

适用于航空热管理的相变材料研究进展



刘士阳¹,梁导伦¹,周禹男²,许王子¹,黄一帆¹,沈德魁¹

1.东南大学 能源热转换及其过程测控教育部重点实验室,江苏 南京 211100

2.航空工业金城南京机电液压工程研究中心 航空机电系统综合航空科技重点实验室,江苏 南京 211106

摘要:航空领域的热管理至关重要,良好的热管理可以提高设备能效,提升系统的稳定性和可靠性。本文阐述了航空领域进行热管理应用的需求,分析了利用相变材料辅助热管理的优势,指明了当前航空领域热管理所需相变材料热物理性能面临的挑战。本文梳理了通过多种方法对相变材料热性能进行优化的方案,重点讨论了分子设计、共晶混合、分散添加剂和封装技术等用于制备复合相变材料的策略及其性能提升效果。同时,介绍了相变材料常用的换热性能测试和仿真方法。现有研究存在的主要问题是相变材料的分子设计和部分共晶混合缺乏系统化理论或模型指导。未来,结合机器学习、量子化学计算和分子动力学模拟等方法有望得到更理想的设计方法。通过综述相变材料在航空热管理领域应用的研究进展,期望为相关材料的设计、制备和性能验证提供指导和启示。

关键词:相变材料;航空热管理;分类;储热性能优化;换热性能测试

中图分类号:V259

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.06.001

在当前先进战斗机的发展中,航空电子设备、机电飞行控制执行器、发动机附件,以及武器和任务系统不断更新^[1],设计采用电动或混合动力推进系统的飞机的电气化程度更高^[2-4],相应产生的热损失不断增加。而热量的不断累积不仅容易导致设备过热并失效,危及飞行安全,还会影响飞行的舒适度及飞机性能。因此,航空器对热量控制的要求也越来越高。航空热管理是指在航空器运行过程中,对机体及其各个系统的热量进行有效控制和管理的技術。目前针对电子设备的冷却技术包括空气自然对流冷却、空气强迫对流冷却、液体冷却、相变冷却等。根据美国空军的一项调查,电子设备中与温度相关的故障百分比超过55%^[5],出于航空器安全的考虑,热管理系统必须可靠并且可适应各种极端环境。目前,大多数飞机产生的短时热负荷首先被传导至周围空气或者结构,并最终传输至周围大气或者机载燃油中^[6]。随着航空器越来越多地采用低重量(质量)、高强度的复合材料,许多机体结构的导热性能和热

容量显著下降。此外,燃油热容量有限并且流量以发动机需求为主,高超声速飞行还会受到气动加热的影响。因此,航空器迫切需要寻求新的冷源。考虑到航空器重量对飞行性能的显著影响,热管理组件需要尽量减少重量。为适应周期性、间歇性峰值的热负载,研究人员提出结合相变材料(PCM)以设计更小型化热管理系统的技术路径。

PCM是一类在相变循环过程中具有吸收和释放热量的固有能力的材料,可以在保持恒温的同时存储大量热量,具有储热密度高、相变温度可调、相变过程恒温等特点。其出色的相变潜热意味着PCM可以用于蓄热装置,提升器件温度的稳定性,降低设备热应力,延长航空器部件的使用寿命。PCM还有助于保持飞行过程中航空器部件在最佳温度范围内运作,防止因温度过高导致的电子元器件性能下降或失效^[7-8]。早在20世纪60年代开始,科学家们开始探索PCM在航天器热管理中的应用^[9-10],早期研究集中于简单的PCM,包括石蜡、脂肪酸、无机盐水合物等。20世纪末

收稿日期: 2025-01-08; 退修日期: 2025-03-27; 录用日期: 2025-04-29

基金项目: 航空科学基金(20230028069001); 中央高校基本科研业务费项目(2242025RCB0003)

引用格式: Liu Shiyang, Liang Daolun, Zhou Yunan, et al. Progresses in phase change materials for thermal management in aviation[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(6): 1-12. 刘士阳, 梁导伦, 周禹男, 等. 适用于航空热管理的相变材料研究进展[J]. 航空科学技术, 2025, 36(6): 1-12.

已开始使用PCM对航空电子设备模块进行瞬态热控制的研究^[1]。随后研究者广泛关注于纳米颗粒、复合材料等技术改进PCM性能^[12-13],优化PCM热管理系统的结构^[14],减小相变响应时间。近年航空热管理的需求向高效率、轻量化、智能化发展,针对不同组件设计个性化结构和材料,可实现变化环境下精准的温度控制,结合相变储能与热力发电、电磁屏蔽、抗辐射等功能^[15-17],满足航空器多任务需求。

王佩广等^[18]结合不同飞行器热管理特点,以PCM为冷源,提出了空气循环、蒸发循环、液体冷却回路、开式蒸发冷却、直接式相变蓄热冷却5种热控制方案,其中PCM以被动散热的方式工作,对热管理系统的小型化和轻量化起到关键作用^[19]。Shi Mingxuan等^[20]对混合涡轮电动支线喷气机的热管理系统进行了设计与分析,对比了增加冷却油和利用PCM(六水氯化镁,尿素-氯化钾共晶混合物)两种方案对起飞和爬升阶段飞机热管理系统散热能力不足问题的改善效果。结果表明,添加PCM对减轻重量和燃油消耗更为有利。因此,研究结合PCM的热管理系统对于降低系统所占空间和质量具有重要意义。

然而,目前PCM在航空器的应用中还存在一些问题。如相变温度不适宜、PCM自身热导率低、相分离、腐蚀性、液态易泄漏、冷热循环多次热存储性能下降等。同时,PCM在航空中的应用需要考虑超重、失重等状态的影响,制备的PCM缺乏在风洞和模拟飞行条件下的性能测试数据,难以验证其在实际应用中的热管理效果。对于PCM的长期应用,还需考虑环境毒性、腐蚀性和循环热稳定性等问题。此外,将PCM集成到现有航空系统中还需解决设计、制造、维护等多方面问题,开发智能化热管理系统还需结合传感器探索适应算法。

为推进PCM在航空热管理领域的实际应用,本文综述了目前该领域PCM的相关研究进展,总结了PCM分类,讨论了其储热性能优化方法和换热性能测试与仿真技术,分析了现有研究中存在的缺陷和不足,并对PCM的后续设计、优化和应用研究提出了思考和建议。

1 相变储热材料分类

PCM往往充当热管理系统中的冷源,图1说明了PCM与典型热控制模块中航空电子组件之间的相互作用,应用PCM通常应考虑以下因素^[21-23]:(1)熔点;(2)相变潜热;(3)比热容;(4)热导率;(5)相变过程的体积变化率;(6)过冷度;(7)热稳定性和化学稳定性;(8)制备和应用成本。

PCM根据相变形态的不同,可分为固-固、固-液、固-

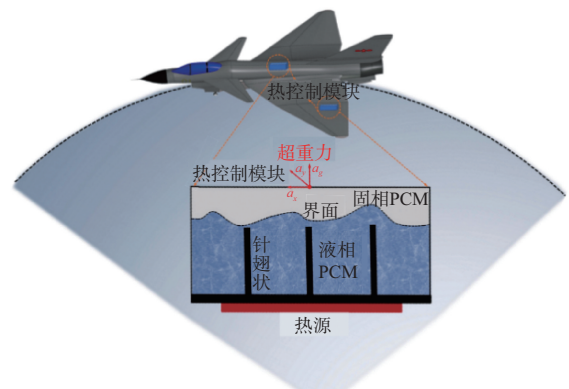


图1 电子元件的PCM热控制系统

Fig.1 PCM thermal control systems for electronic components

气和液-气相变。根据熔点 T_m ,可将PCM分为低温($T_m \leq 100^\circ\text{C}$)、中温($100^\circ\text{C} < T_m \leq 400^\circ\text{C}$)和高温($T_m \geq 400^\circ\text{C}$)PCM。PCM按成分可分为无机和有机,无机PCM中包含水合盐、熔盐、金属等,有机PCM包括石蜡、脂肪酸、醇、酯、聚合物等。无机相变材料普遍具有相变潜热高、导热系数大、密度大等优势,但存在金属壁面腐蚀性和过冷度大的缺陷,部分熔盐、金属及合金熔点过高,水合盐在吸放热循环中还会出现相分离。有机相变材料通常具有高化学稳定性和热稳定性、无腐蚀性、过冷度小、热循环稳定性高等特点,而低导热系数和低密度限制其储热性能,可燃性无法应对急剧升温,脂肪酸对金属表面具有腐蚀性,醇类则具有高过冷度的缺陷。

针对飞行器热载荷问题,固-液相变由于其高热能存储能力、宽相变温度范围和小体积变化率,在热存储中表现出更优越的应用潜力。电子元件工作温度范围一般为 $-5 \sim 65^\circ\text{C}$ ^[24],因而更关注低温PCM。具有更高热能存储容量,即更大的相变潜热和比热容的PCM可以降低所需重量。此外,想以更快的热量传输来控制温度变化则需要提高材料热导率。

无机PCM的高相变潜热展现了其应用潜力,Shi Mingxuan等^[20]利用相变潜热为150J/g的六水氯化镁和227J/g的尿素-氯化钾共晶混合物作为额外冷源,耦合热管理系统控制电力推进系统起飞和爬升过程中的峰值热负荷,该方案在增加控制温度的同时对减轻重量和燃油消耗有所帮助。然而,相分离(见图2)、高过冷度、低循环稳定性及易泄露性等因素,限制了无机PCM的长期应用^[25]。

有机PCM中的石蜡凭借其过冷度小、较高的相变潜热、高化学稳定性、价格低廉等优势而被广泛应用。Li Yanwei等^[26]结合有机PCM提出一种多层系统级热控制方

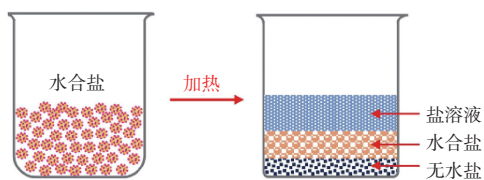


图2 相分离现象示意图

Fig.2 Schematic diagram of phase separation phenomenon

法以控制航空相机的温度,其中电荷耦合元件温度处于18~30℃时可获得高质量的图像。为了更好地吸收元件热量,选用低温PCM中相变温度为28~31℃的正十八烷,在18℃恒温室环境下,采用完全密封的铝合金封装容器盛放PCM对元件进行热控制,2h内电荷耦合元件温度水平可以维持在18~28℃之间,符合器件热控制需求,有助于获得更高质量的航拍图像。Wang Yilin等^[27]针对飞行器健康监测系统供电稳定性不足的问题,以熔化潜热213J/g的石蜡为储热材料,填充带有金属翅片的铜制容器蓄热单元,结合热电发电机和电存储单元设计了一种利用热能供电的装置。通过建立热等效电路模型并搭建试验装置,研究了设备参数对性能的影响并进行了参数优化。Cao Chenyu等^[28]选用有机材料硬脂酸和乙酰胺的共晶混合物,以膨胀石墨为基质材料,通过简单的共混和物理吸附法制备了复合PCM。通过将形状稳定的复合PCM融入波纹芯集成热防护系统,有效控制了温升,增强了高超声速飞行器热保护系统的热防护性能。

PCM在航空领域展现出其显著的热控制潜力,对低温、固-液相变、有机类型的PCM开展研究对于提升航空器的热管理性能具有深远的学术意义与实践价值;无机PCM则需进一步研究其过冷和相分离缺陷的矫正以提升应用潜力。探索具有更高潜热和目标熔点的PCM已成为适应不同航空热管理应用的关键。

2 相变材料性能优化

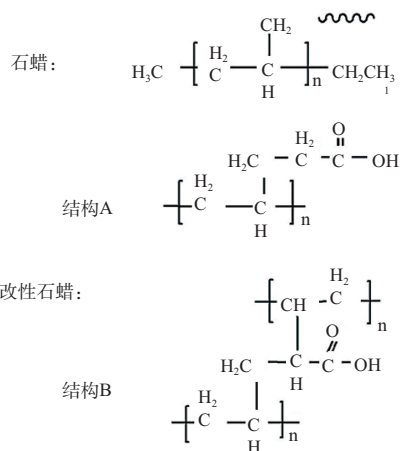
研究人员期望利用PCM设计小型化、轻量化的热管理系统,然而针对不同部件的需求,现有PCM难以同时满足所有要求,需对熔点、潜热、热导率、稳定性等性能进行取舍,如金属合金及熔融盐,在相变潜热高的同时普遍伴随高熔点;水合盐的熔点低且潜热较高,但通常附带相分离缺陷;石蜡的低熔点和低热导率限制了其进一步应用。本节总结了有机PCM及水合盐等材料的热性能优化策略,包括通过分子设计、共晶混合、使用添加剂、封装材料等技术制备复合PCM,从而更好地满足热管理设备的设计需求,以

应用于电子设备的热管理。

2.1 分子设计

PCM熔化过程中,材料吸收热能引起分子动能增加,改变分子排列规则,克服分子间力,从而增加分子间相互作用距离,破坏较为稳定的分子组织形状,最终导致材料由固相转变为液相^[29]。因此,分子间作用力对PCM的熔化起着决定性作用。部分研究人员提出以接枝官能团等方式改变分子间作用力,以改变PCM的熔点或相变潜热。

石蜡等长脂肪族链之间储能的主要驱动力是其强范德华相互作用,可以通过接枝不同基团改变分子间相互作用,进而改善石蜡的潜热。选择将极性基团引入石蜡是一种共识,Zhao Xiaowen等^[30]将极性单体丙烯酸借助引发剂过氧化苯甲酰经由自由基反应共价接枝到石蜡链上对石蜡进行改性,在接枝率0.78%时相变潜热达到顶峰,比纯石蜡的201.5J/g多16.1J/g,分析其潜热变化归因于形成了图3中更紧凑的结构B。而接枝率升高,许多分支点形成结构A将导致的分子链间距离增加和结晶度下降。

图3 改性石蜡的化学结构^[30]Fig.3 Chemical structure of modified paraffin^[30]

对于部分有机PCM,接枝不同长度烷基链已成为常用的结构设计方式。Liu Hao等^[31]将烷基链接枝到偶氮苯分子中,通过改变烷基链的长度,可以实现对PCM异构转变温度和熔点的控制,体现其应用于太阳能热存储的潜力。

将PCM接枝于纳米材料上,可以增强PCM的稳定性。Mu Mengya等^[32]通过原位自由基聚合可将聚十六烷基丙烯酸酯固定在纤维素纳米晶体上,所制备的固-固PCM相变潜热达到139.7J/g,其相变潜热增加的原因是聚十六烷基丙

烯酸酯和纤维素纳米晶体的协同相变效应。

由此可见,通过化学方法改变分子结构以改变分子间相互作用,可以改变相变潜热等热性能。设计不同的相变材料可能需要分析不同的相互作用机理,研究分子间范德华相互作用的改变需要关注分子量,而氢键的形成和断裂则需关注强极性基团,如羟基、羧基等功能化基团。此外,在纳米材料中接枝 PCM 可改善材料的稳定性。然而,设计得到的具体材料性能仍需进行试验测试,而无法通过系统化的理论方法进行预测。目前,研究人员通过不断设计新的分子结构,期望构建分子排列结构更紧密和规律的 PCM,从而获得更高的相变潜热。

2.2 共晶混合

共晶混合是一种有前景的 PCM 熔点调节手段,因为混合物的制备流程简易而被广泛应用, Schröder-Van Laar 方程^[33]将特定多晶体溶解度 x^* 与熔化焓 ΔH_f 、熔融温度 T_f 、熔融相与固体的热容之差 ΔC_p 、活性系数 γ^* 和固溶温度 T 联系起来,式(1)描述了二元系统大多数“理想”固-液平衡

$$\ln(x^*\gamma^*) = -\frac{\Delta H_f}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_f}\right) + \frac{\Delta C_p}{R}\left(\frac{T_f}{T} - \ln\left(\frac{T_f}{T}\right) - 1\right) \quad (1)$$

由于 ΔC_p 值较小,通常无法从已有的试验中获得,并且由于低于熔点温度时不存在液体,难以准确性地进行估计;理想液体混合活度系数为 1。为了选取理想熔点相变材料并减少不同混合比例的测试,文献[34]根据简化 Schröder-Van Laar 方程预测共晶混合物熔点 T ,如式(2)所示

$$\ln x_i = \frac{\Delta H_i}{R}\left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T}\right) \quad (2)$$

式中, x_i , ΔH_i 和 T_i 为第 i 个组分的摩尔分数、相变焓、纯组分熔点。

Zhao Pin 等^[35]选取常见脂肪酸制备共晶混合物,其结果验证方程对三元脂肪酸混合物预测的适用性。研究人员已经开展了多种不同共晶混合物的制备研究,发现结构类型相似或相同的 PCM 通常更易混合。通过调节不同石蜡的混合比,可获得相变温度在 17~49℃、相变潜热在 190~245 kJ/kg 的多种混合材料^[36]。将相变温度为 30.61℃、熔化潜热为 168.90 J/g 的癸酸和相变温度为 52℃、相变潜热为 240.47 J/g 的肉豆蔻酸以质量比 85:15 的比例混合,获得共晶混合物的相变温度为 20.68℃,相变潜热略微下降至 156.99 J/g,该共晶材料具有良好的热稳定性和化学稳定性^[37]。将质量比为 7:3 的十四胺和十六胺通过熔融共混法混合得到的共晶 PCM,二元相图如图 4 所示,相变温度从 36.7℃ 和 44.2℃ 降低至 29.08℃,相变潜热为 255.95 J/g,且具

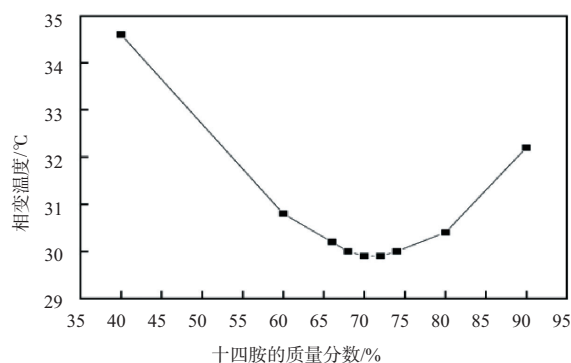


图4 十四胺与十六胺的二元相图

Fig.4 Binary phase diagram of tetradecylamine and hexadecylamine

有优异的循环热稳定性^[38]。

脂肪酸酯和脂肪醇混合也可获得相变温度较低的混合物, Ghadim 等^[39]制备并测量了此类共晶混合物的热物性,结果表明其相变温度为 20~33℃,相变潜热为 200~230 J/g,其中摩尔分数为 0.3 的棕榈酸甲酯与 1-十二醇混合,得到共混物的熔点为 20.34℃,比熔点更低的 1-十二醇还要低 5.25℃,相变潜热则比两者更高一方的棕榈酸甲酯高 9.82 J/g。将石蜡与脂肪酸根据比例混合得到的二元混合物,相变温度也更低,其中石蜡和棕榈酸共晶点质量比为 5:5,相变温度为 46.7℃,比原材料平均熔点降低 16.8℃,相变潜热 201.9 J/g,比原材料平均潜热降低 8.7 J/g^[40]。

共晶混合物种类众多,常见的有机混合物包括石蜡、脂肪酸、醇、酯、糖及糖醇等,无机混合物包括水合盐、熔盐、金属合金等。这些传统共晶混合物中,脂肪族有机物的混合可以获得相变温度在室温附近的 PCM,更符合航空电子元器件热管理所需熔点要求。近年来,许多学者对寻找低共熔溶剂产生了兴趣,其作为共晶混合物的一部分,主要特点在于熔点低于理想液体混合物预测的熔点^[41-42],表现出应用于相变材料熔点设计的极大潜力。然而,目前仍缺乏合适的热力学模型描述低共熔溶剂的熔点变化,这可能是由于其中氢键供体与受体间形成的氢键、阴阳离子间的静电力及整体分子几何构型组合不同的空间位置产生的相互作用过于复杂。

2.3 添加剂

在利用 PCM 热性能的过程中,不适配的热性能、低热导率和低稳定性限制了 PCM 的进一步应用。选择纳米颗粒添加至相变材料的方案因其操作简单而广泛应用。纳米颗粒为尺寸介于 1~100 nm 的颗粒,纳米颗粒具有高比表面积,一些纳米颗粒本身具有高热导率,同时由于界面效应和

微观结构变化等作用,添加纳米颗粒能够使材料的热物性得到增强^[43]。大量研究表明,添加纳米颗粒可以增强PCM的热导率,且相变潜热降低不明显甚至增加。同时,选择合适的纳米颗粒添加剂还可以改善过冷度高、相分离和稳定性差等问题^[44-45]。纳米颗粒增强型PCM的研究日益受到重视。

通常纳米颗粒分为非金属(碳、二氧化硅等)、金属及金属化合物,可通过熔融共混法配合超声法将其与PCM混合。目前,以石蜡为纳米颗粒分散基底的研究最为常见。Xu Bin等^[46]取石蜡与一定量的氧化铜、硫、油酸和羧基多壁碳纳米管进行混合,加入蒸馏瓶中以180℃加热并搅拌3.5h,可制得复合PCM,固态复合相变材料于30℃下的热导率提高了44.3%。Jamil等^[47]熔化了一定质量的石蜡,并称量质量分数为0.25%或0.5%的多壁碳纳米管、石墨烯纳米片和氧化镁加入熔融石蜡,用磁力搅拌器搅拌1h后在60℃的条件下再超声波超声处理2h,成功提高了复合PCM热导率,使光伏板最多降温9.94℃。Kalidasan等^[48]称量了固体石蜡放入样品瓶中加热熔化,并称量不同质量分数的纳米银颗粒加入其中,通过超声处理40min以达到均匀分散,结果表明含0.8wt%纳米银颗粒的复合PCM潜热无明显变化,热导率则从0.28W/(m·K)增加到0.44W/(m·K),其相变材料的电子显微镜图像如图5所示。

为了促使纳米颗粒均匀分散,减少沉降和团簇,许多纳米PCM需要进一步添加分散剂或表面活性剂。Nourani等^[49]将氧化铝纳米颗粒添加至石蜡中时,采用了硬脂酰乳酸钠作为表面活性剂以提升纳米颗粒的分散性,再经熔融混合和超声处理后制备得到纳米复合PCM。含有10wt%质量分数纳米氧化铝的样品在固态和液态下的有效导热系数提高率分别为31%和13%,加热和熔化时间减少了27%,该PCM在120次熔化/凝固循环后均表现出良好的热稳定性。George等^[50]在石蜡基质中添加导热聚苯胺或氧化铜纳米颗粒制备两类复合PCM时,添加了Triton X-100表面活性剂以促进均匀分散,经熔融共混并超声处理30min得到纳米复合PCM。200次热循环后热性能分析结果表明,石蜡/聚苯胺纳米复合材料的熔融温度较稳定,相变潜热降低了约14J/g,热分解温度为242.33℃。石蜡/氧化铜复合材料的熔融温度较稳定,相变潜热降低了约21J/g,热分解温度则降至233.17℃。

直接购买商用纳米颗粒固然便利,然而一些具有特殊结构的纳米颗粒仍需在实验室进行制备,如立体四针状纳米氧化锌须以微米级锌粉为原料,使用火焰传输合成法进

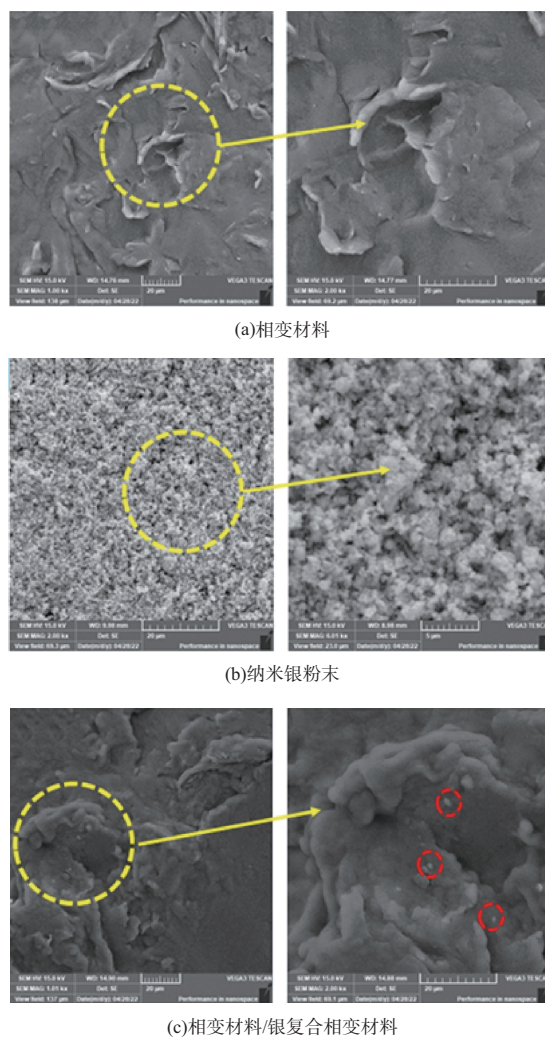


图5 PCM形态特征

Fig.5 PCM morphological behaviour

行合成。取一定量石蜡熔化,称量氧化锌颗粒和等质量的十二烷基苯磺酸钠表面活性剂,经超声处理60min可得复合PCM。该PCM的热导率最多可提高94.4%,熔化潜热最多可增加3.5%^[51]。研究人员广泛探索不同的添加剂结构,而其制备工艺往往较为复杂,对于实际应用还需进一步探索更便利的合成方案。

浸渍、压缩等工艺则需专业设备进行操作,Li Chao'en等^[52]将五烯链的多孔支撑材料粉末加入溶液中并在真空浸渍系统的协助下制备出复合PCM。Kim等^[53]将十八烷和膨胀石墨混合过程中则需要利用到捏合机。

添加纳米颗粒可有效解决PCM的低导热性问题,并改善过冷、泄漏、相分离和易燃性等稳定性问题。然而,纳米颗粒的使用也可能伴随着相变潜热下降的风险。为此,需要探索不同结构或组成的添加剂与PCM基底的相互作用

机制。此外,部分纳米颗粒增强型PCM需要使用昂贵的专业设备和复杂的操作步骤才能制备,探索性能更优异且制备更简易的纳米颗粒增强型PCM已成为新的技术要求。

2.4 复合改性手段

各种热性能增强策略并非完全独立,它们可以共同作用于同一材料。平衡不同物质间的相互作用关系,如添加剂在提升热导率和稳定性的同时可能会降低相变潜热,由多种性能增强策略指导下制备的复合PCM更具应用潜力。

Luo Zigeng等^[54]制备了形态稳定的复合PCM,方法为将癸酸-棕榈酸-硬脂酸三元低共熔混合物浸渍到纳米二氧化硅中。复合PCM的相变温度范围为17.16~26°C,相变潜热为99.43kJ/kg,导热系数为0.08239W/(m·K),同时经过500次加热/冷却循环后仍表现出良好的热稳定性和化学稳定性。Yuan Yanping等^[55]在棕榈酸-硬脂酸低共晶混合物中添加石墨烯纳米片或微米级膨胀石墨,研究了碳材料对复合PCM热性能的影响。随着负载量的增加,复合PCM的相变潜热降低,但热导率显著提升。Wu Tong等^[56]以氯化镁作为PCM基底,利用多壁碳纳米管与成核剂(氢氧化钙和氯化钙)降低过冷度,制备得到的纳米流体PCM过冷度可降低89%。他们还添加了增稠剂黄原胶以防止相分离和团聚,获得了相变温度为-34.54°C,相变焓为146.9kJ/kg,热导率为0.5344W/(m·K)的复合PCM,经过400次热循环后仍保持良好的稳定性。

选择多种PCM优化策略相互配合,平衡取舍部分性能,已成为PCM性能优化的重要部分。

2.5 封装

固液PCM相变过程中容易漏液的问题阻碍着其进一步应用,目前广泛采用的解决策略为使用前对PCM进行封装。PCM的封装有助于防止固-液相变过程中的液相泄漏,从而得到形状稳定的复合PCM和封装PCM。此外,封装增加了传热面积来改善传热。宏观封装条件下可通过设计不同的换热器结构进一步增强传热性能,微观封装条件下则主要采用微胶囊封装和多孔吸附。将颗粒包裹在涂层材料中或嵌入基质中形成胶囊还可能解决热不稳定和过冷问题。因此,选择合适的壳体材料和制备方案,可以有效地提升PCM的多项性能。

Fuensanta等^[57]采用细乳液聚合工艺将石蜡封装在苯乙烯-丙烯酸丁酯共聚物壳中,通过不同试验表征技术对纳米包覆PCM进行了分析。结果表明,纳米颗粒的相变温度降低,熔化潜热随PCM的增加而增加,同时经历220次热循环

后仍表现出较高的稳定性。Sun Zhao等^[58]设计并制备了聚苯胺/碳纳米管分级相变微胶囊,核心PCM为正二十二烷,材料显示出出色的相变可逆性、高工作可靠性、长耐用性、良好的形状稳定性和高耐热性。Konuklu等^[59]利用癸酸为核心PCM,采用一步法原位聚合技术制备了不同原料的微胶囊,图6为微胶囊的扫描电子显微镜图像,聚(三聚氰胺-尿素-甲醛)具有比聚(尿素-甲醛)微胶囊更高的稳定性,比聚(三聚氰胺-甲醛)微胶囊更高的相变潜热。

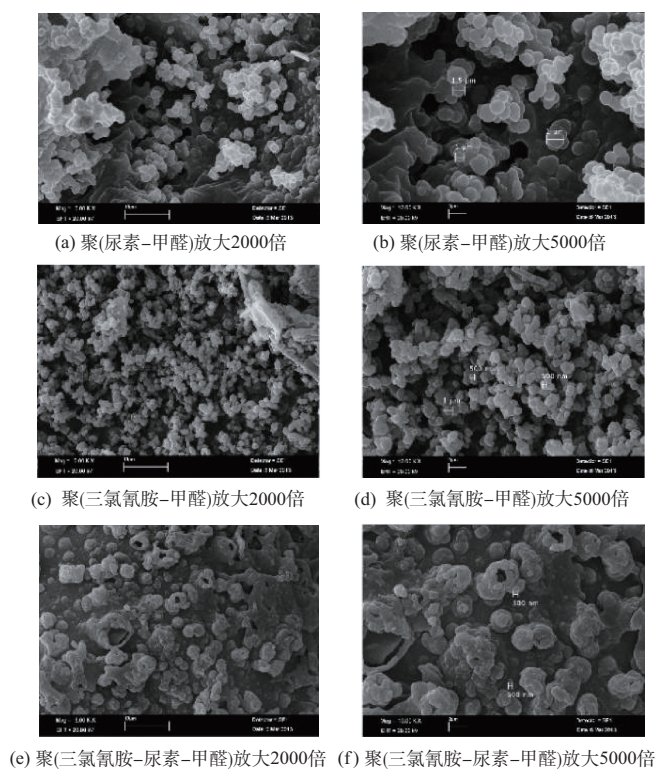


图6 微胶囊的扫描电子显微镜图像

Fig.6 Scanning electron microscope images of microcapsules

目前,PCM封装技术的研究已经较为丰富^[60-61]。封装PCM技术多样,但大多局限为有机PCM封装。高效的封装制备策略,热性能更好、粒径更均匀及水合盐等高潜热低稳定性PCM的封装技术仍有待进一步研究。

综上所述,各种性能优化方式各有特点,分子设计可设计结构丰富,但目前缺乏相变潜热与结构之间系统化理论指导结构设计,而制备所设计的PCM结构则需要一定的专业知识与实践经验;共晶混合降低PCM的熔点,其制备流程简单,相变潜热损失极小,但需要试验测定不同比例混合物以确定共晶点,非共晶点附近吸放热流程长,部分组合无法互溶或相图复杂,需要合适的筛选;PCM添加纳米颗粒或材料可改善结晶成核性能,碳基材料能提高导热系数,从

而缩短相变时间,优化储放热性能,但所添加材料因密度差异过大导致沉降或团聚影响其长久应用,可能需要进一步添加表面活性剂,增加了制备的复杂性;复合改性则是更全面考虑优化策略,从而定制所需的热性能,但需要广泛性的筛选和试验,提升了工作和时间成本;通常采用宏封装防止材料泄漏,微胶囊则可以改善材料的过冷度、相分离和泄漏特性,但对包覆材料、配比等要求高,同时微胶囊封装的操作性和技术性需要专业知识的支持。

3 换热性能测试与仿真

相变材料传热特性的测试和模拟对于它们在航空航天热管理系统中的成功应用至关重要。通过进行全面的测试和仿真,工程师可以准确得出这些材料在实际条件下的性能,及时识别出因相变材料相变温度偏移、实际热负荷超出相变潜热、长时间运行材料性能下降、低热导率散热性能差等可能引发系统失效的问题,从而确保热管理系统的安全性和效率。

相变材料具体性能的测试,目前普遍采用差示扫描量热仪测量相变温度和潜热,偏振光学显微镜图像观察复合材料的均匀性^[62],扫描电镜观察分散形态,X射线衍射分析晶型,傅里叶红外光谱分析复合材料与原材料相比是否有化学键变化等^[63]。Lian Peng等^[64]通过上述测试技术得出样品相变温度和相变潜热变化较小,无明显化学结构变化,200次热循环后性能稳定,验证了新型形状稳定的复合相变材料的实用性。

航空器中电子模块所执行的功能日趋复杂,热负荷也不断增加,为了节约时间与经济成本,研究人员期望利用仿真及数值模拟等方式预先验证所设计的相变蓄热装置的可行性。Zhou Hao等^[65]利用某仿真软件验证热控制器几何模型适用性,采用直接金属激光熔化技术制备由晶格和壳体组成的热控制器结构,向热控制器内填充PCM正十四烷,加热带作为热源,用热电偶测量相变热控制器顶面和底面的温度,热容量较传统工艺制作的热控制器可提高50%左右。Li Yanwei等^[26]根据航空相机内外热边界条件和热控制措施,利用结构-热-光学-性能模型按照能量等效原理简化航空相机热模型,结果表明,耦合正十八烷相变材料的多层热管理系统有效控制了相机温度,镜头温度为11.9~18.0℃,最大温差为6.1℃,更有利于高质量成像。Elshaer等^[66]使用开孔泡沫铜/PCM组合的热控制模块对卫星进行热管理,利用某仿真软件进行数值仿真,采用焓孔隙率法对相变过程进行建模,结果表明,PCM可以显著降低组件温

度,对于7W时瞬态温度变化,PCM外壳最高温度降低了约43.67%,10W时的瞬态温度显示相变材料外壳显示最高温度降低了约41.4%,组合翅片则会更进一步提升相变材料温度控制效果。

对于相变材料的性能测试,广泛采用差示扫描量热仪测量其核心参数相变温度和潜热,利用偏振光学显微镜、扫描电镜、X射线衍射和傅里叶红外光谱等辅助分析相变过程,更完整地描述相变性能。利用数值仿真和模拟计算大幅降低了热管理系统的设计,已逐渐被应用于新型PCM耦合热管理系统的研究。但是,目前采用的模型普遍过于理想,如设置相变材料均匀、各向同性、不可压缩,不能体现其实际应用中体积变化和边界效应等的影响;同时相变材料相变温度和相变潜热等在参数仿真过程中是固定理想,不会随温度变化速率或模拟时长而变化;相变材料模拟中许多忽略重力的影响,从而忽视了固-液密度差引起的对流换热;仿真模拟中边界条件也无法完整描述实际换热情况,导致热控制效果略有偏差。探索设计更贴合实际的仿真模拟来验证相变材料的热控制效果将更具有指导意义。

4 结论与展望

本文概述了PCM在航空领域的热管理应用,特别是其通过相变潜热调控电子设备温度和辅助设计轻量化热管理系统的功能。针对不同应用需求,PCM的选择必须考虑高密度材料,同时还需评估安全性、熔点、潜热、热稳定性、导热系数、比定压热容、制备成本等因素。为了制备符合需求的高性能PCM,总结了分子设计对相变材料改性,利用相似结构材料共晶混合物或制备低共熔溶剂降低熔点,使用适量添加剂、封装及对应制备方案等增加PCM热导率和稳定性,同时可多种方案协同优化PCM。对于实际应用复合PCM需进行性能测试,对常用分析相变过程的技术进行了介绍,引申至数值模拟仿真验证其相变性能。

未来,针对航空热管理的需求,制备具有优异热稳定性和适配热性能的复合PCM是一个重要的发展趋势。根据不同的性能要求,从关键参数选择基础项相变材料,再利用共晶混合或添加剂进一步优化相变温度、热导率、相变潜热等热性能。在PCM的研究中,离子液体普遍具有熔点可调、低蒸汽压、高热稳定性等独特的性能优势,在热管理领域展现了巨大潜力^[67]。近年来,面对分子设计中缺乏系统理论指导的问题,机器学习可以帮助筛选较为可能

的合适相变温度构型^[68],量子化学计算和分子动力学模拟技术^[69]在理解结构-性能关系和开发新材料相变温度和相变潜热的预测方法方面展现出巨大潜力。但目前尚存在计算量大、分子间相互作用类型复杂、无法完全分离不同相互作用的影响,相变过程中分子排列结构变化引起计算误差,相变潜热测量数据数量和准确性不足,难以支撑模型校准,机器学习方法自身精度限制等问题。今后需要不断优化算法降低计算量,提升计算精度,修正模型误差,以更好地指导PCM设计。微纳米封装和添加剂制备技术性和专业性限制了其高效试验,研究独特结构和尺寸和高效制备是未来趋势。数值模拟或试验验证材料稳定性阶段,还需进一步考虑外场影响,如重力场、压力场等影响,提升PCM航空应用的适用性。PCM与纳米技术和智能材料等新兴技术相结合,可能使创建多功能PCM以实现实时监控和自适应热管理成为可能。利用PCM的温度控制未来可能应用于月球基地建设甚至太空探索。PCM与储能系统结合使用,可以提高航空航天应用的整体能源效率。探索生物基等环保PCM,可以在保持高性能的同时最大限度地减少对生态的影响。

AST

参考文献

- [1] 李爱成, 周月, 胡文超. 热载荷利用及管理方法分析及展望[J]. 中国科技信息, 2014(12): 68-69.
Li Aicheng, Zhou Yue, Hu Wenchao. Analysis and prospect of thermal load utilization and management methods[J]. China Science and Technology Information, 2014(12): 68-69. (in chinese)
- [2] 张典, 梁培鑫. 电动飞机推进电机发展及关键技术综述[J]. 航空科学技术, 2024, 35(3): 1-10.
Zhang Dian, Liang Peixin. Overview of the development and key technologies of electric aircraft propulsion motors[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(3): 1-10. (in Chinese)
- [3] Asli M, König P, Sharma D, et al. Thermal management challenges in hybrid-electric propulsion aircraft[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2024, 144: 100967.
- [4] 周琪琛, 李春华, 张威, 等. 全电高速无人直升机电池风冷散热能力研究[J]. 航空科学技术, 2024, 35(4): 83-89.
Zhou Qichen, Li Chunhua, Zhang Wei, et al. Research on air-cooling effectiveness for the battery of electric high-speed unmanned helicopter[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(4): 83-89. (in Chinese)
- [5] Yeh L. Review of heat transfer technologies in electronic equipment[J]. Journal of Electronic Packaging, 1995, 117(4): 333-339.
- [6] Pal D, Severson M. Liquid cooled system for aircraft power electronics cooling [C]// Proceedings of the 2017 16th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 2017: 800-805.
- [7] Yue Qianli, He Changxiang, Wu Maochun, et al. Advances in thermal management systems for next-generation power batteries[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 181: 121853.
- [8] He Liange, Gu Zihan, Zhang Yan, et al. Review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles: Advances, challenges, and outlook[J]. Energy & Fuels, 2023, 37(7): 4835-4857.
- [9] Fixler S Z. Satellite thermal control using phase-change materials[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1966, 3(9): 1362-1368.
- [10] Schelden B G, Golden J O. Development of a phase change thermal control device[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1973, 10(2): 99-100.
- [11] Pal D, Joshi Y K. Thermal management of an avionics module using solid-liquid phase-change materials[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1998, 12(2): 256-262.
- [12] Zhao C Y, Lu W, Tian Y. Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs)[J]. Solar Energy, 2010, 84(8): 1402-1412.
- [13] Ren Qinlong, Guo Penghua, Zhu Jianjun. Thermal management of electronic devices using pin-fin based cascade microencapsulated PCM/expanded graphite composite[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 149: 119199.
- [14] Kalbasi R, Afrand M, Alsarraf J, et al. Studies on optimum fins number in PCM-based heat sinks[J]. Energy, 2019, 171: 1088-1099.
- [15] He Yingjie, Shao Yaowen, Xiao Yuanyuan, et al. Multifunctional phase change composites based on elastic MXene/ silver nanowire sponges for excellent thermal/ solar/

- electric energy storage, shape memory, and adjustable electromagnetic interference shielding functions[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(4): 6057-6070.
- [16] Li Xiaolong, Sheng Mengjie, Gong Shang, et al. Flexible and multifunctional phase change composites featuring high-efficiency electromagnetic interference shielding and thermal management for use in electronic devices[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 430: 132928.
- [17] Hu Boyang, Guo Hong, Li Ting, et al. Millefeuille-like phase change composite with multi-level oriented architecture for efficient thermal management and electromagnetic interference shielding [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 483: 149240.
- [18] 王佩广, 刘永绩, 王浚. 相变蓄热材料在高超声速飞行器热控系统中的应用[J]. *中国工程科学*, 2008, 10(7): 188-192.
Wang Peiguang, Liu Yongji, Wang Jun. Application of phase change materials to thermal controlsystems for hypersonic vehicles[J]. *Strategic Study of CAE*, 2008, 10(7): 188-192. (in Chinese)
- [19] Lyu Yigao, Zhang Gaopeng, Wang Qiuwang, et al. Thermal management technologies used for high heat flux automobiles and aircraft: A review[J]. *Energies*, 2022, 15(21): 8316.
- [20] Shi Mingxuan, Sanders M, Alahmad A, et al. Design and analysis of the thermal management system of a hybrid turboelectric regional jet for the NASA ULI program[C]. 2020 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS). IEEE, 2020: 1-24.
- [21] Rao Zhonghao, Wang Shuangfeng. A review of power battery thermal energy management[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(9): 4554-4571.
- [22] Oró E, De Gracia A, Castell A, et al. Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications [J]. *Applied Energy*, 2012, 99: 513-533.
- [23] Xu Yu, Wang Jiale, Li Tong. Experimental study on the heat transfer performance of a phase change material based pin-fin heat sink for heat dissipation in airborne equipment under hypergravity[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 52: 104742.
- [24] 郝俊娇, 潘日, 周刚, 等. 高热流密度电子元件中热管散热技术的进展[J]. *化工进展*, 2015, 34(5): 1220-1224+1231.
Hao Junjiao, Pan Ri, Zhou Gang, et al. Development of heat pipe cooling technology in high heat flux electronic components[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2015, 34(5): 1220-1224+1231. (in Chinese)
- [25] Dixit P, Reddy V J, Parvate S, et al. Salt hydrate phase change materials: Current state of art and the road ahead[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 51: 104360.
- [26] Li Yanwei, Yuan Guoqin, Xie Xinwang, et al. Multilayer thermal control for high-altitude vertical imaging aerial cameras[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(17): 5205-5214.
- [27] Wang Yilin, Cheng Kunlin, Dang Chaolei, et al. Performance and experimental investigation for a novel heat storage based thermoelectric harvester for hypersonic vehicles[J]. *Energy*, 2023, 263: 125885.
- [28] Cao Chenyu, Wang Ruixing, Xing Xiaodong, et al. Performance improvement of integrated thermal protection system using shaped-stabilized composite phase change material[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 164: 114529.
- [29] Strandburg K J. Two-dimensional melting [J]. *Reviews of Modern Physics*, 1988, 60(1): 161.
- [30] Zhao Xiaowen, Liu Pengfei, Ye Lin. Synthesis, structure and phase transition property of acrylic acid grafted paraffin[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2014, 1064: 37-43.
- [31] Liu Hao, Feng Yiyu, Feng Wei. Alkyl-grafted azobenzene molecules for photo-induced heat storage and release via integration function of phase change and photoisomerization [J]. *Composites Communications*, 2020, 21: 100402.
- [32] Mu Mengya, Huang Junwen, Chen Yuxiang, et al. Simultaneously enhance the heat storage capacity and shape stability of poly (hexadecyl acrylate) by immobilizing it to cellulose nanocrystal via in situ free radical polymerization[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2022, 4(2): 899-907.
- [33] Prausnitz J M, Lichtenthaler R N, De Azevedo E G. Molecular thermodynamics of fluid-phase equilibria[M]. U. S.: Pearson Education, 1998.
- [34] Yuan Yanping, Tao Wenquan, Cao Xiaoling, et al. Theoretic prediction of melting temperature and latent heat for a fatty acid eutectic mixture[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2011, 56(6): 2889-2891.
- [35] Zhao Pin, Yue Qinyan, He Hongtao, et al. Study on phase diagram of fatty acids mixtures to determine eutectic

- temperatures and the corresponding mixing proportions[J]. *Applied Energy*, 2014, 115: 483-490.
- [36] 闫全英, 王威. 低温相变石蜡储热性能的实验研究[J]. *太阳能学报*, 2006, 27(8): 805-810.
- Yan Quanying, Wang Wei. Experimental study on the thermal performance of paraffin[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2006, 27(8): 805-810. (in Chinese)
- [37] Jebasingh E B, Arasu V A. Characterisation and stability analysis of eutectic fatty acid as a low cost cold energy storage phase change material[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 31: 101708.
- [38] 张万鑫, 孙志高. 十四胺-十六胺二元相变材料的制备及其性能研究[J]. *化工新型材料*, 2023, 51(8): 257-260+267.
- Zhang Wanxin, Sun Zhigao. Preparation and properties of tetradecylamine-hexadecylamine binary phase change materials [J]. *New Chemical Materials*, 2023, 51(8): 257-260+267. (in Chinese)
- [39] Ghadim H B, Shahbaz K, Al-Shannaq R, et al. Binary mixtures of fatty alcohols and fatty acid esters as novel solid - liquid phase change materials[J]. *International Journal of Energy Research*, 2019, 43(14): 8536-8547.
- [40] 闫全英, 张静, 刘莎, 等. 工业石蜡和脂肪酸二元混合物储热性能研究[J]. *化工新型材料*, 2019, 47(8): 248-251.
- Yan Quanying, Zhang Jing, Liu Sha, et al. Study on the heat storage performance of the binary mixture of paraffin and fatty acid[J]. *New Chemical Materials*, 2019, 47(8): 248-251. (in Chinese)
- [41] Yu Dongkun, Xue Zhimin, Mu Tiancheng. Eutectics: formation, properties, and applications[J]. *Chemical Society Reviews*, 2021, 50(15): 8596-8638.
- [42] Hansen B B, Spittle S, Chen B, et al. Deep eutectic solvents: A review of fundamentals and applications[J]. *Chemical Reviews*, 2020, 121(3): 1232-1285.
- [43] Tan Shenhui, Zhang Xuelai. Progress of research on phase change energy storage materials in their thermal conductivity [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 61: 106772.
- [44] Schmit H, Rudaleviciene D, Rathgeber C, et al. Influence of basic raw materials on the maximum storage capacity of the phase change material calcium chloride hexahydrate[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 27: 101064.
- [45] Sharma R, Ganesan P, Tyagi V, et al. Thermal properties and heat storage analysis of palmitic acid-TiO₂ composite as nano-enhanced organic phase change material (NEOPCM) [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 99: 1254-1262.
- [46] Xu Bin, Zhang Caixia, Chen Chenghua, et al. One-step synthesis of CuS-decorated MWCNTs/ paraffin composite phase change materials and their light heat conversion performance [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018, 133: 1417-1428.
- [47] Jamil F, Ali H M, Nasir M A, et al. Evaluation of photovoltaic panels using different nano phase change material and a concise comparison: An experimental study[J]. *Renewable Energy*, 2021, 169: 1265-1279.
- [48] Kalidasan B, Pandey A, Saidur R, et al. Energizing organic phase change materials using silver nanoparticles for thermal energy storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 58: 106361.
- [49] Nourani M, Hamdami N, Keramat J, et al. Thermal behavior of paraffin-nano-Al₂O₃ stabilized by sodium stearyl lactylate as a stable phase change material with high thermal conductivity [J]. *Renewable Energy*, 2016, 88: 474-482.
- [50] George M, Pandey A, Abd Rahim N, et al. A novel polyaniline (PANI)/ paraffin wax nano composite phase change material: Superior transition heat storage capacity, thermal conductivity and thermal reliability[J]. *Solar Energy*, 2020, 204: 448-458.
- [51] Balasubramanian K, Pandey A K, Abolhassani R, et al. Tetrapods based engineering of organic phase change material for thermal energy storage[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 462: 141984.
- [52] Li Chao'en, Yu Hang, Song Yuan, et al. Synthesis and characterization of PEG/ ZSM-5 composite phase change materials for latent heat storage[J]. *Renewable Energy*, 2018, 121: 45-52.
- [53] Kim D, Jung J, Kim Y, et al. Structure and thermal properties of octadecane/ expanded graphite composites as shape-stabilized phase change materials[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 95: 735-741.
- [54] Luo Zigeng, Zhang Hua, Gao Xuenong, et al. Fabrication and characterization of form-stable capric-palmitic-stearic acid ternary eutectic mixture/nano-SiO₂ composite phase change material[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 147: 41-46.

- [55] Yuan Yanping, Zhang Nan, Li Tianyu, et al. Thermal performance enhancement of palmitic-stearic acid by adding graphene nanoplatelets and expanded graphite for thermal energy storage: A comparative study[J]. *Energy*, 2016, 97: 488-497.
- [56] Wu Tong, Xie Ning, Niu Junyi, et al. Preparation of a low-temperature nanofluid phase change material: MgCl_2 H_2O eutectic salt solution system with multi-walled carbon nanotubes (MW-CNTs) [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 113: 136-144.
- [57] Fuensanta M, Paiphansiri U, Romero-Sánchez M D, et al. Thermal properties of a novel nanoencapsulated phase change material for thermal energy storage[J]. *Thermochimica Acta*, 2013, 565: 95-101.
- [58] Sun Zhao, Zhao Lianjie, Wan Haixiao, et al. Construction of polyaniline/ carbon nanotubes-functionalized phase-change microcapsules for thermal management application of supercapacitors[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 396: 125317.
- [59] Konuklu Y, Paksoy H O, Unal M, et al. Microencapsulation of a fatty acid with Poly (melamine urea formaldehyde) [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 80: 382-390.
- [60] Umair M M, Zhang Y, Iqbal K, et al. Novel strategies and supporting materials applied to shape-stabilize organic phase change materials for thermal energy storage: A review[J]. *Applied Energy*, 2019, 235: 846-873.
- [61] Liu Chenzhen, Rao Zhonghao, Zhao Jiateng, et al. Review on nanoencapsulated phase change materials: preparation, characterization and heat transfer enhancement[J]. *Nano Energy*, 2015, 13: 814-826.
- [62] Mohamed N H, Soliman F S, El Maghraby H, et al. Thermal conductivity enhancement of treated petroleum waxes, as phase change material, by α nano alumina: Energy storage[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 70: 1052-1058.
- [63] Şahan N, Paksoy H. Investigating thermal properties of using nano-tubular ZnO powder in paraffin as phase change material composite for thermal energy storage[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 126: 88-93.
- [64] Lian Peng, Yan Ruihan, Wu Zhiguo, et al. Thermal performance of novel form-stable disodium hydrogen phosphate dodecahydrate-based composite phase change materials for building thermal energy storage[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2023, 6(2): 74.
- [65] Zhou Hao, Zhang Xiaoyu, Zeng Huizhong, et al. Lightweight structure of a phase-change thermal controller based on lattice cells manufactured by SLM[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 32(7): 1727-1732.
- [66] Elshaer A M, Soliman A, Kassab M, et al. Experimental and numerical investigations of an open-cell copper foam (OCCF)/ phase change material (PCM) composite-based module for satellite avionics thermal management in a thermal vacuum chamber (TVC) [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 75: 109572.
- [67] Li Qi, Yang Chunyun, Wang Shaohui, et al. Challenges and strategies for imidazolium ionic liquids as novel phase change materials for low and medium temperature thermal energy storage: A critical review[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2024, 395: 123812.
- [68] Kadulkar S, Sherman Z M, Ganesan V, et al. Machine learning-assisted design of material properties[J]. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 2022, 13(2022): 235-254.
- [69] Tafrishi H, Sadeghzadeh S, Ahmadi R. Molecular dynamics simulations of phase change materials for thermal energy storage: a review[J]. *RSC Advances*, 2022, 12(23): 14776-14807.

Progresses in Phase Change Materials for Thermal Management in Aviation

Liu Shiyang¹, Liang Daolun¹, Zhou Yunan², Xu Wangzi¹, Huang Yifan¹, Shen Dekui¹

1. Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 211100, China

2. Key Laboratory of Comprehensive Aviation Science and Technology for Aviation Electromechanical Systems, AVIC Jincheng Nanjing Electromechanical Hydraulic Engineering Research Center, Nanjing 211106, China

Abstract: Thermal management in aviation is critical. Good thermal management can improve equipment energy efficiency and enhance system stability and reliability. The need for thermal management applications in aviation is described, the advantages of using phase change materials to assist thermal management are analyzed, and the current challenges to the thermophysical properties of phase change materials required for thermal management in aviation are indicated. Optimization schemes for the thermal properties of phase change materials by various methods are reviewed, focusing on the strategies of molecular design, eutectic mixing, dispersed additives, and encapsulation techniques used for the preparation of composite phase change materials, as well as their performance enhancement effects. Commonly used testing and simulation methods for the heat transfer performance of phase change materials are introduced. The main problem with existing research is the lack of systematic theory or model guidance for molecular design and partial eutectic mixing of phase change materials. In the future, the combination of machine learning, quantum chemical calculations and molecular dynamics simulations is expected to lead to a more optimal design method. By summarizing the research progress of phase change materials for thermal management applications in aviation, it is expected to provide guidance and insights for the design, preparation and performance verification of related materials.

Key Words: phase change material; thermal management in aviation; categorization; optimization of thermal storage performance; heat transfer performance test

Received: 2025-01-08; **Revised:** 2025-03-27; **Accepted:** 2025-04-29

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (20230028069001); Fundamental Research Funds for the Central Universities(2242025RCB0003)