

高径比对猪场废水脱氮与沼气脱硫耦联反应器的影响

孙竹^{1,2}, 伍钧¹, 蒲小东², 邓良伟^{2*}

(1. 四川农业大学资源环境学院,雅安 625014; 2. 农业部沼气科学研究所,成都 610041)

摘要:采用填料鼓泡塔反应器研究其高径比对猪场废水脱氮与沼气脱硫耦联过程的影响,比较了 3 种不同高径比(8:1、3:1、2:1)反应器的废水脱氮与沼气脱硫效能.在温度 30~32℃、空塔停留时间 6.70 min、水力停留时间 3.35 d、沼气中 H₂S 浓度 1 414~1 838 mg·m⁻³、进水 NO_x⁻-N 浓度 114~243 mg·L⁻¹的条件下,高径比 2:1 反应器的运行较稳定,且处理效果较好,硫化氢去除率平均值为 96.7%,NO_x⁻-N 去除率平均值达到 88.7%;而高径比 8:1 和 3:1 反应器的运行不太稳定,硫化氢去除率的平均值分别为 68.0%、80.4%,NO_x⁻-N 的去除率平均值分别为 89.7%、90.2%.主要是因为高径比 2:1 反应器的实际气速(3.12×10⁻² m·s⁻¹)比高径比 3:1、8:1 反应器的实际气速(分别为 3.62×10⁻² m·s⁻¹和 6.64×10⁻² m·s⁻¹)更慢,其气液传质系数(1.79×10⁻⁵ s⁻¹)比高径比 3:1、8:1 反应器的气液传质系数(分别为 1.64×10⁻⁵ s⁻¹和 1.55×10⁻⁵ s⁻¹)更大,传质效果更好.处理效能试验结果以及反应器流体力学特征参数均表明,高径比 2:1 反应器为最适合的反应器.

关键词:猪场废水;脱氮;脱硫;沼气;高径比

中图分类号:X713 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)09-2214-06

Effect of the Ratio of Height to Diameter on the Performance of the Simultaneous Reactor for Nitrogen Removal from Swine Wastewater and Sulfide Removal from Biogas

SUN Zhu^{1,2}, WU Jun¹, PU Xiao-dong², DENG Liang-wei²

(1. School of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China; 2. Biogas Scientific Research Institute of Ministry of Agriculture, Chengdu 610041, China)

Abstract: The effect of the ratio of height to diameter (H/D) on the process of simultaneous nitrogen removal from swine wastewater and hydrogen sulfide removal from biogas was investigated using the bubble column reactors with packing material. The performance of the reactor with H/D of 8:1, 3:1 and 2:1 was compared. Under temperature of 30~32℃, gas retention time of 6.70 min, hydraulic retention time of 3.35 d, hydrogen sulfide concentration of 1 414~1 838 mg·m⁻³ in biogas, and NO_x⁻-N concentration of 114~243 mg·L⁻¹ in influent. The reactor with H/D of 2:1 achieved a stable and good treatment result, with the average removal rates of 96.7% for hydrogen sulfide and 88.7% for NO_x⁻-N. While the reactors with H/D of 3:1 and 8:1 obtained unstable and inferior results, with the average removal rates of 68.0%, 80.4% for hydrogen sulfide respectively, and 89.7%, 90.2% for NO_x⁻-N respectively. The reason could be attributed to the following facts. The reactor with H/D of 2:1 has a slower optimum gas velocity (3.12×10⁻² m·s⁻¹) than the reactor with H/D of 3:1 and 8:1 (3.62×10⁻² m·s⁻¹ and 6.64×10⁻² m·s⁻¹ respectively) and has a higher gas-liquid mass transfer coefficient (1.79×10⁻⁵ s⁻¹) than the other two reactors (1.64×10⁻⁵ s⁻¹ and 1.55×10⁻⁵ s⁻¹ respectively). Results of the performance and the hydrodynamics parameters of the reactors all indicated that the reactor with H/D of 2:1 was more suitable for the process of simultaneous nitrogen and hydrogen sulfide removal.

Key words: swine wastewater; nitrogen removal; sulfide removal; biogas; height to diameter ratio

随着我国养殖业的快速发展,畜禽粪便污染已超过生活污染和工业污染成为第一大污染源^[1],其中规模化猪场污染占的比重最大.因此,研究规模化猪场粪便废水处理利用方法具有重要的现实意义.

对于含有高浓度有机物的猪场废水,一般采用厌氧消化工艺进行前处理以减轻后续处理的负荷,并回收清洁能源——沼气.厌氧消化产生的沼气中含有硫化氢,由于硫化氢对沼气利用设备具有很强的腐蚀作用,并且经过燃烧后,会造成大气污染,因此,在沼气利用之前需进行脱硫.目前,沼气脱硫主

要采用物化法和加氧生物脱硫法.由于物化法劳动强度大,运行费用较高^[23],加氧生物脱硫法也就成为沼气脱硫新趋势,但存在着氧气供应量难以调控以及危险性的问题.因此,有必须研究新型的沼气脱硫方法.

物化法和加氧生物脱硫法的核心都是有电子供

收稿日期:2009-11-13;修订日期:2010-01-20

基金项目:国家自然科学基金项目(30671540)

作者简介:孙竹(1984~),女,硕士研究生,主要研究方向为废弃生物处理,E-mail: 958764132@qq.com

* 通讯联系人,E-mail: dlwbrtc@yahoo.com.cn

体(硫化氢),需要提供电子受体;而废水脱氮过程则是电子受体(NO_3^- 、 NO_2^-),需要提供电子供体.因此,可以将废水脱氮过程和沼气脱硫过程耦联起来,达到同时脱氮脱硫的效果.

在成功启动了废水脱氮与沼气脱硫耦联反应器的基础上^[4,5],本试验进一步研究了不同高径比反应器对猪场废水脱氮与沼气脱硫耦联工艺处理效果的影响,以期废水脱氮与沼气脱硫耦联反应器设计制造提供依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料与接种污泥

试验进气为处理生活污水和猪场粪便污水的沼气池(容积 30 m³)产生的沼气,通过管道接入实验室作为反应器的进气.

试验进水为猪场废水厌氧消化液好氧后处理硝化阶段出水,即将处理猪场粪便污水的厌氧消化器出水(简称厌氧消化液)取回实验室后对厌氧消化液进行间歇曝气,方法参见文献[24],取曝气阶段结束后沉淀上清液作为反应器进水.

试验使用污泥为已经驯化好的猪场废水脱氮与沼气脱硫耦联反应污泥^[4].试验进气、进水具体组分见表 1.

1.2 试验装置

表 1 试验废水与沼气成分
Table 1 Components of wastewater and biogas

试验用沼气(体积分数)/%			试验用废水 / mg·L ⁻¹					
甲烷	二氧化碳	硫化氢	COD	BOD ₅	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	pH
60.3~67.9	20.5~30.2	0.100~0.130	501~1 107	6.32~12.5	20.2~179	42.9~240	2.41~94.8	7.9~8.2

试验装置及工艺流程见图 1. 试验反应器有效容积为 3.35 L,由有机玻璃加工而成,分为内外两层,内层呈圆柱形并且放置 2 种填料,其中 1/3 为多面空心球数个,2/3 为一根弹性填料,填料性能参数参见文献[24].外层为一夹套,通过水泵(RS Electrical-468B)将水浴锅内的热水泵入夹套进行循环加热反应器,控制反应器内水温.试验进水由蠕动泵(BQSO-4J)将其从反应器顶部泵入反应器内.试验进气流量通过湿式气体流量计(LML-2)调节.

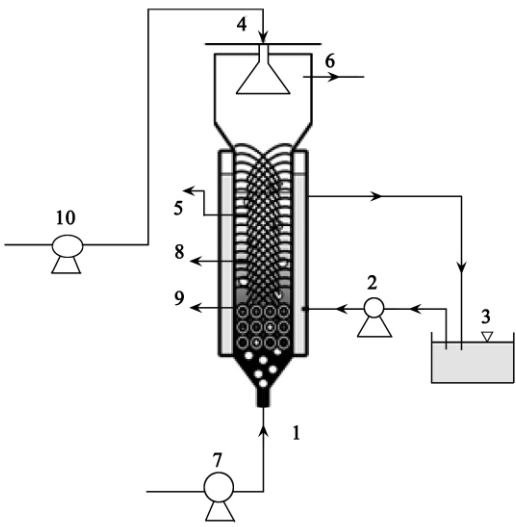
试验设置 1 号、2 号、3 号反应器,除高径比分别为 8:1、3:1、2:1 之外,其他条件均保持一致.

1.3 试验方法

启动前 3 个反应器均加入 1 L 已经培养好的废水脱氮与沼气脱硫耦联反应污泥、2.35 L 厌氧消化液好氧后处理硝化阶段出水.3 个反应器每天进出水 1 L,水力停留时间为 3.35 d,进出沼气 200 L,气体体积流量为 0.5 L·min⁻¹,空塔停留时间为 6.7 min.试验温度保持在(30±2)℃,试验共进行 32 d.试验结束后,测定各反应器实际气速、气含率、空塔时间、溶液中硫化氢的饱和浓度、气液传质系数等反应器流体力学特征参数.

1.4 分析测试项目与方法

试验运行中,每天测试反应器进气、出气硫化氢浓度各 1 次.每批进水测定亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、pH 值,每 2 d 测试反应器出水亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、pH 各 1 次.



1. 沼气进口 2. 水泵 3. 恒温水浴 4. 进水口 5. 出水口
6. 净化后沼气出口 7. 湿式气体流量计 8. 内置弹性填料
9. 内置多面空心球料 10. 蠕动泵

图 1 试验装置及工艺流程示意

Fig. 1 Schematic representation of the reactor and workflow

各项目分析测试方法参见文献[6,7],亚硝酸盐氮:N-(1-萘基)-乙二胺光度法;硝酸盐氮:酚二磺酸光度法;pH:酸度计法;硫化氢:检测管法,并用亚甲基蓝分光光度法校正.

反应器的空塔气速、溶解硫化氢的饱和浓度测定参见文献[8],实际气速、气含率测定参见文献[9],气液传质系数测定参见文献[10].

2 结果与分析

2.1 NO_x⁻-N 的去除

图2为试验进水与3个反应器出水NO_x⁻-N浓度的变化曲线;图3为3个反应器NO_x⁻-N的去除率变化曲线。

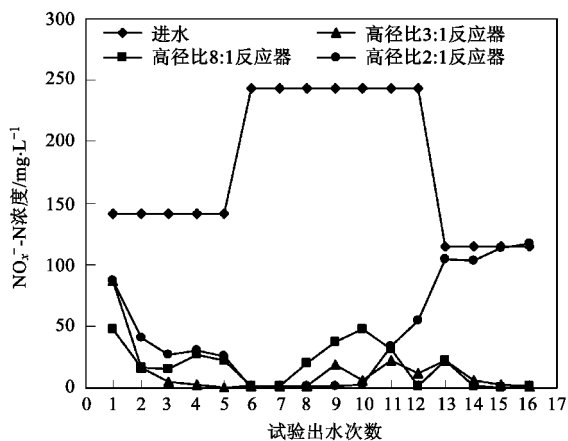


图2 进水与3个反应器出水的NO_x⁻-N浓度变化
Fig.2 NO_x⁻-N concentration variation curve of influent and effluent of three reactors

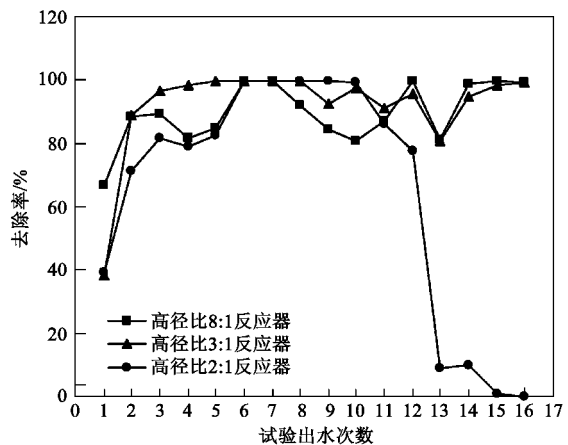


图3 3个反应器对NO_x⁻-N的去除率变化
Fig.3 NO_x⁻-N removal rate variation curve of three reactors

试验开始后3个反应器对NO_x⁻-N的去除都是呈上升趋势.试验第4~24 d 3个反应器对NO_x⁻-N的去除情况都较稳定且无较大区别.进水的NO_x⁻-N浓度为114~243 mg·L⁻¹,高径比8:1、3:1、2:1反应器的出水NO_x⁻-N浓度平均值分别为19.7、16.2、19.5 mg·L⁻¹.3个反应器NO_x⁻-N的去除率平均值和标准差见表2.

反应器的去除效率可以用去除率平均值表征,由表2可知3个反应器的NO_x⁻-N去除率平均值在

90%左右,并且无显著差异.因此,可以判断3个反应器对NO_x⁻-N的去除情况是基本一致的,并且去除效果较好.

表2 3个反应器NO_x⁻-N的去除率平均值和标准差

Table 2 Average value of NO _x ⁻ -N removal rate and standard deviation of three reactors			
反应器	高径比	去除率平均值/%	标准差
1号	8:1	89.7	0.096 2
2号	3:1	90.2	0.112
3号	2:1	88.7	0.107

反应器运行的稳定性可以用去除率的标准差表征^[11],由表2可知3个反应器去除率的标准差较小,并且基本接近,说明反应器对NO_x⁻-N的去除较稳定.

在试验第26 d,因温度保持在(30±2)℃的水浴锅出现故障,3个反应器出水的去除率都有不同程度下降,且高径比2:1反应器的去除率下降幅度最大.之后,恢复恒温水浴正常运行,高径比8:1、3:1反应器的去除率均回升至下降之前数值.但高径比2:1反应器的去除率没有回升趋势.检查发现是因为高径比2:1反应器内的部分溶液和微生物回流到其对应的湿式气体流量计中,导致硫化氢在湿式气体流量计中去除,结果反应器中缺乏与NO_x⁻-N反应的硫化氢.

2.2 硫化氢的去除

图4为试验进气与3个反应器出气的硫化氢浓度的变化曲线;图5为3个反应器的硫化氢去除率变化曲线。

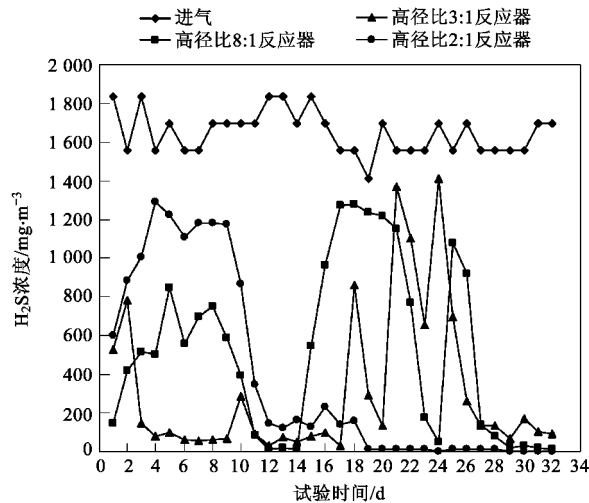


图4 进气与3个反应器出气的硫化氢浓度曲线
Fig.4 H₂S concentration variation curve of intake biogas and exhaust of three reactors

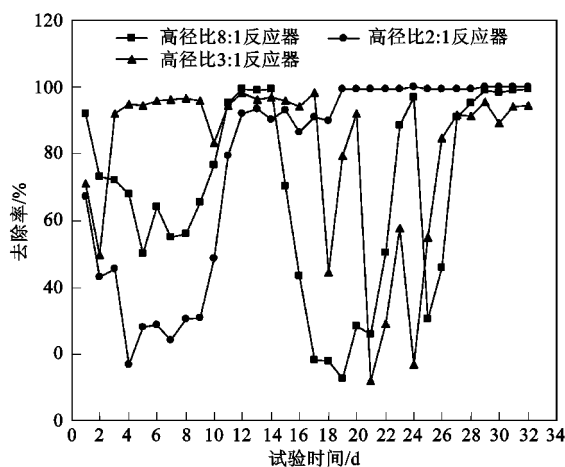


图 5 3 个反应器的硫化氢去除率曲线

Fig. 5 H_2S removal rate variation curve of three reactors

试验开始后, 3 个反应器对硫化氢的去除都是呈上升趋势. 试验的进气浓度为 $1.414 \sim 1.838 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 在试验第 12 d 时, 高径比 2:1 反应器的硫化氢去除开始达到稳定状态, 并且一直持续到试验结束, 出气浓度的平均值为 $55.8 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 但是高径比 8:1 反应器和高径比 3:1 反应器的去除率一直是呈波动状态, 没有达到相对稳定运行状态, 出气浓度的平均值分别为 515 、 $316 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 3 个反应器的 H_2S 去除率平均值和标准差见表 3.

表 3 3 个反应器 H_2S 的去除率平均值和标准差Table 3 Average value of H_2S removal rate and standard deviation of three reactors

反应器	高径比	去除率平均值/%	标准差
1 号	8:1	68.0	0.287
2 号	3:1	80.4	0.250
3 号	2:1	96.7	0.056 6

由表 3 可知, 高径比 2:1 反应器的硫化氢平均值去除率 (96.7%) 明显优于高径比 8:1 反应器 (68.0%) 和 3:1 反应器 (80.4%).

污染物去除率的标准差可以反映反应器运行的稳定性, 标准差越小, 说明反应器越稳定^[11]. 由表 3 可知, 高径比 2:1 反应器去除率标准差显著低于其他 2 个反应器, 说明高径比 2:1 反应器去除硫化氢的性能更稳定.

2.3 反应器的流体力学特征

对鼓泡填料塔而言, 由于填料、横截面一定, 因此可以根据气体体积流量求出空塔气速, 即^[8]:

$$\text{空塔气速} = \frac{\text{气体体积流量}}{\text{反应器横截面积}} \quad (1)$$

对于圆柱形鼓泡塔来说, 由于横截面一定, 因此

气含率的大小意味着通气前后塔内充气床层膨胀高度的大小, 故气含率可以从测量静液层高度算出, 即^[9]:

$$\varepsilon_G = \frac{z_{GL} - z_L}{z_{GL}} \quad (2)$$

式中 ε_G 为气含率, %; z_{GL} 为通气时液层高度, m; z_L 为静液层高, m.

气含率可作为空塔气速和实际气速的联系:

$$u_G = \frac{u_{OG}}{\varepsilon_G} \quad (3)$$

式中 ε_G 为气含率, %; u_G 为实际气速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; u_{OG} 为空塔气速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

根据测得的沼气流量、反应器横截面积、静液层高以及通气时液层高度计算出的 3 个反应器各自的实际气速、气含率、空塔气速, 见表 4.

表 4 反应器实际气速、气含率、空塔气速

Table 4 Optimum gas velocity, air voids and empty reactor's gas velocity

反应器	高径比	空塔气速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	气含率 /%	实际气速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
1 号	8:1	1.667×10^{-3}	2.51	6.64×10^{-2}
2 号	3:1	0.85×10^{-3}	2.35	3.62×10^{-2}
3 号	2:1	0.678×10^{-3}	2.17	3.12×10^{-2}

2.4 反应器的气液传质系数

根据亨利定律公式, 可计算出试验条件下溶解硫化氢的饱和浓度 c^* , 即^[8]:

$$p^* = c^* / H \quad (4)$$

式中 c^* 为溶液中硫化氢的饱和浓度, $\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3}$; p^* 为气相中溶质的平衡分压, kPa; H 为溶解度系数, $\text{kmol} \cdot (\text{kN} \cdot \text{m})^{-1}$.

$$H = \rho / EM \quad (5)$$

式中 ρ 为溶液密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; M 为溶剂分子量; E 为亨利系数, 单位与压强一致.

因此 c^* 可表示为:

$$c^* = p^* \rho / EM \quad (6)$$

试验沼气的含有 0.218 摩尔分数的硫化氢, 而相应分压为总压乘以其摩尔分数, 因此, 根据这些数据和式 (6) 可以求出试验条件下溶解硫化氢的饱和浓度 $c^* = 675.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

根据测得出水的硫化物浓度随时间变化的斜率, 则可计算出气液传质系数 $K_L a$, 即^[10]:

$$-\ln\left(\frac{c^* - c}{c^* - c_0}\right) = K_L a t \quad (7)$$

式中 c^* 为溶解硫化氢的饱和浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; c_0 为

水中硫化物的初始浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; c 为时间 t 时水中硫化物的浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

由图 6 可求出高径比 2:1、3:1 和 8:1 反应器的气液传质系数 ($K_L a$) 分别为 1.79×10^{-5} 、 1.64×10^{-5} 和 $1.55 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

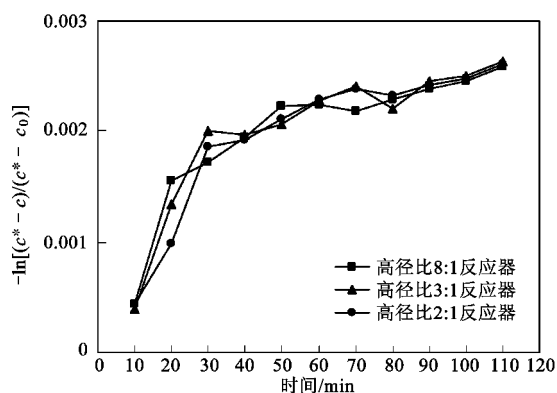


图 6 3 个反应器 $-\ln[(c^* - c)/(c^* - c_0)]$ 与 t 关系的曲线

Fig. 6 Relation of $-\ln[(c^* - c)/(c^* - c_0)]$ and t of three reactors

3 讨论

3.1 反应器对 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 的去除

按空塔气速 u_{0G} 的大小可将塔内的流动状态划分为安静鼓泡区、湍流鼓泡区、柱塞鼓泡区、过渡区。由表 4 可知, 3 个反应器的空塔气速 $u_{0G} < 0.05 \sim 0.06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 所以反应器内部都为安静区。气泡大小比较均匀, 并作有规则的浮升, 鼓泡塔内液体扰动并不显著, 避免了气体的轴向返混。3 个反应器的塔径分别为 0.08、0.112 和 0.125 m, 均小于 0.15 m, 因此, 气泡都是在塔中心聚集起来, 小气泡并集为大气泡, 甚至形成气泡柱, 出现柱塞气泡流动状态^[9]。并且, 通过传质试验可知, 试验条件下沼气中的硫化氢溶解到水中形成的硫化物的浓度较低。

综上所述, 3 个反应器内部的气泡在上升形态上并无区别, 液体扰动的作用又可以忽略, 虽然实际气速有快慢之分, 但总体而言, 气速都较慢, 且溶解到水中的硫化物浓度也较低, 水中的氮相对于硫而言是过量的, 所以对反硝化反应的进行没有太大影响。这就是导致 3 个反应器对 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 的去除差别不大的根本原因。

3.2 反应器对硫化氢的去除

由表 4 可知, 虽然 3 个反应器进气流量同为 0.5 L/min , 但是由于 3 个反应器高径比的不同, 导

致 3 个反应器内实际的气体流速不一致。高径比 8:1 反应器的实际气速最快, 为 $6.64 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 其次是高径比 3:1 的反应器, 其实际气速为 $3.62 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 最慢的是高径比 2:1 反应器, 其实际气速为 $3.12 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。并且用肉眼已经可以比较出这 3 个反应器内部气泡上升速度的快慢。在其他条件一致的情况下, 实际气速较慢的反应器内, 气泡在上升过程中与液体接触时间相对较长, 气液传质效果越好。这一结果与获得的硫化氢总转移系数结果相互印证。高径比 2:1 的反应器的气液传质系数最大, 为 $1.79 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; 其次是高径比 3:1 的反应器, 其气液传质系数为 $1.64 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; 高径比 8:1 反应器的的气液传质系数最小, 为 $1.55 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。气液传质系数越大, 气液传质效率越高, 气相中的硫化氢转移到液相的数量也就越多, 与微生物发生反应之后, 硫化氢的去除效果也就更好。所以 3 个反应器对硫化氢的去除效果由高到低依次是: 高径比 2:1 反应器、高径比 3:1 反应器、高径比 8:1 反应器。

4 结论

(1) 高径比对猪场废水脱氮与沼气脱硫耦联反应器的运行效果有显著影响。高径比 2:1 反应器的处理效果优于高径比 8:1 和 3:1 的反应器。

(2) 在温度为 $30 \sim 32^\circ\text{C}$ 、空塔停留时间为 6.70 min、水力停留时间为 3.35 d、沼气中 H_2S 浓度为 $1414 \sim 1838 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、进水 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 浓度为 $114 \sim 243 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下, 高径比 2:1 反应器的硫化氢去除率平均值可达 96.7%、 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 去除率平均值达 88.7%。

(3) 高径比 2:1 反应器处理效果好的原因可归因于较慢的实际气速和较高传质效果系数。

参考文献:

- [1] 余道胜. 中国养猪形势之分析[J]. 今日畜牧兽医, 2007, 11:4-6.
- [2] 邓良伟, 郑平, 陈子爱. Anarwia 工艺处理猪场废水的技术经济性研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2004, 30(6):628-634.
- [3] 邓良伟, 郑平, 李淑兰, 等. 添加原水改善 SBR 工艺处理猪场废水厌氧消化液性能[J]. 环境科学, 2005, 26(6):105-109.
- [4] 陈会娟, 邓良伟, 陈子爱. 猪场废水脱氮与沼气脱硫耦联反应器的启动[J]. 环境科学学报, 2008, 28(8):1542-1548.
- [5] 陈子爱, 邓良伟, 陈会娟, 等. 废水脱氮与沼气脱硫耦联菌株的驯化和分离[J]. 环境科学, 2008, 29(4):1099-1103.
- [6] 国家环境保护总局. 空气和废气监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003. 178-181.
- [7] 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,1989.238-239,252-256,260-263,321-322.
- [8] 谭天恩,袁梅,周明华,等.化工原理[M].北京:化学工业出版社,2006.251-297.
- [9] 罗康碧,罗明河.反应工程原理[M].北京:科学出版社,2005.231-282.
- [10] 刘德林,靳海波,佟泽民.高温高压下浆态鼓泡床气液传质系数的测定[J].过程工程学报,2004,4(4):289-294.
- [11] 金仁村,郑平,胡宝兰,等.厌氧氨氧化反应器的稳定性及模糊评价[J].华南理工大学学报(自然科学版),2006,34(9):121-127.
- [12] 王爱杰,杜大仲,任南琪.脱氮硫杆菌同步脱硫反硝化技术的关键因素研究[J].地球科学进展,2004,19(6):533-536.
- [13] 张少辉,郑平.反应器启动方法的研究[J].中国环境科学,2004,24(4):496-500.
- [14] 何连生,朱迎波,席北斗,等.集约化猪场废水 SBR 法脱氮除磷的研究[J].中国环境科学,2004,24(2):224-228.
- [15] 徐洁泉.规模畜禽场沼气工程发展和效益探讨[J].中国沼气,2000,18(4):27-30.
- [16] 方士,陈国喜,吴玉祥,等.生物塔外曝气法去除沼气中硫化氢的研究[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2000,26(1):41-50.
- [17] 孔垂雪.沼气生物脱硫静态因子试验与初步中试研究[D].北京:中国农业科学院,2007.
- [18] 李献.微生物脱氮除硫的研究[D].南宁:广西大学,2005.
- [19] 邓旭亮.同步脱硫反硝化工艺运行效能及关键影响因素研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- [20] 王文华,沈娟,徐志刚,等.气升式内循环流反应器的含气率研究[J].当代化工,2007,27(1):325-328.
- [21] 杨志生,安钢,孙宇,等.振动筛板鼓泡塔中气含率的研究[J].天津大学学报,1997,30(1):99-103.
- [22] 张同旺,何广湘,靳海波,等.气液鼓泡床气含率的实验研究[J].石油化工高等学校学报,2002,15(4):24-28.
- [23] Jackso Y. An advanced method of hydrogen sulfide removal from biogas[J]. Sci Industr Res,1998,16(3):98-103.
- [24] Deng L,Chen H,Chen Z *et al.* Process of simultaneous hydrogen sulfide removal from biogas and nitrogen removal from swine wastewater[J]. Bioresource Technol,2009,100(12):5600-5608.
- [25] Deng L W,Cai C D,Chen Z A. The treatment of swine wastewater by a full scale Anarwia process[J]. Biosystems Eng,2007,98(3):327-334.
- [26] Deng L W,Zheng P,Chen Z A, *et al.* Improvement in post-treatment of digested swine wastewater[J]. Bioresource Technol,2008,99(8):3136-3145.
- [27] Font X,Adroer N,Poch M. Evaluation of an integrated system for pig slurry treatment[J]. J Chem Technol Biot,1997,68:75-81.
- [28] Vaiopoulou E,Melidis P,Aivasidis A. Sulfide removal in wastewater from petrochemical industries by autotrophic denitrification[J]. Water Res,2005,39(7):4101-4109.
- [29] Gabriel D,Deshusses A M. Retrofitting existing chemical scrubbers to biotrickling filters for H₂S emission control[J]. P Natl Acad Sci Usa,2003,100(11):6308-6312.
- [30] Kim J H,Chen M,Kishida N. Integrated real-time control strategy for nitrogen removal in swine wastewater treatment using sequencing batch reactors[J]. Water Res,2004,38:3340-3348.
- [31] Kleerebezem R,Mendez R. Autotrophic denitrification for combined hydrogen sulfide removal from biogas and post-denitrification[J]. Water Sci Technol,2004,45(10):349-356.
- [32] Lau G N,Sharma K R,Chen G H. Integration of sulphate reduction,autotrophic denitrification and nitrification to achieve low-cost excess sludge minimisation for Hong Kong sewage[J]. Water Sci Technol,2006,53(3):227-235.