

火电厂汽轮机冷端系统节能优化及运行调整研究

胡耀东

内蒙古蒙泰不连沟煤业有限责任公司煤研石热电厂 内蒙古 鄂尔多斯 017100

摘要: 汽轮机冷端系统是火电机组能耗损耗的核心环节,直接影响机组运行经济性与稳定性。本文剖析冷端系统结构原理与能耗特性,结合现场全工况运行数据,梳理设备老化、调控粗放、管理缺失等核心问题,量化各类缺陷的能耗影响权重。针对性提出空冷凝汽器、空冷风机、抽真空系统专项优化方案及多设备耦合调控策略,构建全工况精细化运行体系,有效降低机组热耗与厂用电消耗,为火电节能降耗提供技术参考。

关键词: 火电厂; 汽轮机; 冷端系统; 节能优化; 运行调整

引言: 双碳背景下,火电机组节能降耗、提质增效成为行业发展核心趋势。汽轮机冷端系统作为机组重要辅机体系,换热损耗、辅机低效运行、真空泄漏等问题普遍存在,造成大量能源浪费,制约机组经济运行。为解决传统固定调控模式适配性差、能耗偏高的痛点,本文依托热力数学模型,结合现场实测数据开展问题分析与优化研究,旨在优化冷端运行工况,挖掘机组节能潜力,提升火电机组运行经济性与稳定性。

1 火电厂汽轮机冷端系统结构原理与能耗特性分析

1.1 冷端系统整体结构与工作原理

(1) 系统核心组成: 汽轮机冷端系统为机组重要辅机系统,主要由空冷凝汽器、空冷风机、抽真空系统、凝结水系统等核心设备组成,各设备协同配合,构成完整的排汽冷却与热量散失体系,是保障汽轮机高效运行的基础。(2) 工作运行机理: 系统运行时,汽轮机做功后的低温排汽进入空冷凝汽器,与空气通过翅片管束完成对流换热实现冷凝液化;通过抽真空系统持续抽取内部不凝结气体,维持系统负压环境;吸热后的空气自然排散,凝结水汇集至凝结水箱循环复用,完成全过程热力与空气循环。(3) 系统运行目标: 核心运行目标为维持机组最佳背压参数,最大限度降低空冷风机、真空泵等辅机能耗,减少机组热耗损失,同时规避真空异常、换热失效等故障,保障机组长期安全、稳定、高效运行^[1]。

1.2 冷端系统能耗影响核心参数

(1) 空冷凝汽器参数: 凝汽器背压、端差与翅片管清洁度是核心参数,直接决定机组热耗水平。背压升高会提升汽轮机排汽压力,增加机组做功损耗;端差异常反映换热匹配失衡;翅片管积灰、堵塞导致清洁度下降,会大幅降低换热效率。(2) 空冷系统参数: 空气流量、环境温度及空冷风机运行方式直接影响系统能耗。风量过大将增加风机厂用电消耗,风量不足则换热不充

分;环境温度升高会弱化冷凝效果;不合理的风机组合运行模式会造成能源浪费。(3) 环境与工况参数: 环境温度、风速风向、机组负荷及季节工况会对冷端运行产生动态扰动。高温夏季、机组高负荷工况下,空冷散热能力受限,系统换热效率下降,能耗损耗显著提升。

1.3 冷端系统能耗损失类型与产生机理

(1) 换热损失: 长期运行后空冷凝汽器翅片管积灰、脏污堵塞,会增大换热热阻,降低空气与排汽的热量交换效率,引发不可逆换热能耗损失。(2) 动力能耗损失: 空冷风机、真空泵未根据工况匹配最优运行参数,长期超负荷或低效运行,会造成厂用电无端消耗,是冷端主要动力损耗来源。(3) 真空泄漏损失: 抽真空系统管道、法兰、轴封等密封部位存在缺陷,会引发外界空气渗入,导致系统真空下降,排汽冷凝效率降低,间接增加机组热耗损失。

1.4 冷端系统热力数学模型构建

(1) 空冷凝汽器热力换热模型: 以热量平衡和传热方程为基础,结合排汽参数、空气参数、环境温度,建立凝汽器背压精准计算模型,为背压参数调控提供理论依据。(2) 空冷系统流动与能耗模型: 基于流体力学与风机特性曲线,分析空气流动阻力特性,构建空冷风机能耗与风量匹配数学模型,优化风机运行工况。(3) 空冷系统散热热力模型: 结合变工况散热规律,搭建空冷岛散热效率与排汽背压计算模型,适配不同环境、负荷下的运行仿真分析。

2 火电厂汽轮机冷端系统现存问题及诱因分析

2.1 冷端系统运行现状调研

(1) 目标机组概况: 本文研究对象为配备循环流化床锅炉的抽汽凝汽式空冷机组,机组额定容量固定,冷端系统配套空冷凝汽器、空冷风机、抽真空装置、凝结水泵等核心设备,设备参数贴合机组额定工况。机组日

常运行涵盖满负荷、中高负荷、低负荷等典型工况，现阶段采用传统人工结合固定逻辑的调控模式，未根据工况变化进行动态优化调控。（2）现场运行数据采集：为精准分析系统运行状态，开展全工况数据采集工作。分别采集春、夏、秋、冬四季环境工况下，机组不同负荷对应的核心运行数据，主要包含空冷凝汽器背压、端差、环境温度、空冷风机频率及电流、真空泵能耗、凝结水温度等关键参数，为问题分析提供真实数据支撑。

（3）运行性能现状评价：结合空冷机组行业运行标准与节能指标，对采集数据进行整理分析。从运行稳定性、能耗水平、换热效率多维度评估，发现目标机组冷端系统整体运行存在明显节能空间，变工况适应性较差，部分工况下能耗指标超出行业合理范围，经济性有待提升。

2.2 系统核心运行问题梳理

（1）空冷凝汽器运行问题：机组长期运行后空冷凝汽器翅片管表面积灰严重，尤其春季杨柳絮、冬季灰尘积聚，大幅降低换热性能；系统运行端差长期高于标准区间，换热损耗严重。同时机组变负荷、变环境温度工况下，背压波动幅度大，稳定性较差，直接影响机组做功效率。（2）空冷系统问题：空冷风机采用粗放式运行策略，多为固定转速或固定台数运行，未依据机组负荷、环境温度动态调节风量。普遍存在风量匹配不合理问题，低负荷、低温工况下风量过剩，造成无效能耗，且风机叶片磨损、电机老化导致效率下降^[2]。（3）抽真空系统问题：真空系统存在轻微泄漏问题，轴封、法兰等密封点严密性不足，导致系统负压稳定性差。真空泵长期高负荷运行，工况匹配度低，设备能耗居高不下，且抽吸能力因泄漏而增大功耗。

2.3 问题成因深度分析

（1）设备层面：空冷系统多数设备服役时间较长，存在普遍老化现象。空冷凝汽器翅片管积灰堵塞、翅片腐蚀、真空法兰及密封件老化失效、风机减速机磨损等硬件缺陷，直接造成换热效率下降、真空泄漏、空气流动阻力增大等一系列运行问题。（2）运行层面：机组沿用传统固定运行模式，空冷风机、真空泵等设备运行参数固化，无法适配变负荷、变环境温度的动态工况。同时人工调控依赖运行经验，精细化程度不足，缺乏科学的动态调控依据，导致系统长期低效运行。（3）管理层：电厂设备定期清洗、检修维护工作落实不到位，常态化养护机制缺失。空冷翅片管清洗周期不明确，系统性能实时监测体系不完善，无法及时捕捉设备性能衰减问题，且缺乏标准化的节能运行管理制度，规范管控力度不足。

2.4 能耗影响权重量化分析

（1）各缺陷对机组热耗、供电煤耗的影响量化计算：依托热力平衡模型，结合现场实测数据，量化分析空冷凝汽器端差超标、真空泄漏、风机低效运行等各类缺陷对机组热耗率、供电煤耗的影响数值，明确各类问题对应的能耗损耗占比。（2）确定影响冷端节能效果的关键短板因素：通过对比各类缺陷的能耗影响权重，筛选出对冷端系统节能运行制约最大的核心短板，优先明确背压稳定性差、空冷凝汽器换热效率低、风机运行匹配度不足等关键问题，为后续优化方案设计提供精准的数据支撑与优化方向。

3 火电厂汽轮机冷端系统节能优化方案与运行调整策略

3.1 空冷凝汽器系统节能优化设计

（1）空冷凝汽器清洁优化：针对机组空冷凝汽器长期运行积灰、翅片脏污、换热效率衰减等问题，建立常态化、标准化的设备清洗维护体系。结合机组运行时长、季节特性及端差变化规律，制定定期停机高压水冲洗方案，彻底清除翅片管表面积灰、油污及杂物。同时加装在线或离线压缩空气吹扫装置，在机组运行期间定期吹扫，抑制灰尘累积，持续降低换热热阻，稳定提升空冷凝汽器整体换热效率，减少因脏污导致的热耗损失。（2）抽真空系统优化：针对真空严密性不足、背压波动大等缺陷，开展全系统密封治理工作。全面排查真空管道、法兰、阀门、汽轮机轴封等关键密封点位，更换老化失效密封部件，封堵系统泄漏点。同时优化真空查漏技术，采用氦质谱检漏仪开展常态化检测，及时发现微小隐蔽泄漏隐患。通过全方位密封优化与隐患治理，有效提升真空系统严密性，减少不凝结气体积聚，稳定维持系统负压环境，降低机组热耗^[3]。（3）最佳背压动态调控：摒弃传统固定背压运行模式，结合机组实时负荷、环境温度、风速风向等关键参数，依托热力计算模型，精准核算不同工况下的机组最佳背压区间。建立动态背压调控逻辑，打破单一工况调控局限，在变负荷、变季节运行状态下，实时匹配最优背压参数，平衡空冷凝汽器换热效果与风机能耗，实现机组做功效率最大化。

3.2 空冷系统优化与运行调整

（1）空冷风机运行优化：针对空冷风机粗放式运行、能耗偏高的问题，引入变频调速调控技术，替代传统定速运行模式。基于机组负荷与环境温度，优化风机启停组合方式与运行频率，摒弃固定台数、固定转速的运行策略。在机组低负荷、低温环境工况下，降低风机

运行频率、减少运行台数,在高负荷、高温工况下精准匹配运行参数,有效降低风机无效厂用电消耗。(2)风道系统优化:针对空冷岛风道积灰、风阻分布不均、局部涡流等问题,开展风道系统性优化整改。定期清理风道内杂物、灰垢,检查并修复破损的导流板,优化风道结构减少局部阻力,提升空气流动均匀性,降低风机电耗。(3)变工况风量匹配策略:建立全工况动态风量匹配机制,根据机组实时发电负荷、环境温度、空冷凝汽器出口空气温度的变化,动态调整空冷风机转速与运行台数。杜绝高风量低负荷、低温大风量等不匹配运行现象,实现风量与凝汽器换热需求精准适配,在保障冷凝换热效果的前提下,最大限度缩减空冷系统能耗^[4]。

3.3 空冷系统防冻与工况适配优化

(1)防冻改造与运行策略:针对空冷机组冬季低温运行易发生冻结的风险,优化空冷岛防冻措施。在风机出口加装保温挡风帘或自动调温装置,合理分组控制风机启停,避免局部过冷。建立冬季低温运行规程,根据环境温度及凝结水过冷度,动态调整风机运行方式和逆流管束配风,确保安全运行的同时降低能耗。(2)风机运行优化:结合环境温湿度、排汽背压、凝结水温度,建立空冷风机智能调控策略。根据实时散热需求,动态调整风机运行台数与运行转速,高温高负荷工况下提升风机出力,低温低负荷工况下降低转速或停运部分风机,避免风机无效耗能,实现散热效果与风机能耗的最优平衡^[5]。(3)工况适配调整:结合季节环境差异,制定冬夏季差异化运行方案。夏季高温工况下,以强化散热为核心,优化风机与风量匹配模式,降低机组背压;冬季低温工况下,合理缩减风机出力与运行台数,规避过冷冻结风险与无效能耗,有效降低整体散热能耗,适配全年变季节运行需求。

3.4 冷端系统耦合运行优化策略

(1)多设备协同调控机制:打破冷端各设备独立运

行、单独调控的弊端,建立空冷凝汽器、空冷风机、抽真空系统、凝结水系统多设备联动耦合调控机制。以机组综合能耗最低为目标,统筹协调背压参数、风机风量、真空泵出力,实现各设备工况动态匹配,避免单一设备优化引发的系统适配失衡,提升冷端整体运行协同性与经济性。(2)全工况精细化运行规程:结合机组变负荷、变季节运行特性,整合各项优化策略,制定标准化、精细化的全工况运行规程。明确不同负荷区间、不同环境温度下冷端各设备的运行参数、调控方式与调整标准,规范人工操作与智能调控逻辑,解决传统运行模式粗放、调控滞后的问题,实现冷端系统全工况高效节能稳定运行。

结束语

本文完成火电厂抽汽凝汽式空冷机组冷端系统能耗机理、现存问题与优化策略的系统性研究,明确了制约系统节能的核心短板,形成设备改造、运行调整、耦合调控一体化优化方案。通过精细化、动态化、协同化的运行调整,可有效改善空冷系统换热性能,降低辅机能耗与机组热耗。研究成果可有效解决机组变工况运行低效问题,为火电厂空冷机组冷端系统节能改造、标准化运维提供可行的实践参考。

参考文献

- [1]刘志宏,郑凯.火电机组冷端系统优化运行技术研究[J].热力发电,2023,52(7):112-118.
- [2]陈伟东,孙鹏.汽轮机冷凝系统节能改造与运行效果分析[J].电力建设,2024,45(3):65-72.
- [3]周林,高晨.基于智能化控制的火电厂冷端系统节能运行探讨[J].中国电力,2022,55(12):98-104.
- [4]程波.汽轮机冷端系统运行优化方法及研究进展[J].电站辅机,2024,45(1):71-75.
- [5]杨阳,金杰.联合循环机组蒸汽轮机冷端系统运行优化研究[J].机电信息,2023,5(2):15-17.