

陈欢, 占升, 徐华锺, 等. 某工业园区受污染地下水处理工艺设计及应用[J]. 净水技术, 2026, 45(6): 132-139, 156.

Chen H, Zhan S, Xu H Z, et al. Design and application of treatment process for contaminated groundwater in an industrial park[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(6): 132-139, 156.

## 某工业园区受污染地下水处理工艺设计及应用

陈欢<sup>1</sup>, 占升<sup>1</sup>, 徐华锺<sup>1</sup>, 魏宇琦<sup>1</sup>, 陈文杰<sup>2</sup>, 范占煌<sup>1,\*</sup>

(1. 中节能大地<杭州>环境修复有限公司, 浙江杭州 310000; 2. 松阳县经济发展投资集团有限公司, 浙江丽水 323000)

**摘要** 【目的】为防治工业园区地下水污染, 设计采用“格栅+调节池+气浮/铁碳微电解+混凝沉淀+缺氧-好氧(AO)+膜生物反应器(MBR)”工艺处理某工业园区石油类、总氮、镍、氟化物、苯系物复合污染地下水。【方法】对地下水开展气浮试验、铁碳微电解试验、混凝沉淀试验、AO试验, 设计适用于该园区地下水处理的工艺参数。【结果】污染地下水经气浮工艺试验装置曝气 20 min, 调节 pH 值为 7, 添加地下水量 1‰的 10% 质量分数的聚合氯化铝(PAC)溶液, 添加地下水量 2.5‰的 1% 质量分数的聚丙烯酰胺(PAM)溶液, 石油类污染物去除率达 99.29%; 铁碳微电解工艺试验添加 50 g/L 的铁粉、25 g/L 的碳粉, 曝气量为 1 L/min, 水力停留时间(HRT)为 20 min, 苯系物去除率达 99.87%; 混凝沉淀工艺试验添加地下水量 1‰的 10% 质量分数 PAC 溶液, 地下水量 2.5‰的 1% 质量分数 PAM 溶液, 调节 pH 值为 10, 镍去除率达 92.39%, 氟化物去除率达 59.34%; 添加地下水量 3‰的 10% 质量分数 PAC 溶液, 地下水量 2‰的 1% 质量分数 PAM 溶液, pH 值为 6 时, 氟化物去除率达 99.44%; AO 工艺试验中, 缺氧污泥质量浓度为 2 g/L 时, 总氮去除率达 48.17%; 缺氧污泥质量浓度为 4 g/L 时, 五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、化学需氧量(COD)去除率分别达 37.44%、37.43%; 好氧污泥质量浓度为 4 g/L 时, 氨氮、BOD<sub>5</sub>、COD 去除率分别达 57.39%、58.45%、52.13%。【结论】采用上述工艺对某工业园区污染地下水进行处理, 地下水出水水质达标, 为类似工程项目的运行提供了理论指导, 对地下水污染防治及碳减排具有重要意义。

**关键词** 工业园区; 地下水; 复合污染; 工艺设计; 工程应用

中图分类号: X523 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)06-0132-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.06.015

## Design and Application of Treatment Process for Contaminated Groundwater in an Industrial Park

Chen Huan<sup>1</sup>, Zhan Sheng<sup>1</sup>, Xu Huazhong<sup>1</sup>, Wei Yuqi<sup>1</sup>, Chen Wenjie<sup>2</sup>, Fan Zhanhuang<sup>1,\*</sup>

(1. CECDADI <Hangzhou> Environmental Remediation Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;

2. Songyang County Economic Development Investment Group Co., Ltd., Lishui 323000, China)

**Abstract** [Objective] In order to prevent and control groundwater pollution in industrial parks, the design adopts the process of "grid+regulating tank+air flotation/iron-carbon micro-electrolysis+coagulation-sedimentation+anoxic-oxic (AO)+membrane bioreactor (MBR)" to treat the composite pollution of petroleum, total nitrogen, nickel, fluorides, and benzene derivatives in groundwater in an industrial park. [Methods] A series of experiments, including air flotation tests, iron-carbon micro-electrolysis tests, coagulation-sedimentation tests, and AO process tests, were conducted on extracted groundwater to design process parameters suitable for groundwater treatment in the industrial park. [Results] Following 20 minutes of aeration in the air flotation test apparatus, pH value adjustment to 7, addition of a 10% mass fraction polyaluminium chloride (PAC) solution at 1‰ by weight of the groundwater, and 1% mass fraction polyacrylamide (PAM) solution at 2.5‰ by weight of the groundwater, the removal rate of petroleum reached 99.29%. In the iron-carbon micro-electrolysis process experiment, when adding 50 g/L iron powder and 25 g/L carbon powder relative to the groundwater, with an aeration rate of 1 L/min and a hydraulic retention time (HRT) of 20 minutes, the removal efficiency of benzene

[收稿日期] 2024-12-18

[基金项目] 浙江省科技计划项目(2021C03167)

[作者简介] 陈欢(1993—), 女, 工程师, 主要从事土壤污染防治和地下水污染治理等工作, E-mail: kelly\_chenhuan@163.com。

[通信作者] 范占煌, 男, 高级工程师, E-mail: fanzhanhuang@dadi-ep.com。

series compounds reached 99.87%. In the coagulation-sedimentation process experiment, when adding a 10% mass fraction PAC solution at 1‰ by weight of the groundwater and a 1‰ mass fraction PAM solution at 2.5‰ by weight of the groundwater, followed by pH value adjustment to 10, the removal efficiencies of nickel and fluoride reached 92.39% and 59.34%, respectively. When adding a 10% mass fraction PAC solution at 3% by weight of the groundwater and a 1‰ PAM solution at 2% by weight of the groundwater, followed by pH value adjustment to 6, the removal efficiencies of fluoride reached 99.44%. In the AO process experiment, when the mass concentration of anaerobic sludge was 2 g/L, the total nitrogen removal rate reached 48.17%. When the mass concentration of anaerobic sludge was 4 g/L, the removal rates of 5-day biochemical oxygen demand (BOD<sub>5</sub>) and chemical oxygen demand (COD) reached 37.44% and 37.43%, respectively. When the mass concentration of aerobic sludge was 4 g/L, the removal rates of ammonia nitrogen, BOD<sub>5</sub>, and COD reached 57.39%, 58.45%, and 52.13%, respectively. [ **Conclusion** ] The above process is used to treat polluted groundwater in an industrial park, and the groundwater effluent quality meet the standard, providing theoretical guidance for the design and operation of similar engineering projects. It is of great significance for the prevention and control of groundwater pollution and carbon reduction.

**Keywords** industrial park; groundwater; combined pollution; technological design; engineering application

地下水是我国重要的水资源,广泛应用于生产、生活等领域,随着工业化进程的加速,工业园区地下水污染问题日益严重<sup>[1]</sup>。尤其是不锈钢生产企业,生产过程中的酸洗、抛光等工艺复杂,地下水污染具有成分复杂、污染范围广、水质波动性大、修复困难的特点,对人类健康及生态环境造成严重危害<sup>[2-4]</sup>。加强地下水污染防治,对保障地下水资源的安全和可持续利用,保护饮用水源,促进经济可持续发展具有重要意义。

本文以某不锈钢生产企业为主的工业园区抽出地下水为对象,针对 pH、镍、总氮、氟化物、石油类、苯系物复合污染地下水,开展小试及中试试验,验证“格栅+调节池+气浮/铁碳微电解反应+混凝沉淀+缺氧-好氧(AO)+膜生物反应器(MBR)”处理工艺可行性,

并得到最佳工艺参数,最终应用于该工业园区污染区块,地下水出水达到园区出水水质要求,实现不锈钢企业污染地下水收集管网全覆盖,对工程化应用及地下水减污降碳具有重要意义<sup>[5-11]</sup>。

## 1 地下水来源及水质特征

本文污染地下水抽提自某工业园区污染 4 个区块(区块 1~区块 4)。根据地下水调查情况及环境风险分析结果,以污染程度、污染范围、环境暴露风险、与产业特征的关联度为主要评判依据,污染区块 1 和污染区块 2 抽出地下水修复及风险管控目标污染物为 pH、镍、总氮、氟化物、石油类,污染区块 3 和污染区块 4 抽出地下水修复及风险管控目标污染物为 pH、镍、总氮、氟化物、苯系物。其污染物质量浓度如表 1 所示。

表 1 地下水目标污染物水质情况  
Tab. 1 Water Quality of Target Pollutants in Groundwater

污染区块	pH 值	镍/( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	总氮/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	氟化物/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	石油类/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	苯系物/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )
区块 1	6.2~8.6	1.28~33 900.00	0.22~815.00	0.103~292.000	0.58~38.20	ND
区块 2	4.6~9.8	3.25~64 900.00	0.10~2 330.00	0.431~137.000	ND	ND
区块 3	5.4~11.2	1.62~13 600.00	0.38~2 240.00	0.200~167.000	ND	0.01~0.77
区块 4	6.1~8.3	1.92~73 100.00	0.36~570.00	0.246~488.000	ND	ND

注:ND 表示质量浓度小于检出限值。

## 2 地下水处理工艺设计及试验内容

针对各污染区块抽出的污染地下水,采用抽出处理进行存量污染削减,改善区块污染地下水水质,再设计将地下水导排至园区污水处理厂,经处理处置,水质达标后排放。污染区块 1 地下水含有石油类,调节池出水进入气浮池处理石油类污染,同时可以在一定程度上降低氟化物污

染<sup>[12]</sup>;污染区块 3 地下水含有苯系物,调节池出水进入铁碳微电解反应系统氧化还原去除苯系物。镍、氟化物等拟通过混凝沉淀去除,同时,混凝沉淀池出水 pH 值调节为 6~9。总氮(主要为硝酸盐氮)通过“AO+MBR”工艺进行生化处理,污水经过缺氧反硝化-好氧硝化处理后,进入 MBR 膜池,实现脱氮和降低化学需氧量(COD)。故污染

区块 1 及污染区块 2 设计抽出地下水处理工艺为“格栅+调节池+气浮+混凝沉淀+AO+MBR”, 其工艺流程如图 1(a) 所示; 污染区块 3 及污染区块 4

设计抽出地下水处理工艺为“格栅+调节池+铁碳微电解+混凝沉淀+AO+MBR”, 其工艺流程如图 1(b) 所示。

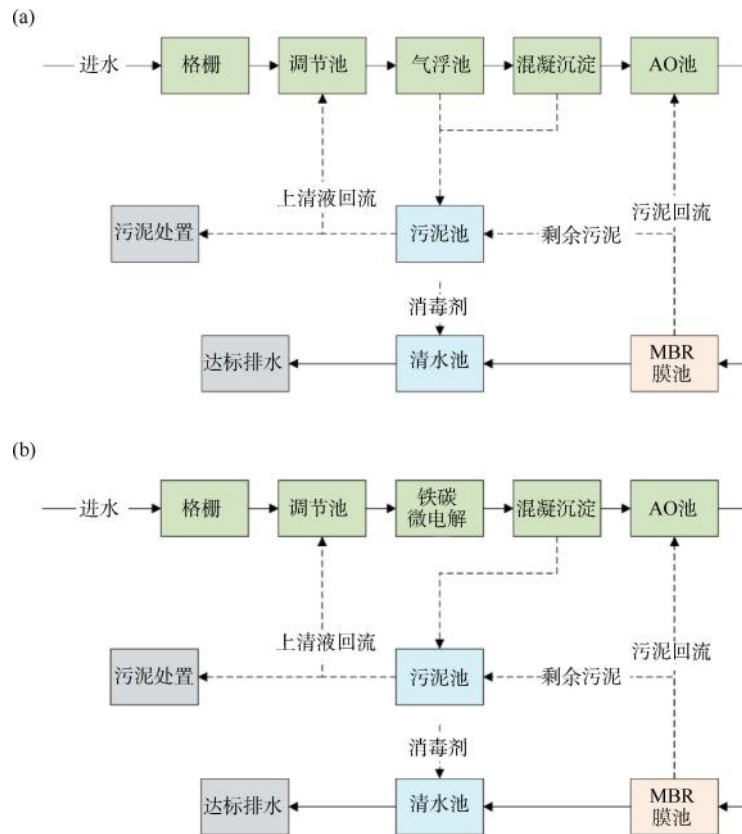


图 1 (a) 污染区块 1 及 2 抽出地下水处理工艺; (b) 污染区块 3 及 4 抽出地下水处理工艺

Fig. 1 (a) Groundwater Extraction Treatment Process for Contaminated Blocks 1 and 2;

(b) Groundwater Extraction Treatment Process for Contaminated Blocks 3 and 4

## 2.1 地下水前处理

取  $1\text{ m}^3$  地下水于塑料或防腐容器中静置 24 h 以上, 模拟工程段的调节池, 取静置后的上清液进行试验。

## 2.2 气浮试验

气浮法是一种进行固液分离的方法, 气泡和颗粒间进行物理吸附, 并形成悬浮体上浮分离<sup>[13-14]</sup>。针对地下水石油类污染, 探究气浮试验装置对石油类污染物的处理效果(图 2)<sup>[15]</sup>。根据压力溶气气浮法, 采用水泵将气浮处理的水抽送到压力为 0.2~0.4 MPa 的溶气罐中, 同时注入加压空气, 然后使经过溶气的水通过减压阀进入气浮池, 此时由于压力突然降低至 0.1 MPa(常压), 溶解于水中的空气便以微气泡形式从水中释放出来。微细的气泡在上升的过程中附着于悬浮颗粒及石油类污染物上, 密度

减小, 上浮到气浮池表面与液体分离。模拟目标污染地下水在气浮装置运行条件下的处理效果, 研究 pH 对气浮效果的影响。

## 2.3 铁碳微电解试验

铁碳微电解利用金属腐蚀原理, 将铁屑和碳颗粒浸没在酸性污染地下水中, 利用铁和碳之间的电极电位差, 在污染地下水中形成无数个原电池, 在酸性曝气条件下发生电化学反应, 改变污染地下水有机物的结构和特性, 使其发生断链、开环, 以达到被降解的目的。通过曝气, 增加污染地下水中溶解氧含量, 使铁屑和碳颗粒充分接触, 防止板结。反应中生成的羟基既可以使出水 pH 升高, 又可以与由  $\text{Fe}^{2+}$  氧化生成的  $\text{Fe}^{3+}$  逐渐生成聚合度大的  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  胶体絮凝剂, 有效吸附、凝聚水中污染物, 增强污染地下水的净化效果<sup>[15]</sup>。针对地下水苯系物污染, 分

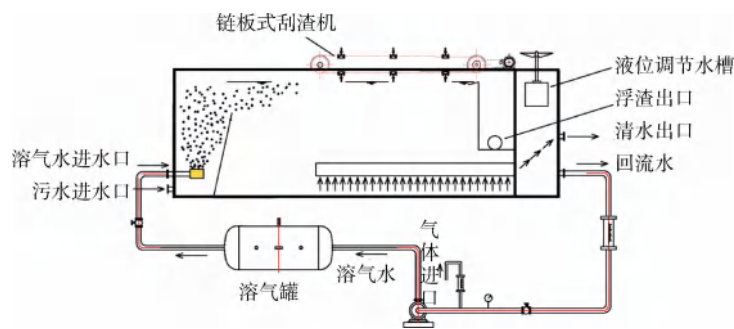


图2 气浮装置

Fig. 2 Air Flotation Device

别以 pH、水力停留时间 (HRT)、铁碳添加量、曝气量为变量,设计静态烧杯试验探求铁碳微电解反应的最佳反应条件。

## 2.4 混凝沉淀试验

重金属离子去除剂能与目标重金属离子强力螯合生成大分子的螯合物质,借助混凝剂聚丙烯酰胺 (PAM) 及絮凝剂聚合氯化铝 (PAC),通过絮凝沉淀作用去除目标重金属物质<sup>[16-17]</sup>。针对地下水重金属镍及氟化物,分别以 pH、PAC 及 PAM 的加药量为变量,设计静态烧杯试验探求混凝沉淀反应的最佳反应条件,并筛选合适的重金属离子去除剂,确定重金属离子去除剂加药量。

## 2.5 AO 试验

AO 处理工艺包含 2 个阶段:硝化阶段和反硝化阶段。硝化阶段有机物通过氧化还原作用被氧化为二氧化碳和水,并释放能量,氨氮被氧化为硝酸盐氮。反硝化阶段氮化细菌通过还原硝酸盐氮消耗氧气,并从污水中消耗有机碳添加物作为电子供体,最终释放氮气和一氧化碳等有害气体。分别测定缺氧与好氧污泥驯化试验组进出水 pH、总氮、氨氮、氟化物、总镍、五日生化需氧量 (BOD<sub>5</sub>)、COD、高锰酸盐指数指标,绘制好氧污泥驯化试验中内源呼吸曲线及生化呼吸曲线,比较 2 条呼吸线验证 AO 工艺去除污染地下水中总氮含量的可行性<sup>[18-19]</sup>。

## 3 试验步骤及结果分析

### 3.1 气浮试验

目标污染地下水初始 pH 值为 6.61,石油类初始质量浓度为 5.64 mg/L,采用气浮装置处理 20 min 得到溶气气泡水,分别以 1 200 mL 溶气气泡水为试验样品开展试验。用质量分数为 10% HCl 或 10% NaOH 调节组别 1~5 溶气气泡水 pH 值为 6.0、

7.0、8.0、9.0、10.0,组别 6 不调节 pH,然后加入 1.2 mL 质量分数为 10% 的 PAC 溶液并搅拌均匀混,再加入 3 mL 质量分数为 1‰ 的 PAM 溶液并搅拌均匀混,静置沉淀 10 min,组别 7 仅采取气浮处理,取清液测定 pH、石油类污染物含量。

试验结果如图 3 所示,组别 1~6 在气浮 20 min 基础上,加入混凝沉淀药剂可提高石油类的去除率。分别加入 1‰ 处理地下水量、质量分数为 10% 的 PAC 溶液,2.5‰ 处理地下水量、质量分数为 1‰ 的 PAM 溶液,石油类污染物去除效果均优于仅进行气浮的组别,当 pH 值为 7.0 时,石油类去除率最佳,达 99.29%。组别 7 经气浮装置曝气 20 min 后,石油类污染物质量浓度从 5.64 mg/L 降到 0.55 mg/L,去除率达 90.25%。

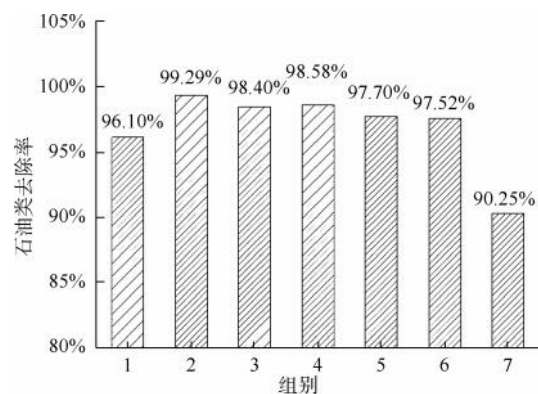


图3 pH 值对气浮效果影响

Fig. 3 Influence of pH Values on Air Flotation

### 3.2 铁碳微电解试验

目标污染地下水苯系物初始质量浓度为 0.45 mg/L,分别以 100 mL 目标地下水为试验样品开展试验。当 pH 值分别为 2.0、3.0、4.0、5.0 时,添加 10.0 g 铁粉、10.0 g 碳粉,曝气量为 2 L/min, HRT 为 30 min,处理后目标地下水中苯系物均未检

出。当 pH 值为 6.0 时, 苯系物质量浓度为 0.03 mg/L。针对本工业园区苯系物超标情况, 铁碳微电解工艺最佳 pH 值为 5.0。

当 HRT 分别为 20、30、40、60 min, 添加 10.0 g 铁粉、10.0 g 碳粉, 曝气量为 2 L/min, 处理后目标地下水中苯系物均未检出。HRT 为 10 min 时, 苯系物质量浓度为 0.06 mg/L, 故 HRT 为 20 min 时苯系物处理效果最佳且曝气时间最短。针对本工业园区苯系物超标情况, 铁碳微电解工艺最佳 HRT 为 20 min。

铁碳添加量影响试验如表 2 所示, pH 值为 5.0, 曝气量为 2 L/min, HRT 为 20 min 时, 组别 a~组别 f 处理后目标地下水苯系物质量浓度均 < 0.6 μg/L, 去除率均超过 99.86%, 组别 g~组别 i 处理后目标地下水苯系物质量浓度为 0.02、0.03、0.06 mg/L, 去除率分别为 95.56%、93.33%、86.67%, 组别 j 处理后目标地下水苯系物质量浓度为 0.40 mg/L, 去除率为 11.1%。针对本工业园区苯系物超标情况, 铁碳微电解工艺最佳铁粉添加量为 50 g/L、碳粉添加量为 25 g/L。

表 2 铁碳添加量处理工艺试验  
Tab. 2 Treatment Process Experiment for Iron and Carbon Dosages

组别	铁、碳添加量
a	10.0 g 铁粉、10.0 g 碳粉
b	10.0 g 铁粉、5.0 g 碳粉
c	10.0 g 铁粉、2.5 g 碳粉
d	5.0 g 铁粉、10.0 g 碳粉
e	5.0 g 铁粉、5.0 g 碳粉
f	5.0 g 铁粉、2.5 g 碳粉
g	2.5 g 铁粉、10.0 g 碳粉
h	2.5 g 铁粉、5.0 g 碳粉
i	2.5 g 铁粉、2.5 g 碳粉
j	无铁粉、无碳粉

当曝气量分别为 1、2、3 L/min 时, pH 值为 5.0, 添加 5.0 g 铁粉、2.5 g 碳粉, HRT 为 20 min, 处理后目标地下水苯系物均未检出, 曝气量为 1 L/min 时能耗最低。针对本工业园区苯系物超标情况, 铁碳微电解工艺最佳曝气量为 1 L/min。

### 3.3 混凝沉淀试验

目标污染地下水水样初始 pH 值为 6.58 ~

6.62, 镍初始质量浓度为 2.68 ~ 2.89 mg/L, 氟化物初始质量浓度为 3.33 ~ 6.36 mg/L, 分别以 100 mL 目标地下水为试验样品开展试验。试验步骤为先调节水样 pH, 然后添加一定量质量分数为 10% PAC 溶液并搅拌均匀混, 再添加一定量质量分数为 1‰ PAM 溶液并搅拌均匀混, 静置沉淀 10 min 后取清液测定 pH、镍、氟化物含量。

#### 3.3.1 PAC 添加量试验

不调节 pH (初始水样 pH 值为 6.60), 保持质量分数为 1‰ PAM 溶液 2 mL 添加量不变的条件下, 分别添加 0.10、0.25、0.50、1.00、2.00、3.00 mL 质量分数为 10% PAC 溶液, 对照组不添加 PAC 溶液, 试验结果如图 4 所示。质量分数为 10% PAC 添加量为 0.10~3.00 mL 时, 添加量越大, 氟化物去除效果越好, 镍去除效果越差。加入 3.00 mL 质量分数为 10% PAC 溶液、2 mL 质量分数为 1‰ PAM 时氟化物去除效果最佳, 去除率达 99.44%。加入 0.10 mL 质量分数为 10% PAC 溶液、2 mL 质量分数为 1‰ PAM 时镍去除效果最佳, 去除率达 12.13%。

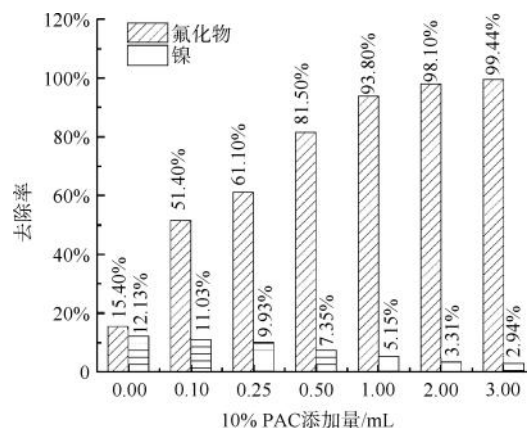


图 4 PAC 添加量对混凝沉淀效果影响

Fig. 4 Effect of PAC Dosages on Coagulation and Sedimentation

#### 3.3.2 PAM 添加量试验

不调节 pH 值, 保持质量分数为 10% PAC 溶液 0.1 mL 添加量不变的条件下, 分别添加 0.05、0.10、0.25、0.50、1.00、2.00 mL 质量分数为 1‰ PAM 溶液, 对照组不添加 PAM 溶液, 试验结果如图 5 所示。质量分数为 1‰ PAM 添加量为 0.25~2.00 mL 时, 氟化物去除效果较好; 质量分数为 1‰ PAM 添加量为 0.25 mL 时, 镍去除效果较好。加入 0.1 mL 质量分数为 10% PAC 溶液、2.00 mL 质量分数为 1‰ PAM

时氟化物去除效果最佳,去除率达 56.45%。加入 0.1 mL 质量分数为 10% PAC 溶液、0.25 mL 质量分数为 1‰ PAM 时镍去除效果最佳,去除率达 26.12%。

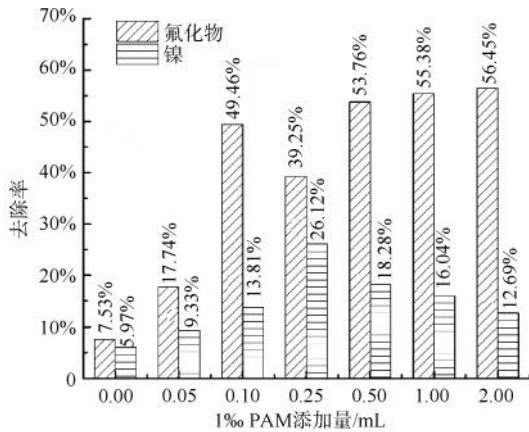


图 5 PAM 添加量对混凝沉淀效果影响

Fig. 5 Effect of PAM Dosages on Coagulation and Sedimentation

### 3.3.3 pH 影响试验

先分别调节各水样 pH 值为 6、7、8、9、10, 对照组不调节 pH, 分别加入 0.1 mL 质量分数为 10% PAC 溶液及 0.25 mL 质量分数为 1‰ PAM 溶液, 试验结果如图 6 所示。在 pH 值为 6~10 条件下, 随着 pH 的升高, 镍的去除效果提高。pH 值为 10 时, 镍去除效果最佳, 去除率达 92.39%, 氟化物去除率达 59.34%。在 pH 值为 6~10 条件下, 氟化物的去除效果呈先降低后升高的趋势。pH 值为 6 时, 氟化物去除效果最佳, 去除率达 75.82%; pH 值为 8 时去除效果最差, 去除率为 50.00%。

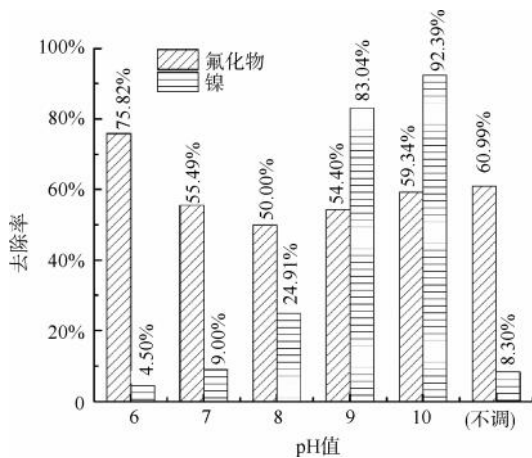


图 6 pH 值对混凝沉淀效果影响

Fig. 6 Effect of pH Values on Coagulation and Sedimentation

## 3.4 AO 试验

### 3.4.1 污泥驯化

采集某不锈钢废水处理厂缺氧污泥及好氧污泥, 采用气浮及混凝沉淀工艺处理后地下水进行污泥驯化(培养温度为 25 ℃)。缺氧污泥驯化过程如下: 在容积为 10.0 L 的密封塑料桶(A 池, 直径为 24 cm, 开口口径为 18 cm, 高为 29 cm) 中加 10.0 L 混凝沉淀后出水作为 A 池进水 ( $BOD_5/COD$  浓度比为 0.22~0.27, 外加乙酸为碳源, 投加后质量浓度为 50 mg/L), 分别投加污泥质量浓度为 2、4 g/L 的缺氧污泥; 控制溶解氧质量浓度为 0.2~0.5 mg/L, HRT 为 24 h, 排出部分混合液, 沉淀 30 min, 用虹吸管排出上清液, 向装置投加新的混凝沉淀后的出水; 重复上述试验至 A 池运行稳定。好氧污泥驯化过程如下: 在容积为 8.0 L 的有机玻璃容器(O 池, 20 cm×20 cm×20 cm) 中添加 1 600 mL 的 A 池运行稳定出水作为 O 池进水 ( $BOD_5/COD$  浓度比为 0.26~0.28, 外加乙酸为碳源, 投加后质量浓度为 40 mg/L), 分别投加污泥质量浓度 2、4 g/L 的好氧污泥; 通过曝气控制溶解氧质量浓度大于 2 mg/L, HRT 为 24 h, 排出部分混合液, 沉淀 30 min 后, 用虹吸管排出上清液, 再向装置投加新的 A 池运行稳定出水; 重复上述试验至 O 池运行稳定。测定 A 池及 O 池稳定后进水及出水 pH、总氮、氨氮、氟化物、 $BOD_5$ 、COD、污泥浓度、污泥龄等指标。

### 3.4.2 可生化试验

O 池水样  $BOD_5/COD$  浓度比为 0.42~0.45, 污染地下水可生化试验以质量浓度为 4 g/L 好氧污泥组别开展试验, 通过测定好氧污泥的呼吸速率验证污染地下水生物处理可行性。得到不同反应时间积累耗氧量, 并绘制内源呼吸曲线及生化呼吸曲线(图 7)。在 0~6 min, 微生物内源呼吸耗氧速率为 0.07~0.08 mg/(L·min), 耗氧量相对稳定, 耗氧量与时间成直线关系; 生化呼吸耗氧速率为 0.21~0.26 mg/(L·min), 初期耗氧量相对较大, 随水中有机物被消耗, 耗氧量逐渐降低, 生化呼吸耗氧速率始终大于内源呼吸耗氧速率, 说明好氧污泥进行生化反应可行。

### 3.4.3 AO 试验进水、出水水质测定及结果分析

A 池进水 pH 值为 10.0~10.2, 总氮质量浓度为 32.8~33.5 mg/L, 氨氮质量浓度为 2.66~

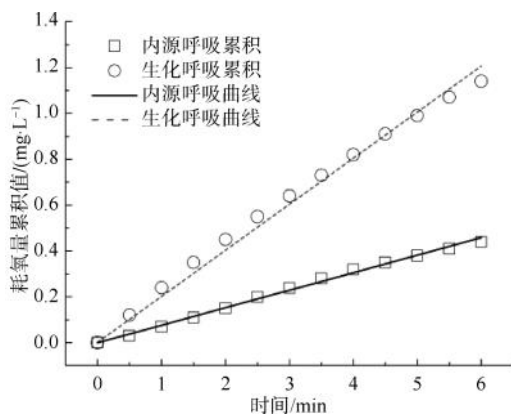


图7 内源呼吸及生化呼吸曲线

Fig. 7 Curves of Endogenous and Biochemical Respiration

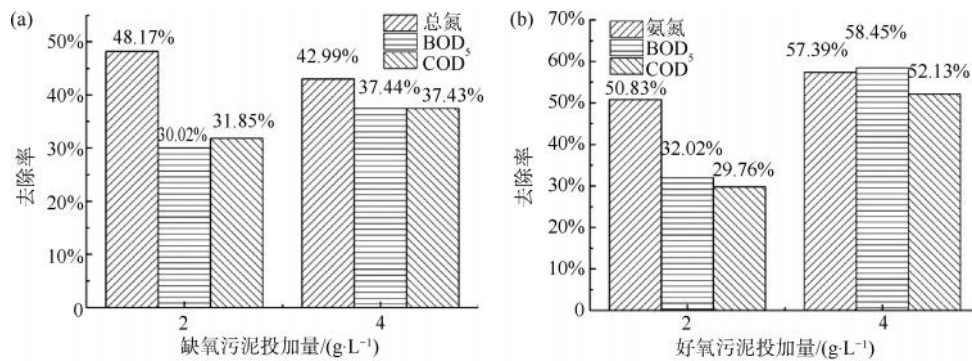


图8 (a) 缺氧工艺及 (b) 好氧工艺污染物去除率

Fig. 8 Removal Rates of Pollutants in (a) Anaerobic Process; and (b) Aerobic Process

#### 4 工程运行效果

污染区块1采用“格栅+调节池+气浮+混凝沉淀+AO+MBR”工艺对抽出地下水进行实际处理,运行后连续4个月对进出水水质检测并分析,如表3所示,pH值及石油类、镍、氟化物、总氮出水质量浓度均达到《钢铁工业水污染物排放标准》(GB 13456—2012)间接排放标准限值要求。“格栅+调节池+铁碳微电解+混凝沉淀+AO+MBR”工艺尚未

表3 污染区块1抽出地下水进、出水水质

Tab. 3 Influent and Effluent Quality of Groundwater in Pollution Block 1

指标	进水	出水	出水限值要求
pH值	6.1~6.8	7.7~8.5	6~9
石油类/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.50~3.70	0.70~1.76	10
镍/(mg·L <sup>-1</sup> )	3.30~4.54	<0.05	1.0
氟化物/(mg·L <sup>-1</sup> )	16.60~22.40	2.43~6.40	20
总氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	70.00~167.80	9.65~19.60	35

2.76 mg/L, BOD<sub>5</sub> 质量浓度为 44.3~45.4 mg/L, COD 质量浓度为 167~168 mg/L; O池进水 pH 值为 7.6, 总氮质量浓度为 13.4~18.0 mg/L, 氨氮质量浓度为 6.02~9.88 mg/L, BOD<sub>5</sub> 质量浓度为 91.2~98.2 mg/L, COD 质量浓度为 328~336 mg/L。

缺氧工艺试验结果如图8(a)所示。缺氧污泥质量浓度为 2 g/L 时, 总氮、BOD<sub>5</sub>、COD 去除率分别达 48.17%、30.02%、31.85%; 缺氧污泥质量浓度为 4 g/L 时, 总氮、BOD<sub>5</sub>、COD 去除率分别达 42.99%、37.44%、37.43%。好氧工艺试验结果如图8(b)所示。好氧污泥质量浓度为 4 g/L 时, 氨氮、BOD<sub>5</sub>、COD 处理效果更佳, 去除率分别为 57.39%、58.45%、52.13%。

在污染区块开展工程应用。运行期间, 污染地下水经抽提后, 布设的监测井数据显示枯水期水位波动小于 0.3 m, 区域下游地下水水质提升。

#### 5 结论

采用“格栅+调节池+气浮/铁碳微电解反应+混凝沉淀+AO+MBR”工艺作为本工业园区复合污染地下水处理工艺可行。针对不同类型目标污染物, 气浮、铁碳微电解、混凝沉淀、AO 处理工艺推荐工艺参数及相应污染物去除率如下。

(1) 沉淀前处理污染地下水经气浮工艺试验装置曝气 20 min, 调节 pH 值为 7.0, 10% 质量分数 PAC 溶液添加量为处理地下水量的 1‰, 1‰ 质量分数 PAM 溶液添加量为处理地下水量的 2.5‰, 石油类去除率达 99.29%。

(2) 铁碳微电解工艺试验在添加 50 g/L 铁粉、25 g/L 碳粉, 曝气量为 1 L/min, HRT 为 20 min 条件下, 苯系物去除率达 99.87%。

(3) 混凝沉淀工艺试验添加 0.1% 目标污染地下水、10% 质量分数 PAC 溶液, 0.25% 目标污染地下水、1% 质量分数 PAM 溶液, pH 值为 10 时, 镍去除率达 92.39%, 氟化物去除率达 59.34%; 添加 3% 目标污染地下水、10% 质量分数 PAC 溶液, 2% 目标污染地下水、1% 质量分数 PAM 溶液, pH 值为 6.0 时, 氟化物去除率达 99.44%。对于氟化物含量较高的地下水, 可根据实际情况在除镍后再次添加 PAC、PAM 药剂, 并调节 pH 值为 6.0, 提高氟化物去除率。

(4) 设计 AO 工艺运行主要参数如下, A 池污泥质量浓度为 2 g/L, 污泥龄为 20 d, 溶解氧质量浓度为 0.2~0.5 mg/L, HRT 为 24 h; O 池污泥质量浓度为 4 g/L, 污泥龄为 15 d, 溶解氧质量浓度大于 2 mg/L, HRT 为 24 h。缺氧工艺总氮、BOD<sub>5</sub>、COD 去除率分别达 48.17%、30.02%、31.85%; 好氧工艺氨氮、BOD<sub>5</sub>、COD 去除率分别达 57.39%、58.45%、52.13%。

### 参考文献

- [1] 华兴国, 龙泉, 张雨晴, 等. 迭置指数法在工业园区地下水污染风险评估中的应用[J]. 四川环境, 2024, 43(3): 19-28.  
Hua X G, Long Q, Zhang Y Q, et al. Application of overlay and index method for assessment of groundwater contamination risk in industrial park[J]. Sichuan Environment, 2024, 43(3): 19-28.
- [2] 黄万抚, 何善媛. 钢铁酸洗废水处理与回收利用[J]. 冶金丛刊, 2005(5): 33-36, 39.  
Huang W F, He S Y. Treatment and recycle of steel-pickling liquid waste[J]. Metallurgical Collections, 2005(5): 33-36, 39.
- [3] 尹建云. 不锈钢酸洗废水中金属离子的资源化利用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.  
Yin J Y. Research on resource utilization of metal ion from spent steel pickling wastewater [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [4] 王叶杰. 浙江省不锈钢酸洗行业环境污染控制及资源循环利用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.  
Wang Y J. The environmental pollution control and resource recycling and utilizing in stainless steel pickling industry in Zhejiang Province[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [5] 赵子千, 黄超, 魏坤昊, 等. 地下水抽出一处理的困境与破局[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(4): 562-568.  
Zhao Z Q, Huang J, Wei K H, et al. Dilemmas and solution of groundwater pump and treatment technology[J]. Environmental Pollution & Control, 2023, 45(4): 562-568.
- [6] 张莉, 刘菲, 袁慧卿, 等. 地下水抽出处理技术研究进展与展望[J]. 现代地质, 2023, 37(4): 977-985.  
Zhang L, Liu F, Yuan H Q, et al. Research progress and prospect of groundwater pump and treat technology [J]. Geoscience, 2023, 37(4): 977-985.
- [7] MacKay D M, Cherry J A. Groundwater contamination: Pump-and-treat remediation[J]. Environmental Science & Technology, 1989, 23(6): 630-636.
- [8] 袁英英, 胡浩丽. 抽出处理技术在地下水污染修复工程中的应用[J]. 环境与发展, 2019, 31(7): 73-73, 75.  
Yuan Y Y, Hu H L. Application of extraction processing technology in groundwater pollution restoration project [J]. Environment and Development, 2019, 31(7): 73-73, 75.
- [9] 王家樑. 抽出处理技术在地下水污染修复工程中的应用[J]. 上海建设科技, 2019(1): 67-69.  
Wang J L. Application of drainage treatment technology in groundwater pollution rehabilitation project [J]. Shanghai Construction Science & Technology, 2019(1): 67-69.
- [10] 鄢楷, 曾杰. 浅析污染场地地下水抽出处理技术[J]. 低碳世界, 2020, 10(6): 29-30.  
Yan K, Zeng J. Analysis on groundwater pumping treatment technology in polluted site [J]. Low Carbon World, 2020, 10(6): 29-30.
- [11] 杨萌, 翁仕龙, 潘怡然, 等. 地下水污染修复技术研究进展[J]. 环境科学与管理, 2022, 47(4): 118-122.  
Yang M, Weng S L, Pan Y R, et al. Research progress on remediation technologies of groundwater pollution [J]. Environmental Science and Management, 2022, 47(4): 118-122.
- [12] 谢汝桢, 张永丽. 玻璃厂废水处理分析与研究[J]. 四川环境, 2006, 25(4): 75-78.  
Xie R Z, Zhang Y L. Study on wastewater treatment technology for glass industry [J]. Sichuan Environment, 2006, 25(4): 75-78.
- [13] 何圣兵, 孟凡良, 王宝贞, 等. 溶气气浮法与沉淀法的处理效果比较[J]. 中国给水排水, 2002, 18(5): 42-44.  
He S B, Meng F L, Wang B Z, et al. Comparison on the treatment effects of dissolved-air flotation and sedimentation processes [J]. China Water & Wastewater, 2002, 18(5): 42-44.
- [14] Giustra M G, Di Bella G. Shipboard wastewater treatment using granular activated carbon: Adsorption test and bioregeneration [J]. Journal of Environmental Engineering, 2017, 143(10): 06017007.
- [15] 周伟, 庄晓伟, 陈顺伟, 等. 铁碳微电解预处理工业废水研究进展[J]. 工业水处理, 2017, 37(7): 5-9.  
Zhou W, Zhuang X W, Chen S W, et al. Research progress in (下转第 156 页)

10. 1016/j. colsurf. 2012. 11. 018.
- [20] Sabouhi M, Torabian A, Bozorg A, et al. A novel convenient approach toward the fouling alleviation in membrane bioreactors using the combined methods of oxidation and coagulation [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 33: 101018. DOI: 10. 1016/j. jwpe. 2019. 101018.
- [21] 潘伟亮, 张汛, 李姣妮, 等. 次氯酸盐氧化耦合 FeCl<sub>3</sub> 絮凝调节改善污泥脱水[J]. *化工进展*, 2024, 43(6): 3450-3458.
- Pan W L, Zhang X, Li J N, et al. Hypochlorite oxidation coupled with FeCl<sub>3</sub> flocculation to improve sludge dewatering [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2024, 43(6): 3450-3458.
- [22] Xing X C, Li T, Bi Z H, et al. Destruction of microbial stability in drinking water distribution systems by trace phosphorus polluted water source[J]. *Chemosphere*, 2021, 275: 130032. DOI: 10. 1016/j. chemosphere. 2021. 130032.
- [23] Li Y F, Wang D B, Xu Q X, et al. New insight into modification of extracellular polymeric substances extracted from waste activated sludge by homogeneous Fe(II)/persulfate process [J]. *Chemosphere*, 2020, 247: 125804. DOI: 10. 1016/j. chemosphere. 2019. 125804.
- [24] Ai J, Wang Z Y, Dionysiou D D, et al. Understanding synergistic mechanisms of ferrous iron activated sulfite oxidation and organic polymer flocculation for enhancing wastewater sludge dewaterability [J]. *Water Research*, 2021, 189: 116652. DOI: 10. 1016/j. watres. 2020. 116652.
- [25] Flemming H C, Wingender J. The biofilm matrix [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2010, 8(9): 623-633.
- [26] 唐玉霖, 吴梦怡, 孙天晓, 等. NaClO/Fe<sup>2+</sup> 强化含藻污泥脱水性能与机理研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(9): 1226-1233.
- Tang Y L, Wu M Y, Sun T X, et al. NaClO/Fe<sup>2+</sup> coagulation to improve dewatering performance of algae-containing sludge and mechanism investigation [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2021, 49(9): 1226-1233.
- [27] Yang P, Li D D, Zhang W J, et al. Study of sludge conditioning using organic acids chelated ferrous ion catalyzed NaClO oxidation: Evolution of extracellular polymeric substances and floc structure [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 280: 111757. DOI:10. 1016/j. jenvman. 2020. 111757.
- [28] Liu S, Gunawan C, Barraud N, et al. Understanding, monitoring, and controlling biofilm growth in drinking water distribution systems [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(17): 8954-8976.
- [29] Wang R D, Zhou K, Mou J Y, et al. Formation and characteristics of viable nonculturable *Vibrio parahaemolyticus* induced by sodium hypochlorite [J]. *Food Bioscience*, 2025, 64: 105902. DOI:10. 1016/j. fbio. 2025. 105902.
- [30] 靳军涛, 管运涛. 再生水管壁菌株胞外聚合物提取及腐蚀性研究[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(6): 78-82.
- Jin J T, Guan Y T. Extraction methods and corrosion characterization of extracellular polymeric substances from strain attached on the reclaimed wastewater pipelines [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(6): 78-82.
- [31] 滕飞, 管运涛, 李莎莎, 等. 生物膜对给水铸铁管腐蚀结垢的影响[J]. *环境科学*, 2009, 30(2): 396-401.
- Teng F, Guan Y T, Li S S, et al. Effect of biofilm on the corrosion and fouling of cast iron pipe for water supply [J]. *Environmental Science*, 2009, 30(2): 396-401.

(上接第 139 页)

- the pretreatment of industrial wastewater by iron-carbon micro-electrolysis process [J]. *Industrial Water Treatment*, 2017, 37(7): 5-9.
- [16] 邵启运, 蒋志辉, 袁东日, 等. 不锈钢产品生产废水零排放工程实例[J]. *工业水处理*, 2021, 41(7): 152-156.
- Shao Q Y, Jiang Z H, Yuan D R, et al. Project example of zero-discharge treatment of stainless-steel production wastewater [J]. *Industrial Water Treatment*, 2021, 41(7): 152-156.
- [17] 张金梅. 混凝沉淀处理生活污水的实验研究[J]. *绿色科技*, 2022, 24(8): 100-102.
- Zhang J M. Experimental research on treatment of domestic sewage by coagulation and sedimentation [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2022, 24(8): 100-102.
- [18] 侯金财. A/O-MBR 生物脱氮工艺试验研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2013.
- Hou J C. Researches on the biological denitrification process by anoxic/aerobic membrane bioreactor [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2013.
- [19] 呼永锋, 王坤, 曹孟京, 等. A/O+MBR 工艺在分散式污水处理工程中的应用[J]. *水处理技术*, 2022, 48(1): 150-152, 156.
- Hu Y F, Wang K, Cao M J, et al. Application of A/O+MBR process in decentralized wastewater treatment project [J]. *Technology of Water Treatment*, 2022, 48(1): 150-152, 156.