

工业锅炉余热回收利用路径探讨

王世鹏

中电投蒙东能源集团有限公司通辽发电总厂 内蒙古 通辽 028000

摘要：在当今社会里，节能已成为继煤炭、电力、石油和天然气之后的“第五能源”。而在现在的工业锅炉的使用中普遍存在着热量利用率低下，排放烟气余热温度过高，以及烟气内污染环境气体含量过高等问题。余热指工业生产过程中因技术、设计或理念局限性未被合理利用的废弃热能，包括高温废气、冷却介质、废汽废水、高温炉渣等载体中的显热与潜热。余热回收是对废弃热能进行收集、转化与再利用的技术，旨在提升能源利用效率并减少浪费。

关键词：锅炉；余热；回收；利用率

目前，节能已是我国经济发展的一项长远战略规划，也是当前一项紧迫的任务。当前，全社会都在开展节能降耗，缓解能源压力，建设节能型社会，而工业锅炉余热资源的回收利用是节约能源的重要措施，工业锅炉排烟余热所占锅炉热量比重较大。如果不控制锅炉烟气余热，将会给地球环境和资料带来极大的危害。

1 工业锅炉余热回收基本原理

工业锅炉余热回收的基本原理是通过热交换与能量转换技术，将锅炉排放废气中的废弃热能转化为可利用能源，其核心实现路径可归纳为以下三部分：

（1）热量传递与介质加热

热传导路径，高温废气（如800-1000℃烟气）通过换热器（管壳式、翅片管或热管）与冷介质（水、空气等）间接接触，利用导热和对流方式传递热量。例如，烟气中的热量经金属管壁传导至锅炉补水，使其升温后返回锅炉循环系统，降低燃料消耗。工质相变过程，余热锅炉通过烟气与水管的热交换，使水吸收热量后发生相变，转化为蒸汽或高温热水，供发电、供暖或工艺使用。此过程遵循能量守恒定律，实现热能梯级利用。

（2）能量转化路径

热能→热能，空气预热、导热油循环，直接利用中高温余热提升燃烧效率。热能→机械能，蒸汽驱动汽轮机发电，适用于稳定热源，转化效率20%-25%。热能→化学能，热化学储能反应（如吸热反应），实现余热储存与跨时段利用。

（3）技术实现特点

直接利用与间接转换结合，直接回用：高温烟气优先用于原料预干燥或燃烧空气预热，减少主锅炉负荷；间接提质：低温余热（< 200℃）借助热泵提升温度后供给工艺环节，解决低品位热能利用率低的问题。系统适配性设计，根据余热温度差异采用分级回收策略：高

温段（> 500℃）：通过辐射换热快速回收热量；中低温段（< 500℃）：采用强化对流换热的翅片管或板式换热器。

2 工业锅炉余热回收技术路径

（1）热交换回收技术

热交换器技术，烟气-介质换热：通过管壳式、板式或热管换热器将烟气余热传递给水、空气或蒸汽，预热锅炉给水或工艺介质，降低排烟温度（常见温度由160℃降至60℃以下）。废气/废水热能回收：利用换热器提取废气、冷却水中的热量，用于预热新风、工艺补水或供暖，综合节能可达20%。热泵技术，吸收式热泵：以LiBr-H₂O溶液为工质，回收低温烟气余热（如30-60℃），制取高温热水（80-120℃），COP值可达8，提升锅炉热效率8%-15%。空气能热泵：结合直流变频压缩技术，COP值达4.2，适用低温环境（-25℃），配合余热回收形成节能闭环。喷淋热泵：通过喷淋冷水吸收烟气潜热，深度降温至30℃以下，同步减少氮氧化物和硫化物排放。热功转换技术，利用余热发电系统将高温烟气热能转化为电能，适用于钢铁、水泥等高耗能行业，实现能源自供。典型案例：燃煤锅炉余热发电系统年回收热量5万吉焦，供热效率提升8%。热能化学储存技术，通过化学吸附或吸热反应储存余热，实现间歇性热能回收与释放，适用于波动性热负荷场景。

（2）关键技术设备

高温热泵，采用耐腐蚀钛合金换热器与多级压缩技术，处理含硫油气等复杂介质，输出温度可达150℃。高效换热器，分离式热管换热器通过工质汽化-冷凝循环传递热量，适应高温高压环境，减少烟尘附着。智能控制系统，动态匹配冷热需求，结合AI算法优化运行模式，实时监控能耗节点，提升系统稳定性。

（3）热功转换技术

技术类型	核心原理	典型应用场景
蒸汽发电	余热锅炉产蒸汽驱动汽轮机发电	钢铁、水泥等高耗能行业
热电联产	蒸汽发电+余热供暖+工艺用热	区域集中供热系统
ORC低温发电	有机朗肯循环利用低品位余热	数据中心废热回收

（4）热泵协同技术

高温热泵提质，采用钛合金换热器与耐高温冷媒，吸收80-120℃低温余热并升温至150℃回用，可替代30%-50%蒸汽锅炉负荷；化工行业案例表明，模块化热泵与冷水机组联动，同步输出140℃蒸汽与7℃冷水，投资回收期缩短至2-3年。深度回收技术，喷淋热泵：结合吸收式热泵与喷淋换热，将排烟温度降至25℃以下，实现全热回收，但需解决尾部烟道腐蚀问题；开式热泵：烟气直接参与热泵循环，简化系统流程并兼具脱硫效果，但钙盐吸收液需定期更换。

（5）多级集成路径

温度梯度适配，高温段（> 500℃）：优先用于空气预热或蒸汽生产，采用辐射换热技术快速回收热量；中低温段（< 500℃）：通过翅片管或板式换热器加热水/导热油，匹配工艺用热需求；极低温段（< 80℃）：耦合热泵提升温度或制取冷水，拓展至区域供暖或制冷场景。防腐与稳定性设计，含硫烟气采用钛合金/防腐涂层换热器，降低设备腐蚀风险；通过冗余设计与智能控制系统应对热源波动，如烧结余热回收系统增加备用换热单元。技术选择要点：余热温度 > 200℃时优先选用直接换热或余热锅炉；低温余热（< 200℃）需依赖热泵提质；腐蚀性烟气环境需匹配防腐材料，如某燃气锅炉项目采用高效烟气换热板+直燃热泵，CO₂年减排量达2176吨。

3 工业锅炉余热回收应用场景

工业锅炉余热回收应用场景可分为以下四大领域，不同行业根据余热特性与工艺需求选择适配技术：

（1）冶金与化工行业

高温烟气利用，钢铁冶炼：回收高炉、转炉800-1000℃高温烟气余热，通过余热锅炉生成蒸汽驱动发电机组，典型案例中单条2500t/d水泥生产线余热发电功率达9MW，年减排CO₂超6万吨；金属热处理：利用700-900℃高温废气预热金属坯料，降低主炉燃料消耗15%-20%。中低温余热提质，化工反应余热：采用高温热泵吸收80-120℃蒸馏或反应余热，升温至150℃后回用于原料预热，可替代30%-50%蒸汽锅炉负荷；含硫烟气处理：配置钛合金/ND钢换热器回收化工尾气余热，同步降低硫化物排放浓度15-25mg/m³。

（2）建材与电力行业

水泥生产，窑头/窑尾废气余热发电，SP锅炉+AQC

锅炉联合系统，排烟温度降至300℃以下，年节约标煤超2万吨。火电厂，回收汽轮机乏汽余热供暖，余热锅炉+热泵协同，将40-60℃低温余热转化为区域供暖热水。

（3）轻工业与区域供热

纺织印染，回收燃气锅炉250-300℃烟气余热，将20℃软水预热至85℃后输入蒸汽锅炉，单台10t/h锅炉年节约标煤约150吨。食品加工，导热油炉加装翅片管换热器，助燃空气预热至120℃，热效率提升8.2%。集中供热，燃气锅炉加装两级换热器，排烟温度从180℃降至28.6℃，回收热量通过热泵系统供暖，覆盖22万㎡居民区。

（4）跨领域协同应用

冷热联供，模块化系统同步输出140℃蒸汽与7℃冷水，解决化工、制药行业冷热负荷错配问题，投资回收期缩短至2-3年。农业与服务业，回收空调/空压机30-50℃低温余热，用于泳池恒温或温室农业，配合防生物附着涂层延长设备寿命。

4 工业锅炉余热回收经济与环境效益

（1）经济效益。

节能降耗显著，回收中高温余热（如500-1000℃烟气）用于预热锅炉补水或助燃空气，可降低燃气消耗量15%-20%。典型案例显示，单台10t/h燃气锅炉通过余热回收系统年节约标煤约150吨；高温热泵协同冷水机组应用，同步减少蒸汽消耗与制冷能耗，化工行业案例中设备投资回收期缩短至2-3年。投资回报周期短，余热发电项目（如钢铁、水泥行业）通过蒸汽轮机发电，回收期通常为3-5年。模块化余热利用系统可灵活适配工业流程，如热泵联合余热锅炉方案覆盖冷热联供需求，提升综合能效30%以上。政策与税收支持，符合资源综合利用条件的企业可享受增值税即征即退政策，余热发电项目最高可享企业所得税“三免三减半”优惠；政府针对工业余热利用项目提供专项资金支持，推动行业设备更新与减排目标实现。

（2）环境效益。

减排温室气体，回收70%余热资源可减少CO₂排放量达2.3万吨/年（以海上发电装置为例），助力碳达峰目标实现；钢铁企业烧结余热发电系统应用后，单条生产线年减排CO₂超6万吨。降低污染物排放，耐腐蚀换热器（钛合金/ND钢）在化工尾气处理中同步降低硫化物浓度15-25mg/m³，减少酸雨风险；余热锅炉协同布袋除尘系

统（如AOD精炼炉项目）使粉尘排放浓度降至15mg/Nm³以下，优于环保标准。资源循环利用，建材行业回收窑尾废气余热发电，排烟温度降至300℃以下，实现能源

梯级利用；纺织印染厂将250-300℃烟气余热用于软水预热，减少一次能源消耗并提升水资源利用效率。

（3）综合效益提升路径

关键策略	实施方向	效益提升幅度
梯度温度适配回收	高温段发电/蒸汽、低温段热泵提质	综合能效提升25%-35%
智能控制系统集成	动态匹配热源负荷与用能需求	运维成本降低18%-22%
防腐材料与工艺升级	钛合金换热器+多级除尘设计	设备寿命延长20%-30%

5 工业锅炉余热回收挑战解决方案

（1）工业锅炉余热回收的主要挑战

系统适应性不足，余热品位波动：工业锅炉烟气温度受生产工艺影响波动大（如烧结工艺停机导致余热回收中断）10，传统热交换设备难以动态响应；介质腐蚀性：含硫、氮氧化物的烟气易引发换热器低温腐蚀，常规碳钢设备寿命缩短50%以上。技术经济性瓶颈，初始投资高：高温热泵、储能系统等设备成本较传统锅炉高30%-50%，用户接受度受限；回收周期长：低温余热（< 100℃）回收项目因热能价值低，投资回报周期可能超过5年。系统集成复杂性，工艺耦合难度：余热回收需与原锅炉系统、生产流程紧密配合（如烧结机速与环冷机速匹配问题），设计不当易引发热网失衡；运维风险：烟气冷凝水处理不当会导致设备结垢，降低热效率并增加维护成本。

（2）关键解决方案与创新方向

耐腐蚀材料与结构优化，采用钛合金换热器、改进型ND钢等耐腐蚀材料，提升设备在含硫烟气中的使用寿命（寿命 > 5.5万小时）；开发分离式热管换热器，通过模块化设计降低积灰风险，减少停机清洗频率。智能调控技术，集成AI算法与数字孪生技术，实现动态电价响应与余热波动预测（如某零碳园区蒸汽成本降低29%）；构建“源-网-荷-储”协同系统，通过储能装置缓冲余热波动，保障热网输送能效提升15%。多技术耦合应用，热泵+余热锅炉：高温热泵（COP = 3-6）回收低温余热，再通过余热锅炉生成蒸汽，覆盖40-200℃全温域需求；吸收式制冷+储热：利用LiBr-H₂O溶液储热，消纳间歇性余热

并同步输出冷热能，综合能效提升30%。余热价值深度挖掘，余热分级利用：高温段（> 200℃）用于发电，中温段（80-200℃）驱动热泵，低温段（< 80℃）用于预热补水；热能化学储存：通过吸热反应储存低品位余热，高峰时段释放能量，实现峰谷价差套利。

（3）典型案例验证

燃煤锅炉改造：某集中供热项目采用吸收式热泵+余热锅炉组合，排烟温度从160℃降至28.6℃，年回收热量5万吉焦，热效率提升8%；

零碳园区实践：模块化储热锅炉替代燃煤锅炉，蒸汽成本降低120元/吨，年消纳绿电超1.2亿千瓦时。

当然，目前锅炉余热的回收率已经提高了许多，但前面的路还有很远。为了能更好的利用资源，更好的保护环境，所有业内人士还需更加的努力，早日使用更新的技术和材料，来提高锅炉烟气余热的回收利用率，为美化我们的环境尽一份力。

参考文献

[1]张倩.工业锅炉低温腐蚀研究[J].中国特种设备安全,2022(6):60-63.

[2]徐连.工业锅炉烟气余热回收技术及应用[J].机械工程师,2022(7):224-225.

[3]刘平.工业锅炉尾部烟气余热综合利用技术的应用[J].价值工程,2023(16):317-318.

[4]陈金学.燃气锅炉烟气余热深度回收技术应用[J].机械研究与应用,2022,29(6):169-170,173.

[5]王镭.燃煤锅炉烟气余热深度回收及脱水性能分析[J].热力发电,2022,47(4):48-54.