

城市固体废物好氧生物 反应器填埋方式的实验研究

李 兵^{1,2} 赵勇胜² 董志颖³ 赵由才¹ 柴晓利¹

(1. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 2 吉林大学环境与资源学院, 长春 130026;
3 宁波大学建筑工程与环境学院, 宁波 315211)

摘 要 MSW (城市固体废物) 生物反应器型填埋是一种较新颖的方法。在系统分析现有填埋方法优缺点的基础上, 对其加以改进, 将强制通风好氧和渗滤液循环 2 种方式有机地结合在一起, 构建了 MSW 好氧生物反应器。考察了 NH_3 、 CH_4 、 CO_2 、pH 和温度等因素, 并监测分析了渗滤液中的 COD、 BOD_5 、 Zn^{2+} 、 NH_4^+ 和 NO_3^- 等指标, 旨在研究其中垃圾的降解及渗滤液中 COD、 BOD_5 、 Zn^{2+} 、 NH_4^+ 和 NO_3^- 的去除情况, 探讨该生物反应器对垃圾和渗滤液相关参数的作用机理。结果表明, 该反应器对渗滤液中 COD、 BOD_5 、 NO_3^- 的去除率分别达到 96.34%、94.58% 和 99.9%, 对其中的 Zn^{2+} 也有较好的脱除效果。

关键词 固体废物 好氧生物反应器 渗滤液 循环 强制通风

中图分类号 X705 文献标识码 A 文章编号 1008-9241(2005)10-0024-05

Experimental research on MSW aerobic bioreactor landfilling

Li Bing^{1,2} Zhao Yongsheng² Dong Zhiying³ Zhao Youcai¹ Chai Xiaoli¹

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, Tongji University, Shanghai 200092;

2. College of Environment & Resources, Jilin University, Changchun 130026;

3. College of Construction Engineering & Environment, Ningbo University, Ningbo 315211)

Abstract MSW bioreactor landfill is an emerging landfilling method. On the basis of analyzing the merits and defects of present landfilling methods, these methods are improved and organically forced aeration and leachate recirculation are combined into MSW aerobic bioreactor. During the experiment, NH_3 , CH_4 , CO_2 , pH and temperature, etc, have been reviewed, meanwhile, COD, BOD_5 , Zn^{2+} , NH_4^+ and NO_3^- have been detected and analyzed, which is to research on the waste degradation and the removal of COD, BOD_5 , Zn^{2+} , NH_4^+ and NO_3^- , probe into the function mechanics of the reactor to wastes and leachate. The result indicates that the removal rates of COD, BOD_5 , NO_3^- are 96.34%, 94.58% and 99.9% respectively, and the effect to remove Zn^{2+} is preferable.

Key words solid waste; aerobic bioreactor; leachate; recirculation; forced aeration

1 前 言

目前, 垃圾处理的主要方法有填埋、焚烧和堆肥。在众多因素的制约下, 适合我国国情的处理方法是垃圾卫生填埋为主, 垃圾焚烧和堆肥为辅。

当前填埋法中存在 2 种反应器型填埋方法, 即 MSW 准好氧填埋法和具有渗滤液循环的 MSW 填埋法。尽管这 2 种方法都对所填垃圾具有较好的降解效果, 但 MSW 准好氧填埋不便对垃圾层进行水分、pH 值及营养调节, 在一定程度上会抑制好氧微生物的活性, 而且填埋层中存在大量的厌氧微生物, 这会

使降解速度变慢; 具有渗滤液循环的填埋方法虽然能够对所填埋的垃圾进行水分、营养及 pH 值调节, 但填埋层中降解垃圾的微生物大多数是厌氧微生物, 这也使得降解速度变慢。

因此, 现有的 MSW 填埋方法存在不足之处或

基金项目: 国家科技部科技攻关项目 (2003BA808A17); 宁波大学科
研基金 (0311057, SS2004014)

收稿日期: 2004 - 03 - 30; 修订日期: 2004 - 09 - 30

作者简介: 李兵 (1977 ~), 男, 博士研究生, 主要从事固体废物资源化
和垃圾填埋场污染控制研究。

E-mail: 0310050039@smail.tongji.edu.cn

一些亟待改进的方面,为了探求一种更有效的 MSW 填埋方法,本文作者将国内外正在研究的强制好氧填埋和渗滤液循环这 2 种填埋方式结合起来,构建成 MSW 好氧生物反应器。在本实验中,MSW 好氧生物反应器以一定频率进行强制通风,使所填埋的 MSW 处于好氧环境;通过渗滤液的循环,提供垃圾填埋场内充足的水分,定时监测、取样分析,并依据分析结果对实验进行 pH 值和营养调节,从而激发好氧微生物的降解机能。借助这些手段,最大限度地发挥填埋层中好氧微生物的活性,使其对所填埋垃圾中的有机物、无机物、重金属和浊度都有较强的去除效果。

2 实验装置及方法

2.1 实验装置

本实验设计一组实验装置,其设计模拟了实际垃圾填埋场。该装置主体槽长 \times 宽 \times 高为 90 cm \times 50 cm \times 80 cm。装置中分布有布水槽、布气管、渗滤液收集系统、气体收集系统及渗滤液循环系统。装置的示意图如图 1 所示。

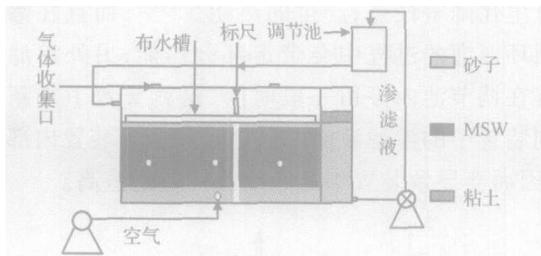


图 1 装置示意图

Fig 1 Sketch map of equipment

装置中布水槽为一个长 \times 高 \times 宽为 86 cm \times 4 cm \times 46 cm 的小槽,槽的底部布满直径为 0.15 cm 的小孔,并在该槽的底部平铺滤纸,如此设计是为了渗滤液经小孔缓慢下滴,因而能使装置布水均匀。

装置中布气管的干管外径为 4 cm;支管外径为 1 cm。两相邻支管中心距都为 12 cm;干管和支管上都开有小孔,相邻小孔中心距都为 12 cm 且夹角为 0°;如此设计是为了布气管能够布气均匀。装置中布气管示意图如 2 所示。

2.2 实验样品采集及预处理

本次实验用垃圾取自长春市石碑岭垃圾场。进行垃圾场采样时,在垃圾场设计了 5 个垃圾采样点,所取的样混在一起合成总样。所取回的垃圾样用 10 mm 的筛子进行筛选,把里面的小石块、塑料袋的

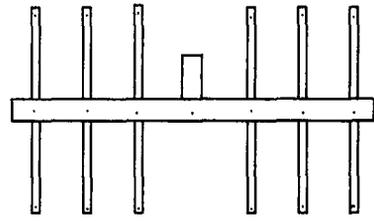


图 2 布气管示意图

Fig 2 Sketch map of charge pipe

小碎片、小金属块剔除掉,保留其他组分。并通过实验测定出该垃圾样的含水率为 9.1%。

2.3 实验方法

2.3.1 实验分析方法

本次实验中所测参数都严格按照其相应的分析方法进行监测和分析:渗滤液中 COD、 NH_4^+ 、 Zn^{2+} 、pH 和电导率都参照文献 [1] 中有关监测分析方法;对填埋气体 (CO_2 、 CH_4 、 NH_3) 采用文献 [2] 中介绍的好氧枪进行气体收集,然后将所收集的气体注入气质联机器进行分析;城市固体废物有机质含量依文献 [3] 中的灼烧法进行分析测定。

2.3.2 装 样

首先在装置底部安装布气管,然后再铺设 10 cm 厚的砂子,使其覆盖整个布气管。然后在砂面上进行垃圾装样,每称 8 kg 的垃圾进行一次压实,完成装样后装置内装了 115 kg 的垃圾,并在垃圾面上每隔 3 cm 打一 3 mm 通孔,以有助于气体扩散。随后在所装垃圾之上再平铺 5 cm 厚的砂子,且在此之上放置布水槽,必须使布水槽呈水平状态。最后联结好 2 实验中所需要的各种管件。

为了使实验正常工作,必须确保实验中的水量与垃圾量之比在 50% ~ 55% 之间^[2,4]。因而,向装置内加入 53 kg 的水,经测定含水率为 55%。装置垃圾密度 1.02 t/m³,压实高度 25 cm,强制通气,通风频率 12 h/次,人工控制通风,水量与垃圾量之比为 55%。

2.3.3 需氧量的确定

本次实验中,强制通风采用的是时间控制法和温度控制法相结合的方法,即每天通风 2 次,每次通风 1 h,2 次通风时间间隔为 12 h;同时将实验环境温度基本控制在 20 ~ 25 之间,以降低其对实验的影响。

MSW 的好氧降解的理论需氧量为^[5]:

$$D = km c (0.0012t + 0.28) / 12$$

式中: D 为理论需氧量(mol); k 为调节系数,一般为0.5~1.5; m 为MSW的质量(g); t 为温度(°C); c 为MSW中的总有机碳的百分含量;12为1mol碳原子的质量(g/mol)。

按经验, k 的取值为1.0。实验中MSW的有机含量为9.87%, t 值根据当天所测温度确定;通气时考虑了氧损失情况,因而实际通气时间要适当延长一些。

2.3.4 实验运行

实验开始之前,为了确保装置中含水率保持在50%~55%之间(干基),向装置中加入53L的去离子水。经测定,装置中含水率为55%(干基)。实验开始之后,每天下午4点收集渗滤液40L,并进行渗滤液循环回灌,回灌的速率为12.43 mL/s。在实验开始阶段每2d分析一次渗滤液,当实验进行到22d时每3d分析一次渗滤液,分析用渗滤液的量为250mL,同时取250mL的去离子水补充进收集的渗滤液中(使装置含水率保持在55%)一并进行循环。由于所加入去离子水的量与装置中渗滤液的总量相比较小,所以加入的去离子水对渗滤液的稀释作用较小。

当收集的渗滤液全都回灌至装置中后,根据当天测定的装置内温度值算出所需氧量,并换算成所需要空气量,并进行强制通风,通风速率为0.9 m³/h,每次通风1h。给装置内通入空气时,也能对进入收集系统中的渗滤液有一个充氧的过程,使渗滤液也能充分且快速的降解。

从实验开始的第3d开始收集气体样,由于实验装置是由有机玻璃制成的,当装置内压力过大时,装置易变形,气体样的收集比较困难,因而制定成每5d取一次样。

3 实验结果分析

实验结束时(历时73d),装置中MSW的高度为20.3cm,沉降比为13.4%。下面对本实验中所测的项目进行分析。

3.1 判断装置中是否处于好氧状态

本次实验选取了Eh(氧化还原电位)、温度、pH、LFG(填埋气体)这几个参数判断装置内是否好氧。

3.1.1 Eh值

图3为装置中Eh值变化曲线图。在整个实验期间,装置中的Eh值都大于15mV,因而从这一方面来说装置中是处于好氧状态的。从图3中在还可

以看出,在实验开始阶段Eh值很高,这是因为好氧微生物处于适应期,氧气消耗量小。随着时间的推移,好氧微生物经历对数增长期、静止期,氧气消耗量较大,氧气消耗量变大,因而Eh变小。到实验中、后期,好氧微生物处于静止期,氧气消耗量较稳定,因而Eh变化也不大。

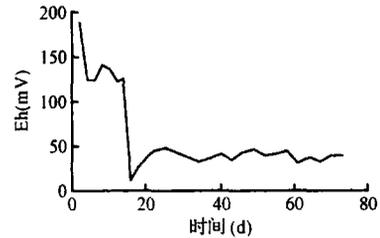


图3 装置中Eh值变化曲线图

Fig 3 Variable curve of Eh

3.1.2 温度

图4是装置及实验室中温度对比图。在实验过程中,装置温度都在20~30°C且基本上都高于室温。装置中温度比较低是因为本次实验所用MSW中有机质含量相当低,仅为9.87%,因而所取垃圾的可生化降解性差,产生的热能少^[6,7];而且在渗滤液循环回灌的过程中会带走部分热能;另外渗滤液需要在调节池内停留一段时间,这就导致了重新回灌到装置中的渗滤液的温度已远远低于装置内部温度,因而会导致装置中的温度没有理论值高。

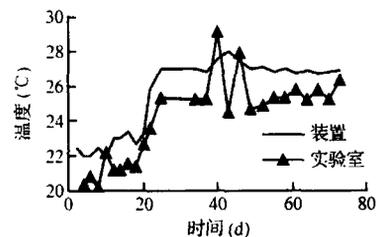


图4 装置及实验室中温度对比图

Fig 4 The contrast of temperature between the equipment and lab

3.1.3 pH值

图5是装置中pH值变化曲线图。在实验开始时,渗滤液中的pH低于7,这是因为刚填入槽内的MSW刚从垃圾填埋场取回,其在填埋场中是处于半好氧状态、甚至厌氧状态,因而pH值较低^[8]。随着对装置内通入空气,装置的pH开始上升,图5中显示装置的pH都维持在7.5左右。而在好氧条件下,MSW渗滤液的pH值一般都在7.0~8.5之间,这说明本实验中的2装置中的pH值在其范围之

内,跟理论相符。

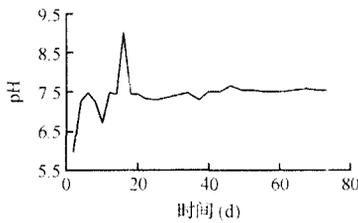


图 5 装置中 pH 值变化曲线图

Fig 5 Variable curve of pH

3.1.4 填埋气体 (LFG)

对实验过程中所取的气体样分析了 CH_4 、 NH_3 和 CO_2 3 个指标,结果表明几乎全是 CO_2 ,没有发现有 CH_4 和 NH_3 的存在。这说明实验中几乎没有发生厌氧产 CH_4 和厌氧反硝化反应。

在本次实验中,所取的渗滤液均没有难闻气味,这与好氧条件下,渗滤液没有难闻气味相符。

从以上分析可以知道,填埋层中绝大部分在实验中是处于好氧状态。

3.2 实验对有机物的降解

本次实验中通过对渗滤液中 COD 和 BOD_5 的分析来反映实验对有机物的降解。

图 6 是装置中 COD 变化曲线图。从图 6 中可以看出,在实验初始阶段,装置中的 COD 很快达到最高值 3505.52 mg/L,随着实验的进行,装置中 COD 的值下降很快且幅度很大,到实验结束时其值为 122.54 mg/L,对 COD 的去除率达到 96.34%。实验中通过强制通风使得装置处于好氧状态,从而发挥好氧微生物的降解性能。同时装置中渗滤液的循环回灌,不仅给微生物提供了丰富的营养,而且增大填埋层的孔隙率,有利于空气的流通,能够让更多的微生物呼吸到氧气,从而有利于好氧微生物的生长、发育和繁殖。而且微生物的种类也得到增加,会出现一定数量的原生动物和大量菌胶团,因而这样的填埋层相当于一个好氧生物滤池^[7,9]。好氧微生物、原生动动物及菌胶团通过自身的生命代谢活动,进行分解代谢和合成代谢,把一部分吸收的有机物氧化成简单的无机物,并放出生物生长、活动所需要的能量;把另一部分有机物转化合成新的细胞物质,使微生物生长繁殖,从而产生更多的好氧微生物供降解有机物。因此在实验中,强制通风、渗滤液循环回灌与有机物的降解是相辅相成的。而且随着实验的进行,装置中的 MSW 会逐步形成腐殖质的,也能够吸附一定量的有机化合物,这在一方面也促成了有

有机物含量的降低。

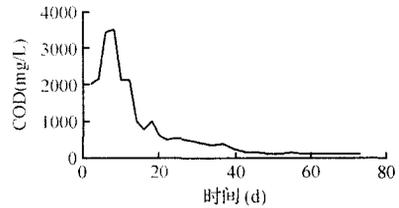


图 6 装置中 COD 变化曲线图

Fig 6 Variable curve of COD

图 7 是装置中 BOD_5 变化曲线图。装置对 BOD_5 的降解的趋势与装置对 COD 的降解趋势很相似,装置中 BOD_5 的最高值为 120.34 mg/L,实验结束时的 BOD_5 的值为 6.52 mg/L,去除率为 94.58%。

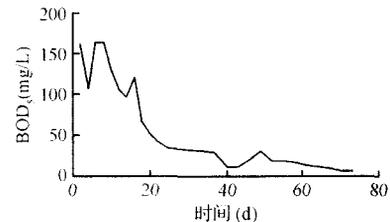


图 7 装置中 BOD_5 变化曲线图

Fig 7 Variable curve of BOD_5

从以上分析可以看出,MSW 好氧生物反应器型填埋方式对有机物的降解非常有效,不仅降解快而且较充分,对 COD 和 BOD_5 有很高的去除率。

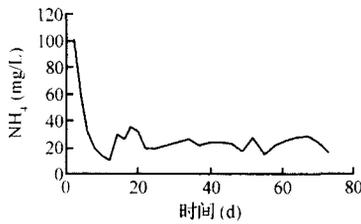
3.3 实验对氮元素的影响

3.3.1 实验对 NH_4^+ 的影响

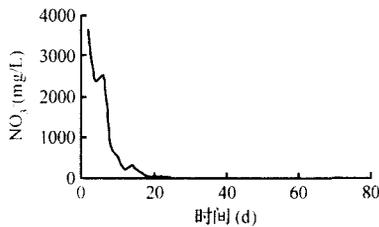
图 4~图 6 是装置中 NH_4^+ 变化曲线图。在实验的初始阶段,由于 NH_4^+ 极易溶于水,装置中 NH_4^+ 一开始就达到最高 (100.46 mg/L)。从图 4~图 6 中可以看出,实验初期 NH_4^+ 下降很快,这是因为,实验过程中的强制通风使装置中的亚硝化细菌和硝化细菌大量繁殖^[10],而在这 2 种细菌的作用下, NH_4^+ 发生硝化反应生成 NO_2^- 和 NO_3^- ;而且在强制通风好氧也对渗滤液中的氨存在吹脱过程,这也能使其浓度得到降低。还可以看出,实验中后期 NH_4^+ 浓度变化不大是因为在该阶段碳源营养不足所致。实验中的渗滤液循环只能对通气性能产生有益的影响,对 NH_4^+ 去除帮助不是很大。

3.3.2 实验对 NO_3^- 的影响

图 9 是装置中 NO_3^- 变化曲线图。由于 NO_3^- 极易溶于水,实验开始时, NO_3^- 的浓度即达到最大值,

图8 装置中 NH_4^+ 变化曲线图Fig 8 Variable curve of NH_4^+

为 3628.6 mg/L。随着实验的进行,实验中 NO_3^- 浓度都很快降低,到实验结束时达到 1.78 mg/L, NO_3^- 浓度变化率分别达到 99.9%。这既可能因为实验中好氧微生物新陈代谢比较频繁,需要大量的氮素营养,而 NO_3^- 可作为好氧生物的氮素营养且易被很好吸收;又可能因为填埋层处于兼氧好氧交替状态,从而 NO_3^- 发生反硝化反应生成 N_2 的缘故^[10]。因而对硝态氮的去除是这 2 种原因共同作用的结果。

图9 装置中 NO_3^- 变化曲线图Fig 9 Variable curve of NO_3^-

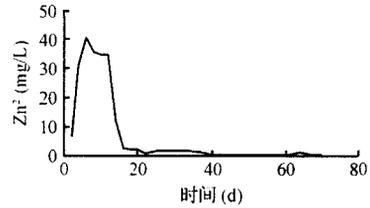
3.4 实验对渗滤液中 Zn^{2+} 的去除

图 10 是装置中 Zn^{2+} 变化曲线图。随着实验的进行,实验中的 Zn^{2+} 浓度很快达到最大值 40.66 mg/L,这是由于在该阶段渗滤液呈弱酸性, Zn^{2+} 逐渐被淋滤的缘故。但随后就开始下降,并且在较短的时间内就降到很低值,在实验最后的一个多月内,其值基本都在 1.0 mg/L 之下。这是因为这期间渗滤液呈弱碱性,渗滤液中的 OH^- 与 Zn^{2+} 反应生成氢氧化物沉淀;而且 Zn^{2+} 与腐殖质产生很稳定的螯合物和络合物;另外,装置中 MSW 颗粒的吸附性能较强的也使 Zn^{2+} 的浓度下降。

4 结论与建议

通过对 MSW 好氧生物反应器填埋方式实验的研究,可以得出以下结论:

(1)与 MSW 传统厌氧填埋的相比,MSW 好氧生物反应器能够迅速地使所填埋的垃圾得到降解。

图10 装置中 Zn^{2+} 变化曲线图Fig 10 Variable curve of Zn^{2+}

(2)MSW 好氧生物反应器对所填埋垃圾中的有机物、铵氮、硝态氮、重金属及浊度都具有极好的去除效果。

(3)MSW 好氧生物反应器能够较大沉降,从而使填埋场的使用寿命更长,又由于所填埋的垃圾能尽快达到稳定,因而能产生巨大的环境效益和社会效益。

(4)由于 MSW 好氧生物反应器填埋方式使所填埋的垃圾在较短时间之内基本上得以降解,渗滤液中的污染质的浓度也相应地较低,因而所产生的渗滤液不需要或稍作处理后即可排放,这样可节省因处理渗滤液所需要的大量资金。

参考文献

- [1] 国家环境局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法(第三版). 北京:中国环境科学出版社,1989. 90~454
- [2] 聂永丰主编. 三废处理工程技术手册(固体废物卷). 北京:化学工业出版社,2000. 248~250
- [3] 佩奇(美). 土壤分析法. 北京:中国农业科技出版社,1991. 150~154
- [4] Tohn Bowders, Mark hudgins, EhetMclaughlin, et al Proceedings of the session: Bioreactor landfills Bioreactor Landfills Session Summary, 2000, 7: 17~18
- [5] 朱国营. 城市固体废物好氧填埋方式的研究[博士学位论文]. 长春:吉林大学,2001. 12~13
- [6] 陈满江,李国建. 高温好氧法处理生活垃圾中的供氧与通风控制. 环境卫生工程, 2001, 8(1): 24~26
- [7] Mark Hudgins, John march In-situ Municipal solid waste composting, using an aerobic landfill system. American Technologies, Inc., 1998. 23~65
- [8] 赵勇胜,郑连阁,朱国营. 城市垃圾的地质处置. 世界地质, 1999, 19(2): 73~82
- [9] 徐迪民,李国建,于晓华,等. 垃圾填埋场渗滤液回灌技术的研究. 垃圾渗滤水填埋场回灌的影响研究. 同济大学学报, 1995, 23(4): 371~375
- [10] 周群英,高廷耀. 环境工程微生物学(第二版). 北京:化学工业出版社,2000. 248~250