

论述与研究

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.19.001

剩余污泥碳化裂解液的资源化中试研究

赵博玮, 牛宇锟, 谢飞, 李登飞, 周爱娟, 孔鑫, 汪素芳, 岳秀萍
(太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 山西省晋中市污水处理厂建立了国内首家较大规模的污泥碳化工程项目,处理量达到300 t/d,取得了良好的处理效果,但其产生的碳化裂解液中COD浓度高达20 000 mg/L左右、氨氮浓度约为1 200 mg/L,并含有大量难降解有机物,碳化裂解液的处理成为制约该工艺发展的主要原因。为此,提出了污泥碳化裂解液制备反硝化碳源和产甲烷两种资源化方案,并构建了处理量为1 m³/d的中试装置。研究结果表明,通过厌氧产甲烷工艺,裂解液中有机物的甲烷产率达到0.33 m³/kgCOD,证明其具有较好的产甲烷潜力;通过厌氧酸化联合氨吹脱工艺,裂解液中的COD酸化率达到50%以上、COD损失率为14.2%、氨氮去除率达到85%以上;裂解液制备的碳源的反硝化效果略低于乙酸钠但优于葡萄糖,是良好的反硝化碳源。以中试结果和市场价格推算,日产生300 m³裂解液的污泥碳化工程,若回收甲烷每年可节约能源成本141.99万元,若回收碳源每年可节省碳源投加费用467.57万元。

关键词: 剩余污泥; 碳化裂解液; 资源化; 反硝化碳源; 沼气

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)19-0001-06

Pilot-scale Study on Resource Recycling of Excess Sludge Carbonized Pyrolysis Liquid

ZHAO Bo-wei, NIU Yu-kun, XIE Fei, LI Deng-fei, ZHOU Ai-juan, KONG Xin,
WANG Su-fang, YUE Xiu-ping

(College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan
030024, China)

Abstract: The first large-scale sludge carbonization project in China has been established in a wastewater treatment plant in Jinzhong, Shanxi Province. The project has a treatment capacity of 300 t/d and a good treatment performance. However, the concentrations of COD and ammonia nitrogen in the carbonized pyrolysis liquid are as high as 20 000 mg/L and 1 200 mg/L, and the liquid also contains a lot of refractory organic matters, leading to its treatment becomes the main reason restricting the development of this process. Therefore, two resource utilization schemes were proposed, namely preparation of denitrifying carbon source and methane production from the carbonized pyrolysis liquid,

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC0408601、2019YFC0408602); 国家自然科学基金资助项目(52070139); 山西省重点研发项目(社发领域)(201903D321055、201903D321057); 晋中市科技重点研发计划项目(Y191020)

通信作者: 岳秀萍 E-mail:yuexiuping@tyut.edu.cn

and a pilot plant with a treatment capacity of $1 \text{ m}^3/\text{d}$ was constructed. The methane production rate of the organic compounds in the pyrolysis liquid reached $0.33 \text{ m}^3/\text{kgCOD}$ through the anaerobic methanogenic process, which proved that this liquid had a good methanogenic potential. The COD acidification rate, COD loss rate and ammonia nitrogen removal efficiency in the carbonized pyrolysis liquid reached more than 50%, 14.2% and 85% by the anaerobic acidification combined with ammonia stripping process. The denitrifying performance of the carbon source prepared by the pyrolysis liquid was slightly worse than that of the sodium acetate but better than that of the glucose, indicating that it was a good denitrifying carbon source. According to the results of the pilot test and the price in the market, the sludge carbonization project that produced $300 \text{ m}^3/\text{d}$ pyrolysis liquid could save energy cost of 1.419 9 million yuan per year if methane was recovered, and carbon source consumption cost of 4.675 7 million yuan per year if carbon source was recovered.

Key words: excess sludge; carbonized pyrolysis liquid; resource recycling; carbon resource for denitrification; biogas

随着生活污水处理设施普及率的不断提高,剩余污泥产量也逐年增加,其处理与处置成为急需解决的环境问题。处理剩余污泥的关键是脱水预处理环节,目前常用的脱水工艺包括直接物理压干、化学调理后压干、氧化破壁后脱水和物化破壁后脱水等。污泥热解技术是指在高温缺氧条件下对污泥进行热分解,将其中的有机物转化为燃油、燃气、污泥炭和水的技术^[1]。低温碳化技术属于污泥热解技术,通常是将污泥加压升温到 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,使污泥细胞破裂,胞内物质通过变性脱水碳化直接转化成生物炭燃料。经碳化处理后的剩余污泥含水率较低(在 30% 以下),便于运输和存储,且可作为燃料直接燃烧。相较于传统的直接燃烧法,污泥碳化技术具有高效、无毒、快速和处置彻底等优点,且能够降低污水处理厂的生产成本,大幅提高污泥资源化效率,并能够解决二次污染的问题^[2]。但是,污泥碳化工艺除主产物污泥干料以外,还会伴随产生一定量的污泥裂解液。由于污泥细胞壁高度破碎且有机物变性程度较高,该裂解液中含有大量的氨氮和难降解有机物,且成分复杂。若将裂解液视为工艺尾液,直接回流至生化系统,会产生严重抑制功能微生物活性和增加氨氮负荷等问题。此外,一些发电厂内建设的污泥处理中心无收纳系统。综合上述原因,发展和建设裂解液处理工程,是污泥碳化工艺改进为市政污泥焚烧替代技术过程中的一个必要环节^[3]。

碳化裂解液作为一种新型废水,关于其处理和资源化利用的研究国内外鲜有报道,但从其主要污染物指标来看,裂解液是一种高氨氮有机废水。山

西省晋中市某污水处理厂建立了国内首家较大规模的污泥碳化工程项目,处理量达到 $300 \text{ t}/\text{d}$,取得了良好的处理效果,但其碳化裂解液中的 COD 浓度高达 $20\,000 \text{ mg}/\text{L}$ 左右、氨氮浓度约为 $1\,200 \text{ mg}/\text{L}$,并含有大量难降解有机物,是制约该工艺发展的主要原因。鉴于此,笔者提出了污泥碳化裂解液制备反硝化碳源和产甲烷两种资源化方案,并以该污泥碳化工程为基础,构建了处理量为 $1 \text{ m}^3/\text{d}$ 的中试装置。针对污水处理厂普遍缺乏反硝化碳源的情况^[4],开展裂解液厌氧发酵制备小分子有机碳源的研究,拟通过建立厌氧产酸及氨吹脱系统,研究碳化裂解液制备碳源的可行性,为有外加碳源需求的污水处理厂提供一种污泥碳化裂解液的综合处置方案;针对无碳源需求的情况,本研究拟通过建立厌氧发酵产甲烷系统,考察裂解液的产甲烷能力,为污水厂能源补充和污泥处理提供综合可行性方案。

1 材料与方法

1.1 剩余污泥碳化裂解液特性

对晋中市该污水厂的剩余污泥碳化裂解液进行连续数月现场采样检测,结果显示,COD 和 BOD_5 浓度分别为 $16\,000 \sim 26\,000$ 、 $4\,400 \sim 5\,600 \text{ mg}/\text{L}$,氨氮、硝态氮、亚硝态氮、总氮浓度分别为 $1\,100 \sim 1\,500$ 、 $20 \sim 25$ 、 $0.2 \sim 0.5$ 、 $1\,800 \sim 2\,000 \text{ mg}/\text{L}$,TP 浓度为 $18 \sim 25 \text{ mg}/\text{L}$,pH 值为 $6.5 \sim 7.0$,蛋白质和多糖分别为 $4\,090 \sim 4\,230$ 、 $1\,338 \sim 1\,435 \text{ mg}/\text{L}$ 。经计算,裂解液的 B/C 值 < 0.3 ,表明裂解液中有有机碳含量高,但多为难降解有机物,可生化性较低,C/N 平均值为 10,总氮浓度较高,无法直接作为碳源。

进一步对裂解液中的小分子有机物进行质谱分析,结果表明,生物难降解有机物占比为57%,其中吡啶、嘧啶等含氮杂环有机物占26%,苯胺、苯酚、苯酮等苯系物占10%,2-环戊烯酮等含氧杂环有机物占11%,顺-3-甲基-2-戊烯等短链烃类有机物占10%;较易被生物降解的有机物占比为27%,其中丙酸等小分子有机酸占比为23%,醛、醚和醇类占比为4%;另外,腈类有机物占比为8%,胺、脲、胍类有机物占比为8%。Zhao等人^[5]研究表明,较高浓度的苯酚对生物降解具有明显抑制作用,因此裂解液中芳香类和酚类有机物是生物降解的重点。吡啶、嘧啶及其衍生物等含氮杂环有机物在水中具有更高的溶解性和稳定性,生物降解性较差,其中开环是整个生物化学反应的限速阶段,更易发生在厌氧条件下^[6],因此去除含氮杂环有机物是处理裂解液的另一关键环节。

1.2 试验装置

1.2.1 厌氧反应器

厌氧发酵试验(包括产甲烷试验和产酸试验)采用升流式厌氧污泥床(UASB)反应器,试验装置如图1所示。反应器直径为1.5 m、高为2.5 m,总容积为4 m³,有效容积为3.6 m³,配备回流系统。反应器设置有温度传感器和电加热毯,用以控制(35±2)℃的中温运行条件。装置顶部设有湿式气体流量计、水封瓶和管道阻燃器,分别用以计量产气速率、防止火星进入罐体引起燃烧和爆炸。



图1 UASB反应器

Fig.1 Schematic diagram of UASB reactor

1.2.2 氨吹脱装置

酸化液氨吹脱试验采用敞口圆柱形反应器,四周设有泡沫收纳区,如图2所示。该反应器直径为1 m、高为2.5 m,总容积为2 m³,有效容积为1.9 m³。鼓风机采用单叶片风机,在每次吹脱前将配制好的碱液加入反应器罐体内用于调节pH值。

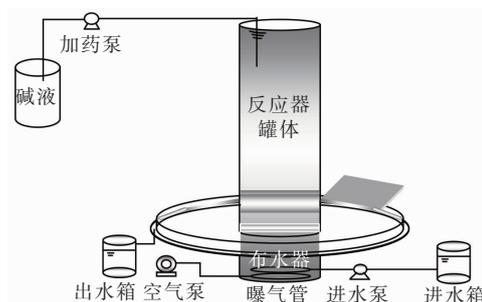


图2 氨吹脱反应器

Fig.2 Ammonia stripping reactor

1.3 试验方法

1.3.1 污泥接种与驯化

为实现UASB反应器的快速启动,接种污泥取自晋中市餐厨垃圾处理厂厌氧发酵塔,污泥浓度为20 g/L,采用稀释裂解液为进水对污泥进行培养驯化,进水COD浓度控制在10 000 mg/L左右、总氮浓度为1 700 mg/L、pH值为7.8。驯化后的污泥从絮状变为球形颗粒状,结构致密,外观呈黑色(见图3),粒径在0.2 mm左右,属于小颗粒污泥。启动后厌氧反应器出水SS大幅下降,表明所培养的颗粒污泥沉降性能良好,没有出现跑泥、漏泥现象。

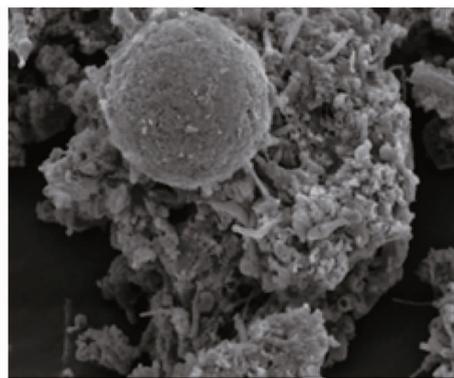


图3 UASB反应器的厌氧污泥形态

Fig.3 Anaerobic sludge morphology of UASB reactor

1.3.2 产甲烷和产酸试验

污泥驯化成功后先进行产甲烷试验,后进行产酸试验,具体运行参数如表1所示。在产甲烷试验中,为探索高浓度氨氮和有毒物质对产甲烷的抑制作用,将试验分为两个阶段,阶段I采用裂解液原水,阶段II将裂解液原水稀释1倍以降低抑制作用。产甲烷试验完成后,排出反应器内部分污泥并酸化培养30 d,进入产酸试验。当pH值、COD去除率和挥发性脂肪酸(VFAs)等没有明显波动,且产气量维持稳定时,视为达到稳定运行状态。

表 1 试验运行参数

Tab. 1 Operation parameters of test

项目	阶段	运行时间/d	HRT/h	COD 负荷/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)	pH 值
产甲烷试验	I	6	144	3.3 ± 0.2	7.5 ± 0.2
	II	16	144	1.6 ± 0.1	7.3 ± 0.2
酸化培养		30	30~50	4.8~6.4	6.8 ± 0.2
产酸试验		30	20 ± 5	10 ± 0.2	6.5 ± 0.2

1.3.3 氨吹脱制备反硝化碳源试验

收集产酸试验的酸化裂解液作为原水进行氨吹脱试验,在曝气强度为 $0.25 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{min})$ 、曝气时间为 4 h、 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度条件下,向酸化裂解液中分别投加 1.10 、 1.47 、 3.05 kg/m^3 的 NaOH 或 1.00 、 1.14 、 1.28 kg/m^3 的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 调节 pH 值分别为 10、11 和 12,研究不同碱和 pH 值条件下的吹脱效率。

1.3.4 反硝化效果验证试验

为了验证裂解液制备碳源的反硝化效果,采用乙酸钠和葡萄糖两种常用碳源与吹脱后的酸化裂解液进行反硝化效果对比。酸化裂解液的 COD 为 6721 mg/L 、VFAs(以 COD 计)为 3563 mg/L ,VFAs 占比约为 53%。反硝化污泥取自污水厂缺氧池,MLVSS/MLSS 为 50%。反硝化试验条件如下:污泥浓度为 3 g/L ,初始 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度为 60 mg/L ,COD/ $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为 7,pH 值为 7.5,温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.4 分析项目与方法

COD、 BOD_5 、氨氮、总氮、硝态氮、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、TP 等常规指标采用国家标准方法测定;VFAs、 CH_4 、 CO_2 和 H_2 采用气相色谱仪测定;蛋白质和多糖分别采用 BAC 蛋白试剂盒和苯酚-硫酸法测定。

2 结果与讨论

2.1 裂解液厌氧产甲烷

碳化裂解液产甲烷试验中各指标的变化情况如图 4(a) 所示。厌氧污泥培养驯化完成后,将 HRT 调整为 144 h,此时 COD 负荷为 $3.3 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,进水 COD 浓度为 $18500 \sim 21000 \text{ mg/L}$ 、平均值为 19002 mg/L 。在阶段 I,反应器出水 COD 平均浓度为 12198 mg/L ,COD 平均去除率为 35.8%,平均产气量为 1390.0 L/d ,甲烷产量为 1052.2 L/d ,甲烷占比为 75.7%。分析认为,如此低的产甲烷量和 COD 去除率是由于裂解液含有大量毒性有机物和较高浓度的氨氮,这两方面因素会对产甲烷菌产生较强的抑制作用。因此在阶段 II,将裂解液稀释 1

倍之后作为进水,HRT 仍然为 144 h,COD 负荷减小到 $1.6 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,进水 COD 浓度为 $9000 \sim 13500 \text{ mg/L}$ 、平均为 11490 mg/L ,在此条件下,出水 COD 平均浓度为 3436 mg/L ,COD 平均去除率提高至 70.1%,平均产气量为 2148.4 L/d ,甲烷产量为 1546.9 L/d ,甲烷占比为 72.0%,单位裂解液的甲烷产量为 $5.16 \text{ m}^3/\text{m}^3$,计算得出单位 COD 的甲烷产率为 $0.33 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。

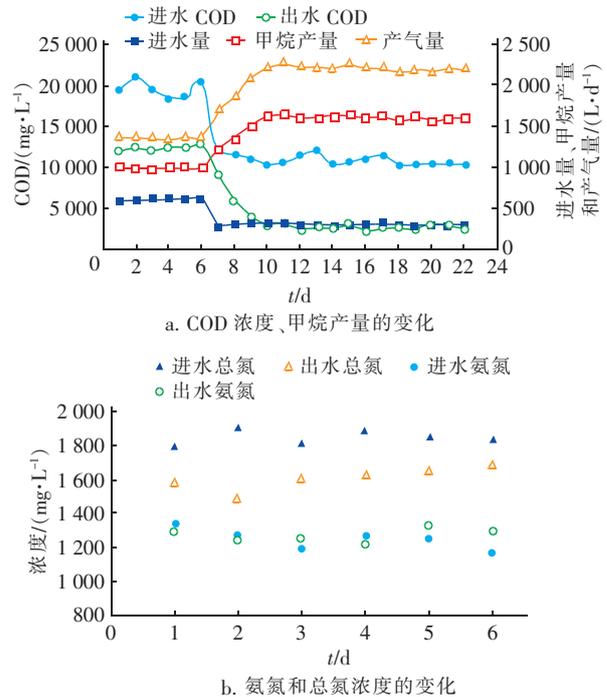


图 4 裂解液产沼气试验结果

Fig. 4 Results of pyrolysis liquid producing biogas test

在阶段 I 对进出水氨氮和总氮浓度进行检测,考察反应器内氮的转化情况,结果如图 4(b) 所示。进水和出水中 TN 的平均浓度分别为 1844 、 1604 mg/L ,氨氮的平均浓度分别为 1251 、 1275 mg/L 。氨氮的减少主要是由于在 $33 \text{ }^\circ\text{C}$ 下大量产气会携带氨氮逸散,但在厌氧环境下部分有机物会分解生成氨氮又会导致氨氮浓度升高,综合上述因素,使得氨氮总体浓度变化不大,而总氮浓度有所下降。

2.2 裂解液厌氧产酸

厌氧产甲烷试验后,排出反应器内部分污泥,采用裂解液原水在 HRT 为 30~50 h 的条件下酸化培养 30 d。培养完成后开始产酸试验,此时控制 HRT 为 20 h,COD 负荷为 $10 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,进水 pH 值为 6.5 左右。在高有机负荷、低 pH 值、高浓度氨氮且存在毒性物质的情况下产甲烷活性受到强烈抑制,

反应器出现大量 VFAs 积累,具体情况见图 5。如图 5(a)所示,进水 COD 浓度在 17 000 ~ 19 000 mg/L 之间、平均为 18 083 mg/L;出水 COD 在 14 000 ~ 16 000 mg/L 之间、平均为 15 542 mg/L;COD 损失率在 10% ~ 20% 之间、平均为 14.2%,由此证明反应器以有机物酸化为主。如图 5(b)所示,进水 VFAs 浓度在 1 000 mg/L 以下、平均为 864 mg/L;出水 VFAs 浓度在 5 000 ~ 7 000 mg/L 之间、平均为 6 066 mg/L;出水 VFAs 折算成 COD,则在 7 000 ~ 10 000 mg/L 之间、平均为 8 485 mg/L,出水中 VFAs (以 COD 计)占 COD 的比例达到了 54.6%,表明出水中的有机物大部分为 VFAs,具备成为反硝化碳源的条件。从 VFAs 组成来看,乙酸:丙酸:丁酸基本保持在 50:15:35,且丁酸中的正丁酸:异丁酸稳定在 5:1,两者的占比分别为 29% 和 6%,说明丁酸型发酵是裂解液产酸发酵的主要类型。

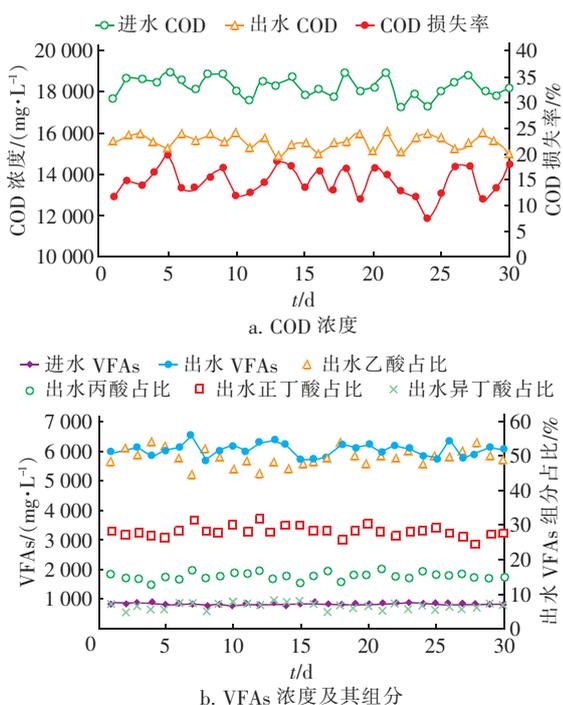


图 5 裂解液厌氧产酸试验结果

Fig. 5 Results of pyrolysis liquid anaerobic acidogenesis test

2.3 酸化液吹脱除氨

在曝气强度为 $0.25 \text{ m}^3 / (\text{m}^3 \cdot \text{min})$ 、温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,分别采用 NaOH 和熟石灰溶液调节 pH 值至 10、11 和 12,进行 3 批次试验,吹脱时间为 4 h,结果如图 6 所示。以 NaOH 为碱度来源,当 pH 值分别为 10、11 和 12 时,氨氮的平均去除率分别为 76.9%、91.0% 和 91.7%。当 pH 值为 10 时,吹脱

后氨氮可降至 300 mg/L 以下;当 pH 值为 12,吹脱后氨氮可稳定在 100 mg/L 左右,但此时 NaOH 投加量达到了 3.05 kg/m^3 ,药剂量过大,经济性较差。以 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 替代 NaOH 调节 pH 值分别为 10、11 和 12 时,氨氮的平均去除率分别为 85.8%、90.4% 和 90.6%。pH 值为 10 时,吹脱后氨氮降至 150 mg/L 以下,基本满足酸化液脱氨要求,此时 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量仅为 1.00 kg/m^3 ,经济性较好。

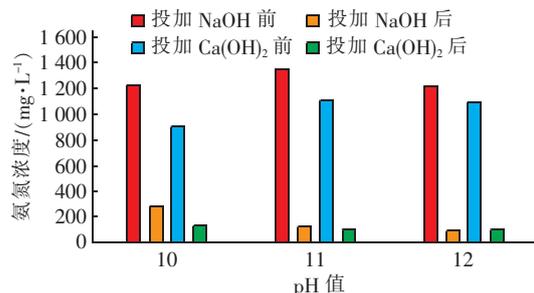


图 6 裂解液氨吹脱效果

Fig. 6 Ammonia stripping effect of pyrolysis liquid

2.4 反硝化效果验证

采用乙酸钠和葡萄糖两种常用碳源与吹脱后的酸化裂解液进行反硝化效果对比,结果见图 7。3 种碳源均对反硝化过程有明显的促进作用,从反硝化速率来看,乙酸钠最快,在 30 min 内可以将大部分 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 还原,其次为裂解液制备碳源,葡萄糖最慢。从 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除率来看,乙酸钠为碳源时去除率为 98.9%,裂解液制备碳源的去除率为 78.8%,而葡萄糖为碳源时去除率仅为 48.4%。因此,可以认为裂解液制备碳源对反硝化作用的促进效果较好,反硝化效率低于乙酸钠但高于葡萄糖。

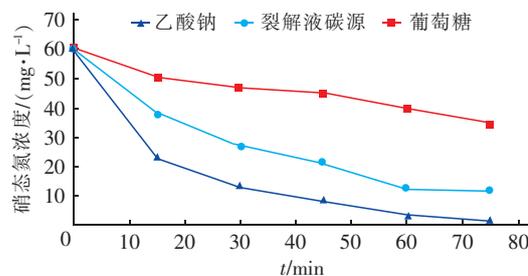


图 7 不同碳源用于反硝化脱氮的效果对比

Fig. 7 Denitrification effect comparison of different carbon sources

2.5 技术和经济综合分析

2.5.1 产甲烷经济性

研究基于中试结果,单位裂解液的甲烷产量为 $5.16 \text{ m}^3 / \text{m}^3$,以裂解液日产量为 300 m^3 计算,每日

可产甲烷 1 548 m³。裂解液厌氧产甲烷过程加热及搅拌产生的电耗成本约为 0.5 元/m³,若将裂解液所产甲烷用于补充污水厂天然气消耗,扣除甲烷气体制备成本,以天然气价格 3 元/m³ 计,每年可节约运行成本 141.99 万元。

2.5.2 制备碳源经济性

根据中试结果,低温碳化裂解液的 COD 浓度约为 16 000 ~ 26 000 mg/L,酸化过程 COD 损失率为 14.2%,酸化处理后 VFAs(以 COD 计)占裂解液 COD 的 54.6%,吹脱 VFAs 损失可忽略,单位裂解液可制备碳源 7.5 ~ 12.2 kg/m³(以 COD 计),平均为 10 kg/m³。裂解液厌氧产酸过程中加热以及搅拌产生的电耗成本为 0.3 元/m³,氨吹脱过程中的 Ca(OH)₂ 投加量为 1.00 kg/m³,成本为 0.8 元/m³[Ca(OH)₂ 市场价格约为 800 元/t],曝气电耗成本为 1 元/m³,总运行成本为 2.3 元/m³,裂解液碳源的制备成本约为 230 元/m³。现有乙酸钠市场价格约为 3 250 元/t,折合碳源价格为 4 500 元/t(以 COD 计),每吨裂解液制备成碳源可节约碳源成本为 4 270 元。日产生 300 m³ 裂解液的污水厂,预计每年可节省碳源投加费用 467.57 万元。

3 结论

针对碳化裂解液中有有机物和总氮浓度较高的特性,构建了中试装置进行厌氧产甲烷和厌氧产酸联合氨吹脱制备反硝化碳源,结果表明:裂解液中有有机物的甲烷产率为 0.33 m³/kgCOD,裂解液的甲烷产量为 5.16 m³/m³,可为有天然气需求的污水厂提供能源供应,使日产生 300 m³ 裂解液的污水厂每年节约成本 141.99 万元;采用厌氧产酸联合氨吹脱制备反硝化碳源,出水 VFAs 平均浓度为 8 485 mg/L(以 COD 计),占出水 COD 的 50% 以上,投加 1.00 kg/m³ 的 Ca(OH)₂ 吹脱 4 h 后氨氮去除率可达 85% 以上,氨氮浓度低至 150 mg/L 以下,可为污水厂水处理工艺提供反硝化碳源,反硝化效能弱于乙酸钠但强于葡萄糖。对于日产生 300 m³ 裂解液的污水厂,每年可节省碳源投加费用 467.57 万元。

参考文献:

[1] 闫志成,许国仁,李建政. 污泥热解工艺连续式生产性研究[J]. 中国给水排水,2017,33(13):16-20.

YAN Zhicheng, XU Guoren, LI Jianzheng. Production scale experimental study on sludge pyrolysis technology [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(13):16-20 (in Chinese).

[2] 洪建军. 污泥低温碳化焚烧处理技术与应用[J]. 中国给水排水,2014,30(8):61-63.

HONG Jianjun. Application of low-temperature carbonization incineration technology in sewage sludge treatment[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(8):61-63 (in Chinese).

[3] 韩融,刘晋文,赵晨曦,等. 生物物理干化污泥快速热解半焦特性研究[J]. 中国给水排水,2016,32(15):52-56.

HAN Rong, LIU Jinwen, ZHAO Chenxi, et al. Char characteristics of fast pyrolysis of biophysical dried sludge [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(15):52-56 (in Chinese).

[4] 孙慧,郑兴灿,孙永利,等. 外加碳源对改良 A²/O 工艺反硝化除磷的影响[J]. 中国给水排水,2010,26(13):82-85.

SUN Hui, ZHENG Xingcan, SUN Yongli, et al. Effect of external carbon source on denitrifying phosphorus removal in modified A²/O process [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(13):82-85 (in Chinese).

[5] ZHAO L, XIAO D, LIU Y, et al. Biochar as simultaneous shelter, adsorbent, pH buffer, and substrate of *Pseudomonas citronellolis* to promote biodegradation of high concentrations of phenol in wastewater [J]. Water Research, 2020, 172:115494.

[6] 高艳娟,岳秀萍,段燕青,等. 厌氧反硝化产甲烷体系中喹啉与吲哚共基质的降解特性[J]. 中国环境科学, 2019, 39(10):4150-4156.

GAO Yanjuan, YUE Xiuping, DUAN Yanqing, et al. Degradation of quinoline and indole co-substrate under anaerobic denitrification and methanogenesis conditions [J]. China Environmental Science, 2019, 39(10):4150-4156 (in Chinese).

作者简介:赵博玮(1984-),男,黑龙江齐齐哈尔人,博士,讲师,主要研究方向为污水处理技术与资源化。

E-mail: zhaobowei@tyut.edu.cn

收稿日期:2020-05-25

修回日期:2020-07-31

(编辑:刘贵春)