

在线反洗超滤装置的节能降耗创新实践研究

杨博超 王建旭

国家能源集团宁夏煤业煤制油分公司 宁夏 银川 750000

摘要：针对煤化工水处理系统中超滤装置传统清洗模式存在的停机损耗大、资源消耗高、膜污染清理不彻底、自动化运维水平低等行业共性痛点，本文依托现场开展化学清洗在线反洗超滤装置的工艺优化、设备改造及工程应用研究。通过优化工艺管路布局、加装水质调控与精密过滤设备、升级自动化控制系统、建立标准化运维体系，构建闭环式化学清洗在线反洗一体化装置。本改造突破常规在线反洗仅依靠自产产水反洗的技术局限，实现RO膜化学清洗达标废水梯级资源化复用，达成超滤装置不停机、连续化、自动化在线化学反洗作业。工程实践表明，该装置可有效降低超滤膜跨膜压差，稳定产水水质，大幅削减新鲜水与药剂消耗，减少清洗废水外排，降低岗位运维强度，延缓超滤膜老化、延长膜组件使用寿命。项目实现了水处理系统节能降耗、提质增效、绿色减排的综合目标，装置运行稳定、工况适配性强，具备良好的现场实用性与行业推广价值^[2]。

关键词：煤化工；超滤装置；在线反洗；化学清洗；节能降耗；资源化利用

引言：煤化工是我国能源转化与基础化工原料生产的支柱产业，具有高耗水、高污染、水质工况复杂的特点，水处理系统的稳定高效运行是装置连续安全生产、企业绿色低碳发展的重要保障。超滤装置作为水处理前端核心预处理设备，主要拦截水体悬浮杂质、胶体、微生物及大分子有机物，其运行状态直接决定反渗透、蒸发结晶等深度水处理工艺的进水水质，对整套水处理系统运行效率与生产连续性起到决定性作用^[3]。

煤化工废水高盐、高悬浮物、高有机物、水质波动大的特性，导致超滤装置长期恶劣工况运行下膜丝易吸附污染物、膜孔易结垢堵塞，造成跨膜压差上升、产水通量衰减，必须定期清洗恢复膜性能^[4]。目前国内多数煤化工企业采用“离线化学清洗+常规物理反洗”运维模式，弊端显著：离线化学清洗需整套系统停机8~12h，年度停机清洗18~22次，频繁停机造成产水中断、产能损耗；同时离线清洗消耗大量新鲜水与酸碱药剂，清洗废水直接外排，资源浪费与环保处置压力突出。常规物理反洗仅能清除膜表面浮尘，无法去除膜孔内部顽固污染物，膜污染持续累积加速膜丝老化，大幅缩短膜组件使用寿命，抬高运维成本^[5-6]。

现有行业在线反洗技术多以超滤自产产水为介质，通过气水脉冲实现滤芯再生，虽简化操作流程，但清洗方式单一、去污能力有限，未适配煤化工复杂水质，且无废水资源化复用功能，节能与治理效果不足^[1]。企业RO膜化学清洗产生的达标废水水质洁净，完全满足超滤反洗用水标准，但原有工艺无回用通道，直接外排造成优质水资源浪费，增加企业水耗与环保压力^[7]。

1 课题背景与选题意义

1.1 课题背景

国家能源集团宁夏煤业煤制油分公司超滤装置承担全厂生产用水与工艺回水预处理任务，长期处于高污染、高盐复杂水质工况中，膜丝结垢、污染、堵塞问题频发，导致跨膜压差异常升高、产水水质波动、运行效率下降。现场运维数据显示，传统离线化学清洗模式作业周期长、停机频次高，单次清洗停机8~12h，年度累计停机18~22次，严重压缩有效产水时长。资源消耗方面，单次离线清洗消耗新鲜水15~20m³、酸碱药剂0.8~1.2t，年度资源消耗量大、运维成本居高不下。

原有物理反洗仅能实现表层冲洗，无法清除膜孔内部顽固污染物，膜污染持续累积导致设备性能逐年衰减。改造前超滤膜跨膜压差由初始0.03MPa攀升至0.15MPa以上，产水效率下降30%以上，膜组件实际更换周期仅1.5~2年，远低于设计寿命，设备更换与检修成本较高。同时厂区RO膜化学清洗日均产生0.8~1.2m³达标废水，具备极高回用价值，但原有工艺无回用管路，全部直接外排，既浪费水资源，也加重后端污水处理负荷。基于上述现场痛点与行业技术短板，本次QC项目搭建专用在线化学反洗装置，实现超滤不停机、资源化、自动化反洗，全面提升系统节能降耗水平与运行稳定性。

1.2 选题意义

本课题聚焦煤化工超滤运维核心痛点，针对传统清洗能耗高、停机多、清洗不彻底、运维繁琐等问题开展创新改造，相比传统工艺与现有在线反洗技术，具备多重实践价值。

第一,节能降耗、降低运行成本。改造实现RO清洗废水梯级循环复用,改变传统工艺大量消耗新鲜水与药剂的模式,弥补常规在线反洗无废水资源化利用的短板,有效降低水耗、药耗与废水处置成本。

第二,稳定工况、保障连续生产。搭建不停机在线化学反洗体系,彻底消除离线清洗停机干扰,规避常规在线反洗局部停机隐患,延长系统连续运行时长,保障生产用水稳定供给。

第三,缓解膜污染、延长设备寿命。依托水力冲刷与化学药剂协同作用,深度清除膜丝内外污染物,稳定跨膜压差,延缓膜老化速率,有效延长超滤膜使用寿命,降低设备更换成本。

2 现场问题梳理与目标制定

2.1 现场现存核心问题

结合现场运行数据、设备工况及行业技术对比,梳理出制约超滤系统高效稳定运行的五大核心问题,现有常规在线反洗技术无法有效解决。

一是清洗效果不足,膜污染反复滋生。原有单一物理反洗仅能清除表面松散杂质,无法剥离膜孔内部有机物、胶体与盐垢,清洗彻底性差,导致产水浊度、SDI指标波动大,难以稳定达标。现有在线反洗技术未适配煤化工高污染水质,清洗效果有限。

二是停机频次偏高,生产连续性差。传统离线化学清洗需整机停机,造成水处理系统中断产水,产生非计划产能损耗。常规在线反洗无闭环自控体系,工况稳定性不足,仍存在局部停机隐患。

三是资源消耗过大,运维成本偏高。离线清洗模式水耗、药耗、废水外排量大,资源浪费严重,不符合节能降本要求。现有在线反洗无废水复用功能,仅依靠自产产水反洗,资源利用率极低。

2.2 项目目标制定

结合现场痛点与企业管控要求,对标行业技术短板,制定本次改造五大核心目标,实现提质、增效、节能、降本、减排全方位升级。

运行管控目标:搭建不停机在线化学反洗系统,实现超滤装置全程不停机反洗作业,消除非计划停机损耗,保障水处理系统连续稳定运行。

水质保障目标:反洗后超滤产水浊度 $\leq 0.1\text{NTU}$ 、SDI ≤ 3 ,跨膜压差稳定控制在 0.1MPa 以内,产水水质持续达标,清洗效果优于行业常规技术。

节能降耗目标:RO清洗废水回用率 $\geq 85\%$,药剂消耗量降低50%以上,新鲜水消耗量减少70%以上,大幅提升水资源利用率。

运维效率目标:单次反洗时长缩短40%以上,系统非计划停机时间减少90%,建成全自动闭环管控体系,减少人工干预。

成本管控目标:通过节水、节药、减停机、延寿命多重效益叠加,年度节约水处理综合运行成本不低于5万元,实现经济、环保、社会效益共赢。

3 问题根源分析与关键要因核定

3.1 根源分析方法

本次项目采用鱼骨图分析法,从人员、设备、物料、工艺、环境、监测六大维度全面排查问题成因,结合现有在线反洗专利技术(CN-111632425-A)应用短板,逐一对比验证、剔除次要因素,精准锁定核心症结,明确改造优化方向。

3.2 核心根源排查

经现场排查、数据复盘与工艺核对,确定四项核心问题根源。

第一,工艺设计不完善。原有系统无专用在线化学反洗管路与废水回用通道,无法实现不停机在线化学反洗,只能依赖传统停机清洗模式,是行业多数在线反洗技术的共性短板。

第二,配套设备不齐全。缺少压力调控、精密过滤、水质在线监测设备,无法精准管控反洗水质、水压与流量,既难以保障清洗效果,还存在膜组件损伤风险。

第三,操作流程不规范。无标准化在线反洗作业规程,运维操作依赖人工经验,参数设置、作业流程随机性强,清洗效果稳定性差。

3.3 关键要因核定

经现场试验验证,剔除次要干扰因素,锁定三项关键关键要因:一是专用在线反洗管路缺失,是不停机清洗落地的核心瓶颈;二是过滤、调控、监测配套设备缺失,无法保障反洗水质与设备安全;三是无标准化自控运维体系,操作不规范、管控精度低,导致清洗效果不稳定、资源消耗偏高。

4 创新方案设计与落地实施

4.1 核心创新思路

本次改造依托现有化学清洗系统,搭建闭环式在线化学反洗一体化装置,突破常规自产水反洗模式局限。充分利用RO膜化学清洗达标废水的洁净水质与残余药剂优势,经过滤、稳压、水质监测预处理后,通过专用防腐管路反向输送至超滤装置,实现低压、可控、全自动在线化学反洗。依靠水力冲刷与化学药剂协同去污,深度清除膜丝内外污染物,全程无需停机、无二次污染,实现废水梯级复用、设备连续运行、系统节能增效。

4.2 具体实施举措

针对三项核心要因,结合现场工况制定三项针对性改造举措。

一是工艺管路优化改造。新增耐酸碱衬胶专用反洗管路,打通RO清洗系统与超滤装置连通通道,构建闭环反洗回路。加装压力调节阀与双止回阀组,将反洗压力稳定控制在0.2~0.3MPa,避免高压冲击损伤膜丝,全部管路适配酸碱工况,杜绝腐蚀渗漏问题。

二是配套辅助设备加装。增设立式缓冲过滤罐体,截留回用废水微量杂质,杜绝二次堵膜;加装在线pH、浊度监测仪表,实时监控反洗水质,实现水质参数可控可调,保障反洗质量与膜组件安全。

三是自控系统升级优化。将新型反洗系统接入原有PLC自控平台,预设反洗时长、频率、流量等核心参数,实现流程自动启停、运行、复位。新增故障识别、声光报警、工况自动切换功能,异常状态下即时切换原运行模式,全程不影响生产。

4.3 实施过程质量管控

项目采用分步施工、试点先行模式,错峰开展施工调试,避免干扰正常生产。选取单套装置试点试运行,持续优化运行参数,工况稳定后全面推广。全程落实专人监护、台账记录与应急管控,全方位规避生产风险,保障改造质量达标落地。

5 实施效果检验与效益剖析

5.1 实施效果检验与验证

经1个月连续试运行监测,改造后各项指标均超额达标,整体效果优于传统工艺与常规在线反洗技术。超滤膜跨膜压差稳定控制在0.1MPa以内,膜污染清除彻底;产水浊度稳定 $\leq 0.09\text{NTU}$ 、SDI ≤ 2.5 ,水质稳定性大幅提升;装置实现全程不停机反洗,系统连续运行率达99%以上,非计划停机时间减少95%;废水回用率88%,药剂消耗量降低52%,新鲜水消耗量减少73%,节能降耗成效显著。

5.2 经济效益剖析

本次改造成效经济收益突出。直接成本方面,年度节约新鲜水、药剂、人工运维等综合成本超5.2万元,较常规在线反洗技术年多节约成本1.5万元以上。设备效益方面,超滤膜使用寿命延长1~2年,大幅降低设备采购与检修成本。间接收益方面,彻底消除停机产能损耗,延长有效产水时长,年度间接增产收益超3万元,综合降本效果显著。

5.3 环保效益剖析

改造绿色减排优势明显,年度减少清洗废水外排 150m^3 以上,有效减轻后端污水处理负荷与环保处置成

本。药剂使用量大幅削减,降低化学品污染风险,实现RO清洗废水资源化循环利用,降低企业综合水耗,助力企业落实绿色低碳生产要求,提升清洁生产水平。

6 成果巩固举措与标准化建设

为固化改造成果、保障装置长效稳定运行,制定四项标准化巩固措施。一是制度固化,将反洗工艺、操作流程、维保规范纳入车间常态化管理制度,明确岗位责任与考核标准;二是常态化维保,定期检修校准管路、阀门、在线仪表及自控系统,及时排查设备隐患;三是动态优化,结合水质与工况变化,持续优化反洗核心参数,保持最优运行工况。

7 结论与展望

7.1 项目结论

本次项目通过管路优化、设备加装、自控升级、制度规范四项举措,成功搭建闭环式化学清洗在线反洗一体化装置,有效突破传统离线清洗与常规在线反洗技术短板,解决了超滤装置清洗不彻底、停机损耗大、能耗偏高、运维低效、膜寿命短等核心问题。实践证明,该装置运行稳定、适配性强,可在不影响生产的前提下完成深度化学清洗,有效稳定产水水质、控制跨膜压差、延缓膜污染老化,同时实现废水资源化复用,圆满达成节能降耗、提质增效、绿色减排的多重目标。

7.2 后续工作展望

后续将持续开展技术迭代升级,进一步提升装置智能化与适配性。一是升级智能自控系统,新增远程监控、智能调参功能,减少人工干预;二是拓展适用工况,优化不同水质、不同负荷下的反洗参数,扩大技术适配范围;三是优化工艺模式,探索最优药剂配比与反洗频次,进一步压缩运行成本。

参考文献

- [1]国家知识产权局.一种过滤器自动反洗设备及反洗方法[P].CN-111632425-A,2020-09-08.
- [2]张磊,李娟.煤化工水处理系统超滤装置运维优化研究[J].煤化工,2023,51(2):78-82.
- [3]王浩,赵阳.超滤膜污染控制技术研究进展[J].水处理技术,2022,48(7):1-7.
- [4]刘敏.煤化工废水处理中超滤装置在线清洗技术应用[J].化工环保,2021,41(5):589-593.
- [5]陈峰,杨艳.超滤装置离线与在线清洗技术对比分析[J].石油化工应用,2022,41(3):145-148.
- [6]周明.煤化工RO膜清洗废水资源化利用技术研究[J].中国资源综合利用,2023,41(4):123-126.
- [7]吴涛,郑丽.绿色低碳理念下煤化工水处理节能技术创新[J].化工进展,2022,41(S1):345-348.