

# 第十六届太阳能热利用科学技术 研究生论坛

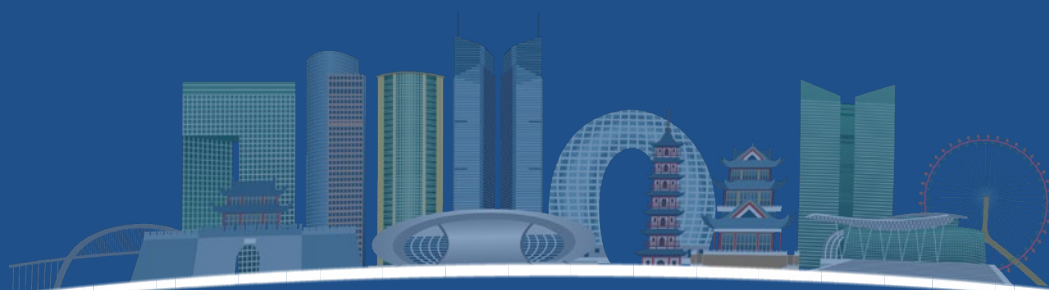
## 摘要集

主办单位：太阳能光热产业技术创新战略联盟

承办单位：湖州工业控制技术研究院

浙江绿储科技有限公司

中关村新源太阳能热利用技术服务中心



# 目录

## CONTENTS

主题一：系统技术	1
风沙地区多排槽式反射器沉积特性及梯级加热系统光热性能优化研究	2
基于混合工质临界线调控的太阳能低温储热优化方法	3
基于机器学习的塔式光热电站定日镜瞄准策略模型预测控制研究	4
基于蒙特卡洛光线追踪与定日镜连续瞄准优化的腔式吸热器热流密度均匀化研究	5
基于模型预测控制的级联相变储热式太阳能干燥系统性能研究	6
集成光伏 - 槽式光热联合电站的超高温热泵卡诺电池系统	7
面向大规模熔盐电加热的新型金属粉末 - 陶瓷管高电压电热元件电学及热 - 力学特性研究	8
面向低碳供热的太阳能光伏光热综合利用跨季相变储热系统设计及性能实验研究	9
面向动态云遮的塔式光热电站镜场近端策略优化在线调度研究	10
面向零碳园区的绿电驱动熔盐储热耦合蒸汽供应系统设计与 4E 分析	11
人工智能物联网 (AIoT) 驱动的太阳能光热电耦合智能温室系统设计与能效优化研究	12
日光温室太阳能聚光供热过程中非饱和土壤热物性研究	13
塔 - 槽耦合集成蓄热的太阳能 - 燃气联合循环系统热力学特性研究	14
对流式 $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ 热化学储能固定床反应器的中试规模研究	15
中深层地热 - 太阳能耦合阵列的热干扰特性研究	16
太阳能驱动生物质颗粒热解：耦合建模、热流非均匀性调控与多目标优化研究	17
云层阴影形状对光热发电吸热器光热耦合特性影响研究	18
风电光伏耦合电加热储热供热系统容量设计优化方法	19
太阳能驱动多级被动界面蒸发装置用于高效海水原位绿色制氢	20
光伏光热耦合跨季节储热供暖系统优化设计研究	21
主题二：部件设备	22
高流速工况下翅片管式换热器不同管排配置流动与传热特性分析	23
不同流道结构内固体颗粒流动特性研究	24
单侧受热边界条件下细通道内超临界 $\text{CO}_2$ 流动阻力特性实验与数值模拟研究	25
非均匀辐照下固体颗粒吸热器多尺度耦合仿真与实验研究	26
基于树形翅片与多界面热力耦合的复合储热块性能强化研究	27

太阳能集热器不同结构及入射方式对比研究·····	28
熔盐储热系统翅片管电加热器热工水力性能的数值研究·····	29
基于月光扫描与机器视觉反馈的回转塔式聚光器相对能流分布测量及校正方法研究·····	30
青藏高原极端环境下全玻璃热管式真空管性能提升与运行状态预测·····	31
主题三：材料·····	32
醋酸钠过冷相变材料驱动的太阳能跨季节高效利用·····	33
低熔点四元混合硝酸熔盐试验及其热物性研究·····	34
高熵纳米碳增强固 - 固相变材料用于高效太阳能热储存与利用 ·····	35
高稳定性钙基热化学储能材料的构筑与调控·····	36
机械性能显著提升的 NaCl-Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 共晶盐高温相变大胶囊 ·····	37
构建仿木结构的生物质气凝胶用于高效驱动的太阳能界面蒸发器：实现海水淡化与水质净化·····	38
基于密度泛函理论的热化学储能的机理解析与材料设计：进展与展望·····	39
基于 Rayleigh-Bénard 对流逆向光照纳米流体体系的热质传递强化及其在过硫酸盐活化中的应用 ·····	40
基于吸附除湿与光热再生的 Al-Fum/MXene 复合材料用于聚光镜防霜·····	41
面向高温储热的铝基相变宏胶囊制备与性能研究·····	42
面向热化学储能与空气分离的 Ca <sub>2</sub> AlMnO <sub>5+δ</sub> 球形颗粒制备与性能研究 ·····	43
面向中低温太阳能热利用的磷石膏基掺杂体系热力学调控与传质强化研究·····	44
Si 焊接强化 Mn 基吸光壳层稳定钙基颗粒实现长期环境暴露下的热化学储能·····	45
柔性异质结构 TiO <sub>2</sub> @ 碳毡用于高效潜热回收的先进多级太阳能驱动膜蒸馏系统 ·····	46

## 前言

“太阳能热利用科学技术研究生论坛”（简称论坛）由太阳能光热产业技术创新战略联盟于 2011 年发起主办，以“我的研究，我的创新”为主题，旨在加强各高校和科研院所所在太阳能热利用科学技术领域的交流和合作，推动我国太阳能热利用科学技术的发展，同时也为广大研究生们搭建展示自我的平台，为相关企事业单位人才选择创造机会。论坛现已成功召开十六届，先后由华北电力大学、兰州理工大学、上海交通大学、云南师范大学（两届）、天津大学、西安交通大学、北京工业大学、清华大学、中国科学院上海应用物理研究所、内蒙古工业大学、浙江大学、河北工业大学、上海第二工业大学、湖州工业控制技术研究院 / 浙江绿储科技有限公司（两届）单位承办。

第十六届研究生论坛于 2026 年 6 月 7 日在浙江湖州西塞科学谷圆满闭幕。来自北京工业大学、华北电力大学、哈尔滨工业大学（深圳）、河北工业大学、河北省热科学与能源清洁利用技术重点实验室、兰州理工大学、内蒙古工业大学、南京师范大学、上海第二工业大学、上海交通大学、先进内燃动力国家重点实验室（天津大学）、武汉理工大学、西安建筑科技大学、西安交通大学、动力工程多相流国家重点实验室（西安交通大学）、浙江大学、能源高效清洁利用全国重点实验室（浙江大学）、郑州航空工业管理学院、郑州轻工业大学、中国农业大学、中国矿业大学、中国科学院大学、中国科学院电工研究所、中国科学院大连化学物理研究所、中国科学院太阳能热利用及光伏系统重点实验室、中南大学、云南师范大学、新加坡国立大学（按单位拼音首字母排序）的 49 名研究生们进行了报告交流。其中，16 位研究生报告优中选优，荣获优秀报告及德芳太阳能热利用奖学金。

为促进学术交流、拓宽学术视野，太阳能光热联盟特组织编制了本届论坛的报告摘要集，以供参考。

本报告引用格式为：太阳能光热产业技术创新战略联盟，第十六届太阳能热利用科学技术研究生论坛摘要集，2026 年 6 月，湖州。

太阳能光热产业技术创新战略联盟副理事长

浙江大学热能工程研究所副所长

2026 年 6 月



主题一：系统技术



# 风沙地区多排槽式反射器沉积特性及梯级加热系统光热性能优化研究

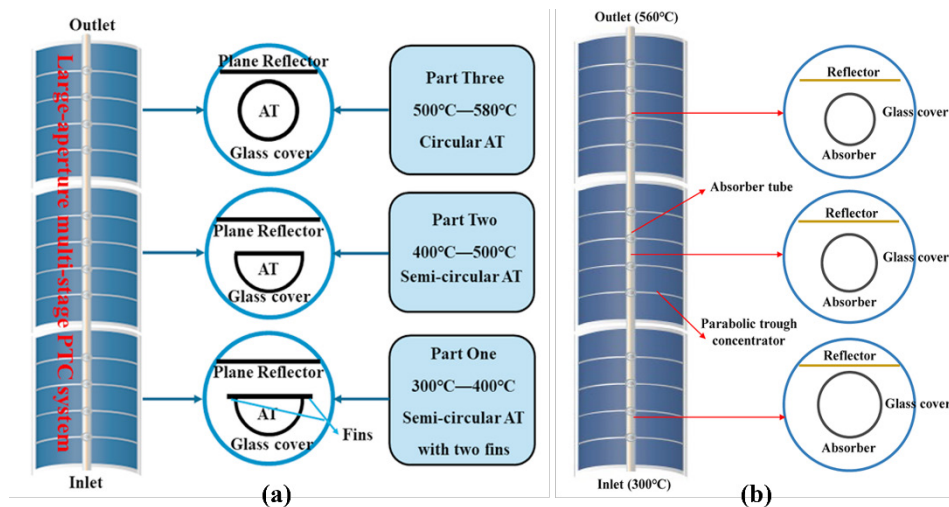
张振兴<sup>1,2</sup>, 巩景虎<sup>1,2\*</sup>

1. 西安建筑科技大学建筑环境与设备工程学院, 710055, 西安
2. 西安建筑科技大学西部绿色建筑国家重点实验室, 710055, 西安

**摘要:** 面向荒漠、戈壁等风沙地区太阳能光热系统的高效稳定运行需求, 针对风沙环境中镜面沉积引起的反射率衰减与热输出波动问题, 建立多排槽式反射器风沙两相流模型, 重点揭示阵列遮蔽、排间流场干扰及非均匀沉积分布机制。在此基础上, 为提高大口径 PTC 系统的高温输出能力与光热转换效率, 提出多级梯级加热技术, 通过半圆形带外翼吸热管、半圆形吸热管和圆形吸热管分段匹配不同温区, 实现传热流体由 300 °C 升温至 580 °C, 使系统光学效率达到 79.1%, 热效率最高达到 72.8%。进一步构建由新型真空吸热管和平面二次反射器组成的三级变直径 PTC 系统, 系统光学效率提高至 79.3%, 热效率为 62.9%–72.8%, 总回路长度为 1314.5 m, 较传统最优 90 mm 吸热管系统缩短 71.5 m, 光学效率和热效率分别提升 3.1% 和 4.0%。研究表明, 将风沙沉积机理分析与大口径 PTC 梯级吸热结构优化相结合, 可为风沙地区槽式太阳能系统的镜场布置、抗积尘设计及高效发电提供理论依据和工程参考。

**关键词:** 风沙沉积; 大口径槽式聚光器; 梯级加热; 变直径吸热管; 光热效率

插图:



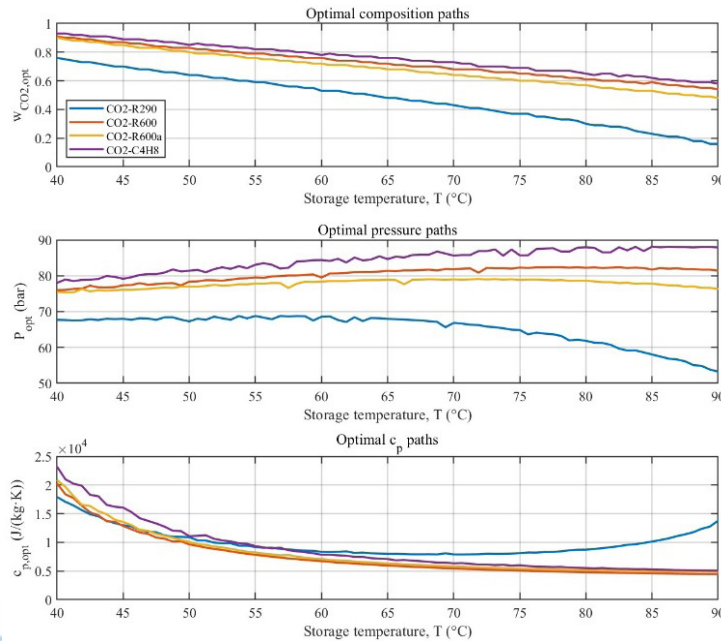
# 基于混合工质临界线调控的太阳能低温储热优化方法

赵梦娣<sup>1</sup> 许伟聪<sup>1</sup> 陈瑞华<sup>1</sup> 邓帅<sup>1</sup> 赵力<sup>1\*</sup>  
 先进内燃动力全国重点实验室（天津大学），天津，300350

**摘要：**针对太阳能低温热利用中宽温区储热需求与纯工质热物性调控能力不足的问题，本文提出一种基于混合工质临界线调控的储热路径优化方法。以40–90℃为目标温区，选取CO<sub>2</sub>/R290、CO<sub>2</sub>/R600、CO<sub>2</sub>/R600a和CO<sub>2</sub>/C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>作为候选工质，构建临界线与最大定压比热轨迹线，并搜索组分-压力协同变化的最优储热路径。结果表明，在目标温区内，CO<sub>2</sub>/R290的单位质量储热密度最高，为494.79kJ/kg；CO<sub>2</sub>/C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>、CO<sub>2</sub>/R600a和CO<sub>2</sub>/R600的分别为438.65 kJ/kg、391.40 kJ/kg和370.29 kJ/kg，均高于纯CO<sub>2</sub>的91.54 kJ/kg。；CO<sub>2</sub>/C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>的有效能量储热密度最高，为179.74MJ/m<sup>3</sup>；CO<sub>2</sub>/R290、CO<sub>2</sub>/R600和CO<sub>2</sub>/R600a分别为152.36 MJ/m<sup>3</sup>、150.23 MJ/m<sup>3</sup>和142.83 MJ/m<sup>3</sup>，均高于纯CO<sub>2</sub>的16.28 MJ/m<sup>3</sup>。研究表明，通过混合工质临界线调控，可实现工质高热容区与太阳能低温储热目标温区的连续匹配，从而提高储热性能。该方法有望为太阳能低温热利用系统中储热工质的设计及储热路径优化提供新思路。

**关键词：**太阳能低温储热；CO<sub>2</sub>基混合工质；临界线；定压比热；储热密度

插图：



第一作者：赵梦娣，mengdi888@tju.edu.cn，1. 热力学循环基础理论；2. 太阳能高效热利用  
 通讯作者：赵力，jons@tju.edu.cn，1. 热力学循环基础理论；2. 新型工质；3. 太阳能高效热利用  
 通讯地址：先进内燃动力全国重点实验室（天津大学） 邮编：300350

# 基于机器学习的塔式光热电站定日镜瞄准策略模型预测控制研究

吴嘉怡<sup>1, 3</sup>, 王兴超<sup>1, 2, 3\*</sup>

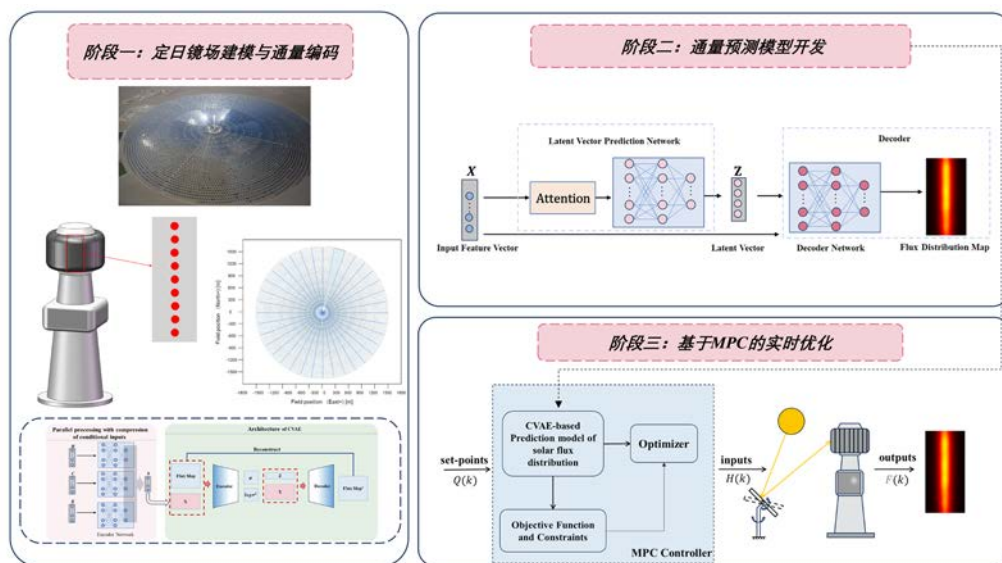
中国科学院大连化学物理研究所光热转化利用创新特区研究组, 116023, 大连

中国科学院大连化学物理研究所催化基础国家重点实验室, 116023, 大连

中国科学院大学, 100049, 北京

**摘要:** 塔式光热电站中, 定日镜瞄准策略需在云遮多变条件下兼顾考虑聚光集热效率最大化与吸热器安全运行。传统基于解析光学模型与启发式算法的优化方法在计算效率与约束处理灵活性上存在局限性, 难以满足大规模定日镜场实时闭环控制的要求。本研究提出一种机器学习方法, 并构建了模型预测控制 (MPC) 框架。首先采用条件变分自编码器对热流图像进行压缩, 同时保持较高的重建精度; 随后结合增强型神经网络, 在不同法向直接辐射强度、太阳位置及云遮工况下快速预测热流分布, 峰值热流密度预测误差为 2.91%。在此基础上, 将热流预测模型嵌入包含吸热器热安全约束的 MPC 框架, 实现定日镜瞄准策略的实时闭环优化。为了验证该方法在云遮工况下的有效性, 以美国新月沙丘塔式电站为对象, 基于 SolarPILOT 仿真数据, 对比分析了静态控制方法与本研究中 MPC 框架的性能。结果表明, 与静态控制相比, MPC 框架的功率跟踪精度提升 10.8%, 输出功率提高 6.4%, 允许热流密度违约率仅为 0.91%, 热流均匀性提升 22.3%; 单次优化控制计算耗时约 14.5 s, 满足 30 s 控制间隔的实时性要求。本研究可为云遮扰动下太阳能塔式电站的高效可靠运行提供方法参考。

**关键词:** 塔式光热电站; 定日镜场控制; 模型预测控制; 机器学习; 条件变分自编码器  
插图 (1 张):



第一作者: 吴嘉怡, wujiayi@dicp.ac.cn, 基于颗粒储热的塔式光热发电系统动态建模与智能运行优化方法研究

通讯作者: 王兴超, wxc@dicp.ac.cn, 太阳能光热转化利用, 长时规模化储热技术

通讯地址: 中国科学院大连化学物理研究所光热转化利用创新特区研究组 邮编: 116023

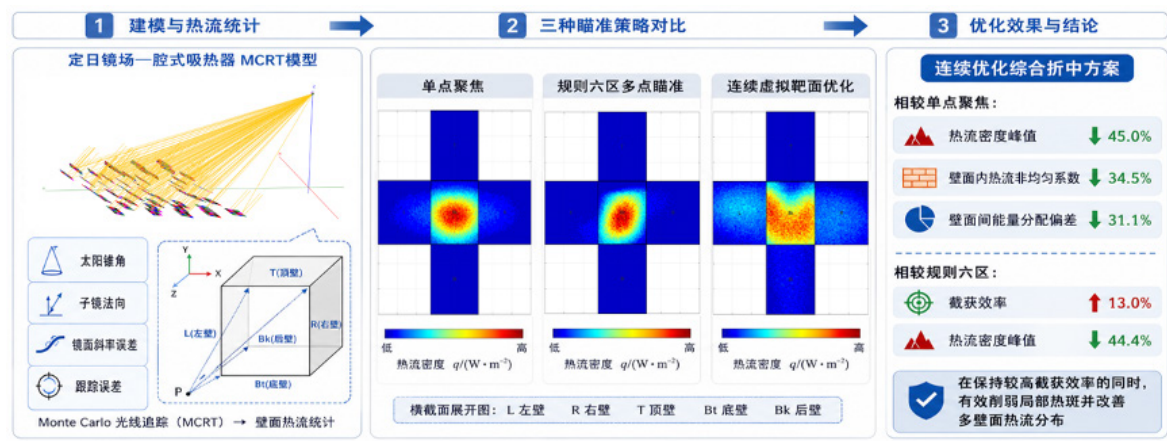
# 基于蒙特卡洛光线追踪与定日镜连续瞄准优化的腔式吸热器热流密度均匀化研究

刘松, 李彪, 王跃社\*

西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安

**摘要:** 为解决太阳能驱动生物质气化反应器中腔式吸热器局部热流密度过高、各壁面间能量分布不均及固定热斑易引发热应力损伤的问题, 本文建立了定日镜场与腔式吸热器间的光-热耦合计算模型。采用蒙特卡洛光线追踪方法模拟了太阳光在定日镜场中的反射、传播与入腔过程, 构建了腔体内多壁面光线命中的判定方法, 并通过十字展开实现了对腔体多内壁面热流密度分布的统一表征。在此基础上, 提出一种基于连续虚拟靶面的定日镜场瞄准优化方法, 以镜组瞄准坐标为优化变量, 以热流峰值、热流非均匀系数、壁面间能量偏差和截获效率为评价指标, 采用多目标优化算法获得了不同热流调控需求下的瞄准策略。通过与单点聚焦和规则分区多点聚焦策略进行对比, 分析不同瞄准方式对腔式吸热器多壁面热流分布和光学性能的影响。结果表明, 与单点聚焦策略相比, 优化瞄准策略使腔体内壁面的热流密度峰值降低 45.0%, 热流非均匀系数降低 34.5%, 壁面间能量分配偏差降低 31.1%, 而截获效率则仅下降 9.3 个百分点; 与规则分区多点聚焦策略相比, 热流密度峰值降低 44.4%, 壁面间能量分配偏差降低 40.8%, 截获效率还提升了 13%。上述结果进一步说明, 本文方法能够在保持较高截获效率的同时有效抑制腔体内局部热斑的形成, 并改善腔体各壁面间的能量分配与壁面内热流密度分布的均匀性, 为 MW 级太阳能吸热反应器聚光镜场与腔式吸热器协同设计提供理论依据。

**关键词:** 定日镜场; 腔式吸热器; 蒙特卡洛光线追踪; 热流密度均匀化; 多目标优化



发言人简介: 刘松, 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 博士研究生, 研究方向为多相流热物理及太阳能热发电技术研究。

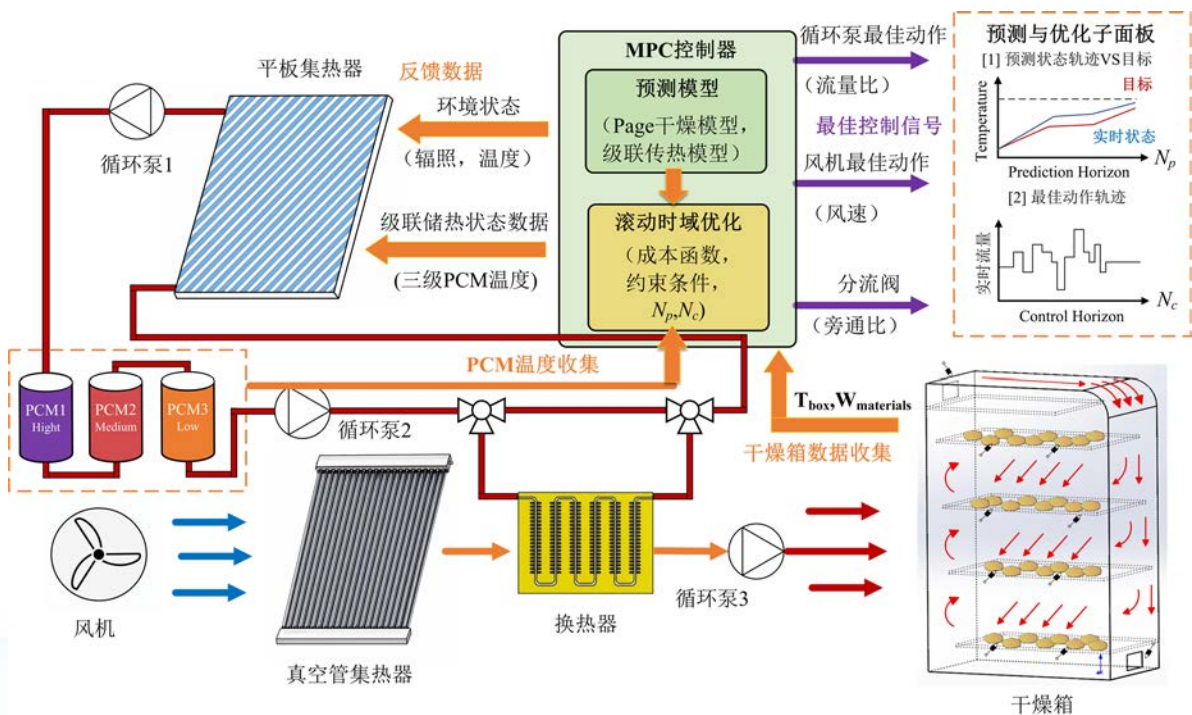
# 基于模型预测控制的级联相变储热式太阳能干燥系统性能研究

李晓霞<sup>1, 2, 3, 4\*</sup>, 郜一帆<sup>1, 2, 3</sup>, 元国彬<sup>1, 2, 3</sup>, 郭泉<sup>1, 2, 3</sup>, 李金平<sup>1, 2, 3</sup>

1. 兰州理工大学绿色能源与储能学院, 730050, 兰州
2. 中国西部能源与环境研究中心, 730050, 兰州
3. 西北低碳城镇支撑技术协同创新中心, 730050, 兰州
4. 内蒙古工业大学土木工程学院, 010051, 呼和浩特

**摘要:** 太阳能干燥技术因其低碳特性和经济优势而备受关注。然而, 传统的太阳能干燥系统受到太阳能间歇性和波动性的限制, 这使得难以确保其持续运行。本研究提出了一种具有级联相变储热的太阳能干燥系统, 以实现持续、高效和稳定的运行。通过实验验证结合数值模拟, 在多个时间尺度上(包括典型的日和年条件)对系统性能进行了研究。引入了等效时间理论来建立连续动态干燥模型, 从而能够分析在不同运行条件下的储/放热和干燥特性。此外, 还开发了一种基于模型预测控制的运行策略优化方法以提高系统性能, 并降低干燥箱温度波动。结果表明, 在典型日条件下, 所提出的系统相较于单级相变蓄热系统, 蓄热能力提高了 8.64%; 在冬至日, 太阳能利用率达到 49.31%。经过优化后, 系统水分蒸发量增加了 8.61%, 整个系统的效率提高了 13.05%, 进口温度波动降低了 35.7%。7 月份系统的峰值效率达到了 60.5%。本研究为太阳能干燥系统热集成的设计以及运行策略的智能化预测控制提供了理论依据与技术参考。

**关键词:** 太阳能干燥系统; 级联相变储热; 动态干燥模型; 模型预测控制; 干燥性能分析



第一作者: 李晓霞, lixiaoxia5102@126.com, 太阳能热高效利用  
 通讯作者: 李晓霞  
 通讯地址: 兰州理工大学, 730050

# 集成光伏 - 槽式光热联合电站的超高温热泵卡诺电池系统

虞劲<sup>1,2</sup>, 赵耀<sup>1,2</sup>, 代彦军<sup>1,2\*</sup>

上海交通大学机械与动力工程学院, 200240, 上海  
太阳能发电与制冷教育部工程研究中心, 200240, 上海

**摘要:** 聚光太阳能热发电与卡诺电池的集成为大规模光伏电力储存与可调度发电提供了一种具有前景的技术路径。本文提出了一种与光伏 - 槽式聚光太阳能热发电联合电站集成的卡诺电池系统, 其中采用超高温空气逆布雷顿热泵和超临界 CO<sub>2</sub> 动力循环分别进行充电与放电。建立了包括热力学模型、太阳能集热模型以及蒙特卡洛经济模型在内的综合模型。在两种设计模式下, 将所提系统与基于电加热的系统进行了对比分析。火用分析表明, 热泵的提质作用使少量太阳能火用输入即可替代大量电能输入, 从而使系统往返效率提升 0.175, 整体太阳能利用效率提升 0.041。参数分析结果表明, 在典型工况下, 当太阳能仅作为热泵低温热源时 (模式 1), 系统可实现最高 63.2% 的往返效率。进一步开展的技术经济多目标优化揭示了效率与平准化储能成本 (LCOS) 之间的权衡关系, 最优方案为模式 2 (太阳能同时用于热泵低温热源和熔盐预热), 此时系统往返效率达到 59.6%, LCOS 为 0.085 ± 0.015 美元 / kWh。最后, 通过年典型日运行特性分析发现, 相较于传统槽式光热电站, 所提出的卡诺电池系统可将等效发电时长提升 82.5%, 其中 24.7% 的增益来源于热泵的提质作用。

**关键词:** 卡诺电池; 联合电站; 储能; 超高温热泵

# 面向大规模熔盐电加热的新型金属粉末 - 陶瓷管高电压电热元件电学及热 - 力学特性研究

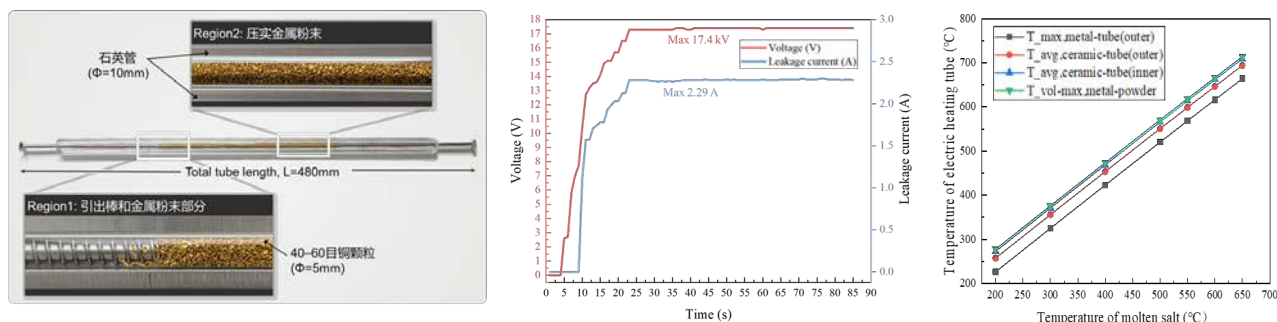
张翼<sup>1</sup>, 吴玉庭<sup>1\*</sup>, 张灿灿<sup>1</sup>, 杜彦君<sup>1</sup>

北京工业大学机械与能源工程学院, 100124, 北京

**摘要:** 在可再生电力消纳及熔盐电加热中, 传统电阻式熔盐电加热器在绝缘性能与导热性能之间存在此消彼长的固有矛盾。针对这一行业痛点, 本文提出并系统研究了一种新型金属粉末填充陶瓷管电热元件。首先, 通过对金属粉末电学特性的深入分析发现, 其电阻特性受粒径与粉末组分的显著影响, 具有较宽的可选阻值范围。研究发现金属粉末的本征电阻需在高压击穿状态下得以有效激活。实验结果验证了该新型电热元件的可行性: 在稳态工况下, 加热管表面温度分布均匀, 无局部热点现象。性能对比分析表明, 该陶瓷电热元件在绝缘性能与导热性能上均优于传统结构电热元件。在 5 kV 室温下测试, 陶瓷管在绝缘层厚度为传统电热管三分之一的情况下, 其泄漏电流仅为传统加热管的 13.8%。此外, 典型工况下的数值模拟结果显示, 高温下陶瓷管内外壁温差仅为 15 °C 左右, 由此产生的热应力为 38.5 MPa, 仅为陶瓷许用强度的 25.6%, 充分保证了结构的安全性。金属粉末 - 陶瓷管电热元件能有效解决高电压熔盐电加热中的热 - 电矛盾, 在大规模熔盐电加热储热领域具有显著的应用潜力。

**关键词:** 熔盐储热; 长时储热; 高电压电加热; 陶瓷加热管;

**插图:**



第一作者: 张翼, yizhang@emails.bjut.edu.cn, 可再生能源利用与高电压加热技术  
 通讯作者: 吴玉庭, wuyuting@bjut.edu.cn, 高温传热蓄热、高效热功转换  
 通讯地址: 北京工业大学机械与能源工程学院, 邮编: 100124

# 面向低碳供热的太阳能光伏光热综合利用跨季相变储热系统设计及性能实验研究

赖洋琰<sup>1</sup>, 杨生<sup>1</sup>, 范利武<sup>1,2\*</sup>

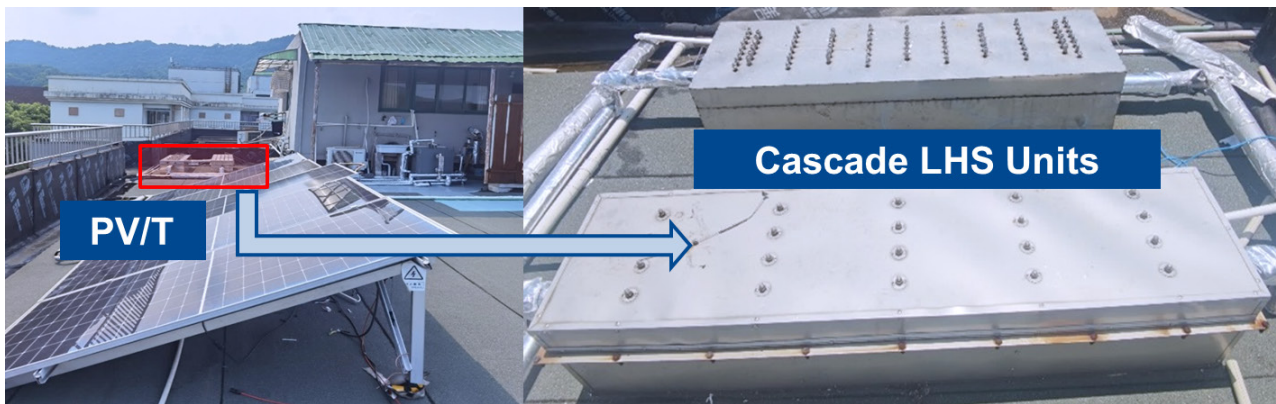
浙江大学能源工程学院热工与动力系统研究所, 浙江省 杭州市 310027

能源高效清洁利用全国重点实验室, 浙江省 杭州市 310027

**摘要:** 将太阳能技术应用于冬季建筑供热, 符合我国能源清洁低碳发展的现实需求和长远目标, 但夏季丰富的太阳能和冬季强烈的采暖需求之间形成的显著供需季节性矛盾始终制约着太阳能供热技术的效率。相变储热技术在中低温区具有储热密度大, 储热灵活性好, 保温成本低等优势。因此, 本文提出一种光伏光热综合利用的跨季相变储热系统, 将夏季光伏余热和余电以热能形式进行储存并用于冬季供热, 实现“夏热冬用”。本研究采用共晶方法调节赤藓糖醇基相变材料熔点, 以契合用户供热需求(供暖与热水等), 并搭配更低熔点的石蜡构筑梯级相变储热单元, 实现了热能高效存储与利用。目前, 在杭州搭建了基于上述原理与设计的太阳能跨季相变储热供热系统示范实验台, 该实验台正在持续调试与运行当中。初步结果表明, 系统可以很好地回收光伏余热并利用相变材料进行梯级储热。此外, 本研究提出通过调节固液界面能的方法提升相变材料过冷度, 以面对寒冷自然条件的严苛挑战, 有望在未来进一步降低长周期相变储热的保温成本。

**关键词:** 太阳能热利用; 相变储热; 跨季储热; 建筑低碳供热

插图 (1 张):



第一作者: 赖洋琰, yangyan\_lai@zju.edu.cn, 太阳能相变储热

通讯作者: 范利武, liwufan@zju.edu.cn, 相变储热技术及应用

通讯地址: 浙江省杭州市西湖区浙大路 38 号浙江大学玉泉校区低温楼, 邮编: 310027

# 面向动态云遮的塔式光热电站镜场近端策略优化在线调度研究

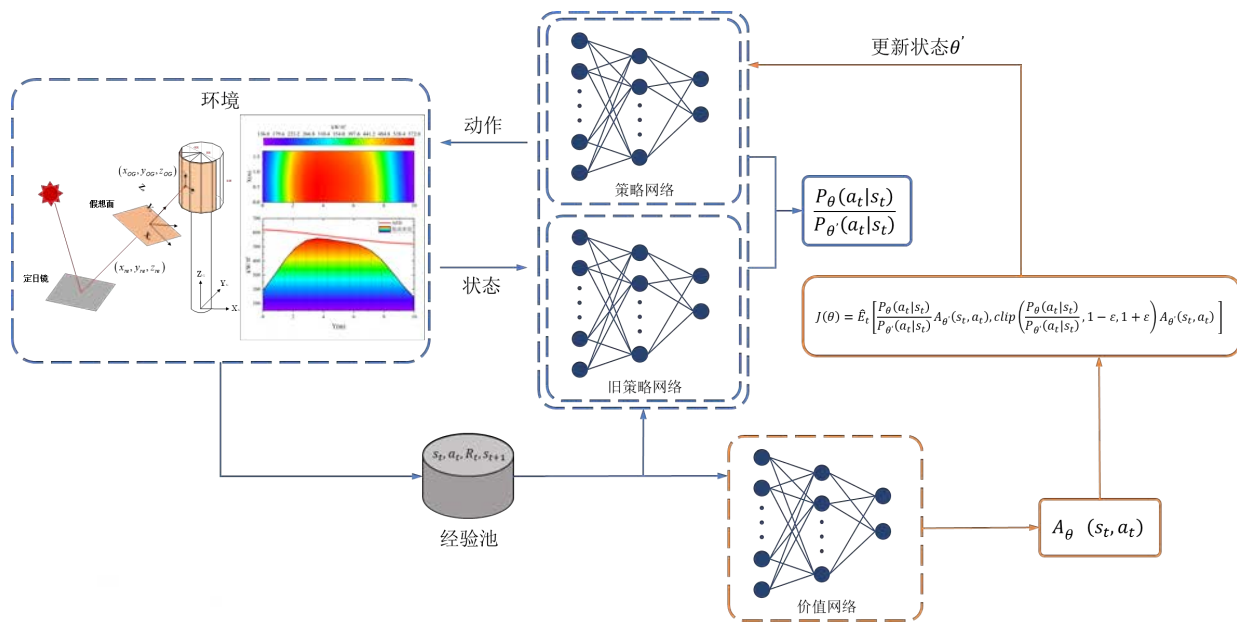
周先让<sup>1</sup>, 侯宏娟<sup>1\*</sup>, 斯楞戈<sup>1</sup>

华北电力大学能源动力与机械工程学院, 102206, 北京

**摘要:** 塔式光热电站现有镜场调度难以应对动态云遮, 且无法在保证吸热器安全的前提下满足在线实时调度需求, 其本质是调度策略缺乏对云遮随机扰动的精准感知与快速自适应决策能力。本文提出一种基于近端策略优化的镜场实时调度方法。该方法通过建立聚光集热系统模型, 量化吸热器动态最大允许能流密度安全边界, 设计参数分区瞄准策略以降低高维镜场控制的复杂度, 进而构建面向动态云遮场景的强化学习马尔可夫决策过程, 采用近端策略优化算法离线训练自适应瞄准策略并用于在线快速决策。以西班牙 Gemasolar 电站为分析对象, 开展薄云和厚云两类云遮工况的仿真实验。结果表明, 所提方法可实现云遮扰动下的秒级响应; 与遗传算法相比, 薄云工况下输出功率提升 1.33%, 厚云工况下提升 1.86%; 全过程峰值能流始终低于安全约束, 能流均匀度波动控制在 0.36 以内; 且相较传统调度方法, 计算效率大大提升。本研究有望为动态云遮下定日镜场的在线安全高效调度提供可行的技术参考。

**关键词:** 塔式光热电站; 镜场调度; 动态云遮; 强化学习; 能流密度

面向动态云遮场景的近端策略优化 (PPO) 决策框架



第一作者: 周先让, 17860528862@163.com, 塔式光热方向  
 通讯作者: 侯宏娟, hhjnceptu@163.com, 太阳能热利用相关方向  
 通讯地址: 北京市昌平区北农路 2 号 邮编: 102206

# 面向零碳园区的绿电驱动熔盐储热耦合蒸汽供应系统设计与4E分析

李彪，刘松，王跃社\*

西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室，710049，西安

**摘要：**工业蒸汽供应系统的低碳化与稳定运行是实现零碳园区建设目标的重要基础。然而，绿电直供电锅炉方案受风光出力波动影响显著，难以满足工业蒸汽负荷连续稳定的运行需求。为解决绿电波动性与工业供汽稳定性之间的耦合矛盾，本文提出一种面向零碳园区的绿电驱动电磁感应加热熔盐储热耦合蒸汽供应系统。该系统以高温熔盐为储热介质，通过电磁感应加热实现绿电高效转化与热量储存，并结合熔盐蒸汽发生器实现稳定工业蒸汽输出。系统主要由风光发电单元、电磁感应加热器、高/低温熔盐储罐以及熔盐蒸汽发生器构成。在模型构建方面，针对电磁感应加热熔盐过程高保真数值模拟计算耗时的问题，基于大量数值模拟数据建立机器学习降阶模型，实现边界条件至出口熔盐温度的秒级快速预测；同时建立熔盐蒸汽发生器稳态模型，并与ROM耦合形成完整系统仿真框架。在此基础上，从能效（Energy）、焓效（Exergy）、经济性（Economic）和碳效（Environmental）四个维度开展4E综合性评价。结果表明：电磁感应加热熔盐系统能源效率可达97.5%，较传统燃气锅炉提高约8个百分点；系统综合焓效率达到38.7%；在经济性方面，最优配置方案年总成本降至 $8.78 \times 10^6$ 元，较天然气供汽方案节约运行成本约702万元/年；在碳减排方面，高比例风光供能条件下系统日运行碳排放趋近于零，年减碳量约为5423 t。研究结果表明，所提系统可有效实现零碳园区工业蒸汽的稳定低碳供应，为绿电消纳与工业热利用的深度耦合提供了可行路径。

**关键词：**熔盐储热；电磁感应加热；蒸汽发生器；降阶模型；零碳园区

发言人简介：李彪，西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室，博士研究生，研究方向为储热材料及储热系统优化与设计，已在Energy、Applied thermal engineering、Journal of energy storage等杂志上发表论文多篇。

# 人工智能物联网 (AIoT) 驱动的太阳能光热电耦合智能温室系统设计与能效优化研究

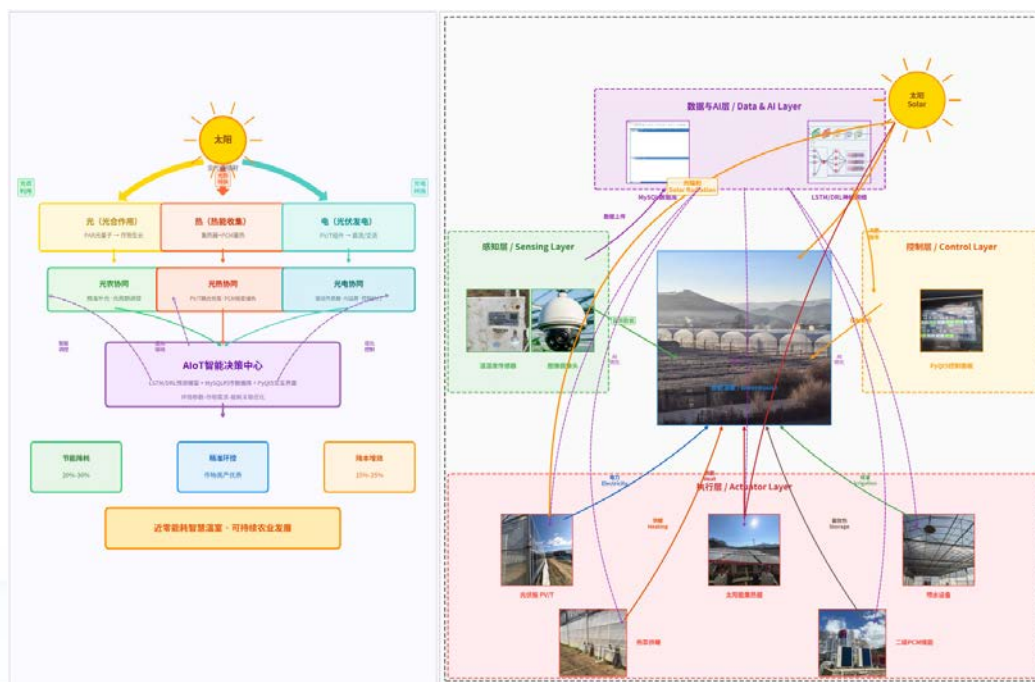
钱仕贵<sup>1, 2</sup>, 李明<sup>1, 2\*</sup>, 张莹<sup>1, 2</sup>, 李国良<sup>1, 2</sup>

1. 云南师范大学能源与环境科学学院, 650500, 昆明

2. 西南联合研究生院, 650000, 昆明

**摘要:** 针对传统农业温室能耗高、环境调控滞后、太阳能利用单一及资源配置粗放等核心问题, 本文提出一种物联网 (IoT)、MySQL 数据库与人工智能 (AI) 深度协同驱动的太阳能光热电耦合智能温室大棚系统。分布式物联网传感器网络实时采集温室内空气温度、相对湿度、CO<sub>2</sub> 浓度、光照强度、土壤温湿度及气体浓度等多维环境参数, 基于 MySQL 关系型数据库构建高维时序数据集, 实现监测数据的高效存储、查询与管理。基于 PyQt5 开发计算机-物联网交互式图形控制界面, 集成数据可视化、设备远程监控与实时报警功能, 实现人机协同的温室智能化管理。采用机器学习 (随机森林、梯度提升树) 与深度学习 (长短期记忆网络 LSTM、深度强化学习 DRL) 方法对历史数据库进行训练, 建立温室环境参数-作物生长需求-能源消耗关联预测模型, 精准预测不同生育期作物所需的环境条件最佳阈值。以 AI 预测结果为决策依据, 反向驱动光热调控系统 (包括相变储热材料 PCM 蓄放热、光伏光热 PV/T 耦合热泵、主动蓄热墙体等执行机构), 实现太阳能光热、光电、光农的协同优化与梯级利用。最终实现, 温室微气候的自主感知、智能决策与精准调控, 在保证作物高产优质的前提下, 显著降低化石能源依赖, 预计可减少生产成本 15%–25%、降低温室能耗 20%–30%, 达到“节能减排”与可持续农业生产的目标。

**关键词:** 物联网 (IoT); 深度学习; 光热电耦合; 相变储热; 能源优化; 全光谱利用



第一作者: 钱仕贵, shigui\_qian@126.com, 太阳能光热电耦合温室利用

通讯作者: 李明, lmllldy@126.com, 太阳能综合利用

通讯地址: 云南省昆明市呈贡区聚贤街 768 号 邮编: 650500

# 日光温室太阳能聚光供热过程中非饱和土壤热物性研究

周天宇<sup>1, 2</sup>, 常泽辉<sup>1, 2\*</sup>, 彭娅楠<sup>1, 2</sup>

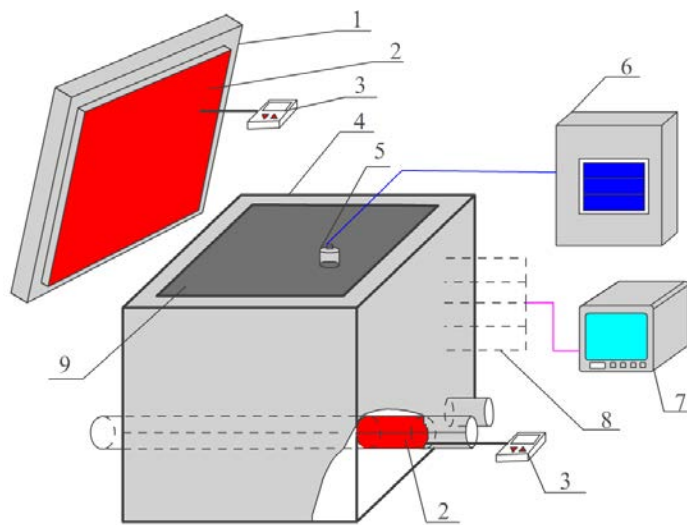
1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 010051, 呼和浩特

2. 内蒙古工业大学太阳能应用技术工程中心, 010051, 呼和浩特, Email: xxxx@xxx

**摘要:** 日光温室太阳供热系统运行过程中, 种植用非饱和土壤的热物性会对作物跟区温度及热湿耦合性能产生影响, 而含水率是影响土壤导热系数及热惯量等热物性参数的关键因素。本文开展不同含水率条件下的非饱和土壤热物性测试分析, 并进一步计算土壤导热系数与热惯量等热物性参数变化趋势, 结合理论计算与 COMSOL Multiphysics 数值模拟, 明晰土壤导热系数和热惯量等与含水率之间的关联关系。研究表明: 当土壤含水率由 8% 增加到 20%, 土壤导热系数值由 1.31 W/(m·K) 增至 2.02 W/(m·K), 热惯量值从 1210.13 J/( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{1/2}$ ) 增加到 2291.31 J/( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{1/2}$ ); 含水率较高的土壤具有较大热容, 土壤升温更趋均匀, 且数值模拟结果与实验测试结果吻合度较好, 为优化日光温室太阳能聚光集热土壤供热系统提供参考。

**关键词:** 日光温室; 非饱和土壤; 热物性; 数值模拟; 测试

插图 (1 张):



第一作者: 周天宇, 2733166382@qq.com, 太阳能聚光集热土壤供热系统  
通讯作者: 常泽辉, changzehui@163.com, 太阳能光热利用技术  
通讯地址: 内蒙古工业大学科学楼 914 室, 邮编: 010051

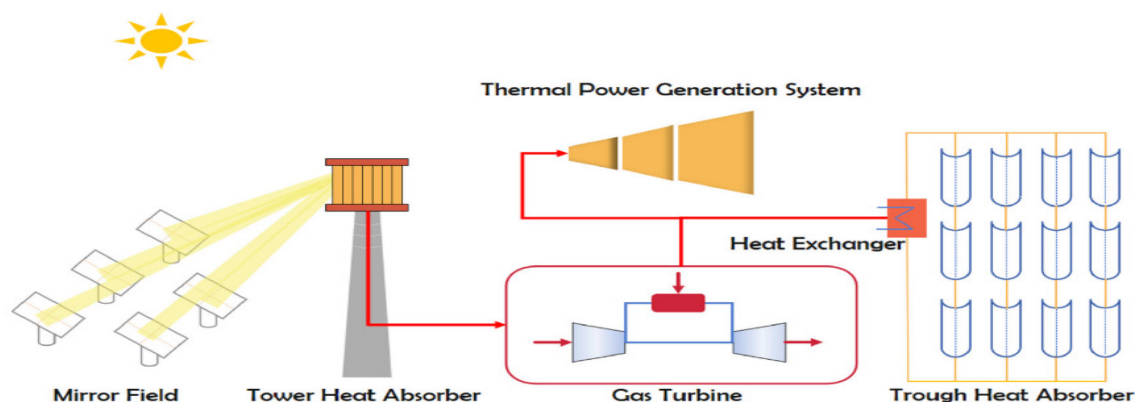
# 塔 - 槽耦合集成蓄热的太阳能 - 燃气联合循环系统热力学特性研究

任帅颖<sup>1</sup>, 江雨晨<sup>1</sup>, 王之龙<sup>1</sup>, 李一帆<sup>1</sup>, 陈柯宇<sup>1</sup>, 耿直<sup>1\*</sup>  
郑州航空工业管理学院航空发动机学院, 450046, 郑州

**摘要:** 太阳能热发电作为极具潜力的清洁能源技术, 长期受限于太阳辐射的间歇性以及与传统热力循环能级匹配度低等瓶颈。针对上述问题, 基于“温度对口、梯级利用”的原则, 本研究创新性地提出了一种塔 - 槽双重耦合且集成双罐直接蓄热装置的新型太阳能 - 燃气蒸汽联合循环 (ISCC) 互补发电系统。本研究利用 Epsilon 软件构建了该综合系统的热力学仿真模型, 探究了蓄热系统的最佳耦合方式, 结果表明当蓄热系统耦合于高压受热面时系统综合性能最优。相比传统系统, 新型双循环互补系统的循环热效率显著提升, 最大增幅可达 4.9%; 在额定工况下, 发电功率增加了 0.701 MW, 排烟温度大幅下降了 10.6 °C。针对典型变工况的动态特性分析表明, 随着环境温度和太阳直射辐射强度 (DNI) 的上升, 系统发电功率持续增加。此外, 本研究结合热力学第二定律, 深入剖析了系统内部的焓效率、焓损率的变化规律。分析指出, 系统运行的循环热效率峰值可达 44.7%, 系统的焓效率峰值高达 48.91%; 系统最大的焓损主要集中在燃烧室和太阳能集热器中。本研究不仅为解决太阳能发电的波动性提供了有效方案, 也为未来高效、低碳的 ISCC 电站的设计与优化提供了坚实的理论依据。

**关键词:** 新型太阳能联合循环; 塔 - 槽耦合; 能量梯级利用; 蓄热系统; 焓分析

插图 (1 张):



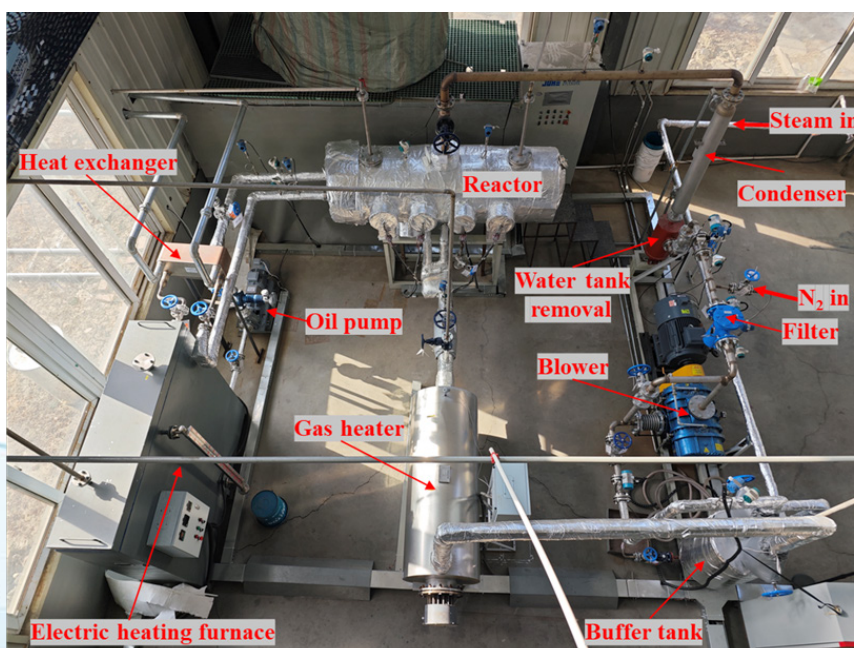
# 对流式 $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ 热化学储能固定床反应器的中试规模研究

杨朋霄<sup>1</sup>, 刘汉卿<sup>1</sup>, 方嘉宾<sup>1\*</sup>, 魏进家<sup>1</sup>, 高峰<sup>2</sup>  
西安交通大学化学工程与技术学院, 710049, 西安  
首航高科能源技术有限公司, 100071, 北京

**摘要:**  $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$  体系因具有储能密度高、材料成本低和温度范围宽等优点被认为是热化学储能最具前景的体系之一。然而, 现有关于热化学储能反应器的研究多局限于数值模拟和实验室小规模层面, 缺乏中试规模研究。此外,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  分解温度较高, 这会加剧物料的烧结且无法有效利用中低温热源, 现有研究多通过材料掺杂降低分解温度, 从反应器设计方面考虑较少。基于此, 本文提出一种可负载至少 334.14 kg  $\text{CaO}$  的对流式固定床反应器中试规模原型, 储热阶段通过高温  $\text{N}_2$  直接对流传热的同时带走反应蒸汽以降低分解温度, 释热阶段通过翅片管内导热油间接取热。通过搭建的含换热流体循环利用的热化学储-释能一体化实验系统, 从多维度对反应器性能进行综合评估。共进行了 4 次连续循环性能实验, 最大转化率为 98.21%, 最终转化率为 91.75%。对于典型的释能阶段, 释能时间为 105 min, 最大/平均放热功率为 75.03/52.89 kW, 放出能量约为 318.17 MJ, 总/颗粒侧传热系数平均约为 96/105  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。对于储能阶段, 分解温度可下降至 430  $^\circ\text{C}$  左右, 但由于气体载热能力有限, 储能时间相对较长, 为 1135min。最大/平均储能功率约为 7.97/4.68 kW, 反应储存能量约 321.03 MJ。基于能量平衡分析, 释能效率、储能效率和循环效率分别为 91.46%、66.27% 和 65.41%。这项工作在中试规模、反应转化率和分解温度等方面都展现了明显优势, 研究内容可为中低温热源驱动的热化学储能大型反应器设计提供新的思路。

**关键词:**  $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ ;  
热化学储能; 固定床反应器;  
中试规模

插图 (1 张):



第一作者: 杨朋霄, 20020108yx@stu.xjtu.edu.cn, 研究方向为太阳能光热及化学转化与利用  
通讯作者: 方嘉宾, jiabinfang@xjtu.edu.cn, 研究方向为太阳能光热及化学转化与利用  
通讯地址: 陕西省西安市咸宁西路 28 号 邮编: 710049

# 中深层地热—太阳能耦合阵列的热干扰特性研究

陈飞<sup>1,2</sup>, 毕扬<sup>1,2</sup>, 代彦军<sup>1,2\*</sup>

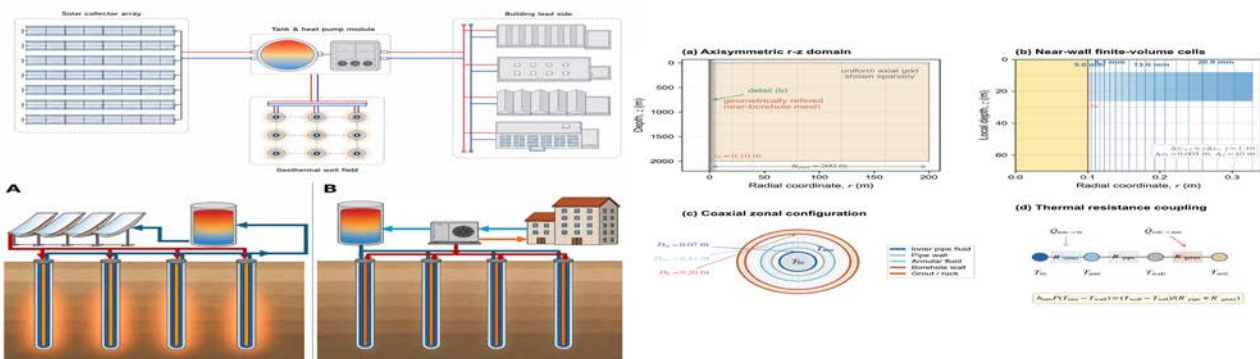
1. 上海交通大学机械与动力工程学院学院, 200240, 上海
2. 上海交大太阳能发电和制冷工程研究中心, 200240, 上海

**摘要:** 中深层同轴套管换热器 (DBHE) 阵列耦合太阳能补热为实现碳中和目标下的区域供热提供了可行路径。然而, 此类系统的长期热力性能受制于两个尚未充分认知的机制: 一是在强地温梯度背景下, 太阳能回灌补热效果随深度变化的规律; 二是井间方位角热干扰在十年运行尺度上的累积效应及其对井群布局的工程约束。

针对上述问题, 本文提出一种准三维数值仿真框架。该框架在  $r$ - $z$  柱坐标平面内采用交替方向隐式有限体积法求解主导的径向-轴向热传导, 在方位角方向则利用基于 Graf 加法定理的修正 Bessel 函数谱展开方法处理井间热干扰。框架集成了动态压缩式热泵、辐照度驱动流量调制的太阳能集热器、建筑供暖负荷和生活热水调度模型。针对井间距、井深、阵列几何构型和太阳辐照度开展了 10 年期系统仿真。研究发现三个核心结论。第一, 太阳能回灌存在一个有效穿透深度 (约 2000~2400 m) 第二, 在极端非对称 L 形井群布局 (中, 方位角热干扰导致的井间最大温差达  $3.67^\circ\text{C}$ , 对于受场地限制的不规则井群布局具有直接的工程冻井风险预警意义。第三, 谱方法在均质岩土中具有超快收敛性: Graf 展开的零阶项捕获了超过 99.98% 的热干扰信号, 高阶  $\cos(n\theta)$  调制项贡献小于  $0.001^\circ\text{C}$ , 因此  $M=1$  截断对工程精度完全足够。

本研究提出的准三维谱方法框架为中深层地热阵列的快速工程设计与优化提供了兼具物理严谨性与计算效率的数值工具, 为太阳能-地热耦合系统的深度选型提供了定量判据。

**关键词:** 中深层地热; 多井热干扰; 太阳能蓄热; 方位角谱方法



第一作者: 陈飞, SJTYcf0102@sjtu.edu.cn, 中深层地热与太阳能  
 通讯作者: 代彦军, yjdai@sjtu.edu.cn, 太阳能利用与建筑节能、除湿空调、环境湿度控制  
 通讯地址: 上海交大机械与动力工程学院 A 楼 406 室 邮编: 200240

# 太阳能驱动生物质颗粒热解：耦合建模、热流非均匀性调控与多目标优化研究

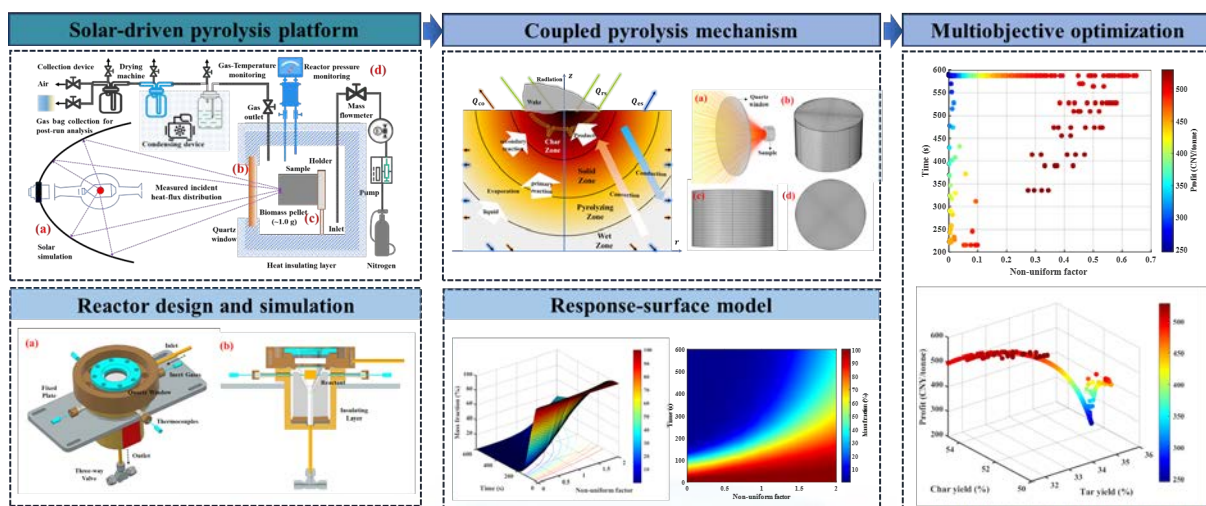
李自豪<sup>1</sup>, 余强<sup>1\*</sup>

1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 100083, 北京

**摘要:** 太阳能驱动生物质热解是将间歇性太阳能转化为可储存化学产物的重要热化学路径。本文以椰壳废弃物压制颗粒为研究对象, 构建了固定床反应器与 12 kW 太阳模拟器耦合的直接辐照热解实验平台, 并以实测目标面热流密度作为有效辐射边界, 开展颗粒尺度太阳能热解过程研究。在此基础上, 建立了考虑挥发分二次反应的传热传质耦合模型, 揭示了非均匀辐照条件下颗粒内部干燥、热解、炭化及油/气/炭产物迁移转化规律。进一步引入热流非均匀因子, 构建其与停留时间、产物收率之间的响应面模型, 实现对生物油和生物炭产物分布的定向调控。最后, 以生物油收率、生物炭收率和经济收益为目标建立多目标技术经济优化模型, 获得兼顾能量利用、产物调控和经济性的运行窗口。结果表明, 最优区域的收益成本比约为 1.73, 平均利润较基准工况提高 31.8%, 为集光太阳能生物质热化学转化反应器的设计优化和运行调控提供了理论依据。

**关键词:** 太阳能热化学; 生物质热解; 非均匀热流; 产物调控; 多目标优化

**插图:** 实验—机理—优化框架图



第一作者: 李自豪, lzihaohao@163.com, 太阳能热化学转化与生物质能源利用  
 通讯作者: 余强, yuqiang\_21st@sina.com, 太阳能光热利用与新能源系统优化  
 通讯地址: 中国农业大学信息与电气工程学院 邮编: yuqiang\_21st@sina.com

# 云层阴影形状对光热发电吸热器光热耦合特性影响研究

万振杰<sup>1,2</sup>, 李由达<sup>1</sup>, 宋玉兴<sup>1</sup>, 吴艳敏<sup>1</sup>, 耿圣<sup>3</sup>, 陈思运<sup>3</sup>, 彭博<sup>3</sup>

1. 郑州轻工业大学 建筑环境工程学院, 450000, 郑州

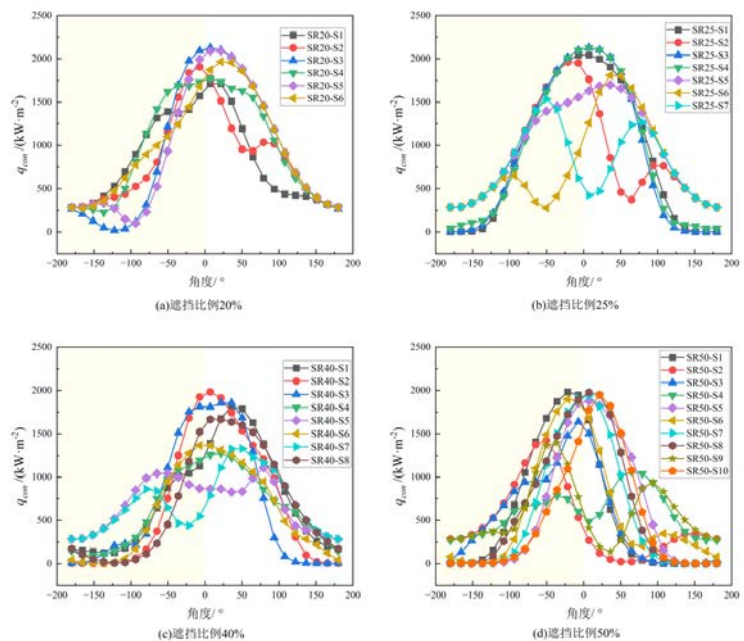
2. 郑州轻工业大学 河南省卓越工程师学院, 450000, 郑州

3. 郑州航空港区豫州新能源有限公司, 450000, 郑州

**摘要:** 塔式太阳能光热发电作为一种可调度的清洁能源技术, 在实际运行中常受到云层遮挡的影响, 造成入射能流密度的不断变化, 进而导致吸热器的能量产出不稳定及寿命衰减。目前研究大多是对定日镜场在均匀辐射衰减或规则形状云层下的热性能, 真实云层对吸热器热性能及管道温度的影响研究较少。为了探究实际云层遮挡对定日镜聚光及吸热器传热性能的影响, 以 Crescent Dunes 塔式光热电站为研究原型, 建立了结合云图空间映射的定日镜场与吸热器光热耦合数值计算模型。将实际云层阴影图像进行分割转换, 得到二值化图像, 导入到 SolarPILOT 的 Python API 程序当中, 获取复杂云层阴影及不同云层透过率下吸热器聚光能流密度分布的影响规律, 然后通过吸热器的光-热转换多物理场耦合分析模型, 获取其对吸热器热性能及温度分布的影响。通过引入不同云层透过率变量, 并结合遮挡比例在 20% 至 50% 之间的多组真实云层形状数据进行模拟, 深入分析了复杂阴影状态下吸热器表面的聚光能流密度分布、熔融盐流量、管壁温度以及薄膜温度等的变化。结果表明: 吸热器表面的聚光能流分布不仅受到总体遮挡面积的影响, 也与云层阴影的形态及透过率密切相关。不同云层透过率直接决定了局部的辐射衰减深度, 而云影的空间割裂效应则容易引起峰值能流密度位置的严重偏移, 造成能流密度的畸变与多峰分布。在回路熔融盐质量流量偏低时, 这种局部强能流的汇聚可能造成熔融盐温度超过热分解限值, 引起薄膜温度突破 650℃ 的运行安全界限, 造成吸热器管道腐蚀速率显著升高, 给系统安全运行带来风险。此外, 当系统为维持工质出口温度而下调质量流量时, 因局部热点区域的存在, 吸热器表面的对流与辐射热损失未能随入射总能量的下降而成比例减少, 导致吸热器的宏观热效率逐渐降至 85% 以下, 且效率波动幅度有所增加。研究结果可为真实复杂云层条件下吸热器内部流量的协调分配及运行调节提供理论参考和技术支撑。

**关键词:** 塔式光热发电; 熔融盐吸热器; 云层遮挡; 光热耦合; 能流密度分布; 传热特性

插图



作者简介: 万振杰 (1989—), 男, 山东菏泽人, 讲师, 太阳能热发电技术。E-mail: zhenjiewan@zzuli.edu.cn  
 通讯作者: 吴艳敏 (1981—), 女, 河南开封人, 副教授, 新型电力系统。E-mail: yanmin1020@126.com  
 通讯地址: 河南省郑州市中原区科学大道 136 号

# 风电光伏耦合电加热储热供热系统容量设计优化方法

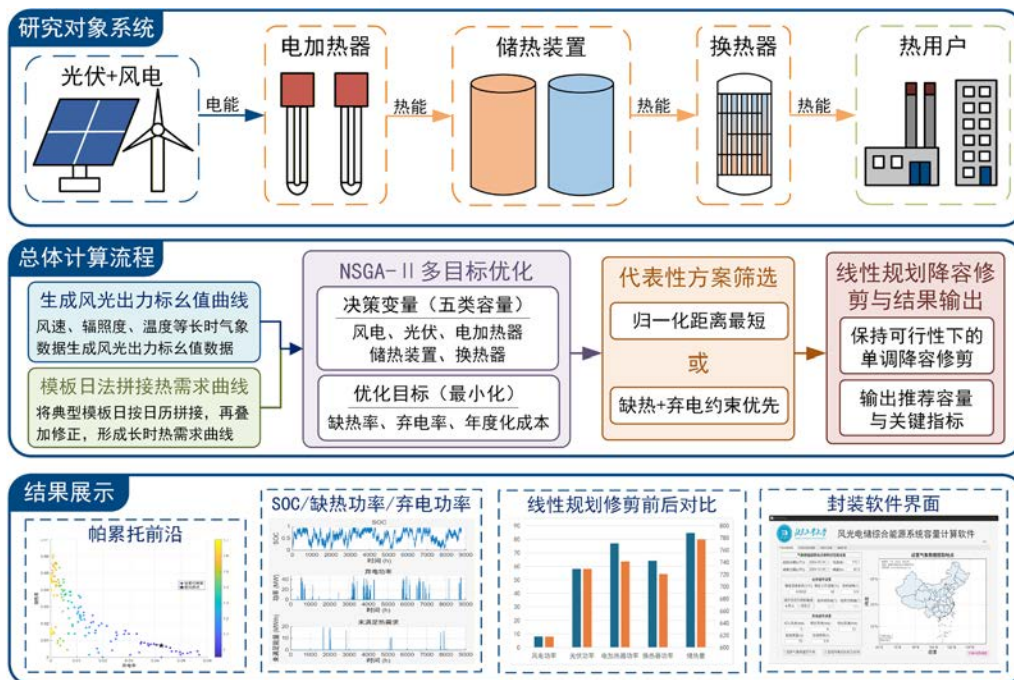
刘嘉龙<sup>1, 2</sup>, 张灿灿<sup>1, 2\*</sup>, 吴玉庭<sup>1, 2</sup>

北京工业大学机械与能源工程学院, 传热与能源利用北京市重点实验室, 100124, 北京  
国家能源用户侧储能创新研发中心(筹), 100124, 北京

**摘要:** 针对风电光伏耦合电加热储热供热系统早期容量规划中资源、负荷、容量与运行指标耦合的问题, 提出一种软件化容量设计优化方法。基于气象再分析数据生成风电、光伏出力标么值曲线, 并采用典型日模板、日历规则和月度系数构造热需求曲线; 以缺热率、弃电率和年度化成本为目标, 采用 NSGA-II 对风电、光伏、电加热器、储热装置及换热器容量进行多目标寻优, 结合归一化距离最短或约束优先准则筛选方案; 进一步引入线性规划单调降容修剪, 在不突破指标阈值前提下识别并削减冗余装机。典型算例表明, 该流程可实现资源生成、负荷构造、容量寻优、方案筛选与冗余修剪的一体化计算, 合理搜索边界下可削减约 19% 的非主导成本设备冗余容量。该方法可为风电光伏电加热储热供热系统早期规划和方案比选提供量化支撑。

**关键词:** 风电光伏; 电加热储热; 容量优化; NSGA-II; 线性规划

**插图:**



第一作者: 刘嘉龙, cube\_ljl@emails.bjut.edu.cn, 研究方向为熔盐储热系统调度控制;  
通讯作者: 张灿灿, zcc@bjut.edu.cn, 研究方向为太阳能、传热储热、过程设备节能等。  
通讯地址: 北京市朝阳区平乐园 100 号 邮编: 100124

# 太阳能驱动多级被动界面蒸发装置用于高效海水原位绿色制氢

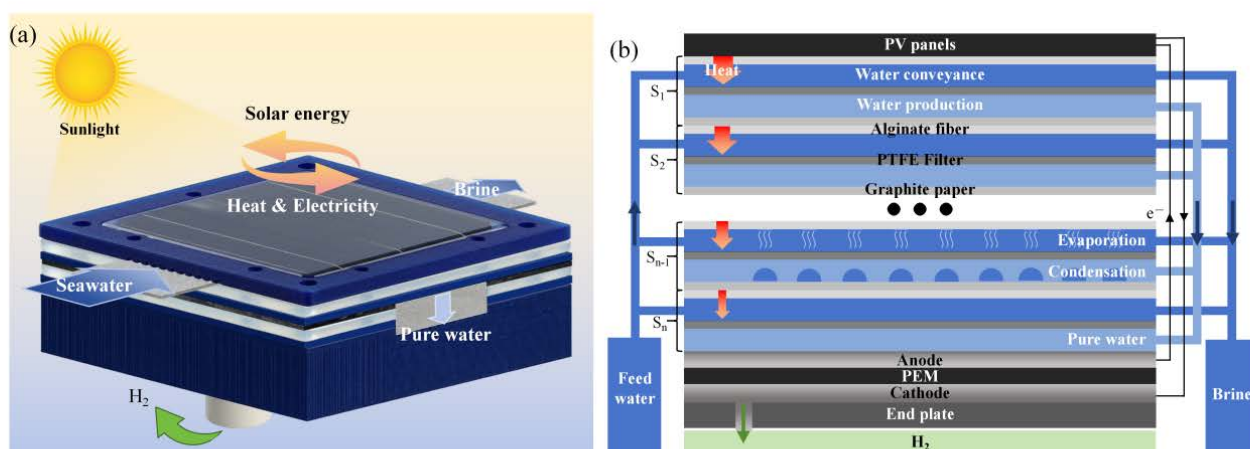
曹耀文<sup>1</sup>, 石雷<sup>1</sup>, 周天<sup>1\*</sup>

中南大学能源科学与工程学院, 410083, 湖南

**摘要:** 太阳能电解水是实现绿氢规模化生产的核心技术之一, 而淡水资源匮乏成为制约其产业化发展的关键瓶颈。海水储量充沛, 是极具应用前景的制氢水源, 但其复杂组分严重阻碍了直接电解技术的应用。本文设计并搭建了以自然光和天然海水为输入源的低成本、可持续太阳能海水制氢系统, 研究制备了藻酸盐纤维作为高效输水结构。在 1sun 光照条件下, 系统最大产水速率为  $2.28 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在 NaCl 溶液和真实海水环境下, 经处理后的出水电导率下降两个数量级, 且在天然海水环境中连续运行 6 h, 性能保留率达 92.6%。户外试验证实, 该系统太阳能-氢能转化效率最高为 7.37%, 峰值产氢速率达到  $20.8 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。该装置设计有效摆脱了制氢工艺对淡水和外接电能的依赖, 为海水原位制氢的工程化应用提供了可行方案。

**关键词:** 太阳能驱动界面蒸发; 海水淡化; 电解; 海水制氢; 原位制氢

插图 (1 张):



第一作者: 曹耀文, 253901005@csu.edu.cn, 光热利用装置

通讯作者: 周天, t\_zhou@csu.edu.cn, 相变储能材料及热物性测试、综合能源系统、可再生能源

通讯地址: 湖南省长沙市麓山南路 932 号 邮编: 410083

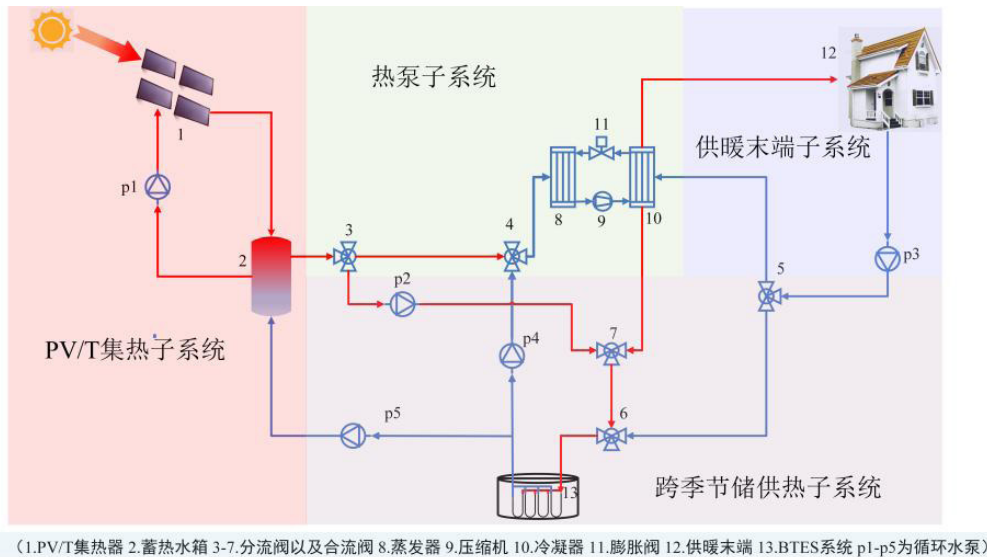
# 光伏光热耦合跨季节储热供暖系统优化设计研究

李晓霞<sup>1, 2, 3, 4\*</sup>, 郭垚钟<sup>1, 2, 3</sup>, 靳立丰<sup>1, 2, 3</sup>, 郭泉<sup>1, 2, 3</sup>, 李金平<sup>1, 2, 3</sup>

1. 兰州理工大学绿色能源与储能学院, 730050, 兰州 2. 中国西部能源与环境研究中心, 730050, 兰州 3. 西北低碳城镇支撑技术协同创新中心, 730050, 兰州  
4. 内蒙古工业大学土木工程学院, 010051, 呼和浩特

**摘要:** 针对光伏光热 (PV/T) 耦合跨季节储热供暖系统多能量耦合及关键参数匹配问题, 本研究以兰州地区一栋建筑面积为 300 m<sup>2</sup> 的办公建筑为研究对象, 开展了系统建模、动态仿真与优化设计研究。基于 TRNSYS 平台构建了 PV/T 耦合跨季节储供热系统动态仿真模型, 并通过文献实测数据进行了验证, PV/T 集热器模型平均相对误差为 5.45%, 跨季节储热模型均方根误差为 5.46%, 表明模型具有较高可靠性。系统综合性能系数 (COP) 为 4.36, 年供热量为 65334 kWh, 其中 PV/T 集热贡献占比为 53.78%。通过参数敏感性分析揭示了关键设计参数对系统性能的影响规律。结果表明, PV/T 集热器面积为 30 ~ 40 m<sup>2</sup>、水箱体积为 3 ~ 4 m<sup>3</sup>、热泵功率为 21 ~ 22 kW 时系统性能较优, 其中热泵功率对系统能效影响最为显著。研究结果为光伏光热耦合跨季节储热供暖系统的合理配置与优化设计提供了理论依据。

**关键词:** 跨季节储热; 光伏光热 (PV/T); 动态仿真; PV/T 集热器; 敏感性分析;



## 主题二：部件设备



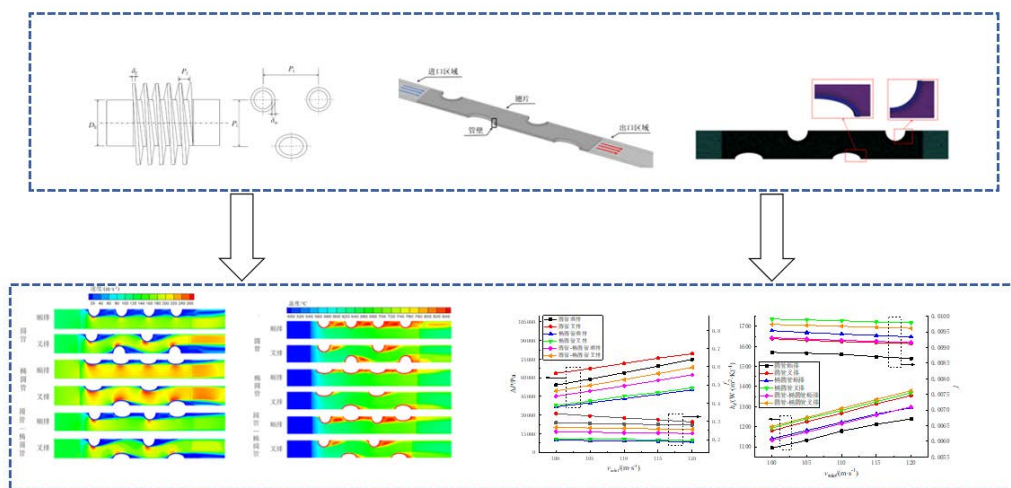
# 高流速工况下翅片管式换热器不同管排配置流动与传热特性分析

王之龙<sup>1</sup>, 李一帆<sup>1</sup>, 任帅颖<sup>1</sup>, 江雨晨<sup>1</sup>, 陈柯宇<sup>1</sup>, 耿直<sup>1\*</sup>  
 郑州航空工业管理学院航空发动机学院, 450046, 郑州

**摘要:** 针对航空发动机冷却空气系统中的翅片管式换热器在外涵道高流速工况下, 传统顺排圆管结构易诱发流动分离与压损剧增等问题, 本文旨在通过优化基管截面构型与管束排列方式, 实现强化传热与阻力控制的协同优化。采用数值模拟方法, 对比分析了圆管、椭圆管及圆管-椭圆管组合三种基管管型在顺排与叉排布置下的流动演变与传热特性。研究以  $j/f$  因子作为换热器综合性能的评价指标, 系统考察了六种结构配置对换热器内部速度场、温度场、压降特性、对流换热系数及翅片效率的作用机制。数值计算结果表明椭圆管凭借其流线型特征, 可显著抑制气流分离; 叉排布置通过强化流场扰动, 使得换热系数与  $j$  因子均普遍优于同管型顺排结构, 但该排列方式的增益效果弱于基管几何外形的影响。圆管-椭圆管组合构型的各项性能则介于纯圆管与纯椭圆管之间。综合评价显示, 椭圆管叉排配置具备最佳的综合换热性能, 在 120 m/s 的高流速条件下, 其  $j/f$  因子达到 0.0503, 较传统圆管顺排配置提升约 63.2%, 成功实现了高流速工况下换热强化与流动阻力的最优平衡。本研究结论可为高流速翅片管式换热器的结构创新与性能优化提供理论依据与工程参考。

**关键词:** 翅片管式换热器; 高流速工况; 管排配置; 流动特性; 传热特性

插图 (1 张):



第一作者: 王之龙, 18238230806@163.com, 传热强化  
 通讯作者: 耿直, zhgz@zua.edu.cn, 动力工程及工程热物理  
 通讯地址: 郑州市郑东新区文苑西路 15 号郑州航空工业管理学院 邮编: 450046

## 不同流道结构内固体颗粒流动特性研究

付焯<sup>1,2,3</sup>, 白凤武<sup>1,2,3\*</sup>, 聂辅亮<sup>1,2,3</sup>

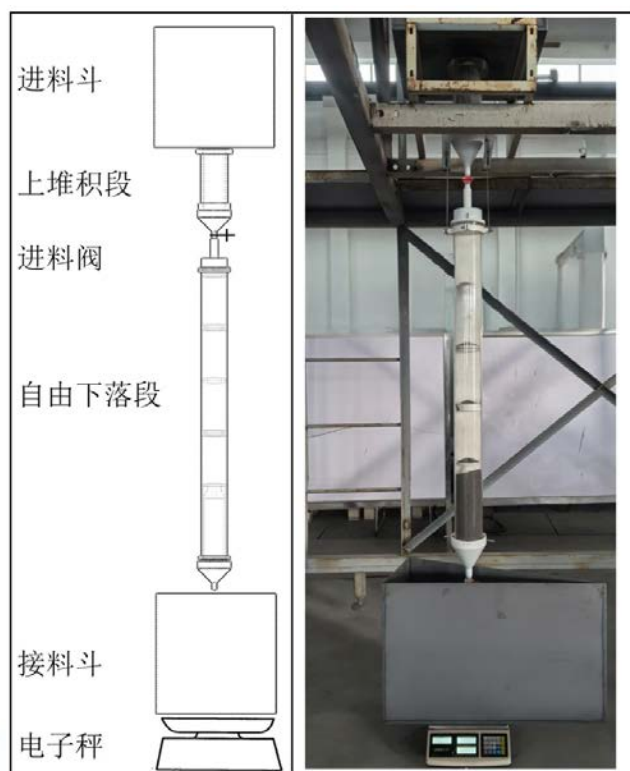
1. 中国科学院太阳能热利用与光伏系统重点实验室, 100190, 北京;

2. 中国科学院电工研究所, 100190, 北京;

3. 中国科学院大学, 100049, 北京;

**摘要:** 固体颗粒具有耐高温、易获取等优点, 被认为是下一代聚光太阳能热发电系统理想的传热和储热介质, 其应用有望进一步降低平准化度电成本。在本研究中, 建立了一个颗粒流体动力学模型并开展计算颗粒动力学(CPDF)模拟, 探究不同流道结构(环状沟槽、Z字形沟槽和小孔阵列)以及对应不同尺寸对颗粒帘幕厚度、流动状态以及颗粒流量的影响。此外, 本研究建立了固体颗粒流动实验装置, 用于验证颗粒流体动力学模型结果。结果表明,Z字形沟槽颗粒帘幕固体体积分数在高度方向上变化最小, 形成颗粒厚度最稳定。不同沟槽宽度影响自由下落连接处颗粒滞留层厚度, 宽度越大, 滞留层厚度越大。本研究中, 根据 CPDF 模拟结果, 10mm 宽度 4mm 振幅的 Z 字形沟槽结构形成的颗粒帷幕厚度在高度方向变化最小, 颗粒滞留层最薄, 建议选取此种结构作为自由下落段内部结构。该冷态数值研究中的结论可为进一步建立精确的固体颗粒吸热器热模型提供依据。

**关键词:** 固体颗粒; 流道结构; 计算颗粒动力学; 流动状态



第一作者: 付焯, fuye@mail.iee.ac.cn, 太阳能热利用  
通讯作者: 白凤武, baifw@mail.iee.ac.cn, 太阳能热利用  
通讯地址: 北京市海淀区中关村北二条 6 号 邮编: 100190

# 单侧受热边界条件下细通道内超临界 CO<sub>2</sub> 流动阻力特性实验与数值模拟研究

连志诚<sup>1, 2, 3</sup>, 刘妍君<sup>1, 2, 3</sup>, 王坤<sup>1, 2, 3\*</sup>,

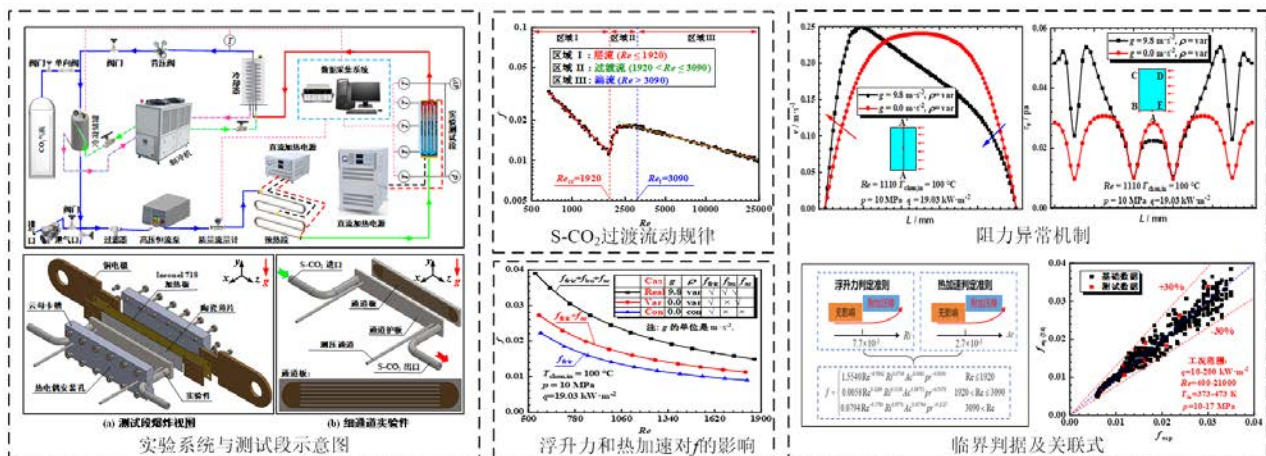
河北省热科学与能源清洁利用重点实验室, 天津, 300401, 中国

河北工业大学能源与环境工程学院, 天津, 300401, 中国

河北省先进储能技术与设备工程研究中心, 天津, 300401, 中国

**摘要:** 细通道紧凑型吸热器被认为是直接式太阳能超临界二氧化碳循环系统中极具前景的吸热形式之一。其中, 流动阻力特性是决定吸热器热工水力性能的核心因素。本研究采用实验与数值模拟相结合的方法, 对水平细通道内单侧受热工况下超临界二氧化碳的流动阻力特性进行了系统性研究。首先, 通过等温实验界定了矩形细通道内超临界二氧化碳的流态转捩边界, 其从层流向过渡流、以及从过渡流向湍流演化的临界雷诺数分别为 1920 和 3090。随后, 探究了受热条件下的浮升力效应和热加速效应对额外压降的影响机制。具体而言, 浮升力诱导二次流加剧了近壁面的速度梯度, 显著提升了壁面剪切应力, 从而导致压降增加。同时, 热加速效应通过强化壁面剪切应力和轴向动量通量, 进一步引起额外压降。本研究确立了浮升力与热加速效应的临界阈值并开发了一种全新的用于预测超临界二氧化碳阻力因子的实验关联式, 经验证, 该关联式的预测偏差保持在  $\pm 30\%$  以内, 为工程中紧凑型超临界二氧化碳吸热器设计与优化提供了可靠支撑。

**关键词:** 紧凑型太阳能吸热器; 细通道; 浮升力和热加速效应; 过渡流



第一作者: 连志诚, 202521301008@stu.hebut.edu.cn, 太阳能吸热器中的强化传热  
 通讯作者: 王坤, wangkun@hebut.edu.cn, 太阳能光热发电中的工程热物理问题  
 通讯地址: 天津市北辰区双口镇西平道 5340 号, 300401

## 非均匀辐照下固体颗粒吸热器多尺度耦合仿真与实验研究

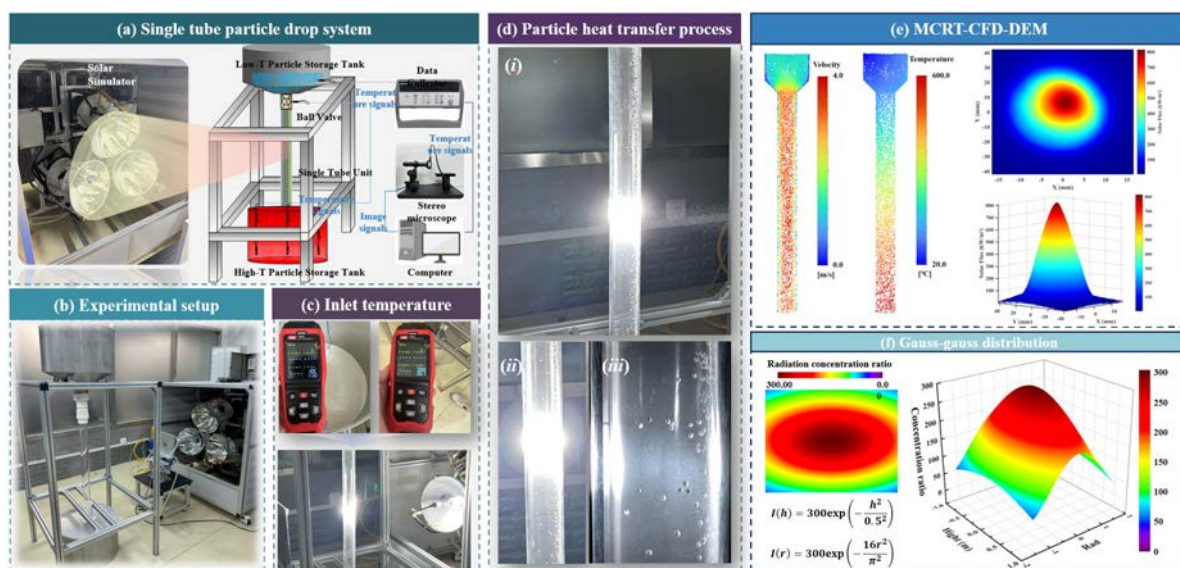
徐啸宇<sup>1</sup>, 余强<sup>1\*</sup>

1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 100083, 北京

**摘要:** 固体颗粒吸热器是超临界二氧化碳塔式太阳能热发电系统中的关键能量转换部件, 其传热性能直接影响系统效率。针对非均匀聚光辐照下颗粒流动、辐射吸收与传热耦合复杂、传统模型难以准确描述瞬态热响应的问题, 本文构建了蒙特卡洛光线追踪、离散元方法与计算流体力学耦合的多尺度模型, 并搭建单管自由下落实验平台进行验证。首先, 利用蒙特卡洛光线追踪获得高斯-高斯型非均匀能流密度分布; 其次, 基于 DEM-CFD 方法分析颗粒速度场、温度场及碰撞特征, 揭示近壁低速区对换热的抑制作用; 最后, 通过实验对颗粒出口温度进行验证。结果表明, 模拟与实验最大温差为 2.52 °C; 当 DNI 高于 600 W/m<sup>2</sup> 时, 换热效率稳定在约 68%; 响应面优化可确定较优颗粒流量与辐照功率匹配区间, 系统效率最高提升约 28%。研究可为 CSP 固体颗粒吸热器优化设计与工程应用提供参考。

**关键词:** 太阳能热发电; 固体颗粒吸热器; 蒙特卡洛法; DEM-CFD 耦合; 非均匀辐照

插图 (1 张):



第一作者: 徐啸宇, 1398111849@qq.com, 光热发电技术 / 储能技术  
 通讯作者: 余强, yuqiang\_21st@sina.com, 太阳能光伏 / 光热发电技术  
 通讯地址: 中国农业大学信息与电气工程学院 邮编: yuqiang\_21st@sina.com

# 基于树形翅片与多界面热力耦合的复合储热块性能强化研究

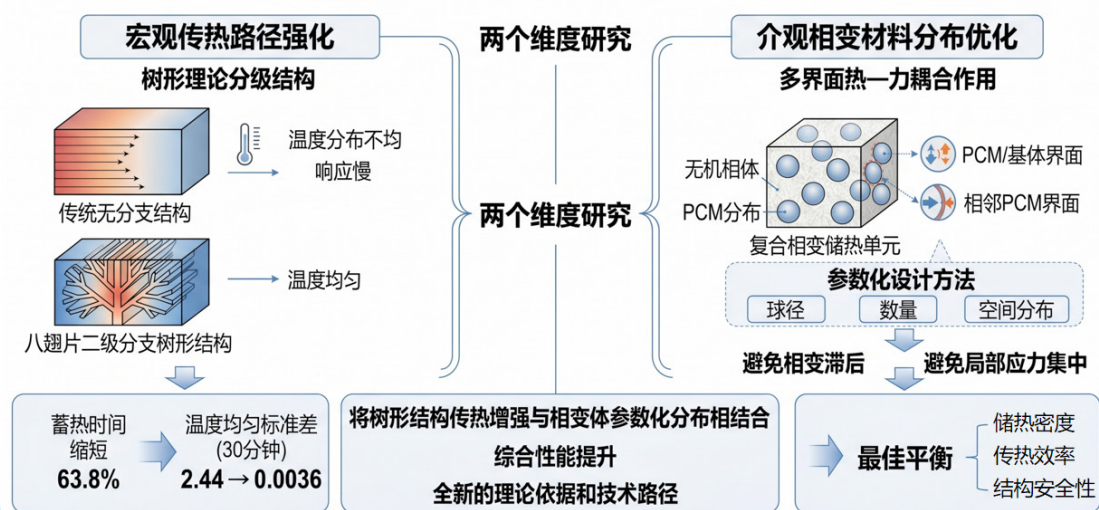
涂伟乐<sup>1</sup>, 巩景虎<sup>1\*</sup>, 师立强<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学建筑设备科学与工程学院, 陕西西安, 710055; )

**摘要:** 固态与复合相变储热技术在能源高效利用中具有重要应用, 但传统储热块在实际运行中普遍存在温度分布不均匀、热响应迟缓等状况, 严重限制了系统整体效能的提高。本研究从宏观传热路径与介观相变材料分布两个维度, 开展了储热块的性能强化与温度场优化研究。在宏观结构层面, 基于树形理论的分级结构特征搭建了树形翅片固态储热体物理模型, 系统剖析了不同分支级数对储热体内热流分布状态的影响机制; 在介观材料层面, 针对无机基体/PCM 复合相变储热单元, 深入探讨了多界面 (PCM/基体界面、相邻 PCM 球体界面及外边界) 的热-力耦合作用机制, 并建立了一套确定 PCM 相变体球径、数量与空间分布的参数化设计方法。研究表明, 在宏观流场优化方面, 采用八翅片二级分支树形结构能最有效推动热流均匀扩散, 相比传统无分支结构可使蓄热时间缩短 63.8%, 且蓄热 30 分钟时温度均匀标准差从 2.44 大幅降至 0.0036; 在介观分布层面, 通过约束最大可行球半径与体积分数, 可有效避免相变滞后与局部应力集中, 实现在储热密度、传热效率与结构安全性之间的最佳平衡。本研究将树形结构传热增强与相变体参数化分布相结合, 为改善固态与复合储热块的综合性能提供了全新的理论依据和技术路径。

**关键词:** 复合相变储热; 树形翅片; 温度场优化; 温度场优化; 参数化设计; 传热强化

## 固态与复合相变储热性能强化与温度场优化研究



第一作者: 涂伟乐 (2003—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事固态储热方面的研究, twl7650@126.com。

通信作者: 巩景虎 (1989—), 男, 博士、副教授, 主要从事太阳能热利用和储能方面的研究, gongjinghu0103@163.com。

通讯地址: 西安建筑科技大学, 710055

# 太阳能集热器不同结构及入射方式对比研究

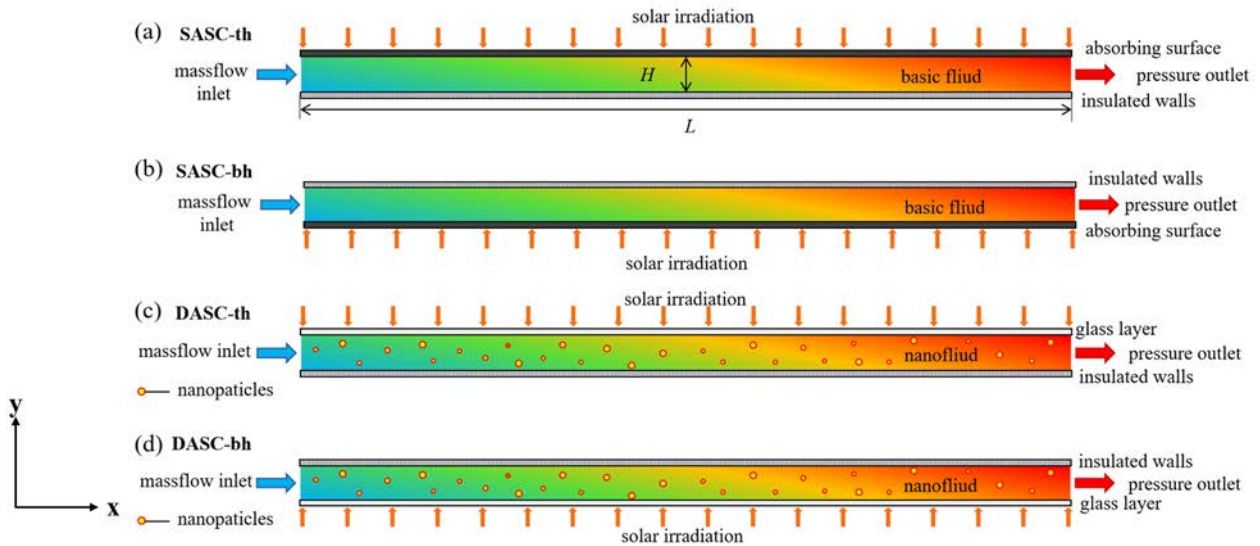
谯攀攀<sup>1</sup>, 秦彩燕<sup>1,\*</sup>

哈尔滨工业大学(深圳)机器人与先进制造学院, 518055, 深圳

**摘要:** 太阳能集热器是太阳能光热转换的关键组件。传统的表面吸收式太阳能集热器(SASCs)依赖高吸收率表面吸收太阳辐射,然后将热量传递给工作流体,这通常会导致相当大的表面热损失。相比之下,直接吸收式太阳能集热器(DASCs)(即体积吸收集热器)通过具有光学吸收性的纳米流体将太阳能直接转化为体积热源,从而减少热损失并提高效率。尽管最近提出了底部入射策略逆重力加热流体,从而加强流体浮力,促进纳米流体垂直方向的混合及热量传递,但现有关于底部入射的研究大多局限于静态集热器。在本研究中,利用有限体积法(FVM)建立了二维耦合光-热-流模型,以研究不同加热策略下的动态集热器。系统比较了四种配置,包括顶部入射和底部入射的SASC/DASC,评估了几种配置下集热器的出口温度、光热效率和温度场均匀性。然后通过改变入口质量流量、流体消光系数以及集热器几何尺寸(长度和高度),进一步对DASC进行了参数研究。结果表明,底部入射使DASC的效率提高10.71%,SASC提高5.61%。增加入口质量流量可提高效率,DASC-bh在质量流量为0.05 kg/s时实现了83.22%的效率。确定了 $37.5 \text{ m}^{-1}$ 约为研究范围内的最佳消光系数。此外,在集热器长度为200 cm、高度为7.5 cm时,实现了出口温度与效率之间的最佳权衡。

**关键词:** 表面吸收式太阳能集热器(SASC); 直接吸收式太阳能集热器(DASC); 顶部入射; 底部入射; 自然对流

插图(1张):



四种太阳能集热器配置的二维几何示意图: (a) 顶部入射/加热的表面吸收型太阳能集热器(SASC-th), (b) 底部入射/加热的表面吸收型太阳能集热器(SASC-bh), (c) 顶部入射/加热的直接吸收型太阳能集热器(DASC-th), 以及(d) 底部入射/加热的直接吸收型太阳能集热器(DASC-bh)。

第一作者: 谯攀攀, 2530387523@qq.com, 太阳能集热器优化

通讯作者: 秦彩燕, qincaiyan@hit.edu.cn, 太阳能热利用, 人工智能工程应用

通讯地址: 哈尔滨工业大学(深圳)信息楼 L222 邮编: 518071

# 熔盐储热系统翅片管电加热器热工水力性能的数值研究

林勇杰<sup>1</sup>, 吴玉庭<sup>2\*</sup>, 杜彦君<sup>2</sup>, 张灿灿<sup>2</sup>, 李晓琼<sup>2</sup>

1. 北京工业大学材料科学与工程学院, 100124, 北京

2. 北京工业大学机械与能源工程学院, 100124, 北京

**摘要:** 高压电阻式熔盐电加热器作为大规模熔盐储热系统中的核心“电转热”部件, 在实现电网灵活调节与可再生能源集成方面发挥着至关重要的作用。然而, 传统的光滑电加热管在换热效率上存在显著局限, 难以满足现代工业对高效率热传递的需求。为解决这一问题, 本研究对四种不同类型的翅片管电加热管——波纹翅片管 (COF)、直翅片管 (STF)、螺旋翅片管 (SPF) 及 H 型翅片管 (HSF) 进行了系统的数值模拟, 旨在评估并筛选出能够有效提升熔盐电加热器综合性能的最佳构型。研究采用可实现 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型, 对壳程流场、压力场及温度场进行了深入分析。此外, 在等泵功约束下, 利用综合性能评价指标 (PEC) 对各构型进行了综合评估, 以准确反映工业运行中的实际限制。研究结果表明, 纵向翅片通过增强流体扰动, 能有效抑制流动死区及局部热点。其中, 波纹翅片管实现了最优的热工水力性能。与传统光滑管相比, 波纹翅片管使努塞尔数平均提升了 21.45%, 综合性能指标提升了 14.53%, 同时压力损失相应增加了 19.98%。

**关键词:** 翅片管电加热管、数值模拟、强化传热、综合性能

插图:

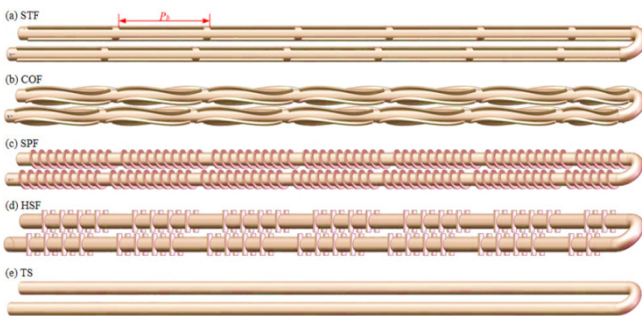


图 1 翅片管结构

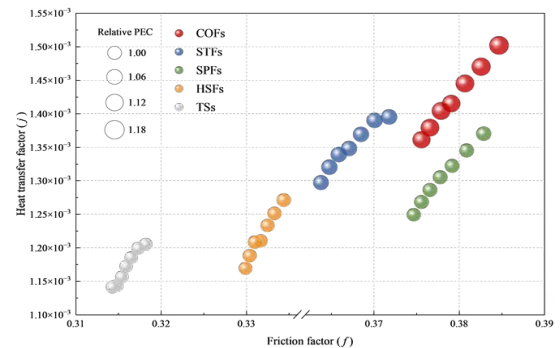


图 2 不同翅片配置的  $j$  因子和  $f$  因子之间的关系, 气泡大小代表 PEC

# 基于月光扫描与机器视觉反馈的回转塔式聚光器相对能流分布测量及校正方法研究

赵天宇<sup>1,2</sup>, 王志峰<sup>1,2</sup>, 朱会宾<sup>1</sup>, 郭明焯<sup>1,2</sup>, 滕镇宇<sup>1,2</sup>

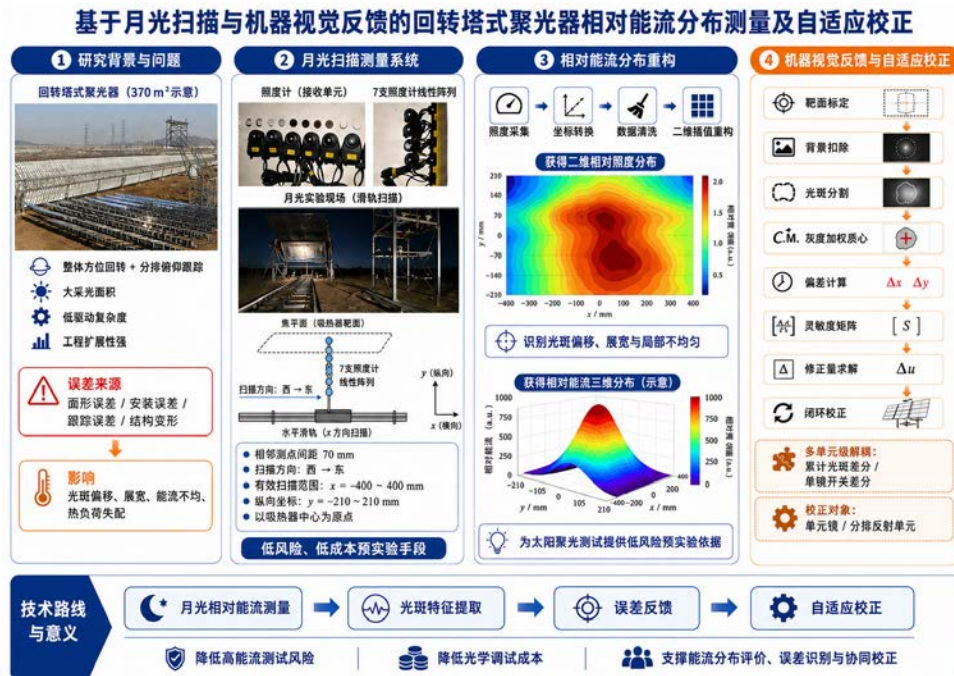
1. 中国科学院电工研究所, 100190, 北京

2. 中国科学院大学, 100190, 北京

**摘要:** 回转塔式聚光器通过整体方位回转与分排俯仰跟踪实现多反射单元协同聚光, 但单元镜面形、安装、跟踪及结构变形误差会导致焦平面光斑偏移和能流分布不均。针对太阳聚光高能流测试风险高、光学调试反馈不足的问题, 本文提出一种基于月光扫描与机器视觉反馈的相对能流测量及校正方法。以 370 m<sup>2</sup> 回转塔式聚光器为对象, 采用 7 支照度计组成线性阵列, 结合滑动导轨沿东西方向扫描焦平面, 并以吸热器中心为坐标原点, 将多通道照度数据转换为二维相对照度分布。结果表明, 月光条件下可获得具有明显高照度区的聚光光斑, 能够反映光斑偏移、展宽和局部不均匀特征。进一步结合靶面标定、背景扣除、光斑分割、灰度加权质心提取和灵敏度矩阵校正, 构建“测量—识别—反馈—校正”的自适应调节流程。该方法可降低大型聚光器光学测试风险和调试成本, 为回转塔式聚光器能流分布评价、误差识别及多反射单元协同校正提供参考。

**关键词:** 回转塔式聚光器; 月光法; 相对能流分布; 机器视觉; 自适应校正

插图:



论文框架图

第一作者: 赵天宇, zhaotianyu@mail.iee.ac.cn, 主要从事自适应太阳能聚光器研究;  
通讯作者: 王志峰, zhifeng@vip.sina.com, 主要从事太阳能热利用技术研究;  
通讯地址: 北京市海淀区中关村北二条 6 号中国科学院电工研究所 邮编: 100190;

# 青藏高原极端环境下全玻璃热管式真空管性能提升与运行状态预测

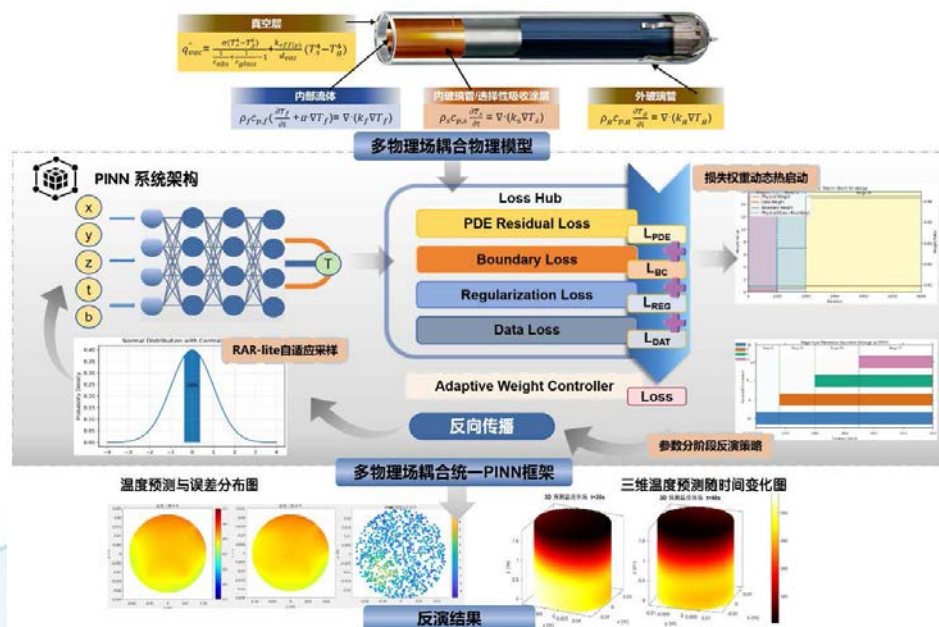
苏元昊<sup>1</sup>, 巩景虎<sup>1</sup>

1. 西安建筑科技大学, 建筑设备科学与工程学院, 710055, 西安

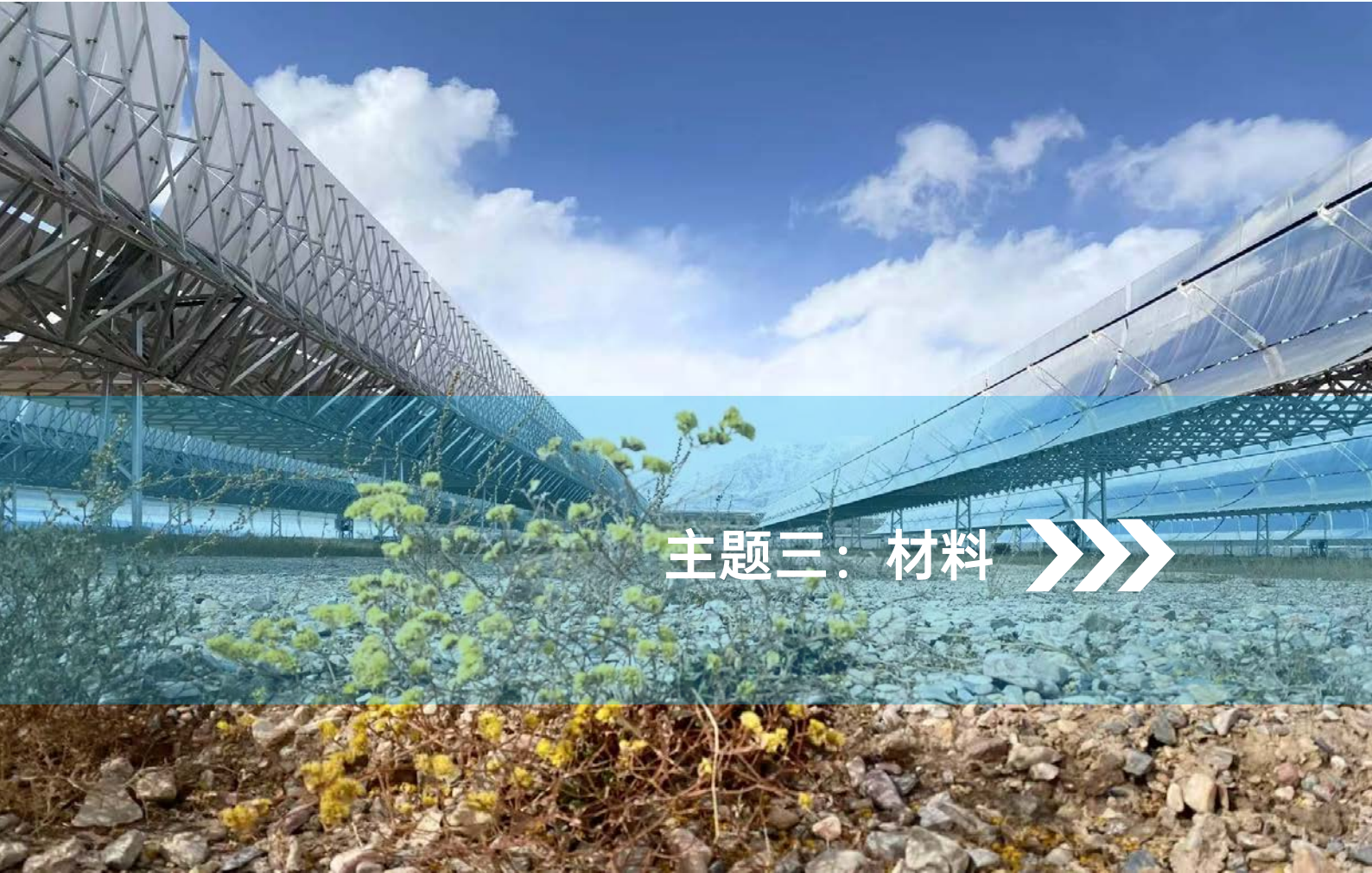
**摘要:** 全玻璃热管式真空管具有结构简单、传热效率高和良好的防冻能力, 尤其适用于青藏高原等高海拔、低温、大温差环境。然而在实际运行过程中, 集热器仍出现冻结、过热或传热效率下降等故障。因此研究全玻璃热管式真空管的传热与能量利用机制、冻结及过热规律, 并探索运行状态监测与异常识别方法, 对于提升其高效、可靠与安全运行能力具有重要意义。本研究围绕全玻璃热管式真空管的性能提升展开, 首先通过内置吸热件强化管内吸热与传热过程, 结果表明, 内置吸热件可使径向当量热阻下降 52.0%, 内部传热效率达到 67.46%, 系统总体热效率稳定在 50.51% 左右, 并能在约 55s 内建立稳定循环。随后结合夜间散热实验与数值模拟, 研究低温环境下热管内工质的降温过程、冻结起始位置及冻结前沿演化, 结果显示工质首先在工质上部区域出现冻结, 同时冻结过程具有明显的时空非均匀性。最后引入物理信息神经网络方法, 将传热控制方程与运行数据相融合, 实现集热器运行状态预测与异常识别, 为全玻璃热管式真空管集热器的性能优化、冻结防护及智能运维提供参考。

**关键词:** 全玻璃热管式真空管; 性能提升; 冻结特征; 物理信息神经网络

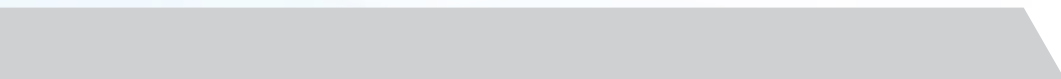
插图:



第一作者: 苏元昊, suyuanhao021031@163.com, 动力工程与工程热物理  
 通讯作者: 巩景虎, gongjinghu0103@163.com, 动力工程与工程热物理  
 通讯地址: 陕西省西安市碑林区雁塔路中段 13 号 邮编: 710055



主题三：材料 >>>



## 醋酸钠过冷相变材料驱动的太阳跨季节高效利用

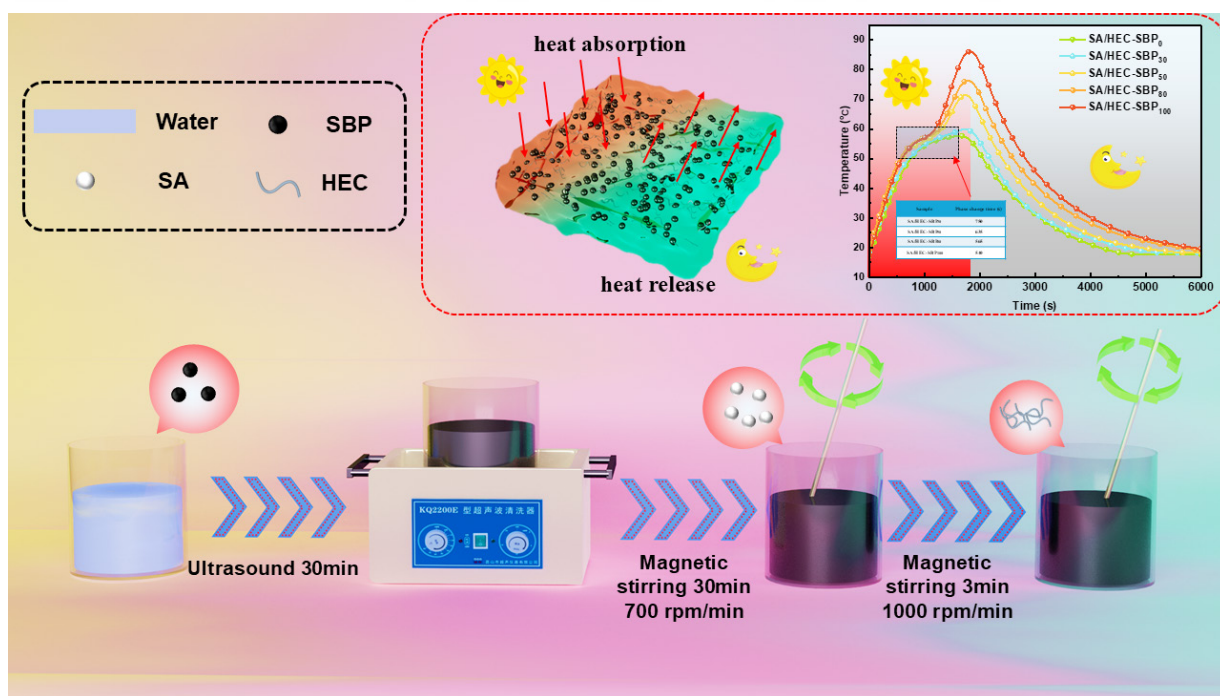
杜嘉瑞<sup>1</sup>, 吴雪辰<sup>1</sup>, 周宇升<sup>1</sup>, 汪玲玲<sup>1\*</sup>, 谢华清<sup>1</sup>, 于伟<sup>1\*</sup>

1. 上海第二工业大学能源与材料学院, 201209, 上海

**摘要:** 太阳能的间歇性和不稳定性导致供需在时间和空间上的不匹配, 从而制约了其利用效率。相变材料在太阳能热储能领域极具潜力, 但其放热过程中的自发结晶现象缩短了潜热储存的周期。因此, 我们开发了具有显著过冷度的复合相变材料来克服这些限制。首次采用醋酸钠 (SA)- 水为相变基质, 羟乙基纤维素 (HEC) 提高过冷稳定性, 碳微球 (CB) 提高光热转化效率。优化后的 SA/HEC-CB80 复合材料具有高达 96.43% 的光热效率, 即使在  $-18^{\circ}\text{C}$  到  $-20^{\circ}\text{C}$  的温度下也能保持 120 天以上的稳定性, 并能通过电触发控制潜热释放。在实际演示中, 该系统实现了“跨季储热”, 能够连续提供 3.5 h 的  $40^{\circ}\text{C}$  恒温热水; 同时, 一体化应急服装通过机械触发方式, 在 60s 内实现了  $5\sim 8^{\circ}\text{C}$  的快速升温。这项研究为高效的跨季节太阳能蓄热提供了可行的策略, 有效地缓解了太阳能利用中的时空不匹配。

**关键词:** 相变材料; 结晶; 季节性储热; 太阳能光热转换效率; 可控放热

插图:



第一作者: 杜嘉瑞, 2295036361@qq.com, 跨季节储热

通讯作者: 汪玲玲, llwang@sspu.edu.cn, 纳米流体, 热功能材料, 光吸收与储存

通讯地址: 上海市浦东新区上海第二工业大学 邮编: 201209

## 低熔点四元混合硝酸熔盐试验及其热物性研究

阿木古楞<sup>1</sup>, 吴玉庭<sup>1\*</sup>

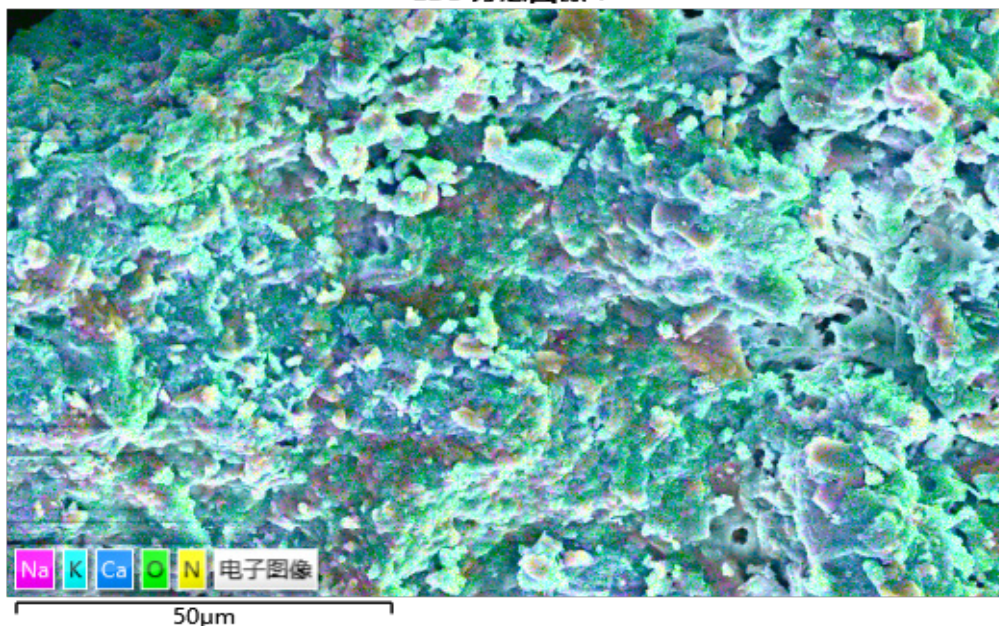
1. 北京工业大学机械与能源工程学院, 100124, 北京

**摘要:** 熔盐由于其具有较高的使用温度、高热稳定性、高比热容、高对流传热系数、低粘度、低饱和蒸汽压、低价格等“四高三低”的优势, 成为目前光热发电领域中认可度最高的传储热介质之一。本文通过以课题组优选出的低熔点、高分解温度且低成本的四元混合硝酸熔盐为基础, 对其进行了多次吨级工程应用上的中试试验, 随后对其在不同升高温度下进行了热物性测试, 得到了 325℃, 460℃, 500℃, 540℃, 580℃下恒温 8 小时后的熔点、初晶点、分解温度, 以及加热至 540℃时熔盐黏度随温度的变化。之后对不同处理温度下的熔盐进行了电子扫描电镜分析。结果表明, 低熔点四元混合硝酸盐熔点和初晶点以及分解温度, 凝结温度在不同处理温度下发生变化。整体而言随着处理温度的升高, 熔盐熔点和初晶点以及分解温度也随之提高。结合扫描电镜及能谱仪可以得出, 低熔点四元硝酸盐表面漂浮物不是简单的随机污染物, 而更可能是体系内部无机组分富集、迁移、析出或剥离形成的表面副产物。

**关键词:** 太阳能热发电; 熔融盐; 低熔点; 热物性

插图 (1 张):

EDS 分层图像 1



第一作者: 阿木古楞, baiamgl@163.com, 熔盐储热材料研发  
通讯作者: 吴玉庭, wuyuting@bjut.edu.cn, 可再生能源利用  
通讯地址: 北京市朝阳区平乐园 100 号北京工业大学 邮编: 100124

# 高熵纳米碳增强固 - 固相变材料用于高效太阳能热储存与利用

朱富霖<sup>1, 2</sup>, 东楠楠<sup>1, 2</sup>, 汪玲玲<sup>1, 2\*</sup>, 王德兵<sup>1, 2\*</sup>, 谢华清<sup>1, 2</sup>, 于伟<sup>1, 2</sup>, 李一凡<sup>1, 2</sup>

1. 上海第二工业大学能源与材料学院, 201209, 上海

2. 上海先进热功能材料工程技术研究中心, 201209, 上海

**摘要:** 相变材料 (PCMs) 在太阳能的捕获与储存方面具有重要应用前景。然而, 传统固 - 液相变材料在太阳能技术中的广泛应用受到其固有缺陷的限制, 例如相分离、泄漏以及光热转换效率低等问题。为克服这些限制, 本文开发了一种由固 - 固相变材料与高熵纳米碳组成的新型复合材料 (SSPCM-H)。该材料以聚乙二醇 (PEG) 构筑用于潜热储存的交联聚合物, 同时引入高熵纳米碳 (HENC) 作为光热纳米材料。交联三维网络增强了分子间作用力, 从而赋予材料优异的结构稳定性。最优的 SSPCM-H 0.2% 复合材料表现出高达 89.7% 的光热转换效率, 同时具有 149.5 J/g 的熔融焓。这表明该材料在热能储存和热电转换领域具有开发更高效、更具适应性的清洁能源解决方案的潜力。

**关键词:** 太阳能热利用; 固 - 固相变材料; 高熵纳米碳; 光热转换; 热能储存; 热电转换

插图 (1 张):

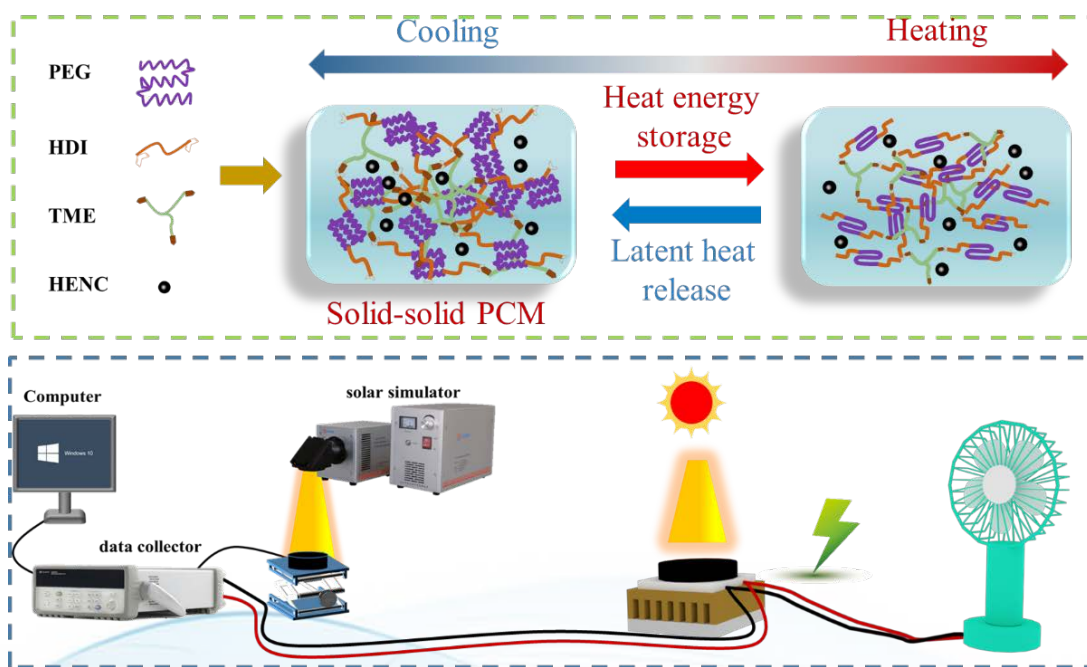


图 1 高熵纳米碳增强固 - 固相变材料用于太阳能热储存与热电转换示意图

第一作者: 朱富霖, 邮箱: 20251518220@sspu.edu.cn, 研究方向: 相变储热材料、太阳能热利用

通讯作者: 汪玲玲, llwang@sspu.edu.cn, 研究方向: 先进热功能材料、太阳能热利用; 王德兵, dbwang@sspu.edu.cn,

研究方向: 先进热功能材料、热能储存与利用

通讯地址: 上海市浦东新区金海路 2360 号上海第二工业大学能源与材料学院 邮编: 201209

# 高稳定性钙基热化学储能材料的构筑与调控

雷煜航<sup>1</sup>, 方嘉宾<sup>1\*</sup>, 魏进家<sup>1</sup>

西安交通大学化学工程与技术学院, 710049, 西安

**摘要:** CaO/CaCO<sub>2</sub> 热化学储能材料因其储能密度高、成本低等优点, 在太阳能光热发电及跨季节储能领域受到广泛关注。然而, 循环过程中 CaO 材料易发生烧结与孔结构坍塌, 导致反应活性衰减和储能性能下降。为提升钙基热化学储能材料的循环稳定性, 本研究以硝酸钙为钙源, 采用溶胶-凝胶法制备 Mn、Zr 共掺杂高稳定性钙基热化学储能材料, 建立制备高性能储能材料的方法体系。通过检测表征与循环性能测试, 分析了 Mn、Zr 掺杂对材料微观结构、抗烧结性能及储热性能的影响。结果表明, Mn 与 Zr 的协同掺杂有效抑制 CaO 颗粒高温烧结, 优化材料孔结构并提升了 CO<sub>2</sub> 扩散与反应动力学性能。载能体储能密度可达到 1650 kJ/kg, 在 100 次储热-释热循环过程中未出现明显性能衰减, 表现出优异的循环稳定性与热化学反应可逆性。本研究有望为高稳定性钙基热化学储能材料的开发及热化学储能技术的工程化应用提供理论与技术参考。

**关键词:** 热化学储能; 钙基储能材料; 抗烧结性能; 溶胶-凝胶法

插图 (1 张):



# 机械性能显著提升的 NaCl-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 共晶盐高温相变大胶囊

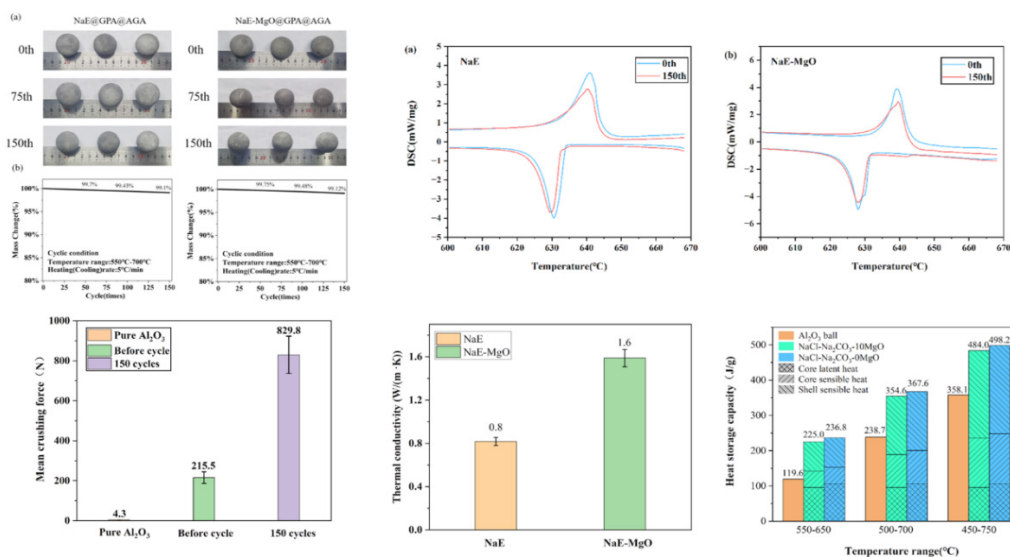
杨晓焯<sup>1</sup>, 盛楠<sup>1</sup>, 朱春宇<sup>1\*</sup>

1. 中国矿业大学低碳能源与动力工程学院, 221116, 徐州

**摘要:** 熔盐因其低成本和高相变焓, 被视为太阳能热利用系统中极具前景的高温相变储热材料。然而, 其在实际太阳能热发电等高温应用场景中仍面临热导率低、腐蚀性强及封装结构机械强度不足等挑战。本研究针对上述问题, 以 NaCl-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 共晶盐为相变材料, 制备了一种适用于太阳能热利用系统的双壳层大胶囊 (NaE-MgO@GPA@AGA)。通过引入玻璃料作为烧结助剂, 显著改善了胶囊的机械性能。该相变胶囊的抗压强度高达 829.8 N, 是未改性胶囊的 193 倍。机理分析表明, 玻璃料的添加有效促进了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷的致密化烧结过程, 从而赋予陶瓷壳体优异的机械强度。在 450–750 °C (典型的太阳能热利用工作温度范围) 下, 该大胶囊的储热密度达到 484.0 J/g, 并在长期热循环后保持稳定的热性能。本研究为开发面向高温太阳能热利用系统的高性能、高可靠性相变大胶囊储热材料提供了有价值的实验依据和设计思路。

**关键词:** 共晶盐; 相变材料; 热能储存; 热管理

**插图:**



第一作者: 杨晓焯, 15731262204@163.com, 熔融盐相变储热  
 通讯作者: 朱春宇, zcyls@cumt.edu.cn, 高温储热技术  
 通讯地址: 中国矿业大学低碳能源与动力工程学院 邮编: 221116

# 构建仿木结构的生物质气凝胶用于高效驱动的太阳能界面蒸发器：实现海水淡化与水质净化

王以涛<sup>1</sup>，刘宛翔<sup>1</sup>，邴乃慈<sup>1,2,3\*</sup>，于伟<sup>1,2,3</sup>

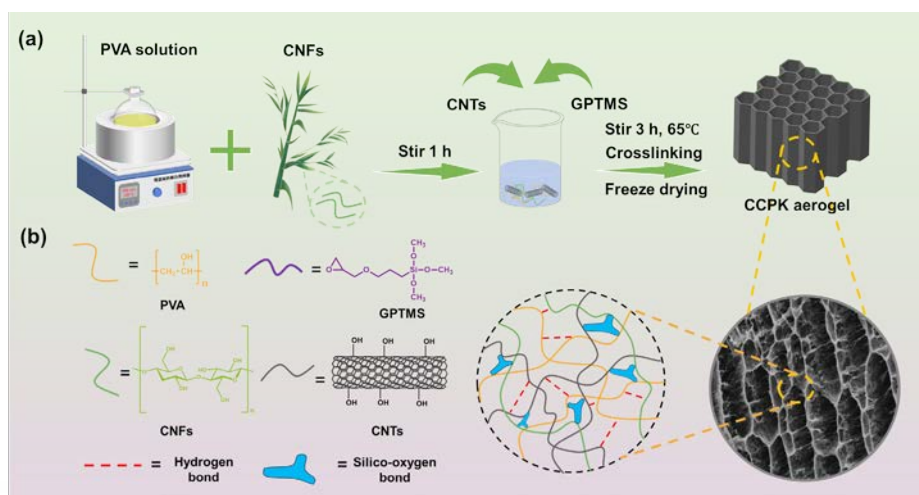
1. 上海第二工业大学能源与材料学院，上海市 浦东新区 201209

2. 上海市先进热功能材料工程研究中心，上海热物性大数据专业技术平台，上海市 浦东新区 201209

3. 可再生能源材料先进技术与制备教育部重点实验室，上海市 浦东新区 201209

**摘要：**针对全球淡水资源短缺及传统蒸发技术热损失严重等挑战，本研究受天然木材蒸腾过程启发，通过一锅缩合结合冰模板诱导生长的协同策略，成功制备了具有三维垂直定向多孔结构的纳米纤维素（CNFs）/聚乙烯醇（PVA）/碳纳米管（CNTs）复合生物质气凝胶（CCPK）。利用硅烷交联剂 GPTMS 构建的多级网络结构，显著增强了气凝胶的机械强度与结构稳定性。该“仿木结构”气凝胶具有 89.17% 的超高孔隙率和各向异性的垂直微通道，不仅实现了 96.44% 的高效广谱光吸收，还通过毛细作用保障了水分的快速输送与热量的局域化管理。实验结果表明，在一个太阳光照下，CCPK-1 蒸发器的蒸发速率达到  $1.78\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，光热转换效率高达 90.43%。得益于垂直孔道产生的盐浓度梯度与化学势差驱动，该系统展现出卓越的抗盐结晶性能，在 20 wt% 高浓度盐水中仍能保持  $1.33\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  的稳定蒸发。此外，该蒸发器在实际海水淡化及工业废水处理中表现优异：对真实海水（渤海）的平均蒸发速率稳定在 1.51，且对四种主要海盐离子的去除率及对重金属离子和有机污染物的净化率均高达 98% 以上，水质符合 WHO 饮用水标准。本研究为开发高性能、低成本且可持续的太阳能界面蒸发系统提供了新的材料设计策略与理论依据。

**关键词：**太阳能界面蒸发；生物质气凝胶；仿木结构；海水淡化；水质净化；抗盐性



第一作者：王以涛，1599271833@qq.com，先进材料  
 通讯作者：邴乃慈，ncbing@sspu.edu.cn，热功能材料  
 通讯地址：上海第二工业大学能源与材料学院，邮编：201209

# 基于密度泛函理论的热化学储能的机理解析与材料设计：进展与展望

董佳尧<sup>1</sup>, 陈瑞华<sup>1\*</sup>, 赵洁<sup>2</sup>, 许伟聪<sup>1</sup>, 周劲松<sup>3</sup>, 肖刚<sup>3</sup>, 赵力<sup>1\*</sup>

天津大学内燃机国家重点实验室, 300350, 天津

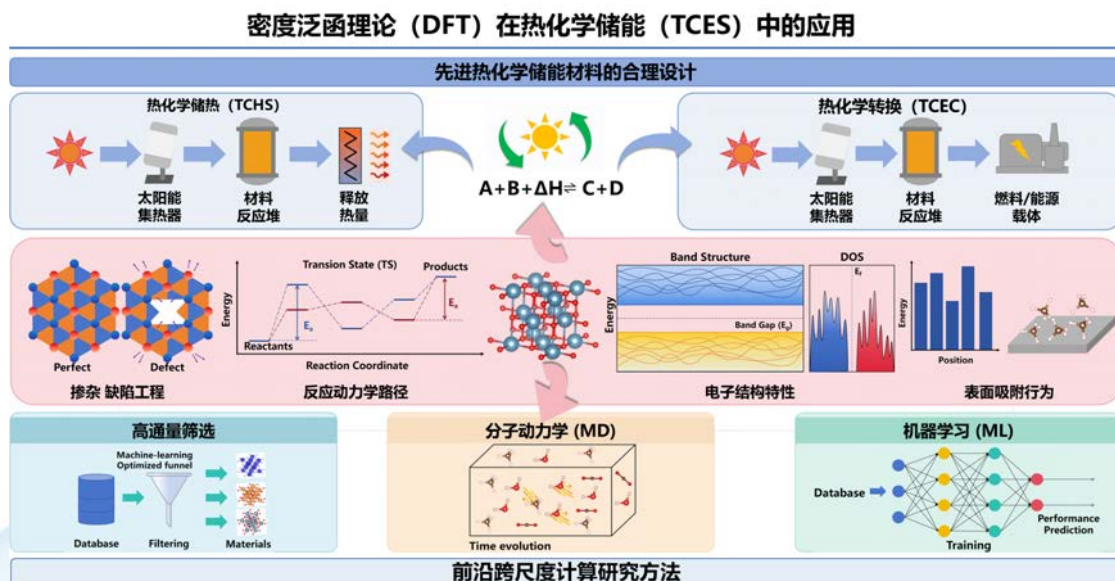
新加坡国立大学化学与生物分子工程系, 119260, 新加坡

浙江大学清洁能源利用国家重点实验室, 300350, 杭州

**摘要:** 热化学储能 (TCES), 包括热化学热能存储 (TCHS) 和热化学能量转换 (TCEC), 是一种极具潜力的高效大规模储能技术, 因其高能量密度和长期存储能力而备受青睐。由于实验条件苛刻且成本高昂, 密度泛函理论 (DFT) 已成为阐明热化学反应机制和优化材料性能的强大工具。尽管已得到广泛应用, 但缺乏将基础理论与实际材料瓶颈相连接的系统框架, 阻碍了 DFT 在 TCES 研究中的充分潜力发挥。本综述旨在填补这一空白, 全面阐述 DFT 原理和常见的交换关联函数, 同时强调其在研究热化学稳定性、吸附行为、动力学途径和电子结构等方面的作用。在此基础上, 分别总结了 TCHS 和 TCEC 中 DFT 的最新进展, 展示了其在揭示电子结构、反应路径和宏观性能方面的有效性, 从而揭示了掺杂、缺陷调控和界面设计的机制。此外, 为解决 DFT 的固有局限性, 特别是在现实高温条件和工程规模下的动态演变描述方面的问题, 建议将 DFT 与温度校正、分子动力学、机器学习和高通量筛选技术相结合。通过提供理论视角, 本综述有望加速下一代热化学能量存储系统中先进材料的合理设计和精确调控。

**关键词:** 密度泛函理论; 热化学储能材料; 热化学能量转换; 热化学储热

插图:



第一作者: 董佳尧, jydong12138@tju.edu.cn, 基于 DFT 模拟方法的热化学储热研究

通讯作者: 陈瑞华, chenrh@tju.edu.cn, 电化学热回收技术、电化学热机

通讯作者: 赵力, jons@tju.edu.cn, 太阳能高效热利用的相关技术研究

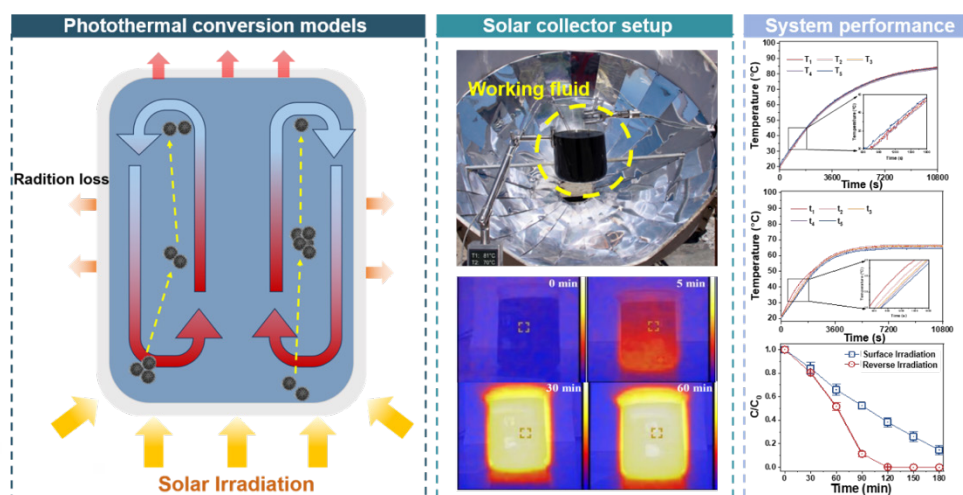
通讯地址: 天津市津南区雅观路 135 号 邮编: 300354

# 基于 Rayleigh-Bénard 对流逆向光照纳米流体体系的热质传递强化及其在过硫酸盐活化中的应用

王景晨<sup>1</sup>, 王德兵<sup>1\*</sup>, 汪玲玲<sup>1</sup>, 谢华清<sup>1</sup>, 于伟<sup>1</sup>  
1. 上海第二工业大学能源与材料学院, 201209, 上海

**摘要:** 太阳能光热活化过硫酸盐高级氧化工艺在抗生素废水处理领域极具前景, 但传统的顶部光照模式受限于流体内部传热不均。本研究制备了磁性海胆状  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}$  纳米材料, 并构建了逆向光照纳米流体直接式太阳能吸收器 (RI-NB-DASC)。该系统通过逆向光照驱动  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}$  纳米颗粒产生瑞利 - 贝纳德 (Rayleigh-Bénard) 对流, 显著增强了流体内部的热传递, 减少了纳米颗粒的团聚并高效活化过硫酸盐。结果表明: 与传统顶部光照相比, 在 3 小时光照下, RI-NB-DASC 体系的平衡温度从  $61^\circ\text{C}$  显著提升至  $81^\circ\text{C}$ , 光热转换效率由 33% 大幅提高至约 70%; 同时, 四环素降解的伪一级反应速率常数 ( $k_{\text{obs}}$ ) 从  $0.007 \text{ min}^{-1}$  跃升至  $0.035 \text{ min}^{-1}$ 。此外, 海胆状  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}$  不仅增强了光散射和热辐射, 也展现出优异的稳定性和磁回收性能, 在经过五次重复利用试验后, 体系的 COD 去除率依然高达 91%, 表现出极佳的应用潜力。在实际应用中, 逆向光照可通过镜面反射低成本实现, 无需额外能源消耗。本研究为太阳能高级氧化技术的实际工程化应用提供了一种高效、稳定且经济可行的解决方案。

**关键词:** 直接式太阳能吸收器; Rayleigh-Bénard 对流; 水处理; 高级氧化工艺  
插图 (1 张):



第一作者: 王景晨, 20241518110@sspu.edu.cn, 新型环境功能材料开发及水处理性能应用  
通讯作者: 王德兵, dbwang@sspu.edu.cn, 太阳能热利用与存储, 污水处理与资源化利用  
通讯地址: 上海市浦东新区上海第二工业大学 邮编: 201209

# 基于吸附除湿与光热再生的 Al-Fum/MXene 复合材料用于聚光镜防霜

汤雪萍<sup>1</sup>, 王云峰<sup>1,\*</sup>, 李明<sup>1</sup>, 赵晓辉<sup>2</sup>

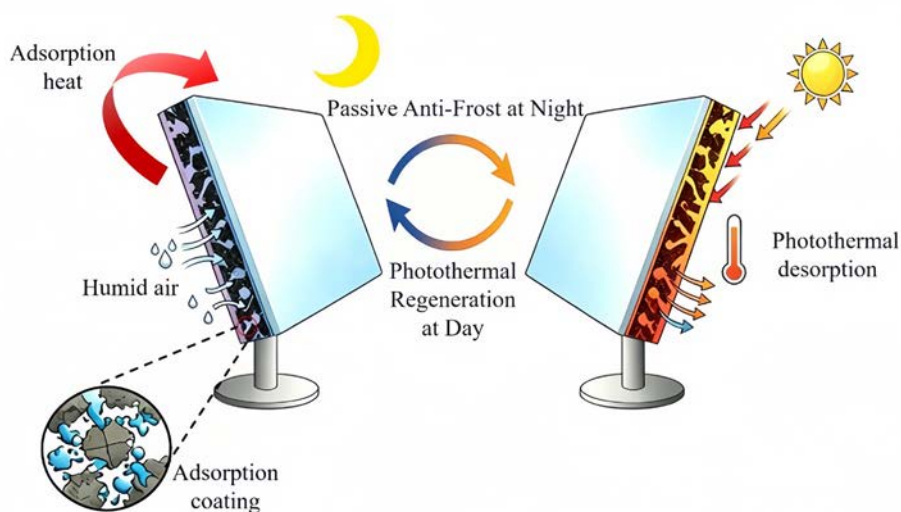
1. 云南师范大学能源与环境科学学院, 650500, 昆明

2. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 710075, 西安

**摘要:** 塔式聚光镜在秋冬季夜间低温高湿的环境下, 镜面极易发生结露与结霜, 导致光学反射率显著下降, 进而削弱光学反射率并导致主动除霜能耗。针对传统电加热除霜能耗高、被动疏水/超疏水策略耐久性不足等问题, 本文提出一种基于吸附除湿与光热再生耦合机制的防霜方法。在反光镜背面构筑 Al-Fum/MXene 复合功能涂层, 其中 Al-Fum 作为吸湿主体, 通过丰富微孔结构捕获镜面附近水汽, 降低局部水蒸气分压; MXene 作为光热转换组分, 依靠其高效光热效应实现太阳驱动快速升温, 促进水分脱附, 建立“夜间被动防霜 - 白天光热再生”的循环模式。复合材料在 25 °C、90% RH 条件下的饱和吸附量可达 0.71 g/g, 且在 115 min 内达到吸附平衡, 表现出较强的水蒸气捕获能力。在 1 kW/m<sup>2</sup> 太阳辐照下, 复合材料表面温度可在 15 min 内由 14.8 °C 升高至 70.7 °C, 同期释放 88.05% 的水分。连续 20 次的吸附 - 脱附循环测试表明, 该复合吸附剂的容量保留率高达 96%, 证实了其出色的结构稳定性。研究表明, Al-Fum/MXene 复合涂层能够为塔式聚光镜提供低能耗、可持续的防霜解决方案, 并为吸附材料在太阳能热发电场景中的热湿调控应用提供了新的设计思路。

**关键词:** 太阳能热发电; 镜面防霜; 复合材料; 吸附除湿; 光热再生

插图 (1 张):



第一作者: 汤雪萍, 2018343230@qq.com, 吸附材料  
通讯作者: 王云峰, wangyf@ynnu.edu.cn, 太阳能热利用  
通讯地址: 云南省昆明市呈贡区聚贤街 768 号, 邮编: 650500

# 面向高温储热的铝基相变宏胶囊制备与性能研究

唐仁旭<sup>1</sup>, 盛楠<sup>1</sup>, 朱春宇<sup>1\*</sup>

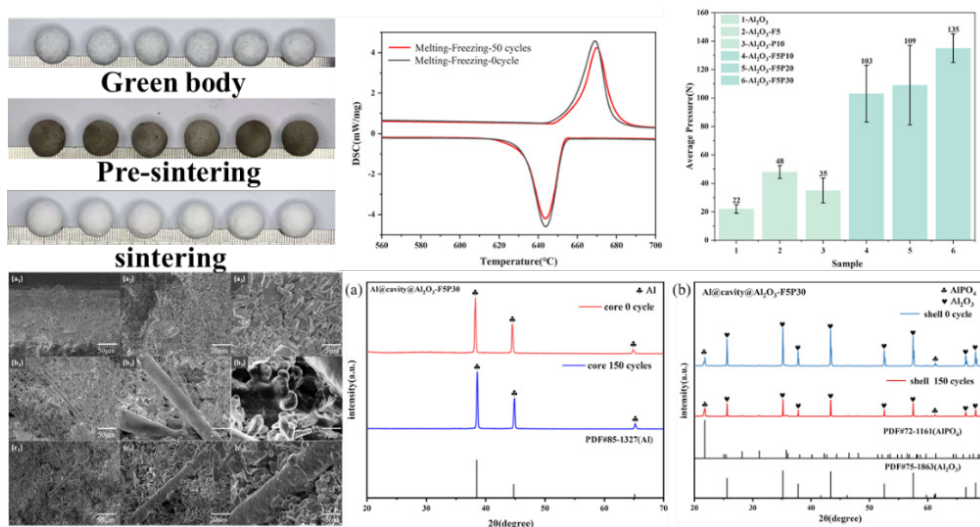
1.

中国矿业大学低碳能源与动力工程学院, 221116, 徐州

**摘要:** 为满足未来太阳能光热发电 (CSP) 系统对高温潜热储热材料高能量密度与高服役稳定性的需求, 针对传统相变储热胶囊单组分  $\text{Al}_2\text{O}_3$  外壳抗压强度不足以及宏胶囊规模化制备效率低的问题, 本研究采用添加  $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$  烧结助剂和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纤维增强的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷作为胶囊外壳材料, 并结合糖衣机实现了相变储热宏胶囊的高效制备。研究表明,  $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$  的引入有效促进了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  外壳的烧结过程, 显著提高了陶瓷外壳的致密性; 同时,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纤维的加入增强了外壳韧性, 抑制了烧结过程中裂纹的产生。优化后的储热胶囊表现出优异的力学性能, 其平均抗压强度达到 135 N, 约为未改性胶囊的 6 倍。经过空气气氛下 150 次高温热循环后, 胶囊仍保持稳定的相变焓值, 展现出良好的热循环稳定性与结构可靠性。在 600–700 °C 工作温区内, 胶囊的质量储热密度和体积储热密度分别达到 351.37 J/g 和 964.47 J/cm<sup>3</sup>, 表现出较高的高温热能存储能力。该研究为太阳能光热发电系统中高温金属相变储热材料的规模化应用提供了一种兼具高机械稳定性与高效批量化制备能力的新策略, 表明其在未来高温热能储存与太阳能热电转换技术的发展潜力。

**关键词:** 相变材料; 热能储存; 高温储热宏胶囊

插图 (1 张):



第一作者: 唐仁旭, TS24130030A31@ cumt.edu.cn, 相变储热

通讯作者: 盛楠, snym@cumt.edu.cn, 高温储热技术

通讯地址: 中国矿业大学低碳能源与动力工程学院 邮编: 221116

# 面向热化学储能与空气分离的 $\text{Ca}_2\text{AlMnO}_{5+6}$ 球形颗粒制备与性能研究

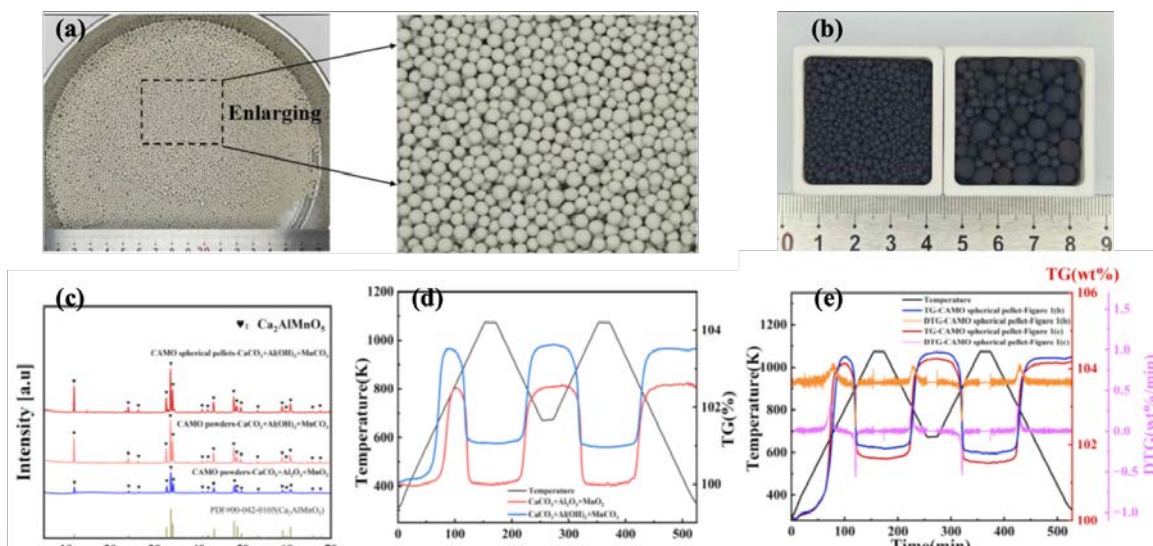
李生新<sup>1</sup>, 王业库<sup>1</sup>, 盛楠<sup>1</sup>, 朱春宇<sup>1\*</sup>

1. 中国矿业大学低碳能源与动力工程学院, 221116, 徐州

**摘要:** 氧化还原型金属氧化物  $\text{Ca}_2\text{AlMnO}_{5+6}$  (CAMO) 具有优异的储氧与储热性能。然而, 其广泛应用受到原材料成本较高以及制备工艺复杂的限制。本研究采用较低成本的  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$  和  $\text{MnCO}_3$  作为原料, 通过固相反应法实现了 CAMO 的经济化制备。此外, 开发并优化了一种连续化成球工艺, 为未来工业化生产提供了可行途径。所得 CAMO 球形颗粒在 723-923 K 温度范围内表现出良好的氧化还原活性, 氧储量达到  $1686.7 \mu\text{mol-O/g}$ , 质量储热密度达到  $321.06 \text{ J/g}$ 。同时, CAMO 球粒具有优异的抗压性能, 其最大抗压载荷高达  $512.7 \text{ N}$ 。氧化反应过程受三维 Yonder 方程模型和指数规律模型共同控制, 表观活化能为  $196.22 \text{ kJ/mol}$ 。经过 100 次循环后, 球粒性能衰减极小, 结构完整性与尺寸稳定性均得到良好保持。研究结果表明, 采用本研究开发并优化的连续化成球工艺制备的 CAMO 热化学球粒兼具较强反应活性和较高机械强度, 可直接应用于聚光太阳能 (CSP) 反应器, 在实现空气分离的同时进行热能储存, 从而提高整体能源利用效率, 并为碳中和技术的发展提供支撑。

**关键词:** 热化学储热; 热能储存; 氧载体; 热管理

**插图:**



第一作者: 李生新, lsx788200@cumt.edu.cn, 热化学储热  
 通讯作者: 朱春宇, zcyls@cumt.edu.cn, 高温储热技术  
 通讯地址: 中国矿业大学低碳能源与动力工程学院 邮编: 221116

# 面向中低温太阳能热利用的磷石膏基掺杂体系热力学调控与传质强化研究

牟飞<sup>1</sup>, 罗帅<sup>1</sup>, 付萌<sup>1</sup>, 杨光<sup>1</sup>, 唐旭元<sup>1</sup>, 程晓敏<sup>1\*</sup>, 李元元<sup>1</sup>

1. 武汉理工大学材料科学与工程学院, 430070, 武汉

**摘要:** 针对中低温太阳能热利用系统 (80 至 120 °C) 与传统硫酸钙热化学储热材料 (纯态脱水峰值温度约 140 °C) 之间存在的热力学失配问题, 本研究提出以大宗固废磷石膏 (PG) 为基体, 通过低液固比 (0.3) 的非平衡态水化结晶工艺, 制备了锌掺杂二水硫酸钙 / 膨胀石墨复合储热材料。实验表征结合密度泛函理论 (DFT) 计算表明,  $Zn^{2+}$  的引入在微观层面形成了具有较强局域刚性的 Zn-O 杂化配位。由于非平衡态极速结晶显著限制了晶格的均匀弹性弛豫, 这种局域应力畸变被有效“冻结”, 从而在宏观晶体内部诱发出高密度的纳米空洞与面缺陷。这种微观缺陷网络的形成不仅在热力学上弱化了体相水分子的氢键网络结合能, 同时显著降低了水分子脱附与内部迁移的阻力。宏观热物理测试结果显示, 该复合体系的表现脱水峰值温度大幅降低至 73.7 至 97 °C, 实现了与低品位太阳能热源的温区匹配。在引入膨胀石墨构建连续导热骨架后, 复合材料在历经 30 次液相水化 - 气相脱水循环测试后, 仍保持 434.1 J/g 的储能密度。本研究为大宗固废基低品位热化学储热材料的设计与系统应用提供了实验支撑与理论依据。

**关键词:** 磷石膏; 热化学储热; 非平衡态结晶; 缺陷工程; 中低温太阳能

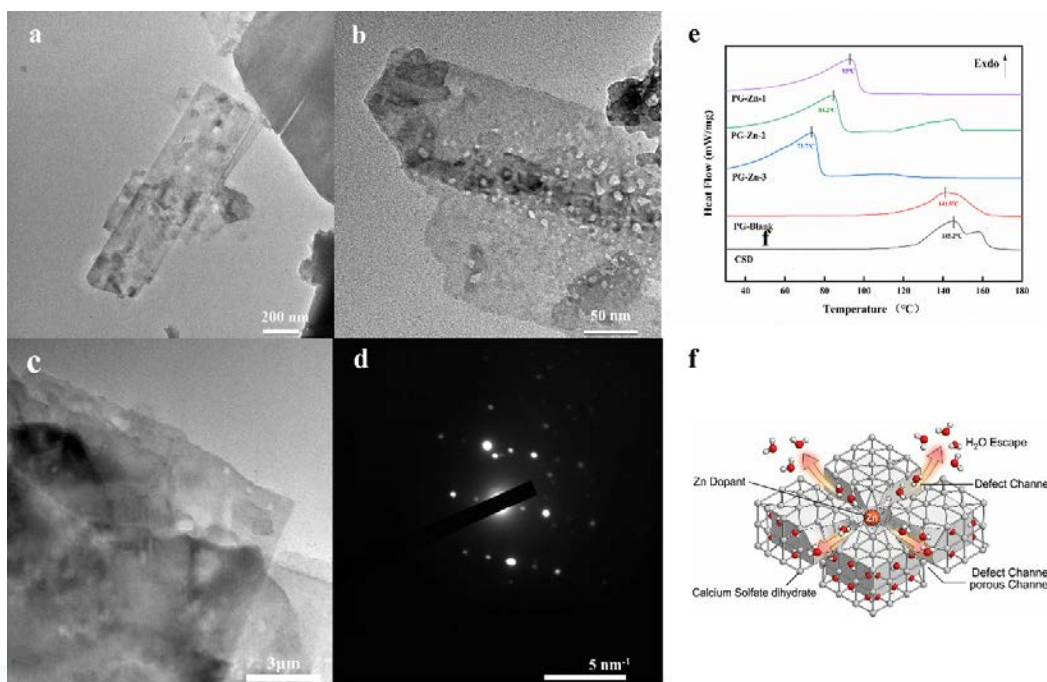


图 1 (a-c) 磷石膏经过  $Zn^{2+}$  掺杂后的二水硫酸钙晶体 TEM 图像;(d)SEAD 图像, (c) 不同比例掺杂后的样品与磷石膏、二水硫酸钙的 DSC 测试结果; (d) 掺杂后样品脱水机理示意图。

第一作者: 牟飞, naluiska@whut.edu.cn, 研究方向: 储热材料

通讯作者: 程晓敏, Chengxm@whut.edu.cn, 研究方向: 热管理一体化材料、光热转化。

通讯地址: 湖北省武汉市洪山区珞狮路 122 号武汉理工大学材料科学与工程学院 邮编: 430070

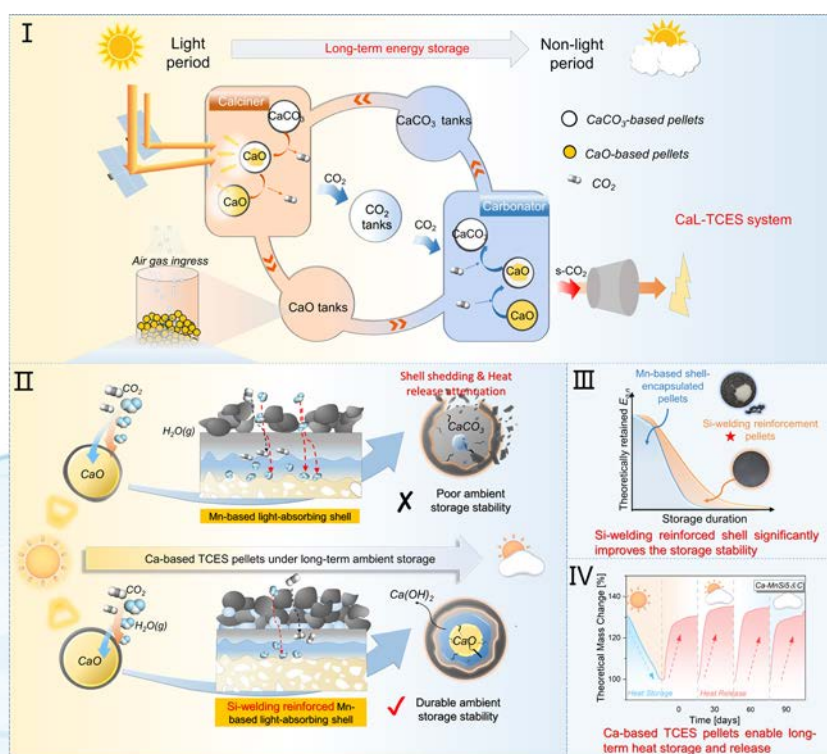
# Si 焊接强化 Mn 基吸光壳层稳定钙基颗粒实现长期环境暴露下的热化学储能

毛吉云, 石祎, 李晓彤, 孙健\*

南京师范大学能源与机械工程学院, 210042, 南京

**摘要:** 太阳辐射在昼夜及季节尺度上的间歇性, 导致聚光太阳能 (CSP) 系统的能源供给具有内在不稳定性, 因此亟需发展长时、跨季节的储能技术。钙基热化学储能 (TCES) 颗粒因其高能量密度而成为应对这一挑战的有前景方案。前期研究通过构建壳核型钙基储热颗粒, 实现了储能密度与吸光性能的协同提升, 但其在真实环境储存条件下的力学与热化学稳定性仍缺乏系统研究。本研究设计并制备了以 Al 稳定的钙基核心为主体、外裹覆 Si 焊接强化 Mn 基壳层的钙基 TCES 颗粒, 并系统研究了其在真实环境条件下的长期储存行为。结果表明, 在长期空气暴露过程中, 水分和  $\text{CO}_2$  逐步扩散进入颗粒内部, 活性  $\text{CaO}$  优先转化为  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 并进一步转化为  $\text{CaCO}_3$ , 导致颗粒力学性能与储热能力同步衰减。相比于纯 Mn 基壳层, Si 焊接强化 Mn 基壳层显著提升了材料的储存稳定性: 在 90 天储存后, 其理论储能密度保持在  $0.91 \text{ MJ/kg}$  (约为前者 7.6 倍), 壳层脱落率仅为 10.25% (不足前者五分之一)。性能提升主要归因于 Si 掺杂与石墨分散的协同作用, 在吸光壳层中形成均匀分布的低温共晶相, 从而强化壳体结构、增强壳核界面结合, 并有效抑制水分和  $\text{CO}_2$  的侵入。此外, 长期储存后的颗粒可通过再煅烧实现完全再生, 其储能密度甚至可恢复并超过初始水平。该协同强化策略为推动钙循环热化学储能体系在跨季节储能中的实际应用提供了重要支撑。

**关键词:** 热化学储能; 钙基储热材料; 硅焊接强化; 环境储存稳定性



# 柔性异质结构 $\text{TiO}_2@$ 碳毡用于高效潜热回收的先进多级太阳能驱动膜蒸馏系统

王奕阳<sup>1</sup>, 石雷\*, 孙志强\*  
中南大学, 410083, 湖南

**摘要:** 太阳能驱动膜蒸馏技术 (SDMD) 在可持续淡水生产和海水淡化领域具有重要应用潜力, 但其实际应用仍受到热能利用不足、单位面积产水率较低以及系统结构集成度有限等问题的制约。针对上述问题, 本文构建了一种集成化、柔性且高效的多级太阳能驱动膜蒸馏装置, 并采用二氧化钛修饰碳毡 ( $\text{TiO}_2@$ CF) 作为光热层。通过酸活化与溶胶-凝胶沉积处理, 所制备的  $\text{TiO}_2@$ CF 表现出更高的表面粗糙度、优异的亲水润湿性以及 200–2600 nm 范围内的宽谱光吸收能力, 有利于增强太阳能捕获、水运输和界面蒸发过程。通过串联多个蒸发-冷凝单元, 该装置实现了潜热的高效回收与级联利用, 使蒸发效率由单级装置的 66.7% 提高至四级装置的 75.7%。在 1 sun 光照条件下, 优化后的五级装置在室内测试中实现了  $3.97 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  的集水率, 冷凝液回收率达到 74.94%。同时, 该柔性系统在 0.5–3 sun 不同光照强度下表现出良好的适应性, 并在最高 20 wt% NaCl 的高盐度环境中仍能保持稳定淡水产出。真实海水长期连续运行测试表明, 装置性能未出现明显衰减, 体现出良好的运行稳定性和抗盐结晶潜力。本研究通过功能光热材料设计与多级热管理结构耦合, 为高效太阳能海水淡化和浓盐水资源化利用提供了一种可扩展的技术思路。

**关键词:** 太阳能驱动海水淡化技术; 光热膜蒸馏; 多级蒸发; 潜热回收; 海水淡化  
插图 (1 张):

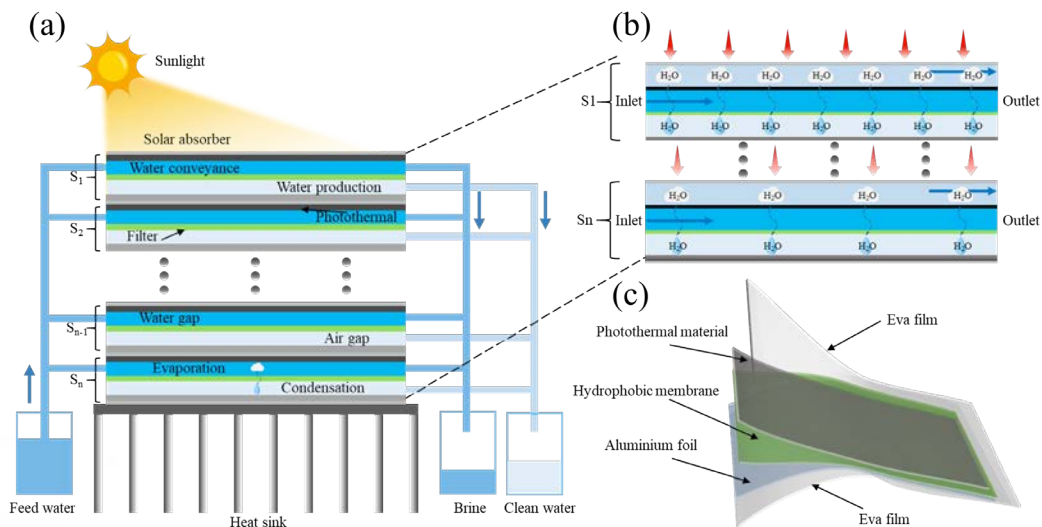
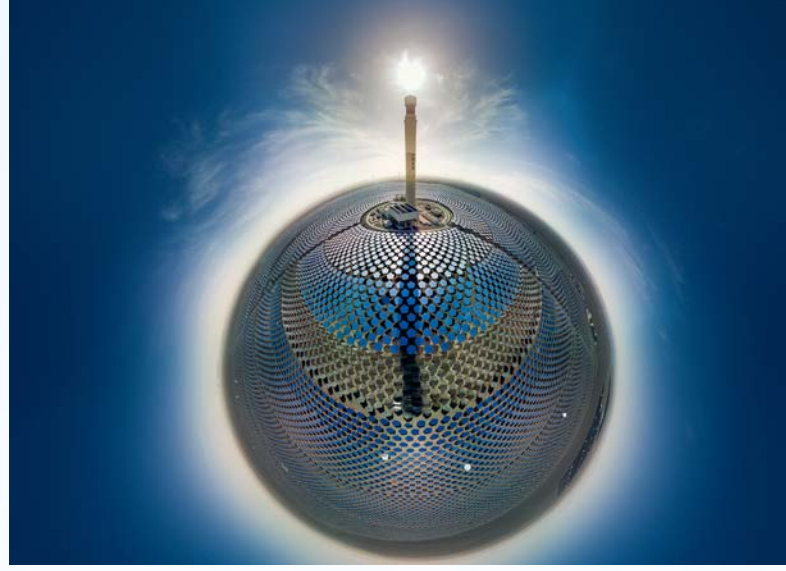


图 1 多级光热膜蒸馏器的结构与工作原理。(a) 多级光热膜蒸馏装置示意图;  
(b) 工作原理示意图; (c) 结构组成示意图。

第一作者: 王奕阳, 18952458453@163.com, 太阳能光热利用  
通讯作者: 石雷, shi.lei@csu.edu.cn, 新能源热管理  
通讯地址: 湖南省长沙市岳麓区中南大学岳麓山校区 邮编: 410083





关注太阳能光热联盟  
微信公众号



关注湖州工学院  
微信公众号



关注绿储科技  
微信公众号

国家太阳能光热产业技术创新战略联盟秘书处

地址：北京市海淀区中关村中国科学院电工研究所北院 313 室

电话：010-82547214 转 801

邮箱：cnste@vip.126.com