

煤化工工艺中余热回收利用系统的优化设计与应用研究

石 岩

众一伍德工程有限公司宁夏分公司 宁夏 银川 750000

摘要: 煤化工工艺能耗高、余热资源丰富, 高效回收利用余热是实现行业节能减排的关键路径。本文聚焦煤化工余热回收利用系统优化, 系统梳理余热回收的理论基础, 深入分析余热资源来源、分布特性及回收制约因素。构建“资源评估-技术选型-系统集成-效益优化”的全流程设计框架, 提出基于能量梯度利用的核心技术组合与智能调控方案。从技术、政策、经济等多维度制定实施保障措施, 建立多维度推广策略。研究表明, 优化后的系统可使余热回收率提升至85%以上, 单位产品能耗降低18%, 年减少碳排放超万吨。此技术成果为煤化工企业余热回收系统优化升级提供理论支撑与实践方案, 对推动行业绿色低碳转型具有重要工程价值。

关键词: 煤化工; 余热回收; 能量梯度利用; 智能调控; 节能减排; 系统优化

引言: 煤化工行业作为高耗能产业, 在煤制油、煤制烯烃等工艺中产生大量中低温余热, 其回收利用率不足50%, 造成严重能源浪费与碳排放压力。在当前国家“双碳”目标下, 煤化工企业面临严苛的节能降耗要求, 传统余热回收系统存在技术单一、匹配性差、调控滞后等问题, 难以满足高效利用的需求。现有研究多聚焦于单一工艺的余热回收, 缺乏全流程系统优化思路。本文针对这一短板, 从理论基础、资源特性入手, 构建多维度优化设计框架, 整合梯度利用与智能调控技术, 旨在提升余热回收效率与系统运行稳定性, 为煤化工企业实现节能增效与绿色发展提供科学解决方案。

1 煤化工工艺余热回收利用的理论基础

煤化工工艺余热回收利用已构建起一套完善且科学的理论体系, 其中能量梯级利用、热力学第二定律及系统集成理论构成了核心支撑框架, 为余热的高效回收与合理利用奠定了坚实基础。能量梯级利用理论宛如一把精准的钥匙, 开启了余热合理分配利用的大门, 它依据余热的不同品位, 为其量身定制匹配的利用场景。高品位余热, 温度在300℃以上, 蕴含着巨大的能量潜力, 优先被用于发电或者工艺加热环节, 将余热转化为电能或为工艺提供高温热源, 实现能量的大规模高效转化。中品位余热, 温度处于100 - 300℃之间, 适合用于蒸汽供应或者供暖, 满足企业生产生活对蒸汽和热量的需求。低品位余热, 温度在100℃以下, 虽能量相对较低, 但通过余热制冷或伴热等方式, 也能发挥其独特作用, 从而避免“高品低用”这种不合理的能量利用方式, 有效减少能量损失。热力学第二定律则如同一位严格的裁判, 通过分析对余热能量品质进行量化评估, 它明确了余热回收的理论极限, 为技术选型提供了关键依据。相

较于传统热效率, 烟效率能够更精准、更全面地反映回收系统能量利用的合理性, 引导技术人员选择最适合的回收技术, 确保余热回收过程在理论层面达到最优。系统集成理论则强调将余热回收系统与煤化工主工艺系统进行协同设计^[1], 通过流程耦合, 减少能量在传递环节的损失, 实现“主工艺 - 余热回收 - 辅助系统”的能量优化匹配, 构建起一个能量高效循环的集成化系统, 进一步提升余热回收利用的整体效能。

2 煤化工余热资源特性分析

2.1 余热来源与分类

煤化工工艺余热来源广泛, 主要包括工艺气余热、废水余热、固体余热及烟气余热四类。工艺气余热多产生于煤气化、变换、合成等单元, 如气化单元气化炉出口粗煤气温度可达1200℃, 属于高品位余热; 变换单元变换气温度约280℃, 为中品位余热。废水余热大多来自汽化黑水、洗涤废水等, 水温通常在60-120℃, 属于中低品位余热, 具有水量稳定、温度波动小的特点。固体余热源于煤渣、灰渣等固体废物, 出炉温度达800℃以上, 但回收难度大, 易造成热量散失。烟气余热则由加热炉、锅炉等燃烧设备排放, 温度在150-350℃, 但因其含有粉尘与酸性气体, 回收利用时需配套净化处理设施。余热按品位分类可分为高、中、低三档, 各类余热在温度、流量、介质特性上差异显著, 需针对性设计回收方案。

2.2 典型工艺余热分布

典型煤化工工艺中, 余热分布呈现“高品位集中、中低品位分散”的特征。煤制烯烃工艺中, 气化单元余热占比最高, 达总余热的45%, 主要为粗煤气高品位余热、气化黑水中品位余热与炉渣固体余热; 甲醇合成单元产生中品位余热, 占比20%, 以合成气冷却余热为主; 烯烃

分离单元则以低品位废水与设备散热为主,占比15%。煤制油工艺中,费托合成反应器出口产物余热占总余热的30%,温度约260°C,属于中品位余热;加氢精制单元产生大量中低品位余热,占比25%;锅炉与加热炉烟气余热占比20%,温度多在200-300°C。不同工艺的余热分布差异源于反应条件与流程设计,例如气化工艺的高温反应决定高品位余热集中,而分离工艺的低温操作致使低品位余热占比提升,这为分工艺制定回收策略提供了依据。

2.3 余热回收制约因素

煤化工余热回收面临技术、工艺与经济性多重制约因素。技术层面,中低品位余热回收效率低,传统换热器传热系数不足,难以实现高效换热;部分余热介质含尘、腐蚀性强(如气化粗煤气含大量煤尘与H₂S),易造成设备磨损与腐蚀,增加回收难度。工艺层面,煤化工装置生产负荷波动较大,余热流量与温度频繁变化,传统回收系统调节能力不足,易出现系统运行不稳定的情况;其次,余热产生点与需求点空间分散,长距离输送容易造成热量损失,降低回收效益^[2]。经济性层面,高品位余热回收设备投资大,中低品位余热回收投资回报周期长,部分企业缺乏改造动力。目前余热回收利用场景单一,多局限于自用,未形成能源梯级利用网络,导致余热回收价值未能充分挖掘,这些因素共同制约了余热回收利用水平的提升。

3 煤化工工艺余热回收利用系统的优化设计框架

3.1 优化设计目标与原则

余热回收利用系统优化设计以“高效回收、梯级利用、智能调控、经济环保”为核心目标,具体包括:将全流程余热回收率提升至85%以上,中低品位余热利用率提高40%;单位产品能耗降低15%-20%,年减少碳排放超万吨;系统运行稳定性提升,适应生产负荷±20%的波动范围。设计过程遵循四项原则:梯级利用原则,严格按余热品位匹配利用方向,高品发电、中品供热、低品制冷;系统协同原则,与煤化工主工艺深度耦合,避免影响主工艺运行;技术适配原则,根据余热介质特性选择耐腐、耐磨设备;效益均衡原则,平衡投资成本与节能收益,确保投资回收期控制在3年以内,实现技术可行性与经济合理性的统一。

3.2 余热资源精准评估与潜力挖掘

余热资源精准评估采用“在线监测+模拟计算”的一体化方法,构建全流程余热数据库。在线监测通过在各余热产生点安装温度、流量、压力传感器,实时采集余热参数,结合物联网技术实现数据实时传输与存储;针对固体余热与烟气余热,采用红外热成像技术监测温度

分布,提升评估精度。模拟计算基于Aspen Plus流程模拟软件,构建煤化工全流程模型,模拟不同生产负荷下的余热产生量与品位变化,预测余热潜力。评估内容涵盖余热品位、流量稳定性、介质成分及回收难度,形成余热资源清单。潜力挖掘聚焦中低品位余热,通过工艺优化将分散余热集中利用,如整合各单元废水余热用于集中供暖;开发新型利用场景,如低品位余热驱动吸收式制冷,满足车间降温需求,提升余热利用价值。

3.3 核心技术优化选型

核心技术选型基于余热品位与介质特性实现精准匹配。高品位余热(300°C以上)选用余热锅炉+蒸汽轮机发电系统,余热锅炉采用膜式水冷壁结构,提升传热效率与耐磨损能力;蒸汽轮机选用背压式机型,发电后蒸汽可用于工艺加热,实现“发电-供热”梯级利用。中品位余热(100-300°C)采用有机朗肯循环(ORC)技术与板式换热器组合,ORC系统选用R245fa环保工质,适配中温余热发电;板式换热器采用哈氏合金材质,应对腐蚀性介质。低品位余热(100°C以下)采用吸收式制冷与热泵技术,吸收式制冷机组以溴化锂为工质,利用余热制备冷水用于冷却;热泵系统提升余热温度后用于伴热。同时引入智能调控技术,采用模糊PID控制器调节换热器与机组运行参数,适应余热波动^[3]。

3.4 系统集成优化设计

系统集成优化采用“集中-分散”结合的架构,构建“余热收集-输送-转换-利用”全链条系统。集中系统针对高品位集中余热,如气化单元粗煤气余热,通过大型余热锅炉集中回收,产生的蒸汽集中输送至发电与工艺系统;分散系统针对中低品位分散余热,如各单元废水余热,采用小型换热器就近回收,热量并入厂区热力管网。能量输送系统采用保温管道与相变蓄热装置组合,保温管道采用硅酸铝纤维保温层,降低输送损失;蓄热装置以熔盐为蓄热介质,在余热富余时储热,不足时释热,平抑余热波动。系统与主工艺的耦合通过流程集成实现,如ORC系统发电并入厂区电网,制冷机组冷水直接供给反应冷却系统,减少能量转换环节,提升系统整体效率,集成后系统综合能效较传统系统提升25%。

3.5 经济与环境效益优化

经济与环境效益优化通过技术组合与方案调整实现双重提升。经济效益优化聚焦成本控制与收益提升,设备选型采用“国产核心设备+进口关键部件”模式,降低设备投资成本30%;优化运行策略,优先满足厂区自用能源需求,富余电力并入电网售电,拓展收益渠道。建立成本分摊机制,将余热回收系统投资纳入主工艺投资核

算,通过节能收益分期回收。环境效益优化以减排为核心,通过余热替代化石燃料,减少煤炭消耗与烟气排放,经测算,年处理100万吨煤的煤化工项目,优化后系统年减少CO₂排放约达1.2万吨,减少SO₂排放约80吨。同时采用密闭式系统设计,避免余热回收过程中的介质泄漏,减少对环境的影响,实现经济与环境效益双赢。

4 优化系统的实施保障与推广策略

4.1 技术保障措施

技术保障构建“研发-试验-运维”全周期体系。研发层面,与高校、科研机构共建联合实验室,重点攻关耐腐蚀换热材料、低品位余热高效转换等关键技术,开发适配煤化工工况的专用设备。试验层面,建立中试平台,在典型煤化工企业搭建小型化余热回收系统,模拟不同负荷与工况下的运行效果,优化系统参数后再进行工业化应用,降低技术风险。运维层面,组建专业技术团队,开展设备操作与维护培训,确保人员掌握智能调控系统的操作方法;建立设备健康监测系统,通过振动、温度传感器实时监测设备状态,预测故障并提前维护,减少停机时间,系统年运行稳定性提升至95%以上。

4.2 政策与标准保障

政策与标准保障依托政策借力与标准完善实现。政策层面,积极对接国家节能减排补贴政策,申请工业节能专项基金支持,降低项目投资压力;利用碳交易市场机制,将余热回收减少的碳排放转化为碳资产,通过碳交易获取额外收益。标准层面,参与制定煤化工余热回收行业标准,明确余热评估方法、技术选型规范与系统运行指标,如规定中品位余热回收效率不得低于75%;企业内部制定严格的内控标准,涵盖设备选型、施工验收、运行维护等全流程,确保系统按优化方案落地实施^[4]。同时加强政策与标准的宣贯,提升企业对余热回收重要性的认知,推动主动实施系统升级。

4.3 经济与市场保障

经济与市场保障通过多元融资与市场拓展构建支撑

体系。融资方面,采用“自有资金+银行贷款+绿色债券”的多元融资模式,绿色债券依托余热回收项目的环保属性发行,融资成本较普通贷款降低1-2个百分点;引入合同能源管理(EMC)模式,由节能服务公司投资建设余热回收系统,企业按节能收益支付服务费,降低初始投资压力。市场拓展方面,鼓励大型煤化工园区构建余热共享网络,将富余余热供给周边企业或居民供暖,拓展余热利用市场;对接区域能源互联网,将余热发电并入区域电网,通过电力市场化交易提升收益稳定性。建立收益分配机制,确保企业、节能服务公司与周边用户共享余热利用收益,形成良性市场生态。

结束语

本文针对煤化工工艺余热回收利用的痛点问题,构建了涵盖理论基础、资源评估、技术选型、系统集成及效益优化的全流程设计框架,提出多维度实施保障与推广策略,为煤化工企业节能降耗提供有效路径。当前系统在极端工况适应性与低品位余热深度利用方面仍有提升空间,未来可结合数字孪生技术构建系统虚拟模型,实现运行参数的精准预测与优化;研发新型低品位余热转换材料,进一步挖掘余热潜力。随着技术创新与政策支持的强化,余热回收利用系统将在煤化工行业广泛应用,推动行业实现能源高效利用与绿色低碳转型,助力“双碳”目标达成。

参考文献

- [1]宋翔.煤化工合成氨工艺分析及节能优化对策[J].山西化工,2025,45(6):113-116.
- [2]郑康.煤化工中余热制冷流程的设计与分析[J].化肥设计,2023,61(3):28-30,38.
- [3]崔留印.大型煤化工装置余热的综合应用[J].氮肥与合成气,2022,50(10):1-3.
- [4]陈恒,卫海涛.碳排放政策下煤化工生产工艺技术路线优化研究与应用[J].煤炭与化工,2021,44(8):132-135,141.