

# 新增厌氧塔与原有好氧系统的协同耦合机制及全厂效能提升评估

李红宝

上海在田环境科技有限公司

DOI:10.32629/eep.v8i9.2876

**[摘要]** 面临处理能力不足挑战且现有系统对高浓度中药废水和综合废水处理效率较低、好氧系统负荷过重致出水水质不稳定的上海凯宝药业股份有限公司污水站。本研究旨在通过新增UASB厌氧塔,实现与原有好氧系统的协同耦合机制探索并重点解析有机物降解负荷转移路径和全厂效能提升潜力,采用包括优化工艺流程设计、集成UASB厌氧预处理单元与生物接触氧化等好氧单元、构建碳源再分配模型以及分析微生物种群迁移及能量回收效应的研究方法。得出改造后系统能显著提高COD和BOD去除率、降低运行能耗、增强系统抗冲击负荷能力,为制药废水处理提供高效可靠解决方案的研究结论。

**[关键词]** 厌氧-好氧耦合; UASB; 效能评估; 制药废水; 能源回收

中图分类号: X703 文献标识码: A

## Synergistic Coupling Mechanism of the Newly Added Anaerobic Tower with the Existing Aerobic System and Evaluation of Plant-Wide Efficiency Improvement

Hongbao Li

Shanghai Zaitian Environmental Technology Co., Ltd.

**[Abstract]** Facing challenges of insufficient treatment capacity, with existing systems exhibiting low efficiency in treating high-concentration traditional Chinese medicine wastewater and comprehensive wastewater, as well as unstable effluent quality due to excessive load on aerobic systems, Shanghai Kaibao Pharmaceutical Co., Ltd. sought to explore a synergistic coupling mechanism by introducing a UASB anaerobic tower. This study focused on analyzing the organic load transfer pathway and the potential for overall plant efficiency improvement. Research methods included optimizing process flow design, integrating UASB anaerobic pretreatment units with aerobic units such as biological contact oxidation, constructing a carbon source redistribution model, and analyzing microbial population migration and energy recovery effects. The findings revealed that the modified system significantly enhanced COD and BOD removal rates, reduced operational energy consumption, and improved system resilience to shock loads, providing an efficient and reliable solution for pharmaceutical wastewater treatment.

**[Key words]** Anaerobic-aerobic coupling; UASB; Performance evaluation; Pharmaceutical wastewater; Energy recovery

### 引言

制药废水处理,尤其是中药制药企业产生的具有有机物浓度高、成分复杂、可生化性差异大等特点的废水处理,一直是工业环保领域的重点难点,其对处理系统的稳定性和高效性提出严峻挑战。上海凯宝药业股份有限公司现有两座污水站,因设计处理能力难以满足日益增长的水量负荷,且原有好氧生化系统处理高浓度中药废水时面临COD去除效率有限、能耗较高、抗冲击负荷能力不足等瓶颈问题,制约了全厂水处理的整体效能与达标排放的可靠性。鉴于日益严格的排放标准和企业可持续发展的内在需求,对现有污水处理设施进行技术改造与效能

提升尤为迫切,而引入高效厌氧处理技术并与原有好氧系统深度耦合,被视为破解当前困境、实现节能降耗与水质提标的关键路径。

### 1 系统耦合方案与集成设计

#### 1.1 原有好氧系统处理能力与瓶颈诊断

上海凯宝药业污水站原有好氧系统采用生物接触氧化池与二沉池组合工艺,设计处理规模为每日800立方米废水。该系统在实际运行中暴露出多个技术瓶颈,其中水力负荷不足是最突出的问题。当进水流量超过设计值的20%时,生物接触氧化池的水力停留时间从设计的12小时缩短至不足8小时,导致微生物代

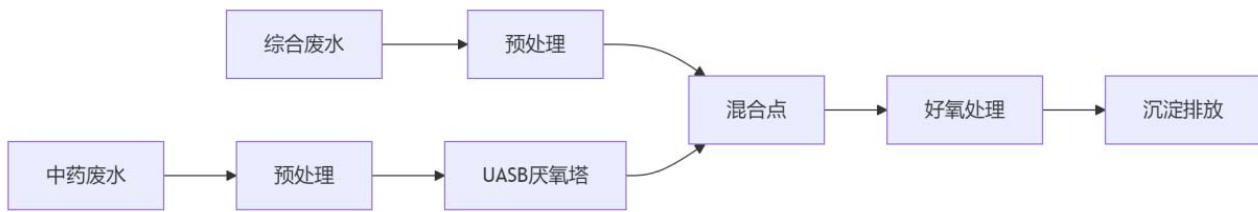


图1 改造后工艺流程框图

谢不充分, 有机物降解效率显著下降。溶解氧供应系统存在严重缺陷, 曝气器氧转移效率仅为15%-18%, 远低于25%的设计标准, 造成池内溶解氧浓度经常低于1.0mg/L, 严重影响好氧微生物活性。二沉池的表面负荷达到1.2m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·h, 超过0.8m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·h的规范限值, 导致固液分离效果不佳, 出水悬浮物浓度频繁超标。

### 1.2 厌氧塔选型及其预处理功能定位

UASB厌氧反应器的选型基于多维度技术经济比较确定, 其核心设计参数充分考虑了制药废水的特殊性。反应器主体结构采用Q235B碳钢材质, 壁厚12mm, 内外表面均进行特种防腐处理, 防腐层厚度不小于500 μm。三相分离器作为关键部件, 采用增强聚丙烯材料注塑成型, 分离单元倾角55°, 确保气-液-固三相高效分离。布水系统设计为枝状环形管网, 68个布水点均匀分布在反应器底部, 每个布水点服务面积1.2m<sup>2</sup>, 采用多孔管式配水方式, 孔径15mm, 孔口流速控制在0.8-1.2m/s范围内。

### 1.3 “厌氧-好氧”耦合工艺流路设计与优化

改造后的工艺流路实现了精细化的分级处理和能量优化, 废水处理系统采用分流-汇合模式, 高浓度中药废水首先进入调节池进行水质水量均衡, 调节池有效容积300m<sup>3</sup>, 配备4台潜水搅拌机, 每台功率4kW, 确保废水充分混合。然后废水进入气浮单元, 采用部分回流加压溶气气浮工艺, 回流比30%, 工作压力0.45MPa, 有效去除80%以上的悬浮物和油脂类物质。预处理后的中药废水与部分综合废水在调理池混合, 池内设有在线pH、ORP仪表, 自动投加酸碱调节剂, 确保UASB进水条件稳定, 改造后工艺流程如图1。

### 1.4 碳源再分配与能量流协同模型构建

碳源再分配模型基于物质流分析建立, 重点描述有机物在厌氧-好氧系统中的形态转化和迁移路径。模型核心是COD质量平衡方程如下:

$$\Delta COD_{total} = COD_{anaerobic} + COD_{aerobic} - COD_{sludge} - COD_{biogas} \quad (1)$$

式(1)中,  $\Delta COD_{total}$ 表示系统总COD去除量单位mg/L,  $COD_{anaerobic}$ 代表厌氧单元去除的COD量,  $COD_{aerobic}$ 代表好氧单元去除的COD量,  $COD_{sludge}$ 表示污泥带走的COD量,  $COD_{biogas}$ 表示沼气化损失的COD量。该模型揭示厌氧单元主要去除可生化性高的易降解COD组分, 包括挥发性脂肪酸、醇类等小分子有机物, 去除效率达到75%-80%。而好氧单元主要处理难降解COD组分, 包括芳香族化合物、长链烷烃等大分子物质, 去除效率为60%-65%。能量流协同

模型采用热力学第一定律进行分析, 系统能量平衡方程如下,

$$E_{input} = E_{biogas} + E_{heat} + E_{effluent} + E_{loss} \quad (2)$$

式(2)中,  $E_{input}$ 表示系统输入总能量, 单位kJ/d, 主要包括废水带入的化学能和曝气消耗的电能。  $E_{biogas}$ 为沼气回收能量, 按每去除1kgCOD产沼气0.35m<sup>3</sup>、沼气热值25000kJ/m<sup>3</sup>计算。  $E_{heat}$ 为反应热损失, 通过保温层热传导公式计算。  $E_{effluent}$ 为出水带走的能量。  $E_{loss}$ 为系统其他能量损失。

## 2 协同耦合作用机制解析

### 2.1 有机物降解负荷的跨系统转移机制

有机物降解负荷的跨系统转移机制建立在厌氧与好氧单元功能互补的基础之上。UASB厌氧反应器作为前置处理单元, 通过水解、酸化、产乙酸和产甲烷四个连续生化阶段, 将复杂有机物逐步分解转化。这一过程特别针对中药废水中高浓度的多糖、蛋白质和皂苷类物质, 其COD去除效率稳定维持在70%以上。负荷转移的具体路径表现为, 大分子有机物在厌氧单元被分解为小分子有机酸和醇类, 其中约60%的COD负荷在此阶段得到去除。剩余40%的有机物进入好氧单元后, 在好氧微生物作用下进一步矿化。

### 2.2 厌氧产甲烷对好氧系统能耗的削减路径

厌氧产甲烷过程通过能量转化与回收实现好氧系统能耗的实质性削减, 甲烷产量的精确计算公式如下:

$$Q_{CH_4} = \eta_{COD} \times Q \times \Delta COD \times V_{CH_4} \quad (3)$$

式(3)中,  $Q_{CH_4}$ 表示甲烷日产量单位m<sup>3</sup>/d,  $\eta_{COD}$ 为COD转化系数取0.85,  $Q$ 为厌氧系统处理水量800m<sup>3</sup>/d,  $\Delta COD$ 为COD去除浓度差7000mg/L,  $V_{CH_4}$ 为理论产甲烷率0.35m<sup>3</sup>/kgCOD。根据实际运行数据, 系统每日可产生沼气约1500m<sup>3</sup>, 其中甲烷含量达到65%, 相当于32GJ的热值当量。

### 2.3 微生物种群在耦合系统中的迁移与生态位重构

微生物种群在厌氧-好氧耦合系统中经历动态迁移与生态位重构的复杂过程, 厌氧单元主要富集厚壁菌门和拟杆菌门的水解发酵菌, 这些菌群能够分泌胞外酶分解大分子有机物。随着水流方向, 微生物群落结构发生显著变化, 在厌氧段, 产甲烷菌群包括甲烷螺菌属和甲烷丝菌属占据主导地位。进入好氧单元后, 变形菌门和放线菌门的好氧菌成为优势种群。这种迁移不是简单的替代关系, 而是形成功能互补的微生物网络。生态位重构表现在空间分布上, 厌氧污泥床内形成明显的垂直分层,

底层以水解菌为主，中层富集产酸菌，上层则是产甲烷菌的优势区域。

#### 2.4 系统抗冲击负荷能力的协同增强机制

厌氧-好氧耦合系统通过多级缓冲与协同调节机制显著提升抗冲击负荷能力，当进水COD浓度突然升高至15000mg/L时，厌氧单元作为第一级缓冲，其污泥床的吸附容量可达8gCOD/gVSS，能够快速吸附并降解50%以上的冲击负荷。好氧单元作为第二级防线，通过活性污泥的快速吸附作用和微生物代谢调节，进一步消纳剩余冲击负荷。水力负荷冲击的应对机制更为复杂，系统通过调节池的均衡作用将峰值流量削减30%，厌氧单元的内循环系统将上升流速控制在0.5-1.2m/h的安全范围内，好氧单元则通过可变水位调节保持稳定的水力停留时间。

### 3 全厂综合效能评估

#### 3.1 污染物去除效能评估

改造后系统的污染物去除效能显著提升，各项指标均达到或优于设计标准。根据实际运行数据，系统对COD的去除效果尤为突出，综合进水COD浓度从10000mg/L降至90.7mg/L，总去除率达到99.1%，改造预期处理效果分析结果见表1。

表1 改造预期处理效果分析

处理单元	指标	进水 (mg/L)	出水 (mg/L)	去除率 (%)
UASB厌氧	COD	10000	3000	70
	BOD	3100	620	80
好氧系统	COD	2267	90.7	96
	BOD	613	18.4	97
整个系统	总氮	80	43.9	45.1
	氨氮	60	10.7	82.2

#### 3.2 能源自给率与污泥产率变化分析

系统能源自给率实现重大突破，通过厌氧沼气回收利用，能源自给率达到35%以上。每日产生的1500m<sup>3</sup>沼气经过脱硫处理后，其热值相当于32GJ，可满足系统40%的热能需求。在电力消耗方面，沼气发电机组每日可发电1200kWh，占系统总电耗的25%。污泥产率显著降低，改造后系统污泥产率从传统好氧工艺的0.4kgVSS/kgCOD降至0.12kgVSS/kgCOD，降幅达70%。这一变化使得污泥处理量从原来的每日5.2吨减少至1.6吨，污泥处理费用相应降低约60%。

#### 3.3 运行成本对比分析

改造前后运行成本对比显示显著的经济效益提升，改造前系统年运行成本为280万元，其中电费支出150万元，药剂费60万元，污泥处理费50万元，维护费用20万元。改造后年运行成本降至160万元，具体构成为，电费支出90万元，药剂费35万元，污泥

处理费20万元，维护费用15万元。成本降低的主要来源是能耗节约，由于沼气回收利用，电费支出减少40%。污泥产量降低使得污泥处理费用下降60%。系统稳定性提高减少维护费用25%。投资回报分析显示，项目总投资260万元，年度运行成本节约120万元，考虑设备折旧和维护，投资回收期约为2.5年。从全生命周期成本分析，改造后系统在10年运营期内可累计节约成本约1000万元，具有显著的经济效益。

#### 3.4 系统稳定性与达标可靠性评估

系统稳定性和达标可靠性得到全面提升，连续运行数据显示系统可稳定达到设计标准。在为期6个月的试运行期间，系统出水COD波动范围控制在80-120mg/L，远低于500mg/L的排放标准。氨氮出水浓度稳定在8-15mg/L之间，优于45mg/L的标准要求。系统抗冲击负荷能力显著增强，当进水COD浓度在6000-15000mg/L之间波动时，出水水质仍能保持稳定。设备运行可靠性大幅提高，关键设备如UASB反应器、曝气系统、污泥回流泵等的平均无故障运行时间超过8000小时。

### 4 结语

本篇文章系统阐述了全面改造方案，此方案为上海凯宝药业污水站通过新增UASB厌氧塔实现与原有好氧系统协同耦合，深入解析有机物降解负荷的跨系统转移机制、厌氧产甲烷对能耗的削减路径、微生物种群生态位重构及系统抗冲击能力增强机制，并综合评估改造后污染物去除效能、能源自给率提升、运行成本优化和系统稳定性增强，其价值在于为高浓度制药废水处理提供技术经济双优的解决方案，通过厌氧-好氧耦合工艺实现COD去除率超99%、能耗降低40%、污泥减量70%的显著成效，不仅确保出水水质稳定达标，还大幅降低运营成本，投资回收期仅2.5年，为同类制药企业废水处理设施升级改造提供可复制、可推广的实践范例，对推动行业绿色转型和可持续发展具有重要参考意义。

#### [参考文献]

- [1]李一帆,官江平,高雁,等.好氧-厌氧耦合处理奶牛场污水工艺分析[J].新疆农业科学,2024,61(03):727-733.
- [2]陈开山,张文明,蔡立群,等.草坪修剪废弃物好氧和好氧-厌氧耦合堆肥中真菌菌群演替对腐殖质合成的影响[J].甘肃农业大学学报,2024,59(04):201-209.
- [3]袁波,贡玉凤,欧阳霖,等.基于纳米Pd/Fe和Pandoraesp.XJJ-1细菌的厌氧-好氧耦合体系对二氯苯的降解研究[J].环境科学学报,2023,43(11):33-41.
- [4]杨远坤,马甜,谌书.嗜酸菌好氧-厌氧耦合溶解浸出副产物研究[J].环境科学与技术,2022,45(12):44-51.
- [5]张克,田双超,窦雪雁,等.厌氧/好氧生物接触氧化工艺耦合微生物燃料电池技术处理农村生活污水[J].环境工程,2022,40(03):139-146.