

超声波参数对短程硝化的影响

朱易春^{1,2}, 王佳琪^{1,2}, 章 璋^{1,2}, 连军锋^{1,2}, 刘祖文^{1,2}, 张光明³

(1. 江西省环境岩土与工程灾害控制重点实验室, 江西 赣州 341000; 2. 江西理工大学
赣江流域水质安全保障工程技术研究中心, 江西 赣州 341000; 3. 中国人民大学 环境
学院, 北京 100872)

摘 要: 在 SBR 连续运行过程中, 采用 20 kHz 的超声波, 在不同声能密度与辐照时间下处理浓缩污泥, 考察超声波参数对短程硝化的影响。结果表明, 低强度超声波可有效促进氨氧化细菌 (AOB) 活性并抑制亚硝酸盐氧化细菌 (NOB) 活性。适宜的超声波声能密度为 0.05 W/mL, 辐照时间为 20 min, 能量为 23 kJ/gVSS。在此条件下, SBR 的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除负荷为 2.54 mg/(gVSS · h), 亚硝酸盐积累率 (NAR) 为 59.6%, 在过度曝气条件下仍可维持短程硝化状态。同时 AOB 活性达到最大值 8.06 mgO₂/(gVSS · h), 比未超声组提高了近 114%。胞外聚合物 (EPS)、蛋白质与多糖浓度分别提高了 62.0%、200.3% 与 30.1%, 超声波可加快细胞新陈代谢进而促进胞外聚合物分泌。因此, 合适能量的超声波是维持短程硝化的有效措施。

关键词: 短程硝化; 超声波; 声能密度; 辐照时间

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2018)05-0026-06

Effect of Ultrasound Parameters on Partial Nitrification

ZHU Yi-chun^{1,2}, WANG Jia-qi^{1,2}, ZHANG Zhang^{1,2}, LIAN Jun-feng^{1,2}, LIU Zu-wen^{1,2},
ZHANG Guang-ming³

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Environmental Geotechnology and Engineering Disaster Control, Ganzhou 341000, China; 2. Research Center for Water Quality Security Technology at Ganjiang River Basin, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 3. School of Environment & Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: In order to investigate the effect of ultrasound parameters on partial nitrification, six sequencing batch reactors (SBRs) were obtained. Condensed sludge in SBRs was treated by ultrasound with density from 0.05 W/mL to 0.4 W/mL and irradiation time ranging from 10 min to 90 min at a frequency of 20 kHz. Results showed that bioactivity of ammonia-oxidizing bacteria (AOB) was enhanced by ultrasound, while that of nitrite-oxidizing bacteria (NOB) was suppressed simultaneously. The optimal ultrasonic density and irradiation time for stimulating partial nitrification were 0.05 W/mL and 20 min respectively, under which ultrasonic energy was 23 kJ/gVSS. Under the optimal condition, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ removal load in SBR was 2.54 mg/(gVSS · h) and $\text{NO}_2^- - \text{N}$ accumulation rate (NAR) reached 59.6%, which indicated that even with excessive aeration operation partial nitrification could be maintained by ultra-

sound with suitable parameters. AOB bioactivity reached the maximum of $8.06 \text{ mgO}_2/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ at ultrasonic energy of 23 kJ/gVSS , which was increased by 114% compared with the control. Under the same condition, sludge extracellular polymeric substances (EPS), protein and polysaccharide concentrations were increased by 62.0%, 200.3% and 30.1% compared with the control, which revealed that ultrasound irradiation could accelerate cell metabolism then enhance EPS yield. Ultrasound with appropriate energy is a feasible strategy to retain partial nitrification.

Key words: partial nitrification; ultrasound; ultrasonic density; irradiation time

为弥补传统生物脱氮技术的不足,新型脱氮工艺引起广泛关注,其中短程硝化因节约碳源与能源成为研究热点^[1,2]。短程硝化工艺多用于处理低 C/N 值废水,它是将硝化产物控制为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$,而不是进一步转化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,其主要通过抑制亚硝酸盐氧化细菌(NO_B)的生长而不影响氨氧化细菌(AOB)的正常代谢来实现。维持低溶解氧(DO)浓度、交替缺氧(厌氧)/好氧运行、高浓度游离氨(FA)等方法均可有效抑制 NO_B 活性,但存在难以维持短程硝化稳定运行等问题^[1,3]。

近年来发现适当能量的超声波可促进 AOB 生长并抑制 NO_B 增殖,可快速启动并稳定维持短程硝化^[4],长期辐照可形成稳定的菌群结构^[5],为短程硝化的实现与维持提供了新思路。唐欣等^[6]采用序批式试验研究超声波参数对短程硝化污泥活性的影响,发现能量为 43.2 kJ/gVSS 的超声波可最大程度地提高 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的生成量。Zheng 等人^[7]采用直接辐照 SBR 反应器中所有泥水混合物方式,在超声波能量约为 130 kJ/gVSS 时成功实现了短程硝化。不同研究方法所得适宜的超声波能量差异较大,有研究表明^[8],取浓缩污泥进行超声波处理可降低能量损失。笔者将超声波处理与反应器运行分离,并以浓缩污泥为超声波辐照对象,在 SBR 连续运行处理低 C/N 值模拟污水过程中,考察了不同声能密度与辐照时间下的氮素转化性能,以及不同辐照时间下 AOB 与 NO_B 活性与污泥胞外聚合物(EPS)浓度的变化,以探究超声波对短程硝化的影响规律并得到适宜的超声波能量参数。

1 材料与方法

1.1 试验装置与进水水质

试验在 6 个圆柱体 SBR 中进行,其内径为 10 cm,有效体积为 1 L,试验装置如图 1 所示。运行期间控制各反应器的曝气量为 $80 \sim 100 \text{ L/h}$,水温为 $18 \sim 21^\circ\text{C}$ 。反应器换水率为 50%。SBR 运行周期

安排如下:进水为 5 min,反应为 6 h/9 h,沉淀为 50 min,排水为 5 min。反应采用缺氧(厌氧)/好氧交替的方式运行,其中 6 h 反应阶段安排为:2 段 1 h 曝气/1 h 停曝与 2 段 0.5 h 曝气/0.5 h 停曝;9 h 反应阶段安排为:3 段 1 h 曝气/1 h 停曝与 3 段 0.5 h 曝气/0.5 h 停曝。

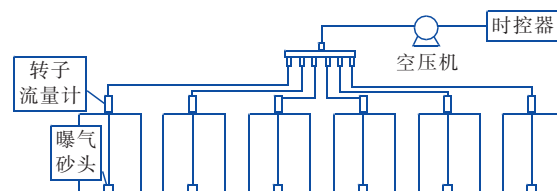


图1 反应器装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental equipment

进水采用人工配水,模拟污水主要成分:乙酸钠为 $1\,012 \text{ mg/L}$,氯化铵为 229 mg/L ,磷酸二氢钾为 26 mg/L ,硫酸铁为 9 mg/L ,氯化钙为 50 mg/L ,七水合硫酸镁为 21 mg/L 。相应的进水 COD、氨氮、总磷分别为 300 、 60 及 3 mg/L 。通过加入一定量的碳酸氢钠,使出水 pH 值维持在 $7.5 \sim 8.5$ 之间。

1.2 超声波辐照试验

超声波试验装置采用探头式超声波发生器,频率为 20 kHz ,探头直径为 6 mm ,辐照方式为间歇式。SBR 运行周期完成后,取反应器中全部(500 mL)泥水混合物(MLVSS 为 $4\,600 \sim 6\,600 \text{ mg/L}$)于烧杯中,使探头浸入液面下约 10 mm ,进行超声波处理,处理后倒入原 SBR 开始下一个周期。每个 SBR 的超声波处理间隔周期为 24 h 。

1.3 确定超声波参数

试验种泥取自赣州市某污水厂,在 SBR 中驯化后开始进行超声波处理。首先固定超声波辐照时间为 10 min ,调整超声波功率使得声能密度依次为 0.05 、 0.1 、 0.2 、 0.3 及 0.4 W/mL ,每天测定 SBR 反应时间为 6 h 的周期出水水质,以选择合适的声能密度。

取重新驯化的污泥,采用已选的声能密度,设定辐照时间为10、20、40、60与90 min,测定反应时间为9 h的周期出水水质,并在运行稳定期间测定污泥AOB与NOB活性,以及各SBR中污泥的EPS组分。

1.4 分析方法

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、MLSS与MLVSS均采用国家标准分析方法测定;DO和pH值分别用溶解氧仪和pH计测定,温度采用水银温度计测量。

测定AOB与NOB的活性时,从各SBR中取出100 mL泥水混合物,清洗后放入烧杯并加400 mL自来水进行空曝,在测定前15 min停止曝气,取沉淀后的污泥进行测量。OUR测试底液的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度均为20 mg/L, SOUR_{AOB} 与 SOUR_{NOB} 的测定与计算方法见文献[9]。EPS采用热提取法提取^[10],蛋白质采用考马斯亮蓝法测定,多糖采用硫酸-苯酚法测定,DNA采用二苯胺比色法测定。

2 结果与讨论

2.1 声能密度对氮素转化的影响

SBR运行10 d,其 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除负荷、NAR、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度随声能密度的变化如图2所示。

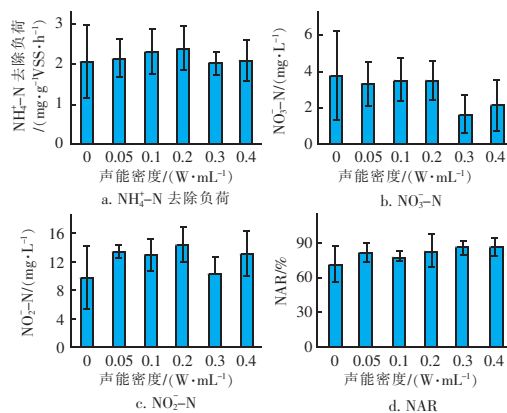


图2 不同超声波声能密度下氮素的转化性能

Fig. 2 Variation of nitrogen transformation with ultrasonic density

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除负荷可反映污泥氧化 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的能力。由图2(a)可知,随着超声波声能密度的增加, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除负荷呈先增后减的变化趋势,但波动较小,基本处于2.0~2.4 $\text{mg}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ 之间。经过超声波辐照的SBR出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度均高于未超声组,而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度均低于未超声组,说明

超声波辐照可促进 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累。NAR随声能密度的提高基本呈缓慢增长趋势,其中0.05 W/mL组的NAR为82.3%,而0.4 W/mL组为87.1%,仅提高了5.8%,说明增加声能密度对短程硝化效果的促进作用不明显。为节能,确定合适的超声波声能密度为0.05 W/mL。

2.2 辐照时间对氮素转化的影响

SBR运行期间维持好氧段较高的DO浓度(平均 $\text{DO} > 3 \text{ mg/L}$),并延长反应时间,保证 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率 $> 99\%$,使各SBR基本处于过度曝气状态。开始超声波处理第1天,各组NAR基本处于42.4%~64.4%,9 d之后,各组SBR出水氮素转化情况基本稳定,结果如图3所示。

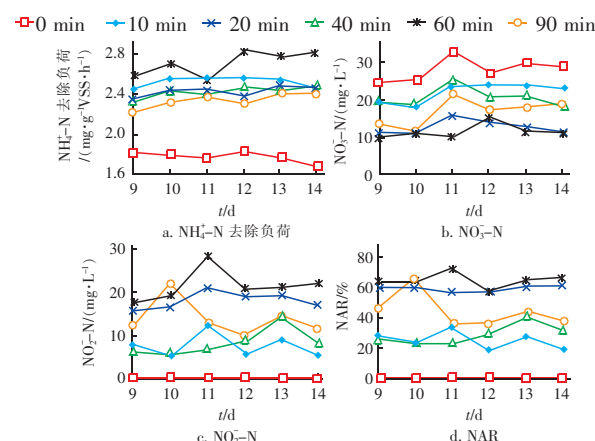


图3 稳定期间不同辐照时间下SBR的运行情况

Fig. 3 Variation of SBR performance with ultrasonic irradiation time during stable operation

由图3(a)可知,运行稳定期间,不同辐照时间的SBR对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均去除负荷相差不大,基本处于2.2~2.8 $\text{mg}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ 之间,而未超声组的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均去除负荷较低,为1.7~1.8 $\text{mg}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ 。说明在DO充足的条件下,超声波辐照可提高污泥的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除能力。在9~14 d未超声组的出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度最低($< 0.1 \text{ mg/L}$),而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度最高($> 24.7 \text{ mg/L}$),处于全程硝化状态。而各超声组的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 均高于5 mg/L ,有 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累。说明超声波辐照有利于促进全程硝化向短程硝化转变。

一般认为,当NAR高于50%且稳定产生较高浓度的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 时,即实现了短程硝化。由图3(d)可知,超声波辐照时间对系统NAR影响显著。对于各超声组,超声波辐照时间为10、40与90 min

的SBR出水NAR基本低于50%。而20 min与60 min组均维持在50%以上,最高分别可达60.6%与73.2%。高大文等^[11]等发现过度曝气会使NAR在12 d内从96%降为39.3%,在较高浓度的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 与DO条件下NOB很快恢复活性,破坏了短程硝化状态。声能密度为0.05 W/mL、辐照时间为20与60 min的SBR在过度曝气条件下依然可维持短程硝化状态,说明选择合适的超声波参数能够有效抑制NOB的活性。

Zheng等^[7]认为超声波处理能够提高反应器中温度与pH值,为短程硝化提供了适宜的环境。本试验中超声波处理与反应器运行分开进行,且出水取自超声波处理后第二个运行周期。超声波辐照过程中产生的加速物质传递与升温等作用,虽可加快细胞新陈代谢^[12,13],但持续时间较短,对生物反应器影响甚微。超声波强化污泥活性在处理结束后仍具有持续性,这种持续效应对促进短程硝化过程起主要作用。

对运行稳定期间(9~14 d)以上指标的平均值进行统计,辐照时间为20与60 min时对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除负荷较高,分别为2.54与2.67 mg/(gVSS·h),相比未超声组提高了41%与48%。超声波辐照时间为0~20 min时NAR随辐照时间的延长而逐渐升高,在20 min时 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度升高至18.7 mg/L,而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 降低至12.7 mg/L,此时NAR达到59.6%。40 min时,随 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的降低与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的升高,NAR降低至28.6%。辐照时间延长至60 min时, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度分别为21.7与11.7 mg/L,NAR达到最大,为64.9%。随着超声波辐照时间的继续延长,至90 min时NAR再次下降。生物硝化过程由两步连续的生化反应组成,AOB与NOB的代谢活性是决定硝化类型的关键因素。超声波辐照时间会改变AOB与NOB活性^[4,7]。不同辐照时间下NAR的变化可能与相应的AOB与NOB活性变化有关。

2.3 不同辐照时间下的污泥活性

SOUR_{AOB} 和 SOUR_{NOB} 分别是AOB与NOB的比耗氧速率,与相应的底物氧化速率有很好的相关性^[9],可用来反映污泥中AOB与NOB的代谢活性^[14]。在反应器运行稳定期间取各SBR中的污泥,测得 SOUR_{AOB} 和 SOUR_{NOB} ,据此计算不同超声波辐照时间下 SOUR_{AOB} 和 SOUR_{NOB} 相对于未超声组的

增长率,结果如图4所示。

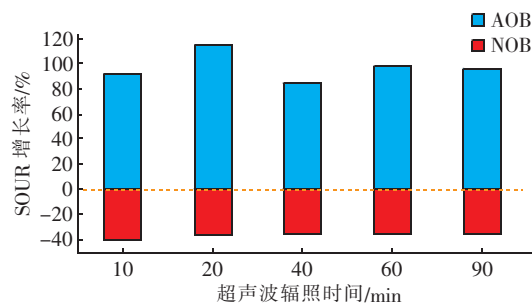


图4 不同超声波辐照时间下 SOUR_{AOB} 与 SOUR_{NOB} 增长率

Fig. 4 Growth rate of SOUR_{AOB} and SOUR_{NOB} under different ultrasonic irradiation time compared with control

由图4可知,相比未超声组,经超声波处理的污泥 SOUR_{AOB} 均有所提高,而 SOUR_{NOB} 均有所下降,这说明10~90 min的超声波辐照均可促进AOB活性并抑制NOB活性。Lin等^[15]认为超声波对微生物产生损伤效应,微小伤口会激发细胞的防御机制,加快其代谢速率,如果伤口过多则会导致微生物死亡。不同种类的微生物对超声波刺激的耐受性不同。NOB可能对超声波刺激的耐受性更弱,经超声波辐照后,活性受到抑制。而AOB经相同条件的超声波辐照后代谢加快,活性提高。大连理工大学段秀梅的研究显示,适当能量的超声波可加速细胞内外传质、增强细胞通透性、提高酶活性并加速细胞生长。氨单加氧酶(AMO)是AOB中 NH_3 氧化的关键酶,唐欣等^[6]的研究表明,适当能量的超声波处理可增强AMO的活性。综上所述,低强度超声波可选择性地抑制NOB活性,有利于实现短程硝化。

图4还表明超声波提高AOB活性存在一个最佳的辐照时间, SOUR_{AOB} 在20 min时达到了最大值8.06 mgO₂/(gVSS·h),相比未超声组提高了近114%。20 min之后超声波对AOB的伤害加大,强化作用减弱。然而,在超声波辐照时间为60 min时, SOUR_{AOB} 再次提高。当辐照时间继续延长至90 min时,AOB因过长时间超声波辐照活性降低, SOUR_{AOB} 下降。此外,辐照时间为10~90 min时 SOUR_{NOB} 基本处于4.74~5.19 mgO₂/(gVSS·h)之间,NOB活性受辐照时间的影响较小。可能因为测量活性之前,污泥经多次(≥ 9 次)超声波处理,不同辐照时间下的NOB活性均处于较低水平,表现为各组 SOUR_{NOB} 差距较小。AOB活性越高、NOB活性越低越有利于 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累。 SOUR_{AOB} 与 SOUR_{NOB}

的差值在超声波辐照时间为 20 min 时达到最大,为 $2.97 \text{ mgO}_2/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$,在 40 min 时降低为 $1.87 \text{ mgO}_2/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$,至 60 min 时又上升为 $2.27 \text{ mgO}_2/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ 。这与 NAR 随超声波辐照时间的变化趋势基本一致。

2.4 超声波辐照时间对污泥 EPS 的影响

蛋白质、多糖与 DNA 是微生物胞外聚合物 (EPS) 的主要成分。在运行至第 14 天时取污泥,对其 EPS 组分含量进行测定,结果如图 5 所示。

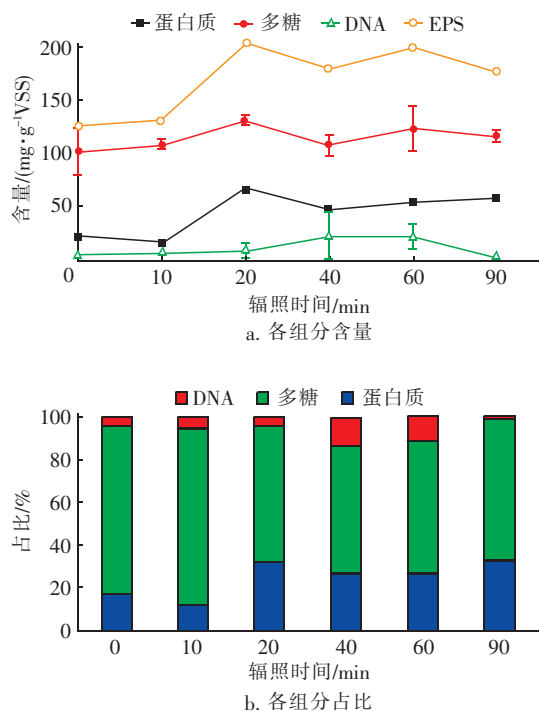


图5 不同辐照时间下 EPS 的变化

Fig.5 Change of EPS with ultrasonic irradiation time

由图 5(a)可知,随着辐照时间的延长,总 EPS、蛋白质、多糖与 DNA 含量呈先增后减的变化趋势。EPS 含量在 20 min 时达到最高,比未超声组提高了 62.0%,此时蛋白质与多糖含量分别为 66.2 与 131.6 mg/gVSS,相比未超声组分别提高了 200.3% 与 30.1%。超声波辐照污泥时可提高细胞壁与细胞膜的通透性,促进细胞新陈代谢从而使 EPS 的分泌量增加,但随着辐照时间的延长,自由基的分解作用使污泥的 EPS 含量逐渐降低^[16]。

从图 5(b)可以看出,EPS 中各组分占比受超声波辐照时间的影响较大。20~90 min 组的蛋白质占比在 26.6%~33.2% 之间,明显高于未超声组 (17.4%),而多糖占比为 60.2%~66.0%,低于未

超声组 (79.6%),说明适当延长超声波辐照时间可提高 EPS 中蛋白质的比例。当辐照时间 < 40 min 时 DNA 占比在 3.0%~4.6% 之间,当辐照时间达到 40 min 时 DNA 占比突然增加至 13.1%,此时微生物细胞膜被破坏,胞内 DNA 大量流出,超声波已产生明显的融胞效应。细菌被裂解后在曝气过程中易造成生物泡沫,且沉淀出水浑浊,即过长的辐照时间不利于系统稳定运行。因此,确定促进短程硝化合适的超声波辐照时间为 20 min,此时超声波比能耗约为 23 kJ/gVSS。相比 Zheng 等人^[7]的研究结果 (比能耗约为 130 J/mgVSS,MLVSS 取 1 500 mg/L),节能近 82%。尽管存在操作条件与超声波装置等的差异,但采用超声波辐照浓缩污泥的处理方式比辐照全部反应器中泥水混合物大大节约了能耗。此外,王佳琪等采用同样的超声波处理方式,在强化污泥整体活性时,确定合适的声能密度与辐照时间分别为 0.2 W/mL 与 12 min。为了促进短程硝化,推荐 0.05 W/mL 与 20 min 为最佳声能密度与辐照时间。说明不同的强化目的所得超声波参数有所差异。因此针对不同强化目的,开展相应的超声参数优化研究很有必要。

3 结论

在声能密度为 0.05 W/mL 时,超声波辐照 10~90 min 均可促进 AOB 活性并抑制 NOB 活性,但在过度曝气条件下,只有 20 与 60 min 的超声波维持了短程硝化状态。由于超声波辐照时间超过 20 min 后会产生明显的融胞现象,不利于系统稳定运行,故选择辐照时间为 20 min。超声波维持短程硝化存在一段较窄的合适能量范围,在本试验中约为 23 kJ/gVSS。

参考文献:

- [1] Ge S, Wang S, Yang X, et al. Detection of nitrifiers and evaluation of partial nitrification for wastewater treatment: a review[J]. Chemosphere, 2015, 140: 85-98.
- [2] 张宗和, 郑平, 厉巍, 等. 一体化生物脱氮技术研究进展[J]. 化工进展, 2015, 34(10): 3762-3768. Zhang Zonghe, Zheng Ping, Li Wei, et al. Research progress in integrative bio-technologies for nitrogen removal [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(10): 3762-3768 (in Chinese).
- [3] Ge S, Peng Y, Qiu S, et al. Complete nitrogen removal from municipal wastewater via partial nitrification by ap-

- appropriately alternating anoxic/aerobic conditions in a continuous plug-flow step feed process[J]. *Water Res*, 2014, 55: 95 – 105.
- [4] Zheng M, Liu Y C, Xin J, *et al.* Ultrasonic treatment enhanced ammonia-oxidizing bacterial (AOB) activity for nitrification process[J]. *Environ Sci Technol*, 2015, 50(2): 864 – 871.
- [5] 叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 等. 超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中细菌群落结构分析[J]. *环境科学*, 2012, 33(2): 618 – 624.
- Ye Yundi, Sun Shuiyu, Zheng Li, *et al.* Analysis of community structure on sludge aerobic/anoxic digestion after ultrasonic pretreatment[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(2): 618 – 624 (in Chinese).
- [6] 唐欣, 乔森, 周集体. 低强度超声对短程硝化污泥活性的影响[J]. *安全与环境学报*, 2017, 17(1): 267 – 272.
- Tang Xin, Qiao Sen, Zhou Jiti. Influence of the lower intensity ultrasound on the activity of the partial nitrification sludge[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(1): 267 – 272 (in Chinese).
- [7] Zheng M, Liu Y, Xu K, *et al.* Use of low frequency and density ultrasound to stimulate partial nitrification and simultaneous nitrification and denitrification[J]. *Biore-sour Technol*, 2013, 146: 537 – 542.
- [8] Zhang G, Zhang P, Gao J, *et al.* Using acoustic cavitation to improve the bio-activity of activated sludge[J]. *Biore-sour Technol*, 2008, 99(5): 1497 – 1502.
- [9] Zhang R, Jin R, Liu G, *et al.* Study on nitrogen removal performance of sequencing batch reactor enhanced by low intensity ultrasound[J]. *Biore-sour Technol*, 2011, 102(10): 5717 – 5721.
- [10] 龙焙, 程媛媛, 赵珏, 等. 好氧颗粒污泥处理化工废水的应用研究[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(5): 26 – 32.
- Long Bei, Cheng Yuanyuan, Zhao Jue, *et al.* Treatment of chemical wastewater by aerobic granular sludge[J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(5): 26 – 32 (in Chinese).
- [11] 高大文, 彭永臻, 王淑莹. 短程硝化生物脱氮工艺的稳定性[J]. *环境科学*, 2005, 26(1): 63 – 67.
- Gao Dawen, Peng Yongzhen, Wang Shuying. Stability of shortcut nitrification-denitrification[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(1): 63 – 67 (in Chinese).
- [12] Zhu Y, Li X, Du M, *et al.* Improve bio-activity of anaerobic sludge by low energy ultrasound[J]. *Water Sci Technol*, 2015, 72(12): 2221 – 2228.
- [13] Schläfer O, Sievers M, Klotzbücher H, *et al.* Improvement of biological activity by low energy ultrasound assisted bioreactors[J]. *Ultrasonics*, 2000, 38(1): 711 – 716.
- [14] Manser R, Gujer W, Siegrist H. Decay processes of nitrifying bacteria in biological wastewater treatment systems[J]. *Water Res*, 2006, 40(12): 2416 – 2426.
- [15] Lin L, Wu J. Enhancement of shikonin production in single- and two-phase suspension cultures of *Lithospermum erythrorhizon* cells using low-energy ultrasound[J]. *Biotechnol Bioeng*, 2002, 78(1): 81 – 88.
- [16] Chen W, Gao X, Xu H, *et al.* Influence of extracellular polymeric substances (EPS) treated by combined ultrasound pretreatment and chemical re-flocculation on water treatment sludge settling performance[J]. *Chemosphere*, 2017, 170: 196 – 206.



作者简介: 朱易春(1979 –), 男, 湖北仙桃人, 博士, 副教授, 主要从事污水处理技术研究。

E-mail: zhuych@jxust.edu.cn

收稿日期: 2017 – 10 – 25