

光热转换相变储能材料的研究进展

樊冬婵^{1*}, 刘丽霞², 陆亚清²

¹南通大学化学化工学院, 江苏 南通

²苏州市产品质量监督研究院, 江苏 苏州

收稿日期: 2022年8月22日; 录用日期: 2022年11月12日; 发布日期: 2022年11月21日

摘要

太阳能是一种取之不尽、用之不竭的清洁可再生能源,但其间歇性与不连续性的特点,一定程度上限制了它的发展与商业化应用。基于有机相变材料的潜热存储技术不仅可以完美地解决太阳能自身存在的缺陷,而且能够有效地将太阳能转换成热能并存储起来。本文综述了有机相变材料进行光热转换与存储的基本方法和机理,浅谈了光热转换材料最新的研究进展以及在节能建筑、个人热管理和电子器件的热管理等领域的应用。最后,对光热转换相变储能材料未来的研究重点进行了展望。

关键词

光热转换, 相变, 储能材料

Research Progress of Phase Change Energy Storage Materials with Solar-Thermal Conversion

Dongli Fan^{1*}, Lixia Liu², Yaqing Lu²

¹School of Chemistry and Chemical Engineering, Nantong University, Nantong Jiangsu

²Suzhou Institute of Product Quality Supervision and Inspection, Suzhou Jiangsu

Received: Aug. 22nd, 2022; accepted: Nov. 12th, 2022; published: Nov. 21st, 2022

Abstract

Solar energy is a kind of inexhaustible clean and renewable energy, but its intermittency and discontinuity restrict its development and commercial application to a certain extent. Latent heat storage technology based on organic Phase Change Materials (PCMs) can not only perfectly solve

*通讯作者。

the defects of solar energy itself, but also can effectively convert solar energy into heat energy and store it. In this paper, the basic methods and mechanisms of PCMs for solar-thermal conversion and storage are reviewed. The latest research progress of solar-thermal conversion materials and their applications in the fields of energy-saving buildings, personal thermal management and thermal management of electronic devices are briefly discussed. Finally, future research focusing on solar-thermal conversion PCMs is prospected.

Keywords

Solar-Thermal Conversion, Phase Change, Thermal Energy Storage Materials

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

太阳能是一种取之不尽、用之不竭的绿色可再生能源，且非常有可能取代传统的化石能源[1]。我们的地球每天接受大量的太阳辐射，倘若能把太阳能进行有效的“收割”与存储，将在一定程度上缓解全球能源危机[2]。然而，太阳辐射具有间歇性与不连续地特点，采用光驱动复合相变材料实现太阳能转换，是一种有效解决太阳光在时间与空间不匹配问题的手段[3] [4]。光-热能量转换与存储技术在经济上可行、操作上简便，而且能够得到高效的光-热能量转换与存储效率。在光-热能量转换与存储系统中，太阳光首先被转换成热能，接着通过相变材料的相变过程，将之前产生的热能存储为潜热[5]。复合相变材料的光-热能量转换与存储性能的好坏，主要取决于材料本身的能量转换效率与导热系数大小。纯的有机固-液相变材料通常受限于弱的光吸收能力或者高反射率与低导热系数。因此，向有机固-液相变材料中添加光吸收剂，能够有效地将太阳光转换为热能并存储于相变材料中[6]。如表 1 所示，诸如表面等离激元金属、半导体、有机染料以及碳材料等几种光吸收剂已经被广泛用于光驱动复合相变材料的光-热能量转换与存储过程。

Table 1. Solar-thermal energy conversion and storage properties of light-driven composite phase change materials [6]

表 1. 光驱动复合相变材料的光-热能量转换与存储性能[6]

PCMs	Additive	Light Intensity [mW·cm ⁻²]	Efficiency [%]	Ref.
PW	Au Nanoparticles	2900	N/A	[7]
PEG	Organic Dye	300 94	94	[8]
PW	CNTs/GO	42	N/A	[9]
PW	CNTS	90	60	[10]
Fatty Acids	C-SiO ₂ Aerogel	100	N/A	[11]
Alcohols	Carbon Aerogel	100	N/A	[12]
PU	Graphite Foam	90	66.9	[13]
PW	Graphene Foam	150	79.9	[14]
PW	Graphene Aerogels	100	77	[15]

Continued

PW	Fe ₃ O ₄ -Graphene	1000	92.4	[16]
<i>n</i> -eicosane	Carbon Foam/Ti ₂ O ₃	87	88.2	[17]
PEG	GO	100	87.3	[18]
PW	GO	N/A	N/A	[19]

基于相变储能技术的光热转换材料因其光热转换效率高、潜热存储能力高、物理化学性质稳定和节能效果显著等优点，被广泛应用于节能建筑、个人热管理和电子器件的热管理等领域。本文系统介绍了不同材料的光热转换机理、国内外光热转换材料的研究进展以及光热转换材料的应用，并对其未来的研究重点进行了展望。

2. 光热转换机理

太阳能可以转换为电能、化学能与热能等多种形式的能源。光与热之间是一种直接的转换过程，可以获得接近于 100% 的能量转换效率。根据光与物质相互作用理论，光 - 热能量转换机理大致可以分为三种类型：金属纳米颗粒表面等离子体局部加热、半导体的非辐射弛豫以及分子的热振动[20] [21]。各种光 - 热能量转换机理与相应材料的光吸收波长范围如图 1 所示。

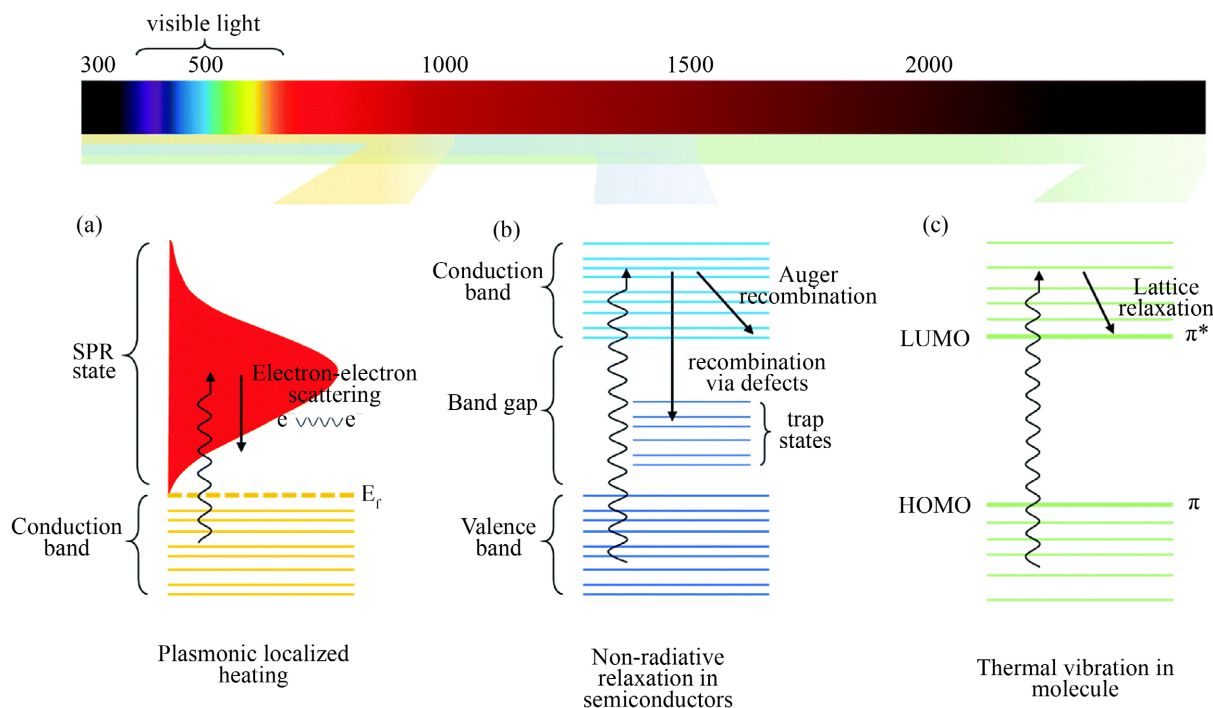


Figure 1. Various mechanisms of the solar-thermal energy conversion with the corresponding light absorption range [22]

图 1. 各种光 - 热能量转换机理与相应材料的光吸收波长范围[22]

1) 金属纳米颗粒表面等离子体局部加热

金属纳米颗粒表面等离子体局部加热的光 - 热能量转换机理如图 1(a)所示，当金属纳米颗粒受到与其表面电子一致的照射频率时，由于局域表面等离子体共振，会造成粒子表面电子的共振进而形成热电子。这些热电子会通过辐射扩散或者电子耦合进行衰减。电子耦合衰减会对过热电子能量进行重新分配，

进而使得金属纳米颗粒的局部表面温度快速升高。最终, 通过电子与声子以及声子与声子耦合实现热量从金属纳米颗粒向相变材料的转移与存储。

2) 半导体的非辐射弛豫

半导体中存在直接带隙, 吸光后诱导电子带间跃迁, 受激发电子最终返回低能态并以光子(辐射弛豫)或声子(非辐射弛豫)的形式释放过剩能量。当以非辐射弛豫方式释放能量时, 光激发扩散与载流子重构进而产生光-热转换现象, 具体机理如图 1(b)所示。

3) 分子的热振动

许多有机材料吸收光能后会通过晶格振动将光能转换为热能。当分子材料受到一定频率的光照射后, 电子会从最高占据轨道(HOMO)激发到最低未占据轨道(LUMO), 如图 1(c)所示。若激发态的电子以电子-声子耦合方式衰减, 吸收的光能会被转换成热能, 进而表现为物体温度的上升[22]。

3. 光热转换材料研究进展

3.1. 负载金属纳米颗粒的复合相变材料

具有局域表面等离子体共振效应的金属纳米颗粒可以用来显著增强材料的光热转换性能。Cao 等[23]将支链烷基化聚降冰片烯与十八醇混合制备了一种定形相变材料。由于聚降冰片烯的支链烷基与十八醇分子链段相似, 两者之间通过诱导偶极作用相互紧紧地缠绕在一起, 赋予定形相变材料较好的形状保持能力。同时, 再向该定形相变材料中引入 3D 花形硫化钼纳米微球(PNb(10,12)C/MoS₂/OCC), 不仅进一步增强复合相变材料的形状保持能力, 而且提高材料的光热能量转换能力, 当光照射强度为 300 mW/cm²时, 光热转换效率可达到 85.5%。

在石墨烯上修饰具有表面等离激元效应的金属粒子后, 可以显著地增强其光热转换效率。Zhang 等[24]以 Ag 纳米粒子修饰的石墨烯纳米片(Ag-GNPs)作为 PEG 的支撑骨架制备了一种新的光驱动复合相变材料。因为 Ag 纳米粒子修饰的石墨烯纳米片具有优异的全光谱吸收能力, 因此, 该复合相变材料能够很好地将光转换为热能且能量转换效率达到了 88.7%~92.0%, 明显高于其它一些负载碳基材料的相变材料。

3.2. 负载有机材料的复合相变材料

1) 聚吡咯(PPy)

一般来说, 共轭聚合物是一类常见的具有光热转换能力的有机材料。Xu 等[25]将正二十八烷封装于纳米纤维素与聚吡咯的混合气凝胶的三维空洞之中, 制备了一种具有高能量存储密度与光热能量转换性能的新型复合相变材料。研究发现, 正二十八烷的负载率达到了 96%; 当光照射强度为 300 mW/cm²时, 光热能量转换效率介于 64.4%~85.9%之间。为了进一步提高光热能量转换效率, Tao 等[26]以聚吡咯(PPy)/Fe₃O₄ 修饰的中空木棉纤维气凝胶作为支撑骨架, 石蜡作为热能存储单元制备了一种同时具有光热、磁热能量转换性能的复合相变材料(KF@PPy-Fe₃O₄/PW)。所得的复合相变材料拥有高的能量存储密度(161.4 J/g)和导热系数(1.06 W/m·K); 当时光照强度为 1000 W/m²时, 光热能力转换效率达到 90%左右。

2) 聚多巴胺(PDA)

Yang 等[27]将呋喃修饰的聚多巴胺粒子作为交联剂与光热试剂通过 Diels-Alder 反应与马来酰亚胺封端的聚氨酯相变材料作用制备了一种具有自修复和可回收功能的复合相变材料(DMCP-x)。光照实验证明, 呋喃修饰的聚多巴胺粒子可以显著增强复合相变材料光热转换性能, 能量效率达到了 87.9%; 此外, 该复合材料在近红外光诱导下可实现自修复功能。Wu 等[28]将聚多巴胺修饰的三聚氰胺泡沫(MF@PDA)作为石蜡的支撑骨架, 制备了一种具有光驱动形状记忆与光热能量转换功能的复合相变材料(MF@PDA/PW)。

研究发现,材料的形状恢复能力接近 100%,光热能量转换效率达到了 80.8%,且光驱动形状记忆与光热能量转换速率随着聚多巴胺的掺入量的增加而增加。此外,该复合相变材料还具有非常稳定的形状记忆循环性能与热稳定。

3) 有机染料(Dye)

Wang 等[29]开发了一种基于有机染料与相变材料的具有可见光驱动的有机光热能量转换材料(OPTCM)。有机染料作为一个有效的光子“捕捉”与分子加热器,能够使相变材料快速地对可见光进行“捕捉”、转换与存储,光热转换效率达到 94%以上。Yan 等[30]将有机染料修饰在 SiO₂ 上,通过溶胶/凝胶法与 PEG 制备了一种光驱动的复合相变材料(PEG/SiO₂-dye)。实验结果表明,该复合相变材料不仅具有优异的形状保持能力与热稳定性,而且具有宽的光吸收范围与高的能量存储密度(167.0 J/g)。更重要的是,在光照强度为 1000 W/m²时,它的光热转换效率达到了 85%~88%,经过 300 次的光诱导相变循环,仍然具有较好的热稳定性与光热循环能力。此外,Wang 等[31]首先将蓝色蒽醌染料(Bdye)修饰在羧基化氧化石墨烯(GO)上,得到一种 Bdye 接枝 GO 的纳米共轭材料(GO-co-Bdye);再将熔融的 PEG 浸渍进入该 GO-co-Bdye 中,形成一种新的具有增强光热转换效应的定形相变材料(PEG/GO-co-Bdye)。实验结果表明,该定形相变材料的光热转换效率达到了 86.6%,且导热系数相对于纯的 PEG 提高了 98.0%。

3.3. 负载碳基材料的复合相变材料

1) 炭黑纳米颗粒(Carbon Black Nanoparticles, CBNPs)

作为一种廉价易得的碳材料,炭黑纳米颗粒(CBNPs)拥有优异的光热性能。Mishra 等[32]将不同量的炭黑纳米颗粒引入到月桂酸中得到了一种定形相变材料。当引入的 3.5 wt% 炭黑纳米颗粒时,定形相变材料的导热系数与光热转换效率分别提高了 195%与 134%,可以广泛应用于便携式光热电池等领域。为了提高光热转换速率,Tao 等[33]在熔融盐无机相变材料的基础上,设计了一种快速的大容量磁驱动直接光存储系统。在这个系统中,修饰有 PDMS 与石墨纳米颗粒的磁响应光热网格(MPM)能够有效地吸收太阳阳光,高温熔融盐无机相变材料能够快速经历一个固-液相变将转换的热能存储起来。而且在磁场作用下,MPM 会发生移动,强化固-液界面的相互作用。因此,可以通过控制磁场来调节 MPM 的运动,从而实现大规模的光热能量转换与存储。

2) 碳纳米管(Carbon Nanotubes, CNTs)

碳纳米管(CNTs)具有导热性能好、光吸收能力强、吸收光谱范围宽等特点而广泛应用于光热能量转换系统。虽然引入碳纳米管能够显著改善相变材料的光热转换能力与导热性能,但是 CNTs 与相变材料的兼容性与稳定性较差,限制了它们在光热能量转换与存储系统中的使用。为了解决这一问题,Du 等[34]将氨基功能化的单壁碳纳米管(SWNTs-NH₂)引入 PEG 基的聚氨酯相变材料中,得到了一种具有优异光热转换效率与导热性能的定形相变材料(SPCMs),其相变焓在 124.0~126.1 J/g 之间。光照实验表明,在 PEG 基的聚氨酯相变材料中引入氨基功能化的单壁碳纳米管(SWNTs-NH₂)后,光热能量转换效率在 44.8%~89.3%之间,而且具有可逆的光热循环能力与热稳定性能。此外,Cao 等[35]通过 Diels-Alder 反应将十六烷基丙烯酸酯修饰在碳纳米管上,得到了一种光驱动固-固相变材料(HDA-g-CNTs)。当照射光的强度为 100 mW/cm²时,该固-固相变材料的光热能量转换效率达到了 79.1%。

3) 石墨烯(Graphene)

石墨烯(Graphene)不仅拥有非常高的导热系数(5000 W/mK)与比表面积(2630 m²/g),而且具有较好的光吸收能力与光热效应,因此,可以作为定形相变材料的支撑骨架,同时,改善定形相变材料的导热性能与光热转换能力。Zhang 等[14]构建一种 3D 结构的石墨烯泡沫用于石蜡的支撑骨架,制备了一种形状稳定、高导热系数与具有光热转换能力的定形相变材料(PW/GF)。在光照条件下,该定形相变材料能够

积极地“捕捉”与转换太阳能为热能并存储在相变材料中。当照射光强度为 150 mW/cm^2 时, 其光热转换效率达到了 79.9%。

一般来说, 石墨烯基复合相变材料的制备过程比较复杂, 熔融的相变材料分子存在从石墨烯内部孔洞溢出来的可能性, 因此, 将相变材料接枝在石墨烯上制备一种石墨烯基固-固相变材料可以避免上述发生泄漏的危险, 同时, 还能实现光热能量转换。Cao 等[36]通过 Diels-Alder 将丙烯酸十六烷基酯(HDA)引入到石墨烯纳米片上, 成功获得了一种石墨烯基固-固相变材料(HDA-g-GN)。HDA-g-GN 的熔融与结晶焓分别为 57 与 55 J/g, 由于石墨烯的作用, 它的导热系数高达 3.96 W/mK 。更为重要的是, 该材料能够同时实现光热与电热的能量转换与存储, 在节能建筑、电池热管理、生物医疗器械等方面具有潜在的应用价值。

4) 膨胀石墨(Expanded Graphite, EG)

膨胀石墨(EG)具有多孔蓬松的蠕虫状结构, 是一种优异的碳基光热材料。Bing 等[37]以 PEG 作为热能存储介质, 交联的不饱和聚酯树脂作为支撑骨架, 膨胀石墨(EG)作为导热填料制备了一种柔性的 PEG 基定形相变材料。结果表明, 这样定形相变材料具有优异的形状稳定性与热可靠性, 即使工作温度达到 80°C 时, 也未发生泄漏现象。此外, 当 EG 的添加量达到 7 wt% 时, 定形相变材料的光热转换效率高达 93.3%, 导热系数相较于纯的 PEG 提高了 1150%。Chen 等[38]将聚乙烯(PE)与三元乙丙橡胶(EPDM)作为聚合物基质引入到石蜡与膨胀石墨(EG)的复合物中制备了一种定形相变材料。测试结果表明, 这种材料的导热系数为 2.08 W/mK , 热量存储密度为 139 J/g 。另一方面, 光热转换实验结果表明, 在光照条件下, 定形相变材料的温度升高至 63°C 时仅需 72 s, 达到石蜡的熔融温度需要 64 s。对于纯的石蜡来说, 达到上述温度分别需要 870 s 与 810 s。这一结果充分说明, EG 能够显著增强定形相变材料的光热转换能力。

5) 其它碳材料

农用生物质是一种可持续的再生能源, 可以作为原材料来制备 3D 层状多孔的碳骨架。因为 3D 层状多孔的碳骨架具有低成本、比表面积大与光吸收容量高等特点, 而常常被用来作为有机相变材料的封装介质。Li 等[39]以冬瓜为原料通过水热碳化与热解成功制备了一种轻质、导电且具有三维结构的碳凝胶(CAs), 再通过真空浸渍法将石蜡封装在碳凝胶(CAs)的孔道之中, 得到一种定形相变材料(CA-wax)。这种 CA-wax 材料具有优异的形状稳定性与高的能量存储密度(115.2 J/g)。同时, 它还对紫外与近红外光具有很好的吸收能力与转换能力。此外, 它的电导率达到 3.4 Sm^{-1} , 能够在外加低电压下实现电热转换与存储。为了进一步提高能量存储密度与光热转换效率, Wang 等[40]分别以向日葵花托与茎为原料制备了两种碳气凝胶(r-CA 与 s-CA)用于封装十六胺(HDA)与棕榈酸(PA), 得到了两种生物质基的复合相变材料(PCM/BCAs)。测试结果表明, PCM/BCAs 的能量存储密度分别达到 207.9 与 271 J/g , 而且具有优异的热稳定性与循环耐久性。此外, 对于 HDA/r-CA 与 HDA/s-CA 来说, 其光热转换效率分别为 75.6% 与 67.8%。除了上述两种生物质基原料外, 棉花、胡萝卜、木材等也可以用来构建碳气凝胶, 并且取得了较好的光热/电热转换效果。

4. 相变材料在热管理中的应用

4.1. 节能建筑

从可持续发展的角度出发, 全世界许多国家将绿色节能技术用于建筑物的制冷与制热系统作为主要的发展目标[41]。在建筑物的墙体、屋顶以及蓄热器等设备中引入储热材料后, 基于相变材料的潜热存储技术能够在炎热的夏季或寒冷的冬季, 通过存储或释放大量的热能从而达到自发地调节室内的温度以满足人体舒适性要求。全世界的科学家已经对于不同温度范围的相变材料用于建筑物的热调节做了大量研究工作。低分子量的有机相变材料与水与盐是在建筑物中最常用的两类相变材料。当用于建筑物材料中,

它们能够对于外界温度的波动做出响应,通过存储或者释放热量来维持室内舒适的温度。共混、多孔吸附或者封装等是用来制备具有相变功能的建筑物材料的通用技术[42]。常见的具有相变功能的建筑物材料主要包括:屋顶、地板、墙壁以及窗户等。

4.2. 个人热管理

随着人们生活水平的不断提高,采用热管理技术使人体处于一个舒适的温度范围是非常有必要的。由于空气的导热系数比较低[43],传统的衣物基本上都是通过阻隔衣物与周围空气的对流传热而达到个人热管理的目的。这种衣物一般很难在恶劣条件下满足使用要求而且功能比较单一,冬季的衣服不能在夏季使用达到热管理的作用,反之亦然。基于相变材料能够在基本恒定的温度范围内进行热量存储与释放的特性,这就为开发具有热调节功能的织物用于个人热管理提供了无限可能[44]。

发生相变材料时的液体泄漏现象是热调节织物在实际使用过程中存在的一个主要问题。采用静电纺丝技术将相变材料限制在纤维的核芯结构里面[45],制成成形纺织纤维是解决液体泄漏现象的一种主要方法。Lu等[46]以商业化聚丙烯腈为壳,石蜡为核制备了一种复合纤维,并同时添加 $\text{Cs}_{0.32}\text{WO}_3$ 纳米颗粒来增强纤维材料的光热转换能力。 $\text{Cs}_{0.32}\text{WO}_3$ 纳米颗粒具有优异的近红外光吸收能力,使这种纤维能够在白天吸收太阳能并存储起来,到了夜间再将存储的热能释放出来,从而达到维持温度恒定的目的。另一方面,复合纤维材料的潜热存储能力还可用于人体的热治疗。Ye等[47]将有机相变材料封装于涂覆有碳涂层的铜泡沫中,制备了一种具有光热转换性能的可用于热治疗的柔性复合材料。得益于柔性的特点,使得该复合材料能够与皮肤进行良好的接触,从而达到更好的热治疗效果。

4.3. 电子器件的热管理

电子器件在使用过程中产生的热量如何及时地扩散至周围环境中,是延长电子器件使用寿命的关键。相变材料具有等温吸热的特征,因此,将相变材料引入到电子器件的被动冷却系统中是解决这一问题的有效手段。但是,相变材料自身的一些缺陷严重地限制了它在电子器件的热管理领域中的应用。一个可行的方法就是开发可直接用于电子器件热管理的复合相变材料,同时,解决相变材料易泄漏、导热性能差、刚性较强等问题。具有3D结构的铜泡沫、铝泡沫、镍泡沫以及碳基的多孔材料能够有效地增强相变材料在电子器件热管理中的性能。

Wu等[48]将膨胀石墨与相变材料复合,通过机械压缩法成功制备一种石墨片成定向排列结构的复合相变材料。与传统的熔融浸渍不同,这种机械压缩法可以使相变材料层均一地分布在定向石墨片的表面。由于在相邻石墨片之间存在低的声子散射与高效的声子传导,这种定向排列与包覆的复合相变材料的导热系数达到了 35 W/mK 。当将其用于锂离子电池热管理时,在 3°C 条件下对锂离子电池进行充放电实验,可以使电池始终在低于 55°C 的温度条件下运行,起到对电池的热保护效果。

与传统的电子器件相比,便携式可穿戴电子器件的热管理更加迫切与需要。在解决便携式可穿戴电子器件的热管理时,器件的冷却系统与发热量的控制需要同时考虑进去。比如,将器件产生的热量扩散到周围环境之中,可以有效降低器件的工作温度,但是对于用户来讲可能会造成局部的热不适感。若采用隔热界面保护与器件接触的皮肤,又可能造成器件的发热量的累积,进而影响器件的工作效能。利用相变材料的等温热存储性能可以完美地解决可穿戴电子器件的热管理问题。同时,为了避免器件热管理过程中可能存在的漏电现象,在相变材料中引入导热系数高的电绝缘氮化硼(BN),可以很好地解决这一问题。Wang等[49]开发了一种基于氮化硼(BN)气凝胶膜的复合相变材料,作为一种智能的热调节器,使用过程中通过相变材料发生的固-液相变来吸收5G手机持续运行时产生的多余热量,从而达到对5G手机进行热管理的目的。除此之外,开发导热系数高且具有柔性功能的复合相变材料,是在实际使用中需

要重点关注的问题。

5. 结语

目前, 光热转换相变材料的种类已非常丰富, 基于相变材料的热能存储技术的广泛应用, 极大地促进了太阳能的有效利用。但还有不少工作面临挑战。

1) 导热系数作为相变材料重要的热性能参数, 在调节相变材料的储热和放热速率、提高热能利用效率方面起着重要作用。到目前为止, 相关的应用研究也主要集中在如何提高导热系数上, 但还缺乏对其机理的深入研究。

2) 现有的研究报导中光热转换效率几乎接近 100%, 但转换成热能后对热能的综合利用效率却较低。因此, 如何设计实用装置以避免在后期应用时热量的损失, 最大化提高热能的综合性利用还有待进一步探索。

3) 设计构筑定形相变材料可以防止泄漏、增强其导热性能与循环寿命。但是, 定形相变材料的机械性能与耐溶剂性较差, 一旦支撑骨架遭到破坏, 泄漏风险依旧存在; 另一方面, 支撑骨架与高导热介质的引入会降低储热密度, 甚至会造成相分离与过冷现象, 严重影响热能利用效率与实际使用效果。在后期的研究中, 光热转换材料的性能稳定性和使用寿命仍是研究重点。

参考文献

- [1] Wang, S., Qin, P., Fang, X., *et al.* (2014) A Novel Sebacic Acid/Expanded Graphite Composite Phase Change Material for Solar Thermal Medium-Temperature Applications. *Solar Energy*, **99**, 283-290. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.11.018>
- [2] Fares, R. and Webber, M. (2017) The Impacts of Storing Solar Energy in the Home to Reduce Reliance on the Utility. *Nature Energy*, **2**, Article No. 17001. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.1>
- [3] Li, B., Nie, S., Hao, Y., *et al.* (2015) Stearic-Acid/Carbon-Nanotube Composites with Tailored Shape-Stabilized Phase Transitions and Light-Heat Conversion for Thermal Energy Storage. *Energy Conversion and Management*, **98**, 314-321. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.04.002>
- [4] Zhang, Y., Umair, M., Zhang, S., *et al.* (2019) Phase Change Materials for Electron-Triggered Energy Conversion and Storage: A Review. *Journal of Materials Chemistry A*, **7**, 22218-22228. <https://doi.org/10.1039/C9TA06678K>
- [5] Zhang, Y., Li, X., Li, J., *et al.* (2018) Solar-Driven Phase Change Microencapsulation with Efficient Ti₄O₇ Nanoconverter for Latent Heat Storage. *Nano Energy*, **53**, 579-586. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.09.018>
- [6] Wang, X., Li, G., Hong, G., *et al.* (2017) Graphene Aerogel Templated Fabrication of Phase Change Microspheres as Thermal Buffers in Microelectronic Devices. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **9**, 41323-41331. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b13969>
- [7] Wang, Z., Tao, P., Liu, Y., *et al.* (2015) Rapid Charging of Thermal Energy Storage Materials through Plasmonic Heating. *Scientific Reports*, **4**, Article No. 6246. <https://doi.org/10.1038/srep06246>
- [8] Wang, Y., Tang, B. and Zhang, S. (2012) Novel Organic Solar Thermal Energy Storage Materials: Efficient Visible Light-Driven Reversible Solid-Liquid Phase Transition. *Journal of Materials Chemistry*, **22**, 18145-18150. <https://doi.org/10.1039/c2jm33289b>
- [9] Zheng, Z., Chang, Z., Xu, G.K., *et al.* (2017) Microencapsulated Phase Change Materials in Solar-Thermal Conversion Systems: Understanding Geometry-Dependent Heating Efficiency and System Reliability. *ACS Nano*, **11**, 721-729. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.6b07126>
- [10] Chen, L., Zou, R., Xia, W., *et al.* (2012) Electro- and Photodriven Phase Change Composites Based on Wax-Infiltrated Carbon Nanotube Sponges. *ACS Nano*, **6**, 10884-10892. <https://doi.org/10.1021/nn304310n>
- [11] Huang, X., Liu, Z., Xia, W., *et al.* (2015) Alkylated Phase Change Composites for Thermal Energy Storage Based on Surface-Modified Silica Aerogels. *Journal of Materials Chemistry A*, **3**, 1935-1940. <https://doi.org/10.1039/C4TA06735E>
- [12] Huang, X., Xia, W. and Zou, R. (2014) Nanoconfinement of Phase Change Materials within Carbon Aerogels: Phase Transition Behaviours and Photo-to-Thermal Energy Storage. *Journal of Materials Chemistry A*, **2**, 19963-19968. <https://doi.org/10.1039/C4TA04605F>

- [13] Chen, R., Yao, R., Xia, W., *et al.* (2015) Electro/Photo to Heat Conversion System Based on Polyurethane Embedded Graphite Foam. *Applied Energy*, **152**, 183-188. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.022>
- [14] Zhang, L., Li, R., Tang, B., *et al.* (2016) Solar-Thermal Conversion and Thermal Energy Storage of Graphene Foam-Based Composites. *Nanoscale*, **8**, 14600-14607. <https://doi.org/10.1039/C6NR03921A>
- [15] Li, G., Zhang, X., Wang, J. and Fang, J. (2016) From Anisotropic Graphene Aerogels to Electron- and Photo-Driven Phase Change Composites. *Journal of Materials Chemistry A*, **4**, 17042-17049. <https://doi.org/10.1039/C6TA07587H>
- [16] Wang, Z., Tong, Z., Ye, Q., *et al.* (2017) Dynamic Tuning of Optical Absorbers for Accelerated Solar-Thermal Energy Storage. *Nature Communications*, **8**, Article No. 1478. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01618-w>
- [17] Wang, W., Cai, Y., Du, M., *et al.* (2019) Ultralight and Flexible Carbon Foam-Based Phase Change Composites with High Latent-Heat Capacity and Photothermal Conversion Capability. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **11**, 31997-32007. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b10330>
- [18] Li, M. and Wang, C. (2019) Preparation and Characterization of GO/PEG Photo-Thermal Conversion Form-Stable Composite Phase Change Materials. *Renewable Energy*, **141**, 1005-1012. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.141>
- [19] Hou, S., Wang, M., Guo, S., *et al.* (2017) Photothermally Driven Refreshable Microactuators Based on Graphene Oxide Doped Paraffin. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **9**, 26476-26482. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b08728>
- [20] Yuan, K., Shi, J., Aftab, W., *et al.* (2019) Engineering the Thermal Conductivity of Functional Phase-Change Materials for Heat Energy Conversion, Storage, and Utilization. *Advanced Functional Materials*, **8**, Article ID: 1904228. <https://doi.org/10.1002/adfm.201904228>
- [21] Gao, M., Zhu, L., Peh, C.K., *et al.* (2019) Solar Absorber Material and System Designs for Photothermal Water Vaporization towards Clean Water and Energy Production. *Energy & Environmental Science*, **12**, 841-864. <https://doi.org/10.1039/C8EE01146J>
- [22] Vélez-Cordero, J. and Hernández-Corderob, J. (2015) Heat Generation and Conduction in PDMS-Carbon Nanoparticle Membranes Irradiated with Optical Fibers. *International Journal of Thermal Sciences*, **96**, 12-22. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2015.04.009>
- [23] Cao, Y., Fan, D., Lin, S., *et al.* (2021) Branched Alkylated Polynorbornene and 3D Flower-Like MoS₂ Nanospheres Reinforced Phase Change Composites with High Thermal Energy Storage Capacity and Photothermal Conversion Efficiency. *Renewable Energy*, **179**, 687-695. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.028>
- [24] Wang, W., Umair, M., Qiu, J., *et al.* (2019) Electromagnetic and Solar Energy Conversion and Storage Based on Fe₃O₄-Functionalised Graphene/Phase Change Material Nanocomposites. *Energy Conversion and Management*, **196**, 1299-1305. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.084>
- [25] Tao, Z., Yang, M., Wu, L., *et al.* (2021) Phase Change Material Based on Polypyrrole/Fe₃O₄-Functionalized Hollow Kapok Fiber Aerogel Matrix for Solar/Magnetic-Thermal Energy Conversion and Storage. *Chemical Engineering Journal*, **423**, Article ID: 130180. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130180>
- [26] Yang, S., Du, X., Deng, S., *et al.* (2020) Recyclable and Self-Healing Polyurethane Composites Based on Diels-Alder Reaction for Efficient Solar-to-Thermal Energy Storage. *Chemical Engineering Journal*, **398**, Article ID: 125654. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125654>
- [27] Wu, H., Chen, R., Shao, Y., *et al.* (2019) Novel Flexible Phase Change Materials with Mussel-Inspired Modification of Melamine Foam for Simultaneous Light-Actuated Shape Memory and Light-to-Thermal Energy Storage Capability. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **7**, 13532-13542. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b03169>
- [28] Xie, Y., Li, W., Huang, H., *et al.* (2020) Bio-Based Radish@PDA/PEG Sandwich Composite with High Efficiency Solar Thermal Energy Storage. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **8**, 8448-8457. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c02959>
- [29] Wang, C., Dong, W., Li, A., *et al.* (2022) The Reinforced Photothermal Effect of Conjugated Dye/Graphene Oxide-Based Phase Change Materials: Fluorescence Resonance Energy Transfer and Applications in Solar-Thermal Energy Storage. *Chemical Engineering Journal*, **428**, Article ID: 130605. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130605>
- [30] Mishra, A.K., Lahiri, B. and Philip, J. (2020) Carbon Black Nano Particle Loaded Lauric Acid Based Form-Stable Phase Change Material with Enhanced Thermal Conductivity and Photo-Thermal Conversion for Thermal Energy Storage. *Energy*, **191**, Article ID: 116572. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116572>
- [31] Tao, P., Chang, C., Tong, Z., *et al.* (2019) Magnetically-Accelerated Large-Capacity Solar-Thermal Energy Storage within High-Temperature Phase-Change Materials. *Energy & Environmental Science*, **12**, 1613-1621. <https://doi.org/10.1039/C9EE00542K>
- [32] Du, X., Xu, J., Deng, S., *et al.* (2019) Amino-Functionalized Single-Walled Carbon Nanotubes-Integrated Polyurethane Phase Change Composites with Superior Photothermal Conversion Efficiency and Thermal Conductivity. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **7**, 17682-17690. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b03853>
- [33] Cao, R., Chen, S., Wang, Y., *et al.* (2019) Functionalized Carbon Nanotubes as Phase Change Materials with Enhanced

- Thermal, Electrical Conductivity, Light-to-Thermal, and Electro-to-Thermal Performances. *Carbon*, **149**, 263-272. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.04.005>
- [34] Zhang, Q. and Liu, J. (2019) Anisotropic Thermal Conductivity and Photodriven Phase Change Composite Based on RT100 Infiltrated Carbon Nanotube Array. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **190**, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.10.010>
- [35] Du, X., Qiu, J., Deng, S., *et al.* (2020) Alkylated Nanofibrillated Cellulose/Carbon Nanotubes Aerogels Supported Form-Stable Phase Change Composites with Improved n-alkanes Loading Capacity and Thermal Conductivity. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 5695-5703. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b17771>
- [36] Qian, Y., Han, N., Zhang, Z., *et al.* (2019) Enhanced Thermal-To Flexible Phase Change Materials Based on Cellulose/Modified Graphene Composites for Thermal Management of Solar Energy. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **11**, 45832-45843. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b18543>
- [37] Li, Y., Samad, Y., Polychronopoulou, K., *et al.* (2014) From Biomass to High Performance Solar-Thermal and Electric-Thermal Energy Conversion and Storage Materials. *Journal of Materials Chemistry A*, **2**, 7759. <https://doi.org/10.1039/C4TA00839A>
- [38] Wang, C., Liang, W., Yang, Y., *et al.* (2020) Biomass Carbon Aerogels Based Shape-Stable Phase Change Composites with High Light-to-Thermal Efficiency for Energy Storage. *Renewable Energy*, **153**, 182-192. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.008>
- [39] Zhou, H., Lin, B., Qi, J., *et al.* (2018) Analysis of Correlation between Actual Heating Energy Consumption and Building Physics, Heating System, and Room Position Using Data Mining Approach. *Energy and Buildings*, **166**, 73-82. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.042>
- [40] Zhou, D., Zhao, C.Y. and Tian, Y. (2012) Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials (PCMs) in Building Applications. *Applied Energy*, **92**, 593-605. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.025>
- [41] Roman, K., O'Brien, T., Alvey, J. and Woo, O. (2016) Simulating the Effects of Cool Roof and PCM (Phase Change Materials) Based Roof to Mitigate UHI (Urban Heat Island) in Prominent US Cities. *Energy*, **96**, 103-117. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.082>
- [42] Zhang, Q., He, Z., Fang, X., *et al.* (2017) Experimental and Numerical Investigations on a Flexible Paraffin/Fiber Composite Phase Change Material for Thermal Therapy Mask. *Energy Storage Materials*, **6**, 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2016.09.006>
- [43] Lu, Y., Xiao, X., Zhan, Y., *et al.* (2018) Core-Sheath Paraffin-Wax-Loaded Nanofibers by Electrospinning for Heat Storage. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **10**, 12759-12767. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b02057>
- [44] Lu, Y., Xiao, X., Fu, J., *et al.* (2019) Novel Smart Textile with Phase Change Materials Encapsulated Core-Sheath Structure Fabricated by Coaxial Electrospinning. *Chemical Engineering Journal*, **355**, 532-539. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.08.189>
- [45] Li, G., Hong, G., Dong, D., *et al.* (2018) Multiresponsive Graphene-Aerogel-Directed Phase-Change Smart Fibers. *Advanced Materials*, **30**, Article ID: 1801754. <https://doi.org/10.1002/adma.201801754>
- [46] Aftab, W., Khurram, M., Jinming, S., *et al.* (2020) Highly Efficient Solar-Thermal Storage Coating Based on Phosphorene Encapsulated Phase Change Materials. *Energy Storage Materials*, **32**, 199-207. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.07.032>
- [47] Wang, B., Li, G., Xu, L., *et al.* (2020) Nanoporous Boron Nitride Aerogel Film and Its Smart Composite with Phase Change Materials. *ACS Nano*, **14**, 16590-16599. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c05931>
- [48] Zhao, S., Chen, L., Zhang, C., *et al.* (2020) Functional Oil-Repellent Photothermal Materials Based on Nickel Foam for Efficient Solar Steam Generation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **214**, Article ID: 110574. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110574>
- [49] Cao, Y., Fan, D., Lin, S., *et al.* (2020) Phase Change Materials Based on Comb-Like Polynorbornenes and Octadecylamine-Functionalized Graphene Nanosheets for Thermal Energy Storage. *Chemical Engineering Journal*, **389**, Article ID: 124318. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124318>