



UASB 处理液晶面板显影液废水中试研究

肖 凡

(上海东振环保工程技术有限公司, 上海 201203)

[摘要] 液晶面板显影液废水的主要污染成分是四甲基氢氧化铵(TMAH),该有机物具有强碱性和神经毒性。采用升流式厌氧污泥床(UASB)对实际显影液废水进行中试处理,考察了不同处理负荷下的 TOC 处理效果以及有机氮的转化效率。结果表明,在进水 TMAH 质量浓度为 2 070~8 900 mg/L 时,经 UASB 处理后,出水 TMAH 质量浓度低于 0.5 mg/L,TOC 去除率保持在 96.4% 以上;UASB 不仅能有效去除显影液废水中的 TMAH,还可大幅降低出水有机物浓度;UASB 在高进水 TMAH 浓度工况下仍能长期稳定运行,得益于其高回流比对 TMAH 的不断稀释。稳定运行期间,UASB 可将 93%~97% 的有机氮转化为无机氨氮,大幅降低废显影液毒性,有利于后续处理工艺进一步脱氮。研究还发现,单位 TOC 沼气产率为 1.57~1.81 m³/kg,且沼气中 CH₄ 与 CO₂ 的体积比约为 3.26。本中试试验直接运行费用(电耗和药剂)为 13.22 元/m³,后续工程实践还可通过回用沼气进一步降低废水处理系统运行费用。

[关键词] 升流式厌氧污泥床;显影液废水;四甲基氢氧化铵

[中图分类号] X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2023)02-0148-06

Pilot scale study on the treatment of developer wastewater by UASB

XIAO Fan

(Shanghai Dongzhen Environment Protection Engineering & Technology Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract: Tetramethylammonium hydroxide (TMAH) is the major component of liquid crystal display developer wastewater, which is a corrosive alkaline and neuronal toxic organic compound. The up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) was applied to treat the developer wastewater in pilot scale. The TOC removal and nitrogen transformation effect were investigated under different influent loads. The results indicated that when the influent TMAH mass concentration was 2 070~8 900 mg/L, the effluent TMAH mass concentration was lower than 0.5 mg/L after UASB treatment, and the TOC removal rate remained above 96.4%. Thus, UASB could not only effectively remove TMAH from developer wastewater, but also greatly reduce the concentration of organic matter in effluent. UASB could still run stably for a long time under the condition of high influent TMAH concentration, due to the continuous dilution of TMAH by its high reflux ratio. During stable operating period, the UASB could convert 93%~97% of organic nitrogen into inorganic ammonia nitrogen, greatly reducing the toxicity of waste developer, which was conducive to further nitrogen removal in subsequent treatment process. It was also found that biogas production rate of per TOC reached 1.57~1.81 m³/kg, and the volume ratio of CH₄ and CO₂ was around 3.26. The direct operating cost including power consumption and reagent of this pilot test was 13.22 yuan/m³, and the subsequent engineering practice could further reduce the operating cost of the wastewater treatment system through the reuse of biogas.

Key words: UASB; developer wastewater; TMAH

液晶面板生产时光刻、显影、蚀刻等工艺需要使用显影液溶解去除玻璃基板上曝光区域的光刻胶。显影液的主要成分是四甲基氢氧化铵(TMAH),质量浓度高达 20 g/L 以上。TMAH 具有强碱性和腐蚀

性,且对人体和水生生物具有急性毒性^[1]。光电显示生产行业通常将废显影液作为危险废弃物委外处置,但费用高昂。近年来,随着光电显示行业的快速发展,废显影液产生量逐年增多,亟需探寻一种有效

且经济的处理方式。

有研究采用紫外活化过硫酸盐氧化^[2]、臭氧纳米气泡协同双氧水氧化^[3]、纳滤膜分离结合树脂吸附^[4]、膜蒸馏^[5]等方法对TMAH进行处理,但这些方法由于普遍存在能耗高、投资大、反应条件苛刻等问题,难以工业化应用。还有液晶面板工厂尝试将废显影液排至厂内废水站,与其他有机废水合并进行厌氧/好氧(A/O)生化处理,但运行过程中发现,TMAH会抑制好氧池硝化反应,导致出水NH₃-N与TN不达标。Yiju WU等^[6]研究发现,当好氧反应器中TMAH的质量浓度超过550 mg/L时,硝化反应即会延迟滞后,且滞后时间随TMAH浓度升高而延长。也有研究者指出TMAH能被厌氧微生物降解^[7],降解中间产物包括三甲胺、二甲胺和甲胺,最终产物是NH₄⁺、CH₄和CO₂。Juan Lü等^[8]采用序批式中温厌氧反应器分别处理TMAH质量浓度为1 000 mg/L的模拟废水和实际废水,TMAH均能在24 h内几乎被完全降解。

相比传统好氧生化工艺,厌氧生化工艺具有处理污染物浓度高、动力消耗少、可产生沼气能源等优点。升流式厌氧污泥床(UASB)是目前工程应用中较为常见的一种高效厌氧生物反应器,本试验采用UASB对实际显影液废水进行处理,考察反应器对

废水中TMAH的去除效果和反应产物生成情况,以期对显影液废水处理工程实践提供参考。

1 材料与方法

1.1 显影液废水

试验废水取自华中地区某液晶面板工厂废显影液储罐。首先对废液进行加酸调节pH和混凝沉淀处理,去除废液中的光刻胶;再将沉淀出水用工厂自来水稀释至一系列不同TMAH浓度(稀释比为2~45)的配水,作为UASB试验装置进水。废显影液和试验装置进水水质见表1。

表1 废显影液与UASB进水水质

项目	废显影液	试验进水
TMAH/(mg·L ⁻¹)	16 790~19 800	410~8 900
TOC/(mg·L ⁻¹)	8 500~10 200	216~4 695
TN/(mg·L ⁻¹)	2 609~3 026	63~1 340
NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)	—	—
pH	13.2~13.8	7.0~7.5

1.2 中试装置

中试装置包括原水箱、进水箱、厌氧进水泵、UASB反应器、内回流泵、水封柱、沼气流计、营养液储罐及投加泵等设备,工艺流程见图1。

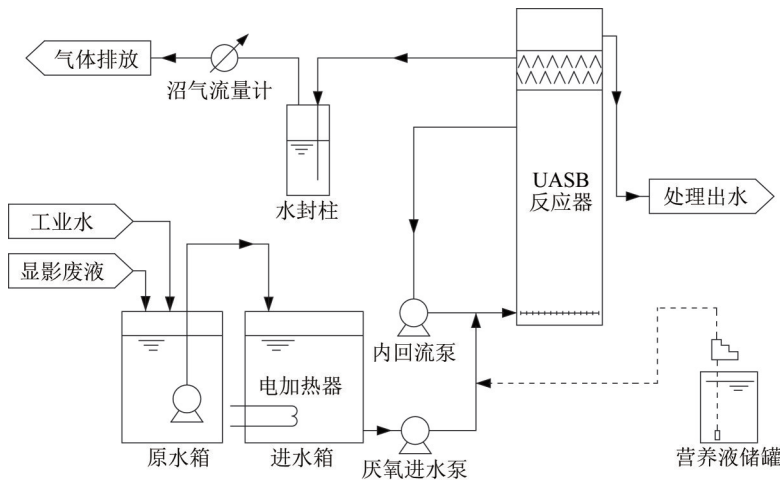


图1 中试装置流程

Fig. 1 Pilot scale reactor flow

试验装置24 h连续运行,原水箱容积为2 000 L,进水箱容积为400 L,进水箱内设有电加热器(3 kW)对废水进行加热,控制UASB反应器内温度为37~38 ℃。厌氧进水泵(BY100-3J,兰格蠕动泵)流量为10.4 L/h,内回流泵(BN1-6L,Seepex螺杆泵)流量为620 L/h。

UASB反应器尺寸为0.4 m×0.4 m×3 m,有效容积400 L,HRT为38.5 h,反应器底部设有穿孔管布水器,上部设有三相分离器和出水堰。UASB反应器和进水箱的材质均为不锈钢,外壁保温。反应器出水排至废水站地沟。厌氧过程产生的沼气经三相分离器分离后引入水

封柱,再经湿式流量计(LMF-1,北京金志叶仪器)计量后排放至室外大气。每升厌氧进水投加1 mL营养液,营养液配方为12 g/L KH_2PO_4 、0.5 g/L $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、0.6 g/L $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、0.7 g/L $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、0.2 g/L $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、1.2 g/L $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、0.2 g/L $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、2.4 g/L $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。

1.3 试验启动与负荷提升

试验接种污泥取自该工厂废水站生化污泥浓缩池。整个试验过程包括启动驯化期、负荷提升期与稳定运行期。

在启动驯化期,维持UASB进水中TMAH质量浓度为250~400 mg/L,并投加1 000~1 200 mg/L葡萄糖;反应器连续运行18 d后,观察到水封柱内有沼气泡冒出;继续运行15 d后,检测到反应器出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 明显升高,且出水 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})/\rho(\text{TN})$ 大于0.8,即认为反应器内污泥已完成厌氧产甲烷和降解TMAH的驯化。

在负荷提升期,按20%~30%幅度逐步提高UASB进水中TMAH浓度,同时逐步降低葡萄糖投加量,在进水TMAH质量浓度达到1 000 mg/L时停止投加葡萄糖。反应器在每个进水浓度工况下运行3~5 d,共计运行约60 d。定期检测反应器进出水TMAH、TOC、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、COD、pH等指标,每日记录沼气产量。当反应器出水 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})/\rho(\text{TN})$ 大于0.8后即进入下一个进水浓度提升工况。

当进水TMAH质量浓度达到8 900 mg/L后,UASB反应器进入稳定运行期,在此进水浓度下运行约45 d。期间反应器内污泥质量浓度为13 800~15 350 mg/L, SV_{30} 为76%~82%,污泥龄为52 d。

1.4 分析方法

$\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、COD、pH、MLSS等指标的分析按国家标准方法执行^[9]。TOC采用TOC测定仪(Multi N/C 3100, Jena Co., Germany)检测。TMAH浓度采用离子色谱法(ICS-1100, Thermo, USA)测定,色谱柱为CS12A,尺寸为 $D 4 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$,柱温 30°C ,淋洗液为甲磺酸(MSA, 20 mmol/L),流速为1 mL/min,进样器体积为25 μL ,配备电导检测器。中间产物三甲胺、二甲胺和甲胺的浓度采用气相色谱检测,色谱柱为CP-Volamine (CP7447, 30 m $\times$ 0.32 mm),进样口温度 250°C ;柱温先在 40°C 维持3 min,再以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率梯度升温到 280°C ;FID检测器温度为 300°C ,分流比为10:1;进样

体积为2 μL ,载气为氦气,流量为20 mL/min;燃气为氢气,流量为40 mL/min;助燃气为空气,流量为300 mL/min。

沼气中 CH_4 体积比和 H_2S 浓度采用气体检测仪(TY-6000, 武汉天禹)测定, CO_2 体积比采用红外线分析仪(JH-3010E, 青岛精诚)测定, NH_3 和CO浓度的检测分别参照《环境空气和废气氨的测定 纳氏试剂分光光度法》(HJ 533—2009)和《固定污染源废气 一氧化碳的测定 定电位电解法》(HJ 973—2018)执行。

2 结果与讨论

2.1 TMAH与TOC去除效果

负荷提升期间,UASB反应器部分运行工况的进出水TMAH和TOC浓度见表2。

表2 UASB进出水TMAH和TOC质量浓度

Table 2 TMAH and TOC mass concentration of UASB influent and effluent

工况	进水 TMAH/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	出水 TMAH/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	进水 TOC/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	出水 TOC/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
工况 1	2 070	0.416	1 046.2	37.2
工况 2	2 750	ND	1 408.3	48.1
工况 3	3 460	0.385	1 754.9	46.3
工况 4	4 320	0.392	2 256.1	44.7
工况 5	5 020	ND	2 538.7	85.8
工况 6	5 998	0.432	3 145.8	95.5
工况 7	6 409	ND	3 301.3	101.3
工况 8	8 900	0.478	4 380.8	102.4

注:ND—未检出。

由表2可见,在进水TMAH质量浓度为2 070~8 900 mg/L时,经厌氧生化反应后,显影液废水中的TMAH几乎被完全去除;在UASB进水TOC为1 046.2~4 380.8 mg/L时,出水TOC为37.2~102.4 mg/L,TOC去除率均高于96.4%,其中当进水TMAH质量浓度为8 900 mg/L时,TOC去除率可达97.7%。显影液废水经UASB处理后,不仅TMAH被有效去除,出水中有机物浓度也大幅降低。此外,在UASB反应器负荷提升期间,TOC处理负荷随进水TMAH浓度提升而逐渐升高(图2)。当反应器在进水TMAH质量浓度为8 900 mg/L的工况下稳定运行时,TOC处理负荷高达 $2.73 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。

T. H. HU等^[10]采用摇瓶试验考察了不同初始TMAH浓度对厌氧污泥降解活性的影响,结果表明,当初始TMAH质量浓度由1 500~3 000 mg/L升高至4 500 mg/L以上时,厌氧污泥对TMAH的降解速率

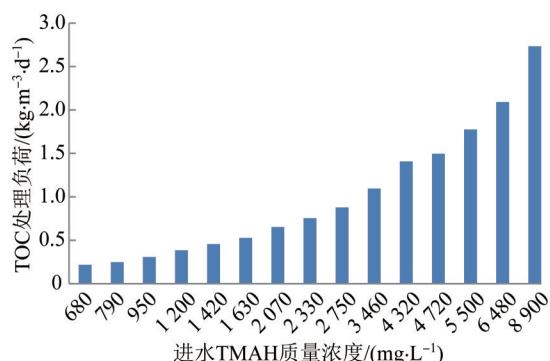


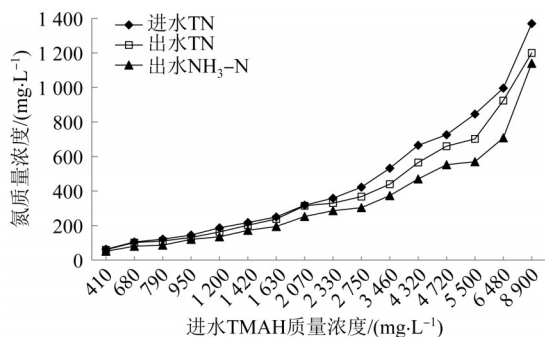
图2 负荷提升期间TOC处理负荷

Fig. 2 TOC loading rate during load increase period

由7.1~9.5 mg/(g·h)大幅降低至0.5 mg/(g·h)以下,即高浓度TMAH会对厌氧污泥降解活性产生抑制。而本试验中UASB反应器在进水TMAH质量浓度为8900 mg/L工况下仍能长期稳定运行,并未观察到厌氧污泥降解活性受到明显抑制,这可能与本试验采用的UASB反应器设计有内循环有关。通过在反应器污泥悬浮区和三相分离区之间设置循环管,将泥水混合液通过循环泵回流至底部进水区,可以解决传统UASB中污泥与废水混合不充分以及易受进水浓度冲击的问题。本试验中内回流流量与进水流量比为60:1,利用高比例回流液对反应器进水中高浓度TMAH不断进行稀释,可降低进水TMAH浓度对厌氧污泥的影响,增强反应器对废水水质变化以及毒性物质的适应能力,因此反应器可以承受较高的进水TMAH浓度。

2.2 进出水TN与NH₃-N变化

在UASB反应器负荷提升期间,进水TMAH质量浓度由410 mg/L逐步提升至8900 mg/L,各TMAH进水浓度工况下UASB进出水TN与出水NH₃-N浓度的变化见图3。

图3 负荷提升期间UASB进出水TN与出水NH₃-NFig. 3 TN and NH₃-N concentrations of UASB influent and effluent during load increase period

由图3可知,随着进水TMAH质量浓度逐渐提高,出水NH₃-N和TN质量浓度也相应升高,各工况下出水 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})/\rho(\text{TN})$ 均大于0.8,说明进水中超过80%的有机氮经过厌氧处理已经转化为NH₃-N。另外,UASB反应器在进水TMAH质量浓度为8900 mg/L工况下稳定运行时,出水NH₃-N质量浓度最高达到1260 mg/L, $\rho(\text{NH}_3\text{-N})/\rho(\text{TN})$ 最高为0.97(表3),表明UASB反应器在降解TMAH的同时,进水中的有机氮已经几乎全部经氨化反应转化为了NH₃-N。

表3 稳定运行期UASB进出水TN与NH₃-NTable 3 TN and NH₃-N concentrations of UASB influent and effluent during stable operation period

项目	进水	出水
TN/(mg·L ⁻¹)	1305~1370	1220~1280
NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)	—	1165~1260
$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/\rho(\text{TN})$	0	0.93~0.97

通过计算发现,各TMAH进水浓度工况下反应器对进水TN的去除率为4.5%~17.3%,TN可能是通过反应器中厌氧微生物生长增殖发生同化作用而被去除。尽管UASB工艺不能将废显影液中的TN有效去除,但能将TMAH中的有机氮大部分转化为无机态的氨氮,大幅降低废显影液的毒性,有利于后续处理工艺进一步脱氮。

2.3 进出水COD的变化

负荷提升期间,UASB反应器在部分TMAH进水浓度工况下的进出水COD如图4所示。

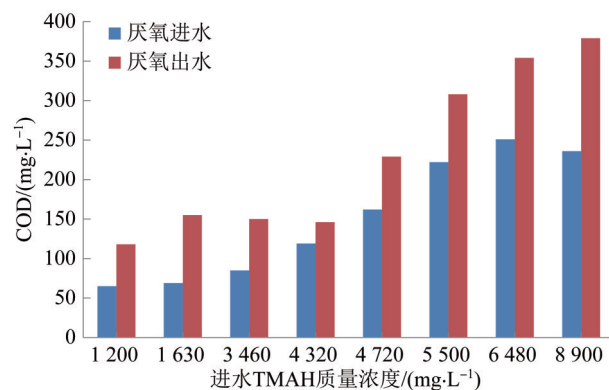


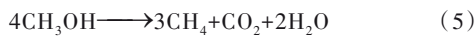
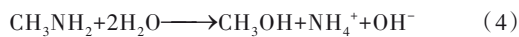
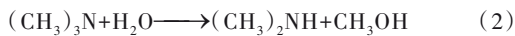
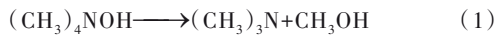
图4 负荷提升期间UASB进出水COD

Fig. 4 COD of UASB influent and effluent during load increase period

图4数据表明,在各TMAH进水浓度工况下,UASB出水COD均高于进水;且随着进水TMAH质量浓度逐渐提高,UASB出水COD也相应升高。在

进水 TMAH 质量浓度为 8 900 mg/L 的工况下, 进水 COD 为 236 mg/L, 出水 COD 为 379 mg/L。由于 TMAH 不能被 $K_2Cr_2O_7$ 氧化^[11], 进水中的 COD 不能反映废显影液中有机物的实际浓度, 因此测得的进水 COD 较低。

Bing LIU 等^[12]的研究表明, TMAH 厌氧降解菌可能为甲基营养型产甲烷菌, TMAH 厌氧脱甲基过程的中间产物为三甲胺、二甲胺、甲胺和甲醇, 最终产物是 NH_4^+ 、 CH_4 和 CO_2 , 具体降解机理见式(1)~式(5)。



试验过程中, 针对 UASB 负荷提升期不同运行工况下出水中三甲胺、二甲胺和甲胺的浓度进行了检测, 结果见表 4。各运行工况下出水中均含有一定浓度的三甲胺、二甲胺和甲胺, 这与 Juan LÜ 等^[8]的试验结果相同。UASB 出水中测得的 COD 主要由这 3 种中间产物构成。

表 4 UASB 出水三甲胺、二甲胺和甲胺质量浓度

Table 4 TMA, DMA and MMA mass concentrations of UASB effluent

工况	进水 TMAH/ (mg·L ⁻¹)	三甲胺/ (mg·L ⁻¹)	二甲胺/ (mg·L ⁻¹)	甲胺/ (mg·L ⁻¹)
工况 1	2 070	1.56	45.95	10.25
工况 2	2 750	2.52	38.62	12.77
工况 3	3 460	0.84	26.36	18.55
工况 4	4 320	3.05	33.57	15.48
工况 5	5 020	1.08	40.96	8.32
工况 6	5 998	2.38	37.84	8.12
工况 7	6 409	2.22	43.95	14.35
工况 8	8 900	1.05	50.24	12.76

2.4 沼气生成情况

负荷提升期间, UASB 反应器沼气产生量见图 5(a)。根据 UASB 进出水 TOC 浓度、废液日处理量以及沼气日产生量, 可计算各工况的沼气产率, 结果见图 5(b)。

如图 5(a)所示, UASB 反应器负荷提升期间, 沼气产生量随进水 TMAH 质量浓度提升而逐渐升高。当反应器在进水 TMAH 质量浓度为 8 900 mg/L 的工况下稳定运行时, 沼气产生量最高可达 1 860 L/d。图 5(b)数据表明, 当进水 TMAH 质量浓度为 680~1 200 mg/L 时, 单位 TOC 沼气产率为 1.23~1.37 m³/kg; 当进水 TMAH

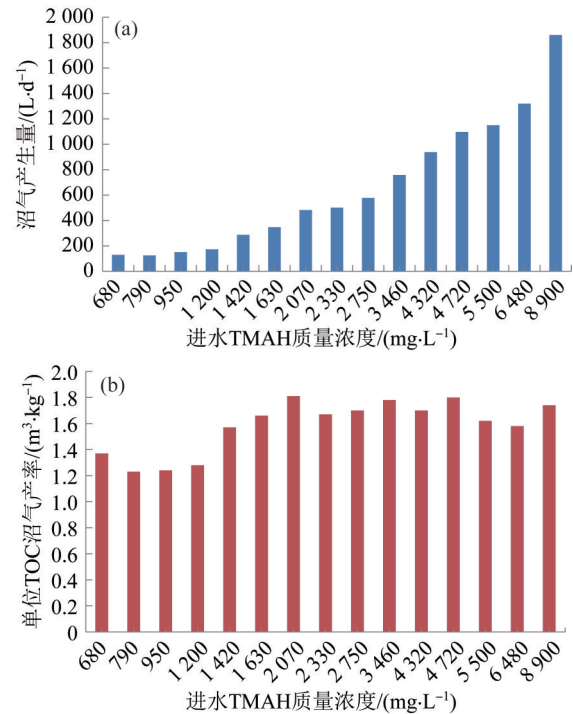


图 5 负荷提升期间 UASB 沼气产生量(a)及沼气产率(b)

Fig. 5 Biogas production (a) and biogas production rate (b) of UASB during load increase period

质量浓度提高至 1 420~8 900 mg/L 时, 单位 TOC 沼气产率升高至 1.57~1.81 m³/kg。根据式(1)~式(5)计算出的 TMAH 的单位 TOC 理论沼气产率为 1.87 m³/kg, 与试验中测得的结果较为接近。

在 UASB 反应器稳定运行期还对沼气成分进行了检测, 结果表明, TMAH 厌氧降解生成沼气的主要成分是 CH_4 和 CO_2 , 含有少量 NH_3 和极少量 H_2S 。沼气中含有 NH_3 可能是 TMAH 厌氧降解生成的部分 NH_4^+ 由液相迁移至气相所致。此外, 试验得出沼气中 CH_4 和 CO_2 的体积比为 3.26, 与式(5)的理论值 3 较为接近。

2.5 运行费用分析

中试试验过程中, UASB 反应器进水加热电耗为 16.83 kW·h/m³, 泵提升电耗为 5.29 kW·h/m³, 处理废水的电耗合计为 22.12 kW·h/m³, 工厂电价按 0.50 元/(kW·h) 计, 则废水处理电耗费用为 11.06 元/m³。另试验过程需消耗盐酸、氢氧化钠、营养液等药剂, 废水处理药剂费用为 2.16 元/m³。直接运行费用(电耗和药剂)为 13.22 元/m³。工程实践中可通过锅炉燃烧沼气回收热量, 补偿 UASB 反应器进水加热所需能耗, 从而降低废水处理系统运行费用。

3 结论

(1)采用UASB对液晶面板显影液废水进行中试处理研究,UASB能有效去除显影液废水中的TMAH,并将废水中的有机氮大部分转化为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 。在进水TMAH质量浓度为8 900 mg/L、TOC为4 380.8 mg/L、TN为1 370 mg/L时,出水TMAH质量浓度低于0.5 mg/L,TOC去除率高达97.7%,出水中TN转化为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的质量分数约为93%~97%。

(2)液晶面板显影液废水厌氧降解的沼气产率为1.57~1.81 m^3/kg ,沼气的主要成分是 CH_4 和 CO_2 ,两者体积比为3.26。

(3)液晶面板显影液废水经UASB处理后,出水中仍含有大量 $\text{NH}_3\text{-N}$,可采用生物脱氮或氨吹脱等工艺进一步处理去除。

参考文献

- [1] MORI I C, ARIAS-BARREIRO C R, KOUTSAFTIS A, et al. Toxicity of tetramethylammonium hydroxide to aquatic organisms and its synergistic action with potassium iodide[J]. Chemosphere, 2015, 120: 299-304.
- [2] WANG Chiwei, LIANG Chenju. Oxidative degradation of TMAH solution with UV persulfate activation[J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 254: 472-478.
- [3] KIM T K, KIM T, LEE I, et al. Removal of tetramethylammonium hydroxide (TMAH) in semiconductor wastewater using the nano-ozone H_2O_2 process[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 409: 123759.
- [4] GOVARDHAN B, FATIMA S, KALYANI S, et al. An integrated approach of membrane and resin for processing highly toxic and corrosive tetramethylammonium hydroxide alkali to ultrahigh purity[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(5): 106125.
- [5] NOOR I E, COENEN J, MARTIN A, et al. Experimental investigation and techno-economic analysis of tetramethylammonium hydroxide removal from wastewater in nano-electronics manufacturing via membrane distillation[J]. Journal of Membrane Science, 2019, 579: 283-293.
- [6] WU Yiju, IRMAYANI L, SETIYAWAN A A, et al. Aerobic degradation of high tetramethylammonium hydroxide(TMAH) and its impacts on nitrification and microbial community[J]. Chemosphere, 2020, 258: 127146.
- [7] HU T H, WHANG L M, HUANG Chiyu. Methanogenic degradation of tetramethylammonium hydroxide by methanomethylovorans and methanosarcina[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 357: 180-186.
- [8] LÜ Juan, WANG Yan, FU Mengya, et al. Removal of tetramethylammonium hydroxide (TMAH) from thin-film transistor liquid crystal display (TFT-LCD) industry wastewater by hydrolysis acidification-aerobic and anaerobic processes[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 279: 123502.
- [9] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 254-279.
- State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 254-279.
- [10] HU T H, WHANG L M, LIU P W G, et al. Biological treatment of TMAH (tetra-methyl ammonium hydroxide) in a full-scale TFT-LCD wastewater treatment plant[J]. Bioresource Technology, 2012, 113: 303-310.
- [11] CHANG K F, YANG S Y, YOU H S, et al. Anaerobic treatment of tetramethyl ammonium hydroxide (TMAH) containing wastewater[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2008, 21(3): 486-491.
- [12] LIU Bing, YOSHINAGA K, WU J H, et al. Kinetic analysis of biological degradation for tetramethylammonium hydroxide(TMAH) in the anaerobic activated sludge system at ambient temperature[J]. Biochemical Engineering Journal, 2016, 114: 42-49.

[作者简介] 肖凡(1981—), 硕士, 高级工程师。电话: 021-58961515, E-mail: andyxiaofan@126.com。

[收稿日期] 2022-11-25(修改稿)