

汽轮机冷端系统真空度优化对机组能耗的影响

潘 敏

广东大唐国际肇庆热电有限责任公司 广东 肇庆 526105

【摘要】：汽轮机冷端系统的真空度水平直接决定排汽压力大小，进而影响机组的循环效率与能耗表现。真空度偏离最优区间时，排汽损失增大，汽轮机输出功率下降，辅机负荷加重，导致单位发电量能耗上升；而通过优化冷端换热能力、凝汽器清洁度、循环水流量以及运行负荷匹配，可使真空度稳定在高效区间，使排汽焓降充分释放，从而提升机组整体热经济性。研究以冷端传热特性与运行参数耦合关系为主线，通过分析真空度与能耗指标变化趋势，论证在合理范围内提升真空度可有效降低循环热损失与电耗占比，进而实现机组节能运行。

【关键词】：汽轮机；冷端系统；真空度；能耗优化；热经济性

DOI:10.12417/2811-0528.26.06.080

汽轮机冷端系统在电站热力循环中处于能量最低端，但对机组效率具有放大式影响。真空度的微小波动都会改变排汽状态，使得能耗变化呈现敏感特征。当真空度不足时，排汽无法充分膨胀，循环效率明显下降；而过度追求高真空又会导致辅机电耗上升，使节能收益被抵消。因此，寻找真空度与能耗之间的最优平衡点成为运行调控的重要议题。围绕冷端换热性能、凝汽器状态与循环水系统的交互作用展开讨论，有助于揭示真空度优化对机组能耗改善的关键路径。

1 冷端系统真空度偏差导致机组能耗升高的机理分析

汽轮机冷端系统的真空度一旦偏离适宜区间，排汽压力便随之升高，使得蒸汽在最后级的有效膨胀受到限制，排汽焓降减少，导致轮机输出功率下降。末级叶片的可利用能量降低后，单位热耗呈现上升趋势，循环效率受到明显削弱。排汽参数变化还会改变凝汽器内的传热驱动力，使换热面积的有效利用率下降，蒸汽凝结过程受到影响，促使冷端整体的能量损失加剧。随着真空度不断偏离最优区间，汽轮机内部各级的焓降分布被打破，运行工况趋于低效化，能耗水平呈现上升态势。

当真空度偏低时，凝汽器中的蒸汽含湿量提高，气侧混合物的比例增加，使传热过程受阻。冷却水温升幅度下降，传热推动力不足，蒸汽无法在设计工况下迅速凝结，最终引起排汽温度上升。凝汽器内部若存在积垢、气体滞留或管束堵塞，真空度会进一步降低，形成恶性循环，使压降损失加大，循环水泵及风机的负荷也随之上扬。辅机电耗因真空度恶化而不断攀升，使机组在相同发电负荷下需要消耗更多能量。冷端系统的这种耦合效应逐步放大能耗问题，最终表现为单位发电量综合能耗的上升。

真空度偏差还会影响汽轮机末级流动状态，导致湿蒸汽冲刷风险加剧，使末级通流能力下降，进一步削弱排汽能力。当

排汽压力升高时，汽轮机内部流道会出现附面层厚度增加、局部旋涡形成等现象，流动损失放大，循环水温度变化对真空度的敏感性也随之增强。冷端设备在波动工况下持续运行，会导致热负荷不均、换热边界不稳定，从而使能量传递环节的效率难以保持在合理水平。综合来看，真空度的偏差通过影响排汽膨胀、凝汽传热、辅机负荷以及通流结构稳定性多重路径推动机组能耗升高，使冷端系统成为影响机组热经济性的关键环节之一。

2 提升冷端换热能力实现真空度优化的关键技术路径

提升冷端换热能力的关键在于强化凝汽器内外部的传热条件，使蒸汽在进入冷端后能够迅速完成相变，维持稳定而充分的冷端真空度。凝结换热过程受蒸汽侧传热膜系数、管壁导热性能以及冷却水侧流速共同影响，任何一项偏离设计要求都会削弱换热效率。通过改善蒸汽分配结构，使蒸汽在凝汽器管束中的流动更加均匀，可减少局部过饱和区和滞流区的形成，从而有效提升传热驱动力。高效传热管的选用也起到直接影响，采用内外表面强化结构的铜基或钛基管材，可减小管壁热阻，在保证耐腐蚀与强度的条件下大幅提升凝结速率，为真空度保持在高效区间创造热力基础。

冷却水系统的运行状态对冷端换热能力具有显著影响。提高循环水流量能够增强冷却水侧对流换热能力，使进入凝汽器的冷却水具备更大的吸热潜力，从而使凝结界面的温差维持在合理范围内。优化冷却塔风机布水方式、加强填料的湿热交换效率以及降低冷却水回水温度，都能间接改善冷端换热环境。在高温季节或负荷波动工况下，适当调整循环水泵转换方式、减少水泵节流运行，可有效降低系统阻力，使冷却水能够以更高的流速进入管束内部，形成更强的湍流状态，提高管内换热系数。这些措施在实际运行中能够显著提升冷端吸热能力，使

排汽压力更容易维持在目标范围。

真空系统的可靠运行也是实现换热能力提升的重要组成部分。有效的抽气装置能够及时排出凝汽器内部的不可凝气体,避免其在管束表面形成附着层,从而减少蒸汽冷凝的传热阻力。采用机械真空泵或复合抽气系统,可在更低能耗下实现更高的抽吸速率,使真空度保持稳定。配合在线监测装置,对凝汽器端差、氧含量、循环水压差以及管束堵塞情况进行实时诊断,可提前识别换热衰减趋势。通过定期清洗管束表面、清理微生物黏附层以及改善水质,可以保持凝汽器在高传热效率下运行,进一步推动真空度优化,为机组热经济性提升提供持续支撑。

3 真空度与能耗协调优化的运行策略与综合评价

真空度与能耗的协调优化需要在维持汽轮机排汽膨胀充分性的前提下,使冷端系统的辅机电耗保持在合理范围,从而实现整体热经济性的提升。真空度提高能够降低排汽压力,使汽轮机末级的焓降得到更充分释放,但过度提升真空度会使循环水泵和真空泵的负荷大幅上升,造成电耗偏高。运行决策的关键在于找到排汽膨胀收益与辅机能耗之间的平衡点,使真空度稳定在能耗最低的区间。基于运行数据分析排汽压力、端差、抽气量与循环水参数的耦合关系,可以确定不同负荷下的最优真空度目标,从而使调节策略更加具有针对性。

在运行调控中,冷端换热能力的变化会直接影响最佳真空度区间的选择。当冷端换热条件良好且循环水温度处于较低水平时,真空度可维持在较高范围而不引起辅机能耗显著增加;当冷却水温度偏高或凝汽器换热系数下降时,强行维持高真空反而会导致系统阻力增大、抽汽负荷提升,能耗曲线出现反弹。

参考文献:

- [1] 王建民.凝汽器运行特性与真空优化控制研究[J].热力发电,2019,48(4):112-118.
- [2] 刘志强.循环水系统对汽轮机冷端真空影响机理分析[J].电站系统工程,2020,36(2):45-52.
- [3] 陈海东.冷端换热性能退化对机组经济性的影响研究[J].发电设备,2021,35(3):67-74.

通过对循环水泵运行方式、风机启停组合、冷却塔风机布风布水条件进行优化,可减少非必要的能耗支出,使真空度调节具备更灵活的空间。加之对凝汽器端差、真空度波动幅度、湿冷塔热力性能的动态监测,有助于根据换热变化及时调整运行状态,使排汽压力维持在靠近最优点的区域。

协调优化不仅涉及实时调节策略,也包括对机组能耗表现的系统化评价。构建以单位发电热耗、电耗率、凝汽器传热系数、真空稳定性、循环水泵效率等为核心指标的综合评价模型,可对不同真空度水平下的经济性进行量化比较,使运行人员能够明确各类调节措施的能效差异。通过引入数据驱动的运行优化方法,如基于负荷预测的真空度设定、基于端差变化的换热衰减识别、基于整体能耗曲线的目标值自适应调整,可在不增加额外硬件投入的条件下实现更高效的真空度控制方式。结合冷端设备的长期运行状况,对换热退化趋势、抽气系统效率衰减以及循环水品质变化进行综合分析,可以持续提升真空度调控的准确性,使机组能耗在不同季节、不同负荷条件下均保持在稳定而低的水平。

4 结语

冷端系统真空度的调控贯穿汽轮机运行的关键环节,其变化会在排汽膨胀、凝结传热以及辅机负荷等多条路径上影响机组能耗水平。围绕真空度偏差的成因、换热能力的提升方法以及运行参数的协调优化展开分析,可使冷端系统的能效表现得到更准确的判断,更利于在不同工况下保持机组的热经济性。以换热性能、真空稳定性与能耗评价体系为基础的运行策略,为确保汽轮机在复杂运行环境中维持高效稳定提供了可靠支撑。