

文章编号:1008-1542(2016)06-0620-07

doi:10.7535/hbkd.2016yx06015

UASB—A/O 工艺处理淀粉、维生素 B₁₂ 混合废水工程设计与运行

陈媛媛^{1,2}, 杨柯³, 杨景亮^{1,2}

(1. 河北科技大学环境科学与工程学院, 河北石家庄 050018; 2. 河北省污染防治生物技术重点实验室, 河北石家庄 050018; 3. 英国沃克斯弗德环境工程与技术服务有限公司, 英国牛津 OX2 7DL)

摘要: 淀粉、维生素 B₁₂ 混合废水的 COD 和氨氮的浓度均较高, 并含有大量的难生物降解物质, 需采用稳定、高效的废水处理工艺对其进行净化处理, 实现达标排放。采用 UASB—A/O 工艺处理淀粉、维生素 B₁₂ 混合废水, 处理规模为 5 000 m³/d。当进水 COD 质量浓度为 8 544~9 720 mg/L、总氮质量浓度为 240~250 mg/L 时, 处理系统出水 COD 质量浓度为 78.4 mg/L、氨氮质量浓度为 18.7 mg/L、总氮质量浓度为 41.1 mg/L, 去除率分别可达 99% 以上、92.1% 和 82.7%。结果表明, 采用 UASB—A/O 组合工艺对淀粉、维生素 B₁₂ 混合废水进行处理是可行的, 各处理工艺单元的构成及设计参数选择合理且处理效果好, 运行稳定, 出水水质能够满足《污水综合排放标准》(GB 8978—1996) 中的一级标准要求。

关键词: 水污染防治工程; 淀粉废水; 维生素 B₁₂ 废水; UASB—A/O 工艺; 设计与运行

中图分类号: X522 **文献标志码:** A

Design and operation of UASB—A/O process for treatment starch and VB₁₂ wastewater

CHEN Yuanyuan^{1,2}, YANG Ke³, YANG Jingliang^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 2. Pollution Prevention Biotechnology Laboratory of Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 3. United Kingdom Woxford Environmental Engineering and Technical Services Company Limited, Oxford, England OX2 7DL, Britain)

Abstract: Starch and VB₁₂ wastewater with higher COD and ammonia nitrogen concentration, contains a large number of difficult biodegradable material, complex composition, is difficult to deal with. In recent years, with the increasingly stringent wastewater discharge standards, require the use of a stable and efficient wastewater treatment process for purification treatment of high concentration of ammonia nitrogen in wastewater and the refractory organic pollutants, to achieve discharge standards. Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)—Anoxic/Oxic(A/O) process was employed in a wastewater treatment of starch and Vitamin B₁₂ wastewater, which was 5 000 m³/d with highly concentrated organic pollutants and ammonia. The efficiency

收稿日期:2016-03-08;修回日期:2016-04-18;责任编辑:王海云

基金项目:国家“十一五”重大水专项(2009ZX07529-006)

作者简介:陈媛媛(1987—),女,河北石家庄人,硕士研究生,主要从事水污染控制及污染资源化方面的研究。

通讯作者:杨景亮教授。E-mail:yangjingliang@sina.com

陈媛媛,杨柯,杨景亮. UASB—A/O 工艺处理淀粉、维生素 B₁₂ 混合废水工程设计与运行[J]. 河北科技大学学报, 2016, 37(6): 620-626.
CHEN Yuanyuan, YANG Ke, YANG Jingliang. Design and operation of UASB—A/O process for treatment starch and VB₁₂ wastewater [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2016, 37(6): 620-626.

and reliability of the process has been proven. The results of the system operation show that the concentration of the effluent COD, ammonia and total nitrogen (TN) were at 78.4 mg/L, 18.7 mg/L and 41.1 mg/L, and the treatment efficiencies of COD, ammonia and TN reached over 99%, 92.1%, 82.7%, respectively, when the influent COD and TN concentration were in the ranges of 8 544~9 720 mg/L and 240~250 mg/L. The quality of the treated wastewater met the first-class discharge standards in *Integrated Wastewater Discharge Standard* (GB 8978—1996).

Keywords: water pollution control engineering; starch wastewater; VB₁₂ wastewater; UASB—A/O process; design and operation

某公司是以玉米淀粉和维生素 B₁₂ 为主要产品的企业,生产过程中产生的废水均为高浓度有机废水。其中,淀粉废水中的污染物主要为可溶性淀粉、蛋白质、纤维等^[1-2],维生素 B₁₂ 废水中的污染物主要为有机酸、残糖、酮类、氨氮等^[3]。这两种废水的水质特征为有机物浓度高,氨氮浓度高,成分复杂,可生化性较好^[4]。

对于高浓度有机废水多采用厌氧消化技术进行处理,该方法处理负荷高,能耗低,可回收沼气作能源^[5];废水中的氨氮宜采用 A/O 工艺进行处理,该方法净化彻底,无二次污染^[6-8]。针对废水的水质特征,采用 UASB—A/O 工艺对淀粉、维生素 B₁₂ 混合废水进行处理。

1 废水的水质水量

淀粉废水主要来自淀粉生产过程的分离工序和蛋白质回收工序^[9],维生素 B₁₂ 废水主要为提炼工序产生的废液和精制工序产生的酸碱废水^[10]。混合废水的水质水量见表 1。

表 1 废水的水质水量
Tab. 1 Water quality and quantity of wastewater

废水名称	产生量/ (m ³ ·d ⁻¹)	污染物指标			
		pH 值	$\rho(\text{COD})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{总氮})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
淀粉废水	4 000	4.0~4.5	6 000~7 000	150~180	0
VB ₁₂ 提炼废液	500	3.0~3.5	20 000~24 000	650~900	600~800
VB ₁₂ 酸碱废水	500	3.5~4.0	400~500	60~100	40~60

2 工艺设计

2.1 设计参数

1) 设计规模 设计处理能力为 5 000 m³/d。

2) 设计水质 进水水质:pH 值为 4.5,COD 质量浓度为 10 000 mg/L,总氮(TN)质量浓度为 250 mg/L;出水水质:满足《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)中的一级标准要求,即 pH 值为 6~9,COD 质量浓度不大于 100 mg/L、氨氮(NH₃-N)质量浓度不大于 25 mg/L。

2.2 工艺流程

生产过程中产生的废水首先进入集水池,然后经泵提升进入调节池,视反应器的运行状况进行水质水量的调节,调节后的废水依次流经进料泵、换热器,升温后从底部进入厌氧反应器,控制厌氧反应器内的温度为(35±1)℃,废水中的有机物被厌氧菌群降解为 CH₄ 和 CO₂,净化后的废水经厌氧沉淀池泥水分离后,进入 A/O 处理系统,在 A 池中,反硝化细菌利用废水中的有机物将 O 池回流混合液中的 NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 还原为氮气放出,达到脱氮的目的;在 O 池中,好氧微生物先将废水中的有机物分解为 CO₂ 和 H₂O,硝化细菌再将水中的氨氮氧化为 NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N。

废水处理工艺流程见图 1。

2.3 主要设备、构筑物

1) 调节池

采用半地下式钢筋混凝土结构,有效尺寸为 24.4 m×20.0 m×4.3 m,有效容积为 2 000 m³,停留时间为 9.6 h;设置 2 座,交替使用;通过泵循环搅拌调节废水水质,设 3 台循环水泵,2 用 1 备,流量为 140 m³/h,

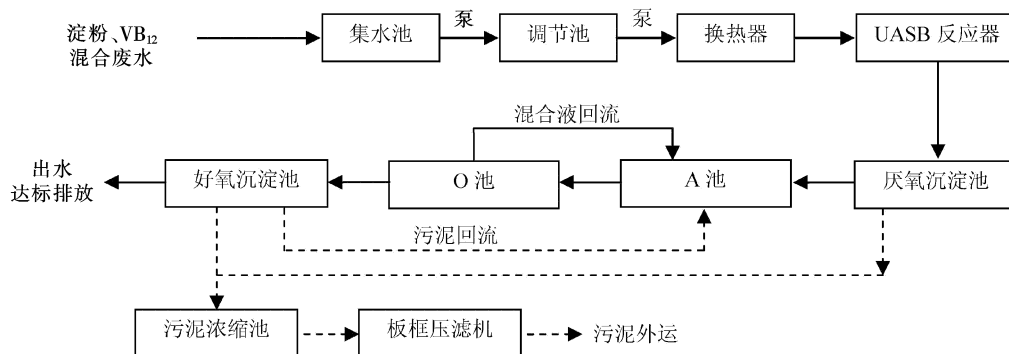


图1 UASB—A/O 工艺流程图

Fig.1 UASB—A/O process flow diagram

扬程为 11.0 m, 功率为 3.0 kW。

2) UASB 反应器

采用地上式碳钢结构, 共 4 台, 单台有效容积为 1 000 m³。采用中温消化, 控制温度为 (35±1)℃, 水力停留时间为 19.2 h, 设计容积负荷为 10.0 kg/(m³·d) (以 COD 计, 下同), 单台反应器的沼气产量为 5 200 m³/d。反应器采用大阻力配水系统, 设 6 台进料泵, 4 用 2 备, 流量为 62 m³/h, 扬程为 50.0 m, 功率为 15.0 kW。

3) 厌氧沉淀池

共建有 2 座钢制竖流式沉淀池, 直径为 9.0 m, 有效水深 4.0 m, 表面负荷为 1.5 m³/(m²·h)。设 2 台污泥泵, 流量为 58 m³/h, 扬程为 17.0 m, 功率为 11.0 kW。

4) A/O 池

A 池与 O 池合建, 均为地上钢筋混凝土结构。

设计负荷分别为 0.6 kg/(kg·d) (以 NH₃-N/MLSS 计, 下同) 和 0.13 kg/(kg·d), A 池有效容积为 3 300 m³, O 池有效容积为 6 700 m³, 污泥质量浓度为 3 kg/m³ (以 MLSS 计, 下同)。

A 池设 6 台推流式潜水搅拌机, 单台功率为 3.0 kW。

好氧池采用鼓风曝气, 选用曝气软管: 曝气量为 3 m³/(m·h), 总长 1 250 m; 配套风机: 风压为 58.8 kPa, 风量为 34.7 m³/min, 配电功率为 55 kW, 共 3 台, 2 用 1 备。

设混合液回流泵 2 台, 1 用 1 备, 流量为 200 m³/h, 扬程为 20.0 m, 功率为 22.0 kW。

A 池、O 池分别设有温度、pH 值、溶解氧测定仪, 实时监测废水的运行状况。

5) 好氧沉淀池

好氧沉淀池为辐流式沉淀池, 地上钢筋混凝土结构, 1 座, 直径为 22.0 m, 有效水深 4.0 m, 表面负荷为 1.5 m³/(m²·h); 设刮泥机 1 台; 污泥泵 2 台, 1 用 1 备, 流量为 120 m³/h, 扬程为 18.0 m, 功率为 11.0 kW。

3 系统启动及运行

3.1 UASB 反应器的启动及运行

1) 接种污泥及接种量

UASB 反应器污泥菌种为城市污水处理厂的厌氧消化污泥和部分发酵猪粪, 污泥菌种的 $\rho(\text{MLVSS})/\rho(\text{MLSS})$ 值为 0.68, 接种量为 13.5 g/L (以 VSS 计, 下同), 接种体积约为 UASB 反应器有效容积的 30%。

2) 反应器的启动及运行

根据 UASB 反应器的运行状况, 启动及运行过程一般分为启动阶段、负荷提高阶段和稳定运行阶段^[11]。

① 启动阶段

厌氧反应器采用低浓度高水力方式启动, 即用公司所排低浓度废水对高浓度废水进行调节后作为反应器的进水。该阶段的控制条件: COD 质量浓度为 2 500~3 000 mg/L, 启动负荷为 1.0 kg/(m³·d), 当反应

器出水的pH值为7~8,COD去除率大于80%时,稳定运行3~5 d后提高反应器的运行负荷,此后反应器运行负荷提高的幅度为0.5 kg/(m³·d)左右,提高负荷的控制条件同前述。该阶段反应器间歇进水,水质保持不变,负荷提高靠逐步增加进水时间来实现。

反应器启动后,通过控制进水温度来逐步提高反应器的运行温度。经过15 d的运行,反应器的运行温度稳定控制在(35±1)℃。按上述控制条件,经过60 d的运行,单台反应器进水量达到50 m³/h,达到了反应器的设计水力负荷,实现了反应器连续进水,反应器运行负荷达到3.06 kg/(m³·d)。此时,可视为反应器启动阶段结束。

②负荷提高阶段

负荷提高阶段的控制条件:维持反应器进水量不变,通过增加进水COD质量浓度来提高反应器运行负荷,当反应器出水pH值为7~8,COD去除率大于85%时,稳定运行3~5 d后提高反应器的运行负荷,运行负荷提高幅度为1.0 kg/(m³·d)左右。经过100 d的运行,反应器进水的COD质量浓度达到9 870 mg/L,进水水质不再进行调节,反应器运行负荷达到10.7 kg/(m³·d),出水COD质量浓度为552 mg/L,COD去除率达到94.4%。反应器开始进入稳定运行阶段。

③稳定运行阶段

在此后的45 d运行过程中,反应器进水量为49.6~52 m³/h,进水COD的质量浓度为8 544~9 720 mg/L,进水容积负荷为12.11 kg/(m³·d)(均值),出水COD的质量浓度为492~512 mg/L,COD去除率达到94.2%~94.7%,沼气产生量约为6 550 m³/d,沼气产率约为0.531 m³/kg(以去除的COD计,下同)。

厌氧反应器运行结果统计见表2。

表2 反应器运行结果统计
Tab.2 Statistical results of reactor operation

运行阶段	运行时间/d	进水量/ (m ³ ·d ⁻¹)	$\rho(\text{COD})_{\text{进水}} /$ (mg·L ⁻¹)	$\rho(\text{COD})_{\text{出水}} /$ (mg·L ⁻¹)	COD去除率 (均值)/%	负荷(均值)/ (kg·m ⁻³ ·d ⁻¹)
启动运行阶段	1~25	375~412	2 540~2 900	380~851	80.6	1.14
	26~45	409~826	2 500~3 100	230~404	82.5	2.26
	46~60	816~1 210	2 670~3 060	221~321	86.0	3.06
负荷提高阶段	61~85	1 152~1 236	3 096~5 497	319~486	91.7	5.13
	86~105		4 896~6 597	425~501	92.3	6.86
	106~145		6 296~8 100	498~532	91.8	8.60
	146~160		8 090~9 870	487~552	92.5	10.7
稳定运行阶段	161~205	1 190~1 248	8 544~9 720	492~512	94.6	12.11

3.2 A/O池的启动及运行

1)接种污泥及接种量

A/O池污泥菌种为城市污水处理厂污泥浓缩池污泥,污泥菌种的 $\rho(\text{MLVSS})/\rho(\text{MLSS})$ 值为0.65,接种量为3 000 mg/L(以MLSS计)。

2)处理水质

由UASB反应器的稳定运行结果可知,反应器出水的COD质量浓度为492~512 mg/L,出水的pH值为7.6~8.2,由于UASB反应器的氨化作用,淀粉废水中的蛋白质和维生素B₁₂中的含氮有机物较为彻底地转化为氨氮,废水中的氨氮质量浓度达到240~250 mg/L,是A/O池净化的重点。

3)反应器的启动及运行

为保证A/O池进水水质的稳定,防止进水水质波动对A/O池启动运行的影响,当UASB反应器运行稳定后A/O池再开始启动。

A/O池采用连续进水方式启动。启动初期控制启动水力负荷为设计负荷的25%左右,即进水量为50 m³/h,为减轻氨氮质量浓度对启动的抑制影响,用生产过程的循环排污水进行调节,控制进水的氨氮质量浓度约为120 mg/L,控制溶解氧质量浓度为3.0~3.5 mg/L,污泥回流比为50%,投加NaOH调节曝气池的pH值为7.5~8.0。经过20 d运行,氨氮氧化效果达到70%左右,启动混合液回流,并通过投加高浓度废水

调节 A/O 池进水的 $\rho(\text{COD})/\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 值, 实现硝态氮的有效反硝化, 达到脱氮的目的。当氨氮去除率达到 85% 以上、脱氮达到 70% 以上时, 增加 A/O 池的运行负荷, 视运行效果及时调节 A/O 池的溶解氧、混合液的回流比、 $\rho(\text{COD})/\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 值及 pH 值。经过 75 d 的运行, A/O 池运行能力、净化效果达到设计要求, A/O 池进入稳定运行状态。A/O 池运行的控制条件见表 3, 运行效果见表 4。

表 3 A/O 池运行控制条件

Tab. 3 A/O pool operation control conditions

水质指标	pH 值	$\rho(\text{溶解氧})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	污泥回流比/%	混合液回流比/%	$\rho(\text{COD})/\rho(\text{NH}_3\text{-N})$
数据	7.5~8.0	3.0~3.5	60~80	300~400	4.5~5.2

表 4 A/O 池运行效果统计(均值)

Tab. 4 Statistics on the running effect of A/O pool (mean value)

水质指标	出水 COD		出水 $\text{NH}_3\text{-N}$		出水 TN		出水 pH 值
	质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	去除率/%	质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	去除率/%	质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	去除率/%	
数据	78.4	84.6	18.7	92.1	41.1	82.7	7.8

可见, 在控制条件下, A/O 池取得较好的运行效果, 处理后出水水质指标达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)中的一级标准要求。

4 处理工艺及运行特征

1) 调节池的设置保证了厌氧反应器进水水质水量的可控性^[12-13]。鉴于生产过程中所产生废水的水质水量波动较大, 易对厌氧反应器造成冲击而影响其运行效果, 处理工艺设置 2 座调节池, 每座水力停留时间为 8.0 h, 交替使用, 保证了厌氧反应器在不同运行阶段对水质水量的控制要求, 为厌氧反应器的快速启动和高效运行提供了保障。

2) 厌氧沉淀池的设置阻隔了厌氧反应器出水中的悬浮物和厌氧菌群对后续 A/O 系统的影响^[14]。在运行初期及达到稳定运行后, 厌氧反应器出水中的悬浮物浓度均较高, 造成在运行过程中的大量惰性污泥流失, 因此, 需设置沉淀池, 以较好地分离厌氧污泥和悬浮物, 消除对后续好氧处理系统的影响^[15-16]。

3) 厌氧反应器为 UASB 反应器, 属第二代高效反应器^[17]。具有微生物持有量大、有机负荷高、净化效率高优点; 改进后的布水系统, 废水分布均匀、不堵塞, 改善了反应器中液体的流动状态; 新型的三相分离器较好地将水、污泥和沼气分离, 可有效防止污泥流失, 从而保证厌氧反应器中具有较大的污泥存存量; 在反应器中可培养、驯化出大量的高活性厌氧颗粒污泥^[18-19]。进入稳定运行阶段后, 反应器污泥床基本实现颗粒化, 实现了厌氧反应器的稳定、高效运行。

4) A/O 池为前置式反硝化生物脱氮系统, 以污水中的有机物为碳源, 对回流混合液中硝酸盐反硝化脱氮。该工艺反硝化产生的碱度可补偿硝化所消耗碱度的 50% 左右, 工艺流程简单, 脱氮效率可达到 75% 以上^[20-23]。但是该工艺的不足在运行中也有所体现, 例如污泥易上浮流失, 动力消耗较大^[24]。通过控制 $\rho(\text{COD})/\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 值、溶解氧等运行参数, 污泥上浮流失基本得到了控制, 取得较好的运行效果^[25-27]。另外, 运行过程证明, 先进的工艺运行控制手段是实现系统稳定运行的保证。

5) 主要单元处理效果好, 实现了处理系统的整体高效能运行。UASB 反应器稳定运行负荷达到 12.11 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ (均值), COD 去除率达到 94.6% (均值), 沼气产率为 0.531 m^3/kg ; A/O 池出水的 COD 质量浓度为 78.4 mg/L , COD 去除率为 84.6%, 整体工艺的 COD 去除率达到 99% 以上; A/O 池出水氨氮为 18.7 mg/L , 去除率达到 92.1%; 出水总氮为 41.1 mg/L , 去除率为 82.7%。

5 结论

针对目标企业淀粉、维生素 B_{12} 混合废水的水质特征, 采用 UASB—A/O 组合工艺进行处理是可行的。

各主要单元的处理效果好,运行稳定,实现了处理工艺的整体高效运行。当进水COD的质量浓度为8 544~9 720 mg/L、总氮质量浓度为240~250 mg/L时,处理系统出水COD质量浓度为78.4 mg/L、氨氮质量浓度为18.7 mg/L、总氮质量浓度为41.1 mg/L,去除率分别可达99%以上、92.1%和82.7%,出水水质能够满足《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)中的一级标准要求。

参考文献/References:

- [1] 王艳,吕维华,姜红波,等. 淀粉废水处理技术研究进展[J]. 应用化工, 2010, 39(10): 1568-1573.
WANG Yan, LYU Weihua, JIANG Hongbo, et al. Research progress on starch wastewater treatment process [J]. Applied Chemical Industry, 2010, 39(10): 1568-1573.
- [2] 李东伟,何晓曼,李斗,等. 淀粉废水的资源化处理[J]. 水处理技术, 2007, 33(3): 69-71.
LI Dongwei, HE Xiaoman, LI Dou, et al. Starch wastewater treatment for its resource recovery [J]. Technology of Water Treatment, 2007, 33(3): 69-71.
- [3] 陈琳,许柯,任洪强,等. 混凝-Fenton法深度处理维生素B₁₂废水[J]. 化工环保, 2014, 34(2): 119-123.
CHEN Lin, XU Ke, REN Hongqiang, et al. Advanced treatment of vitamin B₁₂ wastewater by coagulation-Fenton oxidation process [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2014, 34(2): 119-123.
- [4] 刘翠英,张华涛,刘锦,等. 厌氧-接触氧化工艺处理VB₁₂、淀粉混合废水的研究[J]. 中国沼气, 2000, 18(3): 24-27.
LIU Cuiying, ZHANG Huatao, LIU Jin, et al. Anaerobic and aerobic combined process to treat the mixture of VB₁₂ and starch production wastewater [J]. China Biogas, 2000, 18(3): 24-27.
- [5] SUN L, WAN S, YU Z, et al. Anaerobic biological treatment of high strength cassava starch wastewater in a new type up-flow multi-stage anaerobic reactor [J]. Bioresource Technology, 2012, 104: 280-288.
- [6] 张春利. A/O工艺污水处理厂运行及控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
ZHANG Chunli. Study on Operation and Control of Wastewater Treatment Plant about A/O Process[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [7] 程艳坤,闫志谦,赵文霞,等. 混凝脱硫与A/O组合技术处理高浓度制药废水的研究[J]. 河北科技大学学报, 2010, 31(3): 278-281.
CHENG Yankun, YAN Zhiqian, ZHAO Wenxia, et al. Study on high potency drugs manufacture waste water treatment by coagulation desulphurization and A/O combination technology [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2010, 31(3): 278-281.
- [8] 吴巍,张洪林. A/O-MBBR工艺处理制革废水的研究[J]. 河北科技大学学报, 2010, 31(3): 274-277.
WU Wei, ZHANG Honglin. A/O-MBBR process for treatment of tannery wastewater [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2010, 31(3): 274-277.
- [9] 蔡晶,柴社立,芮铭先,等. 玉米淀粉废水的处理技术[J]. 环境工程, 2007, 25(1): 72-74.
CAI Jing, CHAI Sheli, RUI Mingxian, et al. Techniques of corn starch wastewater treatment [J]. Environmental Engineering, 2007, 25(1): 72-74.
- [10] 邢奕,鲁安怀,李慧军,等. 微电解联合物化法处理维生素B₁₂难降解废水的研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(10): 2267-2272.
XING Yi, LU Anhuai, LI Huijun, et al. Study on micro electrolysis and physicochemical combined treatment for vitamin B₁₂ refractory organic wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(10): 2267-2272.
- [11] 王开红,廉静,岳琳,等. UASB反应器处理青霉素废水启动特性的研究[J]. 河北工业科技, 2012, 29(2): 73-77.
WANG Kaihong, LIAN Jing, YUE Lin, et al. Start-up of UASB reactor for treating penicillin wastewater [J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2012, 29(2): 73-77.
- [12] 韩学琴. UASB-A/O工艺处理玉米淀粉废水[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2013.
HAN Xueqin. UASB-A/O Process for Corn Starch Wastewater Treatment[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2013.
- [13] 张春艳. UASB工艺处理玉米淀粉废水研究[J]. 市政技术, 2008, 26(4): 334-336.
ZHANG Chunyan. Study on treatment of corn starch wastewater by UASB process [J]. Municipal Engineering Technology, 2008, 26(4): 334-336.
- [14] 杜虎,戴建军,王文文,等. UASB+A/O工艺处理制药废水的启动与运行[J]. 中国给水排水, 2014, 30(18): 112-115.
DU Hu, DAI Jianjun, WANG Wenwen, et al. Start-up and operation of UASB and A/O process for pharmaceutical wastewater treatment [J]. China Water and Wastewater, 2014, 30(18): 112-115.
- [15] 张秀明,韩雪,陈志强. UASB-A/O工艺处理马铃薯淀粉废水[J]. 中国给水排水, 2011, 27(14): 78-80.
ZHANG Xiuming, HAN Xue, CHEN Zhiqiang. Combined process of UASB and A/O for treatment of potato starch wastewater [J]. China Water and Wastewater, 2011, 27(14): 78-80.
- [16] 李亚峰,陈涛,闫旭. UASB反应器处理淀粉废水的效果及影响因素[J]. 工业安全与环保, 2010, 36(5): 1-2.
LI Yafeng, CHEN Tao, YAN Xu. Effect and influencing factors of UASB reactor treating starch wastewater [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2010, 36(5): 1-2.
- [17] TANG C J, ZHENG P, WANG C H, et al. Performance of high-loaded ANAMMOX UASB reactors containing granular sludge [J]. Wa-

- ter Research, 2011, 45(1): 135-144.
- [18] 梁晶. UASB处理淀粉废水启动特性及污泥颗粒化形成研究[J]. 现代盐化工, 2015(6): 18-21.
LIANG Jing. Study of star-up performance and granulation process of UASB reactor in treating starch wastewater[J]. Modern Salt and Chemical Industry, 2015(6): 18-21.
- [19] KARTAL B, KUENEN J G, van LOOSDRECHT M C M. Sewage treatment with Anammox [J]. Science, 2010, 328(5979): 702-703.
- [20] SHEN J Y, HE R, HAN W Q, et al. Biological denitrification of high-nitrate wastewater in a modified anoxic/oxic-membrane bioreactor (A/O-MBR)[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 172(2/3): 595-600.
- [21] 马斌, 张树军, 王俊敏, 等. A/O+Anammox工艺处理低C/N城市污水的脱氮性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(8): 2526-2530.
MA Bin, ZHANG Shujun, WANG Junmin, et al. Performance of nitrogen removal from municipal wastewater in A/O+Anammox system[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(8): 2526-2530.
- [22] 郝祥超, 王良, 张俊华, 等. A/O工艺在高氨氮废水中的应用[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(7): 82-84.
HAO Xiangchao, WANG Liang, ZHANG Junhua, et al. Application of A/O process to the wastewater treatment of high NH₃-N wastewater[J]. Environmental Science and Management, 2010, 35(7): 82-84.
- [23] 马勇, 彭永臻, 于德爽. A/O生物脱氮工艺处理生活污水中试(二): 系统性能和SND现象的研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(5): 710-715.
MA Yong, PENG Yongzhen, YU Deshuang. A/O pilot-scale nitrogen removal process treating domestic wastewater(II): The study of system characteristics and SND[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(5): 710-715.
- [24] 李松, 单胜道, 陈英旭, 等. A/O工艺处理啤酒废水工程设计[J]. 工业水处理, 2009, 29(2): 74-76.
LI Song, SHAN Shengdao, CHEN Yingxu, et al. Design of beer wastewater treatment by A/O process [J]. Industrial Water Treatment, 2009, 29(2): 74-76.
- [25] 李静, 李征, 张彦平, 等. A/O-MBR-臭氧-活性炭工艺处理混合污水的试验研究[J]. 河北工业大学学报, 2014, 43(5): 85-88.
LI Jing, LI Zheng, ZHANG Yanping, et al. Disposal of mixed wastewater using A/O-MBR-ozonation-activated carbon process[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2014, 43(5): 85-88.
- [26] 崔树军, 谷立坤, 张建云, 等. 高氨氮废水的处理技术及研究应用现状[J]. 中国给水排水, 2010, 26(14): 26-29.
CUI Shujun, GU Likun, ZHANG Jianyun, et al. Treatment technology of high ammonia nitrogen wastewater and its research and application[J]. China Water and Wastewater, 2010, 26(14): 26-29.
- [27] OLLER I, MALATO S, SANCHEZ J. Combination of advanced oxidation processes and biological treatments for wastewater decontamination: A review[J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(20): 4141-4166.