火电厂节能技术探讨

杨春波
云南华电昆明发电有限公司　云南　昆明　650308

摘　要：本文围绕火电厂全流程能耗核心环节展开系统性梳理，明确主体发电系统与辅助运行系统的能耗分布特征，量化各核心损耗环节的占比与能效优化潜力。从锅炉、汽轮发电机、辅助系统三大维度，逐一拆解当前行业主流的成熟节能技术的作用机理、工程落地路径与实际应用价值，针对性覆盖燃烧优化、余热回收、通流改造、辅机调速等核心技术方向，可为火电厂开展系统性能效提升改造、降低供电煤耗与厂用电率提供完整的技术参考体系，支撑火电行业低碳转型目标落地。

关键词：火电厂；能耗分析；节能技术；系统优化；设备改造

引言：在我国构建新型电力系统、推动火电行业低碳深度转型的行业背景下，火电厂作为当前电力供应体系的核心支撑，其能效水平直接决定全国电力生产的整体能效底线。当前国内大量在运火电机组普遍存在长期调峰运行、设备老化、运行参数匹配度不足等问题，各类无效能耗持续推高机组供电煤耗，行业能效提升需求迫切。本文从火电厂全生产流程的能耗分布特征切入，系统性梳理各核心能耗环节的成因与优化空间，全面拆解当前主流成熟节能技术的应用逻辑与工程路径，为火电厂开展定向能效升级提供专业技术支撑。

1 火电厂能耗核心环节分析

火电厂作为我国电力供应体系的核心支撑，其能耗水平直接决定了电力生产的能效底线，开展系统性的节能技术研究，是推动火电行业低碳转型、降低供电煤耗的核心路径。从生产流程的能耗分布特征来看，火电厂整体能耗主要集中在主体发电系统与辅助运行系统两大板块，各环节能耗成因具有明显的差异性，不同环节的能效优化空间也呈现出显著区别。（1）在主体发电系统中，锅炉侧的能耗损失占比最高，其中煤粉燃烧配风参数匹配偏差导致的不完全燃烧损失、尾部排烟温度过高造成的余热流失，是长期存在的核心能耗来源，这两类损失在锅炉总热损失中的占比可超过60%。汽轮机侧的能耗则主要源于调门节流损失、通流部分级间间隙泄漏、蒸汽在换热与输送过程中的不可逆损耗，这类损失直接降低了蒸汽热能向机械能的转换效率，是影响机组循环热效率的关键因素。上述环节的能量损失占全厂总能量损失的70%以上，是能效提升的核心攻坚方向。（2）在辅助运行系统中，水泵、风机等大容量辅机设备长期偏离设计工况运行、调速方式适配性不足导致的低效运行，汽水、风烟系统管路布局不合理引发的阻力损耗，以及冷端系统换热面结垢、循环水参数匹配不当造成的换热不佳等问题，会在机组全运行周期内产生持续性的无效能耗。这类辅机系统的能耗占机组厂用电总量的80%左右，长期累积下来会推高整体供电能耗水平。（3）整体来看，火电厂多数能耗均源于设备运行状态不佳、运行参数匹配不合理、不同品位能量回收利用不充分，通过针对性的技术改造与运行优化，可大幅降低各类无效能耗，提升机组整体运行效能，最终实现供电煤耗与厂用电率的双重下降[1]。

2 锅炉系统节能技术

2.1 锅炉燃烧优化技术

锅炉是火电厂燃料化学能向蒸汽热能转换的核心承压设备，其燃烧效率直接决定入炉燃料的整体利用水平，燃料不完全燃烧是当前锅炉系统运行中最突出的能耗损耗来源。锅炉燃烧优化技术的核心逻辑是通过动态调整风煤配比、分级优化配风层级、精准调控全炉膛燃烧工况，让入炉燃料实现充分、稳定的定向燃烧，最大程度减少化学不完全燃烧、机械不完全燃烧带来的无效热量损耗。该技术落地过程中，核心是依托在线煤质分析装置的实时数据，根据入炉燃料的低位热值、煤粉颗粒细度的动态变化，同步调整一次风、二次风的送入量与风速配比，既避免过量送风造成的排烟热损失攀升，又防止风量不足引发的飞灰、炉渣含碳量超标。同时通过全炉膛燃烧工况的均衡调控，重构炉膛内部温度场分布，消除局部高温偏烧、局部低温熄火的异常区域，进一步降低燃料燃尽损失，提升水冷壁对炉膛辐射热的吸收效率，从源头削减锅炉侧的燃料无效消耗[2]。

2.2 余热回收利用技术

锅炉尾部排出的烟气携带大量150℃以下的低温余热，是火电厂运行过程中占比最高的余热损耗形式，也

是当前技术成熟度最高、可回收利用价值最突出的能耗优化环节。余热回收利用技术主要针对锅炉排烟、烟道烟气中的残余热量开展深度梯级回收，通过在尾部烟道适配加装高效耐腐蚀换热装置，对排出烟气中未被利用的残余热量进行二次定向利用。常规工程技术路径为通过在空预器后设置低温省煤器、烟气-空气换热器等专用设备，利用排烟携带的余热加热回热系统中的低温凝结水与锅炉入口助燃空气，直接减少锅炉侧加热给水、预热助燃空气所需的燃料消耗量。同时配套开展烟道密封结构优化改造，降低全烟道漏风率，减少外界冷空气侵入造成的余热稀释与无效热量损耗，最大化回收烟气中的残余热量，最终提升全厂热力系统的整体热量循环利用率。

2.3 锅炉设备增效改造技术

锅炉经过长期连续运行后，普遍会出现受热面结焦积灰、核心部件磨损、密封件老化等共性问题，直接导致受热面换热系数大幅衰减，系统换热效率下降，最终引发锅炉运行能耗异常升高。锅炉设备增效改造技术主要围绕锅炉受热面、燃烧核心设备、全炉密封结构三大核心模块开展定向优化升级。一方面，通过加装声波+脉冲组合式高效吹灰装置、针对性优化受热面管束排布结构，彻底清除受热面表面积灰与熔融结焦，恢复受热面原设计换热系数，保障烟气侧热量向工质侧的高效传递；另一方面，对锅炉炉墙、尾部烟道、各类人孔门等密封薄弱部位开展柔性密封改造，大幅降低漏风、漏热问题，减少炉膛内部的无效热量散失。此外，对原有燃烧器结构进行升级优化，提升煤粉燃料的雾化与扩散效果，适配不同煤种的波动工况，进一步提升锅炉整体的燃烧与换热效率。

3 汽轮发电机系统节能技术

3.1 汽轮机通流部分优化技术

汽轮机是火电厂中将锅炉输出的高温高压过热蒸汽的热能向转子旋转机械能转换的核心动力设备，其通流部分的各类不可逆损耗是汽轮机系统运行过程中占比最高的能耗来源，具体涵盖叶栅型线流动损失、调门非全开工况下的节流损失、末级排汽余速损失等多个核心维度，这类损耗会直接削减蒸汽的有效做功能力，是制约汽轮机组缸效提升的核心瓶颈。汽轮机通流部分优化技术的核心实施路径，是对汽轮机全缸内部的动叶片、静喷嘴、各级动静叶之间的通流间隙开展系统性升级改造，采用当代先进的气动设计体系重新设计全级叶片的三维气动线型与匹配气动参数，改善蒸汽在全通流流道内的流动状态，精准削减蒸汽流经叶栅过程中产生的通道涡流、边界层摩擦与局部节流损耗。同时通过精细化调整动静叶顶部的径向通流间隙，在不触碰动静部件碰摩安全阈值的前提下，大幅降低级间蒸汽的内泄漏损失，提升蒸汽在各级叶片中的有效做功利用效率，让蒸汽携带的热能最大程度转化为转子旋转机械能，减少蒸汽能量的无效耗散，根据国内机组改造实测数据，该技术可让汽轮机各缸内效率提升2至5个百分点，最终实现机组整体循环热效率的显著提升[3]。

3.2 机组冷端系统优化技术

汽轮机冷端系统是连接汽轮机排汽侧与循环水系统的核心单元，主要包含凝汽器、自然/机械通风冷却塔、循环水泵组等核心设备，冷端系统的实际运行状态直接决定汽轮机排汽压力与系统真空度，是影响汽轮机组整体做功效率的关键边界条件。机组冷端系统优化技术主要通过精细化调控循环水运行工况、优化冷却塔换热条件、提升凝汽器换热性能三个核心路径实现节能降耗。依托机组实时负荷与环境温湿度数据动态匹配循环水泵的运行台数与转速，避免高负荷供水、低负荷工况下的冗余电能消耗；同时定期清理凝汽器换热管内的结垢与附着物，优化冷却塔填料区的配水结构，消除配水不均导致的换热死区，有效降低凝汽器端差，提升机组真空运行稳定性，减少汽轮机排汽侧的无效热量损耗，最终提升整个汽轮发电机组的循环热效率。

3.3 发电机能效优化技术

汽轮发电机是将汽轮机输入的旋转机械能转化为可外送电能的核心终端设备，运行过程中会持续产生定子绕组铜损、定子铁芯铁损、转子风摩损耗等多类固有电气与机械损耗，机组长期偏离设计工况低效运行时，这类损耗会进一步攀升，造成大量本该外送的电能被无效消耗。发电机能效优化技术主要围绕削减发电机本体固有损耗、动态匹配机组最优运行工况两大核心方向落地。通过对发电机空冷或氢冷冷却系统开展精细化优化调整，均衡定子绕组与铁芯的全域温度分布，降低高温工况下导体电阻上升引发的额外损耗；同时依托励磁系统的闭环动态调控，根据机组实时负荷精准匹配励磁电流参数，避免励磁过量或不足引发的运行效率下降。此外优化发电机内部通风流道结构，降低通风阻力损耗与冷却风扇无用功耗，在完全保障发电机安全稳定运行的前提下，最大限度削减各类电气与机械损耗，提升机械能向电能的转换效率[4]。

4 辅助系统节能技术

4.1 辅机变频调速节能技术

火电厂配置的引风机、送风机、循环水泵、空压机

等各类辅机设备，传统设计多采用工频恒速运行模式，在机组调峰导致负荷变动时，普遍依靠入口挡板、出口阀门的开度变化实现流量调节，这种节流调节方式会产生大量不可逆节流损耗，造成辅机侧的无效电能浪费。辅机变频调速节能技术通过在辅机电机供电回路加装高压变频调控装置，根据机组实时负荷、介质流量、管网压力的动态需求，闭环动态调整辅机电机的运行转速，完全替代传统的挡板、阀门节流调节方式。该技术可从根源消除传统调节模式下的节流损耗，让辅机实时出力与系统实际需求精准匹配，彻底避免设备长期满负荷空转、偏离高效区低效运行的问题，相关工程实测数据显示，工况波动较大的辅机改造后可实现20%~50%的节电率，大幅降低辅机系统的厂用电消耗，是当前火电厂辅助系统应用最广泛、节能收益最突出的主流节能技术之一。

4.2 管道系统节能优化技术

火电厂内部的汽水管道、烟风管道覆盖全厂所有生产系统，管道运行过程中产生的沿程阻力、局部阻力、表面散热、介质内漏外漏是长期被忽略的隐蔽性能耗的主要来源。管道系统节能优化技术体系主要包含管道阻力优化与管道保温优化两个核心技术方向。管道阻力优化通过精准校核管道设计流速重新匹配适配管径、调整管路走向减少不必要的弯头与变径、更换磨损老化导致通流截面缩减的管路、定期清理管道内壁沉积的污垢与腐蚀产物，全方位降低介质在管道内的流动阻力，从根源减少水泵、风机驱动介质输送的无用功耗。管道保温优化通过更换导热系数更低的高效保温材料，修复管道表面破损脱落的原有保温层，严格按照规范设置潮湿区域的防潮层，大幅减少管道内高温介质的表面散热损耗，避免热能通过管壁向环境无效流失，最终提升全厂热力系统的整体热量利用率。

4.3 循环水系统优化技术

循环水系统是火电厂保障凝汽器、冷油器等核心冷却设备长期稳定换热的关键公用系统，承担着汽轮机排汽冷凝、各类辅机运行介质降温的核心功能，其运行功耗占全厂辅机总功耗的比例长期处于较高水平，传统固定台数运行模式下，系统工况与机组实际冷却需求匹配度低，是该环节最突出的能耗短板。循环水系统优化技术主要通过系统运行模式动态调控、设备运行组合智能匹配、水质处理方式定向优化三大核心路径实现系统性节能降耗。依托不同季节的环境温湿度、循环水进水温度以及机组实时负荷的多源数据，构建闭环调控逻辑动态调整循环水泵的运行台数与变频运行参数，实现循环水流量的按需精准供给；通过优化阻垢缓蚀的水质稳定处理工艺，减少循环水管道与凝汽器换热管内的结垢、腐蚀产物沉积，长期稳定换热设备的换热效率，同步降低系统沿程运行阻力与设备输送能耗，在完全满足机组各冷却设备设计换热裕度的前提下，最大限度降低循环水系统的整体运行能耗[5]。

结束语

综上，火电厂的能效提升是一项覆盖全生产流程的系统性工程，并非单一技术改造即可实现最优效果。从锅炉侧的燃烧与余热回收优化，到汽轮发电机侧的通流与冷端性能升级，再到辅助系统的辅机、管道、循环水精细化调控，各环节的节能技术相互协同，才能最大化挖掘机组的能效潜力。未来随着火电调峰深度持续提升，全工况动态能效优化将成为行业核心发展方向，通过多技术的融合应用，可持续推动火电机组供电煤耗与厂用电率稳步下降，在保障电力供应稳定的前提下，助力火电行业实现低碳高效的高质量发展。

参考文献

[1]王勇.火电厂锅炉运行中节能降耗技术的应用方法探讨[J].中文科技期刊数据库（引文版）工程技术,2026,(2):071-074

[2]闫海行.火电厂集控运行中节能减排技术的探讨与实践研究[J].中文科技期刊数据库（文摘版）工程技术,2026,(2):123-126

[3]刘万金.火电厂热能动力工程中的节能技术研究[J].中国科技期刊数据库 工业A,2026,(3):122-125

[4]柳杰.火电厂集控运行中电气系统节能优化策略研究[J].中国科技期刊数据库 工业A,2026,(1):185-188

[5]朱婷,刘继丰,易洪春.火电厂水处理革新:紫外线杀菌设备的安装、运行及其效益[J].中国高新科技,2026,(2):56-58.