

填埋场最终覆盖(封顶)系统

钱学德 郭志平

(河海大学岩土工程研究所 南京 210098)

对于已填满的城市固体废弃物填埋场,合适的封闭是必不可少的。设计封顶的主要目的之一是阻止水流渗入废弃物以使可能逸入地下水源的淋洗液减至最少^[1]。要使封闭后的填埋场淋洗液减至最少,必须阻止液体重新进入填埋场,并使原来存在的淋洗液被收集和排除掉。在填埋场选址和其封闭结构的规划、设计均确定后,就必须考虑最终覆盖(封顶)系统计划。通常要考虑的因素包括:覆盖的位置、低透水性土的有效利用率、优质表土的备料情况、使用土工合成材料以改善覆盖系统性能的有效程度、稳定边坡的限制高度以及填埋场封闭后管理

期间该地面如何使用等。填埋场封顶的目标是尽量减少今后维护和最大限度保护环境及公众健康。

1 封顶系统剖面

现今,复合封顶系统已广泛使用于城市固体废弃物填埋场,图1(a)~(f)表示广泛应用于美国城市固体废弃物填埋场设计中封顶系统的各类典型剖面^[2,3],从下到上由下列部分组成。

a. 气体排放层。多孔的、高透水性的土层,厚度不小于30cm,直接位于压实土层之下,用来将填埋

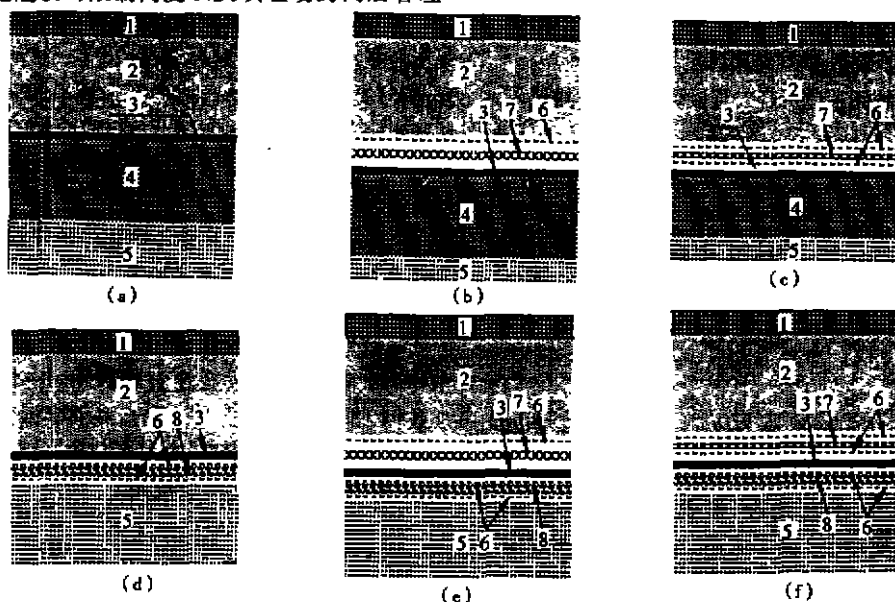


图1 填埋场封顶系统各类典型剖面

(a)典型的填埋场封顶;(b)具有土工织物及土工网排水层的填埋场封顶;(c)具有土工复合材料排水层的填埋场封顶;(d)具有GCL的填埋场封顶;(e)具有土工织物和土工网排水层以及GCL的填埋场封顶;(f)具有土工复合材料排水层以及GCL的填埋场封顶

1.带有植被的表土;2.保护层;3.土工膜;4.压实土层;5.气体排放层;6.土工织物反滤层;7.土工网排水层;8.GCL

作者简介:钱学德,男,博士,旅美学者,美国密歇根州环保署官员,河海大学兼职教授,从事环境土工研究。

郭志平,男,教授,从事岩土工程研究,曾发表《土工原理与计算》等论著。

废气排入排气井中。

b. 低透水性压实土层。土及土工膜的复合层,位于气体排放层之上以限制表面水渗入填埋场中,其厚度不小于45 cm,透水率 $k \leq 1.0 \times 10^{-5}$ cm/s。

用于封顶系统的土工膜,应具有耐久性,并能承受预期的沉降变形。可选择高密度聚乙烯(HDPE)或其它具有较强双向应力-应变能力的聚合材料。图2为HDPE和其它土工膜聚合物的典型双向应力-应变曲线。具有较高双向强度的材料比较容易承受封顶后产生的不均匀沉降,从而避免破坏。

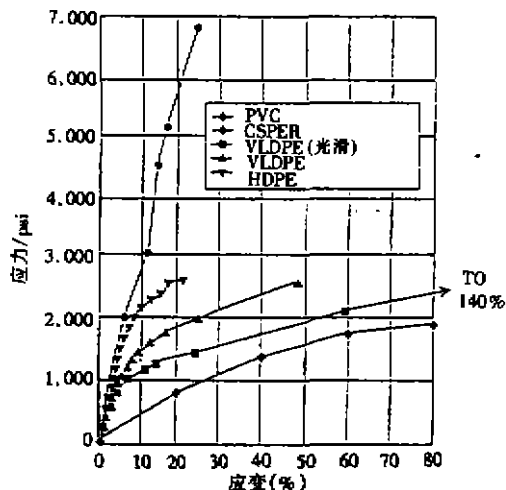


图2 五种土工膜材料的双向应力-应变关系曲线^[9]

土工合成材料粘土衬垫(GCL)可以用来代替压实土层,因为GCL透水性较低而容许张应变较高,可以承受封顶以后的不均匀沉降。如用GCL代替压实土层,则其下必须铺设至少45 cm厚的土料以保护衬垫免遭废弃物损伤和减少沉降的影响,如图1(d)~(f)所示。

c. 排水及保护层。排水及保护层厚度应大于60 cm,直接铺在复合覆盖衬垫之上,它可以使降水离开填埋场顶部向两侧排出,减少寒流对压实土层的侵入,并保护柔性薄膜衬垫不受植物根系、紫外线及其它有害因素的损害。对这一层并无压实要求。

在近代封顶设计中,常将土工织物和土工网或土工复合材料置于土工膜和保护层之间以增加侧向排水能力,如图1(b)(c)(e)(f)所示。高透水的排水层能防止渗入表面覆盖层的水分在隔离层上积累起来。因为积累起来的水会在土工膜上产生超孔隙水应力并使表面覆盖层和边坡脱开。边坡的排水层常将水排至排水能力比较大的趾部排水管中,如图3所示。

d. 表面覆盖层(浸蚀控制层)。表面覆盖层由

不小于15 cm的土料组成,它能维持天然植被和保护封顶系统不受风、霜、雨、雪和动物的侵害,虽然通常无需压实,但为避免填筑过松,土料要用施工机械至少压上两遍。

为防止水在完工后的封顶表面积聚,封顶表面的梯级边界应能有效防止由于工后沉降产生的局部坑洼有所发展。封顶表面的坡度在任何地方均应大于4%,但也不宜超过25%^[4]。

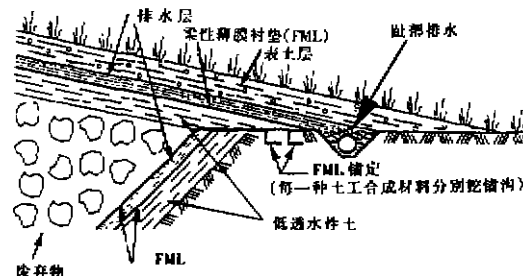


图3 边坡排水层示意图

2 封顶材料的详细说明

a. 表土。对表土应进行饱和容重、颗粒级配以及透水性等土工试验。颗粒级配主要用以设计表土和排水层之间的反滤层。因为较松的土样会得到比较保守的渗透试验结果(渗透系数偏大),实验室制备试样应尽量接近预期的现场施工条件。

b. 排水材料。这些材料同样需要进行饱和容重、颗粒级配和透水性试验。级配试验结果应该对其最大容许细粒含量、间断级配和反滤层与表土的协调。与表土相反,比较紧密的排水材料试样会使渗透试验的结果比较保守(渗透系数偏小)。

c. 土工织物。挑选土工织物的主要标准是结构耐久性以及置于表土和排水层之间的反滤性能。所选材料在足够的透水性、土粒的滞留程度和能与土料长期协调等方面均应符合设计要求。其与附近土的界面抗剪强度亦应符合边坡稳定需要。

d. 土工膜。土工膜覆盖材料的选择标准包括:结构耐久性、在填埋场产生沉降和不均匀沉降时仍能保持完整的能力、覆盖边坡时的稳定性以及所需费用等。除此以外,还应考虑铺设方便、施工质量容易得到保证、能防止动植物侵害、在极端冷气候条件下也能铺设、耐老化以及为焊接、卫生、安全或环境的需要能随时将衬垫打开等。以上后面一些考虑因素一般不是主要的,但因某些特殊计划的需要,也可能成为主要的考虑因素。

挑选材料计划中需要哪些试验和说明,完全取决于设计是如何考虑的。一旦产品类型选定以后,产品说明通常还应包括覆盖土工膜强度和延伸率的最小值,并提供土工膜和附近土体的最小摩擦系数。

e. 土工合成材料和土的界面。下列界面的抗剪强度应予给出:①表土与保护层的土;②保护层的土与土工织物(或保护层的土与土工复合材料);③土工织物与土工网;④土工网与土工膜(或土工复合材料与土工膜);⑤土工膜与压实粘土衬垫(或土工膜与GCL);⑥压实粘土衬垫与气体排放层(或GCL与气体排放层);⑦气体排放层与固体废弃物。特别危险的界面是排水材料和土工膜之间的界面,因为只有在这个界面上会产生孔隙水应力。而在边坡位置的其它界面,只要选择材料恰当,其稳定性应当是足够的。

3 封顶系统无限边坡稳定分析

封顶系统通常均是相对较薄的土层,当位于边坡位置时,由于重力作用,均有向下滑动的趋势。下列计算适用于沿排水层与土工膜之间存在的潜在破坏面,其滑动方向与坡面平行。

a. 土工膜上无渗透水的情况。边坡部位覆盖层的稳定分析,可以按整个边坡计算其向量力,包括坡脚的抗力在内,也可以稍加简化按无限边坡进行分析^[5]。采用何种方法取决于要求的安全度及其对设计判断的影响,也取决于坡脚抗力与整个边坡阻力相比相对影响有多大,对于坡面覆盖比较长的情況,坡脚抗力通常仅占整个土坡阻力的5%,此时可按无限边坡分析。若无限边坡分析求出的安全系数小于期望值,也可用包括坡脚抗力在内的整体分析方法进行校核,并重新计算安全系数。

下面讨论无限边坡稳定分析法。图4表示一段边坡部位的封顶系统,包括压实土层、土工膜、排水层以及相同厚度的表土层。如果土工膜上没有孔隙水应力,沿着坡角为 β 的边坡,可以写出力的平衡方程,其稳定安全系数 F_s 为抗滑力与滑动力之比,计算公式为

$$F_s = (C + N \tan \delta) / W \sin \beta \quad (1)$$

若粘聚力 $C=0$,则

$$F_s = \tan \delta / \tan \beta \quad (2)$$

式中 β 为坡角; δ 为多层覆盖系统的最小界面摩擦角。

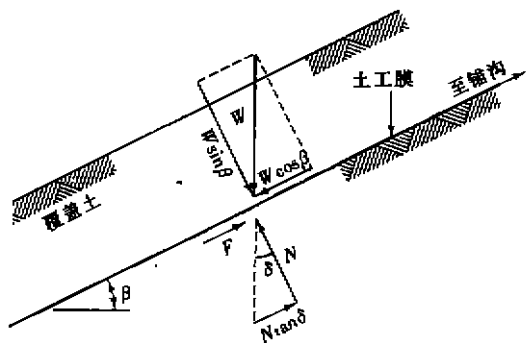


图4 封顶边坡土工膜与其上覆土层界面上的力

以上分析中需考虑的最重要的参数是边坡的坡角和与坡面平行的潜在破坏面上的抗剪强度。潜在破坏面以上材料的容重当排水层内无渗流时,对稳定分析没有影响。

b. 砂砾排水层,土工膜上有渗透水流的情况。图5表示部分饱和和边坡当土工膜上渗流方向与边坡平行时的一般几何形态。注意其孔隙水扬压力(孔隙水应力)是由流网确定的,流网的一部分已在图5中画出。对于砂砾排水层,当土工膜上存在渗流时,封顶系统的稳定安全系数可用下式计算:

$$F_s = \frac{\frac{c}{\cos \beta} + [\gamma_1 h_1 + \gamma_2 (h_2 - h_w) + (\gamma_{2sat} - \gamma_w) h_w] \tan \delta}{[\gamma_1 h_1 + \gamma_2 (h_2 - h_w) + \gamma_{2sat} h_w] \tan \beta} \quad (3)$$

若 $c=0$,则式(3)成为

$$F_s = \frac{[\gamma_1 h_1 + \gamma_2 (h_2 - h_w) + (\gamma_{2sat} - \gamma_w) h_w] \tan \delta}{[\gamma_1 h_1 + \gamma_2 (h_2 - h_w) + \gamma_{2sat} h_w] \tan \beta} \quad (4)$$

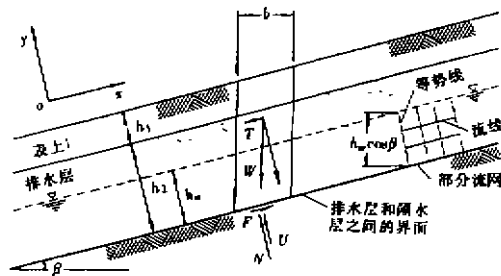


图5 渗流与封顶边坡平行的无限边坡稳定分析

图5及以上公式中的符号含义: W 为有代表性的覆盖层条块总重量,kN/m; U 为孔隙水扬压力,kN/m; N 为有效法向力,kN/m; T 为滑动力,kN/m; F 为抗滑力,kN/m; c 为覆盖层条块底部单位面积有效粘聚力,kPa; h_1 为表土层厚度,m; h_2 为排水层厚度,m; h_w 为排水层中垂直于土坡的渗透水深,m; b 为所取代表性覆盖层条块宽度,m; γ_1 为表土的饱和容重,kN/m³; γ_2 为排水层的湿容重,kN/m³; γ_{2sat} 为排水层的饱和容重,kN/m³; γ_w 为水的容重(9.81kN/m³); δ 为排水层和土工膜之间的有效摩擦角; β 为覆盖层的坡角。

c. 关于安全系数的选择。对于边坡的长期静力稳定分析,通常认为取最小安全系数为1.5是比较合适的。但这常用于土坝设计,对于填埋场整体边坡稳定分析或封顶边坡稳定分析是否合适呢?美国环保局(EUSEPA)建议最小安全系数可取1.25~1.5,其大小完全取决于所取抗剪强度参数的正确程度^[6]。另外在选择封顶系统的最小稳定安全系数时,下列因素也应予考虑:①由于土工合成材料试验的相对历史比较短,所提供的材料特性其可信程度

可能比较低;②在估计材料特性时,常常已经包括有一定的安全度在内;③通常取最不利的条件来进行分析,但其发生的时段可能很短。

4 填埋场沉陷和地震对封顶系统的影响

填埋场沉陷可能是整体的(例如由于固体废弃物的均匀下沉)或局部的(例如由于在部分覆盖下有很大的孔洞而引起坍塌)。通常整体沉陷不会在覆盖层中引起过大的拉应变,而且由于减少了滑动会使覆盖层的稳定性得到改善。因此,即使填埋场有比较大的整体沉陷,对封顶系统也不会造成很大的损害。但是,局部沉陷却会在覆盖层表面形成凹坑,使覆盖层内部产生很大的拉应变,并导致覆盖层积水。可以通过使用具有极限双向应变特征的土工膜来减少拉应变的影响,这些土工膜可由超低密聚乙烯(VLDPE)、线性低密聚乙烯(LLDPE)和聚氯乙烯(PVC)组成。积水应尽量避免,因为它会破坏封顶表面的植被,而且水的重量会使地表的积水坑加快扩展。

如果城市固体废弃物填埋场位于地震活动带内,其设计应充分考虑填埋场、承重结构及下卧土层在地震荷载作用下的稳定性。此时稳定计算的关键是在填埋场使用和封闭以后,如何考虑水平地震加速度对填埋场边坡稳定性的影响。特别重要的是在计算中对于填埋场衬垫系统中土工膜衬垫的表面应使用较低的摩擦角。地基稳定性计算则应校核饱和和松砂地层在地震时有无可能产生液化,这种液化是由砂层内因受剪而产生的超孔隙水应力引起的,在产生液化的瞬时,地基土的承载力将消失,从而造成整个填埋场衬垫系统的毁坏。

覆盖层可使用 Newmark 的典型分析法^[7],在分析时应考虑在排水层内容许达到多大的饱和度(如使用与静力稳定计算中同样的最大值可能过于保守)以及覆盖层的容许变形值。由于封顶覆盖层变形并不会造成生命危险,而且出事后也易于检查修复,其容许值可略高于底部衬垫。对于比较可靠的设计地震选型,已经引用的底部衬垫容许变形值约为 15~30 cm^[8]。有一种看法认为可近似使用与覆盖

层处于干燥状态同样的标准,因为当覆盖层处于最大饱和状态的同时又发生地震的机会是很少的。另一种看法则认为封顶系统的变形并不直接影响其下填埋场废弃物容量而且它又是可以被检查修复的,因此封顶系统容许维持较高的变形值,例如大约 30~90 cm。一般来说,如果设计已能满足具有适当安全系数的最危险静力状态,在地震状态下通常也是可以容许的。

参考文献

- 1 USEPA. Design and construction of RCRA/CERCLA final covers (seminar publication). US. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, EPA/625/4-91/025, May 1991
- 2 Qian Xuede. Geotechnical aspects on landfill design. The University of Michigan, Department of Civil and Environmental Engineering, Ann Arbor, Michigan, USA, May 1995
- 3 钱学德,郭志平.美国的现代卫生填埋工程.水利水电科技进展,1995,15(5):8~12;15(6):27~31
- 4 USEPA. Federal register Part II. 40 CFR Parts 257 and 258, Solid Waste Disposal Facility Criteria; Final Rule, October 9, 1991
- 5 Thiel R S, Stewart M G. Geosynthetic landfill cover design methodology and construction experience in the Pacific Northwest. In: Geosynthetics '93 Conference Proceedings, Vol. 3, Vancouver, Canada, 1993. 1131~1144
- 6 USEPA. Draft technical manual for solid waste disposal facility criteria. 40 CFR Part 258, April, 1992
- 7 Newmark N M. Effects of earthquakes on dams and embankments. Geotechnique, 1965, 5(2)
- 8 Seed R B, Bonaparte R. Seismic analysis and design of lined waste fills; current practice, Stability and performance of slopes and embankments - II. ASCE Geotechnical Special Publication No. 31, New York, 1992
- 9 Frobel Ron. Geosynthetic material response to landfill cap settlement and subsidence. In: Proceedings of Geosynthetics 1991 Conference, IFAI Atlanta, 1991

(收稿日期:1997-03-03 编辑:马敏峰)

新书简介

《Canal and Communities—Small-Scale Irrigation System》——Canal and Communities—Small-Scale Irrigation System = 运河与社会——小型灌溉系统/Jonathan B Mabry 著。——美国亚利桑那大学出版社,1996年,273P。
\$ 47.50, ISBN 0-8165-1591-1

长期以来,人们一直千方百计通过种种方式引水调水以保证对工业和居民的持续供水和农作物灌溉用水。本书通过一系列实例研究和各地研究机构从事的水资源管理比较试验研究结果对这种小型灌溉系统进行认真的分析探讨。书中的实例说明,这些“土办法”灌溉系统往往比人们认为的更具有可持续性和更有效益。书中作者不但阐述了在小型灌溉系统条件下的环境、文化传统和历史背景等,而且着重鼓励人们开展合作,共同决定选址原则,共同制定灌溉系统运行规则及冲突解决机制。

(熊莉芸供稿)