

杜松, 金晶, 牟子申, 等. 2011. 准好氧填埋工艺中通气管径对垃圾填埋气(LFG)影响研究及空气热力学计算[J]. 环境科学学报, 31(2): 414-419
Du S, Jin J, Mou Z S, et al. 2011. Impact of aeration conduit diameter on production of landfill gas in a semi-aerobic landfill[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(2): 414-419

准好氧填埋工艺中通气管径对垃圾填埋气(LFG)影响研究及空气热力学计算

杜松^{1,3}, 金晶^{1,*}, 牟子申⁴, 王迪², 赵瑞江¹, 崔宝山²

1. 北京永新环保有限公司, 北京 100083
2. 北京国环清华环境工程设计研究院有限公司, 北京 100083
3. 中国矿业大学(北京), 化学与环境工程学院, 北京 100083
4. 清华大学, 环境科学与工程系, 北京 100084

收稿日期: 2010-05-24 修回日期: 2010-07-19 录用日期: 2010-08-09

摘要: 针对我国土地资源有限、垃圾产生量大的特点, 准好氧填埋工艺逐渐成为中小型城市治理固体废物污染的首选技术. 该工艺中, 进入填埋堆体的空气量对垃圾填埋气(LFG)的产生及组分有重要的影响. 为了确定准好氧填埋结构中竖向导气管与渗滤液导排主管直径的合理比例, 在涿州市生活垃圾处理场建立了中试装置进行模拟准好氧填埋试验, 并设置了直径分别为 100、150、200mm 的三种通气管(以下分别表示为 DN100、DN150、DN200)与渗滤液导排管相连接, 连续 10 周监测 LFG 中 O₂、CO₂ 和 CH₄ 的体积分数, 最后用热力学原理对数据进行数学计算和分析. 结果表明, DN100 填埋装置内, LFG 中的 O₂ 无论是最终体积分数还是上升趋势都明显高于其他装置, 在温室气体减排方面, CH₄ 和 CO₂ 也得到了更为有效的抑制. 通过理论计算可知, DN100、DN150 和 DN200 的通气管排出气体量为 2:3:4, 由于进气情况相同, 因此, DN100 的通气管向填埋堆体内部传输空气量最多.

关键词: 准好氧填埋; 通气管径; LFG 减排; 空气热力学计算

文章编号: 0253-2468(2011)02-414-06 中图分类号: X705 文献标识码: A

Impact of aeration conduit diameter on production of landfill gas in a semi-aerobic landfill

DU Song^{1,3}, JIN Jing^{1,*}, MOU Zishen⁴, WANG Di², ZHAO Ruijiang¹, CUI Baoshan²

1. Beijing Novel Environmental Protection Co., LTD., Beijing 100083
2. Beijing Guohuan Tsinghua Environmental Engineering Design & Research Institute, Beijing 100083
3. China University of Mining & Technology, Beijing, School of Chemical & Environmental Engineering, Beijing 100083
4. Tsinghua University, Department of Environmental Science & Engineering, Beijing 100084

Received 24 May 2010; received in revised form 19 July 2010; accepted 9 August 2010

Abstract: Semi-aerobic landfilling is becoming the main technology to solve the solid waste pollution problem in some medium and small cities in China because of land resource limitation and the large amount of garbage. In this technology, the amount of air which enters the landfill site has great impact on the generation and composition of landfill gas (LFG). We set up pilot plants to simulate semi-aerobic landfill technology at the Zhuozhou municipal solid waste landfill site. Three different diameters of aeration conduits, DN100, DN150 and DN200 (100mm, 150mm and 200mm) were connected to the leachate drainage pipe. The concentration of gases in the LFG was monitored for 10 weeks continuously. The results show that the concentration and the tendency of O₂ in LFG coming from the plant with the DN100 aeration conduit are much higher than that from the other two plants. The greenhouse gases CH₄ and CO₂ have been controlled more effectively in this plant. Through aerothermodynamics calculations, we can see the amount of gas coming from the aeration conduits DN100, DN150 and DN200 are in the proportion 2:3:4. Since the amount of gas entering the drainage pipe is of the same level, more air is transported into the landfill from the DN100 aeration conduit than in the other two situations.

Keywords: semi-aerobic landfill; aeration conduit diameter; LFG reduction; aerothermodynamics calculation

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)

Supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2007AA06Z350) and the National Key Technology R&D Program (No. 2006BAC06B05)

作者简介: 杜松(1987—), 男, E-mail: Alex_dusong@126.com; * 通讯作者(责任作者), E-mail: jinjingswu@163.com

Biography: DU Song(1987—), male, E-mail: Alex_dusong@126.com; * **Corresponding author**, E-mail: jinjingswu@163.com

1 引言(Introduction)

面对资源日趋匮乏、生态环境日益恶化的形势,实现人类社会的可持续发展与缓解温室效应的任务迫在眉睫.同时,随着我国城市化进程的加快,垃圾产生量也逐年增大,填埋技术也因此成为处理固体废物的重要手段(杜吴鹏等,2006).面对我国土地资源有限、垃圾有机物含量多的现状,准好氧填埋工艺逐渐在中小型城市得到推广和应用.日本学者在早期的研究中发现(Matsuto *et al.*, 1991; Matsufuji *et al.*, 1993),如果填埋场中供气充分,则废物分解的速度会有所提高,通过增大准好氧填埋结构中好氧区的面积尽管会使 CO_2 产生量多于同等规模的厌氧填埋场,但准好氧填埋场中 CH_4 产生量比厌氧填埋场中的 CH_4 要少.由于同当量 CH_4 的温室效应是 CO_2 的 21 倍(Themelis *et al.*, 2007),因此,准好氧填埋工艺可有效地控制温室效应.

准好氧填埋工艺中,进入填埋堆体的空气量对垃圾填埋气(Landfill Gas, LFG)的产生及组分有重要的影响.因此,本文根据准好氧填埋场自充氧原理,从优化准好氧填埋结构角度出发,对准好氧填埋工艺中通气管径与 LFG 组分之间的关系进行研

究,并通过空气热力学原理对数据进行系统计算和分析.以期得到竖直填埋管与渗滤液倒排主管的最佳管径比例,为优化准好氧填埋工艺及普及准好氧填埋技术提供指导.

2 材料与amp;方法(Materials and methods)

2.1 试验装置

在涿州市生活垃圾处理场建立 3 个同等大小的模拟准好氧填埋实验装置.装置外部主体(3.0m × 2.3m × 4.4m,长 × 宽 × 高)为集装箱,利用水泥进行密封和防渗防腐处理.箱体底部根据填埋场设计规范,使用 HDPE 膜、粘土、碎石、土工布进行铺盖.各装置底部中间渗滤液导排管均为 DN200 圆形塑料倒排盲沟速排龙,两侧向内倾斜 2° 以利于渗滤液外排.3 个装置中间分别使用 DN100、DN150、DN200 圆形塑料倒排盲沟速排龙作为通气管,下端与渗滤液导排管连接,上端伸出垃圾填埋堆体及覆盖土层表面,周围用碎石包裹.模拟试验中采用管径比例有别于实际工程比例,目的是在不影响比较不同高度填埋层的填埋气体浓度变化的同时,较快地得到较明显的浓度变化差异.试验装置基本结构如图 1 所示.

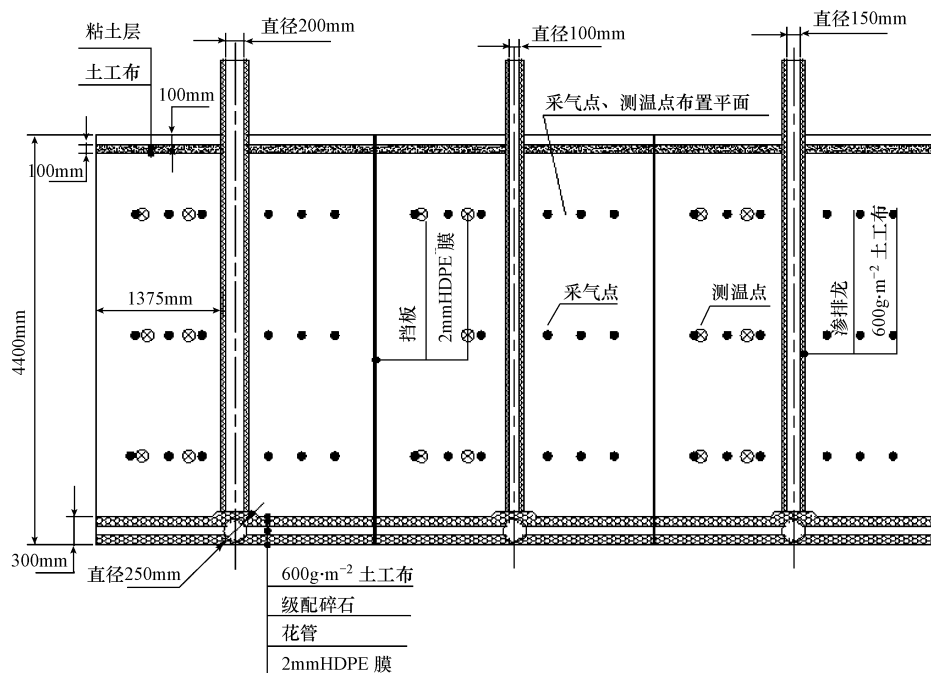


图 1 模拟准好氧试验中试装置结构示意图

Fig. 1 Sketch of the semi-aerobic landfill

2.2 材料组分

装置内填充 24m^3 生活垃圾,填充前经过分拣、

破碎和均匀混合,去除体积大于 0.125m^3 的建筑垃圾和难降解垃圾.选取典型垃圾样品烘干后分类称

重,其基本组分及质量分数见表 1. 混合垃圾样品含水率 43.5%,装填后容重为 $0.741\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$.

表 1 中试所用涿州市生活垃圾成分表

Table 1 Components and physical characteristics of Municipal Solid Waste

纸类	草木	厨余	布类	塑料	金属	砖瓦	灰土	玻璃
2.81%	30.30%	0.50%	3.93%	1.80%	2.55%	8.52%	2.85%	3.21%

2.3 监测方法

如图 1 所示,黑色圆点为气体监测位点,试验装置内均分上中下 3 层布置,每层水平位置距离箱底分别为 1300、2600 和 3900mm. 每层 6 个位点,中心对称分布在导气管两侧. 图 2 为中试装置俯视图,可

见各层气体监测点均在通气管到装置顶点的连线上,距离通气管中心分别为 450、900 和 1350mm. 下文分析中所用数据为同层 6 个位点每周两次的监测平均值. 气体采样点处使用 DN10 的 PVC 管与气体采集装置密封连接.

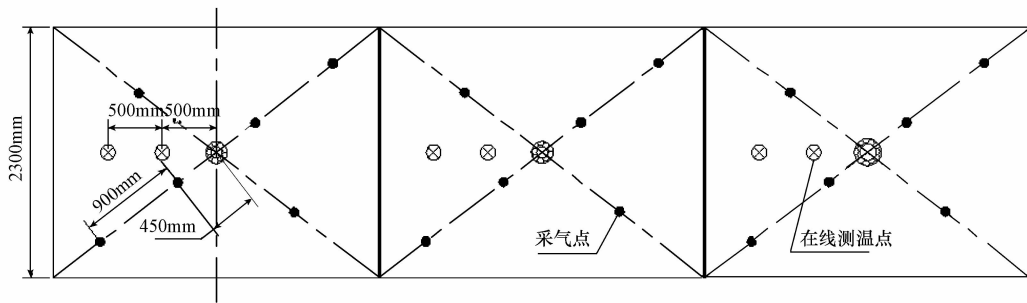


图 2 模拟准好氧试验中试装置俯视图

Fig. 2 Planform of the semi-aerobic landfill

气体监测设备采用 SP2100 气相色谱分析仪,监测时通过气体采集装置自动进气,以 H_2 为载气, TCD 为检测器,对 O_2 、 CO_2 、 CH_4 的体积分数进行监测. 气象色谱与微机相连,使用浙大智大 N2000 色谱工作仪对监测数据进行分析处理并存储. 监测时间通常为每周二和周五各进行 1 次,连续 10 周. 若因天气变化则向后顺延 1d.

3 结果 (Results)

3.1 气体组分监测结果

图 3 为 3 个中试装置下层气体监测点各组分气

体平均体积分数随时间的变化情况. 从图 3 可以看出,在 3 个装置的下层, CH_4 和 CO_2 的初始下降速率和 O_2 的初始上升速率大致相同,前 3 周的监测结果显示,各装置中 LFG 组成情况大致相同. 由于准好氧填埋工艺中,通入下层垃圾中的空气主要来源于渗滤液导排管 (Shimaoka *et al.*, 2000),而本研究中 3 个中试装置使用相同的渗滤液导排管,因此,试验初期各箱体垃圾层底层的埋埋气体变化几乎同步. 第 4~7 周的数据显示,埋埋堆体下层由厌氧状态慢慢向好氧状态过渡,随着 O_2 体积分数的升高, CH_4 和 CO_2 同时降低,且 CH_4 体积分数下降速率较快. 因为

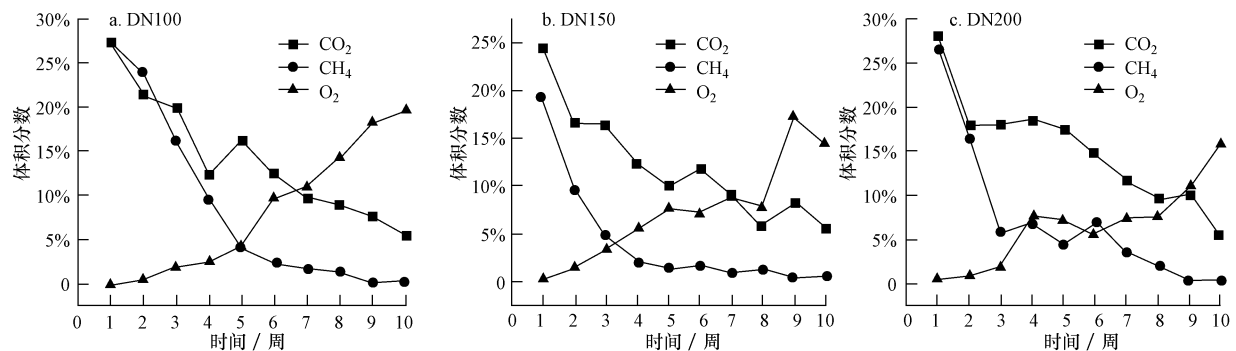


图 3 各中试装置下层监测点各组分气体平均体积分数随时间变化示意图

Fig. 3 The CH_4 , CO_2 and O_2 concentrations in the bottom layer

在好氧状态下,部分 CH_4 在微生物作用下可以被转化为 CO_2 (Ruo *et al.*, 2008), 这也是准好氧填埋工艺控制温室效应的重要表现之一. 第 8 周后, CH_4 和 CO_2 体积分数的变化趋于稳定, 由此可知, 各装置内垃圾中的易降解物已基本降解完全, 而通气管为 DN100 的实验装置中 O_2 的上升趋势明显高于其他工况, 且在试验结束时其体积分数达到 20%, 基本接近于空气中的水平. 由此可证明该装置下层 O_2 的通入量高于其他工况.

图 4 为 3 个中试装置中层气体监测点各组分气体平均体积分数随时间的变化情况. 由图 4a、4b 可知, 通气管为 DN100 和 DN150 的试验装置中, 从第 3 周开始, CH_4 和 CO_2 的体积分数开始下降, O_2 的体积分数开始上升, 后期二者变化情况接近, 到试验

结束时通气管为 DN100 的试验装置中 O_2 体积分数约为 18%, DN150 试验装置中 O_2 体积分数约略低, 稳定在 13% 左右; CH_4 和 CO_2 最终体积分数的对应关系相反, 即通气管为 DN100 的试验装置内垃圾降解情况最好. 通气管为 DN200 的试验装置的监测结果与另两种工况有明显差异, 各组分气体从第 5 周开始才有明显的变化, 且试验结束时 CO_2 体积分数约为 15%, O_2 体积分数约为 10% (图 4c), 这进一步说明该装置内垃圾降解速率较为缓慢. 由此可以推断相同的准好氧填埋环境下, 空气在较大管径的通气管中运移时, 向外直接排空量较大, 即通气管为 DN200 的试验装置中, 空气向填埋堆体内扩散作用较弱, 导致该装置内垃圾好氧降解程度明显低于另两种工况. 后文将通过计算予以理论证明.

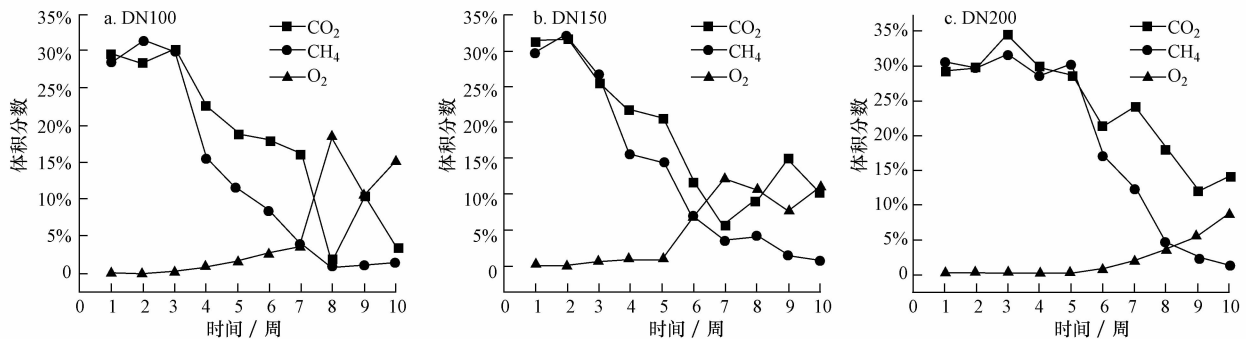


图 4 各中试装置中层监测点各组分气体平均浓度随时间变化示意图

Fig. 4 The CH_4 , CO_2 and O_2 concentrations in the middle layer

图 5 为 3 个中试装置上层气体监测点各组分气体平均体积分数随时间的变化情况. 从图 5a 中可以看出, 通气管为 DN100 的试验装置上层中的垃圾降解速率较快, 实验开始后各气体体积分数变化速率保持较高水平, 到第 4 周时基本趋于稳定, 垃圾中的易降解物基本降解完全. 相较而言, 通气管为 DN150

的反应装置上层中各气体变化趋势与 DN100 装置接近, 但垃圾降解速率略低, 试验结束时 CH_4 和 CO_2 的体积分数明显较高, O_2 的体积分数稳定在 18% 左右 (图 5b). 通气管为 DN200 的反应装置中 CH_4 和 CO_2 的体积分数在第 2 周开始下降, O_2 体积分数在第 4 周开始上升 (图 5c). 该组试验结果与图 3、图 4

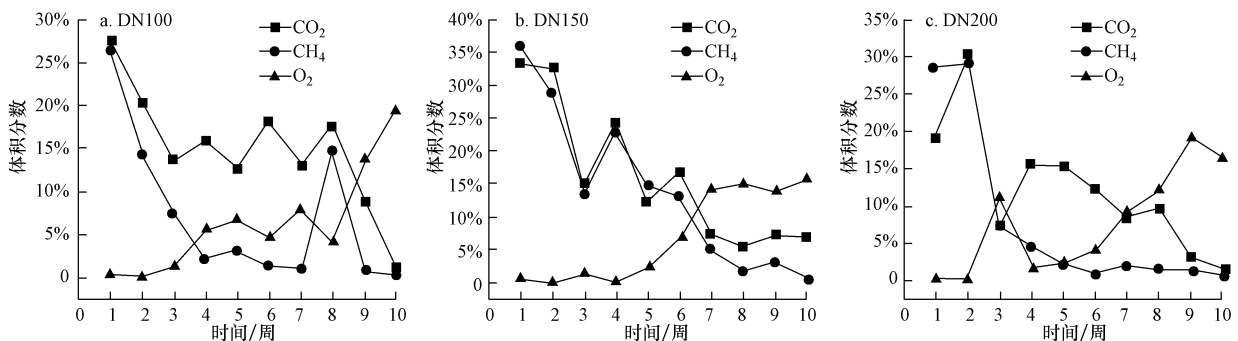


图 5 各中试装置上层监测点各组分气体平均体积分数随时间变化示意图

Fig. 5 The CH_4 , CO_2 and O_2 concentrations in the upper layer

所示结果相类似,总体而言,通气管管径越小,试验装置中垃圾降解速率越大,反应结束时 LFG 中温室气体含量越少。

3.2 空气热力学计算与分析

由于 3 组中试装置内的填充物可以认为是相同均质垃圾,因此,假设 3 种管径的通气管外接触的填埋垃圾温度变化情况相同。在 3 个通气管中取相同高度元 (dh) 的气体柱,由于管径比为 2:3:4,则 DN100, DN150 和 DN200 管内待研究气体柱的质量比为 4:9:16。由于 3 组中试装置的渗滤液导排管工况相同,所以,认为 3 个气体柱刚刚进入通气管后具有相同的初始温度和初始速度。以下对管内空气的受热及运动情况予以计算和分析。

在本实验研究中,待研究气体柱由于通气管内外温差而吸收热量。通气管壁及保护材料的传热属于热传导过程,整体过程为多层长圆管壁的稳态导热。根据傅立叶定律(薛兵,2005),传热量 Q 仅与各材料导热热阻及内外温差有关,根据假设, DN100、DN150 和 DN200 管内待研究气体柱吸收热量相同。根据气态导热公式:

$$Q = cm\Delta T \quad (1)$$

式中, Q 为气体柱吸收的热量(J); c 为气体比热容 ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$); ΔT 为气体柱吸热后温度变换量 (K); m 为气体质量 (kg)。根据上述分析, DN100、DN150 和 DN200 管内待研究气体柱在吸收相同热量后温度变化量之比分别为: $\Delta T_{100} : \Delta T_{150} : \Delta T_{200} = 36:16:9$ 。

根据气体由于温差而获得浮力加速度的方程(戴树桂,2006):

$$a = dv/dt = (\Delta T/T)g \quad (2)$$

式中, a 为气体柱在通气管内运移的加速度 ($m \cdot s^{-2}$); ΔT 为气体柱吸热后温度变换量 (K); T 为气体柱刚进入通气管时的初始温度 (K); g 为重力加速度 ($m \cdot s^{-2}$)。由此可知, DN100、DN150 和 DN200 管内待研究气体柱在吸收相同热量后向上运移的加速度之比为: $a_{100} : a_{150} : a_{200} = 36:16:9$ 。

根据牛顿第二定律变换形式:

$$2aS = v_2^2 - v_1^2 \quad (3)$$

式中, a 为气体柱在通气管内运移的加速度 ($m \cdot s^{-2}$); S 为气体柱运动的位移 (m); v_2 为气体柱运动的末速度 ($m \cdot s^{-1}$); v_1 为气体柱运动的初速度

($m \cdot s^{-1}$), 本研究中气体柱通过渗滤液导排管横向迁移至通气管底部,其向上运动的初速度为 0。将通气管分为 n ($n = L/dh$) 个单元,气体柱在上升过程中满足相同的热量传递和浮力加速影响,因此,运动至通气管口时速度 $v_{出}$ 满足:

$$v_{出}^2 = (2L/dh) \sum_{i=1}^n a_i \quad (4)$$

根据 $a_{100} : a_{150} : a_{200} = 36 : 16 : 9$ 可知, DN100、DN150 和 DN200 管内气体柱运动至通气管口时速度 $v_{出}$ 之比为 6:4:3。由于管径比为 2:3:4,根据公式(5)可计算得到 3 个通气管中的排出空气量 (q , $m^3 \cdot s^{-1}$)。

$$q = \pi r^2 v_{出} \quad (5)$$

因此, DN100, DN150 和 DN200 通气管排出空气量之比为 2:3:4。由此可知,通气管径为 DN100 的模拟准好氧填埋中试装置内,空气经过通气管路直接排入大气的量最少,向填埋堆体内部传输空气量最多。结合上文对各装置内 LFG 监测的结果分析,可知本研究条件下 DN100 的通气管更有利于准好氧填埋工艺在 LFG 减排和加速垃圾降解方面发挥优势。

4 结论(Conclusions)

结果表明,通气管径为 DN100 的装置中垃圾好氧降解速率最快,该装置中各层 LFG 内的 O_2 无论是最终体积分数还是从上升趋势都明显高于其他装置,在温室气体减排方面, CH_4 也得到了更为有效的抑制。通过理论计算可知, DN100、DN150 和 DN200 的通气管排出气体量比为 2:3:4,由于进气情况相同,因此, DN100 通气管向填埋堆体内部传输空气量最多。该结果对于准好氧填埋工艺的应用具有一定的指导意义,建议使用与渗滤液管径比为 50% 的圆形塑料倒排盲沟速排龙作为通气管,其更有利于空气向填埋堆体内部的传输以及抑制 LFG 中温室气体的产生。

责任作者简介:金晶,硕士,工程师,现在北京永新环保有限公司固废事业部工作, E-mail: jinjingswu@163.com。

参考文献(References):

- 戴树桂. 2006. 环境化学[M]. 北京:高等教育出版社. 55
Dai S G. 2006. Environmental Chemistry [M]. Beijing. Higher Education Press. 55 (in Chinese)

- 杜吴鹏,高庆,张恩琛,等. 2006. 中国城市生活垃圾处理及趋势分析[J]. 环境科学研究, 19(6):115-120
- Du W P, Gao Q, Zhang E C, *et al.* 2006. The treatment and trend analysis of municipal solid waste in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 19(6):115-120 (in Chinese)
- Matsuto T, Tanaka N, Koyama K. 1991. Stabilization mechanism of leachate from semi-aerobic sanitary landfill of organics-rich waste [C]. Third International Landfill Symposium [A]. Cagliari; 875-888
- Matsufuji Y, Masataka H, Naganno S, *et al.* 1993. Generation of greenhouse effect gases from different landfill types[J]. *Engineering Geology*, 34(4): 181-187
- Ruo H, Aidong R, Chenjing J, *et al.* 2008. Responses of oxidation rate and microbial communities to methane in simulated landfill cover soil microcosms[J]. *Bioresource Technology*, 99(15): 7192-7199
- Shimaoka T, Matsufuji Y, Masataka H. 2000. Mechanism of self-stabilization of semi-aerobic landfill [C]. Proceedings of the 5th Annual Landfill Symposium [A]. San Diego:11-13
- Themelis N J, Ulloa P A. 2007. Methane generation in landfills [J]. *Renewable Energy*, 32(7): 1243-1257
- 薛兵. 2005. 工程热力学[M]. 西安:陕西科学技术出版社. 61-69
- Xue B. 2005. *Engineering Thermodynamics* [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press. 61-69 (in Chinese)