

锅炉烟气余热深度回收系统经济性分析

安鹏博

华能国际电力股份有限公司营口电厂, 辽宁 营口 115000

DOI:10.61369/EAE.2025020010

摘 要 : 锅炉烟气预热深度回收系统在实际应用中主要就是利用技术手段回收烟气中余热, 通过此种方式可以有效提高能源的综合利用效率, 降低了燃料消耗以及碳排放。通过研究表明, 此技术在实际应用中具有显著的经济效益以及环境效益。目前, 随着节能减排要求的不断增加, 锅炉烟气余热深度回收技术应用日益广泛。在锅炉运行中会排出大量的热量, 这样则会导致能源浪费等问题的出现, 也会加剧环境污染。对此, 开发高效、经济的烟气余热回收系统, 可以有效提高能源的利用效率, 降低运行成本, 有效满足双碳发展目标。

关 键 词 : 锅炉烟气余热深度回收系统; 经济性; 低碳

Economic Analysis Of Deep Recovery System For Boiler Flue Gas Waste Heat

An Pengbo

Huaneng International Power Co., Ltd. Yingkou Power Plant, Yingkou, Liaoning 115000

Abstract : The deep recovery system for preheating boiler flue gas mainly uses technical means to recover waste heat from flue gas. Through this method, the comprehensive utilization efficiency of energy can be effectively improved, fuel consumption and carbon emissions can be reduced. Research has shown that this technology has significant economic and environmental benefits in its application. Currently, with the increasing demand for energy conservation and emission reduction, the application of deep recovery technology for boiler flue gas waste heat is becoming increasingly widespread. During boiler operation, a large amount of heat is emitted, which can lead to energy waste and exacerbate environmental pollution. Developing efficient and economical flue gas waste heat recovery systems can effectively improve energy utilization efficiency, reduce operating costs, and effectively meet the dual carbon development goals.

Keywords : boiler flue gas waste heat deep recovery system; economy; low carbon

为了积极响应双碳发展目标, 全面推广绿色低碳技术的持续发展, 锅炉烟气余热深度回收技术也日益成熟。此技术在实际应用中主要是通过回收烟气中的显热以及潜热, 则可以有效提高锅炉的热效率, 降低了燃料消耗, 减少了污染物的排放, 其应用价值显著。

一、烟气温度与回收深度架构与关键技术

烟气温度越高, 则其回收的余热量相对越大, 则其产生的经济效益越高。在实际应用中应用锅炉烟气余热深度回收技术以及主要结构如下:

(一) 系统结构

烟气温度与回收深度系统通过烟气余热深度回收技术手段, 利用燃气直燃型吸收式热泵回收技术进行处理, 其主要结构如下所示。

1. 烟气系统

烟气余热回收装置主要结构为喷淋换热塔, 在系统中对其进行脱硫处理厂支持后, 烟气则可以汇合到锅炉喷淋塔中, 通过与水液滴直接接触, 然后进行换热、脱硫等反应。

2. 余热回收系统

低温循环水通过中间循环泵处理之后进入到内部的喷淋层中, 通过与烟气充分的接触、换热处理之后, 则可以吸收酸性物质以及相关烟尘。在升温之后的循环水通过设备将热量传递到热网水中, 实现了资源的回收利用。

3. 除雾冲洗系统

除雾器在实际应用中主要就是在喷淋塔的内部结构中, 利用实时性监控系统则可以判断烟气压差, 了解其是否存在污垢堵塞等问题, 通过自动化操作可以进行在线冲洗。

其中传感器系统的布局设置中, 可以在喷淋塔的入口 / 出口等位置设置高频微波湿度计。在塔内则可以根据实际状况设置温湿度矩阵探头结构, 其中每一层设置4点, 这样则可以有效消除测量死角。

最后，系统在应用中其主要控制逻辑为：在系统出口烟气的相对湿度 < 95% 的时候，系统会自动增大喷淋量；而在其出口的温度 > 31℃ 的时候，系统则会自动启动备用制冷机组降温。

(二) 关键技术手段

1. 喷淋热泵技术

此技术是主要的深度回收技术手段之一。在应用中主要是通过蒸汽或者高温热水驱动溴化锂吸收式热泵，利用喷淋塔则可以直接的与烟气进行接触。其中，在操作中主要就是通过冷水吸收烟气对其进行显热处理，然后促使水蒸气冷凝，整个过程中会释放潜热，利用热泵系统再回收热量处理之后，提升温度至 60~80℃ 左右，然后将其输送至供热管网中。此种技术在处理中可以深度降温，其中排烟温度可以降低到 20℃ 左右，有效突破了传统换热器无法回收潜热的技术问题。在处理中可以实现协同净化操作，其中喷淋过程可以溶解各种酸性气体，有效降低了后续操作中的脱硫脱硝负荷问题。

2. 冷凝式换热技术

其主要是利用翅片管式金属换热器进行处理，其主要就是通过扩展换热面积达到强化传热的目的。在操作中可以将烟气从 200~400℃ 冷却到 100~150℃ 左右。而利用氟塑料 / 玻璃钢非金属换热器，则可以通过耐腐蚀材料直接接触低 ≤ 80℃ 高温硫烟气，这样则可以将排烟温度控制到 40℃ 以下，并且回收冷凝潜热。此技术在应用中其投资回收快，防腐性高，可靠性强的特征。同时，在应用中可以通过设备模块化进行处理，在系统中应用可以有效满足灵活部署的应用需求。但是在系统应用中对于金属换热器的露点腐蚀要求严格，在一定程度上限制潜热回收深度。

3. 开式热泵技术

此种技术手段属于直接接触式回收类型，在应用中烟气直接通入溴化锂吸收式热泵发生器进行处理，产生的水蒸气被浓溶液吸收之后则会释放冷凝热，然后其热量通过热泵循环处理之后则达到升温，最后输出。此种技术在应用中操作流程简单便捷，可以节省中间的换热环节，有效减少了热损失等诸多问题。在处理中具有脱硫协同化的特征，其中溴化锂溶液可吸收 SO₂，有效降低了烟气硫含量以及应用的比例。但是，此技术在应用中因为溴化锂溶液与酸性烟气反应生成一定的 Li₂SO₄ 等盐类物质，这样则会导致钛合金换热器以及相关设备出现腐蚀性问题。在处理中必须根据实际状况定期更换溶液以及相关设备，其经济性不足。主要就是在 SO₂ < 50mg/Nm³ 的天然气管炉中应用。

4. 一体化减排技术

一体化减排技术具有节能环保协同管理的特征，在应用中可以将预热回收系统与脱硫脱硝工艺充分的融合，实现集成化设计。其中最为经典的技术就是利用“空塔喷淋 + 热泵”工艺进行处理，其中烟气先进入喷淋塔中，而冷水降温的同时可以有效吸收 SO₂，然后在通过热泵提升余热品位；也可以根据实际状况应用“冷凝换热 + 湿式电除尘”技术对其进行优化，此技术在应用中主要就是在回收潜热，可以有效捕集 PM2.5 相关微颗粒。在应用中必须要精准控制喷淋液 pH 值，保障其控制在 5.5~6.5 左右，避免设备出现腐蚀性影响。同时，基于实际状况优化热泵系统，保障

其符合脱硫塔流量应用需求。

二、锅炉烟气余热深度回收系统经济性分析核心指标

锅炉烟气余热深度回收技术在实践中应用可以有效提高能源利用效率、降低运行成本，具有显著的经济性特征。但是其还是存在初始投资高、技术复杂性大等相关问题以及挑战。因此，在实践中要重点分析锅炉烟气余热深度回收系统的经济性，了解其技术特征，通过多种方式进行优化完善，方可实现经济性与环保效益的双赢。

(一) 静态投资回收期

静态投资回收期在应用中不会考虑资金时间价值中产生的回本速度。在锅炉烟气余热深度回收系统的分析中，其主要公式为：

静态回收期 (年) = 初始总投资 / 年净收益静态回收期 (年) = 年净收益 / 初始总投资

其中初始总投资包括了换热设备，其主要占 50%~70%、安装费、设计费以及辅助系统。其中，辅助系统则主要包括了泵 / 风机改造等相关内容。在计算中其年净收益包括了燃料节约、节水收益、减耗收益的相加之和，然后在减去新增运行成本。

其主要使用与项目初筛以及风险厌恶型决策中应用。此种方式计算简单便捷，可以直接的反应短期风险问题。但是在应用中容易忽略资金时间价值；缺乏对回收期后收益的重视，容易出现高估短期高收益项目的问题。因此，在应用中要基于实际状况联合其他指标对其进行深度论证。

(二) 净现值

其主要就是通过分析对项目全生命周期中创造的价值绝对值进行分析，主要就是在项目最终决策、互斥方案比选中应用。可以基于全生命周期的视角对其进行动态分析，利用资金时间价值量比等方式进行处理，则可以获得绝对收益指标。

(三) 动态投资回收期

其主要就是分析资金时间价值的回本周期。在计算中可以把各年净现金流以折现率折算为现值；通过分析累计现值归零所需时间，则可以获得动态回收期。相对与静态回收期对比来说，动态 PP ≥ 静态 PP，其可以真是的反应资金回收风险等诸多问题。

(四) 内部收益率

其主要就是通过分析项目自身的预期复合年化收益率，了解其经济效益。通过次吹吹方式进行分析则可以直观反映资本利用效率。在锅炉烟气预热深度回收系统分析中其主要指标组合矩阵决策如表 1 所示。

表 1. 指标组合决策矩阵

应用情景	指标组合	逻辑说明
初步筛选	静态 PP + BCR	快速排除回收期过长或效率低的方案
最终决策	NPV + IRR (需验证)	确保绝对收益与收益率双达标
高风险项目	动态 PP + 敏感性分析	重点评估资金回收安全性
政府 / 补贴项目	BCR + NPV	突出公共资金使用效率

三、锅炉烟气余热深度回收系统经济性要点

(一) 主要成本构成分析

锅炉烟气余热深度回收系统的经济性受到技术要求、边界条件等多种因素的影响。在分析中必须要基于实际状况重点分析影响经济性的主要因素。

1. 初始投资成本

在进行锅炉烟气余热深度回收系统的改造处理中需要对根据结构需求,选择核心部件、材料以及换热面积、设计压力等相关参数。同时,辅助设备系统成本也是主要之一,其主要包括了防腐材料、烟气净化装置以及冷凝水等相关设备。

同时,安装以及土建相关项目也是主要的成本内容之一。但是在应用中,容易受到场地等多种因素的限制,因此,在设计中可以通过紧凑型的方式进行设计,这样则可以有效降低土建成本。

2. 运行维护成本

原有排烟温度如果越高,则其可以回收的余热量相对越大,其经济性越高。而目标温度越低,则其回收热量越多,但是其在应用中的设备投资以及运行风险等问题也会在不断的增加。对此,在锅炉烟气余热深度回收系统应用中必须要确定最佳的平衡点。例如,在系统应用中排烟温度每降低10℃,则可以提高锅炉热效率1.4%~3.2%左右。同时,在此系统中可以有效降低燃料的成本,效果显著。

(二) 运行收益量化分析

这是直接影响系统整体的经济性的主要因素。例如,将回收的烟气余热用于加热凝结水,则可以提高系统运行的收益。而如果单纯的增加采暖风机则不会产生直接的收益,但是可以有效保障主要工艺的安全性。

1. 低谷电驱动

系统在操作中可以通过蒸汽驱动与电动压缩机的自动离合器进行优化,可以有效满足应用需求。通过此种方式进行处理,可以有效降低17%的蒸汽消耗量,起综合能源成本下降了12%左右。

2. 冷凝水分级利用成本

此技术在应用中其主要的水质分级标准如表2所示。

表2. 水质分级标准

等级	pH 值	TDS (mg/L)	用途	处理成本
I 级	6.5~7.0	< 50	脱硫塔补水	0元 /t
II 级	5.0~6.5	50~200	冲灰 / 洗煤	2元 /t
III 级	< 5.0	> 200	中和后排放	5元 /t

在应用中主要就是通过旋流离心除酸处理,基于离心力分离H₂SO₄液滴操作,其去除率为92%,在系统应用中减少碱液消耗的问题。而基于系统实际需求进行动态加药控制,通过pH反馈调节NaOH投加量,其中节省中和剂30%。

(三) 推广障碍以及降本措施

锅炉烟气余热深度回收系统在应用中还是存在初始投资成本高的特征。锅炉烟气余热深度回收技术在应用中主要就是通过热能梯级利用以及多污染物协同控制管理方式进行处理,此种技术在应用中可以有效提高整体性能。但是在应用中其必须要解决潜在的问题,重视材料与结构优化,开发低成本的防腐涂层,有效减少换热器的体积。根据实际状况实现智慧化调控,基于大数据、人工智能等多种技术手段进行动态匹配分析,确定热网负荷参数,了解余热输出等相关信息数据,方可有效满足应用需求。

四、结束语

锅炉烟气余热深度回收技术手段在多个领域中应用效果显著。利用技术手段回收烟气中的余热,可以有效提高能源的利用效率,也可以降低燃料消耗以及碳排放,有效实现经济效益与环境的平衡发展。今后,随着技术的不断进步,烟气余热回收技术会在各个领域广泛应用。而为了有效满足应用需求,必须要强化技术研发与创新,方可有效满足双碳下目标能源需求以及环境保护发展的迫切需求。

参考文献

- [1] 徐铭基, 闫京, 关宝良, 等. 集中供热燃气锅炉房烟气余热深度回收技术研究与应用 [J]. 国企管理, 2024, (09): 120-123.
- [2] 蒋军成, 胡政. 燃煤电站中锅炉燃烧烟气余热节能分析 [J]. 能源与环保, 2023, 45(02): 173-179.
- [3] 李允超, 赵大周, 刘博, 等. 火电厂烟气余热利用现状与展望 [J]. 发电技术, 2019, 40(03): 270-275.
- [4] 穆连波, 王随林, 朱峰, 等. 燃气锅炉烟气冷凝余热深度回收系统应用与节能分析 [J]. 暖通空调, 2020, 50(12): 65-69.
- [5] 张群力, 张秋月, 曹明凯, 等. 燃气锅炉烟气余热回收利用技术研究 [J]. 建筑科学, 2016, 32(06): 133-141.
- [6] 宋永明, 张士平, 张蓉. 烟气余热深度回收技术路线对比分析 [J]. 煤气与热力, 2025, 45(03): 15-17.
- [7] 王琼弼, 吴涛, 张竞. 多台锅炉与单台热泵联合供热系统设计分析及其相关问题探讨 [J]. 暖通空调, 2024, 54(S2): 33-36.
- [8] 徐铭基, 闫京, 关宝良, 等. 集中供热燃气锅炉房烟气余热深度回收技术研究与应用 [J]. 国企管理, 2024, (09): 120-123.
- [9] 赵化涛, 石灿, 张素华, 等. 燃气锅炉烟气余热深度回收技术及应用分析 [J]. 区域供热, 2024, (04): 8-14.
- [10] 李明辉. 燃煤锅炉低温烟气余热回收与深度治理技术应用效果分析 [J]. 节能, 2022, 41(03): 69-73.