

蓄冷保温箱的研究进展

Research progress of cold storage type incubator

王雪松^{1,2} 谢 晶^{1,2,3,4}

WANG Xue-song^{1,2} XIE Jing^{1,2,3,4}

(1. 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306; 2. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 3. 食品科学与工程国家级实验教学示范中心[上海海洋大学], 上海 201306; 4. 上海冷链装备性能与节能评价专业技术服务平台, 上海 201306)

(1. Shanghai Engineering Research Center of Aquatic Product Processing & Preservation, Shanghai 201306, China; 2. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering [Shanghai Ocean University], Shanghai 201306, China; 4. Shanghai Professional Technology Service Platform on Cold Chain Equipment Performance and Energy Saving Evaluation, Shanghai 201306, China)

摘要:随着相变储能技术的发展,未来蓄冷保温箱将会更加环保、节能、耐用,并会对食品冷链运输产生积极的影响。文章综述了蓄冷保温箱所用的有机、无机和复合相变三类蓄冷剂,以及近年来国内外开发的微胶囊蓄冷剂、纳米蓄冷剂等新型蓄冷剂;从保温材料和温度场均匀性两方面阐述了蓄冷保温箱设计优化的进展,提出新型保温材料结构的可行性以及箱内温度场的影响因素。研发高效环保的蓄冷剂,优化的保温结构以及温度场均匀性是今后蓄冷箱研究的重点。

关键词:蓄冷剂;保温材料;蓄冷保温箱;温度场

Abstract: With the development of phase change coolants and insulation technologies, it is expected that the cold storage incubators will be more economical, environmentally friendly, and durable, and have a positive impact on cold chain logistics and people's lives. Firstly, three types of organic, inorganic, and composite phase-change coolants used in cold storage incubators, as well as new cold storage agents such as microcapsule cold storage agents and nano-coolant developed in recent years were reviewed. Then, from thermal insulation materials and temperature fields, in terms of uniformity, the progress of design optimization of cold storage incubator were expounded, and the feasibility of

the new thermal insulation material structure and the influencing factors of the temperature field inside the tank were proposed. The development of efficient and environmentally friendly coolants, optimized insulation structure and temperature field uniformity are the focus of future research on cold storage tanks.

Keywords: cold storage agent; thermal insulation material; cold storage incubator; temperature field

为了更好地降低易腐农产品或食品流通过程的损耗,一般采用冷链物流,而冷链物流过程中的温度波动会对食品产生负面影响^[1]。例如,如果新鲜的肉类或水产品低温物流所需的温度范围在1~2℃,但在运输过程中若出现了2~7℃的温度波动,则会加速其品质的恶化,从而缩短货架期。

如今,随着人们生活水平提高和电商的不断发展,使得生鲜食品的需求和供给都得到了极大的丰富,生鲜食品冷链物流中温度的稳定和品质的控制就显得尤为重要。当前的冷藏运输设备主要是机械式冷藏车,在高油价的今天,不仅经济性差、不环保,而且可能存在“大车送小货”的现象^[2]。应用蓄冷保温箱则可以避免这些问题,它是将蓄冷技术与隔热技术有机地结合。将食品分装于含有蓄冷剂的绝热保温材料箱体中,通过不同相变温度的蓄冷剂来保证不同食品所需的冷藏温度,则可以利用普通货车进行配送,与传统的冷藏车相比,蓄冷保温箱因其灵活环保、经济节能、安全可控等优点,促进了食品冷链水平的提高^[3]。近年来,对蓄冷保温箱的研究始终是热点。一方面,蓄冷剂已从前采用传统的水冰,转变为现在的高分子复合相变蓄冷剂,并且一些新材料新技术

基金项目: 国家“十三五”重点研发项目(编号: 2018YFD0400605);国家海水鱼产业技术体系(编号: CARS-47);上海市科委公共服务平台建设项目(编号: 17DZ2293400)

作者简介: 王雪松,男,上海海洋大学在读硕士研究生。

通信作者: 谢晶(1968—),女,上海海洋大学教授,博士。

E-mail: jxie@shou.edu.cn

收稿日期: 2019-03-26

也开始用于蓄冷剂的开发;另一方面,除了常规采用发泡材料作为保温箱体外,开始应用真空绝热板等新型绝热保温材料,保温性能提升显著。此外,为了优化保温箱内温度场的分布,数值模拟技术也开始用于保温箱的设计。

文章综述了蓄冷保温箱的发展现状,介绍了保温箱所用蓄冷剂的优缺点和一些新型蓄冷剂的研究进展,并总结了蓄冷箱保温材料的进步以及其保温箱内温度场的优化工作。

1 保温箱蓄冷剂的研究进展

相变蓄冷材料可以通过发生从固态变为液态的相变来吸收潜热,从而抵御环境温度对于冷链食品温度的影响。选择合适的相变蓄冷剂时应遵循以下几个原则^[4]:

(1) 热力学性质:合适的相变温度、高比热容、高相变潜热、高导热系数,长期保持热稳定。

(2) 化学性质:无毒、不易燃、无腐蚀性,长期保持化学性质稳定。

(3) 经济性:易于生产和获得,价格便宜,具有可回收性。

(4) 物理性质:高密度、小过冷度,相变体积变化小,高效结晶速率。

蓄冷剂按照材料的组成成分可以分为:有机蓄冷剂、无机蓄冷剂、复合蓄冷剂 3 种。

1.1 有机与无机蓄冷剂

有机蓄冷剂由于具有长碳链,可以吸收或释放大量的潜热,具有较高的化学稳定性,可重复循环使用,无腐蚀性以及无过冷,然而,其主要缺点是导热系数低、相变潜热小^[5]。目前应用较多的有机蓄冷剂主要是脂肪烃类与聚多元醇类化合物。

应用在食品冷链领域的无机蓄冷剂多为水合共晶盐。水具有导热系数高,相变潜热大,蓄冷密度大等优点,也是使用最早且最广泛的一种相变蓄冷材料。然而,水在凝固过程中的过冷是一个主要问题,即水在低于冰点温度时不会立即凝固,只有在低于冰点一定温度下才开始结晶。在过冷程度较高的情况下,成核速度慢,冻结时间长。另外,水作为蓄冷剂只能用于 0℃ 以上的食品蓄冷^[2]。共晶盐无机蓄冷剂具有相变潜热大、导热系数高、价格便宜、相变体积变化小等优点,但是有腐蚀性,易发生过冷和相分离等缺点。这些缺点可以通过添加成核剂和增稠剂的方法来解决^[6]。鄢瑛等^[7]通过向相变材料 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 中添加成核剂(活性 Al_2O_3)和增稠剂(羧甲基纤维素钠),经过 30 次循环融冻试验,发现体系中无相分离现象,并且过冷度从 26℃ 降低到 14℃。徐笑锋等^[8]对相变材料 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 进行了研究,发现添加硼砂(成核剂)和聚丙烯酸钠(增稠剂)能降低过冷度,并可以解决相分离的问题。

1.2 复合相变蓄冷剂

有机蓄冷剂与无机蓄冷剂都存在一些使用局限,研究者^[9]通过将无机蓄冷剂和有机蓄冷剂复合,研制出有机-无机复合蓄冷剂,可以有效解决以上蓄冷剂导热系数小、相变潜热低,存在过冷和相分离等问题。傅一波等^[10]通过将硝酸钾和乳酸钙进行复配(3%硝酸钾,1%乳酸钙,3%羧甲基纤维素钠),研制出一种适用于食品微冻贮运(温度: -5~3℃)的复合相变蓄冷剂,并通过往复融冻试验,得出该蓄冷剂无明显的过冷及相分离,具有较好的稳定性,能长期循环使用。傅仰泉等^[11]将甘露醇和碳酸钠复配,制备出一种环保型蓄冷剂(6%甘露醇,2%碳酸钠,2%硼砂,5%羧甲基纤维素钠),相变温度在 5℃ 左右,相变潜热为 290.2 kJ/kg,适用于所需温度在 2~10℃ 的果蔬保鲜,并且过冷度小,无相分离,经草莓的贮运试验证明该蓄冷剂使用效果良好。

然而,在蓄冷剂的使用中也需要注意如下问题,如一些蓄冷剂使用过程中由固体转变为液体时,由于体积膨胀而使包装破裂,从而污染到食品和保温容器。此外,液态的蓄冷剂在运输过程中因剧烈晃动而容易产生较大载荷。因此,如果将蓄冷剂在液态状态下转化为凝胶状,成为不易流动的状态,则可以扩大其使用范围。研究者^[12-13]发现了以高吸水树脂(Super Absorbent Polymer, SAP)作为载体,使易于流动的固-液相变材料吸附于高吸水树脂的网格结构中,制成高吸水树脂复合相变蓄冷剂。该复合蓄冷剂体系中绝大部分是水,而且水的物性参数基本未变,其中水的蒸汽压、冰点、比热容、潜热等基本物性与水相似。戚晓丽等^[14]利用甘露醇和氯化钾水溶液并添加高吸水性树脂研制出相变温度为 -4.1℃ 且相变潜热为 299.1 kJ/kg 的低温复合相变材料。通过与市面上一系列的蓄冷冰袋对比测试相变温度和相变潜热,发现这种蓄冷剂的蓄冷性能均优于市面上销售的蓄冷冰袋。李婷等^[15-16]对 KCl 溶液、NaCl 溶液作为食品相变蓄冷剂的配方进行了优化,添加 SiO_2 、CuS、 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 做人晶核改善过冷,将 SAP 作为蓄冷剂的载体,使之在液态时呈现黏胶状,不易流动。

1.3 新型蓄冷剂

微胶囊相变材料(Microencapsulated Phase Change Materials, MCPCM)是将微胶囊技术与相变材料相结合的新型蓄冷剂。这是一种在固-液蓄冷剂表面包覆一层性能稳定的高分子膜而成的核壳结构的蓄冷剂。这种蓄冷剂发生固-液相转变时,其外层的高分子膜始终保持为固态^[17]。MCPCM 具有如下优点^[18]:① 提高了传统蓄冷剂的稳定性,可以改善蓄冷剂过冷和相分离现象;② 强化了传统蓄冷剂的传热性能;③ 易于混合各种高分子材料形成性能稳定优良的复合相变材料;④ 防止了蓄冷剂液态时的泄露。于党伟等^[19]以正十四烷作为芯材,聚甲

基丙烯酸甲酯(Polymethyl Methacrylate, PMMA)作为微胶囊壳材,制备了一种低温相变微胶囊材料,将其置于发泡聚乙烯保温箱中,并对酸奶进行了保温试验,与无蓄冷剂的聚乙烯保温箱的对照组相比,试验组酸奶的 pH、黏度变化均不大,说明该新型蓄冷剂在低温奶制品运输中具有较好的实用价值。Tumirah 等^[20]采用乳液原位聚合法,以十八烷为芯材,以苯乙烯-甲醛为壁材,制得微胶囊有机相变蓄冷材料,具有较好的化学稳定性和热稳定性。

随着纳米材料的迅速发展,研究者们通过将纳米材料与相变材料复合,配制出新型纳米蓄冷材料。刘玉东^[21]、何钦波等^[22-23]将纳米材料 TiO_2 加入到 BaCl_2 共晶盐水溶液,配制成 $\text{TiO}_2\text{-BaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ 纳米流体相变蓄冷材料,并对该纳米蓄冷材料的成核过冷度、热物性和蓄/释冷特性等指标进行研究,发现其导热系数得到了显著提升,比未加纳米材料时提高了 11.28%,并且将过冷度从 3.97 °C 降到 1.21 °C,同时黏度增加了 21.7%。相变材料中加入纳米粒子不仅可以提高材料的热力性能,而且增加了材料的接触面,成为凝固过程中的成核剂,从而提高了冰晶的生长速率。Harikrishnan 等^[24]制备了 CuO 与油酸复合的纳米相变材料,发现在油酸中加入 2% 的 CuO 纳米颗粒,可以分别节省 27.67% 和 28.57% 的完全凝固时间和融化时间。另外,He 等^[25]制备了 $\text{TiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 纳米流体,发现在去离子水中加入 2.4% 的 TiO_2 纳米颗粒后,过冷度下降了 50%,总冻结时间缩短了 33.33%。

总之与传统蓄冷剂相比,新型蓄冷剂具有以下优点:①微胶囊技术的应用,提高了蓄冷材料的稳定性,使得原来蓄冷剂易发生泄露的问题得到解决。例如,谢鸿洲等^[26]研制了正十四烷-聚苯乙烯-二氧化硅新型纳米胶囊相变蓄冷剂,通过差示扫描量热(Differential Scanning Calorimetry, DSC)和热失重(Thermal Gravimetric, TG)测试,结果表明该蓄冷剂具有较低的黏度、较高的机械稳定性。②通过纳米材料的添加,可以起到复合蓄冷剂中增稠剂、成核剂一样的效果,使得蓄冷剂过冷度大、导热系数小、相分离等问题得以有效改善。例如,纪琨等^[27]研制的水基纳米 TiO_2 复合相变材料使水在相变过程的过冷度降低了 5~6 °C,且导热系数提高了 62.7%。但由于技术不够成熟,目前新型蓄冷剂普遍存在生产成本高的缺点,且当前的研究多停留在实验室阶段,在食品冷链中的应用情况仍有待研究。因此,新型蓄冷剂仍有较广的研究前景。

目前,国内外对蓄冷剂的研究已从传统的有机或无机蓄冷剂转变为复合蓄冷剂,这使传统蓄冷剂存在的过冷度大,相变分离现象以及相变潜热低等问题得以解决,并且通过微胶囊技术和纳米技术的应用,使蓄冷剂的特性变得更加优良。但是,在实际应用中,蓄冷剂还存在不

易降解和回收机制欠缺等问题,这会对环境产生较大危害。目前针对这种问题已有解决方案的提出,张芸等^[28]以淀粉系吸水树脂为基材,以 NaCl 为主储能材料合成了一种可降解蓄冷剂,并通过对该蓄冷剂进行了降解性能的测定,发现该蓄冷剂在米曲霉的作用下,降解率随着培养天数而不断增加,从而达到可生物降解的目的。因此,寻找和利用可降解物质作为蓄冷剂基材也有较高的研究价值与广泛的应用前景。

2 蓄冷保温箱的优化

蓄冷保温箱主要由两部分构成:保温箱体和蓄冷剂,保温箱体是以聚乙烯或玻璃钢作为外壳材料,并在外壳夹层中填充聚氨酯发泡材料来提升保温性能,箱体内部使用高效蓄冷剂来维持低温环境。

2.1 保温材料的优化

蓄冷箱保温材料一方面可以有效地维持内部易腐食品处于所需的低温环境中,另一方面,保温材料的使用也对外界的物质进行了阻隔,减少了外界因素对易腐食品的影响,提升了冷链运输的安全性。

传统的蓄冷保温箱材料有聚氨酯(Polyurethane, PU)和聚苯乙烯(Expandable Polystyrene, EPS),其保温性能较好但降解性差,对环境有较大的影响。陈海洋等^[2]提出了使用真空绝热板(Vacuum Insulated Panel, VIP)作为保温材料的可行性。真空绝热板是一种非常有效的热屏蔽物,在板内平均温度为 25 °C 时,导热系数实测值仅为 0.004 4 W/(m·K),其导热系数仅为同样厚度的聚苯乙烯绝热材料的 1/10^[29]。该板材不单保温性能良好、成本低,而且是一种新型环境友好型保温包装材料。潘欣艺等^[30]比较了上述 3 种不同材质制作的保温箱的温度场,通过构建保温箱传热基本模型,运用有限元法及 Fluent 进行热流耦合分析,得到保温箱内温度场分布规律,得出 VIP 的阻热性能最好。

目前真空绝热板(VIP)已经开始用于冷链物流中物品的保温,并且以真空绝热板和发泡材料复合的保温材料也是蓄冷型运输保温箱保温材料改进的替代产品之一。VIP+PU 是一种高效、节能、环保的新型保温材料,一方面,抽真空脱出了开孔结构泡沫中的气体,使材料具有优良的隔热性能;另一方面,由于其不含任何氯氟烃物质,对环境无污染。因此,具有极好的发展和应用前景。王达等^[31]提出真空绝热板和聚氨酯复合结构(VIP+PU)蓄冷保温箱,并以桃子为例,对 VIP+PU、PU、EPS 3 种不同隔热材料蓄冷保温箱的保冷效果进行试验,结果表明 VIP+PU 蓄冷保温箱最好,适合长途运输。刘翠娜等^[32]利用 ANSYS 对保温箱温度场进行模拟,发现用真空绝热板与聚氨酯发泡组成复合保温材料比增加发泡层厚度的方法保温效果更佳,在保证有效容积率不变的情

况下,使箱体冷负荷降低 15%。

2.2 蓄冷箱内温度场的优化

为了保证蓄冷箱冷链物流食品的品质,保温箱内不能只保证低温环境,箱内部温度场的均匀性也至关重要。

朱宏等^[33]分析了内置相变温度为 5℃ 的蓄冷剂的蓄冷箱在不同外界温度环境下的保冷情况,得出保温箱内外温差越大,保温箱内温度场越不均匀,有效保温时间越短的结论。营宗昌等^[34]对保温箱建立了有限元模型,利用 Ansys 模拟了在 23, 35, 45℃ 3 种不同外界环境温度下保温箱中蓄冷剂中心温度随时间的变化。中国幅员辽阔,针对不同地区与季节,应对外界环境温度的变化,保温方式不能一成不变,应该就实际情况而变,以确保冷链流通过程中的食品品质与安全。

蓄冷剂的质量以及蓄冷板的摆放方式影响着蓄冷保温箱的温度场均匀性。宋海燕等^[35]研究了在厚度为 30 mm 的 XPS 药品保温箱内,装入不同质量的蓄冷剂,对其保温效果的影响。通过在同一外界环境的条件下,综合比较每个测点的保温时间以及箱内温度场,发现蓄冷剂与药品质量比为 4:1 时,箱内温度场最均匀,并且可以保持药品所需温度在 24 h 以上;另外通过 3 种温湿度不同的外界环境下,测定 5 种不同蓄冷剂与药品质量比的中心测试点保温时间,并用 Matlab 建立了外界环境—蓄冷剂与药品质量比—保温时间的三维模型,并验证其预测误差在 10% 以下,证明该模型具有一定应用价值。目前保温箱蓄冷剂摆放位置并无统一的规范,因此蓄冷剂在使用过程中存在随意摆放的情况,这会使箱内温度分布不均,导致食品药品的运输温度并不在所需要的温度范围内。翟纪强等^[36]研究了同样质量的蓄冷材料侧面摆放、双面摆放、边缘摆放(集中摆放在箱内的一个拐角)和顶底摆放 4 种摆放方式对发泡聚丙烯(Expanded Polypropylene, EPP)多温区保温箱保温性能的影响,试验得到箱内测点温度随保温时间的变化曲线,表明侧面摆放的保温效果最好,边缘摆放最差。考虑到箱顶部容易出现漏热,因此顶部摆放结合侧摆保温效果最优。杨国梁等^[37]以 VIP 为保温材料,设计一种相变蓄冷式双温区保温箱,并通过模拟及试验研究了宅配保温箱内的温度变化情况和保温性能,研究发现蓄冷剂放置于保温箱顶部时,箱内温度场虽有分布不均的情况出现,但两区温度在 2 h 内总体稳定,基本上满足日常宅配需求。

综上所述,在蓄冷保温箱的优化上,一方面,采用真空绝热板作为保温材料具有绝热性能更高的优点,并且将其与发泡材料复合,效果更加优良。例如,陈文朴等^[38]的研究表明,以甲酸钠低温相变材料作为蓄冷剂,放在纯聚氨酯发泡(PU)、真空绝热板—聚氨酯复合(VIP+PU)两种保温箱中,结果表明复合的蓄冷箱保冷效果是纯聚氨酯蓄冷箱的 2 倍。另一方面,外界环境温度的变化,蓄

冷剂的质量以及摆放方式对蓄冷箱温度场的波动、保冷时长以及有效利用容积有很大的影响,通过数值模拟的方法,模拟蓄冷箱内的流场分布,对优化流场均匀性是可行的。例如,潘欣艺等^[39]通过 Fluent 进行热流耦合分析了保温箱使用过程中的温度场变化,得到了保温箱内部温度场分布的一般规律,其中边缘摆差异性最大,侧摆次之,顶摆时温度场分布最均匀。目前的研究正在朝向低研发成本化、高效化、新型复合材料化的方向发展。

3 结论与展望

生鲜产品“最后一公里”配送是生鲜冷链配送环节中最大的难题。据调查^[40],生鲜产品在运输配送途中的损耗率高达 15%，“最后一公里”的配送成本占据了运输成本的 40%。这是由冷链物流标准未统一化,产生了温控不精确甚至断链等现象,发展蓄冷保温箱是一个有效降低冷链食品物流过程损耗的方法。为了进一步提升蓄冷保温箱的水平,未来在以下几个方面值得关注。

(1) 蓄冷剂方面:① 着重研发高潜热、导热优良、无腐蚀以及循环性能优良的高性能的、符合环保要求的新蓄冷剂;② 针对不同食品冷链物流所需温度,研制相应的蓄冷剂,以提高利用效率,降低经济成本,例如在多温度区的冷链运输中应用了相变温度可调的蓄冷剂,可以实现同车运输,不用分批运输,在保证制冷效果的同时降低了运输的成本;③ 目前蓄冷剂回收率不高,有效的蓄冷剂循环回收和再利用机制仍有待研发与完善;

(2) 蓄冷箱方面:① 当前蓄冷箱箱体仍存在密封性差、保温一般等缺点,如何研发保温性能优良、环保、轻便、成本低的保温箱体结构等问题亟待解决;② 数值模拟技术为蓄冷保温箱的设计提供了新方法,通过构建模型、箱体温度场模拟,为寻找蓄冷材料与箱体的耦合作用与优化设计方案提供了新思路,以期达到延长保温箱内温度场均匀的时间的目的,同时较传统的实体模拟,计算机模拟可节约大量的设计时间和资金。

参考文献

- [1] LIKAR K, JEVSNIK M. Cold chain maintaining in food trade[J]. Food Control, 2006, 17(2): 108-113.
- [2] 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.
- [3] 房慧, 伊藤 VS 松冷. 蓄冷式运输模式始末[J]. 食品安全导刊, 2009(4): 86-87.
- [4] SIDIK NAC, KEAN TH, CHOW HK, et al. Performance enhancement of cold thermal energy storage system using nanofluid phase change materials: A review [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2018, 94: 85-95.
- [5] 赵杰, 唐炳涛, 张淑芬, 等. 有机相变储能材料研究进展[J].

- 中国科技论文在线, 2010, 5(9): 661-666.
- [6] 苑坤杰, 张正国, 方晓明, 等. 水合无机盐及其复合相变储热材料的研究进展[J]. 化工进展, 2016, 35(6): 1 820-1 826.
- [7] 鄢瑛, 林小花, 张会平. 十二水磷酸氢二钠相变材料的改性研究[J]. 高校化学工程学报, 2011, 25(6): 1 068-1 072.
- [8] 徐笑锋, 章学来, 李玉洋, 等. 十水硫酸钠低温相变材料的制备及稳定性[J]. 化学工程, 2018, 46(10): 11-15, 25.
- [9] 章学来, 徐笑锋, 周孙希, 等. 蓄冷技术在冷链物流中的研究进展[J]. 制冷与空调, 2017, 17(12): 88-92.
- [10] 傅一波, 王家俊, 王冬梅. 复合相变蓄冷剂性能研究[J]. 化工新型材料, 2017, 45(10): 235-237.
- [11] 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.
- [12] SHIBUKAWA M, AOYAGI K, SAKAMOTO R, et al. Liquid chromatography and differential scanning calorimetry studies on the states of water in hydrophilic polymer gel-packings in relation to retention selectivity[J]. Journal of Chromatography A, 1999, 832: 17-27.
- [13] OMIDIAN H, ZOHURIAAN-MEHR M J. DSC studies on synthesis of superabsorbent hydrogels[J]. Polymer, 2002, 43: 269-277.
- [14] 戚晓丽. 复合相变蓄冷剂开发及在果蔬保鲜上的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015: 23.
- [15] 李婷, 潘欣, 应铁进. 食品相变蓄冷剂的配方优化及应用[J]. 中国食品学报, 2011, 11(4): 115-122.
- [16] 潘欣. 食品相变蓄冷剂的研制[D]. 杭州: 浙江大学, 2005: 26.
- [17] 叶四化, 郭元强, 吕社辉, 等. 微胶囊相变材料及其应用[J]. 高分子材料科学与工程, 2004(5): 6-9.
- [18] ZHAO Chang-ying, ZHANG Guan-hua. Review on micro-encapsulated phase change materials (MEPCMs): Fabrication, characterization and applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(8): 3 813-3 832.
- [19] 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: 21.
- [20] TUMIRAH K, HUSSEIN M Z, ZULKARNAIN Z, et al. Nano-encapsulated organic phase change material based on copolymer nanocomposites for thermal energy storage[J]. Energy, 2014, 66: 881-890.
- [21] 刘玉东. 纳米复合低温相变蓄冷材料的制备及热物性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005: 18.
- [22] 何钦波. 纳米流体相变蓄冷材料的热物性及小型蓄冷系统特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005: 35.
- [23] 何钦波, 童明伟, 刘玉东. 低温相变蓄冷纳米流体成核过冷度的实验研究[J]. 制冷学报, 2008, 28(4): 33-36.
- [24] HARIKRISHNAN S, KALAISELVAM S. Preparation and thermal characteristics of CuO-oleic acid nanofluids as a phase change material[J]. Thermochimica Acta, 2012, 553: 46-55.
- [25] HE Qin-bo, ZENG She-quan, YIN Shao-you, et al. Experimental investigation on nucleation supercooling degree of $\text{TiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ nanofluids for cool storage[J]. Advanced Materials Research, 2012, 553: 2 723-2 727.
- [26] 谢鸿洲. 新型无机-有机复合壳层纳米胶囊相变蓄冷流体的热物性及传热性能[D]. 广州: 华南理工大学, 2015: 31.
- [27] 纪琚, 曾涛, 章学来, 等. 水基纳米 TiO_2 复合相变材料的制备及性能[J]. 制冷学报, 2018, 39(1): 90-97.
- [28] 张芸, 钱静. 可降解凝胶蓄冷剂的制备及性能分析[J]. 包装工程, 2012, 33(23): 40-44.
- [29] FRICKE J, SCHWAB H, HEINEMANN U. Vacuum insulation panels: Exciting thermal properties and most challenging applications[J]. International Journal of Thermophysics, 2006, 27(4): 1 123-1 139.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 刘翠娜, 张双喜, 周恒勤, 等. 便携式蓄冷保温箱结构优化[J]. 吉林化工学院学报, 2011, 28(1): 29-33.
- [33] 朱宏, 王冬梅, 潘欣艺. 不同外界环境温度下保温箱保温性能研究[J]. 包装与食品机械, 2018, 36(4): 9-12.
- [34] 菅宗昌. 典型潜热型控温包装热传递过程模拟[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 28.
- [35] 宋海燕, 田萌萌, 伍亚云. 蓄冷剂质量对挤塑聚苯乙烯保温箱温控效果的影响研究[J]. 包装工程, 2016, 37(7): 56-60.
- [36] 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.
- [37] 杨国梁, 胥义, 辛岩, 等. 相变蓄冷式双温区城市宅配保温箱的研制及测试[J]. 包装工程, 2018, 39(23): 43-50.
- [38] 陈文朴, 章学来, 黄艳, 等. 甲酸钠低温相变材料的研制及其在蓄冷箱中的应用[J]. 制冷学报, 2017, 38(1): 68-72.
- [39] 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.
- [40] 胡静怡, 朱浩, 杨玉宏, 等. 生鲜电商“最后一公里”配送问题的探讨[J]. 现代企业, 2018(10): 80-81.