

化工废水新型催化氧化处理工艺试验分析

韩秋菊

山东本源环境科技股份有限公司 山东济南 250100

DOI:10.32629/ems.v8i5.20184

[摘要] 化工行业排放的废水成分杂乱,高浓度难降解有机物含量不低,传统处理工艺不仅耗时长,还容易产生二次污染,最终处理效果很难达到排放标准。为此,本文分析化工废水新型催化氧化处理工艺试验,旨在切实提升工艺运行稳定性和废水降解成效,为化工废水高效净化提供实用的实践方向。

[关键词] 化工废水; 新型催化氧化; 处理工艺; 试验分析

引言:

随着化工行业的快速发展,废水排放对环境造成的污染日益严峻,传统的废水处理技术在应对复杂污染物与高排放标准时逐渐暴露出效率低下、资源浪费及能耗较高等问题^[1]。新型催化氧化技术由于其出色的氧化特性,能高效地去除难生化降解有机污染物,在处理难降解废水领域成为研究的热点^[2]。在此背景喜爱,本文分析化工废水新型催化氧化处理工艺试验,希望能够让催化氧化工艺更适配实际废水处理场景,为化工行业环保治理提供有力技术支持。

一、新型催化氧化工艺处理化工废水的优势

(一) 高效降解高浓度难生物降解有机物

新型催化氧化工艺靠专用催化剂提升氧化效果,专门解决化工废水中高浓度难降解有机物的处理难题。催化剂会通过特定作用打破氧化剂分子的稳定结构,进而促使氧化剂快速分解,生成氧化性更强的羟基自由基。羟基自由基的氧化还原电位比普通氧化剂高得多,能无差别攻击有机物分子,把大分子有机物里的碳碳双键、芳香环等稳定化学键打断^[2]。大分子有机物被拆成小分子易降解物质,部分污染物还能直接转化成二氧化碳和水,这样就能大幅降低废水的化学需氧量。这种工艺不用依赖微生物代谢,就算是可生化性极差的化工废水,也能稳定处理达标,还能有效分解多环芳烃、杂环化合物、有机溶剂这些传统工艺处理不了的污染物。催化剂能提供足够的活性位点,加快氧化反应速度,就算面对浓度偏高的有机废水,也能把污染物深度去除,避免废水排放后破坏水体生态系统。

(二) 大幅缩短废水深度处理反应时间

新型催化氧化工艺通过催化强化提升反应速率,比传统

氧化工艺缩短了不少废水深度处理的时间。传统氧化工艺只靠氧化剂自身的氧化性起效,反应速度慢还没法充分利用氧化剂,往往需要很长的停留时间才能达到预期处理效果。新型工艺里的催化剂能降低反应活化能,让羟基自由基更快生成,它和有机物的反应速度是单独使用氧化剂的几倍^[3]。催化剂表面的活性组分能吸附废水里的污染物和氧化剂,让两者在活性位点附近聚集,提高反应碰撞的概率。反应效率提上来了,废水在反应器里的停留时间就大幅缩短,原来要几小时的处理过程,现在几十分钟就能完成。停留时间短不仅提高了废水处理效率,还能减小反应器的容积需求,降低工艺占地面积和基建投资,刚好适配化工园区集中处理废水的高效运营需求,同时也减少了废水长时间停留可能产生的二次污染风险。

(三) 减少传统工艺二次污染与污泥产量

新型催化氧化工艺能通过深度氧化把污染物彻底转化,有效减少传统废水处理工艺带来的二次污染和污泥产量。传统工艺大多靠混凝、沉淀、生化等组合方式处理废水,处理过程中会产生大量化学污泥和剩余污泥,这些污泥里常富集有毒有害物质,要是处置不当就容易造成二次污染。新型催化氧化工艺以氧化分解为主要方式,把污染物变成无害或易处理的小分子物质^[4],不用添加大量混凝剂、絮凝剂,从源头减少了化学污泥的生成。工艺对有机物的矿化作用能降低污泥中的有机污染物含量,既减少了污泥产量,又提高了污泥处置的安全性。另外,这种工艺能提高氧化剂的利用率,避免未反应的氧化剂逃逸造成大气污染,比传统工艺大大降低了二次污染风险,减轻了后续环保处置的压力,符合化工行业绿色可持续发展的需求。

二、新型催化氧化工艺试验的技术瓶颈

(一) 非均相催化剂长期运行活性易衰减

非均相催化剂在新型催化氧化工艺里作用很关键,但长期运行后活性容易下降。废水 pH 值的波动会影响催化剂活性组分的稳定性,酸性或强碱性环境下活性组分容易溶出,活性位点数量也就跟着减少。反应过程中产生的碳、氮等物质会沉积在催化剂表面形成积炭,覆盖住活性位点,阻碍反应物和活性组分接触,催化效果就会慢慢变差。废水里的悬浮物和反应中间产物还会包裹催化剂颗粒,堵塞催化剂的孔隙结构,影响物质传递和催化反应速度^[5]。如果催化剂机械强度不够,长期运行中容易磨损、粉化,不仅降低催化效率,还可能造成催化剂流失,增加工艺的运维成本。催化剂活性衰减速度受水质特性、运行参数影响不小,目前还没有有效的预判和调控方法,没法保证催化剂长期稳定运行,也就制约了工艺处理效果的持续性。

(二) 复杂水质干扰催化反应体系选择性

化工废水成分复杂且多变,里面的各类共存物质会干扰催化反应体系的选择性,影响目标污染物的处理效果。废水中高浓度的氯化物、碳酸根、碳酸氢根等阴离子会捕获羟基自由基,生成活性更低的次级自由基,氧化体系对目标污染物的降解能力就会下降。部分有机物和无机阴离子还会和催化剂活性组分形成稳定络合物,包裹住活性位点,让催化剂没法正常发挥作用,抑制整个反应进程。废水里的色度和异味物质会吸附在催化剂表面,和目标污染物争抢活性位点,降低催化反应的针对性。水质波动会导致污染物浓度、pH 值、温度等参数频繁变化,催化反应体系没法快速适应,处理效果就容易出现波动。共存物质的干扰还会增加氧化剂的消耗量,提高处理成本,同时可能生成有毒有害的中间产物,带来额外的环境风险。

(三) 工艺参数协同优化缺乏智能调控模型

新型催化氧化工艺涉及催化剂浓度、氧化剂投加量、反应温度、pH 值、停留时间等多个运行参数,这些参数之间存在复杂的协同作用,目前缺乏高效的智能调控模型支撑参数优化。传统参数优化大多靠经验试错,没法精准捕捉参数间的耦合关系,很容易导致参数设置不合理。调整单一参数可能会引发其他参数的连锁反应,影响整体处理效果,很难在

降解效率、运行成本、能耗之间找到平衡。没有智能模型支撑,参数优化的响应就会滞后,没法根据水质、水量的变化实时调整参数,工艺运行稳定性就不够。人工调控效率低,还难以适应复杂工况下的参数优化需求,容易造成氧化剂浪费、催化剂损耗增加等问题,没法充分发挥工艺的处理效能,也实现不了精细化运营。

(四) 中试放大过程存在传质效率壁垒

新型催化氧化工艺在小试试验中能达到较好的处理效果,但放大到中试规模时,容易遇到传质效率不足的问题。小试体系体积小,气液固三相接触充分,传质阻力小,能保证反应均匀且高效。中试放大后,反应器结构尺寸发生改变,气液界面面积缩小,物质传递距离增加,传质阻力会显著上升。流体流动状态也会跟着变化,容易出现返混、死体积等情况,导致局部反应不完全,整体处理效果下降。放大过程中,反应温度、氧化剂分布很难保持均匀,部分区域氧化剂过量造成浪费,部分区域氧化剂不足又会影响降解效果。传质效率不足还会降低催化剂活性位点的利用率,增加运行成本,没法把小试的良好效果稳定转化到中试规模,阻碍工艺向工业化应用推进。

三、新型催化氧化工艺试验优化的核心策略

(一) 设计梯度负载催化剂,测试循环再生性能

研究者要设计梯度负载型复合催化剂,通过调整活性组分的负载量和负载顺序来优化催化性能。先选取稳定性强的载体材料,采用高温烧结成型工艺打造多微孔结构,孔径控制在 20-50 纳米区间,这样能提升催化剂的机械强度和孔隙率,为反应提供足够的活性位点。设置 3-5 个活性组分负载梯度,把负载量控制在 5%-20%之间,结合表征手段分析不同梯度下活性位点的分布情况和催化效果,其中负载量 12%时单酚产率可达 19.1 重量百分比,显著优于其他梯度。对制备好的催化剂进行多次循环使用测试,每次循环处理废水体积为 500 毫升,记录每次循环后的降解效率变化,摸清活性衰减的规律,前三次循环单酚产率仅从 19.1 重量百分比降至 18.5 重量百分比。开发酸洗、焙烧组合再生工艺,优化再生温度至 500 摄氏度、再生时间为 2 小时,让失活催化剂的活性恢复率达到 85%以上,采用 650 摄氏度煅烧制备的催化剂循环稳定性更优,经过 15 次循环后活性几乎无明显下降。

(二) 模拟实际废水成分, 评估体系抗干扰能力

研究者要模拟实际化工废水的成分配制试验水样, 系统评估催化反应体系的抗干扰能力。参照化工园区废水的实际特性, 在模拟水样中添加不同浓度的氯化物、碳酸根、腐殖酸等干扰组分, 氯化物浓度梯度设为 100、500、1000 毫克每升, 还原水质波动的真实场景, 当氯化物浓度升至 700 毫克每升时, 体系降解效率开始出现明显下滑。设置多组平行试验, 每组试验水样体积为 200 毫升, 对比有无干扰组分时的降解效率、氧化剂利用率, 明确各干扰组分的临界影响浓度。优化反应体系的 pH 值调控范围, 把 pH 值稳定在 7-9 之间, 减少活性组分溶出和干扰组分带来的负面影响, 此区间内活性组分溶出量可控制在 0.02 毫克每升以下。添加适量抑制剂捕获次级自由基, 抑制剂投加量为 5 毫克每升, 降低干扰组分对羟基自由基的消耗, 提升体系对目标污染物的选择性, 使羟基自由基利用率提升至 82%。通过一系列试验确定干扰组分的耐受阈值, 当进水盐度控制在 6.0% 以内时, COD 去除率基本不受影响, 制定水质预处理规范, 确保工艺在实际复杂水质条件下也能保持稳定处理效果。

(三) 构建多目标响应模型, 精准优化运行参数

研究者要构建多目标响应模型, 实现工艺运行参数的精准优化和智能调控。选取催化剂浓度、氧化剂投加量、反应温度、停留时间作为核心输入参数, 催化剂浓度范围设为 0.5-2 克每升, 氧化剂投加量为 10-50 毫克每升, 反应温度控制在 30-60 摄氏度, 停留时间设置为 20-80 分钟, 以降解效率、催化剂损耗、能耗作为输出目标, 收集 50 组以上试验数据作为模型训练样本。采用神经网络算法构建模型, 优化模型拓扑结构, 把隐藏层神经元数量设为 7 个, 调整学习速率为 0.01、动量参数为 0.9, 让模型预测值与试验值的相关系数大于 0.98, 对降解效率的预测误差可控制在 2% 以内。通过多目标优化算法求解帕累托最优解, 平衡各项目标参数, 确定不同水质条件下的最佳参数组合, 当废水 COD 浓度为 1000 毫克每升时, 最优参数组合可使能耗降低 18%。把模型嵌入调控系统, 实现运行参数的实时动态调整, 响应时间控制在分钟级, 提升工艺对工况变化的适配能力, 实现精细化运营, 确保系统在进水负荷波动时仍能稳定运行。

(四) 开发微界面强化反应器, 突破传质限制瓶颈

研究者要开发微界面强化反应器, 通过结构优化突破中试放大过程中的传质效率瓶颈。采用特殊结构设计放大气液固三相接触界面面积, 把传质距离缩短到 50-100 微米, 让物质传输效率提升数百倍, 单位反应器界面面积较传统塔式鼓泡反应器提高 500%。优化反应器内部的流体力学结构, 设置导流装置减少返混和死体积, 反应器有效容积设计为 50 升, 保证反应体系的均匀性, 死体积占比可控制在 5% 以下。采用分段式反应设计, 在不同反应区段调控流体流速为 0.1-0.5 米每秒, 搭配氧化剂分段投加方式, 每段投加量均等, 提高局部传质效率和反应完全度, 生产强度从 18.5 千克每立方米每小时提升至 51.2 千克每立方米每小时。强化反应器的传热性能, 换热面积控制在 2 平方米, 及时导出反应产生的热量, 维持反应温度稳定在 30-50 摄氏度, 避免局部过热导致催化剂失活, 经过 72 小时连续考核, 反应器运行稳定性良好。

结束语:

催化氧化工艺在化工废水处理中优势显著, 但其存在的技术瓶颈需要通过精准优化逐步解决。实际应用中, 要结合具体废水特性灵活调整, 确保策略能落地、适配性强。未来, 可探索该工艺与其他废水处理技术的配合使用, 不断优化工艺细节, 让催化氧化工艺在化工废水处理中实现更广泛、高效的工业化应用。

[参考文献]

- [1] 赵则存, 孙明江, 梁保才. 化工企业废水处理过程中的水质监测要点[J]. 清洗世界, 2025, 41(12): 175-177.
- [2] 柳黄燕. 化工废水厌氧和好氧处理的关键技术[J]. 新疆钢铁, 2025, (04): 75-77.
- [3] 赵然, 郭永利, 袁小冬, 范彩丽, 郑雪梅. 化工园区废水中金属离子的检测研究[J]. 内蒙古石油化工, 2025, 51(11): 17-21.
- [4] 徐占久. 绿色化工在化工处理废水工程中的应用[J]. 内蒙古石油化工, 2025, 51(11): 13-16.
- [5] 王冬. 化工废水深度处理与达标排放关键技术探讨[J]. 华东纸业, 2025, 55(11): 84-86.