



热储能技术发展现状及储热介质与装备的传热挑战

Development Status of Thermal Energy Storage and Heat transfer Challenges in Thermal Storage Media and Equipment

期刊：	中国科学: 技术科学
稿件ID：	SST-2026-0073.R3
稿件栏目：	评述
作者提交日期：	2026-06-07
参与作者列表：	尤汉, 郭欣杰, 杨鹏, 吴安宜, 靳开元, 李小波, 杨荣贵
关键词：	热储能, 传热, 长时储能, 光热发电, 火电改造, 谷电蓄热
英文关键词：	thermal energy storage, heat transfer, long-term energy stroage, concentrated solar power, coal-fired power plant retrofitting, off-peak electricity thermal storage
学科领域：	储能科学与工程
专题：	



论文

热储能技术发展现状及储热介质与装备的传热挑战

尤汉^①, 郭欣杰^①, 杨鹏^①, 吴安宜^①, 靳开元^{①*}, 李小波^{①*}, 杨荣贵^{①②*}^① 华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074;^② 北京大学力学与工程科学学院, 北京 100871;

* E-mail: kaiyuanj@hust.edu.cn; xbli35@hust.edu.cn; ronggui@pku.edu.cn

收稿日期: ; 接受日期: ; 网络出版日期:

内蒙古自治区科技“突围”工程“揭榜挂帅”项目(编号: 2025KJTW0005), 国家自然科学基金(编号: 52306084), 湖北省自然科学基金-三峡创新发展联合基金项目(编号: 2024AFD352)资助

摘要 热储能作为一种具有广泛应用场景的长时储能技术, 凭借不受地理条件制约、低成本、高安全性、长寿命等优势, 在新型电力系统的构建中发挥着愈发重要的作用. 热储能系统的储放热性能由复杂的传热过程主导, 而目前的技术发展水平仍存在亟待突破的传热瓶颈, 制约了热储能技术的大规模应用. 本文系统性地介绍了热储能技术的发展现状与主要应用场景, 分别剖析了固体与液体储热系统在材料和装备层面的传热挑战, 并总结针对相关挑战的研究进展及可能的技术发展方向. 针对固体储热系统, 其主要挑战在于储热介质的光吸收率与热导率偏低, 储换热装备在换热过程中存在热阻较高或换热效率较低等局限; 当前研究聚焦于固体储热材料的复合改性、固定床与移动床装备的换热结构优化以及流化床的寄生功率与热损失控制. 针对液体储热系统, 其材料层面的难点在于液体储热介质热导率等热物性参数的精准测量, 以及如何克服低热导率等热物性对储换热能力的制约; 而装备层面则亟需提升电热转化与热交换装备的功率规模与转化效率; 潜在的解决方案包括根据液体特性针对性地改进物性测量装置、引入纳米颗粒协同调控液态介质的热导率与储热密度、开发电磁感应加热、高温热泵等新型电热转化技术并提出可规模化的热交换装备传热增强设计. 在未来, 随着上述传热难题的逐步攻克, 热储能技术将在光热发电、火电灵活性改造、储能电站及工业/居民供暖等领域实现更广阔的规模化应用, 助力经济社会的全面绿色转型与“双碳”目标的顺利实现.

关键词 热储能, 传热, 长时储能, 光热发电, 火电改造, 谷电蓄热

1 引言

自前工业时代以来, 化石能源在人类社会大量使用, 全球二氧化碳的排放量迅速增加, 导致了全球

变暖和极端气候事件频发. 目前, 近 200 个国家已经签署了《巴黎气候协定》, 其目标是限制全球二氧化碳排放, 并在本世纪末将气温上升控制在 1.5 摄氏度以下. 近些年来, 净碳排放几乎为零的可再生能源利

引用格式: 尤汉, 郭欣杰, 杨鹏, 等. 热储能技术的传热学挑战. 中国科学: 技术科学, You H, Guo X J, Yang P, et al. Heat transfer challenges in thermal energy storage (in Chinese). Sci Sin Tech,

1 尤汉等：热储能技术发展现状及储热介质与装备的传热挑战

2
3
4 用技术发展迅速，并有望在未来取代化石燃料，成为
5 未来社会电力、工业生产等领域的主力能源。据国际
6 能源署预测^[1]，2050 年全球将有 60% 以上的电力来
7 自太阳能和风能发电。在“碳达峰”和“碳中和”政
8 策的驱动下，未来 30-35 年人类社会能源主体将由化
9 石能源逐渐向可再生能源转变。

10
11 以太阳能和风能为主的可再生能源存在间歇性
12 特征，其不稳定供应给电网的安全运行带来了巨大
13 挑战。大规模长时储能被认为是平衡可再生能源供
14 给和未来电力系统需求不匹配的关键技术。目前储
15 能技术正在迅猛发展，截止 2025 年，全球已投运的
16 储能装机总量为 496.2 GW，年增长率达到 33.3%^[2]。
17 考虑到同年的可再生能源发电总装机规模已超过
18 5149 GW^[3]，年增长率接近 15.5%，大规模储能在未来
19 仍然具有旺盛的需求。在众多储能形式中，抽水蓄
20 能技术最为成熟，大规模应用的历史也最为悠久，而
21 锂离子电池储能的增长速率最快，在新增储能装机
22 总量中也占有最高的份额，目前在全球储能总装机
23 中的占比已经达到 54.9%^[2]。而在国内，锂离子电池
24 储能能在 2025 年的总装机甚至已经超越了抽水蓄能，
25 占国内储能总装机的 54.9%。除了以上两种为人熟知
26 的规模化储能技术外，热储能技术在国内外也得到了
27 稳步发展，其中最为成熟的熔盐储热技术约占全球
28 储能总装机的 1.0%^[2]，是排名第三的储能形式，主
29 要应用场景为光热电站与火电灵活性改造，目前仍
30 有不少正在建设或计划建设的项目。热储能的主要
31 优势有三个方，其一是热储能的装机容量大，可以
32 达到吉瓦时规模甚至更高，释能时间可以从几个小
33 时到几十个小时甚至跨季节时间尺度变化，适用场
34 景广阔。同时其建设与选址较抽水蓄能和压缩空气
35 储能技术更为灵活，几乎不受地理与环境因素制约。
36 其二是热储能系统通常具有显著的规模经济效益，
37 当储能容量超过百兆瓦时级别时，熔盐储热的成本
38 约 150-250 元/kWh^[4]，而锂离子电池储能的成本至少
39 为 400-500 元/kWh^[5]，在一些对热能需求有规模需求
40 的场景中，热储能可能更具成本优势。最后，热储能
41 系统寿命可达 20 年以上，且大多数储热介质无毒无
42 害，无爆炸风险，较锂离子电池储能具有寿命长且
43 本征安全的特点。考虑到中国能源行业中热能占终端
44 用能的 40% 以上^[6]，且多数应用场景对于储能具有
45 一定的灵活选址和长寿安全需求，热储能会在今后的
46 储能市场中发挥越来越大的作用。

2 热储能基本原理

2.1 储热机制与介质分类

热储能介质通常分为显热、潜热与热化学储热三
种形式^[7]。显热储热通常包括以水、熔盐为代表的液
体显热储能技术和以砂石为代表的固体显热储能技
术，这些技术均在不同场景中实现了大规模商用，成
熟度相对较高。显热储热的突出优势在于材料成本
较低、装备构成与系统方案简单，但是其需要在较大
且固定的温差下进行储热才可以实现足够的储热密
度与经济性。潜热储热又称相变储热，可以在较窄温
区内实现较高的储热密度，在建筑蓄热、谷电蓄热
供暖等中低温供热领域具备占地面积小、热损失小等
优势，目前正在进行一些商业化尝试。不过在高温区
($>400^{\circ}\text{C}$)，目前潜热储热的材料技术还不成熟，非
金属相变材料在固相时热传导较慢，而铝、铝硅合
金等金属相变材料又存在与储罐材料兼容性较差等
问题，目前都还没有得到大规模示范或应用。热化学
储热一般利用可逆化学反应进行储放热，在理论上
可以实现较高的储热密度，同时适用的温区较高，有
望在工作温度高于传统熔盐储热温度的先进能源系
统中得到应用。另一类热化学储热被称为吸附式储
热，其本质是通过物理或者化学吸附过程，在进行
吸附和解吸的同时实现热能或冷能的存储与释放，
通常适用温度较低的储热或者储冷应用场景。另外，
多模态储热^[8]这一概念也在近几年得到了业内的关
注，其通过调控材料的共晶、水合等作用机制，在
一定温度区间内同时实现显热、潜热与热化学储
热，可以在相对较低的温度下实现极高的储热密度，
在未来的低品位热能利用方面具有规模应用潜力。

2.2 储热介质相态传热机理与传热速率对比

从介质状态与传热机理的角度，热储能技术又
可以大致分为液体储热与固体储热技术两类。其中
液体储热技术通常通过强迫对流和自然对流过程进
行储放热，而固体储热介质的加热与降温则通过热
传导过程来实现。为了提供一个简明有效的传热速
率对比，我们假设存在一个单位长度下直径为 50 cm
且厚度为 2 mm 的不锈钢传热管道，其中充满初始
温度为 300°C 的储热介质，而管道表面的温度设置
为 600°C 。当我们将储热介质分别设置为固体熔盐
(热导率约 $0.5\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)，固体水泥(热导率约
 $2\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)，

固体不锈钢(热导率约 $20 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), 静态液体熔盐(自然对流传热)以及流速为 0.5 m/s 的动态熔盐这五种情况并进行仿真计算, 装有熔盐储热介质的传热管道截面温度场如图 1(a)所示, 而储热介质的平均温度随时间变化的曲线如图 1(b)所示. 由图中结果可以看出, 热导率以及是否进入对流状态会显著影响储热介质在加热过程中的温度变化速率, 即传热速率.

熔盐作为一个低热导率($\sim 0.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)储热介质, 其固态下传热速率较慢, 但是液化后即便处于静止状态, 也能通过自然对流机制得到远高于具有中等热导率的固体水泥的传热速率. 若将熔盐进行流动换热, 其传热速率甚至可以超过拥有高热导率的不锈钢材料. 可见储热介质的状态与物性参数会显著影响其传热表现.

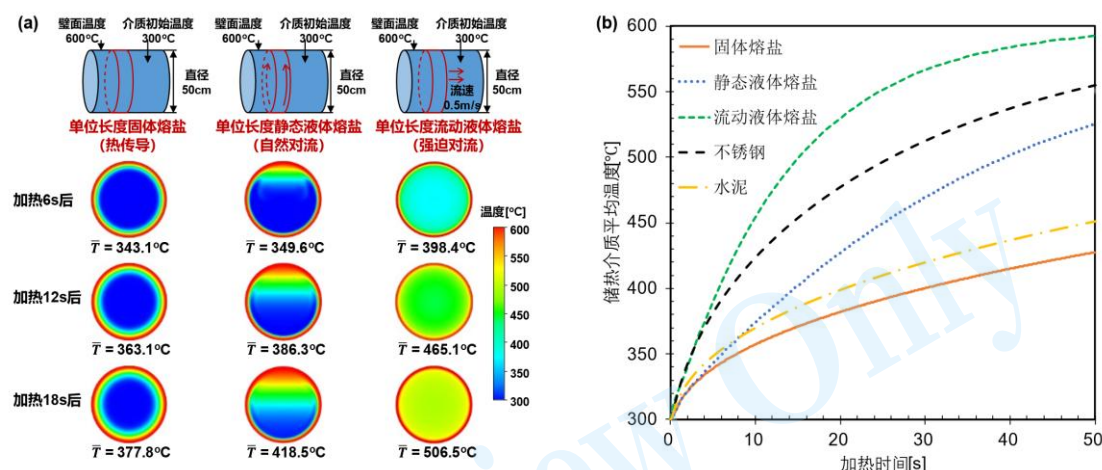


图 1 储热介质传热速率对比. (a) 固体熔盐、静态液体熔盐、流动液体熔盐管道进口截面处的暂态温度场; (b) 熔盐、不锈钢与水泥管道进口截面处平均温度随时间的变化曲线

Figure 1 Comparison of heat transfer rates among thermal storage media. (a) Transient temperature fields at the pipe inlet cross-sections for solid-state, static liquid, and flowing liquid molten salts; (b) Variation of average temperature versus time for molten salt, stainless steel, and cement at the pipe inlet cross-section.

而整个热储能系统中的传热过程远比上述算例复杂, 相关的传递效率与传热速率直接影响了整个系统的储能往返效率与储、释能功率, 目前仍然有不少传热相关的挑战制约了热储能技术的规模发展. 在材料层面, 不少天然固体储热介质具有较低的热导率与吸收率, 限制了其储热功率与响应速率. 在装备层面, 各类储热系统中的加热与换热装置都或多或少的面临着传热效率与速率低下、设计方案复杂亟待优化等问题. 本文将重点论述热储能技术的应用场景与发展现状, 厘清与传热学相关的科学技术挑战、研究思路与解决方案, 为热储能的规模化应用与技术革新提供支撑.

3 热储能应用场景与发展现状

热储能的应用场景十分广泛, 光热电站是规模化热储能技术发展之初的主要目标场景. 目前国内

外正在运行的光热电站总装机已经超过 7.5 GW ^[9], 国内已经并网或正在建设的光热电站项目超过 40 个. 其中绝大多数光热电站采用二元硝酸盐 ($60\% \text{NaNO}_3 + 40\% \text{KNO}_3$) 作为液体储热介质, 在热储能系统、集热系统、蒸汽发生系统之间循环进行充放热. 二元硝酸盐储热技术已经相对成熟, 不过它材料成本偏高, 约 6000 元/吨; 同时存在高温稳定性较差的问题, 在 565°C 以上便会发生明显的分解, 支撑机组参数约 $550^\circ\text{C}/14 \text{ MPa}$ 的超高压蒸汽机组进行释热发电, 其规模与效率均落后于目前的火电机组水平. 为支撑更高参数的光热发电机组, 近年来有不少研究团队围绕多元硝酸盐基熔盐^[10]、单质硫^[11]、金属氧化物^[12]等新型储热材料进行技术攻关, 以实现较二元硝酸盐更高的储热温度. 美国国家可再生能源实验室在 2017 年提出第三代光热技术路线图^[13], 希望通过新型储热技术耦合超临界 CO_2 热发电机组, 将光热电站的储热温度与热电效率分别提升至 720°C 与

1 尤汉等：热储能技术发展现状及储热介质与装备的传热挑战

2
3
4 50%以上, 其中氯化盐显热储热、固体颗粒显热储热、
5 钙基热化学储热^[14]等新型高温热储能技术, 都相继
6 得到了大量的关注与研究。

7 虽然光热电站为规模化热储能技术提供了应用
8 场景, 但仍需要进一步降低投资和运维成本。近些年,
9 在火电灵活性改造项目中, 热储能技术的应用正在
10 快速发展^[15]。2022 年, 规模为 40 MW/80 MWh 的熔
11 盐储热耦合煤电调频调峰项目在江苏国信靖江电厂
12 正式投入运行, 该项目通过电加热方式将电厂过剩
13 的电能储存在熔盐储热系统中, 在需要时再将热水
14 通入熔盐储热系统, 生产约 260°C/1.2 MPa 的蒸汽并
15 供给周边生产企业, 实现电厂的热电解耦以及调频
16 调峰。除该路线外, 目前也有研究项目提出采用抽取
17 机组蒸汽或锅炉烟气加热熔盐, 熔盐储存的热量可
18 以在机组顶峰、顶尖峰时生产中压蒸汽, 进入机组进
19 行额外的做功发电。卡诺电池储能电站^[16]是火电灵
20 活性改造的另一条具有规模应用潜力的技术路线,
21 该电站通过电-热-电的形式进行电网规模储能。采用
22 新能源电或谷电通过电加热或热泵加热熔盐的形式
23 完成电-热转化与储存, 而热-电转化部分则通过熔盐
24 换热器和原有的火电机组耦合完成热发电。该方案
25 可以使得火电厂被完全改造为零碳排放的储能电站,
26 同时又利用了火电中的发电机组与上网设备, 相较
27 新建储能电站节约大量成本。

28 压缩空气储能是一种长时热机械储能技术, 其
29 利用空气压缩后产生的压力能与热能进行大规模能
30 量存储。然而, 早期国际上的技术路线多以非绝热补
31 燃式为主, 系统整体储能效率较低, 并伴随一定的碳
32 排放问题, 因此在商业化推广方面进展缓慢。我国从
33 2005 年起开始尝试开发先进绝热压缩空气储能技术,
34 目前已经取得了世界领先的技术能力, 陆续建成了
35 60 MW、100 MW 与 300 MW 规模的商用压缩空气储
36 能电站, 其设计储能往返效率可达 70%左右^[17]。先进
37 绝热压缩空气储能与非绝热压缩空气储能的主要区
38 别就在于其拥有热储能系统, 将空气压缩过程中产
39 生的大量热能通过换热器输入储热工质中并进行储
40 存, 在释能时又通过换热器加热带压空气, 在透平中
41 做功发电。根据现有项目数据, 一个 100 MW/400
42 MWh 的压缩空气储能电站的储热量超过 100
43 MWh^[18], 可见储热在该应用场景中占有重要体量。
44 热水储热是当前已建成的压缩空气储能电站的主要
45 储热模式, 通过多级压缩换热可以将大部分压缩热

控制在 200°C以下的温度, 并采用储水球罐实现室温
到 180°C左右的大温差储热, 在保证储热密度的前提
下实现较低的储热成本。导热油热储能技术可以实现
300°C以上的储热温度, 进一步提升机组整体的储能
效率, 同时减少压缩机级数与复杂度, 目前有一些项
目选择该路线进行压缩空气储能电站的建设。熔盐
储热可以达到更高的储热温度, 但其存在低温凝固
和冻堵问题, 不宜直接与空气耦合换热, 不少项目方
案选择熔盐和热水梯级储热^[19], 以保障热储能系统
能够安全运行并实现更高的储能往返效率。

储热供蒸汽与供热水(供暖)也是目前热储能技
术的主要应用场景之一。其代表性技术之一为固体
电蓄热^[20], 该系统将电加热原件分散密布在堆满镁
砖、陶瓷砖的储热单元之中, 通过电加热储存高品位
热能; 释能时将空气通入储热单元取热, 并通过汽水
换热器生产一定参数的蒸汽。模块化熔盐储热^[21]也
可以实现类似的电蓄热产蒸汽功能, 该系统将熔盐
材料储存在带有换热管道的储热单元之中, 在加热
时将熔盐缓慢泵入电加热器加热, 之后便流回储热
单元储存; 在释热时熔盐在储热单元内静置并与储热
管道进行自然对流换热, 热水通过换热管道进入储
热单元取热变为高温蒸汽, 当多个储热单元进行一
定的串并联排列便可以在一定时间内实现稳定的蒸
汽输出。相变式电蓄热^[22]可以用于空间受限的谷电
或绿电供暖场景中, 与直接热水储热不同, 相变储热
不依靠温差显热, 能够在稳定输出特定温度热水的
前提下实现相对较高的储热密度与较小的占地面积。
通过大规模水体或土壤进行跨季节储热^[23]也是热储
能的重要应用场景之一, 其通常在夏季将富裕的光
热资源集中并大量储存, 在冬季将热量持续输出进
行取热供暖。

另外, 不少热化学储热过程可以与化学链如钙
循环过程耦合, 有望在高温工业过程中规模化应用,
如水泥生产^[24]、碳捕集^[25]等, 并实现储能、气体富集
等多重功能。

综上所述, 热储能技术可以在光热发电、火电灵
活性改造、压缩空气储能以及工业供热供汽等多个场
景中进行规模化应用, 如图 2 所示, 储热形式涵盖了
以熔盐、热水为代表的液体显热储热, 以镁砖、陶瓷
颗粒为代表的固体显热储热, 以及相变储热与热化
学储热等多种路线。不过, 无论采用何种储热方式,
储/释热过程中的传热性能始终是决定系统效率、功

率及响应速度的核心因素。目前, 传热相关的技术瓶颈普遍存在于各类热储能系统中。例如, 不少储热介质存在热导率、吸收率较低等问题, 直接限制了相关系统的储放热速率; 各类储热装备技术目前也不够成

熟, 要实现高功率储放热往往需要较大的传热面积、装备体积与成本。下文将分别围绕固体储热与液体储热系统在储换热过程中的传热挑战展开论述。

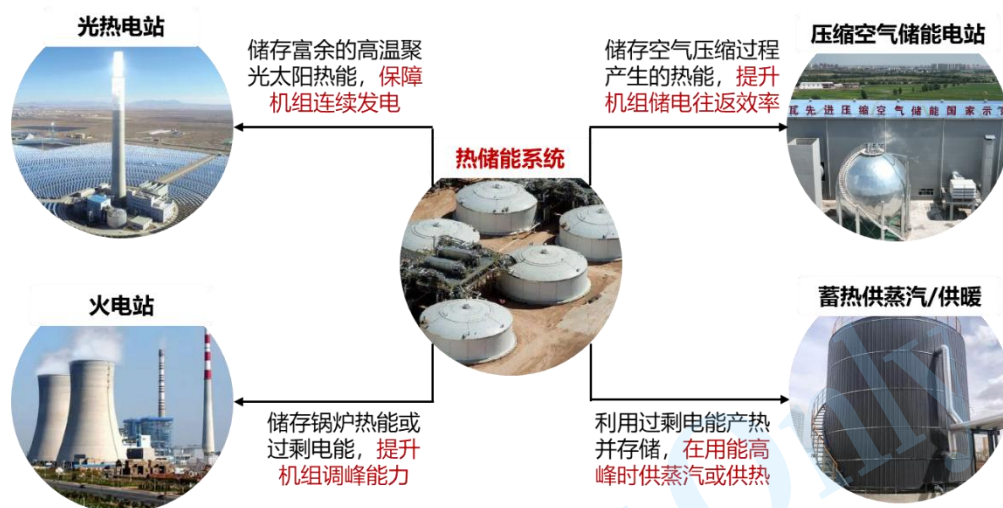


图 2 热储能技术的主要应用场景

Figure 2 Main application scenarios of thermal energy storage.

4 固体储热系统中的传热问题

固体储热的传热问题可分为材料与装备两个层面。在材料方面, 低成本固体颗粒介质的本征光吸收率较低, 如 Al_2O_3 、 CaO 等, 若直接在光热场景中使用将导致系统的吸热效率低下。另外, 常见的固体显热储热材料, 如混凝土、石英砂等, 其热导率通常不到 $2.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 直接制约了系统的储放热速率。在装备层面, 固定床式与移动床式系统通常依靠翅片等传热增强结构提升储放热过程中的传热速率, 已有的传热增强结构方案众多, 但复杂度可控且传热增强效果突出的方案尚不明确。相比之下, 流化床式系统通过引入对流传热机制显著提升了固体颗粒间传热速率, 但其带来了更高的额外功耗与不可避免的气体能量损失, 相关技术优势仍缺少规模化验证。

4.1 固体储热介质的热物性调控

在光热发电场景中, 固体颗粒储热介质作为直接暴露式热吸收与储存介质, 可以实现更高的储热温度, 同时有效规避熔盐体系常见的凝固冻堵、高温

热稳定性差等问题, 从而显著提升系统运行的可靠性与安全性。不过, 直接暴露式吸热机制对于颗粒材料的光吸收性能和循环稳定性也有很高的要求。常见固体颗粒材料的本征吸收率通常较低, 往往需要组分掺杂或复合、涂层构建等方式来调控其光吸收率与高温稳定性。早期研究主要围绕寻找天然的高吸收率介质展开, 如目前应用较为广泛的陶瓷铝土矿基颗粒。这类颗粒材料通常以天然铝土矿石为前驱体原料, 经造粒后高温烧结制备而成, 其主要成分为氧化铝、二氧化硅及其他氧化物, 外观呈深棕色^[26], 其在太阳光谱加权吸收率可达 0.931, 远高于纯 Al_2O_3 基体。但该类颗粒在长期高温服役时, 其颜色会因为氧化作用逐渐变浅, 引起吸收率衰减, 因此通常需要在气氛保护下使用。Nie 等人^[27] 综合分析了氧化铝、石英砂、陶粒砂、黑铜渣、金属氧化物复合颗粒等九种常见固体颗粒样品的性质, 发现 SiC 、灰色陶粒砂和铝土矿-堇青石陶瓷在热处理后具有更高的太阳能加权吸收率和热稳定性。

为主动提升复合固体颗粒在多次循环后的光吸收率稳定性, 不少研究团队还通过主动引入不同元

尤汉等：热储能技术发展现状及储热介质与装备的传热挑战

素或氧化物对基体材料进行晶格掺杂，原位形成更稳定的固溶体或尖晶石等新相，增加了原子扩散的势垒，在维持高吸收率的同时提升了颗粒的抗高温衰减能力。如图 3(a)所示，Siegel 等人^[28]通过多种氧化物复合掺杂的方式来实现与商业颗粒一样的高吸收性能，他们合成并表征了 140 种复合颗粒配方，其中 Al_2O_3 、 SiO_2 为主要成分，本征吸收率较高的氧化物为掺杂成分，最终筛选出 12 种光热吸收性能最优的材料配比，在 700°C 高温下保持 500 小时后，仍具有高于 0.900 的吸收率。Liu 等人^[29]提出了用纳米级镁、锰氧化物修饰 CaO 颗粒，同时提升颗粒的循环稳定性与吸收率，并发现随着循环次数的增加，材料内部的网链结构逐步从粒子内部迁移到表面，可以使得该复合颗粒展现出越来越好的太阳光吸收能力。

另一种提高固体材料吸收率的方式是在材料表面构建高吸收率涂层，经过涂覆和烧结实现高吸收率涂层的高温附着，如图 3(b)所示。Chung 等人^[30]发明了用于固体颗粒的先进涂料，该涂料采用有机硅粘合剂，可以在表面固化过程中分解产生二氧化硅并将黑色纳米级颜料颗粒粘附在基体颗粒上，从而提高其表面吸收率。Gobereit 等人^[31]通过溶胶-凝胶法

涂敷无机涂层和内部扩散着色制备了改性铝矾土颗粒，将颗粒表面的光吸收率从 87% 提升至 95%，并降低了其反射损失。此外，石墨、碳黑等涂层材料也可以显著提升其表面太阳光吸收率从而提高系统热效率^[32]。尽管涂层能显著提升初始光吸收率，其与颗粒基体间热膨胀系数的失配往往会诱发显著的热机械应力^[33]。在频繁的高低温热循环与流化摩擦中，这种应力集中易导致涂层萌生微裂纹、发生机械破碎甚至界面脱层^[34]。因此，开展高吸收率涂层界面的高温机械性能评估，是保障长期稳定光吸收的关键。

由此可见，固体颗粒储热介质的吸收率调控是当前该领域的研究热点之一，为其在第三代光热等先进太阳能技术领域的应用提供了关键支撑。目前的研究焦点已从寻找高吸收率介质转为对已有固体颗粒进行复合掺杂或构建涂层来实现吸收率的主动增强。相关评价方式也从单纯关注光吸收率高低变为强调多次储放热后其光吸收能力的循环稳定性。未来，在光热场景下规模化使用的固体储热介质应同时具备高吸收率与高循环寿命，其制备工艺也需从实验室精细合成走向工业化生产，实现批量制备与成本可控。

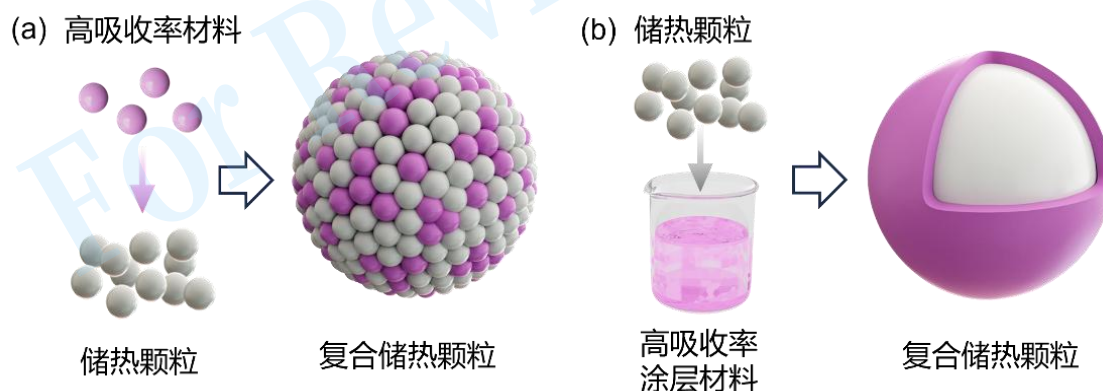


图 3 针对固体颗粒材料吸收率增强的技术方法。(a) 掺杂高吸收率颗粒；(b) 涂覆高吸收率涂层

Figure 3 Approaches for absorptivity enhancement of solid particulate materials. (a) Addition of high-absorptivity particles; (b) Deposition of high-absorptivity coatings.

除光热辐射换热外，固体储热介质主要通过热传导过程进行储放热，其热导率的调控与优化亦是提升系统整体传热效率的关键。为突破储热材料本征热导率较低的物理瓶颈，当前研究主要通过基体复合、骨架嵌入以及壳层构建等方式增强材料的导热

能力。图 4(a)显示了多尺度复合制备高热导复合储热颗粒的方法。在显热储热方面，Xu 等人^[35]采用碳热还原法处理铝硅酸盐前驱体，通过消除低导热的二氧化硅相，原位合成了 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ 复合陶瓷颗粒。该复合材料内部生成的 Al_2O_3 基体与高导热 SiC 晶粒的

紧密交织形成了致密的微观导热网络, 将其热导率显著提升至 $13.73 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, 相较传统氧化铝基陶瓷提高了 3 倍以上. 在潜热储热领域, Tian 等人^[36]通过高温下物理混合 Mg 颗粒与三元碳酸盐制备了高导热复合相变材料, 这些镁颗粒以树枝状结构分散在熔盐中, 有效增强了材料的热传导能力, 当镁的添加量为 2 wt% 时, 该复合材料的热导率达到了 $1.93 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, 相比纯三元碳酸盐提高了 145%. 针对大孔隙骨架, Singh 等人^[37]通过高温和压力辅助将 MgCl_2 相变储热介质熔化后渗透到石墨泡沫骨架中, 该复合材料具有较高的储热密度且其在 600°C 时的热导率达到 $14.6 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, 较纯 MgCl_2 的材料其热导率提升超过 30 倍. Du 等人^[38]通过冻结铸造和原位反应方法制备了层状多孔的 Ti_3SiC_2 骨架, 并将其与 NaCl-KCl 熔盐结合制备了形状稳定的高温相变材料复合材料, 将热导率从 $6.13 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 提升到 $9.27 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. 在热化学储热中, Li 等人^[39]通过挤压成球方法制备了 SiC/Mn 共掺杂的 CaO 颗粒, SiC 的加入不仅将热导率提高了 2.4 至 3.2 倍, 更作为惰性骨架有效限制了 CaO 在高温下钙循环过程中的烧结团聚与原子迁移, 从而改善了整体热传输效率. 此外, 将石墨烯等高导热纳米材料均匀分散于储热基体中, 也是实现该类材料综合热导率提升的重要微观路径.

另一方面, 将储热介质复合并构建高导热的核壳结构, 是另一类核心强化路径, 如图 4(b) 所示. 目前, 这类核壳结构设计已受到了广泛研究, 如 Al_2O_3 核壳、复合陶瓷或石墨壳层等. 在相变储热方面, Zhong 等人^[40]利用准等静压技术制备了以掺杂石墨的 NaCl 为芯材、致密石墨为高导热壳层的高温相变胶囊. 该石墨壳层不仅能有效防止液态相变材料在高温条件下的泄漏, 还能显著强化传热, 使相变胶囊的平均充热和放热速率分别大幅提升了 92.5% 和 168.4%. 针对热化学储热, 莫雅超等人^[41]通过湿法制粒和高温烧结技术制备了具有核壳结构的 Ca(OH)_2 颗粒, 高导热的 SiC 陶瓷壳层不仅赋予了颗粒远超纯 Ca(OH)_2 的导热系数, 还从物理上压实了内部芯体, 进一步提升了其有效热导率. 除强化导热外, 这种核壳设计还能通过增加反应接触面积来提升反应速率, 并显著改善介质的热化学循环稳定性.

综上所述, 当前固体储热介质热导率的强化策略主要围绕材料复合与核壳包覆展开, 可以有效解决基体材料本征导热较差的物理瓶颈. 不过, 与吸收率调控类似, 目前绝大多数热导率提升方法还处于实验室初期研究阶段, 缺少规模化的改性或制备工艺, 如何平衡热导率增强效果与材料成本提升也需在未来重点关注.

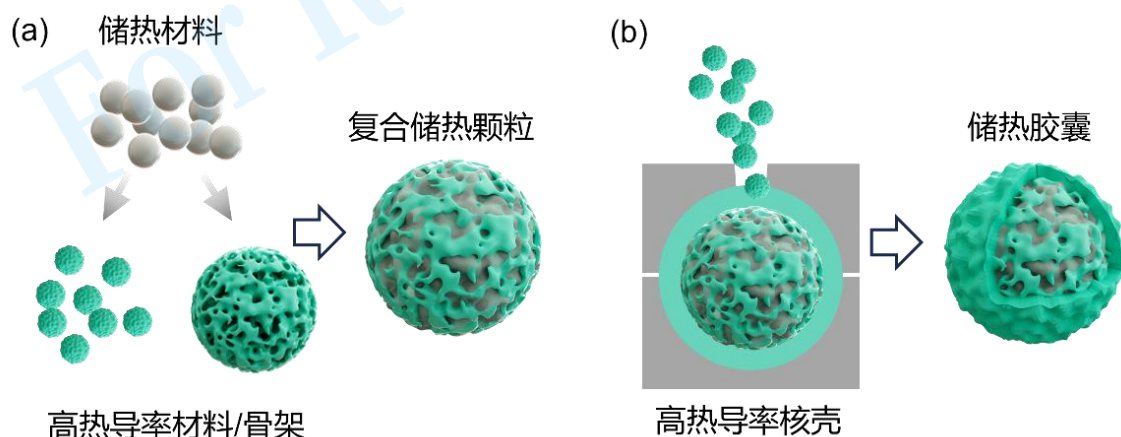


图 4 针对固体储热材料热导率增强的技术方法. (a) 复合高热导率材料/高热导率骨架; (b) 胶囊化并复合高热导率核壳

Figure 4 Approaches for thermal conductivity enhancement of solid thermal storage materials. (a) High-thermal-conductivity composites/frameworks; (b) Encapsulation with high-thermal-conductivity core-shell structures.

4.2 固体储热装备中的性能提升

固体储热系统通常分为固定床、移动床与流化床式三类储热系统。其中固定床系统的储换热过程主要依赖固体颗粒导热，受制于多数颗粒热导率较低，研究人员通常引入肋片、热管等传热增强结构提升换热系数与传热面积。Zhang 等^[42]比较了不同肋片形式下储热介质的换热性能，发现经过拓扑优化的肋片具有最快的换热速率，如图 5(a)所示，为后续结构优化设计提供了参考。热管具有高效传热和均温特性，在释热、加热和储热阶段将相变材料分别布置于热管的蒸发段、冷凝段和绝热段，可以实现热量的定向存储与释放，大幅提升了系统的温度均匀性与储热效率^[43]，如图 5(b)所示。

相比于固定床，移动床换热器在重力作用下使得颗粒通过管壳式或板壳式结构同时进行换热与传热，可以保持恒定的换热介质出口温度。但颗粒移动增大了颗粒间或者颗粒与传热表面间的空隙，进而增加了传热过程中的接触热阻。例如，在管壳式结构中，由于管顶部存在滞止区和底部存在空隙区，阻碍了颗粒与管间的换热。Tian 等^[44]通过比较不同管束排列方式，指出交错排列相较于对齐排列可显著缩小

滞止区与空隙区，如图 5(c)所示，换热功率提高了 26%，进一步将圆管替换为曲率变化更平缓的椭圆管，滞止区明显减小，颗粒与壁面接触更均匀，换热功率提高 67.8%，传热系数提升 9.1%。这表明，管形与排列方式对颗粒侧换热具有显著影响，合理的几何设计可有效降低接触热阻。在板壳式结构中，颗粒侧的近壁面区大部分热量需通过低导热的气体间隙传递，而主流区为塞流，热量向流动法向传递以热扩散为主，导致有效热导率降低。为突破这一瓶颈，Ma 等^[45]设计六边形的加热颗粒通道，如图 5(d)所示，通过破坏颗粒流态，促使颗粒直接接触加热面并实现各流道间的充分混合，显著增强了传热效果。在多种几何参数和摩擦系数下，其换热系数可达 $500 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 至 $1500 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ，显示出良好的强化传热潜力。Mishra 等^[46]则在颗粒通道中填充高热导率多孔金属泡沫骨架，如图 5(e)所示，解决了因近壁面区孔隙率增加导致的传热性能下降的问题，显著提升了传热效率。上述强化传热形式表明，针对固定床、移动床颗粒侧低换热系数问题，结合几何构型优化、功能复合设计以及多孔介质增强等多尺度结构创新手段，是提升储热与换热系统综合性能的有效途径。

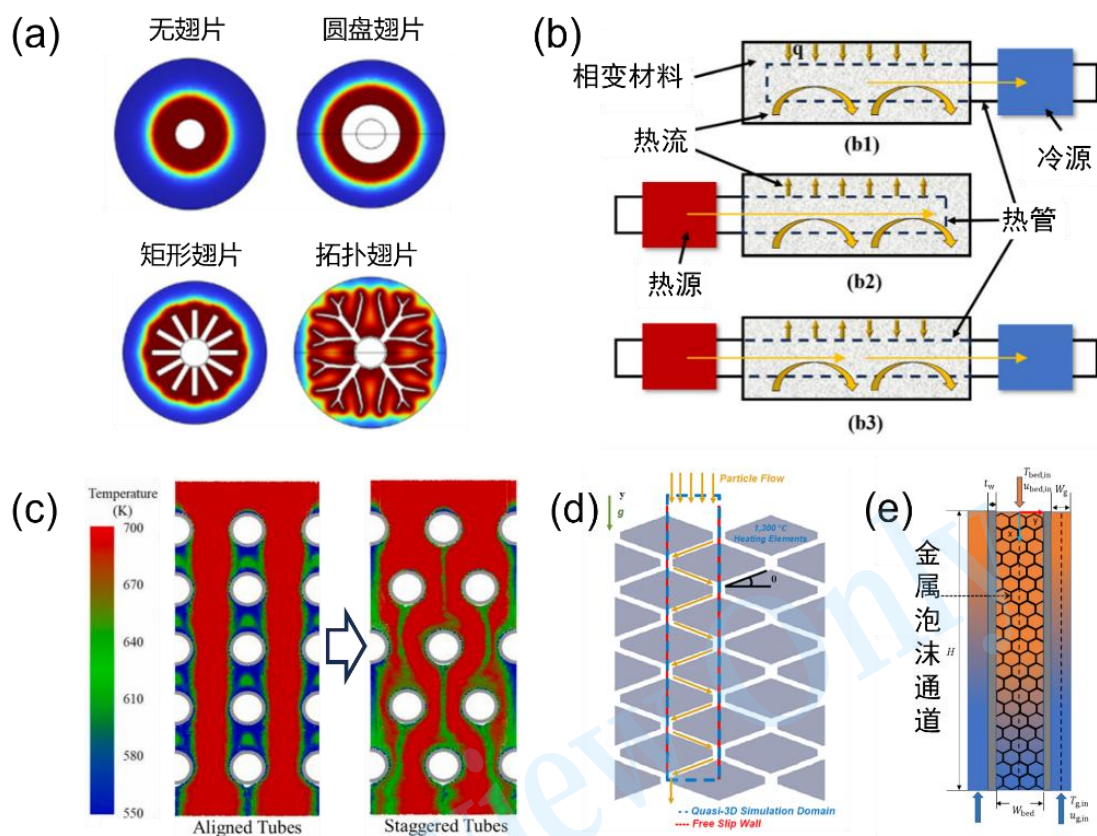


图 5 固定床与移动床储热系统的传热强化措施. (a) 固定床肋片结构^[42], Copyright © 2025 Elsevier Ltd; (b) 固定床热管原理^[43], Copyright © 2024 Elsevier Ltd; (c) 移动床管道排布方式优化^[44], Copyright © 2023 Elsevier Ltd; (d) 移动床中的六边形颗粒加热流道^[45], Copyright © 2022 Elsevier Ltd; (e) 移动床中填充多孔金属泡沫骨架的工质传热通道^[46], Copyright © 2023 Elsevier Ltd

Figure 5 Heat transfer enhancement for packed-bed and moving-bed thermal energy storage systems. (a) Fin structures in a packed-bed system^[42], Copyright © 2025 Elsevier Ltd; (b) Principle of heat pipes in a pecked-bed system^[43], Copyright © 2024 Elsevier Ltd; (c) Optimization of tube arrangement in a moving-bed system^[44], Copyright © 2023 Elsevier Ltd; (d) Hexagonal particle heating channels in a moving-bed system^[45], Copyright © 2022 Elsevier Ltd; (e) Heat transfer channels filled with a porous metal foam skeleton in a moving-bed system^[46], Copyright © 2023 Elsevier Ltd.

将固体颗粒在流化的状态下进行充放热也可以强化相关的传热过程, 这种系统构型统称为流化床储热系统. 该系统中高温颗粒流持续置换在换热面处被冷却的低温颗粒流, 使换热表面维持高温梯度驱动力, 且传热系数提升与表面颗粒更新频率成正比, 如 Brewster 等^[47]提出的窄通道流化床的传热系数可达 $1100 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, 比非流化状态高约 400%. 不过, 流化床存在流化气体寄生功率(压缩机功率)和热损失, Miller 等^[48]指出窄通道的流化床在流化速度 U_g 是最小流化速度 U_{mf} 的 2~4 倍时, 传热系数最高, 当 $U_g > U_{mf}$, 气泡率增加, 颗粒与壁面接触时间减少, 从而降低传热系数. Briongos 等^[49]也指出在 $U_g = 3U_{mf}$ 时,

寄生能耗最小. 在直接气固接触换热时, Gifford 等^[50]采用流化气体作为换热介质, 消除了管壳换热器的壁面热阻和无流化气热损失, 提高气固接触面积, 显著提升传热系数和能量效率, 而在间接换热场景下, 也可通过回收流化排出气体的余热, 预热入口流体化气体以减少热损失.

总体而言, 固体储热装备的几何结构重构、优化以及设计参数优化均可在装备侧提升相关储热系统的传热性能, 进而提升系统的储换热能力以及综合性能表现. 针对固定床与流化床储热系统, 相关装备的传热增强结构设计方案与固体通道结构优化方法已得到大量研究, 未来的研究应该更加关注其加工

尤汉等：热储能技术发展现状及储热介质与装备的传热挑战

制造的可行性与经济性。流化床储热系统相对复杂，设计参数众多，如何在传热效果达标的同时协同减少系统的寄生功率损耗与热损失还需更多的机理研究与技术开发。

5 液体储热中的传热问题

相较于以导热和辐射换热为主的固体储热，液体储热系统凭借储热介质的对流传热实现高效的热量输运与交换。尽管熔融盐、导热油等液体介质的热导率普遍低于 $1.0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ，但由于其传热速率主要由对流传热系数主导，通过材料改性提升本体热导率的迫切性相对较低；然而，液体储热系统的设计优化高度依赖准确的物性参数数据，且亟需打破介质的本征性能限制以降低成本。因此，如何实现液体热导率等物性的精准测量与有效调控，是目前液体储热在介质层面面临的核心传热挑战之一。液体储热在装备层面的挑战主要围绕电热转换与热交换装备展开。目前大功率电热转换装备技术尚不成熟，传统的电阻式加热存在加热元件的电绝缘性与热传导性难以协同提升的本征挑战，导致电加热功率提升会造成巨额的电气成本增加。液体储热介质热交换装备技术相对电加热装备更为成熟，但目前也存在体积庞大、损耗高等问题，如何强化换热器中的对流传热过程是当前技术发展的重要需求。

5.1 液体储热介质的热导率准确测量

准确测量液体储热介质热导率对于系统的设计与优化十分重要。然而液体样品具有流动性，需要特定的高温容器承装，相较固体样品，其测量过程更复杂且误差更高。热线法是液体热导率测量的传统标准方法，通过监测通电热丝的温升曲线反演样品热导率，具有快速、高精度的优势，但其直接应用于熔盐等液体储热材料时存在电热丝材料腐蚀失效、测量原件短路等难题，可以通过涂覆氧化铝绝缘薄膜以避免材料腐蚀与短路问题，可以实现高温液体储热

材料的热导率测量。Zhao 等^[51]提出频域热线法，如图 6(a)所示，通过分析不同频率电流下的铂丝的温度响应，可将熔盐热导率测量精度控制在 20%左右。然而氧化铝等绝缘涂层在长期运行中仍然会因腐蚀而逐渐失效，这使得热线法通常具有高额的运维成本与较差的测试重复性，相关问题仍需进一步研究与攻克。Zeng 等^[52]发明了名为调制光热辐射法(Modulated Photothermal Radiometry)的液体热导率非接触式原位测量测量技术(图 6(b))，使用激光加热流体管道外壁，通过红外探测器捕捉管壁温度响应，结合热穿透深度与激光频率的关联性，实现对动态流动熔盐的热导率测量，目前应用于纯硝酸盐、太阳盐及氯化盐等储热介质。该方法避免了接触式测量的腐蚀与短路风险，并能反映实际工况下的热物性参数，但其依赖精密激光装置、恒温流体回路及高灵敏度信号处理系统，导致设备成本高昂、操作复杂，目前仍处于实验室开发阶段。Parker 等^[53]开发了激光闪光法(Laser Flash Analysis)，如图 6(c)所示。其核心原理是将液体材料放入液体容器，通过激光脉冲加热容器主体底部，利用红外探测器记录容器顶盖上表面的温升曲线，结合一维传热模型计算容器内液体的热扩散率与热导率。An 等^[54]则针对熔盐材料的腐蚀性强所导致昂贵金属容器易损坏等问题，发明了石墨液体容器，并将其应用在商用的激光闪光分析仪中，测定了多种氯基熔盐在 $500\sim 700^\circ\text{C}$ 范围内的热导率。Dong 等^[55]通过实验与数值建模等方法优化了针对硝酸盐熔盐材料测试的液体容器构型并增加侧壁导热传热屏障，使得该类熔盐在测量过程中的传热路径基本为一维导热，大幅提升热导率测量的准确性，不过其研究也表明对于热导率范围不同的液体介质，相关液体容器最优结构参数并不相同。可见，储热介质热导率等物性的准确测量仍对相关实验技术进行针对性的改进，其中关键设备或容器装置的耐久性与适用性还需要提升。

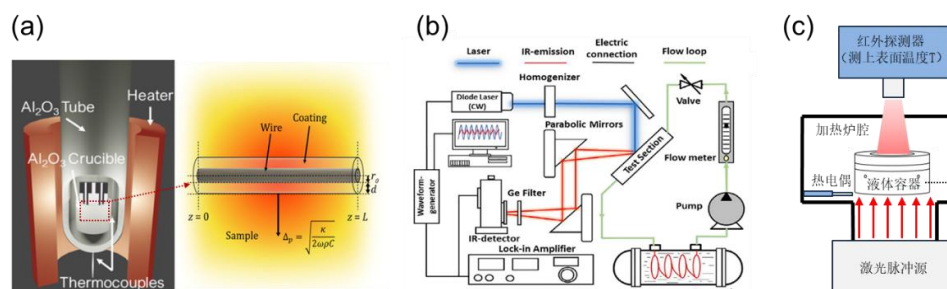


图 6 适用液体储热介质热导率测量的方法. (a) 频域热线法原理图^[51], Copyright © 2020 American Chemical Society; (b) 调制光热辐射测量法实验系统图示^[52], Copyright © 2021 Elsevier Ltd; (c) 激光闪光法测量原理图^[55], Copyright © 2024 Chinese Materials Research Society.

Figure 6 Methods for measuring thermal conductivity of liquid thermal storage media. (a) Schematic of the frequency-domain hot-wire method^[51], Copyright © 2020 American Chemical Society; (b) Schematic of the experimental setup for modulated photothermal radiometry^[52], Copyright © 2021 Elsevier Ltd; (c) Schematic of the laser flash analysis^[55], Copyright © 2024 Chinese Materials Research Society. Published by Elsevier B.V.

5.2 液体储热介质的热物性调控

液体储热介质的储换热效率通常受限于较低的本征热导率. 掺杂调控可在一定程度上缓解这一问题, 其中向熔盐中掺混纳米颗粒是近年来较受关注的一类方法. 值得说明的是, 纳米颗粒的引入不仅可以改善热导率, 其往往还能同时提升液体储热介质的储热密度, 实现传热与储热的协同增强.

针对熔盐中纳米颗粒的热导率强化机理以及储热密度协同提升机制, 已有研究从宏观实验到微观模拟开展了多尺度探索. Awad 等人^[56]在太阳盐中分别掺混 Fe_2O_3 、 CuO 与 TiO_2 纳米颗粒, 发现 Fe_2O_3 纳米颗粒可在该体系中同时改善熔盐的热导率与比热容, 其中热导率最高提升约 60%, 比热容最高提升约 11% (即储热密度提升约 11%). 传统观点通常将储热介质热导率的提升归因于纳米颗粒的布朗运动, 认为其引发的微扰动有效增强了颗粒与流体间的能量传递效率. 然而, 随着微观模拟技术的发展, 关于传热强化机理的认知发生了深刻转变. Li 等^[57]采用分子动力学(MD)模拟指出, 由于热扩散速率比布朗扩散快 3~4 个数量级, 布朗运动和微对流并非热导率增强的主导因素. 其本质在于纳米颗粒的引入提升了系统的库仑势能, 缩短了离子间的平均间距, 从而大幅提高了离子间碰撞的概率和频率, 主导了热传导的增强. 在比热容与储热密度协同增强方面, Rizvi 等^[58]从双电层理论出发, 指出纳米颗粒表面与熔盐离子间的静电相互作用诱导了离子微分离与局部密度

变化, 界面层内离子的高势能状态使其需要额外能量才能脱离有序结构参与热运动.

虽然已有研究证明了掺混纳米颗粒可以实现液体储热介质热导率与储热密度的协同增强, 但掺混后形成的纳米流体以及相关热物性的强化效果存在稳定性欠佳的问题, 纳米流体中颗粒的分散状态与团聚行为对此有显著影响. 针对多颗粒体系的协同效应, Liang 等^[59]采用 MD 模拟分析了 Hitec 盐中多个 MgO 纳米颗粒的动态演化. 研究揭示, 固液界面处形成的高度有序的吸附层是热物性提升的关键. 但当颗粒浓度过高时, 颗粒间的相互作用与团聚趋势会削弱界面吸附层的稳定性, 导致热导率随浓度的增加出现非单调变化. 这在微观尺度上凸显了纳米颗粒的分散状态对维持界面传热网络稳定性并优化热物性的核心作用. 关于颗粒分散与团聚在更大尺度上的影响, 学术界存在多维度的观点. 在介观尺度上, Huang 等^[60]结合 MD 与格子玻尔兹曼方法(LBM)揭示了反直觉的“团聚效应”, 他们发现, 纳米颗粒的适度团聚并未恶化传热, 反而能在流体内部构建出低热阻的传热通道, 使系统势能对热传导的贡献显著增加, 进而获得比完全均匀分散状态更高的热导率. Chen 等^[61]对比了三不同形态的多壁碳纳米管对太阳盐和 Hitec 盐的影响, 发现普通长管极易发生恶性团聚导致热导率下降, 而添加 0.6 wt% 的短管或羧基化碳纳米管, 则能在熔盐中形成致密的网状结构并构建高效导热通道, 可稳定获得约 131% 的热导率提升与 22% 储热密度提升. 可见, 纳米颗粒的浓度、

尤汉等：热储能技术发展现状及储热介质与装备的传热挑战

团聚状态以及粒子尺度均会对其与储热介质组成的纳米流体的稳定性产生影响, 实际调控复杂度很高.

最后, 面向万吨级的商用需求, 目前仍缺乏低成本、规模化的纳米颗粒掺混制备工艺. 传统的“水溶液法”因高耗能而难以实现规模应用. 为此, Xiong 等^[62]对比评估了高温熔融直混法(将纳米颗粒直接加入 300℃熔融盐中机械搅拌)与水溶液法的制备效果, 证实熔融法能更好地保留微晶骨架, 其制备的纳米流体热导率提升幅度较水溶液法高出 35.71%. 此外, 高能球磨法、前驱体原位合成法等极具量产潜力的机械或化学混合工艺也受到了广泛关注.

总体而言, 液体储热介质的热导率调控可以通过引入纳米颗粒等方式实现, 在提升热导率的同时还有望协同增强介质的比热容等核心热物性参数. 不过, 该调控手段目前还存在如何维持掺混后纳米流体长期稳定、如何实现该纳米流体低成本大规模工业制备工艺等挑战.

5.3 液体储热装备的性能提升

液体储热的电热转换装备在火电机组耦合热储能、风电光伏耦合热储能系统有着广泛应用需求, 同时也在液体储热系统中扮演着重要角色, 相关装备主要分电加热器和热泵两类. 随着热储能系统向大规模大容量发展, 电加热器装备主要的发展挑战为提高电压等级、单机功率以及响应速度等, 涉及相关的构型改进与传热过程研究. 目前, 适用于液体储热系统的电加热方式主要有电阻式、电磁感应式和电极式. 电阻式主要由许多的电热管串并联而成, 电热管传热过程由发热丝发热传至绝缘材料填充层再到金属外壳, 最终与液体介质换热, 如图 7(a)所示. 该加热器技术成熟度高, 成本较低, 但热惯性大, 温度响应速度慢, 适合非快速变负荷或介质出口温度要求不高的场景, 此外, 对于高压电阻式加热器而言, 如何在电热管实现高电压绝缘的同时保证其具有足够的热传导速率已成为当前技术的关键瓶颈. Zhang 等^[63]指出 AlN 抗高压击穿能力优于传统 MgO 粉体, 且热扩散性能好, 适合作为高压电阻式电加热器的绝缘填充材料, 不过该介质成本很高, 其规模使用会造成电阻式加热器成本的大幅增加. 电磁感应加热通过交变磁场在金属管路中诱发感应涡流产生焦耳热,

熔盐再通过对流换热升温, 如图 7(b)所示. 而传统感应加热设备漏磁、热损失大、效率低, Zhou 等^[64]提出了工频电磁耦合加热方案, 采用类变压器绕组结构实现 96.56%的加热效率. 采用电磁感应加热方式可以实现对熔盐等储热介质进行非接触式加热, 规避了传统电阻式加热对于绝缘填充材料的需求, 有望实现大规模高电压等级加热, 此外电磁感应加热还具有快速响应特性, 适用于调频和波动性电能场景. 电极式加热利用液体介质自身导电, 通电产生焦耳热, 省去了传统加热中依赖固体壁面的传热环节, 因而具备更快的响应速度、结构紧凑、系统简化等优势. 如图 7(c)为喷射式电极加热原理示意图. 针对高电导率的熔盐储能介质其电导率高于水至少 3 个量级且升温需求高, 需设计适用于熔盐介质的高电压、大功率电极加热器结构. 杭州华源前线能源设备有限公司提出了喷射式电极加热装置^[65], 优化了相关电极设计与结构参数, 实现了高电压单台超过 50MW 等级的熔盐电极式加热喷射式电极加热设备. 与电磁感应加热类似, 电极式加热器同样具备高电压加热等级与快速响应能力, 在大规模储热耦合火电调峰调频等系统中具有应用潜力. 高温热泵技术在近几年也得到了储热领域的广泛关注, 相较于电加热器, 热泵可以实现高于 100%的电热转化比率, 其基本构成如图 7(d)所示. 传统蒸汽压缩热泵系统基于逆卡诺循环供热温度低于 80℃, 然而 Du 等^[66]提出采用 N₂ 和 Ar 混合工质的超高温布雷顿循环热泵系统, 最高制热温度可达 560℃, 可匹配熔盐储热系统. 浙江绿储科技有限公司正在主导开发的 600℃特高温热泵技术, 并通过示范系统初步验证了 2 MW 级规模特高温热泵的可行性. 由此可见, 热泵有望在未来成为液体储热系统中成为主流的电热转化技术.

综合而言, 电阻式加热技术适合中小规模且电压等级需求低的液体储热应用场景, 其技术水平相对成熟, 但发展潜力受限于绝缘材料的性能与成本. 电感式与电极式加热有望实现高电压等级加热, 且具有相对更快的响应速率, 适合电加热储热参与调峰调频等大规模复杂应用场景. 热泵加热虽然系统较为复杂, 但理论效率更高, 同样具备规模发展的价值与潜力.

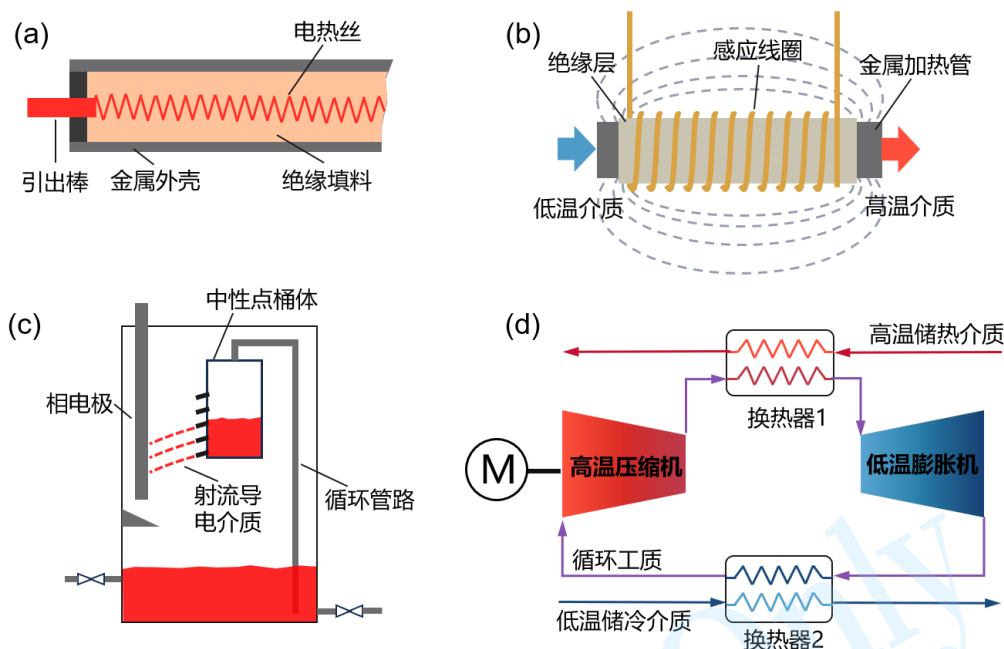


图 7 电-热转换装置基本原理示意图. (a) 电阻式电热管; (b) 电磁感应加热; (c) 喷射式电极加热; (d) 热泵系统
Figure 7 Schematics of electricity-to-heat conversion devices. (a) Tubular resistance heater; (b) Electromagnetic induction heating; (c) Jet-type electrode heater; (d) Heat pump system.

液体储热系统中的换热装备通常为复杂的管束模组, 普遍面临体积庞大与不可逆熵损较高的宏观传热痛点. 为突破这一装备瓶颈, 在不增加体积的前提下实现降本增效, 当前研究主要聚焦于引入被动式结构, 以实现“管外壳侧-管壁表面-管内流体”多区域的对流传热强化. Stehlik 等人^[67]研究了螺旋折流板对于换热的影响, 如图 8(a)所示. 研究发现, 螺旋挡板能显著提高换热器的换热能力, 同时降低换热器压降, 通过改变螺旋挡板的倾角, 可以使湍流增强因子最大增加 1.39 倍. 除折流板外, 在管道表面增添翅片等传热增强结构也可以提升管外侧的湍流扰动以及传热面积, 从而增强换热器的壳侧传热性能, 如图 8(b)所示. Mousavi 等人^[68]研究了螺旋状翅片对套管换热器的传热增强作用, 其发现该类翅片的引入可将管外侧传热系数提升 15%-47%, 但同时保持摩擦系数小于 1.24. 微型传热增强结构如低矮翅片、管道表面的低矮凸起或凹陷(如图 8(c)所示)等亦可以实现更强的扰流从而提升表面的传热能力, 同时还具备易加工与安装的显著优势, 在液体储热系统的换热器当中更具应用潜力. Kaood 等人^[69]比较了球形、

圆柱形、锥形、阶梯锥形凹坑管道在换热器中的传热能力, 并与光滑直管进行了比较, 发现阶梯锥形凹坑形状的换热管的换热效果最好, 综合传热影响因子可达到 1.32. 最后, 换热管内侧也可以通过增加扰流结构从而增强该侧流体与壁面的传热速率, 如图 8(d)所示. Pandey 等^[70]提出在圆形管换热器中使用 Y 型插入件, 实验结果发现在雷诺数 Re 为 3000 时, 该结构的引入可以使得管道内侧努塞尔数(Nu)提升 5.05 倍, TPF 因子提升达 2.88 倍. 由此可见, 在液体流动区域增加各类扰流结构或插入件不但可以增加传热面积, 同时也能增强对流传热过程中的流体扰动从而强化传热系数, 不少设计在实验室尺度的实验或模拟中已经展现了其对于储热装备换热性能的显著提升效果. 不过, 大规模液体储热装备类型众多, 整体结构复杂, 传热强化结构的引入可能诱发局部流速死区的形成, 进而加速材料腐蚀或造成介质凝固冻堵. 因此, 未来的液体储热换热装备的传热强化研究需要协同考虑对流传热、压力损失、流动腐蚀、启动与停止过程中的冻堵等多方面因素, 通过多参数优化等方法进行综合设计才能突破其传热能力瓶颈.

尤汉等：热储能技术发展现状及储热介质与装备的传热挑战

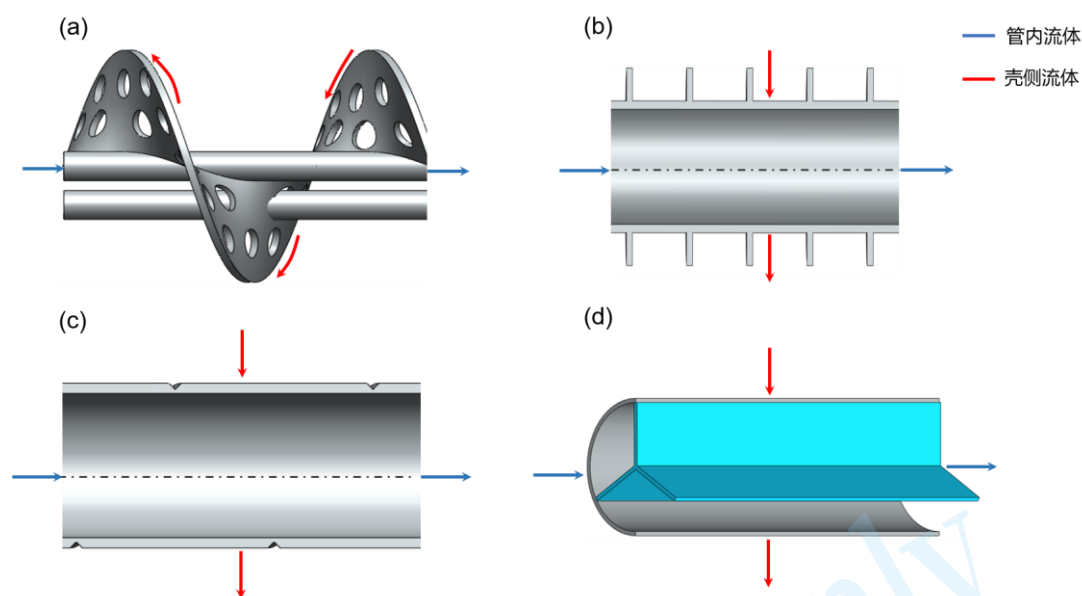


图8 储热流体换热器中的传热强化设计。(a) 螺旋折流板; (b) 管外翅片; (c) 管外表面微型结构; (d) 管内嵌入件

Figure 8 Heat transfer enhancement in heat exchangers for thermal energy storage. (a) Helical baffles; (b) External fins; (c) Microstructures on the outer tube surface; (d) Tube inserts.

6 结论与展望

热储能作为典型的大规模长时储能技术，在光热发电、火电灵活性改造及压缩空气储能等领域具有广阔的应用前景。本文从储热介质形态出发，将热储能技术划分为固体与液体两大类，系统梳理了其在材料物性和宏观装备层面所面临的传热挑战及有发展潜力的技术研究方向。

围绕固体储热，其材料层面的传热挑战主要为储热介质光吸收率与热导率的调控与提升，材料复合或增加高性能涂层/核壳是当前技术突破的主要方向。固体储热装备相关的传热问题与其装备类型直接相关，固定床主要通过发展翅片、热管等传热增强结构实现综合传热性能提升；移动床则需通过固体通道结构优化降低颗粒与传热表面之间的接触热阻；流化床技术相对复杂，当前仍需进行颗粒流换热理论研究及与流化参数优化以降低相关气体寄生功率与热损失。

围绕液体储热，相关材料挑战主要为热导率等热物性的准确测量，需要根据储热介质特性对测量装置与方法进行针对性的改进与升级。采用掺混纳

米颗粒等方法提升热导率及储热密度时还需要解决如何维持长期稳定性和实现规模化工业制备等问题。其装备层面的问题主要在于电热转换与热交换，电热转换装备将主要从传统电阻式加热向电感式、电极式以及热泵加热三种路线进行技术革新，其中电感与电极式加热具有高电压加热及快速响应等优势，热泵加热则能够从理论上提升电热转换效率，均具备大规模发展潜力。热交换装备的升级则主要在于其内部的对流传热强化，目前的主要传热增强设计已通过实验室尺度的实验与仿真验证，主要挑战为在规模换热装备中需要实现装备的耐久性、稳定性以及换热能力的协同提升。

总体而言，突破上述材料与装备层面的传热瓶颈，是当前热储能技术降本增效的关键途径，也是支撑热储能在可再生能源发电、火电灵活性改造、储能调峰电厂以及谷电蓄热供暖等新型大规模能源项目中规模化应用的关键。随着相关理论研究与技术创新的不断深入，热储能技术将在未来的新型电力系统构建和低碳工业生产中发挥更核心的调度与枢纽作用，助力“双碳”目标的平稳实现。

致谢 本研究得到内蒙古自治区科技“突围”工程“揭榜挂帅”项目(编号: 2025KJTW0005), 国家自然科学基金(编号: 52306084)和湖北省自然科学基金-三峡创新发展联合基金(编号: 2024AFD352)的资助, 得以顺利实施, 在此深表谢忱。

参考文献

- 1 IEA. Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector. Technical Report, France: International Energy Agency, 2021.
- 2 China Energy Storage Alliance. Energy Storage Industry Research White Paper 2026 (in Chinese). Technical Report. Beijing: China Energy Storage Alliance, 2026 [中关村储能产业技术联盟. 储能产业研究白皮书 2026. 技术报告. 北京: 中关村储能产业技术联盟, 2026.]
- 3 IRENA (2026). Renewable Capacity Statistics 2026. Technical Report, Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2026.
- 4 Turchi C S, Vidal J, Bauer M. Molten salt power towers operating at 600–650°C: Salt selection and cost benefits. *Sol Energy*, 2018, 164: 38–46.
- 5 Liu Y, Teng W J, Gu Q F, et al. Scaled-up diversified electrochemical energy storage LCOE and its economic analysis (in Chinese). *Energy Storage Sci Technol*, 2023, 12(1): 312. [刘阳, 滕卫军, 谷青发, 等. 规模化多元电化学储能度电成本及其经济性分析. *储能科学与技术*, 2023, 12(1): 312–318]
- 6 Yan H, Zhang C, Shao Z, et al. The Underestimated Role of the Heat Pump in Achieving China's Goal of Carbon Neutrality by 2060. *Engineering-PRC*, 2023, 23: 13–18.
- 7 Alva G, Lin Y, Fang G. An overview of thermal energy storage systems. *Energy*, 2018, 144: 341–378.
- 8 Saher S, Johnston S, Esther-Kelvin R, et al. Trimodal thermal energy storage material for renewable energy applications. *Nature*, 2024, 636(8043): 622–626.
- 9 Sun L P, Song Z H, Ma J, et al. Research overview of solar thermal power technology in China (in Chinese). *South Energy Constr*, 2025, 12(5): 70–84 [孙丽平, 宋子恒, 马骏, 等. 中国太阳能光热发电技术研究综述. *南方能源建设*, 2025, 12(05): 70–84]
- 10 Na H, Zhang C, Wu Y, et al. Effect of Na_2CO_3 content on thermophysical properties, corrosion behaviors of $\text{KNO}_3\text{-NaNO}_2$ molten salt. *Energy*, 2024, 311: 133378.
- 11 Barde A, Jin K, Shinn M, et al. Demonstration of a low cost, high temperature elemental sulfur thermal battery. *Appl Therm Eng*, 2018, 137: 259–267.
- 12 Xiang D, Gu C, Xu H, et al. Self-Assembled Structure Evolution of Mn-Fe Oxides for High Temperature Thermochemical Energy Storage. *Small*, 2021, 17(29): 2101524.
- 13 Mehos M, Turchi C, Vidal J, et al. Concentrating solar power Gen3 demonstration roadmap. Technical Report, Golden, CO (United States): National Renewable Energy Lab, 2017
- 14 Colelli G, Chacartegui R, Ortiz C, et al. Life cycle and environmental assessment of calcium looping (CaL) in solar thermochemical energy storage. *Energy Convers Manage*, 2022, 257: 115428.
- 15 Zhang Y H, Song X H, Yang R G, et al. Performance of Molten Salt Thermal Energy Storage System Based on Reheat Steam Extraction from Coal-fired Power Plants (in Chinese). *J Chin Soc Power Eng*. 2024, 44(3): 447–454. [张宇恒, 宋晓辉, 杨荣贵, 等. 基于再热蒸汽抽汽-熔盐储热的火电系统分析. *动力工程学报*, 2024, 44(3): 447–454]
- 16 Yong Q, Jin K, Li X, et al. Thermo-economic analysis for a novel grid-scale pumped thermal electricity storage system coupled with a coal-fired power plant. *Energy*, 2023, 280: 128109.
- 17 Wei S Z, Li B F, Sun C Y, et al. Research progress of compressed air energy storage and its coupling power generation (in Chinese). *Huadian Technol*, 2021, 43(7): 9–16 [魏书洲, 李兵发, 孙晨阳, 等. 压缩空气储能技术及其耦合发电机组研究进展. *华电技术*, 2021, 43(7): 9–16]
- 18 Yang Z, Chen H S, Wang L, et al. Influence of Thermal Energy Storage on Performance of Supercritical Air Energy Storage System (in Chinese). *Electr Power Constr*, 2016, 37(8): 33–37 [杨征, 陈海生, 王亮, 等. 蓄热对超临界空气储能系统性能的影响. *电力建设*, 2016, 37(8): 33–37]
- 19 Zhao H C, Han W, Yao M Y, et al. Economic analysis of a compressed air energy storage system coupled with molten salt thermal storage system (in Chinese). *Therm Power Gener*, 2024, 53(8): 1–8 [赵瀚辰, 韩伟, 姚明宇, 等. 熔盐储热耦合压缩空气储能系统经济性分析.

1 尤汉等：热储能技术发展现状及储热介质与装备的传热挑战

- 2
3
4 热力发电, 2024, 53(8): 1–8]
- 5 20 Han W. Solid state electric heat storage heating system and its application analysis (in Chinese). *Energy Conserv*, 2024, 43(12): 79–82 [韩
- 6 伟. 固体电蓄热供暖系统及其应用分析. *节能*, 2024, 43(12): 79–82]
- 7 21 Song Y Y, Zhou K, Lu X Y, et al. Study on Flow and Heat Transfer Characteristics and Safety Analysis of Modular Molten Salt Thermal
- 8 Storage Heat Exchangers (in Chinese). *J Xi'an Jiaotong Univ*, 2025, 59(07): 118–128. [宋园园, 周科, 鲁晓宇, 等. 模块化熔盐储热换热器
- 9 流动传热特性研究及安全性分析. *西安交通大学学报*, 2025, 59(07): 118–128.]
- 10 22 Yin S W, Li Q Q, Han J W, et al. Heat charge and release characteristics of household off-peak electricity thermal storage heating system (in
- 11 Chinese). *Chem Ind Eng Prog*, 2024, 43(3): 1206–1213 [尹少武, 李纤纤, 韩嘉维, 等. 分户式低谷电蓄热供暖系统的蓄放热特性. *化*
- 12 *工进展*, 2024, 43(3): 1206–1213]
- 13 23 Wang L, Luo Y, Wang L, et al. Dynamic performance analysis and climate zone-based design of a seasonal solar thermochemical energy
- 14 storage and heating system in China. *Energy Convers Manage*, 2025, 331: 119688.
- 15 24 Liu X, Li X, Yang R. High-temperature thermal storage-based cement manufacturing for decarbonization. *Carb Neutrality*, 2022, 1(1): 29.
- 16 25 Xu Q, Wang L, Li Z, et al. A calcium looping system powered by renewable electricity for long-term thermochemical energy storage,
- 17 residential heat supply and carbon capture. *Energy Convers Manage*, 2023, 276: 116592.
- 18 26 Siegel N, Gross M, Ho C, et al. Physical Properties of Solid Particle Thermal Energy Storage Media for Concentrating Solar Power
- 19 Applications. *Energy Procedia*, 2014, 49: 1015–1023.
- 20 27 Nie F, Cui Z, Bai F, et al. Properties of solid particles as heat transfer fluid in a gravity driven moving bed solar receiver. *Sol Energy Mater*
- 21 *Sol Cells*, 2019, 200: 110007.
- 22 28 Siegel N P, Gross M D, Coury R. The Development of Direct Absorption and Storage Media for Falling Particle Solar Central Receivers. *J*
- 23 *Sol Energy Eng*, 2015, 137(4): 041003.
- 24 29 Liu H, Zhang J, Wei J. Mn and Mg synergistically stabilized CaO as an effective thermochemical material for solar energy storage. *Sol*
- 25 *Energy Mater Sol Cells*, 2023, 252: 112202.
- 26 30 Chung K M, Chen R. Black coating of quartz sand towards low-cost solar-absorbing and thermal energy storage material for concentrating
- 27 solar power. *Sol Energy*, 2023, 249: 98–106.
- 28 31 Gobereit B, Amsbeck L, Happich C, et al. Assessment and improvement of optical properties of particles for solid particle receiver. *Sol*
- 29 *Energy*, 2020, 199: 844–851.
- 30 32 Rodríguez J B, Majó M, Mondragón R, et al. Experimental evaluation of carbon-coated sand as solar-absorbing and thermal energy storage
- 31 media for concentrated solar power applications. *Appl Therm Eng*, 2025, 269: 126082.
- 32 33 Oskay C, Bik M, Grimme C, et al. Microstructural stability of coatings with high solar absorptance for ceramic particles during thermocyclic
- 33 exposure for concentrated solar thermal applications. *Sol Energy*, 2025, 301: 113961.
- 34 34 Trevisan S, Wang W, Laumert B. A high-temperature thermal stability and optical property study of inorganic coatings on ceramic particles
- 35 for potential thermal energy storage applications. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2022, 239: 111679.
- 36 35 Xu X, Lao X, Wu J, et al. Synthesis and characterization of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ composite ceramics via carbothermal reduction of aluminosilicate
- 37 precursor for solar sensible thermal storage. *J Alloys Compd*, 2016, 662: 126–137.
- 38 36 Tian H, Du L, Wei X, et al. Enhanced thermal conductivity of ternary carbonate salt phase change material with Mg particles for solar thermal
- 39 energy storage. *Appl Energy*, 2017, 204: 525–530.
- 40 37 Singh D, Kim T, Zhao W, et al. Development of graphite foam infiltrated with MgCl_2 for a latent heat based thermal energy storage (LHTES)
- 41 system. *Renewable Energy*, 2016, 94: 660–667.
- 42 38 Du W. Characterization of novel lamellar porous Ti_3SiC_2 as shape-stabilized high-temperature phase change materials composites for durable
- 43 enhancement thermal storage properties. *J Energy Storage*, 2024, 81: 110287.
- 44 39 Li B, Li Y, Dou Y, et al. SiC/Mn co-doped CaO pellets with enhanced optical and thermal properties for calcium looping thermochemical
- 45 heat storage. *Chem Eng J*, 2021, 423: 130305.
- 46 40 Zhong Y, Zhao B, Lin J, et al. Encapsulation of high-temperature inorganic phase change materials using graphite as heat transfer enhancer.
- 47 *Renewable Energy*, 2019, 133: 240–247.
- 48 41 Mo Y C, Yan J, Zhao C Y, et al. Preparation and thermal storage properties of $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ core-shell-structured particles (in Chinese).
- 49 *Energy Storage Sci Technol*, 2022, 11(12): 3828–3835 [莫雅超, 闫君, 赵长颖. $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ 核壳结构颗粒的制备及其储热性能. *储能*
- 50 *科学与技术*, 2022, 11(12): 3828–3835]
- 51 42 Zhang Y, Liu D, Ma J, et al. Improvement of heat transfer and reaction performance of a K_2CO_3 fixed-bed energy storage reactor using
- 52 topology optimization. *J Energy Storage*, 2025, 111: 115443.
- 53
54
55
56
57
58
59
60

94

- 43 Liu K, Wu C, Gan H, et al. Latent heat thermal energy storage: Theory and practice in performance enhancement based on heat pipes. *J Energy Storage*, 2024, 97: 112844.
- 44 Tian X, Jia H, Zhang J, et al. Heat transfer characteristic of particle flow around the out-wall of different geometries. *Energy*, 2023, 280: 128217.
- 45 Ma Z, Wang X, Davenport P, et al. System and component development for long-duration energy storage using particle thermal energy storage. *Appl Therm Eng*, 2022, 216: 119078.
- 46 Mishra A, Singh P, Li L. Heat transfer model for moving packed-bed particle-to-sCO₂ heat exchangers integrated with metal foams. *Appl Therm Eng*, 2024, 239: 122062.
- 47 Brewster K J, Fosheim J R, Arthur-Arhin W J, et al. Particle-wall heat transfer in narrow-channel bubbling fluidized beds for thermal energy storage. *Int J Heat Mass Transf*, 2024, 224: 125276.
- 48 Miller D C, Pfutzner C J, Jackson G S. Heat transfer in counterflow fluidized bed of oxide particles for thermal energy storage. *Int J Heat Mass Transf*, 2018, 126: 730–745.
- 49 Briongos J V, Gómez-Hernández J, González-Gómez P A, et al. Two-phase heat transfer model of a beam-down gas-solid fluidized bed solar particle receiver. *Sol Energy*, 2018, 171: 740–750.
- 50 Gifford J, Ma Z, Wang X, et al. Computational fluid dynamic analysis of a novel particle-to-air fluidized-bed heat exchanger for particle-based thermal energy storage applications. *J Energy Storage*, 2023, 73: 108635.
- 51 Zhao A Z, Wingert M C, Garay J E. Frequency-Domain Hot-Wire Measurements of Molten Nitrate Salt Thermal Conductivity. *J Chem Eng Data*, 2021, 66(1): 262–270.
- 52 Zeng J, Chung K M, Adapa S R, et al. In-situ thermal transport measurement of flowing fluid using modulated photothermal radiometry. *Int J Heat Mass Transf*, 2021, 180: 121767.
- 53 Parker W J, Jenkins R J, Butler C P, et al. Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity. *J Appl Phys*, 1961, 32(9): 1679–1684.
- 54 An X H, Cheng J-H, Yin H Q, et al. Thermal conductivity of high temperature fluoride molten salt determined by laser flash technique. *Int J Heat Mass Transf*, 2015, 90: 872–877.
- 55 Dong S, Zhang M, Jin K, et al. An improved laser flash method for thermal conductivity measurement of molten salts. *Prog Nat Sci-Mater*, 2024, 34(2): 345–353.
- 56 Afrah Awad, Helena Navarro, Yulong Ding, Dongsheng Wen. Thermal-physical properties of nanoparticle-seeded nitrate molten salts. *Renewable Energy*, 2018, 120, 275–288.
- 57 Li Z, Cui L, Li B, et al. Enhanced heat conduction in molten salt containing nanoparticles: Insights from molecular dynamics. *Int J Heat Mass Transf*, 2020, 153: 119578.
- 58 Syed Muhammad Mujtaba Rizvi, Donghyun Shin. Mechanism of heat capacity enhancement in molten salt nanofluids. *Int J Heat Mass Transf*, 2020, 161, 120260.
- 59 Liang F, Wei X, Lu J, et al. Interplay between interfacial layer and nanoparticle dispersion in molten salt nanofluid: Collective effects on thermophysical property enhancement revealed by molecular dynamics simulations. *Int J Heat Mass Transf*, 2022, 196: 123305.
- 60 Huang C, Cui L, Qiu L, et al. Impact of nanoparticle agglomeration on thermal conductivity of molten salt based nanofluids: Insights from molecular dynamics and lattice Boltzmann methods. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2024, 266: 112691.
- 61 Chen X, Qu L, Zhang M, et al. Experimental study on thermal properties and microstructure of carbon nanotube molten salt nanofluids for solar thermal utilization. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2024, 278: 113201.
- 62 Xiong Y, Sun M, Wu Y, et al. Effects of Synthesis Methods on Thermal Performance of Nitrate Salt Nanofluids for Concentrating Solar Power. *Energy Fuels*, 2020, 34(9): 11606–11619.
- 63 Zhang Y, Zhang C, Wu Y, et al. Experimental study of AlN powder filled high voltage molten salt electric heater for large scale thermal energy storage. *J Energy Storage*, 2024, 91: 112143.
- 64 Zhou F, Jia Q, Yang Q, et al. Research on a new industrial frequency electromagnetic coupled thermal molten salt heat storage system and its uniformity. *Int J Heat Mass Transf*, 2024, 154: 107337.
- 65 Lou Y, Li X, Wang Z H, et al. A high-voltage electrode heating device using non-aqueous liquid medium (in Chinese). CN202011456949.4. 2021 [楼宇, 李兴, 王中红, 等. 一种非水液体介质的高压电极加热装置. CN202011456949.4, 2021]
- 66 Du J, Wang X, Liu J, et al. Efficiency enhancement of liquid air energy storage systems through ultra-high-temperature heat pump integration. *Energy Convers Manage*, 2025, 332: 119714.
- 67 Stehlík P, Němčanský J, Kral D, et al. Comparison of Correction Factors for Shell-and-Tube Heat Exchangers with Segmental or Helical

尤汉等：热储能技术发展现状及储热介质与装备的传热挑战

Baffles. *Heat Transfer Eng*, 1994, 15(1): 55–65.

68 Mousavi S M, Sheikhi Azizi A, Razbin M, et al. Optimized design of Helical-Finned Double Pipe heat exchangers via numerical simulation and Artificial Intelligence. *Appl Therm Eng*, 2025, 258: 124605.

69 Kaood A, ElDegwy A, Aboulmagd A. Hydrothermal and entropy generation performance of convergent tubes with various dimple shapes. *Int J Therm Sci*, 2024, 197: 108842

70 Pandey L, Prajapati H, Singh S. CFD study for enhancement of heat transfer and flow characteristics of circular tube heat exchanger using Y-shaped insert. *Mater Today Proc*, 2021, 46: 9827–9836.

Development Status of Thermal Energy Storage and Heat Transfer Challenges in Thermal Storage Media and Equipment

YOU Han¹, GUO XinJie¹, YANG Peng¹, WU AnYi¹, JIN KaiYuan¹, LI XiaoBo¹, YANG RongGui^{1,2}

¹ School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

² College of Mechanics and Engineering Science, Peking University, Beijing 100871, China.

Thermal energy storage is a long-duration energy storage solution with broad applicability and distinctive advantages, including siting flexibility, cost competitiveness, and long lifespan. It is playing an increasingly vital role in constructing modern power systems. The thermal charging and discharging performance of thermal storage systems is governed by complex heat transfer processes. However, technical bottlenecks regarding the heat transfer processes at both material and equipment levels, which restrict large-scale utilization of thermal storage technologies, exist and require urgent solutions. This manuscript provides a comprehensive review of the current development status and application scenarios of thermal energy storage. In addition, the heat transfer challenges, relevant research progress, and frontier directions of technology development in both solid- and liquid-based thermal storage systems have been discussed. Regarding solid-based thermal storage systems, the primary challenges lie in the low intrinsic optical absorptivity and thermal conductivity of the storage media, alongside the problems of high thermal resistance or low heat transfer efficiency of heat storage and transfer equipment. Current investigations focus on developing composite storage materials with superior optical absorptivity and thermal conductivity, optimizing the heat transfer structures of packed-bed and moving-bed equipment, and controlling the parasitic losses and heat losses of fluidized beds. For liquid-based thermal storage systems, the material-level challenges include precisely measuring thermophysical properties, such as the thermal conductivity of high-temperature liquid media, as well as how to mitigate the restrictions of low thermal conductivity and other thermal properties on heat storage and exchange performance. At the equipment level, there is an urgent demand to elevate the power level and the conversion efficiency of electric heating equipment and heat exchangers. The potential solutions include optimization of thermal property measurement tools, synergistic modification of thermal conductivity and heat storage density in liquid media via nanoparticle incorporation, development of novel electric heating technologies such as electromagnetic induction heaters and heat pumps, and design of heat transfer augmentation of heat exchangers. In the future, as these challenges are progressively resolved, thermal energy storage will achieve larger-scale applications in many fields such as concentrated solar power, retrofitted coal-fired power, grid-scale energy storage, and industrial or residential heating, thereby accelerating the green transition of energy sectors and facilitating the attainment of carbon peaking and carbon neutrality targets.

Keywords: thermal energy storage, heat transfer, long-term energy storage, concentrated solar power, coal-fired power plant retrofitting, off-peak electricity thermal storage