

国家重点研发计划—“工程科学与综合交叉”重点专项（项目编号2021YFF0500400）

# 高通量聚光太阳能热化学转化储能理论与方法

汇报人：魏进家（方嘉宾）

牵头单位：西安交通大学

参加单位：福州大学、浙江大学、中国科学院电工研究所、  
北京石油化工学院、中国科学院理化技术研究所

2024年9月

一

**项目背景**

二

发展现状、趋势与挑战

三

关键科学问题

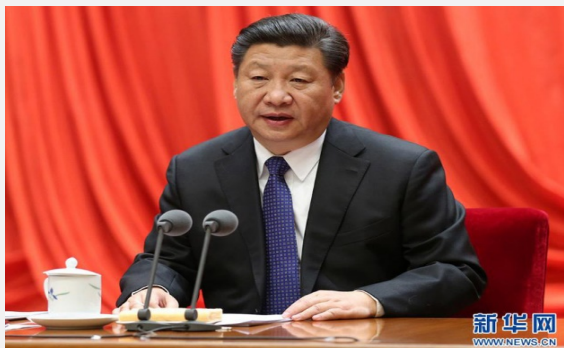
四

研究进展

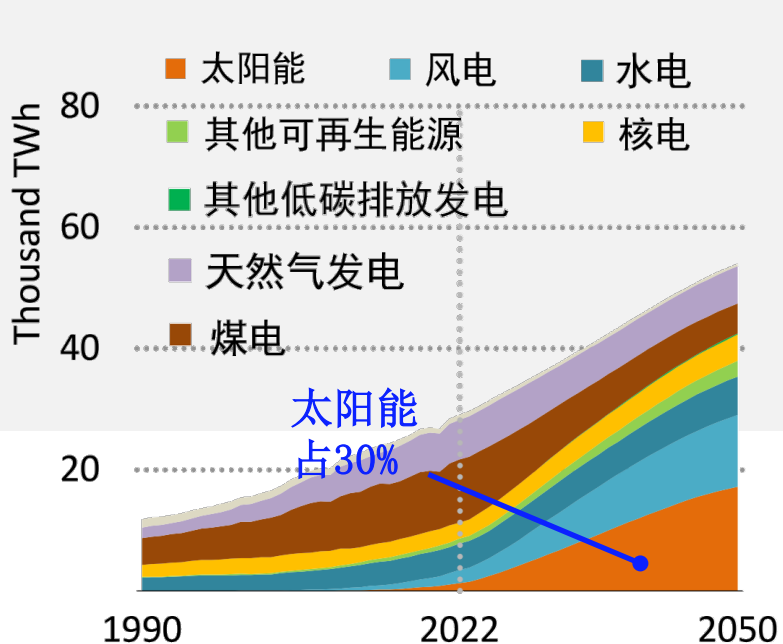
五

下一步工作

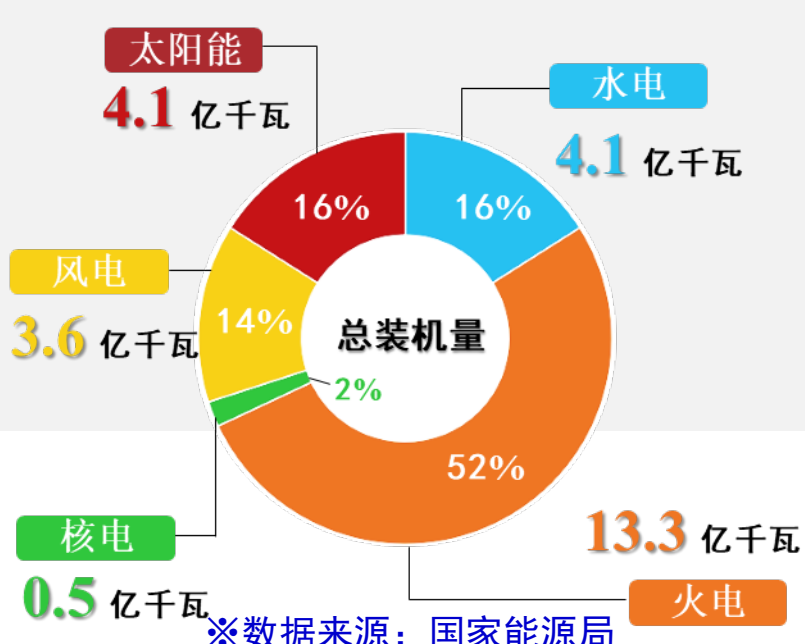
# 1 项目背景



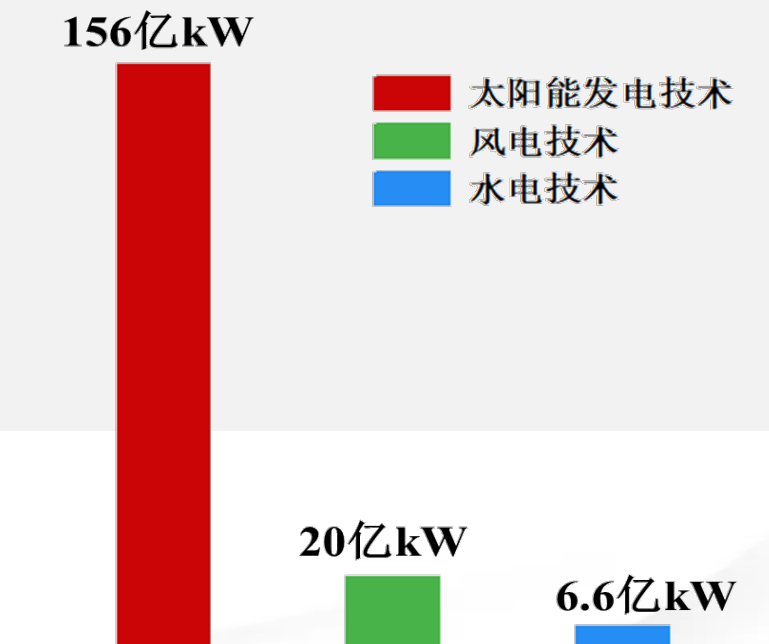
党的二十大报告指出：要完善**能源消耗总量和强度调控**，加快规划建设**新型能源体系**。据国家气象局数据测算，太阳能发电技术可开发装机容量达到**156亿kW**。



全球发电量构成趋势预测 (IEA-2023)



截止2022年太阳能在我国能源电力装机构成



我国新能源发电技术可开发装机容量

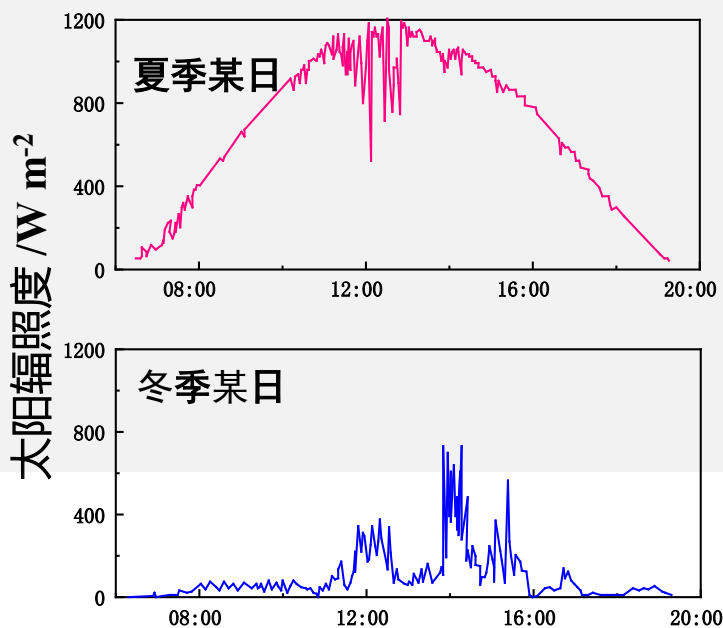
太阳能发电技术必将在新一轮能源技术革命中扮演重要角色

# 1 项目背景

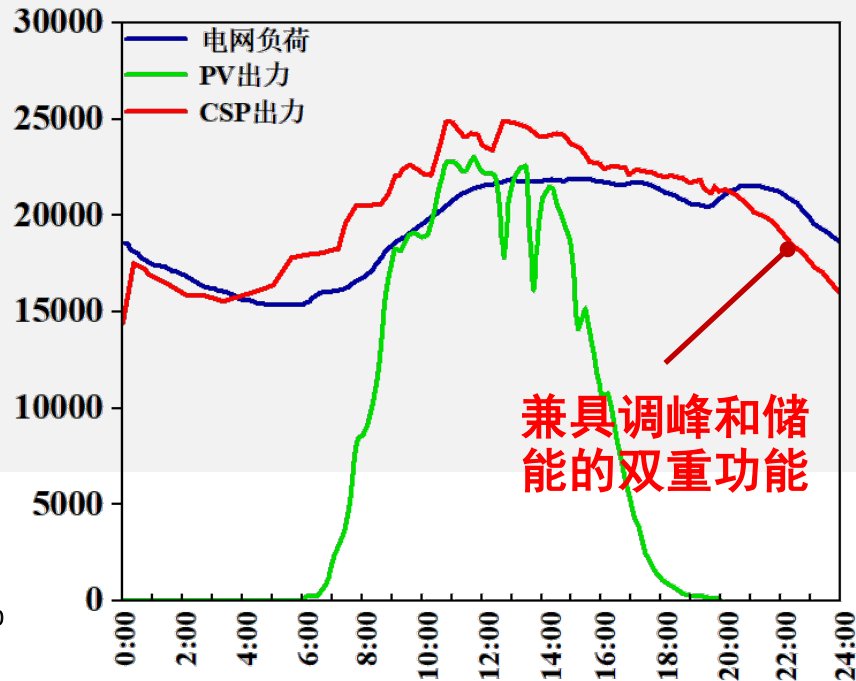
## □ 太阳能热发电（CSP）与光伏发电（PV）对比



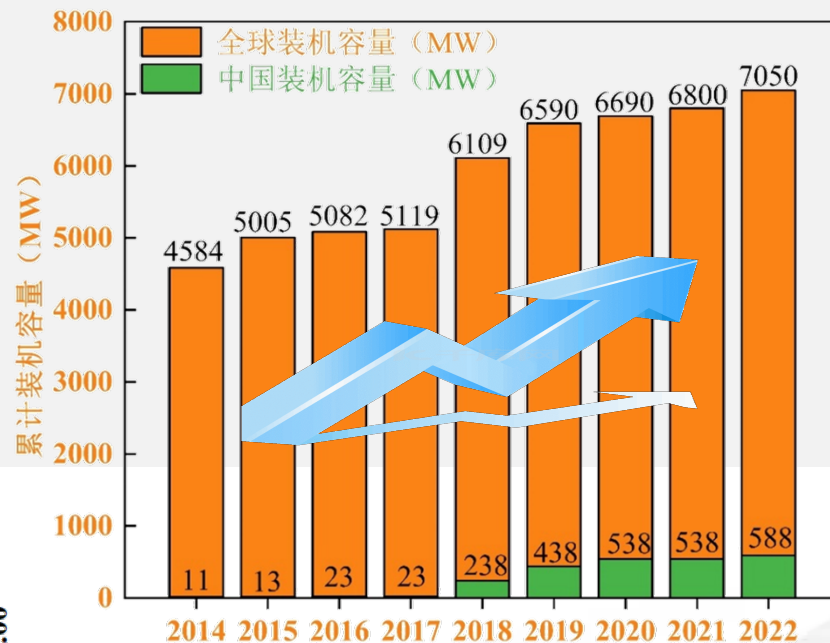
国务院《2030年前碳达峰行动方案》“1+N”政策体系文件均明确提出要**积极发展太阳能光热发电**



太阳能具时空波动性和间歇性



光热出力与光伏出力曲线对比



太阳能热发电装机容量增长迅猛

太阳能热发电是可再生能源系统中最具应用前景的发电技术之一



# 1 项目背景

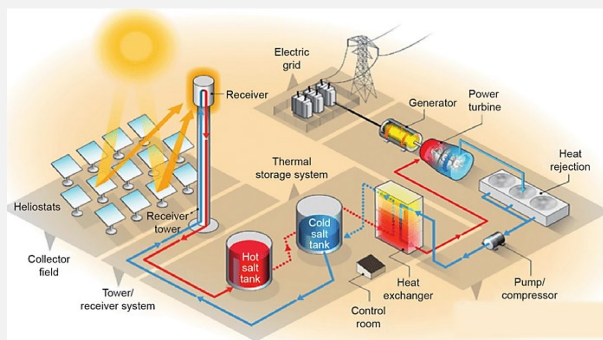
## □ 现有光热储能技术对比

- 光热储能技术在中低温和中高温领域相对成熟，而在**高温领域欠缺**
- **第三代CSP技术**运行温度高达**700°C**以上，亟需与之相匹配的储能技术



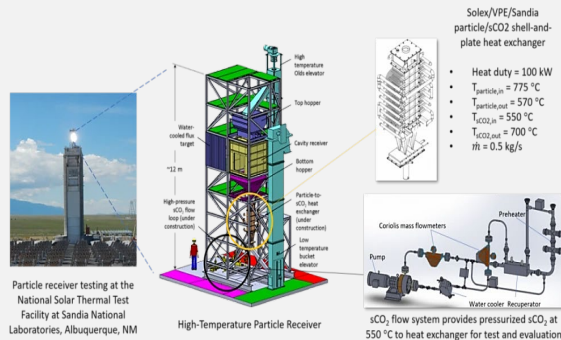
### 石蜡/水体-中低温储能

储能温度 $<200^{\circ}\text{C}$   
工作压力高



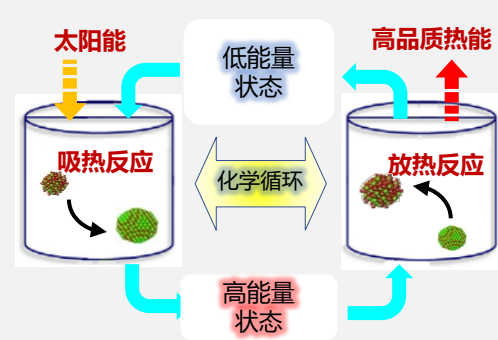
### 熔融盐-中高温储能

储能温度 $260-560^{\circ}\text{C}$   
工作压力低  
循环性能稳定



### 铝土矿颗粒-高温储能

储能温度 $>700^{\circ}\text{C}$   
储能密度低  
传热系数低



### 颗粒-高温储能

储能温度 $>700^{\circ}\text{C}$   
储能密度高  
储能时间长

大规模示范性热化学储能系统的建设上，国内外尚属于空白

一 项目背景

**二 发展现状、趋势与挑战**

三 关键科学问题

四 研究进展

五 下一步工作

# 2.1 发展现状

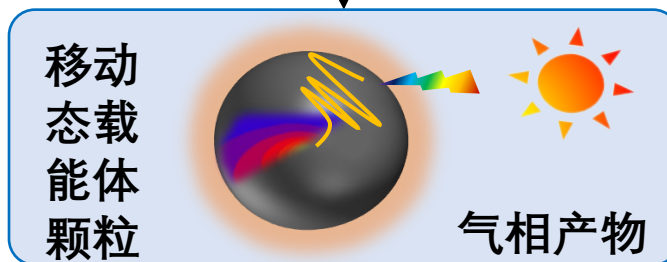
□ 室外非稳定能流密度条件下，**多物理场耦合作用机制**尚不明晰

## 现状1：数学模型层面

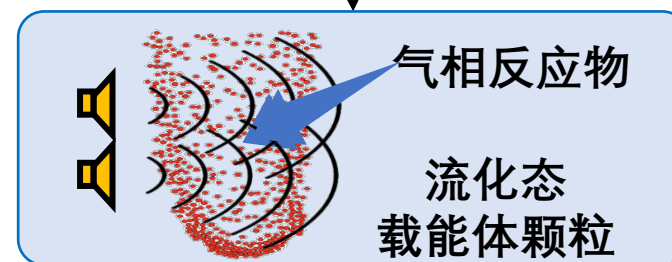
### 多场耦合储能机制

- 德国宇航中心 光-热-流-化多场耦合
- 日本新泻大学 热-流-力-化多场耦合
- 我国(西安交大) 光-热-力-流多场耦合

## 吸热过程非稳态多场耦合 “光-热-力-流”



## 放热过程多尺度多场耦合 “热-力-流-化”

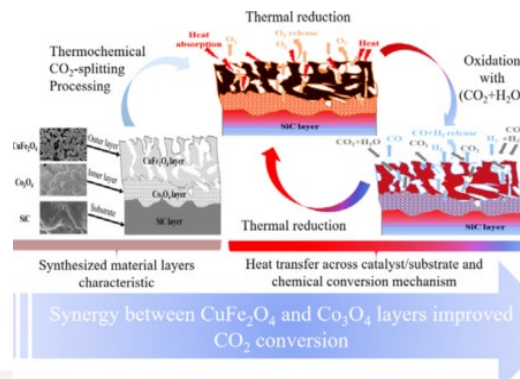


□ 太阳能热化学**载能体**存在吸、放热反应过程中**效率低、易烧结、循环稳定性差**等难题

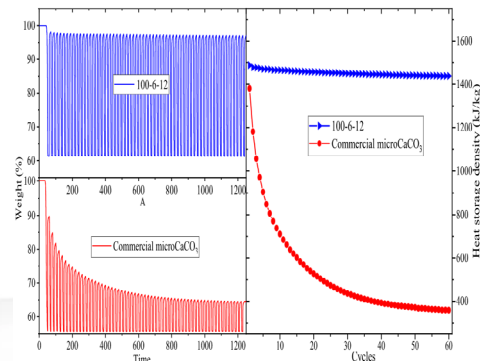
## 现状2：材料层面

### 载能体构筑与制备

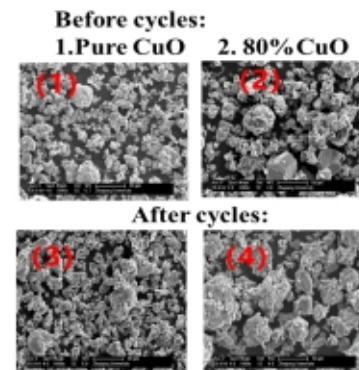
- 德国宇航中心 100次循环稳定后性能下降>15%
- 我国(上海交大) 100次循环稳定后性能下降>10%
- 我国(西安交大) 1000次循环稳定后性能下降<10%
- 我国(西安交大) 福州大学) 2000次循环稳定后性能下降<30%



三层纳米结构氧载体合成方法



共掺杂钙基材料循环性能 多次循环后金属氧化物颗粒形状对比



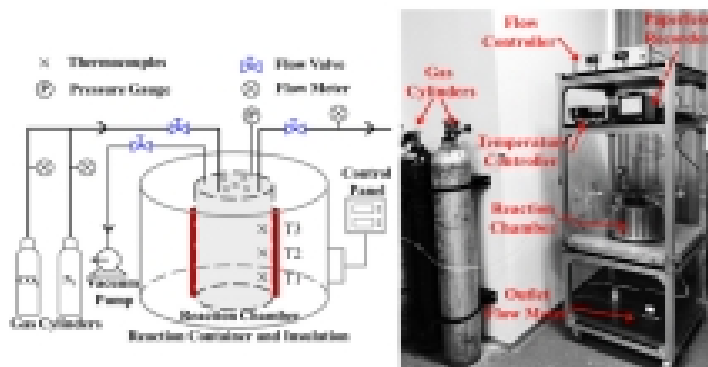
# 2.1 发展现状

☐ 太阳能热化学反应器的研究主要集中在**反应器设计**和**实验室研究**，对反应器**安全性**和**稳定性**研究有限

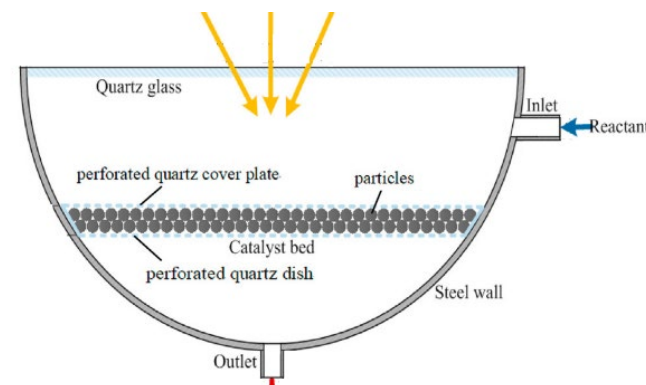
## 现状3：反应器层面

### 太阳能热化学反应单元与调控

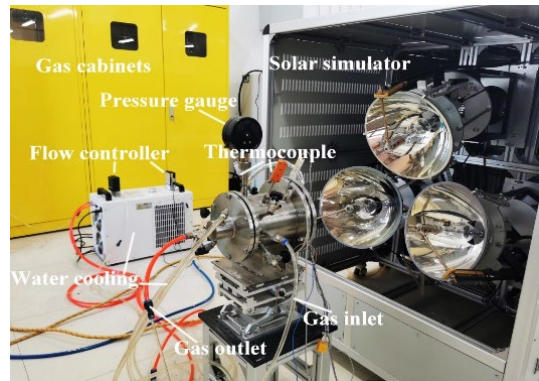
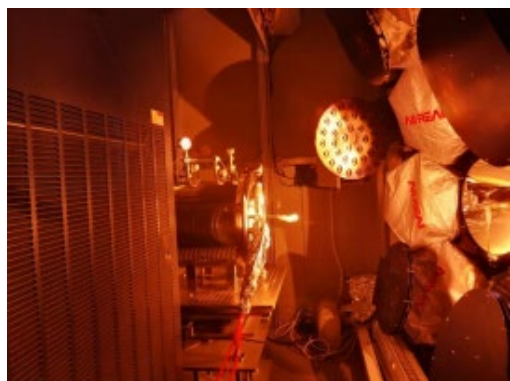
- 瑞典CUT 逆流移动床（非直接阳光）
- 意大利科学院 流化床+声场（非直接阳光）
- 浙江大学 涡旋式移动床（直接阳光）



高温热化学固定床反应器



太阳能热化学腔式反应器



太阳能膜反应器示意图

太阳能高温热化学循环制氢反应器

高通量太阳能热化学还原CO<sub>2</sub>实验装置

涡旋式颗粒移动床

整体上，热化学储能研究尚处于**实验室阶段**，

所得机理与规律**难以**应用于**室外真实气象条件**下高通量聚光太阳能热化学储能过程



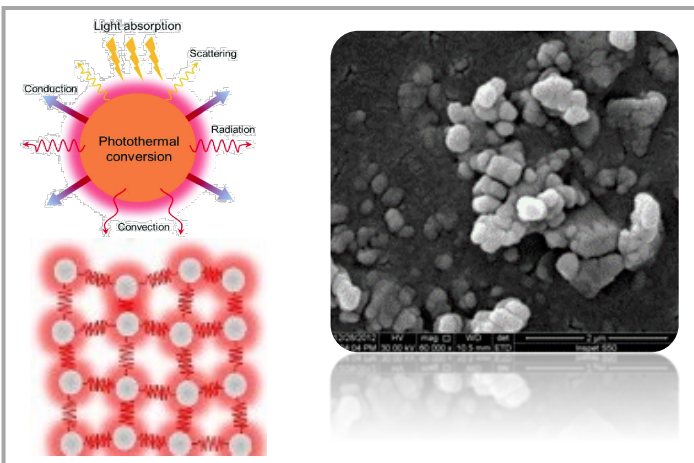
# 趋势与挑战

趋势

- 国内外在相关领域的研究仍处于起步阶段，亟需针对**高放热温度**、**高储能密度**、**长寿命循环**的高效聚光太阳能热化学储能技术开展研究。

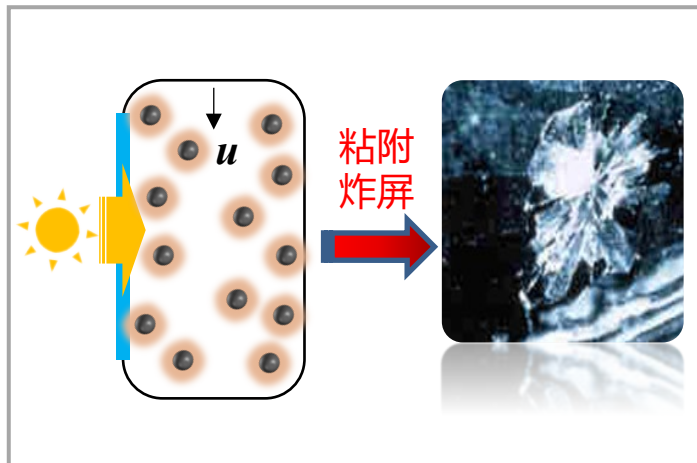
## 挑战1：材料层面

载能体易局部超温烧结导致反应活性显著降低



## 挑战2：反应器层面

细颗粒载能体易粘附、团聚引起“炸屏”和性能衰减



## 挑战3：系统层面

非稳态、非均匀真实辐照条件下聚光集热-化学储能难匹配



挑战

涉及工程热物理、材料、化学、化工、光学、控制等多学科综合交叉的热点和前沿问题

## 3 关键科学问题

一 项目背景

二 发展现状、趋势与挑战

**三 关键科学问题**

四 研究进展

五 下一步工作

# 3 关键科学问题

挑战1  
材料层面

载能体易发生局部超温烧结导致反应活性显著降低

原因分析

现有  
研究局限

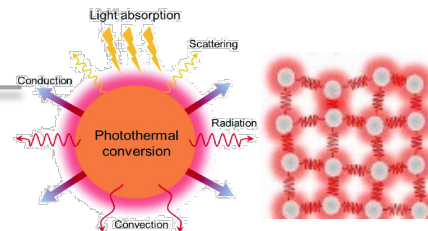
## ① 造孔过程不可控

- 微孔稳定性较差
- 易烧结失活



## ② 光热转换作用

- 载能体长效活化能力差
- 载能体导热性能较差



研究关键

科学问题1：载能体共掺杂改性晶体调控与微孔结构原位再造抑制烧结机理

# 3 关键科学问题

挑战2  
反应器层面

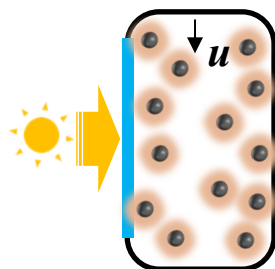
细颗粒载能体易发生粘附/团聚引起性能衰减问题

原因分析

现有  
研究局限

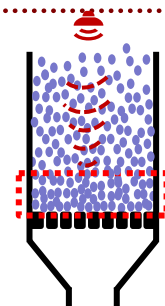
## ① 常规移动床

- 颗粒分散较差
- 颗粒易粘附炸屏



## ② 常规声激励流化床

- 声波单一纵向传递衰减大
- 防团聚效果不可控



解决方案

科学问题2：直接吸热移动床与分布式可控声激励流化床的反应过程强化机理



# 3 关键科学问题

挑战3  
系统层面

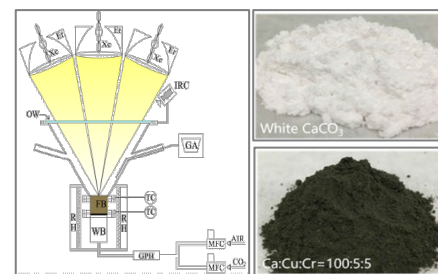
非稳态、非均匀真实辐照条件下聚光集热-化学储能难匹配

原因分析

现有  
研究局限

实验室条件

稳态、微量反应物、多场耦合关键因素  
考虑不全面



研究关键

科学问题3：非稳态多尺度多场耦合作用下的高通量聚光热化学储能机理

一 项目背景

二 发展现状、趋势与挑战

三 关键科学问题

**四 研究进展**

五 下一步工作

# 4 研究进展

## 高通量聚光太阳能热化学转化储能理论与方法 (西安交大、浙大、电工所、福大、理化所、北石化)

科学问题

- 非稳态多尺度多场耦合作用下的高通量聚光热化学储能机理
- 载能体共掺杂改性晶体调控与微孔结构原位再造抑制烧结机理
- 基于涡旋式移动床与分布式可控声激励流化床的反应过程强化机理

方法技术

共掺杂改性与晶体调控  
协同的高活性防烧结载  
能体制备

基于反应气体组分调控  
的载能体微观多孔结构  
原位再造

涡旋式移动床和  
分布式声激励流化床  
反应强化

变辐照高通量  
太阳能热化学  
储能系统一体化

材料  
装备  
研制

高性能热化学载能体

- ✓ 反应温度 $\geq 750^{\circ}\text{C}$
- ✓ 储能密度 $\geq 1200 \text{ kJ/kg}$
- ✓ 循环 $\geq 2000$ 次性能下降 $\leq 30\%$

室外高通量聚光跟踪单元

- ✓ 聚光功率 $\geq 15 \text{ kW}$
- ✓ 峰值热流密度 $\geq 1.6 \text{ MW/m}^2$

吸、放热反应单元

- ✓ 反应温度 $\geq 750^{\circ}\text{C}$
- ✓ 反应单元转化率 $\geq 85\%$
- ✓ 太阳能热化学储能效率 $\geq 60\%$

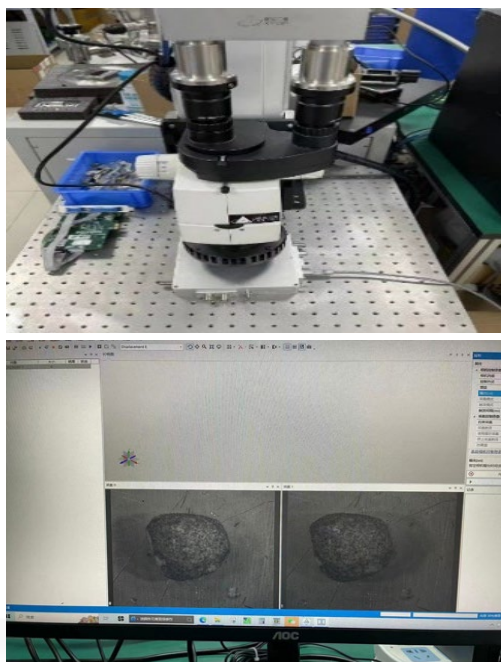
应用  
验证

为实现大规模、长寿命、高效率太阳能热化学转化储能  
提供理论与技术支持

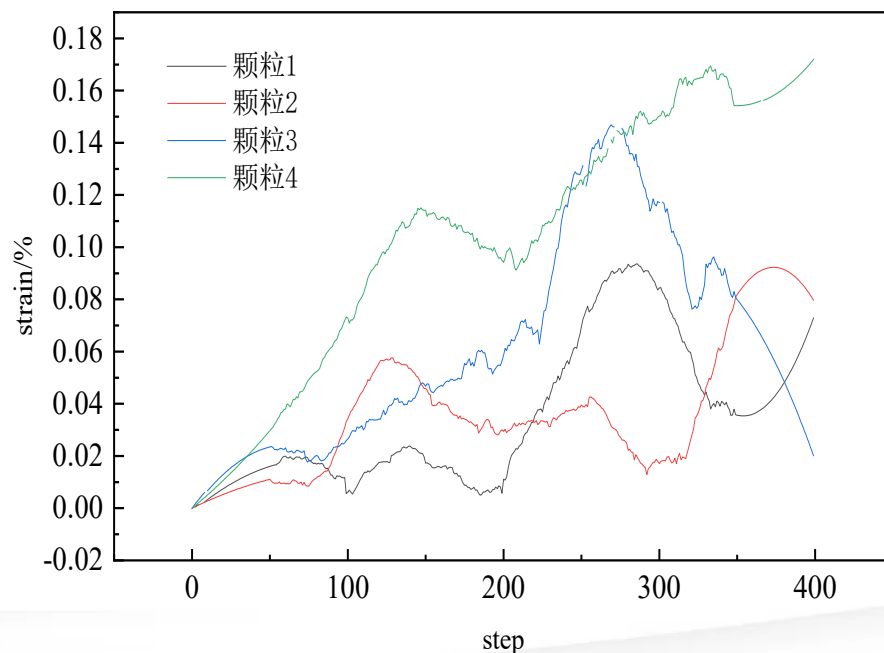
# 4.1 多场耦合协同强化热化学储能理论

## 载能体颗粒表面“光-热-力”耦合作用机制

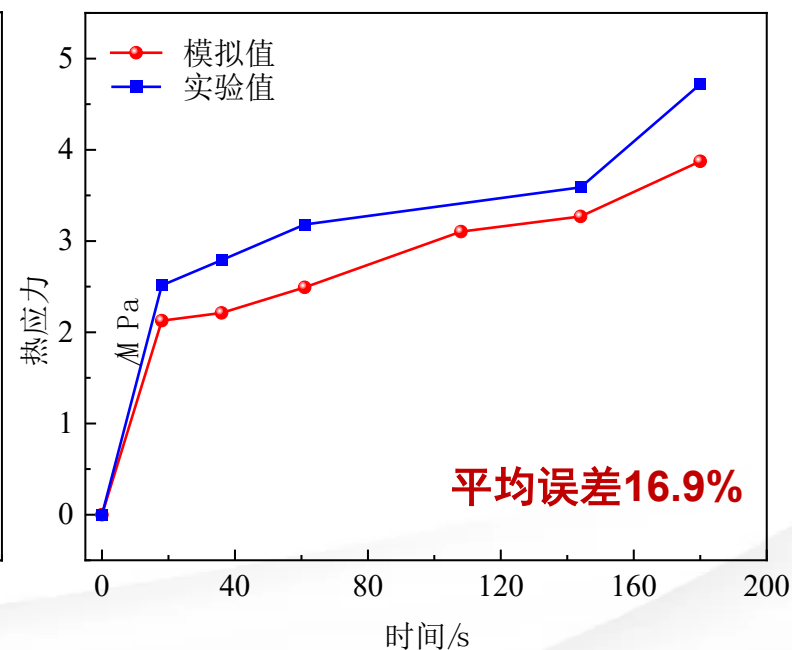
- 搭建了载能体颗粒热应力应变测试平台
- 采用光学法进行了碳酸钙球型颗粒高温热应变实验
- 热应力仿真结果与实验数据的平均误差为16.9%



热应力应变测试平台



热应变实验结果



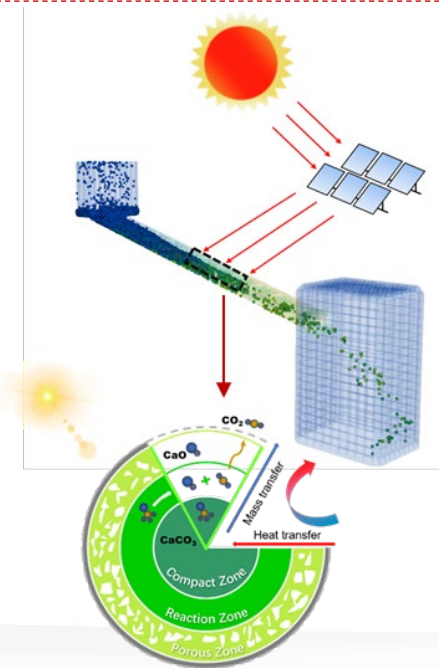
仿真与实验结果对比



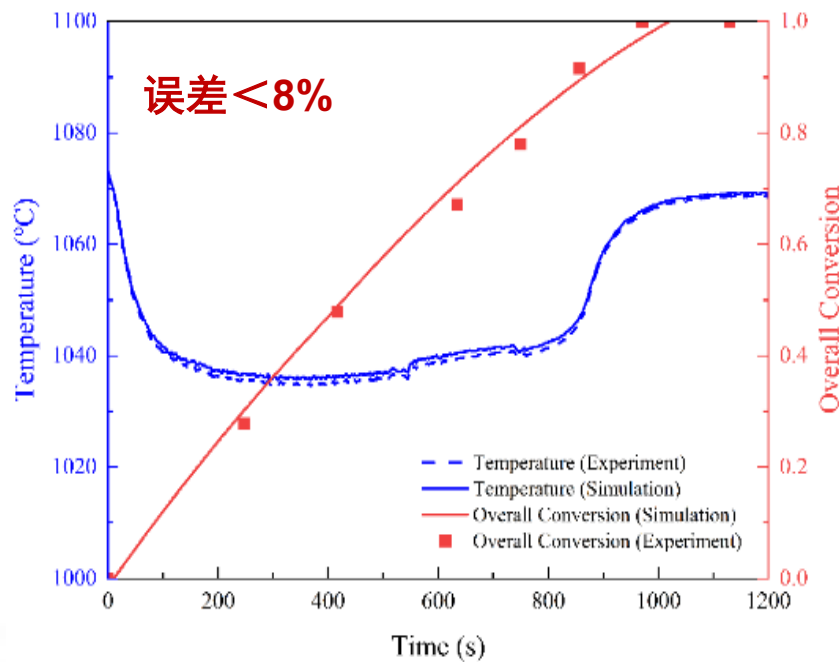
# 4.1 多场耦合协同强化热化学储能理论

## 吸热反应“光-热-流-力-化”耦合作用机制

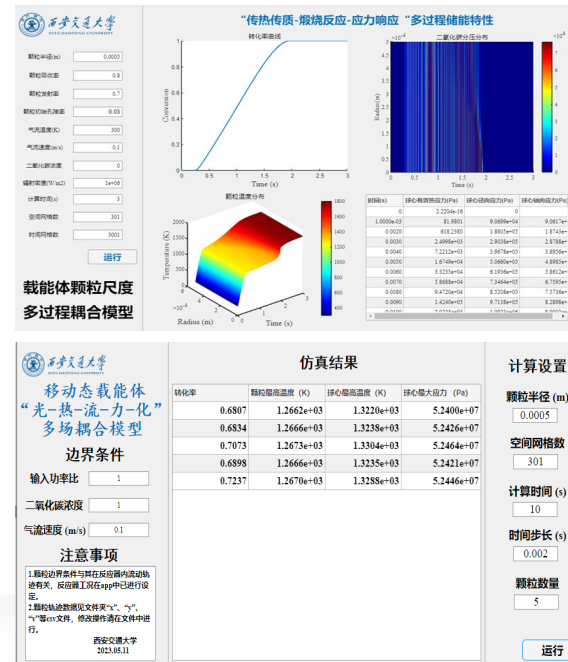
- 构建了移动态载能体“光-热-流-力-化”非稳态、多尺度多场耦合模型
- 模型预测结果与实测数据（转化率、温度）对比，误差 $<8\%$
- 完成了载能体颗粒尺度和移动态载能体多场耦合模型的软件封装



多尺度多场耦合示意图



模型验证



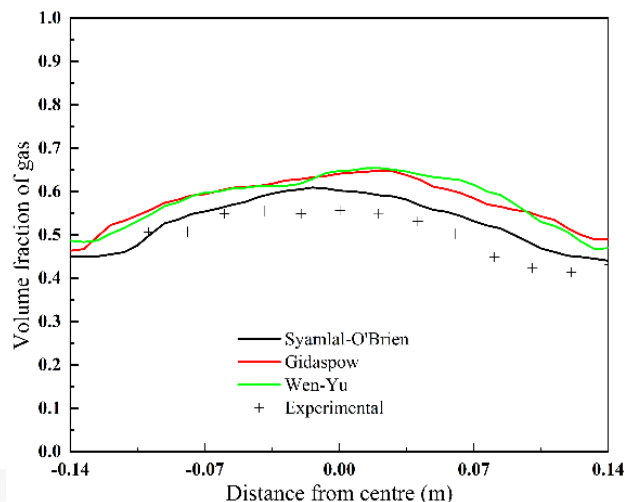
多场模型封装软件界面

# 4.1 多场耦合协同强化热化学储能理论

## 放热反应“热-力-流-化-声”耦合协同强化机制

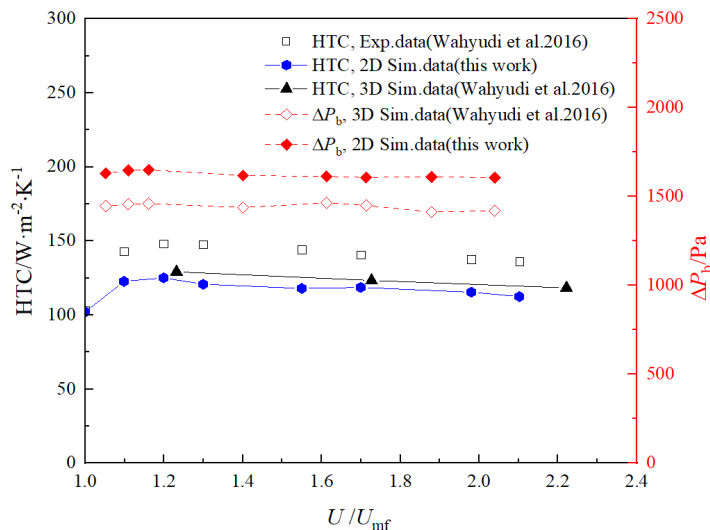
- 建立了针对流化态载能体的二维非稳态流动、换热、反应模型
- 与文献实验值进行对比，平均误差均小于15.6 %

三种不同曳力模型预测的床层孔隙率与实验值的平均误差小于15.6 %



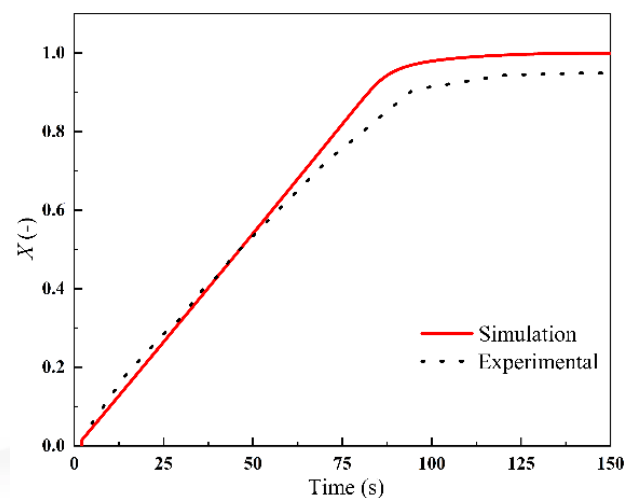
流动模型验证

传热系数模拟值与实验结果平均误差小于14.6 %



传热模型验证

反应转化率模拟值与实验值的平均误差小于8 %

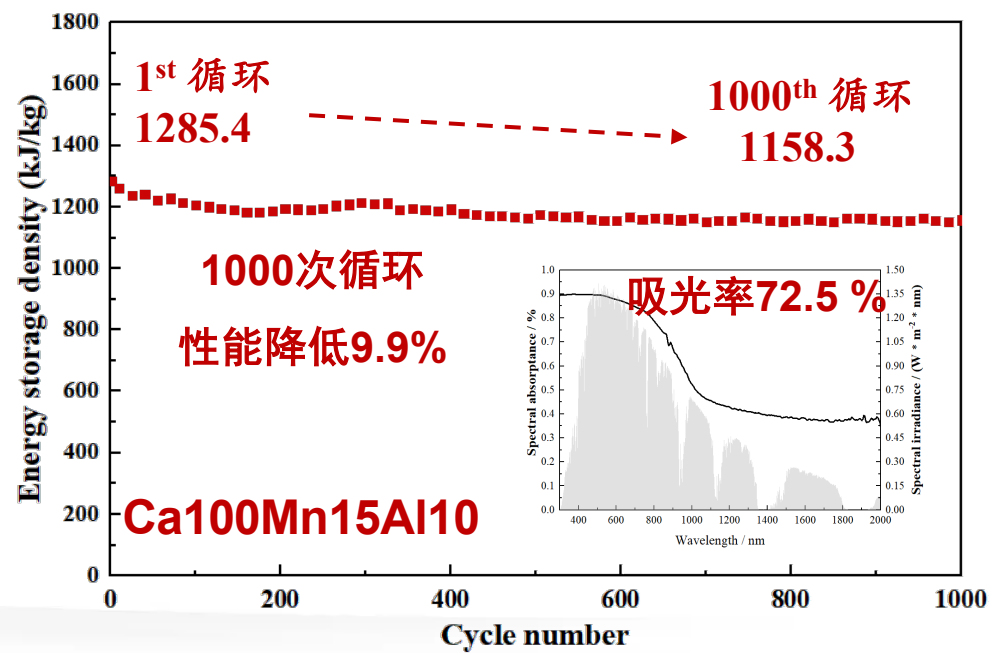


反应动力学模型验证

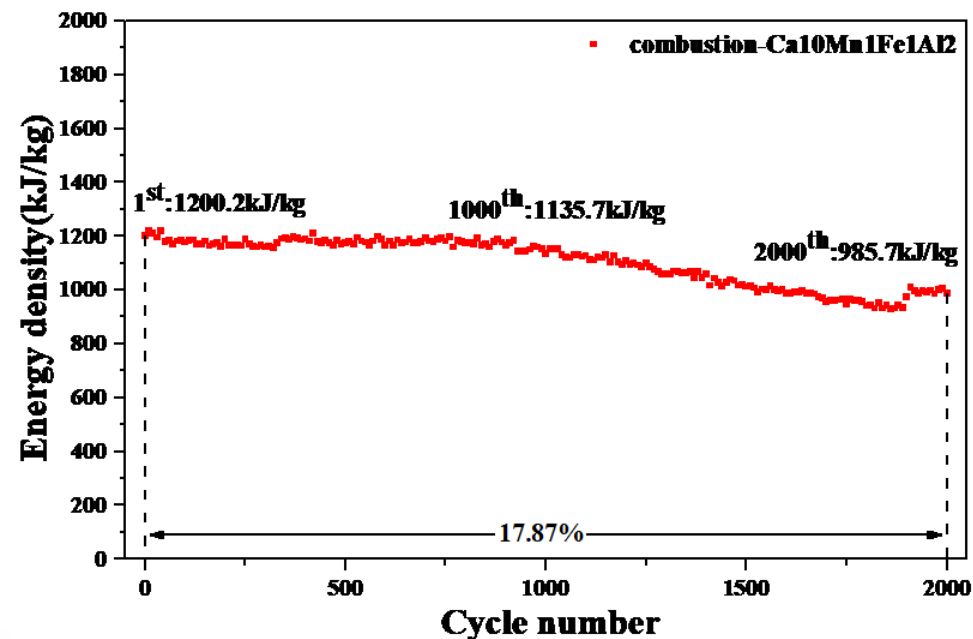
## 4.2 高性能太阳能热化学载能体构筑与制备

### Mn/Al掺杂钙基载能体

- 开发了Mn/Al晶格掺杂钙基载能体材料，材料吸光率为72.5 %
- 材料初始储能密度为1285 kJ/kg，1000次循环（800 °C）下降9.9 %
- 开发了自燃烧造孔法Mn/Al/Fe掺杂材料，2000次循环（800 °C）下降17.9 %



Mn/Al晶格掺杂材料

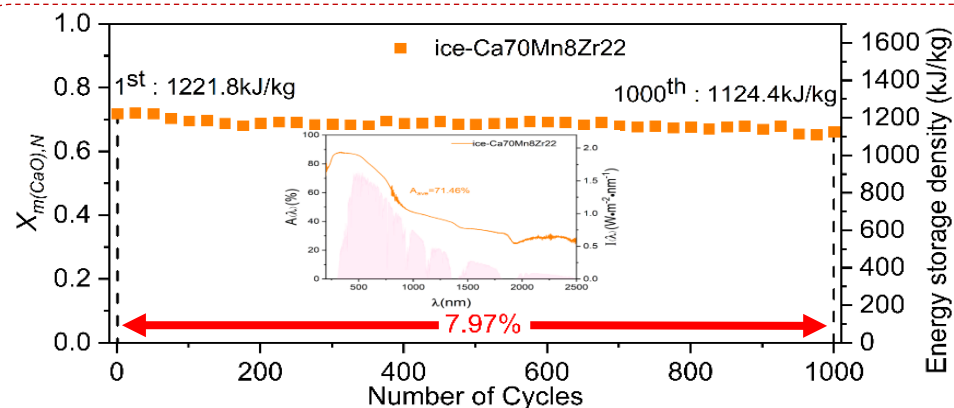


自燃烧造孔法Mn/Al/Fe掺杂材料

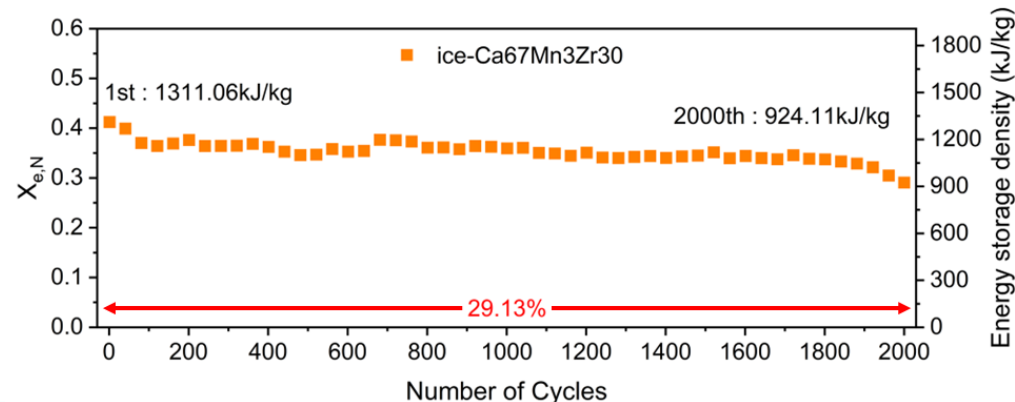
# 4.2 高性能太阳能热化学载能体构筑与制备

## Mn/Zr掺杂钙基载能体

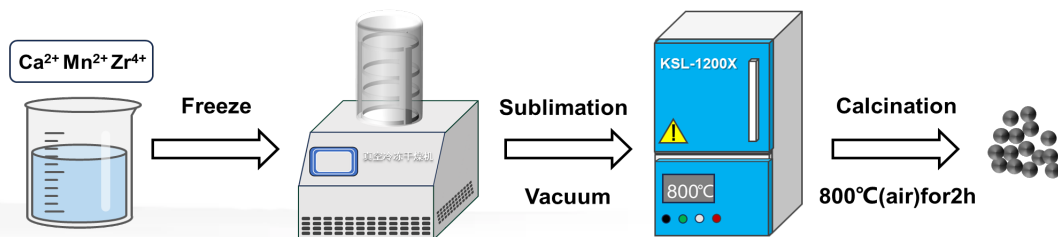
- 基于真空冷冻干燥法制备了Mn/Zr掺杂钙基材料，材料吸光率为71.5 %
- 材料循环性能优异，1000次循环（800°C）下降8.0 %，2000次循环下降小于30%



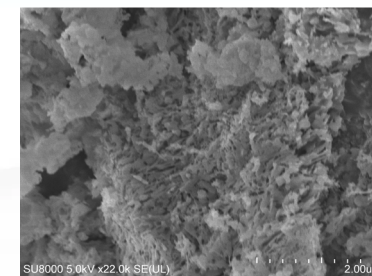
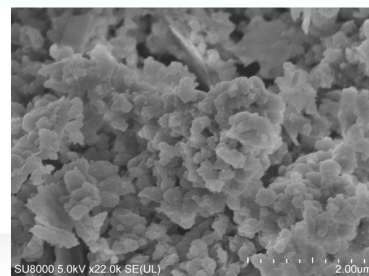
材料储能性能



材料储能性能



合成方案



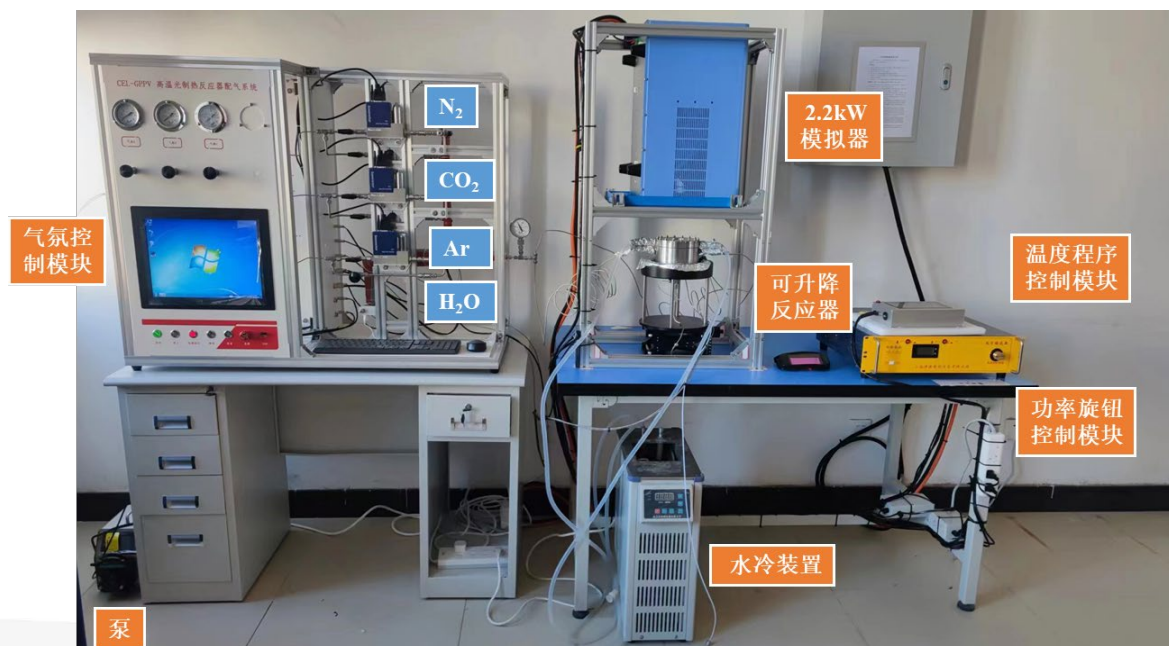
烘箱（左）冻干（右）的SEM



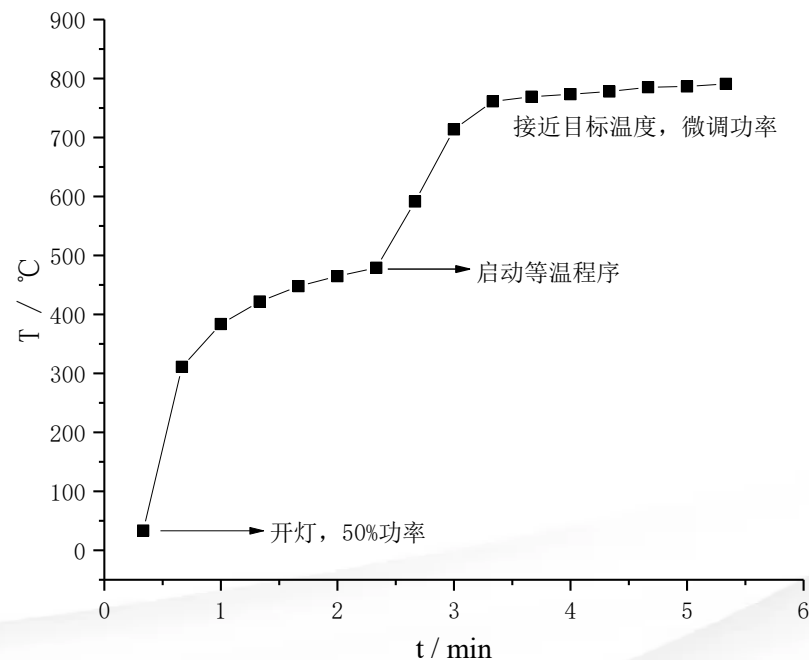
## 4.2 高性能太阳能热化学载能体构筑与制备

### 载能体长效循环性能测试平台搭建

- 建成了基于**2.2kW**太阳能聚光加热的钙基载能体**长效吸放热循环试验平台**
- 可开展钙基载能体材料**2000级次**循环稳定性测试，**循环温度20~1100 °C**
- 探索出一种**无需旋钮且调温温和**的光测试升温方式，**稳定了实验温度**



测试平台实物照片



太阳能模拟器加热特性

# 4.3 太阳能热化学反应单元研发与调控

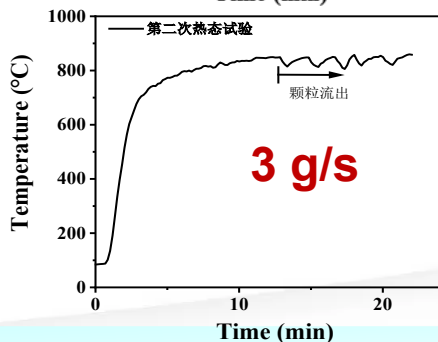
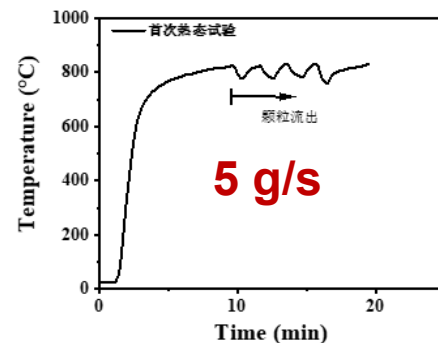
## 高通量聚光太阳能直接吸热移动床反应单元研发

- 已建成闭式直接吸热移动床反应单元实验系统，适配钙基颗粒
- 利用100 kW<sub>e</sub>聚光模拟灯系统进行颗粒高温集热实验
- 通过重复实验，在3 g/s和5 g/s的出口流量下，测得载能体颗粒的反应转化率分别为85.7 %和80.5 %



100 kW<sub>e</sub>模拟灯系统

载能体	元素占比	理论失重率
Ca基颗粒	Ca: Mn: Al: Ce= 100:10:10:5	21%



热态实验	第1次	第2次
流量	5 g/s	3 g/s
实际失重率	16.9 %	18.0 %
反应转化率	80.5 %	85.7 %

闭式直接吸热移动床高温集热过程

热态实验结果

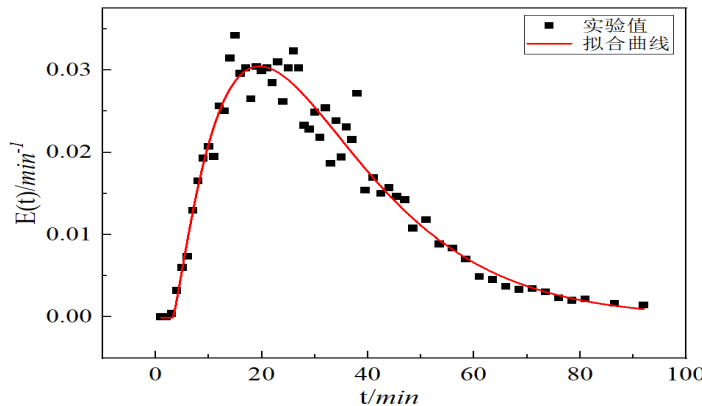
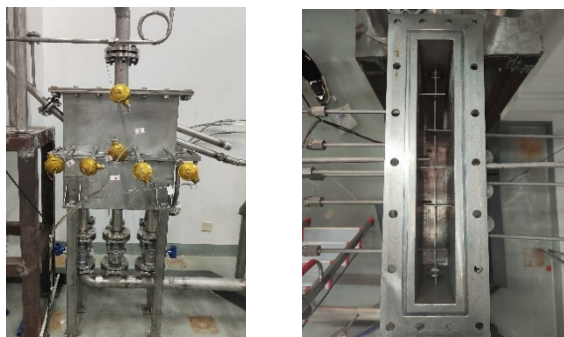
# 4.3 太阳能热化学反应单元研发与调控

## ● 流化床放热反应单元热态实验系统的设计与搭建

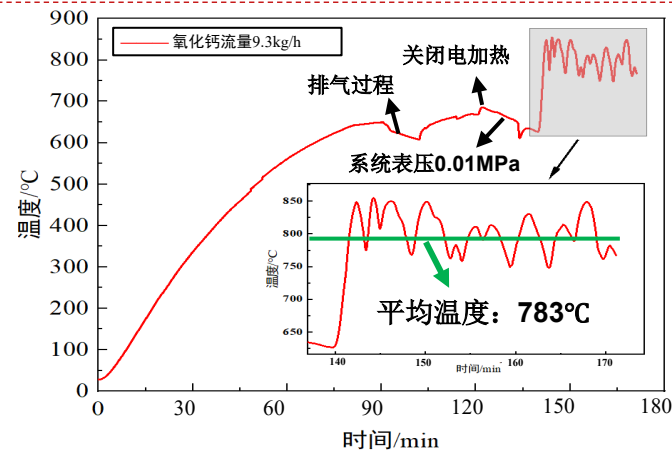
- 设计并搭建了鼓泡流化床放热反应热态实验台，并探究了不同状态下实验台的性能
- 鼓泡流化床放热反应单元反应温度达**783°C**，反应单元转化率达**90.12%**，系统效率为**77.9%**



鼓泡流化床放热实验系统



内部折流结构及颗粒RTD概率密度曲线



系统反应放热	7.918 kW	
物料获得能量	CaO	0.09 kW
	CaCO <sub>3</sub>	1.77 kW
	CO <sub>2</sub>	4.31 kW
系统效率	77.9%	

若目标系统效率达到85%，则CaO流量需为25.96kg/h

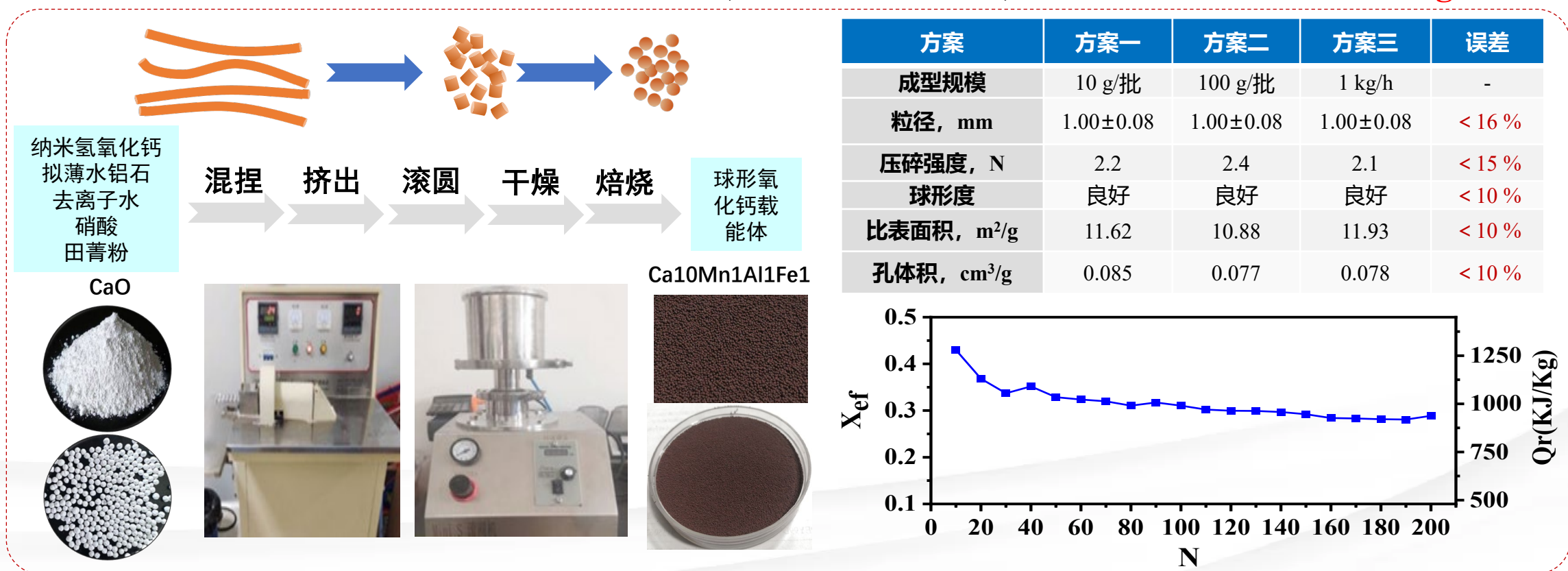
热态实验结果



# 4.3 太阳能热化学反应单元研发与调控

## 载能体颗粒形貌结构调控方案

- 发展了基于挤出滚圆法的球形氧化钙载能体的成型方法，主要步骤包括混捏、基础、滚圆等
- 建立了载能体颗粒形貌结构调控方案，调控参数包括颗粒粒径、压碎强度、球形度、比表面积等
- 完成了150公斤钙基载能体小球的成型制备，200次储能循环，储能能力维持在1000kJ/kg左右。

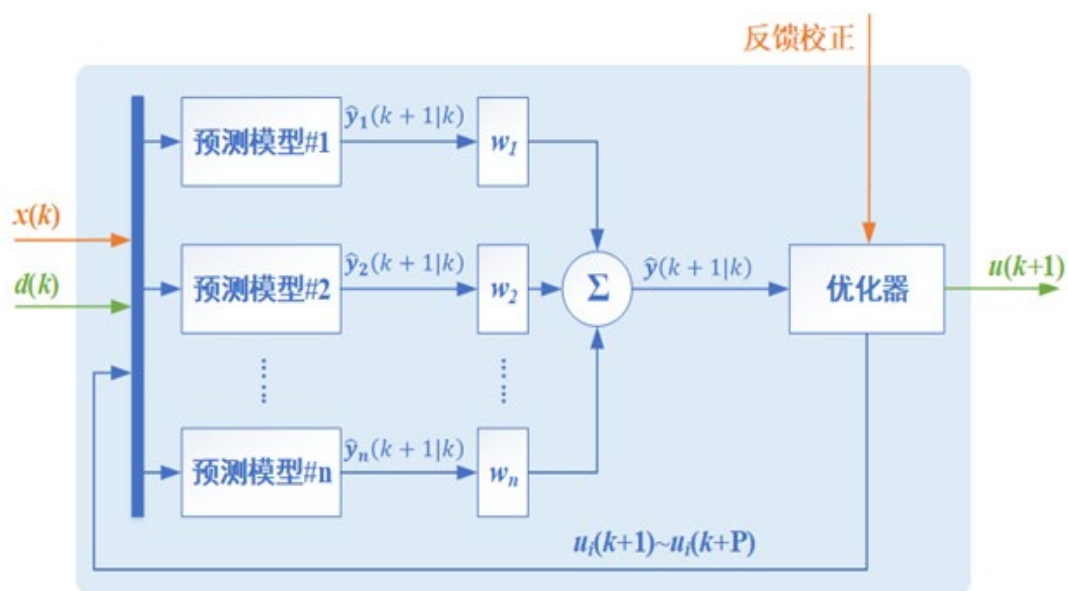




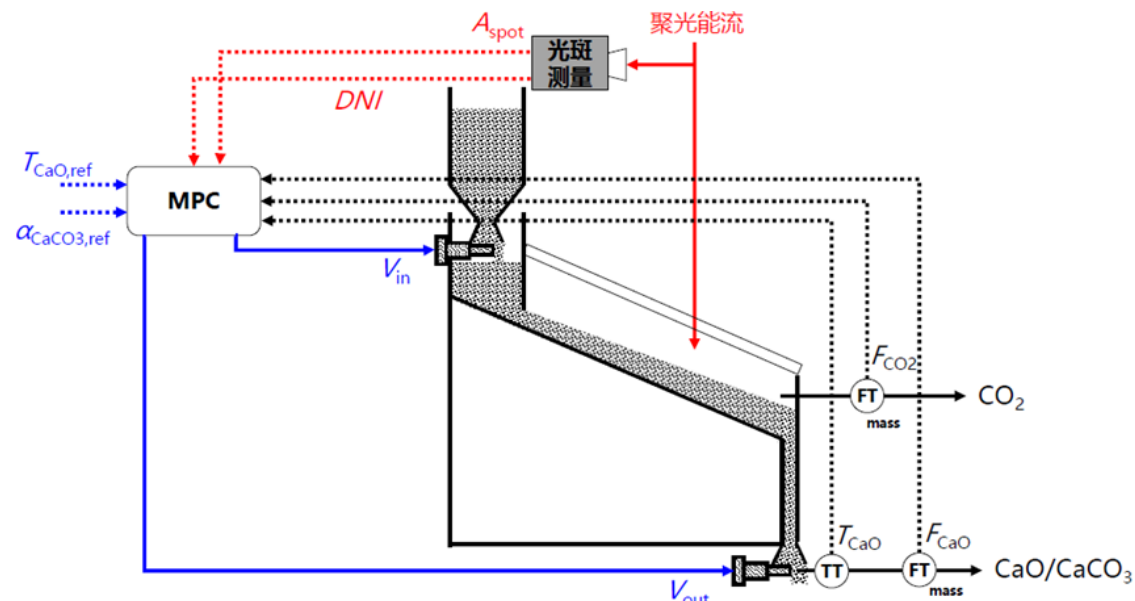
# 4.3 太阳能热化学反应单元研发与调控

## 反应单元性能调控方案

- 针对移动床吸热反应单元和流化床放热反应单元的强非线性动态特性，建立了多模态自适应实时预测与控制算法



多模型预测控制器（MMPC）示意图

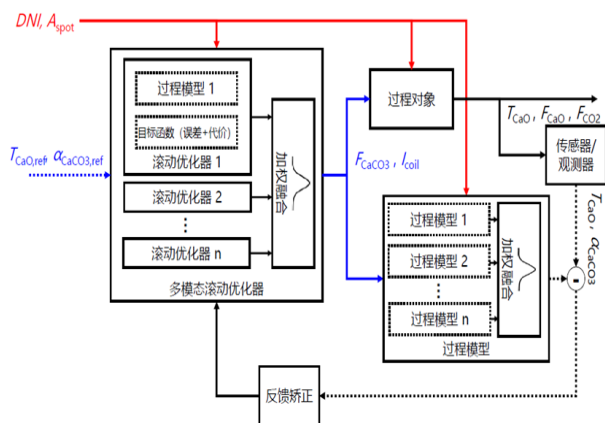


移动床吸热反应单元  
“变工况-变模型”综合控制方案示意图

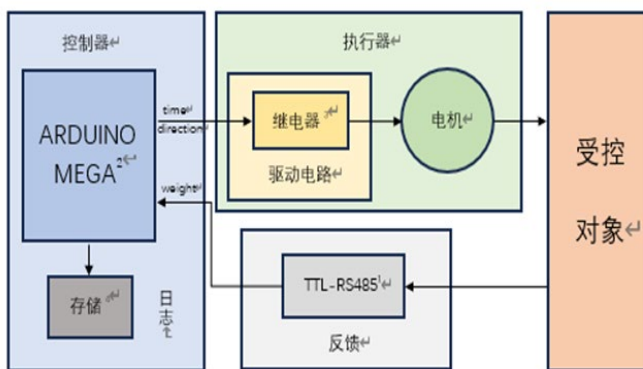
# 4.3 太阳能热化学反应单元研发与调控

## 反应单元性能调控方案

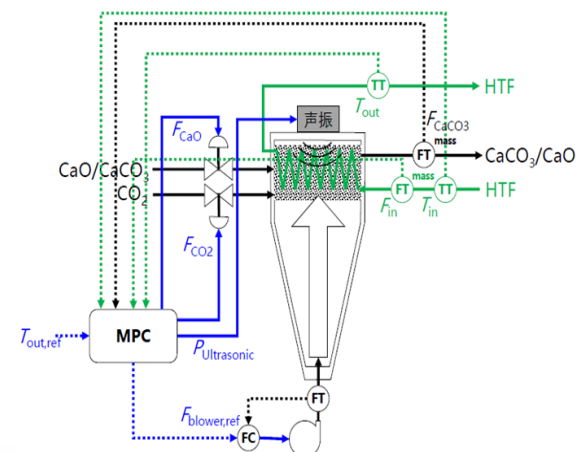
- 针对移动床吸热反应单元的多回路前馈串级反馈控制方案，可实现**颗粒流量设定值跟踪最小 0.002 kg/s**，**响应时间 $\leq 5$  s**
- 在流化床放热反应单元部分，提出了进风速度控制的前馈回路，包括**颗粒入口流量、气体入口流量和声振参数**的出口温度控制回路。



移动床吸热反应单元的多模型预测控制器的内部结构示意图



移动床吸热反应单元多回路控制系统的硬件配置示意图

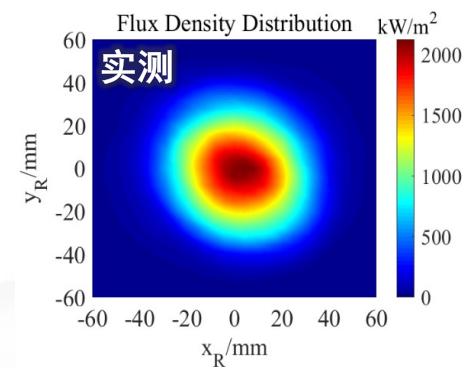
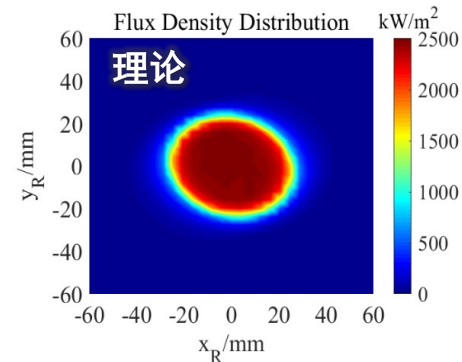
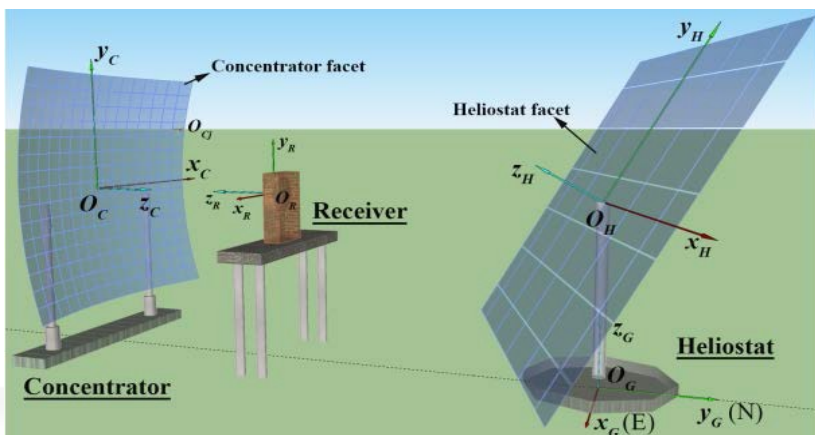
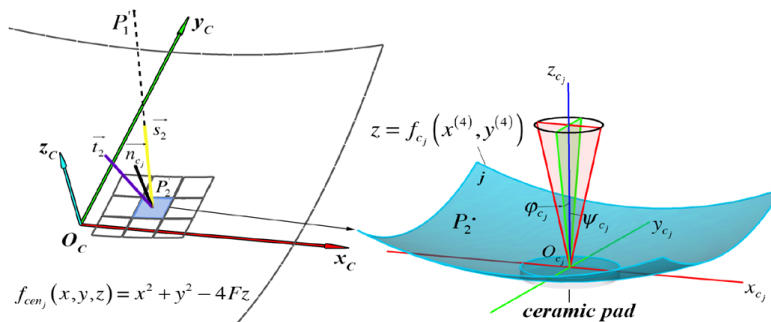
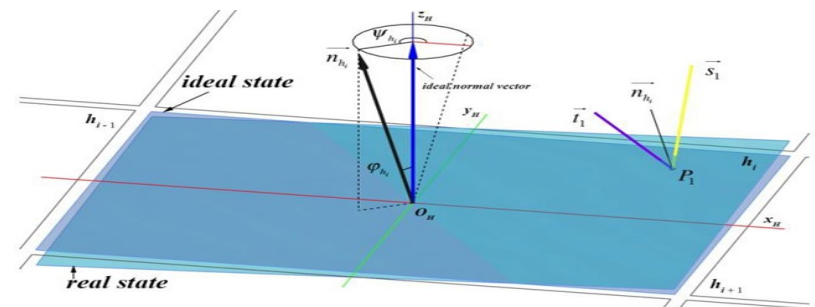


流化床放热反应单元“变工况-变模型”综合控制方案示意图

# 4.4 一体化太阳能热化学储能系统集成

## 室外高通量聚光跟踪单元

- 建成了高通量聚光跟踪单元，集热功率27 kW，峰值能流密度1.9 MW/m<sup>2</sup>
- 建立了光学仿真预测模型，聚光光斑理论与实测分布误差<16%



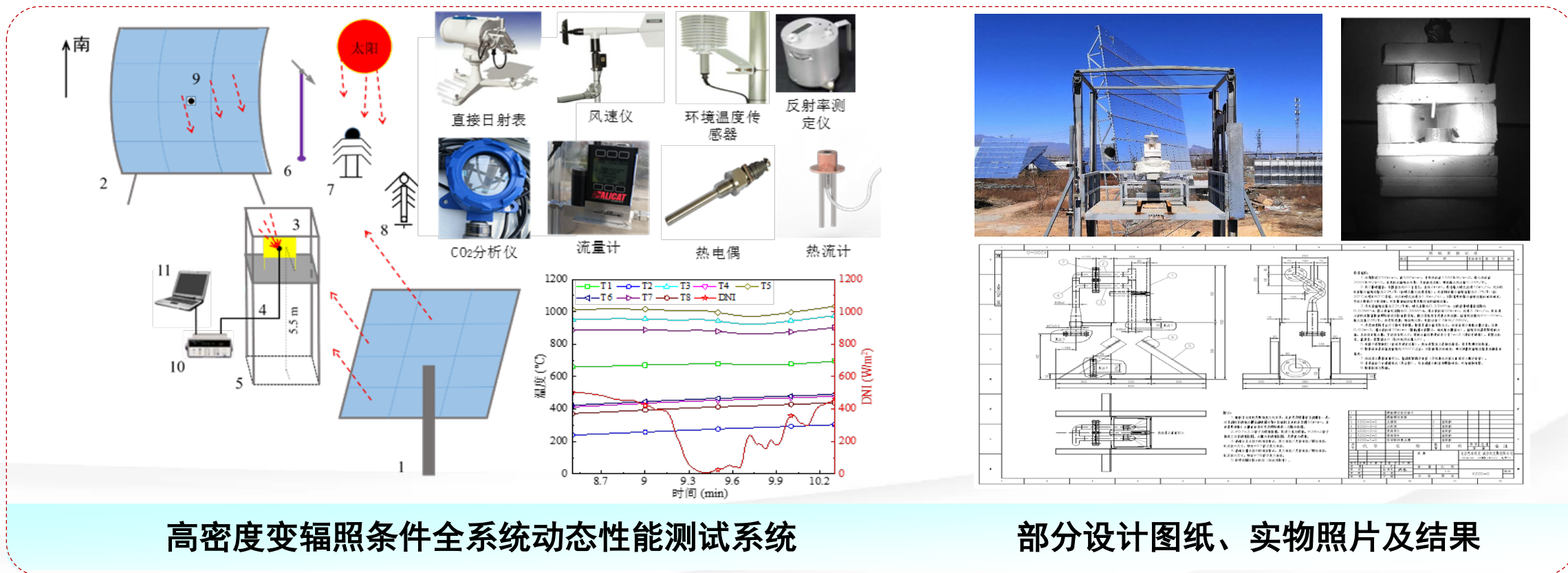
高通量聚光跟踪单元设计图及实物图

聚光光斑对比

# 4.4 一体化太阳能热化学储能系统集成

## 高密度变辐照条件下全系统动态性能评价方法

- 初步设计了全系统动态性能测试流程及评价方法，并搭建了相应测试系统
- 系统测量温度1100 °C，测量能流密度3 MW/m<sup>2</sup>，拍摄速度10,000 帧/秒

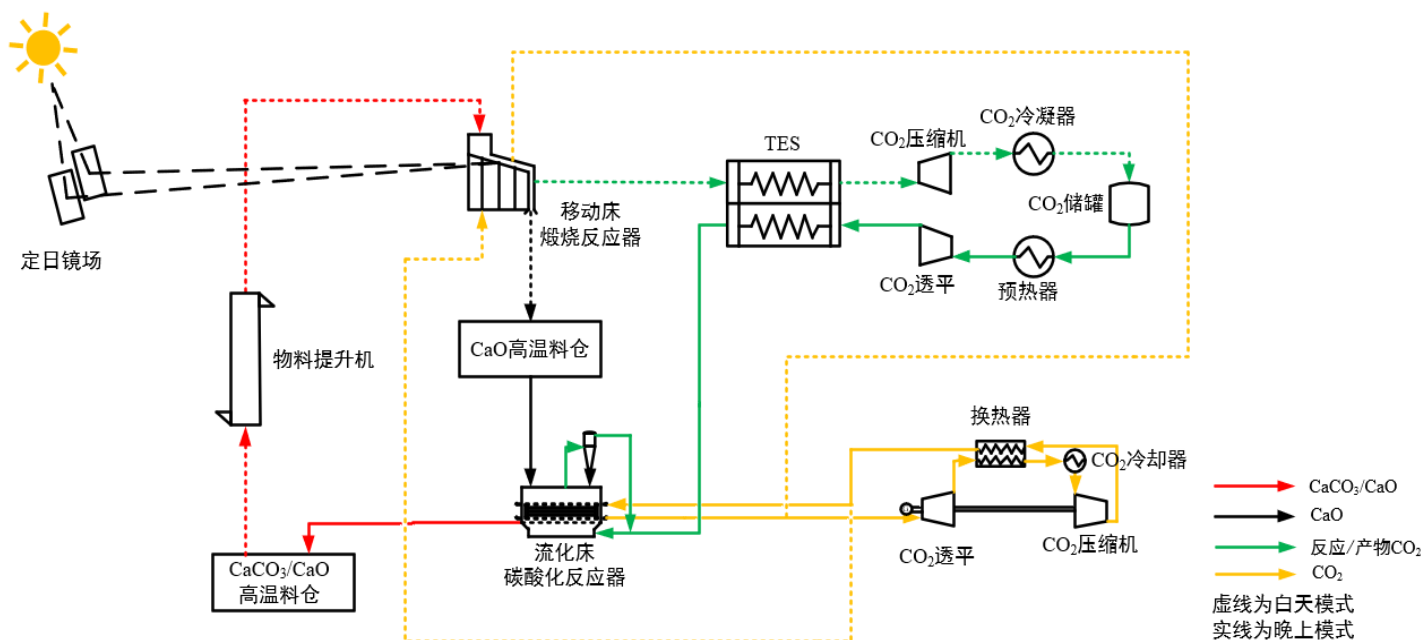




# 4.4 一体化太阳能热化学储能系统集成

## 聚光集热-化学储热一体化集成示范系统实施方案

- 构建了昼夜连续运行的50MWe太阳能热化学储能超临界二氧化碳发电系统并建立模型，仿真预测昼夜综合净发电效率为24%、净焓效率为25.8%。



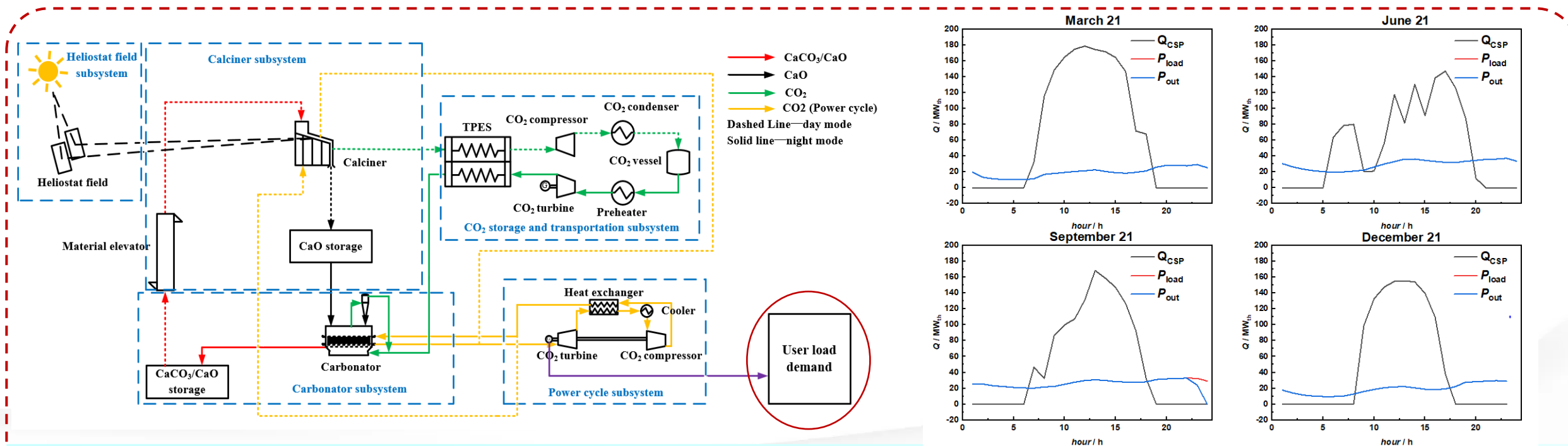
物理量	数据
典型日平均日照时长	8 h
镜场效率	75 %
吸热器热效率	92 %
吸收热能-化学能转化效率	89 %
煅烧反应单元转化率	100 %
碳酸化反应单元转化率	50 %
移动床煅烧反应器反应条件	900 °C, 0.1 MPa
流化床碳酸化反应器反应条件	900 °C, 0.3 MPa
压缩机/透平等焓效率	91 %
压缩机/透平机械效率	99 %
换热器最小换热温差	10 °C
换热器压降	1%



# 4.4 光热热化学储能电站

## 聚光集热-化学储热一体化集成示范系统实施方案

- 根据用户负荷需求通过热化学储能电站将光热发电进行削峰填谷。
- 在光热系统规模为300MW<sub>th</sub>，储能时长10h，储能系统功率为60MW的情况下，新型储能电站的度电成本LCOE=0.22\$/kWh，负荷损失概率LOLP=29.39%。



光热热化学储能电站系统流程图

储能电站四个典型日性能预测

# 下一步工作

一 项目背景

二 发展现状、趋势与挑战

三 关键科学问题

四 研究进展

**五 下一步工作**

## 下一步工作

- 低成本、高储能密度、长循环周期钙基载能体的规模化制备
- 移动床吸热反应器和流化床放热反应器的进一步优化及实时控制方案
- 15kW太阳能热化学储能集成示范系统建设与调试运行
- 钙基热化学储能在光热电站中的应用（MW级）

# 谢谢!

国家重点研发计划—“工程科学与综合交叉”重点专项（项目编号2021YFF0500400）



西安交通大学  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY



浙江大学  
ZHEJIANG UNIVERSITY



福州大学  
FUZHOU UNIVERSITY



中国科学院·电工研究所  
IEECS

中国科学院电工研究所

INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERING, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



中国科学院理化技术研究所

Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS



北京石油化工学院

BEIJING INSTITUTE OF PETROCHEMICAL TECHNOLOGY