

分层填埋场竖井及水平井联合抽气

冯世进^{1,2}, 郑奇腾¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 采用特征函数展开法求解分层填埋场的二维气体运移模型, 考虑了由于压缩、降解和含水量分布不均等引起的产气率和渗透系数成层特性以及垃圾的各向异性, 然后结合边界和连续性条件确定其待定参数。最后, 基于考虑了气体竖向和水平向运移的解析解, 研究了竖井、水平井收集系统和排气层对填埋场内气体压力和回收率的影响, 进一步提出了土工膜覆盖下填埋场气体收集系统的设计方法。

关键词: 分层填埋场; 竖井; 水平井; 排气层; 土工膜

中图分类号: X705

文献标志码: A

Gas Migration in Layered Landfills Incorporating Vertical and Horizontal Extraction Wells

FENG Shijin^{1,2}, ZHENG Qiteng¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A new two dimensional gas flow model was developed to analyze the gas migration in layered landfills. The model considers anisotropy of the municipal solid wastes (MSWs), and vertical variations in both gas generation and permeability caused by compression, degradation and inhomogeneous distribution of moisture content. The general solution of this model can be developed using eigenfunction expansion method, and the unknown integration constants can be determined by the boundary and continuity conditions. According to this analytical solution, the influences of vertical wells, horizontal lines and permeable layers on the gas pressure and recovery were further investigated. Finally, the design method of the landfill gas (LFG) collection system for layered landfills covered by geomembrane was proposed.

Key words: layered landfill; vertical well; horizontal line; permeable layer; geomembrane

填埋气体(landfill gas, LFG)是城市固体废弃物(municipal solid waste, MSW)在生物降解过程中连续产生的一种混合气体, 主要包括甲烷(50%~60%)和二氧化碳(40%~50%)。这两者都是温室气体, 并且甲烷在有氧条件下体积浓度达到5%~15%易发生火灾和爆炸。此外, 如果填埋气体收集不当, 填埋场内较高的气压也会导致垃圾体失稳破坏或者发生爆炸。但是, 甲烷又是一种重要的能源, 将填埋气体回收利用不但可以减少环境污染还可“变废为宝”。为了有效地回收填埋气体, 传统的方法是布置竖井, 然后施加抽气负压进行收集, 但是这种方法只有在填埋场封场后才能达到最好的效果, 而在某些情况下填埋场运营商需要在封场前提前回收填埋气体, 这时可以采用水平井来达到目的^[1]。因此, 在实际工程中, 填埋场气体收集系统经常由竖井和水平井共同组成, 研究两者联合抽气条件下填埋场气体运移规律有着重要的意义。

近年来, 针对填埋场的气体运移规律国内外学者都进行了一些研究, 主要是采用解析和数值两种方法进行分析。为了简化求解过程, 大多数解析解是基于产气率^[1-4]或者渗透系数^[1-6]均匀性假定。然而, 由于压缩、降解和含水量的不均匀分布等原因, 填埋场内垃圾的产气率和气体渗透系数随深度变化明显, 表现出成层特性^[7-8]。因此, Li 等^[9]考虑气压和气流量的连续性, 提出了分层填埋场内气体运移的解析解, 通过对比分析说明了考虑 MSW 成层性对预测填埋场内气体压力的必要性。但是, 该解析解毕竟是一维的, 只考虑了气体竖向运移。数值方法可以用来分析更为复杂问题, 特别是填埋场多场耦合问题, 一些数值解开始考虑 MSW 非均匀性^[10-12]。Jung 等^[10]通过二维分层模型分析了排气层对填埋气体收集和甲烷逸散的影响。Tinet 等^[11]考虑压缩沉降对 MSW 气体渗透参数的影响, 建立了竖井条件下轴对

收稿日期: 2014-01-23

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展规划(2012CB719803); 国家自然科学基金(41072201, 41172245, 41222021); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-13-0421)

第一作者: 冯世进(1978—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为环境岩土工程和土动力学。E-mail: fsjgly@tongji.edu.cn

称气体运移模型,并利用有限体积法求解. Giri 等^[12]通过二维液-气耦合数值模型研究 MSW 非均匀性和各向异性对含水量和填埋场稳定性等的影响,同样强调了考虑 MSW 成层性的必要性. 这些数值解对工程应用来说过于复杂,并且上述所有模型都是将填埋场竖井和水平井分开考虑.

可以发现,考虑垃圾体的成层性,从而分析填埋场内竖井及水平井联合抽气条件下的气体运移规律还较少,已有研究未有二维的解析解. 首先,本文建立分层填埋场的二维气体运移模型,考虑了垃圾产气率和渗透系数的分层特性,然后采用特征函数展开法求得通解,并结合边界和连续性条件确定其待定参数. 最后,基于这考虑了气体竖向和水平向运移的解析解,分析不同工况下的气体运移规律,研究竖井、水平井收集系统和排气层等对气体压力和回收率的影响,进一步提出土工膜覆盖下填埋场气体收集系统的设计方法.

1 数学模型的建立及求解

垃圾填埋场的气体收集系统一般由竖井、沟槽(砾石充填)或水平井共同组成. 沟槽的渗透系数($> 10^{-2} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)几乎比垃圾的渗透系数($10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)大两个数量级. 此外,垃圾具有较高的田间持水量,导致垃圾的气体渗透系数远远小于沟槽的. 因此,本文为了简化计算,将其中一个水平方向上竖井、沟槽(砾石充填)或水平井联合抽气系统视为抽气平面,从而将填埋场内复杂抽气网络简化为二维^[13],如图 1 所示. 整个填埋场被分为 m 层垃圾体,每层垃圾体都有不同的产气率 $s_i, \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 、竖向气体固有渗透系数 $K_{vi}, \text{ m}^2$, 水平向气体固有渗透系数 $K_{hi}, \text{ m}^2$, 其中 i 为层号. 此外, x 为与竖井中心的水平距离, m , z 为与填埋场顶部的垂直距离, m , x_w 为竖井半径, m , x_t 为半个竖井间距(即竖井间距的一半), m , H 为填埋场厚度, m , p_i 为第 i 层绝对气压, Pa , p_w 为指定抽气压力, Pa . 下面建立考虑垃圾体分层特性的气体运移二维模型,然后采用特征函数展开法求解每层垃圾体的气体压力通解,而通解中的待定参数可以通过填埋场边界条件、层间气体压力和流量的连续性条件求得.

1.1 气体运移控制方程

对于均质各向异性的垃圾层,结合 Darcy 定理和理想气体状态方程,考虑气体竖向^[1,9]和水平向运移,根据质量守恒原理可以推导得到填埋气体运移

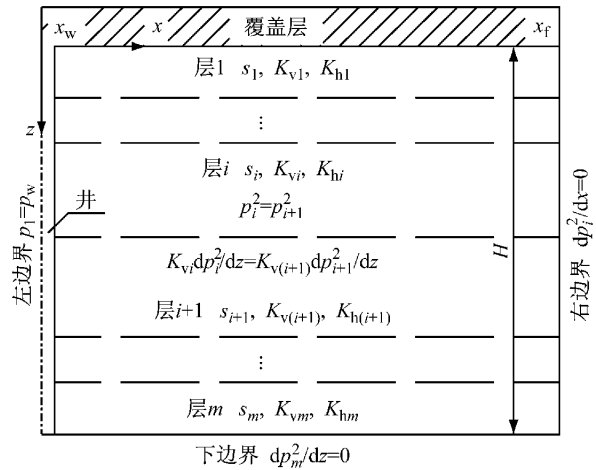


图 1 填埋场示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the landfill

控制方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K_{hi}}{\mu} \frac{p_i}{R_g T} \frac{\partial p_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K_{vi}}{\mu} \frac{p_i}{R_g T} \frac{\partial p_i}{\partial z} \right) + s_i = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{n_g p_i}{R_g T} \right) \quad (1)$$

式中: n_g 为垃圾体的气体含量; t 为时间; s_i, R_g 为气体常数, $277 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, μ 为 LFG 运动粘度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, T 为绝对温度, K .

1.2 特征函数展开法

为了简化控制方程,模型引入如下假设:

- (1) LFG 由等摩尔的 CH_4 和 CO_2 组成,是理想气体,气体含量和运动粘度为常数 ($\mu = 1.37 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$);
- (2) 忽略气体扩散作用,因为其其对气压分布的影响较小,并且忽略气体重力影响;
- (3) 温度随时间和空间的变化保持不变^[1,9],设为常数 ($T = 298 \text{ K}$);
- (4) 填埋场内的气体运移为准稳态,因为垃圾层对产气率变化的响应时间远小于产气率自身发生明显变化所需时间^[1].

根据以上假设,则式(1)可以整理为

$$\frac{d^2 \varphi_i}{dx^2} + \frac{1}{k_i} \frac{d^2 \varphi_i}{dz^2} + 2A_i = 0, \quad (2)$$

式中: $\varphi_i = p_i^2$; $k_i = K_{hi}/K_{vi}$; $A_i = \mu R_g T \cdot s_i / K_{hi}$.

假设竖井边界 x_w 处为指定抽气压力 p_w , 半个竖井间距 x_t 处视气体水平流速为零,则 x 方向的边界条件为

$$\text{当 } x = x_w \text{ 时, } \varphi_i = p_w^2, z_{i-1} \leq z \leq z_i, \quad (3a)$$

$$\text{当 } x = x_t \text{ 时, } \frac{d\varphi_i}{dx} = 0, z_{i-1} \leq z \leq z_i \quad (3b)$$

式中, z_{i-1} 和 z_i 分别是第 i 层的顶面和底面纵坐标,

m.

引入新函数 $u_i = \varphi_i - p_w^2$, 将非齐次边界条件式(3a)和(3b)转化为齐次边界条件, 则关于 u_i 的非齐次线性偏微分方程可以通过特征函数展开法求解, 相应齐次问题的特征函数为

$$X_n = \cos(\sqrt{\lambda_n}(x - x_f)) / \cos(\sqrt{\lambda_n}x_f),$$

式中, λ_n 为特征值, $\lambda_n = ((n-1/2)\pi/(x_f - x_w))^2$, $n = 1, 2, \dots$. u_i 可以用一系列该特征函数来表示:

$$u_i = \sum_{n=1}^{\infty} Z_n(z) X_n(x).$$

代入关于 u_i 的非齐次线性偏微分方程, 则 Z_n 的解为:

$$Z_n = a_n e^{\sqrt{k_i \lambda_n} z} + b_n e^{-\sqrt{k_i \lambda_n} z} + z^*,$$

式中: a_n 和 b_n 为待定参数; z^* 为特解, 如下所示:

$$z^* = \frac{2A_i}{\lambda_n} \frac{\int_{x_w}^{x_f} X_n dx}{\int_{x_w}^{x_f} X_n^2 dx}.$$

因此, 第 i 层的绝对气压 p_i 可以用傅里叶展开式表示:

$$p_i^2 = p_w^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n e^{\sqrt{k_i \lambda_n} z} + b_n e^{-\sqrt{k_i \lambda_n} z} + \frac{4A_i(-1)^{n+1}}{\lambda_n^{3/2}} \frac{\cos \sqrt{\lambda_n} x_f}{x_f - x_w} \frac{\cos(\sqrt{\lambda_n}(x - x_f))}{\cos(\sqrt{\lambda_n} x_f)} \right). \quad (4)$$

1.3 边界和连续性条件

垃圾层间界面的气体压力和气体流量的连续性^[9]条件为:

$$\text{当 } z = z_i \text{ 时, } p_i = p_{i+1}, \quad (5a)$$

$$\text{当 } z = z_i \text{ 时, } f_{z_i} = f_{z_{i+1}}, \quad (5b)$$

式中, f_{z_i} 为第 i 层的气体流量^[1], $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 可表示为

$$f_{z_i} = - \frac{K_{vi}}{\mu R_g T} p_i \frac{dp_i}{dz}.$$

由于覆盖层厚度远小于填埋场高度, 而且覆盖层附近没有施加抽气负压^[14], 因此可以假设覆盖层内气体运移是一维的, 即只考虑竖向运移^[5]. 覆盖层顶部气压为大气压力 p_{atm} (101.3 kPa), 考虑其底部与垃圾顶部的气压和流量连续性条件, 则填埋场顶部气体边界条件可以表示为

$$\text{当 } z=0 \text{ 时, } - \frac{K_{v1}}{2\mu_g R_g T} \frac{\partial p_1^2}{\partial z} = \frac{K_c}{2\mu_g R_g T} \frac{(p_{\text{atm}}^2 - p_1^2)}{H_c} \quad (6a)$$

式中: K_c 为覆盖层气体固有渗透系数, m^2 ; H_c 为覆盖层厚度, m .

假设填埋场底部为气体不可渗透的, 则底部气体边界条件可以表示为:

$$\text{当 } z=H \text{ 时, } f_{zm} = 0. \quad (6b)$$

可以将 $m-1$ 个气压和流量连续性条件式(5a)和式(5b) ($i=1, m-1$)、顶部和底部边界条件式(6a)和式(6b)写成矩阵形式. 对于给定的 n 值, 矩阵有 $2m$ 个相对独立的线性方程和 $2m$ 个待定参数 (即 m 层的 a_n 和 b_n). 因此, 本问题是可解的, 利用数学工具可以求得气体压力分布和回收率, 从而研究竖井和水平井收集系统、排气层和土工膜等对填埋场气体运移规律的影响.

2 竖井和水平井收集系统对气压和回收率的影响

将 30 m 厚的填埋场等分为 5 层, 考虑垃圾生物降解和堆填过程, 最终封场时每层垃圾的产气率 s_i 分别取为 3.90×10^{-7} 、 3.07×10^{-7} 、 2.41×10^{-7} 、 1.90×10^{-7} 和 $1.49 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[9]. 各层的竖向气体固有渗透系数 K_{vi} 分别取为 1.6×10^{-12} 、 0.8×10^{-12} 、 0.5×10^{-12} 、 0.3×10^{-12} 和 $0.2 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ ^[1,7], 水平向气体固有渗透系数 K_{hi} 设为竖向气体固有渗透系数 K_{vi} 的三倍 (即 $k_i = 3.0$). 假设竖井半径 x_w 为 0.1 m, 抽气压力 p_w 为 101.2 kPa (即抽气负压为 -100 Pa); 覆盖层的气体固有渗透系数 K_c 取 $1 \times 10^{-13} \text{ m}^2$, 厚度 H_c 取 0.3 m; 半个竖井间距 x_f 的默认值为 50 m.

当模型忽略水平向气体运移时 (即假设 $k_i = 0.1$), $x = x_f$ 处的气压分布与 Li 等^[9] 一维分层模型的结果很好地吻合, 如图 2 所示, 从而验证了本文模型的正确性. 由于 Li 等的实际垃圾厚度为 29.7 m (扣除 30 cm 覆盖层), 产气量相对减少, 所以其相对气压 ($p_i - p_{\text{atm}}$) 比本文的计算结果略小. 此外, 对比不同 k_i 条件下的气压分布可以发现, 如果不考虑垃

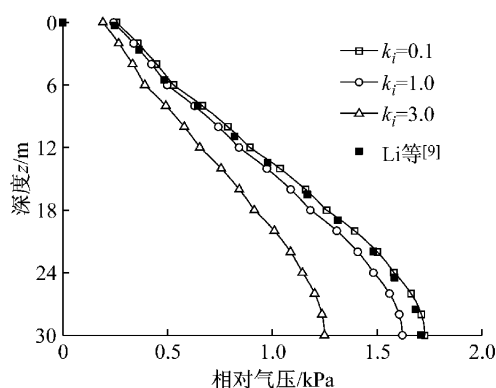


图2 不同 k_i 条件下 $x = x_f$ 处气压分布图
Fig.2 Distribution of gas pressure at $x = x_f$ for different k_i

圾渗透系数的各向异性,填埋场内的最大相对气压会被严重高估。

为了分析竖井和水平井收集系统对气体压力和回收率的影响,考虑不同的竖井和水平井组合工况,如表1和图3所示。

表1 竖井和水平井组合工况

Tab.1 Different combination of vertical and horizontal wells

工况	竖井	水平井	水平井位置
1	有	无	
2	有	有	底部
3	无	有	底部
4	有	有	中部
5	无	有	中部

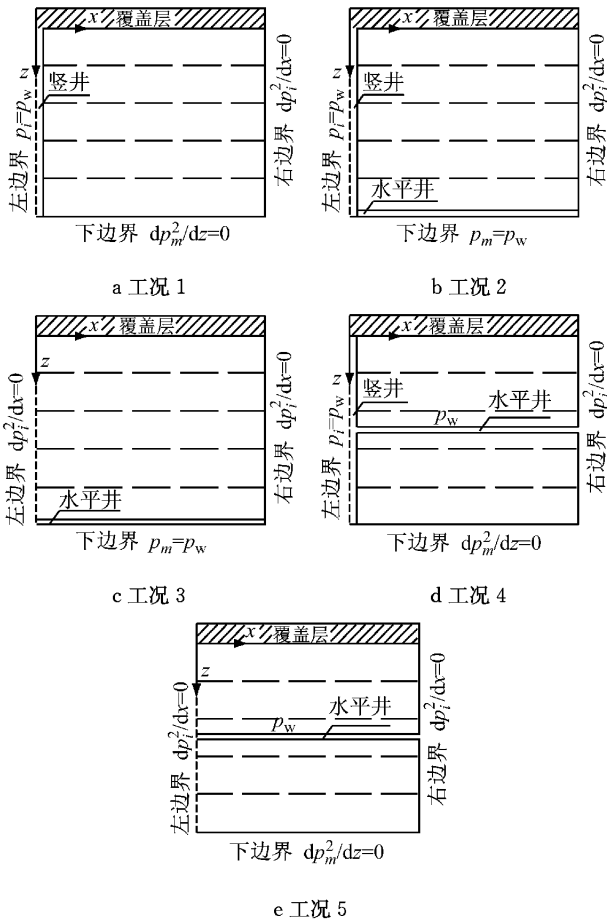


图3 不同竖井和水平井布置图

Fig.3 Different arrangement of vertical and horizontal wells

图4为不同工况下填埋场在 $x = x_f$ 处的气压分布曲线。可以发现,相对于竖井收集系统,水平井收集系统可以明显地降低填埋场内部最大气压。这是由于边界条件的不同所致,并且一旦气压过大发生破坏,竖井情况是局部破坏,而水平井情况是整体破坏。对比工况2、3(中部)和工况4、5(底部)可发现,

水平井收集系统布置在中部的时候,最大气压相对较小,有无竖井对气压分布的影响不大。但值得注意的是,此时最大气压仍然发生在填埋场底部,对底部衬垫有一定影响。

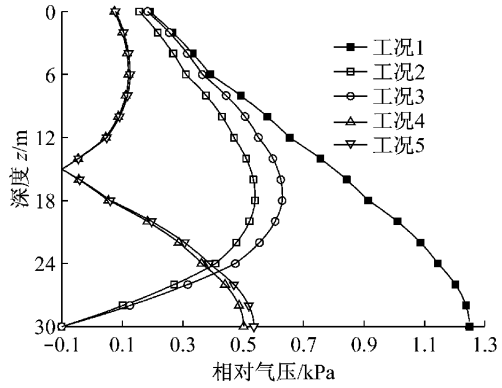


图4 不同工况下 $x = x_f$ 处的气压分布图

Fig.4 Distribution of gas pressure at $x = x_f$ under different conditions

图5为不同工况下LFG回收率随半个竖井间距 x_f 的变化规律曲线。回收率定义为 $[(Q_g - Q_{em}) / Q_g] \cdot 100\%$, 其中 Q_g 为填埋场内垃圾总产气量, Q_{em} 为覆盖层处气体逸出量。对比工况3和5可以看出,水平井收集系统布置在填埋场中部明显能更有效地回收填埋气体。这是由于此时水平井的抽气负压距填埋场顶部更近,使得顶部压力变小(图4),从而减少了覆盖层气体逸出量,增大气体回收率。Vigneault等^[15]定义回收率为90%时(图中虚线所示)的半个竖井间距为竖井抽气影响距离。对比工况1、2和4可以发现,水平井布置在填埋场底部对竖井抽气影响距离的影响很小,而布置在中部可以明显增大该距离。因此,水平井收集系统布置在填埋场中

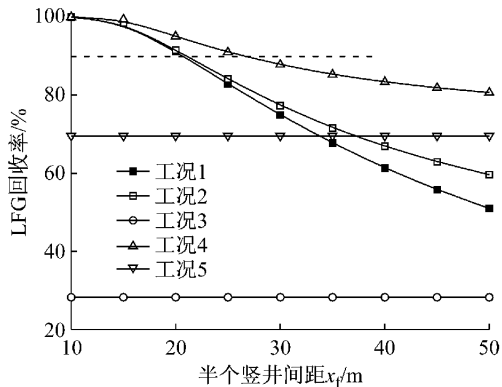


图5 不同工况下LFG回收率随半个竖井间距 x_f 的变化规律图

Fig.5 Variation of LFG recovery rate with half of well distance x_f under different conditions

部更为合理,不但可以降低填埋场内部气压,还可以和竖井共同作用更为有效地回收 LFG.

3 排气层对气压和回收率的影响

填埋场的封顶系统都设置有排气层,排气层的初始渗透系数不小于 $1 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (换算为 $1.18 \times 10^{-9} \text{ m}^2$),但由于使用中会发生淤堵,导致渗透系数降低^[16]. 为了研究排气层对气压和回收率的影响,模拟只有竖井抽气情况,除了将填埋场第 1 层垃圾厚度减小 30 cm 以设置等厚的排气层,其他参数和条件保持不变.

图 6 为排气层渗透系数变化时填埋场在 $x = x_f$ 处的气压分布曲线. 可以发现,排气层可以明显降低填埋场内部的气体压力,然而随着淤堵的发生,有无排气层对气压的分布影响很小. 以无排气层条件下填埋场气压为参考,随着排气层渗透系数从 $1 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 减小到 $1 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,填埋场底部最大气压分别降低了 90 Pa(7.2%)、60 Pa(4.9%)和 20 Pa(1.7%). 值得注意的是,排气层对气压的影响是随深度的增加逐渐减小. 覆盖层顶部的气体压力则是分别降低了 128 Pa(67%)、80 Pa(41%)和 20 Pa(10%).

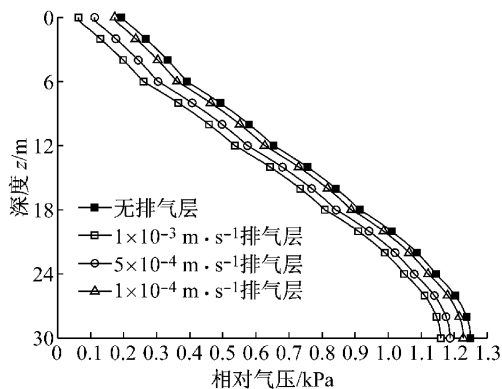


图 6 排气层渗透系数变化时 $x = x_f$ 处的气压分布图
Fig. 6 Distribution of gas pressure at $x = x_f$ for different permeability coefficients of the permeable layer

图 7 为排气层渗透系数变化时填埋场 LFG 回收率随半个竖井间距 x_f 的变化规律曲线. 可以看出,排气层可以明显增大 LFG 回收率和竖井抽气影响距离,从而减少填埋气体逸出量. 此外,当排气层渗透系数为 $1 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,竖井抽气影响距离约为取 $1 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的 2 倍,说明排气层的淤堵对于气体收集系统的设计有着非常显著的影响.

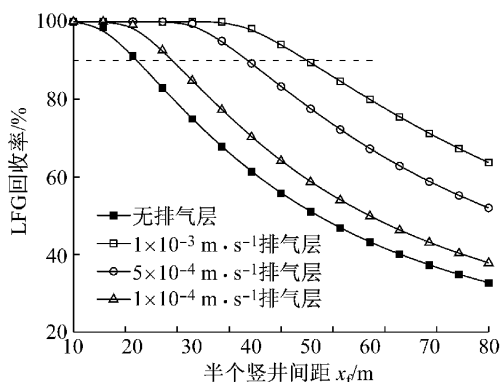


图 7 排气层渗透系数变化时 LFG 回收率变化规律图
Fig. 7 Variation of LFG recovery rate for different permeability coefficients of the permeable layer

4 土工膜覆盖下填埋场气体收集系统的设计

现代卫生填埋场的最终覆盖系统广泛采用低渗透性的土工膜来阻止填埋气体逸出. 这种情况下,如果没有设置气体收集系统或者气体收集系统无法正常工作时,填埋场内气体压力很可能会激增,从而使土工膜膨胀甚至破坏^[17]. 因此,土工膜下往往设有排气层以降低或者均衡土工膜下的气体压力,从而提高覆盖层边坡稳定性^[10]. 模型假设 1.5 mm 厚的土工膜固有渗透系数为 $1.0 \times 10^{-18} \text{ m}^2$, 30 cm 厚的排气层渗透系数为 $1 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,其他参数和条件保持不变.

图 8 为土工膜覆盖下不同气体收集系统在 $x = x_f$ 处的气压分布曲线. 可以看到,只有竖井收集系统且无排气层时,填埋场内最大气压达到 2 kPa,覆盖

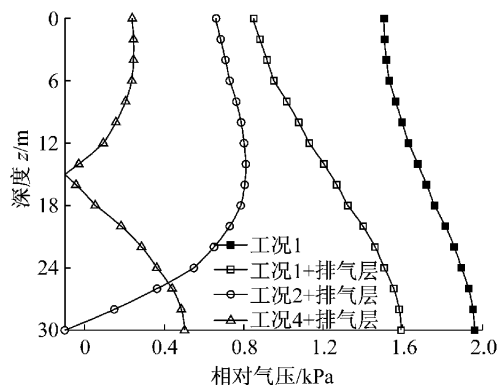


图 8 土工膜覆盖下不同气体收集系统在 $x = x_f$ 处的气压分布图
Fig. 8 Distribution of gas pressure at $x = x_f$ for different gas collection systems in landfills covered by geomembrane

层底部气压达到 1.5 kPa,明显影响填埋场底部衬垫和顶部覆盖层的稳定性.此外,通过对比不同气体收集系统的气压分布,可以发现竖井、水平井(中部)收集系统和排气层的共同作用可以更为显著地降低低渗透土工膜所引起的高气压,从而为实际的填埋场气体收集系统设计提供理论依据.

5 结 论

本文通过分层填埋场的二维气体运移解析解,分析不同工况下的填埋气体运移规律,研究竖井、水平井收集系统和排气层等对气体压力和回收率的影响,初步结论与建议如下:

(1) 水平井收集系统布置在填埋场中部,不但可以明显降低填埋场内部气压,还可以和竖井共同作用,增大其抽气影响距离,更为有效地回收 LFG.

(2) 排气层可以显著地降低填埋场气压和增大竖井抽气影响距离,然而随着淤堵的发生,有无排气层对气压的分布影响很小,而且抽气影响距离明显降低.

(3) 在低渗透土工膜覆盖下,填埋场内部气压显著增大,而竖井、水平井(中部)收集系统和排气层的共同作用可以更为有效地降低气压.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Young A. Mathematical modeling of landfill gas extraction [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1989, 115(6): 1073.
- [3] Wise W, Townsend T G. One-dimensional gas flow models for municipal solid waste landfills: cylindrical and spherical symmetries [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2011, 137(6): 514.
- [4] Baehr A L, Hult M F. Evaluation of unsaturated zone air permeability through pneumatic Tests [J]. *Water Resources Research*, 1991, 27(10): 2605.
- [5] 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.
- [6] 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(2-3): 1404.
- [7] Jain P, Powell J, Townsend T G, *et al.* Air permeability of waste in a municipal solid waste landfill [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2005, 131(11): 1565.
- [8] Faour A A, Reinhart D R, You H X. First-order kinetic gas generation model parameters for wet landfills [J]. *Waste Management*, 2007, 27(7): 946.
- [9] Li Y C, Cleall P J, Ma X F, *et al.* Gas pressure model for layered municipal solid waste landfills [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2012, 138(7): 752.
- [10] Jung Y J, 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.
- [11] 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(23): 6229.
- [12] Giri R K, Reddy K R. Effects of heterogeneous and anisotropic properties of municipal solid waste on leachate distribution and slope stability of bioreactor landfills [C]//Geo-Congress 2014 Technical Papers: Geo-Characterization and Modeling for Sustainability. Reston: American Society of Civil Engineers, 2014: 1483-1492.
- [13] Feng S J, Zheng Q T. A two-dimensional gas flow model for layered municipal solid waste landfills [J]. *Computers and Geotechnics*, 2015, 63: 135.
- [14] 钱学德, 郭志平, 施建勇, 等. 现代卫生填埋场的设计与施工 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [15] QIAN Xuede, GUO Zhiping, SHI Jianyong, *et al.* Design and construction of modern sanitary landfills [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.
- [16] Vigneault H, Lefebvre R, Nastev M. Numerical simulation of the radius of influence for landfill gas wells [J]. *Vadose Zone Journal*, 2005, 3(3): 909.
- [17] CJJ 176—2012 生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [18] CJJ 176—2012 Technical code for geotechnical engineering of municipal solid waste sanitary landfill [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [19] Stark T D, Choi H. Methane gas migration through geomembranes [J]. *Geosynthetics International*, 2005, 12(2): 120.