

工业园区生活污水与工业废水分流处理研究

吕占涛

中国电子系统工程第四建设有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]近年来,我国工业化发展迅速,工业园区众多,极大地推动了城市化进程的同时,随之带来的水环境问题也日益凸显。为解决工业园区污水处理难题,本研究聚焦生活污水与工业废水分流处理体系,分析水质差异、优化分流参数、探究适配工艺及效能、明确核心影响因素与调控策略。通过实验模拟与理论分析,验证分流处理优势。结果显示,分流后针对性处理工艺的 COD 去除率提升,运行能耗降低,且管网布局等参数影响显著,最优分流比例需动态调控,本研究为园区污水处理系统优化升级提供技术支撑。

[关键词]工业园区;生活污水;工业废水;分流处理;工艺优化

DOI: 10.33142/ec.v8i11.18576

中图分类号: X143

文献标识码: A

Research on the Separation Treatment of Domestic Sewage and Industrial Wastewater in Industrial Parks

LYU Zhantao

The Fourth Construction Co., Ltd. of China Electronics System Engineering, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: In recent years, Chinese industrialization has developed rapidly, with numerous industrial parks, greatly promoting the process of urbanization. At the same time, the resulting water environment problems have become increasingly prominent. To solve the problem of sewage treatment in industrial parks, this study focuses on the separation treatment system of domestic sewage and industrial wastewater, analyzes water quality differences, optimizes separation parameters, explores adaptive processes and efficiency, clarifies core influencing factors and regulation strategies. Verify the advantages of diversion treatment through experimental simulation and theoretical analysis. The results show that the COD removal rate of the targeted treatment process after diversion is improved, the operating energy consumption is reduced, and the parameters such as pipeline layout have a significant impact. The optimal diversion ratio needs to be dynamically controlled. This study provides technical support for the optimization and upgrading of the sewage treatment system in the park.

Keywords: industrial park; domestic sewage; industrial wastewater; diversion processing; process optimization

引言

近年来长江流域水环境污染防治工作已取得成效,整体改善,但局部污染问题依然严峻^[1]。为深入贯彻中共中央、国务院关于加强生态文明建设决策部署,加快推进生态环境治理体系和治理能力现代化,全面提升污水集中收集处理率,持续推动水环境质量改善^[2]。多数工业园区采用混合集中处理模式,存在抑制微生物活性、降低生化效率及高成本深度处理等问题^[3]。分流处理模式可源头分离并针对性处理两类污水,但相关研究多聚焦案例,缺乏系统性。因此,开展分流处理研究、明确关键技术要点意义重大。

1 工业园区生活污水与工业废水水质特性差异分析

1.1 实验材料与方法

(1) 采样点设置

依据园区产业布局与污水排放路径,在生活污水(员工宿舍区、办公区总排放口)和工业废水(各行业企业预处理后排放口)排放口设采样点,共设3个生活污水、5

个工业废水采样点,覆盖主要生活与生产区域。

(2) 检测指标与方法

选取污水处理核心控制指标(COD、BOD₅、SS、NH₄⁺-N、TP、pH)及工业废水特征指标(重金属Cu、Zn、Cr,难降解有机物苯酚),检测参照《水质采样和样品保存技术规定》(HJ 493—2009)和《水和废水监测分析方法》(第四版)执行,检测方法如表1所示。

表1 污水检测指标及方法

检测指标	检测方法	检出限(mg/L)
COD	重铬酸盐法	10
BOD ₅	稀释与接种法	2
SS	重量法	1
NH ₄ ⁺ -N	纳氏试剂分光光度法	0.025
TP	钼酸铵分光光度法	0.01
Cu、Zn、Cr	原子吸收分光光度法	0.001
苯酚	4-氨基安替比林分光光度法	0.002
pH值	玻璃电极法	±0.01

(3) 采样与检测步骤

用瞬时采样法,在各采样点连采 3d 水样,每天早、中、晚各采 1 次,每次 1000mL。采样后加保存剂(如 COD 水样加硫酸酸化至 $\text{pH}<2$), $0\sim4^{\circ}\text{C}$ 冷藏,运输至实验室,24h 内检测。

1.2 水质特性检测结果

表 2 展示了生活污水与工业废水各指标检测统计值,生活污水数据取自 3 个采样点平均值,工业废水数据取自 5 个采样点平均值。

表 2 生活污水与工业废水水质特性统计

指标	生活污水	工业废水	差异倍数
COD (mg/L)	380~520 (均值 450)	850~1600 (均值 1200)	2.67
BOD ₅ (mg/L)	150~220 (均值 180)	120~350 (均值 200)	1.11
BOD ₅ /COD	0.38~0.45 (均值 0.42)	0.15~0.28 (均值 0.21)	0.50
SS (mg/L)	120~180 (均值 150)	200~450 (均值 320)	2.13
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	25~40 (均值 32)	10~25 (均值 18)	0.56
TP (mg/L)	4~8 (均值 6)	5~12 (均值 8)	1.33
pH 值	6.8~7.5 (均值 7.2)	5.2~8.8 (均值 6.5)	-
Cu (mg/L)	未检出	0.05~0.32 (均值 0.18)	-
Zn (mg/L)	未检出	0.12~0.45 (均值 0.28)	-
苯酚 (mg/L)	未检出	5~25 (均值 15)	-

1.3 水质特性差异分析

基于检测结果分析生活污水与工业废水水质特性差异:

(1) 有机物与可生化性:工业废水 COD 均值是生活污水的 2.67 倍,有机物污染负荷高;生活污水 BOD₅/COD 均值 0.42,可生化性好,工业废水中含有大量难降解有机物,而生活污水中的有机物多为易生化降解的碳水化合物、蛋白质。

(2) 悬浮物:工业废水 SS 均值是生活污水的 2.13 倍,源于工业生产固体废弃物,增加固液分离难度。

(3) 氮磷营养盐:生活污水 NH₄⁺-N 均值高于工业废水,TP 均值略低,与污水来源成分有关。

(4) 特征污染物:生活污水未检出重金属和苯酚,工业废水有检出。

(5) pH 值:生活污水 pH 值稳定呈中性,工业废水波动大,部分需中和处理。

2 工业园区分流处理系统设计及优化

2.1 分流系统核心设计参数

(1) 管网布局设计

采用“双管并行”管网布局,分别铺设生活污水与工业废水收集管网,为了防止交叉污染的出现,两套管网在空间上并行分布。生活污水管网覆盖生活区域,采用枝状管网布局^[4];工业废水管网覆盖生产车间,用环状+枝状复合布局。两套管网主干管分别接入对应处理站。在管网关键节点设流量监测仪、水质在线监测仪和控制阀,流量计实时监测,水质仪重点监测工业废水关键指标,超阈值时,控制阀自动关闭,避免不合格废水进入。分流系统管网布局如图 1 所示。

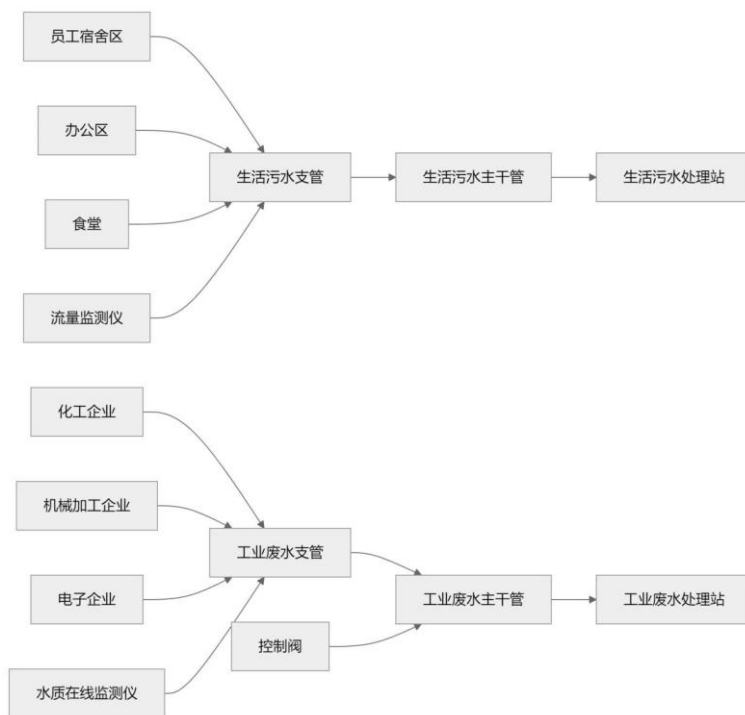


图 1 分流系统管网布局示意图

(2) 分流比例设计

分流比例是生活污水与工业废水流量占园区总污水流量的比例，设计需综合考量园区产业结构、员工数量、生产规模等因素。设园区总污水流量为 Q ，生活污水流量为 Q_1 ，工业废水流量为 Q_2 ，分流比例 $r=Q_1/Q_2$ ，并基于污水排放规律建立计算模型：

$$r = \frac{N \times q}{Q - N \times q} \quad (1)$$

其中， N 为园区员工数（人）， q 是人均生活污水排放量（ $L/人 \cdot d$ ），依《室外排水设计标准》（GB 50014—2021）， q 取 150~200 $L/人 \cdot d$ 。

同时，分流比例要满足生活污水处理工艺最佳流量范围 Q_{10pt} 、工业废水处理工艺最佳流量范围 Q_{20pt} 的要求，分流比例需满足：

$$\frac{Q_{10pt}}{Q_{20pt}} \times 0.8 \leq r \leq \frac{Q_{10pt}}{Q_{20pt}} \times 1.2 \quad (2)$$

(3) 管网流速设计

管网流速是影响管网输送效率和防淤堵的关键参数。《室外排水设计标准》规定，生活污水管网设计流速 0.6-3.0m/s，工业废水管网 0.8-3.0m/s（因工业废水悬浮物高，需更高流速防淤积）。管网管径依流量和流速计算确定，公式如下：

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}} \quad (3)$$

其中， D 为管径（m）； Q 为管段设计流量（ m^3/s ）； v 为管段设计流速（m/s）。

2.2 分流系统参数优化实验

(1) 实验装置与方案

构建实验室规模分流系统模拟装置，含水箱、蠕动泵等。以园区实际数据配模拟污水，调节蠕动泵流量改变分流比，设不同管网流速，探究分流比和流速对分流效率的影响。分流效率评价指标有：分离效率（通过检测特征污

染物含量计算）、管网淤积率（运行 72h 后检测管网内沉积物）、能耗（监测蠕动泵的运行功率，计算单位体积污水的输送能耗）。

(2) 实验结果与分析

①分流比例在 0.3~0.7 时，分离效率超 90%； $r < 0.3$ 或 $r > 0.7$ 时，分离效率显著下降。因分流比例过小或过大，均会使管网流速过低、产生淤积，致污水交叉污染，故最优分流比例范围为 0.3~0.7。

2.3 分流系统优化设计方案

管网布局：“双管并行+分区收集”，生活污水枝状布局覆盖生活区，工业废水环状+枝状复合布局覆盖生产区，关键节点设监测控制设备。

分流比例：分流比例最优范围 0.3~0.7，依员工数、生产规模和处理能力动态调整，用流量控制阀精准调控。

管网参数：生活污水设计流速 1.0~1.2m/s，按流量定管径；工业废水设计流速 1.2~1.4m/s，考虑悬浮物适当增大管径。

辅助设施：两套管网入口设格栅（生活污水细格栅，工业废水粗+细格栅），工业废水管网设置调节池，确保水质和水量的稳定。

3 分流后污水适配处理工艺研究

3.1 分流后生活污水高效生化处理工艺研究

(1) 工艺选择

生活污水可生化性好（ $BOD_5/COD=0.42$ ），氮磷的含量高，需兼顾有机物去除与脱氮除磷。对比 A^2/O 、SBR、MBR 等工艺， A^2/O 因脱氮除磷稳定、成本低、操作简便被选用。该工艺由厌氧、缺氧、好氧池组成，厌氧池聚磷菌释磷，缺氧池内，反硝化菌将硝酸盐氮还原为氮气，好氧池内，有机物被微生物降解，去除磷和有机物^[5]。

分流比例对分离效率的影响

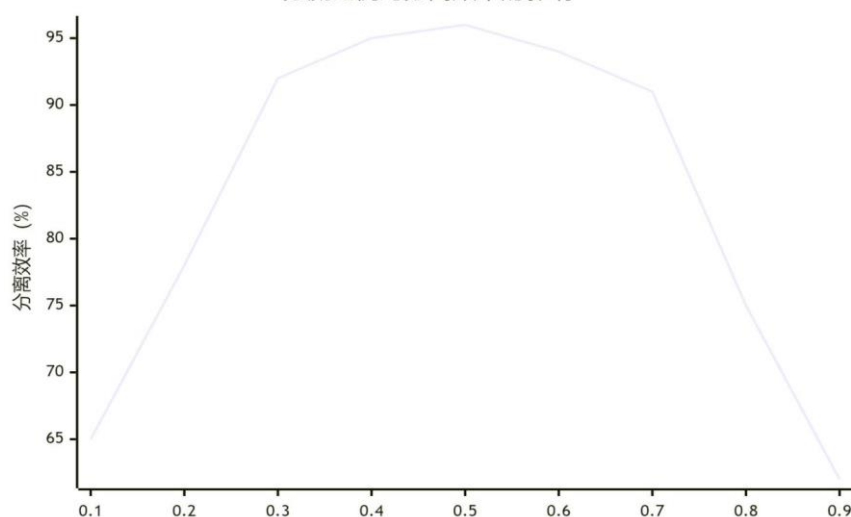


图2 分流比例对分离效率的影响曲线

(2) 实验装置与方案

搭建 50L 实验室规模 A²/O 实验装置, 厌氧池 10L、缺氧池 15L、好氧池 20L、二沉池 5L, 配搅拌器、曝气器等。用模拟生活污水 (COD=450mg/L 等指标), 接种城市污水处理厂回流污泥, MLSS 约 3000mg/L。采用正交实验, 选 HRT、厌氧/缺氧/好氧容积比、回流比 3 个关键参数, 各设 3 个水平, 具体如表 3 所示。以 COD 去除率、NH₄⁺-N 去除率、TP 去除率为评价指标, 优化工艺参数。

表 3 正交实验因素与水平

因素	水平 1	水平 2	水平 3
HRT (h)	8	12	16
厌氧/缺氧/好氧容积比	1:2:3	1:1.5:2.5	1:1:2
回流比 (%)	50	100	150

(3) 实验结果与分析

依据表 4 正交实验结果, 经极差分析明确各因素对处理效能的影响程度, 进而筛选出最优工艺参数组合。

表 4 A²/O 工艺正交实验结果

实验号	HRT (h)	容积比	回流比 (%)	COD 去除率 (%)	NH ₄ ⁺ -N 去除率 (%)	TP 去除率 (%)
1	8	1:2:3	50	78	65	62
2	8	1:1.5:2.5	100	82	72	68
3	8	1:1:2	150	80	70	65
4	12	1:2:3	100	88	85	78
5	12	1:1.5:2.5	150	92	88	82
6	12	1:1:2	50	85	80	75
7	16	1:2:3	150	89	86	79
8	16	1:1.5:2.5	50	87	82	76
9	16	1:1:2	100	90	84	77

极差分析: 对 COD 去除率, HRT 影响最大, 最优组合 (HRT=12h、容积比 1:1.5:2.5、回流比 150%) 下去除率 92%; 对 NH₄⁺-N 去除率, HRT 影响居首, 最优组合同上, 去除率 88%; 对 TP 去除率, 容积比影响最大, 最优组合亦同, 去除率 82%。验证实验表明, 最优参数下水质质达《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准。

3.2 分流后工业废水预处理-深度处理工艺研究

(1) 工艺选择

工业废水可生化性差 (BOD₅/COD=0.21), 含苯酚、重金属等, 直接生化处理效果不佳, 易导致微生物中毒。故采用“预处理+深度处理”组合工艺: 预处理用芬顿氧化工艺, Fe²⁺催化 H₂O₂产·OH; 深度处理用曝气生物滤池 (BAF), 借助填料表面生长的生物膜降解有机物, 实现深度净化。

(2) 实验装置与方案

实验装置含 20L 芬顿氧化反应器与 30L 装火山岩填

料 (粒径 3~5mm) 的 BAF 反应器, 用模拟工业废水 (含多种污染物, pH=6.5、SS=320mg/L 等)。实验分两阶段: 一是芬顿氧化预处理, 探究 H₂O₂、Fe²⁺投加量, pH 值、反应时间对 COD 等去除及 BOD₅/COD 提升的影响; 二是 BAF 深度处理, 将芬顿氧化出水接入 BAF 反应器, 评估 COD 去除率、NH₄⁺-N 去除率、TP 去除率。

(3) 实验结果与分析

(1) 芬顿氧化预处理单因素实验确定最优参数:

H₂O₂30mmol/L、Fe²⁺15mmol/L、pH3、反应 60min 时效果最佳, COD 去除率 45%, BOD₅/COD 升至 0.48, 苯酚、Cu、Zn 去除率分别达 98%、92%、90%。该工艺可有效去难降解物与重金属, 提升可生化性, 利于后续 BAF 处理。

(2) 在芬顿氧化最优参数下, 探究 BAF 工艺参数影响, 发现 HRT=8h、气水比=6:1 时效果最佳, COD、NH₄⁺-N、TP 去除率分别达 75%、80%、72%。经“芬顿氧化+BAF”组合工艺处理后, 出水多项指标达标, 苯酚和重金属未检出, 达《污水综合排放标准》一级标准。

4 分流处理系统影响因素识别与调控策略

4.1 核心影响因素识别

基于前文研究及园区污水排放实际特征, 识别出分流比例波动、水质水量冲击、管网状态、工艺参数匹配度为影响分流处理系统运行的核心因素, 并通过单因素实验与相关性分析探究其影响规律。

4.2 针对性调控策略

(1) 分流比例动态调控策略

在分流系统主干管装智能流量控制阀与在线监测仪, 实时采流量数据, 构建分流比例动态调控模型:

$$r_{real} = \frac{Q_1}{Q_2}, r_{opt} = \frac{Q_{1,opt}}{Q_{2,opt}} \quad (4)$$

当 $|r_{real}-r_{opt}|$ 超 10%时, 系统自动调流量控制阀开度以调整流量; 园区企业设预处理调节池, 工业废水流量大时暂存待稳定后排放; 生活污水管网设应急蓄水池, 流量不足时补清水, 确保分流比例稳定在 0.3~0.7 范围内^[6]。

(2) 水质水量冲击应对策略

构建水质水量预警系统, 在工业废水排放口装在线监测仪, 超阈值 (COD≥1500mg/L、苯酚≥25mg/L) 触发预警, 关闭排放口阀, 废水经应急预处理达标后入分流系统。两类处理系统前端设均化池, 容积按 24h 最大污水量的 30%设计, 配备搅拌装置及调节设备, 水量冲击发生时, 均化池起到缓冲作用, 水质波动时, 投加酸碱调节剂、营养盐, 调 pH 至 6.5~7.5、BOD₅/N/P 至 100:5:1, 保障微生物活性。

(3) 管网运行状态优化策略

建立管网巡检维护制度, 工业废水管网每两个月进行一次疏通, 淤积率控制在 3%内; 关键节点设排污井, 并

定期清理。每年用 CCTV 全面检测管网、修复渗漏。优化管网运行参数,确保两类管网流速稳定在规定范围,防止淤积。

(4) 工艺参数动态匹配策略

构建工艺参数智能调控系统,基于进水水质实时数据,用机器学习算法自动优化参数^[7],芬顿氧化工艺中,进水 COD 升高时,按线性关系增投 H_2O_2 和 Fe^{2+} ; A²O 工艺中,进水 NH_4^+-N 升高时,按线性关系延长好氧池 HRT; BAF 工艺中,进水溶解氧降低时,自动提高气水比。

5 结论

本研究对工业园区生活污水与工业废水分流处理展开系统研究,经系列实验得出:两类污水水质差异大,“双管并行+分区收集”模式下,提出适配处理工艺及参数:生活污水用 A²O 工艺及对应参数,污染物去除率高;工业废水用“芬顿氧化+BAF”组合工艺及对应参数,出水达一级标准。未来可融合物联网与大数据技术,搭建全流程智能监控调控平台,实时精准调控分流比例、管网运行及工艺参数,提升系统自动化与运行效率。

[参考文献]

- [1]曹松.某化工园区“一企一管”废水收集与监测系统设计[J].给水排水,2020,56(1):64-66.
- [2]李益群,王新疆.化工企业废水分类收集、清污分流构思[J].绿色科技,2016,5(10):49-51.
- [3]焦健,王秀红.工业园区污水处理对策研究[J].华东科技:综合,2018(4):1.
- [4]李鹤.CASS 工艺在工业园区污水处理中的应用[J].中国科技投资,2014,11(13):1-2.
- [5]文丽青,颜廷文.天津某工业园污水处理厂提标改造工程设计实例[J].环境工程设计,2020(12):115-117.
- [6]贾新强,郭建华,刘娟,等.山东省某工业园污水处理厂改扩建工程设计[J].中国给水排水,2016,32(2):60-62.
- [7]雷文江.某工业园污水处理厂工程设计[J].市政技术,2021,39(6):141-144.

作者简介:吕占涛(1985.3—),毕业院校:西北大学,所学专业:环境工程,当前就职单位:中国电子系统工程第四建设有限公司,职务:给排水工程师,职称级别:中级工程师。