

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.04.001

污泥有机物降解规律研究

胡龙生¹, 孟琨², 杨广³, 易进翔⁴, 黄泳⁵

(1. 国家知识产权局专利局专利审查协作江苏中心, 江苏 苏州 215163;

2. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 3. 深圳市勘察测绘院有限公司, 广东 深圳 518000;

4. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 5. 南京长盈建筑规划设计有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 污泥中的微生物能够将其中的有机物降解, 影响污泥的填埋工程应用。针对这种问题对污泥开展降解试验, 分析污泥中的有机物的降解过程, 并总结出污泥有机物降解的降解规律和动力学模型。结果表明: 污泥中有机物含量整体趋势是随着时间逐渐减小; 有机物降解速率在初期波动较大, 但整体趋势依然是随着时间逐渐减小; 随着降解时间的增加, 污泥的 pH 先是降低, 然后慢慢回升, 继而逐渐趋于稳定; 而污泥的含水率逐渐增加。有机物降解的动力学模型适合指数关系 ($M = M_0e^{-\beta t}$)。

关键词: 污泥; 填埋; 有机物; 降解; 动力学模型

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2016)04—0001—04

Analysis on Degradation Law of Sewage Sludge

HU Longsheng¹, MENG Kun², YANG Guang³, YI Jinxiang⁴, HUANG Yong⁵

(1. Patent Examination Cooperation Jiangsu Center of the Patent Office, SIPO, Suzhou, Jiangsu 215163, China;

2. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150090, China;

3. Shenzhen Geotechnical Investigation & Surveying Institute Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China;

4. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

5. Nanjing Changying Architectural Planning Design Limited Company, Nanjing, Jiangsu 210000, China)

Abstract: Engineering application of sludge landfill might be influenced because of organic degradation from micro-organic activities. A study on the law of organic matter degradation was conducted to obtain the dynamic model. Results showed that the whole trend of organic matter content was gradually decreased with time in sludge. The degradation rate of organic matter in the early stage was fluctuant, but the overall trend was still gradually decreased. With the increase of degradation time, the PH of the sludge was reduced, then slowly rebound, and gradually stabilized. The water content of sludge was gradually decreased. Dynamic model for the degradation of organic matter fit the exponential relationship $M = M_0e^{-\beta t}$.

Keywords: sewage sludge; landfill disposal; organics; degradation; dynamic model

市政污泥是一种城市污水处理中产生的富含有机物的一种沉淀物。根据《国家环境保护“十二五”规划》, 全国年产生污泥将达到 6 000 万 t 左右。然而, 污泥填埋仍然是目前处理污泥的常用方法^[1], 随着我国经济发展, 目前污泥的处理方式显然滞后于当今的发展需求。

事实上, 污泥填埋后, 由于微生物在厌氧环境下降解, 会产生一些污染环境的二氧化碳、甲烷等气体^[2-3]。边博等^[4]通过固化污泥的填埋柱子试验中

得到有机物降解与污泥中含水率的变化规律, 主要表现为: 随着污泥中有机物的降解, 其体积和强度减小, 相反, 污泥的含水率、压缩性增大, 这些变化会影响填埋场的沉降和稳定性。有机质降解是一个非常漫长的过程, 随着降解过程的进行, 有机质含量不断减少及内部生化环境的不断改变, 其降解速率、降解产物、降解程度等都随着时间不断变化, 逐步达到稳定。李磊等^[5]通过采用室内加速固化污泥的降解方式, 在规定的时间内取固化污泥试样进行测量有机质

和无侧限强度,在此基础上获得了有机物的降解会降低固化污泥的强度以及强度损失与降解的关系。

Brendan C 等^[6]对污泥的降解过程以及不同降解程度下污泥的固结压缩特性进行分析,提出强降解下污泥具有更高的压缩性,合理地对待埋场的长期压缩沉降进行评估。Kinman 等^[7]研究指出甲烷菌为厌氧细菌,适宜于在 $\text{pH} = 7$ 左右生长,而填埋时产生的脂肪酸导致其生长环境呈酸性,不利于甲烷菌的生长,影响甲烷的产生。Samaras P 等^[8]研究预处理污泥中的生物的聚集密度,指出可以采用 TVS 来反映聚集密度,也可用 TVS 对污泥稳定化过程进行合理的评价。Kheradmanda S 等^[9]、张华等^[10]通过对垃圾和污泥的混合填埋进行研究,指出混合后有机质的降解加快,气、液产生规律也发生了明显的变化,加速了填埋场稳定化的过程。

目前,污泥的研究主要集中在污泥脱水性能、固结压缩特性^[6]、渗透性以及改性之后相关性^[4]等,而污泥的有机物降解研究甚少。如孙政^[11]研究指出相比其它的土,污泥的结合水势能是比较高的,这

也是污泥脱水困难的原因。朱伟等^[12]提出固化水平与污泥的渗透性呈反比,酸性环境将提高固化体的透水性;污泥固化体的渗透性受酸性渗透液的渗透量和酸的强度大小影响。李磊等^[13]从水泥添加量、固化龄期等角度进行了压缩试验,并结合水分测量试验,对污泥、固化污泥的压缩特性以及机理分析研究,在文中指出污泥压缩指数相对其他的土来说比较大,属于压缩相对比较高的土。

本文在总结上述研究成果的基础上,进一步对污泥的降解规律开展试验,分析污泥中的有机物的降解过程,并总结出污泥有机物降解的规律和动力学模型。

1 有机物降解试验

1.1 试验污泥

污泥采用某市污水处理厂的脱水污泥。通过对该污泥开展测量污泥相关物理参数的基础试验,获得该污泥的相关物理参数,见表 1。

表 1 污泥相关物理参数

含水率 /%	重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	比重 G_s	塑限 /%	液限 /%	pH	有机物 含量/%	Cd /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Cu /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Zn /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Pb /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
78.90	10.64	1.62	30.2	286.3	7.07	47.20	26	199	502.2	116

1.2 试验安排

本有机物降解规律所采用的污泥共设试样 15 个。为了减少试样在试验过程中水分散失并确保整个试验过程与空气隔绝,将所有试样均放置在带有瓶塞的密闭玻璃容器中,另外,为了避免温度影响,将试验放置在温度波动较小的大棚内,试验共进行 118 d,按照规定的时间取一个锥形瓶的试样,分别测定其含水率、有机物的含量、pH 值。

1.3 参数测量方案

污泥含水率的测量是严格按照《土工试验方法标准》^[14](GB/T 50123 - 1999)规定测量,根据规定,对黏土应将烘箱温度控制在 $105^\circ\text{C} \sim 110^\circ\text{C}$ 的恒温下烘至恒量;对有机质含量超过干土质量 5% 的土,应将温度控制在 $65^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ 的恒温下烘至恒量。由于污泥的有机质含量高,其温度应控制在 $65^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ 。污泥的含水率的计算公式:

$$w = (m_0 - m_d) / m_0 \quad (1)$$

式中: m_0 为湿污泥质量, g ; m_d 为干污泥质量, g 。

有机物含量的测量同样按照标准^[14]要求进行:采用灼烧法测量有机物,具体为: $M = (m_1 - m_2) /$

$(m_1 - m_0)$, 其中 m_0 为坩埚质量, m_1 试样烘干前质量, m_2 为试验烘干后的质量。

pH 值的测量依据《土壤 pH 的测定》^[15](NYT1377 - 2007)测定,具体为:将污泥试样风干,称取 10 g 污泥,向其中加入 25 ml 蒸馏水,搅拌 5 min,然后静置 2 h,采用实验室的 PHS - 3C 型 pH 计进行测量。

2 试验结论与分析

2.1 污泥有机物降解规律的研究

污泥有机物降解试验结果如图 1、图 2 所示。从图中可以看出:

(1) 污泥中有机物含量整体趋势是随着时间逐渐减小。

(2) 有机物降解速率在初期波动较大,但整体趋势依然是随着时间逐渐减小。

原因如下:

(1) 在厌氧降解过程中,污泥中的有机物经过大量微生物的代谢活动,具体经历 4 个阶段,分别为:水解阶段、酸化阶段、乙酸产生阶段、甲烷产生阶

段,有机物最终逐渐转换为: CH_4 、 CO_2 、 H_2O 等无机物^[16]。因此,随着时间的进行,厌氧降解过程的持续,有机物含量逐渐减小。

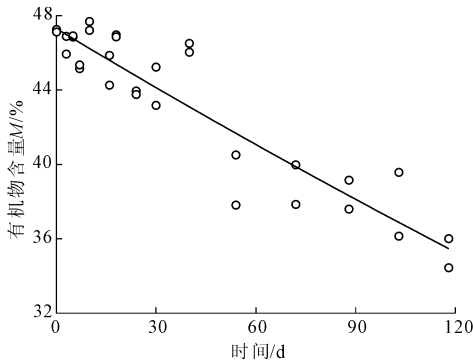


图1 污泥有机物降解量和时间关系

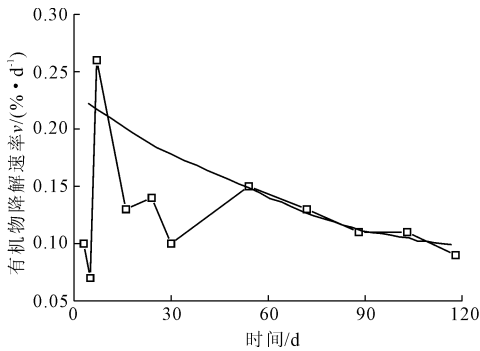


图2 污泥有机物降解速率和时间关系

(2) 由于有机物的降解是多种微生物共同作用的结果。在降解初期阶段,微生物对环境不适应,需要进行调整以及降解初期污泥中含有少量的氧气,可以维持部分微生物的好氧降解等,从而导致有机物降解初期,其降解速率波动大。

随着降解过程的发展,污泥中缺少氧气的供应,好氧降解受到极大的抑制,有机物的降解主要是依靠厌氧降解微生物。参与的微生物主要是指水解发酵菌、产氢气乙酸菌、同型产乙酸菌、产甲烷菌等,而微生物的活动与多因素有关。在有机物降解过程中,有机物含量减少,物质的浓度降低,代谢产物的累积等,通常会阻碍生化反应的顺利进行,抑制微生物的活动;另外微生物厌氧降解会产酸,主要是指乳酸、乙酸、甲酸、碳酸等,造成微生物生长环境的 pH 变化以及有机物降解会引起含水率的增加等,均会抑制微生物的活动。因此,有机物降解速率随着时间逐渐减小。

2.2 污泥有机物降解过程中 pH 值和含水率的变化趋势

污泥有机物降解过程中 pH 值和含水率的变化趋势如图 3、图 4 所示。从图中可以看出:

(1) 随着降解时间的增加,污泥的 pH 先是降低,然后慢慢回升,继而逐渐趋于稳定,并且初期阶段污泥的 pH 降低的速度较快,这与上述污泥的有机物初期降解速率较大相适应。从侧面反映了污泥有机物降解的 pH 值变化是依照彻底消化、渐近固化和静态稳定三大主要过程中的 pH 值变化趋势进行的。究其原因是由于污泥的有机物降解会产生酸,导致 pH 降低,而降解产酸是个中间产物,微生物的活动最终会将其分解转化成甲烷、二氧化碳、水、硫化氢、氨等,引起 pH 回升,直至稳定,而 pH 值的变化,影响降解环境的变化,不利于微生物对降解环境的适应性,起到抑制降解的作用。微生物作用和 pH 值的变化是个相互耦合的关系。

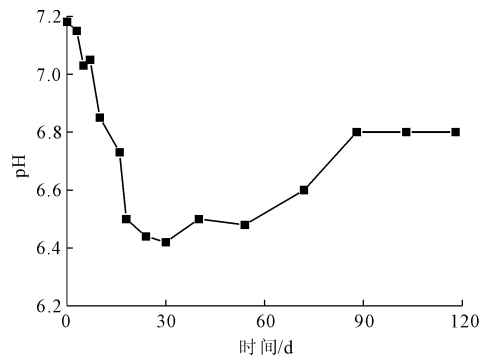


图3 污泥的 pH 变化

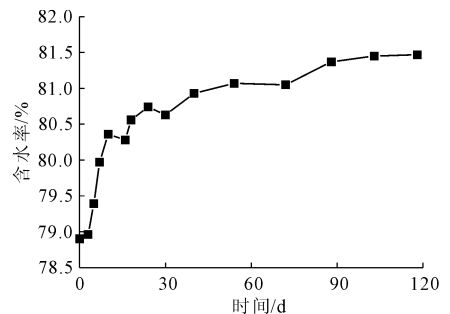


图4 污泥的含水率变化

(2) 随着降解时间的增加,污泥的含水率逐渐增加,在初期阶段,污泥的含水率增加较快,而继续发生降解时,含水率增加较慢。这是因为污泥的有机物降解是在封闭的厌氧环境系统中,所以含水率的增加是由于污泥中微生物厌氧降解有机物产生水导致的。污泥含水率的变化趋势与上述有机物的降解规律相一致。微生物的活动能够降解有机物,导致污泥含水率的增加,而含水率的增加又会抑制微生物的活动,两者是相互耦合的关系。

2.3 污泥有机物的降解模型研究

从上述污泥有机物降解量和时间关系曲线分析,先采用了直线拟合,其结果如下:

$$N = 47.22 - 0.10077t \quad (2)$$

其中,有机物降解速率 $v = 0.10077\%/d$,这与与有机物降解速率随着时间逐渐减小的趋势相违背,不符合有机物降解机理。

结合有机物的降解机理以及现有的降解模型,探索适合污泥的降解模型。目前,污泥降解的研究缺乏大量的监测数据,不适合应用统计模型,而动力学模型是从室内试验模拟角度出发,现有动力学模型主要有 COD 模型^[17]、Sheldon Arleta 模型等^[18]。动力学模型从原理上符合降解规律,并可以通过室内试验获得其相关参数。

从上述的试验结果以及相关的研究,可以假定污泥的降解速率满足如下方程^[17,19],即:

$$v = -\frac{dN}{dt} = \alpha N \quad (3)$$

式中, N 为时间 t 后剩下的污泥的有机物含量; α 为降解速率常数。

对上式进行变换并积分,得

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \int_0^{\infty} -\alpha dt \quad (4)$$

$$N = N_0 e^{-\alpha t} \quad (5)$$

式中, N_0 为初始污泥的有机物含量

对式(5)两边取对数,有:

$$\ln N = \ln N_0 - \alpha t \quad (6)$$

用实际数据进行直线拟合求出参数 $N_0 = 46.77$ 和 $\alpha = 1.05 \times 10^{-3}$

故,厌氧环境中,污泥有机物降解动力学模型:

$$N = 46.77 e^{-1.05 \times 10^{-3} t} \quad (7)$$

这与有机质降解规律相吻合,且拟合所得的动力学模型相关系数为 0.87,说明用式(5)中的动力学模型来描述污泥有机质的降解规律是比较合适的,模型的适用性较强。

3 结 论

(1) 污泥中有机物含量整体趋势是随着时间逐渐减小;有机物降解速率在初期波动较大,但整体趋势依然是随着时间逐渐减小。

(2) 随着降解时间的增加,污泥的 pH 先是降低,然后慢慢回升,继而逐渐趋于稳定,并且初期阶段污泥的 pH 降低的速度较快。

(3) 在试验数据的基础上,由拟合方式获得了有机物降解的动力学模型为 $N = 46.77 e^{-1.05 \times 10^{-3} t}$ 。

参考文献:

[1] 易进翔,杨康迪.固化污泥填埋处置中的压实特性研究

[J].水利与建筑工程学报,2013,11(1):70-73.

- [2] 王思民,王维红,穆玉均.周期循环活性污泥法处理生活污水的试验研究[J].水利与建筑工程学报,2013,11(4):5-7.
- [3] 屈 阳.固化/稳定化处理污泥填埋降解及长期稳定性研究[D].南京:河海大学,2010.
- [4] 边 博,周灵君,屈 阳,等.固化/稳定化处理污泥填埋气液转化模式[J].环境工程学报,2014,8(7):2991-2996.
- [5] 李 磊,朱 伟,吉顺健,等.微生物对固化/稳定化污泥长期强度的影响研究[J].岩土工程学报,2008,30(12):1778-1782.
- [6] O'Kelly B C. Effect of biodegradation on the Consolidation properties of a dewatered municipal[J]. Waste Management, 2008,28(8):1395-1405.
- [7] Kinman R N, Nutini D L, Walsh J J, et al, Gas enhancement techniques in landfill simulators[J]. Waste management & Research, 1987,5(1):27-39.
- [8] Samaras P, Papadimitriou C A, Haritou I, et al. Investigation of sewage sludge stabilization potential by the addition of fly ash and lime[J]. Journal of Hazardous Cements, 2008,154(6):1052-1059.
- [9] Kheradmanda S, Karimi - Jashnia A, Sartaj M. Treatment of municipal landfill leachate using a combined anaerobic digester and activated sludge system[J]. Waste Management, 2010,30(6):1025-1031.
- [10] 张 华,赵由才,黄仁华,等.不同性质污泥在模拟填埋场中的稳定化进程研究[J].环境科学学报,2009,29(10):2103-2109.
- [11] 孙 政.污水厂污泥固结排水规律研究[D].南京:河海大学,2013.
- [12] 朱 伟,李 磊,林 城.生物化学作用对污泥固化体渗透性的影响[J].岩土力学,2006,27(6):933-938.
- [13] 李 磊,徐 菲,周灵君,等.固化污泥压缩特性研究[J].岩土工程学报,2015,37(1):171-176.
- [14] 国家质量技术监督局.中华人民共和国建设部.土工试验方法标准:GB/T 50123 - 1999[S].北京:中国计划出版社,1999.
- [15] 中华人民共和国农业部.土壤 pH 的测定:NY/T 1377 - 2007[S].北京:中国农业科技出版社,2007.
- [16] 边 博,周灵君,屈 阳,等.固化/稳定化处理污泥填埋气液转化模式[J].环境工程学报,2014,8(7):2991-2996.
- [17] 刘宏远,张 燕,沈东升,等.生物反应器填埋场系统有机物降解动力学模型[J].哈尔滨工业大学学报,2004,36(3):307-309.
- [18] 李 磊,王 佩,徐 菲,等.污泥弃置场产气特性试验[J].河海大学学报(自然科学版),2016,44(1):65-71.
- [19] Findikakis A N, Leckie J O. Numerical simulation of gas flow in sanitary landfills[J]. Journal of the Environmental Engineering Division, 1979,105(5):927-945.