

文章编号: 1671-6612 (2026) 04-502-10

光/电热转换功能型相变材料研究进展及应用

姜焱春¹ 孙钦荣² 代金洪² 张 靖² 廖学海²

(1. 重庆科技大学土木与水利工程学院 重庆 401331;

2. 重庆科技大学机械与智能制造学院 重庆 401331)

【摘 要】 随着气候变化与能源问题日益严峻, 能源开发与高效利用至关重要。太阳能作为储量最丰富的可再生能源, 电能作为最广泛利用的高品质能源, 均受时间和空间等多种因素影响导致供需失衡。相变储能技术具备出色的储热能力, 开发光/电热转换复合相变材料已成为研究重点。综述了金属材料、碳材料及半导体材料在光/电热转换中的能量转换机理, 分析了金属材料 (Cu、Ni、Ag) 和碳材料 (CNTs、GO、EG) 对提升复合材料导热性能的作用。基于此类材料特有的能量转换特性以及储热能力, 进一步介绍了其在可穿戴与电子设备、建筑热管理、电池热管理等领域的应用进展, 展现了光/电热转换复合相变材料广泛的应用场景。

【关键词】 光热转换; 电热转换; 相变材料; 应用

中图分类号 TB34 文献标志码 A

Recent Progress and Applications of Phase Change Materials with Solar/Electro-Thermal Conversion Functions

Jiang Yichun¹ Sun Qinrong² Dai Jinhong² Zhang Jing² Liao Xuehai

(1.School of Civil and Hydraulic Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing, 401331;

2.School of Mechanical and Intelligent Manufacturing, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing, 401331)

【Abstract】 As climate change and energy issues become increasingly severe, the development and efficient utilization of energy are of critical importance. Solar energy, as the most abundant renewable energy source, and electricity, as the most widely used high-quality energy source, both suffer from supply-demand imbalances caused by multiple factors such as time and space. Phase change energy storage technology offers excellent thermal storage capability, and the development of photo/electric thermal conversion composite phase change materials has become a research focus. This article reviews the energy conversion mechanisms of metallic materials, carbon materials, and semiconductor materials in photo/electric thermal conversion, and analyzes the roles of metallic materials (Cu, Ni, Ag) and carbon materials (CNTs, GO, EG) in enhancing the thermal conductivity of composite materials. Based on the unique energy conversion characteristics and thermal storage capability of such materials, the article further introduces their application progress in the fields of wearable and electronic devices, building thermal management, and battery thermal management, demonstrating the broad application scenarios of photo/electric thermal conversion composite phase change materials.

【Keywords】 Photothermal conversion; Electrothermal conversion; Phase change materials; Applications

基金项目: 国家自然科学基金 (52508108); 重庆市自然科学基金 (CSTB2024NSCQ-MSX0712); 重庆市教委科学技术研究项目 (KJQN202401539); 重庆科技大学研究生创新计划项目 (YKJCX2520737)

作者简介: 姜焱春 (2001.11-), 男, 在读研究生, E-mail: 2024206127@cqust.edu.cn

通讯作者: 孙钦荣 (1985.03-), 女, 博士, 副教授, E-mail: 2009046@cqust.edu.cn

收稿日期: 2026-03-25

0 引言

在全球气候变化与能源问题日益严峻背景下,如何有效开发可再生能源与提高能源利用效率逐渐成为研究重点,然而可再生能源(如太阳能、风能等)受时间与空间因素的限制,导致其能源利用率低以及供需失衡^[1,2]。热能作为最丰富的能源形式,是工业与民用能源最主要的来源之一,全球约75%的化石燃料被用于提供热量,但其也是造成和加剧气候变化问题的主要因素,因此探寻合适的清洁能源来提供热量是解决这一问题最主要的途径^[3,4]。与此同时,电能作为最直接、最便于使用的能源形式,通常由热能转换而来,在使用过程中也同样存在供需失衡问题,由热能产生的冗余电力需要在低峰期储存,高峰期进行释放^[1]。对此通过热能储存技术来调节能源使用过程中的供需平衡,有效提升能源利用效率,有望减少气候变化以及能源问题带来的影响。

热能储存技术主要包括显热储能^[5]、潜热储能^[6]以及化学储能^[7]。显热储能依靠材料自身比热容,通过调节温度进行储能,但其储能密度低、温度波动大以及储能时间短^[8]。化学储能则通过化学键断裂与重组进行储能,具有较高的储热密度,但其储热条件较为苛刻,因此其实际应用受到广泛限制^[9]。潜热储能利用相变材料相态变化来进行对潜热的吸收与释放,其储热密度高、温度稳定性强等特点使其具有更广泛的应用范围,目前对于相变材料的分类以及原理已有大量文献对其进行综述^[2,10]。随着相变材料技术不断发展,研究者们通过复合改性手段,有效改善了相变材料普遍存在的导热率低、易泄漏等问题,如今为拓展更广泛的应用范围,逐渐将研究重点转变到开发具备光热转换、电热转换等功能型复合相变材料,使其满足不同环境下的热能储存需求。

太阳能作为储量最丰富的可再生能源,其清洁且极易获取,但受时间和空间等多种因素影响,导致太阳能存在明显的间歇性,阻碍了光热材料的持续能量转换,进而导致其光热性能技术不佳^[11,12]。对此利用相变材料的储能特性,开发光热转换功能型复合相变材料,在光热转换材料对太阳能进行捕获与转换后,对热量进行储存,减少受时间与空间等多因素的影响。电能作为目前最直接、最广泛的高品质能源之一,在过去其主要来源于化石燃料等

燃烧发电,而如今随着能源结构的转型,逐渐转向太阳能、风能等可再生能源发电,但可再生能源发电受时间和空间等因素影响导致电力供需失衡^[13]。同理利用相变材料的储能特性,开发电热转换功能型相变材料,将可再生能源产生的冗余电力转换为热能进行储存,并在需要时转换为电量提供给用户,从而提高能源利用效率。

因此,为探究光/电热复合相变材料在今后多领域进行能源转化与储存,提高能源利用效率的可行性,本文综述了光/电热复合相变材料基于不同材料的转换机理,包括金属材料,碳材料以及半导体材料。此外针对复合相变材料普遍存在的导热性差等问题,总结了金属材料以及碳材料在导热强化方面的作用,并且回顾了光/电热转换功能型复合相变材料在可穿戴与电子设备、建筑热管理以及电池热管理等领域的应用。

1 复合相变材料的光/电-热转换机理

1.1 复合相变材料的光-热转换机理

太阳能可通过光电、光化学、光热等方式转化为各种能源形式,光热转换是最直接、最高效的转换途径。将光热转换材料与相变材料集成为光热复合相变材料,可有效提升能源利用的可持续性。当光热复合相变材料吸收太阳光后,通过光激发现象产生热能,并经由热传递将热量储存于相变材料中^[14,15]。光热转换的主要机理包括:金属的局域表面等离子共振(LSPR)效应,半导体的非辐射弛豫效应以及碳基材料和有机材料的分子热振动效应^[16,17]。

LSPR效应是发生在金属纳米颗粒中独特的物理光学现象,当入射光的频率与金属纳米颗粒中的自由电子固有频率相匹配时,金属纳米粒子就会表现出强烈的局部表面等离子体共振,由于纳米结构的局域性,将入射光的频率限制于纳米尺寸中,防止电子的集体振荡以波的形式散出,从而增强光与物质的相互作用^[18,19]。金属纳米结构中光热转换过程如图1(a)所示^[18],在光照条件下,金属纳米结构通过电子跃迁吸收光子能量,当入射光频率与LSPR波段相匹配时,引发强烈的共振相互作用,导致自由电子发生集体性的、相对于原子核的偏移,从平衡状态转移到结构表面,并与外部电磁波产生同相振荡,形成全局非平衡激发态。为了

恢复热平衡状态, 电子的吸收能量通过两种途径释放, 光子的辐射再发射或通过朗道阻尼产生的电子-空穴对的非辐射生成来释放, 这一能量转移过程发生在 1 到 100 飞秒的时间尺度内。非辐射等离子衰变产生的高能电子被称为热电荷载流子, 其初始分布高度非热。这些热电子通过电子-电子碰撞将能量转化为热量, 该过程持续约数百飞秒。随后, 低能电子通过电子-声子散射过程与金属晶格耦合, 持续数皮秒至数百皮秒, 导致晶格热化。最后, 金属内部的热能通过声子-声子碰撞释放到周围环境中, 时间尺度为 100 皮秒至 10 纳秒。随着热耗散, 导带中的电子最终回到光激发前的基态。金属纳米结构中的局部加热效应包括 LSPR 激发、热电子生成与弛豫以及向介质的传热。从吸收光子到能量转移的完整过程包括四个步骤: 表面等离子体共振激发、电子-电子碰撞、电子-声子散射、声子-声子碰撞^[18,20,21]。

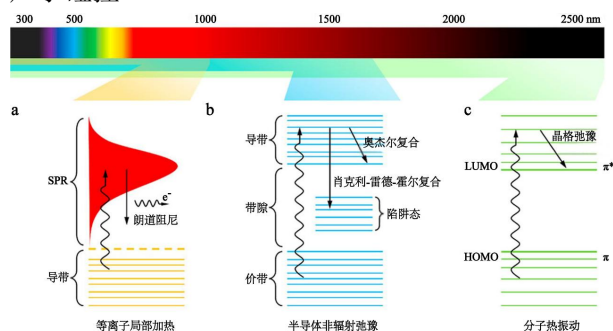


图1 光热转换机理

Fig.1 Photothermal conversion mechanism

在半导体材料中 (如 CuS ^[22], TiO_2 ^[23]等), 其带间/带内电子直接跃迁也能引发光热转换效应^[18]。当半导体材料受到光照激发后, 会产生能量与带隙相近的电子-空穴对。受激电子能量会通过光子形式的辐射弛豫释放, 或通过将能量转移到材料的杂质/缺陷或表面悬键, 以声子形式的非辐射弛豫释放, 从而返回至低能态。通过声子形式释放的热量会引起晶格的局部加热, 并根据半导体的光吸收特性和块体/表面重组形成相应的温度分布。这种由光激发扩散和重组载流子在材料中产生的温度分布, 即为光热效应, 如图 1 (b) 所示^[18,21]。

碳基材料^[24]和有机聚合物^[25]也具有出色的光吸收特性, 通过晶格振动产生热量是其主要的光热转换机制^[16,18]。在大多数的碳键 (如 C-C、C-O、C-H 和 O-H) 中, σ 和 σ^* 轨道之间的能量间隙较大,

很难被直接激发, 然而其中的 π 键的键合强度相对较低, 使得这些材料中的松散电子在低能量照射下, 即可从 π 轨道激发到 π^* 轨道。此外, 共轭 π 键还会引起吸收光谱的红移。随着 π 键数量的增加, 最高占位分子轨道 (HOMO) 和最低未占位分子轨道 (LUMO) 之间的能隙会减小。当入射光子的能量满足材料内部的电子转变时, π 电子就会从基态 HOMO 激发到更高能态 LUMO, 如图 1 (c) 所示。激发的电子通过振动-电子耦合弛豫到基态后, 多余的能量以热量的形式释放出来^[18,20,21]。

1.2 复合相变材料的电-热转换机理

太阳能储量丰富, 但由于其受时间与空间等因素影响, 导致其利用无法做到连续性, 而电热转换技术具有连续性和稳定性等优点, 且转换装置体积小、速度快、效率高、便于携带, 在动力汽车、电子设备等热管理方面具有巨大的应用潜力^[26-28]。

纯相变材料无法将电能直接转换为热能, 主要引入高导电性材料来实现电热转换功能, 其中有金属单体和无机非金属材料 (主要包括碳材料^[29,30]), 这两类材料由于特性不同, 其导电机理具备一定差异^[1]。对于金属材料而言, 其最外层原子的电子与原子核的结合力较弱, 使电子具备很强的离域性, 能够在外电场的作用下移动, 从而产生电流。碳材料的导电性能主要由共轭效应引起, 平行碳原子层中 p 轨道的电子形成大尺度的离域 π 键, 使电子可以在晶格中自由移动。此外, 某些金属的氮化物和氧化物属于半导体, 它们通过由价电子 (共价键中的结合电子) 填满相邻原子价带中的空穴, 从而形成电流。当温度升高时, 产生的电子-空穴对数量越多, 材料的导电性越强。根据焦耳-楞次定律, 在外部电场作用下, 移动的电子会与其他分子或基团碰撞从而产生焦耳热, 如图 2 所示, 并以潜热的形式储存于相变材料中^[1,26-28]。

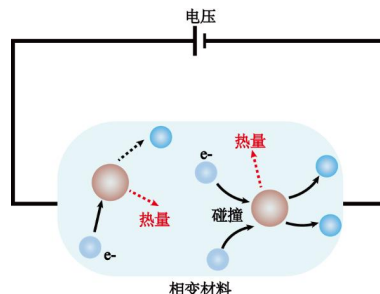


图2 PCM的电热转换机理

Fig.2 Electrothermal conversion of PCM

2 复合相变材料导热强化

在光/电热转换复合相变材料中, 光热转换以及电热转换效率是复合材料的关键参数。此外, 光/电热转换复合材料中的导热率也是至关重要的, 决定着热量在材料内部的传递速率。热传递主要依靠热传导、对流以及辐射三种方式。在相变材料中, 主要的传热机制为热传导和对流。在此过程中, 原子在加热时获得热能, 并通过振动波将热能传递给相邻原子, 逐渐将热量扩散到整个材料中, 并最终通过传导或辐射将热量传递到周围环境中^[1,2]。为提高复合相变材料热量传递效率, 对其进行导热强化是必不可少的, 而添加高导热基质材料是关键方法, 主要利用金属材料的电子热传导以及非金属材料的声子热传导机制^[27,31]。

2.1 金属材料

金属材料具有较强的导热率, 能够通过电子的自由运动实现传热过程, 因此在光/电热转换复合相变材料中添加金属材料能够显著提高其导热率, 尤其是添加 Cu、Ni、Ag 等金属纳米颗粒是最常见的方法^[32-34]。例如, He 等人^[35]通过将 Cu 与 Ni 纳米颗粒负载于还原氧化石墨烯 (rGO) 纳米片上, 并将其整合至泡沫镍 (NF) 基体上, 制备出具有高光热转换效率、高导热和高蓄热能力的复合相变材料。SEM 表征结果表明, rGO 纳米片被覆盖于 NF 表面和孔隙中, 从而构建三维网络框架, 而 Ni 纳米颗粒密集分布于 rGO 纳米片上。进一步通过置换反应引入 Cu 后, 所制得的 NF/Ni-Cu@rGO 复合相变材料中, Cu 与 Ni 纳米颗粒在 rGO 纳米片上交替分布, 有效减少金属颗粒聚集, 建立快速的导热通道, 使复合相变材料的导热率提高了 315%。在这项研究中, 得益于泡沫镍复杂的孔隙结构, 能够有效负载 rGO 纳米片并提供导热通道, 此外其他泡沫金属也具有类似的复杂网络结构, 如图 3 所示^[37], 其较大的比表面积可为热量传递提供有效支撑。

除金属纳米颗粒能够提高导热率外, 添加相关金属衍生物同样能提高复合相变材料的导热率。例如, Wang 等人^[36]通过将 PEG 包裹到 Fe_3O_4 和聚苯胺的碳布 (CC) 中, 制备出具有光热转换功能的导热增强型复合相变材料。由于 Fe_3O_4 材料的引入, 以及 PEG 与碳布之间形成了热传导通道, 有效促进了声子传热, 使得复合相变材料的导热率相较于

纯 PEG 提高了 416%。

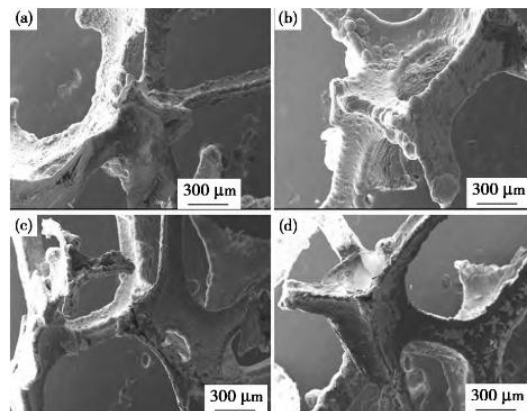


图3 复合泡沫金属相变材料的SEM图: (a) Cu; (b) Ni; (c) Fe; (d) FeNi

Fig.3 SEM images of composite metal foam phase change materials: (a) Cu; (b) Ni; (c) Fe; (d) FeNi

2.2 碳材料

与金属材料电子传热方式不同, 非金属材料主要依靠声子传热机制, 即通过晶格振动传递热量。在常见的碳材料中, 碳纳米管与氧化石墨烯都具有较大的比表面积和导热率, CNTs 的导热率为 $2800\sim 6000\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, GO 的导热率为 $5000\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 能够有效增强复合相变材料的导热率^[2]。然而直接添加碳材料会导致其在基体材料中随机分布, 难以在较高温度下实现极大的导热增强和良好的形状稳定性。因此, 在相变材料中构建相互连接的三维碳网络结构, 可以促进碳材料的均匀分散, 从而以最小的填料负载形成连续的热传导通道, 同时该结构有强大的毛细管力和表面张力, 能够有效防止液体泄漏^[38]。例如, Tao 等人^[39]制备的复合相变材料通过在碳纳米管间隙中添加聚吡咯涂层作为粘合剂, 使聚吡咯作为界面传热的中间体, 降低声子散射和界面热阻, 同时三维碳纳米管气凝胶骨架提供导热通道, 减少声子沿 CNT 网络传输的能量耗散, 从而使复合相变材料的导热率提高了 156%。

膨胀石墨 (EG) 作为高导热碳材料以及其网络微观结构, 也被广泛应用于光/电热转换复合相变材料的导热强化^[40]。例如, Luo 等人^[41]采用石蜡 (PA) 作为相变基体, 膨胀石墨作为导热增强材料, 纳米炭黑颗粒 (N-CB) 作为光热转换增强材料, 通过二次真空渗透制备出光热复合相变材料。在第一次真空渗透后, 由于 EG 三维导热网络的形成成为热量传递至石蜡提供了导热通道, 导致 PA/EG

复合相变材料导热率显著提高,但随着温度的升高以及固液相变的发生而降低。第二次添加 N-CB 进行真空渗透后形成的 NPT-PCM 的导热率普遍低于 PA/EG 复合相变材料,主要是因为 N-CB 涂层的存在一定程度上影响了热传递,但随着复合相变材料相态的发生,导热率逐渐增加,与 PA/EG 复合相变材料变化趋势相反,这主要是因为第一次真空渗透复合相变材料表面会残留 PA 熔化形成液层,改变不同颗粒物之间的接触方式,并且随着温度的升高布朗运动强度增加,导致颗粒物之间的接触与碰撞更加频繁,形成更多传热路径。

当前,用于光/电热转换复合相变材料导热强化的基体材料主要以金属纳米颗粒以及碳材料为主。然而,随着新型材料的不断涌现,如 MXene (新型二维过渡金属碳/氮化物),陶瓷材料(Si_3N_4)等,在导热增强方面也展现出巨大潜力。因此,后续为开发性能优异的光/电热转换复合相变材料,需进一步探究新型材料在光/电热转换复合相变材料中的导热机理,以及对光/电热转换性能的影响。

3 功能型相变材料的应用

基于光/电热复合相变材料所具备的独特能量转换能力以及储热特性,其在多个领域展现出广泛的应用场景,如穿戴与电子设备^[42]、建筑热管理^[43]以及电池热管理^[44]等。通过将功能型相变材料与其他领域交叉融合,可实现热量的高效转换与储存,有效提升能源利用效率。

3.1 可穿戴与电子设备

光/电热转换复合相变材料在可穿戴与电子设

备领域的应用可分为两类:个性化热管理与医疗热管理。在全球气候变化以及极端天气频发背景下,人们通常借助空调等手段来实现室内环境的热管理,以维持人体热舒适性,但在室外环境下传统的热管理手段难以实现,且能源利用效率低^[45]。对此,基于复合相变材料开发的可穿戴设备可实现全天候、全气候的人体热舒适性调节,通过光/电热转换等功能,在复杂多变环境中维持人体的热舒适状态^[46]。例如, Han 等人^[47]通过在棉上原位聚合聚苯胺(PANI)与氧化石墨烯(GO),并浸涂 MXene-CuS 分散液,研发出具备光热和电热转换双重加热功能的 MXene-CuS/PANI-GO 织物(MCPGC)。该织物对于太阳光吸收率高达 97.69%,能够在 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 的照射下升温至 60.2°C ,在电源 4.5V 低电压下可加热至 57.54°C ,而在光电协同作用下,织物表面温度可达 84.13°C ,并且该织物采用脉冲加热控制策略,可在光热能量不足时自动启动电力辅助,从而维持织物温度的稳定。

相较于个性化可穿戴设备热管理的应用,医疗热管理的应用范围更为广泛,主要用于实时健康检测以及治疗等^[48,50]。例如, Gao 等人^[49]通过将二维 MXene 纳米片、一维碳纳米管和零维金属纳米颗粒相结合,并对石蜡进行封装制备出复合相变材料。如图 4^[49]展示的光热转换机制,得益于 MXene、碳纳米管以及金属纳米颗粒的光热协同增强作用,复合相变材料能够高效捕捉光子并进行声子传递,同时复合相变材料还具有较高的微波吸收能力,使其在电子设备的热管理和电磁屏蔽,以及光热治疗和个人电信号检测具有广泛的应用前景。

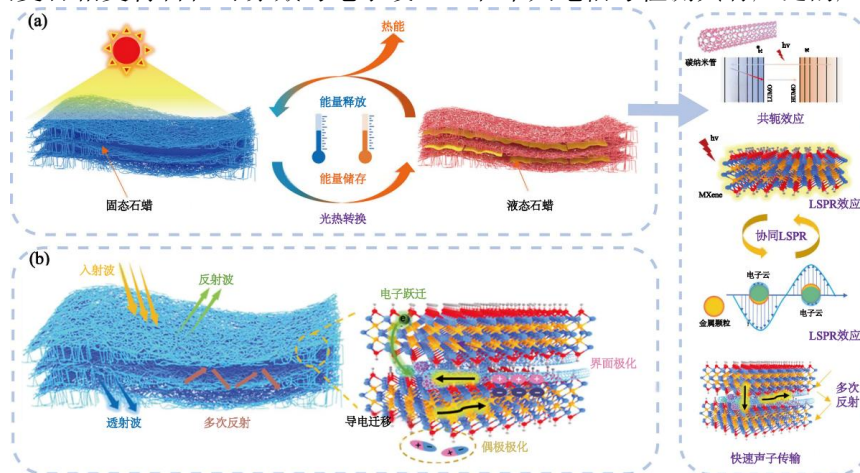


图4 (a) PCM的光热转换机制; (b)微波吸收机制

Fig.4 (a) Photothermal conversion mechanism of PCM; (b) Microwave absorption mechanism

同样, Wang 等人^[51]也制备出具有光热转换、运动灵敏检测功能的柔性复合相变薄膜, 可实时监测人体的各种运动, 包括关节弯曲、面部表情和声音振动等, 其光热转换能力可将多余太阳能转变为潜热进行储存, 在冷却过程时释放热能, 为接触区域提供更温暖环境。Chen 等人^[52]制备出的柔性电热转换复合相变材料, 可用于改善血液循环以及缓解人体关节疼痛, 该材料在低电压 (4.5–6V) 环境下能够从 28℃ 快速加热到 70℃, 并能将多余热量进行有效储存与释放, 从而保持温度的稳定, 而柔性特质能够使其贴合至膝盖等关节处进行反复弯曲, 而保持良好的柔韧性。

3.2 建筑热管理

在建筑领域的热管理应用中, 电热转换相变材料应用较少, 其通常作为太阳能系统的备份, 以避免传统光热转换相变材料的周期性故障^[40]。而光热转换复合相变材料常与建筑围护结构相结合, 以实现建筑节能^[53]。例如, Yin 等人^[54]利用光热转换材料以及持久发光材料构建出新型光热转换复合相变材料, 该材料具备建筑热管理以及被动照明等功能。在该复合相变材料体系中, 相变材料对光热转换过程中的热量进行吸收储存, 并在夜间温度降低时进行释放, 而持久发光材料在白天吸收太阳光中的紫外-可见光, 在夜间发出多色光用于被动照明。此外, He 等人^[55]利用集成光热转换相变板的屋顶以及低过冷度水合盐相变材料散热器协同调控室内热环境, 以维持室内人员热舒适性。如图 4 (b) 所示, 光热转换相变板能够有效吸收太阳光转换为热能进行储存, 同时相变材料散热器吸收了光热转换相变板的热量, 在夜间或温度降低时释放热量以维持室内温度稳定。

3.3 电池热管理

近年来, 随着电动汽车技术的蓬勃发展, 其市场销量也持续攀升, 然而动力电池在长期使用过程中会产生大量热量, 恶劣条件下会引起自燃现象。传统自然冷却手段降温效果有限, 而相变材料具备优异的储热性能, 因此被认为是实现电池热管理的关键手段^[2]。例如, Huang 等人^[56]利用石蜡、聚烯烃弹性体以及膨胀石墨等材料制备出柔性复合相变材料, 将其应用于动力电池的封装, 能够有效降低电池组运行时的接触热阻, 同时凭借柔性复合相变材料的储热特性, 能够确保在不同充放电速率下

电池组的温度始终保持在安全温度以下。

尽管相变材料在电池热管理领域表现出优异的性能, 但在极寒环境下, 相变材料无法实现对电池的自适应加热, 从而实现热管理, 而通过对电热转换相变材料施加电压产生热量, 能够实现对电池的预热功能^[57]。例如, Cheng 等人^[58]研发了基于膨胀石墨/聚合物/石蜡复合电热转换相变材料 (POE) 的全气候电池热管理结构, 该结构能够实现对电池的冷却、预热和保温。当环境温度较低时, POE 与电池形成回路, 同时产生热量来对电池进行预热, 当预热过程完成之后, POE 与负载的电池形成串联电路, 利用电池的电能继续为电池提供热量, 避免电池在放电过程中温度下降, 同时, 低导热系数的石蜡/聚合物复合相变材料 (PO) 与环境接触, 能够有效减少电池组的外部散热。当外部环境温度较高时, POE 复合相变材料又能够利用其储热特性对电池热量进行吸收, 从而有效控制电池温度。此外, Guo 等人^[59]利用液态金属的光热效应与导热特性同样实现了对电池组的双模式热管理。如图 5 所示^[59], 在常规高温环境下, 通过液态金属改性的复合相变材料, 能够有效提高导热率, 使局部热量迅速向周围扩散, 从而降低电池组温度。而在低温环境下, 凭借液态金属等离子效应带来的光热转换, 能够将电池组从零下温度预热到适当的工作温度范围。

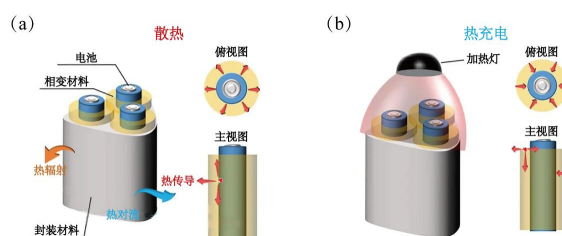


图 5 电池组工作原理

Fig.5 Working principle of the battery pack

对此, 本节综述了光/电热转换功能型相变材料在可穿戴与电子设备、建筑热管理以及电池热管理等领域的应用研究进展。除此之外, 光/电热转换复合相变材料在海水淡化、太阳能发电等众多领域也展现出巨大的应用潜力, 未来需进一步拓展其应用范围。

4 总结与展望

光/电热转换功能型相变材料能够有效将太阳

能、电能转换为热能进行储存,在调节能源供需平衡,提高能源效率方面具有重要应用价值。为深入研究光/电热转换功能型相变材料,对其光-热,电-热转换机理进行综述,探析其能量转换过程。在光/电热转换功能型相变材料中,导热率是决定热量传递速率的关键参数,直接影响材料的储热性能,而通过添加高导热基质,如金属材料(Cu、Ni、Ag),碳材料(CNTs、GO、EG),能够有效提高复合相变材料的导热率,从而拓展功能型材料的实际应用范围,如可穿戴电子设备、建筑热管理以及电池热管理等,充分利用光/电热转换功能型相变材料的能量转换特性以及储热能力,实现能源的高效利用。

在全球气候变化与能源危机日益严峻的背景下,探索可再生能源的利用途径以及提高能源利用效率,是解决当前挑战的关键因素,因此光/电热转换功能型相变材料的研发与应用具有重要意义。目前,针对光/电热转换复合相变材料的研究已较为充分,未来仍需进一步聚焦新型材料开发,扩展其应用范围,如光-热-电耦合复合相变材料基于光-热-电转换原理,可实现太阳能至电能的转换以及储存过程;柔性功能型相变材料,使光/电热转换材料能够适用于多种复杂环境;以及光热复合热致变色相变材料,结合光热转换与热致变色功能,通过调节围护结构对太阳光的吸收反射,实现建筑热管理,从而为能源领域的可持续发展作出贡献。

参考文献:

- [1] JIA Z, HU C, ZHANG Y, et al. Exploring electro-thermal conversion in phase change materials: A review[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023,175:107809.
- [2] SUN Q, JIANG Y, ZHANG N, et al. Functionalized Polyethylene Glycol Composite Phase Change Materials: A Review[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2025,27(21):e202501430.
- [3] SUN M, LIU T, WANG X, et al. Roles of thermal energy storage technology for carbon neutrality[J]. *Carbon Neutrality*, 2023,2(1):12.
- [4] 蒋昊洋,熊丰,覃木林,等.用于电热转化、存储与利用的导电相变材料[J].*化学进展*,2023,35(3):360-374.
- [5] SEYITINI L, BELGASIM B, ENWEREMADU C C. Solid state sensible heat storage technology for industrial applications – A review[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023,62:106919.
- [6] LI X, ZHANG J, LIU Y, et al. Supercooled sugar alcohols stabilized by alkali hydroxides for long-term room-temperature phase change solar-thermal energy storage[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023,452:139328.
- [7] YAN T, ZHANG H, YU N, et al. Performance of thermochemical adsorption heat storage system based on MnCl₂-NH₃ working pair[J]. *Energy*, 2022,239:122327.
- [8] CHAUHAN V K, SHUKLA S K, RATHORE P K S. A systematic review for performance augmentation of solar still with heat storage materials: A state of art[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022,47:103578.
- [9] YAN T, WANG R Z, LI T X, et al. A review of promising candidate reactions for chemical heat storage[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015,43:13-31.
- [10] KIM A, WERT N A, GOWD E B, et al. Recent Progress in PEG-Based Composite Phase Change Materials[J]. *Polymer Reviews*, 2023,63(4):1078-1129.
- [11] TRIPATHI B M, SHUKLA S K, RATHORE P K S. A comprehensive review on solar to thermal energy conversion and storage using phase change materials[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023,72:108280.
- [12] LI J, LONG Y, CAO X, et al. Recent advances and perspectives in solar photothermal conversion and storage systems: A review[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2024,325:103118.
- [13] ZUO J, LUO H, LING Z, et al. Preparation of inorganic molten salt composite phase change materials and study on their electrothermal conversion properties[J]. *Industrial Chemistry & Materials*, 2024,2(4):571-586.
- [14] LIU M, QIAN R, YANG Y, et al. Modification of Phase Change Materials for Electric-Thermal, Photo-Thermal, and Magnetic-Thermal Conversions: A Comprehensive Review[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024,34(33):2400038.
- [15] 许宣洪.光热转换/相变储能超疏水涂层的制备及其防/除冰性能研究[D].西安:西安建筑科技大学,2025.
- [16] ZHAO F, YUAN W, CHEN H, et al. Advances in

- Organic Porous Polymeric-Supported Photothermal Phase Change Materials[J]. Carbon Energy, 2025,7(6):e719.
- [17] SUN H, JIN Y, ALAM F. Review: The Application of MXene in Thermal Energy Storage Materials for Efficient Solar Energy Utilization[J]. Materials, 2025, 18(12):2839.
- [18] CUI X, RUAN Q, ZHUO X, et al. Photothermal Nanomaterials: A Powerful Light-to-Heat Converter[J]. Chemical Reviews, 2023,123(11):6891-6952.
- [19] CHEN J, YE Z, YANG F, et al. Plasmonic Nanostructures for Photothermal Conversion[J]. Small Science, 2021,1(2):2000055.
- [20] 侯明泰. 烷烃类光热相变微胶囊壳层改性构筑与应用性能研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2025.
- [21] GAO M, ZHU L, PEH C K, et al. Solar absorber material and system designs for photothermal water vaporization towards clean water and energy production[J]. Energy & Environmental Science, 2019, 12(3):841-864.
- [22] CHEN W, LIANG X, FU W, et al. Phase Change Composite with Core-Shell Structure for Photothermal Conversion and Thermal Energy Storage[J]. ACS Applied Energy Materials, 2022,5(7):9109-9117.
- [23] ZHAO K, GUO Z, WANG J, et al. Phase change n-Octadecane microencapsulated in titanium dioxide nanoparticle-doped polymer for photothermal conversion and photocatalysis[J]. Solar Energy, 2023, 254:73-87.
- [24] WANG Z, ZHANG X, MIN X, et al. Carbon fiber-reinforced carbon foam-based composite phase change materials for efficient photothermal and electrothermal conversion[J]. Journal of Power Sources, 2026,665:238985.
- [25] LIANG R, YUAN B, ZHANG F, et al. Azopyridine Polymers in Organic Phase Change Materials for High Energy Density Photothermal Storage and Controlled Release[J]. Angewandte Chemie, 2025,137(7): e202419165.
- [26] WANG G, TANG Z, GAO Y, et al. Phase Change Thermal Storage Materials for Interdisciplinary Applications[J]. Chemical Reviews, 2023,123(11):6953-7024.
- [27] 史涛. 三维多孔骨架限域策略构筑的相变储能复合材料的功能化设计及应用研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2025.
- [28] 颜睿翰. 光/电/磁驱动多功能相变复合材料的制备与应用研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2025.
- [29] SUN Q, ZHANG N, ZHANG H, et al. Functional phase change composites with highly efficient electrical to thermal energy conversion[J]. Renewable Energy, 2020,145:2629-2636.
- [30] GAO J. Carbonization welding graphene architecture for thermally conductive phase change composites with solar/electric-to-heat conversion ability[J]. Chemical Engineering Journal, 2023.
- [31] XU Z, ZHANG S, CHEN T, et al. Achieving high photo/electro-thermal efficiency and thermal anisotropy through oriented thermally conductive composite phase change material[J]. Chemical Engineering Journal, 2026,528:172279.
- [32] LV L, WANG Y, AI H, et al. 3D graphene/silver nanowire aerogel encapsulated phase change material with significantly enhanced thermal conductivity and excellent solar-thermal energy conversion capacity[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2022,10(14):7773-7784.
- [33] YANG R, HUANG X, ZHAO G, et al. Ni@rGO into nickel foam for composite polyethylene glycol and erythritol phase change materials[J]. Chemical Engineering Journal, 2023,451:138900.
- [34] LUO W, HU X, CHE Y, et al. Form-stable phase change materials enhanced photothermic conversion and thermal conductivity by Ag-expanded graphite[J]. Journal of Energy Storage, 2022,52:105060.
- [35] HE Y, ZOU Y, XIANG C, et al. Enhanced solar-thermal energy storage performance of NF/Ni-Cu@rGO/PEG composite phase change materials with 3D conductive network[J]. Journal of Energy Storage, 2024,90:111986.
- [36] WANG L, ZHOU M, FU H. An in-situ growth Fe_3O_4 and polyaniline on carbon cloth encapsulated composite phase change materials with high thermal conductivity and photothermal energy conversion and storage[J]. Journal of Energy Storage, 2024,78:110090.

- [37] 袁艳平,赵青云,张楠,等.泡沫金属基复合相变材料的光热转换及蓄热性能研究[J].化工新型材料,2026,54(2):252-258,265.
- [38] LIU M, ZHANG S, SHI Y, et al. Highly thermally conductive and shape-stabilized phase change materials with desirable solar/electric-to-thermal conversion performance based on high-modulus graphite/PVA foam[J]. Chemical Engineering Journal, 2024,499:156509.
- [39] TAO Z, ZOU H, LI M, et al. Polypyrrole coated carbon nanotube aerogel composite phase change materials with enhanced thermal conductivity, high solar-/electro-thermal energy conversion and storage[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2023,629:632-643.
- [40] XU A, XIE B, JIN J, et al. Advanced phase change composite integrating photo/electro-thermal energy conversion and storage[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2025,293:113887.
- [41] LUO X, HAO B, XIANG H, et al. A novel phase change materials used for direct photothermal conversion and efficient thermal storage[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2023,251:112142.
- [42] WU M, WANG C, DA Y. A cost-effective, and intrinsically flexible phase change film for efficient solar energy harvesting and wearable thermal management[J]. Applied Thermal Engineering, 2025,279:127804.
- [43] KONG X, LIU X, YUAN J, et al. Composite phase change materials with thermal-flexible and efficient photothermal conversion properties for solar thermal management[J]. Journal of Energy Storage, 2024,78:110027.
- [44] LIU Q, DENG Z, HAN L C, et al. Innovative flexible multifunctional phase change materials for advanced battery thermal management[J]. Materials Today Energy, 2025,51:101878.
- [45] LI Y, DIAO X, LI P, et al. Advanced multifunctional Co/N co-doped carbon foam-based phase change materials for wearable thermal management[J]. Chemical Engineering Journal, 2024,485:149858.
- [46] LI Y, LI P, YU H, et al. Photoelectric dual-mode triggered phase change materials for all-weather personal thermal management and shape memory[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2024,665:1007-1016.
- [47] HAN W, TAN J, ZHU H, et al. Tunable dual-driven photothermal/electrothermal textile heater for personal thermal management[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2026,203:109583.
- [48] HUANG Z jie, LIU Y long, ZHU T yu, et al. Phase change hydrogels with tunable adhesion for wearable thermal management and intelligent healthcare[J]. Journal of Energy Storage, 2024,98:113043.
- [49] GAO Y, CHEN X, JIN X, et al. Multifunction integration within magnetic CNT-bridged MXene/CoNi based phase change materials[J]. eScience, 2024,4(6):100292.
- [50] LI Z, GE C, FENG D, et al. Flexible phase change sensors with improved heat dissipation for wearable thermal management[J]. Applied Surface Science, 2025,690:162632.
- [51] WANG J, YUE H, DU Z, et al. Highly flexible phase-change film with solar thermal storage and sensitive motion detection for wearable thermal management[J]. Chemical Engineering Journal, 2023,466:143334.
- [52] CHEN L, LUO L, MAO Z, et al. Electrothermal Phase Change Composite with Flexibility over a Wide Temperature Range for Wearable Thermotherapy[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024,16(3):4089-4098.
- [53] HAN Z, ZHAO Y, HU S, et al. Preparation and application of composite PCM with combined radiative cooling and photothermal conversion capabilities for building energy management[J]. Energy and Buildings, 2025,347:116363.
- [54] YIN Y, CHEN H, ZHAO X, et al. Solar-absorbing energy storage materials demonstrating superior solar-thermal conversion and solar-persistent luminescence conversion towards building thermal management and passive illumination[J]. Energy Conversion and Management, 2022,266:115804.
- [55] HE Y, FENG R, WANG S, et al. Design of a passive temperature management house using composite phase change materials[J]. Energy, 2025,319:134962.
- [56] HUANG Y, ZOU M, CHEN W, et al. A Novel

- Room-Temperature Flexible Phase Change Material for Solar Energy Photothermal Conversion and Battery Thermal Management[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2024,12(11):4662-4675.
- [57] WANG M, ZHANG C, WANG J, 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.
- [58] CHENG G, WANG Z, WANG X, et al. All-climate thermal management structure for batteries based on expanded graphite/polymer composite phase change material with a high thermal and electrical conductivity[J]. *Applied Energy*, 2022,322:119509.
- [59] GUO C, HE L, YAO Y, et al. Bifunctional Liquid Metals Allow Electrical Insulating Phase Change Materials to Dual-Mode Thermal Manage the Li-Ion Batteries[J]. *Nano-Micro Letters*, 2022,14(1):202.
-

(上接第 501 页)

- [26] 杜志萍. 地铁隧道围土体热库及其蓄放热性能演化特性的变因素研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2017.
- [27] Cheng X, Sun Z. Effects of burial depth on the seismic response of subway station structure embedded in saturated soft soil[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018,2018(1):8978467.
- [28] GB 50157-2013, 地铁设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [29] 谷雅秀, 翟彤, 潘嵩, 等. 长春地铁热环境与热舒适实测分析[J]. *都市快轨交通*, 2019,32(5):25-32.
- [30] 方静涛. 哈尔滨地区岩土热物性分析及相关性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.