

物流工程

相变蓄冷技术在食品冷链运输中的研究进展

李晓燕, 张晓雅, 邱雪君, 闫淑晴, 陈杰

(哈尔滨商业大学 能源与建筑工程学院, 哈尔滨 150028)

摘要: **目的** 概述相变蓄冷技术在食品冷链运输中的研究进展, 为冷链运输发展提供一定的研究思路。

方法 综述相变蓄冷技术在蓄冷式冷藏车、蓄冷保温箱及其他冷链运输设备中的应用, 主要对其相变蓄冷材料、蓄冷技术与保温材料的结合、运输过程内部温度分布的影响因素及其新型的运输方式进行论述。

结果 相变蓄冷技术在食品冷链的各种运输设备中都有广泛的应用领域和较大的发展空间。**结论** 相变蓄冷技术是提高能源利用效率的有效手段, 在冷链运输系统中具有广阔的应用前景。相变蓄冷材料、保温材料以及运输过程中温度稳定分布的研究及多温共配技术是今后的研究方向。

关键词: 相变蓄冷技术; 冷链运输; 蓄冷冷藏车; 蓄冷保温箱

中图分类号: TS205.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)15-0150-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.15.024

Research Progress of Phase Change Cold Storage Technology in Food Cold Chain Transportation

LI Xiao-yan, ZHANG Xiao-ya, QIU Xue-jun, YAN Shu-qing, CHEN Jie

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

ABSTRACT: The work aims to summarize the research progress of phase change cold storage technology in food cold chain transportation and provide some research ideas for the development of cold chain transportation. The application of phase change cold storage technology in cold storage refrigerating vehicle, cold storage incubator and other cold chain transportation equipment was reviewed; and the phase change cold storage materials, the combination of cold storage technology and thermal insulation material, the influencing factors of internal temperature distribution in the transportation process and the new transportation mode were mainly discussed. The results indicated that, phase change cold storage technology had wide application field and large development space in all kinds of transportation equipment of food cold chain. Phase change cold storage technology is an effective method to improve energy utilization efficiency and has broad application prospect in cold chain transportation system. The research on phase change cold storage materials, thermal insulation materials, the stable distribution of temperature during transportation and the multi-temperature blending technology are the future research directions.

KEY WORDS: phase change cold storage technology; cold chain transportation; cold storage refrigerating vehicle; cold storage incubator

收稿日期: 2019-04-24

基金项目: 国家自然科学基金 (51476049); 哈尔滨商业大学研究团队支持项目 (2016TD004); 哈尔滨商业大学研究生创新科研项目 (YJSCX2018-530HSD)

作者简介: 李晓燕 (1962—), 女, 博士, 哈尔滨商业大学教授, 主要研究方向为制冷节能技术与蓄能材料。

我国是易腐食品的生产和消费大国,随着经济的稳步发展,人民对于冷链流通商品的需求在持续增加,对于食品品质的要求也越来越高^[1-2]。到 2017 年为止,冷链运输的蔬菜、肉类及水产品在我国流通率分别是 35%、57%和 69%,而在发达国家肉类和家禽冷链流通率已经达到了 100%,蔬菜、水果冷链流通率达到了 95%以上,可见我国在冷链产业方面仍有巨大的发展空间^[3]。我国在冷链运输的技术方面相对落后,做为冷链环节中的关键部分,冷链运输对保证食品品质和安全起重要作用^[4-5]。

相变蓄冷技术是一种制冷节能技术,其可以在低用电量时将冷量储存在蓄冷介质中,在用电高峰期释放冷量,以满足冷量的需求。该技术充分利用了峰谷电价差政策,且不同温度段相变蓄冷材料的应用满足了不同温度需求的冷链运输,解决了能源供需矛盾在时间和空间上的不匹配问题,实现了能源的有效利用^[6-9]。

冷链运输需要在中、长距离和短距离配送等运输环节中保持低温。冷链运输按照不同的能源供应方式可以分为有源型和无源型低温配送制冷^[10]。有源型低温配送制冷是自带制冷装置的运输系统,最常见的是机械式冷藏车,采用蒸汽压缩式制冷机组,其运输结构复杂、维修费用较高、噪声大^[11];无源型低温配送一般是通过蓄冷材料(冰袋或干冰)的相变释放冷量来维持配送过程中的低温环境,这种方式成本低,无需额外的能量且使用方便^[12-13],这种运输方式应用最多的是蓄冷式冷藏车和蓄冷运输保温箱。文中主要总结近年来相变储能技术在蓄冷式冷藏车、蓄冷保温箱及其他运输设备中的应用研究。

1 相变蓄冷技术在蓄冷式冷藏车的应用研究

虽然我国冷藏货运市场潜力巨大,但我国冷链物流基础比较薄弱。冷链运输的方式主要包括铁路、公路、水路、航空运输等 4 种,冷链运输对运输工具要求特别高,必须具有良好的性能,对于易腐食品要保持规定的储存温度,切忌大的温度波动^[14]。蓄冷板冷藏车应用相变储能技术,依靠蓄冷板内的蓄冷剂来进行充冷和放冷,这种运输方式结构操作简单、易于维修、运行成本低,已被广泛应用于冷藏运输中。

1.1 保温隔热箱体

冷藏车隔热保温箱体是冷藏车的重要组成部分,其结构和选用的隔热材料直接影响冷藏车的绝热性能和内部环境温度^[15-16]。美国的 Ahmed^[17]将石蜡基相变材料(Phase Change Material, PCM)放入冷藏车箱体的隔热材料中,构成带有 PCM 管箱体的隔热层,

箱体隔热层见图 1,并通过实验对带有 PCM 的箱体与传统冷藏车进行比较,得出新型冷藏车壁面平均传热率降低了 9.1%,平均每日热负荷可以降低 16.3%,减少了车内温度波动,减少了柴油驱动制冷设备的污染,提高了车体隔热性能,达到了节能目的。Michel^[18]等提出了一种用于冷藏车辆的多层保温墙,研究了不同多层复合墙体结构的热响应,测试了总厚度为 6 cm 的不同多层墙体结构,强调了复合层在保温墙内位置的重要性。此外,复合材料层靠近车辆绝缘墙内面和复合层接近外表面等情况之间的能量下降了 18%。该墙含有聚氨酯-PCM 泡沫复合层,与聚氨酯泡沫塑料的标准绝缘墙相比,外壳的能耗降低了 1.2%。目前冷藏箱体围护结构增加相变层的技术还处于研究阶段,尚未大规模应用,保温材料良好的性能有利于降低产品在冷链运输过程中的腐坏率,减少运输环节中的能源消耗。

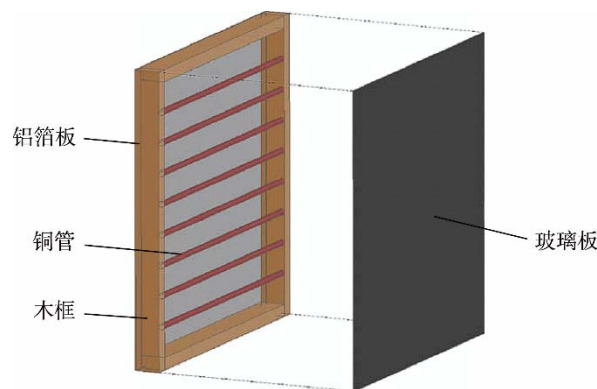


图 1 带有 PCM 管的箱体隔热层剖视
Fig.1 Cut-away view of a trailer simulator wall with PCM pipes

1.2 车厢温度分布

确保车厢内均匀稳定的温度分布是保证运输货物品质的关键^[19]。李晓燕^[20]等对比分析了结晶水合盐与有机物蓄冷的优缺点,并针对蓄冷板冷藏车对相变蓄冷材料的要求,研制出相变温度为 -6.9°C 的相变蓄冷材料。黄荣鹏^[21]等在蓄冷板冷藏车内应用新型相变材料(HWY-1),通过数值模拟研究了箱内温度场,发现应用 PCM 蓄冷板冷藏车内的温度可以长期保持低温,这符合冷藏车运输过程中的实际需求。许多食品在储存和运输过程中都需要精确的温度环境,食物质量会受到温度波动的影响,需准确掌握冷链运输过程中车厢内温度的空间分布特征,因此研究影响车厢内温度分布的各种因素具有重要意义。Xu^[22]等模拟研究了环境温度对冷藏车温度场和冷藏材料融化过程的影响。结果表明,随着温度的升高,储能板的融化过程加快,潜热释放时间缩短。自然对流式温度场分布不均,建议可以采用强制对流来加强热对流和换热。谢如鹤^[23]等通过计算流体力学(Computational

Fluid Dynamics, CFD)对空载冷藏车厢内的温度场进行了 10 h 的非稳态数值模拟研究,主要研究了常见的 3 种不同冷板布置方式(冷板顶置、冷板侧置、冷板部分顶置部分侧置)下车厢内的温度场分布,结果表明冷板部分顶置部分侧置方式下车厢内的温度分布更均匀;同时对模拟结果进行了实验验证,证明计算模型可用于冷藏车厢内温度场的仿真,可为冷板冷藏车的冷板优化布局提供依据。

1.3 新型蓄冷冷藏车

制冷系统是冷链运输设备的重要组成部分,对冷链运输的低温环境起着至关重要的作用。目前,机械制冷技术虽是最成熟和应用最广泛的技术,但仍存在制冷剂易泄漏、噪声大等问题。随着节能环保事业的发展,新型制冷方式的冷藏车得到了广泛的研究^[24]。

Liu^[25-26]提出了一种结合相变材料(PCM)的新型制冷系统,将带有相变材料的绝缘容器(Phase Change Thermal Storage Unit, PCTSU)放置在冷藏车厢外,蓄冷时先冷却传热流体(Heat Transfer Fluid, HTF),将冷量储存在绝缘容器的相变材料中,释冷时先将相变材料的冷量传递给 HTF,再通过冷风机使车厢内空气与 HTF 进行热交换,从而保持冷藏卡车的温度可以保持在 -18°C ,该制冷系统适用于移动运输,其制冷装置见图 2。之后针对该种制冷系统提出了一种 TRNSYS 模型,对热性能的影响参数(PCM 的位置、制冷空间大小、门开口数和 PCM 熔化温度等)进行了研究。

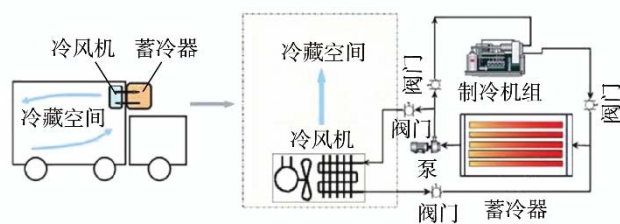
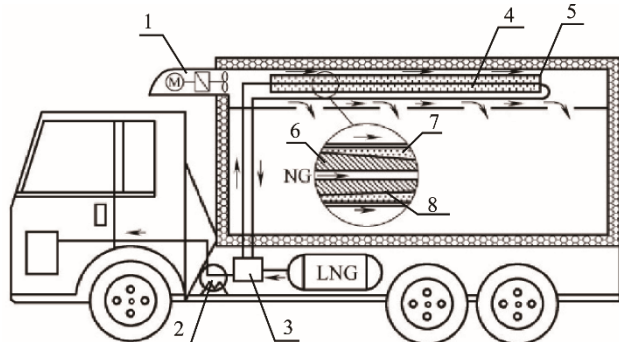


图 2 制冷系统装置

Fig.2 The refrigeration system

液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)的储能密度大,存储密度是标准状态下气态天然气的 600 多倍。作为一种新型能源,LNG 近年来被很多学者关注^[27]。LNG 作为冷源应用于冷藏车中,冷藏车以 LNG 为燃料,利用 LNG 汽化升温过程中所释放冷量来制冷^[28]。Tan^[29]等基于液化天然气冷藏车的冷能回收对水的液固相变蓄冷进行了实验研究,LNG 冷藏车见图 3。此研究选用管壳式换热器,且传热管内由低温氮气代替低温天然气进行冷却,水在传热管外固化。研究发现主要的热阻发生在管内气体传热流体(HTF)中,通过添加波状内部翅片可以有效地改善气侧传热,并发现冰层的厚度沿管长呈抛物线状分

布。李曼^[30]等将 LNG 用于冷藏车,研究了蓄冷冷藏车的运行模式,并对其经济性进行了分析,发现节能环保的 LNG 冷藏车是我国冷藏车今后的发展趋势。



1.风机 2.热交换器 3.阀门箱 4.PCM 5.储冷单元 6.冰 7.水 8.相变界面

图 3 液化天然气冷藏车

Fig.3 LNG refrigerating vehicle

2 相变蓄冷技术在蓄冷保温箱的应用研究

蓄冷型运输保温箱是一种非常有效的冷链运输方式,其可以利用普通货车的配送能力,进而降低配送成本。保温箱和蓄冷板是其主要组成部分,无冷源保温箱自身没有制冷设备,维持箱内长时间的低温环境是依靠不同温度段的蓄冷板来实现^[31]。蓄冷板内装有可以反复多次使用的高效蓄冷剂,这种运输方式具有灵活性高、环保性好、经济性等特点。

2.1 相变蓄冷剂

蓄冷板内相变蓄冷剂的选择对蓄冷运输保温箱的运输性能有一定影响。相变蓄冷材料是能在相变循环中吸收和释放潜在热量的材料,PCMs 可以是有机、无机或共晶混合物,其与冷链运输设备配合使用能创造出一个有利于保护产品的低温环境。目前对相变蓄冷材料的研究主要集中于蓄冷剂筛选、热物性分析等,以期获得适合于食品冷冻冷藏、有合适相变温度和较大潜热的相变材料。Bai^[32]等选择纯水、质量分数为 18.8%的 NaCl、质量分数为 46.3%的乙醇和质量分数为 29%的 CaCl_2 等 4 种溶液,研究了装入不同相变蓄冷剂的冷藏冰袋对配送箱内新鲜农产品品质变化的影响,测量了箱内温度和农产品的中心温度。结果表明冷藏材料的相变温度越低,农产品的保鲜时间越长。Cong^[33]等以 NaCl 溶液为基液,分别添加 NaNO_3 , Na_2SO_4 , KCl,研究了不同添加剂对相变温度和熔解热的影响,发现三元盐水溶液的熔解热随共晶溶液比例的不同而变化。杨兆丹^[34]等采用正交试验研究分析了海绵厚(8, 16, 20 mm)、纳米流体质量分数(0.1%, 0.15%, 0.2%)、蓄冷材料质量(0.3,

0.35, 0.4 kg)、蔬菜预冷温度(1, 4, 12 °C)等 4 种因素及其水平值对纳米蓄冷包装箱冷藏效果的影响, 结果表明蓄冷效果随着海绵厚度、纳米流体质量分数和蓄冷材料质量的增大而增大。

2.2 保温箱温度场

在冷链运输过程中, 保温箱内具有恒定的温度场是货物质量的保障, 蓄冷板内蓄冷剂的蓄释冷特性及蓄冷板摆放方式对运输过程中的温度分布有很大影响。田津津^[35]等模拟分析了 3 种不同环境温度(-10,

0, 10 °C)下 NaCl 蓄冷板的释冷过程, 并且通过实验验证了模型的准确性。Darzi^[36]等对夜间通风系统中采用相变材料(PCM)的板式储能系统进行了数值模拟, 研究了 PCM 厚度、空气质量流量和进气温度对系统性能的影响, 发现储能装置中板材的厚度对装置热性能起着重要作用, PCM 的完全熔化与 PCM 的厚度呈线性关系。潘欣芝^[37]等建立了保温箱模型, 研究了蓄冷剂置于不同位置时, 保温箱内温度场的分布情况和变化规律, 模拟结果见图 4, 保温箱内温度场分布差异很大, 差异性从大到小依次是边缘摆、侧摆、顶摆。

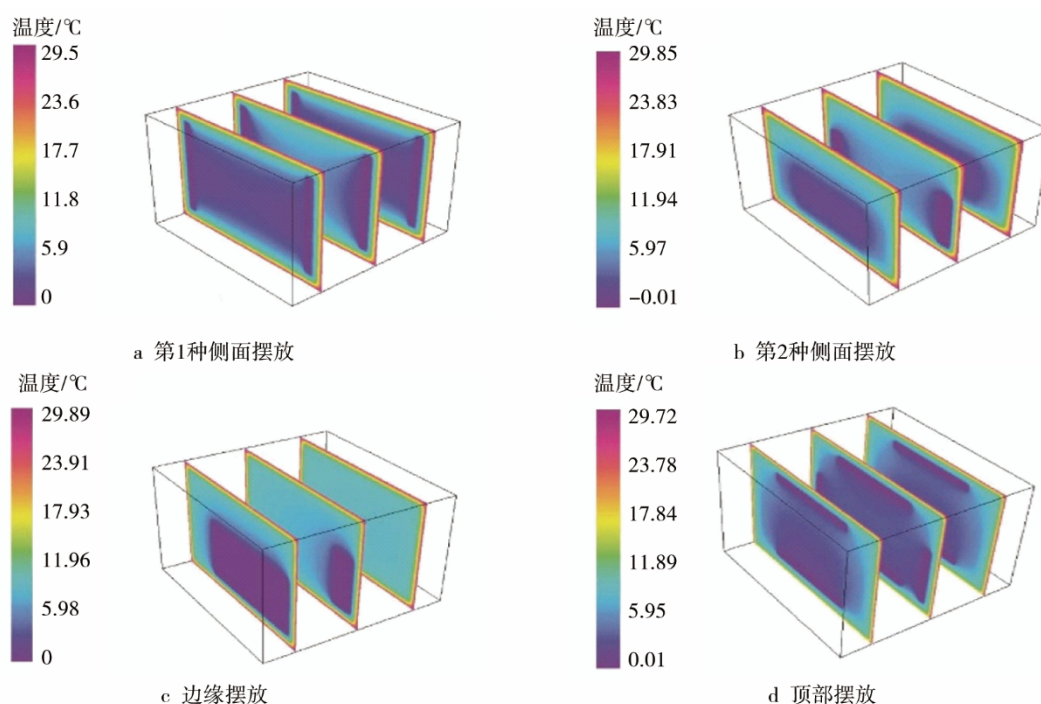


图 4 温度场截面

Fig.4 Section of temperature field

2.3 箱体保温材料

蓄冷保温箱的保温材料对箱内的保温及控温非常关键。Kozak^[38]建议将传统的绝缘材料与相变材料(PCM)相结合, 证明存在最佳的绝缘厚度使 PCM 的熔化时间最大化, 从而使产品长期处于所需的低温环境下。常见的隔热材料主要包括发泡材料和真空绝热板^[39]。高恩元^[40]等模拟研究了聚苯乙烯泡沫(Expanded Polystyrene, EPS)泡沫保温箱、冰蓄冷保温箱和 5 °C 冷链运输等 3 种不同运输方式中番茄的运输和保鲜技术, 得出了不同运输时长及不同条件下需要的冷链运输方式。当时间小于 24 h 时, EPS 保温箱适用; 当时间小于 48 h 时, 应用冰蓄冷保温箱; 5 °C 冷链运输在 72 h 后仍能保持良好的质量, 适用于长途或特种果蔬运输。徐笑锋^[41]等将相变材料封装在聚乙烯蓄冷板中, 并在有负载和无负载的情况下对比了发泡聚丙烯(Expanded Polypropylene)保温箱和真

空绝热板(Vacuum Insulation Panel)保温箱中箱内各点的温度变化及保冷性能。结果表明真空绝热板的保温效果优于发泡聚丙烯, 可使保冷时间延长 13.31%; 真空绝热板保温箱在载货情况下的保冷时间仅比空载保冷时间少 0.77 h, 研究结果为蓄冷保温箱的进一步设计应用和优化提供了参考。

2.4 新型配送方式

多温共配物流系统是基于多温共配技术来实现产品全程保鲜的低成本运输系统。当运输货物少量多样、所需储存温度范围不同时, 为了满足不同储藏温度货物联合运输的要求, 常会将运输空间分为多个温区, 可以减少对冷链运输设备的调度, 成本低、效率高^[42—43]。赵曜^[44]等采用 CFD 技术研究了多温区冷藏运输中气流组织方式对温度分布的影响, 为多温区冷藏运输的设计优化提供了理论依据。翟纪强^[45]等开发出了一种多温区的保温箱, 通过单因素实验, 研究了

蓄冷剂摆放位置、外界环境、蓄冷剂与冷鲜产品的质量比等对保温箱温控效果的影响。研究表明,侧面结合顶部摆放方式保温效果最佳。保温箱的保温时间随蓄冷剂质量的增加而延长,且冷藏区和冷冻区的保温时间最长可分别达到了 44 h 和 28 h,该多温区保温箱能够满足冷鲜产品短途快递运输的温控要求。

3 其他运输设备应用研究

冷藏车和蓄冷保温箱是最常用、灵活的冷链运输方式,相变蓄冷技术在冷藏集装箱、潜热型控温包装等冷链运输设备中也有应用研究。Copertaro^[46]等在传统的冷藏集装箱外壳中加入 PCM 作为隔热层,减少了从外部环境到冷藏室内部的传热,降低了冷藏集装箱的日常热负荷。Fioretti^[47]等提出使用相变材料(PCM)改善冷藏集装箱围护结构热性能的新技术,将外部 PCM 层与绝缘夹层板集成在一起,对冷藏集装箱进行了实验和数值模拟研究。实验结果表明 2 个试验日的峰值传热率分别降低了 5.55% 和 8.57%;模型预测峰值热负荷和总能量分别减少了 20% 和 4.7%。

近年来国内外研究学者对微胶囊技术在食品包装领域的应用进行了大量研究,微胶囊技术打破了相变材料的应用局限性,提高了相变材料的使用效率。江南大学主要对应用于控温包装领域的相变微胶囊进行了研究。于党伟^[48]以正十四烷为相变材料芯材、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)作为微胶囊壳材,通过原位聚合法得到了低温相变微胶囊材料,并对其在控温包装中的应用效果进行了研究。研究发现保温箱内的温度低于普通包装,有较好的应用前景。Hoang^[49]等采用一种新的方法制备出用于食品包装的 PCM 微胶囊,该技术可使用生物衍生材料和可降解生物聚合物作为封装元件,具有好的环境效益。潘暉^[50]等以长方体产品的控温包装为研究对象,建立了控温包装系统控温时间预测模型,并在 3 种环境温度下研究了 2 种典型控温包装的储藏时间,结果表明实际控温时间虽比模型预测时间长,但误差小于 10%,该模型可以为控温包装设计提供理论依据。

4 结语

我国冷链运输市场的潜力巨大,随着人们生活水平的不断提高,对于绿色生鲜食品的需求越来越高,推动了食品冷链运输的发展,因此,将相变蓄冷技术运用在冷链运输中有广泛的应用前景,其今后的研究方向主要包括以下 5 个方面。

1) 在相变蓄冷材料方面,继续寻找或研制高潜热、高导热系数的相变蓄冷材料,以延长蓄冷保温时间,保证运输过程中箱体内的温度场恒定。

2) 完善和探索更加有效的微胶囊制备技术,提

高微胶囊的包覆率,使相变材料微胶囊有更好的热稳定性。

3) 开发新型的保温复合板,对蓄冷材料与保温材料两者复合的新技术及复合比例进行更进一步的研究,以确保精确控温、减少漏热。

4) 在实际应用中将相变蓄冷技术与冷链运输设备相结合,进一步通过实验和模拟研究影响冷链运输中箱内温度场分布的因素,为冷链运输设备的设计优化提供依据。

5) 发展多温共配物流技术,针对货物所需的不同温度,实现不同温度产品的共同配送,提高冷链运输的综合效益,达到提高能效、节能减排的目的。

参考文献:

- [1] 傅仰泉,张帆,李聿乔,等. 环保型蓄冷剂的制备及包装应用[J]. 包装与食品机械, 2018, 36(3): 26—30.
FU Yang-quan, ZHANG Fan, LI Yu-qiao, et al. Preparation and Packaging Application of the Environment-friendly Cold Storage Agent[J]. Packaging and Food Machinery, 2018, 36(3): 26—30.
- [2] ZHAO H, LIU S, TIAN C, et al. An Overview of Current Status of Cold Chain in China[J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 88: 483—495.
- [3] 刘雨平. 我国农产品冷链物流发展存在的问题及对策研究[J]. 价格月刊, 2018(9): 60—63.
LIU Yu-ping. Research on the Problems in the Agricultural Cold Chain Logistics Development of China and Its Countermeasure[J]. Prices Monthly, 2018(9): 60—63.
- [4] MENEGHETTI A, ROLD G D, CORTELLA G. Sustainable Refrigerated Food Transport: Searching Energy Efficient Routes[J]. IFAC-Papers Online, 2018, 51(11): 618—623.
- [5] HUNDY G F. Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps[M]. United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2016.
- [6] 鄢冬茂. 相变储能材料在食品冷链物流中的应用研究进展[J]. 制冷与空调, 2017, 17(11): 1—5.
YAN Dong-mao. The Application of Phase Change in Food Cold Chain Logistics[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2017, 17(11): 1—5.
- [7] VEERAKUMAR C, SREEKUMAR A. Phase Change Material Based Cold Thermal Energy Storage: Materials, Techniques and Applications-a Review[J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 67: 271—289.
- [8] ELIAS C N, STATHOPOULOS V N. A Comprehensive Review of Recent Advances in Materials Aspects of Phase Change Materials in Thermal Energy Storage[J].

- Energy Procedia, 2019, 161: 385—394.
- [9] LU W, LIU G, XING X, et al. Investigation on Ternary Salt-water Solutions as Phase Change Materials for Cold Storage[J]. Energy Procedia, 2019, 158: 5020—5025.
- [10] 王慧梅, 李咏雪, 刘海鹏, 等. 无源医用冷藏箱的技术要求及发展现状[J]. 医疗卫生装备, 2018, 39(12): 65—69.
- WANG Hui-mei, LI Yong-xue, LIU Hai-peng, et al. Technical Requirements and Development Status of Passive Medical Cold Boxes[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2018, 39(12): 65—69.
- [11] 贺廉云. 冷藏车制冷方式分析与研究[J]. 时代农机, 2017, 44(1): 79—80.
- HE Lian-yun. Research of the Refrigeration Method for Refrigerater Trucks[J]. Times Agricultural Machinery, 2017, 44(1): 79—80.
- [12] VADHERA J, SUR A, NANDAN G, et al. Study of Phase Change Materials and Its Domestic Application[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2): 3411—3417.
- [13] 朱麒麟. 浅析我国冷藏车市场现状及发展方向[J]. 机械, 2017, 44(3): 44—47.
- ZHU Qi-rong. Analysis of Current Situation and Development Prospect of Refrigerated Truck Market in China[J]. Machinery, 2017, 44(3): 44—47.
- [14] 汪晓光. 我国农产品冷链运输装备技术现状与发展趋势[J]. 农业工程, 2013, 3(2): 40—42.
- WANG Xiao-guang. Status Quo and Development Trend of China's Cold Chain Transportation Equipments[J]. Agricultural Engineering, 2013, 3(2): 40—42.
- [15] VERMA S, SINGH H. Vacuum Insulation in Cold Chain Equipment: a Review[J]. Energy Procedia, 2019, 161: 232—241.
- [16] 王文文. 冷藏车保温材料对内部环境影响的模拟研究[D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2012.
- WANG Wen-wen. The Numerical Simulation About the Impact of the Internal Environment with the Refrigerated Truck's Insulation Material[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture. 2012.
- [17] 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, 2009, 51(3): 383—392.
- [18] MICHEL B, GLOUANNEC P, FUENTES A, et al. Experimental and Numerical Study of Insulation Walls Containing a Composite Layer of PU-PCM and Dedicated to Refrigerated Vehicle[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 116: 382—391.
- [19] NDRAHA N, HSIAO H I, VLAJIC J, et al. Time-temperature Abuse in the Food Cold Chain: Review of Issues, Challenges, and Recommendations[J]. Food Control, 2018, 89: 12—21.
- [20] 李晓燕, 高宇航, 杨舒婷. 冷藏车用新型相变蓄冷材料的研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2010, 26(1): 96—98.
- LI Xiao-yan, GAO Yu-hang, YANG Shu-ting. Study on New Cool Storage Materials for Refrigerated Vehicle[J]. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition), 2010, 26(1): 96—98.
- [21] 黄荣鹏, 李晓燕, 苗馨月, 等. PCM蓄冷板式冷藏车温度场数值模拟研究[J]. 冷藏技术, 2018, 41(1): 23—26.
- HUANG Rong-peng, LI Xiao-yan, MIAO Xin-yue, et al. Numerical Study on the Temperature Field of Refrigerated Vehicles with PCM Cold-storage Plates[J]. Journal of Refrigeration Technology, 2018, 41(1): 23—26.
- [22] XU X, ZHANG X, MUNYALO J M. Simulation Study on Temperature Field and Cold Plate Melting of Cold Storage Refrigerator Car[J]. Energy Procedia, 2017, 142: 3394—3400.
- [23] 谢如鹤, 唐海洋, 陶文博, 等. 基于空载温度场模拟与试验的冷藏车冷板布置方式优选[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 290—298.
- XIE Ru-he, TANG Hai-yang, TAO Wen-bo, et al. Optimization of Cold-plate Location in Refrigerated Vehicles Based on Simulation and Test of No-load Temperature Field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(24): 290—298.
- [24] 任政, 张蓓乐, 陈小砖, 等. 公路冷藏车技术的研究进展[J]. 制冷与空调, 2018, 18(3): 61—65.
- REN Zheng, ZHANG Bei-le, CHEN Xiao-zhuan, et al. Research Progress of High Way Refrigerated Truck Technology[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2018, 18(3): 61—65.
- [25] LIU M, SAMAN W, BRUNO F. Development of a Novel Refrigeration System for Refrigerated Trucks Incorporating Phase Change Material[J]. Applied Energy, 2012, 92: 336—342.
- [26] LIU M, SAMAN W, BRUNO F. Computer Simulation with TRNSYS for a Mobile Refrigeration System Incorporating a Phase Change Thermal Storage Unit[J]. Applied Energy, 2014, 132: 226—235.
- [27] HE T, CHONG Z, ZHENG J, et al. LNG Cold Energy Utilization: Prospects and Challenges[J]. Energy, 2019, 170: 557—568.
- [28] 张哲, 田津津, 毛力, 等. 冷藏汽车制冷方式及其特点[J]. 低温与超导, 2010, 38(3): 69—71.
- ZHANG Zhe, TIAN Jin-jin, MAO Li, et al. The

- Refrigeration Method and Its Characteristic of the Refrigeration Truck[J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2010, 38(3): 69—71.
- [29] TAN H, LI Y, TUO H, et al. Experimental Study on Liquid/Solid Phase Change for Cold Energy Storage of Liquefied Natural Gas (LNG) Refrigerated Vehicle[J]. *Energy*, 2010, 35(5): 1927—1935.
- [30] 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.
- [31] 李杰瑞, 武吉梅. 蓄冷保温箱技术的应用探讨[J]. *印刷技术*, 2018(1): 49—51.
LI Jie-rui, WU Ji-mei. Discussion on Application of Cold Storage Insulation Box Technology[J]. *Printing Technology*, 2018(1): 49—51.
- [32] BAI B, CHEN N, LI X. Application Research of Nano-storage Materials in Cold Chain Logistics of E-commerce Fresh Agricultural Products[J]. *Results in Physics*, 2019 (Pre-publication).
- [33] CONG L, SHE X, LENG G, et al. Formulation and Characterisation of Ternary Salt Based Solutions as Phase Change Materials for Cold Chain Applications[J]. *Energy Procedia*, 2019, 158: 5103—5108.
- [34] 杨兆丹, 邸倩倩, 刘斌, 等. Al₂O₃-H₂O 纳米蓄冷包装箱的正交试验研究[C]// 第七届中国冷冻冷藏新技术新设备研讨会论文集, 2015: 129—132.
YANG Zhao-dan, DI Qian-qian, LIU Bin, et al. Orthogonal Experimental Study on Al₂O₃-H₂O Nano Cold Storage Incubator[C]// *Proceedings of the 7th China Symposium on New Technology and Equipment for Refrigeration and Refrigeration*, 2015: 129—132.
- [35] 田津津, 张哲, 王怀文, 等. 蓄冷板释冷过程的数值模拟和实验研究[J]. *制冷学报*, 2016, 37(3): 29—34.
TIAN Jin-jin, ZHANG Zhe, WANG Huai-wen, et al. Numerical Simulation and Experiment Research on Cold Plate Melting Process[J]. *Journal of Refrigeration*, 2016, 37(3): 29—34.
- [36] DARZI A A R, MOOSANIA S M, TAN F L, et al. Numerical Investigation of Free-cooling System Using Plate Type PCM Storage[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2013, 48: 155—163.
- [37] 潘欣艺, 王家俊, 王冬梅. 蓄冷剂摆放位置对保温箱中温度场的影响[J]. *包装工程*, 2018, 39(3): 77—82.
PAN Xin-yi, WANG Jia-jun, WANG Dong-mei. Influences of Coolant Placement on the Temperature Field of Incubator[J]. *Packaging Engineering*, 2018, 39(3): 77—82.
- [38] KOZAK Y, FARID M, ZISKIND G. Experimental and Comprehensive Theoretical Study of Cold Storage Packages Containing PCM[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 115: 899—912.
- [39] 陈海洋, 张建一. 蓄冷型运输保温箱在冷链中的应用[J]. *冷藏技术*, 2010(3): 12—16.
CHEN Hai-yang, ZHANG Jian-yi. Applications of Cold Storage Type Transport Box in Cold Chain[J]. *Journal of Refrigeration Technology*, 2010(3): 12—16.
- [40] 高恩元, 荆华乾. 番茄冷链运输保鲜技术研究[J]. *制冷技术*, 2014, 34(5): 49—53.
GAO En-yuan, JING Hua-qian. Research on Fresh-keeping Technology of Cold Chain Transportation for Tomatoes[J]. *Chinese Journal of Refrigeration Technology*, 2014, 34(5): 49—53.
- [41] 徐笑锋, 章学来. 十水硫酸钠相变蓄冷保温箱保冷特性的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(22): 308—314.
XU Xiao-feng, ZHANG Xue-lai. Experimental Study on Cold Retention Characteristics of Cold Storage Incubator Using Na₂SO₄·10H₂O as PCMs[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(22): 308—314.
- [42] TSANG Y P, CHOY K L, WU C H, et al. An Intelligent Model for Assuring Food Quality in Managing a Multi-temperature Food Distribution Centre[J]. *Food Control*, 2018, 90: 81—97.
- [43] 陈婧怡, 邱荣祖. 冷链物流多温共配方案优化系统设计[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2018, 30(5): 132—137.
CHEN Jing-yi, QIU Rong-zu. Design of Optimization System for Multi-temperature Joint-delivery of Cold Chain Logistics[J]. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 2018, 30(5): 132—137.
- [44] 赵曜, 唐刚志, 朱孙科. 多温区冷藏运输车气流组织特性研究[J]. *食品与机械*, 2017, 33(1): 119—121.
ZHAO Yao, TANG Gang-zhi, ZHU Sun-ke. Research of Air Distribution Characteristic for Single Evaporator Multiple Temperature Zones Refrigerated Truck[J]. *Food & Machinery*, 2017, 33(1): 119—121.
- [45] 翟纪强, 宋海燕, 肖婕. EPP 多温区保温箱温控效果的特性研究[J]. *包装工程*, 2019, 40(1): 93—99.
ZHAI Ji-qiang, SONG Hai-yan, XIAO Jie. Characteristics of Temperature Control Effect of the EPP Multi-temperature Insulation Box[J]. *Packaging Engineering*, 2019, 40(1): 93—99.
- [46] COPERTARO B, PRINCIPI P, FIORETTI R. Thermal Performance Analysis of PCM in Refrigerated Container Envelopes in the Italian Context-numerical Modeling and Validation[J]. *Applied Thermal Engineering*,

- 2016, 102: 873—881.
- [47] FIORETTI R, PRINCIPI P, COPERTARO B. A Refrigerated Container Envelope with a PCM (Phase Change Material) Layer: Experimental and Theoretical Investigation in a Representative Town in Central Italy[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 122: 131—141.
- [48] 于党伟. 冷藏用控温包装微胶囊相变蓄冷材料的制备及性能优化研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014.
- YU Dang-wei. Preparation and Performance Optimization Research of Micoencapsulated Phase Change Materials with Refrigeration Temperature Control Packaging[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.
- [49] HOANG H M, LEDUCQ D, PÉREZ-MASIA R, et al. Heat Transfer Study of Submicro-encapsulated PCM Plate for Food Packaging Application[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2015, 52: 151—160.
- [50] 潘嘹, 卢立新, 王军. 控温包装控温时间预测模型研究[J]. *包装工程*, 2014, 35(5): 27—30.
- PAN Liao, LU Li-xin, WANG Jun. Prediction Model for the Shelf Life of Insulating Package[J]. *Packaging Engineering*, 2014, 35(5): 27—30.