

生物反应器填埋场 理论与技术

SHENGWUFANYINGQI
TIANMAICHANG LILUN YU JISHU

李启彬 刘 丹 主编



中国环境科学出版社

生物反应器填埋场理论与技术

李启彬 刘 丹 主编

中国环境科学出版社·北京

前 言

近年来,随着城市化进程的加快和人民生活水平的不断提高,城市生活垃圾产生量也迅速增长,生活垃圾的处理处置给城市可持续发展带来了巨大的压力。20 世纪 60 年代以来,各国都围绕着如何处理城市生活垃圾开展了大量的研究工作。迄今为止,已发展了以卫生填埋、焚烧和堆肥为主的 3 种成熟可靠的城 市生活垃圾处理处置技术。长期以来,卫生填埋因其处理能力大、适应性强、运行费用低等优点成为目前大多数国家,尤其是发展中国家处理城市生活垃圾的主要方法。在我国,大部分城市的生活垃圾也直接进入填埋场进行处置。

但是,由于传统填埋场具有二次污染较为严重,稳定化时间长,资源化利用不足等问题,影响了垃圾填埋处置方式的进一步发展和应用。而生物反应器填埋场通过渗滤液回灌等人工控制措施,强化了填埋场内微生物的降解活动,使填埋垃圾在较传统填埋场短得多的时间内进行处理,并通过气体回收利用、矿化垃圾开采、填埋场地持续使用等手段最大限度地实现了资源化,因而生物反应器填埋场是可持续的填埋场。

从 20 世纪 70 年代开始,国内外学者开展了大量的生物反应器填埋场技术研究和实践,积累了丰富的科研成果和实践经验。本书在前人相关研究的基础上,并结合课题组十余年的研究成果,对近年来国内外学者就生物反应器填埋场技术的研究成果和工程实践进行了系统梳理和全面总结。前沿新颖、针对性强、理论紧密结合实践是本书的三大特色。

本书由 7 章组成。第一章在传统填埋场的基础上,介绍了生物反应器填埋场的定义和分类,分析了生物反应器填埋场的技术优势及其面临的机遇和挑战;第二章对不同类型生物反应器填埋场的稳定机理进行了分析;第三章介绍了生物反应器填埋场渗滤液的运移规律和不同类型生物反应器填埋场的渗滤液水质特性,介绍了主要的渗滤液处理技术;第四章介绍了厌氧型、好氧型和准好氧型生物反应器填埋场气体的产生及特性,分析了气体综合利用的可行性;第五章介绍了不同类型生物反应器填埋场防渗系统、渗滤液收集和导排系统、

渗滤液回灌和处理系统、气体导排和处理系统、覆盖和封场系统的设计基本要领；第六章介绍了生物反应器填埋场的运行管理、环境管理和健康及安全管理要求；第七章在对生物反应器填埋场资源化途径分析的基础上，提出了可持续的生物反应器填埋场运行思路。

希望本书的出版，能够为大专院校师生、工程设计人员以及从事城市生活垃圾处理处置的同行们提供参考和借鉴。

本书各章的编写人员为：第一章李启彬，刘丹；第二章张爱平，韩智勇，刘丹；第三章查坤，李启彬，尹朝阳；第四章张爱平，李启彬，韩智勇；第五章韩智勇，刘丹；第六章韩智勇，刘丹，李启彬；第七章李启彬，刘丹，曾建萍。陈馨、魏巍、张卓君等也参与了部分资料整理和绘图工作，全书由李启彬、刘丹统稿。

本书得到了中央高校基本科研业务费专项资金（项目编号：SWJTU09CX059）的资助，同时在编写和出版过程中得到了中国环境科学出版社的大力支持和帮助，在此一并表示感谢！

由于编者水平有限，书中的错误和缺点在所难免，希望广大读者不吝指正。

编者

2010年6月

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 垃圾卫生填埋与传统填埋场的不足	1
第二节 生物反应器填埋场的由来与分类	6
第三节 生物反应器填埋场的优势	15
第四节 生物反应器填埋场的主要调控措施	18
第五节 生物反应器填埋场面临的机遇与挑战	20
参考文献	24
第二章 生物反应器填埋场的稳定机理	28
第一节 传统填埋场的稳定机理	28
第二节 厌氧型生物反应器填埋场的稳定机理	45
第三节 好氧型生物反应器填埋场的稳定机理	52
第四节 准好氧型生物反应器填埋场的稳定机理	57
第五节 联合型生物反应器填埋场的稳定机理	64
参考文献	65
第三章 生物反应器填埋场渗滤液的产生和处理	68
第一节 生物反应器填埋场渗滤液的产生	68
第二节 生物反应器填埋场渗滤液的运移	70
第三节 生物反应器填埋场渗滤液的水质特性	87
第四节 生物反应器填埋场渗滤液的处理	108
参考文献	119
第四章 生物反应器填埋场气体的产生与综合利用	124
第一节 生物反应器填埋场气体的产生及特性	124
第二节 生物反应器填埋场气体的综合利用	146
参考文献	152
第五章 生物反应器填埋场设计基础	155
第一节 传统填埋场设计简介	155
第二节 厌氧型生物反应器填埋场的设计基础	184
第三节 好氧型生物反应器填埋场的设计基础	212
第四节 准好氧型生物反应器填埋场的设计基础	225

参考文献.....	232
第六章 生物反应器填埋场的运行和管理	237
第一节 运行管理.....	237
第二节 环境管理.....	246
第三节 健康与安全管理.....	254
参考文献.....	258
第七章 可持续的生物反应器填埋场	261
第一节 生物反应器填埋场的资源化途径.....	261
第二节 可持续的生物反应器填埋场.....	273
参考文献.....	276

第一章 绪 论

第一节 垃圾卫生填埋与传统填埋场的不足

一、垃圾卫生填埋的发展

垃圾卫生填埋的雏形是垃圾的土地填埋。土地填埋是从传统的垃圾堆填发展起来的一项最终处置技术。早在公元前 3 000~1 000 年古希腊米诺文明时期，克里特岛首府康诺索斯的居民就曾把垃圾填入低凹的大坑中，并进行分层覆土。近代第一个城市垃圾填埋场是 1904 年在美国伊利诺伊州建成的，其后，俄亥俄州的丹顿（1906 年）、衣阿华州的德文波特（1916 年）等地也相继建成了城市垃圾填埋场。这些垃圾填埋场的建设和运行奠定了垃圾土地填埋处理的早期技术基础。早期填埋场的经验证明，将垃圾填入地下会大大减少垃圾露天堆放所带来的滋生害虫、散发臭气等问题。但是，这种早期的土地填埋方式也引起了一些其他的环境问题，如由于降雨的淋滤及地下水的浸泡，垃圾中的有害物质溶出并污染地表水和地下水；垃圾中的有机物在厌氧微生物的作用下产生以 CH_4 为主的可燃气体，从而引发填埋场的火灾或爆炸等。

20 世纪 30 年代，美国加利福尼亚州首次提出了“卫生填埋”的概念，到 20 世纪 80 年代发展为成熟的垃圾处理技术。卫生填埋与传统的垃圾堆填主要区别如下：

- （1）经过科学选址；
- （2）建设符合环保要求的工程措施；
- （3）按技术规范进行填埋作业；
- （4）填埋终了后要进行封场和封场后的维护管理。

我国垃圾卫生填埋技术发展较晚。直至 20 世纪 80 年代初，我国城市垃圾处理还是以露天堆填为主，全国无一家规范的卫生填埋场。20 世纪 80 年代中后期，垃圾的裸露堆放导致蚊子、苍蝇大量滋生，臭气熏天，而且垃圾渗滤液不经任何处理，随意排放，严重污染了周围的环境。这种状况与各城市的快速发展极不协调，不能满足群众对环保的要求，促使各地开始规划筹建比较规范的垃圾填埋场。

1985 年选址立项，1988 年建设，1991 年运行的杭州天子岭垃圾处理场是我国首家按《城市生活垃圾卫生填埋技术规范》（CJJ 17）设计建造的大型山谷型垃圾卫生填埋场。该填埋场占地 48 hm^2 ，库容 600 万 m^3 ，垃圾处理规模为 $1\,200 \text{ t/d}$ 。该填埋场场址区具有特殊的水文地质条件，故采取垂直帷幕灌浆防渗技术，能较好地防止地下水污染。20 世纪 80 年代末开始筹建的还有广州大田山垃圾填埋场、中山市垃圾填埋场、上海市老港垃圾填埋场等。进入 20 世纪 90 年代后，随着国家对环卫工作的日益重视，全国各大中城市相继建成了城市垃圾卫生填埋场。各垃圾填埋场相比 80 年代的裸露堆放场和简易填埋场

无论从选址、设计、施工还是运行管理方面都有大幅度的改进,这一时期是我国城市垃圾卫生填埋技术发展的黄金时期。20 世纪 90 年代中后期,我国相继建成了几个具有先进水平防渗层的卫生填埋场,如 1996 年建成的北海市垃圾卫生填埋场,1997 年建成的深圳市下坪垃圾填埋场,这两个填埋场也是我国最早采用 HDPE 膜水平防渗的城市垃圾卫生填埋场。此后,昆明、海口、保定、北京六里屯、天津、青岛、泉州等城市又相继建成一批采用 HDPE 膜水平防渗的垃圾卫生填埋场,表明我国的垃圾卫生填埋技术正逐步向国际先进水平看齐。

二、卫生填埋的定义

卫生填埋是利用工程手段,采取有效技术措施,防止渗滤液及有害气体对水体和大气的污染,并将垃圾压实减容,在每天操作结束或每隔一定时间用土覆盖,使整个填埋过程对公共卫生安全及环境均无害的一种土地处理垃圾方法。

卫生填埋时,通常把每天运到填埋场的垃圾在限定的区域内摊铺成 40~75 cm 的薄层,然后压实以减少垃圾的体积,并在每天操作之后用一层厚 15~30 cm 的黏土或粉煤灰覆盖、压实。压实后厚度为 2~4 cm 的垃圾层和土壤覆盖层共同构成一个单元,即填埋单元。具有同样高度的一系列相互衔接的填埋单元构成一个填埋层。最终封场的卫生填埋场是由一个或多个填埋层组成的。当垃圾填埋达最终的设计高度之后,再在该填埋层上建造一厚为 90~120 cm 的覆盖层,就成为一完整的卫生填埋场。图 1-1 是卫生填埋场的剖面图。

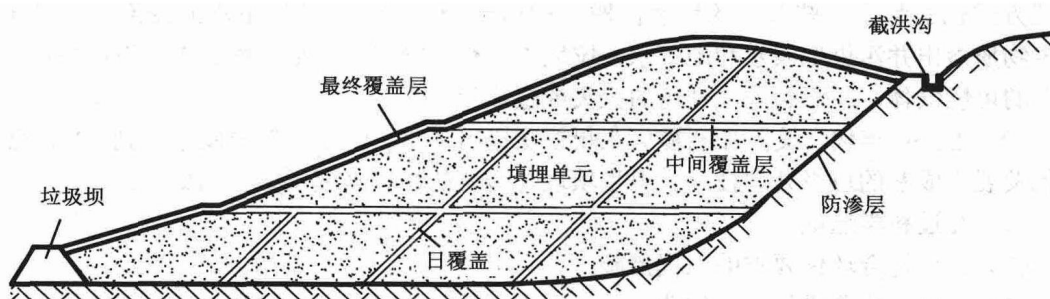


图 1-1 卫生填埋场剖面图

三、卫生填埋在城市垃圾处理中的地位

除对有用物质进行回收利用外,国内外成熟且常用的生活垃圾处理技术主要有填埋、堆肥和焚烧等 3 种。表 1-1 对我国主要的 3 种生活垃圾处理技术进行了比较。

表 1-1 我国主要垃圾处理技术比较

比较项目	卫生填埋	焚烧	堆肥
技术可靠性	可靠,属常用处理方法	可靠,属成熟技术	较可靠,我国有实践经验
工程规模	取决于作业场地和使用年限,一般均较大	单台炉规格常用 150~500 t/d,焚烧厂一般安装 2~4 台焚烧炉	动态间隙式堆肥厂常为 100~200 t/d;动态连续式堆肥厂常为 200~400 t/d

比较项目	卫生填埋	焚烧	堆肥
选址难易度	较困难	有一定难度	有一定难度
占地面积	大, 500~900 m ² /t	60~100 m ² /t	110~150 m ² /t
建设工期	9~12 个月	30~36 个月	12~18 个月
适用条件	对垃圾成分无严格要求, 但含水率不宜过高	进炉垃圾的低位热值高于 4 180 kJ/kg, 含水率小于 50%	垃圾中可生物降解有机物含量大于 40%
操作安全性	较好, 沼气导排要通畅	较好, 严格按规范操作	较好
要求管理水平	一般	很高	较高
产品市场	有沼气回收的卫生填埋场, 沼气可用做发电等	热能或电能可作为社会使用, 需有政策支持	落实堆肥市场有一定难度, 需采取多种措施
主要环保问题	渗滤液处理难度大	烟气与飞灰处理难度大	好氧堆肥时恶臭治理较难
资源化意义	沼气收集后用于发电	焚烧余热可发电	采用厌氧发酵工艺, 沼气收集后可用于发电
资源利用	封场后恢复土地利用或再生土地资源, 陈垃圾可开采利用	垃圾分选可回收部分物质, 焚烧残渣可综合利用	堆肥用于农业种植和园林绿化, 并回收部分物质
稳定化时间	20~50 年	2 h 左右	15~60 d
最终处置	最终处置方式	焚烧炉渣需要处置, 占进炉垃圾量的 10%~15%	不可堆肥物需做处置, 占总垃圾量的 30%~40%
地表水污染	应有完善的渗滤液处理设备, 但不易达标	残渣填埋时与垃圾填埋方法相仿, 但含水量较少	可能性较小, 污水需处理后排入城市管网
地下水污染	场地需有防渗措施, 但可能渗漏, 人工防渗层投资大	可能性较小	可能性较小
土壤污染	限于填埋场区域	灰渣不能随意堆放	需控制重金属和 pH 值
大气污染	有轻微的污染, 可有导气、覆盖、隔离等措施	应加强对酸性气体和二噁英的控制和治理	有轻微气味, 应设除臭装置和隔离带
吨投资 (不计征地费)	18 万~27 万元/t (单层合成防渗层、压实机引进)	50 万~70 万元/t (余热发电上网, 国产化率 50%)	25 万~36 万元/t (制有机复合肥, 国产化率 60%)
处理成本 (计折旧, 不计运费)	35~55 元/t	80~240 元/t	50~80 元/t
技术特点	操作简单, 适应性好, 工程投资和运行成本较低	占地面积小, 运行稳定可靠, 减量化效果好	技术较成熟, 减量化和资源化效果好
主要风险	沼气聚集易引起爆炸; 场底渗漏或渗滤液处理不达标	垃圾燃烧不稳定, 烟气治理不达标	生产成本过高或堆肥质量不佳而影响堆肥产品销售

从表 1-1 可看出, 卫生填埋主要有以下优点:

- (1) 如有适当的土地资源可利用, 一般以卫生填埋处理垃圾最为经济;
- (2) 与其他的处理法比较, 卫生填埋一次性投资额较低;
- (3) 与需要对残渣和无机杂质等进行附加处理的焚烧法和堆肥法相比较, 卫生填埋是一种彻底的、最终的处理方法;
- (4) 卫生填埋法可接受各种类型的城市生活垃圾而不需要对其进行分类收集;
- (5) 卫生填埋法有充分的适应性, 能处理因人口和卫生设施增多而增加产量的生活垃圾;

(6) 稳定填埋场地可重新用做停车场、游乐场、高尔夫球场、航空站等。

因此,我国建设部、国家环保总局和科技部于 2000 年联合制定了《城市生活垃圾处理及污染防治技术政策》,该政策明确指出:卫生填埋是垃圾处理必不可少的最终处理手段,也是我国现阶段城市垃圾的主要处理手段。2005 年,我国城市生活垃圾清运量为 1.56 亿 t,集中处理量为 8 108 万 t,集中处理率为 51.97%,卫生填埋、堆肥和焚烧的处理能力所占比例分别为 85%、5%和 10%。

由于现代的垃圾卫生填埋技术完全符合现行的环境保护要求,同时由于其安全可靠、投资较省、处理费用低,已被世界上许多国家采用。表 1-2 列出了主要工业发达国家应用城市生活垃圾处理技术的比较,从中可以看出,卫生填埋在各国垃圾处理技术中所占的地位。

表 1-2 部分发达国家生活垃圾处理方式的比例

国家	年份	垃圾总量/万 t	填埋所占比例/%	焚烧所占比例/%	堆肥所占比例/%	回收所占比例/%
美国	2005	24 600	54	14	8	24
英国	1993	2 000	83	13	—	4
日本	1993	5 000	15	74	11	—
奥地利	1993	290	48	24	8	20
比利时	1993	358	49	35	—	16
加拿大	1995	2 059	73	4	—	23
丹麦	1993	180	16	71	4	9
芬兰	1990	130	65	4	15	16
法国	1993	2 000	45	42	10	3
德国	1993	3 380	61	36	3	—
爱尔兰	1993	910	97	—	—	3
意大利	1993	2 000	74	16	7	3
卢森堡	1993	18	22	75	1	2
荷兰	1993	770	45	35	5	15
葡萄牙	1993	265	—	90	10	—
西班牙	1993	1 330	64	6	17	13
瑞典	1993	320	30	60	—	10
瑞士	1993	370	11	76	13	—

通过表 1-2 可知,目前世界上大多数国家都以填埋作为主要的垃圾处理方式,只有日本等少数国家由于土地资源紧缺,没有大量的空余土地供卫生填埋使用,所以较少采用填埋法处理城市垃圾。

四、传统填埋场存在的问题

尽管设计和施工良好的垃圾卫生填埋场能较严格限制降雨和地下水进入填埋场内,从而能最大限度地减少垃圾渗滤液的产生以及随之而来的渗滤液处理难题。但是,随着填埋场上部最终覆盖层和下部防渗层的最终失效,大气降水迟早会进入填埋场内,与填

埋垃圾发生一系列物理、化学和生物反应,进而产生渗滤液,并通过失效的防渗层污染填埋场地下水体。因而形象地讲,一个严格的传统填埋场实际上就成为了一颗“定时炸弹”。因此,尽管严格设计施工的传统填埋场短期内不会对周围环境造成威胁,但它会对我们子孙后代的环境需求形成潜在威胁,因而传统填埋场不符合可持续发展的要求。

而设计、施工和运行管理不规范的填埋场投入运行后,大气降水将渗入填埋场内,导致渗滤液大量产生。尽管这类填埋场会在一定时间内实现最终稳定并消除对环境的长期威胁,但它仍存在以下问题:

(1) 渗滤液水量、水质波动大,污染强度高,处理费用居高不下

传统填埋场渗滤液产生量直接受进入场内的大气降水量的影响。一般填埋场运营期间渗滤液产量大,封场后渗滤液量相应减少;雨季渗滤液产量大,旱季渗滤液量则较少。受填埋垃圾组成、渗入的大气降雨量的影响,填埋场渗滤液水质季节性波动明显;受填埋垃圾分解阶段的影响,填埋初期渗滤液污染物(特别是有机污染物)浓度高,填埋后期污染物浓度逐渐降低。一般包括物理、化学和生物处理等工艺在内的渗滤液处理系统无法适应不断变化的渗滤液水质和水量要求,尽管一定容积的渗滤液调节池可从一定程度上缓解这一问题,仍需要经常随季节以及填埋场运行阶段来改建渗滤液处理系统,或对处理系统的有关运行参数进行调整。

填埋场渗滤液不仅污染物种类繁多,成分复杂,同时污染物浓度高。部分填埋场渗滤液 COD 浓度可能高达近 100 000 mg/L,氨氮浓度也可能高达近 10 000 mg/L。要使组成复杂、浓度很高的渗滤液在排放前达到有关排放标准的要求,必须对其进行深度地处理。目前渗滤液处理系统多由物理化学处理法和生物处理法联合组成,处理单位体积渗滤液不仅费用高,有时还难以达到排放标准的要求,对填埋场周围水体造成污染。

(2) 垃圾稳定速率慢,封场后维护监管期长,风险大,费用高,不利于场地及时复用

由于受季节气候影响,使渗入填埋场的水量时间分布不均;同时受填埋场所铺设的覆盖层影响,也使进入填埋场内的水分空间分布不均,因而传统填埋垃圾降解不均匀,而且较缓慢,从而导致填埋垃圾的污染特性将长时间存在。美国环境保护局(USEPA)要求填埋场封场后仍需继续监管 30 年,但也有人认为部分填埋场封场后 100 年还有大量垃圾未能得到有效的降解,仍对填埋场周围环境形成潜在的威胁。长时间的填埋场监管不仅增加渗滤液处理、监测以及其他系统的维护费用,还增加了渗滤液收集系统、防渗层和覆盖层等失效的可能,从而增加了潜在环境污染事件发生的概率。此外,传统填埋场的长期不稳定不利于填埋场地的及时复用。

(3) 产气期滞后且历时较长,产气量小,不利于回收利用

传统填埋场进入甲烷化阶段所需时间较长,还因渗滤液连续排放而损失大量的可转化为甲烷气体的有机物,从而降低了填埋场甲烷总产量;由于产气期较长而使产甲烷速率不高,在甲烷总量减少的同时,传统填埋场还延长了回收利用甲烷气体所需时间,不仅降低了回收利用甲烷气体的经济效益,还影响了广大填埋场业主参与的积极性,部分填埋场业主甚至将富含温室气体——甲烷的填埋场气体直接排放,造成环境污染。

第二节 生物反应器填埋场的由来与分类

基于传统填埋场的不足,从 20 世纪 70 年代开始,欧美等发达国家就开始了新一代填埋场——生物反应器填埋场的研究。从 20 世纪 90 年代起,我国也开始加入了生物反应器填埋场研究的行列。

一、生物反应器填埋场的定义

生物反应器填埋场是通过有目的的控制手段,强化微生物作用过程,从而加速垃圾中易降解和中等易降解有机组分转化和稳定的一种垃圾卫生填埋场运行方式。这些控制手段包括液体(水、渗滤液)注入、覆盖层改良、营养添加、pH 调节、温度调节和供氧等,核心是渗滤液回灌。

生物反应器填埋场类似于土地处理技术,实质是把填埋场作为一个以各填埋年龄段垃圾为填料的生物滤床。当渗滤液流过填埋场覆盖层和垃圾层时,发生一系列生物、化学和物理作用,使渗滤液中的有机物、重金属、无机胶体等物质,通过机械拦截、吸附、络合、菌合和离子交换等作用被截留,并通过覆土层及各年龄段垃圾表面所富集的各种菌胶团和土著细菌等微生物的作用,降解成为稳定和半稳定物质,同时由于蒸发作用,渗滤液回灌过程也达到了生物反应器填埋场渗滤液减量的效果。

二、生物反应器填埋场的发展历程

1. 生物反应器填埋场在国外

(1) 厌氧型和好氧型生物反应器填埋场

有关厌氧型生物反应器填埋场的研究可以追溯到 20 世纪 70 年代的美国。1975 年,美国乔治亚理工学院 Pohland 教授在 US EPA 的资助下,率先在实验室对渗滤液回灌技术进行了研究。研究表明,渗滤液回灌可提高微生物的活性,加速填埋垃圾的稳定化进程,大大降低了渗滤液中有机污染物浓度。

此后,英国、加拿大、澳大利亚、德国、丹麦、意大利、瑞典和日本等国相继开展了渗滤液回灌、污泥接种、通风供氧、高温-中温填埋、垃圾破碎、pH 值调节以及营养物添加等强化技术对填埋垃圾稳定化进程的影响研究。由于渗滤液回灌技术不仅能够净化渗滤液,提高填埋气体产量和能源化利用率,而且能够加速填埋垃圾的稳定化,缩短封场后的维护时间,降低填埋场环境风险,因而是生物反应器填埋场技术研究的热点。

从 20 世纪 80 年代起,生物反应器填埋场技术研究开始进入现场单元试验和现场应用阶段。现场研究采用的强化手段包括渗滤液回灌、注水、污泥接种、改变垃圾密度、供氧、升温、垃圾破碎、日覆盖与最终覆盖、不同性质垃圾混合、营养物添加等。1997 年,北美固体废物协会(SWANA)调查得出,在美国境内已有超过 130 个填埋场实施了渗滤液回灌技术,但多数填埋场均只是将其作为一项渗滤液管理技术,在填埋场设计和施工完成后才开始应用。

由于系列生物反应器填埋场研究取得的成果,生物反应器填埋场技术得到了 US EPA 的充分肯定。2000 年,北卡罗来纳州的 Bouncombe 填埋场、弗吉尼亚州的 Maplewood 填

埋场和 King George 填埋场、加利福尼亚州的 Yolo 县填埋场等 3 个生物反应器填埋场项目成功入围 US EPA 启动的“XL”健康与环境保护创新研究项目。美国加利福尼亚州等地方环保局也组织开展了生物反应器填埋场技术的大量研究。这些项目的研究内容包括不同的渗滤液回灌方式、含水率和温度等参数实时监测、好氧型与厌氧型生物反应器填埋场特性比较等。

(2) 准好氧型生物反应器填埋场

日本学者在 20 世纪 60 年代通过试验研究表明,废弃物填埋层内越“好氧”,渗滤液中污染组分的浓度降低越快,同时甲烷和硫化氢等有害气体的产出越低,在此基础上建立了“填埋结构”的概念。与 Pohland 教授关于厌氧型生物反应器填埋场的研究几乎同步,1975 年,日本固体废物处理专家提出了准好氧填埋的概念。同年,在福冈市建造了第一个准好氧填埋场——Shin Kamata 填埋场。1979 年,准好氧填埋技术被日本厚生省制定的《最终废弃物处置指南》作为推荐技术在全国范围内推广。1980 年,日本福冈大学的花嶋正孝教授在“准好氧填埋”理论的基础上,利用渗滤液回灌进行了“循环式准好氧填埋”的试验研究。研究表明,在循环式准好氧填埋场运行三年间,有机污染物有 90%转入气相,成为 CO_2 、 N_2 等气体。循环式准好氧填埋技术对于降低渗滤液污染负荷、加速填埋垃圾降解的作用显著,研究成果已经用于准好氧填埋场实践中。

由于准好氧填埋方式克服了厌氧填埋稳定期长和好氧填埋运行成本高的缺点,同时具有成本低廉、建设和维护管理方便等优点,目前已经成功应用于多个国家多个填埋场中。目前日本一般废弃物的最终处置场普遍采用了准好氧填埋结构;马来西亚、印度尼西亚、菲律宾、巴西、韩国等多个城市通过与日本进行技术合作,也采用准好氧填埋技术处理本国的城市生活垃圾。

2. 生物反应器填埋场在国内

国内对生物反应器填埋场技术的研究始于 1997 年。同济大学的徐迪民教授和李国建教授率先通过渗滤液回灌实验,研究了填埋垃圾层以及土-垃圾混合层对回灌渗滤液的净化能力,研究表明进行过渗滤液回灌的垃圾体相当于一个生物滤池。此后,浙江大学、西南交通大学、清华大学、中国环境科学研究院、重庆大学、华中科技大学等高校和科研院所相继加入生物反应器填埋场技术的研究行列,分别对厌氧型、准好氧型、好氧型生物反应器填埋场以及填埋场+UASB 渗滤液处理系统等联合型生物反应器填埋场技术进行了研究。2001 年,同济大学主持的“城市生活垃圾生态填埋成套化技术”获得国家高技术研究发展计划(“863”计划)支持,渗滤液回灌、加速垃圾稳定等生物反应器填埋场技术成为其重点研究内容,并在杭州天子岭填埋场进行了单元示范研究。

由于受到国内外生物反应器填埋场研究成果的鼓舞,国内许多填埋场开始采用渗滤液回灌等生物反应器填埋场技术,以作为渗滤液处理和管理手段的一部分。在我国山东省潍坊市、湖南省长沙市、衡阳市及广东省广州市等城市,还进行了准好氧垃圾填埋技术的试验性应用,并收到了良好的效果。

三、生物反应器填埋场的分类与特点比较

根据填埋垃圾体的好氧(厌氧)状态和运行特点,生物反应器填埋场可分为厌氧型生物反应器填埋场、好氧型生物反应器填埋场、准好氧型生物反应器填埋场以及它们的

组合——联合型生物反应器填埋场等 4 类。

1. 厌氧型生物反应器填埋场

在传统填埋场的基础上，厌氧型生物反应器填埋场通过渗滤液回灌、微生物接种等操作运行方式来加速填埋垃圾的降解和稳定进程。厌氧型生物反应器填埋场的基本组成和运行方式如图 1-2 所示。从图中可以看出，厌氧型生物反应器填埋场在运行过程中，须限制氧气的进入，其与传统填埋场的最大差异在于厌氧型生物反应器填埋场实施了渗滤液回灌操作。

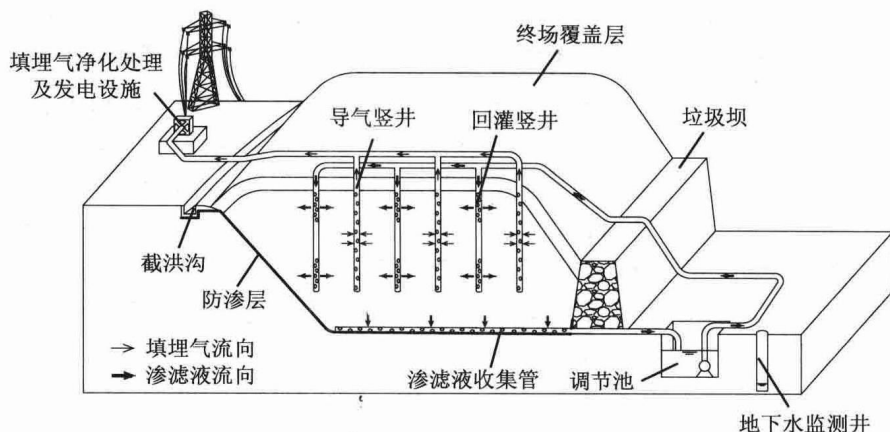


图 1-2 厌氧型生物反应器填埋场概念图

与传统填埋场相比，厌氧型生物反应器填埋场具有下列优势：

- ① 加速填埋垃圾的降解和稳定，增加填埋场的有效容积，提前复用填埋场地；
- ② 增大甲烷气体的产量和产气速率，回收利用甲烷气体更具有经济效益；
- ③ 减小渗滤液处理量和处理难度，降低渗滤液的处理费用；
- ④ 缩短填埋场封场后的维护监管期，减少维护费用。

但是，厌氧型生物反应器填埋场运行期间渗滤液氨氮浓度持续偏高，后期渗滤液有机污染物浓度衰减速度较慢，欲通过厌氧型生物反应器填埋场长期运行实现渗滤液的达标排放几乎不可能。

为缩短厌氧型生物反应器填埋场产甲烷的启动时间，序批式厌氧型生物反应器填埋场的概念得以提出。序批式厌氧型生物反应器填埋场由 3 部分组成：新填埋区、稳定中填埋区和稳定化填埋区。在新填埋区和稳定化填埋区之间，渗滤液通过相互交叉回灌连为一体，即把新垃圾填埋区产生的渗滤液回灌到稳定化填埋区，而把稳定化填埋区所产生的渗滤液回灌到新填埋区。当新填埋区形成适宜产甲烷微生物种群生长的环境时，其渗滤液再直接回灌。随着稳定中填埋区垃圾的降解及稳定化，该填埋区即成为稳定化填埋区，此时，该填埋区又可与新填埋区相连，因此成为序批式生物反应器填埋场（图 1-3）。序批式厌氧型生物反应器填埋场通过新、老填埋区渗滤液的交叉循环，互营联合，较好地解决了厌氧型生物反应器填埋场在填埋初期渗滤液回灌造成的填埋垃圾持续酸化现象，能使填埋场快速进入产甲烷阶段，缩短厌氧型生物反应器填埋场的启动时间，从而缩短了最终稳定所需的时间。

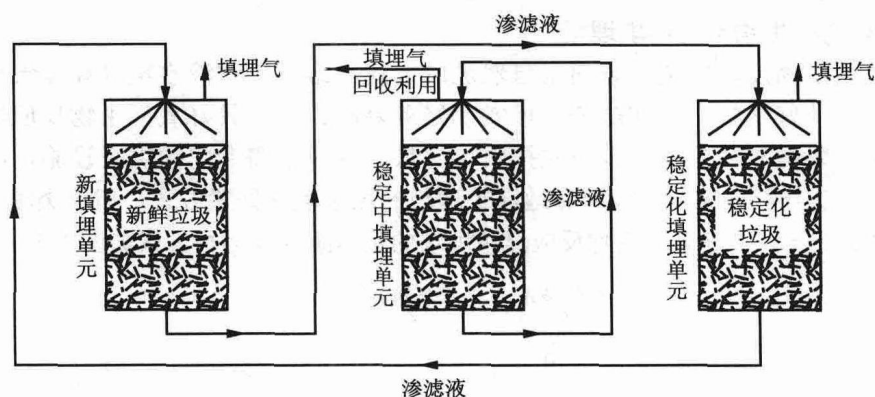


图 1-3 序批式厌氧型生物反应器填埋场的运行模式

2. 好氧型生物反应器填埋场

好氧型生物反应器填埋场通过强制通风设施使填埋垃圾体整体保持好氧状态，此时的填埋场实质上相当于一个大型的好氧静态堆肥反应器。好氧型生物反应器填埋场的基本组成和运行方式如图 1-4 所示。

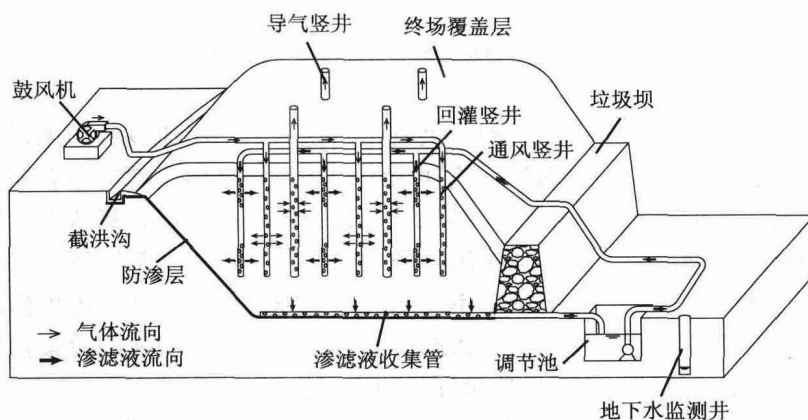


图 1-4 好氧型生物反应器填埋场概念图

好氧型生物反应器填埋场通过强制通风手段，促使填埋垃圾好氧降解，进而加快填埋场的稳定进程，使填埋垃圾能在很短的时间内实现最终稳定。好氧型生物反应器填埋场的主要优势表现为：

- ① 极大地强化了厌氧型生物反应器填埋场的稳定进程，渗滤液污染强度低、填埋垃圾稳定速率快、填埋场封场后维护监管时间短、能提前复用填埋场地等优势；
- ② 渗滤液氮污染物浓度极低，外排渗滤液无须额外进行脱氮处理；
- ③ 好氧型生物反应器填埋场还能大量减少甲烷气体排放量，进而减轻对全球温室效应的影响。

但是，因需要长期进行机械通风供氧，好氧型生物反应器填埋场运行费用较高，在

经济不发达国家和地区大范围推广存在一定困难。

3. 准好氧型生物反应器填埋场

准好氧型生物反应器填埋场利用自然进风方式，维持渗滤液收集管和排气管周围一定区域垃圾层的好氧状态，使部分垃圾实现好氧降解。其兼具好氧型生物反应器填埋场加速填埋垃圾降解和稳定、减少甲烷排放等优势，同时不需专门的供氧设施，因而运行费用较低，是适合经济欠发达国家和地区较理想的垃圾填埋处置方式，但这类填埋场不能回收利用甲烷气体。准好氧型生物反应器填埋场的基本组成和运行方式如图 1-5 所示。

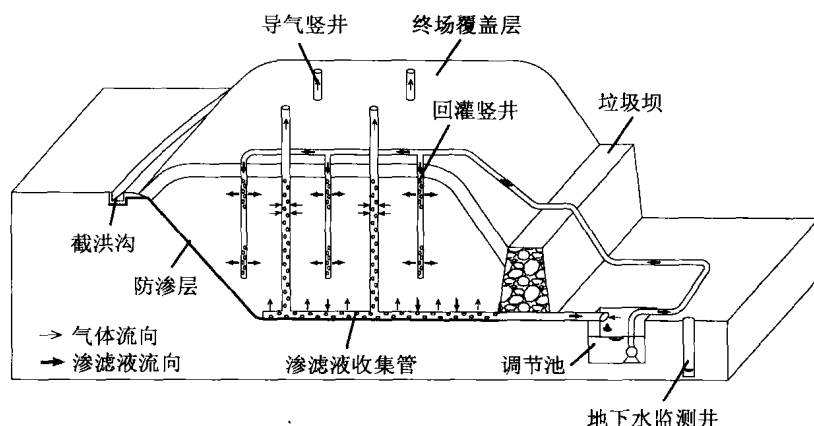


图 1-5 准好氧型生物反应器填埋场概念图

准好氧填埋场设计的思想是不用动力供氧，而是利用不满流设计、末端与大气相通的渗滤液收集管道与导气管组成的气体流动系统，在垃圾堆体发酵产生温差的推动下，使空气自然通入，位于渗滤液收集管和导气管周边的填埋层处于有氧状态，发生好氧分解反应。准好氧型生物反应器填埋场在填埋场内部存在一定的好氧区域，特别是在渗滤液收集管和排气管周围存在好氧区域，不仅能加速填埋垃圾的降解，还可抑制甲烷和硫化氢气体的产生，使垃圾尽早达到稳定状态；同时也降低了渗滤液的污染强度，特别是氮污染物的浓度。准好氧型生物反应器填埋场的优势包括：

① 无须专门通风设施和运行费用即可实现部分垃圾的好氧分解，与厌氧型生物反应器填埋场相比，稳定时间大大缩短，可节省大量的填埋场维护、监管费用；

② 外排气体中 CH_4 含量明显降低，从而减少温室气体的排放，特别适于不回收利用甲烷气体的中、小型填埋场；

③ 加快渗滤液水质（特别是氮污染物浓度）的改善，大大减轻其后续人工处理的困难和压力。

4. 联合型生物反应器填埋场

除前面介绍的 3 种基本形式的生物反应器填埋场外，通过不同形式的生物反应器填埋场在时间、空间上的组合，通过生物反应器填埋场与场外渗滤液处理系统的组合，已构成了多种形式的联合型生物反应器填埋场。

(1) 好氧-厌氧空间联合型生物反应器填埋场

好氧-厌氧空间联合型生物反应器填埋场是在填埋垃圾体的不同部位，分别进行好氧

和厌氧运行的一种联合型生物反应器填埋场技术。好氧-厌氧空间联合型生物反应器填埋场的基本组成和运行方式如图 1-6 所示。

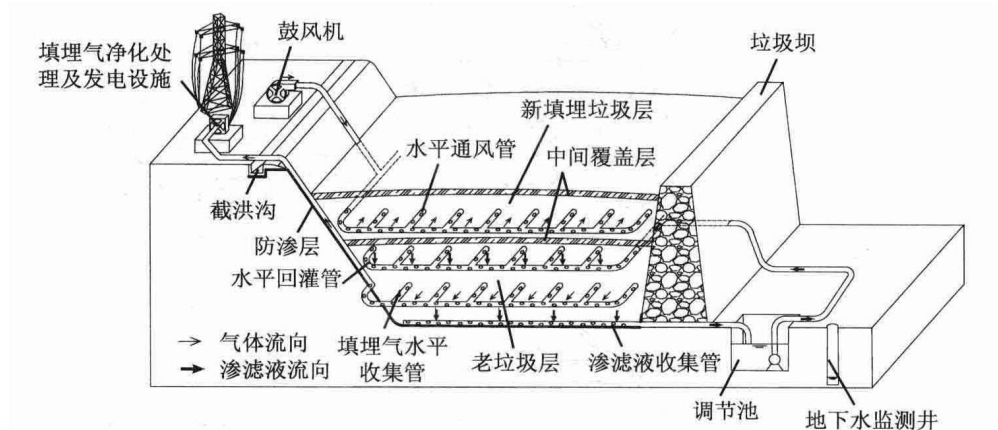


图 1-6 好氧-厌氧空间联合型生物反应器填埋场概念图

运行时，上部新填埋垃圾层进行机械通风供氧，下部老垃圾层进行厌氧发酵，回灌渗滤液通过水平回灌管网注入新老垃圾层之间以对厌氧运行的老垃圾层进行布水。除具有一般厌氧型生物反应器填埋场的优点外，好氧-厌氧空间联合型生物反应器填埋场的特点包括：

① 对新填埋垃圾进行好氧降解后，减轻其中食品垃圾等易降解物厌氧分解产生的有机酸对新填埋垃圾层快速产甲烷的抑制；

② 下部老垃圾层产生的甲烷气体可回收利用。

与厌氧型生物反应器填埋场一样，该填埋场产生的渗滤液氨氮浓度长期偏高，外排处理时需进行专门脱氮处理。

(2) 厌氧-好氧时间联合型生物反应器填埋场

厌氧-好氧时间联合型生物反应器填埋场是在不同的时间段内，将生物反应器填埋场先后分别按厌氧型和好氧型运行的一种联合型生物反应器填埋场技术。其基本组成和运行方式如图 1-7 所示。

厌氧-好氧时间联合型生物反应器填埋场先期按厌氧型生物反应器填埋场方式运行，待填埋场进入减速产甲烷阶段且不再具甲烷回收利用价值时，填埋场改为按好氧型生物反应器填埋场方式运行。对填埋场内垃圾体进行通风供氧，使场内剩余未降解垃圾进行好氧分解。厌氧-好氧时间联合型生物反应器填埋场具有以下特点：

① 具有厌氧型生物反应器填埋场垃圾降解快、产甲烷快且甲烷产量大而利于回收利用的优势；

② 后期好氧方式运行能加快填埋场内剩余有机物的降解；

③ 后期按好氧方式运行能大幅降低渗滤液的氮污染物浓度，渗滤液外排处理时无须再进行脱氮处理。