

填埋场气体收集系统

钱学德 郭志平

(河海大学岩土工程研究所 南京 210098)

固体废弃物填埋场可看作一生物化学反应堆,输入物是固体废弃物和水,输出物则主要是填埋废气和淋洗液。填埋场内物质分类包括部分生物降解有机物和其它原来位于场内的无机废弃材料。填埋场气体控制系统被用来防止废气不必要地进入大气,或在周围土体内作侧向和竖向运动。回收的填埋废气可以用来产生能量或有控制地焚烧以避免其有害成分释放到空气中去^[1,2]。

1 填埋场气体的生成

城市固体废弃物在其分解期间会产生大量气体,填埋废气的生成是一个生化过程,有机废弃物经由微生物分解产生二氧化碳、甲烷和其它气体。这些气体中,主要是二氧化碳、甲烷等气体,也有少量的微量气体。主要气体系废弃物中有机成分经分解生成的,微量气体虽然数量很少,但其中一部分可能有毒,会对公众健康带来危害。

填埋场中各类气体生成的百分分布典型值如附表所示,其中甲烷(CH_4)和二氧化碳(CO_2)是废弃物中生物降解有机废料在厌氧环境中分解生成的。图1表示填埋场气体组成随时间的变化^[4]。最初,填埋场中气体的分布和大气是一样的,约80%为氮,20%为氧,还有少许二氧化碳和其它气体。后来填埋场中的微生物开始分解有机材料,氧气减少,二氧化碳增加,需氧环境转变为厌氧环境。一开始填埋场气体中甲烷很少,但随着时间增加其含量愈来愈高,二

附表 城市固体废弃物填埋场气体成分典型值^[3]

成分	占干燥体积百分比	成分	占干燥体积百分比
甲烷(沼气)	45~60	氮	0.1~1.0
二氧化碳	40~60	氢	0~0.2
氧	2~5	一氧化碳	0~0.2
氧	0.1~1.0	微量成分	0.01~0.6
硫、硫酸等	0~1.0		

氧化碳的含量反而略有减少。这些气体实际上是以甲烷和二氧化碳为主的一种混合气体,经过较长时间,当填埋场中的有机材料消耗完时,所有气体的生成也就中止了。

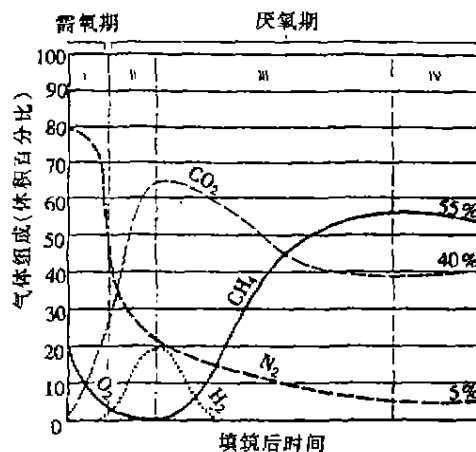


图1 填埋场气体组成随时间的变化

2 影响填埋场气体生成的因素

填埋场气体产出能力取决于很多因素,包括废弃物的构成、含水量、pH值以及有效营养成分等。如果填埋场非常干燥,生成的气体将很少。在有些填埋场内,季节温度变化也会影响气体的产出,如填埋场埋藏较浅,在寒冷季节,其气体产出率将大大降低。同一填埋场不同位置的气体产出率也会有很大变化,因为废弃物的类型分布往往是不均匀的。

一开始,当可分解的垃圾倒入填埋场时,垃圾带着周围大气中的氧一起进入,经过一段细菌分解的自然过程,耗尽了空气中的氧(需氧分解),在填埋场中形成厌氧环境,这通常发生在填埋单元封闭后6个月或更长一段时间内。厌氧环境是产生甲烷的必

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。

要条件之一。如果氧气重新进入填埋场,带有氧气的废弃物将恢复到需氧状态,并使产生甲烷的细菌群体被杀死,需要再过一段时间以后,甲烷产出能力才能回复正常。由于此时填埋场内尚有部分甲烷存在,甲烷逐渐减少完全取决于刚填埋的需氧废弃物有多少,还有其它一些因素。二氧化碳则在需氧和厌氧状态均可产生。在静止状态下,填埋场气体的构成大概一半为甲烷,另一半为二氧化碳,另有少量的氮。

只要存在一定条件,填埋场气体将不断生成,这些条件包括:垃圾成柱状堆积,缺少空气的环境,温度在 $10 \sim 57^{\circ}\text{C}$ 之间以及纤维素或其它有机材料(甲烷细菌的作用物)的有效作用。给填埋场加水可加快气体的产出,在干旱地区干燥的填埋场内,长时间(也许要 100 年)内也只有少量气体生成,而对那些有机材料可适当加水的填埋场,在 $8 \sim 15$ 年内,填埋场废气将生成得很快,以后就降到较低的水平(见图 2^[3])。气体的生成速率,在填埋场中甚至在每一单独的填埋单元内均是变化的。理论上讲每 1 kg 干有机材料能生成 $0.44 \sim 0.56\text{ m}^3$ 气体,而通常每 1 kg 垃圾每年可生成 $0.003 \sim 0.019\text{ m}^3$ 气体。当气体生成时,填埋场内存在一定的气体压力,已经量测到的压力大约为 $0.25 \sim 0.75\text{ kPa}$,有些单元可高达 1.50 kPa ,这些压力已可使气体从填埋场中排入大气,渗入土内,甚至进入周围的建筑之中。

3 填埋场气体的流动

气体从填埋场内向外流动,通常有对流和扩散两种方式。对流是由于气体对周围透水性很小或完全饱和的土层形成压力梯度引起的,也可能是因为甲烷比二氧化碳或空气轻而产生浮力所引起的^[5]。扩散则是由于气体浓度之间的差别而引起的。厌氧分解所产生的带有甲烷和二氧化碳的混合气体,其浓度比周围空气的浓度要大得多,因此甲烷和二氧化碳的分子将从填埋场向周围空气中扩散。与对流相比,扩散在气体流动中只起次要作用。

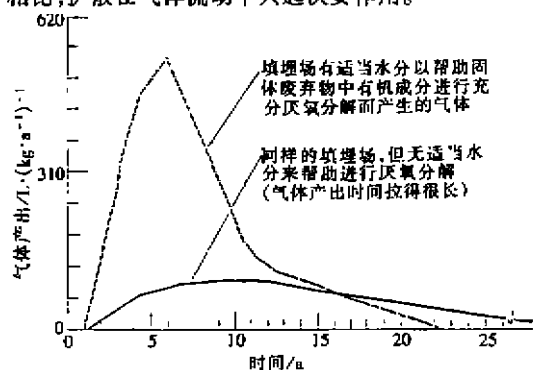


图2 城市固体废弃物填埋场气体产出概念模型

填埋场气体的流动受压力、浓度以及温差所制约,气体生成时形成的气压,就存在一个梯度要使它自身达到平衡。填埋场中气体将沿着阻力最小的途径流动,无论竖向或侧向,其流动程度均取决于很多因素,包括填埋场设计时的自然状态、周围主体的情况、废弃物类型、废弃物在填埋场中被分割的程度以及每天或最终覆盖的类型等等。对于相对透气性较好的砂砾覆盖层,气体倾向于均匀地向垂直方向排出,并通过覆盖层直达表面,而且排气速率基本不变。如果覆盖层透气性较差,则气体倾向于侧向流动,若填埋场用低透水材料封顶,则气体不再向上排出,而如果侧向流动的阻力又小于垂直向的阻力,气体将倾向于向侧向流动并在较低的位置积累起来,如基底、窖井、填埋场附近的泵站等处,最终成为消耗氧气和可能引起爆炸的地方。因此,对在填埋场顶部或附近的任何建筑物都必须进行监测以保证废气不在那里积累。以上关于流动的概念可用图3及图4表示^[1]。

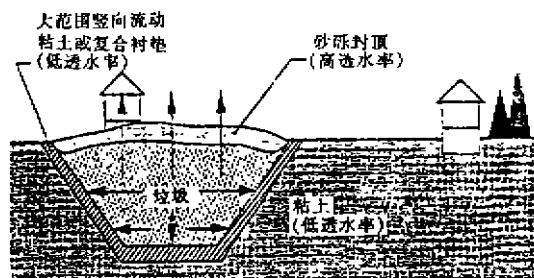


图3 形成气体竖向流动的填埋场环境

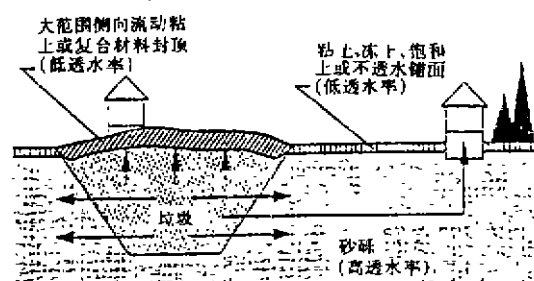


图4 形成气体侧向流动的填埋场环境

气体通常经过非饱和土中无水的孔隙和岩石裂隙进行流动,但因为气体是可溶的,它也可在孔隙压力作用下通过饱和土的孔隙进行流动。例如在过去某些大的填埋场中,相对不透水的废弃物常常被直接堆在地上而在其下并不设置淋洗液收集系统或进行排水。这些填埋场也能产生相当多的气体,有时其压力大得可以将气体渗入地下水,然后通过地下水再排至周边压力较小的非饱和土中。

影响气体流动的因素很多,其中比较重要的有填埋场的设计,包括垃圾库的建造,最终覆盖设计以

则必须铺设在填埋垃圾的上面(见图9),在井或槽中放置部分有孔的管子,然后用砾石回填,形成气体收集带。在井口表面套管的顶部应装上气流控制阀,也可以装气流量测设备和取气样的出口。井应和已形成填埋场抽气系统的管路联成一起。图8表示一能用于填埋场内部或周边的垂直抽气井,典型的抽气井是用直径为1m的勺钻钻至填埋场底部以上3m以内,或钻至碰到淋洗液层^[6]。井内通常放一根直径为15cm的预制PVC套管,其上部1/3无孔,下部2/3有孔。钻孔用直径2.5~5cm的石渣回填。其表面通常用细粒料(可用石渣过筛)和膨润土加以封闭。井及管路系统上均应装有调节气流和作为取样口的阀门。

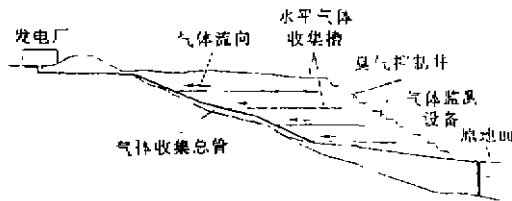


图9 水平气体收集槽示意图

b. 集气管。抽气需要的真空压力和气流均通过地下暗管网输送至抽气井。主要的集气管应设计成环状网络(见图10),这样可以调节气流的分配和防止较低的整体系统压力因场外气流变化而下降。地下暗管要有一个坡度,其控制坡度应使最低点能利用重力收集冷凝水,并尽量避免因不均匀沉降引起堵塞。可以增加管径来减少因摩擦而造成的压力损失。管路埋入填以砂土的槽内,管身用PVC或HDPE管,管壁不能有孔。在管线不同位置应设置阀门以便在系统维修或扩大期间可以将不同部位的井壁隔开。

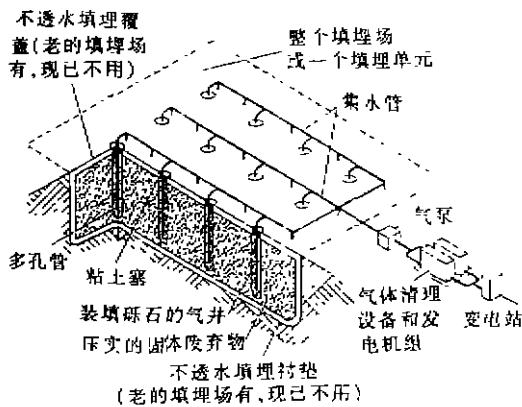


图10 集水管网

c. 冷凝水脱离和水泵站。从气流中控制和排除冷凝水对于气体收集系统的有效使用十分重要。填埋废气中的冷凝水集中在气体收集系统的低处,它

会切断抽气井中的真空,破坏系统正常运行。冷凝水脱离(或冷凝水回收)可以通过增加液体水滴的形成并从气流中脱离进入被控制的位置。间隔60~150m一个的冷凝水回收器应包括在气体收集系统的整体设计内,这些回收器可以使随着气流移动的冷凝水滴从集气管中脱离,以防止管子堵塞(见图11)。大概每生成2.83万 m^3 气体,可产生190~2270L冷凝水,这取决于系统真空压力的大小和废弃物中水汽的含量。当冷凝水已经积聚在水池或气体收集系统的低处时,它可以直接排入水泵站的贮水池中,然后将冷凝水抽入水箱或污水管内进行处理。

d. 真空源(气泵)。气泵应置于高度略高于集气管末端的建筑物内,以促进冷凝水下落,通常安装于填埋场废气发电厂或燃气站内(见图11)。气泵使抽气系统形成真空,并将填埋废气输送至废气发电厂或燃气站。用于填埋场吸气的气泵其吸气量通常为8.5~57 m^3/min ,适用于井口的负压为2.5~25kPa。气泵大小、型号和压力等设计参数均取决于系统总负压的大小和需抽取气体的数量。

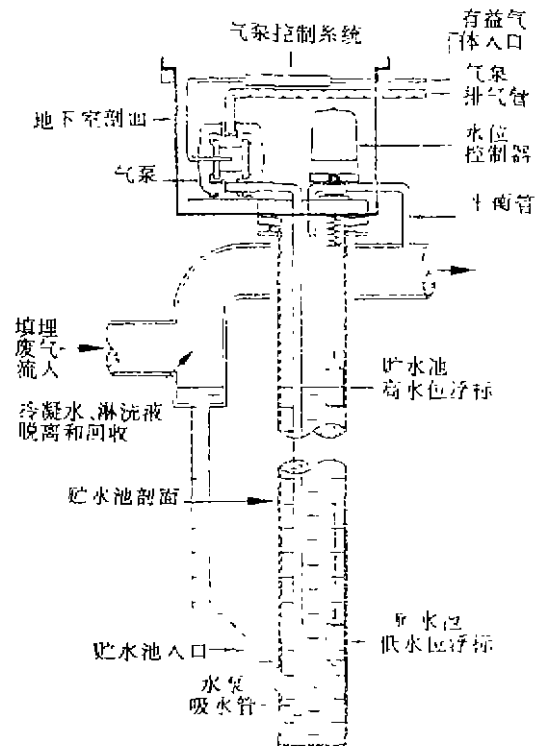


图11 冷凝水脱离和水泵系统详图

e. 气体监测设备。如果填埋场气体收集并群调配不当,填埋废气就会迁离填埋场向周边土层扩散。由于填埋废气会引起爆炸,因此沿填埋场周边的天然土层内均应埋设气体监测设备,以避免甲烷对周围居民产生危害。埋设监测设备的孔常用空心钻杆

打至地下水位以下或填埋场底部以下 1.5 m 处,孔内放一根 2.5 cm 直径的 40 号或 80 号 PVC 套管用来取气样。钻孔用细小的碎石和任何一种封闭材料(包括膨润土)回填,地面设置直径为 15 cm 并带有封闭帽的钢管以保护 PVC 套管。

5 填埋场废气的处理

若使用主动气体收集系统收集填埋场废气,则必须对废气进行处理。废气处理通常包括通过燃烧造成有机化合物热破坏或者对废气进行清理加工和回收能量^[7]。

5.1 废气燃烧

当填埋场废气中有足够的甲烷时(超过总体积的 20% 以上),燃烧是一种常用的处理方法。燃烧可以减少臭气,而且控制臭气的效果比被动散发要好得多。现今大多数燃烧方式均设计成封闭式,与开敞式相比,它停留时间较长,有较高的氧化温度和较好的焚毁效果。

一般来说,气体从填埋场进入燃烧系统要通过设在进口处的阀门(见图 12)。出口通过一段管子与燃烧的烟囱相连,管子上应装上仪器来检测温度和火焰压力并防止气体回火进入。这些仪器包括被动安全装置(如火花制止器)、液体充填反射装置,以及主动保护系统如热电偶(用来监测回火)、自动阀门(用来关闭废气入口)和自动停机传感器等。一旦火焰熄灭,火焰探测器会立即感知,并将自动阀门关闭,以阻止未燃烧的废气逸入大气。燃烧机构应同时设置被动和主动两种安全系统,如果其中之一失效,另一系统可马上接替工作。

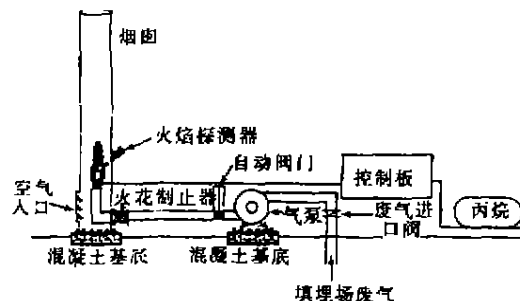


图 12 带有气泵的填埋场气体燃烧系统示意图

5.2 气体清理和能量回收

可通过脱水和去除其它杂质(包括二氧化碳)对填埋场废气进行清理。没有经过清理的填埋场废气其热量约为 4452 kcal(1 kcal = 4.1868 × 10³ J),这个热量大约只有天然气的一半,因为填埋场气体中只有接近一半是甲烷。经过清理可使气体的热量增加 1 倍,达到天然气的水平,气体就可以直接送入管道并像天然气一样使用了。

对某些填埋场,特别是大型填埋场,可实施能量回收,那里产生气体的数量和潜力使回收能量十分经济(见图 13)。能量能否在合适的成本下进行回收,完全取决于填埋场气体的质量和数量。一个小型填埋场其废气热量约为 4452 kcal(1 kcal = 4.1868 × 10³ J),可以用来驱动一个经过改进的燃气引擎或驱动发电机将热能转换为电能。在较大的填埋场,经过脱水和去除二氧化碳等清理后的气体可以用来烧锅炉和驱动涡轮发电机以回收能量。

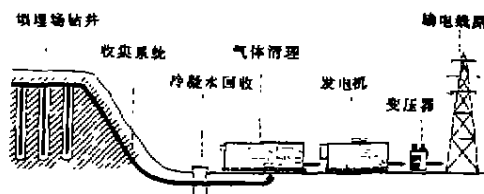


图 13 利用填埋场气体发电示意图

一般来说,若填埋场能在 5 年内封闭,对能量回收最为有利,因为时间一长,那怕条件再好,填埋场生成气体的能力都会降低。然而,只要条件恰当,填埋场在 15 年或更长一些时间内均可产生气体,这取决于气体的生成速率、废弃物的含水量和填埋场封闭的方式。

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): 8-12; 15(6): 27-31
- 3 Tchobanoglous T, et al. Integrated solid waste management, Engineering Principles and Management Issues. McGraw-Hill, Inc, 1993
- 4 USEPA. Behavior and assimilation of organic and inorganic priority pollutants codisposed with municipal refuse, Volumes I and II. U S Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, OH, EPA/R-93/137a and b (NTIS PB93-222198 and PB93-222206), 1993
- 5 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
- 6 Michels M S. Landfill gas collection system components. Solid Waste Technologies, 1996, 10(1): 20-30
- 7 USEPA. Design, operation, and closure of municipal solid waste landfills (seminar publication). U S Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, D C, 20460, EPA/625/R-94/008, September, 1994

(收稿日期: 1996-12-16 编辑: 马敬峰)