

垃圾堆体沉降对填埋气体收集效能的影响

易 富¹,许 越¹,田 宇²,姜丰洋³

(1. 辽宁工程技术大学土木与交通学院,辽宁 阜新 123000;2. 武汉市环境卫生科学研究院,湖北 武汉 430071;
3. 中国建筑第八工程局有限公司大连分公司,辽宁 大连 116400)

摘要:为分析填埋场上覆载荷引起的变形沉降以及垃圾自身降解作用对气体迁移特性的影响,采用多孔介质气-固耦合和生物降解理论,构建了填埋气体迁移的 H-M 耦合模型,通过数值模拟方法分析有无载荷作用对填埋气体储存及迁移规律的影响。结果表明:考虑载荷作用时,底部气体的压力值明显高于顶部,且底部与顶部气体压力差值的变化趋势较无载荷作用时更明显;随着填埋年限的增加,填埋场内部气体压力逐渐降低;考虑载荷作用时场内气体压力值高于不考虑载荷作用的情况,封场 1a 后二者气体压力差值为 0.045 kPa,但 10 a 后压力差值达 0.346 kPa;考虑载荷作用时气井收集量比不考虑载荷作用时高 14.8%;载荷的作用在一定的程度上增大了抽气井影响半径的辐射范围。因此,上覆载荷引起的沉降变形对垃圾填埋气体的收集量影响显著,在设计填埋气体收集控制系统时应考虑该因素。

关键词:垃圾填埋气体;抽气井;气-固耦合模型;气体收集效能

中图分类号:X705 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)03-0030-04

The influence of landfill settlement on the efficiency of landfill gas collection//YI Fu¹, XU Yue¹, TIAN Yü², JIANG Fengyang³(1. *Institute of Civil Engineering and Transportation, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China*; 2. *Institute of Wuhan Environmental Sanitation Science, Wuhan 430071, China*; 3. *Dalian Branch China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Dalian 116400, China*)

Abstract: The influence of deformation settlement of landfill resulting from overlying loan and garbage degradation on the migration characteristics of landfill gas is analyzed in this study. The theories of porous medium gas-solid coupling and biodegradation were applied to construct an H-M coupling model of landfill gas migration so as to analyze the influence of the presence of loading on the storage and migration of landfill gas by the numerical simulation method. The results show that the pressure value of bottom gas with overlying load is clearly higher than the ones of top gas, and the change of gas pressure differences between the bottom and the top with overlying load is clearer than that of no load. With increasing landfill time, the gas pressure of landfill gradually reduces. The gas pressure of landfill with overlying load is higher than that of landfill with no load, and the difference of gas pressure between them is 0.045 kPa after the closure of landfill for one year, and 0.346 kPa after the closure of landfill for ten years. Collection amount of gas well with overlying load is higher 14.8% than that of with no load. The overlying load increases the radiation range of influence radius of the extraction well at some degree. The deformation settlement of landfill caused by overlying load can significantly influence the collection amount of landfill gas. This factor should be considered in the design of the control system of landfill gas collection.

Key words: landfill gas; extraction well; gas-solid coupling model; efficiency of gas collection

垃圾填埋气体收集效能的预测和评价一直是国际环境岩土工程领域研究的热点和难点^[1-3]。由于生活垃圾自身的生物降解作用和填埋场上覆载荷的影响,垃圾堆体的渗透特性随时间和空间发生改变^[4],因此,开展载荷作用对垃圾填埋气体迁移规律的影响研究,对于合理预测填埋气体的收集效能具有重要的现实意义。

国内外学者在填埋气体的产生及迁移规律的预测方面开展了大量研究。Li 等^[5]建立了二维径向流模型,考虑了垃圾的降解、气体间弥散作用以及填

埋场的沉降变形,模拟了填埋气体的产生及运移规律,提出了气井分布的优化方法。Chen 等^[6]通过建立被动式气井抽气的二维数学模型,模拟了纽约市的 Fresh Kill 填埋场,预测了抽气井的有效半径。Mehrdrad 等^[7]在文献^[6]的基础上从空间角度出发建立了一个模拟填埋场气体产出和运移的三维模型,揭示了填埋场内部气体运移和压力变化的规律。Gustavo 等^[8]通过现场监测试验,测得了 Belo Horizonte 填埋场 6 a 内的沉降数据,并修正了 H-M 耦合模型。谢焰等^[9]将填埋场简化为非稳定单向气体渗流场,建立了考虑气-固耦合的填埋场沉降计算模型,分析了场内孔隙气压对沉降的影响。薛强等^[10]通过建立气-水-固三相耦合模型,模拟了垃圾填埋场变形沉降和气体产生及迁移演化规律。Tinet 等^[11]和 Raudel 等^[12]也进行了类似的模拟研究。这些研究为本文开展载荷引起的沉降变形对填埋气体迁移规律及收集效能的影响研究提供了借鉴。

在垃圾降解过程中,大颗粒物质的分解使得内部孔隙变大,在外载荷的作用下,垃圾土因骨架间的应力平衡被破坏而发生沉降变形,直接导致底部垃圾的密度高于顶部。此外,载荷的作用使孔隙中的气体承受上方垃圾的压力,并且这部分压力会通过气体传递给下方的垃圾骨架,因此填埋场内存在气-固耦合作用。为此,本文以多孔介质气-固耦合和生物降解理论为基础,构建了填埋气体释放的 H-M 耦合模型,并通过数值仿真分析预测了填埋场内气体压力的分布情况,分析了有无载荷作用对填埋场气井收集效能的影响。

1 气-固耦合模型的建立

1.1 气相渗流运动方程

填埋场内气体运动连续性方程^[13]可表示为

$$\frac{\partial(\theta_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla(\theta_g \rho_g v_g) = \alpha \quad (1)$$

式中: ρ_g 为气体密度, kg/m^3 ; θ_g 为孔隙度; v_g 为气体流速, m/s ; α 为产气速率, $\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{a})$ 。

垃圾堆体的产气速率 α 采用一级动力学模型求解,可表示为

$$\alpha = C \sum_{i=1}^3 A_i \lambda_i e^{-\lambda_i t} \quad (2)$$

式中: C 为单位质量的垃圾产生的气体体积, m^3/kg ; A_i 为垃圾组分 i 的质量分数, %; λ_i 为垃圾组分 i 生物分解参数, a^{-1} ; $i=1, 2, 3$, 分别表示易降解、中等降解和难降解垃圾。

假设填埋场内气体为 CH_4 , 气体压力 P_g 满足理想气体方程,则

$$P_g = \frac{\rho_g R T}{M} \quad (3)$$

式中: P_g 为气体压力, Pa ; R 为比例常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为温度, K ; M 为气体摩尔质量, g/mol 。

1.2 固相变形方程

填埋场内固体垃圾的质量随着填埋年限的增加逐渐变化,固相质量连续性方程可写为

$$\frac{\partial[(1-n)\rho_s]}{\partial t} + \nabla[(1-n)\rho_s v_s] = M_s \quad (4)$$

式中: n 为不考虑液相存在时的垃圾体孔隙度; ρ_s 为垃圾土的密度, kg/m^3 ; v_s 为固体颗粒运动的绝对速度, m/s ; M_s 为固体垃圾的质量变化率, a^{-1} 。

结合方程(2), M_s 可表示为

$$M_s = \rho_s Y \alpha \quad (5)$$

式中: Y 为常数。

考虑固相颗粒的压缩,假设其为弹性变形,于是固体密度和气体压力之间的关系可表示为

$$\frac{\partial \rho_s}{\rho_s \partial t} = \frac{\partial P_g}{K_0 \partial t} \quad (6)$$

式中: K_0 为弹性模量, Pa 。

当不考虑水相流动,即饱和度为常量时,考虑垃圾固体变形及生物降解条件下的气-固耦合方程^[5],方程(1)可写为

$$\frac{\partial(n\rho_g)}{\partial t} = \rho_g \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{Y\alpha}{\rho_s} + \frac{n}{\rho_g} \frac{\partial \rho_g}{\partial t} \right) \quad (7)$$

展开式(4)中的固相质量连续性方程有

$$(1-n) \frac{\partial \rho_s}{\partial t} - \rho_s \frac{\partial n}{\partial t} + (1-n) \rho_s \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = M_s \quad (8)$$

方程(4)~(8)的推导均建立在小变形假定的基础上,将方程(5)(6)(7)代入方程(8)可得

$$(1-n) \frac{\partial P_g}{K_0 \partial t} - n \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \left(1 + \frac{1}{\rho_s} \right) Y \alpha \quad (9)$$

填埋垃圾应力-应变关系^[10]可表示为

$$\varepsilon = [a + b(1 - e^{\eta \sigma'})] \frac{\partial \sigma'}{\partial t} \quad (10)$$

式中: a, b 为常量, Pa^{-1} , 本文取 $a = 3.8 \times 10^{-7} \text{Pa}^{-1}$, $b = 5.8 \times 10^{-7} \text{Pa}^{-1}$; η 为垃圾堆体的压缩速率, a^{-1} ; σ' 为上覆载荷引起的有效应力, Pa 。

有效应力可通过式(11)计算^[14]:

$$\sigma' = \sigma_0 + S_g P_g \quad (11)$$

其中

$$\sigma_0 = - \int_{z_1}^{z_2} (\theta_g \rho_g + \rho_s) g dz$$

式中: σ_0 为垃圾自重引起的总应力, Pa ; S_g 为气体饱和度; z 为填埋场高度, m ; z_1 为填埋场底部的高度, m ; z_2 为填埋场顶部的高度, m 。

2 气-固耦合模型的应用

根据前文所建立的气-固耦合模型,采用 Matlab

语言编制了仿真计算程序,模拟某垃圾填埋场运行过程中气体的分布及气井收集量的变化,拟建长80 m、高16 m的二维计算模型。以气井为中心,规定在径向某一圆柱区域内当CH₄回收率大于90%时,该区域至气井圆心的距离 R_i 即为影响半径^[15-16]。模型的边界条件:左右边界水平位移为零,抽气井边界气体压力 $P_1=P_0$ (P_0 为大气压),顶部边界 $P_2=P_0$,底部边界 P_3 和右侧边界 P_4 均为零。

已知气井直径为0.6 m,高度为11 m,气井间距为80 m,垃圾的初始压实密度为900 kg/m³,易降解垃圾的质量分数 $A_1=15\%$,中等降解垃圾质量分数 $A_2=55\%$,难降解垃圾质量分数 $A_3=30\%$,易降解垃圾生物分解参数 $\lambda_1=0.1368\text{ a}^{-1}$,中等降解垃圾生物分解参数 $\lambda_2=0.023\text{ a}^{-1}$,难降解垃圾生物分解参数 $\lambda_3=0.017\text{ a}^{-1}$ 。单位质量的垃圾所产生的气体体积 $C=421.98\text{ m}^3/\text{kg}$,CH₄气体的黏滞系数为 $1.54\times 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。垃圾堆体的压缩速率 $\eta=1.17\text{ a}^{-1}$ 。

图1给出了不同垃圾填埋封场年限以及有无载荷作用下气体压力 P_g 随填埋场高度 H 的变化规律。由于填埋气体的产出速率随时间的增长逐渐减小,封场1 a后气体的压力值要高于封场10 a后的压力值;由于垃圾上覆载荷的作用,底部垃圾孔隙内的气体压力值较大,越靠近底部,气体压力值越大,且底部与顶部气体压力差值的变化趋势较无载荷作用时更明显。

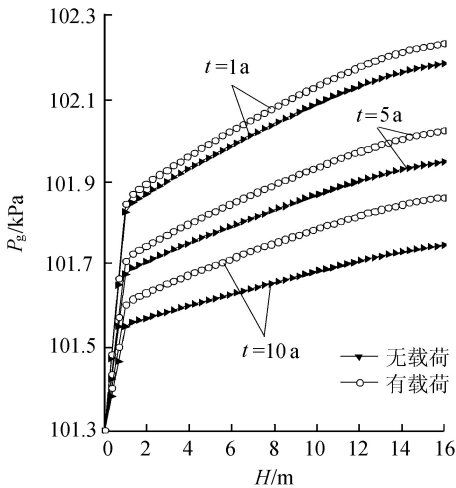


图1 垃圾堆体气体压力随高度的变化规律

图2给出了有无载荷作用下填埋场内部气体压力随时间的变化规律。随着填埋年限的增长,垃圾降解逐渐趋于稳定,场内气体压力变小。考虑载荷作用下的气体压力值高于不考虑载荷作用的情况,封场1 a后二者气体压力差值较小,仅为0.045 kPa,但10 a后压力差值达0.346 kPa。差值变化的原因

主要是考虑载荷作用时垃圾中大颗粒物质的降解破坏了垃圾骨架间的平衡,且降解时间越长,骨架越松散,堆体在上覆载荷的作用下发生沉降变形,使得垃圾的孔隙度变小,气流通道变窄,导致压力较大。而不考虑载荷作用时,随着时间的增长,垃圾孔隙度变化不大,气体流动通畅,故压力偏小。

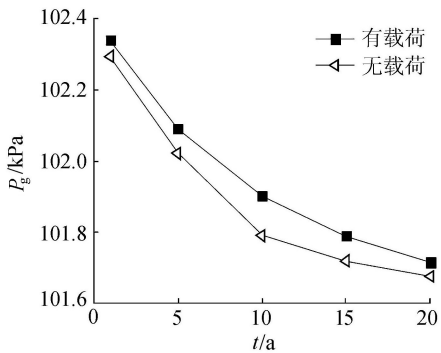


图2 垃圾堆体气体压力随时间的变化规律

图3给出了有无载荷作用下气井收集量 Q 随时间的变化规律。填埋初期,垃圾降解速率较快,考虑载荷作用时,填埋1 a后气井收集量可达到90 m³/h;随着时间的延长,气体有效压力区间减小,流速减缓,直接导致气井收集量下降。考虑载荷作用时气井收集量比不考虑载荷作用时高14.8%,主要是由于无载荷作用时,垃圾孔隙度和渗透率均为定值,影响气井收集量的仅为产气速率。

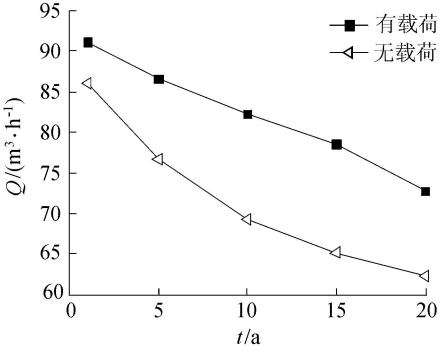


图3 气井收集量随时间的变化规律

图4给出了有无载荷作用下抽气井影响半径 R_i 随时间的变化规律。随着时间的增长,影响半径均出现大幅下降;有载荷作用时,场内气压升高,故而气井的影响半径大于无载荷作用的情况,且后期逐渐趋于稳定。

3 结 论

以多孔介质气-固耦合和生物降解理论为基础,构建了填埋场气体迁移的H-M耦合模型,对比分析了有无载荷作用下填埋气体压力分布和气井收集量的变化规律,结果表明:考虑载荷作用时,填埋场底

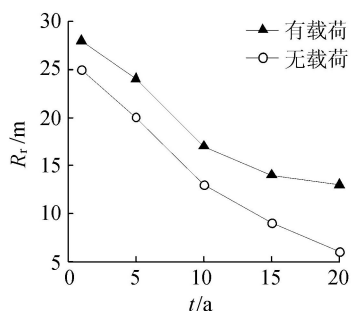


图4 抽气井影响半径随时间的变化规律

部气体的压力值明显高于顶部,且底部与顶部气体压力差值的变化趋势较无载荷作用时更明显;随着填埋年限的增加,填埋场内部气体压力逐渐降低;考虑载荷作用时场内的气体压力值高于不考虑载荷作用的情况,封场1a后二者气体压力差值为0.045 kPa,但10a后压力差值达到0.346 kPa;考虑载荷作用时气井收集量比不考虑载荷作用时高14.8%;载荷的作用在一定的程度上增大了抽气井影响半径的辐射范围。

参考文献:

[1] RITZKOWSKI M, STEGMANN R. Controlling greenhouse gas emissions through landfill in situ aeration [J]. International Journal of Greenhouse gas Control, 2007, 1 (3): 281-288.

[2] ORHAN S, BERRIN T. Effect of persistent trace compounds in landfill gas on engine performance during energy recovery: a case study [J]. Waste Management, 2013, 33(1): 74-80.

[3] PARK J W, SHIN H C. Surface emission of landfill gas from solid waste landfill [J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(20): 3445-3451.

[4] TJALFE G P, PER M, ANNE T, et al. Predicting air permeability in undisturbed, subsurface sandy soil from air-filled porosity [J]. Journal of Environmental Engineering, 2007, 133(10): 995-1001.

[5] LI Y, FRANCISCO B, JESUS C, et al. Gas flow to a vertical gas extraction well deformable MSW landfills [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 168(2/3): 1404-1416.

[6] CHEN Y C, CHEN K S, WU C H. Numerical simulation of gas flow around a passive vent in a sanitary landfill [J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 100(1/2/3): 39-52.

[7] MEHRDAD H, HALIL I K, THEODORE T T, et al. Computer simulation of gas generation and transport in landfills-I: quasi-steady-state condition [J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(13): 2475-2501.

[8] GUSTAVO F S, CICERO A A C. Monitoring and

modeling of long-term settlement of an experiment landfill in Brazil [J]. Waste Management, 2013, 33(2): 420-430.

[9] 谢焰, 陈云敏, 唐晓武, 等. 考虑气固耦合填埋场沉降数学模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 601-608. (XIE Yan, CHEN Yunmin, TANG Xiaowu, et al. Mathematical model for landfill settlement considering gas-solid coupling effect [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 601-608. (in Chinese))

[10] 薛强, 刘磊, 梁冰, 等. 垃圾填埋场沉降变形条件下气-水-固耦合动力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 3473-3478. (XUE Qiang, LIU Lei, LIANG Bing, et al. A gas-hydraulic-solid coupling dynamic model under landfill settlement [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 3473-3478. (in Chinese))

[11] TINET 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): 6229-6237.

[12] RAUDEL S, THEODORE T T, MUHAMMAD S. Computer simulation of gas generation and transport in landfills: modeling of liquid-gas flow [J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(3): 1212-1226.

[13] MOHAMMADI S, POOLADI A. A two-mesh coupled gas-flow-solid interaction model for 2D blast analysis in fractured media [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2012, 50: 48-69.

[14] DUMMUSOGLU E, CORAPCIOGLU M Y, TUNCAY K. Landfill settlement with decomposition and gas generation [J]. Journal of Environmental Engineering, 2005, 131(9): 1311-1321.

[15] VIGNEAULT H, LEFEBVRE R, NASTEV M. Numerical simulation of the radius of influence for landfill gas wells [J]. Vadose Zone Journal, 2004, 3(3): 909-916.

[16] 刘磊, 梁冰, 薛强, 等. 垃圾填埋气体抽排影响半径的预测[J]. 化工学报, 2008, 59(3): 751-755. (LIU Lei, LIANG Bing, XUE Qiang, et al. Estimation of influence of pumping landfill gas [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59(3): 751-755. (in Chinese))

(收稿日期: 2013-05-29 编辑: 骆超)

