

# 变换汽提系统高温尾气余热耦合利用及设备防腐蚀一体化技术研究

闫国栋

大唐内蒙古多伦煤化工有限责任公司 内蒙古 锡林郭勒盟 027300

**摘要:** 变换汽提系统是煤化工生产中的关键单元,其塔顶高温尾气富含余热资源,但传统工艺中直接经水冷器冷却排放,造成大量热量损失。同时,高氨氮、高腐蚀性介质导致设备泄漏频发、蒸汽消耗上升、维护成本居高不下。本文针对上述问题,提出高温尾气余热耦合利用与设备防腐蚀一体化技术方案,通过三级梯级换热实现余热最大化回收,采用钛材水冷器与CS+衬四氟乙烯管线解决腐蚀难题,并设计新旧设备并联安装、在线切换的施工工艺。该技术方案实现了蒸汽能耗降低与设备长周期运行的双重目标,为同类装置改造提供了可复制的技术路径。

**关键词:** 变换汽提;余热耦合;阶梯利用;防腐蚀;一体化技术

**引言:** 煤化工变换汽提单元是合成气净化的重要环节,其运行状态直接影响下游装置的稳定生产。目前,多数变换汽提系统存在塔顶高温尾气余热直接排放、蒸汽消耗偏高、设备腐蚀泄漏频发等共性问题。以某公司为例,汽提蒸汽加入量从设计值18t/h增至35t/h,导致能耗大幅上涨;同时,高氨氮工况下设备腐蚀严重,检修频次增加,运维成本居高不下。针对上述痛点,本文提出高温尾气余热耦合利用及设备防腐蚀一体化技术,通过热量梯级利用回收尾气余热替代部分蒸汽输入,同步升级设备材质与施工工艺,实现节能降耗与设备长周期稳定运行的双重目标,为行业同类装置改造提供技术参考。

## 1 变换汽提系统运行现状与问题分析

### 1.1 变换汽提系统工艺流程

变换汽提系统的主要功能是将变换单元产生的工艺冷凝液进行汽提处理,脱除其中的酸性气体( $H_2S$ 、 $CO_2$ )和氨氮物质,使冷凝液达标后回用或排放。系统核心设备包括汽提塔、再沸器、塔顶水冷器、回流罐及配套管线。来自变换单元的工艺冷凝液经换热预热后进入汽提塔上部,塔底通入0.4MPa饱和蒸汽作为汽提介质,在塔内进行气液接触传质,塔顶产出含 $H_2S$ 、 $NH_3$ 的尾气,经水冷器冷却后部分回流、部分排放至后续处理单元或动力中心;塔底产出净化水,送至下游装置回用。在该工艺中,塔顶尾气温度通常为110~125℃,含有可观的热能。传统设计方案中,这部分尾气直接经水冷器与循环水换热冷却,高温余热未得到任何回收利用,全部散失至环境中。同时,由于尾气中含有高浓度氨和酸性组分,水冷器及连接管线长期处于高腐蚀工况下,设备寿命大幅缩短<sup>[1]</sup>。

### 1.2 主要运行问题

某公司甲醇中心变换汽提单元长期运行暴露出以下突出问题。一是蒸汽消耗严重超标。为维持塔顶温度及冷凝液氨氮指标达标,汽提蒸汽加入量从设计值18t/h持续攀升至35t/h,增幅接近一倍,导致蒸汽能耗大幅上涨,直接增加了生产成本。二是设备腐蚀泄漏频发。尾气中高浓度氨与酸性组分在水冷器冷凝区形成强腐蚀介质,碳钢材质水冷器管束在运行6~12个月后即出现腐蚀减薄、穿孔泄漏,频繁停车维修严重影响装置连续运行。三是维护成本居高不下。设备检修更换不仅产生直接的材料和人工费用,还因非计划停车造成产量损失,综合运维成本显著增长。四是热量浪费严重。110~125℃的高温尾气余热未加利用直接排放,造成了系统热能的巨大浪费,与节能降耗的企业目标背道而驰。

### 1.3 问题成因分析

上述问题的成因可归结为工艺设计与设备选型两方面。工艺设计层面,原流程未考虑尾气余热的回收利用,缺乏对冷热物流热量需求的系统匹配分析,致使每年约数万吉焦的尾气余热被循环水带走,未发挥任何预热作用。设备选型层面,尾气水冷器及进出口管线均采用碳钢材质,未针对高氨氮、高腐蚀工况进行材质升级或防腐内衬处理,腐蚀速率远超常规设备。同时,原设备为单台配置,一旦发生泄漏,无法在线切换检修,只能被迫停车处理,间接加剧了生产损失。此外,随着装置运行时间的延长,汽提塔内部结垢、填料效率下降等因素进一步推高了蒸汽需求,形成了“腐蚀→泄漏→停车→复产→再腐蚀”的恶性循环,亟待通过系统性技术改造打破困局。

## 2 余热耦合利用与防腐蚀一体化技术方案

### 2.1 技术方案总体思路

针对上述问题,本文提出“热量耦合与阶梯利用+设备防腐蚀一体化”技术方案。总体思路是:以尾气余热最大化回收为目标,以冷热物料温度梯度匹配为原则,构建三级梯级换热网络;以高腐蚀介质全流程隔离为保障,升级关键设备材质与管线防腐措施;以在线切换为手段,设计新旧设备并联安装工艺,确保改造期间及后续运行中系统连续稳定。该方案的核心创新在于将热量利用与防腐设计进行深度融合,传统的热量改造仅关注换热效率,忽视介质腐蚀特性对设备长周期运行的影响;传统的防腐升级仅更换材料,忽视热量回收潜力的挖掘。本方案将两者统筹考虑,在余热回收方案设计阶段即充分预判腐蚀风险,在设备选型与管线布置中同步落实防腐要求,形成“热量耦合及阶梯利用+设备防腐蚀”的一体化设计,实现节能降耗与设备长周期运行的双重目标<sup>[2]</sup>。

### 2.2 三级梯级换热网络设计

三级梯级换热网络是余热耦合利用的核心。根据塔顶尾气温度逐步降低的特性,将尾气余热按温度梯度分级利用,与系统中不同温度需求的冷物流逐级匹配换热。第一级:高温余热用于汽提塔进料预热。汽提塔进料为来自变换单元的工艺冷凝液,温度约100℃。塔顶尾气在110~125℃区间,具备加热进料的能力。通过增设高效管壳式换热器,利用高温尾气对进料冷凝液进行预热,使进料温度提升5~10℃,减少再沸器蒸汽消耗。此级换热温差大、效率高,是方案的主要节能贡献环节。第二级:中温余热用于其他辅助物流预热。根据现场工艺条件,可考虑将降温后的尾气用于余热锅炉给水或冬季采暖,进一步挖掘余热价值。第三级:低温余热经循环水冷却。尾气经前两级换热后温度降至50~60℃,此时已不具备经济性预热价值,但仍需通过水冷器进一步冷却至工艺要求的40℃以下,以保证后续分离效果。通过三级梯级设计,尾气余热实现了从高温到低温的阶梯利用,最大化回收热能,系统热效率较原流程显著提升。

### 2.3 防腐蚀设备与管线设计

针对高氨氮、高腐蚀性工况,本项目对关键设备及管线实施材质升级。尾气水冷器材质由碳钢升级为TA2工业纯钛。钛材在含氯离子、氨及酸性介质中具有优异的耐腐蚀性能,表面能形成致密氧化膜,在汽提尾气工况下腐蚀速率接近于零,可显著延长设备使用寿命。同时,钛材换热器的高导热系数保证了换热效率不因材质变更而降低。进出口管线材质升级为CS+衬四氟乙烯方案,即在碳钢管道内壁衬聚四氟乙烯层,利用PTFE的化学惰性

和低摩擦特性,隔离腐蚀性介质与金属管壁接触。该方案较全钛合金管道大幅降低了材料成本,同时保证了防腐效果。关键阀门、法兰等连接件同步采用衬四氟或钛材质,确保全流程防腐无死角。

### 2.4 新旧设备在线切换施工工艺

为保障装置连续生产,项目设计了“新旧设备并联安装、即时在线切换”的施工工艺。新增钛材水冷器与现有碳钢水冷器并列布置,共用进出水管线和尾气管线系统,通过增设切断阀门实现独立投运与切换。施工过程中,先完成新增设备基础、管线预制及阀门组安装,待具备切换条件后,无需停车即可将尾气管路从旧设备切换至新设备,再对旧设备进行隔离检修或拆除。该方案实现了改造施工与装置正常生产同步进行,规避了因改造导致的非计划停车,保证了全年经济效益。

## 3 关键技术与创新点

### 3.1 热量耦合物料换热工艺参数适配技术

本项目针对塔顶尾气110~125℃温度区间与汽提塔进料100℃加热需求,开展换热物料梯级匹配设计。通过热量平衡计算,确定了新增换热器的换热面积、介质流速、管程壳程布置等关键参数,确保余热回收过程中塔压、塔顶温度、冷凝液氨氮含量等工艺指标稳定在设计区间,避免因换热参数不当引发的工艺波动。此外,结合当前汽提塔蒸汽消耗偏高、塔压较高的现状,优化换热器操作参数,使余热回收与塔内汽液平衡形成协同效应,避免因换热参数调整导致塔压或塔顶温度失控<sup>[3]</sup>。

### 3.2 换热与防腐蚀一体化工艺设备设计

区别于常规余热回收仅关注换热效率的做法,本项目将防腐蚀性能纳入换热设计全过程。在换热器选型阶段,即确定钛材管束+碳钢壳体的复合结构,兼顾耐腐蚀性与经济性;在设计阶段,优化管板与管束的连接方式,避免缝隙腐蚀;在施工阶段,严格控制焊接工艺,确保钛材焊接质量。配套的CS+衬四氟乙烯管线在安装时需特别注意衬层完整性,法兰连接采用专用垫片和紧固力矩。通过上述一体化设计,在实现热量阶梯利用的同时,确保设备及管线在强腐蚀工况下的长周期运行。

### 3.3 原位无扰热量耦合改造施工方法

针对装置连续生产需求,项目创新了“原位无扰”热量耦合改造施工方法。通过增设旁路管线、预留阀门接口,在装置正常运行条件下完成新增设备的安装与管线连接。施工期间,新旧系统隔离,不影响原流程运行;待全部安装、试压、气密合格后,通过阀门操作实现工况无缝切换。该施工方法将改造对生产的影响降至最低,规避了传统改造模式中必须停车作业的弊端,成功解决了

连续生产装置“想改不能停”的难题,为同类技改项目提供了可复用的施工经验。

### 3.4 改造前后系统性能对比评估方法

为确保节能效益数据真实、可靠,本项目建立了基于实测数据的对比评估方法。改造前,对原汽提系统进行为期不少于72小时的连续性能基线测试,准确记录蒸汽消耗量、塔顶压力、冷凝液氨氮含量、尾气温度、循环水用量等关键数据;改造投运稳定后,在相同工况条件下进行同等时长的对比测试。通过前后数据对比,量化余热回收效率、蒸汽降耗量、年度增效等核心指标,为项目验收和效益核算提供客观依据。该方法有效避免了理论估算与实际运行效果之间的偏差,保证了技术验证的科学严谨性。

## 4 应用效果与效益分析

### 4.1 节能降耗效果

项目投运后,通过三级梯级换热网络,尾气余热得到高效回收。高温尾气预热汽提塔进料后,汽提塔再沸器所需蒸汽输入明显下降。实际运行数据显示,在相同处理负荷和工艺指标要求下,0.4MPa饱和蒸汽消耗量较改造前降低约5t/h,降幅超过14%。按年运行8000小时计算,年节约蒸汽4万吨。这一效果直接验证了热量耦合与阶梯利用技术的有效性,实现了“余热资源化替代蒸汽输入”的设计目标。

### 4.2 设备运行可靠性提升

钛材水冷器投运后,彻底消除了高氨氮尾气冷凝区的腐蚀问题。设备运行期间未发生管束泄漏、管板腐蚀等典型故障,出口管线衬四氟乙烯层完整,阀门开关灵活,系统密封性能良好。与改造前碳钢水冷器平均6-12个月即出现泄漏的状况相比,新设备预计使用寿命可延长至10年以上。设备可靠性的提升,大幅减少了因腐蚀泄漏导致的非计划停车检修,保障了装置连续运行的稳定性,间接提高了全年产量<sup>[4]</sup>。

### 4.3 经济效益分析

本项目总投资147万元,主要投入为钛材换热器采购、衬四氟管线阀门购置及安装施工费用。节约蒸汽按40元/

吨计算,年节约蒸汽费用4万吨 $\times$ 40元/吨=160万元。据此测算,项目静态投资回收期为 $147 \div 160 \approx 0.92$ 年(约11个月),年收益率达66.7%。此外,设备检修频次降低带来的维护人工费用、备件费用减少,以及因非计划停车避免的产量损失,均构成项目的隐性经济效益。综合来看,本项目投资回报周期短、收益显著,具有良好的经济性。

### 4.4 环境与社会效益

从环境保护角度,项目通过余热回收降低蒸汽消耗,相应减少了锅炉燃料煤的消耗量,每年可减少CO<sub>2</sub>排放约1.2万吨,对实现碳减排目标具有积极意义。从行业推广角度,本项目针对高氨氮、高腐蚀工况下变换汽提系统的共性问题,提供了“热量利用+防腐蚀”一体化解决方案,形成了从工艺设计、设备选型到施工组织的成套技术,可为同行业同类装置改造提供可复制的实践经验,具有良好的推广应用前景。

## 结束语

本文针对变换汽提系统高温尾气余热浪费严重、蒸汽消耗偏高、设备腐蚀泄漏频发等共性问题,提出并实施了高温尾气余热耦合利用及设备防腐蚀一体化技术方案。通过三级梯级换热网络设计,构建“高温尾气-进料预热-循环水冷却”的梯级利用模式,实现余热最大化回收;采用钛材水冷器与CS+衬四氟乙烯管线,根本解决了高腐蚀工况下的设备防腐难题;创新原位无扰施工方法,保障了装置连续生产。该技术方案为煤化工变换汽提系统的节能降耗与可靠性提升提供了有效技术路径,具有良好的推广应用价值。

## 参考文献

- [1]杨德明,张宇,代志先.基于热泵技术的PVC干燥尾气的低温余热利用研究[J].现代化工,2025,45(2):226-231.
- [2]李臣果.变换汽提系统设备腐蚀原因分析及解决措施[J].大氮肥,2025,48(1):7-9,19.
- [3]李强,王海峰.变换汽提系统运行问题分析及改造实践[J].大氮肥,2025,48(1):23-27.
- [4]李家栋,曹珍,白成海,等.变换冷凝液汽提系统优化改造总结[J].中氮肥,2022(2):37-39.