

添加 PAM 对剩余污泥共厌氧消化的影响

台明青¹, 陈杰榕¹, 张建祺²

(1. 西安交通大学生命科学与技术学院, 710049, 西安; 2. 马里兰大学土木环境工程系, 21042, 美国马里兰)

摘要: 考察了含聚丙烯酰胺(PAM)剩余污泥在 3 种温度下与酒精糟液共厌氧消化的运行及厌氧污泥性质. 结果表明:与没有添加 PAM 的共厌氧消化相比,当 PAM 与剩余污泥中总固体的质量比 w 为 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,在 35、45、55 °C 下共厌氧消化后污泥的日产气量分别减少了 32.2%、31.6% 和 29.8%;当 w 为 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,日产气量分别减少了 41.7%、36.9% 和 47.4%. 在同一种温度下,随着 PAM 添加量的增加,化学需氧量、总固体、挥发性固体的去除率逐渐减小,污泥黏度不但受到温度的影响,而且要受到 PAM 添加量的影响. 当 w 为 $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,与低混合搅拌强度下的产气量相比,55 °C 时高混合搅拌强度下的产气量增加最大,35 °C 和 45 °C 时产气量增加并不明显. 沉淀性能最好的是 35 °C 下厌氧消化污泥,沉淀性能最差的是 55 °C 下厌氧消化污泥.

关键词: 共厌氧消化;聚丙烯酰胺;剩余污泥

中图分类号: X703.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)03-0116-05

Effect of Additive Polyacrylamide on Anaerobic Co-Digestion of Waste Activated Sludge

TAI Mingqing¹, CHEN Jierong¹, ZHANG Jianqi²

(1. School of Life Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maryland, Maryland 21250, USA)

Abstract: The effects of the additive Polyacrylamide (PAM) on anaerobic co-digestion of waste activated sludge and wine distillery wastewater and effluent properties at 35 °C, 45 °C and 55 °C were investigated. The results show that PAM addition has an influence not only on the performance of co-digestion, but also on the effluent settling ability. Compared with the case without PAM addition, when the mass ratio of PAM to total solid (TS), referred as w , was $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, the daily biogas yield of co-digestion decreased by 32.2%, 31.6% and 29.8%, respectively, when w was $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, the daily biogas yield of co-digestion decreased by 41.7%, 36.9% and 47.4%, respectively. Under the same temperature condition, the removal rate of COD, TS and volatile solid decreased with the increase of PAM. The effluent viscosity was influenced not only by temperature but also by PAM concentration. When w was $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, high mixing intensity had more influence on the increase of biogas yield at 55 °C than that at 35 °C and 45 °C compared with low mixing intensity, in addition, the effluent settling ability was the best at 35 °C while the worst at 55 °C.

Keywords: co-digestion; polyacrylamide; waste activated sludge

厌氧消化是污泥稳定的重要方法, 剩余污泥在厌氧消化前添加化学絮凝剂可以提高沉淀速度. 聚

丙烯酰胺(PAM)是沉淀过程中使用最广泛的絮凝剂. Dentel 等人^[1]证明了污泥沉淀应用 PAM 与污

泥中总固体(TS)的质量比 w 可达到 10 g/kg. 尽管 PAM 在污泥中的量很小,但对反应运行及污泥性质的影响较大,到目前为止也没有满意的结论^[2-3]. MeLissa 等人^[4]的研究表明,在碳源充足的厌氧环境中添加 PAM 可以激发甲烷微生物的活性,提高甲烷的产气量,同时 PAM 可作为氮源被利用. Chu 等人^[2]的研究表明, w 为 15~40 g/kg 时对甲烷产气量有明显的影响. Campos 等人^[3]研究了 PAM 对猪粪泥脱水后的厌氧消化,结果表明,当 w 为 415 g/kg 时的反应没有毒性,但出现了一些间接抑制现象. PAM 对厌氧消化后污泥的脱水性能研究的资料很有限,也没发现 PAM 作为絮凝剂对剩余污泥和酒精糟液在不同温度下共厌氧消化的研究报道. 本文研究了添加 PAM 的剩余污泥与酒精糟液在 3 种温度下共厌氧消化反应运行以及对厌氧消化后污泥沉淀性能的影响,此外还考察了不同混合搅拌强度对产气量的影响.

1 材料与方法

1.1 实验材料

剩余污泥取自于南阳市污水处理厂,经重力自然沉淀 12~16 h 后在 4 ℃下保存使用. 酒精糟液和种子污泥取自天冠乙醇集团,酒精糟液放置 24 h 后弃去沉淀部分保留上清液备用. PAM 属于阳离子型,相对分子质量为 800 万~1 200 万,离子度为 50~60. 材料性质见表 1.

表 1 实验材料性质

参数	剩余污泥	酒精糟液	种子污泥
pH 值	6.62	4.04	7.86
$\rho_{\text{COD}}/\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	38.60	49.70	30.67
$\rho_{\text{TS}}/\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	22.34	38.40	60.60
$\rho_{\text{VS}}/\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	14.70	30.64	30.30

注: ρ_{COD} 为化学需氧量的质量浓度; ρ_{TS} 为总固体的质量浓度;
 ρ_{VS} 为挥发性固体的质量浓度.

1.2 分析方法

pH 值分析采用玻璃电极法(pH-3C 酸度计),化学需氧量(COD)分析采用重铬酸钾法,总固体(TS)、挥发性固体(VS)分析采用质量法,挥发酸(VFA)分析采用蒸馏滴定法,电导率分析采用仪器法(EC 215 HANNA),氧化还原电位(ORP)分析采用仪器法(HI 98120 HANNA),黏度分析采用仪器法(NDJ-1 型旋转式黏度仪,上海),产气量分析采

用湿式气体流量计(ML-1 气体流量计).

1.3 实验装置

厌氧消化用 3 套平行、有效容积为 20 L 的扰动式厌氧反应器进行. 每个反应器有 2 个共轴的内、外圆柱体组成,有进料口、出料口和气体收集口. 进料口与蠕动泵相连,气体收集口与湿式气体流量计相连,中间盛有 NaCl 饱和溶液的缓冲瓶. 温度保持由恒温热水器和水泵系统控制,反应温度 T 分别为 35、45、55 ℃. 搅拌设有低混合搅拌强度(每小时搅拌 4 次,每次 1 min)和高混合搅拌强度(每小时搅拌 8 次,每次 1 min)2 种状态.

1.4 实验过程

实验开始时在每个反应器内加入 20 L 种子污泥,第 2 天开始进料,并保持反应器内始终有 20 L 的污泥. 运行过程中每天测定产气量及出泥的 pH 值. 运行稳定后连续测定 6 次污泥性质,取平均值. 共厌氧消化由分 4 个阶段完成:第 1 阶段进料为剩余污泥和酒精糟液的混合泥,二者体积比为 3:1,进料速度为 $0.8 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$,污泥有机负荷量为 $0.749 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,污泥停留时间为 25 d,共运行 50 d.物料搅拌采用低混合搅拌方式;第 2 和第 3 阶段是在第 1 阶段的其他操作条件保持不变的况下, w 分别为 10、20 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$;第 4 阶段为采用 2 种混合搅拌方式实验,当 w 为 40 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,运行方式和测定方法同第 1 阶段.

2 结果与讨论

2.1 PAM 对共厌氧消化后污泥的影响

由表 2~表 4 可以看出,3 个系统的厌氧消化后污泥 pH 值均在正常范围内,说明 3 个系统的运行正常. 在同一种温度下,随着 PAM 含量的增加,厌氧后污泥的电导率呈下降趋势,这说明 PAM 的加入影响了离子的传输. 这与 Chu 等人^[2]提出 PAM 的加入影响质子的传输速度结论相一致. 在同一种温度下,随着 PAM 含量的增加,厌氧消化后污泥的黏度增加. 这是由于随着 PAM 含量的增加,未被生物降解的 PAM 量也在增加,导致污泥的黏度增大. 在 PAM 含量相同时,不同温度厌氧消化后污泥的黏度并不随着温度的升高而降低. Chang 等人^[5]的研究表明,PAM 的降解程度可从体系的黏度变化反映出来. Day 等人^[6]认为大分子化合物在厌氧消化时分子的结构会重排,并且温度不同这种重排效果也不同. 因此,厌氧消化污泥黏度变化不但受到温度的影响,而且要受到 PAM 含量的影响.

表2 剩余污泥添加PAM与酒精糟液在35℃时的共厌氧消化结果

参数	厌氧前	厌氧后		
		$w=0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$w=10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$w=20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$
pH 值	4.41	7.45	7.37	7.42
$\sigma/\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$	85	103	93	84
U_{ORP}/mV	15	-286	-271	-266
$\mu/\text{mPa}\cdot\text{s}$	320	140	150	195
$\rho_{\text{COD}}/\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	32.4	18.5	21.1	22.4
$\rho_{\text{VFA}}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	295.00	53.00	19.70	6.99
$\rho_{\text{TS}}/\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	27.7	19.6	21.0	23.3
$\rho_{\text{VS}}/\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	20.1	11.7	12.6	13.3

注: σ 为电导率; μ 为黏度; U_{ORP} 为氧化还原电位; ρ_{VFA} 为挥发酸的质量浓度。

表3 剩余污泥添加PAM与酒精糟液在45℃时的共厌氧消化结果

参数	厌氧前	厌氧后		
		$w=0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$w=10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$w=20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$
pH 值	4.41	7.74	7.52	7.42
$\sigma/\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$	85	103	96	84
U_{ORP}/mV	15	-315	-314	-300
$\mu/\text{mPa}\cdot\text{s}$	320	110	120	150
$\rho_{\text{COD}}/\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	32.4	17.2	20.7	22.2
$\rho_{\text{VFA}}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	295.0	840.0	8.3	48.0
$\rho_{\text{TS}}/\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	27.7	16.4	18.3	19.4
$\rho_{\text{VS}}/\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	20.1	8.3	10.7	13.5

表4 剩余污泥添加PAM与酒精糟液在55℃时的共厌氧消化结果

参数	厌氧前	厌氧后		
		$w=0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$w=10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$w=20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$
pH	4.41	7.55	7.53	7.42
$\sigma/\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$	85	103	100	84
U_{ORP}/mV	15	-322	-358	-312
$\mu/\text{mPa}\cdot\text{s}$	320	160	210	235
$\rho_{\text{COD}}/\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	32.4	14.4	14.4	20.7
$\rho_{\text{VFA}}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	295.0	1 718.0	9.7	64
$\rho_{\text{TS}}/\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	27.7	15.6	19.4	20.2
$\rho_{\text{VS}}/\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	20.1	7.4	9.6	11.6

在相同的PAM含量下,温度越高,厌氧消化后污泥的ORP值越小。Chang等人^[5]认为,ORP与污泥中的厌氧微生物生长有关,并且其值越小厌氧微生物生长越好,因此本研究说明了温度对厌氧消化影响的一般规律,即温度越高其微生物生长越好,表现为ORP的值越小。随着PAM添加量的增加,各温度下污泥的COD、TS、VS去除率逐渐减小。这说明添加PAM对厌氧消化反应产生影响,导致厌氧消化效率降低,这是由于PAM的大分子造成质子传输阻力增大所致^[2]。

没有添加PAM时,在35、45、55℃下厌氧消化后污泥的 ρ_{VFA} 分别是53、840、1 718 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。这与Gavala等人^[7]研究的高温下 ρ_{VFA} 的值高于中温下的,中温下 ρ_{VFA} 的值高于低温下的结果一致。在同一个温度下,与不添加PAM污泥共厌氧后VFA相比,添加PAM污泥共厌氧后VFA降低,但在35℃时厌氧消化没有此规律。这可能是由于PAM在不同温度下降解的中间和最终产物的比例不同,从而对厌氧消化影响也不相同。

2.2 PAM对产气量的影响

图1~图3是 w 分别为0、10、20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,厌氧反应稳定运行后连续12 d共厌氧的日产气量 q_v 的变化图。

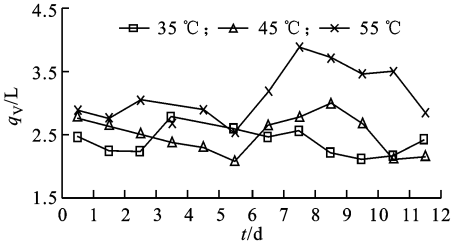


图1 $w=0$ 时产气量

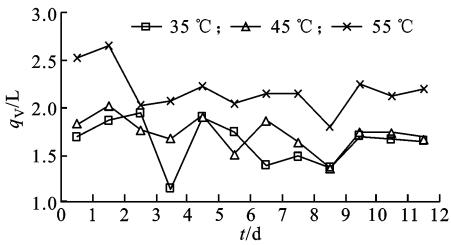


图2 $w=10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时产气量

当 w 为10 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,与同一温度条件下 w 为0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时的日产气量均值 $\bar{q}_v$ 相比,35、45、55℃下的日产气量分别减少了32.2%、31.6%、29.8%。

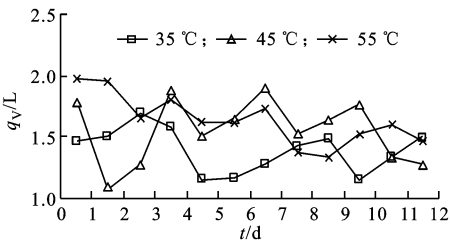


图3 $w=20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时产气量

当 w 为 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,与 w 为 $0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 相比,35、45、55 $^{\circ}\text{C}$ 时日产气量均值分别减少了41.7%、36.9%、47.4%。日产气量均值减少最大的是55 $^{\circ}\text{C}$ 条件下的厌氧消化,减少最小的是45 $^{\circ}\text{C}$ 条件下的厌氧消化。Chu等人^[2]的研究表明,当 w 为 $15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时对产气量有明显影响,而本文研究表明,当 w 为 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时反应有毒性,产气量下降。文献^[3]报道,当 w 在 $415\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时反应无毒性,而本研究表明,当 w 为 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时反应有毒性,产气量下降。原因是PAM的添加形成了大分子障碍层,阻碍了底物与酶的接触,降低了反应速率,导致产气量下降^[2]。

2.3 不同搅拌强度对厌氧反应及产气量的影响

表5表明,每个反应器在高混合搅拌强度下的日产气量均值比低混合搅拌强度下的日产气量均值高。其次,在35、45、55 $^{\circ}\text{C}$ 下,日产气量均值分别增加了6.9%、6.7%、66.6%。说明添加PAM的污泥厌氧消化时,低混合搅拌强度已接近中温和低温对混合条件的要求,而高温反应则需要较高的混合搅拌强度条件。Karim等人^[8]研究了不同混合方式对不同浓度畜禽养殖废水厌氧消化的影响,当粪便的质量分数为5%时,混合搅拌与不混合搅拌反应的运行是一样的。当粪便的质量分数为10%时,3种混合搅拌方式(生物气搅拌、叶轮搅拌和污泥循环搅拌)与不混合搅拌的产气量相比,产气量分别增加了29%、22%和15%。因此,搅拌试验结果间接地证明了Chu等人^[2]提出的PAM絮凝的污泥会使质子传输阻力增大,影响厌氧消化效率的解释。

表5 2种搅拌强度下的日产气量均值

$T/^{\circ}\text{C}$	$\bar{q}_v/\text{L}$	
	低搅拌强度	高搅拌强度
35	0.935	1.000
45	0.885	0.945
55	0.793	1.320

2.4 污泥沉淀性能

由图4可看出:3种温度下厌氧消化后的污泥在不同时间的沉淀率不同。当 w 为 $40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,不同温度厌氧消化后污泥的沉淀性能影响不同,沉淀性能最好的是在35 $^{\circ}\text{C}$ 时厌氧消化后的污泥,沉淀性能最差的是55 $^{\circ}\text{C}$ 时厌氧消化后的污泥。其原因可能是在低温条件下对PAM降解的比例要低一些,在高温条件下对PAM降解的比例要相对高一些,未降解的PAM在污泥中仍发挥着絮凝作用,故低温下污泥的沉淀性能最好。

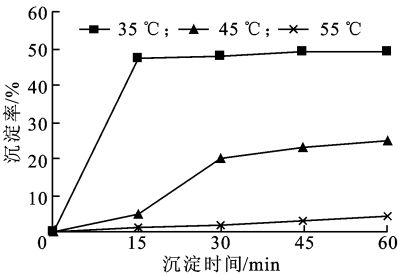


图4 不同污泥沉淀曲线

3 结 论

添加PAM的剩余污泥共厌氧消化不但影响其产气量,而且影响污泥的沉淀脱水性能。当 w 大于 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,反应的产气量下降,同时使COD、TS、VS去除率减小。

电导率变化数据和不同混合搅拌强度对比实验证明了Chu等人^[2]提出的含PAM的污泥会增加其质子传输阻力的解释。

当 w 为 $40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,与低混合搅拌强度下的总产气量相比,高混合搅拌强度、55 $^{\circ}\text{C}$ 条件下共厌氧消化日产气量的增加量最大,45 $^{\circ}\text{C}$ 和35 $^{\circ}\text{C}$ 条件下日产气量的增加量并不明显。沉淀性能最好的是35 $^{\circ}\text{C}$ 下的厌氧消化污泥,沉淀性能最差的是55 $^{\circ}\text{C}$ 下的厌氧消化污泥。对含有PAM的共厌氧消化污泥的毒性应作进一步研究。

参考文献:

[1] DENTEL S K, CHANG L L, RAUDENBUSH D H, et al. Influence of polymer chemistry on biosolids and the environment [M]. Alexandria, VA, USA: Water environment Research Foundation, 2001.

[2] CHU C P, LEE D J, CHANG V B, et al. Anaerobic digestion of polyelectrolyte flocculated waste activated sludge [J]. Chemosphere, 2003, 53 (7): 757-764.

- [3] CAMPOS E, ALMIRALL M, MTNEZ-ALMELA J, et al. Feasibility study of the anaerobic digestion of de-watered pig slurry by means of polyacrylamide [J]. *Bioresource Technology*, 2007,99(2):387-395.
- [4] MELISSA E H, MACKINNON M D, PHILLIP M F. Polyacrylamide added as a nitrogen source stimulates methanogenesis in consortia from various wastewaters [J]. *Water Research*, 2005,39(14): 3333-3341.
- [5] CHANG L L, RAUDENBUSH D L, DENTEL S K. Aerobic and anaerobic biodegradability of a flocculant polymer [J]. *Water Science and Technology*, 2001,44(2/3):461-468.
- [6] DAY M, SHOW K, Cooney D, et al. Degradable polymers: the role of the degradation environmental [J]. *Environ Polym Degradation*, 1997, 5(8): 137-151.
- [7] GAVALA H N, YENAL U, IOAIINS V, et al. Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge: effect of pre-treatment at elevated temperature [J]. *Water Research*, 2003,37(19): 4561-4572.
- [8] KARIM K, HOFFMANN R, KLASSONT, et al. Anaerobic digestion of animal waste: waste strength versus impact of mixing [J]. *Bioresource Technology*, 2005,96(16): 1771-1781.

(编辑 王焕雪)

[文摘预登]

基于遗传算法的复合式贴片机贴装过程优化

杜轩¹, 李宗斌¹, 贾晓晨²

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 中国电子科学研究院 EDMC 中心, 100041, 北京)

针对复合式贴片机的贴装过程优化问题, 将其分解为元件分配、供料器布置和元件取贴顺序 3 个子问题. 在分析实际工程应用的基础上, 以动臂的负荷平衡和最小移动距离为目标, 建立了双动臂转塔式贴片机的贴装过程集成优化模型, 采用遗传算法和元件分配启发式方法相结合的方式实现了贴装过程的优化. 算法中提出了一种分段二元实数编码方法, 在一条染色体中同时描述了元件分配、供料器布置和元件取贴顺序. 针对提出的编码方式, 采用改进的顺序交叉和自适应的变异操作, 结合轮盘赌选择和精英选择策略以及适应度函数的设计, 在满足贴片机运动机构约束条件的情况下, 使得遗传搜索能够快速进入有效解空间进行搜索. 实例计算结果表明, 该算法能实现多动臂转塔式贴片机贴装过程的优化, 从而提高了印刷电路板的装配效率.

本刊实行开放免费阅读, 阅读全文请登录

<http://www.jdxb.cn>