



能源环境保护
Energy Environmental Protection
ISSN 1006-8759, CN 33-1264/X

《能源环境保护》网络首发论文

题目：相变储冷技术在冷链运输低碳转型中的应用
作者：朱傲常，李传常
收稿日期：2022-11-29
网络首发日期：2023-01-18
引用格式：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/OL]. 能源环境保护. <https://kns.cnki.net/kcms/detail//33.1264.x.20230116.1423.004.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

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:在双碳的战略背景下,我国围绕冷链物流建设迅猛发展。但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双碳目标的重大挑战。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。但目前缺少冷链运输低碳转型和相变储冷技术结合方面的综述。本文比较传统冷链运输与装载相变储冷技术冷链运输的碳排放足迹,说明了相变储冷技术在冷链运输低碳转型中的可行性,同时分析了不同种类冷链运输所需的储冷技术要求。而满足不同技术要求的核心技术关键在于相变储冷材料的性能调控和封装技术,其中性能调控在于相变温度的调节,用以满足不同货物的冷藏要求。而封装技术可以解决相变材料的泄露问题和增加其热导性。相变储冷技术与冷链运输的集成方式多种多样,可以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。虽然相变储冷技术已经有相关的研究支撑,但在与冷链运输结合的道路上仍任重而道远,未来可以着重开发新的相变储冷材料,实现冷链运输过程的多温区调控和智能化。

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

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: In the background of the double carbon strategy, China has been developing rapidly around the construction of cold chain logistics. However, the high energy consumption and high emission of traditional cold chain transportation are considered to be a major challenge to achieve "carbon peak" and "carbon neutral" 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. However, there is a lack of review on the combination of low-carbon transformation of cold chain transportation and phase change cold storage technology. This paper compares the carbon footprint of traditional cold chain transportation with that of cold chain transportation loaded with phase change storage and cold technology, illustrates the feasibility of phase change storage and cold technology in the low carbon transformation of cold chain transportation, and analyzes the requirements of cold storage and cold technology needed for different kinds of cold chain transportation. The key to meeting different technical requirements for the core technology lies in the performance regulation of phase change cold storage materials and encapsulation technology, where the

收稿日期:2022-11-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51874047);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);湖南省湘湖青年英才(2020RC3038);长沙市杰出创新青年培养计划(kq1802007)

第一作者: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方面的研究。E-mail:chuanchangli@126.com

performance regulation relies on the adjustment of phase change temperature to meet the cold storage requirements of different goods. The encapsulation technology can solve the leakage problem of phase change materials and increase their thermal conductivity. Phase change cold storage technology and cold chain transport could be integrated in a variety of ways, which include combination with the refrigerated vehicle enclosure structure, fabrication of eutectic plate placed inside the box, and traditional refrigeration units integrated or fabrication of passive cooling cold chain transport box. Although the phase change cold storage technology has been supported by relevant research, there is still a long way to go in the combination with cold chain transportation, and the future efforts can be dedicated to the development of new phase change cold storage materials to achieve multi-temperature control and intelligence of the cold chain transportation process.

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

0 引言

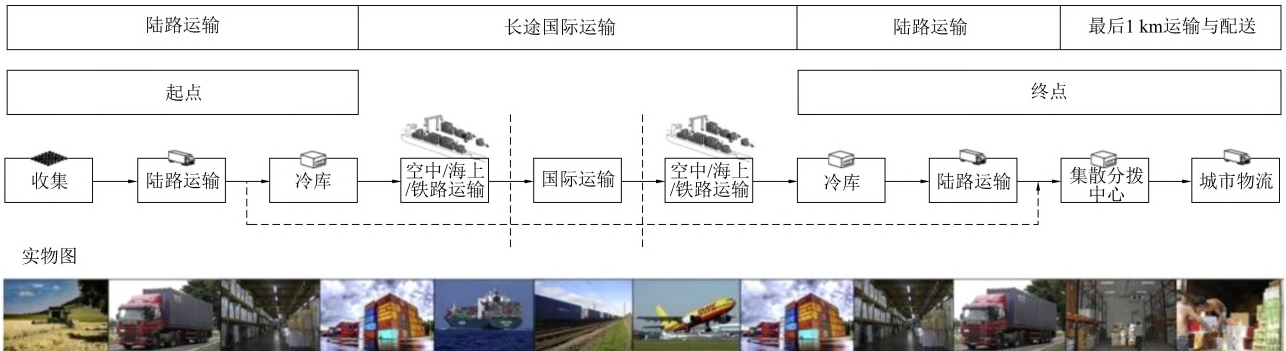
在全球新冠疫情的大背景下,物流行业已成为国家发展进程中不可或缺的一方面。由于食品和药品在物流过程中的运输条件苛刻(通常保持特定的低温环境),因此冷链运输是物流行业中重要发展的难题之一,难题不仅包括保持特定的低温环境,还包括如何在冷链运输过程中实现“低碳”化。目前,放眼全球,2.5%的温室气体排放是由于冷链运输中环节不完善而造成的^[1]。聚焦国内,随着第四次科技革命的进行,互联网产业化和工业智能化给中国冷链物流体系的建设提供了新的活力,然而冷链物流的快速发展将增加能源消耗和温室气体排放^[2]。全国目前共有 28.7 万辆冷链物流车,“断链”、“伪冷链”等现象造成的食品和医疗药品安全隐患居多,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%^[3]。这种现象明显不利于我国双碳目标的实现。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^[4],有望成为未来主流的应用技术。本文综合性阐述了相变储冷材料的分类,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上应用情况。

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,用以满足运输货物的低温需求。其通常都会涉及到货物的收集、储存和运输。当食品或药品在原产地生产出来后会立即集中起来进行陆路运输,接下来根据运输路程的长短分为两种不同的模式,一种是短程运输,由上述陆路直接运输到托运中心后,在托运中心进行货物配送。另外一种则是长途运输,由陆路运送至冷库后,通过货物集装的方式进行海上、空中、铁路等方式实现跨省份、跨地区、跨洲际的运输,运输到距目的地最近的冷库进行集中冷藏,然后重复短途运输的步骤进行目的地的配送。



(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

图 1 冷链运输过程中的不同环节

Fig. 1 The different aspects of the cold chain transport process

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^[6]。

表1 不同运输方式二氧化碳排放量^[6]
Table 1 CO₂ emissions by transport mode

运输方式	类型	CO ₂ 排放量	
		kg · t ⁻¹ · km ⁻¹	kg · TEU ⁻¹ · km ⁻¹
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

由表1可知,公路运输的碳排放量是比其他两种冷链运输方式大一个数量级,所以寻求冷链运输的低碳转型关键是寻求公路运输上的碳排放控制,而公路运输上碳排放主要集中在运输车辆上。表2是不同运行时间下的两种不同冷藏车辆的碳足迹统计,可以明显看出,装备储冷系统的冷

藏车相较于传统冷藏车在全生命周期下明显减少了运行碳排放量和直接碳排放量。但储能排放量和生产排放量有所增加。随着运行时间的增加,装载着储冷系统的冷藏车总排放量最终还是小于传统制冷系统的冷藏车的总排放量。这表明装载储冷系统减少碳排放的潜力巨大。

表2 不同运行时间下是否存在储冷系统冷藏车的碳足迹^[7]

Table 2 CO₂ emissions (gCO₂ · pallet⁻¹ · km⁻¹) for different refrigerated vehicles

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

Behdani^[5]提出了冷链运输的低碳化转型可以从两个目标来实现:提高能源的利用效率从而得到最小化的碳排放量;亦或是改善整个物流过程。目前为了提高全球网络工程中的配送效率,已经提出了不同的信息和通信技术^[8]。Lee等^[9]注重上述的第一个目标,证明了与传统的柴油驱动卡车相比较,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向低碳转型发展的比较可行的方案,但由于电池寿命、充电桩和技术成本等难题目前难以解决,暂时没有进行推广使用。而Tassou等^[10]人报告了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元件,符合这两种系统的材料应用要求,目前越来越多人关注在冷链运输中采用相变储冷材料(Phase change cold storage materials, PCCSM)作为可持续性发展的替代方案,下一章节将对PCCSM进行相关方面介绍。

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,这就要求食品的低温配送方式必须与时俱进^[11]。通常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,其划分依据是看冷藏装置是否自带制冷装置。无源型系统依靠相变材料的相变过程来维持低温环境^[12]。采用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成本较低而且低碳,被广泛应用于食品冷链运输^[13]。

Tang等^[14]人利用纯水、氯化钠、乙醇和氯化钙溶液制备了冷藏袋,通过实验分析,添加相变材料有助于在冷链运输过程中保持鱼肉的质量,并且质量保持时间随着相变材料的相变温度的降低而增加。

1.2.2 医用冷链运输

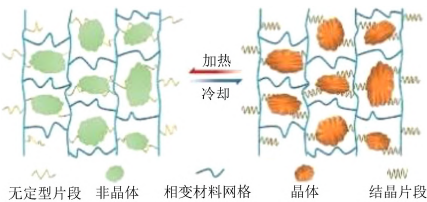
医用冷链运输通常有严格的温度限制,温度过高和过低都会引起药品失活^[15],从而要求相变

材料的相变温度需要在 2~8 ℃ 之间^[16]。

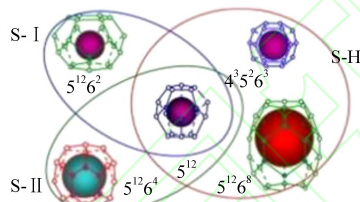
Zhao 等^[16] 选择了十四烷和月桂醇的混合溶液作为基体,并发现了当十四烷和月桂醇在配比为 66 : 34 时,两者共晶以后的相容性最好,相变潜热值最大达到了 $247.1 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$,相变平台最稳定并且有相较于其他配比有相变温度最低,达到了 $4.3 \text{ }^\circ\text{C}$,而且通过添加膨胀石墨提高了其导热性,并且以此为基础开发了一种新型疫苗冷藏设备,该设备可以在用户的手机上实时监测疫苗的温度,具有很大的发展前景。

2 相变储冷技术

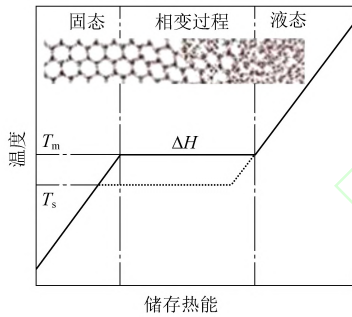
相变储冷技术是主要是利用相变材料在低谷电价时间段内相变,进行冷量存储,然后在用电高峰时期来进行冷量释放^[17]。通过相变储冷技术,



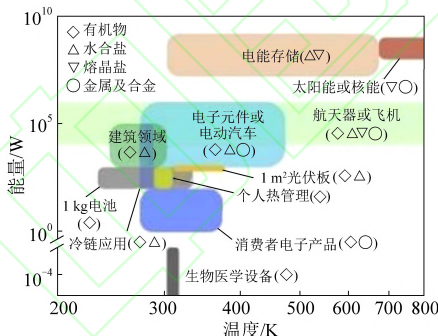
(a) 相变材料储冷机理^[24]



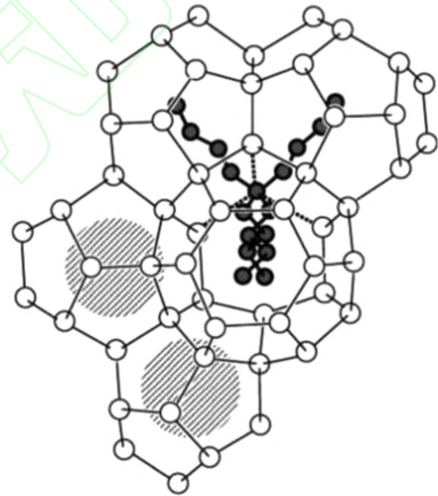
(b) 相变材料电子结构^[25]



(d) 冰水相变的概念图^[26]



(e) 相变材料在不同领域的应用^[26]



(c) 相变材料原子结构^[25]

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,可以确定三个宏观类别,分别是有机相变材料,无机相变材料,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所构成,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,由于具有低过冷度自成核的特性,有机相变储冷材料具有低过冷度、没有相分离、相变具有一致性等优点^[19]。但其成本较高、容易泄漏、部分有机材料易燃^[27]。

可以将处于低谷用电时期的电能转化为冷量储存,虽然能源的品位有所降低,但解决了电能不能大量储存的问题。图 2(a)展示了冰水相变的概念图,在由固态到液态相变过程中,大量的冷能主要由水分子相互之间形成的氢键所储存起来。

从本质上来看,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^[18]。目前该技术已经广泛应用于冷链运输^[19]、建筑领域^[20]、电子器件热管理^[21]、个人热管理^[22]、生物医疗^[23]等场景。本章将着重关注冷链运输中应用的相变储冷材料和相变储冷核心技术。图 2 展示了相变材料在不同领域的应用情况,可以看出,适合于冷链的相变材料的类型一般是有机或水合盐材料。

无机相变材料一般相变焓值较大^[28],不易燃,无腐蚀性,可回收,热导性较高经济效益较高,成核程度较低,过冷度普遍较大,热循环能力相对较低,因此长期使用后会出现储能密度下降的情况^[29-31]。同时部分无机相变材料具有轻微毒性,这将限制其在冷链运输中的应用。

共晶相变材料通常具有急剧的相变温度^[32]和良好的热循环能力,但缺乏足够多的共晶材料的热物理性质的数据,这将限制其在冷能储存应用^[33]。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进而调控相变温度^[34],有机共晶相变温度可以由下式^[35-36]来确定。

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

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

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, 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, K ; H_i 为纯材料 i 的熔化潜热, $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

Liu 等^[36]利用癸醇和月桂酸共晶,并用真空浸渍法装载到膨胀石墨上,从而制备出适合于疫苗冷链物流温度区间的复合相变材料,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^[17]。而天然适用于冷链运输的相变材料种类较少,需要一定措施对相变温度进行调控,有机相变材料通常以共晶方式进行相变温度调节,在上述部分已经进行过阐述,而无机相变材料往往需要改变分子间结构进行温度调控^[10],该思想往往通过在相变材料中添加助剂进行实现^[37]。Li

等^[38]通过添加质量分数为 11% 的尿素,6% 的 NH_4Cl ,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,封装技术不仅能改变相变材料的热导率,还能解决相变材料在相变过程中的泄漏问题。

Tinti 等^[39]使用实验的方法,将正十四烷微胶囊相变材料与传统的聚氨酯泡沫进行复合,从而得到了一种具有低导热并具有冷能储存的微复合隔热材料。Xie 等^[40]使用改性多孔膨胀石墨对主相变材料进行吸附,最终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 $1.83 \text{ }^\circ\text{C}$,该材料在冷链物流领域具有广阔的前景。李亚溪等人^[41]利用 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 共晶以后的水合盐作为主相变材料,并采用 200~400 目的高吸水性树脂来锚定上述材料,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 的热物特性。相变材料对物体的冷却能力并不是一个固

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)	热导率 (液体)	参考文献
有机相变 材料	十二烷	-8.09	/	175.9	/	/	[42]
	正十二烷	-6.41	/	258.12	/	/	[43]
	正十三烷	-2.92	/	179.39	/	/	[43]
	正十四烷	7.3	4.2	211	/	/	[44]
	正十六烷	15.92	13.37	226.8	/	/	[45]
	十八烷	28.1	/	210	/	/	[46]
	正十八烷	25.48	24.59	233.43	/	/	[45]
	石蜡	6~10	5~9.9	174~250	/	/	[47]
	赤藓糖醇四肉豆蔻酸酯	10.82	4.76	181	0.16	0.16	[48]
	脂肪酸基酯	9.4	/	147.49	/	/	[49]
	辛酸月桂酸+7wt%膨胀石墨	3.6	/	132.8	1.275	/	[50]
	癸醇	5	2.6	205	/	/	[51]
	50%乙醇	-43.16	-48.16	240	2.25	0.35	[52]
赤藓糖醇四月桂酸酯	9.03	12.86	173.85	0.14	0.14	[48]	
山梨酸钾	-2.5	/	256	/	/	[53]	

类型	材料名称	熔化温度/℃	凝固温度/℃	相变潜热值/ (J·g ⁻¹)	热导率 (固体)	热导率 (液体)	参考文献
	水	0	/	334	/	/	[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	6.8	6.1	97.05	0.264	/	[54]
	76wt%六水氯化钙+11wt%尿素+6wt%氯化铵+4wt%六水氯化铈+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	2.7	0.8	137.7	0.435	/	[41]
	十四烷+二十二烷	2.5	/	234	/	/	[53]
	癸醇+肉豆蔻醇	3.9	/	178.2	/	/	[55]
共晶相变材料	癸酸+辛酸	2.42	/	126.3	/	/	[56]
	水+10%乙醇	-3	-3	334	2.18	0.58	[57]
	H ₂ O-NaCl-Na ₂ SO ₄ 三元盐	-21.5	/	180	/	/	[58]
	H ₂ O-NaCl-KCl三元盐	-23	/	260	/	/	[58]
	H ₂ O-NaCl-NaNO ₃ 三元盐	-26.5	/	100	/	/	[58]
	MgCl ₂ -H ₂ O共晶盐溶液	-34.54	/	146.96	/	/	[59]

有的材料属性,它高度依赖是最后封装材料以后形成的几何形状,边界条件和温度循环。因此,在分析时需要仔细理解和评估在分子、设备、系统层面上的热传导和相变情况^[26]。

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

目前,冷藏车的隔热结构通常由一层厚的聚氨酯(PU)泡沫组成^[10]。聚氨酯泡沫层具有低导热性^[60]、低亲水性和低成本^[61]等优点。但由于现在聚氨酯泡沫的膨胀剂发生改变导致其隔热能力有所下降,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一层专门用来装载相变材料来作为相变材料隔热层,另外一种则是创建一种复合隔热材料层,主要是将相变材料分散到传统的隔热材料中形成一种均质层^[39, 62-64]。

Copertaro等^[64]研究出一种新型的相变材料层集成的冷藏车的围护机构,并采用实验和有限元数值计算方法对相变材料应用于传统的冷藏集装箱围护结构进行相关能量效益的评估,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使得峰值热负荷降低20%,节省4.65%能量

率。有利于降低能耗,减少温室气体的排放。

Michel等^[61]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。其中相变材料首先是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从而组合成复合层。通过数值分析,最终得到了复合层越靠近外侧,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,该方法通常涉及到使用氯化钠和硝酸盐的水溶液制成的低熔点共晶混合物^[65]。

共晶板处于不同的安装位置时,冷却效果也有所不同。Radebe等^[66]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,这种新型的制冷设备能够降低噪声,减少能量消耗,非常适合于短途运输。

Liu等^[68]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^[69]将 PCM 集成到制冷系统可以极大地减少能源消耗和温室气体的排放,也能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,制冷液泄漏所带来的风险也降低了^[70],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,节能约为 80% 以上。

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,其中 PCM 集成的被动式冷却冷链运

输箱的充冷过程是在库房由固定的电动制冷机组进行冷却,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^[71]描述了被动式 PCM 冷却系统需要将 200 kg 的相变材料进行装载,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^[72]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 为相变储冷技术与冷链运输结合应用的案例展示。

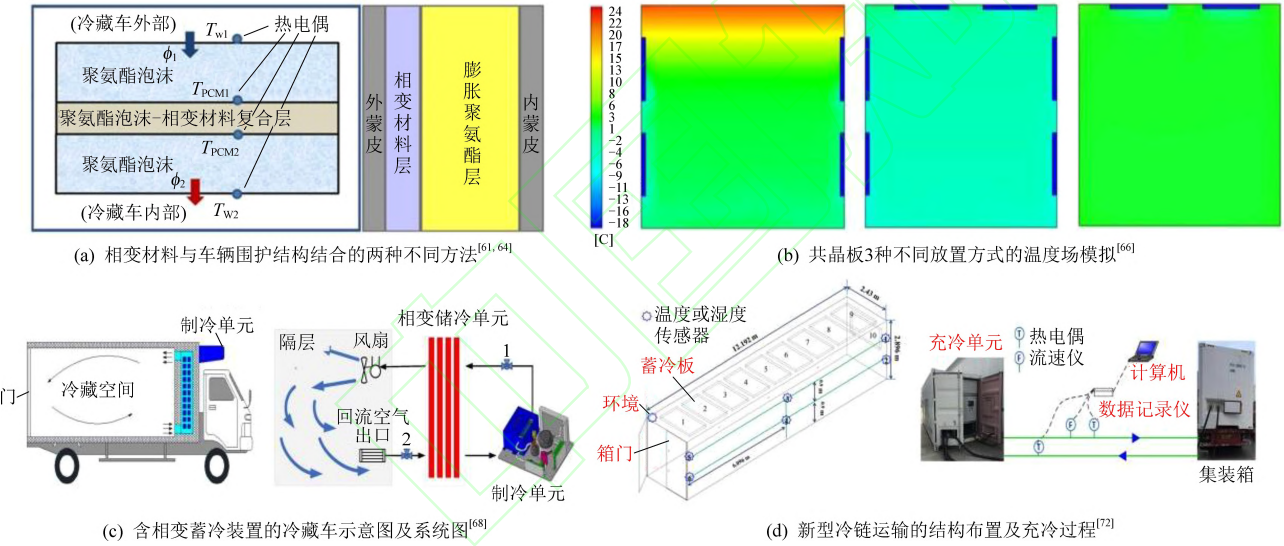


图 3 相变储冷技术与冷链运输结合应用案例

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

4 结论与展望

相变储冷技术是实现“双碳目标”的关键,作为国民经济和能源消耗大户的冷链运输,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进行集成化,能极大地提高能源利用率,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还存在或多或少的问题。未来可以从以下几个方面发展:

- (1) 开发出特定相变温度区间、相变潜热值较高、无相分离、过冷度较小和循环稳定性较好的相变材料是提高相变储冷技术应用程度的基础;
- (2) 将相变储冷技术与互联网科技结合起来

实现相变过程中的智能化;

- (3) 在相变储冷材料与冷链运输箱集成结构中,可以设置多个相变材料以达到设置不同温区的效果,进而满足运输不同货物品质的要求。

参考文献 (References):

[1] Evans J A, Hammond E C, Giegel 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,

The "two sessions" of the cold chain logistics development proposals[J]. Logistics & Material Handling, 2022, 27(S1): 8-9.

- [4] Chandran R, Hasanuzzaman M, Arıcı 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, challenges, 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.
- [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.
- [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] Selvnnes 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, Sari A, Jalaiah 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, Martínez 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, Jalaiah 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 Y, Su Y, Ge X. 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, 谭振伟, 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, Martínez-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, Ero lu 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 thermo-physical 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: MgCl₂ - H₂O 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.