火电厂汽轮机运行中的热效率提升策略

张超洋

国电电力邯郸东郊热电有限责任公司 河北 邯郸 057550

摘要: 火电厂汽轮机运行中的热效率提升通过实时监控轴向推力、温度梯度等参数,优化启停流程及升速控制,减少非计划停机风险。通过上述措施,火电厂可显著减少汽轮机热量损失,实现煤耗降低2g/kWh以上、碳排放削减15%-20%的综合效益。全流程管理优化与技术创新,火电厂可实现汽轮机热效率的持续提升,兼顾经济效益与低碳发展目标。

关键词: 火电厂汽轮机; 运行中; 热效率提升; 策略

近年来,随着我国经济的快速增长和社会电力在需求上日益提高,我国整体的用电结构正发生着明显的改变,其电网负荷的昼夜峰谷差值也越来越大,导致火力发电厂中汽轮机组不得不参与到电网的调峰运行。然而由于我国正在运行大容量汽轮机组,均是按照基本负荷进行设计的,在当前频繁的启停和变负荷运行情况下,也导致汽轮机在热经济性和安全性上出现了明显降低。

1 火电厂汽轮机提升热效率的基本策略概况

火电厂汽轮机热效率提升可从以下多维度策略综合实施:

1.1 热力循环优化。蒸汽参数控制,提高主蒸汽初参数(压力、温度),增强单位体积蒸汽的做功能力,降低排汽热损失^[4];降低排汽压力(提升真空度),减少循环冷源损失。采用二次再热技术,通过热力系统重构进一步提升蒸汽热能利用率,降低碳排放强度。推广中间再热与给水回热,利用抽汽加热锅炉给水或对高压缸排汽再加热,减少燃料消耗和凝汽器热损失。热电联产,利用抽汽或排汽供热,降低凝汽器乏汽量,实现能量梯级利用,提升电厂综合能效。

1.2 设备设计与制造改进。通流结构优化,采用多级汽轮机设计,合理分配各级焓降并利用余速动能,减少流动损失;优化通流部分间隙及轴封设计,降低蒸汽泄漏损失。应用高效涡轮叶片与先进冷却技术,减少能量损耗并控制叶片温度。

材料与制造工艺升级,采用高强度耐高温材料,提升设备运行可靠性及对高参数蒸汽的适应性。

1.3 运行参数动态调控。抽排汽动态分配,通过抽排汽与双减流量的协同调控,平衡供热与发电需求,稳定温度与压力参数,提升发电量并降低能耗。滑压运行策略,根据负荷变化调整主蒸汽压力,优化高压缸效率与给水泵能耗的匹配关系。

1.4 运维管理强化。定期维护与清洁,清除通流部分结垢、腐蚀,维持设备高效运行;监测凝结水溶解氧含量($\leq 50\text{mg/L}$)并控制振动幅值($\leq 0.03\text{mm}$),防止效率下降。智能监测与诊断,采用数字化手段实时监控热力参数(如轴向推力、温度梯度),优化启停流程及升速控制(如临界转速区域速率 $\leq 200\text{r/min}$),减少非计划停机风险。

2 锅炉燃烧过程优化

2.1 燃料管理优化。动态配煤掺烧,基于历史运行数据动态调整入炉掺烧方案,通过优化燃料配比降低采购成本,同时选择污染更低的配煤组合减少排放。对燃料进行预处理(如脱硫、脱水),减少燃烧过程中的能量损失和污染物生成。燃料与负荷匹配,根据机组负荷和煤种特性实时调整燃料供给量,避免过量或不足导致的燃烧效率下降。

2.2 燃烧过程控制。空燃比精准调控,利用传感器实时监测燃料与空气流量,通过PID或模糊控制算法动态调整空燃比,确保充分燃烧并减少未燃煤粉损失。

控制过剩空气系数(氧量4%-6%),平衡燃烧效率与污染物排放。分级燃烧技术,将燃烧过程划分为多阶段,逐步增加燃料供给,避免局部浓度过高或过低,提升燃烧效率并降低NO_x生成。优化二次风配置,增强湍流混合效果,促进燃料完全燃烧。

2.3 技术创新应用。富氧燃烧与二次燃烧,引入富氧燃烧技术,减少氮气稀释效应,提高燃烧温度及效率;结合二次燃烧技术改造,延长燃料停留时间,提升能量利用率。低氮燃烧优化,采用空气分级、燃料分级等技术抑制NO_x生成,兼顾经济性与环保目标,实现NO_x浓度降低15%的同时锅炉效率提升0.25%。

2.4 智能监测与诊断。实时参数监测,部署火焰检测、烟气分析仪等设备,实时获取炉膛温度场分布、飞

灰含碳量及NO_x浓度数据,指导燃烧动态调整。通过炉膛温度场重建技术优化火焰中心位置,防止局部结焦或燃烧不充分。燃烧控制系统升级,构建以效率、排放和成本为多目标的优化模型,通过算法自动筛选最佳操作参数组合,实现闭环控制。

2.5 系统协同运行。协调锅炉燃烧与汽轮机参数(如主蒸汽温度、压力),确保燃烧优化措施与汽轮机热力循环效率提升形成联动效应。

3 火电厂汽轮机减少热量损失的主要方法

3.1 提升真空系统效率。定期维护真空系统,开展真空严密性试验(每月至少一次),处理漏气点并调整轴封供汽状态。清除凝汽器管道结垢(化学清洗+物理清洗),控制循环水入口压力差,确保真空度提升至-91kPa以上,真空度每提高1kPa可降低煤耗约2g/kWh。优化循环水管理,夏季高温时段启动第二台循环水设备,控制循环水温度稳定在39℃以下,改善凝汽器换热效果。

3.2 优化蒸汽参数与热力结构。蒸汽参数调控,提高主蒸汽压力与温度,降低排汽压力,增强单位蒸汽做功能力,减少冷源热损失。应用中间再热与二次再热技术,重构热力循环系统,减少湿蒸汽损失并提升热能利用率。给水回热系统强化,保持高压加热器(高加)投入率,优化水位控制以稳定传热效率,通过抽汽加热给水降低凝汽器热负荷。

3.3 设备升级与技术创新。高效通流部件设计,采用新型涡轮叶片和流道优化技术减少流动阻力,结合气膜冷却技术降低叶片热损耗。优化轴封设计与通流部分间隙,减少蒸汽泄漏损失。凝汽器与换热器优化,定期清洗凝汽器铜管,控制端差降至2.6℃以下,提升换热效率。

3.4 运行策略与能源综合利用。动态调控供热与发电,通过抽排汽与双减流量协同分配,平衡供热温度与发电需求,减少低温蒸汽排放,降低碳排放强度18%。推广热电联产模式,利用抽汽或排汽供热,减少凝汽器冷源损失,综合热效率可提升至80%以上。

3.5 精细化运维管理。监测与维护,定期检查高加密封性及水室隔板,消除漏点以防止蒸汽短路,确保给水温度稳定。控制凝结水溶解氧含量(≤50mg/L),避免管道腐蚀导致的传热效率下降。

4 智能控制系统应用提高汽轮机转速对热效率的影响分析

4.1 转速与热效率的直接关系。设计转速约束,汽轮机设计时已确定额定转速(如3000r/min),其通流结构、叶片强度及热力循环均围绕此参数优化,超出设计转速可能导致流动损失增加或部件应力超标,导致热效

率下降。转速过高可能打破原有蒸汽流动稳定性,引发振动幅值超标(如双振幅超过0.03mm),增加机械能损耗并降低效率。运行参数匹配,在滑压运行模式下,转速与主蒸汽压力需协同调整:负荷降低时,适当降低主蒸汽压力并匹配转速,可减少高压缸节流损失与给水泵能耗,整体提升热效率。若仅提高转速而不调控压力,反而会导致蒸汽做功能力失衡,降低循环热效率。

4.2 转速优化的可行场景。动态负荷响应,在部分负荷工况下,通过短时提升转速并调整抽排汽分配,可改善汽轮机内部蒸汽流动状态,减少湿蒸汽损失,使热效率提升约0.25%~1%。临界转速避让,启动或变负荷过程中,需严格控制升速速率(如临界转速区域速率≤200r/min),避免共振引发振动超标,确保稳定运行的同时维持热效率。

4.3 转速提升的限制与风险。机械损耗加剧转速过高会加大轴承摩擦损失与涡轮叶片离心力,导致润滑油温上升、密封间隙扩大,加剧蒸汽泄漏(如轴封漏汽率增加0.5%),综合热效率下降。系统协同性下降,转速与锅炉燃烧、凝汽器真空等子系统需联动调控:例如转速提升需同步优化燃烧参数以防止主蒸汽温度波动偏离设计值(如降低100℃导致轴向推力增加15%),否则整体热效率反而受损。提高汽轮机转速对热效率的影响需综合考虑设计约束、运行工况及系统协同性:合理范围内动态调整:在额定转速附近优化操作可实现效率提升;盲目超限风险显著:超出设计转速可能导致机械损耗加剧与热力循环失衡,热效率不升反降。建议结合滑压运行策略与智能监测技术(如实时振动分析),确保转速调整在安全、经济区间内。

5 火电厂汽轮机管理与实践提升热效率的综合性策略

5.1 运行参数精细化调控。主蒸汽参数优化,保持主蒸汽压力与温度在设计范围内,主蒸汽温度每降低10℃会导致高压缸效率下降0.6%,滑压运行模式下需结合负荷动态调整参数,减少高压缸节流损失。控制再热蒸汽压损(≤0.1MPa),避免中压缸效率下降0.8%。真空系统维护,定期开展真空严密性试验(泄漏率≤0.3kPa/min),处理凝汽器漏气点,真空度每提升1kPa可降低煤耗2g/kWh。控制循环水入口压差,夏季高温时启用备用循环水泵,维持凝汽器端差≤2.6℃,提升换热效率。

5.2 设备状态与维护管理。通流部件维护,通过三维流场模拟优化叶片型线匹配,修复受损叶片(粗糙度≤Ra12.5μm)以减少涡耗散。采用蜂窝汽封与刷式密封技术,将汽封间隙控制在设计值的1.5倍以内,降低蒸汽泄漏损失15%~20%。

给水系统管理, 高压加热器(高加)投入率需 $\geq 98\%$, 优化水位控制以减少传热效率损失, 保持给水温度稳定。控制凝结水溶解氧 $\leq 50\text{mg/L}$, 防止管道腐蚀和传热恶化。

5.3 技术创新与改造。热力循环优化, 推广二次再热技术, 重构蒸汽膨胀路径, 减少湿蒸汽损失, 综合热效率可提升1.5%~2.5%。应用低温省煤器回收排烟余热, 降低排烟温度20~30°C, 提升锅炉效率0.8%。材料与工艺升级, 采用抗冲蚀涂层(如纳米陶瓷涂层)延长叶片寿命, 减少水蚀导致的通流面积缩减。实施凝汽器铜管镀膜技术, 延缓结垢速率, 延长清洗周期至6个月以上。

5.4 智能监测与协同运行。数字化诊断系统, 部署缸效率在线监测平台, 实时分析主蒸汽流量、排汽背压等参数, 动态修正滑压运行曲线。建立蒸汽品质三级预警机制(pH值、电导率、硅含量), 预防结垢与腐蚀。多系统协同控制, 联动调控锅炉燃烧参数与汽轮机负荷, 确保主蒸汽温度波动 $\leq \pm 5^\circ\text{C}$, 避免轴向推力异常增加。平衡供热与发电需求, 通过抽汽供热降低冷源损失, 整体热效率提升至80%以上。

6 火电厂汽轮机提升热效率的经济与环境效益

6.1 经济效益。降低燃料消耗与运营成本, 通过优化主蒸汽参数(提升压力与温度)和二次再热技术, 热效率提升后可使煤耗降低2~5g/kWh。例如, 主蒸汽温度每提高10°C, 循环效率可上升0.5%~1%。热电联产模式通过回收低品位热能供热, 综合热效率可达85%以上, 显著减少燃料浪费。延长设备寿命与减少维护成本, 优化汽封系统(如蜂窝汽封改造)可减少蒸汽泄漏15%~20%, 降低机械损耗并延长大修周期至4年以上。控制凝结水溶解氧($\leq 50\text{mg/L}$)和定期清洗凝汽器管道, 可减少腐蚀与结垢, 节省检修费用。提升电能产出收益, 汽轮机通流部件升级(如三维流场优化叶片)可提升出力效率1%~3%, 增加电厂发电量收益。

6.2 环境效益。减少碳排放与污染物排放, 煤耗

降低直接减少CO₂排放, 同时NO_x和SO₂排放量下降15%~20%。热电联产模式通过集中供热替代分散燃煤锅炉, 减少粉尘排放量30%~50%。提高资源利用效率, 回收排烟余热(如低温省煤器技术)可将排烟温度降低20~30°C, 提升锅炉效率0.8%。抽汽供热减少冷源热损失, 能源综合利用率提升至80%以上, 减少水资源消耗。推动绿色可持续发展, 采用抗冲蚀涂层等新材料技术, 延长设备寿命的同时减少金属资源消耗。

6.3 综合效益示例。某机组通过二次再热改造与真空系统优化, 煤耗降低4g/kWh, 年节省燃煤成本约1200万元, 同时减少CO₂排放量超3万吨/年。

火电厂汽轮机热效率的提升可同步实现经济收益最大化与环境负担最小化, 契合低碳发展与高效能源转型需求。未来需进一步推广智能监测与热电联产技术, 强化全流程节能降耗。

参考文献

- [1]高艳敏.火力发电厂汽轮机运行效率优化[J].中国科技投资,2022.
- [2]武龙.火力发电厂汽轮机系统运行优化探析[J].黑龙江科技信息,2023.
- [3]周金.论火力发电厂汽轮机的优化运行[J].科技与企业,2024.
- [4]邓文.火力发电厂汽轮机的优化运行思考[J].科技创新导报,2023.
- [5]朱瑞.火力发电厂汽轮机系统优化策略分析[J].河南科技,2022.
- [6]严凯.发电厂热力系统及设备[M].西安:西安交通大学出版社,2023.
- [7]吕波.汽轮机最佳运行工况的经济性试验分析[J].东北电力大学学报,2020(1).
- [8]刘杰.汽轮机变工况优化运行模式研究[J].陕西电力,2022(7).