

风帽在准好氧填埋的应用及对填埋初期的影响

韩丹¹, 赵由才^{1*}, 薛斌杰¹, 高品²

(1. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 2. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620)

摘要: 首次将风帽应用于准好氧填埋, 以 $2\text{ m} \times 1\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的准好氧模拟箱为对象, 考察了风帽对准好氧填埋环境形成过程的影响, 比较了不同风速条件下二氧化碳和甲烷的浓度变化, 并对风帽应用于准好氧填埋的作用原理进行了分析, 以为设计和优化准好氧填埋结构提供参考. 结果表明, 风帽可以加快准好氧环境的形成, 将传统的准好氧环境的形成期由常规的 50 d 以上提前到 40 d 左右. 通过比较风帽先拆后装二氧化碳和甲烷的浓度变化, 表明风帽可以促进甲烷向二氧化碳的转化, 减少甲烷的排放. 卸下风帽后二氧化碳的浓度由最初的 16.67% 降为 15.88%, 甲烷从 6.14% 增大到 16.12%; 装上后二氧化碳的浓度增至 19.18%, 甲烷降为 10.05%. 考察了风速为 2.0、3.5、5.0、6.5、8.0 m/s 5 种条件下导气管出口处的甲烷排放情况, 表明风速可以加强风帽的作用, 有利于甲烷的减排, 当风速增至 8 m/s 时, 甲烷浓度由最初的 15% 以上降为 5% 以下.

关键词: 准好氧; 风帽; 甲烷; 二氧化碳; 风速

中图分类号: X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2009)10-3115-06

Application of Cowl in Semi-aerobic Landfill and Its Influence in Initial Stage

HAN Dan¹, ZHAO You-cai¹, XUE Bin-jie¹, GAO Pin²

(1. State of Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Enhancement of semi-aerobic landfill performance through a cowl installed on the gas ventilation pipeline using a simulated landfill box with $2\text{ m} \times 1\text{ m} \times 2\text{ m}$ in size was investigated, aiming at the maximum methane emission reduction. Influence of cowl on semi-aerobic environment formation was explored, and variety of methane and carbon dioxide concentrations at different wind speeds and mechanism of cowl operation were identified to provide information on design and improvement of semi-aerobic landfill. The results show that the cowl speeds up the semi-aerobic environment to shape, from over 50 days down to approximately 40 days, and reduces methane emission by promoting methane transformation to carbon dioxide. When the cowl is taken off suddenly during the normal operation, carbon dioxide concentration falls to 15.88% from the initial 16.67% immediately, and methane concentration increases to 16.12% from 6.14%. However, the carbon dioxide and methane concentration becomes 19.18% and 10.05%, respectively, as the cowl is taken on again. Additionally, methane emissions in the exhaust gas were monitored at different wind speeds of 2.0, 3.5, 5.0, 6.5, 8.0 m/s, and finds that the methane concentration reduces from the initial 15% to below 5% when the wind speed increases from 2 m/s to 8 m/s.

Key words: semi-aerobic; cowl; methane; carbon dioxide; wind speed

准好氧填埋技术是一种经济、安全、成熟的垃圾填埋技术, 作为控制填埋场 CH_4 排放最可行和有效的措施之一, 在国外已经被广泛采用, 但在我国相对较少, 目前在山东潍坊、湖南长沙、衡阳及广州等城市的应用效果良好. 准好氧填埋依靠渗滤液收集管和大气相通的设计, 以填埋体内外温差为动力实现垃圾的局部好氧分解^[1], 相比厌氧填埋, 准好氧填埋的甲烷产生量只有厌氧填埋的 56%, 大大降低了温室效应^[2,3]. 对于传统的准好氧结构, 导气管内自生抽力(由于介质密度变化而引起的流动损失, 也称自生通风力)引起的烟囱效应是保持通风的关键. 然而, 当垃圾体内外温差较小, 尤其是秋冬季节, 单靠穿孔的导气管提供的排气压头不能克服自生抽力, 因此可能引起外部空气的倒灌. 为了提高通风效果, 最常用的改良办法是在导气管的末端增设排风设

施, 如动力型或无动力型排风机^[4,5].

无动力排风机, 即排风式风帽(简称风帽), 在西方欧美国家早已十分流行, 已有几十年的历史^[6,7]. 在国内, 随着钢结构建筑的大量问世, 风帽的使用也日见增多, 多用于商用建筑和厂矿企业的排风换气. 其原理是利用风力及室内外温差造成的空气热对流, 推动涡轮旋转, 从而利用离心力和负压效应将室内不新鲜的热空气或者废气排出^[8]. 实验首次将风帽应用于准好氧填埋, 大大促进了烟囱效应的“拔风”效果, 提高了渗滤液收集管末端空气进入填埋体的效率.

收稿日期: 2008-11-27; 修订日期: 2009-03-03

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA06Z349)

作者简介: 韩丹(1983~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为固体废弃物的处理与资源化, E-mail: 3824932@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhaoyoucai@mail.tongji.edu.cn

风帽应用于准好氧填埋,有几个优势不容忽视:①提高了系统的通风效果,改善了外界气候变化给系统带来的不稳定性;②利用自然风力,节省能源,维持了准好氧填埋无动力消耗的优点^[9];③其弧形叶片不仅具有防雨、雪,防倒风的功能,而且只需微风或者室内外温差不低于 0.5℃ 的条件,叶片就可以轻盈运转,排风效率高^[10];④运转无噪声,装拆维护方便,且成本低,可广泛推广到垃圾填埋场.若国内绝大多数没有设置填埋气回收装置的填埋场采用这种改良型的准好氧填埋结构,可以大大减少填埋层气体中甲烷的产生量,对减缓温室效应应具有重大的意义^[11,12].

本实验的目的就是考察风帽对准好氧填埋在甲烷减排上的促进效果,为期为未来准好氧填埋结构的改造和优化提供技术支持和依据.

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验建立了规模为 2 m×1 m×2 m 的准好氧模拟填埋装置,见图 1.装置底部沿箱宽间隔 0.25 m 铺设管径为 15 cm,长 1 m 的渗滤液收集干管,每根干管的其中一端开口与外界大气相通.干管之间沿 60°

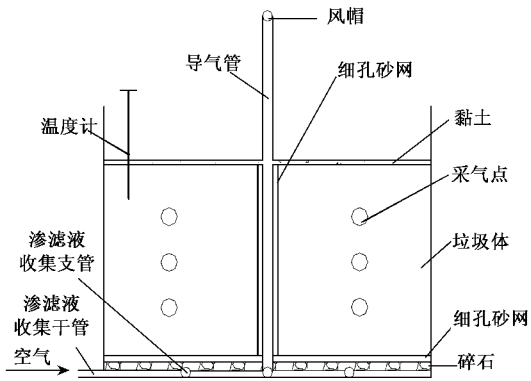


图 1 准好氧填埋装置示意

Fig.1 Sketch of the semi-aerobic landfill

倾角铺设支管,中间干管的中心处安装内径 15 cm、高 2.5 m 的竖直导气管.导气管和渗滤液收集管均穿孔,且周围均用塞满碎石的细孔砂网保护,以防止管壁上的导气孔被堵塞.导气管顶部安装风帽,风帽参数见表 1,结构示意见图 2.风帽转动时导气管内的沼气被不断抽出,同时渗滤液收集管末端的空气不断地被吸入,并通过收集管上的穿孔扩散到垃圾中.在垃圾填埋到 1.5 m 高度时铺厚约 5 cm 的黏土,并在粘土上面铺塑料薄膜实现密封效果.

表 1 风帽参数

Table 1 Parameters of the cowl

材料	形状	叶片数/片	高度/mm	叶片转动半径/mm	筒体内径/mm
不锈钢	球形	16	250	125	150

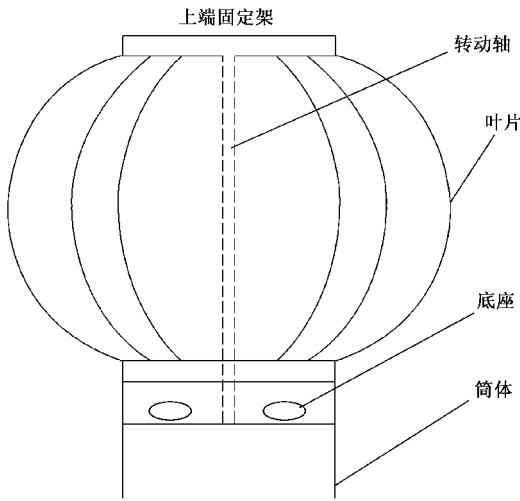


图 2 风帽结构示意图

Fig.2 Sketch of the cowl in the experiment

1.2 试验方法

试验垃圾来自上海同济大学校内博士生活小区内的生活垃圾,填埋量为 3 t 左右,其组成和物理性质见表 2.在装填垃圾的过程中,当垃圾倾倒高度为 0.5、0.9 和 1.3 m 时分别设置水平剖面,在每一剖面内布设 6 个采气点,另外,导气管出口处设置 1 个采气点,共 19 个采气点.在填埋装置封顶 1 周后开始在每个采气点取样测填埋气的成分和含量.前期采样频率为 1 次/4 d,在垃圾层进入相对稳定期后每周 1 次.取样时间均为每日 12:00 ~ 13:00.试验从 2008-07-20 开始.为了减少实验中渗滤液的排放,同时调节垃圾的含水率,渗滤液采用全循环回灌处理.渗滤液通过排水管引至收集池内,利用潜水泵提升至填埋装置上方的回灌池内,定期打开回灌池的阀门,通过顶层的布水器向箱内喷洒实现回灌.

1.3 分析方法

气体组分和含量用气相色谱法测定:采用岛津 GC-14B 型气相色谱仪,热导检测器,不锈钢填充

表 2 填埋垃圾组分和物理性质

Table 2 Components and physical characteristics of municipal solid waste

组分	厨余	草木	纸类	塑料	布类	砖瓦	玻璃	灰土
所占质量分数/%	62.55	10.98	6.68	11.84	1.08	2.16	1.77	2.94

柱,柱长 2 m,担体: GDX-104, 80 ~ 100 目,载气: 氮气,载气流量: 30 mL·min⁻¹,桥电流 90 mA,检测器、进样器及色谱柱温度分别为: 80、40 和 40℃,进样量: 0.2 mL,采用外标法定量. 风速采用 Kestrel 1000 便携式风速计测量,实验中所出现的风速数据均指平均风速.

2 结果与分析

2.1 准好氧环境的形成

试验期间天气比较稳定,平均最低温度为 27℃,最高温度 35℃,东南风 3 ~ 4 级,降雨量小. 由于实验所用的垃圾组分中餐厨垃圾比重大,且正值夏季,瓜果皮屑较多,所以在填埋初期垃圾降解较快. 图 3 和图 4 是填埋初期前 60 d 垃圾降解所产生的填埋气中二氧化碳和甲烷的浓度变化. 从中可见,CH₄ 和 CO₂ 的浓度都因垃圾本身的降解程度增大而缓慢升高,这是垃圾中微生物适应环境的开始^[13]. 之后,从图 3 可以看到,上层的二氧化碳浓度从最高值 7.8% 缓慢下降,第 40 d 时约为 5.1%,此后稳定在 4.5% 左右;中层二氧化碳浓度随时间几乎没有变化,一直在 17% 左右;从趋势线上看,只有下层的二氧化碳浓度变化略大,在填埋初期的整个过程中始终都处于上下波动的状态,且整体上呈下降的趋势,最后稳定在 30% 左右.

相比之下,图 4 中甲烷的浓度变化幅度则较大. 下层的甲烷浓度随时间呈现出缓慢上升趋势,从填埋初期的 4.7% 到 40 d 后升为 10.1%,之后甲烷的浓度几乎都在 9.7% ~ 10.1% 范围内波动;中层甲烷浓度上升的坡度比下层稍大,最初浓度为 2.25%,40 d 以后其浓度基本稳定在 8.4% 左右;上层的甲烷浓度则是下降趋势,在不到 1 个月的时间由最初的 2.0% 迅速下降到 < 1%,至 60 d 左右,就处于检不出阶段. 因此,上层的甲烷绝大部分是由中下层的甲烷扩散所致. 对于中下层来说,从填埋第 40 d 开始之后的 20 d 甲烷的浓度开始缓慢下降,而二氧化碳的浓度在 40 d 以后的一段时间内表现也比较稳定,有上升趋势. 因此,可以认为,从填埋开始第 40 d,装置中准好氧的填埋环境形成. 有研究表明^[14],传统准好氧环境形成的时间为 50 d 以上,而加风帽后该形

成期缩短了至少 10 d.

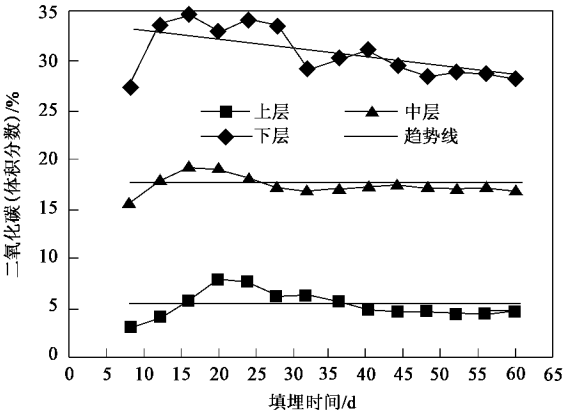


图 3 准好氧填埋初期二氧化碳浓度变化

Fig.3 Variety of carbon dioxide concentration in the initial landfill stage

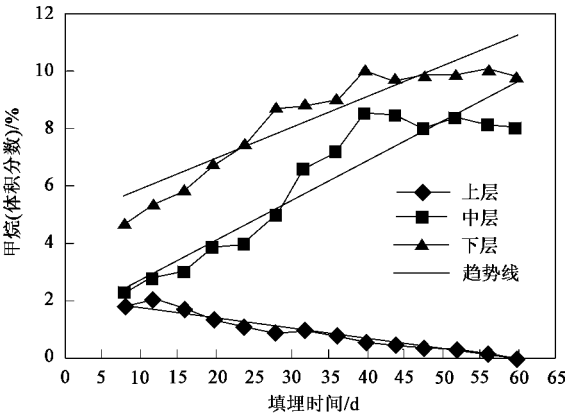


图 4 准好氧填埋初期甲烷浓度变化

Fig.4 Variety of methane concentration in the initial landfill stage

2.2 风帽对准好氧填埋甲烷减排的强化效果

由于在形成期垃圾的降解还极不稳定,加上实验规模不小,垃圾装填不是十分均匀,因此在形成期无法检验风帽的效果. 为了保证较合理的对比性,根据上海的天气预报,实验另选择了天气比较稳定,垃圾降解也较稳定的 9 月下旬拆下风帽,运行一段时间后再重新装上,在靠近导气管出口处的采气点取样测二氧化碳和甲烷的浓度,分析风帽对准好氧填埋甲烷减排的强化效果. 实验期间白天的温度稳定在 32℃ 左右,风向为东南风,风力为 3 ~ 4 级,天气干

燥少雨.图 5 为风帽拆下前后二氧化碳和甲烷的浓度变化,2 条竖线之间是风帽卸下后的运行阶段.

由图 5 可知,9 月 20 日之前二氧化碳和甲烷的浓度变化幅度很小,这主要是由于准好氧环境刚刚形成不久,垃圾中微生物的活性还不高.9 月 20 日拆下风帽后,二氧化碳和甲烷的浓度在 4 d 内都升高,且甲烷的变化比二氧化碳明显.在半个月左右的无风帽抽风期间甲烷浓度整体上呈增大趋势,从 6.14% 增大到 16.12%,最后略降为 15.22%;而二氧化碳整体呈下降趋势,不过程度较小,半月内只由最初的 16.67% 降为 15.88%.待二者的浓度稍稍稳定重新装上风帽,此时可发现甲烷的浓度迅速下降到 10.05%,二氧化碳浓度则增至 19.18%,比实验初始浓度还高.

此外,从图 5 中的涨柱线也可以看出,甲烷和二氧化碳之间的浓度差经历了先减小后增大的过程,这正是甲烷向二氧化碳转化的过程.在无风帽的运行期间,甲烷和二氧化碳的浓度差距很小,且甲烷浓度很高.因此,风帽可以促进准好氧填埋中甲烷向二氧化碳的转化,减少甲烷的排放.

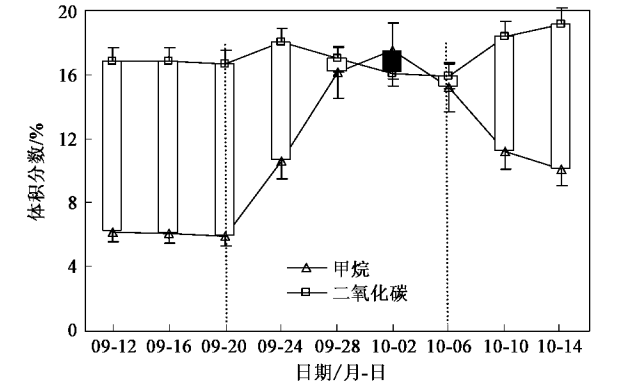
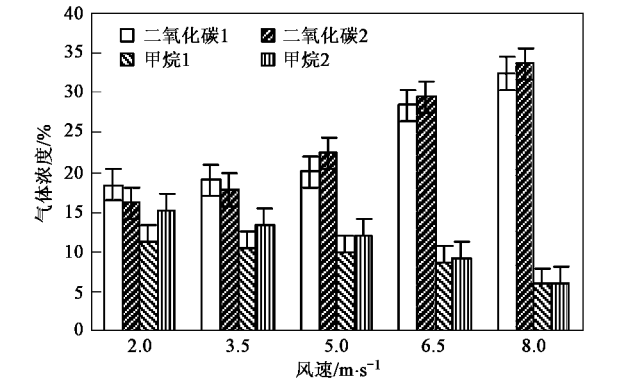


图 5 风帽对准好氧填埋甲烷减排的强化效果
Fig.5 Enhanced effect of cowl on methane emission reduction in semi-aerobic landfill

2.3 风速的影响

Youngkyu 等^[15]通过对一根渗滤液收集管道内气体流速进行研究表明,埋场内外的温度差、场区的表面风速和填埋层的高度比通风管的长度和直径对气体在管道内流速的影响更大.其中,埋场内外的温度差和场区的表面风正是风帽的动力来源^[16].因此,考察风速对本实验的影响具有更重要的意义.由于实验时间短,实验地点风速变化不大,因此借助了一台小型离心风机来调节所需要的风速.风机放置在距离风帽 0.5 m 的地方,出风口正对风帽.在离心

风机的进风截面上安装一块活动挡板,通过调节挡板的作用面积来调节进风量,从而控制离心风机的出口风速.鉴于本实验的规模,只考察风帽边缘风速为 2、3.5、5、6.5、8 m/s 5 种条件下的情况.每组的实验时间控制在 10~12 d,期间取样 2 次.填埋箱内平均温度在 59℃,箱外的气温为 31℃,甲烷和二氧化碳浓度的变化情况如图 6 所示.



“1”和“2”分别表示 2 次取样
图 6 风速对甲烷和二氧化碳浓度的影响
Fig.6 Effects of wind speed on methane and carbon dioxide concentration

从图 6 可以看出,每种风速下 2 次取样二氧化碳的浓度差距都很小,而甲烷在风速比较小的时候变化较大,但随着风速的增大,2 次取样结果的差值也逐渐缩小.从整体上看,风速的增大使得二氧化碳的浓度逐渐加大,而甲烷则逐渐减小,由最初的 15% 以上降为 5% 以下.因此,按上海地区夏秋季节最常见的风力 3~4 级,即风速在 4~8 m/s 之间,对甲烷的减排是很有利的.若在填埋场所在的空旷郊区,这种效果会更好.此外,根据图 5 的结果,在没有风帽的阶段,甲烷的浓度达到 15.12%,而同样的条件(对应这里的风速 6.5 m/s 和 8 m/s)下,甲烷在短期内就可以降到 10% 以下,因此,填埋场上方的风速通过对风帽的影响促进了甲烷的减排效果.

3 讨论

3.1 准好氧环境形成过程的实质和特征

厌氧填埋中填埋气的甲烷含量为 40%~60%,传统的准好氧填埋中填埋气的甲烷含量为 10%~20%^[17],而本实验应用风帽后,通过以上的结果可以看到,甲烷的含量在正常的运行时间内都低于 10%.造成这样效果的关键因素是氧气.填埋层内外的温度差使得空气得以扩散进入到垃圾层中,造成了氧气在垃圾层中的扩散与消耗.准好氧环境的形

成过程,实际是垃圾中微生物适应环境的过程,前期由于空气扩散充氧速度 > 微生物对氧气的消耗速度,因而氧气浓度逐渐积累;随着时间推移,垃圾沉降造成了空气在中下层扩散受阻,所以氧气在垃圾导内的分布出现空间差异性,因此图 3 和图 4 中出现了二氧化碳和甲烷浓度的空间层次性. Lee 等^[18]在对准好氧填埋的稳定化试验中发现,随着填埋高度的不同存在差异,上层的氧气含量为 10% ~ 20%,而下部值很低,常常 < 3%. 随着填埋时间的进行,微生物耗氧与空气扩散充氧这 2 个过程达到平衡,从而氧气浓度保持稳定. 风帽的本质作用是提高氧气进入垃圾体的效率,促进空气的扩散,加快氧气达到平衡的速度,使微生物的活动渐入稳定,准好氧环境提前形成.

准好氧填埋环境形成过程中有一些显著的特征. 其一是二氧化碳和甲烷平均浓度随时间的动态变化,见图 7. 可以看出,在填埋实验开始 40 d 后,准好氧环境形成的表现为二氧化碳和甲烷的浓度都趋于平缓,而渗滤液的 pH 值基本维持在 8 左右. 随着填埋时间继续进行,氧气在填埋层内继续扩散,使得二氧化碳的浓度开始缓慢上升,而甲烷的浓度开始缓慢下降.

其二是气体浓度(体积分数)的分布呈现空间层次性: 下层 $\varphi_{\text{二氧化碳}}$ (30.74%) > 中层 $\varphi_{\text{二氧化碳}}$ (17.55%) > 上层 $\varphi_{\text{二氧化碳}}$ (5.34%), 下层 $\varphi_{\text{甲烷}}$ (8.31%) > 中层 $\varphi_{\text{甲烷}}$ (5.96%) > 上层 $\varphi_{\text{甲烷}}$ (0.87%). 分析原因: 一是二氧化碳和甲烷的密度不同,二氧化碳比空气重,会向下迁移,而甲烷则会向上迁移. 二是由于准好氧填埋的开放式结构,空气的对流使得产生的二氧化碳排放到外面的大气中. 中下层空气通过穿孔管进行扩散的作用有限,使得中下层形成了局部好氧、局部厌氧的环境,甲烷在中下层的体积含量明显偏高;而上层由于扩散作用比较明显,好氧区域很大,仅仅有少量的甲烷,这部分甲烷还可能是由于甲烷的密度较空气轻,中下层的甲烷向上扩散所致. 另外,从表 3 可以看到甲烷的分布呈现的空间层次特征不如二氧化碳明显,且二者下层到中层的变化率($\Delta\varphi$)都不如中层到上层.

这里,浓度(体积分数)变化率 $\Delta\varphi$ 定义为:

$$\Delta\varphi_{\text{下层-中层}} = (\varphi_{\text{下层}} - \varphi_{\text{中层}})/\varphi_{\text{下层}} \quad (1)$$
$$\Delta\varphi_{\text{中层-上层}} = (\varphi_{\text{中层}} - \varphi_{\text{上层}})/\varphi_{\text{中层}} \quad (2)$$

准好氧填埋结构中,中层到上层的甲烷和二氧化碳浓度变化率之所以表现出比下层到中层明显的

层次效应,一方面由于垃圾的自然沉降,使得上层垃圾处于相对比较疏松的状态,而下层的垃圾层则比较紧密,从而造成气体在下层的扩散比较困难;另一方面,垃圾沉降使得上层垃圾上部的空间越来越大,上层垃圾中的气体不断向上层的空间扩散,造成上层垃圾中气体浓度极低,从公式(2)可知,此时中上层垃圾中甲烷和二氧化碳浓度的变化率较大.

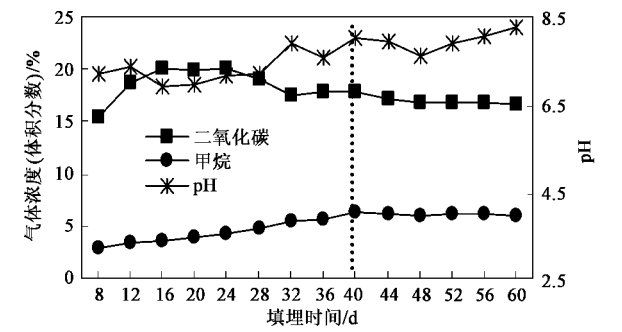


图 7 准好氧填埋二氧化碳、甲烷平均浓度和 pH 变化
Fig. 7 Variety of average methane and carbon dioxide concentration and pH in semi-aerobic landfill

表 3 二氧化碳和甲烷浓度变化的空间层次差别
Table 3 Spatial differences in carbon dioxide and methane average concentration variety

指标	下层 - 中层	中层 - 上层
$\Delta\varphi(\text{CO}_2)$	0.429	0.696
$\Delta\varphi(\text{CH}_4)$	0.283	0.854

3.2 风帽在准好氧填埋中的作用原理

风帽在准好氧填埋中的应用主要是利用其转动带来的抽气和排风效果. 风帽在自然风和烟囱效应牵引力下的 2 种通风效果示意如图 8 所示. 很显然, 烟囱效应下所排出去的风的股数更多, 且气体流动的方向性更强, 不会产生倒灌. 应用到准好氧填埋后, 风帽的通风效果是自然风和烟囱效应 2 种通风效果的叠加^[19]. 当风速增加时, 自然风的效果增强,

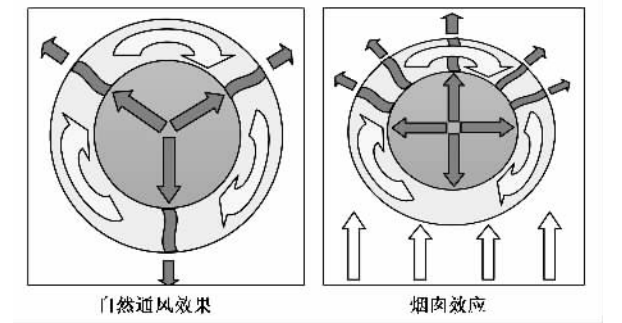


图 8 风帽通风效果示意

Fig. 8 Sketch of cowl ventilation effects

而且风速越大,风帽的叶片转动越快,排出的气体也越多.因此,风速通过对风帽的作用影响了填埋气的排放,当风速由 2 m/s 增至 8 m/s 时,出口处甲烷的浓度迅速降低,实现了甲烷的减排.

传统的准好氧填埋主要依靠烟囱效应^[20],自然风一般只能加快导气管管口所排出气体的扩散,而且有时甚至引起倒灌^[21].此外,空气的进口往往因为实际填埋场建造的地理位置处于地势较低的地方以利于渗滤液的排放,非常不利于空气的主动流入,特别是在冬、春季节,填埋场内外的温差较小,通风效果较差时,氧气扩散的动力更会大大降低.而风帽由于安装在导气管的顶端,位置较高,因此可以充分利用高空的自然风力.即使在填埋体内外温差较小所导致的烟囱效应较弱时,风帽依然可以依靠自然风的通风效果维持准好氧填埋的正常运行.

4 结论

(1)风帽加快了准好氧环境的形成,由传统上的 50 d 以上提前至 40 d.从整个形成过程看,上层的二氧化碳浓度稳定在 4.5% 左右,中层在 17% 左右,下层在 30% 左右;而下层的甲烷浓度在 9.7% ~ 10.1% 范围内波动,中层基本稳定在 8.4% 左右,上层 < 1%,至 60 d 左右就处于检不出阶段.

(2)风帽促进了准好氧填埋对甲烷的减排效果.卸下风帽后二氧化碳的浓度由最初的 16.67% 降为 15.88%,甲烷从 6.14% 增大到 16.12%,重新装上后二氧化碳的浓度增至 19.18%,甲烷降为 10.05%.

(3)风速可以增强风帽的作用,促进甲烷的减排.风速的增大使得二氧化碳的浓度逐渐加大,而甲烷则逐渐减小,当风速达到 8 m/s 时,甲烷的浓度由最初的 15% 以上降到 5% 以下.

参考文献:

- [1] Chong T L, Matsufuji Y, Hassan M N. Implementation of the semi-aerobic landfill system(Fukuoka method) in developing countries: a Malaysia cost analysis[J]. Waste Management, 2005, 25(7): 702-711.
- [2] Matsufuji Y, Hanashima M. Characteristic and mechanism of semi-aerobic landfill on stabilization of solid waste [R]. Japan: Proceedings of the First Korea-Japan Society of Solid Waste Management, 1997. 87-94.
- [3] Matsufuji Y, Tanaka A, Hanashima M. Biodegradation process of municipal solid waste by semi-aerobic landfill type [R]. Proceedings of the first Korea-Japan Society of Solid Waste Management, 1997. 87-94.
- [4] 邹秋生.住宅通风竖井烟囱效应对排风的影响和利用[J].制冷与空调, 2005, (3): 32-34.
- [5] Khan N, Su Y H, Riffat S B, et al. Performance testing and comparison of turbine ventilators[J]. Renewable Energy, 2008, 33(11): 2441-2447.
- [6] Meadows V H. Rotary ventilator [P]. US Patent: 1857762, 1929-10-30.
- [7] West S. Improving the sustainable development of building stock by the implementation of energy efficient, climate control technologies [J]. Building and Environment, 2001, 36(3): 281-289.
- [8] 寇德忠,李建禄.一种节能风帽[P].中国专利: CN 99210269, 2000-04-26.
- [9] Roberts S. Altering existing buildings in the UK [J]. Energy Policy, 2008, 36(12): 4482-4486.
- [10] Pfeiffer A, Dorer V, Weber A. Modelling of cowl performance in building simulation tools using experimental data and computational fluid dynamics [J]. Building and Environment, 2008, 43(8): 1361-1372.
- [11] Khan N, Su Y H, Riffat S B. A review on wind driven ventilation techniques [J]. Energy and Buildings, 2008, 40(8): 1586-1604.
- [12] Omer A M. Renewable building energy systems and passive human comfort solutions[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(6): 1562-1587.
- [13] Francois V, Feuillade G, Matejka G, et al. Leachate recirculation effects on waste degradation: Study on columns [J]. Waste Management, 2007, 27(9): 1259-1272.
- [14] 李帆,黄启飞,张增强,等.准好氧填埋场的温度空间变异性[J].应用生态学报,2006,17(7): 1291-1294.
- [15] Youngkyu K, Toshihiko M, Yasumasa T. Air flow rate in leachate collection pipe of semi-aerobic landfills, the case of a single pipe [J]. Waste Engineering Society, 1997, 8(1): 1-8.
- [16] Dale J D, Ackerman M Y. Evaluation of the performance of attic turbine ventilators [J]. ASHRAE Trans, 1993, 99(1): 14-22.
- [17] 刘玉强,黄启飞,王琪,等.生活垃圾填埋场不同填埋方式填埋气特性研究[J].环境污染与防治,2005,27(5): 333-338.
- [18] Lee N, Kusuda T, Shimaoka T, et al. Pollutant transformations in landfill layers[J]. Waste Management & Research, 1994, 12(1): 33-48.
- [19] 王战友.自然通风技术在建筑中的应用探析[J].建筑节能, 2007, 35(7): 20-23.
- [20] Manfredi S, Christensen T H. Environmental assessment of solid waste landfilling technologies by means of LCA-modeling[J]. Waste Management, 2009, 29(1): 32-43.
- [21] 张卫国,关宏,路永军.住宅排烟道烟气倒灌与串味的原因分析[J].建筑工人, 2008, (5): 41-44.