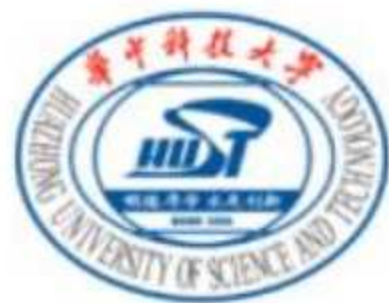




# 双碳战略下的高温热储能技术与应用

**杨荣贵**

北京大学 工学院

[ronggui@pku.edu.cn](mailto:ronggui@pku.edu.cn)

**李小波，靳开元**

华中科技大学 能源与动力工程学院

<http://x-thermal.energy.hust.edu.cn>

# OUTLINES

**1 研究背景**

**2 各类高温热储能技术对比**

**3 熔融盐热储能技术**

**4 单质硫热储能技术**

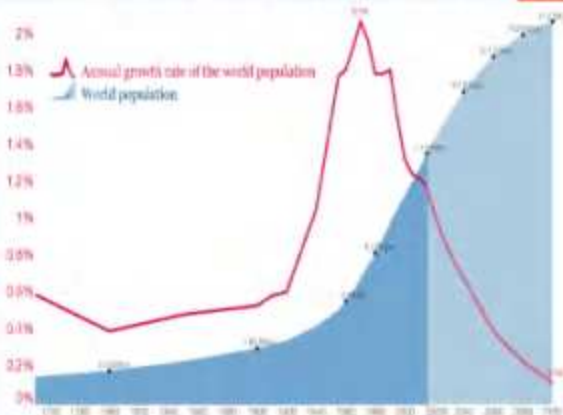
**5 系统耦合与应用**

# 全球变暖是全人类的共同威胁

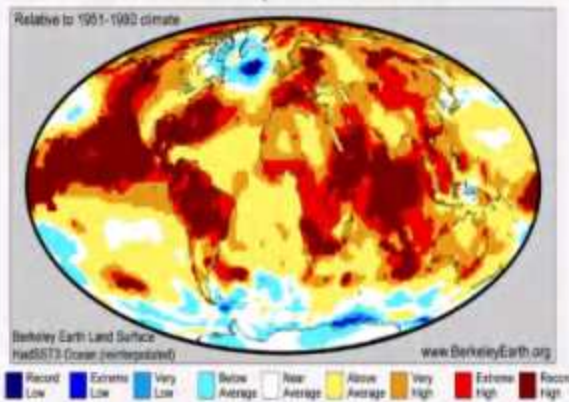


## 全球人口增长 (1750-2100)

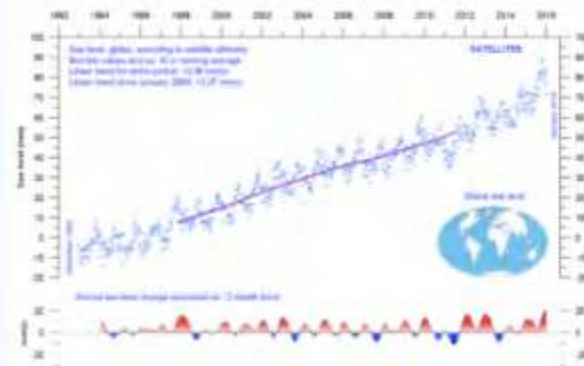
Our World in Data



## 2015 Annual Temperature Local Records

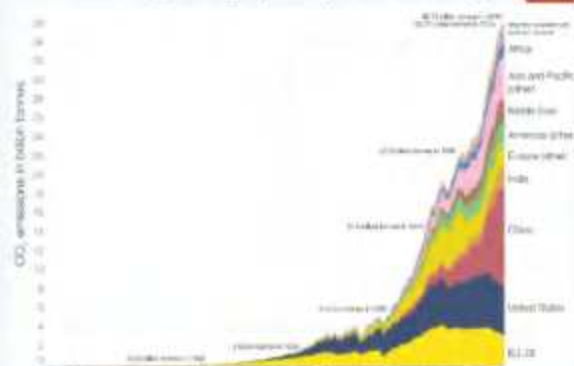


## Sea level rise – 3.4mm a year



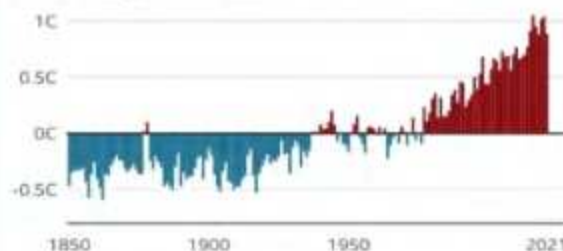
## 全球CO<sub>2</sub>排放 (1751-2015)

Our World in Data



## 全球变暖与CO<sub>2</sub>排放 (1850-2020)

The world has been getting warmer  
Annual mean land and ocean temperature above or below average, 1850 to 2021



Note: Average calculated from January 1951 to December 1980

Source: University of California Berkeley

000



# 国家战略：碳达峰、碳中和



“二氧化碳排放力争于2030年前达到**峰值**，  
努力争取2060年前实现**碳中和**”

——习近平，第75届联合国大会，2020年9月22日

中国、美国、欧盟实现碳达峰和碳中和**时间表**



“我国实现碳达峰、碳中和愿景目标，时间更紧、幅度更大、困难更多，**任务异常艰巨**”

——生态环境部，2021

二十大报告：实现“碳达峰、碳中和”是贯彻新发展理念、构建新发展格局、推动高质量发展的内在要求。

# 碳达峰与碳中和是一场深刻的革命



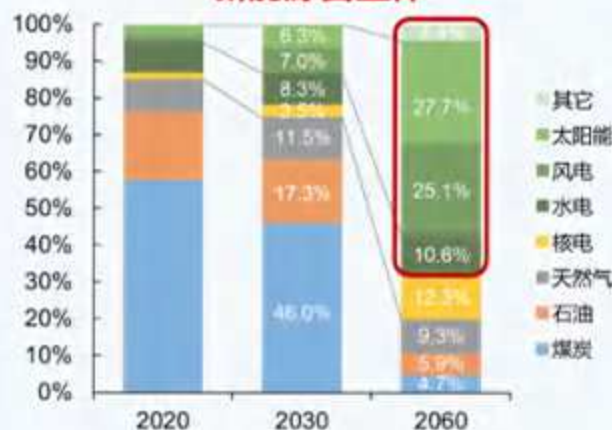
中国碳排放行业占比：电力与工业排放占主体（2021）



中国发电量构成：煤电占主体（2021）



全球支撑碳减排主要技术路径：  
新能源占主体



数据来源：中国石化集团，《中国能源展望2060》

- 中国碳排放总量位居世界第一，其中近45%来自于电力行业
- 截止2021年，火电仍占全国发电量的70%，但未来需向保障性和调节性电源转型
- 预计2060年，风光等可再生能源将取代火电成为电力系统的主力电源，占总发电量65%以上

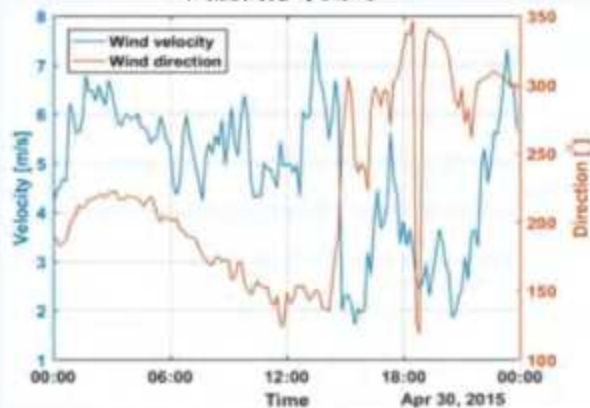
[1] 周孝信, 赵强, 张玉琼. 中国电力企业管理 (2021).

[2] 丁仲礼. 中国工业和信息化 8 (2021): 54-61.

# 可再生能源利用的关键：储能技术

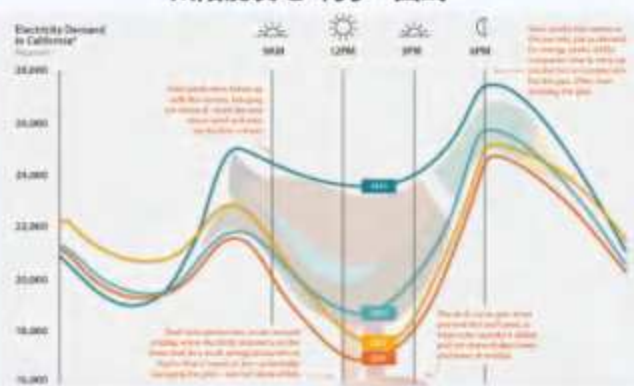


风能日分布曲线



Sources: Remote Sensing 10.1 (2018): 59.

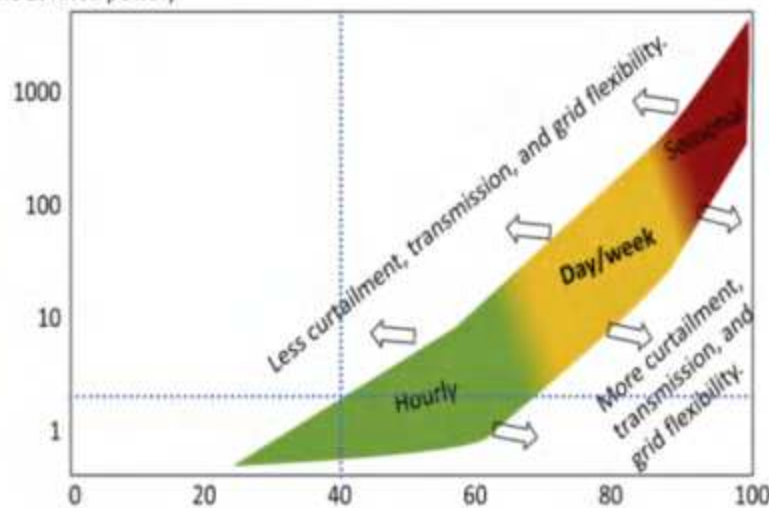
太阳能发电“鸭子”曲线



Sources: The California Independent System Operator

- ☐ 太阳能与风能具有很强的间歇性，发电并网后会对电网的稳定性造成严重的冲击
- ☐ **大规模长时间储能技术**是实现电网深调峰、顶尖峰的重要手段

Maximum required storage duration  
(hours at rated power)



Annual electricity from wind and solar on a regional grid (%)

# 储能技术发展现状



❑ 储能系统累计装机远小于可再生能源发电累计装机

❑ 但近年来，**储能装机**呈大幅增长趋势

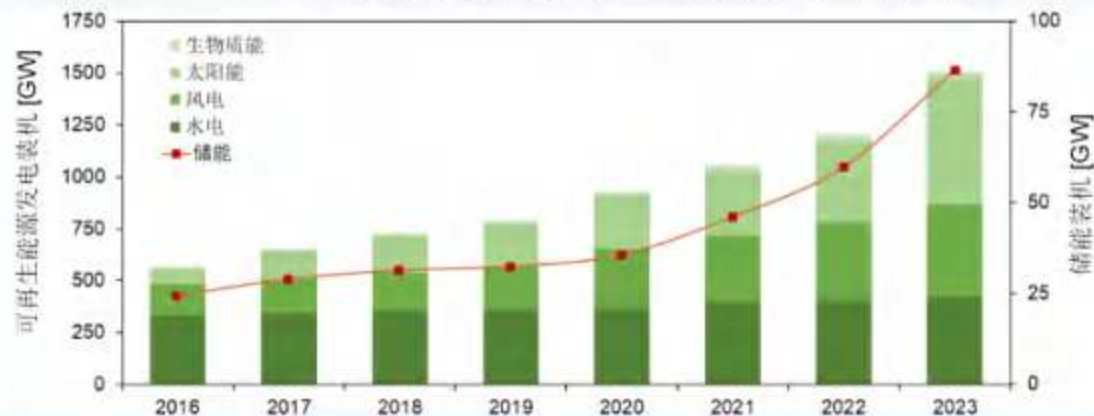
❑ 截止2023年，中国储能总装机约占世界总装机30%

❑ **抽水蓄能**仍在所有储能系统装机中占最高比重，但该比例正逐年下降

❑ **锂离子电池**是装机量第二大的储能技术，同时其拥有最快的增长速率

❑ **高温热储能、压缩空气**等新型长时储能技术具有广阔的发展前景

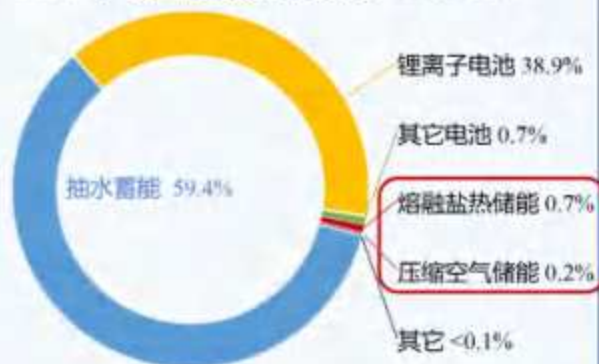
中国储能累计装机vs.可再生能源发电累计装机



2017年中国储能累计装机：28.9 GW



2023年中国储能累计装机：86.5 GW



[1] International Renewable Energy Agency, RENEWABLE ENERGY STATISTICS 2023

[2] 中国能源研究会储能专委会/中关村储能产业技术联盟 (CNESA)。储能产业研究白皮书2023

# OUTLINES

1 研究背景

2 各类高温热储能技术对比

3 熔融盐热储能技术

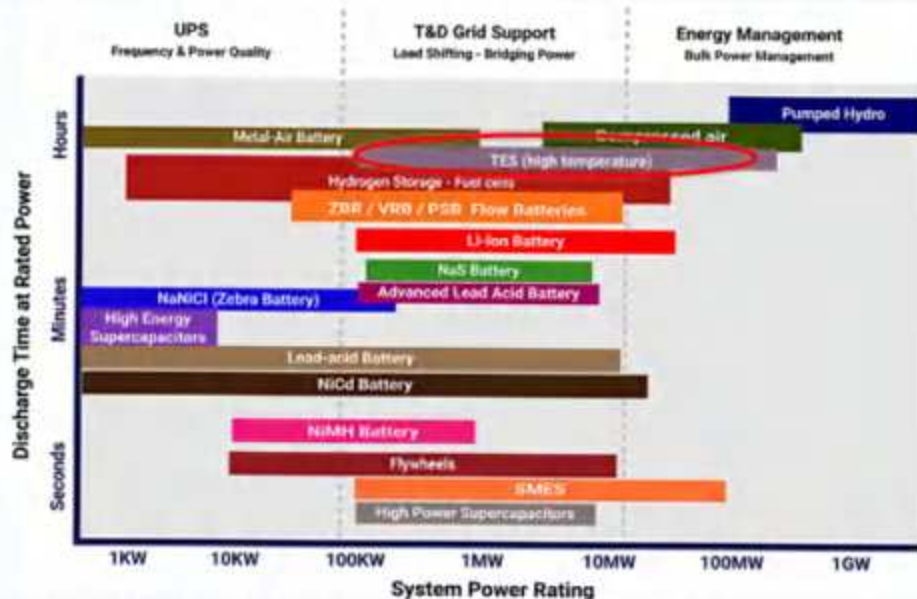
4 单质硫热储能技术

5 系统耦合与应用

# 高温热储能的规模与灵活性优势



## 储/放能功率与时长

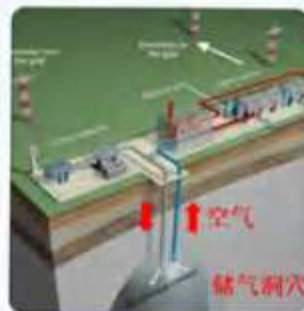


Argyrou, Maria C., et al. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 94 (2018): 804-821.

## 灵活性与适用性



抽水蓄能：上下游水库需要海拔落差



压缩空气储能：需要储气洞穴保证系统安全性与低成本



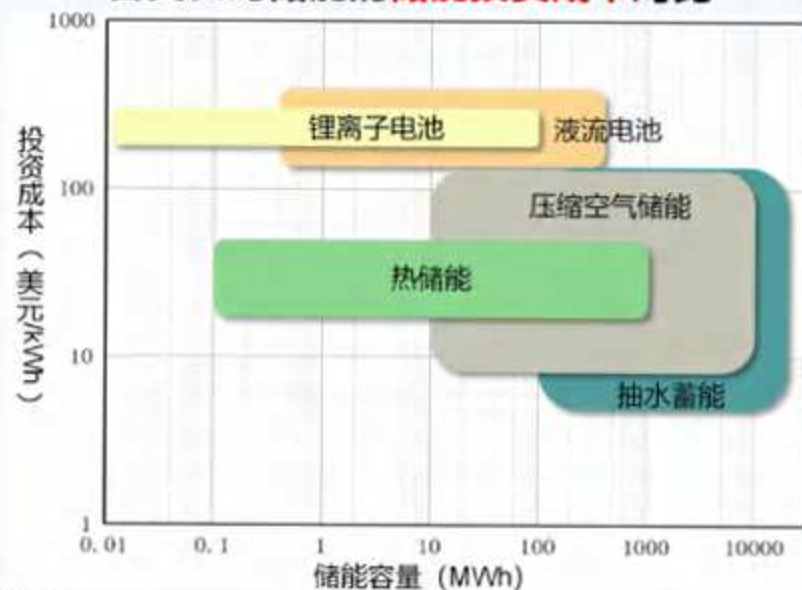
热储能：无特殊的地理位置与环境要求

- ❑ 高温热储能可以实现大规模储能，有功率高( $\sim$ GW)与储能时间长( $>4$ 小时)的特点
- ❑ 高温热储能不受地理与环境因素限制，相比其他长时储能技术有灵活性和适用性优势

# 高温热储能的成本优势



## 各类长时储能的储能投资成本对比



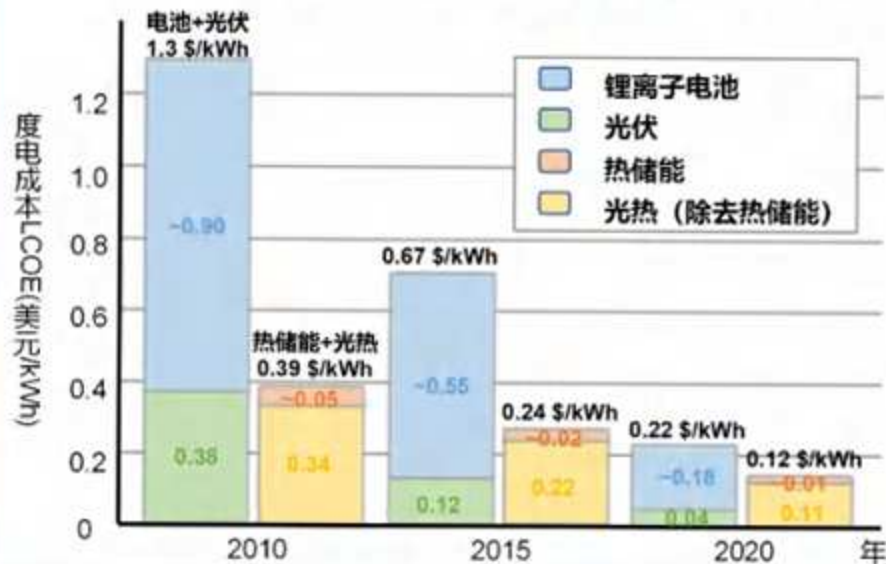
Sources:

1. Energy Conversion and Management, 2020, 223: 113295.
2. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 159: 112240.
3. Concentrating solar power Gen3 demonstration roadmap. NREL, 2017

## ❑ 投资成本低

- ❖ 高温热储能约15-50美元/kWh<sub>t</sub>
- ❖ 锂离子电池储能约190-280美元/kWh<sub>e</sub>

## 电池+光伏与热储能+光热发电成本对比



Sources:

1. Renewable Power Generation Costs in 2020, IRENA, 2021
2. Proceedings of the National Academy of Sciences 117.23 (2020): 12550-12557.
3. U.S. Department of Energy's (DOE's) Argonne National Laboratory

## ❑ 度电成本低 (光热等热发电系统中)

- ❖ 高温热储能约0.01-0.02美元/kWh
- ❖ 锂离子电池储能月0.15-0.2美元/kWh

# 高温热储能的规模应用



## 光热电站



光热最大装机规模: 100 MW( $\times 2$ )

机组类型: 亚临界蒸汽机组

储放热过程: 聚光加热储热介质+储热  
介质放热驱动蒸汽机组发电

储热量:  $\sim 0.5-1.2$  GWh

储放热时长: 6-12小时/天

储热材料: 导热油, 硝酸盐熔盐

最高储热温度:  $400^{\circ}\text{C}$ (油),  $565^{\circ}\text{C}$ (盐)

## 先进绝热压缩空气储能电站



压缩空气最大装机规模: 300 MW (350MW)

机组类型: 压缩空气机组

储放热过程: 热空气加热储热介质+储热介质加  
热冷空气

储热量:  $\sim 0.1-1$  GWh

储放热时长: 4-8小时/次

储热材料: 热水, 导热油, 低熔点硝酸盐熔盐

最高储热温度:  $180^{\circ}\text{C}$ (水),  $<330^{\circ}\text{C}$ (油, 盐)

## 煤电耦合熔盐储热调频调峰



火电最大装机规模:  $660\text{ MW}\times 2$

机组类型: 超临界蒸汽机组

储放热过程: 电/抽汽加热储热介质  
+储热机制放热辅助热电解耦/顶峰

储热量:  $\sim 0.1-1$  GWh

储放热时长: 2-8小时/次

储热材料: 硝酸盐熔盐

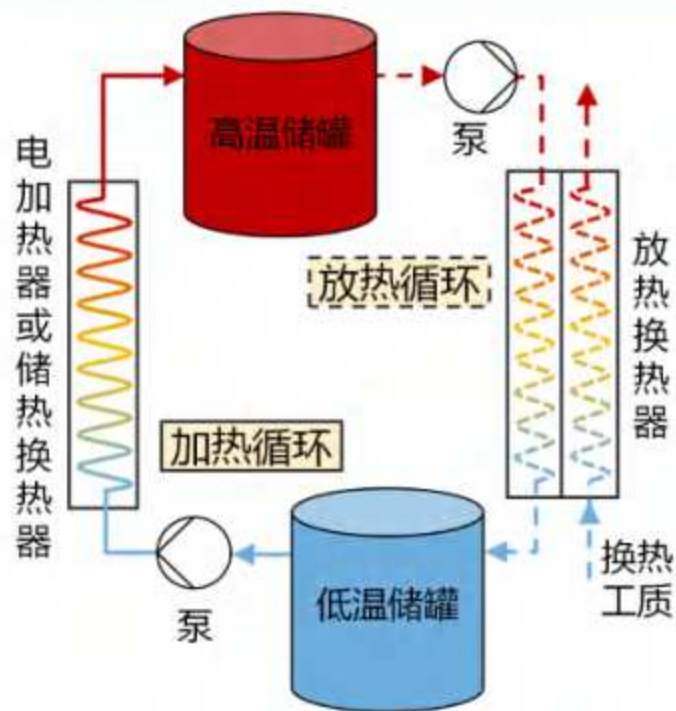
最高储热温度:  $<400^{\circ}\text{C}$

# 热储能技术分类



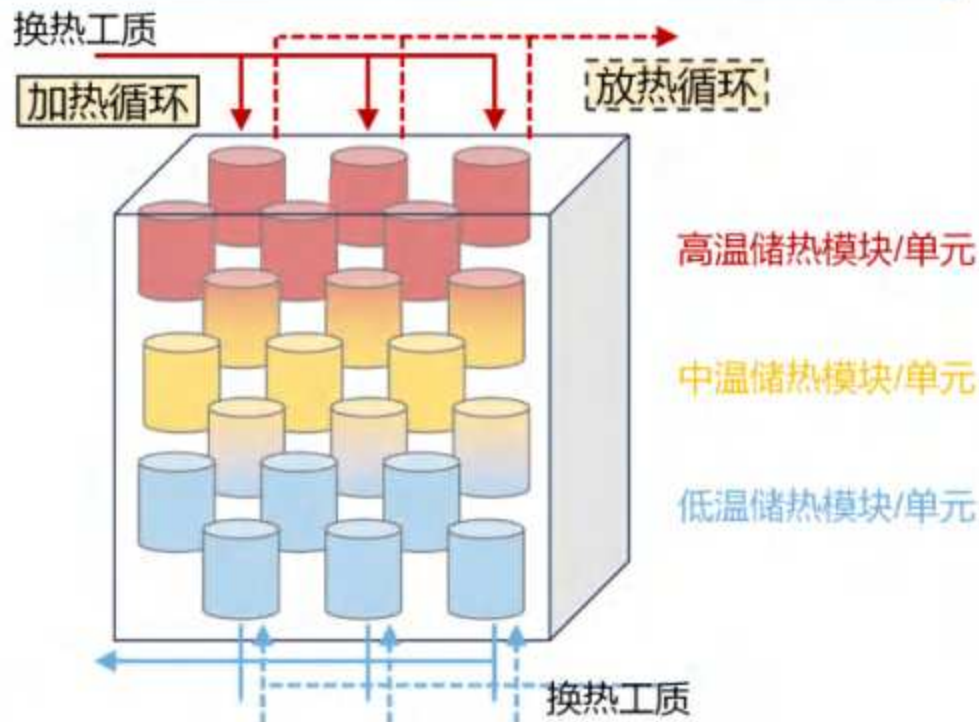
[1] Wei, G., et al. (2018). *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 81, 1771-1786.

[2] Chen, X., et al. (2018). *Energy Convers. Manag.*, 177, 792-815.



## ❑ 流动循环储热系统

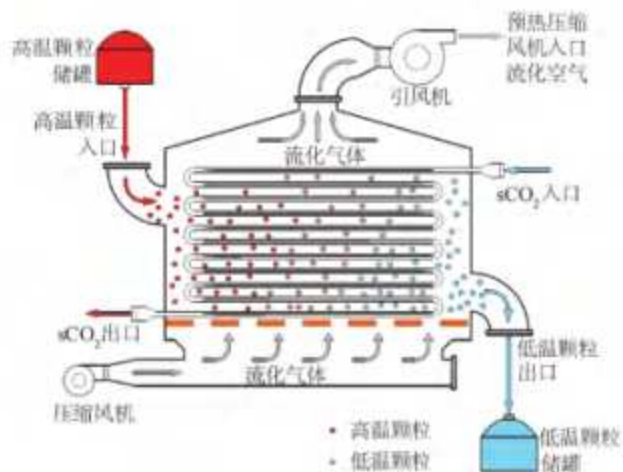
- ❖ 主要传热机制：强迫对流传热
- ❖ 优势：成本规模效应明显，传热速率高
- ❖ 劣势：必须大规模，必须维持介质循环



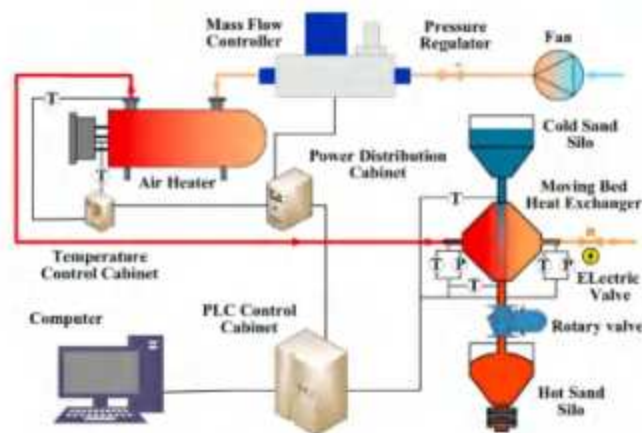
## ❑ 静态/模块化储热系统

- ❖ 主要传热机制：自然对流传热
- ❖ 优势：可分布式、撬装，安全性好
- ❖ 劣势：大规模系统成本高、传热速率待验证

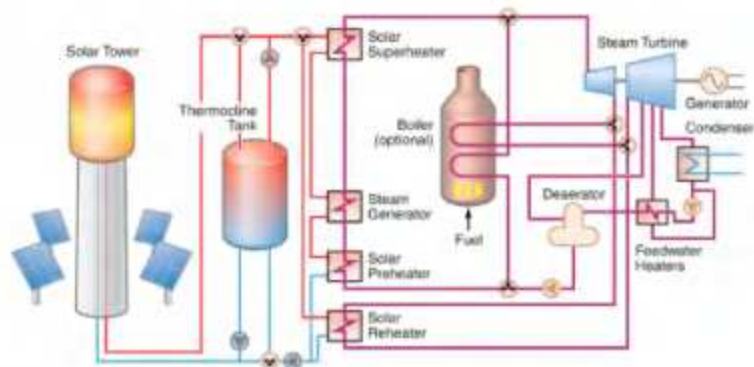
# 固体显热储能技术



杨殿祚, 太阳能学报, 2022, 43(08):195-203



International Communications in Heat and Mass Transfer(2024) Volume 159, Part A



Solar Energy(2017) 153 : 628-654

## □ 流化床储热系统

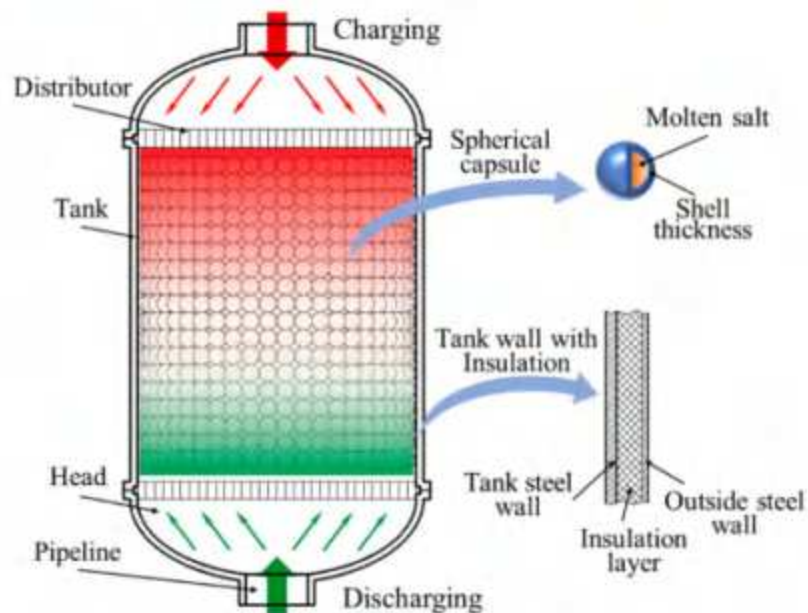
- ❖ 主要传热机制: **强迫对流**
- ❖ 优势: 释热温度稳定, 传热快
- ❖ 劣势: 流化成本很高, 热损失大

## □ 移动床储热系统

- ❖ 主要传热机制: **热传导**
- ❖ 优势: 释热温度稳定, 传热较快
- ❖ 劣势: 成本较高

## □ 固定床储热系统

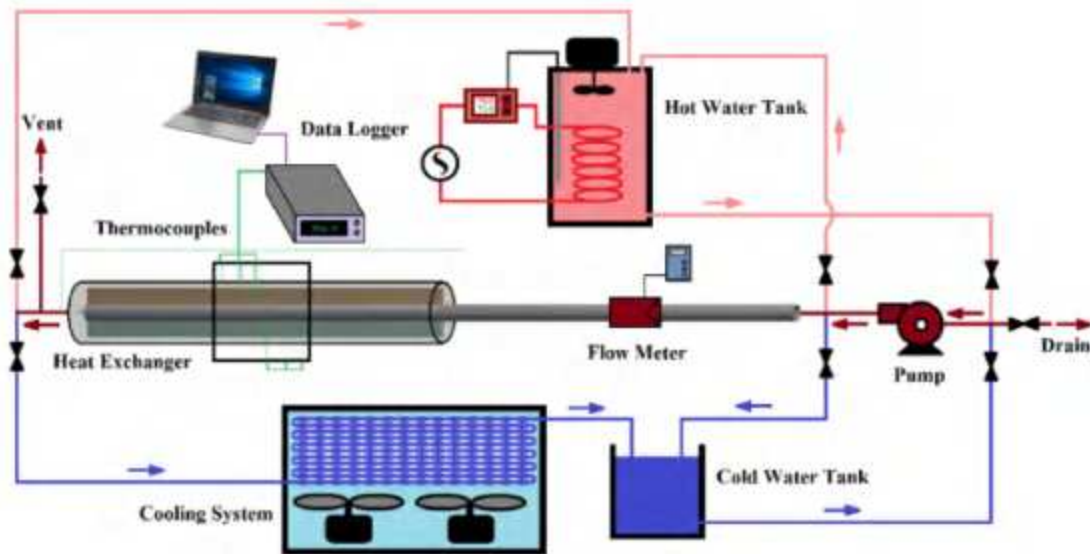
- ❖ 主要传热机制: **热传导**
- ❖ 优势: 系统构造简单, 成本低
- ❖ 劣势: 传热较慢, 释热温度不稳定



Journal of Energy Storage(2022) Volume 51, 104555

## □ 胶囊储热系统

- ❖ 主要传热机制：**热传导**(熔化前) /自然对流
- ❖ 优势：换热面积大，释热温度相对稳定
- ❖ 劣势：成本较高，高温封装材料寿命衰减快



Journal of Energy Storage(2022) Volume 47, 103561

## □ 管壳式储热系统

- ❖ 主要传热机制：**热传导** (熔化前) /自然对流
- ❖ 优势：成本与寿命相对可控，释热温度相对稳定
- ❖ 劣势：需要强化传热



### 液-气储热系统

- ❖ 主要传热机制：强迫对流
- ❖ 优势：储能密度高，传热快
- ❖ 劣势：气体压力高，安全性还需论证

# 热传导与对流传热速率对比

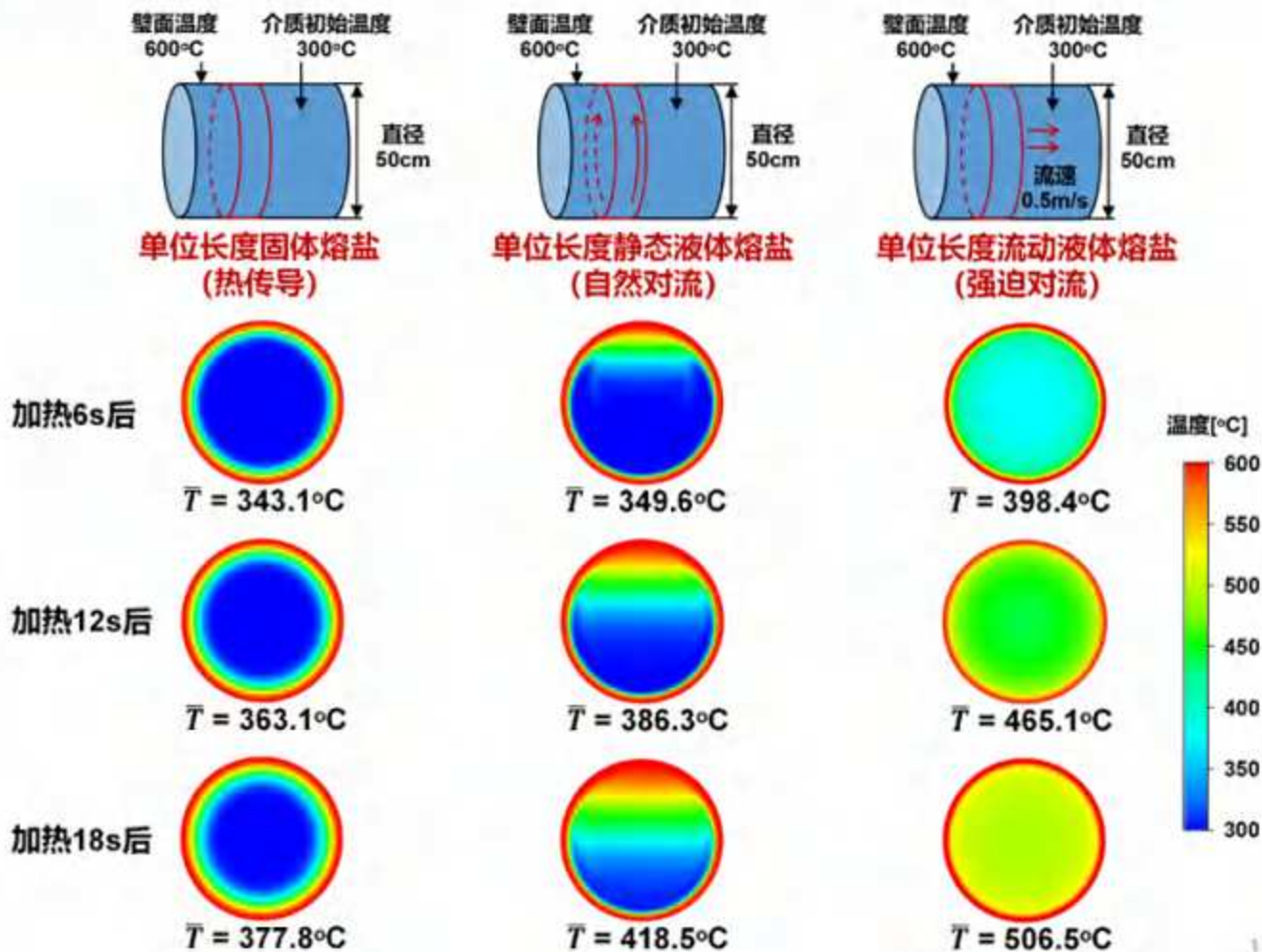


- 假设存在同样几何尺寸和初始温度的固体、静态液体和流动液体熔盐作为储热介质，**三种介质热物性均选用太阳盐的物性**

- 设置介质表面温度突然升高  $300^{\circ}\text{C}$ ，通过数值模拟方法求解加热不同时间后三种介质的温度分布

- 结果显示流动液体平均温度上升最快，静态液体次之，固体温度上升最慢

❖ **传热速率：强迫对流 >> 自然对流 >> 固体热传导**

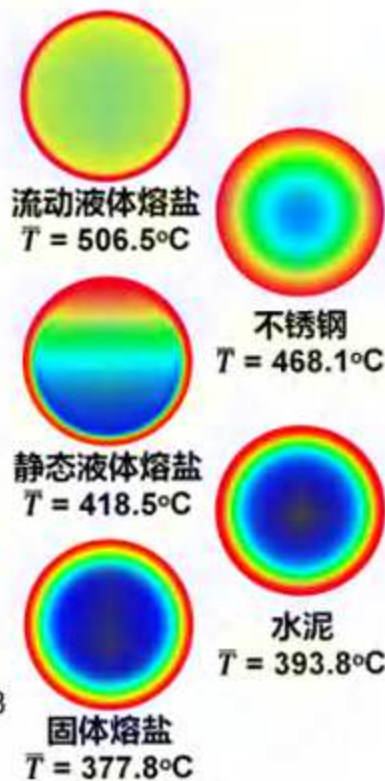
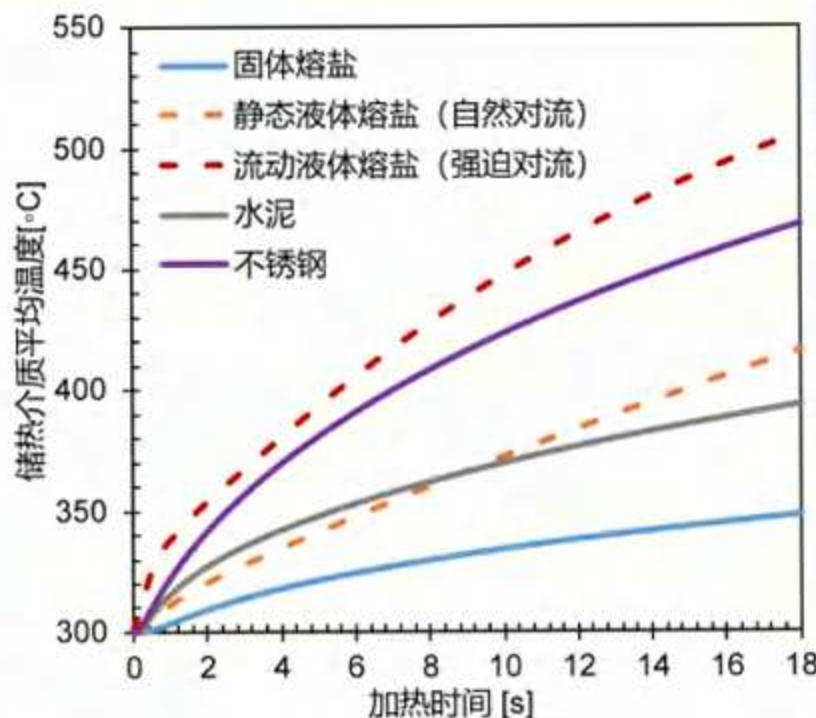


# 不同介质传热速率对比



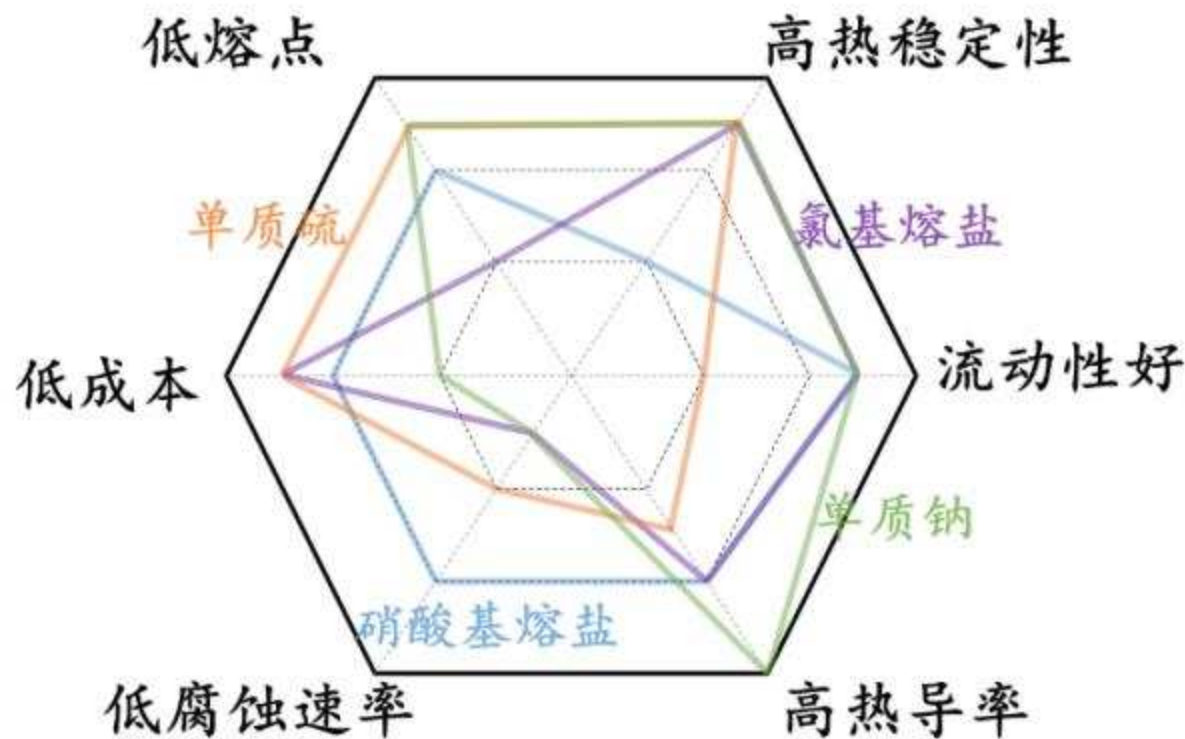
□ 选用相同假设，考虑不锈钢介质热传导（高热导率固体， $k \approx 20 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ）与水泥介质热传导（中等热导率固体， $k \approx 2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ）与此前三种情形比较

- ❖ 流动液体熔盐强迫对流传热速率高于不锈钢介质
- ❖ 静态液体熔盐自然对流的传热速率前期略慢于水泥介质，而之后由于对流行为使得壁面处的流体与固体温差保持一定数值，因此熔盐自然对流传热速率在加热后期将高于水泥介质
- ❖ 固体熔盐热传导速率较慢，因为其热导率较低，约 $k \approx 0.5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ，但该数值仍等于或略高于多数相变储热材料的热导率



## 液体显热储热介质的关键性能指标

- ❖ 低熔点
- ❖ 高热稳定性
- ❖ 流动性好（低粘度）
- ❖ 高热导率
- ❖ 高比热容
- ❖ 低腐蚀速率
- ❖ 低成本

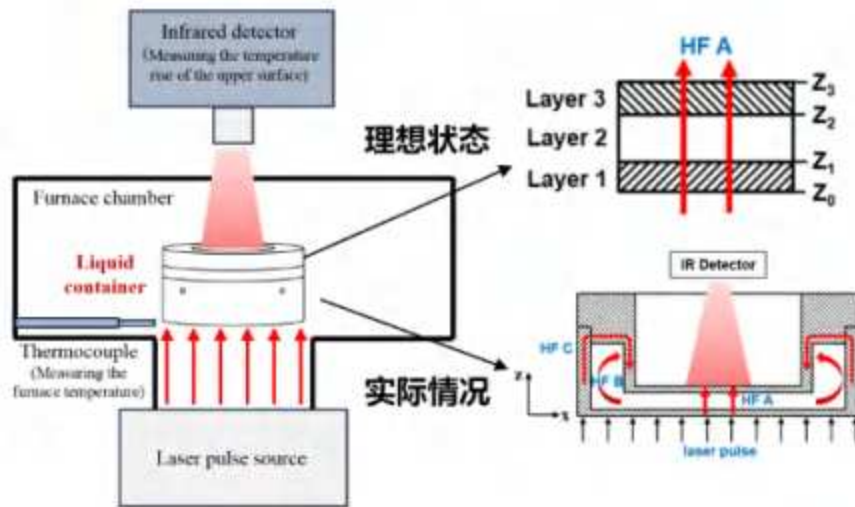


# 高温液体热导率的测量

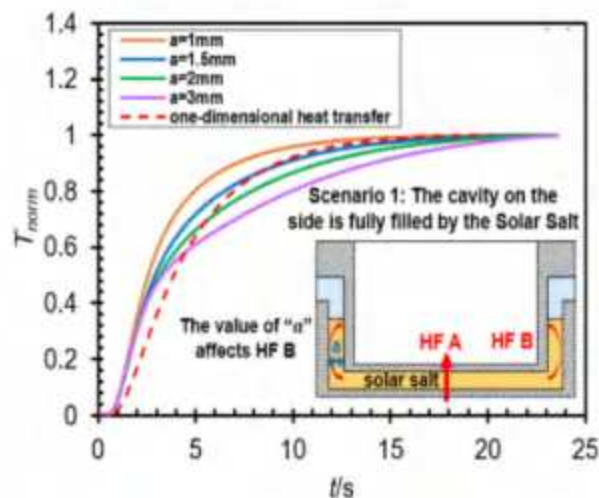


- 熔盐的众多物性中，热导率的测量较为复杂，此前不同文献中的数据偏差很大
- 当前研究提出了一个改进的**激光闪光测量方法**以提升熔盐在液态时的热导率测量精度
  - ❖ 优化了相关液体容器设计，最小化相关测量误差以及热场中的不理想因素（存在对流、侧壁导热等）

## 激光闪光分析中的熔盐传热过程



## 测量温度信号关于容器设计参数的变化规律



### 最优容器设计



# OUTLINES

1 研究背景

2 各类高温热储能技术对比

3 熔融盐热储能技术

4 单质硫热储能技术

5 系统耦合与应用

# 熔融盐热储能技术



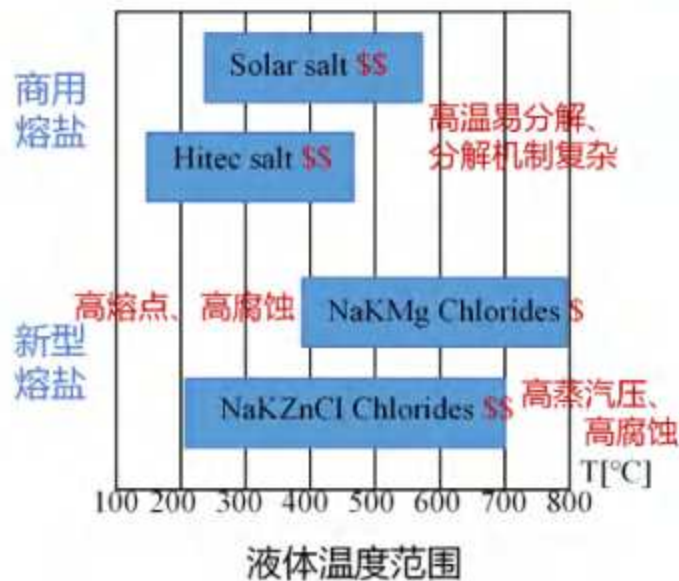
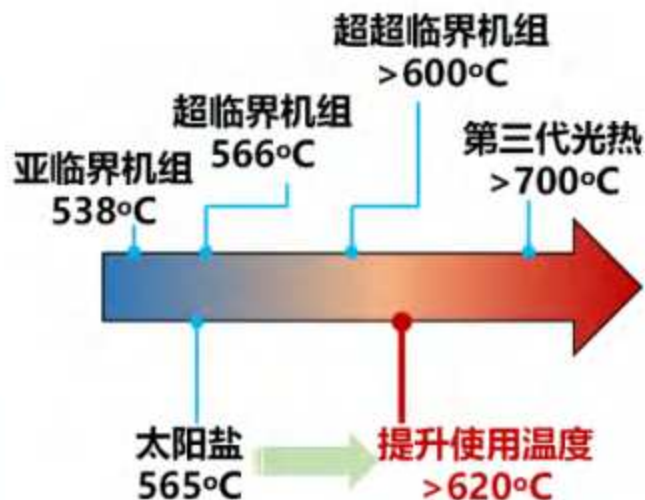
- ❑ **硝酸基熔盐**具有粘度低，腐蚀速率不高，成本相对较低的优势，但其高温易分解，储热温度上限无法满足超临界机组的要求
- ❑ **氯基熔盐**高温不分解，但熔点高（低熔点配方蒸气压高）且高温腐蚀性极强



太阳盐(240-565°C)  
60%NaNO<sub>3</sub>/40%KNO<sub>3</sub>



Hitec盐(150-450°C)  
53%KNO<sub>3</sub>+40%NaNO<sub>2</sub>+7%NaNO<sub>3</sub>



目前广泛使用的两种熔盐的参数表

| 熔盐                  | 组分 (wt%)                                                    | 熔点 (°C) | 温度上限 (°C) |
|---------------------|-------------------------------------------------------------|---------|-----------|
| 太阳盐<br>(Solar salt) | 60NaNO <sub>3</sub> -40KNO <sub>3</sub>                     | 240     | 65        |
| Hitec salt          | 7NaNO <sub>3</sub> -53KNO <sub>3</sub> -40NaNO <sub>2</sub> | 142     | 450       |

## 问题:

为什么太阳盐的工作温度上限是~565°C，而Hitec 盐是450°C？

## 挑战:

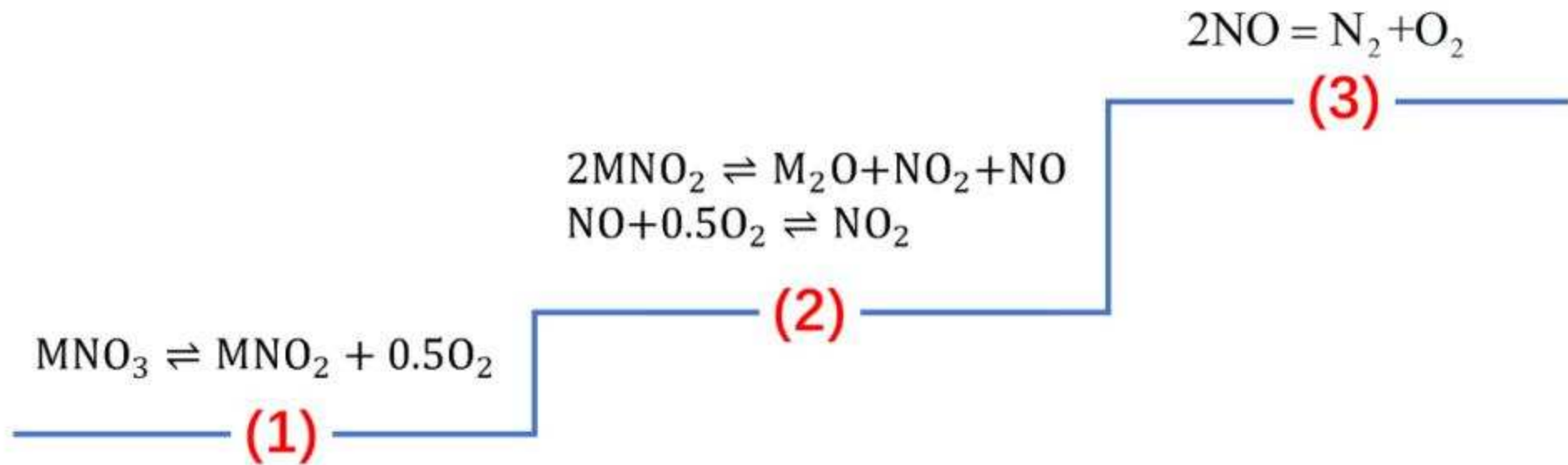
如何进一步提高硝基熔盐的使用温度上限，例如：对于超临界机组，需至少>580°C？

# 硝酸盐的高温分解反应过程



硝基熔盐在高温下的稳定性，主要与以下三个反应相关：

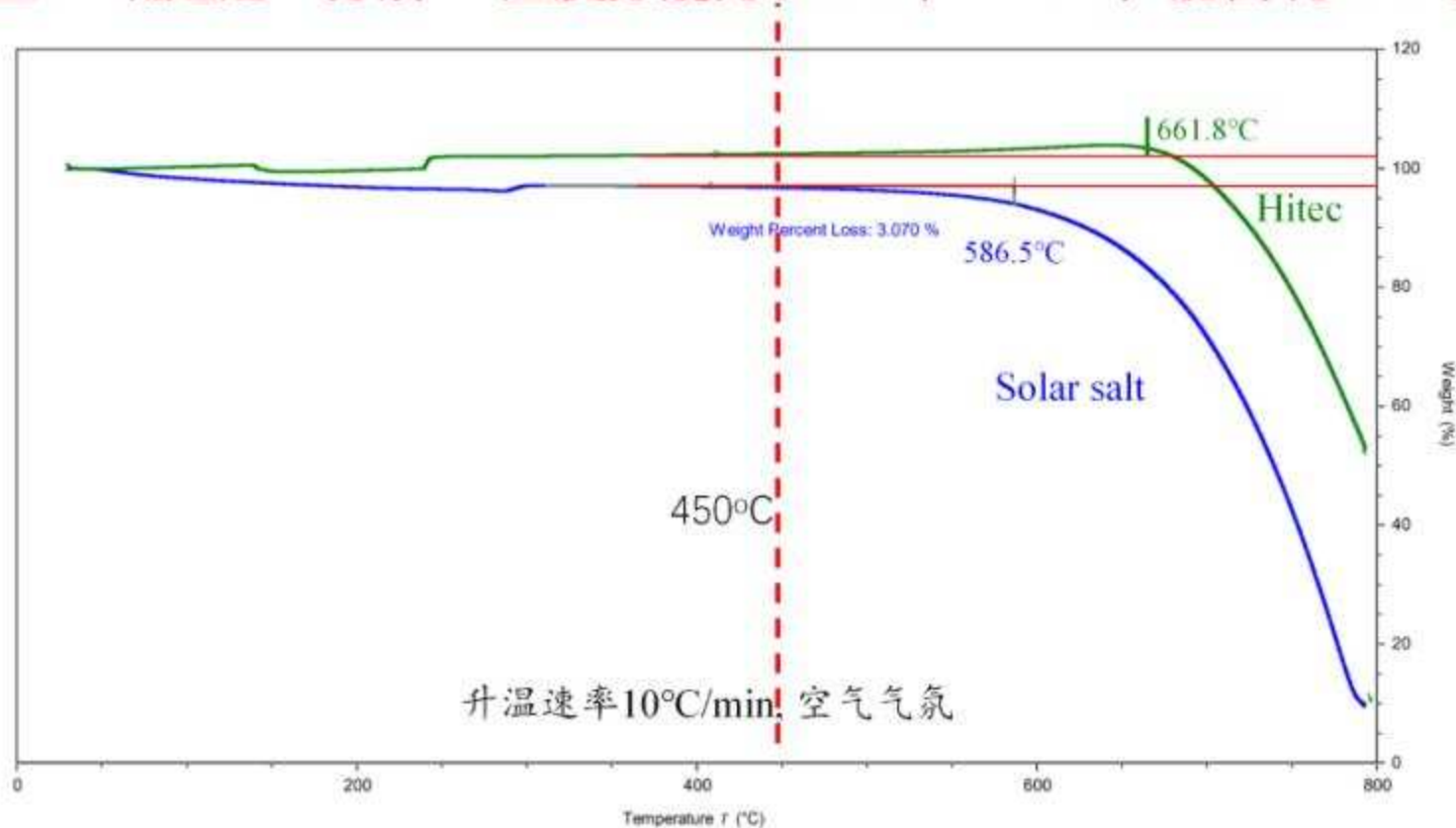
- (1) 硝酸根 ( $\text{MNO}_3$ )与 亚硝酸根 ( $\text{MNO}_2$ )的相互转化 (可逆反应)
- (2) 生成氧化物的反应 ( $\text{M}_2\text{O}$ ) (可逆反应)
- (3) 生成氮气的反应 (不可逆反应)



# 太阳盐和Hitec盐的TGA测试结果



温度 $> 450^{\circ}\text{C}$ 时：太阳盐随着温度升高重量减小，而Hitec盐重量先增加再减小。  
以失重3%确定的“分解”温度分别为 $587^{\circ}\text{C}$ ， $662^{\circ}\text{C}$ ，能否说Hitec盐更稳定？



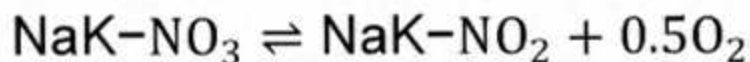
# 太阳盐和Hitec盐的高温反应



## 回答之前提出的问题:

为什么太阳盐的工作温度上限是~565°C? Hitec 盐是450°C?

温度高于~450°C时, 太阳盐(60NaNO<sub>3</sub>-40KNO<sub>3</sub>) 开始分解, 最开始的反应如下, 我们推测在~565°C, 会生成一小部分亚硝酸盐。

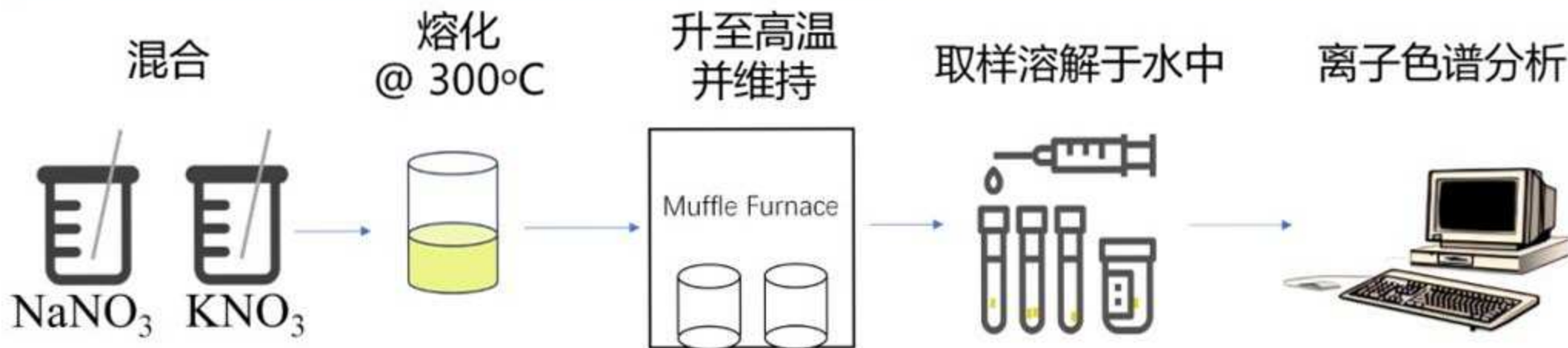


相反, Hitec盐中含有大量的亚硝酸根, 在空气气氛中一开始会先被氧化, 产生增重现象。因此Hitec盐更适合在氮气保护气氛下使用。



温度>565°C时, 推测两种盐会首先由于反应平衡达到接近的组分, 或者说NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 近似相等。更高温度下 (~620-680°C) 会生成氧化物和N<sub>2</sub>, 均产生快速失重的现象。

# 太阳盐和Hitec盐的高温稳定性实验



实验方法可靠性验证

| 样本 | 组分                                      | 理论NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> % | 实测NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> % | 误差%  |
|----|-----------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------|
| 1  | 70NaNO <sub>3</sub> -30KNO <sub>2</sub> | 30.00                            | 29.48                            | 0.52 |
| 2  | 60NaNO <sub>3</sub> -40KNO <sub>2</sub> | 40.00                            | 40.84                            | 0.84 |
| 3  | Hitec                                   | 48.85                            | 49.79                            | 0.94 |
| 4  | Hitec                                   | 48.85                            | 49.91                            | 1.06 |

# 太阳盐和Hitec盐的高温稳定性实验



□ 经过~200小时的加热，NO<sub>2</sub><sup>-</sup>的比例变化：

❖ Hitec Salt: 50% → 6.3%(mol)

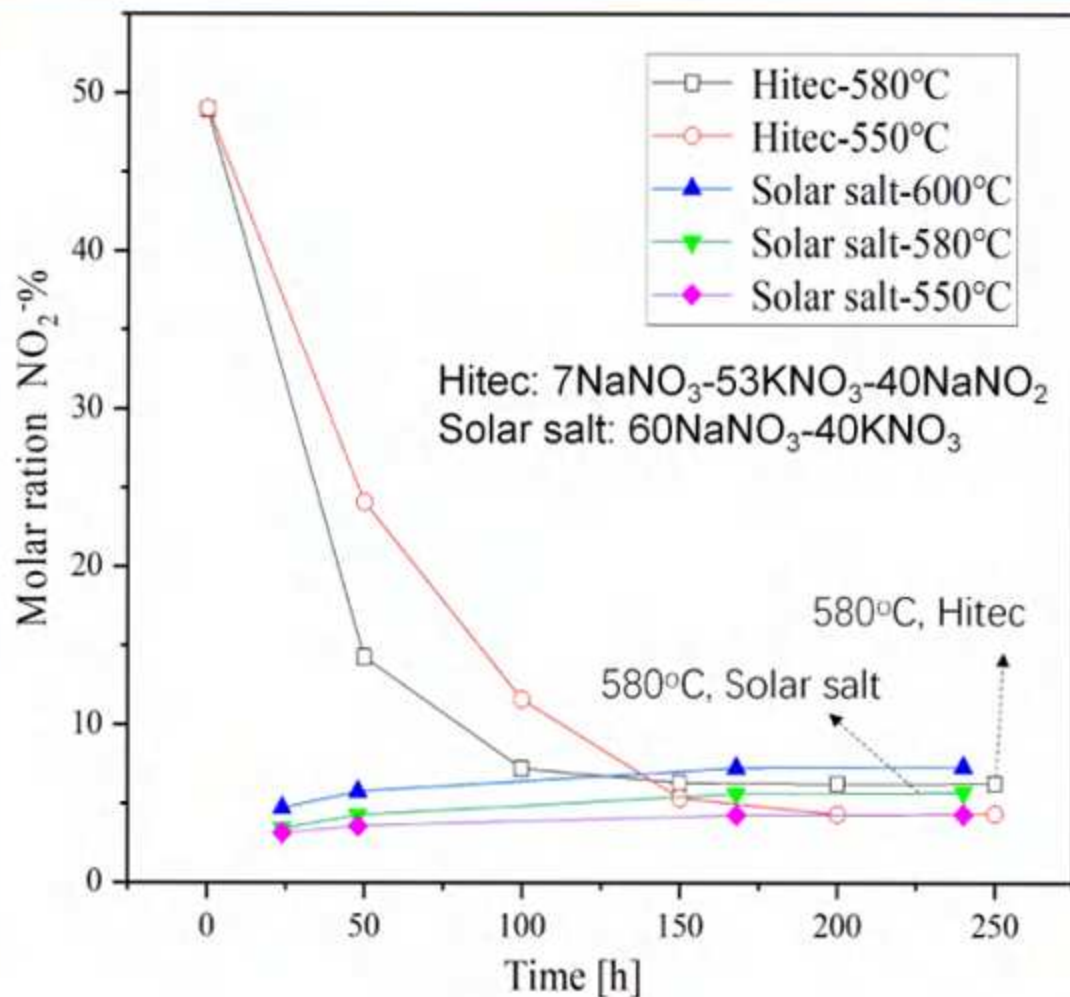
❖ Solar Salt: 0 → 5.7% (mol)

□ Na:K 比也影响平衡后的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 比例

❖ 更高的K，产生更少的NO<sub>2</sub><sup>-</sup>

□ 高于565°C，由于反应速率变快，硝基熔盐中的硝酸根-亚硝酸根之间的反应需要考虑

□ 由于氧气参与硝酸根-亚硝酸根的反应，硝基熔盐的高温稳定性可以通过气氛调节的方式进行控制



# 挑战：提高硝基熔盐的高温稳定性



**一、需要从机理上进一步研究以下三个相关反应，尤其是（1）和（2）：**

- (1) 硝酸根 ( $\text{MNO}_3$ )与 亚硝酸根 ( $\text{MNO}_2$ )的相互转化 (可逆反应)
- (2) 生成氧化物的反应 ( $\text{M}_2\text{O}$ ) (可逆反应)
- (3) 生成氮气的反应 (不可逆反应)

**二、需要更先进的测试方法：**

服役工况下的测试（静态、动态），反应物的在线检测方法（气-液-固产物），.....

**三、需要发展控制硝基熔盐稳定性的方法：**

配方设计（阳离子、阴离子），气氛控制（氧分压），.....

# 熔盐电加热器技术瓶颈



- ❑ 熔盐储热与新型电力系统深度耦合需要**提升电加热器电压等级与功率水平**
- ❑ 传统**电阻式**加热器存在**提高电压等级的同时传热性能变差**的矛盾；新型**感应式**电加热器则**功率较低**，硬件电路复杂且体积庞大；**电极式**加热目前**电压等级低**

调峰火电厂（电加热+熔盐储热）



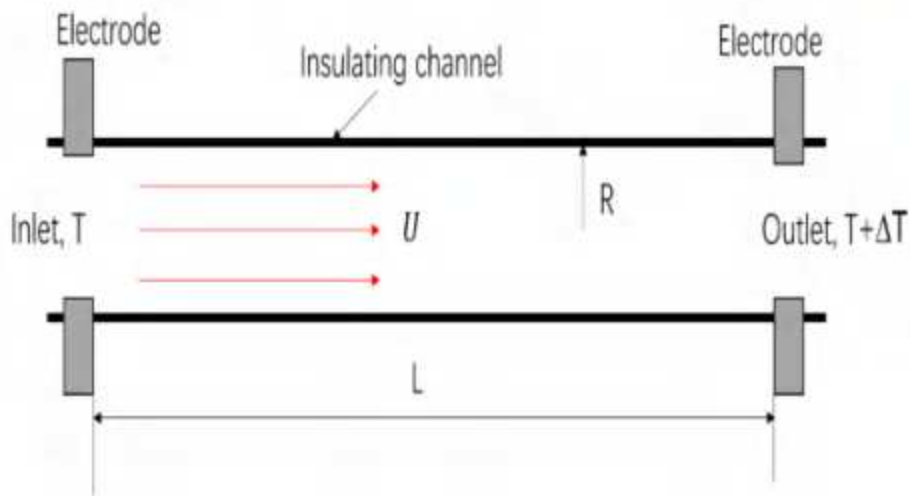
|       | 电阻式管式加热                 | 感应式加热                      | 电极式加热       |
|-------|-------------------------|----------------------------|-------------|
| 电加热技术 |                         |                            |             |
| 电压    | ~690V                   | ~6000V                     | ~24V        |
| 功率    | ~36MW                   | <~0.5MW                    | ~50MW       |
| 存在的问题 | 6000V目前可以实现，但体积大，传热性能变差 | 功率因数一般较低；硬件电路复杂，体积庞大，灵活性不足 | 大容积通电，电压等级低 |

# 熔盐电极式加热技术

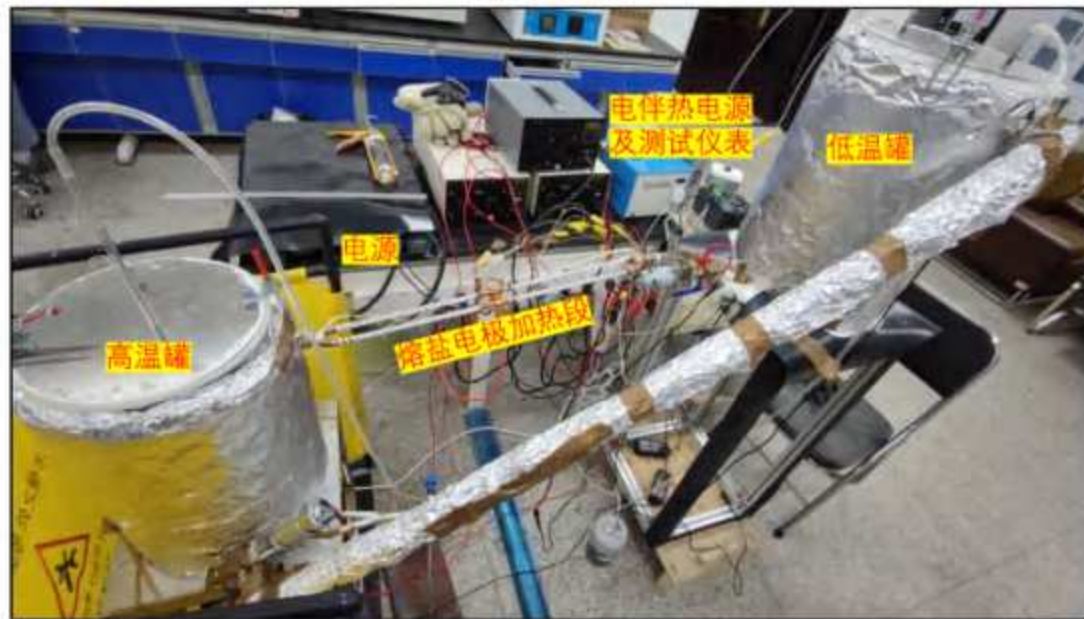


- 提出一种电极式熔盐电加热的原理与设计方法
- 搭建熔盐电极式加热试验系统，初步验证电极式加热原理可行性以及理论预测结果的有效性

电极加热原理



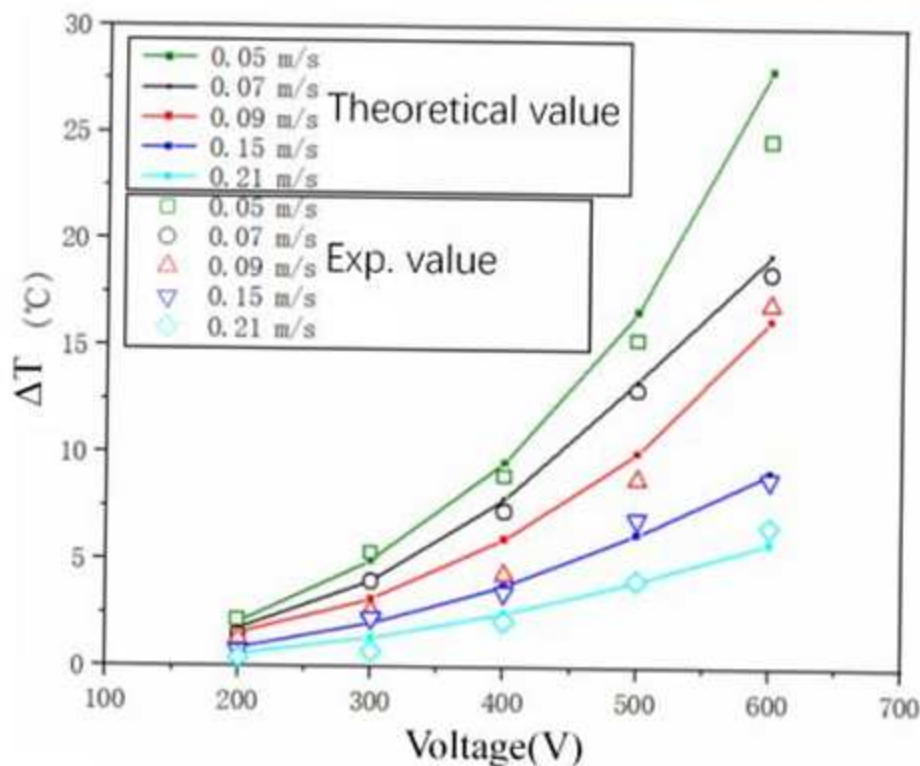
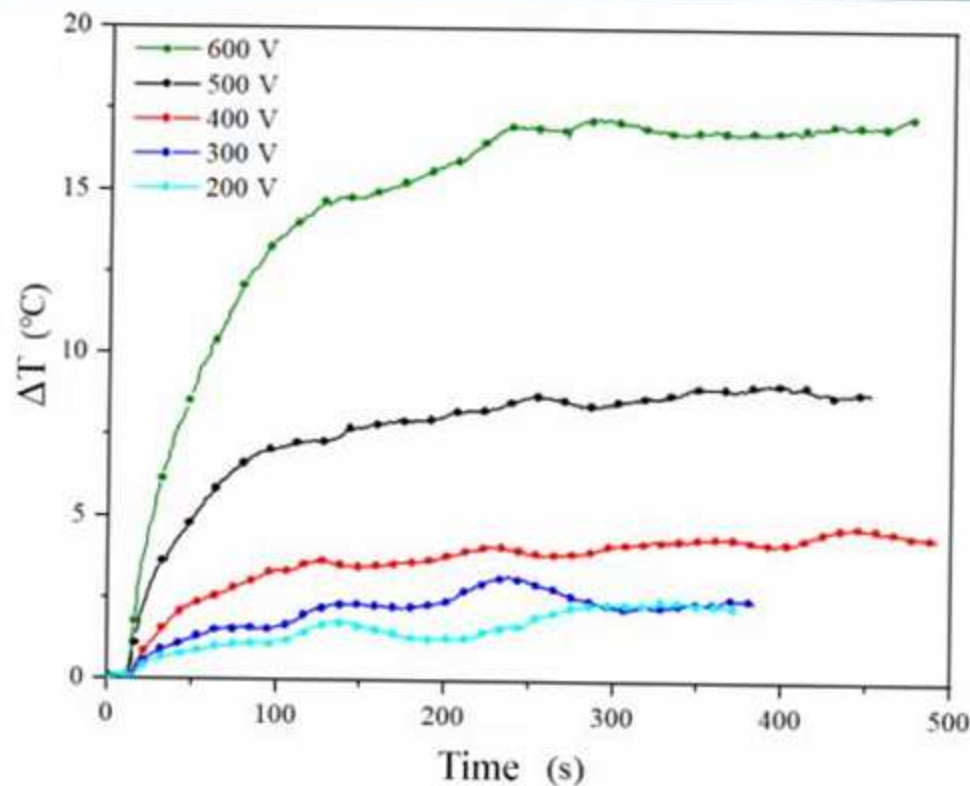
测试平台



# 熔盐电加热实验结果



在熔盐流量0.05 m/s - 0.21 m/s, 电压从200V - 600V的范围内测试了电极式加热器, 测试结果符合理论计算

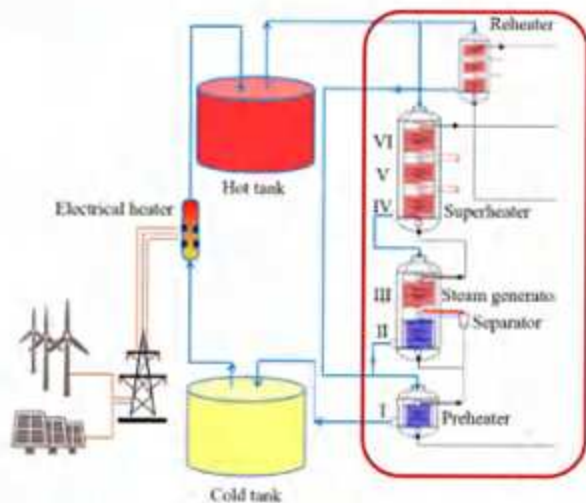


# 熔盐-蒸汽换热器技术瓶颈

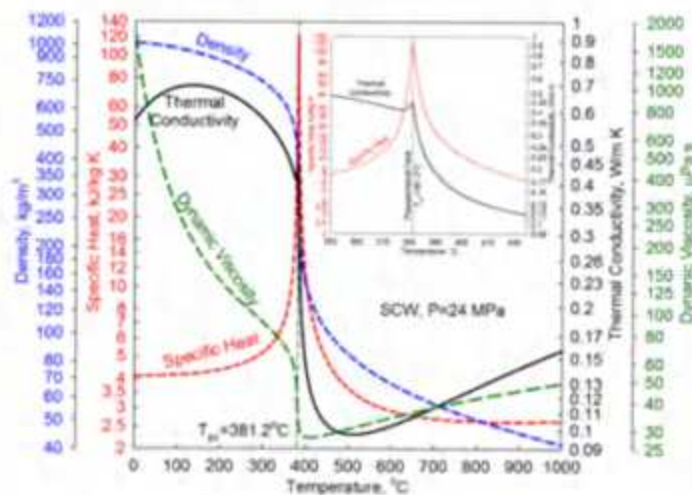


- ❑ 熔盐-蒸汽换热器是基于热储能的火电厂改造以及调峰电厂的核心装备
- ❑ 蒸汽尤其是超临界蒸汽在临界点附近具有**十分剧烈的物性参数变化**，造成换热器出现“夹点”
- ❑ 传统换热器设计方法在该情形下具有较大误差，需要**开发准确的换热器设计模型**

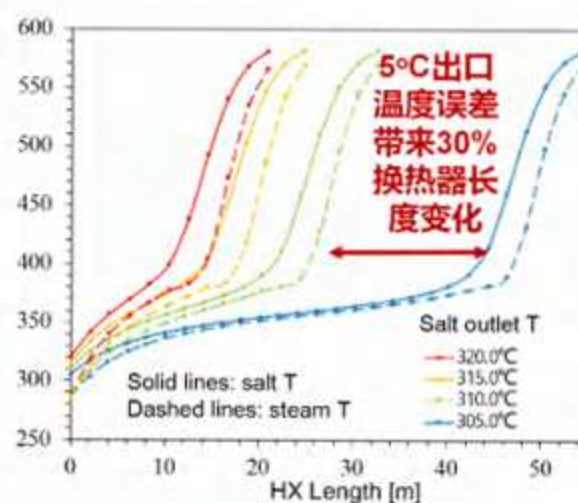
## 基于热储能的改造火电厂以及调峰电厂中的换热器



## 超临界蒸汽物性参数变化规律



## 熔盐-蒸汽换热器温度分布

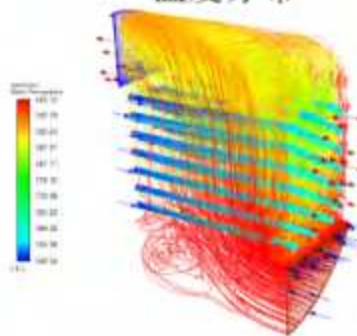


- 经过实验验证的CFD模型可以**准确模拟**换热器中两侧流体的**温度场、速度场与压力场**
- 目前已对**管壳式换热器以及绕管式换热器**中的核心区域完成模型建设与验证工作
- 不过，大规模换热器的CFD仿真具有**庞大的计算量**，无法完成换热器多参数优化等工作

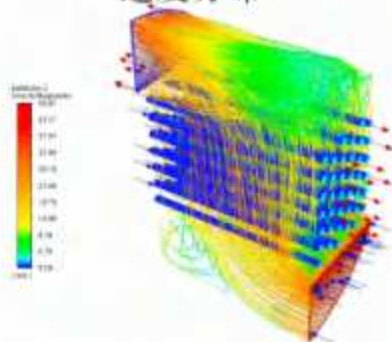
管壳式换热器模型



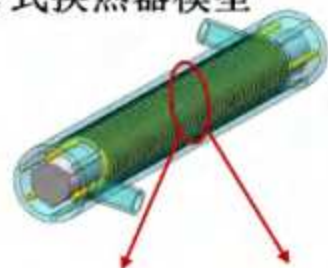
温度分布



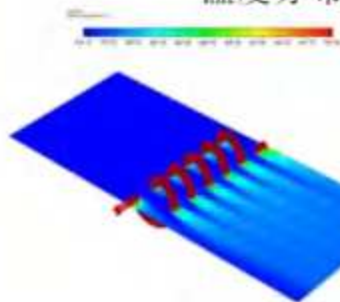
速度分布



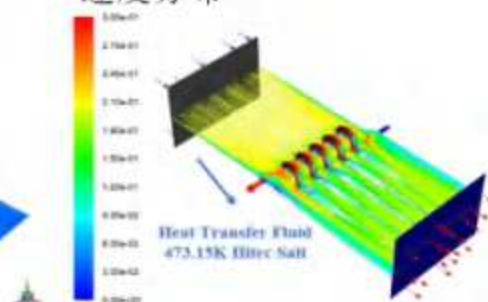
绕管式换热器模型



温度分布



速度分布

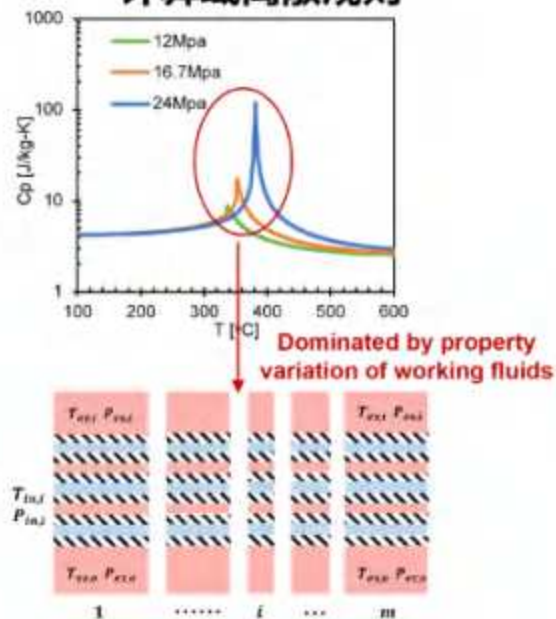


# 分布式参数模型构建

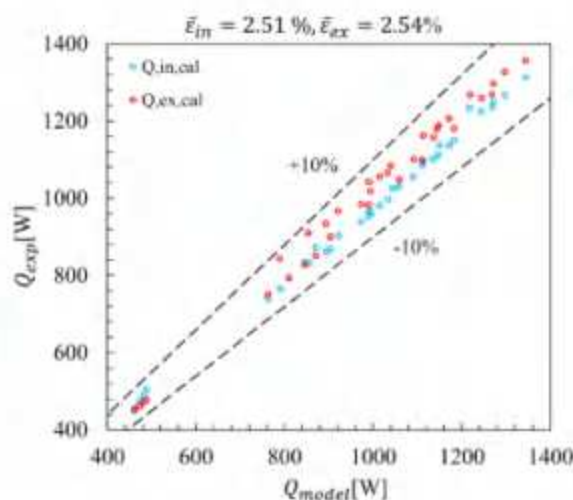


- 通过将求解域离散成多个能量平衡的计算单元来求解温度分布，较CFD模型提升计算速度超过100倍
  - ❖ 离散单元尺度由当前温度下工质的热物性梯度决定，同时保证计算效率与准确度
  - ❖ 当前模型与25组实验数据吻合较好，平均误差维持在 $\pm 3\%$ 以内
  - ❖ 当前模型较此前发表的分布式参数模型具有更高的计算效率与精度

### 计算域离散规则



### 与实验数据对比



### 与此前模型对比

| 模型          | 计算时间  | 离散单元数量 | 误差           |
|-------------|-------|--------|--------------|
| 当前模型        | 0.7s  | 50     | $< \pm 3\%$  |
| 文献 [1] 中的模型 | 17.6s | 100    | $< \pm 10\%$ |

[1] Krishna, A. B., et al. ASME Journal of Heat Transfer, 2022, 144(5): 051903.

# OUTLINES

- 1 研究背景
- 2 各类高温热储能技术对比
- 3 熔融盐热储能技术
- 4 单质硫热储能技术
- 5 系统耦合与应用

# 单质硫热储能

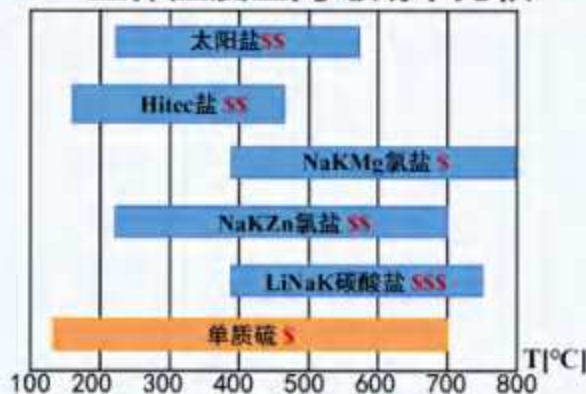


## 单质硫作为储热介质的优势

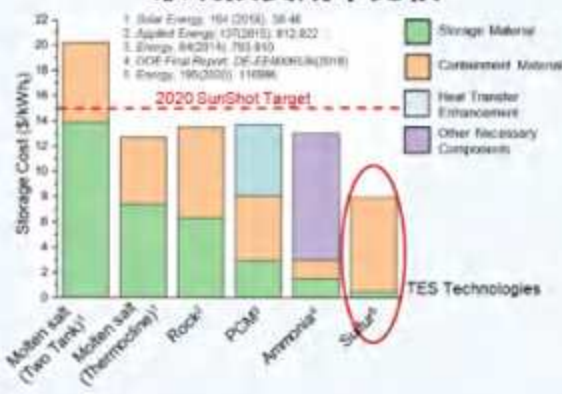


- ❑ 硫元素在地表储量大、单质硫生产**成本极低**(约1000元/吨), 只有商用**硝酸盐熔融盐** (太阳盐) 的1/5;
- ❑ **高温稳定不分解**, 蒸气压低;
- ❑ **熔点低**(约114°C), 比商用**硝酸盐熔融盐** (太阳盐) 低100°C左右。

## 工作温度区间与成本比较



## 系统投资成本比较



## 单质硫热储能技术的瓶颈

| 介质名称                         | 粘度 [mPa·s] | 腐蚀速率* [μm/年] |
|------------------------------|------------|--------------|
| 太阳盐                          | ~1-6       | ~7           |
| Hitec 盐                      | ~2-14      | <10          |
| NaCl-KCl-MgCl <sub>2</sub> 盐 | ~2-8       | ~120         |
| NaCl-KCl-ZnCl <sub>2</sub> 盐 | ~4-35      | ~190-380     |
| 单质硫                          | >100       | ~260         |

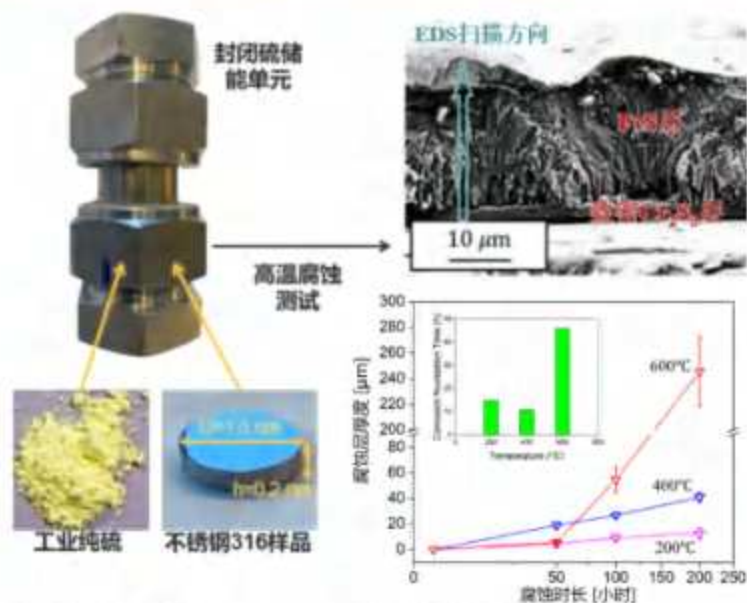
\*500°C下对不锈钢材料

- ❑ 单质硫**高温腐蚀性较强**, 对不锈钢材料的年腐蚀速率**高于硝酸盐熔融盐**。
- ❑ 液态单质硫**粘度偏高**, 工业纯硫的峰值粘度大于100mPa·s, **限制了其流动与传热**;

# 单质硫腐蚀与抗腐蚀机理研究



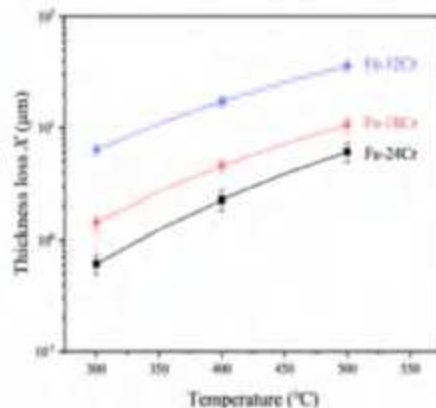
- ❑ 封闭条件下400°C单质硫对SS316材料的腐蚀速率超过100 $\mu\text{m}/\text{年}$ ，不过腐蚀产物相对均匀，产物内侧的**致密硫化铬层有一定的抗腐蚀保护作用**；
- ❑ 改进方法进一步探究合金中元素比例变化对于致密腐蚀产物钝化效果的影响，并筛选得到**适用单质硫储热系统的高温耐蚀合金**。



改进的腐蚀试验装置



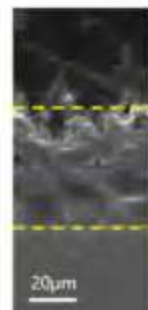
铬元素比例提升  
降低单质硫年腐蚀速率



耐硫合金筛选



传统耐蚀不锈钢SS310s



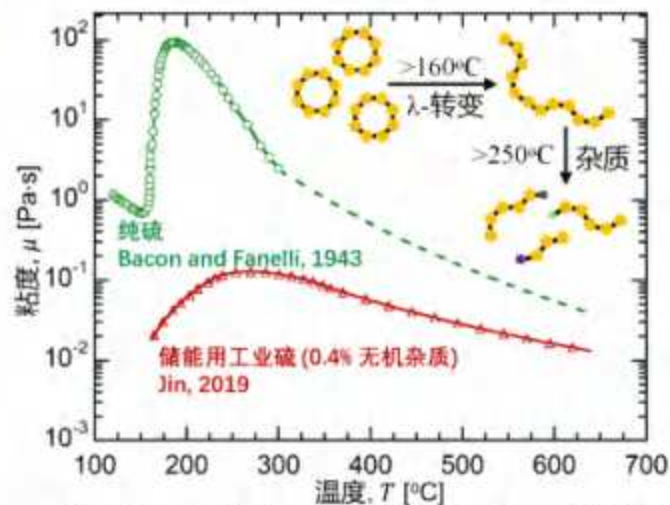
高铬含量铁素体不锈钢XM27

新开元等，一种高温储热介质腐蚀特性测试装置及方法，申请中  
Huang, X., et al. submitted.

# 单质硫粘度调控机理研究



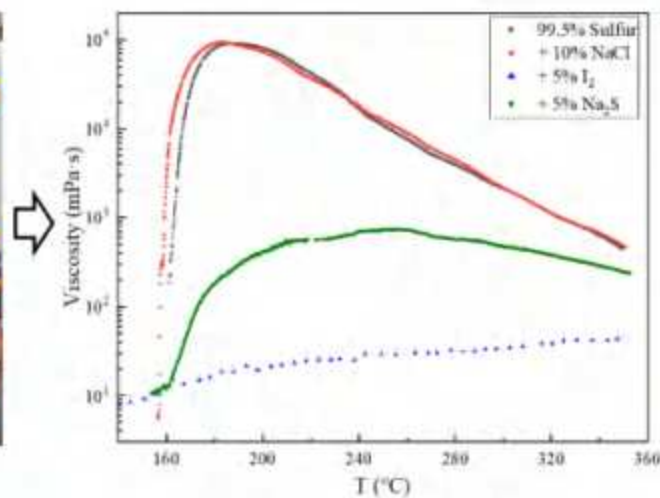
- 此前研究表明：单质硫分子在160-250°C左右的聚合行为导致其粘度急速上升，但长链硫会在温度进一步升高或存在杂质等条件下发生解聚，从而降低粘度。
- 正在研究少量掺杂对单质硫长链分子产生解聚作用机制，以此开发单质硫粘度调控技术与低粘度掺杂硫储热材料体系



单质硫分子聚合与解聚作用对于粘度的影响

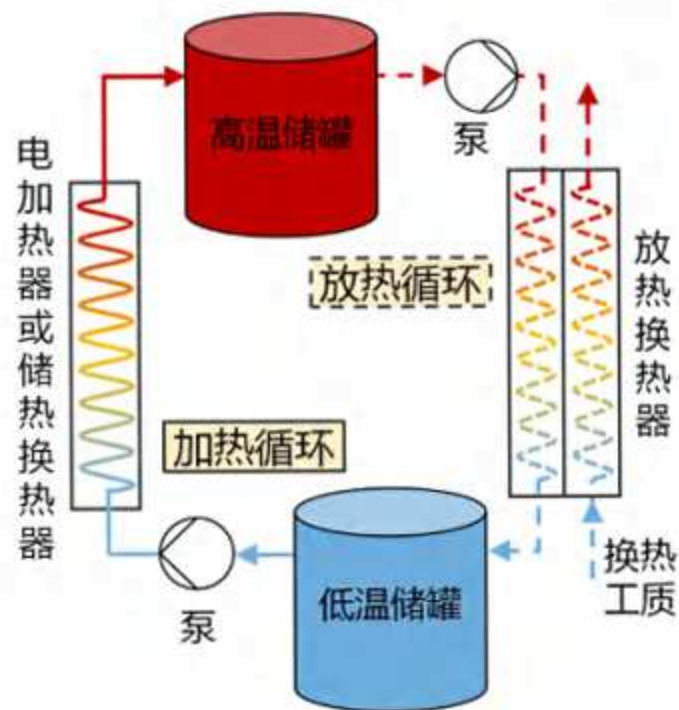


单质硫粘度测试系统



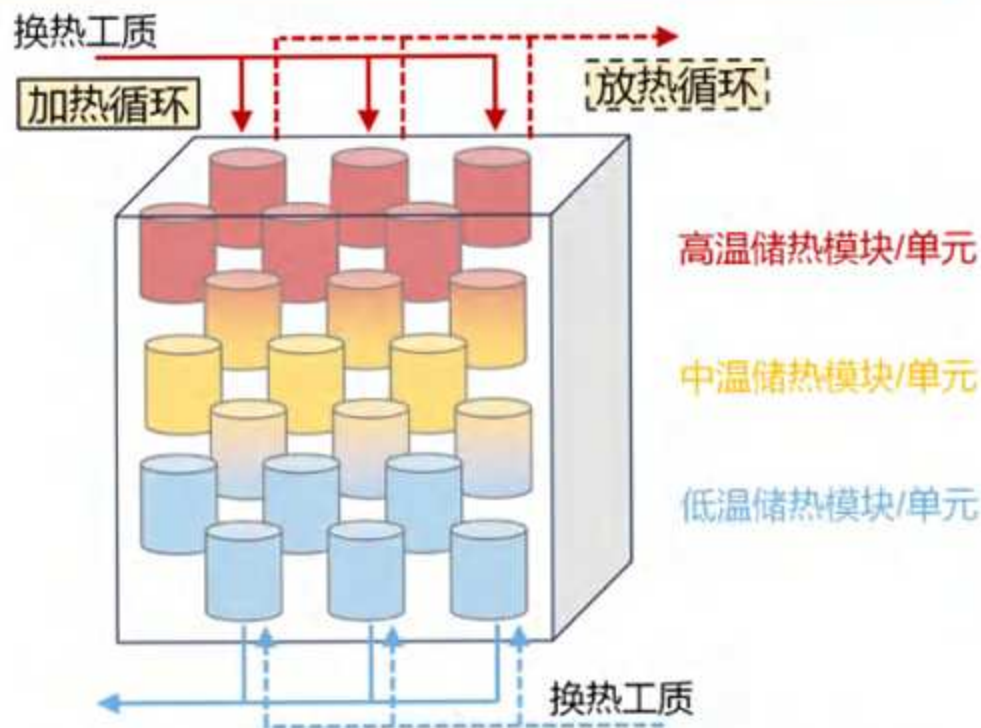
掺杂硫粘度对比

# 模块化静态液体显热储能技术



## □ 双罐循环储热系统：强迫对流换热

- ❖ 优势：成本规模效应明显，传热速率高
- ❖ 劣势：必须大规模，必须维持介质循环



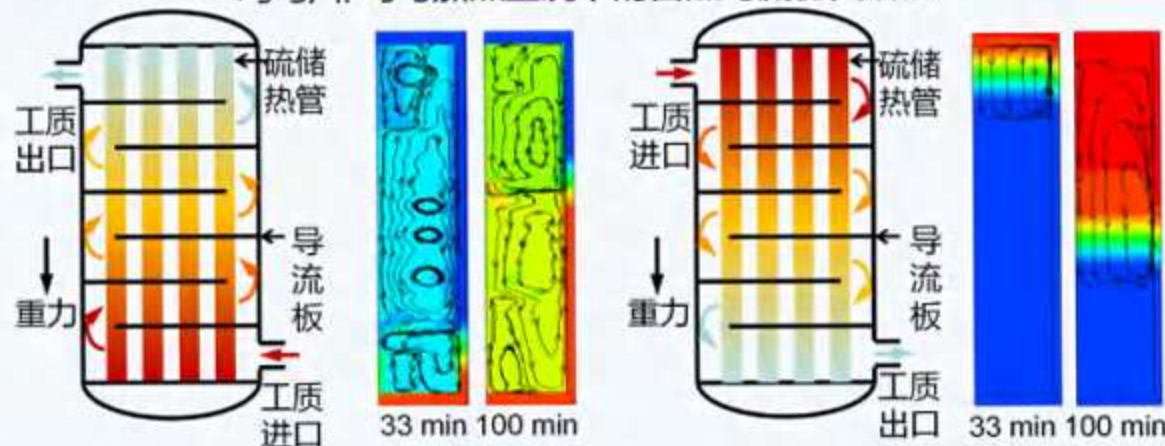
## □ 模块化静态储热系统：自然对流换热

- ❖ 优势：可分布式、撬装，安全性好
- ❖ 劣势：大规模系统成本高、传热速率待验证。

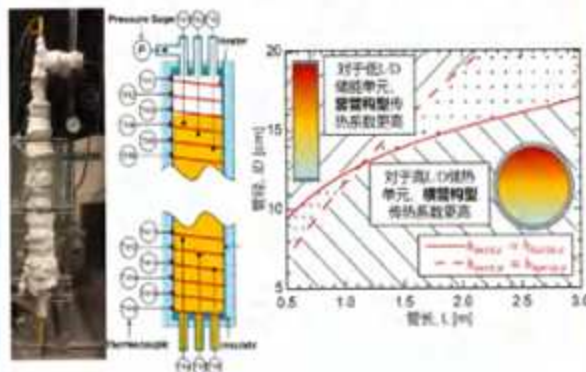
# 管式单质硫储热单元传热研究



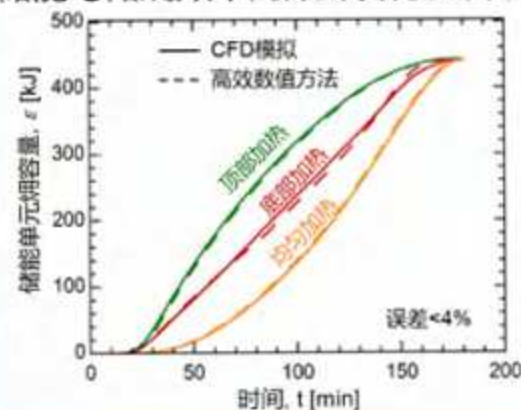
均匀/非均匀加热工况下的自然对流仿真研究



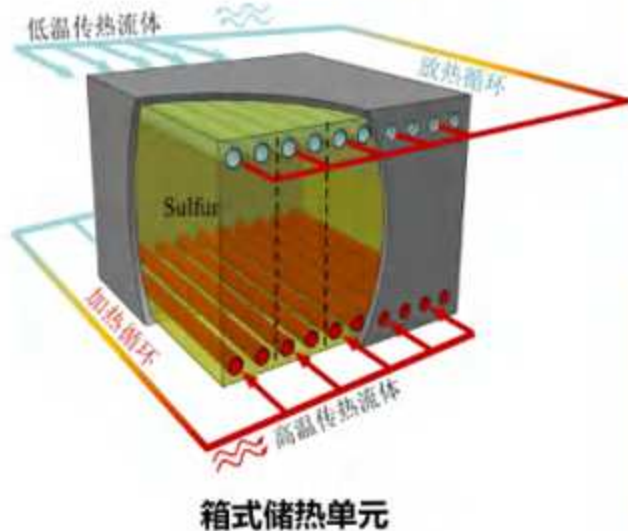
管式储能单元传热性能测试与对比



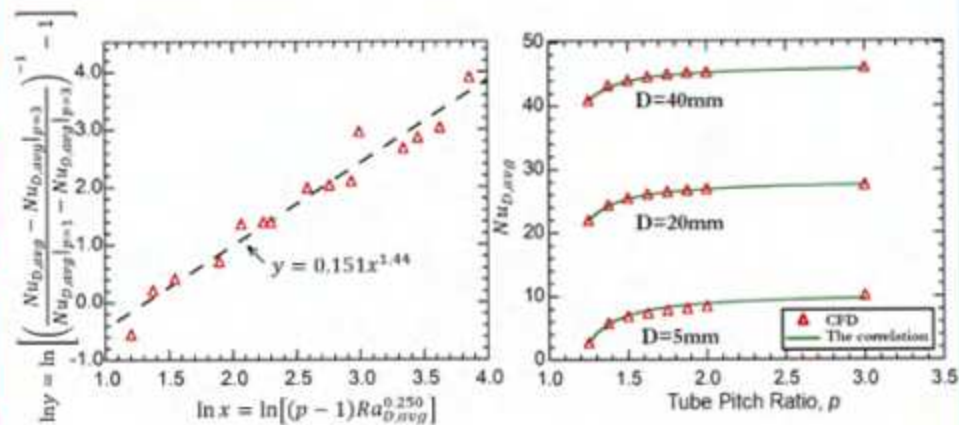
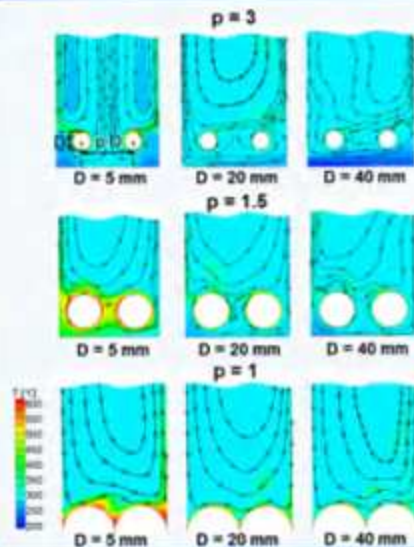
储能与储焓效率高效计算方法开发



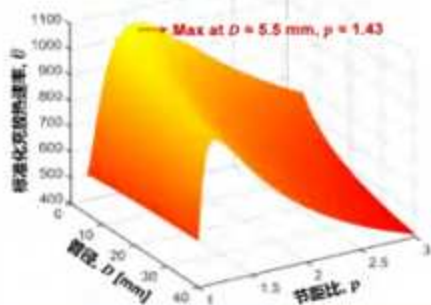
# 箱式单质硫储热单元传热研究



## 自然对流传热性能研究与经验公式开发



## 传热最优设计

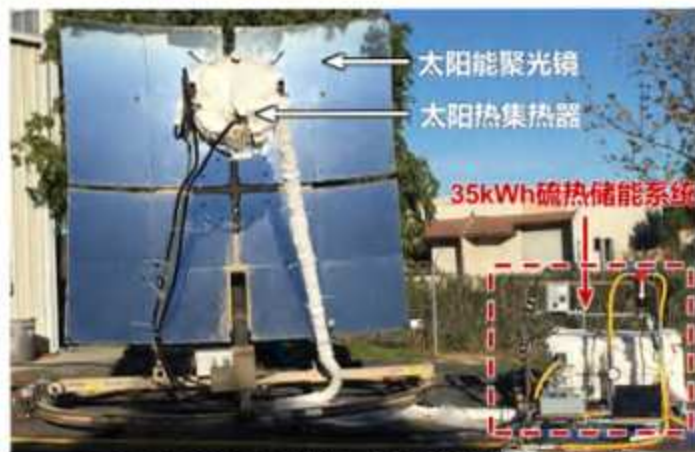


|      | 设计参数                                               | 传热面积<br>[m <sup>2</sup> ] | 硫侧传热系数<br>[W/m <sup>2</sup> ·K] |
|------|----------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| 管式系统 | 管径=17mm<br>管长=1m<br>管数=217                         | 124                       | 175                             |
| 箱式系统 | 管径=5.5mm<br>管长=1m<br>管数=217<br>节距比=1.43<br>高度=87mm | 124                       | 304                             |

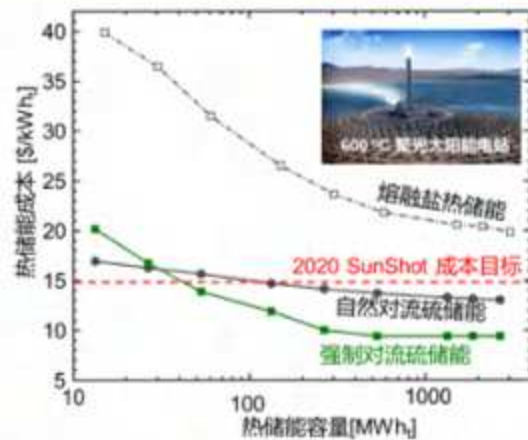
# 单质硫热储能技术发展前景



与光热耦合



35kWh单质硫储热-太阳能集热示范系统



兆瓦级硫热储能系统优化与成本分析

工业蒸汽生产



200kWh箱式单质硫储热系统

石油化工过程



输油管道保温与伴热等

# OUTLINES

**1 研究背景**

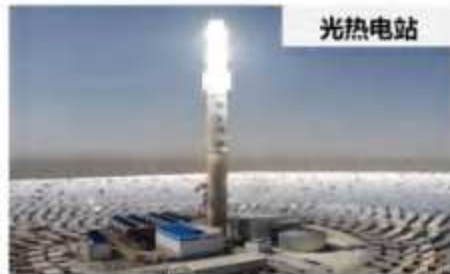
**2 各类高温热储能技术对比**

**3 熔融盐热储能技术**

**4 单质硫热储能技术**

**5 系统耦合与应用**

# 高温热储能技术应用前景



光热电站



燃煤电厂



压缩空气储能电站



电力生产

工业用热



水泥生产



炼钢



炼油

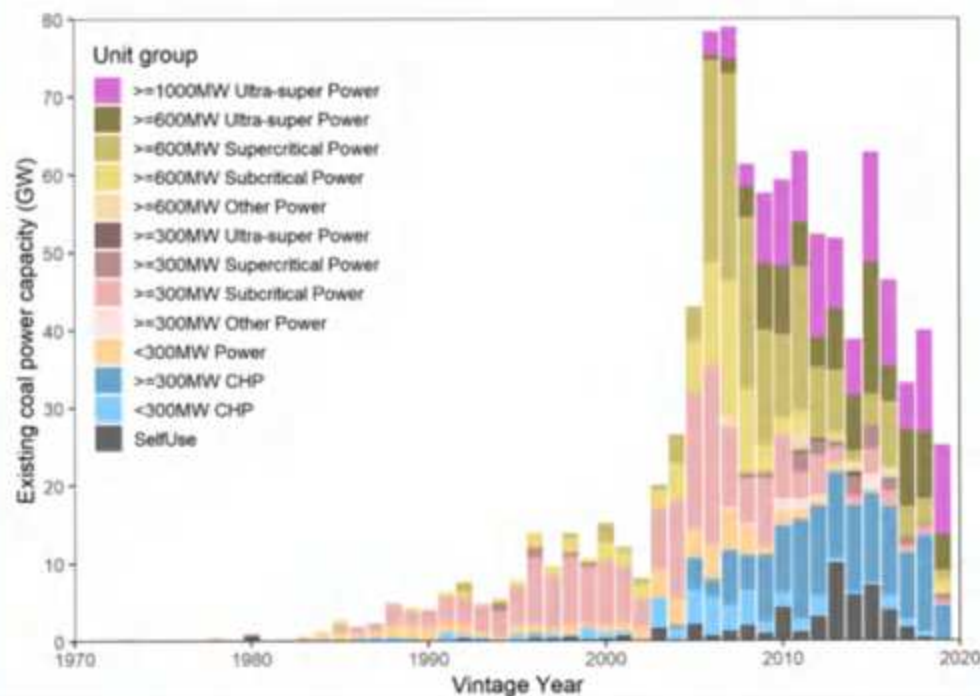


**基于高温热储能的电网规模储能系统:  
未来新型电力系统中的能源调度核心**

我国火电装机时空分布



Cui, R. Y., et al. *Nature communications*, 2021, 12(1): 1468

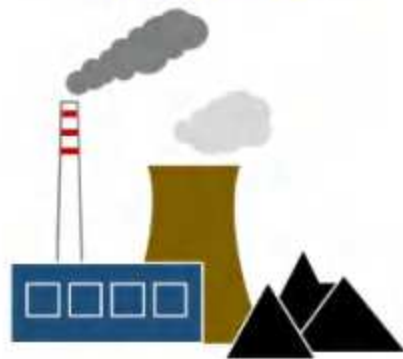


- ❑ 我国是目前世界上**燃煤电厂最多、发电量最大**的国家
- ❑ 多数**燃煤电厂**服役时间不长，平均只有13年左右，提前退役将造成大量资源浪费
- ❑ 将现有的**火电机组与高温热储能技术**耦合，可以以较低的成本实现火电的转型

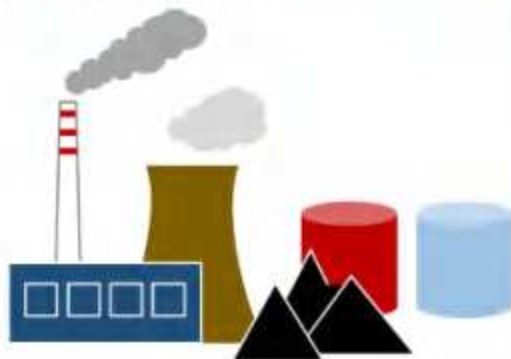
# 火电与热储能耦合技术路线



## 原超临界火电厂



## 基于热储能的火电灵活性改造



## 基于热储能系统取代锅炉的调峰电厂



能量来源: 煤 (碳排放强度高)  
主要功能: 发电  
负荷调节区间: 30%到100%  
负荷调节速率:  $< 2\%/min$   
发电效率:  $\sim 35\%-41\%$

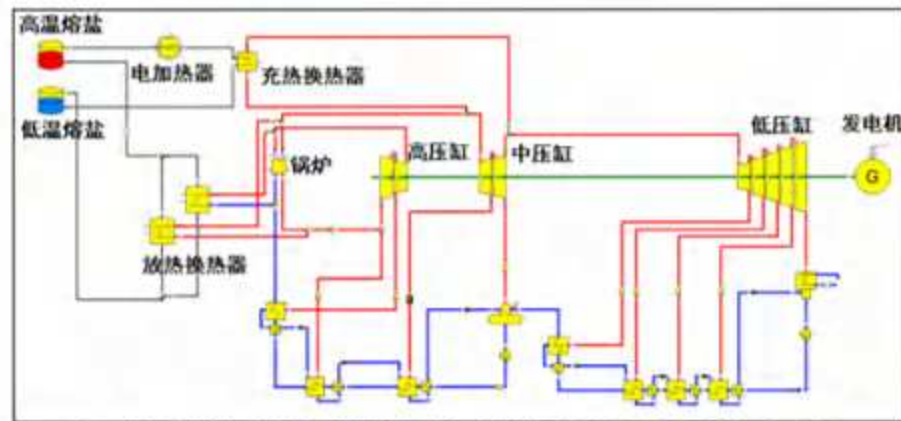
能量来源: 煤/煤+新能源电  
主要功能: 发电+调峰  
负荷区间: 15%到110%  
负荷调节速率:  $>$  原电厂  
发电效率:  $\sim 35\%-41\%$   
储能往返效率:  $\sim 50\%-87\%$

能量来源: 新能源电 (零排放)  
主要功能: 调峰  
负荷区间: 0%到100%  
负荷调节速率:  $>$  含锅炉的改造电厂  
储能往返效率: 42% (电加热),  
56% (热泵+电加热)

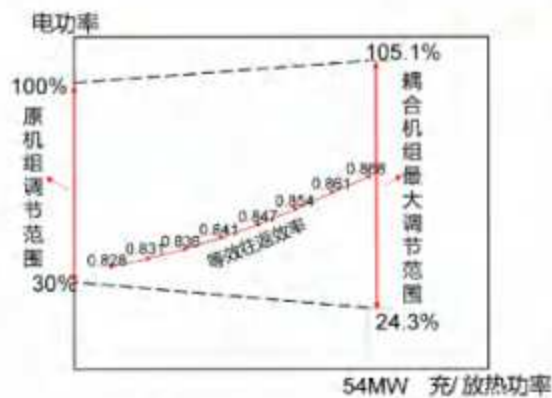
# 基于再热蒸汽抽汽-熔盐储热的火电灵活性改造



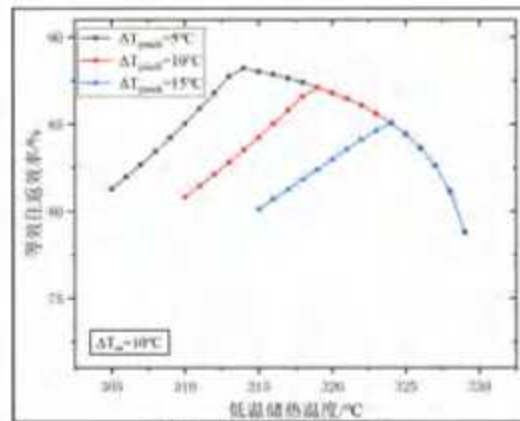
- 再热蒸汽抽汽+电加热辅热较其他改造方案对锅炉影响更少，且储热品质更高
- 提出基于再热蒸汽抽汽与熔盐储热的灵活性改造方案，**拓展机组的负荷调节范围至24.3%-105.1%**
- 优化储热系统相关设计参数，初步实现**高储能往返效率（87.1%）与低投资回报周期（2.37a）**



再热蒸汽抽汽蓄能-熔盐储热耦合系统方案

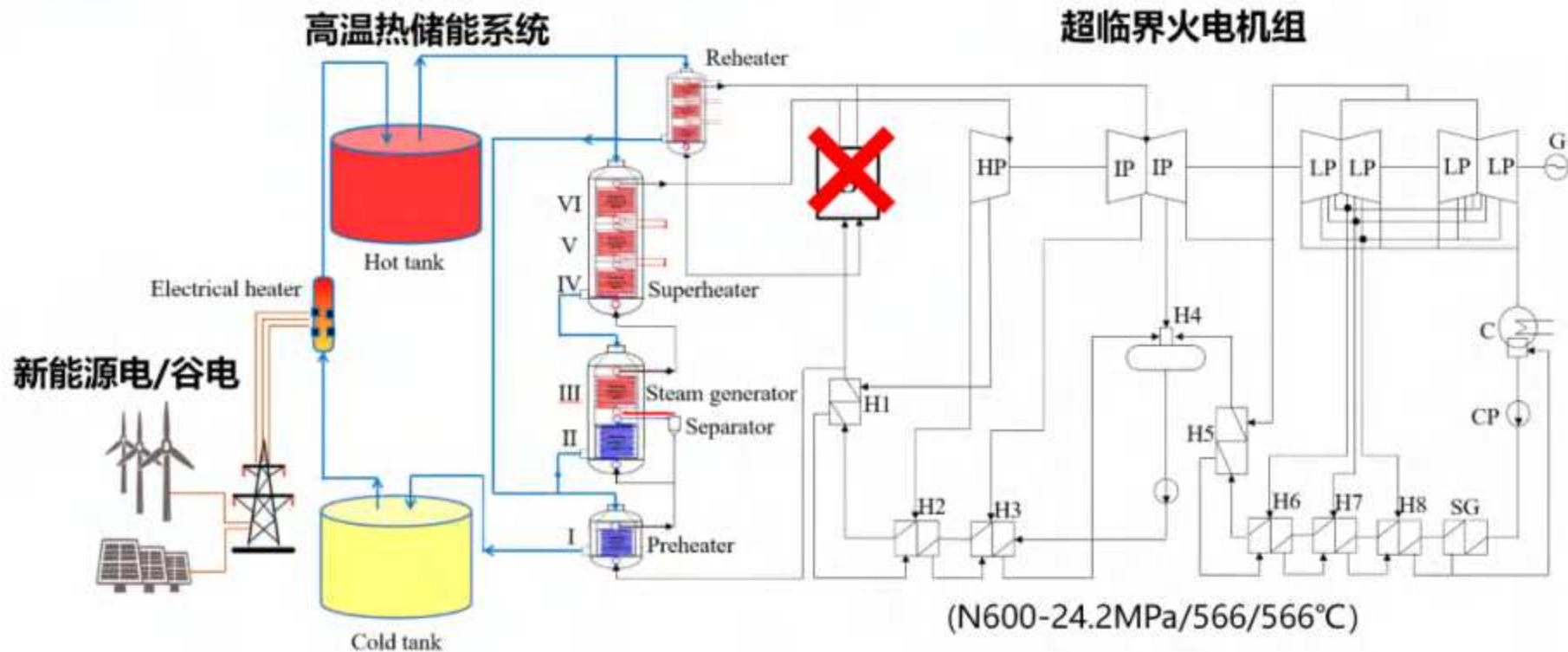


耦合系统负荷调节范围



往返效率分析

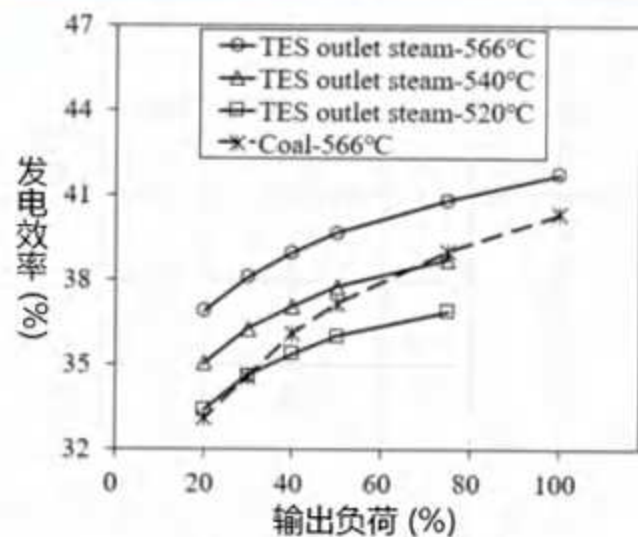
- ❑ **使用高温热储能系统取代燃煤锅炉**可以提升火电机组的灵活性
  - ❖ 可通过**电加热器**将光伏电、风电或电网中的谷电转化为高温热能
  - ❖ 当电网侧有顶峰需求时可将储存的热能通过**换热器**传输到蒸汽机组中进行发电



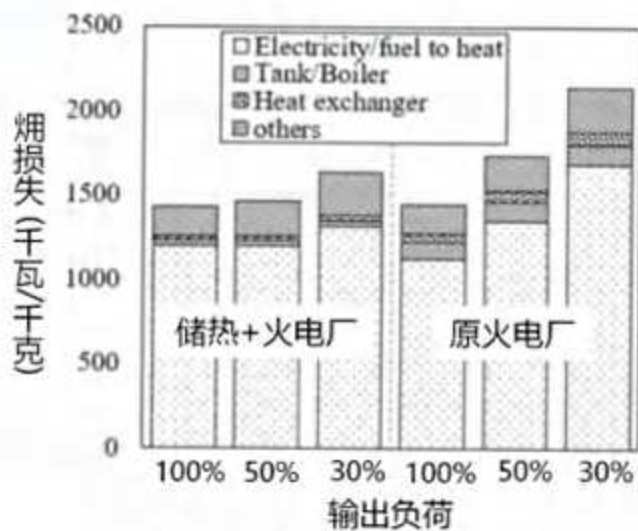
# 性能与成本分析



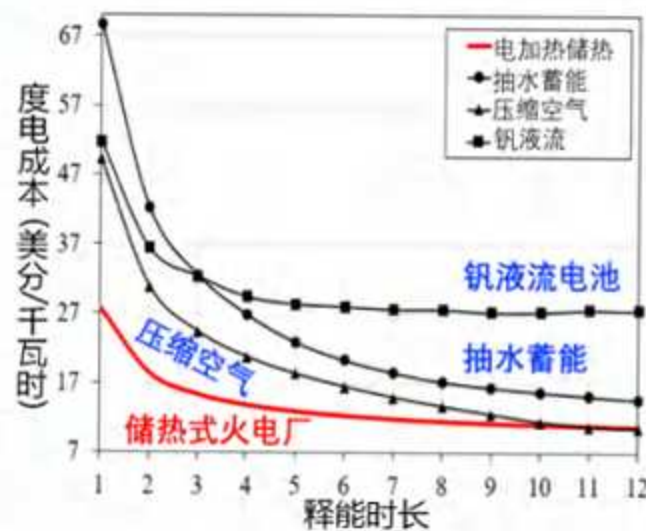
- 在储热温度为275-580°C时，该系统的**循环效率为42%**，比传统燃煤火电厂稍高
- 系统负荷变化时，电热转换**损失低于原火电机组**，可见系统具备优良的调度能力
- 较抽水蓄能、液流电池等其他大规模储能技术，高温热储能**具有明显的成本优势**



循环效率高于40%



系统焓损失低于原有火电机组



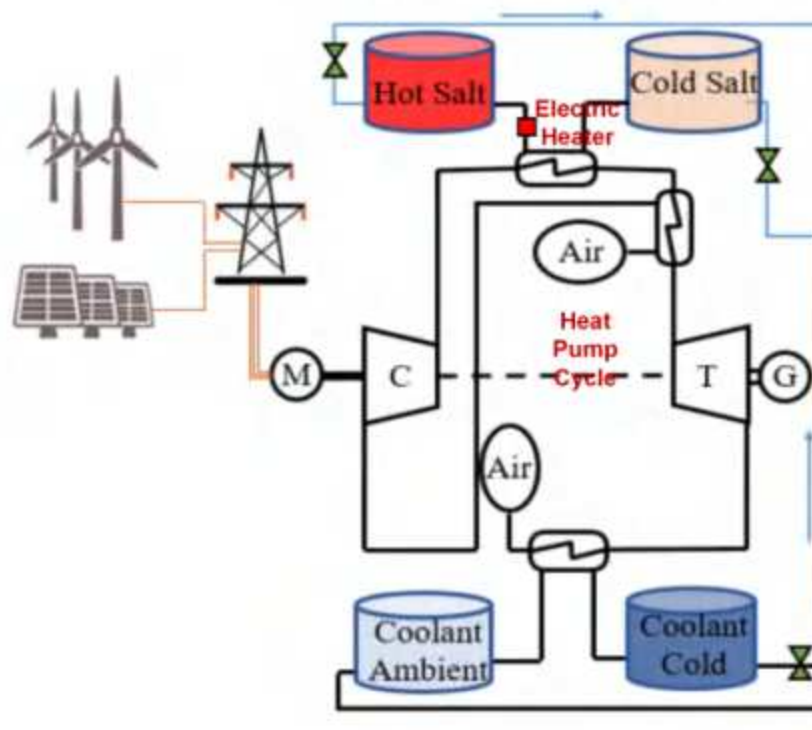
系统度电成本低于其它大规模储能技术

# 基于热储能取代锅炉的调峰电厂：热泵联合电加热储热

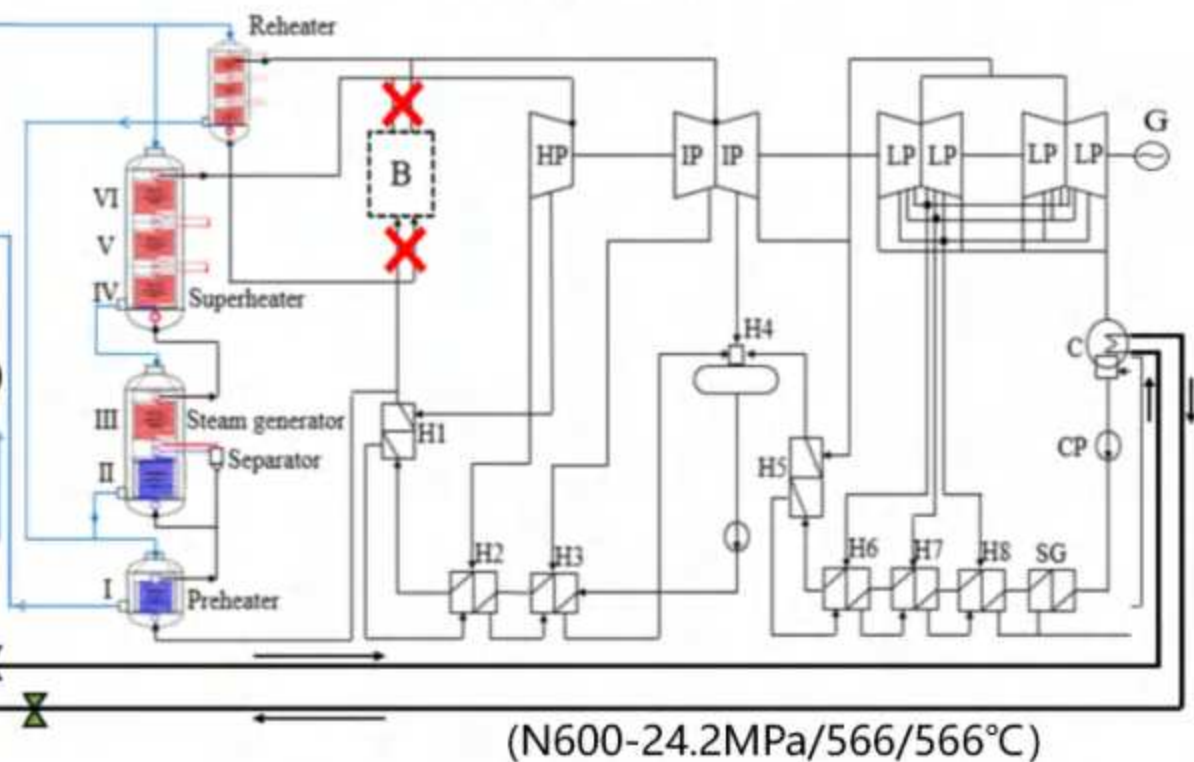


在电加热同时联合热泵系统进行储热，可以提升系统循环效率并额外产生冷能

热泵与电加热联合储热系统



超临界火电机组

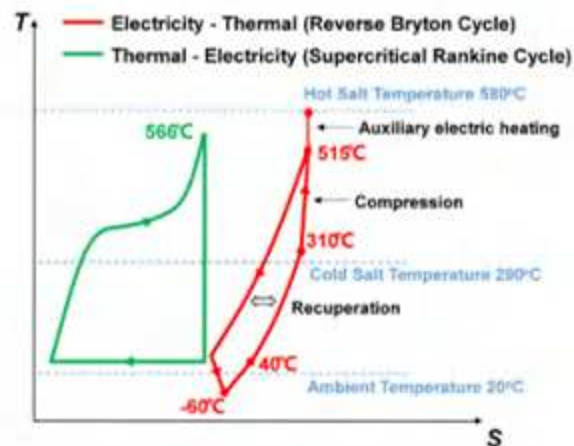


# 性能与成本分析

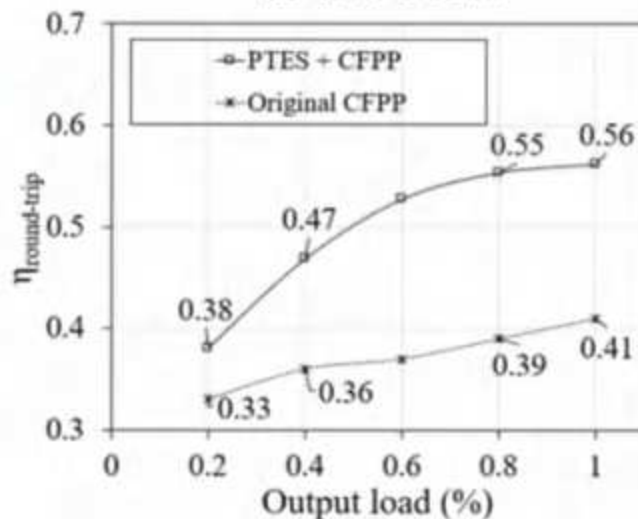


- 该系统的**循环效率**相比纯电加热系统效率有显著提升，**最高可达56%**
- 在**充电电价较高时**，耦合热泵系统比纯电加热系统**有更低的度电成本**，若考虑售卖冷能的经济效益则成本可进一步降低

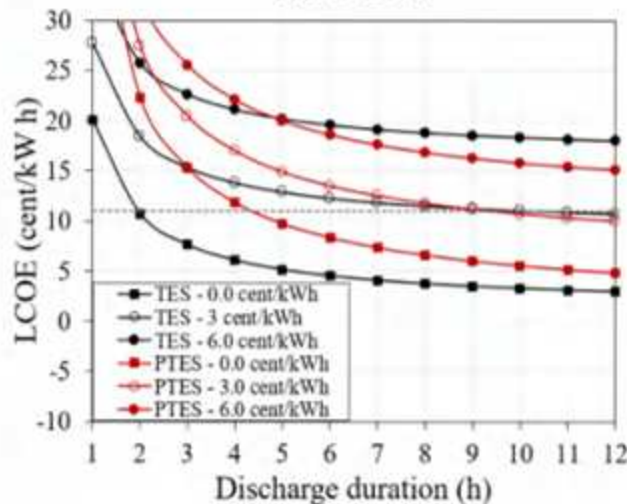
T-S 相图



循环效率分析



成本分析



# 整体研究思路总结



## □ 根据供热应用的场景特点与温度需求选择液体显热储热材料体系，并通过调控相关物理化学性质确保材料在需求温区内具备大规模长期运行的能力

- 熔融盐：调控熔点、稳定温度等
- 单质硫：调控粘度、材料兼容性（抗腐蚀性能）等



## □ 根据热储能供热进出口参数需求设计优化关键装备，较原有方案提升储换热性能

- 换热器：精准设计与优化，减小体积与重量、提升换热器效能、降低压力损失
- 电加热器：提升电加热等级、表面温度不超温情况下提升加热功率
- 静态储换热单元：研究传热机理、提升储换热速率



## □ 提出热储能系统与火电等大型能源系统的耦合方案，平衡系统储能能力与成本

- 耦合模式：抽汽蓄能、电加热蓄能等，蒸汽供热、工质供热等
- 热储能系统设计：双罐循环储热、多模块静态储热等