

新型人工合成膨润土防渗卷材的研制及其渗透性能

白庆中, 刘阳生, 李强, 李成麟, 聂永丰(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084, E-mail: liuysh@mail.cic.tsinghua.edu.cn)

摘要: 将膨润土和胶粘剂加以混合, 结合国外先进的粘结工艺, 制成防渗卷材。对膨润土类型、外封装用材料及胶粘剂的确定, 卷材的成型工艺及卷材的渗透性能研究结果表明, 钠基膨润土的渗透性能优于钙基膨润土。在人工钠土中无论是加入聚丙烯酸酯类乳液还是 PM 植物胶, 在掺加的比例一定时, 随着密度的增大, 渗透系数下降; 在相同密度下, 随着掺加的比例增大, 渗透系数下降。人工钠土的渗透系数与水力坡度呈线性关系。膨润土及其胶粘剂卷材与模拟浸出液间的化学配伍性较好。膨润土卷材具有良好的自封闭性, 在材料受损的情况下也能够通过自封闭作用达到较好的“焊接”效果。

关键词: 膨润土; 防渗卷材; 渗透性能; 胶粘剂; 渗透系数; 水力坡度

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2000)06-05-0056

Development and Permeability of New-style Synthetic Bentonite-Waterproof Roll Liner Material

Bai Qingzhong, Liu Yangsheng, Li Qiang, Li Chenglin, Nie Yongfeng(Dept. of Environ. Science and Eng., Tsinghua Univ., Beijing 100084, China E-mail: liuysh@mail.cic.tsinghua.edu.cn)

Abstract: A long with the increasingly serious pollution caused by solid wastes, the desire for safe-style liner materials for landfill becomes more and more urgent. In this paper, a reliable, easily handled and cheap waterproof roll liner material was designed, in which the Bentonite, a kind of clay soil with unusual self-sealing ability, was used as the protective barrier for containment of hazardous waste in landfills. On the basis of the materials' choice, the permeability properties of this new-style synthetic liner under various conditions were tested. The permeability coefficient of Na^+ -Bentonite was less than that of Ca^{2+} -Bentonite. The suitable adhesives can enhance the waterproof of Na^+ -Bentonite. After Na^+ -Bentonite and the new liner were pretreated by water and well maintained, they hardly changed their permeability when they met such leachates as inorganic acids/bases and organic solvent(e. g. CCl_4). The new liner presents good "welding" property even if it was damaged. The experimental results indicate that this kind of bentonite waterproof roll liner is very suitable for landfill.

Keywords: bentonite; waterproof roll liner; permeability; adhesive; permeability coefficient; hydraulic gradient

膨润土具有优良的吸湿膨胀性、低渗性、高吸附性及良好的自封闭性能, 国外从 60 年代开始将膨润土用作防渗材料。到了 70 年代, 膨润土被制成多种形式的产品^[1]。80 年代, 人们发现只要将膨润土粘结或缝织在 2 层纸或塑料膜中就可制成防渗卷材^[2], 稍加改进即可用作填埋场衬层材料, 这种衬垫较大限度地利用了膨润土材料的自封闭性。

鉴于人造有机防渗材料铺施工较复杂、费用高、易穿刺渗漏的缺点以及天然粘土衬层对选址地形和地质等的较高要求和粘土选料、

施工等的工作难度, 进一步开发研制一种技术可行、应用可靠、经济合理并易于制作、运输和施工的新型衬层材料显得十分迫切。

本文将膨润土和胶粘剂加以混合, 结合国外较成型的粘结工艺, 使之通过胶粘剂的粘接力成为薄型卷材, 外用有机薄膜材料封装, 制成防渗卷材以便于运输和施工。从研制的角度出发, 对胶粘剂的确定、卷材的成型工艺及其渗透

基金项目: 国家“八五”科技攻关项目(85-909-03)

作者简介: 白庆中(1945~), 男, 硕士, 教授, 主要从事固体废物处理处置理论及方法的研究。

收稿日期: 1999-12-27

性能作了比较详细地研究。

1 实验部分

1.1 防渗卷材的结构设计

目前,膨润土防渗卷材的结构设计主要有 2 种类型^[3],产品的基本结构为 1 层膨润土层外加 1~2 层有机材料,有机材料与膨润土层间用针刺缝合或用胶粘剂粘合,见图 1。



图 1 膨润土结构设计的 2 种类型

2 种结构类型中的膨润土层是一样的,最好为钠基膨润土或经钠化处理的钙基膨润土。类型 1 的覆盖层一般为无纺织物或为纺织物和

表 1 钙基膨润土(A)和人工钠土(B)的化学组成/%

膨润土	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量
A	2.93	65.44	1.83	0.50	0.30	14.98	2.37	0.81	0.81	9.74
B	3.83	57.57	2.76	4.85	0.20	14.44	4.42	2.21	0.64	9.17

表 2 钙基膨润土(A)和人工钠土(B)的矿物组成/%

膨润土	蒙脱石	石英	菱镁矿	长石	高岭石	伊利石	方解石	黄铁矿
A	59.1	10.5	4.3	3.9	16.6	4.8	1.7	0.4
B	65.7	9.8	3.1	2.2	13.1	2.1	3.5	0.5

膨润土防渗卷材外包装用有机材料,选用上海产的 5 种聚丙烯编织膜进行了抗拉强度的测试,测试结果见表 3。5 种有机材料的抗拉强度均能满足膨润土防渗卷材对封装材料的强度要求。考虑到产品的性能和价格,本实验选择 1 号聚丙烯编织薄膜作为外包装材料。

表 3 有机薄膜材料产品及性能

材料编号	厚度/mm	面积密度/g·m ⁻²	抗拉强度/MPa
1	0.25	155	30.5
2	0.54	232	25.6
3	0.20	107	55.4
4	0.22	150	29.4
5	0.18	120	26.1

实验中所涉及的膨润土防渗卷材中膨润土颗粒间及其与外包装有机材料间的结合采用胶粘剂粘结。用于卷材的胶粘剂一般为无毒的水基

编织物,由聚烯烃或聚酯制成。类型 2 可不设覆盖层,底层材料为高密度聚乙烯(HDPE)。由于 HDPE 膜价格及其运行操作费用较高,类型 2 的卷材在我国较难推广,因此本实验采用类型 1 的卷材结构。有 2 种工艺可以将膨润土和有机材料结合起来,即粘结法^[4]和针刺法^[1]。本文在用粘结法制备实验模块后适当采用针刺法将模块边缘缝合。

1.2 实验选材

膨润土可分为钠基膨润土和钙基膨润土。钠基膨润土的吸水率和膨胀倍数大,阳离子交换容量高,在较高温度下仍能保持其膨胀性和一定的吸附能力,钙基膨润土经人工钠化处理后可变成钠基膨润土*。本实验选用的膨润土材料是山东高阳县产的钙基膨润土和人工钠土。2 种膨润土材料的化学组成和矿物组成见表 1 和表 2。

胶,对多孔性材料可形成有效的粘结,正符合卷材中粘结膨润土颗粒的要求^[5]。经过对十多种水基胶粘剂的筛选,选取聚丙烯酸酯类乳液和聚丙烯醇水溶液作为实验材料。另外还选用北京泥浆公司的 PM 植物胶干粉配制了无固相地下含水层保护液。按照 1.3 节中所述的方法将这 3 种胶粘剂(溶液)与膨润土材料制成实验模块,在 DGB/20-002A 台式干燥箱中烘烤 2h,除去多余水分后,均能保持较好的柔韧性,胶粘剂固化较好,有机材料与膨润土层粘结紧密。因此,所选的 3 种胶粘剂基本符合研制工作的要求。

1.3 卷材粘工艺

参照美国 Gundle 公司生产的双层结构的膨润土防渗卷材 Gundseal 的工艺流程,设计制作了实验室中制备卷材模块的装置系统,主要由有机玻璃加料斗、化工喷枪(带空气压缩机气

* 匡胜利. 膨润土防渗卷材及其渗透性能的研究. 清华大学环境工程系学士论文, 1995

源)及手工辊组成。见图2和图3。图2中加料斗底部的2片橡胶膜一般情况下是自然靠合的,即使斗内有膨润土时也是如此。只有对边壁施加持续振动力时橡胶膜有较小的开孔,正好让土壤颗粒落下来。图3中喷筒直径为75mm,最佳工作距离为20cm。实际操作中在喷头的前部加了一个减压装置。

制备工艺为:在工作平台上先铺设一张尺寸约30×20cm的聚丙烯薄膜材料(表面作糙化处理),先均匀喷一层胶,用手振动加料斗边壁使膨润土均匀落下,用手拖动薄膜使膨润土尽可能地铺设成一均匀薄层(也可人工刮平),再开启化工喷枪的喷头使胶粘剂均匀铺上一层在膨润土颗粒的表面。然后重复上述过程3~4次,控制加胶比例为土壤的3%~30%,最后在加胶土壤层上方加一块同样尺寸的聚丙烯材料,用手工滚筒辊压数次,控制材料厚度在1cm以内。在恒温恒湿养护箱内养护1d后,将模块送至DGB/20-002A型台式干燥箱,箱内温度稳定在80℃,连续烘烤2h,除去多余水分,即完成模块制备过程。

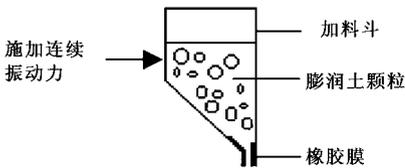
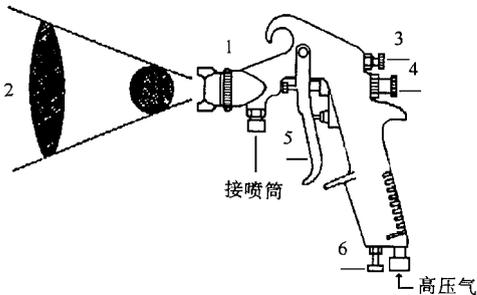


图2 加料斗装置示意图



1. 喷头 2. 雾态胶 3. 雾胶面积调节阀 4. 胶液流量调节阀 5. 喷射开关 6. 空气流量调节阀

图3 喷胶装置示意图

2 实验结果及讨论

在正常情况下,废物填埋场沥滤液均汇集

在填埋场底部,然后渗入地下层,同时发生横向渗透。渗过过程主要遵循Darcy定律^[7]:

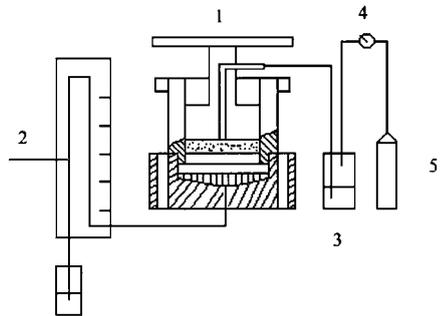
$$Q = -KA(h_1 - h_2)/h \quad (1)$$

式中, Q 为单位时间内的渗流量, K 为渗透系数, A 为过流断面积, h_1 和 h_2 为进出水位差,即断面间水头损失, h 为2断面间距离。

本文渗透系数的测定采用公式(1)。

2.1 不同密度的膨润土试样在相同水力坡度下的渗透系数

实验装置见图4。本实验涉及的密度是指



1. 固结仪 2. 毛细管 3. 高压水罐 4. 高压阀 5. 氮气瓶

图4 渗透实验的固结仪装置

膨润土的干密度,即土样在105~110℃烘干至恒重时的密度。实验中测得钙基膨润土(土样A)的含水率为10.50%,人工钠土的含水率为8.90%。根据式(2)可得不同土样不同密度(1.0~2.0g/cm³)下在固结仪缸体中需称取的膨润土量(m)。

$$m = \rho_{\text{干}} \pi r^2 h (1 + e) \quad (2)$$

式中, $\rho_{\text{干}}$ 为膨润土的干密度, r 为固结仪缸体内径(6.074cm), h 为试样的厚度, e 为土壤的初始含水率。

在一定时间间隔 Δt 内读取渗流液在塑料毛细管内长度变化量 Δl ,由公式(1)变化得到以下渗透系数 K 的计算式:

$$K = \Delta l \cdot ah / (\Delta t \cdot Ah_w) \quad (3)$$

式中, a 为塑料毛细管内径面积, h 为土样厚度, A 为土样截面积, h_w 为加压水头。

图5为不同密度下用氮气瓶测得的2种膨润土的抗渗系数值。从图5可以看出,密度为1.0~2.0g/cm³的膨润土卷材的渗透系数均小

于 10^{-9}cm/s , 说明膨润土是非常理想的填埋场衬层材料, 性能优于一般粘土. 膨润土的渗透系数随密度的增大而迅速下降, 土样 B(人工钠土)的渗透系数小于土样 A 的渗透系数, 因而其抗渗性能优于土样 A. 不同压实密度的膨润土的主要差别在于其土壤颗粒间孔隙的大小. 当密度大时, 单位空间中的土壤颗粒及吸附水层所占的体积就大, 渗流液体通道就窄. 由于膨润土的高吸湿膨胀性和自封闭性, 遇水时极度膨胀, 密度越大, 膨胀倍数越大, 同样的渗流空间留给过流液的通道就越窄, 其渗流系数也就降低了. 选用人工钠土作为后续实验的材料.

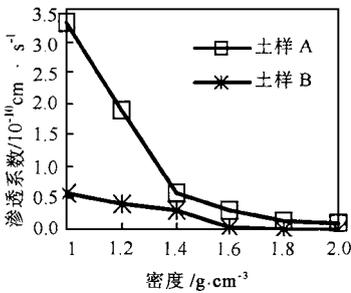


图 5 不同密度下用氮气瓶测得 2 种膨润土的渗透系数值

在人工钠土中以不同比例 (5%, 15%, 25%) 掺入聚丙烯酸酯类乳液或 PM 植物胶后, 不同密度情况下的渗透系数见图 6 和图 7. 无论是加入聚丙烯酸酯类乳液还是 PM 植物胶, 在掺加的比例一定时, 随着密度的增大, 渗透系数下降, 密度较低时尤为明显; 在相同密度下, 随着掺加的比例越大, 渗透系数下降.

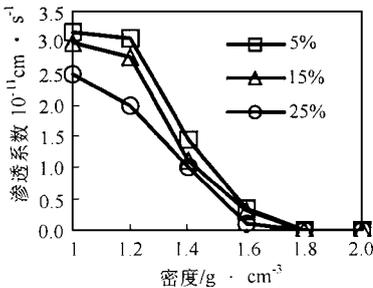


图 6 人工钠土加入聚丙烯乳液后(防渗卷材)的渗透系数与密度的关系

2.2 不同水力坡度下膨润土渗透系数的变化

以人工钠土为实验材料, 密度 1.2g/cm^3 , 不同水力坡度下人工钠土的渗透系数见图 8. 渗透系数与水力坡度呈线性关系, 直线横坐标上的截距 $i_0 = 642$, 即为该膨润土的起始坡降. 水力坡度须大于 i_0 , 才可能产生渗流液.

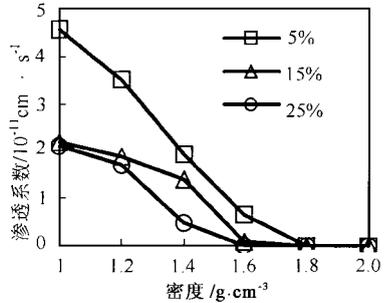


图 7 人工钠土加入 PM 植物胶后(防渗卷材)的渗透系数与密度的关系

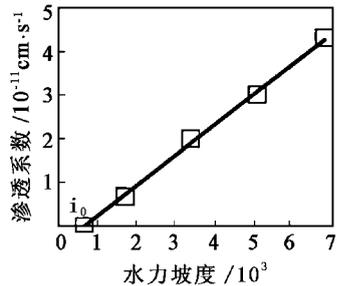


图 8 渗透系数与水力坡度的关系(人工钠土)

2.3 膨润土试样在模拟浸出液作用下渗透性能的影响

用高压土柱法测试了密度为 1.2g/cm^3 的膨润土以及加入 15% 胶粘剂后的膨润土卷材试样在模拟填埋场浸出液作用下的渗透性能的变化情况. 模拟浸出液为填埋场中较为常见的酸和碱 (0.1mol/L HCl , 0.1mol/L NaOH 溶液) 以及已鉴别的 25 种常见污染物之一的四氯化碳有机溶剂. 所测得的渗流结果与渗流液为水的试样的测试结果相比较. 土柱取 $h = 1 \text{cm}$, 压力差 $h_w = 0.4 \text{MPa}$, 时间间隔 $\Delta t = 7200 \text{s}$. 测试结果见表 4. 土柱 1, 土柱 2, 土柱 3 和土柱 4 的过流面积分别为 7.69cm^2 , 7.74cm^2 , 8.60cm^2

和 8.97cm^2 ; 渗流液分别为水, 0.1mol/L HCl , 0.1mol/L NaOH 和 CCl_4 .

表 4 高压土柱法测模拟浸出液作用下膨润土试样的渗透系数 $\times 10^{-11}/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$

试样	土柱 1	土柱 2	土柱 3	土柱 4
人工钠土(预水化)	4.0	4.0	4.0	4.3
加入 15% 聚丙烯酸酯类乳液	2.8	2.8	2.8	2.9
加入 15% PM 植物胶	2.0	2.0	1.5	2.0

由表 4 可知, 胶粘剂的加入能降低膨润土的渗透性能, 所选胶粘剂在适当养护条件下能够与土壤颗粒充分接触达到较好的粘结作用. 胶连结构的形成并没有使土壤组织因为被隔离而失去膨润土原有的特性. 相反, 胶粘剂分子能进入土壤空隙空间, 起到一定的阻水作用. 由表 4 可知, 经过预水化、充分养护的膨润土及其卷材试样与有机溶剂和无机酸、碱等多种沥滤液相遇时, 其渗透性能无显著变化. 预水化过程相当重要, 卷材只有在预水化处理后才能保证膨润土吸附水分, 膨胀并转变成整体块状水力阻挡层. 实验表明膨润土及其卷材试样与模拟浸出液间的化学配伍性较好, 适于作为填埋场的衬层材料.

2.4 常水头下膨润土长期渗透柱实验结果

采用长期渗透柱对密度 $1.2\text{g}/\text{cm}^3$, 厚度 1cm 的膨润土防渗卷材进行了为期 2 个月的测试, 测试水头为 90cm , 水力坡度为 90. 测试过程中未发现有渗流液发生.

膨润土卷材的自愈合检测: 采用表面皿检测及长期渗透柱测试 2 种方法. 在表面皿膨润土层的裂缝或缺口处加注少量水以后, 土壤材料立即膨胀, 絮状土壤逐渐填充裂缝, 在 2h 内基本愈合. 人为破损后的膨润土防渗卷材置于长期渗透柱底部, 测试水头为 90cm , 水力坡度为 90, 历时 20d. 实验刚开始时有少量渗流液流出, 第 2 天后直至实验结束, 再未发现有渗流液产生.

相邻卷材搭接部分防渗性能的测试: 将重

叠放置的 2 块卷材置于长期渗透柱底部, 测试水头为 90cm , 水力坡度为 90, 历时 1 个月, 实验过程中未发现有渗滤液产生.

以上实验结果表明膨润土卷材具有良好的自封闭性, 在材料受损的情况下也能够通过自封闭作用达到较好的“焊接”效果.

3 结语

将膨润土和胶粘剂加以混合, 结合国外先进的粘结工艺, 使之通过胶粘剂的粘结力成为薄型卷材, 外用有机薄膜材料封装, 制成防渗卷材. 通过实验对膨润土类型、外包装用有机材料及胶粘剂的确定、卷材的成型工艺及卷材的渗透性能作了比较详细地研究. 结果表明, 钠基膨润土的渗透性能优于钙基膨润土. 在人工钠土中无论是加入聚丙烯酸酯类乳液还是 PM 植物胶, 在掺加的比例一定时, 随着密度的增大, 渗透系数下降, 密度较低时尤为明显; 在相同密度下, 随着掺加的比例增大, 渗透系数下降. 人工钠土的渗透系数与水力坡度呈线性关系, 水力坡度须大于起始值 i_0 , 才可能产生渗流液. 膨润土及其胶粘剂卷材与模拟浸出液间的化学配伍性较好. 膨润土卷材具有良好的自封闭性, 在材料受损的情况下也能够通过自封闭作用达到较好的“焊接”效果. 因此本研究开发的膨润土卷材适合于作为填埋场的衬层材料.

参考文献:

- 1 Leslie A Crawford. Moisture Impervient Barrier and Method for Making Same. US Patent, PN 4565468, Jan. 21, 1986.
- 2 中国专利文献. 主要由底层可膨胀粘土层和覆盖层组成的水和/或油不可透密封垫. CN/05578A, 1991.
- 3 Bryan M McGroarty, Patrick J McGroarty. Water Barrier. US Patent, PN 4693923, Sep. 15, 1987.
- 4 Fred Sture. Geomembrane-Clay Composite Liners. Geotextiles and Geomembranes 1991, 10: 177~186.
- 5 王孟钟, 黄应昌. 胶粘剂应用手册. 北京: 化学工业出版社, 1993. 14, 260~265.