

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20240802001

文章编号: 1672-9331(2024)04-0028-16

引用格式: 杨晓, 谢宝珊, 李传常. 相变储能技术及其交能融合应用[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(4): 28-43.

Citation: YANG Xiao, XIE Baoshan, LI Chuanchang. Phase change energy storage technology and its application in the integration of transportation and energy[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(4): 28-43.

相变储能技术及其交能融合应用

杨晓, 谢宝珊, 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: 相变储能技术是推动“双碳”目标深入实施的关键技术之一。随着交通与能源融合发展的不断推进, 相变储能技术在交通领域中的应用日益广泛, 也受到了越来越多的研究者的关注。本文对相变储能技术进行了系统分类, 包括相变储热技术和相变储冷技术; 分别介绍了相变储热材料及其优化技术和相变储冷材料及其优化技术, 包括增大热导率、降低过冷度、抑制相分离、调控相变温度; 总结了相变储能技术在冷链运输、电动车以及航空航天领域中的综合应用与创新, 包括相变材料在冷藏车围护结构、储冷板、制冷机组、电池热管理系统、供冷/热系统以及深空探测热管理系统中的应用。最后对相变储能技术在交通领域实际应用中所面临的问题进行了较为全面总结和分析; 指出研制高性能的相变材料、开发密封性好的封装材料、优化相变储能系统的储能效率是今后本领域研究者需要关注的重点。

关键词: 相变储能技术; 储冷; 储热; 交能融合; 相变材料

中图分类号: TK11+4

文献标志码: A

Phase change energy storage technology and its application in the integration of transportation and energy

YANG Xiao, XIE Baoshan, LI Chuanchang

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

Abstract: Phase change energy storage technology is one of the key technologies to promote the in-depth implementation of the goals of “carbon peaking and carbon neutrality”. With the continuous development of integration of transportation and energy, phase-change energy storage technology is increasingly widely used in the field of transportation, and has attracted more and more researchers’ attention. In this paper, phase change energy storage technology was systematically classified, including phase change heat storage technology and phase change cold storage technology. The materials and optimization technologies of phase change heat storage and phase change cold storage were introduced respectively, including increasing thermal conductivity, reducing supercooling degree, inhibiting phase separation and regulating phase change temperature. The comprehensive application and innovation of phase change energy storage technology in cold chain transportation, electric vehicles and aerospace were summarized, including the application of phase change materials in the envelope structure of refrigerated

收稿日期: 2024-08-02; 修回日期: 2024-08-26; 接受日期: 2024-08-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52274252); 湖南省重点研发计划(2023NK2032)

通信作者: 李传常(1983—)(ORCID: 0000-0001-5915-1119), 男, 教授, 主要从事新能源与储能技术方面的研究。

E-mail: chuanchangli@126.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

vehicles, cold storage plates, refrigeration units, battery thermal management systems, cooling/heating systems, and deep space exploration thermal management systems. Finally, the problems facing the practical application of phase-change energy storage technology in the field of transportation were summarized comprehensively. It was pointed out that the development of high-performance phase-change materials, and materials with excellent sealing, as well as the optimization of energy storage efficiency of phase-change energy storage systems were the focuses of future researchers in this field.

Key words: phase change energy storage technology; cold storage; heat storage; integration of transportation and energy; phase change material

Foundation items: Project (52274252) supported by the National Natural Science Foundation of China ; Project (2023NK2032) supported by the Key Research and Development Program of Hunan Province

Corresponding author: LI Chuanchang (1983—) (ORCID: 0000-0001-5915-1119), male, professor, research interest: New energy and energy storage technology. E-mail: chuanchangli@126.com

0 引言

随着我国“双碳”目标的深入实施和居民消费升级的加速推进,交通行业作为社会经济发展的重要支撑,正站在一个充满机遇与挑战的新起点上。在交通领域应用的储能技术多种多样,包括电池储能技术、超级电容器储能技术、燃料电池储能技术、氢能储能技术、相变储能技术等,其中电池储能技术是交通领域应用最为广泛的储能技术。但随着储能技术的不断发展,相变储能技术作为一种高效、先进的能源储存和利用技术,其核心在于利用相变材料在固体、液体或气体状态之间发生相态转换来吸收或放出热量,实现热能或冷能的储存和释放^[1],逐渐成为推动交通行业发展进程中的关键技术之一。

相较于其他储能技术,相变储能技术具有轻量化设计、快速充放电能力、温度调节功能、使用寿命长、环境友好、成本低、效益高等优势。在与交通融合发展的过程中,相变储能技术的应用不仅能够解决可再生能源在交通领域应用的间歇性和不稳定性问题,还能有效提升交通系统的整体能效和可靠性。在新能源汽车领域^[2-3],相变储能技术被广泛应用于电池热管理系统中,通过精准控制电池温度,延长电池使用寿命,提高了车辆续航里程;在冷链物流领域^[4-6],相变储能技术则为冷链运输提供了更加稳定、可靠的保温解决方案,保障了食品、药品等敏感货物的品质与安全;在航空

航天领域^[7],通过精确控制相变材料的相变过程,相变储能技术不仅能有效应对航天器在极端环境下的高温挑战,实现温度的精确调节与恒定控制,还能优化能源利用,提升供电系统的稳定性和可靠性。其高储能密度、易于控制以及对温度变化的敏感响应,使得相变储能技术在航天器的热防护、能源管理等多个方面展现出巨大的应用潜力。

目前,储能技术如锂离子电池、超级电容器、燃料电池以及新兴的固态电池等,在提升电动汽车电池的能量密度、缩短充电时间、延长续航里程方面取得了显著进展。同时,对于公共交通系统,如公交车、地铁等,储能技术也被用于回收制动能量、稳定电网供电,提高能源利用效率。但相变储能技术在交通领域中应用的综述文章还较少,因此,本文对相变储能技术进行了系统性的概括,详细介绍了相变储热技术以及相变储冷技术,并对相变储能技术在交通领域中的应用进行展开分析,最后总结了当前相变储能技术在实际应用中存在的问题,为本领域后续研究的开展提供一定的参考。

1 相变储能技术

1.1 相变储热技术

储热是指通过特定技术手段将热能暂时储存起来,以便在需要时释放和利用。这种技术对于提高能源利用效率、平衡能源供需、促进可再生能

源的广泛应用具有重要意义。热能的储存主要分为热化学储存、显热储存和潜热储存三种方式,其中潜热储存又被称为相变储热^[8-9]。相较于前两种储热技术,相变储热技术利用相变材料在相变过程中吸收或释放的热量进行储能,其原理如图1所示,具有高储能密度、热损失小、环保无污染等优势^[10-11],在热能储存领域具有广阔的发展前景。

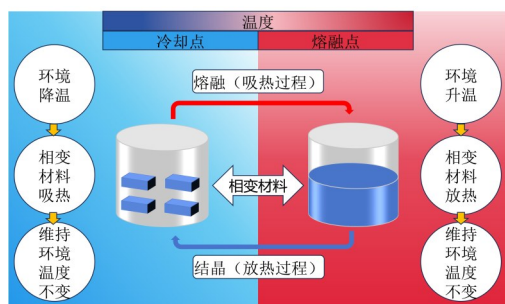


图1 相变储热技术原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of phase change heat storage technology

1.1.1 相变储热材料

相变储热材料是一类能够通过物质的相变过程来储存和释放热量的材料。按照相变材料(phase change material, PCM)发生相变时的相态变化可将相变储热材料分为固-固、固-液、固-气和液-气相变材料。鉴于气体储存的诸多不便,实际应用场景主要选择固-液相变材料与固-固相变材料作为热能储存的优选方案^[12]。尽管固-液相变材料因其在热能储存方面的高效性而备受研究瞩目,但其潜在的腐蚀性、泄漏风险以及相分离难题,成了限制其广泛应用的瓶颈^[13]。相比之下,固-固相变材料具有体积变化小、无泄漏、无相分离等优点,成为近年来研究的热点,在电池热管理^[14]、交通运输^[15]、电子元件^[16]等领域有着较大的应用潜力。

对于固-固相变材料,根据其相变介质的不同,可将其分为无机盐类、有机高分子类和多元醇类。根据材料骨架的不同,可分为微胶囊型、三维多孔型、纳米管型和聚合物型^[17-18]。根据固体-固体相变材料的来源,可分为天然固体-固体相变材料和新型固体-固体相变材料。表1为固-固相变储热材料的分类。固-固聚合物的制备方法主要分为化学接枝、嵌段共聚化、交联聚合三种方法。

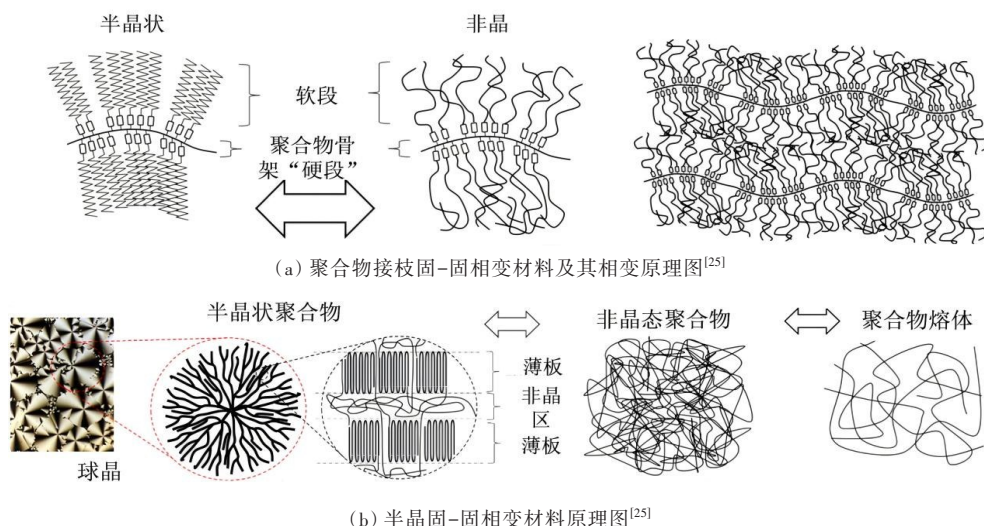
化学接枝法是指利用骨架材料的官能团与相变大分子或单体反应得到相变材料。如图2(a)所示,可以通过调节聚合物主链的软段链长或刚性来调整相变温度。常见的骨架材料有纤维素^[19]、聚苯乙烯^[20]等。HAN等^[21]以甲苯2,4-二异氰酸酯为偶联剂,在离子液体1-烯丙基-3-甲基咪唑氯中合成了一系列新型固-固相变材料纤维素-g-聚氧乙烯(2)十六烷基醚(Cellulose-g-E2C16)共聚物。结果表明,Cellulose-g-E2C16共聚物的储热能力和相变温度与取代度有关。接枝的E2C16的结晶类型不受纤维素骨架的影响。与E2C16相比,Cellulose-g-E2C16共聚物表现出更好的热稳定性。嵌段共聚化是一种特殊的聚合反应过程,它涉及将两种或两种以上性质不同的聚合物链段通过共价键连接在一起,形成具有特定结构的嵌段共聚物,又称镶嵌共聚物。

如图2(b)所示,在结晶过程中,由于冷却速度的不同,柔性聚合物链排列成结晶片层板。这种共聚物兼具各组成聚合物的性质,并可能表现出比单一聚合物更为优异的性能。TIAN等^[22]通过引入 $\pi-\pi$ 堆叠在线性聚乙二醇(polyethylene glycol, PEG)中形成物理交联点来制备固-固相变材料,结果表明,由 $\pi-\pi$ 堆积形成的强大分子间作用力不仅能防止PEG在130℃时泄漏,还能使制备的固-固相变材料具有高温稳定性和优异的韧性。

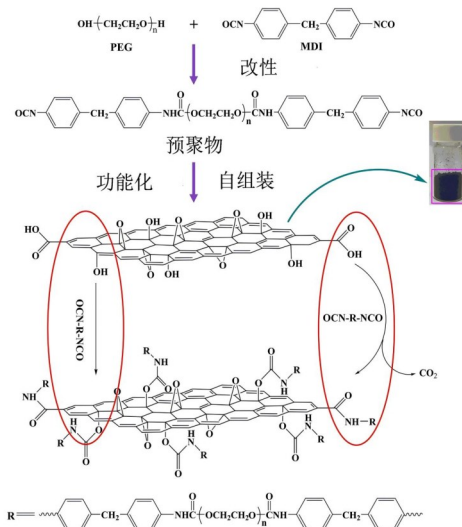
表1 固-固相变材料类型及其优缺点

Table 1 Types of solid-solid phase change materials and their advantages and disadvantages

分类依据	类型	优点	缺点
相变介质	无机盐类	体积变化小、热效率高	种类稀少
	有机高分子类	性能稳定、使用寿命长	导热性能差、成本较高
	多元醇类	过冷小、无腐蚀性	热稳定性差、易溶于水
材料骨架	微胶囊型	无泄漏风险	导热性能较差
	三维多孔型	高导热性、循环稳定性好	制备工艺复杂、孔隙结构调控难度大
	纳米管型	高导热性、储能效率高	成本高、制备工艺复杂
	聚合物型	高相变潜热、易于加工成型	导热性能较差
材料来源	天然固体-固体相变材料	高相变潜热、安全性高	储能密度相对较低
	新型固体-固体相变材料	形状稳定性好、环境友好	成本较高

图2 化学接枝法和嵌段共聚法制备相变材料原理图^[25]Fig. 2 Principle of phase change materials prepared by chemical grafting and block copolymerization^[25]

交联聚合涉及将线性或轻度支化的聚合物链通过共价键相互连接,形成具有三维网络结构的高分子材料,是合成具有非线性结构的固-固相变材料的另一种方法^[23]。XIA等^[24]以聚乙二醇为相变组分,4,4'-二苯基甲基二异氰酸酯为交联剂,氧化石墨烯(graphene oxide, GO)为骨架材料,设计并合成了一系列具有层状结构的新型聚合物固-固相变材料聚氨酯预聚物,如图3所示。结果表明,相变材料具有快速的热响应速率和出色的热调节性能,可以将其温度保持在50~57℃范围内约410 s。

图3 聚氨酯预聚物示意图^[24]Fig. 3 Schematic diagram of Polyurethane prepolymer^[24]

1.1.2 相变储热材料优化技术

尽管相变储热材料因其高储热密度在储热领域展现出了较大的优势,但其相对较小的导热系数却成了其一个不容忽视的局限性^[26],这直接影响了材料在需要高效快速热传导的应用场景中的表现。为了克服这一挑战,提升相变储热材料的传热效率,研究者们积极探索并提出了多种改善方法。

增大相变材料的传热表面积是提升相变材料传热效率的一种关键技术手段。目前,最为常见的做法是通过增设翅片来增加传热表面的面积。研究表明,采用翅片设计的管式相变材料传热系统,其传热速率是非翅片管设计的两倍^[27]。AGYENIM等^[28]研究了径向翅片和轴向翅片存在时的相变,并与无翅片系统进行了比较。他们发现,在翅片管系统中,半径方向的温差明显大于没有翅片的类似系统的,但轴向翅片的温差小于无翅片的系统的。ABDULATEEF等^[29]对卧式三管换热器(three-tube heat exchanger, TTHX)进行了试验和数值研究。通过将PCM保持在中环空区域,数值研究了内管和中管相变材料侧的四个三角形翅片,如图4(a)所示。采用内加热、外加热和两侧加热三种加热方式对8个内纵管翅片卧式TTHX模型进行了试验分析。结果表明,与使用纵向翅片的情况相比,使用内部、内部-外部和外部三角形翅片的效果分别显著提高了11%、12%和15%。此外,研究人员发现换热器内管的几何或

形状、位置的不同对相变材料的传热也有影响。MAHDI等^[30]对月桂酸(lauric acid, LA)相变材料的熔融热特性进行了研究,采用四种不同的换热流体管内布置方式,如图4(b)所示。结果表明,弧形阵列和向下三角形阵列分别减少了约76%和72%的熔化时间。然而,与正常情况相比,向上三角形管布置使熔化时间增加了约10%。

研究人员通过在相变材料中添加纳米级高导热性颗粒,观察到相变材料的热力学性质得到显著改善。因此在相变材料中添加高导热性材料也是一种提升相变材料传热效率的有效手段。近年来,各种类型的碳基和金属基高导热材料在相变材料中的强化传热受到了研究人员的重视。XIAO等^[31]在稳态试验台上测量了纯硝酸盐和硝酸盐/膨胀石墨(graphite, EG)形状稳定复合材料的导热系数。结果表明,EG的加入显著提高了PCM的导热系数,如硝

酸钠质量分数为20%的EG复合PCM在20~120 °C的温度范围内的导热系数为6.66~7.70 W/(m K),是纯硝酸钠的7倍左右。碳纤维在相变材料中也表现出很好的强化传热特性。QIAN等^[32]为了同时稳定PEG相变材料PCM的形状和提高其传热效率,采用易浸渍法制备了一类由单壁碳纳米管(single-walled carbon nanotubes, SWCNs)和PEG组成的新型纳米复合材料,实验研究了2%~10%的SWCNs负载对PEG化学结构、热性能和强化传热性能的影响。图5为不同SWCNs含量的相变材料扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)图像。结果表明,与纯PEG相比,PEG/SWCNs纳米复合材料的熔点降低,凝固点升高,过冷度大幅降低。最重要的是,无论在固态还是液态,相变材料热导率都随着SWCNs负载的增加而增加。

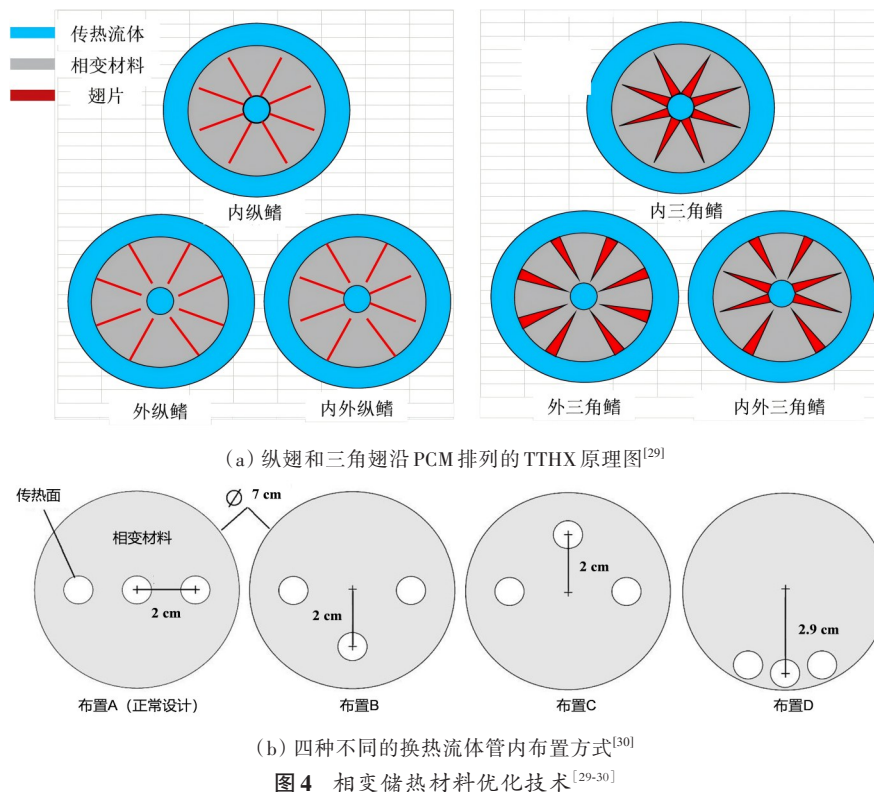


图4 相变储热材料优化技术^[29-30]

1.2 相变储冷技术

相变储冷技术的基本原理是在低谷电价时间段内,利用电制冷设备使相变材料发生相变(如液态到固态),从而储存冷量。在用电高峰期,相变材料发生逆向相变(如固态到液态),释放储存的

冷量,以满足制冷需求^[33]。图6为相变储冷技术原理图。该技术主要利用相变材料在相变过程中保持恒温的特性来缓冲和调节环境温度的波动,目前已广泛应用在冷链运输^[34]、空调系统^[35]、冷库^[4]等领域。

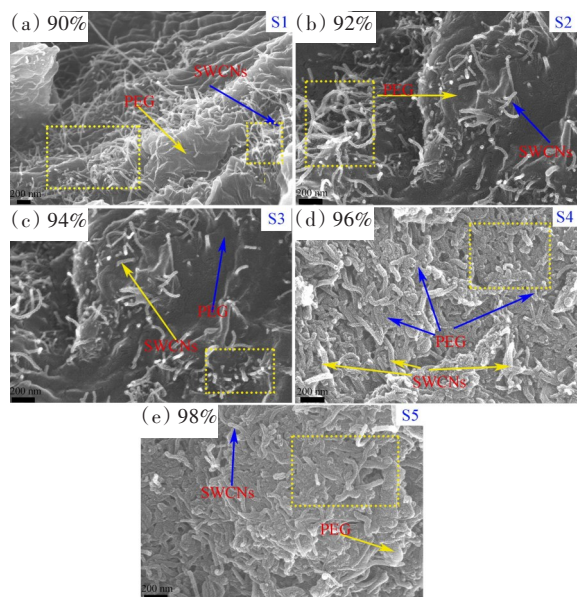


图 5 不同 SWCNs 含量的 PEG/SWCNs 纳米复合材料的 SEM 图像^[32]

Fig. 5 SEM images of PEG/SWCNs nanocomposites with different SWCNs content^[32]

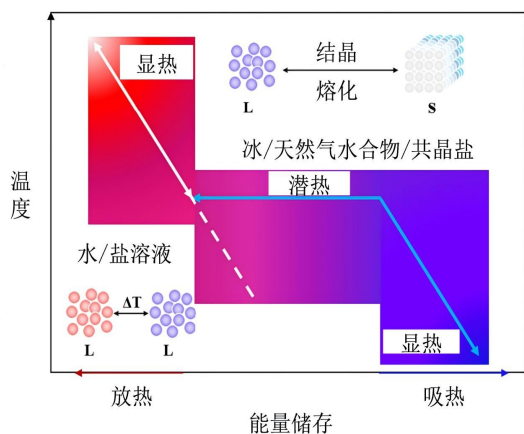


图 6 相变材料熔化过程中的储冷机制^[36]

Fig. 6 Cold storage mechanism of phase change materials during melting^[36]

表 2 固-液相变储冷材料的类型及其优缺点

Table 2 Types of solid-liquid phase change cold storage materials and their advantages and disadvantages

类型	典型材料	优点	缺点
有机相变储冷材料	石蜡	相变温度范围宽、化学稳定性好	导热系数较低
	脂肪酸	相变潜热大	存在过冷和相分离问题
	多元醇	无相分离	相变潜热值较低
无机相变储冷材料	水合盐	相变潜热大, 导热性好	易出现过冷和相分离现象
	熔盐	热稳定性好	热导率低, 存在腐蚀性问题
复合相变储冷材料	纳米复合材料	相变潜热大、循环稳定性好	成本高、导热系数小

CHENG 等^[42]采用真空浸渍法, 分别将铜粉 (Cu powder, CuP) 和碳纤维 (carbon fiber, CF) 加入乙醇中。通过超声分散, CuP 和 CF 在 12 h 内均匀

1.2.1 相变储冷材料

相变储冷材料作为相变储冷技术的核心, 受到了学者们的广泛关注。其中, 固-液相变材料因其来源广、价格低、体积变化小、储能密度大等优点, 在实际应用中最为广泛^[37]。根据化学成分的不同, 固-液相变储冷材料又可分为有机相变储冷材料、无机相变储冷材料和复合相变储冷材料三大类^[38]。有机相变储冷材料主要包括高级脂肪烃、脂肪酸及其酯类、醇类、芳香烃类及高分子聚合物类等, 无机相变储冷材料主要包括无机化合物、水合盐等, 复合相变储冷材料则是通过一定的组合方法将多种相变材料混合在一起得到的。表 2 为部分固-液相变储冷材料的分类及特点。

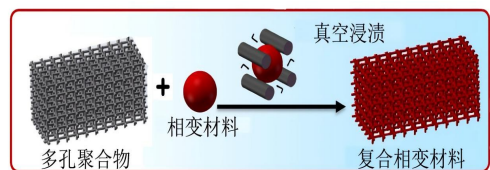
由于单一的无机相变材料或有机相变材料存在的缺点使其难以满足实际应用的需要, 而复合相变材料可以有效地结合多种材料的特性, 是极具研究潜力的研究方向^[39-40]。目前, 制备复合相变材料常用的方法是多孔基质吸附法。该方法通过浸泡、混合等方法, 将 PCM 吸附到具有多孔结构、大孔隙率、大比表面积的支撑材料的微孔结构中, 从而在宏观上制备出具有固态的复合 PCM^[41]。而浸渍法和插层复合法是常用的吸附方法。

浸渍法是一种将固体材料浸泡在含有特定成分的溶液中, 通过物理或化学作用使溶液中的成分附着在固体表面或渗透到其内部的方法。在制备复合相变材料时, 通过将支撑材料浸入含有活性物质的液体或气体中, 使液态 PCM 逐渐吸附在支撑材料上。当浸渍平衡后, 除去剩余液体, 再进行干燥、焙烧、活化等工艺, 即可获得所需的复合相变材料。其中, 浸渍法又可分为真空浸渍法和直接浸渍法。

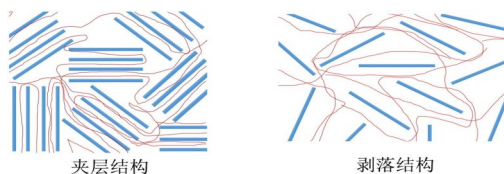
分散到乙醇中。在混合物中加入膨胀珍珠岩 (expanded perlite, EP), 以真空工位放入真空干燥箱中, 得到 EP-CuP 和 EP-CF 复合材料。最后, 将

十四醇(tetradecanol, TD)加入 EP-CuP 中,通过重复吸收过程取出 EP-CF,得到 TD/EP-CuP 和 TD/EP-CF 复合相变材料。图 7(a)为真空浸渍法制备相变材料的原理图。ARUNKUMAR 等^[43]采用直接浸渍法将壳聚糖气凝胶浸渍石墨烯纳米片作为光热吸收剂和大豆蜡为基础的热能储存材料集成到球形太阳能蒸馏器中。结果表明,这种创新的组合提高了太阳能吸收率,并使能量储存成为可能,从而实现全天候的淡水生产。

插层复合法主要利用层状硅酸盐矿物的层间可交换性,将相变材料插入到层状硅酸盐的层间结构中,从而制得具有特殊性能的复合相变材料。如图 7(b)所示,夹层复合结构可分为夹层结构和剥落结构。LI 等^[44]采用插层复合法制备了有机蒙脱土(organic montmorillonite, OMMT)/石蜡/接枝多壁纳米管(multi-walled nanotube, MWNT)复合相变材料。结果表明,复合材料的层间距离大于 OMMT,石蜡在 OMMT 层间插入。同时测得 OMMT/石蜡/接枝 MWNT 复合材料的导热系数比 OMMT/石蜡复合材料高 34%,比石蜡复合材料高 65%。



(a) 真空浸渍法制备复合相变材料原理^[45]



(b) 夹层复合结构示意图^[46]

图 7 浸渍法和插层复合法制备相变材料原理图^[45-46]

Fig. 7 Principle of phase change materials prepared by impregnation and intercalation^[45-46]

1.2.2 相变储冷材料优化技术

选择相变储冷材料时,需要根据不同的使用场景考虑诸多因素。材料相变潜热高意味着储冷效果更好;循环稳定性好则有更长的使用寿命,进而降低了成本;耐腐蚀性能和抗阻燃性能则影响着实际应用中的安全性^[47]。然而,大多数相变储冷材料难以兼顾这些性能指标,因此,采用不同的

优化技术来提高相变材料的整体性能成为研究人员关注的重点。

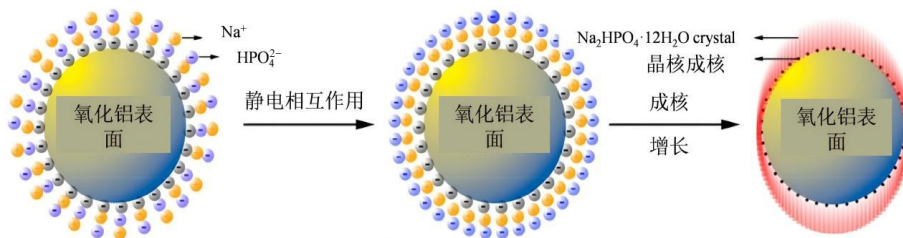
过冷现象是指相变材料在达到理论凝固温度时仍无法凝固,从而导致相变延迟,影响材料的整体性能。目前,通过添加高熔点的成核剂,促进相变材料的结晶过程,是降低材料过冷度的主要手段。YE 等^[48]为了克服水合盐固有的过冷问题,在得到的两种共晶 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -8% $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -15% $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 中以不同的质量分数加入 $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 。结果表明, $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的加入将两种材料的过冷度分别降到了 1.6 °C 和 0.5 °C。DENG 等^[49]使用氧化铝纳米颗粒作为成核剂来降低 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 的过冷度,结果表明添加质量分数为 5.3% 的氧化铝纳米颗粒使材料过冷度显著降低至 1.4 °C。通过分析,DENG 认为是氧化铝表面的负电荷通过静电效应与 PCM 离子强烈相互作用,有效地增加了成核的可能性,减轻了过冷,如图 8(a)所示。

相分离是指二元或多元液体相变材料在一定条件下分离成两种或多种不相溶的液相。相分离严重影响了相变储冷材料的循环稳定性,从而降低了使用寿命。目前,常见的解决方案是向相变材料中添加一定比例的增稠剂,形成凝胶状相变材料,如图 8(b)所示。LIU 等^[50]使用聚丙烯酸钠(poly acrylate sodium, PAAS)作为增稠剂来抑制的多碳纳米管改性水合盐(multi-walled carbon nanotube-glauber salt, MWCNT-GS)的相分离。结果表明,含质量分数 7% 的 PAAS 的 MWCNT-GS/PAAS 在水合物盐熔融状态下仍能保持原有的凝胶结构而不发生泄漏,且经过 500 次热循环,制备的复合材料仍保持了良好的热稳定性和化学稳定性。

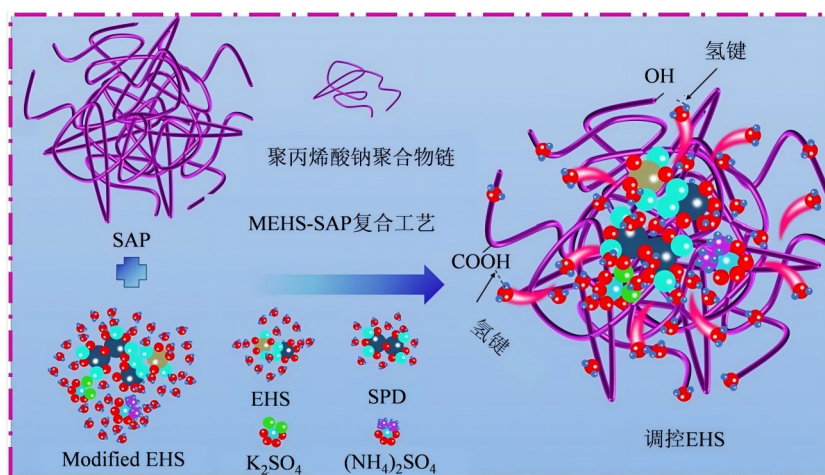
在交通领域,不同的应用场景对温度的要求也不同。因此,开发不同相变温度的相变材料是非常重要的。目前研究人员的重点是通过形成有机共晶化合物来调节相变温度。该方法是将两种或两种以上的有机物按一定比例混合,形成具有新化学成分的化合物,其熔点低于原组分。LIN 等制备了由 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 衍生的相变储冷材料,通过向其中加入一定比例的 KCl 和 NH_4Cl ,成功将相变材料的相变温度降到 10 °C 以下。李亚溪等^[51]

制备了以 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 共晶形成的水合盐(EHS),通过添加相变温度调节剂

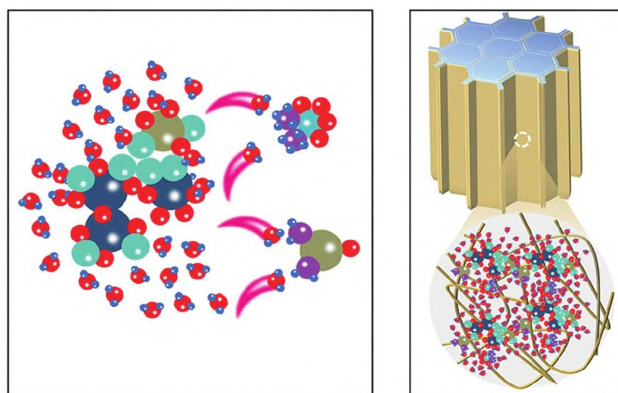
和高吸水性树脂(SAP)将材料的相变温度降低至 $6 \sim 7^\circ\text{C}$,其调控原理如图 8(c)所示。



(a) 氧化铝纳米颗粒促进成核机理图^[49]



(b) 凝胶状相变材料的形成机理示意图^[52]



(c) 相变温度调节剂和SAP调控EHS相变温度的机理图^[51]

图 8 相变储冷材料优化技术机理图^[49,51-52]

Fig. 8 Technical mechanism of phase change cold storage material optimization^[49,51-52]

2 相变储能技术在交通领域中的综合应用与创新

随着全球交通行业的快速发展和能源转型的迫切需求,相变储能技术作为一种高效、环保的能源解决方案,为电动汽车、公共交通系统乃至整个

交通基础设施的能源管理带来了革命性的变革。表 3 为相变储能技术在交通领域的应用现状。本章节旨在深入探讨相变储能技术在交通领域中的综合应用现状,分析其带来的技术创新与优势,并展望其未来的发展趋势,以期为交通行业的可持续发展提供新的思路与方向。

表3 相变储能技术在交通领域的应用现状

Table 3 Application status of phase change energy storage technology in field of transportation

应用场景	典型应用案例	技术成熟度	优点	缺点
冷链运输	冷藏车围护结构	高	增强隔热性能、无污染	封装成本较高
	储冷板	高	可充换模块化设计	存在泄漏风险
	制冷机组	一般	成本低、储能密度大	导热性较差
电动车	电池热管理	较高	提高能量密度和功率密度、成本低	导热性较差、材料选择和设计难度大
	供热系统	较低	温度稳定性好、使用寿命长	存在燃烧风险
	冷却系统	较低	温度稳定性好、使用寿命长	存在燃烧风险
航空航天	深空热管理系统	高	成本低、高储能密度	存在泄漏风险
交通基础设施	沥青	一般	调节温度、提高耐久性	液体渗漏、导热系数低

2.1 相变储能技术在冷链运输中的应用

随着人类生活水平的不断提高和生活方式的转变,人们对高品质商品的需求不断增加。一些生鲜、冷冻食品、乳制品等冷链商品已成为热门^[53]。因此,冷链物流已成为当前支撑国民经济不可或缺的一个环节。为了保证能源的可持续发展,提高能源效率,开发被动经济型冷链技术显得尤为重要^[34]。相变储能技术具有储能容量大、低碳、可循环利用等特点,在冷链运输领域已有广泛的应用。相比于其他散热方法,使用PCM的散热方法在减轻散热器重量方面具有非常显著的优势。

2.1.1 相变材料在冷藏车围护结构中的应用

冷藏车的围护结构是保持货物温度稳定、防止外界热量侵入的关键部分,通常选用聚氨酯发泡材料作为隔热保温层。为了进一步增强围护结构的隔热性能,在隔热保温层中填入相变储冷材料成为当下研究的重点。MICHEL等^[54]提出了一种含有PU-PCM泡沫复合层的冷藏车专用多层保温墙体的试验和数值设计方法,使用原位聚合的方法把相变材料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,如图9(a)所示。模拟结果表明,在“道路运输期间”穿过隔热墙内表面的热量下降了18%。

2.1.2 相变材料在储冷板中的应用

储冷板,又称共晶板。不同于相变材料在围护结构的填充应用,储冷板通过将低熔点冰盐的共晶溶液储存在面板容器中实现冷能储存。储冷板的外壳通常由高密度聚乙烯(high density polyethylene, HDPE)和改性耐寒聚氯乙烯等塑料薄膜制成,相变储冷材料也采用金属外壳封装^[55]。

TIAN等^[56]研究了一种用于便携式应用的冷能储存面板,该面板将热管嵌入到相变材料中,如图9(b)所示。试验结果表明,由于与热管的耦合,相变材料的相变过程可以得到增强和更好的管理。此外,在冷链运输过程中,不同的外部环境以及储冷板的摆放位置都会影响储冷板的制冷效果。DU等^[57]采用试验验证的模型,数值研究了五种不同摆放位置的储冷板对箱体冷却时间的影响,如图9(c)所示。发现20%位于顶部,20%位于侧壁,熔点为2℃的储冷板配置的制冷时间最长。

2.1.3 相变材料在制冷机组中的应用

在冷链运输领域中,制冷机组是至关重要的组成部分。它们通过循环制冷剂来实现冷却作用和冷藏车内部温度的控制,确保储存的货物在适宜的温度下保持新鲜和质量。与相变材料在围护结构和储冷板中的应用相比,相变材料在制冷机组中更多地充当一个辅助制冷单元。将相变材料与制冷机组相结合,不仅能有效降低制冷机组的能耗,同时也能更好地实现温度控制。LIU等^[58]提出了一种新型相变储冷装置(phase change cold storage unit, PCCSU)作为运输冷藏车的移动制冷装置,将PCCSU安装在内部隔热舱的前部,在非高峰期间通过制冷系统充电,如图9(d)所示。结果表明,PCCSU可显著提高冷藏车的温度控制性能。此外,与使用相变材料的传统制冷系统的单一温度配置相比,它还支持不同的温度设置,与柴油发动机驱动的传统机械制冷装置相比,PCCSU的能源成本降低了15.4%~91.4%。

2.2 相变储能技术在电动车中的应用

随着全球对环境保护和可持续发展的日益重视,电动汽车作为新能源汽车的代表,正逐步成为

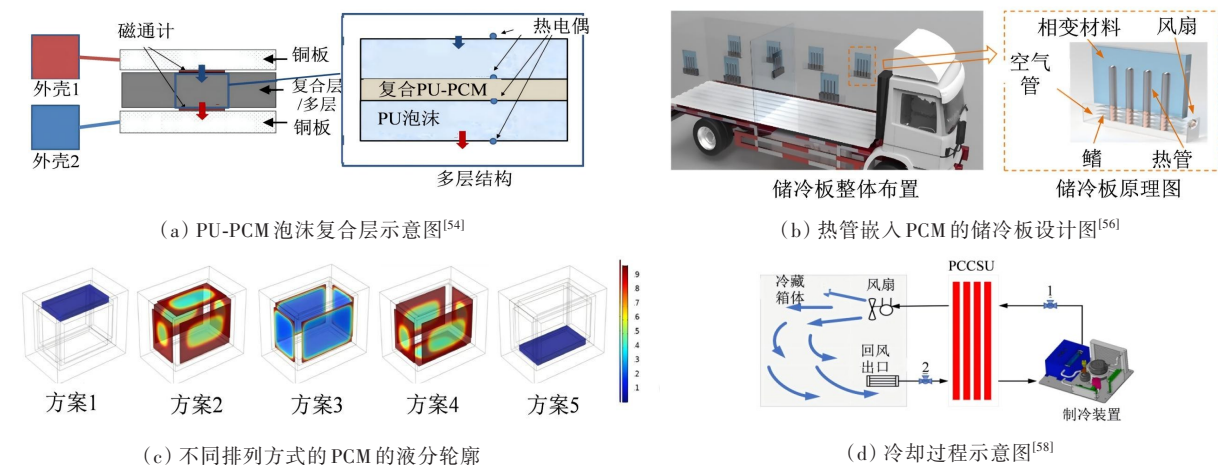


图9 相变储能技术在冷链运输中的应用^[54,56,58]
 Fig. 9 Application of phase change energy storage technology in cold chain transportation^[54,56,58]

汽车行业的重要发展方向。然而,动力电池作为电动汽车的核心部件,其性能与安全性直接受到温度管理的影响^[59-60]。因此,如何有效管理电池温度,成为电动汽车技术发展的关键挑战之一。相变储冷技术凭借其独特的优势,逐渐在电池热管理等领域崭露头角。相变储冷技术利用相变材料在相变过程中吸收或释放大量热量的特性,实现对电池温度的精确控制^[61]。相比传统的风冷和液冷技术,相变储冷技术不需要额外的泵或设备,能够更高效地降低电池温度,提高电池的性能和寿命,同时减少能源消耗,符合电动汽车绿色、节能的发展理念。

2.2.1 相变材料在电池热管理中的应用

锂离子电池凭借其出色的能量密度、紧凑的体积以及无记忆效应等优势,被广泛地应用于电动车领域。然而,锂离子电池在特定滥用条件下(如过充、短路、高温环境等)可能会引发内部化学反应的失控,进而可能触发热失控现象,这对电动车的安全性构成了严重威胁。为了有效管理锂离子电池的温度,防止热失控的发生,相变材料热管理技术近年来得到了广泛的关注和研究。岳珊^[62]以聚乙二醇为相变基材,通过交联共聚的方法制备了一种固-固相变材料,并将电池和相变材料堆叠在一起,设计了一种锂电池热管理模块结构,如图10(a)所示。试验结果表明,使用相变材料的电池组与没有使用相变材料的电池组相比,发生热失控的最高温度下降了69℃,发生热失控的时间延缓了93 s,有效提高了锂离子电池的热安全性。

WANG等^[63]将碳化金属有机骨架(metal organic framework-carbon, MOF-C)和氧化石墨烯气凝胶整合制成碳杂化气凝胶,再将月桂酸包埋在碳杂化气凝胶中制备 LA@MOF-C/GO 复合相变材料用于电池的热管理系统中。由于混合气凝胶的密集网络可以增强导电/导热性,而 MOF-C 和氧化石墨烯之间的协同效应有助于提高相变材料的负载能力。试验结果表明,复合相变材料表现出增强的储热和电热转换性能,在-20℃至45℃的环境温度范围内有效地提高了电池性能。

2.2.2 相变材料在供热系统中的应用

在寒冷的冬天,电动车电池的化学反应速度会减慢,导致电动车的续航能力下降。与此同时,由于车内供暖所需的能量也由电池供应,导致进一步缩短了续航里程,进而限制了电动车在寒冷地区的应用。相比于电池热管理系统中对冷能的需求,车内供暖系统对热能的需求同样是不可忽视的问题。相变材料因其高储能密度、低成本等优势,也被认为是一种解决电动车供热问题的有效手段。罗超鸿^[64]提出了一种基于铝硅合金的紧凑型相变储能系统用于电动车的供热,采用铝硅合金作为相变储热材料的储能供热装置,其原理如图10(b)所示。通过对装置保温性能、储热性能、强化传热方式以及不同供热需求的供热特性进行研究分析,发现与动力电池供热相比,该装置单位重量储热密度提升了10.2%,有效降低了用于车内供热的电池功耗。

2.2.3 相变材料在冷却系统中的应用

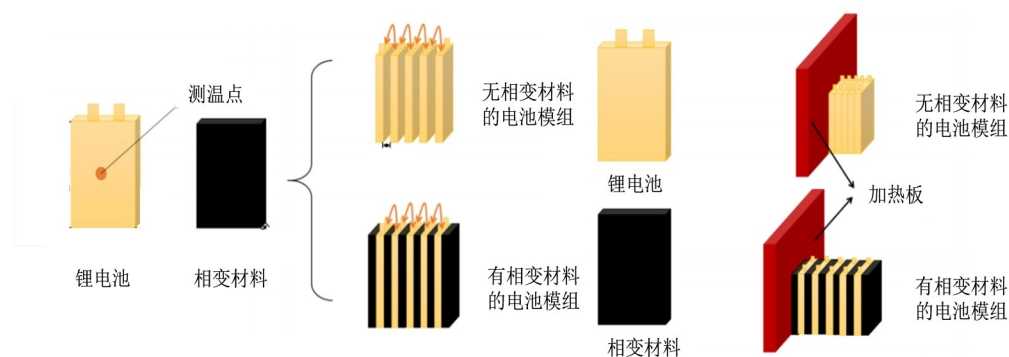
与相变材料在供暖系统中的应用相反,当汽车停在室外时,车内暴露在阳光下,车内温度过高。高温不仅会加速塑料材料的老化和释放有害气体,还会消耗额外的电力来驱动空调来制冷,从而导致车辆续航里程的减少。因此,将相变材料用于电动车的冷却系统成为研究人员关注的对象。QI等^[65]提出了一种基于相变材料的汽车舱室太阳能风冷系统,其原理如图10(c)所示。该系统主要由太阳能收集模块、电能存储模块和相变冷却模块三个部分组成,利用客舱环境空气与相变材料之间的热交换产生冷空气。通过热模拟仿真发现,该系统可以使车内温度保持在32℃以下约24 h,冷却车辆舱室效果显著。此外,该系统还可以在车辆行驶时补充空调为车内提供的冷量,以减少能源消耗和污染排放。

2.3 相变储能技术在航空航天中的应用

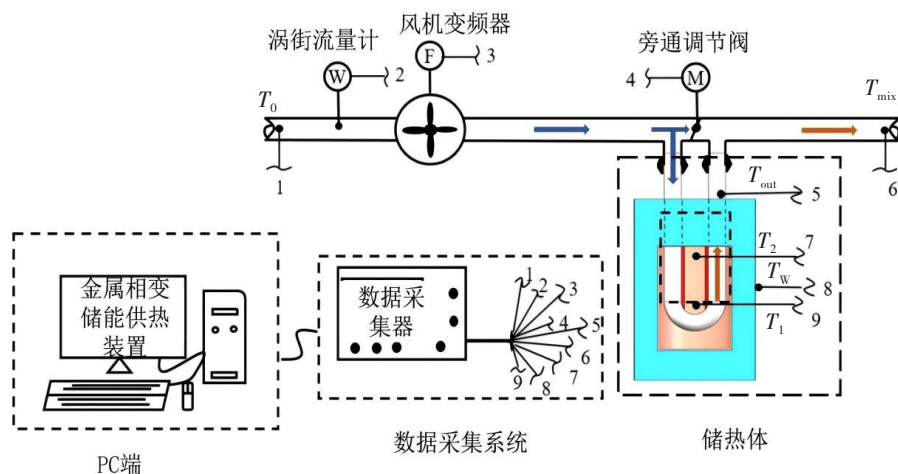
深空的气候非常恶劣,与地球上的气候有很大的不同。探测器从地球发射到外太空,温度会

发生巨大变化,甚至在很长一段时间内没有太阳辐射^[66]。相变材料具有在相变过程中吸收或释放大潜热且温度几乎恒定的特点,在深空探测热管理应用中具有竞争优势。与相变材料在电动车电池热管理系统中的应用相似,深空探测热管理同样需要相变材料储存的冷能来维持系统稳定运行,但后者还需考虑到深空微重力环境以及高速运行对相变材料带来的影响。

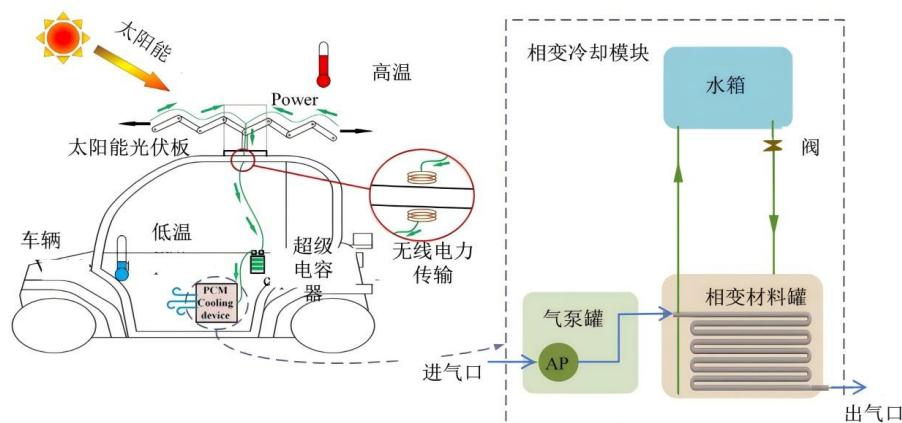
FIXLER等^[67]将使用相变材料的散热方法与其他散热方法进行了比较,发现PCM在减轻卫星散热器重量方面具有非常显著的优势。CHEN等^[68]利用PCM和置于PCM中的管内的两相纳米流体来模拟航空航天用平板锂离子电池的冷却过程,通过改变纳米流体速度和管的位置,计算了熔融PCM在不同时期熔体的平均温度和体积分数。结果表明,纳米流体的流速越快,PCM冷却效果越好,实现了对平板锂离子电池冷却系统性能的优化。



(a) 基于PCM的锂电池热管理模块设计图^[62]



(b) 相变储能供热装置原理图^[64]

(c) 基于PCM的汽车舱室太阳能风冷系统原理图^[65]图10 相变储能技术在电动车中的应用^[62,64-65]Fig. 10 Application of phase change energy storage technology in electric vehicles^[62,64-65]

然而,当航天器加速时,其内部物体所经历的加速度可能超过重力加速度,从而进入超重力状态。相反,重力在太空中对相变材料性能的影响极小,从而进入微重力环境。值得注意的是,重力的这种波动可能会影响PCM的热性能。因此,在航空航天领域,研究变重力条件下PCM的冷却性能具有重要意义。MO等^[69]开发了一种水/聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)海绵复合PCM,通过PVA海绵吸水,通过毛细力克服重力。这使得水态接近微重力状态,模拟了复合PCM在太空微重力条件下的储冷和放冷性能。实验结果表明,所研制的水/PVA海绵复合材料储冷密度达到254.8 kJ/kg时,冷释放效率随质量流量的增加而降低,0.6 g/s时为94%,2.0 g/s时为33%,有效地解决了冻结过程中体积膨胀的问题,为水基PCM在空间热控制中的应用开辟了一条道路。

2.4 相变储能技术在交通基础设施中的应用

将相变储能材料融入交通基础设施的建筑材料中(如路面材料、墙体材料等),可以实现建筑的绿色化和节能化,降低能源消耗和碳排放,提高能源利用效率。同时,在极端气候条件下,相变储能材料可以通过其吸热和放热的特性,帮助调节道路和桥梁的温度,减少因温度变化引起的结构损伤,延长使用寿命。在桥梁结构中应用相变储能技术,可以有效缓解因温度变化而产生的热应力,保护桥梁结构免受损害^[70]。对于需要特殊温度控制的桥梁结构(如钢箱梁桥),相变材料可以作为

一种有效的温度调节手段,保持结构的稳定和安全。此外,在电动汽车充电桩中,相变储能技术可被用于储存电能,以应对电网波动和高峰时段的电力需求。这不仅可以保证充电桩的稳定供电,还能提高电网的可靠性和经济性。

沥青路面作为交通基础设施的重要组成部分,其性能受温度影响显著。在高温下,沥青路面容易软化、产生车辙和推移;在低温下,则容易出现裂缝和脆性破坏^[71]。因此,如何有效调节沥青路面的温度,减少温度对路面性能的影响,成为交通工程领域的重要研究课题。相变材料可以嵌入到沥青混合料中,通过其相变过程吸收和释放热量,从而调节路面的温度。这有助于减少高温下的车辙和推移现象,以及低温下的裂缝和脆性破坏,提高路面的耐久性和使用寿命。WANG等^[72]采用高压发泡法制备一系列高导热中间相沥青基泡沫碳(mesophase pitch-based carbon foam, MPCF),用于合成增强导热性能的相变复合材料。通过有限元建模,建立了改进的高斯模型,分析了结构对导热系数的影响。结果表明,MPCF的导热性能得到极大的改善,且有效提高了材料的吸附性。相变材料的引入还可以在一定程度上改善沥青混合料的性能,如提高沥青的黏度、降低温度敏感性等。这有助于提升沥青路面的整体性能。尽管相变材料在沥青路面中的应用前景广阔,但相变材料的导热性能较差、易泄漏、成本较高等问题仍须解决。

3 结论与展望

随着交通与能源绿色融合发展的持续深入,相变储能技术在交通领域的应用范围正不断拓展。这项技术不仅显著降低了对传统能源的依赖程度,还通过高效的能量储存与释放机制,促进了能源结构的多元化和清洁化,极大提高了能源利用效率。在交通行业,相变储能技术被广泛应用于电动汽车、公共交通系统、航空航运以及交通基础设施等多个领域,有效减少了碳排放,为交通行业实现“双碳”目标提供了强有力的支持。然而,相变储能技术在实际应用中仍存在相变材料使用寿命短、相变材料泄漏、经济效益低等问题。这些问题限制了相变储能技术在交通领域的进一步发展。

因此,致力于研发具备优异循环稳定性、高相变潜热以及低成本特性的新型相变储能材料,是当前及未来科技发展的重要方向。同时,将纳米技术和复合材料技术广泛应用于相变材料的改性中,以提高其热导率、导热均匀性等关键性能。此外,针对这些新型相变材料,需同步开发具有高密封性和高效传热性能的封装技术,以确保材料在应用过程中的性能稳定与高效运行。进一步地,基于不同应用场景的具体需求,对相变储能系统进行优化设计,以最大化其储能效率。例如,在电动汽车中,可以设计更加紧凑、高效的相变储能模块,以延长车辆续航里程。同时,推动相变储能系统与其他交通系统组件(如电池管理系统、热管理系统等)的集成化设计,提高整体系统的紧凑性和协同性。在此过程中,推动相变储能技术与智能交通系统的深度融合,利用现代物联网、大数据及人工智能技术,实现对相变储能系统的远程实时监测与智能精准控制。这不仅将提升系统的整体运行效能,也将为交通领域的绿色、低碳、智能化发展贡献重要力量。

[参考文献]

- [1] 李亚溪,李传常,白开皓,等.热储能技术及其工程应用[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(3): 1-19. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.03.001.
LI Yaxi, LI Chuanchang, BAI Kaihao, et al. Thermal energy storage technologies and its engineering

- applications [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(3): 1-19. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.03.001.
- [2] YANG W S, DU Y X, DENG Q, et al. High thermal conductivity composite phase change material with Zn²⁺ metal organic gel and expanded graphite for battery thermal management [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 249: 123358. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123358.
- [3] ANISUR M R, MAHFUZ M H, KIBRIA M A, et al. Curbing global warming with phase change materials for energy storage [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 18: 23-30. DOI: 10.1016/j.rser.2012.10.014.
- [4] WANG C J, HE Z T, LI H L, et al. Evaluation on performance of a phase change material based cold storage house [J]. Energy Procedia, 2017, 105: 3947-3952. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.820.
- [5] ZHANG Y A, XU Y Q, LU R W, et al. Form-stable cold storage phase change materials with durable cold insulation for cold chain logistics of food [J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 203: 112409. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2023.112409.
- [6] LI Y C M, CHEN Y H A. Assessing the thermal performance of three cold energy storage materials with low eutectic temperature for food cold chain [J]. Energy, 2016, 115: 238-256. DOI: 10.1016/j.energy.2016.08.106.
- [7] CHOI M. Using pre-melted phase change material to keep payload warm without power for hours in space [C]//10th International Energy Conversion Engineering Conference. Atlanta, Georgia. Reston, Virginia: AIAA, 2012: AIAA2012-3894. DOI: 10.2514/6.2012-3894.
- [8] KHAN M M A, IBRAHIM N I, MAHBUBUL I M, et al. Evaluation of solar collector designs with integrated latent heat thermal energy storage: a review [J]. Solar Energy, 2018, 166: 334-350. DOI: 10.1016/j.solener.2018.03.014.
- [9] VENUGOPAL J, DUBEY R, MAHOR V, et al. Analysis and performance enhancement of newly designed solar based heat pump for water heating application [J]. Energy Reports, 2022, 8: 302-312. DOI: 10.1016/j.egy.2022.06.112.
- [10] HUA W S, LV X, ZHANG X L, et al. Research progress of seasonal thermal energy storage technology based on supercooled phase change materials [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 67: 107378. DOI: 10.1016/j.est.2023.107378.
- [11] YANG L, JIN X, ZHANG Y, et al. Recent development on heat transfer and various applications of phase-change materials [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 287: 124432. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124432.
- [12] ZHANG N, YUAN Y P, CAO X L, et al. Latent heat thermal energy storage systems with solid-liquid phase change materials: a review [J]. Advanced Engineering

- Materials, 2018, 20 (6) : 1700753. DOI: 10.1002/adem.201700753.
- [13] 周四丽, 张正国, 方晓明. 固-固相变储热材料的研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40 (3) : 1371-1383. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2020-0875.
- ZHOU Sili, ZHANG Zhengguo, FANG Xiaoming. Research progress of solid-solid phase change materials for thermal energy storage [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40 (3) : 1371-1383. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2020-0875.
- [14] XIA Y P, CUI W W, ZHANG H Z, et al. Preparation and thermal performance of n-octadecane/expanded graphite composite phase-change materials for thermal management [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2018, 131 (1) : 81-88. DOI: 10.1007/s10973-017-6556-1.
- [15] SALEEL C A, MUJEEBU M A, ALGARNI S. Coconut oil as phase change material to maintain thermal comfort in passenger vehicles [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019, 136 (2) : 629-636. DOI: 10.1007/s10973-018-7676-y.
- [16] NIE B J, PALACIOS A, ZOU B Y, et al. Review on phase change materials for cold thermal energy storage applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 134: 110340. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110340.
- [17] PITCHAPPA P, KUMAR A, PRAKASH S, et al. Chalcogenide phase change material for active terahertz photonics [J]. Advanced Materials, 2019, 31 (12) : 1808157. DOI: 10.1002/adma.201808157.
- [18] RAMPHAL I A, HAGERMAN M E. Water-processable laponite/polyaniline/graphene oxide nanocomposites for energy applications [J]. Langmuir, 2015, 31 (4) : 1505-1515. DOI: 10.1021/la5046783.
- [19] LIU W, LIN Q Y, CHEN S Y, et al. Microencapsulated phase change material through cellulose nanofibrils stabilized Pickering emulsion templating [J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2023, 6 (4) : 149. DOI: 10.1007/s42114-023-00725-1.
- [20] SARı A, ALKAN C, BIÇER A. Synthesis and thermal properties of polystyrene-graft-PEG copolymers as new kinds of solid-solid phase change materials for thermal energy storage [J]. Materials Chemistry and Physics, 2012, 133 (1) : 87-94. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2011.12.056.
- [21] HAN N, LI Z N, ZHANG X X, et al. Synthesis and characterization of cellulose-g-polyoxyethylene (2) hexadecyl ether solid-solid phase change materials [J]. Cellulose, 2016, 23 (3) : 1663-1674. DOI: 10.1007/s10570-016-0901-6.
- [22] TIAN C, NING J Y, YANG Y Y, et al. Super tough and stable solid-solid phase change material based on π - π stacking [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 429: 132447. DOI: 10.1016/j.cej.2021.132447.
- [23] MIRANDA D F, VERSEK C, TUOMINEN M T, et al. Cross-linked block copolymer/ionic liquid self-assembled blends for polymer gel electrolytes with high ionic conductivity and mechanical strength [J]. Macromolecules, 2013, 46 (23) : 9313-9323. DOI: 10.1021/ma401302r.
- [24] XIA Y P, ZHANG H Z, HUANG P R, et al. Graphene-oxide-induced lamellar structures used to fabricate novel composite solid-solid phase change materials for thermal energy storage [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 362: 909-920. DOI: 10.1016/j.cej.2019.01.097.
- [25] FALLAHI A, GULDENTOPS G, TAO M J, et al. Review on solid-solid phase change materials for thermal energy storage: Molecular structure and thermal properties [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 127: 1427-1441. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.08.161.
- [26] SHARMA A, TYAGI V V, CHEN C R, et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13 (2) : 318-345. DOI: 10.1016/j.rser.2007.10.005.
- [27] LACROIX M. Study of the heat transfer behavior of a latent heat thermal energy storage unit with a finned tube [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1993, 36 (8) : 2083-2092. DOI: 10.1016/S0017-9310(05)80139-5.
- [28] AGYENIM F, EAMES P, SMYTH M. Experimental study on the melting and solidification behaviour of a medium temperature phase change storage material (Erythritol) system augmented with fins to power a LiBr/H₂O absorption cooling system [J]. Renewable Energy, 2011, 36 (1) : 108-117. DOI: 10.1016/j.renene.2010.06.005.
- [29] ABDULATEEF A M, MAT S, SOPIAN K, et al. Experimental and computational study of melting phase-change material in a triplex tube heat exchanger with longitudinal/triangular fins [J]. Solar Energy, 2017, 155: 142-153. DOI: 10.1016/j.solener.2017.06.024.
- [30] MAHDI M S, MAHOOD H B, ALAMMAR A A, et al. Numerical investigation of PCM melting using different tube configurations in a shell and tube latent heat thermal storage unit [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2021, 25: 101030. DOI: 10.1016/j.tsep.2021.101030.
- [31] XIAO X, ZHANG P, LI M. Experimental and numerical study of heat transfer performance of nitrate/expanded graphite composite PCM for solar energy storage [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 105: 272-284. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.07.074.
- [32] QIAN T T, LI J H, FENG W W, et al. Single-walled carbon nanotube for shape stabilization and enhanced phase change heat transfer of polyethylene glycol phase change material [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 143: 96-108. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.03.065.
- [33] 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]. 储能科学与技术, 2023, 12 (1) : 180-

197. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0498.
- LI Mu, LI Yaxi, LI Chuanchang. Phase change storage technology and its application in air conditioning system [J]. *Energy storage science and technology*, 2023, 12 (1): 180-197. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0498.
- [34] SHA Y S, HUA W S, CAO H F, et al. Properties and encapsulation forms of phase change material and various types of cold storage box for cold chain logistics: a review [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: 105426. DOI: 10.1016/j.est.2022.105426.
- [35] 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. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2012.06.003.
- [36] ZHANG L X, XIA X R, LV Y, et al. Fundamental studies and emerging applications of phase change materials for cold storage in China [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 72: 108279. DOI: 10.1016/j.est.2023.108279.
- [37] 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. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.126.
- [38] HE Y, SONG Y L, YUAN Y P, et al. Experimental investigation on the supercooling and heat conduction of sodium acetate trihydrate/copper foam/YSZ composite phase change material [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2021, 143 (4): 3275-3284. DOI: 10.1007/s10973-020-09456-7.
- [39] HONG H Z, PAN Y, SUN H X, et al. Superwetting polypropylene aerogel supported form-stable phase change materials with extremely high organics loading and enhanced thermal conductivity [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 174: 307-313. DOI: 10.1016/j.solmat.2017.09.026.
- [40] YU X X, WANG Y H, YANG Q W, et al. De novo synthesis of microspheical cellulose 3, 5-dichlorophenylcarbamates: an organic-inorganic hybrid chiral stationary phase for enantioseparation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 238: 116480. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.116480.
- [41] ZHU L L, SHEN D K, LUO K H. A critical review on VOCs adsorption by different porous materials: Species, mechanisms and modification methods [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 389: 122102. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122102.
- [42] CHENG F, ZHANG X G, WEN R L, et al. Thermal conductivity enhancement of form-stable tetradecanol/expanded perlite composite phase change materials by adding Cu powder and carbon fiber for thermal energy storage [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 156: 653-659. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.03.140.
- [43] ARUNKUMAR T, SUH Y, LIM H W, et al. Sustainable solar desalination through interfacial evaporation: Integration of chitosan aerogel-impregnated graphene nanoplatelets solar evaporator and phase change material [J]. *Desalination*, 2024, 572: 117102. DOI: 10.1016/j.desal.2023.117102.
- [44] LI M, GUO Q G, NUTT S. Carbon nanotube/paraffin/montmorillonite composite phase change material for thermal energy storage [J]. *Solar Energy*, 2017, 146: 1-7. DOI: 10.1016/j.solener.2017.02.003.
- [45] LIU C H, XIAO T, ZHAO J T, et al. Polymer engineering in phase change thermal storage materials [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 188: 113814. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113814.
- [46] ZHAO Y X, ZHANG X L, HUA W S. Review of preparation technologies of organic composite phase change materials in energy storage [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, 336: 115923. DOI: 10.1016/j.molliq.2021.115923.
- [47] LI M, XIE B S, LI Y X, et al. Emerging phase change cold storage technology for fresh products cold chain logistics [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 88: 111531. DOI: 10.1016/j.est.2024.111531.
- [48] YE R D, ZHANG C, SUN W C, et al. Novel wall panels containing $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ - $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ /expanded graphite composites with different phase change temperatures for building energy savings [J]. *Energy and Buildings*, 2018, 176: 407-417. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.07.045.
- [49] DENG Y, LI J H, DENG Y X, et al. Supercooling suppression and thermal conductivity enhancement of $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ /expanded vermiculite form-stable composite phase change materials with alumina for heat storage [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6 (5): 6792-6801. DOI: 10.1021/acssuschemeng.8b00631.
- [50] LIU Y S, YU K Y, GAO X J, et al. Enhanced thermal properties of hydrate salt/poly (acrylate sodium) copolymer hydrogel as form-stable phase change material via incorporation of hydroxyl carbon nanotubes [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2020, 208: 110387. DOI: 10.1016/j.solmat.2019.110387.
- [51] 李亚溪, 谭振伟, 李传常. 相变储冷凝胶的制备与应用 [J]. *储能科学与技术*, 2022, 11 (12): 3845-3854. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0321.
- LI Yaxi, TAN Zhenwei, LI Chuanchang. Preparation and application of phase change cold storage gels [J]. *Energy storage science and technology*, 2022, 11 (12): 3845-3854. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0321.
- [52] LI C C, LI Y X, HE Y L. Optimization of super water-retention phase change gels for cold energy storage in cold chain transportation [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 61: 106719. DOI: 10.1016/j.est.2023.106719.
- [53] CHEN J X, LIAO W Z, YU C W. Route optimization for cold chain logistics of front warehouses based on traffic congestion and carbon emission [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 161: 107663. DOI: 10.1016/j.cie.2021.107663.
- [54] 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. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.117.
- [55] RAJ V A A, VELRAJ R. Review on free cooling of buildings using phase change materials[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(9): 2819-2829. DOI: 10.1016/j.rser.2010.07.004.
- [56] TIAN S, YANG Q F, HUI N, et al. Discharging process and performance of a portable cold thermal energy storage panel driven by embedded heat pipes [J]. *Energy*, 2020, 205: 117987. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117987.
- [57] DU J P, NIE B J, ZHANG Y P, et al. Cooling performance of a thermal energy storage-based portable box for cold chain applications [J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 28: 101238. DOI: 10.1016/j.est.2020.101238.
- [58] LIU G H, LI Q T, WU J Z, 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. DOI: 10.1016/j.est.2022.104435.
- [59] GAO H T, CHEN M Q, HONG J J, et al. Investigation on battery thermal management based on phase change energy storage technology [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2021: 553-562. DOI: 10.1007/s00231-021-03061-6.
- [60] DU Y X, XIAO G M, GUI Y W, et al. Study on heat transfer characteristics of phase-change energy storage unit for thermal management [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2014, 35(8): 1577-1589. DOI: 10.1007/s10765-014-1698-x.
- [61] ORÓ E, DE JONG E, CABEZA L F. Experimental analysis of a car incorporating phase change material [J]. *Journal of Energy Storage*, 2016, 7: 131-135. DOI: 10.1016/j.est.2016.05.003.
- [62] 岳珊.用于电池热管理的聚乙二醇基固相变材料热性能研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2024. DOI: 10.27722/d.cnki.gzgmh.2024.000134.
- YUE Shan. Study on thermal properties of polyethylene glycol-based solid-solid phase change materials for battery thermal management [D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2024. DOI: 10.27722/d.cnki.gzgmh.2024.000134.
- [63] WANG M, ZHANG C, WANG J Z, et al. Carbon hybrid aerogel-based phase change material with reinforced energy storage and electro-thermal conversion performance for battery thermal management [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 52: 104905. DOI: 10.1016/j.est.2022.104905.
- [64] 罗超鸿.电动车用铝硅合金相变储能供热装置供热特性研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022. DOI: 10.27029/d.cnki.ggdgu.2022.001292.
- LUO Chaohong. Study on heating characteristics of aluminum-silicon alloy phase-change energy storage heating device for electric vehicles [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022. DOI: 10.27029/d.cnki.ggdgu.2022.001292.
- [65] QI L F, PAN H Y, ZHU X, et al. A portable solar-powered air-cooling system based on phase-change materials for a vehicle cabin [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 150: 148-158. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.07.067.
- [66] WU C T, QIU C H, YUAN X L, et al. Numerical study and optimization of battery thermal management systems (BTMS) Based on Fin-Phase change material (PCM) in variable gravity environments [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 244: 122777. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.122777.
- [67] FIXLER S Z. Satellite thermal control using phase-change materials [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1966, 3(9): 1362-1368. DOI: 10.2514/3.28661.
- [68] CHEN H J, ZHOU W L, YUAN Y J, et al. Effect of tube location on the temperature of plate lithium-ion battery applicable in the aerospace industry in the presence of two-phase nanofluid flow inside a channel placed in phase change material [J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2023, 150: 624-635. DOI: 10.1016/j.enganabound.2023.02.051.
- [69] MO S Y, CHEN Y S, HUANG L P, et al. Preparation and the cold storage performance of water/PVA sponge PCMs for aerospace applications [J]. *Microgravity Science and Technology*, 2022, 34(3): 35. DOI: 10.1007/s12217-022-09946-3.
- [70] 李阳, 胡耀波, 肖洪清. 相变材料在冬季沥青路面中的应用分析[J]. *交通节能与环保*, 2024, 20(3): 148-152. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6478.2024.03.032.
- LI Yang, HU Yaobo, XIAO Hongqing. Analysis on the application of phase change materials in winter asphalt pavement [J]. *Transport Energy Conservation & Environmental Protection*, 2024, 20(3): 148-152. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6478.2024.03.032.
- [71] 杜小聪, 辛春福, 赵钰. 路用复合相变材料及相变改性沥青性能评价[J/OL]. *化工进展*, (2024-7-19) [2024-08-20]. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2024-0620.
- DU Xiaocong, XIN Chunfu, ZHAO Yu. Performance evaluation of road composite phase change materials and phase change modified asphalt [J/OL]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, (2024-7-19) [2024-08-20]. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2024-0620.
- [72] WANG X, LIU H, WANG Y, et al. Experimental and numerical investigations of mesophase pitch-based carbon foam used for thermal conductivity enhancement of paraffinic phase change materials [J]. *Materials Today Communications*, 2024, 38: 108420. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.108420.

(责任编辑:赵冰;校对:毛娜)