

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.13.003

# 超声沉淀/气浮/微流控过滤对机修废水的预处理效能

孙禹<sup>1</sup>, 刘亚丹<sup>1</sup>, 顾超<sup>1</sup>, 陶晓霞<sup>1</sup>, 闫志扬<sup>2</sup>, 刘上游<sup>2</sup>,  
秦晋一<sup>1,2</sup>

(1. 国家能源集团 神东煤炭集团公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017209; 2. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 机修废水的水质波动大, 含油量高达 103.2 mg/L, 铁含量为 3.5 mg/L, 浊度为 800 NTU, COD 为 10 706 mg/L, 单一气浮无法有效去除污染物, 造成后端生化污泥大量死亡。为此, 采用超声沉淀/气浮/微流控过滤复合工艺作为生化反应的预处理, 以降低后端碳负荷。结果表明, 超声沉淀通过声团聚使浊度去除率达 89.45%。气浮中加入 25% 的次氯酸盐, 氧化破坏“油包水”结构, 对油的去除率达 53.74%。同时 Fe<sup>2+</sup> 被氧化为 Fe<sup>3+</sup> 并形成 Fe(OH)<sub>3</sub> 沉淀, 铁去除率达 89.73%。微流控过滤利用电极电解产生更多不溶性絮体, 裹挟 COD 沉淀去除率达 68.05%。在长期运行过程中, 含铁量、含油量和浊度较改造前分别下降了 96.3%、92.5% 和 98.5%, BOD<sub>5</sub>/COD 由 0.15 提升到 0.40。污水处理厂整体出水水质达到《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2005) 中洗涤用水要求。预处理总投资为 131 万元, 处理成本为 3.80 元/m<sup>3</sup>, 较之前降低 41%。该复合工艺的开发为机修废水的生化预处理提供了新的技术思路。

**关键词:** 机修废水; 超声预处理; 气浮; 微流控过滤; 含油量; 铁; 浊度

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)13-0018-08

## Ultrasonic Sedimentation–Air Flotation–Microfluidic Filtration for Pretreatment of Machine Maintenance Flushing Wastewater: Performance and Removal Mechanism

SUN Yu<sup>1</sup>, LIU Ya-dan<sup>1</sup>, GU Chao<sup>1</sup>, TAO Xiao-xia<sup>1</sup>, YAN Zhi-yang<sup>2</sup>,  
LIU Shang-you<sup>2</sup>, QIN Jin-yi<sup>1,2</sup>

(1. Shendong Coal Group Co. Ltd., China Energy Investment Group, Ordos 017209, China;  
2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The water quality of machine maintenance flushing wastewater fluctuates greatly, with oil content of up to 103.2 mg/L, iron content of 3.5 mg/L, turbidity of 800 NTU, and COD of 10 706 mg/L. Single air flotation cannot effectively remove these pollutants, resulting in deaths of a large number of acitivated sludge in subsequent biochemical tanks. This study proposed a combined process of ultrasonic sedimentation, air flotation, and microfluidic filtration as a pretreatment strategy for subsequent biochemical processes. The results showed that ultrasonic precipitation achieved a turbidity removal rate of 89.45% through acoustic agglomeration. Adding 25% hypochlorite to air flotation could oxidize and

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51808044); 国家能源集团科技项目(HT[2022]89号)

通信作者: 秦晋一 E-mail: jinyi.qin@chd.edu.cn

destroys the “water in oil” structure, resulting in a removal of 53.74% for oil. At the same time,  $\text{Fe}^{2+}$  was oxidized to  $\text{Fe}^{3+}$ , and form  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  precipitate, with an iron removal of 89.73%. Microfluidic filtration utilized electrode electrolysis to produce more insoluble flocs, with COD sedimentation removal reaching 68.05%. During long-term operation, the iron content, oil content, and turbidity decreased by 96.3%, 92.5%, and 98.5% respectively compared to before the transformation, and the  $\text{BOD}_5/\text{COD}$  increased from 0.15 to 0.40. The overall effluent quality of the sewage treatment plant met the requirements for washing water in *The Reuse of Urban Recycling Water—Water Quality Standard for Industrial Uses* (GB/T 19923—2005). The total investment for pretreatment was 1.31 million yuan, and the treatment cost was 3.80 yuan/ $\text{m}^3$ , which was 41% lower than before. The development of this process provides a new technological approach for the biochemical pretreatment of machine maintenance flushing wastewater.

**Key words:** machine maintenance flushing wastewater; ultrasonic pretreatment; air flotation; microfluidic filtration; oil content; iron; turbidity

机修废水为机械维修后冲洗地面过程所产生的废水,含有机油、齿轮油等复杂成分,生物难降解,处理难度大。同时,还含有大量重金属离子,会对污泥活性产生抑制<sup>[1-2]</sup>。机修废水处理后作为洗涤用水需满足《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2005)要求。废水中各成分含量对处理效果有较大影响,如高浓度COD会增加后端生化单元的负荷<sup>[3]</sup>,但为了维持良好的生化处理效果,废水经预处理后需达到 $\text{BOD}_5/\text{COD}>0.3$ <sup>[4]</sup>。铁含量超过 10 mg/L 会对微生物脱氢酶的合成产生抑制<sup>[5]</sup>。固体悬浮物作为重金属和其他有毒污染物运输和迁移的载体,会造成污泥大量死亡<sup>[6-7]</sup>,一般应控制在 60 NTU 以下<sup>[8]</sup>。油会导致水体表面形成油膜,使水体缺氧<sup>[9]</sup>,故其浓度应小于 10 mg/L<sup>[10]</sup>。综上,机修废水预处理工艺改造的目的是降低 COD、浊度、铁含量和含油量,并维持较好的可生化性。

由于超声空化效应会扰乱胶体悬浮体系,增加颗粒碰撞,促进颗粒絮凝沉降<sup>[11]</sup>。气浮使气泡黏附分散油颗粒,利用密度差异的浮力不同达到除油目的<sup>[9]</sup>。采用在气浮中加入次氯酸盐和聚合氯化铝(PAC)絮凝剂的措施,会破坏“油包铁”结构,形成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 絮凝核,实现除铁目的<sup>[12]</sup>。配合微流控中电絮凝产生的活性氯组分,可有效破坏有机污染物分子结构<sup>[13]</sup>。为此,以超声沉淀/气浮/微流控过滤复合工艺替代单一气浮,作为生化单元的预处理,并开展相应的试运行和工程改造,以期含油废水处理提供新的思路。

## 1 材料与方 法

### 1.1 原水来源及水质

机修废水来自内蒙古鄂尔多斯市神东设备装备制造基地维修二厂,COD、铁含量、浊度及含油量分别为 10 706 mg/L、3.5 mg/L、800 NTU 和 103.2 mg/L。

### 1.2 工艺流程

采用超声沉淀/气浮/微流控过滤工艺替代原气浮池,改造后的工艺流程见图 1。

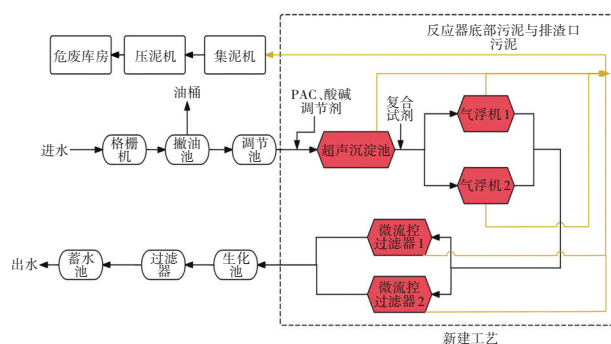


图 1 改造前后机修废水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of machine maintenance flushing wastewater treatment process before and after transformation

机修废水经格栅去除较大悬浮颗粒后,在撇油池进行油水分离,下部废水自流进入调节池。调节 pH 至 8~9 后进入超声沉淀池,水力停留时间(HRT)为 35.7 min。超声沉淀出水进入并联的 2 座气浮机,HRT 为 86.4 min,发生气水微纳米颗粒碰撞,油珠上浮后经上方刮泥板收集,絮体沉淀至底部集泥槽。中间层出水进入 2 座微流控过滤器,其平面尺寸为 4.0 m×2.0 m,有效水深为 1.6 m。设备采用厚

度为8 mm 碳钢板并作防腐处理,每座微流控过滤器内分别设有11块铝制电极板用于电絮凝,长×宽为1 m×1 m,厚度为1 cm,间距为40 cm。其上部有10 cm 水层,用于与电极板接触絮凝,下部为2~4 mm 果壳活性炭滤料层,厚度为50 cm。设计滤速为1.6 m/h,停留时间为60 min。最终出水泵入生化池,经生化处理和过滤器过滤后供厂区循环利用。采用去除率来反映各单元的处理效果,所有数据重复测定三次取平均值。

### 1.3 实验试剂及分析方法

实验试剂包括重铬酸钾、硫酸汞、硫酸银、硫酸、七水合硫酸亚铁、六水合硫酸亚铁铵、邻菲罗啉、盐酸、正己烷、无水乙醇、无水硫酸钠、盐酸羟胺、乙酸铵、冰乙酸、氢氧化钠、氯化钠、聚合氯化铝,以上药剂均为分析纯,皆购自国药集团化学试剂有限公司。

COD 采用重铬酸钾滴定法测定;浊度采用TDT-3型浊度仪测定;含油量采用紫外分光光度法测定;铁含量采用邻菲罗啉分光光度法测定;混合液悬浮固体浓度(MLSS)采用重量法测定;污泥沉降比(SV)采用体积法测定;溶解氧(DO)利用哈希HQ1130溶解氧仪测定;污泥体积指数(SVI)通过SV与MLSS计算得到;氧化还原电位(ORP)采用BPP-7800氧化还原电位测定仪测定。

向150 mL 废水中分别加入不同浓度的PAC以及次氯酸盐,处理后的水样先后经过150 r/min 和30 r/min 离心10 s 和5 min,收集上清液,静置1 d 和10 d 后测定ORP。此外,采用该上清液,补加乙酸钠使COD为2 000 mg/L,用于对3 000 mg/L 污泥进行培养,在第1、5、10天测定污泥相关指标,考察投加药剂对污泥的影响。

## 2 结果与讨论

### 2.1 超声沉淀池对浊度的去除

机修废水含有大量的有机污染物、铁盐,导致COD浓度高,可生化性差。COD主要来自于悬浮油污颗粒的释放,故采用超声沉淀池去除含油絮体颗粒。图2为超声沉淀池中浊度与深度的关系。进水浊度为800 NTU,在中间斜管上方距水面2、10、15和20 cm处,测得浊度分别约为4、10、17和30 NTU。考虑到现场空间有限,因此只能选择超声时间为3.4 min、沉淀时间为32.3 min,最终出水浊度稳定

在22 NTU左右。

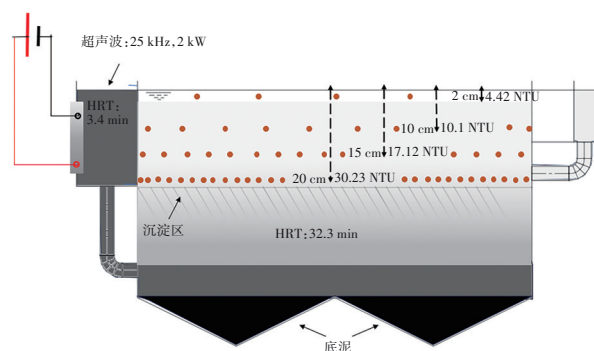


图2 超声沉淀池不同水深处的浊度

Fig.2 Turbidity at different water depths in ultrasonic sedimentation tank

超声频率会影响空化气泡的产生,超声频率越小,越容易产生气泡<sup>[14]</sup>;超声功率越大,空化气泡数量越多。颗粒的声团聚在20 kHz以上才能发生。在25 kHz和2 kW条件下,超声可以通过疏水颗粒表面的气核或空化气泡引导颗粒团聚于声压的波腹区域<sup>[15-16]</sup>。团聚中颗粒会与气泡紧紧黏结,而团聚中的这些气泡是实现声团聚以及团聚稳定的重要原因。此外,超声产生海绵效应,使颗粒之间的水分随声波振动而丢失,失去内部水分的颗粒由于布朗运动,相互碰撞聚集沉淀<sup>[17]</sup>。这不仅可用于颗粒聚集,也可以用于油滴的聚集,促进原油脱水和脱盐<sup>[18]</sup>。因此采用超声波对工业废水进行絮凝,可以提高废水的沉降能力和悬浮物脱水性<sup>[19]</sup>。高频超声(200 kHz)虽然也可产生团聚效应,但相比于低频超声,其能耗过大<sup>[20]</sup>。过高的声能(>2 kW)还会使颗粒微型化,导致沉降性能降低<sup>[17]</sup>。因此,从沉淀效率和经济性考虑,超声沉淀池的频率最终设定为25 kHz,功率为2 kW。

控制废水pH在8~9,预处理进出水水质见图3。经超声沉淀池处理后,浊度由140~180 NTU降低至14~20 NTU,COD、含油量、铁含量分别由10 000~14 000、1~1.3、3.5~5.5 mg/L下降至5 500~7 500、0.9~1.2、3~5 mg/L。超声沉淀池对浊度的去除率达到89.45%,显著减轻了后续单元悬浮物中污染物释放带来的二次污染负荷。超声波可以产生空化效应,不仅使难降解的大分子物质降解为小分子物质,而且在高温高压作用下还可产生羟基自由基,使有机物氧化降解。因此,超声处理对悬浮物及其中污染物的去除包含了物理沉淀和化学断裂的综

合效能。

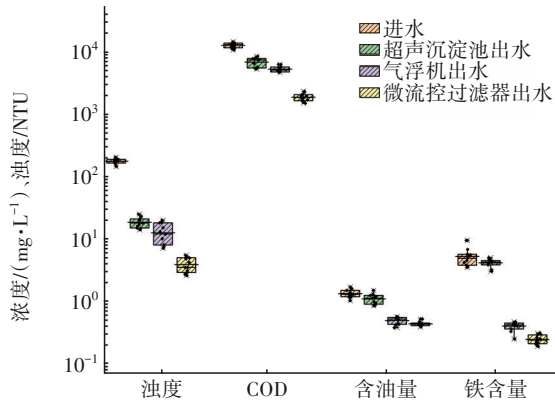


图3 预处理出水水质

Fig.3 Characteristics of water quality after pretreatment

## 2.2 气浮机对油和铁的去除

废水经过超声沉淀处理后,油和铁的含量并未发生显著变化,这主要是因为机修废水中大部分油以乳化油和分散油的形式存在,铁包裹在油珠内,而乳化油和分散油油滴尺寸较小(5~150  $\mu\text{m}$ ),难以捕捉去除<sup>[12]</sup>。此外,机修废水中含有大量表面活性剂,使得油滴在废水中处于亚稳态,油水分离极为困难。课题组在前期研究中发现,在气浮机中加入次氯酸盐能强化纳米气泡的产生,气泡直径通常在10~100  $\mu\text{m}$ 之间<sup>[12]</sup>。

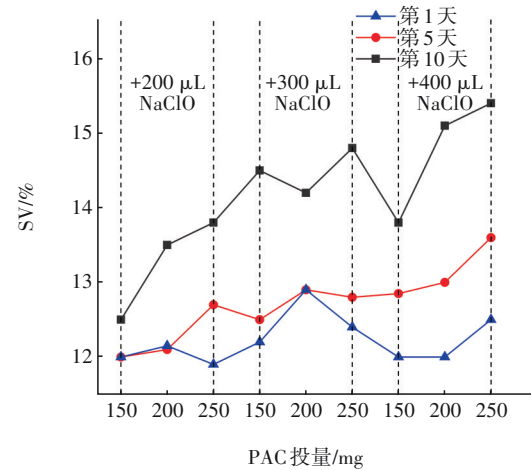
由图3可知,经气浮处理后,出水浊度、COD、含油量和铁含量分别为7.1~18.5 NTU、4 700~6 300 mg/L、0.38~0.57 mg/L和0.34~0.47 mg/L,特别是对油和铁的去除率分别达到53.74%和89.73%。向废水中加入次氯酸盐和PAC,破坏了油包水、水包油结构<sup>[12]</sup>。同时次氯酸盐配合气浮产生了大量的微纳米气泡,油粒附着在气泡四周,其密度变小,上浮速度加快<sup>[21]</sup>。这加大了水中原油颗粒碰撞几率,导致其粒径变大,因此提高了除油率。次氯酸盐的存在使得废水中的二价铁被氧化为三价铁,促进了 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 形成凝结核,便于絮凝团聚。

对气浮进出水浊度进行了连续10 d的测定,分别为79.4~166和1.9~16.2 NTU,去除率达到87.24%~98.25%。因此,次氯酸盐+PAC投加配合气浮使用,对浊度的去除效果稳定,10 d中有7 d的气浮出水浊度<5 NTU,达到相关回用标准,再经微流控过滤则出水浊度的达标率可达100%。

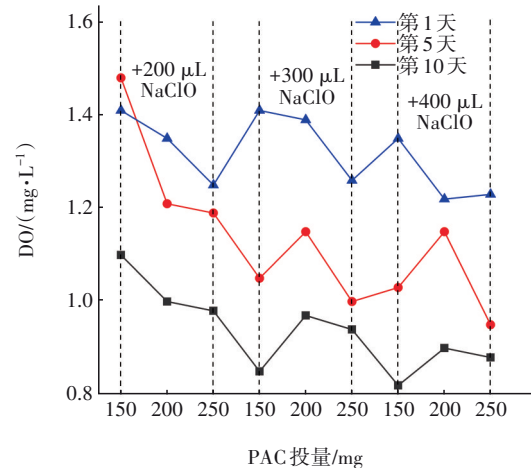
## 2.3 气浮机投加药剂对生化池污泥的影响

气浮机出水中残留的次氯酸盐和PAC可能会

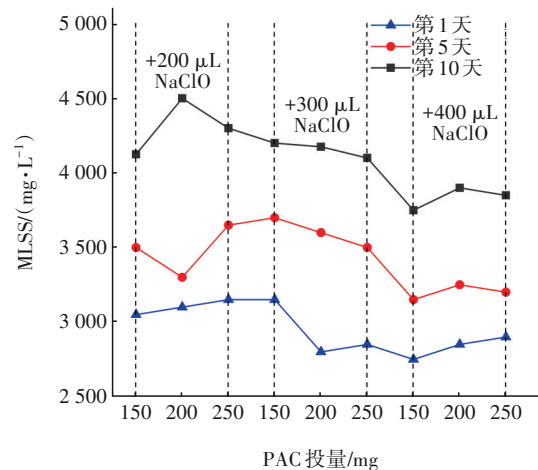
影响后续生化池污泥活性<sup>[22]</sup>。为了考察不同药剂对比对污泥指标的影响,向150 mL废水中加入PAC与NaClO,分别在第1天、第5天和第10天测定SV、DO、SVI和MLSS,结果见图4。



a. SV



b. DO



c. MLSS

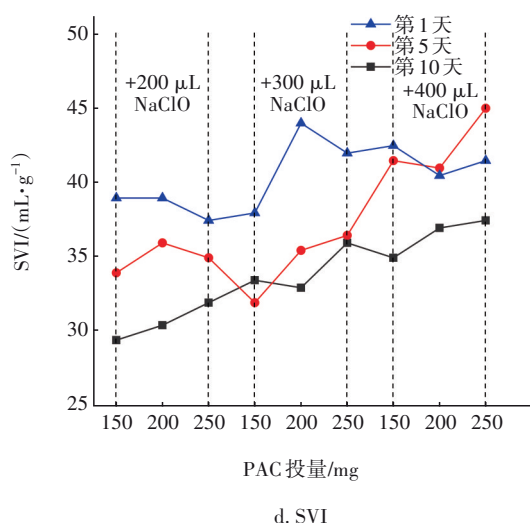


图4 药剂残留对污泥性能的影响

Fig.4 Effect of reagent residue on sludge properties

正常的SV范围为13%~30%，污泥的起始SV仅为12%，随着加药量的变化，第1天的SV仅从12%提升至12.9%；第5天的SV随着投药量的增加整体呈上升趋势，由12.1%上升到了13.6%；第10天时，随着投药量的增加，SV由12.5%逐渐提高到15.3%，反映出沉降比逐渐趋于正常范围。且随着时间的累积，污泥沉降比有一定的上升，说明预处理出水中残留的药剂不会对生化污泥产生抑制，甚至有利于提升沉降性能。

研究表明，正常的DO范围为1~2.5 mg/L，活性污泥对COD的去除率可达90%左右<sup>[23]</sup>。起始DO浓度为1.42 mg/L，处于正常范围内。由图4(b)可知，随着加药量的增加，第1天、第5天、第10天的DO浓度分别由1.41、1.48、1.10 mg/L降至1.23、0.95、0.88 mg/L，这3天的DO浓度都随着加药量的增加而减少，这是因为次氯酸钠可以将大分子有机物氧化为小分子有机物，从而消耗更多的溶解氧。而这些小分子有机物有利于污泥增长，特别是丝状菌具有在低底物浓度下生长并大量繁殖的优势，会导致污泥沉降速度降低和SV增加，故污泥沉降比和溶解氧浓度成反比。溶解氧浓度从大到小的顺序为第1天、第5天、第10天。时间越长，COD去除越彻底，消耗的溶解氧越多。

由图4(c)可知，第1天、第5天、第10天的MLSS浓度分别由3 050、3 500、4 125 mg/L降低至2 900、3 200、3 850 mg/L，由此可知，MLSS浓度与加药量关系不大。MLSS浓度随着时间增加而增大，是因为

废水中COD浓度较高，且基本被氧化为小分子，有利于污泥微生物分解吸收，造成微生物总量增加。

正常的SVI范围为45~120 mL/g<sup>[24]</sup>。由图4(d)可知，不同时间下，SVI均随着投药量的增加呈上升趋势，说明药剂残留对改善SVI有正向作用。但随着时间的增加SVI逐渐减小，考虑到封闭实验中有有机负荷有限，随着时间的增加，有机物被分解或降解，因此SVI降低。综上，考虑到SV>13%、DO>1 mg/L以及SVI达到45 mL/g，最终确定每150 mL废水中加入次氯酸盐和PAC分别为300 μL和200 mg。

#### 2.4 药剂对出水氧化还原电位的影响

由于投加次氯酸盐和PAC会影响废水的氧化还原电位(ORP)，ORP增加，则活性污泥合成聚3-羟基丁酸-co-3-羟基戊酸酯共聚物组分中3-羟基戊酸单体的摩尔分数降低，细胞生长量和碳源利用量增加<sup>[25]</sup>。因此考察了该变化对后续污泥活性的影响，结果见图5。可见，加药后ORP呈上升趋势，这代表着随着加药量的增加，机修废水的还原性减弱。废水的初始ORP约为-40.5 mV，属于还原体系，这与油滴具有极强的抗氧化性论断相一致<sup>[26]</sup>。之后ORP逐渐上升至-16.5 mV左右，这是因为投加的次氯酸盐具有极强的氧化性，可氧化油包水结构，导致水体ORP上升<sup>[12]</sup>。此外，次氯酸盐释放油滴中的二价铁，并将其进一步氧化为三价铁。离子所带正电荷越多，水体的ORP越高。同时，PAC水解产物带正电荷，也提高了氧化还原电位。但在不同投药量下ORP相差不大，说明水体状态十分稳定，储存放置10 d后，不受空气氧化的影响。

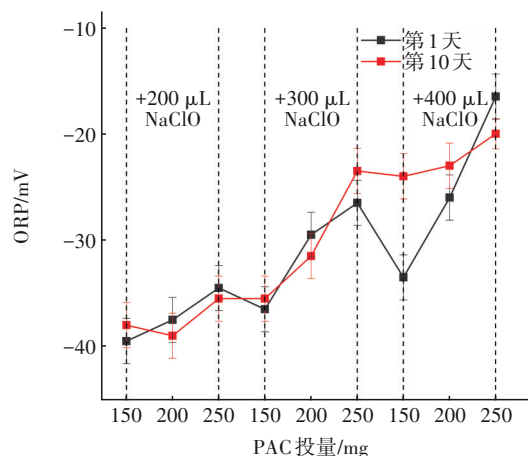


图5 不同药剂对比对出水氧化还原电位的影响

Fig.5 Effect of detergent ratios on ORP of effluent

## 2.5 微流控过滤去除 COD 的效果与机理

虽然气浮改善水质的效果明显,但废水中 COD 浓度仍然较高。机修油携带大量矿物离子特别是氯化物,导致其电导率高达 7~9 mS/cm。当直流电极电场浸入离子溶液的基质中时,它会引发包括电迁移和电化学氧化等过程。具体操作为:在过滤器内安装电极板用于电絮凝(电场强度为 1 V/cm,电流密度为 0.8 mA/cm<sup>2</sup>),产生的絮体裹挟 COD 而沉淀析出,活性炭作为填料过滤去除水中析出的不溶性絮体和 COD。如图 3 所示,经电絮凝+活性炭过滤后,浊度、COD、含油量和铁含量分别降至 3~5 NTU、1 500~2 000 mg/L、0.39~0.52 mg/L 和 0.2~0.3 mg/L,其中含油量变化不明显是因为水中剩余应为溶解油,且机修油含大量非离子型表面活性剂,使油滴界面膜机械强度高,能自动修复油滴间碰撞造成的局部损坏,导致电絮凝除油效果不佳,COD、浊度及铁的去除率分别可以达到 68.05%、68.77% 和 41.17%。在电场条件下,水体中的 Cl<sup>-</sup> 迁移至阳极生成 Cl<sub>2</sub>,并进一步水解生成 ClO<sup>-</sup>,同时促进 PAC 电离出 Al<sup>3+</sup>,一方面 Cl<sub>2</sub> 与水中酚类发生反应生成氯酚类物质,另一方面 ClO<sup>-</sup> 又会与氯酚、氨酰和醇类物质反应,将其转化为甲醇、甲酸等小分子物质,最终被氧化分解为 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O。此外,Al<sup>3+</sup> 水解可以生成 Al(OH)<sub>2</sub><sup>+</sup>、Al(OH)<sub>2</sub><sup>+</sup> 和 Al(OH)<sub>3</sub> 等产物,其带有大量的正电荷,可与电负性较强的氯酚发生电中和、吸附而形成聚集体,同时电场会使 Al<sup>3+</sup> 及其水解产物运动加快,碰撞频率增大,增加絮体的粒径和分形维度,在较短时间内生成较大的絮体,吸附能力更强,提高絮凝效率,从而降低 COD 浓度<sup>[13]</sup>。整个过程中产生的絮体以及原水中残留的悬浮颗粒最终被活性炭滤床截留,使得出水浊度达到排放标准。

## 2.6 水厂运行情况

该工程于 2023 年 11 月投入运营,经过连续调试,在 2024 年 1 月—2 月对各处理单元出水进行了检测,结果见表 1。其间运行结果稳定且系统耐冲击负荷能力强,整个系统对 COD、铁、浊度、油、氨氮和总磷的去除率分别可以达到 99.53%、97.71%、99.81%、94.19%、95.10% 和 99.81%,出水水质达到回用标准。经过改造后,生化池进水可生化性得到明显改善。改造前,单一气浮预处理工艺出水 COD、铁含量、浊度和含油量分别为 9 700 mg/L、2.7 mg/L、120 NTU 和 0.8 mg/L,而改造后微流控过滤器

出水的上述 4 个指标值大幅降低,铁含量、浊度、含油量满足后端生化池进水要求。

表 1 机修废水经过预处理后的水质特征

Tab.1 Removal effect of the pretreatment for maintenance flushing wastewater

项 目	调节池出水	超声沉淀池出水	气浮机出水	微流控过滤器出水	生化池出水
BOD <sub>5</sub> /COD	0.1	0.3	0.33	0.4	—
COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	10 706	5 859	5 459	4 137	50
铁含量/(mg·L <sup>-1</sup> )	3.5	1.5	1	0.1	0.08
浊度/NTU	800	130	80	1.8	1.5
含油量/(mg·L <sup>-1</sup> )	103.2	0.753	0.08	<0.06	<0.06
氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	29.6	22.7	21.1	21.3	1.45
总磷/(mg·L <sup>-1</sup> )	37.77	10.96	10.65	10.52	0.07

## 2.7 经济性分析

工程总投资约为 131 万元,其中,设备工程费约为 84.25 万元,配套材料、管道工程费约为 46.75 万元。污水厂的运行费用包括电费,NaOH、聚合氯化铝、聚丙烯酰胺、复合试剂、葡萄糖等药剂费,以及人工费等。改造前的运行费用合计为 6.48 元/m<sup>3</sup>,改造后降至 3.80 元/m<sup>3</sup>,总运行费用降低 41%。

荆王松等<sup>[27]</sup>采用气浮法+UASB+芬顿法+AO 工艺处理含油废水,废水总量为 9.5 m<sup>3</sup>/d,设备电费为 10.29 元/m<sup>3</sup>,药剂费为 10.73 元/m<sup>3</sup>,直接运行成本达到 29.79 元/m<sup>3</sup>,而本项目自动化程度高、处理量大,因此,设备电费和药剂费分别仅为 0.5、2.41 元/m<sup>3</sup>。同时,因减少了管道堵塞和设备腐蚀维修,每年可降低成本约 24 万元。该技术的应用可延长后端生物膜清洗与更换周期,降低成本约 37 万元。

## 3 结论

① 采用超声沉淀/气浮/微流控过滤复合工艺预处理机修废水,当超声团聚和斜管沉淀的 HRT 分别为 3.4 min 和 32.3 min 时,对浊度的去除率可达 89.45%。设置气浮水力停留时间为 86.4 min,加入 25% 的次氯酸盐可有效产生微气泡,除油率最高可达 53.74%。同时氧化破坏“油包水”结构,Fe<sup>2+</sup> 转化为 Fe(OH)<sub>3</sub> 絮凝核,铁去除率达到 89.73%。60 min 微流控过滤作用下,电极板间场强为 1 V/cm,迫使更多的 COD 被絮体裹挟析出,去除率达 68.05%。最终确定每 150 mL 废水中加入次氯酸盐 300 μL, PAC 为 200 mg。废水的初始氧化还原电位为 -40.5 mV,随着加药量的增加而增大到约 -16.5 mV,之后

10 d不受空气氧化的影响。

② 通过改造,预处理出水COD、铁含量、浊度和石油类含量分别由改造前的9 700 mg/L、2.7 mg/L、120 NTU和0.8 mg/L降至4 137 mg/L、0.1 mg/L、1.8 NTU和<0.06 mg/L。出水水质稳定,满足《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2005)中洗涤用水水质要求。

③ 该工程总投资为131万元,平均水处理成本为3.80元/m<sup>3</sup>,较改造前降低了41%。因此,超声沉淀/气浮/微流控过滤复合工艺用于机修废水的生化预处理是可行的。

#### 参考文献:

- [1] 洪卫,梁世华,张增国,等. 油系针状焦生产废水处理工程设计及运行效果[J]. 中国给水排水, 2023, 39(16):94-98.  
HONG Wei, LIANG Shihua, ZHANG Zengguo, *et al.* Process design and operation effect of oil-based needle coke wastewater treatment project [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(16):94-98(in Chinese).
- [2] 吕冉,李彬,肖盈,等. 铁对废水微生物脱氮的影响研究进展[J]. 化工进展, 2020, 39(2): 709-719.  
LÜ Ran, LI Bin, XIAO Ying, *et al.* Research progress on the effects of iron on microbiological nitrogen removal in wastewater [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(2): 709-719(in Chinese).
- [3] 王晓伟,韩佩轩,周翔,等. 生物组合工艺处理石油化工废水工程实例[J]. 水处理技术, 2024, 50(11): 1-4.  
WANG Xiaowei, HAN Peixuan, ZHOU Xiang, *et al.* Example of biological combination process for treating petrochemical wastewater engineering [J]. Technology of Water Treatment, 2024, 50(11): 1-4(in Chinese).
- [4] 黄强. 以B/C法直接判断废水可生化性的缺陷探讨[J]. 广东化工, 2019, 46(22): 101-102.  
HUANG Qiang. The defects of direct determination of biodegradability of wastewater by B/C method were discussed [J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, 46(22): 101-102(in Chinese).
- [5] ZHANG X J, ZHOU Y, ZHAO S Y, *et al.* Effect of Fe(II) in low-nitrogen sewage on the reactor performance and microbial community of an ANAMMOX biofilter [J]. Chemosphere, 2018, 200: 412-418.
- [6] CHANG C L, LIAO C S. Assessing the risk posed by high-turbidity water to water supplies [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, 184(5): 3127-3132.
- [7] 刘闯,杜思聪,程鹏,等. 植物多酚功能化调控磁性材料磁絮凝高岭土悬浊液[J]. 中国环境科学, 2023, 43(12): 6435-6444.  
LIU Chuang, DU Sicong, CHENG Peng, *et al.* Magnetic flocculation of kaolin suspension using magnetic materials [J]. China Environmental Science, 2023, 43(12): 6435-6444(in Chinese).
- [8] SU D L, WANG J L, LIU K W, *et al.* Kinetic performance of oil-field produced water treatment by biological aerated filter [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2007, 15(4): 591-594.
- [9] 王庆吉,胡景泽,孙秀梅,等. 石油石化含油废水混凝气浮处理系统研究进展[J]. 工业水处理, 2024, 44(3): 45-56.  
WANG Qingji, HU Jingze, SUN Xiumei, *et al.* Research progress of coagulation air flotation treatment system for petroleum and petrochemical wastewater [J]. Industrial Water Treatment, 2024, 44(3): 45-56(in Chinese).
- [10] 韩国义,郑俊,王正收,等. 隔油/气浮/两段生化法处理炼油厂含油废水[J]. 中国给水排水, 2010, 26(2): 64-67.  
HAN Guoyi, ZHENG Jun, WANG Zhengshou, *et al.* Treatment of oily wastewater from oil refinery by oil separation/floatation/two-stage biochemical process [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(2): 64-67(in Chinese).
- [11] 丁淑芳,潘凤娇. 超声强化改性絮凝剂处理煤泥水的试验研究[J]. 黑龙江科技大学学报, 2023, 33(2): 167-172.  
DING Shufang, PAN Fengjiao. Experimental study on treatment of coal slime water with ultrasonic enhanced modified flocculants [J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2023, 33(2): 167-172(in Chinese).
- [12] QIN J Y, HE Y W, SHANGGUAN B T, *et al.* Treating mechanical washing wastewater with iron-in-oil characteristics by changing the fate of iron [J]. Water Science and Technology, 2023, 87(4): 866-878.
- [13] 王亚,宋永辉,李金城,等. 絮凝-电化学氧化协同工艺处理兰炭废水[J]. 中国环境科学, 2024, 44(4): 2063-2072.  
WANG Ya, SONG Yonghui, LI Jincheng, *et al.*

- Treatment of semi-coking wastewater by synergistic process of flocculation-electrolytic oxidation [J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(4): 2063-2072 (in Chinese).
- [14] MESA D, BRITO-PARADA P R. Scale-up in froth flotation: a state-of-the-art review [J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 210: 950-962.
- [15] STACK L J, CARNEY P A, MALONE H B, *et al.* Factors influencing the ultrasonic separation of oil-in-water emulsions [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2005, 12(3): 153-160.
- [16] 陈昱冉, 胡悦, 卜祥宁, 等. 50 kHz/200 kHz声场水中疏水颗粒的瞬态及稳态团聚规律[J]. *声学学报*, 2024, 49(1): 146-154.  
CHEN Yuran, HU Yue, BU Xiangning, *et al.* Transient and stable aggregation of hydrophobic particles in water in 50 kHz/200 kHz sound field [J]. *Acta Acustica*, 2024, 49(1): 146-154(in Chinese).
- [17] 郭佳伟, 田月臣, 郭宏伟. 低声能密度下的超声碱解剩余污泥工艺技术[J]. *净水技术*, 2020, 39(3): 120-125.  
GUO Jiawei, TIAN Yuechen, GUO Hongwei. Technological process of ultrasonic alkaline hydrolysis for excess sludge under low sound energy density [J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(3): 120-125 (in Chinese).
- [18] CHECK R G. Two-stage ultrasonic irradiation for dehydration and desalting of crude oil: a novel method [J]. *Chemical Engineering & Processing Process Intensification*, 2014, 81: 72-78.
- [19] ZHANG G M, ZHANG P Y, CHEN Y M. Ultrasonic enhancement of industrial sludge settling ability and dewatering ability [J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2006, 11(3): 374-378.
- [20] 陈昱冉. 超声驻波场中疏水颗粒稳态声团聚机理[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.  
CHEN Yuran. The Mechanism of the Stable Acoustic Aggregation of Hydrophobic Particles in Ultrasonics Standing Waves Field [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020(in Chinese).
- [21] 王清岭, 王增建, 黄雪松, 等. 两级气浮控油降泥技术在油田产出水处理中的应用[J]. *安全、健康和环境*, 2023, 23(12): 30-34.  
WANG Qingling, WANG Zengjian, HUANG Xuesong, *et al.* Application of oil control and mud reduction technology with two-stage air flotation in oilfield produced water treatment [J]. *Safety Health & Environment*, 2023, 23(12): 30-34(in Chinese).
- [22] MORENO-CRUZ C F, LARA V H, THALASSO F, *et al.* Influence of sodium hypochlorite on the anaerobic treatment of brown water [J]. *Revista Mexicana De Ingenieria Quimica*, 2018, 17(3): 999-1009.
- [23] REYES P, URTUBIA A, SCHIAPPACASSE M C, *et al.* Effect of dissolved oxygen and temperature on macromolecular composition and PHB storage of activated sludge [J]. *Journal of Environmental Science and Health*, 2014, 49(7): 857-862.
- [24] 郭耀, 李志华, 杨成建, 等. 活性污泥物理结构对呼吸过程的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(6): 2813-2820.  
GUO Yao, LI Zhihua, YANG Chengjian, *et al.* Effects of the physical structure of activated sludge on respiration processes [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(6): 2813-2820(in Chinese).
- [25] 蔡萌萌, 蔡宏, 胡文锋, 等. 氧化还原电位对活性污泥合成聚3-羟基丁酸-co-3-羟基戊酸酯组分的影响[J]. *环境污染与防治*, 2008, 30(5): 55-58.  
CAI Mengmeng, CAI Hong, HU Wenfeng, *et al.* The effect of various ORP to the composition of PHBV synthesized by activated sludge [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2008, 30(5): 55-58(in Chinese).
- [26] DECKER E A, VILLENEUVE P. Impact of processing on the oxidative stability of oil bodies [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024, 64(17): 6001-6015.
- [27] 荆王松, 梅荣武, 王泉源. 气浮/UASB/芬顿/AO工艺处理含油废水[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(8): 103-105, 109.  
JING Wangsong, MEI Rongwu, WANG Quanyuan. Application of air flotation/UASB/Fenton/AO process in oily wastewater treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(8): 103-105, 109(in Chinese).

作者简介: 孙禹(1982- ), 男, 内蒙古鄂尔多斯人, 本科, 高级工程师, 主要从事水处理、供热等研究。

E-mail: 99613284@qq.com

收稿日期: 2024-10-28

修回日期: 2024-11-12

(编辑: 李德强)