

异波折板复合厌氧污水处理中试研究

韩相奎¹, 叶长兵^{2, 3}, 庄金鹏¹, 毕冬¹, 王雷¹

(1. 吉林建筑工程学院市政与环境工程学院, 长春 130021; 2. 吉林大学环境与资源学院, 长春 130026; 3. 玉溪师范学院资源环境学院, 玉溪 653100)

摘要:以传质理论和双层分阶段厌氧多生物相(TSMPA)理论为基础, 设计了厌氧污泥-生物膜异波折板复合式反应器, 进行为期 12 个月的生活污水处理中试研究. 动态试验结果表明, 在温度为 $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 条件下, 系统的最佳水力停留时间(HRT)为 6 h. 此时所对应的 COD、TP、TN 去除率分别为 78.58%、35.15%、39.17%; 最适厌氧污泥区百分比为 45%~65%. HRT 为 6 h, 温度降至 7°C 时所对应的 COD、TP、TN 去除率分别为 64.37%、20.72%、23.65%; 最大比甲烷产率为 $1.85 \text{ mL}/(\text{g}\cdot\text{h})$. 结果表明, 在北方地区低温条件下应用本技术处理低浓度生活污水可行.

关键词:异波折板; 双层分阶段多生物相; 传质; 最大比甲烷产率

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)11-3077-04

Pilot-Scale Opposite Folded Plate Hybrid Anaerobic Reactor (OFPHAR) in Treatment of Sewage

HAN Xiang-kui¹, YE Chang-bing^{2, 3}, ZHUANG Jin-peng¹, BI Dong¹, WANG Lei¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, Changchun 130021, China; 2. College of Environmental and Natural Resources, Jilin University, Changchun 130026, China; 3. College of Resources and Environment, Yuxi Normal University, Yuxi 653100, China)

Abstract: Based on the theories of mass-transfer and two-double integrated staged multi-phase anaerobe (TSMPA), a pilot-scale opposite folded plate hybrid anaerobic reactor (OFPHAR) was designed to treat low concentration sewage. All the trial lasted 12 months and the results indicated that the optimal HRT was 6h. At this HRT, the COD, TP and TN removal rate were 78.58%, 35.15%, 39.17%, respectively, at $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. The optimal rate of anaerobic section was 45%-65%. Controlled HRT = 6 h, the COD, TP and TN removal rate were 64.37%, 20.72%, 23.65%, respectively, and the specific methane production capacity were $1.85 \text{ mL}/(\text{g}\cdot\text{h})$ when the temperature decreased to 7°C . The results of trial indicated that apply this OFPHAR to treat low concentration sewage at low temperature in north China is feasible.

Key words: opposite folded plate; two-double integrated staged multi-phase; mass-transfer; specific methane production capacity

由于厌氧生物处理技术具有处理能力大、易调控、效率高、成本低等优点^[1, 2], 目前国内外已对嗜热和嗜温厌氧生物处理技术进行广泛研究和应用^[3~6]. 以往的研究成果和实际工程表明, 嗜热和嗜温厌氧生物处理技术对各种污水的处理效果已相当显著, 但在低温条件下处理低浓度污水的研究却少见报道^[7]. 我国东北大部分地区冬季城市生活污水温度低于 10°C , 采取中温厌氧生物处理技术进行处理已不可能. 若研究出一种新型厌氧生物处理技术, 能在较短水力停留时间(HRT)内显著提高低浓度生活污水的有机物去除效率, 并在东北冬季低温条件下保持较高的有机物去除率, 则可大大降低污水处理厂的基建费用和能耗, 极大促进我国低温厌氧污水处理技术的发展.

为此, 本课题组以传质理论和双层分阶段多生物相理论为基础, 设计了厌氧污泥-生物膜异波折板复合式反应器, 旨在显著强化各运行条件下厌氧反

应器对低浓度污水的去除功效; 同时, 重点探讨了异波折板复合厌氧生物处理技术在北方地区低温条件下运行的可行性, 并以中试进行验证.

1 材料与方法

1.1 反应装置

本试验装置为钢板制成的上流式厌氧污泥-生物膜异波折板复合式反应器. 反应器长 4 m, 宽 1 m, 高 2 m (其中有效高 1.8 m, 保护高 20 cm), 有效容积约 7.2 m^3 . 折板夹角 120° , 波高约 10 cm, 共分为 5 隔室. 末端隔室为平板结构, 以保证泥水分离效率. 反应装置每隔室下半部 1/2 区域为厌氧污泥区, 上半部 1/2 区域为弹性立体填料. 每隔室均设有排泥管. 反应装置结构详见图 1.

收稿日期: 2007-11-23; 修订日期: 2008-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(50778080)

作者简介: 韩相奎(1954~), 男, 教授, 主要研究方向为污水处理技术, E-mail: han_xiangkui@163.com

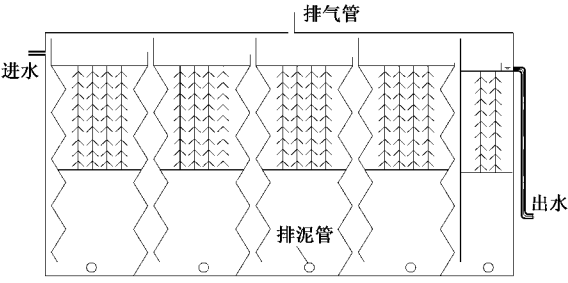


图 1 反应装置示意

Fig.1 Schematic diagram of reactor

1.2 试验污水及启动

本研究试验用水为长春市西郊污水处理厂初沉池出水,其 COD 浓度为 150 ~ 500 mg/L, TN 和 TP 浓度分别为 20 ~ 35 mg/L 和 3 ~ 8 mg/L, pH 值为 7.2 ~ 7.5. 为尽快启动反应器,于长春大成玉米深加工公司 UASB 反应器中取 100 kg 厌氧污泥作为本反应器的接种污泥.其性状为:深黑色;污泥容积指数(SVI)约为 50 mL/g; VSS/SS 值为 0.45. 当试验装置连续运行 50 d 后,即启动成功.

1.3 分析测试方法

COD 测试用重铬酸钾标准法(水样不过滤)^[8]; TN 测试用过硫酸钾氧化紫外分光光度法^[8]; TP 测试用过硫酸钾消解钼锑抗光度法^[8]; SS 与 VSS 用重量法^[8]; pH 值和水温用便携式多功能水质分析仪测定;甲烷气体产生量用液体置换装置法^[9]; SVI 值用标准法测定计算求得^[10].

2 结果与分析

2.1 COD、TP、TN 去除率与 HRT 关系

为查明异波折板复合厌氧反应器运行的最佳 HRT,考察水温在 25℃ ± 2℃ 条件下,其 COD、TP、TN 去除率与 HRT 之间关系.为获得稳定的试验结果,每一 HRT 至少运行 1 周.得出 COD、TP、TN 平均去除率(各标准差 $S \leq 2.84\%$)与 HRT 关系如图 2 所示.

由图 2 可知, HRT = 3 h 时, COD、TP 和 TN 平均去除率分别为 40.21% ($S = 2.22\%$)、14.38% ($S = 1.83\%$)、26.32% ($S = 2.07\%$). 此后, COD、TP、TN 平均去除率随 HRT 增大而急剧上升.当 HRT = 6 h 时, COD、TP 和 TN 平均去除率分别为 78.58% ($S = 2.56\%$)、35.15% ($S = 2.13\%$)、39.17% ($S = 2.06\%$). 进一步增大 HRT, 其 COD、TP、TN 平均去除率上升不明显. HRT 增至 8 h 时, 三者去除率仅增至

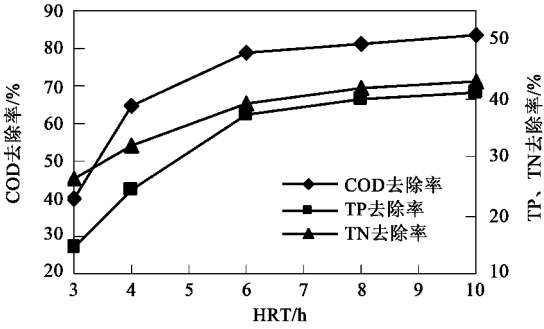


图 2 COD、TP、TN 去除率与 HRT 关系

Fig.2 COD, TP, TN removal rate vs HRT

81.45% ($S = 2.84\%$)、39.89% ($S = 1.92\%$)、41.46% ($S = 2.31\%$). 试验结果表明,在此条件下,异波折板复合厌氧反应器最佳 HRT 为 6 h.

2.2 厌氧污泥量对 COD 去除率的影响

为考察异波折板复合厌氧反应器内污泥量对反应器运行功效的影响,以便于控制运行各时段系统内的厌氧污泥量,本研究引入厌氧污泥区容积百分比这一概念.厌氧污泥区容积百分比即为厌氧污泥区容积与反应器总容积的比值.厌氧污泥区容积以厌氧污泥层容积计,填料区中未被污泥层浸没部分不计.通过考察系统厌氧污泥区容积百分比与 COD 去除率之间的关系,即可查明系统最佳功效时所对应的厌氧污泥区容积百分比.稳定 HRT = 6 h, 温度为 25℃ ± 2℃, 厌氧污泥区容积百分比与 COD 平均去除率关系如图 3 所示.

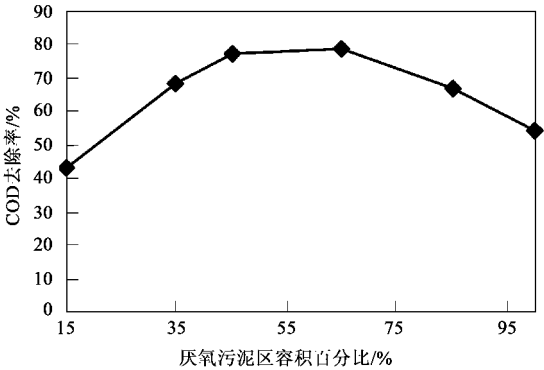


图 3 厌氧污泥区容积百分比与 COD 去除率关系

Fig.3 COD removal rate vs the rate of anaerobic section to volume of reactor

由图 3 可知, COD 去除率先随厌氧污泥区容积百分比增大而增大.当厌氧污泥区容积百分比为 45% ~ 65% 时,反应装置的有机去除功效最大,其 COD 去除率超过 77%. 此后,厌氧污泥若进一步积

累,其有机去除功效反而呈下降趋势.当厌氧污泥区容积百分比为 100% 时,反应器的 COD 去除率已降至 55% 以下.究其原因有二:①厌氧污泥过量积累后,与生物膜形成过于密实的混合区,产生局部堵塞,从而造成系统内传质效率大大降低,最终导致其有机去除功效显著下降;②厌氧污泥的过量积累必将导致其相当部分被冲洗出反应器,从而造成出水水质恶化,使系统有机去除功效降低.此外,污泥的死亡溶解也可能是去除效率降低的原因之一.故异波折板复合厌氧反应器要进行定时定量排泥,以便使厌氧污泥区容积百分比控制在 45% ~ 65%,此时对应的反应器污泥龄约为 95d 左右^[10].

2.3 温度对反应器去除功效的影响

为探讨本技术在东北地区低温条件下应用和推广的可行性,本研究考察温度变化对反应器运行功效的影响.在所进行的 12 个月试验中,东北长春生活污水的温度变化范围为 7 ~ 27℃.由于每一季节的水温均较为稳定,故试验数据较多.本研究所考察温度梯度为(27 ± 1)℃、(22 ± 1)℃、(17 ± 1)℃、(12 ± 1)℃和(7 ± 1)℃.稳定 HRT = 6 h,其 COD、TP、TN 平均去除率(各 $S \leq 2.53\%$)与温度之间关系如图 4 所示.

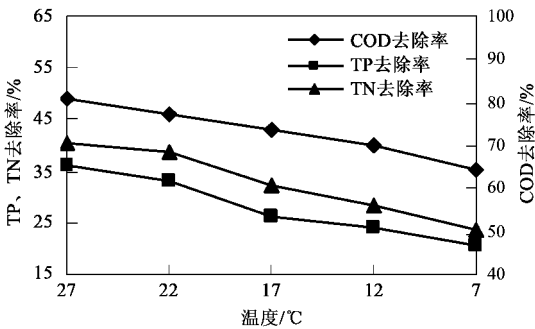


图 4 温度与 COD、TP、TN 去除率关系

Fig. 4 COD, TP, TN removal rate vs temperatures

由图 4 可知,温度变化对反应器 COD、TP、TN 去除率具有一定的影响.在 27℃ 条件下,其 COD、TN、TP 平均去除率分别为 80.67% ($S = 2.40\%$)、36.17% ($S = 1.45\%$)、40.54% ($S = 1.94\%$).随着温度的下降,COD、TP、TN 去除率呈下降趋势.当温度降至 12℃ 时,COD、TN、TP 平均去除率尚能维持在 70.04% ($S = 2.53\%$)、24.12% ($S = 1.67\%$)、28.49% ($S = 1.44\%$).温度进一步降至 7℃ 时,其 COD、TP、TN 平均去除率则分别降至 64.37% ($S = 2.22\%$)、20.72% ($S = 1.71\%$)、23.65% ($S =$

1.65%) .

2.4 温度对产甲烷菌活性的影响

在试验研究过程中,亦考察了温度变化对厌氧污泥产甲烷菌活性的影响.厌氧污泥的产甲烷菌活性以最大比甲烷生产率表示,用液体置换装置法测定.污泥样品为各隔室厌氧污泥区的平均样,定量的厌氧污泥代谢定量的营养液中的葡萄糖产生厌氧气体,该气体在测定装置中置换出等量的 3% 的氢氧化钠溶液,以此计量甲烷气体产量,并计算出最大比甲烷产率^[9].各温度条件下的最大比甲烷生产率如图 5 所示.

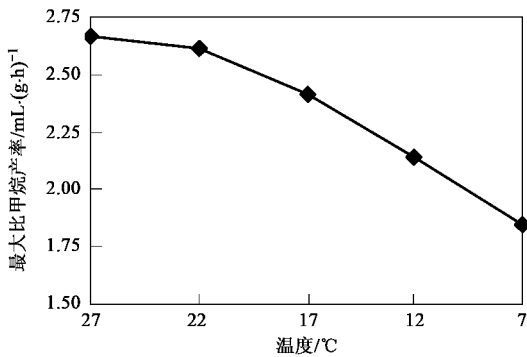


图 5 温度与最大比甲烷产率关系

Fig. 5 Specific methane production capacity vs temperatures

由图 5 可知,在 27℃ 条件下,反应器内的厌氧污泥最大比甲烷产率为 2.67 mL/(g·h).当温度降至 22℃ 时,降幅不大.随着温度的进一步下降,下降明显.当温度降至 7℃ 时,最大比甲烷产率已降至 1.85 mL/(g·h).

试验结果表明,低温对异波折板复合厌氧反应器 COD、TP、TN 的去除功效和厌氧污泥的产甲烷菌活性均存在一定的不利影响,但仍能维系较高的去除功效和活性,故在北方地区应用该技术处理低浓度生活污水可行.

3 讨论

本反应器处理效率高的主要原因有二.首先,厌氧反应器所特有的异波折板结构可大大改善污水的水力条件.当污水以一定流速通过系统时,水流连续不断地在异波折板之间缩、放流动,必定产生湍流流态;同时,废水以一定流速流经装置上半部的弹性立体填料时,由于弹性立体填料具有强制性紊动作用,也产生湍流流态,生成大量不同尺度的涡旋群,形成由涡旋运动造成的局部范围内的对流扩散,即涡流扩散.这种强烈的涡流扩散可以迅速地把液相溶质

的不均匀程度降低到涡旋本身大小. 尽管此时的最小涡旋也比分子尺度大得多, 但它大大增加了分子扩散范围, 也大大减小了扩散距离, 从而使整个反应系统的传质效率显著提高^[11, 12]. 传质效率的显著提高必将消除和减弱生化反应速率中的限制性因素, 从而显著提高生化反应速率, 使反应器处理低浓度生活污水的功效得以强化.

其次, 厌氧污泥-生物膜异波折板反应器还同时具有垂直方向、水平方向双重多生物相特点, 即具有双层分阶段多生物相特点. 在垂直方向上, 反应器具具有厌氧污泥床、生物膜两层次. 由于厌氧污泥与生物膜所具有的生物相不同, 故同一隔室具有厌氧污泥区、生物膜双层生物相特点; 同时, 当污水以推流流态流经相对独立各隔室时, 由于沿程各隔室水质不尽相同, 故各隔室内的微生物相也不尽相同, 因而又形成水平方向上的分阶段多生物相特点. 由于本反应器是以传统 ABR 为基础, 通过优化水力条件设计而成, 故系统可维系较高的生物量; 同时, 双层分阶段多生物相意味着系统可丰富不同生物相于相对独立各隔室内的不同层次中, 从而大大提高沿程各隔室酸化菌和产甲烷菌活性^[13]. 高生物量和高微生物活性必将显著强化反应器的运行功效, 从而大大提高系统在低温低浓度条件下的去除能力.

4 结论

(1) 在 $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 条件下, 反应器的最佳 HRT 为 6 h. 此时所对应的 COD、TP、TN 平均去除率分别为 78.58%、35.15%、39.17%; 最适厌氧污泥区容积百分比为 45% ~ 65%. HRT 为 6 h, 水温低至 7°C 时所对应的 COD、TP、TN 去除率分别为 64.37%、20.72%、23.65%; 最大比甲烷产率为 $1.85 \text{ mL}/(\text{g} \cdot \text{h})$. 表明在北方地区低温条件下应用本技术

处理生活污水可行.

(2) 基于试验结果和理论分析认为, 异波折板复合厌氧反应器特有的高传质特性和双层分阶段多生物相特点是其处理效率高的原因.

参考文献:

- [1] 胡纪萃, 周孟津, 左剑恶, 等. 废水厌氧生物处理理论与技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [2] 任南琪, 王爱杰. 厌氧生物技术原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 83-106.
- [3] Lettings G, Rebac S, Zeeman G, *et al.* Challenge of psychrophilic anaerobic wastewater treatment[J]. Trends in Biotechnology, 2001, **19** (9): 363-370.
- [4] El-Mashad H M, Zeeman G, van Loon W K P, *et al.* Effect of temperature and temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of cattle manure [J]. Bioresource Technol, 2004, **95**(2): 191-201.
- [5] 杜月, 陈胜, 孙德智. 移动床生物膜反应器对垃圾渗滤液短程硝化研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(5): 1039-1043.
- [6] 张薇, 左剑恶, 崔龙涛, 等. 中温和高温厌氧生物产氢反应器连续运行的研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(1): 63-68.
- [7] Connaughton S, Collins G, O'Flaherty V, *et al.* Psychrophilic and mesophilic anaerobic digestion of brewery effluent: A comparative study [J]. Water Research, 2006, **40**(13): 2503-2510.
- [8] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [9] Razo-Flores E, Luijton M, Donlon B A, *et al.* Biodegradation of selected azo dye under methanogenic conditions [J]. Water Sci Technol, 1997, **36**(6-7): 65-72.
- [10] 张自杰, 林荣忱, 金儒霖. 排水工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. 105-112.
- [11] 查金荣, 陈家镛. 传递过程原理及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997. 49-55.
- [12] 谭天恩, 金一中. 传质-反应过程[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990. 10-22.
- [13] Barber W P, Stuckey D C. The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment: A review [J]. Water Research, 1999, **33**(7): 1559-1578.