

燃煤燃烧设备能效提升与余热梯级利用的协同增效机制

季银飞¹ 洪菲² 张建中³

1.浙江浙能绍兴滨海热电有限责任公司 浙江 绍兴 312000

2.浙江快达建设安装工程集团有限公司 浙江 杭州 314100

3.杭州翱翔机电设备有限公司 浙江 杭州 311000

【摘要】：在“双碳”目标背景下，提升传统燃煤燃烧设备的能源利用效率、挖掘系统节能潜力已成为工业领域节能减排的关键路径。本文深入探讨了燃煤燃烧设备本体能效提升与系统余热梯级利用之间的协同增效机制。首先，分析了影响燃煤锅炉及工业炉窑热效率的关键因素，包括燃烧优化、传热强化、智能控制与设备保温等核心技术。其次，系统阐述了基于“温度对口、梯级利用”原则的余热资源分类与回收技术体系，涵盖高、中、低品位余热的动力回收、余热利用及热泵提质等途径。核心部分论证了二者间的协同关系：本体能效提升为余热回收提供了更优质、更稳定的热源基础，降低了余热回收的技术与经济门槛；而高效的余热梯级利用则反向降低了本体设备的终端能耗需求，提升了全系统能源利用率，形成了“1+1>2”的倍增效应。最后，通过构建系统能效评价模型并结合案例模拟分析，量化了协同优化带来的能源、经济及环境效益。本研究为燃煤工业系统的综合节能改造提供了系统的理论框架与技术集成思路。

【关键词】：燃煤燃烧设备；能效提升；余热回收；梯级利用；协同增效；系统集成

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.068

1 引言

煤炭作为我国主体能源的地位在短期内难以根本改变，尤其在电力、冶金、建材、化工等基础工业领域，燃煤锅炉及工业炉窑仍是核心耗能设备。然而，传统燃煤设备普遍存在热效率偏低、余热资源浪费严重的问题，其平均运行效率与国际先进水平存在差距，大量中低温余热未被有效利用而直接排放，造成了巨大的能源浪费与环境热污染。因此，深入挖掘燃煤系统的节能潜力，是实现工业绿色低碳转型的迫切要求。

当前研究与实践多侧重于单一技术环节的改进，或将“设备能效提升”与“余热回收利用”视为两个独立的节能方向。前者聚焦于燃烧器改造、受热面优化、智能控制系统升级等；后者则关注各类换热器、余热锅炉、ORC（有机朗肯循环）发电等末端回收技术的应用。尽管这些措施均能取得一定的节能效果，但往往缺乏从全系统能量流全局最优的角度进行协同设计与集成优化。事实上，燃烧设备的能效状态直接决定了排出余热的品位（温度）与流量，而余热回收的方式与深度又反过来影响主设备的燃料需求与运行工况。二者相互关联、相互影响，存在深刻的协同作用机理。

本文旨在打破传统孤立优化的局限，从系统论和能量梯级利用原理出发，全面阐述燃煤燃烧设备本体能效提升与余热梯级利用之间的协同增效机制。通过分析技术耦合路径、构建系统能效模型，并探讨其综合效益，以期为推动燃煤系统从“局部节能”向“系统能效革命”转变提供理论依据和工程指导。

2 燃煤燃烧设备本体能效提升关键技术

燃煤设备的本体能效是系统能源利用的“源头”。提升其热效率，意味着在完成相同生产任务时，减少初始燃料的输入，

同时优化排出余热的品质。主要技术路径包括：

2.1 高效清洁燃烧技术

先进的燃烧技术是高效转换化学能的基础。采用低氮燃烧器、分级配风、煤粉浓淡分离等技术，可实现燃料的充分、稳定燃烧，提高燃烧效率，从源头上减少不完全燃烧损失和降低烟气体量。同时，燃烧优化能降低烟气中污染物（如NO_x）的初始生成浓度，为后续余热回收设备创造更清洁的工作环境，延长设备寿命。

2.2 传热过程强化与优化

传热效率直接决定燃料化学能向工艺热能的转化率。通过采用波纹管、翅片管等高效传热元件，或应用纳米流体等新型传热工质，可显著强化对流与辐射传热。合理布置受热面，优化烟气流场与温度场分布，减少局部过热或传热死区，能够最大限度地吸收高温烟气的热量，降低排烟温度，提升主设备热效率。

2.3 智能监测与自适应控制

基于物联网、大数据和人工智能的智能控制系统，能够实时监测锅炉/窑炉的运行参数（如烟气成分、温度、压力、氧量等），并通过对燃烧、送风、给料等环节的闭环优化控制，使设备始终处于最佳工况附近运行。这不仅能稳定提高运行效率，还能动态适应燃料特性变化和负荷波动，确保余热排出参数的相对稳定，为下游余热回收系统的稳定高效运行提供前提。

2.4 设备及管网保温增效

对锅炉本体、炉墙、蒸汽管道及热力管网进行高性能保温

改造,采用新型纳米孔、气凝胶等高效保温材料,可大幅减少炉体散热损失和管道输送热损失。这部分损失的减少直接等同于有效热量的增加,是提升系统净效率最直接的措施之一。

3 余热资源特性与梯级利用技术体系

燃煤设备排出的余热形式多样,主要包括烟气余热、冷却介质余热、炉体辐射热、产品显热等。其中,高温烟气余热是主体。根据“温度对口、梯级利用”原则,需按余热品位选择适宜的技术路径。

3.1 余热资源分类与评价

高品位余热(通常 $>400^{\circ}\text{C}$):如高温烟气、高温炉渣显热。具有较高的焓值,适合进行动力回收。

中品位余热(通常 $150^{\circ}\text{C}\sim 400^{\circ}\text{C}$):如中温烟气、蒸汽冷凝水。可用于产生低压蒸汽、驱动吸收式制冷或直接用于工艺预热。

低品位余热(通常 $<150^{\circ}\text{C}$):如低温烟气、循环冷却水。虽然焓值低,但总量巨大,回收利用难度高,经济性挑战大。

3.2 梯级利用技术路径

高品位余热动力化:通过余热锅炉产生中高压蒸汽,驱动汽轮机发电(如烧结余热发电、干熄焦发电),实现余热的高价值转换。

中品位余热直接利用于制冷:通过气-气、气-液换热器预热燃烧用空气(空气预热器)、燃料或工艺物料,直接减少主设备能耗。也可驱动溴化锂吸收式制冷机,提供工艺冷却或空调冷量,实现“热-电-冷”联产。

低品位余热提质回收:采用热泵技术(特别是高温热泵),将低品位余热提升至可利用的温度,用于供暖、工艺加热或锅炉补水预热等,是深度挖掘低温余热潜力的关键。

系统集成与优化:将不同品位的余热回收技术进行有机串联与并联,构建复合式余热利用系统。例如,烟气先通过余热锅炉发电,再通过换热器预热空气,最后通过热泵进一步回收低温余热用于供暖,形成完整的能量梯级利用链条。

4 协同增效机制的理论分析

本体能效提升(简称“本体增效”)与余热梯级利用(简称“余热利用”)并非简单的叠加关系,而是通过能量流、物质流和信息流紧密耦合,产生协同增效。

4.1 正向协同:本体增效为余热利用创造优质条件

提升余热品质:强化燃烧与传热,在提升主设备效率的同时,往往意味着更完全的燃烧和更合理的传热分布。这可能导致排烟温度适度升高(在某些优化场景下)或烟气成分更稳定,从而提高了可利用余热的平均品位,使得原本难以利用的中低品位余热更具回收价值。

稳定余热参数:智能控制系统的应用,使主设备运行工况平稳,烟气流量、温度波动减小。这极大改善了余热回收设备(如换热器、余热锅炉)的运行条件,提高了其设计效率和运行可靠性,降低了因工况频繁变动导致的设备疲劳和效率衰减。

减少余热流量:本体效率提升的直接结果是完成相同功用的总燃料消耗量降低,相应产生的烟气总量减少。这意味着余热回收系统的规模可以相应减小,初始投资和运行成本降低,提高了余热回收项目的经济可行性。

4.2 反向协同:余热利用反哺并放大本体节能效果

直接回用降低本体能耗:将回收的余热用于预热燃烧空气、燃料或给水,直接减少了主设备为达到同样工艺温度所需消耗的燃料,这是最直接的反馈节能。例如,安装高效空气预热器可显著降低排烟损失,提高锅炉热效率 $2\%\sim 5\%$ 。

提供辅助动力/冷量:余热发电产生的电能可以用于驱动本系统的风机、水泵等辅机,实现厂用电自给或部分自给;余热制冷提供的冷量可用于工艺冷却或设备冷却,替代或减少电制冷机的耗电。这从系统辅助能耗侧降低了整体能耗。

改善本体运行环境:深度余热回收,特别是将排烟温度降至露点以下(低温省煤器或冷凝式换热),在回收大量潜热的同时,还能凝结脱除烟气中的部分水分和污染物(如 SO_x 、粉尘),起到了协同减排的效果,有时还能减轻下游环保设施的压力。

4.3 系统集成优化与全局最优

协同增效的最终实现,依赖于从系统全局出发进行集成优化设计。这需要在设计或改造初期,统筹考虑主设备特性、工艺需求、各品位余热分布,通过建模与仿真(如采用 Aspen Plus、EBSILON 等软件),对“燃烧系统—主设备—多级余热回收网络—用能终端”进行全流程模拟与优化,寻找系统焓效率最高或全生命周期成本最低的技术配置与运行策略。

5 系统能效评价与案例分析

5.1 协同系统能效评价模型

为量化协同效益,可构建系统总能源利用率(η_{sys})评价指标:

$$\eta_{\text{sys}}=(E_{\text{有效输出}}+E_{\text{余热利用净收益}})/E_{\text{燃料输入}}$$

其中, $E_{\text{有效输出}}$ 为主设备提供的有效能量(如蒸汽、热水、熔融物料等); $E_{\text{余热利用净收益}}$ 为余热回收系统输出的能量(电、热、冷)扣除其自身运行能耗后的净值。协同优化旨在最大化 η_{sys} 。

5.2 案例模拟分析

以某额定蒸发量 75t/h 的燃煤工业锅炉系统改造为例。

原状态：锅炉热效率 87%，排烟温度 160℃，无系统余热回收。

单一改造方案 A：仅实施本体增效（燃烧器改造、智能控制系统、部分管道保温），预计锅炉热效率提升至 90%，排烟温度降至 145℃。

单一改造方案 B：仅增加尾部余热利用（安装烟气冷凝换热器用于加热锅炉补水），排烟温度可降至 55℃，回收部分显热和大量潜热。

协同方案 C：先实施本体增效（使锅炉效率达 90%，排烟温度 145℃），再在此基础上，针对降低后的排烟温度与流量，优化设计冷凝换热器（规模可减小），并考虑将部分回收热量用于预热燃烧空气，形成闭环。

模拟计算表明（见表 1），协同方案 C 的系统总能源利用率（ η_{sys} ）显著高于 A、B 方案简单叠加的效果，投资回收期也由于系统规模的优化和节能效果的叠加而更短，体现了显著的协同经济效益。

表 1 不同改造方案能效与经济效益模拟对比

方案	锅炉热效率	系统总能源利用率（ η_{sys} ）	综合节煤率	增量投资回收期（年）
原状态	87%	87%	基准	-
方案 A	90%	90%	3.45%	约 2.5
方案 B	87%	91.5%	5.17%	约 3.0
方案 C	90%	94.2%	8.28%	约 2.8

参考文献：

- [1] 刘家友.锅炉烟气余热能量置换梯级利用增效机制与实验研究[D].山东:山东大学,2019.
 [2] 苏晓明,李贵.燃煤电厂节能减排改造技术综合评价研究[J].百科论坛电子杂志,2020(21):3570.

6 结论与展望

本文系统论述了燃煤燃烧设备能效提升与余热梯级利用之间的协同增效机制。研究表明：

本体能效提升与余热梯级利用之间存在深刻、双向的协同关系。本体增效通过优化余热品质、稳定参数、减少流量，为高效余热回收奠定了基础；而深度、梯级的余热利用则通过能量反馈和辅助功能替代，进一步降低了系统总能耗，两者相互促进，产生“协同红利”。

系统集成优化是实现协同增效的关键。必须超越单一设备或技术的局限，从全系统能量流的角度进行整体设计、仿真与优化，匹配各环节的技术参数，才能实现全局能效最大化。

协同方案具有显著的能源、经济与环境综合效益。案例模拟表明，协同改造路径能够在合理投资回收期内，实现比孤立改造更高的系统总能源利用率和更全面的节能减排效果。

展望未来，随着数字孪生、人工智能优化算法、更高性能的换热与储能材料等技术的发展，燃煤系统的协同增效将向着更加精细化、智能化和动态优化的方向发展。未来研究应进一步关注：

多能互补系统（煤、气、生物质、光热）中的协同机制。

考虑碳捕集、利用与封存（CCUS）集成下的系统能耗优化。

基于实时大数据与机器学习的自适应协同运行控制策略。

推动燃煤工业系统向高效、清洁、低碳、智能方向转型，深入理解和应用协同增效机制，是实现这一目标的必由之路。