

考虑气固耦合填埋场沉降数学模型

谢 焰^{1,2}, 陈云敏¹, 唐晓武¹, 凌道盛¹, 柯 瀚¹

(1. 浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 安徽理工大学 资源与环境工程系, 安徽 淮南 232001)

摘要: 为研究城市生活垃圾填埋场孔隙气压对沉降的影响程度, 把填埋场简化为非稳定单向气体渗流场, 采用 Gibson 和 Lo 一维压缩模型及 U.S. EPA Landgem 产气方程, 结合达西定律、气体状态方程、有效应力原理和多孔介质流体动力学理论, 建立了考虑气固耦合的填埋场沉降计算模型。填埋场的沉降按封场前和封场后 2 个阶段分别计算, 封场前填埋场接受垃圾, 堆填压力增加, 而封场后的堆填压力保持不变。运用差分法求解的结果表明, 填埋场垃圾体内孔隙气压与深度、时间和透气率等因素有关。封场前, 气压随深度和时间的增加而增加; 封场后, 气压随时间逐渐消散。高透气率的填埋场有较高的气体消散速率。封场前气压的增加减小了填埋场沉降速率, 从而导致填埋场的容量减少。提出在填埋场沉降计算和边坡稳定分析时考虑气压影响的必要性。

关键词: 数值分析; 沉降; 气固耦合; 数学模型; 填埋场

中图分类号: O 241

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)03 - 0601 - 08

MATHEMATICAL MODEL FOR LANDFILL SETTLEMENT CONSIDERING GAS-SOLID COUPLING EFFECT

XIE Yan^{1,2}, CHEN Yun-min¹, TANG Xiao-wu¹, LING Dao-sheng¹, KE Han¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

2. Department of Resources and Environmental Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: To study the influence of refuse pore gas pressure on the landfill settlement, a mathematical model was developed, which simplified the landfill as a one-dimensional unsteady gas seepage field. The model incorporated Gibson and Lo model, U.S. EPA Landgem model, Darcy's law, ideal gas law, principle of effective stress and theory of dynamics of fluids in porous media. According to the model, the landfill settlement was calculated by the active stage and closed stage, respectively. During the active stage, the landfill continually received refuse, which led to the increase of loads. During the closed stage, the loads kept constant. The result of the finite difference solution represented that the pore gas pressure in the landfill was influenced by the depth, time and permeability. The pore gas pressure increased with the depth and time in the active stage, and dispersed gradually in the closed stage. The landfill with a high permeability has a high rate of pore gas pressure dispersing. The decrease of settlement rate, caused by the increase of gas pore pressure, will decrease the capacity of the landfill. The gas pore pressure should be considered to calculate the settlement and to evaluate the stability of landfills.

Key words: numerical analysis; settlement; gas-solid coupling; mathematical model; landfill

收稿日期: 2004 - 10 - 17; **修回日期:** 2005 - 05 - 21

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(50425825); 教育部高校青年教师奖励基金项目

作者简介: 谢 焰(1968 -), 男, 博士, 1992 年于淮南矿业学院资源与环境工程系获硕士学位, 现任副教授, 主要从事环境岩土工程和工程物探方面的教学与研究工作。E-mail: yxau@zju.edu.cn.

1 引言

生活垃圾中填埋场中固体废弃物在分解过程中产生大量的气体,其主要成分包括 CO_2 , CH_4 , 以及少量 N_2 , H_2 , NH_3 , H_2S 等。填埋场垃圾体内气压的增加,会使垃圾体有效应力减小,从而对填埋场的沉降和稳定产生影响。

正常情况下,由于垃圾的孔隙度较大,填埋场中垃圾的透气系数较高,因而填埋场中的气压较小。但是,随着大型填埋场建设的不断增多,填埋场的深度不断增加,垃圾受的重力荷载不断增大,垃圾体中的孔隙度将逐渐减小,从而导致透气系数减小,造成土中气压增大;如果填埋场设计的排气能力偏小或者排气设施年久失效而发生淤堵,也将会引起排气效率降低,引起土中气压上升。因此,建立考虑气固耦合的填埋场沉降计算模型,对于填埋场的库容量计算及稳定分析具有重要意义。

建立考虑气固耦合填埋场沉降计算模型的关键问题是弄清填埋场的气体渗流规律。受试验条件所限,当前的研究还主要以数值模拟为主。A. N. Findikakis 和 J. O. Leckie^[1]建立了一维气体迁移模型; D. E. Metcalfe 和 G. J. Farquhar^[2]建立了二维气体迁移模型; A. Young^[3]建立了填埋场抽排气数学模型; S. G. Arigala 等^[4]建立了三维气体迁移模型; H. R. Thomas 和 W. J. Ferguson^[5]建立了在非饱和介质中质量和热量耦合的污染气体迁移模型; M. Nastev 等^[6]建立了气体产生和迁移的模型,模拟了水、空气、 CH_4 、 CO_2 和热量等 5 种组分的迁移特征。国内由于大型标准化的填埋场建设起步较晚,在这方面的研究始于近几年,陈家军等^[7]建立了填埋场释放气体运移数值模型,考虑了填埋场中介质含水量变化对气体运移的影响。以上各模型均未考虑介质变形对气体渗流场的影响。陈云敏和柯翰^[8]建立了填埋场库容量计算模型,但是未考虑垃圾体内孔隙气压的影响;薛强等^[9]建立的填埋场气体迁移数学模型中考虑了介质变形的影响,但是未考虑垃圾降解产气源项,及填埋场封场前后总应力的差别。对于一个实际的大型垃圾填埋场,其垃圾堆填的年限较长,当填埋场尚处于堆填阶段时,垃圾体所受的上部压力是不断增加的,而封场后,上部压力保持不变。另外,模型中把垃圾当作弹性材料来处理,未能体现垃圾因降解而表现出来的流变特征。

本文根据 Gibson 和 Lo 流变模型及 U. S. EPA

Landgem 产气方程,结合达西定律、气体状态方程、有效应力原理和多孔介质流体动力学相关理论,建立了考虑气固耦合的填埋场沉降计算模型。在模型中,填埋场的沉降按封场前和封场后 2 个阶段分别计算,封场前填埋场接受垃圾,堆填压力增加,而封场后的填埋场堆填压力保持不变。根据差分求解结果,对填埋场孔隙气压分布和沉降特点做了探讨。

2 填埋场气体流动状态分类

填埋场的填埋方式和排气方式很多,具有不同填埋方式和排气方式的填埋场,其气体渗流特征会有差异。在研究填埋场气体渗流规律之前,必须对填埋场气体流动状态进行分类。

在油气开发和煤层瓦斯研究领域中,是按气体的时间流向(稳定性)和空间流向对气体渗流场进行分类的^[10, 11]。鉴于目前尚未见到有关填埋场气体渗流场分类的资料,本文采用类似分类方案,对填埋场的气体渗流场进行分类。

2.1 按流场的稳定性分类

按流场在时间上是否有变化,可将其分为稳定流场和非稳定流场两类。在稳定流场内,任何一点的气体流速、流向和压力不随时间变化;在非稳定流场中,气体的流速、流向和压力是随时间改变的。

由于填埋场中气体是靠垃圾中有机质的降解产生的,而垃圾体的降解是一个随时间变化的过程,因此,垃圾填埋场气体渗流场应属非稳定流场。

2.2 按流场的空间流向分类

(1) 单向流动:在三维空间内,只有一个方向有流速,其余 2 个方向流速为 0 的流动。单向流动的特点是形成了彼此相互平行、方向相同的流网(见图 1)。

(2) 径向流动:在三维空间内,在 2 个方向有分速度,而在第三个方向速度为 0 的流动,其所形成的流场为径向流场。当填埋场排气管道垂直穿透整个垃圾体,覆盖层密闭效果好,气体主要通过径向流动经排气管排出,此时的流动场可看作径向流场,此时的等压线平行孔壁且呈同心圆形状(见图 2)。

(3) 球向流动:在三维空间内,在 3 个方向都有分速度的流动,其所形成的流场为球向流场。当填埋场垃圾体厚度大,排气管埋设深度较浅,此时的流场可看作球向流场。球向流场的特点在于,在垃圾体内形成近似于同心球状等压线,而流线一

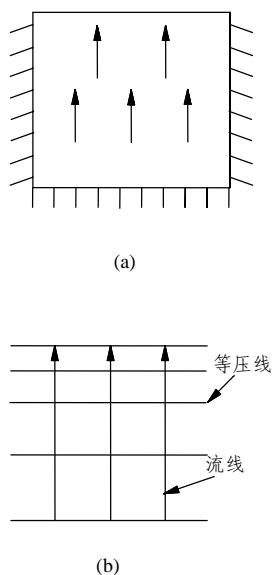


图 1 气体单向流动示意图
Fig.1 Unidirectional seepage

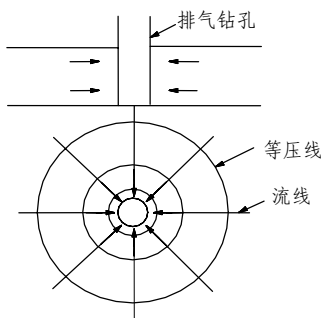


图 2 气体径向流动示意图
Fig.2 Radial seepage

般呈放射网状(见图 3)。

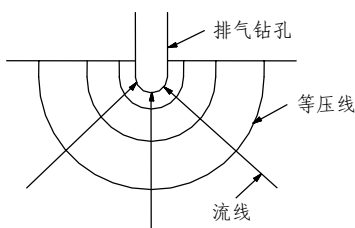


图 3 气体球向流动示意图
Fig.3 Spherical seepage

在进行填埋场气体渗流规律研究时, 应该根据填埋场的实际情况选用以上流场型式。本文忽略填埋场垃圾体内的衬垫层和抽排管道的影响, 把填埋场渗流场简化为一个只有顶部透气, 其余方向不透气的单向流场, 把垃圾体当作透气率为 k 的宏观均质体来进行研究。

3 基本方程

在建立方程前, 引入如下几个假设: (1) 流体为单相气流, 不考虑孔隙中淋滤液的影响; (2) 气体为理想气体; (3) 垃圾体处于等温状态; (4) 气体透气率 k 、黏滞系数 μ 均为常量。在提出上述假设后, 可写出如下几组方程。

3.1 理想气体状态方程

$$\frac{P}{\rho} = \frac{RT}{\mu'} \quad (1)$$

式中: P 为气体绝对压力(Pa), ρ 为气体密度(g/m^3), R 为气体常数($\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$), μ' 为气体分子量(g/mol), T 为气体绝对温度(K)。

3.2 气体运动方程(达西定律)

$$V = -\frac{k}{\mu} \text{grad}P \quad (2)$$

式中: V 为气体流速(m/s), k 为气体有效透气率(m^2), μ 为气体黏滞系数($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。

3.3 有机质降解产气方程

填埋场产生气体的能力依赖于诸多因素, 这些影响因素包括废弃物的组成、湿度、pH 值和营养物质起作用的程度。垃圾降解产气方程可以通过室内试验和现场测试来确定, 在无试验资料情况下, 可用 U.S. EPA Landgem 模型^[12]来计算 CH_4 产量:

$$F(t) = w(1 - e^{-\beta t}) \quad (3)$$

式中: $F(t)$ 为从开始到 t 时刻 CH_4 的总产量(g), w 为单位体积垃圾产生 CH_4 的潜力(g/m^3), β 为降解系数, t 为降解时间。

固体废弃物有机质降解过程分好氧分解和厌氧分解 2 个阶段。好氧分解一般较快完成(多为几个月), 其气体产物主要为 CO_2 , 接下来进行的是厌氧分解阶段, 气体产物主要为 CO_2 和 CH_4 , 因此降解产气属混合气体。填埋场混合气体的产生速率为

$$f(t) = \frac{\alpha dF(t)}{dt} = \alpha w \beta e^{-\beta t} \quad (4)$$

式中: α 为产气比率系数。

3.4 压缩模型

目前常用的垃圾沉降计算模型主要为采用软土压缩计算的 Sowers 模型(1973)和 Edil(1990)提出的 Gibson 和 Lo 流变模型及动力蠕变法则^[13]。考虑到垃圾的主、次固结难于区分, 本文采用 Gibson 和 Lo 流变模型(见图 4)用于垃圾的沉降计算。

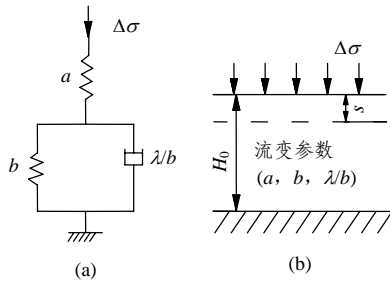


图4 Gibson 和 Lo 流变模型
Fig.4 Gibson and Lo rheological model

应力增量 $\Delta\sigma$ 一旦作用于流变模型，弹性系数为 a 的虎克弹簧立即压缩，这种情形类似于主固结。开尔文单元体由一个弹簧(弹性系数为 b)和一个黏壶(黏滞系数为 λ/b)并联组成，它的压缩由于牛顿黏壶(线性)的存在而延迟，这种情形类似于恒定有效应力下次固结的连续过程。恒定荷载逐渐从牛顿黏壶传递给虎克弹簧，经过一段较长的时间(如在次压缩时间范围内)，全部有效应力将由两根弹簧承受，黏壶不受荷载。应变随时间的变化关系式可表示如下：

$$\varepsilon(t) = \Delta\sigma' \left\{ a + b \left[1 - e^{-\left(\frac{\lambda}{b}\right)t} \right] \right\} \quad (5)$$

式中： $\varepsilon(t)$ 为应变； $\Delta\sigma'$ 为有效压应力，且有 $\Delta\sigma' = \Delta\sigma - P$ ， $\Delta\sigma$ 为压应力，是由上部垃圾荷重产生的， P 为垃圾体内气压； a 为主固结计算参数，即虎克弹簧的弹性系数； b 为次固结计算参数，即开尔文单元体中弹簧的弹性系数； $\frac{\lambda}{b}$ 为次固结速率； t 为加荷开始的时间。

3.5 连续性方程

在垃圾体内任取一正六面体(见图 5)，考虑单向流场，分流速 $V_x = V_y = 0$ 。

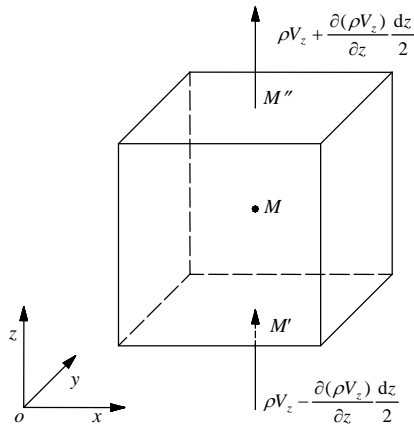


图5 控制单元体气体渗流示意图
Fig.5 Schematic diagram for gas seepage of representative element volume

根据多孔介质流体动力学原理^[14, 15]，考虑降解产气源项的垃圾连续性方程可写为

$$f(t)dx dy dz dt - \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} dx dy dz dt = \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dx dy dz dt \quad (6)$$

式中： $f(t)$ 为降解产气速率。考虑气体为可压缩流体，则上式可写为

$$\left. \begin{aligned} f(t) - \phi \frac{\partial \rho}{\partial t} - \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} &= \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} \\ V_z &= V_r + V_s \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中： V_z 为气体绝对流速， V_r 为气体相对垃圾颗粒的流速， V_s 为垃圾固体颗粒的沉降速率。一般情况下，填埋场气体的流动速率要远大于垃圾固体颗粒的沉降速率，故可以近似认为

$$V_z \approx V_r = -\frac{k}{\mu} \text{grad}P$$

根据沉降与孔隙度变化关系可得

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta e}{1 + e_0} = \frac{\phi_0 - \phi}{1 - \phi} \quad (8)$$

式中： e_0 ， ϕ_0 分别为垃圾的初始孔隙比、初始孔隙率； Δe 为孔隙比改变量。

将式(5)代入式(8)，可得

$$\phi(P, t) = \frac{\phi_0 - 1}{1 - \Delta\sigma' \left\{ a + b \left[1 - e^{-\left(\frac{\lambda}{b}\right)t} \right] \right\}} + 1$$

其一阶偏导为

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = h(P, t) \frac{\partial P}{\partial t} - g(P, t) \quad (9)$$

其中，

$$h(P, t) = \frac{(1 - \phi_0) \left\{ a + b \left[1 - e^{-\left(\frac{\lambda}{b}\right)t} \right] \right\}}{\left\{ 1 - \Delta\sigma' \left\{ a + b \left[1 - e^{-\left(\frac{\lambda}{b}\right)t} \right] \right\} \right\}^2}$$

$$g(P, t) = \frac{(1 - \phi_0) \Delta\sigma' b \frac{\lambda}{b} e^{-\left(\frac{\lambda}{b}\right)t}}{\left\{ 1 - \Delta\sigma' \left\{ a + b \left[1 - e^{-\left(\frac{\lambda}{b}\right)t} \right] \right\} \right\}^2}$$

将式(1)，(4)和(9)代入式(7)，可得

其中,

$$A_i = - \left\{ 2 + \frac{m}{n} g_i^{j-1} \left(L_1 - L_2 \frac{\partial Q}{\partial t} \Delta T \right) \right\}_i^{j-1} \Delta z^2 - \frac{m}{2n\Delta T} \Delta z^2 \left[\phi_i^{j-1} \left(L_1 - L_2 \frac{\partial Q}{\partial t} \Delta T \right) \right]_i^{j-1} + h_i^{j-1} \right\}$$

(i = 1, 2, ..., n)

$$B_1 = \frac{m}{2n\Delta T} \Delta z^2 \left[\phi_1^{j-1} \left(L_1 - L_2 \frac{\partial Q}{\partial t} \Delta T \right) \right]_1^{j-1} Q_1^{j-1} + \frac{\Delta z^2}{n} f_1^j - d$$

$$B_i = \frac{m}{2n\Delta T} \Delta z^2 \left[\phi_i^{j-1} \left(L_1 - L_2 \frac{\partial Q}{\partial t} \Delta T \right) \right]_i^{j-1} Q_i^{j-1} + \frac{\Delta z^2}{n} f_i^j$$

(i = 2, 3, ..., n)

各系数中的 $\frac{\partial Q}{\partial t} \Big|_i^{j-1}$ 可通过将式(8)直接写成差分

格式得到:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \Big|_i^{j-1} = \frac{2n}{m \left(h_i^{j-1} + \frac{\phi_i^{j-1}}{\sqrt{Q_i^{j-1}}} \right)} \left(- \frac{Q_{i+1}^{j-1} - 2Q_i^{j-1} + Q_{i-1}^{j-1}}{\Delta z^2} + \frac{m}{n} \sqrt{Q_i^{j-1}} g_i^{j-1} + \frac{1}{n} f_i^{j-1} \right)$$

方程式(16)的系数矩阵为三对角矩阵, 可根据初始条件式(14)由追赶法求解 Q_i^j 值。将 $P_i^j = \sqrt{Q_i^j}$ 代入到式(5)即可算得考虑气固耦合的各分层的变形量, 继而可求得填埋场的高度。

4.2 程序设计流程图

程序设计分封场前和封场后两种情况。两者区别在于, 封场后的填埋场不再堆填垃圾, 因而某一高度垃圾体所受的重力荷载不变。图 6 给出的是封场后填埋场气压和高度计算程序流程图, 其中, T_T 为封场时间(a), T_M 为计算时间(a)。至于封场前的程序流程图, 相当于图中 $T \leq T_T$ 以上部分。

4.3 垃圾堆填过程处理

封场前, 垃圾不断堆填, 使得下部的垃圾体所受荷载不断增加。现场填埋场垃圾的堆填是分层、分单元堆填的, 每一单元的堆填时间一般为几天到数周, 因而在考虑垃圾堆填引起的荷载增加这一过程时, 可按瞬时加载处理。这样, 假如填埋场封场前每年的平均堆填高度为 10 m, 则堆填过程可按图 7 所示步骤处理。

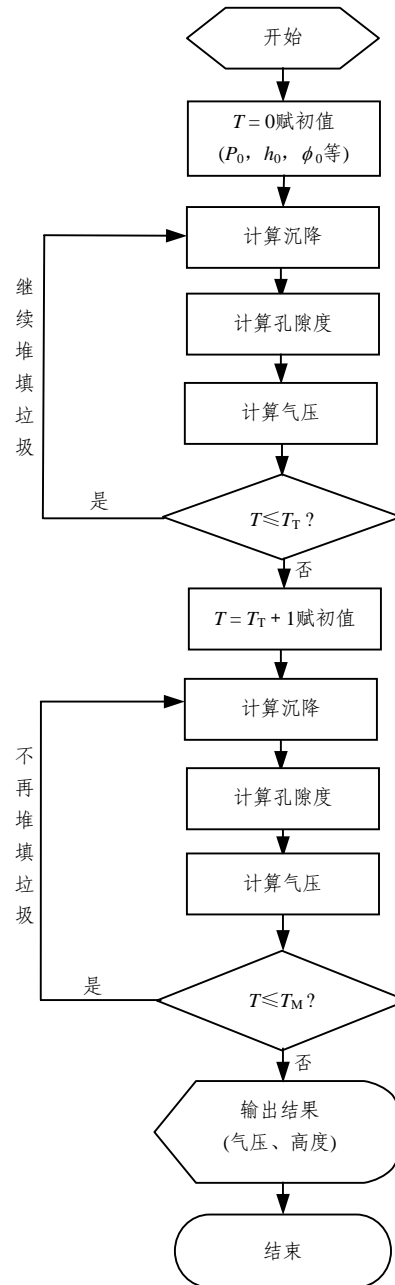


图 6 程序流程图

Fig.6 Flow chart of program

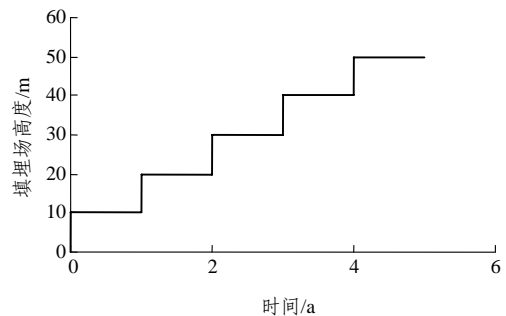


图 7 填埋场封场前堆填过程示意图

Fig.7 Refuse filling rate in the active stage

5 算例分析

假设某填埋场各计算参数如下(部分取自谢 焰等^[17]试验结果): 气体常数 $R = 8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$, 混合气体分子量 $\mu' = 30 \text{ g}/\text{mol}$, 气体温度 $T = 314 \text{ K}$, 气体黏滞系数 $\mu = 1.3 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 产气比率系数 $\alpha = 2$, 降解系数 $\beta = 0.032$, 每立方垃圾最终产气质量 $w = 80 \text{ kg}$, 时间步长 $\Delta T = 1 \text{ a}$; 垃圾初始孔隙率 $\phi_0 = 0.7$, 每年垃圾堆填高度 $h_0 = 10 \text{ m}$, 填埋场垃圾堆填年限 $T_T = 10 \text{ a}$, 垃圾密度 $\rho = 600 \text{ kg}/\text{m}^3$, 每年垃圾分层数 $N_0 = 5$, $a = 3.8 \times 10^{-4} \text{ kPa}^{-1}$, $b = 5.8 \times 10^{-4} \text{ kPa}^{-1}$; $\lambda/b = 0.129$ 。

图 8 和 9 分别为透气率 $k = 0.16 \times 10^{-12}$, $0.16 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ 时的孔隙气压分布曲线。从图中可见, 填埋场气压分布与深度、时间和透气率有关。封场前, 气压随时间的增加而增加, 且随高度增加而减小; 封场后, 气压随时间逐渐消散。高透气率的填埋场有高的气体消散速率。当 $T_M = 25 \text{ a}$ 时, $k = 0.16 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ 的填埋场各深度的孔隙气压已经消散到标准大气压 101 kPa, 而同期 $k = 0.16 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 的填埋场仍保持较高的气压。

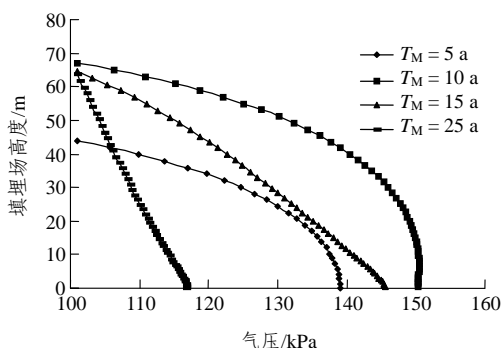


图 8 填埋场气压沿高度分布曲线($k = 0.16 \times 10^{-12} \text{ m}^2$)
Fig.8 Distribution of gas pressure along depth ($k = 0.16 \times 10^{-12} \text{ m}^2$)

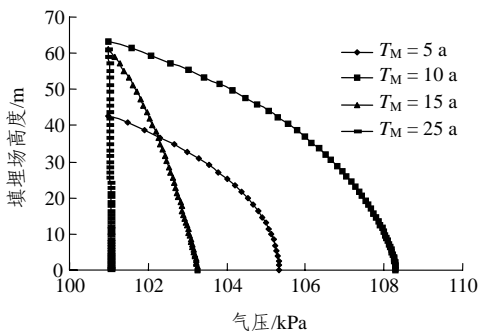


图 9 填埋场气压沿高度分布曲线($k = 0.16 \times 10^{-11} \text{ m}^2$)
Fig.9 Distribution of gas pressure along depth ($k = 0.16 \times 10^{-11} \text{ m}^2$)

图 10 为计算时间 $T_M = 5 \text{ a}$ 时, 透气率分别为 $k_1 = 0.16 \times 10^{-11} \text{ m}^2$, $k_2 = 0.16 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, $k_3 = 0.16 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 和 $k_4 = 0.8 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 时, 所求得的填埋场气压随高度的变化曲线。从图中可见, 填埋场高度和气压随透气率的减小而增大(透气率为 k_1, k_2, k_3 和 k_4 的填埋场对应的高度分别为 42.7, 43.8, 49.0 和 51.6 m)。当 $k_4 = 0.8 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 时, 填埋场的高度为 51.6 m, 高于垃圾实际的堆填高度(50 m)。这是理论计算结果, 对于一个实际的填埋场, 当气压增高过大时, 可能由于有效应力的减小而导致边坡失稳。

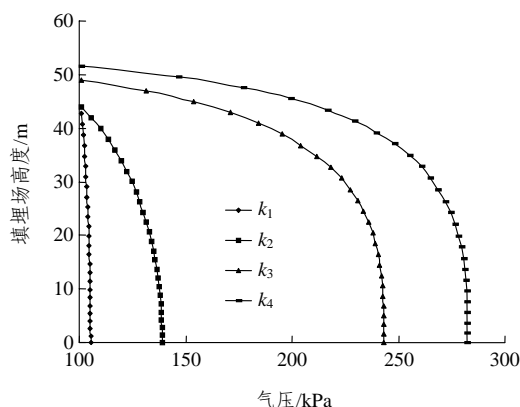


图 10 不同透气率 k 的填埋场气压沿高度变化曲线 ($T_M = 5 \text{ a}$)

Fig.10 Distribution of gas pressure along depth with different gas permeabilities($T_M = 5 \text{ a}$)

以上计算结果说明, 在进行填埋场设计和管理时考虑气固耦合的重要性。当填埋场设计的排气能力偏小或排气设施年久失效而发生淤堵引起透气性减小, 会造成孔隙气压增大、有效应力降低、沉降速率减小, 从而导致填埋场的容量减小, 严重时还会引起边坡失稳和气体爆炸, 影响填埋场的正常运行。

6 结 论

(1) 采用 Gibson 和 Lo 一维压缩模型及 U.S. EPA Landgem 产气方程, 结合达西定律、气体状态方程和多孔介质流体动力学相关知识, 建立了考虑气固耦合的填埋场沉降计算模型。

(2) 差分法计算结果表明, 填埋场气压与深度、时间和透气率等因素有关。封场前气压随时间和深度的增大而增大, 封场后填埋场气压逐渐消散。透气率高的填埋场其气压消散速率要相对较高。

(3) 填埋场沉降速率与孔隙气压有关。气压增

高引起有效应力降低、沉降速率减小, 导致填埋场容量减小。

本文建立的气固耦合填埋场沉降计算模型是在对填埋场作了很多近似和简化的基础上得到的。实际填埋场的垃圾为固液气三相组成, 液相对气体的流动有重要影响; 透气率及压缩系数不是常量, 会随填埋深度的增加而发生变化; 由于垃圾降解是个放热反应, 热量的迁移会严重影响气体的流动规律; 气体的吸附和解吸对气体迁移的影响程度也是一个尚待研究的课题; 垃圾孔隙率的变化除了因垃圾压缩而减小外, 还会由于垃圾中有机质降解而增加。总之, 垃圾填埋场气固耦合问题相当复杂, 有待于在理论和试验方面进行更深入的研究工作, 而最终的研究成果需要通过大量的现场试验来验证和完善。

参考文献(References):

- [1] Findikakis A N, Leckie J O. Numerical simulation of gas flow in sanitary landfill[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1979, 195(5): 927 - 945.
- [2] Metcalfe D E, Farquhar G J. Modeling gas migration through unsaturated soils from waste disposal sites[J]. *Water, Air, Soil Pollute*, 1987, 32: 247 - 259.
- [3] Young A. Mathematical modeling of landfill gas extraction[J]. *Journal of Environmental Division*, ASCE, 1989, 115(6): 1 073 - 1 087.
- [4] 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.
- [5] 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(1): 65 - 87.
- [6] Nastev M, Therrien R, Lefebvre R, et al. Gas production and migration in landfills and geological materials[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2001, 52(1 - 4): 187 - 211.
- [7] 陈家军, 王红旗, 王金生, 等. 填埋场释放气体运移数值模型及应用[J]. *环境科学学报*, 2000, 20(3): 327 - 331.(Chen Jiajun, Wang Hongqi, Wang Jinsheng, et al. Numerical model of landfill gas migration and its application[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(3): 327 - 331.(in Chinese))
- [8] 陈云敏, 柯翰. 城市固体废弃物的压缩性及填埋场容量分析[J]. *环境科学学报*, 2003, 23(5): 694 - 698.(Chen Yunmin, Ke Han. Compression characteristics of MSW and analysis of capacity for landfills[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(5): 694 - 698.(in Chinese))
- [9] 薛强, 梁冰, 刘晓丽. 填埋场中气体运移的非稳定耦合渗流数学模型[J]. *岩土力学*, 2002, 23(2): 191 - 195.(Xue Qiang, Liang Bing, Liu Xiaoli. Research on unsteady seepage coupling mathematical model and gas migration in landfill[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(2): 191 - 195.(in Chinese))
- [10] 张建国, 雷光伦, 张艳玉. 油气层渗流力学[M]. 东营: 石油大学出版社, 1998.(Zhang Jianguo, Lei Guanglun, Zhang Yanyu. *Fluid Mechanics in Porous Media for Petroleum Seam*[M]. Dongying: University of Petroleum Press, 1998.(in Chinese))
- [11] 周世宁, 林柏泉. 煤层瓦斯赋存与流动理论[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999.(Zhou Shining, Lin Baiquan. *Theory of Gas Flow and Storage in Coal Seams*[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1999.(in Chinese))
- [12] Hossain M S, Gabr M A, Barlaz M A. Relationship of compressibility parameters to municipal solid waste decomposition[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(12): 1 151 - 1 157.
- [13] 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.(Qian Xuede, Guo Zhiping, Shi Jianyong, et al. *Design and Construction of Modern Sanitary Landfill*[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001.(in Chinese))
- [14] 贝尔 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.(Bear J. *Dynamics of Fluids in Porous Media*[M]. Translated by Li Jingsheng, Chen Chongxi. Beijing: China Architecture and Building Press, 1983.(in Chinese))
- [15] 孙培德, 万华根. 煤层气越流固-气耦合模型及可视化模拟研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(7): 1 179 - 1 185.(Sun Peide, Wan Huagen. Visual simulation on coupling model of solid deformation and gas leak flow[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(7): 1 179 - 1 185.(in Chinese))
- [16] 赵阳升. 煤体-瓦斯耦合数学模型及数值解法[J]. *岩石力学与工程学报*, 1994, 13(3): 229 - 239.(Zhao Yangsheng. Coupled mathematical model on coal mass-methane and its numerical method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1994, 13(3): 229 - 239.(in Chinese))
- [17] 谢焰, 陈云敏, 唐晓武, 等. 城市生活垃圾降解压缩试验仪研制及应用[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(5): 571 - 576.(Xie Yan, Chen Yunmin, Tang Xiaowu, et al. Development and application of biodegradation-compression test apparatus for municipal solid waste[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(5): 571 - 576.(in Chinese))