

火电厂 660MW 锅炉烟气余热回收与利用的节能效益

熊天钰

国家电投集团贵州金元黔西中水发电有限公司 贵州省毕节市 551500

摘要: 在能源需求增长与环保要求趋严的形势下,火电厂节能减排意义重大。660MW 机组作为火电主力,其锅炉排烟热损失现象十分普遍,回收利用烟气余热对节能减排有显示意义。本文剖析了 660MW 锅炉烟气特性与现有余热回收系统的不足,如传统设备仅回收显热、低温段腐蚀严重、系统耦合性差等问题。并基于问题提出一系列节能策略,包括基于梯级利用的技术集成优化,采用耐腐蚀材料与智能清灰设备,以及运行优化和多目标协同优化等。以期实现节水、减少液氨消耗,降低环保设备运维成本,有效推动火电厂节能减排,助力“双碳”目标实现。

关键词: 火电厂; 660MW 锅炉; 热量; 烟气余热回收; 节能减排

在全球能源需求持续增长和环保要求日益严格的大背景下,火电厂作为能源消耗和碳排放大户,面临着巨大的节能降耗和减排压力。我国能源结构以煤炭为主,火力发电在电力供应中占比超过一半,其中 660MW 机组因高效稳定成为主力机型之一,但其锅炉排烟温度通常高达 120–150℃,大量携带显热与潜热的烟气直接排放,导致锅炉排烟热损失占比达 10%–15%,成为火电厂能源浪费的主要环节。当前,我国正加速推进能源结构调整,火电厂亟需通过技术创新提升能效、降低排放,而烟气余热作为低品位热源,其回收与利用可直接减少燃料消耗、降低排烟温度,对缓解能源供需矛盾、降低污染物排放浓度、提升火电厂经济效益与环境效益具有双重意义。研究 660MW 锅炉烟气余热回收与利用的节能策略,既是破解火电厂高能耗、高排放问题的关键路径,也是推动能源行业绿色低碳发展、助力“双碳”目标实现的重要实践,对保障能源安全、促进可持续发展具有显著的现实意义与战略价值。

1. 火电厂 660MW 锅炉烟气特性与现有系统问题分析

1.1 烟气参数与余热特征

660MW 锅炉烟气参数与余热特征紧密关联机组运行特性,其排烟温度通常处于 120–150℃ 区间,对应烟气流量约 2000t/h,该参数范围既反映了锅炉燃烧效率及受热面布置特点,也决定了余热回收的可行性边界。含尘量 30–50mg/m³ 的设计值虽满足环保排放要求,但细微颗粒在低温换热面易形成积灰,影响传热效率并增加阻力损失^[1]。SO₂/SO₃ 浓度受煤质影响显著,褐煤因含硫量低(通常 ≤ 1%)导致

酸性气体浓度较低,而烟煤(含硫量 1%–3%)在燃烧过程中生成的 SO₃ 易与水蒸气结合,使烟气酸露点升高至 90–120℃,成为低温段设备腐蚀的关键诱因。从余热品位看,占比 80% 的显热集中于 100–150℃,其能量形式适合通过换热器直接加热凝结水(30–50℃)、循环水(20–35℃)或空预器入口风(20–30℃)等低温介质,实现能级匹配;剩余 20% 潜热源于水蒸气冷凝(约 50–80℃),需通过冷凝式设备回收,但其回收过程受限于酸露点约束,需在防腐与能效间寻求平衡。整体而言,烟气参数的波动性与余热品位的差异性,对回收技术的适应性和系统设计的精准性提出了较高要求。

1.2 现有余热回收系统不足

1.2.1 技术层面

传统低温省煤器基于显热回收设计,仅通过管内工质(如水或蒸汽)与管外烟气的温差换热提取 100–150℃ 区间的显热,而占比 20% 的潜热(水蒸气冷凝热)因需突破酸露点(90–120℃)限制、面临严重腐蚀风险而未被利用,导致余热总回收率仅 60%–70%。在低于酸露点(90–120℃)的低温段,烟气中 SO₃ 与水蒸气结合生成硫酸蒸汽,冷凝后附着于换热管表面形成强腐蚀性介质^[2],即使采用 ND 钢等耐候材料,壁厚年减薄量仍可达 0.3–0.5mm,导致管道穿孔泄漏风险增加,检修周期缩短至 3–6 个月。

1.2.2 系统层面

现有余热回收系统多采用定参数控制策略,与汽轮机“抽汽–做功”环节、发电机负荷调节的动态耦合机制缺失。

当机组负荷低于 75%（如深度调峰工况）时，排烟温度下降至 110–130℃，但低温省煤器进水流量（凝结水）因汽轮机抽汽量减少而同步降低，导致换热面积裕度不足，余热利用率下降 20%–30%；而负荷高于 90% 时，烟气流量增加引发换热器压降超限（超过设计值 10%–15%），引风机电耗反增，抵消部分节能收益，形成“高负荷能耗反弹、低负荷回收失效”的调节盲区^[3]。

2. 节能策略设计

2.1 基于梯级利用的技术集成优化

2.1.1 显热 – 潜热分级回收技术

基于烟气余热品位差异的梯级利用策略通过温度区间划分实现能量精准匹配，高温段（150–120℃）依托高效管式低温省煤器（如螺旋鳍片管或 H 型鳍片管）构建显热直接回收通道，利用 150–120℃ 烟气与 30–50℃ 凝结水（或 100–150℃ 给水）的 50–80℃ 温差优势，将凝结水温度提升 20℃（如从 30℃ 升至 50℃），使汽轮机低压抽汽量减少 10%–15%，相当于每小时节约 0.5–1 吨高品位蒸汽，这部分蒸汽可返回汽轮机中低压缸继续做功，直接提升机组汽轮效率 1%–1.5%。中温段（120–90℃）采用热管式或板式烟气 – 空气预热器，利用 120–90℃ 烟气与 20–30℃ 空预器入口风的 60–90℃ 温差，将送风温度提升 20–30℃（如从 25℃ 升至 50℃），高温空气进入炉膛后可降低燃料着火温度，减少煤粉预热所需热量，使锅炉热效率提升 1.5%–2%，对应供电煤耗下降 1.2–2.5g/kWh，同时缓解空预器低温段漏风导致的排烟温度波动问题^[4]。低温段（<90℃）引入带防腐涂层的冷凝式换热器，突破传统设备避开酸露点的限制，在 80–50℃ 区间通过表面凝结回收烟气潜热（约占余热总量 20%），将循环水（20–35℃）或脱硫塔补水（40–60℃）温度提升 15–25℃，同时利用硫酸蒸汽冷凝过程脱除 80%–90% 的 SO₃，使烟气酸露点从 100℃ 降至 85℃ 以下，既避免后续设备腐蚀，又通过潜热利用使全厂热效率额外提升 1.5%–2%，形成“显热高效利用 – 中温能量耦合 – 潜热深度回收 + 污染物预处理”的三级梯级利用体系，较传统单一设备回收效率提升 30%–40%。

2.1.2 跨系统耦合技术

热泵耦合技术通过吸收式热泵构建烟气余热与热网系统的跨介质能量桥梁，其核心是以汽轮机低压抽汽（通常为 0.3–0.6MPa、130–160℃ 的饱和蒸汽）作为驱动热源，利用

溴化锂溶液的吸收 – 解吸特性，将低温烟气余热（50–90℃）提升至适合热网水（60–80℃）的供热品位。在供热机组中，传统尖峰锅炉依赖高品位蒸汽（1.0–2.5MPa）直接加热热网水，能源利用率仅 60%–70%，而吸收式热泵通过“低品位余热提取 + 高品位能量驱动”模式，可将烟气中 50–90℃ 的显热与潜热（合计约占余热总量 30%–40%）转移至热网水，使热网回水（40–50℃）温度提升 20–30℃，替代 70%–80% 的尖峰锅炉负荷。

2.2 更新材料与设备

2.2.1 耐腐蚀材料应用

针对低温段（<90–120℃）硫酸露点腐蚀难题，ND 钢（09CrCuSb）凭借其铜、铬、镍合金成分形成的致密氧化膜，可将腐蚀速率控制在 0.05–0.1mm/年，较普通碳钢（腐蚀速率 0.5–1mm/年）提升 5–10 倍，适用于含硫量 1%–2% 的烟煤烟气环境。搪瓷管通过高温烧结在钢管表面形成 0.3–0.5mm 厚度的玻璃质涂层，其耐酸露点温度可达 120℃ 以上，且表面光滑度高（粗糙度 $R_a \leq 1.6\mu m$ ），使硫酸冷凝液难以附着，某电厂在空预器冷端更换搪瓷管后，检修周期从 6 个月延长至 2 年，泄漏率从 8% 降至 1.5%，维修成本下降 60%。玻璃管凭借其化学惰性（耐酸腐蚀系数 > 99.5%）和透光性，可在 < 80℃ 的深度冷凝段使用，虽抗冲击性能较弱，但通过不锈钢框架支撑和弹性密封设计，可承受 10kPa 以内的烟气压差，适合新建项目或腐蚀严重的改造场景。表面涂覆 TiO₂ 防腐涂层技术则通过纳米级二氧化钛颗粒的光催化效应，在紫外线照射下分解吸附的硫酸液滴，形成自清洁表面，配合阴极保护措施，可将金属基体寿命延长 1.5–2 倍，尤其适用于复杂烟气成分（如同时含尘和 SO₃）的苛刻环境。

2.2.2 智能清灰与防堵设计

智能清灰系统通过集成声波吹灰器（频率 20–40kHz，声压级 140–160dB）、脉冲清灰阀（喷吹压力 0.4–0.6MPa）与在线监测装置（粉尘浓度仪、SO₃ 传感器、壁温热电偶、压差变送器），构建“数据采集 – 阈值判断 – 策略执行”闭环控制体系。当粉尘浓度 > 50mg/m³ 且换热管压差较基准值上升 15% 时，系统自动启动声波吹灰，利用高频振动破坏细颗粒（≤ 10μm）的粘滞吸附状态；若 2 小时内压差未恢复，则触发脉冲清灰，通过高速气流（30–50m/s）吹扫积灰死角。结合 SO₃ 含量与壁温数据（< 酸露点 + 5℃ 时腐蚀风险升高），系统可动态调整清灰频率（正常工况 8–12 次 /

天,高腐蚀工况 15–20 次/天),避免因积灰厚度超过 3mm (热阻增加 $0.2(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$) 导致的传热效率下降 ($> 10\%$)。某 660MW 机组应用该系统后,低温省煤器压降波动幅度从 $\pm 2\text{kPa}$ 收窄至 $\pm 0.5\text{kPa}$,吹灰能耗占厂用电比例从 0.5% 降至 0.3%,同时减少过度吹灰导致的管材磨损(壁厚年减薄量从 0.4mm 降至 0.15mm),实现清灰效率提升 30% 与设备寿命延长 25% 的双重效益,为高灰分、高硫烟气环境下的长期稳定运行提供技术保障。

2.3 基于运行优化的系统能效提升

变负荷动态匹配控制策略通过构建余热回收系统与锅炉燃烧、汽轮机做功的三维联动控制模型,解决传统定参数调节在 60%–100% 负荷区间的适应性难题。PLC/DCS 系统实时采集锅炉负荷、排烟温度(精度 $\pm 1^\circ\text{C}$)、汽轮机进汽流量(精度 $\pm 0.5\%$)等 30+ 关键参数,经数据滤波处理后输入基于机理模型与 BP 神经网络的联合预测控制器,动态计算当前工况下余热回收设备的最优运行参数(如低温省煤器旁路开度、热泵驱动蒸汽量、冷凝水流量)。当机组负荷低于 70% (如深度调峰至 450MW) 时,系统自动触发“潜热优先回收模式”:通过关小高温段低温省煤器旁路阀(开度从 50% 降至 20%),将更多烟气引入低温段冷凝式换热器,同时提升热泵溶液循环泵转速(增加 15%–20%),强化 50–80°C 潜热回收,使热网水温度维持在设计值 $\pm 2^\circ\text{C}$ 波动^[5];负荷高于 90% (600MW 以上) 时,启动“显热–阻力平衡模式”,自动开大各段换热器旁路(开度增加 30%),将烟气压降控制在设计值 $\pm 10\%$ 以内,避免引风机耗电超限。某 660MW 超临界机组应用该策略后,在 50%–100% 负荷区间内,排烟温度波动幅度从 $\pm 25^\circ\text{C}$ 收窄至 $\pm 8^\circ\text{C}$,余热回收率较固定参数运行提升 12%–18%,尤其在 70% 负荷以下时,潜热回收量增加 25%,对应全厂热效率提升 0.8%–1.2%,煤耗下降 3–5g/kWh,有效破解了变负荷工况下“高负荷能耗反弹、低负荷回收失效”的调节盲区,实现余热利用效率与机组运行稳定性的协同优化。

2.4 多目标协同优化

与环保设备协同优化策略通过余热回收系统与湿法脱硫、SCR 脱硝装置的温度场匹配,构建“节能–减排–效率提升”的闭环联动机制。在湿法脱硫环节,排烟温度每降低 10°C (如从 130°C 降至 120°C),烟气中水蒸气分压下降 15%–20%,使脱硫塔内气液传质效率提升,相同 SO_3 脱除率下液气比可从 $15\text{L}/\text{m}^3$ 降至 $14.25\text{L}/\text{m}^3$,耗水量减少 5%,

对应循环水泵电耗下降 3%–4%;同时,较低的烟气温度 ($\leq 120^\circ\text{C}$) 可抑制脱硫过程中 SO_3 的生成(浓度下降 8%–10%),减轻后续烟囱“石膏雨”现象。在 SCR 脱硝系统中,余热回收系统通过高温段低温省煤器的旁路调节(如负荷波动时保留 10–20°C 温升裕度),将进入 SCR 反应器的烟气温度稳定控制在 320–380°C (催化剂最佳活性区间),避免因温度低于 300°C 导致的 NH_3/NO_x 反应不完全(氨逃逸率从 3ppm 降至 2ppm 以下),同时减少电加热装置投用时间(年均减少 500–800 小时),使喷氨量降低 8%–12% (每万标方烟气节约 0.5–0.8kg 液氨)。某 660MW 机组改造后,湿法脱硫系统年节水 120 万吨(相当于 300 户家庭年用水量),SCR 脱硝系统年节约液氨 320 吨(成本下降 15%),同时因 SO_3 浓度下降使烟囱防腐涂层寿命延长 2–3 年,形成多维度协同效应,实现单台机组年减排 SO_3 约 180 吨、 NO_x 约 120 吨,同步降低环保设备运维成本 10%–15%。

3. 结语

通过深入分析烟气特性和现有系统问题,针对性提出的多种节能策略成效显著。基于梯级利用的技术集成优化,提高了余热回收效率;材料与设备的创新,有效应对了腐蚀和积灰难题;运行优化和多目标协同优化,实现了系统能效提升与节能减排的协同发展。这些策略不仅能降低火电厂的能耗和排放,还能带来可观的经济效益。然而,在实际应用中仍需持续关注技术的可靠性和稳定性,不断优化改进。未来,随着技术的进步,火电厂烟气余热回收与利用有望取得更大突破,为能源行业的绿色可持续发展注入新动力。

参考文献:

- [1] 俞增亮,尹大元,张瑜.丙烷脱氢装置余热锅炉烟气热量深度回收研究[J].中国石油和化工,2025,(04):91–93.
- [2] 张修宁,刘金花,杨子长,等.加热炉烟气余热深度利用研究及应用[J].化工设计通讯,2025,51(03):42–43+49.
- [3] 孙鹏.工业锅炉烟气余热回收技术及其节能应用研究[J].工业加热,2025,54(03):60–63.
- [4] 韦成浩.烧结烟道烟气余热回收改造实践[J].冶金设备管理与维修,2025,43(01):10–12.
- [5] 郭勇,王发现,田学军,等.燃气锅炉烟气余热回收技术及其发展方向[J].工业炉,2025,47(01):24–28.

作者简介:熊天钰;性别:男;出生日期:1998 年 5 月;民族:土家族;籍贯:贵州德江;学历:大学本科;职称:助理工程师;研究方向:火电厂锅炉系统研究应用