

低加疏水回收改造对机组热力循环效率的影响分析

王新宇 王 浩

华电潍坊发电有限公司 山东潍坊 261000

摘 要: 在我国火力发电厂大力发展的大环境下, 锅炉中的低加疏水回收装置的工作状况将对整个热力循环的效能产生重要的影响。基于热电厂理论, 研究其对机组热平衡、给水温度和热利用率的作用机理, 提出疏水冷却器优化、多级串联回收和热泵回收等改造方法, 明确设备选型、管路设计和控制系统联动等关键技术。通过对系统进行低负荷疏水回收技术的研究, 可以降低系统疏水损耗, 提高给水系统的换热能力, 促进系统运行参数的优化, 实现对整个系统的高效利用, 为我国火力发电厂实现高效、经济的发展奠定坚实的理论基础。

关键词: 低加疏水回收; 热交换效能; 改造方案; 火力发电厂

引言

在目前的能源结构转换过程中, 火力发电厂仍然担负着基本的供电支持任务, 因此, 机组升级改造以提高发电效率和降低能耗为主要目的。热力循环的效能是衡量火力发电厂整体能源消耗的重要参数, 而作为整个热力循环的核心部件的低加疏水回收系统的工作效能将会对能源的有效利用产生显著的影响。常规的低加疏水回收方法因疏水能量损失大和回收效率低而限制了机组热力循环的热效率^[1]。在这种背景下, 通过对机组进行系统优化改造, 研究其对机组经济性和能耗的作用机理, 进而制定出一套合理的技术路线。基于热力循环和疏水回收的机理, 分析其对回收效果的影响, 并给出相应的改造措施和关键技术, 为我国节能减排工程的实施奠定基础。

一、机组热力循环与低加疏水回收技术要点

(一) 火电机组热力循环的基本原理

在火力发电厂的热力系统中, 朗肯循环为主体, 即利用工质相变和能量转化来将热量转变为机械能。工作原理是通过在锅炉中的燃料燃烧生成热量, 将给水系统中的水加热至高温高压。主蒸汽通过汽轮机的膨胀做功, 带动发电机产生电能; 经过工作后的乏汽在凝汽器中进行冷凝, 然后经过凝结水泵、低压加热器(低加)和给水泵等设备增压和加热, 再回到锅炉中, 形成完整的循环。整个系统的运行效果主要由系统内的能源利用率决定, 其核心影响参数主要有主蒸汽参数、给水温度和冷源损耗等。升高给水温度可以减小机组内部的传热温差, 减小排烟损耗, 从而改善机组的运行效能, 而低加系统则是实现机组回热加热、优化机组运行参数的重

要装置^[2]。

(二) 低加疏水回收系统的运行机理

低加疏水回收系统是火力发电厂热力循环中一关键的辅助系统, 其主要作用是将低加内加热给水后所生成的疏水(也就是汽轮机抽汽冷凝水)进行回收, 以防止因疏水直接排放而导致的能源损耗。现行的低加疏水回收大多采取逐级自流模式: 高压等级低加的疏水通过压差自流到低压等级低加处, 最后进入除氧器或凝汽器^[3]。其工作机理是通过梯级利用疏水所载余温余压, 进而提高给水加热效率, 但是不可否认的是, 在实际的运行过程中, 由于管路阻力和疏水过冷度的不合理调控, 有部分疏水会直接进入凝汽器并被循环水带走, 造成冷源损耗增大, 进而使系统的能源利用率下降, 从而会间接限制机组经济效益的提高。

二、低加疏水回收改造对机组热力循环效率的影响

(一) 疏水能量损失对热力循环热平衡的影响

低加疏水蕴含一定的焓值, 其回收效率对整个系统的热平衡状况有很大的影响。在常规疏水回收技术中, 因缺少高效的能量回收设备, 导致部分疏水不能实现梯级利用而直接进入凝汽器, 疏水携带的热量被循环水带走, 从而使系统中的冷源损耗增大, 此种情况会破坏系统的热平衡, 降低系统的热效率。通过优化回收路径和增设能量回收装置, 可以降低疏水回收过程中的能量损失, 重建热力循环的热平衡。改造后可充分利用疏水所承载的余温余压, 降低冷源损耗, 提高给水加热的能量供给, 推动热力循环向更高效的热平衡状态转变。这种热平衡优化可以有效降低机组的热耗率, 提高整个系统的热力循环效率, 进而促进火力发电的运作效能的提高, 有相当关键的存在意义。

（二）疏水回收效率对给水温度、主蒸汽利用效率的连锁影响

提高低加疏水回收效率将对给水温度及主蒸汽利用效率产生重要影响。随着疏水回收效率的提升，更多疏水携带的热能被用于加热给水，从而显著提高给水温度。工作者借提高给水温度可以减小锅炉内水的换热温差，可以达到降低锅炉的传热损耗、降低排烟温度的目的，从而达到节能降耗。此外当给水温度升高后，锅炉产生相同参数主蒸汽所需的热能减少，这就使得主蒸汽可以更多地被用来推动机组做功，从而提高主蒸汽的利用效率，进而实现“疏水回收效能提升-给水升温-主蒸汽利用效率提升-热力循环效能增强”的良性循环，实现系统的高效节能。

三、低加疏水回收改造方案设计

（一）改造需求分析

基于机组节能降耗的实际需要及现行系统存在的不足，相关人员需要综合做好对低加疏水回收改造需求的深入分析。从经济性方面看，在目前激烈的电力市场竞争下，降低发电煤耗和提高机组经济性是提高企业竞争力的重要途径，而对疏水回收系统进行优化改造可以有效降低机组的热耗率，产生显著的经济效益。从环境保护的视角来看，在“双碳”背景下，火力发电厂需要进一步降低碳排放强度，通过技术改造提高能源利用效率，可间接减少单位发电量的碳排放量，实现节能减排。从运行稳定的角度来看，当前疏水回收管路堵塞和疏水量波动大等问题，极易引起低加水位异常，严重威胁机组的安全运行，因此火力发电厂迫切需要通过改造解决这一问题，提高系统的运行稳定性，且改造还需根据机组的不同负荷情况进行适配，以保证在全负荷范围内都能实现高效疏水回收^[4]。

（二）典型改造技术方案

1. 疏水冷却器优化改造

疏水冷却器作为提高疏水回收效率的重要装置，传统疏水冷却器存在换热面积小、传热系数低、疏水过冷度不足等问题，导致能量难以有效利用，相关人员可以选择从增加换热面积和改进换热结构两个方面对疏水冷却器进行优化，首先是采用波纹管、波纹管等高效换热管材代替普通光管，可提高换热系数；其次是需要合理调整管束排布，增加换热面积，同时减小管路阻力，期间重点优化疏水冷却器进出口参数设计，实现疏水在冷却器内充分换热，提高疏水过冷度的调控精度。

通过对疏水冷却器进行改造，其换热效率可得到有效地提高，从而减少疏水携带的蒸汽量，避免因疏水进入凝汽器而引起的闪蒸损失，除此以为，在改造工作结

束后，还可以实现对疏水温度的稳定调控，为后续给水加热提供可靠的热量来源，进而提高整个低加系统的综合运行效率，此方法改造难度小、投资少、见效快，适用于原有疏水冷却器老化、效率偏低的机组。

2. 多级疏水串联回收系统改造

针对传统逐级自流回收方式能量损耗大、回收效率低等缺点，可以选择使用多级疏水串联回收系统改造方案，重点打破传统按压力等级逐级自流的模式，选择增设串联管路及调节阀等方案，将各级低加疏水汇集到专用回收母管，形成“高压疏水加热低压疏水”的梯级利用模式，提高疏水整体能源利用率^[5]。与此同时，还可以在后续回收母管末端加装高效换热器，进一步提取疏水余热用于加热给水。

其核心是建立精准的压力调节机制，保证各级疏水都能平稳汇入回收母管，不会发生倒灌、断流情况。通过加装压力变送器、电动调节阀等设备，可对回收母管内的压力进行实时监测与调节。依托此种方式，火力发电期间，疏水能量回收效率能够提升，切实有效地减少冷源损耗。同时该系统可减少管路分支，降低堵塞风险，提高系统运行稳定性，适用于各级低加疏水回收相互干扰较大的机组。

3. 疏水热泵回收技术应用

对于疏水产品位低而常规回收方法效果不佳的机组，可采用疏水热泵回收技术，该技术通过“压缩-冷凝-膨胀-蒸发”的循环过程，将低品位疏水的热能提升至可用品位，进而实现对给水的加热。即利用蒸发器吸收疏水热量，使工质蒸发；通过压缩机对工质蒸汽进行压缩，提高其温度和压力，再通过冷凝器释放热量加热给水；冷凝后的工质通过膨胀阀进行节流减压，重新回到蒸发器，完成完整循环。

疏水热泵可实现对低品位疏水能量的有效回收，尤其适用于低负荷条件下的疏水回收，在实际改造期间，工作者需根据疏水流量和温度参数，选用匹配的热泵机组，并优化热泵与原有低加系统的联动控制，以此来切实有效地将疏水热量回收率提高，提升给水温度，降低锅炉热负荷。但是需要予以重点关注的是，该方法初期投入较高、技术要求较高，适用于对节能要求高、疏水资源丰富的大型火力发电厂。

（三）改造关键技术要点

1. 设备选型和选配

选择合适的设备是保证改造效果的关键，必须遵循“匹配性、高效性、可靠性”的原则，火力发电厂可以将疏水冷却器优化改造为对象，根据机组低加参数（如

疏水流量、温度、压力等), 计算所需换热面积及换热系数, 选择高效换热管材及相应的管束结构, 确保换热效果达到设计要求^[6]。在此基础上需考虑提高设备的耐腐蚀和防结垢性能, 以延长设备使用寿命。

对于热泵机组、调节阀门等关键设备, 需选择符合行业标准的优质产品, 为满足不同负荷条件下的运行需求, 应选用变频控制的热泵机型; 调节阀门必须具备高精度调节能力及优良的密封性能, 以保证压力与流量控制精准, 同时设备选型还需充分考虑安装空间及维护便利性, 从而降低改造及运维成本。

2. 管路优化设计

管路设计对疏水流动阻力及能量损失有很大影响, 需从管路布置、管径选择及保温措施三个角度进行优化。管路布局应尽量缩短管路长度, 减少弯头、三通等局部阻力部件, 并采用顺坡布置, 防止产生积液死角。管径的选取应以疏水流量及流速为依据, 将流速控制在1.5~2.5米/秒范围内, 既能保证流量需求, 又可减小管路阻力, 原因如公式:

$$\Delta P = \lambda \times \left(\frac{L}{d}\right) \times \left(\frac{\rho v^2}{2}\right)$$

其中

λ : 管路沿程阻力系数(与管材、流体雷诺数相关);

L 为管路长度;

d : 管径;

ρ : 流体密度;

v : 流速。

可见, 流速 v 越大, 阻力损失 ΔP 会呈平方级增长——如果 v 超过3m/s, 阻力会急剧上升, 导致热泵机组循环泵能耗翻倍, 还可能引发管路振动、噪音; 但如果 v 低于1m/s, 为了满足相同流量(Q), 就需要更大管径(d), 会直接增加管材采购、安装空间占用成本, 且容易导致管内流体滞留、结垢(尤其热泵系统的水介质)。

此外还需强化管路的保温设计, 选择高品质的保温材料(如岩棉、硅酸铝纤维等), 降低管路散热损失。为保证保温效果, 需根据环境温度及管路温度确定保温层厚度, 在管路关键部位(如转弯处、阀门前后)设置排污口和检查口, 方便后期维护与清理, 降低管路堵塞风险。

3. 控制系统联动优化

改造后系统需与机组原有控制系统实现精准联动, 以保证系统稳定、高效运行。首先, 建立分布式控制系统(DCS)联动平台, 将新增设备(如热泵机组、调节阀门、压力变送器等)的运行参数接入原有DCS系统, 实现对疏水回收系统的集中监测与控制。通过实时采集

疏水流量、温度、压力及给水温度等参数, 构建运行数据库。其次, 优化系统控制逻辑, 实现对系统参数的自动调节。比如: 可根据机组负荷变化, 调整热泵机组的运行频率, 调节阀门开度, 从而保证疏水回收效率稳定; 当低加水位出现异常时, 可自动调整疏水排放路径, 保障机组安全运行。设计中设有报警装置, 一旦参数超过规定范围, 会立即发出警报, 通知工作人员及时处置。最后, 需对控制系统进行调试与优化。通过空载调试和带负荷调试, 检验控制逻辑的合理性及参数设定的准确性。在此基础上, 调整控制参数, 保证系统在各种负荷条件下高效运行, 实现疏水回收系统与机组热力循环的协同优化。

结束语

综上所述, 低加疏水回收改造是提高火力发电厂热力循环效能的重要手段, 通过降低疏水能量损耗、优化热力循环热平衡, 可达到显著的节能降耗效果。包括疏水冷却器优化、多级串联回收、疏水热泵回收等改造方案均可适应多种运行工况与需求, 其中设备选型、管路设计与控制系统联动优化是改造实施的核心支撑。在实际实施过程中, 需根据机组具体参数及运行工况, 选用合适的改造方案, 以保证改造效果。火力发电厂需要对低加疏水回收系统的优化升级, 推动其向智能化、高效化方向发展, 可进一步提高火力发电厂的经济效益与环保效益, 为我国在能源转型背景下实现火力发电厂可持续发展奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 陈豪, 谢尉扬. 660MW 机组复合式低加疏水温度异常分析[J]. 电站系统工程, 2025, 41(01): 44-46+84.
- [2] 胡正荣, 罗曙炎, 王日成, 等. 1000MW 火电机组给水回热系统故障分析及处理[J]. 发电设备, 2024, 38(05): 318-322.
- [3] 姬定西, 晏海能, 陈永光, 等. 某电厂 1000MW 超超临界机组除氧器入口溶解氧异常原因分析及处理[J]. 全面腐蚀控制, 2023, 37(09): 21-24.
- [4] 金亚飞, 王渡, 魏佳倩. 基于 BEST 的 1000MW 二次再热机组低压加热器疏水系统优化研究[J]. 上海电力大学学报, 2023, 39(02): 131-136.
- [5] 侯超亮, 丁川. 垃圾焚烧汽轮发电机组低压加热器疏水改造[J]. 节能与环保, 2022, (11): 61-62.
- [6] 王维英, 李卫军, 冯立国, 等. 630MW 机组低压末级长叶片水蚀分析及预防[J]. 浙江电力, 2022, 41(04): 89-95.