

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.05.008

# 城市生活垃圾填埋场气压分布一维稳态分析模型

马小飞<sup>1,2</sup>, 李育超<sup>1</sup>, 詹良通<sup>1</sup>, 陈云敏<sup>1</sup>

(1. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310058; 2. 杭州市建筑设计研究院有限公司, 杭州 310001)

**摘要:**掌握填埋场气压分布是填埋气灾害控制和资源化利用的基础。提出了分层垃圾填埋体气压分布一维稳态分析模型及求解方法。该模型可分析含有给定抽气压力或给定抽气流量水平导气层的填埋体气压分布。采用该模型探讨了垃圾分层特征、封顶覆盖层下和填埋体内的高渗透性水平导气层、填埋体底部渗沥液导排系统兼作填埋气导排通道对填埋体气压分布的影响规律。通过参数分析得到以下结论:填埋体垃圾不考虑产气速率和固有渗透系数随垃圾埋深增加而减小(产气速率和固有渗透系数按埋深平均)会高估填埋体内气压;封顶覆盖层下和填埋体内设置水平导气层可有效降低填埋体内气压;填埋体底部填埋气导排通道对填埋气气压较大的深部垃圾降压效果较明显。分析结果表明,该模型可指导填埋气收集系统设计,如水平导气层位置和间距布置及抽气功率选择等。

**关键词:**填埋场; 分层垃圾; 气压; 填埋气收集系统; 导气层

**中图分类号:** X705      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2013)05-0044-06

## One-dimensional Steady-state Model for Gas Pressure Distribution in Municipal Solid Waste Landfills

Ma Xiaofei<sup>1</sup>, Li Yuchao<sup>1</sup>, Zhan Liangtong<sup>1</sup>, Chen Yunmin<sup>1</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China; 2. Hangzhou Architectural Design & Research Co, LTD, Hangzhou 310001, P. R. China)

**Abstract:** Gas pressure distribution in landfills is of great importance to control hazards and improve recovery of landfill gas. An one-dimensional steady-state model and its solving approach are presented for gas pressure distribution in layered waste landfills. The model can be used to investigate the gas pressure distribution of the landfill with horizontal gas collection layers having specified pressure or flux. The influences of layered properties, horizontal permeable layer under final cover and horizontal gas collection layers and bottom leachate drainage systems dually serving as gas collection layers on gas pressure distribution are investigated. The results of parameter analyses using the presented model show that the assumption that homogenizations of gas generation rate and gas permeability through a landfill considerably overestimate gas pressure in landfill; horizontal permeable layer under final cover and horizontal gas collection layers can effectively reduce gas pressure in landfills; the bottom leachate drainage systems dually serving as gas collection layers can significantly reduce the gas pressure in the lower portion of landfills. The presented model provides a useful tool in the designing of landfill gas collection systems, such as, the positions and spacing of horizontal gas collection layers and pump section.

**Key words:** landfill; layered waste; gas pressure; landfill gas collection system; permeable layer

**收稿日期:** 2013-02-20

**基金项目:** 国家自然科学基金(50878194, 51010008, 51009121); 教育部留学回国人员启动基金(教外司留 2012-1707); 苏州市科技支撑计划项目(520324)

**作者简介:** 李育超(1978-), 男, 博士, 主要从事环境岩土工程研究, (E-mail) yuchao\_li@hotmail.com。

城市生活垃圾中含有大量的有机质,填埋后发生生化降解,产生大量主要成分为温室气体甲烷和二氧化碳的填埋气(其中甲烷体积约占一半)。填埋气无序排放,会加剧全球气候变暖,同时造成巨大的能源浪费(甲烷具有资源化利用价值)。垃圾填埋体中填埋气导排运移受阻造成的气体累积和气压上升,易引发填埋体失稳和物理爆炸;另一方面,填埋气与空气混合极易引发化学爆炸<sup>[1-3]</sup>。现代卫生填埋场应当科学设计填埋气导排和收集系统,控制填埋体气压,防止填埋气相关灾害,有效收集填埋气以资源化利用。

掌握填埋场内气压分布规律是合理设计填埋气导排和收集系统设计的基础。Findikakis等<sup>[4]</sup>和El-Fadel等<sup>[5-6]</sup>提出了单相一维对流-扩散运移模型,仅考虑填埋气从填埋体顶部排出情况,分析了填埋体中气压和气体组分随时间的变化规律。Townsend等<sup>[7]</sup>建立了均质垃圾填埋体气压分布模型,分析了垃圾产气速率、填埋厚度和固有渗透系数对气压分布的影响,并针对填埋场顶部导气层和底部渗沥液导排系统兼作填埋气收集的情况分析了填埋气收集对填埋体气压分布的影响。上述模型均假设填埋体为均质,然而实际填埋场垃圾因填埋作业顺序的原因,工程特性在深度方向具有明显的分层特征。填埋垃圾的产气速率和固有渗透系数随填埋深度增加而减小<sup>[8-9]</sup>,上述已有模型无法考虑填埋垃圾产气速率和固有渗透系数的分层特征对气压分布的影响。魏海云等<sup>[8]</sup>提出了分层填埋体气压的有限差分分析模型,该模型在填埋体沿深度方向空间离散求解。国内学者对于竖井抽气条件下的填埋场气压分布研究较多<sup>[10-11]</sup>,水平导气层对气压分布的影响规律研究还较少。

提出可考虑填埋体分层特征和水平导气层的气压一维稳态分析模型,采用线性表达式描述填埋体边界条件和层间连续条件,提出给定气压和给定填埋气流量两种分析水平导气层的方法,并给出了相应的求解方法,通过4个例子分析了垃圾产气速率和固有渗透系数分层特征、封顶覆盖层下和填埋体内的高渗透性水平导气层、填埋体底部渗沥液导排系统兼作填埋气导排通道对填埋体气压分布的影响规律,指导填埋气收集系统设计。

## 1 分析模型

考虑实际填埋场垃圾生化降解时间随埋深增大的规律,针对填埋垃圾的分层特征提出以下气压分析模型。将填埋体分为 $n$ 层,各层厚度为 $h_i$ ,产气速

率和固有渗透系数分别为 $a_i$ 和 $K_i$ ,如图1所示,填埋体总厚度为 $H$ , $z$ 为垃圾埋深,第 $i$ 层和第 $i+1$ 层间界面埋深为 $z_i$ 。各层可为具有不同填埋龄期的垃圾层、水平导气层、封顶覆盖层或中间覆盖层。

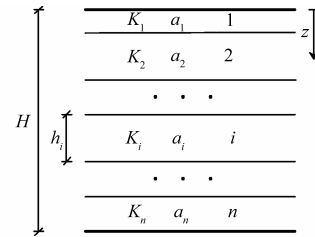


图1 分层垃圾填埋体模型图

填埋体中某一层材料(垃圾层、导气层或覆盖层)的填埋气流动可根据多孔介质流体力学理论<sup>[12]</sup>采用一维气体流动控制方程表示:

$$-\frac{\partial[K_i \rho_i (\frac{\partial p_i}{\partial z_i} - \rho_i g)]}{\mu \partial z_i} + \frac{\partial(n_g \rho_i)}{\partial t} = a_i \quad (1)$$

式中: $K_i$ 为固有渗透系数, $m^2$ ;  $\rho_i$ 为填埋气密度, $kg/m^3$ ;  $p_i$ 为气体压力,Pa;  $\mu$ 为填埋气粘滞系数, $1.37 \times 10^{-5} kg/(m \cdot s)$ ;  $n_g$ 为垃圾含气率,无量纲;  $a_i$ 为产气速率,即单位体积垃圾在单位时间内的产填埋气质量, $kg/(m^3 \cdot s)$ ,其中导气层和覆盖层 $a_i$ 为零。

根据理想气体状态方程,填埋气密度与气压存在如下关系:

$$\rho_i = \frac{\omega}{RT} p_i \quad (2)$$

式中: $\omega$ 为填埋气摩尔质量, $0.03 kg/mol$ ;  $R$ 为气体常数, $8.314 3 kg \cdot m^2/(s^2 \cdot mol \cdot K)$ ;  $T$ 为气体开氏温度,K,取298 K。

根据学者们研究与分析<sup>[7,13-16]</sup>,填埋垃圾生化降解过程一般长达数十年,其生化降解速率较慢,填埋垃圾的产气速率 $a_i$ 和固有渗透系数 $K_i$ 随填埋时间变化缓慢,可用稳态方程分析一定时期内填埋体气压分布,忽略式(1)中的重力项(填埋气密度 $\rho_i$ 较小),则式(1)可简化为:

$$\frac{\partial^2 p_i^2}{\partial z_i^2} = -\frac{2\mu RT}{\omega K_i} a_i \quad (3)$$

令 $A_i = \frac{\mu RT}{\omega K_i} a_i$ ,并对式(3)两次积分可得:

$$p_i^2 = -A_i z_i^2 + B_i z_i + C_i \quad (4)$$

式中: $B_i$ 和 $C_i$ 为待定积分常数,由填埋体各层边界条件确定。

层与层之间满足以下连续条件(以第 $i$ 层和第 $i+1$ 层为例):1)气压连续,即 $p_i = p_{i+1}$ ; 2)气体流



$$-A_{i+1}z_i^2 + B_{i+1}z_i + C_{i+1} = p_s^2 (p_{i+1} = p_s \text{ 在 } z = z_i) \quad (21)$$

求解得到填埋体气压分布后,可通过下式求得水平导气层抽气速率,指导水平导气层抽气泵选择:

$$q_{CL} = -\frac{K_{i-1}\omega}{2\mu RT}(-2A_{i-1}z_{i-1} + B_{i-1}) + \frac{K_{i+1}\omega}{2\mu RT}(-2A_{i+1}z_i + B_{i+1}) \quad (22)$$

## 2 模型运用

填埋场气压现场监测主要针对垃圾表层,鲜有随深度的分层气压监测资料。采用 Townsend 等<sup>[7]</sup>的单层均质填埋体算例及魏海云等<sup>[8]</sup>的分层填埋体算例验证了本文提出模型,并分析了垃圾填埋龄期、低渗透性的中间覆盖层因素对填埋体气压分布的影响。本文重点分析垃圾分层特征、封顶覆盖层下和填埋体内的高渗透性水平导气层、填埋体底部渗沥液导排系统兼作填埋气导排通道对填埋场气压分布的影响。填埋场堆体高度为 30 m,填埋速率为 3 m/a,分析时将填埋体分 5 层,每层厚度为 6 m,各层垃圾龄期取其平均值。填埋垃圾的产气速率  $a$  随填埋龄期的变化规律根据《生活垃圾填埋场填埋气体收集处理及利用工程技术规范》(CJJ 133-2009)中的公式确定,即

$$a(t) = ML_0 k e^{-kt} \quad (23)$$

式中:  $t$  为填埋垃圾龄期, a;  $a(t)$  为填埋垃圾在填埋龄期  $t$  的产气速率,  $m^3/a$ ;  $M$  为填埋垃圾的重量,  $t$ ;  $L_0$  为单位重量垃圾的最大产气量,  $m^3/t$ ;  $k$  为填埋垃圾产气速率常数,  $1/a$ 。文中  $L_0$  取  $150 m^3/t$ ,  $k$  取湿润、中等湿润气候范围内值 0.12, 填埋垃圾密度取  $800 kg/m^3$ 。

深度小于 18 m 的填埋垃圾固有渗透系数根据 Jain 等<sup>[9]</sup>的现场实验数据取值,深度超过 18 m 的填埋垃圾固有渗透系数根据魏海云<sup>[20]</sup>实验数据所得固有渗透系数随深度变小趋势变缓的规律取值。填埋场封场时各垃圾层产气速率  $a$  和固有渗透系数  $K$  具体取值如表 1 所示:

表 1 各垃圾层产气速率和固有渗透系数取值

物理量	层 1	层 2	层 3	层 4	层 5	各层平均值
$a_i (\times 10^{-7} kg/(m^3 \cdot s^{-1}))$	5.43	4.27	3.36	2.64	2.08	3.56
$K_i (\times 10^{-13} m^2)$	16.0	8.0	5.0	3.0	2.0	6.8

模型边界条件采用顶部边界条件为给定气压(大气压),底部边界条件为给定零流量。下面分析除说明外均采用上述封场时垃圾分层产气速率、固有渗透系数取值和边界条件。

### 2.1 垃圾分层特征对气压分布的影响

首先,采用本文模型分析垃圾分层与否对封场时填埋体内气压计算结果的影响(图 2)。若产气速率和固有渗透系数均分层取值,气压梯度在层间处具有明显变化,这是由于层间固有渗透系数不同产生的。若固有渗透系数分层取值而产气速率取各层平均值,气压梯度仍在层间处呈现明显变化,但由于产气速率取值按埋深平均后,深部垃圾产气速率高于其实际值,加上深部垃圾的固有渗透系数较低,因此填埋体底部气压明显高于产气速率和固有渗透系数均分层取值的分析结果。若产气速率分层取值而固有渗透系数取各层平均值,气压梯度无上述层间突变现象,但由于固有渗透系数取值按埋深平均后,浅部垃圾固有渗透系数低于其实际值,而浅部垃圾因填埋龄期较短而产气速率较高,因此填埋体浅部气压明显高于产气速率和固有渗透系数均分层取值的分析结果。若产气速率和固有渗透系数均取各层平均值,填埋体气压整体明显高于产气速率和固有渗透系数均分层取值分析结果,例如深度 12 m 处高出 88%。可见,产气速率和固有渗透系数按埋深平均取值计算会显著高估填埋体内气压。本文得到的无覆盖条件下填埋体气压值与文献报道的无覆盖条件下气压计算值相近<sup>[7-8]</sup>。

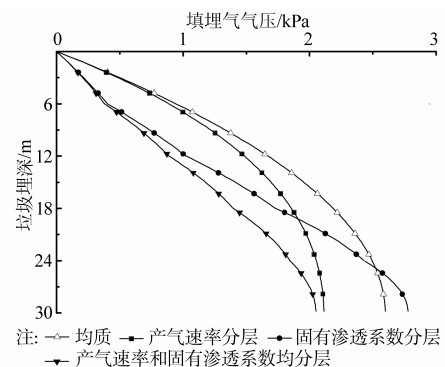


图 2 垃圾分层特征对气压分布的影响

### 2.2 土质封顶覆盖层下设置水平导气层对气压分布的影响

与垃圾相比,土质覆盖层固有渗透系数明显较小,假设填埋体表面设有一厚度为 1 m<sup>[13,21-23]</sup>、固有渗透系数为  $1.0 \times 10^{-14} m^2$ <sup>[21]</sup> 的土质封顶覆盖层。由图 3 可见,设置土质封顶覆盖层后封场填埋体表面气压增大为 10.7 kPa,该部位气压过大可影响土质封顶覆盖层稳定性。如在土质封顶覆盖层设置一厚度为 60 cm、固有渗透系数为  $3.0 \times 10^{-9} m^2$  的高渗透性水平导气层<sup>[16]</sup>。气压的减小值与水平导气层抽气速率  $q$  基本成正比例关系。当水平导气层抽气速

率为  $9.0 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时, 填埋体表面气压下降至  $0.9 \text{ kPa}$ 。可见, 水平导气层可有效减小填埋体表面气压。填埋场工程设计中可根据土质封顶覆盖层下气压控制要求, 根据本文模型分析结果指导合理选择抽气泵。

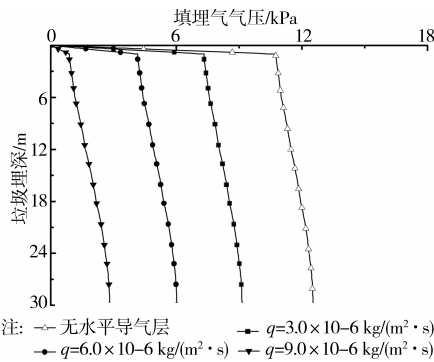


图 3 封顶覆盖层下设置水平导气层对气压分布的影响

### 2.3 填埋体内水平导气层对气压分布的影响

在填埋体内设置水平导气层是高效收集填埋气的一种常用手段。假定在填埋体埋深 12 和 24 m 处各设有一厚度为 60 cm 的水平导气层(导气层上下两层垃圾厚度各减小 30 cm), 其固有渗透系数为  $3.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ , 并假设 12 和 24 m 处导气层抽气速率分别为  $q_1$  和  $q_2$ 。由图 4 可见, 当  $q_2 = 0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,  $q_1$  从  $2.0 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  增大到  $4.0 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 12 m 埋深导气层以下垃圾的填埋气气压在相同埋深处均降低了  $0.24 \text{ kPa}$ , 即导气层以下气压分布曲线形态不随导气层抽气速率变化而变化。这是由于稳态条件下导气层下部气压分布形状由该部分的产气速率和固有渗透系数决定。当抽气速率为  $2.0 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  的导气层从埋深 12 m 处下降至埋深 24 m 处时, 底部最大气压降低幅度从 13% 增大到 49%, 但 12 m 以上垃圾气压分布没有变化。这是因为在稳态条件下填埋体底部至 12 m 处的垃圾产气速率  $a$  不变, 且该部分填埋气出流量恒定, 故对于 12 m 以上产气速率  $a$  不变的垃圾气压分布不变。由上述分析可见, 填埋体内设置水平导气层可有效降低填埋体内的气压; 相同抽气速率条件下, 填埋体内水平导气层埋深越深降压效果越好; 本文模型可指导水平导气层位置和间距布置及合理选择抽气功率。

### 2.4 填埋体底部填埋气导排通道对气压分布的影响

国外低水位填埋场底部渗沥液导排系统兼作填埋气导排通道<sup>[7,17-18]</sup>。下面分析填埋体底部填埋气导排通道集气速率  $q$  对气压分布的影响。由图 5 可见, 填埋气气压减小值随集气速率  $q$  的增大而增大。

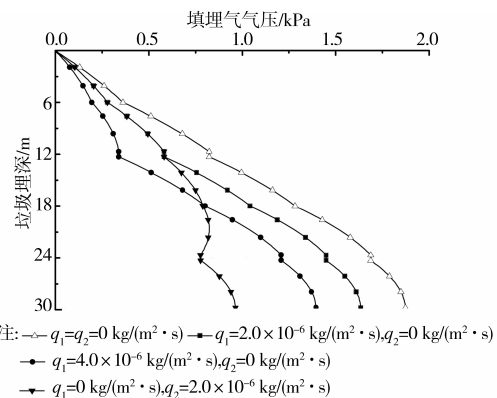


图 4 填埋体内设置水平导气层对气压分布的影响

集气速率为  $2.0 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时, 底部填埋气气压由无气体导排时的  $2.05 \text{ kPa}$  下降至  $0.43 \text{ kPa}$ , 下降幅度为 79%; 而埋深 12 m 处填埋气气压下降幅度仅为 28%。其最大气压则是由无气体导排时的  $2.05 \text{ kPa}$  下降至  $0.93 \text{ kPa}$ , 降幅为 55%, 且其位置由底部上升至埋深 21 m 处。由上述分析可见, 填埋体底部填埋气导排通道可有效减小填埋体内填埋气气压, 特别是接近导排通道的深部垃圾填埋气气压。

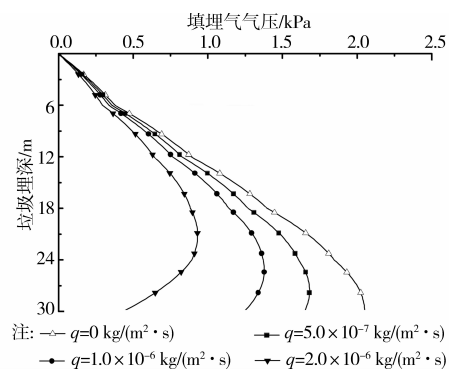


图 5 填埋体底部渗沥液导排系统兼作填埋气导排通道对气压分布的影响

## 3 结论

提出了分层垃圾填埋体气压分布一维稳态分析模型, 并提出顶部边界为给定气压、底部边界为给定气压或流量工况的求解方法, 分析了垃圾分层特征、封顶覆盖层下和填埋体内高渗透性的水平导气层、填埋体底部渗沥液导排系统兼作填埋气导排通道对填埋场气压分布的影响, 并得到如下结论: 填埋体均质化模型(产气速率和固有渗透系数按埋深平均)会显著高估填埋体内气压, 填埋体气压分析宜采用分层模型; 封顶覆盖层下和填埋体内设置水平导气层可有效减小填埋体气压, 在相同抽气速率条件下水平导气层埋深越深降压效果越好; 填埋体底部填埋

气导排通道对填埋气气压较大的深部垃圾降压效果较明显;本文模型可指导填埋气导气系统布置及合理选择抽气功率。

#### 参考文献:

- [1] El F M, Findikakis A N, Leckie J O. Environmental impacts of solid waste landfilling [J]. *Journal of Environmental Management*, 1997, 50: 1-25.
- [2] Manfredi S, Christensen T H. Environmental assessment of solid waste landfilling technologies by means of LCA-modeling [J]. *Waste Management*, 2009, 29:32-43.
- [3] Chen Y M, Xu X B, Zhan L T. Analysis of solid-liquid-gas interactions in landfilled municipal solid waste by a bio-hydro-mechanical coupled model[J]. *Science China Technological Sciences*, 2012, 55:81-89.
- [4] Findikakis A N, Leckie J O. Numerical simulation of gas flow in sanitary landfills [J]. *ASCE Journal of Environmental Engineering*, 1979,115: 927-945.
- [5] El F M, Findikakis A N, Leckie J O. Numerical modeling of generation and transport of gas and heat in landfills I. model formulation [J]. *Waste Management & Research*, 1996, 14: 483-504.
- [6] El F M, Findikakis A N, Leckie J O. Numerical modeling of generation and transport of gas and heat in landfills II. model application [J]. *Waste Management & Research*, 1996, 14: 537-551.
- [7] Townsend T G, Wise W R, Jain P. One-dimensional gas flow model for horizontal gas collection systems at municipal solid waste landfills [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2005, 131 (12): 1716-1723.
- [8] 魏海云,詹良通,陈云敏,等. 分层填埋垃圾体中气体一维稳态运移规律[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(11): 1665-1671.  
Wei H Y, Zhan L T, Chen Y M, et al. One-dimensional gas migration in multi-layered landfills of municipal solid wastes [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(11): 1665-1671.
- [9] Jain P, Powell J, Townsend T G, Reinhart D R. Air permeability of waste in a municipal solid waste landfill [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2005, 131 (11): 1565-1573.
- [10] 彭绪亚,余毅,刘国涛. 垃圾填埋场竖井抽气条件下的填埋气压力分布[J]. *重庆大学学报*, 2003, 26(11): 92-95.  
Peng X Y, Yu Y, Liu G T. Pressure distribution of LFG in a landfill with vertical extraction system [J]. *Journal of Chongqing University*, 2003, 26(1): 92-95.
- [11] 刘磊,薛强,梁冰,等. 垃圾填埋场封场后气体产出及释放规律研究[J]. *环境卫生工程*, 2010, 18(1): 19-21.
- Liu L, Xue Q, Liang B, et al. Landfill gas generation and emission in closed landfill sites [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2010, 18(1): 19-21.
- [12] BEAR J. 多孔介质流体动力学[M]. 李竞生, 陈崇希. 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.
- [13] Arigala S G, Tsotsis T T, Webster I A, et al. Gas generation, transport, and extraction in landfills [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1995, 121(1): 33-44.
- [14] Chen Y C, Wu C H, Hu H Y. Numerical simulation of gas emission in a sanitary landfill equipped with a passive venting system [J]. *Journal of Environmental Science and Health*, 2000, A35(9): 1735-1747.
- [15] Tinetti A J, Oxarango L. Stationary gas flow to a vertical extraction well in MSW landfill considering the effect of mechanical settlement on hydraulic properties [J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65: 6229-6237.
- [16] Jung Y, Imhoff P T, Augenstein D C, et al. Influence of high-permeability layers for enhancing landfill gas capture and reducing fugitive methane emissions from landfills [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2009, 135(3): 138-146.
- [17] Townsend T G, Miller W L. Landfill gas extraction from leachate collection systems [J]. *Journal of Solid Waste Technology and Management*, 1997, 24 (3): 131-136.
- [18] Fredenslund A M, Scheutz C, Kjeldsen P. Tracer method to measure landfill gas emissions from leachate collection systems [J]. *Waste Management*, 2010, 30 (11): 2146-2152.
- [19] USEPA, 1985. Minimum technology guidance on double liner systems for landfills and surface impoundment-design, construction and operation [S]. EPA/530/SW-85-012, U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.
- [20] 魏海云. 城市生活垃圾填埋场气体运移规律研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007: 156-157.
- [21] Thomas H R, Ferguson W J. A fully coupled heat and mass transfer model incorporating contaminant gas transfer in an unsaturated porous medium [J]. *Computers and Geotechnics*, 1999, 24: 65-87.
- [22] Sanchez R, Tsotsis T T, Sahimi M. Computer simulation of gas generation and transport in landfills. IV: Modeling of liquid-gas flow [J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65: 1212-1226.
- [23] Yu L, Batlle F, Carrera J, et al. Gas flow to a vertical gas extraction well in deformable MSW landfills [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 168: 1404-1416.