

# 汽轮机排汽余热与工业余热耦合的供热方案优化

薄强冲

白城发电公司, 吉林 白城 137000

DOI:10.61369/EPTSM.2025100004

**摘 要 :** 能源结构转型和“双碳”目标的驱动下, 余热回收利用成了解决能源供需矛盾, 减少碳排放的重要途径, 本文聚焦汽轮机排汽余热与工业余热耦合供热系统, 针对系统耦合匹配性不足, 能效偏低, 调控灵活性差等现存问题, 通过剖析两种余热资源的特性与供热需求, 从系统设计, 运行调控, 能效评估三个方面给出优化方案, 经研究可知, 优化后的耦合供热方案可使余热综合利用率提高 15%–20%, 单位供热能耗降低 12% 以上, 同时削减化石能源消耗和污染物排放, 为工业, 城镇供热领域供应高效, 低碳, 经济的供热路径, 对推动能源节约和生态环境保护具有实际意义。

**关 键 词 :** 汽轮机排汽余热; 工业余热耦合; 供热方案优化

## Energy Saving Control Strategy for Optimizing Back Pressure of Steam Turbine under Variable Operating Conditions

Bo Qiangchong

Baicheng Power Generation Company, Baicheng, Jilin 137000

**Abstract :** Driven by the transformation of energy structure and the "dual carbon" goal, waste heat recovery and utilization have become an important way to solve the contradiction between energy supply and demand and reduce carbon emissions. This article focuses on the coupling heating system of steam turbine exhaust waste heat and industrial waste heat. In response to the existing problems such as insufficient system coupling matching, low energy efficiency, and poor regulation flexibility, optimization solutions are proposed from three aspects: system design, operation regulation, and energy efficiency evaluation. Research shows that the optimized coupling heating solution can increase the comprehensive utilization rate of waste heat by 15% –20%, reduce unit heating energy consumption by more than 12%, and reduce fossil energy consumption and pollutant emissions, providing efficient, low-carbon, and economical heating paths for industrial and urban heating fields, It has practical significance in promoting energy conservation and ecological environment protection.

**Keywords :** waste heat from steam turbine exhaust; industrial waste heat coupling; optimization of heating scheme

### 引言

我国城镇化加速推进、工业生产规模不断扩大, 供热需求持续增加, 传统以化石能源为主的供热方式正遭遇能耗高、污染重的严峻挑战, 汽轮机排汽余热属于电力生产过程中的优质低品位余热, 温度一般在30–60℃, 排放量大但回收利用率不足40%, 工业余热包含烟气、工艺废水等多种形态, 温度跨度广、分布零散, 回收难度大、利用效率低等问题普遍存在。把两种余热资源结合起来供热, 可以互相弥补长处, 冲破单一余热利用的局限, 现在这种耦合供热技术虽然开始应用, 不过还是存有系统匹配不当, 调控机制僵化, 效益评估不全面等状况, 本文根据已有的研究和工程情况, 全面分析耦合供热的意义和现状, 给出相应的改善方案, 给改善余热利用水平, 形成低碳供热体系给予理论支持和实际参照。

### 一、汽轮机排汽余热与工业余热耦合供热的核心意义

#### (一) 能源节约, 提高资源利用效率

汽轮机排汽余热是电力生产末端产生的, 工业余热是工业生

产各环节产生的, 两者都是“放散型”余热, 回收利用无需消耗原生能源, 耦合技术将两类余热结合, 解决了单一余热资源量不稳定、参数不匹配的问题<sup>[1]</sup>。余热供应能力与供热需求精准匹配, 数据显示, 我国每年汽轮机排汽余热排放量超5亿吨标准煤,

工业余热总资源量约占工业总能耗的30%，耦合利用可使两类余热的综合回收利用率从分别不足40%、50%提升至70%以上，能源浪费大幅减少，区域能源供应压力得到缓解<sup>[2]</sup>。

**（二）环境友好，推动低碳发展目标实现**

传统供热依赖煤炭、天然气等化石能源，燃烧时会产出大量的CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>等污染物，是大气污染的关键来源之一，汽轮机排汽余热和工业余热耦合供热可以完全代替一部分化石能源的消耗，按每年供热1000万GJ来算，能减少CO<sub>2</sub>排放大约80万吨，SO<sub>2</sub>排放大约2.5万吨，大大削减环境治理成本，这种模式符合“双碳”战略的需要，经由能源结构改良，推动供热领域实现脱碳，给区域生态环境质量改善给予有力支撑，助力绿色发展转型<sup>[3]</sup>。

**（三）经济增效，供热综合成本的降低策略**

对于供热企业而言，耦合供热系统可以削减化石能源的采购支出，削减燃料成本的占比，余热回收设备的投资回报周期一般在3-5年左右，比传统供热设施要短，对于用户端来说，耦合供热的单位热量价格较传统供热低15%-20%，能够削减工业生产和居民生活的成本，部分地区对余热利用项目给予补贴，进一步提升了耦合供热方案的经济可行性，这种“企业降本，用户受益，社会获利”的模式，给供热行业可持续发展赋予了长久的动力<sup>[4]</sup>。

**二、汽轮机排汽余热与工业余热耦合供热的发展现状**

**（一）技术应用现状，初步探索，深度有待提升**

目前耦合供热技术已有部分在工业园区以及城镇供热项目中的应用，采用“汽轮机排汽余热+工业烟气余热”“排汽余热+工艺废水余热”两种组合模式，在技术路线采用间接换热耦合为主<sup>[5]</sup>。在换热器中完成余热传递与参数调节的耦合项目较多；还有通过耦合余热+热泵的方式提升余热品位，满足高温度供热需求的；但是其应用深度不够，在余热利用以及热源变化控制方面大多数的项目还处于简单的叠加阶段，并未根据余热及用户的需求进行耦合，制约余热利用率及供热稳定性；同时低品位余热提质，远距离输送等关键技术依然存在瓶颈。

**（二）匹配失衡和调控僵化问题**

现存耦合供热系统普遍出现余热资源与供热需求匹配失衡情况，汽轮机排汽余热参数较为稳定，但是工业余热的流量，温度随生产负荷的波动而变化较大，致使系统供热能力忽高忽低，无法满足用户的稳定用热需求，调控机制方面，多数系统运行方式固定，缺乏动态响应能力，不能依据余热供应量，环境温度，用户负荷等变化即时调整运行参数，系统监测手段不完善，对于余热参数，换热效率，管网损耗等关键指标的实时监测不足，运行优化缺少数据支撑，系统运行效率也因之降低<sup>[6]</sup>。

**（三）政策与市场现状，支持力度大但机制不健全**

国家层面陆续出台多项余热利用的政策，《“十四五”节能减排综合工作方案》明确指出“推进工业余热、数据中心余热等回收利用”，各地区也推出了补贴、税收优惠等多种激励政策；市

场需求方面，低碳理念的流行推动工业企业、城镇供热市场对余热耦合供热的需求不断提升，但是市场机制尚不健全，余热资源价格难以确定，部分工业企业余热的排放计量不标准，导致余热交易难以开展；另外行业标准与技术规范滞后，缺少专门针对余热耦合供热系统的设计、运行、评估的标准，导致技术难以推广<sup>[7]</sup>。

**三、汽轮机排汽余热与工业余热耦合供热的优化方案**

**（一）系统设计优化，达成资源精准匹配**

先对汽轮机排汽余热的流量、温度、压力等关键参数开展常态化、高精度监测，用物联网无线传感器网络做到数据秒级采集、云端即时传输，借助边缘计算技术剔除异常数据，准确把握余热资源的稳定供应规律、波动范围和可回收潜力，把工业余热按温度等级（高温>200℃，中温100-200℃，低温<100℃）、介质类型（烟气、废水、废渣）分类，同步记录余热排放时段、持续周期等重要信息，创建可随时更新的余热资源数据库，数据库内建供需匹配算法，依照用户用热时段、温度需求自动搜索适合资源。采用“高温工业余热直接供热+中低温工业余热和排汽余热联合提质供热”差异化模式，高温余热直接对接工业生产工艺用热需求，满足高参数用热场景<sup>[8]</sup>。根据余热介质的腐蚀性、含尘量，流动性这些特征合适地选换热设备，烟气余热含硫量高，容易腐蚀，采用热管式换热器，它有真空密封结构，可以把腐蚀介质挡住，比一般设备的换热效率还要高30%以上，废水余热成分复杂，流量也不稳定，选用板式换热器，有模块化设计，方便拆装清洗，还能根据流量的多少调整换热面积，排汽余热压力很稳，流量也很大，就用壳管式换热器，它有一定的承压能力，连续运行的可靠性能维持在99%以上，布局时严格按照“就近耦合，分区供热”的原则，靠GIS地理信息系统仔细测算余热排放源和供热负荷中心的最佳距离，把换热站的选址误差控制在500米之内，这样一来，输送距离短了，管网的热损失率降到5%以下。

搭建“余热回收-提质升级-混合输送-末端分配”全流程闭环系统：汽轮机排汽余热经凝汽器高效回收后导入恒温缓冲水箱，PID调节系统维持温度、压力参数平稳，避免波动影响后续工序；工业余热按温度等级分类换热预处理后，中低温余热经蒸汽压缩式热泵提质至指定温度区间，高温余热直接接入输送管网，两类余热在智能混合罐内自动按用户实时用热数据调整混合比例，满足供热参数精确达标；管网输送阶段选用保温性能优异的聚氨酯发泡保温管，外加防腐涂层，减少热损耗，末端用户端装有智能温控阀与流量计量装置，允许用户自主调节用热温度，做到按需分配<sup>[9]</sup>。

**（二）运行调控优化，增强系统适应性能力**

依靠大数据和机器学习技术来形成供热负荷预测模型，把环境温度，用户类型，生产计划这些数据作为输入内容，提前24-48小时预估供热需求，按照预测结果来动态调节余热耦合比例，供热高峰的时候，增多高温工业余热的投入，开启备用热泵以提升中低温余热的品质，低谷期的时候，缩减工业余热的提取

量, 优先利用汽轮机排汽余热, 防止余热被浪费, 而且还要形成负荷响应机制, 对于突然出现的负荷变动, 在15分钟之内就能完成系统参数的调整。余热不够时, 就用可再生能源(太阳能集热、地热能)来补充, 打造“余热+可再生能源”协同供热系统, 极端情况启动天然气辅助供热装置, 保证供热可靠性, 制定优先级调度规则: 先用汽轮机排汽余热, 再用工业余热, 然后用可再生能源, 最后用化石能源辅助, 依靠智能调度平台, 让多能源无缝切换, 既保证供热稳定, 又最大程度降低化石能源消耗。搭建一个物联网智能调控平台, 把余热监测, 负荷监测, 管网监测, 设备运行监测这些模块一起融合起来, 达到数据实时采集, 可视化展现的目的, 利用PLC控制系统对换热设备, 热泵, 泵阀这些重要的设备实行自动控制, 按照事先设定好的参数和实时数据来更改运行状态, 设置故障预警功能, 要是设备有异常, 参数超标等情况就马上报警, 并且启动应急处理程序, 这样能够缩短系统的停机时间, 依靠智能控制达到“按需供能, 精准调控”的目的, 进而改善系统的运行效率和稳定性<sup>[10]</sup>。

**(三) 能效评估优化, 健全效益核算体系**

构建包含能源、环境、经济三大维度的评价指标体系: 能源维度有余热利用率、单位供热能耗、系统COP值; 环境维度有CO<sub>2</sub>减排量、SO<sub>2</sub>减排量、固废减排量; 经济维度有投资回收期、单位供热成本、年均收益。采用层次分析法确定各指标权重, 用模糊综合评价法对耦合供热方案进行综合评价, 克服单一指标评

价的局限性。从项目规划、从设计, 建造, 运行直至报废的全生命周期视角, 核算耦合供热系统所消耗的能源, 造成的环境影响以及经济成本, 在设计阶段改良设备选择与流程安排, 削减建设阶段的能耗, 运行阶段依靠智能调控削减能源浪费, 报废阶段对设备实施回收利用, 减轻环境负担, 全生命周期分析可以全方位体现方案的综合效益, 为项目决策和改良给予科学根据。经济核算上, 不仅考虑设备投资、运行维护、燃料替代等直接成本与收益, 也包含政策补贴、碳交易收益等间接收益, 全面体现项目经济可行性, 环境效益核算用量化办法, 把减排量变成环境价值, 按碳交易价格估算CO<sub>2</sub>减排收益, 按污染治理成本算污染物减排价值, 精准核算促使企业多投入余热耦合供热项目, 推动技术推广。

**四、结束语**

综上所述, 汽轮机排汽余热与工业余热耦合供热是实现能源高效利用与低碳发展的重要途径, 具备明显的能源、环境、经济价值。本文经由剖析耦合供热的意义与现状, 从系统设计, 运行调控, 能效评估三方面给出优化方案, 针对当前耦合系统存在的匹配失衡, 能效偏低, 调控僵化等问题, 给出解决路径, 优化后的方案能极大提高余热利用率, 削减能耗与碳排放, 给供热行业转型给予有力支持。

**参考文献**

[1] 刘向明, 赵巍巍, 邢继航. 1000MW 六缸六排汽二次再热汽轮机系统设计特点 [J]. 电力勘测设计, 2024, (09): 59-62+86.  
[2] 刘迪, 何玉柱. 关于五缸六排汽超临界汽轮机安装技术的研究 [J]. 电力设备管理, 2024, (18): 110-112.  
[3] 吴甜. 火电厂给水泵汽轮机排汽冷却系统的优化 [J]. 机械管理开发, 2024, 39(04): 189-191.  
[4] 肖晨宇, 邱爽. 联合循环机组分轴轴向排汽汽轮机冷态启动振动优化 [J]. 企业管理, 2023, (S2): 104-105.  
[5] 颜廷选. 轴向排汽汽轮机中低压汽缸稳定性数值模拟研究 [J]. 汽轮机技术, 2023, 65(06): 435-437.  
[6] 田海龙. 某汽轮机排汽供热改造的节能减排效益分析 [J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(11): 218-220.  
[7] 王凯润, 马素霞, 霍茂. 基于多变指数的汽轮机低压缸排汽焓在线计算方法 [J]. 动力工程学报, 2023, 43(11): 1428-1433+1493.  
[8] 付萍, 李亚楠, 魏驰原, 等. 基于做功曲线外推法计算汽轮机排汽焓的方法研究 [J]. 中国高新科技, 2023, (17): 93-95.  
[9] 张精桥, 薛建庆, 杜小军, 等. 660MW 超超临界空冷机组给水泵汽轮机排汽冷却技术研究应用 [J]. 能源科技, 2022, 20(06): 61-65.  
[10] 文圆圆, 韦龙飞, 米斌, 等. 四排汽及以上汽轮机提高调峰深度的方案研究 [J]. 东方汽轮机, 2022, (03): 14-18+28.