

# 城市生活垃圾填埋场固液气耦合一维固结模型

陈云敏<sup>1</sup>, 谢 焰<sup>1,2</sup>, 詹良通<sup>1</sup>

(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:** 建立了一维固、液、气三相耦合的大孔隙垃圾固结数学模型。把垃圾视为大孔隙介质, 假定基质吸力等于 0, 即孔隙气压等于孔隙液压, 把填埋场简化为非稳定单向渗流场。模型中采用了 Gibson 和 Lo 一维压缩流变模型及 Landgem 产气方程, 结合了达西定律、气体状态方程、有效应力原理和多孔介质流体动力学理论。填埋场的沉降按封场前和封场后两个阶段分别计算, 封场前填埋场接受垃圾, 导致堆载压力增加, 而封场后的填埋场堆载压力保持不变。垃圾堆填时产生的超孔隙压力按 Hilf 分析法计算。运用差分法对固、气耦合问题进行了数值求解。计算结果表明: 气压随深度增加而增大, 透气率大的填埋场其气压消散速率快。在堆填期, 气压随时间增加而增大; 封场后, 气压逐渐消散。气压增加, 导致填埋场沉降速率和容量减小。

**关键词:** 固、液、气相互作用; 降解; 固结; 垃圾填埋场

中图分类号: X705

文献标识码: A

文章编号: 1000(2006) - 02 - 0184 - 07

**作者简介:** 陈云敏(1962 - ), 男, 浙江温岭人, 教授, 博士生导师。从事土力学和环境土工教学和研究。

## One-dimensional consolidation model for landfills considering solid-liquid-gas interaction

CHEN Yun-min<sup>1</sup>, XIE Yan<sup>1,2</sup>, ZHAN Liang-tong<sup>1</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Department of Resources and Environmental Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** A preliminary study on the solid-liquid-gas interaction in the landfill of municipal solid waste (MSW) was carried out by use of the numerical modeling. It was assumed that the mechanical effect of suction in the MSW could be ignored because macro-pores were dominant in the MSW. On the basis of this assumption, a theoretical model considering solid-liquid-gas interaction was developed to compute the compression of landfill of MSW. The model incorporated Gibson and Lo's biodegradation and creep model, the Landgem's gas production equation, Darcy's law, the ideal gas law, the dynamics of fluids in porous media and the principle of effective stress. It was assumed that the migration of landfill gas only occurred vertically, and hence the theoretical model could be simplified to a one-dimensional compression model. The compression model could be used to calculate the settlement during the filling stage and the closed stage. During the filling stage, the landfill continually received the refuse which led to the increasing of the loading pressure. During the closed stage, the loading pressure kept constant. The excess pore pressure caused by the loading pressure was calculated by Hilf's analysis. A finite difference solution was obtained for the solid-liquid-gas interaction problem, which was a special case of solid-liquid-gas interaction problem. The results showed that the gas pressure increased along the depth. During the filling stage, the gas pressure increased. During the closed stage, the gas pressure dispersed gradually. In the landfill with high permeability, the pore gas pressure dispersed quickly. The quick decrease of the settlement rate, caused by the increasing of the gas pressure, would decrease the capacity for the landfill.

**Key words:** solid-liquid-gas interaction; biodegradation; consolidation; landfill

## 0 引 言

自 20 世纪 80 年代以来, 随着城市人口的增长和居民消费水平的提高, 我国城市垃圾处置及污染防治问题变得日益突出。目前, 我国城市人均日产垃圾量超过 1 kg, 城市垃圾年产出量已达 1.5 亿吨, 而且每

年以 8%~10% 的速度增长<sup>[1]</sup>。填埋处理是目前世界各国处置城市垃圾的主要方法。我国目前已建成大小

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(50425825); 国家自然科学基金基金重点项目(50538080)

收稿日期: 2005 - 08 - 15

660 多个城市垃圾填埋场, 每年消纳垃圾达 1.2 亿吨以上。随着我国城市化快速发展以及人们对环境保护意识的提高, 垃圾填埋场的数量将急剧增加。

垃圾填埋场是城市化发展产生的新型基础设施和土工构筑物。目前国内外已建成和正在运行的垃圾填埋场存在的主要问题表现为以下 4 个方面: ①垃圾堆体的失稳; ②填埋气体 (LFG) 引起的爆炸或火灾; ③垃圾堆体的变形和沉降; ④垃圾渗滤液渗漏和扩散导致的地下水或地表水体的污染。上述灾害现象归根于人类对这些问题的内在机理认识的局限性及现行的垃圾填埋场设计和施工方法的欠合理性。

填埋场中垃圾由固、液、气三相组成, 与其他非饱和土的主要区别在于垃圾中有机质的降解特性。垃圾降解使得固相组分减少, 产生大量的气体和液体, 同时放出大量的热量。

垃圾的工程特性以及垃圾填埋场中渗流、变形、稳定及扩散机理比传统的土力学更为复杂, 而导致这些机理复杂性的根本原因是填埋场中固、液、气相互影响或耦合作用。

从 90 年代后期开始, 环境工作者和岩土工作者从不同的角度来研究固液气的相互作用, 研究工作侧重于数学物理模型的建立和数值求解。

环境工作者侧重于垃圾中气、液相的产生和运移及其与温度场的耦合作用<sup>[2~10]</sup>。由于垃圾填埋场固、液、气相互作用问题的复杂性, 上述工作尚未考虑垃圾骨架的压缩变形对液、气相运移的影响 (即假设垃圾骨架是刚性的), 以及液、气相压力变化对垃圾堆体变形和稳定的影响, 这可能是垃圾填埋场发生失稳或爆炸原因之一。与环境工程界不同, 岩土工程界对固、液、气相互作用机理的研究更侧重于固相的变形<sup>[11~18]</sup>, 未考虑垃圾降解引起的源汇问题。

本文在进行城市生活垃圾固液气相互作用试验的基础上, 把垃圾视为大孔隙介质, 假定基质吸力等于 0, 即孔隙气压等于孔隙液压, 把填埋场简化为非稳定单向渗流场, 建立了一维固、液、气三相耦合的大孔隙垃圾固结数学模型。模型中采用了 Gibson 和 Lo 一维压缩流变模型及 Landgem 产气方程, 结合了达西定律、气体状态方程、有效应力原理和多孔介质流体动力学理论。垃圾堆填时产生的超孔隙压力按 Hilf 分析法计算。因此, 本文所建立的模型既考虑了降解引起的源汇问题, 又体现了介质的流变特性。

## 1 城市生活垃圾固液气相互作用试验

浙江大学岩土所自行研制的城市生活垃圾固液气相互作用试验系统进行了为期 6 个月的试验, 系统工

作原理如图 1 所示, 有关试验详细内容见文献[19]。试验的主要成果如下。

(1) 温度是影响降解速率的主要因素, 回灌能加快降解速率。在绝对气压为 400 kPa 时, 降解仍能继续进行。反映垃圾降解菌有高的耐压性。

(2) 在温度为 41℃ 和回灌的条件下, 降解在 6 个月已基本完成。

(3) 5 kg 垃圾试样置入直径为 190 mm 的圆柱型土样室 (土样的初始高度为 320 mm), 在 150 kPa 压力下, 降解结束后的总压缩量为 142 mm, 其中主压缩量为 65 mm, 降解与蠕变引起的压缩量为 77 mm。

(4) 保持土样室容积不变, 并处于密闭不透气状态, 在高速产甲烷阶段, 土样室气压在 1 周时间内增加了 150 kPa。

(5) 垃圾体内孔隙气压对变形速率有重要影响。

垃圾固液气相互作用试验成果表明, 垃圾的土工特性非常复杂, 由于垃圾中有机质的降解, 导致垃圾中固液气三相的质量发生变化, 同时伴随有热量的迁移, 孔隙流体压力的增加对垃圾体的变形产生重要影响。垃圾固液气相互作用试验成果要求在建立垃圾固液气相互作用模型时必须考虑垃圾的这些特性。

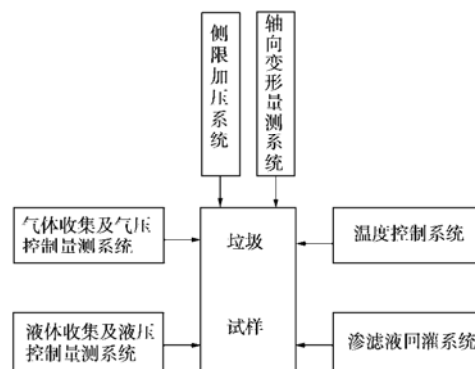


图 1 试验系统工作原理示意图

Fig. 1 Test principle

## 2 固液气三相耦合垃圾填埋场一维固结模型

### 2.1 基本方程

在建立方程前, 引入如下 8 个假设: ①垃圾为宏观均质大孔隙介质, 基质吸力等于 0; ②垃圾不可压缩, 但可降解; ③流体渗出和垃圾压缩只沿竖向发生; ④混合气体有相同的分子量, 为理想气体, 忽略在液体中溶解; ⑤垃圾体处于等温状态; ⑥气液体的渗透率、粘滞系数均为常量, 渗流服从 Darcy 定律; ⑦骨架服从 Gibson 和 Lo 压缩流变模型; ⑧固体骨架流动速率远小于气体和液体的流动速率。在提出上述假设

后,可写出如下 7 组方程。

(1) 基质吸力方程

$$P_c = P_g - P_w = f(S_w) = 0, \quad (1)$$

式中,  $P_g$  为孔隙气体绝对压力 (Pa),  $P_w$  是孔隙液体绝对压力 (Pa),  $S_w$  为液相饱和度。

(2) 气相状态方程

$$\rho_g = \frac{\mu'_g P_g}{RT} = m P_g, \quad (2)$$

式中,  $\rho_g$  为气体密度 ( $\text{g/m}^3$ ),  $R$  为气体常数 ( $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $P_g$  为孔隙气体绝对压力 (Pa),  $\mu'_g$  为气体分子量 ( $\text{g/mol}$ ),  $T$  为气体绝对温度 (K)。

(3) Gibson 和 Lo 压缩流变模型

$$\varepsilon(t) = \Delta\sigma' \left[ a + b \left( 1 - e^{\left( -\frac{\lambda}{b} \right) t} \right) \right]. \quad (3)$$

式中  $\varepsilon$  为应变;  $\Delta\sigma' = \Delta\sigma - P$ ,  $\Delta\sigma$  为上部垃圾荷重产生的压应力 (kPa);  $P = P_g = P_w$  为垃圾体中孔隙流体压力;  $a$  为主固结计算参数 ( $\text{kPa}^{-1}$ );  $b$  为次固结计算参数 ( $\text{kPa}^{-1}$ );  $\lambda/b$  为次固结速率 ( $\text{m}^{-1}$ );  $t$  为加荷开始的时间 (m)。以上各参数可通过垃圾固液气相互作用试验的得到的压缩曲线获得。

(4) 运动方程

液相: 相对于运动着的固体颗粒的液相流速为

$$q_{rw} = -\frac{kk_{rw}}{\mu_w} \left( \frac{\partial P_w}{\partial z} + \rho_w g \right) = -l_w \left( \frac{\partial P_w}{\partial z} + \rho_w g \right); \quad (4)$$

气相: 相对于运动者的固体颗粒的气相流速为

$$q_{rg} = -\frac{kk_{rg}}{\mu_g} \frac{\partial P_g}{\partial z} = -l_g \frac{\partial P_g}{\partial z}. \quad (5)$$

式中  $k$  是介质中的绝对渗透率 ( $\text{m}^2$ );  $k_{rw}$ 、 $k_{rg}$  分别是液相和气相的相对渗透率, 它们是饱和度和孔隙比的函数, 本文假定其为常量;  $\mu_w$ 、 $\mu_g$  分别是液相和气相粘滞系数 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ );  $g$  为重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ )。

(5) 饱和度约束方程

$$S_w + S_g = 1, \quad (6)$$

式中,  $S_w$ 、 $S_g$  分别为液相和气相的饱和度。

(6) 孔隙率变化表达式

与其他土不同, 垃圾孔隙比变化有应力压缩和降解两种作用引起, 见图 2 所示。前者的作用是使孔隙比减小, 后者的作用是使孔隙比增大。垃圾孔隙率变化的表达式可表示为

$$\phi_{(t)} = \frac{(\phi_0 - 1)(1 - F_s(t)/\rho_s)}{1 - \varepsilon_{(t)}} + 1. \quad (7)$$

式中  $F_s(t)$  为固体垃圾在  $t$  时刻已降解质量(kg), 符

合指数衰减规律<sup>[20,21]</sup>,  $F_s(t) = F_0(1 - e^{-k_s t})$ ;  $F_0$  为单位体积垃圾最终可降解质量(kg);  $k_s$  为固体颗粒降解系数;  $\phi_0$  为初始孔隙率;  $\rho_s$  为垃圾固相密度 ( $\text{kg/m}^3$ )。将式 (3) 代入式 (6), 求得孔隙率对时间一阶偏导:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = h(P, t) \frac{\partial P}{\partial t} - g(P, t), \quad (8)$$

其中

$$h(P, t) = (1 - \phi_0) \left( \frac{1 - F_s(t)}{\rho_s} \right) \left\{ a + b \left[ 1 - e^{\left( -\frac{\lambda}{b} \right) t} \right] \right\}.$$

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

$$g(P, t) = \left\{ \frac{(\phi_0 - 1)}{\rho_s} F_0 k_s e^{-k_s t} \left\{ 1 - \Delta\sigma' \left\{ a + b \left[ 1 - e^{\left( -\frac{\lambda}{b} \right) t} \right] \right\} \right\} \right\} +$$

$$(1 - \phi_0)(1 - F_s(t)/\rho_s) \Delta\sigma' \cdot b \cdot \frac{\lambda}{b} \cdot e^{\left( -\frac{\lambda}{b} \right) t} \cdot$$

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

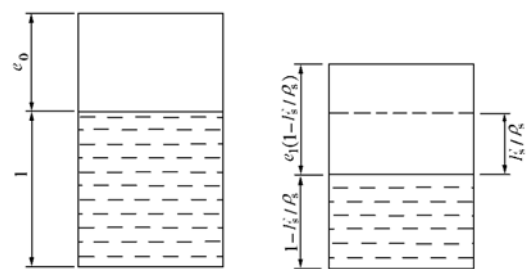


图 2 孔隙比变化示意图

Fig. 2 Variation of the void ratio

(7) 连续性方程

根据多孔介质流体动力学理论<sup>[22]</sup>, 气液两相的连续性方程分别写为:

液相

$$-\frac{\partial(\rho_w q_w)}{\partial z} + f_w(t) = \frac{\partial(\phi S_w \rho_w)}{\partial t}; \quad (9)$$

气相

$$-\frac{\partial(\rho_g q_g)}{\partial z} + f_g(t) = \frac{\partial(\phi S_g \rho_g)}{\partial t}. \quad (10)$$

式中  $f_w(t)$ 、 $f_g(t)$  分别为垃圾降解产生的液体源项和气体源项;  $q_w$ 、 $q_g$  分别为液相和气相相对于固定坐标的流速 ( $\text{m/s}$ )。假设固体介质流速  $V_s$  远小于孔隙中流体的流动速度, 则  $q_w \approx q_{rw}$ 、 $q_g \approx q_{rg}$ 。

将式 (4)、(7)、(8) 代入式 (9), 将式 (2)、(5)、(7)、(8) 代入式 (10), 则连续性方程可改写为:

液相

$$\frac{\partial S_w}{\partial t} = \frac{1}{\phi} \left( l_w \frac{\partial^2 P_w}{\partial z^2} + \frac{f_w(t)}{\rho_w} - S_w \left( h(P_w, t) \frac{\partial P_w}{\partial t} - g(P_w, t) \right) \right); \quad (11)$$

气相

$$\frac{\partial P_g}{\partial t} = \left[ \frac{m l_g}{2} \frac{\partial^2 P_g^2}{\partial z^2} + m P_g g(P_g, t) + m l_w P_g \frac{\partial^2 P_g}{\partial z^2} + \right. \\ \left. f_g(t) - m P_g \frac{f_w(t)}{\rho_w} \right] / \left[ m(P_g h(P_g, t) + S_g \phi) \right]. \quad (12)$$

式(1)、(6)、(11)和(12)一起构成一维固、液、气三相耦合大孔隙垃圾填埋场固结问题的总控制方程。

定解条件为:

气相  $t=0$  时,  $S_g = 1 - S_{w0}$ ,  $P = P_0 + \Delta P$ ,

$$t>0 \text{ 时, } \begin{cases} z=0, P=P_a, \\ z=H, P=P_a; \end{cases}$$

液相  $t=0$  时,  $S_w = S_{w0}$ ,  $P = P_0 + \Delta P$ ,

$$t>0 \text{ 时, } \begin{cases} z=0, q=q_{w0}, \\ z=H, P=P_a. \end{cases}$$

式中,  $\Delta P$  是根据 Hilf 分析法<sup>[23]</sup>迭代计算所得的垃圾堆填压力  $\Delta \sigma$  引起的超孔隙压力增加量:

$$\Delta P = \frac{1}{1 + \frac{(1-s_w)\phi_0}{(P_0 + \Delta P)m_v}} \Delta \sigma, \quad (13)$$

其中,  $m_v$  是一维固结试验中测得的饱和垃圾的体积变化系数,  $P_0$  为加荷前孔隙中的流体压力(Pa)。  $s_{w0}$  为垃圾野外容水率,  $q_{w0}$  为降雨入渗率,  $P_a$  为标准大气压(Pa)。

### 3 垃圾填埋场固气耦合问题求解

由式(1)、(6)、(11)和(12)构成的垃圾总控制方程为非线性偏微分方程组,宜采用数值法求解,作为一种特例,本文对固、气耦合问题进行求解。在忽略液相的条件下,控制方程退化为

$$\frac{\partial^2 P^2}{\partial z^2} = -\frac{m}{n} \left[ P \cdot h(P, t) + \phi(P, t) \right] \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{m}{n} \cdot P \cdot g(P, t) + \frac{1}{n} f(t), \quad (14)$$

式中  $m = \frac{\mu'}{R \cdot T}$ ,  $n = -\frac{\mu' \cdot K}{2R \cdot T \cdot \mu}$ 。式(14)即为考虑气固耦合的填埋场气体渗流总控制方程<sup>[24]</sup>。

定解条件综合写成

$$\begin{aligned} t=0 \text{ 时} \quad & P = P_0 + \Delta P; \\ t>0 \text{ 时} \quad & \begin{cases} P|_{z=0} = P_a, \\ \frac{\partial P}{\partial z}|_{z=H} = 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

式中,  $P_0$  为每次堆填前垃圾体内孔隙气压(Pa),  $\Delta P$  是超孔隙压力(Pa),  $H$  为填埋场填埋体厚度(m)。

#### 3.1 差分方程

令  $Q = P^2$ , 将方程(14)写成隐式差分格式:

$$\begin{aligned} -\left( \frac{Q_{i+1}^j - 2Q_i^j + Q_{i-1}^j}{\Delta Z^2} \right) + \frac{m}{n} \left( \frac{g(\sqrt{Q}, t)}{\sqrt{Q}} \right) \Big|_i^j Q_i^j + \frac{1}{n} f_g \Big|_i^j \\ = \frac{m}{2n} \left[ \left( \frac{\phi(\sqrt{Q}, t)}{\sqrt{Q}} + h(\sqrt{Q}, t) \right) \Big|_i^j \right] \frac{Q_i^j - Q_{i-1}^{j-1}}{\Delta T}. \end{aligned} \quad (16)$$

定解条件改写为

$$\text{初始条件}(t=0) \quad Q_i^0 = (P_0 + \Delta P)^2, \quad (17)$$

$$\text{边界条件}(t>0) \quad \begin{cases} Q_0^j = P_a^2 = d, \\ Q_{n+1}^j = Q_{n-1}^j. \end{cases} \quad (18)$$

式中  $\Delta Z$  为空间步长;  $\Delta T$  为时间步长;  $i$  是空间节点数,  $i=1, 2, 3, \dots, n$ ;  $j$  是时间节点数,  $j=1, 2, 3, \dots$ 。

求解上面所述的方程的通常做法是将非线性项系数作线性处理。将非线性项系数作线性化处理的方法是很多的,张建国<sup>[25]</sup>在油气层渗流力学分析中将非线性项系数中的变量(气压)用常量(地层压力)来近似代替;赵阳升<sup>[26]</sup>在矿井瓦斯流体分析中在时间域将非线性项系数通过 Taylor 公式展开,保留一阶微量;龚晓南<sup>[27]</sup>在软粘土地基分析中,将非线性项系数中第  $j$  步的量用第  $j-1$  步的量来近似代替,通过将该法计算所得结果与简单情况下解析解结果比较后发现两者吻合较好,从而证明该计算方法有较高的精度。Bear 也是提出过这种算法。本文采用这种线性处理方法,将

方程(14)中非线性项系数  $\left( \frac{g(\sqrt{Q}, t)}{\sqrt{Q}} \right) \Big|_i^j$  和  $\left( \frac{\phi(\sqrt{Q}, t)}{\sqrt{Q}} + h(\sqrt{Q}, t) \right) \Big|_i^j$  分别用  $\left( \frac{g(\sqrt{Q}, t)}{\sqrt{Q}} \right) \Big|_i^{j-1}$  和  $\left( \frac{\phi(\sqrt{Q}, t)}{\sqrt{Q}} + h(\sqrt{Q}, t) \right) \Big|_i^{j-1}$  来近似代替。

经过以上线性处理后,结合边界条件(18),可将差分方程(16)表示成矩阵式:

$$\begin{bmatrix} A_1 & 1 & & & \\ 1 & A_2 & 1 & & \\ & 1 & A_3 & 1 & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & & 1 & A_{n-1} & 1 \\ & & & & 2 & A_n \end{bmatrix}^{j-1} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ \vdots \\ Q_{n-1} \\ Q_n \end{bmatrix}^j = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ \vdots \\ B_{n-1} \\ B_n \end{bmatrix}^{j-1}, \quad (19)$$

其中

$$A_i = - \left\{ 2 + \frac{m \cdot \Delta Z^2}{n} \left( \frac{g}{\sqrt{Q}} \right)_i^{j-1} - \frac{m \Delta Z^2}{2n \Delta T} \left[ \frac{\phi}{\sqrt{Q}} + h \right]_i^{j-1} \right\},$$

$$B_1 = \frac{m \Delta Z^2}{2n \Delta T} \left( \frac{\phi}{\sqrt{Q}} + h \right)_1^{j-1} Q_1^{j-1} + \frac{\Delta Z^2}{n} f_g \Big|_1^j - d,$$

$$B_i = \frac{m \Delta Z^2}{2n \Delta T} \left( \frac{\phi}{\sqrt{Q}} + h \right)_i^{j-1} Q_i^{j-1} + \frac{\Delta Z^2}{n} f_g \Big|_i^j \quad (i=2,3,\dots,n).$$

式(19)的系数矩阵为三对角矩阵,可根据初始条件式(17)由追赶法求解 $Q_i^j$ 值。由 $P_i^j = \sqrt{Q_i^j}$ 代入到式(3)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。

### 3.2 Landgem 有机质降解产气方程

$$f_g(t) = \alpha w \beta e^{-\beta t}. \quad (20)$$

式中  $f_g(t)$  为  $t$  时刻混合气体产气速率;  $w$  为单位体积垃圾产生  $\text{CH}_4$  的潜力 ( $\text{g/m}^3$ );  $\beta$  为降解系数 ( $\text{m}^{-1}$ );  $t$  为降解时间 ( $\text{m}$ );  $\alpha$  为比例系数。以上各参数可通过垃圾固液气相互作用试验得到的产气量曲线获得。

### 3.3 算例分析

假设某填埋场各计算参数如下: 气体常数  $R = 8.31 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ ; 混合气体平均分子量  $\mu' = 30 \text{ g/mol}$ ; 气体温度  $T = 314 \text{ K}$ ; 气体粘滞系数  $\mu = 1.3 \times 10^{-5} \text{ pa} \cdot \text{s}$ ; 气体透气率  $k = 0.16 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ ; 产气比率系数  $\alpha = 2$ ; 时间常数  $\beta = 0.032 \text{ m}^{-1}$ ; 每立方垃圾最终产气质量  $w = 80 \text{ kg}$ ; 时间步长  $\Delta T = 1 \text{ m}$ ; 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  $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$ ; 每年垃圾分层层数  $N_0 = 5$ ;  $a = 3.8 \times 10^{-4} \text{ kPa}^{-1}$ ;  $b = 5.8 \times 10^{-4} \text{ kPa}^{-1}$ ;  $c = \lambda/b = 0.129 \text{ m}^{-1}$ ; 最终降解质量  $F_0 = 120 \text{ kg/m}^3$ ;  $k_s = 0.032 \text{ m}^{-1}$ ; 垃圾固体颗粒密度  $\rho_s = 2200 \text{ kg/m}^3$ 。

图3、4分别为透气率  $k_1 = 0.16 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  和  $k_2 = 0.66 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  的孔隙气压沿填埋场高度分布曲线。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 ( $T < T_T = 10 \text{ a}$ ), 气压随深度和时间的增加而增加; 封场后 ( $T > T_T = 10 \text{ a}$ ), 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  $T = 25 \text{ a}$  时,  $k_2 = 0.66 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  的填埋场各深度的孔隙气压已经消散到标准大气压  $101 \text{ kPa}$ , 而同期的  $k_1 = 0.16 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  的填埋场仍保持较高的气压。

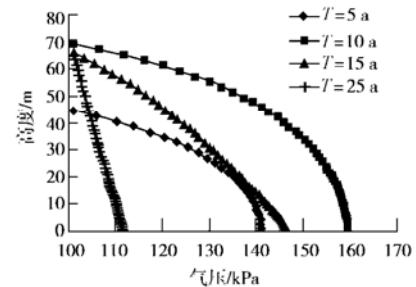


图3 填埋场气压沿高度分布曲线

Fig. 3 Distribution of gas pressure along the depth

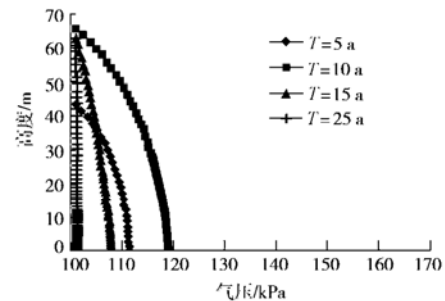


图4 填埋场气压沿高度分布曲线

Fig. 4 Distribution of gas pressure along the depth

图5表示当填埋场以垃圾堆填时间  $T_T = 10 \text{ a}$  作为封场期限时, 透气率分别为  $k_1 = 0.16 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 、 $k_2 = 0.66 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  的填埋场所求得的填埋场高度随时间的变化曲线。从图5中可见, 透气率大的填埋场 ( $k = k_2$ ), 其沉降速率也大, 封场时填埋场高度也更低。封场后, 随着气压的消散, 两填埋场的高度逐渐接近。

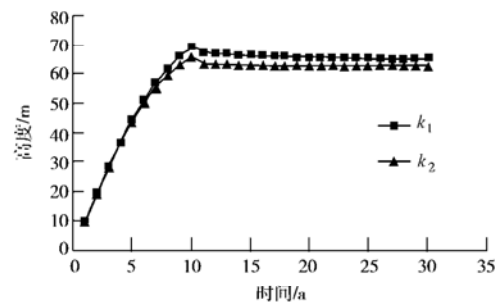


图5 不同透气率  $k$  的填埋场高度变化曲线

Fig. 5 Variation of the height

图6表示当填埋场以填埋高度  $70 \text{ m}$  作为封场标准时, 透气率  $k_1 = 0.16 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 、 $k_2 = 0.66 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  的填埋场的高度随时间的变化曲线。图6中可见, 当填埋场按  $10 \text{ m/a}$  的速度堆填, 如果不考虑垃圾的可压缩性, 则填埋场只要经过  $7 \text{ a}$  就达到了封场高度。在考虑垃圾压缩性的条件下, 对于透气率为  $0.16 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  的填埋场,  $10 \text{ a}$  后堆填高度才达到  $70 \text{ m}$  的封场标

准,而对于透气率为  $0.66 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  的填埋场须经过 12 a 才达到该填埋高度。可见,透气率大的填埋场可以增加填埋场的容量、延长填埋场服务年限。

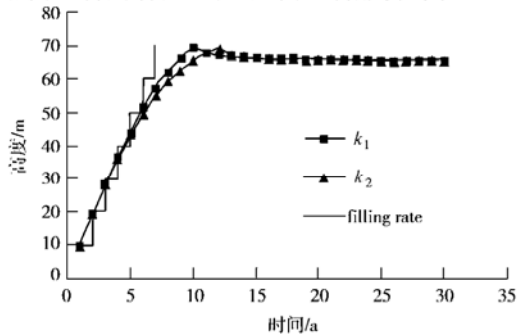


图6 不同透气率  $k$  的填埋场高度变化曲线

Fig. 6 Variation of the height

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,严重者还会引起边坡失稳和气体爆炸,影响填埋场的正常运行。

## 4 结 论

(1) 把垃圾视为大孔隙介质,假定基质吸力等于 0,即孔隙气压等于孔隙液压力,把填埋场简化为非稳定单向渗流场,建立了一维固、液、气三相耦合的大孔隙垃圾固结数学模型。模型中采用了 Gibson 和 Lo 一维压缩模型及 Landgem 产气方程,结合了达西定律、气体状态方程、有效应力原理和多孔介质流体动力学理论。

(2) 垃圾堆填时产生的超孔隙压力按 Hilf 分析法计算。填埋场的沉降按封场前和封场后两个阶段分别计算,封场前填埋场接受垃圾,导致堆载压力增加,而封场后的填埋场堆载压力保持不变。

(3) 运用差分法对固、气耦合问题进行了数值求解。计算结果表明,气压随深度增加而增大,透气率大的填埋场其气压消散速率快。在堆填期,气压随时间增加而增大;封场后,气压逐渐消散。气压增加,导致填埋场沉降速率和容量减小。

本文对垃圾填埋场固、液、气相互作用一维固结模型的建立是在对填埋场做了很多的近似和简化的基础上进行的。实际的填埋场常为多层结构,垃圾本身具有高度不均匀性。由于气体和液体抽排管道的存在,填埋场渗流场的类型表现为径向或球向流场。垃圾会发生大的变形,在计算流体流速时要考虑固相沉降速率的影响作用。随着沉降的发生,填埋场中垃圾的孔隙比将逐步减小,基质吸力将不再为 0,孔隙中的气体压力会大于液体压力,同时,流体的渗透率也会随

孔隙比和饱和度的变化而发生变化。由于垃圾降解是个放热反应,热量的迁移使得填埋场固、液、气相互作用问题变得更加复杂。此外,介质对气体的强吸附特性也会对流体的流动规律产生影响。因此,垃圾填埋场固、液、气相互作用问题的解决要求在试验和理论方面开展更深入的研究工作,而最终的研究成果还必须通过大量的现场试验来检验和完善。

## 参考文献:

- [1] 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 Xue-de, GUO Zhi-ping, SHI Jian-yong, et al. Design and construction for modern sanitary landfill[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.)
- [2] El-Fadel M, FINDIKAKIS A N, LECKIE J O. Numerical modeling of generation and transport of gas and heat in landfills( I ) [J]. Model Formulation,Waste Management & Research, 1996, 14(5):483 - 504.
- [3] 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.
- [4] SUK H, LEE K-K, LEE C H. Biologically reactive multispecies transport in sanitary landfill[J]. Journal of Environmental Engineering, 2000, 126(5):419-427.
- [5] ISLAM J, SINGHAL N, O'SULLIVAN M. Modelling biogeochemical processes in leachate-contaminated soils: a review[J]. Transport in Porous Media, 2001, 43(3): 407 - 440.
- [6] BRUN A, ENGESGAARD P. Modelling of transport and biogeochemical processes in pollution plumes: Literature review and model development[J]. Journal of Hydrology, 2002, 256(3-4): 211 - 227.
- [7] 殷勇,王洪涛,等.垃圾填埋场水分迁移模型的应用研究[J].环境污染治理技术与设备,2002,3(10):36-40. (YIN Yong, WANG Hong-tao, et al. Numerical simulation of moisture movement in landfill bioreactors under the condition of leachate recirculation[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2002, 3(10): 36 - 40.)
- [8] 邹春,廖利.垃圾填埋气气体横向迁移数学模型[J].环境卫生工程,1998,6(3):85 - 87,103. (ZOU Chun, LIAO Li. Mathematical model for LFG transverse migration[J]. Environmental Sanitation Engineering. 1998, 6(3): 85 - 87, 103.)

- [9] 奚成刚, 陈家军, 等. 水—气二相流及污染物运移数值模拟研究[J]. 水文地质与工程地质, 1999, 3: 34 - 38. (XI Cheng-gang, CHEN Jia-jun. Numerical simulation of two-phase seepage and pollution migration[J]. Hydrogeology and Engineering Geology. 1999, 3: 34 - 38.)
- [10] OLIVELLA S, CARRERA J G A, alonso E E. Non-isothermal multiphase flow of brine and gas through saline media[J]. Transport in Porous Media, 1994, 15: 271 - 293.
- [11] THOMAS H R, HE Y. Analysis of coupled heat moisture and air transfer in a deformable unsaturated soil[J]. Geotechnique, 1995, 45(4): 677 - 689.
- [12] 杨代泉, 沈珠江. 非饱和土孔隙气、水、汽、热耦合运动之模拟[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 357 - 361. (YANG Dai-quan, SHEN Zhu-jiang. Modelling fully coupled moisture, air and heat transfer in unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 357 - 361.)
- [13] 张振营, 吴世明, 陈云敏. 城市生活垃圾土性参数的室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 35 - 39. (ZHANG Zhen-ying, WU Shi-ming, CHEN Yun-min. Experimental research on the parameter of life rubbish in city[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 35 - 39.)
- [14] 武文华, 李锡夔. 非饱和土的热—水—力本构模型及数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 411 - 416. (WU Wen-hua, LI Xi-kui. Constitutive model and numerical simulation of thermo-hydro-mechanical behavior in unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(4): 411 - 416.)
- [15] 张丙印, 朱京义, 王昆泰. 非饱和土水气两相渗流有限元数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 701 - 705. (ZHANG Bing-yin, ZHU Jing-yi, WANG Kun-tai. Finite element modeling of two-phase seepage in unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(6): 701 - 705.)
- [16] 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 Yun-min, KE Han. Compression characteristics of MSW and analysis of capacity for landfills [J]. ACTA Scientiae Circumstantiae, 2003, 23(5): 694 - 698.)
- [17] 薛 强, 梁 冰, 孙可明, 刘晓丽. 填埋气体迁移气—热—力耦合动力学模型的研究[J]. 应用力学学报, 2003, 20(2): 54 - 60. (XUE Qiang, LIANG Bin, SUN KE-ming, LIU Xiao-li. Thermo-gas-mechanical model for LFG[J]. Chinese journal of Applied Mechanics. 2003, 20(2): 54 - 60.)
- [18] 张振营, 陈云敏. 固体废弃物压缩性及填埋场沉降研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 116 - 120. (ZHANG Zhen-ying, CHEN Yun-min. Study on compressibility and settlement of landfill with municipal solid waste[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 116 - 120.)
- [19] 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 Yun-min, TANG Xiao-wu, et al. Development and application of biodegradation-compression test apparatus for MSW[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(5): 571 - 576.)
- [20] DEAN K Wall, CHRIS Zeiss. Municipal landfill biodegradation and settlement[J]. Journal of Environmental Engineering, 1995, 121(3): 215 - 213.
- [21] 赵由才, 黄仁华, 赵爱华, 等. 大型垃圾填埋场垃圾降解规律研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(6): 736 - 739. (ZHAO You-cai, HUANG Ren-hua, ZHAO Ai-hua, et al. Degradation of refuse in large scale of landfill[J]. ACTA Scientiae Circumstantiae, 2000, 20(6): 736 - 739.)
- [22] J 贝尔. 多孔介质流体动力学[M]. 李竞生, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983. (BEAR J. Dynamics of Fluids in Porous Media. [M]. LI Jing-sheng, trans lator. Beijing: China Architecture & Building Press, 1983)
- [23] 弗雷德隆德 D G, 拉哈尔佐 H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (FREDLUND D G, HARIANTO Rahardjo. Soil mechanics for unsaturated soil[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.)
- [24] 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. (XIE Yan, CHEN Yun-min, TANG Xiao-wu, et al. Mathematical model for landfill settlement on account of gas-solid coupling effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering.
- [25] 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, 2002. (ZHANG Jian-guo, LEI Guang-lun, ZHANG Yan-yu. Permeation fluid mechanics in petroleum seam [M]. Dongying: University of Petroleum Press, 2002.)
- [26] 赵阳升, 矿山岩石流体力学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994. (ZHAO Yang-sheng. Fluid mechanics for mining[M]. Beijing: Coal Industry Press, 1994.)
- [27] 龚晓南. 土工计算机分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. (GONG Xiao-nan. Computer analysis for geotechnical engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000.)