

填埋气在裂隙覆盖层中的二维扩散半解析解

谢海建¹, 吴思芸¹, 罗元丰², 邱战洪³

(1. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 宁波市建设检测有限公司, 浙江 宁波 315032; 3. 台州学院建筑工程学院, 浙江 台州 318000)

摘要 目的 分析评估裂隙对甲烷在压实黏土覆盖层(CCL)中运移影响规律. 方法 建立了甲烷在非饱和黏土覆盖层裂隙和土骨架中的二维扩散模型, 利用拉普拉斯变换及 Stehfest 数值反演方法得到了半解析解. 并与数值模拟结果对比后验证其准确性. 结果 覆盖层表面裂隙宽度由 1 mm 增大至 10 mm 时, 表面甲烷体积分数比增大了 2 个数量级. 在不同裂隙宽度和不同气体运移速率下, 甲烷在覆盖层中的竖向扩散对结果影响很小. 当甲烷在覆盖层中的一阶氧化系数由裂隙中的 1/10 增大至 10 倍时, 体积分数比减小了 100 倍. 当覆盖层中的氧化程度超过裂隙中的氧化程度时, 更多的甲烷在覆盖层中氧化. CCL 中的甲烷氧化作用对裂隙开口处的体积分数影响更大. 结论 此半解析解相对简单, 可用于检验数值模型, 拟合实验数据可用于垃圾场覆盖层的初步设计.

关键词 甲烷氧化; 压实黏土覆盖层; 裂隙; 半解析解; 二维扩散

中图分类号 TU13; O346.5 文献标志码 A

Two-dimensional Semi-analytical Model for Landfill Gas Diffusion in Fractured Cover Soil

XIE Haijian¹, WU Siyun¹, LUO Yuanfeng², QIU Zhanhong³

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, China, 310058; 2. Construction Testing Company in NingBo, NingBo, China, 315032; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Taizhou University, Taizhou, China, 318000)

Abstract: To evaluate the effect of the cracks to methane (CH_4) migration in compacted clay layer (CCL), two-dimension diffusion model were established in the fissures of the unsaturated clay layer and the soil skeleton. Semi-analytical solutions were obtained by using Laplace transform and Stehfest numerical inversion method. And the accuracy was verified by comparing it with the results of numerical simulation. The ratios of the surface methane concentration improved by two orders of magnitude when the cover surface crack width was increased from 1 mm to 10 mm. Vertical diffusion of methane in the cover have little impact on the results under different cracks widths

收稿日期: 2018-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41672288, 51578356, 51478427, 51008274 和 51278452); 中央高校基本科研业务费 (2017QNA4028)

作者简介: 谢海建 (1981—), 男, 教授, 博士, 主要从事环境岩土工程方面研究.

and different gases migration rates. The CH_4 concentration decreased by 100 times when the first-order oxidation coefficient in the cover increased from 1/10 of that of the fracture to 10 times of it. More methane was oxidized in the cover soil when the oxidation rate in the cover soil was larger than that in cracks. Compared the opening cracks, methane oxidation in CCL had a greater influence on the concentration. The solution was relatively simple which could be used to test the numerical model and can be used for the preliminary design of cover soil in the landfill.

Key words: methane oxidation; compacted clay cover; cracks; semi-analytical solution; two dimensional diffusion

城市生活垃圾填埋场在长期填埋过程中由于填埋土固结、降雨入渗、微生物分解及其他化学反应等作用,产生填埋气体等二次污染物^[1].为了阻断填埋气体和其他有害物质,各类填埋场的封场系统都应包含垃圾体、底部衬垫系统、渗滤液收集和排放系统、气体控制系统以及封顶系统等5个部分.其中覆盖层主要是低透水性的压实土层,位于排气层之上以限制地表水渗入填埋场中,其厚度不小于45 cm,渗透系数不大于 $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$.甲烷作为填埋气的主要成分,若在无控制的情况下任其无序扩散,会导致严重的温室效应.填埋场黏土覆盖层作为阻滞甲烷向大气扩散的主要屏障,但由于季节性干湿循环、填埋堆体内外温差、不均匀沉降和植物根系蒸腾作用等原因,容易产生裂隙^[3].MILLER C J等^[4]曾在填埋场覆盖层中发现过开口宽度超过10 mm、深度超过30 mm的裂隙.干湿循环作用除了导致黏土垫层的干燥开裂之外,也极易导致土骨架产生变形.CZEPIEL P M等^[5]发现,若填埋场覆盖层中存在裂隙,50%的甲烷会通过这些裂隙溢出.KRISTENSEN A H等^[6]通过研究发现土壤的压实度、含水率等因素都为对裂隙的开展有一定影响,同时也建立了用于预测非均质土气体扩散的数学模型.很多研究甲烷从CCL中释放到建筑物、大气中的实例.杨益彪等^[7]建立填埋气在垃圾体和覆盖层中的一维稳态运移模型,分析了覆盖层气体渗透系数和抽气速率对填埋气释放控制效

果的影响.罗云菊^[8]根据气体动力学理论,建立了西部山城垃圾填埋场填埋气在场内外迁移的数学模型.辛丹慧等^[9]通过系统分析植被对填埋场甲烷传输与氧化过程的影响规律,揭示了植被传输机制在提高填埋场甲烷预测模型准确性方面的重要作用.詹良通等^[10]通过土柱试验及数值模拟探究了覆盖层中水-气耦合运移的规律.但至今未有研究甲烷在黏性覆盖层存在裂隙的情况下的运移规律.笔者建立了甲烷在覆盖层裂隙中包括对流、扩散和氧化的二维运移数学模型,并通过数值反演方法得到了有限边界条件下该模型的半解析解,同时研究了甲烷在CCL表面裂隙开口处的体积分数比与裂隙开口宽度、甲烷扩散系数、甲烷氧化速率等参数的关系.

1 裂隙黏土覆盖层甲烷运移模型

1.1 甲烷运移的瞬态控制方程

甲烷在压实黏土覆盖层中的运动可分为在裂隙中和CCL中的运移.在裂隙边界处,两个等式通过气体通量和气体体积分数比相等的关系建立联系.该模型假设气体在裂缝中沿裂缝宽度方向的扩散和机械弥散充满裂缝壁且黏土覆盖层骨架中的渗透不显著.因此,甲烷的运移过程的作用:裂隙中的对流、沿裂隙的分子扩散、由裂隙向孔隙覆盖层的分子扩散、甲烷通过覆盖层向大气的竖向运移以及甲烷在覆盖层中的氧化反应如图1所示.

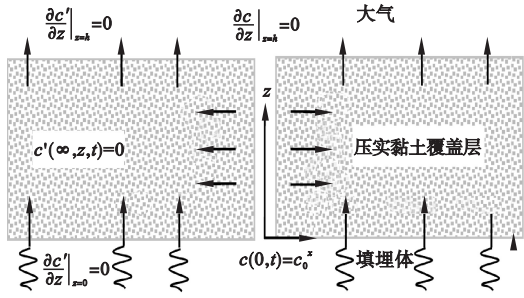


图1 填埋气在裂隙非饱和压实黏土覆盖层中运移模型

Fig. 1 Migration model of landfill gases in unsaturated compacted clay cover

由于填埋场覆盖层不同程度上存在孔隙或裂隙,大气中的氧气会进入覆盖层与甲烷发生氧化反应^[11],甲烷在裂缝中的运移方程^[12]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v \frac{\partial c}{\partial z} - D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + \lambda c + \frac{q}{b} = 0. \quad (1)$$

甲烷在土骨架中的运移方程^[12]:

$$\frac{\partial c'}{\partial t} - D'_x \frac{\partial^2 c'}{\partial x^2} - D'_z \frac{\partial^2 c'}{\partial z^2} + \lambda' c' = 0. \quad (2)$$

式中: z 为沿裂缝方向的纵坐标; t 为时间; c 为裂隙中甲烷的体积分数; c' 为CCL中甲烷的体积分数; $2b$ 为裂缝宽度; v 为甲烷沿裂缝方向运移的达西流速; q 为垂直于裂缝的甲烷扩散通量; D 为甲烷在空气中的扩散系数; D'_x 为甲烷在覆盖层中水平向扩散系数; D'_z 为甲烷在覆盖层中竖向扩散系数; λ 为甲烷在空气中的一级氧化反应速率; λ' 为甲烷在覆盖层的一级氧化反应速率。

由于裂缝和黏土覆盖层界面处的气体通量相等,故两个平衡方程之间的关系为^[12]

$$q = -\theta D'_x \frac{\partial c'}{\partial x} \Big|_{x=b}. \quad (3)$$

式中: θ 为压实黏土垫层的体积含气量; q 为裂缝和黏土覆盖层界面处的气体通量。

实际上,文中所涉及的压实黏土覆盖层是一种孔隙-裂隙双重介质,孔隙与裂缝之间是相互连通的,两者具有不同的孔隙度。一般来说,裂缝介质的孔隙度小于孔隙介质的

孔隙度,且双重介质模型通常将整个系统看作是一个连续或等效连续的介质继而进行数学建模^[13],故在此仅考虑黏土覆盖层所存在的孔隙的影响。

控制方程式(1)的边界条件为

$$\begin{cases} c(0, t) = c_0, \\ \frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{z=h}, \\ c(z, 0) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

控制方程式(2)的边界条件为

$$\begin{cases} c'(b, z, t) = c(z, t), \\ c'(b, z, 0) = 0, \\ c'(\infty, z, t) = 0, \\ c'(b, 0, t) = c_0, \\ \frac{\partial c'}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \\ \frac{\partial c'}{\partial z} \Big|_{z=h} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

式中: c_0 为覆盖层底部的甲烷初始体积分数,即填埋场中产生的甲烷体积分数,此处假设为一定值。裂缝中甲烷的达西流速为

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{\mu}{k_g} v. \quad (6)$$

式中: dp/dz 为裂隙压力梯度; μ 为动力黏滞系数; k_g 为甲烷的渗透系数。

假设甲烷氧化满足Koschorreck等人所提出的一阶动力学模型,甲烷一阶氧化常数也可转化为甲烷氧化速率 R_{CH_4} ,两者有如下关系^[14]:

$$R_{CH_4} = \int_0^{0.6} \lambda c z dz. \quad (7)$$

由于甲烷的一阶氧化速率是关于体积分数和深度的函数,笔者在此作简化计算,取 $\bar{\lambda} = \frac{(\lambda_0 + \lambda_{0.6})}{2}$,其中 λ_0 和 $\lambda_{0.6}$ 分别为 $z=0$ m和 $z=0.6$ m时(即黏土覆盖层与大气接触面和覆盖层底部),作为甲烷氧化速率的恒定常数。

甲烷在CCL中的扩散系数 D_m 可由式(8)得出^[15]:

$$\frac{D_m}{D_0} = \frac{\theta^{10/3}}{n^2} = n^{\frac{4}{3}}(1 - S_r)^{\frac{10}{3}}. \quad (8)$$

式中: D_0 为甲烷在大气中的扩散系数; n 为土体的孔隙率; S_r 为土体的饱和度.

1.2 半解析解的反演过程

将式(2)进行拉普拉斯变换:

$$p\bar{c}' = D'_x \frac{\partial^2 \bar{c}'}{\partial x^2} + D'_z \frac{\partial^2 \bar{c}'}{\partial z^2} - \lambda' \bar{c}'. \quad (9)$$

利用分离变量法, 设

$$\bar{c}' = X(x)Z(z). \quad (10)$$

$$\begin{cases} \frac{X''}{X} = \alpha^2, \\ \frac{Z''}{Z} = -\beta^2. \end{cases} \quad (11)$$

故式(11)的通解为

$$\begin{cases} X = c'_1 e^{\alpha x} + c'_2 e^{-\alpha x}, \\ Z = c'_3 \cos(\beta z) + c'_4 \sin(\beta z). \end{cases} \quad (12)$$

代入边界条件式(5)中 $c'(\infty, z, t) = 0$ 可得:

$$c'_1 = 0. \quad (13)$$

将式(11)代入式(9)得:

$$D'_x \alpha^2 = D'_z \beta^2 + (p + \lambda'). \quad (14)$$

将式(12)代入式(10)得:

$$\bar{c}' = e^{-\alpha x} (c_3 \cdot \cos \beta z + c_4 \cdot \sin \beta z). \quad (15)$$

将边界条件式(5)中 $c'(b, 0, t) = c_0$ 进行拉氏变换后得:

$$\bar{c}'(b, 0, p) = \frac{c_0}{p}. \quad (16)$$

代入式(15), 可求得系数:

$$c_3 = \frac{c_0/p}{e^{-\alpha b}}. \quad (17)$$

由边界条件式(5)中 $\frac{\partial c'}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0$ 可得:

$$c_4 = c_3 \cdot \tan \beta h. \quad (18)$$

将已求得系数代入式(3)可得:

$$\frac{q}{b} = \frac{\theta \cdot D'_x \alpha}{b} \cdot \bar{c}. \quad (19)$$

将式 1.9 代入(1)的拉普拉斯形式可得:

$$\frac{d^2 \bar{c}}{dz^2} - \frac{v}{D} \cdot \frac{d\bar{c}}{dz} - \frac{p + \lambda + \alpha \theta D'_x / b}{D} \cdot \bar{c} = 0. \quad (20)$$

其解的形式为

$$\bar{c} = A \exp(zr_1) + B \exp(zr_2). \quad (21)$$

由边界条件式(5)中 $\frac{\partial c'}{\partial z} \Big|_{z=h} = 0$ 可得:

$$\beta \cdot \tan \beta h = 0. \quad (22)$$

$$A + B = \frac{c_0}{p}. \quad (23)$$

$$r_1 A \exp(hr_1) + r_2 B \exp(hr_2) = 0. \quad (24)$$

可解得:

$$\begin{cases} A = \frac{r_2 c_0 / p \cdot \exp(hr_2)}{r_2 \exp(hr_2) - r_1 \exp(hr_1)}, \\ B = \frac{c_0}{p} - A. \end{cases} \quad (25)$$

其中:

$$\begin{cases} r_1 = \frac{v}{2D} + \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{v}{D}\right)^2 + 4Q}, \\ r_2 = \frac{v}{2D} - \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{v}{D}\right)^2 + 4Q}. \end{cases} \quad (26)$$

$$Q = \frac{p + \lambda + \alpha \theta D'_x / b}{D}. \quad (27)$$

2 计算模型的验证

笔者通过拉普拉斯数值反演, 得到压实黏土覆盖层中的甲烷体积分数比随着深度的变化关系. 图 2 为笔者采用的 Stehfest 反演方法^[15]借助 Matlab 软件编程得到的半解析解与 Comsol5.2 有限元软件的模拟结果对比. 从图中可以得知, 相同参数条件下, 两种计算结果在裂隙宽度较小的情况下吻合较好. 当裂隙宽度为 1 mm 时, 数值解的体积分数比为 0.003, 半解析解的结果为 0.002 5, 仅比数值解小了 17.4%; 但在大宽度情况下, 半解析解则比数值解大了 23.1%. 可见随着裂隙宽度的增大, 结果差别也逐渐增大, 但仍在可控范围内.

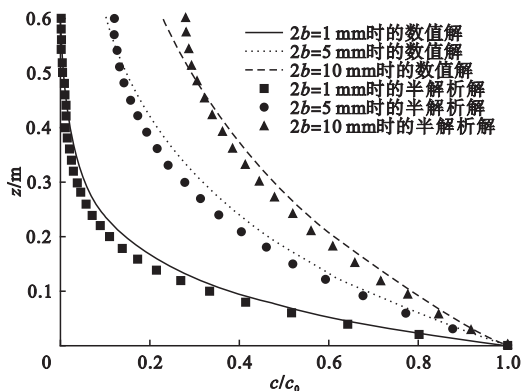


图2 不同宽度下甲烷体积分数比与深度关系的半解析解和数值解的对比

Fig. 2 Comparisons between the proposed semi-analytical solution and the numerical solution of methane concentration profiles with different fracture widths

3 参数敏感性分析

为确定相关参数对甲烷在有裂隙黏土覆盖层中运移的影响,笔者对裂缝宽度、甲烷在覆盖层中的扩散系数以及甲烷的一阶氧化系数等参数进行了敏感性分析. YAO Y^[16]等在试验中得出,甲烷在和氧气混合的二相气体中的扩散系数为 $2.263 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. 同时,根据式(6),可计算出黏土覆盖层裂隙中甲烷的运移速率在 $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ m/s}$,故将其平均值作为所设参数进行分析. 另取压实黏土覆盖层的孔隙率 n 为 0.4 ^[17]. 此外,试验还得到甲烷一阶氧化系数在 $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,甲烷在黏土覆盖层中的扩散系数在 $2.13 \times 10^{-6} \sim 6.27 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,而压实黏土饱和度介于 $0.1 \sim 0.9$,故根据式(8)可得出扩散系数为 $3.83 \times 10^{-9} \sim 5.81 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,因此, D'_x 取其上下限的平均值 $3.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

3.1 裂缝宽度

Camp S等^[18]通过四点弯曲试验得出的黏土裂隙宽度为 $2.1 \sim 4.5 \text{ mm}$. 蔡武军^[19]通过室内土梁弯曲试验得出的黏土裂隙宽度为 2 mm 左右. 蔡光华等^[20]得出在不同含水率下裂缝宽度发展至 $1 \sim 2 \text{ mm}$. 故笔者在此选

取了 1 mm 、 5 mm 和 10 mm 等3个宽度值来研究其对甲烷在有裂隙黏土覆盖层中运移的影响. 此时,甲烷在黏土覆盖层中的扩散系数和甲烷一阶氧化系数则取 YAO Y等^[16]的试验所得的数值的平均值,分别为 $D'_x = D'_z = 4.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 和 $\lambda = 0.5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$,而甲烷在覆盖层的一级氧化反应速率在此处则考虑与其在空气中的相等. 通过数值反演,得出不同裂隙宽度下的体积分数比和深度的关系. 不同裂隙宽度下甲烷体积分数分布剖面如图3所示. 覆盖层表面裂隙处的甲烷体积分数随着裂隙开口的增大而增大. 当裂隙宽度由 1 mm 增大至 10 mm 时,表面体积分数比由 0.002 增至 0.235 ,增大了约2个数量级. 但随着裂隙开口的增大,甲烷体积分数比相对应增大的幅度2有所减缓.

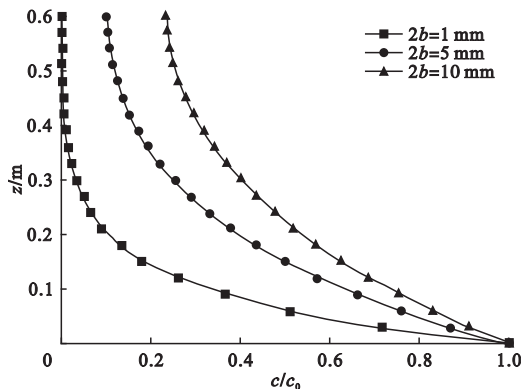


图3 不同裂隙宽度下甲烷体积分数分布剖面深度

Fig. 3 Methane concentration profiles depth under different fracture widths

3.2 覆盖层中的甲烷纵向扩散系数

YAO Y等^[16]的试验和式(8)综合得到的甲烷在覆盖层中的扩散系数的数值在 $3.83 \times 10^{-9} \sim 6.27 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,此处为探究甲烷在覆盖层中二维扩散的影响,取横向扩散系数这二者的平均值,计算不同裂隙宽度下,竖向扩散系数的影响(见图4). 由图4可看出,当裂隙宽度为 10 mm 时,在 $v = 1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 运移条件下,覆盖层表面裂隙处的体积分数比为 0.033 ;以 $v = 1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 的速率运移时,体积分数比则增大至 0.071 ,增

大了近一倍. 当裂隙宽度减小, 开口处的体积分数比也随之减小. 在不同裂隙宽度下或者不同气体运移速率下, 甲烷在覆盖层中的竖向扩散对结果几乎没有影响, 主要以水平扩散为主, 也说明了在此条件下控制方程式(2)实则可以作一定简化.

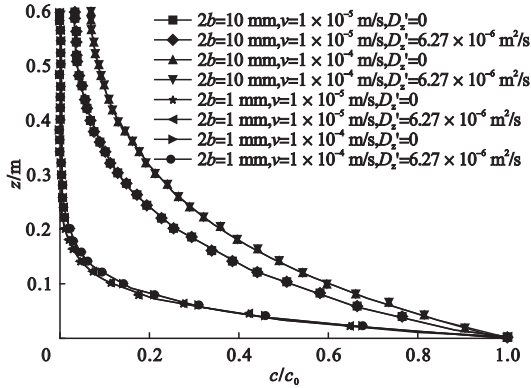


图4 不同气体运移速率下甲烷在覆盖层中竖向扩散系数的影响

Fig. 4 Effect of methane vertical diffusion coefficient of CCL under different gas velocities

3.3 甲烷在覆盖层中的一阶氧化系数

YAO Y 等^[16]通过试验得出甲烷在空气中的一阶氧化系数的量级为 10^{-6} 至 10^{-5} , 且其值会随着覆盖层深度以及甲烷体积分数的变化而变化. 笔者在此是取其一半将其近似为常数做计算, 取 $0.5 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. 图5为甲烷在覆盖层中的氧化系数与裂隙中的氧化系数相互关系对裂隙开口处体积分数的影响. 当甲烷在覆盖层中的一阶氧化系数由裂隙中的 $1/10$ 增大至 10 时, 体积分数比从 0.235 减小至 0.002 , 减小了约 100 倍. 说明当覆盖层中的氧化程度超过裂隙中的氧化程度时, 裂隙开口处的甲烷体积分数比会随之减小, 也就是说, 更多的甲烷在覆盖层中被消耗. 当只考虑土骨架中的氧化时, 裂隙开口处的体积分数比为 0.06 ; 只考虑裂隙中的氧化时, 开口处体积分数比为 0.54 ; 当两者都不考虑氧化作用时, 体积分数比增大至 0.67 . 说明压实黏土覆盖层中的甲烷氧化作用对裂隙开口处的体积分数的影响更大, 这与

裂隙和骨架的相对尺度有关.

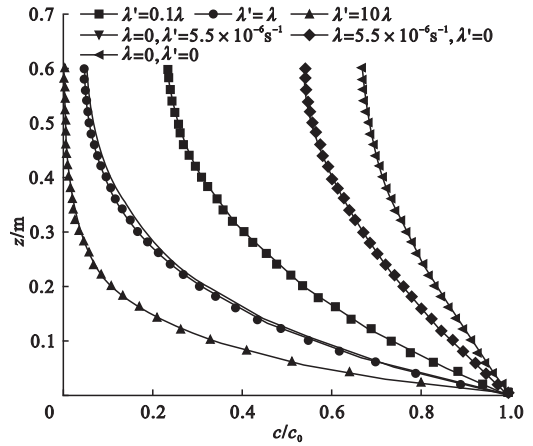


图5 裂隙和骨架中的甲烷氧化系数对体积分数的分布剖面的影响

Fig. 5 Effect of methane oxidation coefficient in matrix and fracture on concentration profiles

4 结论

(1) 覆盖层表面裂隙处的甲烷体积分数随着裂隙开口的增大而增大. 当裂隙宽度由 1 mm 增大至 10 mm 时, 表面体积分数比由 0.002 增至 0.235 , 增大了约 2 个数量级. 但随着裂隙开口的增大, 甲烷体积分数比相对应增大的幅度 2 个数量级有所减缓.

(2) 在低速运移条件下, 覆盖层表面裂隙处的体积分数比为 0.033 ; 以运移速率增大时, 体积分数比则增大至 0.071 , 增大了近乎一倍. 但在不同裂隙宽度下或者不同气体运移速率下, 甲烷在覆盖层中的竖向扩散对结果几乎没有影响, 主要以水平扩散为主.

(3) 当甲烷在覆盖层中的一阶氧化系数由裂隙中的十分之一增大至十倍时, 体积分数比从 0.235 减小至 0.002 , 减小了约 100 倍. 说明当覆盖层中的氧化程度超过裂隙中的氧化程度时, 裂隙开口处的甲烷体积分数比会随之减小, 也就是说, 更多的甲烷在覆盖层中被消耗. 同时, 压实黏土覆盖层中的甲烷氧化作用对裂隙开口处的体积分数的影响更大, 这与裂隙和骨架的相对尺度有关.

参考文献

- [1] 陈云敏. 环境土工基本理论及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 1-46.
(CHEN Yunmin. A fundamental theory of environmental geotechnics and its application [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2014, 36(1): 1-46.)
- [2] POWELL J T, TOWNSEND T G, ZIMMERMIN J B. Estimates of solid waste disposal rates and reduction targets for landfill gas emissions[J]. Nature climate change, 2016, 6(2): 162-165.
- [3] LI J H, LI L, CHEN R, et al. Cracking and vertical preferential flow through landfill clay liners[J]. Engineering geology, 2016, 206: 33-41.
- [4] MILLER C J, MISHRA M. Modeling of leakage through cracked clay liners - state of the art[J]. Jawa journal of the American water resources association, 1989, 25(3): 551-556.
- [5] CZEPIEL P M, MOSHER B, HARRISS R C, et al. Landfill methane emissions measured by enclosure and atmospheric tracer methods[J]. Journal of geophysical research: atmospheres, 1996, 101(11): 16711-16719.
- [6] KRISTENSEN A H, THORBJORN A, JENSEN M P, et al. Gas-phase diffusivity and tortuosity of structured soils[J]. Journal of contaminant hydrology, 2010, 115(1): 26-33.
- [7] 杨益彪, 詹良通, 王顺玉, 等. 封顶覆盖黄土气体渗透特性测试及填埋气一维运移分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 1973-1980.
(YANG Yibiao, ZHAN Liangtong, WANG Shunyu, et al. Measurement of gas permeability of cover loess and one-dimensional analysis of landfill gas emission [J]. Rock and soil mechanics, 2015, 36(7): 1973-1980.)
- [8] 罗云菊. 西部山城垃圾填埋场气液运移规律及其污染控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
(LUO Yunju. Research on the law of leachate and gas movement and the pollution of control in the landfill of western mountain city of China [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.)
- [9] 辛丹慧, 赵由才, 柴晓利. 填埋场甲烷氧化传输与释放预测模型研究进展[J]. 中国环境科学, 2016, 36(3): 819-826.
(XIN Danhui, ZHAO Youcai, CHAI Xiaoli. Review on the landfill methane oxidation, transportation and emission models [J]. China environmental science, 2016, 36(3): 819-826.)
- [10] 詹良通, 邱清文, 杨益彪, 等. 黄土覆盖层水-气耦合运移土柱试验及数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(6): 969-977.
(ZHAN Liangtong, QIU Qingwen, YANG Yibiao, et al. Soil column testes and numerical simulations of moisture-gas coupled flow in a loess cover [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2017, 39(6): 969-977.)
- [11] Ng C W, FENG S, LIU H W. A fully coupled model for water-gas-heat reactive transport with methane oxidation in landfill covers[J]. Science of the total environment, 2015, 508: 307-319.
- [12] TANG D H, FRIND E O, SUDICKY E A. Contaminant transport in fractured porous media: Analytical solution for a single fracture [J]. Water resources research, 1981, 17(3): 555-564.
- [13] HANTUSH M M, RAO S G. Theoretical development and analytical solutions for transport of volatile organic compounds in dual-porosity soils[J]. Journal of Hydrology, 2003, 279(1): 18-42.
- [14] KOSCHORRECK M, CONRAD R. Oxidation of atmospheric methane in soil: measurements in the field, in soil cores and in soil samples [J]. Global biogeochemical cycles, 1993, 7(1): 109-121.
- [15] STEHFEST H. Algorithm 368: Numerical inversion of Laplace transforms [D]. Communications of the acm, 1970, 13(1): 47-49.
- [16] YAO Y, SU Y, WU Y, et al. An analytical model for estimating the reduction of methane emission through landfill cover soils by methane oxidation[J]. Journal of hazardous materials, 2015, 283(283): 871-879.
- [17] POULSEN T G, CHRISTOPHERSEN M, MOLDRUP P, et al. Modeling lateral gas transport in soil adjacent to old landfill [J]. Journal of environmental engineering, 2001, 127(2): 145-153.
- [18] CAMP S, GOURC J P, PLE O. Landfill clay barrier subjected to cracking: Multi-scale analysis of bending tests [J]. Applied clay science, 2010, 48(3): 384-392.
- [19] 蔡武军. 不均匀沉降引起压实粘土屏障开裂及优势渗流分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
(CAI Wujun. Analysis of cracks and subsequent preferential flow caused by uneven settlement in clay barrier [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.)
- [20] 蔡光华. 垃圾填埋场压实黏土封场系统开裂规律研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2012.
(CAI Guanghua. Cracking law of landfill compacted clay cover system [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2012)