

# 复合型氧化沟处理城市污水中磷的高效去除与资源化回收路径

黄梦姣

郑州工业应用技术学院

DOI:10.12238/eep.v8i8.2795

**[摘要]** 本文围绕城市污水处理中磷的高效去除与资源化回收,通过试验研究分析了复合型氧化沟工艺的应用。重点介绍了复合型氧化沟的基本结构、运行参数、悬浮填料投加及系统启动等关键技术,探讨了其在高效除磷方面的效果。同时,提出了磷释放与液相富集、高效分离与回收等资源化路径,包括生物释放、化学沉淀、热解与电化学等方法,为实现磷的循环利用提供了可行方案。

**[关键词]** 复合型氧化沟; 城市污水; 除磷处理; 磷回收

**中图分类号:** TU992.25 **文献标识码:** A

## Efficient Phosphorus Removal and Resource Recovery Pathways in the Treatment of Urban Wastewater by Hybrid Oxidation Ditches

Mengjiao Huang

Zhengzhou University of Industrial Technology

**[Abstract]** This paper focuses on the efficient removal and resource recovery of phosphorus in urban sewage treatment, and analyzes the application of the composite oxidation ditch process through experimental research. It mainly introduces the basic structure, operation parameters, suspended filler addition and system start-up of the composite oxidation ditch, and discusses its effect on efficient phosphorus removal. At the same time, it proposes resource recovery paths such as phosphorus release and liquid phase enrichment, efficient separation and recovery, including biological release, chemical precipitation, pyrolysis and electrochemical methods, providing feasible solutions for phosphorus recycling.

**[Key words]** Composite oxidation ditch; Urban sewage; Phosphorus removal treatment; Phosphorus recovery

### 前言

磷是生物体必需的不可再生资源,但过量排入水体会引发富营养化,破坏生态平衡。城市污水中磷的来源包括工业废水、农业径流和生活污水,若不有效处理,将导致资源浪费与环境污染。因此,研究高效除磷与磷回收技术具有重要意义。本文以复合型氧化沟工艺为基础,探讨其在城市污水处理中磷的高效去除与资源化回收路径。

### 1 复合型氧化沟介绍

复合型氧化沟是在传统氧化沟基础上改良而成的污水处理工艺,通过优化结构与运行方式,强化脱氮除磷功能。其工艺流程包括前置厌氧区、氧化沟(缺氧/好氧区)和二沉池。进水与回流污泥经厌氧池混合后进入氧化沟,通过聚磷菌代谢实现磷的去除。系统通过推流、曝气与搅拌等方式保持泥水混合与反应条件。具体处理中,该系统主要通过硝化与反硝化工艺脱氮,通过聚磷菌代谢除磷,以满足城市污水的除磷处理需求。图1为城市污水除磷处理中的复合型氧化沟基本工艺流程示意图:

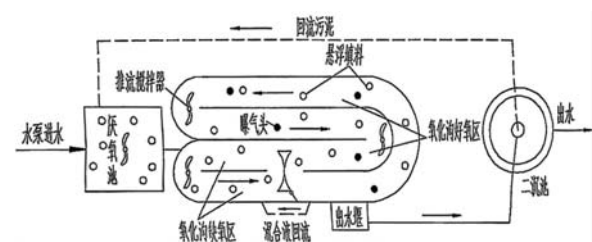


图1-城市污水除磷处理中的复合型氧化沟基本工艺流程示意图

反应器进水与二沉池回流污泥经计量泵送入厌氧池。为促进泥水混合,厌氧池内设搅拌器,氧化沟的缺氧段与好氧段则设置推流器。缺氧段仅配置推流器,不设曝气设施;好氧段则布置曝气头,并与空气泵相连,通过调节曝气量控制溶解氧浓度。

### 2 复合型氧化沟在城市污水高效除磷中的应用分析

#### 2.1 城市污水原水质

在此次基于复合型氧化沟的城市污水高效除磷处理试验中,研究者将市政污水作为原水,其COD浓度在305-413mg/L之间,pH值在6.9-7.6之间,TN浓度在31.52-43.24mg/L之间;TP浓度在

3. 26~4. 43mg/L之间,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在23. 9~35. 35mg/L之间。试验过程中, 水质COD指标通过重铬酸钾法测定; TN指标通过碱性过硫酸钾消解与紫外分光光度法结合测定; TP指标通过过硫酸钾消解与钼锑抗分光光度法结合测定;  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 指标通过纳氏试剂光度法测定; 污泥中的TP通过过硫酸钾消解法测定; DO浓度通过HACH溶解氧测定仪测定; pH通过HACH溶解氧测定仪测定。

### 2. 2 复合型氧化沟装置设置

此次试验中, 应用的复合型氧化沟装置为前置厌氧改良后的小型Carrousel 2000氧化沟模型, 该模型在城市污水高效除磷处理中的工艺流程与上文所述流程相一致。其中, 厌氧池的有效容积是20L; 氧化沟的有效容积是85L; 二沉池的有效容积是16L。

### 2. 3 复合型氧化沟运行参数

本试验重点分析了悬浮填料投加前后厌氧池的磷释放规律、系统整体除磷效率及磷平衡, 并通过静态厌氧释磷试验模拟了厌氧区的实际运行状态。通过该装置试运行情况以及前期研究经验等, 研究者为其设置的运行参数如表1所示:

表1-此次试验中的复合型氧化沟运行参数设置情况

序号	项目	参数	序号	项目	参数
1	污泥回流比	100%	7	氧化沟好氧区 DO 浓度	2. 0~2. 0mg/L
2	污泥浓度	3000~4000mg/L	8	厌氧池水力停留时间	2h
3	厌氧池与氧化沟填投配比	10%	9	氧化沟厌氧区水力停留时间	2. 2h
4	混合液回流比	250%	10	氧化沟好氧区水力停留时间	7. 3h
5	厌氧池 DO 浓度	<0. 2mg/L	11	污泥龄期	12~15d
6	氧化沟厌氧区 DO 浓度	0. 5~0. 7mg/L			

### 2. 4 悬浮填料投加

试验采用由高分子材料改性制成的悬浮填料, 该填料为花瓣齿形圆柱结构, 空隙率 $\geq 95\%$ , 比表面积 $\geq 700\text{m}^2/\text{m}^3$  (规格 $\phi 25 \times 10$ )。由于该填料自身湿密度较水略低, 所以在实际应用中, 研究者可直接将其投入氧化沟装置, 借助装置中的搅拌、推流以及曝气等功能, 使其最终以悬浮状态在水中流动。

为满足实际高效除磷处理需求, 研究者以分区投配的方式向复合型氧化沟中投加悬浮填料, 使厌氧池、氧化沟厌氧段以及好氧段的投配比均为总体积的10%。因悬浮填料较水的比重略低, 所以在氧化沟装置中的水力作用下, 填料可通过流动的方式均匀分散于各个分区, 实现全池流化。如此便可使基质、DO和填料中的微生物充分接触, 以实现基质以及DO的高效利用, 并达到良好的除磷效果。

### 2. 5 复合型氧化沟系统启动

在基于复合型氧化沟的城市污水高效除磷处理试验中, 复合型氧化沟的启动有两个支持条件, 第一是活性污泥培养, 第二是活性污泥驯化。因此在具体的系统启动过程中, 研究者应先实施活性污泥培养与驯化; 在完成污泥培养与驯化之后, 方可将复合型氧化沟系统启动, 通过该系统对城市污水实施高效除磷处

理试验。

首先是复合型氧化沟系统中的活性污泥培养及其驯化。在复合型氧化沟活性污泥培养与驯化试验中, 采用污水处理厂二沉池回流污泥作为接种污泥, 投入氧化沟并进行闷曝。闷曝1天后进行排水沉淀, 再次进水继续闷曝24小时, 随后以间歇进水排水方式(周期15小时)进行培养驯化。闷曝期间控制溶解氧在2~3mg/L, 每日测定污泥浓度与沉降比, 观察微生物相并计算污泥体积指数。

培养一周后, 活性污泥颜色转为黄褐色, 污泥体积指数在70~100之间, 表明其凝聚与沉降性能良好。镜检发现轮虫、累枝虫、钟虫等指示微生物。对上清液水质进行分析, COD、TP、TN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级B标准, 说明系统内活性污泥已具备良好污水处理能力, 培养与驯化工作顺利完成。

其次是复合型氧化沟系统启动。在完成其中的活性污泥培养和驯化工作后, 研究者便将该系统启动, 严格按系统设计时确定的运行参数, 通过连续进出水的方式, 使其进入稳定运行阶段。在此过程中, 研究者通过活性污泥定量外排的方式, 将其龄期控制在合理范围内, 从而有效保持其浓度与活性, 满足实际的污水处理需求。待系统完全稳定运行后, 研究者便开始通过该复合型氧化沟装置进行城市污水高效除磷处理试验, 并对该系统连续运行30d期间的城市污水除磷处理效果进行研究。

### 2. 6 复合型氧化沟除磷效果

经此次试验发现, 复合型氧化沟系统对于城市污水中的COD、TN、TP以及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均具有较好的去除效果, 处理后的平均去除率很高, 平均出水浓度不仅均可满足《标准》中的一级B类出水水质要求, 且已达到其中的一级A类要求。通过试验中的进一步统计和分析可知, 在该复合型氧化沟系统稳定运行条件下, 城市污水中的COD、TN、TP以及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度达标天数较多, 试验达标天数较长, 且COD、TN、以及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度参数的达标率都比较高, 只有TP在试验期间浓度参数的达标率略低, 但已远高于传统处理工艺的达标率。表2为此次试验中基于复合型氧化沟的城市污水处理效果:

表2-此次试验中基于复合型氧化沟的城市污水处理效果

序号	项目	COD	TN	TP	$\text{NH}_4^+\text{-N}$
1	平均去除率	89. 06%	77. 92%	74. 91%	91. 44%
2	平均出水浓度	41. 37mg/L	8. 06mg/L	0. 91mg/L	2. 45mg/L
3	出水达标天数	28d	30d	26d	29d
4	试验期间达标率	93. 33%	100%	86. 67%	96. 67%

经进一步分析可知, 试验中, 出水中的TP浓度不达标的时期主要集中在该系统初期运行的10d时间段内, 在这段时间里, 出水中的COD浓度以及TN浓度也较出水平均值高很多, COD不达标情况中的60%均集中在了这一时间段内。之所以出现此种情况,

其主要原因是当复合型氧化沟系统处在初期稳定运行阶段时, 其中的污泥生长状态可能并未达到最佳, 从而不能对实际运行参数情况下的环境条件做出有效适应, 其消耗城市污水中各种污染物的速率也比较低, 从而导致TP以及COD的处理效果较后续处理效果略差。但在后续的20d时间内, 该系统中处理后的城市污水各项污染物含量参数达标率均已超过85%。由此可证明, 在稳定运行情况下, 该系统有效去除城市污水中的各种污染物。且在其中的污泥生长状态达到最佳之后, 整体系统的除磷效率将显著提升, 从而可在后续应用中达到高效除磷效果。

### 3 复合型氧化沟在城市污水高效除磷中的资源化回收路径分析

#### 3.1 磷释放与液相富集途径

在通过复合型氧化沟对城市污水实施除磷处理时, 针对除磷后排出的活性污泥水, 磷释放与液相富集是磷回收的主要途径。具体回收时, 污水处理厂可采取的技术措施主要包括生物释放以及化学释放两种。

首先是生物释放, 其主要措施包括以下几种。(1) 厌氧消化, 将污泥放置在消化池或浓缩池内, 在温度为35-37℃、pH为6.8-7.3的厌氧条件下, 释放出活性污泥水中的磷酸盐。经此种方法回收处理后, 上清液中的TP浓度可达到100-200mg/L。(2) 强化发酵, 将pH在10-12的NaOH或pH在2-3的HCl投加到污泥水中, 以此来破坏污泥结构, 提升其中的磷释放率。在该方法支持下, 可释放出活性污泥水中超过80%的磷。(3) 超声波和热解, 通过200-400W功率的超声波, 在60-90℃条件下进一步实施活性污泥破解, 加入CaCl<sub>2</sub>实施化学调节, 如此便可进一步提高活性污泥中的磷回收率。

其次是化学释放, 其主要回收措施如下。(1) 将FeCl<sub>3</sub>投加到活性污泥水中, 借助其絮凝作用, 将污泥中的吸附态磷释放出来, 但回收时应将其pH控制在6-8之间, 以免出现二次沉淀。(2) 将强酸性阳离子树脂投加到活性污泥水中, 以此来实施磷的选择性吸附。在此种方法支持下, 吸收后的磷浓度可超过300mg/L。

#### 3.2 磷的高效分离与回收途径

对于复合型氧化沟除磷处理后的活性污泥水, 在具体的磷回收工艺中, 高效分离与回收也是一个重要路径。具体回收时, 污水处理厂可采取的主要技术措施包括化学沉淀、生物膜法磷富集以及热解和电化学回收三种。

首先是化学沉淀, 其主要回收措施如下。(1) 鸟粪石(MgNH<sub>4</sub>PO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O)回收, 在8.5-9.5的pH值条件下, 将Mg<sup>2+</sup>离子以及NH<sub>4</sub><sup>+</sup>离子投加到活性污泥水中, 使Mg<sup>2+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>以及PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>的物质的量之比保持在1:1:1, 反应15-30min后, 即可从中高效分离出可用作缓释

材料的鸟粪石。(2) 磷酸钙回收, 将钙离子投加到活性污泥水中, 将pH调节到10-11之间, 从中分离出适用于工业级磷酸生产的高纯度磷酸钙。

其次是生物膜法富集, 其主要回收措施包括以下几种。(1) 序批式生物膜反应器, 将该反应器调节至好氧和厌氧交替运行模式, 通过生物膜中的聚磷菌, 对活性污泥水中的磷进行富集处理, 处理后的污泥水磷浓度可超过300mg/L, 之后采用化学沉淀法进行回收。(2) 集成工艺, 将生物膜富集液以及污泥厌氧发酵液混合在一起, 借助鸟粪石结晶对其中的磷进行进一步回收。在该方法支持下, 活性污泥水中的磷回收率可达到90%以上。

最后是热解与电化学回收, 其主要回收措施包括以下几种。(1) 碱活化热解与水浸结晶, 按1:1质量将活性污泥和KHCO<sub>3</sub>掺加到一起, 在600℃条件下生成水溶性K<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, 再通过水浸法结晶回收兰铁矿(Fe<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·8H<sub>2</sub>O)。在该方法支持下, 活性污泥水中的磷回收率可接近90%。(2) 双模块流动电极电容去离子, 先以电吸附的方式使活性污泥水中的磷浓缩到极高浓度, 再通过结晶法生成兰铁矿, 以实现其中磷元素的有效回收。

### 4 结束语

综上所述, 在现代城市污水处理中, 磷的高效去除与回收是一项关键工作内容。为达到这一目标, 污水处理厂应引入当前先进的复合型氧化沟系统, 在该系统支持下, 将城市污水中的磷有效去除, 以达到良好的污水净化效果。对于处理后的含磷活性污泥水, 污水处理厂需继续通过磷的释放、液相富集、高效分离与回收等途径, 对其做到合理回收。如此方可充分发挥复合型氧化沟在城市污水处理中的应用优势, 从而为磷的循环利用创造有利条件。

#### [参考文献]

- [1]张青青, 胡亮, 廖妍, 等. 改良A<sub>2</sub>O氧化沟在小城镇污水处理厂中的应用研究[J]. 水处理技术, 2024, 50(6): 140-143.
- [2]柏春荫, 张庆习, 赵帅, 等. BAF+高效沉淀池+反硝化深床滤池用于准IV类提标[J]. 中国给水排水, 2023, 39(12): 119-124.
- [3]孟钊. 城镇污水处理厂的微生物群落结构与功能特征及运行实效研究——以淄博周村城镇综合污水处理厂为例[D]. 山东农业大学, 2023.
- [4]吴星悦, 何若男, 穆洪新, 等. 腺苷三磷酸结合盒转运蛋白活性导向的市政污水生物处理工艺毒性削减能力评价和特征致毒物质识别[J]. 环境科学学报, 2023, 43(10): 15-25.

#### 作者简介:

黄梦姣(2004--), 女, 河南省南阳市人, 本科, 职称: 学生, 研究方向: 资源循环科学与工程。