

应用于冷链运输相变蓄冷技术研究进展

赵祎, 章学来, 徐笑锋, 张时华, 刘璐

(上海海事大学 蓄冷技术研究所, 上海 201306)

摘要: **目的** 概述应用于冷链运输的相变蓄冷技术研究进展, 为冷链运输发展提供一定的研究思路。**方法** 系统地综述相变蓄冷材料的几种主要包装形式, 并对分析冷藏集装箱、冷藏车和蓄冷保温箱的优点和缺点。**结果** 蓄冷技术能有效提高能源利用率, 蓄冷技术在冷链运输的各环节中都具有广泛的应用背景和节能潜力。**结论** 相变蓄冷材料的相变机理、相变过程中的释冷速率、微胶囊制备工艺简单化及冷链运输装备内的温度场分布情况将是未来的研究方向。

关键词: 冷链运输; 蓄冷板; 蓄冷微胶囊; 蓄冷袋; 蓄冷运输装备

中图分类号: TK02 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)21-0117-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.21.016

Research Progress of Phase Change Cold Storage Technology Applied to Cold Chain Transportation

ZHAO Yi, ZHANG Xue-lai, XU Xiao-feng, ZHANG Shi-hua, LIU Lu

(Institute of Cool Thermal Storage Technology, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

ABSTRACT: The work aims to summarize the research progress of phase change cold storage technology applied to cold chain transportation, and to provide some research ideas for the development of cold chain transportation. Several main packaging forms of phase change cold storage materials used in cold chain transportation were summarized systematically. The advantages and disadvantages of refrigerated containers, refrigerated trucks and cold storage thermal insulation boxes were compared and analyzed. The cold storage technology can effectively improve the energy utilization rate. The cold storage technology had a wide application background and energy saving potential in each link of the cold chain transportation. The phase change mechanism of the phase changes cold storage material, the cooling rate during the phase change process, the simplification of the microcapsule preparation process, and the temperature field distribution in the cold chain transportation equipment are future research directions.

KEY WORDS: cold chain transportation; cold storage plate; cold storage microcapsule; cold storage bag; cold storage transportation equipment

当前, 可再生能源是能源消耗的主要来源, 可满足全球能源消耗的18%以上^[1]。在LHTES(潜热热能存储)系统中使用PCM(相变材料)是最有吸引力

的能量存储方法之一, 因为PCM可以在相变过程中存储或释放热能。由于蓄冷技术对负荷转移的独特作用, 蓄冷技术已经成为改善电力短缺状况的重要措

收稿日期: 2020-05-17

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFD0401300); 上海市科委项目(16040501600); 上海海事大学研究生拔尖人才培养项目(2019YBR019)

作者简介: 赵祎(1995—), 女, 上海海事大学硕士生, 主攻蓄冷及冷链物流。

通信作者: 章学来(1964—), 男, 上海海事大学教授、博导, 主要研究方向为相变储能。

施。冷能存储是缓解能源供需差距的有效途径。蓄冷技术在食品低温加工、低温贮藏、低温运输配送、低温销售等冷链的各环节中都具有广泛的应用背景和节能潜力^[2]。

蓄冷剂的包装主要有蓄冷板、蓄冷袋以及蓄冷胶囊等类型^[3]。蓄冷板的蓄冷能力取决于大小、容积以及蓄冷剂的特性等。蓄冷板通常采用可拆卸式安装,根据冷库大小、冷藏车厢体和产品对温度的不同需求对所安装的蓄冷板进行选择^[4-5]。相变微胶囊不仅能解决相变过程中相变材料的泄漏及腐蚀、长期应用中的相分离问题,也可以防止与周围环境相反应。蓄冷袋在实际生活中已广泛应用,保鲜效果较好且成本低^[6-7]。蓄冷式冷藏车和冷藏集装箱在冷链物流中的应用不仅可延长货物的存储期限,还能降低货物的损坏率。相变蓄冷保温箱可以长时间保持环境温度低而无需额外的功率,并且进一步有效、经济地实现冷链分配,不仅可以保证冷冻,冷藏商品的质量,还可以有效利用冷藏车的配送能力,降低配送成本^[8]。

文中拟对应用于冷链物流的相变蓄冷材料进行详细的分类,并对每类相变蓄冷材料的优缺点进行阐述。同时,系统综述应用于冷链运输相变蓄冷材料的几种主要包装形式(蓄冷板、蓄冷微胶囊、蓄冷袋)及其应用现状,并对比分析冷藏集装箱、冷藏车和蓄冷保温箱的优点和缺点。最后,提出进一步研究所要解决的关键问题。

1 应用于冷链物流的蓄冷包装结构

1.1 蓄冷板

蓄冷板以蓄冷量大、可重复使用等优点成为冷链物流的主要冷源,使冷藏装置内部温度保持在货物适宜的低温^[9-10],常用于冷链运输的蓄冷板见图1。杜雁霞等^[11]研究了蓄冷剂在蓄冷板中凝固时的相界面移动速度,即通过相界面的热流密度随固相区厚度的增加而减小,因此应当考虑蓄冷时间、传热速率和电价低谷时段来确定蓄冷板的厚度。朱先锋等^[12]研究发



图1 用于冷链运输的蓄冷板

Fig.1 Cold storage plate for cold chain transportation

现环境温度对充冷时间的影响较大,蓄冷剂的潜热越大所需要的充冷时间就越长,蓄冷剂的质量越大,蓄冷板能储存的冷量就越多。蒋玉龙等^[13]在蓄冷板内填充开孔聚氨酯泡沫和泡沫铜,并对蓄冷板的融化过程进行了数值模拟,研究蓄冷板融化过程的速率、温度分布、相界面移动等规律。

李晓燕等^[14]研发了一种新型蓄冷板,新型蓄冷板与平板蓄冷板相比蓄释冷更快,其蓄冷、释冷完成时间与平板蓄冷板相比分别缩短了39.1%与39.3%,同时研究了蓄冷保温箱配送过程中,4种蓄冷板的布置方式(顶部布置、四周布置、并列布置、重合布置)及下箱体的保冷性能。蓄冷板在蓄冷保温箱中分布得越均匀,箱内的换热面积就越大,保冷性能就越强。范中阳等^[15]研究了2种蓄冷板的摆放形式(顶部摆放和四周摆放)对蓄冷保温箱内环境温度和白菜中心温度的影响,以及在宅配过程中白菜的品质变化情况,蓄冷板四周摆放相比顶部摆放具有较大优势,四周摆放时箱内温度上升较平缓,而顶部摆放时蓄冷板箱内温度上升较快。

蓄冷板式冷藏车的厢体采用硬质聚氨酯泡沫塑料发泡成形,蓄冷板一般对称安装在冷藏车厢体的两侧或顶部,厚度为50~100 mm,用铝合金做成中空的壳体,内部充装蓄冷剂。为防止蓄冷板冷藏车在运输货物时发生不同部位货物温度不均造成腐烂变质,詹耀立等^[16]研究了蓄冷板在侧置、顶置时车厢内温度场的分布和变化规律,以及主要的影响因素。蓄冷板顶置时的货物两端及车门附近的温度较高,车内货物温度上升比侧置时快,蓄冷板侧置时货物两侧下部温上升较快。在处理此类问题时,常用的方法有焓法和显热容法。杨培志等^[17]采用焓法研究了冷板的相变传热,通过数值模拟得到冷板的最佳厚度及管间距。张杰等^[18]用显热容法对蓄冷板放冷的过程进行了分析,并建立了蓄冷板放冷的数学模型。

1.2 蓄冷微胶囊

由于液态相变材料会发生泄漏及腐蚀,基于此开发了相变材料微胶囊化技术。微胶囊良好的密封性可防止胶囊内蓄冷剂泄露,保证了产品的安全性。蓄冷相变微胶囊主要由核和壳组成,核一般为一种或者几种低温相变材料(芯材),壳一般为高分子聚合物(壁材),但这类壁材的导热性较差,会严重影响微胶囊相变材料的导热性能。蓄冷微胶囊是一种新型的具有核-壳结构的蓄冷剂,是通过将蓄冷剂涂在一层或多层性能良好且结构稳定的安全聚合物薄膜中制成的^[19]。微胶囊相变材料普遍存在工艺流程复杂、循环耐久性较差、安全性较差、相变材料包覆效率较低等问题,因此,把复杂的制备工艺简单化,提高生产工艺的安全性、可靠性,是今后研究的重要方向。龙金领^[20]以苯乙烯为壁材,十三烷为芯材制备了一种蓄冷

型相变微胶囊，探究了微胶囊的材包覆率、粒径大小及分布和焓值等几种影响因素。所制备的相变微胶囊以聚苯乙烯为壁材能有效阻止正十三烷挥发，提高了相变微胶囊的热稳定性，可以满足蓄冷调温的功能需要。刘媛^[21]以正癸醇为芯材，二氧化钛为壳材，制备了正癸醇/二氧化钛微胶囊复合相变蓄冷材料。试验结果表明，微胶囊中正癸醇和二氧化钛具有很好的相容性且微胶囊的耐火性能得到了极大提高，该材料在蓄冷实际应用中具有一定的前景。

Saputro 等^[22]研究了 3 种不同的相变微胶囊，包括金属涂层的相变微胶囊。与其他微胶囊相比，相变微胶囊在 20 次循环后的热性能没有明显变化，显示出更好的热存储/释放性能。在粒径分布方面，相变微胶囊在 20 次循环后仍保持原尺寸。于党委^[23]制备了 1 种低温相变微胶囊材料样品，对优选制备的正十四烷微胶囊相变材料在控温包装中的应用进行了试验，在保温箱内部均匀粘贴正十四烷微胶囊相变材料，酸奶的 pH 值、粘度下降均较低，相变微胶囊在维护低温奶品质、保证其商品价值方面具有重要的作用。Dhivya 等^[24]合成新型 Ag-ZnO 纳米材料微胶囊增强油酸肉豆蔻酸共晶相变材料。以油酸-肉豆蔻酸共晶混合物为芯材，通过混合不同质量分数的纳米材料制备了纳米增强复合 PCMs。微观分析表明，三聚氰胺甲醛壳在核材料上形成均匀的球形结构，具有完善的核壳结构。通过导热系数测定、热重分析和热循环分析，发现微胶囊相变材料(MEPCMs)具有较好的导热性、稳定性和可靠性。Ag-ZnO 纳米材料的 MEPCMs 有望成为低温储能的潜在核心材料。

1.3 蓄冷袋

蓄冷袋在实际生活中已广泛应用，普通生鲜产品使用蓄冷袋贮运，保鲜效果较好且成本低，用于冷链运输的冰袋见图 2。张继明等^[25]模拟了 4 种冷链运输中的蓄冷保温处理：PS 泡沫保温箱；EPS 泡沫保温箱+12 cm 保温层；PS 泡沫保温箱+蓄冷冰袋；EPS 泡沫保温箱+蓄冷冰袋+12 cm 保温层。EPS 保温箱及附加保温层 EPS 保温箱适合短距离运输，运输时间不超过 24 h。加入等质量蓄冷冰袋并附加 12 cm 保温



图 2 用于冷链运输的冰袋
Fig.2 Ice bag for cold chain transportation

层处理的 EPS 保温箱能确保枣果维持 10 °C 以下保鲜运输，各项指标均满足优质果蔬的商品性，且耗能少、成本低，蓄冷冰袋可反复利用，对于长途运输有巨大的优势。

基于已有的食品专用高效相变蓄冷剂配方与其配套装置的成果，对在实际运行条件下的应用效果进行了一系列试验。盛况^[26]选用了高级冷藏水果、食用菌、冷冻食品等 3 大类中具有代表性的物料进行实际的冷藏运输条件模拟试验。从效果与经济方面考虑，在 28 °C 室温下，建议使用 3 袋蓄冷袋(-2.5 °C, 750 g)进行冷藏，可以在较长时间内保证试验冷藏食品的温度。汤元睿等^[27]分别选取了纯水、氯化钠、乙醇和 CaCl₂ 溶液制作冰袋，以不加冰袋作为对照，模拟夏季金枪鱼配送箱的配送情况，对箱内温度以及金枪鱼排的中心温度、感官和理化指标进行测定。试验结果表明，18.8%的 NaCl 溶液冰袋能够较好保持鱼肉的品质，可在 2 h 内将鱼排维持在冻结状态，适合短途配送；46.3%的 CaCl₂ 溶液冰袋能使鱼排在运输 5 h 后仍保持冻结状态，中心温度仅-20.74 °C，运输末期鱼肉品质接近新鲜鱼肉，是较好的金枪鱼肉的低温蓄冷材料。

2 蓄冷式运输装备

2.1 冷藏集装箱

冷藏集装箱可简单定义为专为运输要求保持一定温度的冷冻货或低温货而设计的集装箱^[28]。冷藏集装箱具有良好的隔热性、抗震性，并且可维持较为稳定的低温。冷藏集装箱用于长距离输送货物，不仅结构非常坚固，还能够承受环境的变化。田津津等^[29]研究了冷藏集装箱的内部温度场分布以及货物堆码对箱内温度场的影响。结果表明，货物堆码方式的变化可以改变箱内流体温度分布情况。其中四体堆码方式最优，在各个截面上中点的温度变化速度最快。郭志鹏等^[30]模拟了 4 种货物堆码方式下的箱内温度分布情况。结果表明，货物左右对称堆码方式的温度场分布情况优于货物整体堆码方式的情况，集装箱的高温区域主要出现在门端偏后处和集装箱的拐角处。娄宗瑞等^[31]基于紊流模型下进行三维稳态空气流做了计算模拟和仿真，发现冷藏集装箱内送风端和中部温度较低，门侧顶部温度最高。刘亚皎等^[32]研究了 4 种不同货物间隔堆码方式下箱内动态温度场。货物中间留有间隔能有效避免货物内部呼吸热的积聚。当间距增大到一定程度，不利于冷空气的循环流通。以上研究，对货物的堆码方式和位置提供了参考。

张哲等^[33]研究了空载时冷藏集装箱内的温度场分布。冷藏集装箱内部温度场不均匀，箱体前部与后部的温度差异大，不利于货物的储存。李东等^[34]研究了载货情况下冷藏集装箱的内部温度场分布情况，模

拟计算得到的温度场受送风参数的影响很大,实际的冷藏集装箱内的温度受送风参数的影响程度小于模拟计算的结果。Copertaro 等^[35]利用有限元方法,对相变材料应用于冷藏集装箱所产生的相关能量效益进行理论评估。特别是对几种 PCMs、气候条件和暴露进行了数值分析。Kayansayan 等^[36]研究了冷藏集装箱的温度分布效果,确定其通风特性,对冷藏集装箱的共轭传热进行了数值研究。通过对冷藏车周围流场的研究,计算了外表面传热系数。Fioretti 等^[37]利用相变材料改善冷藏集装箱外壳热性能。将一个外相变材料层与一个隔热夹层板结合起来,以减少和置换由外部气候条件引起的热通量相。通过试验和数值设计研究对所提出的技术进行了评估。随着冷链技术的不断发展,进一步完善诸多种类冷藏集装箱的设计和生等各个环节,设计多温共配的新型冷藏集装箱,是适应冷链发展的必然趋势。实现节能经济的冷链运作^[38],检测和温湿度控制系统中的可靠性与经济性的提升^[39-40],针对不同的冷藏冷冻货物,实现最佳贮运方式的冷藏集装箱的设计^[41]为目前的主要研究方向。

2.2 公路冷藏车

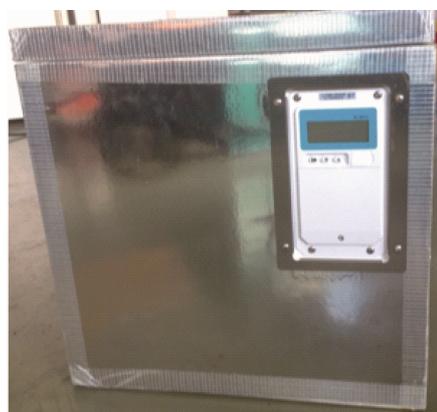
冷藏车的箱体注重气密性能和保温性能,通常冷藏车的结构采用3层结构,保证货物在一个稳定的温度环境中^[43]。夏全刚等^[42]设计了一种新型冷藏车箱体,冷藏车的箱体中加入一定量的复合相变材料,利用相变材料的固液相变性能增加箱体的蓄冷特性。在升温过程中,使得周围环境的升温速率低于冷藏车箱体,将相变材料添加到箱体的壁面中,使箱体更加适合食品的冷藏保鲜。

蓄冷板的布置方式,有无蓄冷板均会对冷藏车内温度场分布产生影响^[44]。谢如鹤等^[45]在冷板部分顶置部分侧置、冷板顶置、冷板侧置情况下对冷藏车厢内的温度场做了模拟研究,冷板侧置时厢内温度低,均匀性最好,冷板部分顶置部分侧置时,可用空间及重心介于另2种方式之间,冷板顶置可用空间最小,冷板部分侧置部分顶置的方式较为合理。王安冉等^[46]以苹果为物料,研究空载和满载降温结束后车厢及货物区的流场和温度场分布特征。赵春江等^[47]研究了冷藏车车厢内不同边界条件和货物不同堆栈方式车厢内温度场分布。孙永才^[48]采用真空绝热板的分压片式高压整体灌注法制作了冷藏车车厢箱体真空隔热材料,分析真空绝热板的绝热机理和影响热性能的因素,指出采用真空隔热材料制备冷藏车箱体可以降低冷藏车的漏热量,是公路冷藏车的发展趋势。Liu 等^[49]提出了一种采用相变材料的新型制冷系统,使冷藏车保持在理想的热状态。该系统消耗的能源更少,产生的本地温室气体排放量也更低。制备的相变材料成本低,适用于将冷藏卡车保持在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度。搭建了

一个原型系统,试验结果证明了该制冷系统在移动运输中的可行性。

2.3 蓄冷保温箱

冷藏保温箱由保温或低导热率的材料制成,内部装有蓄冷器以保持保温箱内部的温度,从而方便完成食物的冷链运输,特别适合易腐食品的多频次和小批量运输要求。Zhao 等^[50]研发了一种新型蓄冷盒疫苗蓄冷保温箱(见图4),可在用户端通过手机实时监测疫苗温度情况,适合灭活疫苗运输。保温箱是采用绝热或者导热系数较低的材料做箱体,内部放置蓄冷剂来保持箱内的温度,冷板先将蓄冷箱内的空气进行冷却,空气的热阻较大,冷却箱内空气会造成蓄冷剂的冷量浪费。新型蓄冷盒疫苗蓄冷保温箱将冷源与疫苗直接接触,蓄冷盒贮存孔内可放置疫苗试剂管,使蓄冷盒中的蓄冷剂在试剂管之间更加均匀的释放和传输冷量,实现冷量的高效利用。冯自平等^[51]考察分析了国内外现有的蓄冷恒温箱混装配送技术,低温蓄冷运输箱是混装配送的最好选择,不仅可以长时间保持稳定低温,而且在运输过程中不需要电源和制冷系统。潘欣艺等^[52]研究了保温材料对保温箱内温度场的影响,选取3种常见保温材料(挤塑聚苯乙烯(XPS)、发泡聚氨酯(EPU)与真空隔热板(VIP)),通过模拟仿



a 蓄冷保温箱箱体



b 保温箱内置蓄冷板

图4 蓄冷保温箱

Fig.4 Cold storage thermal insulation box

真得到3种不同保温材料保温箱内温度场分布规律, VIP保温箱内温度最接近蓄冷剂相变温度值, 且温度场分布最均匀, 其中VIP的阻热性能最好, 在保温箱内相同位置的温度比EPU和XPS低。蓄冷保温箱对于新形势下“小批量、多批次、门对门”的配送问题具有冷链优势。

3 结语

综述了应用于冷链运输的相变蓄冷材料的几种主要包装形式, 并对比分析了冷藏集装箱、冷藏车和蓄冷保温箱的优点和缺点。对今后的重点研究方向提出以下展望。

1) 研究相变机理和相变复合技术, 为配制出性能优良的蓄冷材料提供依据。

2) 控制相变过程的释冷速率, 延长相变的工作时间是提高相变材料应用范围的研究方向。

3) 简化微胶囊的制备工艺, 降低生产和制备的成本, 可提高生产工艺的安全可靠性。

4) 蓄冷剂摆放位置因素会影响保温箱内温度场的分布情况, 应对蓄冷保温箱内的温度场分布进行深入研究。

5) 在冷藏车的箱体中加入复合相变材料或通过增加相变材料层与隔热夹层板结合起来, 来增加箱体的蓄冷特性, 以及设计多温共配的新型冷藏集装箱也是冷链发展的必然趋势, 具有广阔的前景。

参考文献:

- [1] MAGENDRAN S S, KHAN F S A, MUBARRAK N M, et al. Synthesis of Organic Phase Change Materials (PCM) for Energy Storage Applications: A Review[J]. Nano-structures & Nano-objects, 2019, 20: 100399.
- [2] ZHAO Y, ZHANG X L, XU X F. Application and Research Progress of Cold Storage Technology in Cold Chain Transportation and Distribution[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2020, 139: 1419—1434.
- [3] 王冰, 王文焕. 蓄冷技术的应用与综合分析[J]. 电力需求侧管理, 2009, 11(6): 20—22.
WANG Bing, WANG Wen-huan. Application and Comprehensive Analysis of Cold Storage Technology[J]. Electric Power Demand Side Management, 2009, 11(6): 20—22.
- [4] 杨天润. 基于相变材料的冷库储能系统设计及优化[D]. 济南: 山东大学, 2018: 1—2.
YANG Tian-run. Design and Optimization of Cold Storage Energy Storage System Based on Phase Change Materials[D]. Jinan: Shandong University, 2018: 1—2.
- [5] 赵晓晓, 夏铭, 管维良, 等. 蓄冷技术在生鲜果蔬贮藏和运输中的研究与应用[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(1): 217—225.
ZHAO Xiao-xiao, XIA Ming, GUAN Wei-liang, et al. Research and Application of Cold Storage Technology in the Storage and Transportation of Fresh Fruits and Vegetables[J]. Freshness and Processing, 2020, 20(1): 217—225.
- [6] FAN L W, FANG X, WANG X, et al. Effects of Various Carbon Nanofillers on the Thermal Conductivity and Energy Storage Properties of Paraffin-based Nanocomposite Phase Change Materials[J]. Applied Energy, 2013, 11(5): 163—172.
- [7] 杨天润, 孙锲, WENNERSTEN R, 等. 相变蓄冷材料的研究进展[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(3): 567—573.
YANG Tian-run, SUN Qie, WENNERSTEN R, et al. Research Progress of Phase Change Cold Storage Materials[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(3): 567—573.
- [8] WANG L J, MENG D. Fatty Acid Eutectic/Polymethyl Methacrylate Composite as Form-stable Phase Change Material for Thermal Energy Storage[J]. Applied Energy, 2010, 7(8): 2660—2665.
- [9] 伍景琼, 韩春阳, 贺瑞. 生鲜食品冷链配送相关理论研究综述[J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(1): 45—54.
WU Jing-qiong, HAN Chun-yang, HE Rui. Review on the Theoretical Research of Fresh Food Cold Chain Distribution[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2016, 33(1): 45—54.
- [10] 张哲, 王飒飒, 李立民, 等. 蓄冷板冻结与释冷的实验研究[J]. 低温工程, 2015(1): 64—68.
ZHANG Zhe, WANG Sa-sa, LI Li-min, et al. Experimental Study on Freezing and Cooling of Cold Storage Plates[J]. Low Temperature Engineering, 2015(1): 64—68.
- [11] 杜雁霞, 程宝义, 贾代勇, 等. 相变材料蓄冷板凝固过程的传热研究[J]. 制冷学报, 2005(2): 44—46.
DU Yan-xia, CHENG Bao-yi, JIA Dai-yong, et al. Study on Heat Transfer of Solidification Process of Phase Change Material Cold Storage Plate[J]. Journal of Refrigeration, 2005(2): 44—46.
- [12] 朱先锋, 陈焕新, 刘国峰. 影响蓄冷板蓄冷量及充冷时间的因素[J]. 铁道机车车辆, 2004, 6(2): 37—39.
ZHU Xian-feng, CHEN Huan-xin, LIU Guo-feng. Factors Affecting the Cold Storage Capacity and Cold Charging Time of the Cold Storage Plate[J]. Railway Locomotive & Car, 2004, 6(2): 37—39.

- [13] 蒋玉龙, 张素军, 李菊香. 泡沫材料冰蓄冷板融化过程的研究[J]. 制冷学报, 2015, 36(5): 65—73.
JIANG Yu-long, ZHANG Su-jun, LI Ju-xiang. Study on the Melting Process of Foam Ice Storage Plate[J]. Journal of Refrigeration, 2015, 36(5): 65—73.
- [14] 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 Study on Performance Optimization of Cold Chain Cool Storage Box[J]. Energy Saving Technology, 2019, 37(1): 87—90.
- [15] 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. The Effect of Cold Storage Plate Placement on the Cold Chain Home Distribution Process[J]. Refrigeration Technology, 2017, 37(6): 51—54.
- [16] 詹耀立, 冯国会. 不同冷板布置方式的冷板车内温度场模拟[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2008(5): 859—862.
ZHAN Yao-li, FENG Guo-hui. Simulation of Temperature Field in Cold Plate Car with Different Cold Plate Layouts[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science Edition), 2008(5): 859—862.
- [17] 杨培志, 刘向龙. 冷板冷藏车内冷板换热性能的研究[J]. 制冷与空调, 2006(1): 51—53.
YANG Pei-zhi, Liu Xiang-long. Study on the Heat Transfer Performance of Cold Plate in Cold Plate Refrigerator Car[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2006(1): 51—53.
- [18] 张杰, 莫玲. 机械冷板冷藏车冷板放冷数值模拟[J]. 制冷与空调(四川), 2006(1): 24—27.
ZHANG Jie, MO Ling. Numerical Simulation of Cold Plate Cooling of Mechanical Cold Plate Refrigerator Car[J]. Refrigeration and Air Conditioning (Sichuan), 2006(1): 24—27.
- [19] REGIN A F, SOLANKI S C, SAINI J S. An Analysis of a Packed Bed Latent Heat Thermal Energy Storage System Using PCM Capsules: Numerical Investigation[J]. Renewable Energy, 2009, 34(7): 1765—1773.
- [20] 龙金领. 正十三烷/聚苯乙烯微胶囊相变材料的制备与表征[D]. 郑州: 郑州大学, 2017: 6—10.
LONG Jin-ling. Preparation and Characterization of N-tridecane/polystyrene Microcapsule Phase Change Material[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017: 6—10.
- [21] 刘媛. 有机/无机定型复合相变材料的制备及其性能研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2019: 21—48.
LIU Yuan. Preparation and Properties of Organic/inorganic Stereotyped Composite Phase Change Materials[D]. Nanchang: Nanchang University, 2019: 21—48.
- [22] SAPUTRO A E, SHANNAQA R A, FARIDA M M. Performance of Metal and Non-metal Coated Phase Change Materials Microcapsules when Used in Compressed Air Energy Storage System[J]. Applied Thermal Energy, 2019, 22(15): 113715.
- [23] 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: 16—42.
YU Dang-wei. Preparation and Performance Optimization of Temperature-controlled Packaging Microcapsule Phase Change Cold Storage Materials for Cold Storage[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014: 16—42.
- [24] DHIVYA S, HUSSAIN S I, JEYASHEELA S, et al. Experimental Study on Microcapsules of Ag Doped ZnO Nanomaterials Enhanced Oleic-myristic Acid Eutectic PCM for Thermal Energy Storage[J]. Thermochimica Acta, 2019, 36(17): 70—82.
- [25] 张继明, 张新, 李喜宏, 等. 灵武红枣简约冷链物流中蓄冷保温关键参数研究[J]. 食品工业, 2018, 39(1): 132—135.
ZHANG Ji-ming, ZHANG Xin, LI Xi-hong, et al. Research on the Key Parameters of Cold Storage and Heat Preservation in the Simple Cold Chain Logistics of Lingwu Jujube[J]. Food Industry, 2018, 39(1): 132—135.
- [26] 盛况. 农产品冷链专用高效相变蓄冷剂的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 10—41.
SHENG Kuang. Application Research of High-efficiency Phase Change Cold Storage Agent for Agricultural Products Cold Chain[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 10—41.
- [27] 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 Research of Phase Change Cool Storage Technology in Tuna Cold Chain Logistics[J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(1): 173—178.
- [28] 王世良. 机械制冷与冷藏集装箱运输[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 7—10.
WANG Shi-liang. Mechanical Refrigeration and Refrigerated Container Transportation[M]. Beijing: China Communications Press, 2005: 7—10.
- [29] 田津津, 张哲, 李曼, 等. 冷藏集装箱内部温度场的试验研究[J]. 流体机械, 2016, 44(6): 56—60.
TIAN Jin-jin, ZHANG Zhe, LI Man, et al. Experimental Study on Temperature Field Inside Refrigerated

- Containers[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 44(6): 56—60.
- [30] 郭志鹏, 阚安康, 杨帆, 等. 布置真空绝热板的冷藏集装箱内温度分布[J]. *南京航空航天大学学报*, 2017, 49(1): 29—33.
GUO Zhi-peng, KAN An-kang, YANG Fan, et al. Temperature Distribution in Refrigerated Containers with Vacuum Insulation Plates[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 49(1): 29—33.
- [31] 娄宗瑞, 曹丹, 阚安康, 等. 冷藏集装箱内部温度场的特性研究[J]. *制冷*, 2013, 32(1): 23—25.
LOU Zong-ru, CAO Dan, KAN An-kang, et al. Study on the Characteristics of Internal Temperature Field of Refrigerated Containers[J]. *Refrigeration*, 2013, 32(1): 23—25.
- [32] 刘亚姣, 杨小凤, 庄春龙, 等. 果蔬堆码方式对机械式冷藏集装箱内温度场的影响[J]. *后勤工程学院学报*, 2015, 31(6): 67—72.
LIU Ya-jiao, YANG Xiao-feng, ZHUANG Chun-long, et al. Effects of Stack Method of Garden Stuff on Temperature Field Inside Mechanical Refrigerated Container[J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2015, 31(6): 67—72.
- [33] 张哲, 郝俊杰, 李曼, 等. 冷藏集装箱内部温度场的理论与实验研究[J]. *低温与超导*, 2016, 44(6): 76—80.
ZHANG Zhe, HAO Jun-jie, LI Man, et al. Theoretical and Experimental Study on Temperature Field Inside Refrigerated Containers[J]. *Cryogenics and Superconductivity*, 2016(6): 76—80.
- [34] 李东, 韩厚德, 纪珺, 等. 冷藏集装箱内部温度场分布的试验研究[J]. *机电设备*, 2006(6): 14—18.
LI Dong, HAN Hou-de, JI Jun, et al. Experimental Study on Temperature Field Distribution in Refrigerated Containers[J]. *Mechanical and Electrical Equipment*, 2006, 23(6): 52—56.
- [35] 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 Energy*, 2016, 102(22): 873—881.
- [36] KAYANSAYAN N, ALPTEKIN E, AKIF M. Thermal Analysis of Airflow Inside a Refrigerated Container[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2017, 84(16): 76—91.
- [37] 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(6): 131—141.
- [38] 李勤国. 冷藏集装箱分类及其在冷链物流中的应用[J]. *保鲜与加工*, 2017, 17(3): 118—123.
LI Qin-guo. Classification of Refrigerated Containers and Its Application in Cold Chain Logistics[J]. *Freshness and Processing*, 2017, 17(3): 118—123.
- [39] 孟谦. 船用冷藏集装箱真空绝热板布置工艺及性能研究[D]. 厦门: 集美大学, 2015: 4—6.
MENG Qian. Research on the Layout and Performance of Vacuum Insulation Panels for Marine Refrigerated Containers[D]. Xiamen: Jimei University, 2015: 4—6.
- [40] 王文生, 杨少桢, 闫师杰. 我国果蔬冷链发展现状与节能降耗主要途径[J]. *保鲜与加工*, 2016, 16(2): 1—5.
WANG Wen-sheng, YANG Shao-hui, YAN Shi-jie. Development Status of China's Fruit and Vegetable Cold Chain and Main Ways of Energy Saving and Consumption Reduction[J]. *Preservation and Processing*, 2016, 16(2): 1—5.
- [41] SEPE R, POZZI A, ARMENTANI E. Development and Stress Behavior of an Innovative Refrigerated Container with PCM for Fresh and Frozen Goods[J]. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 2015, 11(2): 142003—142003.
- [42] 夏全刚, 刘宝林, 宋晓燕. 一种新型冷藏车箱体模型的设计与实验验证[J]. *制冷学报*, 2014(4): 108—112.
XIA Quan-gang, LIU Bao-lin, SONG Xiao-yan. Design and Experimental Verification of a New Type of Refrigerated Vehicle Model[J]. *Journal of Refrigeration*, 2014(4): 108—112.
- [43] 黄艳. 蓄冷技术在食品冷链物流中的研究进展[C]//上海市制冷学会, 2015: 268—273.
HUANG Yan. Research Progress of Cold Storage Technology in Food Cold Chain Logistics[C]// Shanghai Refrigeration Society, 2015: 268—273.
- [44] 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 Cold Storage Technology in Food Cold Chain Logistics[J]. *Packaging Engineering*, 2015, 36(15): 23—29.
- [45] 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 Layout for Refrigerated Trucks Based on No-load Temperature Field Simulation and Test[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(24): 290—298.
- [46] 王安冉. 基于CFD的冷藏车内流场及温度场的数值研究[D]. 济南: 山东大学, 2017: 20—39.

- WANG An-ran. Numerical Study of Flow Field and Temperature Field in Refrigerated Truck Based on CFD[D]. Jinan: Shandong University, 2017: 20—39.
- [47] 赵春江, 韩佳伟, 杨信廷, 等. 基于CFD的冷藏车车厢内部温度场空间分布数值模拟[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 168—173.
- ZHAO Chun-jiang, HAN Jia-wei, YANG Xin-ting, et al. Numerical Simulation of Temperature Field Distribution in Refrigerated Truck Based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 168—173.
- [48] 孙永才. 冷藏车热工性能分析及其真空隔热材料研制[D]. 广州: 广州大学, 2011: 15—34.
- SUN Yong-cai. The Thermal Performance of Refrigerated Trucks and the Development of Vacuum Insulation Materials[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2011: 15—34.
- [49] LIU M, SAMAN W, BRUNO F. Development of a Novel Refrigeration System for Refrigerated Trucks Incorporating Phase Change Material[J]. Applied Energy, 2012, 23(92): 336—342.
- [50] ZHAO Y, ZHANG X L, XU X F, et al. Development of Composite Phase Change Cold Storage Material and Its Application in Vaccine Cold Storage Incubator[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 11(30): 101455.
- [51] 冯自平. 采用蓄冷恒温箱实现混装的冷藏配送技术研究[J]. 物流技术, 2005(7): 32—34.
- FENG Zi-ping. Research on Refrigerated Distribution Technology of Mixed Storage Using Cooling Thermostat [J]. Logistics Technology, 2005(7): 32—34.
- [52] 潘欣艺, 王冬梅, 朱宏. 保温材料对保温箱内温度场的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(8): 115—118.
- PAN Xin-yi, WANG Dong-mei, ZHU Hong. Influence of Thermal Insulation Materials on Temperature Field in Incubator[J]. Food and Machinery, 2018, 34(8): 115—118.