ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第36卷 第5期
2015年5月15日

目 次

第 36 卷第 5 期
2015 年 5 月
环 境 科 学
ENVIRONMENTAL SCIENCE
Vol. 36, No. 5
May, 2015

通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响

张喻[1], 韩融[1], 陆文静[1], 王洪涛[1*], 明中远[1], 王强[2], 夏伟[2]
(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 江苏田娘农业科技有限公司, 常熟 215532)

摘要: 将污泥与树皮按照一定比例混合, 利用自主研制的滚筒式污泥生物干化中试系统进行实验, 通过对温度、含水率、O_2 和 CO_2 浓度、挥发性固体(VS)、pH 等参数的检测, 研究了通风强度对市政污泥生物干化效果的影响. 结果表明, 通风强度对污泥生物干化有较大影响, 通风强度(以 VS 计)为 120 $L\cdot(h\cdot kg)^{-1}$ 时, 最高温度达到 66℃, 55℃以上高温可以维持 40 h 以上, 111 h 后污泥最终含水率可以降低至 56%; 生物干化过程中 pH 始终保持在 6.5 ~ 8.5 之间, 不会影响微生物生命活动; 滚筒式污泥生物干化反应器能够使反应器内基质均一性良好, 对利用滚筒式反应器实现污泥连续流处理提供参考.

关键词: 通风强度; 污泥; 滚筒; 生物干化; 中试
中图分类号: X703 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2015)05-1727-06 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2015.05.030

Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test

ZHANG Yu[1], HAN Rong[1], LU Wen-jing[1], WANG Hong-tao[1*], MING Zhong-yuan[1], WANG Qiang[2], XIA Wei[2]
(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Jiangsu Tianniang Agricultural Technology Co., Ltd., Changshu 215532, China)

Abstract: A drum-type biodrying pilot scale test system was made to treat the municipal sludge. Sludge was mixed with barks according to certain proportion, and was used to study the influence of air flux on municipal sludge biodrying through parameter detection, such as temperature, moisture content, pH and volatile solid (VS). Results showed that air flux had a great influence on the effect of biodrying. When the air flux was 120 $L\cdot(h\cdot kg)^{-1}$, the best result was obtained, the highest sludge temperature was 66℃ and the temperature could remain upon 55℃ for more than 40 h. After 111 h, the moisture content reduced to 56%. The pH remained at 6.5-8.5 through the whole biodrying process. As a result, the microorganism activities would not be affected. The sludge inside the drum-type biodrying system was homogeneous. This research provides a reference about sludge treatment using a continues flow process by drum-type biodrying system.

Key words: air flux; sludge; drum-type biodrying system; biodrying; pilot scale test

市政污泥是污水处理的副产物. 随着我国经济的高速发展, 污水排放量和处理率逐年提高, 污泥产量急剧增加. 据统计[1], 2012 年我国污水排放总量 684 亿 t, 综合处理率按 60% 计, 污泥(含水率 96%)产量达到20 431万$m^3\cdot a^{-1}$[2].

污泥成分复杂, 有机质含量高, 含有重金属、病原微生物, 并带有强烈臭味, 易造成二次污染. 高效的污泥处理处置措施, 降低其含水率是关键, 而目前, 国内多数污水厂经过浓缩机械脱水后的污泥含水率为 80% 左右, 不可能达到 60%[3], 这对后续处理处置技术来说含水率过高[4], 干化成为污泥处理的瓶颈问题. 传统干化技术, 如间接热干化和直接热干化, 存在耗能高、热效率低、二次污染严重的问题[5].

生物干化即利用微生物降解污泥中有机质产生的能量使堆体升温, 实现水分快速蒸发, 使其臭气减少, 处理后污泥疏松、分散, 成粒状, 物理性状明显改善[6], 同时热值升高[7], 便于运输, 有利于焚烧、填埋等各种后续技术, 是一种经济节能的污泥干化技术.

目前国内外学者在污泥生物干化领域已经开展了一些研究, 内容包括辅料种类[8,9]及其与污泥的混合比例[10,11], 以及温度[12,13]、含水率[14,15]、通风强度、通风方式[16~18]等因素对生物干化的影响.

目前关于生物干化研究主要集中在实验室规模, 利用滚筒式装置进行污泥生物干化的中试规模研究鲜有报道. 通风强度是影响污泥生物干化过程的重要参数, 通风强度过小, 则污泥中微生物得不到充足氧气影响好氧降解过程, 温度难以维持高温, 水分蒸发量减少, 水分排出困难, 最终影响含水率去除效果; 通风强度过大, 反应器中热量随通风流失严重, 温度降低, 污泥水分蒸发困难, 同样影响含水率去除效果. 本实验利用自主研制的滚筒式反应器, 在中试规模条件下, 研究通风强度对污泥生物干化

收稿日期: 2014-09-29; **修订日期**: 2014-12-23
基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(201209022)
作者简介: 张喻(1987 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为固体废物处置及资源化, E-mail: y-z06@mails.tsinghua.edu.cn
* 通讯联系人, E-mail: htwang@tsinghua.edu.cn

的影响,同时结合实验效果,对利用滚筒式反应器实现污泥连续流处理的可行性提供参考.

1 材料与方法

1.1 实验材料

污泥样品为北京清河污水处理厂脱水污泥,并保证当天取泥当天实验,由于污泥没有经过消化,有机质含量较高,更利于生物干化. 所用辅料为樟松和落叶松树皮,由上海丘山环保科技有限公司提供. 本实验树皮为已经接种驯化过的回流树皮. 实验材料基本性质见表1.

表1 实验材料基本性质

Table 1 Basic property of experimental materials

原料	含水率/%	VS/%	pH
污泥	81.61~82.69	68.22~71.53	7.0~7.4
回流树皮	12.89~13.41	83.48~84.90	—

1.2 实验装置

实验装置采用滚筒式生物干化系统,由清华大学环境学院自主研发,其正面及剖面见图1.

滚筒有效直径设计为2 m,配置合适长度,便可保证小型污水厂污泥日处理要求. 本实验取反应器断面进行研究,长度设计为1 m,滚筒外壁及气孔盖均以聚氨酯材料保温. 采用调频电机带动滚筒转动,实现转速调节. 滚筒内沿圆周均匀布设6根温度探头,气体出口处设置O_2、CO_2检验装置,减少随意取点造成的误差. 滚筒内均匀布设6块布气板,每块布气板表面布满直径3 mm,间距5 cm的布气孔. 滚筒转动过程中,时刻保持最下面两块布气板向反应器内充空气,最上面一块布气板与大气联通,其余布气板关闭. 每块布气板与一排水管相连,当布气板与大气相通时,排水管打开,排出布气板与反应器内壁间隙的冷凝水.

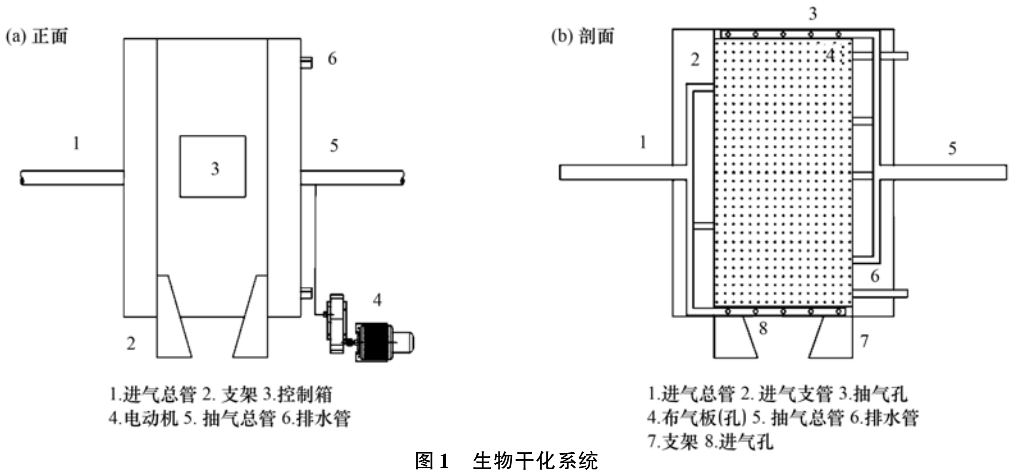

图1 生物干化系统

Fig. 1 Biodrying system

1.3 实验方法

进行批式实验,将污泥与树皮按照质量比(湿基比)5∶3进行混合,每批进料量在1 130 kg左右,同时保证反应器容积率达到75%. 小试试验结果表明,转速对干化效果影响较小,同时确定了合理的通风强度区间. 基于此,调节滚筒转动周期为18 $h \cdot r^{-1}$,调节空压机,使得不同批次进气强度(以VS计,下同)依次为60、120、180 $L \cdot (h \cdot kg)^{-1}$. 每日早晚各取一次样,每个样做2个平行样. 反应器温度降至50℃以下时,单批实验结束,出料放置在通风处晾晒,直至含水率下降至15%以下,经过筛分,得到回流树皮作为辅料进行下一批实验,筛分得到的干化污泥含水率低,方便用于后续处理.

1.4 测试项目

温度、O_2、CO_2浓度监测: 滚筒内均布深入基质15 cm的6个温度传感器,出气口内侧装有O_2、CO_2传感器,实现监测. 样品检测项目包括: 含水率、VS、pH.

含水率: 采用公式(1)计算.

$$含水率 = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \tag{1}$$

式中,m_1为样品新鲜质量,kg; m_2为样品105℃条件下烘干至恒重时的质量,kg.

VS: 采用公式(2)计算.

$$VS = \frac{m_2 - m_3}{m_2} \tag{2}$$

式中,m_2为样品105℃条件下烘干至恒重时的质量,kg; m_3为样品烘干后,550℃灼烧2 h后的质量.

pH值: 污泥样品与去离子水按质量比1∶10混合,用玻璃棒剧烈搅动1~2 min,静置30 min,而后

用 pH 计测定.

2 结果与讨论

2.1 通风强度对污泥生物干化温度影响

不同通风强度条件下,温度随时间变化情况如图 2 所示. 可以看出,反应过程大致分为升温期(0 ~40 h)、高温期(40 ~80 h)和降温期(80 ~111 h),随着通风强度的不同,3 个时期的长短不尽相同. 不同通风强度对基质温度有较大影响. 通风后,微生物开始进行好氧呼吸,放出大量热量,随着反应进行可供利用的有机物逐渐减少,微生物产生热量随之减少,故温度均呈现先升高后降低的趋势. 当通风强度为 60 L·(h·kg)$^{-1}$时,基质升温速率介于 120 L·(h·kg)$^{-1}$和 180 L·(h·kg)$^{-1}$之间. 这是由于过大的通风强度导致热量随着气体快速流失,升温速率最慢; 通风强度过低,污泥升温所需氧气量得不到满足,升温速率较慢. 通风强度为 60 L·(h·kg)$^{-1}$时最高温度可以达到 66℃,且在 60℃以上可维持 40 h 以上,但降温速率较慢,111 h 后温度仍达到 51℃,这会导致干化周期变长,VS 消耗大,干化污泥热值降低. 通风强度为 180 L·(h·kg)$^{-1}$时,升温速率最慢,最高温度只能达到 56℃,之后迅速降温,并没有起到高温强蒸发效果. 通风强度为 120 L·(h·kg)$^{-1}$时,升温速率最快,因为此时通风强度适中,微生物不会因氧气过少而生命活动减缓,也不会因为通风强度过大而带出过多热量; 最高温度达到 66℃,可以达到高温调质及水分强蒸发的效果; 之后温度迅速下降,111 h 后降至 36℃.

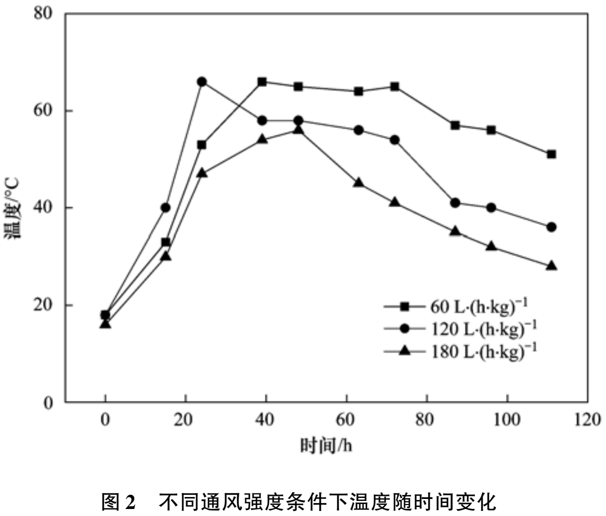

图 2　不同通风强度条件下温度随时间变化

Fig. 2　Changes of temperature with time under different air fluxes

2.2 通风强度对污泥含水率的影响

通风强度对污泥含水率影响见图 3. 高温使得污泥中的束缚水活化[19],同时极大地促进水分蒸发,而进气造成污泥表面空气流动速率加快,气体将自身所含水分带出,故反应过程中污泥含水率逐渐降低. 通风强度为 60 L·(h·kg)$^{-1}$时,含水率在反应初期下降幅度相对较小,24 h 仅下降 5.66%,进入高温期后,虽然基质可以在高温下持续较长时间,但较小的通风强度限制了水分带出速率,导致基质周围空气含水率较高,基质水分蒸发强度下降,由于没有及时排出水分,部分水分也会冷凝,回流入基质,最终污泥含水率下降了 23.84%,达到 59.07%. 通风强度为 180 L·(h·kg)$^{-1}$时,虽然升温速率较慢,温度较低造成水分蒸发速率下降,但强劲的通风对流作用依然使污泥快速达到较好的脱水效果,污泥含水率下降 26.26%,含水率降至 56.79%,然而高通风强度对设备要求更高,污泥处理成本提升. 通风强度为 120 L·(h·kg)$^{-1}$时,通入空气即保证了微生物活动放热所需,也可及时带出水分,基质含水率最低降到 55.66%,污泥含水率降低 26.41%,污泥含水率下降至最低同时能耗相对较低.

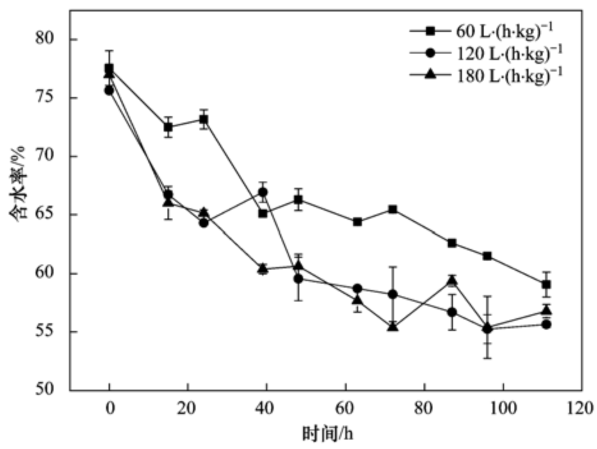

图 3　不同通风强度条件下含水率随时间变化

Fig. 3　Changes of water content with time under different air fluxes

2.3 通风强度对污泥降解情况的影响

污泥降解情况用出气口 O_2 和 CO_2 浓度表征,他们在不同通风强度条件下随时间变化趋势见图 4 和 5.

污泥中微生物降解有机物同时消耗 O_2,放出 CO_2. 实验初期随着微生物对环境的适应,且温度适中,降解速率逐渐增加; 随着实验进行,温度升高及有机质的消耗,微生物的活动受到抑制,降解速率逐渐下降. 故总的来看出气口 O_2 浓度先降后升,CO_2 浓度先升后降. 通气强度为 60 L·(h·kg)$^{-1}$时,出口 O_2 浓度在 15 h 时达到最低,但仍有 9.35%,说明较

低通气强度对微生物活动抑制作用较弱,微生物依然可以在较为充足的氧气环境中进行好氧呼吸;CO_2 浓度在 24 h 时达到最大的 8.83%,说明反应器中产生的 CO_2 没有被及时排出,继而可推断出空气中水分没有被及时排出,这也正是反应器内温度较高但含水率下降速率有限的原因. 通风强度为 180 L·(h·kg)$^{-1}$时,过大的通风使得 O_2 利用效率下降,同时稀释了 CO_2,24 h O_2 浓度最低时依然达到 15.19%,CO_2 浓度最高时仅为 3.18%. 通风强度为 120 L·(h·kg)$^{-1}$时,出气口 O_2 和 CO_2 浓度介于另外两种通风强度之间,分别达到 12.97%、5.07%,此时反应器内 O_2 浓度充足,通风量适中,保证了有充足的通风带出水分而不使温度下降过快.

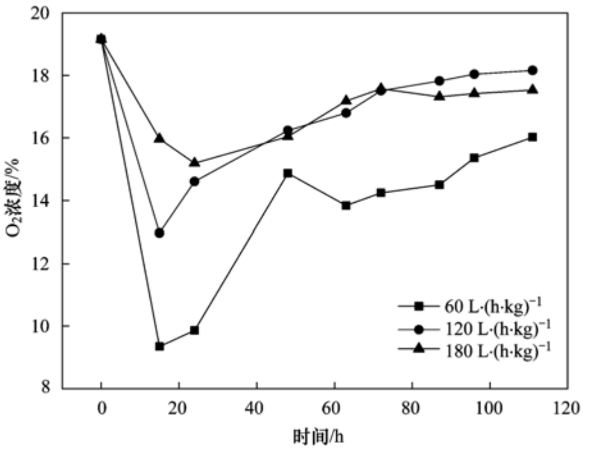

图 4 不同通风强度条件下氧气浓度随时间变化

Fig. 4 Changes of oxygen percent with time under different air fluxes

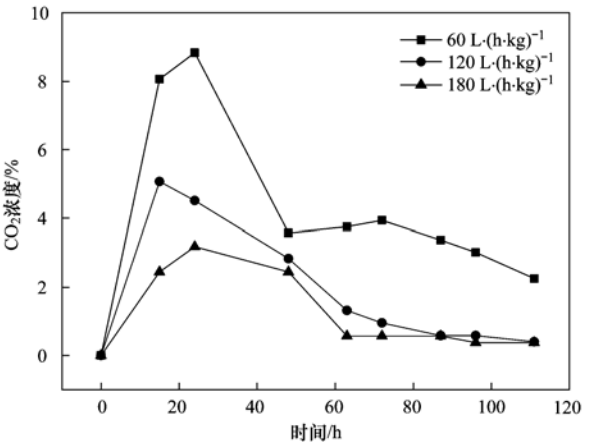

图 5 不同通风强度条件下二氧化碳浓度随时间变化

Fig. 5 Changes of carbon Dioxide percent with time under different air fluxes

2.4 通风强度对污泥 pH 的影响

污泥的 pH 对污泥中微生物生命活动有重要影响,它可引起细胞膜及细胞内的蛋白质、核酸等物质所带电荷发生变化,改变环境中营养物质的可给性及有害物质的毒性[20]. 微生物适宜生长的 pH 值范围大约为 6.5 ~ 8.5. 生物干化过程中会产生大量的氨气,随着温度的升高挥发出来并溶解于污泥中,这是导致污泥 pH 值升高的主要原因.

通风强度对污泥 pH 影响见图 6. 不同通风强度条件下,污泥 pH 随时间变化不大,维持在 6.5 ~ 8.5 之间,不会影响微生物活性,整个生物干化过程中无需对 pH 进行调节. 当通风强度为 60 L·(h·kg)$^{-1}$时,污泥温度维持高温时间长,大量可溶性蛋白转化成氨气挥发,同时碳水化合物转化成 CO_2 进行碱中和,系统的 pH 处于动态平衡,固相中的 pH 升高幅度较小,最高 pH 为 7.6. 随着通风强度的增大,系统维持高温时间变短,生物转化速率降低,挥发性的 NH_3 则随过量气体(空气)持续逸散,使得污泥固相的 pH 值升高幅度变大.

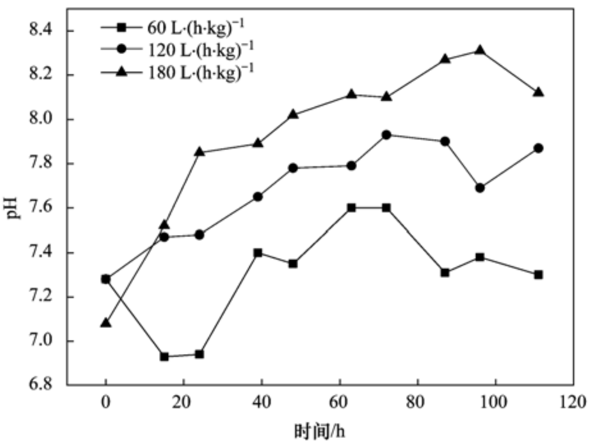

图 6 不同通风强度条件下 pH 随时间变化

Fig. 6 Changes of pH with time under different air fluxes

2.5 通风强度对污泥 VS 的影响

所有的有机质都是 VS,通过测定污泥中的 VS 可大致得知其中有机质含量的变化情况. 生物干化过程中微生物通过降解污泥中的 VS 释放出热量,达到升温调质降低污泥含水率的目的,故在生物干化过程中 VS 均有逐渐降低的趋势,且升温阶段有机质含量高,微生物活性高,VS 迅速降低,高温期和降温期 VS 下降缓慢.

图 7 可以看出,通风强度为 180 L·(h·kg)$^{-1}$时,VS 下降幅度最小,111 h 内从 66.70% 下降至 60.76%,下降了 8.91%. 通风强度变为 60 L·(h·kg)$^{-1}$、120 L·(h·kg)$^{-1}$时,基质 VS 分别下降了 10.21% 和 13.50%. 总体看来,VS 下降幅度都比较小,说明生物干化过程可以较大程度地保留污泥

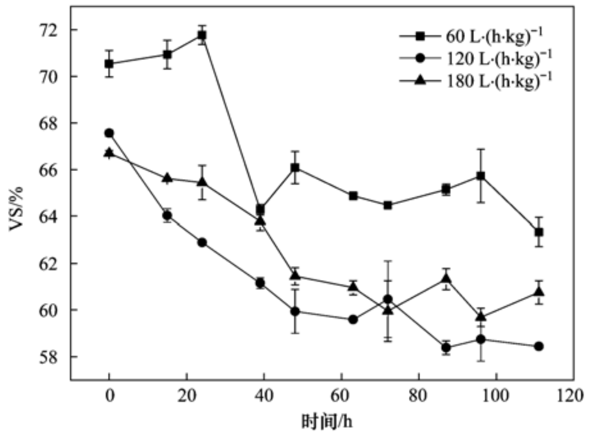

图 7　不同通风强度条件下 VS 随时间变化

Fig. 7　Changes of VS with time under different air fluxes

中的有机物,方便污泥后续处理.

综合上述讨论,将各主要监测参数与通风强度的关系进行总结,如图 8.

可以看出,随着通风量的增加,反应器出口 O_2 浓度的上升趋势和 CO_2 浓度的下降趋势均较为明显,经过生物干化过程,污泥中的 VS 下降比例均较小. 当通风强度为 60 $L·(h·kg)^{-1}$、120 $L·(h·kg)^{-1}$时,污泥可以上升至高温 66℃,通风强度升至 180 $L·(h·kg)^{-1}$时,最高温度大幅下降至 56℃. 通风强度为 60 $L·(h·kg)^{-1}$时,虽然可达高温,但通风量过小,水分不能及时带出导致含水率下降比例有限,通风强度为 180 $L·(h·kg)^{-1}$时通风量过大,热量散失过快,高温难以达到,虽可较快去除水分,但耗能过大. 可见,120 $L·(h·kg)^{-1}$是本实验条件下最优通风强度.

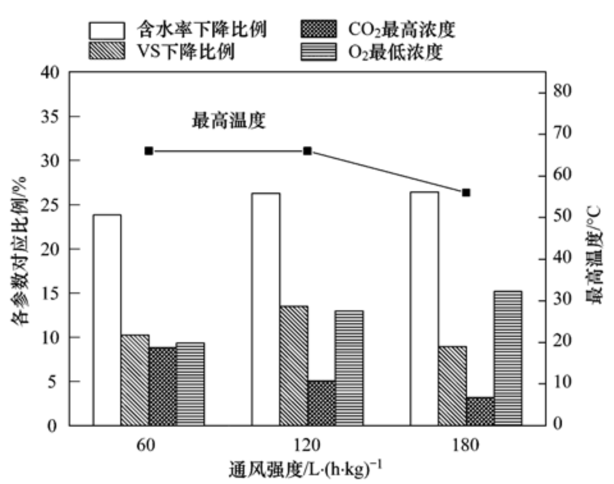

图 8　各主要监测参数随通风强度变化

Fig. 8　Changes of main parameters during biodrying process under different air fluxes

3　结论

(1)通风强度对污泥生物干化有较大影响,适宜通风强度可以保证充足的氧气供应前提下及时把水分从反应器带出,同时可以维持一段时间高温. 通风强度为 120 $L·(h·kg)^{-1}$时,最高温度达到 66℃,55℃以上高温可以维持 40 h 以上,水分蒸发迅速,111 h 后污泥最终含水率可以降低至最好效果 55.66%,耗能相对较小.

(2)通风强度对 pH 影响较小,pH 始终保持在 6.5 ~ 8.5 之间,不会影响微生物生命活动,实验过程无需对 pH 进行调节. 控制污泥生物干化条件,可以达到较短周期内污泥含水率迅速降低至 60% 以下,同时较大程度保持污泥中有机质的效果,方便后续处理.

(3)滚筒式污泥生物干化反应器能够使反应过程中反应器内基质保持良好的均一性,利用滚筒式反应器实现污泥连续流生物干化过程可行性较大.

参考文献:

[1]　中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.

[2]　邵立明, 顾伟妹, 徐华成, 等. 脱水污泥生物干化及产物农用性质评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(11): 2379-2383.

[3]　邵立明, 何品晶. 城市污水厂污泥热干燥处理与利用的可行性分析[A]. 见: 赵宪忠. 枫林学苑[M]. 上海: 上海科教文献出版社, 2000. 268.

[4]　Tsang K R, Vesilind P A. Moisture distribution in sludges[J]. Water Science & Technology, 1990, **22**(12): 135-142.

[5]　易浩勇. 污泥干燥特性及干燥过程研究[D]. 南京: 东南大学, 2006. 8-16.

[6]　Hall J E. Sewage sludge production, treatment and disposal in the European Union[J]. Water and Environment Journal, 1995, **9**(4): 335-343.

[7]　Kraft D L, Orender H C. Considerations for using sludge as a fuel[J]. Tappi Journal, 1993, **76**(3): 175-183.

[8]　刘卫, 袁兴中, 欧阳建新, 等. 利用污泥熟肥作为高含水率污泥堆肥调理剂[J]. 环境工程学报, 2013, **7**(6): 2349-2354.

[9]　马娜, 陈玲, 熊飞. 我国城市污泥的处置与利用[J]. 生态环境, 2003, **12**(1): 92-95.

[10]　阳金龙, 杜琼, 李东, 等. 辅料配比对污泥生物-物理联合干燥的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(8): 2365-2370.

[11]　Frei K M, Cameron D, Stuart P R. Novel drying process using forced aeration through a porous biomass matrix[J]. Drying Technology, 2004, **22**(5): 1191-1215.

[12]　Liang C, Das K C, McClendon R W. The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic

microbial activity of a biosolids composting blend [J]. Bioresource Technology, 2003, **86**(2): 131-137.

[13] Léonard A, Blacher S, Marchot P, *et al*. Convective drying of wastewater sludges: Influence of air temperature, superficial velocity, and humidity on the kinetics [J]. Drying Technology: An International Journal, 2005, **23**(8): 1667-1679.

[14] Nakasaki K, Aoki N, Kubota H. Accelerated composting of grass clippings by controlling moisture level [J]. Waste Management and Research, 1994, **12**(1): 13-20.

[15] Liang T, Khan M A, Meng Q. Spatial and temporal effects in drying biomass for energy [J]. Biomass and Bioenergy, 1996, **10**(5-6): 353-360.

[16] 魏源送, 李承强, 樊耀波, 等. 不同通风方式对污泥堆肥的影响[J]. 环境科学, 2001, **22**(3): 54-59.

[17] Ahn H K, Richard T L, Choi H L. Mass and thermal balance during composting of a poultry manure-Wood shavings mixture at different aeration rates [J]. Process Biochemistry, 2007, **42**(2): 215-223.

[18] 徐红, 樊耀波, 贾智萍, 等. 时间温度联合控制的强制通风污泥堆肥技术[J]. 环境科学, 2000, **21**(6): 51-55.

[19] 郭松林, 陈同斌, 高定, 等. 城市污泥生物干化的研究进展与展望[J]. 中国给水排水, 2010, **26**(15): 102-105.

[20] 陈飞燕. pH 值对微生物的影响[J]. 太原师范学院学报(自然科学版), 2009, **8**(3): 121-124, 131.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 36 No. 5

May 15, 2015

CONTENTS

环境科学

(HUANJING KEXUE)

(月刊　1976年8月创刊)

2015年5月15日　第36卷　第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly　Started in 1976)

Vol. 36　No. 5　May 15, 2015

主　管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主　办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协　办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路18号,邮政编码:100085) 电话:010-62941102,010-62849343 传真:010-62849343 E-mail:hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102,010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail:hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn
出　版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing　100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发　行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail:journal@mail.sciencep.com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail:journal@mail.sciencep.com
订购处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN　0250-3301 / CN　11-1895/X　　国内邮发代号：2-821

国内定价：120.00元　　国外发行代号：M 205

国内外公开发行