

Energy saving technology for thermal power engineering in thermal power plants

Xueliang Yang

Hebei Xibaipo Power Generation Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050400, China

Abstract

This article focuses on energy-saving technologies for thermal power engineering in thermal power plants. Based on the core position of energy supply in China's thermal power plants and the dual needs of energy conservation, consumption reduction, and environmental protection, the article systematically analyzes the energy conversion principle of thermal power engineering and key loss links such as exhaust, heat dissipation, and condensation. By sorting out four practical energy-saving technologies including advanced frequency regulation, efficient waste heat recovery, precise condensation, and innovative combustion, combined with typical renovation cases of large, medium, and small thermal power plants, the economic and environmental benefits of technology application are quantitatively analyzed. At the same time, the challenges faced by the industry such as technological bottlenecks and cost pressures were discussed, and future development directions such as intelligence and cascade utilization were forecasted, providing theoretical and practical references for thermal power plants to achieve green transformation and support the "dual carbon" goal through technological innovation.

Keywords

thermal power plant; Thermal energy; Power engineering; Energy saving; technology

火电厂热能动力工程节能技术

杨雪亮

河北西柏坡发电有限责任公司, 中国·河北 石家庄 050400

摘要

本文聚焦火电厂热能动力工程节能技术,立足我国火电厂能源供应核心地位与当前节能降耗、环保减排的双重需求,系统剖析了热能动力工程能量转换原理及排烟、散热、冷凝等关键损耗环节。通过梳理先进调频、高效废热回收、精准冷凝、创新燃烧四大类实用节能技术,结合大中小型火电厂典型改造案例,量化分析技术应用的经济与环保效益。同时探讨了行业面临的技术瓶颈、成本压力等挑战,展望了智能化、梯级利用等未来发展方向,为火电厂通过技术创新实现绿色转型、助力“双碳”目标提供理论与实践参考。

关键词

火电厂; 热能; 动力工程; 节能; 技术

1 引言

火电厂作为我国能源供应体系不可或缺的核心支柱,长期承担着全国约70%的电力供应任务,其安全稳定运行直接关乎国民经济的持续健康发展与亿万民众的生产生活保障,在能源结构中占据着不可替代的战略地位。热能动力工程作为火电厂的核心技术支撑体系,贯穿锅炉燃烧、汽轮机做功、余热回收、能量转换等关键生产环节,其能源利用效率的高低直接决定了火电厂的节能降耗水平、经济效益与环保合规能力。尽管历经数十年的技术迭代与升级改造,我国火电厂热能动力工程的整体水平已有显著提升,但当前仍

面临两大亟待破解的核心挑战:一方面,能源浪费问题依然突出,传统火电机组的热能转换效率普遍维持在40%-45%之间,大量宝贵的热能通过排烟、冷却系统排放、设备散热等多个环节白白流失,据行业统计数据显示,全国火电厂每年因各类能量损耗造成的直接经济损失已超过千亿元,节能潜力巨大;另一方面,环境污染压力持续加剧,煤炭在燃烧过程中产生的二氧化硫、氮氧化物及粉尘等污染物,已成为我国大气污染的主要来源之一,随着国家环保政策的不断收紧,超低排放、碳减排等硬性要求对火电厂的清洁生产能力提出了前所未有的严苛标准。在此严峻的发展背景下,加快研发与规模化推广热能动力工程节能技术,已成为火电厂突破发展瓶颈、实现降本增效、推动绿色低碳转型的必然选择,更是助力我国“双碳”目标实现的关键路径。

【作者简介】杨雪亮(1983-),男,中国河北石家庄人,本科,工程师,从事热能动力工程研究。

2 热能动力工程基础探秘

2.1 基本概念与能量转换原理

热能动力工程是一门聚焦热能与机械能相互转换规律及其工程应用的核心技术学科，其理论体系构建于热力学第一定律（能量守恒定律）与第二定律（熵增定律）之上，核心目标是通过科学的技术手段实现能量转换效率的最大化。在火电厂的实际生产流程中，该工程技术的应用遵循着清晰的能量转换路径：首先通过锅炉设备将煤炭等燃料蕴含的化学能充分燃烧转化为热能，使水加热形成高温高压蒸汽；随后高温高压蒸汽进入汽轮机，推动汽轮机转子高速旋转，将热能进一步转化为机械能；最后汽轮机带动发电机运转，将机械能最终转化为电能输送至电网。

值得注意的是，在这一系列能量转换过程中，能量传递需经过燃料→蒸汽→机械功→电能等多次介质转换，而每一次转换环节都不可避免地会伴随能量损耗，理想状态下无损耗的能量转换效率仅存在于理论层面，在实际运行过程中，受设备性能、工艺水平、运行参数等多种因素影响，必须通过持续的技术优化、设备升级与精细化运维，最大限度降低各环节的能量损耗，才能不断提升火电厂的整体能源利用效率。

2.2 常见能量损耗环节及原因

火电厂热能动力系统的能量损耗贯穿生产全流程，其中最主要的损耗环节是排烟热损失，该部分损失占总损耗的50%以上，其主要成因包括锅炉内燃料燃烧不充分、排烟温度过高（传统机组排烟温度多维持在120-150℃）、烟道密封性能不佳导致漏风等，这些问题直接导致大量热能随高温烟气排放至大气中，造成严重浪费；其次是散热损失，锅炉、汽轮机、蒸汽管道等核心设备的表面会向周围环境散发热能，再加上设备保温层长期运行后的老化、破损、脱落等情况，进一步加剧了热能流失，该部分损失约占总损耗的5%-10%；第三是机械损耗，汽轮机、发电机等转动设备在高速运转过程中，轴承摩擦、气流阻力、部件间隙配合不当等因素会导致部分机械能损失，此类损耗约占总损耗的3%-5%，虽占比相对较小，但长期积累仍会影响机组效率；第四是冷凝损失，凝汽器作为汽轮机的关键辅助设备，若存在真空度不足、冷却水温过高、换热面结垢等问题，会导致汽轮机排汽无法充分冷凝，大量热能被冷却水带走，这部分损失约占总损耗的20%-30%，对机组循环效率影响显著；最后是燃烧效率损失，受煤炭品质不均、燃烧配风比例不合理、炉膛结构设计存在缺陷、燃烧器性能老化等多种因素影响，燃料无法在炉膛内完全燃烧，导致部分化学能不能充分转化为热能，该部分损失约占总损耗的5%-8%，直接影响锅炉的热效率与燃料利用率^[1]。

3 实用节能技术大盘点

3.1 先进调频技术

3.1.1 技术原理与作用

先进调频技术是火电机组响应电网频率波动、维持电网安全稳定运行的核心关键技术，其技术原理基于电网频率与有功功率的动态平衡关系，我国电网额定频率为50Hz，当电网因用电负荷变化出现频率偏离额定值时，火电机组需通过调频技术快速调整输出功率，以实现电网频率的实时恢复。该技术的核心作用机制是通过自动化控制系统，快速调整锅炉燃烧强度、汽轮机进汽量等关键运行参数，进而实现机组输出功率的精准、实时调节，确保电网频率稳定在合理区间。除保障电网稳定外，先进调频技术还具备显著的节能价值：通过智能优化机组运行负荷曲线，可有效避免机组长期处于低效运行区间，减少因负荷频繁波动带来的额外能源消耗，同时还能降低机组启停次数，减少启停过程中的能量浪费，实现节能与电网稳定的双重目标，是火电厂提升运行灵活性与经济效益的重要技术手段。

3.1.2 应用案例与节能效果

某百万千瓦级大型火电厂为提升机组调频性能与节能水平，采用了高压缸调门节流调频技术，并与锅炉燃烧自动控制系统进行深度融合优化，通过技术改造实现了机组功率在30%-100%额定负荷范围内的快速、平滑调节，调频响应时间大幅缩短至2秒以内，远超行业平均水平，有效提升了机组对电网频率波动的响应速度与调节精度。改造完成后，该机组在调频工况下的发电煤耗较改造前降低了8g/kWh，按照机组年运行小时数5000小时、额定发电量100万千瓦计算，年节约标准煤约2400吨，按当前市场煤价测算，直接经济效益超过160万元。此外，该先进调频技术的应用还显著减少了机组因负荷剧烈波动带来的设备冲击与损耗，降低了汽轮机叶片、锅炉燃烧器等核心设备的磨损速度，延长了设备使用寿命，减少了设备维护成本与停机检修时间，间接提升了机组的可用率与运行稳定性，实现了经济效益、节能效益与设备运维效益的多重提升。

3.2 高效废热回收技术

3.2.1 技术原理与工作流程

高效废热回收技术是火电厂实现热能梯级利用、降低能源消耗的关键技术之一，其核心原理是通过专用换热设备，对火电厂生产过程中产生的各类余热资源进行回收利用，将原本直接排放的热能转化为可再利用的能量，从而减少化石燃料消耗。该技术的核心设备包括烟气换热器（GGH）、低压省煤器、吸收式热泵、余热锅炉等，其典型工作流程为：首先识别火电厂的主要余热介质，包括锅炉排烟、汽轮机冷却排水、工业废水等，通过管道系统将这些余热介质引入专用换热设备；在换热设备内部，余热介质与

受热介质（如锅炉给水、燃烧所需空气、生活用水等）进行高效热交换，余热介质释放热量后温度降低，受热介质吸收热量后温度升高；随后，被加热的受热介质重新参与火电厂生产流程或其他用途，如加热后的锅炉给水进入锅炉可减少燃料消耗，预热后的燃烧空气可提升燃烧效率，加热后的热水可用于工业生产用汽或区域供暖，实现了热能的梯级利用与资源化回收，从源头减少了能量浪费。

3.2.2 应用效果与环保意义

某 30 万千瓦级火电厂为解决排烟热损失严重的问题，在锅炉尾部加装了低压省煤器用于回收排烟余热，通过技术改造将锅炉排烟温度从原来的 135℃ 降至 90℃，回收的大量热能用于加热汽轮机凝结水，使锅炉给水温度提升了 15℃，有效降低了锅炉的加热负荷。改造完成后，该机组的发电煤耗较改造前降低了 12g/kWh，按机组年运行小时数 5000 小时计算，年节约标准煤约 1800 吨，根据煤炭燃烧排放系数测算，每年可减少二氧化碳排放约 4800 吨，节能减排效果显著。此外，排烟温度的降低还带来了额外的环保效益：低温环境有利于烟气中二氧化硫等污染物的吸附与去除，使锅炉脱硫系统的二氧化硫去除效率提高了 5%，进一步降低了污染物排放浓度，助力电厂实现超低排放目标；同时，余热回收减少了化石燃料消耗，间接减少了煤炭开采、运输过程中的环境影响，对推动火电厂绿色低碳转型、改善区域生态环境具有重要意义，实现了节能与环保的协同发展。

3.3 精准冷凝技术优化

3.3.1 凝气装置的核心作用

凝汽器作为火电厂汽轮机系统的重要辅助设备，其运行状态直接关系到机组的循环效率与能源消耗水平，具有不可替代的核心作用。其主要功能是将汽轮机做功后的低压排汽冷凝为水，形成稳定的真空环境，通过降低汽轮机排汽压力，增大汽轮机进出口的压力差，从而提高汽轮机的做功能力与效率。从能量利用角度来看，凝汽器的冷凝效果直接影响热能向机械能转换的充分性，若凝汽器真空度不足，会导致汽轮机排汽无法完全冷凝，大量热能被冷却水带走，造成严重的能量浪费；反之，良好的真空环境能最大限度回收排汽余热，提升机组循环热效率。行业数据表明，凝汽器真空度每下降 1kPa，火电机组的发电煤耗将上升约 3-5g/kWh，以 60 万千瓦机组为例，每年将多消耗标准煤数千吨，因此，保障凝汽器的高效稳定运行，是火电厂节能降耗的关键环节之一。

3.3.2 优化措施与应用案例

针对凝汽器运行过程中存在的效率不足问题，精准冷凝技术优化主要采取三大关键措施：一是采用高效冷凝管，如钛合金波纹管、不锈钢波纹管等，这类管材具有换热系数高、抗结垢能力强、使用寿命长等优势，能显著提升凝汽器的换热效率；二是优化冷却水系统运行参数，包括合理调整

冷却水流量、控制冷却水温，采用闭式循环冷却系统替代传统开式系统，减少冷却水损耗与热能流失；三是建立常态化清洗维护机制，定期对凝汽器换热面进行化学清洗或物理清洗，去除结垢与杂物，保障换热通道畅通。某 60 万千瓦火电厂为提升冷凝效率，实施了冷凝技术优化改造，更换了全部传统冷凝管为钛合金波纹管，并配套建设了闭式冷却塔优化冷却水循环，改造后凝汽器真空度从原来的 -92kPa 提升至 -96kPa，机组循环热效率提高了 1.2 个百分点，发电煤耗显著下降，经测算年节约标准煤约 3600 吨，按改造总投资 1296 万元计算，投资回收期仅为 1.8 年，不仅实现了显著的节能效益，还提升了机组运行稳定性，降低了设备故障发生率，经济回报十分可观^[2]。

3.4 创新燃烧技术应用

3.4.1 新型燃烧技术的特点与优势

创新燃烧技术以提升燃烧效率、减少污染物排放为核心目标，针对传统燃烧技术存在的燃烧不充分、污染物生成量大等问题，通过技术创新实现了突破性发展，主要包括循环流化床燃烧技术（CFB）、低氮燃烧技术、富氧燃烧技术等主流类型。其中，循环流化床燃烧技术通过炉膛内物料的循环燃烧，使燃料与空气充分接触，燃烧效率可达 98% 以上，且能灵活适应劣质煤、煤矸石等低品位燃料，大幅降低燃料成本；低氮燃烧技术通过优化燃烧空气配比、调整燃烧器结构设计、采用烟气再循环等方式，抑制氮氧化物生成，可将氮氧化物排放浓度控制在 50mg/m³ 以下，满足超低排放要求；富氧燃烧技术则通过提高燃烧空气中的氧气浓度（通常从 21% 提升至 30%-40%），强化燃料燃烧反应，减少烟气排放量，降低排烟热损失，同时便于二氧化碳捕集，为碳减排提供支撑。这些新型燃烧技术的共同优势在于实现了燃烧效率与环保性能的协同提升，既降低了能源消耗，又减少了污染物排放，契合火电厂绿色转型的发展需求。

3.4.2 应用成效

某 20 万千瓦火电厂原有传统煤粉锅炉存在燃烧效率低、污染物排放超标的问题，为解决这一困境，电厂实施了燃烧系统改造，将传统煤粉锅炉改造为循环流化床锅炉，并配套安装了低氮燃烧器，构建了高效清洁燃烧系统。改造完成后，机组燃烧效率从原来的 92% 大幅提升至 98.5%，燃料燃烧更加充分，发电煤耗降低了 25g/kWh，按机组年运行小时数 4000 小时计算，年节约标准煤约 5000 吨，直接降低燃料成本超 300 万元。在环保效益方面，改造后氮氧化物排放浓度从原来的 300mg/m³ 降至 45mg/m³，二氧化硫排放浓度通过炉内脱硫系统降至 50mg/m³ 以下，均远低于国家超低排放标准，无需额外建设 costly 的脱硫脱硝辅助设施，大幅降低了环保投入与运行维护成本。该案例充分证明，创新燃烧技术的应用不仅能实现显著的节能降耗效果，还能有效破解火电厂的环保压力，为老旧机组改造提供了可行的技术路径^[3]。

4 结语

火电厂热能动力工程节能技术的研发与推广应用,是我国实现能源节约、推动电力行业绿色低碳转型的关键举措,对保障能源安全、改善生态环境、助力“双碳”目标实现具有重要战略意义。从实践效果来看,先进调频技术、高效废热回收技术、精准冷凝技术、创新燃烧技术等核心节能技术的规模化应用,已充分证明通过多环节协同改造,能够显著降低火电厂发电煤耗与污染物排放,其中大型火电厂通过组合式节能改造,年节煤量可达数万吨,直接经济效益超数千万元,小型火电厂则可通过低成本、易实施的节能方案,在控制投入的同时实现能耗与排放的双重改善,效益提升显著。未来,需进一步强化政府、企业与科研院校的协同

合作,针对不同规模、不同类型火电厂的实际需求定制个性化技术方案,加大节能技术研发投入,推动智能化调控、余热梯级利用、富氧燃烧与碳捕捉一体化等新技术的迭代升级与市场化推广,持续提升火电厂能源利用效率与清洁生产水平,为我国能源可持续发展筑牢坚实基础。

参考文献

- [1] 杨小宁.火电厂热能动力工程中的节能技术研析[J].电力设备管理,2025,(08):260-262.
- [2] 张恒超,徐晓妮.热能与动力工程中的节能技术研究[J].中国设备工程,2025,(05):227-229.
- [3] 杨辉.火电厂热能动力工程中的节能技术研究[C]//中国电力设备管理协会.全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集(一).国能重庆电厂有限公司,2024:287-289.