

DOI: 10.19666/j.rlfed.202210230

# 熔盐储能在新型电力系统中 应用现状与发展趋势

左芳菲, 韩伟, 姚明宇  
(西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

**[摘要]** 储能是新型电力系统的关键核心技术, 熔盐储能作为一种中高温传热蓄热方法, 因具有储能密度高、稳定性好等优点, 广泛应用于太阳能光热系统、调峰调频、绿电消纳等新能源领域。但目前对熔盐储能系统中的核心部件如储罐、熔盐电加热器、熔盐换热器等设备的研究普遍基于太阳能热发电技术的需求开展, 针对其他应用场景的研究尚不够充分。在不同应用场景下, 熔盐的使用温度区间、加热及换热方式都有区别。概述了熔盐储能关键技术的研究现状和技术成果, 研究了熔盐储能技术的发展路径, 提出了其在新型电力系统中的应用领域, 并针对不同应用场景, 提出了相应的熔盐选型参数、储罐及换热器类型。

**[关键词]** 熔盐储能; 熔盐储罐; 太阳能光热; 调峰调频; 绿电供热

**[引用本文格式]** 左芳菲, 韩伟, 姚明宇. 熔盐储能在新型电力系统中应用现状与发展趋势[J]. 热力发电, 2023, 52(2): 1-9.  
ZUO Fangfei, HAN Wei, YAO Mingyu. Application status and development trend of molten salt energy storage in novel power systems[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(2): 1-9.

## Application status and development trend of molten salt energy storage in novel power systems

ZUO Fangfei, HAN Wei, YAO Mingyu  
(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Energy storage is the key technology of novel power system. As a medium and high temperature heat transfer and heat storage fluid, molten salt has the advantages of high heat capacity and good stability. It has been widely used in concentrated solar power (CSP) system, peak and frequency modification, green electricity consumption and other new energy fields. However, at present, the core components of molten salt energy storage system, such as the tanks, the electric heaters, the heat exchangers, and so on, are studied and developed based on the demand of CSP technology. The other application scenarios are not sufficiently considered. However, in different application scenarios, the working temperature range, heating and heat exchange methods have different requirements on molten salt. Therefore, the research status and technical achievements of the key technologies of molten salt heat storage are summarized. The development path of molten salt energy storage technology and its application in novel power systems are studied. According to the different application scenarios, the requirements on molten salt parameters and the suitable types of storage tanks and heat exchangers are illustrated.

**Key words:** molten salt heat storage; molten salt storage tank; CSP; peak and frequency shaving; green electricity heating

“双碳”背景下, 构建新型电力系统是保障我国能源安全的战略任务。光伏光热、风电水力等新能源存在间歇性和不稳定性, 易造成能源供需不匹

配, 需要配合储能技术。熔盐储热是一种安全水平较高的储能方式, 利用硝酸盐等熔盐作为传热介质, 通过熔盐的储热和放热循环来存储和放出能

收稿日期: 2022-10-15 网络首发日期: 2022-12-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1501004)

Supported by: National Key Research and Development Program (2018YFB1501004)

第一作者简介: 左芳菲(1999), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为熔盐储能, zuofangfei2021@126.com。

量,实现能量的有效迁移。熔盐储能的关键核心技术和设备包括熔盐、电加热器、储罐以及换热器等,广泛应用在以下3个方向:太阳能光热发电、耦合火电机组调峰调频、耦合新能源绿电供热。

表1为熔盐储能不同应用场景对比。针对不同应用场景,熔盐的使用温度区间和换热过程均有较大差异。现阶段以解决光热电站的技术需求为主,针对熔盐储能耦合火电机组调峰调频、绿电供热等领域的系统性研究严重不足。

表1 熔盐储能不同应用场景对比

Tab.1 Different application scenarios of molten salt energy storage technologies

应用场景	熔盐使用温度区间/℃	换热过程
光热发电系统	290~565	熔盐-蒸汽
耦合火电机组调峰调频	140~650	熔盐-蒸汽、蒸汽-熔盐、电-熔盐
绿电供热	140~450	熔盐-蒸汽、电-熔盐

## 1 熔盐储能关键技术

现有熔盐的选型主要为耐高温熔盐和低熔点盐。耐高温熔盐如技术成熟的Solar盐,最高工作温度达565℃,适合于高参数光热发电或火电机组储热调峰系统。低熔点盐通常为多元混合盐,熔点低于240℃,如工程中常用的Hitec盐等,能降低熔盐凝固的风险,适用于较低参数的系统。

熔盐储罐主要有单罐、双罐、多罐系统。单罐熔盐储能系统结构简单,成本较低,适用于小面积

生活供暖等领域,但存在斜温层导致蓄热效率降低的问题<sup>[1]</sup>。双罐系统包含冷罐与热罐,通过冷热熔盐分离并在2罐中循环换热,避免了斜温层问题,技术风险也相对较低。在双罐的基础上还可进一步增加储罐数量,形成多罐系统,增大储热量。如哈密50 MW熔盐塔式光热发电项目首创了双热罐、一冷罐的系统配置,提高了机组的可靠性和灵活性。

实现大规模熔盐储能的关键是兼具低成本、可实施性的高电压等级熔盐电加热器的研发。目前,熔盐电加热器主要有电阻式、电极式、感应式3种形式。现有技术普遍为380 V或690 V的低压电阻式加热器,主要应用于光热发电场景。若用于电加热熔盐的场景如绿电供热,则存在高压绿电输入与低压加热器不匹配而产生较高变电成本的问题。目前,市面上总体缺乏成熟的高电压熔盐加热器。

传统的熔盐换热器有管壳式换热器和套管式换热器。管壳式换热器是目前熔盐换热器的主要形式,许多研究者已通过实验和计算给出了推荐的管程、壳程换热关联式<sup>[2-3]</sup>,对其传热特性进行了数学描述。套管式换热器具有结构简单、能耐高压的优点,在工程中也有应用。与上述传统换热器相比,以印刷电路板换热器为代表的紧凑式换热器效率高且能承受高温、高压工况,在新型电力系统如熔盐储能与新型动力循环的耦合中具有很大优势<sup>[4]</sup>。表2整理了熔盐关键技术的对比、分类情况,以及不同的应用场景下熔盐、储罐、加热器选型的区别。

表2 熔盐储能技术整理

Tab.2 Different types of molten salt heat storage technologies

关键技术	分类	优点	局限	研究进展	应用范围
熔盐	耐高温熔盐	扩大温域,支持更高参数的蒸汽运行	广泛选择的Solar盐工作温度不能超过600℃	碳酸盐、氯化盐 <sup>[5]</sup> 工作温度能够超过600℃	发展高参数光热电站
	低熔点盐	扩大温域,增加光热电站的运行天数 <sup>[6]</sup>	温度上限较低,储热容量受限	主要通过混合多元熔盐来制备低熔点盐 <sup>[7]</sup>	核电等低参数电站
储罐	单罐	结构简单,投资成本低	斜温层降低系统的有效储热量 <sup>[8]</sup>	模拟、预测罐体内部温度分布和斜温层的移动 <sup>[9]</sup>	槽式或小型光热发电系统
	双罐	技术风险相对较低	熔盐冷罐凝固风险更大	双罐直接或间接系统与新型动力循环的结合	大部分商业光热电站
	多罐	提高机组可靠性、灵活性	投资成本高	低、中、高温3罐熔盐系统能匹配不同加热段的换热能力 <sup>[10]</sup>	局部应用于中间再热式机组
加热器	电阻加热器	热惯性小、调温速度快、控温精度高	高电压电阻式在熔盐加热领域尚无工业实例	实验研究电阻丝加热熔盐过程中的自然对流特性 <sup>[11]</sup>	应用广泛
	电极加热器	电压等级高(6 kV)	加热炉中温度骤变,易导致连接管道快速老化 <sup>[12]</sup>	最新成果功率可达50 MW以上,可加热熔盐达700℃ <sup>[13]</sup>	多结合电极锅炉使用,目前应用较少
	感应加热器	加热速度快,避免电阻加热中电阻丝烧断的问题	功率因数一般较低	最新成果6 kV/500 kW电磁加热器,电热转换效率可达97% <sup>[14]</sup>	目前应用较少
换热器	管壳式换热器	结构坚固、适应性强	熔盐直接用于传统直管换热器存在安全隐患	通过翅片管、U型管、蛇形管、螺旋盘管等形式优化	应用广泛
	印刷电路板式换热器	紧凑高效,使用温度区间大	加工工艺耗费大,成本高	增加肋片,强化换热性能 <sup>[15]</sup>	高参数光热和新型动力循环方向

## 2 熔盐储能在光热领域的应用

太阳能光热发电是新型电力系统的中坚力量，拥有并网无障碍、连续发电调节能力强的优势。光热电站将太阳能以热能的形式存储在熔盐中，后续利用熔盐加热给水获取蒸汽，优势在于储能容量大，对地理环境要求低，建设规模可达 10 GW 以上。光热型熔盐储能电站的技术研究重点是如何降低其成本、提高安全性。

大部分光热电站使用熔盐双罐系统，光热和熔盐的耦合形式分为间接和直接 2 种。双罐熔盐储热系统如图 1 所示<sup>[16-17]</sup>。

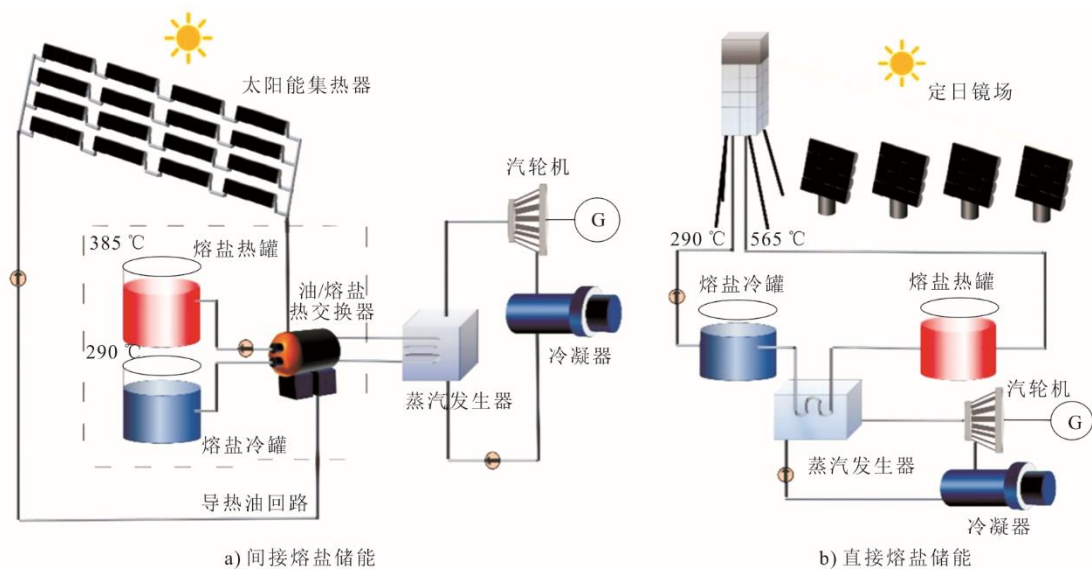


图 1 双罐熔盐储热系统

Fig.1 The two-tank molten salt heat storage system

光热与熔盐耦合的 2 种形式在工程中均有应用。熔盐间接蓄热一般能保持较高的循环效率，比蒸汽蓄能成本更低<sup>[16]</sup>，如西班牙 Andasol 槽式光热电站是第一个大规模熔盐间接蓄热电站，容量约为 1 000 MW·h，储能时间为 7.5 h。熔盐直接蓄热简化了电站设备组成，后期运维便捷。典型的熔盐直接蓄热电站是美国 Solar two 项目，该项目使用的硝酸盐混合盐被称作 Solar 盐，温度范围 290~565 °C。此后的塔式熔盐光热电站多沿用直接蓄热方式与此工作温度区间，如西班牙 Gemasolar 电厂、青海中控德令哈 10 MW 项目。

未来光热的发展主要在于高参数运行及耦合新型动力循环。高参数运行涉及的关键技术为耐高温熔盐，选用碳酸盐和部分  $MgCl_2$ - $KCl$ - $NaCl$  混合体系的氯化盐可提高系统的整体效率。光热耦合新型动力循环则主要涉及高参数熔盐及熔盐换热器，

间接蓄热系统需要换热装置来传递热量，采用导热油或水蒸气作为传热流体，在熔盐中蓄热。间接蓄热系统换热过程为太阳能-熔盐-导热油-蒸汽，熔盐中储存的热能通过导热油循环，到达蒸汽发生器换热。间接蓄热系统中熔盐储能系统作为相对独立的模块存在，可用于改造普通光热电站。因导热油的热稳定性不足，间接蓄热的工作温度一般规定在 400 °C 以下。直接蓄热系统采用熔盐作为传热和蓄热介质，其换热过程为太阳能-熔盐-蒸汽，不需要经过导热油循环，避免了不良换热，适用于 400~500 °C 的高温工况，也可提高电站效率和朗肯循环效率。

以超临界  $CO_2$  ( $S-CO_2$ ) 布雷顿循环光热发电系统为例，其中最高工作温度可达 800 °C，冷热罐熔盐的温差将达到 100~120 °C，储能的难度更大<sup>[18]</sup>，需要使用性能稳定的宽温域高参数熔盐。该系统参数高、效率高、部件紧凑，涉及的熔盐- $CO_2$  换热器需耐受苛刻工况。在熔盐- $CO_2$  换热领域可选择紧凑式换热器如印刷电路板换热器<sup>[4]</sup>，换热效率高，能承受高达 30 MPa 的高温、高压工况。印刷电路板换热器用于熔盐储能和  $CO_2$  循环已有研究。Wang 等人<sup>[15]</sup>设计并制造了一种翼形肋片印刷电路板换热器，在工作压力较小的熔盐系统中采用换热性能较好的肋片强化换热通道。张虎忠<sup>[19]</sup>搭建了最高压力和温度分别为 32 MPa 和 600 °C 的  $S-CO_2$  换热器试验平台，深度掌握了  $S-CO_2$  在印刷电路板换热器中的流动换热特性。

光热发电中，塔式通过吸热塔吸收聚集的太阳

能, 传热至热罐; 槽式通过集热管收集太阳能; 线性菲涅尔式光热发电成本低, 在我国西部拥有良好的商业化前景; S-CO<sub>2</sub>用于光热系统具有循环效率高、结构紧凑的优势。光热发电加热器一般为低压电阻式, 以较低的成本满足需求。除加热器外, 不同技术路线涉及的熔盐储能技术存在的区别见表3。

表3 不同光热技术路线适用的熔盐储能技术

Tab.3 The molten salt energy storage technologies suitable for different CSP technology roadmaps

技术路线	温度/℃	容量规模/(MW·h)	适用熔盐	储罐	换热器
塔式	565	≥1 000	Solar 盐	双罐	管壳式
槽式	398	≥1 000	Solar 盐、低熔点盐	单、双罐	管壳式
线性菲涅尔式	530	≥1 000	Solar 盐	双罐	管壳式
S-CO <sub>2</sub> 光热系统	700	≥1 000	高温熔盐	双、多罐	管壳式、印刷电路板式

### 3 熔盐储能在火电调峰领域的应用

在火电机组中采用储能可以实现削峰填谷, 目前已经可以实现工程应用的是高温熔盐储热耦合火电机组调峰技术<sup>[20]</sup>。熔盐-火电耦合系统的优势在于能极大地提高机组深度调峰和提供高温蒸汽的能力。熔盐-火电耦合形式多样, 如抽取部分主蒸汽和再热蒸汽进入熔盐储能模块实现蒸汽蓄热; 用发电机出口电力加热熔盐的电加热; 通过烟气-熔盐换热器实现的烟气蓄热以及结合以上几种耦合形式的混合型加热。为提高熔盐-蒸汽换热效率、增加储能时长, 火电调峰领域主要涉及高参数、宽温域的熔盐选型以及安全稳定的双罐熔盐系统。

#### 3.1 蒸汽蓄热

##### 3.1.1 再热蒸汽加热熔盐

在火电机组正常运行的同时抽取高压主蒸汽和再热蒸汽加热熔盐, 该耦合系统能够提高调峰性能和全过程循环效率, 主要适用于亚临界一次再热机组 500~600 ℃水平的蒸汽蓄热。罗海华等<sup>[21]</sup>通过计算证明了再热蒸汽加热熔盐方案的可行性, 该方案利用熔盐存储的热量加热给水, 输出工业蒸汽, 能实现火电机组热电解耦和供热调峰。熔盐-火电耦合也可存在多个抽汽点, 范庆伟等<sup>[10]</sup>以 600 MW 机组为例, 提出多罐-多换热器储热系统, 将再热蒸汽分别引入 2 个加热器, 其中疏水段加热器的烟效率最高。

##### 3.1.2 再热+过热蒸汽加热熔盐

同时抽取再热、过热蒸汽与熔盐换热的技术路线能够充分利用锅炉所产生的高温蒸汽, 适用主蒸汽温度为 500~600 ℃。王辉等<sup>[22]</sup>设计了火电机组超临界百兆瓦级熔盐储能工艺流程, 具体流程如图2所示。其中, 冷罐熔盐预热后分成 2 路, 分别进入过热加热器和再热加热器, 2 路混合后进入热盐罐, 实现熔盐回路的流动储热。该方案各工艺模块均为闭式循环, 在全过程中锅炉和汽轮机的高温工质没有减少或浪费, 能极大提高深度调峰能力和系统灵活性<sup>[23]</sup>。

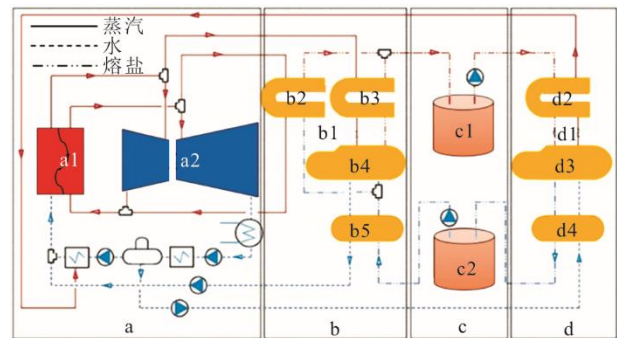


图2 火电机组百兆瓦级熔盐储能工艺流程  
a—主机模块: a1—锅炉; a2—汽轮机; b—充电功率模块: b1—蒸汽加热熔盐系统; b2—再热加热器; b3—过热加热器; b4—相变加热器; b5—预热加热器; c—储热能量模块: c1—热盐罐; c2—冷盐罐; d—放热功率模块: d1—熔盐蒸汽发生系统; d2—过热器; d3—蒸发器; d4—预热器。

图2 火电机组百兆瓦级熔盐储能工艺流程  
Fig.2 The molten salt energy storage process for one hundred MW thermal power units

##### 3.1.3 高再冷段蒸汽加热熔盐

抽取再热蒸汽加热熔盐可能导致再热温度超限, 采用具有烟气再循环的二次再热机组可避免上述问题。该技术路线适用于主蒸汽温度 600~620 ℃的二次再热机组。

在上述机组中抽取高再冷段蒸汽加热熔盐, 所储热能可用于加热给水, 供热或供工业蒸汽, 提高机组灵活性。张世刚<sup>[24]</sup>以某超超临界 660 MW 二次再热机组为研究对象, 提出同时抽取一次和二次高再冷段高温蒸汽进行熔盐蓄热。庞力平等<sup>[25]</sup>则模拟了二次再热机组锅炉和汽轮机的负荷响应特性, 结果表明高再冷段蒸汽用于熔盐蓄热, 可提高二次再热机组对电网负荷的响应速率。

##### 3.1.4 直接蒸汽蓄热技术

针对超超临界机组 620 ℃以上的蒸汽蓄热, 就需要采用直接蒸汽蓄热 (direct steam generation, DSG) 技术。DSG 电站中仅产出饱和蒸汽, 无法采

用常规的熔盐冷、热罐倒换运行模式,缺乏合适的长时间大规模储热系统。为解决DSG技术的瓶颈,可采用高参数熔盐技术和多罐熔盐系统来组成DSG的储能装置。如Seitz等人<sup>[26]</sup>在DSG系统中耦合冷、热、中间罐3罐熔盐储能,间接存储给水蒸发的热量,进行预热和过热加热。Disor项目<sup>[27]</sup>使用熔点为306℃的硝酸钠熔盐作为介质,直接与水蒸气进行换热。此类特殊情况涉及高参数熔盐,对熔盐热稳定性的要求较高。

### 3.1.5 蒸汽加热熔盐的不同情况

在主蒸汽蓄热和再热蒸汽蓄热领域,熔盐的选型存在区别。再热蒸汽压力参数较低,一般约为4MPa,对应饱和蒸汽温度约251℃。高温主蒸汽和再热蒸汽分别在不同熔点的熔盐中蓄热的情况如图3所示。

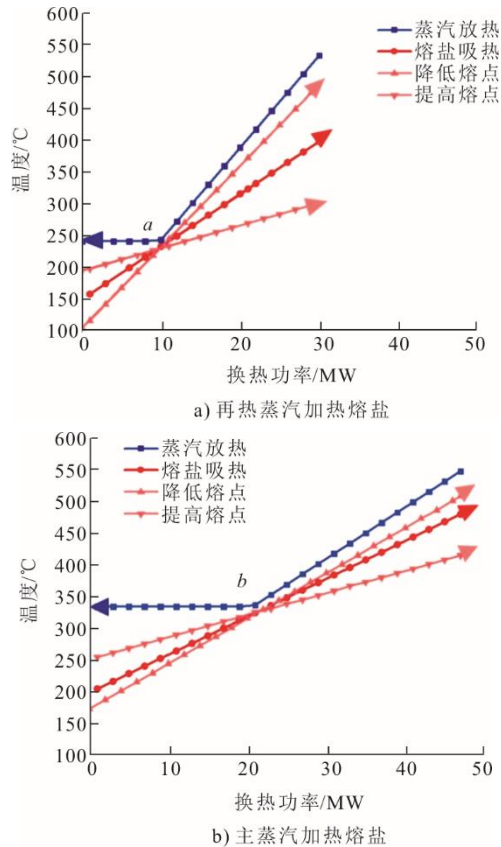


图3 主蒸汽和再热蒸汽熔盐蓄热

Fig.3 The heat storage in molten salt using main steam and reheat steam

由图3a)可见,由于点a处夹点温度的存在,熔盐被加热的温度受到熔盐最低使用温度和夹点温度的限制,其使用温度范围有限。常见的低熔点熔盐使用温度范围为140~450℃,受到夹点温度影响,其最高温度仅能被加热至400℃左右。若降低

熔点,选择熔点在100℃左右的熔盐,其使用温度上限就可以提升至450℃,但此类熔盐的应用研究尚不充分,工程实际中使用较少。若采用常规Solar盐,其使用温度为260~565℃,此时熔盐最低工作温度已经接近饱和蒸汽线,被再热蒸汽加热的空间较小,并不适用于该场景。综上所述,在再热蒸汽蓄热的情景下,宜采用熔点较低的熔盐,其最高使用温度无需设置过高。

与之相反,主蒸汽的参数较高,以14MPa主蒸汽为例,对应饱和蒸汽温度约335℃,如图3b)点b,其夹点位置相对更高,对熔盐加热的限制相对较小。图3b)描述了同一参数的主蒸汽加热不同参数熔盐的情况,此时常见的低熔点熔盐工作温度范围为140~450℃,最高温度可进一步拓展,而Solar盐工作温度约260~565℃,在此蒸汽参数下,只能被加热到420℃左右,若降低熔点,则熔盐甚至可被加热到530℃以上。由此可见,针对主蒸汽蓄热供热场景,常规熔盐即可适用,但是对于主蒸汽蓄热后还要再产生蒸汽的熔盐蓄热场景,适用于熔点较低但是最高温度较高的宽温域熔盐。

### 3.2 发电机出口电加热熔盐

发电机出口电加热熔盐技术路线是利用电厂发电机出口的高压电加热熔盐,将储存的热能输出为调峰电能,即“电-热-电”转化。所存储的热能也可用于实现供热,即“电-热-热”转化。电加热熔盐储能启停方便,能提高现有储热和发电设备的利用率,降低弃风弃光率,提升电站效益。与光热发电和电化学储能相比,电加热熔盐通过在电厂发电机出口增加电加热熔盐装置就能实现,成本下降空间大;与锂电池等储电池相比,其优势为兼具火电灵活性改造的功能,满足灵活调峰调频等工况需要。

在电加热熔盐的使用情景下,电能直接来源于发电机出口,功率规模大,使用传统低压电阻式熔盐加热器不能满足需求。因此,需要采用高电压加热系统如高电压电阻式、感应式、电极式加热器。高电压熔盐加热器电压等级可达6~10kV,可避免低压电阻式加热方案中输电线路损耗高的问题,成本较低。

“电-热-电”熔盐电蓄热是一种电热储能,即“卡诺电池”技术。可采用双罐熔盐系统,通过冷热罐循环放热发电。“电-热-热”转化的情况下,熔盐电蓄热与固体蓄热具有相似性,并且可以结合。张家口市崇礼区城建小区使用固体蓄热电锅炉,绿

电进入 110kV 电锅炉加热镁砖至 500~550 °C，所储热能再通过换热器传导至热水，热水进入集中供热系统。

### 3.3 烟气蓄热

大型火电机组中的高温烟气可达 700~800 °C，若能在熔盐中蓄热形成稳定热源，就可以实现较高参数的可持续供暖或供生活热水，同时也使锅炉适应热负荷变化较大的供热需要，提高机组调峰能力。熔盐烟气蓄热涉及高参数熔盐以及特殊的烟气-熔盐换热器。目前，关于高温烟气与熔盐的储热换热设备有许多设计，如引导烟气穿过加热棒，实现高温烟气熔盐储热的特殊换热通道<sup>[28]</sup>，以及利用高温烟气加热熔盐的自冷却屏式加热器<sup>[29]</sup>等，其

优势在于传热温差大，热量品位高。烟气-熔盐换热器还可收集炼钢过程中产生的高温余热，由多根并联的金属管束组成并设置在烟腔内<sup>[30]</sup>。

通过烟气-熔盐换热器收集烟气废热，可通过熔盐双罐系统实现再利用。利用双罐熔盐中储热实现发电的循环包括：低温熔盐从烟气出口进入换热器管束，与烟气换热成为高温熔盐；依次经过过热器、蒸发器、预热器加热给水，输出过热蒸汽驱动汽轮机发电，换热后的低温熔盐回到储罐<sup>[31]</sup>。

现有的高温烟气熔盐换热器适用温度范围较小，无法利用低浓度烟气的余热，在安全性和蓄热换热能力方面依然有待提高。表 4 为蒸汽、电蓄热、烟气蓄热情景下对熔盐储能技术的选择。

表 4 火电领域不同技术路线适用的熔盐储能技术

Tab.4 The molten salt energy storage technologies suitable for different thermal power technology roadmaps

技术路线	温度/°C	适用熔盐	储罐	换热器	电加热器
再热蒸汽蓄热	400~500	低熔点盐	双罐、多罐	管壳式	低压电阻式
主蒸汽蓄热	400~500	Solar 盐、低熔点宽温域熔盐	双罐、多罐	管壳式	低压电阻式
电蓄热	90~500	solar 盐	双罐	管壳式	高电压电阻式、感应式、电极式
烟气蓄热	700~800	高温熔盐	单罐、双罐	管壳式烟气-熔盐换热器	低压电阻式

## 4 熔盐储能在绿电供热领域的应用

新能源发电称作绿电，绿电供热是新能源消纳的一种新途径，是指使用低谷电或风、光富余电量加热熔盐，经过电-熔盐-给水的热传递，用于入户供暖。一般通过双罐熔盐系统来实现绿电供热，其原理如图 4 所示<sup>[31]</sup>。使用绿电弃电或谷电将熔盐加热并储存在高温熔盐罐中，白天将高温熔盐从罐中抽出，通过熔盐换热器加热给水，满足多种需求。如供给 90 °C 热水实现常规居民供热，供给 180~360 °C 的中低温工业蒸汽，以及 500 °C 以上的高温蒸汽。换热后降温的熔盐再流入低温熔盐罐，完成循环。

绿电供热是一种高效的清洁供暖方式，在各地已开展试点工程。河北辛集熔盐蓄热低谷电绿色供暖示范工程<sup>[32]</sup>以低熔点盐作为传热、蓄热工质，利用电网 10 h 的低谷电力加热熔盐用于供给生活热水，储热时长 16 h。北京市燃气热力供热中心<sup>[33]</sup>将夜间低谷绿电转化为热能储存在 180~390 °C 的熔盐中，白天使用熔盐储热为北京西站地区供暖，同时对外供应稳定的中低温工业蒸汽。与燃气供暖相比，绿电供热的运行费用更低；与热泵供暖技术相

比，其初投资较低；与水蓄热式电采暖相比，其优势在于占地面积小，蓄能密度高。部分绿电供热机组能够同时供应 100 °C 以下的民用热水和各类工业蒸汽，热效率较高，为火电机组改造提供了新方向。

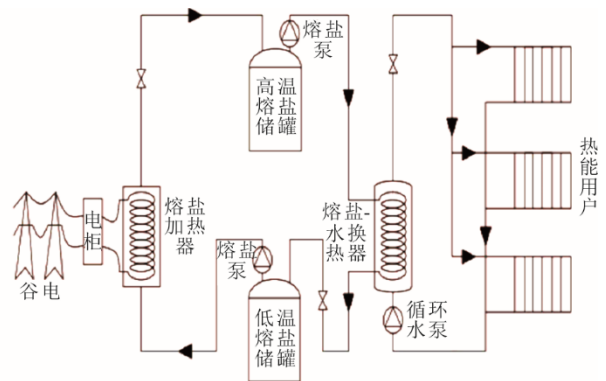


图 4 熔盐储热供暖系统原理

Fig.4 Working principle of the molten salt heat storage and heating system

绿电供热涉及的关键技术为安全稳定的双罐系统、高效率的换热器和高电压熔盐电加热器。普通生活热水供应系统中常使用浮动盘管型弹性管束换热器，而在熔盐-水换热的情景下，需要在管壳式熔盐换热器的基础上进行改造优化。由于直接接

入电网的熔盐加热器可以节省变电成本，绿电供热也需要成熟可靠的高电压熔盐加热器，如各类高压电阻式、电极式、电磁感应式加热器。对于部分只

提供民用热水或中低温工业蒸汽的机组，也可直接采用 380 V 电极式或电阻式熔盐加热炉。总结绿电供热不同技术路线适用的关键技术见表 5。

表 5 绿电供热技术路线适用的熔盐储能技术  
Tab.5 The molten salt energy storage technologies suitable for green electricity supplying heating

技术路线	温度/℃	适用熔盐	储罐	换热器	电加热器
高参数供热、工业蒸汽	360~500	Solar 盐	双罐	管壳式	高电压电阻式、感应式、电极式
中低温工业蒸汽	180~360	低熔点盐	双罐	管壳式	高压或低压电阻式、感应式、电极式
民用热水	90	低熔点盐	单罐、双罐	管壳式	高压或低压电阻式、感应式、电极式

在绿电供热场景中，由熔盐加热蒸汽或过冷水，应根据不同的情况选择低参数或高参数熔盐。绿电供热中熔盐蒸汽换热情况如图 5 所示。

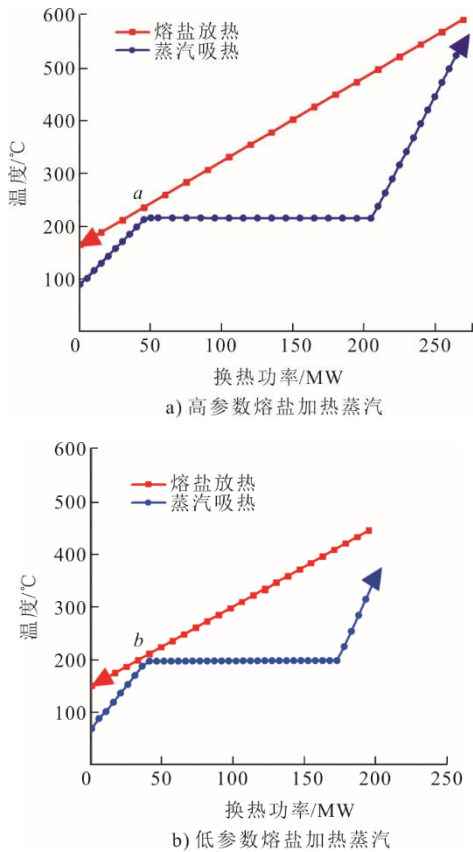


图 5 绿电供热中熔盐蒸汽换热示意  
Fig.5 Schematic diagram of heat transfer between molten salt and steam in green electricity heating

由图 5a)可见，蒸汽的升温受到夹点 *a* 的限制，若要输出超过 500 °C 的高温工业蒸汽，就需要提高熔盐的蓄热温度至约 600 °C，选用高参数熔盐与蒸汽进行换热。在供应中低温工业蒸汽时，使用熔点较低的硝酸盐熔盐即能满足需求（图 5b)）。熔盐加热蒸汽的过程受夹点 *b* 温度限制，最终在低参数熔盐工作区间 150~450 °C，可供应 1.2 MPa、370 °C 的蒸汽。

## 5 结 论

1) 目前，熔盐储能相关技术多样，但各项关键技术都存在欠缺,限制了熔盐储能在新型电力系统中的应用发展。目前，在多元混合熔盐领域，低熔点盐主要是锂、钙、钾等元素的硝酸盐和亚硝酸盐体系，如 Hitec 盐。耐高温盐中氯化盐的腐蚀性以及碳酸盐的易分解性缺陷，还需要展开针对研究，为市场提供更多商业化熔盐材料。另外，在熔盐储罐的预热、变工况方面研究不足，大型高温熔盐储罐缺乏完善的制造标准和规范。市场缺乏成熟的高电压等级熔盐电加热器，部分电磁感应加热器虽可接入高电压，但成本较高，并不具备普遍实施性。目前，广泛采用的传统管壳式换热器，存在未兼顾以熔盐为工质的情况，缺少针对优化熔盐换热器的构型展开的实验研究。

2) 熔盐储能系统的技术突破能提高效率、降低成本，也是增强光热电站竞争力的关键所在。目前在光热领域，我国已具备了支撑光热发电大规模发展的基础。太阳能光热发电的成本控制主要通过提高系统效率和降低设备成本 2 方面来实现。

在提高系统效率方面主要有 2 种途径：①高参数光热发电，使用温度区间和储热容量更大，循环效率更高；②光热耦合新型动力循环，如熔盐储能耦合 S-CO<sub>2</sub> 光热发电系统，需要采用耐高温高压的印刷电路板换热器，储热系统温度需超过 700 °C，但目前还没有成熟的商用熔盐可以满足需求，存在技术瓶颈。

降低成本应从熔盐储能关键技术入手，如关于下一代光热电站熔盐的选型，期望同时满足低熔点、耐高温、低成本的要求。但关于不同熔盐、储罐、加热器等的选型还需要进一步细化行业标准，形成规范评价体系，促进技术配套实现。

3) 火电机组与熔盐储能结合是增加机组灵活

性,提高全过程循环效率的有效方式。但目前针对火电机组与熔盐储能耦合的运行工况研究较少,双罐系统在其中的安全性保证仍需进一步实践研究。

现有熔盐-火电耦合发电系统的研究范围多针对主蒸汽温度 620 °C 以下的机组,关于超超临界机组主蒸汽温度 620 °C 以上的熔盐蒸汽蓄热还缺乏成熟落地的方案。目前,抽取再热或过热蒸汽加热熔盐的方案可行性已被证实,但具体抽汽量的标准尚不明确,对火电系统整体的负面影响也需要进一步对比研究。

### [参考文献]

- [1] 耿直, 苗亿文, 李仁凤, 等. 单罐熔融盐蓄热装置蓄热特性数值模拟[J]. 热力发电, 2021, 50(5): 108-113.  
GENG Zhi, MIAO Yiwen, LI Renfeng, et al. Numerical simulation on heat storage characteristics of single tank molten salt heat storage device[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(5): 108-113.
- [2] DU B C, HE Y L, WANG K, et al. Convective heat transfer of molten salt in the shell-and-tube heat exchanger with segmental baffles[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 113: 456-465.
- [3] HE S, LU J, DING J, et al. Convective heat transfer of molten salt outside the tube bundle of heat exchanger[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 59: 9-14.
- [4] CACCIA M, TABANDEH-KHORSHID M, ITSKOS G, et al. Ceramic-metal composites for heat exchangers in concentrated solar power plants[J]. Nature, 2018, 562(7727): 406-409.
- [5] DING W, BAUER T. Progress in research and development of molten chloride salt technology for next generation concentrated solar power plants[J]. Engineering, 2021, 7(3): 334-347.
- [6] ZHANG S, LI Z, WANG H, et al. Component-dependent thermal properties of molten salt eutectics for solar thermal energy storage: experiments, molecular simulation and applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 209: 118333.
- [7] 罗海华, 沈强, 林俊光, 等. 新型低熔点混合熔盐蓄热材料的开发[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(6): 1755-1759.  
LUO Haihua, SHEN Qiang, LIN Junguang, et al. Development of new low melting point mixed molten salt heat storage material[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(6): 1755-1759.
- [8] 鹿院卫, 杜文彬, 吴玉庭, 等. 熔融盐单罐显热蓄热基本原理及自然对流传热规律[J]. 储能科学与技术, 2015, 4(2): 189-193.  
LU Yuanwei, DU Wenbin, WU Yuting, et al. Sensible heat storage in a single tank using molten salt and associated natural convection heat transfer[J]. Energy Storage Science and Technology, 2015, 4(2): 189-193.
- [9] 余抒阳. 太阳能单罐熔盐蓄热特性数值模拟研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2020: 1.  
YU Shuyang. Numerical simulation and study on thermal energy storage characteristics of solar energy molten-salt-based single-tank[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2020: 1.
- [10] 范庆伟, 居文平, 黄嘉骊, 等. 基于储热过程的工业供汽机组热电耦研究[J]. 汽轮机技术, 2019, 61(3): 221-223.  
FAN Qingwei, JU Wenping, HUANG Jiasi, et al. Research on decoupling of heat and power of industrial steam supply unit based on heat storage process[J]. Turbine Technology, 2019, 61(3): 221-223.
- [11] LU Y, LI X, LI Q, et al. Numerical simulation and experimental investigation of natural convection heat transfer of molten salt around fine wire[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(7): 1651-1656.
- [12] 武庆新, 陈学政, 王际友, 等. 一种电极式均苯四甲酸二酐制备用熔盐加热器: CN215446885U[P]. 2022-01-07[2022-10-13].  
WU Qingxin, CHEN Xuezheng, WANG Jiyu, et al. Electrode type fused salt heater for preparing pyromellitic dianhydride: CN215446885U[P]. 2022-01-07 [2022-10-13].
- [13] 华源前线供热. 全球首发电极式熔盐加热炉[EB/OL]. (2022-08-12)[2022-10-13]. <https://news.bjx.com.cn/html/20220812/1247952.shtml>.  
Hua Yuan front heating. The world's first electrode molten salt heating furnace[EB/OL]. (2022-08-12) [2022-10-13]. <https://news.bjx.com.cn/html/20220812/1247952.shtml>.
- [14] 西安慧金科技. 高压大功率熔盐储热电磁加热技术服务商西安慧金科技成为 CSPPLAZA 会员单位[EB/OL]. (2022-07-05)[2022-10-13]. <https://www.csplaza.com/article-21855-1.html>.  
Xi'an Huijin Technology. Xi'an Huijin Technology, a high-voltage and high-power molten salt heat storage electromagnetic heating technology service provider, became a member of CSPPLAZA[EB/OL]. (2022-07-05) [2022-10-13]. <https://www.csplaza.com/article-21855-1.html>.
- [15] WANG W Q, QIU Y, HE Y L, et al. Experimental study on the heat transfer performance of a molten-salt printed circuit heat exchanger with airfoil fins for concentrating solar power[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 135: 837-846.
- [16] GONZÁLEZ-ROUBAUD E, PÉREZ-OSORIO D, PRIETO C. Review of commercial thermal energy storage in concentrated solar power plants: steam vs. molten salts[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 80: 133-148.
- [17] BAUER T, ODENTHAL C, BONK A. Molten salt storage for power generation[J]. Chemie Ingenieur Technik, 2021, 93(4): 534-546.
- [18] WANG K, HE Y L, ZHU H H. Integration between supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycles and molten salt solar power towers: a review and a comprehensive comparison of different cycle layouts[J]. Applied Energy, 2017, 195: 819-836.
- [19] 张虎忠. 超临界 CO<sub>2</sub> 印刷电路板换热器性能研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020: 1.  
ZHANG Huzhong. Study on the thermal-hydraulic performance of printed circuit heat exchanger with supercritical carbon dioxide[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2020: 1.
- [20] 王月明, 姚明宇, 张一帆, 等. 煤电的低碳化发展路径研究[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 11-20.  
WANG Yueming, YAO Mingyu, ZHANG Yifan, et al. Study on low-carbon development path of coal-fired power generation[J]. Thermal Power Generation, 2022,

- 51(1): 11-20.
- [21] 罗海华, 张后雷, 刘文涛, 等. 基于熔盐蓄热的亚临界火电机组工业供热调峰技术[J]. 暖通空调, 2020, 50(10): 71-75.  
LUO Haihua, ZHANG Houlei, LIU Wentao, et al. Peak regulation technology for industrial heating of subcritical thermal power units based on molten salt heat storage[J]. Heating Ventilating and Air Conditioning, 2020, 50(10): 71-75.
- [22] 王辉, 李峻, 祝培旺, 等. 应用于火电机组深度调峰的百兆瓦级熔盐储能技术[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(5): 1760-1767.  
WANG Hui, LI Jun, ZHU Peiwang, et al. Hundred-megawatt molten salt heat storage system for deep peak shaving of thermal power plant[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1760-1767.
- [23] 李峻, 祝培旺, 王辉, 等. 基于高温熔盐储热的火电机组灵活性改造技术及其应用前景分析[J]. 南方能源建设, 2021, 8(3): 63-70.  
LI Jun, ZHU Peiwang, WANG Hui, et al. Flexible modification technology and application prospect of thermal power unit based on high temperature molten salt heat storage[J]. Southern Energy Construction, 2021, 8(3): 63-70.
- [24] 张世刚. 高温熔盐储能提高二次再热机组灵活性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020: 1.  
ZHANG Shigang. Study on flexibility improvement of ultra-supercritical double-reheat unit using high temperature molten salt thermal energy storage[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020: 1.
- [25] 庞力平, 张世刚, 段立强. 高温熔盐储能提高二次再热机组灵活性研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2682-2691.  
PANG Liping, ZHANG Shigang, DUAN Liqiang. Flexibility improvement study on the double reheat power generation unit with a high temperature molten salt thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2682-2691.
- [26] SEITZ M, CETIN P, ECK M. Thermal storage concept for solar thermal power plants with direct steam generation[J]. Energy Procedia, 2014, 49: 993-1002.
- [27] BAYÓN R, ROJAS E, VALENZUELA L, et al. Analysis of the experimental behaviour of a 100 kWth latent heat storage system for direct steam generation in solar thermal power plants[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(17/18): 2643-2651.
- [28] 陈金华, 姚成林, 肖露, 等. 一种高温烟气熔盐换热器及换热方法: CN112629301A[P]. 2021-04-09[2022-10-13].  
CHEN Jinhua, YAO Chenglin, XIAO Lu, et al. A high temperature flue gas molten salt heat exchanger and heat exchange method: CN112629301A[P]. 2021-04-09[2022-10-13].
- [29] 时正海, 茹宇, 高洪培, 等. 一种锅炉高温烟气熔盐储热装置: CN212005650U[P]. 2020-11-24[2022-10-13].  
SHI Zhenghai, RU Yu, GAO Hongpei, et al. A boiler high temperature flue gas molten salt storage device, CN212005650U[P]. 2020-11-24[2022-10-13].
- [30] 孙少鹏, 胡清, 宁玉琴, 等. 新型卧式相变换热烟气余热回收技术的分析及应用[J]. 热能动力工程, 2015, 30(5): 742-744.  
SUN Shaopeng, HU Qing, NING Yuqin, et al. Analysis of a novel type horizontal phase change heat exchange waste heat recovery technology and its applications[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2015, 30(5): 742-744.
- [31] 林俊光, 仇秋玲, 罗海华, 等. 熔盐储热技术的应用现状[J]. 上海电气技术, 2021, 14(2): 70-73.  
LIN Junguang, QIU Qiuling, LUO Haihua, et al. Application status of molten salt heat storage technology[J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2021, 14(2): 70-73.
- [32] 吴玉庭, 张晓明, 王慧富, 等. 基于弃风弃光或低谷电加热的熔盐蓄热供热技术及其评价[J]. 中外能源, 2017, 22(2): 93-99.  
WU Yuting, ZHANG Xiaoming, WANG Huifu, et al. Molten salt heat storage and supply technology based on heating using abandoned wind power, PV power or off-peak power[J]. Sino-Global Energy, 2017, 22(2): 93-99.
- [33] 袁振国. 熔盐储能供蒸汽技术的应用前景分析[J]. 能源与节能, 2022(3): 116-119.  
YUAN Zhenguo. Application prospect of molten salt energy storage technology for steam supply[J]. Energy and Energy Conservation, 2022(3): 116-119.

(责任编辑 杨嘉蕾)