# 火力发电厂锅炉尾部烟气余热利用技术

郭 轩 孙毅轩 李皓栋 贾若愚 王东辉
内蒙古和林发电有限责任公司 内蒙古 呼和浩特 011508

**摘 要：**燃煤火电机组运行过程中，锅炉尾部烟气携带大量低温余热直接排放，是电厂能源损耗的主要途径之一，不仅造成能源浪费，还加剧环境污染。为提升火电机组能源利用效率、降低供电煤耗，适配新型节能环保电力生产要求，本文结合火电生产实际，系统梳理锅炉尾部烟气余热损耗特征，分析主流余热利用技术原理、应用优势与适用场景，探究技术应用中的腐蚀、换热效率不足等常见问题，并提出针对性优化改进策略，为火电机组余热深度回收、节能降耗改造提供技术参考。

**关键词：**火力发电厂；锅炉；尾部烟气；余热利用技术

## 引言

在“双碳”政策背景下，火电行业节能降碳、提质增效改造成为行业发展主流趋势。现阶段常规火电机组锅炉排烟温度普遍偏高，尾部烟气余热未得到充分利用，大量低温余热随烟气排入大气，导致机组整体热效率偏低、煤炭资源消耗量大。烟气余热利用是提升火电机组经济性、降低污染物排放的核心技术手段。基于火电生产运行痛点，本文系统性研究锅炉尾部烟气余热利用核心技术，剖析技术应用难点，优化运行改造方案，助力火电机组实现高效、低碳、稳定运行。

## 1 火力发电厂锅炉尾部烟气主流余热利用技术

### 1.1 低温省煤器余热利用技术

低温省煤器技术是当前火电厂应用最广泛的尾部烟气余热回收技术，核心原理是在锅炉尾部烟道脱硫装置前加装低温换热设备，利用低温烟气加热机组凝结水，实现余热回收再利用。该设备串联于机组回热系统，通过吸收烟气余热提升凝结水温度，替代部分低压抽汽，被替代的抽汽可返回汽轮机继续做功，有效提升机组循环效率。低温省煤器技术结构简单、运行稳定、改造成本低，适配各类容量燃煤机组。实际运行可降低锅炉排烟温度20℃~40℃，单机组供电煤耗下降1.5～3g/kWh，节能效果显著。降温后的烟气可以改善脱硫系统运行条件，减少脱硫工艺水消耗，提高脱硫效率。该技术存在明显缺陷，低温工况下换热管壁容易发生低温腐蚀与积灰堵塞，设备长期运行后换热效率逐步下降，缩短设备使用年限。运行阶段需要持续管控烟气参数，控制管壁温度，配套清灰措施，抑制腐蚀和积灰发展，维持换热设备稳定工作，保障节能效果持续发挥。

### 1.2 烟气空气预热余热利用技术

烟气空气预热技术属于传统基础余热利用技术，依靠空气预热器完成尾部烟气与锅炉进风之间的热量交换，利用烟气余热加热助燃空气，提高入炉空气温度，降低锅炉燃煤热耗。该工艺伴随锅炉全程运行，是维持锅炉燃烧稳定、提高炉膛燃烧效率的基础手段。空气预热器能够回收中高温烟气余热，提升炉膛煤粉燃烧程度，减少不完全燃烧带来的能量损失与粉尘排放，改善锅炉燃烧状态。传统空预器存在换热不充分、漏风率偏高问题，行业普遍选用板式、回转式高效空预器，优化换热元件结构，强化密封结构，减少漏风造成的热量损失，提升余热回收水平[1]。这项技术机组适配范围广，单独使用只能回收部分高温区间烟气余热，80~120℃区间低温烟气余热难以回收，余热利用深度不足。工程应用一般不单独布置，需要搭配低温省煤器或者热泵设备组成复合系统，拓展余热回收温区，进一步提高整体烟气余热回收总量。该技术在锅炉系统中应用成熟，设备运行可靠性较高，改造施工难度较低，运行维护工作量小，在多数燃煤机组余热改造项目中作为基础单元，和其他余热设备协同工作，共同挖掘烟气侧余热资源，降低排烟热损失。

### 1.3 热泵式烟气余热深度利用技术

热泵式余热利用技术属于低温烟气余热深度回收的新型技术，突破传统换热设备难以回收80℃以下低温余热的限制。该技术以溴化锂吸收式热泵为主设备，消耗少量电能作为驱动能量，提取脱硫后低温烟气内含有的低品位热能，将低品位热能转换为高品位热能，产出热能用于厂区供暖、生活热水制备、机组给水预热等用途。对比常规余热回收手段，热泵可以覆盖全温区烟气余热回收，余热利用率能够达到85%以上，消除传统工艺存在的低温余热回收盲区。进入冬季供暖时段，该系统能够替代原有燃煤供暖设施，减少电厂供暖燃料消耗，降低碳排放水平。该技

术系统组成复杂，设备一次性投资和日常运维成本偏高，对机组负荷平稳性要求较高。机组低负荷运行时，烟气参数发生波动，热泵换热效率会出现一定衰减。该技术更适合大中型、常年连续稳定运行的火电机组配套改造，需要搭配监测调控装置，实时调整运行参数，降低变工况对热泵性能带来的负面影响。

1.4 余热梯级综合利用技术

余热梯级综合利用技术遵循能量梯级利用基本原理，组合多种余热回收设备，针对锅炉尾部不同温度段烟气余热分级回收，是现阶段火电厂节能改造的优选方案。该技术按照烟气温度梯度分配换热任务，120℃以上高温余热依靠空预器、高温省煤器加热锅炉助燃空气与给水；100℃~120℃中温余热通过低温省煤器加热凝结水；80℃以下低温余热借助热泵回收，用于厂区供暖和工艺补水加热。梯级利用模式能够弥补单一余热技术的短板，实现烟气余热全温区高效回收，充分挖掘烟气余热资源潜力[2]。系统可与脱硝、脱硫装置协同运行，优化整条烟道内设备工况，减少管壁腐蚀与积灰发生概率，提升机组整体运行可靠性。该技术已经大量应用于电厂节能升级项目，新建机组与老旧改造机组均可适配。系统综合节能效果优于单独使用任意一类余热设备，设计阶段需要做好各换热单元负荷匹配，控制管路阻力损失，保障变负荷条件下整套梯级系统稳定工作。

## 2 火力发电厂烟气余热利用技术应用现存问题

2.1 低温腐蚀与设备积灰问题

低温腐蚀与积灰堵塞是余热利用设备运行的高频问题。锅炉尾部低温烟气中含有二氧化硫、三氧化硫等酸性气体，烟气降温过程中会形成酸性凝结水，附着在省煤器、换热器管壁，造成管壁腐蚀、破损泄漏，缩短设备使用寿命。低温工况下烟气中粉尘易黏附在换热管壁，形成顽固积灰，堵塞换热通道，设备换热效率持续下降，烟道通风阻力增大，引风机运行能耗上升。积灰会覆盖换热表面，进一步降低管壁温度，促进酸性凝结，加剧腐蚀进程。积灰发展到一定程度会改变烟道内流场，局部流速异常，形成恶性循环。严重积灰与腐蚀会造成烟道压力异常，限制机组带负荷能力，引发非计划停机风险。

2.2 余热回收利用率不均衡

多数电厂余热利用改造存在技术单一、系统设计不合理的问题，仅采用低温省煤器或空预器单一设备，仅能回收中高温烟气余热，低温烟气低品位余热被直接排放，余热回收不彻底。部分梯级利用系统存在参数匹配不合理问题，各换热设备负荷分配不均，高温余热过度回收、低温余热闲置，能量利用失衡，无法发挥梯级利用技术的最大优势，整体节能效益达不到设计标准。烟气温度区间划分缺少精准计算，换热单元工作区间重叠或者出现回收空白。换热介质流量分配缺少校核，部分换热单元负荷超出设计范围。系统整体热量回收量偏低，排烟余热资源没有得到分级利用，改造后的实际节能指标低于前期设计值。

2.3 设备运行稳定性与适配性不足

部分老旧机组余热改造过程中，存在设备选型与机组工况不匹配的问题。低负荷运行工况下，锅炉排烟温度、烟气量波动较大，余热回收设备换热参数无法实时适配工况变化，导致换热效率大幅下降[3]。余热利用系统自动化调控水平偏低，缺乏智能监测与调节机制，无法根据烟气温度、机组负荷实时调整换热负荷，系统运行能耗偏高，节能效益被大幅削弱。缺少管壁温度、烟气组分在线监测装置，不能提前识别低温腐蚀风险。固定运行参数只能适配额定负荷，机组变负荷时换热端差持续增大。手动调节响应滞后，介质流量调整不及时，余热回收效果不稳定，设备长期偏离最优工作区间。

2.4 运维管理体系不完善

余热利用设备长期处于高温、高粉尘、酸性腐蚀环境，对日常运维养护要求较高。现阶段部分电厂存在重改造、轻运维的问题，缺乏标准化的设备巡检、清灰、防腐养护制度，设备故障隐患无法及时排查。运维人员对新型热泵、梯级利用系统的操作技能不足，无法精准调控系统运行参数，设备长期低效运行，余热利用技术的应用价值无法充分发挥。运维记录内容不全，缺少长期工况数据统计分析，不能预判腐蚀、积灰发展趋势。清灰作业缺少固定周期规范，作业质量不受管控。没有配套的技能培训与考核机制，人员故障识别和应急处置能力不足，设备隐患持续累积，缩短设备使用周期。

## 3 火力发电厂烟气余热利用技术优化改进策略

3.1 强化设备防腐防堵改造

针对低温腐蚀与积灰问题，优先选用耐腐蚀高强度特种合金制作换热管壁，配套喷涂专用防腐涂层，阻隔酸性气体接触管壁，降低腐蚀风险。优化烟道结构与设备布置，增设烟道导流装置，均衡烟气分布，减少局部积灰。安装智能声波清灰与高压吹灰设备，落实常态化清灰制度，保持换热通道通畅。严格管控排烟温度下限，避开酸露点腐蚀区间，持续监测烟气酸性组分与管壁温度。合理设定烟气流速，防止粉尘沉降堆积，同时减轻高速烟气对管壁的冲刷磨损。改造烟道拐角、换热元件死角结构，削减涡流积灰区域。定期检查防腐涂层

状态，出现破损及时修补[4]。建立管壁腐蚀速率台账，依托监测数据调整运行参数与检修周期，抑制腐蚀发展，降低换热元件失效概率，延长余热换热设备服役周期。

3.2 优化余热梯级利用系统设计

摒弃单一余热回收模式，采用烟气余热梯级综合利用系统，依据机组排烟参数合理搭配空预器、高低温省煤器、热泵设备。划分烟气温度梯级，分配各换热单元负荷，分级回收高、中、低温余热。优化管路与水力参数，降低热量与流动阻力损失，平衡设备工况，消除低温余热回收盲区，提升余热利用率。核算不同温区烟气可回收热量，匹配对应换热设备工作区间，避免热能能级浪费。优化管路管径与走向，减少弯头，降低流体阻力。计算介质流量与换热温差，减小换热端差，降低不可逆热损失。校核系统压力平衡，避免支路流量分配失衡。结合烟气流量波动确定换热单元容量，保障变工况稳定运行。对比不同设备组合方案的热效率与投资成本，选取最优梯级配置，充分挖掘低温烟气余热回收潜力。

3.3 提升系统智能适配运行能力

升级余热利用自动化控制系统，增设烟气温度、流量、管壁温度、换热效率在线监测元件，搭建智能调控平台。系统依据机组负荷、排烟工况、环境温度变化，实时调整换热介质流量与设备运行参数，实现自适应调节，保证高低负荷下余热设备高效换热。结合机组容量与常年运行工况定制改造方案，合理选型设备，规避参数不匹配与容量冗余问题。平台汇总运算实时监测数据，识别烟气参数变化趋势，设置多套工况调节逻辑，升降负荷时自动调节介质流量，稳定换热端差。增设管壁超温、低温腐蚀预警模块，参数超标时发出告警并自动调整策略。定期校准温度、流量传感器，保障监测数据可靠。搭建设备性能模型，对比实际换热效率与理论值，识别设备性能衰减。参照机组负荷曲线确定设备额定参数，控制投资与能耗，维持全工况余热回收稳定。

3.4 完善运维管理与人员培训体系

建立余热设备标准化常态化运维制度，明确巡检、清灰、防腐检修、故障排查流程与周期，记录运行数据并开展工况分析，预判老化、堵塞、腐蚀隐患，落实预防性养护。开展运维人员技能培训，讲解新型余热设备、梯级系统、智能控制系统原理与操作方法，提升现场操作和故障处置能力。建立运维考核机制，规范作业流程，保障系统长期稳定运行。细化巡检点位清单，制定日、周、月巡检内容，记录烟气参数、设备振动、管壁温度与积灰情况。汇总历史运行数据，分析参数变化特征，识别故障前兆，提前安排检修[5]。编制清灰作业规程，明确吹灰顺序、时长与间隔，避免清灰操作损坏换热元件。设置分层培训内容，覆盖基础原理、日常操作、故障识别与应急处置。定期开展实操演练，考核运维作业质量，整改不规范操作，减少非计划停机，延长余热系统稳定运行时间。

**结语**

锅炉尾部烟气余热利用是火电行业节能降碳、提质增效的核心举措。各类余热利用技术各有优劣，单一技术应用存在明显局限性，梯级综合利用技术可实现烟气余热最大化回收，适配火电生产发展需求。针对技术应用中存在的腐蚀积灰、利用率不足、运维不完善等问题，通过设备改造、系统优化、智能升级、规范运维等多措并举，可有效提升余热利用系统运行稳定性与节能效益。持续优化烟气余热梯级利用技术，能够有效降低火电机组能耗与碳排放，推动传统火电产业向高效、低碳、绿色方向转型。

**参考文献**

[1]马凯.火力发电厂锅炉尾部烟气余热利用技术探究[J].电力设备管理,2026,(4):258-260.

[2]韩志永.火力发电厂锅炉尾部烟气余热利用技术探究[J].中国资源综合利用,2025,43(2):237-239.

[3]袁新立,靳志鹏.火力发电厂锅炉尾部烟气余热利用技术探析[J].电力设备管理,2024(10):255-257.

[4]王鸿飞.火力发电厂锅炉尾部烟气余热利用技术探索[J].应用能源技术,2021,(9):51-54.

[5]赵麟.分析火力发电厂锅炉尾部烟气余热利用技术[J].中国设备工程,2023(5):108-110.