

# 现代卫生填埋场的 设计与施工

钱学德 郭志平 编著  
施建勇 卢廷浩

中国建筑工业出版社

2 705

X705  
2002020

# 现代卫生填埋场的设计与施工

钱学德 郭志平 编著  
施建勇 卢廷浩

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

现代卫生填埋场的设计与施工/钱学德等编著.-北京:  
中国建筑工业出版社, 2001.5  
ISBN 7-112-04591-6

I. 现... I. 钱... III. ①垃圾处理厂-建筑设计  
②垃圾处理厂-工程施工 IV. X705

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 04992 号

现代卫生填埋是世界各国处理城市固体废弃物的主要方法。填埋场的建设必须具备合适的水文、地质和环境条件, 并要进行专门的规划、设计、精心施工和科学管理, 严格防止对周围环境造成污染。它应建有不透水的衬垫系统和淋滤液收集、处理系统; 还要提供填埋废气的排除或回收通道; 并对淋滤过程中产生的水、气和附近地下水源进行监测。本书系统论述了填埋场地的选定, 废弃物的工程性质, 淋滤液和填埋废气的产出机理, 并对填埋场各组成系统的设计、施工方法作了详细介绍。对于近年来与此有关的环境土工方面的研究成果和美国环保部门的有关规定也作了较多的介绍和评述。书中附有大量插图和参考文献, 对主要的分析计算方法均有算例, 可供工程技术人员实际使用, 也可供大专院校有关专业师生和科研人员作参考。

## 现代卫生填埋场的设计与施工

钱学德 郭志平 编著  
施建勇 卢廷浩

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京建筑工业印刷厂印刷

\*

开本: 787 × 1092 毫米 1/16 印张: 18½ 字数: 447 千字

2001 年 5 月第一版 2001 年 5 月第一次印刷

印数: 1—5,000 册 定价: 26.00 元

ISBN 7-112-04591-6

TU·4098 (10041)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

## 前 言

由于经济快速发展，城市化扩大，居民消费水平日益提高，我国城市垃圾处置及污染防治已成为环境保护的突出问题。目前，我国人均年产垃圾已达 450kg 以上，城市垃圾年产出量超过 1 亿吨，年增长率为 8%~10%，已与发达国家相接近。由于长期缺乏科学管理和合理处置，全国每年都有上百起垃圾污染事故发生。一个不合格的垃圾堆场就是一个大的再生污染源，其污染延续时间可以长达数十年甚至上百年。一旦地下水源和周围土壤被污染，想用人工方法实施再净化，技术上将十分困难，其费用也极其昂贵。

现代卫生填埋工程（城市固体废弃物填埋场）是世界各地处理城市固体废弃物的主要方法。一个现代卫生填埋场的建设必须具备合适的水文、地质和环境条件，并要进行专门的规划、设计，精心的施工和科学的管理。为严格防止地下水被污染，它应建有淋滤液的收集和处理系统，还要提供填埋废气（主要为沼气和二氧化碳）的排除或回收通道，并对淋滤过程中产生的水、气和附近地下水源进行监测，还必须满足一定的防洪标准。

我国卫生填埋工程起步较晚，目前各大城市的垃圾填埋场大多还达不到严格防止再生污染的要求，与国外发达国家相比尚有较大差距。随着城市建设的逐步规范，两个文明程度的进一步提高，居民的环保意识和对周围环境的要求将愈来愈高，建设一批高标准的、对周围环境不产生二次污染的大型卫生填埋场已是政府、人民和有关部门的共同要求。但目前国内对卫生填埋场建设尚无统一的规范或标准，也缺少全面、系统论述现代卫生填埋场规划、设计、施工方法的书籍，介绍国外这方面经验的资料也较少。各级城建、环保等有关部门和设计、施工单位的工程技术人员以及高校、科研单位有关专业的师生及研究人员都迫切希望有一本全面介绍这方面知识的书籍，本书的编写和出版将填补这一领域的空白。

本书第一作者，河海大学兼职教授，旅美学者钱学德博士长期在美从事卫生填埋场的设计、施工和计划审定工作，现为美国密歇根州环保署官员，负责对卫生填埋场计划的技术审查和核批，并在密歇根大学开设“卫生填埋工程的设计和施工”这门课程。本书就是根据他讲授该门课程的英文讲稿进行编译和撰写的。书中系统论述了填埋场地的选定、固体废弃物的工程性质、淋滤液和填埋场气体的产出机理，并对填埋场各组成系统的设计、施工方法进行详细介绍，对于近年来与此有关的环境土工方面的研究成果和美国联邦环保局和州环保署的有关规定也作了较多的介绍和评述。书中附有大量插图和参考文献，对主要的计算分析方法均有算例，便于实际应用。参加本书编译和撰写工作的有河海大学郭志平教授（第一、二、三、六、十一、十三、十四章），施建勇教授（第四、五、十、十五章）和卢廷浩教授（第七、八、九、十二章），由郭志平教授负责统稿并作部分修改，中文初稿曾经由钱博士过目。

由于缺少国内填埋工程建设的资料，本书所介绍的内容基本上是国外的（主要是美国的），未能紧密结合国内的实际情况，书中某些理论观点、技术方法、施工经验仅能提供给国内有关单位及技术人员作参考。我们希望国内同行经过实践和总结能尽早订出我们自己的规范和标准，出版出能反映我国卫生填埋工程技术水平和工程经验的书籍。如果本书能

对此有所帮助，则编者将感到无比欣慰。

本书编写、出版过程中得到河海大学岩土工程研究所和深圳市下坪固体废弃物填埋场的大力支持，编者十分感谢。由于水平所限，书中出现错误或不当之处，在所难免，还望读者不吝施教。

本书的出版得到“教育部优秀青年教师教学科研奖励计划”和“江苏省高校跨世纪学术带头人培养计划的资助”。

编者

2000年12月于南京

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
1.1 填埋场的形式及组成 .....	2
1.2 复合衬垫系统 .....	5
参考文献.....	8
<b>第二章 填埋场场址的选定</b> .....	9
2.1 资料收集.....	10
2.2 选择场址的标准.....	11
2.3 钻探与取样.....	12
2.4 土料料场勘察.....	13
2.5 实验室试验方法.....	15
2.6 可行性报告的准备工作.....	15
参考文献 .....	16
<b>第三章 压实粘土衬垫</b> .....	17
3.1 传统压实粘土和填埋场粘土衬垫的比较.....	17
3.2 土的压实与渗透.....	19
3.3 压实粘土衬垫的设计.....	22
3.4 土块对透水性的影响.....	27
3.5 砾石含量对土体透水性的影响.....	30
3.6 冻融对土体透水性的影响.....	31
参考文献 .....	35
<b>第四章 柔性膜衬垫</b> .....	38
4.1 材料类型和土工膜的厚度.....	38
4.2 土工膜在填埋场中的使用.....	39
4.3 土工膜的拉伸与摩擦.....	41
4.4 不平衡摩擦力导致的拉伸应力.....	44
4.5 沉降引起的拉应力.....	47
4.6 土工膜的伸出和锚固槽.....	49
4.7 通过衬垫的渗漏量估算.....	56
参考文献 .....	61
<b>第五章 土工聚合粘土衬垫 (GCL)</b> .....	63
5.1 钠膨润土的构造.....	63
5.2 土工聚合粘土衬垫类型和目前应用情况.....	64
5.3 钠膨润土的水化作用.....	67
5.4 土工聚合粘土衬垫的工程特征和性状.....	68
5.5 通过土工织物的渗出势能.....	72

5.6	土工聚合粘土衬垫与压实粘土衬垫的区别	73
	参考文献	75
<b>第六章</b>	<b>固体废弃物的工程性质</b>	<b>76</b>
6.1	固体废弃物的组成	76
6.2	固体废弃物的重力密度	79
6.3	固体废弃物的含水量	80
6.4	固体废弃物的孔隙率	82
6.5	固体废弃物的透水性	82
6.6	固体废弃物的持水率和凋萎湿度	83
6.7	固体废弃物的强度	84
	参考文献	87
<b>第七章</b>	<b>填埋场淋滤液的特性</b>	<b>90</b>
7.1	影响淋滤液产出量的因素	90
7.2	工作条件下淋滤液产出率的估算	91
7.3	封闭条件下淋滤液产出率的估算——水量平衡法	93
7.4	填埋场淋滤液特性的水文估算模型 (HELP)	99
	参考文献	104
<b>第八章</b>	<b>淋滤液的排放</b>	<b>107</b>
8.1	淋滤液排水层的构成	107
8.2	土质排水层与反滤层	110
8.3	土工织物滤水层的设计	112
8.4	土工网淋滤液排水层的设计	121
8.5	排水层最大淋滤液水头的估算	128
	参考文献	135
<b>第九章</b>	<b>淋滤液收集系统</b>	<b>137</b>
9.1	底面坡降	137
9.2	淋滤液收集槽	138
9.3	淋滤液收集管的选定	140
9.4	淋滤液收集管的变形与稳定	143
9.5	淋滤液收集池及提升管	150
9.6	淋滤液收集泵	152
	参考文献	158
<b>第十章</b>	<b>填埋沉降</b>	<b>159</b>
10.1	固体废弃物沉降机理	159
10.2	覆盖土层的效应分析	160
10.3	填埋场沉降速率	162
10.4	固体废弃物的压缩性	166
10.5	固体废弃物沉降的估算	169
10.6	估算填埋场沉降的其他方法	173

10.7	填埋场地基沉降估算	175
	参考文献	178
<b>第十一章</b>	<b>填埋场稳定分析</b>	<b>181</b>
11.1	填埋场边坡破坏的型式	181
11.2	机理分析及土的工程性质	184
11.3	边坡土体的稳定性	185
11.4	边坡位置多层衬垫系统的稳定性	188
11.5	固体废弃物的稳定性	197
	参考文献	202
<b>第十二章</b>	<b>气体收集系统</b>	<b>203</b>
12.1	填埋场气体的生成	203
12.2	影响填埋场气体生成的因素	204
12.3	填埋场气体的流动	205
12.4	气体收集系统的类型与组成	207
12.5	填埋场气体的处理	213
12.6	气体收集系统的设计	215
	参考文献	218
<b>第十三章</b>	<b>最终覆盖系统</b>	<b>220</b>
13.1	最终覆盖系统的组成	220
13.2	最终覆盖无限边坡稳定分析	224
13.3	土体侵蚀控制	230
13.4	沉降和下陷的影响	237
13.5	地震的考虑	239
	参考文献	239
<b>第十四章</b>	<b>土质构筑物的施工</b>	<b>241</b>
14.1	基底的处理	241
14.2	土质衬垫的施工	242
14.3	铰台的施工	249
14.4	淋滤液收集槽的施工	250
14.5	砂土排水铺盖的施工	255
14.6	地下排水层的施工	255
14.7	填埋覆盖的施工	256
14.8	含水量和密度的现场测定	257
14.9	施工质量保证和质量控制	259
	参考文献	262
<b>第十五章</b>	<b>土工合成材料的铺设</b>	<b>264</b>
15.1	材料的运输和相应的测试	264
15.2	土工膜的铺设	265
15.3	土工网的铺设	279



15.4	土工织物的铺设·····	280
15.5	土工复合材料的铺设·····	283
15.6	土工聚合粘土衬垫的铺设·····	284
	参考文献·····	286

# 第一章 绪 论

现代卫生填埋工程是有控制地处理城市固体废弃物的一种方法。城市固体废弃物一般包括生产垃圾、商业垃圾和生活垃圾。一个现代化城市的固体废弃物每天可高达数十吨以上，经过分选以后，大部分均要集中堆放到某一场地。一个开敞的、没有严格控制措施的垃圾堆，将是一个巨大的污染源，其淋滤液会污染地下水或附近的水源；排出的气体会污染空气，还会孳生蚊蝇，引来昆虫、鼠类和鸟；如果采用焚烧，则产生的烟和臭气会严重污染空气，有时还有毒；丑陋的外形也大大影响城市美好的形象。所有这些在一个规划、设计、运行和维护均很科学合理的现代卫生填埋工程中都是不存在的。现代卫生填埋工程简称卫生填埋场或填埋场，就是在铺设良好防渗性能衬垫的场地上，将固体废弃物铺成一定厚度的薄层，加以压实，并加土覆盖。其场地必须具有合适的水文、地质和环境条件，并要进行专门的规划、设计，严格施工和加强管理。为严格防止周围环境被污染，必须设有一个淋滤液收集和处理系统，还要提供气体（主要为甲烷和二氧化碳）的排除或回收通道，并对填埋过程中产生的水、气和附近的地下水进行监测，还需能达到抵御百年一遇以上洪水的设计标准。图 1.1 为一现代卫生填埋场的简图。

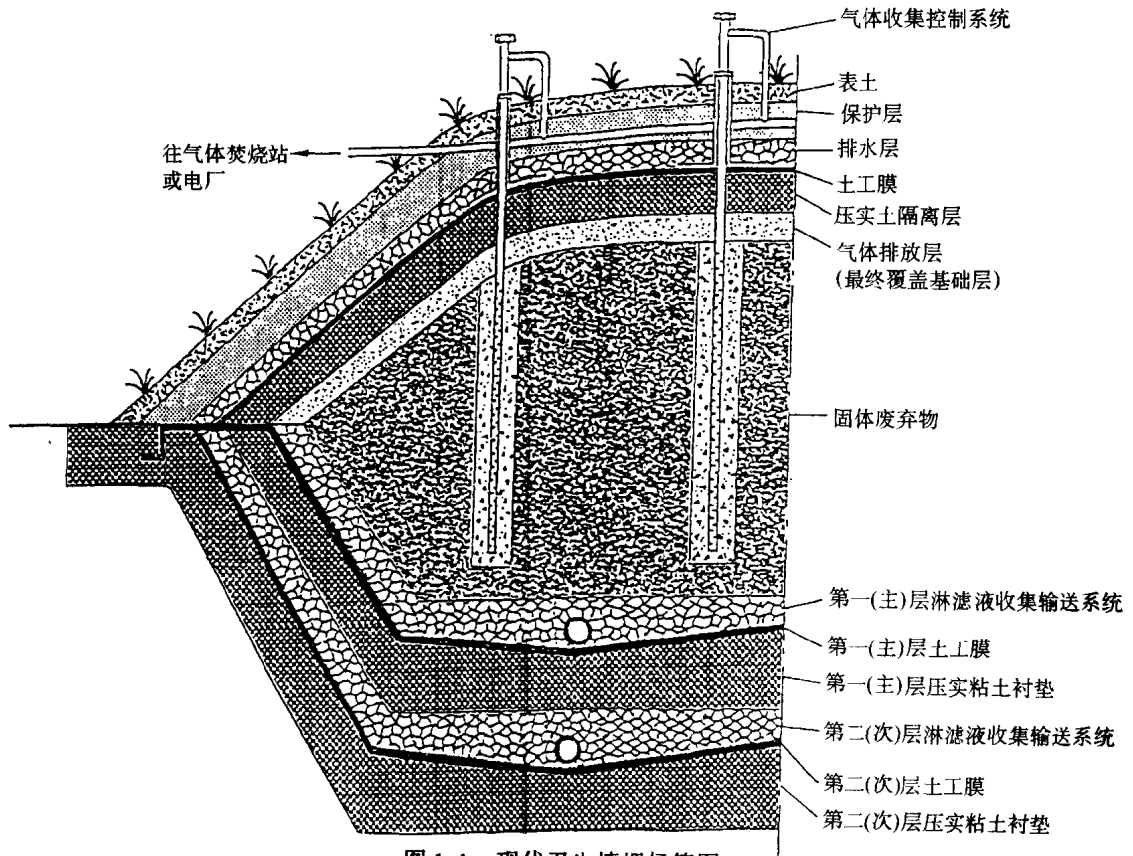


图 1.1 现代卫生填埋场简图

在填埋工程中，选择合适的场地往往是一个最重要的环节，决定性的关键是它对民众健康的影响程度，尽管为此可能会使工程变得比较复杂或需要较高的费用。同时，选择合适的场地不但可以降低工程造价，也可以使运行、监测、维护及回收淋滤液等长期费用大大降低。选址以后第二个重要环节就是设计和施工。环境土工研究领域的一个重要课题就是对卫生填埋场提出科学合理的设计原理和施工程序，以保证填埋单元短期和长期的稳定性以及它的运行性能。特别重要的是要保证衬垫系统的强度、稳定性以及耐久性。合适的设计方法应能保证填埋场和废弃物在整个施工、运行（堆填废弃物）和封闭阶段都是稳定的。根据设计要求选择合适的施工材料和进行施工质量控制同样十分重要。在场地调查时搜集充分可靠的资料，采用已被证明了的科学设计方法可大大减少填埋场对周围环境可能带来的危害。

中国自改革、开放以来，随着经济发展和都市规模的扩大，城市固体废弃物的产出量逐年增加，1995年统计全国工业固体废弃物产出6.5亿t（不含乡镇企业），历年累计堆存量已达66.41亿t，占地55085公顷，并以每年8%~10%的速度递增。全国城市垃圾产出量已达1.0亿t/天以上，人均日产量超过1kg。面对数量这么庞大的固体废弃物，为了减少对环境的危害和利用有限的土地资源，必须大力发展现代化的卫生填埋场，使城市固体废弃物达到无害化的最终归宿。

目前，卫生填埋方法在各发达国家应用非常广泛，例如英国在1978年~1979年占废物处置量的89%，前西德1979年占62%，日本是以谋求废物能源化为目标的国家，但填埋处理量在1979年仍占52%。在美国，每年填埋处置的废弃物占80%，美国联邦环保局（USEPA）和很多州都已详细制定了关于填埋场选址、设计、施工、运行、水气监测、环境美化、封闭性监测以及30年内维护的有关法规。现代填埋场无论在设计概念、原则、标准和方法上和所采用的防渗、排水材料都与传统填埋场有本质区别。目前，工业发达国家在设计填埋场时，大多采用多重屏障的概念，利用天然和人工屏障，尽量使所处置的废物与生态环境相隔离。不但注意淋滤液的末端处理，更强调首端控制，力求减少淋滤液产出量，提高废物的稳定性和填埋场的长期安全性，尽量降低填埋场操作和封闭后的费用。

中国自60年代以后，特别是近年来，固体废弃物填埋技术有了很大发展，固体废弃物的处置方法从简单的倾倒、分散的堆放向集中处置、卫生填埋方向发展。部分城市建成了卫生和安全的填埋场，如杭州天子岭垃圾填埋场，北京阿苏卫、北神树、安定三个垃圾填埋场，深圳下坪废物填埋场，上海的老港填埋场和江镇堆场，佛山市五峰山卫生填埋场等，它们大多均设有防渗的压实粘土衬垫和淋滤液及气体收集系统，还有气、水污染的检测设备。但总的看来，国内大部分已建的填埋场在设计理论和方法，高性能防渗材料和排水材料的开发等方面与国外尚有较大差距，设计人员对填埋场设计还缺乏足够的知识和经验，也无设计标准可供参考，所设计的填埋场不仅耗资大，而且其安全性也不十分理想。因此，我们还需要认真学习国外发达国家的经验，通过实践加以总结，结合我国的实际情况，尽快制定出我国自己的设计标准和法规来。

## 1.1 填埋场的形式及组成

大多数卫生填埋工程的项目应包括：填埋场场地平整，基底处理，填埋单元划分，周

边和单元之间的通道，衬垫系统，淋滤液收集系统，气体收集系统，封顶级配，封顶剖面，雨水管理系统，地下水监测系统和填埋气体监测系统。

图 1.2 表示固体废弃物的堆填过程和封闭后的情况。不同填埋单元之间的相互联系和填埋的次序在填埋场设计中十分重要，根据这些单元如何组合，从几何外形来看，一般可将填埋场的型式分成四类（见图 1.3）。

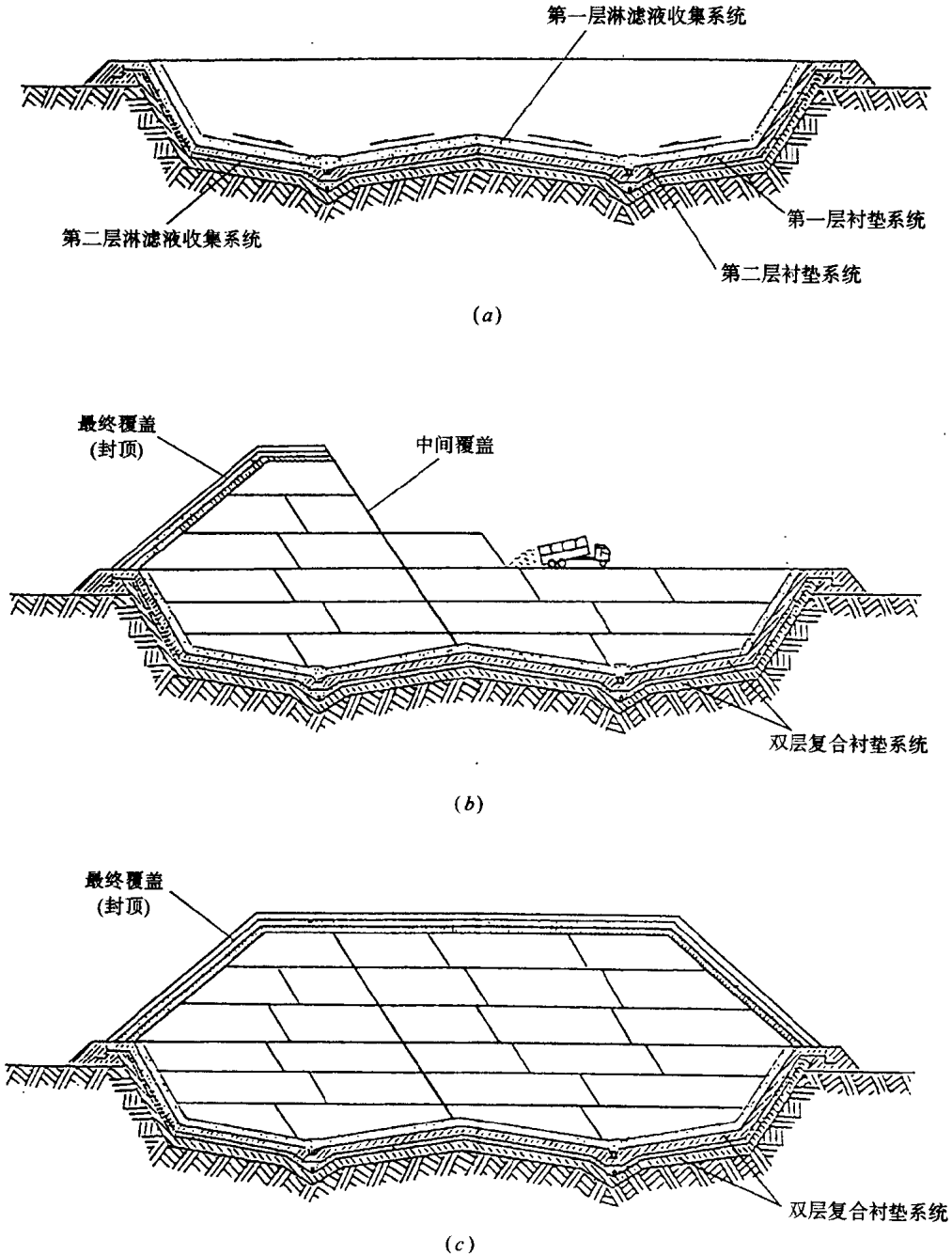


图 1.2 废弃物填埋过程和封闭

(a) 填埋单元基底和淋滤液收集系统；(b) 填埋场固体废弃物的堆填；(c) 封顶后的封闭填埋场

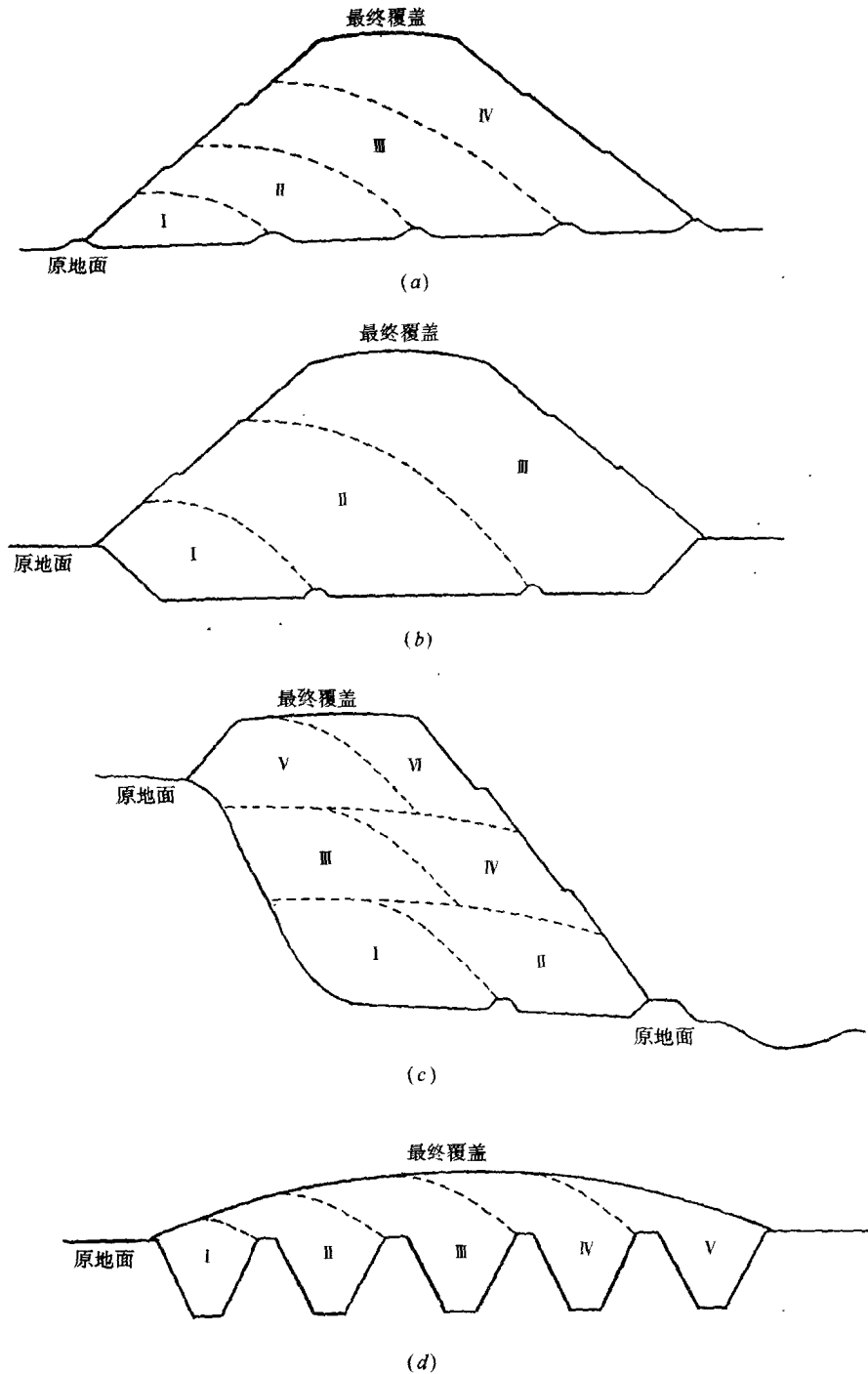


图 1.3 填埋场四种类型

(a) 平地堆填; (b) 地上和地下堆填; (c) 谷地堆填; (d) 挖沟堆填

(1) 平地堆填: 填埋过程只有很小的开挖或不开挖 (图 1.3a), 通常适用于比较平坦且地下水埋藏较浅的地区。

(2) 地上和地下堆填: 填埋场由同时开挖的大单元双向布置组成, 一旦两个相邻单元填

满了,它们之间的面积也就填满了(图 1.3b),通常用于比较平坦但地下水埋藏较深的地区。

(3) 谷地堆填:堆填的地区位于天然坡度之间(图 1.3c),它可能包括少许地下开挖。

(4) 挖沟堆填:与地上和地下堆填相类似,但其填埋单元是狭窄的和平行的(图 1.3d)。通常仅用于比较小的废物沟。

在现代卫生填埋场设计中最重要关键部位包括衬垫系统,淋滤液收集系统,气体收集系统和最终覆盖(封顶)系统。

衬垫系统位于填埋场底部和四侧,它是一种水力屏障,用来隔离固体废弃物以免对填埋场四周的土和地下水产生污染。衬垫系统是填埋场最重要的组成部分。填埋场淋滤液是由于降水经过废弃物过滤和对废弃物压榨产生的,它是一种典型的污染液,若不加处理排入周围土体及地下水中,将对土体和地下水产生严重污染。淋滤液收集系统用来收集填埋场中产生的淋滤液并将其排放至废水处理站或集水池集中进行处理。城市固体废弃物分解时会产生大量气体,其中两个主要成分为甲烷( $\text{CH}_4$ )和二氧化碳( $\text{CO}_2$ ),气体收集系统用来收集废弃物中有机成分分解时产生的气体,收集后的气体可以用来发电或有控制地进行燃烧。对填埋场进行封顶的目的是尽量减少封闭后降水对填埋场的渗入以减少淋滤液的产生。

## 1.2 复合衬垫系统

发挥填埋场封闭系统正常功能的关键部位是单层或多层的衬垫,图 1.4 至图 1.8 表示美国常用的几种衬垫的剖面图。这些衬垫剖面的大致使用时间为:1982 年以前,单层粘土衬垫(图 1.4);1982 年,单层土工膜衬垫(图 1.5);1983 年,双层土工膜衬垫(图 1.6);1984 年,单层复合衬垫(图 1.7);1987 年以后,带有两层淋滤液收集系统的双层复合衬垫(图 1.8)。

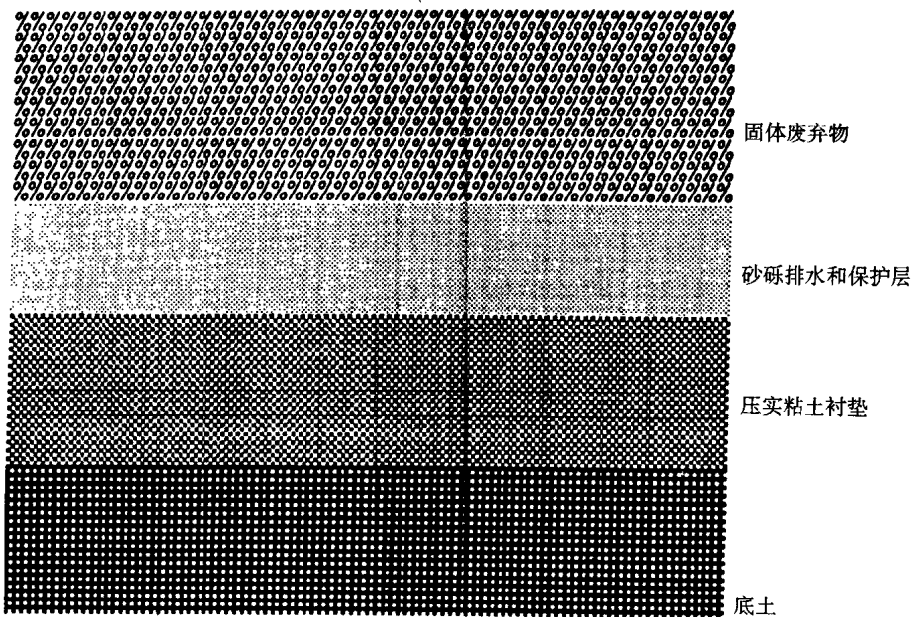


图 1.4 单层粘土衬垫

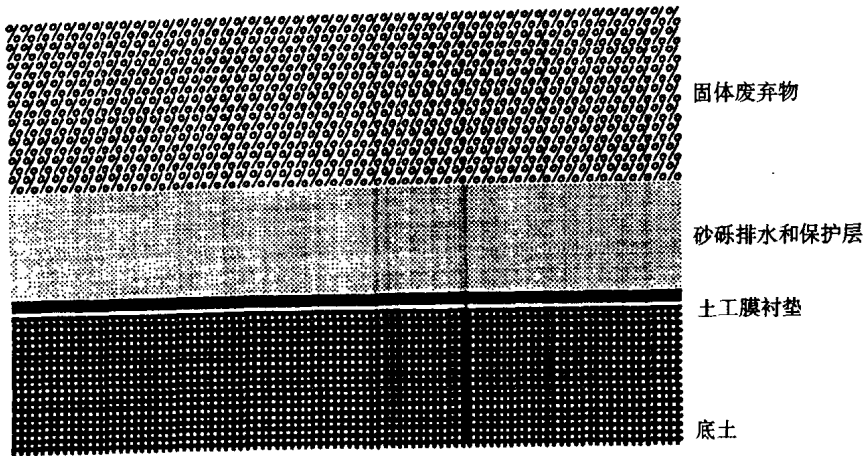


图 1.5 单层土工膜衬垫

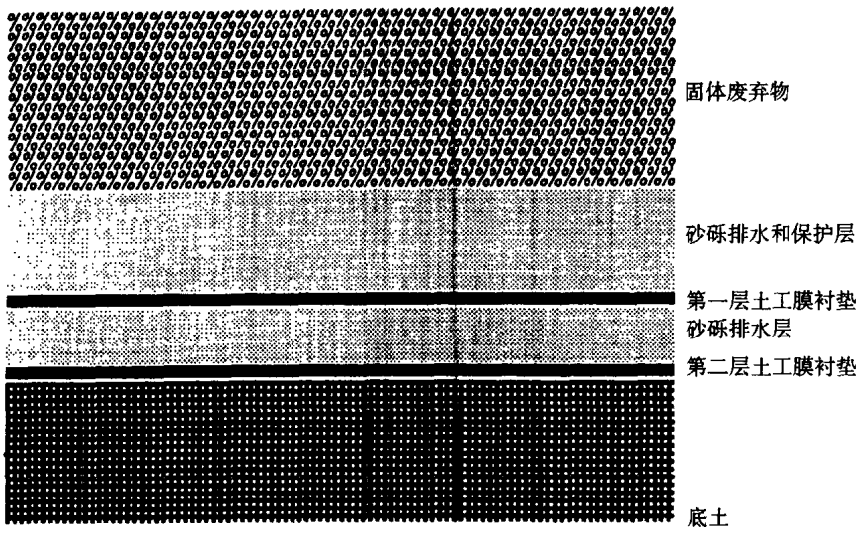


图 1.6 双层土工膜衬垫系统

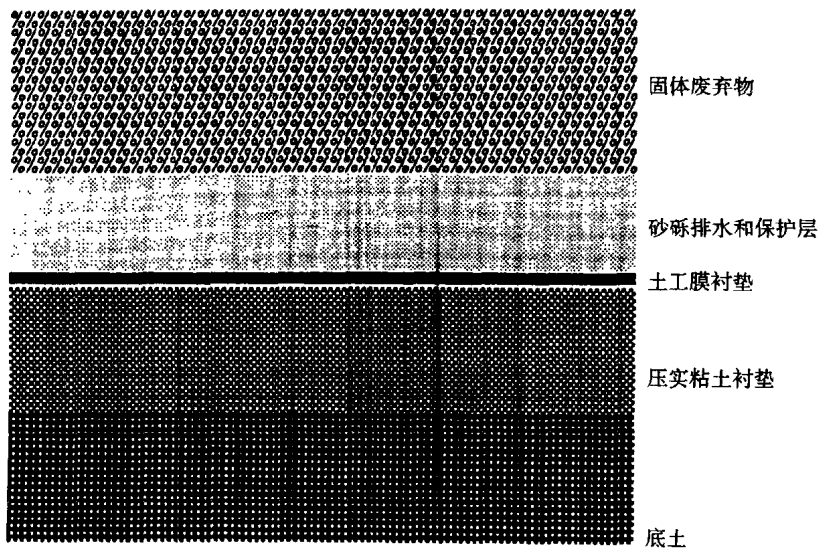


图 1.7 单层复合衬垫系统

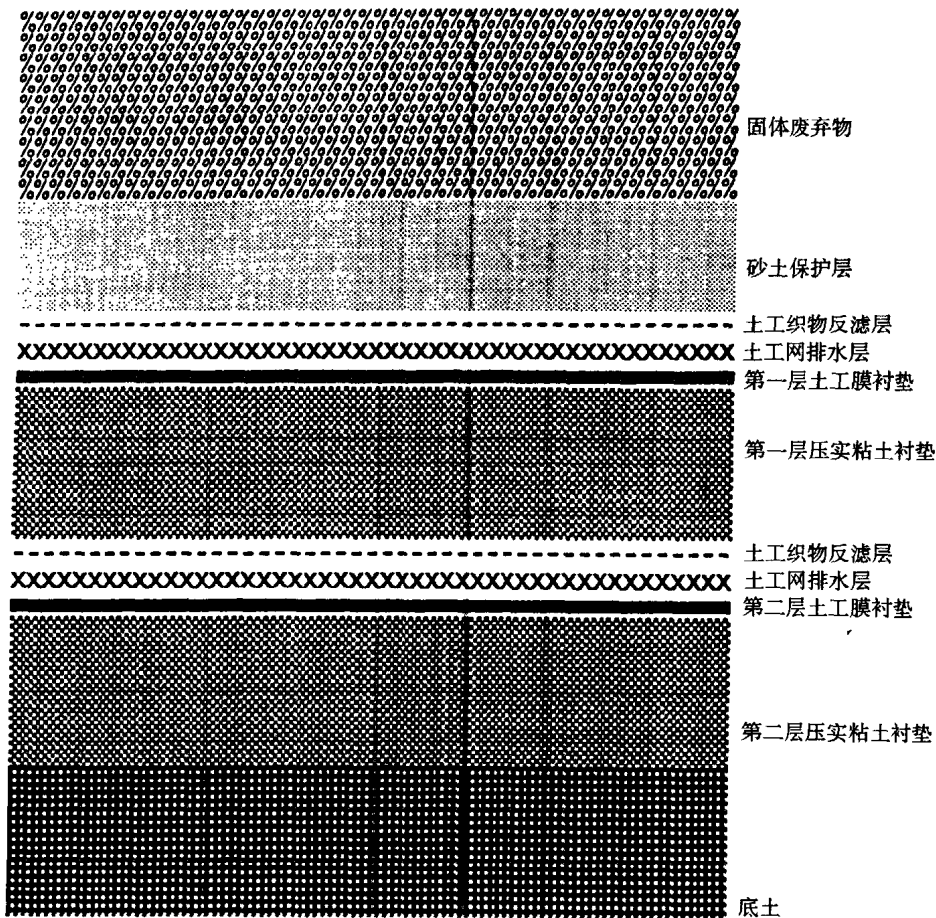


图 1.8 双层复合衬垫系统

在美国，根据新环保法的要求，带有主、次两层淋滤液收集系统的双层复合衬垫已被广泛应用于城市固体废弃物填埋场。双层复合衬垫从底部到顶部由以下部分组成（参见图 1.8）：底层为厚度不小于 3m 的天然粘土或 0.9m 厚的第二层压实粘土衬垫；然后依次向上为第二层合成材料衬垫，二次淋滤液收集系统，0.9m 厚的第一层压实粘土衬垫，第一层合成材料衬垫，首次淋滤液收集系统；顶部是 0.6m 厚的砂砾铺盖保护层。淋滤液收集系统则由一层土工网和土工织物组成。合成材料衬垫的厚度应大于 1.5mm，底层和压实粘土衬垫的渗透系数应小于或等于  $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 。

复合衬垫可以克服单层土工膜衬垫偶然存在破洞、接缝等缺陷。图 1.9 为复合衬垫工作过程的草图，并和单独的土工膜或土质衬垫进行对比。若在土工膜上有一个洞，而它下面的土层渗水性又较强，则淋滤液将极易经过这个洞渗出。单独的土质衬垫虽然透水性较低，但渗流将在整个面上发生。对于复合衬垫，液体虽然很容易经过土工膜中的孔洞流出，但会遇到透水性很低的压实粘土，阻止它继续向下渗透，因此，经过土工膜中孔洞的泄漏量会因而大大减少。同时，经过土质衬垫的泄漏量又因在其上设置有土工膜，尽管膜上偶然存在有孔洞或接缝处有缺陷，但因为经过土质衬垫的流动面积大大减少了，泄漏液体的流动速率将大为降低，泄漏量也可大为减少。

为了有效地实现复合的目标，土工膜的铺设必须和土质衬垫形成紧密的水力接触。通



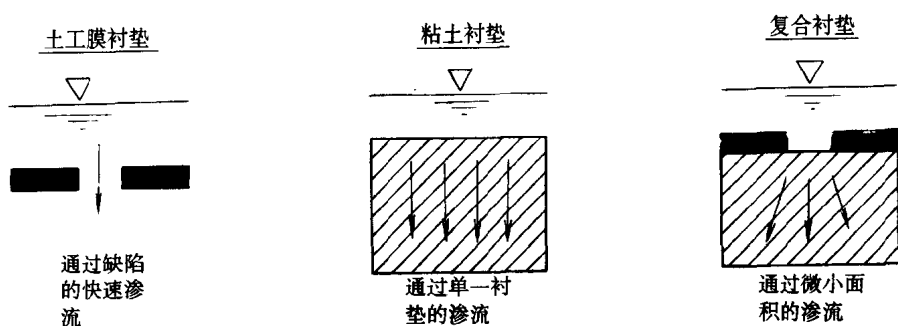


图 1.9 经过土工膜、土和复合衬垫的渗流模式

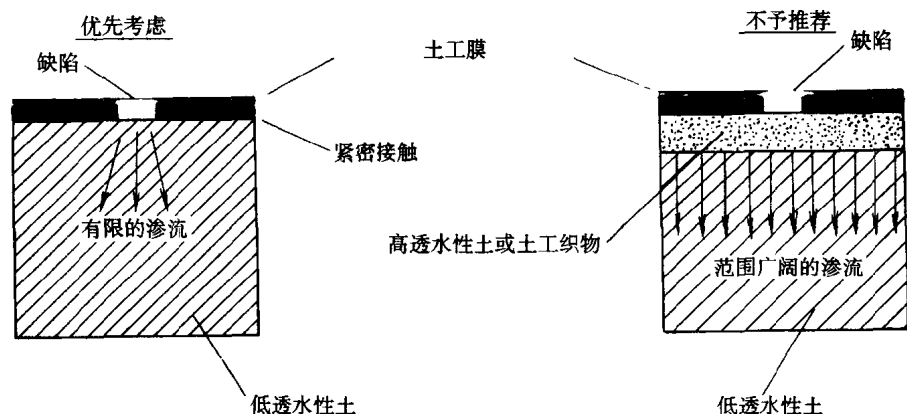


图 1.10 为使土工膜和压实粘土紧密接触复合衬垫的合理设计

常不能在土工膜和土质衬垫之间用高透水性的材料如砂垫层或土工织物隔开，否则紧密的水力接触将会被破坏（见图 1.10）。如果在土质衬垫中存在有可能刺破土工膜的石子，则必须加以剔除，或将专门经过挑选的土料作为隔离层放在与土工膜的接触面上。为了获得紧密的接触，设置土工膜的压实粘土衬垫表面要用滚筒式碾压机碾压光滑。另外，土工膜在铺设和回填时都应尽量减少折皱。

### 参 考 文 献

1. Daniel, D. E. , (1993a) "Landfill and Impoundments," Geotechnical Practice for Waste Disposal, Chapter 5, Edited by David E. Daniel, Chapman & Hall, pp. 97-112.
2. 钱学德, 郭志平 (1995). 美国的现代卫生填埋场、水利水电科技进展, Vol. 15, No. 5~6, pp. 8-12, pp. 27-31
3. 钱学德, 郭志平 (1997). 填埋场复合衬垫系统. 水利水电科技进展, Vol. 17, No. 5, pp. 64-68