

2024 中国太阳能热发电大会

塔式太阳能光热发电技术与产业化

——以兰州理工大学为例

焦树强 杜小泽

兰州理工大学

Email: duxz@lut.edu.cn

敦煌 2024年9月10-13日

报告提纲

1、研发背景

2、学科基础

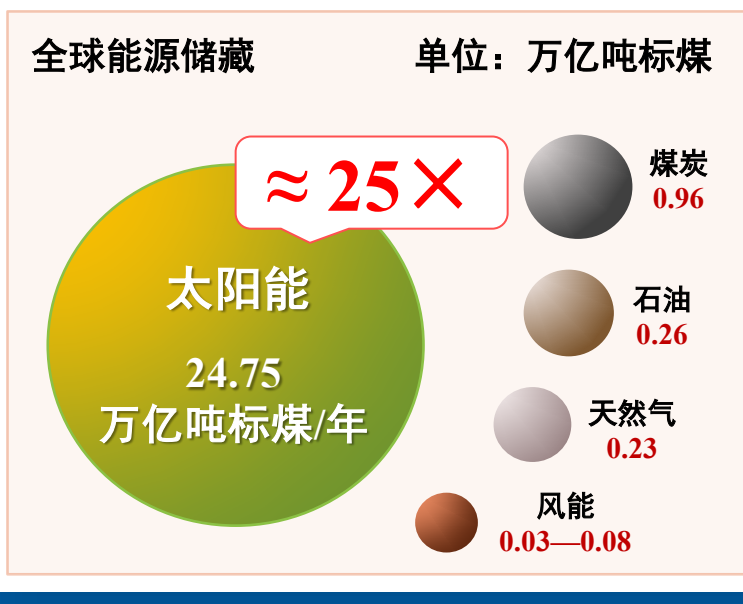
3、阶段进展

4、下一步工作

研发背景

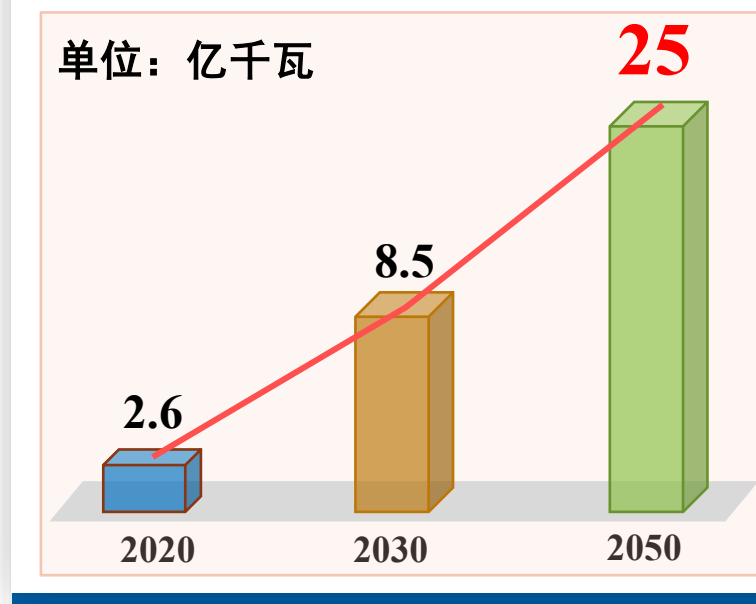
- 大力发展**可再生能源**是我国实现**碳中和**的**必由之路**。
- **太阳能**是地球表面**最丰富**的可再生能源，将成为未来能源体系中的**主导能源**。

太阳能资源丰富*



* 数据来源于国际可再生能源署2050

我国太阳能装机趋势**

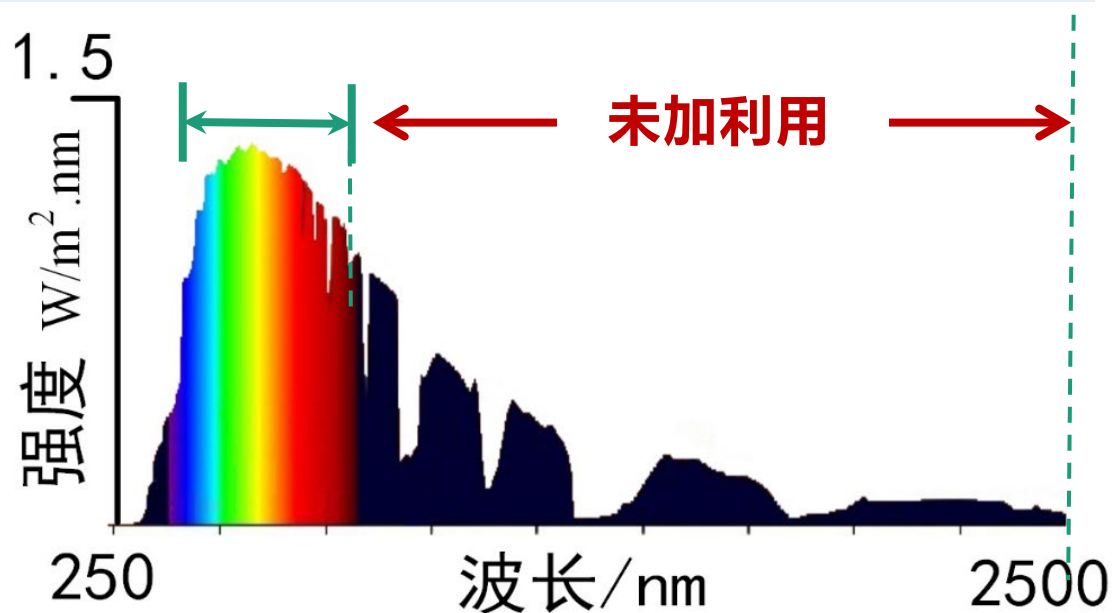


** 中国可再生能源发展路线图2050

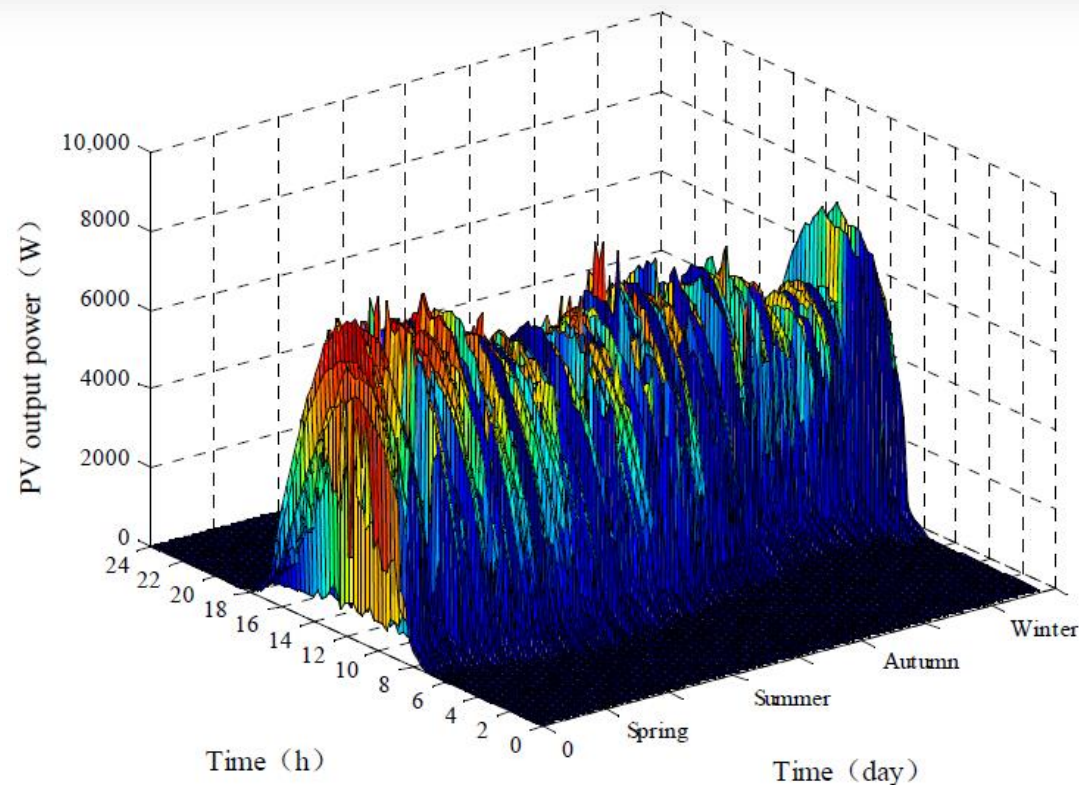
研发背景

太阳能利用面临的挑战：1 能量捕获、转换效率低；2 随机波动性导致难以消纳利用

光伏：300-1100 nm；效率 ~20%



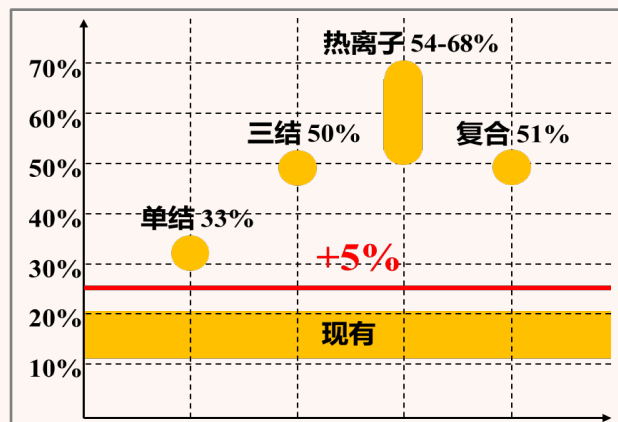
光伏技术仅能利用有限波段太阳能



典型光伏电站年逐时功率输出

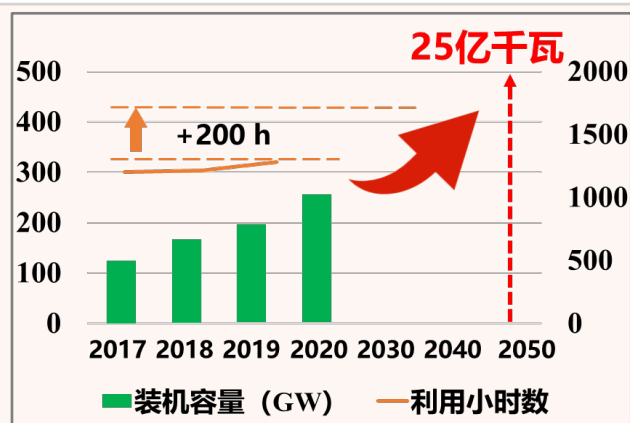
研发背景

转化效率低 ▶



- 现有太阳能的平均利用效率在**20%左右**，有待提高。

消纳利用难 ▶



- 现有消纳技术下，近5年平均年弃光量达**55亿千瓦时**。

25亿千瓦
(2050年预计)

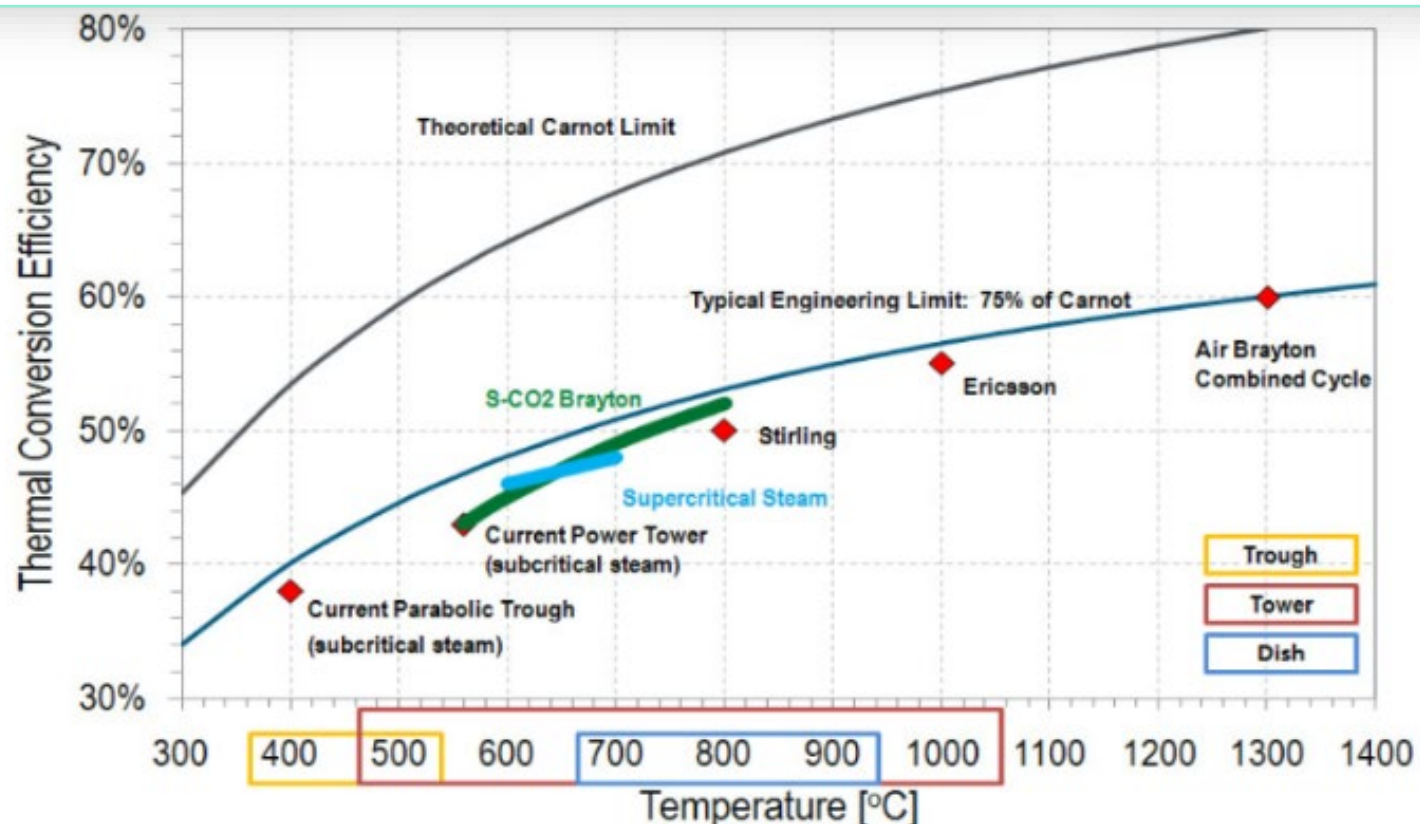


2.6亿千瓦
(2020年)

研发背景

➤ 太阳能光热发电：大规模、高效率

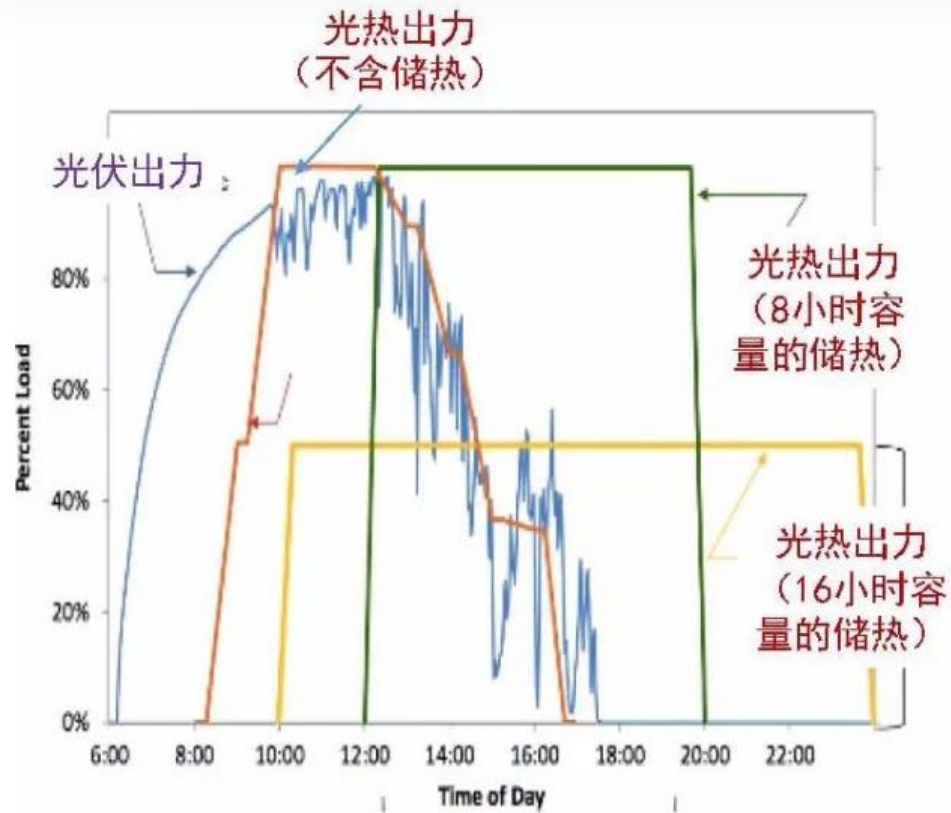
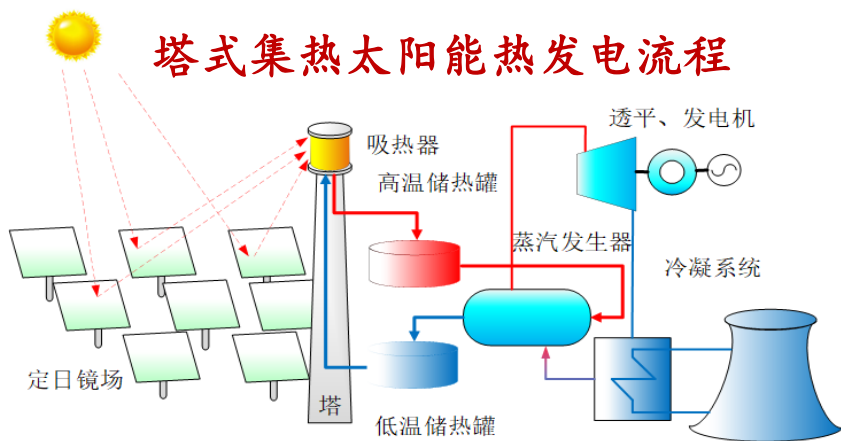
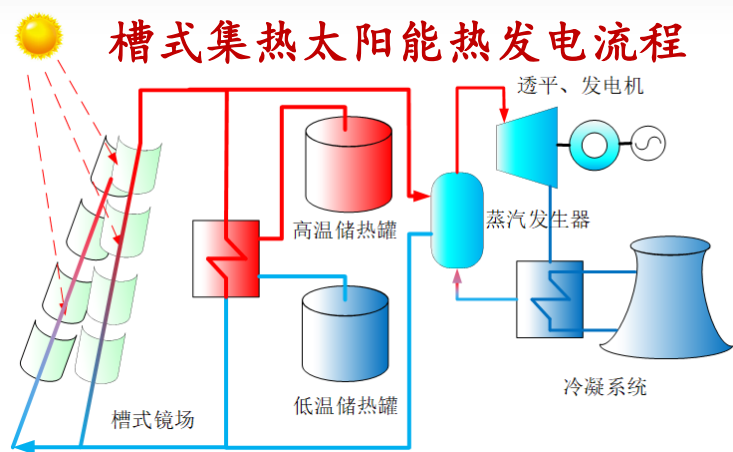
1. 太阳能全光谱吸收与转化；
2. 基于传统热力学循环热功转换，发电效率随聚焦温度提升：**原理清晰、技术成熟**



太阳能发电热效率与集热温度之间的关系

研发背景

- **灵活调峰潜力**：太阳能热发电与**低成本储热系统集成**，是解决**可再生能源转化效率低和难于消纳**等固有缺陷**最具前景**的技术路线。



太阳能光热发电与储热集成具有平稳负荷输出能力

光热发电正在成为我省新名片

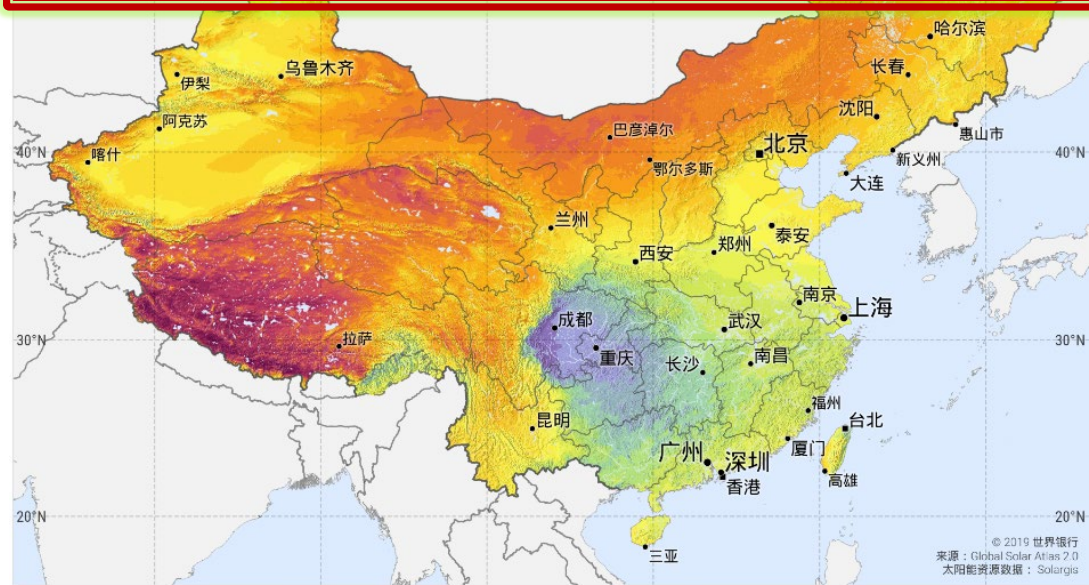
- 甘肃省太阳能资源得天独厚；甘肃酒泉光电储量近**20亿千瓦**，是全国**最理想的光热发电建设区域**之一。
- 太阳能光热发电正使酒泉成为新能源领域的**国家名片**。

www.news.cn
新华网
NEWS
www.news.cn

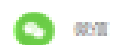
酒泉发展光热发电产业正当时，光热发电开启千亿产业投资盛宴

2018-10-26 11:21:28 来源：经济参考报

让新闻离你更近



关注新华网



在敦煌市七里镇光电产业园内，两个圆筒状高塔耸入云天。塔顶上一块块镜子随太阳转动，将阳光反射到塔顶的接收器上，万道白光聚合在一起，那亮光像爆炸了似的。这两个高塔是首航新能源的两个塔式光热电站。其中塔高261米的是100兆瓦项目，目前正在进行聚光调试，投产运营指日可待；塔高138米的是10兆瓦项目，已经于2016年并网发电，每小时可发1万千瓦时。

光热发电自二十世纪80年代迈入商业化进程已30多年，其在全球电力供应结构中的地位逐步提升。我国的光热发电产业项目近年来才正式亮相，但是很多项目迅速做到全球首创，且这些领先项目大部分都在酒泉。

目前我国首批20个国家级光热示范项目，有9个在酒泉，总投资额达到169亿元。全球第三座、亚洲第一座实现24小时连续发电的项目（首航新能源10兆瓦塔式熔盐光热发电项目）在酒泉；全球范围内在建装机规模最大的熔盐工质塔式非承压式项目（兰州大成敦煌熔盐菲涅尔光热项目）、全球首个塔式导热油光热发电项目（玉门龙腾导热油槽式5万千瓦光热发电示范项目）、全球首个商业化熔盐槽式光热电站（金川阿克塞50兆瓦槽式太阳能光热发电项目）、全球首个采用二次反射塔式熔盐技术开发的商业化光热电站为中国首批光热示范项目（玉门首航5万千瓦塔式熔盐光热示范项目）在酒泉。酒泉正在由传统能源城市向新能源产业转型，成为我国光热发电产业发展的高地。



光热发电将带动**前沿储热材料、先进储热技术、高端运输与动力装备**等众多新能源业态

报告提纲

1、研发背景

2、**学科基础**

3、阶段进展

4、下一步工作

兰州理工大学：甘肃省、教育部、国防科工局共建高校

学科基础

- **能源与动力工程学院：国家双万计划一流专业、国防特色学科**
- **石油化工学院：国家级特色专业**
- **材料学院：有色金属先进加工与再利用国家重点实验室**

动力工程及工程热物理
一级学科博士点

材料科学与工程
一级学科博士点

- **建立从高温储热材料、前沿储热技术到先进系统集成的完整链条**



- **我国第一个水力机械专业，成功研制核电主泵、各类石化泵**



- **全国唯一阀门高教与科研专业：熔盐阀、核级铅铋合金调节阀等**





兰州兰泵有限公司

- 西北地区**规模最大、泵类产品种类最多**，唯一能提供大流量、高扬程、多泥沙、特殊工况工业泵的企业

- 建有**超高温熔盐泵阀工程研究中心**，正在建设**全国首个超高温熔盐泵、阀高温测试基地**
- 700°C超高温熔盐泵、阀研发制造及测试条件：**全球温度最高、技术难度最大**

承担超高温熔盐泵阀的**制造及性能测试实验**



武威钍基熔盐堆核能系统用泵



高温熔盐系统用阀



产学研校企合作基础



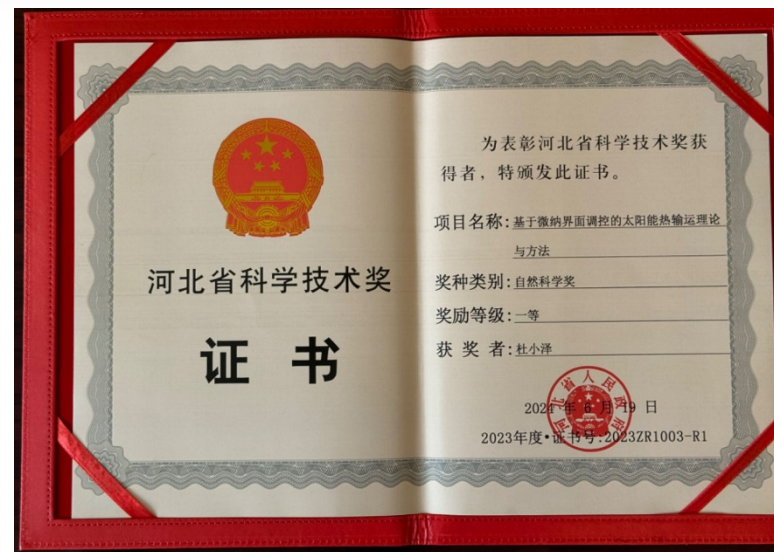
首航高科能源技术股份有限公司

➤ 总部位于兰州市，从事**太阳能光热发电**、余热利用、电站节水的高新技术型企业。

- 建设10MW塔式熔盐光热发电项目，于2016年底成功一次并网发电。
- 首航敦煌100MW光热电站：**中国首个百兆级国家太阳能热发电示范电站**；目前**全球最大的熔盐塔式光热电站**。



建设进程



2023年度河北省自然科学一等奖

为学校的研究成果提供实际工况下的**试验验证与工程示范条件**

产学研校企合作基础

能动学院
流体机械与工程
特种泵
先进储能技术

材料学院
先进储能材料
金属材料

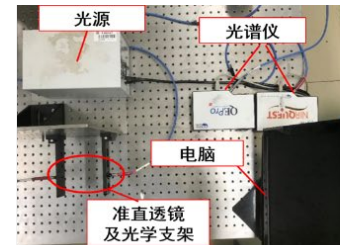
**光热发电
项目团队**

石化学院
特种阀
新能源

兰州兰泵
首航高科
样机制造
转化与示范



百kW级高功率太阳能模拟器 高精度功率可调太阳模拟器 基于光纤束传输的灯阵列光源



涵盖200~2500nm波长范围的分光光谱特性测试平台



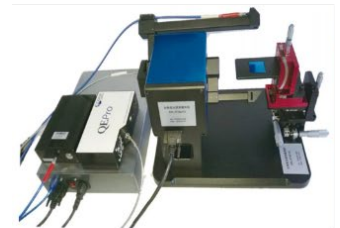
SPA400原子力显微镜



多功能X射线衍射仪



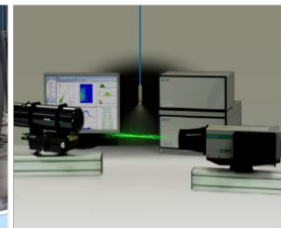
激光米粒度电位仪



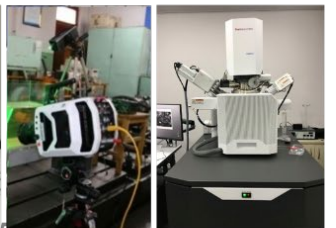
自动全角度光谱测量台



高温导热系数仪



粒子动态分析仪



激光多普勒测速仪 扫描电镜

报告提纲

1、研发背景

2、学科基础

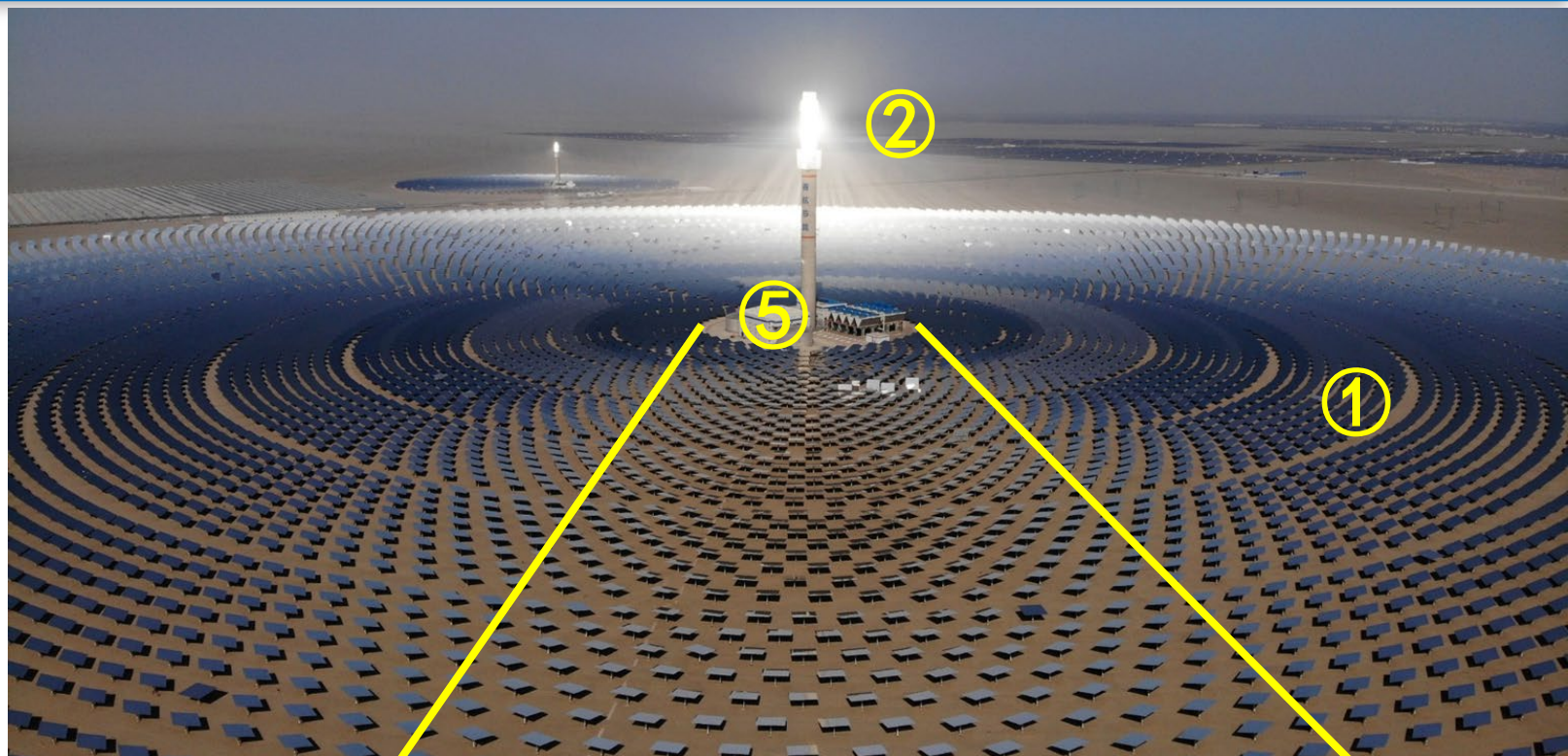
3、阶段进展

4、下一步工作

塔式光热发电的技术挑战

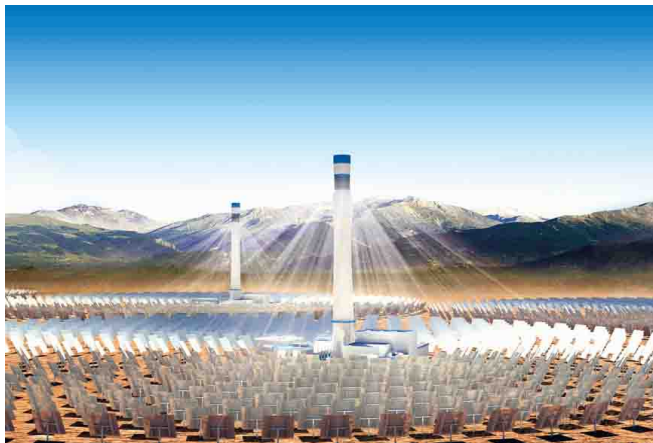
塔式集热太阳能光热发电 关键技术方向：

- 1 低遮挡率、紧凑式集热镜场
- 2 面向超临界发电的新型集热器
- 3 大规模、低成本高温熔融盐储热
- 4 高温熔融盐运输与换热装备国产化
- 5 大型光热电站安全、高效、灵活运行



1 低遮挡率、紧凑式集热镜场的高效设计-技术背景

塔式电站定日镜场



◆ 主要功能：

利用成百上千的定日镜将光线聚焦到**中心吸热器**产生高密度热流。

◆ 影响因素：

经纬度、天气（**光照条件**）、**占地面积**、地貌、定日镜尺寸、吸热器尺寸。

◆ 效率组成：

- ① 余弦效率
- ② **集热溢出效率**
- ③ **阴影和遮挡效率**
- ④ 大气传输效率
- ⑤ 镜面反射率

$$\eta_{op} = \eta_{\cos} \times \eta_{itp} \times \eta_{sb} \times \eta_{att} \times \eta_{ref}$$

1 低遮挡率、紧凑式集热镜场的高效设计-技术背景

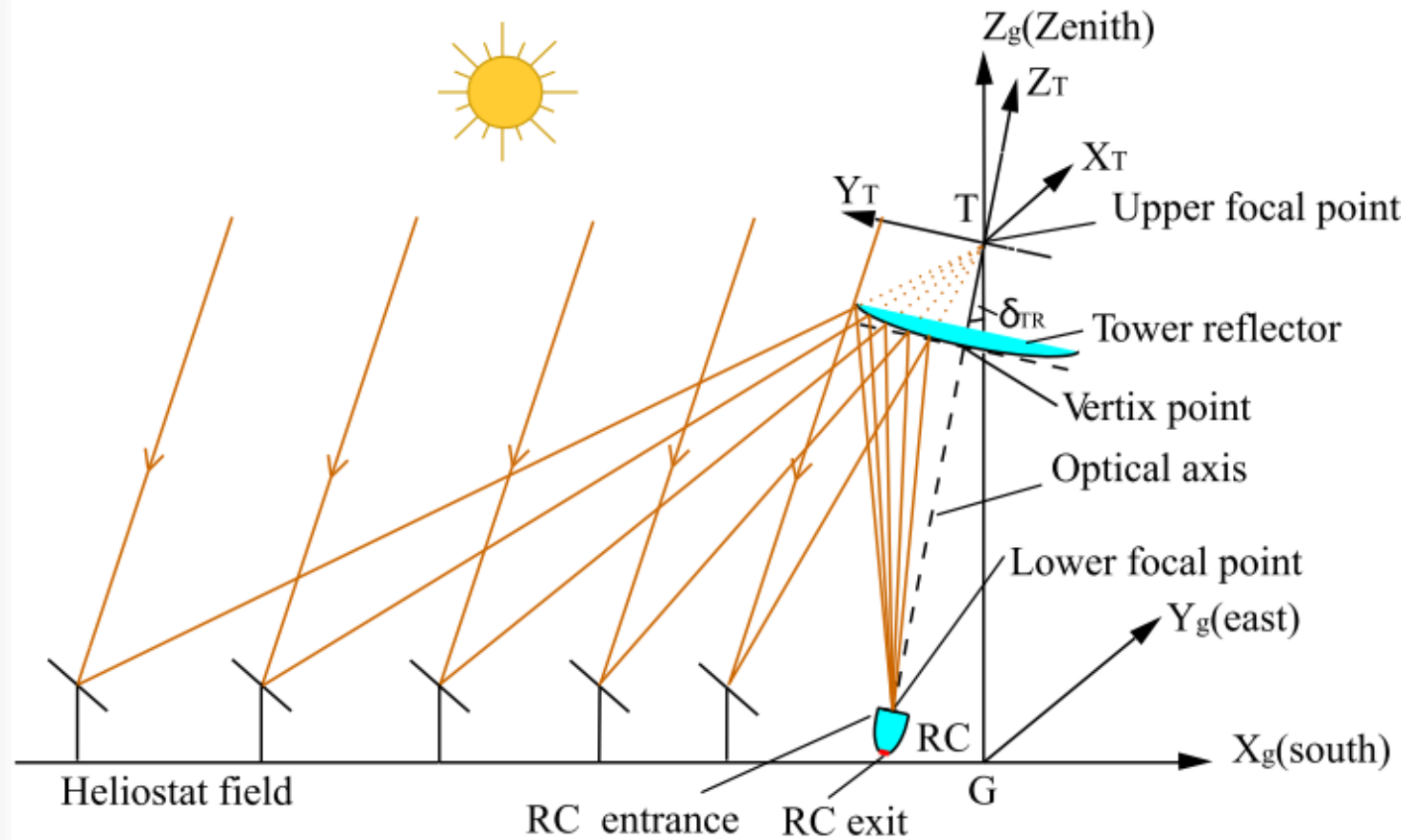
国际主流设计思路

➤ 几何投影积分法

- 聚光场效率算法：RCELL、DELSOL、CAMPO等；
- 速度较快、精度较低

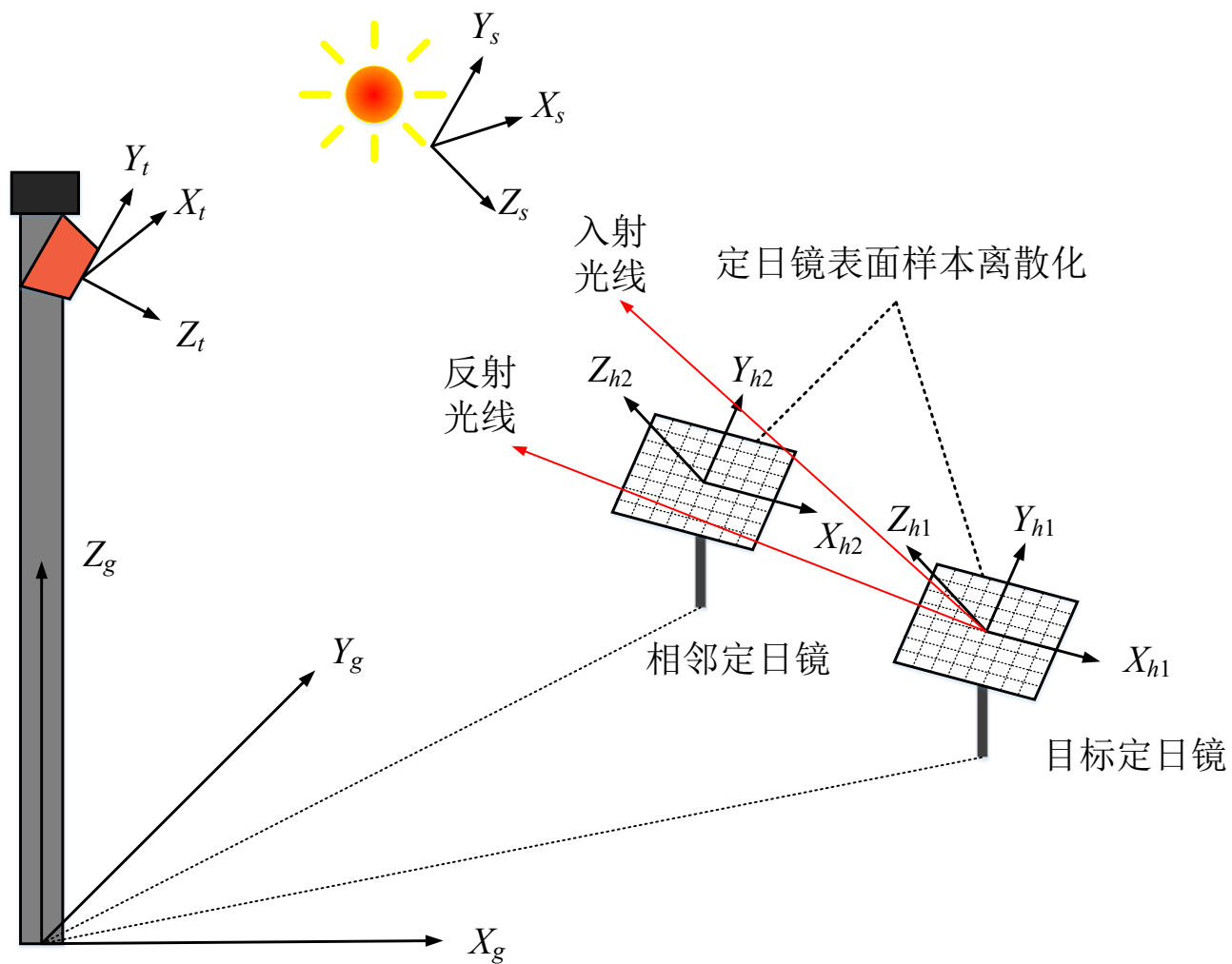
➤ 蒙特卡洛射线追踪法

- MIRVAL、SCT、HFLD、MIT等；
- 精度较高、速度较慢

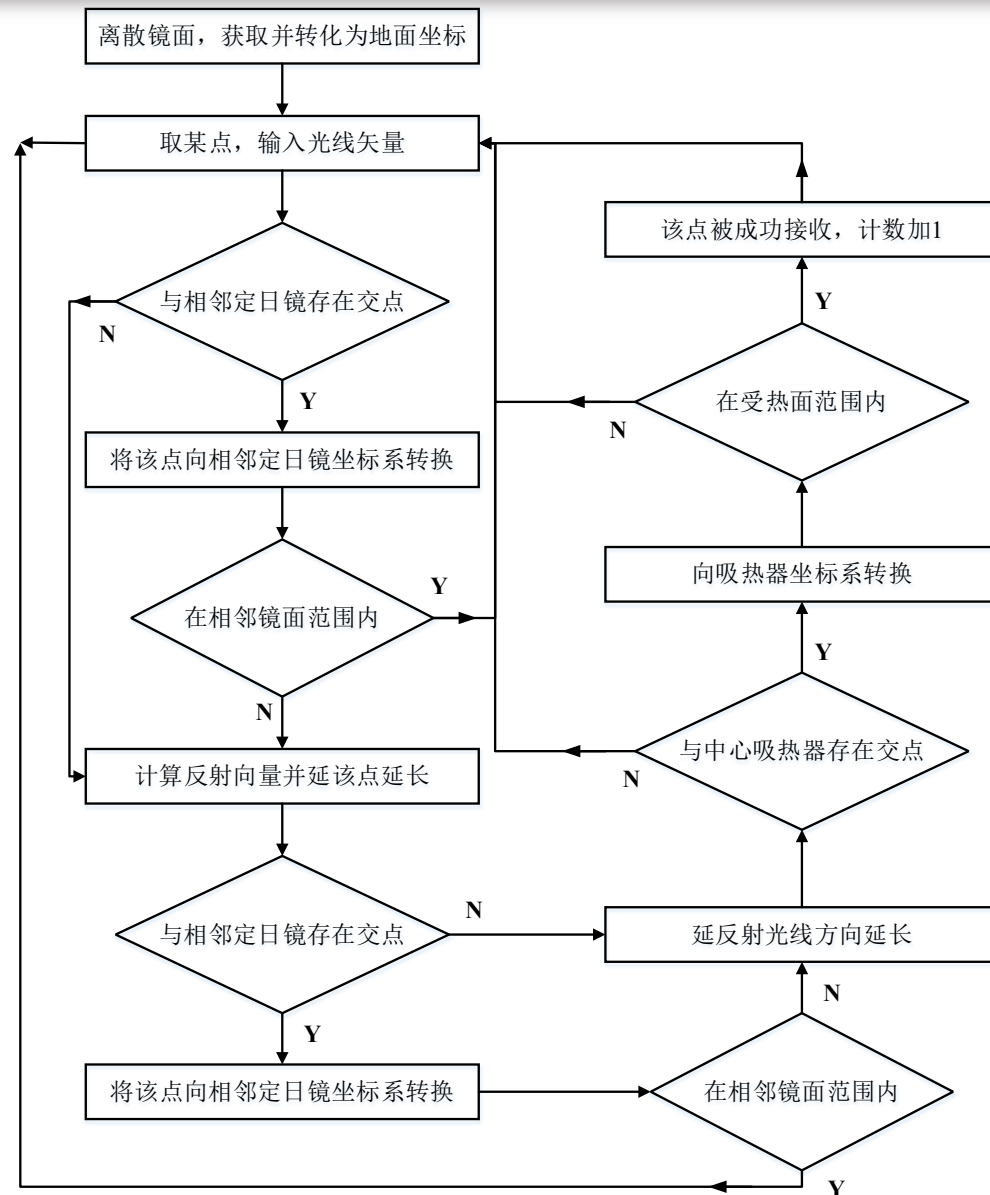


塔式太阳能集热镜场设计模型

1 低遮挡率、紧凑式集热镜场的高效设计

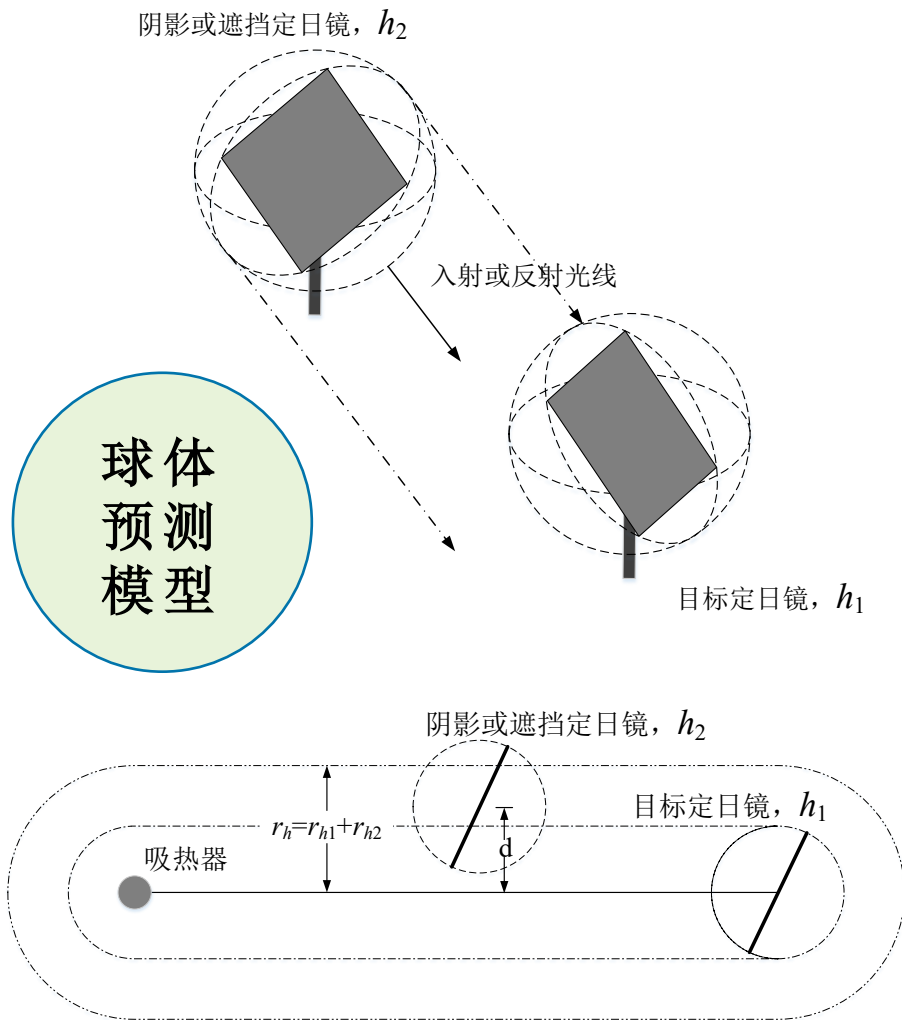


蒙特卡洛射线追踪法



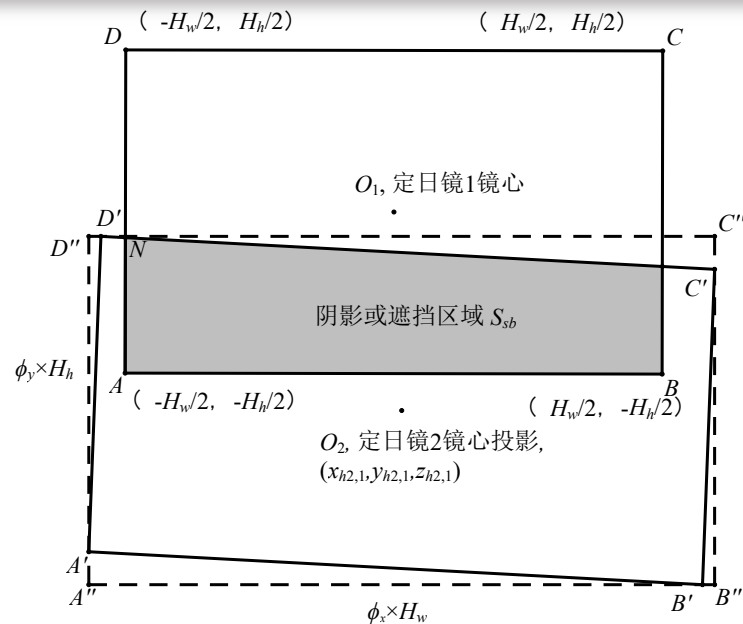
1 低遮挡率、紧凑式集热镜场的高效设计

阴影与遮挡效率算法-预测部分

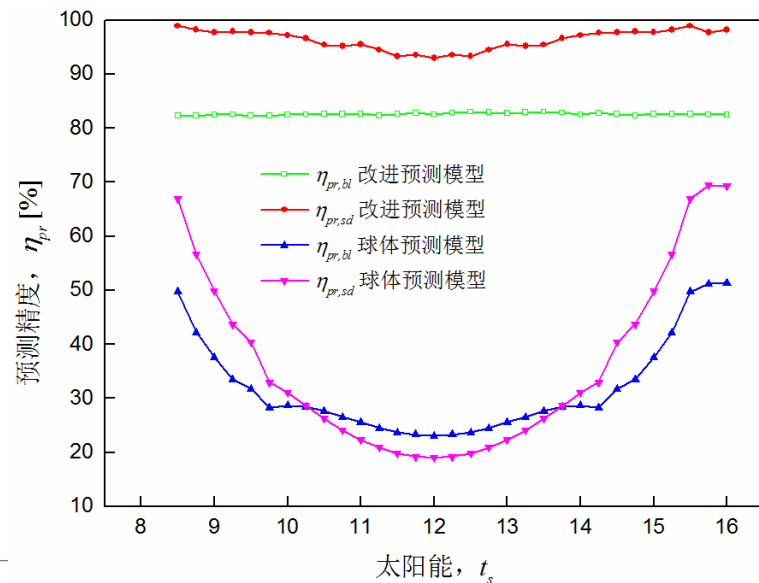


塔式太阳能光热发电技术研究

平板预测模型



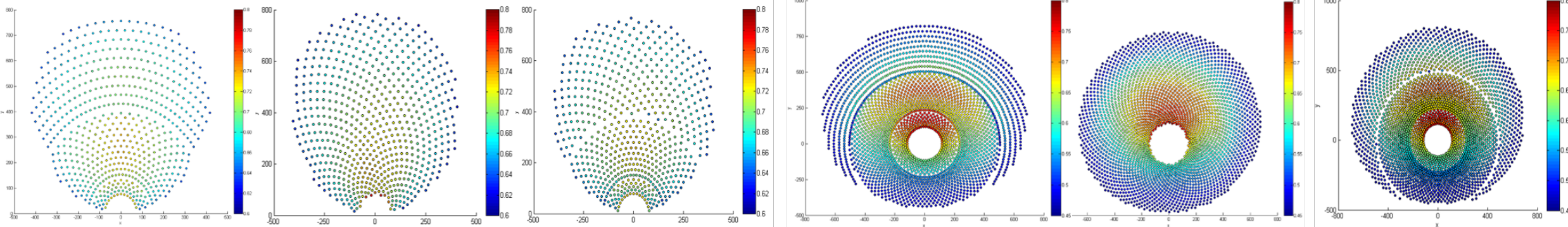
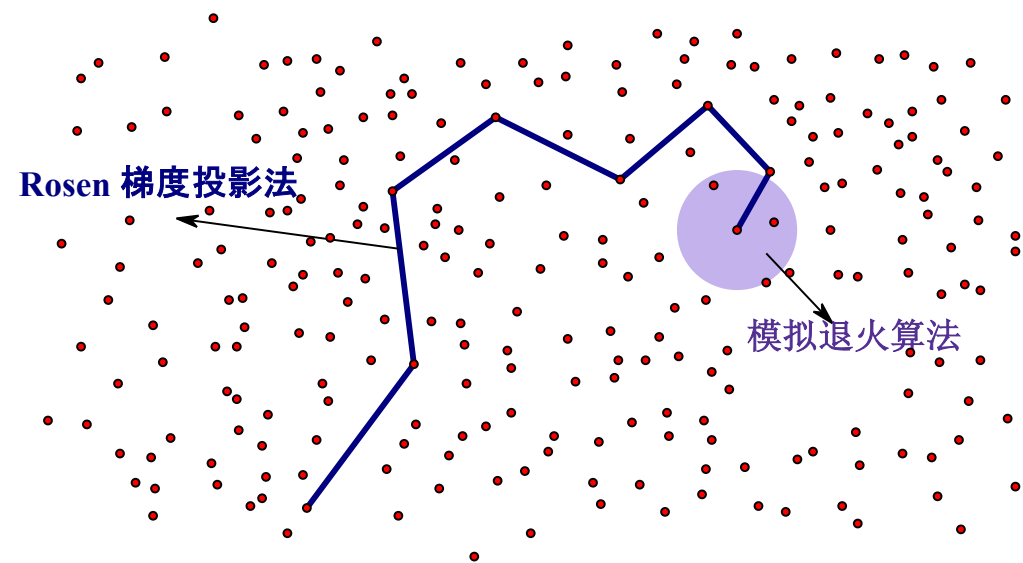
预测模型对比



1 低遮挡率、紧凑式集热镜场的高效设计

Rosen-SA组合优化算法

- Rosen梯度投影算法在全域计算可行性优化方向;
- SA算法进行局域搜索，并通过控制退火温度赋予其一定地全局搜索能力。



- 镜场分布优化 北部镜场：仿生螺旋式；周向镜场：混合仿生螺旋组合式

1 低遮挡率、紧凑式集热镜场的高效设计

集热镜场效率公式

余弦效率

由光线非垂直照射定日镜表面引起。

$$\eta_{\cos} = \cos(\arccos(\frac{\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}}{R \cdot S}) / 2)$$

大气传输效率

光线在穿过空气时会有部分的能量耗散。

$$\eta_{att} = \begin{cases} 0.000679 - 0.00001176d_{h_r} + 1.97 * 10^{-8} d_{h_r}^2 & d_{h_r} < 1000m \\ \exp(-0.0001106d_{h_r}) & d_{h_r} > 1000m \end{cases}$$



集热溢出效率

因光散效应和追踪误差部分光线偏离集热表面。

$$f_{int} = \frac{1}{2\pi\sigma_{tot}^2} \iint_{x' y'} \exp\left(-\frac{x'^2 + y'^2}{2\sigma_{tot}^2}\right) dy' dx'$$

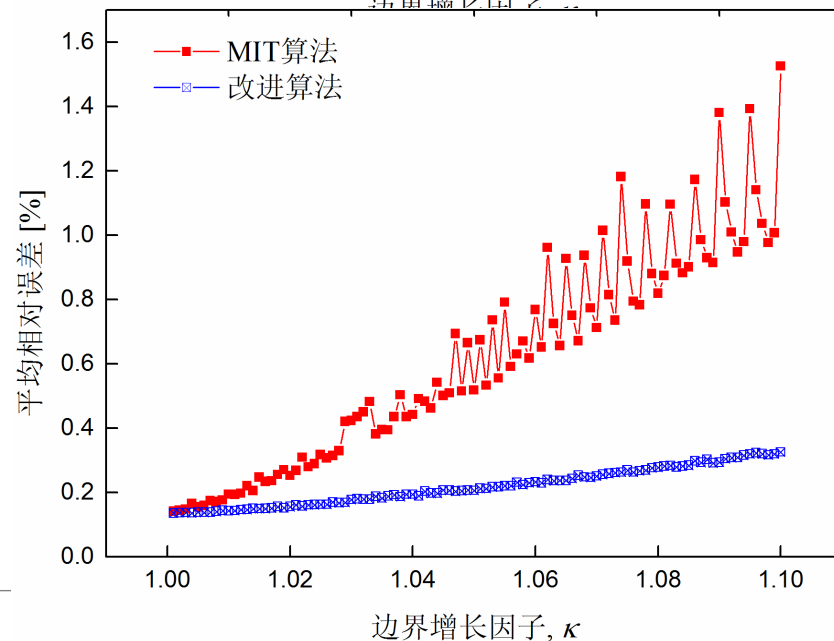
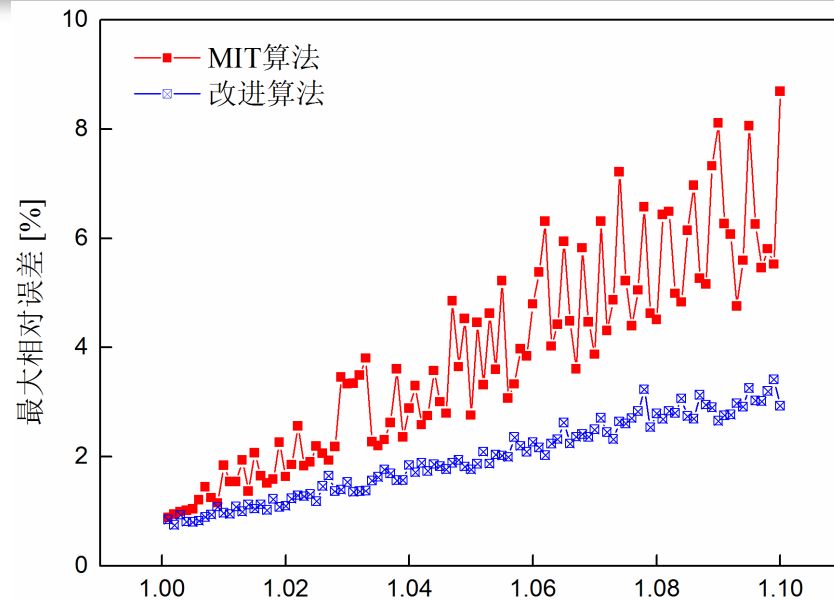
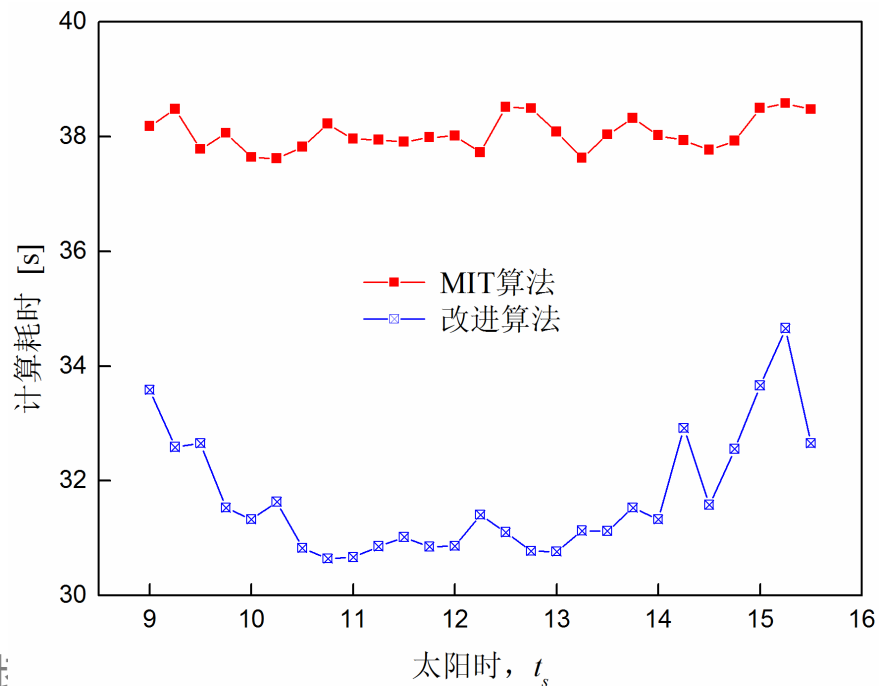
镜面反射率

与定日镜表面设计质量与清洁程度有关，常设定为0.88。

1 低遮挡率、紧凑式集热镜场的高效设计

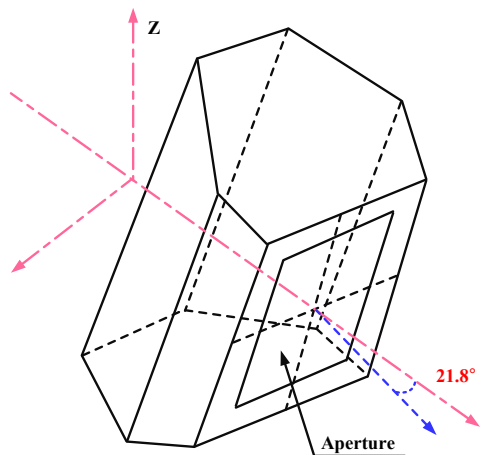
阴影与遮挡效率算法-精度与速度

- 改进算法的单个**最大相对误差**和整体**平均相对误差**都优于MIT算法;
- 改进算法由于网格优势最大相对误差波动较小;
- 计算速度也会随着阴影或遮挡效率的**增大而减小**。

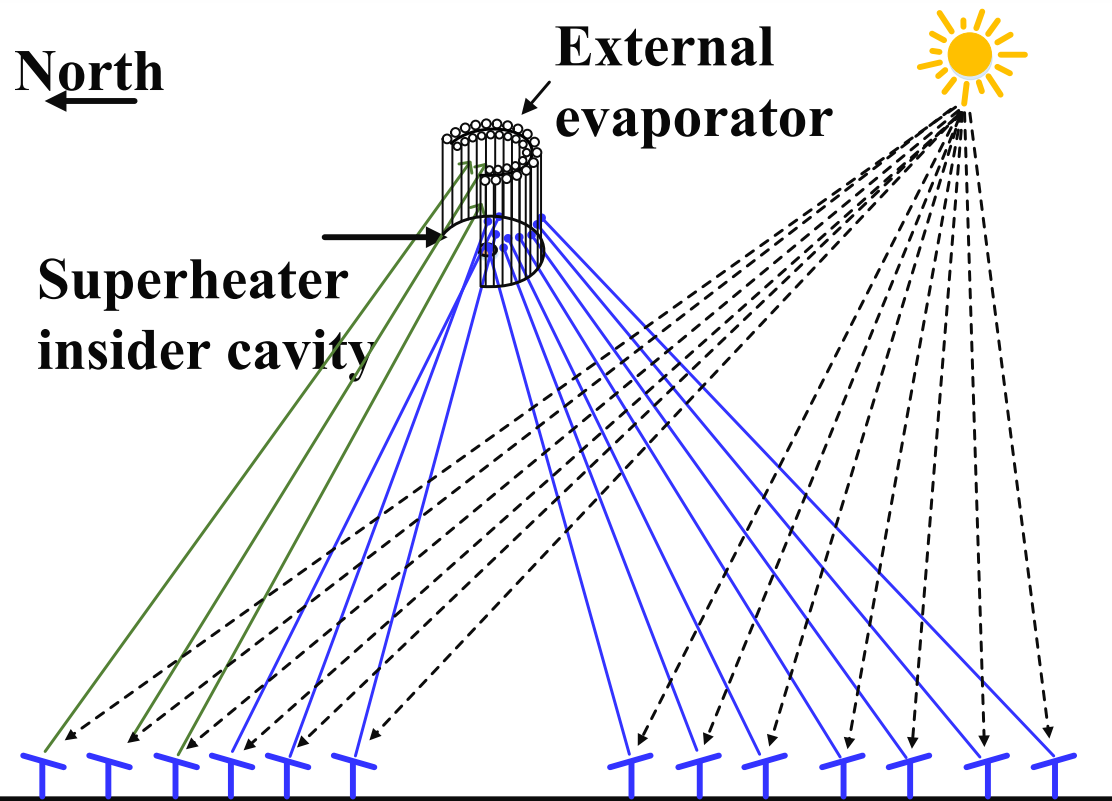
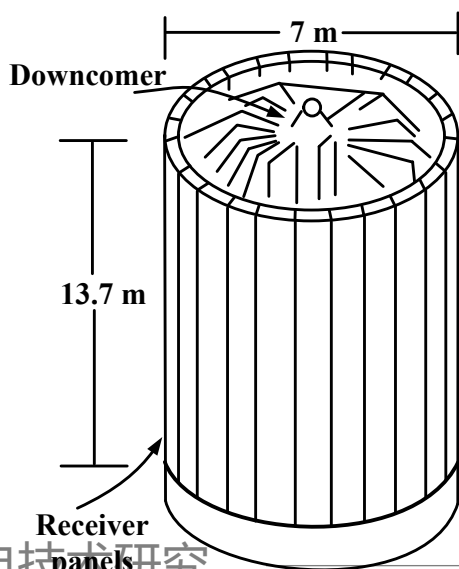


2 新型分段式集热器-技术背景

腔式集热器：热损失小、镜场利用率低



外置式集热器：热损失大、镜场利用率高



整体式集热器

- 外表面用于蒸发，内置腔式吸热用于工质过热；
- 结构复杂；上升管过热阻碍蒸汽流动；仅适用于水/水蒸气工质

2 新型分段式集热器

➤ 提出分段式吸热器设计及定日镜场布置与分配方法

双吸热器

$$q_{\max\text{蒸发段}} = 650 \text{ kW/m}^2$$

$$q_{\max\text{过热段}} = 300 \text{ kW/m}^2$$

维持稳定的吸热器出口蒸汽温度

缩短电站启机时间

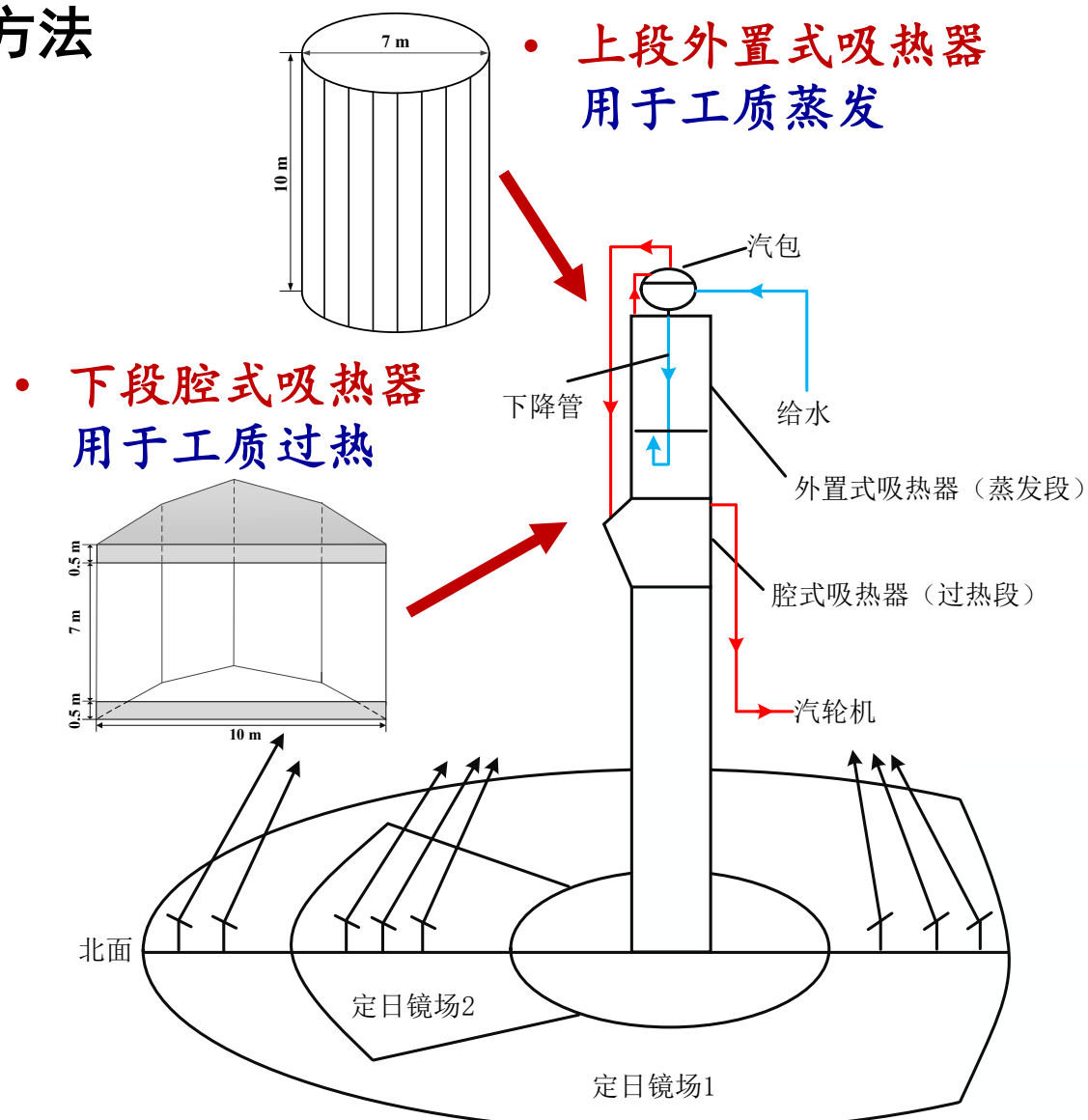
分段式吸热器

$$\eta_{\text{总}} = \eta_{\text{定日镜场}} \cdot \eta_{\text{吸热器}} \cdot \eta_{\text{热电转换}}$$

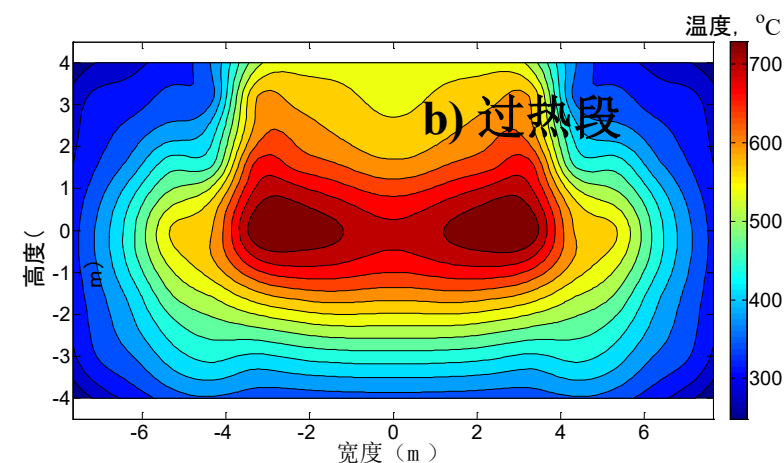
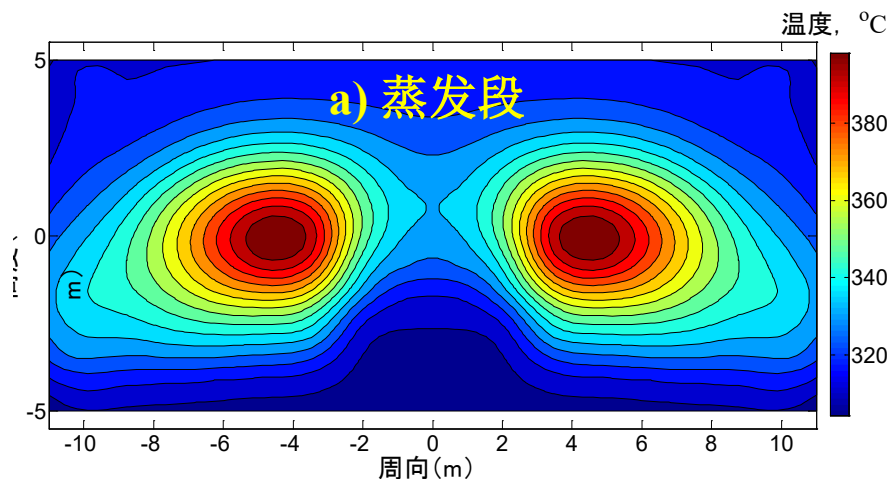
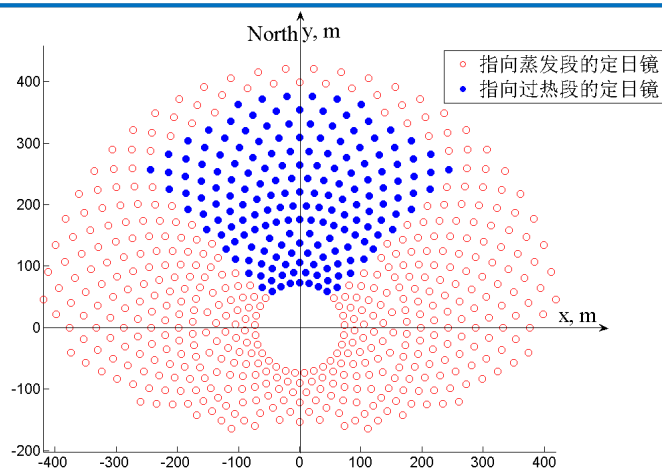
外置式吸热器热效率低，定日镜场效率高

腔式吸热器热效率高，定日镜场效率低

蒸发段壁温远低于过热段



2 新型分段式集热器



设计工况（春分12:00）定日镜场分配结果

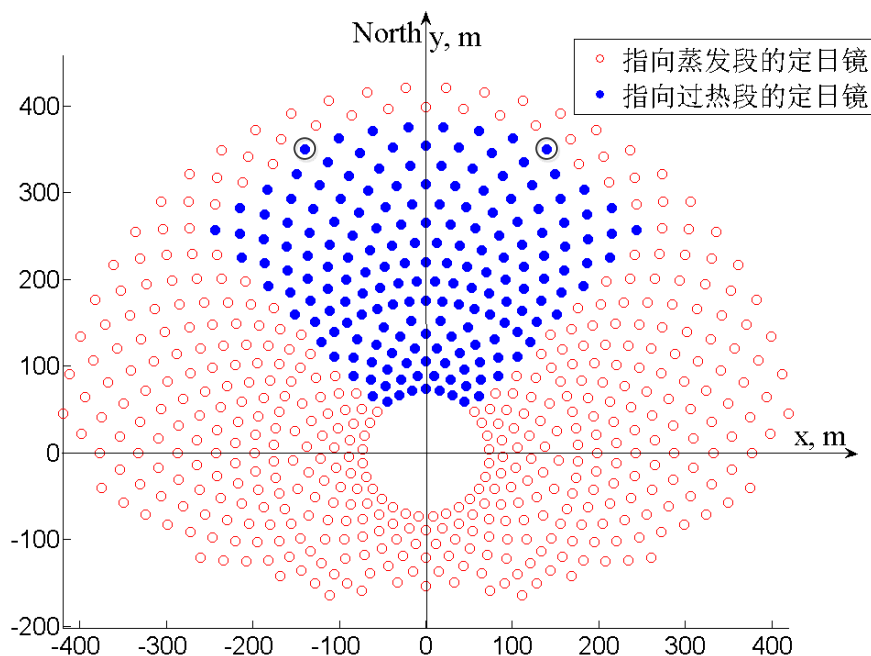
吸热器表面热流分布

➤ 与国际同类分段式吸热器相比，热效率提高**3.2%**，电站效率提高**0.88%**。

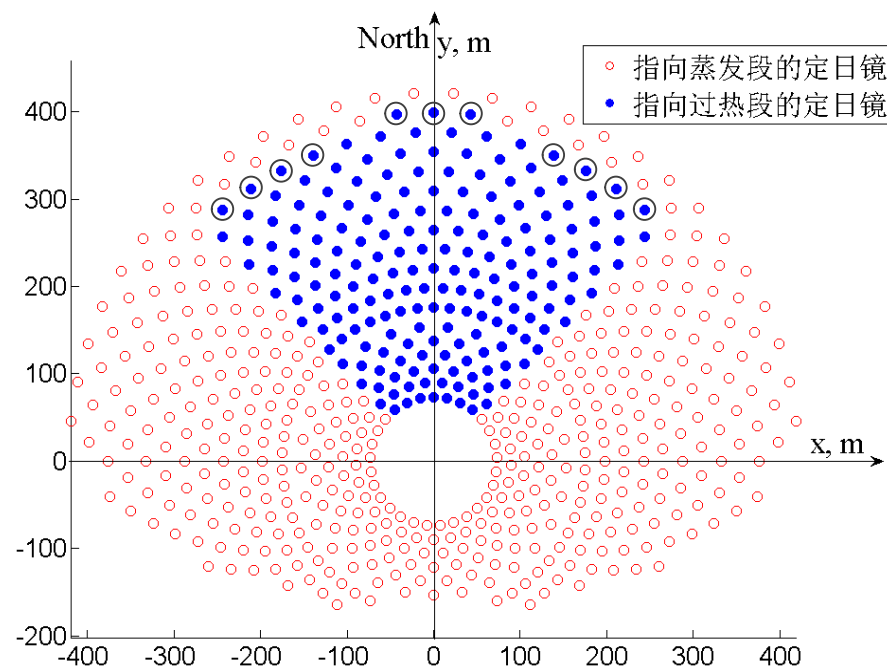
		分段式	双外置式			分段式	双外置式
定日镜场效率 (%)	蒸发段	72.37	72.27	定日镜场性能 (MW_{th})	69.2→50	69.2→50.1	
	过热段	71.74	72.51		吸热器性能 (MW_{th})	50→43.2	50.1→41.7
	总的	72.17	72.33			进入储热系统的热量 (MW_{th})	17.8
吸热器热效率 (%)	蒸发段	88.16	87.98	进入汽轮机的热量 (MW_{th})			25.4
	过热段	82.64	73.27		朗肯循环效率 (%)		40.6
	总的	86.55	83.35			发电量 (MW_e)	10.3
过热段吸热器各热损失效率 (%)	对流热损失	4.84	5.4	电站效率 (%)			25.36
	辐射热损失	9.52	16.32				
	反射热损失	3	5				

2 新型分段式集热器

运行时刻对分段式吸热器热性能的影响



a) 春分8:00



b) 冬至9:00

- 不同运行时刻下，通过**动态调节**蒸发段和过热段所对应的定日镜场，可保证吸热器**出口蒸汽温度**维持为**515 °C**，从而保证较高的朗肯循环效率和较低的汽轮机末级湿度。

3 大规模低成本高温熔融盐储热与换热-技术背景

太阳能光热发电尚有待突破**储热性能**和**发电效率**的**双重瓶颈**：

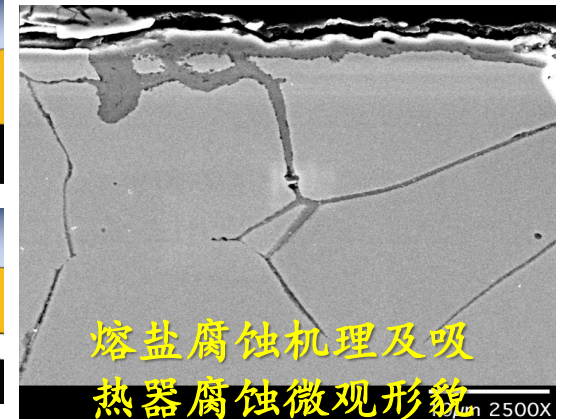
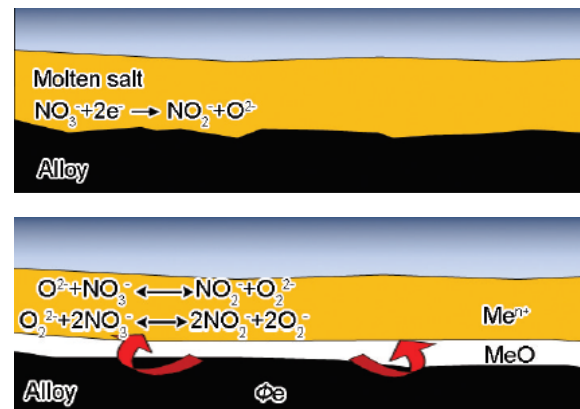
- 吸热和储热介质**熔融盐**传热性能差；
- 大规模储热高温下易发生**腐蚀**和**应力破坏**。



西班牙Gemasolar20MW塔式太阳能光热电站



储热时长：**15h**
吸热与储热熔盐用量：**6871吨**
光热转化效率：**13.67%**

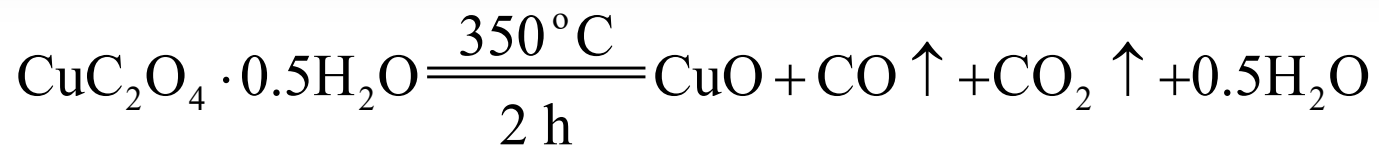


熔盐腐蚀机理及吸热器腐蚀微观形貌

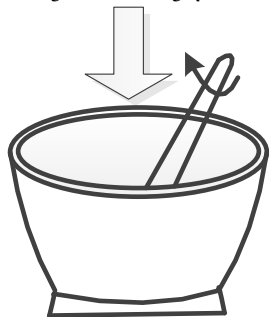
3 大规模低成本高温熔融盐储热与换热

二元熔融盐（太阳盐，60wt%NaNO₃+40wt%KNO₃）的储热性能调控

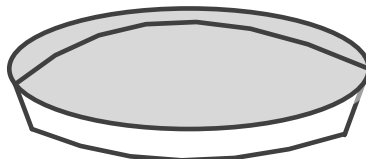
- 提出“一步法”制备低成本氧化铜纳米颗粒与熔融盐的共生复合结构，显著提升熔融盐基纳米流体的高温热稳定性



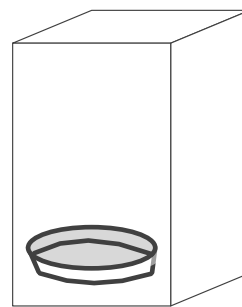
CuC₂O₄·0.5H₂O
+
NaNO₃ / KNO₃ (60:40)



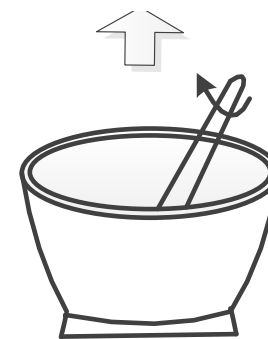
Grind and mix
for 20 minutes



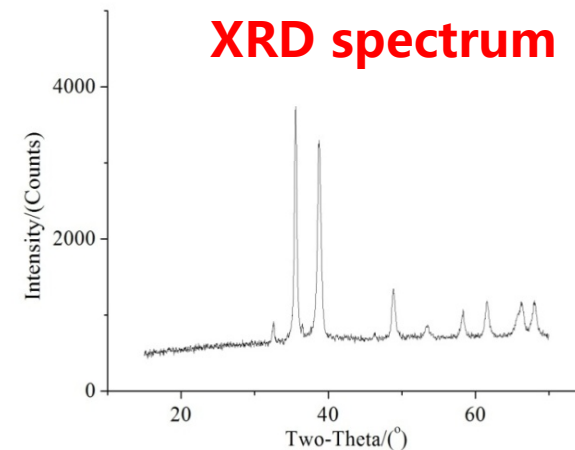
Place mixture in a
aluminum foil plate



Heat mixture in a furnace
for 2 hours at 350 °C

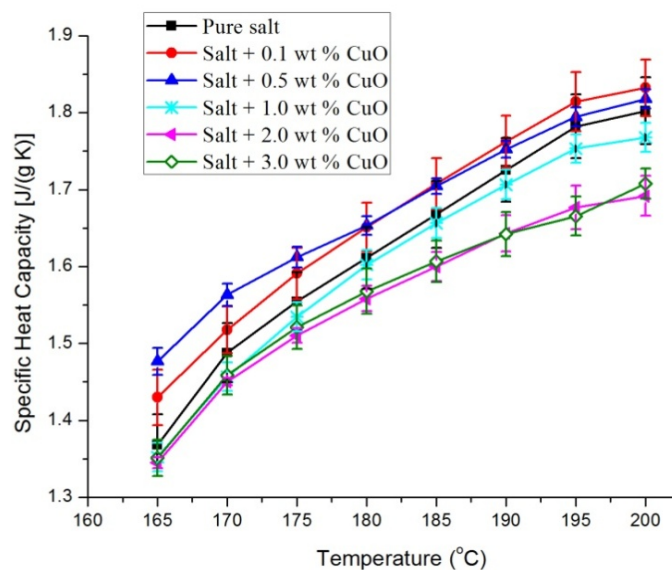


After cooling, grind and
mix for 60 minutes

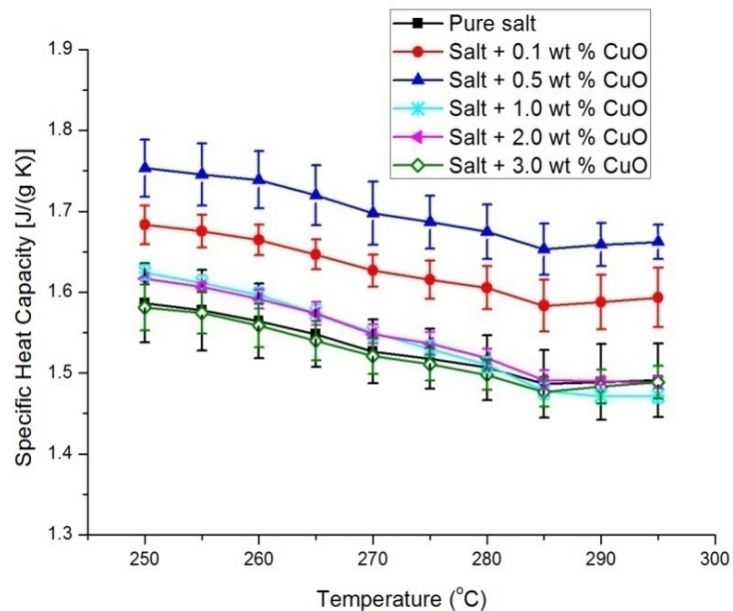


3 大规模低成本高温熔融盐储热与换热

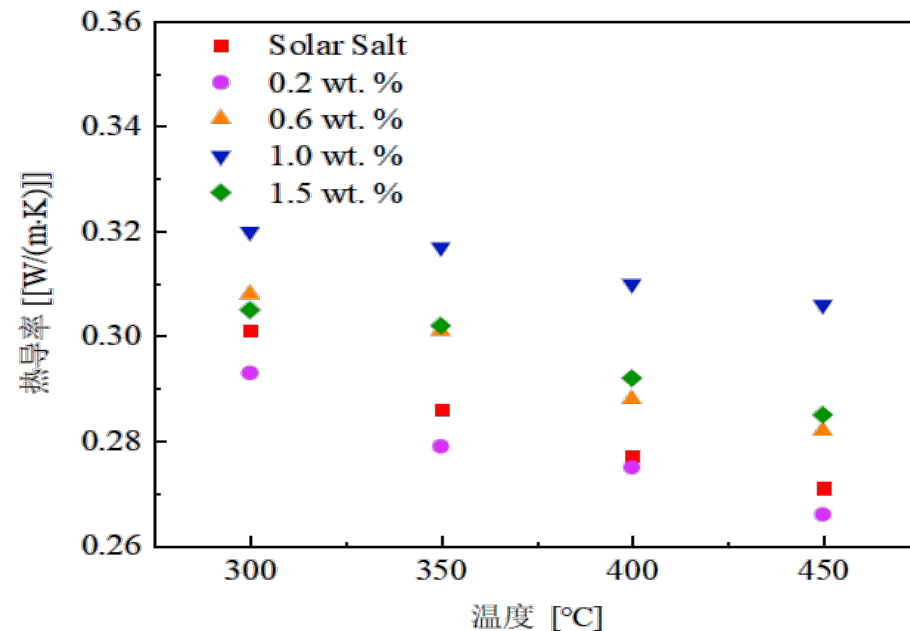
➤ 纳米颗粒同时提升二元熔融盐的蓄热和传热性能



固相比热



液相比热



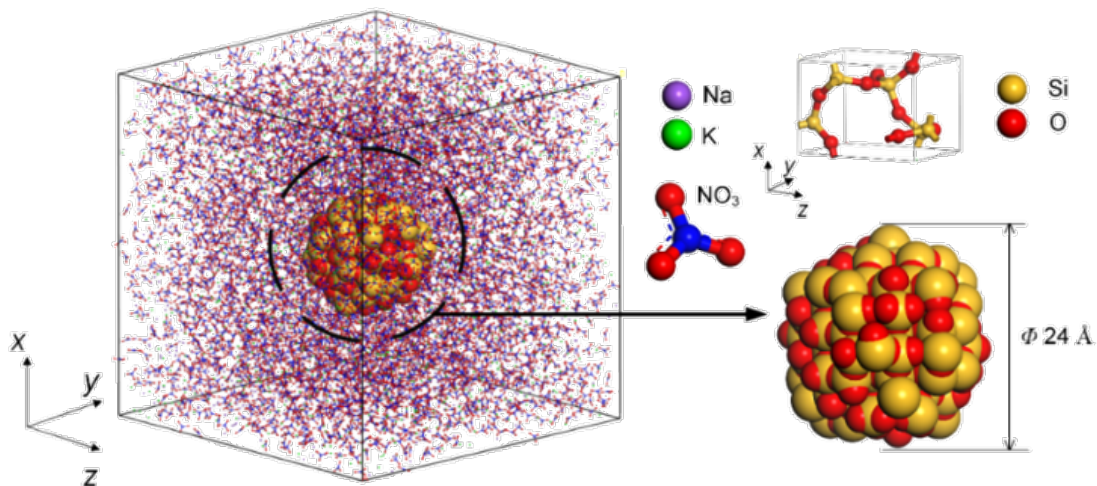
热导率

二元熔融盐蓄热和传热性能随纳米颗粒质量分数的变化

3 大规模低成本高温熔融盐储热与换热

➤ 纳米颗粒同时提升二元熔融盐的蓄热和传热性能

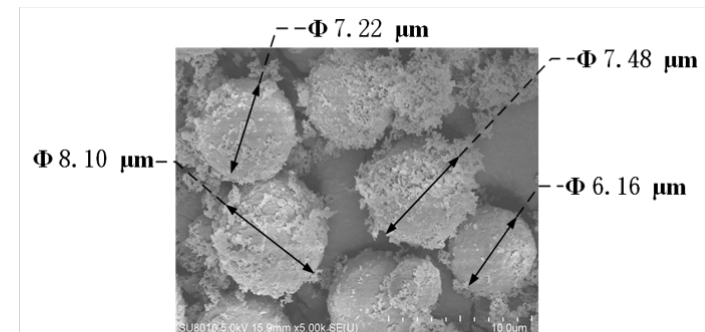
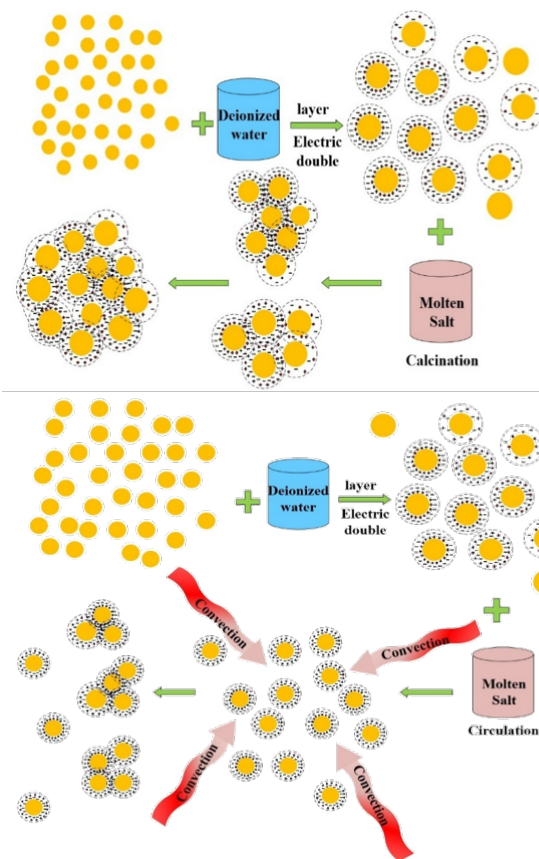
SiO₂ @ Solar Salt (60% wt. NaNO₃-40% wt. KNO₃)



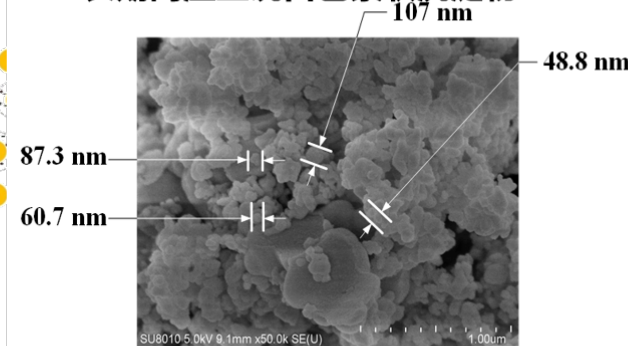
修正热流

$$J = \left[\sum_{j=1}^N \mathbf{v}_j E_j - \sum_{\alpha=1}^2 h_{\alpha} \sum_{j=1}^{N_{\alpha}} \mathbf{v}_{\alpha j} \right] + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N r_{ij} (\mathbf{v}_j \cdot \mathbf{F}_{ij})$$

基于分子动力学模拟，提出纳米颗粒强化熔盐物性的机理解释



长期高温工况白色絮状沉淀物



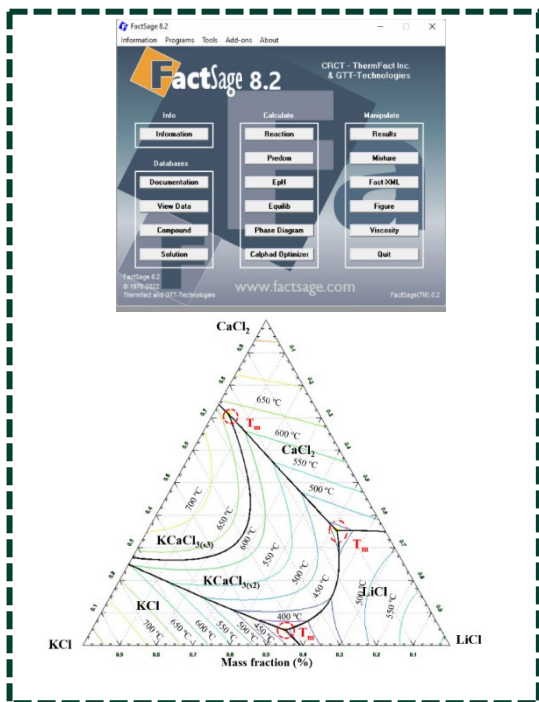
高低温循环工况白色絮状漂浮物

从微观机理层面，揭示纳米颗粒在高温熔盐中的团聚及其抑制机制

3 大规模低成本高温熔融盐储热与换热

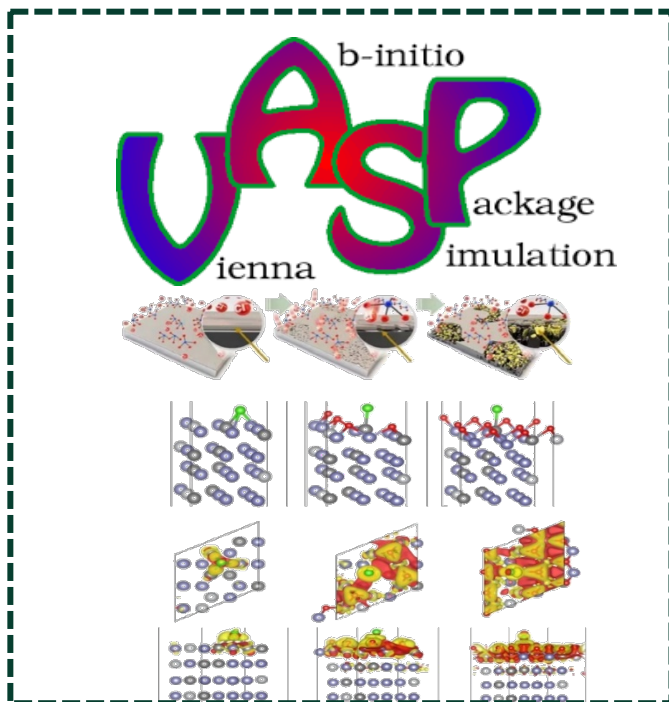
➤ 高温熔融盐的制备及其腐蚀性能探究

热物性预测及表征



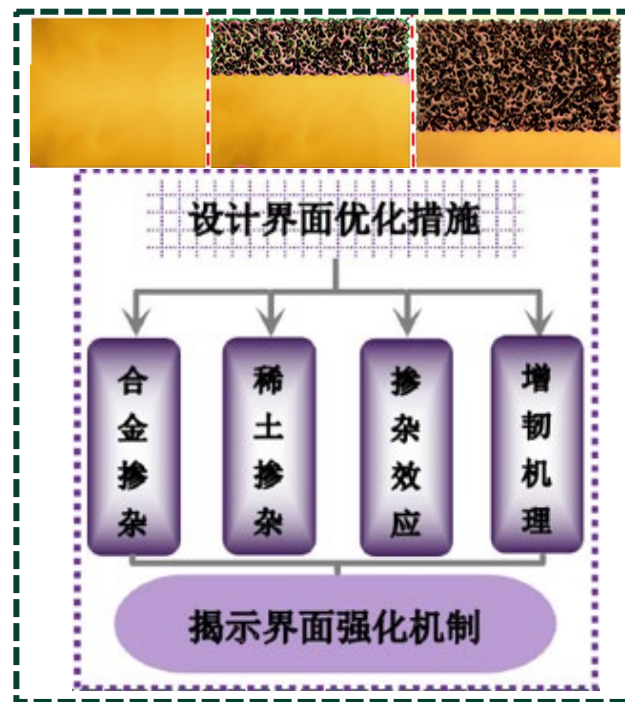
组分对于工作温度的影响

腐蚀机理探究



熔融盐对合金的腐蚀机制

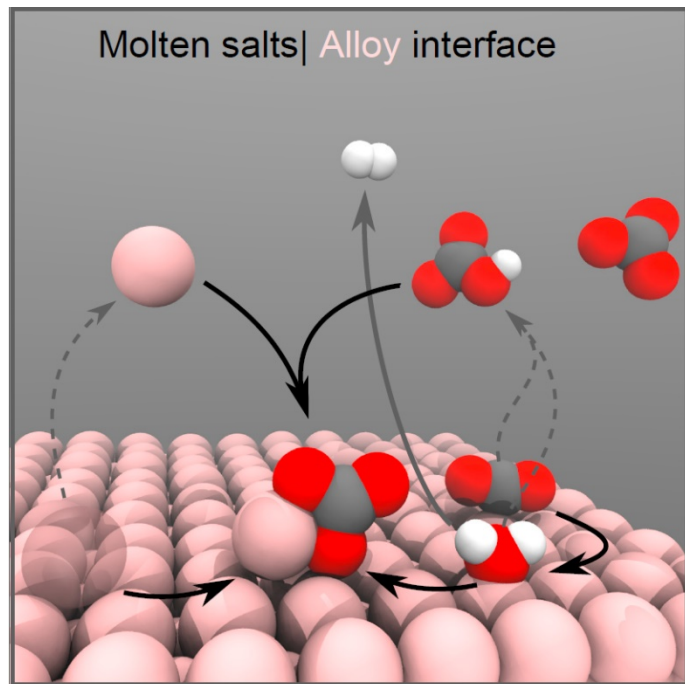
策略调控及组分优化



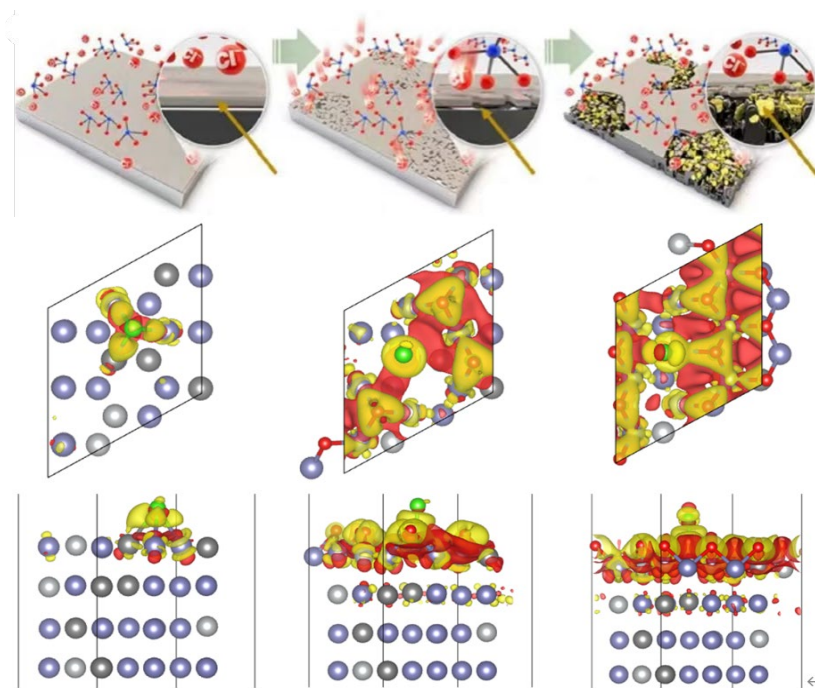
策略调控及组分优化对界面的影响

3 大规模低成本高温熔融盐储热与换热

➤ 高温熔融盐的制备及其腐蚀性能探究



界面作用机制



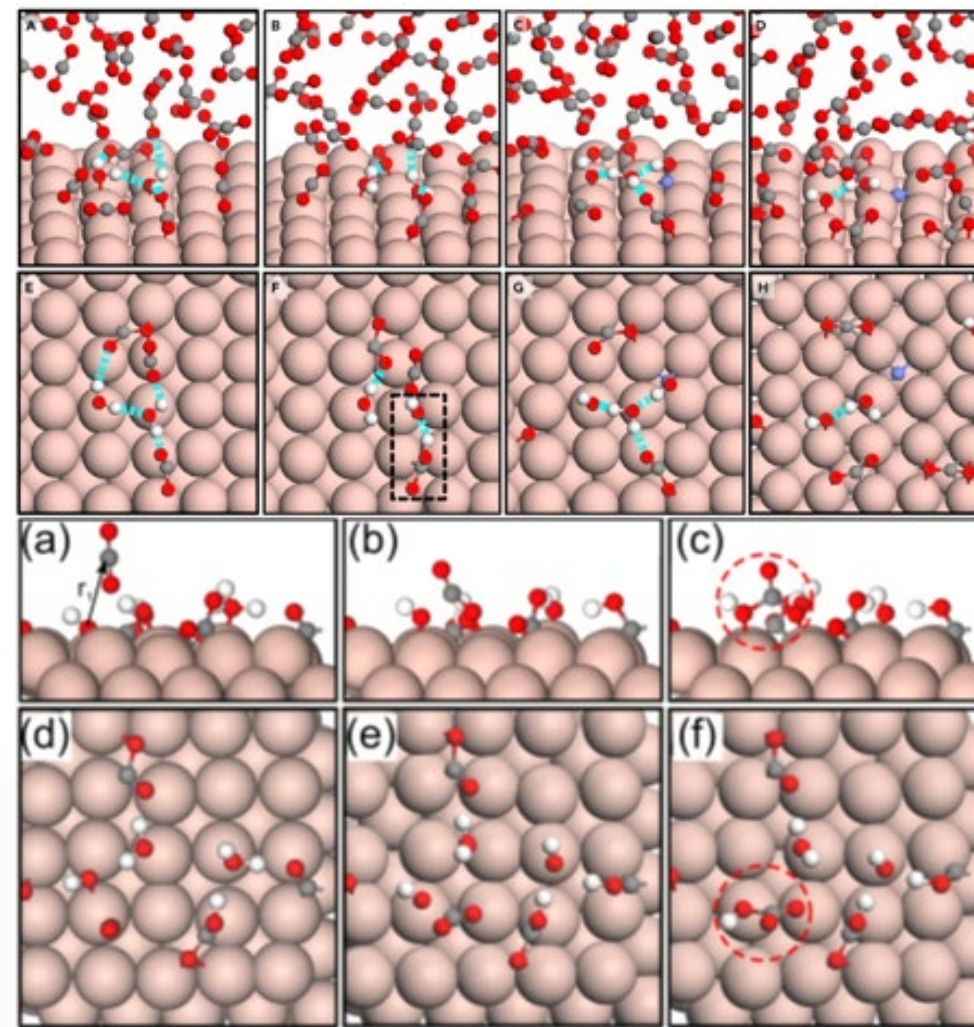
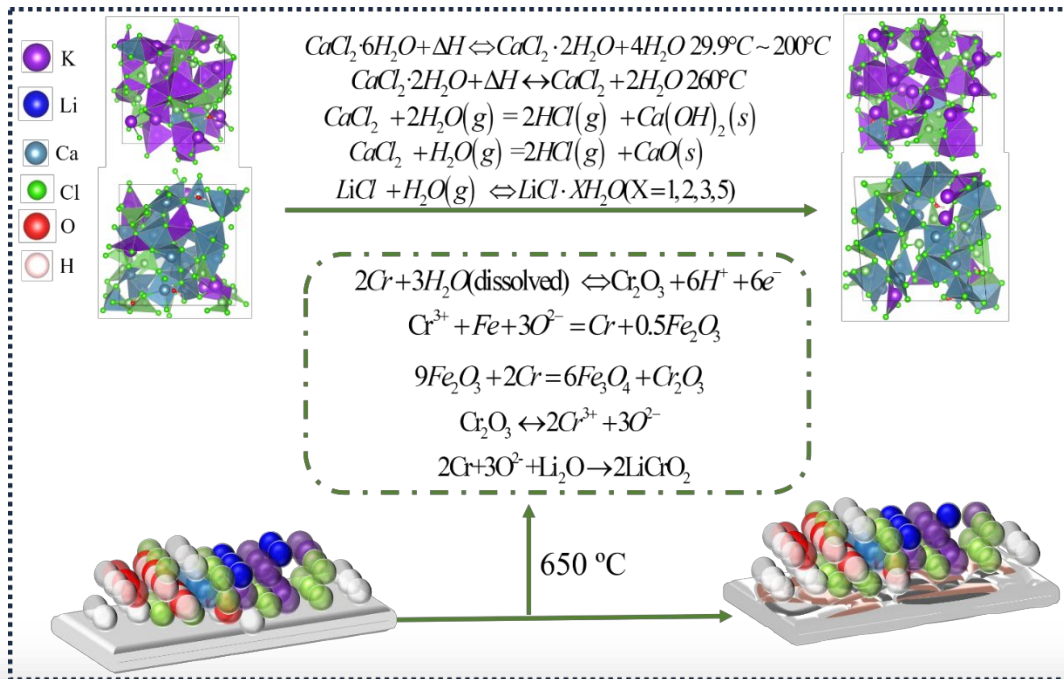
多重因素协同效应：包括熔融盐温度，熔融盐组分及合金的组成

阐释熔融盐在动态升温过程中与合金的反应界面机制：

- 熔融盐中的碱土氯化盐 CaCl_2 解离空气中的部分水；合金的Fe、Cr元素优先吸附熔融盐中的腐蚀性介质。

3 大规模低成本高温熔融盐储热与换热

➤ 高温熔融盐的制备及其腐蚀性能探究



揭示出水在腐蚀机制中的作用：

- 水作为熔融盐中杂质氢键网络加速了界面反应。
- 水和熔融盐中的碱土氯化盐反应生成氧化物杂质，进一步加快合金的溶解。

3 大规模低成本高温熔融盐储热与换热-金属材料310S-Al钢热轧态

组织力学性能分析

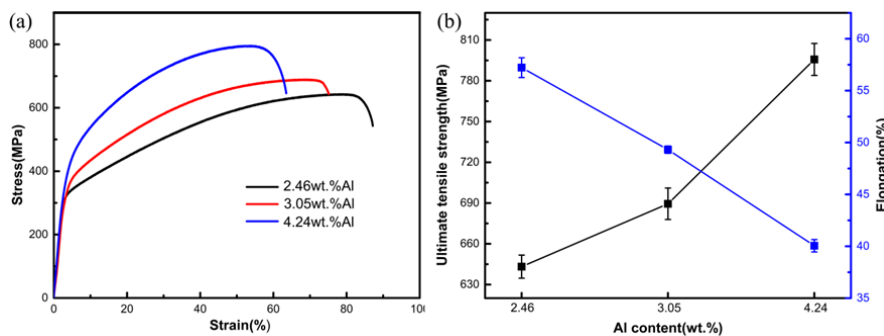
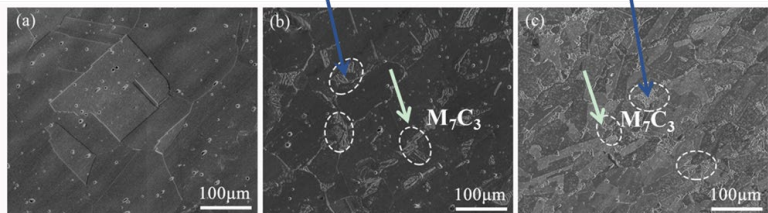
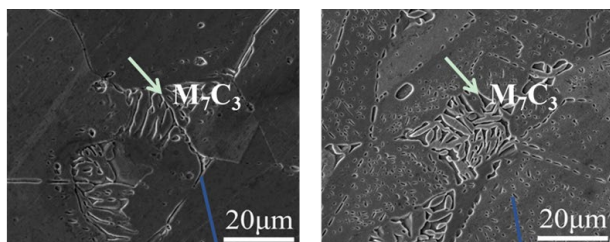


图1 不同Al含量热轧态310S室温拉伸

(a)应力-应变曲线; (b)抗拉强度和延伸率变化图

表1 不同Al含量热轧态310S室温拉伸

Al含量 (%)	硬度 (HV0.3)	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	延伸率 (%)
2.46	160.22	291.33	643.22	57.22
3.05	176.78	322.40	689.44	49.31
4.24	220.63	342.19	795.71	40.05

图1 通过对实验钢扫描电镜观察，发现在晶界处有碳化物的生成

- 高铝耐热钢随着Al含量的增加，逐渐增加，而延伸率变化相反；
- 原因：随着Al含量的增长，耐热钢晶粒尺寸逐渐增大，碳化物以及第二相析出物也都溶解到基体中，固溶强化、细晶强化和晶界析出强化的共同作用。

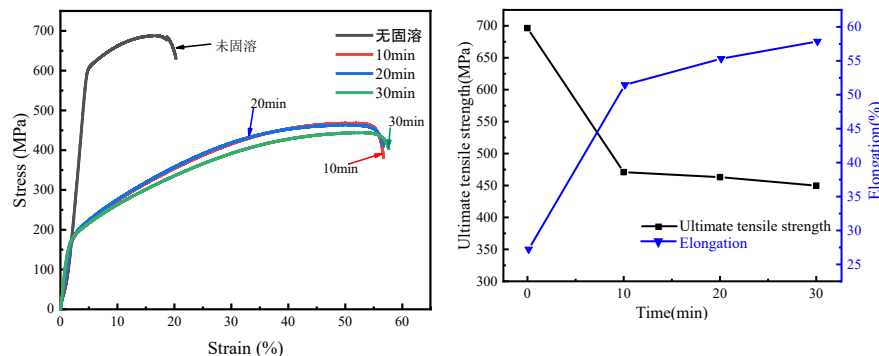


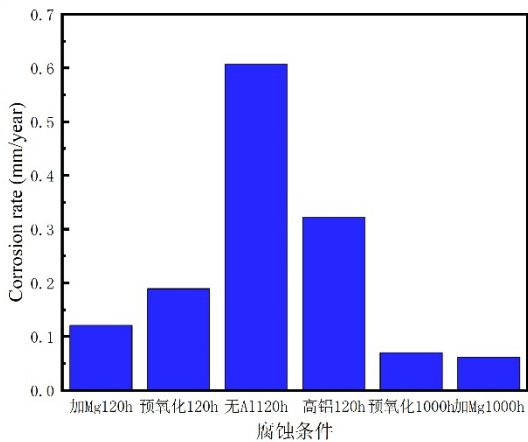
图7 1150 °C下不同固溶时间高铝耐热钢室温拉伸性能

(a)应力应变曲线; (b)抗拉强度和延伸率变化图

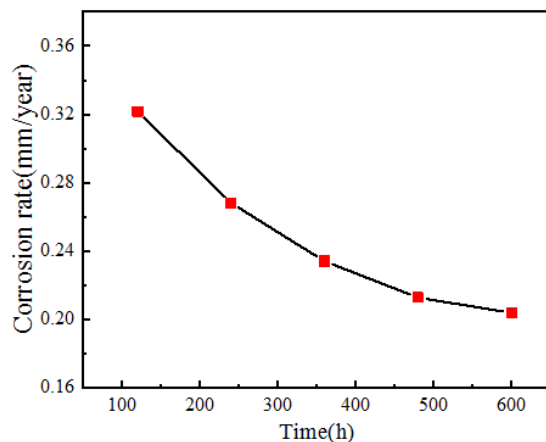
表2 1150 °C下不同固溶时间高铝耐热钢室温力学性能

时间 (min)	硬度 (HV0.3)	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	延伸率 (%)	硬度 (HV)
0	232.62	603.25	696.32	27.23	230
10	151.51	193.84	470.89	51.46	150
20	167.47	190.68	463.04	55.31	162
30	144.36	187.91	449.86	57.68	148

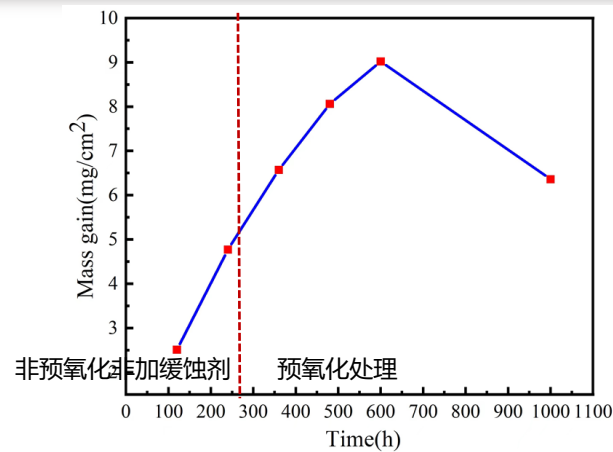
3 大规模低成本高温熔融盐储热与换热-碳酸盐腐蚀性能



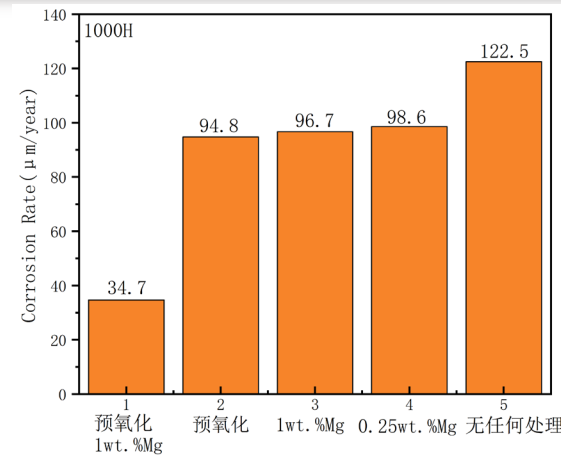
碳酸盐腐蚀



碳酸盐非预氧化非添加缓蚀剂



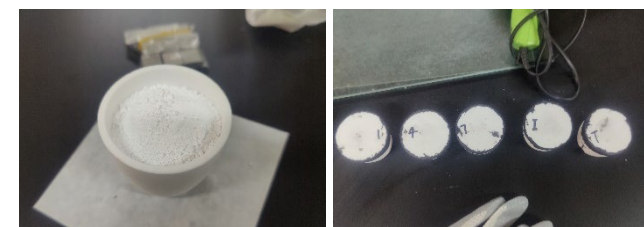
碳酸盐非预氧化非添加缓蚀剂



氯盐腐蚀

- 随着腐蚀时间的延长，腐蚀速率在不断减慢。基体合金与熔盐中的氧以及其他元素反应生成具有保护性的氧化膜碳酸盐配比： $\text{Li}_2\text{CO}_3:\text{Na}_2\text{CO}_3:\text{K}_2\text{CO}_3$ 为32.1:33.4:34.5;
- 氯盐配比：NaCl-KCl-MgCl₂ 为24.5 : 20.5 : 55.1;
- 腐蚀温度：650°C

类别	测试条件	氩气保护	腐蚀速率 (mm/年)
碳酸盐 (120h)	未加铝	否	0.607
	加铝	否	0.3216
碳酸盐 (1000h)	未处理 (含Al)	否	0.07
	预氧化	否	0.061
	加缓蚀剂	否	0.061
氯盐 (1000h)	预氧化	是	0.94
	加缓蚀剂	是	0.0967
	预氧化+加缓蚀剂	是	0.0347



3 大规模低成本高温熔融盐储热与换热-高铝 In625合金

组织和力学性能分析

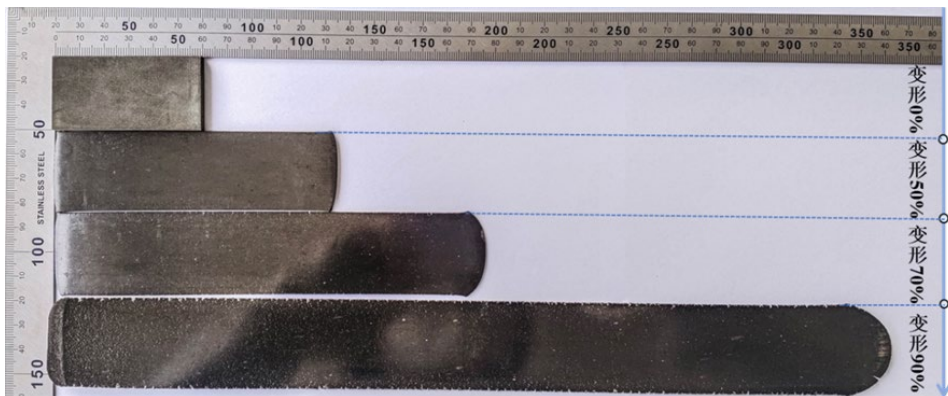
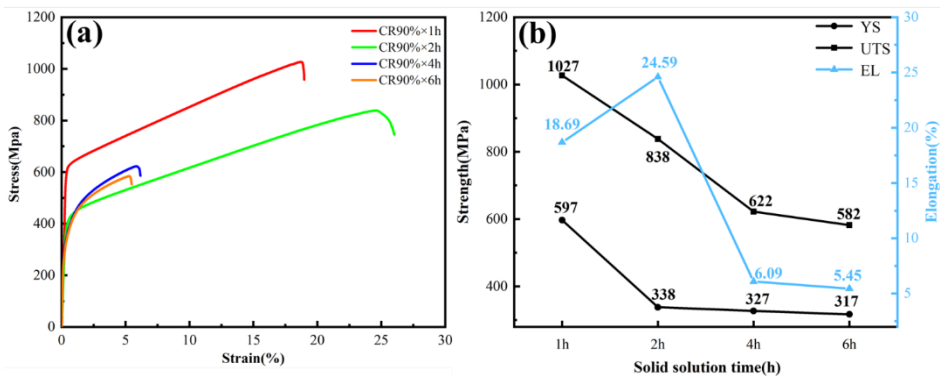


图1 不同变形量冷轧合金板材宏观形貌

发现高铝625合金冷轧性能较好，90%变形量未发现大裂纹



合金抗拉强度为636 MPa，延伸率为13.56%

表1 高铝In 625镍基合金的成分(wt.%)

	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Al
3.0 wt.% Al In 625	59.85	18.00	5.00	4.15	10.00	3.00

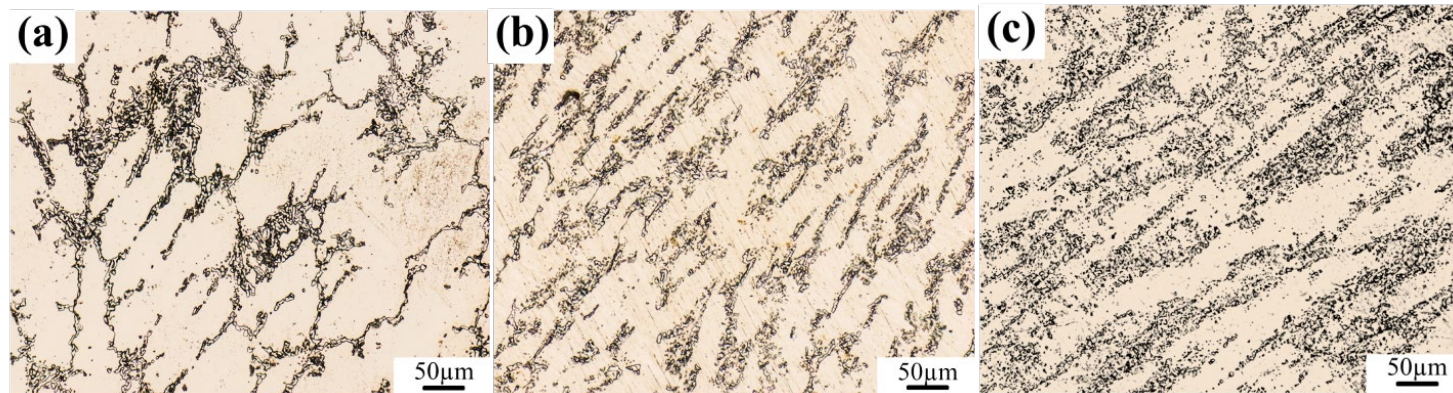


图2 不同变形量冷轧合金板材金相组织(a)变形50%; (b)变形70%; (c)变形90%

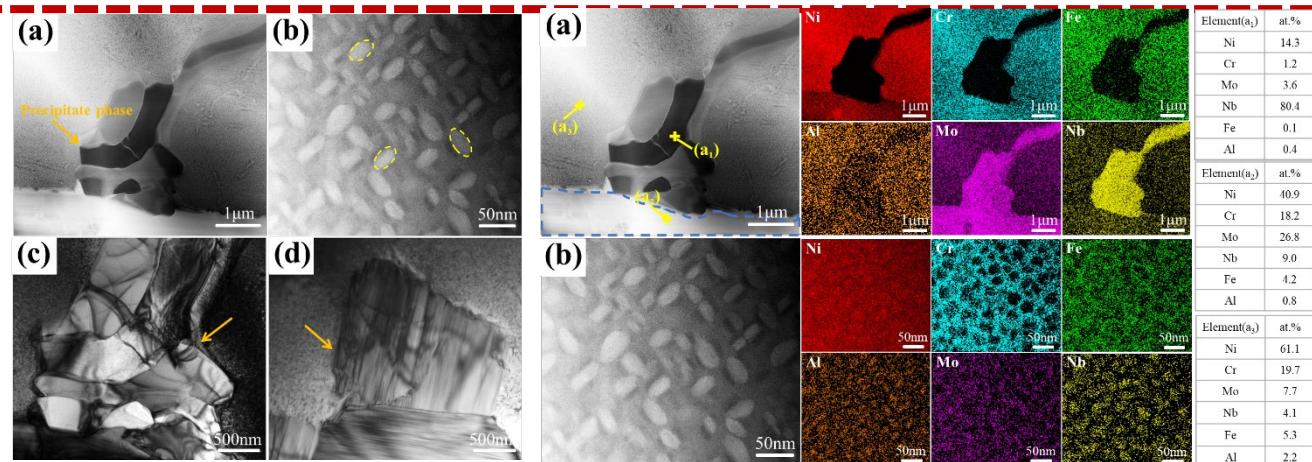


图3 含3.0 wt.%Al In 625铸态合金在不同区域的TEM形貌图

图4 铸态合金在不同区域的TEM元素分布

3 大规模低成本高温熔融盐储热与换热-碳酸盐腐蚀性能

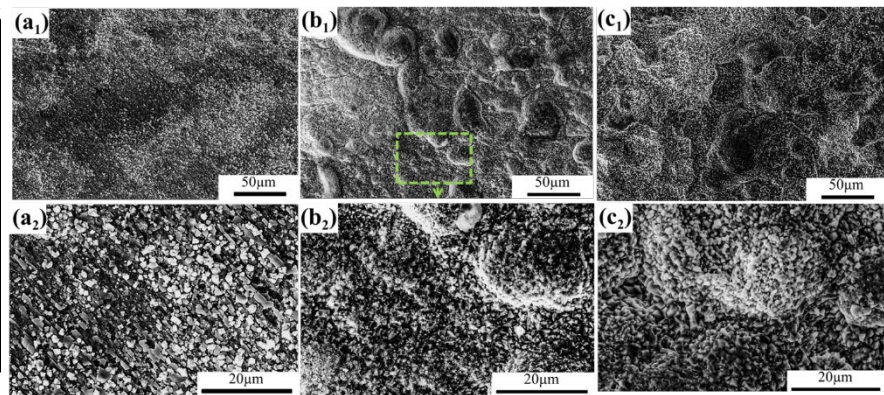
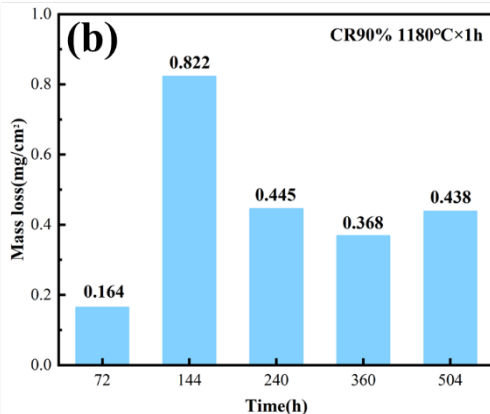
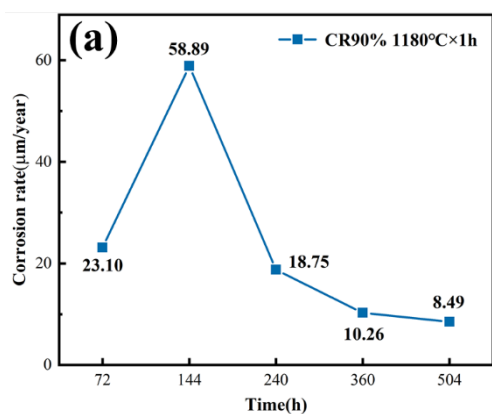
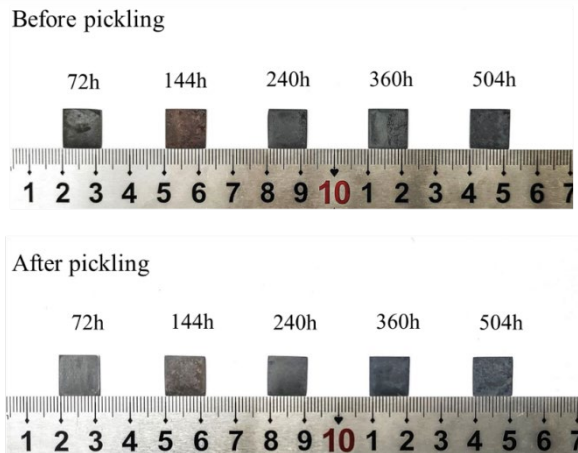


图1 薄板材在碳酸盐中腐蚀不同时间酸洗前后的宏观形貌

图2 高铝 In625合金薄板材在碳酸盐中不同腐蚀时间的腐蚀数据 (a)腐蚀速率曲线; (b)质量损失

图3 高铝 In 625合金薄板材在碳酸盐中腐蚀不同时间的表面形貌 (a1)(a2)72 h; (b1)(b2)240 h; (c1)(c2) 504h

➤ 连续且致密的 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{LiAlO}_2$ 保护层形成后, 有效保护了合金, 腐蚀504 h后的合金腐蚀速率仅为 $8.49 \mu\text{m}/\text{year}$, 明显优于其他同类合金。

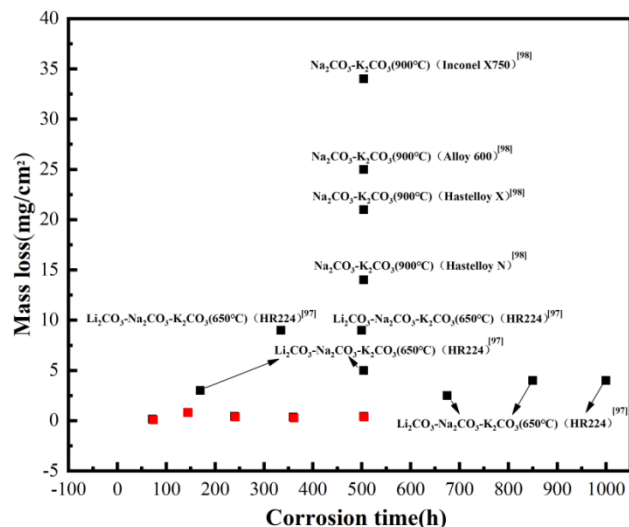


图4 与In 625合金成分含量差不多的相关合金腐蚀速率及质量损失的调研结果

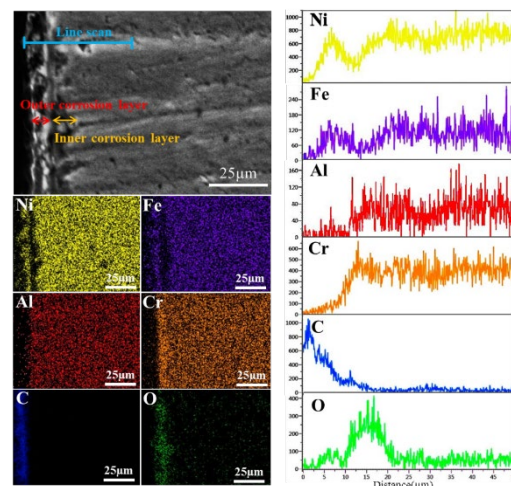


图5 薄板材腐蚀240 h后的截面形貌及能谱

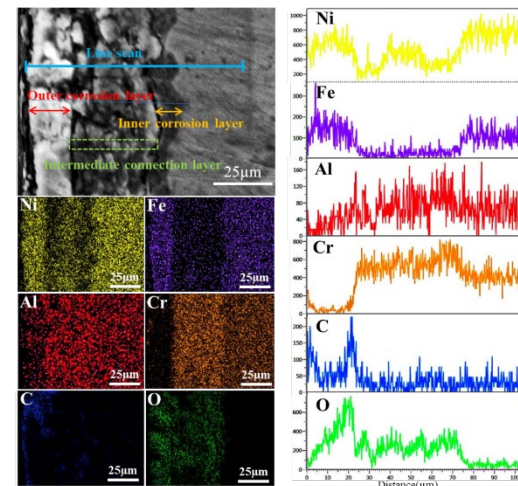


图6 薄板材腐蚀504 h后的截面形貌及能谱

4 输运与换热装备-熔盐泵阀设备

针对高温熔盐泵阀开展的关键技术与开发，其技术途径和路线融合美国福斯、瑞士苏尔寿、德国费亚泰克等国外高温熔盐泵领军企业的技术特征，**关键技术指标优于国内同类产品**。并搭建有系列熔盐泵阀测试实验台，开展系列实验测试研究。



熔盐泵性能测试实验台
塔式太阳能光热发电技术研究



长轴泵转子动力学特性实验

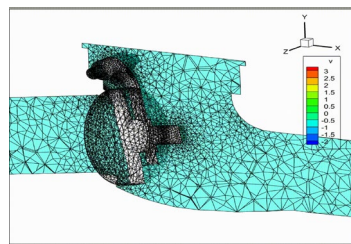
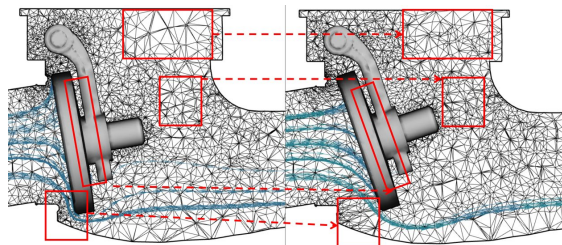
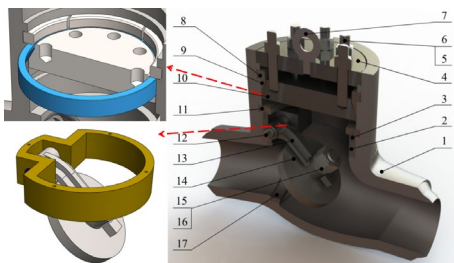


盐分解特性测试实验台

熔盐阀门研究

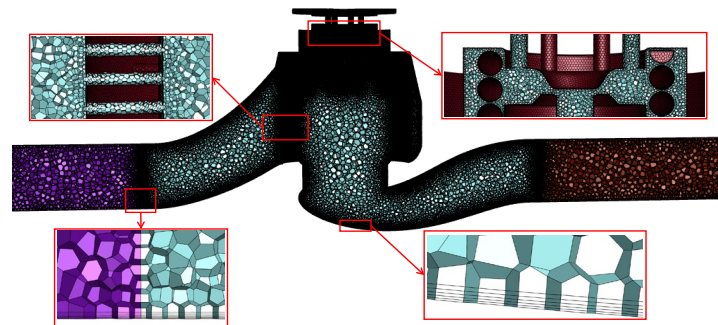
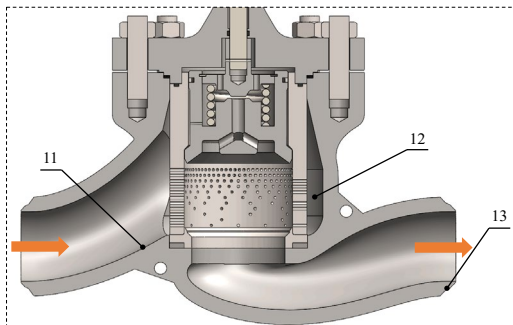
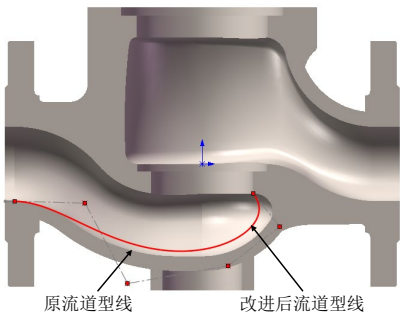
➤ 高温熔盐旋启式止回阀研发与启闭动态特性研究

针对现有高温熔盐旋启式止回阀填料易腐蚀、关闭过程易发生熔盐锤、开启过程阀瓣易振荡等问题；
采用无填料自紧密封阀盖结构：避免了高温熔盐阀填料腐蚀问题。



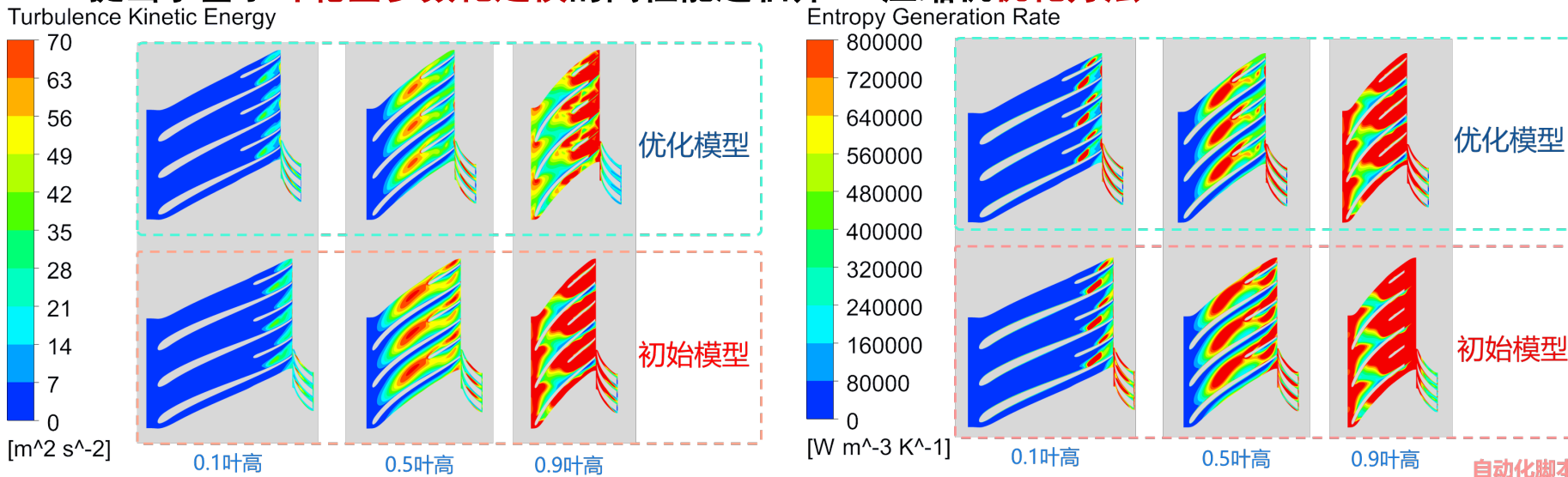
➤ 熔盐调节阀吹扫性能优化及防结晶结构研发

针对光热发电系统非正常工作时，熔盐阀门内积液易结晶，会导致阀门堵塞、内件损坏、内漏等问题，对流动型线进行优化，
优化后的结构更利于吹扫，用更小的吹扫流速就能完全排除积液。

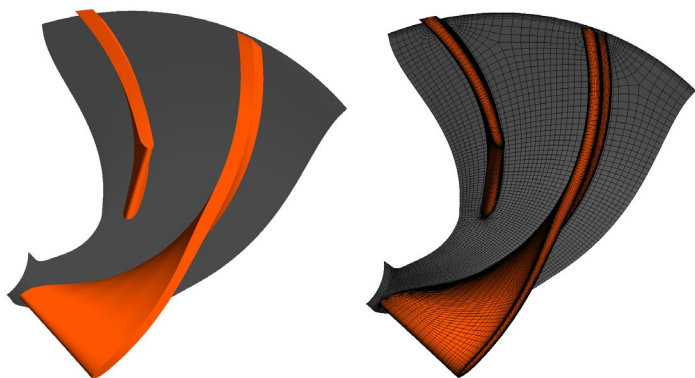


4 输运与换热装备-超临界CO₂压缩机

✓ 提出了基于叶轮全参数化建模的高性能超临界CO₂压缩机优化方法



优化前后叶轮-扩压器通道内湍动能对比



全参数化叶片模型及网格

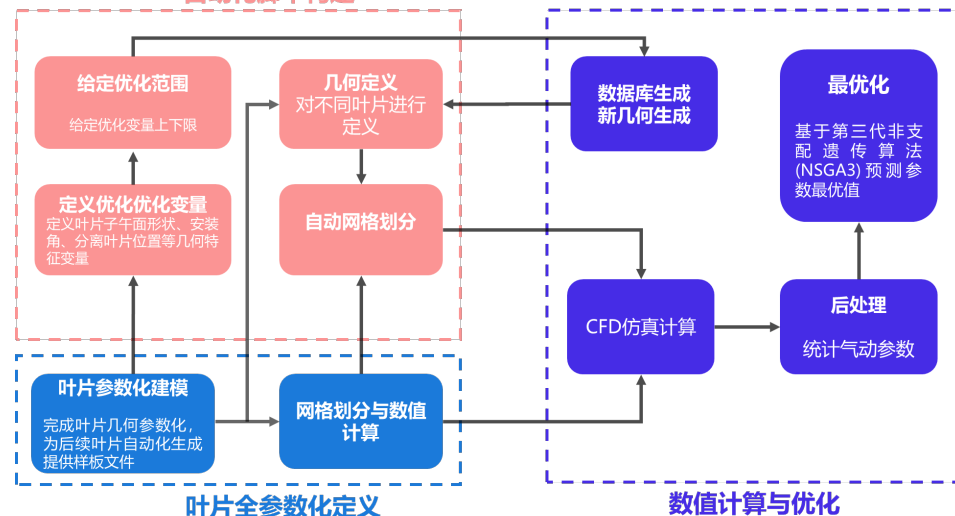
优化前后叶轮-扩压器通道内熵产对比

	初始模型	优化模型
压比	1.48	1.53
等熵效率	79.51	82.74

优化前后性能对比

↑ 3.3 %

↑ 4.1 %



基于叶轮全参数化建模方法的超临界CO₂压缩机优化流程图

叶轮全参数化建模结合NSGA 3的压缩机优化方法可有效提升超临界CO₂压缩机性能。

报告提纲

1、研发背景

2、学科基础

3、阶段进展

4、下一步工作

太阳能粒子吸热器技术

高温集热关键技术—背景

Solar collector



Parabolic trough solar collector



Tower solar collector



Particle solar collector

Solar absorption medium



Steam or oil



Molten salt



Particle or gas

Working temperature

250-500°C

500-600°C

>700°C

水物性→
提高温度需
提高压力

熔融盐高
温分解稳定
性差

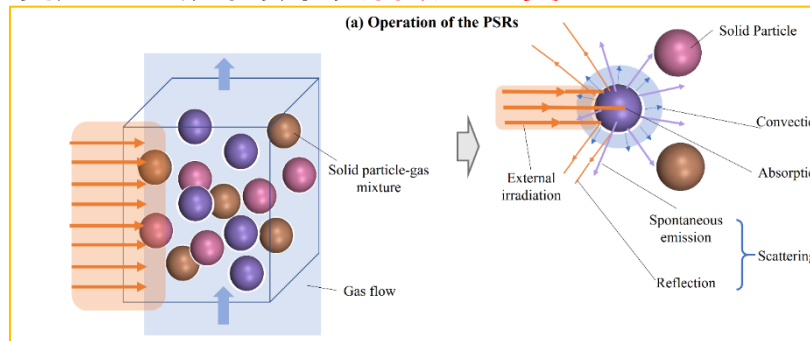
固体颗粒稳定
/吸收率高→储
热>1000°C

粒子式太阳能吸热器(PSR)

- 新一代太阳能集热技术
- 储热有望突破1000 °C
- 颗粒吸/释热辐射为主
- 同步光谱调控→后端应用

塔式太阳能光热发电技术研究

提高太阳能光热利用效率的核心→提高介质储热温度

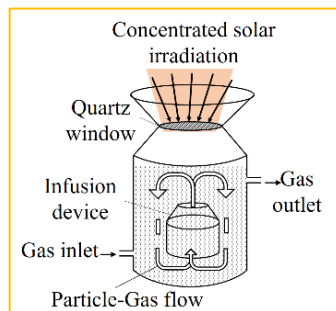


PSR工作过程=气固两相流+辐射传热深度耦合

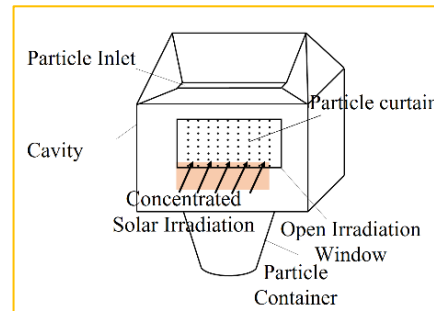
关键技术

颗粒选型→光谱发射率
→测试/制备/调控

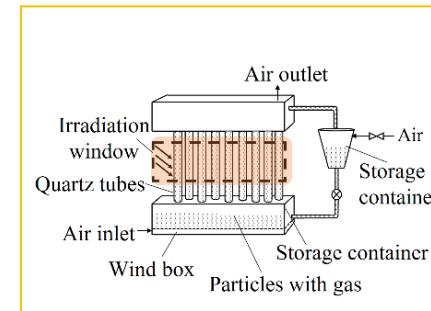
两相流场/辐射匹配→
掺混/分离/吸热/释热



流化床式

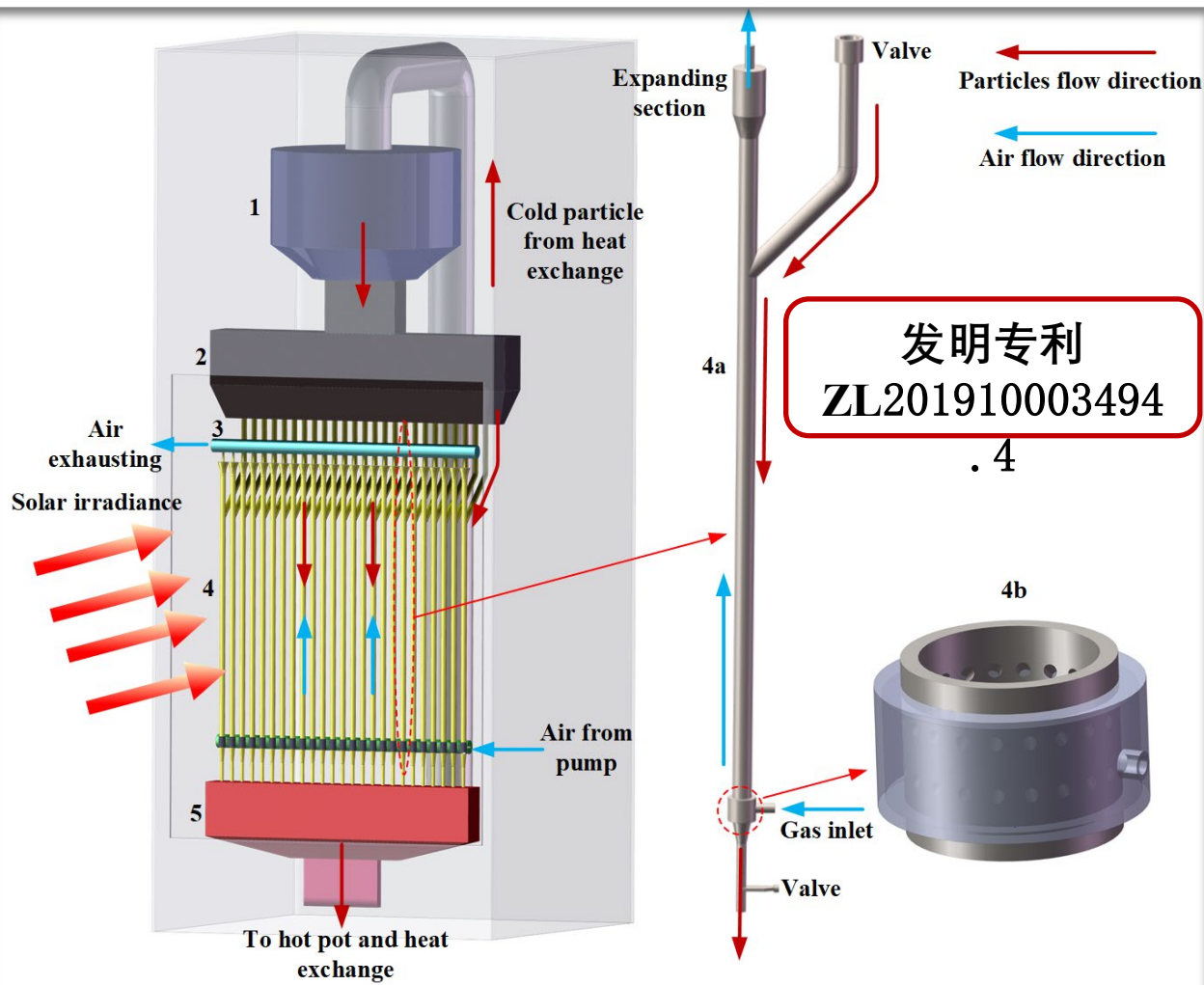


自由下落式



气固逆流式

密相气固逆流式粒子吸热器结构设计



结构改进，提出成熟方案

基本工作原理：

进出口分别设置阀门控制颗粒流量，通过控制阀门开度使最大出料量小于最大进料量从而使颗粒在管内形成密相堆积态，颗粒进口采用侧边进料，从而实现进料量的自适应调节；气体自下而上流动，从而在管内形成扰动，使颗粒换热均匀并强化壁面与颗粒的换热系数。

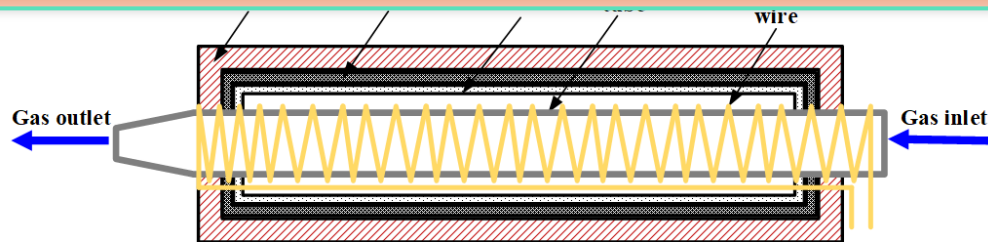
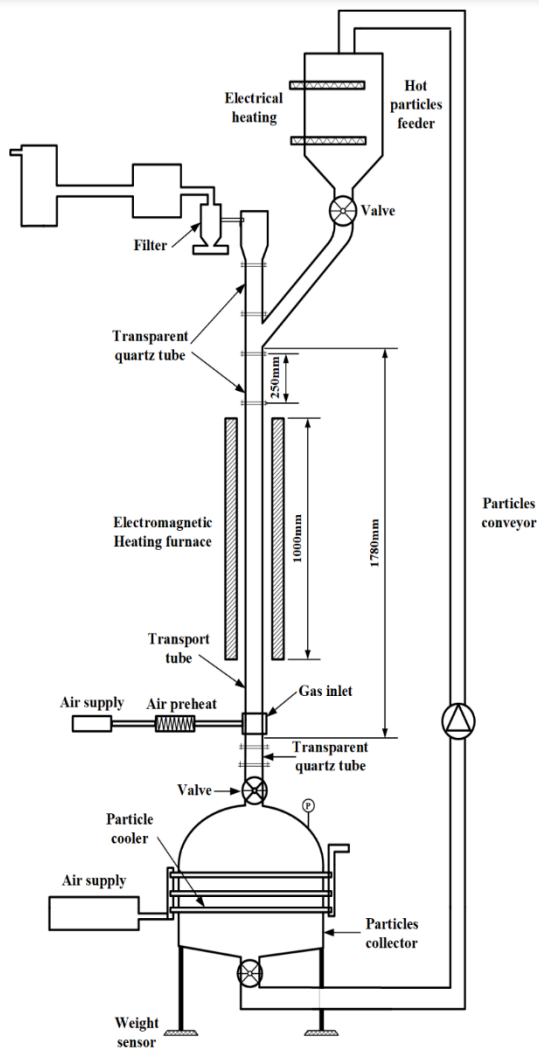
目前采用空气为流化气，下一步采用

CO₂.

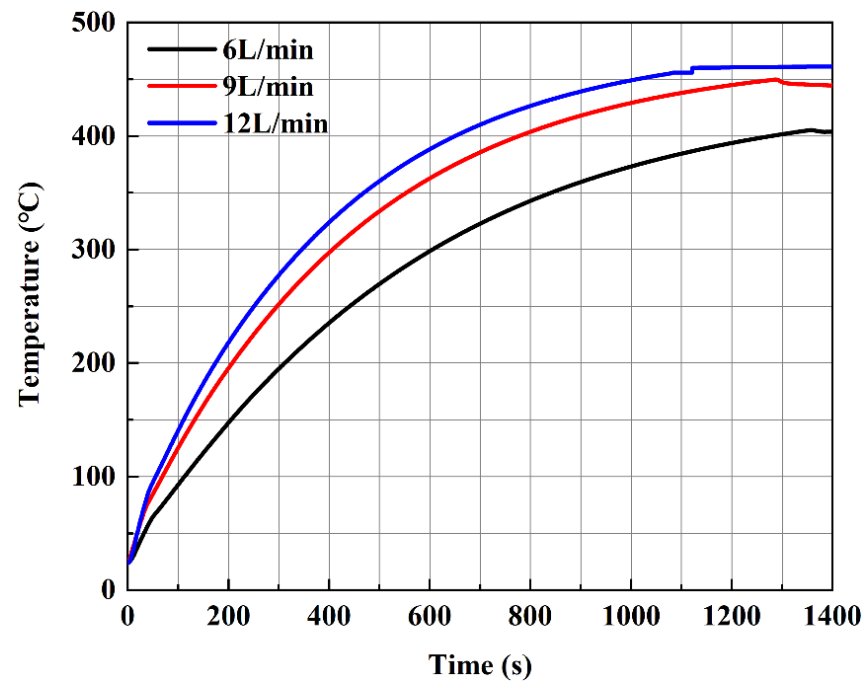
粒子吸热器整体结构、单管结构及进气室示意图

太阳能粒子吸热器技术

密相气固逆流式粒子吸热器结构设计



低流量空气预热器 (1.2kWel)

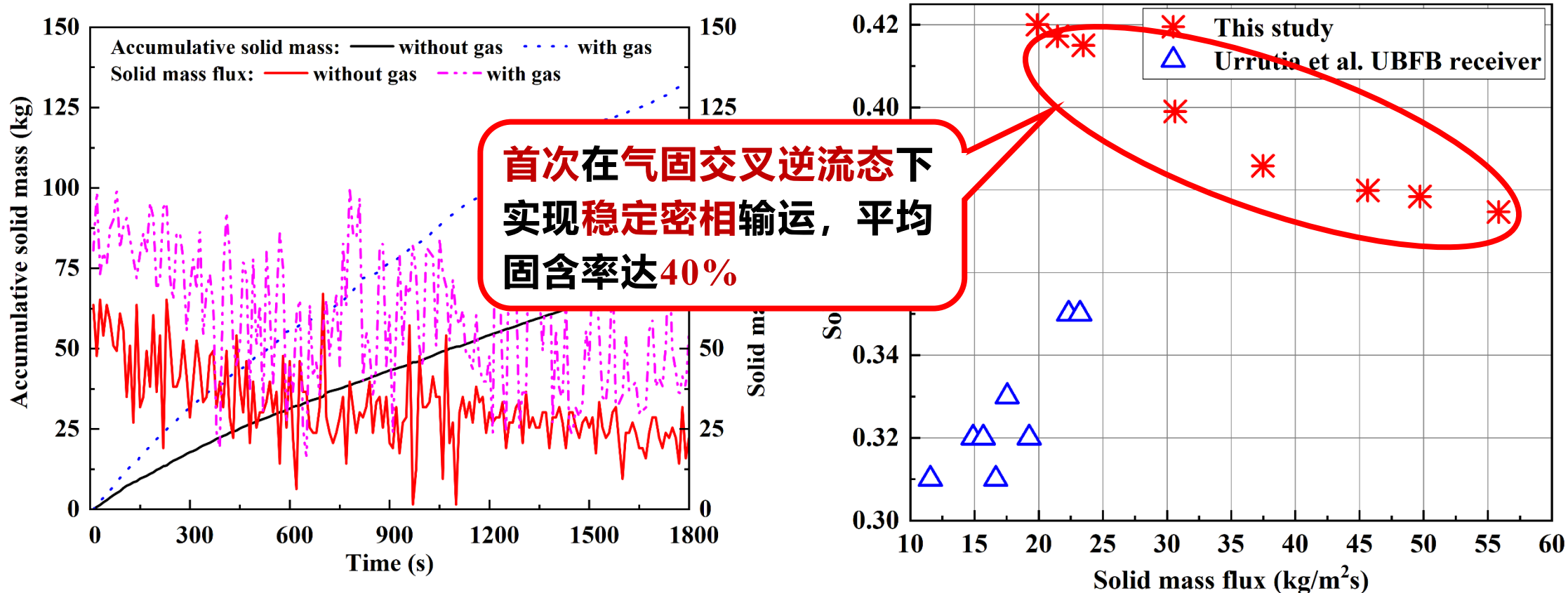


不同空气流量温升速率曲线

单管密相气固逆流式流化床粒子吸热器实验流程图 (左) 及高温实验系统实拍图 (右)

密相气固逆流式粒子吸热器高温热运输特性

热态下基本流动特性



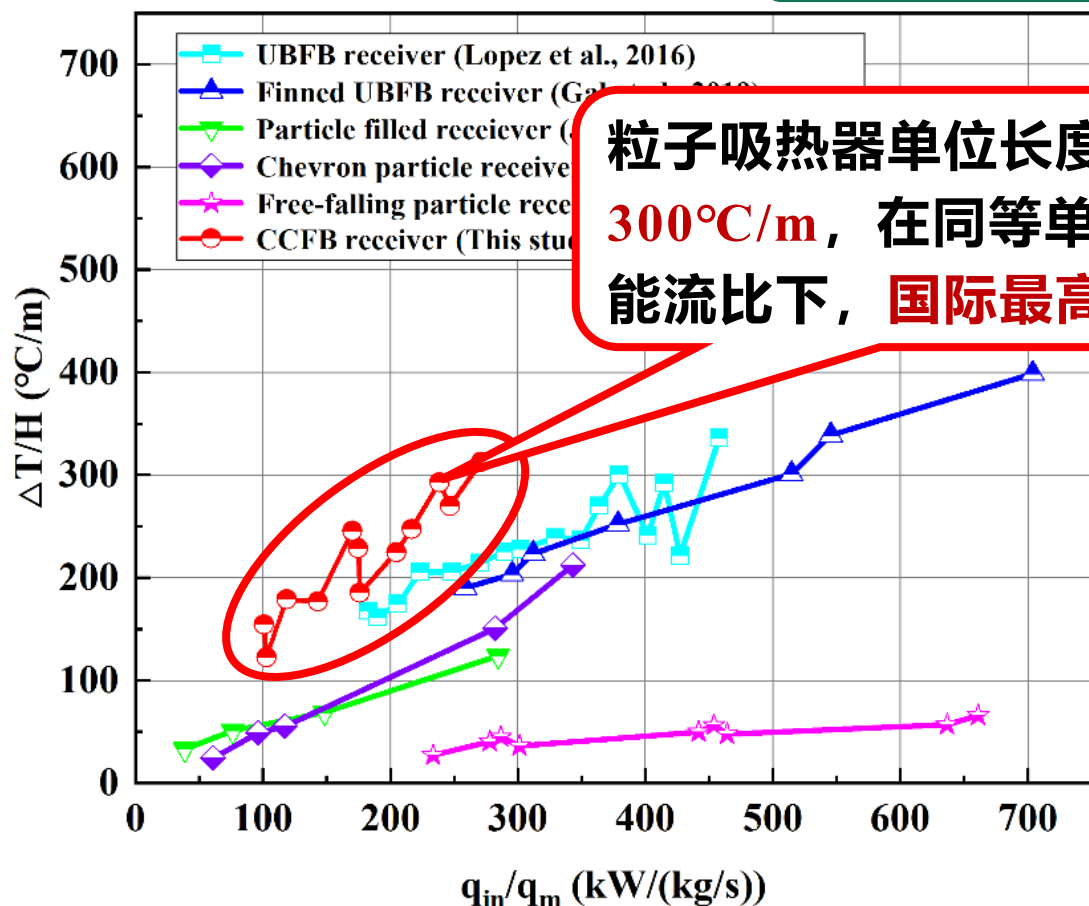
通气与不通气下颗粒累计流量与瞬时流量对比

与上升式鼓泡流化床固含率对比

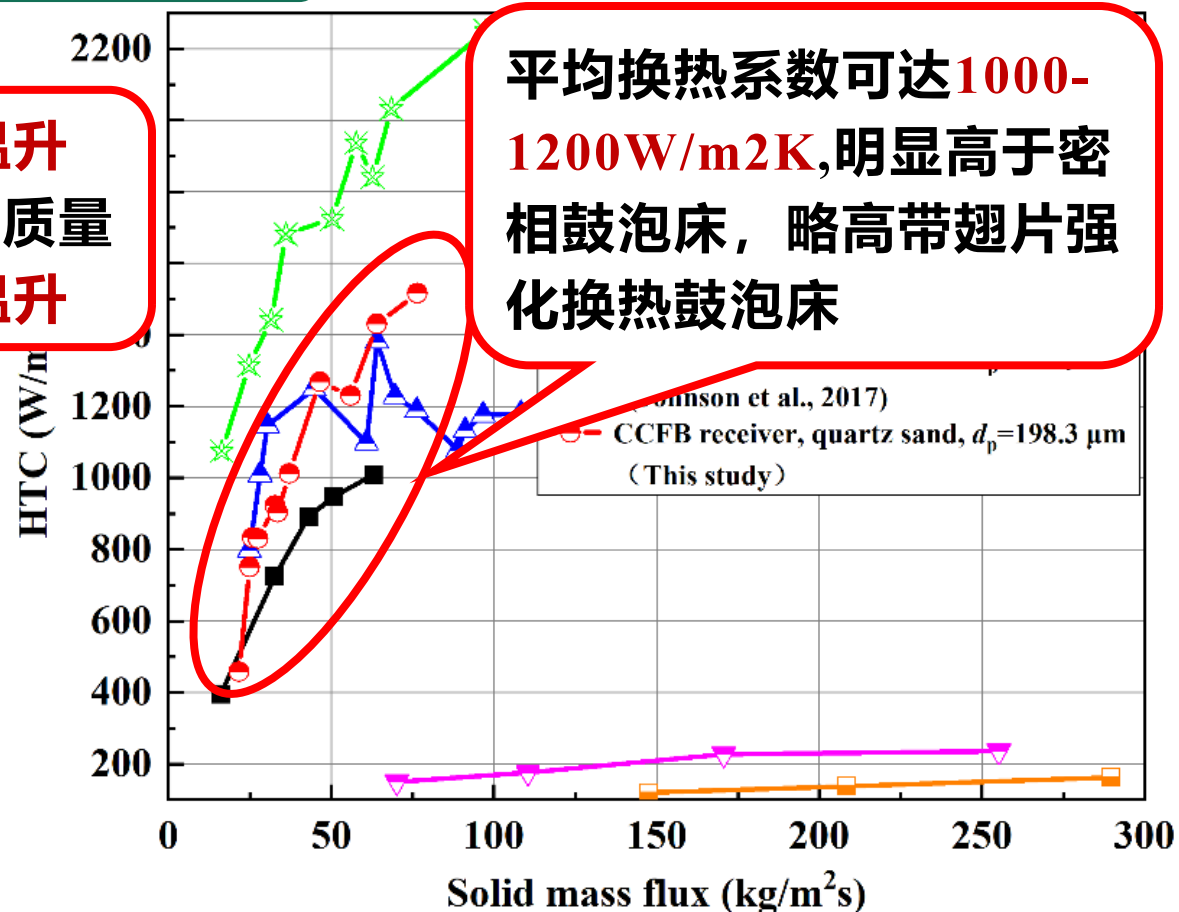
太阳能粒子吸热器技术

密相气固逆流式粒子吸热器高温热运输特性

与主流吸热器性能对比



单位长度温升对比

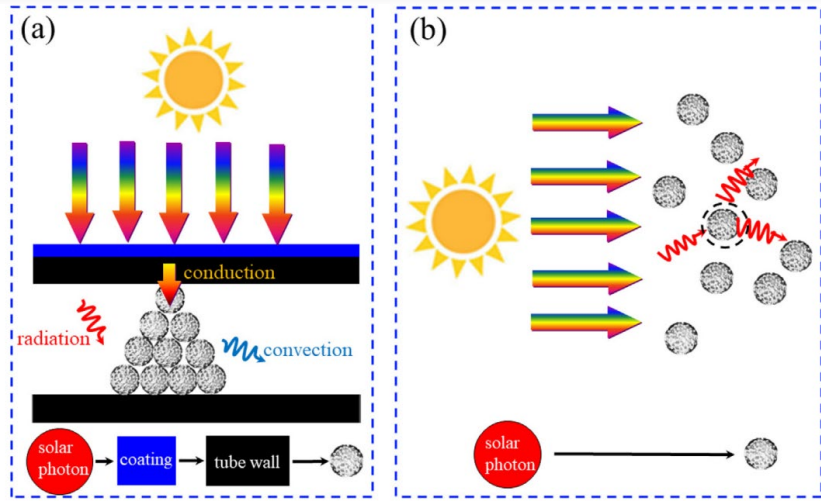


换热系数的对比

太阳能粒子吸热器技术-全光谱太阳能吸收性能的调控策略研究

表面式吸收

体积式吸收



新一代吸热、传热、储热固体颗粒介质主要的挑战:

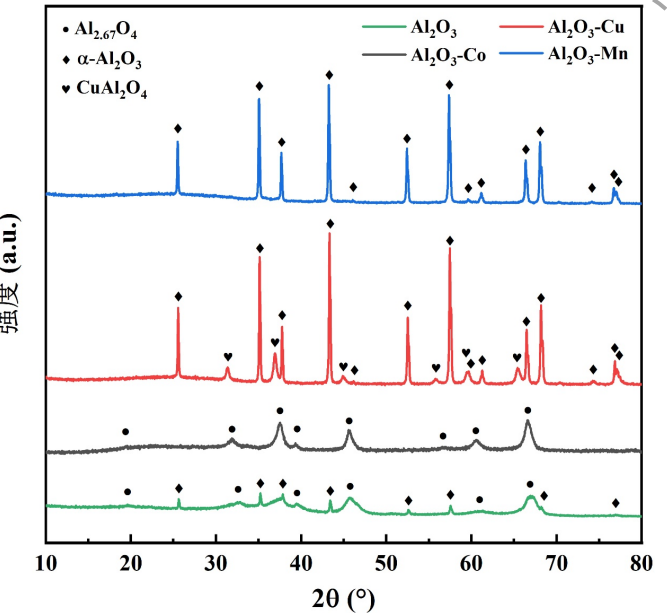
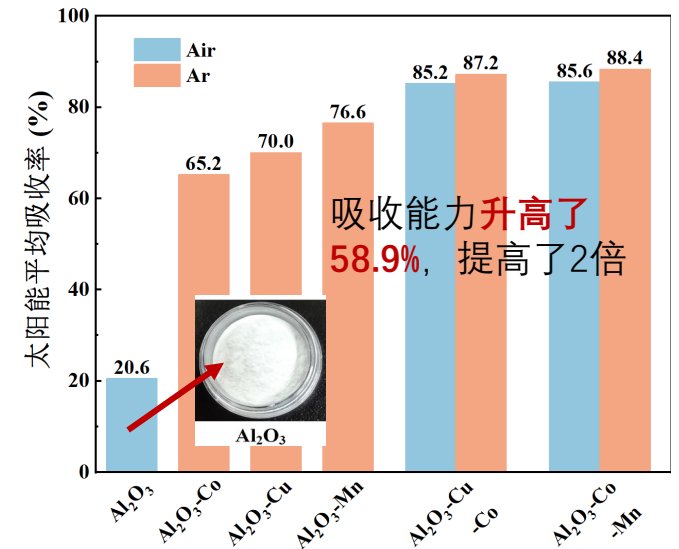
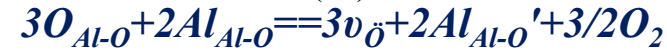
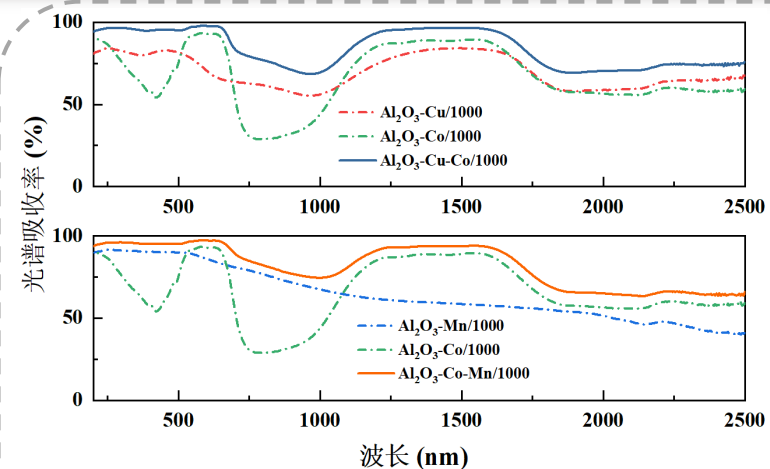
- 覆盖整个太阳能光谱高吸收率、可控的发射率
- 长期暴露下具有高化学稳定性、热稳定性
- 优良的储热能力与机械强度

吸收错峰掺杂结合惰性分段煅烧工艺

制备合成

低制备温度、1000°C以上高稳定性吸收增强的尖晶石-氧化铝基复合颗粒

塔式太阳能光热发电技术研究



1000 °C均完成了α-Al₂O₃相转变 低于其他制备方式200-400°C

惰性处理后O空位的数量明显增加，金属结合能略微向低结合能移动

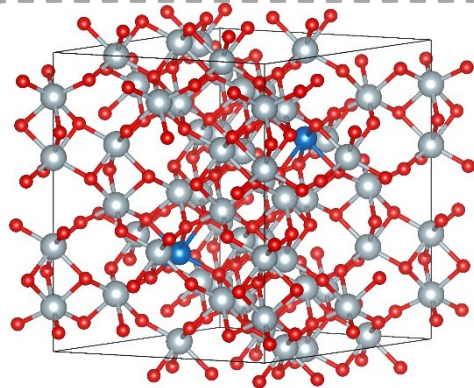
有益于 太阳能短波段的吸收

太阳能粒子吸热器技术-全光谱太阳能吸收性能的调控策略研究

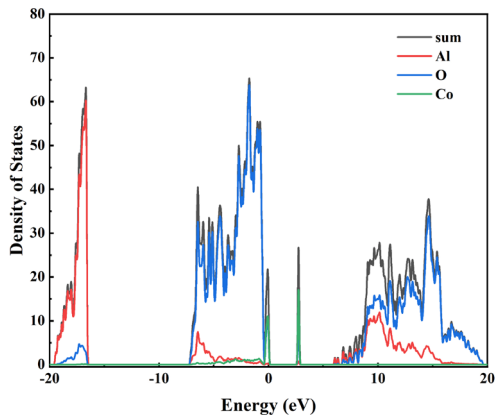
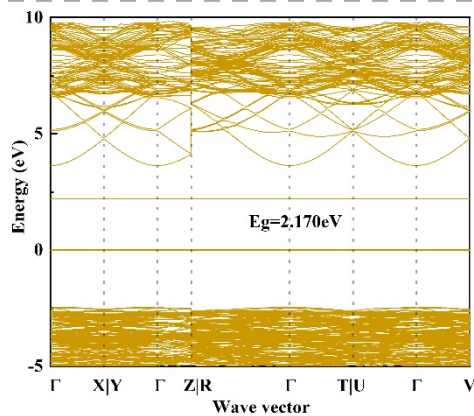
基于第一性原理的赝势平面波方法

研究

复合颗粒金属掺杂机制和氧空位对吸收性的影响



优化后的超胞模型示意图



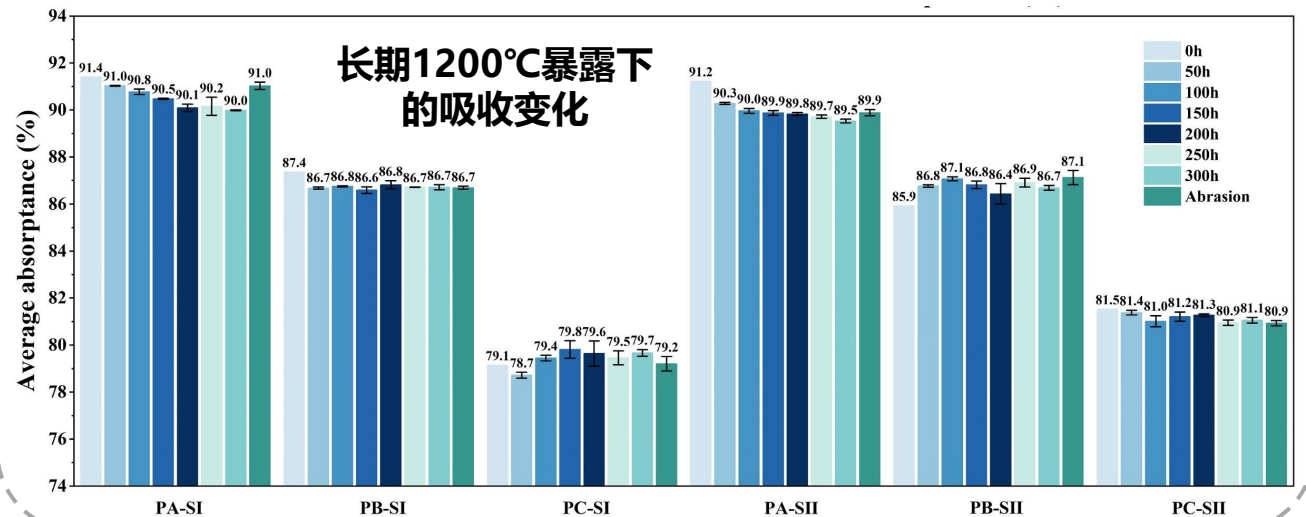
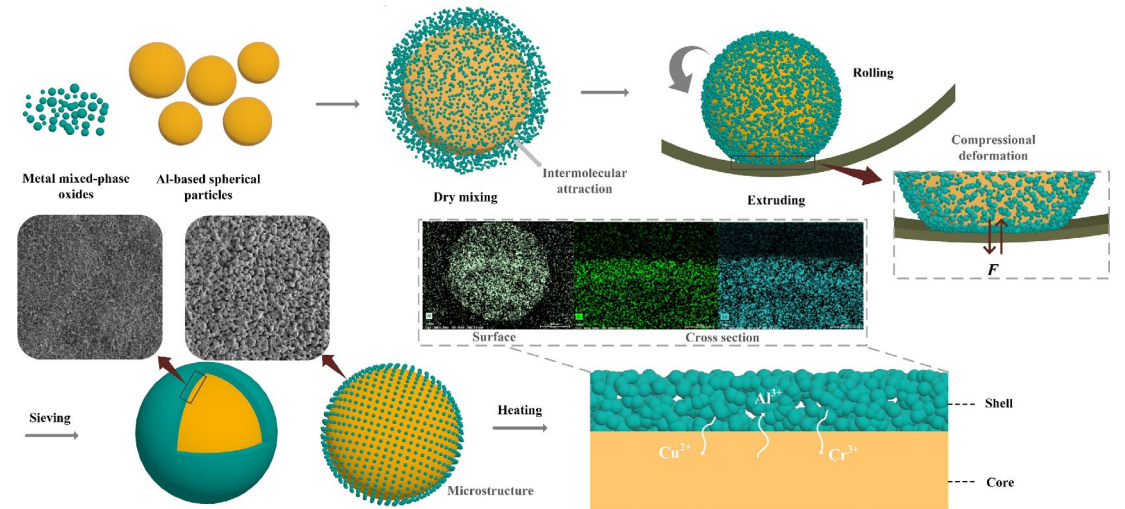
在费米能级附近产生新的杂质能级

在介电函数短波段形成次级主峰

带隙能量由6.017 eV降低至4.464 eV、2.170 eV

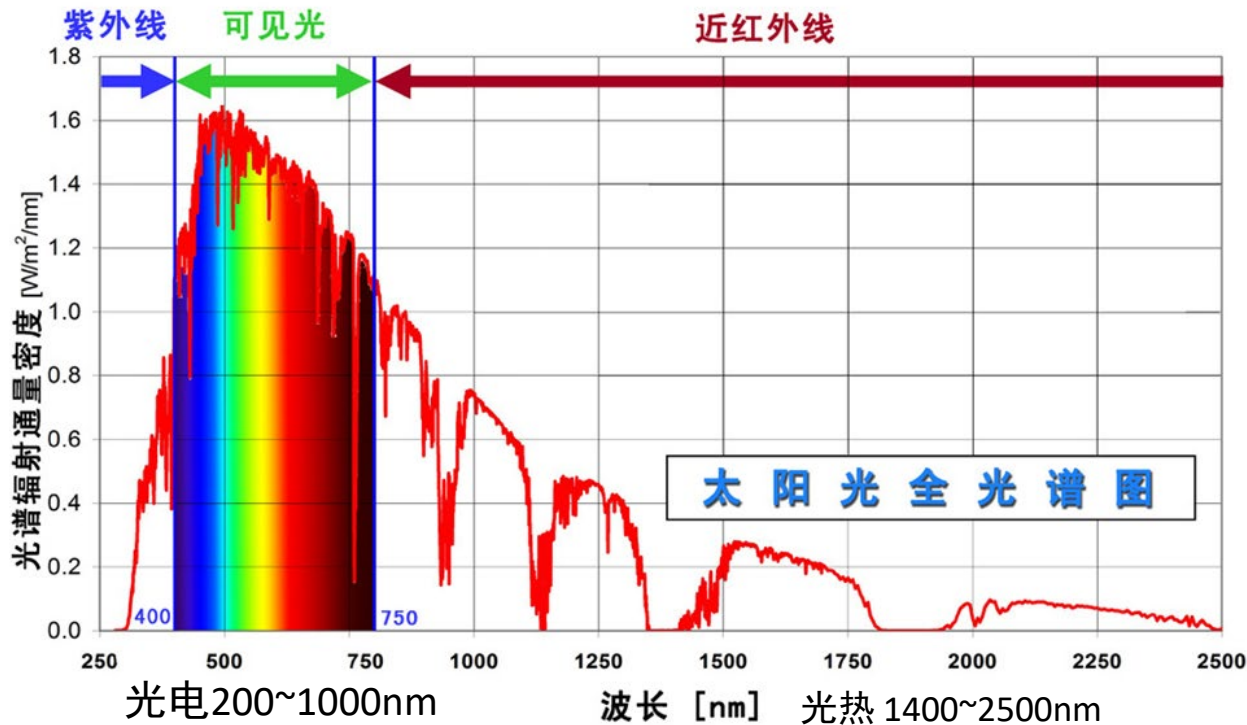
尖晶石氧化物旋转滚圆法高效涂覆技术——显著提高吸收性能

制备流程



太阳能粒子吸热器技术-全光谱太阳能吸收性能的调控策略研究

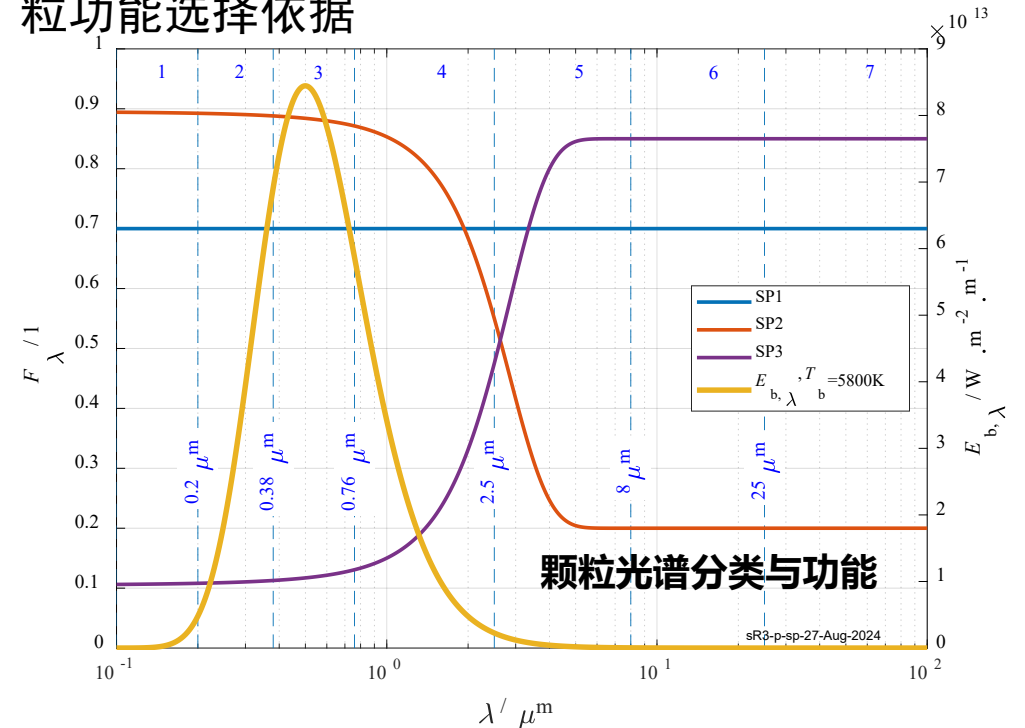
光谱调制是不同形式太阳能利用精细化/高效化通用手段



作为高温传热固体颗粒，吸收辐射转化均可在针对的偏好波段开展光谱调制

以提高太阳能全光谱吸收性能，降低近红外辐射性能

适配太阳能的光谱分布与后端应用偏好波段是颗粒功能选择依据

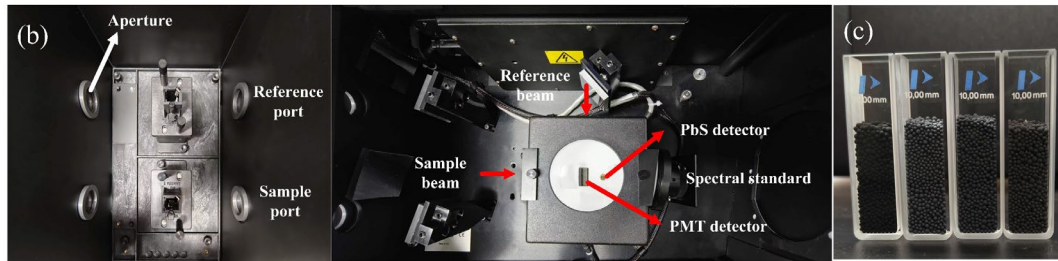
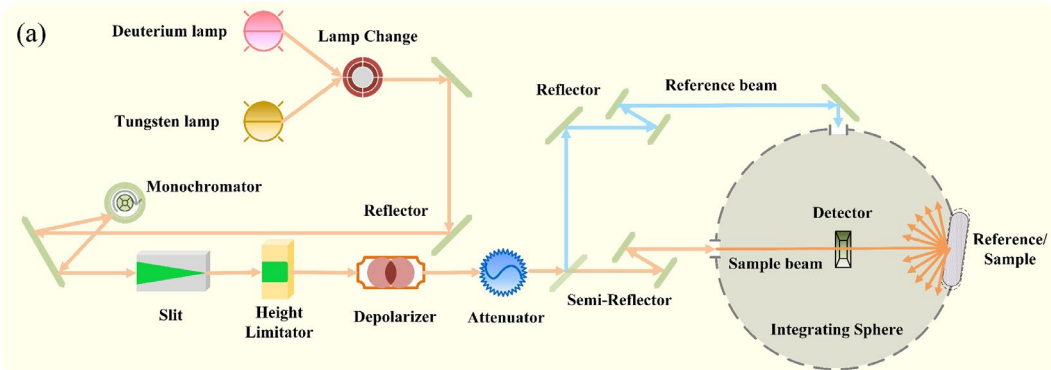


SP1型, 发射率恒定, 灰体→短波强吸收/长波强发射→适于光谱调控

SP2型, 发射率随波长增大而下降→短波强吸收/长波少发射→适于颗粒储热

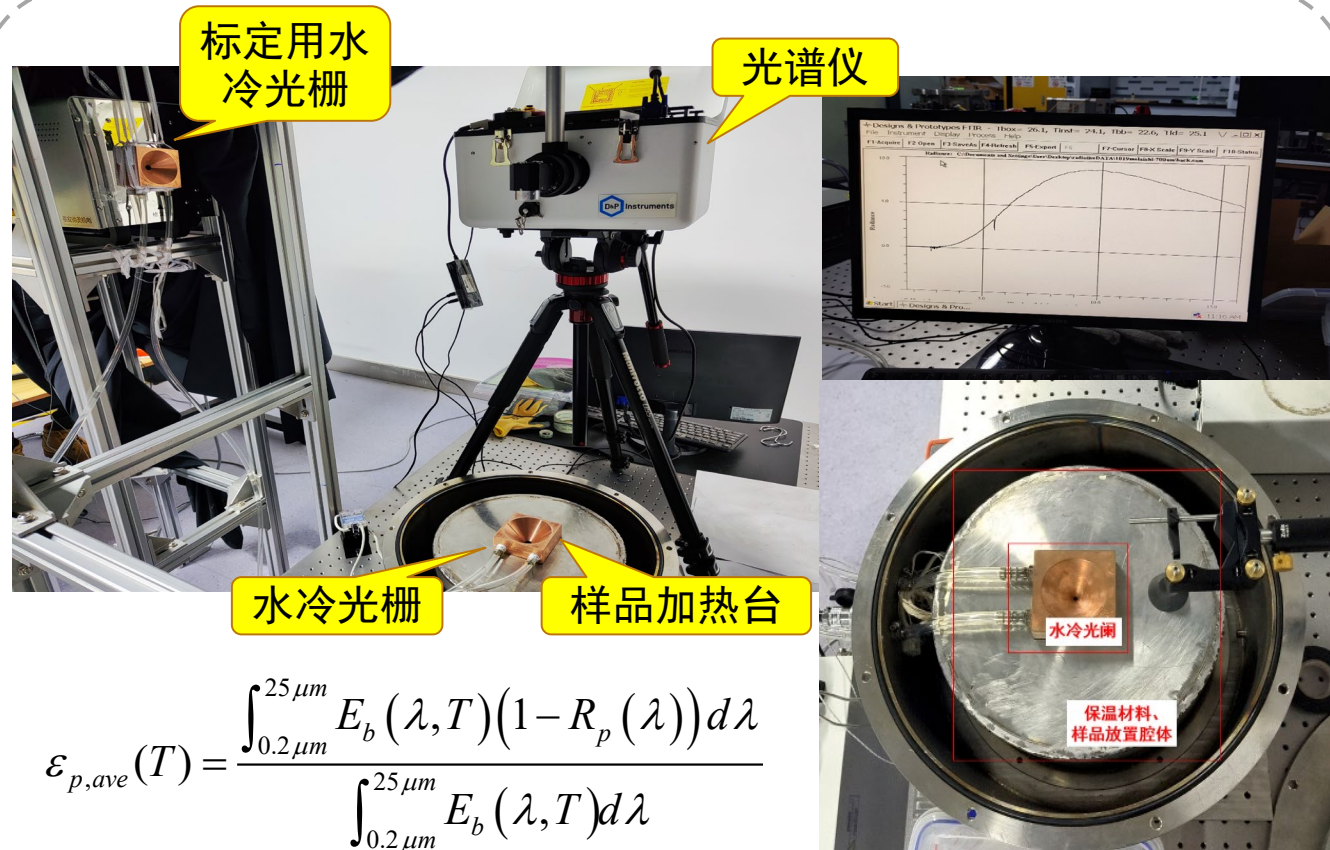
SP3型, 发射率随波长增大而上升→短波少吸收/长波强发射→传递外部辐射/高温气体介质快速释热

太阳能粒子吸热器技术-高温传热/储热固体颗粒吸收辐射特性的表征测试平台



$$\alpha_p = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \alpha_p(\lambda) I(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} I(\lambda) d\lambda}$$

搭建**固体颗粒表面吸收率测试平台**
对**200-2500 nm**范围内高温颗粒表面吸收比准确表征

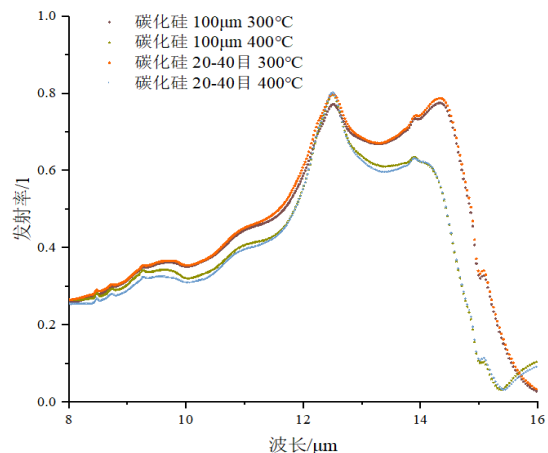


$$\epsilon_{p,ave}(T) = \frac{\int_{0.2\mu m}^{25\mu m} E_b(\lambda, T)(1 - R_p(\lambda)) d\lambda}{\int_{0.2\mu m}^{25\mu m} E_b(\lambda, T) d\lambda}$$

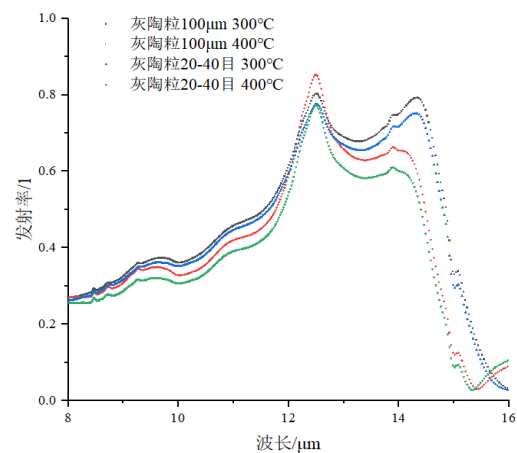
搭建**高温固体颗粒表面发射率测试平台**
对**0.4-25 μm**范围内室温~1200°C颗粒表面发射率准确表征

太阳能粒子吸热器技术-高温传热/储热固体颗粒吸收辐射特性的表征测试平台

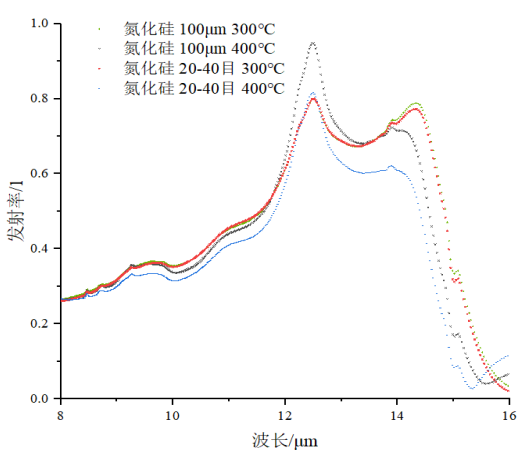
颗粒光谱发射率测量



碳化硅光谱发射率

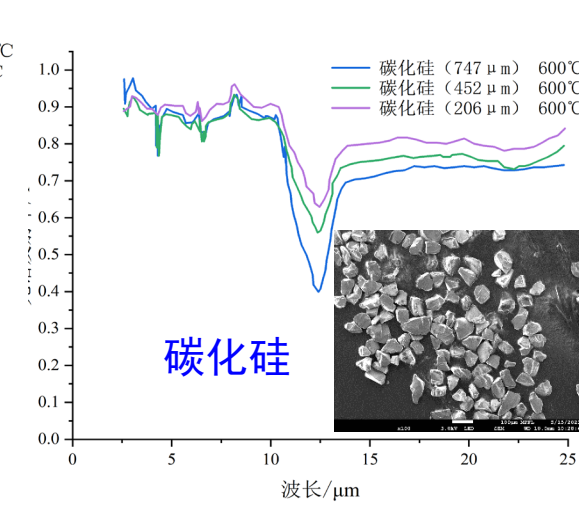
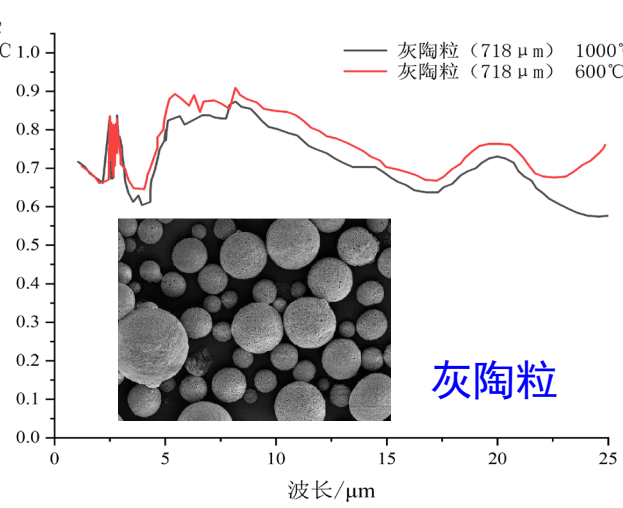
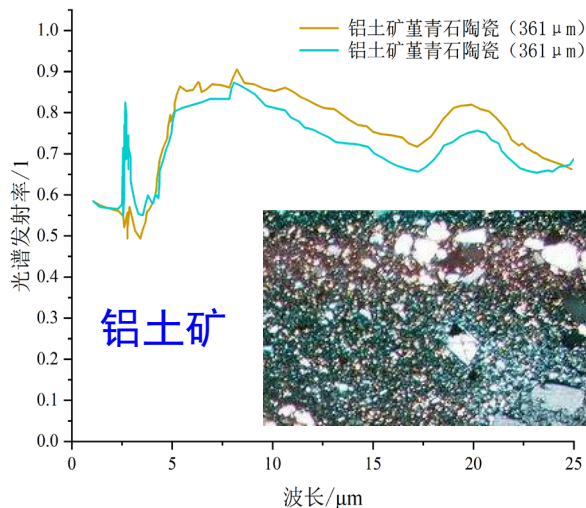


灰陶粒光谱发射率



氮化硅光谱发射率

名称	样品质量	粒径	冷却水温度	样品到光谱仪镜头的距离
碳化硅 氮化硅 灰陶粒 石英砂 莫来石	1.0 g	100µm 700µm 20-40目	24.5-28°C	125 mm



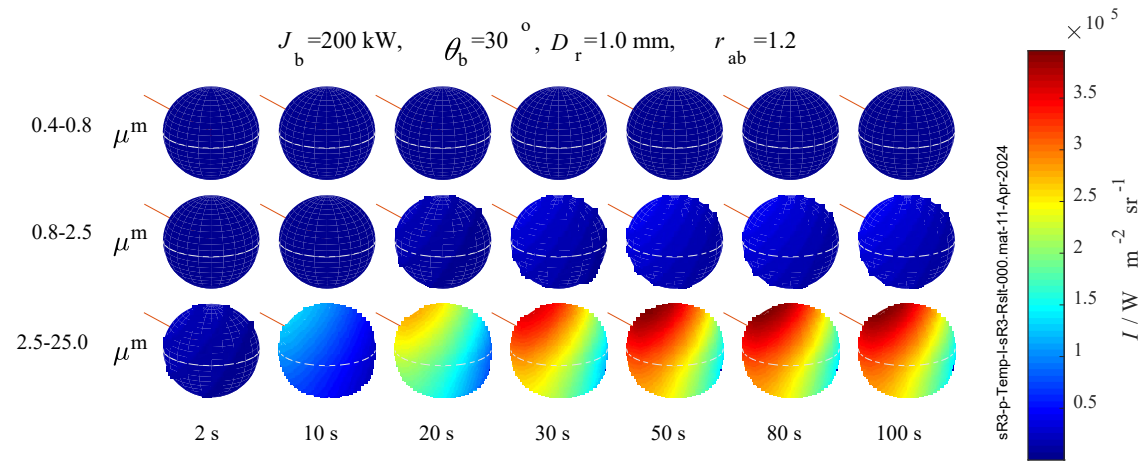
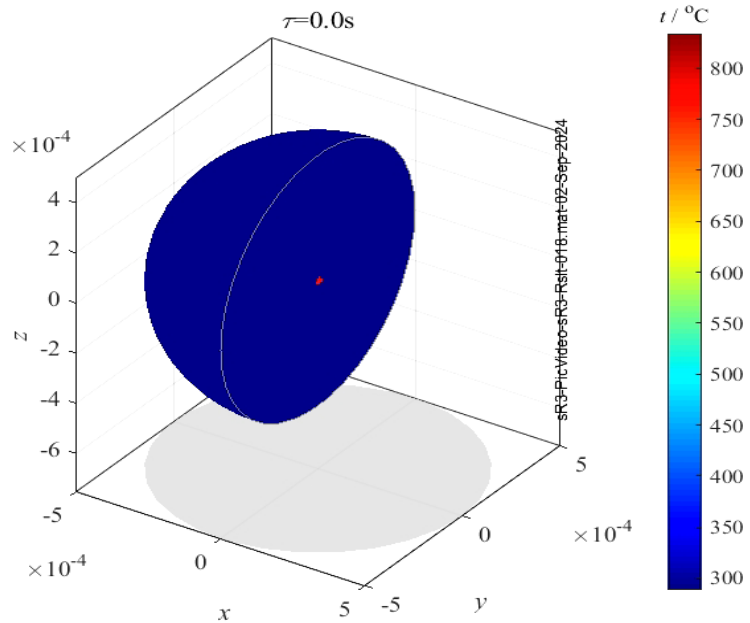
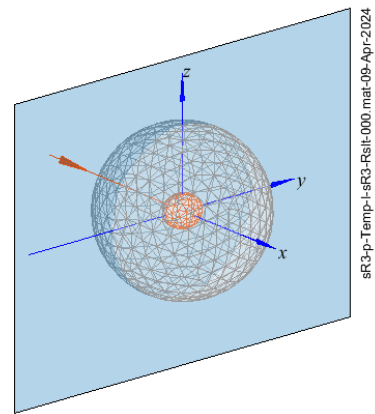
1. 相同颗粒光谱发射率主要受温度影响，随粒径变化不大
2. 颗粒平均发射率随温度升高呈现下降趋势；随粒径增大略微减小
3. 100µm氮化硅和100µm灰陶粒在300°C和400°C下平均发射率仍大于0.4

太阳能粒子吸热器技术-颗粒群弥散体系辐射传输数值模拟

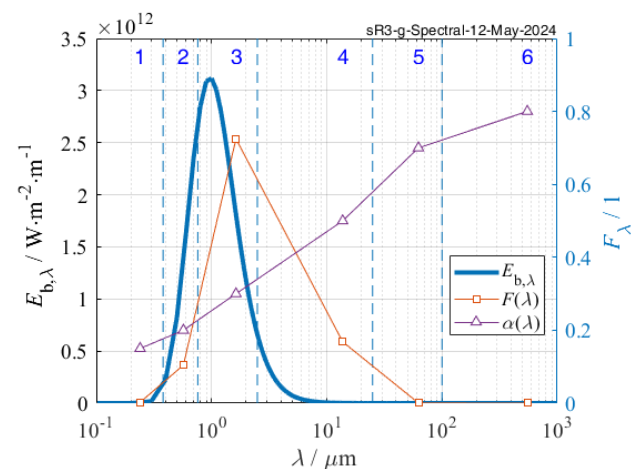
单颗粒光谱吸收/散射性能数值模拟方法

- SP2型颗粒关注吸收 / SP1, SP3型关注散射
- 数值模拟→升温/散射空间/光谱分布
- 模型: 3D/椭球/任意入射方向/入射光谱
AM1.5 / 区域法+近似谱带法

$J_b=200 \text{ kW}, \theta_b=30^\circ, D_r=1.0 \text{ mm}, r_{ab}=1.2$



不同波段散射辐射球面定向辐射强度



颗粒光谱吸收率

吸收 $q_{sh} = \sum_{i_s=1}^{N_s} \sum_{i_\lambda=1}^{N_\lambda} F(T_b, i_\lambda) \cdot \delta_{sh}(i_s) \cdot J_b \cdot \cos(-\mathbf{n}_b, \mathbf{n}_{s,i}) dA(i_s)$

反射 $q_{ref}(i_s) = \sum_{i=1}^{N_\lambda} [1 - \alpha(i_\lambda)] \cdot F(T_b, i_\lambda) \cdot \delta_{sh}(i_s) \cdot E_b(T_b) \cdot \cos(-\mathbf{n}_b, \mathbf{n}_{s,i}) dA(i_s)$

自发辐射 $q_{em}(i_s) = \sum_{i_\lambda=1}^{N_\lambda} \alpha(i_\lambda) \cdot F(T(i_s), i_\lambda) \cdot E_b(T(i_s)) \cdot dA(i_s)$

内部导热 $\rho c \frac{\partial T(i_v)}{\partial \tau} dV(i_v) = k(\nabla \cdot \nabla T) dV(i_v) + S(i_v)$

100 kW, 1mm 颗粒升温 动画

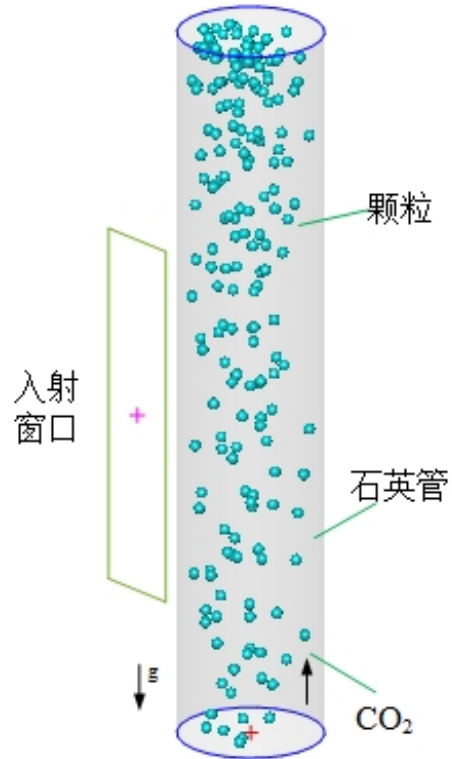
塔式太阳能光热发电技术研究

太阳能粒子吸热器技术-颗粒群弥散体系辐射传输数值模拟

两相流/辐射传热耦合计算

- 逆流式颗粒-CO2吸热器
- 数值模拟→光谱吸收性能/两相流动的耦合
- 模型: 3D/运动颗粒/分光谱/DPM-MCM模型

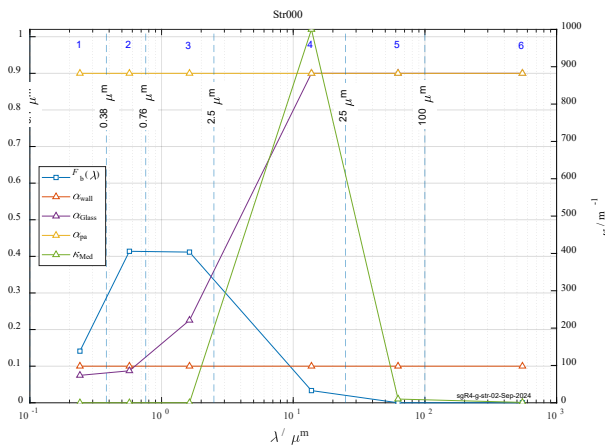
$\tau=0.000s, D=0.8mm, Num=5,$



颗粒/CO2逆流式SRC

$$\begin{aligned} \rho_m c_m V_m \frac{dT_m}{d\tau} &= J_b A_b \cdot \sum_{i_\lambda=1}^{N_\lambda} b m(i_\lambda) \cdot F(T_b, i_\lambda) \\ &+ A_{pa} \cdot \sum_{i_p=1}^{N_{pa}} \sum_{i_\lambda=1}^{N_\lambda} v m(i_p, i_\lambda) \cdot \alpha_{pa}(i_\lambda) \cdot F(T(i_p), i_\lambda) \cdot E_b(T(i_p)) \\ &+ \sum_{i_s=1}^{N_s} \sum_{i_\lambda=1}^{N_\lambda} s m(i_s, i_\lambda) \cdot \alpha(i_s, i_\lambda) \cdot F(T(i_s), i_\lambda) \cdot E_b(T(i_s)) \cdot A(i_s) \\ &+ \sum_{i_m=1}^{N_m} m m(i_m) \cdot [4\kappa(i_\lambda) \cdot V_m] \cdot F(T(i_m), i_\lambda) \cdot E_b(T(i_m)) \\ &- \sum_{i_\lambda=1}^{N_\lambda} [4\kappa(i_\lambda) \cdot V_m] \cdot F(T(i_m), i_\lambda) \cdot E_b(T(i_m)) \end{aligned}$$

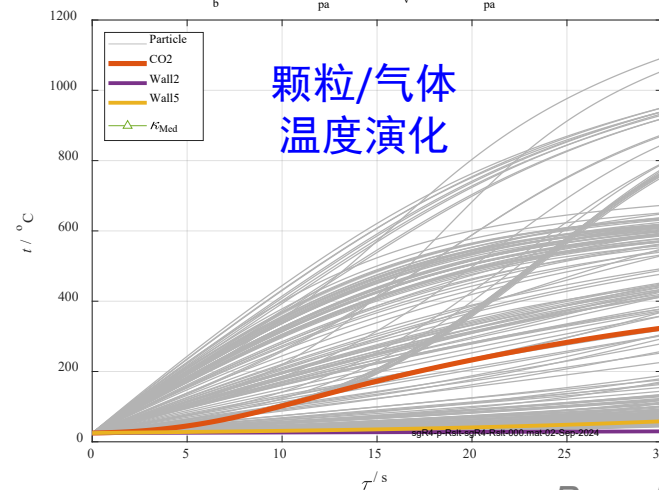
颗粒/气体
能量守恒



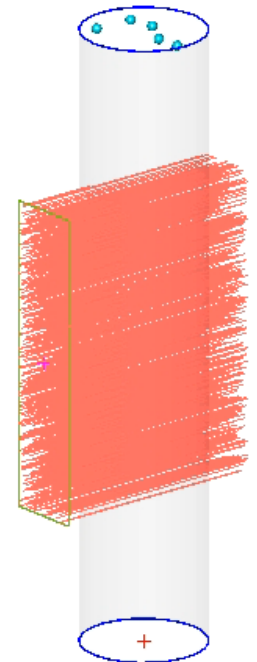
颗粒/气体/管壁辐射性能

$$\begin{aligned} &\rho_{pa} c_{pa} V_{pa} \frac{dT(i_p)}{d\tau} \\ &= J_b A_b \cdot \sum_{i_\lambda=1}^{N_\lambda} b v(i_p, i_\lambda) \cdot F(T_b, i_\lambda) \\ &- A_{pa} \cdot \sum_{i_\lambda=1}^{N_\lambda} \alpha_{pa}(i_\lambda) \cdot F(T(i_p), i_\lambda) \cdot E_b(T(i_p)) \\ &+ A_{pa} \cdot \sum_{j_p=1}^{N_{pa}} \sum_{i_\lambda=1}^{N_\lambda} v v(i_p, j_p, i_\lambda) \cdot F(T(j_p), i_\lambda) \cdot \alpha_{pa}(i_\lambda) \cdot E_b(T(j_p)) \\ &+ \sum_{i_s=1}^{N_s} \sum_{i_\lambda=1}^{N_\lambda} s v(i_p, i_s, i_\lambda) \cdot \alpha(i_s, i_\lambda) \cdot A(i_s) \cdot F(T(i_s), i_\lambda) \cdot E_b(T(i_s)) \\ &+ \sum_{i_\lambda=1}^{N_\lambda} m v(i_p, i_\lambda) \cdot [4\kappa(i_\lambda) \cdot V_m] \cdot F(T(i_m), i_\lambda) \cdot E_b(T(i_m)) \\ &- h_f A_{pa} (T(i_p) - T(i_m)) \end{aligned}$$

$J_b = 100kW, D_{pa} = 1mm, f_v = 0.08, N_{pa} = 203,$



颗粒/气体
温度演化



Monte Carlo 法探
测辐射传输矩阵
动画



兰州理工大学
Lanzhou University of Technology

甘肃省人民政府·教育部
国家国防科技工业局

共建
高校

感谢国家自然科学基金支持

(批准号: 51676069, 51821004, 52090062, 52130607, 52211530087)