

模块化熔盐储热换热器流动传热特性研究及 安全性分析

宋园园¹, 周科², 鲁晓宇², 李明皓², 卫子钰¹, 杨冬¹

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安热工研究院有限公司, 710054, 西安)

摘要: 为进一步提升燃煤机组的运行灵活性并实现燃煤机组与电力系统的热电解耦, 针对燃煤-熔盐耦合系统中储热换热器的优化设计问题展开研究。基于新型模块化熔盐储热换热器的结构特点和实际运行工况中的现场测量数据, 计算得出熔盐侧换热系数并对汽水系统的流动传热特性进行计算分析。基于流动网络系统法将汽水管束进行划分并建立流量分配和压降计算模型, 将熔盐泵启动工况下实际测量的运行数据与程序计算得出的系统总压降进行对比, 相对误差为 2.13%, 验证了计算模型的可靠性。计算分析了设计工况下汽水系统的压力分布、流量分配、出口汽温、管壁金属温度等特性参数, 并进行热负荷受到扰动时的流动不稳定性研究。结果表明: 设计工况下熔盐泵不启动时, 工质出口汽温为 327.7 °C; 熔盐泵启动时, 工质出口汽温为 362.2 °C; 两种运行工况下系统总压降与最大管壁金属温度均在安全合理的范围内, 且不会发生流动不稳定的现象。该研究全面评价了熔盐储热换热器运行时的安全性与可靠性, 为耦合燃煤发电的熔盐储能技术提供了理论基础。

关键词: 熔盐储热换热器; 熔盐侧换热系数; 流量分配; 压降计算

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202507012 **文章编号:** 0253-987X(2025)07-0118-11

Study on Flow and Heat Transfer Characteristics and Safety Analysis of Modular Molten Salt Thermal Storage Heat Exchangers

SONG Yuanyuan¹, ZHOU Ke², LU Xiaoyu², LI Minghao², WEI Ziyu¹, YANG Dong¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to further enhance the operational flexibility of coal-fired units and to realize the thermo-electric decoupling of coal-fired units from the power system, the optimal design of heat storage heat exchanger in coal-fired molten salt coupling system is studied. Based on the structural characteristics of a novel modular molten salt thermal energy storage heat exchanger and field measurement data from actual operating conditions, the heat transfer coefficient on the molten salt side is calculated and the flow and heat transfer characteristics of the steam-water system are analyzed. Utilizing the flow network system method, the steam-water tube bundle is divided and a flow distribution and pressure drop calculation model is established. Actual operational data measured during the molten salt pump startup condition are compared with the total pressure drop obtained from the program calculations, resulting in a relative error of 2.13%, which verifies the reliability of the calculation model. The pressure distribution, flow distribution, outlet steam temperature, and pipe

收稿日期: 2025-01-13。 作者简介: 宋园园(1998—), 女, 硕士生; 杨冬(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项

目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB4100303)。

网络出版时间: 2025-04-10

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20250410.1424.004>

wall metal temperature under design conditions of the steam-water system are calculated and analyzed, along with a study on flow instability when thermal load disturbances occur. The results indicate that, under design conditions, when the molten salt pump is not started, the working fluid outlet steam temperature is 327.7 °C; when the molten salt pump is started, the outlet steam temperature is 362.2 °C. The total pressure drop of the system and the maximum metal wall temperature under both operating conditions are within safe and reasonable ranges, and no flow instability occurs. This comprehensively evaluates the safety and reliability of the molten salt thermal storage heat exchanger during operation and provides a theoretical basis for the molten salt energy storage technology coupled with coal-fired power generation.

Keywords: molten salt heat storage heat exchanger; molten salt side heat transfer coefficient; flow distribution; pressure drop calculation

随着能源需求不断增加和环境污染问题的日益严重,我国不断推进各项节能减排政策,并提出了构建低碳、安全、高效的新型电力系统^[1]。可再生能源具有较大的不稳定性,大规模并入电网时将电力系统的安全运行带来较大的挑战^[2]。为了提高电网负荷响应的安全协调能力和对新能源发电的消纳能力,火电机组需要进一步提高深度调峰和灵活性运行改造的能力^[3-4]。耦合燃煤发电的新型储能技术能够实现能量的跨时空利用,调峰容量大且负荷响应快,是目前提高燃煤机组运行灵活性的有效手段和重要技术^[5]。当前,满足煤电机组灵活性调峰的储能技术主要包括熔盐储热、压缩空气储能等^[6]。其中,熔盐储能容量大、稳定性高、运行成本低、使用温度高,并且不受地理位置的限制,具有广阔的发展前景和独特的经济及竞争优势。通过将熔盐储热与传统火电机组耦合,可以有效提升火电机组深度调峰的能力、实现热电解耦^[7-9],因此高温熔盐储换热系统成为辅助燃煤机组深度调峰灵活性运行的重要研究方向^[10-13]。

针对耦合熔盐储热技术的火电机组灵活性改造,国内外学者们进行了大量的研究。目前燃煤机组耦合熔盐储热系统主要采用烟气、抽汽显热或潜热以及厂用电3种加热技术,电加热方法可行性较高,运行简单,目前国内已有示范电厂投运^[14-15]。王珠等^[16]针对集成熔盐储能的燃煤机组为研究对象,建立了动态仿真模型,研究了不同变负荷区间的系统能效。宋晓辉等^[17]以某装机容量为670 MW的电厂为依托,基于Ebsilo对该机组的一种熔盐火电耦合系统改造方案进行仿真计算。王辉等^[18]分析了采用主蒸汽和再热蒸汽加热熔盐储热以及高加旁路方案释热的熔盐储热的系统性能。鹿院卫等^[19]提出了一种在熔盐单罐内布置换热器并完成蓄热和释热过程的新型熔盐储热技术,为单罐式熔盐储热技术提供了一定的理论基础。耿直等^[20]针对某单罐式熔盐蓄热装置的结构特征,采用了数值

模拟方法分析了不同的工质进口流速、温度和填充不同多孔介质材料对斜温层厚度和蓄热效率的影响。高克宇等^[21]基于低谷光伏弃电,提出了一种模块化熔盐储能装置,其中包含矿物质颗粒的多孔介质固相材料和液体熔盐蓄热材料,对传统熔盐储能技术进行了创新。Li等^[22]对从火电机组中提取烟气加热熔盐进行蓄热的过程进行数值模拟研究,结果表明,耦合熔盐蓄热系统火电机组协调控制方法可有效提高火电机组调频响应速度。Zhang等^[23]提出了一种基于多热源,即高温烟气和过热蒸汽集成在燃煤电厂内的新型熔盐储热系统。Du等^[24]设计了一种带弓形挡板的熔盐管壳式换热器结构,通过实验分析和参考数据拟合出壳程熔盐侧的传热关系式,认为扇形挡板对熔盐传热强化效果在低流速区优于高流速区。Kim等^[25]研究了一种五元混合熔盐的传热特性,并拟合了该熔盐在向上垂直管中的传热关联式。Zhang等^[26]以单罐熔盐储热器盘管式换热器为研究对象,分析讨论了盘管式换热器不同参数对单罐熔盐散热性能、流场和温度分布的影响。

综上所述,高温熔盐作为优良的储能传热介质,耦合燃煤机组的熔盐储热技术可以扩大机组的变负荷区间,进而提高燃煤机组深度调峰灵活运行的能力。目前,现有的研究主要集中在不同的熔盐加热方式及储热构型对系统能效、调峰能力和环境性能的影响,并且燃煤机组深度调峰中熔盐储热系统多采用常规的双罐式熔盐储热技术,而适应于火电机组调峰/调频/供汽的模块化熔盐储热换热器是对常规熔盐储热技术的进一步拓展创新,能够为熔盐储能技术的深入应用提供新的发展思路,因此非常有必要对复杂流动条件下,模块化熔盐储换热器的流动传热特性及换热器安全性进行系统的理论分析与实证研究。本文提出了一种新型的与燃煤机组耦合的模块化熔盐储热换热器,并建立了熔盐侧与汽

水侧的热力计算模型。通过实际运行测量获得的各模块熔盐温度分布和工质进出口参数,计算得出熔盐侧换热系数。建立汽水管束流量分配和压降计算模型,将熔盐泵启动工况下的实际运行数据与程序计算结果进行对比,二者误差较小,验证了模型的可靠性。研究分析了设计工况下熔盐侧换热特性,计算了汽水系统的压力分布、流量分配、出口汽温及管壁金属温度等参数,并探讨了热负荷扰动下的流动不稳定性,全面评估了该装置运行的安全性与可靠性。

1 熔盐储热换热器结构与实际运行参数

某电厂模块化熔盐储热换热器的布置结构如图 1、图 2 所示。设备主要包括熔盐、熔盐变频泵、熔盐电加热器、多孔介质固体蓄热材料、换热器设备等。从图 1 可以看出,该熔盐储热换热器由 12 个并联连接的熔盐单元构成,每个单元的熔盐管路相互独立,并分别布置变频熔盐循环泵,以达到强化传热的目的。每一个熔盐单元自下而上总共包括 13 个模块,每个模块内均填充满多孔介质材料作为固体蓄热介质,多孔介质材料为固体氧化物,介质平均比定压热容为 $1.1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,孔隙率为 58.3% 。高温熔盐作为液体蓄热介质,兼具储热与换热功能。熔盐通过熔盐泵从底部熔盐池输送至上部,经电加热器加热后,从顶部自上而下流动,将热量传递至每一层多孔介质固体蓄热材料,并与汽水管束进行热交换。每个模块底部均设有溢流孔,促进熔盐的流动换热效果,最终熔盐汇集至底部熔盐箱。由图 2 可以看出,各模块内汽水管束采用盘管形式布置,管材均采用 20 号钢。前 8 个模块内,均布置 4 排并联蛇形管,模块 1、2 相互串联,模块 3、4 相互并联,模块 5、6 相互并联,模块 7、8 相互并联,这 5 部分整体再相互串联。模块 9 及其之上的模块都是包含两排并联蛇形管,模块与模块之间相互串联,模块 7、8 并联出口处布置抽汽口。管内工质与熔盐和多孔介质的换热主要在前 8 个模块进行,模块 9 及其以上的部分不直接参与管内工质的换热,主要起到蓄热缓冲的作用。最底下一个模块为高 2 m 的熔盐池,上面的 12 个模块均为高 0.6 m 。

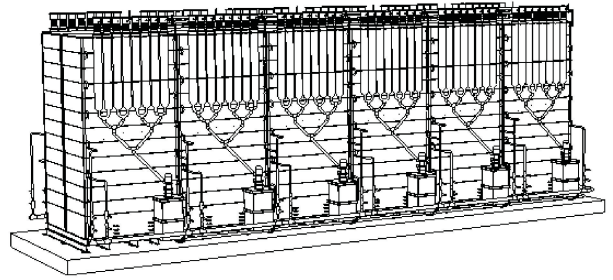


图 1 熔盐储热换热器立体布置结构

Fig. 1 Molten salt energy storage heat exchanger three-dimensional arrangement structure diagram

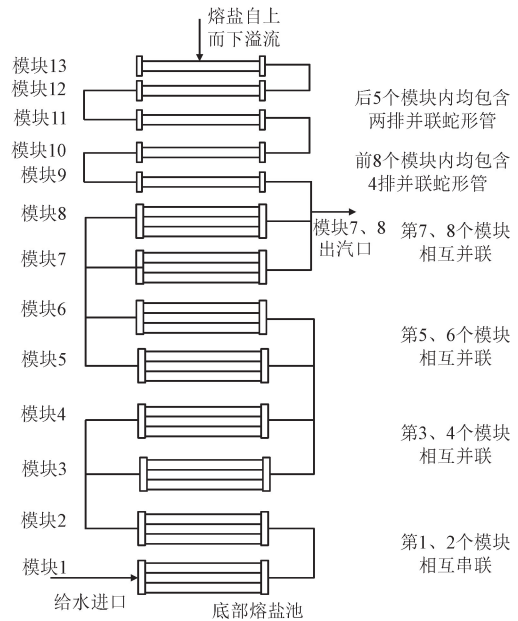


图 2 熔盐储热换热器结构布置简图

Fig. 2 Molten salt energy storage heat exchanger structural arrangement sketch

采用三元共晶硝酸熔盐作为高温液体蓄热材料,熔盐的成分包含硝酸钾、硝酸钠和亚硝酸钠,按照 $53 : 40 : 7$ 的质量比组成,使用上限温度为 $580\text{ }^{\circ}\text{C}$,工作凝固点在 $142\text{ }^{\circ}\text{C}$,该蓄热材料使用温度范围广,是一种优良的蓄热介质。相关的熔盐物性参数如表 1 所示。由表 1 可以看出,熔盐的动力黏度与密度在高温使用范围内随温度的变化均较小,说明温度对高温熔盐的流动特性影响较小。

表 1 高温熔盐物性参数

Table 1 Physical properties of high-temperature molten salts

温度/ $^{\circ}\text{C}$	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	动力黏度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	比定压热容/ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	导热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
300	1 863.0	0.287 3	1 504.0	0.501
350	1 826.0	0.286 4	1 496.5	0.498
420	1 774.2	0.285 9	1 488.0	0.479

底部熔盐池的熔盐由熔盐泵送至上部,经电加热器加热后到达熔盐装置顶部,每一个熔盐单元由13个模块构成,模块之间是相互串联连接的,每一个模块堆积着多孔介质固体蓄热材料,汽水管束埋藏在多孔介质之中,高温熔盐在重力的作用下自上而下逐级溢流,同时也将热量不断传递给周围的多孔介质固体材料。该熔盐储热换热器通过固体介质的填充,将熔盐与固体介质的蓄热换热及熔盐与汽水管束的换热整合为一体,提高了整个装置的换热效率与蓄热能力。相关的实际运行参数如表2所示。

表2 实际运行热力参数

Table 2 Actual operating thermal parameters

参数	数值		
	运行工况1	运行工况2	设计工况
熔盐进口温度/℃	375.10	357.40	420.00
给水进口温度/℃	150.00	140.00	150.00
给水流量/(t·h ⁻¹)	3.90	3.90	7.50
给水压力/MPa	2.25	2.27	2.50
出口蒸汽温度/℃	343.40	347.40	300.00

给水从熔盐装置底部的管道自下而上流入各个熔盐模块,给水自下而上流经管道,熔盐自上而下流经熔盐储热换热器,与管内给水形成逆流对流换热。水经过吸热升温-蒸发-过热,最终从模块7、8并联出口处抽汽口排出蒸汽,此时熔盐变频泵的启停状态或者频率大小是根据实际出汽情况而不断调节的。

2 基于实际运行参数的熔盐侧换热系数计算与分析

2.1 热力计算模型

选取一个熔盐单元作为研究对象,熔盐储换热器的模块示意如图3所示。释热过程高温熔盐流经多孔介质固体材料外掠汽水管束进行换热,模块之间通过溢流孔产生流动,熔盐的流速难以直接确定,流动传热特性极为复杂。换热器的换热负荷计算公式为

$$Q = \frac{q_{v2}(H_{2o} - H_{2i})}{3.6} \quad (1)$$

式中: q_{v2} 为管内给水的流量; H_{2i} 和 H_{2o} 分别为管内工质的进口与出口焓值。

以基管外表面积作为基准面积,该熔盐储热换热器内汽水管束的基本传热公式为

$$Q = KA_o \Delta t_{em} \quad (2)$$

$$K = 1 / \left(\frac{1}{h_o} + \frac{D_o}{D_i} \frac{1}{h_i} + \frac{D_o}{2\lambda_b} \ln \frac{D_o}{D_i} \right) \quad (3)$$

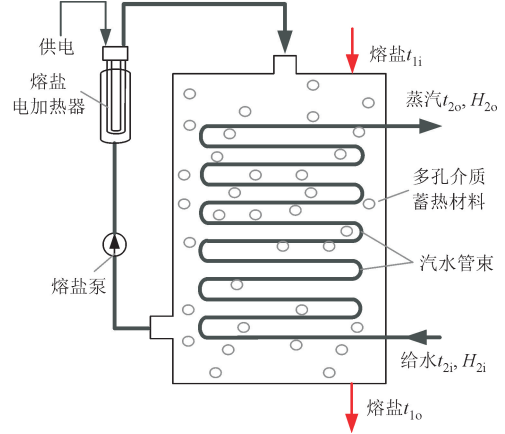


图3 某一熔盐储热换热器模块示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a molten salt storage heat exchanger module

$$A_o = \pi n D_o l \quad (4)$$

式中: K 为总传热系数; A_o 为基管外表面积; h_o 为以基管外表面积为基准的熔盐侧换热系数; h_i 为管内工质与内壁之间的对流换热系数; λ_b 为管壁的导热系数; D_o 、 D_i 分别为基管外径和内径; Δt_{em} 为修正后对数平均温差; l 为管子长度。

对于各种复杂布置的管壳式及交叉流式换热器,其平均温差可以采用下式来计算

$$\Delta t_{em} = \phi \Delta t_m \quad (5)$$

$$\Delta t_m = \frac{(t_{1i} - t_{2o}) - (t_{1o} - t_{2i})}{\ln \left[\frac{(t_{1i} - t_{2o})}{(t_{1o} - t_{2i})} \right]} \quad (6)$$

式中: ϕ 是小于1的修正系数; Δt_m 为修正前对数平均温差,当冷热介质的进出口温差相等时,采用算术平均温差

$$\Delta t_m = \frac{(t_{1i} + t_{1o}) - (t_{2i} + t_{2o})}{2} \quad (7)$$

管内工质单相区的对流换热系数 h_{1i} 计算原理如下

$$h_{1i} = \frac{\lambda}{D_i} 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (8)$$

$$Re = \frac{uD_i}{\nu} \quad (9)$$

式中: λ 为工质导热系数; Re 为雷诺数; Pr 为工质的普朗特数; u 为工质的流速; ν 为动力黏度。池沸腾换热系数 h_2 和两相区的对流换热系数 h_{2i} 计算原理如下式

$$h_2 = 3.16 \left(\frac{p^{0.14}}{0.722} + 0.019 p^2 \right) q_n^{0.7} \quad (10)$$

$$h_{2i} = \left[(h_{1i}^2 + (0.7h_2)^2) \right]^{0.5} \cdot \left(1 + 1.027 \times 10^{-9} \left(\frac{\rho_b u h}{q_w} \right)^{1.5} \left(\frac{0.7h_2}{a} \right)^2 \right)^{0.5} \quad (11)$$

式中: ρ_b 为饱和水密度; p 为工质压力; q_n 为内壁热

负荷; q_w 为外壁热负荷。

由于该熔盐储热换热器各个模块内都填充了多孔介质固体蓄热材料,熔盐的流量与流速难以直接确定,熔盐泵的频率与启停状态也是根据实际运行情况而调节,释热过程中熔盐流动传热复杂。以 5 号熔盐单元为研究对象,根据 2024 年 4 月 24 日 16 点 22 分熔盐泵不启动和 2024 年 4 月 14 日 17 点 46 分熔盐泵启动(熔盐泵频率为 33 Hz)实际运行工况下测量得到的工质和熔盐的温度分布情况,结合换热器的传热关系式进行计算得到熔盐侧换热系数,为后续的热力计算提供理论依据。两种运行工况下均是打开模块 7、8 并联出口处抽汽口,熔盐温度整体较高时,熔盐泵不启动也可满足出汽要求,随着释热过程不断进行,熔盐在各个模块的温度出现下降,模块 7、8 并联出口抽汽口处的蒸汽品质降低,此时启动熔盐变频泵,频率为 33 Hz。表 3 列出了两种实际运行工况下工质在各模块的实际测量温度分布参数,熔盐在各个模块的实际测量温度分布规律如图 4 所示。

表 3 两种实际运行工况工质进出口测量参数

Table 3 Measured parameters of mass inlet and outlet under two actual operating conditions

参数	数值	
	熔盐泵不启动	熔盐泵启动
进口流量/($t \cdot h^{-1}$)	3.90	3.90
进口温度/ $^{\circ}C$	150.00	145.00
进口压力/MPa	2.25	2.37
第 1 模块出口温度/ $^{\circ}C$	212.30	216.70
第 2 模块出口温度/ $^{\circ}C$	213.40	216.60
第 3、4 模块出口温度/ $^{\circ}C$	332.90	215.60
第 7、8 模块出口温度/ $^{\circ}C$	343.40	347.40

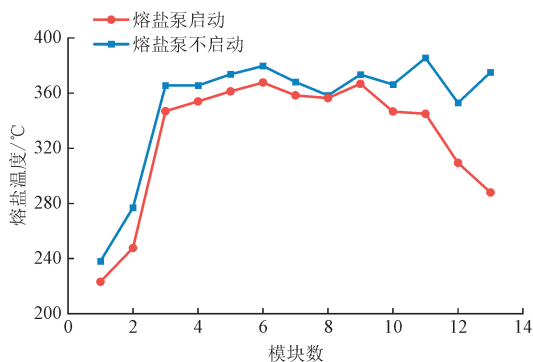


图 4 两种运行工况下熔盐模块温度分布

Fig. 4 Molten salt module temperature distribution in two operations

熔盐储热装置内部工质吸收的热量主要是来自于高温熔盐的对流和多孔介质对管壁的导热,然而,壳侧蓄热介质的复杂性及其特殊的结构布置,直接

计算多孔介质对管壁的导热部分较为困难。因此,基于总熔盐换热量剥离计算得出总传热系数,在此基础上计算出管内工质的换热系数,进一步反推计算出熔盐侧换热系数,其中多孔介质对管壁的导热已经包含在了熔盐侧换热系数中。

管内给水吸热后经过升温、蒸发和过热的过程,基于 5 号单元实际运行工况下的工质和熔盐的温度分布,在计算出单相水、两相区以及过热蒸汽 3 部分吸热量的前提下,确定各部分的管外换热面积及对数平均温差,在此基础上反推出总传热系数 K ,基于工质物性参数计算管内工质的对流换热系数 h_i ,最终反推计算出熔盐侧换热系数 h_o 。根据计算得到的不同区域的熔盐侧换热系数,进行分模块热力计算,以确定饱和水点和饱和蒸汽点的位置,并与初始设定的饱和水点位置对比后做出相应调整。在此基础上,重复计算熔盐侧换热系数,并根据修正后的饱和水点和饱和蒸汽点位置进行迭代计算,最终计算得出准确的熔盐侧换热系数和相态转变点位置。两种实际运行工况下熔盐侧换热系数计算结果如表 4 所示。在实际运行中,模块 5~8 的过热蒸汽段总换热量较小,但其管外换热面积达 $116.98 m^2$,导致熔盐侧换热系数剥离计算的不确定度较高。熔盐变频泵位于熔盐储热换热器下部,将熔盐泵送至顶部后自上而下溢流,其运行显著影响熔盐流动。由于溢流孔数量和熔盐重力的作用,下部熔盐流动强于上部,导致不同区域熔盐侧换热系数存在差异。但整体上,熔盐泵启动时的熔盐侧换热系数都高于不启动工况。

表 4 5 号单元熔盐侧换热系数计算结果

Table 4 Unit 5 molten salt side heat transfer coefficient

管内工质状态	对应位置	换热系数/($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	
		熔盐泵不启动	熔盐泵启动
单相水段	模块 1	266.22	362.25
两相区段	模块 2~4	266.22	362.25
过热蒸汽段	模块 5~8	64.00	88.00

2.2 熔盐侧换热系数的验证

基于该熔盐储热换热器 5 号单元实际运行工况下计算得到的熔盐侧换热系数计算结果,选取其他熔盐单元释热过程运行工况的实测数据进行热力计算,根据 7 号熔盐单元 2024 年 8 月 29 日 14 点 35 分熔盐泵启动工况,熔盐出口温度为 $390.3^{\circ}C$,已知熔盐的进出口温度及工质进口的温度和流量,计算得出模块 7、8 并联出口抽汽口处的工质温度,并将其与熔盐泵启动工况实际测得的工质温度进行对比,二者误差较小;同理选取 3 号熔盐单元 2024 年

8月29日14点55分熔盐泵不启动工况进行计算,熔盐出口温度为395.0℃,计算得到的模块7、8并联出口抽汽口处的工质温度与实际测得的工质温度分布规律基本吻合,说明计算得到的熔盐侧换热系数范围是合理可靠的。利用5单元运行工况测量数据计算得到的熔盐侧换热系数对7号单元和3号单元的模块7、8并联出口抽汽口处工质温度的计算结果与实际测量数据对比如图5所示。

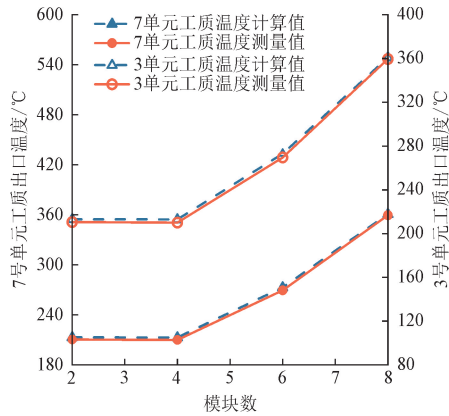


图5 7号单元和3号单元的出口工质温度计算与测量数据对比

Fig. 5 Comparison of calculated and measured outlet mass temperatures for units 7 and 3

3 汽水管束流量分配及压降计算模型

3.1 计算回路及管段划分

基于流动网格系统法,将汽水管束进行等效划分,依次对受热回路、连接管回路和压力节点进行编号,图6为熔盐储热换热器沿着汽水流程方向的回路划分示意图。总共包含32个受热管回路,6个连接管回路,10个中间混合集箱。进口集箱为模块1的入口集箱,出口集箱为模块7、8并联出口处的抽汽口。将1个蛇形管回路划分成若干个管段,每个管段长2~4 m,1个回路共划分为14个管段。

3.2 控制方程

首先对未知量进行假设,以列出其所遵循的质量守恒、动量守恒、能量守恒方程。采用拟牛顿法进行迭代对所列出的封闭方程组进行求解,即可得到各回路的流量分配和节点压力分布。同一进口和出口集箱下的并联管束之间,其压降与管内工质的质量流量之间存在一定的函数关系,即

$$\Delta p_i = \varphi_i(w(i)) \quad (12)$$

式中: Δp_i 为第 i 回路的压降; $w(i)$ 为第 i 回路质量流量。

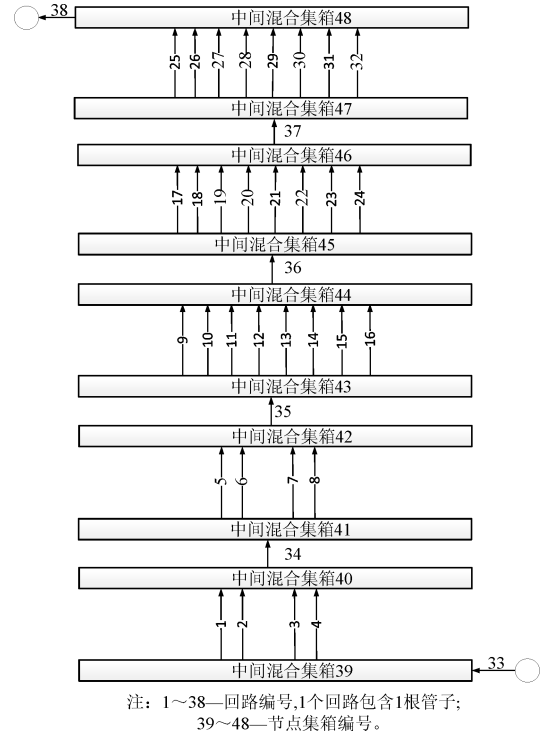


图6 流量回路与压力节点划分

Fig. 6 Flow circuit and pressure node division

各回路所遵循的动量守恒方程,即

$$0 = p(i)_{in} - p(i)_{out} - \Delta p_i \quad (13)$$

式中: $p(i)_{in}$ 为第 i 回路的入口集箱处的压力; $p(i)_{out}$ 为第 i 回路的出口集箱处的压力; Δp_i 为第 i 回路的压降。

节点遵循的质量守恒方程式,即

$$0 = \sum w(i)_{in} - \sum w(i)_{out} \quad (14)$$

式中: $\sum w(i)_{in}$ 、 $\sum w(i)_{out}$ 分别为流入、流出该节点的所有工质的质量流量之和。

适用于流动不稳定性分析的一维单通道通用数值计算^[27]中的质量守恒方程如下

$$A \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial z} = 0 \quad (15)$$

式中: M 为质量流量; ρ 为流体密度; z 为沿管长的轴向坐标; A 为内横截面积。

能量守恒方程为

$$q_l = \frac{\partial (wH_1)}{\partial z} + A \frac{\partial (\rho H_1)}{\partial t} \quad (16)$$

式中: H_1 为流体焓值; q_l 为线密度。

动量守恒方程为

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{w^2}{\rho A} \right) + A \frac{\partial p_l}{\partial z} = -\rho g A \sin \theta - \left[\frac{f}{d} + K_{in} \delta_d(z) + K_{ex} \delta_d(z - L_g) + K_{jb} \delta_d(z - z_{jb}) \right] \frac{w^2}{2\rho A} \quad (17)$$

式中: p_i 为流体压力; f 为摩擦阻力系数; d_n 为管子内径; K_{in} 为进口局部阻力系数; K_{ex} 为出口局部阻力系数; K_{jb} 为弯头局部阻力系数; δ_d 为一维狄拉克函数; L_g 为管子总长度; z_{jb} 为弯头处管子的轴向坐标; θ 为流动方向与水平面的夹角; g 为重力加速度。

3.3 模型验证

基于 2.1 节中的工质运行参数和熔盐泵启动工况下的熔盐侧换热系数,利用流量分配和压降计算模型对运行工况 2 下的系统总压降和各回路工质出口汽温进行计算。实际测量得到的工质进口压力为 2.23 MPa,出口压力为 1.76 MPa,系统总压降为 (2.23-1.76) MPa=0.47 MPa。程序计算得到的系统总压降为 (2.27-1.81) MPa=0.46 MPa,二者相对误差为 2.13%,说明程序建立的流量分配与压降计算模型是正确可靠的。

在运行工况 2 下,实际测量得到的模块 3、4 出口工质温度为 215.6℃,模块 5、6 出口工质温度为 269.9℃,模块 7、8 并联出口抽汽口处工质温度为 347.4℃。实际测量得到的运行数据与程序计算得到的工质温度分布对比见表 5,各个模块的温度分布规律基本一致,说明程序建立的计算模型是正确可靠的。

表 5 工质温度分布对比

Table 5 Comparison of work temperature distribution

模块	工质温度/℃	
	实际测量数据	程序计算结果
2	216.6	217.3
3、4	215.6	215.6
5、6	269.9	264.3
7、8	347.4	347.5

4 管束流动传热特性计算与安全性分析

4.1 各模块热力计算结果

基于实际运行中熔盐温度分布规律,设计工况下熔盐进口温度为 420℃,结合 2.1 节中计算得出的两种运行工况下熔盐侧换热系数,对释热过程的汽水系统进行分段热力计算,各个模块的传热量如表 6 所示,结合对应的传热面积得到各回路的热负荷分布。每个模块内均采用 4 个回路并联布置,且各回路在熔盐装置中的高度不同。假设每个模块内的热负荷沿高度方向呈线性递减,最终计算出的每个模块内各个回路在设计工况下熔盐泵启动(频率为 33 Hz)和不启动时热负荷分布情况如图 7 所示。

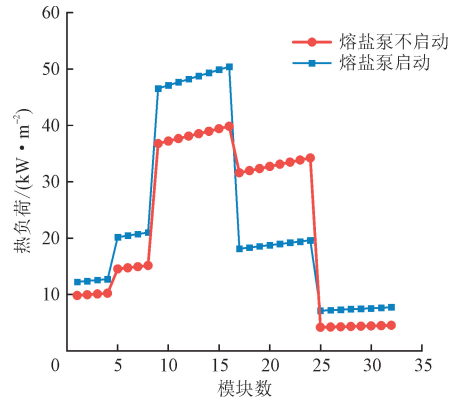


图 7 各回路的热负荷分布

Fig. 7 Heat load distribution in each circuit

表 6 设计工况下各模块的传热量分布

Table 6 Heat transfer distribution of each module under design conditions

模块	传热面积/ m²	传热量/kW	
		熔盐泵不启动	熔盐泵启动
1	29.25	293.01	364.66
2	29.25	433.65	601.83
3、4	58.49	2 240.51	2 836.58
5、6	58.49	1 924.98	1 102.89
7、8	58.49	254.00	433.95
合计	233.96	5 146.15	5 339.91

4.2 压力分布计算结果

设计工况下熔盐泵启动(频率为 33 Hz)和熔盐泵不启动时该熔盐储热换热器各部分的压力分布结果如表 7 所示,系统总压降表示从模块 1 进口集箱到模块 7、8 并联出口抽汽口处集箱的总压降。从表 7 中可以看出,熔盐泵不启动时整个熔盐储换热装置系统总压降为 1 078.86 kPa,熔盐泵启动时系统总压降为 1 309.38 kPa,其中摩擦压降占主要部分,整体重力压降较小。

表 7 各部分压力计算结果

Table 7 Pressure calculation results for each part

模块	出口集箱压力/kPa	
	熔盐泵不启动	熔盐泵启动
1	2 483.32	2 483.25
2	2 449.92	2 421.17
3、4	2 328.70	2 255.98
5、6	2 007.38	1 876.71
7、8	1 421.14	1 110.07
系统总压降	1 078.86	1 309.38

4.3 回路流量分配与出口汽温

设计工况下该熔盐储热换热器中各回路的质量流量和质量流速分布如图 8 所示,可以看出,熔盐泵启动和不启动时,各回路的质量流速与质量流量分布趋势基本一致,前两个模块内均由 4 排并联管构成,后面的部分均由 8 排并联管构成,所以后面的单管质量流量和质量流速均降低。在每个模块内,热负荷自上而下降低,所以同一模块内的各个回路的流量是不一样的。

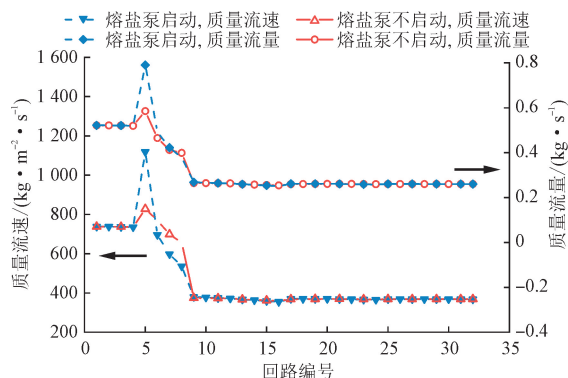


图 8 质量流量和质量流速分布

Fig. 8 Mass flow rate and mass flow rate distribution

设计工况下各回路的出口焓值和出口汽温分布如图 9 所示,从图 9 可以看出,熔盐泵不启动运行时,模块 1 内 4 个回路出口工质还处于过冷水状态;模块 3、4 出口工质处于两相区,温度保持在饱和温度 220.2℃,但焓值出现较大的提高;模块 5、6 出口工质达到过热状态,因为自下而上各回路热负荷线性升高,所以回路的出口汽温也自下而上升高,最终在模块 7、8 并联出口抽汽口处工质平均出口汽温为 327.7℃。熔盐泵启动运行时,模块 1 内 4 个回路出口工质处于过冷水状态,平均出口汽温为 189.6℃;模块 3、4 出口工质仍处于两相区,温度保持在饱和

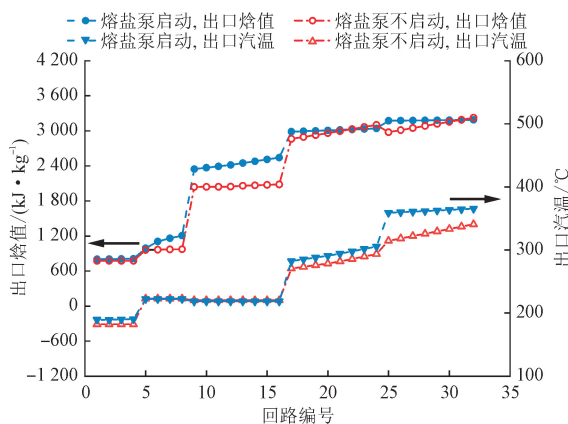


图 9 出口汽温和出口焓值分布

Fig. 9 Vapor temperature and enthalpy distribution of export

温度 218.5℃,但焓值出现较大的提高;最终在模块 7、8 并联出口抽汽口处达到过热状态,工质平均出口汽温为 362.2℃。

4.4 金属壁温分布

图 10 和图 11 展示了两种工况下熔盐储热换热器金属管壁温度分布特征。选取 24 和 32 回路作为壁温分析对象,从图 10 可以看出,熔盐泵不启动时,24 回路工质刚开始处于两相区,因沿程阻力导致饱和温度小幅降低,壁温随之下降;进入过热段后工质温度飞升至 327.8℃,壁温同步上升,24 回路在出口处达到最大外壁温度为 315.0℃,32 回路在出口处最大外壁温度为 332.4℃。从图 11 可以看出,熔盐泵启动时,模块 5、6 内 24 回路工质初始两相区壁温稳定,进入过热段后持续升温,24 回路在出口处最大外壁温度为 316.7℃,32 回路在出口处最大外壁温度为 371.5℃。

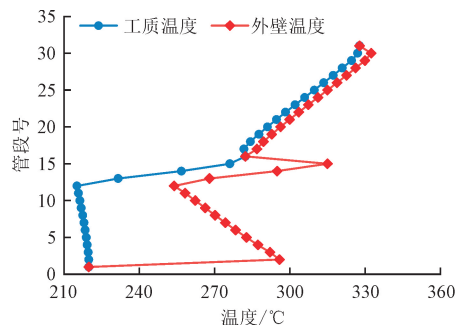


图 10 熔盐泵不启动时管壁金属温度分布

Fig. 10 Molten salt pump does not start tube wall metal temperature distribution

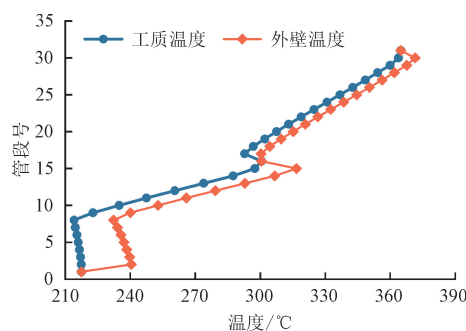


图 11 熔盐泵启动时管壁金属温度分布

Fig. 11 Molten salt pump start-up tube wall metal temperature distribution

各模块内汽水管束的金属管材均为 20 号钢,最高许用温度为 450℃,所以设计工况下熔盐泵启动或不启动时管壁金属温度均在材料允许范围内,正常运行时不会出现超温爆管现象。

4.5 流动稳定特性计算结果

流动不稳定性由热流密度变化而引发,出现流动不稳定现象时,汽液界面持续波动可能导致管壁热疲劳。选取设计工况下熔盐泵不启动时14回路和22回路为计算对象,建立一维单通道通用数值计算模型,施加1.2倍热负荷扰动,进行流动不稳定性计算与分析。

图12和图13分别为14回路和22回路被施加1.2倍热负荷扰动下的进、出口流量脉动图。由图12、13可以看出,14回路和22回路在1.2倍热负荷扰动下均出现进、出口流量脉动。扰动撤消后,脉动幅值逐渐衰减并趋于稳定,未出现持续大振幅振荡,表明管内流动始终保持安全稳定。

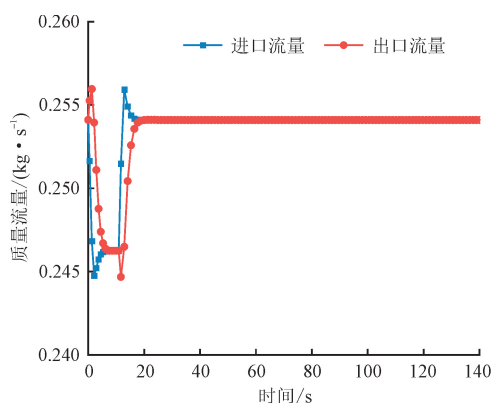


图12 14回路1.2倍热负荷扰动进、出口流量脉动

Fig. 12 14 circuits 1.2 times thermal load disturbance inlet and outlet flow pulsation

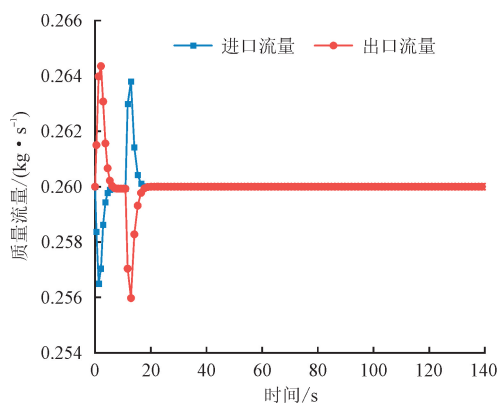


图13 22回路1.2倍热负荷扰动进、出口流量脉动

Fig. 13 22 circuits 1.2 times thermal load disturbance inlet and outlet flow pulsation

5 结论

燃煤-熔盐储热耦合系统通过热电解耦显著提升调峰能力。基于模块化熔盐换热器结构及实测数

据,计算出熔盐侧换热系数,针对汽水管束建立流动网格模型,分析了汽水系统的流动传热特性,得到如下结论。

(1)计算得出熔盐泵不启动工况时,单相水与两相区段熔盐侧换热系数为 $266.22 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,过热蒸汽段为 $64 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;熔盐泵启动工况(频率为 33 Hz)时,单相水与两相区段的熔盐侧换热系数为 $362.25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,过热蒸汽段为 $88 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,说明熔盐泵的启动能够显著提升熔盐侧的换热效率。

(2)运行工况下实际测量与程序计算得到的系统总压降的相对误差为 2.13% ,且各模块的工质温度分布规律基本一致,验证了计算模型的准确可靠性。

(3)设计工况下熔盐泵不启动时整个熔盐储换热装置系统总压降为 $1\,078.86 \text{ kPa}$,模块7、8并联出口抽汽口处汽温为 327.7°C ,最大管壁温度为 332.4°C 。熔盐泵启动时系统总压降为 $1\,309.38 \text{ kPa}$,模块7、8并联出口抽汽口处汽温为 362.2°C ,最大外壁温度为 371.5°C 。汽水系统具有良好的抗干扰能力,两种工况下均不会出现流动不稳定的现象。

(4)模块化熔盐储热技术是对常规熔盐储热技术的升级与进一步创新。通过该熔盐储热换热器的流动传热特性的计算分析,全面评估了该熔盐储热换热装置运行过程中的安全性与可靠性,为类似的储能装置的优化设计提供了重要的理论依据。

参考文献:

- [1] 林伯强, 杨梦琦. 碳中和背景下中国电力系统研究现状、挑战与发展方向 [J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2022, 42(5): 1-10.
LIN Boqiang, YANG Mengqi. China's power system research in the context of carbon neutrality: current status, challenges, and development direction [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University(Social Sciences), 2022, 42(5): 1-10.
- [2] 杨鹏, 刘锋, 姜齐荣, 等. “双高”电力系统大扰动稳定性:问题、挑战与展望 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(5): 403-414.
YANG Peng, LIU Feng, JIANG Qirong, et al. Large-disturbance stability of power systems with high penetration of renewables and inverters: phenomena, challenges, and perspectives [J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2021, 61(5): 403-414.
- [3] 刘吉臻, 王庆华, 张效宁, 等. 支撑我国能源转型的灵活燃煤发电新技术: 燃煤耦合储能系统及智能控制系统 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6855-6882.

- LIU Jizhen, WANG Qinghua, ZHANG Xiaoning, et al. Novel technologies of flexible coal-fired power generation to support China energy transition: coal-fired coupled energy storage system and smart control system [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6855-6882.
- [4] 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, LÜ 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.
- [5] 赵攀, 苟非非, 许文盼, 等. 风-火-储耦合系统储能容量配置优化对比 [J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(8): 38-48.
- ZHAO Pan, GOU Feifei, XU Wenpan, et al. Comparison of storage capacity configuration optimization in wind-thermal power-storage coupling system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(8): 38-48.
- [6] 葛刚强, 王焕然, 李瑞雄, 等. 压缩空气储能蓄热器性能分析和优化设计 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(1): 45-54.
- GE Gangqiang, WANG Huanran, LI Ruixiong, et al. Performance analysis and optimization design of heat accumulator in compressed air energy storage [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(1): 45-54.
- [7] WANG Zhu, LIU Ming, YAN Hui, et al. Improving flexibility of thermal power plant through control strategy optimization based on orderly utilization of energy storage [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 240: 122231.
- [8] 张明理, 张娜, 武志锴, 等. 日前电能市场与深度调峰市场联合出清模型 [J]. 中国电力, 2022, 55(2): 138-144.
- ZHANG Mingli, ZHANG Na, WU Zhikai, et al. Joint clearing model of day-ahead energy market and down regulation service market for accommodation of renewable energy [J]. Electric Power, 2022, 55(2): 138-144.
- [9] 巩志强, 商攀峰, 徐明新, 等. 煤电机组耦合储热系统的灵活性调峰特性研究及其性能评价 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(12): 4837-4849.
- GONG Zhiqiang, SHANG Panfeng, XU Mingxin, et al. Research and evaluation on the flexible peaking performance of coal-fired power plants coupled with thermal storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(12): 4837-4849.
- [10] 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.
- [11] 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 Huiyu, 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.
- [12] 魏乐, 樊冰芬, 张怡, 等. 耦合熔盐储热的火电机组灵活调峰控制策略研究 [J/OL]. 中国电机工程学报. (2024-09-05) [2024-12-17]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241471>.
- WEI Le, FAN Bingfen, ZHANG Yi, et al. Research on flexible peak shaving control strategy of thermal power unit coupled with molten salt heat storage system [J/OL]. Proceedings of the CSEE. (2024-09-05) [2024-12-17]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241471>.
- [13] 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.
- [14] 周信华, 郑桢晨, 胡远庆. 抽汽熔盐蓄热技术在煤电灵活性改造中的应用研究 [J]. 科学技术创新, 2023(22): 53-56.
- ZHOU Xinhua, ZHENG Zhenchen, HU Yuanqing. Application research of steam extraction molten salt heat storage technology in coal-fired power generation flexibility transformation [J]. Scientific and Technological Innovation, 2023(22): 53-56.
- [15] 杜志强, 宋中越. 新型熔盐结合吸收式热泵大温差储能供暖系统的研究 [J]. 建筑科学, 2020, 36(4): 86-89.
- DU Zhiqiang, SONG Zhongyue. Study on a new large temperature difference energy storage heating system using molten salt and absorption heat pump [J]. Building Science, 2020, 36(4): 86-89.
- [16] 王珠, 刘双白, 胡娱欧, 等. 集成熔盐储能的燃煤机

- 组多区间变负荷瞬态特性 [J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(5): 12-22.
- WANG Zhu, LIU Shuangbai, HU Yuou, et al. Transient performance of coal-fired power plant integrated with molten salt energy storage system under variable load intervals [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(5): 12-22.
- [17] 宋晓辉, 韩伟, 王兴, 等. 基于高温熔盐储热系统的火电机组深度调峰方案对比及分析 [J]. 热能动力工程, 2023, 38(11): 63-74.
- SONG Xiaohui, HAN Wei, WANG Xing, et al. Comparison and analysis of deep peak shaving schemes for thermal power units based on high-temperature molten salt heat storage system [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(11): 63-74.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 高克宇, 张翔宇, 高磊. 模块化熔盐储能技术在新能源消纳中的应用研究 [J]. 内蒙古石油化工, 2024, 50(10): 79-84.
- GAO Keyu, ZHANG Xiangyu, GAO Lei. Study on application of the modular molten salt energy storage technology in new energy consumption [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2024, 50(10): 79-84.
- [22] LI Le, LI Wenyi, MA Jianlong. Research on coordinated control strategy of thermal heating and melting depth of steam heating and melting salt reservoir [J]. Applied Sciences, 2023, 13(8): 4708.
- [23] ZHANG Kezhen, LIU Ming, ZHAO Yongliang, et al. Design and performance evaluation of a new thermal energy storage system integrated within a coal-fired power plant [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 50: 104335.
- [24] DU Baocun, HE Yaling, WANG Kun, 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.
- [25] KIM H, KIM H, LEE S, et al. A study on heat transfer characteristics of quinary molten salt mixture [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 127(Part C): 465-472.
- [26] ZHANG Cancan, SHI Suli, LU Yuanwei, et al. Heat discharging and natural convection heat transfer performance of coil heat exchanger in single molten salt tank [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 166: 114689.
- [27] WANG Wenyu, YANG Dong, LIU Wanyu, et al. Experimental investigation on two-phase flow instabilities of ultra supercritical pressure boiler with spirally water wall tubes [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 81: 304-313.

(编辑 武红江)