

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.24.023

气浮+臭氧催化氧化用于工业园区污水厂提标改造

程明涛, 张万里

(华昕设计集团有限公司, 江苏 无锡 214072)

摘要: 对苏南地区某保税区工业园污水厂按照《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值》(DB 32/1072—2018)进行提标改造,设计规模为 $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,面临着出水标准大幅提高、水质复杂、可选择工艺有限、用地紧张等难题。通过现状进、出水水质分析,结合验证性试验结果,对二沉池出水采用气浮+臭氧催化氧化进一步处理,出水水质稳定达到新标准。提标改造后工艺流程为粗格栅/进水泵房+细格栅/旋流沉砂池+匀质池+生化池+二沉池+高速气浮池+臭氧催化氧化池。该工程总投资为6 637.08万元,处理成本比原来增加 $0.552 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

关键词: 工业园区污水厂; 提标改造; 臭氧催化氧化; 气浮

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)24-0134-06

Application of Dissolved Air Flotation and Ozone Catalytic Oxidation Process in the Upgrading and Reconstruction of a WWTP in an Industrial Park

CHENG Ming-tao, ZHANG Wan-li

(Huaxin Design Group Co. Ltd., Wuxi 214072, China)

Abstract: A WWTP in an industrial park with designed capacity of $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ in southern Jiangsu was upgraded and reconstructed according to *Discharge Standard of Main Water Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant & Key Industries of Taihu Area* (DB 32/1072—2018). It was faced with the problems such as higher requirement of effluent quality, complicated influent quality, limited option of available sewage treatment process, lack of construction land. Dissolved air flotation and ozone catalytic ozonation are used to further treat the effluent of secondary sedimentation tank based on current water quality analysis and confirmatory test. The effluent quality reaches the new design standard stably. After the transformation, the new process consists of coarse grid and inlet pump house, fine grid and cyclone settling tank, equalization tank, biochemical pond, secondary sedimentation tank, high speed flotation tank, ozone catalytic oxidation pond. The total investment of the project is 66.370 8 million yuan, and the total treatment cost is increased by $0.552 \text{ yuan}/\text{m}^3$.

Key words: wastewater treatment plant in industrial park; upgrading and reconstruction; ozone catalytic oxidation; dissolved air flotation

1 工程背景

苏南地区某市濒临长江,拥有国内唯一的内河保税区工业园。园区性质为化工生产基地、化工企业聚集区,是世界知名、国内一流的化工工业园。保税区内建有集中污水处理厂,主要负责保税区工业园工业废水和生活污水的处理,始建于1992年,最

初设计规模为 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,一期工程设计规模为 $2.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (分为A、B两个系列,规模相同),采用SBR工艺。二期工程设计规模为 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采用传统AAO工艺。随着园区的发展,接管污水量逐渐增加,于2010年—2014年在主体构筑物不变的情况下进行了扩容和提标改造,设计总规模提高到 $4.5 \times$

10⁴ m³/d,其中一、二期处理能力分别提高到 2.6×10⁴、1.9×10⁴ m³/d,一、二期主体工艺均改造为缺氧+好氧+载体生物膜。二期工程另配套有工业废水集

中预处理系统,主要处理企业排放的高浓度有机废水,采用 EGSB 工艺处理后接入主体生化系统,设计规模为 7 500 m³/d。现状工艺流程见图 1。

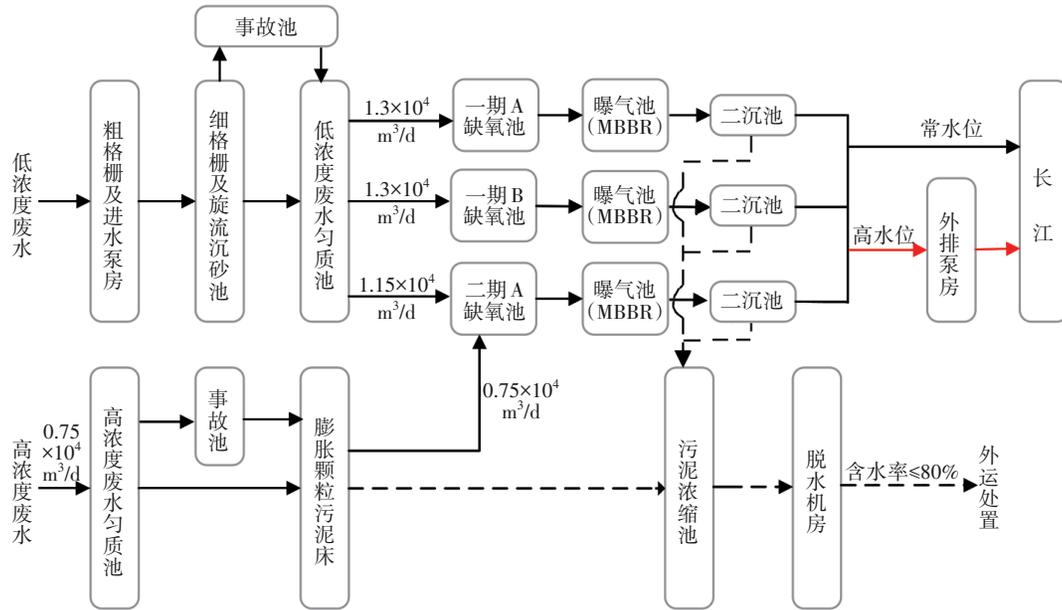


图 1 现状工艺流程

Fig.1 Flow chart of current sewage treatment process

出水 COD、NH₃-N、TN、TP 指标执行《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值》(DB 32/1072—2007)中表 3 标准, BOD₅、SS 参照江苏省《化学工业主要水污染物排放标准》(DB 32/939—2006)中表 2 标准。污泥采用重力浓缩+带式脱水机脱水至含水率≤80%后外运处置。现状设计进、出水水质见表 1。

表 1 现状设计进、出水水质

Tab.1 Current design influent and effluent quality

项目	设计进水	设计出水	执行标准
COD	400	80	《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值》(DB 32/1072—2007)中表 3 标准
NH ₃ -N	40	5	
TN	45	15	
TP	2	0.5	
BOD ₅	120	20	江苏省《化学工业主要水污染物排放标准》(DB 32/939—2006)中表 2 标准
SS	300	70	

随着《太湖地区城镇污水处理厂及重点行业主要水污染物排放限值》(DB 32/1072—2018)的颁布实施,该污水厂无法满足新标准对出水水质的要求,需要进行提标改造。

2 提标改造工艺的分析与确定

2.1 提标改造前实际进、出水水质

该厂提标改造前(2018年1月—2019年6月)实际进、出水水质见表 2。

表 2 提标改造前污水处理厂实际进、出水水质

Tab.2 Actual influent and effluent quality of the WWTP before upgrading and reconstruction

项目	进水水质				出水水质				
	COD	NH ₃ -N	SS	TN	COD	NH ₃ -N	SS	TN	
2018年	最大值	378	23.6	292	32	64	1.68	49	14.84
	最小值	114	5.5	49	11	41	0.10	9	5.80
	平均值	227	12.4	141	19	50	0.30	27	9.08
2019年1月—6月	最大值	402	27.5	349	33	63	1.10	44	11.50
	最小值	137	7.5	51	13	40	0.12	5	3.00
	平均值	279	15.9	188	22	51	0.41	24	7.63
新排放标准 (DB 32/1072—2018)					50	4(6)	10	12(15)	
江苏省《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB 32/4440—2022)表 1 B 级标准					40	3(5)	10	10(12)	

注: 2018年新标准下 COD、NH₃-N、SS、TN 的达标率分别为 36.71%、99.03%、19.15%、98.33%, 2019年1月—6月新标准下 COD、NH₃-N、SS、TN 的达标率分别为 39.51%、98.54%、21.03%、98.64%。

2.2 提标改造重难点分析

该污水厂接纳污水以工业废水为主,生活污水占比极少。企业生产废水经内部预处理后接入污水厂,可生化性差,难降解有机物多。实际进水的COD和SS数据亦能佐证。出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN均值分别低于0.5、10 mg/L。COD和SS均值较高,分别大于50、25 mg/L。进一步分析发现,COD、SS超出新标准较多,平均达标率仅为38.11%和20.09%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN已基本符合DB 32/1072—2018表2标准。

由以上分析可知,提标改造重难点在于COD和SS的进一步去除。经过生化系统处理后,出水中剩余COD基本为难降解有机物,提标改造工艺选择范围有限。现状一期工程矩形平流式二沉池均由原SBR池改造而来,且设计规模提高了30%,单座池体平面尺寸为33.25 m×15.55 m,平均表面负荷为 $1.19 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,原排放标准对SS要求较低,出水无进一步沉淀或过滤措施,导致出水SS较高。此外,该污水厂建设时间较早,早期建设标准低,现状厂区经过数次改造,管线系统十分复杂,厂区预留用地较少且需兼顾后期扩容需求,实际可用地面积仅约1300 m^2 ,用地十分有限。因此,提标改造工程工艺的选择除兼顾污染物的去除要求外,还应尽可能节省占地,保证建设条件。

2.3 提标改造工艺的选择

目前,对COD进一步去除主要有高级氧化和活性炭吸附等方法。不同程度的中试和工程案例都表明臭氧催化氧化对生化段出水中的难降解COD有较好的去除效果^[1-4]。活性炭吸附主要是通过物理吸附对COD进一步去除。吸附饱和以后需要再生,再生过程能耗成本较高,再生次数亦有一定限制。更换的活性炭需要作为危险废物进行严格管理,后期处置成本高。鉴于此,本工程推荐采用臭氧高级氧化工艺作为COD深度处理工艺。

SS主要是通过沉淀和气浮去除。因本工程用地有限,沉淀或气浮工艺的表面负荷需达到 $20 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 左右才能满足用地条件的限制。沉淀工艺中只有外加介质的磁混凝沉淀或加载沉淀才能达到要求,气浮工艺由于采用微气泡促进絮体上浮,只需进行溶气水回流,表面负荷高,水下动力设备少,运行较稳定。实践中有采用反硝化生物滤池和高速气浮工艺将一级A出水提标至DB 32/1072—2018表1标准的案例^[5]。同时有研究表明^[6-8],混

凝-气浮工艺可去除大部分悬浮物、COD和TP,减轻后续处理构筑物的负荷,节约运行成本,出水SS可满足臭氧催化氧化进水要求,保证催化设备的正常运行。综上,SS的去除采用气浮处理工艺。

2.4 验证性试验

本工程为工业园区污水厂提标改造,为验证臭氧催化氧化和气浮工艺在本工程的适应性及实用性,在提标改造开始之前进行了中试验证。试验条件和结果分别见表3~5。

表3 1#验证性中试结果

Tab.3 Results of confirmatory pilot test 1#

频次	二沉池出水/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)		臭氧催化氧化装置出水/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)		臭氧催化氧化装置污染物去除率/%	臭氧投加量/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	投加比
	SS	COD	SS	COD	COD		
1	49.4	55.4	26.3	33.8	38.99	30.7	1.42
2	52.2	52.2	25.1	35.6	31.80	28.1	1.69
3	47.0	60.3	24.0	32.9	45.44	33.1	1.21
4	52.0	57.1	22.5	37.6	34.15	26.3	1.35
5	47.6	49.6	24.8	31.7	36.09	27.6	1.54
6	46.8	56.8	28.2	32.4	42.96	28.2	1.16
平均值	49.2	55.2	25.2	34.0	38.24	29.0	1.39

注:水质条件为二沉池出水;试验条件为直接进入臭氧催化氧化试验装置。

结果表明,在三组试验条件下,臭氧催化氧化对COD均有一定去除率,去除率为38%左右。随着进水COD的下降,臭氧投加比随之降低。在未经气浮处理的条件下,臭氧催化氧化装置出水COD较高,臭氧投加量亦较高,出水SS不能满足新标准的要求。最佳试验进水条件为将气浮装置和臭氧催化氧化装置联用,二沉池出水经气浮去除大部分SS和部分COD后,再经臭氧催化氧化处理,出水水质完全能满足新排放标准的要求。在保证后续臭氧催化氧化装置运行条件的同时,也能降低臭氧投加量。进一步分析发现,在第三组试验条件下,气浮装置对SS的去除效果良好,平均去除率达到了89.31%,出水SS低于10 mg/L,同时对COD也有一定去除效果,去除率达到了25.00%。经过气浮处理后,臭氧投加量较前2组试验有所降低,平均臭氧投加比降至1.16,对降低初期投资和运行费用有较大裨益。试验结果与相关研究、工程案例较一致^[2-5],对本工程有较强的参考意义。

江苏省《城镇污水处理厂污染物排放标准》

(DB 32/4440—2022)已于2023年3月28日正式实施,该污水厂因出水直排长江而面临着再提标的要求。中试工艺出水COD、SS和最终运行数据均已满足新地标表1的B级标准要求,工艺前瞻性较强。

表4 2#验证性试验结果

Tab.4 Results of confirmatory pilot test 2#

频次	二沉池出水与部分原水混合/ (mg·L ⁻¹)		臭氧催化氧化装置出水/(mg·L ⁻¹)		臭氧催化氧化装置污染物去除率/%	臭氧投加量/(mg·L ⁻¹)	投加比
	SS	COD	SS	COD	COD		
1	67.2	85.2	38.4	54.9	35.56	57.3	1.89
2	73.4	80.4	33.1	49.5	38.43	59.6	1.93
3	71.3	86.3	36.9	48.2	44.15	65.3	1.71
4	87.2	93.2	39.2	53.3	42.81	73.2	1.83
5	79.3	91.0	41.1	48.5	46.70	80.1	1.88
平均值	75.7	87.2	37.7	50.9	41.53	67.1	1.85

注:水质条件为二沉池出水和部分原水混合,试验条件为直接进入臭氧催化氧化试验装置。

表5 3#验证性试验结果

Tab.5 Results of confirmatory pilot test 3#

频次	二沉池出水/ (mg·L ⁻¹)		气浮试验装置出水/(mg·L ⁻¹)		臭氧催化氧化装置出水/(mg·L ⁻¹)	气浮试验装置污染物去除率/%		臭氧催化氧化装置COD去除率/%	臭氧投加量/(mg·L ⁻¹)	投加比
	SS	COD	SS	COD	COD	SS	COD	COD		
1	45.6	59.7	2.8	43.6	27.7	93.86	26.97	36.47	18.2	1.14
2	29.3	58.5	5.2	39.2	24.8	82.25	32.99	36.73	18.4	1.28
3	31.6	61.1	3.5	45.2	27.2	88.92	26.02	39.82	21.2	1.18
4	35.6	70.3	2.9	48.8	27.0	91.85	30.58	44.67	21.6	0.99
5	57.4	52.6	3.3	43.4	26.2	94.25	17.49	39.63	18.3	1.06
6	33.7	57.4	6.1	47.8	29.4	81.90	16.72	38.49	23.5	1.28
7	53.4	55.4	6.6	46.8	25.4	87.64	15.52	45.73	25.0	1.17
8	46.3	69.4	7.4	44.1	25.6	84.02	36.46	41.95	21.0	1.14
9	34.2	58.6	2.6	45.3	29.2	92.40	22.70	35.54	19.8	1.23
10	62.1	61.2	2.5	46.2	33.2	95.97	24.51	28.14	14.3	1.10
平均值	42.9	60.4	4.3	45.0	27.6	89.31	25.00	38.72	20.1	1.16

注:水质条件为二沉池出水;试验条件为气浮试验装置和臭氧催化氧化试验装置串联使用。

3 工程设计

3.1 设计规模、水质及工艺流程

提标改造工程设计规模仍为4.5×10⁴ m³/d,出水水质执行DB 32/1072—2018表2标准及国家一级A标准。设计进、出水水质见表6。

表6 提标改造工程设计进、出水水质

Tab.6 Design influent and effluent quality for upgrading and reconstruction project mg·L⁻¹

项目	COD	SS	NH ₃ -N	TN	TP
进水水质	400	300	40	45	2
二沉池出水水质	80	70	5	15	0.5
出水水质	50(可以达到40)	10	4(6)	12(15)	0.5

注:括号内数值为水温≤12℃时的控制指标,括号外数值为水温>12℃时的控制指标。

提标改造工艺流程见图2。

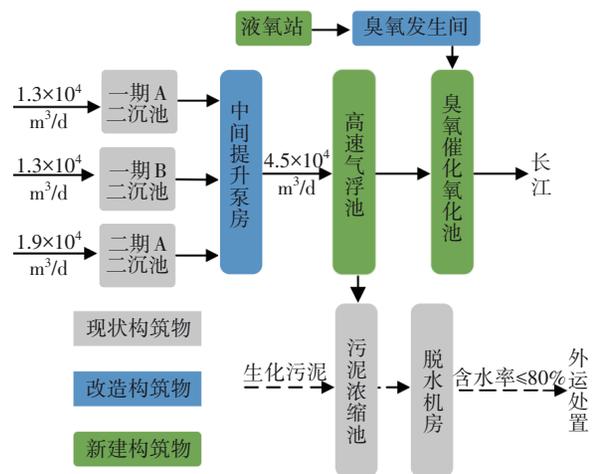


图2 提标改造工艺流程

Fig.2 Flow chart of wastewater treatment process for upgrading and reconstruction project

本次提标改造主要针对SS、COD进一步去除,

通过新建高速气浮池及臭氧催化氧化池使SS和COD达标排放。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN通过优化厂区运行管理,在二级生物处理段强化去除。现状二沉池出水汇入中间提升泵房,经中间提升泵提升至高速气浮池,去除SS后进入臭氧催化氧化池,通过臭氧催化氧化处理后达标排放。

3.2 总平面布置

针对厂区用地紧张、现状管线复杂的问题,提标改造工程在设计之初就充分考虑利旧,合理优化新建构筑物布置。中间提升泵房、臭氧发生间、变配电间均利用现有建(构)筑物改造,不新增占地;新建单体高速气浮池和臭氧催化氧化池,采用合建形式;其他诸如加药装置、冷却塔、液氧站等小单体则充分利用厂区现有场地,见缝插针进行布置;部分工艺管道采用架空敷设方式,有效解决了工程用地紧张以及与现状厂区衔接的问题。

3.3 单体工艺设计

① 中间提升泵房

现状厂区有应急外排泵房一座,高水位时厂区尾水通过应急泵房外排长江。为节省占地,本次提标升级工程将出水水位提升到长江百年一遇洪水位标高,将应急泵房改造为中间提升泵房。保留应急泵房地下主体结构,拆除部分上部建筑,在原有底板基础上重新构筑池体并加高,使中间泵房水位与上游二沉池水位保持协调,充分利用现有水头,减少中间提升泵扬程。共安装干式潜污泵4台,3用1备, $Q=625\text{ m}^3/\text{h}$, $H=50\text{ kPa}$, $N=15\text{ kW}$ 。

② 高速气浮池

新建高速气浮池1座,平面尺寸为 $28.2\text{ m}\times 16.4\text{ m}$,分3组,有效水深为 3.9 m ,表面负荷 $22.0\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。共安装气浮设备3套,主要包括高效溶气装置、微气泡发生装置、紊流集水装置、刮渣机等;回流水泵5台,3用2备, $Q=85\text{ m}^3/\text{h}$, $H=680\text{ kPa}$, $N=30\text{ kW}$ 。

③ 臭氧催化氧化池

新建臭氧催化氧化池1座,平面尺寸: $27.6\text{ m}\times 26.8\text{ m}$,有效水深 8.0 m 。主要设备有溶气装置6套,二次混合设备9套,均相催化反应器3台,溶气回流水泵7台(6用1冷备, $Q=280\text{ m}^3/\text{h}$, $H=240\text{ kPa}$, $N=37\text{ kW}$,变频控制);排泥泵2台(1用1冷备, $Q=100\text{ m}^3/\text{h}$, $H=110\text{ kPa}$, $N=5.5\text{ kW}$)。

④ 臭氧发生间

改造现有厂房,布置臭氧发生设备。主要设备有臭氧发生器(含电源柜)4台,3用1备,设计臭氧平均产量 $\geq 20\text{ kg/h}$, $N=150\text{ kW}$;外循环水泵2台,1用1备, $Q=160\text{ m}^3/\text{h}$, $H=200\text{ kPa}$, $N=15\text{ kW}$;板式换热器(含水泵、膨胀罐、工艺阀门等)4套,3用1备, $Q=43.3\text{ m}^3/\text{h}$, $H=240\text{ kPa}$, $N=5.5\text{ kW}$;空压机2套,1用1备, $Q=0.6\text{ m}^3/\text{h}$, $N=5.5\text{ kW}$;冷水机(水冷型)2套,1用1备,制冷量 495.3 kW/h , $N=105.5\text{ kW}$;冷冻水箱(冷水机内循环出水存储)1台, $V=12\text{ m}^3$ 。

⑤ 液氧站

液氧站主要为臭氧发生器提供液氧源。设液氧储罐2台,单台容积 30 m^3 ,工作压力 1.6 MPa 。

⑥ 冷却塔

新增冷却塔2台,1用1备,循环水量 $150\text{ m}^3/\text{h}$ 。配套循环水泵2台, $Q=150\text{ m}^3/\text{h}$, $H=100\text{ kPa}$, $N=7.5\text{ kW}$ 。

⑦ 加药装置

新增PAC投加装置1套,采用地上式储罐。单台有效容积 20 m^3 ,共2台。主要用于存储高速气浮池用混凝剂。PAM投加系统布置于现状脱水机房内,制备能力 3 kg/h 。

4 运行效果及成本分析

该提标改造工程于2021年6月建成投运,2022年1月—5月进、出水水质见表7。

表7 2022年1月—5月实际进、出水水质

Tab.7 Actual influent and effluent quality after upgrading and reconstruction from January to May in 2022 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

项目		COD	$\text{NH}_3\text{-N}$	TP	SS	TN
进水水质	最大值	267.00	14.10	1.98	159.00	22.59
	最小值	73.80	8.15	0.95	46.00	15.21
	平均值	152.08	10.79	1.37	93.39	18.02
二沉池出水水质	最大值	63.43	1.78	0.53	53.26	12.83
	最小值	38.27	0.12	0.16	12.71	6.22
	平均值	51.92	0.36	0.31	24.14	8.41
气浮池出水水质	最大值	47.64	0.71	0.09	9.00	11.29
	最小值	32.48	0.24	0.03	2.00	5.36
	平均值	43.71	0.35	0.05	4.43	7.84
最终出水水质	最大值	38.00	0.60	0.09	9.00	11.04
	最小值	25.47	0.20	0.03	2.00	4.92
	平均值	33.14	0.31	0.05	4.43	7.39

由以上结果可知,气浮和臭氧催化氧化系统运行良好,能有效去除原工艺尾水中的SS和COD。该工程总投资为6 637.08万元,运行后处理成本比原

来增加0.552元/m³。增加费用主要包含动力费、药剂费(PAC、PAM及液氧)及臭氧催化氧化耗材费,分别为0.249、0.288、0.015元/m³。

5 结论

① 该化工工业园区污水厂提标改造工程采用高速气浮和臭氧催化氧化工艺对SS和COD进一步去除,达到了新标准的要求。

② 验证性试验结果表明,最佳工艺路线为气浮和臭氧催化氧化工艺联用。臭氧投加比与进水条件有较大关系。前置气浮工艺不仅可以有效去除SS,同时对COD亦有一定去除效果,为臭氧催化氧化工艺的运行提供了良好的条件。

③ 针对厂区用地困难、管线复杂等情况,采取现状建构(筑)物改造利用、管线架空敷设等方式保证了建设条件。

参考文献:

- [1] 栗文明,白永刚,周军,等. 臭氧催化氧化应用于工业园区污水处理厂深度处理工艺的选择及设计[J]. 给水排水,2019,45(5):90-93.
LI Wenming, BAI Yonggang, ZHOU Jun, *et al.* Selection and design of catalytic ozonation in wastewater advanced treatment of industrial park [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2019, 45 (5) : 90-93 (in Chinese).
- [2] 赵红兵,余琴芳,许江军,等. 臭氧高级氧化对某工业园区污水处理厂生化出水处理试验[J]. 净水技术,2022,41(6):96-102.
ZHAO Hongbing, YU Qinfang, XU Jiangjun, *et al.* Experiment of ozone advanced oxidation process for biochemical effluent treatment of a WWTP in an industrial park [J]. *Water Purification Technology*, 2022,41(6):96-102(in Chinese).
- [3] 孙逊,杨红红. 催化臭氧氧化工艺深度处理市政污水厂生化出水[J]. 中国给水排水,2018,34(1):74-76,81.
SUN Xun, YANG Honghong. Application of catalytic ozonation in treatment of biochemical effluent of municipal wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2018,34(1):74-76,81(in Chinese).
- [4] 王舜和,郭淑琴,李滕. 降低负荷+臭氧催化氧化用于张贵庄污水处理厂提标改造[J]. 中国给水排水,

2017,33(6):56-62.

WANG Shunhe, GUO Shuqin, LI Meng. Renovation upgrading project of Zhangguizhuang wastewater treatment plant via reduction pollutants load + ozone catalytic oxidation process [J]. *China Water & Wastewater*, 2017,33(6):56-62(in Chinese).

- [5] 冯仕训,张万里,程明涛,等. 太湖流域一级保护区内某污水处理厂提标改造工艺设计[J]. 中国给水排水,2022,38(6):76-80.

FENG Shixun, ZHANG Wanli, CHENG Mingtao, *et al.* Design of a wastewater treatment plant upgrading and reconstruction process in the first-grade protection zone of Taihu Lake basin [J]. *China Water & Wastewater*, 2022,38(6):76-80(in Chinese).

- [6] 杨墨,刘毛,邓涛,等. 混凝-气浮-过滤深度处理A²O工艺二沉池出水[J]. 中国给水排水,2020,36(19):89-94.

YANG Mo, LIU Mao, DENG Tao, *et al.* Advanced treatment of effluent from secondary sedimentation tank of A²O process by coagulation-dissolved air flotation-filtration [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36 (19):89-94(in Chinese).

- [7] 刘亦凡,陈涛,李军. 中国城镇污水处理厂提标改造工艺及运行案例[J]. 中国给水排水,2016,32(16):36-41.

LIU Yifan, CHEN Tao, LI Jun. Process analysis of upgrading and reconstruction of municipal wastewater treatment plants in China [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(16) : 36-41(in Chinese).

- [8] 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 Shengbing, MENG Fanliang, WANG Baozhen, *et al.* Comparison on the treatment effects of dissolved-air flotation and sedimentation processes [J]. *China Water & Wastewater*, 2002, 18(5) : 42-44(in Chinese).

作者简介:程明涛(1987-),男,河南信阳人,硕士,高级工程师,主要从事城市污水处理厂及管网设计工作。

E-mail:657281903@qq.com

收稿日期:2022-11-10

修回日期:2023-01-12

(编辑:衣春敏)