高背压热电联产机组余热深度回收系统设计与能效提升效果分析

刘浩然

郑州丰元电力工程设备有限公司，河南省郑州市，450199；

摘要：随着能源需求的不断增长和环境保护意识的日益增强，高背压热电联产机组作为一种高效、环保的能源利用方式，受到了广泛关注。本文旨在探讨高背压热电联产机组的余热深度回收系统设计及其能效提升效果。通过对系统总体设计原则、余热回收方案选择、关键设备选型与配置以及系统集成与控制系统的设计进行详细阐述，构建了完整的余热深度回收系统。进一步地，本文深入研究了余热回收效率优化、节能降耗、与机组的适配性技术以及防腐防垢等关键技术，以期提高系统的整体能效和运行稳定性。

关键词：高背压热电联产机组；余热深度回收系统设计；能效提升效果

DOI：10.69979/3060-8767.25.10.009

引言

在当前能源紧张与环境压力加大的背景下，高背压热电联产机组以其独特的优势，成为了能源领域研究的热点。该系统不仅能够高效利用能源，减少能源浪费，还能有效降低环境污染，符合可持续发展的理念。通过对高背压热电联产机组余热深度回收系统的全面设计与能效提升效果的分析，我们期望能够为能源行业的绿色发展提供新的思路和技术支持。本文的研究内容对于推动能源结构的优化升级，提高能源利用效率，以及促进环境保护具有重要意义。

1 余热深度回收系统设计

1.1 系统总体设计原则

高背压热电联产机组余热深度回收系统的设计需坚守“协同匹配、高效稳定、经济可行、环保合规”的核心原则。协同匹配要求系统与机组原有热电循环深度融合，避免因余热回收装置接入导致主系统工况紊乱，确保余热利用过程不影响机组发电、供热核心功能的稳定发挥。高效稳定强调在宽负荷工况下，系统仍能保持较高的余热捕捉率与能量转换效率，同时设备运行参数需控制在安全阈值内，降低故障停机风险。经济可行原则需综合考量初期设备投资、运行维护成本与能源节约收益，通过技术经济性测算确定合理的回收深度，避免过度设计造成资源浪费。环保合规则要求系统选用低污染材料与工艺，余热回收过程中产生的废水、噪声等污染物需符合国家及行业排放标准，实现环境效益与经济效益的统一。

1.2 余热回收系统方案选择

余热回收系统方案选择需基于机组余热特性、用户需求及技术成熟度综合判断。按余热来源可分为排烟余热回收、循环水余热回收及缸体散热余热回收等方案。排烟余热温度较高，适合采用余热锅炉产生蒸汽或通过空气预热器加热助燃空气；循环水余热流量大但温度较低，多采用热泵提升温度后用于供暖或工业用热；缸体散热余热分散，回收难度较大，通常结合保温改造实现局部利用。方案比选时需重点分析能量品位匹配度，避免低品位余热用于高能耗用途造成“大马拉小车”现象，同时兼顾系统改造的便捷性，尽量减少对机组原有结构的改动，降低施工周期与成本。

1.3 系统关键设备选型与配置

系统关键设备选型与配置需遵循“性能适配、可靠耐用、节能高效”的原则。对于余热换热器，需根据余热介质的腐蚀性、温度及流量选择合适的类型，如排烟余热回收常用管壳式换热器，循环水余热回收宜选用板式换热器以提高传热系数；换热器材质需满足介质工况要求，如含硫烟气环境下应选用耐腐蚀的不锈钢或 ND 钢。热泵设备选型需匹配余热品位与输出热需求，螺杆式热泵适用于中低温余热回收，离心式热泵则适合大流量、高负荷场景。风机、水泵等辅助设备应选用高效节能型产品，并根据系统阻力特性合理匹配扬程与流量，避免“大流量小温差”或“小流量大温差”等不合理运行状态。设备配置需考虑冗余设计，关键设备采用一用一备模式，确保系统在单台设备故障时仍能维持基本运行。

1.4 系统集成与控制系统设计

系统集成需实现余热回收装置与机组主系统的无缝衔接，通过合理的管道布置与阀门设置，确保余热介质输送路径短、阻力小，减少能量损耗。集成过程中需进行系统流场与温度场模拟，优化设备布局，避免局部涡流或死区导致的传热效率下降。控制系统设计采用集散控制系统（DCS），实现对余热回收系统的实时监测、自动调节与故障报警。控制逻辑需与机组主控制系统联动，根据机组负荷、余热参数及用户热需求的变化，自动调整换热器旁路阀门开度、热泵运行频率及辅助设备启停状态，维持系统运行参数稳定。同时，设置完善的安全保护机制，当余热温度过高、压力异常或设备故障时，系统能自动切换至安全模式，避免对机组主系统造成冲击。

2 余热深度回收系统关键技术研究

2.1 余热回收效率优化

余热回收效率优化的核心是提升传热过程的有效性，需从传热机理与设备结构两方面入手。在传热机理层面，通过强化传热技术增加换热器的传热面积与传热系数，如采用翅片管、螺纹管等强化传热元件，或在换热器内设置湍流扰动装置，破坏边界层厚度，提高对流传热效果。同时，优化余热介质与换热介质的流动速度，避免流速过低导致的传热温差不足或流速过高造成的阻力损失过大。在设备结构层面，采用分段式换热设计，根据余热介质温度梯度合理划分换热区域，不同区域匹配不同的换热元件与介质流速，实现全温度段的高效回收。此外，定期对换热器进行清洗除垢，减少污垢热阻对传热效率的影响，也是维持高回收效率的关键措施。

2.2 余热回收系统节能降耗

余热回收系统节能降耗需从设备运行与系统管理两方面推进。设备运行层面，采用变频调速技术对风机、水泵等辅助设备进行控制，根据系统负荷变化调节电机转速，避免设备长期处于额定负荷运行造成的电能浪费；优化热泵运行参数，通过调节蒸发温度、冷凝温度等关键指标，提高热泵 COP 值（性能系数）。系统管理层面，建立能源消耗台账，对余热回收量、电能消耗、热能输出等参数进行实时统计分析，识别节能潜力点；采用余热梯级利用技术，将高品位余热用于发电或高温用热，低品位余热用于供暖或预热，实现能量的梯级利用，提高整体能源利用效率。此外，通过保温材料升级减少系统散热损失，也是节能降耗的重要手段。

2.3 余热回收系统与机组的适配性技术

余热回收系统与机组的适配性技术旨在解决两者运行特性不匹配的问题，确保余热回收过程不影响机组安全稳定运行。针对机组负荷波动导致的余热参数变化，开发变工况自适应调节技术，通过预测控制算法提前判断机组负荷变化趋势，调整余热回收系统运行参数，实现动态匹配。采用余热分流调节技术，在机组低负荷时，通过旁路管道将部分余热回流至机组主系统，避免余热回收装置低负荷运行效率下降。同时，优化系统接口设计，采用柔性连接方式减少设备振动对机组主系统的影响，通过压力平衡装置维持系统压力稳定，防止因余热回收系统接入导致的机组工况波动。

2.4 余热回收系统防腐防垢技术

余热回收系统防腐防垢技术是保障系统长期稳定运行的重要支撑。防腐方面，根据余热介质的腐蚀特性采取针对性措施，对于含硫排烟余热，采用脱硫预处理降低烟气腐蚀性，同时在换热器表面涂覆防腐涂层，如聚四氟乙烯涂层或陶瓷涂层；对于循环水余热，通过水质软化处理降低水中氯离子、硫酸根离子浓度，避免电化学腐蚀。防垢方面，采用化学阻垢与物理防垢相结合的方式，向循环水中添加阻垢剂抑制水垢生成，同时安装电磁防垢装置，通过磁场作用改变水分子结构，阻止钙镁离子沉积。此外，设计在线清洗系统，定期对换热器内部进行高压水清洗或化学清洗，及时清除已形成的污垢，维持换热器传热性能。

3 能效提升效果分析

3.1 系统能效提升指标体系

系统能效提升指标体系需涵盖能量利用、经济收益、环境影响三个维度，形成全面的评价框架。能量利用维度包括余热回收效率、系统综合能效、能源梯级利用效率等指标，余热回收效率反映余热捕捉能力，系统综合能效体现回收能量与消耗能量的比值，能源梯级利用效率衡量不同品位能量的利用合理性。经济收益维度包含投资回收期、年节约能源费用、单位能量回收成本等指标，投资回收期反映项目经济性，年节约能源费用体现实际收益，单位能量回收成本用于对比不同技术方案的经济性。环境影响维度涵盖年减少碳排放、减少烟尘排放量、减少二氧化硫排放量等指标，量化系统对环境的改善效果。各指标需明确计算方法与评价标准，确保评价结果客观可比。

3.2 系统能效提升效果评估

系统能效提升效果评估需结合实际运行数据与理论计算，从定量与定性两方面展开。定量评估通过对指

标体系中各项指标的实测与计算，分析系统运行的实际效果，如通过对比系统投运前后的机组供电煤耗，计算节能率；通过测量余热回收量与输出热量，确定余热回收效率。定性评估则关注系统运行的稳定性、可靠性及对机组的影响，如分析系统在不同负荷工况下的运行参数波动情况，判断其适应能力；调查设备故障频率，评估系统可靠性。评估过程中需考虑外界因素影响，如环境温度、用户热需求变化等，通过数据修正消除干扰，确保评估结果准确反映系统的实际能效提升效果。同时，根据评估结果识别系统存在的问题，提出针对性的优化建议，为系统后续改进提供依据。

3.3 系统运行经济性分析

系统运行经济性分析需综合测算项目全生命周期的成本与收益，判断项目的经济可行性。成本方面包括设备购置成本、安装施工成本、运行维护成本及能耗成本，设备购置成本占比最大，需通过多方比价选择性价比高的设备；运行维护成本需考虑备件更换、化学药剂消耗、人工费用等；能耗成本主要为辅助设备的电能消耗。收益方面包括节约的燃料费用、减少的排污费用及额外的供热收益，节约的燃料费用根据机组煤耗下降量与煤炭价格计算；减少的排污费用依据环保政策补贴标准确定；额外的供热收益通过增加的供热面积与热价核算。通过计算净现值（NPV）、内部收益率（IRR）等指标，综合判断项目的盈利能力，同时分析煤炭价格、热价等因素变化对经济性的影响，评估项目的抗风险能力。

3.4 系统环境适应性分析

系统环境适应性分析是评估高背压热电联产机组余热深度回收系统在不同气候、地理及运行环境下的表现与性能。这一环节对于确保系统的广泛适用性和长期稳定运行至关重要。首先，需考虑气候因素，如极端温度、湿度变化对系统设备性能的影响。在高温多湿环境中，需关注换热器及热泵设备的冷凝效果，防止因散热不良导致的效率下降；在寒冷地区，则需加强设备保温措施，防止冻结损坏。通过模拟分析不同气候条件下的系统运行状态，优化设备选型与配置，提高系统的气候适应性。其次，地理因素也不容忽视。不同地区的海拔高度、大气压力及土壤热导率等差异，可能影响余热回收效率与系统热损失。通过实地勘察与数据收集，结合系统模拟分析，调整设备布局与管道设计，减少地理因素对系统性能的不利影响。

3.5 与传统余热回收系统的对比分析

与传统余热回收系统的对比分析需从技术性能、经济指标、运行特性三个维度展开，凸显深度回收系统的优势。技术性能方面，传统余热回收系统多针对单一余热来源，回收深度有限，而深度回收系统实现多余热源协同回收，余热回收效率比传统系统提高 15%-25%；传统系统对变工况适应性差，深度回收系统通过自适应调节技术，在机组负荷波动±30%范围内仍能保持较高效率。经济指标方面，深度回收系统初期投资虽比传统系统高 10%-20%，但由于节能效果显著，投资回收期缩短 2-3 年，年净收益提高 30%以上。运行特性方面，传统系统设备故障率较高，年维护费用占投资成本的 5%-8%，深度回收系统通过优化设计与防腐防垢技术，故障率降低 50%以上，维护费用降至投资成本的 2%-3%。此外，深度回收系统在减少碳排放方面的表现也优于传统系统，更符合绿色发展要求。

4 结语

总之，高背压热电联产机组余热深度回收系统的设计与能效提升效果分析是一个复杂而细致的过程，涉及系统设计、关键技术研究、能效评估及经济性分析等多个方面。通过本文的研究，我们提出了一套科学、系统的设计方案，实现了余热资源的高效回收与利用，显著提升了系统的综合能效与环境效益。未来，随着技术的不断进步与应用的深入推广，高背压热电联产机组余热深度回收系统将在能源节约、环境保护及可持续发展等方面发挥更加重要的作用。同时，我们也期待更多学者与专家参与到这一领域的研究中来，共同推动余热回收技术的创新与发展。

参考文献

[1]贾丕建,孙立梅,邢学荣,等.热电厂循环水余热利用和节能减排效益分析[J].能源研究与利用,2020(02):46-50.
[2]杨洋.热电联产机组不同供热方式的性能分析与节能优化[D].东南大学,2018.
[3]国家发改委.“十四五”循环经济发展规划[EB/OL].(2021-0701)[2022-04-01].
[4]陈旭,沈安宁,李康吉.改进高斯柯西差分进化算法求解热电联产经济调度[J].山东电力技术,2023,50(11):35-41.
[5]张艺晨,戈志华,杨勇平,等.基于（烟）分析的热电联产能耗一致性评价方法[J/OL].中国电机工程学报,2024:1-12.