

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.01.011

污泥弃置场产气特性试验

李磊¹,王佩¹,徐菲¹,张春雷²

(1. 河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 210098;2. 河海大学环境学院,江苏 南京 210098)

摘要:以某污泥弃置场修复工程为例,采用室内试验模拟污泥的产气过程,并对气体产生速率常数进行温度修正,建立了能够反映现场条件的污泥弃置场产气动力学模型。采用所建立的模型预测污泥弃置场产气总量和产气速率,结果表明:污泥弃置场的产气过程长达50 a,但是产气总量和最大年产气量均较小;进行封场设计中应当建设气体导排系统,可以不考虑对气体进行集中处理。

关键词:污泥弃置场;污泥产气过程;室内试验;动力学模型

中图分类号:X52

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2016)01-0065-07

Experimental study on gas generation process in abandoned sludge yard

LI Lei¹, WANG Pei¹, XU Fei¹, ZHANG Chunlei²

(1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Using the restoration project of an abandoned sludge yard as an example, the gas generation process of sludge was investigated through laboratory experiments. A dynamic model of gas generation from sludge was built based on the experiments and correction of the gas generation rate constant based on temperature, which can reflect the actual situation. The gas generation quantity and rate were forecasted using the dynamic model. The results show that the process of gas generation takes as long as 50 years, while the total gas generation quantity and maximum annual gas generation quantity are low. The gas-exhausting system should be included in the design of the cover system, but the concentrated disposal does not need to be considered.

Key words: abandoned sludge yard; gas generation process of sludge; laboratory experiment; dynamic model

污泥是污水处理厂对污水进行处理过程中产生的沉淀物质以及污水表面漂出的浮沫所得的残渣,其物质组分中无机颗粒成分含量少,主要以有机物形式存在,并含有大量的微生物、病原体、重金属以及有机污染物等,如处理不善将会造成严重的二次污染。长期以来,受我国污水处理界“重水轻泥”倾向的影响,我国90%以上污水处理厂没有污泥处理配套设施,60%以上的污泥没有经过任何处理就直接弃置,形成大面积的污染土地。如成都长安、深圳下坪、南昌麦园及苏州七子山等污泥填埋场均有大量未经规范处理的弃置污泥;部分地方甚至把污泥直接弃置在鱼塘、矿坑、农田中。这些弃置的污泥因为含水率高、含有污染物、物理力学性质差、产生甲烷气、产生喷涌等易引发安全问题和环境问题^[1-5],其最终安全处置已经成为污染治理领域亟待解决的技术难题。

为了解决弃置污泥场地修复和封场中所面临的技术难题,目前主要开展了基本物理力学性质的研究工作,为对其进行稳定性评价以及制定后续合理的处理方案提供基础数据^[6]。除了力学性质之外,弃置污泥产生的气体也会影响到堆体的稳定性:污泥中含有大量的有机物,在微生物的作用下会产气,产生的气体会导致污泥孔隙水应力增加以及体积膨胀,引起堆体失稳等工程灾害^[7-8]。由于污泥在理化性质上与生活垃圾有着较大的区别,其产气量、产气速率以及成分等与生活垃圾不同^[9-10],生活垃圾产气研究成果直接应用

收稿日期:2015-04-16

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2012CB719804);国家自然科学基金(51278172,51478167)

作者简介:李磊(1976—),男,河南固始人,副教授,博士,主要从事环境岩土工程研究。E-mail: dr.lilei@163.com

于污泥产气研究会导致产生较大的偏差。目前关于污泥产气的研究成果较少,Debra 等^[11]等发现污泥掺入垃圾后,加速了气体的产生速率;污泥的产气过程启动较快,且改性后的污泥产气速率明显增加,并可以提高气体中的甲烷气含量^[12];朱英等^[13]的研究结果表明,化学计量法和动力学模型预测的气体产生量和产生率更能反映污泥填埋场实际的气体产生情况。另外,弃置污泥属于无序处理,不同年代弃置的污泥往往混合在一起,产气规律与新鲜污泥差异较大。

为明确污泥弃置场的产气过程,以国内某大型污泥弃置场中的污泥为研究对象,采用室内试验研究不同弃置年代和深度下污泥的产气过程,并采用动力学模型对弃置污泥的长期产气量和产气速率进行计算,为污泥弃置场的修复提供相关的设计参数。

1 工程概况

江苏某企业从 20 世纪 80 年代中期开始将企业所产生的污泥弃置在附近的废弃矿坑,占地总面积约 3.333 hm² (50 亩),深度从 3 m 到 20 m 不等,目前形成了 4 个大小不等的污泥弃置场所。污泥弃置过程和结束始终未做任何覆盖措施,该处地层以渗透性较低的黏土为主,大量的降雨也贮留在污泥坑中。根据测算,目前整个矿坑内污泥总量已超过 30 万 m³。

为了解决该处弃置污泥的安全处置问题并进行污染场地修复,采用对弃置污泥进行加固并在周围设置垂直防渗帷幕后封场的修复方案。在场地修复中的封场设计中需要考虑是否设计填埋气的收集和处理设施,并为其设计提供产气量、产气速率等基础参数。但是弃置污泥与垃圾、新鲜污泥的性质有较大差异,直接采用已有的垃圾填埋场的封场技术规范设计填埋气的收集处理系统会产生较大误差,需要根据弃置污泥的性质、弃置场地的实际情况,研究其产气量及产气速率,为封场中气体收集处理系统设计提供相应的依据。

2 试验方案

2.1 现场取样

污水厂产生的新鲜脱水污泥来自于 2 种不同的工艺,分别编号为 1、2。现场弃置污泥的取样采用玻璃钢船,取样人员坐在船上,从对岸用牵引绳将船拖至污泥弃置场地中间采集柱状样。柱状样采用自制的 5 m 分层取样器,自泥面往下按 30 cm 分层包装。试标编号标记为 A-B 的形式,A 表示污泥弃置场编号(1,2,3,4),按照弃置的年代,1 号年代最久,4 号最新;B 分别用 1、2、3 表示表层(约 1 m 以下)、中间层(约 2 m 以下)、底层(约 5 m)。由于 4 号场地深度较浅,仅取了中间层样品。

样品取后立刻用塑料密封袋密封并排除空气,放置在冷藏箱中冷藏,24 h 之内开始相关指标检测以及试验工作。

2.2 污泥的基本指标

污泥的基本性质指标如表 1 所示。

表 1 污泥的基本性质指标

Table 1 Basic characteristics of sludge

试样编号	含水率/ %	有机/ %	密度/ (g · cm ⁻³)	pH	$w(\text{Cr})/$ (mg · kg ⁻¹)	$w(\text{Cu})/$ (mg · kg ⁻¹)	$w(\text{Ni})/$ (mg · kg ⁻¹)	$w(\text{Pb})/$ (mg · kg ⁻¹)	$w(\text{Zn})/$ (mg · kg ⁻¹)	$w(\text{Cd})/$ (mg · kg ⁻¹)
1	567.4	72.2	1.053	7.80	84.0	139.6	36.8	4.8	1444.7	1.8
2	643.4	71.5	1.046	7.70	117.7	66.2	—	9.3	431.3	1.1
1-1	1940.8	63.9	1.031	8.55	111.4	305.8	56.7	43.2	1734.7	6.2
1-2	1090.5	52.1	1.038	8.65	103.2	177.2	102.1	38.5	945.7	2.7
1-3	910.1	54.2	1.035	8.53	99.7	135.0	56.6	19.5	646.2	1.7
2-1	1104.8	61.6	1.035	8.77	115.7	351.0	119.5	87.4	1086.0	1.5
2-2	2122.2	33.8	1.032	8.88	63.0	193.3	118.9	26.4	1066.2	2.2
2-3	1487.3	59.3	1.061	8.81	98.2	72.3	75.4	18.1	780.7	0.5
3-1	1165.8	66.5	1.058	8.09	69.9	146.6	45.6	16.9	1348.0	2.4
3-2	1076.5	56.0	1.039	8.61	76.1	136.5	90.6	10.6	892.5	2.5
3-3	1182.1	57.6	1.029	8.67	47.4	50.3	55.6	18.5	219.5	2.0
4	910.1	60.1	1.088	8.88	144.5	175.8	109.8	15.1	846.6	2.2

从表1中可以看出,弃置污泥含水率远高于新鲜污泥,表层的含水率普遍低于底层,主要原因是大量降雨汇集在弃置场中不能排出。另外,污泥的有机质含量较高,具有较强的产气潜能,弃置污泥有机质低于新鲜污泥,上部的污泥有机质含量高于底部污泥有机质含量,表明弃置的污泥已经产生了降解,并且随着弃置年代的增加,降解量也在增加。

2.3 试验方法及仪器

室内试验所用的装置如图1所示。

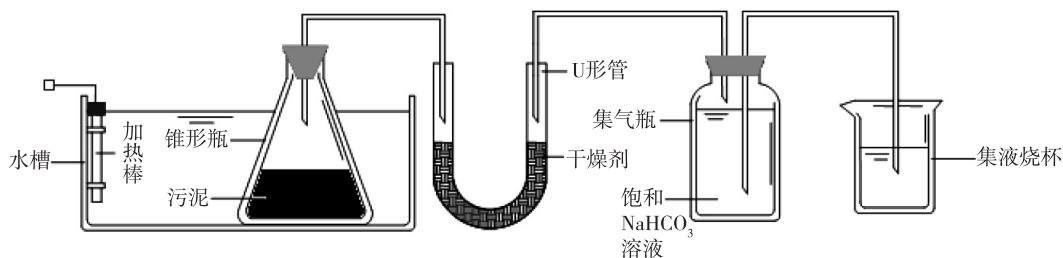


图1 污泥产气试验装置

Fig. 1 Experimental system of gas generation from sludge

现场取回的污泥从密封袋中取出 800 g,迅速装填于 2 L 锥形瓶内,瓶口在封闭之前进行充氮(时间控制为 1.5 min),目的是充分的充氮以排除氧气,使锥形瓶内固化污泥处于厌氧环境,保证污泥产气过程是一个厌氧反应过程。整个锥形瓶放置于 35 ℃ 恒温水浴锅中。所产气体经过干燥管干燥后,采用排液法(饱和 NaHCO_3)收集气体,通过排出的水量即可获得产生的气量(所获得的气量已扣除锥形瓶中原先残余的气体体积)。

3 结果与分析

3.1 产气试验结果

污泥产气试验结果如图2所示。

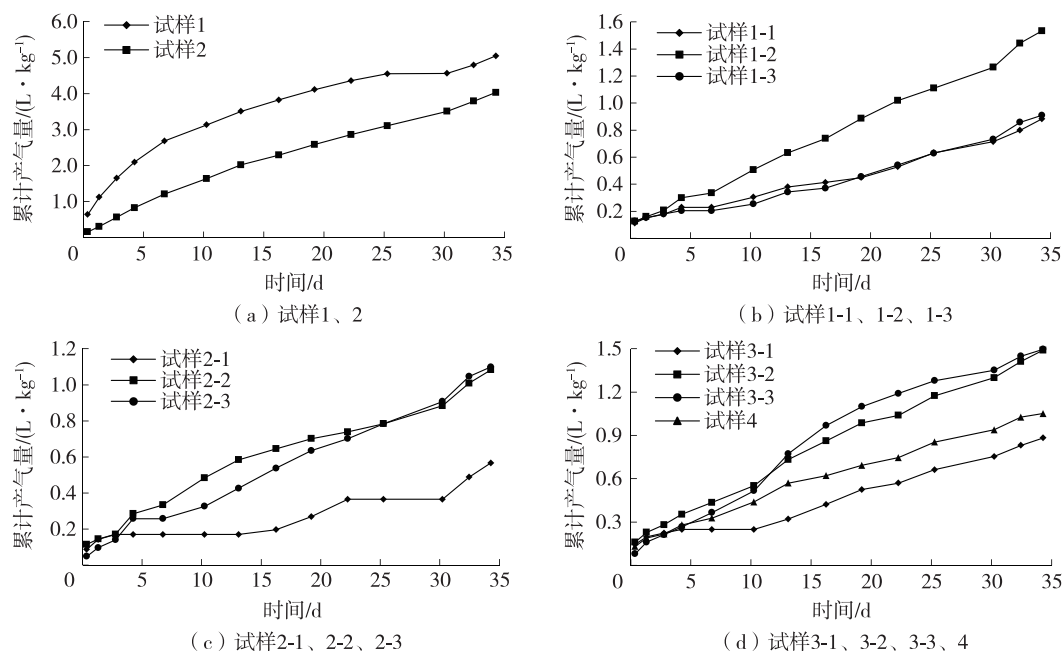


图2 污泥产气试验结果

Fig. 2 Experimental result of gas generation from sludge

从图2中可以看出:

a. 污泥的产气过程启动迅速,在试验第一天开始后就已经启动,这与文献[12]的研究结果较接近。另外,新鲜污泥产气现象十分明显,而且产气量较高,这与其有机质含量较高以及 pH 值较接近中性而有利于

产气有关。

b. 弃置场中的污泥产气量远远小于新鲜污泥的产气量,主要在于所弃置污泥的弃置时间最长已经接近30 a,大量易降解的有机物已经被分解,所以产气量大幅度下降。

c. 从弃置场中污泥分层产气的状况来看,虽然底部的污泥弃置时间早、上部的污泥弃置时间短,但是普遍存在表层产气量小、底部产气量大的现象。试验结束后,对剩下的污泥样品中的有机质含量进行检测,结果表明:1-1、1-2、1-3 试样的有机质减少量分别为 22.5 g、43.1 g 和 52.3 g;2-1、2-2、2-3 试样的有机质减少量分别为 32.1 g、23.2 g 和 34.7 g;3-1、3-2、3-3 试样的有机质减少量分别为 37.6 g、42.4 g 和 41.8 g。有机质减少量和产气量的变化规律基本一致,表明底层污泥的有机质更多地被降解后转化为填埋气。造成这种现象的原因是下部的污泥产气条件受到了抑制,一旦挖出后,恢复适宜的产气条件,其产气量马上有显著的提升。

d. 抑制下部污泥产气的原因主要包括温度、含水率以及酸碱环境等。从取样分析的结果来看,底部污泥的含水率显著偏高,pH 值偏高,另外底层的温度受阳光辐射等影响较小,现场实测表明温度普遍维持在 15℃ 左右,这些原因造成底部污泥产气受到一定的抑制。

e. 弃置场中污泥产气过程将是长期的,对封场后上部盖层将会产生不利影响。目前污泥弃置场为敞开式,产生的气体是无组织大面积挥发和排放,不会对上覆污泥产生影响。如果增加上部的盖层,但是没有良好的气体导排系统,加之污泥透气性极差,易导致底部污泥产生的气体聚集,产生过高的气压,在气压累积到一定程度时,易发生喷涌等问题,直接影响到上部盖层的稳定性。因此,污泥弃置场封场工程需要布设相应的气体收集和导排系统。

3.2 产气动力学模型

从产气试验研究结果来看,弃置场中的污泥虽然经历了长达 10 余年的稳定期,但是由于弃置时未经过任何预处理,造成弃置的污泥仍然处于不稳定状态,其长期产气量仍然不可忽视。虽然室内试验的研究成果可以在一定程度上反映污泥产气的基本规律,但是对气体收集处理系统的设计而言,需要获得产气量、产气速率等参数,上述室内试验成果尚难以满足工程设计的要求。因此,需要在室内试验的基础上建立反映污泥产气总量以及产气速率的动力学模型,为封场设计提供基础参数。

目前,填埋场的产气模型主要分为动力学模型和统计模型 2 种类型。其中,动力学模型主要有 Gardner 模型^[14]和 Sheldon Arleta 模型等^[15];统计模型有 IPCC 模型、化学计量式模型和 COD 估算模型等^[16]。统计学模型一般需要大量的监测数据,而污泥产气方面目前缺少相应的监测结果,难以采用统计学模型。动力学模型则是按照 CH₄/CO₂ 产生机理进行预测,从原理上符合产气规律,并可以通过室内试验获得其相关参数。

从上述的试验结果可以看出,污泥的产气阶段启动很快,基本不存在滞后;研究中一般认为产气速率与产气潜能之间符合一级动力学关系^[17-18],即

$$\alpha = -\frac{dC}{dt} = kC \quad (1)$$

对式(1)进行变换并积分,得

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = \int_0^\infty -k dt \quad (2)$$

$$C = C_0 e^{-kt} \quad (3)$$

因此,在这一阶段的产气量可以表示

$$G = C_0 - C = C_0(1 - e^{-kt}) \quad (4)$$

式中: α ——产气速率; C ——时间 t 后剩下的污泥可产生的填埋气,即产气潜能; k ——气体产生速率常数; C_0 ——某时刻垃圾总的产气潜能; G —— t 时刻后单位质量污泥产气量。

根据室内试验获得的产气量,建立了预测污泥产气量的动力学方程。如表 2 所示。

表 2 污泥产气量动力学模型
Table 2 Dynamic model of gas generation from sludge

编号	产气模型	R^2	编号	产气模型	R^2
1	$G=6.12\times(1-e^{-0.0617t})$	0.8712	2-2	$G=1.65\times(1-e^{-0.0332t})$	0.8842
2	$G=5.02\times(1-e^{-0.0766t})$	0.9015	2-3	$G=1.94\times(1-e^{-0.0206t})$	0.9316
1-1	$G=1.53\times(1-e^{-0.0211t})$	0.8824	3-1	$G=1.50\times(1-e^{-0.0220t})$	0.9017
1-2	$G=2.06\times(1-e^{-0.0312t})$	0.8917	3-2	$G=1.81\times(1-e^{-0.0415t})$	0.9112
1-3	$G=2.32\times(1-e^{-0.0128t})$	0.8817	3-3	$G=2.06\times(1-e^{-0.0385t})$	0.8562
2-1	$G=1.09\times(1-e^{-0.0154t})$	0.8015	4	$G=1.71\times(1-e^{-0.0282t})$	0.9134

所建立的产气模型与实验室实测的数据具有良好的相关性;而且其潜在的产气能力 C_0 的规律与污泥产气性能的变化规律基本一致,即产气量越大的污泥,其潜在的产气能力也越大。

3.3 模型修正

产气过程受到很多因素的影响,如含水率、温度、pH 值和营养物质等。室内试验为了加快试验的周期以便在短时间内获得污泥产气模型,采用了提高反应温度的方法,其他因素则未进行干涉。因此,对于本试验结果影响较大的因素为反应温度。现场取样过程中对分层污泥样品的温度进行了测量,其 50 cm 以下层温度基本趋于稳定,基本在 15℃ 左右波动。但是从试验周期角度出发,如果采用 15℃ 的温度,试验周期过长,而且产气量较小,精度也较差。为了获得现场实际温度条件下的动力学模型,本文通过建立 k 与温度 T 之间的关系来解决上述问题。

为减少试验量,每个污泥弃置场中的分层样品等比例混合(编号分别为 U1、U2、U3、U4),试验中分别设计了 35℃、33℃、30℃、28℃、26℃ 温度梯度下 15 d 的产气试验,并计算不同温度下的 k ,其变化关系如图 3 所示。

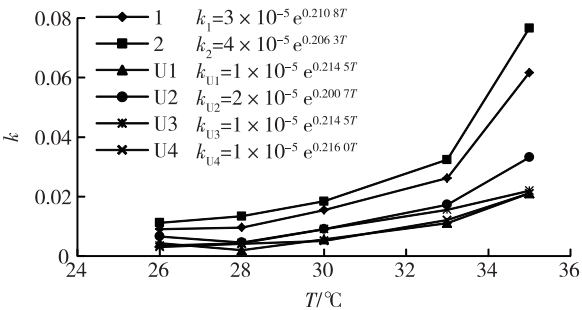


图 3 k 与 T 的关系
Fig. 3 Relationship between k and T

试验结果表明, k 与 T 之间服从指数分布规律(图 3)。根据图 3 中获得的 k 与 T 的关系即可获得现场实际温度条件下污泥产气的动力学模型。

3.4 污泥产气过程的预测

根据所建立的动力学模型及其对产气速率常数的修正,获得了现场实际条件下污泥产气的动力学模型,并对污泥的产气过程进行预测,结果如图 4 所示。

污泥趋于稳定的重要标志之一是产气速率逐步降低并趋于稳定,产气量逐步增加,最后趋于稳定。从上述产气速率和总产气量预测结果中可以看出:

- a. 根据产气速率以及产气量,1 号弃置场中污泥的稳定时间最长,50 a 后底层产气速率仍然未趋于稳定;2 号弃置场在 50 a 内产气基本已经达到稳定;3、4 号弃置场在 40 a 内产气已基本稳定。
- b. 1 号弃置场中的污泥弃置周期最长,但是最终的稳定时间也越长,造成这种现象的原因除了含水率不稳定及地形条件造成污泥流动混合、温度变化等外,比较重要的原因在于 1 号试样和 2 号试样污泥产气规律有较大差异。现场调查表明,1 号弃置场全部为 1 号试样污泥,其余的基本以 2 号试样污泥为主,从 1 号试样、2 号试样污泥的产气过程来看,1 号试样污泥趋于稳定时间约 15 a,2 号试样污泥的趋于稳定时间约 10 a,从稳定时间来说,这也是呈现污泥弃置时间虽然早,但仍然尚未稳定的原因。
- c. 对比实验室和模拟现场的产气结果,现场弃置污泥的稳定时间远小于实验室的结果。即使改变温度一个因素,也造成其最终的结果出现了显著改变,产气周期较长。因此,最终封场气体收集系统的设计应当考虑到填埋气的产生周期。
- d. 对比已有的生活垃圾填埋场产气研究成果,一般垃圾产气量最小约 20 m³/t,最大可以达到 100~400 m³/t^[19-20]。而根据本文的研究结果,即使产气潜能最大的 1 号试样污泥,其产气量也仅为 6.1 m³/t,最小

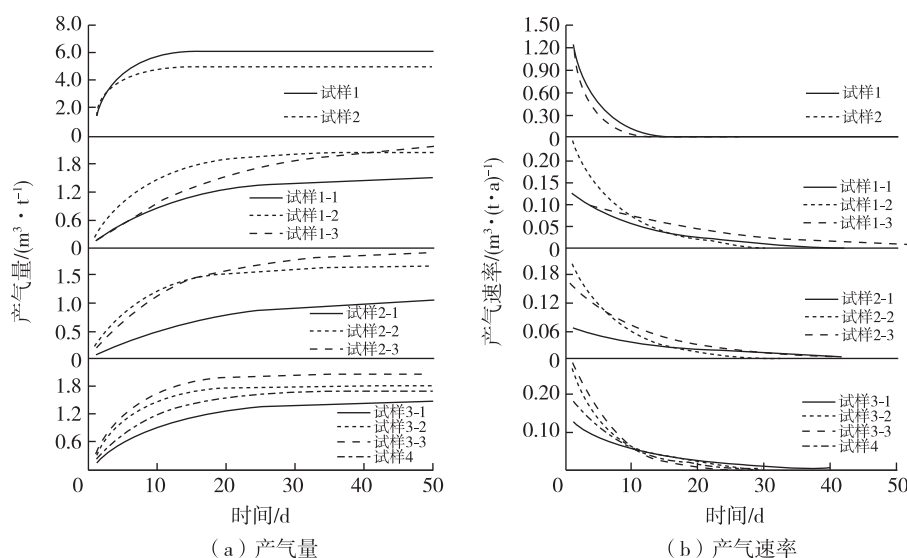


图4 污泥产气过程预测

Fig. 4 Forecast of gas generation process

的为2-1弃置污泥,产气量为 $1.09 \text{ m}^3/\text{t}$,远远小于生活垃圾的产气量。弃置污泥在50a的总产气量约为71万 m^3 ,最大的年产气量约8万 m^3 。其产气量较少,不需要设置专门的处理设施,但是需要布置导气设施,防止出现封场后局部气压过高的问题。

4 结 语

a. 采用室内强化试验在实验室尺度内获得了污泥的产气规律,并通过动力学模型以及对产气速率常数的修正,建立了模拟现场条件下预测污泥产气速率以及产气量的动力学模型。

b. 通过试验结果以及预测的结果可以看出,虽然污泥弃置的时间已经较长,但是产气过程仍然在持续,并且尚未进入稳定阶段,封场中需要设置气体收集和导排系统,防止因为气体累积产生污泥喷涌、沼气爆炸等问题。但是因污泥的总产气量和最大年产气量均较小,因此可以不对气体进行集中处理,采取无组织排放。

c. 弃置污泥的稳定时间和弃置时间不一定相关,而是受到现场地形、降雨、污泥混合、不同泥质等多种因素的影响。因此对弃置污泥的产气计算需要综合现场实际条件进行分析。

d. 现场大量污泥的产气受到了诸如含水率、应力、温度、透气性等多种因素影响,本文仅考虑了现场的温度条件,更为准确的产气模型应当综合考虑上述多种因素。

e. 污泥弃置场地的修复是污染土修复领域的一项新课题,本文仅仅探讨了未经处理的弃置污泥产气过程,在实际修复中应当根据实际情况对处理后的污泥产气状况进行进一步的研究。

参考文献:

- [1] 冯源,罗小勇,林伟岸,等.处置库污泥工程特性测试研究[J].岩土力学,2013,34(1):115-122. (FENG Yuan, LUO Xiaoyong, LIN Weian, et al. Geotechnical properties measurement of sewage sludge at a disposal site[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 115-122. (in Chinese))
- [2] 詹良通,罗小勇,管仁秋,等.某垃圾填埋场污泥坑外涌及其引发下游堆体失稳机理[J].岩土工程学报,2013,35(7):1189-1196. (ZHAN Liangtong, LUO Xiaoyong, GUAN Renqiu, et al. Failure mechanism of sludge pit and downstream waste slope of a MSW landfill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(7): 1189-1196. (in Chinese))
- [3] 陈萍,林伟岸,占鑫杰,等.渗滤液浸泡对深度脱水污泥强度和渗透性能的影响[J].岩土力学,2013,34(2):337-341. (CHEN Ping, LIN Weian, ZHAN Xinjie, et al. Influence of leachate soaking on strength and permeability of deeply dewatered sewage sludge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 337-341. (in Chinese))
- [4] 施建勇,王娟.污泥掺入生活垃圾后的力学特性试验研究[J].岩土力学,2012,33(11):3208-3212. (SHI Jianyong, WANG Juan. Mechanical behavior test study of sludge mixed with municipal solid waste[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33

- (11): 3208-3212. (in Chinese))
- [5] 甄广印,刘大江,赵由才.城市污泥填埋气集气井收集系统的优化研究[J].环境污染与防治,2010, 32(2): 33-36. (Zhen Guangyin, Liu Dajiang, Zhao Youcai. Study on optimum design of vertical extraction well based sewage sludge landfill gas collection system[J]. Environmental Pollution & Control, 2010, 32(2): 33-36. (in Chinese))
- [6] ZHAN Liangdong, ZHAN Xinjie, LIN Weian, et al. Field and laboratory investigation on geotechnical properties of sewage sludge disposed in a pit at Changan landfill, Chengdu, China[J]. Engineering Geology, 2014, 170: 24-32.
- [7] O'KELLY B C. Consolidation properties of a dewatered municipal sewage sludge[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(5): 1350-1358.
- [8] WILLIAMS G M, AITKENHEAD N. Lessons from Loscoe: the uncontrolled migration of landfill gas[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1991, 24(2): 191-207.
- [9] 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. (ZHANG Hua, ZHAO Youcai, HUANG Renhua, et al. Biodegradation and stabilization of landfilled biological and chemical sludge[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(10): 2103-2109. (in Chinese))
- [10] LESTER B L, CHRIS T H, NOELLETTE M C S, et al. Municipal solid waste recycling issues[J]. Journal of Environmental Engineering, 1999, 125: 944-949.
- [11] DEBRA R R, MANOJ B, et al. Design and operational issues related to the co-disposal of sludge and biosolids in class I landfills [R]. Florida: University of Florida, 2003.
- [12] 张华.污泥改性及其在填埋场中的稳定化过程研究[D].上海:同济大学,2007.
- [13] 朱英,赵由才,李鸿江.污泥填埋场气体产量的预测方法研究[J].中国环境科学,2010, 30(2): 204-208. (ZHU Ying, ZHAO Youcai, LI Hongjiang. Prediction methods of the gas production content in the sludge landfill[J]. China Environmental Science, 2010, 30(2): 204-208. (in Chinese))
- [14] GARDNER N, PROBER S D. Forecasting landfill gas yield[J]. Applied Energy, 1993, 44: 131-163.
- [15] FAIR G M, MOORE E W. Heat and energy relations in the digestion of sewage solids[J]. Sewage Works Journal, 1932, 4(5): 430-439.
- [16] 刘春华.固体废物填埋场气体产生过程及模拟研究[D].北京:清华大学,1995.
- [17] NASTEV M, THERRIEN R, LEFEBVRE R, et al. Gas production and migration in landfills and geological materials[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2001, 52: 187-211.
- [18] 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.
- [19] HOEKS J. Significance of biogas production in waste tips[J]. Waste Management & Research, 1983, 1(4): 323-335.
- [20] WISE D L, LEUSCHNER A P, LEVY P F, et al. Low-capital-cost fuel-gas production from combined organic residues: the global potential[J]. Resource Conservation, 1987, 15(3): 163-190.