

超临界汽轮机热力系统效率优化研究

刘 斌 宁尚雪

新疆皖能江布发电有限公司 新疆 昌吉 831100

摘要: 本文系统梳理了超临界汽轮机热力系统的基本构成与热力学特性,深入分析了影响其效率的关键因素,重点探讨了回热系统优化、主蒸汽参数提升、汽轮机通流部分改进、热力系统集成与智能控制等核心优化技术。通过典型660MW超临界机组的案例分析,验证了多维度协同优化策略在提升热效率方面的显著效果。研究表明,通过参数协同设计、先进材料应用与智能化运行管理,可将超临界机组热效率提升1.5–2.5个百分点,年节煤量可达数万吨,具有显著的经济与环境效益。最后,本文对超临界汽轮机热力系统未来在700℃先进超超临界技术、数字化孪生、灵活性运行等方面的发展趋势进行了展望。

关键词: 超临界汽轮机; 热力系统; 热效率; 回热系统; 通流优化; 智能控制

引言

全球气候变化加剧,减少化石能源消耗、降低温室气体排放成国际共识。中国作为最大能源消费和碳排放国,提出“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”目标。电力行业是碳排放主要来源之一,燃煤发电虽受可再生能源冲击,但未来仍承担基荷电源角色,提升燃煤机组效率、降低供电煤耗是关键。超临界与超超临界发电技术基于热力学原理,提高蒸汽参数以提升效率。超临界汽轮机热力系统是复杂耦合系统,整体热效率受多重因素影响。对它进行系统性效率优化,有重要理论与工程意义。本文旨在系统研究其效率优化路径,从热力学原理出发,结合工程实践提出多维度协同优化策略,为提升我国高效清洁煤电技术水平提供参考。

1 超临界汽轮机热力系统概述

1.1 基本构成与工作流程

超临界汽轮机热力系统以改进的朗肯循环为基础,其典型流程如下:(1)锅炉系统:给水在超临界压力(通常为24–28MPa)下被加热至高温(570–620℃),直接转化为高温高压蒸汽,无相变过程。(2)汽轮机系统:高温高压蒸汽依次通过高压缸(HP)、中压缸(IP)和低压缸(LP)做功,驱动发电机发电。做功后的乏汽进入凝汽器。(3)凝汽系统:乏汽在凝汽器中被冷却水冷凝为凝结水,维持汽轮机排汽端的高真空度,以最大化做功能力。(4)回热系统:从汽轮机各级抽汽口引出部分蒸汽,用于加热凝结水和给水,形成多级回热加热(通常为7–9级),减少锅炉吸热量,提高循环效率^[1]。(5)给水系统:凝结水经低压加热器、除氧器、高压加热器逐级加热后,由给水泵升压送回锅炉,完成循环。

1.2 热力学特性分析

超临界状态下,水与蒸汽的物理性质发生显著变化:密度连续变化、无明显汽液相界面、比热容出现峰值(拟临界区)。这些特性对锅炉传热、汽轮机流动与换热产生重要影响。从热力学角度看,超临界机组效率提升主要源于:(1)提高平均吸热温度:主蒸汽温度每提高10℃,理论循环效率可提升约0.25–0.3%。(2)降低排汽熵增:更高的初参数使膨胀线更靠近理想等熵线,减少不可逆损失。(3)优化回热匹配:高温抽汽可更高效地加热给水,减少冷源损失。典型参数对比显示:亚临界机组(17MPa/540℃)热效率约38%,超临界机组(25MPa/570℃)可达42–44%,而超超临界机组(30MPa/600℃)可突破46%。

2 影响热力系统效率的关键因素

2.1 主蒸汽参数

主蒸汽压力与温度是决定循环效率的首要因素。然而,参数提升受限于材料耐温耐压性能与制造成本。目前主流超临界机组主蒸汽温度为570–580℃,超超临界可达600–620℃。

2.2 回热系统配置

回热级数、抽汽点位置、加热器端差(上端差、下端差)直接影响给水温度与锅炉吸热量。端差每增加1℃,供电煤耗约增加0.5–1.0g/kWh。

2.3 汽轮机内效率

包括高压缸效率(通常88–92%)、中压缸效率(90–93%)、低压缸效率(85–89%)。影响因素包括:叶型设计与通流间隙、湿蒸汽损失(低压缸)、漏汽损失、轴封系统性能。

2.4 凝汽器真空度

凝汽器压力每降低1kPa, 热耗率可降低约1.5–2.0%。真空度受冷却水温、凝汽器清洁度、真空系统严密性影响。

2.5 辅机能耗

给水泵、循环水泵、引风机等辅机耗电占厂用电率10–15%, 其效率直接影响净输出效率。

3 热力系统效率优化关键技术

3.1 回热系统精细化优化

精细化优化首先体现在抽汽参数的匹配上。通过完整热平衡计算与焓分析, 可以重新分配各级抽汽量, 使加热器之间的温升分布更加均匀, 避免局部过热或加热不足, 从而减少系统内部的不可逆损失。例如, 适当提高高压加热器出口给水温度, 可有效降低锅炉省煤器区域的吸热量, 使更多热量集中在高温辐射区, 提升锅炉整体热效率。加热器本体性能的提升同样至关重要。采用双流程U型管结构配合高效传热管(如T型管或H型翅片管), 可显著增强传热系数, 缩小端差^[2]。同时, 优化疏水系统设计, 减少疏水在闪蒸过程中的能量损失, 也是提升回热效率的有效手段。近年来, 部分先进机组开始引入“0号高压加热器”, 利用再热冷段或热段蒸汽对给水进行额外加热, 使其温度突破300℃, 进一步逼近锅炉入口理想状态, 已在660MW超超临界机组中取得良好应用效果。

3.2 主蒸汽参数协同提升

在材料技术允许的范围内, 主蒸汽温度的提升对效率的贡献远大于压力提升。这是因为温度直接影响循环的平均吸热温度, 而压力提升带来的效率增益存在边际递减效应。例如, 将主蒸汽温度从570℃提升至600℃, 理论上可使热效率提升约1.2个百分点。然而, 这一提升必须依赖于新型高温合金材料的应用, 如奥氏体不锈钢Super304H用于过热器, 镍基合金Inconel740H用于更高温度区域。材料的高温蠕变强度、抗氧化性及焊接工艺稳定性成为制约参数进一步提升的关键瓶颈。因此, 主蒸汽参数的优化必须与材料研发、制造工艺及寿命评估协同推进, 实现安全、经济与高效的统一。

3.3 汽轮机通流部分优化

汽轮机通流优化是提升内效率的核心。现代设计采用全三维CFD优化弯扭叶片, 抑制二次流与尾迹损失; 高压缸效率可提升0.5–1.0%。先进密封(如蜂窝、刷式汽封)将漏汽率控制在1.5%以下; 低压缸采用1150mm以上长末级叶片并辅以激光熔覆抗水蚀处理, 降低排汽损失。通流改造通常涵盖“三缸联动”整体优化策略:

(1) 高压缸: 除更换全三维弯扭静/动叶外, 还需优化

进汽室流道, 减少节流损失; 对调节级进行特殊强化设计, 以应对启停和变负荷过程中的热冲击; (2) 中压缸: 重点在于再热蒸汽入口结构优化, 避免流动分离, 并采用双层缸结构以减小热应力; 同时, 合理布置隔板汽封, 防止高温蒸汽沿转子轴向窜流; (3) 低压缸: 除末级叶片升级外, 还需优化排汽导流环与蜗壳型线, 改善排汽均匀性, 降低背压波动; 对于沿海或湿冷机组, 增设去湿装置(如捕水环)可有效减少湿蒸汽对后续级的冲蚀。此外, 通流改造需结合机组实际运行数据开展“定制化”设计。例如, 针对长期低负荷运行的机组, 应适当调整各级反动度分布, 扩大高效区范围; 对于频繁启停机组, 则需兼顾热疲劳寿命与气动性能^[3]。

3.4 热力系统集成与余热利用

系统集成视角下的余热深度利用是效率优化的延伸方向。例如, 给水泵汽轮机(小机)的排汽通常被排入凝汽器, 造成能量浪费。若将其引入除氧器或低压加热器, 可替代部分主汽轮机抽汽, 提高系统整体焓效率。值得深入分析的是, 小机排汽具有中等焓值(典型排汽温度约150–180℃, 压力0.4–0.6 MPa), 其热品位明显高于凝结水温度(通常30–50℃), 但低于主汽轮机高压或中压抽汽。在传统设计中, 小机排汽直接排入凝汽器, 不仅损失了这部分可用能, 还增加了凝汽器热负荷, 间接导致真空恶化、循环水泵功耗上升。将小机排汽引至除氧器或#5/#6低压加热器, 可在不增加锅炉燃料的前提下提升给水温度。尤其在机组参与深度调峰运行(如负荷降至40%以下)时, 主汽轮机高、中压缸抽汽量显著减少, 回热系统加热能力下降, 给水温度偏低成为制约效率的关键因素。此时, 小机排汽作为稳定的辅助热源, 可有效“补位”, 维持回热系统热平衡, 避免因低负荷下端差增大而导致煤耗飙升。此外, 锅炉尾部烟气余热回收(如加装低温省煤器)可将排烟温度从120℃以上降至90℃以下, 每降15℃, 煤耗约减1 g/kWh。在供热区域, 热电联产通过抽汽供热实现电热联产, 综合能效可超70%, 显著优于纯凝工况。

3.5 智能化运行与控制优化

随着数字化技术的发展, 智能化运行已成为效率优化的新范式。滑压运行策略的优化是其中典型代表。传统定压运行在部分负荷下效率显著下降, 而滑压运行通过动态调整主蒸汽压力, 使汽轮机在变负荷工况下仍能维持较高的通流效率。通过建立精确的变工况热力模型, 可生成最优滑压曲线, 并嵌入DCS系统实现自动控制。更进一步, 基于实时数据的性能监测与诊断系统正在广泛应用。通过构建热力系统的数字孪生模型, 可在

线计算各设备的实际效率、端差、热耗率等关键指标,自动识别性能劣化点,如加热器结垢、凝汽器脏污或汽封磨损等,为检修决策提供依据^[4]。在此基础上,模型预测控制(MPC)或强化学习等先进算法被用于开发智能优化控制系统,能够动态协调抽汽阀门、凝汽器真空、给水温度等多个自由度,在满足负荷需求的同时实现全局热效率最优。这种“感知-分析-决策-执行”的闭环优化机制,标志着热力系统运行从经验驱动向数据驱动的根本转变。

4 案例分析:某660MW超临界机组效率优化实践

某电厂660MW超临界机组原设计主蒸汽参数为25.0MPa/570℃/570℃,采用“3高4低1除氧”共8级回热系统,设计热效率为42.5%,供电煤耗为295g/kWh。在运行数年后,机组效率出现缓慢下降,亟需系统性优化。优化工作首先聚焦于回热系统。通过对热平衡数据的深入分析,发现#3高压加热器端差偏大(2.5℃),传热效率偏低。为此,将其传热管更换为T型高效传热管,并优化疏水流程,使端差降至0.8℃。同时,重新核算各级抽汽压力分配,适当提高#1至#3高加的抽汽份额,使给水温度由285℃提升至292℃,有效降低了锅炉吸热量。其次,对汽轮机通流部分实施改造。高压缸全部更换为全三维弯扭叶片,并在轴封处应用蜂窝汽封技术,显著减少了漏汽损失。低压缸则将末级叶片由1030mm延长至1150mm,并对叶片表面进行激光熔覆处理,以应对高湿度环境下的水蚀问题。最后,部署智能化运行系统。基于DCS历史数据构建热力性能在线监测平台,实时计算热耗率与设备效率;同时,根据负荷变化动态调整主蒸汽压力,实施优化后的滑压运行策略。优化后机组热效率提升至44.3%,供电煤耗降至283g/kWh,高压缸效率提高1.8个百分点。按年利用小时5500计算,年节约标准煤约4.8万吨,减少二氧化碳排放约12.5万吨,项目投资回收期约为3.2年,经济效益与环境效益显著。

5 挑战与未来展望

超临界技术虽取得长足进步,但仍面临诸多挑战。材料瓶颈是700℃先进超超临界技术商业化的核心阻碍,

镍基高温合金成本高、工艺复杂,部件寿命预测模型也不完善。热力系统高度耦合,多目标优化难度大,传统设计方法难以兼顾全工况性能。新能源高比例接入,煤电机组频繁深度调峰,启停次数增加使热应力疲劳加剧,长期运行效率难维持。未来,超临界汽轮机热力系统发展将多维度融合。700℃CA-USC技术是提升效率的终极路径之一,多国正推进示范项目建设,目标热效率超50%。数字化与智能化将深度融合,构建全生命周期数字孪生平台,实现预测性维护与自主优化。适应新型电力系统,灵活性与效率协同优化成研究重点,“热电解耦”技术可提升调峰能力、避免效率下滑。长远看,超临界机组将与多种技术集成,向近零、负碳排放演进,发挥能源转型压舱石作用。

6 结语

本文研究表明,回热系统的精细化设计与加热器性能提升是成本效益最高的优化路径;汽轮机通流部分采用先进气动与密封技术,可显著提升内效率;主蒸汽参数在材料允许范围内适度提升,对效率贡献显著;而智能化运行控制则能实现全工况高效运行,尤其在变负荷条件下优势突出。通过多维度协同优化,超临界机组热效率可提升1.5至2.5个百分点,年节煤量达数万吨,兼具经济与环境双重价值。未来,随着700℃材料技术突破、数字孪生平台普及及多能互补系统发展,超临界汽轮机热力系统将在高效、灵活、低碳方向持续演进,为构建安全、清洁、高效的现代能源体系提供坚实支撑。

参考文献

- [1]李明.基于超临界参数的汽轮机热力系统优化方法研究[J].电工技术,2025,(15):170-172+175.
- [2]王婧,杨金福,段立强,等.高参数超超临界燃煤机组汽轮机热力系统优化设计[J].发电技术,2021,42(04):480-488.
- [3]税杨浩.超高温超超临界汽轮机热力系统的参数优化[D].中国石油大学(北京),2020.
- [4]沈春,邵罡北.超超临界机组汽轮机热力性能优化设计探讨[J].发电设备,2022,36(05):350-354.