

文章编号: 1000-7598-(2009)01-0091-08

垃圾卫生填埋中的一些岩土工程技术

卢应发^{1,2}, 陈朱蕾³, 谢文良², 吕志中³

(1.三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2.华中科技大学 土木工程与力学学院, 武汉 430074;
3.华中科技大学 环境科学与工程学院, 武汉 430074)

摘 要: 垃圾卫生填埋是环境科学的重要研究内容, 是一项综合性的研究课题。垃圾卫生填埋场高度和垃圾坝(或坑)深度的确定主要建立在岩土工程的稳定性理论基础。在垃圾卫生填埋场中主要解决的防渗问题也是利用填埋场地质材料的渗透性质和现行的土工防渗技术, 同时利用垃圾自身的物理力学特性解决填埋场排气等问题, 而垃圾卫生填埋场的污水必须进行处理。从垃圾填埋场地质材料和垃圾自身的力学特性, 结合某市垃圾卫生处理场实例对垃圾卫生填埋场中的一些岩土工程技术进行分析。

关 键 词: 垃圾卫生填埋; 垃圾坝; 稳定性; 土工织物防渗; 污水处理
中图分类号: X 33 **文献标识码:** A

Application of geotechnics to sanitation landfill of refuse

LU Ying-fa^{1,2}, CHENG Zhu-lei³, XIE Wen-liang², LÜ Zhi-zhong³

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. College of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
3. College of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The more rapidly the national economics develops, the more important the environmental sciences research is; the environmental sciences research must be emphasized. The sanitation landfill of refuse is main content of environmental science study, and is the comprehensive research topic. The height of refuse disposal plant and of refuse dam is estimated based on the stability theories of civil engineering; the seepage subject is of important in refuse sanitation disposal plant and it is resolved based on the seepage properties of geological material and on the technical of anti-seepage by geotechnical material. At the same, the discharge of gas in the refuse disposal plant is disposed by the physico-mechanical behaviors of refuse. The waste water of the sanitation disposal plant must be treated. Some geotechnics are analyzed for the refuse sanitation disposal plant from physico-mechanical behaviors of geomaterials in the site and of refuse itself by an example in a city.

Key words: refuse sanitation landfill; refuse dam; stability; anti-seepage by geotextile; waste treatment

1 前 言

垃圾卫生填埋是国内外广泛采用的一种固体废弃物处理技术^[1-3], 20 世纪 80 年代中期人们就开始研究垃圾填埋处置技术, 特别是近十年来, 其研究日新月异。主要研究的内容包括: 垃圾填埋场的场地选择、城市垃圾的成分分析及其工程性质、垃圾填埋场分成覆盖黏性土层的工程性质、垃圾填埋场的结构优化设计; 渗流理论及防渗技术研究、垃圾坝的设计及稳定性计算、渗滤液的运移模型研究和

垃圾填埋场的渗滤液对地下水和地表水的污染及处理等, 这些相关研究取得了很多研究成果^[1-5], 为垃圾场研究及设计打下了坚实的基础。

垃圾卫生填埋是我国目前垃圾卫生处理的主要手段。垃圾卫生填埋按其组成部分的不同功能, 可以分为垃圾填埋场库区坝体(或防渗支护结构)、渗滤液管道收集系统、防渗系统、沼气收集系统、雨水排放系统、污水处理系统以及环境监测系统^[6]等。

在垃圾卫生填埋的防渗支护结构(或垃圾填埋场库区坝体)的稳定性研究方面, 它与垃圾体的物

收稿日期: 2007-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 50779030), 国防科工委: 科工计[2007]838 号。

作者简介: 卢应发, 男, 1964 年生, 留法博士, 教授, 博士生导师, 楚天学者, 主要从事岩土力学及路基工程的教学和科研工作。

E-mail: Lu64@mail.hust.edu.cn

理力学性质和支护结构的物理力学性质相关。垃圾体的物理力学性质既是填埋场运营过程中所面临的问题之一,也是岩土工程问题分析研究的前提和基础,相关研究内容即垃圾体的静力力学特性和垃圾卫生填埋的稳定性研究。国外这方面的研究工作开展较早,钱学德等^[7]概括了一些发达国家垃圾体物理力学性质的研究结果,陈云敏等^[8]、张振营等^[9]在杭州天子岭生活垃圾填埋场进行了静力触探试验,对垃圾的物理力学性质进行了室内试验研究。

在垃圾卫生填埋场的防渗方面,土工合成材料黏土垫^[10-12](geosynthetic clay liner 简称 GCL)是一种新型的复合土工合成材料,具有极好的防渗隔气功能。将 GCL 引入垃圾填埋场中可以增大垃圾填埋场的容积,提高垃圾填埋场密封系统的防渗隔气性能。

在解决垃圾卫生填埋场中排水排气的岩土工程问题方面,一般是采用模型化的方法来研究垃圾填埋场中挥发气体的运移过程对于评价气体传输机制,包括气体对流、弥散和吸附解吸等行为具有重要的作用。王惠芸等^[13]对 VOC 传输过程的非稳态环境诊断模型进行描述,并采用有限差分方法用数学模型进行数值求解,定量分析挥发性气体迁移行为,这不仅为填埋气体的安全释放提供基础理论依据,而且为研究多孔介质中气体渗流的机制分析奠定基础。

在渗滤液处理方面,美国和德国的几个活性污泥法处理厂运行结果表明,通过提高污泥浓度降低污泥的有机负荷可以获得令人满意的处理效果。Venkataramani 等^[14]研究认为渗滤液中 80 % 以上的有机氮被活性污泥去除,即使进水中的有机物浓度达到 1 000 mg/L,污泥生物相也能很快适应。

本文对垃圾卫生填埋场的设计中应用到的岩土工程技术问题进行了阐述,它包括填埋场安全稳定性问题、场区内防渗问题、排水排气问题以及污水处理问题等 4 个方面,最后结合某市的垃圾卫生填埋工程的工程实例,对填埋场设计中的岩土工程技术进行了具体分析。

2 垃圾卫生填埋场岩土工程问题分析

2.1 垃圾填埋场稳定性

垃圾卫生填埋场一般分为山谷型、平地型和坑埋型,不同类型的填埋场具有不同性质的安全稳定性问题:山谷型填埋场主要面临边坡稳定性问题,平地型填埋场主要面临地基稳定性问题,而坑埋型填埋场主要面临支护结构稳定性问题^[14]。

山谷型垃圾卫生填埋场填埋体稳定性主要分为两个部分:填埋体边坡稳定性和垃圾坝稳定性。填埋场边坡稳定分析应从短期及长期稳定性两方面考虑,短期破坏通常发生在开挖期,若边坡较陡,在开挖后不久即可能发生失稳破坏,如在饱和黏土区,由于开挖使边坡内部应力很快发生重组,在潜在破坏区内孔隙水应力的增大,从而增加了发生破坏的可能性。当潜在破坏区的变形达到临界极限时,会出现明显的负超孔隙应力,使潜在破坏区的强度暂时增加,但负超孔隙应力的消散常直接导致设计不当的边坡突然破坏,这属于长期破坏问题。负超孔隙应力消散速率主要取决于黏土的固结系数和破坏区的平均深度^[15-16]。

垃圾坝稳定性分析:我国垃圾卫生处理工程大多属山谷型填埋场,山谷型填埋场通常需在山谷出口处设一垃圾坝,使填埋场形成一个相对独立的作业区,在保持填埋体的稳定性的同时,增加填埋场库容,防止雨季作业时废物被雨水冲出填埋场外。垃圾坝一般就地取材,设计成土石坝等各种形式。

垃圾坝承受的主要作用力有坝体自重、填埋体土压力、渗透压力等,这些力对垃圾坝稳定性存在影响:(1)坝体自重,是垃圾坝的主要荷载,取决于坝体材料的重度和坝体剖面尺寸。对透水坝,应对其浸润线上下部分分别取湿重度和饱和重度计算其自重。由于垃圾坝一般不太高,坝坡较缓,因此自重引起坝体破坏的可能性不大。(2)填埋体土压力,相对于填埋体而言,垃圾坝为一向填埋体方向倾斜的挡土墙,承受主动土压力。根据库仑土压力理论,可以计算主动土压力,由于填埋体的内摩擦角相对其他土体来说比较大,因此垃圾坝承受的主动土压力相对较小。(3)渗透压力,垃圾填埋场水平防渗往往采用压实黏土或高密度聚乙烯,垃圾坝内坡亦被防渗衬层所覆盖,属于不透水坝,浸润线位置很低,渗透变形微弱,化学潜蚀也可忽略。另外,填埋场底部防渗衬层对垃圾坝坝基而言相当于防渗铺盖,能够有效地降低垃圾坝坝基的水力坡度,防止垃圾坝基渗透变形过大而失稳。

平地型垃圾卫生填埋场填埋体稳定性主要为地基失稳,某些山谷型填埋场中也存在地基失稳。地基稳定性是指填埋场地基在填埋体压力和其他外荷作用下抵抗剪切破坏的能力。一般而言,平地型填埋场地基大多都是承受垂直分布荷载的软土地基,其破坏形式主要有 3 种:整体剪切破坏、局部剪切破坏和冲剪破坏,具体发生何种形式的破坏,取决于地基土体的压缩性。如果地基土体是不可压缩的,

且具有一定的抗剪强度,其破坏形式通常为整体剪切破坏;如果地基土体较为松散软弱,则其破坏形式通常为冲剪破坏;压缩性介于上二者之间的地基土体,发生局部剪切破坏的可能性较大。

填埋场软土地基中可能存在饱水的塑性软黏土或淤泥夹层,或者可能夹有砂土或粉砂薄层或透镜体。在上覆荷载作用下塑性软黏土或淤泥夹层由于透水性差,排水缓慢而使其保持很高的孔隙水压力,甚至接近于附加压力而使其有效应力趋近于0;砂土和粉砂薄层或透镜体则因透水性好,周围土体中的水分大量进入而使其孔隙水压力不断增大,有效应力不断减小,甚至接近于0,从而使其抗滑能力很低^[17-18]。

2.2 填埋场防渗工程技术

污染物(包括废弃物、浸出液和气体)的泄漏会引起环境污染,解决的办法就是作好防渗措施,既要防止污染物外渗,也要防止外水内渗(会增加浸出液量、导致堆体失稳等)。防渗结构包括底层防渗层和各级覆盖层,为人工构筑的防渗体系,涉及防渗结构功能和防渗材料性能等问题。在垃圾填埋场中合理地使用防渗材料,并做工程处理,以达到更好的防渗功能。从防渗层的角度来考虑,目前我国采用的方法有帷幕灌浆垂直防渗和铺设水平防渗衬层2种:垂直防渗在我国的山谷型填埋场采用较多,在地质条件较好的基岩上设置截污坝及帷幕灌浆垂直防渗措施。水平防渗按建设部颁布的《城市垃圾卫生填埋场标准》中规定天然黏土防渗层标准是底部和周围的黏土层厚度大于2 m,渗透系数小于 10^{-7} cm/s;人工防渗层标准是渗透系数小于 10^{-7} cm/s时抗压强度必须大于0.6 MPa,不因填埋碾压而断裂,厚薄均匀,能抵御坚硬物体的刺、划,能适应剧冷剧热变化等。目前我国填埋场的水平防渗方法采用的垫层有4种:HDPE和黏土复合衬层;膨润土防渗衬层;黏土防渗衬层和沥青混凝土衬层等^[19-21]。

2.3 填埋场排水、排气

垃圾卫生填埋场的排水分流系统主要包括两部分:一是控制地表径流,二是防止地下水浸入,其中后者是通过防渗系统和地下水导排系统处理,关键是对地表径流的控制。对于地表径流控制从3个方面加以解决:场外径流与场内雨水分流系统、作业区域与非作业区域雨水分流系统以及填埋场封场后雨水径流排出系统。场外径流与场内雨水分流系统主要是建立环场截洪沟系统。填埋场应在场内道路两侧以及填埋场四周设置环场截洪沟,或在不同

高程设置数条截洪沟,分别拦截各截洪沟外围汇水区域内的降雨。当填埋区扩展到某高程截洪沟时,就将该截洪沟排放场外的通道截断,而将其与场内渗滤液导排系统相连,变截洪沟为导渗沟,其中沟顶面高程等于最终覆盖面的截洪沟可改为最终覆盖面表面排水沟加以利用。作业区域和非作业区域的雨水分流系统基本原则是只在作业区域修建渗滤液导排系统,非作业区则仍按原自然排洪途径排除雨水,必要时建筑少量分流设施,实现清污分流。封场后,由于最终封顶的坡度在任何地点原则上不能小于4%,则在垃圾坝上修筑雨水渠以汇集封场后的场顶径流排出系统,其排水断面大小通过计算确定。

填埋场释放出的气体是垃圾中的有机物在多介质环境(水分、温度和应力等)耦合作用条件下分解而生成的富含甲烷的生物气体,其成分主要为 CH_4 和 CO_2 ,其中大约含甲烷55%、二氧化碳40%和少量的氧、氮、一氧化碳和硫化氢等。此外,填埋场气体中还有总量低于1%的一些微量气体,这些气体虽然含量极低,但种类多、成分复杂,主要包括烷烃、环烷烃、芳烃和卤代化合物等挥发性有机污染物(VOC)。这些气体在填埋场内累积,产生高于大气压的气体压力,在压力梯度的驱动力下向外释放,对周围环境及人类生命造成极大的危害^[22]。

填埋场释放气体控制系统有被动式和主动式。被动式气体控制系统是填埋场内产生的气体的压力作为气体运移的驱动力,主要有:减压排气孔、周边截流槽、周边隔气槽和填埋场中隔气层;而主动式气体控制系统是通过抽气控制气体的流动,主要有2类:一类是周边控制系统,包括周边抽气井、周边抽气槽和周边注气井(气体帷幕系统)。另一类是抽气井系统,系统包括垂直抽气井系统和水平抽气系统^[23],这种系统类似于石油工程中的注水采油和矿山瓦斯排放系统建立,它是固-液-气-温度-化学反应等耦合问题^[24]。

2.4 填埋场渗滤液处理

由于垃圾渗滤液水量和污染物的浓度变化很大,主要取决于所填埋废弃物的种类、污染物的溶出速度和化学作用、降雨状况、填埋场场龄以及填埋场结构等,其中填埋场场龄最为重要。随着垃圾填埋场场龄的增加,渗滤液的可生化降解性不断下降。对于新的填埋场(一般小于5年),其渗滤液的性质属于低pH、 BOD_5 (5 d内生化需氧量)、COD(化学需氧量)和 BOD_5/COD 值,较高的氨氮和重金属离子浓度;对于中、老龄的填埋场(一般大于

10 年), 其渗滤液 pH 呈中性或弱碱性, 低 BOD_5 和 COD , 低 BOD_5/COD 值, 较低重金属离子浓度, 更高的氨氮浓度。因渗滤液对地下水和地表水的污染比较严重^[25-27], 垃圾渗滤液的处理技术已成为污水处理领域和卫生工程领域研究的热点。目前对渗滤液的处理方法大致有以下几种: 生物塘法、生物膜法和活性污泥法、厌氧生物处理法、渗滤液回灌法、生物炭处理法、湿地处理法、膜过滤法、Fenton 法等^[28-29]。

生物塘法: 由于渗滤液对地表水和地下水的影响主要是有机物污染, 处理技术主要是生物处理。生物塘是将污水中有机物质在塘中停留时间长, 被塘中生长的微生物氧化分解和稳定。生物塘有好氧生物塘和厌氧生物塘, 由于后者允许接纳的有机负荷较高, 常作为好氧生物处理塘的预处理措施。在生物塘的运用中常在塘中放养水生植物如水葫芦(凤眼莲)等, 以进一步降低水中的 BOD_5 值。由于生物塘有机负荷一般不高, 故多用于渗滤液最后处理工序, 以保证出水满足环境目标。

生物膜法和活性污泥法: 两种均可用于处理渗滤液, 实际应用生物膜法和活性污泥中有延时曝气法、生物转盘(主要是除氮用)等。这些方法不仅可以有效地降低 BOD_5 、 COD 和氨氮, 还可以去除另一些污染物质如铁、锰等金属。

厌氧生物处理法: 近年来开发的厌氧生物处理方法有厌氧生物滤池、厌氧接触法、上流式厌氧污泥床反应器及分段厌氧消化等。虽然实践已经证明厌氧生物处理对高浓度有机废水处理的有效性, 但单独采用厌氧法处理渗滤液较为少见, 而采用厌氧-好氧法处理工艺既经济合理, 处理效率高。

渗滤液回灌法: 属于土地处理, 是将收集到的渗滤液用泵输送到覆盖层表面或覆盖层下部, 重新灌到填埋场, 利用填埋场的垃圾层及覆土这一“生物滤床”进行降解, 渗滤液量还因为蒸发而减少。同时, 可保持填埋垃圾的湿润性, 提高有机物的厌氧生物降解速率。根据工艺流程中布水系统的不同, 渗滤液回灌可以分为表面灌溉、竖式井、水平井、喷灌和针注 5 种方法。

生物炭处理技术: 近年来, 国外曾有报道采用生物活性炭流动床(BACFB)技术处理垃圾渗滤液。活性炭可吸附部分小分子有机物和微生物的代谢产物, 且这种方法去除腐殖质的效果也很明显。

湿地处理技术: Craig D. Martin 等采用扩展曝气和表面流湿地系统处理填埋场渗滤液, 能将 COD

从 1 182 mg/L 降至 136 mg/L, 而且对氨氮、总磷、TSS(总悬浮固体量)、TOC(总有机碳)、重金属等参数有 64%~99% 的去除率。

膜过滤技术: Massoud Pirbazari 等组合使用超滤膜和生物活性炭技术, 在系统中同时存在吸附、生物降解和膜过滤的效果, 超滤膜可以去除一些胶体颗粒和微生物细胞。此组合方法对垃圾污泥液的处理效果较高, 能去除 95%~98% 的 TOC 和 97% 的特殊有机污染物, 并且可以 100% 去除水中悬浮物。

Fenton 技术: Soo-M Kim 等研究了用紫外光辅助 Fenton 试剂处理垃圾渗滤液。当光辐射为 80 kW/m³ 时可提高氧化率 6 倍, 当光辐射提高到 160 kW/m³ 时降解速率会提高 1 倍。S-H Gau 等详细研究了 pH 值、H₂O₂ 浓度与 FeSO₄ 浓度对处理效果的影响以及最佳比例, 发现 pH=4.0 是凝结的最佳条件, H₂O₂ 与 FeSO₄ 的浓度需根据渗滤液中有有机物浓度作相应调整, 经 Fenton 试剂处理后的出水还可经活性炭进一步深度处理。

3 卫生填埋场实践

现以某市垃圾处理工程为例, 探讨垃圾填埋中相关的一些土工技术问题。该垃圾填埋场地为山谷型填埋场, 场区的基本地质情况为: 地基土除局部人工填土外, 均为第四系上更新统冲洪积层(Q_3^{al+pl})和中更新统冲洪积层(Q_2^{al+pl}), 下伏基岩为上第三系黏土岩。场区地下水主要为上层滞水, 主要存于岗地坳谷土层中, 中更新统黏土下覆第三系黏土岩为相对隔水层。场地地形高差 18 m, 地貌类型较单一; 地层结构较简单, 主要持力层分布连续, 厚度较稳定, 物理力学性质较均匀, 力学强度较高, 勘察揭示, 在勘察深度范围内无采空区无岩溶, 地面无塌陷, 滑坡及泥石流等不良地质现象分布。

在该场区垃圾填埋场平面布置图如图 1 所示, 该垃圾填埋场共布设了 3 座垃圾坝, 防渗工程包括场底防渗和周边防渗体系、排水排气和渗滤液处理等。

3.1 垃圾坝稳定性分析与设计

垃圾坝含库区主坝、副坝及分区坝共计 3 座(图 1)。各垃圾坝平面位置直接根据库区地形确定, 坝高研究应考虑 3 个因素: 保证垃圾坝的稳定; 要形成较大的垃圾填埋库容, 并可调节渗滤液的流出量; 在提高坝高增加库容的同时, 也需进行投资的合理性分析, 即二者之间的优化分析。

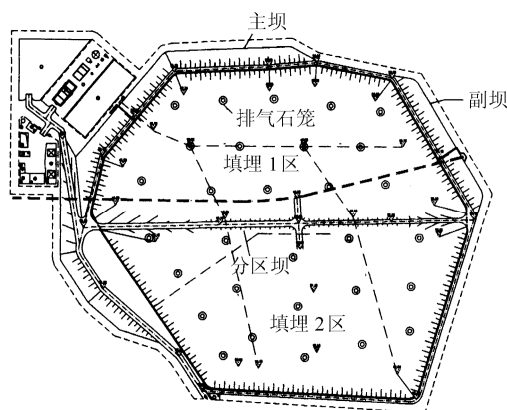


图1 某市垃圾场布置图

Fig.1 Distribution of treatment measure of refuse disposal plant in a city

西侧垃圾主坝坝高 8 m，全长 332 m，以黏土分层碾压夯实而成，放坡坡比为 1:2.5。行车坝段的路面为混凝土路面，宽 6.0 m，其余坝段为泥结碎石路面，宽 4.0 m。东北角垃圾副坝坝高 8 m，全长 155 m，以黏土分层碾压夯实而成，放坡坡比为 1:2.5，宽 4.0 m。中间分区坝坝高从 8.0 m 过渡到 1.0 m，全长 399.2 m，中间设置下场平台，供车辆卸载垃圾使用，坝体以黏土分层碾压夯实而成，放坡坡比为 1:2。下场平台前一段为临时行车路面，拟用泥结碎石修筑，宽 6.0 m，起到分区与行车作用，其余分区坝段宽 4.0 m，只起分区作用。临时道路随垃圾填埋进站进度由建筑垃圾或钢板（循环使用）铺设，使用期不长，随着单元填埋高程（作业区）的封场而废弃。

表1 计算参数表

Table 1 The calculating parameters

设计参数	重度 $\gamma / (\text{kN}/\text{m}^3)$	凝聚力 c / kPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
黏土	27.3	12.5	17
垃圾	10	0.0	18

各坝稳定性分析采用瑞典法（亦称 Fellenious 法），该法假定滑裂面为圆弧形，计算安全系数时简单地将条块重量向滑面法向方向分解来求得法向力。所不同的是，垃圾坝稳定性计算的是多相介质（黏土和垃圾），且要考虑水的影响和汽车荷载，典型计算剖面图见图 2，该场区黏土和垃圾物理力学参数见表 1，通过对垃圾的组成及室内分析，其重度为 $10 \text{ kN}/\text{m}^3$ ，凝聚力为 0 kPa ，内摩擦角为 18° 。

通过上述计算，各土坝稳定性系数大于安全系数 1.30（50 年设计年限）的要求，该土坝设计符合稳定要求。

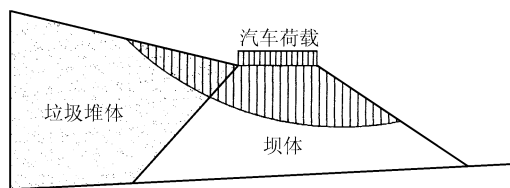


图2 典型垃圾坝稳定性计算分析图

Fig.2 Calculation model of stability of typical refuse dam

3.2 防渗工程

防渗是垃圾填埋的主要和重要的研究工程，也是紧密相关于岩土工程，分为垃圾填埋场场底防渗和周边防渗，该垃圾填埋场布置：场底防渗，在场底平整压实后，先铺设 300 mm 厚的压实黏土层，在其上铺设 $4500 \text{ g}/\text{m}^2$ 的 GCL 膨润土毯做为膜下防渗保护层，上铺 1.5 mm 厚的 HDPE 膜防渗层，防渗膜之上铺设 $500 \text{ g}/\text{m}^2$ 土工布和排水片材构成的保护层，之上为 300 mm 厚的渗滤液导流层，导流层包括粒径 15~30 mm 的 200 mm 厚卵石层和 100 mm 厚的粗砂层，其上为 $150 \text{ g}/\text{m}^2$ 土工布防堵塞隔层，在此之上为垃圾堆埋体。填埋场区水平防渗结构由下至上依次见图 3。周边防渗，在周边设平台，宽 3 m，布设防渗膜（HDPE 膜）的锚固沟。铺设在周边上的 HDPE 防渗膜与场底防渗膜连成整体，在周边 HDPE 防渗膜之上设置缓冲保护层，该缓冲保护层由废旧轮胎或者素土袋组成，防止防渗膜不被填埋垃圾中尖利物刺破。

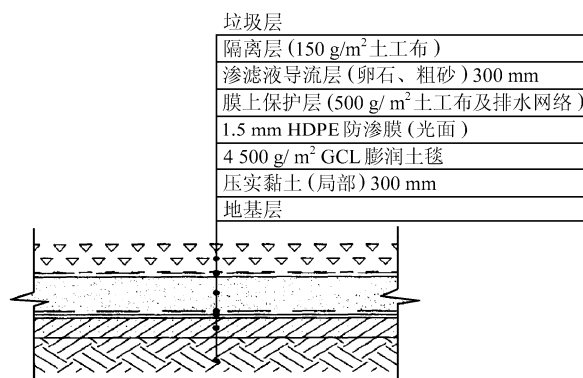


图3 填埋场区水平防渗结构图

Fig.3 Structure of horizontal anti-seepage of refuse disposal plant

填埋场周边防渗结构由下至上依次为：平整后地基基础， $4500 \text{ g}/\text{m}^2$ 的 GCL 膜下保护层，1.5 mm 厚 HDPE 膜防渗层， $500 \text{ g}/\text{m}^2$ 土工布保护层，素土袋或废旧汽车轮胎缓冲保护层，垃圾堆埋体。详细结构见图 4。

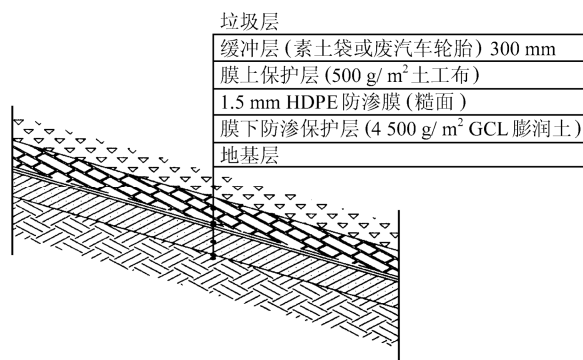


图 4 填埋场周边防渗结构图
Fig.4 Structure of boundary anti-seepage of refuse disposal plant

为了保证防渗系统的稳定,库区周围做环库的膜锚固沟,起稳定膜的作用,锚固沟兼做截洪沟。整个防渗体系的计算,采用的是一般渗流计算,未考虑非饱和及污水不同渗流特性的影响。

3.3 排水、排气方案

填埋场库区采用雨污分流进行排水。雨污分流有利于减少垃圾渗滤液产生量、降低垃圾渗滤液的处理费用。该设计中采取主要措施有:(1)分区填埋,根据场区地形,本工程填埋库区分为 2 区,填埋从位于高处的第 2 区最南端开始填埋;处于低处的雨水自流至分区坝和垃圾主坝流出,雨水不经处理。(2)单个作业区域填埋作业时,通过导流坝将已填埋库区与未填埋库区隔开,最大限度的实现雨污分流。(3)当垃圾填埋高出地面后,在进行垃圾填埋层中间覆盖时,使覆盖面表面形成向四周排水的坡度,坡度大于 2%,并于其上加铺 1 mm 厚 HDPE 膜,在长时间不填埋垃圾时雨水从中间层表面径流出填埋场外。不能及时覆土的作业面,采用 0.5 mm 厚的土工膜,临时覆盖以减少雨水的入渗。(4)库区封场后表面排水沟沿着垃圾堆体马道布置,雨水根据不同堆体位置分别排入永久截洪沟。(5)在垃圾库区周围设置永久截洪沟,雨水通过截洪沟排入下游冲沟。(6)副坝低洼处产生的积水通过地下涵管导流出场区。

填埋场气体处理(LFG)措施如下:LFG 的控制方式有两种:主动控制和被动控制。本项目拟采用被动控制系统,即在 LFG 主要气体大量产生时,为其提供高渗透性的通道,使气体按设计的方向运动。填埋气收集系统可采用水平收集系统、垂直收集系统及垂直与水平相结合的收集系统。根据本填埋场的特点,采用垂直与水平相结合的收集方式。为了使填埋场能安全、稳定地运行,在填埋库区内

每隔 50 m 设置一垂直导气石笼井,共 30 个。导气井中部设置 $\phi 250$ mm 混凝土穿孔导气管,管外用铅丝网围成 $\phi 1\ 500$ mm 的网笼,管与网笼之间填充 50~120 mm 粒径的碎石。石笼外围 150 g/m² 土工布反滤层。导气石笼井的初期施工高度为 2 m,随着垃圾堆体的不断增高,导气石笼井也随之安装加高。导气石笼高出填埋作业面 1 m 左右。

LFG 的最终排放有两种方式:分散排放和分区集中排放。分散排放是在每个竖向石笼中部(接近最终覆盖层处)设置一根 $\phi 250$ mm 混凝土导气管,排气口高于最终覆盖层 1.0 m;分区集中排放是在覆盖层下面设置数条水平导气带(或管),将若干垂直石笼连通起来,形成一个集气区,并设一个排气管,将该区域内的填埋气体集中排放。根据实际情况,拟采用分区集中排放。因本工程填埋规模小,产气量小,利用价值低,不进行回收利用,沼气处理方案采用场外直接燃烧处理。填埋气体经集中收集后通过金属软管引到场外燃烧塔进行燃烧处理。燃烧塔设置压力控制装置和自动点火装置,当填埋气体压强达到设定数值后通过自动点火装置对 LFG 进行燃烧处理。

3.4 渗滤液处理

本工程对渗滤液的处理方案为物化处理,即 MBR+UF+NF 处理工艺方案。渗滤液经生化预处理后进入 MBR 反应器,通过超滤膜分离净化水和菌体,污泥回流可使生化反应器中的污泥浓度达到 20 g/L,经过不断驯化形成的微生物菌群,对渗滤液中难生物降解的有机物逐步降解。MBR 生化系统 COD 设计去除率 90%,NH₃-N 设计去除率为 99%。采用特殊设计的高效内循环射流曝气系统,氧利用率可高达 25%。MBR 系统的剩余污泥量小,每天排泥量按不同运行期(前、中、后)为 110~50 m³/d 左右。MBR 系统出水无菌体和悬浮物,进入纳滤系统进一步深化处理,出水稳定达标排放,浓缩液则回灌至填埋场。纳滤系统采用特殊纳滤膜和工艺设计,可使盐随净化水排出,不会出现盐富集现象,纳滤净化水回收率可达到 85%。纳滤浓缩液量为 3.7 m³/h,为节省投资及运行费用可将浓缩液回灌至填埋场处置。采用该工艺处理渗滤液,适应性强,能确保不同季节不同水质条件下,出水稳定达标。在国外大量工程实例中发现,即使对于 BOD/COD 小于 0.2 的老填埋场渗滤液,经过 MBR 反应器与纳滤后也能使 COD、BOD 和 NH₄-N 达标排放。主要特点:反应器体系中生物浓度高,达到 20 g/L,对难生物降解的有机物及氨氮的去除效率高;污泥稳定性强,

粘度低,易脱水,不易腐败变质;出水不存在致病菌污染问题。

4 结 论

垃圾卫生填埋工程除污水处理之外,基本上是和岩土工程相关的,垃圾填埋工程中存在岩土工程和相应的处理对策研究问题:

(1) 垃圾体是一种特殊的材料,其物理力学特性和岩土体的力学特性具有相似性,亦具有差异性,并具有固体-液体-气体-热-化学等耦合力学特性,进行相关的物理力学特性及本构理论研究是非常必要的。

(2) 垃圾坝稳定性分析是垃圾体、水和坝体的综合研究课题,考虑温度等影响,在垃圾体物理力学特性变化情况下研究坝体的稳定性也是可行的。

(3) 防渗体系研究对垃圾填埋、核废料处置等至关重要,本文提出的多层防渗体系,对一些重要工程具有指导作用。

(4) 渗滤液采用生物塘处理也相关于水的蒸发等学科的研究,在严格的雨污分流条件下,根据气候条件,准确计算蒸发量,可以获得较为真实的渗滤液处理量,对工程建设等具有指导作用。

对于垃圾填埋场,目前尚有许多未解决的问题有待进行深入地研究。现代生活垃圾卫生填埋场是个集垃圾填埋、环境保护和后期开发功能于一体的系统,在施工和运营过程中必然会碰到上述的岩土工程与环境工程问题,这些问题是岩土工程研究者必须解决的。

参 考 文 献

- [1] 全国人大常委会办公厅. 中华人民共和国固体废物污染环境防治法[M]. 北京: 中国民主法制出版社, 1996.
- [2] 张澄博. 垃圾卫生填埋结构对地质环境效应的控制研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1999, (增刊): 68—87.
ZHANG Cheng-bo. The control of refuse landfill structure on geological environmental effect[J]. *Journal of Geological Hazard and Environment Preservation*, 1999, (Supp.): 68—87.
- [3] 顾宝和. 固体废弃物处理的环境岩土工程问题[J]. 工程地质学报, 2001, 9(4): 424—428.
GU Bao-he. Geotechnical engineering aspects of solid waste disposal[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2001, 9(4): 424—428.
- [4] 刘长礼. 适合国情的垃圾填埋场衬垫系统[J]. 工程地质学报, 2000, 8(1): 118—122.
- LIU Chang-li. A lining system of waste landfill site adequate for current situation in China[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2000, 8(1): 118—122.
- [5] 梅其岳, 张斯. 山谷型填埋场及堆体边坡稳定分析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 1120—1125.
MEI Qi-yue, ZHANG Si. Valley type landfill site and slope stability analysis for filled waste[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(3): 1120—1125.
- [6] 陈卫国. 城市垃圾卫生填埋场填埋区的设计讨论[J]. 国外建材科技, 2006, 27(4): 150—157.
CHEN Wei-guo. Analysis of the design on waste sanitation landfill in city[J]. *Science and Technology of Overseas Building Materials*, 2006, 27(4): 150—157.
- [7] 钱学德, 马明. 城市固体废弃物(MSW)的工程性质[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 1—6.
QIAN Xue-de, MA Ming. The engineering properties of municipal solid waste[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(5): 1—6.
- [8] 陈云敏, 陈俊. 城市垃圾填埋场边坡稳定分析[J]. 土木工程学报, 2000, (3): 92—97.
CHEN Yun-min, CHEN Jun. Stability analysis of a solid waste landfill slope[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2000, (3): 92—97.
- [9] 张振营, 吴世明, 陈云敏. 城市生活垃圾土性参数的室内试验研究. 岩土工程学报, 2000, (1): 35—39.
ZHANG Zhen-ying, WU Shi-ming, CHEN Yun-min. Experimental research on the parameter of life rubbish in city[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, (1): 35—39.
- [10] 《土工合成材料工程应用手册》编委会. 土工合成材料工程应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [11] 张颖新, 张天胜. 改性膨润土及其在环保方面的应用[J]. 化工新型材料, 2002, 30(4): 33—37.
ZHANG Yin-xin, ZHANG Tian-sheng. Modified bentonite and its application in environmental protection[J]. *New Chemical Materials*, 2002, 30(4): 33—37.
- [12] 付志前, 姜萍. 土工合成材料膨润土衬垫及其应用[J]. 建筑技术, 2005, (2): 147—148.
FU Zhi-qian, JIANG Ping. Wet-mixed bentonite liner and its application[J]. *Architecture Technology*, 2005, (2): 147—148.

- [13] 王惠芸, 潘惠. 填埋场中 VOC 动态传输的环境诊断模型[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 387—389.
- WANG Hui-yun, PAN Hui. Environmental diagnosis model of volatile organic compounds transport in landfill site[J]. **Chinese Journal of Scientific Instrument**, 2006, 27(6): 387—389.
- [14] KAVAZANGIANS S J, MATASOVIC N, BONAPARTE R, et al. Evaluation of MSW properties for seismic analysis [C]//Proceedings of Geoenvironment 2000 (Geotechnical Special Publication No46). New Orleans, LA: ASCE, 1995.
- [15] 卢应发, 崔玉军, 姚海林, 等. 饱气带区的渗流特性及地表模型[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊): 8—12.
- LU Ying-fa, CUI Yu-jun, YAO Hai-lin, et al. Seepage properties of non-saturated soils in vadose zones and soil-surface model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(Supp.): 8—12.
- [16] CUI Y J, YAHIA A M, DELAGE P. A model for the volume change behaviour of heavily compacted swelling clay[J]. **Engineering Geology**, 2002, 64: 233—250.
- [17] 拓勇飞, 孔令伟, 郭爱国, 等. 湛江地区结构性软土的赋存规律及其工程特性[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1879—1884.
- TUO Yong-fei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Occurrence and engineering properties of structural soft clay in Zhanjiang area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(12): 1879—1884.
- [18] 蔡羽, 孔令伟, 郭爱国, 等. 剪应变率对湛江强结构性黏土力学性状的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1235—1240.
- CAI Yu, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Effects of shear strain rate on mechanical behavior of Zhanjiang strong structured clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(8): 1235—1240.
- [19] 杨一清. 高密度聚乙烯(HDPE)膜在垃圾填埋场基底防渗层中的应用[J]. 环境卫生工程, 2001, 9(3): 116—119.
- YANG Yi-qing. Application of high density polyethylene (HDPE) film at waste sanitary landfill[J]. **Contemporary Chemical Industry**, 2001, 9(3): 116—119.
- [20] MASAO Taxebayashi. Countermeasures by combustion technology[J]. **Chemical Engineering**, 2000, 63(2): 90.
- [21] 徐岩. 塑料排水带在港口工程中的应用及发展[J]. 中国港湾建设, 2002, (2): 39—42.
- XU Yan. Application and development of strip geodrain in harbour and port works[J]. **China Harbour Engineering**, 2002, (2): 39—42.
- [22] HOBANOGLIOUS G, THEISEN H, VIGIL S. Integrated solid waste management[C]//Engineering Principles and Management Issues. New York: McGraw-Hill, 1993: 381—417.
- [23] 陈家军, 张琼. 填埋场释放气体运移数值模型[J]. 环境科学学报, 2000, 20(3): 327—331.
- CHEN Jia-jun, ZHANG Qiong. Numerical model of landfill gas migration[J]. **Chinese Journal of Environmental Science**, 2000, 20(3): 327—331.
- [24] 薛强, 梁冰, 王惠芸, 等. 垃圾填埋气体资源化利用过程中多场耦合问题[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, (25): 104—106.
- XUE Qiang, LIANG Bin, WANG Hui-yun, et al. Multi-field coupling problem of landfill gas for resource utilization[J]. **Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition)**, 2006, 25: 104—106.
- [25] LI X Z, ZHAO Q L. Efficiency of biological treatment affected by high strength of ammonium-nitrogen in leachate and chemical precipitation of ammonium-nitrogen as pretreatment[J]. **Chemosphere**, 2001, (44): 37—43.
- [26] HURD S, KENNEDY K, DROSTE J, et al. Low-pressure reverse osmosis treatment of landfill leachate[J]. **Journal of Solid Waste Technology and Management**, 2001, 27(1): 1—14.
- [27] COELHO M A Z, RUSSO C, ARAUJO Q Q F. Optimization of a sequencing batch reactor for biological nitrogen removal[J]. **Water Research**, 2000, 34(10): 2809—2817.
- [28] JOKELAJ P Y, KETTUNEN R H, SORMUNEN K M, et al. Biological nitrogen removal from municipal landfill leachate: low-cost nitrification in biofilters and laboratory scale in: Situ denitrification[J]. **Water Research**, 2002, 36: 4079—4087.
- [29] ILIES P, MAVINIC D S. The effect of decreased ambient temperature denitrification of a high ammonia landfill[J]. **Water Research**, 2001, 35(8): 2065—2072.