

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.18.020

合成革DMF废水处理及回用工程实例分析

杨青¹, 任昆鹏¹, 杨辉², 赵刚强¹, 赵舒琪¹, 张龙飞¹
(1. 浙江海拓环境技术有限公司, 浙江 杭州 311100; 2. 中能环境科技有限公司, 浙江 杭州 311100)

摘要: 温州某皮革厂针对生产用水消耗大、重复利用率要求高的问题,采用水解酸化+两级AO+MBR工艺处理经过精馏/脱酸处理后的冷凝水(含有N,N-二甲基甲酰胺,即DMF),平均出水COD为56 mg/L、氨氮为0.5 mg/L、TN为3.5 mg/L、悬浮物为0.5 mg/L、色度为8倍,满足皮革厂对回用水水质的要求。将该工艺产水回用至生产车间凝固槽作为补充水,实现对冷凝水的100%重复利用率。整个项目自建成运营以来,废水处理效果稳定,实际处理水量为360 m³/d,工程建设费用为950万元,处理费用为9.05元/m³,具有一定的环境效益和经济效益。

关键词: 合成革废水; N,N-二甲基甲酰胺; 水解酸化; 两级AO; MBR; 处理及回用
中图分类号: X703 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)18-0126-06

Analysis of Synthetic Leather DMF Wastewater Treatment and Reuse Engineering Example

YANG Qing¹, REN Kun-peng¹, YANG Hui², ZHAO Gang-qiang¹, ZHAO Shu-qi¹, ZHANG Long-fei¹

(1. Zhejiang Hi-tech Environmental Technology Co. Ltd., Hangzhou 311100, China; 2. Shenergy Environmental Technologies Co. Ltd., Hangzhou 311100, China)

Abstract: In response to the high water consumption and high requirements for water reuse in leather factory production, we use the hydrolysis acidification+two-stage AO+MBR process to treat the condensed water containing DMF after distillation/deacidification treatment from a leather factory in Wenzhou. The average concentration of pollutants in the process water is: COD 56 mg/L, NH₃-N 0.5 mg/L, TN 3.5 mg/L, SS 0.5 mg/L, and the chromaticity of 8 times. The effluent quality meets the requirements of the leather factory owner for recycled water quality. Reusing the process water to the solidification tank in the production workshop as supplementary water achieved a 100% reuse rate of condensed water. Since the completion and operation of the project, the wastewater treatment effect has been stable, with a actual processing water volume of 360 m³/d, the construction cost is 9.5 million yuan, and the water treatment cost is 9.05 yuan/m³, which has certain economic value and environmental benefits.

Key words: synthetic leather wastewater; DMF; hydrolytic acidification; two-stage AO; MBR; treatment and reuse

皮革业是很多发展中国家的主要产业之一。我国的皮革业自改革开放以来发展迅速,市场份额不

通信作者: 杨青 E-mail: yangqstar@163.com

断提高,已经成为全球第一大皮革生产国和出口国^[1-2]。皮革业的兴起也给社会发展造成了许多不利影响,比如生产过程中,根据产品品种及生坯类别的不同,每加工1 t原料皮需要60~120 m³的水^[3],对水资源造成较大的消耗。根据《人造革与合成革工业节水技术要求》(QB/T 5595—2021)中的国内一般水平基准,水重复利用率须达到60%以上,这无疑对皮革废水处理提出很高要求。

在皮革生产过程中会使用大量酸、碱、铬盐、单宁、溶剂、硫化物、染料、助剂和其他化合物,这些物质由于无法完全固定在皮革上,而大量残留于废水中^[4],其中N,N-二甲基甲酰胺(DMF)结构稳定性强,并且可与水及醇、醚、酮、酯、芳烃、不饱和烃等大多数有机溶剂任意混合,被誉为“万能溶剂”^[5]。由于DMF具有强水溶性、致病性等特点^[6],如果不经过有效处理必然对生态环境和生物体健康造成破坏。与高耗能、高成本的物化处理工艺相比,生物处理能更好地实现经济和环境目标,被认为是处理工业废水的有利工艺^[7]。Wang等^[5]采用AnSBR-ASBR反应器处理DMF废水,当HRT为24 h时,AnSBR对COD的平均去除率为39.54%,而ASBR对氨氮的去除率为88.38%。Kong等^[8]使用实验室规模的UASB,通过人工混合厌氧颗粒污泥和DMF降解活性污泥,厌氧处理COD约2 000 mg/L的DMF废水,在有机负荷为1.63~4.62 gCOD/(L·d)的条件下,对DMF的去除率达到96%以上。马睿莉等^[9]采用两级A/O-复合生物脱氮工艺(HBR)处理DMF废水,当使用聚氨酯海绵作为填料时脱氮效果明显,出水TN浓度平均为25 mg/L,去除率约88.85%。研究表明,生物技术对DMF废水具有良好的处理效果,但当前对此类废水的处理研究多停留在实验室阶段,其建设、运行成本以及处理效果往往不满足现实需要,同时工艺产水鲜以回用为目标,可能造成皮革厂水重复利用率难以满足节水要求。

以浙江温州某含有DMF的合成革废水生物处理及回用工程为例进行介绍,并分析处理效果,以期同类工程提供参考。

1 工程概况

浙江省温州市某皮革厂主营业务为以湿法制革为生产线的聚氨酯(PU)合成革研发、生产和销售。根据该厂生产规模,废水处理工程设计规模为

700 m³/d。生产车间排放废水首先进入精馏塔以提纯DMF从而进行资源化利用,精馏塔排出冷凝水(占原料80%,含少量DMF)进入废水调节池进行中和,然后进入水解酸化+两级AO+MBR工艺流程进行处理,工艺产水最终进入回用水池。回用水用于补充皮革厂生产车间凝固槽消耗水,可根据生产需要确定回用水标准(见表1)。

表1 回用水水质标准

Tab.1 Requirements for reclaimed water quality

项目	COD/ (mg·L ⁻¹)	NH ₃ -N/ (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	悬浮物/ (mg·L ⁻¹)	色度/ 倍	pH
数值	<80	<8	<15	<1.0	<16	6~9

2 工艺选择

DMF废水具有一定毒性,B/C值较低,直接进行生物主反应效果较差,故选择在前端首先进行预处理,将难降解大分子有机物分解为小分子物质从而提高废水可生化性。水解酸化单元通过将生化反应控制在水解、产酸脱氢两个阶段,既保留将复杂大分子有机物分解为小分子有机物的功能,又能降低反应过程中COD的消耗,从而保证一定的C/N,而与Fenton氧化、臭氧氧化等预处理工艺相比,最终选择水解酸化工艺主要基于其具备以下优点:①不需要气体收集、处理系统,基建成本低。②对DO、pH、温度等环境条件要求低,操作简单。经过水解酸化反应后,废水COD无明显变化,而有机氮经过氨化反应转化为氨氮,工程上常采用A²/O、AO等方式进行生物脱氮。根据废水调节池水质指标及回用水水质要求,TN去除率须达到97%以上,而根据《厌氧-缺氧-好氧活性污泥法污水处理工程技术规范》(HJ 576—2010),常规A²/O与单级AO工艺均难以满足要求,且单级反应器中氨氮被完全氧化后,较高的TN去除量要求较高的硝化液回流量,会产生较大的回流泵运行功耗,故选择两级AO工艺对TN进行逐步去除。为保证最终工艺产水水质,两级AO工艺段后续设MBR对COD、悬浮物作进一步处理。MBR工艺将膜分离与活性污泥法相结合,一方面通过膜孔过滤作用来对悬浮物进行拦截;另一方面通过曝气为活性污泥中的好氧微生物提供生存条件,从而有利于有机物的降解,同时还将水力停留时间(HRT)与污泥停留时间(SRT)完全分开,保证极长的SRT,结合膜截留的高效性,可以使世代时

间长的硝化菌等在生物反应器内生长,因此脱氮效果良好^[10]。MBR膜出水进入回用水池储存,由于水中仍有一部分TN,长期存放会有藻类滋生,所以对回用水进行消毒处理。在各类消毒工艺中,紫外消毒具有高效性、广谱性,并且在常规剂量内不会有副产物生成,故选择紫外消毒工艺。

3 工艺流程

废水处理站工艺流程见图1。

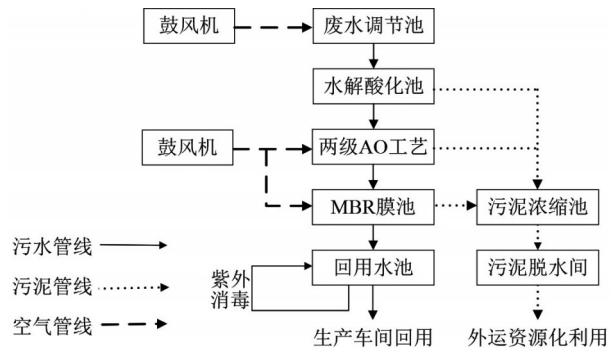


图1 废水处理站工艺流程

Fig.1 Process flow chart of wastewater treatment station

① 废水调节池出水首先进入水解酸化池。水解酸化池内部装填立体弹性填料,通过提高水解酸化池内微生物多样性、延长微生物停留时间等提高对污染物的去除效果。水解酸化池配置循环泵,通过内循环方式提高废水和填料表面微生物的接触频率,进一步提高处理能力。水解酸化池设溢流堰,出水通过重力溢流方式进入两级AO工艺。

② 两级AO工艺段由1级A池-1级O池-沉淀池-2级A池-2级O池组成。整个两级AO工艺段设有小回流(1级O池至1级A池,2级O池至2级A池)、大回流(2级O池至1级A池)两种回流方式,两者结合有利于:a.硝化液回流,为缺氧条件下的反硝化反应提供底物;b.好氧硝化产物——硝酸盐与易降解有机物充分接触,从而进行深度脱氮;c.充分利用易降解有机物,同时也对COD进行深度处理。在1级O池后设沉淀池,通过污泥回流方式维持1级A池-1级O池污泥浓度。1级A池、2级A池内设潜流搅拌机,使活性污泥呈悬浮状态,保证微生物与废水中污染物的充分接触。

③ 两级AO工艺段出水进入MBR膜池。MBR膜池设鼓风机,在进水过程中鼓风机持续对膜池进行曝气,一方面通过膜丝的摆动来缓解膜污染,另一方面通过曝气制造好氧环境,从而为好氧微生物

提供反应条件。膜池设污泥泵,通过回流方式维持2级A池-2级O池部分污泥浓度。

④ MBR滤后水进入回用水池,回用水池配置紫外消毒装置与循环水泵,对回用水进行消毒并循环至回用水池,从而防止回用水池内藻类滋生。

⑤ 根据水解酸化池、沉淀池、MBR膜池污泥浓度变化定期排泥至污泥浓缩池,之后污泥进入污泥脱水间进行脱水处理。为减少建设费用,选择叠片螺旋式污泥脱水机进行污泥脱水,泥饼进行资源化利用。

4 主要构筑物及运行参数

废水处理构筑物均为钢筋混凝土结构,当前处理水量为 $360\text{ m}^3/\text{d}$ (每天按24 h计,即 $15\text{ m}^3/\text{h}$)。

① 废水调节池。1座,尺寸为 $14.0\text{ m}\times 9.0\text{ m}\times 6.0\text{ m}$,有效水深为 5.5 m , $\text{HRT}=46.2\text{ h}$,池底设穿孔曝气管。废水调节池出水通过2台提升泵提升, $Q=13.2\text{ m}^3/\text{h}$, $H=140\text{ kPa}$, $P=1.5\text{ kW}$ 。

② 水解酸化池。1座分2格,2格连通,单格尺寸为 $6.0\text{ m}\times 6.0\text{ m}\times 9.0\text{ m}$,有效水深为 8.0 m , $\text{HRT}=38.4\text{ h}$ 。设2台循环泵进行内循环, $Q=180.0\text{ m}^3/\text{h}$, $H=60\text{ kPa}$, $P=5.5\text{ kW}$,回流比为200%。池内悬挂弹性填料,填充率为30%,污泥浓度(MLSS)按 7.5 g/L 计。水解酸化池顶部设出水堰,与1级A池通过穿孔墙连接。

③ 1级A池。1座分2格,2格连通,单格尺寸为 $7.0\text{ m}\times 7.0\text{ m}\times 9.0\text{ m}$,有效水深为 8.0 m , $\text{HRT}=52.3\text{ h}$,MLSS为 $2.5\sim 3.0\text{ g/L}$,总氮负荷率为 $0.04\sim 0.05\text{ kgTN}/(\text{kgMLSS}\cdot\text{d})$ 。设2台潜水搅拌机, $P=3.0\text{ kW}$ 。

④ 1级O池。1座分2格,2格连通,单格尺寸为 $18.8\text{ m}\times 7.0\text{ m}\times 9.0\text{ m}$,有效水深为 8.0 m , $\text{HRT}=140.4\text{ h}$,MLSS维持在 $3.0\sim 3.5\text{ g/L}$,污泥负荷为 $0.035\sim 0.040\text{ kgCOD}/(\text{kgMLSS}\cdot\text{d})$ 。设2台硝化液回流泵, $Q=44.7\text{ m}^3/\text{h}$, $H=160\text{ kPa}$, $P=3.75\text{ kW}$,回流比为200%。控制DO为 2 mg/L 。设在线溶氧仪,池底布置盘式微孔橡胶膜曝气器。

⑤ 沉淀池。1座,尺寸为 $5.0\text{ m}\times 7.0\text{ m}\times 7.0\text{ m}$,有效水深为 6.3 m ,表面负荷为 $0.43\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,中间设 $\text{Ø}600\text{ mm}$ 导流筒。附近设2台污泥泵, $Q=10.0\text{ m}^3/\text{h}$, $H=100\text{ kPa}$, $P=0.75\text{ kW}$,污泥回流比为100%。

⑥ 2级A池。1座分4格,4格连通,每格尺寸为6.6 m×5.0 m×9.0 m,有效水深为8.0 m, HRT=70.4 h, MLSS维持在2.0~2.5 g/L,总氮负荷率为0.035~0.040 kgTN/(kgMLSS·d)。每格设1台潜水搅拌机, P=3.0 kW。

⑦ 2级O池。1座分4格,4格连通,每格尺寸为12.0 m×7.5 m×9.0 m,有效水深为8.0 m, HRT=192 h, MLSS维持在1.5~2.0 g/L,污泥负荷为0.006~0.009 kgCOD/(kgMLSS·d),设硝化液回流泵2台, Q=44.7 m³/h, H=160 kPa, P=3.75 kW,回流比为200%,控制DO为2 mg/L。池内设在线溶氧仪,池底布置盘式微孔橡胶膜曝气器。

⑧ MBR膜池。1座,根据膜元件尺寸确定膜池尺寸为7.0 m×4.0 m×5.0 m,有效水深为4.0 m, MLSS维持在2.5~3.0 g/L。设2组MBR膜元件,聚四氟乙烯(PTFE)材质,尺寸为2.5 m×3.0 m×3.0 m。整个膜系统当前实际产水量为15.0 m³/h,共设2台自吸式离心泵, Q=21.0 m³/h, H=100 kPa, P=1.5 kW,将膜产水输送至回用水池。设反洗泵2台, Q=11.0 m³/h, H=160 kPa, P=1.5 kW;加药泵2台, Q=7.2 m³/h, H=138 kPa, P=0.75 kW;污泥泵2台, Q=10.0 m³/h, H=100 kPa, P=0.75 kW。

⑨ 回用水池。1座,尺寸为10 m×9.0 m×6.0 m,有效水深为5.5 m,配备紫外杀菌系统1套,自带6支90 W紫外灯。设循环泵1台, Q=40 m³/h, H=120 kPa, P=2.2 kW,循环流量比为200%。

⑩ 风机房。设4台罗茨鼓风机,其中3台 Q=12.24 m³/min, H=100 kPa, P=24.63 kW,用于为1级O池、2级O池、MBR膜池供气,2用1备;另外1台 Q=6.13 m³/min, H=60 kPa, P=8.48 kW,用于废水调节池曝气搅拌。

⑪ 污泥浓缩池。1座,尺寸为5.0 m×3.0 m×6.0 m,有效水深为5.5 m。设气动隔膜泵1台, Q=0.5 m³/h, H=300 kPa, P=0.55 kW。

⑫ 脱水间。设叠螺式污泥脱水机1台,绝干污泥处理量为90~150 kgDS/h, P=0.65 kW,每天运行3 h;500 L加药桶1个,配 P=0.2 kW 搅拌机;2台机械隔膜加药计量泵, Q=175 L/h, H=700 kPa, P=0.25 kW。

5 实际运行效果

该废水处理站自调试运营以来,处理效果稳定,处理水量为360 m³/d。需要注意的是,生产车间内涂布槽、凝固槽、原料储桶清洗水等高浓度废液定期排放,此类高浓度废液须储存至储罐,定时定量排入废水处理站调节池,通过废水调节池的稀释作用降低高浓度废液对生化系统的冲击。因该废水处理站废水主要来自多级精馏塔塔顶冷凝水,其水温常年为32~37℃,故生化处理效果受季节性影响较小。目前,由车间运营人员对各构筑物每日取水样进行水质检测。表2为废水处理站稳定运行后,11月各处理单元的平均水质,可见均满足回用水水质要求。

表2 废水处理站主要构筑物水质及污泥负荷

Tab.2 Water quality and sludge load of main structures in the wastewater treatment station

处理构筑物	COD/ (mg·L ⁻¹)	NH ₃ -N/ (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	悬浮物/ (mg·L ⁻¹)	色度/倍	pH	污泥负荷
废水调节池	3 000	30	500	125	64	7.4	
水解酸化池	2 850	480	495	336	64	9.2	0.40 kgCOD/(kgMLSS·d)
1级A池	1 150	169	242		32	7.2	0.045~0.05 kgTN/(kgMLSS·d)
1级O池	472	89.5	232		32	7.3	0.20~0.25 kgBOD ₅ /(kgMLSS·d)
2级A池	173	32.3	6.8		32	7.1	0.030~0.035 kgTN/(kgMLSS·d)
2级O池	86	3.2	5.2		16	7.3	0.20~0.25 kgBOD ₅ /(kgMLSS·d)
MBR膜池	56	0.5	3.5		8	7.2	
回用水池	56	0.5	3.5	0.5	8	7.2	

① 废水调节池COD为3 000 mg/L,其中主要为难降解有机物,经过水解酸化池处理后,COD无明显变化,但废水可生化性提高,其中有机物在1级A池作电子供体参与回流硝化液反硝化反应,COD降至1 150 mg/L,然后在1级O池被好氧异养微生物

降解,此时COD去除率为84.27%,随后在2级A池、2级O池经过相同类型反应后,出水COD为86 mg/L,最终进入MBR膜池,在好氧环境下有机物进一步被好氧微生物降解,COD降至56 mg/L,COD总去除率为98.13%。

② 废水调节池TN为500 mg/L,其组成主要为有机氮,氨氮仅为30 mg/L。调节池出水进入水解酸化池,有机氮在胞外水解酶的作用下分解为含氮化合物,再经水解脱氨、还原脱氨或氧化脱氨等方式将其转化为氨氮^[11],因而氨氮增至480 mg/L,而总氮无明显变化。随后氨氮进入1级A池,与回流硝化液混合稀释至169 mg/L,然后在1级O池、2级O池、MBR膜池的好氧条件下,由亚硝化菌、硝化菌转化为硝酸盐,氨氮最终降至0.5 mg/L,去除率为98.33%。转化的硝酸盐随硝化液回流至1级A池、2级A池,在缺氧环境下以有机物为电子供体进行反硝化反应转化为N₂,最终总氮降至3.5 mg/L,去除率为99.3%。

③ 各构筑物中悬浮物除少量为废水调节池(125 mg/L,见表1)原有外,其他主要为微生物群体、微生物代谢产物,经过沉淀池重力沉淀、MBR膜过滤作用后,悬浮物浓度降至0.5 mg/L,去除率为99.6%。废水调节池色度主要由少量有机物产生,因而通过对COD的去除能将色度由64倍降至8倍,去除率为87.5%。

④ 整个废水处理站各构筑物结构尺寸按700 m³/d设计,当后期处理规模提高时,可通过提高污泥浓度来维持污泥负荷,从而保证处理效果。

6 经济分析

该工程建设费用(含土建施工、设备采购与安装费用)为950万元,运行费用明细见表3。吨水处理费用为9.05元/m³,其中电费6.00元/m³、药剂费3.05元/m³。刘素杰等^[12]采用“絮凝沉淀+AO+二次沉淀+生物接触氧化+终沉淀”工艺处理合成革废水(DMF废水与其他多种废水混合),运行费用为2.38元/m³,由于其原水COD、TN等指标与该工程原水相比浓度较低,且以排水纳管为目的,出水标准要求相对较低,因而整体处理难度较小。鲍磊^[13]采用“芬顿氧化+水解酸化+二级A/O+MBR”主体工艺对膜生产废水(主要污染物为DMF与其他有机成分)进行处理,当进水COD为11 752 mg/L、TN为1 060 mg/L时,最终工艺产水COD为42 mg/L、TN为12 mg/L,处理成本为18.6元/m³,过高的污染物处理量提高了处理成本,而当前合成革废水处理原水一般情况下COD<10 000 mg/L、TN<1 000 mg/L,故该工程组合处理工艺更具有参考意义。

表3 运行费用明细

Tab.3 Operating cost detail

物料	单价	消耗量	单日费用/(元·d ⁻¹)	吨水费用/(元·m ⁻³)
电	1元/(kW·h)	2 159.33 kW·h/d	2 159.33	6.00
磷酸二氢钾	5 000元/t	0.020 16 t/d	100.80	0.28
聚丙烯酰胺(PAM)	10 000元/t	0.003 6 t/d	36.00	0.10
葡萄糖	4 000元/t	0.217 t/d	866.88	2.41
盐酸溶液	500元/t	0.018 t/d	9.00	0.03
次氯酸钠溶液	1 000元/t	0.042 t/d	42.00	0.12
液碱溶液	1 500元/t	0.025 t/d	37.50	0.11

7 结语

① 该皮革厂DMF废水处理及回用案例以补充生产车间凝固槽消耗水为产水目的,在此基础上进行工艺设计,避免了资源浪费或处理效果与实际需要不符的问题。

② 整个项目以生物处理为主,在处理难降解DMF废水方面展现出良好的COD降解与脱氮效果,可为同类型废水处理及回用工程提供借鉴。

③ 当前存在电费占比较高的问题,后续将继续进行设备或技术优化,通过降低运行功耗进一步降低运行费用。

参考文献:

- [1] MOKTADIR M A, AHMADI H B, SULTANA R, *et al.* Circular economy practices in the leather industry: a practical step towards sustainable development [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 251: 119737.
- [2] 罗明, 黄其斌, 李明武. 中国皮革产业地区分布及变化趋势分析[J]. *皮革科学与工程*, 2022, 32(5): 99-102, 105.
LUO Ming, HUANG Qibin, LI Mingwu. Analysis on regional distribution and changing trend of China's leather industry [J]. *Leather Science and Engineering*, 2022, 32(5): 99-102, 105 (in Chinese).
- [3] 陈晓屏. 制革工业污水中污染物的特点及减排技术探析[J]. *皮革制作与环保科技*, 2021, 2(12): 9-10.
CHEN Xiaoping. Characteristics of pollutants in wastewater from tanning industry and analysis of emission reduction technology [J]. *Leather Manufacture and Environmental Technology*, 2021, 2(12): 9-10 (in Chinese).

- [4] LOFRANO G, MERIÇ S, ZENGIN G E, *et al.* Chemical and biological treatment technologies for leather tannery chemicals and wastewater: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 461: 265–281.
- [5] WANG Y C, CAO L L, LU Y Y, *et al.* Impact analysis of hydraulic residence time and dissolved oxygen on performance efficiency and microbial community in N, N-dimethylformamide wastewater treated by an AnSBR-ASBR [J]. *Environmental Pollution*, 2024, 344: 123326.
- [6] LU X Y, WANG W W, ZHAN L G, *et al.* Molecular mechanism of N, N-dimethylformamide degradation in *Methylobacterium* sp. strain DM1 [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2019, 85(12): 1–43.
- [7] TAN X W, FAN Y Q, ZHANG X Z, *et al.* Carbon-neutral potential in treatment of N, N-dimethylformamide-containing industrial wastewater: comparative investigation of energy conservation, carbon reduction and expenditure between UASB and Fenton process [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 56: 104325.
- [8] KONG Z, LI L, LI Y Y. Characterization and variation of microbial community structure during the anaerobic treatment of N, N-dimethylformamide-containing wastewater by UASB with artificially mixed consortium [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 268: 434–444.
- [9] 马睿莉, 徐乐中, 陈茂林, 等. 2级 A/O-HBR 工艺 2 种填料处理 DMF 废水研究[J]. *水处理技术*, 2021, 47(9): 111–115, 120.
MA Ruili, XU Lezhong, CHEN Maolin, *et al.* Study on treatment of DMF wastewater by two-stage A/O-HBR process with two different fillers [J]. *Technology of Water Treatment*, 2021, 47(9): 111–115, 120 (in Chinese).
- [10] 白润英, 肖作义, 宋蕾. 水处理新技术、新工艺与新设备[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2017: 92–97.
BAI Runying, XIAO Zuoyi, SONG Lei. *New Technologies, Processes, and Equipment for Water Treatment* [M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2017: 92–97(in Chinese).
- [11] 党澎泽, 谈新伟, 李祥, 等. 氨氮胁迫对厌氧处理高浓度有机氮废水的影响[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(10): 5453–5460.
DANG Pengze, TAN Xinwei, LI Xiang, *et al.* The effect of ammonia nitrogen stress on anaerobic digestion treatment of high concentration organic nitrogen wastewater [J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(10): 5453–5460 (in Chinese).
- [12] 刘素杰, 孙湘, 张留成, 等. 合成革生产综合废水处理工程实例分析[J]. *工业水处理*, 2022, 42(1): 167–170.
LIU Sujie, SUN Xiang, ZHANG Liucheng, *et al.* Case analysis of synthetic leather production integrated wastewater treatment project [J]. *Industrial Water Treatment*, 2022, 42(1): 167–170 (in Chinese).
- [13] 鲍磊. 芬顿+水解酸化+二级 A/O+MBR 处理膜生产废水的工程实例[J]. *化工管理*, 2024(18): 67–71.
BAO Lei. Engineering example of Fenton + hydrolysis acidification + secondary A/O + MBR treatment of membrane production wastewater [J]. *Chemical Engineering Management*, 2024(18): 67–71(in Chinese).

作者简介:杨青(1987-),男,安徽安庆人,大学本科,工程师,主要研究方向为废水处理及资源化利用。

E-mail: yangqstar@163.com

收稿日期: 2024-10-30

修回日期: 2025-01-27

(编辑: 衣春敏)