

生物沥浸处理提高城市污泥脱水性能的中试研究:连续运行模式

刘奋武,周立祥*,周俊,姜峰

(南京农业大学资源与环境科学学院环境工程系,南京 210095)

摘要:采用有效容积为 700 L 的推流式生物沥浸反应器对城市污泥进行连续 10 d 的生物沥浸处理,采用折流方式将反应器从进泥端到处理结束后的排泥端,沿程方向依次划分为 1~6 区.对试验过程中各区的 pH 变化趋势,各区污泥的脱水性能(用污泥比阻 SRF 表征)及生物沥浸污泥经厢式压滤脱水泥饼含水率及其水分蒸发速度进行了系统的研究.结果表明,当反应器曝气量为 $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,HRT 为 2.5 d,微生物营养剂加入量为 $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,该反应器能够较好地完成污泥生物沥浸过程.沥浸体系在第 6 d 达到稳定时,污泥的比阻值可由原来的 $1.50 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 最低降低至 $0.34 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$.生物沥浸后的污泥经过增强聚丙烯厢式压滤机脱水后,在 0.3 MPa 压力条件下压滤 4 h(进泥 2 h,压榨 2 h)、3 h(进泥 1.5 h,压榨 1.5 h)、2 h(进泥 1 h,压榨 1 h)与 1 h(进泥 0.5 h,压榨 0.5 h),脱水泥饼的含水率分别为 57.9%、59.2%、59.6% 与 63.4%.不同压滤时间的泥饼在 25℃ 条件下放置 15 h,泥饼的含水率均下降至 45% 左右,放置 96 h 后,含水率进一步降低至 10% 以下.此研究将为城市污泥生物沥浸后期工程化及脱水污泥能源化应用提供必要的参数支持.

关键词:城市污泥;生物沥浸;推流式反应器;中试;脱水

中图分类号:X705 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2011)10-2993-06

Improvement of Municipal Sewage Sludge Dewaterability by Bioleaching: A Pilot-Scale Study with a Continuous Plug Flow Reaction Model

LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang, ZHOU Jun, JIANG Feng

(Department of Environmental Engineering, College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: A plug-flow bio-reactor of 700 L working volume for sludge bioleaching was used in this study. The reactor was operationally divided into six sections along the direction of the sludge movement. Ten duration of continuous operation of sludge bioleaching with *Acidibacillus* spp. and $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ aeration amount was conducted. In this system, sludge retention time was 2.5 d, and the added amount of microbial nutritional substance was $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. During sludge bioleaching, the dynamic changes of pH, dewaterability (specific resistance to filtration, SRF) of sewage sludge in different sections, the moisture content and moisture evaporation rate of dewatered bioleached sludge cake obtained by chamber filter press were investigated. The results showed that the SRF of sludge significantly decreased from initial $1.50 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ to the final $0.34 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$. The wasted bioleached sludge was collected and dewatered by chamber filter press under the following pressures as 0.3 MPa for 4 h (2 h for feeding sludge, 2 h for holding pressure), 3 h (1.5 h for feeding sludge, 1.5 h for holding pressure), 2 h (1 h for feeding sludge, 1 h for holding pressure), and 1 h (0.5 h for feeding sludge, 0.5 h for holding pressure). Correspondingly, the moisture of dewatered sludge was reduced to 57.9%, 59.2%, 59.6%, and 63.4% of initial moisture, respectively. Moreover, the moisture content of bioleached sludge cake was reduced to about 45% and less than 10% if the cake was placed at 25℃ for 15 h and 96 h, respectively. Obviously, sludge bioleaching followed by sludge dewatering using chamber filter press is a promising attractive approach for sludge half-dryness treatment in engineering application.

Key words: municipal sludge; bioleaching; plug-flow bioleaching reactor; pilot; dewatering

目前,常规的污泥处理与处置方法是在液态污泥中添加阳离子聚丙烯酰胺(CPAM)等絮凝剂后进行机械脱水,使其成为含水量为 80%~85% 的脱水污泥,然后对脱水污泥进行卫生填埋,土地利用或者焚烧处置^[1-3].然而,正是脱水后污泥仍含有大量水分,成为了制约污泥处置的重要“瓶颈”.采用机械方法对污泥深度脱水(使污泥饼含水率低于 60%)较之热干化方法可节约大量的能耗,是目前国内外

普遍推崇的方法.然而要实现机械深度脱水,污泥必须经过一定调理.常见的污泥调理方法有水热调理^[4,5]、化学调理($\text{FeCl}_3 + \text{CaO}$)^[6-8]、超声调理^[9,10]

收稿日期:2010-11-25;修订日期:2011-02-14

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2009AA06Z317);
国家自然科学基金项目(20977048)

作者简介:刘奋武(1984~),男,博士研究生,主要研究方向为固体废物处理处置与资源化,E-mail:lfwlfw2008@sina.com

* 通讯联系人,E-mail:lxzhou@njau.edu.cn

与微波调理^[11,12]等. 本课题组曾系列报道了生物沥浸技术 (bioleaching) 在提高城市污泥脱水性能方面的巨大作用^[13-15]. 例如, 城市污泥经过生物沥浸调理后, 污泥的脱水性能可提高 8 ~ 10 倍^[14]. 在此基础上, 笔者曾采用序批式运行模式, 对生物沥浸法改善污泥脱水性能进行了中试试验, 也获得相同效果, 为该技术走向工程化应用提供了科学依据^[16]. 值得指出的是, 序批式运行模式是一种间歇运行方式, 在工程应用上对自动化程度要求较高. 若能采用连续运行模式, 则在工程管理上可能更加方便. 虽然在污水处理厂, 无论是批式运行模式 (如 SBR) 还是连续运行模式 (如传统的活性污泥法) 都有广泛应用, 但对于 SS 比污水高得多的污泥的处理尤其是污泥生物沥浸处理, 却鲜有报道. 另外有关生物沥浸处理后脱水污泥饼水分蒸发速度也少见报道, 而这对污泥后期资源化利用却十分重要. 为此, 本研究采用中试试验方法, 探讨了采用推流式反应器对污泥进行连续的生物沥浸处理的效果, 以期寻找更优的运行方式提供依据.

1 材料与方 法

1.1 供试污泥与接种物的制备

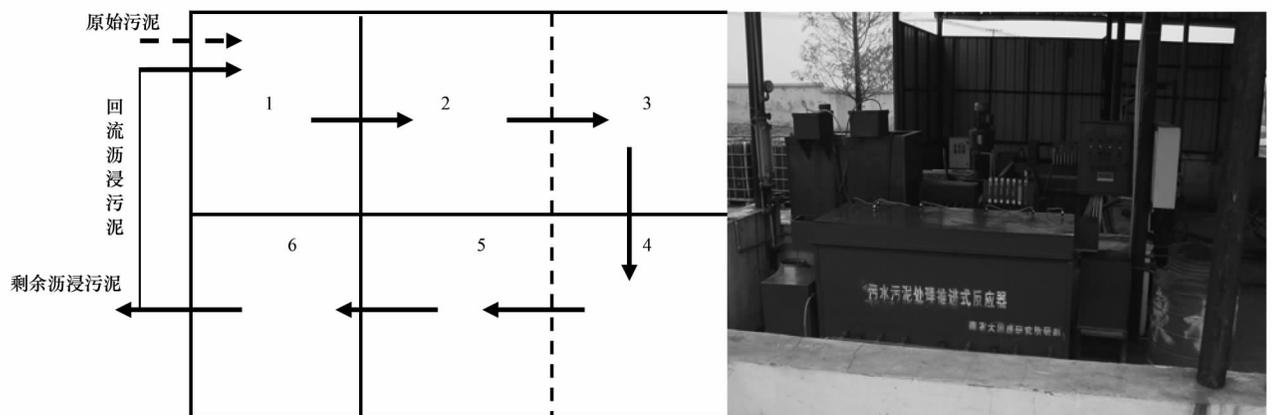
供试污泥: 采自南京某污水处理厂的污泥浓缩池, 该污水处理厂的污水处理工艺为活性污泥法, 污泥未经厌氧或好氧消化处理. 该液态污泥基本性质为: pH 7.49, 有机质 52.9%, 含固率 4.46%. 本中试研究所用污泥为原始污泥用自来水稀释 1 倍后的污泥, 即连续处理中试污泥的相关性质如下: pH 7.26,

有机质 52.9%, 含固率 2.23%, 污泥比阻 (γ) $1.50 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$.

反应器中酸化污泥的制备: 按参考文献 [17] 在实验室利用氧化硫硫杆菌 *A. thiooxidans* TS6、氧化亚铁硫杆菌 *A. ferrooxidans* LX5 和其他耐酸性异养菌组成的复合菌群对城市污泥进行生物沥浸处理, 培养生物酸化污泥 5 L. 然后将其接种于装有 40 L 原始污泥的连续搅拌釜式反应器中, 维持体系的温度在 20℃ 左右, 进行生物沥浸处理 5 d, 当污泥中菌密度达到 $10^7 \sim 10^8 \text{ cells/mL}$ 时, 将得到的 45 L 酸化污泥转移至 700 L 的生物沥浸反应器中, 补充 655 L 原始污泥, 当污泥体系菌密度再次达到 $10^7 \sim 10^8 \text{ cells/mL}$ 时, 体系中得到的 700 L 酸化污泥即为体系连续推流启动前反应器需要准备的酸化污泥.

1.2 生物沥浸反应器及系统污泥流向

所用的污泥生物沥浸反应系统的结构与组成详见文献 [16]. 简言之, 生物沥浸反应器由污泥调节池、推流式污泥生物沥浸反应器、污泥浓缩池、重金属回收池等设施以及曝气、加热、脱水、搅拌等装置组成. 生物沥浸反应器采用 8 mm PVC 板焊接而成, 为长 2 000 mm × 宽 700 mm × 深 850 mm 的长矩形结构, 工作体积 700 L. 沿纵向用 PVC 隔板完全分隔成 2 个廊道, 每个廊道设置 2 个 PVC 折流板, 上下交错, 区分为 3 个区域, 2 个廊道共 6 个区域 (见图 1). 反应器中复合微生物在曝气和投加微生物营养剂条件下与污泥作用, 通过生物氧化和生物酸化的共同作用, 使污泥得到调理而易于沉降和易于脱水; 原始污泥与回流的部分生物沥浸酸化污泥通过



相邻区域隔板实线表示隔板露出水面, 底部向上 1/4 高度区间为污泥流过通道; 虚线表示隔板位于水下, 从水面向下 1/4 区间为污泥流过通道

图 1 700 L 生物沥浸系统中污泥流向示意及反应器实物

Fig. 1 Configuration sketch map of the sludge flow in 700 L bioleaching system and the picture of reactor

计量泵连续不断泵入反应器中,处理后剩余污泥通过反应器 6 区排泥口进入污泥浓缩池.在浓缩池进行重力浓缩,浓缩污泥采用增强聚丙烯厢式压滤机(型号为 XMG10/800-UK,工作压力 0.3 MPa)压滤脱水.压滤水和沉淀池上清液中重金属用石灰水沉淀回收.

1.3 城市污泥生物沥浸中试研究试验

在上述生物沥浸反应器中,将原始污泥(按 $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 加入微生物复合营养剂)与 6 区回流的部分沥浸污泥同时通过计量泵连续不断泵入反应器 1 区,污泥从 1 区依次经过 2、3、4、5 区,最终从 6 区排泥口流出反应器(见图 1),污泥平均停留时间(SRT)为 2.5 d.反应器温度通过加热装置恒定在 28°C 、曝气量为 $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.推流生物沥浸过程中,定时监测生物沥浸体系污泥的 pH、污泥的比阻值(SRF)及系统达到稳定时各区污泥的沉降性能.将每天处理的剩余沥浸污泥浓缩后集中收集,通过增强聚丙烯厢式压滤机在不同压滤时间下压滤脱水,测定脱水泥饼的含水率及固体回收率.同时在 25°C 条件下,测定不同压滤时间得到脱水泥饼的水分蒸发量.

1.4 测定方法

采用 pHS-2TC 精密 pH 计(浙江海天电子仪器厂)测定污泥的 pH 与 ORP 值;污泥的比阻 SRF 采用采用布氏漏斗-真空抽滤法测定^[14,18].污泥沉降性能测试:250 mL 沥浸后的污泥充分摇匀后,倒入 250 mL 量筒中,记录下 24 h 后上清液的体积,并计算上清液体积占总体积的百分数即代表污泥的沉降性^[15].将压滤得到的泥饼在 105°C 烘干,根据烘干前后泥饼的重量来计算泥饼的含水率.将不同压滤时间得到的泥饼在 25°C 放置 11 d,根据泥饼质量的变化,掌握污泥饼的水分损失情况.

2 结果与讨论

2.1 污泥生物沥浸系统 pH 的变化动态

图 2 反映了推流式生物沥浸反应器系统 pH 随时间的变化趋势.反应系统初始时(0 时刻)1~6 区均为驯化后的生物酸化污泥,其各区 pH 基本维持一致(pH 2.5~2.7).

随着污泥生物沥浸推流式运行的开始,体系 1 区污泥 pH 首先受到进入反应器的新鲜污泥的影响,在前 60 h,1 区污泥 pH 由原来的 2.71 逐渐增加至 4.45,并且维持 4.50 水平直到生物沥浸反应器运行至第 10 d,同时,在前 60 h,反应器的 2~6 区

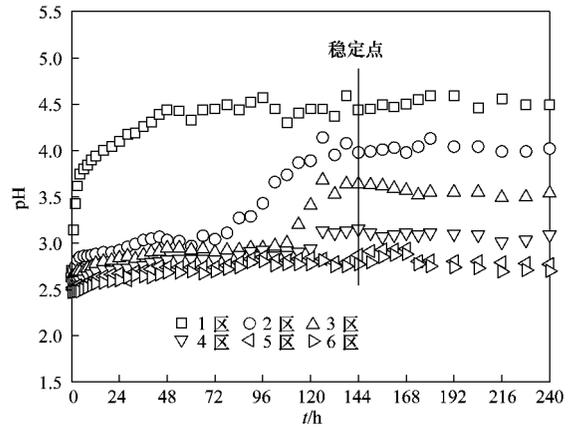


图 2 推流式生物沥浸反应器系统污泥 pH 随时间的变化
Fig. 2 Variation of sludge pH values with time in the plug-flow bioleaching reactor system

pH 也依次受到新进泥的影响,呈现缓慢上升的趋势,2~6 区污泥 pH 分别从原来的 2.65、2.63、2.58、2.51 与 2.47 上升至 3.04、2.90、2.82、2.74 与 2.69. 60 h 后反应器中接种的酸化污泥基本上被新进污泥所替代,此时反应器 2 区、3 区和 4 区 pH 分别由 72 h、108 h 与 120 h 时的 3.04、3.00、2.94 上升至 144 h 的 3.98、3.64 与 3.15. 在第 144 h,5 区与 6 区的污泥 pH 小幅上升至 2.87 与 2.77. 沥浸系统在运行至 144 h(6 d) 时达到稳定,稳定时,1~6 区的 pH 值分别维持在 4.50、4.00、3.60、3.00、2.90 与 2.80. 这说明在 2.5 d 的 SRT 时间内生物沥浸污泥体系中微生物菌群能够在反应器中良好地生长繁殖.同时,该生物沥浸反应器的 6 个分区的 pH 是从 1~6 区沿着污泥流动的方向依次在不同时间达到稳定,进而使得反应器整体运行达到稳态.

2.2 污泥比阻随时间的变化情况

污泥的比阻通常被用来作为衡量其脱水性能优劣的指标^[14,19,20],比阻值越高,污泥的脱水性能越差,相反,比阻值越低,污泥的脱水性能越好.一般认为比阻 $\text{SRF} > 0.40 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时污泥不易脱水; SRF 在 $0.10 \times 10^{13} \sim 0.40 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时脱水性能中等; $\text{SRF} < 0.10 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时污泥为易脱水污泥^[21].图 3 反映了推流式生物沥浸中试过程中,反应器各区污泥比阻(SRF)随时间的变化趋势.

从图 3 可以看出,在推流式生物沥浸初始时刻(0 h),由于体系中存在的是预先培养好的生物沥浸酸化污泥,所以反应器各区的污泥脱水性能均达到中等脱水的要求,污泥的比阻值均在 $0.20 \times 10^{13} \sim 0.40 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$. 随后,随着推流生物沥浸时间的

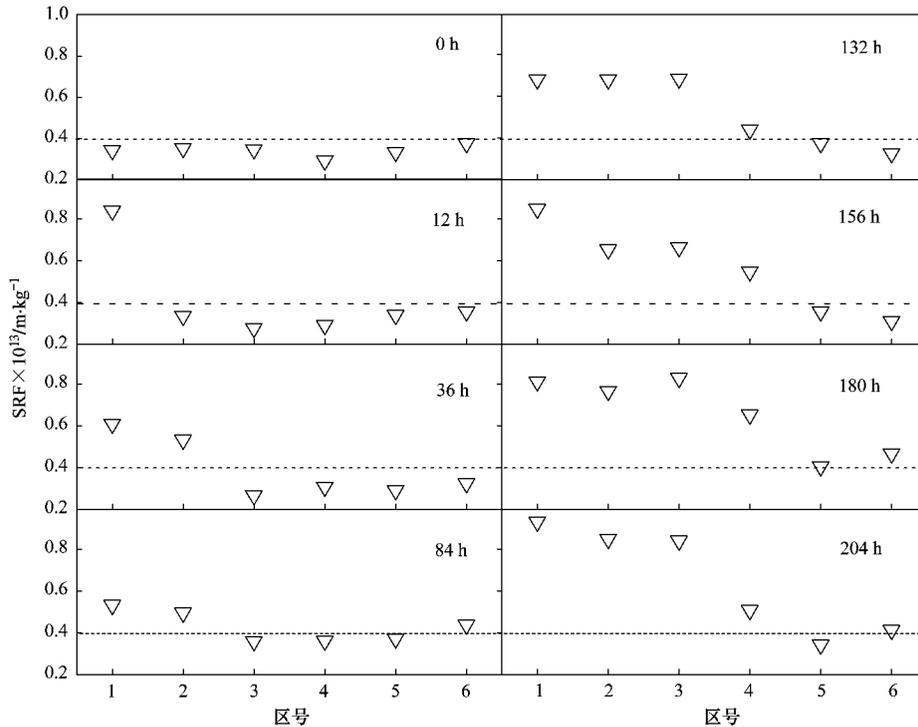


图3 推流式生物沥浸反应器系统各区污泥比阻值随时间的变化

Fig. 3 Changes of sludge SRF value with time in the different sections of plug-flow bioleaching reactor

延长,和 pH 的变化趋势相类似,反应器 1 区污泥的比阻值首先受到进入反应器污泥的影响. 反应器 1 区污泥的比阻值已经由 0 h 的 $0.34 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 升高至第 12 h 的 $0.84 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$. 即经过 12 h, 反应器 1 区的污泥由较易脱水的污泥变成为不易脱水的污泥. 随着推流式生物沥浸过程进一步进行, 在第 36 ~ 84 h, 反应器 1 区与 2 区的污泥均变得不易脱水, 污泥在 1 区与 2 区的比阻值分别为 36 h 的 $0.61 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 与 $0.53 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$, 84 h 的 $0.53 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 与 $0.49 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均大于 $0.40 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$, 当体系运行至 132 h 后, 反应器 1 ~ 4 区的污泥由于外界污泥的不断进入, 污泥的比阻值均高于 $0.40 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 而变得不易脱水, 但是反应器 5 ~ 6 区的污泥仍然维持在较易脱水的水平. 例如, 在 204 h 时, 反应器 1 ~ 4 区污泥的比阻值分别为: 0.93×10^{13} 、 0.85×10^{13} 、 0.84×10^{13} 、 0.51×10^{13} 、 0.34×10^{13} 与 $0.41 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$. 类似趋势一直维持在中试研究结束. 可见, 如果从污泥脱水性能来衡量系统运行的稳定性, 反应器各区污泥的比阻值在 132 h 以后及达到稳态, 这一时间与上述体系 pH 达到稳态的时间 (144 h) 基本上是吻合的, 可见, 在生物沥浸过程, 随着复合菌群在利用微生物营养剂良好生长, 污泥体系逐渐酸化的过程中, 城市污泥

得到调理, 脱水性能得到显著改善.

2.3 反应器达到稳态时各区污泥沉降性能

污泥的沉降性能也可以间接用来评价污泥脱水性及污泥体系固液分离的能力^[22-24]. 图 4 反映了中试过程反应器处于稳态运行后 (第 240 h), 反应器各区污泥的沉降性能.

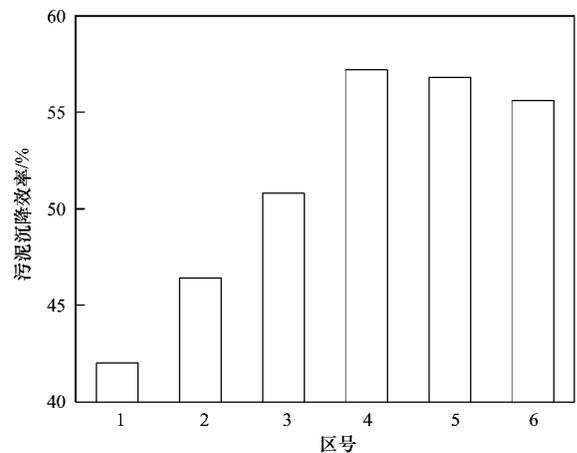


图4 反应器达到稳态时各区污泥的沉降效率

Fig. 4 Sludge settlement efficiency in different regions when the leaching system reached stable phase

从图 4 可以看出, 在生物沥浸反应器中随着污泥从 1 区向 6 区的推进, 污泥的沉降性能逐渐得到

改善. 沉降率表现出逐渐增加的趋势. 原始污泥的沉降率为 30%, 当原始污泥一进入反应器后(1 区), 其沉降率即提高到 42%, 随着反应的进行, 到 4 区后, 沉降率大幅提高到 56% ~ 57%. 很明显, 生物沥浸过程使得污泥的固液分离能力得到增强, 使原来很难再重力浓缩的浓缩污泥, 可进一步浓缩出更多的水分.

2.4 生物沥浸污泥脱水泥饼的含水率及其水分蒸发情况

将反应器中排出的沥浸污泥不加任何絮凝剂直接经过增强聚丙烯厢式压滤机压滤后, 在 0.3 MPa 压力条件下压滤 4 h(进泥 2 h, 压榨 2 h)、3 h(进泥 1.5 h, 压榨 1.5 h)、2 h(进泥 1 h, 压榨 1 h) 与 1 h(进泥 0.5 h, 压榨 0.5 h), 固体回收率近乎为 100%, 得到脱水泥饼的含水率分别为 57.9%、59.2%、59.6% 与 63.4%. 为了研究脱水泥饼的水分蒸发速度, 本试验将不同压滤时间得到的泥饼分别取长与宽各约 15 cm 的泥饼样品放置温度为 25°C 的恒温条件下, 进行水分蒸发试验, 结果见图 5.

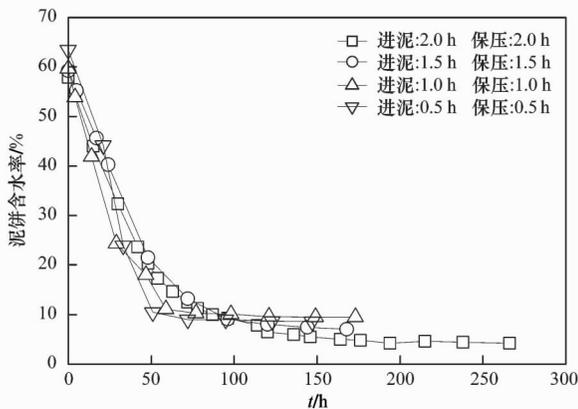


图 5 不同压滤时间脱水泥饼的水分蒸发情况(25°C)

Fig. 5 Moisture evaporation of dewatered sludge cake for different press time (25°C)

从图 5 可看出, 不同压滤时间得到的泥饼, 在 25°C 的恒温条件下放置 15 h 左右后, 污泥的含水率均可以降低至 45% 左右. 例如, 压滤 4 h 的泥饼放置 15 h 后, 泥饼的含水率为 44%, 压滤 3 h 泥饼放置 17 h 后, 泥饼的含水率为 45%. 压滤 2 h 泥饼放置 14 h 后, 泥饼的含水率为 42%. 压滤 1 h 泥饼放置 21 h 后, 泥饼的含水率为 44%. 不同压滤时间得到的泥饼放置 48 h 后, 污泥泥饼的含水率分别为 20%、21%、18% 与 10%. 然而, 如果不同压滤时间得到泥饼在 25°C 的恒温条件下放置 96 h 左右后, 泥饼的含水率可进一步降低至 10% 以下. 例如, 压滤 4

h 的泥饼放置 96 h 后, 泥饼的含水率为 9%, 压滤 3 h 泥饼放置 96 h 后, 泥饼的含水率为 9%. 压滤 2 h 泥饼放置 98 h 后, 泥饼的含水率为 10%. 压滤 1 h 泥饼放置 95 h 后, 泥饼的含水率为 9%. 然而, 随着蒸发时间的进一步延长, 污泥饼的水分含量虽然有所减少, 但是减少速度相对缓慢.

笔者前期研究表明, 城市污泥经过生物沥浸过程, 污泥的有机质基本不会发生变化^[14,25], 因此生物沥浸后, 城市污泥的干基热值与原始污泥热值相当. 经测定, 处理前后污泥干基热值基本维持在 11 MJ/kg, 按水的蒸发潜热 2 930 kJ 计算, 生物沥浸后含水率约为 60% 脱水污泥的热值约为 2 637 kJ, 含水率约为 45% 脱水污泥的热值为 4 743 kJ, 含水率为 10% 脱水污泥的热值为 9 628 kJ. 可见, 城市污泥生物沥浸后脱水泥饼在 25°C 的恒温条件下放置 15 h 与 96 h, 其泥饼热值分别是较刚脱水泥饼热值的 1.8 倍和 3.6 倍. 可见, 从泥饼焚烧能源化利用率与污泥处理效率来分析, 建议工程应用中, 生物沥浸后脱水污泥在 25°C 的条件下自然干化 3 ~ 4 d. 同时, 从图 5 可以发现, 随着压滤时间的减少, 泥饼相对较薄, 水分蒸发速度相对较快, 而自然干化稳定后留在泥饼中的水分较长时间压滤泥饼却有小幅增加, 这可能是由于短期的压滤时间不足以充分将污泥中的毛细水压滤出来的原因所致. 例如不同压滤时间得到的泥饼, 在 25°C 的恒温条件下水分蒸发曲线稳定时, 留在污泥中的水分含量分别为 4% (压滤 4 h)、7% (压滤 3 h)、9% (压滤 2 h) 与 9% (压滤 1 h).

由此可见, 对城市污泥进行生物沥浸处理, 在理论与实际应用过程中均是可行的, 反应器体系达到稳定状态时, 污泥的脱水性能可到显著的提高, 进而达到可以高效机械脱水的要求. 脱水后的泥饼的含水率可控制在 60% 以下, 同时脱水泥饼在常温下有较快的水分蒸发速度, 便于泥饼的后续焚烧能源化应用.

3 结论

(1) 采用容量为 700 L 的推流式生物沥浸反应器连续处理污泥, 当反应器曝气量为 $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, HRT 为 2.5 d, 微生物营养剂加入量为 $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 该反应器能够较好的完成污泥生物沥浸过程. 沥浸体系在第 6 d 达到稳定, 污泥的比阻值可由原来的 $1.50 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 最低降至 $0.34 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$.

(2) 生物沥浸后的污泥经过增强聚丙烯厢式压滤机脱水后, 不同压滤时间的泥饼在 25°C 条件下放

置 15 h, 泥饼的含水率下降至 45% 左右, 放置 96 h 后, 含水率进一步降低至 10% 以下。

参考文献:

- [1] 秦俊芳. 污水处理厂污泥安全处置方式的比较筛选 [J]. 中国资源综合利用, 2010, **28**(4): 52-55.
- [2] Cheng H F, Xu W P, Liu J L, *et al.* Application of composted sewage sludge (CSS) as a soil amendment for turfgrass growth [J]. *Ecological Engineering*, 2007, **29**(1): 96-104.
- [3] Lin C, Wu C H, Ho H M. Recovery of municipal waste incineration bottom ash and water treatment sludge to water permeable pavement materials [J]. *Waste Management*, 2006, **26**(9):970-978.
- [4] Neyens E, Baeyens J. A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, **98**(1-3): 51-67.
- [5] 荀锐, 王伟, 乔玮, 等. 城市污泥处理现状与强化脱水的水热减量技术 [J]. 环境卫生工程, 2006, **16**(2):28-32.
- [6] Turchiuli C, Fargues C. Influence of structural properties of alum and ferric flocs on sludge dewaterability [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2004, **103**(1-3): 123-131.
- [7] Deneux-Mustin S, Lartiges B S, Villemin G, *et al.* Ferric chloride and lime conditioning of activated sludges: an electron microscopic study on resin-embedded samples [J]. *Water Research*, 2001, **35**(12): 3018-3024.
- [8] 袁园, 杨海真. 污泥化学调理和机械脱水方面的研究进展 [J]. 上海环境科学, 2003, **22**(7):499-503.
- [9] 徐静, 王三反. 超声波预处理改善污泥性能研究 [J]. 净水技术, 2009, **28**(1):51-53.
- [10] Shao L M, Wang G H, Xu H C, *et al.* Effects of ultrasonic pretreatment on sludge dewaterability and extracellular polymeric substances distribution in mesophilic anaerobic digestion [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(3): 474-480.
- [11] 田禹, 方琳, 黄君礼. 微波辐射预处理对污泥结构及脱水性能的影响 [J]. 中国环境科学, 2006, **28**(10):2012-2017.
- [12] Yu Q, Lei H Y, Yu G W, *et al.* Influence of microwave irradiation on sludge dewaterability [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, **155**(1-2): 88-93.
- [13] 宋兴伟, 周立祥. 生物沥浸处理对城市污泥脱水性能的影响研究 [J]. 环境科学学报, 2008, **28**(10):2012-2017.
- [14] 刘奋武, 周立祥. 不同能源物质配合及化学强化对生物沥浸法提高城市污泥脱水性能的效果 [J]. 环境科学学报, 2009, **29**(5):974-979.
- [15] 周立祥, 周顺桂, 王世梅, 等. 制革污泥中铬的生物脱除及其对污泥的调理作用 [J]. 环境科学学报, 2004, **24**(6):1014-1020.
- [16] 刘奋武, 周立祥, 周俊, 等. 生物沥浸处理提高城市污泥脱水性能的中试研究: 批式运行模式 [J]. 环境科学, 2011, **32**(7):2023-2029.
- [17] 周立祥, 方迪, 周顺桂, 等. 利用嗜酸性硫杆菌去除制革污泥中铬的研究 [J]. 环境科学, 2004, **25**(1):62-66.
- [18] 周立祥. 固体废弃物处理处置与资源化 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2007. 120-178.
- [19] Alam M Z, Razi A F. Enhanced settleability and dewaterability of fungal treated domestic wastewater sludge by liquid state bioconversion process [J]. *Water Research*, 2003, **37**(5): 1118-1124.
- [20] Feng X, Deng J C, Lei H Y, *et al.* Dewaterability of waste activated sludge with ultrasound conditioning [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(3):1074-1081.
- [21] 王电站, 周立祥, 何峰. 生物淋滤法提高制革污泥脱水性能的研究 [J]. 中国环境科学, 2006, **26**(1):67-71.
- [22] Li D J, Hsu Y H. Fast freeze / thaw treatment on floc formation in sludge conditioning with polymers [J]. *Water Science and Technology*, 1994, **28**(8):1222-1449.
- [23] Yu X, Somasundaran P. Role of polymer conformation in interparticle-bridging dominated flocculation [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1996, **177**(2):283-287.
- [24] Chen G W, Chang I L, Hung W T, *et al.* Regimes for zone settling of waste activated sludges [J]. *Water Research*, 1996, **30**(8):1844-1850.
- [25] 李超, 周立祥, 王世梅. 复合硫杆菌浸出污泥中重金属的效果及与 pH 和 ORP 的关系 [J]. 环境科学学报, 2008, **28**(6): 1155-1160.