

DOI: 10.19666/j.rlfed.202208183

耦合熔融盐储热的火电机组灵活调峰系统 关键技术研究进展

毛翠骥^{1,2}, 余雄江^{1,2}, 徐进良^{1,2}, 谢剑^{1,2}, 牛玉广³

(1.低品位能源多相流与传热北京市重点实验室, 北京 102206;

2.电站能量传递转化与系统教育部重点实验室, 北京 102206;

3.新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

[摘 要] 基于国家“双碳”目标及能源转型的战略需求, 火电机组参与电网调峰已趋于常态。为了大幅提升现有机组调峰能力, 可将熔融盐储热系统与火电机组汽水流程进行正、逆循环耦合。详细梳理了耦合熔融盐储热的火电机组灵活调峰系统关键技术及其储热系统流程设计的研究进展。首先, 围绕储热工质综述了现有常用熔融盐的制备配方、物化性质的研究现状, 重点阐述了火电机组储热系统对于熔融盐的特性要求。其次, 详细阐述了储热系统的关键设备部件, 总结了单罐与双罐熔融盐储热系统及其辅机的原理、特性, 从系统安全性、成本、技术成熟度、调峰响应速率等角度分析了前二者对火电机组储热调峰系统的适用性。其后, 归纳了当前熔融盐换热器的研究现状, 从多个角度重点分析了熔融盐-汽水管壳式换热器的研究成果与不足之处。随后, 梳理了熔融盐储热系统的设计方案, 对比总结了不同类型火电机组储热系统的设计特点, 归纳了储热灵活调峰系统设计需要进一步开展的研究工作。最后, 对熔融盐储热系统的设计及其实际应用进行了展望。

[关键词] 火电调峰; 熔融盐; 储热罐选型; 熔融盐换热器; 储热系统流程

[引用本文格式] 毛翠骥, 余雄江, 徐进良, 等. 耦合熔融盐储热的火电机组灵活调峰系统关键技术研究进展[J]. 热力发电, 2023, 52(2): 10-22. MAO Cuiji, YU Xiongjiang, XU Jinliang, et al. Research progress on key technologies of flexible peak shaving system of thermal power unit coupled with molten salt heat storage[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(2): 10-22.

Research progress on key technologies of flexible peak shaving system of thermal power unit coupled with molten salt heat storage

MAO Cuiji^{1,2}, YU Xiongjiang^{1,2}, XU Jinliang^{1,2}, XIE Jian^{1,2}, NIU Yuguang³

(1. Beijing Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer for Low Grade Energy Utilization, Beijing 102206, China;

2. Key Laboratory of Power Station Energy Transfer Conversion and System, Beijing 102206, China;

3. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, Beijing 102206, China)

Abstract: There is an increasing participation of thermal power units in peak shaving of power grid due to the national “double carbon” target and the strategic demand of energy transformation in China. The molten salt heat storage system can substantially improve the peak shaving capacity of thermal power system by absorbing or releasing heat efficiently from or into the thermal system. The key technologies of thermal power units coupled with molten salt heat storage system and the research progress of the heat storage system process flow design are combed in detail. Firstly, the formulas and physicochemical properties of commonly used molten salts are summarized. Great attention is paid to the characteristics and application prospects of the currently widely used binary and ternary nitric acid molten salts. Secondly, the critical equipment components including the thermal storage tank as well as heat exchangers used in the heat storage system are elaborated. The heat storage principle and characteristics of single-tank and double-tank molten salt heat storage methods are summarized, and the applicability of the former

收稿日期: 2022-08-20 网络首发日期: 2022-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(52130608)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (52130608)

第一作者简介: 毛翠骥(1999), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为熔融盐储热, 120212202044@ncepu.edu.cn.

通信作者简介: 余雄江(1990), 男, 助理研究员, 主要研究方向为相变传热、超临界流体传热、储热技术, 50202675@ncepu.edu.cn.

two methods to thermal power units' heat storage and peak shaving system is analyzed from the perspectives of system safety, cost, technology maturity and peak shaving response speed. Then, the current research status of molten salt heat exchanger is summarized, and the research achievements and shortcomings of molten salt-steam-water tube shell heat exchanger are emphatically analyzed from multiple perspectives. Moreover, the design schemes of molten salt heat storage system are sorted out emphatically for the process of heat storage system. The different design features of thermal storage systems are compared. Furthermore, some of the future work on the design of flexible-peak-shaving thermal storage system is also figured out. Finally, the design and practical application of molten salt heat storage system are prospected.

Key words: flexible peak shaving in thermal power plant; molten salt; heat storage tank type selection; molten salt heat exchanger; heat storage system process

在“双碳”目标背景下，提高可再生能源装机容量及发电量比例是能源行业主要发展趋势。2020年，我国可再生能源发电量占比达到24%，而火电机组发电量占比已经下降到近70%。随着风光发电成本的不断降低，可再生能源在未来大有迅猛发展的态势^[1]。然而，受天气和气候条件的制约，风电、太阳能光热、光伏等发电方式普遍具有间歇性和较大波动性。为了弥补因可再生能源并入导致的电网稳定性的降低，火电机组需承担更重的调峰任务。通过频繁改变机组工况实现负荷调节的方式不仅灵活性差，而且容易对机组运行可靠性、效率产生影响^[2]，因此，对现有机组灵活性和调峰深度提出了更严格的要求。

储能技术作为一种改变能量时空分布的技术手段，可大幅提高电站的调峰灵活性，缓解电网供需平衡问题。在众多储能方式中，熔融盐储能同时具有储能密度高和储能周期长且成本较低的优势，因而成为具有前景的火电机组调峰手段之一^[3]。

目前，熔融盐光热发电技术在太阳能光热电站中已经实现了商业运行，美国、西班牙等国已经率先建成了数十兆瓦等级的光热发电机组。近几年，熔融盐光热发电在我国开始发展，我国已经建成了如首航节能敦煌100 MW 熔融盐塔式太阳能光热电站等多个示范电站。表1比较了光热发电系统与火电机组熔融盐储热系统。

表 1 光热发电系统与火电机组熔融盐储热系统比较

Tab.1 Comparison between solar thermal power system and molten salt thermal storage system coupling thermal power unit

对比项	太阳能光热电站发电系统	火电机组熔融盐储热系统
技术成熟度	高	中低
换热工质	熔融盐、导热油、汽水	熔融盐、汽水、烟气
储热侧换热器	盐-油、盐-盐、盐-汽水	盐-汽水、盐-烟气
放热侧换热器	盐-汽水	盐-汽水
热源	太阳能	高温蒸汽、高温烟气等
储热时间级别	10 h 级	h 级或 min 级

由表1可以看出，火电机组熔融盐储热系统与太阳能光热发电系统之间相似度较高。两系统间的差异主要体现在以下2个方面：

1) 储热热源 光热电站以聚集式高温太阳能作为储热热源，热源温度远高于熔融盐温度，限制储热温度的因素是熔融盐分解温度；而燃煤灵活性储热系统以高温蒸汽作为储热热源，储热过程涉及蒸汽热量的释放，是变温储热过程，制约储热温度的因素是换热器窄点问题；

2) 储热规模及频率 以太阳能光热电站为例，其日出储热日落放热，储放频率固定，储放热时长是10 h 级，储放热功率几乎等同于电站热功率；而燃煤灵活性储热系统储放热过程受电网的高频调度，储放热时长是 min 级，储放热功率用于调峰，可以小于电站热功率。

熔融盐光热发电技术在我国日渐成熟对于在此基础上研究火电机组熔融盐储能调峰技术具有理论基础和借鉴意义。灵活燃煤储热系统的特殊需求是抽汽、汇水点如何选取，汽水-熔融盐换热器的热量负荷如何分配，从而规避换热器窄点温差限制。在系统构建时需要从储热系统需求角度出发进行熔融盐优选、储热罐选型、换热器设计、系统流程设计等工作。对此，本文详细梳理了熔融盐储热系统设计过程中的关键问题和设计流程研究现状，以期对未来我国电站熔融盐灵活调峰系统的设计与建造提供理论参考。

1 熔融盐研究及优选分析

火电机组储热系统的基本原理是：利用熔融盐良好的蓄热能力及时按需储放系统热量以配合机组快速变负荷。熔融盐自身特性如工作温度范围、腐蚀性、成本、稳定性等需要满足储热系统的要求。因此，根据不同参数、类型机组的需要合理地进行盐的选择至关重要。本节针对火电机组储热调峰系统中较为常用的备选盐类进行详述和分析。

熔融盐是熔融态液体^[4]，一般指无机盐的熔融体，具有以下特点：1) 导热系数大、比热容高、密度大，利于储放热过程中的热量传递；2) 大部分熔融盐在高温下黏度低，流动损失小，适合作为载热工质在系统中运转；3) 使用温度范围 100~600 °C，容易匹配不同场合的热源及需求温区。

当前研究较多的熔融盐包括硝酸盐、碳酸盐、氯化盐、氟化盐等。不同盐之间熔点、工作温度范围、化学性质差异较大，适用情况不同。一般来说，碳酸盐和氟化盐、氯化盐的熔点较高，容易造成运行过程中盐的冻结。碳酸盐黏度偏大^[5]，在高温下易分解^[6]；氯化盐腐蚀性较强^[7]；氟化盐具有较大的毒性。碳酸盐、氯化盐在一些光热电站中有所应用。氟化盐具有黏度小、与金属材料相容性好等特点，其经常以多元混合盐的形式作为核燃料载体与一些复合材料组合应用于核电站熔融盐堆。此外，在熔融盐中添加纳米材料改性有助于强化蓄热、传热过程^[7]。常用纳米材料有 SiO₂、Al₂O₃ 等。熔融盐的蓄热能力与稳定性因混合纳米材料得到了显著提升，该技术体现了较好的应用潜力。

相较其他盐类，硝酸盐导热性稍差，但其熔点较低，腐蚀性较弱，经济性、可靠性高，因而被广泛用于太阳能光热发电领域^[8-9]。在此主要针对储热工程中应用最多的硝酸盐进行分析。

硝酸盐熔点较其他熔融盐偏低，但其单种硝酸盐熔点可达 300 °C 左右^[10]，在电站运行中可能造成低温冻管等问题，为电站安全运行埋下隐患。为了尽可能拓宽硝酸盐的工作温度范围，研究人员采用按不同比例、不同熔融盐成分混合的方式制备二元盐和三元盐等多元共晶盐，并对其理化特性进行了分析与对比，相关成果整理至图 1。

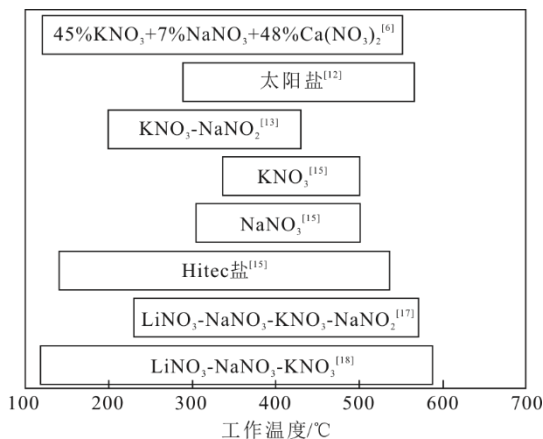


图 1 硝酸盐工作温度对比
Fig.1 Comparison of nitrates working temperature

二元盐中最具有代表性的是太阳盐 (40%KNO₃-60%NaNO₃)，其在青海德令哈光热电站中已得到应用。研究显示，太阳盐工作温度限制范围为 230~581 °C 且稳定性较好^[11]，但在工程实践中，为保证安全运行，其工作温度通常取 290~565 °C^[12]。对于其他种类二元盐研究，葛顺鑫等^[13]测定了不同成分比掺混的 KNO₃-NaNO₂ 盐的热物性及比热容值，发现二元硝酸盐具有较低的熔点和良好的热稳定性，工作温度范围为 200~430 °C，同时发现成分比对于混合盐的比热容影响不大；章凯羽^[14]也针对 KNO₃-NaNO₂ 混合盐的理化性质进行了研究，通过热重分析法对 9 种不同比例 (1:9—9:1) 混合盐的热重曲线与差热曲线进行了对比分析，结果表明，在 KNO₃ 和 NaNO₂ 的质量比为 6:4 时，熔融盐的稳定性和经济性最好。

三元和四元盐等多元硝酸盐组合形式多样，种类繁多，研究中常采用钾、钠、锂、钙、镁等硝酸盐类和钠、钾等亚硝酸盐中几种盐按不同比例混合的方式制备混合盐。Hitec 盐是一种典型的三元硝酸盐，其将 KNO₃、NaNO₂、NaNO₃ 三者按 53%:40%:7% 的比例混合而成，工作温度范围为 142~535 °C^[15]。相同温度下，Hitec 盐与太阳盐黏度相当而导热系数、比热容却高于后者，因而是一种非常好的储热材料。但亚硝酸盐在高温下易氧化、分解，导致盐的整体熔点升高而对熔融盐系统蓄放热过程带来安全隐患。目前只有少数太阳能光热电站采用 Hitec 盐作为工质。

在 Hitec 盐成分基础上适当混合添加剂是改善其特性的一种简单有效的方式。彭强等^[16]研究了以 KNO₃、NaNO₂、NaNO₃ 为三元基元混合添加剂 (5% 质量的某氯化物) 的硝酸盐，由于少量高熔点氯化物的添加，实验得出熔融盐的最高工作温度由原来的 500 °C 提高到约 550 °C；于建国等^[17]通过在 Hitec 盐中加入硝酸锂得到一种四元硝酸盐，发现该混合硝酸盐的最佳工作温度范围为 250~550 °C。

在其他类型三元盐的研究方面，赵柏岑等^[18]研究了 LiNO₃-NaNO₃-KNO₃ 混合盐的热稳定性，发现其工作温度范围为 118.3~587.2 °C；马重芳、吴玉庭团队在多元熔融盐制备与物性测量上进行了大量工作，他们充分探究了多达 130 种熔融盐的理化性质和热物性参数，其中最佳熔融盐熔点低至 100 °C，而工作温度上限已达 600 °C^[19]，工作温度区间宽度达 500 °C。

综上，熔融盐优选时需综合考量以下特性，以

便于其更好地与储热系统相匹配:

1) 价格 熔融盐成本是储热系统设计时的首要考虑因素。表 2 比较了市面上常见的二元与三元硝酸盐的特点。由于硝酸钾及亚硝酸盐单价较高, 单位重量 Hitec 盐成本比太阳盐成本高约 15%。此外, 由于三元盐易氧化, 如果在使用过程中盐发生变质等问题, 需要额外补充新盐调整系统整体的盐

类比例, 因此成本将进一步增加。

相比太阳盐与 Hitec 盐, 其他种类硝酸盐商业运营程度仍较低, 我国仅有部分小规模电站或实验平台进行尝试性实验研究, 且其配方中添加剂成本过高的同时常伴随研发成本增加, 导致大多数新品种盐类尽管已经能满足电站盐类选型需要, 但因成本高昂不适合大规模商用;

表 2 太阳盐与 Hitec 盐比较
Tab.2 Comparison between solar salt and Hitec salt

项目	太阳盐	Hitec 盐
工作温度范围/°C	230~581	142~535
成本/(元·t ⁻¹)	6 000	6 900
适用条件	电辅热	电辅热、气体保护
劣势	最低工作温度低, 电辅热要求高, 管道冻结隐患大、电辅热成本高	工质成本高, 气体保护不当易导致盐熔点升高引起运行问题, 需定期对盐进行抽样监测
优势	成本低, 盐稳定性强	工作温度范围广, 电辅热耗电量低
商业运营成熟度	西班牙 Andasol 槽式太阳能热发电站 西班牙 Solar Tres 电站和 Andasol 电站 美国 Solar 2 塔式电站 意大利 Archimede 示范电站 首航节能 100 MW 光热电站	法国 THEMIS 电站 意大利 Eurelios 电站 西班牙 CESA-1 电站

2) 工作温度 熔融盐的工作温度范围是火电机组储热系统中熔融盐选型的主要指标之一。尽可能降低盐的最低工作温度和提高最高工作温度有利于提升储热系统的兼容性和安全性。根据图 1, 采用多种盐类混合的方式可以改善单一硝酸盐熔点高的缺点。另外, 提纯也是一种改善熔融盐工作温度范围的有效手段^[20]。在进行筛选时, 熔融盐工作温度上下限与储热系统设计温度范围应留有一定裕度, 同时对其杂质含量应予以考量;

3) 腐蚀性 熔融盐选择不当易影响系统寿命与运行安全性。对于火电机组熔融盐储热系统, 熔融盐腐蚀可从熔融盐自身与金属选材 2 个角度改善:

①火电机组熔融盐储热系统主要备选盐类——硝酸盐, 相比于腐蚀性较强的氯化盐与氟化盐, 其自身腐蚀性较低, 可以向其中添加适量缓蚀剂以进一步减小其腐蚀性; ②可以通过选择耐腐蚀材料(含稀有金属合金)或对金属进行特殊化学处理的方式进一步降低腐蚀影响, 从而延长系统整体寿命;

4) 稳定性 熔融盐的稳定性决定了系统运行安全性及成本。Hitec 盐稳定性低且易氧化分解。尽管 Hitec 盐系统不需要过多电辅热, 但其引入了惰性气体保护系统使储热系统趋于复杂, 因此其商业运营成熟度远低于太阳盐。太阳盐尽管熔点较高, 但不会被空气氧化、分解, 保证了储热系统的可靠性。

2 火电机组储热调峰系统关键部件

2.1 储热罐储热原理、特点及选型分析

储热罐有 2 种基本形式, 即单罐式和双罐式。一些文献表明, 无论在亚临界燃油电厂^[21]、超临界火电机组^[22]还是亚临界火电机组^[23]中, 采用熔融盐罐储能的调峰方式都是可行的。单罐、双罐储热的原理、特点及使用利弊分析如下。

单罐熔融盐储热是利用 1 个罐进行储、放热过程的技术。目前存在 2 种形式的单罐储热方式:

1) 以罐体本身作为换热器的储热单罐(换热器储热罐) 其换热管道布置在储热罐内, 管道内通入水作为工质实现罐体的放热, 在储热罐处于低温状态时, 管道内通入蒸汽即可实现储热过程。代表性工作包括马重芳教授团队的一些研究^[24-27], 见表 3;

2) 斜温层储热罐 其储放热原理如图 2 所示。斜温层储热罐内 2 种温度熔融盐在密度差作用下上、下分层。在 2 种温度熔融盐交界面处, 由于熔融盐之间的掺混导致该界面附近存在较大温度梯度, 形成具有一定厚度的斜温层。斜温层产生于储、放热过程, 其位置沿罐体轴向发生移动。斜温层的存在严重降低了系统的有效储热量^[28], 其厚度是影响储热性能的关键参数, 与上下层流体之间的温差、流体入口速度、储热时间正相关。为了减弱斜

温层的影响,一些研究通过在罐体内填充固体填充物来优化罐体的储热性能,尹辉斌等^[29]通过实验探究了铅质蓄热球与泡沫碳化硅陶瓷多尺度固体填充层对储热单罐蓄热性能的影响,结果发现,多孔介质填料的加入有利于保持熔融盐流体为理想的重力流或活塞流,改善了罐内熔融盐流动特性。受限于填充物特性,系统储热容量低,在相同入口速度条件下,填充固体材料的储热罐较单相流体储热

罐最大蓄热时间短 10s 左右,斜温层厚度较未填充单罐大,对斜温层特性的改善作用较小。

左远志^[30]从模拟和实验 2 个角度对比了储热罐内单相流体与带多孔介质的复合储热材料对储热罐蓄热性能的影响,结果表明,采用单位体积热容量大于熔融盐热容量的多孔介质填料能增加单罐蓄热量,这是固体储热材料可以提高储热罐储热性能的主要原因。

表 3 单罐熔融盐储热方式研究汇总
Tab.3 Research progress of single-tank molten salt heat storage

研究人员	研究方式	工质	结论与成果
施素丽等 ^[27]	模拟	自制二元盐	上进下出的取热方式有利于提高释热效率,释热效率提高 20%
孙晓丽等 ^[24]	实验	LiNO ₃	罐内隔板有助于缩短储热时间,取热 50%时,总时间减少 7 min
孙晓丽等 ^[25]	实验	LiNO ₃	“上进下出+罐内隔板”方案换热效果最好,较无隔板下进上出能量释放率高 13%
鹿院卫等 ^[26]	模拟	LiNO ₃	管束垂直间距不宜过小、水平间距不宜过大
尹辉斌等 ^[29]	实验	自制硝酸盐	多孔介质改善罐内流体流动特性,斜温层存在导致储热效率小于 80%
左远志 ^[30]	实验+模拟	Hitec 盐	单位体积热容量大于熔融盐热容量的多孔介质填料能够增加单罐蓄热量

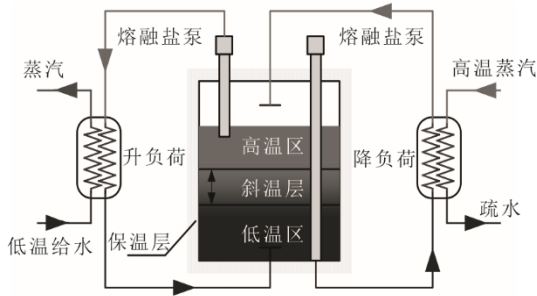


图 2 斜温层熔融盐储热罐储、放热原理

Fig.2 The heat storage and release principle of a molten salt heat storage tank with inclined temperature layer

双罐熔融盐储热技术将高、低温熔融盐分别放在 2 个罐中储存,其储、放热流程如图 3 所示。在电站降负荷时,低温熔融盐从低温熔融盐罐经换热器吸收蒸汽热量回到高温熔融盐罐;电站升负荷时,高温熔融盐从高温熔融盐罐经换热器放出显热回到低温熔融盐罐。双罐储热技术有效避免了前文所述的斜温层问题,降低了安全隐患,提高了系统储热容量,但增加了建设成本。相比单罐熔融盐储热技术,双罐熔融盐储热不存在重大技术障碍^[31]。

储热罐系统除储热罐本体外,还包括熔融盐泵、电辅热装置等重要辅机。熔融盐泵在设计时需要考虑储热系统中熔融盐流量范围、熔融盐泵最高耐受温度、扬程、泵体长度等重要参数。电辅热装置运用在低温管道、储热罐低温部分外壁等位置,该装置可以通过电生热的方式对储热系统运行过程中的散热损失进行补偿。同时,其可以对熔融盐

侧低温部位进行防冻结保护。目前,对此进行专门报道文献较少。

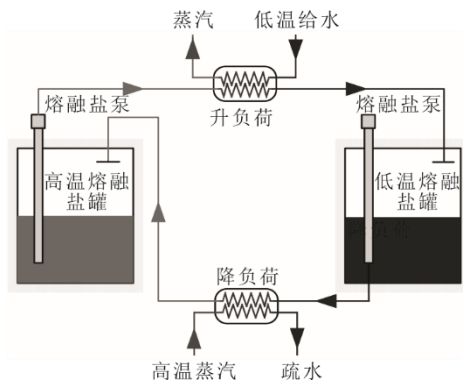


图 3 双罐熔融盐储热系统储、放热流程

Fig.3 The heat storage and release process of double-tank molten salt heat storage system

基于 2 种储热形式的特点,储热调峰系统储热罐选型需从如下角度考虑:

1) 成本 单、双罐熔融盐储热系统间成本差距小。单罐储热减少了 1 个储热罐的成本。对于双罐熔融盐储热系统,低温罐材料要求较高温罐低,且对于大部分火电机组,熔融盐储热调峰改造的储热罐容量需求与其参与调峰时间正相关,对于 min 级的调峰系统,熔融盐需求量小,附加 1 个单罐的成本并不高。此外,对于系统检修维护过程,单罐储热系统需要额外布置储盐罐来存放熔融盐以实现单罐的排空。相比而言,双罐熔融盐储热系统可以使熔融盐在 2 个储热罐之间循环排空,便于单独对某个储热罐进行维护;

2) 安全 双罐熔融盐储热系统较单罐系统安全性高。单罐储热方式常使得高、低温熔融盐分层布置。储热罐储放热流体次数过多,罐体及内部熔融盐泵由于较大温差变化而易产生交变热应力。此外,其内部系统集成度高,较双罐熔融盐储热系统安全系数低;

3) 技术成熟度 双罐熔融盐储热技术更成熟。双罐储热系统在大部分光热电站中实现了长期运行,拥有大量支撑数据可供分析。其技术成熟度、可行性较高。单罐储热系统仅有个别光热电站使用,并没有大规模推广;

4) 火电机组调峰速率需求 斜温层单罐储热技术易在变负荷后期影响机组及换热器运行。负荷变化要求较低时,单罐、双罐储热系统均满足要求。在负荷变化要求较高时,熔融盐流量较大,对双罐储热系统没有影响,但易导致单罐储热系统罐内储热时间缩短、斜温层变厚、储热容量降低,在变负荷后期阶段,斜温层移动到熔融盐泵入口,导致换热器内部发生瞬态响应,对于汽轮机及锅炉内部换热器产生一系列影响。

从成本、安全性、技术成熟度和火电机组调峰速率响应需求角度考虑,双罐储热系统具有明显优势。斜温层单罐储热系统面临着如抑制斜温层影响有效方式的探究、高性能填充材料的制备与研发、储热罐尺寸优化设计等问题。换热器储热罐需要在出口温度控制方面做出努力。储热罐结构及尺寸设计对储热罐保温效率、储热罐系统运行安全性等至关重要,已经有一些文献对此类设计流程进行了详细介绍^[32-33],因篇幅有限,此处不展开讨论。

2.2 熔融盐换热器实验与模拟研究现状

熔融盐换热器是实现熔融盐和其他工质之间换热的设备,也是熔融盐储热灵活调峰系统的关键部件。管壳式换热器具有结构坚固、适应性强的优点^[34],是熔融盐换热器的主要形式。当前国内对于熔融盐换热的各种研究中,包含电阻丝加热下熔融盐自然对流特性研究^[35]和定热流条件下熔融盐管内流动换热^[36]等机理研究,以上研究对熔融盐电加热过程和熔融盐强化传热技术有重要意义。此外,也有针对熔融盐管壳式换热器的油-盐换热特性的研究^[37-39],其为塔式光热电站一些利用油-盐-水介质的储热过程提供了大量数据与经验。从熔融盐储热灵活调峰系统需求来看,熔融盐-汽水换热器是研究的重点,然而这方面研究比较缺乏^[37,40]。储热

灵活发电系统对于换热器的特殊要求体现在:1) 换热器功率较低;2) 换热器需要具备良好的耐受性和可靠性。熔融盐换热器的低热功率、耐受性、可靠性与其内部换热工质的布置方式、换热器结构的合理性、换热器设计关联式是否准确密不可分,本节从以上角度分析归纳其研究进展。

董新宇等^[40]对不同入口温度、不同压力的未饱和水、亚临界汽水在不同入口温度、流速的二元硝酸盐工况下进行了比较充分的直管管壳式换热器单相逆流换热实验研究,结果发现在相同蒸汽压力与入口温度条件下,换热系数随汽、水和熔融盐流量的增加而增大。实验结果表明, Dittus-Boelter、Sieder-Tate、Mихеев、Gnielinski 方程的计算值均比亚临界汽、水实验值要大,误差绝对值均在 30% 范围内。其后基于 Gnielinski、Dittus-Boelter 关联式分别拟合了汽、水实验关联式,误差在 $\pm 10\%$ 之间,符合程度较好。之后再次对直管管束换热器进行了亚临界沸腾实验研究^[41],结果发现,压力对单相水的换热系数影响不大,但对过冷沸腾状态下的换热系数影响明显。惠姣等^[42]对于熔融盐横掠 200 °C 的未饱和水管道进行了实验研究,也发现传热系数随熔融盐和水侧流量的增大而增大,且熔融盐传热系数随水侧压力的增大而减小,入口温度对熔融盐传热系数的影响最大。何石泉等^[43]开展了过渡流与湍流状态下的熔融盐-汽水的管壳式换热器实验,结果发现: Wiegand、Huasen、Gnielinski 关联式均低估了管外过渡流状态的实验数据, Wiegand 误差最小,为 23%, Huasen 关联式误差最大; Gnielinski、Sieder-Tate、Dittus-Boelter、Wiegand 预测值也低于湍流状态下的实验数据, Wiegand 误差最小,为 22%, Sieder-Tate 误差最大。对熔融盐-水的数值模拟方面,扶麟^[44]模拟分析了熔融盐-蒸汽套管换热器的耦合传热特性,模拟选用了典型三元盐,探究了不同工况下过热蒸汽内部的温度与流场分布,发现提高入口雷诺数、降低管径有利于提高换热效果,其将数据与 Dittus-Boelter 公式进行了对比,误差在 $-2.2\% \sim 10.7\%$ 。

综上所述:1) 在盐-汽水布置方面:大部分实验研究为管内水、管外熔融盐的布置方式,缺少熔融盐相变换热器中汽水走壳侧、熔融盐走管侧的实验研究^[45]。相关研究工作应加强,为后期分析各种汽水-盐布置方式的安全性、成本等特性提供充分数据;

2) 在实验关联式预测方面: 表 4 整理了我国当前对于熔融盐换热器实验关联式的研究进展。现有实验关联式如 Dittus-Boelter 公式等对于预测熔融盐换热器的误差较大, 主要原因是熔融盐物性的变化和其物性对于传统实验关联式的不适应性, 大多数学者均采用在已有关联式基础上改良的方式提

出新的实验关联式, 但无法统一。

因此, 未来亟需探明熔融盐-固壁-汽水传热机理及影响因素, 提高关联式的准确性, 避免换热面积设计误差过大导致实际运行过程中换热器长期偏离设计工况运行, 降低运行可靠性, 为换热器设计工作提供有力参考;

表 4 熔融盐换热器关联式整理
Tab.4 Summary of experimental correlations for molten salt heat exchanger

作者	换热器类型	研究类型	工质类型	管侧雷诺数或流量范围	换热关联式	误差范围
董新宇等 ^[40]	套管式换热器	实验	管外太阳盐-管内水、蒸汽	5 000~10 500	$Nu = 0.020 1 Re^{0.808} Pr^{0.320} 7 \left(\frac{\mu_l}{\mu_w} \right)^{0.25}$ (水) $Nu = 0.019 6 (Re^{0.837} - 280) Pr^{0.399 57} [1 + (d/l)^{2/3}] (Pr_l/Pr_w)^{0.11}$ (蒸汽条件: 熔融盐入口 500 °C) $Nu = 0.019 6 (Re^{0.835} - 280) Pr^{0.403} [1 + (d/l)^{2/3}] (Pr_l/Pr_w)^{0.11}$ (蒸汽条件: 熔融盐入口 450 °C)	±10% ±5%
董新宇等 ^[41]	直管管束换热器	实验	管外盐-管内汽水	38.7/51.6/64.4 kg/(m ² ·s)	$\frac{h_s}{h_{sin}} = e^{9.559} q^{0.47} T^{-1.924 46}$ (过冷沸腾, 热流密度 43~266 kW/m ² , 熔融盐入口温度 360~560 °C)	绝对误差 6.11%
何石泉等 ^[43]	套管式换热器	实验	管外盐-管内水	3 100~9 900	$Nu = 0.091 Re^{0.71} Pr^{0.4} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \left(\frac{d_o}{d_i} \right)^{0.45}$ (Pr=9.0~10.7)	小于 8%
惠姣等 ^[42]	管壳式换热器	实验	管外太阳盐-管内水	6 000~52 000	$Nu = 0.015 6 (s_1/s_2)^{0.2} Re^{0.129 16} Pr^{4.45} (Pr_w/Pr_l)^{0.25} \cdot 0.84$ (Pr=3.1~5.5)	±10%
王金梁等 ^[12]		综述		2 300~1 000 000	$Nu = \frac{(f/8)(Re - 1 000) Pr}{1 + 12.7 \sqrt{f/8} (Pr^{2/3} - 1)} [1 + (d/l)^{2/3}] c_i$ (Pr=0.6~100 000)	±20%, 高热流密度下误差大于 30%
孟强等 ^[39]	套管式换热器	模拟	管内硝酸锂、太阳盐、Hitec 盐-管外导热油	10 000~70 000 17 000~45 000	$Nu = 0.012 9 Re^{0.869 5} Pr^{0.331}$ (Pr=11.7~14.7) $Nu = 0.024 2 Re^{0.81} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14}$ 充分发展湍流管内 (Pr=11.7~14.7)	最大误差 11.6% ±10%
刘斌等 ^[37]	套管式换热器	实验	管内熔融盐-管外导热油	4 100~9 850	$Nu = 0.007 (Re^{0.92} - 280) Pr^{0.4} [1 + (d/l)^{2/3}] (Pr_l/Pr_w)^{0.11}$ 过渡流 (Pr=12.7~18.4)	±15%

3) 在换热器结构研究方面: 现有管壳式换热器大部分为直管道, 直管道虽具有容易拆卸更换的优势, 但容易产生膨胀应力, 不适用于熔融盐储热系统。图 4 为电站常用的 U 型管道管壳式换热器, 该形式不仅可以使换热器整体更紧凑, 而且可以降低换热器整体热应力。但针对该构型换热器的实验研究较少, 应加强该方面的研究工作。此外, 一些新形式的换热器如螺旋管结构换热器具有强化换热的特点^[34], 且其耐热冲击, 适合储热系统高频变负荷应用场景, 然而相关研究仍不够充分;

4) 在数值模拟方面: 熔融盐-汽水换热的模拟研究比较缺乏。大部分模拟集中在二维单个管道、单元模拟研究层面, 均为单相流体之间换热, 对三

维换热器整体研究不够充分, 对于管束换热效果研究比较少, 容易忽略换热器内部的“换热死区”。在该方面应尽量充分研究各种工况、熔融盐工质的换热器整体性能、内部流动换热特性。其模拟结果与实验关联式等形成依托对照, 为换热器设计研究过程提供保障。现有关于熔融盐换热器的数值模拟聚焦于换热特性研究, 鲜有文献研究换热器变负荷过程管道的双向流固耦合换热, 探究变负荷对于管道振动变形、交变应力强度的影响。该方面研究恰恰决定了换热器的抗热冲击特性与可靠性。此外, 在降负荷过程中, 往往需要用低温盐冷却高温高压汽水, 甚至是超临界水介质, 而采用熔融盐冷却的模拟、实验研究则几乎是空白。

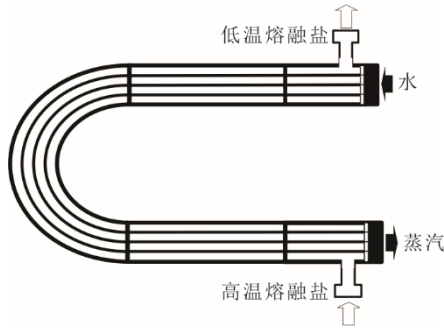


图 4 发夹式 U 型熔融盐-汽水换热器
Fig.4 The hairpin type U-shaped molten salt-water heat exchanger

3 储热系统流程设计研究现状

我国火电机组的深度调峰能力相比世界领先水平差距较大^[46]，为了深度利用可再生能源，亟需提高现有火电机组的“移峰填谷”能力。常规灵活性改造方式存在使锅炉系统效率降低等问题。熔融盐储热技术降低了对锅炉侧的要求，实现了机炉解耦，大幅提高了现有机组灵活性。同时，高温熔融盐储热技术对于一些电站的延寿改造^[47]、持续利用十分有利。目前，火电机组熔融盐储热系统尚处于流程设计和模拟研究阶段，少有应用^[48]。前文已经针对储热材料、关键部件进行了介绍分析，下面将针对熔融盐储热流程的理论设计进行分析。

3.1 熔融盐工业供汽储热调峰研究

范庆伟等^[49]针对亚临界 600 MW 机组建立了一种可以实现工业供汽热电解耦的熔融盐储热系统并进行了模拟分析，如图 5 所示。该系统储热流程为：再热蒸汽分为 2 路，一路依次经过凝结段加热器、疏水段加热器将低温熔融盐加热后至除氧器，另一路通过降温段加热器释放显热将中温罐部分熔融盐加热后通至低压缸。放热过程为：将前置泵来水依次经过预冷段加热器、蒸发段加热器、过热段加热器吸收熔融盐热量后生成蒸汽供给热用户。该系统设有高、中、低 3 个不同容量的储热罐（容量依次为 2.4、8.4、10.8 t），中温罐起到缓冲、分流作用，避免了换热器内部的“窄点温差”问题。其模拟结果（表 5）指出：储热系统储、放热过程的焓效率最低处分别出现在温差较大的降温段加热器、过热段加热器。储热过程热耗率、热损失较放热过程大，储热过程储热量较放热过程小。

与前者三罐式方式不同，罗海华等^[50]提出了基于熔融盐蓄热的调峰新方案，该系统在降负荷时抽取再热蒸汽换热后供给热用户，升负荷时利用高温

熔融盐加热除氧水为热用户供给蒸汽。该系统以热用户为主要服务目标进行储热流程设计，实现了火电机组的热电解耦。

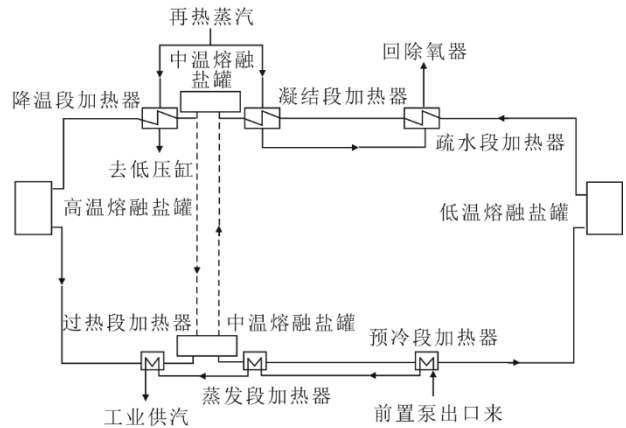


图 5 熔融盐工业供汽设计流程（基于文献[49]图 2 重构）
Fig.5 Design process of molten salt industrial steam supply (based on Fig.2 in Reference [49])

表 5 三罐式工业供汽调峰系统模拟结果汇总（基于文献[49]）
Tab.5 Summary of the simulation results of the three-tank industrial steam supply and peak regulation system (based on Reference [49])

项目	储热过程	放热过程
低温熔融盐需求/t		10.8
中温熔融盐需求/t		8.4
高温熔融盐需求/t		2.4
加热器焓效率	0.899 5 (降温段)	0.842 7 (过热段)
	0.927 9 (凝结段)	0.951 1 (蒸发段)
	0.971 3 (疏水段)	0.957 6 (预冷段)
热耗率/(kJ·(kW·h) ⁻¹)	8 569.12	8 035.32
热损失/(g·(kW·h·MW) ⁻¹)	0.3	0.02
储热量/MW	65.66	
放热量/MW		71.72

3.2 超临界火电机组熔融盐调峰系统设计研究

庞力平等^[51]对超超临界 660 MW 二次再热机组的熔融盐储热流程进行了设计和模拟计算，图 6 为其系统储热部分流程。该方案同时选取一次、二次再热冷段抽汽实现机组降负荷过程，升负荷过程将取水点选在 3 号高压加热器（高加）管侧，回水点为 1 号高加，避免了升负荷时抽水对锅炉侧的影响。计算发现：熔融盐储热系统可显著改善二次再热机组的响应速度，系统储热过程爬坡率显著提高，100% 负荷工况下，储热过程预期缩短降负荷时间 600 s，放热过程预期缩短升负荷时间 1 800 s。该方案和仿真结果证明了熔融盐储热系统对超临界二次再热机组的适用性。

李峻等^[47,52]分析了熔融盐储热在火电机组中的应用前景并提出一种适合超临界火电机组的熔融

盐双罐储热系统（图 7），其储热过程为：低温熔融盐送入预热加热器，被加热后进入相变加热器，加热后分成 2 路，一路进入过热加热器与部分主蒸汽换热，另一路进入再热加热器与部分再热蒸汽换

热，2 路熔融盐混合后进入热盐罐储存，实现熔融盐回路的流动和储热。放热过程汽水侧为：抽取除氧水进行加热产生蒸汽。该系统储热时间为 6 h，熔融盐总用量约 2.3 万 t，系统综合热效率达 77.8%。

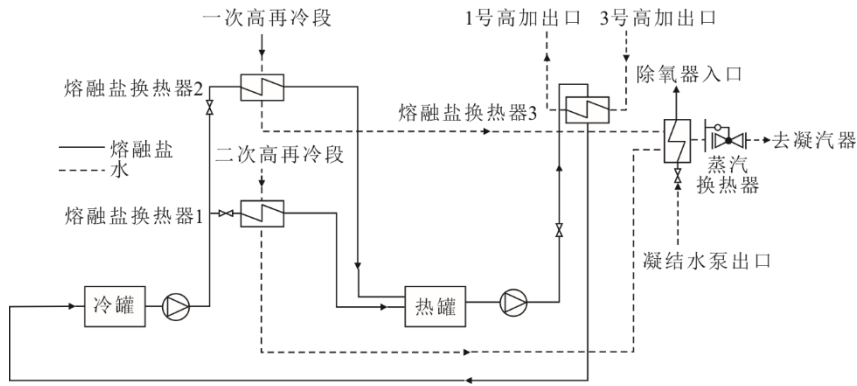


图 6 超超临界二次再热火电机组储热系统设计（基于文献[51]图 1 重构）

Fig.6 Design of heat storage system for ultra supercritical secondary reheat unit (based on Fig.1 in Reference [51])

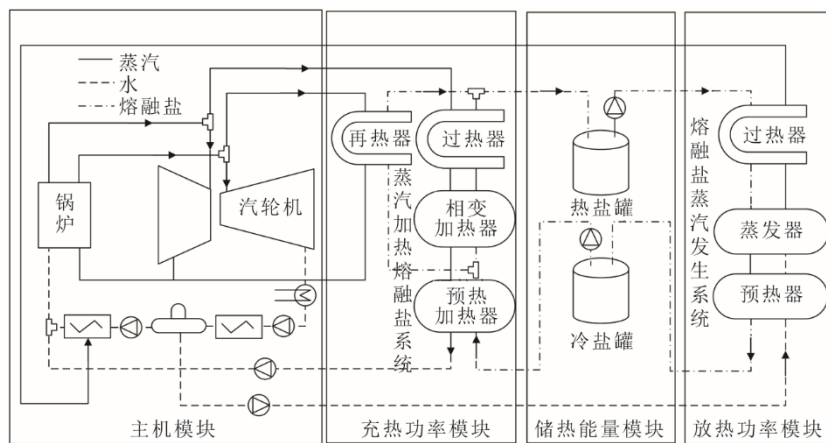


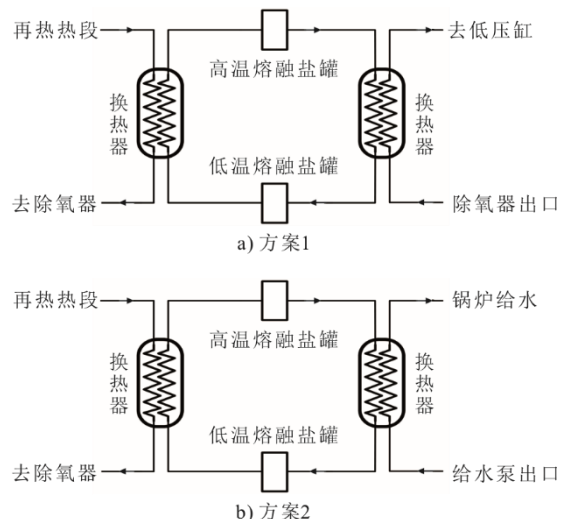
图 7 （主、再抽汽）超临界一次再热机组储热系统（基于文献[47]图 1 重构）

Fig.7 The heat storage system of supercritical primary reheat unit (both main stream and reheat stream, based on Fig.1 in Reference [47])

3.3 亚临界火电机组储热灵活性改造系统设计研究

张显荣等^[53]提出了 3 种基于三元盐的 600 MW 纯凝机组熔融盐储热系统，如图 8 所示。

图 8 中：方案 1 为再热蒸汽抽汽去除氧器进行降负荷，抽取除氧水与高温熔融盐换热至低压缸进行升负荷；方案 2 为再热热段抽汽去除氧器进行降负荷，给水泵后取水去锅炉进行升负荷；方案 3 为再热冷段抽汽去 2 号高加疏水进行降负荷，升负荷方式同方案 2。其对不同储热系统的性能进行了对比分析，发现不同系统优势各异，在锅炉热负荷不变的条件条件下，方案 3 调峰性能改善最佳，而方案 2 系统热力性能最优。



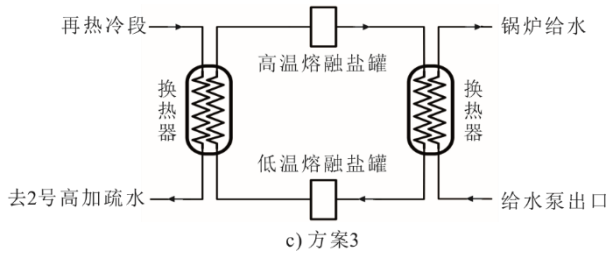
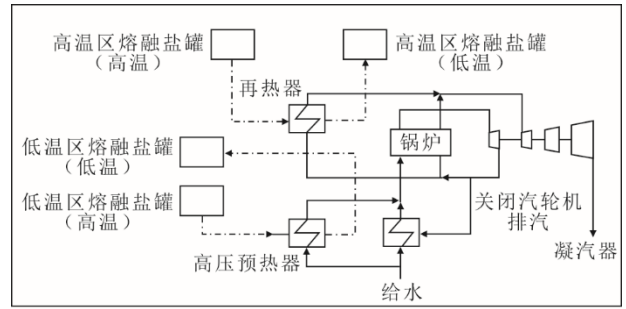
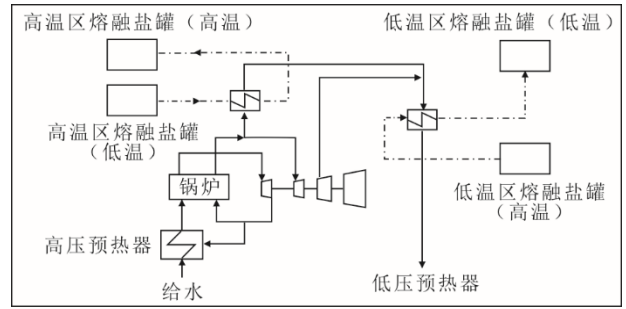


图 8 基于三元盐的 600 MW 纯凝机组熔融盐储热系统^[53]
 Fig.8 The molten salt heat storage system of 600 MW pure condensing unit based on ternary molten salt^[53]

Garbrecht 等人^[23]分析了 1 台德国 300 MW 旧机组的储热灵活性改造可能性并设计了如图 9 所示的储热系统流程,该系统特点是采用 2 种熔融盐“四罐式”的储热方式,降负荷时抽取再热蒸汽、低压缸部分蒸汽利用熔融盐冷却;升负荷时利用低温区熔融盐先将给水预热、然后用高温区熔融盐将再热蒸汽加热。该系统创新性地利用 2 种熔融盐对储热调峰过程进行温度匹配,以低温盐匹配低温汽水、高温盐匹配高温蒸汽,有效降低了换热过程中由于较大温度差异导致的能量品质降低。以上各储热方案综合比较见表 6。



a) 升负荷



b) 降负荷

图 9 德国某亚临界 300 MW 一次再热机组储热系统流程 (基于文献^[23]图 5 重构)

Fig.9 The heat storage system flow of a subcritical 300 MW unit with primary reheat in German (based on Fig.5 in Reference^[23])

表 6 熔融盐储热系统方案比较

Tab.6 Comparison of molten salt heat storage system schemes

研究人员	机组类型	降负荷抽汽位置	升负荷取水位置	系统特点
范庆伟等 ^[49]	亚临界 600 MW 机组	再热蒸汽	前置泵来水	三罐式储热、工业供汽调峰
罗海华等 ^[50]	亚临界 350 MW 机组	再热蒸汽	除氧水	双罐式储热、工业供汽调峰
庞力平等 ^[51]	超超临界 660 MW 二次再热机组	一次、二次再热冷段	3 号高加管侧水	双罐式储热、超超临界机组调峰
李峻等 ^[47,52]	百兆瓦级超临界火电机组	主蒸汽、再热蒸汽	除氧水	双罐式储热
张显荣等 ^[53]	600 MW 纯凝机组	再热冷段/再热热段	给水泵来水/除氧器来水	双罐式储热
Garbrecht O 等人 ^[23]	亚临界 300 MW 机组	再热蒸汽	给水	高低温熔融盐组合四罐式储热

3.4 小结

1) 当前储热系统理论设计方面研究中,基于亚临界机组的研究偏多,这对于当前低容量、参数老旧热电联产机组的灵活性改造十分有利。超临界机组作为我国未来主力机组参与调峰过程的可能性较高,当前对于超临界、超超临界火电机组熔融盐储热调峰系统的设计研究偏少,建议加强超临界机组的储热系统相关设计研究。

2) 调研文献中的储热方式全部以双罐式储热为原型设计储热系统,从系统可靠性和实现的难易程度都可以说明双罐熔融盐储热在未来火电机组调峰中较大的应用潜力。由于斜温层单罐储热技术上的复杂性,相关储热系统的研究很少,同时,其

是否适合大型电站储热改造有待数据对比,未来工作中需要进一步补充。

3) 无论是一次再热还是二次再热机组,现有降负荷过程设计多倾向于抽取再热蒸汽,或者是主、再蒸汽混合抽取的方式,直接抽取主蒸汽进行降负荷调峰作用明显,但纯粹选择主蒸汽进行降负荷的调峰过程较少;升负荷过程中抽水点选择设计时,多选择除氧水、给水,也有在一些加热器管侧抽水的抽水方式。各种类型机组、抽汽点、回水点选择方式的经济性综合对比、调峰灵活性对比有待进行后期对比。

4) 一些文献^[52]表明,抽汽量大小会对锅炉内再热器、过热器换热产生一定影响,甚至造成过热器

超温,但对于影响程度的大小,相关计算对比尚且不足,熔融盐储热系统对锅炉内部能量的时空分布甚至整个机组的影响仍需进一步研究。

4 结 论

1) 熔融盐的工作温度范围、稳定性、成本是其能否较好地配合储热系统运行的关键特性,选用适当的耐腐蚀材料及在盐侧添加缓蚀剂后,腐蚀性对储热系统影响较小。在蓄热材料方面仍需要围绕宽工作温度范围、低成本、高适应性熔融盐的制备与研发开展工作,为储热系统设计提供更多的选择性方案。

2) 单、双罐储热技术成本相当。在技术成熟度、安全性、配合储热系统调峰响应方面,双罐储热技术优势明显。储热罐相关重要辅机如熔融盐泵、电辅热系统的专题研究鲜有报道,该方面研究有待提高深入。

3) 熔融盐换热器的耐受性与可靠性是其能否满足火电机组储热系统需要的重要特性。对于换热器的研究仍需要围绕以下方面展开:①工质多样性,探究不同工质对换热器换热特性、可靠性的影响程度;②充实不同汽水-盐布置组合的相关研究数据;③探究换热器换热机理,提出较为精准的实验关联式;④丰富熔融盐换热器结构研究,提高换热器换热性能、耐热冲击性;⑤充分进行三维数值模拟研究工作,为换热器设计工作提供保障。

4) 储热系统与火电机组耦合可以大幅提高机组变负荷速率。储热系统耦合对于其他类型机组的适用性是今后探究的重点方向。双罐储热系统应用潜力较大,单罐储热系统有待仿真研究、数据对比。储热系统与火电机组接入接出点选择对系统灵活性、经济性、安全性的影响仍需大量数据验证。

5) 整体而言,熔融盐储能调峰系统对于不同参数、容量机组的适应性强,适合推广,是非常有前景的火电机组调峰方式之一。

[参 考 文 献]

- [1] 刘世宇,陈俊杰.“十四五”新能源消纳形势分析与建议[J]. 新能源科技, 2021(10): 35-37.
LIU Shiyu, CHEN Junjie. Analysis and suggestions on new energy consumption during the 14th Five-Year Plan[J]. New Energy Technology, 2021(10): 35-37.
- [2] 王伟,徐婧,赵翔,等. 中国煤电机组调峰运行现状分析[J]. 南方能源建设, 2017, 4(1): 7.
WANG Wei, XU Jing, ZHAO Xiang, et al. Analysis on peak load regulation status quo for coal-fired power plants in China[J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(1): 7.
- [3] 段立强,王婧,庞力平,等. 二次再热机组高效灵活发电创新理论与方法[J]. 中国电力, 2019, 52(5): 1-12.
DUAN Liqiang, WANG Jing, PANG Liping, et al. Innovative theory and methods for high-efficiency and flexible power generation of ultra-supercritical double-reheat coal-fired power generation unit[J]. Electric Power, 2019, 52(5): 1-12.
- [4] 谢刚. 熔融盐理论与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998: 1.
XIE Gang. Theory and application of molten salt[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1998: 1.
- [5] 宋宇宽,王俊勃,徐洁,等. 太阳能热发电中熔融盐储热材料研究进展[J]. 轻工标准与质量, 2015(2): 59-60.
SONG Yukuan, WANG Junbo, XU Jie, et al. Research progress of molten salt heat storage materials in solar thermal power generation[J]. Standard & Quality of Light Industry, 2015(2): 59-60.
- [6] 沈向阳,丁静,彭强,等. 高温熔盐在太阳能热发电中的应用[J]. 广东化工, 2007, 34(11): 49-52.
SHEN Xiangyang, DING Jing, PENG Qiang, et al. Application of high temperature molten salt to solar thermal power[J]. Guangdong Chemical Industry, 2007, 34(11): 49-52.
- [7] 初泰青,王钰森,庞开安,等. 高温熔融盐储热技术常见材料分析[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2018, 14(1): 91-96.
CHU Taiqing, WANG Yusen, PANG Kaian, et al. Analysis of common materials for high temperature molten salt heat storage technology[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2018, 14(1): 91-96.
- [8] 王立娟,闫全英. 熔融盐在太阳能热发电中的应用及性能研究现状[J]. 材料科学, 2015, 5(3): 72-78.
WANG Lijuan, YAN Quanying. Research progress of the application and properties of molten salt to solar thermal power[J]. Materials Science, 2015, 5(3): 72-78.
- [9] 田增华,张钧. 槽式太阳能热发电双罐式熔融盐间接储热系统设计研究[J]. 太阳能, 2012(22): 54-60.
TIAN Zenghua, ZHANG Jun. Design and research of double tank molten salt indirect heat storage system for trough Solar thermal power generation[J]. Solar Energy, 2012(22): 54-60.
- [10] 张宏韬,赵有璟,张萍,等. 硝酸熔盐储热材料在太阳能利用中的研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29(1): 54-60.
ZHANG Hongtao, ZHAO Youjing, ZHANG Ping, et al. Research progress of molten nitrate salts with application to solar energy utilization[J]. Materials Reports, 2015, 29(1): 54-60.
- [11] 吴玉庭,王涛,马重芳,等. 二元混合硝酸盐的配制及性能[J]. 太阳能学报, 2012, 33(1): 148-152.
WU Yuting, WANG Tao, MA Chongfang, et al. Preparation and experimental study of binary nitrate salts[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2012, 33(1): 148-152.
- [12] 王金梁,吴华栋. 太阳盐的热力学性质及其在光热发电中的应用[J]. 发电设备, 2021, 35(5): 334-338.
WANG Jinliang, WU Huadong. Thermophysical properties of solar salt and its application in solar thermal power generation[J]. Power Equipment, 2021, 35(5): 334-338.
- [13] 葛顺鑫,李方义,贾秀杰,等. 二元硝酸盐的热物性测试及比热分析[J]. 功能材料, 2014, 45(15): 15009-15011.
GE Shunxin, LI Fangyi, JIA Xiujie, et al. Analysis on thermal physics and test of specific heat capacity of binary

- nitrate salt[J]. *Functional Materials*, 2014, 45(15): 15009-15011.
- [14] 章凯羽. $\text{KNO}_3\text{-NaNO}_2$ 系熔盐的物理化学性质研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008: 1.
ZHANG Kaiyu. The research on physical chemistry properties on molten salt of $\text{KNO}_3\text{-NaNO}_2$ [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008: 1.
- [15] 李光华. 小容量熔融盐蓄热装置结构与性能优化的研究[D]. 南京: 东南大学, 2019: 1.
LI Guanghua. Design and research on performance optimization of small capacity molten salt heat storage device[D]. Nanjing: Southeast University, 2019: 1.
- [16] 彭强, 魏小兰, 丁静, 等. 多元混合熔融盐的制备及其性能研究[J]. *太阳能学报*, 2009, 30(12): 1621-1626.
PENG Qiang, WEI Xiaolan, DING Jing, et al. Research on the preparation and properties of multi-component molten salts[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2009, 30(12): 1621-1626.
- [17] 于建国, 宋兴福, 潘惠琴. $\text{LiNO}_3\text{-KNO}_3\text{-NaNO}_3\text{-NaNO}_2$ 混合熔盐及制备方法: CN126392AC[P]. 2000-08-23[2022-08-20].
YU Jianguo, SONG Xingfu, PAN Huiqin. $\text{LiNO}_3\text{-KNO}_3\text{-NaNO}_3\text{-NaNO}_2$ mixed molten salt and its preparation method: CN126392AC[P]. 2000-08-23[2022-08-20].
- [18] 赵柏岑, 丁静, 魏小兰, 等. $\text{LiNO}_3\text{-NaNO}_3\text{-KNO}_3$ 三元熔盐材料的设计及热稳定性研究[J]. *化工学报*, 2019, 70(6): 2083-2091.
ZHAO Baicen, DING Jing, WEI Xiaolan, et al. Design and thermal stability study of $\text{LiNO}_3\text{-NaNO}_3\text{-KNO}_3$ ternary molten salt system[J]. *CIESC Journal*, 2019, 70(6): 2083-2091.
- [19] REN N, WU Y T, WANG T, et al. Experimental study on optimized composition of mixed carbonate for phase change thermal storage in Solar thermal power plant[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2011, 104(3): 1201-1208.
- [20] 张宏韬, 车晖贤, 赵有璟, 等. 高纯硝酸熔盐的制备及热物性能研究[J]. *云南化工*, 2018, 45(9): 21-23.
ZHANG Hongtao, CHE Huixian, ZHAO Youjing, et al. Effect of purification on thermal stability of high-temperature molten nitrate salts[J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2018, 45(9): 21-23.
- [21] WOJCIK J D, WANG H J. Technical feasibility study of thermal energy storage integration into the conventional power plant cycle[J]. *Energies*, 2017, 10(2): 205.
- [22] LI D C, WANG H J. Study of supercritical power plant integration with high temperature thermal energy storage for flexible operation[J]. *Journal of Energy Storage*, 2018, 20(12): 140-152.
- [23] GARBRECHT O, BIEBER M, KNEER R. Increasing fossil power plant flexibility by integrating molten-salt thermal storage[J]. *Energy*, 2017, 118: 876-883.
- [24] 孙晓丽, 鹿院卫, 崔锡民, 等. 单罐熔融盐释热传热规律实验研究[J]. *太阳能学报*, 2018, 39(1): 8-13.
SUN Xiaoli, LU Yuanwei, CUI Ximin, et al. Discharge experiments of molten salt in single storage tank[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2018, 39(1): 8-13.
- [25] 孙晓丽, 鹿院卫, 崔锡民, 等. 熔融盐单罐储热系统释热传热规律研究[J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(5): 1032-1037.
SUN Xiaoli, LU Yuanwei, CUI Ximin, et al. Heat discharge research of molten salt in single energy storage tank[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(5): 1032-1037.
- [26] 鹿院卫, 杜文彬, 吴玉庭, 等. 熔融盐单罐显热储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.
- [27] 施素丽, 鹿院卫, 于强, 等. 熔盐单罐释热过程换热器取热方式优选[J]. *化工学报*, 2019, 70(3): 857-864.
SHI Suli, LU Yuanwei, YU Qiang, et al. Optimization of heat removal modes for heat exchanger in molten salt single storage tank[J]. *CIESC Journal*, 2019, 70(3): 857-864.
- [28] 曹瑞峰, 赵浩, 高建. 单罐储热系统的动态特性数值研究[J]. *东北电力大学学报*, 2020, 40(4): 61-68.
CAO Ruifeng, ZHAO Hao, GAO Jian. Numerical study on dynamic characteristics of single tank thermal energy storage system[J]. *Journal of Northeast Electric Power University*, 2020, 40(4): 61-68.
- [29] 尹辉斌, 丁静, 杨晓西. 高温熔融盐斜温层单罐蓄热的热过程特性[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(26): 68-74.
YIN Huibin, DING Jing, YANG Xiaoxi. Thermal characteristics of the high-temperature molten-salt heat storage process with a thermocline in single tank[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(26): 68-74.
- [30] 左远志. 熔融盐高温斜温层混合蓄热的热过程特性[D]. 广州: 华南理工大学, 2010: 1.
ZUO Yuanzhi. Thermal process characteristics on high-temperature thermocline hybrid thermal energy storage with molten salt materials[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010: 1.
- [31] KONSTANTIN P. *Praxisbuch energiewirtschaft*[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 1.
- [32] WAN Z J, WEI J J, QAISRANI M A, et al. Evaluation on thermal and mechanical performance of the hot tank in the two-tank molten salt heat storage system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 167: 114775.
- [33] 王钰森. 熔盐储热罐的设计研究[D]. 沈阳: 沈阳工程学院, 2019: 1.
WANG Yusen. Research on design of molten salt heat storage tank[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Engineering, 2019: 1.
- [34] 林文珠, 曹嘉豪, 方晓明, 等. 管壳式换热器强化传热研究进展[J]. *化工进展*, 2018, 37(4): 1276-1286.
LIN Wenzhu, CAO Jiahao, FANG Xiaoming, et al. Research progress of heat transfer enhancement of shell-and-tube heat exchanger[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2018, 37(4): 1276-1286.
- [35] LU Y W, LI X L, 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.
- [36] 文玉良. 熔融盐横纹管吸热器传递特性与强化机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010: 1.
WEN Yuliang. Transport characteristic and its enhancement mechanism for transverse ridged tubes with molten salts materials in receiver[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010: 1.
- [37] 刘斌, 吴玉庭, 马重芳, 等. 圆管内熔融盐强迫对流换热的实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2010, 31(10): 1739-1742.
LIU Bin, WU Yuting, MA Chongfang, et al. Experimental

- study for forced convective heat transfer with molten salts in a circular tube[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, 31(10): 1739-1742.
- [38] 叶猛, 刘斌, 吴玉庭, 等. 熔融盐(LiNO₃)强制对流换热实验[J]. *工程热物理学报*, 2008, 29(9): 1585-1587.
YE Meng, LIU Bin, WU Yuting. An experimental investigation of heat transfer during forced convection in molten salt (LiNO₃) [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, 29(9): 1585-1587.
- [39] 孟强, 陈梦东, 胡晓, 等. 管内熔融盐强制对流传热的数值模拟[J]. *储能科学与技术*, 2019, 8(3): 544-550.
MENG Qiang, CHEN Mengdong, HU Xiao, et al. Numerical simulation of forced convective heat transfer of molten salt in tubes[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2019, 8(3): 544-550.
- [40] 董新宇, 姚凡, 毕勤成. 熔融盐-亚临界汽/水传热性能实验分析[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(15): 4467-4473.
DONG Xinyu, YAO Fan, BI Qincheng. Experimental investigation of heat transfer performance of solar salt and subcritical water/steam[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(15): 4467-4473.
- [41] 董新宇, 毕勤成, 姜梦雨. 熔盐在套管换热器中传热特性实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(19): 6670-6678.
DONG Xinyu, BI Qincheng, JIANG Mengyu. Experimental investigation of heat transfer performance of molten salt in double-pipe heat exchanger[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(19): 6670-6678.
- [42] 惠姣, 鲁莉, 董新宇. 熔盐横掠管束传热特性实验研究[J]. *热能动力工程*, 2020, 35(12): 115-120.
HUI Jiao, LU Li, DONG Xinyu. Experimental investigation on heat transfer characteristic of molten salt flow across tubes[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2020, 35(12): 115-120.
- [43] 何石泉, 丁静, 陆建峰, 等. 管外高温熔盐的流动换热特性[J]. *工程热物理学报*, 2013, 34(1): 103-105.
HE Shiquan, DING Jing, LU Jianfeng, et al. Convective heat transfer characteristics of high temperature molten salt outside tube[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, 34(1): 103-105.
- [44] 扶麟. 熔盐-蒸汽套管换热器耦合传热特性研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2018: 1.
FU Lin. Study on coupled heat transfer characteristics in molten salt-steam double-pipe heat exchanger[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2018: 1.
- [45] 汪琦, 张慧芬, 俞红啸, 等. 熔盐塔式太阳能发电站与熔盐吸热器的研究[J]. *化工装备技术*, 2018, 39(3): 55-58.
WANG Qi, ZHANG Huifen, YU Hongxiao, et al. Study on molten salt tower-type solar power station and molten salt heat absorber[J]. *Chemical Equipment Technology*, 2018, 39(3): 55-58.
- [46] 侯玉婷, 李晓博, 刘畅, 等. 火电机组灵活性改造形势及技术应用[J]. *热力发电*, 2018, 47(5): 8-13.
HOU Yuting, LI Xiaobo, LIU Chang, et al. Flexibility reform situation and technical application of thermal power units[J]. *Thermal Power Generation*, 2018, 47(5): 8-13.
- [47] 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.
- [48] 周科, 李银龙, 李明皓, 等. 燃煤发电-物理储热耦合技术研究进展与系统调峰能力分析[J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(3): 159-172.
ZHOU Ke, LI Yinlong, LI Minghao, et al. Research progress on the coupling technology of coal-fired power generation-physical thermal storage and analysis for the system peaking capacity[J]. *Clean Coal Technology*, 2022, 28(3): 159-172.
- [49] 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.
- [50] 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]. *Journal of HV & AC*, 2020, 50(10): 71-75.
- [51] 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): 2682-2690.
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): 2682-2690.
- [52] 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.
- [53] 张显荣, 徐玉杰, 杨立军, 等. 多类型火电-储热耦合系统性能分析与比较[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(5): 1565-1578.
ZHANG Xianrong, XU Yujie, YANG Lijun, et al. Performance analysis and comparison of multi-type thermal power-heat storage coupling systems[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(5): 1565-1578.

(责任编辑 李园)