

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.09.006

熔盐储热技术的应用现状与研究进展

Application and research progress of molten salt heat storage technology

张钟平¹, 刘亨^{2*}, 谢玉荣¹, 赵大周¹, 牟敏¹, 陈桥¹

ZHANG Zhongping¹, LIU Heng^{2*}, XIE Yurong¹, ZHAO Dazhou¹, MOU Min¹, CHEN Qiao¹

(1. 华电电力科学研究院有限公司, 杭州 310030; 2. 上海电力大学 能源与机械工程学院, 上海 200090)

(1. Huadian Electric Power Research Institute Company Limited, Hangzhou 310030, China; 2. School of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

摘要: 熔盐是一种理想的储热介质, 具有黏度低、蒸汽压低、热稳定性高、储热密度高等优点, 因此熔盐储热技术可以广泛应用于太阳能光热发电、火力发电机组的调峰调频、供暖与余热回收利用等领域。目前对熔盐储热关键技术研究普遍以太阳能光热发电为中心展开, 针对其他场景的研究与应用不够充分。在不同的应用场景下, 熔盐的工作温度区间、加热方式、关键部件的选择和系统流程的布置都有区别。概述了熔盐储热技术的优势特点与技术关键, 总结了在不同场景下的研究现状和最新的应用示范, 分析了目前熔盐储热技术需要加强研究的关键方面, 并提出了未来的发展趋势与目标。

关键词: 熔盐; 储热; 光热发电; 火力发电机组; 余热回收

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2097-0706(2023)09-0040-08

Abstract: Molten salt heat storage is a key technology for constructing future neo power systems. Since molten salt, an ideal heat storage medium, is of low viscosity, low steam pressure, high stability, high heat storage density, molten salt heat storage technology can be widely used in solar thermal power generation, thermal power peak and frequency regulation, heating, and waste heat recovery and utilization. However, current researches about this technology mainly focus on its employment in solar photothermal power generation, while its applications in other scenarios are insufficient in study. Under different application scenarios, the working temperature range, heating mode, selection of key components and design of working flow of a molten salt heat storage system are different. The advantages, characteristics and key technologies of molten salt heat storage technology are expounded, the research progress and the latest demonstration projects under different scenarios are listed, and the key problems subjected to further research are analyzed. Finally, future development trend and target of this technology are proposed.

Keywords: molten salt; heat storage; photothermal power generation; thermal power unit peak load regulation; waste heat recovery

0 引言

随着可再生能源并网规模的迅猛发展, 其间歇性与不稳定性对电力系统的安全稳定运行产生较大负面影响, 须配置储能系统消纳可再生能源电力^[1]。2022年2月10日国家发展改革委员会、国家能源局发布的《“十四五”新型储能发展实施方案》中指出, 新型储能是构建新型电力系统的重要技术和基础装备, 是实现“双碳”目标的重要支撑。目前应大力发展火力发电机组抽汽蓄能等依托常规电

源的新型储能技术, 推进源网荷储一体化协同发展^[2]。

熔盐作为一种中高温传热蓄热介质, 与常规高温传热流体相比具有饱和蒸汽压较低、高温稳定性优越、黏度低、比热容大的优势^[3], 因此熔盐储热系统具有适用范围广、绿色环保、安全稳定等优点, 是目前大规模、长时间、中高温储热技术的首选, 不仅适用于太阳能热发电, 还可应用于火力发电的灵活性改造、余热回收利用、清洁供暖等, 是构建未来新型储能系统的关键技术之一^[4]。本文重点介绍熔盐储热技术的特点, 总结该技术在不同场景下的研究现状和最新的应用示范, 分析目前需要加强研究的关键方面, 总结并展示未来的发展趋势与目标。

基金项目: 上海市高峰高原学科项目(A1-5701-18-007-03)
Shanghai Peak Plateau Discipline Project (A1-5701-18-007-03)

1 熔盐储热技术特点

1.1 熔盐储热的优势

目前储能技术主要分为机械储能、电化学储能、储热、电磁储能及化学能储能等^[5],其发展现状、优缺点、容量范围等见表1。机械储能的应用受限于位置环境^[6],其中飞轮储能更适用于启动时间要求较高的快速调频领域,且成本较高^[7]。电化学储能技术既包括较成熟的锂电池技术,也包括液流电池和钠硫电池等新兴技术。锂电池技术目前仍存在能量密度低、循环寿命短和安全性差等问题。液流电池与钠硫电池作为新兴的高效大容量储能电池,具有一定的应用前景,但成本还需要进一步控

制^[8]。电磁储能和化学储能目前还处于研发试验阶段,距离大规模应用还有一段距离^[9]。与电化学储能和机械储能技术相比,储热技术的寿命更长、成本更低,比储电更加安全稳定^[10],并且在太阳能光热发电领域应用广泛,积累了丰富的丰富经验。

在储热技术中,熔盐是一种比较理想的储热介质。相比水储热,熔盐储热的工作温度区间更宽,可以在中高温储热场景使用^[11],因此熔盐储热技术可以在多种场景下应用。相比固体储热,熔盐储热具有稳定、寿命长、换热难度小等优势。综上所述,熔盐储热具有大规模、长时间、安全稳定以及不受选址限制的特点,是构建未来新型电力系统中极有前途的储能技术之一。

表 1 各种储能技术的特点
Table 1 Characteristics of various energy storage technologies

储能类型	储能方式	发展现状	容量范围	优点	缺点
机械储能	抽水蓄能	商业化	10 kW~100 MW	容量大、寿命长	选址受限、建设周期长
	压缩空气储能	商业化	10~100 MW	容最大、快速响应、容量功率范围灵活	选址受限
	飞轮储能	商业化	10 kW~1 MW	高效、寿命较长	自放电率高、短期储能、成本高
电化学储能	锂离子电池	商业化	10 kW~300 MW	能量需度高、高效率、无污染	成本较高
	全钒液流电池	商业化早期	100 kW~10 MW	充放电次数多、容量大、寿命短	能量密度较低
	钠硫电池	商业化	100 kW~10 MW	结构紧凑、容量大、效率高	运行维护费用高
储热	熔盐储热	商业化	10 kW~100 MW	储能密度大、无污染、安全稳定,适用于大规模、长寿命系统	初期投资成本高,熔盐性能、关键设备待提升
	固体储热	商业化	10 kW~100 MW	储热能力强,温度上限高	换热不稳定、寿命短
	水储热	商业化	—	储热稳定、来源丰富、投资低	储热温差小、温度低
电磁储能	超级电容器	研发中	10~100 kW	充放电快速、高效率、寿命长	能量密度低、成本高
	超导储能	研发中	—	功率大、占地小、损耗小	成本高、自放电率高

1.2 熔盐储热应用的关键

现阶段,熔盐储热技术要实现大规模应用还有一些关键技术问题需要解决。首先,熔盐材料是熔盐储热技术的根本,其热物理性质参数尚存在熔点高、比热容低、热导率低等不足,直接影响储热系统的运行,并导致系统占地面积及成本居高不下^[12]。

近年来,国内外专家学者对高比热容、低熔点熔盐的制备及熔盐热物理性质参数的提升进行研究^[13~19],发现在熔盐材料中添加可溶性添加剂或纳米材料颗粒可以显著提升熔盐的储热性能^[20~22]。Aljaerani 等^[23]将 CuO 纳米颗粒掺杂于三元硝酸熔盐($\text{KNO}_3+\text{NaNO}_2+\text{NaNO}_3$,也被称为 HiTec 盐)并分析了掺杂前后比热容、熔点和潜热、热稳定性的变化,如图1所示。结果表明,掺杂0.1%质量分数 CuO 纳米颗粒的 HiTec 盐,比热容提高了5.6%,潜热提高了30.0%,热稳定性提高了9.0%。

其次,熔盐换热器是熔盐储热系统中的关键部件之一,其设计不仅要考虑换热效率,还要考虑熔盐的腐蚀性,以及温度变化时熔盐可能凝固造成换

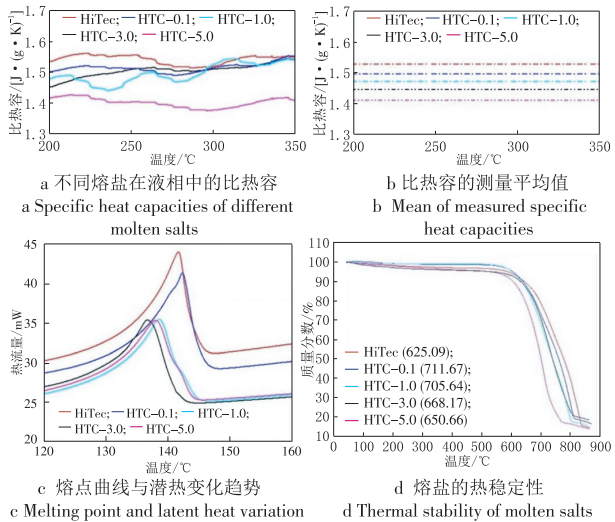


图 1 不同熔盐性能对比
Fig. 1 Performances of different molten salts

热器堵塞等问题。因此熔盐换热器的设计也是近年来的研究热点^[24~26]。最后,在熔盐储热系统集成方面还有一些关键技术,如高电压等级的电加热熔盐加热器^[27]、耐腐蚀与高温的熔盐泵^[28]、阀门、管

道^[29]及熔盐储罐^[30]的设计选型与单罐、双罐、多罐系统的研发设计等^[31-32]。

2 太阳能光热发电

熔盐储热已成功应用于国内外多个太阳能光热电站,以槽式导热油传热熔盐储热和熔盐塔式光热电站最为常见。2009年,配置熔盐储热的西班牙安达索尔槽式光热发电站成功投入运行,成为全球首个商业化聚光太阳能电站。2010年,意大利阿基米德建成以熔盐作为储热传热介质的4.9 MW槽式聚光太阳能光热电站。2013年,国内的青海中控德令哈10.0 MW塔式熔盐光热电站实现并网发电,是我国首座成功投运的规模化储能光热电站。2018年,北京首航敦煌100.0 MW塔式熔盐光热电站的建成,标志着我国自主研发的太阳能光热发电技术向商业化运行迈出了成功的一步。相比国外,我国的太阳能光热发电处于示范电站阶段,商业化运行也处于初级发展阶段,因此熔盐储热应用于太阳能光热发电有着广阔的市场空间^[33]。

目前,常见的光热电站按光热和熔盐的耦合方式可分为间接与直接2种,系统结构如图2所示^[34]。2种系统流程的区别在于,间接熔盐储热系统需要设置换热装置进行换热,通常采用导热油或水蒸气作为传热介质,而直接熔盐储能不需要换热装置。因此,间接熔盐储热的工作温度一般在400℃以下,直接熔盐储热的工作温度适用于400~500℃。

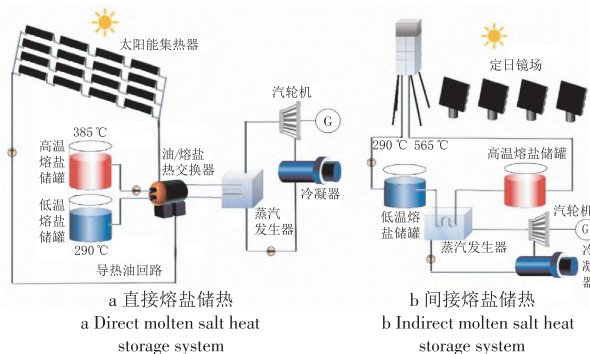


图2 常见光热电站熔盐储热结构

Fig. 2 Structure of a common molten salt heat storage system in a photothermal power station

现阶段光热电站的冷却方式以空冷机组为主,但机组发电仍采用水蒸气朗肯循环。许多专家学者研究了基于S-CO₂布雷顿循环的太阳能光热发电系统,以CO₂替代水蒸气作为传热介质。系统运行时最高温度可达800℃,通常选用耐高温且性能稳定的氯化盐和碳酸盐,使系统获得循环效率高、系统紧凑、灵活性高等优点,更适我国缺少水资源的西部地区^[35]。王智等^[36]通过Ebsilon软件模拟了青

海塔里木地区30 MW再压缩S-CO₂塔式太阳能光热布雷顿循环系统,其设计使用了45%LiCl+55%KCl作为传热介质的熔盐储热系统,总结了熔盐储热量在各月所需时长与两分两至日系统供能情况,发现5—7月熔盐系统的储热时间最短,11月至次年1月储热时间最长,在无光源状态下机组可满功率发电10 h,如图3所示。冬至日熔盐储热系统无法储满热,无光照下系统持续运行发电功率仅为17.34 MW,如图4所示。

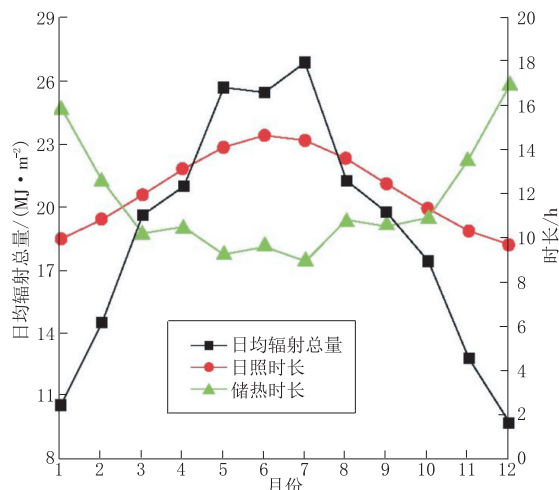


图3 30 MW再压缩S-CO₂塔式太阳能光热电站储热时长^[36]

Fig. 3 Time of heat storage of a 30 MW re-compressed tower solar thermal power plant based on S-CO₂^[36]

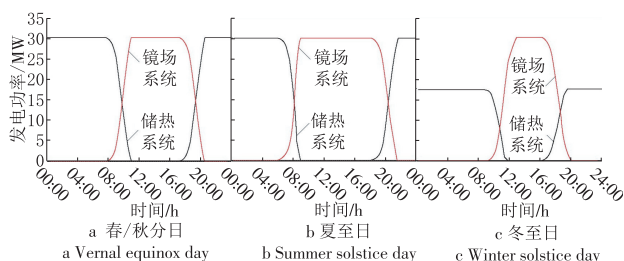


图4 系统供能情况^[36]

Fig. 4 Energy supply situation of system^[36]

3 煤电灵活性改造

在太阳能光热发电领域广泛应用的二元硝酸盐(60%NaNO₃+40%KNO₃),其工作温度区间为221~565℃,刚好匹配火力发电系统的温度参数,因此熔盐储热技术也适用于火力发电机组的灵活性改造。以热电联产机组为例,此类机组需要长期向外供热,在调峰时段,机组的电负荷出力严重受限,调峰深度受到供热负荷的影响及“以热定电”的约束。将熔盐储热系统加入机组的热力系统,在适合的时段加热熔盐,待到调峰时段通过高温熔盐放热供暖,从而切除机组的热负荷,实现“热电解耦”的同时提高机组运行的灵活性。图5为火力发电机组的

锅炉和汽轮机之间耦合大容量高温熔盐储热系统,为煤电机组灵活性改造提供了新的策略^[37-39]。

2022 年 12 月,江苏国信靖江发电有限公司煤电机组耦合熔盐储热示范工程顺利投入运行,机组调峰容量达到 75% 额定负荷,标志着熔盐储热技术在煤电领域的应用取得新的突破。

近年来,许多专家学者通过软件模拟(如 Ebsilon, Aspenplus 等)的方法对熔盐储热系统耦合火力发电机组实现调峰调频进行了深入研究^[40-46],选择的机组为 350, 600, 660 MW 的火力发电机组,熔盐采用电加热或机组产生的蒸汽加热,模拟分析

得出的结果见表 2。

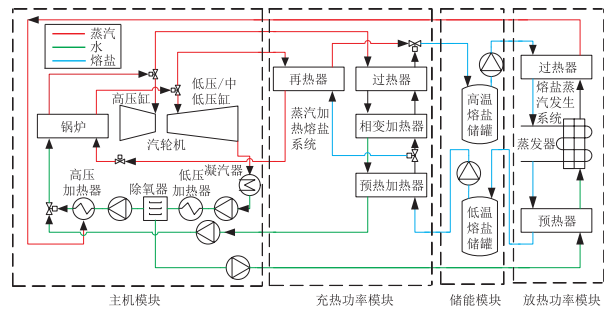


图 5 高温熔盐储热系统耦合燃煤机组
Fig. 5 High-temperature molten salt heat storage system coupled with coal-fired units

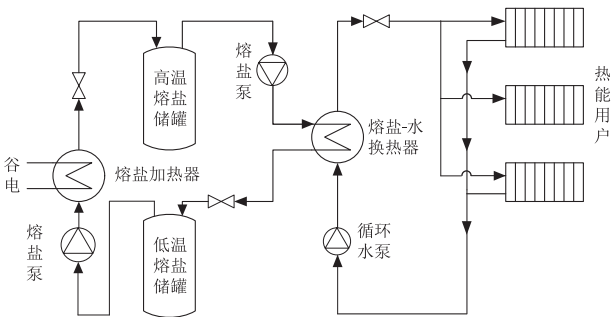
表 2 近年来对熔盐储热系统耦合燃煤机组模拟的研究

Table 2 Recent simulation studies on the molten salt heat storage system coupled with coal-fired units				
作者	模拟软件	机组功率与类型	熔盐加热方式	模拟分析结果
邹小刚等 ^[40]	Ebsilon	350 MW 燃煤	电加热	电加热熔盐系统循环热效率为 33.2%, 机组最低发电负荷可降至 25.0% 以下
刘金恺等 ^[41]	Matlab	600 MW 燃煤	电加热	电加热熔盐储热, 释热时加热旁路给水, 调峰深度 17.83%
范庆伟等 ^[42]	Ebsilon	600 MW 燃煤	再热蒸汽	储热过程中每增加 1 MW 储热功率, 耗煤增加 0.3 g/(kW·h)
张显荣等 ^[43]	Aspenplus	600 MW 燃煤	再热蒸汽	机组新增上/下调峰容量 29.25/36.50 MW, 新增上/下调峰深度 4.87%/6.08%
王惠杰等 ^[44]	Aspenplus +Ebsilon	塔式太阳能+ 660 MW 燃煤	塔式太阳能集热器	燃煤机组在 80.00%~90.00%THA 负荷下运行, 煤耗降低率由 5.76% 提高到 15.54%
庞力平等 ^[45]	Thermoflow	660 MW 燃煤	再热蒸汽	储放热阶段, 储热阶段的最大调峰量为 6.82%, 放热阶段为 1.82%, 明显提高了机组对负荷的响应速度
王坚等 ^[46]	无	350 MW 燃煤	主蒸汽+再热蒸汽	储能规模达到 650 MW·h 以上, 系统综合储能效率>90.2%

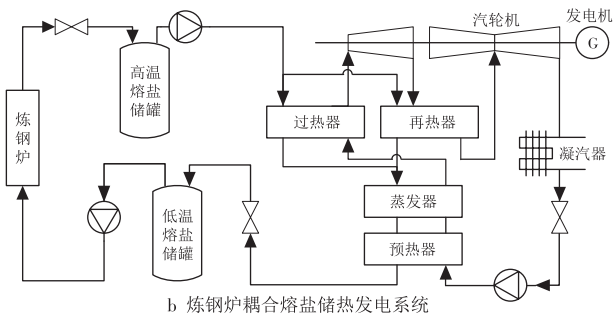
邹小刚等^[40]发现在他们设计的多种不同耦合流程中,电加热熔盐系统的循环热效率是最高的。刘金恺等^[41]设计几种不同的电加热与蒸汽加热熔盐耦合煤电系统的方案,通过计算发现电加热熔盐储热,在放热时通过熔盐加热旁路给水的方案具有最佳的负荷调节能力,但电加热造成大量的烟损失。由表 2 可见,熔盐储热系统耦合煤电系统可以明显提高调峰能力、拓宽机组的运行区间及响应速度等参数。王惠杰等^[44]模拟了塔式太阳能耦合燃煤机组,结果表明耦合之后可以降低火力发电机组的煤耗,同时熔盐储热系统消纳了更多的太阳能。

4 熔盐储热供暖与余热利用

利用夜间低谷电价时段的电能加热熔盐,待顶峰电价时段需要供热时,将熔盐储存的热量放出,通过换热器加热给水并实现供暖。放热后的冷熔盐再储存于储罐中,待到低谷电价时加热,重复循环使用,不仅实现了移峰填谷,还能消纳新能源发电,为电网的安稳运行提供保障,又能在一定程度上减少排放^[47],系统原理如图 6a 所示。2016 年,河北辛集熔盐蓄热低谷电供暖项目投入运行,每年可节约燃煤 699 t,减少 CO₂ 排放 1 889 t,具有出色的环保效益^[48]。



a 谷电-熔盐储热供热系统
a Heating system powered by off-peak electricity and the molten salt heat storage system



b 炼钢炉耦合熔盐储热发电系统
b Power generation system integrating the steel-making furnace and molten salt heat storage system

图 6 熔盐储热余热利用案例
Fig. 6 Waste heat utilization project with molten salt heat storage system

在我国钢铁行业的生产过程中,存在大量可回收的余热,将这些余热回收用于发电、居民供暖将

获得可观的收益。以炼钢炉为例,耦合熔盐储热系统实现发电的系统原理如图 6b 所示,炼钢过程中产生的高温烟气在烟腔内将低温熔盐加热至高温,高温熔盐通过过热器、蒸发器、预热器将给水加热成过热蒸汽并驱动汽轮机发电。

5 结论与展望

熔盐储热具有储能容量大、储存周期长、成本低等优点,是大规模储能的理想选择。熔盐储热已广泛应用于太阳能光热发电及火力发电机组的灵活性改造、供暖与余热回收利用等场景,并有一些代表性的示范项目,但在一些关键技术方面还有待提升。在熔盐材料方面,应研发出更加适合商业化的熔盐材料。以熔盐为工质的相关设备缺乏完善的制造标准和规范。在火力发电机组灵活性改造方面,标准尚未明确,以及对实际改造中将面临的问题缺少研究。

未来,熔盐材料的成本将明显降低,同时储热密度大大提高。熔盐储热系统的关键设备形成明确的制造标准,系统集成形成规范的评价体系,应用于各场景的技术实现统一配套。熔盐储热技术将实现大规模的商业化,成为新型电力系统中成熟的储能技术之一。

参考文献:

- [1] 杨水丽, 来小康, 丁涛, 等. 新型储能技术在弹性电网中的应用与展望[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(2): 515-528.
YANG Shuli, LAI Xiaokang, DING Tao, et al. Application and prospect of new energy storage technologies in resilient power systems [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(2): 515-528.
- [2] 郑云平, 李明, 张艳丽, 等. 新型储能政策分析与建议[J/OL]. 储能科学与技术, 2023; 1-10(2023-04-06)[2023-06-06].
<https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0140>.
ZHENG Yunping, LI Ming, ZHANG Yanli, et al. Analysis and suggestions on new energy storage policy [J/OL]. Energy Storage Science and Technology, 2023; 1-10(2023-04-06)[2023-06-06]. <https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0140>.
- [3] 魏小兰, 谢佩, 张雪钊, 等. 氯化物熔盐材料的制备及其热物理性质研究[J]. 化工学报, 2020, 71(5): 2423-2431.
WEI Xiaolan, XIE Pei, ZHANG Xuechuan, et al. Research on preparation and thermodynamic properties of chloride molten salt materials [J]. CIESC Journal, 2020, 71(5): 2423-2431.
- [4] 欧阳子区, 王宏帅, 吕清刚, 等. 煤粉锅炉发电机组深度调峰技术进展[J/OL]. 中国电机工程学报, 2023; 1-22(2023-02-23)[2023-06-06]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222007>.
- [5] 陈海生, 李泓, 马文涛, 等. 2021 年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(3): 1052-1076.
CHEN Haisheng, LI Hong, MA Wentao, et al. Research progress of energy storage technology in China in 2021 [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(3): 1052-1076.
- [6] 张玮灵, 古含, 章超, 等. 压缩空气储能技术经济特点及发展趋势[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(4): 1295-1301.
ZHANG Weiling, GU Han, ZHANG Chao, et al. Study on technical economic characteristics and development trends of compressed air energy storage [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(4): 1295-1301.
- [7] 马汀山, 王妍, 吕凯, 等. “双碳”目标下火电机组耦合储能的灵活性改造技术研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(S1): 136-148.
MA Tingshan, WANG Yan, LYU Kai, et al. Research progress on flexibility transformation technology of coupled energy storage for thermal power units under the "dual-carbon" goal [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(S1): 136-148.
- [8] 张华民. 全钒液流电池的技术进展、不同储能时长系统的价格分析及展望[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(9): 2772-2780.
ZHANG Huamin. Development, cost analysis considering various durations, and advancement of vanadium flow batteries [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(9): 2772-2780.
- [9] 蒋文坤, 韩颖慧, 薛智文, 等. 多能互补能源系统中储能原理及其应用[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(1): 63-71.
JIANG Wenkun, HAN Yinghui, XUE Zhiwen, et al. Energy storage technologies and their applications in multi-energy complementary power system [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(1): 63-71.
- [10] 刘阳, 滕卫军, 谷青发, 等. 规模化多元电化学储能度电成本及其经济性分析[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(1): 312-318.
LIU Yang, TENG Weijun, GU Qingfa, et al. Scaled-up diversified electrochemical energy storage LCOE and its economic analysis [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(1): 312-318.
- [11] 何雅玲, 严俊杰, 杨卫卫, 等. 分布式能源系统中能量的高效存储[J]. 中国科学基金, 2020, 34(3): 272-280.
HE Yaling, YAN Junjie, YANG Weiwei, et al. High efficient energy storage in distributed energy system [J].

- Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2020, 34(3): 272–280.
- [12] YUAN F, HE Y L, LI M J, et al. Study on the theoretical calculation method for the effective thermal conductivity of carbon nanotube composite molten salt for solar energy application [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2022, 238: 111631.
- [13] ALJAERANI H A, SAMYKANO M, SAIDUR R, et al. Nanoparticles as molten salts thermophysical properties enhancer for concentrated solar power: A critical review [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 44: 103280.
- [14] LI C, LI Q, LU X K, et al. Inorganic salt based shape-stabilized composite phase change materials for medium and high temperature thermal energy storage: Ingredients selection, fabrication, microstructural characteristics and development, and applications [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 55: 105252.
- [15] YADAV A, VERMA A, KUMAR A, et al. Recent advances on enhanced thermal conduction in phase change materials using carbon nanomaterials [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 43: 103173.
- [16] 熊亚选, 张慧, 吴玉庭, 等. 纳米颗粒对二元硝酸盐表面张力和密度的影响[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(4): 1297–1304.
- XIONG Yaxuan, ZHANG Hui, WU Yuting, et al. Effect of nanoparticles on surface tension and density of binary nitrate [J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(4): 1297–1304.
- [17] 武延泽, 王敏, 李锦丽, 等. 纳米材料改善硝酸熔盐传蓄热性能的研究进展[J]. 材料工程, 2020, 48(1): 10–18.
- WU Yanze, WANG Min, LI Jinli, et al. Research progress in improving heat transfer and heat storage performance of molten nitrate by nanomaterials [J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(1): 10–18.
- [18] JEONG S, JO B. Distinct behaviors of KNO_3 and NaNO_3 in specific heat enhancement of molten salt nanofluid [J]. The Journal of Energy Storage, 2023, 57: 106209.
- [19] GROSU Y, ANAGNOSTOPOULOS A, BALAKIN B, et al. Nanofluids based on molten carbonate salts for high-temperature thermal energy storage: Thermophysical properties, stability, compatibility and life cycle analysis [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2021, 220: 110838.
- [20] 田禾青, 周俊杰, 郭茶秀. 熔盐储热材料比热容强化的研究进展[J]. 化工进展, 2020, 39(2): 584–595.
- TIAN Heqing, ZHOU Junjie, GUO Chaxiu. Progress of specific heat enhancement of molten salt thermal energy storage materials [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(2): 584–595.
- [21] ROPER R, HARKEMA M, SABHARWALL P, et al. Molten salt for advanced energy applications: A review [J]. Annals of Nuclear Energy, 2022, 169: 108924.
- [22] 张灿灿, 韩松涛, 吴玉庭, 等. 硝基熔盐纳米流体在扭曲扁管内流动与换热特性[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(11): 3641–3648.
- ZHANG Cancan, HAN Songtao, WU Yuting, et al. Nitrate molten salt - based nanofluid flow and heat transfer characteristics in twisted tube [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(11): 3641–3648.
- [23] ALJAERANI H A, SAMYKANO M, PANDEY A K, et al. Thermophysical properties enhancement and characterization of CuO nanoparticles enhanced HiTec molten salt for concentrated solar power applications [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2022, 132: 105898.
- [24] 王中原, 傅瑶, 邹杨, 等. 管壳式熔盐换热器折流板开孔数值分析[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(10): 2790–2797.
- WANG Zhongyuan, FU Yao, ZOU Yang, et al. Numerical analysis of baffle opening on shell and tube molten salt heat exchanger [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(10): 2790–2797.
- [25] 孙育滨, 高伟. 熔盐换热系统在化工行业的应用[J]. 广东化工, 2022, 49(11): 21–23.
- SUN Yubin, GAO Wei. The application of molten salt heat exchange system in chemical industry [J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(11): 21–23.
- [26] YANG Y. Numerical study on heat transfer characteristics of molten salt in a flat tube with circular helical wire [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 227: 120373.
- [27] 张永乐, 吴玉庭, 张灿灿, 等. 熔盐电磁感应加热器的数值模拟与分析[J]. 太阳能学报, 2021, 42(8): 243–250.
- ZHANG Yongle, WU Yuting, ZHANG Cancan, et al. Numerical simulation and analysis electromagnetic induction heater for molten salt [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(8): 243–250.
- [28] 操松林, 呼核升, 操瑞嘉, 等. 熔盐泵现状与展望[J]. 流体机械, 2019, 47(11): 49–55.
- CAO Songlin, HU Hesheng, CAO Ruijia, et al. The present situation and prospect of molten salt pump [J]. Fluid Machinery, 2019, 47(11): 49–55.
- [29] 牛东圣, 周治, 肖斌, 等. 槽式光热电站熔盐管道系统防凝研究进展[J]. 热力发电, 2020, 49(3): 1–7.
- NIU Dongsheng, ZHOU Zhi, XIAO Bin, et al. Advances in freeze protection of molten salt piping system in parabolic trough CSP plants [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(3): 1–7.
- [30] 王鼎, 肖虎, 陈宇轩, 等. 基于CFD方法的熔盐储罐预热分析[J]. 华电技术, 2021, 43(7): 75–81.
- WANG Ding, XIAO Hu, CHEN Yuxuan, et al. Preheating

- analysis on molten salt storage tank based on CFD method [J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(7): 75–81.
- [31] 杜保存, 贾凡, 郭一帆, 等. 50 MWe 光热电站填充床储罐的高温蠕变与机械性能研究[J/OL]. 太原理工大学学报: 1–9 (2022–10–29) [2023–06–06]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/14.1220.N.20221028.1329.002.html>.
DU Baocun, JIA Fan, GUO Yifan, et al. High temperature creep and mechanical analysis of the packed-bed thermal storage tank in 50 MWe solar power plant [J/OL]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 1–9 (2022–10–29) [2023–06–06]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/14.1220.N.20221028.1329.002.html>.
- [32] 徐玫, 王晓, 肖斌, 等. 塔式太阳能热发电系统性能模型及其仿真研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(2): 238–245.
XU Mei, WANG Xiao, XIAO Bin, et al. Performance model and simulation study of solar power tower system [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2022, 43(2): 238–245.
- [33] 童家麟, 吕洪坤, 李汝萍, 等. 国内光热发电现状及应用前景综述[J]. 浙江电力, 2019, 38(12): 25–30.
TONG Jialin, LYU Hongkun, LI Ruping, et al. Review on status and application prospect of domestic csp generation [J]. *Zhejiang Electric Power*, 2019, 38(12): 25–30.
- [34] 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.
- [35] 何志瞧, 童家麟. 太阳能光热发电现状及超临界 CO₂ 光热发电技术应用前景[J]. 华电技术, 2020, 42(4): 77–83.
HE Zhiqiao, TONG Jialin. Development status of solar thermal power generation and prospect of supercritical carbon dioxide technology applied in it [J]. *Huadian Technology*, 2020, 42(4): 77–83.
- [36] 王智, 闫锐鸣, 刘亚丽, 等. 再压缩 S–CO₂ 塔式光热发电系统模拟及参数优化[J]. 汽轮机技术, 2021, 63(6): 422–426.
WANG Zhi, YAN Ruiming, LIU Yali, et al. Simulation and parameter optimization of recompression S–CO₂ tower photothermal power generation system [J]. *Turbine Technology*, 2021, 63(6): 422–426.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 邹小刚, 刘明, 肖海丰, 等. 火电机组耦合熔盐储热深度调峰系统设计及性能分析[J]. 热力发电, 2023, 52(2): 146–153.
ZOU Xiaogang, LIU Ming, XIAO Haifeng, et al. Design and performance analysis of deep peak shaving system of thermal power units coupled with molten salt heat storage [J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(2): 146–153.
- [41] 刘金恺, 鹿院卫, 魏海蛟, 等. 熔盐储热辅助燃煤机组调峰系统设计及性能对比[J]. 热力发电, 2023, 52(2): 111–118.
LIU Jinkai, LU Yuanwei, WEI Haijiao, et al. Design and performance comparison of peak shaving system of coal-fired unit aided by molten salt heat storage [J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(2): 111–118.
- [42] 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解耦研究[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.
- [43] 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.
- [44] 王惠杰, 董学会, 胥永超, 等. 熔盐储热型塔式太阳能与燃煤机组耦合方式及热力性能分析[J]. 热力发电, 2019, 48(7): 47–52.
WANG Huijie, DONG Xuehui, ZAN Yongchao, et al. Coupling method and thermal performance analysis for molten salt heat storage tower solar energy power station and thermal power unit [J]. *Thermal Power Generation*, 2019, 48(7): 47–52.
- [45] 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.
- [46] 王坚, 王辉. 火电厂抽汽储能深度调峰技术研究[J]. 电力勘测设计, 2022(6): 30–34.

WANG Jian, WANG Hui. Research on the energy storage technique by steam extraction from thermal power units used to deep load modulation [J]. Electric Power Survey & Design, 2022(6): 30-34.

[47] 林俊光, 仇秋玲, 罗海华. 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. Application status of molten salt heat storage technology [J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2021, 14(2): 70-73.

[48] 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.

(本文责编: 惠忻)

收稿日期: 2023-05-05; 修回日期: 2023-06-08

上网日期: 2023-06-30; 附录网址: www.iienenergy.cn

作者简介:

张钟平(1984), 男, 高级工程师, 硕士, 从事新型储能与综合能源等方面的工作, zhongping-zhang@chder.com;

刘亨*(1997), 男, 在读硕士研究生, 从事熔盐与新型储热技术等方面的研究, 1436016642@qq.com。

*为通信作者。

“面向‘双碳’目标的综合能源系统优化规划与运行控制”专刊征稿启事

近年来, 气候变化成为全球各国关注的焦点, 我国提出了二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和的“双碳”目标。未来能源系统的演化将向着节能减排、清洁高效方向发展。低碳理念的渗透与各类低碳要素的引入将使得综合能源呈现出明显的能碳耦合特性与全新的运行模式, 并广泛地影响系统规划、投资、调度与运行等功能环节。因此, 在传统综合能源系统学科研究体系基础上, 从“碳视角”出发的综合能源系统低碳化研究将成为一个重要的研究发展方向。

为此, 《综合智慧能源》特推出“面向双碳目标的综合能源系统优化规划与运行控制”专刊, 邀请浙江大学杨强教授、中国农业大学付学谦副教授、河海大学吴英俊副教授、杭州电子科技大学董伟副研究员担任特约主编, 共同探讨“双碳”目标及“智慧综合能源系统”背景下清洁低碳能源电力系统的最新研究进展、理论成果、技术应用及相关标准, 促进新一代低碳智慧综合能源系统研究的深入和技术的进步, 为我国能源系统的低碳发展提供有益的借鉴与启示, 欢迎业内同仁踊跃投稿!

一、征稿范围(包括但不限于)

- (1) 综合能源系统优化规划与运行控制方法综述;
- (2) 综合能源系统低碳规划与时序建设研究;
- (3) 综合能源系统多时间尺度低碳运行调度研究;
- (4) 多方综合能源系统碳交易机制与应用;
- (5) 计及需求响应的综合能源系统低碳运行调度;
- (6) 提高供能可靠性的综合能源系统鲁棒优化调控;
- (7) 多投资主体视角下综合能源系统容量优化配置研究;
- (8) 考虑碳捕集的综合能源系统经济运行研究;
- (9) 考虑碳交易的多能耦合园区低碳规划;
- (10) 基于博弈的多区域综合能源系统协同优化研究;
- (11) 含P2G的综合能源系统风电消纳研究;
- (12) 电氢气多能协同的综合能源系统低碳经济调度研究;
- (13) 区域综合能源系统仿真方法及示范性应用。

二、时间进度

专刊拟于2023年11月30日截稿, 择期优先出版。

三、征稿要求

- (1) 专刊只收录未公开发表的论文, 拒绝一稿多投。作者对论文内容的真实性和客观性负责。
- (2) 按照《综合智慧能源》论文格式要求使用 Word 软件排版, 请登录《综合智慧能源》在线采编系统(www.hdpower.net 或 www.iienenergy.cn)下载中心下载论文模板。
- (3) 请保留论文图片、曲线和表格原始文件, 并在投稿时按规定提交。
- (4) 论文作者应遵守相关学术不端规定。

四、投稿方式

- (1) 在线投稿(推荐): 登录在线采编系统(www.hdpower.net 或 www.iienenergy.cn), 完成在线全文投稿, 欢迎投稿时推荐审稿人。
- (2) 邮箱投稿: qyang@zju.edu.cn(杨教授); hdjs-chd@vip.163.com(编辑部)。
- (3) 咨询联系: 刘芳 0371-58501060, 13838002988; 杨满成 010-63918755, 13801175292。