

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.22.026

膜芬顿技术在污水深度处理中的应用

刘建林, 谢 杰

(中信环境技术有限公司, 广东 广州 510665)

摘 要: 膜芬顿是通过将传统芬顿加以改进,与超滤膜过滤有机结合而产生的一种新型污水处理技术,已证明能有效去除污水中的 COD、悬浮物、总磷、氟化物等污染物组分。通过一系列实验室研究、中试和商业规模示范工程的运行,初步证实了膜芬顿技术的适用性和高效率,表明它集成了高级氧化、混凝、化学沉淀、吸附、膜过滤等多种水处理机理。生产性示范工程长期运行结果表明,该工艺用于处理精细化工废水时,膜芬顿出水平均 COD、总磷可达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅲ类水标准,运营成本约为 1.89 元/m³。针对印染行业因水回用而产生的 RO 浓水的中试结果显示,膜芬顿出水 COD、悬浮物可达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准,总磷可达到地表水环境Ⅲ类水标准。

关键词: 膜芬顿; 超滤; 高级氧化; 深度处理; 可生化性

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2020)22-0145-07

Application of Membrane Fenton Coupling Technology in Wastewater Advanced Treatment

LIU Jian-lin, XIE Jie

(CITIC Envirotech Ltd., Guangzhou 510665, China)

Abstract: The membrane Fenton technology is newly invented by coupling modified Fenton process with ultrafiltration. It has shown effective removal of COD, total suspended solids (TSS), total phosphorus (TP), fluoride and other contaminants in wastewater. Through a series of laboratory research, pilot and commercial scale demonstration projects, the applicability and high efficiency of membrane Fenton technology have been preliminarily verified, indicating that it integrates various mechanisms such as advanced oxidation process (AOP), coagulation, chemical precipitation, adsorption and membrane separation. The long operation of a commercial scale demonstrative project showed that the average effluent COD, TP could consistently meet level Ⅲ criteria in the *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002). The operating cost was about 1.89 yuan/m³. The pilot research on treatment of concentrated RO reject water from dyeing and printing industry showed that the effluent COD and TSS could meet the first level A criteria specified in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002), while TP could meet level Ⅲ criteria in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002).

Key words: membrane Fenton (mFenton); ultrafiltration; advanced oxidation; advanced treatment; biodegradation

工业废水具有成分复杂、高 COD、高含盐量及难生物降解等特点^[1],现有的污水深度处理技术在实际应用中均存在一定局限性,例如,传统混凝沉淀、过滤技术主要去除悬浮物和胶体类污染物,对于溶解性 COD、TP 等处理效果有限;吸附、萃取、离子交换类技术只是污染物的浓缩转移,而且存在成本高、再生难的问题;生物处理[包括膜生物反应器(MBR)]技术对不可生物降解的溶解性污染物无能为力等。近年来,国内现有大部分城镇和工业园区污水厂为适应日益严格的环境法规亟需进行提标改造、技术升级。许多工业污水处理厂普遍采用高级氧化技术(AOP)作为工业废水不可降解 COD 的前处理或后处理,其中芬顿技术是当今最重要的 AOP 之一。芬顿去除污染物不仅通过羟基自由基的强氧化作用,而且结合了混凝、吸附等机理,因而污染物去除效率高,出水水质好^[2-3]。但是,传统芬顿因占地面积大、出水水质不稳定、投加药剂的使用效率不高、污泥产生量大等缺点限制了其作为深度处理技术的推广应用。鉴于传统芬顿处理技术在实际应用中的缺陷,近年来在传统芬顿的基础上开发出许多类-Fenton 处理技术,如改性 Fenton 法、光-Fenton 法、电-Fenton 法、超声-Fenton 法、微波-Fenton 法、零价铁-Fenton 法等,但大多数尚处于实验室摸索阶段,大规模应用的很少^[4-7]。笔者通过实验室概念验证、中试优化、生产性示范工程等研究和创新过程开发了膜芬顿技术,为工业废水的深度处理提供了又一具有竞争力的选择。

1 膜芬顿技术

1.1 工艺流程

膜芬顿的工艺流程见图 1。

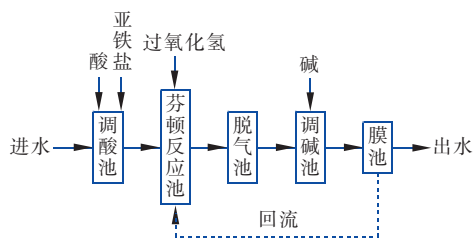


图1 膜芬顿工艺流程

Fig.1 Simplified process flow diagram of mFenton

膜芬顿技术是通过改进传统高级氧化-芬顿技术,并与膜过滤相结合产生的新型工艺。膜芬顿利用超滤膜代替传统的芬顿沉淀池,通过膜的截留作用及创新的平行内回流设计,维持系统的高污泥浓

度,集成了高级氧化、混凝、化学沉淀、吸附、膜过滤等多种水处理机理,具有去除效果好、占地面积小、运行成本低、运行维护简单、自动化程度高等优势。

① 调酸池。污水首先进入调酸池,与投加的无机酸(如硫酸)和亚铁盐(如硫酸亚铁)相混合。投加的无机酸(如硫酸)主要用于调酸池的 pH 值调控,一般控制在 4~6 之间,投加的亚铁盐(如硫酸亚铁)作为芬顿反应的催化剂。调酸池一般采用钢筋混凝土或钢结构,主要设备及仪表包括调酸泵、硫酸亚铁投加泵、在线 pH 仪及搅拌器等,根据实际情况选择备用。

② 芬顿反应池。芬顿反应池为发生高级氧化的主要场所。经过调酸池调质后的污水流入芬顿反应池,在此投加过氧化氢溶液。以亚铁为催化剂,与过氧化氢发生一系列的反应,产生强氧化性的羟基自由基矿化降解污染物,达到降低 COD 的效果。与此同时,接受自膜池回流的高浓度铁泥(MLSS 为 4 000~6 000 mg/L),一方面增强了三价铁参与芬顿反应的几率,提高了反应速度,同时有可能在不溶性的铁氧体表面发生异相芬顿反应;另一方面,高浓度的铁泥强化了混凝和吸附效果,进一步提升了水质。芬顿反应池的 pH 值一般控制在 3~5,停留时间根据不同水质和反应动力学原理进行设计。芬顿反应池一般采用钢筋混凝土或钢结构,主要设备及仪表包括双氧水投加泵、在线 pH 和 ORP 仪、搅拌器等,根据实际情况选择备用。

③ 脱气池。芬顿反应池的混合物进入脱气池,吹脱残留的过氧化氢和反应产物二氧化碳,消除过氧化氢对 COD 检测的影响,同时降低氧化剂对膜的损伤。脱气池一般采用钢筋混凝土或钢结构,主要设备为鼓风机,用于吹脱搅拌等。

④ 调碱池。脱气池的混合液进入调碱池,通过投加碱(如氢氧化钠)调高 pH 值,使得混合液中的三价铁离子转化为氢氧化铁或其他铁氧化物,便于下游膜工艺对混合液进行有效的固液分离。调碱池的 pH 值一般控制在 4 以上,以满足固液分离和后续处理工艺要求。脱气池一般采用钢筋混凝土或钢结构,主要设备及仪表包括加碱泵、在线 pH 仪、鼓风机(用于搅拌)等,根据实际情况选择备用。

⑤ 膜池。浸没式超滤膜池为固液分离的步骤,膜芬顿采用抗氧化的超滤膜,膜过滤精度为 0.04 μm ,胶体、悬浮物以及以大分子存在的不溶性有机

物均可以被膜截留。芬顿反应生成的铁的氧化物或者氢氧化物,也可以被膜有效截留。同时,经过膜浓缩的混合液回流至芬顿反应池,部分混合液排出系统,以剩余污泥的形式进入浓缩脱水处理单元。污泥浓度为4 000~6 000 mg/L,根据膜污染倾向选择适当的膜通量,一般为15~30 L/(m²·h),膜池一般采用钢筋混凝土或钢结构,主要设备及仪表包括产水泵、回流泵、排泥泵、压力传感器、pH计、鼓风机等,根据实际情况选择备用。

1.2 技术特点

膜芬顿与传统芬顿、流化床芬顿最大的不同是用超滤膜过滤代替了沉淀池以实现固液分离。因此,膜芬顿表现出了下列特点:①膜的过滤作用,不受污泥沉降性能的影响,出水总悬浮固体(TSS)几乎为零;②膜的浓缩作用,使得反应体系可以保持较高的反应底物浓度;③膜池混合液回流,有助于提高反应效率。

2 膜芬顿深度处理精细化工废水应用案例

2.1 工程背景

广州某精细化工园区污水处理项目于2006年4月建成投产,该项目处理出水排入珠江,执行广东省《水污染物排放限值》(DB 44/26—2001)第二时段一级标准以及《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准的较严值,要求COD≤40 mg/L、TP≤0.5 mg/L。废水来源主要包括化工废水、润滑油废水等,含有烟酰胺、医药中间体、润滑油、树脂等污染成分。其中,精细化工废水占主要部分,仅有极少量的生活污水。污水成分复杂,可生化性差,处理难度大。原处理工艺包括格栅、沉砂池、调节池、水解酸化池、生化池、MBR等(见图2)。因污水厂COD、TP波动较大,为了保证出水水质稳定达标,并同时增加高浓度废水的处理量以提高经济效益,在大量实验室小试、现场中试结果的基础上,新增膜芬顿作为深度处理单元。该设施于2018年10月正式投产,处理规模为2 000 m³/d,稳定运行至今。

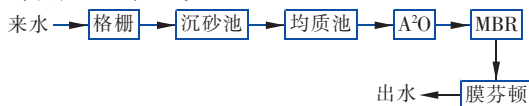


图2 广州某精细化工园区污水处理项目工艺流程

Fig. 2 Flow chart of wastewater treatment process in a fine chemical industry park in Guangzhou

2.2 进、出水水质

该项目进、出水水质如表1所示。

表1 膜芬顿进、出水水质

Tab. 1 Influent and effluent quality of mFenton

项 目	COD/ (mg · L ⁻¹)	TP/ (mg · L ⁻¹)	SS/ (mg · L ⁻¹)	pH 值	色度/ 倍
进水	17.2~69.0	0.04~1.03	<10	6~9	50~60
膜芬顿出水	3.4~39.2	0~0.34	未检出	6~9	<30
排放标准	40	0.5	10	6~9	30

2.3 调试运行

2.3.1 COD去除效果

膜芬顿进水为MBR出水,已经过两级生物处理,因此膜芬顿进水绝大部分为不可生化降解的溶解性COD,进水COD为17.2~69.0 mg/L,平均值为37.8 mg/L。膜芬顿对COD的去除效果见图3。运行0~36天,系统处于调试阶段,因系统内铁泥浓度低,pH值尚未调至最佳状态,处理效果不显著;从第36天开始,系统进入稳定运行阶段,膜芬顿出水COD随着进水COD波动,出水COD为3.4~39.2 mg/L,平均值为19.1 mg/L,COD平均去除率为51.0%,最高去除率可达85.6%。通过对膜出水、调碱池上清液、排泥混合液的COD进行连续监测,针对某一运行时间段对COD去除总量、膜截留去除COD总量、排泥去除COD总量进行统计分析,高级氧化、膜截留及强化混凝吸附作用对COD的去除贡献分别占79.4%、12.5%及8.1%。

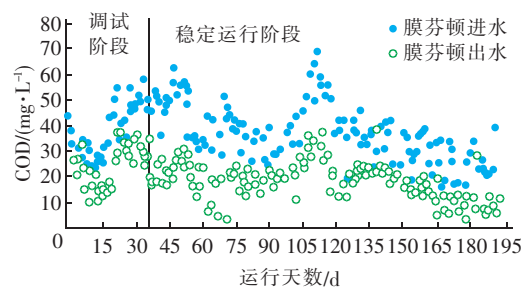


图3 膜芬顿COD去除效果

Fig. 3 Removal efficiency of COD by mFenton process

2.3.2 TP去除效果

膜芬顿的TP去除效果见图4。进水TP波动范围为0.04~1.03 mg/L,平均值为0.51 mg/L,进水TP波动较大。运行0~36天,总磷平均去除率为65.2%,去除效果较差,主要原因是系统pH值偏高,导致双氧水与亚铁产生羟基自由基的效率低,无法将有机磷有效氧化为磷酸盐,有机磷依旧以溶解

态形式存在于出水中,导致出水总磷较高。36天后,系统进入稳定运行阶段,出水总磷稳定在0~0.34 mg/L,平均值为0.07 mg/L,总磷基本可达到地表Ⅲ类水标准。

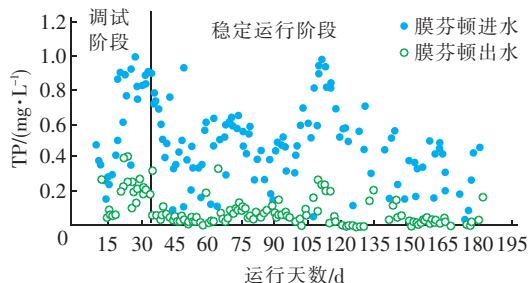


图4 膜芬顿 TP 去除效果

Fig. 4 Removal efficiency of TP by mFenton process

2.3.3 悬浮物和胶体去除效果

膜组件采用“美能”聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维膜,膜过滤孔径约为0.04 μm,可截留悬浮物、大分子胶体物质及细菌。运行数据表明,出水TSS可保持在检测限以下。

2.3.4 氟化物去除效果

膜芬顿对有些工业废水中存在的氟离子也有很好的去除效果。虽然采用常规工艺,例如通过投加钙盐、铝盐、铁盐等可以将高浓度的氟离子去除,但是由于这些金属盐类溶解度较高,出水氟浓度难以达到很低的排放要求^[8]。通过小试验证了膜芬顿铁泥对低浓度氟离子(2~10 mg/L)的吸附去除效果,去除率高达70%,芬顿铁泥的饱和吸附量达12.33~12.4 mgF⁻/gFe(OH)₃。膜芬顿实现了氟离子的高效去除,得益于高浓度铁泥产生的化学沉淀和吸附作用。

2.3.5 膜系统运行情况

① 透水率稳定性

透水率($J_{25}/\Delta P$)是衡量膜渗透性能的主要指标^[9],膜芬顿运行时的流量和压力由现场设备监控站(PLC)记录获取,通过流量计算出膜通量,经25℃温度校正的膜通量(J_{25})与跨膜压差(ΔP)的比值,即透水率。以透水率随运行时间的衰减速率作为膜系统运行稳定性的评价指标,方法是:通过线性拟合分析得到每次维护性清洗(MC)后的起始透水率,再将每个恢复性清洗(RC)周期内的起始透水率进行线性回归,得到每个RC周期内的透水率衰减速率,见图5。

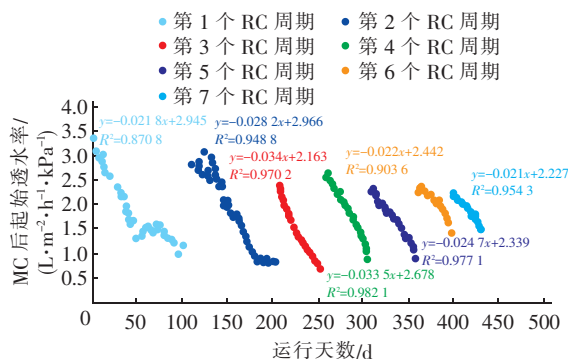


图5 膜系统长期运行透水率变化趋势

Fig. 5 Membrane permeability trend over long term operation

由图5拟合数据可知,第1~7个RC周期的起始透水率分别达到2.945、2.966、2.163、2.678、2.339、2.442、2.227 L/(m²·h·kPa),第1、2个RC周期起始透水率高于其他周期,究其原因,新膜表面众多微孔中,不可避免会出现少数在标准孔径范围之外的大孔,导致透水率的虚高;第3~7个RC周期起始透水率平均达到2.37 L/(m²·h·kPa),通过RC基本可恢复至起始透水率;且7个RC周期内透水率衰减速率均稳定保持在0.02~0.03 L/(m²·h·kPa),因此膜芬顿的膜系统可持续长期稳定运行。

② 膜丝性能

在388天的运行期间,膜外观、断丝、磨损等情况均良好,运行0~34天,发现膜片底部有铁泥积累,进行曝气管路改造后,后续未见集泥。通过SEM/EDX元素分析发现,整个运行期间膜内、外表面间歇有轻微的Fe、S、Ca、Al、Si污染,经清洗后可完全恢复。通过红外分析(FTIR)检测采集的膜芬顿超滤膜丝样品,对比纯PVDF膜材料特征吸光度,未发现异常变化,说明膜丝可长期使用。

2.4 项目经济性分析

膜芬顿可根据进水COD浓度灵活调节加药量,因运行期间进水COD波动较大,截取稳定运行阶段进水COD较稳定的时段(36~54 d)的数据进行运行成本分析:电费0.22元/m³,药剂费1.36元/m³,膜折旧费0.17元/m³,污泥处理费0.14元/m³,则运行费用为1.89元/m³。

3 膜芬顿深度处理印染废水应用案例

3.1 项目背景

广东省清远市某印染工业废水处理厂目前共处

理10家印染企业的生产废水。废水经过常规污水处理流程后,一部分达标排放,另一部分进入回用水处理流程。后者采用较为主流的UF+RO工艺,产生RO浓水约8500 m³/d。RO浓水具有含盐量高、可生化性差、以溶解性污染物为主等特点^[10],采用常规的生化或者物化处理技术效果均很差。以RO浓水为代表水质,通过中试,评估膜芬顿技术处理RO浓水的技术经济可行性。

3.2 进、出水水质

RO浓水的主要水质指标:COD为150~160 mg/L,总氮为23.36 mg/L,氨氮为6.43 mg/L,TP为1.59 mg/L,碱度为1208 mg/L,硬度为347.5 mg/L,氯离子含量为3000~4000 mg/L,电导率为12.35 mS/cm,含盐量(TDS)为9290 mg/L。经膜芬顿处理后,出水COD能稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准;出水TP可稳定达到地表Ⅲ类水标准,TSS可稳定保持在检测限以下。

3.3 调试运行

3.3.1 COD 的去除效果

膜芬顿的COD去除效果见图6。

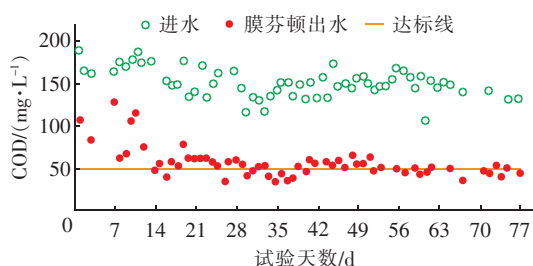


图6 膜芬顿COD去除效果

Fig. 6 Removal efficiency of COD by mFenton process

由图6可知,系统从第20天左右进入稳定运行阶段,进水平均COD为150 mg/L,COD平均去除率为63%,最高去除率达到76%左右;第50天前,出水COD高于50 mg/L,究其原因,系统当时运行的MLSS不稳定,污泥浓度过高时,铁泥回流导致芬顿反应池的运行pH值升高,高级氧化效率下降;污泥浓度过低时,铁泥混凝吸附总量有限。第51天后,将pH值、MLSS调回系统运行正常值,出水COD能稳定达到一级A标准。

3.3.2 TP去除效果

膜芬顿的TP去除效果见图7。由图7可知,进水TP为0.88~1.88 mg/L,平均为1.23 mg/L,出水

TP为0.03~0.18 mg/L,平均为0.08 mg/L,平均去除率达到93%以上,TP指标可稳定达到地表Ⅲ类水标准。

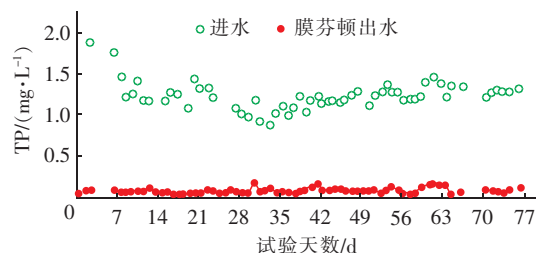


图7 膜芬顿TP去除效果

Fig. 7 Removal efficiency of TP by mFenton process

3.3.3 TN和氨氮去除效果

膜芬顿对TN和氨氮的去除效果见图8。

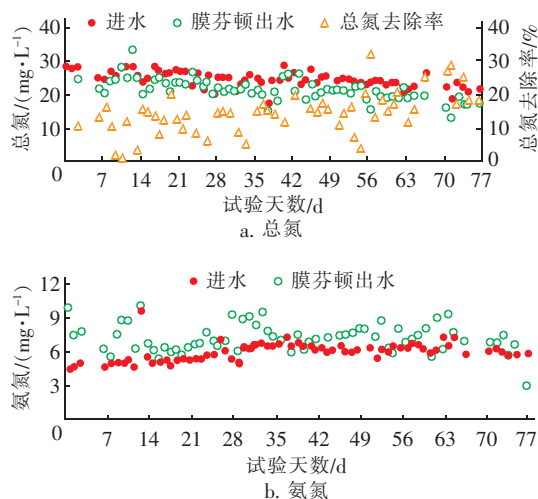


图8 膜芬顿TN和氨氮的去除效果

Fig. 8 Removal efficiency of TN and NH₃-N by mFenton process

由图8可知,进水TN为17.83~28.87 mg/L,平均为24.5 mg/L;稳定运行阶段,出水TN平均为21.7 mg/L,去除率为10%~20%,平均为15.1%。分析总氮的去除机理,高浓度铁泥的强化混凝吸附作用,可能是主要的去除机制。研究发现,与COD的吸附相似,TN的吸附量会随着硫酸亚铁的投加量增加而增大。由于原水中TN的组分以及芬顿反应产物主要是溶解态的化合物,在没有反硝化作用的情况下,TN难以通过膜芬顿高效去除。

稳定运行阶段,进水氨氮平均为6.28 mg/L,出水氨氮平均为7.8 mg/L,相较于进水,膜芬顿出水氨氮升高1.5~1.6 mg/L。这是因为,伴随着COD的去除,部分有机氮在羟基自由基的强氧化作用下

转化为氨氮,使得膜芬顿出水氨氮高于进水,氨氮增加的幅度取决于进水有机氮的含量。

3.3.4 可生化性分析

通过可生化性试验对 RO 浓水及膜芬顿出水的可生化性进行对比分析,RO 浓水与膜芬顿出水的不可生化 COD 占比分别为 73.5% 和 40.3%,且通过膜芬顿处理后,RO 浓水不可生化的 COD 从 121.22 mg/L 降至膜芬顿出水的 25.74 mg/L。因此,膜芬顿可大大提升出水的可生化性,并且膜芬顿出水不含有悬浮物,为后续联合生物滤池等生物处理工艺进一步提高出水水质奠定了基础。

3.4 膜芬顿处理 RO 浓水的经济性分析

采用芬顿处理 RO 浓水的运行成本 < 2 元/m³,包括电费 0.22 元/m³、药剂费 1.56 元/m³、膜折旧费 0.17 元/m³。排放的芬顿污泥可以通过资源化途径加以利用,相比目前 RO 浓水的其他处理技术,特别是常用的蒸发结晶等零排放技术,成本有较大幅度的降低。

4 设计及运维要点

① 采用物美价廉的中空纤维超滤膜用于固液分离,但是,由于芬顿的强氧化性,以有机聚合物为材料的超滤膜是否可以耐受残留的芬顿试剂是个极大的挑战,否则将严重影响膜的使用寿命。为了应对这个问题,一是选用了以聚偏氟乙烯(PVDF)为材料通过热致相工艺(TIPS)制成的超滤膜,二是采用在线 ORP 仪加强工艺的控制。

② 膜污染的控制是运行操作的关键。铁泥中存在大量不溶性的金属氧化物以及吸附的无机物和有机物,有很强的膜结垢和污染倾向。因此,膜污染的监控是运维过程中一个长期而艰巨的任务。一旦发现膜出现严重污染的迹象,要及时采取措施,避免不可逆膜污染的发生。

③ 系统 pH 值的控制是决定系统处理效果关键因素之一。运行中应定期对在线 pH 仪进行清洗维护,保证监测数据的准确性。芬顿试剂的投加量是另一关键因素。经验表明,可通过观察膜出水的色度(取膜出水调 pH 值至 9~10,观察产生絮状物的颜色和量),并结合反应池混合液的 pH 值、颜色等定性判断投加量是否合适。定量优化需在实验室试验的基础上进行。

5 结论与展望

① 膜芬顿技术将芬顿与超滤工艺有机结合,

充分彰显了两者的优势并同时克服传统芬顿的不足,是一个对多种污染物(如 COD、TP、TSS、F⁻等)均有较好处理效果的新型技术。对于膜芬顿无法去除的氨氮以及去除效率不高的总氮,因膜芬顿出水的可生化性大大提升,可根据具体进水水质和达标要求,按需通过膜芬顿技术与生物处理技术的联用进一步提升出水水质。

② 膜芬顿的技术推广工作进展顺利,第一个工程化的示范项目用于高难度的精细化工废水深度处理,出水平均 COD、TP 等均可达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅲ类水标准,处理成本约 1.89 元/m³。

③ 为了拓展膜芬顿的应用场景,开展了 RO 浓水处理的中试研究,结果表明,出水 COD、TSS 能稳定达到一级 A 标准,TP 能达到地表Ⅲ类水标准。相比目前 RO 浓水的其他处理技术,膜芬顿具有效率高、效果好、成本低等特点。

④ 近年来,由于我国新增工业废水量逐年大幅度增长,环保法规日益严格,水回用的需求越来越高。作为一项综合性的深度处理技术,膜芬顿可以与生物法等联用,全面满足最严格的排放标准或者回用水要求。

参考文献:

- [1] 张潇逸,何青春,蒋进元,等. 类芬顿处理技术研究进展综述[J]. 环境科学与管理,2015,40(6):58-61.
Zhang Xiaoyi, He Qingchun, Jiang Jinyuan, et al. Study process of class-Fenton treatment technology [J]. Environmental Science and Management, 2015, 40(6): 58-61 (in Chinese).
- [2] 刘俊,梅荣武,李军,等. 流化床/Fenton 法处理制药废水研究[J]. 中国给水排水,2013,29(3):70-73.
Liu Jun, Mei Rongwu, Li Jun, et al. Treatment of pharmaceutical wastewater by fluidized bed/Fenton process[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(3): 70-73 (in Chinese).
- [3] 王卓然,朴春香. CaO₂ 基类 Fenton 试剂降解亚甲基蓝机制及影响因素[J]. 中国给水排水,2019,35(13):90-96.
Wang Zhuoran, Piao Chunxiang. Mechanism and influencing factors of methylene blue degradation by CaO₂-based Fenton-like reagent [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(13): 90-96 (in Chinese).
- [4] 胡德皓,孙亮,毛慧敏,等. 芬顿氧化技术处理废水中

- 难降解有机物的应用进展[J]. 山东化工,2019,48(7):60-65.
- Hu Dehao, Sun Liang, Mao Huimin, *et al.* Research progress of the Fenton oxidation technology for treatment of refractory organics[J]. Shandong Chemical Industry, 2019,48(7):60-65(in Chinese).
- [5] Jaafarzadeh N, Takdastan A, Jorfi S, *et al.* The performance study on ultrasonic/ $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{H}_2\text{O}_2$, for degradation of azo dye and real textile wastewater treatment[J]. J Mol Liq,2018,256(15):462-470.
- [6] 刘静,王杰,孙金城,等. Fenton 及改进 Fenton 氧化处理难降解有机废水的研究进展[J]. 水处理技术,2015,41(2):6-10.
- Liu Jing, Wang Jie, Sun Jincheng, *et al.* Research advances in Fenton and improvements of the Fenton oxidation process for organic wastewater treatment[J]. Technology of Water Treatment,2015,41(2):6-10(in Chinese).
- [7] Clarizia L, Russo D, Somma I D, *et al.* Homogeneous photo-Fenton processes at near neutral pH: A review [J]. Appl Catal B - Environ,2017,209:358-371.
- [8] 张学洪,赵文玉,曾鸿皓,等. 工业废水处理工程实例[M]. 北京:冶金工业出版社,2009.
- Zhang Xuehong, Zhao Wenyu, Zeng Honghao, *et al.* Cases of Industrial Wastewater Treatment Project[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,2009(in Chinese).
- [9] 许颖,雷霆,孙剑宇,等. 城市污水膜生物反应器处理工程中膜寿命预测[J]. 中国给水排水,2015,31(5):34-39.
- Xu Ying, Lei Ting, Sun Jianyu, *et al.* Life-time assessment of membrane in large-scale MBR plants for municipal wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater,2015,31(5):34-39(in Chinese).
- [10] 奚旦立,马春燕. 印染废水的分类、组成及性质[J]. 印染,2010,36(14):51-53.
- Xi Danli, Ma Chunyan. Classification, composition and properties of dyeing effluents[J]. Dyeing & Finishing, 2010,36(14):51-53(in Chinese).



作者简介:刘建林(1968-),男,山东滕州人,博士,主要从事水、固废污染防治技术研究及应用工作。

E-mail:jerryliu@citicenvirotech.com

收稿日期:2020-07-31

依法划定河湖管理范围

严格水域岸线水生态空间管控