

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.04.006

考虑竖井作用的填埋场气-液耦合运移规律

施建勇, 赵 义, 周继东

(河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究存在竖井的填埋场中填埋气、渗滤液的运移规律,在忽略气、液竖向流动的前提下,基于有机物生化降解、气-液本构关系和气、液连续性条件,结合抽气、回灌渗滤液等工况,建立填埋场平面轴对称气-液耦合运移理论,得到被动集气和主动集气 2 种工况下的简化解析解。计算结果表明:孔隙水压力和孔隙气压力均随离开竖井距离的增大而增大;孔隙水压力随时间逐渐消散,孔隙气压力先达到峰值再消散;考虑液相对孔隙气压力的耦合影响时,孔隙气压力有所提高;气相渗透系数增大会减小液相对孔隙气压力的耦合影响,液相渗透系数增大会加剧耦合影响。

关键词: 垃圾填埋场;竖井;气-液耦合作用;解析解

中图分类号: X705 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2014)04-0314-07

Flow equation for gas-leachate coupling effect considering vertical wells in landfills

SHI Jianyong, ZHAO Yi, ZHOU Jidong

(Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering (Hohai University),
Ministry of Education, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this study, the flow of gas and leachate to vertical wells in landfills was investigated. Neglecting the flow of landfill gas and leachate in the vertical direction, and based on the degradation of organic matter, gas-leachate constitutive relationship, and gas-leachate continuous conditions, the flow equation under the condition of a plane axisymmetric gas-leachate coupling effect was established with gas pumping and leachate recirculation. The analytical solution in the unsteady state of the simplified equation is presented under conditions of passive and active extraction wells. The results show that the pore water pressure and gas pressure increased with the distance from the extraction well. The pore water pressure dispersed as time went on, and the gas pressure increased to its peak value initially, and then dispersed. The gas pressure that considered the gas-leachate coupling effect was relatively higher. The coupling effect on gas pressure was reduced with the increase of gaseous permeability, and become more significant with the increase of liquid permeability.

Key words: landfill; vertical well; gas-leachate coupling effect; analytical solution

城市固体废弃物(MSW)生化降解的两大产物——填埋气(LFG)和渗滤液(Leachate)对填埋场周边环境有很大影响^[1](如填埋气的积聚会引起爆炸,渗滤液泄漏会污染地下水),因此有必要控制收集填埋气和渗滤液。国内外学者针对填埋气和渗滤液的迁移规律做了很多有意义的研究。EL-Fadel 等^[2]首次将 Halvadakis 产气方程与气体运移结合,得到降解作用下的气压分布规律;Hettisrachchi 等^[3]考虑填埋场产气规律,通过有效含水量将气相和液相联系起来,由气相质量守恒方程实现耦合,建立了气-液耦合模型;Singhal 等^[4]在淋滤液回灌情况下,分析力-气-液耦合作用下的固结效应;陈云敏等^[5]建立了固-液-气耦合一维沉降固结模型,得到气压分布和沉降变化规律;薛强等^[6]建立了力-气-热耦合作用的沉降和气体运移模型;彭绪亚等^[7]假设填埋气单向流迁移,给出了稳定产气、抽气量与产气量相等条件下单井轴对称气体运移

收稿日期: 2013-12-05

基金项目: 国家自然科学基金(41372268)

作者简介: 施建勇(1965—),男,江苏如皋人,教授,博士,主要从事环境岩土工程研究。E-mail: soft-ground@hhu.edu.cn

理论解;Liu 等^[8]发展了一维气-液耦合固结理论,得到了液压、气压分布和沉降变化规律。

在垃圾填埋场气-液耦合的流体运移理论建立和求解中,常通过数值方法求解定解问题^[9-11],且较多的成果集中在气体运移理论研究上,淋滤液运移研究成果较少,气-液耦合的一维流体运移理论控制方程组的研究成果偶见报道,气-液耦合轴对称流体运移理论控制方程组研究处于探索阶段。笔者将在 Liu 等^[8,12]研究工作的基础上,发展轴对称气-液耦合运移理论控制方程组及分析研究。

1 考虑竖井作用气-液耦合迁移理论的建立

现代卫生填埋场常利用竖井抽排填埋气和回灌渗滤液,竖井作用下的气、液是轴对称运移的。填埋场中垃圾的分层填埋会造成填埋气和渗滤液的水平向渗透性大于竖向渗透性^[11,13],导致气、液沿水平向迁移的特性明显。建立理论时忽略填埋场中气、液的竖向流动,只分析其径向运动,计算简图如图 1 所示。引入假设条件:(a)竖井贯穿填埋体,气、液只发生水平向运移;(b)垃圾体的气相、液相渗透系数为常量,填埋体内部温度恒定;(c)混合气体处于理想状态,气体不溶于液体;(d)填埋场上覆压力不变,且无空气和雨水侵入。在这里,通过坐标变换将文献[8]的气-液一维耦合运移方程推广到平面轴对称形式,即得到所需控制方程:

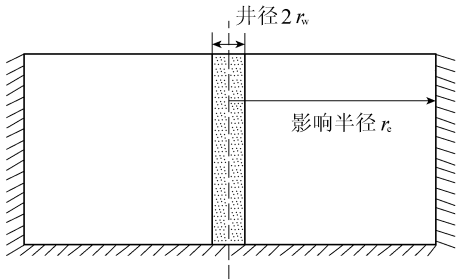


图 1 计算简图
Fig. 1 Calculation diagram

$$\begin{cases} \frac{\partial u_a}{\partial t} = -A_2 \frac{k_a}{g} \left(\frac{\partial^2 u_a}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_a}{\partial r} \right) - A_2 \frac{m_{ba} - m_{a0}}{V_0 m_{ba}} \frac{\partial M_{ba}}{\partial t} + A_3 \frac{\partial u_w}{\partial t} \\ \frac{\partial u_w}{\partial t} = B_1 \left(\frac{\partial^2 u_w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_w}{\partial r} \right) - B_2 \frac{\left(\frac{1}{9}k + \frac{3}{22} \right) AM_{b0}}{(k+1)V_0 \rho_w B} t e^{-\frac{t}{B}} - B_3 \frac{\partial u_a}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$A_2 = \frac{RT}{m_{a0} [(-m_{1ka} + m_{2a}) \bar{u}_{amix} + n_s(1 - S_r)]} \quad A_3 = \frac{m_{2a} \bar{u}_{amix}}{(-m_{1ka} + m_{2a}) \bar{u}_{amix} + n_s(1 - S_r)}$$
$$\frac{\partial M_{ba}}{\partial t} = M_{b0} \frac{At}{B} e^{-\frac{t}{B}} \quad B_1 = \frac{k_w}{\rho_w g m_{2w}} \quad B_2 = \frac{1}{m_{2w}} \quad B_3 = \frac{m_{1kw} - m_{2w}}{m_{2w}}$$

式中: u_a ——考虑降解作用的混合气体孔隙气压力,Pa; u_w ——孔隙水压力,Pa; r ——计算半径,m; t ——时间,d; M_{b0} ——降解物质干质量,kg; n_s ——孔隙率; S_r ——饱和度; k_a ——气相渗透系数,m/d; k_w ——液相渗透系数,m/d; T ——热力学温度,K; k ——纤维素和半纤维素比例;其他各参数意义见文献[8]。

在垃圾填埋场运行中,抽气井工作状态分为主动集气和被动集气,渗滤液回灌有固定水头和固定流量方式,各种情况对应的定解条件如下:

主动抽气(抽气真空压力 p_s)

$$u_a \Big|_{r=r_w} = p_s \quad \frac{\partial u_a}{\partial r} \Big|_{r=r_e} = 0 \quad (2)$$

被动抽气(填埋气从井中自然排出)

$$u_a \Big|_{r=r_w} = 0 \quad \frac{\partial u_a}{\partial r} \Big|_{r=r_e} = 0 \quad (3)$$

渗滤液回灌(固定水头 p_w 回灌)

$$u_w \Big|_{r=r_w} = p_w \quad \frac{\partial u_w}{\partial r} \Big|_{r=r_e} = 0 \quad (4)$$

渗滤液回灌(固定流量 Q 回灌,井深 H_l)

$$\frac{\partial u_w}{\partial r} \Big|_{r=r_w} = \frac{\rho_w g Q}{2\pi r_w H_l k_w} \quad \frac{\partial u_w}{\partial r} \Big|_{r=r_e} = 0 \quad (5)$$

如果垃圾体中有初始气压 q_1 和初始水压 q_2 ,则对应的初始条件如下:

$$u_a = q_1 \quad u_w = q_2 \quad (6)$$

上述定解条件和方程组(1)构成平面轴对称气-液耦合运移理论。

2 平面轴对称气-液耦合运移理论的解

研究认为垃圾土中气体运移的速度远快于液体,因此气体消散得更快^[8,14]。在平面轴对称气-液耦合运移理论控制方程组解析解推求时,先忽略液压控制方程中气体的影响,得到孔隙水压力解;然后将孔隙水压力解代入气压控制方程,推求得到考虑液相影响的耦合孔隙气压力解;再分析气-液的相互耦合影响。本文拟进行被动集气和主动集气2种工况下解的推求与分析计算。假设集气时井中气压值 p_s 沿深度不变($p_s=0$ 表示被动集气, p_s 为负值表示主动集气),则定解条件为

气压:
$$\begin{cases} u_a(r,0)=q_1 \\ u_a(r_w,t)=p_s \\ \frac{\partial u_a(r_e,t)}{\partial r}=0 \end{cases}$$

水压:
$$\begin{cases} u_w(r,0)=q_2 \\ u_w(r_w,t)=p_s \\ \frac{\partial u_w(r_e,t)}{\partial r}=0 \end{cases}$$

(7)

解得

$$u_w(r,t)=\sum_{n=1}^{\infty}\left\{\frac{A_nD}{B_1\beta_n^2-\frac{1}{B}}\left(t-\frac{1}{B_1\beta_n^2-\frac{1}{B}}\right)e^{-\frac{1}{B}t}+\left[\left(q_2-p_s\right)A_n+\frac{A_nD}{\left(B_1\beta_n^2-\frac{1}{B}\right)^2}\right]e^{-B_1\beta_n^2t}\right\}\left[Y_0\left(\beta_nr_w\right)J_0\left(\beta_nr\right)-J_0\left(\beta_nr_w\right)Y_0\left(\beta_nr\right)\right]+p_s$$

$$u_a(r,t)=\sum_{n=1}^{\infty}\left\{\frac{A_nD_2}{D_1\beta_n^2-\frac{1}{B}}\left(t-\frac{1}{D_1\beta_n^2-\frac{1}{B}}\right)e^{-\frac{1}{B}t}+\left[\left(q_1-p_s\right)A_n+\frac{A_nD_2}{\left(D_1\beta_n^2-\frac{1}{B}\right)^2}\right]e^{-D_1\beta_n^2t}\right\}\left[Y_0\left(\beta_nr_w\right)J_0\left(\beta_nr\right)-J_0\left(\beta_nr_w\right)Y_0\left(\beta_nr\right)\right]+$$

$$\sum_{n=1}^{\infty}\left\{\frac{A_3A_nDB^3B_1\beta_n^2}{\left(BD_1\beta_n^2-1\right)\left(BB_1\beta_n^2-1\right)^2}e^{-\frac{1}{B}t}-\frac{A_3A_nD}{BB_1\beta_n^2-1}\frac{1}{D_1\beta_n^2-\frac{1}{B}}\left(t-\frac{1}{D_1\beta_n^2-\frac{1}{B}}\right)e^{-\frac{1}{B}t}-\frac{A_3B_1}{D_1-B_1}\left[\left(q_2-p_s\right)A_n+\frac{A_nD}{\left(B_1\beta_n^2-\frac{1}{B}\right)^2}\right]e^{-B_1\beta_n^2t}+I'e^{-D_1\beta_n^2t}\right\}\cdot$$

$$\left[Y_0\left(\beta_nr_w\right)J_0\left(\beta_nr\right)-J_0\left(\beta_nr_w\right)Y_0\left(\beta_nr\right)\right]+p_s$$

(8)

(9)

其中

$$D_1=-A_2\frac{k_a}{g}\qquad D_2=-A_2A_n\frac{m_{ba}-m_{a0}}{V_0m_{ba}}\frac{1.111(k+1.023)}{k+1}M_{l0}\frac{A}{B}$$

$$D=-B_2\frac{\left(\frac{1}{9}k+\frac{3}{22}\right)AM_{l0}}{(k+1)V_0\rho_wB}\qquad A_n=\frac{\pi J_1^2(\beta_nr_e)}{J_1^2(\beta_nr_e)-J_0^2(\beta_nr_w)}$$

$$I'=\frac{A_3B_1}{D_1-B_1}\left[\left(q_2-p_s\right)A_n+\frac{A_nD}{\left(B_1\beta_n^2-\frac{1}{B}\right)^2}\right]-\frac{1}{\left(D_1\beta_n^2-\frac{1}{B}\right)^2}\frac{A_3A_nD}{BB_1\beta_n^2-1}-\frac{A_3A_nDB^3B_1\beta_n^2}{\left(BD_1\beta_n^2-1\right)\left(BB_1\beta_n^2-1\right)^2}$$

式中: β_n —— $Y_0(\beta_nr_w)J_1(\beta_nr_e)-J_0(\beta_nr_w)Y_1(\beta_nr_e)=0$ 的根; k_a ——气相渗透系数; $J_0(\beta_nr)$ 、 $Y_0(\beta_nr)$ ——0阶第一类、第二类贝塞尔函数; $J_1(\beta_nr)$ 、 $Y_1(\beta_nr)$ ——1阶第一类、第二类贝塞尔函数。

气压解答式由2部分组成,第一部分是降解气源项产生的气压运移规律,第二部分是水压运移耦合作用对气压变化的影响。

3 计算分析与研究

3.1 验证分析

由于分析填埋场渗滤液的运移时常运用潜水井理论,将水压控制方程中的耗水项简化成常数,退化得到和潜水非稳定流理论类似的方程,将非稳定流与本文计算结果进行对比,以验证本文结果的可靠性。潜水非稳定流的定解问题如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial t} = B' \left(\frac{\partial^2 H}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H}{\partial r} \right) + M \\ H(r, 0) = H_0 \\ H(r_w, t) = h_0 \\ \frac{\partial H}{\partial r}(r_e, t) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: H ——潜水水位; B' ——水位传导系数; M ——入渗强度; H_0 ——初始水位; h_0 ——进井水位。

式(10)定解问题与主动集气工况下水压计算相似,只是该问题中非齐次项为常数,而不是与时间有关的函数,解得

$$H = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{A_n M}{B' \beta_n^2} + \left[(H_0 - h_0) A_n - \frac{A_n M}{B' \beta_n^2} \right] e^{-B' \beta_n^2 t} \right\} [Y_0(\beta_n r_w) J_0(\beta_n r) - J_0(\beta_n r_w) Y_0(\beta_n r)] + h_0 \quad (11)$$

取潜水井实例计算,参数如下: $H_0=20\text{ m}$, $h_0=14\text{ m}$, $r_w=1\text{ m}$, $r_e=200\text{ m}$, $B'=850\text{ m}^2/\text{d}$, $M=0.04\text{ m/d}$ 。将计算结果与文献[15]的结果进行对比,如图2所示。由图2可知,二者计算结果很接近,相差最大时仅为2.9%,表明本文计算可靠。

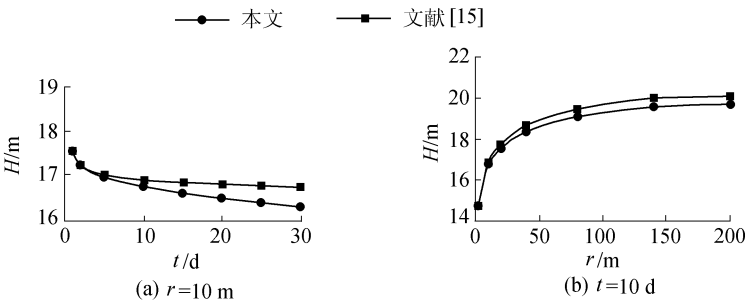


图2 本文水头计算结果与文献[15]结果对比

Fig. 2 Comparison of head calculation of present study and in literature[15]

3.2 气压、液压规律分析

某填埋场, $r_w=0.5\text{ m}$,采用被动集气进行填埋气的控制收集,即 $p_s=0\text{ kPa}$;竖井的影响半径 $r_e=25\text{ m}$ 。气、液压变化规律分析计算参数为^[8]: $T=293.6\text{ K}$, $M_{\text{b}0}=28.6\text{ kg}$, $V_0=0.1\text{ m}^3$, $n_s=0.7$, $S_r=0.5$, $k=4$;降解参数 $A=0.03$, $B=11.13$;体积变化参数 $m_{2w}=2\times10^{-6}\text{ Pa}^{-1}$, $m_{2a}=1\times10^{-4}\text{ Pa}^{-1}$, $m_{1ka}=4\times10^{-4}\text{ Pa}^{-1}$, $q_1=7\,989\text{ Pa}$, $q_2=1\,511\text{ Pa}$, $k_a=0.04\text{ m/d}$, $k_w=0.01\text{ m/d}$ 。计算结果如图3和图4所示。

由图3(a)、图4(a)可见,孔隙水压力处于消散状态,从垃圾体中的初始孔隙水压力 $q_1=7\,989\text{ Pa}$ 逐渐消散到很小值,需要的时间约为4000 d;靠近竖井的垃圾体中孔隙水压力消散较快。图3(b)、图4(b)表现出不同的变化规律,孔隙气压力经历了先增大,到达峰值后再减小的过程。由于垃圾土的生化降解作用,在垃圾体中会有气体集聚,填埋气通过竖井排出。开始阶段降解比较缓慢,垃圾体中孔隙气压力增加;经过一段时间后降解比较旺盛,垃圾体中孔隙气压力会增加并达到峰值压力;再经过一段时间,降解消退并趋于结束,垃圾体中孔隙气压力会减小,400 d后孔隙气压力已经达到很小的数值,最终完全消散。

从图3可知,达到相同消散比例时孔隙水压力消散需要的时间远大于孔隙气压力消散需要的时间,推求孔隙水压力理论解时忽略孔隙气压力消散的影响有合理性。

3.3 耦合效应分析

耦合效应分析主要考虑耦合方程组(1)求解时,在气压解答式中分离出水压运移的耦合作用,研究气压的

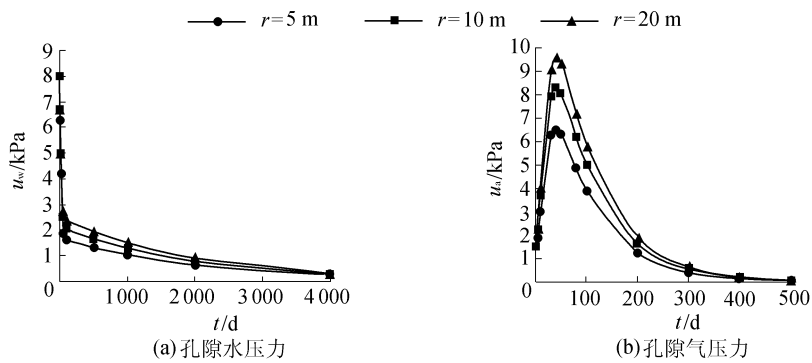


图3 孔隙水压力、孔隙气压力的时间变化曲线

Fig. 3 Variations of pore water pressure and gas pressure with different times

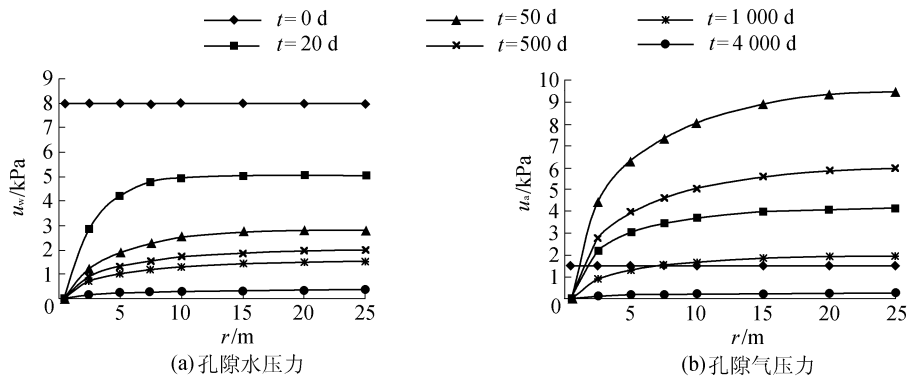


图4 孔隙水压力、孔隙气压力随 r 的变化曲线

Fig. 4 Pore water pressure and gas pressure vs. r

变化规律。图5是考虑耦合作用时距集气井轴线10 m处孔隙气压力随时间的变化曲线。由图5可知,考虑耦合作用时孔隙气压力值增加1.22 kPa,比不考虑耦合作用要高约17%;耦合效应对垃圾填埋场气体运移的影响比较大,应引起重视。为了深入研究耦合作用的影响规律,分别分析 k_a 、 k_w 对耦合效应的作用。

3.3.1 k_a 对耦合效应的影响

陈云敏等^[5]在计算分析时 k_a 取为0.009~0.037 m/d,彭绪亚等^[7]计算时 k_a 取为2.9 m/d,Yu等^[9]计算时 k_a 取为0.07~0.22 m/d。本文分析对比时 k_a 取0.1 m/d和0.5 m/d, r 取10 m,其他参数同3.2节,计算结果对比如图6所示。

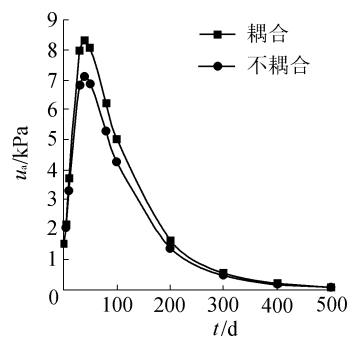


图5 孔隙气压力变化规律

Fig. 5 Variation of gas pressure

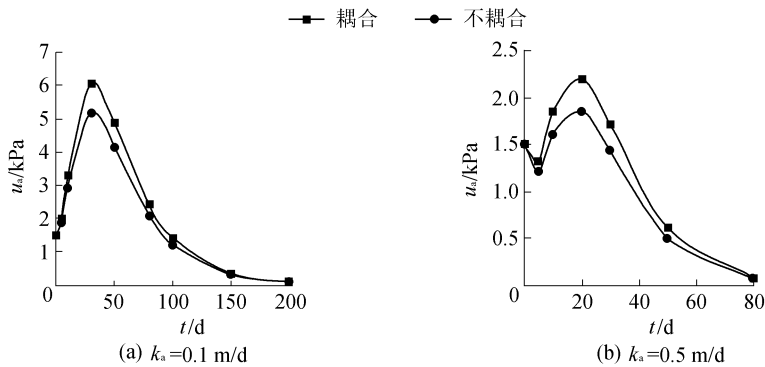


图6 k_a 对孔隙气压力的影响

Fig. 6 Effect of k_a on gas pressure

从图 6 可以看出:当 $k_a=0.1\text{ m/d}$ 时,耦合作用会使孔隙气压力增加 0.88 kPa ,当 $k_a=0.5\text{ m/d}$ 时,耦合作用会使孔隙气压力增加 0.34 kPa ,不同 k_a 下考虑耦合作用得到的孔隙气压力的差异不同, k_a 越低,考虑耦合作用孔隙气压力的差异越明显,但相对差异基本在 17% 左右;随 k_a 增加,孔隙气压力峰值会降低,改善垃圾土的气相渗透性有利于降低填埋场内部的填埋气压。图 6(b) 的孔隙气压力曲线在起始段出现了压力下降的现象,这是因为当气相渗透系数增加到某一数值,垃圾土表现出较好的气体压力消散性质,在垃圾土有机物降解初期,降解反应速率在缓慢增加,气压消散速度大于降解产生气压的速度,孔隙气压力降低,随着降解量增加,由降解产生的气压超过垃圾土的气压消散能力,垃圾体中的孔隙气压力升高;在降解达到峰值后降解速度变慢,垃圾体中的孔隙气压力也逐渐升高到达峰值后继续消散,垃圾体中的孔隙气压力最终消散完成。

3.3.2 k_w 对耦合效应的影响

Han 等^[16]通过试验得到垃圾土的 $k_w=0.04\sim0.16\text{ m/d}$,White 等^[17]通过现场回灌试验得到垃圾土 $k_w=4.32\text{ m/d}$,钱学德等^[1]总结现有试验结果得到 k_w 的平均值为 0.86 m/d 。本文计算取 $k_w=0.1\sim0.5\text{ m/d}$, $r=10\text{ m}$,其他参数同 3.2 节,考虑耦合作用的垃圾体孔隙气压力变化如图 7 所示。

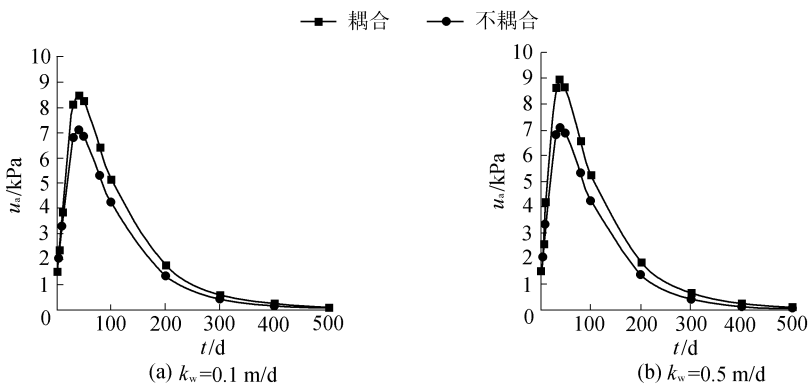


图 7 k_w 对孔隙气压力的影响
Fig. 7 Effect of k_w on gas pressure

从图 7 可以看到, $k_w=0.1\text{ m/d}$ 时峰值阶段孔隙气压力相差约 1.2 kPa ,液相对孔隙气压力影响约 18% ,而 k_w 增大至 0.5 m/d 时峰值阶段孔隙气压力相差约 1.7 kPa ,影响达到 24% 。虽然本文没有采用非饱和土的水气平衡关系,但从计算结果仍可以看到,垃圾体液相渗透系数增加的内因是垃圾体的饱和度提高,气体的有效渗透通道减少,运移受限,孔隙气压力会升高。

4 结 语

通过对垃圾土有机物降解过程进行分析,建立了考虑耦合作用的气-液运移理论控制方程组,结合定解条件,提出了耦合作用下气-液运移理论的解析解。经过计算分析,得到以下结论:

- a. 孔隙水压力处于消散状态,靠近竖井垃圾体中的孔隙水压力消散较快;孔隙气压力经历了先增大,达到峰值压力后减小的过程;孔隙水压力消散需要的时间远大于孔隙气压力消散需要的时间,忽略气相对孔隙水压力消散影响的假设是合理的。
- b. 考虑耦合作用得到的孔隙气压力值会增高;气相渗透系数越低,耦合作用效应越明显;气相渗透系数增加,孔隙气压力消散的时间缩短。液相渗透系数增大,考虑耦合作用得到的孔隙气压力峰值会增大,耦合作用越明显。

参考文献:

[1] 钱学德,施建勇,刘晓东. 现代卫生填埋场的设计与施工[M]. 2 版. 北京:中国建筑工业出版社,2011:209-335.
[2] EL-FADEL M, FINGIKAKIS A N, LECKIE J O. Numerical modeling of generation and transport of gas and heat in landfills[J]. Waste Management and Research,1996,14(5):483-504.
[3] HETTISRACHCHI C H, MEEGODA J N, TAVANTZIS J. Numerical model to predict settlement coupled with land-fill gas pressure in bioreactor landfills[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007,139(3):514-522.

- [4] SINGHAL N, ISLAM J. One-dimensional model for biogeochemical interactions and permeability reduction in soils during leachate permeation[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2008, 96(1): 32-47.
- [5] 陈云敏, 谢焰, 詹良通. 城市生活垃圾填埋场固液气耦合一维固结模型[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(2): 184-190. (CHEN Yunmin, XIE Yan, ZHAN Liangtong. One-dimensional consolidation model for landfills considering solid-liquid-gas interaction [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(2): 184-190. (in Chinese))
- [6] 薛强, 梁冰, 孙可明, 等. 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): 54-59. (XUE Qiang, LIANG Bing, SUN Keming, et al. A gas-heat-solid coupling dynamics model for landfill gas extraction [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2003, 20(2): 54-59. (in Chinese))
- [7] 彭绪亚, 余毅, 刘国涛. 垃圾填埋场竖井抽气条件下的填埋气压力分布[J]. *重庆大学学报*, 2003, 26(1): 92-95. (PENG Xuya, YU Yi, LIU Guotao. Gas pressure distribution in the landfill under pumping conditions [J]. *Journal of Chongqing University*, 2003, 26(1): 92-95. (in Chinese))
- [8] LIU Xiaodong, SHI Jianyong, QIAN Xuede, et al. One-dimensional model for municipal solid waste (MSW) settlement considering coupled mechanical-hydraulic-gaseous effect and concise calculation[J]. *Waste Management*, 2011, 31(12): 445-456.
- [9] 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): 1404-1416.
- [10] 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.
- [11] 彭绪亚, 余毅. 填埋垃圾体气体渗透特性的实验研究[J]. *环境科学学报*, 2003, 23(4): 530-534. (PENG Xuya, YU Yi. Experimental study on air permeability of compacted MSW by a landfill lysimeter [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(4): 530-534. (in Chinese))
- [12] 刘晓东, 施建勇. 城市固体废弃物持水特性的室内试验[J]. *水利水电科技进步*, 2012, 32(1): 34-38. (LIU Xiaodong, SHI Jingyong. Laboratory tests on hydraulic properties of municipal solid waste [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2012, 32(1): 34-38. (in Chinese))
- [13] Stoltz G, Gourc J P, Oxarango L. Liquid and gas permeabilities of unsaturated municipal solid waste under compression[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2010, 118(1): 27-42.
- [14] YOUNG A. Mathematical modeling of landfill gas extraction[J]. *Journal of Environmental division, ASCE*, 1989, 115(6): 1073-1087.
- [15] 李佩成. 地下水非稳定渗流解析法[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 145-160.
- [16] HAN B, SCICCHITANO V, IMHOFF P T. Measuring fluid flow properties of waste and assessing alternative conceptual models of pore structure[J]. *Waste Management*, 2011, 31(3): 445-456.
- [17] WHITE J K, BEAVEN R P, POWRIE W, et al. Leachate recirculation in a landfill: Some insights obtained from the development of a simple 1-D model[J]. *Waste Management*, 2011, 31(6): 1210-1221.