

朱勇,牟子申,陆文静,等. 2011. 呼吸型填埋场覆盖层技术研究 II: 呼吸型覆盖层的甲烷氧化性能研究[J]. 环境科学学报, 31(12): 2785-2791
Zhu Y, Mou Z S, Lu W J, et al. 2011. Development of a breathing landfill biocover technique II: Study on the methane oxidation capability [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(12): 2785-2791

呼吸型填埋场覆盖层技术研究 II: 呼吸型覆盖层的甲烷氧化性能研究

朱勇¹, 牟子申¹, 陆文静^{1,*}, 段振菡¹, 龙於洋^{1,2}, 庄原发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: 2011-05-11

摘要: 基于前期研究构建的热动力自充氧装置, 研究了模拟呼吸型自充氧覆盖层(2.4 m × 0.85 m × 3.6 m, 长 × 宽 × 高)对甲烷氧化性能的影响。结果表明, 在垃圾快速降解期内, 40 cm 厚自充氧覆盖层中的 O₂ 含量始终保持在 15% 以上, 释放到外界的填埋气中 CH₄ 含量在检出限以下, 与传统覆盖层技术相比, CH₄ 含量最大可削减 76.5%。通气管路的对比研究进一步表明, 自充氧覆盖层技术克服了传统覆盖层内部 O₂ 不足的瓶颈, 充氧速率的增加在一定程度上有助于 CH₄ 转化。利用热动力改变覆盖层内的气体组成结构, 提高了 O₂ 含量和好氧微生物的活性, 进而增强 CH₄ 转化效果。该技术为中小型填埋场控制温室气体排放提供了新的途径和思路。

关键词: 准好氧填埋; 覆盖层; 自充氧; 甲烷氧化

文章编号: 0253-2468(2011)12-2785-07 中图分类号: X705 文献标识码: A

Development of a breathing landfill biocover technique II: Study on the methane oxidation capability

ZHU Yong¹, MOU Zishen¹, LU Wenjing^{1,*}, DUAN Zhenhan¹, LONG Yuyang^{1,2}, ZHUANG Yuanfa¹, 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 11 May 2011

Abstract: Based on the passive air venting system developed in previous research, an upsealed simulated system (2.4 m × 0.85 m × 3.6 m) combined the breathing biocover with semi-aerobic landfill was constructed. Its effect on methane oxidation capability was investigated. The results showed that the lowest O₂ level kept more than 15% in the whole biocover layer (40 cm) during the fast degradation phase of waste. Correspondingly, CH₄ in the surface area of the biocover layer cannot be detected. Compared to the traditional cover layer, the highest CH₄ concentration can be reduced by 76.5% with the introduction of the breathing biocover. Oxygen supply by thermal motive changed the distribution of CH₄ and CO₂ inside the cover layer. The study verified the hypothesis that methane emission can be reduced by enhancing activity of methanotrophs through supplying sufficient O₂ in the cover layer.

Keywords: semi-aerobic landfill sites; bio-cover; oxygen self-filling; CH₄ oxidation

1 引言(Introduction)

垃圾填埋场填埋气(LFG)中的甲烷(CH₄)是仅次于二氧化碳(CO₂)的重要温室气体,其温室效应潜能却是 CO₂的 21 倍(Nickolas *et al.*, 2007),对全球气候变暖的贡献达 15%。可见,经济有效地削减

垃圾填埋场的 CH₄排放量,对于我国实现温室气体减排和履行清洁发展机制(CDM)具有重要意义。本着可持续发展的原则,亟需选用经济适用、技术可行的 CH₄减排型垃圾填埋方式,以改善现有的温室气体大量无序排放的传统填埋方式。20 世纪 70 年代初,日本福冈大学开发了准好氧填埋工艺,通过

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: 朱勇(1986—),男, E-mail: zhu-y08@mails.tsinghua.edu.cn; * 通讯作者(责任作者), E-mail: luwenjing@tsinghua.edu.cn

Biography: ZHU Yong(1986—), male, E-mail: zhu-y08@mails.tsinghua.edu.cn; * Corresponding author, E-mail: luwenjing@tsinghua.edu.cn

渗滤液导排管的不满流设计,利用填埋堆体外外的温度差使空气自然通入,使填埋场内部存在一定的好氧区域,从而加快垃圾降解,提高渗滤液水质和改善 LFG 质量.由于该技术在一定程度上解决了渗滤液和 LFG 的收集处理问题,目前正逐步得到推广(旦增等,2006;苏俊等,2005).

长期以来,针对填埋场封场后 LFG 收集效率降低甚至失效的现状,基于终场覆盖层作为大气中氧气与 LFG 的动态混合区域,研究人员认为强化利用终场覆盖层的 CH_4 生物转化能力是实现其最终排放的一种经济、高效的手段(Boeckx *et al.*, 1996; Chong *et al.*, 2005; Yedla *et al.*, 2002; Hegde *et al.*, 2003; Chen *et al.*, 2008).由于覆盖层中的 O_2 含量是甲烷氧化菌等好氧微生物活性的重要限制因素,为了提高空气在覆盖层中的渗透能力,针对覆盖层土壤类型、环境条件、材料尺寸等的优化开展了大量研究(Einola *et al.*, 2008; Berger *et al.*, 2005; Mahieu *et al.*, 2008; Stern *et al.*, 2007).目前,文献报道的覆盖层最大 CH_4 转化深度为 30 cm(何品晶等,2007),难以突破 O_2 自然扩散的深度限制, CH_4 转化效果也因此受到抑制.

本研究结合准好氧填埋工艺和覆盖层的 CH_4 转化技术,基于准好氧填埋工艺的热动力自充氧原理,于填埋场覆盖层内设置与渗滤液导排管道相连接的通气管路,自下而上改变覆盖层中的气体组成结构,突破 O_2 自然扩散深度对覆盖层转化 CH_4 的限制,并进一步削减填埋场 CH_4 的排放量,以期为实现垃圾填埋场温室气体的有效减排提供切实可行的填埋作业模式.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 实验装置

如图 1 所示,实验采用模拟准好氧填埋仓(以下简称“填埋仓”),有效尺寸为 $2.4 \text{ m} \times 0.85 \text{ m} \times 3.6 \text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高),由石膏板和轻体砖砌成,并经水泥密封和防渗防腐处理.填埋仓的进料和取样处分别设置双层隔板,中央设有出气风道和应急抽气扇.底部倾斜,外部连接有效容积为 160 L 的渗滤液收集池.填埋仓内部按准好氧填埋工艺进行管路布设,装填模拟垃圾,并组建自充氧覆盖层.填埋仓底部中央设置直径 110 mm、长 2.5 m、材质为 UPVC 的渗滤液导排管,导排管伸出填埋仓并敞开,同时作为渗滤液出水和进气通道.为方便渗滤液导排和外

部空气进入填埋垃圾,导排管周围钻有直径为 5 mm 的小孔,并用石子层覆盖,以避免细小颗粒垃圾堵塞.填埋仓内部距离左右两侧各 0.4 m 处分别布设竖直通气管(竖管),并与导排管连接.其中左侧竖管为直径 110 mm 的 UPVC 管,长 2.2 m,周围钻有直径为 5 mm 的小孔;为考察空气流速对充氧效果的影响,右侧竖管设置为 3 根 UPVC 管通过变径直通密封连接,从下至上直径分别为 110、75 和 50 mm,管长分别为 1.0、0.6 和 0.6 m,周围分别钻有直径为 5、4 和 3 mm 的小孔.两根竖管均包有直径为 300 mm 的石笼,石笼由铁丝网包裹碎石构成.

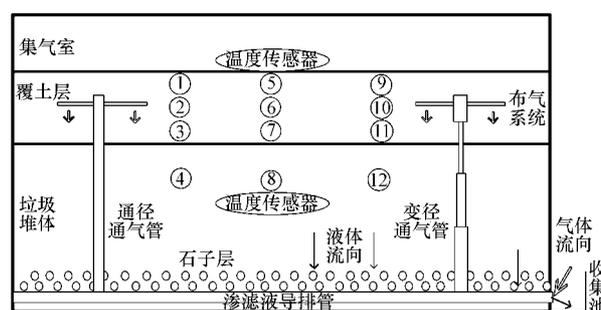


图 1 模拟准好氧填埋仓实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of simulated semi-aerobic landfill column

两根竖管顶端均连接结构相同的布气系统,该布气系统由中央通气管焊接辐射状的通气支管所组成.中央通气管为直径 110 mm、长度 20 cm 的 UPVC 管,直接与竖管连接,末端封闭.中央通气管周围均匀焊接 6 根相通的通气支管,所有通气支管直径和长度均分别为 32 mm 和 30 cm,周围均钻有直径为 2 mm 的小孔,末端封闭.两套布气系统周围均使用石笼包裹.

2.2 模拟垃圾

填埋仓内装填模拟垃圾,有效装填体积约为 5 m^3 ($2.4 \text{ m} \times 0.85 \text{ m} \times 2 \text{ m}$).模拟垃圾各组分及含水率如表 1 所示.

表 1 模拟垃圾的主要组分质量分数及含水率

Table 1 Components and moisture content of simulated waste

成分	质量分数	含水率
粘土	30%	12% ~ 15%
干草	2% ~ 3%	1% ~ 2%
树枝	2% ~ 3%	2% ~ 3%
塑料	5% ~ 6%	< 1%
纸板	7% ~ 8%	< 1%
木竹	2% ~ 3%	2% ~ 3%
厨余	50%	65% ~ 70%

粘土、干草和树枝组分取自绿化带,塑料、纸板和木竹组分取自废品站,厨余垃圾组分则取自清华大学食堂泔脚。所有垃圾组分破碎至平均粒径小于 5 cm,混合均匀后装填入填埋仓内。模拟垃圾装填完毕后,于顶层装填覆盖层,总装填体积约为 1 m^3 ($2.4 \text{ m} \times 0.85 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$)。覆盖层上方剩余空间为集气室,与外界空气环境通过排气口连通。覆盖层用土取自生活垃圾处理场日覆盖层用土。

2.3 分析方法

如图 1 所示,分别在垃圾堆体内部和覆盖层上表面设置温度传感器,监测实验过程中垃圾内部及覆盖层和外界气体的温度,每天测定 1 次。

在垃圾堆体和覆盖层中 12 个点位设置气体监测点,具体设置为:监测点分 3 列 4 排设置,1~4 号距离左侧竖管的距离为 40 cm,5~8 号位于实验装置中间,9~12 号距离右侧变径竖管的距离为 40 cm。1、5、9 号所在平面距离覆盖层上表面 10 cm,2、6、10 号所在平面距离覆盖层上表面 25 cm,3、7、11 号所在平面为覆盖层与填埋垃圾的接触面,4、8、12 号在填埋垃圾内部,距离覆盖层上表面 1.4 m。所有监测点位均设置延伸至堆体外的导气管,导气管末端用乳胶塞封闭,仅在气体监测时开启。采用 Biogas Check (Geotechnical Instruments) 气体分析仪分别监测各点位气体中的 O_2 、 CH_4 和 CO_2 的含量。

3 结果与讨论 (Results and discussion)

3.1 填埋仓内部温度差异

本实验在 2009 年 2—3 月进行,连续 30 d,在本实验周期内,垃圾填埋堆体基本处于快速降解阶段。室内温度、覆盖层温度和垃圾堆体内部温度随时间变化曲线如图 2 所示。由图 2 可知,前 18 d,垃圾堆体内部温度由 $23 \text{ }^\circ\text{C}$ 持续上升至 $29 \text{ }^\circ\text{C}$,此后温度开始下降,至实验最后 5 d,垃圾堆体温度稳定在 $27.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。总体而言,垃圾堆体内部温度经历着先上升后下降最后趋于平稳的过程,这与垃圾堆体中易降解有机物在填埋初期的降解现象一致,与相关研究报道的结果吻合(张正安等, 2006; 李帆等, 2006)。由于该实验装置的运行监测时间为冬季,外界环境温度较低,因此,该组数据与常规模拟填埋实验中得到的温度数据相比较低。

从室内温度和覆盖层温度随时间变化曲线可以看出,二者趋势基本相同,分别从监测初期的 $5.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $11.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 上升至实验结束时的 $10.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 和

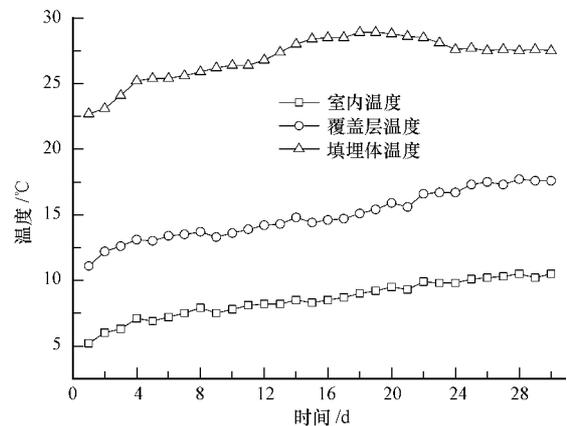


图 2 填埋仓中垃圾内部与覆盖层温度随时间变化

Fig. 2 Variation of temperature in the deposited waste and cover layer of test column

$17.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 。由此说明,覆盖层内并没有引起温度变化的剧烈生化反应发生,其温度的升高是由于 2—3 月外界温度的变化所引起的。

3.2 O_2 含量变化特征

实验期间填埋仓内各气体监测点的 O_2 含量变化情况如图 3 所示。由于 5~8 号点所在断面附近未设置与渗滤液导排管相连接的竖管,覆盖层中也未设置布气系统,因此,该组监测结果反映的是传统厌氧填埋工艺中垃圾堆体内部和覆盖层中的 O_2 分布规律,在本实验研究中该组数据则可作为对照。相比而言,1~4 号点所在断面附近为直径 110 mm 的通气管和与之连接的布气系统,9~12 号点所在断面附近为变径的通气管和与之连接的布气系统,这两个断面分别反映了通气方式对覆盖层及垃圾堆体气体结构的影响。

结果表明,实验期间 5~8 号 O_2 含量分别为 17%~19%、13%~15%、9%~11% 和 2%~4%,这主要是由于该断面 O_2 来源完全依靠于空气的自然扩散,随着覆盖层埋深增加,空气扩散能力逐渐降低, O_2 含量相应逐渐减少。值得注意的是,8 号点(处于填埋垃圾层)的 O_2 含量在实验运行期间一直维持在 2%~4%,明显低于 5~7 号点,这表明经过覆盖层的阻滞后,填埋垃圾层基本处于兼氧或厌氧环境,这也是传统垃圾填埋方式的直接结果。

1~4 号点 O_2 含量分别为 20%~21%、19%~20%、16%~18% 和 6%~7%,与 5~8 号点相比,在相同埋深处的 O_2 水平均有所提高,其中 4 号点尤为明显,其氧含量比同深度的 8 号点提高了 2~3 倍。由此可见,布气系统对覆盖层中气体组成结构

有显著的改善,明显增加了覆盖层内的 O_2 含量,有效解决了空气自然扩散对覆盖层内 O_2 含量的限制问题,而随着覆盖层的气体结构改善和含氧量提高,紧挨着覆盖层的垃圾层中的氧含量相应有所改

善,这也意味着设置布气系统的准好氧填埋工艺同样可以有效改善填埋垃圾堆体内部的气体组成结构,对于削减 LFG 大有裨益。

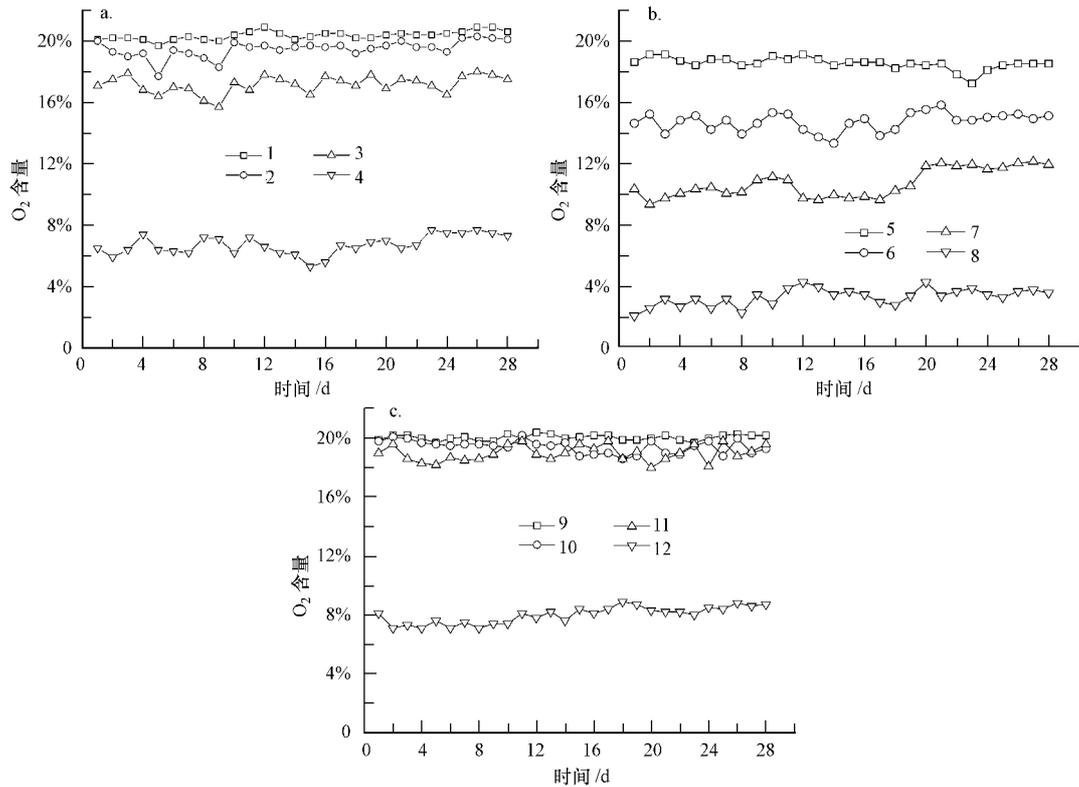


图3 填埋仓实验装置中 O_2 含量变化

Fig. 3 Variation of O_2 contents in column

实验期间,9~12号点 O_2 含量分别为20%~21%、19%~20%、18%~19%和7%~8%,再次验证了布气系统的引入对覆盖层和垃圾层氧含量的提高作用.此外,与1~4号点相比,9~12号点的 O_2 含量进一步得到提高.由此可见,变径通风管的布气系统可以更好地改善覆盖层中 O_2 不足的情况,更有利于发挥准好氧填埋工艺的优势.这主要因为变径通风管可以提升在热动力作用下的空气流动速度,虽然流速的提升可能会引起能量损失,但流速增大同样有利于空气进入填埋垃圾堆体和覆盖层.因此,依靠热动力传输的空气在与 LFG 混合过程中,初始动能的增加提升了其占据介质中多孔环境的几率,这为准好氧填埋工艺提供了新的思路.

相比于传统准好氧填埋工艺中通气管管口敞开并伸出垃圾堆体及覆盖层表面的情况,本研究中通气管上端封闭,侧面连接周圈开孔的布气系统.当垃圾降解产热与外界环境形成温差时,管内空气

在热动力作用下自然流动,由于渗滤液导排管道为外界空气进入的通道,而垃圾堆体和覆盖层中的多孔结构为空气的流出通路,从而在垃圾堆体和覆盖层中均形成 O_2 与 LFG 的动态混合区域,明显改善覆盖层中的气体组成结构,这也使得覆盖层中空气来源仅依靠于表面自然扩散的现象得到彻底改善.

3.3 CH_4 含量变化特征

实验期间填埋仓内各气体监测点的 CH_4 含量变化情况如图4所示.实验期间5~8号点的 CH_4 含量分别为1%~2%、5%~6%、8%~9%和11%~12%.随着覆盖层深度的增加, CH_4 含量亦逐步增加,这主要由于 LFG 在经过覆盖层向上迁移时与外界空气动态混合引起了覆盖层中气体组成结构的变化,也与图3中5~8号点的 O_2 含量监测结果吻合.相比而言,在通气管和布气系统附近监测到的 CH_4 含量结果差别明显,从4号点和12号点的监测数据来看,在实验运行阶段 CH_4 含量分别为6%~

7%和5%~6%,明显低于8号点,尤其是位于变径通气管附近的12号点,这也与图3中12号点的 O_2

监测数据略高于4号点的监测数据的实验结果相符.

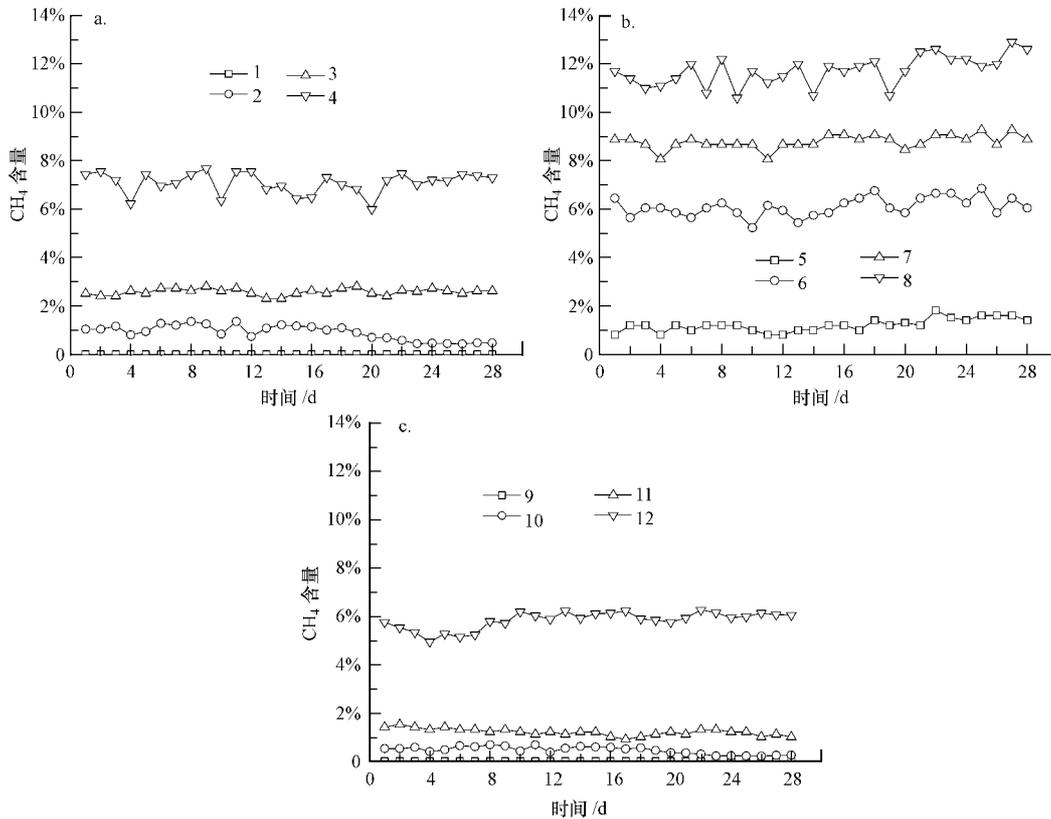


图4 模拟填埋仓实验装置中 CH_4 含量变化

Fig. 4 Variation of CH_4 contents in column

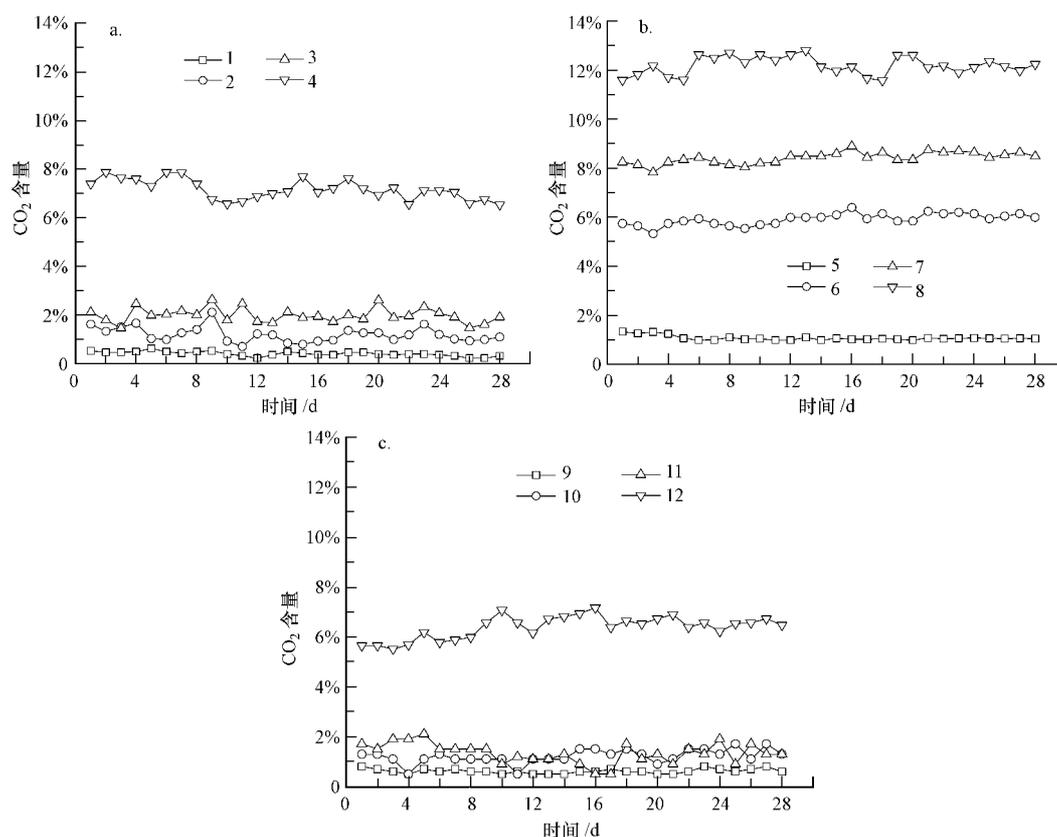
3号和11号点监测得到的 CH_4 含量分别为2%~3%和1%~2%,由于这两个监测点所处层面为填埋垃圾堆体层的接触面,因此,其监测数据反映了进入自充氧覆盖层中的混合气体的组成结构,与7号点的监测数据相比 CH_4 含量已明显降低,削减量达76.5%.由此也说明了该工艺首先降低了 CH_4 及LFG进入覆盖层的初始含量.另外2号和10号点监测得到的 CH_4 含量始终在1%上下波动,图3中相同位置的 O_2 含量范围始终在19%上下波动,由此说明该处覆盖层内的好氧微生物不再受客观条件的限制,气体组成结构中的 CH_4 含量明显减少.1号和9号点在实验运行阶段几乎没有监测到 CH_4 ,说明LFG经过自充氧覆盖层进入外界空气前已被完全转化.

可见,在没有布气系统的覆盖层中,仅依靠外界空气自然扩散难以实现供氧充足,导致 CH_4 的微生物转化受限,对于填埋场LFG中 CH_4 的削减效果

不理想.在设置有布气系统的覆盖层中,由于在热动力作用下充入了外界空气,覆盖层含氧量的提高能明显降低LFG中的 CH_4 ,充分证明了该工艺在削减填埋场排放 CH_4 的有效性,而变径通气管布气方式则能进一步降低LFG中的 CH_4 .

3.4 CO_2 含量变化特征

实验期间填埋仓内各气体监测点的 CO_2 含量变化情况如图5所示.由图5可知,实验期间5~7号点 CO_2 含量分别为1%~2%、5%~6%和8%~9%,与各点 CH_4 含量接近,呈现出在覆盖层内逐渐上升的过程中 CO_2 含量逐渐降低的规律;8号点 CO_2 含量同样与 CH_4 接近,始终保持在11%~12%,符合传统填埋工艺中垃圾厌氧降解产气的普遍规律,但由于 O_2 含量的限制,好氧微生物活动受到抑制,因此,气体迁移过程中 CH_4 与 CO_2 的相对比例没有明显变化.

图5 模拟填埋仓实验装置中 CO₂ 含量变化Fig. 5 Variation of CO₂ contents in column

4 号和 12 号点的 CO₂ 含量分别为 6% ~ 7% 和 5% ~ 6% , 与这两点的 CH₄ 含量接近但略高, 可以认为通气管向填埋垃圾堆体内部传输的空气不仅引起了物理变化, 即除气体组成结构有所变化之外, 还促进了好氧微生物的活动, 使部分 CH₄ 转化为 CO₂. 在这两个因素的作用下 LFG 的体积分数与传统厌氧填埋工艺中对应位置相比有所降低. 另外, 1 ~ 3 号和 9 ~ 11 号点的 CO₂ 含量均为 0 ~ 3% , 与 CH₄ 不同的是, CO₂ 在通过自充氧覆盖层进入外界空气的过程中并没有被转化, 且各点的 CO₂ 含量均高于 CH₄ 含量, 尤其是 1 号和 9 号点的 CO₂ 含量平均值分别为 0.41% 和 0.63% , 而对应位置没有监测到 CH₄ , 由此可以证明自充氧覆盖层中的好氧微生物有效地将 CH₄ 转化成了 CO₂.

根据图 4 所示 1 号和 9 号点的监测结果, 可以认为该实验研究中进入自充氧覆盖层的 CH₄ 量不高于微生物在本实验装置运行条件中表现出的 CH₄ 转化能力. 2 号和 3 号点的 CO₂ 含量平均值分别为 1.19% 和 1.98% , 9 号和 10 号点的 CO₂ 含量平均值分别为 0.63% 和 1.22% , 由于变径通气管连接的布

气系统周围 O₂ 更为充足, 且进入覆盖层的 CH₄ 含量较小, 因此, 该结果符合客观规律. 另一方面, 由于 3 号和 11 号点的 CH₄ 含量均高于 CO₂ 含量, 由此证明本实验装置中在自充氧覆盖层埋深 40 cm 处, 好氧微生物同样有效地将部分 CH₄ 转化成了 CO₂, 外界空气的扩散深度已不再是微生物活动的限制因素, 即该技术有效地克服了传统覆盖层内部 O₂ 不足导致 CH₄ 转化受限的瓶颈.

4 结论(Conclusions)

本研究利用填埋堆体与空气环境的温差作为热动力构建了自充氧覆盖层, 实现了向覆盖层内无动力传输空气, 有效改善了传统覆盖层中 O₂ 扩散深度有限的问题, 提高了好氧微生物的活性, 进而促进了 LFG 中 CH₄ 的转化效果, 使 CH₄ 削减量最高可达 76.5%. 在实验运行阶段 40 cm 的自充氧覆盖层中最低 O₂ 含量始终保持在 15% 以上, 进入外界空气的 CH₄ 含量在检出限以下, 有效地实现了 LFG 的温室气体减排. 另一方面, 变径通气管可提升充氧速率, 使自充氧覆盖层技术的优势得以进一步体现.

该技术为我国中小型城市控制填埋场温室气体产生提供了一种切实可行的作业模式。

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)

- Abichou T, Chanton J, Powelson D. 2006. Methane flux and oxidation at two types of intermediate landfill covers[J]. *Waste Management*, 26(11): 1305-1312
- Berger J, Fornes L V, Ott C. 2005. Methane oxidation in a landfill cover with capillary barrier[J]. *Waste Management*, 25(4): 369-373
- Boeckx P, Van Cleemput O, Villaralvo I. 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
- Chen I C, Ullas H, Chang C H. 2008. Methane and carbon dioxide emissions from closed landfill in Taiwan[J]. *Chemosphere*, 70(8): 1484-1491
- Chong T L, Matsufuji Y, Hassan M N. 2005. Implementation of the semi-aerobic landfill system (Fukuoka method) in developing countries: A Malaysia cost analysis [J]. *Waste Management*, 25(7): 702-711
- 旦增,刘咏. 2006. 垃圾准好氧填埋技术的研究进展[J]. *云南环境科学*, 25(2): 24-26
- Dan Z, Liu Y. 2006. Study on the quasi-aerobic sanitary landfill [J]. *Yunnan Environmental Science*, 25(2): 24-26 (in Chinese)
- Einola J K, Karhu A E, Rintala J A. 2008. Mechanically biologically treated municipal solid waste as a support medium for microbial methane oxidation to mitigate landfill greenhouse emissions [J]. *Waste Management*, 28(1): 97-111
- 何品晶,瞿贤,杨琦,等. 2007. 土壤因素对填埋场终场覆盖层甲烷氧化的影响[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 35(6): 755-759
- He P J, Qu X, Yang Q, *et al.* 2007. Effects of soil factors on methane oxidation capacity in landfill cover soil [J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 35(6): 755-759 (in Chinese)
- Hegde U, Chang T C, Yang S S. 2003. Methane and carbon dioxide emissions from Shan-Chu-Ku landfill site in northern Taiwan [J]. *Chemosphere*, 52(8): 1275-1285
- 李帆. 2006. 准好氧填埋场产甲烷特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学. 29-33
- Li F. 2006. Study on the methane production characteristic of semi-aerobic landfill [D]. Yangling: Northwest A&F University. 29-33 (in Chinese)
- Mahieu K, De Visscher A, Vanrolleghem P A. 2008. Modelling of stable isotope fractionation by methane oxidation and diffusion in landfill cover soils [J]. *Waste Management*, 28(9): 1535-1542
- Stern J C, Chanton J, Abichou T, *et al.* 2007. Use of a biologically active cover to reduce landfill methane emissions and enhance methane oxidation [J]. *Waste Management*, 27(9): 1248-1258
- 苏俊,叶小兰,曹利军. 2005. 准好氧填埋技术在城市垃圾处理中的应用[J]. *新疆环境保护*, 27(2): 33-35
- Su J, Ye X L, Cao L J. 2005. Semi-aerobic filling-burying technology applying in urban garbage disposal [J]. *Environmental Protection of Xinjiang*, 27(2): 33-35 (in Chinese)
- Themelis N J, Ulloa P A. 2007. Methane generation in landfills [J]. *Renewable Energy*, 32(7): 1243-1257
- Yedla S, Parikh J K. 2002. Development of a purpose built landfill system for the control of methane emissions from municipal solid waste [J]. *Waste Management*, 22(5): 501-506
- 张正安,黄启飞,屈明,等. 2006. 准好氧填埋结构填埋气的空间变异性研究[J]. *环境科学研究*, 19(5): 32-36
- Zhang Z A, Huang Q F, Qu M, *et al.* 2006. The research on spatial variation of landfill gases in semi-aerobic landfills [J]. *Research of Environmental Sciences*, 19(5): 32-36 (in Chinese)