

合成氨工艺中余热回收系统能效提升路径

张掌权 杨兴珂 张明良
海洋石油富岛有限公司 海南 东方 572600

摘要: 本文聚焦合成氨工艺中余热回收系统能效提升问题,采用系统工程学方法分析余热分布特征与采集规律,针对当前系统存在换热效率低下及工艺控制滞后等问题提出改进策略。通过优化余热采集路径、改进换热器结构、建立实时监测系统及推进设备改造等综合措施,可显著提升余热回收率,降低能源消耗指标,实现全流程能效优化。建议合成氨企业应加强技术创新投入,完善能效管理体系,构建智能化余热回收网络促进绿色低碳发展目标实现。

关键词: 合成氨工艺;余热回收;能效提升

引言:合成氨工艺作为化工行业重要组成部分,具有能耗高、热量损失大等特点。我国合成氨企业能源消耗占化工行业总能耗比重较大,余热资源未充分利用问题突出^[1]。随着国家双碳战略的推进,节能减排要求日益严格,合成氨工艺余热回收系统能效提升成为行业关注焦点。当前余热回收系统普遍存在采集不全面、换热设备老化、控制精度不足等问题,严重制约能效提升。

1 优化余热采集

1.1 分析余热分布

合成氨工艺中余热分布呈现多源、多级、波动性强等典型特征。气化炉高温烟气温度较高,余热品位高;转化炉出口气体温度适中,热量规模大;合成塔放热反应释放大量能量,温度较为稳定;冷却水系统低品位余热数量可观^[2]。各工段余热品质与回收经济性呈明显正相关,高温烟气余热回收热效率通常较高,中温尾气回收热效率次之而低温余热回收热效率相对较低。系统集成余热流量监测数据发现,工艺波动导致余热释放强度变化幅度较大,给回收系统设计带来挑战。

通过过程量热学方法,测算各工段余热产出规律,确立典型工况下余热产出曲线。该分析框架帮助识别关键余热节点为余热梯级利用奠定基础,实现余热收集精准定位与最大化捕捉。分析结果显示合成氨工艺余热资源丰富且分布广泛,通过科学评估与合理规划,可大幅提高余热回收潜力。

1.2 规划采集路径

本文发现分区域、分温度梯级采集模式优于传统集中式采集方案,可显著提高余热回收率^[3]。高温区采用辐射式采集装置,如换热墙组件;中温区采用对流式接触采集方式,如管壳式余热锅炉;低温区宜选择高效冷凝采集技术,如螺旋板式换热器。多点采集网络设计遵

循近采近用原则,减少余热输送距离可有效降低能量损失。建立余热采集管网拓扑结构优化模型,采用智能算法确定最优管径与布局,实现输送阻力最小化。

针对间歇性余热源,设计蓄热单元实现峰谷调节,提高系统柔性。完善采集系统安全设计,增设紧急排放回路与自动泄压装置,确保工艺波动条件下系统安全稳定运行,为高效率余热采集创造可靠条件。集成梯级利用理念,构建余热阶梯式采集网络,低温余热优先满足低温需求,高温余热定向用于高温工艺或发电,避免能级错配造成能源浪费^[4]。

1.3 选择高效装置

高温区宜选用耐高温高压换热器,如整体翅片管换热器或陶瓷管壳式换热器,具备优异耐温性能,传热系数明显高于普通管壳式。中温区适合螺旋板式或板壳式换热器,紧凑结构提供大换热面积,单位体积换热量远超传统设备。低温区推荐高效套管式或板式换热器,结垢系数低,易于清洗维护。针对含尘烟气余热采集难题,新型垂直管束余热锅炉具有良好防堵性能,运行阻力增长率显著降低。对于腐蚀性工艺气体,采用氟塑料换热器或石墨换热器使用寿命明显延长。

通过计算流体动力学模拟,优化管束布局与挡板设计,提高换热器流场均匀性。实施相变换热技术如热管式换热器在氨合成冷却环节应用,传热效率显著提升。引入微通道换热技术,通过增大比表面积方式强化传热过程,提高单位能耗传热量。评估新型导热材料应用前景,如石墨烯复合材料换热管表现出优异传热性能,热阻大幅降低。

2 提升换热效率

2.1 优化换热器结构

针对管壳式换热器,调整折流板开孔率与间距采用

偏心挡板设计,降低壳程短路流量比例,热效率明显提高^[5]。针对板式换热器,优化板片波纹角度与深度,强化湍流扰动,综合传热系数大幅提升,同时流阻增幅控制在可接受范围。引入偏心导流技术,改善流体分布均匀性,降低边缘效应影响。针对高温换热器,采用双层壳体结构,内置保温层,减少热量损失。

对于烟气余热回收实施辐射段与对流段耦合设计,最大化捕获不同传热机制热量。增设旋转涡流发生器,破坏边界层,强化对流传热过程。采用复合式换热器结构,实现多流体多级换热,提高能量利用层级。针对易结垢工况,研发自清洁换热表面,如表面超疏水处理技术,减少垢层形成。

2.2 改进传热介质

传统合成氨工艺余热回收多采用水或导热油作为传热介质,存在传热系数低、温度适用范围窄等问题。研究新型传热介质应用效果,纳米流体通过悬浮纳米颗粒增强热传导性能,实验证明添加适量浓度氧化铝纳米颗粒可显著提高水基传热介质导热系数。离子液体作为新型传热介质展现出优异温度稳定性与低蒸汽压特性,适用温度范围广泛,有效拓宽余热回收工况范围。

改进导热油分子结构,增加芳香基团比例,提高热稳定性,使用寿命显著延长。引入微胶囊悬浮液作为智能传热介质,随温度变化自动调节物理性质,实现传热过程自适应调节^[6]。优化介质流动状态,通过脉动流增强湍流换热,传热系数明显提高。建立传热介质定期分析制度,监测理化性能变化确保介质品质。

2.3 加强设备维护

建立预测性维护体系应用振动分析、红外热成像等无损检测技术,识别潜在故障点,实施早期干预。引入换热器结垢监测技术,通过测量传热系数变化趋势,建立垢层生长模型,优化清洗周期,避免过早或过晚清洗造成经济损失。开发在线清洗技术,如化学清洗循环系统或机械球刷自动清洗装置,减少停机时间。针对不同垢质的特点,研发定制化清洗方案,如碱性垢采用酸洗法,有机垢采用表面活性剂清洗。

强化密封系统维护,预防泄漏问题,提高系统安全性。实施换热表面防腐处理,延长设备使用寿命如采用钛合金、哈氏合金等耐腐蚀材料或表面喷涂技术。建立关键部件备件管理制度,确保维修及时性。开发换热器拆装专用工具,提高维护效率。制定精益维护计划,结合生产周期安排检修时间,最小化影响。建立设备健康档案,记录维护历史与性能变化,为状态评估提供数据支撑。组织技术培训,提升维护人员专业素质,掌握先

进维护理念与方法。

3 完善工艺控制

3.1 建立实时监测系统

构建多层次监测网络架构,包括现场仪表层、数据采集层、数据处理层与应用层形成闭环监测体系。部署先进测量仪表,如超声波流量计、高精度铂电阻温度传感器、智能压力变送器等,提高数据采集精度。测量精度提高可有效降低能源浪费。对关键参数如热源温度、流量、压力、介质物性等实施高频采集,缩短采样周期,捕捉工艺快速波动。引入先进数据传输技术如工业以太网或现场总线,确保通信实时性与抗干扰能力。开发边缘计算单元,实现数据就近处理,减轻中央系统负担。

3.2 优化参数设定

在传统经验参数设定模式下,余热回收系统平均运行效率远低于理论最优值。引入动态参数优化技术,根据工况变化自动调整控制参数,适应性优于固定参数模式。建立关键参数敏感性分析模型,识别高影响因子,重点优化介质流量比、温度梯度、换热器入口温度等核心参数。针对换热器运行,确定最佳流量分配比例,平衡传热效率与泵功耗关系。优化流量分配可显著提高综合效益。针对多级换热网络,应用熵产生最小化理论,确定各级换热温差分配方案,提高系统热力学完善度。

开发智能流量调节策略,根据温度变化自动调整流量,保持最佳换热效率。建立蒸汽参数优化模型,确定最经济蒸汽压力与温度平衡热能品质与利用效率。针对热网平衡调节,设计供回水温差控制策略,在满足用热需求前提下最大化回收能量。制定换热器进出口温度控制范围,避免过冷或过热现象。开发工况自适应参数调整算法,随季节变化自动优化设定值。

3.3 强化数据分析

开发特征提取算法,识别关键影响因素,构建余热系统运行特征图谱。采用时间序列分析方法,挖掘参数波动规律与周期性特征,预测余热产生趋势。引入机器学习算法,如支持向量机、随机森林等,建立余热量预测模型,实现高精度预测。开发多元线性回归模型,量化控制参数与能效指标关系,指导优化调整。实施聚类分析,将运行状态划分为多个典型工况,针对不同工况制定差异化控制策略。

开发异常工况识别算法,通过统计过程控制技术监测系统偏差,及时发现异常。构建多目标参数寻优模型,平衡能效与经济性要求。引入热力学第二定律分析方法,评估系统不可逆损失,识别改进潜力点。开发能效诊断专家系统,基于历史案例库提供优化建议。实施

设备健康状态评估,预测性能劣化趋势,指导预防性维护。通过深度数据分析,实现余热系统运行智能化与精细化管理,持续提升系统运行质量与经济效益。

4 推进设备改造

4.1 更新节能设备

制定分级设备更新策略,优先改造高能耗与高回报设备。引入高效板式换热器替代传统管壳式换热器,传热系数显著提高,占地面积大幅减少。采用新型螺旋板换热器改造高温余热回收系统,抗结垢能力提升,运行周期明显延长。更新循环泵系统引入变频控制技术,根据工况需求自动调节流量,节电效果显著。

引入先进冷凝回收技术,如低温省煤器或烟气冷凝器,回收低温余热,提高锅炉效率。更新储热设备,采用相变储热技术,能量密度大幅提高,占地需求显著减少。改造压缩机余热回收系统,采用高效油冷却器与中间级冷却器,回收率明显提高。针对烟气余热引入低温腐蚀防护技术,扩大回收温度下限。

4.2 强化自动化系统

高度自动化系统可明显提高能源利用效率,显著降低运行波动。构建分散控制系统架构,实现全流程一体化控制。开发先进控制算法,如模型预测控制,相比传统PID控制可显著提高控制精度,减小波动幅度。引入自适应控制技术,根据系统特性变化自动调整控制参数,保持最优控制效果。实施多变量耦合控制策略,处理参数间复杂相互影响,提高系统整体稳定性。建立故障诊断与容错控制系统,在设备部分失效条件下维持系统可控运行。开发工艺智能调度平台,根据生产计划与能源价格波动,优化余热利用方案,提高经济效益。

引入工业云平台技术,实现远程监控与专家诊断,提高技术支持效率。建立边缘计算架构,实施就近数据处理,降低通信延迟,提高控制响应速度。开发人机交互系统,通过可视化界面增强操作人员态势感知,提高异常工况处理能力。构建控制系统自诊断机制,监测控制回路性能,识别控制质量劣化。建立控制资产管理平台,规范控制策略版本管理,确保系统可靠升级。

4.3 改造老旧装置

首先进行换热表面强化改造,采用错流技术或增设扰流器,提高传热系数,投资小见效快。实施管束优化改造,改变管排布局或管径配置,提高流场均匀性,降低阻力。针对烟气余热锅炉增设低温省煤器,回收烟气显热,同时配套防腐设计,确保长期稳定运行。更新密封系统,采用先进机械密封或磁流体密封技术,泄漏率显著降低。

引入在线清洗装置,减少停机维护时间,提高年运行率。改造保温系统,采用新型纳米气凝胶材料,热损失明显降低。针对老旧设备安全隐患,增设状态监测装置,实现预测性维护。建立设备改造效果评估体系,通过关键性能指标监测,验证改造成效,指导后续优化。老旧装置改造遵循功能优先、经济合理、安全可靠原则,通过技术创新与精细管理,最大限度挖掘现有设备潜能,实现低投入高产 outcomes 提升目标。

结论:优化余热采集环节可精准识别热能分布特征,合理规划采集路径,选择高效装置,实现余热最大化捕获;提升换热效率措施包括优化换热器结构、改进传热介质、加强设备维护,可显著提高传热效率与系统可靠性;完善工艺控制通过建立实时监测系统、优化参数设定、强化数据分析,实现系统精细化管理与智能调控;推进设备改造通过更新节能设备、强化自动化系统、改造老旧装置,持续提升系统技术水平与运行效率。

参考文献

- [1]陈凤壮.合成氨装置工艺气余热回收系统存在的问题及改造[J].天然气化工,2019,44(5):102-106.
- [2]赵昕晖,袁祥征,王伟.合成氨生产工艺中气体交换与热能回收的优化研究[J].化肥设计,2025,63(1):58-61.
- [3]李帅,李国峰,杨伟强,等.合成氨尾气回收技术制取LNG工艺流程优化研究[J].粘接,2024,51(1):121-124.
- [4]朱月.煤化工合成氨工艺与节能优化措施分析[J].化工管理,2024(12):42-45.
- [5]黎小辉,崔静怡,夏伟,等.基于CO₂减排重塑合成氨工艺流程方案研究[J].石油化工应用,2024,43(7):85-92.
- [6]王崢,卢俊文,湛立宁,等.10MoWVNb合成氨高压厚壁管道焊接工艺研究[J].化肥设计,2024,62(1):30-33.