

城市生活垃圾降解压缩试验仪研制及应用

Development and application of biodegradation-compression test apparatus for municipal solid waste

谢 焰^{1,2}, 陈云敏¹, 唐晓武¹, 柯 翰¹, 詹良通¹

(1. 浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 安徽理工大学 资源与环境工程系, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 为了研究城市生活垃圾降解与填埋场沉降关系问题, 研制了一台垃圾降解压缩试验仪。该仪器具有温度控制、渗滤液回灌、加压、气体和液体收集等功能。5 kg 垃圾试样装入直径为 190 mm 的土样室(试样初始高度为 320 mm), 在 150 kPa 压力下进行一次降解压缩试验。试验检验了温度、回灌、气压等因素对降解速率的影响程度。试验结果表明, 温度是影响降解的主要因素, 回灌能加快产气速率, 在 400 kPa 的气压下(绝对气压), 降解仍能继续进行。在温度为 41℃ 和回灌的条件下, 6 个月后降解已基本完成; 气相色谱/质谱分析结果表明, 气体组分主要为 CH₄、CO₂ 和 H₂O。降解完成后, 总的变形量为 142 mm, 其中主压缩变形量为 65 mm, 次压缩变形量为 77 mm。提出了在填埋场沉降计算时考虑气压影响的必要性。

关键词: 城市生活垃圾; 降解; 压缩; 仪器; 气压

中图分类号: X 705

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2005)05-0571-06

作者简介: 谢焰(1968-), 男, 江西兴国人, 现为安徽理工大学资源与环境工程系副教授、浙江大学岩土工程研究所博士生, 主要从事环境岩土工程和工程物探方面的研究工作。

XIE Yan^{1,2}, CHEN Yun-min¹, TANG Xiao-wu¹, KE Han¹, ZHAN Liang-tong¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Department of Resources and Environmental Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: To study the relationship between the municipal solid waste biodegradation and the settlement of the landfill, a biodegradation-compression test apparatus for MSW was developed, whose functions include temperature controlling, leachate recirculating, loading and gas collecting. A sample of 5 kg refuse with the height of 320 mm, filled in a 190 mm diameter cylinder, was compressed under 150 kPa and decomposed under different conditions with various temperatures, gas pressure, and leachate recirculation. The test results showed that temperature was the dominant factor influencing the biodegradation rate, and leachate recirculation increased gas production rate. The refuse kept decomposing at 400 kPa (absolute gas pressure). The biodegradation of the refuse sample nearly completed after 6 months, which was placed in a cylinder maintained 41℃ and operated with leachate recycled; The GC/MS analysis represented that the gas generated from the refuse was mainly composed of CH₄, CO₂ and H₂O. The total deformation of the sample was 142 mm, among which the secondary compression deformation was 77 mm. The gas pressure should be considered to calculate the settlement for landfills.

Key words: municipal solid waste; biodegradation; compression; apparatus; gas pressure

0 引 言

城市生活垃圾降解是指垃圾中有机质在生物化学作用下不断分解的过程。固体生活垃圾中有机质降解可分为四个阶段: ①好氧分解阶段; ②厌氧酸化阶段; ③厌氧加速产甲烷阶段; ④厌氧减速产甲烷阶段^[1]。垃圾的降解会伴随有气体的产生。垃圾降解对填埋场沉降表现为两种作用: 一方面引起垃圾中固体组分减小, 促进填埋场沉降增加; 另一方面垃圾降解引起的固体组分减小又引起总应力减小, 从而减少沉降量。另外, 降解产生的大量气体, 又会导致垃圾中气压的增加, 引起垃圾中有效应力降低, 使得填埋场沉降速率减小。由于垃圾土的沉降关系到填埋场的容量、管

道设施安全和场地的后续利用等问题, 因此研究垃圾降解与变形的关系具有重要的意义。

由于垃圾成分复杂, 颗粒粗, 稳定化时间长, 降解又是放热反应, 供常规土工压缩试验用的固结仪不能满足试验要求, 因此, 研制出一台高性能的垃圾降解压缩试验仪器显得十分必要。

关于垃圾降解对变形影响规律的研究要解决两个关键课题: 一是找到能使垃圾快速降解的方法; 二是要确定评价垃圾降解程度的指标。

填埋场垃圾的稳定化时间很长, 这就要求试验必

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(50425825); 教育部高校青年教师奖励基金

收稿日期: 2004-10-08

须采用能加速垃圾降解的方法。研究认为^[2], 41℃ 的温度、回灌渗滤液、活性污泥接种、添加营养物及酸碱中和等方法有助于加快降解速率。因此仪器应该具有温度控制、渗滤液回灌及物质添加的功能。

国内外文献中有关评价垃圾降解程度的指标有很多, 包括挥发份、总糖、纤维素、半纤维素、木质素、甲烷产率及产量、BDM^[3]等, 其中垃圾降解产气量和所产气体组分的变化能直观地反映生化降解的进程, 如果采用降解产气量和所产气体组分的变化来评价垃圾降解程度, 就要求仪器要具备密闭集气功能。此外, 为了模拟填埋场垃圾的堆填过程, 仪器还要有加压功能。

朱青山^[4]把垃圾试样装入聚氯乙烯桶中, 进行了垃圾降解试验, 研究了多种因素对降解速率的影响变化关系, 但是试验未设计专用的加压、温度控制和气体收集装置; 罗锋^[5]设计制作了填埋场反应器装置, 研究了生物反应器参数对垃圾降解的影响规律, 但是设计的装置中没有加压功能; Hossain^[6]设计制作了回灌、气液收集等装置, 但是没有制作专用的温度控制系统, 而是把试验安排在一个温度为 37~41℃ 的房间进行的。这样做的缺点是, 不但温度的控制精度低、投入大, 而且在这样的高温环境下工作会给实验人员带来诸多不便。

浙江大学岩土所通过对填埋场现场钻孔取样, 总结了垃圾有机组分含量及其随深度的变化规律, 根据室内压缩曲线和现场压缩曲线建立了考虑降解的填埋场沉降计算模型^[7,8]。本次研制的城市生活垃圾降解压缩试验仪具有温度控制、渗滤液回灌、加压和气体和液体收集功能, 为进一步研究垃圾降解对变形的影响规律提供了重要手段。

1 仪器原理及结构

1.1 仪器工作原理

垃圾降解压缩试验仪工作原理如图 1 所示。先将制备好的垃圾试样放入土样室, 由温度控制装置将土样温度调整到一个最适宜生物降解的温度 T , 通过加压设备对土样施加竖向荷载 $d\sigma$, 垃圾试样的变形和气压 P 可分别由百分表和气压表读出。为了加速垃圾降解, 采用了渗滤液回灌的方法。

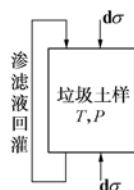


图 1 仪器工作原理示意图

Fig. 1 Test principle

本次试验将土样温度控制在 41℃, 根据 Hossain 试验得出的气体产率变化与 $(C+H)/L$ (纤维素与半纤维素之和与木质素的比值) 在反映降解程度上具有很好的一致性的结论, 本次试验采用气体产量结合气体组分变化作为降解程度的指标。

1.2 仪器结构

图 2 为城市生活垃圾降解压缩试验仪示意图, 现就仪器结构分别介绍如下。

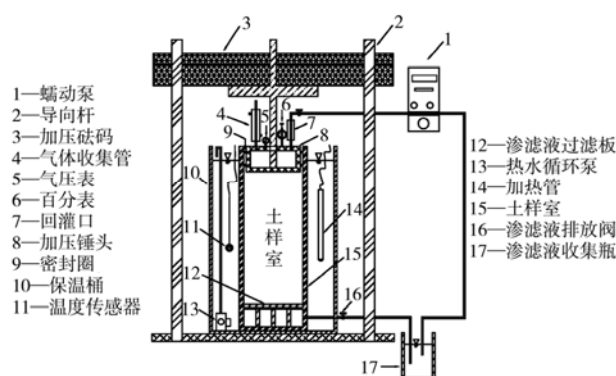


图 2 仪器结构示意图 (堆载式加压)

Fig. 2 Test apparatus I

(1) 土样室

土样室由无缝钢管制成, 内径为 190 mm, 高度为 600 mm。为减小试样与土样室内壁的阻力, 需要对钢管内壁进行加工, 提高金属管内表面的光洁度。为防腐蚀, 内外表面做镀铬处理。试样桶底部设计有过滤板, 上置土工布, 其功能是只允许垃圾土中的渗滤液通过, 而阻止垃圾土细小固体颗粒的渗漏。

(2) 温度控制系统

温度控制系统是按照热水水浴的原理进行设计的。温控系统包括温控仪 (图中未标出)、加热管、温度传感器、循环热水泵、以及外层裹有保温材料保温桶。单根加热管的功率为 100 W, 其数目由热水和室内的温差及水的体积来决定。由于加热管是点式热源, 为保证水体的均匀热场, 在热水桶中安装了热水循环泵。热水循环泵把底部的水抽排到桶的顶部, 使桶中的热水处于循环状态, 为试样提供一个均匀热场。温度传感器的精度是 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。桶外包裹的保温材料能减小热量损耗。如前文所述, 垃圾的最佳降解温度是 41℃, 本仪器设计的最高可控制温度为 70℃。

(3) 密封系统

上部荷载通过锤头传递到垃圾土试样中, 在锤头与试样桶内壁之间存有间隙, 间隙的存在既不利于气体收集, 也会影响厌氧降解菌的繁殖, 此外, 从间隙中排出的气体还会污染实验室的环境, 因而必须进行密封设计。本仪器制作了双道橡胶密封圈。试验证明,

在土样室的绝对气压达 400 kPa 时, 仍然能保持很好的密封效果。

(4) 加压系统

根据试验所需压力水平不同, 可分别采用堆载式和杠杆式两种加压方式。

堆载式(如图 2 所示)是把砝码置于锤头顶部, 砝码可顺着导向杆滑动。堆载方式适用于试样直径不大、加载压力较小的试验条件。

杠杆式加压系统(图 3)与常规的三联固结仪相似, 都是利用砝码的重量通过杠杆原理将压力加到试样上。由于垃圾土压缩性很大, 为此设计了特别的蜗轮蜗杆系统, 蜗轮系统的最大行程为 300 mm。杠杆式加压系统适用试样直径大、加载压力大的试验。



图 3 仪器结构示意图(杠杆式加压)

Fig. 3 Test apparatus II

(5) 回灌系统

回灌系统除了将试样底部排出的渗滤液送回到土样室, 实现渗滤液循环之外, 还兼有输送酸碱中和液的功能, 本仪器选用蠕动泵来提供渗滤液循环动力。当土样室中气压较大时, 可选用注射泵来代替。

回灌系统工作流程: 待土样室中气体通过排气口排放完全后, 打开渗滤液排放阀, 土样室中的渗滤液在残留气压和水头差的作用下, 流入到渗滤液收集瓶, 开启蠕动泵, 收集瓶中的渗滤液将经锤头上的回灌口流回到土样室。

为保证渗滤液均匀渗入到土样中, 在锤头顶部设计了 A、B 两个呈对称分布的回灌口, 在回灌口的底部各设有一个开有许多小孔的环形渗滤液分配器, 每个回灌口可对土样室中半个区域的土样进行回灌。

(6) 气体收集系统

集气管安装在锤头顶部, 垃圾土样降解产生的气体经排气管流入到抽成真空的气体收集袋。气体收集袋由专门厂家生产, 采用特殊工艺制成的集气袋保证

了所收集的气体不被吸收, 以备做分析测试之用。

(7) 锤头拆卸装置

试验完成之后, 要拆除锤头以便清洗土样室中的垃圾试样。由于锤头侧壁安装了橡胶密封圈, 密封圈与试样桶内壁之间有一定摩擦阻力, 给锤头拆卸工作带来一定难度, 锤头拆卸装置专为此设计。

拆卸装置工作原理是: 制作一个带气门芯的气咀, 选一根高压气管把气咀与锤头的排气孔相连, 关闭锤头和试样桶的所有阀门, 用手动打气筒通过气咀和排气孔向土样室供气, 随着气压的增加, 锤头在气压推动下将逐渐往上提离垃圾试样表面, 完成拆卸过程。

2 试验内容

仪器制作完成后, 进行了为期 6 个月的初步试验。试验的目的包括: ①检验仪器各部件的功能效果; ②检验温度、气压、回灌等因素对降解速率的影响程度; ③检验气体的组成; ④检验垃圾降解对变形的影响。

2.1 试样制备

垃圾试样按表 1 配比人工制备。颗粒尺寸小于 25 mm。该配比的垃圾无机组分含量多, 有机组分含量少, 相当于我国 20 世纪 90 年代中期的垃圾状况^[9]。先将制备好的土样装入直径为 190 mm、高度为 600 mm 的土样室中, 打开气阀, 施加 1.5 kN 压力, 模拟现场填埋场垃圾土预压过程。测得预压后垃圾土样高度为 320 mm, 根据土样各组分的比重, 计算求得此时孔隙比约为 3.3。关闭放气阀, 给试样施加 150 kPa 的压力, 通过百分表观测垃圾试样在此压力作用下的变形量, 采用专用气体收集袋进行气体收集, 通过排水法来测量气体体积, 根据气体状态方程把气体体积换算成标准状态下(1 atm, 20℃)的气体体积。

2.2 试验步骤

试验如表 2 所示分 9 个阶段进行。

3 试验结果及分析

3.1 产气量观测结果及分析

垃圾降解产气量可作为垃圾降解程度的重要指标。通过对降解产气量和气压变化曲线(图 4~6)及表 2 有关内容分析, 可得出如下几点结论: ①温度对降解产气速率有重要影响。在温度为 15℃的 AB 段,

表 1 垃圾土样组成

Table 1 The composition of municipal solid waste

组分	厨余	纸	塑料	橡胶	纤维	煤渣石土	玻璃	金属	陶瓷	果核	草木	总计
组分质量/kg	0.855	0.21	0.335	0.03	0.38	2.845	0.025	0.06	0.015	0.02	0.225	5
质量比/%	17.1	4.2	6.7	0.6	7.6	56.9	0.5	1.2	0.3	0.4	4.5	

表 2 降解压缩试验过程表

Table 2 Test process

降解阶段	降解时间/d	温度/℃	有无回灌	排气状态/备注
AB	0~19	15	无	关闭放气阀, 不排气。
BC	19~42	41	无	关闭放气阀, 不排气, 第 25 天固定锤头高度。在第 39 天的绝对气压达到 400 kPa 后开阀放气, 当土样室绝对气压降低至 150 kPa 时关闭放气阀。
CD	42~63	41	无	每 3 天排一次气, 绝对气压降至 150 kPa 时, 关闭放气阀。
DE	63~71	41	无	打开排气阀, 连续排气, 气压降至 1 atm 时关闭放气阀。
EF	71~96	41	无	每 3 天排一次气, 气压降至 1 atm 时关闭放气阀。
FG	96~114	29	无	每 3 天排一次气, 气压降至 1 atm 时关闭放气阀。
GH	114~142	41	A 号回灌口回灌, 400 mL/d, pH = 7~8	每天排一次气, 气压降至 1 atm 时关闭放气阀。
HI	143~161	41	B 号回灌口回灌, 400 mL/d, pH = 7~8	每天排一次气, 气压降至 1 atm 时关闭放气阀。
IJ	162~181	41	A、B 两个回灌口同时回灌, 回灌量各为 200 mL/d	每天排一次气, 气压降至 1 atm 时关闭放气阀。
JK	182~188	25	无	土样室加工处理后, 装入已降解的垃圾试样, 观测变形。

除了加压初期由于主压缩的变形导致孔压瞬时增加外, 在主压缩完成以后, 土样室的气压几乎没有增加, 表明此时段产气量很小。当温度从 EF 段的 41℃ 降到 FG 段的 29℃ 时, 产气量从 EF 段的每天 1.4 L 降为 0.2 L; ②回灌能加快产气速率。GH、HI 两段与 EF 段的温度均为 41℃ 时, 但是回灌后的 GH、HI 两段产气量达到每天 2 L, 而未回灌的 EF 段仅为 1.4 L; GH、HI 两段比 EF 段的产气量曲线有更高的斜率; ③降解菌有较高的耐压性。BC 段的绝对气压最高值达到 400 kPa, 表明降解菌在高的气压下仍能保持高的活性; ④ 5 kg 垃圾经过 6 个月的降解后共产气 204 L, 气体产气速率已降为每天 0.5 L, 可认为降解已基本结束。

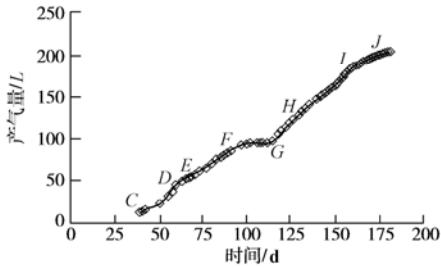


图 4 产气量曲线

Fig. 4 Gas production curve

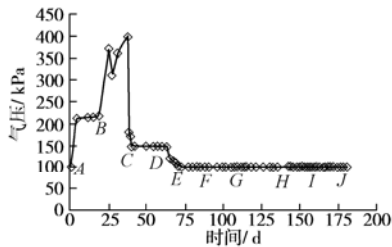


图 5 气压变化曲线

Fig. 5 Variation of gas pressure

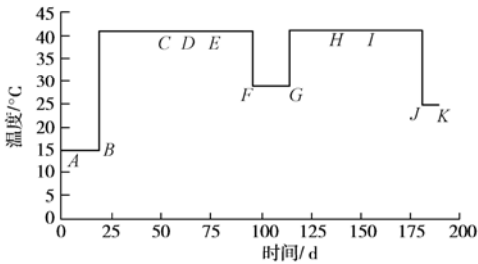


图 6 温度变化曲线

Fig. 6 Variation of temperature

Wall^[10]和 Hossain 用各自设计的仪器进行了垃圾降解压缩试验。试验中均采用了回灌、酸碱液中和及污泥接种等加快降解速率的办法, 不同之处在于 Hossain 将试样温度控制在 37~41℃, 而 Wall 把温度控制为 25℃。Hossain 经过 127 d 的试验, 发现垃圾已基本降解完全, 而后者在 225 d 后仍未见到明显降解迹象。这两者的试验结果及本文的试验结果都说明了温度对降解速率影响的重要性。

杭州地区温暖湿润的气候, 为垃圾的降解创造了有利条件。根据钻孔实测资料^[11], 杭州天子岭填埋场垃圾体内的温度为 38~50℃, 处于非常有利于降解的温度范围。杭州天子岭填埋场中新鲜垃圾的塑料含量为 5% 左右, 而钻孔揭露的填埋场垃圾堆体中的塑料含量上升至 10% 以上, 而且垃圾成分不受填埋深度的影响。由于塑料属于难降解物质, 塑料含量的变化, 反映了易腐物质含量的变化, 可以作为垃圾土的降解程度的指标。杭州天子岭填埋场塑料含量的变化规律表明垃圾的降解速度非常快。这与本次试验的结果是相一致的。

从图 5 可见, 第 19 天到第 25 天共 7 d 的时间里,

降解产气导致土样室内的气压增加了 150 kPa。由于气压的增加会导致垃圾土体有效应力的减小, 从而对填埋场的稳定带来影响, 因而在填埋场设计和管理中要充分认识到垃圾体中气压的影响, 对排气设施进行合理设计和科学管理。

垃圾土的降解速率受多种环境因素的影响, 因此, 在进行排气井的设计时, 要因地制宜, 合理安排。在气候条件适宜降解的地区, 可以根据填埋场垃圾降解速率快、浅部产气量比深部大的特点, 遵循“浅密深疏”的原则, 优化设计方案。

3.2 变形观测结果及分析

试验中垃圾试样的变形是通过安装在加压锤头上的百分表来测定的。当放气阀关闭时, 锤头高度变化反映的是土样室中垃圾试样和气体总体积变化的情况, 其目的是为了研究填埋场中垃圾降解产生的气体对填埋场沉降和稳定性影响程度。锤头高度随时间变化曲线如图 7 所示。曲线可根据土样室气压大小分为 *AE*, *EJ* 两段来分析。在 *AE* 段, 土样室中气压保持为高于大气压的状态, 而在 *EJ* 段, 土样室中的气压消散为大气压。

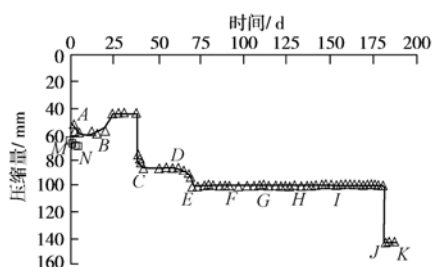


图 7 变形曲线

Fig. 7 Displacement

在试验开始的 *AB* 段, 由于此段温度较低 (15℃), 产气量少, 锤头下沉量在荷载施加初期迅速增加, 随后便趋于稳定; 在 *BC* 段初期, 由于温度升高 (41℃), 产气量迅速增加, 气压持续升高, 锤头发生回弹。锤头发生回弹后, 气压随孔隙度增加有所减小。此后, 固定锤头高度, 土样室中气压又随气体的产生而不断增加, 在绝对气压最高值达到 400 kPa 时开始放气, 锤头高度随气压的减小而快速下降。

垃圾体内孔隙气压对变形影响试验结果说明了在进行填埋场容量设计时考虑气压作用的必要性。随着大型填埋场建设不断增多, 填埋场的高度不断增加, 垃圾受的重力荷载不断增大, 垃圾的孔隙度不断减小, 导致土的透气系数减小, 造成土中气压增大; 如果填埋场设计的排气能力偏小, 或者排气设施年久失效而发生淤堵时, 也会引起填埋场垃圾体内气压的增加, 气压的增加引起有效应力减小, 从而导致沉降减小,

甚至对填埋场的稳定带来影响。

在气压消散后的 *EJ* 段, 变形曲线近似呈一条水平线, 而同期的产气量曲线则反映垃圾降解仍在进行。推测出现这一异常现象的原因, 可能是由于锤头所处位置对应的土样室内壁光洁度不够, 导致锤头下行受阻。在试验进行到 181 d, 考虑到垃圾降解已基本结束, 取下锤头和倒出垃圾试样, 经对土样室孔壁加工处理后重新装上已降解的垃圾试样, 测得的变形曲线为图中 *JK* 段。*JK* 段数据显示, 变形较 *EJ* 段有较大的增加, 从而验证原来对 *EJ* 段出现异常现象原因的推测。另外, 由于变形很快趋于稳定, 反映降解已基本完成, 此时得到的变形量可作为垃圾试样在 150 kPa 作用下降解完成后的最终变形量。

图 7 中的 *MN* 曲线是同一台仪器对同样配比和重量的新鲜垃圾试样在相同压力下进行的压缩试验, 不同之处在于该试验是在温度为 5℃ 的条件下进行的, 而且未进行渗滤液回灌, 因此可忽略降解对变形的影响。

Wall 将垃圾的压缩总结为初始压缩、主压缩和次压缩三种方式, Hossain 将初始压缩和主压缩不做区分, 总称为主压缩, 而把次压缩进一步细分为蠕变和降解引起的次压缩两种类型。

本次试验中 *MN* 对应的变形量可看作 Hossain 分类中的主压缩量, 而 *JK* 段对应的变形量可作为总压缩量, 它与主压缩量之差可作为包括蠕变和降解引起的次压缩量。从图 7 可得, 垃圾试样经过降解后的最终变形量为 142 mm, 而未经降解的主压缩量为 65 mm, 次压缩量为 77 mm。

降解与变形关系的试验结果表明了在进行填埋场沉降计算时考虑降解影响的重要性。在进行填埋场沉降计算时, 如果仅根据主压缩曲线进行计算, 会使得计算结果偏小, 特别是对于有机质含量高的垃圾土更是如此。同样要考虑的是, 随着垃圾的降解, 垃圾固体组分会相应减少, 导致垃圾体总质量的减小, 使得填埋场内某深度单元体所受的总应力减小, 如果仅根据新鲜垃圾堆填重量作为荷载而不考虑降解引起的应力减小部分, 又会使得计算结果偏大。

3.3 气相色谱/质谱分析

气体组分分析不但能为填埋场气体处理方案的设计提供依据, 同时也是判断垃圾土降解程度的重要指标。好氧分解阶段的气体产物主要是 CO₂, 而 CH₄ 气体的产生表明降解已进入厌氧阶段。

本次试验采用色谱/质谱联用技术 (GC/MS), 对所采集的四个气体样品的组分进行测定, 4 个气体样品的降解时间分别为第 50、87、132 和 161 天。所用仪器为 ThermoQuest Trace 2000 GC/MS (Finnigan,

America), 并配有 NIST(v2.0)谱库。测试条件如下: 进样口温度为 220℃, 色谱柱为 GASPRO 柱 (30m×0.32 mm), 高纯氦气做载气, 柱流量为 1.0 mm/min, 柱温: 35℃(2 min) $\xrightarrow{15^{\circ}\text{C/min}}$ 180℃(10 min), 质谱监测器: EI 源、200℃、70 ev, 质量扫描范围 0~100 aum, 电子倍增管电压为 250 V。

该仪器的气相色谱部分是用来分离样品中的混合组分, 即利用混合样品的各组分在柱子的固定相和流动相存在微小的分配差别, 使其在流动相的推动下进行反复的吸附和脱附, 从而实现各组分分离。仪器的质谱部分是将各组分在标准条件下 (70 ev) 下, 进行质谱测试, 并进行谱库搜寻, 从而确定气体组分。

测试结果表明, 4 个气体样品的组分基本相同, 每个样品均含 3 个组分, 气体保留时间 (RT) 各自为 1.06、1.77 和 11.00 min, 分别代表 CH₄、CO₂ 和 H₂O。其中第 50 天的气体样品总离子流图如图 8 所示。分析结果表明, 土样在试验进行到第 50 天时就已进入到厌氧降解阶段。

由于 CH₄ 可以作为能源加以回收利用, 加强填埋场垃圾土的填埋方式对气体组分影响方面的试验研究, 可为填埋场的设计提供科学指导。

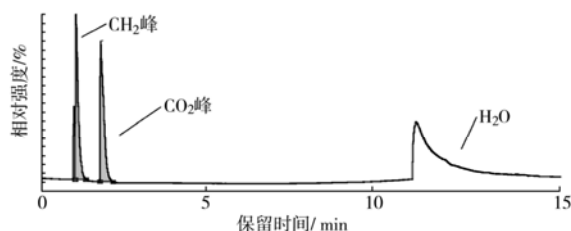


图 8 总离子流图

Fig. 8 Total ion current

4 结 论

(1) 研制了一台新型城市生活垃圾降解压缩试验仪, 该仪器具有温控、回灌、加压和气液收集等功能, 试验证明仪器性能稳定。

(2) 温度是影响降解速率的主要因素, 回灌能加快降解速率。在绝对气压为 400 kPa 时, 降解仍能继续进行。

(3) 在温度为 41℃ 和回灌的条件下, 降解在 6 个

月后已基本完成; 气相色谱/质谱分析测试表明, 气体组分主要为 CH₄、CO₂ 和 H₂O。

(4) 5 kg 垃圾试样置入直径为 190 mm 的圆柱型土样室 (土样的初始高度为 320 mm), 在 150 kPa 压力下, 降解结束后的总压缩量为 142 mm。

(5) 垃圾体内孔隙气压对变形速率有重要影响。

参考文献:

- [1] Barlaz M A, Schaefer D M, Ham R K. Bacterial population development and chemical characteristics of refuse decomposition in a simulated sanitary landfill[J]. Appl Environ Microbiol, 1989, 55(1): 55 - 65.
- [2] Barlaz M A, Milke M W, Ham R K. Gas production parameters in sanitary landfill simulators[J]. Waste Management & Research, 1987, 5 (1): 27 - 39.
- [3] 王罗春, 赵由才, 陆雍森. 垃圾 BDM 分析及应用[J]. 环境卫生工程, 2003, (1): 6 - 8.
- [4] 朱青山, 赵由才, 许迪民. 垃圾填埋场中垃圾降解与稳定化模拟试验[J]. 同济大学学报, 1996, (5): 597.
- [5] 罗 锋, 陈万志, 李小鹏, 等. 三种垃圾填埋场单元模拟器对废物降解的对比试验[J]. 中国环境科学, 2004, (4): 474 - 479.
- [6] Hossain M S, Gabr M A, Barlaz M A. Relationship of compressibility parameters to municipal solid waste decomposition[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(12): 1151 - 1157.
- [7] 张振营, 吴世明, 陈云敏. 城市生活垃圾土性参数的室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 35 - 39.
- [8] 陈云敏, 柯 翰. 城市固体废弃物的压缩性及填埋场容量分析[J]. 环境科学学报, 2003, 23(5): 694 - 698.
- [9] 张振营, 陈云敏. 固体废弃物压缩性及填埋场沉降研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 116 - 120.
- [10] Dean K Wall, Chris Zeiss. Municipal landfill biodegradation and settlement[J]. Journal of Environmental Engineering, 1995, 121(3): 215 - 213.
- [11] 冯广德, 俞赜赜. 垃圾填埋场内垃圾成分变化的研究[J]. 环境卫生工程, 2000, (2): 74 - 75.