

引用格式: 白培加. 基于相变-辐射冷却的双模式热管理及其在低空飞行器中的应用前景[J]. 中国材料进展, 2026, 45(5): 425-431.  
BAI P J. Dual-Mode Thermal Management Strategy Integrating Phase Change and Radiative Cooling: Application Prospects in Low-Altitude Aircraft [J]. Materials China, 2026, 45(5): 425-431.

## 基于相变-辐射冷却的双模式热管理及其 在低空飞行器中的应用前景

白培加<sup>1,2</sup>

- (1. 天目山实验室, 浙江 杭州 311115)
- (2. 北京航空航天大学, 北京 100191)

**摘要:** 针对低空飞行器(如电动垂直起降飞行器(eVTOL)、长航时无人机)在复杂飞行环境中面临的热管理难题: 既需应对电池、电机等核心部件的瞬时高热负荷(峰值热流密度可达  $200\sim 500\text{ W/m}^2$ ), 又要适应高低温( $-40\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$ )循环、强太阳辐射( $\leq 1000\text{ W/m}^2$ )等极端工况, 且受限于轻量化、低能耗要求, 综述了相变吸热和辐射冷却技术的发展。提出一种双模式热管理技术, 通过有机整合相变复合材料的储热缓冲特性与辐射冷却的被动散热优势: 在高负荷阶段, 通过高潜热相变材料快速吸收瞬时热量; 在低温稳定阶段, 辐射冷却涂层将热量无能耗辐射至环境。该技术有望应用于 eVTOL 领域, 解决垂直起降阶段动力电池的热失控风险, 延长电池循环寿命; 在长航时无人机领域, 突破高空稀薄大气下对流散热效率衰减的瓶颈, 为低空飞行器热管理提供轻量化、低能耗、宽工况适配的创新方案, 对推动城市空中交通及低空作业装备的规模化应用具有重要意义。

**关键词:** 低空飞行器; 相变材料; 辐射冷却; 热管理; 双模式

中图分类号: TB34 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2026)05-0425-07

## Dual-Mode Thermal Management Strategy Integrating Phase Change and Radiative Cooling: Application Prospects in Low-Altitude Aircraft

BAI Peijia<sup>1,2</sup>

- (1. Tianmushan Laboratory, Hangzhou 311115, China)
- (2. Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Low-altitude aircraft, including electric vertical take-off and landing (eVTOL) and long-endurance unmanned aerial vehicles, face significant thermal management challenges in complex flight environments. They must not only cope with instantaneous high heat loads from core components (e.g., batteries and motors), with peak heat flux densities reaching  $200\sim 500\text{ W/m}^2$ , but also adapt to extreme conditions such as wide temperature ( $-40\text{ to }60\text{ }^\circ\text{C}$ ) cycles and intense solar radiation ( $\leq 1000\text{ W/m}^2$ ), while adhering to strict lightweight and low-energy-consumption requirements. This paper proposes a dual-mode thermal management technology that organically integrates the heat storage and buffering properties of composite phase change materials (PCMs) with the passive heat dissipation advantages of radiative cooling. During high-heat-load phases, high-latent-heat PCMs rapidly absorb transient heat. During low-temperature steady phases, radiative cooling coatings dissipate heat to the environment without energy consumption. In applications, this technology is expected to mitigate the risk of thermal runaway in eVTOL power batteries during vertical take-off and landing (while extending battery cycle life) and overcome the bottleneck of reduced heat dissipation efficiency caused by thin high-altitude atmospheres for long-

endurance unmanned aerial vehicles. It provides an innovative, lightweight, low-energy-consuming and widely adaptable thermal management solution for low-altitude aircraft, which is of great significance for promoting the large-scale application of urban air mobility and low-altitude operational equipment.

**Key words:** low-altitude aircraft; phase change materials; radiative cooling; thermal management; dual-mode

收稿日期: 2025-09-11 修回日期: 2025-11-12

基金项目: 浙江省博士后择优资助项目(ZJ2026181)

通讯作者: 白培加, 男, 1995 年生, 助理研究员,

Email: peijiabai@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202509010

## 1 前言

近年来,低空经济发展态势迅猛,已然成为全球经济增长的新焦点。与此同时,政府出台了《国家综合立体交通网规划纲要》、《通用航空装备创新应用实施方案(2024-2030年)》等一系列利好措施,低空经济已从概念设想迈向大规模产业化落地<sup>[1]</sup>。2023年我国低空经济规模已突破5000亿元,到2026年将会形成万亿级的市场规模<sup>[2]</sup>。然而,低空飞行器核心部件(动力电池、电机控制器、航电系统)的热管理难题正成为制约其性能提升与安全的关键瓶颈。在垂直起降阶段,电池的瞬时热流密度可达200~500 W/m<sup>2</sup>。当电池温度超过45℃时,将增加超过30%的容量衰减率<sup>[3,4]</sup>;在高空巡航时,稀薄大气使传统对流散热效率下降60%,宽温域工作循环会进一步加剧内部热应力损耗。与此同时,低空飞行器对热管理系统的轻量化要求严苛(质量占比≤15%),而传统主动冷却系统(如液冷、风冷)因能耗高(占整机功耗10%~15%)、质量大,难以适配未来高效低碳的发展需求,亟需探索新型被动-半被动热管理技术<sup>[5]</sup>。

在相变冷却领域,国内外学者已开展大量基础研究。国外研究团队<sup>[6]</sup>以石蜡为基体,复合石墨烯构建三维导热网络,将相变材料(phase change material, PCM)导热系数从0.2提升至5.8 W/(m·K),并通过铜泡沫封装实现1000次热循环无泄漏。国内清华大学团队<sup>[7]</sup>开发出脂肪酸酯-碳纳米管复合相变材料,将相变温度精准调控至35~40℃,成功将无人机电池模组温差控制在3℃以内。但现有研究多聚焦单一相变材料性能优化,未充分考虑低空飞行器振动(5~500 Hz)、湿度(80%~95% RH)等复杂工况对封装结构稳定性的影响,且缺乏与其他散热方式的协同设计。

辐射冷却技术作为被动散热的核心方向,近年来在航空领域展现出潜力。国外研发的SiO<sub>2</sub>/二甲硅氧烷(PDMS)复合涂层,在8~13 μm大气窗口发射率达0.94,太阳反射率为0.92,成功使卫星组件温度降低8℃<sup>[8]</sup>;国内研究团队通过仿生微纳结构设计,开发出垂直双面辐射器,将冷却功率密度提升至传统方案的2倍<sup>[9]</sup>。然而,现有辐射冷却涂层多针对高空恒定环境设计,在低空强太阳辐射(≤1000 W/m<sup>2</sup>)、气流冲刷(速度≥200 km/h)条件下,易出现太阳吸收率升高(>10%)、涂层剥落等问题,且未与相变储热形成动态适配机制。在双模式热管理探索方面,国际上仅少数团队开展初步尝试,德国DLR研究所将相变模块与辐射器串联,在无人机上实现基础控温,但切换依赖人工阈值设定,响应时间超5 s<sup>[10]</sup>;国内研究团队提出“相变-对流”复合系统,虽可降低能

耗,但未引入辐射冷却,高空散热效率受限<sup>[11]</sup>。

总体而言,当前研究存在3大短板:①相变材料与辐射冷却涂层的界面热阻未优化(>0.05 K·m<sup>2</sup>/W),协同散热效率低;②缺乏适配低空复杂工况的智能切换策略,无法动态匹配热负荷波动;③系统集成度低,质量与空间占用未满足飞行器轻量化要求。基于此,本文概述了相变吸热和辐射冷却技术的重要发展,提出一种双模式热管理技术,通过有机整合相变复合材料的储热缓冲特性与辐射冷却的被动散热优势,为低空飞行器在宽温域、高波动热负荷下的被动-半被动热管理提供支撑,突破传统主动冷却系统的能耗与质量瓶颈,为低空飞行器热管理提供高效、可靠、轻量化的创新解决方案。

## 2 相变材料在飞行器热管理中的应用

相变材料作为一种具有独特热物性的材料,近年来在材料科学领域备受瞩目。其核心特征在于特定温度下能够发生相转变,吸收或释放大量的潜热,从而实现对外围环境温度的有效调控(图1a)。这一特性使其在能源存储、建筑节能以及航空航天等众多领域展现出广阔的应用前景,尤其是在对热管理要求极为严苛的飞行器领域,相变材料正逐渐成为解决热控难题的关键技术路径(图1b~1d)。

在飞行器核心部件热管理中,相变材料展现出独特的优势。中国民用航空飞行学院团队<sup>[12]</sup>针对航空锂电池热安全问题开展系统研究,采用无机阻燃相变材料构建电池热缓冲层,通过“动压变温实验舱”(模拟20~101 kPa气压、-60~100℃温度范围)验证表明,该相变材料在500次冷热循环后潜热衰减仍低于8%,有效解决了锂电池在宽温域下的热失控风险。这一研究揭示,在低空飞行器特有的“高功率起飞-低功率巡航”动态工况中,相变材料能精准匹配电池热负荷波动。通过数值模拟研究进一步证实,具备高潜热特性的相变材料可将电池温度稳定在15~35℃的最优工作区间,避免低温下的容量衰减与高温下的循环寿命缩短(55℃时锂电池600次循环容量损失达70%)。

在相变材料的系统集成方面,航天科工三院306所<sup>[13]</sup>开发的微胶囊相变技术为低空飞行器提供了可靠的封装方案,其研制的相变温控装置通过精细化包覆与表面密封技术,在振动测试(加速度10 g,持续24 h)中实现泄漏率≤0.3%/循环,解决了传统相变材料在飞行器振动环境下的泄漏难题。北京航空航天大学团队<sup>[14]</sup>通过流延取向和正-负压真空浸渍法构建了导热系数高达85 W/(m·K)的相变复合材料(图2),有效解决了高功率电子器件的瞬时发热行为。正如作者团队前期工作

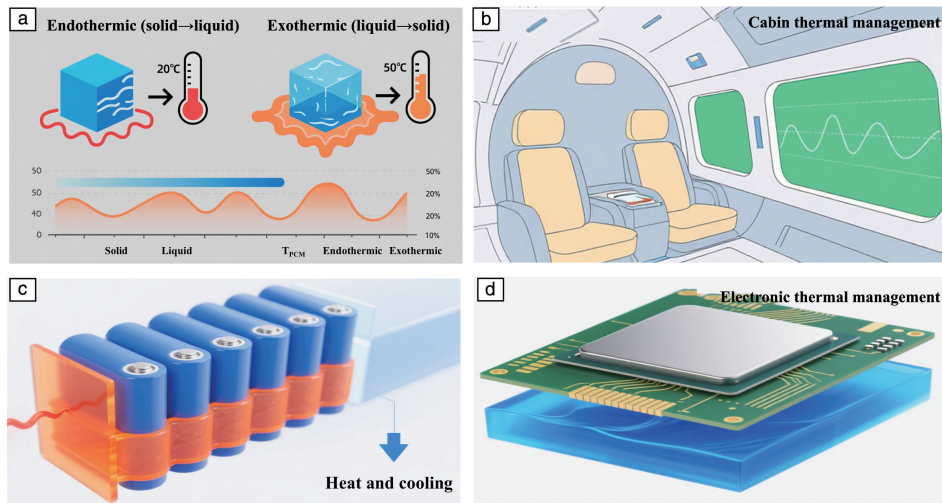


图 1 相变材料的吸/放热原理示意图 (a) 及其用于飞行器舱内热管理 (b)、锂电池散热控温 (c) 和电子元件热管理 (d)  
 Fig. 1 Schematic diagram of heat absorption/release of phase change materials (a) and their applications in thermal management inside aircraft cabins (b), heat dissipation and temperature control of lithium batteries (c), and thermal management of electronic components (d)

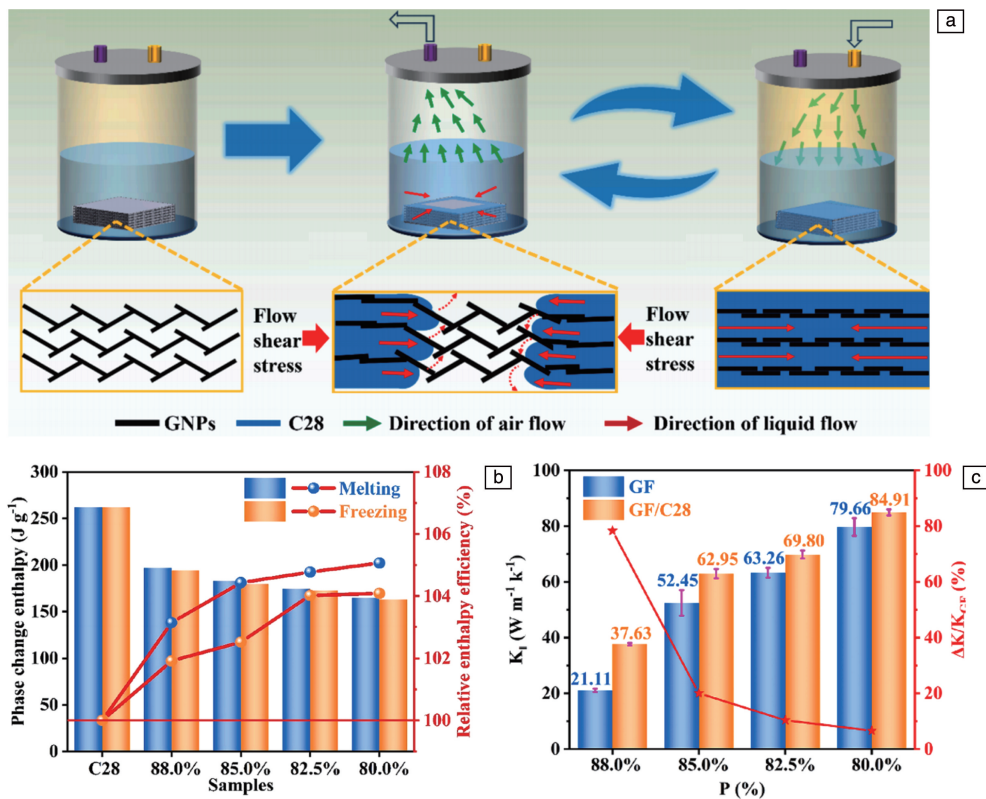


图 2 压力诱导制备 GF/C28 原理图 (a); C28 和 GF/C28 的熔融焓、结晶焓以及相对焓效率对比 (b); 复合前后不同孔隙率 GF 的径向导热系数对比 (c) [14]  
 Fig. 2 Schematic diagram of pressure-induced preparation of GF/C28 (a); comparison of melt enthalpy, crystallization enthalpy and relative enthalpy efficiency between C28 and GF/C28 (b); comparison of radial thermal conductivity of GF with different porosity before and after compounding (c) [14]

所示，相变材料可较好地应用在封装电子器件热管理中，将 Electro-PCM 与 Thermo-PCM 进行耦合，可以构建出具有协同电热相变效应的复合材料 [15]。该材料成功将模拟

电子芯片温度降低了 49.32 ℃，展现出卓越的冷却性能与实际应用潜力。

当前，相变材料在低空飞行器中的应用仍面临部分

挑战: ① 相变材料易出现过冷现象, 导致储热能力衰减, 需通过添加成核剂(如硝酸铜、石墨烯量子点)进一步优化; ② 相变材料与飞行器结构材料(如铝合金、碳纤维复合材料)的界面热阻仍较高( $>0.05 \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$ ), 影响传热效率, 需开发新型界面结合技术(如等离子体预处理、界面涂层); ③ 大规模应用成本较高, 如石墨烯增强相变材料的量产成本高于传统石蜡的 10 倍, 需通过材料配方简化(如用碳纳米管替代部分石墨烯)与工艺规模化(如连续化微胶囊制备)降低成本。

### 3 辐射冷却材料在飞行器热管理中的应用

辐射冷却技术可满足低空飞行器在复杂气象条件下

的热管理需求。传统风冷系统在 3000 m 海拔地区时, 热管理效率衰减 40%。辐射冷却材料则通过  $8 \sim 13 \mu\text{m}$  实现无源散热的特性(图 3<sup>[16]</sup>), 为 eVTOL、长航时无人机等装备提供了轻量化解决方案。其核心优势在于具备高太阳反射率(减少热源输入)与高红外发射率(增强热量输出)的双重特性, 在强日照与稀薄大气环境中展现出独特价值。

上海理工大学团队<sup>[17]</sup>开发了六方氮化硼/聚乙烯醇(h-BN/PVA)复合薄膜, 如图 4 所示, 通过仿生定向组装结构实现 96.5% 的太阳反射率与 0.95 的中红外发射率, 同时将导热系数提升至  $23.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , 这种“光-热”性能的协同优化使复合薄膜在无人机电子设备测试中,

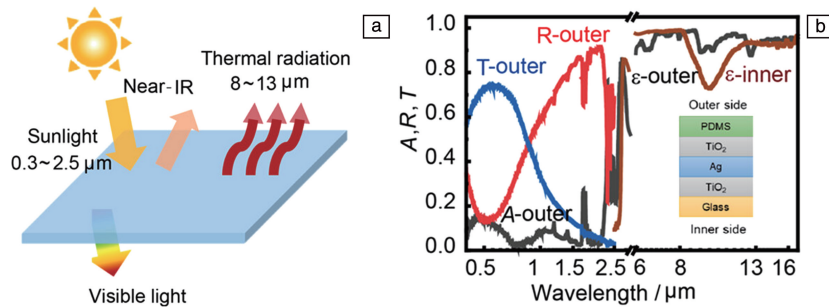


图 3 透明辐射冷却的理想外透射率、反射率和发射率示意图(a); PDMS/NIR/玻璃内外两面的吸收率、反射率和透光率(b)<sup>[16]</sup>  
Fig. 3 Ideal external transmittance, reflectance and emissivity spectra of transparent radiative cooling (a); absorption rate, reflectance and light transmittance of both the inner and outer surfaces of PDMS/NIR/glass (b)<sup>[16]</sup>

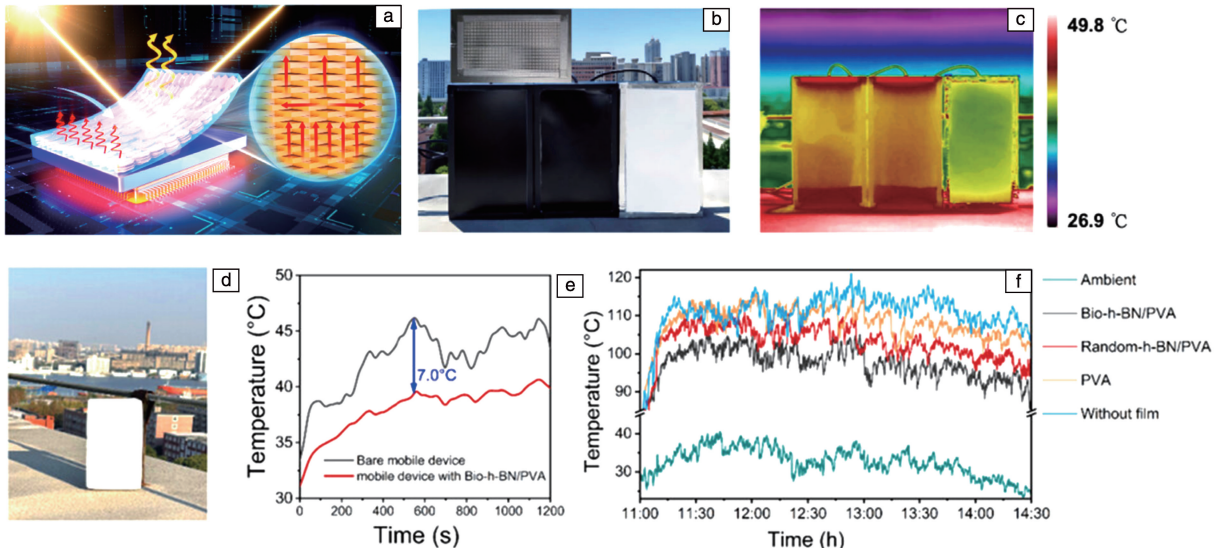


图 4 用于电子器件的 h-BN/PVA 复合薄膜示意图(a); 阳光直射下贴有 PVA 膜和 Bio-h-BN/PVA 复合膜的 LED 广告牌的照片(b)和红外热像图(c); 粘附 Bio-h-BN/PVA 复合膜的移动设备照片(d); 运行相同程序测量裸露移动器件和粘附 Bio-h-BN/PVA 复合膜的移动器件的温度曲线(e); 室外实验时测得的温度曲线(f)<sup>[17]</sup>

Fig. 4 Schematic diagram of the h-BN/PVA composite film used for electronic devices (a); photo (b) and infrared thermal image (c) of LED billboards attached with PVA film and Bio-h-BN/PVA composite film under direct sunlight; photos of mobile devices adhering Bio-h-BN/PVA composite films (d); the temperature curves of the exposed moving device and the moving device adhering to the Bio-h-BN/PVA composite film measured while running the same program (e); temperature curves measured during outdoor experiments (f)<sup>[17]</sup>

能将热平衡温度降低 18 °C 以上。北京航空航天大学团队<sup>[16]</sup>研发的多层纳米颗粒-聚合物超材料则在平流层飞艇应用中验证了极端环境适应性，地面实验显示其正午温度较传统 Silica/Ag 材料低 6.7 °C，而飞行试验更是记录到 15.4 °C 的最大降温效果，为低空飞行器的高空巡航场景提供了技术参照。针对低空场景的特殊性，中南大学团队<sup>[18]</sup>开展的外壳辐射冷却涂层研究表明，通过 3D 打印微结构设计可将热辐射效率提升至 92%，在载人 eVTOL 客舱温度控制中实现±1.5 °C 的波动精度，满足适航认证要求。

作者团队<sup>[19]</sup>设计了一步法制备的冷辐射制冷层，该材料具有超低辐射率(0.07)，允许按需温度无能量调制。与周围环境相比，辐射冷却侧温度下降了 4 °C。该策略为彩色低发射率材料的可扩展制造和应用提供了有效帮助。然而，当前辐射冷却的研究仍面临多重挑战。如高温环境下的辐射冷却性能稳定性不足，尽管新型涂层在 70 °C 时仍能保持 0.8 以上的发射率，但低空飞行器表面因气动加热产生的 140~650 °C 温度梯度，仍可能导致涂层开裂与性能衰减。在工程应用中，辐射冷却层与飞行器气动外形的兼容性问题突出，需在保证散热效率的同时避免增加空气阻力。此外，高反射率涂层的雷达隐身冲突、复杂工况下的耐久性测试标准缺失等问题，也制约着技术规模化应用。

#### 4 双模式热管理及低空飞行器应用

将相变吸热与辐射冷却相结合构建双模式热管理系统，不仅解决了单一散热方式的局限(相变材料储热有限、辐射冷却在高负荷时响应不足)，更契合低空飞行器对轻量化、低能耗的严苛要求。该双模式热管理技术有望进一步与飞行器结构件融合(如将相变材料灌注至机翼蒙皮蜂窝结构)，实现“结构承载-热管理”一体化，为城市空中交通、低空物流等场景的规模化落地提供关键热控支撑。

当前已有少量研究，如西南交通大学团队<sup>[20]</sup>提出的温度自适应相变-辐射冷却系统，巧妙地解决了传统辐射材料夜间过冷的难题。该系统采用 PDMS@BN 泡沫负载相变材料正十八烷，在 28 °C 相变点实现光学性能智能切换，高温时展现 96% 的太阳反射率与 93% 的红外发射率，净冷却功率达 58.6 W/m<sup>2</sup>；低温时通过相变放热补偿辐射损失，净加热功率为 6.8 W/m<sup>2</sup>(图 5)。这种自适应特性特别适合昼夜温差大的低空飞行环境，顺丰丰翼无人机采用类似技术后，单次航程从 80 提升至 120 km，验证了该技术的经济性<sup>[21]</sup>。南方科技大学团队<sup>[22]</sup>则创新性地 将相变材料与辐射冷却技术耦合，开发出 h-BN/PDMS 复合涂层的防泄漏冷却器，该系统在 2000 W/m<sup>2</sup> 热冲击下可实现 35.3 °C 的瞬时温降，其高反射/高发射辐射层(太阳反射率 92%、大气窗口发射率 94%)与相变层的协同作用，为无人机高空巡航阶段提供了无能耗散热路径。在无人机整机应用中，采用微胶囊相变树脂(相变温度 50 °C，潜热 180 J/g)填充电子舱间隙的设计，实现了“被动散热+结构承载”的功能一体化，使热管理系统质量降低 20%<sup>[23]</sup>。

目前，作者团队已初步搭建起相变-辐射冷却双模式热管理系统，通过“高导热相变材料模块+双层伪装色辐射冷却涂层模块”的协同作用，达成高效热控与环境伪装一体化的功能。其中，高导热相变材料以石蜡为相变基体材料，与聚烯烃弹性体交联后，借助真空浸渍工艺灌注到高导热三维网络骨架(石墨烯碳泡)内，该材料同时具备高导热性、防漏液特性以及优良的力学性能。伪装色辐射冷却涂层采用双层结构设计：底层为 TiO<sub>2</sub>/丙烯酸酯白色辐射制冷层，表层为红外高反射颜料粒子分散在 PDMS/正己烷溶剂体系伪装色涂层。该系统通过导热硅脂实现热量传导：相变材料一侧贴合发热电子元件以吸收热量，另一侧贴合设备外壳以导出热量；设备外壳表面涂覆的双层辐射冷却涂层则进一步强化散热。最终，系统

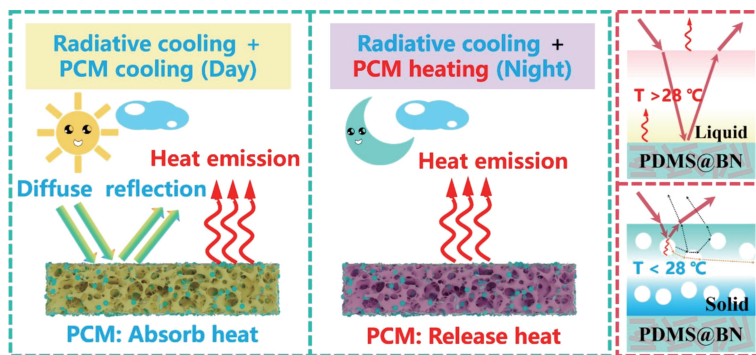


图 5 相变-辐射冷却的双模式热管理材料<sup>[20]</sup>

Fig. 5 Dual-mode thermal management material with phase change-radiation cooling<sup>[20]</sup>

实现“高效储热控温+被动辐射散热+多色伪装”的三重功能,适用于户外、特种装备等既要求高效热管理又需具备隐蔽性的电子设备场景。

## 5 未来发展方向

(1)材料性能向“高适配性、多特性协同”迭代。当前双模式系统的核心材料仍存在性能短板,在低空飞行器特有的高频振动(5~500 Hz)、宽温域循环(-40~60 ℃)下,仍面临封装泄漏(循环500次后泄漏率超5%)、潜热衰减(衰减幅度达10%~15%)等问题;辐射冷却涂层易出现涂层开裂和发射率衰减(衰减超8%)。未来需重点开发“多特性协同”的功能材料。可通过分子设计构建“有机相变基体-无机增强相-弹性封装层”三元体系,实现循环无泄漏,同时将相变温度调控精度缩小至 $\pm 2$  ℃,适配不同核心部件(电池35~45 ℃、电机50~60 ℃)的温度需求。针对辐射冷却涂层,需研发“耐温-抗老化-低气动阻力”一体化涂层,例如在SiO<sub>2</sub>/PDMS涂层中引入碳化硅纳米颗粒,提升耐温性能,同时通过微纳结构优化(如仿生蛾眼结构),降低空气阻力系数。

(2)系统集成:向“结构-热管理一体化、智能自适应”升级。现有双模式系统多以独立模块形式存在(如相变热沉、辐射冷却板),不仅占用飞行器内部空间,还需额外质量支撑(质量占比5%~7%),难以满足低空飞行器“轻量化、紧凑化”的设计需求。未来系统集成需向“结构-热管理一体化”方向设计,将双模式热管理功能融入飞行器核心结构,如将相变材料灌注至eVTOL的电池舱壳体(采用蜂窝状多孔结构),壳体外表面直接制备辐射冷却涂层,使壳体同时具备“承载-储热-散热”三重功能。构建基于传感器与AI算法相融合的新系统,通过传感器采集工况数据,并结合深度学习算法,预测热负荷变化趋势,动态调整相变储热优先级与辐射冷却时长。

(3)场景适配:向“极端环境、多类型飞行器”拓展。当前双模式系统的验证场景多集中于常规低空环境(温度0~35 ℃、海拔3000 m以下),而低空飞行器的应用边界正不断拓展至极地科考、高原作业(海拔5000 m以上)、临近空间巡航(海拔10~20 km)等极端场景。未来需针对不同场景与飞行器类型开展定制化研发:对于极地无人机,可在相变材料中引入低熔点金属,实现低温下主动放热,同时优化辐射冷却涂层的低温稳定性。对于氢能eVTOL,可设计“相变储热-辐射冷却-氢燃料预热”协同系统,利用相变材料吸收燃料电池产热,冬季通过辐射冷却控制电池温度,同时将储存的热量用于氢燃料箱预热(避免燃料结冰),提升能源利用效率。

(4)工程化落地:向“标准化、低成本、高可靠”推

进。多基于实验室静态工况(如恒定温度、无振动),模拟未来低空飞行器的动态工况(如振动、气动加热、紫外线照射)。石墨烯增强相变材料的量产成本约为200元/kg(是传统石蜡的10倍),高发射率辐射冷却涂层的制备成本约为500元/m<sup>2</sup>,制约规模化应用。需通过工艺优化降低成本,例如采用连续化微胶囊技术制备相变材料,开发辊涂、喷涂、刮涂等更便捷的工艺替代真空镀膜制备辐射冷却涂层。未来需联合飞行器厂商开展长期户外验证,例如在物流无人机上搭载双模式系统进行常态化运营测试,记录不同季节、不同海拔下的性能衰减规律,建立可靠性数据库,为系统优化提供数据支撑。

未来3年,双模式热管理技术将迎来重大变革。这些变革不仅将使低空飞行器的续航能力提升,更将推动热管理系统从“性能保障部件”升级为“能效优化核心”,为低空经济的安全、高效、可持续发展提供坚实支撑。当双模式技术与氢能动力、自动驾驶等技术形成协同创新合力,低空交通网络的“热韧性”将得到根本性提升,最终解锁城市空中物流、应急救援等场景的商业化潜力,推动城市空中交通、低空物流等场景从“技术验证”走向“商业化落地”。

## 6 结 语

(1)基于相变-辐射冷却的双模式热管理技术,通过有机融合相变材料“被动储热缓冲”与辐射冷却“无源高效散热”的特性,可构建适配低空复杂飞行场景的热管理新方案,从根本上突破传统单一散热方式的性能局限,为低空飞行器热管理提供全新技术路径。

(2)双模式协同性能显著优于传统方案,可通过“高负荷储热-低负荷散热”动态适配机制,降低质量和能耗,同时规避主动散热的管路泄漏风险。应用场景适配性覆盖多元低空应用需求,可抑制动力电池热失控,延长循环寿命,具有在常规低空、高空、极寒等多元场景的普适性。

(3)工程化潜力为规模化落地基础。通过“结构-热管理一体化”可设计相变材料灌注电池舱壳体、辐射涂层直覆蒙皮,契合轻量化需求;借助连续化微胶囊工艺与辊涂技术,降低相变材料与辐射涂层成本;配套的多传感器融合智能调控模块可进一步保障工程化应用的可靠性与精准性。

(4)对低空经济发展的关键意义:该技术从材料研发、系统集成到工程化落地可形成完整技术链条,其“被动式、轻量化、高适配”的核心优势,不仅破解了低空飞行器热管理的核心难题,更将为城市空中交通、低空物流、应急救援等低空经济场景的商业化落地提供关键热

控保障, 推动低空装备向“更安全、更高效、更低碳”方向升级, 助力低空经济规模化发展。

### 参考文献 References

- [1] 单伟, 谢文彬, 孙一中, 等. 科学学研究[J], 2025, 9(9): 1-26.  
SHAN W, XIE W B, SUN Y Z, *et al.* Studies in Science of Science [J], 2025, 9(9): 1-26.
- [2] 朱睿颖. “低空物流+”催生万亿市场蛋糕[N]. 现代物流报, 2025-08-20.  
ZHU R Y. “Low-Altitude Logistics+” Gives Rise to a Trillion-Dollar Market Pie[N]. Modern Logistics Industry Network, 2025-08-20.
- [3] BAI P, CUI H, ZHANG D, *et al.* Next Materials [J], 2023, 1(1): 100001.
- [4] BO Y, ZHANG H, CUI H, *et al.* ACS Applied Materials & Interfaces [J], 2025, 17(16): 24443-24450.
- [5] KOU Y, SUN K, LUO J, *et al.* Energy Storage Materials [J], 2021, 34: 508-514.
- [6] 钟金豹, 范浩熙, 方桂花, 等. 化工新型材料[J], 2025, 53(5): 24-29.  
ZHONG J B, FAN H X, FANG G H, *et al.* New Chemical Materials [J], 2025, 53(5): 24-29.
- [7] ZHANG R, ZHANG Y, ZHANG Q, *et al.* ACS Nano [J], 2013, 7(7): 6156-6161.
- [8] FEI J, ZHANG X, HAN D, *et al.* Science [J], 2025, 388(6751): 1044-1049.
- [9] AHMAD S, SIDDIQUI A R, YANG K, *et al.* Advanced Materials [J], 2024, 36(51): 2404037.
- [10] SABATER C, STÜRMER P, BEKEMEYER. AIAA Journal [J], 2022, 60(9): 13.
- [11] 杜双庆. 螺旋翅片对移动相变储能罐性能强化的模拟研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2024.  
DU S Q. Simulation Study on Strengthening Performance of Mobile Phase Change Energy Storage Tank with Spiral Fins [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2024.
- [12] 许乐俊, 王世林, 王勇, 等. 电池[J], 2023, 53(6): 687-691.  
XU L J, WANG S L, WANG Y, *et al.* Battery Bimonthly [J], 2023, 53(6): 687-691.
- [13] 郭海龙. 应用于极端低温环境下的摄像装置热控结构设计与分析[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2023.  
GUO H L. Design and Analysis for Thermal Control Structure of Camera Device Applied in Extreme Low-Temperature Environment [D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences), 2023.
- [14] LI R, SUN X, ZHANG R, *et al.* Chemical Engineering Journal [J], 2025, 504: 158964.
- [15] WANG G, BAI P, YUAN S, *et al.* Advanced Materials [J], 2025, 37(35): 2506006.
- [16] FU C, ZHU M, LIU D, *et al.* Advances in Space Research [J], 2023, 72(2): 541-551.
- [17] WANG Z, WANG T, ZHU Q, *et al.* Advanced Functional Materials [J], 2025, 35(42): 2501646.
- [18] LI Y, CHEN X, YU L, *et al.* ACS Applied Materials & Interfaces [J], 2023, 15(3): 4122-4131.
- [19] YU S, ZHOU Y, BAI P, *et al.* Nano Letters [J], 2024, 24(46): 14758-14765.
- [20] JIANG W, ZHU T, CHEN J, *et al.* Chemical Engineering Journal [J], 2024, 502: 157862.
- [21] 于洋, 魏尧, 王靖云, 等. 长沙理工大学学报(自然科学版) [J], 2025, 9(9): 1-34.  
YU Y, WEI Y, WANG J Y, *et al.* Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science) [J], 2025, 9(9): 1-34.
- [22] DU Q, YANG M, SUN H, *et al.* Advanced Functional Materials [J], 2025, 35(34): 2500131.
- [23] 李海强, 常宏, 马天翼. 电池工业 [J], 2025, 29(2): 77-86.  
LI H Q, CHANG H, MA T Y. Chinese Battery Industry [J], 2025, 29(2): 77-86.