

研究论文

DOI: 10.11949/0438-1157.

燃煤机组中熔盐-蒸汽过热器瞬态传热特性及热应力分布

董新宇^{1,2}, 岳鹏^{1,2}, 李怡菲^{1,2}, 刘璐^{1,2*}, 王腾^{1,2}, 王太^{1,2}

(¹ 华北电力大学河北省储能技术与能源综合利用重点实验室, 河北 保定 071003; ² 华北电力大学燕赵电力实验室, 河北 保定 071003)

摘要: 双碳目标下, 熔盐储热是提升燃煤机组深度调峰灵活性的关键技术。然而, 作为储热系统的核心释能设备, 熔盐-蒸汽过热器在快速变负荷工况下的瞬态传热与热冲击机理尚不明确, 制约了机组的安全长效运行。本文基于数值模拟方法, 系统研究了深度调峰工况下过热器的瞬态传热特性、流动特性与热应力分布规律。结果表明: 换热器两侧流动存在显著的弱耦合效应, 双侧同步变负荷时压降呈指数型增长, 且阻力系数对单侧变工况呈现差异化响应。传热方面, 相较于单侧变负荷, 双侧同步调节可使出口温度波动幅度降低约20%, 实现热流密度的平稳爬升, 有效规避初期强热冲击; 总传热系数则呈现前期近似指数、后期转为线性的阶段性增长特征。此外, 系统热应力波幅与调峰速率呈对数增长趋势, 最终应力水平由流速决定, 而瞬态演化受流速变化率主导; 结构最大形变介于0~0.4 mm之间, 变形峰值集中于变工况10~20 s区间。本研究揭示了过热器在瞬态工况下的热-力动态协同演化机制, 为该换热器安全、高效运行提供理论依据。

关键词: 熔盐; 蒸汽; 过热器; 传热特性; 热应力; 瞬态

中图分类号: TK223

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-15

Numerical simulation of transient heat transfer characteristics and thermal stress distribution of molten salt-steam superheater in coal-fired units

DONG Xinyu^{1,2}, YUE Peng^{1,2}, LI Yifei^{1,2}, LIU Lu^{1,2*}, WANG Teng^{1,2}, WANG Tai^{1,2}

(¹ North China Electric Power University, Hebei Provincial Key Laboratory of Energy Storage Technology and Comprehensive Energy Utilisation, Baoding 071003, Hebei, China; ² North China Electric Power University, Yanzhao Electric Power Laboratory, Baoding 071003, Hebei, China)

Abstract: Under the dual-carbon goals, molten salt heat storage is a critical technology for enhancing the deep peak-shaving flexibility of coal-fired power plants. However, as the core energy-release equipment of the storage system, the transient heat transfer, which restricts the safe and long-term operation of the units. Based on numerical simulation methods, this paper systematically investigates the transient heat transfer characteristics, flow characteristics, and thermal stress distribution of the superheater under deep peak-shaving conditions. The results indicate a significant weak coupling effect between the flows on both sides of the heat exchanger. Under synchronous bilateral load variations, the pressure drop exhibits exponential growth, and the resistance coefficient shows a differentiated response to unilateral load variations. Regarding heat transfer, compared to unilateral load

收稿日期: 2026-03-21 修回日期: 2026-07-05

通信作者: 刘璐(1984—), 女, 博士研究生, 教授, lulu@ncepu.edu.cn

第一作者: 董新宇(1990—), 男, 博士研究生, 副教授, xydong@ncepu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(52406183); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2026MS148)

引用本文: 董新宇, 岳鹏, 李怡菲, 刘璐, 王腾, 王太. 燃煤机组中熔盐-蒸汽过热器瞬态传热特性及热应力分布[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1–15

Citation: DONG Xinyu, YUE Peng, LI Yifei, LIU Lu, WANG Teng, WANG Tai. Numerical simulation of transient heat transfer characteristics and thermal stress distribution of molten salt-steam superheater in coal-fired units[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1–15

variations, synchronous bilateral regulation can reduce the outlet temperature fluctuation amplitude by approximately 20% and achieve a steady climb in heat flux, thereby effectively circumventing severe initial thermal shocks. The overall heat transfer coefficient demonstrates a phased growth pattern characterized by an initial near-exponential increase followed by a transition to linear growth. Furthermore, the amplitude of the system's thermal stress exhibits a logarithmic growth trend with the peak-shaving rate. The ultimate stress level is determined by the flow velocity, whereas the transient evolution is dominated by the flow velocity variation rate. The maximum structural deformation ranges from 0 to 0.4 mm, with the deformation peak concentrated within the 10 – 20s interval of the load variation process. This study reveals the dynamic thermo-mechanical synergistic evolution mechanisms of the superheater under transient conditions, providing a theoretical basis for the safe and efficient operation of this heat exchanger.

Keywords: molten salt; steam; superheater; heat transfer characteristics; thermal stress; transient

引 言

双碳目标下,以风光为主的新能源电力系统快速发展^[1-2],然而风电、光伏的强波动性导致电网调峰压力激增,预计2035年全国最大负荷峰谷差将突破10亿千瓦^[3]。在新能源大规模并网的行业背景下,燃煤机组仍是电力系统兜底保供、灵活调峰的核心支撑,对保障电网安全稳定运行具有不可替代的作用^[4-6]。

熔盐储热(MSHS)凭借大容量、长时储热的独特优势,成为提升燃煤机组(CFPPs)灵活性、提高全过程循环效率的关键技术^[7-9]。通过集成熔盐储热系统,可实现燃煤机组炉侧与机侧的热电解耦,有效优化机组调峰能力、快速启停性能及调频特性^[10-12]。熔盐-蒸汽换热器作为储热系统释能发电的核心设备,承担着熔盐热能向蒸汽热能转化的核心功能,其运行性能直接决定储热系统效率与机组调峰水平^[13]。

目前,国内外针对熔盐-蒸汽换热器已开展大量研究,现有研究涵盖U型管式、壳管式、螺旋管式、套管式等典型换热器结构,系统探究了不同结构的传热性能与应力分布特征。其中,陈玉爽等^[14]通过数值模拟分析了稳态工况下U型管换热器的温度与应力分布规律;Zou等^[15]通过实验对比揭示了U型管束与直管束的熔盐传热差异,并建立高精度传热关联式。He等^[16-17]结合试验与仿真阐明了不同蒸汽发生系统的盐侧传热主导机制,后续研究进一步明确了进水温度、流速等参数对U型管-列管式耦合换热系统传热性能的差异化影响^[18]。

在参数影响与换热机理研究方面,Lu等^[19]明确了水和熔盐流量对系统沸腾换热与热损耗的影响

规律。Abu-Hamdeh等^[20]与Huang等^[21]分别针对壳管式、螺旋管式换热器开展参数试验,建立了盐侧传热系数预测模型,可为设备稳态设计提供依据。Dong等^[22]基于亚临界工况试验,完善了熔盐-水过冷沸腾机理并拟合得到高精度传热关联式。此外,已有研究初步探索了动态变负荷特性:Wenner等^[23]揭示了负荷变动下流速变化率对温度超调的影响;Wang等^[24-25]、朱晨等^[26-27]分析了流量扰动下过热器的动态响应规律并提出优化思路;户雯婷等^[28]的研究也为储热系统变负荷传热分析提供了方法支撑。

综上所述,现有研究已完善了熔盐-蒸汽换热器的稳态传热与结构适配理论,能够支撑设备常规设计与稳态运行,但仍滞后于机组快速、高频调峰的实际工程需求。目前相关研究多聚焦稳态工况,对变负荷过程中换热器的瞬态传热响应、热应力演化及热冲击机理缺乏系统探究。工程实践证实,瞬态工况诱发的热冲击会大幅缩减设备使用寿命,导致电站经济效益下降4.6%~5.1%^[29-30],成为设备安全稳定运行的主要隐患^[31]。因此,深入剖析换热器瞬态传热与热应力响应规律、探究热冲击抑制策略,是提升耦合机组调峰能力、保障设备长效安全运行、推进熔盐储热技术规模化应用的核心研究重点。

本文旨在针对深度调峰背景下熔盐-蒸汽过热器的瞬态运行过程,采用数值模拟方法模拟变负荷工况,系统分析流速变化率等关键参数对盐侧与蒸汽侧出口温度、传热系数、压降、阻力系数、总传热系数及热应力的时间演化规律,揭示其动态传热机制与应力分布特征,为设备优化设计及安全高效灵活运行提供科学理论支撑。

1 数值模拟

1.1 物理模型及网格划分

图1所示为燃煤机组灵活性改造项目中应用的列管式熔盐-蒸汽过热器,熔盐与蒸汽采用逆流换热方式。若完全依据换热器实际结构尺寸构建物

理模型并开展仿真计算,将对算力提出极高要求,且需耗费大量计算时间与资源。为通过数值模拟高效、精准地获取熔盐-蒸汽过热器的传热性能,基于几何尺寸一致、流场分布与原型一致、传热面积比例一致的简化原则,采用简化方法对列管式过热器进行等效处理。

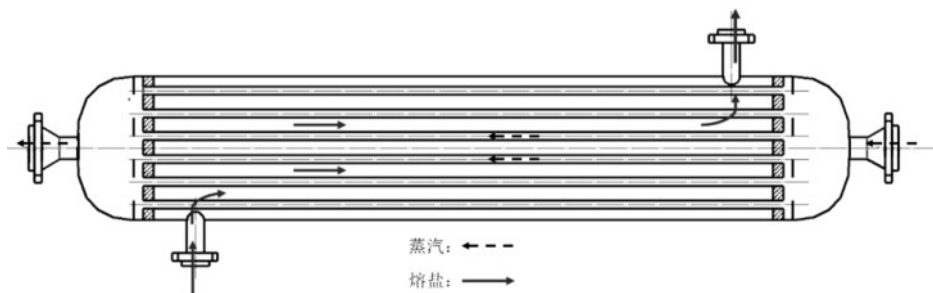


图1 列管式过热器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of superheater structure

图2为简化后的过热器横断面示意图及单元管束物理模型,基于局部模拟条件,将包含N根换热管的过热器简化为单个等效换热单元;该单元中蒸汽在换热管内流动,熔盐在管外通道流动,冷热流体

通过管壁实现热量传递。经合理简化后,物理模型的关键几何参数如下:换热管内径21mm、外径25mm、壁厚2mm,虚拟管外径41.892mm,套管总长度3000mm。

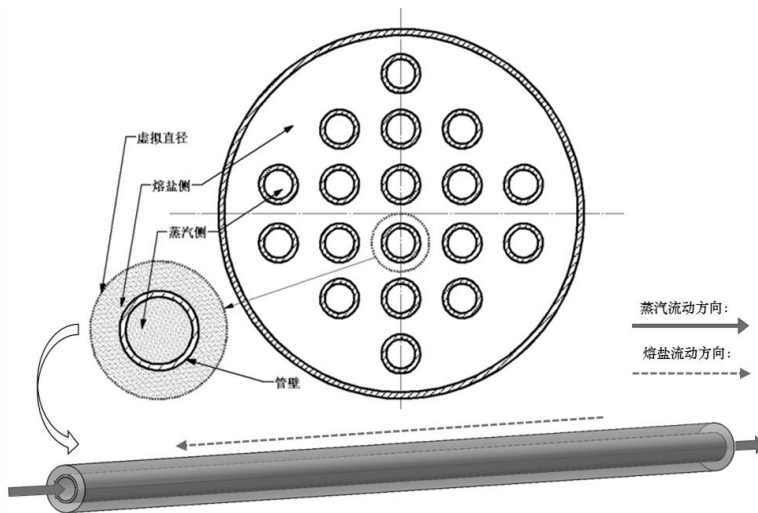


图2 简化模型

Fig.2 Simplified model

1.2 传热熔盐及其热物性

传热工质采用文献^[32]中的二元熔盐(40%KNO₃+60%NaNO₃),其熔点为220℃,工作温度可达580℃,其主要物理性质如下(式中T的单位为℃):

密度(kg/m ³):	$\rho = -0.64031T + 2090.186$	(1)
热导率(W/(m·K)):	$\lambda = (1.78219/10000)T + 0.44767$	(2)
比定压热容(J/kg·K):	$C_p = 0.17228T + 1447.587$	(3)
动力黏度×10 ⁻³ (Pa·s):	$\mu = 33.17125e^{-T/115.82} + 0.82874$	(4)

1.3 求解方法及边界条件

为分析蒸汽与熔盐的流动-换热耦合过程,需求解连续性方程、N-S方程与能量方程,采用双精度压力基求解器,时间步长设置为0.005s,满足库朗数要求。管内蒸汽与管外熔盐流动均处于湍流,结合燃煤电厂热力系统典型设计参数(蒸汽压力/温度)与熔盐储热系统特性(熔盐压力/温度),同时针对深

度调峰时快速、大范围变负荷的运行场景,对模拟工况进行简化处理。管内蒸汽与管外熔盐采用逆流布置,进口边界采用速度入口,出口设定为压力出口。蒸汽侧和熔盐侧三类变负荷工况如下:

汽侧变工况(Ⅰ):

验证流速影响:固定熔盐进口流速为1、2、3m/s,蒸汽进口流速在0–5.5m/s范围内连续变化,对应变化率0.05m/s²。

验证流速变化率影响:固定熔盐进口流速2m/s,蒸汽进口流速在0–5.5m/s内变化,对应变化率0.01m/s²(case1)、0.05m/s²(case2)、0.0333m/s²(case3);

盐侧变工况(Ⅱ):

验证流速影响:固定蒸汽进口流速为1、2、3m/s,熔盐进口流速在0–1m/s内变化,对应变化率0.01m/s²。验证流速变化率影响:固定蒸汽进口流速2m/s,熔盐进口流速在0–1m/s内变化,对应变化率0.02m/s²(case1)、0.01m/s²(case2)、0.0066m/s²(case3);

双侧变工况(Ⅲ):

验证流速影响时蒸汽侧流速变化率取0.05m/s²、熔盐侧流速变化率取0.01m/s²。

验证流速变化率影响时,同步改变蒸汽与熔盐进口流速,其中蒸汽侧取0.1m/s²(case1)、0.05m/s²(case2)、0.0333m/s²(case3),熔盐侧取0.02m/s²(case1)、0.01m/s²(case2)、0.0066m/s²(case3)。

1.4 网格无关性验证及实验验证

如图3所示,模型所有区域均采用结构化网格构建;在流体域的近壁面区域,插入边界层以提升计算精度,边界层设置方式为Total thickness,增长率设定为1.1;在应力模块计算中,管壁固体域同样沿用该网格模型。依次选取网格数量为100万、150万、200万、250万、300万及350万的模型进行计算,模型计算结果如图4所示,当网格数量达到250万后,蒸汽和熔盐出口温度的变化幅度显著减小,曲线趋于平缓,最终确定采用250万网格数量的模型开展计算。

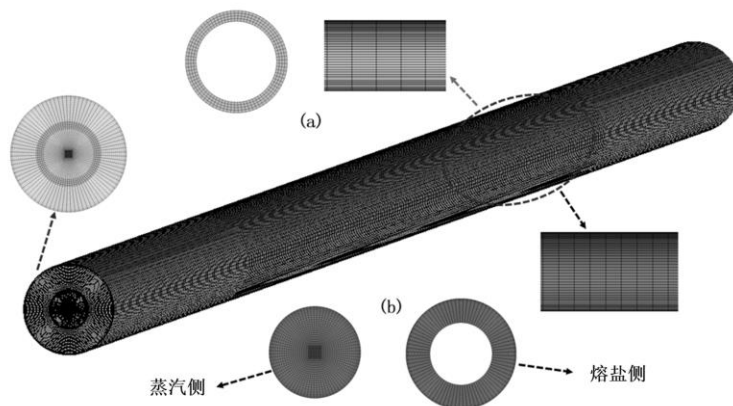


图3 网格划分

Fig.3 Grid division

为确保数值模拟结果准确性与模型准确性,将数值计算结果与文献^[33]中的实验数据进行对比分析,结果如图5所示,熔盐出口温度误差小于±0.5%,蒸汽出口温度误差小于±1%,数值计算结果与实验数据的误差均小于1%,完全满足精度要求;最终选定与实验数据吻合度最高的SSTk- ω 模型作为湍流模型,其近壁区求解精度高,对流动换热的预测更为准确。

2 流动特性分析

2.1 进出口压差

流速对压差的影响规律由图6所示,汽侧变工况时,熔盐侧流速保持恒定而汽侧流速逐步提升,汽侧压差随流速升高呈指数级增长,而盐侧压差基本维持稳定,波动幅度小于5%。在盐侧变工况时,蒸汽流速恒定而熔盐侧流速逐步提升,汽侧压差稳定在 0.5×10^4 – 4.0×10^4 Pa区间内,波动幅度小于10%。在双侧同步变工况时,两侧压差均随时间逐步上升,其中汽侧压差平均上升速率约为1200Pa/s,

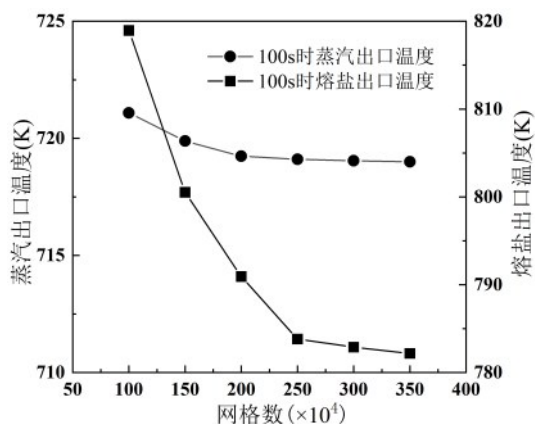


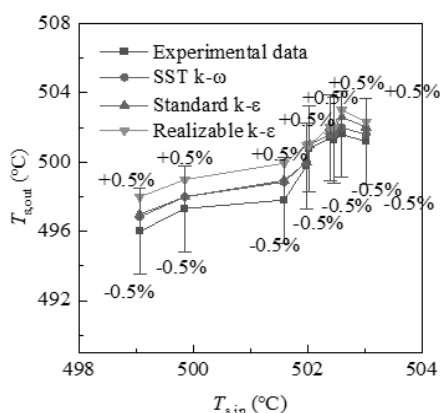
图4 过热器网格无关性验证

Fig.4 Verification of grid independence of superheater

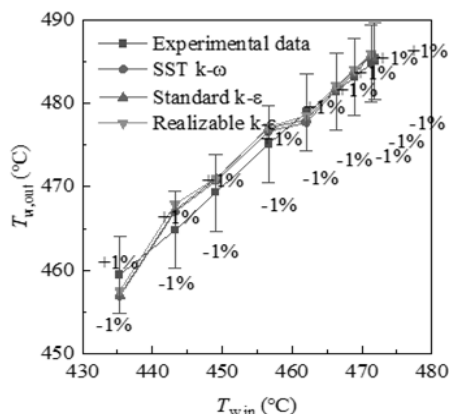
盐侧压差平均上升速率约为 70 Pa/s, 汽侧上升速率为盐侧的 17 倍以上, 这一差异与汽侧高压工况直接相关, 高压环境显著放大了流速变化对流动阻力的影响幅度, 使得汽侧压差对流速扰动的响应更为剧烈。

流速变化率对压差的影响规律由图 7 所示, 汽

侧变工况时, 汽侧压差的上升速率随流速变化率的增大而提高, 整体增幅约为 $1.1 \times 10^5 \text{ Pa}$; 同时盐侧压差也呈现缓慢上升趋势, 总增幅约 200 Pa, 增幅仅为 0.9%, 汽侧工况扰动对盐侧压降的影响较弱。盐侧压差增长的原因是当汽侧流速提升而盐侧流速恒定时, 汽侧换热增强, 熔盐温度降低, 黏度增大, 使得盐侧流动阻力略有上升, 表现为盐侧压差缓慢升高。盐侧变工况时, 熔盐侧流速变化率的增大会加快盐侧压差的上升速率, 二者呈正相关, 汽侧压差则表现出缓慢下降的特征, 且盐侧流速变化率越大, 汽侧压差下降越快, 原因是熔盐流速提高带来的换热增强, 导致汽侧工质温度升高, 虽然蒸汽的动力黏度变化有限, 但密度降低带来的雷诺数提升会进一步使阻力系数下降, 最终表现为汽侧压差呈现缓慢下降的趋势。汽侧压差由初始 20000 Pa 下降至 19250 Pa, 降幅约为 4%, 可见熔盐侧变工况时对汽侧压差的影响, 比汽侧变工况时对盐侧压差的影响更为显著。



(a) 熔盐出口温度对比



(b) 蒸汽出口温度对比

图5 模型验证

Fig.5 Model verification

当熔盐与蒸汽流速的变化率同时增大时, 盐侧压降呈指数性增长。综合图 6 与图 7 的分析结果可知, 熔盐-蒸汽换热系统两侧压差的动态特性同时受流速大小与流速变化率共同控制, 流速变化率相比流速对压降的影响更显著, 且两侧流动并非完全独立, 而是存在弱耦合效应, 一侧工况的变化会通过换热过程间接影响另一侧的压降特性。

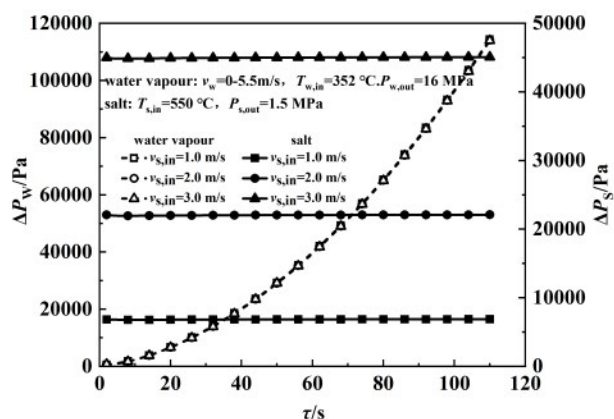
2.2 阻力系数

流速对阻力系数的影响规律如图 8 所示, 单一介质流速改变时, 该侧阻力系数呈现快速下降后趋

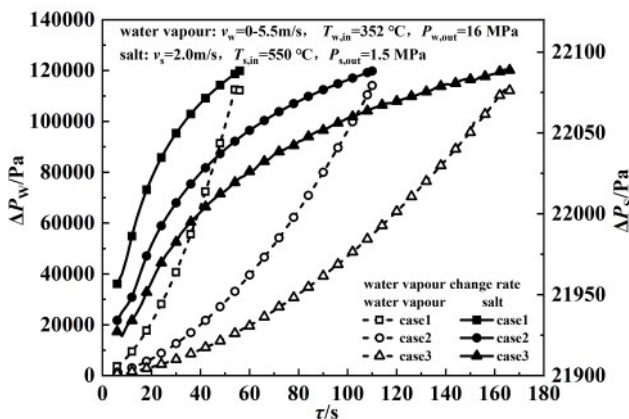
于收敛的指数衰减趋势, 当汽侧流速提升, 其阻力系数迅速降低并最终趋于平缓, 而盐侧阻力系数始终保持稳定; 反之, 若仅提高盐侧流速, 盐侧阻力系数呈指数级衰减, 汽侧阻力系数则维持稳定。双侧同步变工况下, 汽侧与盐侧流速同步变化, 汽侧阻力系数在 20s 时降至 0.12, 100s 时衰减至 0.055; 盐侧阻力系数 20s 时降至 0.11, 100s 时衰减至 0.045, 两者衰减速率接近。而双侧流速同步变化时, 两侧阻力系数呈现高度同步的衰减与收敛特征。

流速变化率对阻力系数的影响规律如图 9 所

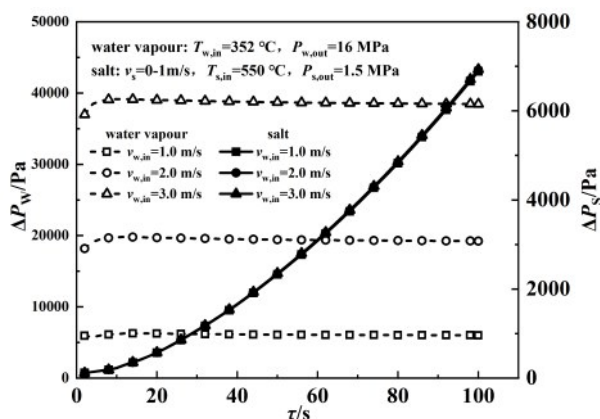
图6流速对压差的影响规律图7流速变化率对压差的影响规律



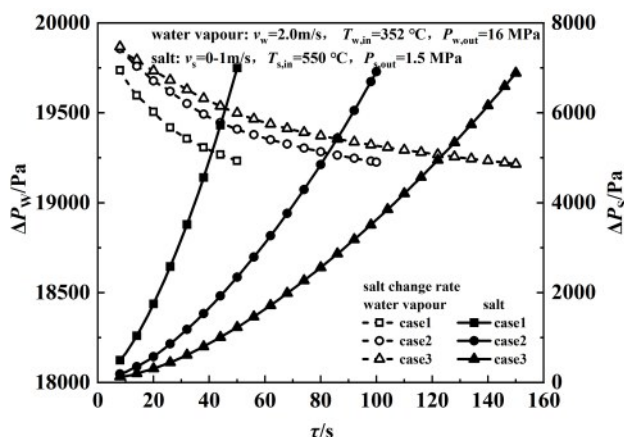
(a) 汽侧变工况



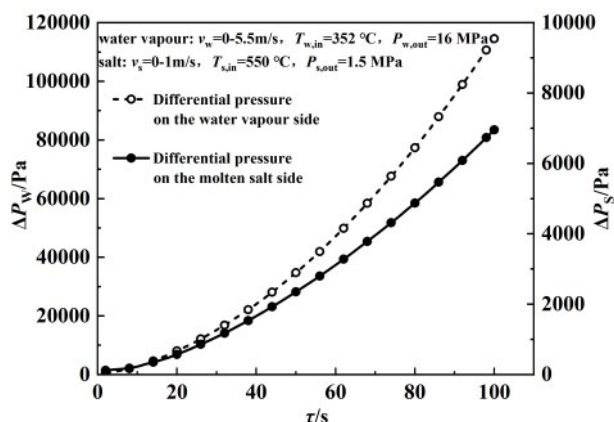
(a) 汽侧变工况



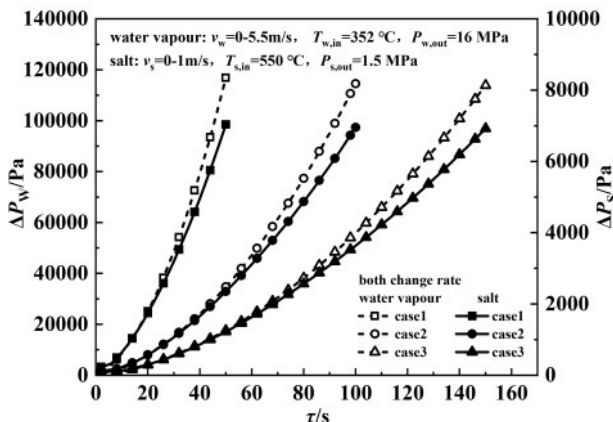
(b) 盐侧变工况



(b) 盐侧变工况



(c) 双侧同步变工况



(c) 双侧同步变工况

Fig.6The relationship between flow velocity and pressure differential.Fig.7The relationship between the rate of change in flow velocity and its effect on pressure differential.

示,汽侧变工况时,随着汽侧流速变化率的增大,汽侧阻力系数呈下降趋势;而盐侧阻力系数呈上升趋势,但整体上涨幅度小于1%,且流速变化率越大,汽侧阻力系数下降越快,盐侧阻力系数增长越快。盐侧变工况时,随着盐侧流速变化率的增加,盐侧

阻力系数同样呈逐渐下降趋势,同时汽侧阻力系数也同步降低,盐侧流速达到1m/s时阻力系数下降约5%,且流速变化率越大,盐侧与汽侧阻力系数衰减越快。该阻力系数的变化趋势,佐证了2.1节中本侧流动状态变化会通过换热间接影响另一侧压降

的结论。

图8流速对阻力系数的影响规律图9流速变化率对阻力系数的影响规律

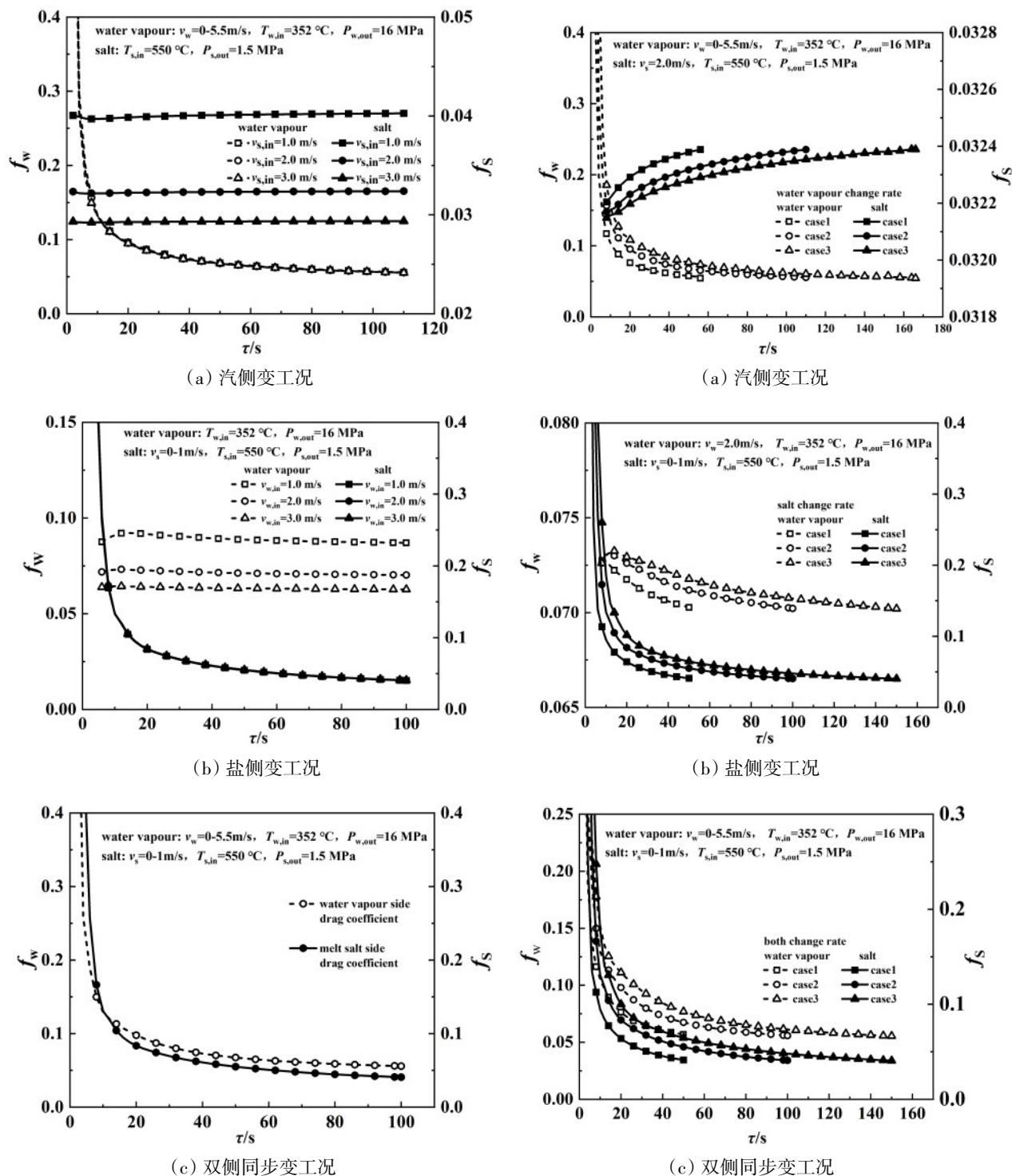


Fig.8 Relationship between Flow Velocity and Drag Coefficient Fig.9 Relationship between the rate of flow velocity change and the drag coefficient

3 传热特性分析

3.1 出口温度随时间变化

流速对出口温度的影响规律如图 10 所示,汽侧变工况时,随着汽侧流速增大,汽侧换热能力增强,初始阶段汽侧出口温度快速下降,20s 后下降速度放缓;盐侧出口温度也同步下降,蒸汽流速每提高 1.0 m/s,熔盐出口温度下降约 2~3 K,这是由于汽侧带走的热量增多导致的熔盐侧释热量增加,但其下降幅度小于汽侧。盐侧变工况时,随着盐侧流速的增大,盐侧换热能力同样得到增强,熔盐出口温度持续上升;同时汽侧出口温度也同步上升,熔盐流速每提高 0.2m/s,蒸汽出口温度上升约 5~10K,可见熔盐侧流速增加时对汽侧出口温度的增幅更大。双侧同步变工况后期总体变化幅度比单一流体变化时更小,说明双流体协同调节可以有效提升出口温度的稳定性。

流速变化率对出口温度的影响规律由图 11 所示,汽侧变工况时,汽侧流速变化率越大,汽侧出口温度的下降速度越快;熔盐出口温度与汽侧同步下降,但变化率对其影响程度较小。盐侧变工况时,盐侧流速变化率越大,熔盐出口温度上升速度越快;汽侧出口温度与盐侧同步上升,但变化幅度相对较小。双侧同步变工况时,汽侧与盐侧出口温度在 20s 左右出现温度波动,随后均趋于稳定,两者的波动幅度整体上比单一流体变工况时小 20% 左右,进一步验证了双流体协同调节的优势。

3.2 热流密度

流速对热流密度的影响规律如图 12 所示,汽侧变工况时,提高汽侧流速可强化汽侧对流换热,使汽侧热流密度显著上升,同时盐侧热流密度也同步升高,对比 110s 不同蒸汽流速时两侧的热力密度,可以发现流速提升 2 倍后,汽侧、盐侧热流密度增幅均约 45%;盐侧变工况时,增大盐侧流速可减薄盐侧边界层,同样可增强其对流换热,推动盐侧与汽侧热流密度上升;双侧流速同步提升时,两侧流动换热均得到增强,两侧热流密度在 40~100 s 区间内表现出显著线性增长规律,该线性区间内,汽侧热流密度由约 150 kw/m^2 升至 460 kw/m^2 ,平均增长速率约 3.7 $\text{kw}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

流速变化率对热流密度的影响规律如图 13 所示,在汽侧变工况时,汽侧流速变化率加快可促使汽侧边界层减薄、增强换热,提升汽侧热流密度,同

时带动盐侧热流密度的提高;盐侧变工况时,盐侧流速变化率增大可增强湍流扰动,使盐侧热流密度随变化率呈正向增长,同时带动汽侧热流密度的提高。水盐双侧流速同步提升时,热流密度曲线在上升阶段 20s 至 100s 时表现出较强的线性爬升特征,这说明同步调节能有效避免单侧剧烈调节初期热流密度呈大斜率上升所引发的热冲击,使换热器管壁受到的热负荷变化更加均匀平稳。全工况下汽侧热流密度始终高于盐侧,且差值随流速变化率增大而扩大,体现出提高流速变化率对汽侧换热优势的放大作用。

3.3 传热系数

流速对传热系数的影响规律如图 14 所示,在汽侧变工况时,汽侧换热系数随流速提升显著增强,呈线性增加,蒸汽流速每提高 1m/s,蒸汽侧传热系数约增大 3000 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,而盐侧则基本稳定;在盐侧变工况时,盐侧换热系数随流速升高显著增大,同样呈线性增加,熔盐流速每提高 0.2m/s,熔盐侧传热系数约增大 1000 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,汽侧受其影响微弱;在双侧同步变工况中,随着蒸汽侧与熔盐侧的流速增大,两侧换热系数均呈线性增加。各工况下汽侧传热系数均高于盐侧,这是由于熔盐黏度高的性质造成的,相同流速下盐侧雷诺数更低、边界层更厚,因此传热能力更差,在强化换热时应优先强化盐侧。

由图 15 可见,汽侧变工况时,蒸汽流速变化率越大,其传热系数增长越快,蒸汽侧传热系数在 0~15000 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$ 范围内变化;而盐侧传热系数则随时间缓慢下降并趋于平缓,整体下降幅度小于 5%,这是由于汽侧传热强化导致盐侧温度小幅降低,熔盐黏度增大、边界层增厚,流动换热被削弱所致。盐侧变工况时,盐侧传热系数随时间显著上升,且增长趋势与熔盐流速变化率正相关,变化率越大,盐侧传热系数上升速率越快,盐侧传热系数在 0~5000 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$ 范围内变化;与之相对,汽侧传热系数随着时间出现小幅度缓慢上升,上升约 8%,这是由于盐侧传热强化导致的汽侧温度升高,汽侧雷诺数增大,最终表现为汽侧换热增强。双侧同步变工况时,蒸汽与熔盐的传热系数均随时间持续增长,且二者的增长速率均与各自对应的流速变化率呈正相关。

3.4 总传热系数

对比分析图 16、17 可得,无论是流速本身的改

图10 流速对出口温度的影响规律图11 流速变化率对出口温度的影响规律

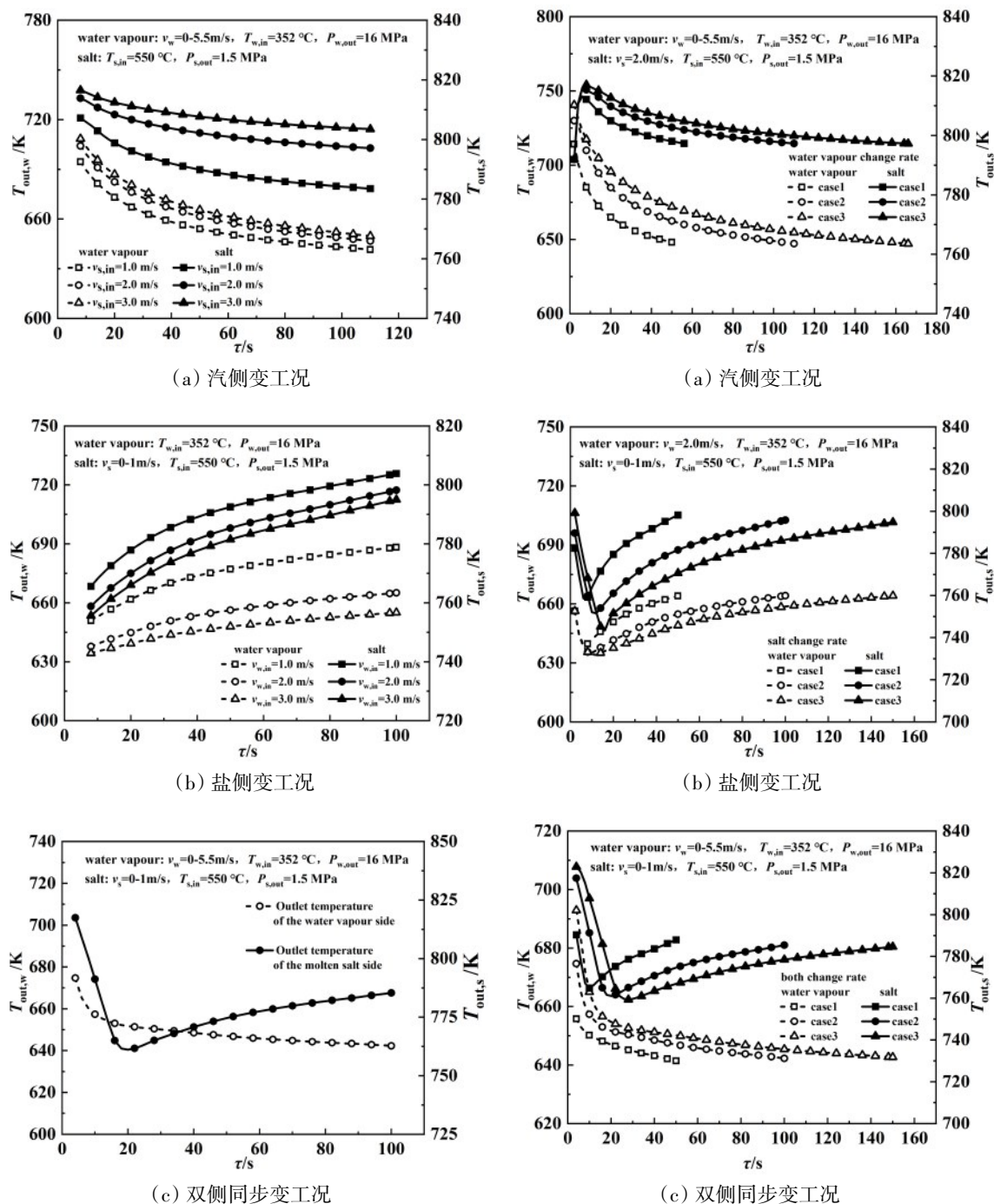


Fig.10 The relationship between flow velocity and outlet temperature. Fig.11 The relationship between the rate of change in flow velocity and the outlet temperature.

变,还是流速变化率的波动,均对总传热系数的变化起到重要影响。由图16所示,总传热系数与蒸汽侧或盐侧流速呈正相关,随着变工况侧流速的增大而增大,非变工况侧流速增大时整体换热水平同步提高。由图17所示,总传热系数随蒸汽流速变化率、盐侧流速变化率的提高而增大,但其最大值保

持恒定;当熔盐流速变化率与蒸汽流速变化率同时增大时,前期总传热系数呈现近似指数增长趋势,后期转为线性增长;且流速变化率的差异会显著影响总传热系数的增长幅度,变化率越大,总传热系数的增长速率越迅速。

图12 流速对热流密度的影响规律图13 流速变化率对热流密度的影响规律

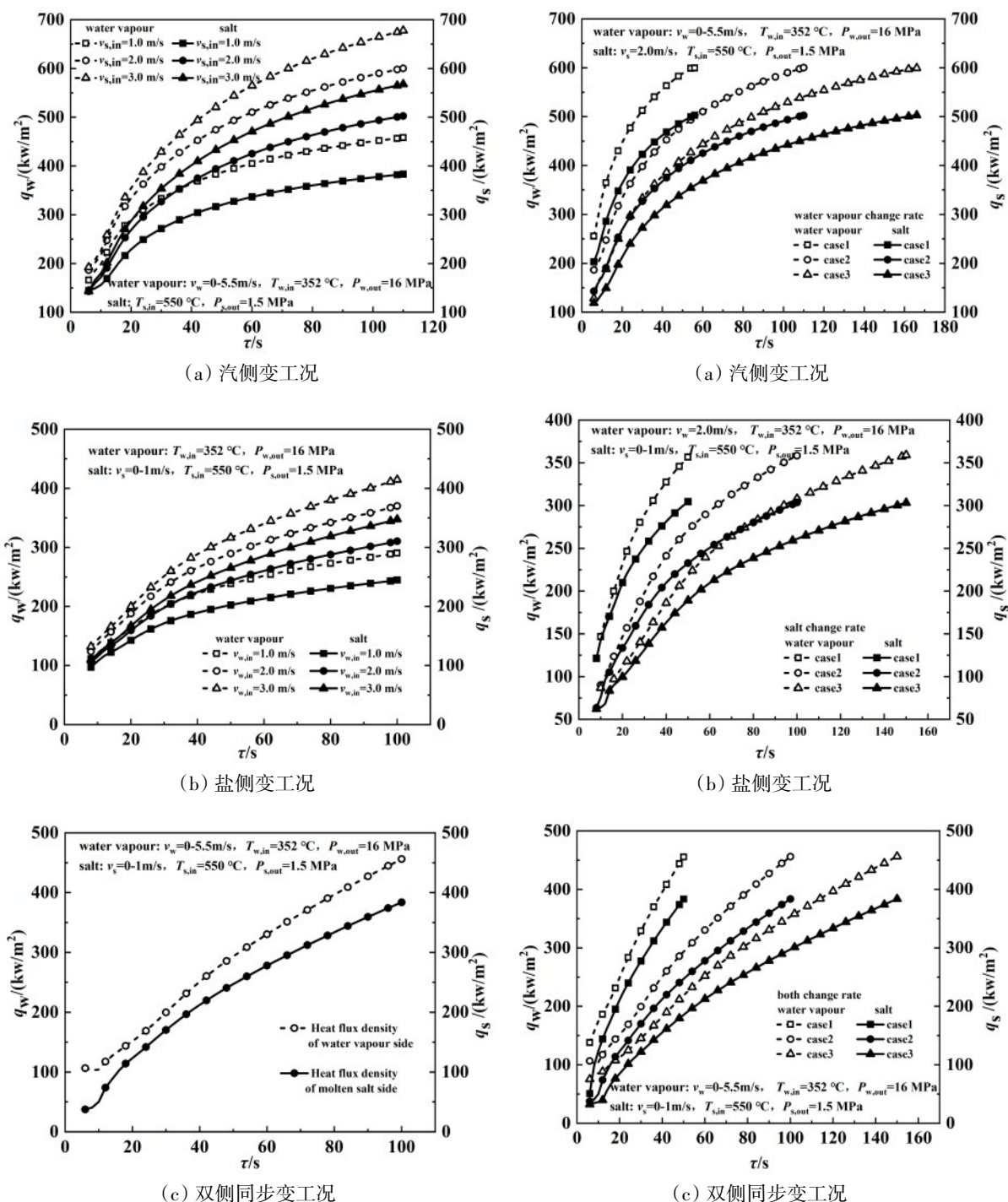


Fig.12 The relationship between flow velocity and heat flux density. Fig.13 The relationship between the rate of change in flow velocity and heat flux density.

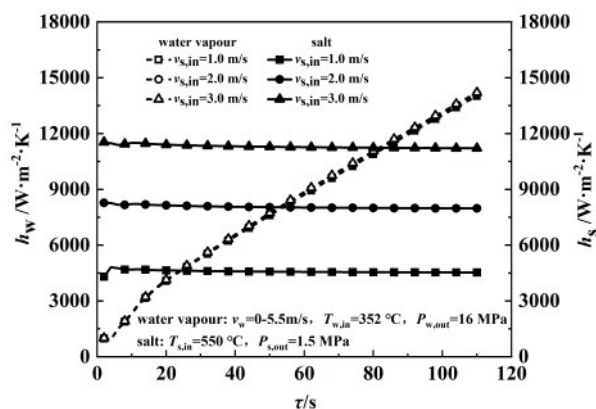
4 热应力分析

4.1 等效应力

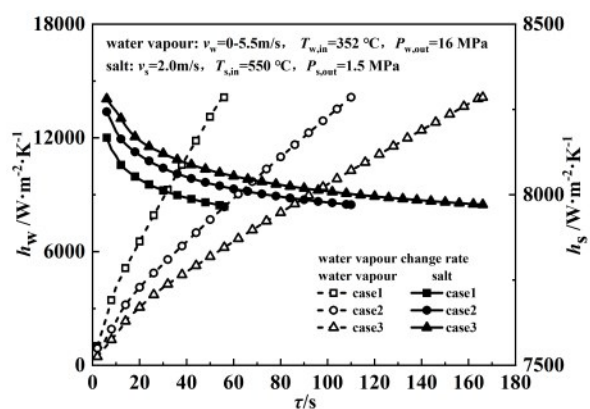
由图18可见,汽侧、盐侧分别单独变工况时,等效应力均随该侧介质流速提升表现为先快速增长

后逐渐放缓的变化规律。究其机理是由于工况改变瞬间高温熔盐与低温蒸汽换热强度增加,管壁两侧瞬态温度梯度陡增,热应力快速累积;随着时间推移,管壁温度趋于均匀,热应力增长速率随之下降,应力曲线斜率逐步降低。对比(a)、(b)结果可见,

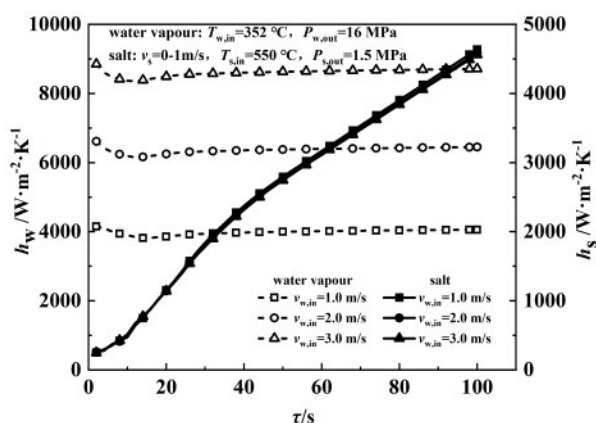
图14流速对传热系数的影响规律图15流速变化率对传热系数的影响规律



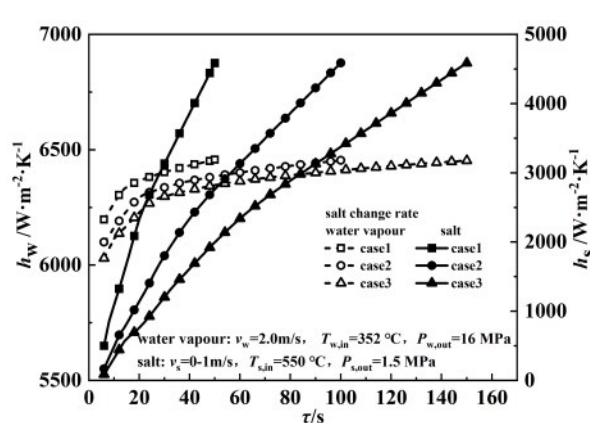
(a) 汽侧变工况



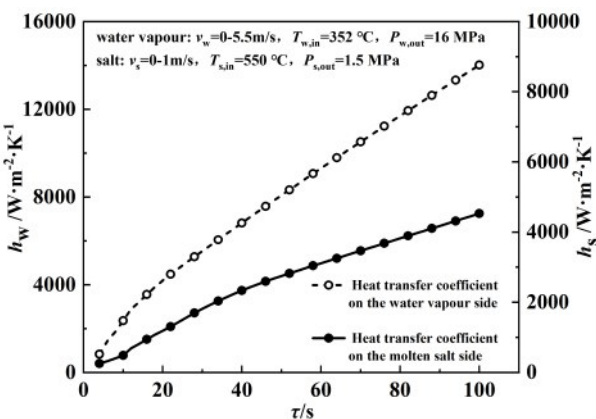
(a) 汽侧变工况



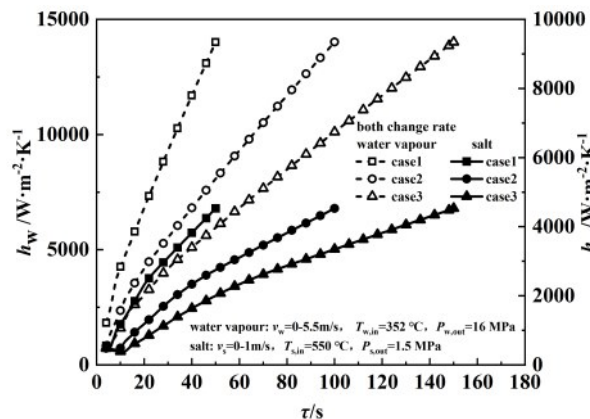
(b) 盐侧变工况



(b) 盐侧变工况



(c) 双侧同步变工况



(c) 双侧同步变工况

Fig.14The relationship between flow velocity and heat transfer coefficient.Fig.15The relationship between the rate of change in flow velocity and the heat transfer coefficient.

汽侧工况下,不同流速的最终等效应力差近20 MPa;熔盐侧工况下,最终等效应力差近5 MPa,表明汽侧流速对管壁等效应力的影响作用显著强于熔盐侧。

与此同时,图18(a)应力曲线在25 s、图18(b)在

70 s处出现明显曲线交叉现象,即非变工况侧流速越大,变工况初期整体等效应力值越低,但在换热中后期应力上升幅度更大,最终反超低流速工况。这是由于初期变工况侧流速较低,此时非变工况侧的高流速有效抑制了贴壁处的瞬态温度骤变,改善

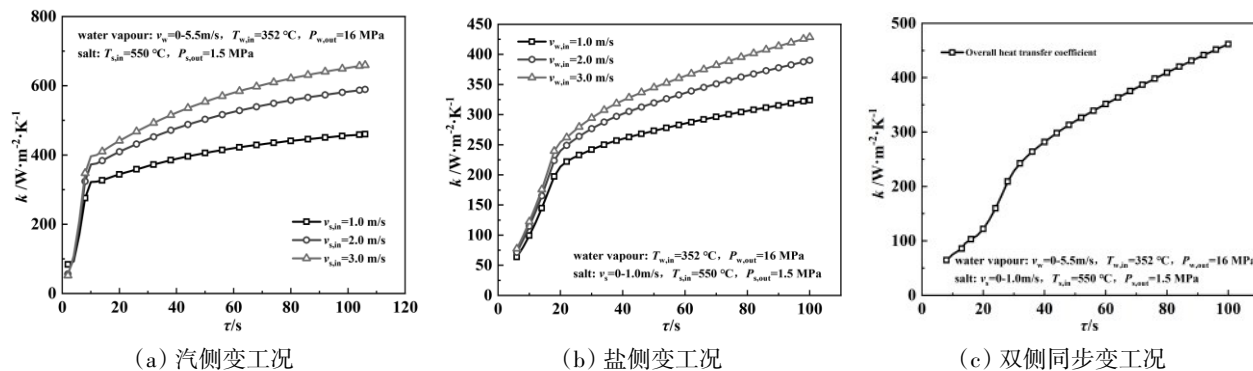


图 16 流速对总传热系数的影响规律

Fig.16 The relationship between flow velocity and the overall heat transfer coefficient.

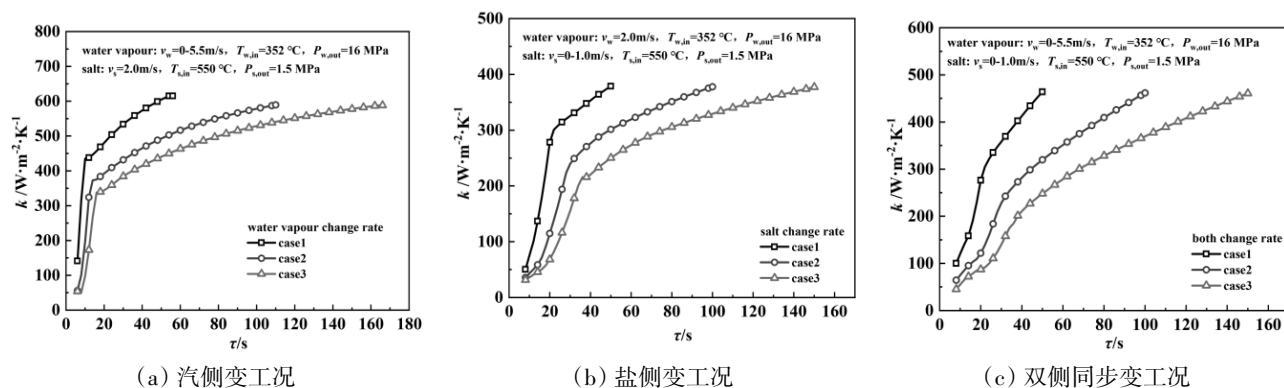


图 17 流速变化率对总传热系数的影响规律

Fig.17 The relationship between the rate of change in flow velocity and the overall heat transfer coefficient.

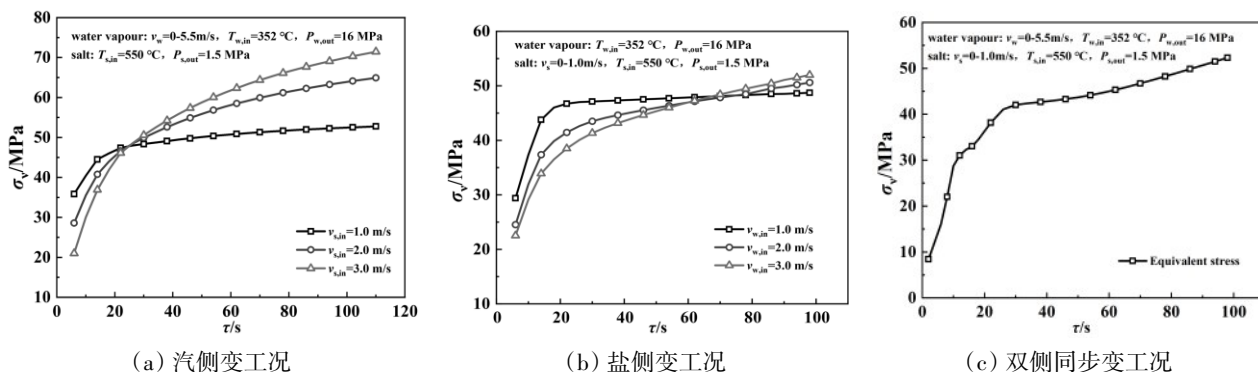


图 18 流速对等效应力值的影响规律

Fig.18 The relationship between flow velocity and equivalent stress values.

了管壁温度分布的均匀性,使得初始热冲击应力偏低;随着后期变工况侧流速增大,两侧流速的协同作用显著强化了系统的整体传热量,逐步拉大管壁温度梯度,最终导致热应力大幅攀升从而反超了低流速工况对应的应力水平。该现象充分揭示了变工况不同阶段下,流速配合与传热机制对热应力演化的主导作用。

流速变化率对等效应力的影响规律如图 19 所示。从瞬态响应特征来看,流速变化速率越大,同一时刻结构瞬态等效应力越高,变流速带来的应力差异主要体现在变工况前期 0~40s 内的应力快速爬升阶段。在汽侧或盐侧单侧变工况下,流速变化率的增大均显著提升了等效应力在初始阶段的成长速率,表明流速变化率增大会加剧管壁温度场的非

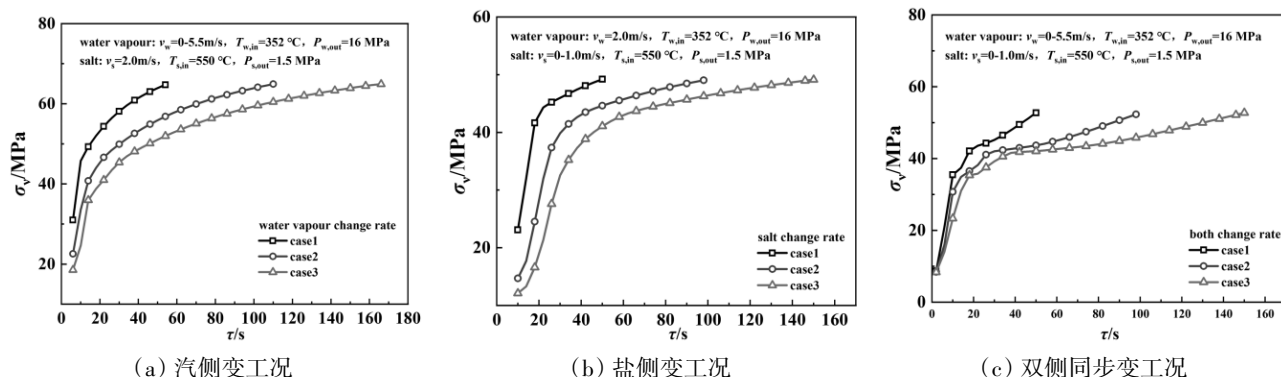


图19 流速变化率对等效应力值的影响规律

Fig.19 The relationship between the rate of change in flow velocity and the equivalent stress value.

均匀性,进而放大了瞬态热应力冲击。双侧同步变工况时,可以发现等效应力在初始阶段出现应力波动。同时,三个工况下对应不同流速变化率之间的最终应力差值均收窄至1~3MPa,表明流速终值确定时,流速变化速率仅改变应力上升快慢与瞬态峰值大小,基本不影响系统最终应力水平。

4.2 最大形变量

流速对最大形变量的影响规律如图20所示,汽侧变工况中,当蒸汽流速从0~5.5m/s逐渐提升时,结构最大形变量呈快速上升后逐渐衰减的趋势,当熔

盐流速从1.0 m/s提升至3.0 m/s后,部件最大变形量水平下降,最大变形量峰值由约0.36 mm逐步降至0.25 mm。盐侧变工况时,最大形变量的变化趋势与水侧变工况时一致。双侧同步变工况下,最大形变量整体呈先快速上升后逐渐衰减的变化趋势,但在变工况初期,最大形变量出现明显波动,变形峰值约为0.36 mm,与汽侧变工况中熔盐流速1.0 m/s时的峰值接近,整体上结构最大形变量的波动范围为0~0.4mm。

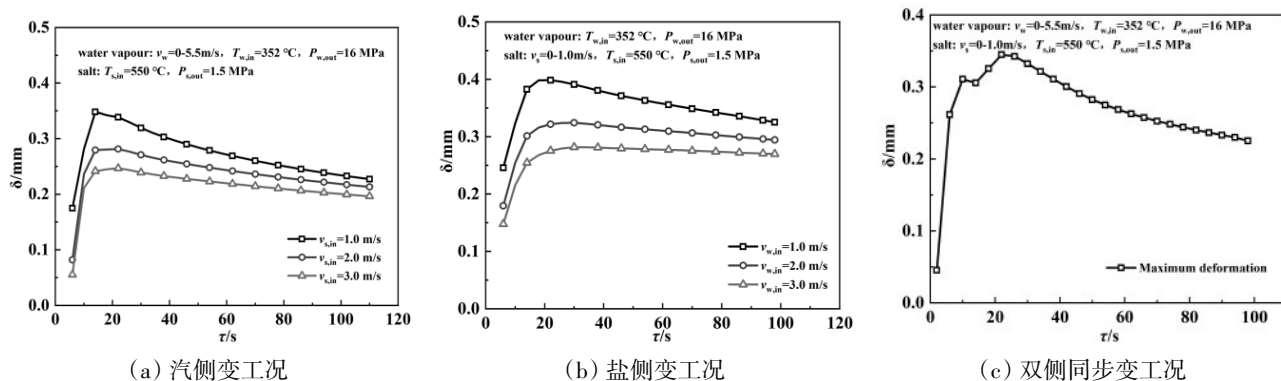


图20 流速对最大形变量的影响规律

Fig.20 The relationship between flow velocity and maximum deformation.

流速变化率对最大形变量的影响规律如图21所示,汽侧变工况中,整体表现为随着流速变化率的降低,最大形变量峰值略有回落且后期衰减趋势更为平缓,表明蒸汽流速变化率的减小有助于弱化瞬态热冲击强度,减少结构变形。盐侧变工况下,最大形变量的变化趋势与汽侧变工况时一致。

综合来看,盐侧变工况时的最大形变量峰值均略高于汽侧变工况,同时不同侧的响应差异表明,

最大形变量对双侧同步变工况的响应程度更为敏感。时间尺度上,10~20 s仍是各类动态工况下变形峰值的核心区间,此阶段是热变形风险防控的关键节点,而调控流速变化率可作为动态工况下抑制热变形的重要手段。

5 结论

本文采用数值模拟方法,系统研究深度调峰工

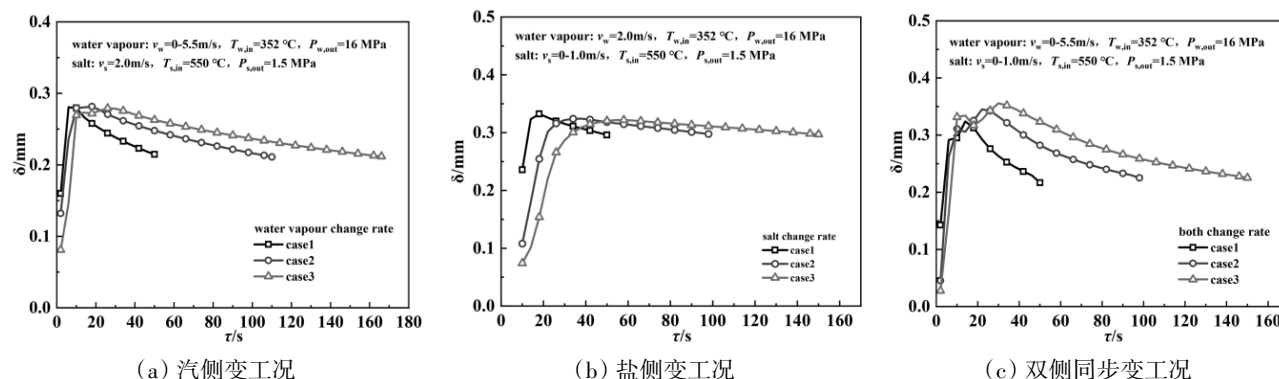


图21 流速变化率对最大形变量的影响规律

Fig.21 The relationship between the rate of change in flow velocity and the maximum deformation.

况下熔盐-蒸汽过热器的瞬态传热特性与热应力分布规律,主要结论如下:

1、流动特性:熔盐-蒸汽换热系统两侧压差动态特性受流速大小与变化率共同控制,两侧流动存在显著的弱耦合效应,压降随自身流速变化率的增大而增大,当两侧流速变化率同步增大时,压降呈指数型增长。阻力系数总体呈指数衰减特征,同时两侧阻力系数随工况变化呈现差异化响应规律:汽侧变工况时,汽侧阻力系数随流速变化率增大而降低,盐侧阻力系数则随之升高;盐侧变工况时,两侧阻力系数则均随盐侧流速变化率的提升呈下降趋势。

2、传热特性:流速及流速变化率对两侧的流动换热影响显著。双侧同步变工况可有效提升出口温度的稳定性,相较于单侧变工况,可使两侧出口温度波动幅度降低约20%。汽侧热流密度与传热系数因熔盐高黏度特性始终优于盐侧;双侧流速同步提升过程中,热流密度可实现平稳线性爬升,规避了调节单侧工况的初期强热冲击问题。总传热系数受二者协同调控,双侧协同变工况时,总传热系数前期近似指数增长,后期增速放缓转为线性增长。

3、应力特性:系统热应力与变形响应受流速与变化率协同调控,流速大小决定最终水平,流速变化率主导瞬态变化过程及增长速率。应力波动幅值呈对数增长趋势,汽侧与盐侧变工况下,随着流速增大,管壁等效应力先快速上升后增速放缓。结构最大形变量波动范围为0~0.4mm,10~20s为变形峰值出现的关键区间。

参考文献

- [1] 国家发展改革委 国家能源局. «“十四五”现代能源体系规划» 印发[J]. 华北电力, 2022(3): 4.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Issuance of the 14th Five-Year Plan for Modern Energy System [J]. North China Electric Power, 2022(3): 4.
- [2] Zhang K Z, Liu M, Zhao Y L, 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.
- [3] 严秉忠. 明确发展目标 优化产业布局 抽水蓄能中长期发展迎来新机遇[N]. 中国电力报, 2021-09-11(001).
Yan B Z. Clarifying development goals and optimizing industrial layout: New opportunities for the medium- and long-term development of pumped storage [N]. China Electric Power News, 2021-09-11(001).
- [4] 王庆华, 刘吉臻, 樊欢豹, 等. 支撑我国能源转型的灵活燃煤发电新技术: 锅炉系统及汽轮发电机系统[J]. 中国电机工程学报, 2024, **44**(18): 7136-7166, 10007.
Wang Q H, Liu J Z, Fan H B, et al. Novel technologies of flexible coal-fired power generation to support China energy transition: boiler system and turbine generator system[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2024, **44**(18): 7136-7166, 10007.
- [5] 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]. 中国电机工程学报, 2023, **43**(22): 8772-8789.
Ouyang Z Q, Wang H S, Lyu Q G, et al. Research progress on deep peak shaving technology of pulverized coal-fired boiler power unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, **43**(22): 8772-8789.
- [6] 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[J]. 中国电机工程学报, 2026, **46**(2): 691-702.
Wei Y, Fan B F, Zhang Y, et al. Flexible peak shaving control strategy of thermal power unit coupled with molten salt heat storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2026, **46**(2): 691-702.
- [7] 王艳, 徐进良, 谢剑, 等. 支撑超灵活燃煤发电的储能系统熔盐筛选[J]. 中国电机工程学报, 2025, **45**(20): 8053-8066, 10017.
Wang Y, Xu J L, Xie J, et al. Molten salt selection for thermal energy storage system of ultra-flexible coal-fired power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, **45**(20): 8053-8066, 10017.

- [8] 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 F F, Han W, Yao M Y. Application status and development trend of molten salt energy storage in novel power systems[J]. Thermal Power Generation, 2023, **52**(2): 1-9.
- [9] 张鹏, 廖海燕, 周兆伦, 等. 高温熔融盐储热辅助热电联产机组灵活调峰研究[J]. 新疆大学学报, 2025, **42**(4): 496-505.
- Zhang P, Liao H Y, Zhou Z L, et al. Research on flexible peak shaving of combined heat and power generation units assisted by high-temperature molten salt thermal energy storage[J]. Journal of Xinjiang University, 2025, **42**(4): 496-505.
- [10] Lv S N, Lu Y W, Wei H J. Research on operational flexibility of 600 MW subcritical coal-fired power unit by coupling three-tank molten salt thermal energy storage system[J]. Energy, 2025, **322**: 135580.
- [11] Yan Z Y, Tan R, Meng F X, et al. Molten-salt-based thermal storage for thermal power plant peaking[J]. Energies, 2026, **19**(5): 1246.
- [12] 栾俊, 马勇, 宋磊, 等. 耦合蒸汽熔盐储热的燃煤机组调频响应特性研究[J]. 电气技术, 2025, **26**(9): 13-20, 61.
- Luan J, Ma Y, Song L, et al. Study on frequency regulation response characteristics of a coal-fired unit integrating steam molten salt thermal energy storage[J]. Electrical Engineering, 2025, **26**(9): 13-20, 61.
- [13] Zhang Q J, Dong J N, Chen H, et al. Dynamic characteristics and economic analysis of a coal-fired power plant integrated with molten salt thermal energy storage for improving peaking capacity[J]. Energy, 2024, 290130132-.
- [14] 陈玉爽, 田健, 丁梦婷, 等. 基于流热耦合的U型管式熔盐换热器温度场与应力场分析[J]. 核技术, 2023, **46**(1): 010604.
- Chen Y S, Tian J, Ding M T, et al. Temperature field and stress field analysis of molten salt U-tube heat exchanger based on fluid-thermal-solid coupling method[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(1): 010604.
- [15] Zou Y K, Ding J, Wang W L, et al. Heat transfer performance of U-tube molten salt steam generator[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, **160**: 120200.
- [16] He S Q, Wei L H, Lu J F, et al. Heat transfer characteristics of molten salt flowing in steam generator[J]. Thermal Science, 2022, **26**(2 Part C): 1757-1769.
- [17] He C M, Lu J F, Ding J, et al. Heat transfer and thermal performance of two-stage molten salt steam generation system[J]. Applied Energy, 2017, **204**: 1231-1239.
- [18] He S Q, Lu J F, 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.
- [19] Lu J F, Liu Z, Zou Y K, et al. Experimental thermal performance study of molten salt steam generator-superheater with saturated water[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, **168**: 120884.
- [20] Abu-Hamdeh N H, Salilih E M. Numerical modelling of a parallel flow heat exchanger with two-phase heat transfer process[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021, **120**: 105005.
- [21] Huang Z J, Zou Y K, Ding J, et al. Experimental investigation of heat transfer in coiled tube type molten salt steam generator[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, **148**: 1131-1138.
- [22] Dong X Y, Bi Q C, Jiang J L, et al. Experimental investigation on the heat transfer characteristics of molten salt to subcooled boiling water[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, **159**: 120120.
- [23] Wenner J, Wagner M J. Dynamic simulation of a molten salt-steam superheater for load-following applications[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2025, **147**: 011005.
- [24] Wang H, Xu J L, Zhao Y W, et al. Numerical simulation of the thermal performance of the molten-salt steam generator for a coal-fired power plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, **267**: 125847.
- [25] Cui Z P, Hao J, Wang D L, et al. Dynamic characterization and predictive control of the steam-molten salt heat exchanger in charging process[J]. Energy, 2025, 321135523-135523.
- [26] 朱晨, 张光明, 朱珂言, 等. 烟气-熔盐储热系统动态建模与非线性预测控制[J]. 动力工程学报, 2025, **45**(12): 2079-2089.
- Zhu C, Zhang G M, Zhu K Y, et al. Dynamic modeling and nonlinear predictive control of flue gas-molten salt thermal storage system[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2025, **45**(12): 2079-2089.
- [27] Wang C Y, Liu M, Zhao Y L, et al. Thermodynamic optimization of the superheater during switching the load transient processes[J]. Energy, 2021, **218**: 119446.
- [28] 户雯婷, 刘明, 张顺奇, 等. 电制热熔盐储热发电系统的动态特性分析[J]. 热力发电, 2025, **54**(9): 25-34.
- Hu W T, Liu M, Zhang S Q, et al. Dynamic characteristics analysis of power-to-heat molten salt heat storage and power generation system[J]. Thermal Power Generation, 2025, **54**(9): 25-34.
- [29] Hood K, Walsh M, Zolan A, et al. Characterizing and improving the performance of molten-salt-steam heat exchangers in concentrating solar power plants[J]. Energy Conversion and Management, 2024, **315**: 118721.
- [30] González-Gómez P A, Gómez-Hernández J, Briongos J V, et al. Lifetime analysis of the steam generator of a solar tower plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, **159**: 113805.
- [31] 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 J Z, Wang Q H, Zhang X N, 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.
- [32] Dong X Y, Bi Q C, Yao F. Experimental investigation on the heat transfer performance of molten salt flowing in an annular tube[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, **102**: 113-122.
- [33] Dong X Y, Bi Q C, Jiang J L, et al. Experimental investigation on the shell-side thermal performance of molten salt steam generators[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, **158**: 119991.