

相变材料在冷藏车中的应用研究

侯法振¹ 张娜祥¹ 宋占涛² 杨春光^{1*}

(1.大连海洋大学机械与动力工程学院, 辽宁 大连 116023; 2.大连双瑞科技有限公司, 辽宁 大连 116600)

摘要: 相变材料可以在特定温度下发生相态变化, 并伴随大量能量的储存和释放, 被应用于冷藏车的制冷系统及围护结构中。介绍相变材料在冷藏车中的应用理论基础, 概括新型相变材料用于蓄冷剂的研究进展、相变材料在车厢厢板上的应用及冷藏车的温度场模拟仿真。

关键词: 相变材料; 蓄冷; 围护结构; 模拟仿真

中图分类号: U469.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-7948 (2021) 07-0078-03

doi: 10.3969/j.issn.1004-7948.2021.07.023

Overview of research on the application of phase change materials in refrigerated vehicles

HOU Fa-zhen ZHANG Na-xiang SONG Zhan-tao YANG Chun-guang

Abstract: Phase change materials can be at a specific temperature phase changes, and accompanied by a large amount of energy storage and release, can be used in refrigerated vehicles in the refrigeration system and the enclosure structure. This paper introduces the theoretical basis of the application of phase change materials in refrigerated vehicles, and summarizes the research progress of new phase change materials for cold storage, the application of phase change materials on the compartment panels and the temperature field simulation of refrigerated vehicles.

Key words: phase change material; cold storage; enclosure; simulation

引言

据我国国家数据网显示, 运输途中仅果蔬腐烂所造成的年损失达1 000亿元以上^[1], 而其中大部分损失是依靠冷链运输避免的。铁路冷链运输由于设备陈旧、不能适应市场等原因, 占市场的份额逐年下降^[2], 公路冷链运输因其灵活方便, 逐渐成为冷链运输的主要运输方式。随着公路冷链运输的快速发展, 冷藏车的制冷系统及围护结构的材料选择逐渐成为当前的研究热点。

1 相变材料用作蓄冷剂的研究现状

相变材料 (PCMs), 可以在特定温度下发生物理相态变化, 并伴随大量能量的储存和释放。按照相变方式, 相变材料可分为固-固相变 (SS)、固-液相变 (SL)、液-气相变 (LG)^[3]。液-气相变对设备要求较高, 实用性不高; 固-固相变的相变潜热较小, 应用范围受到限制; 固-液相变材料相变温度覆盖范围较广, 且相变潜热较大, 相变过程中体积可控, 成为应用最广泛的相变材料。相变材料可在极小温度范围内吸收或释放大热量, 拥有出色的蓄热能力, 同时对环境友好, 适合应用于冷藏车的制冷系统及围护结构中。

冷藏车传统机械式制冷技术已经非常成熟, 具有运行可靠、稳定等优点, 但是制冷需要内燃机提供动力, 内燃机损耗大, 运输里程短, 停车无法制冷^[4]。相变蓄冷是将相变材料应用于冷藏车中, 夜间用电低谷时段给相变蓄冷板充冷, 白天运输过程中释放冷量, 减少白天用电负荷。蓄冷式冷藏车结构简单, 可将制冷装置与冷藏车分离, 增大载货体积, 减少自重, 降低运输制冷成本。

不同运输产品对冷藏温度的需求不尽相同, 单一相变材料相变温度固定, 无法满足多种应用场景。将相变材料进行复合制备, 通过调节各组分的比例改变相变温度, 从而满足各种温度需求。有机复合相变材料的相变温度主要分布在-10~20℃之间, 且大部分在5℃附近^[5], 对于0℃以上的冷藏运输, 有机复合相变材料的研究较多。Wang^[6]等研制87%的辛酸与13%的肉豆蔻酸复合有机相变材料。对比分析膨胀石墨和羟基化多壁碳纳米管对该相变材料导热系数的影响, 最终选择7%的膨胀石墨为添加剂, 导热系数提高235.75%, 能够适用于2~8℃的医药及食品运输。无机复合相变材料的相变温度跨度较大, 最低相变温度可达-60℃, 具有高导热率、无相分离、无过冷等优点, 成为0℃以下冷冻运输蓄冷剂的主要研究对象。Lu^[7]等选用无机盐与有机盐混合溶液作为相变材料, 使用质量分数70%的蒸馏水, 分别用不同比例C₆H₇KO₂、C₄H₄Na₂O₆、C₄H₄Na₂O₄、C₁₀H₁₄N₂Na₂O₈·2H₂O和HCO₂Na, 其余为氯化钾或氯化镁。通过DSC测试, 确定甲酸钠/氯化钾/蒸馏水的质量比为22:8:70时, 该溶液稳定, 相变温度-23.8℃, 相变潜热250.3 J/g, 适用

作者简介: 侯法振 (1996—), 男, 硕士, 研究方向为聚氨酯泡沫与相变储能技术。

通信作者: 杨春光 (1976—), 男, 博士, 教授, 研究方向为相变储能技术。

收稿日期: 2020-11-13

于冷冻食品的运输。Wu^[8]等制备了价格低廉的纳米流体相变材料(NFPCMs)。将质量分数23%无水氯化镁、1%无水氯化钙、0.5%的氢氧化钙加入去离子水中,再加入质量分数1%的多壁碳纳米管(MWCNTs),采用机械搅拌与超声振动相结合的方式完成制备。最终得出相变材料的相变温度-34.54℃,在低温运输及低温冷柜等方面拥有广阔的应用前景。

2 相变材料在车厢围护结构中的应用

夏季冷藏车在运输过程中,阳光照射车厢,大量热量经由厢壁进入车厢内部,导致温度升高,因此车厢围护结构对于冷藏车的保温性能至关重要。将相变材料应用于冷藏车的围护结构,减少通过厢壁传入车厢内部的热量,达到延长保温时间,节约能源的目的。

目前应用较多的相变材料是固-液相变材料,在相变过程中会有液体产生,因此在使用中需要容器进行封装。Ahmed^[9]等将PCM(石蜡)用铜管进行封装并均匀的排布于聚氨酯泡沫中,用于1.22 m³的冷藏模拟车厢。通过与标准冷藏车厢对比,该模拟车厢峰值传热减少29.1%,总传热减少16.3%,效果非常理想。Copertaro^[10]等直接将相变材料RT35HC制成相变层置于外蒙皮与普通隔热层之间,如图1所示。研究发现,相变层的加入可将夏季冷藏车内的热负荷峰值减少20.01%~20.87%,每日减少能量消耗4.55%~4.74%,有效降低能耗,减少温室气体排放。

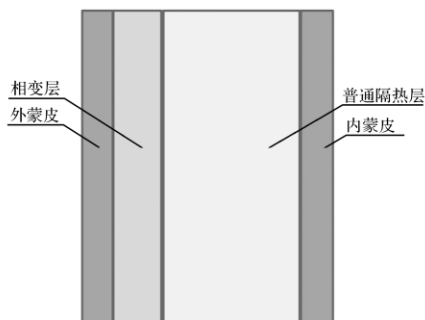


图1 带有相变层的冷藏车围护结构

与宏观封装不同,将相变材料直接掺入聚氨酯发泡体系中制备出复合绝热泡沫,并应用于冷藏车的围护结构。聚氨酯泡沫拥有优秀的绝热能力,是如今使用较多的保温材料,而相变材料有较好的蓄热能力,制得的复合绝热泡沫蓄热能力与隔热能力兼备,有效提高冷藏车的保温性能。Andrea^[11]等将正十四烷相变微胶囊掺入聚氨酯泡中制备出复合绝热泡沫。相比于纯聚氨酯,加入正十四烷可增强温度调节能力,有效增长保温时间,且不会对聚氨酯泡沫的主要性能产生明显影响。该系统对制冷系统停电、开关门等特殊情况具有一定的调节能力。

3 冷藏车的温度场模拟

冷藏车制冷效果的影响因素众多,蓄冷板中相变材料的种类、蓄冷板的位置、甚至是冷藏车的运行速度都

会对制冷效果造成影响。使用CFD可以很好地解决这类问题。CFD是一种流体力学与计算机科学相互交叉产生的新型学科,其核心思路是,在原时间与空间坐标中的连续物理量的场(如速度场、温度场),采取有限个离散值的集合进行替代,建立各离散点上的离散方程,通过方程的求解获得近似解。目前主流的CFD软件主要有CFX、Fluent、FloEFD等,可以很好地模拟冷藏车温度场中的各种问题。

3.1 蓄冷板释冷温度场模拟

蓄冷式冷藏车蓄冷剂的种类对制冷效果影响很大,采用软件模拟可以很好地研究不同蓄冷剂的制冷效果。黄荣鹏^[12]等采用新型相变材料HWY-1作为蓄冷剂,使用Fluent软件模拟冷藏车温度场变化。结果显示,装有蓄冷板的车厢内部温度场呈现条形,且与无蓄冷板的车厢相比,温度明显降低,能够满足食品的运输要求。田津津^[13]等建立NaCl蓄冷板释冷模型,模拟蓄冷板在-30℃的初始温度下,分别在-10℃、0℃及10℃的不同外界温度下的释冷过程。结果显示,当环境温度高于共晶温度时,环境温度越高,共晶冰融化温度越短。Xu^[14]等以NaCl水溶液为相变材料,建立冷藏车的物理模型,研究环境温度分别为20℃、25℃及30℃时,对冷藏车厢内温度以及相变材料融化过程的影响。研究发现,环境温度越高,相变材料到达相变温度的时间越早,融化过程所需时间越短,热流密度越大。上述研究对相变冷藏车的应用有实际意义,可以根据环境温度选择合适的相变材料以及确定冷藏车的工作时间,同时能够更精确地调控车厢内的温度。

3.2 蓄冷板位置的温度场模拟

由于冷藏车厢内货物的摆放及气流变化的影响,车厢内部会有温度场不均匀的现象。通过改变蓄冷板的摆放位置使问题得到改善,模拟仿真可以更加直观地观察出温度场的变化。对3种不同冷板布置进行仿真模拟及试验研究,蓄冷板的3种摆放方式如图2所示。谢如鹤^[15]等发现冷板侧置时车厢内整体温度较低,温度场均匀,但占据货物存放空间;冷板顶置时会提高车辆重心,增加车辆运行风险;冷板部分侧置部分顶置时,能够很好地弥补前两者的缺点。潘欣艺^[16]等使用8块蓄冷板,采取4种不同的摆放方式,分别为两种侧面放置、顶部放置以及边缘放置,如图3所示。对保温箱的保温过程进行模拟后发现,顶部摆放,箱内温度最低且温度场较为均匀。通过总结发现,蓄冷板的摆放位置及方式对温度影响很大,二者模型虽不相同,但是模拟结果却较为类似,都是蓄冷板部分顶置部分侧置时最为理想,既能保证温度场的均匀,也能尽量节省车厢载货面积。未来蓄冷板位置设计可优先考虑部分顶置、部分侧置的设计方式,但具体的设计细节需要通过车厢的尺寸、制冷所需温度、蓄冷剂的种类及蓄冷板的尺寸等因素综合考虑。

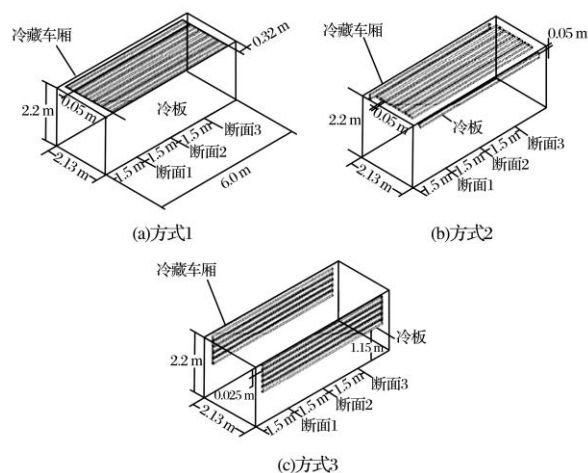


图2 蓄冷板的3种摆放方式

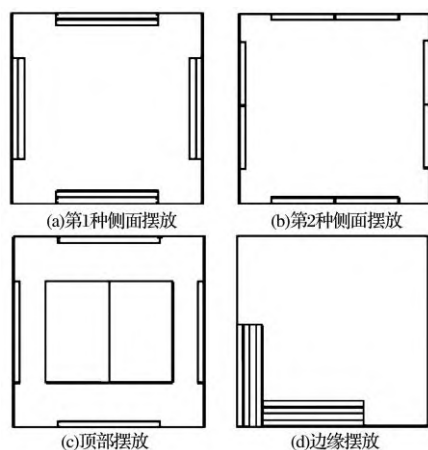


图3 蓄冷板的4种摆放方式

4 结语

随着冷藏车市场的逐渐扩大,对于冷藏车的节能环保愈发重视,相变材料因其优秀的蓄热能力必将成为冷藏车的发展热点。下一阶段的研究方向主要分为以下几点:

(1) 通过研究新型相变材料用作蓄冷剂,保证更加严格的货品运输温度需求。同时改进相变材料的性能,克服冷却速度慢等缺点。

(2) 通过改变蓄冷剂的封装方式、蓄冷板的摆放方式及摆放位置等,解决车厢内温度不均、占用空间大等问题。

(3) 将相变材料应用于车厢维护结构中,通过改变相变材料的种类、使用方式、使用位置及厚度等,达到更好的保温效果。

参考文献

- [1] 齐馨.我国低温冷藏车研究综述[J].企业技术开发,2015,34(30):3-4.
- [2] Zhao H X. An overview of current status of cold chain in China[J]. International Journal of Refrigeration, 2018(88): 483-495.
- [3] 白钢.石蜡相变复合储能材料的制备及其应用研究[D].沈阳:辽宁大学,2019.
- [4] 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.
- [5] 杨天润,孙铤,程林,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.

- [6] Wang Y H, Zhang X L. Thermal conductivity modification of n-octanoic acid-myristic acid composite phase change material [J]. Journal of Molecular Liquids, 2019(288): 92-111.
- [7] Lu W, Liu G Z. Investigation on ternary salt-water solutions as phase change materials for cold storage [J]. Energy Procedia, 2019 (158): 5020-5025.
- [8] Wu T, Xie N. Preparation of a low-temperature nanofluid phase change material: $\text{MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ eutectic salt solution system with multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) [J]. International Journal of Refrigeration, 2020(113): 136-144.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Andrea T, Antonella T, Alessandra P, et al. Thermographic analysis of polyurethane foams integrated with phase change materials designed for dynamic thermal insulation in refrigerated transport [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 70(1): 201-210.
- [12] 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, 37.
- [13] 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.
- [14] Xu X F, Zhang X L, Jotham M M. Simulation study on temperature field and cold plate melting of cold storage refrigerator car [J]. Energy Procedia, 2017(142): 3394-3400.
- [15] 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.
- [16] 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.