

填埋场粘土类防渗系统研究进展*

陈永贵^{①②③} 叶为民^① 张可能^③

(^①同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室 上海 200092)

(^②长沙理工大学土木与建筑学院 长沙 410076)

(^③中南大学地学与环境工程学院 长沙 410083)

摘要 作为防止污染物扩散的防渗系统是填埋场中最重要的部分之一。在总结国内外众多有关填埋场粘性土防渗系统研究成果的基础上,阐述了粘土类防渗系统的工作机理;从粘性土阻滞特性、污染物运移、改性与替代材料以及防渗系统设计等4个方面综述了粘土类防渗系统研究的最新进展;并据此认为,非饱和和渗透特性、吸附效应及基于吸附-扩散效应的设计方法等将成为今后填埋场粘性土防渗系统研究的主要问题。

关键词 填埋场 粘土 防渗系统 吸附 污染物

中图分类号:TU 473 **文献标识码**:A

CURRENT STATUS OF CLAYEY SEEPAGE CONTROL SYSTEM FOR MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILL

CHEN Yonggui^{①②③} YE Weimin^① ZHANG Keneng^③

(^①Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092)

(^②School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076)

(^③College of Geoscience and Environmental Engineering, Central South University, Changsha 410083)

Abstract The seepage control system in municipal solid waste (MSW) landfill is to prevent the spread of pollutants. This paper presents a literature review of the studies on clayey seepage control systems in MSW landfills. It further presents the mechanism of clayey seepage control system. The developments of the studies of the clayey seepage control systems in MSW landfills include the retardation characteristics, the contaminant transport, the modification and substitute, and the design on the seepage control system. It is pointed out that the unsaturated permeability, adsorption effect and optimize design based on adverse-adsorption are the key topics in the future study of clayey seepage control systems for MSW landfills.

Key words Municipal solid waste, Landfill, Seepage, Clay, Pollution

* 收稿日期:2008-08-18;收到修改稿日期:2008-09-29.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40572161;40728003;40772180;40802064),中国博士后科学基金资助项目(20080430680),上海市博士后科研资助计划项目(08R214155),湖南省自然科学基金资助项目(07JJ4012),湖南省教育厅资助科研项目(06C093),上海市重点学科(工程地质)资助项目(B308).

第一作者简介:陈永贵,工程地质专业. Email: yg - chen@163. com

1 引言

如何高效、安全地处理城市生活垃圾已成为城市发展中急需解决的主要问题之一。无论在发达国家还是发展中国家,卫生填埋至今仍然是最普遍使用的处理方法。我国自 20 世纪 80 年代开始建设垃圾填埋场,据统计,截至 2005 年底,全国 661 个城市中共有运行的生活垃圾填埋场 372 座,分布在 297 个城市^[1]。研究表明,作为防止污染物扩散的防渗系统是填埋场中最重要的部分之一^[2],目前国际上主要倾向于采用压实粘土衬垫(CCL)、土工合成粘土衬垫(GCL)或高密度聚乙烯土工膜(HDPE)。而以粘土矿物为主要成分的压实粘土是最适合的人工防渗材料,它具备吸附污染物的化学屏障^[3,4]和阻止地下水渗流的机械屏障等双重功能。

填埋场防渗系统的研究涉及岩土工程、环境工程、土壤科学、化学与化工工程、生态学、卫生与防护以及测试技术与数值分析等多学科领域,是介于这些学科边缘的交叉学科。随着人们环境意识的增强,这一问题成了环境岩土工程界研究的热点之一。在国外,如美国环保总局、Wayne State 大学、加拿大 Western Ontario 大学、英国 Cambridge 大学等机构和学校都有许多研究填埋场防渗系统尤其是粘土防渗衬垫的经验。在国内,自 20 世纪 90 年代我国第一座卫生填埋场——杭州天子岭填埋场建成投入使用后,研究人员在这方面也开展了积极工作。但与国外相比,我国对粘土类防渗系统的研究工作相对滞后,缺乏系统、全面的研究。

2 粘土类防渗系统工作机理

为了达到卫生填埋的目的,填埋场由组合衬垫系统、渗滤液收集和排除系统、废气收集排放系统以及封顶系统组成(图 1)^[5],在组合衬垫系统和封顶系统中都设有防渗层。

垃圾卫生填埋处置中,作为防渗系统的压实粘土衬垫的设计功能是,依靠其低渗透特性阻止填埋场内渗滤液向外渗漏,将垃圾与周围环境隔开以免垃圾中的有害物质污染周围的土地和地下水^[6]。为此,美国有关规范限制衬垫之上渗滤液的最大水头在 30 cm 以内^[7],以降低水头梯度,减小渗滤液通过防渗衬垫层产生的渗流量;中华人民共和国行业标准《城市生活垃圾卫生填埋技术规范》(CJJ17 -

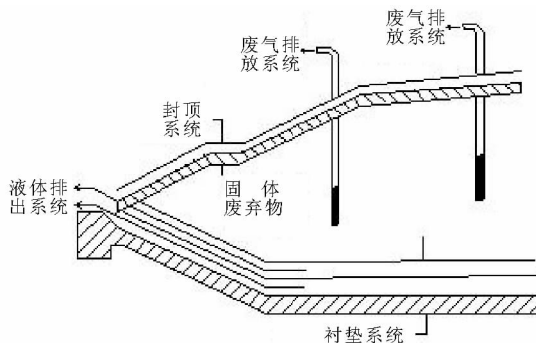


图 1 城市固体废弃物填埋场示意图

Fig. 1 Sketch map of MSW landfill

2004)^[8]也明确规定压实后的粘土衬层饱和渗透系数应小于 $1.0 \times 10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,厚度应不小于 2m。同时,由于粘性土具有较大的比表面积、阳离子交换容量和强烈的亲水性,对渗滤液中可溶性污染物具有极强的吸附作用,在阻止渗滤液运移过程中可以吸附部分污染物使其滞留在防渗系统内,进一步形成屏障阻止污染物迁移^[9]。

近年来,中南大学开发出以粘土为主要成分的粘土固化注浆帷幕^[4]在南昌、长沙、贵阳、昆明等地的填埋场建设中已取得了良好的防渗效果和社会经济效益。由于粘性土具有较大的比表面积和较强的吸附能力,污染物在粘土固化注浆帷幕中运移时将发生弥散、转化、吸附与交换等反应,不断发生质和量的变化,在各种作用的综合影响下,污染物浓度由进液端 C_0 逐渐过渡到出液端 C_L ,粘土固化注浆帷幕完成对渗滤液的污染控制(图 2)。

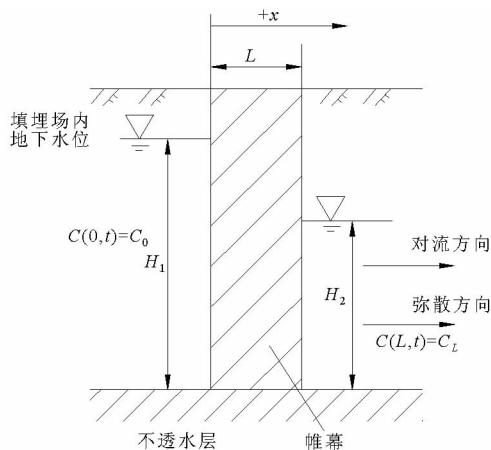


图 2 粘土固化注浆帷幕工作机理

Fig. 2 Mechanism of clay - solidified grouting curtain

3 粘性土阻滞特性研究

3.1 渗透特性

在填埋场中建立的防渗系统,主要是依靠其低渗透性来阻止有害气体和渗滤液的渗出,同时也防止地下水浸入填埋场,造成渗漏液量的大幅上升。因此,抗渗是防渗系统的最基本要求,渗透系数是评价防渗功能的关键指标。

3.1.1 防渗层渗透特性

国外对填埋场压实粘土材料及其渗透性问题的研究起步较早,最深入最完善的应是有关土工参数对渗透性能影响的研究(Purdy 和 Suryasmita, 2006^[10]),研究表明,大量的粘土均能满足压实后渗透系数小于 $1.0 \times 10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的要求。

由于填埋场渗滤液成分复杂,污染物含量高,对不同的污染物质,在渗滤液水力梯度和浓度梯度作用下,防渗系统的渗透特性也将发生变化。研究表明,防渗系统的渗透特性不仅与粘性土土工参数有关,同时也受到污染物种类、溶液浓度、pH 值、盐度、温度等因素的影响^[11,12]。实际上,当渗滤液进入防渗层后,渗滤液中的碱基和酸基使粘土中的某些矿物质发生溶解,通过离子吸附或交换作用改变粘土结构,而且渗滤液中的重金属、碳酸盐等物质由于物理或化学反应产生的絮凝和沉淀作用,最终导致防渗层组分、结构、孔隙等发生变化,渗透性能随之改变。

3.1.2 主要影响因素

对防渗系统防渗能力的影响,一般主要有以下几方面:(1)粘土的渗透性。粘土的压实性和渗透稳定性对防渗系统的渗透特性起控制性作用。(2)防渗系统所处的地质条件。地质条件对防渗系统稳定性和耐久性影响很大。大量的工程实践表明,防渗系统抗渗效果不佳或耐久性较差,绝大多数发生在穿过幕区的断层,挤压破碎带或软弱夹层地段。当这些区域的水文地质条件发生变化,产生高压渗流水时,在防渗系统中极易形成渗水通道,加速其防渗性能的衰减,甚至破坏系统的渗透稳定。(3)渗滤液的性质。渗滤液对防渗系统防渗能力的衰减程度由许多因素所决定,如渗滤液的化学成分、渗滤液浓度,渗滤液的流速、流量和渗压等。(4)施工工艺。防渗系统的防渗性能与所用粘土材料质量、品种以及相应的施工工艺有关。

国内对粘土防渗特性的研究主要是结合工程实

践,侧重于对不同粘土的渗透系数测定,为填埋场防渗系材料的选择提供可行性分析和技术支持。

3.2 吸附特性

早在 1976 年 Griffin 就研究了粘土矿物吸附填埋场渗滤液中铅离子的性能^[13],并相继研究了粘土矿物吸附铜、锌、镉、铬以及砷和硒的性能。目前仍有许多学者从事这一研究,Pivato 和 Raga(2006)^[14]等人通过对粉末状态和压实状态下的粘土分别进行吸附试验研究,发现粘性土对污染物的吸附可以加速污染物在压实粘土衬垫中的衰减,发挥化学屏障功能。

在我国,对粘土弥散、吸附等环境特性方面的认识和研究尚处于起步阶段,刘长礼(2000)^[15]、成春奇(2001)^[16]和吴大清(2003)^[17]等学者主要是从土壤学、矿物学、地球化学等方面对粘性土的吸附性进行研究。近年来,有学者从岩土工程角度,特别是从粘土在填埋场中应用方面,对粘性土的吸附特性进行了探索。栾茂田等(2005)研究发现,压实粘土衬垫的吸附特性对屏蔽污染物可以起到控制性作用^[18]。陈永贵等(2007)^[19]基于渗透和弥散作用,通过土柱试验和数值计算研究发现粘土固化注浆帷幕的渗透性和吸附性对渗滤液的运移具有重要的控制作用。对比国内外研究现状,可以发现国内在粘土方面的研究主要从矿物学角度,且多用于对废水的处理,在填埋场应用方面的研究明显不足,且缺乏系统性。

3.3 微观结构

防渗层防渗性能的好坏及其变化取决于其微观结构,即可渗透组织的连续性和稳定性,而渗滤液中化学物质特别是电解质是造成粘土层可渗透组织产生及其连续性、状态的关键所在^[20]。Selvam 和 Barkdoll(2005)^[21]利用柔性渗透仪和环境扫描电镜,研究了粘土衬垫在化学物质渗透过程中微观结构的变化及其对渗透系数的影响机理。Leroy 和 Revil(2005)^[22]对渗滤液中的电解质在与粘土层接触过程中引起的粘土层特别是蒙脱土膨胀性能以至于防渗性能的改变进行了实验研究,并结合经典的双电层理论,提出了电解质对粘土层作用过程的模拟模型。Delage(2006)^[23]通过吸力控制试验和微观结构测试,认为水分滞留和迁移特性、以及吸力变化下的膨胀反应都与微观机理相关,并对吸附阳离子的作用进行了评价。

4 防渗层中污染物运移研究

4.1 试验研究

防渗系统的重要功能是阻止污染物的运移。国外关于污染物在粘土介质中迁移转化方面的研究和应用较早,在土柱实验和渗透实验方面进行了大量的研究工作,对有毒有害的重金属离子、挥发性有机物和放射性核废料在粘土衬层中自然渗透、迁移转化进行了研究,并对污染物在粘土中的扩散系数进行了测定。

4.1.1 污染物迁移试验

Murray 等(1997)^[24]阐述了铅在土中的分布和迁移,铅在次表土中的分布与铅在表层土的分布有关,这表明铅会沿渗流区向下流动和迁移,即使是粘粒富集的土,也会发生迁移。Edil(2003)^[25]研究了液相挥发性有机化合物(VOC)在现代填埋场合成衬垫(粘土层、土工膜、土工网等)中的运移规律。

国内在这方面的研究起步较晚,研究程度较低,实际应用较少,但广大科技工作者也做了大量的研究,研究成果集中反映了污染物在粘性土防渗层中的迁移受土层厚度、击实密度、孔隙比、矿物成分等因素以及污染物本身的浓度、离子半径等因素的影响。2005年,陈云敏等^[26]研制了室内动电模拟试验装置(图3),进行了电场、渗流场和浓度场多场耦合作用下锌离子在粘土中的迁移试验,结果表明动电作用可以有效地阻滞锌离子在粘土中的迁移。

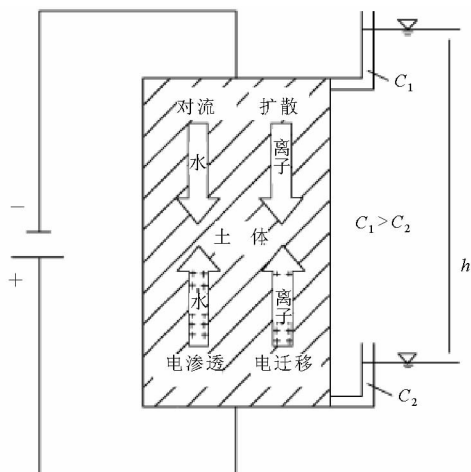


图3 多场耦合离子迁移试验原理图

Fig. 3 Concept of the experiment for heavy metal ion transport in clay under coupled flows

研究表明,即使无水头差的作用,土中或溶液中的污染物仍将在化学扩散的作用下发生迁移,且这种迁移受到离子性质和土的性质的影响。

4.1.2 水动力弥散系数测定

水动力弥散系数是描述污染物运移的重要参数,包括机械弥散系数与分子扩散系数。Ferrell 等(2002)^[27]通过化学模型模拟铅通过 10cm 厚粘土垫层的弥散运移过程,得到实验条件下的弥散系数,并计算出阻滞系数。通常不同实验条件下得到的弥散系数不同,说明模型不能包含实验过程中的所有吸附机理,因此在应用于特殊废弃场地之前,必须要根据现场数据进行修正。Du 等(2006)^[28]对日本九州地区的有明粘土和赤土作为废弃物填埋场底部粘土衬垫层的适应性进行了一系列室内扩散试验,模拟计算反演出钾离子的扩散系数,研究结果发现在混合溶液的情况下,钾离子的扩散系数较在单一溶液的钾离子的扩散系数小。为深入了解孔隙结构对膨润土阻滞污染物运移能力的影响,何俊等(2007)^[29]对 Ca^{2+} 、 Cl^{-} 和 Zn^{2+} 在不同孔隙率膨润土中的扩散进行了试验研究,结果表明随着孔隙率的增加,离子扩散系数增加,且二者之间存在指数关系。

4.2 数值模拟分析

针对正在运营或已经闭场的卫生填埋场,根据现场监测数据和填埋场结构与实际工程地质条件,预测污染物的运移及其对地下水的污染状况,也是当前研究的重要课题。有关填埋场渗滤液渗漏导致的污染时有报道,通过数值模拟与分析,有效地掌握污染物质在地下水环境中的迁移规律,精确了解污染物在防渗系统中的分布范围和发展趋势,对可能存在的污染及时采取治理措施,可以有效控制污染物质的进一步扩散,避免地表水和地下水环境遭受污染。

对污染物在粘性土介质中运移进行分析时,一般将岩土介质理想化为多孔介质,同时采用数学模型进行模拟。模型中所使用的有关参数由实验室确定,且常辅以实验室试验或现场试验予以验证。

Jin 等(1996)^[30]用一维对流-弥散-吸附模型验证了分配系数 K_d 对挥发性有机化合物在粘土垫层中运移过程的影响,数值模拟表明 K_d 对粘土垫层中挥发性有机化合物的穿透时间是个重要参数。Li 和 Wu 等(1999)^[31]应用多组分反应性溶质运移模型对含有 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 等 4 种重金属

的两种淋滤液在高岭粘土中的运移进行了数值模拟,结果表明 pH 值对不同重金属离子的迁移速率影响不同。Chang 等(2001)^[32]采用有限差分法研究了铜和镉在红粉质粘土中的运移,结果表明采用 Freundlich 非线性阻滞系数模拟的渗透曲线与实验结果吻合得较好。

城市卫生填埋场防渗系统对于减小渗滤液扩散的有效性同时得到了国内学者的广泛关注。刘建国等(2004)^[33]通过对填埋场不同防渗配置下渗滤液及污染物泄漏的计算,发现难降解的污染物一旦穿透粘土衬层后,其泄漏量较为可观。同时,研究者们发现,即使防渗系统的渗透系数很小,在地下水渗流速度可以忽略的情况下,污染物的运移依然存在,并且指出,在进行填埋场防渗系统设计时,仅仅将渗透系数作为控制指标是不全面的,必须同时考虑粘土对污染物的吸附效应^[34,35]。

5 粘土基防渗材料研究

5.1 改性材料研究

为了寻找经济、有效的防渗层,研究人员对粘土进行了各种改性。这方面的研究工作主要有两种思路,一是通过在粘性土中添加一种材料从而形成新的复合防渗材料,增加其抗渗阻滞性能,另一种是在一定条件下加入改性添加剂使粘土矿物(多为膨润土)发生物理化学变化,形成一种新的防渗材料,使用的改性添加剂大多是有机物质,改性后的有机粘土矿物具有较强的吸附性能和较好的力学特性,能够有效控制填埋场渗滤液的运移。

5.1.1 复合防渗材料

Ekrem 和 Suat(2004)^[36]研究了在粘土中掺入硅粉后其抗渗性能和强度性能显著提高。Chun 等(2006)^[37]通过试验研究得出当砂、黄土和膨润土混合物中砂和黄土的比例为 8:2,膨润土含量为 2% 时配比最优。

黄婉荣等(2000)^[38]经试验发现粘土中加入 30%~40% 砂时,可获得低收缩率的压实粘土砂土混合材料,较好解决了填埋场施工过程中压实粘土衬垫的干裂问题。史敬华和赵勇胜等(2003)^[39]提出了一种复合土(石灰+粘性土+膨润土)作为改性衬里。赵晓霞和王宪恩(2005)^[40]研究后发现粉质粘土+蒙脱土+石灰组成的复合防渗层在三者质量比为 2:8:1 时的防渗性能达到最佳,而对于不

同种类的粘土当中加入不同含量的膨润土时,抗压强度可达到最大。

5.1.2 有机改性粘土材料

Lo(1998)^[41]研究显示,将质量比为 20% 的膨润土交换为 20% 的有机膨润土,土壤垫层的阻隔能力增长了 6 倍,这说明有机膨润土对渗滤液中有机污染物迁移有显著的影响。国内外研究均表明,通过对粘性土的有机改性处理,可以极大的改进膨润土的吸附性和膨胀性,有效增强有机膨润土防渗层对有机污染物的吸附能力,从而使防渗层有效去除溶解的污染物和控制渗滤液的渗透,显著延缓污染物穿透防渗层的速度。

5.2 替代材料研究

虽然粘性土是填埋场防渗系统的理想选材,但是随着填埋场建设的快速发展,可供使用的粘性土原料越来越少,同时考虑到建设成本,也要求工程建设者们能够就地取材,寻找可替代材料,以节省工程造价。目前,针对疏浚土、下蜀黄土和碱厂白泥等材料的吸附、渗透和强度特性研究已经展开,并将这些废弃物作为填埋场防渗材料加以利用,取得了较好效果。

6 防渗系统设计研究

6.1 复合防渗层的设计

为了更有效防止渗滤液泄漏造成污染,董军等(2005)^[42]建议在垃圾填埋场底部设计防渗型和反应型并存的双层防渗系统,其中防渗型防渗层主要阻止渗滤液流动,反应型防渗层的主要用于控制污染物的运移。陈延君等(2005)^[43]根据双层矿物基底衬里(DMBL)概念,利用改性膨润土设计了新型垃圾填埋场的底部防护系统。

6.2 基于吸附-扩散效应的设计方法

当前国内外的大多数填埋场的设计规程中均将渗透系数的最低值视作评价防渗垫层或其他防渗性能极为重要参数。然而,污染物由于吸附而滞留在防渗系统中,同时,当水流速度很小时,污染物就会以扩散为主发生运移。因此,吸附-扩散效应对污染物运移具有重要影响。刘长礼等(2000, 2004)^[15,44]曾提出了粘性土衬垫的“截污容量”概念,强化粘性土防渗层对污染物的净化作用。Bar-

telt - Hunt (2006) 等^[45]、张金利 (2005)^[46]、陈永贵 (2007)^[19] 等将吸附 - 扩散效应纳入粘土类防渗系统的功能作用,通过试验研究、理论分析和数值模拟技术对填埋场防渗层的合理设计进行了初步研究。

7 发展与展望

对于填埋场以粘性土为主的防渗材料、防渗结构及其渗透性能的变化规律研究,并取得了丰富成果,为今后进一步研究奠定了基础。但对粘土防渗层的非饱和渗透特性、污染物的吸附与阻滞效应、新的可替代防渗材料等方面的研究还有待进一步加强。笔者认为今后的研究热点有:

(1) 非饱和渗透特性研究。包括粘性土防渗材料的土 - 水特征、土 - 污染物特征,渗透性能及其本构模型,非饱和土层中的污染物多相迁移和吸力的关系问题。

(2) 吸附效应研究。包括分配系数和阻滞因子的研究问题,污染物吸附对微观结构及渗透性能影响的机理研究,以及基于吸附效应的新材料研究。

(3) 基于吸附 - 扩散效应的设计方法研究。包括填埋场防渗设计标准的确定问题,将吸附效应引入粘土类防渗系统的功能评价,建立基于对流 - 吸附效应的粘土类防渗系统设计理论与方法体系。

参 考 文 献

- [1] 环境技术网. 我国城市生活垃圾处理官方统计资料[EB/OL]. <http://www.cnjlc.com/sw/6/2007080813137.html>, 2007 - 08 - 08/ 2008 - 02 - 21.
Environmental Technology Network. Official statistics of urban garbage disposal in China. <http://www.cnjlc.com/sw/6/2007080813137.html>, 2007 - 08 - 08/ 2008 - 02 - 21.
- [2] 陈云敏, 谢海建, 柯瀚, 等. 挥发性有机化合物在复合衬里中的一维扩散解[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(9): 1076 ~ 1080.
Chen Yunmin, Xie Haijian, Ke Han, et al. Analytical solution of one - dimensional diffusion of volatile organic compounds (VOCs) through composite liners. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(9): 1076 ~ 1080.
- [3] Pivato A, Raga R. Tests for the evaluation of ammonium attenuation in MSW landfill leachate by adsorption into bentonite in a landfill liner[J]. Waste Management, 2006, **26**(2): 123 ~ 132.
- [4] Chen Y G, Zhang K N, Zou Y S, Deng F Y. Removal of Pb²⁺ and Cd²⁺ by adsorption on clay - solidified grouting curtain for waste landfills[J]. Journal of Central South University of Technology, 2006, **13**(2): 166 ~ 170.
- [5] 周正兵, 王钊, 费香泽. 用于固体废弃物填埋场中的两种复合防渗系统的比较[J]. 环境工程, 2002, **20**(3): 55 ~ 60.
Zhou Zhengbing, Wang Zhao, Fei Xiangze. Comparison of two kinds of composite impervious systems used in solid waste landfills. Environmental Engineering, 2002, **20**(3): 55 ~ 60.
- [6] 唐晓武, 史成江, 林廷松, 等. 混合粉质粘土和疏浚土填埋场防渗垫层的环境土工特性研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(6): 626 ~ 631.
Tang Xiaowu, Shi Chengjiang, Lin Ting - Song, et al. Geoenvironmental properties of silty soil mixed with dredged soil applied as clay liner of landfill. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(6): 626 ~ 631.
- [7] 柯翰, 黄传兵, 陈云敏. 成层介质中填埋场渗滤液的最大饱和度和深度[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(10): 1194 ~ 1197.
Ke Han, Huang Chuanbin, Chen Yunmin. Maximum saturated depth of landfill leachate in layered drainage media. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(10): 1194 ~ 1197.
- [8] 中华人民共和国行业标准编写组. 城市生活垃圾卫生填埋技术规范(CJJ17 - 2004)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Technical code for municipal solid waste sanitary landfill (CJJ17 - 2004). Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.
- [9] Ayala J, Vega J L, Alvarez R, Loredo J. Retention of heavy metal ions in bentonites from Grau Region (Northern Peru)[J]. Environmental Geology, 2008, **53**(6): 1323 ~ 1330.
- [10] Purdy S, Suryasmita V. Comparison of hydraulic conductivity test methods for landfill clay liners[C]. Geotechnical Special Publication: Advances in Unsaturated Soil, Seepage, and Environmental Geotechnics - Proceedings of the GeoShanghai Conference, Shanghai, 2006. ASCE, 2006, (148): 364 ~ 372.
- [11] Moutier M, Shainberg I, Levy G J. Hydraulic gradient and wetting rate effects on the hydraulic conductivity of two calcium vertisols[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, **64**(4): 1211 ~ 1219.
- [12] Hamdia N, Dellab M, Srasra E. Experimental study of the permeability of clays from the potential sites for acid effluent storage[J]. Desalination, 2005, (185): 523 ~ 534.
- [13] Griffin R A, Shimp N F. Effect of pH on exchange - adsorption or precipitation of lead from landfill leachates by clay minerals[J]. Environmental Science and Technology, 1976, **10**(13): 1256 ~ 1261.
- [14] Pivato A, Raga R. Tests for the evaluation of ammonium attenuation in MSW landfill leachate by adsorption into bentonite in a landfill liner[J]. Waste Management, 2006, **26**(2): 123 ~ 132.
- [15] 刘长礼, 王秀艳, 张云. 城市垃圾卫生填埋场粘性土衬垫的截污容量及其研究意义[J]. 地质评论, 2000, **46**(1): 79 ~ 85.
Liu Changli, Wang Xiuyan, Zhang Yun. Filtration capability of

- clayey Soil Liner for garbage sanitary burial fields and its significance. *Geological Review*, 2000, **46**(1): 79 ~ 85.
- [16] 成春奇. 粘土对重金属污染物容纳阻滞能力研究[J]. *水文地质工程地质*, 2001, (6): 12 ~ 17.
Chen Chunqi. Retention capacity of heavy metal on clay. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2001, (6): 12 ~ 17.
- [17] 吴大青, 刁桂仪, 彭金莲. 高岭石等粘土矿物对五氯苯酚的吸附及其与矿物表面化合态关系[J]. *地球化学*, 2003, **32**(5): 501 ~ 505.
Wu Daqing, Diao Guiyi, Peng Jinlian. Adsorptions of pentachlorophenol onto clay minerals and relationship with their surface speciation. *Geochimica*, 2003, **32**(5): 501 ~ 505.
- [18] 栾茂田, 张金利, 杨庆. 污染物运移过程的一维数值分析[J]. *岩土工程学报*, 2005, **27**(2): 185 ~ 189.
Luan Maotian, Zhang Jinli, Yang Qing. One - dimensional numerical analyses of migration processes of pollutants through a clay liner considering sorption of aquifer. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, **27**(2): 185 ~ 189.
- [19] 陈永贵, 邹银生, 张可能, 等. 重金属污染物在粘土固化注浆帷幕中的运移规律[J]. *岩土力学*, 2007, **28**(12): 2583 ~ 2588.
Chen Yonggui, Zou Yinsheng, Zhang Keneng, et al. Heavy metals transport process through clay - solidified grouting curtain in waste landfills. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, **28**(12): 2583 ~ 2588.
- [20] Pusch R. Microstructural evolution of buffers[J]. *Engineering Geology*, 1999, **54**(1 ~ 2): 33 ~ 41.
- [21] Selvam A, Barkdoll B. Clay permeability changes - flexible wall permeameter & environmental scanning electron microscope[A]. In: Conference Proceeding Of World Water & Environmental Resources Congress [C]. Anchorage, AK, USA: ASCE, 2005: 302.
- [22] Leroy P, Revil A. A triple - layer model of the surface electrochemical properties of clay minerals[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, **270**(2): 371 ~ 380.
- [23] Delage P. 微观结构对用于工程屏障的高压实膨胀粘土性状的一些作用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, **25**(4): 721 ~ 722.
Delage P. Some microstructure effects on the behaviour of compacted swelling clays used for engineered barriers. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, **25**(4): 721 ~ 722.
- [24] Murray K, Bazzi A, Carter C, et al. Distribution and mobility of lead in soils at an outdoor shooting range [J]. *Journal of Soil Contamination*, 1997, **6**(1): 79 ~ 93.
- [25] Edil T B. A review of aqueous - phase VOC transport in modern landfill liners[J]. *Waste Management*, 2003, **23**(7): 561 ~ 571.
- [26] 陈云敏, 叶肖伟, 张民强, 等. 多场耦合作用下重金属离子在粘土中的迁移性状试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2005, **27**(12): 1371 ~ 1375.
CHEN Yunmin, YE Xiaowei, ZHANG Minqiang, Et Al. Experimental study on heavy metal ion transport in clay under coupled flows. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, **27**(12): 1371 ~ 1375.
- [27] Ferrell Ray E, Aagaard P, Forsman J. Application of a geochemical transport model to predict heavy metal retention (Pb) by clay liners[J]. *Applied Clay Science: Clay barriers and waste management*, 2002, **21**(1 ~ 2): 59 ~ 66.
- [28] Du Y J, Liu S Y, Hayashi S. Some factors controlling diffusive transport of potassium ion through clayey soils[J]. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2006, **22**(1): 106 ~ 111.
- [29] 何俊, 施建勇, 廖智强, 等. 膨润土中离子扩散特征试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, **28**(4): 831 ~ 836.
He Jun, Shi Jianyong, Liao Zhiqiang, et Al. Test of ions diffusion in bentonite. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, **28**(4): 831 ~ 836.
- [30] Jin A, Chang S Y. Sensitivity test for partitioning of VOCs in a clay liner transport model[A]. *Proceedings of the International Conference on Solid Waste Technology and Management [C]*, 1996, 1 ~ 8.
- [31] Li L Y, Wu G X. Numerical simulation of transport of four heavy metals in kaolinite clay[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1999, **125**(4): 314 ~ 324.
- [32] Chang C M, Wang M K, Chang T W, et al. Transport modeling of copper and cadmium with linear and nonlinear retardation factors[J]. *Chemosphere*, 2001, **43**(8): 1133 ~ 1139.
- [33] 刘建国, 聂永丰, 王洪涛, 等. 填埋场不同防渗配置下渗滤液及污染物泄漏[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2004, **44**(12): 1684 ~ 1687.
Liu Jianguo, Nie Yongfeng, Wang Hongtao, et al. Leachate and contaminant leakage in various types of landfill liners. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2004, **44**(12): 1684 ~ 1687.
- [34] 钱学德, 施建勇, 郭志平, 等. 粘土衬垫系统污染物迁移规律研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2004, **32**(4): 415 ~ 420.
Qian Xuede, Shi Jianyong, Guo Zhiping, et al. Regularity of contaminant transport through geosynthetic clay liners. *Journal of Hehai University (Natural Sciences)*, 2004, **32**(4): 415 ~ 420.
- [35] 唐晓武, 罗春泳, 陈云敏, 等. 粘土环境岩土工程特性对填埋场衬垫防渗标准的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, **24**(8): 1396 ~ 1401.
Tang Xiaowu, Luo Chunyong, Chen Yunmin, et al. Effect of geoenvironmental characteristics of clay on standard of landfill liner. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(8): 1396 ~ 1401.
- [36] Ekrem K, Suat A. The positive effects of silica fume on the permeability, swelling pressure and compressive strength of natural clay liners[J]. *Engineering Geology*, 2004, **73**(1 ~ 2): 145 ~ 156.
- [37] Chun B S, Park J W, Lee Y J, Kim B H. Geotechnical characterization of permeable barriers mixture of sand, loess and benton-

- ite[A]. In: Proceedings of the ISSMGE 5th Int. Congress[C]. Cardiff, Wales, United Kingdom; Thomas Telford Services Ltd, 2006, 415 ~ 422.
- [38] 黄婉荣, 郭志平. 填埋场压实粘土衬垫防干裂试验研究[J]. 河海大学学报, 2000, **28**(6): 19 ~ 22.
Huang Wanrong, Guo Zhiping. Experimental research on preventing desiccation cracking of compacted clay liner in municipal solid waste landfill. Journal of Hehai University (Natural Sciences), 2000, **28**(6): 19 ~ 22.
- [39] 史敬华, 赵勇胜, 洪梅. 垃圾填埋场防渗衬里粘性土的改性研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, **33**(3): 355 ~ 359.
Shi Jinghua, Zhao Yongsheng, Hong Mei. A study on modification of clayey soil as landfill liner material. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2003, **33**(3): 355 ~ 359.
- [40] 赵晓霞, 王宪恩. 石灰在填埋场防渗层中的改性研究[J]. 环境科学与技术, 2005, **28**(5): 32 ~ 34.
Zhao Xiaoxia, Wang Xian'en. Lime - modified impermeable layer in landfill. Environmental Science and Technology, 2005, **28**(5): 32 ~ 34.
- [41] Lo I M C, Mak Raymod K M. Transport of phenolic compounds through a compacted organoclay liner [J]. Water Science and Technology, 1998, **38**(2): 143 ~ 150.
- [42] 董军, 赵勇胜, 杨继东, 等. 沸石改性天然粘土防渗层性能研究[J]. 环境科学与技术, 2005, **28**(4): 92 ~ 94.
- Dong Jun, Zhao Yongsheng, Yang Jidong, et al. . Study on performance of zeolites modified clay - liners. Environmental Science and Technology, 2005, **28**(4): 92 ~ 94.
- [43] 陈延君, 王红旗, 赵勇胜, 等. 用改性膨润土作垃圾填埋场底部衬里的试验[J]. 中国环境科学, 2005, **25**(4): 437 ~ 440.
Chen Yanjun, Wang Hongqi, Zhao Yongsheng, et al. . Test studies on using modified bentonite as the base bottom liner in the garbage landfill. China Environmental Science, 2005, **25**(4): 437 ~ 440.
- [44] 刘长礼, 张云, 张胜, 等. 填埋场粘性土防渗层中强化微生物对垃圾污染物的净化作用[J]. 地球科学进展, 2004, **19**(增): 506 ~ 510.
Liu Changli, Zhang Yun, Zhang Sheng, et al. . Purification of artificial microbe to waste pollutants in the clayey soils lines under landfill. Advance in Earth Sciences, 2004, **19**(Suppl.): 506 ~ 510.
- [45] Bartelt - Hunt S L, Culver T B, Smith J A, Matott L S, Rabideau A J. Optimal design of a compacted soil liner containing sorptive amendments. Journal of Environmental Engineering, 2006, **132**(7): 769 ~ 776.
- [46] 张金利. 填埋场污染物运移数值分析及安全防渗系统设计方法探讨[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
Zhang Jinli. A study on numerical analysis of pollutant transport of municipal solid wastes and design method of safety lining system of landfill. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.