厌氧分步生物反应器系统处理城市生活垃圾的试验研究

王君琴 , 沈东升
(浙江大学环境与资源学院 ,杭州 310029 ,E- mail : wjq @zju .edu .cn)

摘要 :以生活垃圾中 COD 溶出量为研究参数 ,试验研究了厌氧分步生物反应器系统和渗滤液直接回灌填埋场中的有机物降解规律与产甲烷特征 .结果表明 :厌氧分步生物反应器系统可显著促进生活垃圾及渗滤液中有机污染物的降解 ,加速填埋垃圾稳定化 ,其 COD 溶出总量与填埋时间的对数呈极显著的线性相关性 .厌氧分步生物反应器中产甲烷反应器的产气量占总产气量的 80 % ,甲烷含量 55 % ~ 69 % ,较适容积 COD 负荷为 6 .5 ~ 7 .5g/ (L• d) .

关键词 :厌氧分步生物反应器 ;生活垃圾 ;数学模型 ;产甲烷
中图分类号 : X705 文献标识码 : A 文章编号 :0250-3301(2004) 03-0160-04

Studies on the Anaerobic Phased Solid Digester System for Municipal Solid Waste (MSW) Treatment

WANG Jun-qin , SHEN Dong-sheng
(Department of Envionment and Resource , Zhejiang University , Hangzhou 310029 , China E- mail : wjq @zju .edu .cn)

Abstract : Through analyzing and detecting the leaching pollutant(COD) in two bioreactors , anaerobic phased solid digester system and leachate direct- recirculating landfill , the changing rule of municipal solid waste and the characteristics of methanogenesis were studied . The results showed that anaerobic phased solid digester system accelerated the process of degrading municipal solid waste and stabilizing landfill site . The relationship between the leaching pollutant(COD) and refuse age was logarithmic linear correlation . More than 80 % of biogas in volume occured in the methanogenisis bioreactor , the methane content in which was 55 % ~ 69 % . The preferable volumetric COD loading rate of the methanogenisis bioreactor was 6 .5 ~ 7 .5g/ (L• d) .

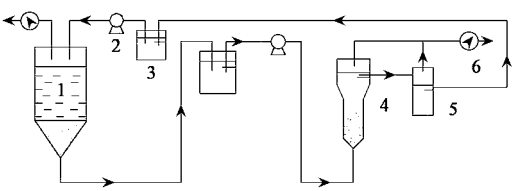
Key words : anaerobic phased solids digester system ; municipal solid waste(MSW) ; mathematic formula ; methanogenesis

卫生填埋是目前我国城市生活垃圾处理的主要方式 ,而卫生填埋场产生的渗滤液是一种有毒有害的高浓度有机废水 ,如不采取收集与处理措施 ,就会引起地面水 、地下水 、土壤等严重二次污染 .目前 ,国内外利用渗滤液直接回灌来促进填埋垃圾的降解已有较多的研究[1 ~3] ,但渗滤液直接回灌存在抑制填埋场产甲烷细菌的生长和填埋气体甲烷含量不高等问题 .本文主要就厌氧分步生物反应器系统处理城市生活垃圾的运行特性进行研究 ,并与渗滤液直接回灌填埋场进行比较 .

1 试验方法与装置

1 .1 试验装置

本试验采用的装置流程如图 1 .厌氧分步生物反应器系统由 2 部分组成 ,其中厌氧水解相直径 28 .7cm , 高 65cm ,总容积为 42L .厌氧水解相底部垫一层厚约 5cm 的碎石 ,以便渗滤液顺利排出 ;垃圾层厚 50cm ,垃圾密度控制在 0 .5t/ m^3 ;上面铺 5cm 厚的沙子 ,剩 5cm 作气室 .产甲烷反应器采用上流式厌氧污泥床生物反应器 ,反应器总容积为 6 .28L , 有效容积 5 .50L , 内径为 10cm , 高 80cm , 径高比 1∶8 .



1 .厌氧水解相(卫生填埋场) 2 .蠕动泵 3 .集水瓶
4 .产甲烷反应器 5 .外置三相分离器 6 .气体流量计

图 1 厌氧分步生物反应器系统流程示意图

Fig .1 Schematic diagram of anaerobic phased solid digester

1 .2 试验垃圾组成

参考全国生活垃圾组成成分数据 ,试验垃圾采用人工合成 ,其组成成分如表 1 所示 .

收稿日期 :2003-03-22 ;修订日期 :2003-05-19
基金项目 :国家自然科学基金资助项目(59808012) ;浙江省自然科学基金资助项目(599127)
作者简介 :王君琴(1978 ~) ,女 ,硕士研究生 ,主要从事环境工程与环境生物技术方向研究 .

表 1　试验垃圾成分

Table 1　Component of experimental municipal solid waste

样品成分	厨余	纸类	橡皮塑料	织物	竹木	砖石沙子	金属玻璃
比例/ %	58.66	7.66	12.18	3.68	2.81	8.63	6.38

1.3　试验方法

本实验分为 2 个系统,一是渗滤液直接回灌填埋场(U0 生物反应器,对照),即一般卫生填埋场的渗滤液未经任何处理直接用泵送到填埋场的表面进行回灌;二是厌氧分步生物反应器系统(U1 生物反应器),由厌氧水解相和产甲烷反应器组成,厌氧水解相出水(即渗滤液)经产甲烷反应器处理后再回灌到厌氧水解相的表面.厌氧水解相在室内常温进行,试验开始时气温为 20 ℃左右,后来上升到 35 ℃左右.产甲烷反应器试验在恒温室内进行,温度控制在 28 ℃ ±1 ℃.其中产甲烷反应器接种污泥取自于杭州柠檬酸厂和四堡污水处理厂,试验前先采用模拟废水对厌氧活性污泥进行活化培养,然后用渗滤液驯化起动产甲烷反应器,直至全部用渗滤液作为进水进行厌氧处理.

1.4　主要分析项目与分析方法

试验过程中每天记录渗滤液产生量及 pH 值、气体产量,并且每周采取渗滤液样品,分析测定渗滤液中 COD、NH_3-N 和挥发性脂肪酸(Volatile Fatty Acid ,VFA);每周测气体甲烷组分.其中 pH 值测定采用玻璃电极法;COD 浓度测定采用标准重铬酸钾法;VFA 浓度测定采用酸性乙二醇试剂光度法;NH_3-N 测定采用纳氏试剂光度法;气体甲烷组分测定采用气相色谱法.

2　试验结果与讨论

2.1　生活垃圾有机物的溶出特征

填埋场生活垃圾有机污染物(COD)溶出总量可表示为:

$$COD_{(总)} = \sum_{i=0}^{n}(Q_i S_i - Q_i^* S_i^*)$$

式中,S_i^* 和 S_i 分别为回灌渗滤液 COD 浓度和厌氧水解相渗滤液 COD 浓度,Q_i^* 和 Q_i 分别为回灌渗滤液水量和厌氧水解相渗滤液量,i 为运行时间(d).基于以上的数据处理,2 个生物反应器内垃圾有机污染物质(COD)溶出总量与运行时间的关系如下图 2.

由于生活垃圾中可溶出有机物的多少在一定程度上反映了垃圾中可以降解的有机物数量,因此从图 2 日 COD 溶出量可以看出,U1 生物反应器无论溶出速度还是溶出稳定性均明显优于 U0 生物反应器.到第 84 天,U1 生物反应器的垃圾降解已基本趋于完成(日 COD 溶出量已接近 0),由此可以推断该生物反应器中作为垃圾卫生填埋场的厌氧水解相中垃圾有机物已基本全部被降解;而此时 U0 生物反应器的垃圾还极不稳定,日 COD 溶出量在 0.5 ~ 2.0 g,由此也可以推断渗滤液直接回灌填埋场由于受到酸性代谢产物积累的影响,还没有建立动态稳定的产甲烷微生物体系,垃圾中的有机物还不能实现向甲烷等能源气体的转化.

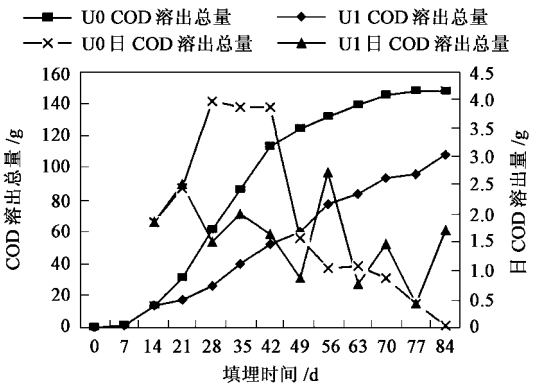


图 2　COD 溶出量与填埋时间的变化

Fig.2　Relationship between the leaching pollutant (COD) and refuse age

对垃圾有机物 COD 溶出总量随运行时间的变化曲线进行对数数学拟合的结果如表 2.

表 2　垃圾 COD 溶出总量随运行时间变化的数学拟合结果

Table 2　The mathematical formula of relationship between the leaching pollutant(COD) and refuse age

反应器	拟合公式[1)]	特征系数	溶出量单位	相关系数[2)]
U0	$M_t = 48.5\ln(t) - 126.4$	48.5	g	0.8822
U1	$M_t = 52.4\ln(t) - 88.5$	52.4		0.9018

1) M_t 为 COD 溶出总量; 2) 当置信度为 99 %,自由度为 12 时,则临界相关系数 $r = 0.661$,达到极显著相关.

表 2 的结果表明,虽然垃圾有机物降解过程实质上是一个同时进行着复杂的物理、化学和生物反应过程,但在生物反应器填埋场中垃圾有机物降解过程是以生物反应占主导地位的复杂过程,相关系数的大小表明 U1 生物反应器中生物反应更典型、更稳定,而渗滤液直接回灌的 U0 生物反应器则较

次.表 2 特征系数以定量的方式体现了生物反应器中有机物降解速度的快慢,其大小表明 U1 生物反应器内有机物(COD)的降解速度优于 U0 生物反应器,因此可以通过表 2 的数学模型较方便准确地预测垃圾有机物降解过程,为能源的利用提供理论依据.

2.2 产甲烷反应器的产能特征

产甲烷反应器对生活垃圾厌氧水解相溶出的 COD 转化为沼气的处理结果如表 3 所示.结果表明,产甲烷反应器对水解相溶出的 COD 转化为沼气的处理效果较好.初期由于渗滤液水量较小,产甲烷反应器容积 COD 负荷较低,因此 COD 去除率较高;当水解相渗滤液水量迅速增加时(28 ~ 56d),产甲烷反应器对厌氧水解相溶出的 COD 去除率有所下降,但仍可维持在 50 %以上;随着时间的延长,当厌氧水解相渗滤液中的 COD 浓度下降时,产甲烷反应器容积 COD 负荷也相应地下降,其 COD 去除率迅速上升到 70 %以上.这说明容积 COD 负荷是影响产甲烷反应器 COD 去除率的主要因素.本试验结果还表明,产甲烷反应器处理有机垃圾水解相渗滤液的较适容积 COD 负荷应在 6.5 ~ 7.5g/(L·d).

表 3 产甲烷反应器的运行特性

Table 3 Operational characteristics of the methanogensis bioreactor

取样时间 t/d	进水量 Q/L	进水 COD 浓度 S_0 /g·L^{-1}	出水 COD 浓度 S_e /g·L^{-1}	容积 COD 负荷 N_v /g·(L·d)$^{-1}$	去除率 η/%
7	0.24	27.64	0.41	1.21	98.5
14	0.66	30.42	1.10	3.65	96.4
21	1.12	27.81	7.37	5.66	73.5
28	2.25	27.88	12.92	11.40	53.7
35	2.53	25.16	10.96	11.57	56.4
42	2.97	23.24	11.14	12.54	52.1
49	3.30	18.80	9.07	11.28	51.7
56	3.23	18.48	8.40	10.85	54.5
72	3.31	12.20	2.77	7.34	77.3
70	3.36	6.10	1.02	3.73	83.3
77	2.91	2.68	0.21	1.42	92.2
84	2.56	0.81	0.11	0.38	86.4

2.3 厌氧分步生物反应器系统产气量和甲烷含量

在填埋运行的 84d 内,渗滤液直接回灌填埋场由于其 pH 一直在 5.20 以下,抑制了产甲烷细菌的生长,因而在整个填埋过程中此生物反应器基本无气体产生.

表 4 为厌氧分步生物反应器系统(U1 生物反应器)厌氧水解相与产甲烷反应器的产气量、甲烷含量及渗滤液 pH 实测结果.表 4 表明,当 pH 在 4.82 ~ 6.47 的范围时,厌氧水解相基本监测不到产气量;随后当 pH 上升到 6.5 ~ 7.5 时,厌氧水解相可产生少量的气量,但气体的甲烷含量很低(15 % ~ 32 %).产甲烷反应器的产气量占整个系统总产气量的 80 %以上,甲烷含量也高达 55 % ~ 69 %;其产甲烷反应器的产气率和甲烷含量基本不受渗滤液 pH 的影响,有利于垃圾产甲烷气体的收集与利用.若采用 $G = M(S_0 - S_e)Q + b$ 建立产气模型,则其产气量与有机基质具有很好的线性正相关[7].

表 4 厌氧分步生物反应器系统的气体产量及甲烷含量

Table 4 The volume and the contents of methane in anaerobic phased solids digester system

取样时间 t/d	pH	水解相的产气量 V_S/L	水解相气体甲烷含量/%	产甲烷相的产气量 V_j/L	产甲烷相气体甲烷含量/%
7	4.82	0		2.25	55
14	5.46	0		7.36	60
21	5.10	0		9.64	63
28	5.18	0		13.45	68
35	5.36	0		13.83	68
42	6.47	微量[1)]	17	15.69	69
49	7.01	少量[2)]	32	15.38	67
56	6.89	少量[2)]	26	14.64	67
63	7.20	少量[2)]	30	14.33	68
70	7.28	少量[2)]	20	8.54	65
77	7.41	微量[1)]	15	3.52	60
84	7.59	0		0.52	55

1)产生的气体小于 0.2L; 2)产生的气体为 1 ~ 3L

结合表 3 和表 4 的数据可以推知:厌氧分步生物反应器系统可以采用调节水解相和产甲烷反应器的水力负荷及容积 COD 负荷,使厌氧水解相 pH 小于 6.5,产甲烷反应器的容积负荷在 6.5 ~ 7.5 g/(L·d)等方法,达到提高厌氧分步处理的效果及气体甲烷含量的目的.

2.4 2 个生物反应器中垃圾的稳定程度

填埋垃圾层的稳定主要是指表面沉降的停止,以及渗滤液和气体中的污染成分对环境的影响降到可接受的程度[5,6].渗滤液有机污染物的浓度也在一定程度上反映垃圾层的稳定程度.渗滤液直接回灌型填埋场(U0 生物反应器)和厌氧分步生物反应器系统(U1 生物反应器)中渗滤液 COD 浓度与 pH 见表 5.

从表 5 可以看出,厌氧分步生物反应器系统渗滤液中 COD 和 VFA 浓度低,说明垃圾层中有机物

分解基本完成,稳定程度高;渗滤液直接回灌填埋场的渗滤液 COD 和 VFA 浓度高,pH 低,基本无气体产生,这是由于此反应器产甲烷微生物协调作用失衡,垃圾层中有机物未彻底分解,仅停留在水解酸化的阶段所致,因而,此反应器的稳定程度低,还需要相当一段时间才能达到完全稳定.

表 5　生物反应器填埋场系统的渗滤液水质

Table 5　The characteristics of leachate under the different bioreactor

反应器	COD/ mg·L^{-1}		VFA/ mg·L^{-1}		pH		NH_3-N/ mg·L^{-1}	
	第 3 天	第 84 天	第 3 天	第 84 天	第 3 天	第 84 天	第 3 天	第 84 天
U0	28 441.6	31 528.0	8 242.6	20 055.6	4.90	5.10	1 104.1	1 446.3
U1	26 821.2	1 100.3	8 814.9	301.1	5.45	7.59	1268.1	1 354.6

3　结论

(1) 填埋垃圾 COD 溶出总量随填埋时间变化规律的数学拟合结果表明:对数拟合的相关系数体现了生物反应器填埋场系统的生物反应特性,并且能较准确地预测填埋垃圾有机物的降解过程;

(2) 厌氧分步生物反应器系统由于强化了生物反应过程,有助于城市生活垃圾及渗滤液中有机污染物降解,从而加速填埋垃圾的稳定化;产甲烷反应器不仅有利于甲烷气体的收集与利用,而且对渗滤液水质的中和及稳定化处理效果也较好.

(3) 为提高厌氧分步处理的效果及气体甲烷含量,可以采用调节水解相和产甲烷反应器的水力负荷及容积 COD 负荷,使水解相 pH 小于 6.5,产甲烷反应器的容积负荷在 6.5 ~ 7.5g/(L·d) 等方法.

参考文献:

[1] 卢成洪,徐迪民.回灌法处理城市垃圾填埋场渗滤液[J].上海环境科学,1997,**16**(1):38 ~ 40.

[2] Debra R, *et al*. The impact of leachate recirculation on municipal solid waste landfill operation characteristics[J]. Waste Management & Research,1996,**14**:337 ~ 346.

[3] Townsend T G, *et al*. Acceleration of landfill stabilization using leachate recycle[J]. Journal of the Environmental Engineering, 1996,**122**(4):263 ~ 268.

[4] Bae J H, *et al*. Effect of leachate recycle and anaerobic digester sludge recycle on the methane production from solid wastes[J]. Water Science & Technology,1998,**38**(2):159 ~ 168.

[5] 花岛正孝ち.一般废弃物最终处分场[M].川崎:财团法人日本环境卫生・ンタ一,1994.

[6] Debra R Reinhart. Full-scale experiences with leachate recirculating landfills: case studies[J]. Waste Management & Research, 1996,**14**:347 ~ 365.

[7] 何若,沈东升,方程冉. 生物反应器填埋场系统的特性研究[J].环境科学学报,2001,**21**(6):763 ~ 767.