

剩余污泥机械破碎碳源快速释放与回收技术

王先宝, 亓雪菲, 费 骄, 张安龙

(陕西科技大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710021)

摘 要: 基于我国城市污水处理厂进水碳氮比低影响生物系统脱氮除磷效果的现状, 针对传统污泥厌氧发酵产酸工艺周期长、效率低的问题, 开展了剩余污泥机械破碎碳源快速释放与回收技术研究, 考察了机械破碎强度与作用时间对污泥絮体结构与碳源释放的影响。结果表明, 随着机械破碎强度的增加, 溶解性 COD 的产量逐渐升高; 而随着机械破碎作用时间的延长, 溶解性 COD 的产量呈现先升高再缓慢降低的趋势, 作用时间为 8 min 时, 溶解性 COD 的产量达到最大, 约 910 mg/L。激光粒度仪与环境扫描电镜分析结果显示, 随着破碎强度与作用时间的增加, 污泥絮体粒径逐渐变小, 结构松散直至破碎, 达到污泥破碎碳源释放的效果。当以产生的溶解性 COD 为碳源时活性污泥反硝化速率为 $2.553 \text{ mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gMLSS} \cdot \text{h})$, 略高于以葡萄糖为碳源时的脱氮速率。而经过机械作用后剩余污泥絮体破碎, 脱氮性能基本丧失, 其反硝化速率仅为 $0.680 \text{ mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gMLSS} \cdot \text{h})$ 。机械破碎作用可实现剩余污泥碳源的快速释放, 为解决污水处理厂碳源不足与剩余污泥处置困难的问题提供了新的思路与途径。

关键词: 剩余污泥; 机械破碎; 碳源回收; 絮体结构

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2018)19-0012-06

Carbon Source Release and Recovery Rapidly from Excess Sludge by Mechanical Disintegration

WANG Xian-bao, QI Xue-fei, FEI Jiao, ZHANG An-long

(School of Environmental Science and Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: The problem of low carbon and nitrogen ratio in influent of wastewater treatment plants is common in China, which interferes with biological nitrogen and phosphorus removal. Based on the problem of long period and low efficiency of traditional sludge anaerobic fermentation, the study of carbon source release and recovery rapidly from excess sludge by mechanical disintegration was carried out. The effect of mechanical disintegration strength and time on the sludge flocs structure and carbon source release was analyzed. The results showed that soluble COD (SCOD) yield gradually increased with the increase of mechanical disintegration strength. However, with the extension of mechanical disintegration time, the SCOD yield increased first and then decreased slowly. When the mechanical disintegration time was 8 min, the yield of SCOD reached the peak, it was about 910 mg/L. The results of laser particle size analyzer and environmental scanning electron microscope showed that with the increase of mechanical disintegration strength and time, the sludge floc size gradually decreased, and the structure became loose

until it was broken. Using SCOD produced from sludge as the carbon source, the denitrification rate of activated sludge was $2.553 \text{ mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gMLSS} \cdot \text{h})$, which was slightly higher than the denitrification rate using glucose as the carbon source. After the mechanical disintegration, the sludge flocs were broken, and the denitrification performance was basically lost. The denitrification rate was only $0.680 \text{ mg-NO}_3^- - \text{N}/(\text{gMLSS} \cdot \text{h})$. The mechanical disintegration can realize the rapid release of carbon source in excess sludge, which provides a new idea and approach for solving the problem of insufficient carbon source and excess sludge disposal in the wastewater treatment plant.

Key words: excess sludge; mechanical disintegration; carbon source recovery; floc structure

目前城市污水处理厂主要采用活性污泥处理工艺,在运行过程中面临两个重要问题,首先我国大部分污水处理厂进水有机物含量较低,碳源不足直接制约了生物脱氮除磷效果^[1,2];其次,活性污泥工艺运行过程中产生大量剩余污泥,其处理与处置成本较高^[3,4]。剩余污泥的主要成分为有机质,污泥发酵产酸一方面可以解决污水厂进水碳源不足的问题,另一方面可减少剩余污泥量,降低污泥处置成本,因此受到了广泛关注^[5,6]。通过发酵条件的优化调控,提高发酵产酸效率一直是污泥发酵技术的研究热点,为此学者们系统分析了pH值、温度、污泥停留时间、污泥浓度等因素对污泥厌氧发酵产酸的影响,确定了适宜的污泥发酵产酸条件^[7~9]。同时通过对污泥发酵产酸过程及机制的分析可以发现,污泥细胞破壁及细胞质溶出是影响发酵产酸过程的限制步骤,因此学者们提出了污泥发酵预处理技术^[10,11]。污泥发酵预处理技术主要包括物理法、化学法及生物法,其中物理法主要有超声、微波消解、热解、冷冻等^[12],化学法主要以酸碱处理、氧化处理、表面活性剂处理为代表^[13],生物法则以接种发酵细菌、投加酶制剂为主^[14]。三种污泥发酵预处理技术的核心均为破坏细胞壁结构,使细胞内物质溶出,尽快参与发酵过程,从而提高发酵产酸效果。虽然污泥发酵预处理技术可以显著提高污泥发酵产酸效率,但是目前研究表明污泥发酵产酸的停留时间一般在5~10 d,甚至更长,因此需要建立一个较大容积的水解发酵池,同时为提高污泥发酵产酸效果,需要对发酵系统的温度、pH值等进行严格的控制^[2,15],而这在污水处理厂实际应用过程中是很难实现的。针对此问题,笔者提出了一种剩余污泥机械破碎碳源快速释放技术,通过高强度的物理破碎作用,实现剩余污泥中有机碳源的快速转化与回收,为解决污水处理厂碳源不足与剩余污泥处置问题提

供新的思路与途径。

1 材料与方法

1.1 试验污泥

污泥取自西安市某污水处理厂二沉池,取得样品后在4℃下保存,调整污泥浓度至8 000 mg/L后进行序批式试验。污泥初始溶解性COD(SCOD)为 $(86 \pm 22) \text{ mg/L}$,氨氮为 $(2.3 \pm 0.2) \text{ mg/L}$,磷酸盐为 $(0.4 \pm 0.05) \text{ mg/L}$ 。

1.2 试验设备与流程

污泥机械破碎装置采用九阳JYL-Y99破壁机,破壁强度分为1~10档,最高档位转速为35 000 r/min。首先取750 mL污泥在最高档位下进行破碎,每隔2 min取样测定SCOD浓度,每次试验取样6次,分析机械破碎时间对SCOD产量的影响,以确定最佳破碎时间。然后取5份750 mL污泥分别在不同破碎强度(2、4、6、8、10档)下破碎8 min,取样测定SCOD浓度,分析破碎强度对SCOD产量的影响。

1.3 测定指标

COD、SCOD、氨氮、磷酸盐等常规指标采用国标法测定;污泥粒径采用Mastersizer 2000型激光粒度仪测定;污泥絮体形态采用FEI Q45型环境扫描电镜进行分析。

活性污泥的反硝化速率通过烧杯试验确定,取2 000 mL剩余污泥,平均分成两份后装入2个2 000 mL烧杯中,向一个烧杯中加入900 mg COD的葡萄糖为碳源,另一烧杯中加入900 mg剩余污泥释放的SCOD为碳源,加纯水使两个烧杯中溶液至2 000 mL,此时两个烧杯中SCOD浓度约为450 mg/L(扣除剩余污泥自身溶解性COD浓度),向两个烧杯中分别加入60 mg硝酸盐,通过机械搅拌使活性污泥处于悬浮状态,在25℃下测定硝酸盐浓度的变化,计算不同碳源条件下的反硝化速率。采用同样的方

法,以经过 35 000 r/min 机械破碎 8 min 的活性污泥为基质,以葡萄糖为碳源,测定其反硝化速率,评价机械破碎对活性污泥脱氮性能的影响。

2 结果与讨论

2.1 破碎时间对 SCOD 产量的影响

破碎强度为 35 000 r/min 时,SCOD、氨氮及磷酸盐浓度随时间的变化如图 1 所示。

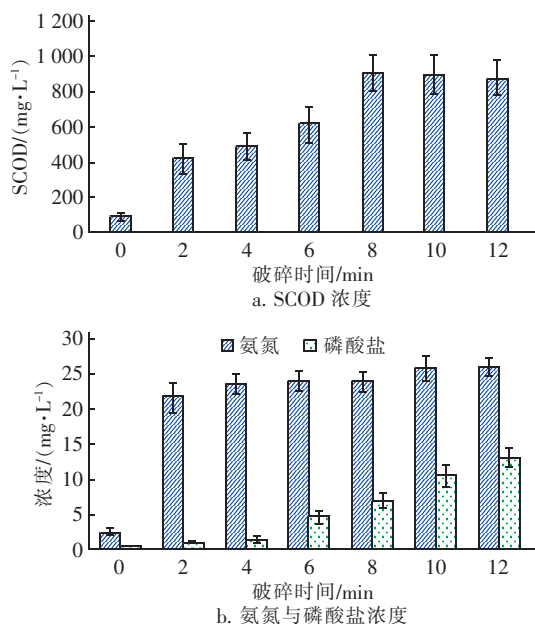


图1 破碎时间对 SCOD 产量与氮、磷释放的影响

Fig. 1 Effect of mechanical disintegration time on SCOD yield and nitrogen and phosphorus release

由图 1(a) 可以看出,在 2~8 min 内随着破碎时间的延长,SCOD 产量逐渐增加,当破碎时间为 8 min 时 SCOD 的产量达到最大,约为 910 mg/L。当破碎时间增加至 10 及 12 min 时,SCOD 浓度呈下降趋势。在剩余污泥机械破碎过程中,氮、磷呈现不同的释放规律,当机械破碎进行 2 min 时,氨氮浓度由 2.3 mg/L 急剧增加至 21.7 mg/L,随后氨氮浓度缓慢增加,当破碎 12 min 时,氨氮浓度为 26 mg/L。而机械破碎 2 min 时,磷酸盐浓度变化很小,仅由原始的 0.4 mg/L 增加至 0.6 mg/L,然后随着破碎时间的延长,磷酸盐浓度逐渐增加,最终达到 13 mg/L。这可能是由于随着机械破碎的进行,污泥絮体结构首先发生裂解,污泥絮体胞外聚合物破碎进入水中,蛋白质是胞外聚合物的主要成分^[16],因此导致氨氮含量急剧增加。而磷被聚磷菌以聚磷酸盐的形式贮存在细胞内^[17],因此机械作用初期磷酸盐含量变化不大,随着机械作用时间的延长,细胞壁开始破碎,

磷酸盐溶出,导致磷酸盐含量逐渐升高。

2.2 破碎强度对 SCOD 产量的影响

破碎时间为 8 min 时,不同破碎强度下 SCOD 产量及氮、磷的释放情况见图 2。随着破碎强度的增加,SCOD 浓度逐渐升高,当破碎强度达到 35 000 r/min 时,SCOD 产量达到 892 mg/L。氨氮浓度变化趋势与 SCOD 基本相同,随着破碎强度的增加,氨氮浓度逐渐升高。而在 2 档与 4 档的破碎强度下,磷酸盐浓度变化不大,在 0.4~0.5 mg/L 之间。当破碎强度继续增加时,磷酸盐浓度开始逐渐升高,最终达到 6.6 mg/L。SCOD 产量与氨氮浓度变化趋势基本一致,而磷酸盐浓度变化则有所不同,这可能是由于低机械强度下只能破坏污泥絮体结构,而无法使细胞壁破碎,絮体胞外聚合物破碎释放出一定量的 SCOD 及氨氮。较高的机械强度下细胞才发生解体并释放磷酸盐,导致其浓度逐渐升高。

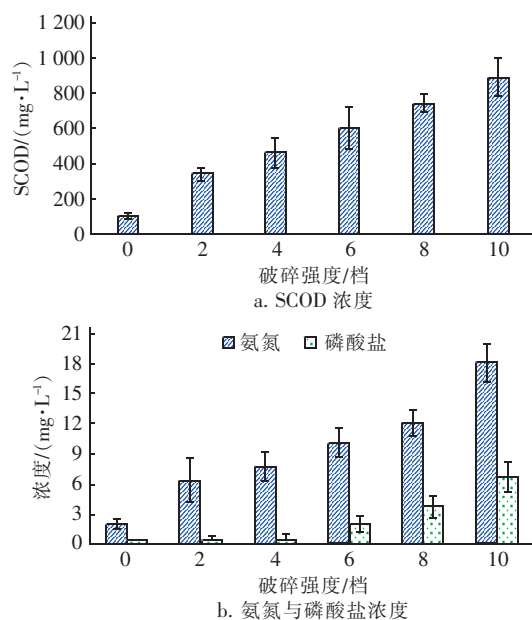


图2 破碎强度对 SCOD 产量与氮、磷释放的影响

Fig. 2 Effect of mechanical disintegration strength on SCOD yield and nitrogen and phosphorus release

2.3 污泥絮体结构变化

破碎时间与破碎强度对污泥粒径的影响如图 3 所示。在机械破碎前 8 min 内,污泥粒径逐渐降低,由 40.3 μm 降至 18.8 μm ,当破碎时间增加至 10 及 12 min 时,污泥粒径有所增大,分别为 22.5 与 20.1 μm 。这可能是由于随着机械破碎时间的延长,破壁器内污泥温度逐渐升高,破碎的污泥絮体发生了絮凝作用,这也可能是过长的破碎时间导致 SCOD 产

量有所降低的原因。随着破碎强度的增加,污泥粒径逐渐降低,说明机械破碎强度越大,污泥絮体破碎越严重。

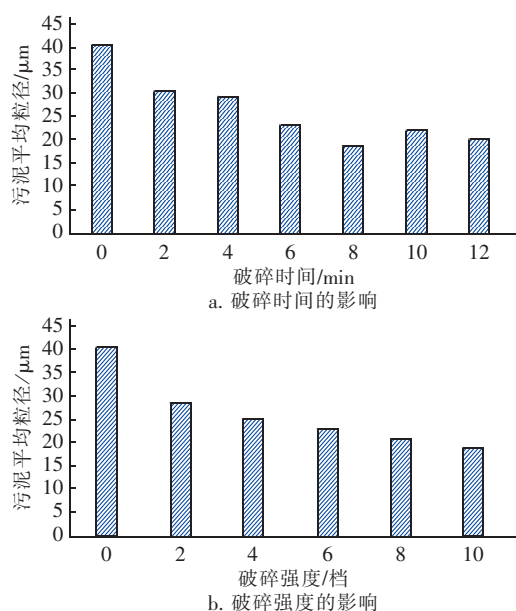


图3 破碎时间与破碎强度对污泥粒径的影响

Fig. 3 Effect of mechanical disintegration time and strength on sludge particle size

图4为不同机械强度下污泥破碎8 min后的絮体结构,可以看出随着破碎强度的增加,首先絮体结构变得松散,然后开始破碎,说明随着机械强度的增加,污泥絮体破碎程度逐渐加强,这与污泥粒径及SCOD浓度变化基本吻合。

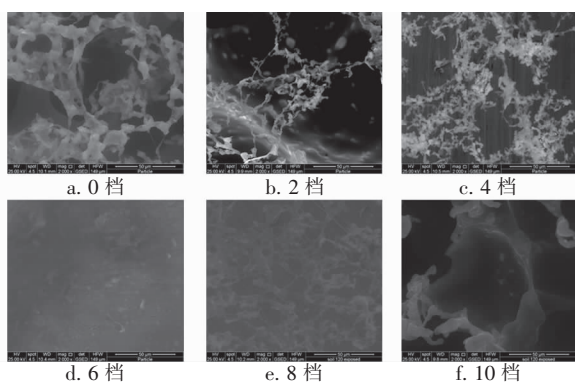


图4 不同破碎强度下的污泥絮体结构

Fig. 4 Sludge floc structure under different mechanical disintegration strength

图5为不同破碎时间下污泥絮体在环境扫描电镜下放大到2 000倍的图片(破碎时间为零时为原污泥,与图4中0档的相同)。可以看出机械破碎2 min后,污泥絮体结构被破坏,变得分散,但仍可见

微生物聚集的絮体。机械破碎4及6 min后,污泥中大的絮体被破坏,结构变得更加松散,说明随着破碎时间的增加,污泥中的絮体被离散成更小的微絮体结构。机械破碎8 min,污泥絮体已完全破碎,基本观察不到絮体,只有许多絮体残片,同时溶液变为糊状。可以推测此时污泥中细胞壁被破坏,大量细胞质流出。通过电镜对絮体结构的分析可知,在机械破碎前8 min内,随着时间的延长,絮体结构逐渐被破坏,最终细胞壁破碎,细胞质流出,从而导致SCOD的产量逐渐增加。而在机械破碎10 min与12 min时,可以再次观察到微小絮体。这可能是由于破壁器内污泥温度逐渐升高,破碎细胞成分发生了絮凝作用。正是由于微小絮体的形成,从而导致了SCOD浓度的降低,同时也使污泥粒径有所升高。

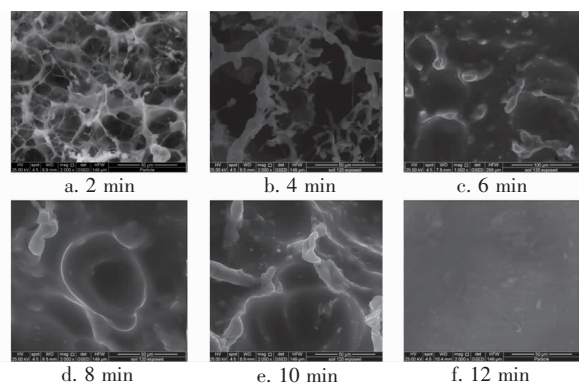


图5 不同破碎时间下的污泥絮体结构

Fig. 5 Sludge floc structure under different mechanical disintegration time

2.4 污泥释放碳源可利用性评价

以葡萄糖及剩余污泥释放的SCOD为碳源时,反硝化速率分别为2.39和2.55 $\text{mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gMLSS} \cdot \text{h})$ 。说明剩余污泥机械破碎释放的SCOD可被活性污泥微生物利用,而且是一种较为优质的碳源,其反硝化脱氮速率略高于葡萄糖的,这与污泥发酵产酸相关研究结果基本吻合^[2,18]。以经过高强度机械破碎后的污泥为基质,以葡萄糖为碳源,测定其反硝化速率仅为0.680 $\text{mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gMLSS} \cdot \text{h})$,说明机械作用使污泥絮体破碎,已经基本完全丧失其原本的脱氮性能。

3 结论

① 机械破碎剩余污泥可以实现碳源快速释放与回收,随着破碎强度的增加,SCOD的产量逐渐提高,机械作用时间为8 min时,SCOD产量达到最大,

约为910 mg/L,同时污泥破碎过程中伴随着氮、磷的释放。

② 随着破碎强度的增加,絮体粒径逐渐减小,结构发生破裂,而随着破碎时间的增加,絮体结构首先发生破碎、粒径降低,然后破碎成分出现微小絮凝现象。

③ 机械作用使污泥絮体破碎,基本丧失脱氮性能,而污泥释放的SCOD是一种较为优质的碳源,可以被活性污泥微生物所利用。

参考文献:

- [1] 张智,李柏林,相欣奕,等. 处理低温低碳源城市污水的A/A/O氧化沟工艺脱氮运行工况优化[J]. 环境工程学报,2012,6(8):2565-2570.
Zhang Zhi, Li Bolin, Xiang Xinyi, et al. Operation optimization of A/A/O oxidation ditch for nitrogen removal from low-temperature and low-carbon municipal sewage [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(8): 2565-2570 (in Chinese).
- [2] Jin P L, Wang X B, Zhang Q H, et al. A new activated primary tank developed for recovering carbon source and its application[J]. Bioresour Technol, 2018, 200: 722-730.
- [3] Lin Y M, Zhou S Q, Li F Z, et al. Utilization of municipal sewage sludge as additives for the production of eco-cement[J]. J Hazard Mater, 2012, 213: 457-465.
- [4] 林奕明,方益民,许冠英. 广东省污泥无害化处置情况及技术政策探讨[J]. 中国给水排水, 2017, 33(12): 19-23.
Lin Yiming, Fang Yimin, Xu Guanying. Current situation of harmless treatment and disposal of sewage sludge and discussion on relevant technical policies in Guangdong Province [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(12): 19-23 (in Chinese).
- [5] 张娟. 初始pH值对皂苷强化污泥生产短链挥发性脂肪酸的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(1): 336-340.
Zhang Juan. Effect of initial pH on short chain fatty acid production from sludge anaerobic fermentation enhance by saponin[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(1): 336-340 (in Chinese).
- [6] Yuan Y, Peng Y Z, Liu Y, et al. Change of pH during excess sludge fermentation under alkaline, acidic and neutral conditions[J]. Bioresour Technol, 2014, 174: 1-5.
- [7] Maspolim Y, Zhou Y, Guo C H, et al. The effect of pH on solubilization of organic matter and microbial community structures in sludge fermentation [J]. Bioresour Technol, 2015, 190: 289-298.
- [8] 刘绍根,徐锐,胡星梅. 污泥性质对污泥水解酸化效果的影响[J]. 环境工程学报, 2015, 9(2): 572-578.
Liu Shaogen, Xu Rui, Hu Xingmei. Effect of sludge property on sludge hydrolysis and acidification process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(2): 572-578 (in Chinese).
- [9] 邢立群,彭永臻,金宝丹,等. 盐度强化剩余污泥碱性发酵产酸[J]. 中国环境科学, 2015, 35(6): 1771-1779.
Xing Liqun, Peng Yongzhen, Jin Baodan, et al. Enhanced production of short-chain fatty acids from waste activated sludge alkaline fermentation: The effect of salinity [J]. China Environmental Science, 2015, 35(6): 1771-1779 (in Chinese).
- [10] 刘充. 预处理调解对剩余污泥发酵液微生物电解产氢影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
Liu Chong. Effects of Pretreatment on Hydrogen Production in Microbial Electrolysis Using Waste Sludge Fermentative Liquid [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016 (in Chinese).
- [11] 郝晓地,蔡正清,甘一萍. 剩余污泥预处理技术概览[J]. 环境科学学报, 2011, 31(1): 1-12.
Hao Xiaodi, Cai Zhengqing, Gan Yiping. Review of pretreatment technologies for excess sludge [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(1): 1-12 (in Chinese).
- [12] Yeneneh A M, Kayaalp A, Sen T K, et al. Effect of microwave and combined microwave-ultrasonic pretreatment on anaerobic digestion of mixed real sludge [J]. J Environ Chem Eng, 2015, 3: 2514-2521.
- [13] Huang X F, Shen C M, Liu J, et al. Improved volatile fatty acid production during waste activated sludge anaerobic fermentation by different bio-surfactants [J]. Chem Eng J, 2015, 264: 280-290.
- [14] 张源凯,王洪臣,庄健. 污泥预处理的几种新技术[J]. 水资源保护, 2014, 30(4): 71-77.
Zhang Yuankai, Wang Hongchen, Zhuang Jian. New technologies for sludge pretreatment [J]. Water Resource Protection, 2014, 30(4): 71-77 (in Chinese).
- [15] 李秀芳. 基于机械淘洗的活性初沉池碳源转化与回收评价[J]. 中国给水排水, 2016, 32(17): 11-16.

(下转第22页)