

文章编号: 1000-0887(2005) 12-1470-09

垃圾填埋气体渗流过程中 压力分布的滑脱解*

薛 强¹, 冯夏庭¹, 梁 冰²

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 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)

(李家春推荐)

摘要: 考虑气体滑脱效应条件下, 建立了垃圾填埋场气体渗流的数学模型。采用摄动法及积分变换法对模型进行解析求解, 定量研究填埋气体的压力分布特征, 并结合监测数据对模型参数与模型可靠性进行灵敏度分析和验证。结果表明: 滑脱效应对气体渗流有较大影响, 考虑滑脱效应条件的气体压力小于未考虑滑脱效应条件的气体压力, 且得到的滑脱解与实测数值吻合较好。因此, 研究填埋气体渗流时不能忽略滑脱效应。这不仅对于填埋场释放气体控制系统的设计和管理提供理论依据, 而且可为低渗透油气藏工程开发过程中试井数据的确定提供科学的技术支持

关键词: 填埋气体; 滑脱效应; 数学模型; 摄动法; 滑脱解

中图分类号: O357.3; TE312 **文献标识码:** A

引 言

随着社会发展, 人口逐步增长, 城市中垃圾的产量日益增多, 并以每年 8% ~ 10% 的速率增长。垃圾填埋场投入运营约一年后, 开始产气, 其成分主要为 CH_4 、 CO_2 , 还有一些微量气体如 N_2 、 H_2 、 H_2S 和挥发性有机气体等^[1]。填埋气体可透过填埋场周边的土壤或砂质土流动, 在 100 m ~ 200 m 以外的建筑物内可测得 5% 的填埋气体 CH_4 。如果垃圾填埋场不使用衬层和收集系统加以阻挡, 垃圾气体可以迁移到离填埋场较远周边地区沿较小的路线移动, 然后由地表逸出释放到大气中, 造成环境隐蔽性污染和事故的发生。在垃圾填埋场附近 250 m 范围内的任何开发, 都应对填埋气体的横向迁移规律进行现场测试, 并对其潜在危险性进行全面评价^[2]。因此, 研究气体在垃圾填埋场中的渗透规律, 对于气体安全控制工程设计具有重要的意义。

大量实验表明^[3~5], 气体在多孔介质中迁移时, 在固体壁上气体渗流表现出速度不为零的“滑脱”现象, 其渗流规律不再符合线性 Darcy 规律, 而呈现滑脱效应, 从而导致气体渗透率的

* 收稿日期: 2004_07_06; 修订日期: 2005_05_23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50309015); 国家重点基础研究发展规划 973 项目(2002CB412708); 武汉市青年科技晨光计划项目(20055003059_33); 地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室基金资助项目(GZ2004_011)

作者简介: 薛强(1976—), 男, 山东潍坊人, 副教授, 博士(联系人, Tel: + 86_27_62164319; Fax: + 86_27_87197386; E_mail: qiangx@whrsm.ac.cn)。

改变,对于低渗透多孔介质,滑脱效应则更为明显。目前还没有一种完全成功的测量土壤内气体流量的方法,现场测试研究常采用测量土层中气体的甲烷含量浓度和气体压力梯度等的方法来获取基础资料。所以,对气体在填埋场中压力分布规律的研究很有必要。

对于垃圾填埋气体渗流模型的研究,Young^[6]在考虑气体压力、密度变化较小情况建立了填埋气体运移的半解析模型和数值模型;Rathfelder 和 Mackay 等人^[7]建立了土壤抽气过程中挥发性气体分布规律数值模型;Douglas 等人^[8]采用数值模拟方法计算非饱和土壤中填埋气体浓度分布变化;Lu 和 Kuntz^[9]建立了一维径向流模型来模拟了填埋气体传播的压力分布以及甲烷气体的产出量;陈家军等学者^[10]在假定介质的变形很小和液相水的运移相对气体运移要稳定得多的情况,建立了填埋场释放气体运移数值模型;笔者曾对填埋气体在土壤中非稳定耦合渗流问题进行了初步探讨^[11]。但由于填埋气体在多孔介质中渗流特征的复杂性,对其迁移行为的研究大多采用数值解,并且均在假定气体渗流符合 Darcy 定律的前提下进行数值分析。为此,本文建立了考虑滑脱效应条件下气体渗流的数学模型,通过引入无量纲变换因子 ω ,采用摄动法及积分变换法进行解析求解,定量研究填埋气体的压力分布特征,并对模型参数与模型可靠性进行灵敏度分析。

1 填埋气体渗流的滑脱机制

当生活垃圾中的有机物经厌氧微生物分解产生填埋气体后,致使垃圾填埋场内部压力增加并超过大气压,当填埋场内部压力超过大气压后就会发生气体的迁移与排放。填埋气体从填埋场内向外流动,主要有对流和扩散两种方式:随浓度梯度而扩散以及随压力梯度而对流。厌氧分解所产生的带有甲烷和二氧化碳的混合气体,其浓度比周围空气的浓度要大很多,因此甲烷和二氧化碳的分子将从填埋场向周围空气中扩散。与对流相比,扩散在气体流动中只起次要作用。影响填埋气体迁移和释放的主要因素有:覆盖和垫层材料,地质条件,水文条件和大气压。考虑到垃圾填埋场二次污染问题,当填埋场封场时,通常采用低渗透性覆盖层来阻止气体向大气扩散。因此,垃圾填埋气体在低渗透多孔介质中的运移主要是横向迁移为主。

在气测渗透率实验中,Klinkenberg^[12](1941)提出了微管流动时的滑脱效应。认为气固之间的分子作用力远比液固间的分子作用力小得多,在管壁处的气体分子有的仍处于运动状态,并不全部粘附于管壁上。另一方面,相邻层的气体分子由于动量交换,可连同管壁处的气体分子一起作定向的沿管壁流动,即“滑动效应”,当平均压力愈小时,滑动效应愈严重。

其渗透率表达式为

$$k_g = k_{rg}k_{g\infty} \left[1 + \frac{4c\lambda}{r} \right], \quad (1)$$

式中, k_g 为平均压力 P_m 下气体渗透率, k_{rg} 为气体相对渗透率, $k_{g\infty}$ 为气体绝对渗透率, c 为比例因子, λ 为气体分子平均自由程, r 为孔隙平均半径。

根据 Klinkenberg 实验,气体分子平均自由程与平均压力 P_m 成反比,则方程(1)变为

$$k_g = k_{rg}k_{g\infty} \left[1 + \frac{b}{P_m} \right], \quad (2)$$

式中, $P_m = (P_i + P_o)/2$, P_i 和 P_o 分别为进口和出口压力; b 为滑脱因子,定义为

$$b = \frac{4c}{r} \lambda P_m. \quad (3)$$

Sampath 和 Keighin^[13](1982)通过大量的实验对气体滑脱因子与气体绝对渗透率之间的关

系进行了研究, 得出了如下经验公式为

$$b = 0.0955 \left(\frac{k_{rg\infty}}{\phi_g} \right)^{-0.53}, \quad (4)$$

式中 ϕ_g 为介质孔隙度。

2 填埋气体渗流的数学模型

2.1 填埋气体控制方程的建立

在建立模型前作如下几个假设:

- ① 土壤内气体视为理想气体, 忽略介质变形的影响;
- ② 土壤内部为各向同性, 即孔隙率和绝对渗透率保持不变;
- ③ 气体渗流为等温和单相渗流, 忽略重力和毛细管力的影响;
- ④ 满足 Kaluarachchi 假定^[14], 即平均压力 P_m 应是介质中任意点气体压力 P 。

1) 运动方程

$$q_i = - \frac{k_g}{\mu_g} \frac{\partial P}{\partial x_i} = - \frac{k_{rg} k_{g\infty}}{\mu_g} \frac{\partial P}{\partial x_i} \left(1 + \frac{b}{P} \right), \quad (5)$$

式中 q_i 为气体的 Darcy 流速, P 为气体压力, μ_g 为气体粘滞系数。

2) 气体状态方程

$$\rho_g = \frac{M_g P}{RT}, \quad (6)$$

$$\phi_g = \text{const}, \quad (7)$$

式中 R 为气体常数, T 为绝对温度, M_g 为气体摩尔质量。

3) 质量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho_g \phi_g)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_g q_i) = 0 \quad (8)$$

将方程(5)~(7)代入方程(8)中可得填埋气体渗流的控制方程

$$\mu_g \phi_g \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{rg} k_{g\infty} \left(1 + \frac{b}{P} \right) P \frac{\partial P}{\partial x_i} \right]. \quad (9)$$

令 $\alpha = \mu_g \phi_g / k_{rg} k_{g\infty}$ 。本文仅考虑气体横向迁移, 一维情况下气体压力分布式(9)可变为

$$\alpha \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(1 + \frac{b}{P} \right) P \frac{\partial P}{\partial x} \right]. \quad (10)$$

2.2 定解条件

考虑如下填埋气体渗流问题, 其边界条件及初始条件如下

初始条件

$$P(x, t) |_{t=0} = P_0, \quad (11)$$

边界条件

$$P(x, t) |_{x=0} = P_1, \quad P(x, t) |_{x=\infty} = P_0 \quad (12)$$

3 数学模型的滑脱解

根据以上基本方程可知, 方程(10)与定解条件(11)、(12)构成一个考虑滑脱效应条件下填埋气体渗流的定解问题, 且该数学模型是一个二阶强非线性的偏微分方程组, 无法求得精确解^[15]。为此, 通过引入无量纲变换因子 ω , 采用摄动法及积分变换法对本文所建立的数学模

型进行拟解析求解, 具体求解过程如下:

由式(10)、(11)和(12)组成正则摄动问题^[15]. 对式(10)采用无量纲变换, 令

$$P = \frac{P^2 - P_1^2}{P_0^2 - P_1^2}, \quad \omega = \frac{P_0^2 - P_1^2}{P_1^2} \ll 1, \quad (13)$$

将式(13)代入式(10)得

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = (\sqrt{1 - \omega \bar{P}} + \beta) \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \quad (14)$$

其中 $\tau = \frac{P_0 t}{\alpha}$, $\beta = \frac{b}{P_0}$.

定解条件(11)和(12)变为

$$P(x, \tau) |_{\tau=0} = 0, \quad P(x, \tau) |_{x=0} = 0, \quad P(x, \tau) |_{x=\infty} = 1 \quad (15)$$

通过因次分析中的 π 定理可知由式(14)、(15)两式组成的定解问题存在一相似解 $P(\xi)$, 并设 $\xi = x/(2\sqrt{\tau})$ 则式(14)和(15)变为

$$(\sqrt{1 - \omega \bar{P}} + \beta) \frac{d^2 P}{d\xi^2} + 2\xi \frac{dP}{d\xi} = 0, \quad (16)$$

$$P(\xi) |_{\xi=\infty} = 1, \quad P(\xi) |_{\xi=0} = 0 \quad (17)$$

对 P 可作如下展开式

$$P = P_0 + \omega P_1 + \omega^2 P_2 + \dots, \quad (18)$$

由于

$$\begin{aligned} \sqrt{1 - \omega \bar{P}} &= 1 - \frac{1}{2} \omega \bar{P} - \frac{1}{8} \omega^2 \bar{P}^2 - \dots = \\ &= 1 - \frac{1}{2} \omega (P_0 + \omega P_1 + \dots) - \frac{1}{8} \omega^2 (P_0 + \omega P_1 + \dots)^2 - \dots \end{aligned} \quad (19)$$

将式(18)和式(19)代入式(16)可得

$$\begin{aligned} (1 + \beta) \frac{d^2 P_0}{d\xi^2} + \omega \left[(1 + \beta) \frac{d^2 P_1}{d\xi^2} - \frac{P_0}{2} \frac{d^2 P_0}{d\xi^2} \right] + \\ \omega^2 \left[(1 + \beta) \frac{d^2 P_2}{d\xi^2} - \frac{P_0}{2} \frac{d^2 P_1}{d\xi^2} - \left(\frac{P_1}{2} + \frac{P_0^2}{8} \right) \frac{d^2 P_0}{d\xi^2} \right] = \\ - 2\xi \left[\frac{dP_0}{d\xi} + \omega \frac{dP_1}{d\xi} + \omega^2 \frac{dP_2}{d\xi} + \dots \right]. \end{aligned} \quad (20)$$

相应边界条件变为

$$P_0(\infty) + \omega P_1(\infty) + \omega^2 P_2(\infty) + \dots = 0, \quad (21)$$

$$P_0(0) + \omega P_1(0) + \omega^2 P_2(0) + \dots = 0 \quad (22)$$

由式(20)、式(21)和式(22)合并 ω 的同次幂项, 并令 $\omega^i (i = 0, 1, 2)$ 的系数为零, 可得

$$\omega^0: \begin{cases} \frac{d^2 P_0}{d\xi^2} + \frac{2\xi}{1 + \beta} \frac{dP_0}{d\xi} = 0, \\ P_0(\infty) = 1, \quad P_0(0) = 0; \end{cases} \quad (23)$$

$$\omega^1: \begin{cases} \frac{d^2 P_1}{d\xi^2} + \frac{2\xi}{1 + \beta} \frac{dP_1}{d\xi} = \frac{P_0}{2(1 + \beta)} \frac{d^2 P_0}{d\xi^2}, \\ P_1(\infty) = 0, \quad P_1(0) = 0; \end{cases} \quad (24)$$

$$\omega^2: \begin{cases} \frac{d^2 P_2}{d\xi^2} + \frac{2\xi}{1 + \beta} \frac{dP_2}{d\xi} = \frac{P_0}{2} \frac{d^2 P_1}{d\xi^2} + \left(\frac{P_1}{2} + \frac{P_0^2}{8} \right) \frac{d^2 P_0}{d\xi^2}, \\ P_2(\infty) = 0, \quad P_2(0) = 0 \end{cases} \quad (25)$$

对于式(23)采用积分变换法可得其解为

$$P_0 = \operatorname{erf}(\sqrt{\gamma/2}\xi), \quad (26)$$

其中 $\gamma = 2/(1 + \beta)$ 。

对于式(24)采用常数变易法进行求解,经积分变换后可得

$$P_1 = \frac{\sqrt{\gamma\gamma^2}}{4\sqrt{2\pi}} \int_0^\xi \xi^2 e^{-\gamma\xi^2/2} \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{\gamma}{2}}\xi\right) d\xi + \frac{\gamma^2}{4\pi} \int_0^\xi \xi e^{-\gamma\xi^2} d\xi + \frac{\gamma^2}{4\pi} \int_0^\xi e^{-\gamma\xi^2/2} \int_0^\xi e^{-\gamma\xi^2/2} d\xi dt + \gamma(0) \int_0^\xi e^{-\gamma\xi^2/2} d\xi. \quad (27)$$

利用条件 $P_1(\infty) = 1$, 对上式化简,可得

$$P_1 = -\frac{\gamma}{4\pi} \left\{ \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{\gamma}{2}}\xi\right) \left[\sqrt{\frac{\gamma\pi}{2}} \gamma \xi e^{-\gamma\xi^2/2} + 1 \right] - e^{-\gamma\xi^2} + 1 \right\}. \quad (28)$$

同理,将式(26)和式(28)代入式(25)可求得

$$P_2 = \frac{\gamma}{4} \left[\operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{\gamma}{2}}\xi\right) \left(\sqrt{\gamma\pi} \xi e^{-\gamma\xi^2/2} - e^{-\gamma\xi^2} \right) \right] - \frac{\gamma}{4\pi} \left[\operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{\gamma}{2}}\xi\right) \right] + \frac{\gamma}{16\pi^{3/2}} \sqrt{\frac{\gamma}{2}} \xi e^{-\gamma\xi^2} - \frac{1}{16\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\gamma}{2}} \xi (5 - \gamma\xi^2) e^{-\gamma\xi^2/2} \left[\operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{\gamma}{2}}\xi\right) \right]^2 + \frac{\gamma}{8\pi} \left[2 - \left(\frac{\gamma\xi^2}{2} \right) \right] e^{-2\gamma\xi^2} \left[\operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{\gamma}{2}}\xi\right) \right] + \frac{3^{3/2}\gamma}{32\pi} \left[\operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{3\gamma}{2}}\xi\right) - \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{\gamma}{2}}\xi\right) \right]. \quad (29)$$

将式(26)、式(28)、式(29)代入式(18)可得数学模型二阶滑脱解:

$$P = P_0 + \omega P_1 + \omega^2 P_2 = \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{\gamma}{2}}\xi\right) - \frac{\gamma}{4\pi} \left\{ \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{\gamma}{2}}\xi\right) \left[\sqrt{\frac{\gamma\pi}{2}} \gamma \xi e^{-\gamma\xi^2/2} + 1 \right] - e^{-\gamma\xi^2} + 1 \right\} \omega + \left\{ \frac{\gamma}{4} \left[\operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{\gamma}{2}}\xi\right) \left(1 + \sqrt{\gamma\pi} \xi e^{-\gamma\xi^2/2} - e^{-\gamma\xi^2} \right) \right] - \frac{\gamma}{4\pi} \left[\operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{\gamma}{2}}\xi\right) \right] + \frac{\gamma}{16\pi^{3/2}} \sqrt{\frac{\gamma}{2}} \xi e^{-\gamma\xi^2} - \frac{1}{16\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\gamma}{2}} \xi (5 - \gamma\xi^2) e^{-\gamma\xi^2/2} \left[\operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{\gamma}{2}}\xi\right) \right]^2 + \frac{\gamma}{8\pi} \left[2 - \left(\frac{\gamma\xi^2}{2} \right) \right] e^{-2\gamma\xi^2} \left[\operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{\gamma}{2}}\xi\right) \right] + \frac{3^{3/2}\gamma}{32\pi} \left[\operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{3\gamma}{2}}\xi\right) - \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{\gamma}{2}}\xi\right) \right] \right\} \omega^2. \quad (30)$$

4 解的理论分析与验证

1) 当不考虑滑脱效应时,即 $b = 0$ 时,所得到的是气体满足 Darcy 定律条件下近似解析解 (Darcy 解),其表达式为

$$P = P_0 + \omega P_1 + \omega^2 P_2 = \operatorname{erf}(\xi) - \frac{1}{2\pi} \left\{ \operatorname{erf}(\xi) (2\sqrt{\pi} \xi e^{-2\xi^2} + 1) - e^{-2\xi^2} + 1 \right\} \omega + \left\{ \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf}(\xi) (1 + \sqrt{2\pi} \xi e^{-\xi^2} - e^{-2\xi^2}) \right] - \frac{1}{2\pi} [1 - \operatorname{erf}(\xi)] + \frac{1}{8\pi^{3/2}} \xi e^{-3\xi^2} - \frac{1}{16\sqrt{\pi}} \xi (5 - \gamma\xi^2) e^{-\xi^2} \left[\operatorname{erf}(\xi) \right]^2 + \frac{1}{4\pi} (2 - \xi^2) e^{-2\xi^2} \left[\operatorname{erf}(\xi) \right] + \frac{3^{3/2}}{16\pi} \left[\operatorname{erf}(\sqrt{3}\xi) - \operatorname{erf}(\xi) \right] \right\} \omega^2; \quad (31)$$

2) 对于油气藏工程中气体渗流问题, 由于解析求解困难, 常采用 Robinson 线性化的方法^[16]。用此方法对本文所建立的数学模型 (10) 进行简化, 采用如下控制方程:

$$\eta \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \quad (32)$$

式中, $\eta = \alpha / P_c$, P_c 为原始地层中固定压力。

采用相同定解条件式 (11) 和 (12) 情况下, 求得其解析解 (Robinson 解) 为:

$$P(x, t) = \text{erf}(\zeta) \quad \left[\text{其中 } \zeta = \frac{x}{2\sqrt{\eta t}} \right]. \quad (33)$$

为了模拟滑脱效应影响条件下垃圾填埋气体渗流过程中压力动态分布特征, 采用本文所求得的滑脱解, 对深圳某垃圾填埋场单井抽气情况下其内部气体压力的分布特征进行对比分析, 模型参数取值如表 1, 计算结果如图 1~ 图 6。

表 1 模型参数取值

模型参数	有效孔隙率	初始压力	边界压力	气体有效渗透率	温度	动力粘度	气体的密度	填埋场长度	填埋场高度
	ϕ_g	p_0/MPa	p_1/MPa	k_g/m^2	T/K	$\mu_g/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	L/m	H/m
数值	0.35	0.10	0.095	1.2×10^{-11}	303	1.7×10^{-5}	1.21	100	5

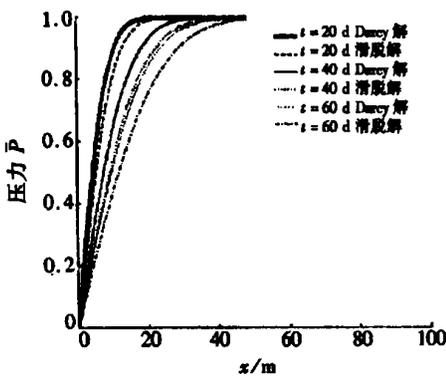


图 1 不同时间内考虑滑脱与未考虑滑脱效应条件下填埋气体压力水平分布

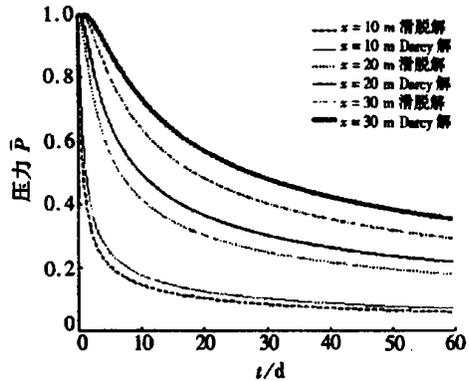


图 2 考虑滑脱与未考虑滑脱效应条件下不同点位填埋气体压力随时间变化

图 1 和图 2 显示了考虑滑脱和未考虑滑脱效应条件下填埋场内部气体压力随时空的变化规律。从图中可以看出, 考虑滑脱效应条件下气体压力小于未考虑滑脱效应条件下气体压力, 且随着气体抽出时间增长和距离抽出井距离的增大, 其差别越大。因此, 在研究气体在填埋场内迁移时需考虑气体的滑脱效应。

从图 3 滑脱因子 b 对填埋气体压力分布的影响曲线可以看出, 随着滑脱因子的增大, 气体压力减小, 滑脱越明显, 这与文献[17]所测试的实验结果相一致, 且随着时间的延长, 其差别越大。气体压力降低的主要原因是, 在抽气状况下, 当滑脱因子增大时, 孔隙半径减小, 填埋场介质将被压密, 气体的渗透率降低, 从而导致内部气体压力降低。

图 4 示出了摄动小参数 ω 的变化对气体压力分布的影响。从计算结果可知, 当摄动参数取值在 $0.01 < \omega < 1$ 时, 其变化对于气体压力分布有较大的影响; 随着摄动小参数 ω 取值的减小, 其影响越小; 仅当 $\omega < 0.01$ 时, 对气体压力分布基本无影响。因此, 在采用摄动法求解非线性问题时, 必须满足 $\omega \ll 1$ 这一关键性条件, 否则, 将会降低模型解的精度, 这为摄动小参的

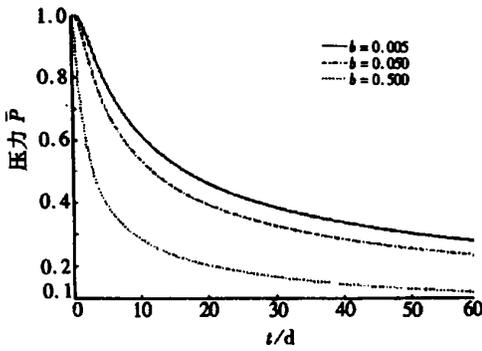


图3 滑脱因子 b 对填埋气体压力分布的影响

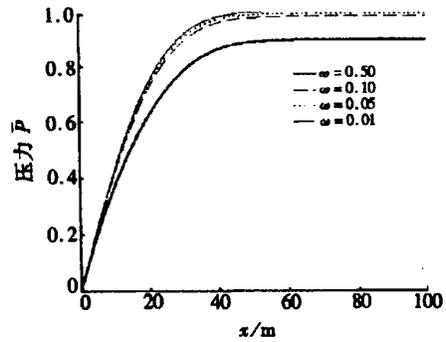


图4 摄动小参 ω 的变化对气体压力分布的影响

确定提供参考依据。

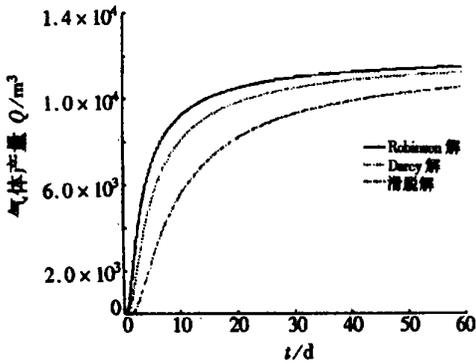


图5 填埋气体产出量随时间变化关系及对比

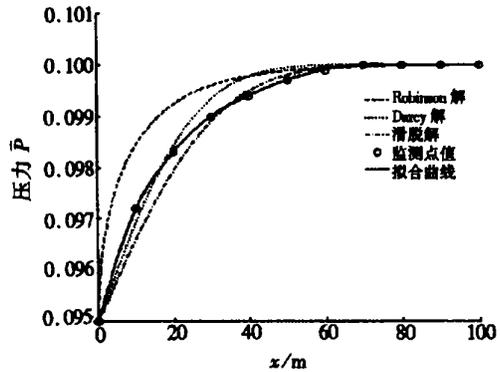


图6 填埋气体压力分布对比曲线

图5表示不同条件下填埋气体产出量随时间变化关系。从图中可以明显看出,考虑滑脱效应条件时气体的产量最小,气体渗流满足Darcy渗流条件的产量次之,采用Robinson线性化的方法求得的气体产量最大。导致滑脱效应影响下气体的产量减少的原因是由于填埋场内部压力梯度变化慢,气体导气性低而产生的,这与图1中压力梯度变化相吻合,即考虑滑脱效应条件时气体压力梯度比未考虑滑脱效应条件时气体压力梯度小。因此,对于低渗透垃圾填埋场,若仍沿用Darcy线性渗流规律来进行气体资源化开发计算,将使得计算的产能偏大,从而导致在进行开发决策时过高地估计填埋场的开发指标。

图6采用深圳某垃圾填埋场10个监测点气体压力数据进行了对比和验证,从图中可以看出,本文所求得的滑脱解较Darcy解和Robinson解与实测数据所拟合的曲线相比更接近,从而进一步验证了本文模型所求得滑脱解的可靠性。在抽气井口附近范围内差别较大的原因,笔者认为这是由于气体压力从 P_0 突然降到 P_1 而造成。

5 结 论

通过本文的研究可以得到以下的结论:

1) 考虑气体滑脱效应前提下,建立了垃圾填埋气体迁移过程的数学模型,并采用了摄动法及积分变换法对非线性方程模型进行解析求解;

2) 通过对填埋气体压力动态分布特征分析可以得出,滑脱效应对气体压力的分布有较大的影响,且随着时间的延长和距离的增大,其差别越明显。因此,在研究气体在填埋场内迁移时不能忽略滑脱效应;

3) 通过对模型参数 b 和 ω 灵敏度分析可以看出,其取值的变化将直接影响到填埋场内部气体压力的分布。摄动小参数 ω 的确定必须在满足 $\omega \ll 1$ 条件下方可采用摄动方法来解析求解,否则将直接影响解的精度;对于滑脱因子 b 应结合实验室介质气透实验确定,以保证模型的参数取值的准确度;

4) 与监测数据进行对比分析,本文模型所得出的滑脱解准确度高,符合实际气体的渗流,表明在填埋气体渗流过程中考虑滑脱效应的重要性,且文中采用的摄动理论方法可为求解非线性偏微分数学方程组提供了一种求解途径;

5) 本文的滑脱解可为油气藏工程中气体压力动态分布特征和试井数据的确定提供参考依据。

致谢 本论文在研究过程中得到了美国犹他州大学土木与环境工程系 Jagath J. Kaluarachchi 教授和中国科学院渗流流体力学研究所刘慈群研究员的热心帮助与指导,特表感谢!

[参 考 文 献]

- [1] 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**(1/3): 39—52.
- [2] Ham R K. Field Testing for Evaluation of Landfill Gas Yields Landfilling of Waste: Biogas [M]. London: Sponpress, 1996, 297—315.
- [3] Estes R K, Fulton P F. Gas slippage and permeability measurements[J]. Trans AIME, 1956, **207**(3): 338—342.
- [4] 陈代 . 渗流气体滑脱现象与渗透率变化的关系[J]. 力学学报, 2002, **34**(1): 96—100.
- [5] 科林斯 R E. 流体在多孔材料中流动[M]. 陈钟祥, 吴望一 译. 北京: 石油工业出版社, 1981.
- [6] Young A. The effects of fluctuations in atmospheric pressure on landfill gas migration and composition[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1992, **64**(5): 601—613.
- [7] Rathfelder K, Yeh W W_G, Mackay D. Mathematical simulation of soil vapor extraction systems: model development and numerical examples[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1991, **22**(8): 263—297.
- [8] Douglas E Metcalfe, Grahame J Farquhar. Modeling gas migration through unsaturated soils from waste disposal sites[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1987, **32**(2): 247—259.
- [9] Lu A H, Kuntz C O. Gas flow model to determine methane production at sanitary landfills[J]. Environmental Science and Technology, 1981, **15**(2): 305—316.
- [10] 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.
- [11] 薛强, 梁冰, 刘晓丽. 填埋气体运移非稳定耦合渗流数学模型[J]. 岩土力学, 2002, **23**(2): 191—195.
- [12] Klinkenberg L J. The permeability of porous media to liquid and gas[J]. In: Drilling and Production Practice [C]. Washington: American Petroleum Institute, 1941, 200—213.
- [13] Sampath K, Keighin C W. Factors affecting gas slippage in tight sandstones of cretaceous age in the Uinta basin[R]. JPT, 1982, 2715—2720.
- [14] Kaluarachchi J J, Parker J C. Modeling multicomponent organic chemical transport in three-phase porous media[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1990, (5): 349—374.

- [15] 巴斯宁耶夫 K C, 费拉索夫 A M, 科钦娜 N H, 等. 地下流体力学[M]. 张永一, 赵碧华 译. 北京: 石油工业出版社, 1992.
- [16] 钱伟长. 奇异摄动理论在力学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1981, 186—191.
- [17] 王勇杰, 王昌杰, 高家碧. 低渗透多孔介质中气体滑脱行为的研究[J]. 石油学报, 1995, 16(3): 101—105.

Slippage Solution of Gas Pressure Distribution in the Process of Landfill Gas Seepage

XUE Qiang¹, FENG Xia_ting¹, LIANG Bing²

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science,
Wuhan 430071, P. R. China;

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

Abstract: A mathematical model of landfill gas migration was established under presumption of the effect of gas slippage. The slippage solutions to the nonlinear mathematical model were accomplished by the perturbation and integral transformation method. The distribution law of gas pressure in landfill site was presented under the conditions of considering and neglecting slippage effect. Sensitivity of the model input parameters was analyzed. The model solutions were compared to observation values. Results show that gas slippage effect has a large impact on gas pressure distribution. Landfill gas pressure and pressure gradient considering slippage effect is lower than that neglecting slippage effect, with reasonable agreement between model solution and measured data. It makes clear that the difference between considering and neglecting slippage effect is obvious and the effects of coupling cannot be ignored. The theoretical basis is provided for engineering design of security control and decision making of gas exploitation in landfill site. The solutions give scientific foundation to analyzing well test data in the process of low permeability oil gas reservoir exploitation.

Key words: landfill gas; gas slippage effect; mathematical model; perturbation method; slippage solution