

# 火电机组烟气余热供暖系统换热效率影响因素及调控策略

孙立斌

吉林电力股份有限公司四平第一热电公司, 吉林 四平 136001

DOI:10.61369/EPTSM.2025110017

**摘 要 :** 火电机组烟气余热供暖是能源梯级利用与节能减排的关键技术路径, 其换热效率直接决定余热回收潜力与供暖系统经济性。本文基于烟气余热供暖系统的传热机理, 从结构设计、介质特性、运行工况及外部环境四个维度, 深入剖析影响换热效率的核心因素, 揭示各因素对传热热阻、流场分布及能量传递过程的作用机制。针对关键影响因素, 提出优化换热器结构参数、强化介质预处理、动态匹配运行工况及自适应环境调节的调控策略, 为提升火电机组烟气余热供暖系统的换热性能与运行稳定性提供理论支撑。

**关 键 词 :** 火电机组; 烟气余热供暖; 换热效率; 影响因素; 调控策略

## Factors Affecting Heat Exchange Efficiency and Control Strategies in Flue Gas Waste Heat Heating Systems of Thermal Power Units

Sun Libin

Siping No.1 Thermal Power Company of Jilin Electric Power Co., Ltd., Siping, Jilin 136001

**Abstract :** Waste heat recovery from flue gas in thermal power units is a key technical pathway for energy cascade utilization and energy conservation with emission reduction. The heat exchange efficiency directly determines the potential of waste heat recovery and the economic feasibility of the heating system. Based on the heat transfer mechanism of flue gas waste heat heating systems, this paper conducts an in-depth analysis of core factors influencing heat exchange efficiency from four dimensions: structural design, medium characteristics, operating conditions, and external environment. It reveals the mechanisms by which these factors affect thermal resistance, flow field distribution, and energy transfer processes. For critical influencing factors, optimization strategies are proposed, including adjusting heat exchanger structural parameters, enhancing medium pretreatment, dynamically matching operating conditions, and implementing adaptive environmental regulation. These strategies provide theoretical support for improving the heat exchange performance and operational stability of flue gas waste heat heating systems in thermal power units.

**Keywords :** thermal power units; flue gas waste heat heating; heat exchange efficiency; influencing factors; regulation strategies

### 引言

在“双碳”目标引领下, 火电机组节能降耗与余热资源化利用成为能源行业转型的重要方向。火电机组排烟温度通常在120–150℃, 蕴含大量中低温余热, 若直接排放不仅造成能源浪费, 还会加剧环境热污染。烟气余热供暖系统通过换热器将烟气中的热能传递至供暖循环水, 实现余热回收与供暖需求的精准匹配, 兼具节能与环保双重价值。然而, 实际运行中换热效率受多重因素耦合影响, 易出现传热系数下降、积灰堵塞等问题, 制约了余热利用效率的提升。基于此, 本文聚焦换热效率的核心影响因素, 深入分析其作用机理, 并提出针对性调控策略, 为系统优化设计与高效运行提供参考。

## 一、火电机组烟气余热供暖系统换热机理

工业余热供热是以回收工业生产过程中产生的废热、废水、废气等低品位能源（指以环境温度为基准，被考察体系排出的热载体可释放的热量）实现集中供热技术。该技术通过回收工业余热进行集中供热，能节约一次能源，提高经济效益，减少污染。其热源涵盖高温烟气、冷却循环水、蒸汽冷凝水等载体形态，主要应用于石化、钢铁、建材等高能耗行业。火电机组烟气余热供暖系统的核心是热量传递过程，主要通过间壁式换热器实现烟气与供暖循环水的能量交换。烟气侧的显热通过对流换热和辐射换热传递至换热器壁面，再通过导热传递至循环水侧，最终由循环水将热量输送至供暖终端。换热过程的效率由传热系数、换热面积及传热温差共同决定，遵循传热基本方程  $Q=K \cdot A \cdot \Delta t_m$ （ $Q$  为换热量， $K$  为总传热系数， $A$  为换热面积， $\Delta t_m$  为对数平均传热温差）。总传热系数  $K$  的大小取决于烟气侧对流传热系数、管壁导热系数、循环水侧对流传热系数及各环节的污垢热阻，其数值直接反映系统的传热能力，是衡量换热效率的核心指标。<sup>[1]</sup>

## 二、火电机组烟气余热供暖系统换热效率影响因素

### （一）结构设计因素

换热器的结构参数直接决定传热面积、流场分布及热量传递路径，是影响换热效率的基础性因素。换热器类型选择对换热效率影响显著。管壳式换热器结构稳固但烟气侧流场易出现死区，导致局部传热不均；板式换热器传热面积大、传热系数高，但抗堵塞能力较弱；翅片管式换热器通过扩展表面增大换热面积，但若翅片间距设计不合理，易造成积灰堆积。不同类型换热器的结构特性决定了其适用场景与传热效率上限。流道设计参数影响介质流动状态与传热效果。流道截面形状、排列方式及流速匹配度直接决定烟气与循环水的湍流程度，湍流状态下的对流传热系数远高于层流。若流道过宽，烟气流速降低，对流换热强度减弱；流道过窄则易引发积灰堵塞，增加传热热阻。此外，逆流布置的换热器传热温差大于顺流，相同条件下换热效率更高。换热面积与壁面特性也会影响换热效率。换热面积不足会导致传热温差过大，热量传递不充分；而过度增大换热面积会增加设备体积与投资成本，且可能引发流场分布不均。换热器壁面的材质导热系数、表面粗糙度同样关键，导热系数高的材质（如不锈钢、铜合金）能减少管壁热阻，而表面过于粗糙易导致灰尘吸附，形成污垢热阻。<sup>[2]</sup>

### （二）介质特性因素

烟气与供暖循环水的物理化学特性直接影响传热过程的顺畅性，是导致换热效率波动的重要因素。<sup>[3-5]</sup> 火电机组烟气中含有  $SO_2$ 、 $NO_x$ 、粉尘、水分等，其中粉尘颗粒在换热器壁面形成积灰层，增加传热热阻； $SO_2$  与水分结合形成的酸性冷凝液对管壁腐蚀，使壁厚增加或出现腐蚀穿孔，破坏传热路径；烟气中水分含量过高，则造成露点腐蚀，同时烟气黏度增加，降低对流传热系数。供暖循环水的水质与温度参数同样重要。循环水硬度、含氧

量太高，造成管壁结垢与腐蚀，形成污垢热阻，阻碍热量传递；回水温度太高，缩小传热温差，降低换热驱动力；回水温度太低，将使烟气侧出现露点腐蚀，且增加循环水泵能耗，间接影响系统整体效率。

### （三）运行工况因素

火电机组的负荷波动与系统运行参数的匹配度，直接改变换热过程的边界条件，影响换热效率。烟气流量与流速的变化对换热效率影响显著。火电机组负荷升高时，烟气流量增大，流速加快，可以增强烟气侧的对流换热强度，提高总传热系数；但流速过高，会加大烟气阻力，引起引风机能耗升高，而且会加剧管壁磨损。反之，低负荷工况下烟气流量小、流速低，对流传热系数下降，换热效率明显下降。系统压力与温度参数的稳定性非常重要。<sup>[6-9]</sup> 烟气侧压力过低会导致流场分布不均，局部出现负压区，影响热量传递的均匀性；循环水侧压力波动过大会导致水流速度不稳定，甚至出现空化现象，破坏管壁表面的传热膜。此外，烟气入口温度的变化会直接改变传热温差，温度过低时换热效率显著下降，难以满足供暖需求。运行负荷的频繁波动会加剧换热效率的衰减。火电机组负荷频繁升降会导致烟气参数（温度、流量）快速变化，换热器壁面温度随之波动，易引发热应力损伤，同时导致积灰层脱落与重新堆积，形成周期性的热阻变化，降低换热效率的稳定性。

### （四）外部环境因素

外部环境条件的变化会通过影响系统散热与运行边界，间接影响换热效率。

环境温度的波动会改变系统的传热温差与散热损失。冬季供暖期环境温度过低时，换热器外壳的散热损失增加，同时供暖终端的热量需求上升，导致循环水回水温度降低，虽能增大传热温差，但可能引发烟气侧漏电腐蚀；环境温度过高时，传热温差缩小，换热效率下降，且易造成系统超温运行。环境湿度与风速会加剧外部散热与设备腐蚀。高湿度环境会加速换热器外壳的腐蚀，同时增加烟气中水分的凝结概率，加剧积灰与腐蚀的耦合效应；风速过大时，换热器外部的强制对流散热增强，导致有效热量减少，间接降低换热效率。<sup>[10]</sup>

## 三、火电机组烟气余热供暖系统换热效率调控策略

### （一）优化结构设计参数

针对结构设计对换热效率的制约，通过优化换热器结构参数，构建高效传热路径。合理选择换热器类型并优化结构参数。根据火电机组烟气特性与供暖需求，选择适配的换热器类型：高粉尘烟气工况优先选用翅片间距较大的翅片管式换热器，低粉尘工况可采用板式换热器提升传热系数。优化翅片高度、间距与排列方式，采用错排布置增强流场扰动，同时控制翅片间距在  $8 \sim 12\text{mm}$ ，平衡换热面积与抗堵塞能力。优化流道设计与传热面积匹配。采用变截面流道设计，根据烟气流量变化调整流道宽度，避免局部流速过低或过高；采用逆流布置提升传热温差，同时合理匹配换热面积，根据最大换热量需求设计冗余系数，避免

过度设计导致的流场不均。改进换热器壁面特性。选用导热系数高的不锈钢或铜合金材质，降低管壁热阻；对壁面进行防腐涂层处理（如聚四氟乙烯涂层），减少积灰吸附与腐蚀；采用表面光滑的换热管，降低污垢附着概率，提升传热效率。

（二）强化介质预处理与特性调控

通过对烟气与循环水的预处理，减少污染物对换热过程的干扰，优化介质特性。强化烟气预处理环节。在换热器入口设置高效除尘装置，采用静电除尘与袋式除尘组合工艺，降低烟气粉尘含量；增设脱硫脱硝预处理单元，减少  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  含量，降低酸性腐蚀风险；设置烟气除湿装置，控制烟气水分含量在露点以下，避免冷凝液引发的积灰与腐蚀。优化供暖循环水水质。采用软化处理降低循环水硬度，添加阻垢剂与缓蚀剂，抑制结垢与腐蚀；定期检测循环水的 pH 值与含氧量，保持 pH 值在 8.5–9.5 之间，含氧量低于 0.1mg/L；设置旁滤装置，及时去除循环水中的悬浮物，减少污垢热阻。根据供暖需求与烟气温度变化，调节循环水回水温度，保持传热温差在合理范围（20–30℃）；避免回水温度过低导致的漏电腐蚀，同时防止回水温度过高造成的换热效率下降。

（三）动态匹配运行工况

根据火电机组负荷变化与烟气参数波动，动态调整系统运行参数，实现换热效率的最优匹配。采用变频调节引风机转速，根据机组负荷变化动态调整烟气流量，保持烟气流速在 6 ~ 10m/s 的最优区间，平衡对流换热强度与风机能耗；低负荷工况下通过阀门调节减少流道截面积，提高局部流速，避免换热效率衰减。设置压力缓冲装置，控制烟气侧压力波动范围在  $\pm 5\text{kPa}$  以内，循环水侧压力波动范围在  $\pm 0.1\text{MPa}$  以内；采用温度反馈控制，通过调节循环水流量匹配烟气入口温度变化，保持传热温差稳定。减少负荷波动对换热效率的影响。优化火电机组负荷调度策略，避

免频繁启停与负荷突变；在换热器入口设置烟气混合室，均衡烟气温度与流量分布，减少参数波动对传热过程的冲击。

（四）自适应环境调节

针对外部环境变化，采取自适应调节措施，降低环境因素对换热效率的干扰。采用岩棉或聚氨酯保温材料对换热器外壳进行保温处理，保温层厚度不低于 50mm，降低环境散热损失；设置温度监测装置，根据环境温度变化调整保温层的散热面积，避免超温或低温运行。高湿度环境下增加防腐涂层的维护频率，定期检查管壁腐蚀情况；在换热器外部设置防风罩，减少风速对外部散热的影响，同时避免雨水直接冲刷设备。通过传感器实时监测环境温度、湿度与风速，将数据反馈至控制系统，动态调整循环水流量与烟气流速，实现换热效率与环境条件的自适应匹配。

四、结论

火电机组烟气余热供暖系统的换热效率受结构设计、介质特性、运行工况及外部环境多重因素的耦合影响，其中换热器结构参数、烟气粉尘与水分含量、运行负荷波动及环境温度变化是核心制约因素。它们通过改变传热热阻，流场分布及传热温差而影响系统的传热效率。换热效率的提高应采取系统性调控：优化换热器结构设计，建立高效的传热路径；强化介质预处理，减少由于积灰、腐蚀与结垢引起的热阻增长；动态匹配运行工况，平衡换热效率与能耗；自适应环境变化，减少外部因素的干扰。协同实施多维度调控措施，有效提高系统的换热性能和运行稳定性。未来研究可结合智能化技术，建立大数据与机器学习的换热效率预测模型，实现调控策略的精确优化，进一步挖掘火电机组烟气余热的利用潜力，为能源节约与低碳发展提供更强有力的技术支撑。

参考文献

[1] 刘卫东, 潘广旭, 王晓梅, 任学良, 牛蔚然, 杨伟进, 李一真, 颜勇. 基于价值工程理论的电锅炉供暖方案优选方法研究 [J]. 日用电器, 2017, (07): 15–20.  
[2] 裴文浩, 贾鸿源, 闫孟哲, 杜浩浩. 光伏发电与固体储热联合供暖系统开发与应用 [J]. 河北水利电力学院学报, 2024, 34(02): 49–53.  
[3] 凡烈, 邢永杰, 刘芳, 熊亚选. 储热系统优化对延庆冬奥村供暖经济性的影响 [J]. 储能科学与技术, 2024, 13(06): 2057–2067.  
[4] 杨海鸿, 马坤, 李学娟, 邵继新, 管东海, 王翠萍. 中深层无干扰地岩热供暖系统测试研究 [J]. 节能技术, 2024, 42(02): 164–168.  
[5] 董蓬, 王伟奇, 李智丽, 王君君. 太阳能集热室内供暖现状及展望 [J]. 节能, 2024, 43(01): 113–115.  
[6] 武晔秋, 刘旺, 王莹莹, 王瑞. 晋北地区村镇住宅建筑供暖系统优化及经济性研究 [J]. 节能, 2023, 42(02): 20–24.  
[7] 李嘉丰, 程晓绚, 熊显智, 李天泽, 李智轩. 面向园区的综合能源供暖系统设计与实践 [J]. 暖通空调, 2022, 52(S1): 18–24.  
[8] 李泽瑞, 姜晓霞, 刘克为. 跨季节斜温层储罐蓄热太阳能供暖系统配置研究 [J]. 电站辅机, 2022, 43(01): 24–28.  
[9] 尚庆晓, 孙鸣. 基于风电、储(热)供暖系统的电网优化调度研究 [J]. 太阳能学报, 2021, 42(07): 65–70.  
[10] 梁启煜, 刘志刚, 王迎春, 赵佳悦, 宋晓皎. 槽式太阳能供暖系统工程应用与分析 [J]. 节能, 2021, 40(03): 13–15.