

垃圾填埋场沉降变形条件下气 - 水 - 固耦合 动力学模型研究

薛 强¹, 刘 磊^{1,2}, 梁 冰², 赵 颖^{1,2}, 王永波^{1,2}

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 辽宁工程技术大学 力学与工程科学系, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 基于多孔介质流气 - 水 - 固耦合和微生物降解理论, 建立描述这一复杂动力学行为的二维气 - 水 - 固耦合数学模型, 并给出耦合模型的数值格式。通过数值仿真实现垃圾填埋体的变形沉降及气体产生和迁移演化过程的可视化, 得到气体压力及产气量随填埋年份的变化规律。数值计算结果表明: 填埋体内总应力及孔隙度的改变与垃圾降解变化规律一致; 抽气过程使场内气体压力得到释放; 由于沉降作用填埋场内水相饱和度有增大的趋势, 其中底部变化较顶部明显; 此外, 气井产量的变化与气体迁移单相模型的计算结果基本吻合, 验证耦合模型的可靠性, 其研究成果为垃圾填埋场沉降控制与气体资源化利用提供技术支持和理论依据。

关键词: 土力学; 垃圾填埋场; 沉降; 气 - 水 - 固耦合; 填埋气体; 动力学行为

中图分类号: TU 47

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 1 - 3473 - 06

A GAS-HYDRAULIC-SOLID COUPLING DYNAMICS MODEL UNDER LANDFILL SETTLEMENT

XUE Qiang¹, LIU Lei^{1,2}, LIANG Bing², ZHAO Ying^{1,2}, WANG Yongbo^{1,2}

(1. *Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;*

2. *Department of Mechanics and Engineering Sciences, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China*)

Abstract: Landfill gas(LFG) and leaching solution are generated by bio-degradation in bioreactor landfills inducing the settlement of waste. The deformation and movement of waste matrix result from upper landfill loading and bio-degradation behaviour of organic matter. Based on porous medium fluid(water and gas)-solid coupling and micro-degradation theory, the gas-hydraulic-solid coupling model is developed to describe the dynamic behavior of settlement and LFG flow in landfill. And the finite element model is established. The visualization of matrix deformation and gas generation and transport is presented by numerical simulation. The variation of gas pressure and flow rate with time(year) elapsed after the closure of the landfill is given. The results show that the variation law of waste degradation is coincident with the total stress and porosity of landfill waste. The gas pressure is released by extracting within the landfill. The water saturation increases with the settlement, and the variation amplitude of saturation at the landfill bottom is more obvious than that at the top. The gas flow rate by coupling model agrees well with that by single phase model. The reliability of the coupling model is verified. It will provide technological and theoretical support for further studies on settlement treatment and gas resource reuse of municipal solid waste.

收稿日期: 2007 - 05 - 10; **修回日期:** 2007 - 06 - 15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50309015); 湖北省青年杰出人才基金项目(2006ABB007); 建设部科学技术资助项目(05 - K2 - 15); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室资助项目(GZ2006 - 03)

作者简介: 薛 强(1976 -), 男, 博士, 1999 年毕业于辽宁工程技术大学力学与工程科学系工程力学专业, 现任副研究员, 主要从事环境岩土工程和多场多相耦合理论方面的研究工作。E-mail: qiangx@whrsm.ac.cn

Key words: soil mechanics; landfill; settlement; gas-hydraulic-solid coupling; landfill gas; dynamics behavior

1 引言

城市固体废弃物(MSW)的无害化处理和资源化利用已得到社会各界学者的广泛关注^[1~3]。其中,作为MSW产物之一的垃圾填埋气体(landfill gas, LFG)就是一种高效能的清洁能源(主要成分为CH₄),此外,它也是温室气体的主要来源。据统计,填埋场中温室气体的释放量占全球总排放量的12%^[2]。因此,控制和再利用LFG具有双重意义。

国内外的学者相继开展了LFG产生及迁移规律的研究。M. Nastev等^[3]开发了LFG释放热耦合计算软件TOUGH2-LGM,软件同时考虑了填埋场内析出水分对气体迁移规律的影响。Q. Xue等^[4]在考虑气体“滑脱”效应条件下给出了LFG迁移非稳态模型的解析解。Y. C. Chen等^[5]给出了极坐标系下LFG迁移单(渗流)场单(气)相二维稳态数学模型,并以被动式抽气井为计算模型对纽约市某填埋场产气规律进行了预测。通常,LFG的产气速率采用一级动力学模型描述,生物反应器产气的同时,垃圾体自身也在逐渐消耗。垃圾自下而上的堆填方式改变了场内垃圾土密度的分布,加之自身的衰减,可使填埋场的沉降变形持续相当长的时间(>30 a),可能超出LFG的回收利用年限。C. N. Liu和R. H. Chen^[6]及谢焰等^[7]分别采用解析和数值方法对考虑生物降解条件下填埋场沉降变形及气体分布规律进行了探讨。

垃圾土层的沉降和载荷作用使垃圾骨架受压变形,导致底部垃圾土密度远高与顶部。在整个沉降过程中孔隙中的水分和气体不仅承受上方垃圾土的积压,作为体积力的一部分也同时作用于其下方的垃圾骨架,即场内气-水-固各相存在耦合作用。另一方面,由于LFG的密度很小,迁移规律不同与孔隙中的水,可假设填埋场内三相间有相对运动。为此,本文在多孔介质气-水两相渗流理论的基础上,建立了气-水-固耦合动力学模型,并通过数值仿真分析,给出垃圾填埋体内孔隙度、总应力、水饱和度及气体压力的分布,预测了气井产量的变化规律。

2 气-水-固耦合模型的建立

2.1 气-水两相渗流运动方程

填埋场内气、水共存而充满孔隙空间,假设二

者不混溶,连续性方程可表示为

$$\frac{\partial(n\rho_\alpha S_\alpha)}{\partial t} + \nabla(nS_\alpha \rho_\alpha V_\alpha) = F_\alpha \quad (1)$$

式中: α 为相(w 和 nw); ρ_α 为密度; S_α 为饱和度; n 为孔隙度; V_α 为流体的绝对运动速度,有

$$V_\alpha = V_{r,\alpha} + V_s \quad (2)$$

式中: $V_{r,\alpha}$ 为 α 相流体与固体骨架的相对速度, V_s 为固体颗粒运动的绝对速度。

流体运动符合 Darcy 定律,有

$$v_\alpha = -\frac{kk_{r,\alpha}}{\mu_\alpha}(\nabla P_\alpha + \rho_\alpha g \eta) \quad (3)$$

式中: $k_{r,\alpha}$ 为 α 相对渗透系数; k 为固有渗透率,且有

$$k = k_0 \frac{n^3}{(1-n)^2} \quad (4)$$

式中: k_0 为初始固有渗透率; $K_\alpha = -kk_{r,\alpha} / \mu_\alpha$, μ_α 为 α 相黏性系数。此外,LFG 为混合气体(CH₄, CO₂, N₂ 和 O₂),这里引入总压力 P 来描述,有

$$P = \sum_{i=1}^4 P_i \quad (5)$$

P_i 满足理想气体定律,有

$$P_i = \frac{\rho_i RT}{M_i} \quad (6)$$

LFG 产气速率模型采用一级动力学模型^[7]来表示,有

$$F_{nw} = L \sum_{i'=1}^3 A_{i'} \lambda_{i'} e^{-\lambda_{i'} T} \quad (7)$$

式中: $i = 1, 2, 3$, 分别代表难降解、一般降解和易降解垃圾; L 为常数, $L = 421.98$; $A_{i'}$, $\lambda_{i'}$ 均为常数, i' 为组分所占的百分比; T 可写为

$$T = T_0 + Y \frac{T_f}{D} + T_s \quad (8)$$

式中: T_0 为封场后到当前时刻的时间(a), T_f 为垃圾填埋至封场所需的时间(a), T_s 当前时刻至计算结束的时间(a)。

考虑水相流体具有可压缩性,通常表示为

$$\rho_w = \rho_{w0}[1 + \beta_w(P_w - P_{w0})] \quad (9)$$

为了描述气、水运动本构方程,可采用 Van Genuchten 模型,有

$$\theta_w = \theta_{r,w} + S e_w(\theta_{s,w} - \theta_{r,w}) \quad (10)$$

式中: $\theta_{r, w}$ 为残余体积含水率; H_c 为孔隙压力水头; Se_w 为有效饱和度, 且

$$Se_w = \frac{1}{[1 + |\alpha H_c|^\xi]^m} \quad (11)$$

由此可得

$$k_{r, w} = Se_w^{1/2} [1 - (1 - Se_w^{1/m})^m]^2 \quad (12)$$

$$k_{r, nw} = (1 - Se_w)^{1/2} [(1 - Se_w^{1/m})^m]^2 \quad (13)$$

式中: $k_{r, w}$ 为水相相对渗透系数, $m = 1 - 1/n$ 。

2.2 固相运动方程

垃圾土中有机物的降解可表示为固体质量的消耗, 不同有机质的降解特性也存在差别, 固相总质量^[8]可表示为

$$M_s = M_{si} \sum_{j=1}^4 x_j \exp(-\varpi_j t) \quad (14)$$

式中: ϖ_j 为一级衰减系数, $j = 1, 2, 3, 4$ 分别为非降解、难降解、一般降解和易降解类有机物组; M_{si} 为初始固相总质量。由式(14)可得质量变化速率为

$$F_{so} = \rho_{s, i} \sum_{j=1}^4 (-\varpi_j) x_j \exp(\varpi_j T_d) \quad (15)$$

式中: $\rho_{s, i}$ 为垃圾土初始密度; x_j 为 j' 组分所占比例值, x_1 为 0.35, x_2 为 0.25, x_3 为 0.25, x_4 为 0.15。

由于固体骨架质量不断减少(发酵后产生 LFG)并伴随沉降运动, 因此, 固相连续性方程可表示为

$$\frac{\partial[(1-n)\rho_s]}{\partial t} + \nabla[(1-n)\rho_s V_s] = F_{so} \quad (16)$$

垃圾填埋体的沉降变形比较复杂, 主、次固结具有不同的特征, 因此, 应变与应力间存在非线性关系^[9], 由于水平方向上不承受体积力作用, 假设水平方向为线弹性变形, 垂直方向的变形关系有

$$\varepsilon(t) = [a + b(1 - e^{(-\lambda/b)t})]\sigma' \quad (17)$$

即

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = d \frac{\partial \sigma'}{\partial t} + d' \sigma' \quad (18)$$

$$d = a + b[1 - e^{(-\lambda/b)t}] \quad (19)$$

其中,

$$d' = \lambda e^{(-\lambda/b)t} \quad (20)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \text{div} V_s \quad (21)$$

有效应力^[10]表示为

$$\sigma' = \sigma_s + S_w P_w + S_{nw} P_{nw} \quad (22)$$

垂直方向总应力表示为

$$\sigma_{s, y} = -[nS_w P_w + nS_{nw} P_{nw} + (1-n)\rho_s]g(y-f) \quad (23)$$

展开式(1)中的水相方程, 有

$$n\rho_w \frac{\partial S_w}{\partial t} + \beta_w nS_w \rho_{w0} \frac{\partial P_w}{\partial t} + S_w \rho_w \frac{\partial n}{\partial t} + n\rho_w S_w \text{div} V_w = 0 \quad (24)$$

展开式(16), 并两边除以 ρ_s , 与式(24)相加得

$$\frac{n}{S_w} \frac{\partial S_w}{\partial t} + \beta' \frac{\partial P_w}{\partial t} + n \text{div} \left(\frac{1}{nS_w} v_w \right) + \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial t} = \sum_{j=1}^4 (-\varpi_j) x_j \exp(\varpi_j T_d) \quad (25)$$

其中,

$$\beta' = \frac{\beta_w n \rho_{w0}}{\rho_w} + (1-n)\beta_w$$

由气 - 固状态方程, 式(16)变为

$$\frac{\partial n}{\partial t} = (1-n) \frac{\beta_s}{\rho_{nw} \beta_{nw}} \frac{\partial \rho_{nw}}{\partial t} + (1-n) \text{div} V_s - \sum_{j=1}^4 (-\varpi_j) x_j \exp(\varpi_j T_d) \quad (26)$$

将式(26)代入式(1)的气相方程, 得

$$n\rho_{nw} \frac{\partial S_{nw}}{\partial t} + \beta'' S_{nw} \frac{\partial P_{nw}}{\partial t} + nS_{nw} \rho_{nw} \text{div} V_{r, nw} + S_{nw} \rho_{nw} \left[\frac{\partial \varepsilon_i}{\partial t} - \sum_{j=1}^4 (-\varpi_j) x_j \exp(\varpi_j T_d) \right] = F_{nw} \quad (27)$$

$$\beta'' = \frac{M}{RT} \left[n + (1-n) \frac{\beta_s}{\beta_{nw}} \right]$$

其中, 式(25)和(27)为考虑沉降作用的气 - 水 - 固耦合模型。

3 耦合模型的数值解

以气 - 固(式(27))为例, 采用 Galerkin 有限元法构造各函数的近似解, 并采用差分法和 Picard 迭代格式^[11]离散时间项可得到解的表达式:

$$[A] \frac{\{S_{nw}\}^{n+1, l+1} - \{S_{nw}\}^n}{\Delta t} + [B] \{S_{nw}\}^{n+1, l} \left(\frac{\{P_{nw}\}^{n+1, l+1} - \{P_{nw}\}^n}{\Delta t} \right) + [C] \{K_{nw, xx}\}^{n+1, l} \{P_{nw}\}^{n+1, l+1} + [D] \cdot \{K_{nw, yy}\}^{n+1, l} \{P_{nw}\}^{n+1, l+1} + [E] \{K_{nw, yy}\}^{n+1, l} + [F] \cdot \{S_{nw}\}^{n+1, l} \frac{\{\varepsilon_i\}^{n+1, l+1} - \{\varepsilon_i\}^n}{\Delta t} + [G] \{S_{nw}\}^{n+1, l} + [H] = 0 \quad (28)$$

其中,

$$[A] = \int_{D_c} n \rho_{nw} N_i N_j dx dy$$

$$[B] = \int_{D_c} \beta N_i N_j N_k dx dy$$

$$[C] = \int_{D_c} \rho_{nw} \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} N_k dx dy$$

$$[D] = \int_{D_c} \rho_{nw} \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} N_k dx dy$$

$$[E] = \int_{D_c} -\rho_{nw}^2 g \frac{\partial N_i}{\partial y} N_k dx dy$$

$$[F] = \int_{D_c} N_i N_j N_k dx dy$$

$$[G] = \int_{D_c} -\rho_{nw} N_i N_j \sum_{j'=1}^4 (-\omega_{j'}) x_{j'} \exp(\omega_{j'} T_d) dx dy$$

$$[H] = -\int_{D_c} F_{nw} dx dy - \int_{\Gamma} \left(\frac{1}{n S_w} q_{nw} \right) N_i ds$$

4 数值模型的应用

模拟的填埋区域长 10 m、高 15 m，半年时间完成填充作业，如图 1 所示。假设左、右边界水平位移为 0，抽气边界为 $p_{nw} = -p_0$ ，计算参数见表 1 和 2。数值仿真结果如图 2~7 所示。

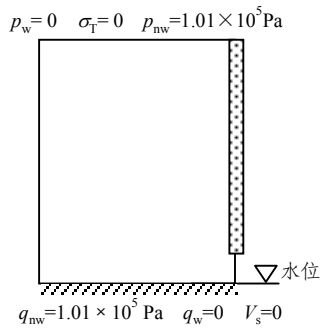


图 1 垃圾填埋体示意图
Fig.1 Schematic diagram of landfill

随着填埋场内有机物降解速率，由于微生物降解及垃圾自重而引发的填埋体沉降使总应力减小，如图 2 所示，在填埋后的 50 a 里下降了 7 kPa；固体骨架受压的同时导致孔隙度变小，见图 3，二者的下降幅度都随年份的延续不断减慢，这主要是由于垃圾降解速率呈递减趋势所导致。不同填埋年份气体压力分布如图 4 所示，填埋垃圾底部气压力较大，且随着年份的增加，压力值逐渐减小；由于填埋体发生沉降，顶部土结构发生变形，气体承压从而使压力值升高，同时水饱和度上升，填埋底部上

表 1 垃圾产气速率参数值
Table 1 Parameters values of LFG generation rate

易降解垃圾 圾含量/%	一般降解垃圾 圾含量/%	难降解垃圾 圾含量/%	L	易降解垃圾 生物分解 参数
15	55	30	421.98	0.138 6
一般降解垃圾 生物分解参数	难降解垃圾生 物分解参数	单位质量垃圾 的产 CH ₄ 量 (m ² · kg ⁻¹)	单位质量垃圾 的产 CO ₂ 量 (m ² · kg ⁻¹)	
0.023 1	0.017 328	0.178	0.178	

表 2 耦合模型参数值
Table 2 Parameter values of coupling model

垃圾土 孔隙度	剩余 饱和度	m(V-G 模型)	n(V-G 模型)	alpha/m ⁻¹
0.4	0.037	0.11	1.12	5.0
水黏性系 数/(Pa · s)	A/(kPa ⁻¹)	b/(kPa ⁻¹)	C _r /(Pa ⁻¹)	垃圾土密度 (kg · m ⁻³)
1 × 10 ⁻³	3.8 × 10 ⁻⁴	5.8 × 10 ⁻⁴	2.0 × 10 ⁻¹⁰	880
k _v /k _h	水平方向的渗透 率/m ²	孔隙压缩系数 /Pa ⁻¹	气体黏性系数 (Pa · s)	
1/3	3.0 × 10 ⁻¹²	0.5 × 10 ⁻⁹	1.54 × 10 ⁻¹⁵	

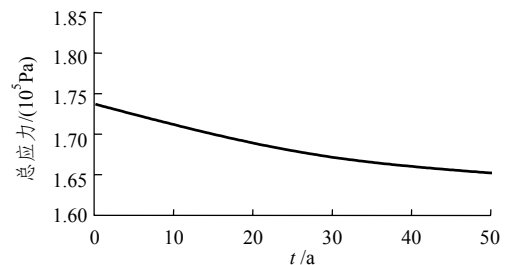


图 2 填埋场底部总应力随沉降时间的变化曲线
Fig.2 Curve of total stress varying with time at the bottom of landfill

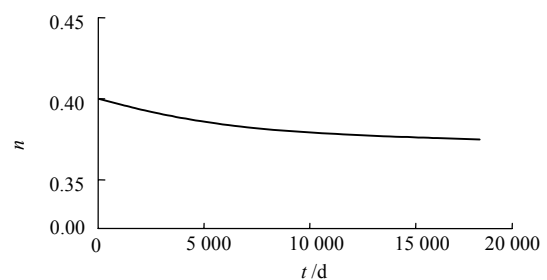


图 3 填埋场底部孔隙度随沉降时间的变化曲线
Fig.3 Curve of porosity varying with time at the bottom of landfill

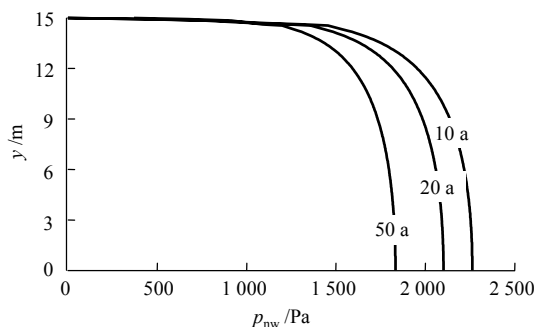


图 4 垂直方向气体压力变化量分布

Fig.4 Gas pressure variation in vertical direction

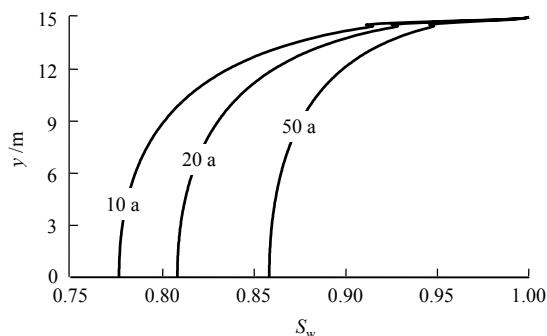
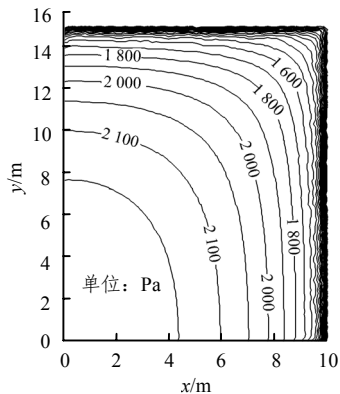
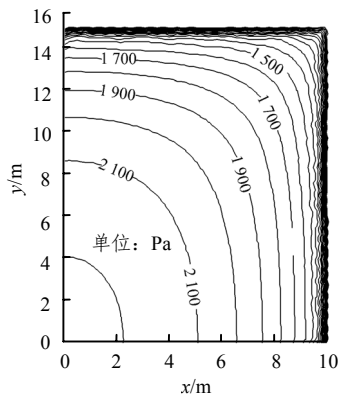


图 5 垂直方向饱和度变化量分布

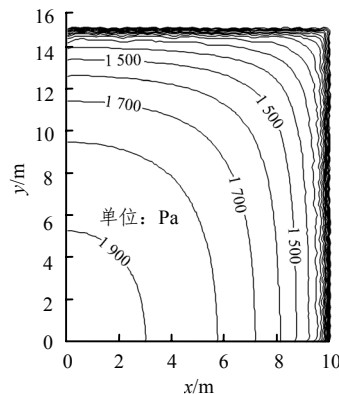
Fig.5 Saturation variation in vertical direction



(a) 10 a



(b) 20 a



(c) 50 a

图 6 气体压力等值线在 10, 20 和 50 a 时的分布情况

Fig.6 Contour of landfill gas in 10, 20 and 50 years

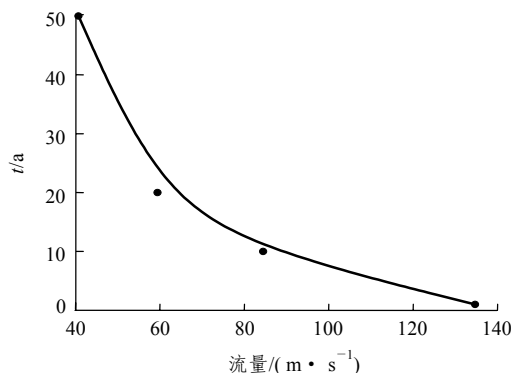


图 7 流量随时间的变化曲线

Fig.7 Gas flow rate varying with years

升幅度相对比较大, 见图 5; 抽气状态下 LFG 的运动规律可见图 6, 一方面, 填埋气体向大气释放, 若无覆盖层保护将直接导致大气污染。另一方面, 填埋气体向气井方向迁移。随着年份的延迟气体压力梯度分布由紧密变稀疏, 表明气压力有效作用区减小, 气体流速逐渐放缓, 这直接导致气井产量下降, 见图 7, 由于新鲜垃圾降解速率快, 因此, 前 10 a 的气井产量曲线较陡, 下降幅度较大, 而 20~50 a 的曲线分布恰相反。

5 结 论

(1) 为了进一步描述生物反应器填埋场有机质降解引发的沉降及气体释放过程。本文以多孔介质气 - 水两相渗流及流 - 固耦合理论为基础, 得到了二维条件下非稳态气 - 水 - 固耦合数学模型, 并结合 Galerkin 有限元和 Picard 迭代法给出了模型的数值格式;

(2) 通过数值仿真分析实现了填埋体沉降及产气规律的可视化, 气体垂向分布表明, 气压随深度的增加而增大, 且随填埋年份的延长, 压力值逐渐减小; 数值仿真结果表明: 由于垃圾降解速率呈递减趋势, 填埋体底部总应力及孔隙度都随填埋年份的延续不断减慢; 抽气过程使场内气体压力得到了持续的释放, 气体压力不断降低; 由于填埋体底部受压变形最大, 水相饱和度相对顶层的上升幅度比较大; 沉降作用使水相饱和度不断增大, 填埋场底部变化较顶部明显; 气井产量的下降幅度随年份的增加而降低, 这一规律与Y. C. Chen等^[5]的研究成果中单场单相迁移模型所得到的抽气量结果相一致, 验证了本文数值仿真结果的可靠性; 模拟结果反映了填埋体内气-水-固三相间的相互联系和制约关系, 为有效控制填埋场固结沉降及更加合理的资源化利用提供了理论依据。

参考文献(References):

- [1] US EPA EIIP. Landfills[M]. [S. l.]: US Environmental Protection Agency, 1997.
- [2] BONGER J E. Fluxes of methane between landfills and the atmosphere: natural and engineering controls[J]. Soil Use Manage, 1997, 13(3): 268 - 277.
- [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(2): 187 - 211.
- [4] XUE Q, FENG X T, LIANG B. Slippage solution of gas pressure distribution in the process of landfill gas seepage[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2005, 26(12): 1 623 - 1 633.
- [5] 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): 39 - 52.
- [6] LIU C N, CHEN R H. Unsaturated consolidation theory for the prediction of long-term municipal solid waste landfill settlement[J]. Waste Management and Research, 2006, 24(1): 80 - 91
- [7] 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))
- [8] HETTIARACHCHI C H, MEEGODA J N, TAVANTZIS J, et al. Numerical model to predict settlements coupled with landfill gas pressure in bioreactor landfills[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 139(3): 514 - 522.
- [9] PARK H, LEE S R M. Evaluation of decomposition effect on long-term settlement prediction for fresh municipal solid waste landfills[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(2): 107 - 118.
- [10] DURMUSOGLU E, CORAPCIOGLU M Y. Landfill settlement with decomposition and gas generation[J]. Journal of Environmental Engineering, 2005, 131(9): 1 311 - 1 321.
- [11] 刘 磊. 水相作用下垃圾填埋气体迁移的数值仿真研究[硕士学位论文][D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2007(LIU Lei. Numerical simulation of landfill gas migration with water[M.S.Thesis][D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2007.(in Chinese))