

卫生填埋体填土层净化机理试验研究*

Contaminant resistant mechanism of filled earth layer in waste disposal site

张莲花¹, 孔德坊¹, 李荣强²

(1. 成都理工学院 工程地质研究所, 四川 成都 610059; 2. 深圳市工程地质勘察研究院, 广东 深圳 518026)

摘要: 针对填土层在填埋体中的作用, 以成都市万兴废弃物处置场为例, 通过土柱试验着重研究了填土层对垃圾淋滤液的净化机理。试验证明在相同的干密度下含水率大的土层对阳离子净化效果要好; 淋滤引起土层的渗透系数明显增大, 变化范围在 0.5~1 个数量级; 典型的一价离子 NH_4^+ (和 Cl^-) 的净化规律可用指数函数表征。

关键词: 卫生填埋体; 填土层; 土柱试验; 净化机理; 土层结构

中图分类号: X 705

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2000)06-0678-04

作者简介: 张莲花, 女, 1974 年生。1998 年获成都理工学院工学硕士学位, 现于成都理工学院攻读博士学位。

ZHANG Lian-hua¹, KONG De-fang¹, LI Rong-qiang²

(1. Chengdu Institute of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Shenzhen Investigation & Research Institute, Shenzhen 518026, China)

Abstract: In the waste filling, it is extremely important that the earth fill retards the percolation of the waste leached solution. On the basis of a large number of test data, the paper presents the decontamination mechanism and laws of ions frequently appearing in leachate. The results of earth column tests indicate that the structure of layers has effects on the transporting and cleaning of ions in different degree with different ions; that due to exchange of adsorption with bivalent cation (Ca^{2+} , Mg^{2+}) in place of monovalent ions the permeability increases 5~10 times; that potential function of typical monovalent ions (NH_4^+ , Cl^-) is exponential.

Key words: landfill; earth fill; earth column test; decontamination mechanism; soil structure

1 引言*

生活垃圾是人类生活过程中必然产生的废弃物。因其来源广泛、成分复杂, 在一定的条件下可成为有害、有毒物质, 对人体健康和自然环境造成不良影响, 生活垃圾的处理和处置成为了环卫部门和市政管理工程部门的一项新课题。废弃物(垃圾)处置是在经济上合理、技术上可能的前提下, 以实现废弃物的无害化、资源化、减量化为原则, 依据废弃物的种类和特点展开的。城市生活垃圾的处理, 目前国内外主要采用的方法是卫生填埋、堆肥和焚烧。经过大量实际工程对比分析表明, 在这几种处理方法中, 大规模(1000 t/d)、近距(< 50 km)的卫生填埋是最为经济合理的一种处理方式。卫生填埋具有相对处理成本低、处置量大、终极化处置程度高等特点, 而且其它方法的终极处置也是采用这种方法。目前在国外的中型城市中, 大多都采用卫生填埋处理城市生活垃圾。

垃圾卫生填埋工程主要由 5 部分组成: ①作为主体的垃圾填埋体; ②污水净化厂; ③垃圾填埋体与污水净化厂之间的排放管道(或暗沟); ④地下水监测点; ⑤排气管等。作为卫生填埋工程主体的垃圾填埋体由垃圾和填土层分层填埋而成, 通常是每天把送到的废弃物在限定的区域内铺散成 40~75 cm 厚的薄层, 然后压实以减少废物的体积, 在每天操作之后用一层厚 20

~30 cm 的土料覆盖压实^[1]。废弃物层和土料覆盖层共同构成一个单元, 即填筑单元。卫生填埋体一般由以下 5 部分组成: ①场地及四壁的衬里层; ②垃圾堆放系统, 按单元分层作业方式堆放填埋, 即在每层垃圾之上覆土压实; ③顶面封场覆盖系统; ④底部排导系统; ⑤填埋体内的排放系统^[1]。图 1 给出了垃圾卫生填埋体结构示意图。

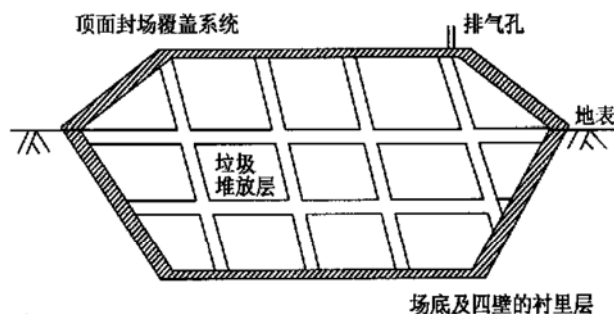


图 1 垃圾卫生填埋体结构示意图

Fig. 1 Vertical profile of a sanitary landfill

填土层除抑制污浊气体自由排放污染大气以外, 主要有以下 4 个方面的作用: ①净化垃圾淋滤液的作用; ②调节淋滤液排放量的作用, 填埋体中的水主要来自大气降水, 具有季节性, 填土层起到使垃圾淋滤液的

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49572163)

收稿日期: 2000-04-20

产生量与污水净化能力相协调的作用;③调节和控制填埋体中的水位,使得填埋体中的水头高度适度,减小淋滤液外渗的渗透压力和渗透量;④影响垃圾土的变形和固结,进而影响填埋场的强度和稳定性^[2]。②③和④的协调可通过对渗透性的优化设计达到目的,将在其他文章中论述。本文以大量土柱试验结果为基础,着重研究了在一定的水头下,具有不同结构(不同密度和含水率)的粘性土对垃圾淋滤液中无机污染组分的净化规律。压实粘土对有机物的运移并没有明显的衰减作用^[3],本文从略。

2 土柱试验情况

仅就土层而言,对污染物净化能力的大小,取决于土层的结构、成分(包括矿物成分和土中各种水)和水动力条件。成都万兴废弃物处置场填土层土料为粘土矿物含量较高的粉质粘土,其平均化学成分的质量分数为:SiO₂ 51.60, Al₂O₃ 15.28, Fe₂O₃ 5.96, CaO 7.55, MgO 3.59, K₂O 1.30, Na₂O 0.28, MnO 0.02, TiO₂ 0.68, P₂O₅ 0.12, 烧失量 13.10, 总计 99.49。天然含水率平均值为 9.5%, 颗粒组成中粒砂(> 0.05 mm)为 14%, 粉粒(0.05~0.005 mm)为 71%, 粘粒(< 0.005 mm)为 15%。土样 X 射线粉晶衍射测试结果为伊利石 32%, 绿泥石 18%, 石英 22%, 长石 20%, 方解石 8%。粘土矿物的相对含量:伊利石 63%, 绿泥石 37%, 土料富 SiO₂和 Al₂O₃, SiO₂/Al₂O₃ 为 3.38, 有机含量为(0.3~0.6)%, 可溶盐含量(0.05~0.67)%^[4,5], 当其具有适当的结构时,对无机物可能起到很好的净化作用。

土柱试验就是在管柱内用具有一定浓度的溶液对具有一定结构的土层进行淋滤的试验。试验中使用对离子吸附性很小的聚氯乙烯(PVC)管材。设计采用 6 种不同结构的土,有关试验参数见表 1。土柱的简易装置如图 2 所示,土柱柱管内径为 7.58 cm,高 15 cm,管内水头 30 cm,过筛孔径 10 mm。

淋滤液组分极为复杂,无机物组分也很复杂,国内部分大城市统计资料表明,无机物组分主要为 Cl⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, NH₄⁺-N。为了避免离子之间的相互作用影响单离子在土层中的净化规律,土柱试验分两批进行。两批土柱试验的土结构完全相同,操作方法和过程也一致,仅所用的淋滤溶液(本文中称为淋母液或母液)的离子种类和浓度不同。第一批离子为 Cl⁻, NH₄⁺, NO₃⁻, NO₂⁻, 浓度分别为 200, 200, 10, 20 mg/L;第二批离子为 SO₄²⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, 浓度分别为 100, 120, 25 mg/L。虽然 SO₄²⁻, Ca²⁺, Mg²⁺ 可以生成难溶盐类,但都可视为可溶盐。为模拟填埋场中填土层的功能,以

及滴定和比色试验的需要,先用母液对土柱进行一天浸泡。保持水头不变,每天放液,每 2~3 天分析一次滤出液中相应离子的浓度。一次性配制母液,即母液浓度为定值,但考虑母液某些离子浓度会随时间变化及系统误差的存在,同时每次还分析母液中各离子浓度。两批土柱试验分别历时近一个月。试验滤出液浓度结果以 NH₄⁺, Ca²⁺ 为例见表 2,3,其他离子结果从略。

表 1 土柱试验参数

Table 1 The parameters of earth column test

编号	含水率 w / %	干密度 ρ_d / (g·cm ⁻³)	密度 ρ / (g·cm ⁻³)	土样质量 / g
X-1	8	1.5	1.616	1093.9
X-2		1.6	1.723	1162.3
X-3		1.7	1.831	1239.3
X-4	12	1.5	1.680	1137.2
X-5		1.6	1.792	1213.0
X-6		1.7	1.904	1288.8

注:第一批试验 X 取值为 1,第二批试验 X 取值为 2

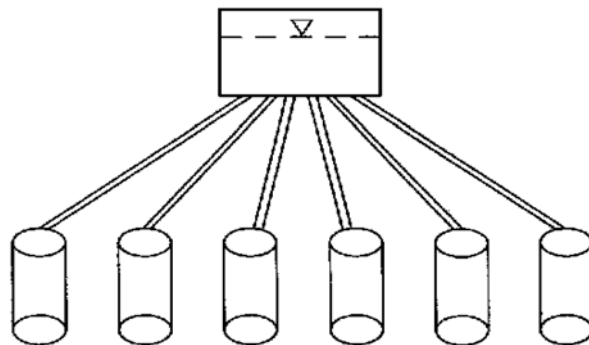


图 2 土柱试验简易装置

Fig. 2 Earth column tests

3 试验结果整理及分析

两个月的土柱试验得到了大量的第一手资料,为单个离子在土层中的净化机理和规律的研究提供了有力保障。为消除母液离子浓度随时间变化和系统产生的误差,使每两次的试验结果可直接进行比较,引入浓度差 dC 来表征离子在土层中的净化效果(本文中浓度差 dC 特指母液和滤出液的浓度差)。两组试验测得淋母液和滤出液 pH 值均在 7 左右。

中性介质中粘土颗粒显负电性,发育双电层^[6]。填土料(就近取土)中的离子成分和浓度与场地的地下水成分和浓度相关,故分析了万兴场建场前地下水本底值。由于淋滤液中存在的离子与土中双电层中的离子在种类、浓度、价态等方面存在差异,必然会发生交换吸附作用。为获得土中双电层中的离子特征,分析了当地未受污染的地下水中的离子特性,并以此作为当地土中离子特征的本底值进行淋滤前后离子特征对比分析。

表 2 第一批土柱试验结果(NH₄⁺)

Table 2 The results of the first earthr column test (NH ₄ ⁺)												mg/L
时间/d	0.5	1	4	8	10	12	15	17	19	22	24	26
母液	180	140	160	94	45	72	60	23	18	—	17	11.5
1- 1	18	0	26	3	2	10.5	5.5	4.5	2	2.5	1.5	0.5
1- 2	25	14	20	11	20	16	9	7	3.5	1.5	6	1.5
1- 3	38	16	45	15	13	13.5	8.5	8	—	6	5.3	1.0
1- 4	20	5	—	18	16	18.5	9.5	8.5	9.5	12	9	0.4
1- 5	0	3	52	17	8	12.5	8	7.5	4	18	12.5	1.7
1- 6	2	12	38	16	11	17	8.3	6	4.5	2	16.5	1.0

表 3 第二批土柱试验结果(Ca²⁺)

Table 3 The results of the second earthr column test												mg/L
时间/d	1	3	5	8	10	12	14	17	19	22		
母液	131.78	135.73	155.80	139.50	127.79	114.36	127.07	124.36	111.78	122.64		
2- 1	106.37	119.14	130.41	116.39	119.80	108.08	126.08	118.94	108.94	119.80		
2- 2	106.20	118.06	137.25	128.67	112.03	110.66	118.08	108.08	108.08	118.80		
2- 3	125.07	107.07	130.97	123.52	106.37	108.08	118.08	107.23	110.37	120.94		
2- 4	104.65	112.27	133.82	126.95	111.51	109.80	110.56	106.37	109.80	121.66		
2- 5	105.51	121.93	130.73	129.53	108.94	110.66	111.51	111.51	109.80	124.09		
2- 6	107.91	121.81	130.39	115.97	107.23	109.80	108.94	108.94	109.80	120.94		

3.1 Ca²⁺ (Mg²⁺) 在不同结构土中的净化规律

淋滤液进入土层后,其Ca²⁺浓度很高必然会引起双电子层的变化。由于Ca²⁺可以把双电子层中的一价阳离子和二价镁离子交换出来,在土的重力水中自身浓度降低。图3显示出Ca²⁺前面一段时间内dC大于零即滤出液浓度小于淋母液,表明Ca²⁺被土吸附,并交换出其他离子。在第8天之后dC变化保持在零左右,交换吸附趋于平衡。试验结果还表明Ca²⁺在相同干密度下含水率大的土层的吸附净化效果好;相同含水率下,不同干密度的土层对dC影响没有明显规律。在其它条件相同时,双电层发育和含水率有关,含水率较大结合水膜也较厚,而压实的粘性土这一特性在饱和后并未发生变化。

3.2 NH₄⁺ 在不同结构土中的净化规律

氨离子为一价阳离子,在硝化细菌作用下不稳定,其净化机理是其不稳定性与土层吸附作用的综合表现,主要体现为粘土的阳离子交换吸附和硝化作用两方面。用基于最小二乘法原理的指数关系回归得到图4所示的曲线。

指数回归曲线方程表征了NH₄⁺在不同土结构中的减缓规律。基本方程可表达如下:

dC = a × bt 或 log dC = A + B × t

a, b(或A, B)为待定系数,不仅与土的矿物成分和介质条件有关,还与土的结构有关。在本文中,土的矿物成分和介质条件一定,故a, b值只与土结构有关。通过6组拟合结果(见表4)比较发现:在一定含

水率下随干密度的提高a值增大,b值减小;干密度为1.5 g/cm³时,含水率大的a, b值均小;干密度为1.6和1.7 g/cm³时,含水率大的a值大,b值小。产生不同的原因可能是淋母液的运动速度不同。含水率和干密度越大淋母液运动越缓慢,净化效果就越好;但a, b的变化范围很小。可见影响NH₄⁺的衰减因素中土结构并不起决定性作用,仅在土的矿物成分和介质条件一定时,填土层的含水率和干密度越大净化效果越好,即净化量大且净化持久。净化持久可以避免填土层净化能力在短时间内失效。并且可以从回归曲线方程推测NH₄⁺交换达到平衡的时间,a、b越大,所需的时间越长。

表 4 回归曲线中 a, b 值及其相关系数

Table 4 The values of a and b in regression curves						
编号	1- 1	1- 2	1- 3	1- 4	1- 5	1- 6
a	175.84	157.54	155.90	167.94	201.37	216.08
b	0.898	0.896	0.881	0.884	0.867	0.861
相关系数	- 0.938	- 0.908	- 0.926	- 0.920	- 0.924	- 0.917

3.3 淋滤引起渗透系数变化

双电子层中阳离子交换使双电子层的厚度发生变化,进而导致了淋滤前后土层的渗透性也发生变化。表5给出了第二批部分土柱渗透性随时间的变化^[7]。由表5可知,渗透系数变化的绝对值随着干密度的增大而减小,即粉质粘土的结构越紧密,淋滤引起渗透系数变化越小。渗透性的增大是由于二价离子交换一价离子后,双电子层变薄引起,渗透系数变化总体范围在0.5~ 1个数量级。

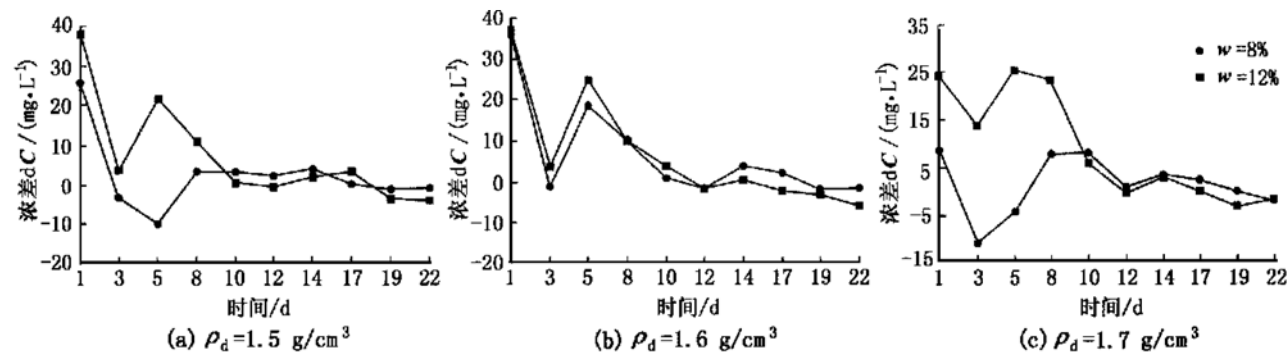


图 3 相同干密度时含水率影响 Ca^{2+} 浓差曲线

Fig. 3 $dC(\text{Ca}^{2+})$ - time curves with different w at same ρ_d

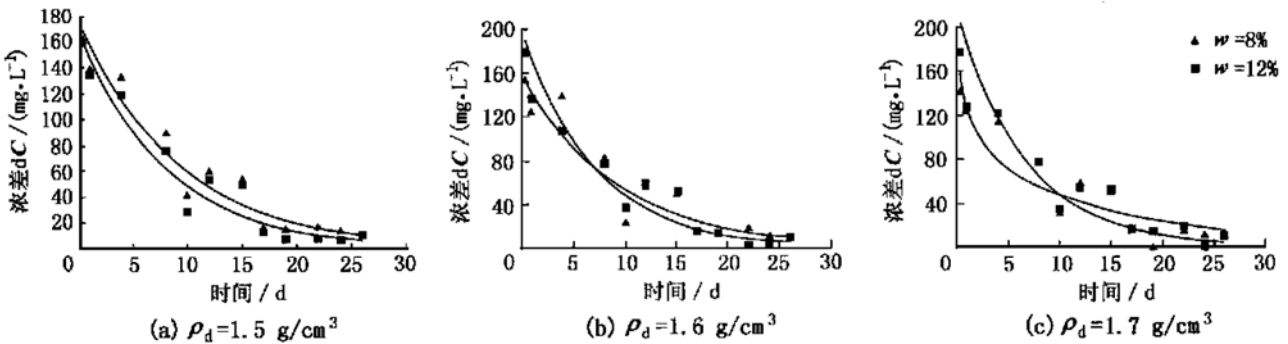


图 4 相同干密度时含水率影响 NH_4^+ 浓差拟合曲线

Fig. 4 $dC(\text{NH}_4^+)$ - time regression curves with different w

表 5 渗透系数随时间变化

Table 5 Coefficient of permeability

10^{-3} cm/s

时间/d	1	3	5	8	10	12	15	17	19	21
2- 1	6.47	5.54	4.50	14.8	13.2	14.4	14.9	14.8	13.2	15.5
2- 2	3.68	4.85	4.56	4.70	5.35	5.50	6.39	6.47	6.21	7.22
2- 3	1.07	1.35	1.61	1.32	1.70	1.72	2.49	2.89	3.12	4.11

确定, 建议今后开展这方面的工作。

4 结论和建议

- (1) 典型的一价阳离子 NH_4^+ 浓度差与淋滤时间的关系可以用指数函数表征, 一价阴离子 Cl^- 同样满足指数关系。
- (2) 淋滤引起渗透系数显著变化, 土层的结构越紧密淋滤引起的渗透性变化越小, 总体变化范围在 0.5 ~ 1 个数量级。
- (3) 二价阳离子 Ca^{2+} (Mg^{2+}) 对阳离子 (K^+ , Na^+) 的交换吸附是导致渗透系数明显增大的原因。
- (4) 离子交换和浓差渗透是垃圾淋滤液中无机污染物在土层中衰减净化的重要机理。
- (5) 在垃圾填埋体的总体结构设计时, 应对离子交换吸附导致渗透系数明显改变予以重视; 还应考虑淋滤液浓度变化时, 土层效用的变化。
- (6) 初始含水率在土层被垃圾淋滤液饱和后对土层的净化机理是有影响的, 但影响的机制和程度没有

参考文献:

[1] CJJ 17—88, 城市生活垃圾卫生填埋技术标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989. 4~ 9.

[2] 张振营, 等. 城市生活垃圾土性参数的室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 35~ 39.

[3] Tuncer B Edil, Park J K, Berthouex P M. Attenuation and transport of volatile organic compounds in clay liner[J]. Environmental Geotechnology, 1992: 77~ 85.

[4] 四川省水利水电勘测设计院. 成都市万兴废弃物处置场试验报告[R]. 1991. 21~ 23.

[5] 金光斗. 成都市万兴废弃物处置场工程地质勘察报告[R]. 成都: 成都市勘测院. 1991. 12~ 15.

[6] James K, Mitchell. 岩土工程土性分析原理[M]. 高国瑞, 韩选江, 张新华, 译. 南京: 南京工学院出版社, 1988. 117~ 143.

[7] Bowders John J Jr, Gordorr Mark E. Hydraulic conductivity of three landfill clay liner: discussion and reply [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(1).