蓄冷技术在食品冷链物流中的研究进展

黄艳，章学来
（上海海事大学，上海 201306）

摘要：目的 研究蓄冷技术在食品冷链物流中的应用进展，提出仍需解决的问题。**方法** 综述了蓄冷技术应用于蓄冷板冷藏车、蓄冷型保温运输箱、控温包装、低温仓储冷库等领域的研究进展，同时对食品冷链用蓄冷剂的相变温度、相变潜热、用量等相关参数及其与微胶囊等技术的复合研究进行了论述。**结果** 蓄冷技术在食品冷链的各环节中都具有广泛的应用背景和节能潜力。**结论** 蓄冷材料本身、蓄冷板冷藏车、蓄冷式多温共配技术等是今后蓄冷技术在食品冷链物流中应用的研究方向。

关键词： 蓄冷技术；食品冷链物流；蓄冷板；蓄冷剂
中图分类号： TS206.5　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1001-3563(2015)15-0023-07

Research Progress of the Application of Cold Storage Technology in Food Cold Chain Logistics

HUANG Yan, *ZHANG Xue-lai*
(Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

ABSTRACT: The study aimed to investigate the application progress of cool storage technology in food cold chain logistics, point out questions that needed to be solved, and provide reference for its further development. This paper summarized the cold storage technology used in the hold-over plate refrigerated vehicles, cold storage insulation transport boxes, packaging, and cold storage, etc.. Meanwhile, the related parameters of the cool storage agent and compound technology research were discussed. Our results indicated that cold storage technology in the food cold chain of each link has a widespread application background and potential of energy conservation. Taken together, cool storage material itself, the hold-over plate refrigerated vehicles, multi-temperature joint-delivery, etc. will be the research directions of cold storage technology application in food cold chain logistics.

KEY WORDS: cold storage technology; food cold chain logistics; hold-over plates; phase change materials

蓄冷技术是指在夜间电力负荷低峰时，运行制冷机组产生冷量存储在蓄冷介质中，然后在电力负荷高峰期释放冷量，满足各种冷负荷需求，移峰填谷，节约电费。冷链物流要求食品从生产加工、储藏运输、销售到消费前的各环节始终处于食品所需的低温环境中，以保证食品质量的损耗降至最低[1—4]。

据2010年国家发改委发布的《农产品冷链物流发展规划》指出，欧、美、加、日等发达国家肉禽冷链流通率已经达到100%，蔬菜、水果冷链流通率也达95%以上。目前我国果蔬、肉类、水产品冷链流通率分别为5%，15%，23%，冷藏运输率分别为15%，30%，40%。全国冷库的总容量仅为880万吨[5]。

利用相变蓄冷原理，按冷链运输不同的温度需求将不同相变温度的蓄冷材料进行合理配置可达到食品冷链物流的要求。蓄冷技术在食品低温加工、低温贮藏、低温运输配送、低温销售等食品冷链的各环节

收稿日期： 2015-06-05
基金项目： “十二五”农村领域国家科技计划（2013BAD19B01）
作者简介： 黄艳（1991—）女，上海人，上海海事大学硕士生，主攻蓄冷技术。
通讯作者： 章学来（1964—），男，浙江海宁人，博士后，上海海事大学教授、博导，主要研究方向为蓄能技术。

中都具有广泛的应用背景和节能潜力[6—8]。

1 蓄冷技术在食品低温运输配送中的应用

1.1 蓄冷板冷藏车

传统冷冻车在车辆行驶中制冷效果会受到引擎转速的影响,特别是引擎怠速时,冷冻压缩机由运输货车引擎驱动,冷冻能力容易不足,造成冷冻车厢内温度升高,影响食品品质,并且存在噪声等问题[9]。蓄冷板冷藏汽车的冷源为自带无动力蓄冷冷板,运输过程中能够均匀稳定地释放冷量,温度波动小,且可集中利用夜间低谷电充冷。蓄冷板中蓄冷剂及其用量的选择、蓄冷剂充放冷时间的影响因素、蓄冷材料的循环稳定性以及蓄冷板换热性能方面的研究是人们关注的焦点[10—11]。

李晓燕等[12]利用步冷曲线分析方法提出了一种A级[13]蓄冷板冷藏车用的相变蓄冷材料,相变温度为-6.9 ℃。杨培志等[14]采用焓法对冷藏车内蓄冷板的相变传热问题进行了研究,结合数值模拟计算得到冷板的最佳厚度及管间距,保证当冷板外表面过热到-5 ℃时冷板内共晶冰全部融解,同时保证冷板的蓄冷量,为冷板结构设计提供参考。

澳大利亚的Ming Liu等[15]研制了一种新型蓄冷式冷藏车,与常规系统相比,其噪音低、能耗少,适用于小型和中型冷藏车的短途和本地运输使用。在此系统中,带有相变材料的绝缘容器(PCTSU)放在冷藏车厢体外面,蓄冷过程中,制冷机组先冷却传热流体(HTF)到-36 ℃,然后使PCTSU中的相变材料凝固,储存冷量。在释冷过程中,相变材料吸热融化,释放冷量给流动的HTF,然后通过冷风机与冷藏车内的空气进行热交换,使车内温度保持在-18 ℃。该蓄冷式冷藏车的制冷系统装置见图1。

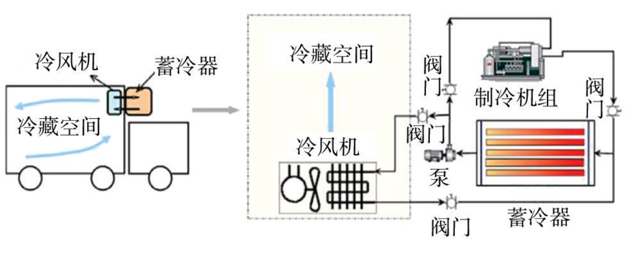

图1 制冷系统装置

Fig.1 Schematic diagram of cooling system

1.2 保温隔热材料

低温冷藏车厢体所用隔热材料及其结构将会直接影响冷藏车的绝热性能、机械强度、环保性能和经济性[16]。美国的Mashud等[17]对冷藏车厢体的隔热材料进行了研究,将相变材料放在铜管内,置于铝合金和玻璃板夹层中,夹层空隙填充聚氨酯泡沫保温材料,以此构成冷藏车厢体的新型隔热层。通过对使用了隔热相变材料的冷藏车和传统冷藏车进行漏热量计算比较,结果显示,使用了相变材料的冷藏车壁面平均峰值漏热量减少29.1%,对于厢体各壁面漏热量降低范围为11.3%~43.8%,平均每日能减少冷量损失约16.3%。

西南交通大学[18]设计了保温层和相变层相结合的集装箱保温方式,满足长时间低温环境下的运输要求。采用聚氨酯作为保温层材料,质量分数为19%的氯化钠溶液作为相变材料用于-40 ℃环境温度下,并保证集装箱内温度为-20 ℃以上。

1.3 蓄冷冰袋

常见的冰袋材质结构分为重复使用型冰袋材质和一次性冰袋材质。重复使用型由2个非编织纺织材料层与多元丙烯酸多元醇压缩而成,具有特殊的交链聚合物结构形式,外层的塑料采用单向微细穿孔技术,使纺织层塑料层相互结合,以适应各种不同的环境,见图2。陈景华等[19]认为在倡导绿色包装的今天,对巧克力类热敏性食品而言,在短途运输中采用保温冰袋是不二选择。对于长途运输,则必须与EPS泡沫结合使用。

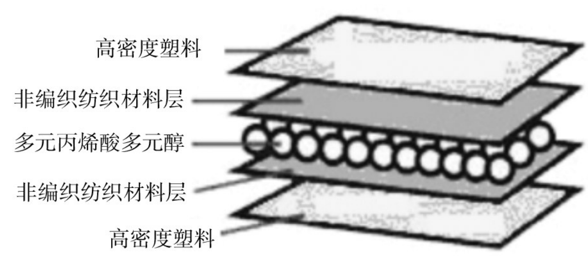

图2 重复使用型冰袋结构

Fig.2 Schematic diagram of the structure of reusable ice pack

汤元睿等[20—22]分别选取纯水、NaCl(质量分数为18.8%)、乙醇(质量分数为46.3%)以及$CaCl_2$(质量分数为29%)溶液制作冰袋,从金枪鱼的感官、肉色、质构、硫代巴比妥酸(TBA)值、挥发性盐基氮(TVB-N)值等方面进行分析,研究了不同成分蓄冷冰袋对金枪鱼品质变化的影响。$CaCl_2$(质量分数为29%)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 ℃,运输末期鱼肉品质接近新鲜鱼肉。储运、销售过程始终保持在-55 ℃的完整冷链下能够使

金枪鱼肉保持良好品质,应尽量避免物流过程中温度的变化。

1.4　蓄冷型保温运输箱

国际上冷链物流的理论与实践应用研究经历了3个发展阶段。由单品温物流发展到机械冷冻车厢区隔、机电共享保冷柜配送的多品温物流,再发展为蓄冷式多温共配物流[23]。在运输货物少量多样且温域不同的情况下,若采用单品温配送,只能单车单运,车辆的运能无法相互运用,造成车辆使用效率低、运能浪费、装卸过程中温度断链以及配送过程中频繁开启车门导致温度变化等问题。在物流中心借助制冷系统将可置换且适用不同品温的蓄冷板集中降温储存冷能,再把蓄冷板置入保温运输箱中,以维持储运食品所需的低温条件,并利用普通货车运送,以此来实现蓄冷式多温共配物流[24]。

高恩元等[25]对番茄冷链运输保鲜技术进行了研究,分别模拟EPS保温箱运输、蓄冷保温箱运输和5 ℃冷链运输等3种方式,通过对番茄品温、营养物质和感官评价来确定不同条件下的不同运输方式。结果表明,EPS保温箱适合不超过24 h的短距离运输,蓄冷保温箱适合不超过48 h的中短距离运输,5 ℃冷链运输则适合长距离或特种果蔬运输。

1.5　潜热型控温包装

利用蓄冷剂自身储备的能量来抵消包装产品在储存、运输、销售等环节所吸收的热量,保护温度敏感性产品免受热冲击[26]。对于易腐水产品,包装使用蓄冷剂保证内部低温,并采用多层结构——较低热导率的发泡聚苯乙烯(EPS)与瓦楞纸箱结合极大减少内外热量交换,见图3[27—28]。

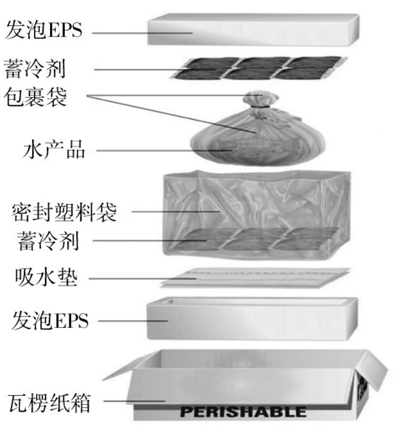

图3　易腐水产品的保温包装

Fig.3 A insulation package series for aquatic food

2　蓄冷技术在食品低温仓储中的应用

目前冷库行业面临着电价上涨、拉闸限电及错峰用电、峰谷电价等不利条件[29]。将蓄冷技术应用于冷库,将冷量的制造过程和冷量的释放过程在时间上分开,可将上述劣势转变为优势。上述转变存在技术上的瓶颈,低温冷库的温度要求为−30~−20 ℃,高温冷库的温度要求在0~4 ℃。目前采用最多的传统冰蓄冷和水蓄冷系统达不到低温冷库的制冷要求,将蓄冷材料直接应用于低温冷库,可达到该库的制冷要求,目前有2种可行性方案[6,30]。

利用相变温度为−30~−20 ℃的低温相变蓄冷材料代替传统蓄冷材料。夜间将冷量存储于蓄冷池中的低温蓄冷剂中,白天使用载冷剂将冷量运输并释放至低温冷库。在冷库顶棚下或库体两侧安装蓄冷板与冷藏车类似。由于冷库用电的峰谷期与电价的峰谷期正好重合,采用单一的供冷方式并不节能。在蓄冷冷库中,蒸发端采用蓄冷板和冷风机联合运行的方式会更节能,见图4。第1种方案在低谷时段制出的冷量需要存储在蓄冷池中,再送入低温冷库,期间必然会和外界产生热量交换,产生冷量损失。蓄冷板则直接接触冷库中的空气,热量交换量很小,即使发生了热量交换,也就相当于向冷库中供冷,故冷量损失少,更节能。另外采用蓄冷板系统的冷库能在规定时间内不间断供冷,而风冷式机械冷库则会由于蒸发器自动融霜使得库内温度产生频繁波动。

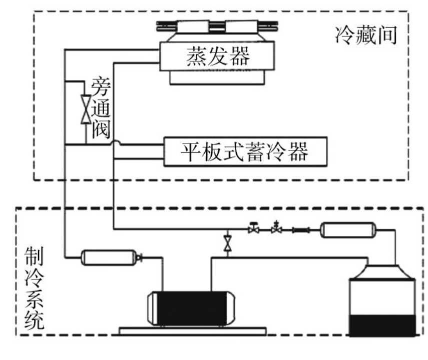

图4　蓄冷冷库运行示意

Fig.4 Schematic diagram of cold storage library operation

3　食品冷链物流用蓄冷剂的研究

3.1　蓄冷剂使用量

对蓄冷剂使用量的预测,可以避免在运输过程中

因使用蓄冷剂过量引起浪费和成本增加，或因使用蓄冷剂太少而无法保证冷量释放，影响食品品质。日本的Shigeyuki，Kenjirou等人[31—32]给出了冷冻鱼在不同储运温度要求下所需的蓄冷剂类型和使用量，其计算方法不涉及蓄冷剂的具体摆放形式等因素对保温箱内温度分布的影响，较粗糙。林晗[33]由运输过程中外界温度的预测模型、平均温度预测模型以及已知的 $T^*-\alpha$ 曲线，构成蓄冷剂用量预测模型。通过迭代计算，得到满足保冷运输要求的蓄冷剂用量最优值。

3.2 蓄冷剂热物性能

目前适合冷链的产品有[34]：初级农产品，包括蔬菜、水果、水产品、肉、禽、蛋、花卉等；加工食品，包括禽、肉、水产品等包装熟食，快餐原料，速冻食品，果蔬饮料，冰激凌和奶制品等；特殊商品，包括药品、试剂、疫苗等。不同产品所需的冷链储运温度不同[35]，对于冷藏产品而言，–10~4 ℃是最适宜的储运温度，冷冻食品是–18 ℃。故冷链物流中所用蓄冷剂的选择应根据实际应用需求选用不同相变温度的蓄冷剂，材料的相变潜热值越高，则其单位质量储能密度越高，对于冷链储运而言，可降低蓄冷剂部分的重量和容积，提高食品单车运输能力，也可降低能耗。

章学来等[36—37]以膨胀石墨/乙二醇/正庚醇为材料，研制出一种相变温度和潜热分别为–43.3 ℃和 10^2 kJ/kg，适用于冷板冷藏车冷冻运输需求的蓄冷剂，其中膨胀石墨的添加，改善了材料的导热性能，增加成核以期提高材料的充冷放冷性能。高斯等[38—39]对保温包装中的蓄冷剂进行了研制。以NaCl作为–5~0 ℃的降温剂，KCl为–10~–5 ℃的降温剂，选用质量分数为0.5%四硼酸钠作为NaCl溶液的成核剂，质量分数为0.02%硅藻土作为KCl溶液的成核剂，加入质量比为18:1:1的聚乙烯醇（质量分数为7%）、戊二醛（质量分数为13%）、柠檬酸缩聚醛（质量分数为3%）反应形成的高吸水性凝胶，合成得到水凝胶蓄冷剂。可根据所需包装产品，通过改变NaCl或KCl溶液的浓度来实现相变温度的改变。

李瑶等[40]改进了以T–history曲线为基础计算相变材料潜热的方法，三次样条插值法拟合后求得相变潜热值与理论值的偏差小于10%，对于无过冷度的相变材料，一阶导数最高点作为相变起始点时，相变潜热计算值与理论值的偏差最大为8.01%，最小为1.55%。

3.3 高吸水性树脂复合蓄冷剂

高吸水性树脂做载体，将容易流动的固–液相变材料吸附于网络结构中，形成固–固相变复合蓄冷材料，可以切割或压制，无需使用容器，能有效增大传热面积、提高传热效率。该复合蓄冷材料体系中绝大部分是水，而且水的物性参数基本不变[41—43]。用冰块做蓄冷材料，在融解释冷时会产生水渍，使农产品感染、腐烂，影响产品质量和贮藏寿命。

李婷等[44—45]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，$Na_2B_4O_7$ 做人工晶核改善过冷，把SAP（超吸水性树脂）作为蓄冷剂的载体，使之在液态时呈现粘胶状，不流动。刘建良[46]以绿色天然物质L–天冬氨酸（LASP）为添加原料，提高传统丙烯酸–丙烯酰胺（AA–AM）高吸水树脂的吸水性能、耐盐性能、生物降解性能和蓄冷保鲜性能。谭爱龄等[47]研究高吸水性树脂复合相变材料的冻融特性，发现其冻结时间较冰蓄冷剂短，熔融时间较冰蓄冷剂的长，且能减少冰蓄冷剂的过冷现象。

3.4 微胶囊相变材料

微胶囊技术是一种用成膜材料把固体或液体包覆使形成微小粒子的技术。将该技术引入相变材料，得到的微胶囊相变材料可以防止相变物质和周围环境反应，控制相转变时的体积变化，提高材料使用效率。在微胶囊相变材料的制备过程中，囊壁材料多数采用聚氨酯、脲醛树脂、三聚氰胺–甲醛树脂等缩聚类高分子材料。在合成过程中均需添加甲醛等有害物质，洗涤除杂不能保证完全除去，有害物质的残留限制了微胶囊相变材料在食品、药品等要求严格领域中的应用。采用乙烯基系材料作为壁材，在其合成过程中单体双键的共聚无需添加甲醛等有害物质，避免了此类问题[48—52]。

4 食品冷链物流蓄冷技术展望

我国平均食物年产值约为3000多亿美元，由于没有很好的冷链条件，因而食品产后损失非常严重。果蔬、水产品、肉类流通损失率分别达到20%~30%，15%，12%，腐烂损耗的果蔬可满足将近2亿人的基本营养需求，损耗量居世界首位，而冷链物流发达的国家果蔬损失率则控制在5%以下。我国冷链物流市场潜力巨大，食品冷链物流蓄冷技术今后的研究方向主要包括以下几个方面。

1）提高蓄冷板性能的理论分析和应用研究，满足行业发展对冷藏运输车提出的车型、温区、安全稳定、体积小、能耗低等要求。

2）发展蓄冷式多温共配技术，针对不同储运产品需求提供相变温度适宜的蓄冷剂，以维持不同的低温环境。

3）对蓄冷剂材料结构与相变潜热的关系进行研究，寻找能提高蓄冷剂相变潜热的途径。

4）冷冻加工、冷冻储藏、冷冻运输与配送、冷冻销售等4个部分构成了一条完整的冷链。将蓄冷技术应用其中的经济性分析及评价需完善。

参考文献：

[1] RATHOD M K, BANERJEE J. Thermal Stability of Phase Change Materials Used in Latent Energy Storage Systems: A Review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 18: 246—258.

[2] SARIER N, ONDER E. Organic Phase Change Materials and Their Textile Applications: An Overview[J]. Thermochimica Acta, 2012, 540: 7—60.

[3] 黄雪莲，于新，马永全. 蓄冷技术在果蔬保鲜中的研究与应用[J]. 仲恺农业技术学院学报，2010，23(2)：67—71.
HUANG Xue-lian, YU Xin, MA Yong-quan. Study and Application of Cool Storage Technology in Fruits and Vegetables Preservation[J]. Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2010, 23(2): 67—71.

[4] 王文铭，刘晓亮. 我国冷链物流能耗现状及对策研究[J]. 中国流通经济，2011，25(10)：29—33.
WANG Wen-ming, LIU Xiao-liang. China Cold-chain Logistics Energy Consumption Status and the Countermeasures[J]. China Business and Market, 2011, 25(10): 29—33.

[5] 国家发展和改革委员会. 农产品冷链物流发展规划[Z]. 2010(6)：1—16.
The National Development and Reform Commission. Development Planning of Agricultural Products in Cold Chain Logistics[Z]. 2010(6): 1—16.

[6] 李晓燕，李凯娣，刘家庆，等. 相变蓄冷技术在食品冷链中的应用研究与进展[C]// 2013中国制冷学会学术年会论文集.武汉，2013.
LI Xiao-yan, LI Kai-di, LIU Jia-qing, et al. Research and Progress of Phase Change Storage Technology Application in the Food Cold Chain[C]// 2013 China Refrigeration Institute Academic Essays. Wuhan, 2013.

[7] 常远，刘泽勤. 冷藏运输及冷藏运输装备发展对策初探[C]// 第七届全国食品冷藏链大会论文集.青岛，2010：164—167.
CHANG Yuan, LIU Ze-qin. The Preliminary Discussion on the Development of Refrigerated Transport and Refrigerated Transport Equipment[C]// Proceedings of the 7th National Conference on Food Cold Chain. Qingdao, 2010: 164—167.

[8] 朱志强，张小栓，于晋泽. 我国鲜活农产品冷链物流与纳米蓄冷材料的应用[J]. 中国果菜，2014，34(6)：14—18.
ZHU Zhi-qiang, ZHANG Xiao-shuan, YU Jin-ze. Nano Cool-storage Material and Cold-chain Logistics of Fresh Agriculture Products[J]. China Fruit Vegetable, 2014, 34(6): 14—18.

[9] 张君瑛，章学来. 蓄冷式冷藏运输[J]. 能源技术，2005，26(3)：127—130.
ZHANG Jun-ying, ZHANG Xue-lai. The Cool Storage Cargo Transportation[J]. Energy Technology, 2005, 26(3): 127—130.

[10] 施敏敏，章学来，王文国，等. 蓄冷式冷藏运输车的设计研究[C]// 第六届全国食品冷藏链大会论文集.上海，2008：354—358.
SHI Min-min, ZHANG Xue-lai, WANG Wen-guo, et al. Design and Research of the Cool Storage Cargo Refrigerated Vehicles[C]// Proceedings of the 6th National Conference on Food Cold Chain. Shanghai, 2008: 354—358.

[11] HOANG M H, LAGUERRE O, MOUREH J, et al. Heat Transfer Modeling in a Ventilated Cavity Loaded with Food Product: Application to a Refrigerated Vehicle[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 113(3): 389—398.

[12] 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—99.
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—99.

[13] 王孟英. 蓄冷板冷藏车[J]. 制冷，1988(4)：36—40.
WANG Meng-ying. Hold-over Plate Refrigerated Vehicles[J]. Refrigeration, 1988(4): 36—40.

[14] 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，2006，6(1)：51—53.
YANG Pei-zhi, LIU Xiang-long. Study of Heat Transfer Performance of Hold-over Plate in Refrigerated Vehicle[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2006, 6(1): 51—53.

[15] LIU MING, WASIM S. Development of a Novel Refrigeration System for Refrigerated Trucksincorporating Phase Change Material[J]. Applied Energy, 2012, 92: 336—342.

[16] 覃宏博，梁骞，田宝聪. 我国低温冷藏车的研究综述[J]. 制冷与空调，2007，7(4)：5—8.
QIN Hong-bo, LIANG Qian, TIAN Bao-cong. Review of Research on Refrigerated Vehicle in China[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2007, 7(4): 5—8.

[17] MASHUD A, OLIVER M, MARIO A, et al. 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.

[18] 赵执婷. 无动力蓄能保温集装箱热工特性研究[D]. 成都：

西南交通大学,2014.

ZHAO Zhi-ting. Thermal Characteristics Research of the Thermal Energy Storage Insulation of No Power Container[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2014.

[19] 陈景华,刘劲阳,刘刚. 热敏性巧克力食品防护包装现状及发展趋势[J]. 包装工程,2012,33(13):34—39.

CHEN Jing-hua, LIU Jin-yang, LIU Gang. Present Situation and Developing Trend of Heat-sensitive Chocolate Food's Protective Packaging[J]. Packaging Engineering, 2012, 33 (13):34—39.

[20] 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.

[21] 汤元睿,谢晶,李念文,等. 不同冷链物流过程对金枪鱼品质及组织形态的影响[J]. 农业工程学报,2014,30(5):285—292.

TANG Yuan-rui, XIE Jing, LI Nian-wen, et al. Effects of Different Cold Chain Logistics Situations on Quality and Microstructure of Tuna (Thummus Obesus) Fillets[J]. Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering, 2014, 30 (5):285—292.

[22] 汤元睿,谢晶,徐慧文,等. 冷链物流过程中温度变化对金枪鱼新鲜度的影响[J]. 食品工业科技,2014(13):332—336.

TANG Yuan-rui, XIE Jing, XU Hui-wen, et al. Effects of Temperature Changes on Freshness of Tuna (Thunnus Obesus) Fillet in Cold Chain Logistics[J]. Science and Technology of Food Industry,2014(13):332—336.

[23] 王倩,王淑云. 关于发展蓄冷式冷链物流多温共配的思考[J]. 中国海洋大学学报:社会科学版,2012(5):49—54.

WANG Qian, WANG Shu-yun. Reflection on the Development of Multi-temperature Joint Distribution Based on Storage Cold Chain Logistics[J]. Journal of Ocean University of China(Social Sciences),2012(5):49—54.

[24] 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. Application of Cold Storage Type Transfer Box in Cold Chain[J]. Cold Storage Technology,2010(3):12—16.

[25] 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]. Refrigeration Technology,2014,34(5):49—53.

[26] JING Qian. Mathematical Models for Insulating Packages and Insulating Packaging Solutions[D]. Memphis: University of Memphis,2009.

[27] 高斯,钱静. 保温包装整体设计及结构分析[J]. 包装工程,2010,31(7):51—65.

GAO Si, QIAN Jing. Overall Design of Insulation Packaging and Structural Analysis[J]. Packaging Engineering, 2010, 31 (7):51—65.

[28] 菅宗昌,潘暸,卢立新. 一种典型潜热型控温包装的有限元分析[J]. 包装工程,2014,35(9):14—17.

JIAN Zong-chang, PAN Liao, LU Li-xin. Analysis of a Typical Latent Heat Type Temperature-control Package[J]. Packaging Engineering,2014,35(9):14—17.

[29] 吴丽媛,宋文吉,肖睿,等. 相变蓄冷技术在低温冷库系统的应用前景[C]// 第七届全国食品冷藏链大会论文集.青岛,2010:120—125.

WU Li-yuan, SONG Wen-ji, XIAO Rui, et al. Prospect of Cool Storage Technology Using Phase Change Material in Low-temperature Refrigerated Warehouse[C]// Proceedings of the 7th National Conference on Food Cold Chain.Qingdao, 2010:120—125.

[30] 邹琅. 蓄冷技术在冷藏库中应用的研究[C]// 2000年中国食品冷藏链大会论文集,2000:133—148.

ZOU Lang. Application Research of Cold Storage Technology in refrigerated storage[C]// Proceedings of the 2000 National Conference on Food Cold Chain,2000:133—148.

[31] SASAYAMA S. Phase Changed Materials in Cold Transportation[J]. Food Circulation Technology,1990,19(3):139—146.

[32] KENJLROU U. Phase Changed Materials[J]. Food Circulation Technology (Temporary Supplement), 1998, 17(14): 144—155.

[33] 林晗. 无内热源货物保冷运输的温度管理方法[D]. 北京:清华大学,2004.

LIN Han. Temperature Managing Method for Cooling Transportation of Cargo without Inner Thermal Source[D]. Beijing: Tsinghua University,2004.

[34] 金盛楠,肖更生,张友胜,等. 冷链物流分析及其在食品中的应用现状[J]. 现代食品科技,2008,24(10):1031—1035.

JIN Sheng-nan, XIAO Geng-sheng, ZHANG You-sheng, et al. Analysis of Cold Chain Logistics and Its Present Application in Food Industry[J]. Modern Food Science and Technology,2008,24(10):1031—1035.

[35] DB31/T 388—2007,食品冷链物流技术与规范[S].

DB31/T 388—2007, Technology and Specification of Food Cold Chain Logistics[S].

[36] 袁园,章学来. -43℃新型复合低温相变材料的制备及热性能研究[C]// 2013中国制冷学会学术年会论文集.武汉,2013.

YUAN Yuan, ZHANG Xue-lai. The Preparation of the New -43℃ Composite Phase Change Material and the Thermal Performance Study[C]// 2013 China Refrigeration Institute Academic Essays.Wuhan,2013.

[37] 章学来，赵群志，袁园，等. 一种冷藏车用低温相变蓄冷材料：中国，103740335[P]. 2013-12-03.
ZHANG Xue-lai, ZHAO Qun-zhi, YUAN Yuan, et al. A low-temperature Phase Change Storage Material for Refrigerator Vehicle：China，103740335[P]. 2013-12-03.
[38] 高斯. 保温包装中蓄冷剂的研制[D]. 无锡：江南大学，2012.
GAO Si. Research on Cold Storage Agent for Insulation Packaging[D]. Wuxi：Jiangnan University，2012.
[39] 高凯，阎瑞香，董爱平，等. 果蔬运输保鲜蓄冷剂的研制[J]. 保鲜与加工，2010，10(6)：20—23.
GAO Kai, YAN Rui-xiang, DONG Ai-ping, et al. Study on Coolant of Fruits and Vegetables during Storage and Transportation[J]. Storage and Process，2010，10(6)：20—23.
[40] 李瑶，钱静，吴丽彬. 基于T-history曲线计算材料相变潜热方法的改进[J]. 包装工程，2014，35(23)：17—22.
LI Yao, QIAN Jing, WU Li-bin. Improvement of Calculation Method for Material Phase Change Latent Heat Based on T-history Curve[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(23)：17—22.
[41] 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.
[42] OMIDIAN H, ZOHURIAAN-MEHR M J. DSC Studies on Synthesis of Superabsorbent Hydrogels[J]. Polymer，2002，43：269—277.
[43] 马承银. 高吸水性树脂在蓄冷材料中的应用研究[J]. 塑料开发，2000；1437—1439.
MA Cheng-yin. Research of High Absorbent Resin Application in the Cool Storage Materials[J]. Plastic Development，2000：1437—1439.
[44] 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.
LI Ting, PAN Xin, YING Tie-jin. Optimization and Application of Formula for CTESM as Temperature Regulator in Food Storage[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2011，11(4)：115—122.
[45] 潘欣. 食品相变蓄冷剂的研制[D]. 杭州：浙江大学，2005.
PAN Xin. Development of CTESM in Food Storage[D]. Hangzhou：Zhejiang University，2005.
[46] 刘建良. LASP/AA/AM高吸水性树脂的合成、性能及蓄冷保鲜应用研究[D]. 广州：广东工业大学，2012.
LIU Jian-liang. Study on Synthesis and Properties of LASP/AA/AM Super Absorbent Polymer and Applied to Cool Storage Fresh-keeping[D]. Guangzhou：Guangdong University of Technology，2012.
[47] 谭爱龄，陈璐，刘建良. 高吸水性树脂复合相变材料的冻融特性[J]. 化工进展，2011，30(10)：2262—2265.
TAI Ai-ling, CHEN Lu, LIU Jian-liang. Freezing and Thawing Characteristics of Superabsorbent Composite Phase Change Material[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2011, 30(10)：2262—2265.
[48] 于党伟，卢立新. 乙烯基微胶囊相变材料的研究进展[J]. 包装工程, 2013，34(23)：127—131.
YU Dang-wei，LU Li-xin. Research Progress in Vinyl Microencapsulated Phase Change Materials[J]. Packaging Engineering，2013，34(23)：127—131.
[49] 陆少锋，邢建伟，吴钦，等. 界面聚合聚脲/聚氨酯双层微胶囊相变材料的研制与性能[J]. 高分子材料科学与工程，2011，27(1)：17—19.
LU Shao-feng，XING Jian-wei，WU Qin，et al. Interfacial Polymerization Polyuria/Polyurethane Double Microencapsulated Phase Change Materials Research and Performance[J]. Polymer Materials Science and Engineering，2011，27(1)：17—19.
[50] 单其艳，杨铭，冉瑞龙，等. 脲醛树脂-石蜡相变微胶囊的制备及性能研究[J]. 上海纺织科技，2012，40(7)：13—15.
SHAN Qi-yan，YANG Ming，RAN Rui-long，et al. Ureaformaldehyde Resin-paraffin Phase Change Microcapsules Preparation and Properties[J]. Shanghai Textile Science and Technology，2012，40(7)：13—15.
[51] 胡广东，邹黎明，徐速，等. 复合相变材料/聚甲基丙烯酸甲酯微胶囊的制备与表征[J]. 合成纤维，2011(1)：20—23.
HU Guang-dong, ZOU Li-ming, XU Su, et al. Composite Phase Change Material/Poly(Methyl Methacrylate) Microcapsules Preparation and Characterization[J]. Synthetic Fiber，2011(1)：20—23.
[52] 张艳辉，邓建国，黄奕刚. 乙二醇双硬脂酸酯/PMMA核壳储能微胶囊制备[J]. 化工进展，2012，31(3)：580—585.
ZHANG Yan-hui，DENG Jian-guo，HUANG Yi-gang. Ethylene Glycol Stearic Acid Ester/PMMA Core-shell Storage Microcapsules[J]. Industry and Engineering Progress，2012，31(3)：580—585.

（上接第22页）

2010，2(1)：28—38.
[48] THIANSILAKUL Y, BENJAKUL S, RICHARDS M P. Effect of Phenolic Compounds in Combination with Modified Atmospheric Packaging on Inhibition of Quality Losses of Refrigerated Eastern Little Tuna Slices[J]. LWT-Food Science and Technology，2013，50(1)：146—152.
[49] MUELA E, ALONSO V, MORAGO P, et al. Effect of Gas Packaging Conditions on Thawed Thunnus Obesus Preservation[J]. Food Control，2014，46：217—224.