗和减少污染。Kumar 等^[12]以活性炭和甲醇为工作对,对太阳能吸附式制冷系统进行了实验研究。研究表明,使用太阳能吸附制冷系统来代替传统的蒸汽压缩式制冷系统,可降低对臭氧层的破坏,减少二氧化碳的排放。同时系统在运行过程中不使用压缩机,相较于蒸汽压缩式制冷系统具有噪声低和耗电量少等优点。目前,国内外专家学者主要通过搭建小型太阳能吸附式制冰装置来进行实验研究,其产品尚未得到广泛应用。Khatab 等^[13]提出了一种新型太阳能吸附式制冰机,该制冰机将吸附床置于玻璃外壳内,通过太阳辐射反射板对吸附床进行加热,该装置具有吸附工质对受热均匀、密封性好等优点。但太阳能吸附式制冰技术存在吸附解析过程时间较长,制冰效果受到天气的影响较大等问题,导致系统性能系数较低。

2 低碳制冰新技术的研究进展

随着人们对环境保护意识的增强,低碳制冰技术受到越来越多的关注和研究。当前二氧化碳跨临界制冰技术、真空闪蒸制冰技术以及太阳能吸附式制冰技术的研究主要集中在提升制冰系统性能与强化制冰过程的传热传质 2 个方面。

2.1 二氧化碳跨临界制冰技术的研究

2.1.1 二氧化碳跨临界制冰系统性能的研究

对二氧化碳跨临界制冷循环的研究,Trygve 等^[14]通过建立仿真模型,得出当处于 14℃的环境温度时,选择双级压缩亚临界二氧化碳制冷系统或双级压缩跨临界二氧化碳制冷系统能达到较好的制冷效果。双级压缩跨临界二氧化碳制冷循环也可在需要利用系统产热的情况下进行使用,节约能耗。刘圣春等^[15]以二氧化碳跨临界单级压缩制冷循环为基础,对二氧

化碳跨临界双级压缩制冷循环进行研究,通过建立制冷循环系统的热力学模型,分析得出二氧化碳跨临界双级压缩系统性能系数最大,且采用双级压缩二次节流中间不完全冷却系统的系统性能系数和系统运行过程中的安全性是各种双级压缩系统中最高的。

Tian 等^[16]提出了一种二氧化碳跨临界动力循环的发动机余热回收优化方法,并通过遗传算法进行参数优化。结果表明,在系统中同时增加预热器和蓄热器,可以最大限度地提高系统性能。Bonilla-blancas 等^[17]对一个在跨临界条件下使用二氧化碳作为制冷剂的单个蒸汽压缩制冷循环进行了热动力学和热经济研究,得出单个蒸汽压缩制冷循环运行费用较高,且为了提高二氧化碳跨临界制冷系统的性能系数,降低运行成本,建议在今后的研究中对采用 2 台压缩机的二氧化碳跨临界制冷系统进行热经济分析。

2.1.2 采用回热器的二氧化碳跨临界制冰系统的研究

在采用回热器的二氧化碳跨临界制冰系统的研究中,孙知晓等^[18]分析了带回热器的跨临界二氧化碳循环系统。研究结果表明,在二氧化碳跨临界制冰系统中添加回热器进行过冷可显著提高系统性能。虽然回热器会导致压缩机的排气温度过高,但其在降低系统节流损失和提升系统制冷量方面效果显著。姚瑶等^[19]对天津某室内二氧化碳跨临界制冷循环冰场进行研究,通过计算与分析得出,采用带回热的二氧化碳跨临界制冰系统受气候影响较小,系统运行更稳定。王威等^[20]研究一种应用于首都体育馆冰场的双级压缩带回热的二氧化碳跨临界制冷循环系统,其系统如图 1^[20]所示。通过研究得出双级压缩过程所产生的熵增使得制冷循环的性能系数的实际值比理论值降低了 32%,同时该冰场具有切换速度快、冰面温度均匀等特点。

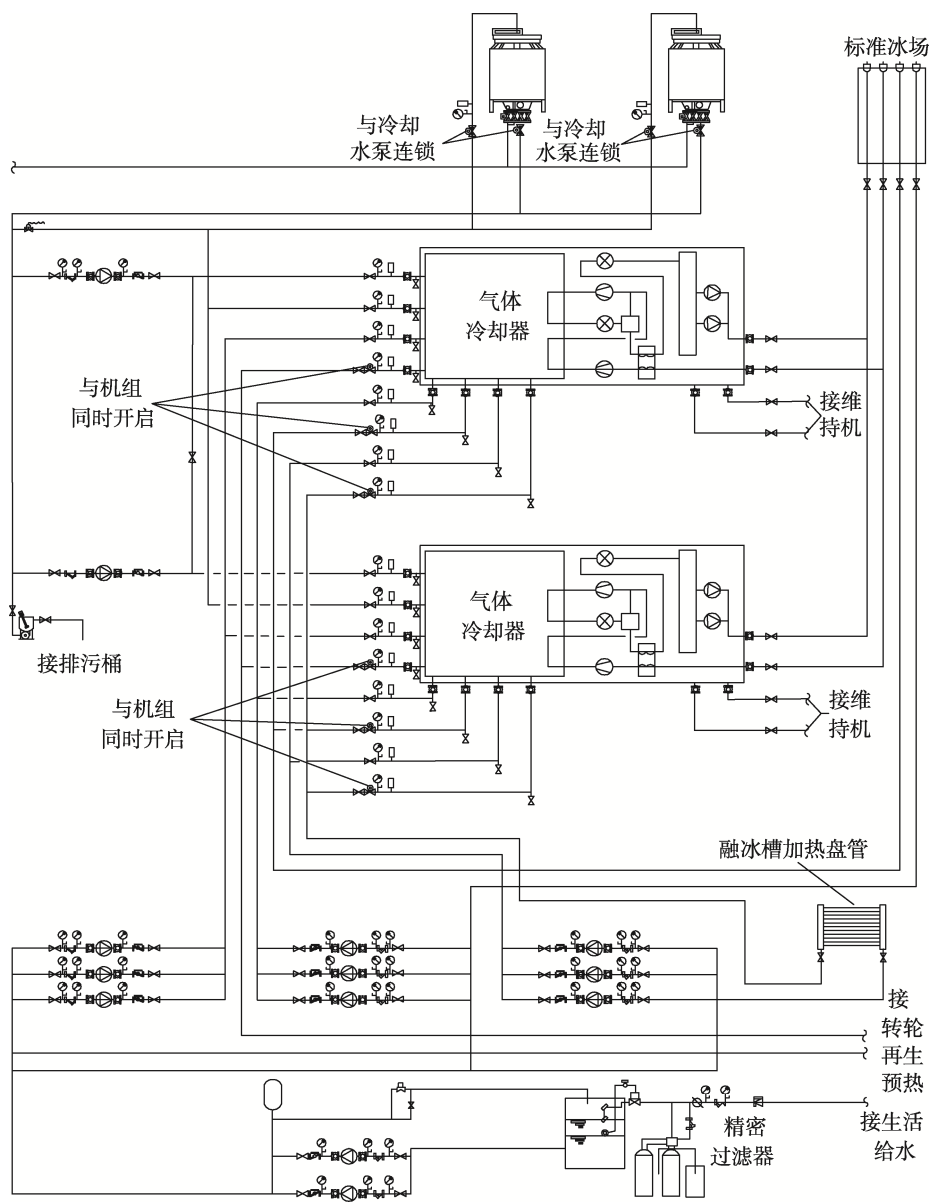


图 1 二氧化碳跨临界冰场系统
Fig.1 System of the carbon dioxide transcritical ice rink

2.1.3 采用涡流管的二氧化碳跨临界制冰系统的研究

在采用涡流管的二氧化碳跨临界制冰系统的研究中,刘业凤等^[21]提出了一种用涡流管替代膨胀阀的二氧化碳跨临界制冰系统,并在传统涡流管上增加一个饱和液体出口,使压缩机进口温度降低,系统性能提高,为今后涡流管膨胀的二氧化碳跨临界制冰系统的优化奠定了理论基础。刘军朴等^[22]通过对 3 种不同膨胀方式(利用涡流管、膨胀机、膨胀阀)的跨临界二氧化碳制冷循环系统进行热力学分析,得出当涡流管效率为 0.2 时,采用膨胀阀与采用涡流管的跨临界二氧化碳制冷循环系统的系统性能系数相同。当涡流管效率在 0.2~0.5 时,可提高系统性能系数 37%。喷嘴、冷孔板、涡流室、热端管等是组成涡流管的主要结构,因此这些组分的参数会对涡流管的性能产生影响。赵林林等^[23]以直径为 4~6 mm 的热端管为研究对象,研究其对涡流管的制冷性能系数及制冷量的影响,建立模型对涡流管进行数值模拟。结果得出当其管径超过 4.5 mm 时,涡流管的制冷量和制冷性能系数随着热端管直径的增大而减小,且冷流比为 0.6;热端管直径为 4.5 mm 的涡流管能获得最大制冷量。

2.2 真空闪蒸制冰技术的研究

2.2.1 真空闪蒸制冰系统捕获水蒸气的方法研究

为了维持真空闪蒸制冰系统的真空度,国内外许多专家学者针对有效捕获水蒸气这一问题,进行了大量的实验研究。Isao 等^[24]利用 LNG 作为冷阱捕获水蒸气,研究了在 70~100 Pa 低压条件下不同温度和大小纯水液滴闪蒸成冰的全过程,观察到装置内蒸发-冻结可分为稳定蒸发-冻结、起泡-冻结、起泡-破裂蒸发冻结和闪蒸冻结这 4 种情况。Zhang 等^[25]利用吸附床与冷凝器盘管相结合的方式捕获水蒸气,从而维持系统的真空环境,分析了该方式对水蒸气捕获的影响。结果表明,吸附室内冷却介质温度对固体吸附能力有明显影响。当冷却介质的温度为 30℃时吸附效果最佳,但冷却介质若温度过低,则不利于吸附。徐爱祥^[26]设计了一个带有夹层的真空闪蒸室,可利用低温制冷剂在闪蒸室中捕获水蒸气,但其存在容积较大,制冷剂的消耗量较大等问题,会导致经济效益较低。殷勇高等^[27]提出了一种溴化锂吸收式真空闪蒸制冰系统,通过溴化锂溶液来吸收闪蒸过程产生的水蒸气,从而维持系统的真空度。Tang 等^[28]提出了一种新型真空制冰系统,其弹射制冷子系统和弹射真空子系统通过抽汽、冷凝过程来维持制冰系统的真空度,对水蒸气捕获效果显著。章学来等^[29]设计了一种带有吸附模块的真空闪蒸制冰系统,闪蒸过程产生的水蒸气经吸附室后

被大量吸收,剩余部分蒸汽由管路流入冷凝室后被冷凝,该系统有助于维持系统真空环境,提高制冰效果,降低能耗。吸附式真空闪蒸制冰装置系统如图 2 所示^[30]。

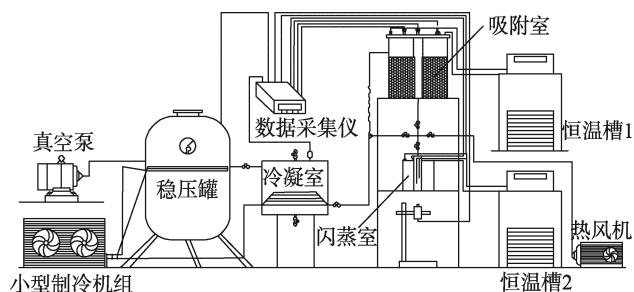


图2 吸附式真空闪蒸制冰装置系统
Fig.2 System of adsorption vacuum flash ice-making device

2.2.2 真空闪蒸制冰系统工艺参数的研究

对真空闪蒸制冰过程工艺参数的研究,刘洋等^[31]研究了水滴在真空环境下的降温结晶特性,结果表明当真空环境压力小于 3 500 Pa 时,水滴温度会低于 0℃,当真空环境压力小于 2 000 Pa 时水滴冻结冰。马军等^[32]对水滴在真空室内的闪蒸结晶过程进行了模拟研究,结果表明真空室内的压力越低,结晶过程进行得越快,但所需能耗较大,液滴初始直径对结晶过程的影响较大,直径越小,结晶过程进行的越快,且对真空室进行设计时需考虑液滴降落距离,使液滴在真空室内获得充分的驻留时间完成结晶过程。刘曦等^[33]以 NaCl 水溶液为研究对象,利用 Jeziorny 方程和 Mo 方程来分析流化冰在闪蒸过程中冷却速率和结晶速率两者之间的关系,研究结果表明在时间相同的条件下,冷却速率越大,生成的流化冰含冰率越高,即结晶速率越快。Lyu 等^[34]研究了不同压力、壁温下对真空闪蒸制取流化冰过程的影响,结果表明,在真空闪蒸状态下,压力越低,闪蒸现象越强烈,初始温度越高,溶液越容易产生气泡。

2.2.3 纳米粒子添加剂强化真空闪蒸制冰的研究

适当使用纳米粒子添加剂可加强水在闪蒸过程中的传热传质,降低流化冰的过冷度,改善流化冰的流动性,提高制冰效率,减小系统能耗。章学来等^[35]通过研究得出体积分数为 5%的乙醇溶液在真空闪蒸制冰过程最稳定,可降低水约 61%的过冷度,最利于水闪蒸成冰。Zheng 等^[36]研究了不同添加剂(CaCl₂和 TiO₂ 纳米颗粒)对真空闪蒸制冰过程的影响,研究结果表明,质量分数为 0.20%的 TiO₂ 纳米粒子添加剂的制冰效果优于质量分数为 1%的 CaCl₂ 添加剂。

Wang 等^[37]研究了 MWCNTs-H₂O 纳米流体对冰静态真空闪蒸实验的影响。当 TNWDIS 与 MWCNTs 的分散比为 0.5:1 时, 过冷度基本保持在 2 °C。Zou 等^[38]研究了真空闪蒸制冰过程中不同浓度的 MgCl₂ 溶液对制取流化冰的影响, 研究表明加入氯化镁有利于冰晶的细化形成。郑钦月等^[39-40]通过添加不同比例的纳米流体和表面活性剂, 研究了具有表面活性剂的纳米流体对制冰过程的影响, 得出具有 CTAB 表面活性剂的 Al₂O₃ 纳米流体和具有 SDBS 表面活性剂的 TiO₂ 纳米流体都具有促进冰晶成核, 降低冰晶过冷, 提高冰晶热导率的效果。为了保证真空闪蒸制冰系统的经济性和稳定性, 使用的添加剂必须克服成本高, 具有腐蚀性、毒性等缺点。这也将是筛选添加剂的重要标准。

2.3 太阳能吸附式制冰技术的研究

2.3.1 系统性能的研究

太阳能吸附式制冰系统性能的优化研究主要体现在优化吸附制冷系统结构^[41]和制冷循环^[42]上。Attalla 等^[43]研究了包含一种新型吸附器的太阳能吸附式制冰系统, 通过使用丙烯酸板代替玻璃来封闭吸附器管, 可使该制冰系统的性能得到提高。Sowunmi 等^[44]通过研究得出集热器元件的反射率及透射率对太阳能吸附式制冷系统的性能有重大影响, 反射技术薄膜比其他材料更具有达到最高系统性能系数的潜力。Zhao 等^[45]介绍了一种真空泵, 用于增大太阳能冷却系统中从吸附器到冷凝器的制冷剂蒸汽流量, 在实验中系统的 COP 提高了 35.9%。Nikbakhti 等^[46]在太阳能吸附式系统中安装热水储罐, 当太阳辐射强度不足, 系统不能提供足够多的冷量时, 储罐中积累的热能可以保证系统稳定运行, 提高了系统性能, 该系统可解决常规太阳能吸附系统间歇性和不稳定性的问题。Zhao 等^[47]提出了一种新型太阳能吸附制冷系统, 并进行了比较实验。研究了在不同天气条件下强化和自然传质循环的系统性能, 结果表明在不同天气条件下, 采用强化传质循环的系统性能水平总是高于采用自然传质循环的系统性能水平。彭佳杰等^[48]以太阳能吸附式冷热联供系统为研究对象, 探究影响其运行性能的因素。Pan 等^[49]研究了硅胶-水吸附式制冷系统中热量和质量回收过程的运行特点, 结果表明, 吸附床和蒸发器中的剩余传热制冷剂对质量和热量回收过程影响显著, 热回收时间的最佳范围为 25~45 s, 当质量回收时间在 5~50 s 范围内时, 制冷系统性能最佳。Chekirou 等^[50]提出了一个基于 Dubinin-Astakhov 方程的热力学模型, 初步研究了循环性能与热回收率、

解吸温度、冷凝温度、蒸发温度等参数之间的关系。研究表明, 以上参数对系统性能影响较大, 采用热回收系统可大大提升吸附式制冷系统的性能。Song 等^[51]设计并构建了一种以活性炭-甲醇为吸附工作对的新型太阳能水浴固体吸附制冰系统, 研究了解吸参数对太阳能水浴固体吸附制冰系统性能的影响。结果表明, 解吸温度对太阳能水浴固体吸附制冰系统的性能有着重要影响。当解吸温度保持在 94 °C 时, 系统的最佳解吸时间为 10 h, 随着脱附时间的延长, 系统的性能因热损失的增加而降低。赵文魁等^[52]以一种复合抛物面集热器 (Compound Parabolic Collector, CPC) 太阳能吸附式制冷系统为研究对象, 系统如图 3 所示^[52], 分析了自然传质、强化传质和自然-强化协传质 3 种模式下系统的性能, 研究结果表明采用自然-强化协同传质的系统 COP 提升最多。

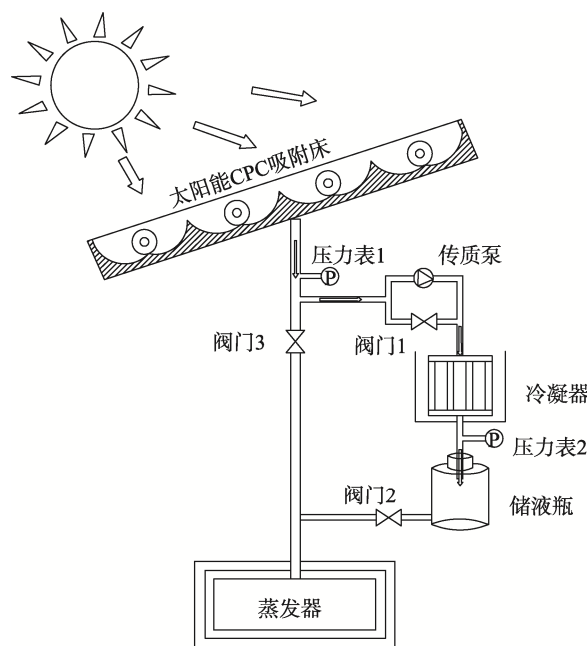


图 3 太阳能吸附式制冰系统
Fig.3 Solar energy adsorption ice-making system

2.3.2 吸附工质对的研究

学者们对太阳能吸附式制冰系统中采用的吸附工质对^[53]进行了深入研究。赵惠忠等^[54]研究了一种新型吸附剂 MgCl₂-13X, 并对其吸附性能进行实验研究, 通过对沸石分子筛中加入 MgCl₂, 吸附性能得到了较大改善, 强化了系统的传热传质, 吸附速率最大提高了 20%。Manish 等^[55]通过对比传统吸附工质对 (如活性炭-甲醇、活性炭-乙醇、沸石-水等) 和新型

工质对 maxsorb-乙醇 (maxsorb 为活性炭衍生物) 的制冷效果, 得出 maxsorb-乙醇的组合对制冷系统性能提升最大。Adenane 等^[56]研究了不同热力学参数对制冷系统的影响, 结果表明, COP 受蒸发温度和最高加热温度影响较大, 但受冷凝压力的影响较小, 同时得出活性炭/甲醇工质对比沸石/水工质对的制冷效果更好。王泽鹏等^[57]研究了粒径不同的硅胶材料对系统制冷能力及吸附床传热传质特性的影响。发现吸附剂的粒径越小, 吸附床内导热性能越强。Liu 等^[58]对硅胶系统和 SAPO-34 沸石系统的性能进行了比较分析, 结果表明, 在太阳能吸附式制冷系统中使用硅胶-水工质对比 SAPO-34 沸石-水工质对的制冷效果更好。选择高效的吸附工质对可大大提高太阳能吸附式制冰系统的性能, 是未来太阳能吸附式制冰技术的研究重点。

3 结语

二氧化碳跨临界制冰技术、真空闪蒸制冰技术以及太阳能吸附式制冰技术作为低碳制冰的新技术, 通过对其相关研究进展进行总结, 可为未来制冰行业的发展提供有效参考。但 3 种制冰新技术目前仍存在不足之处, 可从以下几方面进行深入研究。

1) 未来可从二氧化碳跨临界制冰系统的结构方面进行深入研究, 如系统射流器喷嘴形状、回热器安装位置对系统 COP 的影响。对过热温度与压缩机吸气温度的最适宜取值进行研究, 探讨何种热回收方式最为经济。同时其应用于其他制冰场合的可行性与智能化调控工况方面也是未来二氧化碳跨临界制冰技术的重要发展方向。

2) 针对真空闪蒸制冰技术的真空系统维持稳定性的问题。由于采用吸附式耦合冷凝式真空闪蒸系统捕获水蒸气效果最好, 故未来可从吸附剂种类及其与水量的比例关系等方面进行深入研究, 以提高水蒸气的捕获效果。针对过冷度的问题, 未来可通过采用合适的添加剂进行解决, 如采用具有表面活性剂的纳米粒子添加剂, 或采用物理场辅助的手段改变纳米流体表面物性参数, 以缓解纳米粒子团聚的问题, 提高制冰效率。

3) 针对太阳能吸附式制冰技术因太阳能辐射周期性造成的制冰不连续性问题, 未来可通过对系统蓄冷技术和复合工质等方面进行深入研究, 通过添加储能装置对制冰系统进行辅助制冰, 从而提高制冰系统的稳定性与能源利用率。此外, 还可以通过选择更加安全高效的工质对、优化吸附床结构 (如增加床层孔隙率, 添加抛物面聚焦器等) 以及减少传热阻力等方面进行深入研究, 以提高制冰效率与

系统性能。

参考文献:

- [1] 包海蓉, 金素莱曼. 流化冰技术在水产品冷链流通中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(5): 338-345.
BAO Hai-rong, JIN S. Progress in the Application of Slurry Ice Technology in Seafood Preservation during Cold Chain Logistics[J]. Food Science, 2022, 43(5): 338-345.
- [2] LEIPER A N, HAMMOND E C, ASH D G, et al. Energy Conservation in Ice Slurry Applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 51(1/2): 1255-1262.
- [3] KAUFFELD M, GUND S. Ice Slurry - History, current Technologies and Future Developments[J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 99: 264-271.
- [4] 张振迎, 许禹菲, 尹浩伊, 等. 采用自然工质的冰场制冷系统性能分析[J]. 低温与超导, 2022, 50(4): 51-57.
ZHANG Zhen-ying, XU Yu-fei, YIN Hao-yi, et al. Performance Analysis of Ice Rink Refrigeration System Using Natural Working Fluid[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2022, 50(4): 51-57.
- [5] 张永明. 跨临界二氧化碳热泵热水机组的性能模拟与实验研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
ZHANG Yong-ming. Performance Simulation and Experimental Study of Transcritical Carbon Dioxide Heat Pump Hot Water Unit[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [6] 余琼, 徐宏庆. 冬奥冰场制冷剂适宜性研究[J]. 暖通空调, 2022, 52(6): 12-16.
YU Qiong, XU Hong-qing. Suitability on Refrigerants of Refrigeration System for Ice Rink in Winter Olympic Stadium[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2022, 52(6): 12-16.
- [7] 刘晓艳, 王懿霖. 天津大学马一太、田华教授团队研发直冷制冰技术 制造稳定优质冰面[J]. 求贤, 2022(2): 8.
LIU Xiao-yan, WANG Yi-lin. The Team of Professor Ma Yitai and Professor Tian Hua of Tianjin University Developed The Direct Cold Ice Making Technology to Make Stable and High-quality Ice Surface[J]. Talents Seeking, 2022, 366(2): 8

- [8] 刘楷. 自然工质 CO₂ 在 2022 年北京冬奥会冰场的运用[J]. 制冷技术, 2020, 40(2): 20-24.
- LIU Kai. Application of Natural Refrigerant CO₂ in Ice Rinks of Beijing Winter Olympics in 2022[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2020, 40(2): 20-24.
- [9] 王章飞, 章学来, 贾潇雅, 等. MWCNT-H₂O 纳米流体对静态真空闪蒸制冰实验的影响[J]. 化工进展, 2018, 37(7): 2531-2538.
- WANG Zhang-fei, ZHANG Xue-lai, JIA Xiao-ya, et al. Effects of MWCNT-H₂O Nanofluid on Static Vacuum Flash Ice Production Experiment[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(7): 2531-2538.
- [10] SHIN H T, LEE Y P, JURNG J. Spherical-Shaped Ice Particle Production by Spraying Water in a Vacuum Chamber[J]. Applied Thermal Engineering, 2000, 20(5): 439-454.
- [11] ZOU Lin-geng, ZHANG Xue-lai, ZHENG Qin-yue. Research Progress on Preparation of Binary Ice by Vacuum Flash Evaporation: A Review[J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 121(6): 72-85.
- [12] KUMAR K A, KAPILAN N, DINESH P A, et al. Experimental Studies on Solar Assisted Activated Carbon Based Adsorption Refrigeration System[J]. Materials-today: Proceedings, 2022, 62(8): 5258-5265.
- [13] KHATTAB N M. A NOVEL Solar-Powered Adsorption Refrigeration Module[J]. Applied Thermal Engineering, 2004(24): 2747-2760.
- [14] TRYGVE M E, IGNAT T, KAJA W B, et al. Design and Performance Analysis of Ice CO₂ Refrigeration System with Snow Making Mechanism[J]. Journal of Refrigeration Technology, 2020, 40(2): 53-58.
- [15] 刘圣春, 李正. CO₂ 跨临界双级压缩制冷循环的热力学分析[J]. 制冷技术, 2016, 36(4): 8-13.
- LIU Sheng-chun, LI Zheng. Thermodynamic Analysis of CO₂ Transcritical Two-Stage Compression Refrigeration Cycle[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2016, 36(4): 8-13.
- [16] TIAN Hua, CHANG Li-wen, SHU Ge-qun, et al. Multi-objective Optimization of The Carbon Dioxide Transcritical Power Cycle with Various Configurations for Engine Waste Heat Recovery[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 148(15): 477-488.
- [17] BONILLA-BLANCAS A E, SALAZAR-PEREYRA M, MORA-ORTEGA A, et al. Operation Costs Exergoeconomic of Transcritical Refrigeration Cycle with Carbon Dioxide[J]. International Journal of Ambient Energy, 2020, 41(4): 409-417.
- [18] 孙知晓, 姚海清, 张文科, 等. 跨临界二氧化碳制冷系统优化方案的研究综述[J]. 制冷与空调(四川), 2022, 36(3): 469-475.
- SUN Zhi-xiao, YAO Hai-qing, ZHANG Wen-ke, et al. Review of the Prioritization Scheme of Transcritical Carbon Dioxide Refrigeration Cycle System[J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2022, 36(3): 469-475.
- [19] 姚瑶, 李敏霞, 党超铨, 等. 带热回收的室内冰场 CO₂ 制冷系统设计与分析[J]. 制冷学报, 2022, 43(6): 49-56.
- YAO Yao, LI Min-xia, DANG Chao-bin, et al. Design and Analysis of CO₂ Refrigeration System for Indoor Ice Rink with Heat Recovery[J]. Journal of Refrigeration, 2022, 43(6): 49-56.
- [20] 王威, 徐宏庆, 聂焱, 等. 首都体育馆冰场制冰系统设计研究[J]. 暖通空调, 2022, 52(6): 57-61.
- WANG Wei, XU Hong-qing, NIE Yao, et al. Research on Design of Ice-Making System for Skating Rink of Capital Indoor Stadium[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2022, 52(6): 57-61.
- [21] 刘业凤, 孙影, 张华, 等. 涡流管膨胀的二氧化碳跨临界制冷循环性能研究[J]. 制冷技术, 2019, 39(1): 11-15.
- LIU Ye-feng, SUN Ying, ZHANG Hua, et al. Research on Performance of Carbon Dioxide Trans-Critical Refrigeration Cycle with Vortex Tube Expansion[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2019, 39(1): 11-15.
- [22] 刘军朴, 陈江平, 陈芝久. 跨临界二氧化碳蒸气压缩/喷射制冷循环[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(2): 273-275.
- LIU Jun-pu, CHENG Jiang-ping, CHEN Zhi-jiu. Thermodynamic Analysis on CO₂ Transcritical Vapor Compression/Ejection Refrigeration Cycle[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2004, 38(2): 273-275.
- [23] 赵林林, 李海霞, 潘鹏. 模拟研究热端管直径对涡流管性能的影响[J]. 真空科学与技术学报, 2019,

- 39(8): 736-743.
- ZHAO Lin-lin, LI Hai-xia, PAN Peng. Influence of Hot Tube Diameter on Behavior of Vortex Tube Refrigerator: A Simulation Study[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2019, 39(8): 736-743.
- [24] ISAO S, KAZUYOSHI F, YU H. Freezing of A Water Droplet Due to Evaporation—Heat Transfer Dominating The Evaporation—Freezing Phenomena and The Effect of Boiling on Freezing Characteristics[J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 25(2): 226-234.
- [25] ZHANG Xue-lai, LI Yue, WANG You-li, et al. Experimental Study on The Characteristics of Ethanol Solution's Vacuum Flash Under Adsorption Condition[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 116: 648-654.
- [26] 徐爱祥. 新型真空液滴制冰特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- XU Ai-xiang. Study on Ice-Making Characteristics of New Vacuum Droplets[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [27] 殷勇高, 杜垲, 张小松, 等. 基于溴化锂吸收式制冷循环的流态冰制取方法与装置: 中国, 102062507A[P]. 2011-05-18.
- YIN Yong-gao, DU Kai, ZHANG Xiao-song, et al. Flow Ice Making Method and Device Based on Lithium Bromide Absorption Type Refrigeration Cycle: China, 102062507A[P]. 2011-05-18.
- [28] TANG Yi-fang, LIU Zhi-qiang, LIU Pei, et al. A Novel Ice Slurry Producing System With Vacuum Freezing[J]. Central South University, 2017, 24(3): 736-742.
- [29] 章学来, 郑钦月, 田镇, 等. 纳米 TiO_2 流体表面改性及对真空闪蒸制冰的影响[J]. 化工进展, 2019, 38(3): 1197-1206.
- ZHANG Xue-lai, ZHENG Qin-yue, TIAN Zhen, et al. TiO_2 Nanofluids Surface Modification and the Influence on the Vacuum Flash Ice-Making[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(3): 1197-1206.
- [30] 章学来, 甘伟, 郑钦月, 等. 真空闪蒸制冰技术研究进展[J]. 热科学与技术, 2022, 21(3): 209-220.
- ZHANG Xue-lai, GAN Wei, ZHENG Qin-yue, et al. Research Progress of Vacuum Flash Evaporative Ice Making Technology[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2022, 21(3): 209-220.
- [31] 刘洋, 宋晓燕, 刘宝林, 等. 水滴真空冷却中降温特性的实验研究[J]. 上海理工大学学报, 2016, 38(2): 182-186.
- LIU Yang, SONG Xiao-yan, LIU Bao-lin, et al. Experimental Study on Cooling Characteristics of Water Droplet during Vacuum Cooling[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2016, 38(2): 182-186.
- [32] 马军, 赵红霞, 韩吉田. 水滴在真空室内结晶过程的模拟[J]. 制冷与空调(四川), 2012, 26(3): 213-218.
- MA Jun, ZHAO Hong-xia, HAN Ji-tian. Modeling Crystallization of a Water Droplet Inside a Vacuum Chamber[J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2012, 26(3): 213-218.
- [33] 刘曦, 庄焜煜, 黄成, 等. 真空法动态制冰的非等温结晶动力学[J]. 化工学报, 2017, 68(8): 3071-3081.
- LIU Xi, ZHUANG Kun-yu, HUANG Cheng, et al. Non-Isothermal Crystallization Kinetics of Dynamic Ice Slurry Production by Vacuum Method[J]. CIESC Journal, 2017, 68(8): 3071-3081.
- [34] LYU Yu-yun, ZHANG Xue-lai. Experimental Study of The Factors on Solid Adsorption Vacuum Flash Evaporation for Ice Production[J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 135.
- [35] 章学来, 贾潇雅, 王章飞, 等. 多壁碳纳米管作用下乙醇溶液静态闪蒸特性实验研究[J]. 制冷学报, 2019, 40(3): 124-131.
- ZHANG Xue-lai, JIA Xiao-ya, WANG Zhang-fei, et al. Experimental Study of Ethanol Solution Vacuum Flash Characteristics under the Effect of Multi-Walled Carbon Nanotube[J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(3): 124-131.
- [36] ZHENG Q, ZHANG X, JI J, et al. Experimental Investigation of Additives Enhanced Vacuum Flash Evaporation for Binary Ice Generation[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2020, 15(4): 2485.
- [37] WANG Zhang-fei, ZHANG Xue-lai, JIA Xiao-ya, et al. Effect of Ice-making for Static Vacuum Flash System with MWCNT- H_2O Nanofluid[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(7): 2531-2538.
- [38] ZOU Lin-geng, ZHANG Xue-lai. Prediction of Ice Making by Vacuum Flash Evaporation with Varying

- Concentrations of MgCl_2 Solution[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 216: 119151.
- [39] 郑钦月, 章学来, 贾潇雅, 等. 氯化钙/硼砂改性真空闪蒸制冰实验研究[J]. *化学工程*, 2019, 47(3): 12-18.
- ZHENG Qin-yue, ZHANG Xue-lai, JIA Xiao-ya, et al. Experimental Study on Vacuum Flash Ice Making Modified by Calcium Chloride / Borax[J]. *Chemical Engineering*, 2019, 47(3): 12-18.
- [40] 郑钦月, 章学来, 王章飞, 等. 表面活性剂对纳米流体真空制取冰浆的影响[J]. *高校化学工程学报*, 2019, 33(2): 435-442.
- ZHENG Qin-yue, ZHANG Xue-lai, WANG Zhang-fei, et al. Effects of Surfactants on Vacuum Ice-Making of Nano-Fluids[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2019, 33(2): 435-442.
- [41] 胡伟, 赵越. 硅胶-水吸附式制冷系统吸附床结构优化研究[J]. *科学技术创新*, 2021(2): 1-8.
- HU Wei, ZHAO Yue. Optimization of Adsorption Bed Structure for Silica Gel-Water Adsorption Refrigeration System[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2021(2): 1-8.
- [42] 李祺炜, 何兆红, 李军, 等. 降低吸附式制冷系统驱动热源温度的研究进展[J]. *新能源进展*, 2021, 9(5): 368-378.
- LI Qi-wei, HE Zhao-hong, LI Jun, et al. Review of Low Regeneration Temperature of Adsorption Refrigeration System[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2021, 9(5): 368-378.
- [43] ATTALLA M, SADEK S, SALEM AHMED M, et al. Experimental Study of Solar Powered Ice Maker Using Adsorption Pair of Activated Carbon and Methano[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 141: 877-886.
- [44] SOWUNMI A R. Parametric Study of Reflectivity Transmittance of Materials for Potential Solar Adsorption Refrigeration System[J]. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2022, 17: 1-7.
- [45] ZHAO C, WANG Y, LI M, et al. Impact of Three Different Enhancing Mass Transfer Operating Characteristics on A Solar Adsorption Refrigeration System with Compound Parabolic Concentrator[J]. *Renewable Energy*, 2020, 152: 1354-1366.
- [46] NIKBAKHTI R, IRANMANESH A. Potential Application of A Novel Integrated Adsorption-Absorption Refrigeration System Powered with Solar Energy in Australia[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 194: 117114.
- [47] ZHAO C, WANG Y, LI M, et al. Experimental Study of A Solar Adsorption Refrigeration System Integrated With A Compound Parabolic Concentrator Based on An Enhanced Mass Transfer Cycle in Kunming, China[J]. *Solar Energy*, 2020, 195: 37-46.
- [48] 彭佳杰, 潘权稳, 葛天舒, 等. 太阳能热驱动的吸附式冷热联供系统性能测试[J]. *上海交通大学学报*, 2020, 54(7): 661-667.
- PENG Jia-jie, PAN Quan-wen, GE Tian-shu, et al. Performance Test of an Adsorption Cooling and Heating Cogeneration System Driven by Solar Thermal Energy[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2020, 54(7): 661-667.
- [49] PAN Q W, WANG R Z. Experimental Study on Operating Features of Heat and Mass Recovery Processes in Adsorption Refrigeration[J]. *Energy*, 2017, 135: 361-369.
- [50] CHEKIROU W, BOUKHEIT N, KARAALI A. Heat Recovery Process in An Adsorption Refrigeration Machine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(17): 7146-7157.
- [51] SONG Xiang-bo, JI Xu, LI Ming, et al. Effect of Desorption Parameters on Performance of Solar Water-bath Solid Adsorption Ice-making System[J]. *Applied Thermal Engineering Design Processes Equipment Economics* 2015, 89: 316-322.
- [52] 赵文魁, 王云峰, 赵冲, 等. 太阳能吸附式制冷机强化传质运行策略的优化[J]. *云南师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 40(4): 6-10.
- ZHAO Wen-kui, WANG Yun-feng, ZHAO Chong, et al. Experimental Study on Operation Strategy for Performance Improvement of a Solar Adsorption Refrigerator with Enhanced Mass Transfer[J]. *Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition)*, 2020, 40(4): 6-10.
- [53] 赵海谦, 何明祺, 刘景雯, 等. 制冷工质的应用与研究进展[J]. *徐州工程学院学报(自然科学版)*, 2020, 35(3): 41-46.

- ZHAO Hai-qian, HE Ming-qi, LIU Jing-wen, et al. Application and Research Progress of Refrigerants[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2020, 35(3): 41-46.
- [54] 赵惠忠, 唐祥虎, 严昊鑫, 等. 基于 13 X 沸石分子筛/MgCl₂ 的复合吸附剂性能实验研究[J]. 制冷学报, 2016, 37(5): 50-56.
- ZHAO Hui-zhong, TANG Xiang-hu, YAN Hao-xin, et al. Experimental Study on Composite Adsorbent Performance of Zeolite 13 X/MgCl₂[J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(5): 50-56.
- [55] MANISH K O, ANOOP K S, PUNEET V, et al. Recent Progress and Outlook of Solar Adsorption Refrigeration Systems[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46(11): 5639-5646.
- [56] ADENANE G, MOHAMMED B, MEA G. Effect of Operating Temperatures and Working Pairs on Performance of Solar Adsorption Cooling System[J]. International Journal of Heat and Technology, 2021, 39(4): 1280-1286.
- [57] 王泽鹏, 苑中显, 王洁, 等. 硅胶粒径对太阳能吸附制冷系统性能的影响[J]. 化工进展, 2022, 41(7): 3545-3552.
- WANG Ze-peng, YUAN Zhong-xian, WANG Jie, et al. Effect of Particulate Diameter of Silica Gel on Performance of Solar Adsorption Refrigeration System[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(7): 3545-3552.
- [58] LIU Y M, YUAN Z X, WEN X. Evaluation on Performance of Solar Adsorption Cooling of Silica Gel and SAPO-34 Zeolite[J]. Applied Thermal Engineering. 2021, 182: 116019.

责任编辑: 曾钰婵