



## 纳米组装相变储热材料的热设计前沿

冯妍卉 冯黛丽 褚福强 邱琳 孙方远 林林 张欣欣

## Thermal design frontiers of nano-assembled phase change materials for heat storage

Feng Yan-Hui Feng Dai-Li Chu Fu-Qiang Qiu Lin Sun Fang-Yuan Lin Lin Zhang Xin-Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 016501 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211776

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211776>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

## 专题: 纳米工程和热物理

## 纳米组装相变储热材料的热设计前沿\*

冯妍卉<sup>†</sup> 冯黛丽 褚福强 邱琳 孙方远 林林 张欣欣

(北京科技大学能源与环境工程学院, 北京 100083)

(2021 年 9 月 24 日收到; 2021 年 12 月 3 日收到修改稿)

本文简单回顾了固液相变储热材料发展历程, 重点针对纳米多孔定形相变材料, 从材料层面的研发设计, 到热物理层面的微观限域空间负载、结晶、导热机理, 乃至围绕异相/异质匹配提出的显著提升相变蓄热性能的强化手段进行了总结. 同时, 指出了目前受制于单一尺度孔径无法兼顾储释热的密度和速率的现状, 并探讨在此基础上借助新型多级尺度孔径的骨架材料以突破瓶颈的可能. 最后, 系统梳理了与之伴随的一系列亟待解决的科学问题、机遇和挑战.

**关键词:** 相变, 纳米组装材料, 热设计, 前沿**PACS:** 65.80.-g, 44.30.+v, 61.46.-w**DOI:** 10.7498/aps.71.20211776

## 1 引言

在“碳达峰、碳中和”的双碳目标下, 我国正加速构建以新能源为主体的新型能源体系. 储能作为支撑可再生能源发展的关键技术, 将迎来巨大发展机遇和前所未有的挑战. 以相变材料为核心的潜热式储热技术, 是储能领域的一个重要分支, 其最大潜力就在于可对口解决时间、空间或强度上的热能供给与需求不匹配问题, 对新能源开发利用关键技术攻坚、推进我国能源行业供给侧改革、推动能源生产和利用方式变革具有重要战略意义. 然而, 低碳、无碳的新能源由于间歇性、波动性导致的能量密度低等问题, 对储热材料与技术提出了更高的要求.

## 2 纳米孔组装相变材料的热特性与强化

纵观相变储热材料的发展, 从初期单纯无机或有机相变材料, 因受制于自身易腐蚀、易渗漏且导

热性能差等缺点, 而无法走向大规模应用. 进而采用多孔载体 (如多孔聚合物、多孔碳等)、微胶囊封装 (如高分子有机物、二氧化硅等) 开发定形相变材料以防止渗漏; 同时可借助载体较好的导热性能、力学性能等提升相变材料的综合性能<sup>[1]</sup>. 于是, 近几年来, 相变储热材料的研究主要集中在多孔载体的精选和优化上, 例如选择孔径尺寸越来越小、孔道越来越规整、比表面积越来越大等结构上具有优势的载体材料 (介孔分子筛<sup>[2]</sup>、金属有机骨架<sup>[3]</sup>等), 或是选择能够强化蓄热性能的载体材料 (碳基的多孔材料<sup>[4]</sup>), 进行复合相变储热材料试制备. 这种“载体先行试制备”相变复合材料研发初衷是希望借助结构优异 (具有更大蓄热容积)、导热性能优异的载体材料以获得高储能密度、高导热性能的复合材料, 但却由于缺乏对载体引入后所引发的相变芯体新结构、新性能的深入了解和准确把握, 往往导致制备的相变复合材料难以达到预期性能.

定形相变材料的研发总是重复试错的现状, 使研究者意识到亟待理清微纳米孔隙组装条件下, 异相异质相互作用对相变蓄传热行为与特性的影响

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2018YFA0702300)、国家自然科学基金 (批准号: 51876007, 52176054) 和北京市自然科学基金 (批准号: 3192022) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: yhfeng@me.ustb.edu.cn

机制. 通过一系列集中于微纳米孔载体负载相变材料实验、机理的探索工作, 形成了微纳尺度异相/异质匹配机理的认识, 并提出了蓄热性能的强化手段 (图 1), 如, 通过骨架表面共价修饰促成骨架-芯材间氢键连接以强化负载<sup>[5]</sup>; 通过三维连续网络骨架 (一次导热网络)、骨架-芯材间物理化学键合 (二次导热网络) 构筑多级传热通道, 有效补偿了芯材尺度效应引发的热导率下降<sup>[6]</sup>; 通过孔道拓扑结构、界面作用能约束链段结晶构象和取向, 引导相变芯材利于结晶<sup>[7]</sup>.

利用高导热添加剂 (如金属纳米颗粒<sup>[8]</sup>、碳纳米管、石墨烯碎片等) 分散在相变材料中以提升热导率, 是目前主要采用的强化传热手段. 需要注意的是, 由于界面两侧材料性质的差异, 界面导热能力要显著弱于材料本身的导热能力, 因此对于具有纳米结构的复合材料, 其内部的界面热阻对材料蓄热性能的影响不容忽视<sup>[9-10]</sup>. 针对由空隙引起的界面热阻, 往往是通过向界面空隙处添加某种柔性材料 (热界面材料)<sup>[11-13]</sup>. 针对材料性质差异引起的界面热阻, 则是在界面处增加一种过渡材料, 这种过渡材料或者可以跟界面两侧的材料形成作用力更强的化学键, 或者其本身的性质介于界面两侧的材料之间, 本质上都是通过减小电子或声子散射降低传热热阻<sup>[14-16]</sup>.

### 3 储热材料热设计的前沿科学问题

通过对国内外相关工作的梳理, 可以看出多孔

基相变储热材料的制备和应用已具有一定的经验和基础, 也实现了宏观蓄热、传热性能的提升. 但更重要的是通过这些研究认识到, 受限于一尺度孔径, 材料性能难以实现突破性提升. 因此, 近年来研究者的目光被多级孔材料吸引: 分级的宏、微观尺度孔隙既发挥纳米尺度的封装优势又能规避其在储存量和结晶上的局限, 有望收获一类革新性的高存储量-高导热-高可靠性的相变储热材料. 随着多级孔碳<sup>[17]</sup>、多级孔聚合物<sup>[18]</sup>、等级孔陶瓷<sup>[19,20]</sup>等新型多孔材料的相继问世, 相变储热材料的性能也获得了令人瞩目的提升. 而如何制备多级层次分明、孔隙结构可控、有效孔容大的多级孔材料, 成为新的挑战. 与此同时, 仍有一系列未来值得探索的方向和亟待解决的关键问题:

1) 通过与仿生学的交叉融合, 借鉴自然界生物自身多维、多层次、多结构的本征特征, 有望获得既保持自然界生物精细层次构造, 又拥有人为设计的新特性的新型结构-功能一体化多级孔材料, 赋予相变组装材料超高的储释热性能, 以及重点解决因特殊结构引入的多尺度梯级孔隙空间相变传热传质基础问题.

2) 多孔定形相变储热材料目前大多集中于较低温 (30—130 °C), 对于中高温且具有更大储热密度的熔盐类相变材料关注极少. 而熔盐类储热材料最显著的易腐蚀、相分离、潮解特点, 能否借助多孔骨架得以缓解, 也是非常值得深入探讨的问题.

3) 利用异质掺杂、表面修饰在骨架-芯材界面内构造更强的物理化学作用力 (共价键/离子键/氢

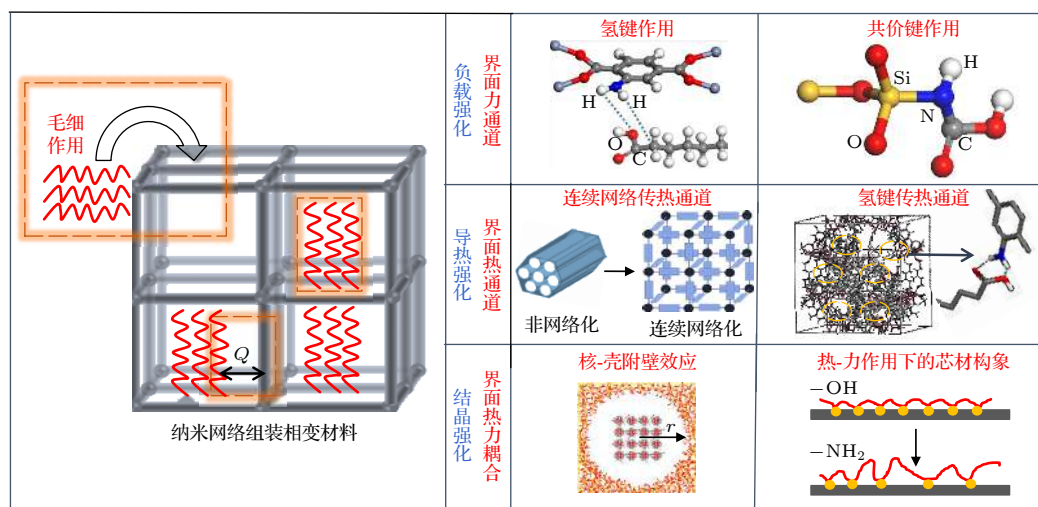


图 1 纳米孔组装相变材料机理探究工作

Fig. 1. Research on the mechanism of nanopore assembly phase change materials.

键), 是降低界面热阻、强化复合材料导热最直接有效的方法. 然而, 缺乏键合稳定性、共价/非共价关联对于相变点、潜热及比热等热物性影响的评估考量. 因此, 各类强化手段的有效性, 需要被更全面的证实或重新认识.

4) 润湿性是体现多孔骨架和相变芯材相容性的重要参数, 对复合相变材料的热传导性能和耐腐蚀性能影响很大. 初步研究表明, 润湿性越好, 相变芯材和多孔骨架之间的界面热阻越小, 但相变芯材对多孔骨架的腐蚀性却越强. 因此, 如何合理调控芯材和骨架的润湿性以平衡复合相变材料热传导和耐腐蚀性能是储热材料应用过程中的关键问题. 当前相关研究尚处于起步阶段, 润湿性与界面热阻和腐蚀速率的定量关系仍不明晰, 尚缺少可靠的准则指导相变芯材和多孔骨架的合理匹配.

5) 由于传统能源材料开发方法存在成本高、功率低、研发周期长等诸多挑战, 先进材料的筛选及其定量构效关系的建模已成为能源材料领域研究热点. 因此, 建立可靠且充足的储热材料热物性数据库, 并借助机器学习等人工智能方法进行材料设计和优化, 将在未来材料研发中发挥重要作用.

6) 纳米孔组装相变储热材料仍处于新材料的研发、性能测试阶段, 复杂、长周期的制备方法且极低的产量极大阻碍其商业化进程. 因此, 当前尤为迫切的是, 开发具有大规模生产潜力的新的合成方法, 开展新型材料-能量收集/转换系统-储能元件-储能系统的全链条研究, 深入探索新型相变材料在不同领域的实际使用性能, 为未来的商业生产和应用提供数据.

## 参考文献

- [1] Feng D, Feng Y, Qiu L, Li P, Zang Y, Zou H, Yu Z, Zhang X 2019 *Renew. Sust. Energ. Rev.* **109** 578
- [2] Feng D, Li P, Feng Y, Yan Y, Zhang X 2021 *Micropor. Mesopor. Mat.* **310** 110631
- [3] Li A, Wang J, Dong C, Dong W, Atinafu D, Chen X, Gao H, Wang G. 2018 *Appl. Energ.* **217** 369
- [4] Yu Z, Feng Y, Feng D, Zhang X 2021 *Micropor. Mesopor. Mat.* **312** 110781
- [5] Feng D, Feng Y, Zang Y, Li P, Zhang X 2019 *Micropor. Mesopor. Mat.* **280** 124
- [6] Zhang J, Feng Y, Yuan H, Feng D, Zhang X, Wang G 2015 *Comp. Mater. Sci.* **109** 300
- [7] Feng D, Feng Y, Li P, Zang Y, Wang C, Zhang X 2020 *Micropor. Mesopor. Mat.* **292** 109756
- [8] Qiu L, Zou H, Wang X, Feng Y, Zhang X, Zhao J, Zhang X, Li Q 2019 *Carbon* **141** 497
- [9] Xu D, Hanus R, Xiao Y, Wang S, Snyder G, Hao Q 2018 *Mater. Today Phys.* **6** 53
- [10] Qiu L, Guo P, Kong Q, Tan C, Liang K, Wei J, Tey J, Feng Y, Zhang X, Tay B 2019 *Carbon* **145** 725
- [11] Xu Y, Wang X, Hao Q 2021 *Compos. Commun.* **24** 100617
- [12] Zheng K, Sun F, Zhu J, Ma Y, Li X, Tang D, Wang F, Wang X 2016 *ACS Nano*. **10** 7792
- [13] Zhou Y, Wu S, Zhu P, Wu F, Liu F, Murugadoss V, Winchester W, Nautiyal A, Wang Z, Guo Z 2020 *ES Mater. Manuf. Mass. Tran.* **7** 4
- [14] Chang G, Sun F, Wang L, Che Z, Wang X, Wang J, Kim M, Zheng H 2019 *ACS Appl. Mater. Inter.* **11** 26507
- [15] Wang S, Xu D, Gurunathan R, Snyder G, Hao Q 2020 *J. Materiomics*. **6** 248
- [16] Hao Q, Garg J 2021 *ES Mater. Manuf. Mass. Tran.* **14** 36
- [17] Feng D, Zang Y, Li P, Feng Y, Yan Y, Zhang X 2021 *Compos. Sci. Technol.* **210** 108832
- [18] Tang J, Yang M, Yu F, Chen X, Tan L, Wang G 2017 *Appl. Energ.* **187** 514
- [19] Wang H, Xu Q, Luo Q, Song Y, Tian Y, Chen M, Xuan Y, Jin Y, Jia Y, Li Y, Ding Y 2021 *Int. J. Heat. Mass. Tran.* **175** 121405
- [20] Feng D, Nan J, Feng Y, Yan Y, Zhang X 2021 *Int. J. Heat. Mass. Tran.* **179** 121748

SPECIAL TOPIC—Nano engineering and thermophysics

# Thermal design frontiers of nano-assembled phase change materials for heat storage<sup>\*</sup>

Feng Yan-Hui<sup>†</sup> Feng Dai-Li Chu Fu-Qiang Qiu Lin  
Sun Fang-Yuan Lin Lin Zhang Xin-Xin

(School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

( Received 24 September 2021; revised manuscript received 3 December 2021 )

## Abstract

The present paper briefly reviews the development progress of solid-liquid phase change materials, particularly the nano-porous shape-stabilized phase change materials. We outline the designs and syntheses of the heat storage functional materials and the thermophysical mechanism of loading, crystallization, and thermal transport in nano-confined space. Besides, the remarkable methods to enhance the heat storage and release performance of heterogeneous materials are included. However, at present, the single-size porous materials cannot satisfy the requirements for high heat storage/release rate and great thermal energy density simultaneously. Based on this, the novel hierarchical porous frameworks materials are explored to overcome these obstacles. For this purpose, some scientific problems, opportunities, and challenges are summarized at the end of this paper.

**Keywords:** phase change, nano-assembled materials, thermal design, frontiers

**PACS:** 65.80.-g, 44.30.+v, 61.46.-w

**DOI:** 10.7498/aps.71.20211776

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2018YFA0702300), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51876007, 52176054), and the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 3192022).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [yhfeng@me.ustb.edu.cn](mailto:yhfeng@me.ustb.edu.cn)