

用于冷链物流运输的蓄冷材料的研究进展

莫茂杰¹, 黄 梦², 王军涛^{1*}

¹湖北科技学院核技术与化学生物学院, 湖北 咸宁

²湖北省康德森新能源有限责任公司, 湖北 咸宁

收稿日期: 2025年10月6日; 录用日期: 2025年10月31日; 发布日期: 2025年11月10日

摘 要

随着生鲜电商、医药生物冷链等行业的快速发展, 蓄冷材料在冷链物流运输中的重要性日益凸显。分析了相变蓄冷材料、复合蓄冷材料、生物基蓄冷材料等主要类型的研究应用进展, 重点分析了其相变温度调控、热力学性能优化及规模化应用等主要技术参数。研究表明, 通过微胶囊化技术、多孔基质复合等手段, 可显著提升蓄冷材料的循环稳定性和能量密度, 并具有较好的环保特性。此外, 数值模拟与实验验证的结合为材料性能预测提供了新思路, 但成本控制与标准化仍是制约产业化的主要瓶颈。未来研究需进一步探索多功能集成材料开发及全生命周期评价, 以推动冷链物流的绿色高效发展。

关键词

冷链运输, 物流, 蓄冷, 相变

Research Progress on Cold Storage Materials for Cold Chain Logistics Transportation

Maojie Mo¹, Meng Huang², Juntao Wang^{1*}

¹School of Nuclear Technology and Chemistry & Biology, Hubei University of Science and Technology, Xianning Hubei

²Hubei Kangdesen New Energy Co., Ltd., Xianning Hubei

Received: October 6, 2025; accepted: October 31, 2025; published: November 10, 2025

Abstract

With the rapid development of industries such as fresh food e-commerce and pharmaceutical and biological cold chain, the importance of cold storage materials in cold chain logistics transportation has become increasingly prominent. The research and application progress of major types such as

*通讯作者。

文章引用: 莫茂杰, 黄梦, 王军涛. 用于冷链物流运输的蓄冷材料的研究进展[J]. 材料科学, 2025, 15(11): 2007-2015.
DOI: 10.12677/ms.2025.1511213

phase change cold storage materials, composite cold storage materials, and bio-based cold storage materials were analyzed, with a focus on the main technical parameters such as phase change temperature regulation, thermodynamic performance optimization, and large-scale application. Research shows that through microencapsulation technology, porous matrix composite and other means, the cycling stability and energy density of cold storage materials can be significantly improved, and they also have good environmental protection characteristics. In addition, the combination of numerical simulation and experimental verification provides new ideas for material performance prediction, but cost control and standardization remain the main bottlenecks restricting industrialization. Future research needs to further explore the development of multifunctional integrated materials and their full life cycle assessment to promote the green and efficient development of cold chain logistics.

Keywords

Cold Chain Transportation, Logistics, Cold Storage, Phase Change

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

冷链物流所使用的蓄冷材料是一种能通过吸收、储存、缓慢释放冷量，从而维持运输和储存过程中所需的特定低温环境的功能性材料。其核心材料为相变蓄冷材料(PCM)，需要达到较低的相变温度是最核心的物理要求[1]，相变温度直接决定了相变蓄冷材料所使用的场景，而相变潜热是其性能的主要核心参数。

良好的相变储能材料还需要满足以下几方面的要求[2]：

- 1) 较高的相变潜热值；
- 2) 反复多次相变后无沉淀、分层现象；
- 3) 相变后体积膨胀率低以保护储存装置；
- 4) 良好的化学稳定性，在充放冷的循环中不发生分解或化学结构的变化；
- 5) 无毒、无异味、无腐蚀性、环保。

2. 蓄冷材料的分类

2.1. 根据材料成分分类

常见蓄冷材料有以下几类：

- 1) 有机相变蓄冷材料，其优点为相变潜热大、化学稳定性好、无毒、不腐蚀、相变过程中体积变化率小；缺点为导热系数低，常需添加导热增强剂。
- 2) 无机相变蓄冷材料，其主要成分为水合盐和熔融盐；优点为相变潜热高，导热系数大，成本低；缺点为易发生“相分离”和“过冷现象”。且某些盐具有腐蚀性。
- 3) 复合相变蓄冷材料，其主要成分为有机 - 无机复合、基料 + 功能添加剂；其综合性能优异，无明显短板，但制备工艺复杂，成本较高。
- 4) 高分子相变蓄冷材料，其优点在于形态稳定性极佳、循环性能优异、安全性高；缺点为导热系数低、成本较高。

2.2. 根据蓄冷材料的用途来分类

- 常见蓄冷材料按照其应用领域可以分为以下三类：
- 1) 果蔬作为易腐烂的产品，运输时需要保持特定低温环境，其需维持的温度为 0℃~10℃，维持好特定温度以减少果蔬的损耗。
 - 2) 生鲜肉类对运输的要求十分严苛，为了保证生鲜的新鲜程度，要求在较低的温度下冷藏，需要把冷藏温度维持在-18℃以下，一些特殊的水产品则需要达到-50℃以下。
 - 3) 医疗生物疫苗对运输的要求也及其苛刻，属于医疗危险品，必须满足运输条件，需维持的冷藏为，疫苗类需要 2℃~8℃，生物制品需要-10℃~0℃，一些特殊药品更低需要至-25℃及以下。

2.3. 常见蓄冷材料的制备方法

常见的相变蓄冷材料制备方法主要包括以下几种技术路线。

2.3.1. 熔融共混法

通过将相变材料与基体材料(如高分子聚合物)熔融混合，形成均匀的复合体系。该方法适用于低温定形相变材料制备，例如石蜡与聚乙烯的共混体系。

2.3.2. 混合烧结法

将微米级基体材料与相变材料球磨混合后压制成型，再经烧结得到高温相变储能材料。例如膨胀石墨与共晶盐的复合体系，通过表面改性提升相容性后烧结，导热系数可达 8.90 W/(m·K)。

2.3.3. 微胶囊封装技术

以相变材料为核心，将其制备成高度分散的小颗粒，利用聚合反应在其表面生成壳层包覆起来，得到微胶囊。反应示意图如图 1 所示：

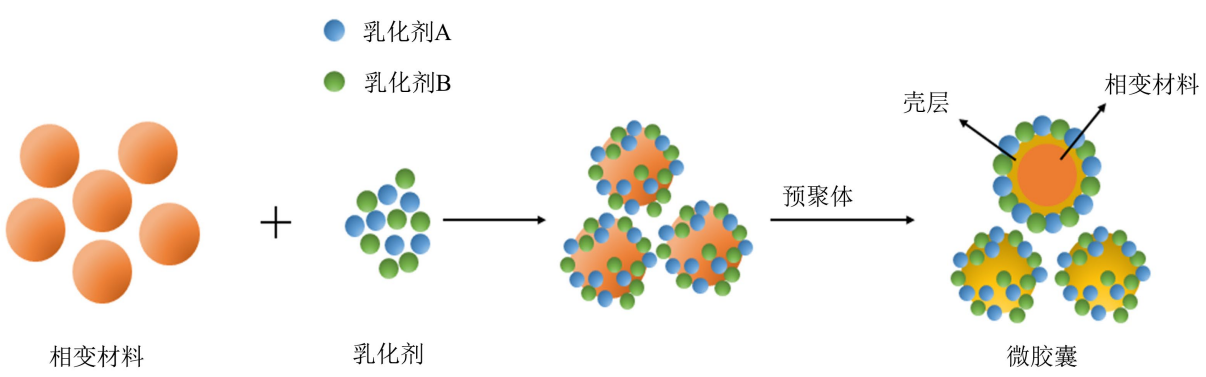


Figure 1. Schematic diagram of preparation of phase change microcapsules
图 1. 制备相变微胶囊示意图

2.3.4. 多孔基质浸渍法

将相变材料灌注到多孔基体(如泡沫金属、膨胀石墨)中，通过毛细作用固定液相。例如：改性膨胀石墨吸附共晶盐后，吸附容量可达 80.71 wt%，过冷度仅 1.83℃。

2.3.5. 化学合成法

通过化学反应制备新型相变材料，如有机酸钠盐与乙二醇的复合体系，相变温度可调至-25℃到-12℃之间，相变焓大于 100 kJ/kg。

3. 蓄冷材料的研究进展

3.1. 果蔬类冷链蓄冷材料

果蔬作为易腐烂的农产品,在运输过程中极易损耗,为了降低其损耗率,运输过程中必须采取冷链运输,以此保证果蔬质量,减少损耗。以下将对其冷链运输中的蓄冷材料展开讨论,常见的蓄冷材料即为水合盐相变蓄冷材料,在冷藏运输中,冷藏蔬果视品种、运输距离不同而异,厢体内温度在 $0^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$,以下收集了一些可应用于果蔬冷链运输的蓄冷材料的研究。

方崱[2]制备了芒硝 + 硼砂 + 氯化钠 + 氯化钾 + 聚丙烯酰胺/膨胀石墨(EG)定型复合蓄冷材料,并探究 EG 与蓄冷剂耦合的最佳比及其热物性能,研究发现,当添加 50 目 12% 的 EG 时,定型蓄冷剂性能最佳且能有效提高热导系数,此时相变温度 5.9°C ,相变潜热为 108.6 J/g ,随着 EG 目数的增加会导致相变温度与相变潜热的降低和过冷度的增加 EG 吸附后试纸的泄漏情况较未吸附要好,证明 EG 可作为骨架支撑相变材料的定型防止泄漏。此研究可帮助解决冷链运输中无机水合盐易泄漏的问题,为无机水合盐定型的发展做出重要参考。

孔琪[3]采用反相悬浮聚合法制备 SAR 的条件进行了优化,提升吸水树脂(Superabsorbent Resin, SAR)的吸水能力,增加其用作蓄冷材料的潜热。并通过实验得出制备 SAR 的最优反应条件为:交联剂为单体丙烯酸(AA)质量的 0.06%,引发剂 0.9%,分散剂 4.38%,淀粉 10%,中和度 75%,反应单体 AMPS: AA 为 1:10,反应温度 65°C ,可将保温箱中的温度保持在 10°C 以下,保证果蔬的新鲜度。

竟浩通[4]利用差示扫描量热法,确定具有合适相变温度($-3^{\circ}\text{C}\sim 1^{\circ}\text{C}$)、相变潜热较大且价格较低的乙二醇为主基液,通过添加不同类型的成核剂,促进主基液结晶,对较佳配方的蓄冷材料进行性能研究。结果表明,当山梨醇($\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_6$)。作为成核剂,且与乙二醇,的质量百分比为 1:5 时,相变蓄冷材料的相变潜热为 235.637 J/g ,相变温度为 -1.51°C ,并且没有过冷和相分离现象。此方法安全性高且操作简单,满足果蔬冷链物流的基本要求。

李梦欣[5]制备出了一种以 $\text{Na}_2\text{SO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 为蓄冷基底材料的复合无机盐相变材料改性后的复合无机盐体系最终配比为 $32\%\text{ Na}_2\text{SO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O} + 48\%\text{ Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O} + 16\%\text{ NH}_4\text{Cl} + 1.6\%\text{ 硼砂} + 1.6\%\text{ CMC} + 0.8\%\text{ 纳米 TiO}_2$,相变温度为 $6.1^{\circ}\text{C}\sim 6.3^{\circ}\text{C}$,相变潜热为 $130\sim 139\text{ J/g}$,过冷度低于 0.5°C ,无相分离现象,液相导热系数为 $0.7989\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,经过 50 次循环后,具有良好的热稳定性。

张敏[6]采用熔融 - 冷却法将三水乙酸钠和十水硫酸钠两种无机水合盐作为相变材料,混合制备成共晶盐,硼砂添加量为 3 wt% 时,共晶盐过冷度最低,为 1.4°C 。向共晶盐中加入羧甲基纤维素钠,当其含量为 1.5 wt% 时,相分离现象完全消除,同时该体系共晶盐的过冷度进一步降低到 0.8°C 。

杨晋[7]提出一种以十水硫酸钠为主材的相变蓄冷材料新型制备配方,并对材料的各方面性能加以优化。经过优化后相变温度为 7.4°C ,相变潜热为 117.4 J/g ,热导率为 $1.876\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,经 200 次循环后材料的相变温度保持稳定,潜热衰减率为 14.05%。

叶荣达[8]制备出一种具有适宜相变温度和潜热值的十水硫酸钠相变蓄冷材料,经过实验十水硫酸钠水合盐体系的最优配比为:4% 硼砂 + 0.75% 聚丙烯酸钠 + 15% 氯化铵 + 5% 氯化钾,此时相变体系基本无过冷和相分离,相变温度为 11.42°C ,相变焓为 97.99 J/g ,且具有稳定的化学性质。

朱奥昌[9]制备了一种新型三元水盐共晶相变凝胶。该复合材料中凝胶基质的最佳含量为 12%,相变温度为 -12.44°C ,潜热为 138.9 J/g 。通过 DSC 测试和冷却曲线,确定硼砂的最佳含量为 2%,复合相变材料的过冷度降至 1.4°C 。润湿性测试表明, DSSSW 与 AMSCA 相容性良好,分子间吸引力较强。DSSSW2-12% AMSCA 的导热系数高于其他复合材料,达到 $0.311\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。DSSSW2-12% AMSCA 经过 300 次 DSC 循环后,相变温度和潜热波动较小,表明水凝胶结构能够抑制相分离,提高循环稳定性。此外,设

计 DSSSW2-12% AMSCA 的水果保鲜实验, 结果显示其能成功对香蕉进行制冷, 延长保鲜时间。

张世华[10]研究了纳米材料对癸酸-辛酸(DA-CA)二元共晶混合物热行为的影响。分别向 DA-CA 中添加不同的高导热纳米材料, 包括纳米氧化铁、纳米铜、羟基化多壁碳纳米管(MWCNT-OH)以及分散剂司盘-60。采用超声振荡法制备纳米材料增强相变材料(NePCMs), 从纳米材料的种类和浓度两个方面, 研究了纳米材料对 DA-CA 蓄冷性能的影响。随着纳米材料质量浓度的增加, 导热系数先增大后逐渐趋于稳定, Fe_2O_3 的热性能最佳, 其导热系数提高了 36.8%, 蓄热时间缩短了 38%。

Sarafoji [11]以月桂醇-癸酸(LA-CA)按 53:47 的重量比组成二元混合物, 提出一种新型相变材料, 向该相变材料混合物中添加 0.25 wt% 的二氧化钛(TiO_2)和氧化铜(CuO)纳米颗粒。对月桂醇-癸酸混合物进行化学和热学表征。合成的相变材料混合物的熔化温度为 9.57°C , 潜热为 159.4 J/g 。掺入纳米颗粒后, 所制备的月桂醇-癸酸/氧化铜相变材料的导热系数提高了 17.56%, 熔化温度为 8.7°C , 潜热为 159.1 J/g 。

3.2. 生鲜冷冻蓄冷材料

目前我国对生鲜肉类的质量把控非常严格, 如刚生产出来的生鲜肉类食品需要运输到各地贩卖, 使用等, 必须经过冷链运输, 而肉类需要的冷藏温度较低, 因此对蓄冷材料的要求非常严格, 其冷藏温度必须达到 -18°C 以下, 一些特殊水产品需要达到 -50°C 以下, 以下展开对蓄冷材料相变温度的讨论。

金云飞[12]将甲酸钠(HCOONa)、氯化铵(NH_4Cl)和水混合组成新型复合相变蓄冷材料 SF70 ($\text{HCOONa-NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ 质量比为 2:1:7), 并以 SF70 为基液, 添加纳米粒子、增稠剂对其过冷度、导热系数及相分离现象进行优化, 对优化后的材料进行循环性能实验及保温箱应用实验; 经过实验得出添加质量分数为 1% 的 PAAS 增稠剂能有效消除复合材料的相分离现象, 优化得出最终的材料 SF70 + 0.4% TiO_2 + 1% PAAS 其相变温度为 -29.9°C 、潜热为 255 kJ/kg 、过冷度为 2.8°C 、导热系数为 $0.6522 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 复合材料热性能稳定。

刘凯[13]将盐水限制在聚丙烯酸钠-海藻酸钙网络中, 并结合膨胀石墨的多孔吸附作用, 制备出相变蓄热凝胶。该材料具有无泄漏特性, 质量保留率接近 100%。添加膨胀石墨后, 导热系数从 $0.542 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 提升至极高的 $2.766 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (提升了 510%)。蓄冷盐水凝胶的焓值高达 $144 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$, 能在 -24°C 左右稳定释冷。通过调控蓄冷工作介质的分布, 可将装置内部的最小温差从 6.7°C 降至约 1°C 。

周志钢[14]提出将三羟甲基丙烷、氯化铵、水组成三元复合相变蓄冷材料, 利用差示扫描量热仪筛选得到了性能较为优异的复合材料, 其质量比为 1:2:7 相变温度为 -19.4°C , 潜热焓为 250.5 kJ/kg 。通过实验发现, TiO_2 纳米颗粒质量分数在 0.4% 时, 过冷度降低效果最佳。由此可见, 在一定范围内减小降温速率, 增大冷却介质温度和容器尺寸, 添加一定量的 TiO_2 纳米颗粒, 可有效降低相变蓄冷材料的过冷度。

3.3. 医疗类冷链蓄冷材料

我国经过 2016 年山东省发生的“疫苗事件”及 2019 年新冠疫情和疫情中的疫苗运输, 对医疗冷链运输越来越重视。在医药冷链运输中合理选择蓄冷材料是保证疫苗质量的重要环节。医疗类冷链运输需要的相变温度范围较大, 如疫苗类需要 $2^\circ\text{C}\sim 8^\circ\text{C}$, 生物制品需要 $-10^\circ\text{C}\sim 0^\circ\text{C}$, 一些特殊药品需要低至 -25°C 及以下。

张子晴[15]选用十四烷为相变材料, 聚山梨酯(吐温 80)和山梨醇酐单油酸酯(司班 80)作乳化剂, 通过高速剪切均质法制备了一种相变蓄冷乳液最佳制备条件为 HLB 为 12、乳化剂质量含量为 8%、相变材料质量含量为 20%、剪切速率为 1800 r/m 和乳化时间为 10 min , 其温度可以保持在 2.73°C 。

王晓杰[16]以浓度 99% 的 THF 和去离子水作为核心基液, 以氯化钠作为温度调节剂, 选用 3 种不同质量分数(3%、6%、9%)的聚乙烯醇作为增稠剂, 研制出了一种高效且性能稳定的相变蓄冷材料。实验得

出, 壬酸的加入能显著降低相变材料的过冷度(近乎降至零), 从而使 PCM 材料表现出理想的相变特性, 相变温度稳定在 6.3℃~8.0℃的范围内, 其相变潜热值为 115 J·g⁻¹ 左右, 表明其具有较高的能量存储密度。

成峰[17]设计了应用相变材料模块的药品保温冷藏箱。使用了聚氨酯泡沫作为保温材料, 通过保温材料不同的摆放方式进行实验, 实验测量了医药运输冷藏箱中蓄冷板两侧摆放、四周摆放和上下摆放对箱内中心温度和壁面温度的影响。结果表明, 上下摆放更利于箱体的快速降温, 且箱体中间温度最低。

王莉[18]自行研制出一种-10℃以下的癸酸和 Na₂HPO₄·12H₂O 混合制作凝胶状低温相变材料, 利用 DSC 测试法, 最终得到相变温度为-14.8℃、相变潜热 225.9 kJ/kg、导热率为 0.57 W/(m·K)的低温相变材料。

刘笛[19]研制了一种以乳酸钙水溶液为主储能剂, 氯化铵水溶液为降温剂, 高吸水树脂为增稠剂的复合相变蓄冷材料, 测试蓄冷材料的相变温度、相变潜热、腐蚀性、导热性和稳定性乳酸钙质量分数为 1%, 氯化铵质量分数为 1%, 高吸水树脂质量分数为 2.2%时, 复合相变蓄冷材料 Onset 温度为-4.45℃, 相变潜热为 300.8 J/g, 导热系数为 4.671 W/(m·K)。铜铁在其中基本无腐蚀, 该材料化学性质稳定。

董月霞[20]研制了一种低温复合相变蓄冷材料, 该材料以甘露醇水溶液为主储能剂, 以氯化钾水溶液为降温剂, 以高吸水树脂为增稠剂。最终复合蓄冷材料的配比为 3%甘露醇 + 2%氯化钾 + 1.8%高吸水树脂, 其余为蒸馏水。DSC 实验发现 Onset 温度为-5.5℃, 相变潜热为 295.7 J/g, 无过冷度, 导热系数为 5.065 W/(m·K), 复合材料对金属片铜片和铝片基本无腐蚀, 且通过 50 次循环实验表明材料稳定性好, 无相分离, 可以很好的应用于医疗冷链运输和某些生鲜中。

张雪冰[21]为探究质量分数对 SH-7 溶液热物性的影响, 对质量分数为 5%、10%、15%、20%以及 25% 的 SH-7 溶液进行了热物性参数的试验研究。实验结果表明, 溶液的相变温度、相变潜热、导热系数以及释冷时间均随质量分数的增大而减小, 而过冷度无明显变化规律。当质量分数为 5%时, 溶液的热物性最佳, 其相变温度为-3.47℃, 相变潜热为 267.5 J/g, 导热系数为 0.5268 W/(m·K)。

娄连心[22]以四丁基溴化铵(TBAB)、四丁基硫酸氢铵(TBAHSO₄)为相变材料, 通过添加成核剂三氧化二铝(Al₂O₃)和增稠剂羧甲基纤维素钠(CMC), 有效减小过冷率并抑制相分离, 成功制备了适用于冷链运输的 TBAB/TBAHSO₄ 水合物复合相变材料。通过实验得出, 此材料的熔化温度在 6.10℃, 相变焓值为 169.23 J·g⁻¹, 可应用于果蔬的冷链运输中。

郑慧凡[23]搭建了一套太阳能喷射 - 压缩复合制冷系统, 核心工作蓄冷介质采用相变微胶囊。微胶囊的合成是以去离子水为溶剂, 添加一定量的十二烷基硫酸钠、黄原胶和氯化钠。以制备的微胶囊为工作介质, 研究了在蒸发温度为-5℃和-10℃、悬浮液质量分数为 10%和 15%的条件下, 太阳能制冷系统的运行特性及相变材料蓄冷性能的变化规律, 测试结果表明该制冷系统的工作性能良好。

Sundaram [24]探究石墨烯 - 水基纳米流体相变材料(NFPCM)与不同类型表面活性剂结合用于冷蓄热(CTS)系统的热性能。将石墨烯纳米片(GnPs)分散在去离子水中, 并添加常用的表面活性剂。通过 zet 在 -7℃的冷却浴温度下, 于球形容器中进行冻结实验, 结果表明表面活性剂对过冷速率和冻结时间有显著影响 a 电位和粒径分布分析了不同表面活性剂对石墨烯纳米片纳米流体胶体溶液稳定性的影响。所制备的纳米流体相变材料因其增强的热传输性能, 可应用于冷蓄热系统, 以提高节能潜力。

Sundaram [25]利用天然树胶作为成核剂(阿拉伯树胶(GA))和高导电纳米材料(石墨烯纳米片(GnPs))来增强去离子水的热传输性能。采用两步合成法制备了不同质量浓度(即 0.25%、0.50%、0.75%和 1.00%)的石墨烯纳米片纳米流体相变材料(NFPCMs)。通过 zeta 电位、紫外 - 可见分光光度法和目视检查等方法分析纳米流体相变材料随时间的稳定性。在-5℃时最大提高了 54.4%。在-7℃的环境浴温下, 在球形封装中进行冻结实验, 研究了纳米流体相变材料的温度 - 时间历程。

翟新宇[26]于聚氨酯泡沫中,制备用于冷链运输的复合材料。微胶囊相变材料(MEPCMs)的芯材为经纳米氧化铜改性的十二烷;壁材为经碳纳米管(CNTs)改性的三聚氰胺-甲醛(MF)树脂。通过扫描电子显微镜、红外光谱、X 射线衍射、差示扫描量热法、热重分析仪等实验技术对微胶囊相变材料及复合材料的综合性能进行了测试。基于含 10.3% MEPCMs 的复合材料设计便携式疫苗冷藏箱,其蓄冷量达 72 kJ,较无复合材料的冷藏箱提升 85%,可在冷链运输中为疫苗(如 Moderna 疫苗需-20℃冷藏)提供低温环境。

秦琴[27]制备了两种复合相变材料:癸醇-膨胀石墨复合材料、癸醇-二氧化硅气凝胶复合材料,膨胀石墨和二氧化硅在复合材料中的最佳含量分别为 9%和 14%。运用冷链运输便携箱对制备的两种复合相变材料进行了性能测试,结果表明:在无任何冷却系统的情况下,能有效维持箱内的温度达数小时,证明这两种产品在冷链运输中具有一定的应用前景。

4. 常见蓄冷材料总结

研究者竞相开发出了适用于各种场景的相变蓄冷材料,常见的相变蓄冷材料总结见下表 1。

Table 1. Common cold storage materials
表 1. 常见蓄冷材料

材料配方	使用温度 范围/℃	相变温度/℃	相变潜热/J/g	导热系数/ W/(m·K)	过冷度/℃	文献 编号
山梨醇 + 乙二醇	-3~1	-1.51	254.0	-	-	[4]
芒硝 + 硼砂 + 氯化钠+氯化钾 + 聚丙烯酰胺/膨胀石墨	5~10	5.9	108.6	1.879	1.67	[2]
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O + Na ₂ HPO ₄ ·12H ₂ O + NH ₄ Cl + 硼砂 + CMC + 纳米 TiO ₂	0~6.3	6.1~6.3	130~139	0.7989	<0.5	[5]
硼砂 + 聚丙烯酸钠 + 氯化铵 + 氯化钾	0~11.42	11.42	97.99		0.2	[6]
DSSSW + AMSCA	-12.44~0	-12.44	138.9	0.311	1.4	[9]
桂醇 + 癸酸	0~8.7	8.7	159.1			[11]
甲酸钠 + 氯化铵	-29.9~-18	-29.9	255	0.6522	2.8	[12]
盐水 + 聚丙烯酸钠-海藻酸钙 + 膨胀石墨	-24~-18	-24	144	2.766	1	[13]
三羟甲基丙烷 + 氯化铵 + 水	-19.4~-18	-19.4	250.5	-	-	[14]
THF + 水	2~8	6.3~8.0	115	-	-	[16]
癸酸 + Na ₂ HPO ₄ ·12H ₂ O	-14.8~0	-14.8	225.9	0.57	-	[18]
乳酸钙 + 水 + 氯化铵	-4.45~0	-4.45	300.8	4.671	-	[19]
甘露醇 + 水 + 氯化钾	-5.5~0	-5.5	295.7	5.065	-	[20]
SH-7 溶液	-3.47~0	-3.47	267.5	0.5268	-	[21]

5. 结论与展望

随着人们生活质量的提高、医疗科技的进步,冷链运输已经是社会发展不可或缺的重要部分,因此,推动冷链运输的发展也是重中之重,所以,相变蓄冷材料在冷链运输领域有着很好的发展前景。但目前相变蓄冷材料在冷链运输中还存在许多使用限制条件和材料自身的缺陷,且需研发更好的温度调控方法,以下简要总结了目前蓄冷材料在冷链运输中的发展方向。

1) 开发基于机器学习/高通量计算的 PCM 配方筛选平台, 以加速新型共晶体系的发现, 以便更加高效快速开发新型相变蓄冷材料。

2) 研究动态可调相变温度的智能蓄冷材料, 提高相变潜热、导热率和循环性能, 以适应运输中多温区变化的需求。

3) 建立标准化的 PCM 全生命周期评价(LCA)方法学, 量化其环境足迹与经济效益, 为绿色冷链提供决策依据。

4) 需要拓宽相变蓄冷材料在医疗冷链的应用, 生物疫苗等医疗类物品, 对冷链运输中温度的要求十分严苛, 且作为生活中的必需品, 相变蓄冷材料在医疗冷链中有巨大的发展潜力。

5) 需要应对目前节能减排的发展趋势, 研发出的相变蓄冷材料尽可能地做到无毒、无异味和可降解、可重复利用, 保护好环境才能更好的发展相变蓄冷材料在冷链运输中的应用。

基金项目

本项目获湖北科技学院横向科研项目(2024HX202, 2023HX244, 2022HX004, 2019HX074), 湖北科技学院校级科研项目(2019-21GP07, 2021-23GP02)支持。

参考文献

- [1] 戴照峰, 姜竹, 赵东亮, 等. 果蔬用冷库相变材料研制及其系统应用[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(12): 3720-3729.
- [2] 方崱, 罗孝学, 李珠等. EG 定型冷链蓄冷材料的制备及性能研究[J]. 应用化工, 2025, 54(1): 147-151.
- [3] 孔琪, 穆宏磊, 韩延超, 等. 反相悬浮聚合法制备相变蓄冷材料及其应用[J]. 食品工业科技, 2021, 42(24): 284-292.
- [4] 竟浩通, 罗孝学, 万红, 等. 海运果蔬保鲜相变蓄冷材料的制备与研究[J]. 北部湾大学学报, 2024, 39(4): 22-28.
- [5] 李梦欣, 陈鹏, 吕钟灵, 等. 复合无机盐相变蓄冷材料的制备与改性研究[J]. 制冷学报, 2021, 42(4): 106-115.
- [6] 张敏. $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O} \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ /膨胀珍珠岩复合相变储热材料的制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- [7] 杨晋. 空调用水合盐相变蓄冷材料的制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2022.
- [8] 叶荣达, 王军, 孙婉纯, 等. 十水硫酸钠相变蓄冷材料的制备及性能研究[J]. 当代化工研究, 2023(23): 176-178.
- [9] Zhu, A., Xie, B., Cao, P., Xie, X., Li, J., He, Y., *et al.* (2024) Novel Ternary Inorganic Phase Change Gels for Cold Energy Storage. *Journal of Energy Storage*, **100**, Article ID: 113482. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113482>
- [10] Zhang, S., Zhang, H., Liu, M., Yuan, Q., Jiang, W., Shi, C., *et al.* (2024) Ultrastrong, High-Barrier, and Transparent Poly(Butylene Adipate-co-Terephthalate) Achieved via Ligament Relaxation-Inspired Calendaring in the Cold Solid-state. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **12**, 17891-17900. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c07814>
- [11] Sarafoji, P., Mariappan, V., Anish, R., Karthikeyan, K. and Kalidoss, P. (2022) Characterization and Thermal Properties of Lauryl Alcohol—Capric Acid with CuO and TiO₂ Nanoparticles as Phase Change Material for Cold Storage System. *Materials Letters*, **316**, Article ID: 132052. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132052>
- [12] 金云飞, 武卫东, 伏舜宇, 等. 低温冷链物流用相变材料的优化及应用[J]. 制冷学报, 2021, 42(6): 106-113.
- [13] Liu, K., Wang, L., He, Z., Lin, P. and Chen, Y. (2024) Efficient Utilization of Cold Energy Enabled by Phase Change Cold Storage Brine Gels with Superior Thermophysical Properties Towards Biochemical Reagent Cold Chain. *Applied Energy*, **371**, Article ID: 123725. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123725>
- [14] 周志钢, 朱群东, 武卫东. 新型冷链物流用复合相变材料制备及过冷度影响因素[J]. 上海理工大学学报, 2021, 43(3): 241-248.
- [15] 张子晴, 雷宪章, 李林辉, 等. 十四烷相变蓄冷乳液的制备及物性研究[J]. 化工新型材料, 2024, 52(S2): 92-98.
- [16] 王晓杰, 罗孝学, 韩晓春, 等. 基于四氢呋喃的相变蓄冷材料的制备及其性能研究[J]. 材料研究与应用, 2025, 19(3): 554-560.
- [17] 成峰, 王瑜, 吴露露. 应用相变材料的药品运输冷藏箱设计与性能实验[J]. 冷藏技术, 2021, 44(1): 15-19.

-
- [18] 王莉, 陆威, 邢向海. 新型低温复合相变蓄冷材料的研制[J]. 广州化学, 2021, 46(4): 50-56.
- [19] 刘笛, 何少勇, 董月霞, 等. 乳酸钙复合相变蓄冷材料的制备及性能研究[J]. 冷藏技术, 2024, 47(2): 28-34.
- [20] 董月霞, 何少勇, 刘笛, 等. 甘露醇复合相变蓄冷材料的制备及性能研究[J]. 冷藏技术, 2024, 47(1): 26-32.
- [21] 张雪冰, 张云照, 刘斌, 等. 低温相变蓄冷材料 SH-7 热物性研究[J]. 计量学报, 2025, 46(4): 580-586.
- [22] 娄连心, 闻晶, 杨铭昭, 等. TBAB/TBAHSO₄ 水合物复合相变材料的合成及其控温性能[J]. 功能材料与器件学报, 2025, 31(4): 317-324.
- [23] Zheng, H., Tian, G., Yang, C., Zhao, Y., Cao, L., Xin, X., *et al.* (2022) Experimental Study on Performance of Phase Change Microcapsule Cold Storage Solar Composite Refrigeration System. *Renewable Energy*, **198**, 1176-1185. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.133>
- [24] Sundaram, P. and Kalaiselvan, A. (2021) Effect of Different Additives on Freezing Characteristics and Stability of GNP-Aqueous-Based PCM for Cold Thermal Storage. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **147**, 8033-8045. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-11056-y>
- [25] Sundaram, P. and Kalaiselvan, A. (2022) Cold Thermal Energy Storage Performance of Graphene Nanoplatelets-DI Water Nanofluid PCM Using Gum Acacia in a Spherical Encapsulation. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **147**, 14973-14985. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11690-0>
- [26] Zhai, X., Wang, J., Zhang, X. and Peng, H. (2022) Polyurethane Foam Based Composite Phase Change Microcapsules with Reinforced Thermal Conductivity for Cold Energy Storage. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **652**, Article ID: 129875. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129875>
- [27] Qin, Q., Cao, W., Zhaxi, D., Chen, X., Andreeva, D.V., Chen, K., *et al.* (2023) Application of 1-Decanol Loaded in Silica Aerogel and Expanded Graphite Composite Phase Change Materials in Cold Chain Transport Portable Boxes. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **33**, 5029-5040. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08301-w>