

牟子申, 陆文静, 龙於洋, 等. 2011. 呼吸型填埋场覆盖层技术研究 I: 热动力自充氧装置构建 [J]. 环境科学学报, 31(11): 2493-2498

Mou Z S, Lu W J, Long Y Y, *et al.* 2011. Development of a breathing landfill biocover technique I: Construction of passive air venting system based on aerothermodynamics [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(11): 2493-2498

呼吸型填埋场覆盖层技术研究 I: 热动力自充氧装置构建

牟子申¹, 陆文静^{1,*}, 龙於洋^{1,2}, 段振茵¹, 杨若冰¹, 朱勇¹, 王洪涛¹

1. 清华大学环境学院, 北京 100084

2. 浙江工商大学环境科学与工程学院, 杭州 310012

收稿日期: 2011-01-29

修回日期: 2011-04-28

录用日期: 2011-05-04

摘要: 填埋场最终覆盖层(以下简称“覆盖层”)中的氧气含量是影响甲烷氧化效果的重要因素。本研究基于空气热力学原理提出了一种呼吸型覆盖层技术, 构建了利用垃圾堆体与外界环境的温差而实现覆盖层自充氧的热动力自充氧装置, 并优化了其空气/氧气充气效率。结果表明, 导气管路内空气流速(v)与温差(ΔT)呈线性关系($v = 0.0281\Delta T - 0.5258$), 增加导气管路长度和进气管径可提升自充氧效果, 本研究中实验所得的导气管路内最大空气流速为 $2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (温差 35°C 、导气管长 2.5 m)。热动力自充氧装置应用于模拟覆盖层时, 40 cm 厚的自充氧覆盖层内各层 O_2 含量始终大于 20% , 而对照覆盖层内最低 O_2 含量为 15.7% , 自充氧技术有效地改善了模拟覆盖层内 O_2 的分布状况。基于该技术开发的热动力自充氧装置克服了传统覆盖层技术中含氧层浅的瓶颈, 为填埋场覆盖层控制温室气体排放提供了改进手段和发展方向。

关键词: 填埋场; 生物覆盖层; 自充氧; 甲烷氧化

文章编号: 0253-2468(2011)11-2493-06

中图分类号: X705

文献标识码: A

Development of a breathing landfill biocover technique I: Construction of passive air venting system based on aerothermodynamics

MOU Zishen¹, LU Wenjing^{1,*}, LONG Yuyang^{1,2}, DUAN Zhenhan¹, YANG Ruobing¹, ZHU Yong¹, WANG Hongtao¹

1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084

2. College of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310012

Received 29 January 2011;

received in revised form 28 April 2011;

accepted 4 May 2011

Abstract: Oxygen (O_2) content is a key factor for methane oxidation in landfill cover layer. In this study, a breathing landfill biocover technique was proposed. A passive air venting system based on aerothermodynamics was constructed as the key component of the breathing biocover system, and its air/ O_2 supply efficiency was optimized. The result showed that the air velocity in venting pipe has a linear relationship with the temperature discrepancy ($v = 0.0281\Delta T - 0.5258$). The air velocity in the venting pipe can be further improved by increasing the length of the vertical venting pipe and diameter of horizontal inlet pipes. The highest velocity ($2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) was achieved at the temperature discrepancy of 35°C and with a 2.5 m vertical venting pipe. When the passive air venting system was introduced into a simulated landfill cover reactor, it significantly improved the level and distribution of O_2 in 40 cm cover layers as the data showed that the average O_2 content in every layer kept more than 20% , while that was 15.7% in the control trail. The study proved that this novel breathing biocover can be applied as an effective way for greenhouse gas emission control in landfill by enhancing biodegradation of methane in landfill gas.

Keywords: landfill; biocover; oxygen self-filling; CH_4 oxidation

1 引言(Introduction)

甲烷(CH_4)是仅次于二氧化碳(CO_2)的重要温

室气体,而生活垃圾填埋场是人类活动引起的最重要的 CH_4 释放源(Nickolas *et al.*, 2007). 由于填埋气(LFG) 收集利用系统的经济可行性差,我国大部

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863) 项目(No. 2007AA06Z350); 国家科技支撑计划(No. 2006BAC06B05); 中国博士后基金特别资助(No. 201003106)

Supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2007AA06Z350), the National Key Technology R&D Program (No. 2006BAC06B05) and the China Postdoctoral Science Foundation Funded Project (No. 201003106)

作者简介: 牟子申(1985—), 男, E-mail: mouzishen@gmail.com; * **通讯作者(责任作者),** E-mail: luwenjing@tsinghua.edu.cn

Biography: MOU Zishen(1985—), male, E-mail: mouzishen@gmail.com; * **Corresponding author,** E-mail: luwenjing@tsinghua.edu.cn

分填埋场产生的 LFG 普遍采取自然排放的方式,而目前已开展 LFG 回收项目的大型填埋场也普遍存在气体收集率低的问题,收集率仅约 55% ~ 75% (赵玉杰等, 2007; 张相锋等, 2006). 此外,填埋场封场后 CH_4 产生强度降低,主动收集系统效率降低,一旦系统停运后剩余 LFG 就会在填埋层内积聚,从而逐渐释放至大气中(蒋满元等, 2006).

20 世纪末,国内外学者提出强化利用填埋场最终覆盖层土壤的 CH_4 氧化能力是实现控制 CH_4 释放的一种经济、高效的手段(Whalen *et al.*, 1990; Pascal *et al.*, 1996; Andrea *et al.*, 1997). 研究表明,在 LFG 收集系统停止运行后,布设生物覆盖层的填埋场比传统填埋场的 CH_4 排放量减少 91.1% 以上(Barlaz *et al.*, 2004). 同时,很多学者尝试通过改善覆盖层材料来提升 CH_4 的氧化效果,结果发现,孔隙率大、导气性好的材料是更适于用作进行 CH_4 氧化的生物覆盖层载体(Alex *et al.*, 2003; Gebert *et al.*, 2006; Ingvar *et al.*, 2000). 然而, O_2 供给是覆盖层氧化 CH_4 技术的瓶颈,若 O_2 供给仅依赖空气扩散,则 CH_4 氧化只发生在覆盖层 20 ~ 30 cm 处,在气压降低或降雨量大的情况下,含氧层会进一步变浅从而限制覆盖层氧化 CH_4 的有效作用面(Berger *et al.*, 2005). 因此,扩大覆盖层的含氧区域是显著提高其 CH_4 氧化能力的关键(Kammann *et al.*, 2001; Suman *et al.*, 2006).

基于此,本研究根据空气热力学原理提出一种呼吸型填埋场覆盖层技术,利用垃圾堆体和外界环境的温差,通过管路向覆盖层内通入空气,从而实现热动力自充氧. 同时,通过模拟自充氧覆盖层实验及优化设计,在不增加能耗的前提下力求提高覆盖层内的 O_2 分布状况,以期为填埋场 CH_4 减排技术提供技术参考.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 实验装置

在实验室建立模拟自充氧覆盖层和传统覆盖层对照实验,装置如图 1 所示. A、B 两实验柱为有机玻璃柱,顶部敞开,直径均为 40 cm. 其中, A 柱为模拟自充氧覆盖层实验柱, B 柱为模拟传统覆盖层对照实验柱. 两柱内分别装填高为 40 cm 的覆盖层材料,覆盖层材料中部均布设有 4 cm 厚的碎石层. A 柱碎石层下方连接直径 50 mm、长 1.2 m 的竖直导气管路. 导气管路伸出柱底部分的长度为 1 m,外围

设置铁丝网,并均匀包裹加热电阻,铁丝网内安装温度探头. 电阻和探头均通过导线连接温度控制器,用于调节导气管路外部环境温度以模拟填埋场内垃圾的降解产热. 管路侧壁(距离 A 柱底部 20 cm) 通过胶塞密封连接热线式风速仪传感器,监测热动力作用下的气体流速;管路底部通过变径三通密封连接两段直径 63 mm、长 0.5 m 的进气管路. 实验中所有管路材料均为 PVC 材质,实验尺寸则根据工程应用和实验规模而定.

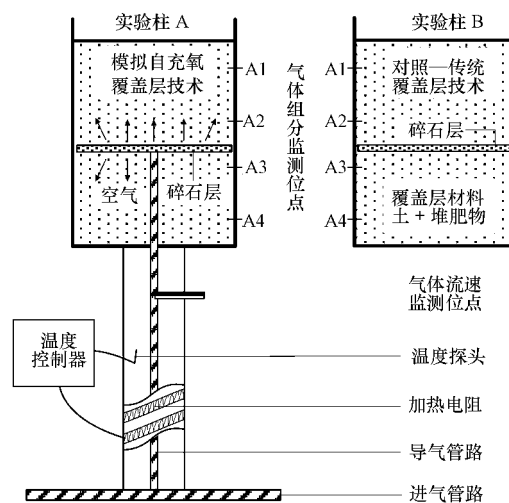


图 1 模拟自充氧覆盖层和传统覆盖层装置

Fig. 1 Set-up of simulated oxygen self-filling biocover and traditional biocover

2.2 填埋层材料

两柱内的覆盖层材料为填埋场日覆盖土与园林废物的均匀混合物(质量比为 7:3). 填埋场日覆盖土取自北京北神树垃圾填埋场,园林废物取自清华大学园林科,混合前破碎至平均粒径约 2 cm. 混合均匀后所得的覆盖层材料的含水率为 25% ~ 27%,有机质含量为 40% ~ 43%.

2.3 自充氧装置热动力学实验

2.3.1 自充氧装置内空气流速与温差关系 该部分实验主要是通过温度控制器调节 A 柱导气管路内外部温差,研究各温差下的气体流速变化特征. 实验时室内温度为 $(8.0 \pm 0.5)^\circ\text{C}$, 温度控制器的绝对温度设定范围为 20 ~ 60 $^\circ\text{C}$, 即 A 柱内外温差范围设计为 12 ~ 52 $^\circ\text{C}$, 该温度范围与垃圾填埋场内有机质自然降解产热导致的温度变化范围相当. 每次设定温度后的稳定时间不少于 30 min, 待温度和气流稳定后测定 A 柱导气管路内的流速, 每组数据重复测定 3 次.

2.3.2 自充氧覆盖层内气体分布特征 为了研究自充氧覆盖层内气体(O_2 和 CO_2 含量)的动态变化特征,同时运行 A、B 两套模拟填埋层实验柱. 根据常规填埋场的基本情况,将 A 柱导气管路外部绝对温度设定为(50.0 ± 0.1) $^{\circ}C$,室内环境温度保持在(15.0 ± 0.5) $^{\circ}C$,即温差设计为 35 $^{\circ}C$. A、B 两实验柱在侧壁各设置 4 个直径为 10 mm 的侧孔,均用胶塞密封,从上至下依次编号 1~4,侧孔中心距填充物上表面依次为 5、15、25 和 35 cm. 每日两次从各侧孔使用 1 mL 注射器取样监测其中 O_2 和 CO_2 的含量,该实验周期共持续 20 d.

2.3.3 自充氧覆盖层进气装置优化 通过改变 A 柱中导气管路的长度和进气管路的面积,研究热动力作用下空气流速的变化,从而对自充氧技术进行优化,并对其实际应用提出合理建议. 实验期间室内温度变化范围为 15~20 $^{\circ}C$,A 柱导气管路外部温度设定变化范围为 25~55 $^{\circ}C$.

首先固定进气管路工况如 2.1 节中所述,通过使用密封直通管将 A 柱外部导气管路的长度从 1.0 m 依次变化至 1.5、2.0 和 2.5 m,测定不同温差下管内空气流速. 此后将外部导气管路长度恢复至 1.0 m,改变底部进气管路面积,同法测定空气流速随温差变化情况. 本研究使用的进气管路基本结构如图 2 所示,中间为 DN75~50(外径 75 mm 转 50 mm)的变径直通,上部与导气管路密封连接,下部使用密封盖封闭,周圈焊接 4 根相同的 DN63(外径 63 mm)进气管路,每根均配备有密封盖,由此可实现 4 种进气管路面积,其中,2 根管路进气时有 90 $^{\circ}$ 和 180 $^{\circ}$ (即为模拟覆盖层气体组分研究中实验柱 A 的进气管路)之分,本部分研究将其视为两种情况.

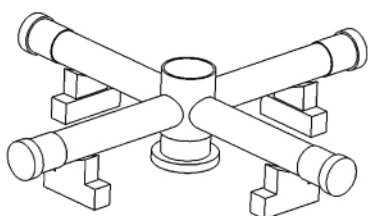


图 2 自充氧装置优化研究中的进气管路结构

Fig. 2 Structure of inlet pipes in the optimization of oxygen self-filling technology

2.4 监测方法

实验所用温度探头为 PT100 型(北京君威,分辨率 0.1 $^{\circ}C$),温度控制器为 XMT122 型(浙江余姚,分辨率 0.1 $^{\circ}C$),风速均采用 KA22 热敏式风速

仪测定(日本家野,精度 0.1 $m \cdot s^{-1}$). 覆盖层间气体组分(O_2 和 CO_2)采用 SP2100 气相色谱(北京瑞达)测定,具体参数为: H_2 作为载气,流速 30 $mL \cdot min^{-1}$; TDX 填充柱,柱箱温度 120 $^{\circ}C$; TCD 检测器,温度 160 $^{\circ}C$.

3 结果与讨论(Results and discussion)

3.1 空气流速变化特征

温度升高时气体内能增加,从而引起压强和体积的改变,当气体密度发生改变后在压强差的作用下会形成运动气流,即温差是主要驱动力. 因此,本研究结果均以温差表示. A 柱导气管路内空气流速随温差变化如图 3 所示. 由图 3 可知,初期温差较小,管路内部空气的能量变化主要用于克服自身的粘滞阻力及与管壁间的摩擦阻力. 当温差达到 20 $^{\circ}C$ 时可监测到管内空气流速为 0.04 $m \cdot s^{-1}$,此后随温差升高管内空气流速线性增加,当温差达到 52 $^{\circ}C$ 时管内空气流速为 0.93 $m \cdot s^{-1}$,此时导气管路外的温度设定值为 60 $^{\circ}C$,考虑到填埋场实际情况及管路材料耐热性,实验终止.

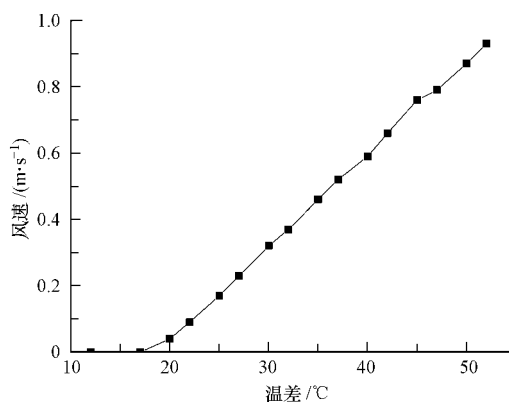


图 3 A 柱中导气管路内空气流速随温差变化

Fig. 3 Relationship between air velocity and temperature discrepancy in column A

从图 3 可以看出,在温差超过 20 $^{\circ}C$ 后管内空气流速与温差呈现出很好的线性递增关系,对其拟合可得到式(1).

$$v = 0.0281\Delta T - 0.5258 \quad R^2 = 0.999 \quad (1)$$

式中, v 为导气管路内空气流速($m \cdot s^{-1}$), ΔT 为该工况下管内外温差($^{\circ}C$)

根据式(1),可计算某一温差(ΔT)下导气管路内最大空气流速,从而得到通入 A 柱内的空气流量. 由于本研究中所测得的风速为管路中心点风速(风速仪传感器设置在导气管路的中心线上),根据

流体力学的基本原理,长圆直管中心流体速度是断面平均流速的 2 倍,因此,可得到式(2)。

$$q = 0.5Sv = 0.125\pi D^2v \quad (2)$$

式中, q 为进入 A 柱内的空气流量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), S 为导气管路内断面的面积(m^2), D 为导气管路直径(m)。因此,可计算得到相应温差下进入覆盖层的空气量。

3.2 气体组分动态变化特征

本部分研究持续 20 d,每日监测 A、B 柱各层气体组分含量,由于 CH_4 的含量在实验期间始终在检出限以下,因此没有在图中体现。图 4 分别为 O_2 和 CO_2 含量随时间的变化结果。由于本实验研究条件与垃圾的厌氧降解环境相差较大,覆盖层材料中含有的部分有机质以好氧降解过程为主,因此仅有 CO_2 产生。

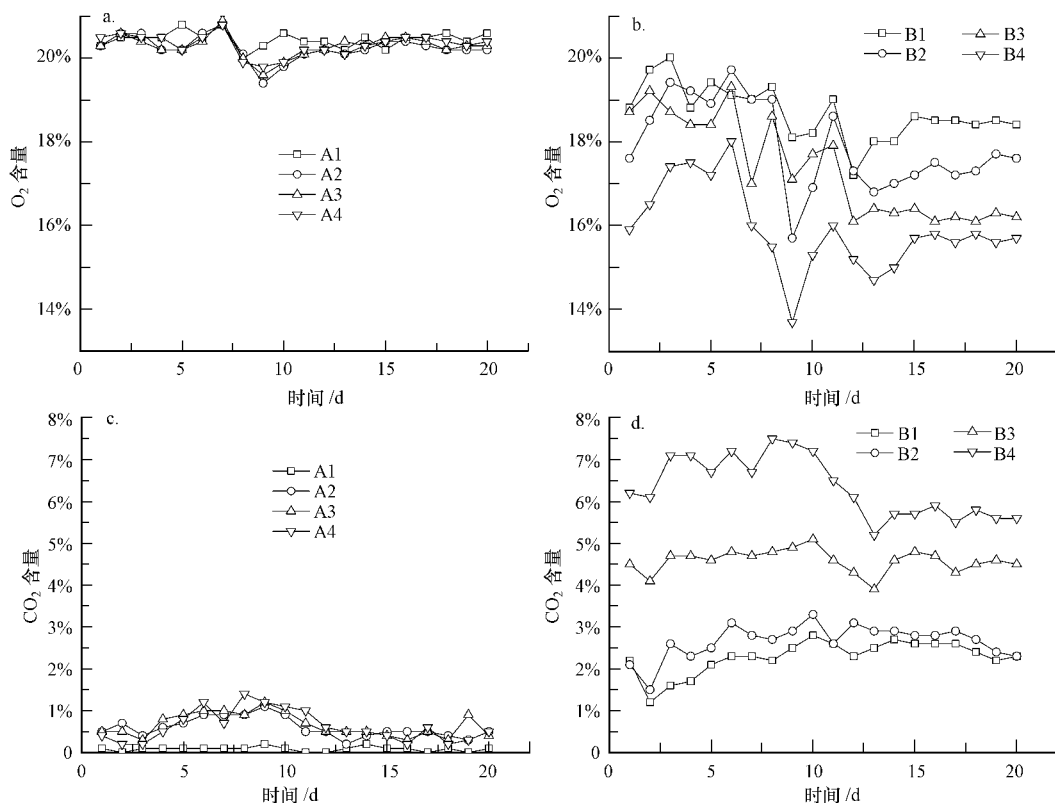


图 4 A、B 柱各层 O_2 和 CO_2 含量随时间变化

Fig. 4 Variation of O_2 and CO_2 contents in different layers of column A and B

两柱的监测结果显示,在实验进行的前两周各层气体含量波动较大,主要是由于覆盖层材料中的有机质在该时间段内发生好氧降解,A 柱中自充氧装置向覆盖层内传输的空气和 B 柱中外界扩散进入覆盖层中的空气都与有机质降解产生的 CO_2 进行动态混合,但由于 B 柱中通过扩散进入的 O_2 和有机质降解产生 CO_2 在量级方面比较接近,因此,气体含量的监测结果波动性较大。后 5 d 有机质的降解过程基本结束,各层气体含量也相应趋于平稳,实验因此终止。

整个监测过程中 A 柱各层气体组分含量相差不大,图 4a 和 4b 显示其 O_2 含量明显高于 B 柱,而图 4c 和 4d 中对应的 CO_2 监测结果正好相反,由此

说明模拟自充氧覆盖层与传统覆盖层相比,其内部气体组成结构明显不同。A 柱覆盖层中各层 O_2 平均含量在 20% 以上,B 柱覆盖层中 O_2 依靠表面空气扩散,含量随覆盖层厚度的增加而降低,监测得到的 O_2 平均含量由 15% 至 20% 不等,B4 监测点得到的 O_2 平均含量最低,只有 15.7%,而自充氧覆盖层对应位置 A4 的 O_2 平均含量为 20.3%,与靠近表层监测点 A1 得到的 O_2 平均含量 20.6% 较为接近。 CO_2 监测结果同样验证了其有效性,A 柱中各层 CO_2 含量始终保持较低水平,均在 1% 以下,B 柱各层 CO_2 含量变化较大,且随覆盖层厚度的增加而增加。B4 监测点得到的 CO_2 平均含量最高为 6.2%。而自充氧覆盖层对应位置 A4 的 CO_2 平均含量仅为 0.6%。

上述研究结果表明自充氧装置有效地增加了覆盖层中的 O_2 含量与扩散区域, 实现了克服传统覆盖层技术中含氧层浅的瓶颈。

3.3 自充氧装置优化

本部分研究在上述实验基础上改变导气管路

的长度和进气管路的面积, 采取同样方法监测热动力作用下的空气流速, 以获得自充氧技术在实际应用中的合理预测。图 5 为不同导气管路长度及不同进气管路面积下空气流速随温差的变化。

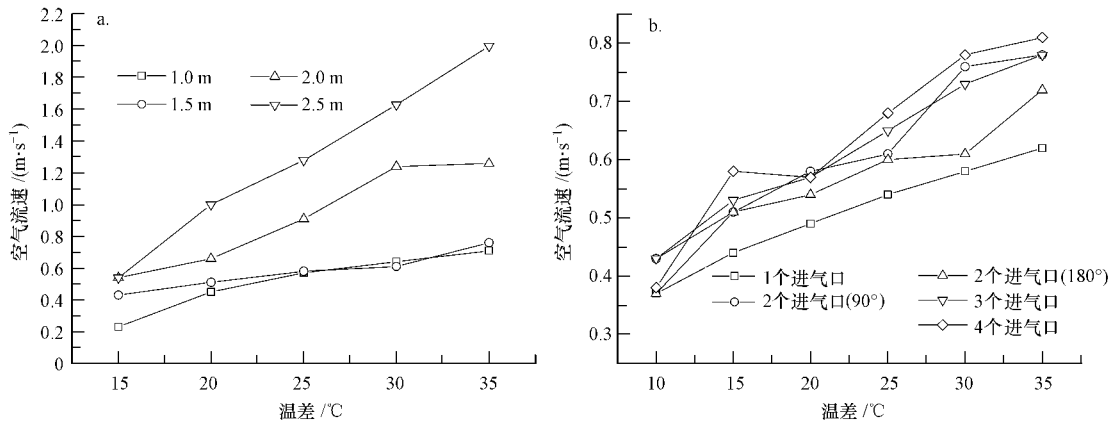


图 5 不同优化工况下导气管路内空气流速随温差变化 (a. 不同导气管路长度; b. 不同进气管路面积)
Fig. 5 Variation of air velocity at different optimization modes (a. different pipe length; b. different pipe sectional area)

从图 5a 可以看出, 不同导气管路长度下空气流速均随温差线性递增, 但从各条曲线的分布情况来看, 随导气管路长度的增加, 空气流速随温差递增的趋势更为明显, 2.0 m 与 2.5 m 的导气管路中空气流速在温差 15 $^{\circ}C$ 时相同, 均为 $0.54 m \cdot s^{-1}$, 但当温差达到 35 $^{\circ}C$ 时前者的空气流速为 $1.26 m \cdot s^{-1}$, 后者的空气流速为 $2.0 m \cdot s^{-1}$, 已经达到二级风 ($1.6 \sim 3.3 m \cdot s^{-1}$) 的风速范围, 同时也为本研究中获得的最大空气流速。2.5 m 导气管路中气体流速随温差的平均增加比例为 $0.07 m \cdot s^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$, 明显高于式 (1) 中的比例系数 0.0281。由于实验条件所限没有继续增加导气管路长度。在实际填埋场中, 垃圾填埋高度通常在 10 m 以上, 由此可估计自充氧技术在实际应用中能达到更好的效果, 后文的计算将予以定性证明。

从图 5b 可以看出, 同时使用 4 根进气管路, 即进气面积最大的情况下, 导气管路内空气流速在大部分温差条件下保持最高水平, 但与使用 3 根进气管路及 2 根管路 90 $^{\circ}$ 方式进气相比优势并不明显, 而温差在 25 ~ 35 $^{\circ}C$ 范围内明显优于 2 根管路 180 $^{\circ}$ 进气, 即在模拟覆盖层气体组分的研究中所使用的进气管路工况条件。只使用 1 根进气管路时空气流速在全部温差条件下都是最低水平。考虑到工程经济的合理性, 建议在实际应用中使用较大口径的管材作为进气管路, 数量不超过 2 根, 垂直布设优于水

平布设。

热动力自充氧技术中涉及到的空气为理想绝热物体, 即温度仅引起物理参数改变, 计算中满足开口系统稳态稳流能量方程, 具体如式 (3) 所示。

$$Q = m \left(h_2 + \frac{v_2^2}{2} + g z_2 \right) - m \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2} + g z_1 \right) + W_s \quad (3)$$

式中, W_s 为轴功 (J), 表征系统通过机械轴向外界传递的热量, 本研究中取值为 0; Q 为热量 (J), 表征系统与外界交换热量, 系统吸收热量为正, 释放热量为负; m 为质量 (kg), 表征系统中研究对象 (运动空气) 的质量; h 为焓 ($J \cdot kg^{-1}$), 表征系统中研究对象 (运动空气) 的内能, 用 $C_p \Delta T$ 计算; v 为速度 ($m \cdot s^{-1}$), 表征系统中研究对象 (运动空气) 运动速度, 竖直向上为正; z 为高度 (m), 表征系统中研究对象 (运动空气) 的相对高度, 且需指定基准面; g 为重力加速度, 常用值为 $9.8 N \cdot kg^{-1}$; C_p 为恒压热容 ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), 是指单位质量物质在恒定压力下温度升高 1 K 所需热量; 下角标 1 和 2 分别表征系统中研究对象 (运动空气) 的初始状态和结束状态。

由于研究在室内进行, 可假设外界空气流速为 0, 则将式 (3) 在如下条件进行简化 (胡洪营等, 2005)。

(1) 对于刚刚进入导气管路的空气, 流速从 0 增大到 $v_{内}$ (竖直导气管路内部的空气流速), 并且在

Q 与 ΔT 一定的条件下, $v_{\text{内}}$ 是定值, 即:

$$\frac{Q}{m} = C_p \Delta T + \frac{v_{\text{内}}^2}{2} \quad (4)$$

(2) 若 ΔT 稳定于某一数值, 则导气管路内的空气流速同样将稳定于 $v_{\text{内}}$ 水平, 空气流动过程中吸收的能量用于克服粘滞与摩擦阻力, 即:

$$\frac{Q}{m} = g(z_2 - z_1) \quad (5)$$

(3) 当热动力作用下导气管路内的空气运动至覆盖层时, 温度降低值仍为 ΔT , 该部分空气的流速将进一步提高至 $v_{\text{外}}$ (覆盖层内的空气流速), 即:

$$v_{\text{外}}^2 = v_{\text{内}}^2 + 2C_p \Delta T \quad (6)$$

上述分析表明, 若导气管路足够长且 ΔT 稳定于某一数值时, 热动力作用下空气从外界进入导气管路最后进入覆盖层的过程中其流速变化过程为增加、稳定、再增加。可以认为本研究中导气管路的长度仍在空气流速提升的范围内。因此, 可推断实际应用中导气管路内空气流速将进一步得到提升, 自充氧效果也将明显增加。

4 结论 (Conclusions)

根据空气热力学原理提出的呼吸型覆盖层技术——热动力自充氧技术在改善覆盖层内气体组成结构方面非常有效, 40 cm 厚的自充氧覆盖层内各层 O_2 含量始终大于 20%, CO_2 含量小于 1%, 而对照覆盖层内最低 O_2 含量为 15.7%, 最高 CO_2 含量则高达 6.2%, 说明自充氧技术有效地改善了覆盖层内 O_2 的分布状况。导气管路内空气流速与温差呈线性关系: $v = 0.0281\Delta T - 0.5258$, 增加导气管路长度和进气管路面积可提升自充氧效果, 所得的导气管路内最大空气流速为 $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (温差 35 °C、导气管长 2.5 m)。基于该技术开发的热动力自充氧装置克服了传统覆盖层技术中含氧层浅的瓶颈, 为填埋场覆盖层控制温室气体排放提供了改进手段和发展方向。

责任作者简介: 陆文静 (1973—), 女, 副研究员, 研究方向: 固体废物处理处置与资源化技术。E-mail: luwenjing@tsinghua.edu.cn.

参考文献 (References):

Alex V, Oswald C. 2003. Simulation model for gas diffusion and methane

oxidation in landfill cover soils [J]. Waste Management, 23(7): 581-591

Andrea W, Karl S, David B. 1997. Oxidation of methane in peat: Kinetics of CH_4 and O_2 removal and the role of plant roots [J]. Soil Biology and Biochemistry, 29(8): 1257-1267

Barlaz A, Green R, Chanton P, et al. 2004. Evaluation of a biologically active cover for mitigation of landfill gas emissions [J]. Environmental Science and Technology, 38(18): 4891-4899

Berger J, Fornes V, Ott C. 2005. Methane oxidation in a landfill cover with capillary barrier [J]. Waste Management, 25(4): 369-373

Gebert J, Gröngroft A. 2006. Performance of a passively vented field-scale biofilter for the microbial oxidation of landfill methane [J]. Waste Management, 26(4): 399-407

胡洪营, 张旭, 黄霞. 2005. 环境工程原理 [M]. 北京: 高等教育出版社. 145-168

Hu H Y, Zhang X, Huang X. 2005. Environmental Engineering [M]. Beijing: Higher Education Press. 145-168 (in Chinese)

Ingvar S, Gunnar B, Anders T. 2000. Methane oxidation and phospholipid fatty acid composition in a podzolic soil profile [J]. Soil Biology and Biochemistry, 32(7): 1025-1028

蒋满元, 唐玉斌. 2006. 垃圾填埋的生态环境问题及治理途径 [J]. 城市问题, 7: 23-29

Jiang M Y, Tang Y B. 2006. Ecological problems and tactics to rubbish landfill [J]. Urban Problems, 7: 23-29 (in Chinese)

Kammann C, Grönhage L, Jäger H J. 2001. Methane fluxes from differentially managed grassland study plots: the important role of CH_4 oxidation in grassland with a high potential for CH_4 production [J]. Environmental Pollution, 115(2): 261-273

Nickolas J T, Priscilla A U. 2007. Methane generation in landfills [J]. Renewable Energy, 32(7): 1243-1257

Pascal B, Oswald V C, Ida V. 1996. Methane emission from a landfill and the methane oxidizing capacity of its covering soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 28(10/11): 1397-1405

Suman M, Alex V, Khaiwal R. 2006. Induction of enhanced methane oxidation in compost: Temperature and moisture response [J]. Waste Management, 26(4): 381-388

Whalen C, Reeburgh S, Sandbeck A. 1990. Rapid methane oxidation in a landfill cover soil [J]. Applied and Environmental Microbiology, 56(11): 3405-3411

张相锋, 肖学智, 何毅, 等. 2006. 垃圾填埋场的甲烷释放及其减排 [J]. 中国沼气, 24(1): 3-5

Zhang X F, Xiao X Z, He Y, et al. 2006. CH_4 emission and its reduction from MSW landfill [J]. China Biogas, 24(1): 3-5 (in Chinese)

赵玉杰, 王伟. 2007. 垃圾填埋场甲烷气的排放及减排措施 [J]. 环境卫生工程, 12(4): 217-219

Zhao Y J, Wang W. 2007. Emission of methane from landfill site and its migration measures [J]. Environmental Sanitation Engineering, 12(4): 217-219 (in Chinese)