



中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司
NORTHWEST ENGINEERING CORPORATION LIMITED

诚信为先 创新为魂 共赢为本
Integrity Innovation All-Win

熔盐储热设计及运维关键技术

张俊峰

2025年11月

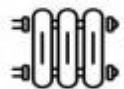


目录

CONTENTS

- 一、背景与意义
- 二、熔盐储热系统设计技术
- 三、工程实践及典型案例
- 四、公司简介

一、背景与意义



1.1 能源转型趋势

01

双碳目标与可再生能源增长

我国提出2030年碳达峰、2060年碳中和目标，预计2030年可再生能源装机占比将超60%，风光产业迎来爆发式增长。



风光能源的系统结构性风险

光伏日内波动可达100%，风电可能出现连续数天低出力，传统火电调峰能力已接近极限，能源供需错配问题凸显。

02

03

储热技术的战略必要性

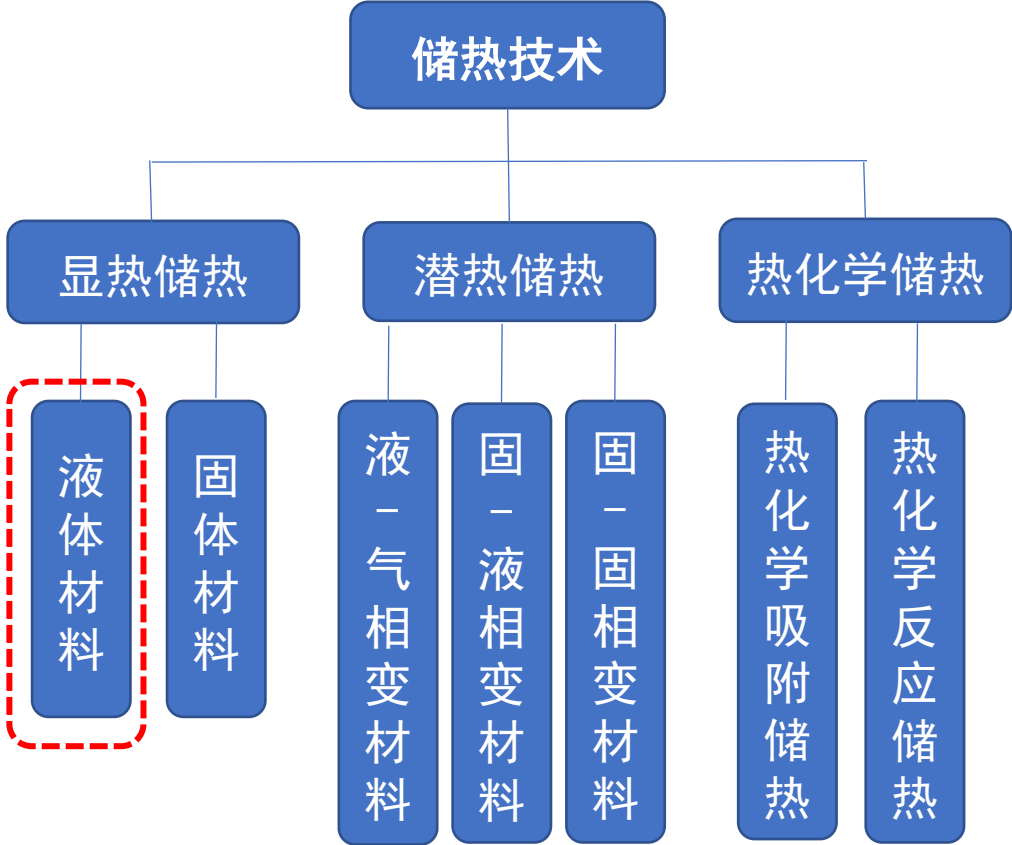
缺乏大容量、长周期、低成本的储能技术，导致‘弃风弃光’现象频发，储热技术成为解决这一问题的关键战略选择。



1.2 储热技术类型及应用

✓ 储热技术以储热材料为媒介将太阳能光热、地热、工业余热、低品位废热等热能加以存储并在需要时释放的技术。

	显热储热	潜热储热	热化学储热
储热材料	水、熔盐、导热油、碎石、鹅卵石、土壤	有机材料、无机材料	碳酸盐、氨水、金属氢化物、金属氧化物等
优势	环境友好 原材料价格低 系统相对简单，易于控制，可靠性佳	储热密度高于显热储热 可提供恒温的热能	储能密度最高 系统紧凑 热损可忽略
劣势	储热密度低 存在热损现象 投建成本高昂 受限于地质条件	相变材料费用高昂 热稳定性差 材料会出现结晶现象 材料会出现腐蚀现象	充放热过程较难控制 循环稳定性差
技术成熟度	高，已用于大规模示范电站	中，处于实验室示范到商业示范过渡阶段	低，处于机理分析、结构测试和实验室验证阶段



1.3 熔盐储热技术优势

储能规模大，持续时间长

熔盐储热技术的储热容量可达百兆瓦时以上，持续放电时间长达10小时以上，完美满足电网级大规模、长时储能需求，有效弥补光伏、风电的间歇性短板，为能源稳定供应提供有力保障。

01

02

工作温度高，能量密度大

熔盐工作温度范围广，通常在290℃至565℃之间，可储存高品质热能。系统能量密度高，所需储罐体积相对较小，节省空间与基础建设成本，提升整体经济性。

系统效率高，运行稳定

熔盐储热技术与光热发电系统耦合，可实现高效的“热-电”转换，综合效率高。储/放能过程主要为物理变化，系统性能衰减慢，寿命长达25年以上，确保长期稳定运行。

03

04

安全环保，成本低廉

熔盐储热技术采用常压操作，无爆炸风险，安全性远高于传统电池储能。熔盐（硝酸盐）原料丰富，环境友好，初始投资与度电成本持续下降，具有显著的经济优势。



1.4 熔盐储热技术应用

太阳能光热发电

- 定位：光伏、风电、光热一体化，新能源基地。
- 特点：太阳能储热，消纳光伏、风电弃电，电网调峰调频。通过多能互补、储能等打造新能源基地。

智慧供暖

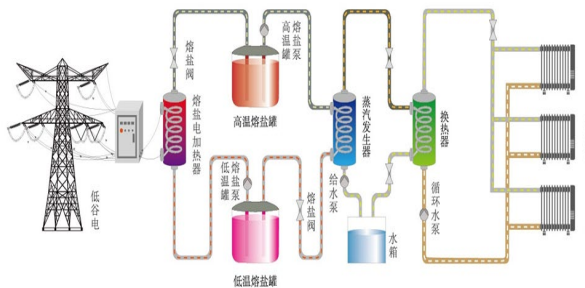
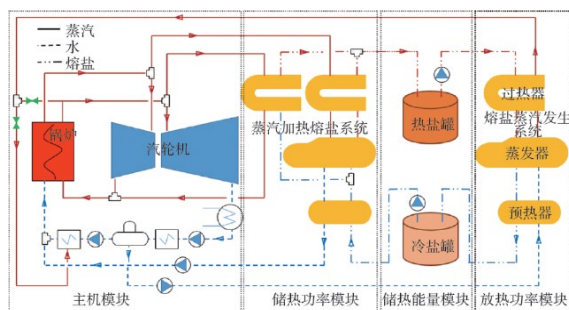
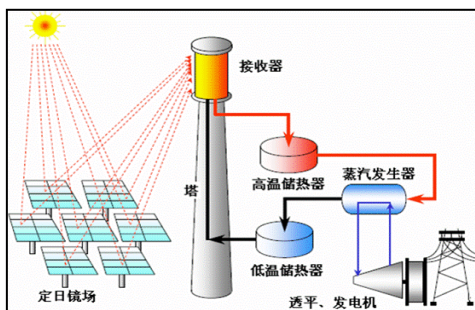
- 定位：智慧供暖，电网削峰填谷。
- 特点：通过单罐或双罐熔盐储热技术，实现电网谷电利用和智慧供暖。

火电厂深度调峰

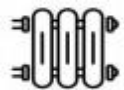
- 定位：助力火电机组热电解耦，实现深度调峰。
- 特点：锅炉、汽轮机不进行改造，通过蒸汽与熔盐换热实现热电解耦，实现火电机组更低的深度调峰，同时系统具备较好的供热能力。

工业余热回收

- 定位：对工业过程的余热进行回收，实现工业领域的节能减碳，打造综合智慧低碳工业。
- 特点：将钢铁、化工等工业领域的余热进行回收和储存，根据用户用能品质要求将热能梯级利用，形成工业领域综合智慧低碳新模式。



二、熔盐储热系统设计技术



2.1 熔盐储热系统—系统组成

□ 储热熔盐（能量载体）

熔盐的主要成分为硝酸钠、硝酸钾盐，化学稳定性强，能长期循环使用且成本较低，是较为常见的化学材料，目前国内熔盐材料的供应已经成熟。

□ 输送与循环系统

核心是熔盐泵，负责将低温熔盐输送至吸热器，再将高温熔盐输送至高温罐，放热时将高温熔盐泵入换热器。

□ 保温系统

主要包括管道阀门保温、设备保温。保温结构为“内侧耐高温层 + 核心保温层 + 外侧防护层”的复合结构，罐顶、罐底及罐壁接缝处做密封处理，避免空气渗透导致保温失效，罐底还会增设隔热支撑结构，减少通过基础的热量传导。

□ 储热罐（热量存储容器）

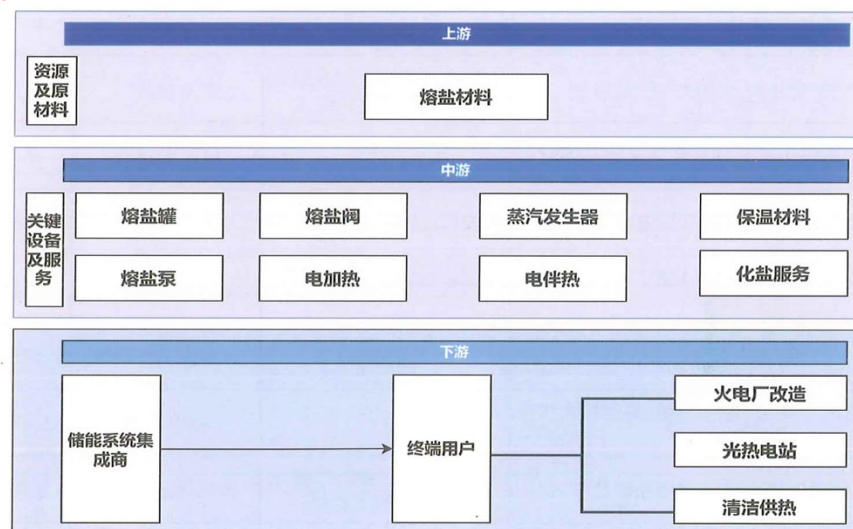
分高温罐和低温罐，均为立式圆柱形常压罐。罐体内壁设耐高温防腐层，外部有保温层，减少散热损失。

□ 换热系统（热量传递核心）

包括放热换热器，将熔盐热量传递给工质如蒸汽，驱动汽轮机发电）。

□ 控制系统与辅助设备

控制系统通过温度、压力、流量传感器实时监测系统状态自动调节，确保熔盐循环稳定。辅助设备包括熔盐电加热器、氮气保护装置、泄放阀等。



2.1 熔盐储热介质—熔盐

■ 熔融盐是一种离子熔体，具有**良好的导电性能**，导电率远高于常规电解质溶液，这使得电加热过程非常方便。其次，熔融盐具有**广泛的使用温度范围**，通常在280℃到1000℃之间，而新型低熔点盐的最低使用温度甚至达到了80℃，能够匹配绝大部分工质应用的温度需求。熔融盐的**饱和蒸汽压较低**，降低了设备成本，提高了安全性。它在**液态状态下粘度较低**，具有良好的化学稳定性和热稳定性，同时原料容易获得，价格相对较低。

相关规范要求	
太阳能光热发电站储热/传热用工作介质技术要求 熔融盐	GB/T 44800-2024
太阳能熔盐(硝基型)	GBT 36376-2018

盐种类	价格元/t	熔点 (°C)	分解温度 (°C)	蓄热密度 (kW·h/t)	蓄热材料成本 (元/kW·h)	蓄热系统成本 (元/kW·h)
Solar Salt	4500-6500	220	584	110	41-59	120-200
Hitec salt	5000-7000	142	535	113	44-62	122-202
LMPS I	12000-110000	89	612	190	63-578	115-750
LMPS II	4900-6700	94	625	199	25-34	68-113
LMPS III	4400-6400	117	576	157	28-41	83-139
LMPS IV	5100-6300	98	582	167	30-38	80-122
LCBS I	2800-4000	216	576	141	20-29	78-140
HLMPS I	20000-230000	323	800	249	80-923	123-1041
HLMPS II	4600-6600	132	734	208	22-32	65-110
HLMPS III	2600-4200	302	652	110	23-38	66-116



2.1 熔盐储热介质—熔盐

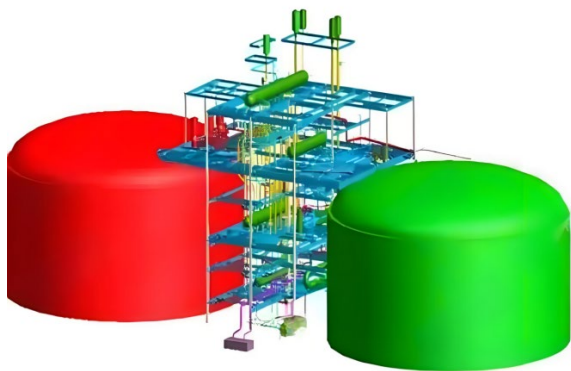
- ❑ 熔盐配方千变万化，按组元数可分为单盐、二元熔盐、三元熔盐和多元熔盐，**二元盐**亦被称作太阳盐，是目前**工程应用最广泛**，也是**商业化光热电站采用最多的熔融盐**。
- ❑ 目前光热项目所处海拔均较高，气压可能会对熔盐的化学反应平衡产生一定影响，目前国内外还未有相关的研究成果。以我公司某100MW塔式光热项目为例，本项目所在地为超高海拔地区（4600m以上），月平均气压最低值为569.1hPa，设计团队对各温度条件下，对二元熔盐做了相关实验室测试：

测试轮次	分解温度（℃）	质量损失率
1	565.5	5.2%/min
2	566.1	5.4%/min
均值	565.8±0.3	

- ❑ 根据测试结果，在0.0569MPa恒定压力下：
分解起始点：562℃（TGA曲线拐点）
快速分解点：565.8℃（（失重率>5%/min）
完全分解温度：>580℃
- ❑ 根据熔盐系统设计，如果高温熔盐工作温度为565℃±5℃，在此处存在低气压导致熔盐分解的风险。

2.2 熔盐储热关键设备—熔盐储罐

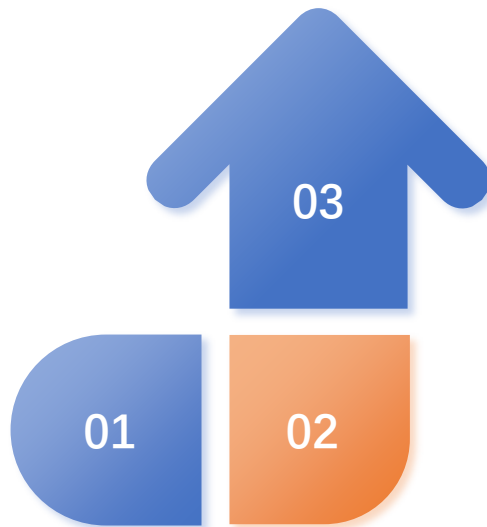
□ 熔盐储热的产业链中游为熔盐储罐等关键设备与技术。其中，熔盐储罐是存储熔盐的关键设备，通常以**不锈钢**（例：SA240-347H，连续使用温度在270~870℃，**高温适配性优，耐氧化、抗晶间腐蚀、高温稳定**）、**碳钢**（例：Q345R，使用温度在-20~425℃，**强度高、韧性好、易加工**；或SA516Gr70，**抗冲击、焊接性能优异**）作为制造原材料，熔盐罐主要由**顶盖、筒体和罐底**三部分组成。



□ 储罐的容积计算

- (1) 根据汽机效率/供暖规模进行储热量计算；
- (2) 根据储热量，高、低温熔盐的物性参数，考虑设备及管道内熔盐容积；
- (3) 考虑储罐残留液面高度（熔盐泵的运行及启动要求）。
- (4) 晃动液位高度及裕量选择

□ 储罐防凝



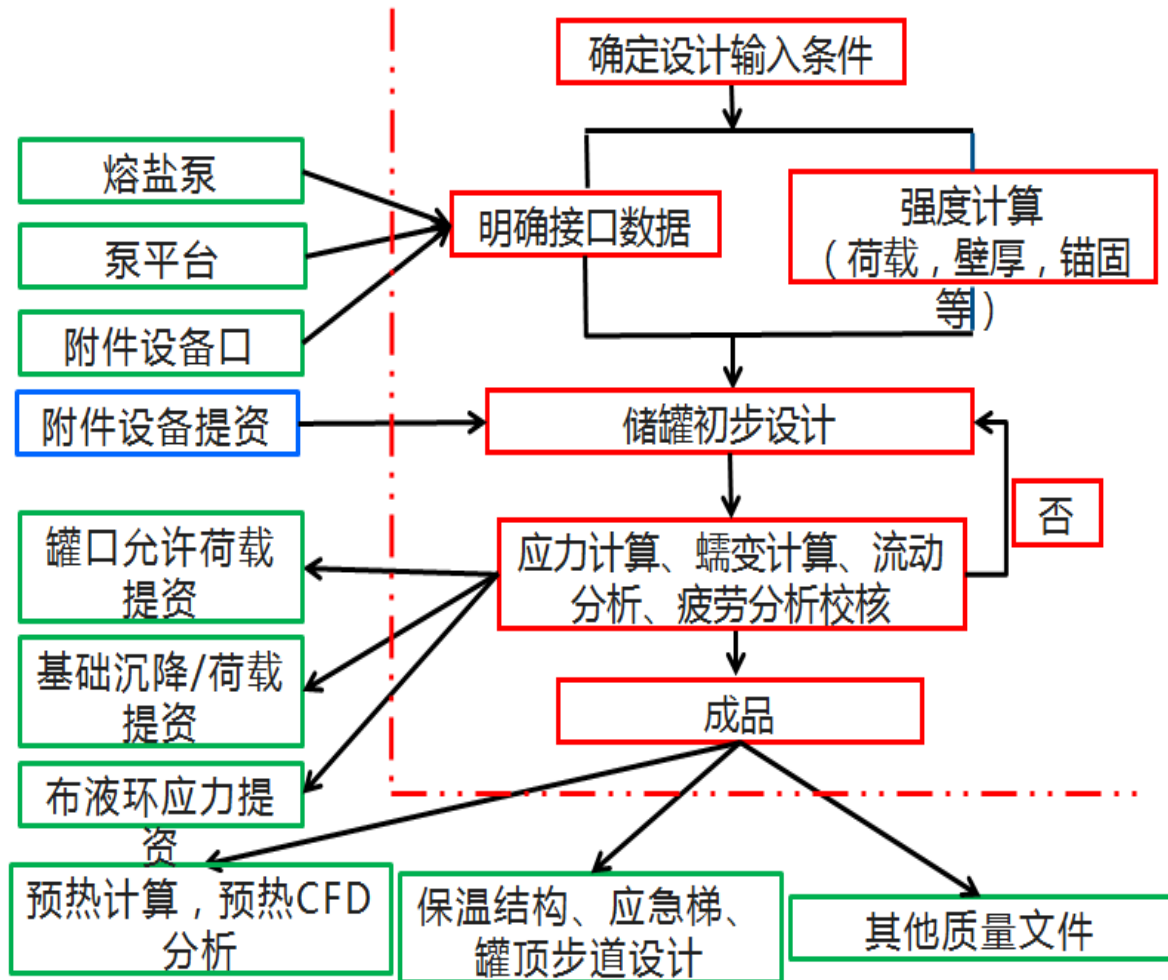
- (1) 电加热器保温：在罐底或罐壁安装电加热管，功率均匀分配，需避免加热管局部过热。
- (2) 伴热保温：管道及罐壁外侧设置伴热电缆，伴热功率按管道长度、罐壁面积分摊。

□ 储罐高度、直径确定

理论上，相同容积，当 $H/D=2$ 时，表面积最小，但 H/D 过大（ >1.5 ）会增加罐壁厚度、提升风载荷和地震风险，基础成本上升； H/D 过小（ <1.0 ）会增大罐顶面积，散热略增，且占用场地更大。

保温层性能越好， H/D 对散热的影响越弱，考虑立式熔盐泵长度等因素，一般取储罐直壁高度在**15m左右**。

2.2 熔盐储热关键设备—熔盐储罐



□ 储罐设计分为两阶段进行，即**常规设计**和**数值分析设计**。

□ **常规设计**可采用理论计算，分为定点设计法和变点设计法。**数值分析设计**需进行有限元分析校核，确保应力集中部位控制在允许范围内。

□ **常规设计**以弹性力学、板壳理论公式为基础，包括弹性失效准则、失稳失效准则；

□ **数值分析设计**以板壳理论、弹塑性力学为基础，包括：弹塑性失效准则、塑性失效准则、失稳失效准则、疲劳失效准则。

- ◆ 熔盐储罐，每天需要进行一次冲放，直径较大，温度较高。
- ◆ 储罐结构设计：掌握储罐尺寸、壁厚、拱顶、罐底计算流程，罐本体结构及预热的分析方法。

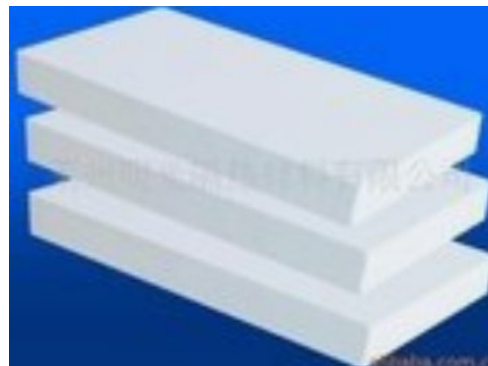
2.2 熔盐储热关键设备—熔盐储罐

□ 储罐罐顶、罐壁保温

对于冷罐/热罐，罐壁设计温度一般取工作温度+15~20度，采用硅酸铝毡+岩棉毡复合保温；冷罐采用单层岩棉毡等材料。

□ 储罐基础保温

储罐基础绝热层包括柔性基础和刚性基础。柔性基础主要采用陶粒土作为绝热层，刚性基础采用硅酸钙板和泡沫玻璃作为绝热层。



- 罐底绝热层要求绝热材料高强、耐久性好、导热系数低。常用的为陶粒，其性能指标较为离散，施工难度大，绝热层厚度较大。采用硅酸钙板、泡沫玻璃、耐火绝热砖等块材有效克服陶粒土的缺点，待实践检验并总结经验。

2.2 熔盐储热关键设备—熔盐泵

- ❑ 熔盐泵的结构主要由**动力系统、传动系统和输送系统**组成。
- ❑ **低温熔盐泵**的作用是将低温熔盐从低温熔盐储罐抽出输送到吸热器或电加热器等设备，其**扬程高，设备阻力较小**。
- ❑ **高温熔盐泵**的作用是将高温熔盐从高温熔盐储罐抽出输送到蒸汽发生系统与汽-水进行换热，其**扬程低于低温泵，但设备阻力较大**。
- ❑ 熔盐泵**泵体安装于罐顶的熔盐泵框架平台**上，其工作原理为叶轮旋转时，使泵内的熔盐产生较强的旋转运动，旋转中心的压力低，将熔盐从吸入口吸入，同时由于外围压力高，使得熔盐液体被压出，产生扬程。

1 明确熔盐介质特性：确定不同温度下的密度、粘度、熔点等。

2 计算设计流量：根据工艺需求确定，考虑10-15%的裕量。

3 根据沿程阻力、局部阻力、位差、出口压力计算泵扬程。

4 核算汽蚀余量，匹配泵型号和性能曲线。

5 计算电机功率：等于轴功率的1.1-1.2倍。



VS4泵型



2.2 熔盐储热关键设备—熔盐电加热器

- ❑ 间接电阻加热（电热管加热器）：电热元件通电发热后，通过绝缘层、高温金属管，间接与熔盐接触换热，该技术电热元件与金属保护层通过氧化镁绝缘层分开，可加热各种熔盐。
- ❑ 直接电阻加热（电极熔盐炉）：利用熔盐自身电阻，通电发热，对熔盐有特殊要求，**换热系数高**。
- ❑ 高压电磁感应加热：换热管在高压线圈产生的磁场中涡流发热，直接与熔盐接触换热，电与流体隔开，换热元件间接发热，新型磁轭结构大幅降低漏磁，**电热效率高**。

规模级别	功率范围	典型应用场景	案例示例
中小功率 (千瓦级)	360kW- 2800kW	小型供暖、中小型 化工辅助加热	冀中能源井矿集团谷电加热项目（2800kW）；SUTE11系列（360-14000kW）适配化肥 / 氧化铝工艺
大功率（兆瓦级）	1MW-50MW以上	新能源储能、大型 工业供热、火电改造	华源前线径流式电极加热技术（单机≥50MW，适配 800℃高温）；东方电热（1-20MW 单机）
超大功率 (组合级)	多台串联总 功率10MW- 1000MW	光热电站、大型火 电改造、千兆瓦级 储能	东方电热多台串联（10-1000MW） 绿储科技项目（最大100MW）



单支电热管截面



集束电热管



单组加热器



高压电磁



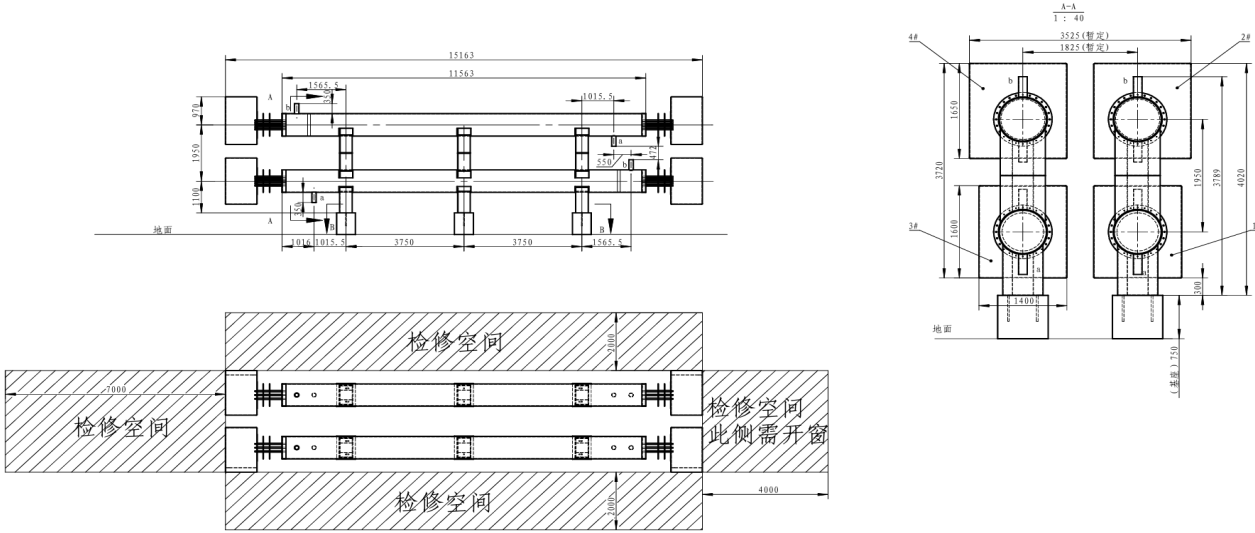
集束电热管高压接线
安全防护距离要求高

2.2 熔盐储热关键设备—电加热器

间接电阻加热（电热管加热器）参数对比

产品型号	单位	15MW电加热器	20MW电加热器	25MW电加热器	30MW电加热器
额定功率	kW	15000	20000	25000	30000
功率因数	/	1	1	1	1
电压等级	kV	6/10	6/10	6/10	6/10
尺寸	m	15*3*4	15*3.5*4	15*4*4	15*4*4.5
空载重量	t	25	28	36	41
满载重量	t	52	55	74	84
换热效率	%	99	99	99	99
设计温度	℃	580	580	580	580

以25MW电加热器为例，设备**平行两侧留有2m检修空间**，**接线盒外侧留有7m的检修空间**或**留有4m的检修空间**并开与接线盒外形尺寸相等的窗方便抽管。其他规格电加热器与其检修空间要求一致。



2.2 熔盐储热关键设备—电加热器

□ 高压电磁感应加热参数对比

高电压大功率电加热熔盐装规格表						
额定功率（MW）	10	12	15	20	25	30
进线电压（V）	6kV/10kV/35kV					
额定温度（℃）	< 565℃（最高可加热到800℃）					
额定流量（t/h） ¹	82	99	123	164	205	247
熔盐压力（1.5MPa）	< 2 MPa					
熔盐压损（100kPa）	< 100kPa					
散热方式	风冷					
外形尺寸（W*D*H）	5600*2600*4200mm	6200*2600*4200mm	6800*2600*4200mm	5600*4800*4200mm	6200*4800*4200mm	6800*4800*4200mm
重量（t）	30	35	40	55	65	75
进线电流（A） ²	579	695	868	1158	1447	1737
综合效率	96% - 98%					
功率因数	> 0.97					

注：(1) 流量按温升275℃计算 (2) 进线电压按10kV计算

长度和宽度方向各增加3米，即可满足检修需求

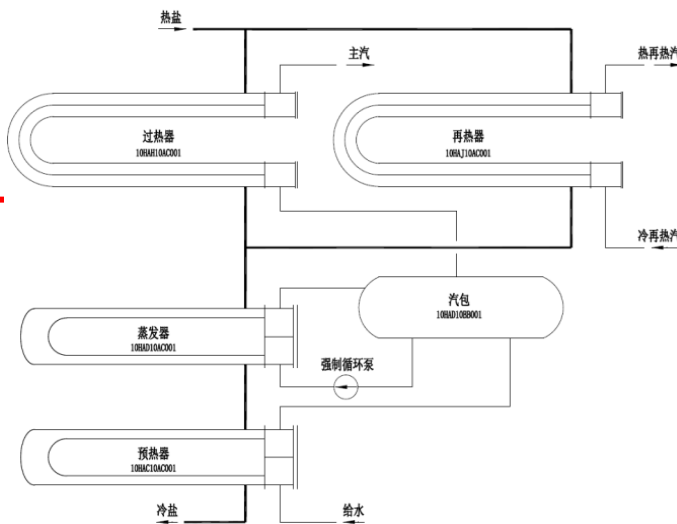
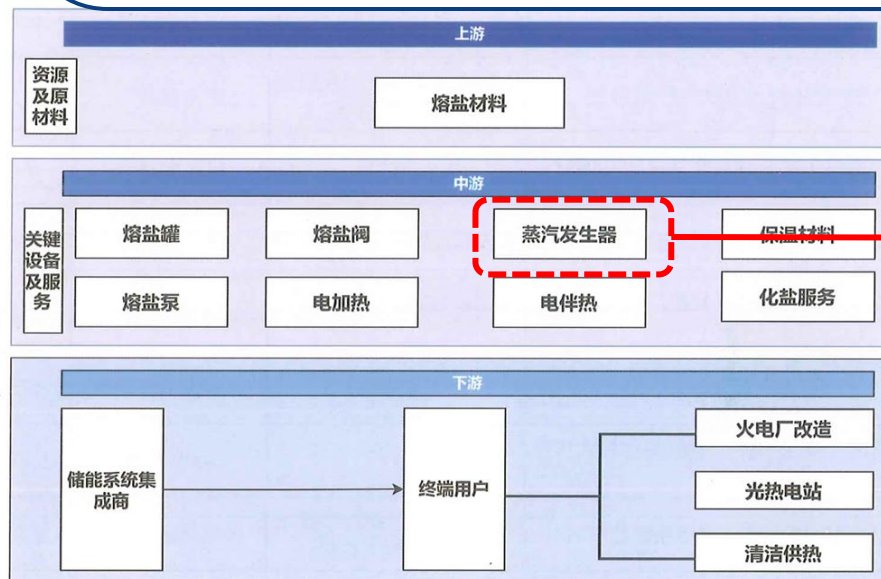
2.2 熔盐储热关键设备—电加热器

序号	项目名称	项目规模	电压等级	单机规模	类型	数量	实施年度
1	酒泉市金塔中光太阳能10万千瓦光热+60万千瓦光伏项目	20MW	6kV	20MW	电阻式	1	2024
2	新疆吐鲁番鄯善县七克台镇100MW光热发电项目	20MW	6kV	20MW	电阻式	1	2024
3	吉西基地鲁固直流140万千瓦外送项目	40MW	10kV	20MW	电阻式	2	2024
4	鲁能阜康市多能互补（暨新能源市场化并网）项目	20MW	6kV	20MW	电阻式	1	2024
5	中广核新能源青海德令哈光储热一体化200万千瓦（光热20万千瓦）项目	100MW	6kV	25MW	电阻式	4	2024
6	国能青海公司海南青豫直流二期10万千瓦光热项目	20MW	6kV	20MW	电阻式	1	2024
7	龙源电力青海龙源新能源有限公司龙源青海格尔木50万千瓦光伏和熔盐储能项目	150MW	6kV	25MW	电阻式	6	2024
8	海西州多能互补集成优化示范工程电热储能改造项目	25MW	6kV	25MW	电阻式	1	2025
9	长源电力荆州公司熔盐储能项目	40MW	6kV	18MW/ 2MW	电阻式	4	2025
10	玉门“光热储能+光伏+风电”示范项目10万千瓦光热储能工程	10MW	6kV	10MW	电磁式	1	2024
11	龙源新能源敦煌70万千瓦光热+项目	12MW	6kV	12MW	电磁式	1	2025
12	大唐石城子“光伏+光热”一体化清洁能源示范项目	12.5MW	35kV	12.5MW	电磁式	1	2025
13	中广核阿里雪域高原“零碳”光储热电示范项目50MW光热发电工程项目	205MW	10kV	10/5MW	电磁式	20+1	2025
14	华能热工院华润菏泽电广灵活性改造项目	1MW	6kV	1MW	电磁式	1	2025

2.2 熔盐储热关键设备—SGS系统（以塔式光热盐水换热为例）

SGS应按照**快速启动**、**频繁启停**等特性进行相关设置。

- 预热器、蒸发器、过热器、再热器，分别实现对汽水的预热、蒸发、过热和再热。
- 换热器选用管壳式，采用串联方式连接，且设置MI电伴热及熔盐紧急排放系统。
- 汽包用于汽水分离，将饱和蒸汽送入过热器，并保持汽水混合物的饱和状态，存水保证汽水循环中的瞬态工况（快速变负荷、汽轮机停机）。给水经预热送到汽包。汽包设置连续排污、定期排污、化学加药、取样管路及氮气管线。



过热器：产生过热蒸汽，进入汽轮机高压缸。

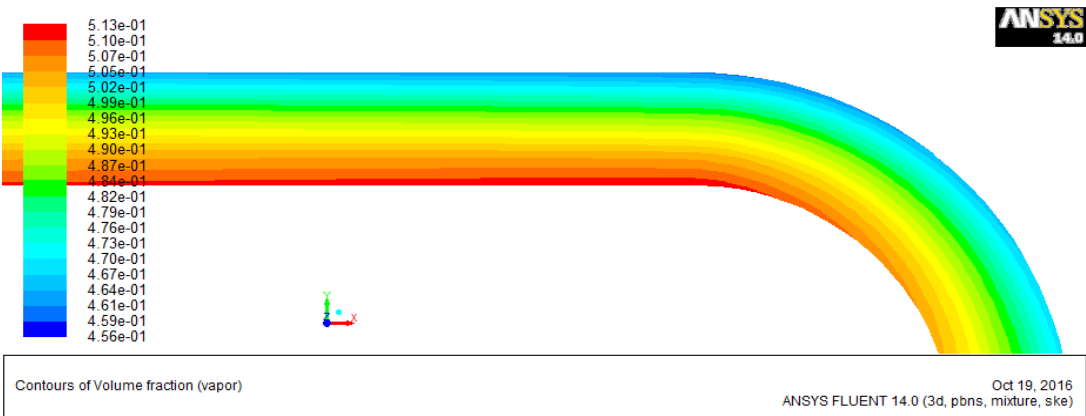
再热器：使冷再热变为热再热蒸汽，然后进入汽轮机中压缸。

蒸发器：从蒸发器（含汽包）中蒸发沸腾，汽水分离产生饱和汽。

预热器：给水加热至准饱和。

2.2 熔盐储热关键设备—SGS系统（以塔式光热盐水换热为例）

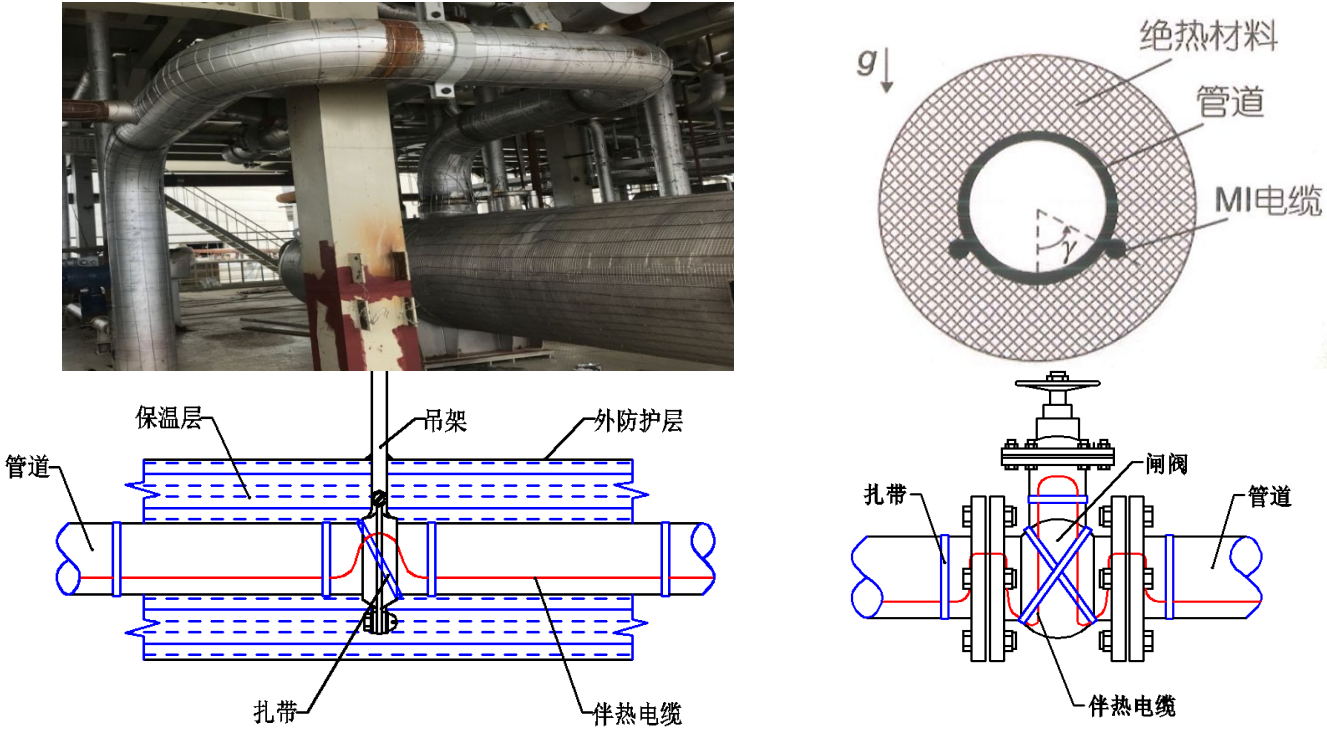
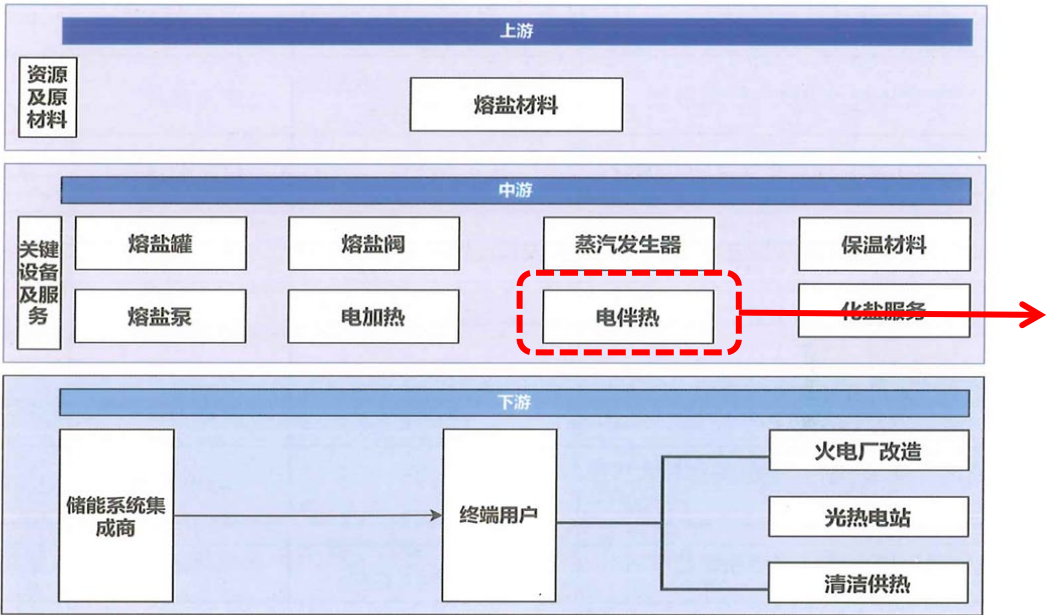
- ❑ **过热器、再热器**：蒸汽管侧、熔盐壳侧。蒸汽升温约200℃以上，传统管壳式换热器，单个管板上下**两侧温差过大**造成高热应力，容易导致管板与换热器焊缝**开裂**而发生**泄漏**，降低蒸汽发生系统的可用率。
 - ❑ 过热器、再热器、预热器采用**发夹式结构**，设计管束进口与出口分别位于**不同**的管板上的**U管U壳**结构，可有效**解决**管板**温差**过大问题，同时有效的**适应**SGS**频繁启停**的特点，增强运行的可靠性。
-
- ❑ **蒸发器**：循环方式，自然与强制。
 - ❑ **强制循环**：允许有较高的阻力，布置有利。汽包布置有夹套，上升汽水混合物从汽包顶部进入汽包夹套，**汽包上下壁温度一致**，使系统起停与变负荷均较快。
 - ❑ **自然循环**：工质重度差较小，一般从汽包中部进入，无法对汽包上下壁进行均匀加热，限制起停速度和负荷变化率。相对每天的热态启动运行，推荐自然循环可是完全满足。



容器名称	过热器、再热器、预热器	
容器类别	III	
结构型式	卧式（发卡式）	
参数	壳程	管程
程数	1	1
介质	熔盐	蒸汽

2.3 熔盐储热关键技术—防凝保温

- ❑ 为了保持熔盐在所需的温度范围内，通常采用伴热保温技术。近年来，矿物绝缘加热电缆因其高效、安全、长寿命等优点，逐渐成为熔盐伴热保温的理想选择。为了保证系统的安全稳定运行，储罐、管道、阀门、换热器等熔盐介质流通的设备都需加装**电伴热**装置。一般全场**熔盐管道、设备阀门**均会铺设**MI电伴热带**，系统中**熔盐温度低于260℃**时，管道电伴热系统打开对其进行加热。
- ❑ 电伴热技术主要通过电能转化为热能来补偿熔盐管道在运行过程中的热量损失，保持熔盐的温度高于其凝固点。



2.3 熔盐储热关键技术—防凝保温（以塔式光热为例）

电伴热总体设计要求

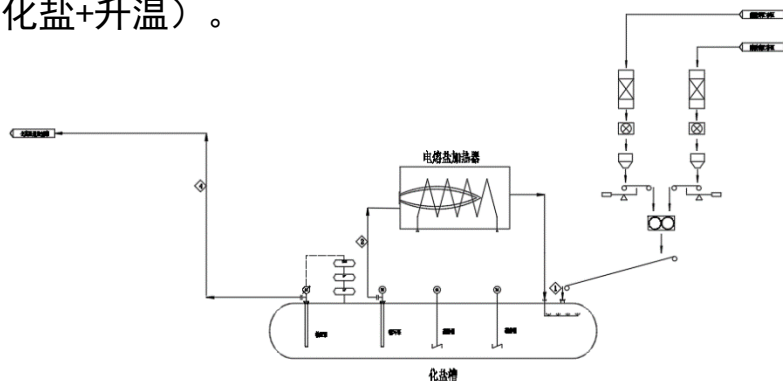
温度要求	• 高温管道，设计温度575℃ • 低温管道，设计温度350℃
状态要求	• 要求电伴热设备保证被伴热管道和设备内的熔盐介质在任何情况下都100%维持于液态
均匀性要求	• 每个回路内，最高温度点和最低温度点之间的温差不得超过25℃
海拔修正	• 电伴热设备绝缘和温升等参数要注意高海拔适用性修正
寿命要求	• 在正常运行条件下连续长时间运行，设计寿命应达到25年以上

电伴热运行模式

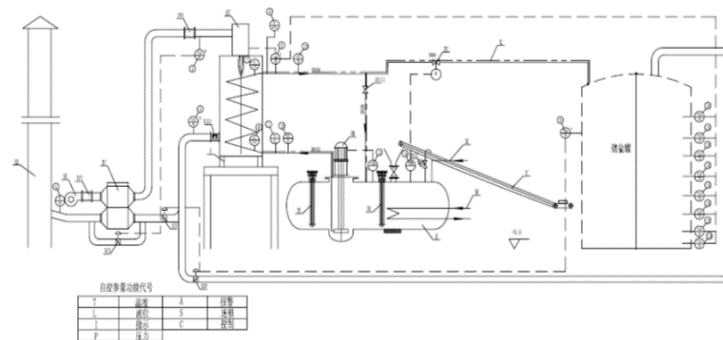
预热模式	保温模式	热盐泵模式
➤对于熔盐管道、阀门和泵，要求能够在24小时内从多年平均气温预热至285℃。 ➤对于熔盐换热器和疏盐罐，其设计加热功率由保温模式确定。	➤补偿管道、阀门、设备及仪表的散热损失，使其温度始终保持在265℃以上。 ➤当温度降低至低于系统设定的安全值时（265℃），电伴热系统开启，在将温度加热至285℃后，电伴热系统关闭。	➤热盐泵及其附属管道在运行前温度应达到400℃以上，以防止热熔盐流过产生大的热应力。 ➤对于热盐泵及其附属管道的电伴热，还要求其具有将温度进一步加热至400℃的能力。

2.3 熔盐储热关键技术—化盐

- 电化盐方案主要采用设备有：**电热风炉**（储罐预热用）+**化盐罐**（含化盐槽+化盐泵）+**电熔盐加热器**（化盐+升温）。



- 天然气化盐方案主要采用设备有：**燃气热风炉**（储罐预热用）+**化盐罐**（含化盐槽+化盐泵）+**燃气熔盐炉**（化盐+升温）。



1) 预热：电/燃气热风炉产生的热风利用高温风机进行强制循环至储罐内，逐步升温至约320°左右，为下一步注入液态熔盐做准备。

2) 固态熔盐融化：使用上料装置将固态熔盐通过化盐槽导入化盐罐内，第一罐固态盐采用电加热方式融化成液体。后续采用化盐泵将液体盐输送进**电熔盐加热器/燃气熔盐炉**进行加热并且在化盐罐及**电熔盐加热器/燃气熔盐炉**之间进行循环，根据化盐罐内液体盐温度和液位调整输送至储罐的阀门大小，保证固态熔盐正常加注及液态盐持续进入熔盐储罐的过程。

3) 熔盐升温：液态盐升温时启动高温熔盐储罐内的高温熔盐泵，将储罐内的液态盐通过管道输送至化盐系统**电熔盐加热器**内进行加热，然后回到高温熔盐储罐，重复上述液态盐循环过程，使液态熔盐温度逐步升高，完成熔盐升温。

2.3 熔盐储热关键技术—化盐

技术比较	优点	缺点
天然气化盐	1) 技术成熟，目前应用较多； 2) 可靠性高，不受电网停电影响进度； 3) 施工期电气配置不需要增大。	1) 化盐过程中存在安全隐患，需要设置警戒区，同时影响其它工段施工，共和项目警戒区如下图： 2) 天然气燃烧过程中有NOx排放，有环保压力，可能需要增设一套SCR脱硝装置。
电化盐	1) 无安全隐患，无需设置警戒区，不影响其它工段施工； 2) 无NOx排放，无环保压力。	1) 施工期电气配置需要增大； 2) 目前在熔盐升温应用较多，化盐应用较少。

序号	名称	天然气化盐方案		电化盐方案			备注
		规模	造价（万元）	规模	造价1（万元）	造价2（万元）	
1	燃气热风炉/ 电热风炉	2000kw	50	2000kw	30	30	
2	化盐罐	70m³	250	70m³	250	250	含化盐槽、 化盐泵
3	燃气熔盐炉/ 电熔盐加热器	50t/h	340	10MW	500	/	含控制系统
4	天然气费/ 电费	32万m³	112	300万 kwh	111.66	111.66	储罐预热
	天然气费/ 电费	108万m³	378	1050万 kwh	390.81	390.81	固态盐融化
	天然气费/ 电费	26万m³	91	250万 kwh	93.05	93.05	升温
	总计		1508.2		1359.5	859.5	

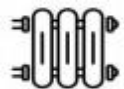
- ❑ 以三峡某光热项目为例，对天然气化盐和电化盐方案做经济性对比：

❑ 1、青海LNG单价按7.4元/kg，折算标方单价为5.23元/Nm3；（1kg=1.41Nm³）

❑ 2、按格尔木市35kV大工业用电，峰、谷、平分别按：0.5815元/kwh、0.3722元/kwh、0.1629元/kwh；本次测算，造价1按平价0.3722元/kwh，造价2去掉电加热器设备费，同样按平价0.3722元/kwh测算。

❑ 针对光热、熔盐储热项目化盐方案，要综合考虑设备运输，电源稳定、项目周期等因素进行设置。

三、工程实践及典型案例



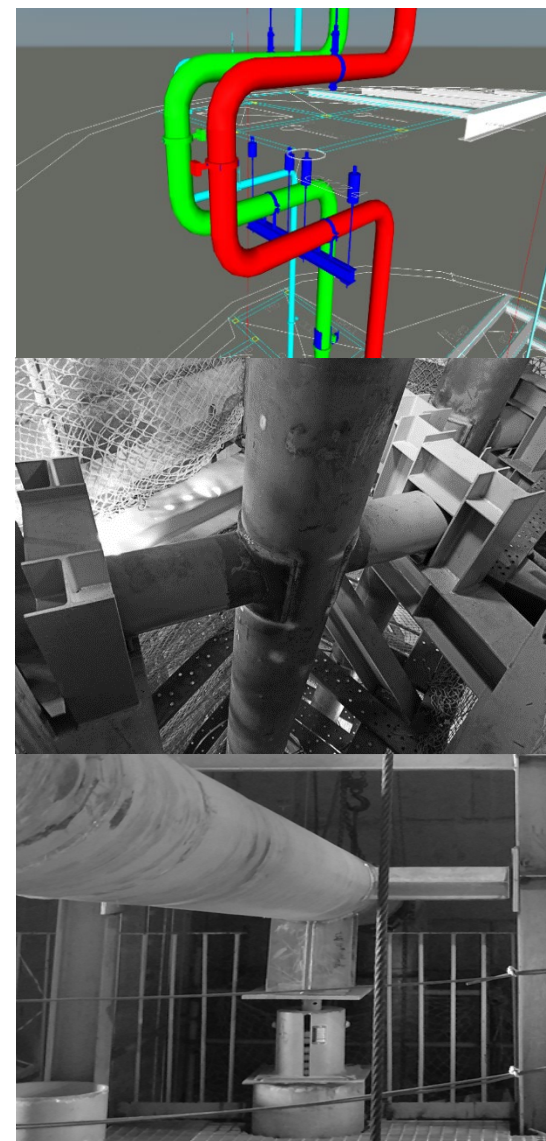
3.1 熔盐储热系统——熔盐管道

光热电站熔盐管道运行中：存在**焊接吊（支）座管部撕裂**和熔盐管道部分**支吊架滑落**情况，经过分析主要有以下原因：

- 熔盐管道温度高，管线长，运行时管道**热位移大**。
- 熔盐管道焊接吊（支）座管部与钢梁之间焊接结构型式，**无法释放**管道径向膨胀引起的**交变热应力**，同时部分管部处**焊缝薄弱**，使焊接质量不达标，导致座管部撕裂；
- 熔盐管道部分支吊架**底板宽度不足**，导致个别支架脱载，偏心拖拽使部分支架完全滑落；
- 由于熔盐密度大，具有**较大的流动激振**，过多的弹簧支吊架在交变热应力下容易失效；

优化解决方案

- 熔盐管道相关支吊架应根据情况尽可能设置一定数量的导向，固定、限位支撑；
- 固定支架需进行特别加固处理，保证相关焊缝达标；
- 增加熔盐管道的**监测**频率并及时复位。



3.2 储罐设计与工程实践

熔盐罐基础多采用**环墙式基础**，基础内依次设置砂垫层、耐热混凝土层、隔热层和底板；隔热材料可采用**板材**（**纳米硅酸钙板**）或**散体陶粒形式**，具体形式需根据现场条件优化方案确定。

（1）隔热材料：**硅酸钙板**

- 硅酸钙板隔热性能很好、施工方便（逐层铺砌）、抗压强度高。自身密实板材，无需压实；
- 整体基础可埋深浅，且板材施工具有施工快速，节约工期的优点，但同时其需做好防水防雨的缺点。
- **要解决的问题**：如何**防雨防雪**

（2）隔热材料：**陶粒**

- 陶粒，散体隔热性一般，对于35m以上大直径储罐，施工需要大型机械逐层压实，且压实系数很难到达设计要求；
- 陶粒摊铺、压实要求：我院技术控制双均匀要求：a每层陶粒的铺填，应拌和均匀；b每层陶粒的压实系数，应均匀；
- 对于陶粒方案，重新设计总结出“**分格舱**”设计方法和施工措施。充分保证陶粒方案的压实度，保证安全可靠。
- **要解决的问题**：如何**均匀压实**



3.3 熔盐泵平台振动

光热项目熔盐泵平台有横跨式、悬挑式、钢结构形式、混凝土钢结构混合形式等，这些结构形式不同程度存在熔盐泵在不同工况下有**振动问题**，通过相关项目实践与数据整理分析主要存在：

- 熔盐泵管道系统**存在较多弯头**，大流量、高密度、高速度、高动能、高动量的熔盐在流动时遇到**弯头产生反作用力，形成激振源**，是冷泵振动和管路系统产生晃动的影响因素之一；
- 设计局限性：仅考虑了熔盐泵在额定频率下的刚度矩阵，导致泵支座处构件的刚度构成单一，在激振力作用下，振动很大，导致**平台及设备整体晃动**，无法满足熔盐泵从零至额定频率整个动态的刚度响应；
- 立式长轴熔盐泵支架平台设计**经验不足、动力学计算不充分**，存在建设电站参考借鉴，冷泵振动存在一定共性问题；
- 熔盐泵本身支架刚度不足。





➤ 常见电伴热故障及解决措施分析

现场常见故障		措施
电气故障	伴热回路过长	复核回路电气参数、电气元件选型是否正确
	断路器损坏	更换断路器
	接头损坏、伴热带损坏、接线盒端子短路	进行绝缘测试，查出故障并修复
伴热带功率过低或不发热	没有供电电压或电压过低	检查回路电压
	电气连接部分断开	检查电气连接处并修复
	伴热带受潮	更换伴热带
	管道设计温度超过伴热带耐受温度导致伴热带部分损坏等	检查管道设计温度，修复损坏部分伴热带
伴热带功率正常，温度达不到要求	动力电缆压降过大导致伴热带供电电压偏低	调整动力电缆规格，减少压降
	温控器故障或设定温度有误	更换或重新设定
	伴热带在阀门等附件上裕量少	增加伴热带裕量
	温度传感器安装位置不正确	重新调整安装位置

启动前检查与预热流程

伴热系统检查

启动前必须确认熔盐管道、阀门、泵及储罐的伴热系统正常运行，**确保系统温度高于熔盐凝固点一定温度**，防止局部凝固。

液位与阀门确认

检查冷热盐罐液位是否充足，确保阀门处于正确启闭状态，特别是主循环回路阀门必须开启，避免泵空转或超压。

冷热态启动差异

冷态启动需用电加热器缓慢升温，控制速率 $\leq 50^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ ；热态启动则重点检查伴热和循环泵，确认无凝固堵塞后快速启动。

逐步建立循环

启动时先以小流量循环，检查系统有无泄漏、泵运行是否平稳、仪表显示是否正常，待稳定后再逐步提升至额定流量。

能量输入控制

在太阳能光热电站中，待集热场达到一定温度后，缓慢将热量导入系统，避免热冲击，确保熔盐与热量平稳换热。

计划停机流程

计划停机时，逐步停止能量输入，优先回收高温熔盐至热盐罐，使用压缩空气或蒸汽吹扫管道，排空残盐，保持伴热系统运行。

紧急停机要点

紧急停机时，立即触发停机程序，维持伴热，利用余压和重力排空熔盐，若无法排空则标记管段待处理。

温度与端差监控要点

1

高低温罐温度监控

盐罐出口温度必须始终高于熔盐凝固点，防止泵入口堵塞，确保系统正常运行。

2

熔盐泵平台振动监控

熔盐泵的平台监控要重点与熔盐泵的启停、升降负荷及共振点等紧密配合优化运行策略。

3

换热器端差监控

监控熔盐与工质进出口温差，端差增大可能意味着换热面结垢或堵塞，需及时处理。

流量液位与压力联动监控

1

熔盐流量监控

熔盐流量需与能量需求匹配，流量过低可能导致换热器出口熔盐温度过低，有凝固风险；流量过高则增加泵耗，影响系统效率。

2

储罐液位监控

实时监控冷热盐罐液位，需保持在安全范围内，同时作为预测电站后续时段出力重要指标。

3

储罐接口位移和基础温度监控

3.7 典型应用案例——太阳能热发电

✓ 熔盐储热在太阳能热发电站中的应用

- 光热发电技术通过聚光系统将太阳辐射聚焦于小面积区域，有效捕获太阳辐射能并转化为高温热能，进而加热熔盐，将能量储存为**高温热能**。随后通过与水换热产生蒸汽驱动汽轮机发电，实现能量的转化与利用。
- 熔盐储热系统核心作用在于弥补太阳供能的**不稳定性**。当太阳能供应充足时，光热发电系统可连续产生电力；而在夜晚或阴天，系统能通过释放储存的热能持续发电，从而实现**全天候稳定供电**。
- 截止2025年7月，我国已建成投运光热发电项目18个，规模合计1400MW，这些项目均配备了熔盐储能系统，储热时长6-16h。

已建成项目区域分布		已建成项目技术路线分布	
青海省	400MW	塔式	1060MW
甘肃省	610MW	槽式	190MW
内蒙古	100MW	菲涅尔式	150MW
新疆	250MW	碟式	
西藏	40MW		
合计	1400MW	合计	1400MW

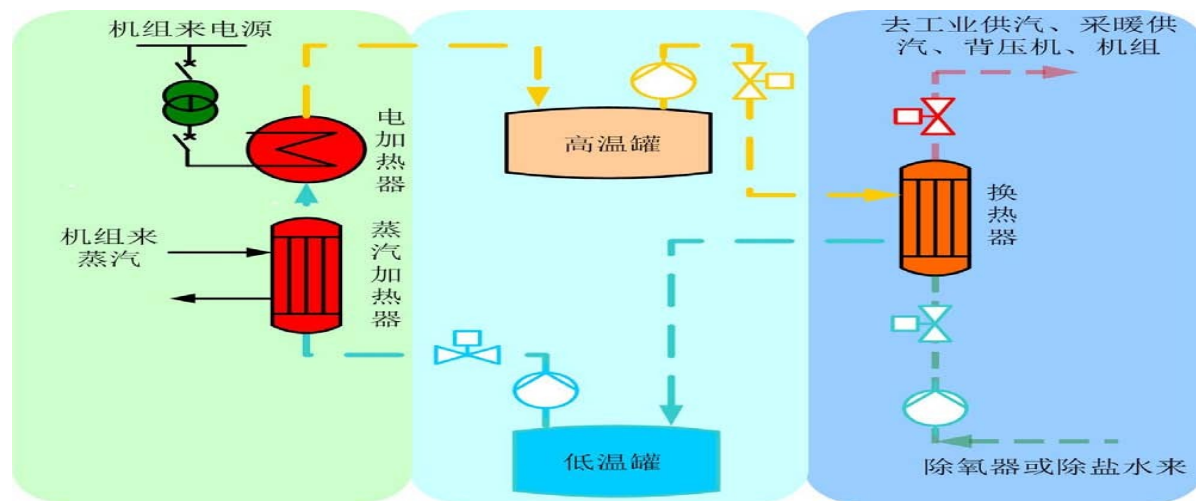


3.8 典型应用案例——火电灵活性改造

案例一：80MWh熔盐储热方案（包括40MW熔盐电加热器+65t/h蒸汽发生系统+高低温熔盐储罐）

- 原机组供汽能力不足，增设熔盐储热系统，实现调频、调峰、安全供热的整体解决方案。
- 储热系统储热过程运行采用三元熔盐为储热介质，使用电厂高厂变作为电源，采用电加热器对熔盐进行加热，通过低温熔盐泵将熔盐从低温熔盐罐（约230℃）输送至熔盐电加热器，经熔盐电加热器至385℃后，送至高温熔盐罐进行储存，熔盐电加热器功率为40MW。
- 储热系统放热时，通过高温熔盐泵将熔盐从高温熔盐罐输送至SGS（蒸发换热）系统，与水进行换热产生1.1MPa，260℃蒸汽，经工业供汽母管送至供热蒸汽汇集箱（分汽缸）。

- **双罐熔盐：**高低温熔盐储罐为立式圆筒形储罐，外形尺寸为10m×9m（直径×直段高度）。
- **熔盐泵：**长轴液下泵，变频控制，罐顶安装，其中，低温熔盐泵3台，2运1备；高温熔盐泵3台，2运1备。



3.8 典型应用案例——火电灵活性改造

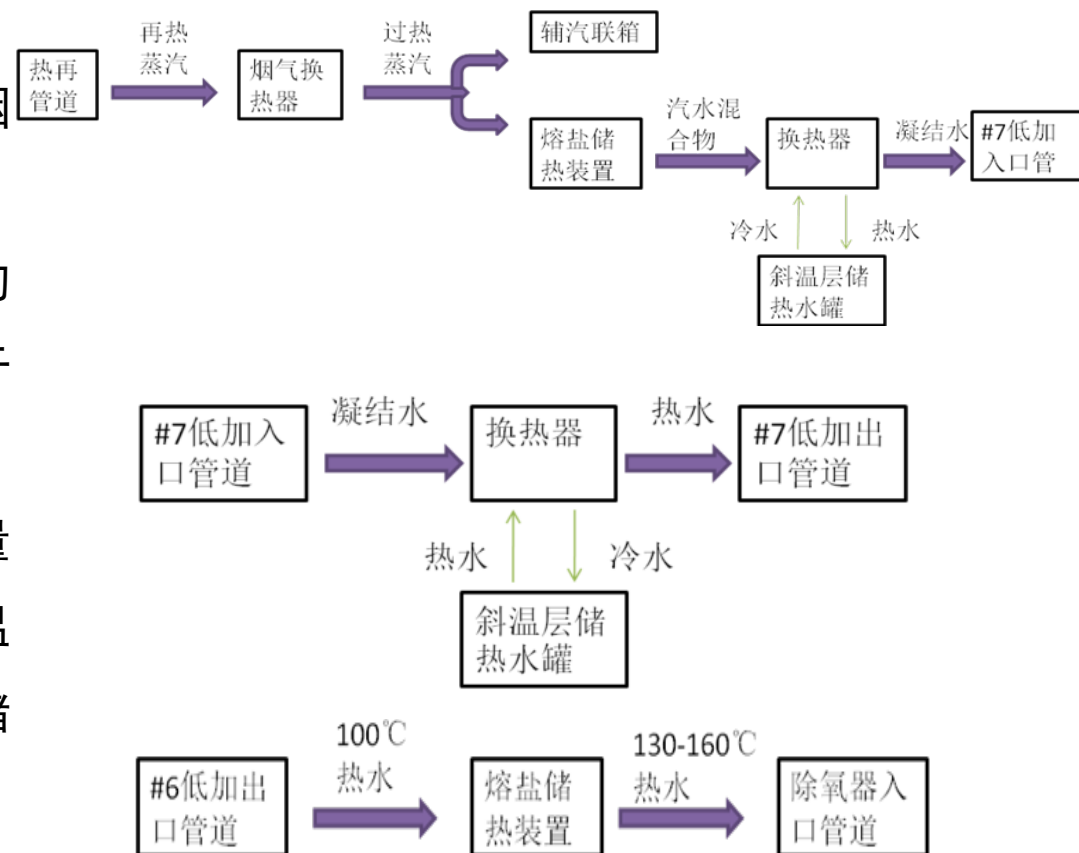
案例二：储热容量为80MWh储热系统（熔盐+热水）和改造1套SCR入口烟气加热系统

➤ 解决低负荷SCR入口烟温低的问题，使机组具备低负荷调峰能力

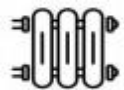
利用**再热蒸汽（565℃/4MPa）**的显热加热脱硝入口烟气，将烟气温度的加热到290℃以上，达到宽负荷脱硝的目的。

烟气加热器出口管内工质仍为过热蒸汽。从烟气加热器出来的过热蒸汽（350℃/4MPa）分成两部分，一部分进入辅汽联箱用于机组用汽，另外一部分进入熔盐储热装置中蓄热。

过热蒸汽在熔盐储热装置中蓄完热变成汽水混合物，部分热量储存在熔盐储热装置中。汽水混合物进入储热换热器中加热斜温层储热水罐中的冷水从而完全冷凝，这部分热量储存在斜温层储热水罐中。**汽水混合物变成凝结水后排入#7低加入口管道中。**



四、公司介绍



5.1 中电建西北院概况

世界五百强企业——中国电建集团重要成员企业之一。

我国首批成立的大型勘察设计企业，持有工程勘察、工程设计、工程监理、工程咨询资信评价等“四综甲”资质资信。拥有水利水电工程、电力工程、市政公用工程施工总承包一级资质及支持多业务发展的一系列行政许可及信用评价。

1950



企业实力

2024年ENR中国工程设计企业60强第19位

2023年陕西省百强企业排名第43位

国家级研发中心7个

5.2 光热业务主要业绩及获奖

- 中电建西北院深入研究太阳能热发电技术、“风光热储”多能互补、“源网荷储”一体化等前沿技术，积极参与西部地区新能源开发。承担了**6个**EPC项目及全阶段设计**国内首个**200MW项目EPC，国内首个三塔一机350MW光热集热储热系统设计、**49项**可研设计**2个**国家级与省部级科技项目**10个**集团科技项目和**5个**省部级科研基金项目主持、参与及评审标准编制**30余项**。



6个EPC
8个全阶段
设计项目



国内首个
200MW光热
项目EPC



6个规划设计
49个可研设计



2个国家级
与省部级
科技项目



10个集团科技项目
5个省部级科研基金
项目



主持、参与
及评审标准
编制**30余项**

- 发表SCI、EI等高水平论文**50余篇**，授权专利**50余项**，荣获各类省部级奖励**30余项**。
- “塔式太阳能安全高效光热转化与存储关键技术及应用”获**陕西省科学技术进步一等奖**
- 中电建青海共和50MW熔盐塔式光热发电项目获**电力行业优秀工程设计一等奖**，**中勘协设计三等奖**。
- “智能型塔式光热电站性能优化与运行提升关键技术”获**中国可再生能源学会科学技术奖一等奖**



谢谢

