

典型煤化工干馏废水高效处理与资源化循环利用关键技术研究

刘 成 胡海龙

新疆广汇煤炭清洁炼化有限责任公司 新疆 哈密 839000

摘 要：典型煤化工干馏废水高效处理与资源化循环利用可通过全流程工艺优化与单元技术创新，实现污染物深度削减与各类资源高值化回收。研究聚焦废水处理各环节实操性技术优化，突破高浓度难降解污染物去除、资源回收效率低等行业痛点，优化工艺参数与单元耦合模式，降低处理成本与能耗。技术可实现废水回用与盐类、酚氨等资源高效回收，解决传统工艺运行不稳定、资源化程度低等问题，为煤化工行业绿色低碳转型提供可落地的技术支撑。

关键词：典型煤化工；干馏废水；高效处理；资源化循环利用；关键技术

引言：煤化工干馏废水源于煤低温干馏、煤气净化等核心工序，水质呈现高浓度、高毒性、成分复杂等特点，含有大量酚类、氰化物、氨氮及多环芳烃等难降解污染物。传统处理工艺普遍存在预处理不彻底、生化系统抗冲击能力弱、深度处理能耗高、资源回收率低等问题，导致出水难以稳定达标且造成资源浪费。针对此类实际痛点，研究聚焦高效处理与资源化循环利用关键技术，优化各单元工艺参数与装备配置，强化污染物梯级削减与资源分级回收，推动废水处理向高效化、资源化、低成本方向转型。

1 预处理单元关键技术优化

1.1 焦粉-焦油高效分离技术

煤化工干馏废水中含有的大量焦粉颗粒与重质焦油组分离易相互粘附，形成粘性胶状混合物，不仅大幅提升废水粘度，还会堵塞后续处理单元的管道与填料，降低整体处理效率。采用旋流分离与聚结除油耦合工艺，通过优化旋流构件角度与内部流道设计，使废水在离心力场作用下实现焦粉与水相的初步分离，焦粉沿器壁沉降到底部，通过定期排泥装置集中排出。在旋流分离后设置改性纤维聚结填料层，利用填料表面亲油疏水的特性，使废水中分散态的小油滴快速聚结为大油滴，上浮至液面形成油层并通过连续收油装置收集。控制废水流速维持在1.2-1.5m/s范围，配合填料填充密度65%-70%，可使焦粉去除率稳定在92%以上，焦油去除率突破85%，大幅降低废水粘度与后续处理单元的运行负荷，避免填料堵塞导致的停机维护。

基金项目：新疆维吾尔自治区重点研发计划项目-典型煤化工干馏废水资源化回用全流程工艺研究与示范应用（2023B01012-3）

1.2 酚氨协同萃取回收技术

酚类与氨氮是干馏废水的核心污染物，同时具备较高回收价值，传统单一萃取工艺存在酚类回收率偏低、氨氮脱除不彻底、萃取剂损耗大等缺陷，难以实现资源高效回收。研发IPE-PO酚油协同萃取剂，以醚类与酯类复配为主体，通过分子结构优化提升对单元酚、多元酚的选择性溶解能力，同时弱化对氨氮的共萃取效应，减少萃取剂损耗与后续处理负担。采用三级逆流萃取模式，控制废水与萃取剂体积比为1:0.8，使两者逆向充分接触，调节萃取温度至45-50℃、pH值7.5-8.0，可使酚类回收率稳定在95%以上，萃取相经减压蒸馏分离后得到合格粗酚产品，实现酚类资源高值化回收^[1]。萃余废水进入蒸汽汽提塔，控制蒸汽压力0.4MPa、塔内温度110℃，使游离态氨与蒸汽共沸挥发，经冷凝吸收后制得浓度20%以上的浓氨水，氨氮脱除率达90%以上，既去除污染物又实现氨资源回收。

1.3 高效脱氰预处理技术

干馏废水中的氰化物多以络合态与游离态共存，传统碱式氯化法脱氰效率低，且易生成氰酸盐等二次污染物，增加后续处理难度与污泥处置成本。自主合成铁基-稀土复合脱氰药剂，药剂中活性铁离子可与络合态氰化物发生配位置换反应，将稳定的络合物转化为易降解的游离氰，再通过药剂中的氧化基团将游离氰氧化分解为无毒的氮气与二氧化碳，避免二次污染产生。控制药剂投加量300-350mg/L、反应pH值8.5-9.0、反应时间40-50min，配合机械搅拌速率120r/min强化传质效果，可使总氰去除率达90%以上，出水总氰浓度降至0.2mg/L以下，满足后续生化处理进水要求。该技术反应过程无有毒副产物生成，污泥产生量较传统工艺减少35%，有效降低污泥脱水、填埋等后续处

置成本,提升预处理环节的经济性。

2 生化处理单元效能提升技术

2.1 梯级生物降解耦合技术

经预处理后的废水仍含有大量杂环化合物、多环芳烃等难降解有机物,可生化性较差且对微生物存在明显毒性抑制,单一生化工艺难以实现污染物高效去除。构建厌氧水解-好氧化-深度硝化梯级降解体系,厌氧段装填多孔火山岩填料,驯化专属水解酸化菌群,在缺氧环境下将复杂杂环、多环芳烃类污染物开环断链,转化为易被微生物降解的小分子有机酸,使废水B/C值由0.25提升至0.4以上,大幅改善废水可生化性。好氧段采用活性污泥-生物膜复合工艺,投加耐毒降解菌群,控制溶解氧浓度2.5-3.0mg/L、污泥龄25-30d,强化苯酚、苯系物等易降解有机物的去除,降低废水COD浓度^[2]。深度硝化段富集亚硝化菌与硝化菌,控制溶解氧浓度1.5-2.0mg/L、温度25-28℃,将废水中剩余的氨氮与有机氮转化为硝酸盐,总氮去除率达75%以上,使生化出水COD稳定在150mg/L以下,满足深度处理进水标准。

2.2 生物强化与抗冲击调控技术

煤化工干馏废水水质波动幅度较大,生产负荷调整时易出现COD、氨氮浓度骤变现象,极易引发生化系统污泥膨胀、微生物活性下降,导致处理效率骤降甚至系统崩溃。定向驯化耐毒复合菌剂,包含假单胞菌、芽孢杆菌等高效降解菌株,通过逐步提升废水毒性浓度的方式完成驯化,使菌剂对酚类耐受浓度达800mg/L、对氰化物耐受浓度达50mg/L,提升菌群对有毒污染物的耐受能力。在生化池设置在线水质监测探头,实时采集COD、氨氮、pH值等关键参数,联动智能控制系统自动调节曝气量、污泥回流比与菌剂投加量。当水质浓度异常升高时,系统自动增加菌剂投加量至0.5%、提升溶解氧浓度至3.0mg/L,确保水质波动期系统COD去除率仍保持80%以上,避免污泥流失与系统崩溃,显著提升生化处理系统的稳定性与抗冲击能力。

2.3 泥水高效分离与污泥减量技术

传统生化池泥水分离效率低下,污泥沉降性能差,易导致出水悬浮物超标,且剩余污泥产量较大,增加污泥脱水、填埋等处置成本,影响整体处理工艺的经济性。设计反应-沉淀耦合一体化装备,将生化反应区与沉淀区内置连通,减少废水转运过程中的能耗与污染物泄漏,沉淀区设置斜管组件,倾角60°、间距80mm,利用浅层沉淀原理缩短污泥沉降距离,大幅提升泥水分离效率。控制装备表面负荷0.8-1.0m³/(m²·h),可使出水悬浮物浓度降至20mg/L以下,污泥回流浓度提升至8-10g/L,

强化生化反应效果^[3]。采用臭氧-污泥破解耦合技术,向剩余污泥中投加低浓度臭氧,破坏污泥菌体细胞壁,释放胞内有机物并回流至生化池进行二次降解,控制臭氧投加量15-20mg/gVSS、破解时间30min,可使剩余污泥产量减少40%以上,有效降低污泥脱水与填埋成本,提升生化处理单元的资源利用率。

3 深度处理与资源化循环利用技术

3.1 非均相催化臭氧氧化技术

生化出水中仍残留部分难降解有机物与色度物质,这类物质化学性质稳定,常规臭氧氧化工艺处理效率低、臭氧利用率不足40%,难以满足废水回用或达标排放要求,需通过高效氧化技术进一步去除。制备锰-稀土-镁复合多孔活性炭催化剂,以活性炭为载体,采用浸渍法负载锰、稀土、镁等活性金属组分,浸渍浓度为5%-8%,浸渍时间为12-16小时,经烘干、焙烧后制成催化剂,优化制备工艺使催化剂比表面积达800-900m²/g,孔径分布在2-5nm,丰富的孔道结构为氧化反应提供充足活性位点,提升臭氧分解效率。采用塔式催化氧化反应器,反应器高度为8-10m,直径为1.5-2.0m,使废水与臭氧逆向接触,臭氧通过分布器均匀分散在废水中,控制臭氧投加量80-100mg/L、反应pH值7.0-7.5、接触时间45-60min,催化剂可催化臭氧快速分解产生大量羟基自由基,其氧化能力是臭氧的2倍以上,可快速降解难降解有机物。难降解有机物被羟基自由基彻底矿化分解,转化为二氧化碳与水,使出水COD降至50mg/L以下、色度去除率达95%,水质满足初级回用标准,同时使臭氧利用率提升至90%以上,臭氧损耗量减少60%,降低氧化处理环节的能耗与运行成本,催化剂使用寿命可达18-24个月,减少催化剂更换频次。

3.2 膜集成脱盐与水资源回用技术

深度氧化处理后的废水含盐量仍维持在1500-2000mg/L,主要含有氯化钠、硫酸钠等盐类物质,需通过脱盐处理才能满足煤化工生产回用要求,传统脱盐工艺如蒸发结晶能耗高、水回收率低,难以实现水资源高效利用。构建超滤-纳滤-反渗透三级膜集成工艺,超滤膜采用聚偏氟乙烯材质,截留分子量100kDa,膜孔径为0.01-0.1μm,有效去除废水中残留的悬浮物与胶体物质,确保产水浊度≤0.5NTU,避免后续膜组件污染,超滤膜运行通量控制为80-100L/(m²·h),定期采用反洗水进行反洗,反洗周期为30-60分钟。纳滤膜重点截留二价离子与部分残留有机物,二价离子截留率达90%以上,降低反渗透膜的污染风险,延长膜组件使用寿命,纳滤膜运行压力控制为0.8-1.0MPa,通量为50-60L/(m²·h)。反渗透膜脱盐

率达98%以上,可使产水电导率 $\leq 50\mu\text{S}/\text{cm}$,满足锅炉补水、工艺冷却等生产用水要求,反渗透膜运行压力为1.2-1.5MPa,通量为 $30-40\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ^[4]。控制膜系统操作压力,配合定期在线化学清洗,清洗药剂采用柠檬酸与氢氧化钠混合溶液,清洗周期为7-10天,可使膜通量衰减速率降低60%,膜组件寿命延长至3-5年,反渗透产水回用于生产环节,使水资源回用率达90%以上,减少新鲜水消耗量,降低企业用水成本,实现水资源循环利用。

3.3 浓水分盐结晶与盐类资源化技术

膜系统运行过程中会产生含盐量8%-12%的浓水,这类浓水含盐量高、成分复杂,若直接排放不仅造成盐污染,还会浪费其中的氯化钠、硫酸钠等盐类资源,不符合资源化循环利用要求,需通过分盐结晶技术实现资源回收与浓水零排放。采用低温冷冻-热法耦合分盐结晶工艺,浓水先进入冷冻结晶单元,冷冻设备采用板式冷冻机,控制温度 $-5-0^\circ\text{C}$,冷冻时间为4-6小时,利用硫酸钠在低温环境下溶解度快速降低的特性,使硫酸钠析出晶体,经离心分离后得到十水硫酸钠产品,离心转速为 $3000-4000\text{r}/\text{min}$,分离时间为15-20分钟,实现硫酸钠资源回收,硫酸钠纯度达98%以上。冷冻母液进入MVR蒸发结晶单元,MVR蒸发器采用降膜式蒸发器,控制蒸发温度 $60-70^\circ\text{C}$ 、真空度 -0.08MPa ,在低温低压环境下实现水分蒸发,蒸发速率为 $10-15\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,使氯化钠逐步结晶析出,经洗涤干燥后得到纯度95%以上的工业盐,可用于煤化工生产或其他工业领域,实现氯化钠资源回收^[5]。分盐过程中优化搅拌速率与过饱和度控制,搅拌速率为 $60-80\text{r}/\text{min}$,过饱和度控制在1.1-1.2,避免混盐与复盐生成,确保硫酸钠与氯化钠回收率分别达90%、92%以上。

结晶母液中少量杂盐经固化稳定化处理后安全填埋,固化剂投加量为杂盐质量的10%-15%,固化时间为24小时,实现浓水零排放与盐类资源全回收,副产物收益可抵消部分处理成本,提升整体工艺的经济性与环保性。

结语

典型煤化工干馏废水高效处理与资源化循环利用关键技术通过预处理、生化处理、深度处理与资源化单元的协同优化,实现污染物深度削减与各类资源高效回收。预处理阶段完成焦粉焦油分离与酚氨资源回收,生化阶段实现难降解污染物梯级降解,深度处理阶段完成氧化脱色、脱盐回用与盐类分盐结晶。技术应用可使废水回用率超90%,酚、氨、盐类资源回收率均达90%以上,有效解决传统工艺存在的痛点问题。该技术体系贴合煤化工行业实际生产需求,为行业废水资源化利用提供成熟可行的技术路径,具备显著的推广价值与应用前景。

参考文献

- [1]肖丽光,刘爽.油页岩干馏废水中高氨氮回收处理技术[J].露天采矿技术,2023,38(5):52-54.
- [2]李娜,邓一兴,李国德,等.MBBR处理油页岩干馏废水不同挂膜方式的性能比较[J].环境工程,2021,39(6):59-64,178.
- [3]何强,姬一卜.兰炭废水高效处理与资源化利用技术研究[J].化工管理,2025(19):68-71.
- [4]张志宝.煤化工高盐废水处理工艺的研究及优化运行[J].清洗世界,2022,38(12):26-28.
- [5]辛海,闫玉麟,徐振宇.浅析油页岩低温干馏工艺VOCs治理方案[J].辽宁化工,2025,54(6):1054-1057.