

# 煤化工废水处理工艺的参数优化

李 静

湖南省雪天盐碱新材料有限公司 湖南 衡阳 421400

**摘要:**煤化工废水污染物种类多、难处理,目前普遍采用“预处理-生物处理-深度处理”组合工艺,但存在运行不稳定、能耗高等问题,需优化参数。预处理关键参数有 pH 值、反应时间等;生物处理包括污泥浓度、溶解氧含量等;深度处理因工艺而异,如膜分离工艺涉及操作压力等,高级氧化工艺涉及 pH 值等。参数优化方法有单因素优化法,用于初步筛选;多因素正交试验法可考察多参数及交互作用;响应面法能精准描述参数非线性关系,适用于复杂组合工艺优化。

**关键词:**煤化工废水;处理工艺;参数优化

引言:煤化工废水因污染物种类多、浓度高、毒性大且可生化性差,传统单一处理工艺效果欠佳,目前多采用“预处理-生物处理-深度处理”组合工艺路线。然而在实际工程中,各工艺环节参数设置依赖经验,存在运行不稳定、污染物去除率波动大、能耗与药剂消耗高等问题,尤其在难降解污染物去除方面,传统参数体系难以适配复杂水质。因此,深入分析各处理工艺的关键影响参数,并探索科学有效的参数优化方法,对提升煤化工废水处理效能、实现达标排放与资源回用具有重要意义。

## 1 煤化工废水处理工艺现状

煤化工废水具有污染物种类多、浓度高、毒性大、可生化性差等特点,传统单一处理工艺难以达到理想处理效果。目前,行业内普遍采用“预处理-生物处理-深度处理”的组合工艺路线。预处理阶段主要通过物理化学方法去除废水中的悬浮颗粒物、油类物质及部分难降解有机物,降低后续生物处理的负荷,常用工艺包括隔油、气浮、催化氧化等;生物处理阶段是废水处理的核心环节,利用微生物的代谢作用降解废水中的有机污染物,实现污染物的无害化转化,常用工艺有厌氧生物处理、好氧生物处理(如活性污泥法、生物膜法)等;深度处理阶段则针对生物处理后仍未达标的废水,进一步去除剩余污染物,保障出水水质满足排放或回用要求,常用工艺包括超滤、反渗透、高级氧化等。然而,在实际工程应用中,各工艺环节的参数设置往往依赖经验值,缺乏科学系统的优化,导致处理系统运行不稳定,污染物去除率波动较大,且存在能耗高、药剂消耗量大等问题,制约了处理工艺的高效发挥。尤其在难降解污染物去除方面,传统工艺参数体系难以适配复杂水质特性,亟需通过系统性参数优化实现处理效能的突破<sup>[1]</sup>。

## 2 煤化工废水处理工艺关键影响参数分析

### 2.1 预处理工艺关键参数

预处理工艺的核心目标是去除废水中的杂质与部分难降解污染物,破坏污染物毒性结构,提升废水可生化性,为后续生物处理创造良好条件,其关键影响参数主要包括 pH 值、反应时间、药剂投加量及温度等。pH 值是影响物理化学预处理效果的核心参数,在催化氧化预处理中,pH 值直接影响催化剂活性位点的暴露程度与反应体系的氧化还原电位,不同类型催化剂(如金属氧化物、活性炭基催化剂)对应的最佳 pH 值范围存在显著差异,通常介于 2-9 之间,酸性条件下更利于羟基自由基生成,碱性条件则可能促进特定污染物的水解反应。反应时间直接关系到污染物的转化程度,需与反应动力学特性匹配,过短则污染物未能充分反应,过长则会增加设备运行成本与能耗,典型预处理工艺的反应时间控制在 15-60 分钟,其中气浮工艺适宜范围为 15-30 分钟,催化氧化工艺则需 30-60 分钟以保障难降解污染物的有效分解。药剂投加量是平衡处理效果与成本的关键经济参数,絮凝剂、氧化剂等药剂的投加量需与废水污染物负荷精准匹配,投加不足则无法达到预期处理效果,投加过量不仅造成药剂浪费、增加污泥产量,还可能对后续生物处理系统产生抑制作用,需通过批次试验与动力学模型计算确定最佳投加量。温度对预处理反应速率与药剂稳定性具有显著影响,温度升高可加快传质速率与反应动力学进程,但过高温度会增加能耗,还可能导致部分药剂分解失效,一般预处理工艺的适宜温度范围为 20-40℃,在此区间内可实现处理效率与能耗的平衡<sup>[2]</sup>。

### 2.2 生物处理工艺关键参数

生物处理工艺是利用微生物的代谢活动降解有机污染物,其处理效果与微生物的生长代谢状态密切相关,

关键影响参数包括污泥浓度 (MLSS)、溶解氧 (DO) 含量、水力停留时间 (HRT)、温度及营养盐比例 (C:N:P) 等。污泥浓度是反映生物处理系统微生物量的核心指标, 直接决定系统污染物降解容量, MLSS 过低时微生物数量不足, 难以承受高浓度污染物冲击, 处理效率偏低; MLSS 过高则会导致污泥沉降性能恶化, 增加曝气能耗与二沉池负荷, 活性污泥法的适宜 MLSS 范围通常为 2000-4000mg/L, 生物膜法则需通过控制挂膜量实现微生物量的优化。溶解氧含量是调控好氧微生物代谢活性的关键因素, DO 不足会导致好氧微生物进入缺氧代谢状态, 有机污染物降解不完全, 还可能产生硫化氢等有害气体; DO 过高则会造成能源浪费, 同时可能抑制硝化细菌等功能微生物的活性, 好氧生物处理的适宜 DO 含量一般为 2-4mg/L, 硝化反应阶段需维持更高 DO 水平 (3-5mg/L) 以保障氨氮去除效果。水力停留时间决定了废水与微生物的有效接触时间, 需匹配污染物降解周期, HRT 过短则污染物未能被充分降解, HRT 过长则会增加反应器容积与运行成本, 厌氧生物处理的 HRT 通常为 12-24 小时, 好氧生物处理的 HRT 为 4-12 小时, 具体需根据废水可生化性调整。温度对微生物的生长繁殖与代谢速率影响显著, 大多数降解煤化工废水的功能微生物 (如酚降解菌、硝化细菌) 适宜生长温度为 25-35℃, 该区间内微生物酶活性最高, 降解效率最佳, 温度低于 15℃或高于 40℃时, 微生物活性会显著抑制, 处理效率大幅下降。营养盐比例 (C:N:P) 是保障微生物正常生长代谢的基础条件, 煤化工废水中往往碳源充足, 但氮、磷含量不足, 需通过投加尿素、磷酸二氢钾等药剂调节 C:N:P 比例至 100:5:1 左右, 确保微生物合成代谢与分解代谢的平衡, 避免因营养缺乏导致处理系统崩溃。

### 2.3 深度处理工艺关键参数

深度处理工艺的目的是进一步去除生物处理后废水中的剩余难降解污染物, 确保出水水质达标, 其关键影响参数因工艺类型而异。对于超滤、反渗透等膜分离工艺, 关键参数包括操作压力、膜面流速、温度及进水水质预处理水平等。操作压力是影响膜分离效率的核心参数, 需匹配膜组件的截留特性, 压力过低时污染物难以有效截留, 出水水质不达标; 压力过高则会加速膜污染与膜孔堵塞, 缩短膜使用寿命, 超滤的操作压力一般为 0.1-0.3MPa, 反渗透的操作压力为 1.0-4.0MPa, 需根据膜材质与截留目标调整。膜面流速直接影响膜表面污染物的沉积速率, 流速过低时污染物易在膜面形成致密污垢层, 导致膜通量快速下降; 流速过高则会增加跨膜压力与能耗, 通常膜面流速控制在 1-3m/s, 可通过错

流过滤方式强化膜面冲刷效果。温度对膜分离过程的影响主要通过改变废水粘度实现, 温度升高会降低废水粘度, 减少膜过滤阻力, 提高膜通量, 但过高温度会影响膜的化学稳定性与机械强度, 膜分离工艺的适宜温度为 20-35℃。进水水质预处理水平对膜分离效果至关重要, 需严格控制进水悬浮物、油类物质含量及污染指数 (SDI), 一般要求 SDI 值低于 3, 以减缓膜污染速率。对于高级氧化深度处理工艺 (如芬顿氧化、臭氧催化氧化), 关键参数包括 pH 值、氧化剂与催化剂投加比例、反应时间等。芬顿氧化的最佳 pH 值范围为 2-4, 该条件下利于  $\text{Fe}^{2+}$  催化  $\text{H}_2\text{O}_2$  生成羟基自由基,  $\text{H}_2\text{O}_2$  与  $\text{Fe}^{2+}$  的适宜摩尔比为 1:1-10:1, 反应时间一般为 30-60 分钟; 臭氧催化氧化工艺中, 臭氧投加量与进水 COD 的比值需控制在 0.3-0.5 $\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}$ , 以保障臭氧利用率接近 100%, 同时通过催化剂调控强化难降解污染物的分解, 参数的合理匹配直接影响羟基自由基等活性物种的生成效率, 进而决定污染物的去除效果<sup>[3]</sup>。

## 3 煤化工废水处理工艺参数优化方法

### 3.1 单因素优化法

单因素优化法是最基础的参数优化方法, 其核心原理是通过固定其他工艺参数, 仅改变某一目标参数, 系统研究该参数对处理效果 (如污染物去除率、出水水质、能耗等) 的影响规律, 进而确定该参数的最佳取值范围。该方法的实施流程包括: 明确优化目标与评价指标 (如 COD 去除率、氨氮去除率、吨水能耗等); 筛选待优化的单一参数, 确定参数调节范围; 固定其他关键参数为经验最优值, 在设定范围内梯度调节目标参数, 开展平行试验; 测定不同参数水平下的评价指标数据, 绘制参数-效果关系曲线; 通过曲线分析确定指标最优时的参数取值或取值区间。例如, 在活性污泥法生物处理工艺中, 可固定 DO 含量、HRT、营养盐比例等参数, 在 1000-5000mg/L 范围内梯度改变 MLSS 浓度, 分别测定不同 MLSS 条件下 COD、氨氮的去除率, 通过拟合曲线确定最佳 MLSS 浓度。该方法操作简单、结果直观, 适用于初步探索单一参数的影响规律, 为后续多参数优化奠定基础, 但由于未考虑参数间的交互作用, 优化结果可能存在局限性, 通常用于优化初期的参数筛选与范围界定。

### 3.2 多因素正交试验法

多因素正交试验法是基于正交表的高效试验设计方法, 核心优势在于通过较少的试验次数, 全面考察多个参数及其交互作用对处理效果的影响, 进而筛选出最佳参数组合。该方法的实施步骤包括: 明确影响处理效果的关键参数, 根据单因素优化结果确定每个参数的水

平范围,通常设置 3-4 个水平;选择合适的正交表(如  $L_9(3^4)$ 、 $L_{16}(4^5)$ ),将参数与水平对应分配至正交表的列与行;按照正交表设计的试验方案开展平行试验,测定各试验组的评价指标数据;通过极差分析确定各参数对评价指标的影响显著性顺序,通过方差分析验证参数影响的统计显著性;根据分析结果筛选出各参数的最优水平,组合形成最佳参数方案。例如,在芬顿氧化深度处理工艺中,可选取 pH 值、 $H_2O_2$ 与  $Fe^{2+}$ 投加比例、反应时间三个关键参数,每个参数设置 3 个水平,采用  $L_9(3^4)$ 正交表设计试验,通过分析不同参数组合下的 COD 去除率,确定各参数的影响权重与最优组合。该方法兼顾了参数的主效应与交互效应,试验效率高、结果可靠性强,广泛应用于多参数协同优化场景,是煤化工废水处理工艺参数优化的常用方法。

### 3.3 响应面法

响应面法是一种基于试验设计与回归分析的精准优化方法,通过构建参数与处理效果之间的数学模型(响应面方程),直观反映参数间的非线性交互关系,进而通过模型求解获得全局最优参数组合。该方法的实施流程包括:通过单因素试验或 Plackett-Burman 设计筛选出对处理效果影响显著的关键参数;采用中心复合设计(CCD)或 Box-Behnken 设计(BBD)等试验方案,在关键参数的水平范围内设置试验点,包括中心点、轴向点与因子点;开展试验并采集评价指标数据,利用回归分析建立参数与响应值之间的二次回归方程;通过方差分析(ANOVA)验证模型的显著性、拟合度与可靠性,剔除不显著项优化模型;通过响应面三维图与等高线图分析参数间的交互作用规律,利用优化算法(如遗传算

法、梯度下降法)求解模型,获得最优参数组合。在厌氧-好氧组合生物处理工艺中,可选取 HRT、MLSS、DO 含量为关键参数,以 COD 与氨氮去除率为响应值,建立二次回归模型,通过模型求解得到最佳参数组合。响应面法能够精准描述参数间的复杂非线性关系,优化精度高于正交试验法,适用于复杂组合工艺的参数优化<sup>[4]</sup>。

### 结束语

煤化工废水成分复杂、处理难度大,其处理工艺参数优化是提升处理效能的关键。本文详细阐述了预处理、生物处理、深度处理各环节的关键影响参数,并介绍了单因素优化法、多因素正交试验法、响应面法等参数优化方法。单因素优化法为后续研究奠定基础,多因素正交试验法兼顾主效应与交互效应,响应面法能精准描述复杂非线性关系。通过合理运用这些方法,可实现工艺参数的科学优化,提高污染物去除率,降低能耗与药剂消耗,保障处理系统稳定运行,推动煤化工废水处理向高效、经济、可持续方向发展,对煤化工行业的绿色转型具有重要意义。

### 参考文献

- [1]张成臣.煤化工废水处理技术探讨[J].皮革制作与环保科技,2022,3(08):98-100.
- [2]解炜,陆晓东,麻荣福,等.气化残渣基活性炭在煤化工废水处理中的应用[J].煤质技术,2021,36(6):44-49.
- [3]牛志军.煤化工废水处理工艺与适用性技术研究[J].山西化工,2024,44(03):229-230+234.
- [4]张倩,王岭,郭学华.煤化工废水深度处理工艺技术研究[J].煤炭与化工,2021,44(06):156-160.