

煤化工污水深度处理及回用工艺优化研究

张宝玉

久泰能源（准格尔）有限公司，内蒙古 鄂尔多斯 010319

DOI:10.61369/ME.2026020018

摘 要： 煤化工产业高质量发展导向下，强化对污水的深度处理和回用，已经成为生产管理变革的必然要求，也是减少生产污染排放的重要路径。但是由于污水成分较为复杂、难降解有机物浓度高、盐分高，处理难度相对较大，需要结合实际选用合适的深度处理技术。本文从煤化工污水特征和处理需求出发，以零排放理念为导向，系统说明电解氧化、双膜法、臭氧催化氧化、芬顿氧化等深度处理技术原理和应用成效，系统说明深度处理后的回用工艺优化策略，以此为煤化工企业污水治理和资源化利用提供参考，为推动煤化工产业高质量发展起到应有促进作用。

关 键 词： 煤化工；污水；深度处理；回用

Research on the Optimization of Deep Treatment and Reuse Process of Coal Chemical Wastewater

Zhang Baoyu

Jiutai Energy (Zhungeer) Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 010319

Abstract： Under the guidance of high-quality development of the coal chemical industry, strengthening the deep treatment and reuse of sewage has become an inevitable requirement for production management reform and an important path to reduce production pollution emissions. However, due to the complex composition of sewage, high concentration of difficult to degrade organic matter, and high salt content, the treatment difficulty is relatively high, and suitable deep treatment technologies need to be selected based on actual conditions. This article starts from the characteristics and treatment needs of coal chemical wastewater, guided by the zero emission concept, and systematically explains the principles and application effects of deep treatment technologies such as electrolytic oxidation, double membrane method, ozone catalytic oxidation, Fenton oxidation, etc. The system also explains the optimization strategies for the reuse process after deep treatment, providing reference for wastewater treatment and resource utilization in coal chemical enterprises, and playing a necessary role in promoting the high-quality development of the coal chemical industry.

Keywords： coal chemical industry; sewage; deep processing; reuse

煤化工是我国能源化工产业的重要组成部分，也是国民经济健康稳定发展的支柱性产业，但是受工艺和技术影响，在生产过程中会消耗大量水资源，产生大量污水，这些污水具有浓度高、成分复杂等德政，且含有酚类、多环芳烃、氰化物等有毒有害物质，部分有机物降解难度较大。单纯依靠传统生化处理工艺，污染指标控制不到位，无法满足高质量发展要求。以此为背景，系统分析煤化工污水深度处理工艺，优化回用工艺，是提升煤化工行业水资源利用效率，降低环境污染，推动行业整体高质量发展的必然要求。

一、煤化工污水特征与处理需求

（一）煤化工污水特征

煤化工污水主要包括气化废水、焦化废水、液化废水及各类洗涤、冷却排污水等种类型，处理难度大。从整体上而言，主要具有如下几种特征：（1）有机物成分复杂、浓度高，依据实验测定，污染物包括酚类、多环芳烃、杂环化合物及长链烷烃等多种物质，其中来自焦油分离、煤气洗涤等环节的酚类化合物占比最高，且具有较高生物毒性；萘、蒽等多环芳烃类物质，由于结

构较为稳定，极难被微生物分解^[1]。（2）无机成分复杂、含盐量高，在煤化工生产过程中，为控制设备腐蚀和结垢现象，需要投加不同剂量的化学药剂，在冷却塔、锅炉等污水中，也富集大量盐分，以此导致污水中总溶解固体浓度相对偏高，部分含盐污水电导率可达到2000~3000 μ S/cm。在阳离子和阴离子含量较高情形下，后续处理会对生化系统微生物活性产生抑制作用，甚至导致膜处理运行不稳定^[2]。（3）水质波动大、生物毒性强，在煤化工处理过程中，受煤种差异、生产负荷变化及设备周期性清洗等因素影响，污水水质通常呈现显著波动性特征，COD、氨氮及特

作者简介：张宝玉（1986.02-），男，汉族，内蒙古赤峰市翁牛特旗人，本科，中级化工工程师，研究方向：煤化工、烯烃工艺生产运行、技术管理及运行优化。

征污染物浓度常会发生变化，峰值浓度远高于平均值，对处理效果产生影响。酚类、氰化物及杂环化合物等物质，在浓度过高情形下，也会对微生物产生显著抑制作用，使得常规生化处理系统难以稳定运行，对出水水质产生影响。

（二）零排放背景下污水处理需求

双碳目标指引下，煤化工污水处理逐渐朝向“零排放”方向转型，要求在污水处理中，充分利用技术优势，将污水中的污染物以固体形式或气体形式分离出来，在厂区内实现污水的全部回用^[3]。以此为指引，要求在污水处理中，不仅要高效去除有机污染物和悬浮物，还需要深度脱除盐分，实现水质的分级分质回用，能够满足不同生产环节再生水利用要求。但是就技术层面而言，传统单一生化处理或物理化学方法，都无法满足零排放对出水水质的要求，必须要在预处理基础上，通过多种深度处理技术的有机结合，加强各单元工艺协同，逐步削减污染物，实现资源的最大化回收利用^[4]。在回用标准要求更加严格背景下，传统粗放式污水处理运行管理方式，已经无法保障系统长期稳定运行，需要积极采用在线监测、智能控制及数字孪生等技术，实现基于实时水质数据的工艺参数动态优化，提升系统运行稳定性和经济性，有效提升污水回用水平。

二、煤化工污水深度处理技术

（一）电解氧化技术

电解氧化技术在煤化工污水深度处理中的应用，主要是通过阳极反应生成羟基自由基等强氧化性物质，高效分解污水中难降解的有机物，处理效果受电极材料选择和反应条件控制直接影响。以硼掺杂金刚石电极或钛基涂层电极为阳极，通过外加电场作用下，在阳极表面可生成羟基自由基。利用羟基自由基的氧化还原电位作用能力，分解有机污染物分子结构，逐步矿化为CO₂和H₂O₂，实现污水的有效处理^[5]。以某煤化工企业处理生化出水项目为例，进水COD浓度为150~200 mg/L，氨氮浓度为20~30 mg/L，选用钛基涂层阳极，运行电流密度设定为15~25 mA/cm²，电解时间30~60 min。依据运行结果分析，COD的平均去除率达35%~45%，处理后COD稳定在100 mg/L以下；对氨氮去除率约30%，结合后续沉淀处理，出水氨氮浓度控制在15 mg/L以内；酚类、氰化物等高毒性有机物去除率达90%以上，整体去除效果显著，有效提升水质安全^[6]。

（二）双膜法深度处理技术

双膜法在污水深度处理中具有较为广泛应用，主要是指超滤与纳滤或反渗透的工艺组合形式，是煤化工污水深度脱盐和回用的核心单元。以超滤进行预处理，能够有效截留污水中的悬浮物、胶体和大分子有机物，悬浮物去除率能够达到99.03%以上，

浊度降低至1NTU以下，确保后续反渗透系统稳定运行^[7]。纳滤膜主要起到选择性截留Ca²⁺、Mg²⁺和SO₄²⁻等二价及高价离子作用，总硬度脱除率能够达到98.23%，主要用于循环冷却水补充水处理环节。反渗透膜在脱盐率方面具有显著优势，能够截留97%以上的盐分和绝大部分有机物，处理后水质能够满足锅炉补给水等需求。

（三）臭氧催化氧化工艺

臭氧催化氧化工艺是指在臭氧氧化基础上，利用不同形式的催化剂，使臭氧分解产生更多羟基自由基，强化有机物的氧化分解，在分解污水中残留酚类、多环芳烃等难以降解的有机物方面，具有良好处理效果，能够有效改善出水的可生化性。传统的臭氧氧化工艺，对COD的去除率多在50%以下，臭氧利用率也较低，因此当前多是采用“臭氧催化氧化+曝气生物滤池”组合工艺进行处理。先利用羟基自由基将污水中难降解的大分子有机物进行开环、断链处理，转化为小分子、可生化性好的中间产物，在后续BAF单元中，利用高比表面积的生物膜，进一步降解为有机物和氨氮，实现COD的深度处理^[8]。在工艺运行中，处理效率主要受催化剂种类、填充密度、臭氧投加量及反应时间等因素影响，合理优化催化剂活性组分和载体结构，能够有效提升臭氧向羟基自由基的转化效率，因此需要根据污水水质波动情况，动态调整臭氧添加量，在保证出水水质达到标准的同时，有效降低整体运行成本。

（四）芬顿氧化法

芬顿氧化法原理是利用Fe²⁺催化H₂O₂分解生成具有极强氧化能力的羟基自由基（·OH），高效氧化分解有机污染物，对含酚、苯类等有毒难降解有机物的处理效果显著，在煤化工有机污水深度处理中，具有较为广泛应用。在工艺运行中，芬顿反应效率受H₂O₂与Fe²⁺的物质的量比、H₂O₂投加量及反应pH值等因素影响，在相关模拟试验中，n(H₂O₂)/n(Fe²⁺)=15:1时，COD去除率达到77.71%。继续增加H₂O₂比例，去除率趋于稳定，表明该条件下产生的羟基自由基能够基本满足氧化需求。反应液中H₂O₂质量浓度从602 mg/L增至1205 mg/L时，COD去除率从43.63%提升至88.05%；继续增加投加量，去除率则因H₂O₂与羟基自由基的副反应而略有下降。pH=4时，COD去除率最高，过高或过低的pH都会影响Fe²⁺的催化活性，导致反应效率降低^[9]。芬顿氧化反应能够在短时间内实现有机物的快速讲解，在煤化工污水生化出水的深度处理中，具有良好应用效果，但也存在药剂消耗量大、产生含铁污泥等二次污染物等问题，因此多是与其他工艺结合，作为生化处理后的深度处理单元，用于去除常规工艺难以降解的残余有机物。

（五）深度处理技术应用效果对比

综合对比上述各类处理技术应用效果，具体如表1所示。

表1 不同类型深度处理技术应用效果

技术名称	电解氧化	双膜法	臭氧催化氧化	芬顿氧化法
适用对象	生化出水，高盐、高毒废水	脱盐、回用前处理	生化出水，难降解废水	含酚、高浓有机废水
主要作用机制	电化学产生·OH、活性氯	物理筛分、电荷排斥	催化产生·OH，开环断链	Fe ²⁺ 催化产生·OH
典型去除效率	COD: 35%~45%，氨氮: 30%，高毒有机物: >90%	悬浮物: >99%，总硬度: >98%	COD: >50%，提高B/C值	COD: >70%
技术优势	适应性强，反应快，无药剂添加	出水水质好，可实现分盐	无二次污染，与生化工艺耦合性好	反应速度快，设备简单
技术局限	能耗较高，电极材料成本高	膜污染问题，运行维护复杂	臭氧利用率待提高，催化剂成本	药剂消耗大，产生铁泥

三、煤化工污水深度处理后的回用工艺

（一）回用工艺流程优化

当前煤化工污水深度处理要求不断提升情形下，回用工艺通常是遵循“分级处理、分质回用”原则，科学集成多个工艺单元，以实现水资源利用效率和运行经济性的统一。深度处理单元是回用系统的核心，主要承担去除生化出水残余污染物、提升水质的作用。以本企业深度处理工艺为例，采用“臭氧催化氧化+膜生物反应器（MBR）”技术路线，利用臭氧催化氧化单元开环断链，提高污水可生化性；在MBR单元中，通过高效截留和生物降解协同作用，有效去除COD和氨氮，稳定出水水质，为后续脱盐单元运行创造良好条件。分质回用则是根据各用水点水质要求，合理配置差异化处理模块。经深度处理后的污水，70%~80%进入“超滤-反渗透”双膜系统，进行深度脱盐，产水输送至循环冷却水及锅炉补给水系统；剩余的反渗透浓水，进入“纳滤-高效反渗透”浓水浓缩单元^[10]。在纳滤单元中，将浓水中的二价例子和一价离子分离，提高Cl⁻浓度；利用高效反渗透将盐含量浓缩至6%~8%之间，确保总回收率提升至90%以上。最终产生的少量高浓盐水，进入蒸发结晶单元，实现零排放目标。

（二）不同回用场景方案

从上述分质利用要求出发，在回用工艺设计中，需要根据不同场景的水质啊哟球，设计差异化处理方案，以实现水资源的高效利用。以循环冷却水回用为例，水质要求相对适中，主要关注浊度、硬度、碱度、氯离子及硫酸盐等指标，通常情形下，采用深度处理+纳滤组合工艺，即可确保出水指标满足《工业循环冷却水处理设计规范》要求，有效避免换热器结垢，直接作为循环水系统的补充水。锅炉补给水对水质要求极为严格，尤其是在电导率、二氧化硅、铁离子等指标方面，都有明确的标准，以避免锅炉结垢和腐蚀现象，因此需要采用深度处理+反渗透+电除盐的深度除盐工艺^[11]。在反渗透单元中，将97%以上的盐分及几乎全部的有机物和胶体去除，将产水电导率控制在10 μS/cm以下，在后续电除盐单元中，利用离子交换树脂和直流电场，将电导率控制在0.2 μS/cm以下，以满足高压锅炉补水要求。工艺

用水直接参与生产反应，对水中有机物残留控制要求较高，以避免催化剂中毒或影响产品质量等现象，因此选用“活性炭吸附+移动床生物膜反应器（MBBR）”组合工艺。利用活性炭吸附单元的孔隙结构和吸附能力，深度去除污水中的微量有机物；利用MBBR单元的转性菌群，降解参与有机物，确保达到工艺用水纯净度要求。

（三）系统运行管理要点

针对回用系统运行稳定性高，工艺流程复杂等特征，在实际运行管理中，需关注如下方面要点：（1）加强膜污染控制，在污水深度处理中，受胶体、有机物和微生物在膜表面的沉积作用影响，常会出现跨膜压差上升、通量下降等现象，需要通过投加阳离子聚电解质等药剂方式进行预处理，优化胶体电中和效应，降低进入膜系统的污染物负荷；合理控制初始通量，避免出现快速污染；在日常运行中，及时采取物理和化学清洗维护，有效保障膜性能，延长膜运行寿命。（2）加强关键工艺参数的动态优化，由于不同工艺单元能耗和药耗对总运行成本的影响不同，需要充分利用在线监测和智能控制技术，动态优化工艺参数，例如在臭氧催化氧化单元运行中，利用COD去除率和臭氧投加量关系模型分析，在满足出水标准前提下，动态调整臭氧投加量，实现处理效果与运行成本的平衡。（3）构建智能化运维体系，利用数字孪生技术搭建智能监控平台，结合紫外-可见光谱、离子选择性电极等在线传感器监测数据，实现对膜污染的监测预警，在出现污堵风险时，提前进行自动清洗，以此能够有效提升整体运行效率。

四、结束语

煤化工污水深度处理和回用工艺优化，是推动产业绿色低碳转型的必然要求，对技术人员而言，应当明确零排放理念导向作用，准确分析不同类型深度处理技术应用优势，结合生产实际和技术发展，优化回用工艺体系，实现多工艺深度协同，以此才能够实现对污水的高效处理，切实降低污染排放，为推动煤化工产业高质量发展起到应有促进作用。

参考文献

- [1] 姚振璇, 刘洪强. 基于电解氧化技术的煤化工污水处理方案实例分享 [J]. 流程工业, 2026, (01): 88-90.
- [2] 蔡雨雨, 范统帅. 煤化工污水处理技术研究与应用 [J]. 山东化工, 2025, 54 (20): 188-190.
- [3] 白永强. 煤化工生产污水深度处理及回用技术 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45 (19): 148-150.
- [4] 呼文平. 基于双膜法深度处理技术的煤化工污水处理研究 [J]. 山西化工, 2024, 44 (12): 209-211.
- [5] 张立伟, 周树鹏, 张明. 非均相臭氧催化氧化工艺深度处理煤化工废水 [J]. 山西化工, 2024, 44 (06): 250-253.
- [6] 刘洪星. 零排放技术在煤化工污水处理中的实践研究 [J]. 现代盐化工, 2023, 50 (05): 29-31.
- [7] 塔斯很·阿勒太. 煤化工生产污水深度处理及回用技术 [J]. 化学工程与装备, 2023, (03): 233-235+232.
- [8] 马学成, 孟凡凯. 煤化工废水资源化回收及深度处理技术 [J]. 化工管理, 2022, (14): 40-42.
- [9] 高意. 煤化工废水项目污水处理案例分析 [J]. 化工管理, 2021, (26): 13-14.
- [10] 杨海琴. 污水零排放技术及其在煤化工污水处理项目中的应用分析 [J]. 决策探索 (中), 2020, (04): 23.
- [11] 齐亚兵, 许鹏飞, 冉佳城, 等. 芬顿氧化法用于煤化工含酚废水的深度处理 [J]. 能源化工, 2019, 40 (06): 59-62.