

填埋场粘土衬垫的设计与施工

钱学德 郭志平

(河海大学岩土工程研究所 南京 210098)

5-59

X 705

压实粘土被广泛用作填埋场和废弃堆积物的衬垫,也可用来覆盖新的废物处理单元和封闭老的废弃物处理点。在美国,几乎所有压实粘土衬垫和覆盖均被设计成其透水性小于或等于某一指定值。例如对于包容有危险品(有毒)垃圾、工业垃圾和城市固体废弃物的粘土衬垫或覆盖,其透水率通常应小于或等于 $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ [1-3]。

粘土的物理性质与其含水状况关系很大,作为主要的填埋场衬垫,必须满足一定的压实标准以保护地下水不被淋洗液污染。一般来说,衬垫应填筑成至少 60 cm 厚且其透水率小于 $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 的压实粘土层。为了满足这个要求,对压实粘土衬垫的设计和施工应采取下列步骤:①选择合适的土料;②确定并满足含水量-干密度标准;③压碎土块;④进行恰当的压实;⑤消除压实层界面;⑥避免脱水干燥。

1 压实粘土衬垫用的土料

对衬垫土料的主要要求是它能够被压实成恰当的低透水性。在选择合适的衬垫土料时,下列条件应得到满足。

a. 细粒料含量。土料中应包括有 20% 以上的细粒料。此处细粒含量的定义是指通过 200 号筛(美制,其孔径相当于 0.075 mm)的土料重量占干土总重量的百分比。

b. 塑性指数。土料的塑性指数至少在 10 以上,虽然有些土料其塑性指数稍低也可适用,但因为塑性指数比 10 小的土料其粘粒含量较少,通常很难压到必需的低透水率。而如果土料的塑性指数大于 30 至 40,则会给施工带来困难,因为这样的土料在干燥时会形成很硬的土块,潮湿时土块又非常粘,这些都会给现场施工带来很大困难。基于同样理由,某些具有较高胀缩趋势的土料也是不合适的。一般来

说,用作压实粘土衬垫的土料其塑性指数在 10~35 之间比较理想。

c. 砾粒含量。砾粒含量(指不能通过 4 号筛(孔径 4.76 mm)的粒料)不能太高,作为一个保守的数值,建议砾粒含量不要超过 10%。然而,如果砾粒在土中分布比较均匀而且不妨碍羊脚碾碾压,则虽然数量较大也不必剔除。文献[4]和[5]中的资料表明(见图 1 和图 2),只要砾粒含量不超过 50%(或 60%),压实粘性土的透水性对砾粒含量的反应是不灵敏的。但是如果砾粒之间的孔隙不能被粘性土填充并能在衬垫中形成连续通道,则砾粒应予剔除,关键问题是在土体孔隙中有没有小颗粒或细颗粒将砾粒隔开。

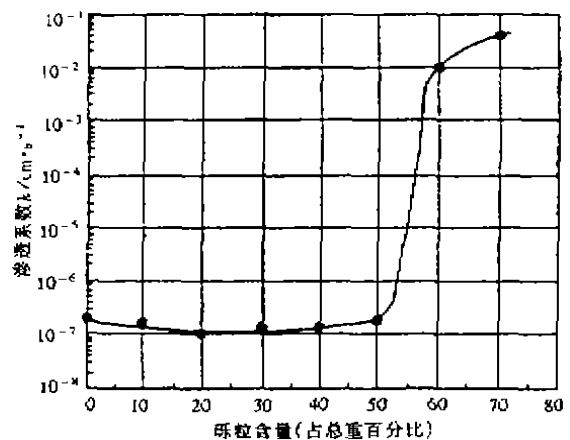


图 1 砾粒含量对压实后的冰碛土透水性的影响^[4]

d. 石料。直径大于 2.5~5 cm 的石块应从衬垫材料中除去。

2 对含水量-干密度(干容重)关系的要求

粘土在高含水量条件下压实能得到较小的透水

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。

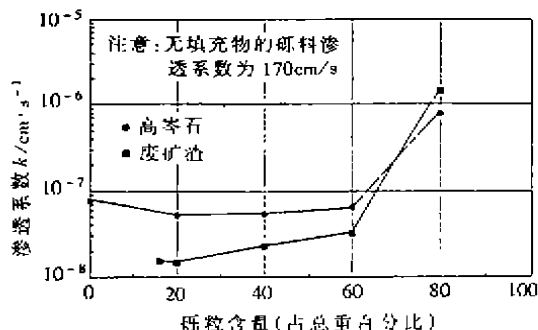


图2 高岭石与砾和废矿渣与砾的混合物，其透水性和砾粒含量的关系^[5]

率,但其抗切强度却会降低,甚至低到难以承受碾压机具的重量。填埋场衬垫的压实标准和其它工程填土(如房屋地基或路基)不同,习惯上工程填土的压实标准是按承载力要求建立在强度基础之上的,而对填埋场衬垫,压实标准是按透水性要求来设计的,粘土衬垫的填筑含水量要比其它工程填土大2%~6%。表1给出了常规压实粘土与填埋场粘土衬垫的比较。

表1 常规压实填土和填埋场粘土衬垫之比较

	常规压实填土	填埋场粘土衬垫
设计标准	承载力(抗剪强度) 压缩性	透水性($k \leq 1 \times 10^{-7}$ cm/s) 抗剪强度,收缩势
施工要求	压实度为90%~95% (含水量可小于或大于最优含水量) 压实层厚通常为20~30 cm	压实度为90%~95% (含水量大于最优含水量) 压实层厚不得超过15 cm

注:压实度为填土的设计干密度与最大干密度之比。

填埋场粘土衬垫最重要的方面是既要保证衬垫土料压实到一定的含水量和干密度(干容重)以得到较低的透水率,又要在其它方面(如抗剪强度等)也具有较好的工程性能。对大多数工程填土来说,修正普氏击实试验结果相当于现场土料压实效果的上限、标准普氏试验的结果相当于压实效果的中间值,而折减普氏试验结果则用来表示有代表性的粘土衬垫或覆盖的最小压实能量水平^[6]。折减普氏试验的步骤与标准普氏试验相同,惟每层击数为15击而不是25击。三类普氏试验之比较见表2。(标准普氏击实试验相当于我国《土工试验方法标准》中的

表2 三类普氏击实试验之比较

试验类型	锤重/kg	落高/cm	击实分层数	每层锤击数
修正普氏试验	4.5	45.7	5	25
标准普氏试验	2.5	30.5	3	25
折减普氏试验	2.5	30.5	3	15

轻型击实试验,修正普氏试验之锤重、落高与分层数均与重型击实试验相同,但重型击实试验的的锤击数为56次而不是25次)。

建立击实试验试样的透水性、抗切强度和其它性能与设计标准之间的关系,可按下列步骤进行^[7]。

a. 将实验室击实试验(包括修正普氏试验,标准试验和折减普氏试验)的结果绘成击实曲线(含水量与干密度或干容重关系曲线),如图3所示^[6]。每条曲线大约需要5~6个不同的击实试样。

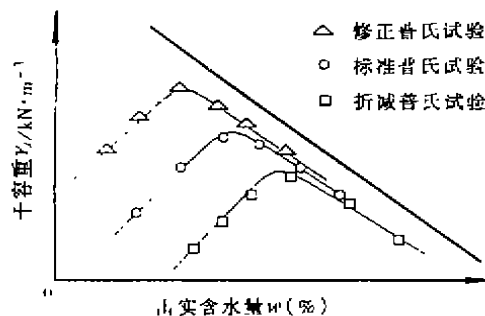


图3 三种普氏击实试验结果的击实曲线^[6]

b. 击实试验结束后,每一个击实试样均应进行渗透试验以确定每个试样的透水性。击实粘土试样的渗透系数可在实验室中用柔壁渗透仪(flexible-wall permeameter,见图4)进行常水头渗透试验测定。试验时要注意保证整个试验步骤都不能出错,包括某些细节如饱和度、回压、有效围压等均应仔细加以选择、将测定的渗透系数绘成试样含水量的函数,如图5所示^[8]。

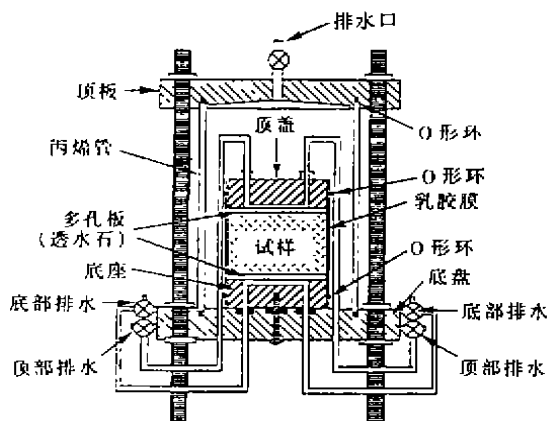


图4 柔壁渗透仪

c. 将图3中的击实曲线按所测定的渗透系数重新点绘,渗透系数不同的击实试样使用不同的符号,如图6所示^[8]。图中空心符号表示渗透系数大于最大理想值(1×10^{-7} cm/s)的试样;实心符号表示渗透系数小于或等于最大理想值的试样。可据此画出一条“理想带”,其范围内的试验已满足或超过了设计标准($k \leq 1 \times 10^{-7}$ cm/s)。

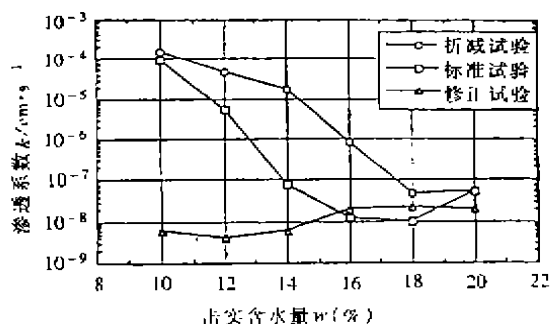


图5 渗透系数与试样含水量关系曲线^[8]

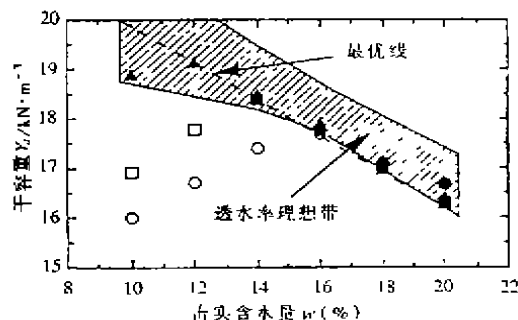


图6 根据渗透系数确定的“理想带”^[8]

d. 理想带还应根据其它因素如抗剪强度等加以修正。为了限定击实试验曲线理想带的范围使既能满足透水性又能满足抗剪强度等其它因素的设计标准,一般还要进行必需的附加试验。图7表示分别根据透水性和抗剪强度限定的理想带如何重叠成一个单一的理想带的^[8]。同样的办法也可用来考虑其它与任何一项特殊设计有关的因素,如收缩势等。

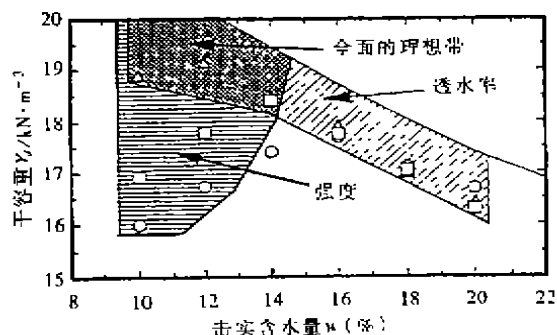


图7 根据渗透系数和抗剪强度建立的理想带^[8]

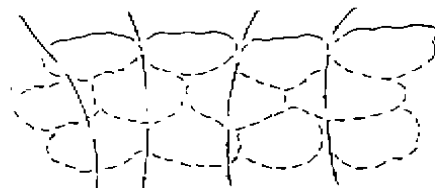
3 土块对粘土压实的影响

土块大小对压实粘土的透水性有很大影响,例如有两个粘土试样,其中一个土块大小为1.91 cm 另一个为0.51 cm,在相同的击实含水量下用同样的力加以击实,前者渗透系数可达 1×10^{-4} cm/s,后者则仅为 1×10^{-7} cm/s^[9]。Daniel 对此进行了研究,其试验结果如表3所示^[10]。

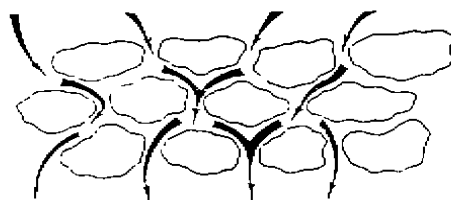
表3 土块大小对压实粘土透水性的影响

土块大小/cm	渗透系数 k / cm ² ·s ⁻¹
1	3×10^{-7}
0.5	2×10^{-8}
0.2	9×10^{-9}

根据 Olsen 提出的土块理论,压实粘土中的水流绝大部分发生在粘土土块之间相对较大的孔隙中,而不是发生在沿土块内土粒之间的微小孔隙中,如图8所示^[11]。同时根据上述理论,湿软的土块比干硬的土块更易被重塑,因此,当粘土在比最优含水量稍湿的条件下压实时,湿软的土块会被重塑,从而使土块之间的孔隙变小,渗透系数降低(见图9)。



重塑土块



无粘结的土块

图8 土块重塑对压实粘土透水性的影响
土块之间的孔隙

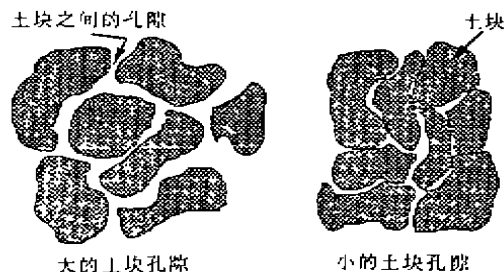


图9 土块孔隙

现场施工应保证粘土块被彻底重塑,而且要消除土块之间的大孔隙。施工时可采用下列两种方法破坏土块。

a. 用较高的填筑含水量使土块湿润,产生的湿软土块在一般的压实能量下容易被重塑成没有大孔隙的土体。但应注意在高含水量情况下不能影响合理施工。

b. 填土在低含水量条件下压实,但使用很重的碾压机具,使土块被压碎,从而消除土块之间的大孔隙。

在施工现场要使填土的含水量和压实功能配合好是十分困难的。如果填土较干,需要相当高的压

实能量才能得到较低的透水率,而对较湿的土,对压实能量的要求就可以比较低。

最合适的填筑含水量还决定于其它一些因素,如担心在长时间内土会被晒干或发生膨胀以及对抗剪强度的考虑等。可以根据对除透水性要求以外的其它因素的考虑,决定采用较低的或较高的含水量范围。

4 压实功能

另一个对粘土衬垫材料工程性质起重要作用的变化因素是压实功能。如图 10 所示,压实功能增加,则干密度(干容重)增加,最优含水量减少,渗透性也减弱。在最佳湿度下压实填土,即使其干密度并未适当增加,其透水率也可通过增加压实功能降低 1 至 2 个数量级^[12]。大的压实功能可以帮助重塑土块,使土粒重新排列,减少土中大孔隙的大小和连接,并降低透水率。关于压实方式,Mitchell 等发现揉搓压实的方式比其它压实方式更能得到低的透水率。他们建议使用羊脚碾,因为“羊脚”能更好地重塑土块^[13]。

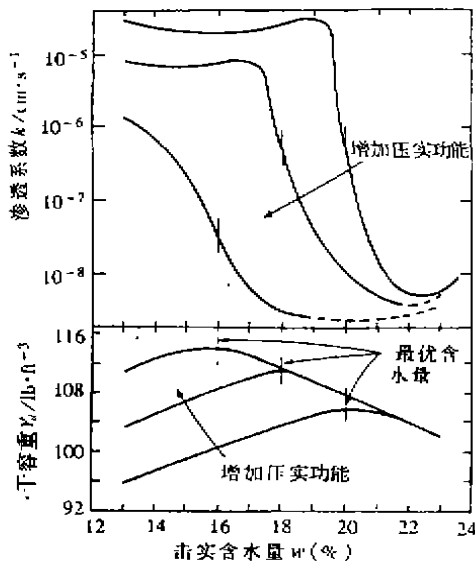


图 10 压实功能及含水量对压实粘土透水性的影响^[12]

在给定某一面积上碾压的遍数和每次需压实的压实层厚度后,施加于土体的压实功能,其大小取决于碾压机重量。增加碾压重量和遍数或减少压实层厚度均能提高压实效果。在压实低透水率粘土衬垫时,这些因素的最佳组合则取决于土的含水量和下卧地基的坚固程度。如果填土非常潮湿或下卧地基很软,压缩量较大,例如在压实填埋场封顶覆盖时,其下 30~60 cm 处恰好为城市固体废弃物,此时就不宜使用很重的碾压机。

• 58 •

常用的碾压机的重量一般超过 32 t,它适用于压实填埋场底部的衬垫,而对大多数覆盖层来说,这样的碾压机太重了,因为在覆盖层下不远处就是压缩性很大的废弃物。静重为 14~18 t 的碾压机可用于封顶系统低透水率层的压实。

碾压机在给定的面积上应碾压足够的遍数以保证达到所需的压实度,最小的碾压遍数是不固定的,但一般认为至少应碾压 5~10 遍,才能施加足够的压实能量并保证施工质量^[12]。

5 压实层界面的处理

粘土衬垫是通过在水平方向逐层压实而填筑起来的,每次倒土压实的土层称为压实层。粘土衬垫施工时,如果新的填土直接倒在原来压实层没有经过扒松的表面上,两层填土的界面会形成一个高透水率、低强度的地带。经过衬垫流动的水分就能通过此界面迅速扩展到下层填土中去,如图 11 所示。为了避免形成界面水流,先填的压实层表面应在加下一层填土之前预先扒松。

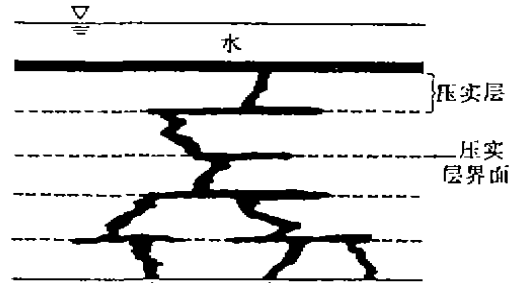


图 11 由于压实层结合较差形成的水流

显然,存在着一个最大的压实层厚度,超过这个厚度,碾压机就不能再重塑土块并使其粘合,或对于给定的含水量,压实层界面搭接将达不到好的效果。通常每层松的倒土厚度为 20~30 cm,压实后的厚度为 15 cm^[14]。使用全贯入羊脚碾可以将新的填土直接压入老的填土中去。“全贯入”的意思就是碾压轮上的脚高比新倒上去尚未碾压的填土厚度还要大,所以“脚”可以充分贯入到松土中(包括在老土顶部被扒松的土)并使压实层界面得到充分压实,如图 12 所示。

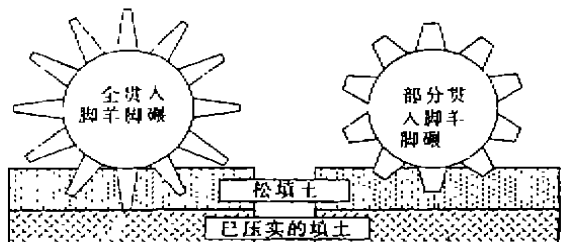


图 12 带有部分贯入和全贯入脚的羊脚碾

6 预防干裂

对于固体废弃物填埋场,用于填筑低透水率衬垫和覆盖的肥粘土,通常均在比最优含水量更潮湿的情况下堆填和压实,这样可以在施工时使压实粘土的透水率最低。但是在相对比较干燥的地区或粘土可能遭到季节性干旱的地区,如果衬垫最终处于干燥状态,上述做法可能适得其反,因为潮湿的压实粘土如果容许干燥则极易产生大的开裂。

产生以上问题的根本原因是当压实粘土的填筑含水量增加时其收缩势也同时增加。而为了使压实粘土的透水率不超过 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$,粘土衬垫压实时的含水量往往大于最优含水量。如果根据透水性要求在湿润条件下压实是有效的,那么在干旱地区,甚至在干旱季节靠近表面的粘土会发生干裂的半干旱地区,用湿粘土施工是否同样合适呢?问题的关键是要找到一个压实土料的方法,使压实后的粘土既满足低透水率又满足低收缩势的要求。

根据许多学者的研究,要在干旱地区或在因其它原因可能会产生干裂的地方设计低透水性压实粘土衬垫或覆盖,其有效的基本设计原理可大致简述如下[15-19]。

a. 使用含砂的土料。土体干缩的趋势将随着土中粘粒含量的增加而增加,粘质砂土兼有低透水性和低压缩性的特点,可以使干燥时土体的收缩率减小。

b. 在最低填筑含水量下压实。有些土可以在相对比较干燥的条件下压实,只要有较高的压实能量,也能做到既满足低透水率又满足低收缩势的要求,即使土体被晒干也只会发生较小的收缩和干裂。

c. 保护粘土衬垫。薄层表土或未加覆盖的土工膜均不能保护其下压实粘土衬垫不被晒干和开裂,但在湿润地区用适当厚度的覆盖土层或在干旱地区用有表土覆盖的土工膜均可有效地防止其下压实粘土衬垫发生干裂。在封顶系统中,应考虑使用复合土工膜和土质保护层,以尽可能减小干燥对隔离层的影响。

参考文献

- 1 Qian Xuede. Geotechnical aspects on landfill design. The University of Michigan, Department of Civil and Environmental Engineering, Ann Arbor, Michigan, USA, May, 1995
- 2 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(5,6)
- 3 钱学德,郭志平. 填埋场最终覆盖(封顶)系统. 水利水电科技进展, 1997, 17(3)
- 4 Shakoar A, Cook B D. The effect of stone content, size, and shape on the engineering properties of a compacted silty clay. Bulletin Association of Engineering, Geologists, 1990, XXVII (2): 245 ~ 253
- 5 Shelley T L, Daniel D E. Effect of gravel on hydraulic conductivity of compacted soil liners. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1993, 119(1): 54 ~ 68
- 6 Daniel D E, Benson C H. Water content-density criteria for compacted soil liners. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1990, 116(12): 1811 ~ 1830
- 7 USEPA. Quality assurance and quality control for waste containment facilities. U S Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, D C, 20460, EPA/600/R-93/182, September, 1993
- 8 Daniel D E, Wu Y K. Compacted clay liners and covers for arid sites. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1993, 119 (2): 223 ~ 237
- 9 USEPA. Design, operation, and closure of municipal solid waste landfills. U S Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, D C, 20460, EPA/625/R-94/008, September, 1994
- 10 Daniel D E. Predicting hydraulic conductivity of clay liners. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1984, 110(4): 285 ~ 300
- 11 Olsen H W. Hydraulic flow through saturated clays. Clays and Clay Minerals, 1962, 9(2): 131 ~ 161
- 12 USEPA. Design and construction of RCRA/CERCLA final covers (seminar publication). U S Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, D C, 20460, EPA/625/4-91/025, May, 1991
- 13 Mitchell J K et al. Permeability of compacted clay. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, 1965, 91 (4): 41 ~ 65
- 14 Herrmann J G, Elsbury B R. Influence factors in soil liners construction for waste disposal facilities. Geotechnical Practice for Waste Disposal, ASCE, Ann Arbor, Michigan, 1987. 522 ~ 536
- 15 DeJong E, Warkentin B P. Shrinkage of soil samples with varying clay content. Canadian Geotechnical Journal, 1965, 2(1): 16 ~ 22
- 16 Boynton S S, Daniel D E. Hydraulic conductivity test on compacted clay. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1985, 111(4): 465 ~ 478
- 17 Kleppe J H, Olson R E. Desiccation cracking of soil barriers. Hydraulic Barriers in Soil and Rock, ASTM 874, 1985, 263 ~ 275
- 18 Montgomery R J, Parson L J. The omega hills final cover test plot study: three-year data summary. Presented at the 1989 Annual Meeting of the National Solid Waste Management Association, Washington DC, 1989
- 19 Corser P, Cranston M. Observations on long-term performance of composite clay-liners and covers. Geosynthetic Design and Performance, Vancouver Geotechnical Society, Vancouver, British Columbia, Canada, 1991

(收稿日期: 1997-03-03 编辑: 马敬峰)