



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114969617 A

(43) 申请公布日 2022. 08. 30

(21) 申请号 202210521886.9

(22) 申请日 2022.05.13

(71) 申请人 华中科技大学

地址 430074 湖北省武汉市洪山区珞喻路  
1037号

(72) 发明人 文小俊 蒲诃夫 胡海蓝 闵明  
杜延军 蒋宁俊

(74) 专利代理机构 北京金智普华知识产权代理  
有限公司 11401

专利代理师 张晓博

(51) Int. Cl.

G06F 17/10 (2006.01)

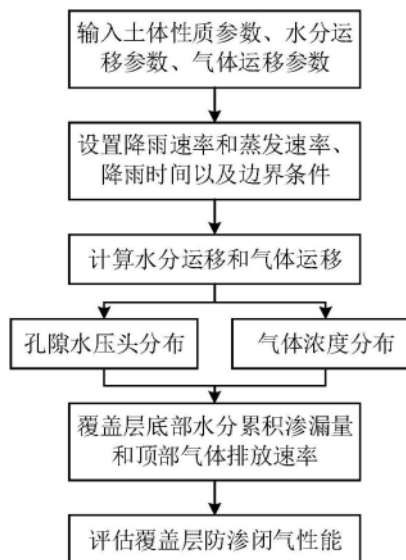
权利要求书2页 说明书6页 附图2页

## (54) 发明名称

一种固体废弃物堆填场覆盖层水气耦合运移的计算方法

## (57) 摘要

本发明提供了一种固体废弃物堆填场覆盖层水气耦合运移的计算方法,涉及环境岩土工程技术领域,旨在解决现有技术中只考虑水分在覆盖层中的运移,缺少填埋气的运移以及水分运移、气体运移的偶尔作用影响的问题,采用的技术方案是,综合考虑了水分入渗、水分蒸发、气体对流、气体扩散、水分与气体运移之间的相互影响,可以模拟不同工况和边界条件下覆盖层中水气耦合运移的过程,计算降雨和蒸发等复杂气候变化对气体运移的影响,根据覆盖层底部累积渗漏量和顶部气体排放速率评估覆盖层的防渗闭气性能;解决了不考虑覆盖层中水分和气体运移之间相互耦合作用而导致计算结果误差较大的问题,且简单方便、易于实现。



1. 一种固体废弃物堆填场覆盖层水气耦合运移的计算方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1,建立固废堆填场单层覆盖层土体中水气运移的模型,并设置模型参数及边界条件;

步骤2,计算覆盖层中水分和气体的分布情况;

步骤3,评价覆盖层的防渗闭气性能。

2. 根据权利要求1所述的一种固体废弃物堆填场覆盖层水气耦合运移的计算方法,其特征在于:所述步骤1中的模型参数包括土体性质参数和气体性质参数。

3. 根据权利要求1所述的一种固体废弃物堆填场覆盖层水气耦合运移的计算方法,其特征在于:所述边界条件包括覆盖层底部水分边界、覆盖层顶部水分边界、覆盖层底部气体边界和覆盖层顶部气体边界。

4. 根据权利要求1所述的一种固体废弃物堆填场覆盖层水气耦合运移的计算方法,其特征在于:所述步骤2中,覆盖层水分分布计算包括 $h(Z, T) =$

$$\frac{\ln[V(Z,T)]-Z/2-T/4}{\alpha}, V(Z, T) = A(T)Z + B(T) + \sum_{k=1}^{\infty} (C_{1k} + C_{2k}) \sin(\lambda_k Z) \exp(-\lambda_k^2 T),$$

$$A(T) = \frac{q(Z,T)/k_s \exp(L/2+T/4) - \exp(\alpha h_0 + T/4)/2}{1+L/2}, B(T) = \exp(\alpha h_0 + T/4),$$

$$C_{1k} = \frac{\int_0^L [\exp(\alpha h_i + Z/2) - A(T)|_{T=0} Z - B(T)|_{T=0}] \sin(\lambda_k Z) dz}{L/2 + \cos^2(\lambda_k L)},$$

$$C_{2k} = -\frac{\int_{\tau=0}^T \int_0^L \left[ \frac{\partial A(T)}{\partial T} \Big|_{T=\tau} Z + \frac{\partial B(T)}{\partial T} \Big|_{T=\tau} \right] \exp(\lambda_k^2 \tau) \sin(\lambda_k Z) dz d\tau}{L/2 + \cos^2(\lambda_k L)}, Z = \alpha z, T = \alpha k_s t / (\theta_s - \theta_r), L = \alpha$$

$l, 2\lambda_k \cos(\lambda_k L) + \sin(\lambda_k L) = 0$ ; 式中,  $q(Z, T)$  为覆盖层顶部入渗或蒸发速率,入渗时为正值,蒸发时为负值,单位为mm/day;  $\alpha$  为土体减饱和系数,单位为m;  $z$  为距离覆盖层底部的坐标高度,单位为m;  $t$  为时间,单位为day;  $k_s$  为土体饱和渗透系数,单位为m/s;  $\theta_s$  为土体饱和体积含水率;  $\theta_r$  为土体残余体积含水率;  $\theta_w$  为土体体积含水率;  $l$  为覆盖层厚度,单位为m;  $h_0$  为覆盖层底部孔隙水压力水头,单位为m;  $h_i$  为覆盖层初始孔隙水压力水头, (m);  $\lambda_k$  为特征值。

5. 根据权利要求1所述的一种固体废弃物堆填场覆盖层水气耦合运移的计算方法,其特征在于:所述步骤2中覆盖层气体浓度分布计算包括 $C_g(z, t) =$

$$Y^T \left[ \exp\left(-\int_0^t H d\tau\right) T(0) + \exp\left(-\int_0^t H d\tau\right) \int_0^t \exp\left(\int_0^\tau H d\tau'\right) G d\tau\right] + W,$$

$$H_{nr} = -\frac{2}{l} \int_0^l \frac{\theta_g D_s}{\theta_g + H_g \theta_w} \frac{\partial^2 \psi_n(z)}{\partial z^2} \psi_r(z) dz - \frac{2}{l} \int_0^l \frac{\partial(\theta_g D_s)/\partial z - (v_w H_g + v_g)}{\theta_g + \theta_w H_g} \frac{\partial \psi_n(z)}{\partial z} \psi_r(z) dz +$$

$$\frac{2}{l} \int_0^l \frac{\partial(\theta_g + \theta_w H_g)/\partial t + \partial(v_w H_g + v_g)/\partial z + \mu \theta_g}{\theta_g + \theta_w H_g} \psi_n(z) \psi_r(z) dz, T_n(t) = \sqrt{\frac{2}{l}} \int_0^l \psi_n(z) u_g(z, t) dz,$$

$$D_s = \tau D_g, \tau = \frac{[(1-S_w)\phi]^{10/3}}{\phi^2}, v_w = -k \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right), v_g = -k_{rg} \frac{k_i}{\mu_g} \frac{\partial P_g}{\partial z},$$
 式中,  $C_g$  为覆盖层中气体浓度,单位为 $\text{mol}/\text{m}^3$ ;  $Y$  为由  $\sqrt{\frac{2}{l}} \psi_n(z)$  组成的  $n \times 1$  阶矩阵;  $H$  为由  $H_{nr}$  组成的  $n \times r$  阶矩阵;  $T$  为由  $T_n$  组成的  $n \times 1$  阶矩阵;  $G$  为由  $G_n$  组成的  $n \times 1$  阶矩阵;  $\theta_g$  为土体体积含气率;  $D_s$  为

气体有效扩散系数,单位为 $m^2/s$ ;  $\tau$ 为土壤孔隙对气体运移的表观弯曲系数;  $D_g$ 为气体扩散系数,单位为 $m^2/s$ ;  $k = k_s e^{ah}$ 为水分不饱和渗透系数,单位为 $m/s$ ;  $k_{rg}$ 为相对气体渗透系数;  $\mu_g$ 为气体动力粘滞系数,单位为 $Pa \cdot s$ ;  $k_1$ 为土体固有渗透率,单位为 $m^2$ ;  $P_g$ 为气体压强,单位为 $Pa$ ;  $S_w$ 为土体饱和度;  $\phi$ 为土体孔隙率;  $H_g$ 为亨利常数;  $v_w$ 为水分渗流速度,单位为 $m/s$ ;  $v_g$ 为气体对流速度,单位为 $m/s$ ;  $C_0$ 为覆盖层底部气体浓度,单位为 $mol/m^3$ ;  $C_t$ 为覆盖层顶部气体浓度,单位为 $mol/m^3$ ;  $F_0$ 为覆盖层底部气体流入速率,单位为 $mol/m^2/day$ 。

6. 根据权利要求5所述的一种固体废弃物堆填场覆盖层水气耦合运移的计算方法,其特征在于:所述步骤2中覆盖层气体浓度分布计算还包括 $G_n =$

$$-\sqrt{\frac{2}{l}} \int_0^l \frac{\partial(\theta_g D_s)/\partial z - (v_w H_g + v_g)}{\theta_g + \theta_w H_g} \left[ -\frac{C_0}{l} + \frac{C_t}{l} \right] \psi_r(z) dz -$$

$$\sqrt{\frac{2}{l}} \int_0^l \frac{\partial(\theta_g + \theta_w H_g)/\partial t + \partial(v_w H_g + v_g)/\partial z + \mu \theta_g}{\theta_g + \theta_w H_g} W \psi_r(z) dz, \quad W = C_0 \left( 1 - \frac{z}{l} \right) + C_t \frac{z}{l},$$

$$\psi_n(z) = \sin \left( \frac{k\pi z}{l} \right), \quad k \text{取正整数}。$$

7. 根据权利要求5所述的一种固体废弃物堆填场覆盖层水气耦合运移的计算方法,其特征在于:所述步骤2中覆盖层气体浓度分布计算还包括 $G_n =$

$$-\sqrt{\frac{2}{l}} \int_0^l \frac{\partial(\theta_g D_s)/\partial z - (v_w H_g + v_g)}{\theta_g + \theta_w H_g} \frac{F_0}{\theta_g D_s} \Big|_{z=0} \psi_r(z) dz -$$

$$\sqrt{\frac{2}{l}} \int_0^l \frac{\partial(\theta_g + \theta_w H_g)/\partial t + \partial(v_w H_g + v_g)/\partial z + \mu \theta_g}{\theta_g + \theta_w H_g} W \psi_r(z) dz, \quad W = \frac{F_0}{\theta_g D_s} \Big|_{z=0} (z - l) + C_t,$$

$$\psi_n(z) = \sin \left[ \frac{(2k-1)\pi}{2l} (l - z) \right], \quad k \text{取正整数}。$$

8. 根据权利要求1所述的一种固体废弃物堆填场覆盖层水气耦合运移的计算方法,其特征在于:所述步骤3中评价参数包括覆盖层底部水分渗漏速度、覆盖层底部水分累计渗漏量、覆盖层顶部气体排放速率和覆盖层气体累计排放量。

9. 根据权利要求8所述的一种固体废弃物堆填场覆盖层水气耦合运移的计算方法,其特征在于:所述覆盖层底部水分累计渗漏量计算公式为: $Q =$

$$\int_0^{t_0} \left[ -k(z, t) \left( \frac{\partial h(z, t)}{\partial z} + 1 \right) \right] \Big|_{z=0} dt - S_f, \quad S_f = \int_0^l \theta_s - \theta_{w0} dz, \text{式中, } Q \text{为覆盖层底部水分渗漏量,单位为mm; } t_0 \text{为计算时间,单位为day; } S_f \text{为覆盖层土体储水能力,单位为mm。}$$

10. 根据权利要求8所述的一种固体废弃物堆填场覆盖层水气耦合运移的计算方法,其特征在于:所述覆盖层顶部气体排放速率计算公式为: $F_t =$

$$\left[ \theta_g D_s \frac{\partial C_g}{\partial z} - (v_w H_g C_g + v_g C_g) \right] \Big|_{z=l}, \text{式中 } F_t \text{为覆盖层顶部气体排放速率,单位为 } mol/m^2/day。$$

## 一种固体废弃物堆填场覆盖层水气耦合运移的计算方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及环境岩土工程技术领域,具体为一种固体废弃物堆填场覆盖层水气耦合运移的计算方法。

### 背景技术

[0002] 填埋是固体废弃物的主要处置方式之一。近年来,随着我国固体废弃物产量的不断增加以及环境保护与治理意识的增强,固废堆填场的污染问题愈发受到重视。堆填场中固体废弃物由于成分复杂,经过一系列生物化学反应,会产生污染性的渗滤液和气体。这些污染物若排放到地下水和大气中,会对固废堆填场周围的生态环境造成严重破坏。覆盖层是堆填场重要的组成部分,就像堆填场的“人工皮肤”。覆盖层不仅隔绝人和动物与废弃物之间的直接接触,同时还需具有防渗和闭气功能,即有效阻止雨水入渗到固废堆体中从而减少渗滤液的产生;防止固废堆体产生的有害气体排放到大气中造成空气污染以及隔绝大气中的氧气入侵到固废堆体中。但是,由于覆盖层直接暴露在复杂多变的大气环境中,须经受长期干湿循环、冷暖和冻融循环的作用,与此同时,堆填场中不断产生气体导致堆填场内气压增大,不断考验着覆盖层的防渗闭气性能。因此,计算堆填场覆盖层中水气运移过程对于评价覆盖层的防渗闭气性能、指导覆盖层设计具有重要意义。

[0003] 目前,本领域相关技术人员已经做了许多研究,但主要侧重于覆盖层的防渗性能研究,即只考虑水分在覆盖层中的运移,而不考虑填埋气的运移以及水分运移气体运移的耦合作用的影响,这在实际工程应用中会产生较大的误差。因此,本领域需要开发一种堆填场覆盖层水气耦合运移的计算方法。

### 发明内容

[0004] 鉴于现有技术中所存在的问题,本发明公开了一种固体废弃物堆填场覆盖层水气耦合运移的计算方法,采用的技术方案是,包括以下步骤:

步骤1,建立固废堆填场单层覆盖层土体中水气运移的模型,并设置模型参数及边界条件;

步骤2,计算覆盖层中水分和气体的分布情况;

步骤3,评价覆盖层的防渗闭气性能。

[0005] 作为本发明的一种优选技术方案,所述步骤1中的模型参数包括土体性质参数和气体性质参数。

[0006] 作为本发明的一种优选技术方案,所述边界条件包括覆盖层底部水分边界、覆盖层顶部水分边界、覆盖层底部气体边界和覆盖层顶部气体边界。

[0007] 优选的,针对水分运移,覆盖层底部水分边界条件为常孔隙水压头边界;覆盖层顶部水分边界条件在降雨期 $t_p$ 时间内为水分入渗边界,在 $t_p$ 时间后为水分蒸发边界。针对气体运移,覆盖层底部气体边界条件可设置为常浓度边界或常通量边界;覆盖层顶部气体边界条件为常浓度边界。

[0008] 作为本发明的一种优选技术方案,所述步骤2中,覆盖层水分分布计算包括

$$h(Z, T) = \frac{\ln[V(Z, T)] - Z/2 - T/4}{\alpha}, \quad V(Z, T) = A(T)Z + B(T) + \sum_{k=1}^{\infty} (C_{1k} + C_{2k}) \sin(\lambda_k Z) \exp(-\lambda_k^2 T),$$

$$A(T) = \frac{q(Z, T)/k_s \exp(L/2 + T/4) - \exp(\alpha h_0 + T/4)/2}{1 + L/2}, \quad B(T) = \exp(\alpha h_0 + T/4),$$

$$C_{1k} = \frac{\int_0^L [\exp(\alpha h_i + Z/2) - A(T)|_{T=0} Z - B(T)|_{T=0}] \sin(\lambda_k Z) dZ}{L/2 + \cos^2(\lambda_k L)},$$

$$C_{2k} = - \frac{\int_{\tau=0}^T \int_0^L \left[ \frac{\partial A(T)}{\partial T} \Big|_{T=\tau} Z + \frac{\partial B(T)}{\partial T} \Big|_{T=\tau} \right] \exp(\lambda_k^2 \tau) \sin(\lambda_k Z) dZ d\tau}{L/2 + \cos^2(\lambda_k L)},$$

式中,  $q(Z, T)$  为覆盖层顶部入渗或蒸发速率,入渗时为正值,蒸发时为负值,单位为mm/day;  $\alpha$  为土体减饱和系数,单位为 $m^{-1}$ ;  $z$  为距离覆盖层底部的坐标高度,单位为m;  $t$  为时间,单位为day;  $k_s$  为土体饱和渗透系数,单位为m/s;  $\theta_s$  为土体饱和体积含水率;  $\theta_r$  为土体残余体积含水率;  $\theta_w$  为土体体积含水率;  $l$  为覆盖层厚度,单位为m;  $h_0$  为覆盖层底部孔隙水压力水头,单位为m;  $h_i$  为覆盖层初始孔隙水压力水头,单位为m;  $\lambda_k$  为特征值。

[0009] 作为本发明的一种优选技术方案,所述步骤2中覆盖层气体浓度分布计算包括

$$C_g(z, t) = Y^T \left[ \exp\left(-\int_0^t H d\tau\right) T(0) + \exp\left(-\int_0^t H d\tau\right) \int_0^t \exp\left(\int_0^\tau H d\tau'\right) G d\tau' \right] + W,$$

$$H_{nr} = -\frac{2}{l} \int_0^l \frac{\theta_g D_s}{\theta_g + H_g \theta_w} \frac{\partial^2 \psi_n(z)}{\partial z^2} \psi_r(z) dz - \frac{2}{l} \int_0^l \frac{\partial(\theta_g D_s)/\partial z - (v_w H_g + v_g)}{\theta_g + \theta_w H_g} \frac{\partial \psi_n(z)}{\partial z} \psi_r(z) dz +$$

$$\frac{2}{l} \int_0^l \frac{\partial(\theta_g + \theta_w H_g)/\partial t + \partial(v_w H_g + v_g)/\partial z + \mu \theta_g}{\theta_g + \theta_w H_g} \psi_n(z) \psi_r(z) dz,$$

$$T_n(t) = \sqrt{\frac{2}{l}} \int_0^l \psi_n(z) u_g(z, t) dz, \quad D_s = \tau D_g, \quad \tau = \frac{[(1 - S_w)\phi]^{10/3}}{\phi^2}, \quad v_w = -k \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right),$$

$v_g = -k_{rg} \frac{k_i}{\mu_g} \frac{\partial P_g}{\partial z}$ , 式中,  $C_g$  为覆盖层中气体浓度,单位为 $mol/m^3$ ;  $Y$  为由  $\sqrt{\frac{2}{l}} \psi_n(z)$  组成的  $n$

$\times 1$  阶矩阵;  $H$  为由  $H_{nr}$  组成的  $n \times r$  阶矩阵;  $T$  为由  $T_n$  组成的  $n \times 1$  阶矩阵;  $G$  为由  $G_n$  组成的  $n \times 1$  阶矩阵;  $\theta_g$  为土体体积含气率;  $D_s$  为气体有效扩散系数,单位为 $m^2/s$ ;  $\tau$  为土壤孔隙对气体运移的表观弯曲系数;  $D_g$  为气体扩散系数,单位为 $m^2/s$ ;  $k = k_s e^{\alpha h}$  为水分不饱和渗透系数,单位为m/s;  $k_{rg}$  为相对气体渗透系数;  $\mu_g$  为气体动力粘滞系数,单位为Pa·s;  $k_i$  为土体固有渗透率,单位为 $m^2$ ;  $P_g$  为气体压强,单位为Pa;  $S_w$  为土体饱和度;  $\phi$  为土体孔隙率;  $H_g$  为亨利常数;  $v_w$  为水分渗流速度,单位为m/s;  $v_g$  为气体对流速度,单位为m/s;  $C_0$  为覆盖层底部气体浓度,单位为 $mol/m^3$ ;  $C_t$  为覆盖层顶部气体浓度,单位为m/s;  $F_0$  为覆盖层底部气体流入速率,单位为 $mol/m^2/day$ 。

[0010] 作为本发明的一种优选技术方案,所述步骤2中覆盖层气体浓度分布计算还包括

$$G_n = -\sqrt{\frac{2}{l}} \int_0^l \frac{\partial(\theta_g D_s)/\partial z - (v_w H_g + v_g)}{\theta_g + \theta_w H_g} \left[ -\frac{C_0}{l} + \frac{C_t}{l} \right] \psi_r(z) dz - W = C_0 \left( 1 - \frac{z}{l} \right) + C_t \frac{z}{l},$$

$$\sqrt{\frac{2}{l}} \int_0^l \frac{\partial(\theta_g + \theta_w H_g)/\partial t + \partial(v_w H_g + v_g)/\partial z + \mu \theta_g}{\theta_g + \theta_w H_g} W \psi_r(z) dz,$$

$$\psi_n(z) = \sin\left(\frac{k\pi z}{l}\right), k \text{取正整数。}$$

[0011] 作为本发明的一种优选技术方案,所述步骤2中覆盖层气体浓度分布计算还包括

$$G_n = -\sqrt{\frac{2}{l}} \int_0^l \frac{\partial(\theta_g D_s)/\partial z - (v_w H_g + v_g)}{\theta_g + \theta_w H_g} \frac{F_0}{\theta_g D_s} \Big|_{z=0} \psi_r(z) dz - W = \frac{F_0}{\theta_g D_s} \Big|_{z=0} (z - l) + C_t,$$

$$\sqrt{\frac{2}{l}} \int_0^l \frac{\partial(\theta_g + \theta_w H_g)/\partial t + \partial(v_w H_g + v_g)/\partial z + \mu \theta_g}{\theta_g + \theta_w H_g} W \psi_r(z) dz,$$

$$\psi_n(z) = \sin\left[\frac{(2k-1)\pi}{2l}(l-z)\right], k \text{取正整数。}$$

[0012] 作为本发明的一种优选技术方案,所述步骤3中评价参数包括覆盖层底部水分渗漏速度、覆盖层底部水分累计渗漏量、覆盖层顶部气体排放速率和覆盖层气体累计排放量,根据污染排放标准或要求,当覆盖层底部渗漏量和顶部气体排放超过标准要求时,该覆盖层被击穿,由此得到覆盖层的水分和气体击穿时间;若覆盖层底部渗漏量和顶部气体排放达到稳定时仍小于排放要求,则表示该覆盖层满足设计要求,防渗闭气性能较好。

[0013] 作为本发明的一种优选技术方案,所述覆盖层底部水分累计渗漏量计算公式为:

$$Q = \int_0^{t_0} \left[ -k(z, t) \left( \frac{\partial h(z, t)}{\partial z} + 1 \right) \right] \Big|_{z=0} dt - S_f, \quad S_f = \int_0^l \theta_s - \theta_{w0} dz, \text{ 式中, } Q \text{ 为覆盖层底部水分渗漏量, 单位为 mm; } t_0 \text{ 为计算时间, 单位为 day; } S_f \text{ 为覆盖层土体储水能力, 单位为 mm。}$$

[0014] 作为本发明的一种优选技术方案,所述覆盖层顶部气体排放速率计算公式为:

$$F_t = \left[ \theta_g D_s \frac{\partial C_g}{\partial z} - (v_w H_g C_g + v_g C_g) \right] \Big|_{z=l}, \text{ 式中 } F_t \text{ 为覆盖层顶部气体排放速率, 单位为 mol/m}^2 \text{/day。}$$

[0015] 本发明的有益效果:本发明综合考虑了水分入渗、水分蒸发、气体对流、气体扩散、水分与气体运移之间的相互影响,可以模拟不同工况和边界条件下覆盖层中水气耦合运移的过程,计算降雨和蒸发等复杂气候变化对气体运移的影响,根据覆盖层底部累积渗漏量和顶部气体排放速率评估覆盖层的防渗闭气性能;能够准确计算覆盖层中水气耦合运移的过程,为实际堆填场覆盖层设计提供了有价值的依据和数据;解决了不考虑覆盖层中水分和气体运移之间相互耦合作用而导致计算结果误差较大的问题,且简单方便、易于实现。

## 附图说明

[0016] 为了更清楚地说明本发明具体实施方式或现有技术中的技术方案,下面将对具体实施方式或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍。在所有附图中,类似的元件或部分一般由类似的附图标记标识。附图中,各元件或部分并不一定按照实际的比例绘制。

[0017] 图1为本发明计算固废堆填场覆盖层水气耦合运移过程的流程示意图;

[0018] 图2为本发明固废堆填场覆盖层计算模型图;

[0019] 图3为本发明覆盖层底部水分累积渗漏量图;

[0020] 图4为本发明覆盖层顶部气体排放速率图。

## 具体实施方式

[0021] 实施例1

[0022] 如图1至图4所示,本发明公开了一种固体废弃物堆填场覆盖层水气耦合运移的计算方法,采用的技术方案是,包括以下步骤:

步骤1为覆盖层中水分和气体耦合运移模型的建立,主要输入土体性质参数、水分运移相关参数、气体运移相关参数、边界条件;

步骤2为计算覆盖层中水气耦合运移过程,得到孔隙水压力水头分布和气体浓度分布;

步骤3为评价覆盖层防渗闭气性能,主要通过计算覆盖层底部渗漏量和覆盖层顶部气体排放,结合相关标准来评价覆盖层的防渗闭气性能。

[0023] 步骤1,建立堆填场覆盖层土体中水气运移的模型,并设置模型的参数及边界条件;

[0024] 具体参数取值和边界条件设置如下:覆盖层土体厚度 $l=1\text{m}$ ,土体饱和体积含水率 $\theta_s=0.43$ ,土体残余体积含水率 $\theta_r=0.0956$ ,土体饱和渗透系数 $k_s=5\times 10^{-7}\text{m/s}$ ,土体减饱和系数 $\alpha=0.3\text{m}^{-1}$ ;土体固有渗透率 $k_i=0.2\times 10^{-15}\text{m}^2$ ;气体动力粘滞系数 $\mu_g=1.1\times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。底部孔隙水压力水头 $h_0=-2.5\text{m}$ ;覆盖层初始孔隙水压力水头 $h_i=-2.5\text{m}$ ; $q(A,T)$ 为覆盖层顶部入渗或蒸发速率(入渗时为 $40\text{mm/day}$ ,蒸发时为 $-2\text{mm/day}$ ,降雨持续时间 $t_p=5\text{day}$ )。甲烷亨利常数 $H_g=0.0316$ ;气体扩散系数 $D_g=2.137\times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ ;覆盖层底部气体浓度 $C_0=10\text{mol}/\text{m}^3$ ;覆盖层顶部气体浓度 $C_t=0\text{mol}/\text{m}^3$ ;初始气体浓度为 $0\text{mol}/\text{m}^3$ 。

[0025] 步骤2,计算覆盖层中水分和气体的分布;

[0026] 建立堆填场覆盖层水气耦合运移的计算模型和输入相关参数后,根据设置的边界

条件通过式 $h(Z,T)=\frac{\ln[V(Z,T)]-Z/2-T/4}{\alpha}$ ,  $V(Z,T)=A(T)Z+B(T)+$

$\sum_{k=1}^{\infty}(C_{1k}+C_{2k})\sin(\lambda_k Z)\exp(-\lambda_k^2 T)$ ,

$A(T)=\frac{q(Z,T)/k_s \exp(L/2+T/4)-\exp(\alpha h_0+T/4)/2}{1+L/2}$ ,  $B(T)=\exp(\alpha h_0+T/4)$ ,

$C_{1k}=\frac{\int_0^L[\exp(\alpha h_i+Z/2)-A(T)|_{T=0}Z-B(T)|_{T=0}]\sin(\lambda_k Z)dZ}{L/2+\cos^2(\lambda_k L)}$ ,

$$C_{2k} = - \frac{\int_{\tau=0}^T \int_0^L \left[ \frac{\partial A(T)}{\partial T} \Big|_{T=\tau} Z + \frac{\partial B(T)}{\partial T} \Big|_{T=\tau} \right] \exp(\lambda_k^2 \tau) \sin(\lambda_k Z) dz d\tau}{L/2 + \cos^2(\lambda_k L)}, Z = \alpha z, T = \alpha k_s t / (\theta_s - \theta_r), L = \alpha$$

1,  $2\lambda \cos(\lambda L) + \sin(\lambda L) = 0$ , 可计算得到覆盖层中水分运移分布; 通过式

$$C_g(z, t) = Y^T \left[ \exp\left(-\int_0^t H dt\right) T(0) + \exp\left(-\int_0^t H dt\right) \int_0^t \exp\left(\int_0^\tau H dt'\right) G d\tau \right] + W,$$

$$H_{nr} = -\frac{2}{l} \int_0^l \frac{\theta_g D_s}{\theta_g + H_g \theta_w} \frac{\partial^2 \psi_n(z)}{\partial z^2} \psi_r(z) dz - \frac{2}{l} \int_0^l \frac{\partial(\theta_g D_s)/\partial z - (v_w H_g + v_g)}{\theta_g + \theta_w H_g} \frac{\partial \psi_n(z)}{\partial z} \psi_r(z) dz +$$

$$\frac{2}{l} \int_0^l \frac{\partial(\theta_g + \theta_w H_g)/\partial t + \partial(v_w H_g + v_g)/\partial z + \mu \theta_g}{\theta_g + \theta_w H_g} \psi_n(z) \psi_r(z) dz,$$

$$T_n(t) = \sqrt{\frac{2}{l}} \int_0^l \psi_n(z) u_g(z, t) dz, D_s = \tau D_g, \tau = \frac{[(1-S_w)\phi]^{10/3}}{\phi^2}, v_w = -k \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right),$$

$$v_g = -k_{rg} \frac{k_i}{\mu_g} \frac{\partial P_g}{\partial z}, G_n = -\sqrt{\frac{2}{l}} \int_0^l \frac{\partial(\theta_g D_s)/\partial z - (v_w H_g + v_g)}{\theta_g + \theta_w H_g} \left[ -\frac{C_0}{l} + \frac{C_t}{l} \right] \psi_r(z) dz -$$

$$\sqrt{\frac{2}{l}} \int_0^l \frac{\partial(\theta_g + \theta_w H_g)/\partial t + \partial(v_w H_g + v_g)/\partial z + \mu \theta_g}{\theta_g + \theta_w H_g} W \psi_r(z) dz, W = C_0 \left( 1 - \frac{z}{l} \right) + C_t \frac{z}{l},$$

$$\psi_n(z) = \sin\left(\frac{k n \pi z}{l}\right), G_n = -\sqrt{\frac{2}{l}} \int_0^l \frac{\partial(\theta_g D_s)/\partial z - (v_w H_g + v_g)}{\theta_g + \theta_w H_g} \frac{F_0}{\theta_g D_s} \Big|_{z=0} \psi_r(z) dz -$$

$$\sqrt{\frac{2}{l}} \int_0^l \frac{\partial(\theta_g + \theta_w H_g)/\partial t + \partial(v_w H_g + v_g)/\partial z + \mu \theta_g}{\theta_g + \theta_w H_g} W \psi_r(z) dz, W = \frac{F_0}{\theta_g D_s} \Big|_{z=0} (z - l) + C_t,$$

$$\psi_n(z) = \sin\left[\frac{(2k-1)\pi}{2l} (l-z)\right], k \text{ 取正整数, 可计算得到覆盖层中气体运移分布。}$$

[0027] 步骤3, 评价覆盖层的防渗闭气性能;

[0028] 根据覆盖层中水气耦合运移计算得到的根据计算得到的水分和气体运移分布, 由

$$\text{式 } Q = \int_0^{t_0} \left[ -k(z, t) \left( \frac{\partial h(z, t)}{\partial z} + 1 \right) \right] \Big|_{z=0} dt - S_f, S_f = \int_0^l \theta_s - \theta_{w0} dz,$$

$$F_t = \left[ \theta_g D_s \frac{\partial C_g}{\partial z} - (v_w H_g C_g + v_g C_g) \right] \Big|_{z=l}, \text{ 进而可以计算出覆盖层底部水分累积渗漏}$$

量和顶部气体排放速率。

[0029] 根据美国ACAP项目中建议的湿润地区土质覆盖层年渗漏量不得大于30mm的要求, 以及澳大利亚遗留垃圾堆填场甲烷项目的监管基线计算指南规定的甲烷气体最小排放速率为0.45mol/m<sup>2</sup>/day的要求, 可以评估该堆填场覆盖层的防渗性能和闭气性能。

[0030] 根据覆盖层底部水分累积渗漏量图和顶部气体排放速率图, 可以看出, 本实施例中覆盖层顶部气体排放速率和底部水分渗漏量均满足相应的标准要求。同时, 计算结果表明, 传统方法不考虑水气耦合作用将会低估覆盖层底部渗漏量, 从而使设计的覆盖层存在较大的安全风险。

[0031] 本文中未详细说明的部件为现有技术。

[0032] 上述虽然对本发明的具体实施例作了详细说明, 但是本发明并不限于上述实施例, 在本领域普通技术人员所具备的知识范围内, 还可以在不脱离本发明宗旨的前提下做



出各种变化,而不具备创造性劳动的修改或变形仍在本发明的保护范围以内。

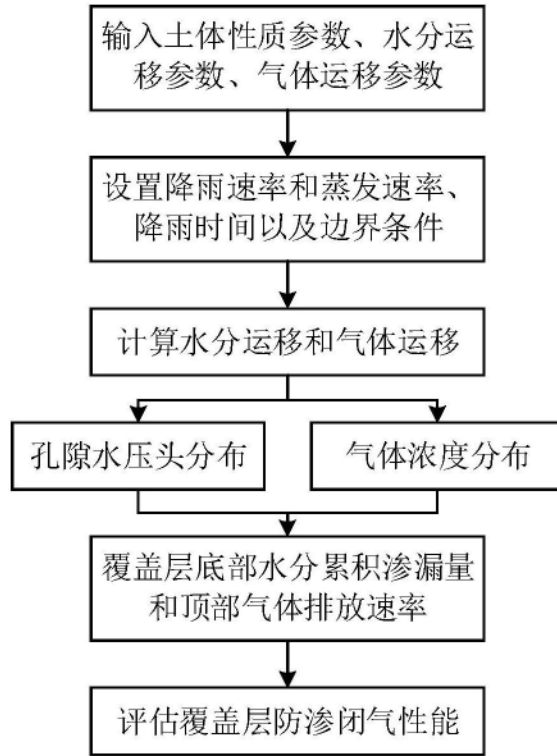


图1

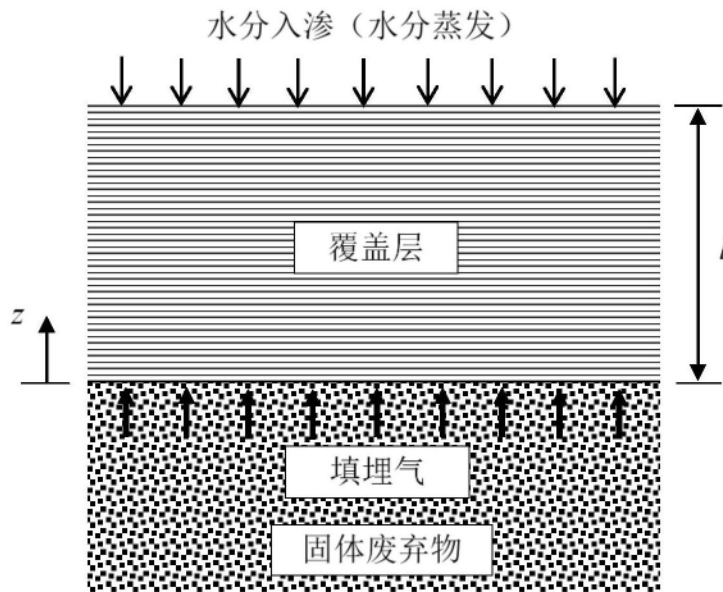


图2

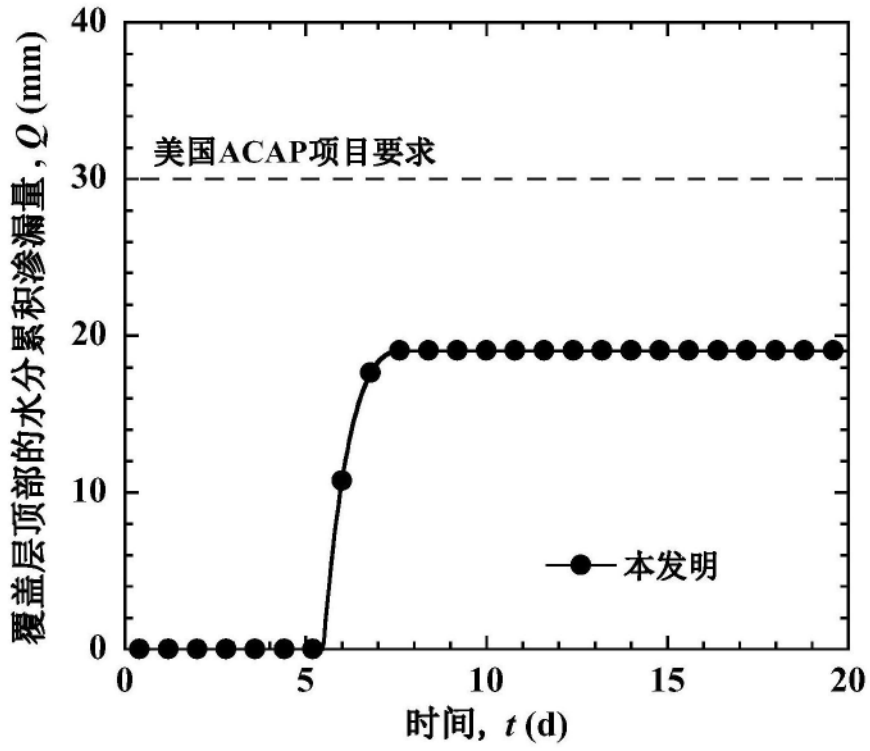


图3

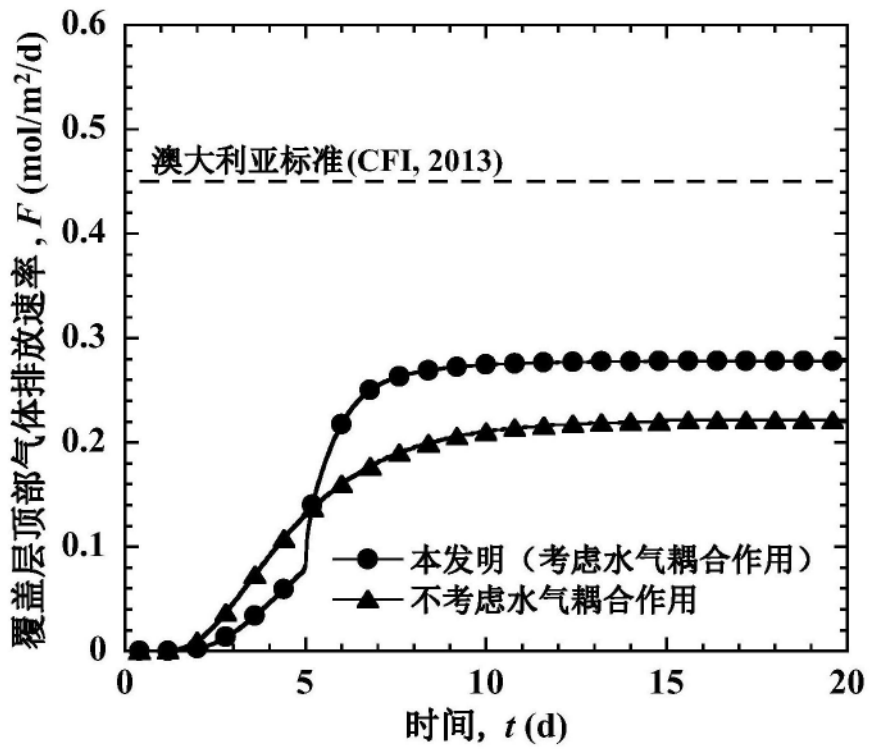


图4