

相变蓄冷技术在生鲜产品冷链中的研究进展

谷旭东^{1,3}, 梁欣², 姚刚², 黄建全¹, 张金斗³, 朱志强^{1,4}

(1.天津市农业科学院, 天津 300384; 2.深圳顺丰泰森控股(集团)有限公司, 广东 深圳 518000;
3.天津商业大学, 天津 300384; 4.国家农产品保鲜工程技术研究中心(天津)
农业农村部农产品贮藏保鲜重点实验室, 天津 300384)

摘要: 目的 分析相变蓄冷材料的研究现状, 以及在生鲜产品冷链运输领域中的应用进展, 为相变蓄冷技术在生鲜产品冷链上的应用及发展提供参考。方法 阐述相变蓄冷技术的基本原理, 及各种相变蓄冷材料性能的调控方法, 总结近年相变蓄冷技术在生鲜冷链运输中的研究方向。结论 相变蓄冷箱是未来的研究重点, 相变蓄冷技术在中短途冷链运输领域中应用广泛。为满足我国绿色化、节能化、标准化的冷链进程需求, 相变蓄冷技术还需向更深入、更广泛的方向发展。

关键词: 相变蓄冷; 生鲜冷链; 蓄冷冷藏箱; 蓄冷运输车

中图分类号: TS205.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)15-0103-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.15.014

Research Progress of Phase Change Cold Storage Technology in the Cold Chain of Fresh Products

GU Xu-dong^{1,3}, LIANG Xin², YAO Gang², HUANG Jian-quan¹,
ZHANG Jin-dou³, ZHU Zhi-qiang^{1,4}

(1. Tianjin Academy of Agricultural Sciences, Tianjin 300384, China; 2. Shenzhen SF Taisen Holding (Group) Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518000, China; 3. Tianjin University of Commerce, Tianjin 300384, China; 4. Key Laboratory of Storage and Preservation of Agricultural Products of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Engineering Research Center for Preservation of Agricultural Products (Tianjin), Tianjin 300384, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the research status of phase change cold storage materials and their application progress in the field of cold chain transportation of fresh products, so as to provide reference for the application and development of phase change cold storage technology in the cold chain of fresh products. The basic principle of phase change cold storage technology and the regulation methods of various phase change cold storage materials were expounded, and the research direction of phase change cold storage technology in cold chain transportation of fresh products in recent years was summarized. Phase change cold storage box is still the focus of future research and phase change cold storage technology in the field of short and medium distance cold chain transportation has made great progress. In order to meet the needs of green, energy-saving and standardized cold chain process in China, phase change cold storage technology needs to develop in a deeper and broader direction.

KEY WORDS: phase change cold storage; cold chain of fresh product; cold storage box; cold storage transporter

收稿日期: 2022-12-25

基金项目: 欧盟 Switch-Asia 项目 (ACA/2021/428-472); 国家葡萄产业技术体系项目 (CARS-29)

作者简介: 谷旭东 (1998—), 男, 硕士生, 主攻能源动力。

通信作者: 朱志强 (1978—), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为农产品采后商品化处理和贮运物流保鲜技术。

随着我国人民消费水平的提高、互联网生鲜电商的发展、国家对农产品冷链物流发展政策的推动,越来越多的生鲜产品及预制冷冻食品涌入线上消费^[1]。我国每年因生鲜冷链不完善造成了生鲜产品的大量损失,调查数据显示,2015—2019年间,我国浪费的生鲜产品数量高达1.2亿t,其中,每年在采后运输过程中造成的浪费超过300万t。在此期间,冷链综合流通率仅为19%,果蔬、肉制品、水产品的冷链流通率分别仅为20%~30%、12%、15%^[2]。目前,我国生鲜产品在冷链运输领域存在初始加工水平落后、冷链运输成本高、冷链脱节、温度控制不合理等问题^[3],然而生鲜产品冷链需求却呈现每年递增趋势。

机械压缩制冷仍然是冷链运输中的主要制冷技术,该技术存在能耗大、机组复杂等缺点,设备频繁开关机造成的温度波动导致难以长时间维持生鲜产品环境的稳定。与传统机械制冷技术相比,蓄冷技术具有环保、节能、成本低廉等优点,能有效减少生鲜产品冷链的“断链”现象^[4-5],因此蓄冷技术在推动冷链物流轻量化、多样化、节能化发展进程中前景广阔。

蓄冷材料利用自身的物理、化学性质吸收或释放热量,实现冷量在时空上的迁移,进而解决冷量供需与时空不匹配的问题,提高了用电经济性^[6]。蓄冷技术按材料的物理化学属性分为显热蓄冷、化学蓄冷、相变蓄冷3类^[7-8]。显热蓄冷技术单纯利用比热容大的材料吸收释放能量。化学反应蓄冷技术利用材料发生可逆化学反应吸收或释放能量,具有储冷量大但过程复杂的特点。相变潜热蓄冷技术利用材料发生相变的巨大潜热吸收或放出的能量,其储冷量比显热蓄冷的储冷量大得多,稳定性更好,性价比更高,在空调、建筑保温、冷链物流中得到广泛应用^[9-10]。

文中对相变蓄冷剂的种类及性能优化研究进行了综述,探讨相变蓄冷技术在实际冷链运输中的研究现状,并展望相变蓄冷技术在生鲜产品冷链中的发展。

1 相变蓄冷材料分类

相变蓄冷材料能实现能量在时空上的转移,且相变控温时间长,可满足冷藏运输的需求,是相变蓄冷技术的核心。蓄冷材料按照物态变化大致分为固-固、固-液、固-气、液-气4类。其中,液-气和固-气相变材料在能量交换过程中会产生气体,限制了其实用范围。虽然固-固蓄冷材料的体积变化较小,但蓄冷量较低^[11-12]。固-液相变蓄冷材料具有成本低、体积变化小、蓄冷量高等特点,在生鲜冷链运输领域中逐步得到应用^[13]。固-液相变蓄冷材料的工作原理如图1所示。

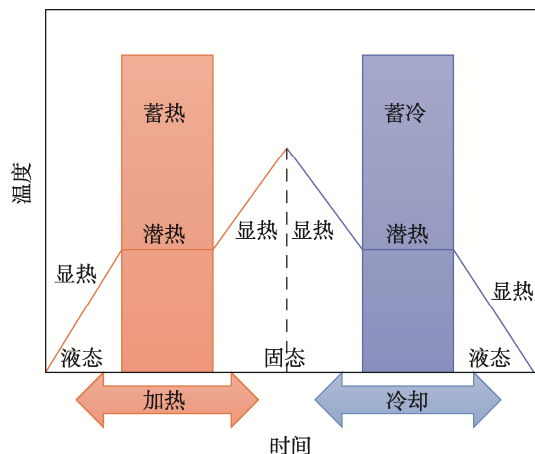


图1 固-液相变蓄冷材料的作用原理

Fig.1 Principle of solid-liquid phase change cold storage materials

相变蓄冷材料包括自身材料基质、相变温度调节剂、成核剂、增稠剂和防腐剂等多种组分。按照成分,可将相变蓄冷材料分为无机相变蓄冷材料、有机相变蓄冷材料、复合相变蓄冷材料。常用的相变蓄冷材料分类如表1所示。

1.1 无机相变蓄冷材料

无机相变蓄冷材料包括水、结晶水合盐类、熔融盐类、金属及合金类物质^[8],具有导热率高、相变潜热大、体积膨胀率小、成本低、易获取等优点^[14-15],但其过冷度较高且循环稳定性较差。部分无机相变蓄冷材料具有腐蚀性,会影响生鲜产品的食用安全,所以需要采取合适的改性措施和封装方式防止其变性和泄漏^[16]。

1.2 有机相变蓄冷材料

有机相变蓄冷材料主要包括石蜡、脂酸类、酰胺类、多元醇类物质及高分子聚合物等^[17-19]。与无机相变蓄冷材料相比,它具有过冷度低、循环稳定性高、材料腐蚀性小等优点,但存在导热率低、潜热值低和易泄漏等缺点^[20]。可通过添加纳米材料、膨胀石墨有效强化换热,在封装形式上可采用微胶囊包装方法解决泄漏问题,以及加入阻燃剂来降低可燃风险^[21-22]。

1.3 复合相变蓄冷材料

为了使蓄冷材料的性能更优越,研究人员将上述2种或2种以上材料复配,制备出复合相变蓄冷材料,按照复合成分可分为有机-有机、无机-无机和有机-无机相变蓄冷材料。常见的复合方法包括将结晶水合盐溶液与有机烷烃相融合,进而降低蓄冷材料的过冷度;将泡沫金属与有机溶液复合,制备出导热性良好的相变蓄冷材料;将高分子材料(如聚丙烯酸钠)与蓄冷材料复合,研制出性能优越的凝胶类相变蓄冷材

料。复合相变材料提升了蓄冷效果, 扩大了应用范围, 成为近年材料领域的研究热点^[23]。

表 1 常用相变材料的分类
Tab.1 Classification of commonly used phase change materials

种类	常用物质
无机相变材料	水-冰、结晶水合盐类, 熔融盐类, 金属及合金类
有机相变材料	石蜡、脂酸类、多元醇类物质
复合相变材料	共晶混合相变蓄冷材料、聚合物相变蓄冷材料和纳米相变蓄冷材料

2 相变蓄冷材料特性优化

国内外研究显示, 相变蓄冷材料的优化方向主要包括对相变温度、热导率、过冷度和循环稳定性方面的调控, 部分研究如表 2 所示^[24-29]。

在相变温度调控方面, 可通过改变复合相变蓄冷材料的组分来调整相变温度, 满足生鲜冷链运输条件的需求, 还需要进一步研究材料配比与相变温度之间的规律。在热导率方面, 添加多孔载体材料或纳米粒子可改变复合蓄冷相变材料的热导性能, 保证其存储的冷量及时释放, 维持贮藏空间中的温度恒定, 仍需

进一步探讨两者的添加比例对相变蓄冷材料导热性能的影响。针对相变蓄冷材料过冷度问题, 往往基于非均匀成核理论, 在材料中添加成核剂或改性容器壁面来消除或降低过冷度。针对成核剂的用量比例、壁面改性的研究甚少, 需要通过大量的实验来归纳总结。相变蓄冷材料的循环不稳定性主要表现为相分离现象和泄漏, 常用的调控方法是添加琼胶、羧甲基纤维素或者活性白土等增稠剂, 以增加材料溶液的黏度^[30], 或将其制备成定形的相变材料, 或将其制备成微胶囊(但相变微胶囊的成本较高, 且容易出现团聚现象^[31])。

3 相变蓄冷技术在生鲜产品冷链中的研究

在冷藏及运输过程中, 时间、空间及冷链环节的变化都会导致生鲜产品环境温度出现波动, 既会影响生鲜产品的品质, 又会增加部分冷链设备的能耗, 因此研究人员利用相变蓄冷材料对冷藏集装箱、冷藏库、冷藏运输车等多种冷链设备进行节能化、轻量化、精准化改良和创新^[32]。相变蓄冷技术的相变控温特性能减少生鲜产品环境温度的波动, 进一步提高生鲜产品的品质。同时, 相变蓄冷技术具有灵活多变、节能环保、经济效益高等优点, 能运用到冷链运输的各个环节。

表 2 相变蓄冷材料的特性优化

Tab.2 Characteristic optimization for phase change cold storage materials

改性调控	研究实验	结果	参考文献
过冷度	在 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} - \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 共晶水和盐相变蓄冷材料中加入 $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (质量分数 3%), 进行性能测试	与未添加 $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 相比, 相变材料的过冷度从 10 °C 以上大幅减小至 2 °C	[24]
过冷度	以水为蓄冷剂, 探究不同粗糙度、接触面积, 不同材料的容器, 不同的冷却速度、悬浮粒径等因素对蓄冷剂过冷度的影响	蓄冷剂与容器的接触面积对过冷度的影响较大, 在一定范围内, 粗糙度与过冷度成反比, 过冷度与冷却速度成正比, 悬浮粒径与过冷度成反比	[25]
导热系数相变温度	将十四烷和十二烷基醇 (TD-LA) 作为相变蓄冷材料, 并加入膨胀石墨 (EG) 对材料进行改性, 测试相变材料的性能	相变温度为 4.3 °C, 相变潜热为 245.1 J/g, 导热系数为 0.965 7 W/(m·K)。与 TD-LA 相比, 其导热系数提高了 3.53 倍	[26]
导热系数相变温度	将十二烷作为材料基质与膨胀石墨 (质量分数 16%) 制备成复合相变蓄冷材料, 并进行性能测试	PCM 的相变温度为 -9.67 °C, 潜热为 151.7 J/g, 导热系数是十二烷的 15 倍	[27]
过冷度	采用不同体积分数的多壁碳纳米管为基本相变材料, 并分散在去离子水中, 制备出纳米流体相变蓄冷材料	在 -9 °C 和 -12 °C 水浴温度下, 相变材料的凝固时间的最大降幅分别为 14% 和 20.1%, 多壁碳纳米管的存在起到了成核剂的作用, 过冷度显著降低	[28]
过冷度	以有机/无机相变复合甘露醇水溶液为相变蓄冷材料进行试验研究	质量分数为 3% 的甘露醇可有效降低过冷度, 氯化镁可以作为降低蓄冷剂相变温度的调节剂, 制备了相变温度为 -6 °C、潜热为 240.1 J/g 的材料基体	[29]

如图2所示,蓄冷保温箱是典型且最基础的小型箱式相变蓄冷设备。保温箱由保温箱体和相变蓄冷材料容器构成,其中相变蓄冷材料可采用蓄冷板、冰袋和微胶囊等多种封装方法,以满足实际生鲜产品的环境工况需要。在生鲜产品的短途运输中,蓄冷保温箱应用的相变蓄冷技术更成熟,能实现无源低温配送制冷。在大型箱式蓄冷设备中,多采用机械压缩制冷技术与相变蓄冷技术相结合的系统对生鲜产品进行贮藏^[4,31]。

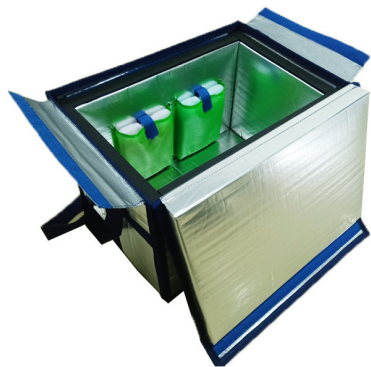


图2 蓄冷保温箱结构
Fig.2 Structure of the cold storage incubator

3.1 生鲜产品的物性与冷链环节

在冷链运输中,生鲜产品的品质会受到自身因素(如呼吸作用、生理老化)、物理因素(温度、湿度)、化学因素(酶、氧化作用)、生物因素(微生物、昆虫)、外界因素(机械损伤)的影响,且贮运条件复杂多变,相变蓄冷技术需要根据生鲜的种类和冷链环节灵活应用。该研究方向大致为相变控温与生鲜产品多种因素或与其他保鲜技术的耦合应用,以及加大相变蓄冷技术在冷链各个环节的应用。

将相变蓄冷材料的相变控温与生鲜产品最佳的保鲜温度相匹配,能在减少温度波动的同时,最大程度地维持生鲜产品的品质。Gin和Farid^[33]利用水和氯化铵配制相变温度为 $-15.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的蓄冷相变材料(冷板),在冰箱($-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右)每天断电2~3h情况下,研究了鲜牛肉和冰淇淋品质的变化情况。结果表明,在2周内,冰箱的最大温度偏差从 $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ 肉块的滴水损失从17%降到10%, 1 L 冰淇淋的冰晶尺寸从 $70\sim 80\text{ }\mu\text{m}$ 降至原始冰晶尺寸($40\sim 50\text{ }\mu\text{m}$),这在很大程度上提高了食物的品质。Zhao等^[34]将相变蓄冷技术与气调储藏方法结合,并应用于草莓短途冷链保鲜中,探究了2种方式的耦合效果。结果表明,采用 O_2 (体积分数10%)+ CO_2 (体积分数0%)气调环境与相变蓄冷包装(EPS包装箱+相变温度 $-2\sim -1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 蓄冷冰袋)相结合的保鲜方法,可将草莓品质在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 外界环境中维持4d,在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

外界环境下维持1.5d,与空白组(无气调储藏+无相变蓄冷包装)和对照组(无气调储藏+相变蓄冷包装)相比,在2种外界温度情况下实验组草莓的品质均最佳。在肉类及水产品储藏中,研究表明预冷速度越快,其品质越好。Lan等^[35]研究了浆冰预冷对养殖鲈鱼品质的影响,并利用扫描电子显微镜和低场核磁共振检测其各项指标。结果表明,养殖鲈鱼经浆冰冷却至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间是碎冰处理的一半;经浆冰处理后,鱼肌色泽和感官品质优于碎冰处理,鱼肉的含水量均高于碎冰处理;经浆冰预冷处理后,鱼肌肉组织结构的稳定性更好。

适合生鲜产品低温贮藏的相变材料有很多,然而相变蓄冷材料的相变温度调控理论并不完善,未来可建立关于生鲜产品贮藏温度和相变蓄冷材料性能的数据库,以推动相变蓄冷材料的规模化使用。为了使生鲜产品获得更好、更长的保鲜效果,相变蓄冷技术与其他保鲜方式的匹配性是新的探索方向。相变蓄冷技术在冷链贮藏和运输环节的技术较成熟,但在零售设备的开发和生鲜产品初加工环节的研究值得进一步探索。

3.2 蓄冷箱体的结构设计

相变蓄冷技术在绝大部分生鲜冷链运输设备(冷库、运输车、保温箱)中都采用箱体结构设计,除制冷系统外,蓄冷箱体结构主要包括相变蓄冷材料和外部围栏结构部分。外部围栏结构在保护生鲜产品的同时能减少热量的流入,相变材料的合理布置能提高箱体内部温度的均匀性。多温共配是将围栏结构与蓄冷材料有机结合,这也是相变蓄冷箱的重要研究方向之一。

3.2.1 外部保温材料

导热系数低的外部保温材料能减少环境热流量,延长保鲜时间^[36]。杨坤等^[37]利用有限元法对EPE(发泡聚苯乙烯EPS+珍珠棉+铝箔)保温箱和EPS箱的保温效果进行了分析对比。结果表明,EPE保温箱的保温效果更佳,EPE保温箱在利用珍珠棉减少热传导的同时,采用铝箔减少了环境热辐射的影响^[38]。真空隔热板具有更好的隔热效果,应用真空隔热板(VIP)能进一步加强蓄冷箱的保温效果。XU等^[39]针对生鲜产品冷链运输,研制出由纳米复合相变蓄冷材料(相变温度为 $-0.037\text{ }^{\circ}\text{C}$,相变潜热为 335.4 J/g)和VIP组成的蓄冷保温箱(如图3所示),并以酸奶为样品进行试验,保温箱能保温并维持酸奶品质长达87h。王达^[40]将真空隔热板和聚氨酯复合结构(VIP+PU)作为隔热材料,制备了新型蓄冷箱,以EPS、聚氨酯(PU)2种隔热材料的保温箱为对照,采用桃子作为实验样品进行验证。在同质量蓄冷剂的条件下,采用VIP+PU的保温效果长达2d,采用PU和EPS材料只能保温0.9d和0.35d,采用VIP+PU

后, 桃子的质量损失率仅为 0.48%。传统 EPS、PU 保温材料的成本较低, 但可回收性较差, 对环境的影响较大, 更适用于短途运输或零售环节。真空绝热板具有高效、环保等优点, 但成本较高, 且需采用良好的保护措施, 以防止箱体受损, 适用于中途运输和长时间保温。



图 3 复合材料真空保温箱示意图^[39]

Fig.3 Schematic diagram of composite vacuum incubator^[39]

3.2.2 相变蓄冷材料的布置

结构设计的另一核心内容是相变蓄冷材料的布置。在小型相变蓄冷保温箱中, 蓄冷材料的合理布置能有效延长蓄冷箱的保温时间, 增加短途运输的距离。在大型相变蓄冷设备中, 通过合理布置相变蓄冷材料能提高设备内部温度的均匀性, 减少制冷设备的运行时间, 从而提高制冷系统的效率。范中阳等^[41]探究了 2 种蓄冷板的布置方式(顶部摆放和四周摆放)对保温箱内部温度的影响, 并用奶白菜进行试验验证。结果表明, 采用四周布置蓄冷板的方式能维持菜心温度波动幅度 $< 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 长达 48 h, 奶白菜的品质更高; 采用顶部布置蓄冷板的方式仅能维持 36 h。聂钰岷^[42]利用数值仿真和实验对四周布置蓄冷管的货运蓄冷箱进行了温度场模拟和测试, 结果表明蓄冷箱上部的温度高于中下层温度。孙锦涛^[6]将蓄冷板布置在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷库顶部, 并进行了冷库断电实验, 采用顶部放置蓄冷板方式的冷库在断电后其温度从 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 减小至 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度分布更均匀, 3 h 温升从 $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 减小到 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。一般来说, 大型冷链设备内部的气流受到自然对流的影响, 需要在顶部合理布置蓄冷材料, 使其温度场更均匀。随着计算机技术的发展, 仿真模拟能够很好地预测相变材料布置对蓄冷设备内部温度场的影响, 将仿真结果运用于实际冷链运输设备空间设计中会大大节约成本和时间。

3.2.3 多温共配相变蓄冷技术

多温共配蓄冷技术是将相变蓄冷箱空间划分为多个温区, 实现同一区域不同温需生鲜产品的共同配送, 从而提高冷链运输的时效性。方文康^[43]通过实验和仿真模拟方法研究了相变蓄冷材料布置、箱体材料、外界环境 3 个因素对多温区保温箱内部温度的影

响。实验结果表明, 在外界温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时采用侧面摆放蓄冷剂的 EPP 蓄冷箱能维持冷藏室有效温度时长达到 14 h, 冷冻室的有效温度时长达到 8 h; 采用隔热效果更好的 EPU 材料冷藏室和冷冻室可将有效保温时长延长至 19 h 和 11 h。徐笑锋^[44]利用真空绝热板技术设计了大尺寸(常温区/冷藏区/冷冻区, 温区隔板可调节)、小尺寸(冷藏区/冷冻区, 温区隔板不可调节) 2 种多温区蓄冷保温箱, 冷藏区与冷冻区之间采用真空绝热板隔开, 并放置相变温度为 $-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $7.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的相变蓄冷材料, 进行了保温箱性能测试。通过分析数据发现, 在外界温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右的环境中, 将大型蓄冷箱冷藏区的温度维持在 $7\sim 9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间长达 13 h; 将冷冻区温度保持在 $-2\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间约为 14 h; 将小型蓄冷箱冷藏区的温度保持在 $7\sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间约为 19 h; 将冷冻区温度保持在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间约为 16 h。

3.3 相变蓄冷材料的封装形式及影响

在生鲜产品冷链中, 生鲜产品的自身因素、相变材料的物性、冷链的环节都直接影响相变蓄冷材料的封装形式。其中, 最常用的封装形式为蓄冷板和冰袋。相变蓄冷微胶囊的导热性能毋庸置疑, 但在冷链运输领域广泛应用还需具有良好的耐久性和安全性^[4]。

相变蓄冷板是应用最广的封装形式, 在冷链的各个环节、各种设备都会采用相变蓄冷板, 它具有蓄冷量大、可重复使用等优点, 可作为短途冷链物流的重要冷源。在冷库、冰箱和冷藏车等设备中, 蓄冷板的作用是实现冷量的时空转移和提高设备效益。提高冷板的释冷效率一直是研究的重要方向, 冷板冷量释放不及时则难以维持空间温度。Gunawati 等^[45]研究了不同型号(平板, 中心带有 1 个长方形空洞的平板, 带有凹槽的平板, 带有 4 个圆形空洞的平板)、不同蓄冷板和不同蓄冷材料(水和体积分数 10% 的 NaCl 溶液)对箱体内部温度场的影响。结果表明, 采用体积分数 10% 的氯化钠溶液能提高 73% 的冷量释放效率, 平板蓄冷板的冷量释放更均匀。李晓燕等^[46]开发了一种新型锯齿状结构的蓄冷板, 并将平板蓄冷板与 3 种不同锯齿尺寸的锯齿状蓄冷板的蓄冷和释冷性能进行了 Fluent 仿真模拟。结果表明, 采用锯齿状蓄冷板将蓄冷和释冷效率提高了 30%~40%。Ghahramani 等^[47]利用仿真模拟技术探究了相变温度为 $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$, NaCl-H₂O 相变蓄冷材料厚度对冷量释放的影响, 结果表明 3 cm 为最佳的相变蓄冷材料厚度。通过改变冷板的样式和材料, 采用导热性好的相变材料都能提高冷量释放效率。关于冷板释冷效率、蓄冷密度、蓄冷剂用量之间的影响规律鲜有人研究。

冰袋具有成本低、使用方便等优点, 常用于快速生鲜物流行业、超市生鲜零售包装等短途运输中。通

常不回收冰袋,所以冰袋应选用更加环保、效果更好的相变蓄冷材料。朱麟等^[48]研究了不同外包装方式与不同数量冰袋蓄冷包装箱对杨梅质量的影响。结果表明,在室温下,采用厚度为 32 mm 的泡沫箱结合 4 个生物冰袋可以保持杨梅果实的感官品质和硬度长达 40 h。汤元睿等^[49]分别选择纯水、NaCl (质量分数 18.8%) 溶液、乙醇 (质量分数 46.3%) 溶液、CaCl₂ (质量分数 29%) 溶液制成 4 种冰袋,对金枪鱼配送箱在夏季的配送情况进行了实验模拟。结果表明,质量分数为 29% 的 CaCl₂ 溶液冰袋能维持鱼肉运输 5 h 的冷冻状态,且鱼肉的品质接近鲜鱼,显著高于其他组。

尺寸在微米级别的相变微胶囊是最新型的封装方式,通过物理法、化学法将相变材料芯包裹在无机材料和高分子材料的壳中^[4]。相变微胶囊在冷链运输领域的研究大多集中在无毒化^[50]、提高循环可靠性、扩大使用温度宽度等方向^[4]。由于微胶囊的制作成本较高,因此需要进一步发掘微胶囊在冷链物流设备中的应用。

3.4 蓄冷运输车

我国生鲜产品的货运量巨大,冷藏运输车在中短途冷链运输中发挥着重要作用。将相变蓄冷技术应用于冷藏车,可以辅助控温、减少车厢内温度波动、降低主动制冷系统的能耗,从而提高生鲜食品品质和能源利用率。刘广海^[51]设计了一款集制冷系统、独立蓄冷车厢于一体的多温蓄冷车,利用仿真模拟技术和实验对其性能进行了测试。实验结果表明,多温蓄冷车厢可有效控温 10 h 以上,满足配送运输需要,平均温度分别在-14.2~-12.9 °C 和 3.4~4.2 °C 间波动,车厢内部温度均匀稳定,远高于传统的蓄冷车厢性能。Ahmed 等^[52]将相变蓄冷材料填充在铜管中,将铜管均匀地布置在运输卡车车厢内部,通过实验探究其应用效果。结果表明,对于单个墙体,峰值传热率降低了 11.3%~43.8%;进入冷藏室的总平均日热流量减少了 16.3%;相变蓄冷材料的应用进一步降低了冷藏运输车厢内的温度波动和蓄冷车的能耗。

蓄冷冷藏车是制冷系统、动力系统、蓄冷技术集成化设备。除了优化冷藏车厢的结构设计外,将相变蓄冷技术与制冷系统或动力系统有机结合也是冷藏车的重要发展方向。Liu 等^[53]研制了一种新型冷藏车制冷系统,在空载情况下,制冷系统为蓄冷材料,在负载运输情况下蓄冷材料将冷量释放到制冷工质中,在维持-18 °C 车厢温度的工况下,新型冷藏车制冷系统的能耗成本仅为传统冷藏车的 1/2。李曼等^[54]将天然气燃料液-气相变释放冷量的特点与相变蓄冷技术结合,设计出新型的制冷系统燃气蓄冷车,并对其性能和经济性进行了分析,天然气在相变过程中 30% 的冷量可以被利用。

4 结语

虽然相变蓄冷技术在生鲜短途运输中应用较广泛,但在我国进一步完善的冷链进程中仍面临巨大的挑战。综合分析蓄冷技术在生鲜冷链方面的应用,未来发展方向主要集中在以下几方面。

1) 进一步研究蓄冷密度高、循环利用性好的相变材料。复合相变蓄冷材料是未来的研究重点,需要探索成分配比及各种调控方法对其性能的影响规律,建立相变材料的数据系统。研发低成本、环保的相变材料,为大规模商业化的蓄冷技术应用打下基础。

2) 相变蓄冷箱仍然是未来相变蓄冷技术的研究重点。计算机技术能更准确地计算生鲜产品呼吸热、外界环境等多种因素对相变蓄冷箱的影响,可以将计算机技术更多地应用到相变蓄冷箱实际开发中。随着我国冷链的不断完善,还需进一步研究相变蓄冷箱的绿色化、低成本化、轻量化。

3) 在产品种类众多、环节复杂多变的生鲜冷链中,蓄冷板和冰袋的回收利用都是未来的研究重点。如何充分利用相变微胶囊,降低相变微胶囊的成本,推动相变微胶囊在生鲜冷链的商业化应用都是重要的研究方向。

4) 蓄冷运输车是多系统集成设备,其复杂程度远高于蓄冷保温箱。以蓄冷车为例,需要提高相变蓄冷技术在生鲜冷链设备中与制冷系统和动力系统的集成化程度。需要开发更多新型相变蓄冷系统,并对新系统进行经济评估和环境评估。

参考文献:

- [1] MENG Bing-bing, ZHANG Xue-lai, HUA Wei-san, et al. Development and Application of Phase Change Material in Fresh E-Commerce Cold Chain Logistics: A Review[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 55: 105373.
- [2] GAO En-yuan, CUI Qi, JING Hua-qian, et al. A Review of Application Status and Replacement Progress of Refrigerants in the Chinese Cold Chain Industry[J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 128: 104-117.
- [3] ARTUSO P, ROSSETTI A, MINETTO S, et al. Dynamic Modeling and Thermal Performance Analysis of a Refrigerated Truck Body during Operation[J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 99: 288-299.
- [4] 张红雨, 万贤, 陈妍, 等. 相变蓄冷材料在冷链物流中的研究进展[J]. 中国塑料, 2021, 35(4): 106-115.
ZHANG Hong-yu, WAN Xian, CHEN Yan, et al. Research Progress in Phase Change Cold-Storage Materials in Cold Chain Logistics[J]. China Plastics, 2021, 35(4): 106-115.

- [5] GUO Jia-ming, LIU Jing, REN Jun-jie, et al. Experimental Study on Thermal Storage Characteristics of Cold Storage Distribution Box[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: 105475.
- [6] 孙锦涛, 游辉, 谢晶. 蓄冷板对冷库保温的影响实验[J]. *包装工程*, 2022, 43(13): 107-116.
SUN Jin-tao, YOU Hui, XIE Jing. Experimental Research on Influence of Cold Storage Plate on Insulation of Cold Storage[J]. *Packaging Engineering*, 2022, 43(13): 107-116.
- [7] 强秋秋. 冷链运输装备用纳米复合相变材料制备及其换热特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2020: 1-5.
QIANG Qiu-qiu. Study on Preparation and Heat Transfer Characteristics of Nano-Composite Phase Change Materials for Cold Chain Transportation Equipment[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2020: 1-5.
- [8] 贺宇舵. 生鲜食品专用复合相变蓄冷剂的开发应用研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2019: 1-3.
HE Yu-duo. Development and Application of Special Composite Phase Change Cold Storage Agent for Fresh Food[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2019: 1-3.
- [9] 张伟. 冰箱冷藏工况下新型复合相变蓄冷材料的制备及热性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013: 5-10.
ZHANG Wei. Study on Preparation and Thermal Performance of a New Composite Phase Change Cold Storage Material under Refrigeration Condition of Refrigerator[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013: 5-10.
- [10] KENISARIN M M, MAHKAMOV K, COSTA S C, et al. Melting and Solidification of PCMS Inside a Spherical Capsule: A Critical Review[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 27: 101082.
- [11] 梁田. 环保型高分子基低温蓄冷剂的制备及其包装应用[D]. 无锡: 江南大学, 2015: 1-9.
LIANG Tian. Preparation and Packaging Application of Environment-Friendly Polymer-Based Low Temperature Cold Storage Agent[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015: 1-9.
- [12] REDDY K S, MUDGAL V, MALLICK T K. Review of Latent Heat Thermal Energy Storage for Improved Material Stability and Effective Load Management[J]. *Journal of Energy Storage*, 2018, 15: 205-227.
- [13] 陈启杨, 章学来. 相变储能材料蓄放能过程热力学分析[J]. *节能*, 2018, 37(6): 35-38.
CHEN Qi-yang, ZHANG Xue-lai. Study on Cool Storage Characteristics of Low Temperature Phase Change Materials Based on Thermodynamic Model[J]. *Energy Conservation*, 2018, 37(6): 35-38.
- [14] 徐治国, 赵长颖, 纪育楠, 等. 中低温相变蓄热的研究进展[J]. *储能科学与技术*, 2014, 3(3): 179-190.
XU Zhi-guo, ZHAO Chang-ying, JI Yu-nan, et al. State-of-the-Art of Phase-Change Thermal Storage at Middle-Low Temperature[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2014, 3(3): 179-190.
- [15] 展佳, 秦善, 高静. 无机水合盐中水的状态与相变潜热的关系[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(1): 80-86.
ZHAN Jia, QIN Shan, GAO Jing. Storage of Water in Inorganic Salt Hydrates and the Implications to Latent Heat in Phase Changes[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2018, 54(1): 80-86.
- [16] ORÓ E, MIRÓ L, BARRENECHE C, et al. Corrosion of Metal and Polymer Containers for Use in PCM Cold Storage[J]. *Applied Energy*, 2013, 109: 449-453.
- [17] LIN Niang-zhi, LI Chuan-chang, ZHANG Dong-yao, et al. Enhanced Cold Storage Performance of $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ /Expanded Graphite Composite Phase Change Materials[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 48: 101596.
- [18] 陆源, 郇昌梦, 齐帅, 等. 静电纺丝用于制备有机相变储热纤维的研究进展[J]. *新能源进展*, 2018, 6(5): 439-447.
LU Yuan, HUAN Chang-meng, QI Shuai, et al. Review on Organic Phase Change Materials Based Fibers for Thermal Energy Storage via Electrospinning Technique[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2018, 6(5): 439-447.
- [19] SHARMA R K, GANESAN P, TYAGI V V, et al. Developments in Organic Solid-Liquid Phase Change Materials and Their Applications in Thermal Energy Storage[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 95: 193-228.
- [20] XUE Fei, QI Xiao-dong, HUANG Ting, et al. Preparation and Application of Three-Dimensional Filler Network towards Organic Phase Change Materials with High Performance and Multi-Functions[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 419: 129620.
- [21] ZHAO Yin-xu, ZHANG Xue-lai, HUA Wei-san. Review of Preparation Technologies of Organic Composite Phase Change Materials in Energy Storage[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, 336: 115923.
- [22] Zhuang MAO PNG, Xiang YUN DEBBIE SOO, Ming HUI CHUA, et al. Strategies to Reduce the Flammability of Organic Phase Change Materials: A Review[J]. *Solar Energy*, 2022, 231: 115-128.

- [23] SHA Yi-shun, HUA Wei-san, CAO Hong-fen, et al. Properties and Encapsulation Forms of Phase Change Material and Various Types of Cold Storage Box for Cold Chain Logistics: A Review[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: 105426.
- [24] LI Gang, ZHANG Bin-bin, LI Xiang, et al. The Preparation, Characterization and Modification of a New Phase Change Material: $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ - $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ Eutectic Hydrate Salt[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2014, 126: 51-55.
- [25] 稻叶英男, 武谷健吾. 静止水の過冷却現象に及ぼす諸因子の影響[J]. *日本机械学会论文集 B 编*, 1993, 59(567): 3557-3564.
- [26] ZHAO Yi, ZHANG Xue-lai, XU Xiao-feng, et al. Development of Composite Phase Change Cold Storage Material and Its Application in Vaccine Cold Storage Equipment[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 30: 101455.
- [27] SONG Yan-lin, ZHANG Nan, JING Yao-ge, et al. Experimental and Numerical Investigation on Dodecane/Expanded Graphite Shape-Stabilized Phase Change Material for Cold Energy Storage[J]. *Energy*, 2019, 189: 116175.
- [28] KUMARESAN V, CHANDRASEKARAN P, NANDA M, et al. Role of PCM Based Nanofluids for Energy Efficient Cool Thermal Storage System[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2013, 36(6): 1641-1647.
- [29] MA Kun-lin, ZHANG Xue-lai, JI Jun, et al. Development, Characterization and Modification of Mannitol-Water Based Nanocomposite Phase Change Materials for Cold Storage[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 650: 129571.
- [30] JUNAID M F, REHMAN Z U, ĀEKON M, et al. Inorganic Phase Change Materials in Thermal Energy Storage: A Review on Perspectives and Technological Advances in Building Applications[J]. *Energy and Buildings*, 2021, 252: 111443.
- [31] 汤磊, 曾德森, 凌子夜等. 相变蓄冷材料及系统应用研究进展[J]. *化工进展*, 2023: 1-26.
TANG Lei, ZENG De-sen, LING Zi-ye, et al. Research Progress of Phase Change Materials and Their Application Systems for Cool Storage[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2023: 1-26.
- [32] ZHAO Yi, ZHANG Xue-lai, XU Xiao-feng. Application and Research Progress of Cold Storage Technology in Cold Chain Transportation and Distribution[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, 139(2): 1419-1434.
- [33] GIN B, FARID M M. The Use of PCM Panels to Improve Storage Condition of Frozen Food[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 100(2): 372-376.
- [34] ZHAO Xiao-xiao, XIA Ming, WEI Xiao-peng, et al. Consolidated Cold and Modified Atmosphere Package System for Fresh Strawberry Supply Chains[J]. *LWT*, 2019, 109: 207-215.
- [35] LAN Wei-qing, ZHANG Wan-jun, LIU Jia-li, et al. Effects of Precooling with Slurry Ice on the Freshness of Farmed Perch (*Lateolabrax Japonicus*) during Logistics Process[J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2021, 30(2): 162-175.
- [36] DU Jian-ping, NIE Bin-jian, ZHANG Yan-ping, et al. Cooling Performance of a Thermal Energy Storage-Based Portable Box for Cold Chain Applications[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 28: 101238.
- [37] 杨坤, 张翔戈, 何裕波, 等. 冷链无源蓄冷保温包装温度场研究[J]. *黑龙江科学*, 2022, 13(24): 87-89.
YANG Kun, ZHANG Xiang-ge, HE Rong-bo, et al. Study on Temperature Field of Cold Chain Passive Cold Storage Thermal Insulation Packaging[J]. *Heilongjiang Science*, 2022, 13(24): 87-89.
- [38] PAQUETTE J C, MERCIER S, MARCOS B, et al. Modeling the Thermal Performance of a Multilayer Box for the Transportation of Perishable Food[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2017, 105: 77-85.
- [39] XU Xiao-feng, ZHANG Xue-lai, LIU Sheng. Experimental Study on Cold Storage Box with Nanocomposite Phase Change Material and Vacuum Insulation Panel[J]. *International Journal of Energy Research*, 2018, 42(14): 4429-4438.
- [40] 王达, 吕平, 贾连文, 等. 不同隔热材料对桃子蓄冷保温运输效果及品质影响的研究[J]. *食品科技*, 2018, 43(2): 58-63.
WANG Da, LYU Ping, JIA Lian-wen, et al. Investigation on the Storage Effect and Nutritional Quality of Peach in Cold Storage Containers Transportation with Different Insulation Materials[J]. *Food Science and Technology*, 2018, 43(2): 58-63.
- [41] 范中阳, 刘升, 武卫东, 等. 蓄冷板摆放方式对冷链宅配过程的影响[J]. *制冷技术*, 2017, 37(6): 51-54.
FAN Zhong-yang, LIU Sheng, WU Wei-dong, et al. Effect of Laying Modes of Cold Plates on Cold Chain Delivery Process[J]. *Chinese Journal of Refrigeration Technology*, 2017, 37(6): 51-54.
- [42] 聂钰岷, 吴祥生, 庄春龙, 等. 货运蓄冷箱内温度场测试试验与数值仿真[J]. *后勤工程学院学报*, 2014, 30(6): 60-66.

- NIE Yu-min, WU Xiang-sheng, ZHUANG Chun-long, et al. Experimental Test and Numerical Simulation of Temperature Field Distribution Inside Cool Storage Freight-Freezer[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2014, 30(6): 60-66.
- [43] 方文康, 宋海燕, 吴迪. 基于 Fluent 的多温区保温包装箱温度场仿真分析[J]. 包装工程, 2020, 41(3): 62-69.
- FANG Wen-kang, SONG Hai-yan, WU Di. Temperature Field Simulation of Multi-Temperature Zone Thermal Insulation Box Based on Fluent[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(3): 62-69.
- [44] 徐笑锋, 章学来, 周孙希, 等. 蓄冷式多温区保温箱系统设计与实验研究[J]. 制冷学报, 2019, 40(3): 92-98.
- XU Xiao-feng, ZHANG Xue-lai, ZHOU Sun-xi, et al. Design and Experimental Study on the Storage Type Insulation Box with Multi-Temperature[J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(3): 92-98.
- [45] GUNAWATI G, DONGORAN A H, SETIAWAN A. Evaluation on Performance of Cold Storage Box Enveloped with Phase Change Materials[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1242(1): 012023.
- [46] 李晓燕, 王雪雷, 苗馨月, 等. 冷链蓄冷保温箱性能优化数值模拟研究[J]. 节能技术, 2019, 37(1): 87-90.
- LI Xiao-yan, WANG Xue-lei, MIAO Xin-yue, et al. Numerical Simulation on Performance Optimization of Cold Storage Incubator during Cold Chain Progress[J]. Energy Conservation Technology, 2019, 37(1): 87-90.
- [47] GHAHRAMANI Z O, AHMADI R. Numerical Investigation of Different PCM Volume on Cold Thermal Energy Storage System[J]. Journal of Energy Storage, 2018, 17: 515-524.
- [48] 朱麟, 凌建刚, 尚海涛. 不同包装方式对模拟物流配送杨梅品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2016, 16(1): 87-90.
- ZHU Lin, LING Jian-gang, SHANG Hai-tao. Effects of Different Out-Store Packaging Treatments on Qualities of Waxberry in Model Condition of Transportation[J]. Storage and Process, 2016, 16(1): 87-90.
- [49] 汤元睿, 谢晶, 徐慧文, 等. 相变蓄冷工艺在金枪鱼冷链物流中的应用研究[J]. 现代食品科技, 2015, 31(1): 173-178.
- TANG Yuan-rui, XIE Jing, XU Hui-wen, et al. Application of Cold Storage Phase-Change Technology in Cold Chain Logistics of Tuna (*Thunnus Obesus*)[J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(1): 173-178.
- [50] 黄艳, 章学来. 蓄冷技术在食品冷链物流中的研究进展[J]. 包装工程, 2015, 36(15): 23-29.
- HUANG Yan, ZHANG Xue-lai. Research Progress of the Application of Cold Storage Technology in Food Cold Chain Logistics[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(15): 23-29.
- [51] 刘广海, 吴俊章, FOSTER A, 等. 多温蓄冷车设计与车内温度场分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 309-316.
- LIU Guang-hai, WU Jun-zhang, FOSTER A, et al. Design of Multi-Temperature Cold Storage Vehicle and Analysis on Temperature Field in Vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 309-316.
- [52] AHMED M, MEADE O, MEDINA M A. Reducing Heat Transfer across the Insulated Walls of Refrigerated Truck Trailers by the Application of Phase Change Materials[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(3): 383-392.
- [53] LIU Ming, SAMAN W, BRUNO F. Development of a Novel Refrigeration System for Refrigerated Trucks Incorporating Phase Change Material[J]. Applied Energy, 2012, 92: 336-342.
- [54] 李曼, 张哲, 田津津, 等. LNG 冷能用于冷藏车的系统设计及分析[J]. 制冷技术, 2014, 34(4): 38-42.
- LI Man, ZHANG Zhe, TIAN Jin-jin, et al. System Design and Analysis for LNG Cooling Capacity Used in Refrigerated Vehicles[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2014, 34(4): 38-42.