



李传常,长沙理工大学能源与动力工程学院教授,博士生导师,中国动力工程学会青年科技奖获得者、湖南省“湖湘青年英才”、湖南省“普通高校青年骨干教师”、长沙市“优秀杰出创新青年”。主要从事新能源与储能领域的教学与科研工作,主持国家自然科学基金3项,湖南省重点研发计划等省部级项目10余项。近年来,发表SCI论文50余篇,授权发明专利13项,出版专著1部、教材4部,获省部级科技奖励4项。



移动扫码阅读

朱傲常,李传常. 相变储冷技术在冷链运输低碳转型中的应用[J]. 能源环境保护, 2023, 37(3): 185-194.

ZHU Aochang, LI Chuanchang. Application of phase change cold storage technology in the low carbon transition of cold chain transportation[J]. Energy Environmental Protection, 2023, 37(3): 185-194.

## 相变储冷技术在冷链运输低碳转型中的应用

朱傲常, 李传常\*

(长沙理工大学 能源与动力工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**传统冷链运输的高能耗和高排放被认为是实现物流运输行业碳达峰、碳中和的重大挑战。相变储冷技术作为近年来发展的新兴技术,有望极大降低制冷负荷、减少能源消耗和温室气体排放量。本文比较传统冷链运输与相变储冷冷链运输的碳排放足迹,阐明了相变储冷技术在冷链运输低碳转型中的应用潜力,分析了不同种类冷链运输所需的储冷技术要求。相变储冷技术关键在于相变储冷材料的性能调控和封装技术,性能调控重点是调节相变温度满足不同货物的冷藏要求,而封装技术则重点解决相变材料的泄漏问题并增强其导热能力。相变储冷技术与冷链运输的集成方式多样:与冷藏车的围护结构相结合,制成共晶板置于厢体内部,与传统制冷单元相集成亦或是制成被动式冷却冷链运输箱。相变储冷冷链运输今后研究的重点是研制高性能相变储冷材料,同时实现冷链运输过程的多温区调控与智能化。

**关键词:**相变储冷;冷链运输;低碳转型;相变材料

中图分类号:X73

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2023)03-0185-10

### Application of phase change cold storage technology in the low carbon transition of cold chain transportation

ZHU Aochang, LI Chuanchang\*

(School of Energy Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** The high energy consumption and high emissions of traditional cold chain transportation are considered to be a major challenge to achieving 'carbon peaking' and 'carbon neutrality' in the logistics and transportation industry. As an emerging technology developed in recent years, phase change cold storage technology is expected to greatly reduce refrigeration load, energy consumption, and greenhouse gas emissions. This paper compares the carbon footprint of traditional cold chain transportation with that of cold chain transportation loaded with phase change cold storage technology, clarifies the application

收稿日期:2022-11-29;责任编辑:蒋雯婷 DOI:10.20078/j.eep.20230123

基金项目:湖南省重点研发计划(2022GK2048);湖南省交通运输厅科技进步与创新计划项目(202029);湖南省湖湘青年英才(2020RC3038);长沙市杰出创新青年培养计划(kq1802007)

作者简介:朱傲常(2000—),男,湖南岳阳人,硕士研究生,主要从事相变储冷技术研究。E-mail: zhuaochang@163.com

通讯作者:李传常(1983—),男,湖南娄底人,教授,主要从事新能源与储能技术研究。E-mail: chuanchangli@126.com

potential of phase change cold storage technology in the low carbon transformation of cold chain transportation, and analyzes the cold storage technology requirements for different types of cold chain transportation. The key of phase change cold storage technology is the performance regulation of phase change cold storage materials and encapsulation technology. The performance regulation focuses on adjusting the phase change temperature to meet the cold storage requirements of different cargoes, while the encapsulation technology focuses on solving the leakage problem of phase change materials and enhancing their thermal conductivity. Phase change cold storage technology and cold chain transport integration in a variety of ways, can: with the combination of refrigerated vehicle enclosure structure; made of eutectic plate placed inside the box, and traditional refrigeration unit integration or made of passive cooling cold chain transport box. The focus of future research on phase change cold chain transport is to develop high-performance phase change cold storage materials and to realize multi-temperature control and intelligence of the cold chain transport process.

**Keywords:** Phase change cold storage; Cold chain transportation; Low carbon transition; Phase change materials

## 0 引言

现代物流一头连着生产,一头连着消费,高度集成并融合运输、仓储、分拨、配送、信息等服务功能,是延伸产业链、提升价值链、打造供应链的重要支撑。由于食品和药品在物流过程中的运输条件苛刻,因此冷链运输是物流行业重点科技攻关领域。目前,2.5%的温室气体排放是由于冷链运输中环节不完善而造成的<sup>[1]</sup>。聚焦国内,互联网产业化和工业智能化给中国冷链物流体系的建设提供了新的活力,然而冷链物流的快速发展将增加能源消耗和温室气体排放<sup>[2]</sup>。全国目前共有28.7万辆冷链物流车,“断链”“伪冷链”等现象造成的食品和医疗药品安全隐患较多,目前仍然存在以“棉被+冰块+货车”的方式进行冷链运输,冷链运输的货物损失量超货物总量的30%<sup>[3]</sup>。相变储冷技术作为近年来备受关注的新型储冷技术之一,由于其在能源、经济和环境效益方面的优异表现<sup>[4]</sup>,有望成为未来主流的应用技术。本文阐述

了冷链运输全过程的碳排放环节,厘清相变储冷材料的分类及性能调控技术,概述了其在冷链运输方面的研究近况,总结了相变储冷技术在冷链运输低碳转型中的重要作用。

## 1 冷链运输

### 1.1 冷链运输环节及主要碳排放环节

如图1所示,冷链运输过程通常由不同的环节紧密串联而成,涉及货物的收取、储存及运输。当食品或药品在生产地制造完成后,进入冷链运输过程,根据运输距离,分为短途运输及长途运输。短程运输是以陆路运输的方式将货物运输到托运中心后,直接完成货物的最后一公里配送;长途运输是以陆路运输的方式将货物送至冷库后,集装货物,并通过海上、空中、铁路等多路径联运,实现货物跨省份、跨地区、跨洲际的运输,运输到距目的地最近的冷库后集中冷藏,然后重复短途运输的步骤实现货物最后一公里配送。

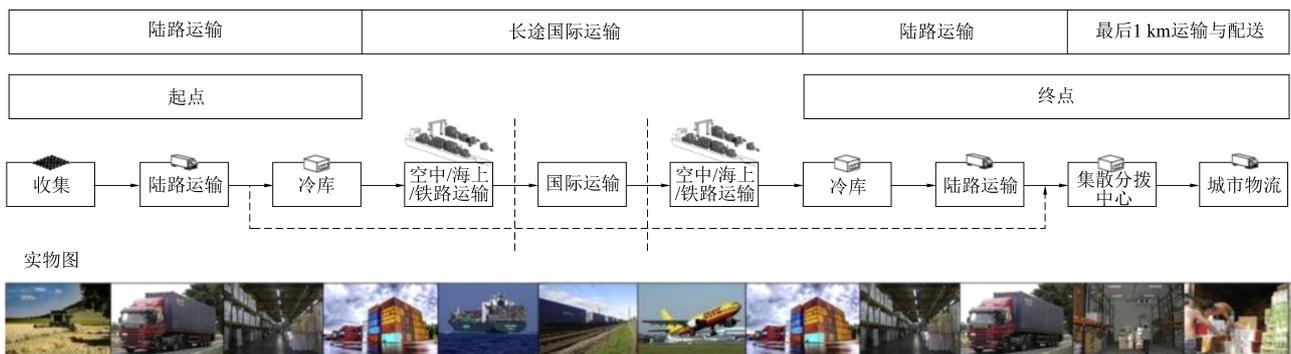


图1 冷链运输过程中的不同环节<sup>[5]</sup>

Fig. 1 The different aspects of the cold chain transport process<sup>[5]</sup>

不同运输方式碳排放量也有所不同,表 1 是国内不同运输方式的二氧化碳排放量。特别说

明,由于国内以航空作为冷链运输的占比量相较于其他几种运输方式比重太小,暂不予以考虑<sup>[6]</sup>。

表 1 不同运输方式二氧化碳排放量<sup>[6]</sup>  
Table 1 CO<sub>2</sub> emissions by transport mode<sup>[6]</sup>

运输方式	类型	CO <sub>2</sub> 排放量	
		kg · t <sup>-1</sup> · km <sup>-1</sup>	kg · TEU <sup>-1</sup> · km <sup>-1</sup>
公路运输	柴油运输车	0.042 14	0.842 8
铁路运输	柴油内燃牵引列车	0.008 30	0.166 0
	电力牵引列车		
水路运输	大型柴油集装箱船	0.004 64	0.092 8

注:TEU 为以长度为 20 英尺集装箱的国际计量单位,也称国际标准箱单位

表 2 不同运行时间下两种冷藏车的碳足迹对比<sup>[7]</sup>

Table 2 Comparison of the carbon footprint of two types of refrigerated trucks at different operating hours<sup>[7]</sup>

是否存在 储冷系统	运行时间 /h	直接排放 /t	生产排放 /t	装配排放 /t	储能碳排 /t	运行碳排 /t	回收碳排 /t	间接碳排 /t	总排放量 /t
是	2 400	0.84	6.08	0.10	45.86	172.60	2.55	227.19	228.03
否		1.22	1.89	0.05	0	215.62	0.86	218.42	219.64
是	3 000	0.84	6.08	0.10	45.86	215.75	2.55	270.34	271.18
否		1.22	1.89	0.05	0	269.53	0.86	272.33	273.55
是	3 600	0.84	6.08	0.10	45.86	258.90	2.55	313.49	314.33
否		1.22	1.89	0.05	0	323.43	0.86	326.23	327.45

由表 1 可知,公路运输的碳排放量远大于其他两种冷链运输方式,所以寻求冷链运输的低碳转型关键是实现公路运输的碳排放控制,而公路运输的碳排放主要集中于运输车辆。表 2 为两种不同冷藏车辆、不同运行时间的碳足迹统计,显然,装备储冷系统的冷藏车相较于传统冷藏车运行碳排放量和直接碳排放量大幅降低,但储能排放量和生产排放量轻微上升。随着运行时间的增加,装备储冷系统的冷藏车优势凸显,表明冷藏车装载储冷系统的碳排放潜力巨大。

Behdani<sup>[5]</sup>提出冷链运输的低碳转型有以下两个目标:提高能源的利用效率从而得到最小化的碳排放量,改善整个物流过程。为提高全球网络工程的配送效率,学者们已经提出了不同的信息和通信技术<sup>[8]</sup>。Lee 等<sup>[9]</sup>注重上述的第一个目标,证明了相较传统的柴油驱动卡车,电动卡车产生的温室气体减少了 42%~61%。因此传统交通工具转变为全电动交通工具是冷链运输低碳转型的合理方案,但由于电池寿命、充电桩及技术成本等难题目前难以解决,该方案未能大面积推广使用。Tassou 等<sup>[10]</sup>提出低温冷却系统和共晶系统可以改善冷链运输的可持续性。而相变材料作为相变储冷技术中的核心,满足上述两种系统的材

料应用要求,目前越来越多人关注采用相变储冷材料(Phase Change Cold Storage Materials, PCCSM)作为冷链运输可持续性发展的替代方案,下一章节将详细介绍 PCCSM。

## 1.2 冷链运输种类

### 1.2.1 食品冷链运输

随着社会的发展,人们对食品的新鲜程度要求越来越高,这要求食品的低温配送方式必须与时俱进<sup>[11]</sup>。食品冷链运输方式按照能源供应方式分为有源型和无源型,其划分依据为冷藏装置是否自带制冷装置。无源型系统直接依靠相变材料的相变过程维持低温环境<sup>[12]</sup>。搭载相变储冷材料的无源型低温配送系统不仅成本相较于传统低温配送方式更低且低碳,被广泛应用于食品冷链运输<sup>[13]</sup>。Tang 等<sup>[14]</sup>利用纯水、氯化钠、乙醇和氯化钙溶液制备了冷藏袋,通过实验分析,表明添加相变材料有助于鱼肉的冷链运输,并且鱼肉品质的保持时间随材料相变温度的降低而增加。

### 1.2.2 医用冷链运输

医用冷链运输有严格的温度限制,温度过高或过低都会引起药品失活<sup>[15]</sup>,运输温区为 2~8 °C 最为合适<sup>[16]</sup>。Zhao 等<sup>[16]</sup>选择十四烷和月桂醇的混合溶液作为复合相变材料,发现十四烷和月桂

醇配比为 66 : 34 时,两者相容性最好,相变潜热值达到了  $247.1 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ ,相变平台最稳定且相较于其他配比的相变温度最低,为  $4.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ;通过添加膨胀石墨提高其导热性,并以此为基础开发了一种新型疫苗冷藏设备,该设备实现疫苗温度的实时监测,具有很大的应用前景。

## 2 相变储冷技术

相变储冷技术主要是利用相变材料在低谷电价时间段内相变,进行冷量存储,然后在用电高峰时期来进行冷量释放<sup>[17]</sup>。通过该技术,将低谷用电时期的电能转化为冷量存储,为电能的大规模

存储提供了新路径。图 2(a)为冰水相变的概念图,由液态到固态的转变过程中,大量的冷能主要由水分子相互之间形成的氢键存储起来。

相变过程中的能量存储和释放的大小与物质内部的分子量总和以及失去堆积密度形式的分子之间接触断开的多少密切相关<sup>[18]</sup>。目前该技术已经广泛应用于冷链运输<sup>[19]</sup>、建筑领域<sup>[20]</sup>、电子器件热管理<sup>[21]</sup>、个人热管理<sup>[22]</sup>、生物医疗<sup>[23]</sup>等场景。本章将着重关注冷链运输应用的相变储冷材料和相变储冷核心技术。图 2 展示了相变材料应用于不同领域的情况,显然,适用于冷链运输的相变材料的类型一般是有机物或水合盐材料。

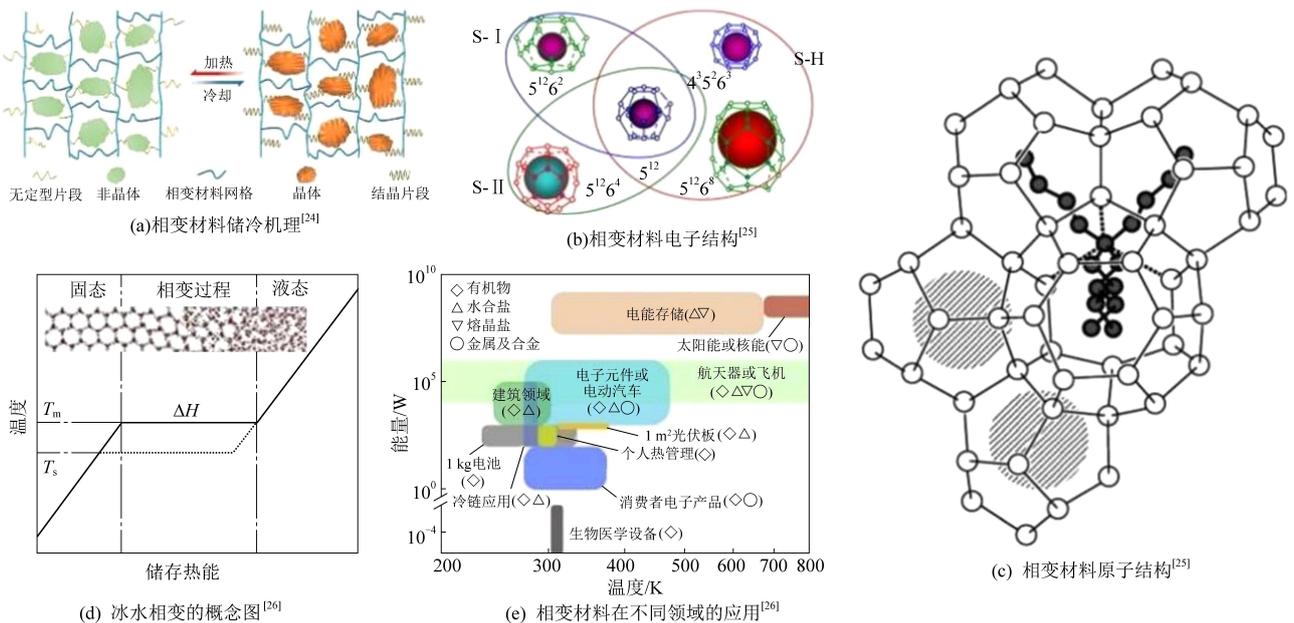


图 2 相变材料储冷机理与应用领域

Fig. 2 Phase change material cold storage mechanism and application areas

### 2.1 相变储冷材料

相变材料是相变储冷技术的核心部分,根据其化学成分,可分为有机相变材料、无机相变材料和共晶相变材料。有机类主要包括石蜡类和脂肪酸,无机物类由盐合物和金属构成,而共晶材料类型包括有机-有机共晶、有机-无机共晶和无机-无机共晶。

有机相变储冷材料主要包括烷烃和非烷烃结构,具备低过冷度、无相分离、相变具有一致性等优点<sup>[19]</sup>。但存在成本较高、容易泄漏、部分有机材料易燃等问题,限制了其发展<sup>[27]</sup>。

无机相变材料相变焓值较大、不易燃、无腐蚀性、可回收、导热性优良、经济效益高<sup>[28]</sup>,但存在成核程度较低,过冷度普遍较大,热循环能力相对较低等问题<sup>[29-31]</sup>,且部分无机相变材料具有轻微毒性,这将限制其在冷链运输的应用。

共晶相变材料具有理想热物理性能,是由不同组分的相图在其共晶点进行设计的混合物<sup>[32]</sup>,但缺乏足够多的共晶材料的热物理性质的数据,这将限制其在冷能存储的应用<sup>[33]</sup>。从相平衡理论和热力学定律可知,有机共晶混合物的共晶温度和焓值可以通过式(1)、(2)进行预测,当混合物处于最低共晶温度时,它具有最好的热稳定性,因此该共晶点称为最佳共晶点。共晶可以通过调节各组分的比例调控相变温度<sup>[34]</sup>,有机共晶相变温度和共晶相变焓值可以分别由式(1)和式(2)<sup>[35-36]</sup>确定。

$$T_m = \frac{T_i H_i}{H_i - T_i R \ln X_i} \quad (1)$$

$$H_m = T_m \sum_{i=1}^n \frac{X_i H_i}{T_i} \quad (2)$$

式中: $R$ 是气体状态常数, $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $T_m$ 为共晶材料的相变温度, $\text{K}$ ;  $H_m$ 是共晶材料的焓值, $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $X_i$ 为共晶物中组分  $i$  的摩尔分数;  $T_i$ 为纯材料  $i$  的相变温度, $\text{K}$ ;  $H_i$ 为纯材料  $i$  的熔化潜热, $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

Liu 等<sup>[36]</sup>利用癸醇和月桂酸共晶,采用真空浸渍法将其装载至膨胀石墨,制备出适用于疫苗冷链物流的复合相变材料,其相变温度为  $2.08 \text{ }^\circ\text{C}$ ,潜热值为  $188.71 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

## 2.2 相变储冷核心技术

### 2.2.1 性能调控

相变温度和相变焓值是相变材料最基本的物性参数。相变温度的不同导致材料的适用场景不同<sup>[17]</sup>。而适用于冷链运输的原生相变材料种类较少,需要一定措施调控相变温度,有机相变材料通常以共晶的方式调控相变温度,上述部分已阐述,而无机相变材料需要添加助剂改变分子间结构,实现温度调控<sup>[10, 37]</sup>。Li 等<sup>[38]</sup>通过添加质量分数为 11% 的尿素,6% 的  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,4% 的  $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  和 3% 的 CMC 成功将初始相变温度为  $28 \text{ }^\circ\text{C}$  的  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  的相变温度降至  $9.51 \text{ }^\circ\text{C}$ ,且过冷度只有  $0.39 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

### 2.2.2 封装技术

目前相变材料的封装技术包括微胶囊封装、

多孔载体封装、相变凝胶封装等,封装技术不仅改变相变材料的导热率,还能解决相变材料相变过程的泄漏问题。

Tinti 等<sup>[39]</sup>将正十四烷微胶囊相变材料与聚氨酯泡沫复合,得到一种具有低导热并能实现冷能存储的微复合隔热材料。Xie 等<sup>[40]</sup>采用改性多孔膨胀石墨实现相变材料的吸附,制得一种复合相变材料,该相变材料的相变温度为  $-5.30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,相变潜热为  $161.8 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ ,过冷度仅为  $1.83 \text{ }^\circ\text{C}$ ,该材料在冷链运输领域具有广阔的应用前景。李亚溪等<sup>[41]</sup>利用  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  与  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  的共晶水合盐作为主相变材料,采用 200~400 目的高吸水性树脂锚定上述材料,最终得到相变温度为  $2.7 \text{ }^\circ\text{C}$ ,相变潜热为  $137.7 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$  的复合相变材料,以该复合材料研制的储冷模块能使葡萄在 49 h 内保持新鲜,有助于推进相变凝胶在冷链运输的发展。

表 3 是部分用于冷链运输的 PCM 的热物理特性。相变材料对物体的冷却能力依赖封装后形成的几何形状、边界条件和温度循环。因此,分析时需要理解和评估相变材料在分子、设备、系统层面的热传导和相变情况<sup>[26]</sup>。

表 3 用于冷链运输的相变材料的热物理性质

Table 3 Thermophysical properties of phase change materials for cold chain transport

类型	材料名称	熔化温度 / $^\circ\text{C}$	凝固温度 / $^\circ\text{C}$	相变潜热值 / $(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	热导率固体 / $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	热导率液体 / $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	参考文献
有机相变 材料	十二烷	-8.09	/	175.90	/	/	[42]
	正十二烷	-6.41	/	258.12	/	/	[43]
	正十三烷	-2.92	/	179.39	/	/	[43]
	正十四烷	7.30	4.20	211.00	/	/	[44]
	正十六烷	15.92	13.37	226.80	/	/	[45]
	十八烷	28.10	/	210.00	/	/	[46]
	正十八烷	25.48	24.59	233.43	/	/	[45]
	石蜡	6.00~10.00	5.00~9.90	174~250	/	/	[47]
	赤藓糖醇四肉豆蔻酸酯	10.82	4.76	181.00	0.160	0.16	[48]
	脂肪酸基酯	9.40	/	147.49	/	/	[49]
	辛酸月桂酸+7wt%膨胀石墨	3.60	/	132.80	1.275	/	[50]
	癸醇	5.00	2.60	205.00	/	/	[51]
	50%乙醇	-43.16	-48.16	240.00	2.250	0.35	[52]
	赤藓醇四月桂酸酯	-9.03	-12.86	173.84	0.140	0.14	[48]
	山梨酸钾	-2.50	/	256.00	/	/	[53]

续表

类型	材料名称	熔化温度 /°C	凝固度 /°C	相变潜热值 /(J·g <sup>-1</sup> )	热导率固体 /(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	热导率液体 /(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	参考文献
	水	0	/	334.00	/	/	[53]
	十水硫酸钠	23.36	12.56	61.63	/	/	[54]
无机相变材料	十水硫酸钠+3wt%硼砂+3wt%CMC+5wt%氯化钾+20wt%氯化铵	6.80	6.10	97.05	0.264	/	[54]
	76wt%六水氯化钙+11wt%尿素+6wt%氯化铵+4wt%六水氯化锶+3wt%CMC	9.51	9.12	99.08	/	/	[38]
	十二水磷酸氢二钠+十水碳酸钠+高吸水性树脂	2.70	0.80	137.70	0.435	/	[41]
	十四烷+二十二烷	2.50	/	234.00	/	/	[53]
	癸醇+肉豆蔻醇	3.90	/	178.20	/	/	[55]
共晶相变材料	癸酸+辛酸	2.42	/	126.30	/	/	[56]
	水+10%乙醇	-3.00	-3.00	334.00	2.180	0.58	[57]
	H <sub>2</sub> O—NaCl—Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 三元盐	-21.50	/	180.00	/	/	[58]
	H <sub>2</sub> O—NaCl—KCl三元盐	-23.00	/	260.00	/	/	[58]
	H <sub>2</sub> O—NaCl—NaNO <sub>3</sub> 三元盐	-26.50	/	100.00	/	/	[58]
	MgCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O共晶盐溶液	-34.54	/	146.96	/	/	[59]

### 3 相变储冷技术与冷链运输的集成应用

#### 3.1 相变材料与冷藏车围护结构集成

冷藏车的隔热结构通常包括一层厚聚氨酯(PU)泡沫<sup>[10]</sup>。聚氨酯泡沫层具有低导热性<sup>[60]</sup>、低亲水性和低成本<sup>[61]</sup>等优点。为了增强聚氨酯泡沫的隔热能力,可以通过集成相变材料的方法来限制通过冷藏车围护结构的热通量。相变材料的集成方式有两种,一种是通过在隔热墙中设计装载相变材料的隔热层,另外一种则是创建一种复合隔热材料层,将相变材料分散到传统的隔热材料中,形成一种均质层<sup>[39, 62-64]</sup>。

Copertaro等<sup>[64]</sup>研制了一种新型相变材料层集成的冷藏车的围护结构,并采用实验和有限元数值计算的方法评估相变材料应用于传统的冷藏集装箱围护结构的相关能量效益,数值结果和实验结果偏差4.23%,结果表明在围护结构中应用PCM能使得峰值热负荷降低20%。有利于降低能耗,减少温室气体的排放。Michel等<sup>[61]</sup>提出了一种多层隔热墙的设计方法,该隔热墙包括两层聚氨酯泡沫层和一层聚氨酯与相变材料的复合层。相变材料首先通过原位聚合的方法制成氨基塑料包裹的微胶囊,进而分散到聚氨酯泡沫层中

形成复合层。通过数值分析,表明复合层靠近外侧,可以最大程度减少冷量流失。

#### 3.2 共晶板

共晶板被认为是替代冷藏车中制冷单元最成熟的替代方案,目前市场上已经有应用案例,该方法通常使用氯化钠和硝酸盐的水溶液制成的低熔点共晶混合物<sup>[65]</sup>。共晶板处于不同的安装位置时,冷却效果也有所不同。Radebe等<sup>[66]</sup>通过数值分析的方法分析出共晶板的安装位置对冷链运输箱体的温度分布的影响情况,结果表明采用顶部和侧面结合安装共晶板比单一侧面安装共晶板的冷却效果更好。

#### 3.3 相变材料与制冷单元集成

与传统的制冷设备相比,该新型制冷设备能够降低噪声,减少能量消耗,适用于短途运输<sup>[67]</sup>。

Liu等<sup>[68]</sup>提出了一种新型相变储冷器作为冷链运输车的移动式制冷单元,用以改善其温控性能。与传统的柴油发动机驱动的传统机械制冷机组相比,该新型相变储冷器的能源成本与传统机械式压缩制冷相比会随着COP的增大而有不同程度的减少,最高可减少91.4%。与此类似,Liu等<sup>[69]</sup>发现PCM集成于制冷系统可以极大减少能源消耗和温室气体的排放,且实现低噪音水平和

较低的维护成本,由于取消了柔性制冷软管,减少了制冷量和钎焊接头的数量,制冷剂泄漏带来的风险进一步降低<sup>[70]</sup>,与内燃机冷却的石油成本相比,采用新型制冷系统的能源成本普遍降低了50%以上。特别是当装置在非高峰阶段进行充冷时,可节省约为80%以上的能源成本。

### 3.4 被动式冷却冷链运输箱

冷链运输箱的冷却方式有被动式冷却和主动式冷却两种,主动式冷却比较常见因而不在此赘述,以PCM集成的被动式冷却冷链运输箱的充冷过程由库房中固定的电动制冷机组执行,这比传统的移动式制冷更加有效,并且能实现更低的温

室气体排放量。

Liu等<sup>[71]</sup>研究表明被动式PCM冷却系统装载相变材料后,比传统的制冷系统重量要小,不仅如此,该系统在仓库期间由固定的电动制冷机组进行冷却,相比传统的制冷机组更加有效,使得能源利用更高效。Tong等<sup>[72]</sup>研究了一个可充放式冷源系统,该系统在冷链运输箱体上方和前侧分别安装了9个和1个冷却板。与传统的柴油动力冷藏集装箱相比,新型可充放式冷源集装箱能耗、运营成本、排放分别降低了86.7%、91.6%、78.5%。而且基于应用实验,采用新型冷链运输箱可以保持高质量的新鲜食品。

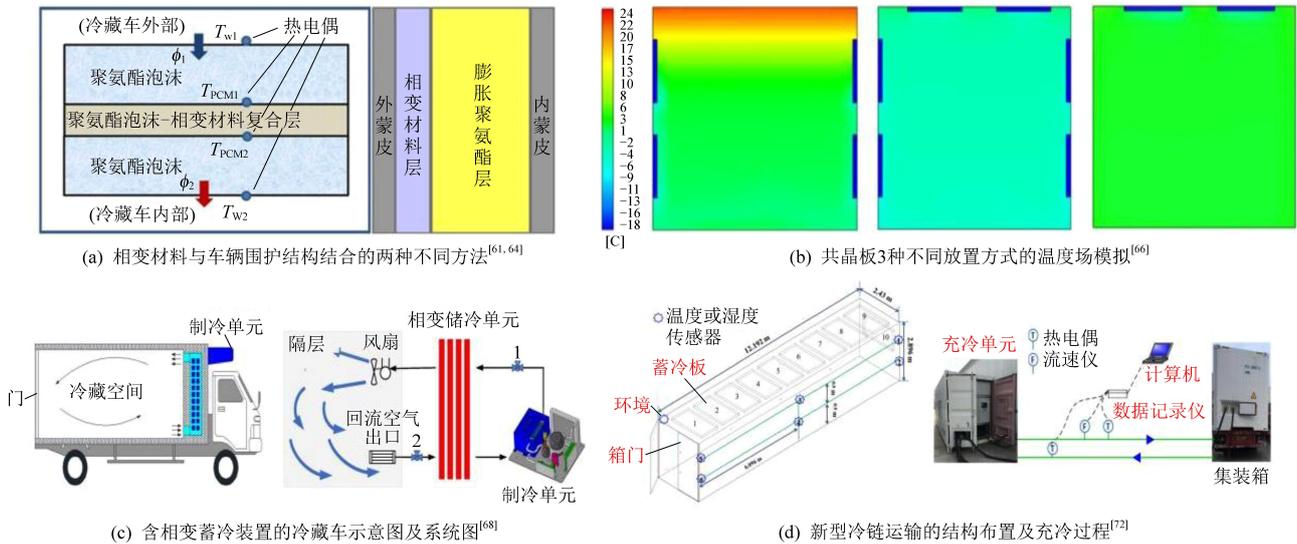


图3 相变储冷技术与冷链运输结合应用案例

Fig. 3 Application cases of phase change cold storage technology combined with cold chain transportation

## 4 结论与展望

作为国民经济和能源消耗量大的冷链运输,近年来受到研究者的广泛关注,将相变储冷技术与冷链运输集成,极大提高能源利用率,减少温室气体排放,具有广阔的应用前景。但距离大规模的应用仍存在部分问题。未来可以从以下几个方面开展研究:

(1) 开发出特定相变温度区间、相变潜热值高、无相分离、过冷度小和循环稳定性较好的相变材料是相变储冷技术广泛应用的基础;

(2) 相变储冷技术与互联网科技结合实现相变过程的智能化控制;

(3) 相变储冷材料与冷链运输箱集成结构中,可以搭载多温区相变材料,进而满足不同货物的运输需求。

## 参考文献 (References):

- [1] EVANS J A, HAMMOND E C, GIGIEL A J, et al. Assessment of methods to reduce the energy consumption of food cold stores [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 62(2): 697-705.
- [2] ZHAO L, YU Q, LI M, et al. A review of the innovative application of phase change materials to cold-chain logistics for agricultural product storage [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 365: 120088.
- [3] “两会”中的冷链物流发展建议[J]. *物流技术与应用*, 2022, 27(S1): 8-9.  
The "two sessions" of the cold chain logistics development proposals [J]. *Logistics & Material Handling*, 2022, 27(S1): 8-9.
- [4] CHANDRAN R, HASANUZZAMAN M, ARICU M, et al. Energy, economic and environmental impact analysis of phase change materials for cold chain transportation in Malaysia [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: 105481.
- [5] BEHDANI B, FAN Y, BLOEMHOF J M. Cool chain and temperature-controlled transport: An overview of concepts, chal-

- lenges, and technologies [C]. Accorsi R, Manzini R. Sustainable Food Supply Chains: Academic Press, 2019: 167-183.
- [6] 王嘉玥. 碳排放限制下中欧冷链多式联运运输方案研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021: 25-27.  
WANG Jiayue. Research on sino-european cold chain multimodal transport scheme under carbon emission restriction [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021: 25-27.
- [7] 吴俊章. 冷藏车典型制冷系统碳足迹模型构建及分析[D]. 广州: 广州大学, 2020: 44-47.  
WU Junzhang. Construction and analysis of carbon footprint model of typical refrigeration system for refrigerated vehicle [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2020: 44-47.
- [8] CALATI M, HOOMAN K, MANCIN S. Thermal storage based on phase change materials (PCMs) for refrigerated transport and distribution applications along the cold chain: A review[J]. International Journal of Thermofluids, 2022, 16: 100224.
- [9] LEE D Y, THOMAS V M, BROWN M A. Electric urban delivery trucks: Energy use, greenhouse gas emissions, and cost-effectiveness[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(14): 8022-8030.
- [10] TASSOU S A, DE LILLE G, GE Y T. Food transport refrigeration - approaches to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(8): 1467-1477.
- [11] 林酿志, 李传常. 相变储能材料及其冷链运输应用[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(3): 1040-1050.  
LIN Niangzhi, LI Chuanchang. Phase change materials for energy storage in cold-chain transportation[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(3): 1040-1050.
- [12] 李晓燕, 张晓雅, 邱雪君, 等. 相变蓄冷技术在食品冷链运输中的研究进展[J]. 包装工程, 2019, 40(15): 150-157.  
LI Xiaoyan, ZHANG Xiaoya, QIU Xuejun, et al. Research progress of phase change refrigeration technology in food cold chain transportation [J]. Packaging Engineering, 2019, 40(15): 150-157.
- [13] 马冰奇. 相变蓄冷技术在食品冷链中的应用与进展[J]. 制冷, 2016, 35(3): 79-83.  
MA Bingqi. Review of development of phase change cold storage technology for food cold chain application[J]. Refrigeration, 2016, 35(3): 79-83.
- [14] TANG Y, LI S, QU J, et al. Malignant rhabdoid tumor with cervical vertebra involvement in a teenage child: Case report and review of the literature[J]. Pediatric Neurosurgery, 2015, 50(3): 173-178.
- [15] 王瑜, 成峰. 药品配送冷藏箱制冷技术现状及关键技术[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(11): 4289-4299.  
WANG Yu, CHENG Feng. Research status and key technology of refrigeration for drug distribution refrigerator [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(11): 4289-4299.
- [16] ZHAO Y, ZHANG X, XU X, et al. Development of composite phase change cold storage material and its application in vaccine cold storage equipment[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 30: 101455.
- [17] 李沐, 李亚溪, 李传常. 相变储冷技术及其在空调系统中的应用[J/OL]. 储能科学与技术: 1-19 (2022-09-23) [2022-10-08]. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0498.  
LI Mu, LI Yaxi, LI Chuanchang. Phase change cold storage technology and its application in air conditioning system [J/OL]. Energy Storage Science and Technology: 1-19 (2022-09-23) [2022-10-08]. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0498.
- [18] SARKAR S, MESTRY S, MHASKE S T. Developments in phase change material (PCM) doped energy efficient polyurethane (PU) foam for perishable food cold-storage applications: A review[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 50: 104620.
- [19] SELVNES H, ALLOUCHE Y, MANESCU R I, et al. Review on cold thermal energy storage applied to refrigeration systems using phase change materials[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2021, 22: 100807.
- [20] YU N, CHEN C, MAHKAMOV K, et al. Selection and testing of phase change materials in the physical models of buildings for heating and curing of construction elements made of precast concrete[J]. Solar Energy, 2021, 226: 309-318.
- [21] KUMAR A, KOTHARI R, SAHU S K, et al. A comparative study and optimization of phase change material based heat sinks for thermal management of electronic components [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 43: 103224.
- [22] LUO Y, YU W, QIAO J, et al. Self-healing inorganic hydrated salt gels for personal thermal management in the static and dynamic modes [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 440: 135632.
- [23] MONDIEIG D, RAJABALEE F, LAPRIE A, et al. Protection of temperature sensitive biomedical products using molecular alloys as phase change material[J]. Transfusion and Apheresis Science, 2003, 28(2): 143-148.
- [24] WU Y, PAN N, LI X, et al. Study on properties and phase transformation mechanism of oil-based solid-solid phase change materials [J]. Thermochimica Acta, 2022, 707: 179109.
- [25] LI G, HWANG Y, RADERMACHER R. Review of cold storage materials for air conditioning application[J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(8): 2053-2077.
- [26] YANG T, KING W P, MILJKOVIC N. Phase change material-based thermal energy storage [J]. Cell Reports Physical Science, 2021, 2(8): 100540.
- [27] XUE F, QI X D, HUANG T, et al. Preparation and application of three-dimensional filler network towards organic phase change materials with high performance and multi-functions [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 419: 129620.
- [28] PARAMESHWARAN R, SARİ A, JALALIAH N, et al. Applications of thermal analysis to the study of phase-change materials [J]. Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry, 2018, 6: 519-572.

- [29] HASSAN A, SHAKEEL LAGHARI M, RASHID Y. Micro-encapsulated phase change materials: A review of encapsulation, safety and thermal characteristics [J]. *Sustainability*, 2016, 8(10): 1046.
- [30] GIRO PALOMA J, MARTINEZ M, CABEZA L F, et al. Types, methods, techniques, and applications for microencapsulated phase change materials (MPCM): A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 53: 1059-1075.
- [31] WILSON P A. *Basic naval architecture: Ship stability* [M]. Cham: Springer International Publishing, 2018: 15-22.
- [32] NAZIR H, BATOOL M, BOLIVAR OSORIO F J, et al. Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 129: 491-523.
- [33] PARAMESHWARAN R, SARI A S, JALALIAH N, et al. Applications of thermal analysis to the study of phase-change materials [J]. *Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018, 6: 519-572.
- [34] VEERAKUMAR C, SREEKUMAR A. Phase change material based cold thermal energy storage: Materials, techniques and applications - A review [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2016, 67: 271-289.
- [35] 张寅平, 苏跃红, 葛新石. (准)共晶系相变材料熔点及融解热的理论预测 [J]. *中国科学技术大学学报*, 1995, 25(4): 474-478.  
ZHANG Yanping, SU Yuehong, GE Xinshi. Prediction of the melting temperature and the fusion heat of (quasi-) eutectic PCM [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 1995, 25(4): 474-478.
- [36] LIU L, ZHANG X, XU X, et al. Development of low-temperature eutectic phase change material with expanded graphite for vaccine cold chain logistics [J]. *Renewable Energy*, 2021, 179: 2348-2358.
- [37] LI Y, LI C, LIN N, et al. Review on tailored phase change behavior of hydrated salt as phase change materials for energy storage [J]. *Materials Today Energy*, 2021, 22: 100866.
- [38] LI C, LI M, LI Y. Tailored calcium chloride hexahydrate as a composite phase change material for cold storage [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 56(A): 105798.
- [39] TINTI A, TARZIA A, Passaro A, 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.
- [40] XIE N, LI Z, GAO X, et al. Preparation and performance of modified expanded graphite/eutectic salt composite phase change cold storage material [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 110: 178-186.
- [41] 李亚溪, 谭振炜, 李传常. 相变储冷凝胶的制备与应用研究 [J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(12): 3845-3854.  
LI Yaxi, TAN Zenwei, LI Chuanchang. Research on the preparation and application of phase change gel for cold storage [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(12): 3845-3854.
- [42] SONG Y, ZHANG N, JING Y, et al. Experimental and numerical investigation on dodecane/expanded graphite shape-stabilized phase change material for cold energy storage [J]. *Energy*, 2019, 189: 116175.
- [43] ZHAO J, LONG J, DU Y, et al. Recyclable low-temperature phase change microcapsules for cold storage [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2020, 564: 286-295.
- [44] HAN P, LU L X, QIU X, et al. Preparation and characterization of macrocapsules containing microencapsulated PCMs (phase change materials) for thermal energy storage [J]. *Energy*, 2015, 91: 531-539.
- [45] CHEN J, ZHANG P. Preparation and characterization of nano-sized phase change emulsions as thermal energy storage and transport media [J]. *Applied Energy*, 2017, 190: 868-879.
- [46] SOENKSEN L R, MARTINEZ Corona D A, Iniguez De Gante S, et al. Low-cost thermal shield for rapid diagnostic tests using phase change materials [J]. *Journal of Medical Devices*, 2018, 12(1): 011009.
- [47] LEE D W. Experimental study on performance characteristics of cold storage heat exchanger for ISG vehicle [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2017, 18(1): 41-48.
- [48] SARI A, KARAIPEKLI A, EROGLU R, et al. Erythritol tetra myristate and erythritol tetra laurate as novel phase change materials for low temperature thermal energy storage [J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2013, 35(14): 1285-1295.
- [49] REDDY V J, YADAV J S, CHATTOPADHYAY S. Phase change material loaded form-stable composites for low temperature thermal buffering application [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, 247: 122859.
- [50] LI Y, ZHANG X, MUNYALO J M, et al. Preparation and thermophysical properties of low temperature composite phase change material octanoic-lauric acid/expanded graphite [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, 277: 577-583.
- [51] JI J, WANG Y, LIN X, et al. Fabrication of highly thermal conductive and shape-stabilized phase change materials [J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 44: 103256.
- [52] SIMARD A P, LACROIX M. Study of the thermal behavior of a latent heat cold storage unit operating under frosting conditions [J]. *Energy Conversion and Management*, 2003, 44(10): 1605-1624.
- [53] BURGESS S, WANG X, RAHBARI A, et al. Optimisation of a portable phase-change material (PCM) storage system for emerging cold-chain delivery applications [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 52: 104855.
- [54] LIN N, LI C, ZHANG D, et al. Emerging phase change cold storage materials derived from sodium sulfate decahydrate [J]. *Energy*, 2022, 245: 123294.
- [55] ZHANG S, ZHANG X, XU X, et al. Preparation and properties of decyl-myristyl alcohol/expanded graphite low temperature composite phase change material [J]. *Phase Transitions*,

- 2020, 93: 491-503.
- [56] ZHANG S, ZHANG X, XU X, et al. Experimental study on the storage and release characteristics of phase change materials with different nanomaterials as additives[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2020, 56(9): 2769-2777.
- [57] LU W, TASSOU S A. Characterization and experimental investigation of phase change materials for chilled food refrigerated cabinet applications[J]. *Applied Energy*, 2013, 112: 1376-1382.
- [58] CONG L, SHE X, LENG G, et al. Formulation and characterisation of ternary salt based solutions as phase change materials for cold chain applications[J]. *Energy Procedia*, 2019, 158: 5103-5108.
- [59] WU T, XIE N, NIU J, et al. Preparation of a low-temperature nanofluid phase change material:  $MgCl_2 - H_2O$  eutectic salt solution system with multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs)[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 113: 136-144.
- [60] GLICKSMAN L R. Heat transfer in foams[M]//Hilyard N C, Cunningham A. *Low density cellular plastics: Physical basis of behaviour*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1994: 104-152.
- [61] MICHEL B, GLOUANNEC P, FUENTES A, et al. Experimental and numerical study of insulation walls containing a composite layer of PU-PCM and dedicated to refrigerated vehicle[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 116: 382-391.
- [62] GLOUANNEC P, MICHEL B, DELAMARRE G, et al. Experimental and numerical study of heat transfer across insulation wall of a refrigerated integral panel van[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 73(1): 196-204.
- [63] 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: 131-141.
- [64] 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.
- [65] SEPE R, ARMENTANI E, POZZI A. Development and stress behaviour of an innovative refrigerated container with PCM for fresh and frozen goods [J]. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 2015, 11(2): 202-215.
- [66] RADEBE T B, HUAN Z, BALOYI J. Simulation of eutectic plates in medium refrigerated transport [J]. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 2021, 19: 62-80.
- [67] 于浩然. 冷链中制冷系统节能技术应用研究[J]. *中国设备工程*, 2020(4): 106-108.  
YU Haoran. Research on the application of energy-saving technologies for refrigeration systems in the cold chain [J]. *China Plant Engineering*, 2020(4): 106-108.
- [68] LIU G, LI Q, WU J, et al. Improving system performance of the refrigeration unit using phase change material (PCM) for transport refrigerated vehicles: An experimental investigation in South China [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 51: 104435.
- [69] LIU M, SAMAN W, BRUNO F. Development of a novel refrigeration system for refrigerated trucks incorporating phase change material[J]. *Applied Energy*, 2012, 92: 336-342.
- [70] CHOPKO R A, STUMPF A. Advantages of all-electric transport refrigeration systems [C]. 21st, International congress of refrigeration, 2003: 2004-2492.
- [71] LIU M S, SAMAN W Y, BRUNO F. Development of a novel refrigeration system for refrigerated trucks incorporating phase change material[J]. *Applied Energy*, 2012, 92: 336-342.
- [72] TONG S, NIE B, LI Z, et al. A phase change material (PCM) based passively cooled container for integrated road-rail cold chain transportation - An experimental study[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 195: 117204.