

# 酚氨废水深度处理中催化氧化与低氧生物耦合集成工艺开发

苏小明

国能新疆煤制气有限公司 新疆 昌吉 831100

**摘要:** 酚氨废水成分复杂且毒性显著, 现有处理技术存在局限。本文聚焦催化氧化与低氧生物耦合集成工艺开发, 阐述催化氧化单元反应原理、催化剂筛选制备及工艺参数优化等, 分析低氧生物处理单元反应机理、功能微生物筛选驯化等内容。探讨耦合集成工艺流程设计、单元间协同衔接技术、运行参数协同优化及稳定性调控技术。该工艺通过分级处理实现污染物高效去除, 提升处理效率、降低运行成本, 为酚氨废水深度处理提供新途径。

**关键词:** 酚氨废水; 催化氧化; 低氧生物处理; 耦合集成工艺

引言: 酚氨废水广泛源于煤化工、石油炼制等行业, 其成分复杂, 含酚类、氨氮等有毒有害物质, 具有高COD、高氨氮、低可生化性特征, 处理难度大。当前物理化学法与生物法处理酚氨废水均存在明显短板, 难以满足高效、经济处理需求。催化氧化技术可提升废水可生化性, 低氧生物处理能耗低且运行稳定, 二者耦合有望形成优势互补。开发催化氧化与低氧生物耦合集成工艺, 对解决酚氨废水处理难题、推动行业可持续发展具有重要意义。

## 1 酚氨废水水质特征及处理现状

### 1.1 酚氨废水水质特征

酚氨废水主要源于煤化工、石油炼制、制药及农药生产等行业, 这类废水成分复杂且毒性显著。其中, 酚类化合物以苯酚、甲酚为主, 具有强腐蚀性与生物毒性, 能抑制微生物活性, 干扰常规生化处理进程。氨氮则以游离氨与铵离子形式存在, 高浓度氨氮会导致水体富营养化, 破坏生态平衡。此外, 废水中还含有芳香族化合物、硫化物、氰化物等有毒有害物质, 这些物质往往难以通过单一处理技术有效去除。酚氨废水通常呈现高化学需氧量(COD)、高氨氮、低可生化性特征, 部分废水pH波动范围大, 进一步增加了处理难度。

### 1.2 酚氨废水现有处理工艺短板

当前酚氨废水处理技术以物理化学法与生物法为主, 但均存在明显局限性。物理化学法如吸附、萃取、化学氧化等, 虽能快速去除部分污染物, 却面临处理成本高、二次污染风险及对难降解物质去除效率低等问题。例如, 活性炭吸附需频繁再生, 化学氧化需大量药剂投入, 多重问题制约大规模应用<sup>[1]</sup>。生物法虽具有成本低、无二次污染优势, 但酚氨废水高毒性导致微生物活

性受抑制, 传统活性污泥法处理效率低下, 甚至出现系统崩溃现象。部分工艺尝试通过预处理提高可生化性, 但预处理阶段与生物处理阶段衔接不畅, 导致整体处理效果不稳定。

### 1.3 催化氧化与低氧生物工艺耦合可行性分析

催化氧化技术通过自由基反应将难降解有机物转化为小分子物质, 显著提升废水可生化性, 为后续生物处理创造有利条件。低氧生物处理利用兼性厌氧菌与反硝化菌协同作用, 在溶解氧受限条件下实现有机物降解与脱氮, 具有能耗低、运行稳定特点。二者耦合可形成优势互补: 催化氧化阶段破坏酚类化合物苯环结构, 降低生物毒性; 低氧生物阶段利用氧化产物作为碳源, 实现深度降解与脱氮。这种组合工艺通过分阶段处理, 既克服单一技术局限性, 又通过物质转化与能量流动实现系统协同, 为酚氨废水高效处理提供新思路。

## 2 催化氧化单元工艺开发

### 2.1 催化氧化反应原理

催化氧化反应以自由基链式反应为核心, 在催化剂介导下, 反应体系中生成羟基自由基、超氧自由基等强氧化性活性物种, 这类活性物种氧化还原电位高, 可无选择性攻击废水中酚类等难降解污染物。反应过程中, 活性物种逐步破坏酚类物质的苯环结构, 使其发生开环、断键反应, 最终转化为二氧化碳、水及其他易生物降解的小分子有机酸。该反应机制符合高级氧化技术的基本理论, 相关研究已通过电子顺磁共振光谱等手段证实活性物种的生成及作用路径, 反应速率受催化剂活性、反应体系环境等因素调控, 温和条件下即可实现污染物的高效降解。

### 2.2 催化剂筛选与制备

催化剂筛选需围绕酚氨废水处理需求, 优先选择催化活性高、稳定性强、抗中毒能力优的材料, 过渡金属氧化物及其复合氧化物是目前应用最广泛的催化材料<sup>[2]</sup>。筛选过程中重点考察材料对酚类降解的催化活性及氨氮转化的辅助作用, 排除易发生溶出、失活的催化剂类型。制备过程采用溶胶-凝胶法、浸渍法等成熟工艺, 通过调控制备温度、焙烧时间、活性组分负载量等参数, 优化催化剂的晶体结构与表面活性位点数量。制备过程中引入掺杂改性技术, 提升催化剂的电子转移效率与抗污染能力, 相关制备工艺已在工业催化领域多篇研究文献中得到验证, 可有效提升催化剂的实际应用性能。

### 2.3 催化氧化工艺参数优化

工艺参数优化以提升污染物去除效率、降低处理成本为目标, 重点优化反应pH值、反应温度、催化剂投加量及氧化剂用量等关键参数。pH值直接影响催化活性及活性物种生成效率, 需根据催化剂类型确定适宜范围, 避免极端pH环境导致催化剂失活。反应温度通过影响反应速率及活性物种稳定性调控处理效果, 需兼顾处理效率与能耗控制。催化剂投加量与氧化剂用量需匹配, 过量投加会增加处理成本, 投加不足则无法达到预期处理效果。优化过程采用单因素变量法结合响应面法, 确定各参数的最优组合, 相关优化方法已广泛应用于催化氧化工艺研究, 可实现工艺参数的精准调控。

### 2.4 催化氧化单元预处理效果调控

催化氧化单元作为预处理环节, 核心调控目标是降低废水毒性、提升可生化性, 为后续低氧生物处理奠定基础。调控过程中重点监测废水酚类浓度、COD及可生化性指标变化, 通过调整工艺参数优化处理效果。针对废水水质波动问题, 建立预处理效果反馈机制, 实时调整催化剂投加量、氧化剂用量等参数, 维持处理效果稳定。采用预处理出水水质缓冲技术, 减少水质波动对后续单元的影响, 同时控制催化氧化反应的副产物生成, 避免副产物对后续微生物产生抑制作用。相关调控策略参考工业废水预处理技术研究成果, 可有效提升催化氧化单元的预处理可靠性与适配性。

## 3 低氧生物处理单元工艺开发

### 3.1 低氧生物反应机理

低氧生物反应依托微生物代谢作用, 在溶解氧浓度较低的环境中实现废水中污染物的降解与转化, 其反应机理基于微生物的异养与自养代谢协同作用<sup>[3]</sup>。低氧环境下, 异养微生物可利用催化氧化预处理后产生的小分子有机酸等易降解有机物作为碳源, 通过有氧呼吸与无氧呼吸的协同代谢过程将其分解为二氧化碳和水。自养型

硝化微生物则可在低氧条件下完成氨氮的硝化反应, 将氨氮转化为亚硝酸盐氮和硝酸盐氮, 实现氨氮的高效去除。该反应机理符合微生物代谢生理规律, 相关研究已通过微生物群落结构分析、代谢产物检测等手段证实低氧环境下功能微生物的代谢路径, 反应进程受溶解氧浓度、碳氮比等环境因素调控, 可在温和条件下实现污染物的协同降解。

### 3.2 功能微生物筛选与驯化

功能微生物筛选需围绕酚氨废水低氧处理需求, 聚焦可耐受低氧环境、能高效降解小分子有机物及转化氨氮的微生物类群, 主要包括异养降解菌、硝化菌及反硝化菌等。筛选过程采用梯度富集培养法, 从煤化工废水处理系统活性污泥、焦化废水处理构筑物底泥等富含目标微生物的环境中分离菌株, 通过选择性培养基筛选出具有高效降解活性的菌株。驯化过程通过逐步降低环境溶解氧浓度、逐步提高进水酚类及氨氮浓度的方式, 提升微生物对低氧环境及废水毒性的耐受能力, 同时强化微生物的降解活性。驯化过程中优化培养条件, 促进功能微生物的增殖与优势菌群形成, 相关筛选与驯化方法已在环境微生物学研究及工业废水生物处理领域得到广泛应用。

### 3.3 低氧生物反应器设计

低氧生物反应器设计以强化微生物与废水的接触效率、维持低氧环境稳定、便于运行调控为核心目标, 结合低氧生物反应特点选择适宜的反应器类型。反应器结构设计需合理划分反应区域, 设置高效曝气装置以精准控制溶解氧浓度, 确保反应器内溶解氧分布均匀, 满足不同功能微生物的代谢需求。反应器内部增设填料层, 为微生物附着生长提供载体, 形成生物膜结构, 提升微生物停留时间与降解效率, 同时减少微生物流失。设计过程中优化反应器水力停留时间、上升流速等结构参数, 兼顾处理效率与能耗控制, 配套设计水质监测与调控装置, 便于实时掌握反应器内反应状态, 相关设计思路参考生物反应器设计理论及低氧生物处理技术研究成果。

### 3.4 低氧生物处理工艺参数调控

工艺参数调控以维持反应器稳定运行、提升污染物去除效率为目标, 重点调控溶解氧浓度、反应温度、pH值、碳氮比及水力停留时间等关键参数。溶解氧浓度需控制在适宜范围, 既要满足硝化微生物的代谢需求, 又要维持低氧环境以促进异养微生物的高效降解。反应温度与pH值需适配功能微生物的代谢特性, 避免极端条件导致微生物活性下降。碳氮比通过投加外加碳源或调整进水负荷进行调控, 确保微生物代谢所需营养均衡。水

力停留时间需根据进水水质浓度优化确定,保障污染物充分降解。调控过程采用实时监测与反馈调节相结合的方式,根据出水水质指标变化动态调整参数,相关调控策略已在低氧生物处理工艺研究中得到验证,可有效提升工艺运行稳定性与处理效果。

#### 4 催化氧化与低氧生物耦合集成工艺设计

##### 4.1 耦合集成工艺流程设计

耦合集成工艺流程设计以实现污染物分级降解、提升处理效率、降低运行成本为核心,结合催化氧化与低氧生物单元的工艺特性,构建串联式耦合流程<sup>[4]</sup>。酚氨废水先进入催化氧化单元,经预处理去除大部分难降解酚类物质、降低废水毒性并提升可生化性,出水经水质调节后进入低氧生物处理单元,通过功能微生物代谢作用去除剩余有机物及氨氮,最终实现废水深度处理。流程设计需合理规划单元顺序与衔接方式,避免水质波动对后续单元造成冲击,同时简化流程结构、减少设备冗余,提升工艺整体运行效率。相关流程设计思路参考工业废水耦合处理技术研究成果,契合酚氨废水污染物降解规律,可实现两类工艺优势的充分发挥。

##### 4.2 单元间协同衔接技术

单元间协同衔接技术重点解决催化氧化与低氧生物单元的水质、水量适配问题,保障耦合工艺顺畅运行。催化氧化单元出水需经过缓冲调节处理,稳定水质pH值、污染物浓度及水温,消除反应副产物对低氧微生物的潜在抑制作用。设置水质调节单元,通过投加调节剂优化进水碳氮比,适配低氧生物单元功能微生物的代谢需求。采用连续式进水与出水模式,控制水流速度,确保低氧生物反应器进水负荷稳定,减少水力冲击对生物膜或活性污泥的破坏。衔接过程中配套实时监测技术,实时反馈进出水水质数据,为衔接参数调整提供支撑,相关衔接技术已在废水耦合处理工程研究中得到应用,可有效提升单元间协同性。

##### 4.3 耦合工艺运行参数协同优化

运行参数协同优化以实现耦合工艺整体性能最优为目标,打破单一单元参数优化的局限性,统筹调控催化氧化与低氧生物单元的关键运行参数。结合两类单元的工艺关联性,优化催化氧化单元催化剂投加量、氧化剂用量与低氧生物单元溶解氧浓度、水力停留时间的匹配关系,避免单一单元参数不合理导致整体处理效果下

降。采用响应面法结合动态调控模型,分析各参数交互作用对处理效果的影响,确定最优参数组合。优化过程中兼顾处理效率与能耗控制,在保障污染物去除效果的前提下,降低药剂消耗与动力能耗,相关优化方法参考耦合工艺参数调控研究成果,可实现工艺运行的高效与经济。

##### 4.4 耦合工艺稳定性调控技术

稳定性调控技术核心是应对进水水质水量波动、工艺参数偏移及微生物活性变化等问题,维持耦合工艺长期稳定运行。建立全流程水质监测体系,实时跟踪各单元进出水污染物浓度、pH值、水温等指标,及时发现异常并启动调控措施。针对催化氧化单元催化剂失活问题,定期进行催化剂再生处理,提升催化剂使用寿命;针对低氧生物单元微生物活性下降问题,优化营养供给与环境条件,强化优势菌群稳定性<sup>[5]</sup>。构建工艺故障预警机制,结合历史运行数据,预判可能出现的运行异常,提前采取调控措施,相关调控技术融合了工业废水处理稳定性控制理论与微生物调控研究成果,可有效提升耦合工艺的抗冲击能力与运行可靠性。

#### 结束语

催化氧化与低氧生物耦合集成工艺,通过分阶段处理实现了酚氨废水污染物的分级降解。该工艺整合了催化氧化提升可生化性与低氧生物深度处理的优势,在单元工艺开发、流程设计、参数协同优化及稳定性调控等方面取得进展。有效解决了传统工艺的局限性,为酚氨废水处理提供了可靠技术方案,在实际应用中有望提升处理效率、降低运行成本,推动相关行业废水处理技术发展。

#### 参考文献

- [1] 靳德源,田文清,何浩宸,等.厌氧氨氧化处理煤化工酚氨废水的研究进展[J].化工环保,2024,44(4):479-487.
- [2] 张明,侯普,高世军,等.石灰铝盐沉淀法去除酚氨废水中氯离子的研究[J].中国氯碱,2025(7):40-43.
- [3] 李小锋,刘健,甘涛,等.低阶煤热解高污染酚氨废水的预处理技术及装置运行分析[J].化学工程,2025,53(2):88-94.
- [4] 姚彬,张玉荣,王志敏,等.掺配酚氨废水制备水煤浆的实验研究[J].煤炭技术,2021,40(3):151-153.
- [5] 王小会.煤气化酚氨废水处理萃取单元优化分析[J].化工管理,2021(32):42-43.