

论述与研究

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.13.001

低速搅拌球磨破解剩余污泥高效释放碳源

朱赵冉¹, 黄显怀¹, 唐玉朝¹, 伍昌年¹, 张滔¹, 袁文晨², 牟为刚²

(1. 安徽建筑大学 环境污染控制与废弃物资源化利用安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230601;

2. 中节能国祯环保科技股份有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘要: 针对传统污泥厌氧消化技术停留时间较长、能耗较高的缺点,采用低速搅拌带动玻璃珠相互挤压、碰撞的方法对剩余污泥进行物理破解,考察了玻璃珠粒径、破解时间、转速、泥珠体积比等对碳源释放的影响。结果表明,SCOD的溶出率随破解时间与转速的增加而增加,但破解时间或转速增加到一定值后,SCOD溶出率增加非常缓慢。当玻璃珠粒径为1~1.5 mm、泥珠体积比为1:2时剩余污泥的破解效果最佳,在搅拌器边缘线速度仅为1.44 m/s的低速条件下破解3 h,上清液SCOD浓度可达3 770 mg/L,氨氮与硝酸盐氮浓度则分别达到25.2、43.7 mg/L;相同条件下,延长破解时间至7 h或增加线速度至2.02 m/s后,SCOD浓度仅分别上升10.3%和2.5%,可知污泥碳源释放已接近极限。经粒径分析,污泥破解前、后中值粒径分别为28.114、2.233 μm ,扫描电镜结果显示,污泥絮体与污泥细胞均被破坏。低速旋流搅拌球磨破解可在较低能耗下实现剩余污泥的碳源充分释放,可为解决剩余污泥处置及低碳氮比污水处理问题提供新思路。

关键词: 剩余污泥; 物理破解; 碳源释放

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)13-0001-06

High Efficient Release of Carbon Source from Excess Sludge Disintegrated by Low-speed Stirring and Ball-milling

ZHU Zhao-ran¹, HUANG Xian-huai¹, TANG Yu-chao¹, WU Chang-nian¹,
ZHANG Tao¹, YUAN Wen-chen², MOU Wei-gang²

(1. Anhui Provincial Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Resource Reuse, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China; 2. CECEP Guozhen Environmental Protection Technology Co. Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: Traditional sludge anaerobic digestion technology has the disadvantages of a long residence time and high energy consumption. Therefore, excess sludge was physically disintegrated by a method of low speed stirring driving glass beads to squeeze and collide with each other, and effects of glass bead size, disintegration time, rotating speed and sludge/bead ratio on carbon source release were investigated. The dissolution rate of SCOD increased with the increase of disintegration time and rotating speed. However, the increase of SCOD was very slow when the disintegration time or speed reached a certain degree. The best excess sludge disintegration performance was obtained when glass bead particle

基金项目: 安徽省教育厅自然科学重大项目(KJ2019ZD54); 国家自然科学基金资助项目(51978003、51578002)
通信作者: 唐玉朝 E-mail: tangyc@ahjzu.edu.cn

size was 1–1.5 mm and sludge/bead ratio was 1 : 2. After disintegrated for 3 hours with agitator edge linear speed of only 1.44 m/s, SCOD in the supernatant could reach 3 770 mg/L, and ammonia nitrogen and nitrate nitrogen could reach 25.2 mg/L and 43.7 mg/L, respectively. Under the same reaction conditions, the SCOD only increased by 10.3% and 2.5% after prolonging the disintegration time to 7 hours or increasing the linear velocity to 2.02 m/s, indicating that the carbon source release of the sludge was close to the maximum. Particle size analysis indicated that the sludge median particle size before and after disintegration was 28.114 μm and 2.233 μm , respectively. SEM showed that both the flocs and the cells were destroyed. Low-speed stirring and ball-milling disintegration method can fully release the carbon source of excess sludge at a lower energy consumption, which provides a new idea for solving the problem of excess sludge disposal and low carbon to nitrogen ratio sewage treatment.

Key words: excess sludge; physical disintegration; carbon source release

在污水处理过程中,活性污泥法会产生大量的剩余污泥,其成分复杂、难以处理,一直是环保行业的棘手问题;同时,在市政污水处理过程中,常常由于碳源不足导致对氮和磷的处理能力下降^[1],需要额外投加碳源。而剩余污泥中富含大量有机质,对其有效回收利用可同时解决上述两个问题^[2]。

目前,各种物理、化学、生物等污泥预处理技术都得到了较为广泛的研究,其中,物理法具有快速释放碳源且不会造成二次污染的优势。Lee等^[3]采用球磨机对剩余污泥进行了预处理,将SCOD由2 000 mg/L提升至9 000 mg/L,但存在能耗较高的缺陷,比能量高达75.8 kJ/gTSS;韩进^[4]采用高速转盘法破解剩余污泥,在5 000 r/min转速下对剩余污泥破解45 min,破解液溶出率可达50%,但当转盘转速较低时对微生物细胞的破解能力较差;王先宝等^[5]采用破壁机对剩余污泥进行处理,35 000 r/min破解强度下作用8 min,SCOD达到910 mg/L,可见纯机械破解的碳源释放量相对较低。李洁^[6]使用球磨搅拌机,当磨珠体积占比达到20%时,对剩余污泥作用30 min可使COD溶出值达到2 089 mg/L。

笔者采用低速搅拌驱动小颗粒玻璃珠作为破解手段,将玻璃珠与剩余污泥混合,在搅拌器的带动下保持一定转速,利用玻璃珠间的挤压碰撞对污泥产生破解作用。与传统破解方法相比,在引入玻璃磨珠的同时,极大降低了机械转速,破壁机与球磨搅拌机的实验转速分别可达35 000、12 000 r/min,而本实验所采用的六联搅拌机(二叶平桨)最高转速仅有800 r/min,桨板直径为5 cm。在降低搅拌器转速的同时也延长了破解时间,即使玻璃珠的加入会增加介质密度,在破解时间延长至3~5 h后,搅拌转

速的大幅降低仍可实现总体能耗的降低,且破解效果并不比传统方法低。笔者对不同玻璃珠粒径、泥珠体积比、转速、破解时间条件下的污泥破解情况展开研究,并分析了污泥破解后的粒径分布情况以及上清液中氨氮、硝酸盐氮浓度的变化。

1 实验材料与方法

1.1 污泥来源

实验用污泥取自合肥市某污水厂剩余污泥,污泥浓度为8 452.5 mg/L, pH值为6.04,污泥初始SCOD为 (63.5 ± 7.5) mg/L,氨氮为 (5.65 ± 0.13) mg/L,硝酸盐氮为 (0.6 ± 0.05) mg/L。

1.2 实验方案

采用MY300-6G六联搅拌机进行污泥破解实验,将剩余污泥与玻璃珠混合达1 L后加入1.5 L实验杯中,控制不同转速(350~550 r/min)与搅拌时间对污泥进行破解,实验温度为室温 (24 ± 1) °C。破解后污泥在4 000 r/min下离心10 min,取污泥上清液,采用0.1 μm 微孔滤膜过滤后测定相关水质指标。另外,改变玻璃珠粒径与泥珠体积比后再次进行实验,观察其对破解能力的影响。

1.3 分析项目与方法

SCOD:快速消解分光光度法; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$:纳氏试剂分光光度法; $\text{NO}_3^- - \text{N}$:紫外分光光度法;MLSS:重量法;pH值:玻璃电极法;污泥粒径:激光粒度仪;污泥微观形貌:生物扫描电子显微镜(SEM)。

2 结果与分析

2.1 破解时间、转速及玻璃珠粒径对破解效果的影响

在泥珠体积比为2 : 1、转速为400 r/min的条件下,玻璃珠粒径对破解效果的影响如图1所示。可以看出,粒径为1~1.5 mm的玻璃珠破解效果最

佳,5 h后上清液 SCOD 达到 1 727 mg/L,而粒径为 4~4.5 mm 时 SCOD 仅为 624.5 mg/L,可见玻璃珠粒径对破解效果的影响极大。当玻璃珠粒径较大时,相同体积的玻璃珠相互碰撞、滚压的接触面积会减小,导致污泥受到的挤压与摩擦作用变小,进而对污泥的破解效果变差。流体的剪切力与玻璃珠之间的挤压碰撞力超过絮体的内键力(如范德华力和疏水作用力)时,絮体就会被破坏^[7], $G = 800 \text{ s}^{-1}$ 被认为是能引起污泥破散的一个中间值^[8]。而污泥破解包括絮体破碎、EPS 释放和细胞破解,絮体破碎需要的剪切力较小,EPS 释放和细胞破解需要的剪切力较大。 $G = 800 \text{ s}^{-1}$ 只能将絮体破碎,并不能破解细胞,单纯采用水力剪切来破解细胞能耗巨大。然而,当水流线速度仅为 1~1.5 m/s 时,小粒径的球形玻璃珠可在水流摩擦力的作用下快速旋转,而玻璃珠的剪切碰撞力却可以使得 EPS 释放和细胞破解,从而实现破解能耗的降低。从图 1 可以看出,粒径为 0.4~0.6 mm 的玻璃珠对污泥的破解效果较差,推测原因为玻璃珠质量过小,在有限的速度下其碰撞挤压力度不足以破坏污泥细胞与 EPS。

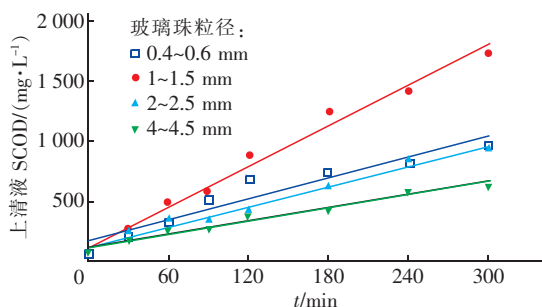


图1 玻璃珠粒径对破解效果的影响

Fig.1 Effect of glass bead diameter on disintegration efficiency of sludge

同时可观测到上清液 SCOD 与破解时间具有良好的线性关系,说明在实验时间内,球磨剪切破解剩余污泥的过程符合一级动力学规律。采用最小二乘法拟合,结果表明,当玻璃珠粒径分别为 0.4~0.6、1~1.5、2~2.5、4~4.5 mm 时,一级动力学常数分别为 0.289、0.557、0.284、0.181 min^{-1} , R^2 值分别为 0.906、0.984、0.977、0.964,可见细胞破裂、EPS 释放、絮体破碎对碳源的释放均有贡献。

在泥珠体积比为 2:1、破解时间为 180 min 的条件下,转速对破解效果的影响如图 2 所示。4 种粒径的玻璃珠在 550 r/min 转速下的碳源释放量较

350 r/min 转速下分别增加了 98.9%、160.9%、14.6%、185.2%,由此可见,增加转速会明显增强对污泥的破解效果。六联搅拌机的搅拌头直径为 5 cm,计算可知,转速由 350 r/min 增至 550 r/min 时,实验杯中水流的最大线速度由 0.79 m/s 增至 1.44 m/s,韩进^[4]在采用高速转盘破解剩余污泥(流体剪切力起主要破解作用)时发现,剩余污泥的破解速率与转盘转速呈正相关,转盘转速由 3 500 r/min 升至 5 000 r/min 后,COD 溶出率提高了 30%,与本研究结果一致。韩进使用的高速转盘直径为 220 mm,运转时的最大线速度可达 63.32 m/s,可见仅依靠流体剪切力破解污泥所需能耗较高。本方法的破解过程中除流体剪切力外,增加转速也会增强玻璃珠间的碰撞强度与搅拌头造成的机械破碎效果。

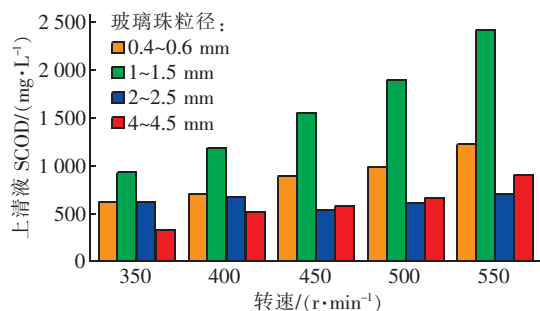


图2 转速对破解效果的影响

Fig.2 Effect of speed on disintegration efficiency of sludge

2.2 泥珠体积比对破解效果的影响

在玻璃珠粒径为 1~1.5 mm、转速为 400 r/min 的条件下,泥珠体积比对破解效果的影响见图 3。

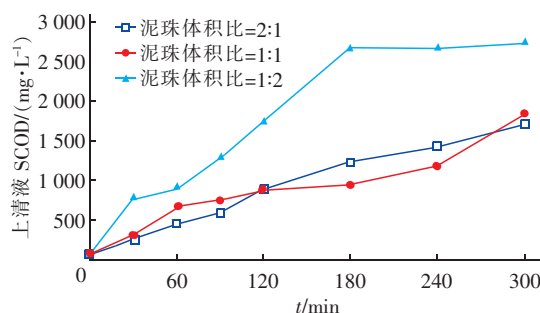


图3 泥珠体积比对破解效果的影响

Fig.3 Effect of volume ratio of sludge to glass beads on disintegration efficiency of sludge

泥珠体积比为 1:2 时,SCOD 释放量较 2:1、1:1 分别高出 58.9%、49.1%。此时不仅珠与珠之间互相碰撞摩擦的概率会增加,玻璃珠与杯壁的接触面积也会增加,但因玻璃珠占比过高,搅拌器所受的阻力也会变大,导致能耗有一定程度的增加。

SCOD 的升高趋势在 3 h 后逐渐放缓,5 h 较 3 h 只提升了 2.8%,推测本方法在 400 r/min 的搅拌速度下对污泥的破解能力具有上限,当絮体破坏、EPS 释放与细胞裂解均完成后,无法进一步释放 SCOD。

为寻找最佳破解条件,在 400 r/min 的转速下延长破解时间,如图 4(a) 所示,即使将破解时间延长至 7 h,与 3 h 相比上清液的 SCOD 浓度也只增加了 10.3%,因此选择最佳破解时间为 3 h,并改变转速继续实验,如图 4(b) 所示。可见,在转速增至 500 r/min 后 SCOD 浓度曲线的上升速率逐渐放缓,700 r/min 时较 500 r/min 时只增加了 2.5%,此实验结果进一步验证了之前的推论,当以小分子存在的 SCOD 都释放后,剩余的类似于腐殖性质质的颗粒有机物^[9],仅凭玻璃珠间的剪切碰撞力度与低速的水流剪切力无法进一步释放碳源。最佳破解条件下上清液 SCOD 可达 3 770 mg/L。

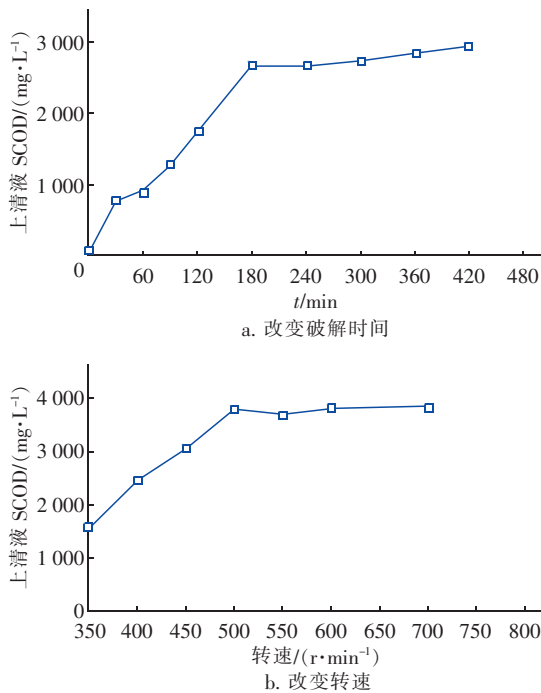


图4 破解条件的优化

Fig. 4 Optimization of disintegration conditions

2.3 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 随破解时间的变化

在泥珠体积比为 1:2、转速为 500 r/min 的条件下,破解过程中上清液的氨氮浓度变化如图 5(a) 所示。当破解时间增加时,上清液中的氨氮浓度随之上升,且破解效果最佳的 1~1.5 mm 玻璃珠产生的氨氮浓度也较其他粒径更高,在 3 h 时达到 25.2 mg/L。分析原因,破解过程中细胞液的释放伴随着

氨氮的溶出和蛋白质的水解^[10]。Kim 等^[11] 在进行污泥预处理时也发现了氨氮随 SCOD 同步释放的规律,且剩余污泥的破解程度与破解液中蛋白质含量呈正相关,蛋白质水解也会使氨氮浓度上升。同样的破解条件下,上清液中硝酸盐氮浓度的变化如图 5(b) 所示。4~4.5 mm 粒径的玻璃珠对污泥的破解效果较差,其他粒径条件下的硝酸盐氮上升趋势在前 2 h 较快,4 h 后达到最大值,1~1.5 mm 粒径的玻璃珠条件下释放的硝酸盐氮浓度达到 43.7 mg/L。但污泥细胞内本不应含有很多硝酸盐氮,分析原因为污泥细胞粉碎使硝化作用的相关酶(AMO、POD、NXR 等^[12]) 释放,而破解过程中的剧烈搅拌导致污泥获得供氧(破解后可观察到污泥上浮、泥水分离现象,期间测得 DO 为 5.32 mg/L),从而将氨氮转化为硝酸盐氮,这也解释了氨氮释放曲线中的下降趋势。

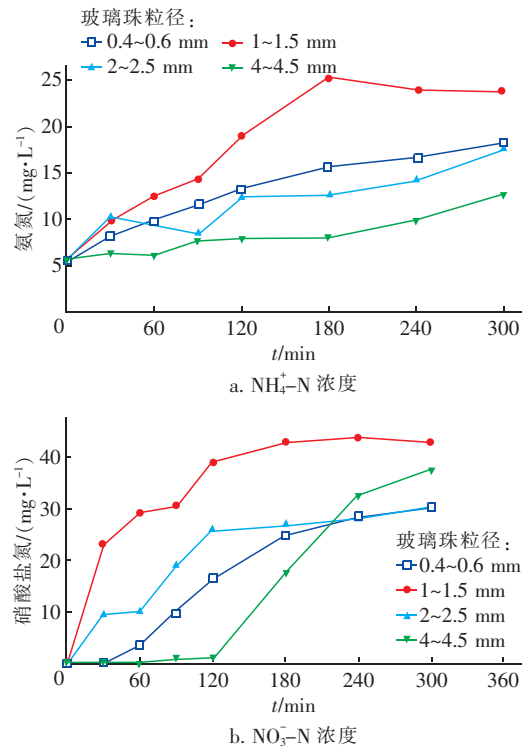


图5 破解过程中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的变化

Fig. 5 Change of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentrations in disintegration process

2.4 破解前后污泥粒径及微观形貌的变化

污泥粒径分布情况能较为直观地呈现污泥破解过程中的微观形态变化。在泥珠体积比为 1:2、玻璃珠粒径为 1~1.5 mm、转速为 500 r/min、破解时间为 360 min 的条件下,污泥破解过程中粒径分布

的变化如图6所示。破解前剩余污泥的粒径在 $1.096 \sim 478.63 \mu\text{m}$ 范围内均有分布,此时观测结果主要展示的是污泥中菌胶团(几十至数百微米^[13])与胞外聚合物($100 \sim 300 \mu\text{m}$ ^[14])的粒径分布情况。随着破解时间达到60 min,观测到频度分布的峰值左移,中值粒径由 $28.114 \mu\text{m}$ 下降至 $10.15 \mu\text{m}$,可见玻璃珠的剪切碰撞作用初步将污泥絮体与菌胶团分散,SCOD的显著上升也可证明EPS被一定程度的移除,但此时边界粒径 $[D_{10}, D_{90}]$ 为 $[2.816 \mu\text{m}, 30.516 \mu\text{m}]$,形体尺寸在微米级别的污泥细胞并未被破坏。破解时间达到120 min后,中值粒径已经下降至 $4.503 \mu\text{m}$,粒径在 $0.417 \sim 0.052 \mu\text{m}$ 范围内的颗粒大幅增加,且可观测到SCOD的急剧上升,说明部分污泥细胞被粉碎,细胞内的有机物质溶出,致使微粒直径降低至 $1 \mu\text{m}$ 以下。同时出现了十分明显的分峰现象,此现象在破解时间达到360 min时仍可观测到,说明并非是破解时间不足导致的破解效果不均匀,分析原因为破解后的污泥细胞再次团聚,因为蛋白质、核酸等细胞溶出物可以与细菌、多糖的负电点位结合导致重新絮凝^[15]。而此时大量出现的 $0.13 \mu\text{m}$ 附近的颗粒,推测应为未团聚时的中值粒径。

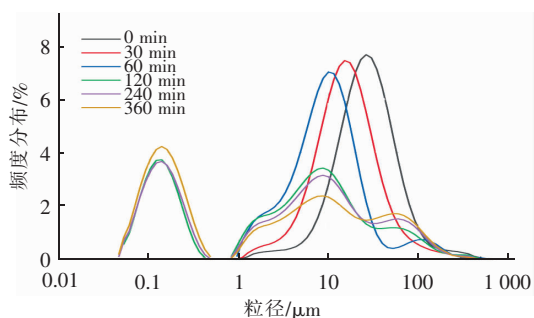


图6 污泥破解过程中粒径分布的变化

Fig. 6 Change of particle size distribution in sludge disintegration process

粒径分布结果也验证了本方法的破解上限,破解时间由120 min增加至360 min,中值粒径也仅下降了 $2.27 \mu\text{m}$,且边界粒径的变化十分微弱, D_{10} 仅由 $0.111 \mu\text{m}$ 下降至 $0.098 \mu\text{m}$,当污泥絮体、EPS与污泥细胞的破解均已充分完成后,已经被破碎的污泥细胞颗粒无法进一步粉碎,SCOD的释放速率也大大减缓。

另外,破解前和破解180 min后剩余污泥的SEM照片见图7。可见,破解前,污泥细胞被包裹在

EPS中,相互联系形成尺寸较大的菌胶团。经过180 min的破解后,在图7(c)中可观察到污泥絮体与EPS均被分散,在图7(d)中可观察到污泥细胞产生裂解,且有一定程度的团聚,多个破解后细胞的细粒聚集为大颗粒。这印证了破解后污泥粒径分布情况,即玻璃珠研磨对污泥细胞具有较强的破解效果,且在破解完成后有重新絮凝的现象发生。

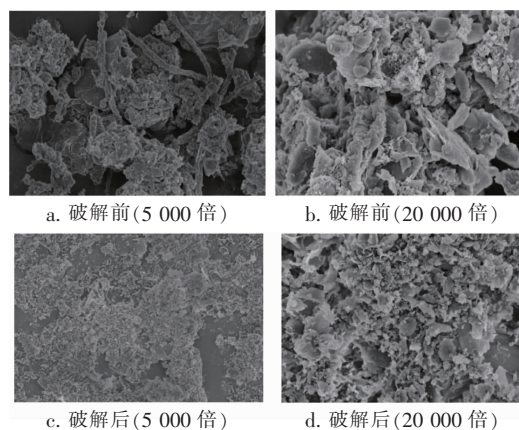


图7 破解前后生物扫描电镜观测结果

Fig. 7 SEM pictures of sludge before and after disintegration

3 结论

① 当玻璃珠粒径为 $1 \sim 1.5 \text{ mm}$ 、泥珠体积比为 $1:2$ 时,低速旋流搅拌球磨技术对剩余污泥的破解效果最好,而且破解效果与破解时间、搅拌器转速呈正相关。

② 采用粒径为 $1 \sim 1.5 \text{ mm}$ 的玻璃珠与浓度为 8452.5 mg/L 的剩余污泥以 $2:1$ 体积比混合,在维持线速度为 1.44 m/s 的条件下破解3 h,污泥上清液的SCOD浓度可达到 3770 mg/L ,继续增加破解时间与转速,SCOD浓度上升不明显,可知本方法对污泥的破解能力具有上限。

③ SCOD的释放伴随着氨氮的溶出,且有相关酶将氨氮转化为硝酸盐氮的现象发生,氨氮和硝酸盐氮的最高浓度分别达到 $25.2, 43.7 \text{ mg/L}$ 。

④ 粒径分析结果显示, $1 \mu\text{m}$ 以下的小尺度微粒大幅增加,中值粒径由 $28.114 \mu\text{m}$ 下降至 $2.233 \mu\text{m}$,因污泥细胞碎片的团聚而发生分峰现象,出现大量 $0.13 \mu\text{m}$ 附近的颗粒。生物扫描电镜照片显示,破解过程中不仅分散了污泥絮体与菌胶团,同时破坏了污泥细胞。

本方法作为一种效果较好的剩余污泥破解技术,具有一定的实际可行性。

参考文献:

- [1] CAMARGO J A, ALONSO A. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: a global assessment [J]. *Environment International*, 2006, 32(6): 831–849.
- [2] WANG D B, ZENG G M, CHEN Y J, *et al.* Effect of polyhydroxyalkanoates on dark fermentative hydrogen production from waste activated sludge [J]. *Water Research*, 2015, 73(15): 311–322.
- [3] LEE M J, KIM T H, YOO G Y, *et al.* Reduction of sewage sludge by ball mill pretreatment and Mn catalytic ozonation [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2010, 14(5): 693–697.
- [4] 韩进. 基于高速转盘破解结合 A/O/A—SBR 工艺的剩余污泥减量化研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
HAN Jin. Excess Sludge Reduction by High Speed Rotary Disk Disintegration with A/O/A – SBR Process [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015 (in Chinese).
- [5] 王先宝, 亓雪菲, 费骄, 等. 剩余污泥机械破碎碳源快速释放与回收技术 [J]. *中国给水排水*, 2018, 34(19): 12–16, 22.
WANG Xianbao, QI Xuefei, FEI Jiao, *et al.* Carbon source release and recovery rapidly from excess sludge by mechanical disintegration [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(19): 12–16, 22 (in Chinese).
- [6] 李洁. 球磨法破解剩余污泥的实验研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
LI Jie. Experimental Study on Disintegration of Excess Sludge with Ball Mills Method [D]. Shenyang: Northeastern University, 2012 (in Chinese).
- [7] 徐银香. 活性污泥旋流释碳工艺研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2016.
XU Yinxiang. Process Study on the Release of Carbon Sources in the Activated Sludge by a Carbon-release Hydrocyclone [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2016 (in Chinese).
- [8] SHENG G P, YU H Q, LI X Y. Stability of sludge flocs under shear conditions [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2008, 38(3): 302–308.
- [9] 郝晓地, 唐兴, 曹亚莉. 腐殖质对污泥厌氧消化的影响及其屏蔽方法 [J]. *环境科学学报*, 2017, 37(2): 407–418.
HAO Xiaodi, TANG Xing, CAO Yali. Effects of humic substances on anaerobic digestion of excess sludge and their blocked approaches [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(2): 407–418 (in Chinese).
- [10] XUE T, HUANG X. Releasing characteristics of phosphorus and other substances during thermal treatment of excess sludge [J]. *Journal of Environmental Science*, 2007, 19(10): 1153–1158.
- [11] KIM T H, LEE M, PARK C. Gamma ray irradiation for sludge solubilization and biological nitrogen removal [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2011, 80(12): 1386–1390.
- [12] 张明霞, 李安章, 陈猛, 等. 异养硝化–好氧反硝化菌脱氮相关酶系及其编码基因的研究进展 [J]. *生物技术进展*, 2020, 10(1): 40–45.
ZHANG Mingxia, LI Anzhang, CHEN Meng, *et al.* Progress on nitrogen removal related enzymes and their coding genes in heterotrophic nitrifying and aerobic denitrifying bacteria [J]. *Current Biotechnology*, 2020, 10(1): 40–45 (in Chinese).
- [13] 刘玉玲, 文晓慧. 城市污水处理厂活性污泥的表面形态和微观结构研究 [J]. *环境科学导刊*, 2015, 34(4): 57–61.
LIU Yuling, WEN Xiaohui. Surface features and microstructures of activated sludge in municipal wastewater treatment plant [J]. *Environmental Science Survey*, 2015, 34(4): 57–61 (in Chinese).
- [14] 郑蕾, 田禹, 孙德智, 等. 活性污泥胞外聚合物提取方法研究 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2006, 7(11): 32–34.
ZHENG Lei, TIAN Yu, SUN Dezhi, *et al.* Research on extraction methods of extracellular polymeric substances from activated sludge [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2006, 7(11): 32–34 (in Chinese).
- [15] GONZE E, PILLOT S, VALETTE E, *et al.* Ultrasonic treatment of an aerobic activated sludge in a batch reactor [J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2003, 42(12): 965–975.

作者简介: 朱赵冉 (1997–), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 研究方向为水处理理论与技术。

E-mail: 171652618@qq.com

收稿日期: 2020–09–04

修回日期: 2020–10–22

(编辑: 刘贵春)