工业水处理

秦天, 袁泽. EGSB+两级 BioDopp 工艺在酿酒废水处理中的应用[J]. 净水技术, 2023, 42(7):110-118. QIN T, YUAN Z. Application of EGSB+ two-stage BioDopp processes in brewing wastewater treatment[J]. Water Purification Technology, 2023, 42 (7):110-118.

# EGSB+两级 BioDopp 工艺在酿酒废水处理中的应用

秦 天<sup>1,2,\*</sup>,袁 哲<sup>1</sup>

(1. 武汉市城市排水发展有限公司,湖北武汉 430062;2. 武汉科技大学城市建设学院,湖北武汉 430070)

摘 要 采用膨胀颗粒污泥床(EGSB)+两级 BioDopp 工艺应用于西南某酿酒厂高 COD<sub>cr</sub> 酿酒废水处理。通过检测启动过程 中挥发性脂肪酸(VFA)以及碱度(ALK)的浓度变化,发现 VFA 质量浓度保持在 250 mg/L 左右,同时反应器内 ALK 浓度较高,说明 ESBG 能实现对酿酒废水的稳定处理。经过一段时间对酿酒废水的稳定处理,其中 EGSB 进水 COD<sub>cr</sub> 均值在 50 000 mg/L,氨氮均值为 1 000 mg/L,总氮均值为 3 000 mg/L,污染物去除率均超过 90%。一级 BioDopp 生化池 COD<sub>cr</sub> 去除率均值 达到 93.5%,氨氮去除率均值达到 88.9%,总氮去除率均值达到 83.5%,总磷去除率均值为 55.0%。二级 BioDopp 生化池出水 COD<sub>cr</sub>、氨氮、总氮和总磷均值分别为 37.8、2.9、11.3 mg/L 和 0.30 mg/L,满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。通过计算发现 EGSB+两级 BioDopp 工艺吨水处理成本约为 1.76 元/(m<sup>3</sup>·d),低于"升流式式厌氧 污泥床(UASB)+AAO""中和混凝沉淀-内循环(IC)厌氧反应器-接触氧化-曝气生物滤池"以及"UASB+序批式活性污泥法 (SBR)"等工艺运行成本,能实现低成本、高处理率的效果。

关键词 膨胀颗粒污泥床 两级 BioDopp 工艺 酿酒废水 污泥特性 经济性分析 中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2023)07-0110-09 DOI: 10.15890/j. cnki. jsjs. 2023. 07. 015

# Application of EGSB+Two-Stage BioDopp Processes in Brewing Wastewater Treatment

QIN Tian<sup>1,2,\*</sup>, YUAN Zhe<sup>1</sup>

(1. Wuhan Urban Drainage Development Co., Ltd., Wuhan 430062, China;
2. School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract** EGSB+ two-stage BioDopp process was applied in the treatment of brewing wastewater with high COD in Southwest China. In the start-up stage of EGSB+ two-stage BioDopp process, the mass concentration of volatile fatty acid (VFA) was found to be about 250 mg/L. And the concentration of ALK was higher in the reactor. This phenomenon indicated that ESBG could achieve stable treatment of brewing wastewater. After a period of stable treatment of brewing wastewater, the mean concentrations of  $COD_{Cr}$ , ammonia nitrogen and TN in EGSB influent water were 5 000, 1 000 mg/L and 3 000 mg/L, respectively. And the removal rates of pollutants were all over 90%. The average removal rate of  $COD_{Cr}$ , ammonia nitrogen, TN and TP in primary BioDopp biochemical pool reached 93. 5%, 88. 9%, 83. 5% and 55. 0%, respectively. The mean values of  $COD_{Cr}$ , ammonia nitrogen, TN and TP were 37. 8, 2. 9, 11. 3 mg/L and 0. 30 mg/L, respectively. Effluent quality reached first class A criteria in the *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wasterwater Treatment Plant* (GB 18918—2002). EGSB+ two-stage BioDopp process cost about 1.76 yuan /(m<sup>3</sup> · d) for ton water treatment. The operation cost of this process was lower than that of "UASB+AAO", "neutralization coagulation precipitation-IC anaerobic reactor-contact oxidation-biological aerated filter" and "UASB+SBR". The effect of low cost and high processing rate can be achieved. **Keywords** expanded granular sludge bed (EGSB) two-stage BioDopp process brewing wastewater sludge characteristics economic analysis

[收稿日期] 2023-02-04

[基金项目] 长江水利委员会长江科学院开放研究基金项目(CKWV2018490/KY)

[通信作者] 秦天(1980—),女,工程师,硕士,主要从事水质技术及环保相关工作,E-mail:xuwangwust@163.com。

— 110 —

根据工信部最新报告,我国 2022 年 1 月—5 月 全国酿酒企业白酒产量达到 3.176×10<sup>9</sup> L,同比增长 3.4%。白酒产量的增长导致白酒酿造工艺中产生 的原料浸泡废水、渗透废水、发酵废水和清洗废水产 量增大。酿酒废水 C/N 较高,可生化性较好,适用 生物处理法。但酿酒废水 COD<sub>cr</sub> 含量较高,且 COD<sub>cr</sub> 中包含发酵副产物如多环芳烃、硫化氢等有 毒物质,使得酿酒废水在生物处理工艺选择上需十 分谨慎<sup>[1-3]</sup>。

膨胀颗粒污泥床(expanded granular sludge bed, EGSB)是一种具有高水力负荷和高有机负荷的厌氧 生物反应器。EGSB 在处理高浓度有机废水和含毒 有机废水时具有良好的处理能力<sup>[4]</sup>。但 EGSB 在有 效脱碳后,无法高效脱氮除磷。而且,酿酒废水较低 的 pH 易使 EGSB 发生酸化现象,降低污染物去除效 能。因此,还需增设后续工艺,继续降解酿酒废水中 氮、磷等物质浓度。BioDopp 工艺近年来在一些工 程项目上得到有效应用,相较于传统的活性污泥法, BioDopp 的高生物量、高内回流比、低能耗和同步硝 化反硝化特点,使其具有高效脱氮能力<sup>[5]</sup>。因此,将 BioDopp 工艺作为 EGSB 后端生化处理工艺,解决 EGSB 脱氮除磷不达标的问题,同时,利用 EGSB 和 BioDopp 工艺节能的特点,降低污水厂整体运行成本。

### 1 工程概况

本项目处理废水来自西南地区某白酒加工厂, 生产浓香型优质白酒,废水规模为1500 m<sup>3</sup>/d。该 厂区废水主要来源于白酒加工生产废水,该废水 BOD<sub>5</sub>/COD<sub>cr</sub>>0.45,可生化性好,适用于生化法进行 处理。但该水 pH 较低,进水 SS 较高,需对该废水 进行预处理,提升生化池进水 pH 和降低进水 SS。 该废水的进水温度在 20~30 ℃,进水 COD<sub>cr</sub>/TN> 15,BOD<sub>5</sub>/TN>10,属于高 C/N 废水。这说明污水中 碳源充足,生化处理无需投加碳源。因此,本项目设 计进出水水质如表1所示。出水指标要求优于《城 镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 中一级 A 标准。

表 1 设计进出水水质 Tab.1 Designed Influent and Effluent Quality

项目	$COD_{Cr}/(mg \cdot L^{-1})$	$BOD_5/(mg \cdot L^{-1})$	氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	$TN/(mg \cdot L^{-1})$	$TP/(mg \cdot L^{-1})$	$SS/(mg \cdot L^{-1})$	pH 值
进水水质	50 000	30 000	1 000	3 000	800	4 000	3~4
出水水质	40	6	≤5	≤15	≤0.4	≤10	6~9

## 2 工程设计参数

# 2.1 工艺特点

BioDopp 工艺采用的新型微孔曝气管壁厚度在 0.3~0.4 mm,出气阻力损失低于1800 Pa。采用新型 微孔曝气管降低气通量[≤1.0 m³/(m·h)便可正常 曝气],同时采用高密度均匀布置与特殊打孔技术,使 得曝气过程中产出的气泡更加均匀,气泡直径约为 0.8 mm。由于气泡直径更小,其在生化池内上升速 率更慢,与活性污泥有更大接触面积,有效提升氧气 利用率。采用密集平铺的安装方式有效避免了曝气 盲区,使生物池内活性污泥充分与氧气接触。因此, BioDopp 工艺既可以保持低曝气量,又能保证生化池 内具有良好的脱氮除磷效果[6-7]。此外,研究[8-9]表 明,相比常规的 AAO 等传统活性污泥工艺, BioDopp 的工艺的优点在于:1)可提高位于生物处理池中微生 物的浓度[污泥质量浓度(MLSS)可超过8g/L],污 泥龄可达传统工艺的1.5倍以上;2)生物反应器中的 溶解氧(DO)质量浓度仅为 0.1~0.3 mg/L,可同时进 行脱碳与硝化反硝化反应,具有较好的脱氮除磷效 果;3)可节省占地面积 30%~50%、节省电耗 44.7% 以上。BioDopp 工艺特点如图 1 所示。

EGSB反应器在结构及运行特点上集升流式厌 氧污泥床(UASB)和厌氧流化床(AFB)的特点于一 体,具有大颗粒污泥、高水力负荷、高有机负荷等明 显优势,该工艺还具备区别于 UASB 和 AFB 的特 点:1)与 UASB 反应器相比,EGSB 反应器高径比 大,液体上升流速(4~10 m/h)和 COD<sub>cr</sub> 有机负荷 [40 kg/(m<sup>3</sup>·d)]更高;2)污泥在反应器内呈膨胀流 化状态,污泥活性高、沉淀性能良好;3)具有较高的 液体上升流速和气体搅动,内循环的形成使得反应 器污泥膨胀床区的实际水量远大于进水量,循环回 流水稀释了进水,大大提高了反应器的抗冲击负荷 能力和缓冲 pH 变化能力<sup>[10]</sup>。

## 2.2 工艺流程

来水经细格栅去除漂浮物后进入调节池调节 pH并调质调量,水质超标或其他特殊工况的污水进



图 1 BioDopp 工艺特点 Fig. 1 Characteristics of BioDopp Process

入事故池,然后通过提升泵的工作运输小流量的废 水进入调节池调节;随后,提升泵将污水提升至混凝 沉淀池,去除大部分 TP 及 SS:污水由混凝沉淀池进 入 EGSB 反应罐,去除大部分有机物,EGSB 出水自 流进入一级 BioDopp 生化池, 污水与高回流比的混 合液迅速混合均匀后,进入缺氧区,利用废水中的碳 源进行反硝化,后进入兼氧区,完成对 COD<sub>c</sub>、氨氮、 TN 等污染物的降解。一级生化出水自流进入高效 沉淀池,进一步去除 TP 及 SS,出水再自流进入臭氧 接触池,完成对难降解有机物的去除,改善 BOD,/ COD<sub>cr</sub>。二级生化采用两段式生化脱氮工艺,一段 缺氧区通过原水引入补充碳源的方式进行初步脱 氮,最后在二段缺氧区配合投加外来碳源的方式完 成深度脱氮,随后进入二段好氧区防止碳源穿透导 致 CODc. 超标,之后污水进入泥水分离区,在泥水 分离区活性污泥被截留。生化池出水进入中间水 池,通过水泵提升至砂滤罐,去除水中残留的悬浮物 并最终达标排放。工艺流程如图2所示。

### 2.3 主体工艺设计参数

设置 EGSB 系统一套。中和罐一套,直径为 5 m,总高为 22.1 m,有效容积为 404 m<sup>3</sup>;EGSB 罐一套,直径为 16.2 m,总高为 22.1 m,有效容积为 4 250 m<sup>3</sup>;污泥储罐 1 套,直径为 12 m,总高为 13.8 m,有效容积为 1 400 m<sup>3</sup>,上升速度为 5 m/h;分离器 采用分步式三相分离器,气体释放区的面积约占整 个池面积的 1/8,导流区的面积大约占整个池面积的 1/8,相比 UASB 两侧溢流堰槽设有挡板,COD<sub>cr</sub>容积负荷为 17.65 kg COD<sub>cr</sub>/(m<sup>3</sup>·d);布水器为可拆卸式,采用旋混布水方式,回流比为 200%,MLSS 为 13 g/L。

一级 BioDopp 生化池 2 座, 合建式。单座缺氧区



#### Fig. 2 Process Flow

有效长度为 13.6 m,有效宽度为 6 m,有效水深为 6 m, 总高为 6.5 m, TN 容积负荷 0.61 kg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/(m<sup>3</sup>·d);单 座兼氧区有效长度为 48 m,有效宽度为 19.6 m,有效 水深为 6 m,总高为 6.5 m, TN 容积负荷为 0.28 kg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>N/(m<sup>3</sup>·d);单座沉淀区区有效长度为 6 m,有效 宽度为 6 m,有效水深为 5.8 m,表面负荷为 0.87 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),污泥回流比为 100%,硝化液回流比为 3 300%,反应池中的 DO 质量浓度控制在 0.8 mg/L 以下,通过精确曝气及智能抗冲击系统(SAS)控制供 风量来对其进行控制,MLSS 控制在 6~8 g/L。

二级 BioDopp 生化池 2 座, 合建式。单座预缺

氧区有效长度为 6.3 m,有效宽度为 2 m,有效水深 为6m,水力停留时间为2.39h;单座前置缺氧区有 效长度为12.4m,有效宽度为6.3m,有效水深为6 m,水力停留时间为 14.28 h, TN 容积负荷为 0.17 kg NO<sub>3</sub>-N/(m<sup>3</sup>·d);单座前置好氧区有效长度为 14.8 m,有效宽度为4 m,有效水深为6 m,水力停留 时间为 11.22 h, COD<sub>cr</sub> 容积负荷 0.66 kg COD<sub>cr</sub>/ (m<sup>3</sup>·d), 氨氮容积负荷 0.13 kg 氨氮/(m<sup>3</sup>·d); 单座 后置缺氧区有效长度为 21.2 m,有效宽度为 6.7 m, 有效水深为6m,水力停留时间为28.43h,TN 容积 负荷为 0.19 kg NO3-N/(m3·d);单座后置好氧区有 效长度为6m,有效宽度为4m,有效水深为6m,水 力停留时间为 4.55 h;单座沉淀区区有效长度为 6.3 m,有效宽度为6 m,有效水深为5.8 m,表面负 荷为 0.87 m³/(m²·h),污泥回流比为 100%,硝化液 回流比为1500%,反应池中的 DO 质量浓度控制在 0.8 mg/L以下,通过 SAS 系统控制供风量的大小 来对其进行控制, MLSS 控制在 6~8 g/L。

高效沉淀池 2 座, 合建式。单座混合区有效长 度为 1 m,有效宽度为 1 m,有效水深为 3 m, 总高为 3.5 m,水力停留时间为 5.7 min; 单座絮凝区单座有 效长度为 2.5 m,有效宽度为 2.5 m,有效水深为 3 m,总高为 3.5 m,水力停留时间为 36 min; 单座斜 管沉淀区,有效长度为 2.5 m,有效宽度为 2.5 m,有 效水深为 5 m, 总高为 5.5 m, 斜管上升流速为 6.8 m/h,表面负荷为 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)。

臭氧接触氧化池 1 座。臭氧接触氧化槽 3 格,单 格有效长度为 3 m,有效宽度为 2 m,有效水深为 5 m, 总高为 5.5 m,总水力停留时间为 1.44 h;稳定吹脱槽 1 格,单格有效长度为 8.5 m,有效宽度为 3 m,有效 水深为 5 m,总高为 5.5 m,水力停留时间为 2 h。

混凝沉淀池 2 座, 合建式。混合区 1 座, 有效长 度为 1 m, 有效宽度为 1 m, 有效水深为 2.5 m, 总高 为 3 m, 水力停留时间为 4.8 min; 絮凝区 3 座合建, 单座有效长度为 1 m, 有效宽度为 1 m, 有效水深为 2.5 m, 总高为 3 m, 水力停留时间为 14.4 min; 沉淀 区 1 座, 有效长度为 17 m, 有效宽度为 4 m, 有效水 深为 3 m, 总高为 3.5 m(不含泥斗), 水平流速为 4 mm/s, 水平流速为 1.4 mm/s, 沉淀时间为 3.3 h。

连续砂滤池。砂滤数量为2套,单套有效直径 为2.26m,总高为5.98m,滤速为7.8m/h;中间水 池1座,有效长度为4m,有效宽度为4m,有效水深 为5m,水力停留时间为1.28h。

## 3 工艺启动

## 3.1 ESGB 启动

ESGB 启动时,从原厌氧塔中取接种污泥,经核 算 ESGB 启动时污泥接种量为 13 kg VSS/m<sup>3</sup>。从事 故池中引高浓度废水至调节池,同时在调节池中进 行稀释,调节进水 COD<sub>cr</sub> 质量浓度在 9 000 mg/L 左 右,进水量为 1 500 m<sup>3</sup>/d,相应启动负荷约 3.0 kg COD<sub>cr</sub>/(m<sup>3</sup>·d)。酿酒废水呈酸性,在调节池加入碱 液调节 pH 值在 6.5~7.5。

根据挥发性脂肪酸(VFA)积累的浓度,判断反 应器内产甲烷菌能否及时代谢中间产物VFA,研 究<sup>[11]</sup>表明厌氧反应器稳定运行时VFA质量浓度在 300 mg/L以内。碱度(ALK)是厌氧系统内的缓冲 物质,保持反应器内pH相对稳定,ALK含量充足说 明反应器有足够的缓冲能力。通过检测ESGB对 COD<sub>cr</sub>的去除率,从而判断容积负荷提高的时机,当 COD<sub>cr</sub> 去除率大于 70%且保持一段时间的上升时, 提高酿酒废水的比例,增大容积负荷,并检测VFA 以及 ALK 的浓度判断 EGSB 系统的稳定运行情况, 每次容积负荷提升 50%。其检测结果如图 3 所示。

启动刚开始时装置内 VFA 处于一个较高水平, 是由于装置启动初期, ESGB 反应罐内产甲烷菌活 性不高,不能实现对容器内 VFA 及时转化,造成 VFA 的积累。但随着反应器运行,内部产甲烷菌的 活性逐渐提高,从而加快对 VFA 的代谢。由图 3 (a)可知, ESGB 从启动至实现满负荷运行耗时 49 d,且满负荷运行时 COD<sub>cr</sub> 的去除率均在 90%,最高 能达到 98%。并且由图 3(b)可知,在第 22 d 后 VFA 下降基本稳定,其质量浓度保持在 250 mg/L 左右,同时反应器内 ALK 浓度较高,说明 ESBG 能 实现对酿酒废水的稳定处理。

#### 3.2 BioDopp 生化池启动

BioDopp 生化池的调试在 ESGB 启动完成后进 行,采用接种驯化法。将 EGSB 反应罐处理后的出 水导入生化池内进行连续培养,监控 DO 质量浓度, 使其维持在 0.4~0.8 mg/L,开始第一周内,暂不进 行污泥、硝化液回流以及排泥过程。第 8 d 开始,监 控 MLSS,此时生化池内的悬浮固体质量浓度 (MLVSS)约为 7 000 mg/L,开启污泥及硝化液回 流,按照设计控制回流比。连续运行 1 个月后,两个

— 113 —

秦 天,袁 哲. EGSB+两级 BioDopp 工艺在酿酒废水处理中的应用



**图 3** (a) COD<sub>Cr</sub> 去除率、COD<sub>Cr</sub> 容积负荷以及温度的变化; (b) VFA、ALK 以及 COD<sub>Cr</sub> 容积负荷的浓度变化 Fig. 3 (a) Changes of COD<sub>Cr</sub> Removal Rate, COD<sub>Cr</sub> Volume Load and Temperature; (b) Concentration

Changes of VFA, ALK and  $\ensuremath{\mathrm{COD}_{\ensuremath{\mathsf{Cr}}\xspace}}$  Volume Load

BioDopp 生化池内处理效果基本稳定,COD<sub>cr</sub> 的去除 率在 80%以上,氨氮及 TN 的去除率在 85%左右,TP 的去除率稳定在 50%~60%。

4 工艺运行及处理效果分析

4.1 处理效果分析

该工艺建成后,经过调试运行一段时间后,开始

正式运行。表2为EGSB段实际进出水水质。

EGSB 能够有效降低酿酒废水中 COD<sub>cr</sub>、氨氮、 TN 和 TP,且出水稳定。EGSB 处理后的酿酒废水可 有效降低后续一级和二级 BioDopp 有机负荷,保障 后续处理工艺出水稳定。

如图 4 所示,为该水厂正式运行期间一级和二

	表2 EGSB 实际进出水水质	
Tab. 2	Actual Water Quality of EGSB Influent and Effluent	

				<b>C</b> 2				
月份	进水 COD <sub>Cr</sub> / (mg·L <sup>-1</sup> )	进水氨氮/ (mg·L <sup>-1</sup> )	进水 TN/ (mg·L <sup>-1</sup> )	进水 TP/ (mg·L <sup>-1</sup> )	出水 COD <sub>Cr</sub> / (mg·L <sup>-1</sup> )	出水氨氮/ (mg·L <sup>-1</sup> )	出水 TN/ (mg·L <sup>-1</sup> )	出水 TP/ (mg·L <sup>-1</sup> )
1月	49 000	1000	3 000	857	580	53. 5	296. 1	28.3
2 月	51 000	1 100	3 100	811	500	50. 1	329.5	28.2
3 月	48 000	1 200	3 100	742	480	51.0	324.9	26.1
4 月	51 000	1 100	2 800	834	510	51.4	296. 8	29.0
5 月	48 000	900	3 000	765	497	56.5	325.0	26.3
6月	49 000	900	3 000	765	520	51.5	292. 5	30.0
7 月	48 000	1 000	3 100	788	510	55.3	312. 2	25.9
8月	51 000	1 000	2 800	742	543	51.9	318.6	26.3
9月	52 000	1 200	3 200	742	522	52.7	300. 3	25.5
10 月	49 000	1 000	3 200	857	497	59.4	301.5	28.0

级 BioDopp 生化池 COD<sub>cr</sub>、氨氮、TN 和 TP 的去除率 箱线图。

由图 4 可知,酿酒废水经过 ESGB 进行处理后, 一级 BioDopp 生化池对废水中 COD<sub>G</sub>、TN、氨氮、TP 污染物的平均去除率分别为 93.52%、83.53%、 88.95%、54.97%,二级 BioDopp 生化池去除率为 84.83%、91.56%、89.86%、59.58%。二者去除效果 较好,去除率变化幅度不超过 10%,说明其对污染 物的去除较为稳定,在处理高有机负荷时,ESGB 能 够为后续工艺的实现稳定处理提供良好的保证。

当该工艺稳定运行后,对经过 ESGB 处理后废 水的污染物浓度变化进行检测,结果如图 5 所示,其 中 A、B、C、D、E 分别代表一级 BioDopp 生化池、高 效沉淀池、臭氧接触池、二级 BioDopp 生化池、连续 砂滤池。

一级 BioDopp 生化池进水 COD<sub>cr</sub> 平均质量浓 度为 503.2 mg/L,进水水质平稳,波动较小,出水 COD<sub>cr</sub> 均值为 33.5 mg/L,去除率均值为 93.5%;进



图 4 (a) 一级 BioDopp 生化池与(b) 二级 BioDopp 生化池污染物去除率

Fig. 4 Pollutant Removal Rate of (a) Primary BioDopp Biochemical Tank and (b) Secondary BioDopp Biochemical Tank



图 5 污染物浓度变化 Fig. 5 Change of Pollutant Concentration

水氨氮均值为 45.9 mg/L, 出水氨氮均值为 5.0 mg/L, 氨氮平均去除率为 88.9%; 进水 TN 均值为 291.8 mg/L, 出水 TN 均值为 48.1 mg/L, 平均去除 率为 83.5%; 进水 TP 均值为 28.7 mg/L, 出水 TP 均值为 12.9 mg/L, 平均去除率为 55.0%。虽然酿酒 废水经过 EGSB 和一级 BioDopp 处理后, 酿酒废水 中的 COD<sub>Cr</sub>、氨氮、TN 和 TP 得到了有效降解, 但 TN 和 TP 出水指标仍不满足一级 A 标要求, 因此, 将一 级 BioDopp 生化池出水接入二级 BioDopp 生化池, 对 TN 和 TP 进行深度去除。

废水后续经过高效沉淀池处理,处理后出水 COD<sub>Cr</sub>、氨氮、TN、TP 质量浓度分别为 26.8、4.85、 47.9、0.43 mg/L,其中 COD<sub>Cr</sub> 和 TP 的去除率分别 达到 20.0%和 96.7%,但氨氮以及 TN 的浓度变化 极小,高效沉淀池能有效去除污水中的磷,并且能在 一定程度上去除废水中的 COD<sub>Cr</sub>。臭氧接触池中 COD<sub>Cr</sub> 质量浓度为 23.5 mg/L,去除率为 12.5%,其 他指标基本未发生改变。

二级 BioDopp 生化池按进水:原水体积比为 250:1补充碳源,添加的原水量约为6000 m<sup>3</sup>/d,因此,二级 BioDopp 生化池进水 COD<sub>Cr</sub>、氨氮、TN和TP 均值分别为256.3、27.9、135.9 mg/L和0.76 mg/L, 出水均值分别为37.8、2.9、11.3 mg/L和0.30 mg/L。二级 BioDopp 污染物平均去除率分别为 84.8%(COD<sub>Cr</sub>)、89.9%(氨氮)、91.6%(TN)和59.6%(TP)。综上,通过 EGSB+两级 BioDopp 处理 后,酿酒废水中污染物得到有效降解。

最终从连续沉砂池排放的出水 COD<sub>cr</sub>、氨氮、 TN、TP 质量浓度分别为 37.2、2.8、10.5、0.28 mg/L,出水指标满足一级 A 标准。

通过运行数据可知,采用 EGSB+两级 BioDopp 工艺可有效去除酿酒废水产生的污染物,使其出水 指标满足一级 A 标准。并且本工艺利用原水特性, 将原水作为补充碳源添加进二级 BioDopp 生化池 内,有效提升生化池内 C/N,增加处理效能的同时 减少外加碳源的成本。

## 4.2 污泥特性分析

4.2.1 ESGB 内污泥

ESBG 反应罐启动前后,其不同高度的平均粒 径变化如图 6 所示

根据对粒径的测量发现,随着反应器的运行,反 应罐的颗粒污泥的粒径不断增大,反应器启动后底 部污泥的平均粒径为3.3 mm,但数量较少。而中部

— 115 —



Different Height

的平均粒径为 1.7 mm, 且该部分的污泥量较多, 在 整体中占比较大。粒径较小的颗粒集中在中上部, 其原因是反应器内进行厌氧产气带动污泥不断上升 循环,较小的颗粒随水流和气体的流动移动到上层, 而较大的颗粒则沉积在底部, 从而导致底部粒径偏 大。而反应器启动运行 1 个月后, 粒径有所增加, 但 速度缓慢。

## 4.2.2 BioDopp 生化池内污泥

BioDopp 生化池内的 DO 质量浓度始终保持在 0.8 mg/L 以下,且处于接近完全混合流态在该状态 下,丝状菌特色的形态学结构,其更容易捕获水体中 的氧气而处于优势状态,因此,容易发生污泥膨胀。 为防止泥水流失以及实现系统内产生较高的污泥 量,需要保证污泥具有良好的沉降性能,其运行过程 中的污泥量及沉降性能如图 7 所示。





由图 7 可知,随着生化池内污泥的沉降性能在 不断地提升,运行一个月后其污泥体积指数(SVI) 由生化池稳定运行初期的 20.0 mL/g 下降到 12.2 mL/g,并且在该过程中,生化池的 MLSS 有所增加, 从 6 380 mg/L 增加到约 7 000 mg/L。

BioDopp 生化池内的污泥未发生恶性膨胀的原因是在系统前端设置了厌氧区,在运行过程中其具有如生物选择器的作用,在厌氧区中,聚磷菌以及絮状菌更容易吸收水溶性物质,能够在细胞中贮存一定底物。研究<sup>[12]</sup>表明,在底物丰富的状态下非丝状菌微生物具有更强的贮存底物能力。因此,在该条件下未出现丝状菌引起污泥沉降性能恶化的现象, BioDopp 生化池能稳定运行。

# 4.3 经济性分析

本工程建设项目总投资为 570.14 万元,其中: 工程费为 472.34 万元,工程建设其他费为 55.57 万 元,基本预备费为 42.23 万元。本工艺运行费用如 表 3 所示,并与某使用 UASB+AAO 工艺处理酿酒废 水的污水处理站进行对比<sup>[13]</sup>。

表 3	运行	了费用	

	Tab. 3	<b>Operation Cost</b>	
名称	总费用/ (元·d <sup>-1</sup> )	吨水处理费用/ [元・(m <sup>3</sup> ・d) <sup>-1</sup> ]	对比费用/ [元・(m <sup>3</sup> ・d) <sup>-1</sup> ]
电费	1 680	1.12	4.16
药剂费	960	0.64	4. 67
阳离子聚丙烯 酰胺(PAM)	159.0	-	-
阴离子 PAM	105.1	-	-
混凝剂	695.9	-	-
碳源(乙酸钠)	0	-	-

由表3可知,ECSB+两级BioDopp工艺吨水处 理成本约为1.76元/(m<sup>3</sup>·d),相比目前熟悉的 UASB+AAO工艺的运行费用,改造后的工艺的运行 费用仅仅是UASB+AAO工艺的1/5。此外,桂林湘 山酒业有限公司酿酒废水采用"中和混凝沉淀-内 循环(IC)厌氧反应器-接触氧化-曝气生物滤池"工 艺,其运营成本为2.07元/(m<sup>3</sup>·d)<sup>[14]</sup>;某酒精厂玉 米酿酒废水采用"UASB+SBR"工艺,其运营成本为 2.96元/(m<sup>3</sup>·d)<sup>[15]</sup>。可见,EGSB+两级BioDopp工 艺在处理能耗方面具有较高的经济性,导致该现象 的原因是BioDopp生化池内整体处于低氧环境,而 且BioDopp生化池内具有高效的曝气系统,相比于 传统曝气系统,其对氧的利用率提高 40%以上,极 大地降低了工艺运行过程中在曝气方面的电耗,同 时其具备较大的硝化液回流比,硝化速率更快。这 些因素综合导致 EGSB+两级 BioDopp 工艺在运行 能耗方面上优于其他工艺,此外二级 BioDopp 生化 池利用原水补充 COD<sub>cr</sub> 供给微生物消耗,几乎不需 要外加碳源,极大地降低了运行过程中的药剂费。 综上,采用 ESGB+两级 BioDopp 工艺处理酿酒废水 时可以达到低成本、高处理率的效果,具有较高的经 济性。

## 5 总结

(1)该工艺能在 3 个月内成功启动,通过利用 EGSB 能实现对含有一定毒性的酿酒废水的初步稳 定处理,保证了后续深度处理的有效进行,整体工艺 能有效处理高 COD<sub>cr</sub> 酿酒废水,出水指标可满足一 级 A 标限值。

(2) ESBG 反应罐内微生物特殊的形态结构,不 仅有利于营养物质的传递运输,而且产生的气体也 可以方便排出颗粒污泥内部,更好地带动传质作用 的实现。BioDopp 生化池系统前端设置厌氧区保证 了污泥的沉降性能稳定。

(3)根据原水高 C/N 特性,利用原水作为补充 碳源投加进二级 BioDopp 生化池可有效提升二级生 化池内 C/N,增加二级生化池 TN 和 TP 去除效能的 同时减少外投碳源成本。

(4)采用 EGSB+两级 BioDopp 工艺吨水处理成 本约为 1.76 元/(m<sup>3</sup>·d),处理效果较好,运营成本 较低。

#### 参考文献

- PETTA L, GISI S D, CASELLA P, et al. Evaluation of the treatability of a winery distillery (vinasse) wastewater by UASB, anoxic-aerobic UF-MBR and chemical precipitation/adsorption
   J. Journal of Environmental Management, 2017, 201: 177-189. DOI; 10.1016/j.jenvman. 2017. 06. 042.
- [2] IOANNOU L A, FATTA-KASSINOS D. Solar photo-Fenton oxidation against the bioresistant fractions of winery wastewater
   [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2013, 1 (4): 703-712.
- [3] YUSUF Y. EC and EF processes for the treatment of alcohol distillery wastewater [J]. Separation and Purification Technology, 2006, 53(1): 135-140.
- [4] XUE Y, MA H Y, HU Y S, et al. Microstructure and granulation cycle mechanisms of anammox-HAP coupled granule

in the anammox EGSB reactor[J]. Water Research, 2022, 210: 117968. DOI: 10.1016/J. WATRES. 2021. 117968.

 [5] 胡秀云,陈威,王家乐,等. BDP 工艺应用于华中某污水厂 体表改造工程中试实验[J].水处理技术,2021,47(2): 87-89.

HU X Y, CHEN W, WANG J L, et al. Pilot-scale study on a wastewater treatment plant in central China using BDP process [J]. Water Treatment Technology, 2021, 47(2): 87-89.

- [6] 刘月,徐旭,贾蒙蒙,等. BioDopp 工艺在乡镇污水处理厂的应用实例[J]. 工业用水与废水, 2021, 52(3):77-80.
  LIU Y, XU X, JIA M M, et al. An application example of BioDopp process in township wastewater treatment plant [J]. Industrial Water and Wastewater, 2021, 52(3):77-80.
- [7] 刘平波,张俊,王家乐,等. BioDopp 工艺应用于污水厂提标 改造工程实例探讨[J]. 工业水处理,2022,42(1):163-166.

LIU P B, ZHANG J, WANG J L, et al. Case analysis on the application of BioDopp technology in upgrading of sewage treatment [J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(1): 163-166.

- [8] 胡秀云. BioDopp 工艺在城镇污水处理厂中的应用研究[D]. 武汉:武汉科技大学, 2020.
   HU X Y. Application of BioDopp process in urban sewage treatment plant[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2020.
- [9] 潘建通,余诚,王凯军,等. BioDopp 中试系统强化脱氮除磷
   及微生物菌群分析[J].中国环境科学,2022,42(12):
   5633-5642.

PAN J T, YU C, WANG K J, et al. Enhanced nitrogen and phosphorus removal and microbial analysis of BioDopp process in pilot scale [J]. China Environmental Science, 2022, 42(12): 5633-5642.

- [10] 刘杰. EGSB-两级 A/O 生物膜工艺处理养猪废水效能及污泥特性研究[D]. 济南:山东建筑大学, 2022.
  LIU J. Study on the efficiency and sludge characteristics of swine wastewater treatment by EGSB-two-stage A/O biofilm process
  [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2022.
- [11] 吴正杰. 一种复合药剂对厌氧反应器启动及稳定运行的影响
  [D]. 扬州:扬州大学, 2021.
  WU Z J. The effect of a compound agent on the start-up and stable operation of anaerobic reactor[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021.
- [12] 彭赵旭,彭永臻,桂丽娟,等.低溶解氧丝状菌污泥微膨胀在 SBR 中的可行性[J].化工学报,2010,61(6):1534-1539.
  - PENG Z X, PENG Y Z, GUI L J, et al. Feasibility study on limited bulking of sludge containing filamentous bacteria with low dissolved oxygen in SBR [J]. CIESC Journal, 2010, 61(6): 1534-1539.

- [13] 陈亚豪. 文水股份有限公司酿酒废水处理系统改造研究
  [D]. 雅安:四川农业大学, 2015.
  CHEN Y H. A research on the reconstruction project of brewery wastewater treatment system in Wenshui Co., Ltd[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2015.
- [14] 苏先真. IC 厌氧反应器-接触氧化-曝气生物滤池处理酿酒 废水[J]. 广州化工, 2016, 44(1): 138-140, 168.
   SU X Z. The treatment of winery wastewater by IC anaerobic

#### (上接第32页)

- [40] DARABI H, KOLEINI S M J, DEGLON D, et al. Investigation of bubble-particle interactions in a mechanical flotation cell, part 1: Collision frequencies and efficiencies [J]. Minerals Engineering, 2019, 134: 54-64. DOI: 10.1016/j. mineng. 2019.01.012.
- [41] MOOSAI R, DAWE R A. Gas attachment of oil droplets for gas flotation for oily wastewater cleanup [ J ]. Separation & Purification Technology, 2003, 33(3): 303-314.
- [42] WANG C, LIU Y, XU L, et al. Rebound behaviors of hydrophilic particle on gas bubble: Effect of particle size and liquid properties [J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2021, 96(8): 2400-2413.
- [43] YAO N, LIU J, SUN X, et al. A rational interpretation of the role of turbulence in particle-bubble interactions [J]. Minerals, 2021, 11(9): 1006. DOI: 10.3390/min11091006.
- [44] CAI X, CHEN J, LIU M, et al. CFD simulation of oil-water separation characteristics in a compact flotation unit by population balance modeling [ J ]. Journal of Dispersion Science & Technology, 2016, 38(10): 1435-1447.
- [45] 陈家庆,刘涛,王春升,等.海上油气田采出水处理技术的现状与展望[J].石油机械,2021,49(7):66-76.
  CHEN J Q, LIU T, WANG C S, et al. Development status and prospect of produced water treatment technology for offshore oil & gas field[J]. China Petroleum Machinery, 2021,49(7):66-76.
- [46] 陈家庆,韩旭,梁存珍,等.海上油田含油污水旋流气浮一体化处理设备及其应用[J].环境工程学报,2012,6(1): 87-93.
  CHEN J Q, HAN X, LIANG C Z, et al. Compact flotation unit and its application in offshore produced water treatment [J].

Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(1): 87-93.

- [47] 张明, 王春升, 陈家庆, 等. 新型气浮旋流水处理装置海上 油田现场试验研究[J]. 中国造船, 2013, 54(s2): 431-435.
  ZHANG M, WANG C S, CHEN J Q, et al. Experiment study of compact flotation unit for treatment of offshore produced water
  [J]. Shipbuilding of China, 2013, 54(s2): 431-435.
- [48] FRANKIEWICZ T C, LEE C M. Vertical gas induced flotation cell: US7157007[P]. 2007-01-02.
- [49] ASDAHL S, JANSEN V R J, WAAG M E, et al. Cost-efficient

reactor-contact oxidation-biological aerated filter technology [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2016, 44(1): 138-140, 168.

[15] 王菁. UASB 处理高浓度酿酒废水工程实例及安全措施[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(s1): 53-57.
WANG J. Engineering examples and the safety measures of high concentration of brewery wastewater UASB processing [J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(s1): 53-57.

de-bottlenecking of produced water treatment systems through the application of a single technology, eliminating the need for hydrocyclones and degassing drums [C]. Abu Dhabi: Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, 2021. DOI: 10.2118/207795-MS.

- [50] 尚超,陈家庆,王春升,等. 离心气浮技术及在含油污水处 理中的应用[J]. 环境工程, 2011(s1): 32-40.
  SHANG C, CHEN J Q, WANG C S, et al. Research on the centrifugal flotation technique and its application in oily wastewater treatment [J]. Environmental Engineering, 2011 (s1): 32-40.
- [51] BHATNAGAR M, SVERDRUP C J. Advances in compact flotation units (CFUs) for produced water treatment[C]. Kuala Lumpur: Offshore Technology Conference-Asia, 2014. DOI:10. 4043/24679-MS.
- [52] 蔡小垒, 王春升, 陈家庆, 等. BIPTCFU-Ⅲ型旋流气浮一体 化采出水处理样机及其在秦皇岛 32-6 油田的试验分析[J]. 中国海上油气, 2014, 26(6): 80-85.
  CAI X L, WANG C S, CHEN J Q, et al. BIPTCFU-Ⅲ integrated cyclonic flotation prototype and its experimental study on the treatment of produced water from offshore QHD32-6 oilfield [J]. China Offshore Oil and Gas, 2014, 26(6): 80-85.
- [53] 丁国栋,陈家庆,蔡小垒,等. 立式气旋浮装置处理油田采 出水的现场实验与应用改进措施[J]. 石油学报(石油加 工),2022,38(6):1493-1505.
  DING G D, CHEN J Q, CAI X L, et al. Field experiment, application and improvement measures for vertical compact flotation unit for treating oilfield produced water [J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2022, 38(6): 1493-1505.
- [54] HAYATDAVOUDI A, HOWDESHELL M, GODEAUX E, et al. Performance analysis of a novel compact flotation unit [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2011, 133(1): 65-73.
- [55] 蒋孟生,胡孝峰. 国产紧凑型气浮装置在南海东部海域油田的应用[J]. 石油化工设备,2021,50(6):64-68.
  JIANG M S, HU X F. Application of domestic compact air flotation unit in the eastern South China Sea oil field [J]. Petro-Chemical Equipment, 2021, 50(6):64-68.

-118 -