

新型调理剂 CTB-2 污泥堆肥的氧气时空变化特征研究

马闯^{1,2}, 高定^{1*}, 陈同斌¹, 郑国砥¹, 刘洪涛¹, 周海滨¹

1. 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心, 北京 100101; 2. 郑州轻工业学院材料与化学工程学院, 河南 郑州 450002

摘要: 采用新型 CTB-2 调理剂与城市污泥进行堆肥, 研究了堆肥过程中氧气、温度的时空变化特征。结果表明, $m(\text{CTB-2 调理剂}):m(\text{污泥})=1:2$ 能够有效降低污泥容重, 改善堆体结构; 堆体能够快速升温至高温期并持续 7 d 以上, 最终完成无害化; 采用该比例的调理剂能够保证堆体的通风供氧, 使堆体各层通风后的氧气体积分数都恢复至 19% 以上, 最低氧气体积分数维持在数 17% 以上; 堆肥过程中堆体的氧气体积分数、耗氧速率和温度都具有明显的层次效应, 堆体耗氧速率呈先升高后降低的趋势, 堆体通风后的氧气和最低氧气体积分数均随着堆肥的进行而增加。

关键词: 城市污泥; 好氧堆肥; CTB-2 调理剂; 氧气; 温度; 时空分布

中图分类号: X705

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2012) 05-0929-04

污泥好氧生物发酵混合料的含水率和堆体结构是决定生物发酵成败的重要参数^[1]。研究表明, 好氧生物发酵的最佳初始含水率范围为 50%~60%^[2-3]。在好氧发酵工程中, 堆体结构的优劣直接影响氧气的供应和传输过程, 结构性差则通风困难, 易导致微生物厌氧发酵^[4], 产生 H_2S 等臭气^[2]; 堆体结构性差还会降低堆体的通透性, 增加鼓风供氧的能耗^[5-6]。城市污泥高温好氧生物发酵过程中, 为了满足好氧微生物生长繁殖的需求, 需要对污泥进行预处理。在预处理过程中, 一般采用加入调理剂的方法来降低污泥的含水率、提高混合料的孔隙率^[7]。目前常用的调理剂如秸秆、锯末、返混料等^[8-9], 存在来源和性质不稳定, 抗压能力较弱, 且堆肥过程中易破碎损耗较多、运输和储存费用偏高^[10]等问题, 难以有效满足日益增多的大型污泥处理厂对调理剂的巨大需求。针对以上问题, 笔者所在课题组采用秸秆与高分子材料开发了一种新型 CTB-2 调理剂, 该调理剂具有抗压能力强、吸水量大、支撑作用强, 能够循环利用等优点^[11]。所用高分子材料主要成分为异氰酸酯粘结剂(MDI), 是由多异氰酸酯单体或其低分子衍生物组成的胶粘剂, 属于反应型成型剂。在新型 CTB-2 调理剂生产过程中添加量为质量分数 4% 成型剂, 成型剂中的异氰酸酯成分与秸秆中的水和醇类等化合物反应并最终生成聚脲, 其具有环境友好的特点^[12], 不会成为堆肥后肥料的污染物, 是一种理想的秸秆成型剂。

本文采用新型的 CTB-2 调理剂与城市污泥中进行堆肥, 研究了堆肥过程中堆体不同层次的氧

气、温度的时空变化特征, 以期从温度、氧气体积分数等方面考察 CTB-2 调理剂的堆肥应用效果, 检验该新型调理剂堆肥的理论可行性。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

供试污泥为北京某污水处理厂消化污泥, $w(\text{含水率})$ 为 83.5%, 容重为 $1010 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。 $w(\text{挥发性有机物 VS})$ 为 47.5%。采用粉碎的秸秆提供碳源, $w(\text{含水率})$ 为 8.1%, $w(\text{挥发性有机物})$ 为 92.1%。

城市污泥堆肥专用调理剂 (CTB-2), 采用秸秆与高分子材料复合成型, 容重为: $721 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 调理剂的为矩形, 其长宽高为: $2 \text{ cm}\times 2 \text{ cm}\times 1.8 \text{ cm}$ 。CTB-2 调理剂 $w(\text{含水率})$ 和 $w(\text{饱和含水率})$ 分别为 7.16% 和 40.5%, 吸水平衡时间为 24 h。

试验混合物料中各物料比例采用污泥: $m(\text{CTB-2 调理剂}):m(\text{秸秆})=20:10:0.5$, 充分混合后上堆。上堆料的 $w(\text{含水率})$ 约 53.2%, 容重约为 $570 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

1.2 试验方法

堆肥方式为强制通风静态垛高温好氧堆肥, 试验通过堆肥专用软件 Compssoft 对通风方式和通风量进行自动控制, 空气通过底部空气泵鼓入系统。堆肥反应器为圆柱体, 分为内外两层, 内层内径为 600 mm, 外层内径 800 mm, 高度 1010 mm, 内外两层间为保温层。有效堆体高度为 0.75 m、直径为 0.607 m, 堆体体积 0.217 m^3 。在堆体的上、中、下 3 层(距底部分别为 60、45、30 cm)分别放置温度监测探头和堆肥氧气探头, 对堆体温度和氧气浓度进行实时在线监测。

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863) 项目(2009AA064703)

作者简介: 马闯 (1982 年生), 男 (回族), 博士研究生, 研究方向为: 固体废弃物资源化。Email: machuang819@163.com

*通信作者: 高定。Email: gaod@igsrr.ac.cn

收稿日期: 2012-04-19

1.3 耗氧速率的计算方法

耗氧速率具体计算步骤为:记录停止通风时测得的最大氧气体积分数,在线监测氧气体积分数的减少。同一测试点氧气体积分数的下降开始很快,呈直线下降,然后曲线趋平,渐近于稳定值。取氧气体积分数下降呈直线状的两点测试值,按下式计算,得到工程上适用的耗氧速率。

$$R_O = \frac{C_O^i - C_O^e}{t}$$

式中: R_O —耗氧速率($\% \cdot \text{min}^{-1}$); C_O^i —起始氧气体积分数(%); C_O^e —最终氧气体积分数(%); t —两测试值相隔的时间(min)。

2 结果与分析

2.1 堆体温度的时空变化特征

堆体温度是好氧堆肥的关键参数,同时也是判断堆肥是否成功,能否最终实现无害化的重要指标之一。堆肥于秋季进行,共持续12 d。一般通风良好、供氧充足,堆体能够顺利快速升温达到高温期,并持续一段时间,从而实现堆肥物料的无害化。由图1可知,本次堆肥从升温开始到温度降至环境温度共历时12 d,堆体上、中、下3层均经历了升温阶段、高温持续阶段和降温脱水阶段。堆肥过程中堆体上、中、下3层均在35 h内完成快速升温,达到高温期。堆体不同层次的温度存在一定的差异,在堆肥的快速升温阶段,3层堆体的温度相近。进入高温阶段后,上层的温度最高,中层次之,下层的温度最低,3层呈现出明显的层次性并持续到堆肥结束。

从图1还可以看出,堆体上、中、下3层的温度在50℃以上的持续时间分别为10.1、9.7和7.7 d,完全达到了《粪便无害化卫生标准》(GB 7959—87)中规定堆温应在50~55℃以上并持续5~7 d的要求。可见,采用CTB-2调理剂可以成功

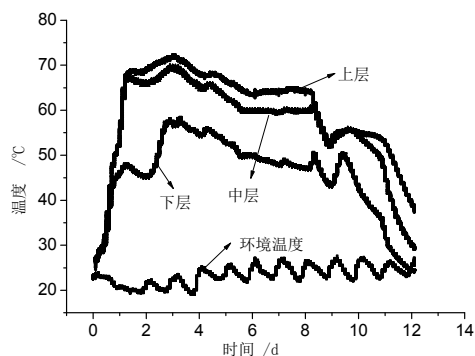


图1 城市污泥堆肥温度的动态变化

Fig.1 Dynamic changes of compost temperature

进行污泥快速堆肥,实现污泥无害化。

2.2 CTB-2 调理剂通风供氧效果

通风刚结束时堆体的氧气含量是每个通风周期内氧气的最高体积分数,显示堆肥过程中氧气被消耗后通风可以补充氧气的程度,可以反映出控制系统的供氧效果^[4],并可以表征不同堆肥条件下堆体的通气性,检验调理剂改善堆体结构的效果。

图2是通风刚结束时堆体上、中、下3层的氧气体积分数在堆肥过程中的变化。由图2可知,通风对堆体氧气的补充效果较好。在堆肥的不同阶段,堆体不同层次的氧气体积分数在通风结束时都恢复到19%以上,能够使堆体处于好氧状态。从空间上看,堆体下层由于靠近鼓风口的氧气体积分数始终最高,中层和上层规律相似。从时间上看,通风刚结束时堆体的氧气体积分数随着堆肥时间的增加而增加,这是由于堆肥过程中水分挥发、有机质降解,导致堆肥自由空域增加,堆体的孔隙性随之增加,供氧效果不断地改善。

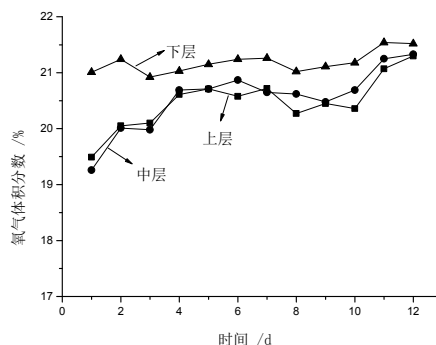


图2 通风刚结束时堆体的氧气体积分数

Fig.2 Variation of oxygen contents in composting pile after aeration

因此,使用该比例的调理剂进行污泥堆肥,能够使堆体氧气得到较好的补充,满足微生物活动的需求。

2.3 耗氧速率的时空变化特征

堆肥过程中,好氧微生物降解有机物,消耗氧气产生 CO_2 。氧气消耗速率是反映堆肥过程中微生物活性的间接指标,一定程度上反映了堆体自由空域的大小。耗氧速率($\% \cdot \text{min}^{-1}$)的高低可以间接反映出堆体的孔隙分布状况和储氧能力。良好的堆体结构能够在鼓风后储存一定量的氧气,供微生物利用。堆体的耗氧速率一般用单位时间堆体内氧气含量的降低量表示,本文中以每分钟(min)氧气体积分数(%)的降低量来表示。

由图3可知,堆肥过程中耗氧速率总体上呈先增加,后减小的趋势,在堆肥开始后迅速增加,达

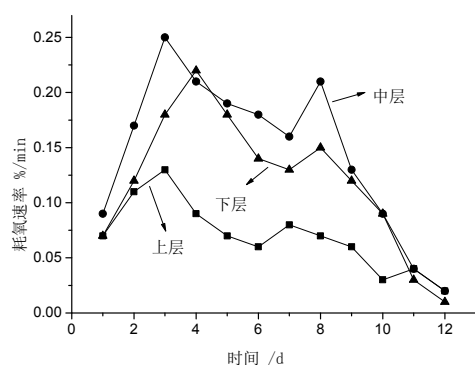


图3 堆肥过程中耗氧速率的变化

Fig.3 Variation of oxygen consumption rates during composting

到最大值, 而到堆肥后期不断降低。同时, 耗氧速率的变化与温度的变化有内在的关联(图1、图3), 耗氧速率的两个峰值出现的时间与温度曲线的两个峰值相对应。对应堆体内微生物活性较高, 大量消耗有机物质, 耗氧速率较高, 释放出大量热量, 堆体温度相应达到峰值。堆体上、中、下3层的耗氧速率有一定的差异, 下层耗氧速率达到最大值的时间比上层和下层1 d; 下层的耗氧速率比中、上层的小, 中层的耗氧速率为3个层次的最大。上层的耗氧速率一直都最小。堆体上层的热量散失大、水分含量相对较低、堆肥反应速度慢, 故耗氧速率小。堆体下层温度较低, 初期压实效应明显、自由空域少、不利于微生物生长, 故其耗氧速率也相对较小。而中层保温效果良好、压实效应相对较小, 因而堆肥反应剧烈, 耗氧速率大。

由图3还可知, 堆体各层次的好氧速率均处在 $0.05 \sim 0.2 \text{ \%} \cdot \text{min}^{-1}$ 之间, 总体上较低, 反映了 CTB 控制系统能够很好的控制堆肥进程, 另一方面也表明 CTB-2 调理剂能够有效改善堆体结构、提高堆体孔隙率, 达到良好的储氧效果。

2.4 堆体最低氧气体积分数的时空变化特征

堆肥各阶段的最低氧气体积分数直接反映了堆体是处于好氧还是厌氧状态, 是制定合理通风策略的主要依据之一。氧气的体积分数对臭气的产生有重要的影响, 为了维持好氧状态, 堆体的氧气体积分数应高于 5% 或 10%。由图4可知, 堆体的最低氧气体积分数总体上随堆肥的进行呈增加的趋势, 在整个堆肥周期中各层次的最低氧气体积分数均在 17% 以上。在高温阶段末期, 堆体有一个短暂的再次升温过程(图1), 耗氧量增多, 故堆体的最低氧气体积分数降低。到堆肥结束前, 各层堆体的最低氧气体积分数都达到了 20% 左右, 堆体的透气性增加, 微生物的耗氧速率很小, 故堆体内的残余氧

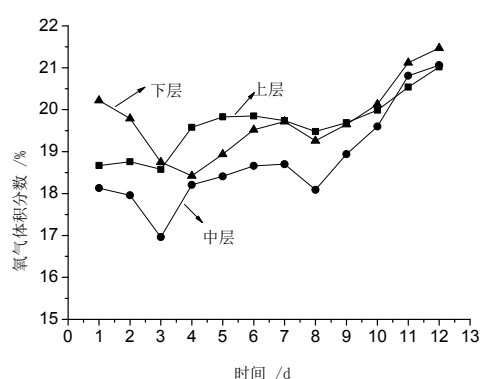


图4 堆体最低氧气体积分数的时空变化

Fig.4 Temporal-spatial variation of minimal contents of oxygen during composting

气很多。结果还表明, 耗氧速率较大时, 堆体的最低氧气体积分数低, 反之则最低氧气体积分数高。从空间上看, 堆体上、中、下3层的氧气最低体积分数存在显著差异, 堆体上层和下层的氧气体积分数较高, 堆体中层的温度最高, 氧气消耗量最大, 故氧气体积分数最低。

通风供氧是污泥高温堆肥成功的关键因素之一, 通风供氧的效果与堆体的自由空域(FAS)密切相关。FAS是指堆体中空气的体积与堆体总体积之比。城市污泥含水率在 80% 左右时, FAS 近似为零, 影响透气性, 不易达到通风供氧的效果。CTB-2 调理剂能够依靠颗粒之间的接触起到支撑作用, 使污泥堆肥物料颗粒之间形成良好的孔隙结构。通过提高堆体的 FAS 和孔隙率, 增加堆体内空气的体积。从而降低污泥的容重, 取得较好的通风供氧效果, 达到调节堆体内氧气体积分数的目的。

3 结论

(1) 污泥堆肥过程中通过添加 CTB-2 调理剂能够有效降低污泥 w (含水率)和容重, 改善堆体结构。CTB-2 调理剂采用 2:1 (污泥: 调理剂) 的比例能够促进堆体快速升温至高温期并持续一段时间, 最终完成污泥无害化。

(2) 堆肥过程中采用该比例的 CTB-2 调理剂取得较好的通风供氧效果, 使堆肥过程中各个层次均得到了充足的氧气。堆肥过程中, 堆体氧气体积分数和耗氧速率都具有明显的层次效应。

(3) 堆体通风刚结束时堆体的氧气体积分数以及堆体的最低氧气体积分数随堆肥的进行呈增加的趋势, 其中堆体通风刚结束时堆体的氧气体积分数始终在 19% 以上, 堆体的最低氧气体积分数均大于 17%, 堆体始终能够维持在好氧状态。

参考文献:

- [1] 张军, 雷梅, 高定, 等. 堆肥调理剂研究进展[J]. 生态环境, 2007, 16(1): 239-247.
ZHANG Jun, LEI Mei, CHEN Tongbin, et al. Application of amendments in composting: A review[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(1): 239-247.
- [2] 罗伟, 陈同斌. 湿度对堆肥理化性质的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(11): 2656-2662.
LUO Wei, CHEN Tong-Bin. Effects of moisture content of compost on its physical and chemical properties[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(11): 2656-2662.
- [3] 罗伟, 陈同斌, 高定, 等. 城市污泥与猪粪混合堆肥过程中湿度空间变异[J]. 环境科学学报, 2004, 24(1): 126-133.
LUO Wei, CHEN Tongbin, GAO Ding, et al. Variations of moisture content during co-composting of biosolid and pig manure[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2004, 24(1): 126-133.
- [4] NAKASAKI K, NAKANO Y, AKIYAMA T, et al. Oxygen diffusion and microbial activity in the composting of dehydrated sewage sludge cakes[J]. Journal of Fermentation Technology, 1987, 65(1): 43-48.
- [5] 刘斌, 陈同斌, 郑国砥, 等. 超高堆体下堆肥物料的氧气时空变化特征研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(11): 110-113.
LIU Bin, CHEN Tong-bin, ZHENG Guo-di, GAO Ding, Yue Bo, DU Wei, Chen Jun. Temporal-spatial Distribution of Oxygen during High Pile Composting[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(11): 110-113.
- [6] VUORINEN A H. Effect of the bulking agent on acid and alkaline phosphomonoesterase and β -glucosidase activities during manure composting[J]. Bioresource Technology, 2000, 75(2): 133-138.
- [7] MCGUCKIN R L, EITEMAN M A, DAS K, et al. Pressure drop through raw food waste compost containing synthetic bulking agents[J]. J Agric Eng Res, 1999, 72(4): 375-384.
- [8] 陈朱蕾, 吴学龙. 脱水污泥好氧堆肥化处理工艺中的返料比研究[J]. 武汉城市建设学院学报, 1999, 16(2): 20-23.
CHEN Zhulei, WU Xuelong. Study on recycle ratio in aerobic composting technology of the dewatered sludge[J]. Journal of wuhan urban construction institute, 1999, 16(2): 20-23.
- [9] ALBERQUERQUE J A, GONZALVEZ J, GARCIA D, et al. Effect of bulking agent on composting of "alperujo", the solid by-product of the two-phase centrifugation method for olive oil extraction[J]. Process Biochemistry, 2006, 9(3): 127-132.
- [10] WEI Y S, FAN Y B, WANG M J, et al. Composting and compost application in China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2000, 30: 277-300.
- [11] 马闯, 高定, 郑国砥, 等. 污泥好氧生物发酵调理剂CTB-2 的吸水性和抗压特性[J]. 中国给水排水, 2011, 27(13): 103-105.
MA chuang, GAO ding, ZHENG Guo-di, et al. Water absorptivity and compressive characteristics of aerobic biological fermentation amendment CTB-2[J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(13): 103-105.
- [12] MO X Q, CHEN E Z, WANG D H, et al. Physical properties of medium-density wheat straw particleboard using different adhesives[J]. Industrial Crops and Products, 2003, 18: 47-53.

Temporal-spatial distribution of oxygen during sewage sludge CTB-2 amendment composting

MA Chuang^{1,2}, GAO Ding¹, CHEN Tongbin¹, ZHENG Guodi¹, LIU Hontao¹, ZHOU Haibin¹

1. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Department of Material and Chemical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China

Abstract: This paper studied the sewage sludge composting using a novel compost amendment (CTB-2). Results showed that CTB-2 amendment could significantly reduce the bulk density of the sewage sludge. When the ratio of CTB-2 to sewage sludge was 1:2, composting process was significantly improved, while the ventilation and oxygen supply of the pile were ensured while the structure was properly adjusted. The pile reached hemophilic stage in 2 days and completed sanitary in 12 days. Oxygen content, consumption rate and temperature in the pile were obviously differed between layers. The oxygen consumption rate increased in the beginning of composting, and fell quickly after the maximum consumption rate achieved. The minimum oxygen content and oxygen contents after aeration increased with composting. After aeration, the oxygen content increased to above 19% (v/v), which help maintain a smooth aerobic environment of composting.

Key words: sewage sludge; aerobic composting; CTB-2 amendment; oxygen; temperature; temporal-spatial distribution