

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2020.03.044

蓄冷板式冷藏箱的节能优化研究进展

Research progress on energy saving optimization of cold storage plate refrigerator

许启军^{1,2} 谢晶^{1,2,3}XU Qi-jun^{1,2} XIE Jing^{1,2,3}

(1. 上海冷链装备性能与节能评价专业技术服务平台, 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)

(1. Shanghai Professional Technology Service Platform on Cold Chain Equipment Performance and Energy Saving Evaluation, 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)

摘要:文章从相变蓄冷材料、冷板放置位置以及保温材料等方面论述了上述因素对蓄冷板式冷藏箱节能效果的影响,并对蓄冷板式冷藏箱未来的研究方向进行了展望。

关键词:冷板;冷藏箱;相变蓄冷材料;保温材料;纳米流体

Abstract: This paper discusses the influence on the energy saving effect of cold storage plate refrigerator from the aspects of phase change cold storage material, cold plate placement and thermal insulation material, and prospects the future research direction of cold storage plate refrigerator.

Keywords: holdover plate; refrigerated container; phase change cold storage material; thermal insulation materia; nanofluids

冷链运输指的是利用各种冷藏运输设备在最佳载存温度下转运易腐食品^[1]。冷藏运输设备在冷链运输过程中对于延长易腐食品的货架期起着至关重要的作用。目前冷藏运输设备主要是机械式冷藏车,由于运量小、耗费能量高、车厢内空间利用率不高,常出现“大车送小货”的现象。因此,一种将蓄冷技术与保温箱相结合的蓄冷板式冷藏箱越来越受到关注,这种蓄冷板式冷藏箱是一种利用蓄冷板内相变蓄冷材料的释冷来保持箱内低温的运

输装备,与携带蒸气压缩式制冷机组的机械冷藏车相比,只需安装冷板,仅利用夜间低谷用电时期对冷板进行充冷,白天运输货物时,将冷板储存的冷量导入箱内进行降温^[2-4]。这种新型蓄冷系统降低了无噪声污染,充分利用了谷电,降低了冷藏箱成本,与采用机械制冷系统的冷藏车相比,蓄冷系统的维护成本较低^[5]。

研究^[6]发现,蓄冷板式冷板的相变蓄冷材料、冷板的放置位置以及保温材料均对冷藏箱的温度场和流场产生影响。文章拟从这3方面阐述蓄冷板式冷藏箱在节能优化方面的研究进展,并对其未来研究方向进行展望,旨在不断提高中国的冷链运输技术,以满足人们对绿色生鲜食品的高品质要求。

1 相变蓄冷材料对冷板的影响

相变蓄冷材料是冷板蓄能的核心,蓄能是提高能源效率和节能的有用工具。存储能量的方法有热化学反应存储、显热存储和潜热存储^[7]。热化学储热过程中,吸收或释放能量的原理是通过化学反应过程中分子键的断裂和组合来实现的;显热存储中,通过提高固体或液体的温度来存储热能。这两种储热方式涉及到复杂的化学反应,安全性也不能保证,而潜热储能的储热量大、安全性高,同时相变温度也比较稳定,是目前最理想的一种储能方式^[8]。

1.1 复合相变蓄冷材料

相变材料可以分为有机^[9]和无机^[10]两大类。研究发现,单独的有机(脂类、醇类、芳香烃类^[11]等)或无机(甲酸钠^[12]、水合无机盐^[8]、三水乙酸钠^[10]等)相变材料均会出现较大的过冷度,相变温度也会随使用次数的增加而产

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(编号:2019YFD0901604);上海市科委科技创新行动计划项目(编号:19DZ1207503);上海市科委公共服务平台建设项目(编号:17DZ2293400)

作者简介:许启军,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:2020-01-19

生较大的波动。为了克服单一材料的缺陷,可将有机与无机材料进行混合,并不断调配比例,使其兼具两种材料的优点,拓展其应用范围^[9]。

李靖等^[13]以浓度为20%的氯化钠和50%的丙三醇作为混合溶液,不断改变两种溶液的配比,获得了两种溶液的质量比为2.5:7.5,相变温度为-31℃的相变蓄冷材料;Yang等^[14]发现,15%氯化铵、10%乙醇和75%水的混合物的相变温度为-21℃,该混合物具有弱腐蚀性。班超方等^[15]以Na₂SO₄(成核剂)、NaCl(主储能剂)、K₂CO₃(降温剂)、CMC(增稠剂羧甲基纤维素钠)^[16]、水作为蓄冷剂配方,在凝固—融化相变试验过程中,没有出现相分离、胀包等现象,加入成核剂Na₂SO₄后的过冷度由3.4℃降至0.5℃,过冷度降低明显,相变温度为-2.4℃。贾蒲悦等^[17]采用聚丙烯酸钠(PAAS)作为增稠剂,得到了由三羟甲基丙烷、NH₄Cl和H₂O按一定的配比组成的三元复合相变蓄冷材料,该材料可在-18℃冷冻温区使用。刘方方等^[18]设计了一种无毒、无污染,同时还具有防腐功能的三元相变复合相变蓄冷材料,该材料是以苯甲酸钠为主储能剂,硅藻土为成核剂,水为辅助溶液,相变温度为-4.06~-5.29℃。

近年来,复合相变蓄冷材料被广泛应用,但随着对蓄冷材料要求的不断提高,一些局限性问题也亟待解决,如复合相变材料在相变过程中会以一种胶状的液态形式存在,增稠剂只会使混合液的黏度增大,但也避免不了在冷板外沿连接处发生泄漏的可能,渗出的无机盐会腐蚀冷板外壳,进而造成更大的泄漏。此外,复合相变蓄冷材料在长期重复充冷、释冷的过程中会出现不可逆的相变分离现象,加入成核剂只会减缓相分离现象的发生,并不能真正解决这个问题^[19]。

1.2 微胶囊相变蓄冷材料

为了能够降低相变蓄冷材料的过冷度以及防止在相变过程中出现的相分离现象,可将相变材料放入一种有机高分子壳中制成微胶囊相变材料。黄金等^[20]利用缩聚反应,在负电场辅助下,使聚合物脲醛树脂在水合盐液滴表面形成胶状物,由于脲醛树脂在此过程中是不溶于水合盐的,因此脲醛树脂很快在水合盐液滴表面形成一圈环形胶状物,即微胶囊囊壁,并逐步形成微胶囊相变材料。Reddy等^[21]发现椭圆形的微胶囊相变材料具有很高的表面积和体积比,蓄能时间最长。将这种微胶囊技术和相变材料结合形成的微胶囊相变材料是一种新型的相变蓄冷方式,提高了传统复合蓄冷剂的稳定性,更好地改善相分离,可防止相变材料在液态时发生泄漏^[22]。

Patry等^[23]在水包油乳液中采用原位聚合法制备了含有活性成分的聚脲醛微胶囊,脲醛聚合物对封闭的环氧树脂(有机溶剂)有很好的阻隔作用,并且试验也表明

微胶囊的大小可通过乳液的搅拌速度来控制。张晓辰等^[24]制备了一种新型的微胶囊材料,囊壁为酚醛树脂,微胶囊促进剂为氯化钾,使用原位聚合法合成了石蜡微胶囊,通过扫描电子显微镜发现微胶囊的形状为圆形,没有粒子团聚现象,整体保护性完好,起到较好的封装作用。这两种制作微胶囊的办法均是采用原位聚合法,可以控制微胶囊的形状,同时通过使用不同的聚合物,微胶囊的状态也有所不同。但在上述制备过程中会有少量甲醛残留,限制了这种微胶囊的应用范围。

1.3 纳米流体相变蓄冷材料

在相变蓄冷材料中加入有机或无机材料的成核剂和增稠剂在一定程度上能够降低混合溶液的过冷度,改善相变分离,但是一般的成核剂和增稠剂都有腐蚀性,同时安全性也无法得到保证。纳米粒子作为一种超微粒,当混合液中加入纳米颗粒时,会悬浮于基液中,形成的布朗运动可以加强基液微粒与纳米粒子间的能量传递效率。利用物理方法降低混合液的过冷度,抑制相变分离,无腐蚀性,安全性也大大提高,同时也会提高相变蓄冷材料的蓄冷能力^[25]。

根据成核理论,分散的相变材料液滴越小,过冷度越大^[26]。Xi等^[27]选用99%浓度的正十六烷C₁₆H₃₄作为相变材料基液,以多壁碳纳米管为成核剂原料,研究了多壁碳纳米管粒子作为成核剂抑制相变材料基液中过冷的效果,发现成核剂存在一个最小有效浓度,该浓度为0.6%时,基液的过冷度最小。Song等^[28]以乙二醇—水溶液作为新型纳米流体相变蓄冷材料的基础液,当添加质量分数0.1%~0.4%的TiO₂纳米颗粒时,降低了过冷度、半冷冻时间和潜热,并提高了导热系数。

由于纳米颗粒会干扰水晶体的生长,因此需要较低相变温度才能为水结晶提供更高的驱动力。在较低的水含量(较高的乙二醇含量)下,纳米颗粒对水晶体生长的影响更大,由于TiO₂纳米颗粒是亲水性的,并且倾向于与水而不是乙二醇分子接触。纳米粒子既可充当成核剂,也可充当乙二醇溶液中的杂质。作为成核剂,纳米颗粒提供了成核位点以诱导异相成核(图1),从而增强了成核温度并降低了过冷度和半冷冻时间^[28]。

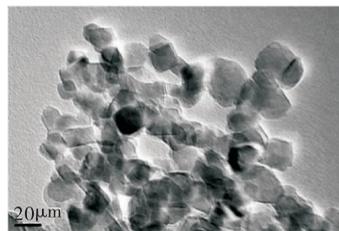


图1 TiO₂ 纳米粒子的透射电子显微镜图

Figure 1 Transmission electron microscope photograph of the TiO₂ nanoparticles

Harikrishnan 等^[29]制备了 CuO—油酸纳米流体, CuO 纳米粒子在基础流体中均匀分散,可极大地提高相变蓄冷材料的传热速率、降低相变蓄冷材料过冷度、抑制相变分离现象。研究^[30]表明,采用阿拉伯树胶粉为分散剂、超声振荡 1.5 h 时,纳米流体具有较好的稳定性。李新芳等^[31]在基液中加入 Cu-H₂O 纳米微粒,研究了其质量分数、粒径、温度对复合材料黏度的影响。赵宁波等^[32]在基液中加入 Al₂O₃ 纳米颗粒,纳米流体的热导率和黏度明显提高。

综上,纳米粒子在加入相变蓄冷材料后会使得混合液的相变时间提前,过冷度随之减小,为相变蓄冷材料的优化指明了方向。但纳米流体热物理性质变化的原理尚待研究,需对某些特性进行深入分析,如纳米流体的表面张力和介电特性,并且还可以研究混合纳米粒子流体,即在基础液中加入两种不同纳米颗粒的混合物^[33]。

2 冷板放置位置对蓄冷板式冷藏箱温度场的影响

冷藏运输设备中所选择的蓄冷技术是利用相变蓄冷材料(PCM)的潜热储能来实现的^[34]。张哲等^[35]利用模拟试验台箱体,单独研究了当冷板分布在箱壁两侧时,内部温度场的分布规律,结果表明车厢顶部和中部的温度比较高。在此基础上,研究了紧密堆放和中间留有间隔的堆放方式对箱体内温度场及流场的影响,通过对其温度场的分析,间隔堆放方式的箱内气流更加均匀,故这种堆码方式是最优选择。Roberto 等^[36-37]将部分冷板安装在冷藏箱的侧壁,通过减少外界热量的传入来保证箱体内部温度场的稳定,提高了制冷系统的效率。

为了减小侧置冷板温度场分布不均的问题,李细霞等^[38]选取了 3 种冷板的放置方式,预冷 30 min 后,发现顶置加侧置冷板比其他两种布置方式所形成的温度场更加均匀,也证明了侧置冷板比顶置冷板的制冷效果好,侧置冷板预冷 30 min 后的最高温度为 7.1 °C,而顶置冷板的为 12 °C,说明顶置加侧置冷板的放置方式优于其他两种方式。谢如鹤等^[39-40]通过数值模拟和试验验证了 3 种冷板布置方式在节能和制冷效率方面的异同,分析了冷板冷藏车容积利用率和车辆重心的高低,发现部分顶置和部分侧置冷板的安装方式是最理想的选择。

3 保温材料对蓄冷板式冷藏箱的影响

性能优良的保温材料可延长蓄冷板的蓄冷时间,减少充冷时间,降低蓄冷成本。常用的保温隔热材料有聚氨酯喷涂发泡材料、酚醛树脂保温材料、聚苯乙烯保温材料和真空绝热板材料^[41]。聚氨酯发泡材料保温性能好、化学性能好,不仅耐高温还耐腐蚀,但在低温下的发泡率较低,发泡成型速度快,成型后的形状不易控制。酚醛树脂泡沫保温材料隔热和阻燃性能好^[42]。聚苯乙烯塑料泡

沫因其易燃,需加入阻燃剂,但加入阻燃剂会增加聚苯乙烯的导热性,所以添加的阻燃剂应适量^[43]。潘欣艺等^[44]也研究了上述材料对保温箱温度场的影响,结果表明,采用真空绝热板的保温箱温度分布均匀,保温效果最理想。

真空隔热板(VIP)通常由中部的填充材料和真空外壳组成,其隔热性能是传统隔热材料的 10 倍以上^[45-46]。VIP 优越的隔热性能主要源于其内部的骨架支撑的芯材结构,由将外界与内部空腔隔离的薄膜以及气体吸附剂和干燥剂组成^[47],但外界空气会因薄膜的机械损伤进入内腔,导致 VIP 保温性能下降,内压的增加以及板内芯材吸收内表面上的水引起热导率的增加^[48]。有学者^[48]采用湿法研发了一种化学稳定性好、吸水率低、疏水性好的超细玻璃纤维芯材,可降低因芯材吸水而引起的热导率增加。王保文等^[49]利用干法制备了一种以木纤维为芯材的 VIP,材料成型性较好、隔热性能优、耐磨且防腐性能好。为了延长真空绝热板的使用寿命,邸小波等^[50-51]对气体吸附剂进行改良,设计了一种以 CaO 和 Co₃O₄ 为主要成分的复合气体吸附剂,利用这种混合物质吸附绝热板内残余的气体,维持真空绝热板内的压力稳定,这种复合吸附剂制作工艺简单、价格低廉,拓展了其适用范围。李君等^[52]研究表明,真空绝热板的覆盖范围并非越大越好,当覆盖率为 60% 时,冷藏箱内部温度场基本处于一个稳定的状态。

传统的保温材料因其价格低廉,应用范围比较广,是目前市场中的主流产品,通过对传统保温材料的不断改进、优化,使每种保温材料适用于不同的场合。新型保温材料真空绝热板与传统保温材料相比,其隔热和防腐方面有了很大的提高,但目前蓄冷板式的冷藏箱中并没有使用这种保温材料,主要是因为真空绝热板内芯材制作复杂,不同芯材性能不同,板材制作成型后不可拆卸、成本较高,其制造工艺有待进一步优化。

4 总结与展望

与机械式冷藏箱相比,蓄冷板式冷藏箱耗能少、污染小、成本低,在冷链运输市场中显现出了巨大的市场潜力,今后对蓄冷板式冷藏箱需在以下几方面进行更加系统的研究。

(1) 在复合相变蓄冷材料的基础上,开发研究更加稳定的成核剂,使加入纳米材料的相变蓄冷剂过冷度更小,且不会出现相分离现象,同时要成本低廉、易于制作。完善制备微胶囊相变蓄冷材料的原理和方法,改善促进剂,开发更加安全的有机高分子外壳,起到更好包裹蓄冷材料分子的效果。

(2) 进一步研究冷板的尺寸大小以及形状差异对板式冷藏箱温度场的影响,发展多温共配物流技术,开发出适宜不同种类产品储存、运输的多温区蓄冷式冷藏箱。

结合自动控制技术,研发出温度可控、气体可控、湿度可控等智能化的蓄冷板式冷藏箱。同时可以配置实时监控系統,用户可以通过手机终端了解冷藏箱的位置、冷藏箱内部的温度、湿度等,并对其进行合理的干预。

(3) 一种具有超级保温隔热性能的高分子纳米材料气凝胶以其较好的绝热性能被应用于航空航天、石油化工等领域。气凝胶是一种纳米分子多孔材料,保温机理也是利用纳米孔洞结构中分散的气体介质来绝热保温。随着人们对蓄冷板式冷藏箱保温性能要求的不断提高,可在冷藏箱的箱壁内侧附着一层这种新型气凝胶复合保温隔热涂料,减少对传统保温材料的依赖。

参考文献

- [1] 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(1): 12-21.
- [2] 李月明. 冷藏运输设备用相变蓄冷介质及应用基础研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2015: 18.
- [3] JAMES S J, JAMES C, EVANS J A. Modelling of food transportation systems: A review[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2006, 29(6): 947-957.
- [4] 吴学红, 王春煦, 高茂条, 等. 相变蓄冷技术在食品冷链中的应用进展[J]. *冷藏技术*, 2016(3): 5-11.
- [5] LIU Ming, WASIM Saman, FRANK Bruno. Development of a novel refrigeration system for refrigerated trucks incorporating phase change material[J]. *Applied Energy*, 2012, 92(1): 336-342.
- [6] 刘广海, 吴俊章, FOSTER, 等. 多温蓄冷车设计与车内温度场分析[J]. *农业机械学报*, 2019, 28(4): 309-316.
- [7] SHARMA A, SHUKLA A, CHEN C R, et al. Development of phase change materials (PCMs) for low temperature energy storage applications[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2014, 7(2): 17-21.
- [8] 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, 24(6): 1 820-1 826.
- [9] 陶文博, 谢如鹤. 有机相变蓄冷材料的研究进展[J]. *制冷学报*, 2016, 37(1): 52-59.
- [10] 李金田, 茅靳丰. 无机水合盐三水乙酸钠作相变储热材料的研究进展[J]. *储能科学与技术*, 2018, 16(5): 881-887.
- [11] 吕岩. 常规工况空调有机相变蓄冷材料研究[D]. 天津: 天津大学, 2017: 15.
- [12] 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, 7(1): 68-72.
- [13] 李靖, 谢如鹤, 刘广海, 等. 冷藏运输用新型低温相变材料及装备的研制[J]. *制冷学报*, 2018, 19(4): 32-37.
- [14] YANG Ying, YAN Hong-yuan, SHEN Hai-ying. Development of a low temperature phase transforming composed material for cool storage[J]. *Journal of Superconductivity & Novel Magnetism*, 2010, 23(6): 1 115-1 117.
- [15] 班超方, 卢立新, 潘嘹. 冷冻型复合相变蓄冷材料的制备与性能评价[J]. *化工新型材料*, 2019, 17(5): 218-221.
- [16] ORO E, BARRENECHE C, FARID M M, et al. Experimental study on the selection of phase change materials for low temperature applications[J]. *Renewable Energy*, 2013, 57(2): 130-136.
- [17] 贾蒲悦, 武卫东, 王益聪, 等. 新型复合低温相变蓄冷材料的研制及热物性优化[J]. *化工学报*, 2019, 23(7): 2 758-2 765.
- [18] 刘方方, 刘欣伟, 张紫恒, 等. 果蔬保鲜用相变蓄冷剂的研制及性能研究[J]. *河北科技大学学报*, 2018, 7(6): 540-545.
- [19] 张紫恒. 半纤维素树脂复合相变蓄冷剂的研制及性能研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2017: 38.
- [20] 黄金, 王婷玉. 无机芯微胶囊相变储能材料制备、表征及其热物性研究[J]. *功能材料*, 2013, 12(3): 1 758-1 762.
- [21] REDDY K D, VENKATARAMAIAH P, LOKESH T R. Parametric study on phase change material based thermal energy storage system[J]. *Energy and Power Engineering*, 2014, 6(14): 537-542.
- [22] 王雪松, 谢晶. 蓄冷保温箱的研究进展[J]. *食品与机械*, 2019, 35(8): 232-236.
- [23] BOLIMOWSKI P A, KOZERA R, BOCZKOWSKA A. Poly (urea-formaldehyde) microcapsules-synthesis and influence of stirring speed on capsules size [J]. *Polimery*, 2018, 63(5): 339-346.
- [24] 张晓辰, 刘猛, 范金福, 等. 氯化钾对相变石蜡微胶囊制备的影响研究[J]. *化工新型材料*, 2019(11): 145-148.
- [25] MAHBUBUL I M, SAIDUR R, AMALINA M A. Latest developments on the viscosity of nanofluids [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(4): 874-885.
- [26] GUNTHER E, SCHMID T, MEHLING H, et al. Subcooling in hexadecane emulsions[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2010, 33(8): 1 605-1 611.
- [27] ZHANG Xi-yao, NIU Jian-lei, WU Jian-yong, et al. Suppression of supercooling of PCM-water emulsions using nano-additives[J]. *储能科学与技术*, 2014, 3(2): 133-136.
- [28] MO Song-ping, ZHU Kang-da, TAO Yin, et al. Phase change characteristics of ethylene glycol solution-based nanofluids for subzero thermal energy storage[J]. *International Journal of Energy Research*, 2017, 41(1): 81-91.

- [29] HARIKRISHNAN S, KALAISELVAM S. Preparation and thermal characteristics of CuO-oleic acid nanofluids as a phase change material[J]. *Thermochimica Acta*, 2012, 533(4): 46-55.
- [30] 熊绍森. 纳米流体热物性及相变蓄冷特性研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2018: 32.
- [31] 李新芳, 朱冬生, 付文亭, 等. 纳米复合相变蓄冷材料黏度特性的影响因素分析[J]. *化学世界*, 2017, 11(2): 119-123.
- [32] 赵宁波, 郑洪涛, 李淑英, 等. Al₂O₃-H₂O 纳米流体的热导率与粘度实验研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2018, 7(1): 60-66.
- [33] BHATTAD A, SARKAR J, GHOSH P. Improving the performance of refrigeration systems by using nanofluids: A comprehensive review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82(17): 3 656-3 669.
- [34] DEFRAEYE T, VERBOVEN P, OPARA U L, et al. Feasibility of ambient loading of citrus fruit into refrigerated containers for cooling during marine transport [J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 134(7): 20-30.
- [35] 张哲, 郭永刚, 田津津, 等. 冷板冷藏汽车箱体内部温度场的数值模拟及试验[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(1): 18-24.
- [36] 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(4): 131-141.
- [37] 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(4): 873-881.
- [38] 李细霞, 肖颖, 汤云峰, 等. 分体式冷板冷藏车设计及温度场分析[J]. *包装工程*, 2018(23): 56-61.
- [39] 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(24): 290-298.
- [40] 谢如鹤, 唐海洋, 陶文博, 等. 基于冷冻肉的冷板冷藏车的数值模拟研究[J]. *冷藏技术*, 2017(2): 32-40
- [41] 陈海洋, 张建业. 蓄冷型运输保温箱在冷链中的应用[J]. *冷藏技术*, 2010, 21(3): 12-16.
- [42] 刘娟. 改性酚醛树脂基泡沫材料的制备与性能研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017: 15.
- [43] BOJAN A, ACIU C. Optimal technologies for External thermal insulation with polystyrene panels for different support materials [J]. *Procedia Technology*, 2015, 19: 512-517.
- [44] 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.
- [45] CHOI Bongsu, SONG Tae-ho. Investigation of edge taping method applied to vacuum insulation panels[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 134(4): 52-60.
- [46] KWON J S, JANG C H, JUNG H, et al. Effective thermal conductivity of various filling materials for vacuum insulation panels [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(23): 5 525-5 532.
- [47] 赵炜. 真空绝热板芯材/整体传热性能及新型应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019: 29.
- [48] BRUNNER S, GHAZI WAKILI K. Hints for an additional aging factor regarding the thermal performance of vacuum insulation panels with pyrogenic silica core[J]. *Vacuum*, 2014, 100(2/3): 4-6.
- [49] 王保文. 干法制备木纤维基真空绝热板及其性能优化[D]. 福州: 福建农林大学, 2019: 13.
- [50] 邸小波, 陈照峰. 真空绝热板用复合吸气剂研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2017, 49(1): 24-28.
- [51] DI Xiao-bo, GAO Yi-min, BAO Chong-gao. Thermal insulation property and service life of vacuum insulation panels with glass fiber chopped strand as core materials[J]. *Energy & Buildings*, 2014, 73: 176-183.
- [52] 李君, 栗栋, 王海林, 等. 真空绝热板覆盖率对冷藏箱体内部温度场特性的影响[J]. *食品与机械*, 2016, 32(7): 99-102.

(上接第 208 页)

- [25] 方敏, 曹朝晖, 方垂, 等. 甲壳低聚糖铁(III)硒配合物的制备及其表征[J]. *微量元素与健康研究*, 2004, 21(6): 36-39.
- [26] 高文宏, 何瑞雪, 万真真. 水溶性大豆多糖-铁(III)的制备及结构表征[J]. *华南理工大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(5): 127-132, 144.
- [27] 张曼, 张宇, 徐少博, 等. 平贝母多糖铁配合物的合成、结构特征及抗氧化活性[J/OL]. *食品科学*. (2019-07-12) [2019-12-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20190710.0948.022.html>.
- [28] 万真真, 高文宏, 曾新安. 不同分子量水溶性大豆多糖铁(III)配合物的合成及其抗氧化活性研究[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(16): 109-113.
- [29] 谭西, 周欣, 陈华国. 多糖结构修饰研究进展[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(4): 341-349, 356.