



2024中国太阳能热发电大会

China Concentrating Solar Power Conference 2024



9月12日-13日



国家重点研发计划项目

宽液体温域高温熔盐储热技术 (2022YFB2405200)

项目负责人： 吴玉庭

项目申报单位： 北京工业大学

项目参与单位： 中国科学院工程热物理研究所 浙江可胜技术股份有限公司

华南理工大学 西安热工研究院 西安交通大学

浙江高晟光热发电技术研究院 华北电力大学

蓝星（北京）化工机械有限公司 河北工业大学



传热强化与过程节能
教育部重点实验室

MOE KEY LABORATORY OF
ENHANCED HEAT TRANSFER
AND ENERGY CONSERVATION



传热与能源利用
北京市重点实验室
BEIJING KEY LABORATORY OF
HEAT TRANSFER AND ENERGY CONVERSION

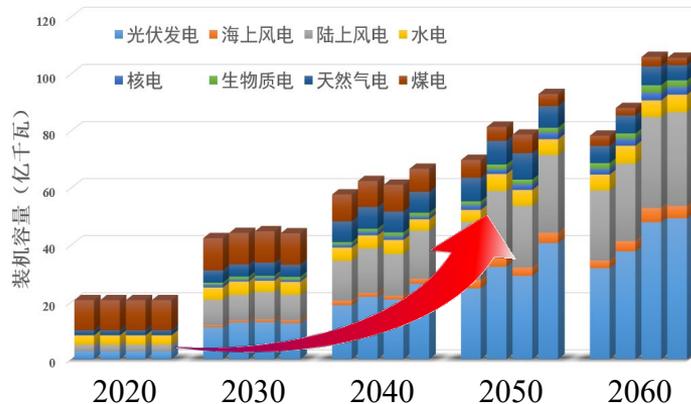
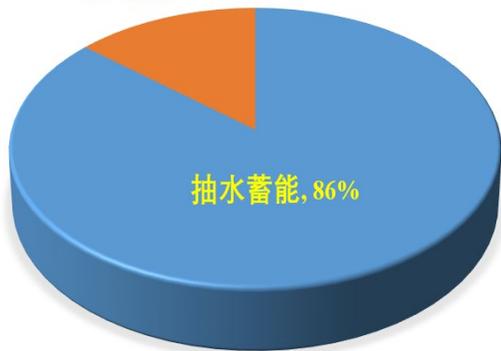
汇报内容

一、项目概况

1.1 发展大容量长时储能是国家能源转型重大战略需求



新型储能, 14%



到2060年，我国风光间歇性可再生能源发电占比将逐步提高至**80%**，需配套足够容量的储能系统。

目前抽水蓄能在全球储能装机占比86%，但抽水蓄能受地形条件的限制，**单靠抽水蓄能无法满足高比例波动性可再生能源对储能系统的巨大需求，缺口非常大。**

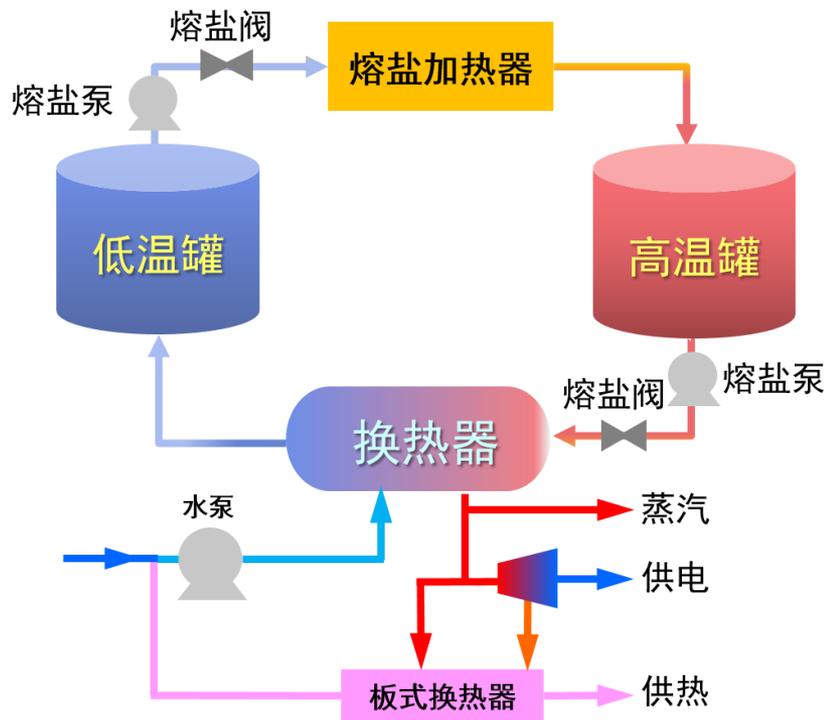
迫切要求发展抽水蓄能之外的低成本大容量新型长时储能技术

1.2 熔盐储热是低成本大容量长时储能技术

- 熔融盐(简称为熔盐), 是盐的熔融态液体, 通常说的熔融盐是指无机盐的熔融体。单一熔盐液体温度范围窄。当把两种以上无机盐混合在一起, 可形成共晶混合物, 可以显著降低熔点, 提高分解温度, 进一步拓宽液体温度范围。因此传热蓄热熔盐一般采用混合熔盐。



1.2 熔盐储热是低成本大容量长时储能技术



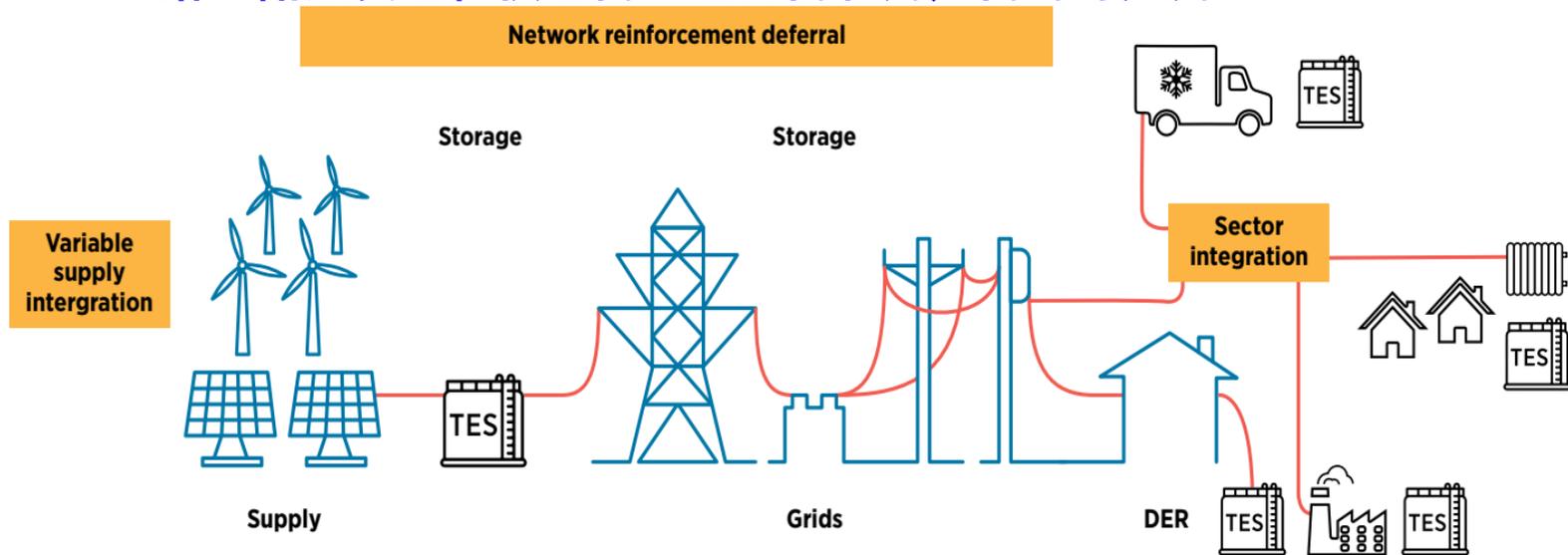
主要优点

- ✓ 储能密度高
- ✓ 储能成本低
- ✓ 对流传热系数高
- ✓ 储热最高温度与取热流体出口温度比较接近
- ✓ 储/释热换热器/电加热器进出口参数恒定
- ✓ 可精准调控储/释热速率

1.3 熔盐储热在双碳目标实现中将发挥重要作用



熔盐储热发电在供电侧、电网侧和用户侧均可应用



供电侧

太阳能热发电
火电厂深度调峰

电网侧

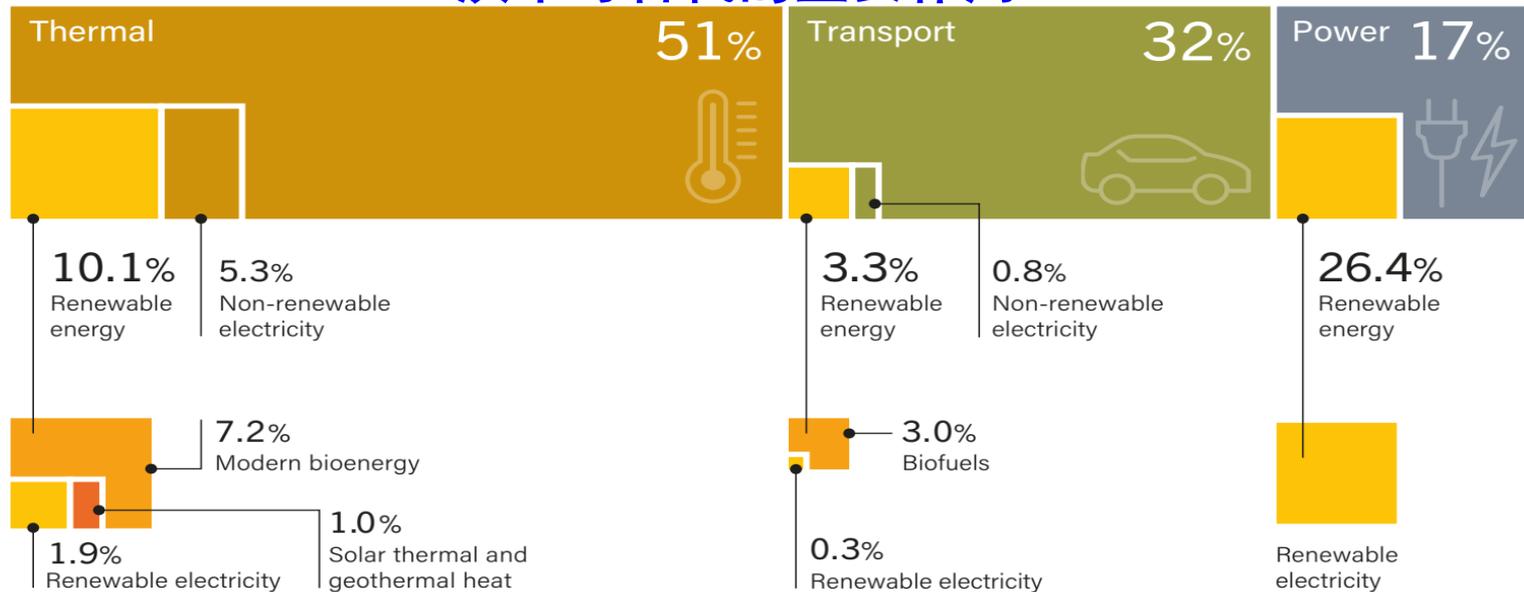
电热储热热电联供储能电站
热泵储热发电储能电站
压缩空气储能电站

用户侧

风光电站储能综合能源系统
分布式太阳能热电（冷）联供

1.3 熔盐储热在双碳目标实现中将发挥重要作用

熔盐储热供热供汽熔盐储热供热可在碳达峰、碳中和目标实现中将扮演不可替代的重要作用



热能占社会总能耗的51%

- ✓ 谷电或风光电加热熔盐储热建筑供暖、工业供热与供汽
- ✓ 太阳能加热熔盐储热建筑供暖与工业供热供汽
- ✓ 间歇余热加热熔盐储热建筑供暖与工业供热供汽

1.4 低熔点宽温域高温熔盐储热是高效低成本储能的迫切要求

熔盐储热材料的发展

$$\text{熔盐质量储热密度} = C_p \times \Delta T$$

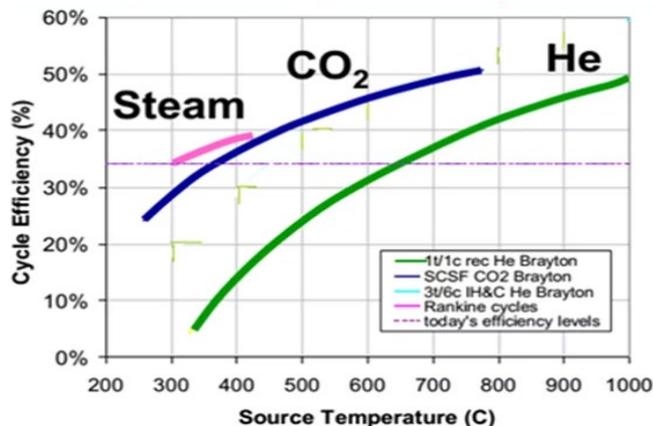
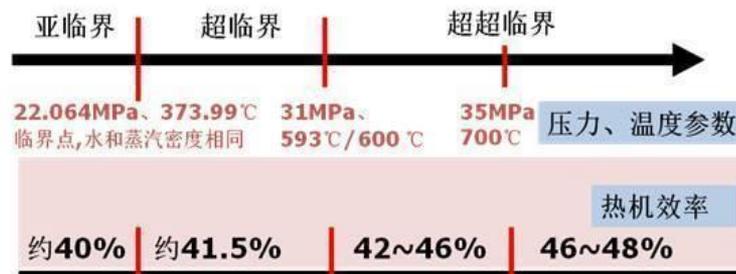
提高储热密度

增加比热 C_p
复合储热材料

增加 ΔT
宽液体温域熔盐

降低熔盐熔点（凝固点）可以降低熔盐储热系统冻堵风险和防冻堵代价

提高熔盐分解温度，可提高熔盐释热温度，满足高参数高效发电和工业高温供热需求

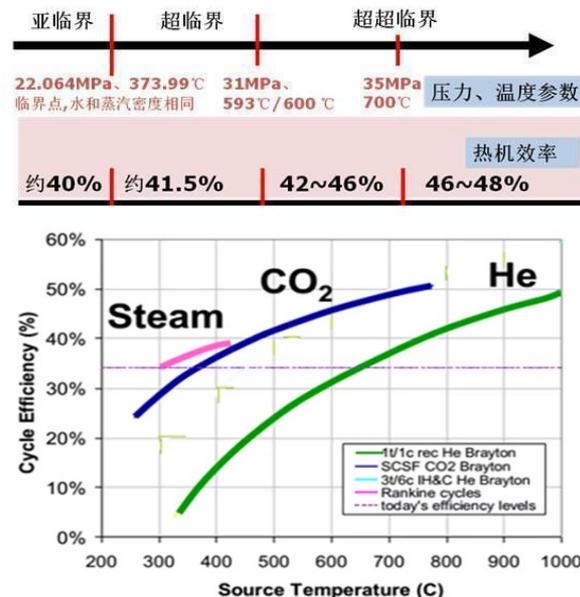


低熔点、高分解温度、宽温域、高储热密度、低腐蚀、低成本是熔盐储热材料的发展方向

1.4 低熔点宽温域高温熔盐储热是高效低成本储能的迫切要求

目前熔盐储热技术瓶颈

- ✓ 熔盐储热目前主要与光热蒸汽朗肯发电耦合，存在形式单一、效率低下。
- ✓ 硝酸盐分解温度 $\leq 650^{\circ}\text{C}$ ，氯化盐和碳酸盐熔点 $\geq 350^{\circ}\text{C}$ 、氯化盐腐蚀性大、碳酸盐成本高昂的缺陷。
- ✓ 熔盐电加热器电压 $< 1\text{kV}$ ，使用温度 $\leq 600^{\circ}\text{C}$ ，存在电气部分成本高昂和电损大缺陷。
- ✓ 熔盐换热器熔盐侧进出口温差 $\leq 300^{\circ}\text{C}$ ，不能满足高效储热发电的需求



迫切需要研发低熔点高分解温度、宽液体温域，高储热密度的低成本低腐蚀性熔盐复合储热材料、大进出口温差熔盐换热器和高电压熔盐电加热器等共性关键技术

实现低成本高温高效储热发电，提高熔盐储热竞争力。

1.5 拟解决关键科学技术问题



聚光太阳能



电厂抽汽、烟气与工业余热



弃风弃光电



谷电、火电厂不上网电

关键科学技术问题1
高温熔盐储热与新型能源系统耦合全工况优化及调控

整体系统

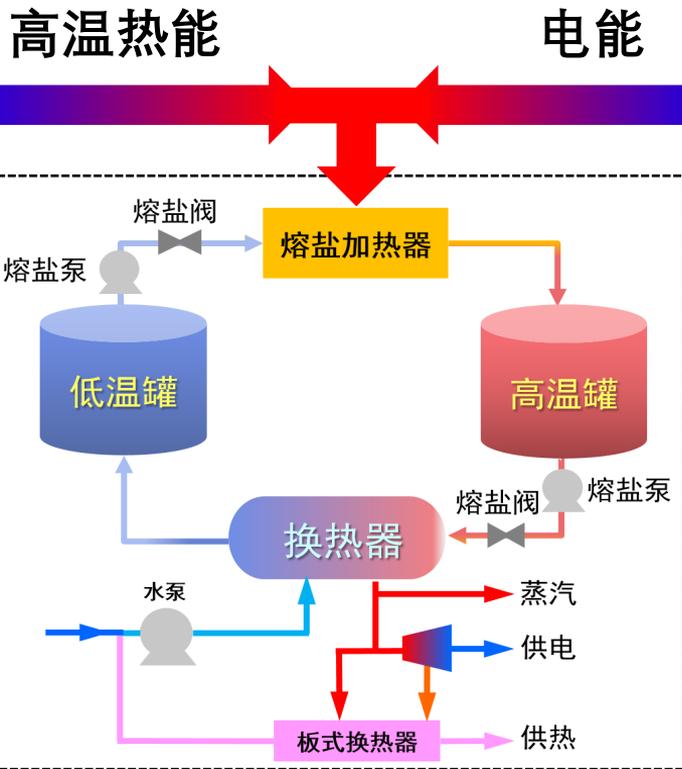
关键科学技术问题2
低熔点高分解温度熔盐复合储热材料性能关联机理及提升途径

储热材料

关键科学技术问题3 大进出口温差大容量熔盐电加热器与熔盐换热器技术

关键部件

关键科学技术问题4 高温熔盐储罐及地基的高可靠性设计制造技术



1.6 项目总体设置情况

重大需求

为双碳目标和高比例可再生能源目标实现研发长时大容量低成本长寿命高温熔盐储热共性关键技术

项目目标

(1) 提出3种高温熔盐储热与新型能源耦合系统优化设计技术方案(系统高温熔盐罐内熔盐最高温度 $\geq 650^{\circ}\text{C}$, 储热量 $\geq 100\text{MWh}$, 最大储/放热时间 $\geq 10\text{h}$, 储热系统效率 $\geq 92\%$, 耦合系统能量损失率减少 $\geq 5\%$)
(2) 提出大容量高温熔盐储罐及其地基的设计及制造技术方案(大容量高温熔盐储罐设计温度 $\geq 660^{\circ}\text{C}$, 设计压力 $\geq 2000\text{Pa}$, 设计散热损失 $\leq 100\text{W}/\text{m}^2$, 设计储热量 $\geq 1000\text{MWh}$)。

研制熔点 $\leq 150^{\circ}\text{C}$ 、分解温度 $\geq 700^{\circ}\text{C}$, 储热密度 $\geq 1\text{GJ}/\text{m}^3$ 的熔盐复合储热材料配方, 在 650°C 和空气气氛下对不锈钢均匀腐蚀速率 $\leq 0.05\text{mm}/\text{年}$, 最大局部腐蚀深度 $\leq 0.2\text{mm}/\text{年}$ 。

(1) 研制耐高温(660°C)高压(6kV AC)的新型电加热元件
(2) 研制高电压电加热器样机, 加热功率 $\geq 1\text{MW}$, 工作电压 $\geq 6\text{kV}$, 可将熔盐由 200°C 加热至 650°C 以上。

(1) 研制熔盐-水/蒸汽换热器样机 1台, 其中熔盐-水换热器热负荷 $\geq 1\text{MW}$, 水/蒸汽侧工作压力 $\geq 10\text{MPa}$, 熔盐侧进出口温差 $\geq 420^{\circ}\text{C}$ 。
(2) 研制熔盐-超临界 CO_2 换热器原理样机 1台, 超临界 CO_2 侧工作压力 $\geq 20\text{MPa}$ 。

(1) 依托煤电机组完成工程验证, 机组AGC调节速率提高 $\geq 1.5\%/\text{min}$ 。
(2) 完成熔盐储热工程验证, 储热容量 $\geq 10\text{MWh}$, 热盐罐温度 $\geq 650^{\circ}\text{C}$, 储热效率 $\geq 92\%$ 。
(3) 建成基于高温熔盐储热的火电机组灵活性改造示范工程, 累计火电机组容量 $\geq 1000\text{MW}$ 。

课题设置

课题 1

熔盐储热系统优化及大容量高温熔盐储罐的可靠性设计制造

课题 2

低熔点宽液体温域高温熔盐复合储热材料的研发

课题 3

高电压熔盐电加热器的研发

课题 4

高温高压及大进出口温差熔盐换热器的研发

课题 5

熔盐储热系统集成调控与工程验证

关键科学技术问题

关键科技问题 4

高温熔盐储罐及地基的高可靠性设计制造技术

关键科技问题 2

低熔点高分解温度熔盐复合储热材料性能关联机理及提升途径

关键科技问题3

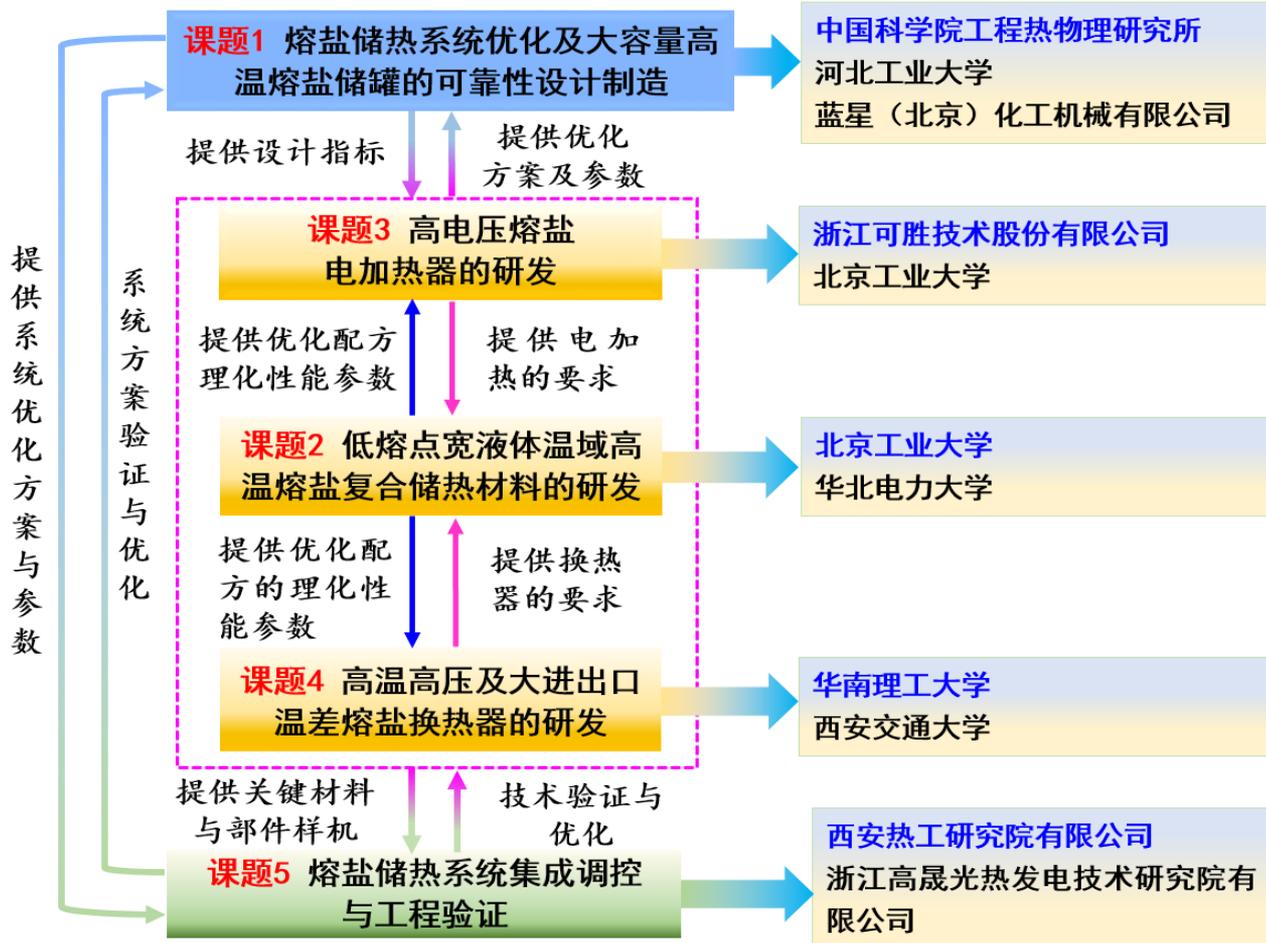
大进出口温差大容量熔盐电加热器与熔盐换热器技术

关键科技问题1

高温熔盐储热与新型能源系统耦合全工况优化及调控

1.7

课题之间相互关系及课题分工



汇报内容

二、主要阶段性成果

2.1 获得了熔点133.3°C、分解温度734°C的混合熔盐优化配方

RuleTest MA 201520340042

报告编号 (No.): RT2210130W1001Z

检测报告

TEST REPORT

样品名称: Na-9G
 Sample Name: _____
 委托单位: 北京工业大学
 Applicant: _____
 检测类别: 委托检测
 Test Category: _____

聊城程诚检测科技有限公司
 Liaocheng Chengcheng Testing Technology Co., Ltd.
 检测专用章

1、检测结果 (Test Result):

序号 No.	检测项目 Test Items	单位 Unit	技术指标 Index	检测结果 Test Results	单项判定 Single-determinant
1	DSC 测试				
	熔点	°C	/	133.3	/
	初晶点	°C	/	142.9	/
2	热扩散系数				
	200°C	mm ² /s	/	0.1458/0.1475/0.1485	/
	250°C	mm ² /s	/	0.1533/0.1548/0.1554	/
	300°C	mm ² /s	/	0.1655/0.1672/0.1694	/
	350°C	mm ² /s	/	0.1728/0.1731/0.1734	/
	400°C	mm ² /s	/	0.1769/0.1795/0.1801	/
	450°C	mm ² /s	/	0.1848/0.1851/0.1865	/
	500°C	mm ² /s	/	0.1895/0.1905/0.1904	/
	550°C	mm ² /s	/	0.1986/0.2003/0.2008	/
	600°C	mm ² /s	/	0.2235/0.2242/0.2244	/
	650°C	mm ² /s	/	0.2258/0.2264/0.2269	/
	700°C	mm ² /s	/	0.2270/0.2272/0.2279	/
3	比热容				
	200°C	kJ/(kg·K)	/	1.4985/1.4874/1.5023	/
	300°C	kJ/(kg·K)	/	1.5484/1.5474/1.5492	/
	400°C	kJ/(kg·K)	/	1.6042/1.5876/1.5944	/

中析研究所 北京中析化工技术研究所 (化工实验室)
 ZHONGXI RESEARCH INSTITUTE Beijing ZXCX Research Institute of Chemical Technology (Chemical Lab)

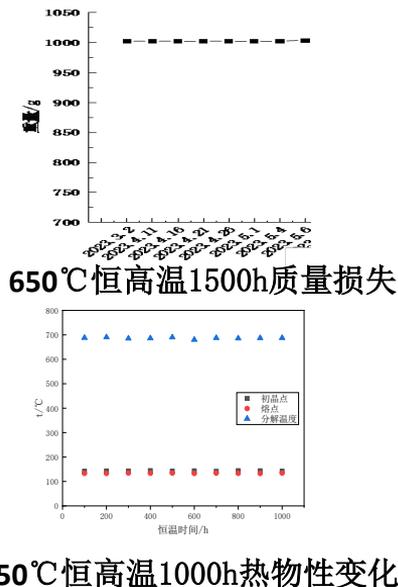
报告编号 (Report ID): ZX220113-110391 日期 (Date): 2023.6.27 第 2 页 共 4 页

研究测试报告

(Research Test Report)

研究测试结果 (Research Test Result):

测试样品: Na-9GY/ZX220113-110391
 测试项目: TG-DSC
 测试条件: 空气气氛, 30-650°C: 10°C/min; 650-800°C: 2°C/min



经过相图分析和配比优化实验，优选出了熔点133.3°C，分解温度734°C的三元硝酸碳酸盐优化配方。委托聊城程诚检测公司进行了优化配方熔点、初晶点、密度、粘度等热物性检测，委托中析研究所进行了熔盐分解温度测试，进行了1500h650°C恒高温失重和热物性测试以及500次冷热循环的混合熔盐热性能测试，结果表明熔盐优化配方具有很好热稳定性。

2.1 获得了熔点 133.3°C 、分解温度 734°C 的混合熔盐优化配方

混合熔盐优化配方在钢丝淬火生产线上得到了规模化应用



东方号|机械博览

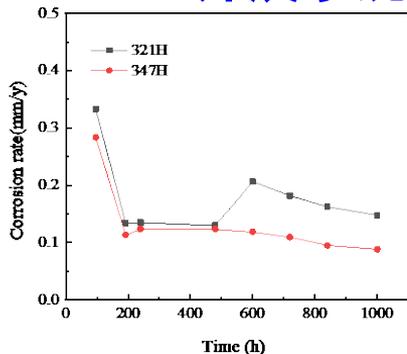
离线盐浴索氏体化处理实现了盘条近似恒温转变，消除了热轧产品在斯太尔摩风冷线上搭接点的影响，大大提高了钢丝组织性能的均匀性，提高了高了钢丝抗拉强度、面缩率、索氏体化率。同时回收的余热温度高，可进行余热发电

三元硝酸碳酸混合熔盐优化配方已经在济源钢铁和宝武南通钢丝淬火生产线上做为传热流体，冷却钢丝制备出了高强度钢丝。济源钢铁使用了45吨，宝武钢铁使用了10吨，都已经成功使用半年以上。

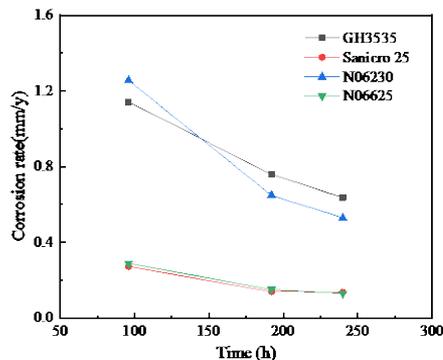


2.1 获得了熔点133.3°C、分解温度734°C的混合熔盐优化配方

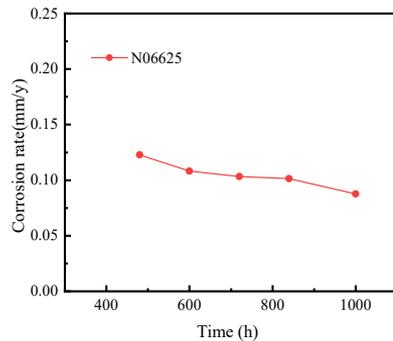
开展了混合熔盐优化配方对金属的动静态腐蚀性能测试



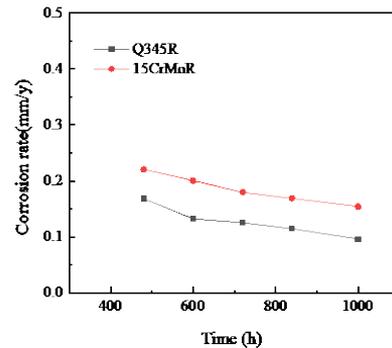
640°C静态腐蚀试验



680°C静态腐蚀试验



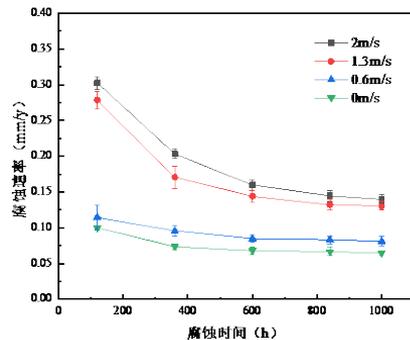
660°C静态腐蚀试验



450°C静态腐蚀试验

开展了三元硝酸碳酸混合熔盐优化配方对321H、347H、GH3535、Sanicro25、N06230、N06625、Q345R、15CrMOR等金属开展了静态腐蚀实验，对347H还开展了动态腐蚀实验，结果表明：

- (1) 347H在640°C熔盐中1000h腐蚀速率0.0881mm/y，可作为高温储罐和换热器的选材；
- (2) N06625在660°C熔盐中1000h腐蚀速率0.0877mm/y，可作为太阳能吸热器管材。
- (3) Q345R在450°C熔盐中腐蚀速率0.0962 mm/y，可作为低温储罐的选材



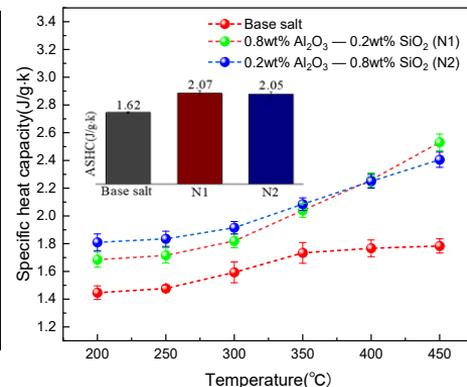
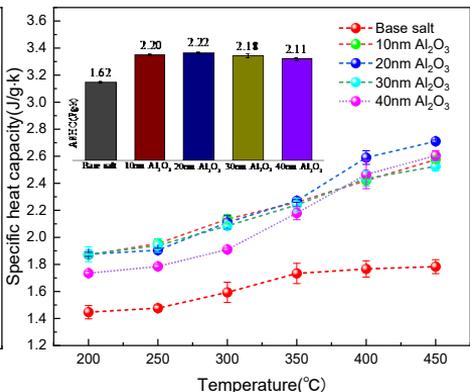
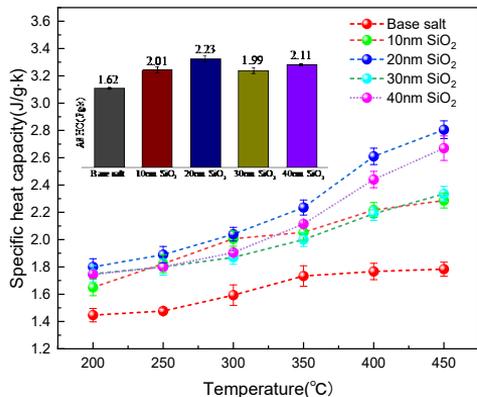
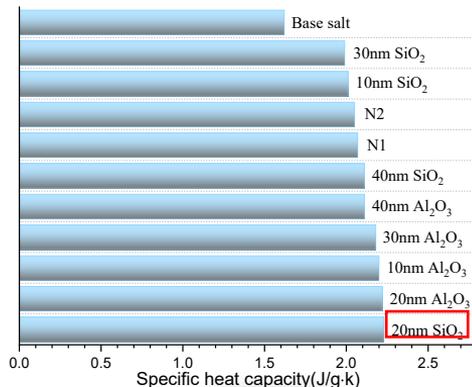
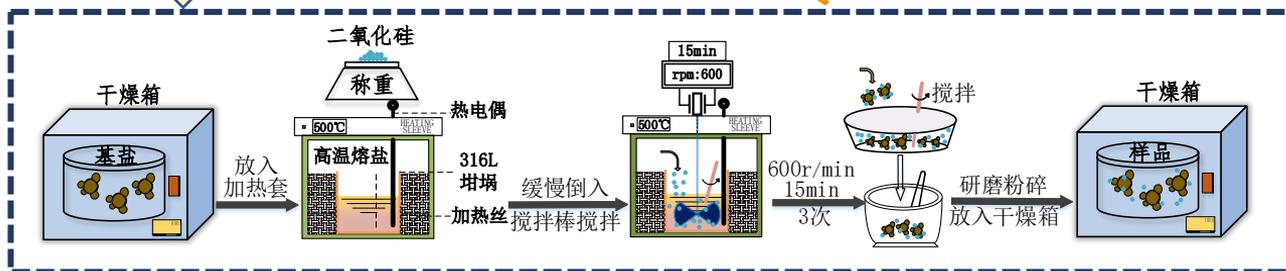
565°C 347H的动态腐蚀试验



2.2 制备了新型高温熔盐纳米流体

高温熔融法

相比较两步水溶法，高温熔融法分散性和稳定性较好。

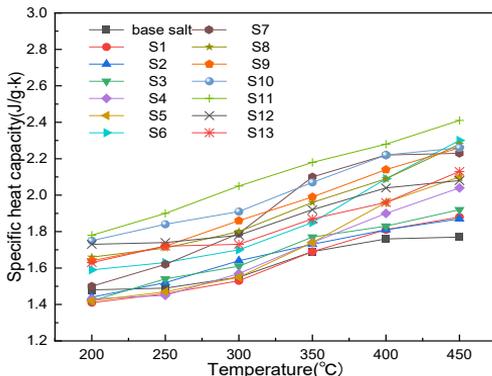


不同纳米流体的比热

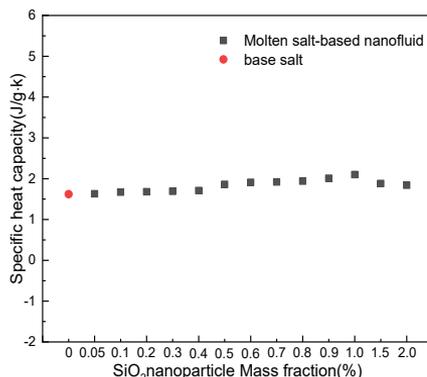
- ✓ 在优选三元混合熔盐中添加1wt%的不同尺寸的二氧化硅 (SiO₂)、三氧化二铝 (Al₂O₃) 和混合纳米颗粒进行实验。
- ✓ 最终，添加20nm二氧化硅 (SiO₂) 的熔盐纳米流体比热提升效果最显著。

2.2制备了新型高温熔盐纳米流体

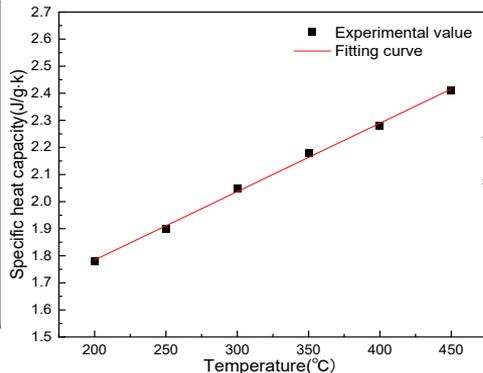
不同浓度SiO₂纳米粒子熔盐纳米流体热物性分析



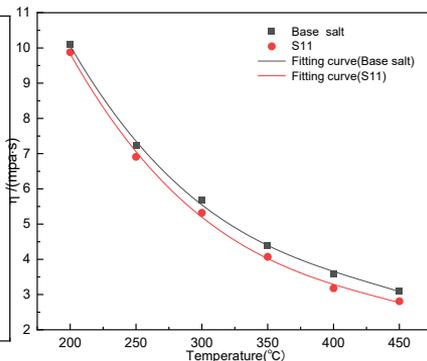
不同SiO₂纳米颗粒质量分数熔盐基纳米流体比热容曲线



SiO₂纳米颗粒质量分数对基盐比热容的影响



S11样品比热容测量值及拟合曲线



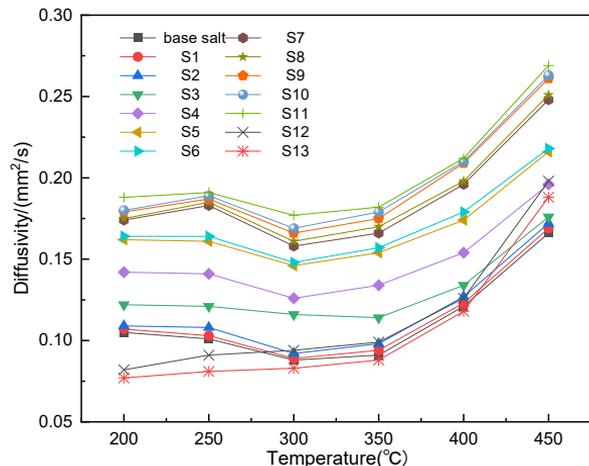
基盐和S11样品粘度对比分析图

- 制备含有不同质量分数20nmSiO₂纳米颗粒（0.05~2.0%）的熔盐纳米流体。
- 添加量为1%时，比热容的增加更加显著。比热容达到最高点，平均值为2.10 J/(g·K)，比热容提高率为29.6%。
- 基盐粘度测量值在3.11~10.08mPa·s 范围内变化，质量分数为1%的样品S11的粘度测量值在2.81~9.88mPa·s，加入纳米粒子的S11样品的粘度有所降低。

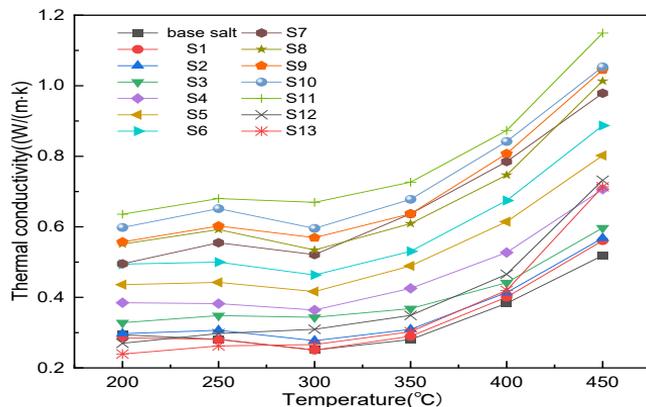


2.2制备了新型高温熔盐纳米流体

不同浓度SiO₂纳米粒子熔盐纳米流体热物性分析



不同SiO₂纳米颗粒质量分数熔盐基纳米流体热扩散系数曲线



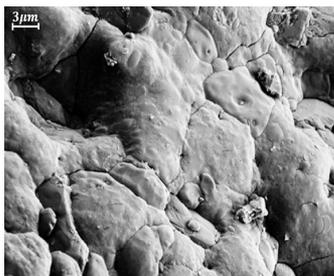
不同SiO₂纳米颗粒质量分数熔盐基纳米流体导热系数曲线

质量分数在1%时样品 (S11) 热扩散系数和导热系数提升较好, 相较基盐提升81.25%和136.23%。随着添加量的增加, 导热系数和热扩散系数的提高幅度逐渐增大。当添加量超过1.0%时, 导热系数和热扩散系数虽然仍有提升, 但提升幅度和效果趋于下降。

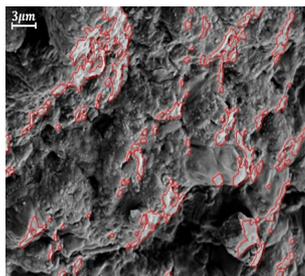


2. 2制备了新型高温熔盐纳米流体

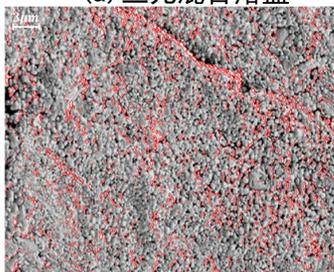
微观结构、局部元素和化学晶体结构分析



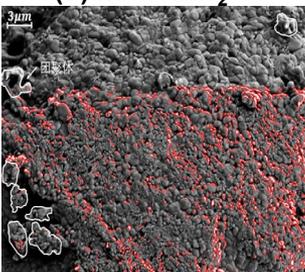
(a) 三元混合熔盐



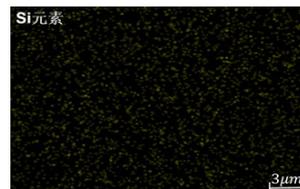
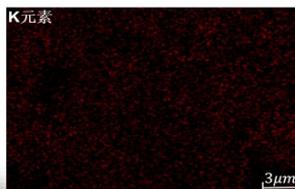
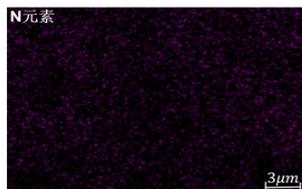
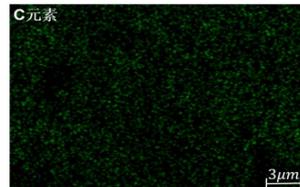
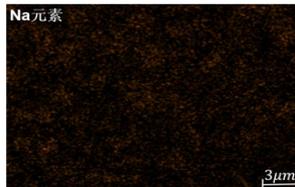
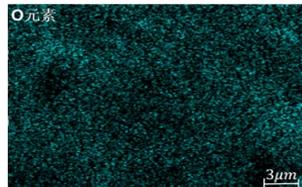
(b) 0.05% SiO₂



(c) 1.0% SiO₂

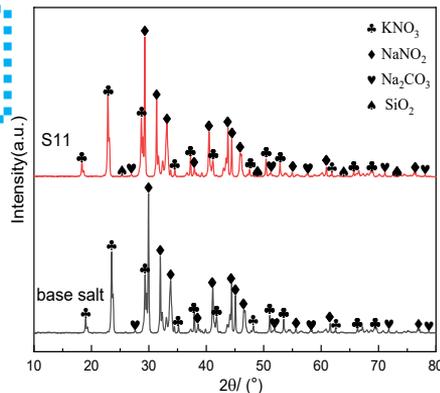


(d) 2.0% SiO₂



Si元素分布也比较均匀，说明SiO₂纳米颗粒在熔体中的分散均匀。

XRD曲线上看出，观察到少量的SiO₂纳米颗粒所对应的新的衍射峰，没有观察到其它新的物相。没有发生化学反应产生新的物质。三元混合熔和SiO₂纳米颗粒只和存在简单的物理结合。

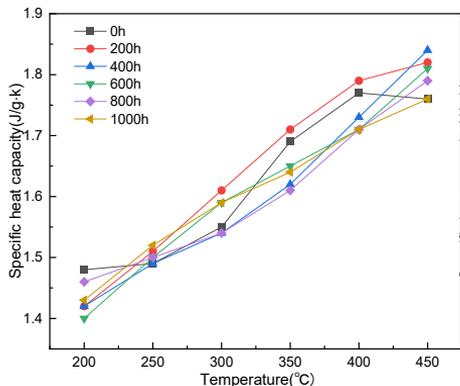


熔盐纳米流体表面形成了网状结构。这些纳米结构像纳米颗粒一样有很大的比面积和极高的表面能，形成的纳米结构有利于提高比热容和导热系数。

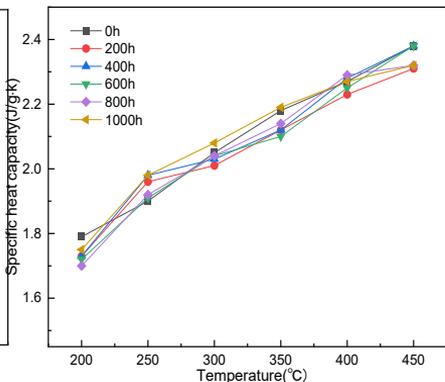


2.2制备了新型高温熔盐纳米流体

高温恒温工况热稳定性能测试与分析



三元混合熔盐的比热对比分析图



S11样品的比热对比分析图

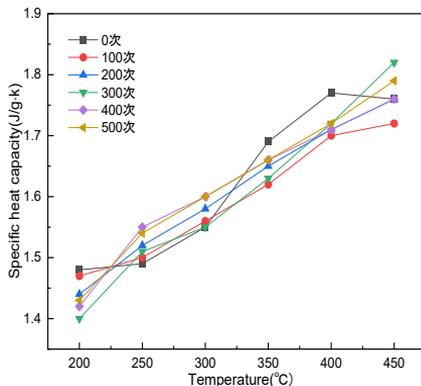
600°C，累计恒温时间为1000小

时

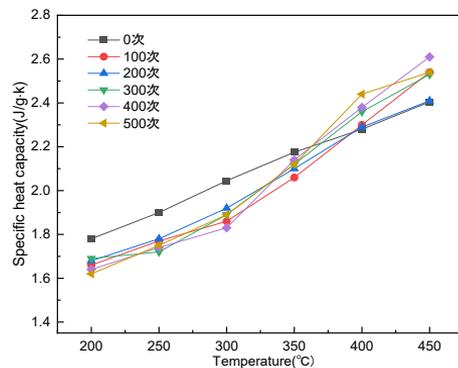
恒温时间 (h)

样品编号	明细	恒温时间 (h)					
		0	200	400	600	800	1000
基盐	平均值	1.62	1.61	1.61	1.61	1.60	1.61
	衰减幅度 (%)	0	0.62	0.62	0.62	1.25	0.62
S11	平均值	2.10	2.06	2.09	2.07	2.07	2.10
	衰减幅度 (%)	0	1.94	0.48	1.45	1.45	0

大温差情况下骤冷/热工况的热稳定性



三元混合熔盐的比热对比分析图



S11样品的比热对比分析图

室温~600°C，冷热循环500次

样品编号	明细	恒温时间 (h)					
		0	200	400	600	800	1000
基盐	平均值	1.62	1.61	1.61	1.61	1.60	1.61
	衰减幅度 (%)	0	0.62	0.62	0.62	1.25	0.62
S11	平均值	2.10	2.06	2.09	2.07	2.07	2.10
	衰减幅度 (%)	0	1.94	0.48	1.45	1.45	0

经过高温恒温和多次骤冷骤热后的优选混合熔盐和S11样品比热衰减幅度均在2%以下，基盐和S11样品仍然具有较好的热稳定性。

2.3 高电压熔盐电加热器研发

耐高温高绝缘强度高导热绝缘材料研发



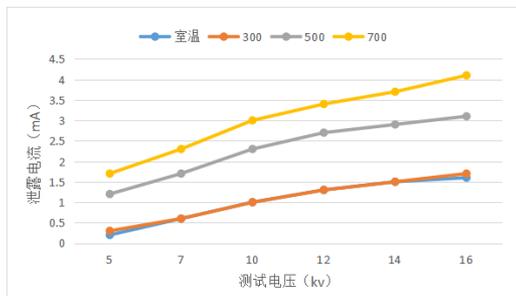
绝缘材料样品



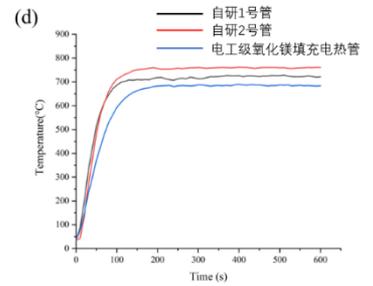
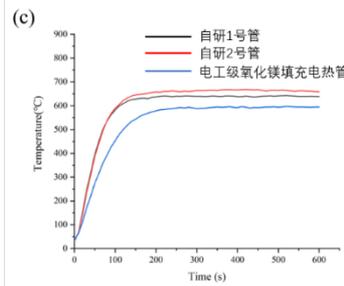
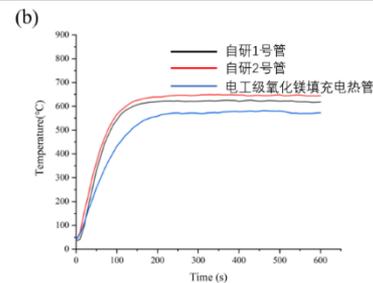
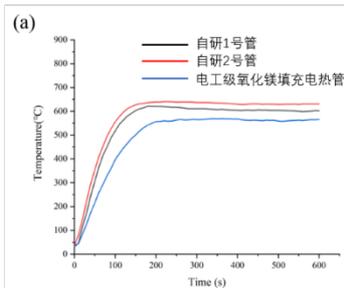
电加热管耐高温测试



绝缘材料耐压测试



GDY系列绝缘材料在不同温度下的耐压测试结果



电加热管耐高温测试结果

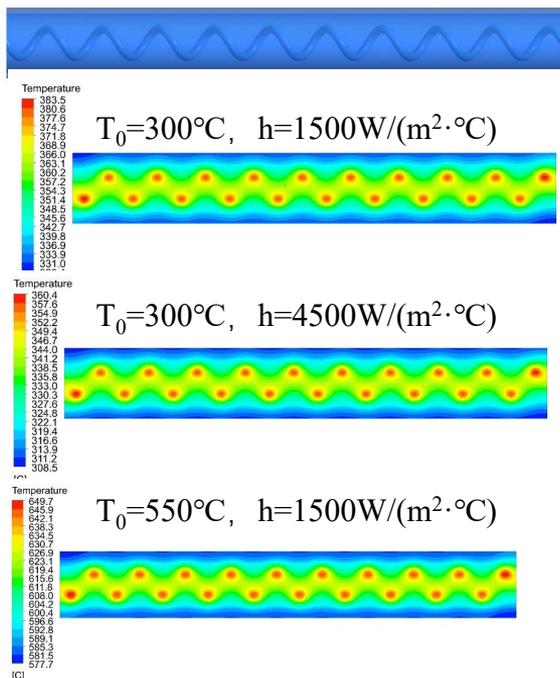
获得了一种高绝缘强度高导热的绝缘材料，可满足在高温(达到660°C)下能承受16000V试验电压历时1min不闪络和击穿且具有良好导热性能。

2.3 高电压熔盐电加热器研发

电加热元件的性能关联机理研究

表1 电加热元件温度与换热系数关系

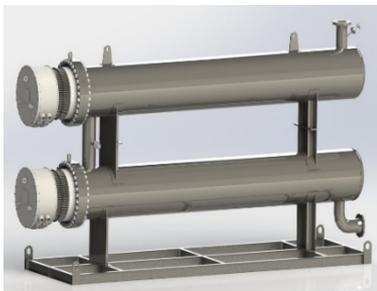
换热介质温度为300°C				
表面换热系数 W/(m ² ·°C)	1500	2500	3500	4500
电加热丝外表面温度 °C	363.4	350.0	344.3	341.1
电加热管表面温度°C	331.6	319.0	313.6	310.5
内外温差°C	31.8	31.0	30.7	30.6
换热介质温度为550°C				
表面换热系数 W/(m ² ·°C)	1500	2500	3500	4500
电加热丝外表面温度 °C	624.3	611.2	605.6	602.4
电加热管表面温度°C	581.6	569.0	563.6	560.5
内外温差°C	42.7	42.2	42.0	41.9



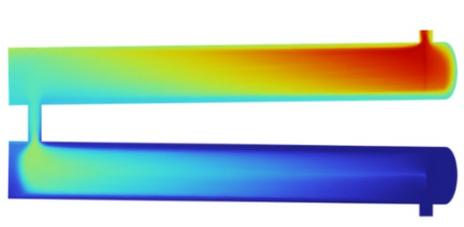
建立了电加热元件数学和仿真分析模型，探究了**绝缘厚度、导热特性对电加热元件温度梯度分布的影响**。结果显示，电加热元件温度与介质温度、绝缘层厚度正相关，与换热系数负相关。

2.3 高电压熔盐电加热器研发

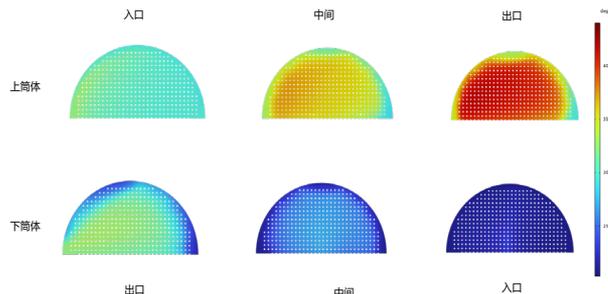
10MW熔盐电加热器温度场模拟研究



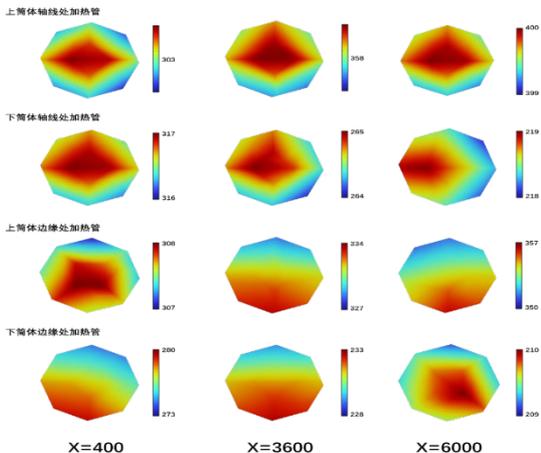
(a) 熔盐电加热器实物图



(b) 纵向温度分布



(c) 流动方向上典型截面内的温度分布



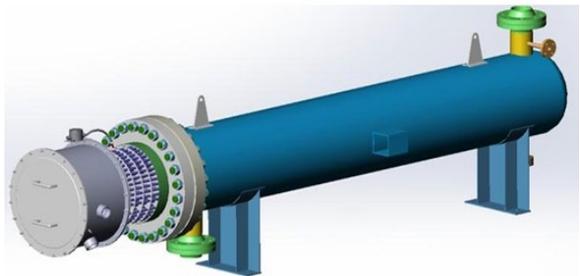
(d) 加热管典型截面内的温度分布

针对10MW盐电加热器搭建了仿真模型，研究分析了流速、热源、结构等参数对温度场的影响，结果表明：

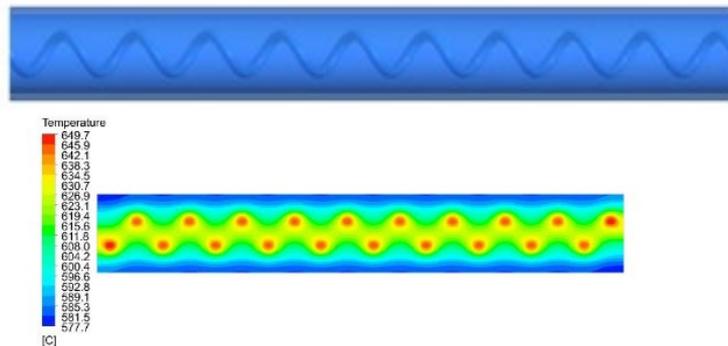
- ① 沿流动方向熔盐和管壁温差逐渐增加，而多组串联布置能够有效降低传热温差，二者温差可从 27°C 降低至 2°C ；
- ② 横截面内中心位置熔盐、电阻丝、填充材料温度明显高于边缘位置处，平均热流密度从 $5.71\text{W}/\text{cm}^2$ 增加至 $28.57\text{W}/\text{cm}^2$ 时，截面熔盐温差从 49°C 提高至 68°C 。

2.3 高电压熔盐电加热器研发

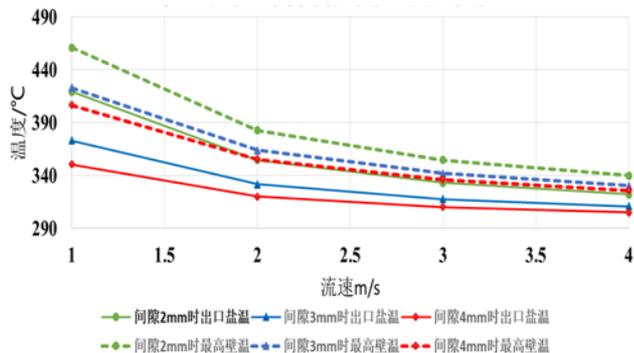
6kV熔盐电加热器仿真模拟研发



(a) 三维仿真模型示意



(b) 三维仿真模型示意



(c) 出口盐温和壁面最高温随流速的变化

重点对管芯、绝缘层、管体等开展传热过程分析，并对不同的换热间隙和流速的电加热管外换热特性进行研究。研究发现，随着流速的增加和间隙的增加，出口盐温和电加管壁温不断下降；随着流速的增加，盐温和电加热管壁温温差不断减小。

2.3 高电压熔盐电加热器研发

完成了2MW及20MW6kV熔盐电加热器样机研发



2MW6kV熔盐电加热器样机

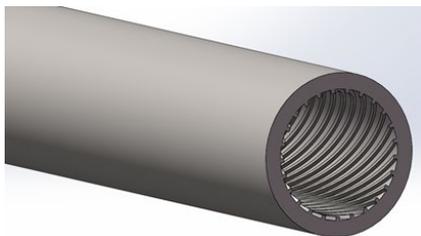


20MW6kV熔盐电加热器样机

完成了6KV-2MW熔盐电加热器 (565°C) 样机设计、制造和长时间稳定运行测试，并实现了6KV-20MW熔盐电加热器 (565°C) 样机供货

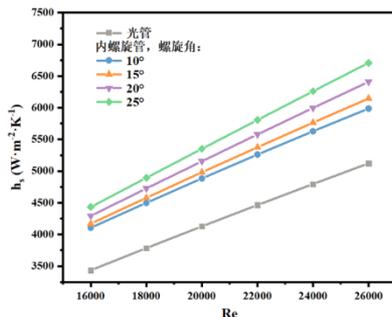
2.4 熔盐-水/蒸汽换热器研发

内螺旋翅片管内熔盐流动传热机理及结构参数优化

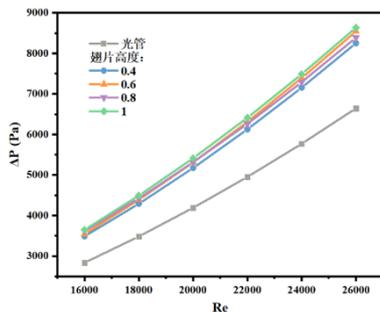


参数	说明
内径	16mm
外径	20mm
壁厚	2mm
材质	不锈钢
螺旋角	10、15、20、25°
翅片高度	0.4、0.6、0.8、1.0mm
翅片间距	1.6、2.0、2.4、2.8mm
翅片厚度	0.5mm

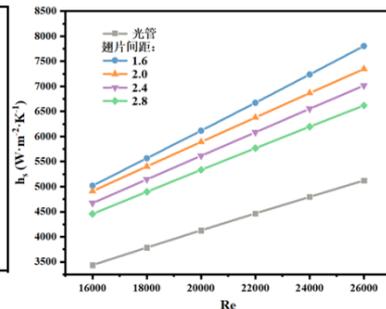
内螺旋翅片管及优化结构参数



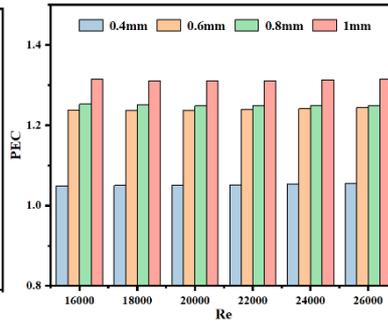
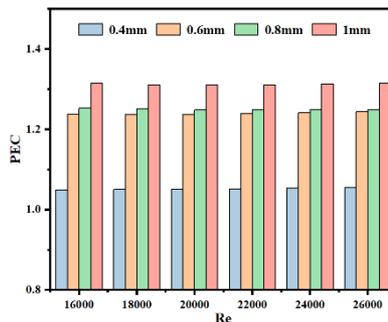
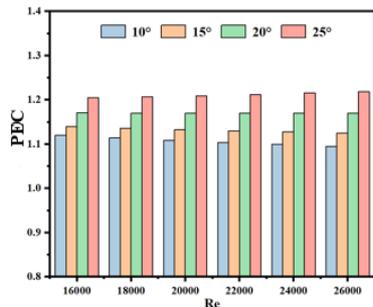
螺旋角的影响



翅片高度的影响



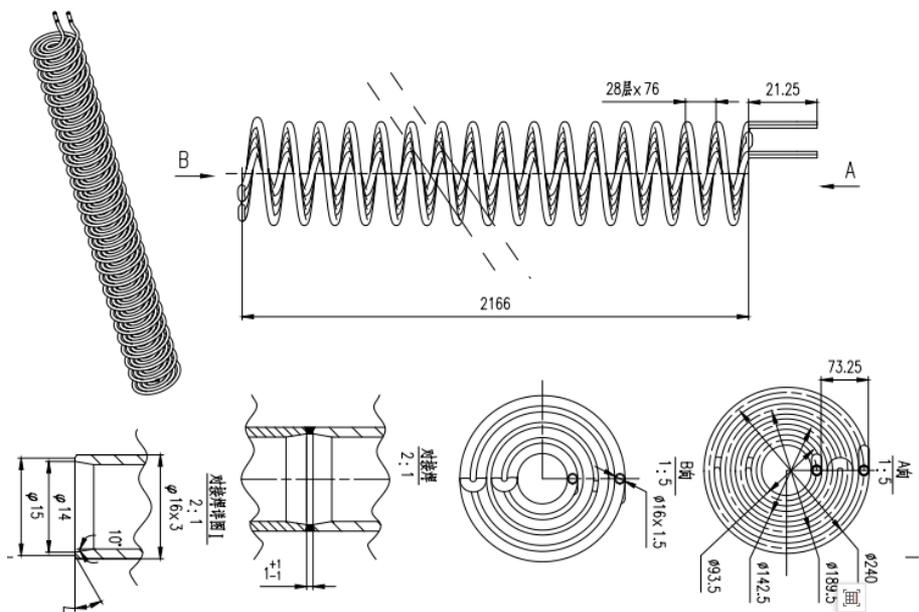
翅片间距的影响



建立了熔盐纳米流体在内螺旋翅片表面的数值传热模型，研究了物性参数、流动参数和翅片结构参数对换热器流-热-力耦合特性的影响规律，获得了优化结构参数。

2.4 熔盐-水/蒸汽换热器研发

针对换热器熔盐侧进出口温差大于 420°C 和蒸汽侧工作压力 $\geq 10\text{MPa}$ 的大温差和高压工况，传统U型管换热器和浮头式换热器不能满足应用需求的技术瓶颈，本项目设计了新型的多流道组合盘管式旋流换热器结构，并完成了样机的设计，正由东方电气（广州）重型机器有限公司进行制造。



多流道组合盘管式旋流换热器

亮点:

- 盘管结构，消除熔盐大温差应力对换热器的破坏
- 熔盐在盘管表面旋流，强化对流传热
- 多流道组合，提高熔盐在低流量下的流速，进一步提高对流传热系数
- 水/蒸汽在管内旋流流动，抑制水的膜态沸腾，并减少换热器的整体承压

2.5 熔盐-超临界CO₂换热器的研发

基于比焓的场协同原理

$$\rho \mathbf{u} \cdot \nabla h = \nabla \cdot (k \nabla T)$$

$$\int_{\Omega} (\rho \mathbf{u} \cdot \nabla h) dV$$

$$= \int_{\Gamma_s} (k \mathbf{n} \cdot \nabla T) dS$$

$$= \int_{\Gamma_s} -\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} dS \approx Q$$

速度-温度场协同原理的适用性:

$$c_p(T) = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p = \frac{\partial h(T)}{\partial T}$$

$$\rho \mathbf{u} \cdot \nabla h = \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T$$

$$= \rho c_p |\mathbf{u}| \cdot |\nabla h| \cdot \cos \theta_T$$

多种平均协同角指标:

1) 速度-温度平均协同角

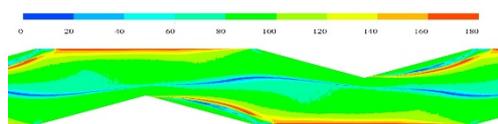
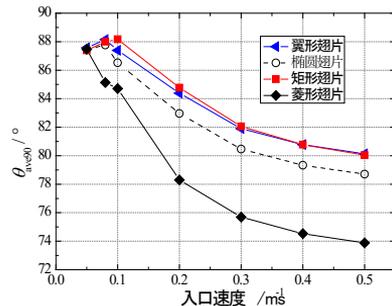
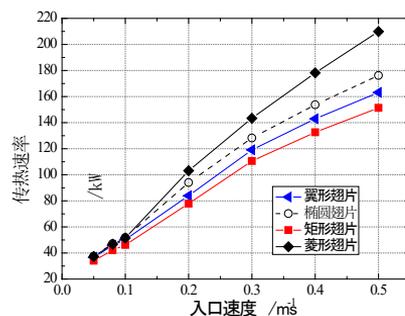
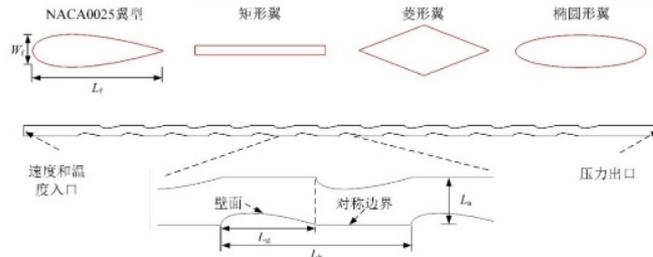
$$\theta_T = \arccos \frac{\sum (\mathbf{u} \cdot \nabla T) dV}{\sum (|\mathbf{u}| \cdot |\nabla T|) dV}$$

2) 速度-比焓平均协同角

$$\theta_h = \arccos \frac{\sum (\rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T) dV}{\sum (|\rho c_p \mathbf{u}| \cdot |\nabla T|) dV}$$

3) 体积平均协同角

$$\theta_{ave} = \frac{\sum \theta_i dV}{\sum dV} \quad \left\{ \begin{array}{l} \theta_i = \arccos \left(\frac{\mathbf{u} \cdot \nabla T}{|\mathbf{u}| \cdot |\nabla T|} \right) \\ \theta_{i90} = \arccos \left(\frac{|\mathbf{u} \cdot \nabla T|}{|\mathbf{u}| \cdot |\nabla T|} \right) \end{array} \right.$$



采用绝对值的体积平均协同角与传热特性间具有最好的一致性。

针对熔盐和超临界CO₂等变物性工质的对流换热，揭示了速度和温度场协同原理的适用性，验证了体积平均协同角作为场协同指标的合理性。

2.5 熔盐-超临界CO₂换热器的研发

流动换热数值模型

连续性方程: $\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0$

动量方程: $\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i$

能量方程: $\frac{\partial}{\partial x_i} \left(u_i \left(\rho c_p T + p \frac{u_i^2}{2} \right) \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_j \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_j \tau_{ij} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial x_i} \right)$

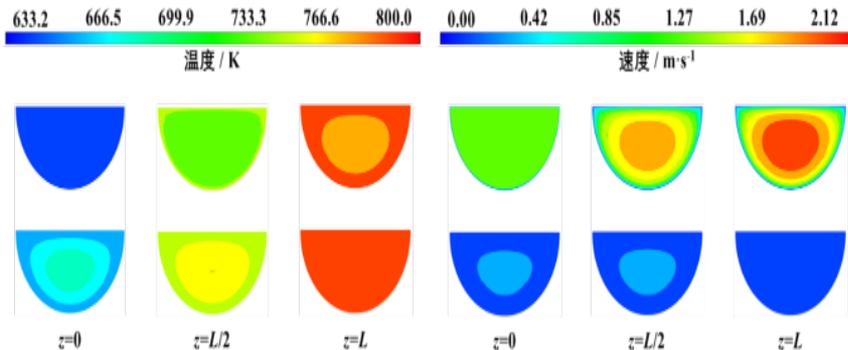
SST $k-\omega$ 湍流模型: $\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k$
 $\frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega$

结构力学数值模型

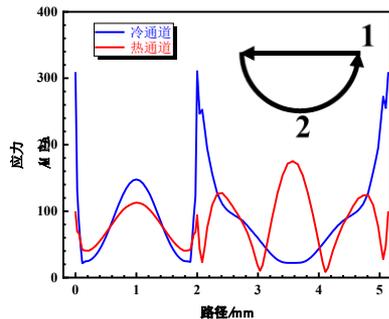
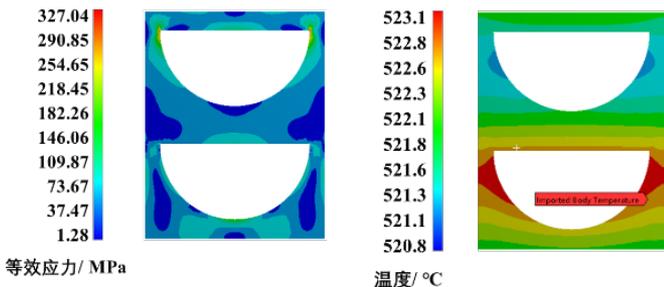
$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial X} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial Y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial Z} + b_x = 0 \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial X} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial Y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial Z} + b_y = 0 \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial X} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial Y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial Z} + b_z = 0 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u_x}{\partial X}; \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial Y}; \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial Z} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u_x}{\partial Y} + \frac{\partial u_y}{\partial X}; \gamma_{yz} = \frac{\partial u_y}{\partial Z} + \frac{\partial u_z}{\partial Y}; \gamma_{zx} = \frac{\partial u_z}{\partial X} + \frac{\partial u_x}{\partial Z} \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} + \alpha \Delta T \\ \varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} + \alpha \Delta T \\ \varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} + \alpha \Delta T \\ \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}; \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}; \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G} \end{cases}$$



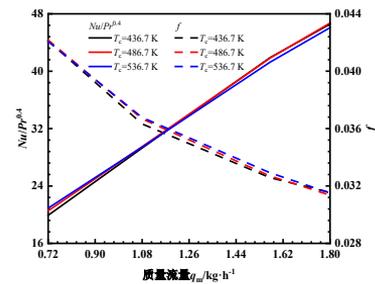
冷通道的应力水平高于热通道, 且最大应力出现在冷通道的尖端处



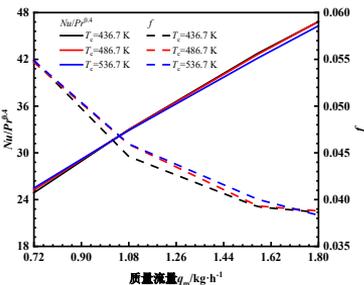
针对高温高压的熔盐/S-CO₂换热器, 综合考虑了高温和大压差导致的热应力与机械应力, 构建了换热器流动-换热-应力一体化耦合数值模型, 揭示了流场、温度场与应力场的多物理场分布规律

2.5 熔盐-超临界CO₂换热器的研发

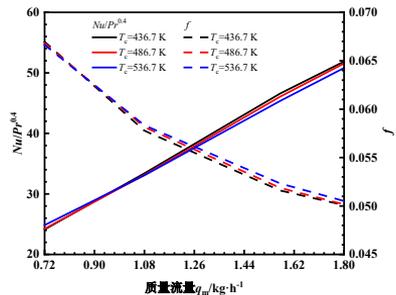
流动换热规律



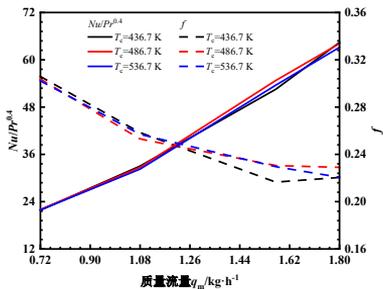
直通道PCHE



波纹通道PCHE

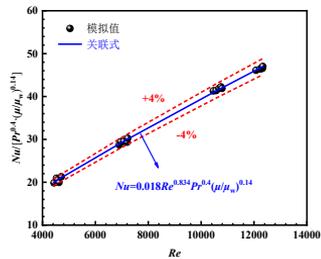


Z之形通道PCHE

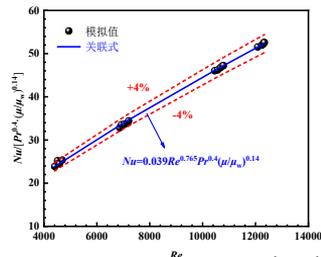


翼型翅片通道PCHE

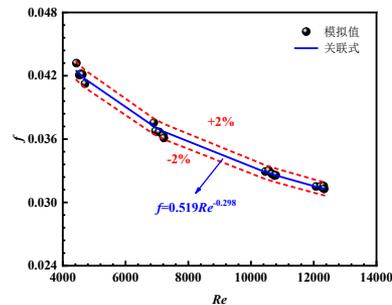
流动换热关联式



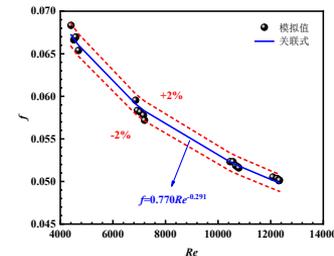
$$Nu = 0.018 Re^{0.834} Pr^{0.4} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$$



$$Nu = 0.039 Re^{0.765} Pr^{0.4} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$$



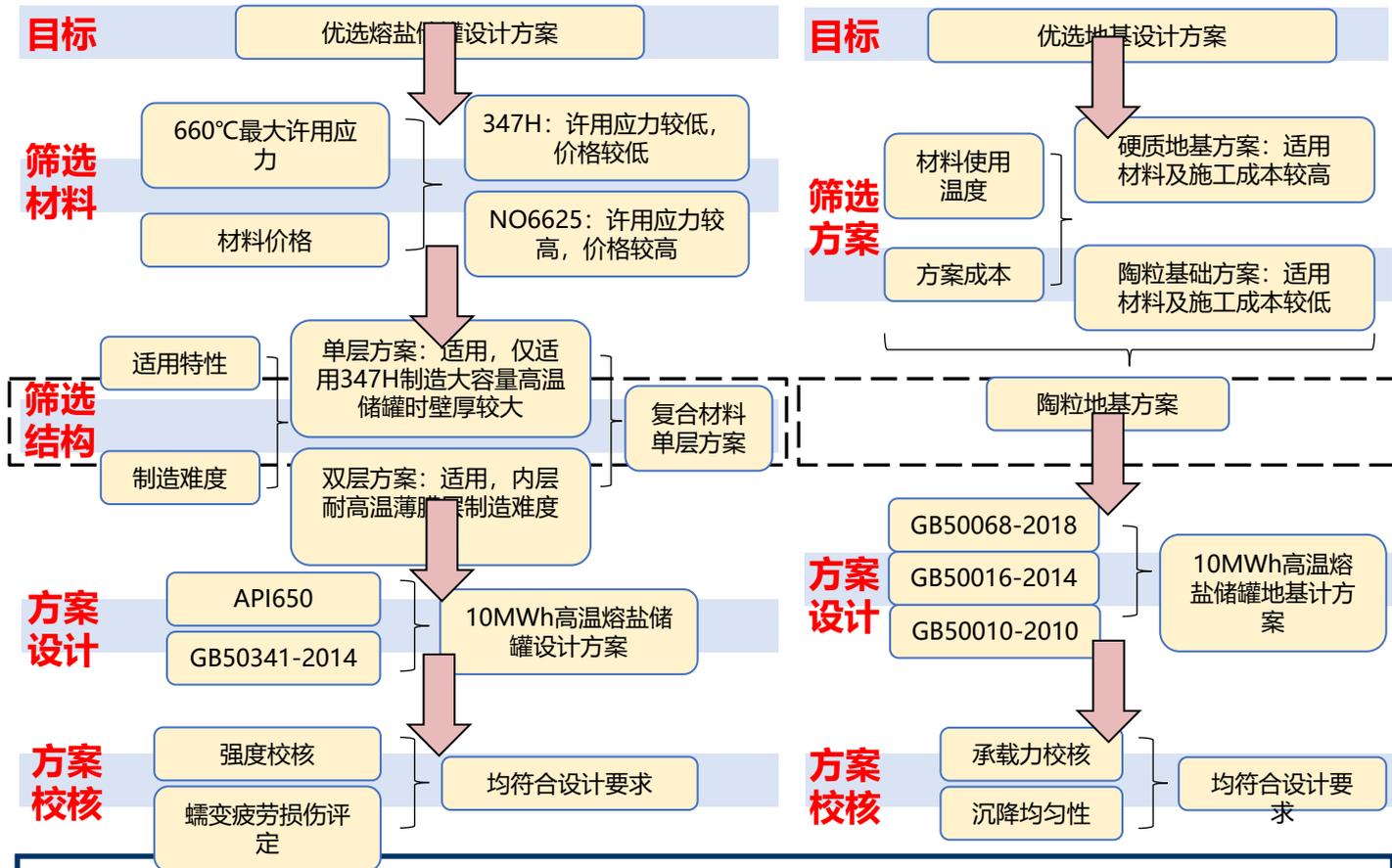
$$f = 0.519 Re^{-0.298}$$



$$f = 0.770 Re^{-0.291}$$

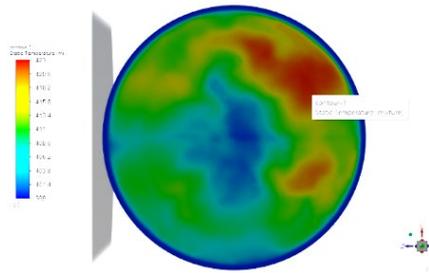
分析了S-CO₂在不同运行工况、不同流道结构内的流动换热规律，获得了不同通道结构下PCHE的流动与换热关联式，可用于指导PCHE的优化与设计研究

2.6 大容量高温熔盐储罐及其基础研究

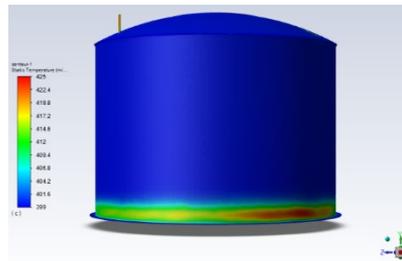


➤ 优选出适用于高温大容量熔盐储罐及其地基的结构方案

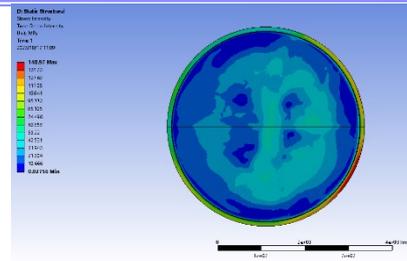
2.6 大容量高温熔盐储罐及其基础研究



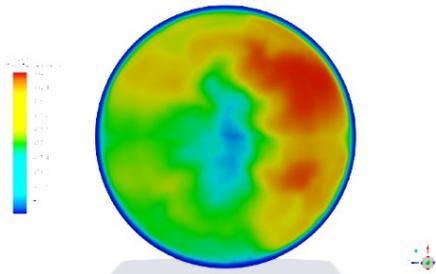
(a) 260s时底板



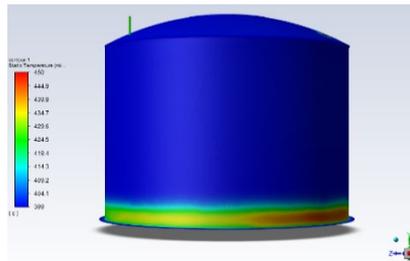
(b) 260s时壁板



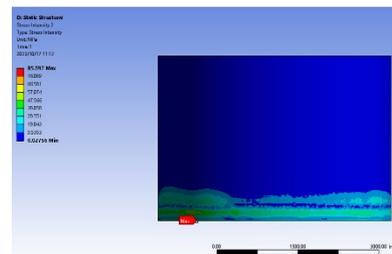
(a) 底板



(c) 520s时底板



(d) 520s时壁板



(b) 壁板

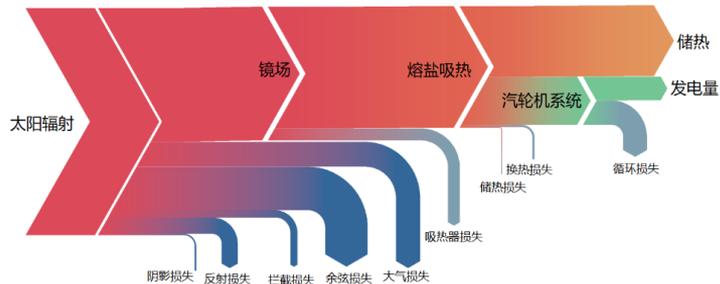
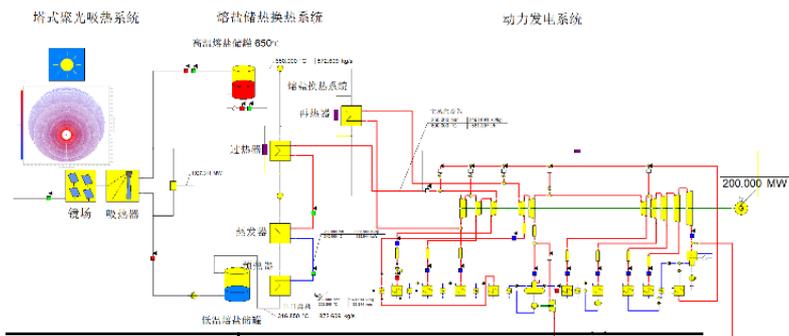
不同进盐时间后熔盐储罐内部温度分布情况

进盐520s后储罐各处应力分布情况

建立了大容量高温熔盐储罐及其基础设计仿真平台并进行了温度分布和应力分布仿真，结果表明：

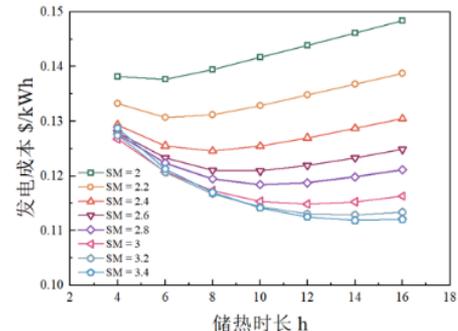
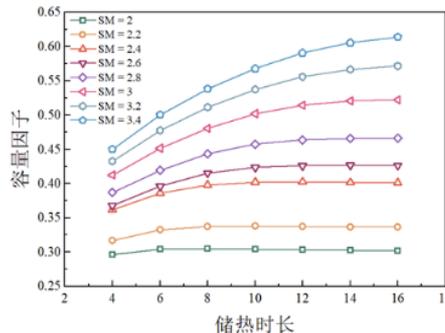
- 罐体温度由常温升至660℃，各路径的最大应力强度呈上升趋势，温度差异最大处出现在路径2、5和9等角焊缝处；
- 随着进盐流量增加，储罐内各处升温速率提高，而随着温度提高，应力更为集中。

2.7 基于高温熔盐储热的太阳能光热发电系统性能分析



系统能流图

项目	性能参数	
	新型复合盐	太阳能盐
定日镜场	定日镜数量15162面, 镜场效率65%	
吸热器	额定功率1027MW	
额定发电量	200 MW	
熔盐工作温度	315~650°C	290~565°C
储热密度	231.01 kWh/m ³	211.04 kWh/m ³
汽轮机进口参数	25 Mpa/600°C/600°C	12.6 Mpa/550°C/550°C
汽轮机循环效率	49.3%	42.7%

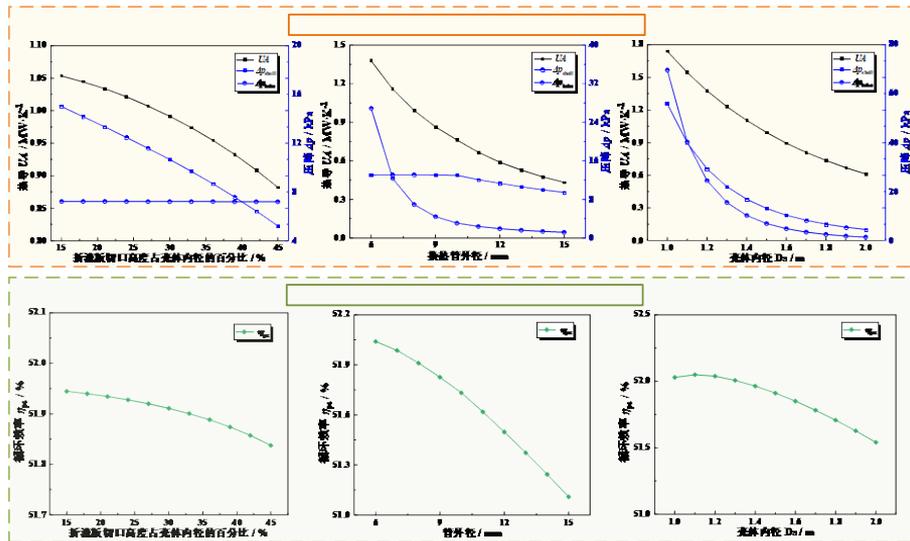
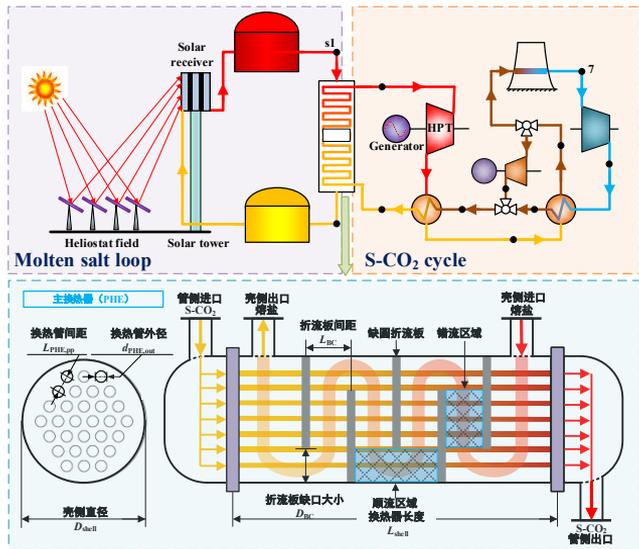


建立了高温熔盐储热太阳能光热发电系统热力学模型，采用**新型复合盐**提升了系统整体性能参数

- 提高太阳倍数和储热时长均利于提升电站容量系数，提高发电能力；
- 太阳倍数为3.4，储热时长为14 h时平准化发电成本最低，为0.112 \$/kWh。

2.7 基于高温熔盐储热的太阳能光热发电系统性能分析

中间换热器结构参数优化分析

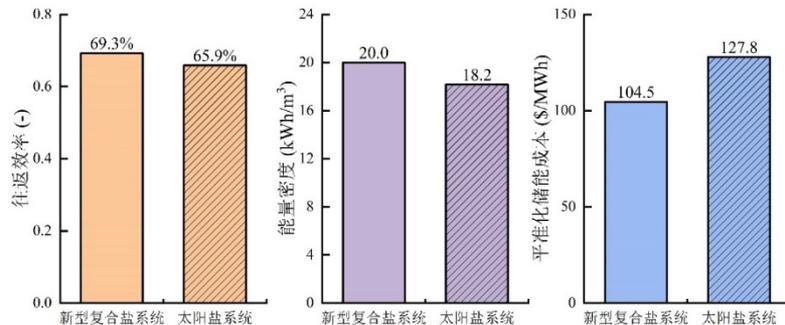
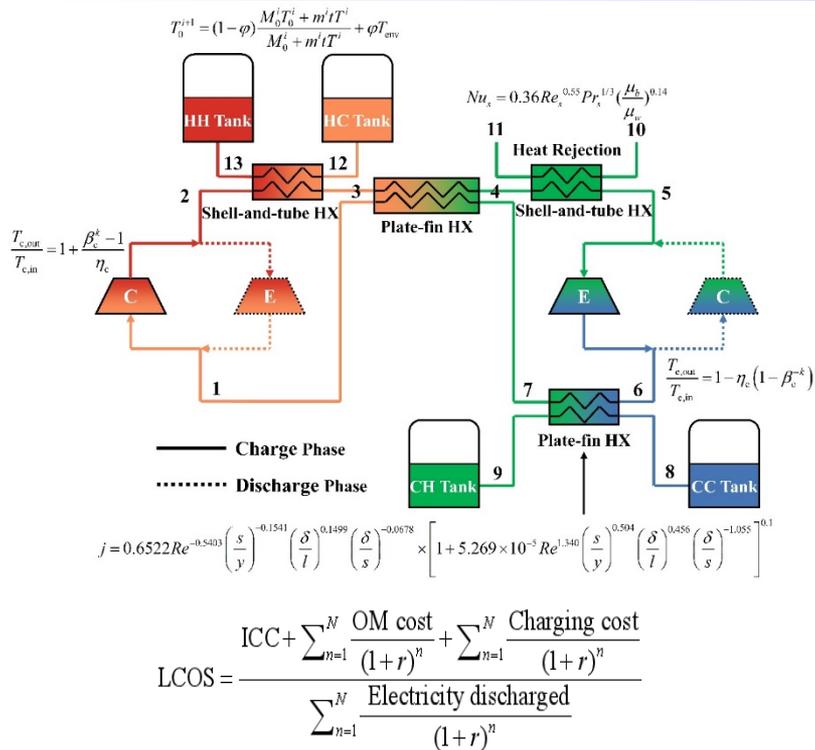


塔式光热电站系统图与中间换热器模型图

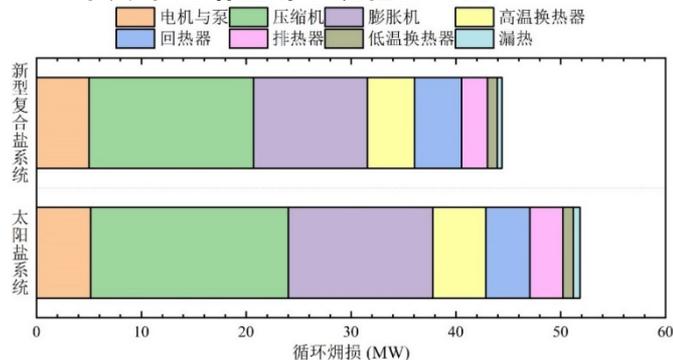
中间换热设备对超临界CO₂塔式光热性能的影响

- 发展完善了全工况范围内超临界CO₂塔式光热发电系统的光-热-功转化完整热力学模型
- 改变中间换热器结构参数将引起其热导的变化，进而对循环运行参数和系统效率产生影响
- 利用粒子群算法对中间换热器结构参数和电站运行参数进行了协同优化，获得了优化设计参数。

2.8 高温熔盐储热与热泵储电系统耦合系统分析优化



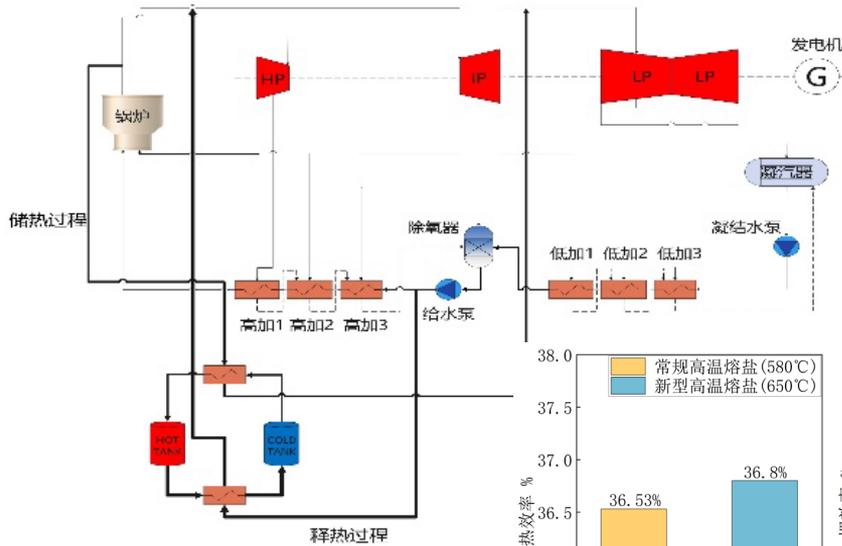
采用不同熔盐的系统性能对比



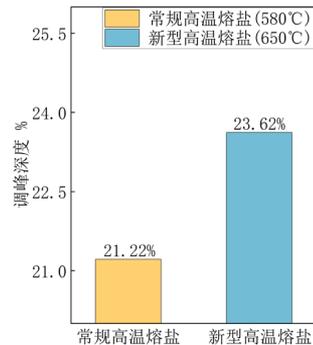
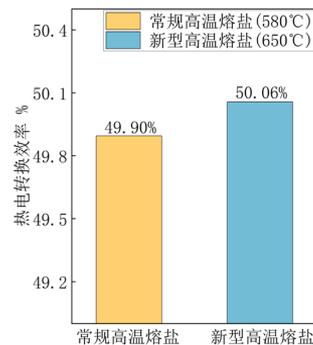
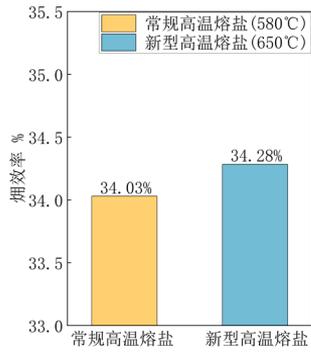
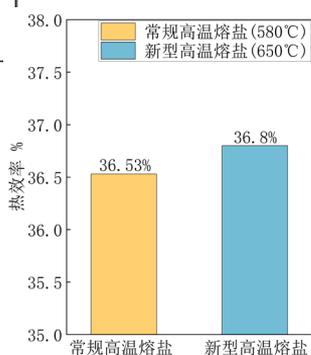
采用不同熔盐的系统各部件焓分析

技术经济分析结果表明：相比于传统太阳盐，采用新型高温熔盐能够获得往返效率提高约3.4%；储能密度提高约1.8kWh/m³；平准化储能成本降低约23.3\$/MWh；将显著降低系统焓损，提高系统效率

2.9 火-储耦合系统调峰能力以及热力性能分析



方案编号	储热过程	释热过程
1	再热蒸汽→低压缸入口	除氧水→主蒸汽
2	再热蒸汽→低压缸入口	除氧水→再热蒸汽
3	再热蒸汽→低压缸入口	6号低加入口取水→再热蒸汽
4	#1抽汽→低压缸入口	除氧水→主蒸汽
5	#1抽汽→低压缸入口	除氧水→再热蒸汽
6	#1抽汽→低压缸入口	6号低加入口取水→再热蒸汽
7	#2抽汽→低压缸入口	除氧水→主蒸汽
8	#2抽汽→低压缸入口	除氧水→再热蒸汽
9	#2抽汽→低压缸入口	6号低加入口取水→再热蒸汽

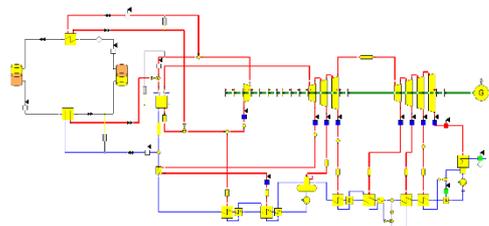


不同类型高温熔盐储热系统耦合火电机组时热力性能对比

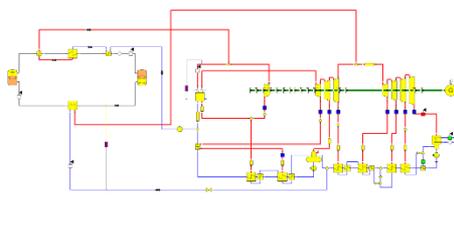
建立了基于高温熔盐的火-储耦合系统模型，确定了最优耦合方案；

对比了650°C新型高温熔盐储热和580°C常规高温熔盐储热与火电机组耦合：**采用了新型高温熔盐的耦合系统热效率、焓效率、调峰深度和热电转化效率分别提高0.27%、0.25%、2.4%、0.16%。**

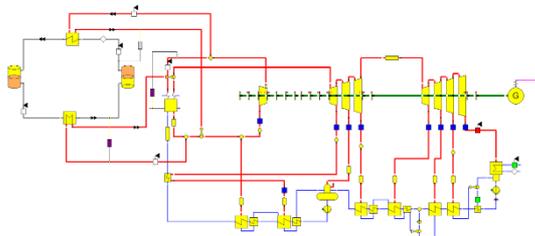
2.10 蒸汽加热熔盐和电加热熔盐火电调峰方案对比



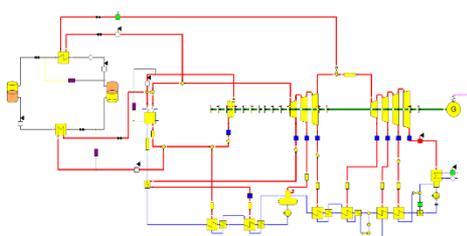
方案A



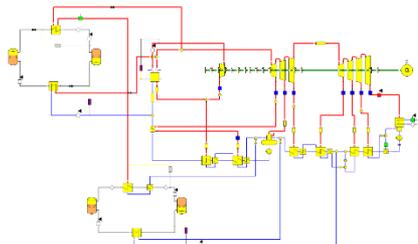
方案B



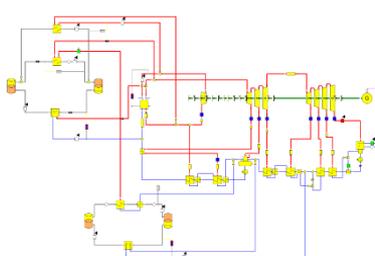
方案C



方案D



方案E



方案F

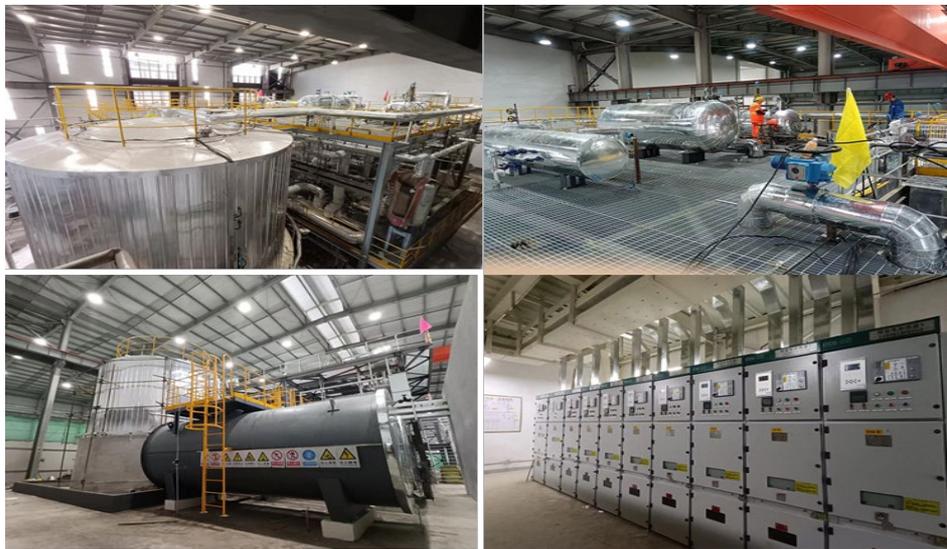
序号	转换效率%	调峰功率MW
方案A	45%	4.26
方案B	38%	9.65
方案C	41%	3.97
方案D	43.8%	3.58
方案E	67%	8.4
方案F	55.7%	12.69
电加热熔盐方案	47%	不受限制

1) 针对330MW煤电机组计算对比了6种蒸汽加热熔盐储热方案，系统转换效率范围为38~67%，调峰功率范围为3.58~12.69MW，表现出调峰能力不足、热力系统复杂的缺陷；

2) 电加热熔盐储热系统转换效率为47%，调峰功率不受限制，调峰能力强，同时能增强机组的调频能力，更加适合煤电机组调峰场景。

2.11 熔盐储热的工程验证和示范

完成了565°C10MWh熔盐储热工程验证系统的建设，正在建设120MWh华能海门电厂高温熔盐储热火电机组调峰示范工程



搭建完成了**10MWh熔盐储热工程验证平台**，待课题2高温熔盐、课题4熔盐-水/蒸汽换热器、课题3熔盐电加热器样机研制成功后就可放入平台进行工程验证



正在建设的**60MW-120MWh华能海门电厂高温熔盐储热火电机组调峰示范工程**：混凝土框架结构平台即将封顶，低温熔盐储罐基本完工，高温熔盐储罐完成约50%，电加热器、蒸汽发生器等主要设备已加工完成。

2.12 申请发明专利清单

1. 一种高温太阳能梯级利用的热发电系统, CN202211699270.7.
2. 一种太阳能吸热器及太阳能梯级利用系统, CN202211699402.6.
3. 一种电机集成式热泵储电轴流透平及其发电系统, CN202310006496.2.
4. 一种适用于液体分布器的免集液的实时分布性能测量系统, CN202310859362.5.
5. 一种喷淋装置中多孔板液体分布器的设计方法, CN202310842770.X.
6. 一种流体分散装置, CN202310281198.4.
7. 一种翅片式相变储能装置, CN202211546175.3.
8. 一种低熔点宽温域五元熔盐复合相变定型材料及其制备方法, CN202310653953.7
9. 一种跨临界二氧化碳热泵熔盐储热发电系统, CN202310005769.1
10. 一种电加热装置. CN202310388229.6
11. 一种用于熔盐换热设备和管道的防冻系统及控制方法, CN202310352557.0
12. 用于燃煤发电机组在低负荷下的稳燃系统及方法, CN202310333264.8
13. 一种太阳能吸热储热系统, CN202310108896.4
14. 一种高效能熔盐储罐, CN202310026902.1
15. 一种基于熔盐储能的热电联产机组, CN202310072570.0
16. 适应电网调频的熔盐电加热器和运行方法, CN202310210580.6
17. 一种基于熔盐储热辅助火电机组的调频系统及方法, CN202310351770.X
18. 耦合多级储热系统的燃煤机组调频调峰系统及其运行方法, CN202310532508.5
19. 一种强化传热的熔盐储罐电加热装置及其使用方法, CN202310615160.6
20. 一种用于熔盐储罐的熔盐加热装置及其使用方法, CN202310750645.6
21. 一种熔盐缓冲装置, CN202310628570.4

2.13 发表论文清单

1. **Operating mode of Brayton-cycle-based pumped thermal electricity storage system: Constant compression ratio or constant rotational speed. Applied Energy, 2023, 343: 121107.**
2. **Optimal dispatch of a novel integrated energy system combined with multi-output organic Rankine cycle and hybrid energy storage. Applied Energy, 2023, 343:121113.**
3. **Off-design performance of supercritical compressed carbon dioxide energy storage system. The 15th International Conference on Applied Energy, Doha, Qatar, 295, 2023.**
4. **Investigation on thermal performance of eutectic binary nitrate-carbonate molten salt under thermal shock condition. Solar Energy Materials & Solar Cells 255 (2023) 112314**
5. **Advances in High-Temperature Molten Salt-Based Carbon Nanofluid Research. Energies 2023, 16, 2178**
6. **Nano additives induced enhancement of thermal energy storage properties of molten salt: Insights from experiments and molecular dynamics simulations. Journal of Energy Storage 72 (2023) 108612**
7. **Experimental and numerical study on heat transfer characteristic of nitrate molten salt-based nanofluids in tube with twisted tape. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry (2023) 148:955–964**
8. **Experimental and numerical study on heat transfer and flow characteristics of molten salt nanofluids in spiral-wound tube heat exchanger. International Journal of Thermal Sciences 191 (2023) 108343**
9. **Study on Flow and Heat Transfer Performance of Molten Salt Based Nanofluids in Shell and Twisted Tube Heat Exchanger with Shutter Baffle. International Journal of Thermophysics (2023) 44:30**
10. **Zi-Xiang Tong, Ting-Ting Zou, Tao Jiang, Jia-Qi Yang. Investigation of field synergy principle for convective heat transfer with temperature- dependent fluid properties. Case Studies in Thermal Engineering 45 (2023) 102926**
11. **Jinxin Feng, Yuyao Guo, Ziyue Ling*, Xiaoming Fang, Zhengguo Zhang*. Performance enhancement and dual-phase change heat transfer mechanism for latent heat storage system using phase change nanoemulsion. Chemical Engineering Science 276 (2023) 118827**
12. **基于熔盐储热辅助煤电机组深度调峰的系统设计及容量计算方法研究, 热力发电, 2023年7月。**
13. **火-储合系统深度调峰综合经济性分析. 中国工程热物理学会工程热力学与能源利用分会, 洛阳, 中国, 231518, 2023.**

2.14 参与标准制定

- IEC国际标准《太阳能光热电站第2-2部分：熔融盐的技术要求》顺利通过IEC立项
- 国家标准《太阳能光热发电站储热/传热用工作介质技术要求 熔融盐》，已形成报批稿
- 参与中国科技产业化促进会团体标准《陶粒型熔盐储热罐基础建造技术及验收规程》

Ms Alina GILMANOVA (fr-ai-gu) Log out en fr

Voting Result **APPROVED**

Document 117/178/NP

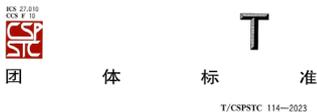
Project : PNW 117-178 ED1

PNW 117-178 ED1: Solar thermal electric plants - Part 2-2: Thermal energy storage systems - Technical requirements for molten salt used as heat storage and heat transfer medium.

Reference	Circulation date	Closing date	Downloads
117/178/NP	2023-03-24	2023-06-16	506 kB

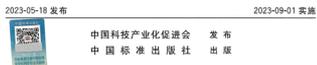
Compilation of Comments

CC file



陶粒型熔融盐储热罐基础建造技术及验收规程

Code of practice for construction technology and acceptance of ceramic molten salt heat storage tank foundation



前言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中建三局第二建设工程有限责任公司提出。

本文件由中国科技产业化促进会归口。

本文件起草单位：中建三局第二建设工程有限责任公司、中铁十一局集团第一工程有限公司、上海电气集团股份有限公司中央研究院、首航高科能源技术股份有限公司、江苏联储能源科技有限公司、蓝星(北京)化工机械有限公司、东方电气集团东方锅炉股份有限公司、中国能源建设集团湖南火电建设有限公司、国家电投集团科学技术研究院有限公司、中国能源建设集团天津电力建设有限公司、北京工业大学、中国能源建设集团江苏省电力建设第一工程有限公司、甘肃省安装建设集团有限公司、浙江可胜技术股份有限公司、山东电力建设第三工程有限公司、山东济容热工科技有限公司、哈尔滨汽轮机厂有限责任公司、中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司、标准联合咨询中心股份公司。

本文件主要起草人：张凤举、张锋凌、王坤、任慧军、高志峰、陈龙、张艳梅、卢稳、齐志鹏、殷建平、司继松、胡亮、陈集农、白宇、徐志勇、吴玉庭、盛华兴、唐娟、代增丽、杨洪才、洪增元、王迎春、彭浩、邹丽文、陈杨化、饶淇、黄立鹏、孙雪梅、王展威、毛江峰、刘波、李夏华、王秋水、陈维虎、左骥、黄诗云、刘庆、陈婷、吴春元、赵翔、洪力、陆维鸿、顾清之、谢小松、徐艳、刘平心、代春雷、肖欣悦、钟成春、姜晓霞、赵景付、张灿灿、王海峰、孙峰、李健、孙立梅、付元刚、张德长、于启发、姚亮、卢成皓。

太阳能光热发电站储热/传热用工作介质技术要求 熔融盐

Technical requirements of working medium for heat storage / heat transfer in solar thermal electric plants: molten salt

国家标准计划 制定 推荐性

国家标准计划《太阳能光热发电站储热/传热用工作介质技术要求 熔融盐》由 TC565（全国太阳能光热发电标准化技术委员会）归口，主管部门为中国电力企业联合会。

主要起草单位 浙江高晟光热发电技术研究院有限公司、北京工业大学、浙江中控太阳能技术有限公司、中广核太阳能开发有限公司。

2.15 获得了工信部第二届先进储能技术创新挑战赛





衷心感谢各位专家!



传热强化与过程节能
教育部重点实验室
MOE KEY LABORATORY OF
ENHANCED HEAT TRANSFER
AND ENERGY CONSERVATION



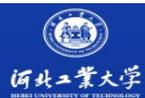
传热与能源利用
北京市重点实验室
BEIJING KEY LABORATORY OF
HEAT TRANSFER AND ENERGY CONVERSION



中国科学院工程
热物理研究所



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY



CosinSolar
可胜技术

TPRI 西安热工研究院有限公司
XI'AN THERMAL POWER RESEARCH INSTITUTE CO., LTD.

BLUESTAR
蓝星(北京)化工机械有限公司
Bluestar (Beijing) Chemical Machinery Co., Ltd.
CosinSolar
高晟太阳能