

## 生活垃圾降解特性室内试验研究

王樱峰,张振营,丁正坤,方月华

(浙江理工大学建筑工程学院,杭州 310018)

**摘 要:**按照杭州天子岭垃圾填埋场生活垃圾的成分,人工配制新鲜生活垃圾试样,放入密封的聚氯乙烯(PVC)桶并置入恒温降解箱内进行厌氧降解。待生活垃圾试样达到指定的降解龄期时,进行降解特性相关试验。结果表明:生活垃圾的密度随着降解龄期的增加而增加,密度与降解龄期的关系可用指数函数进行拟合,拟合系数为0.94;生活垃圾的自然应变随着降解龄期的增加而增加,自然应变与降解龄期的关系可用指数函数进行拟合,拟合系数为0.94;生活垃圾中有机质的含量随着降解龄期的增加而减小,有机质含量与降解龄期的关系可用指数函数进行拟合,拟合系数为0.99。建立了三个关系对应的指数函数表达式。研究结果可为大型垃圾填埋场的库容分析提供参考依据。

**关键词:**生活垃圾;降解龄期;密度;自然应变;有机质含量

**中图分类号:** X705

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851(2018)05-0378-05

### 0 引言

城市生活垃圾是含有多种物质的混合材料,含有大量可降解成分,如蔬菜、水果、废纸和木头等。这些成分随着龄期的增加逐渐降解,产生填埋气和渗滤液。同时,随着降解龄期的增加,垃圾内部的成分也相应发生变化,进而引起垃圾填埋体性质的变化,因此研究垃圾的降解特性显得尤为重要。

Hossain等<sup>[1]</sup>将垃圾的降解过程分为好氧阶段、厌氧酸化阶段、甲烷加速生成阶段和甲烷减速四个阶段。在好氧阶段(第一阶段),垃圾孔隙中的氧气被消耗,而且常规填埋场中并没有氧气补给。在厌氧酸化阶段(第二阶段),多种酸性物质生成、积累,垃圾pH值降低,垃圾的产气量很少,渗滤液呈酸性,此时的环境条件不适合垃圾分解所需的细菌繁殖,所以几乎没有纤维素和半纤维素的分解。在甲烷加速生成阶段(第三阶段),由于条件适宜,甲烷生产率在这一阶段达到峰值,酸性物质转化为甲烷和二氧化碳,pH值升高,纤维素和半纤维素开始分解。在甲烷减速生成阶

段(第四阶段),甲烷生成速度降低,酸性物质分解殆尽,纤维素和半纤维素的分解限制了甲烷的生成<sup>[2]</sup>。

降解作用下,垃圾内部的成分发生改变,生活垃圾在降解和自重作用下产生沉降。随着沉降的增大,垃圾填埋场的库容也会增大,但封场后过大的沉降会导致填埋体防渗系统的破坏,从而引起环境污染。很多学者对垃圾的沉降特性进行了研究,朱青山等<sup>[3]</sup>对人工配制和填埋垃圾进行了密封自然降解试验,研究了不同成分及添加物对垃圾沉降的影响,给出了30~190 d范围内垃圾高度与时间的线性方程,并推算了填埋场的稳定化时间。谢强<sup>[4]</sup>采用自制试验装置对人工配制的垃圾试样进行压缩蠕变试验,得到了不同压力与沉降的关系曲线。张振营等<sup>[5-6]</sup>建立了有机物含量与埋深的数学模型,认为当埋深不大于50 m时,垃圾的有机物含量与埋深可以拟合为线性关系,当埋深大于50 m时垃圾的有机物含量与埋深可以拟合为指数关系,并给出了有机物降解沉降量与埋龄期的指数函数关系式。孔宪京等<sup>[7]</sup>总结了多位学者研究压缩变形特性

收稿日期:2018-01-17 网络出版日期:2018-03-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51478436,51678532)

作者简介:王樱峰(1994-),男,山西运城,硕士研究生,主要从事环境岩土工程方面的研究。

通信作者:张振营, E-mail:zhangzhenyinga@163.com

的现状和不足,自主研制了压缩-降解仪,并讨论了现有沉降模型的优劣和适用条件。

朱青山等<sup>[3]</sup>得出的线性关系有局限性,无法模拟 190 d 以上填埋垃圾的沉降情况。谢强<sup>[4]</sup>的压缩蠕变试验未考虑降解对垃圾沉降的影响。张振营等<sup>[5-6]</sup>总结的有机物降解规律采用两个表达式,不具有统一性。孔宪京等<sup>[7]</sup>总结的三个生物降解模型均采用指数函数,但由于各模型的降解条件不统一,导致模型参数不具有代表性。

本文考虑龄期对垃圾降解特性的影响,采用加速降解条件,建立了具有代表性的降解特性表达式。将人工配制的新鲜生活垃圾试样装入自制密封桶中,并放置到恒温降解箱内进行厌氧降解,考虑 7 个龄期(40、60、105、150、195、240 d 和 285 d),系统地研究了不同降解龄期生活垃圾的降解特性及规律。

## 1 试验仪器及试验材料

### 1.1 试验仪器

Hartz 等<sup>[8]</sup>、Barlaz 等<sup>[9]</sup>研究发现,垃圾降解过程中,甲烷产气的最适宜温度是 41 ℃。McBean

等<sup>[10]</sup>研究表明,最佳的厌氧微生物繁殖温度为 40~41 ℃。玉罗春<sup>[11]</sup>、罗锋等<sup>[12]</sup>、刘辉等<sup>[13]</sup>研究发现,41 ℃时生活垃圾的降解速度最快。

采用恒温降解箱进行加速降解试验。该仪器由温度调节器、恒温箱、加热系统和制冷系统组成。打开电源,在温度调节器上设定好温度后,恒温降解箱会使箱体一直稳定在设定温度±1 ℃。将密封好的试样放入恒温降解箱内,并设定箱体温度为 41 ℃,使生活垃圾加速降解。

采用恒温干燥箱对降解垃圾进行烘干,测定垃圾的含水率。恒温干燥箱由数字显示调节仪、电源、鼓风、高低温开关和干燥箱组成。工作温度为室温升 10~300 ℃。

采用箱式电阻炉对烘干后的垃圾进行有机质含量试验。箱式电阻炉由 XMT 数显调节仪和电阻炉组成,工作温度为 100~1300 ℃。

### 1.2 试验材料

参照杭州天子岭垃圾填埋场垃圾的组成<sup>[14]</sup>,人工配制初始密度为 0.8 g/cm<sup>3</sup> 新鲜垃圾试样,垃圾各成分质量百分比见表 1,各成分见图 1。

表 1 城市生活垃圾各成分质量百分比

成分	废纸	青菜	白菜	芹菜	苹果	香蕉	木头	橡胶
比例/%	2.00	13.50	18.00	4.50	4.50	4.50	3.00	3.00
成分	布料	骨头	塑料	金属	碎石	土	陶瓷	玻璃
比例/%	4.50	4.50	3.00	1.75	4.45	25.30	1.75	1.75

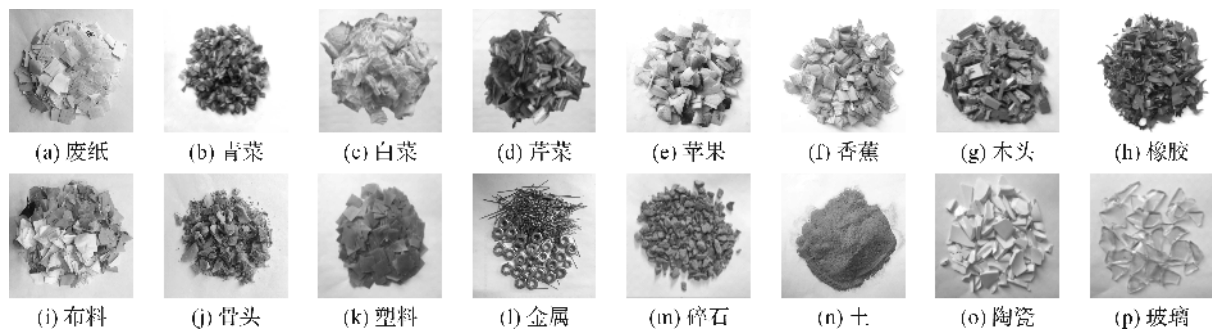


图 1 新鲜垃圾试样的成分

采用直径 150 mm、高度分别为 250 mm 和 100 mm 的聚氯乙烯(PVC)密封桶作为垃圾的密封容器(见图 2)。其中,高度为 250 mm 的密封桶用作沉降测量和密度计算,高度为 100 mm 的密封桶用作有机质含量测定。

根据密封桶内壁的直径和高度,计算所需垃圾试样的



图 2 聚氯乙烯(PVC)密封桶

体积和质量。再根据各成分比例计算相应材料所需的质量。将称好质量的各个材料混合,搅拌均匀后,将试样分 4 层均匀装填到密封桶中,并保证垃圾的初始密度为 0.8 g/cm<sup>3</sup>。用堵头将密封桶两端堵住,并用热熔胶进行密封处理,从而使得垃圾试样进行厌氧降解。重复该过程 14 次,制作 2 组相同成分的试样。第 1 组试样直径为 150 mm、高度为 250 mm,第 2 组试样直径为 150 mm、高度为 100 mm。

对 2 组试样进行编号(a、b、c、d、e、f、g),对应 7 个降解龄期(40、60、105、150、195、240 d 和 285 d)。

## 2 试验过程

### 2.1 降解后垃圾高度的测量

当试样达到指定降解龄期(40、60、105、150、195、240 d 和 285 d)时,分别将第1组高度为250 mm的试样从恒温降解箱取出,将试样冷却至15~20℃。随后打开密封桶的桶盖,测量降解后试样的沉降量。

### 2.2 密度计算

待第1组高度为250 mm的试样冷却至15~20℃时,称量垃圾试样的质量,再根据试样高度和直径,计算降解后垃圾的密度。

### 2.3 有机质含量试验

当试样达到指定降解龄期(40、60、105、150、195、240 d 和 285 d)时,分别将第2组高度为100 mm的试样从恒温降解箱取出。待试样冷却至15~20℃时,放入干燥的盘中摊平,称量试样和盘子的总质量。称量后将试样和盘子置于恒温干燥箱中,烘干温度设定为60~70℃,烘干大于24 h,烘干至2 h内质量变化小于试样质量的1%。将试样从干燥箱中取出,冷却至室温,称量盘子加干试样的质量。将烘干至干燥的降解垃圾放入陶瓷瓶中,称量试样和陶瓷瓶的总质量,再置于箱式电阻炉中,保持600℃的高温烘干2 h以上,并烘干至恒重<sup>[14]</sup>。试样的有机质含量A可用式(1)表示:

$$A/\% = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

式中: $m_1$ 为烘干干燥后垃圾的质量, $m_2$ 为烧灼至恒重后垃圾的质量。有机质含量试验安排见表2。

表2 有机质含量试验安排

试样编号	降解龄期 T/d	烘干温度/℃	灼烧温度/℃
2a	40		
2b	60		
2c	105		
2d	150	60	600
2e	195		
2f	240		
2g	285		

注:试样编号中,2表示第2组。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 降解过程分析

不同降解龄期的垃圾见图3。如图3所示,40 d降解龄期的垃圾产生了一定的沉降,有刺鼻气味产生。垃圾中的有机质成分产生一定的降解,材料颜色、形状变化不大,可清晰辨别。此时的垃圾处于好

氧阶段,垃圾在密封桶内残余氧气作用下进行好氧降解,垃圾在自重作用下发生沉降,孔隙水被排出,孔隙减少,密度增大。

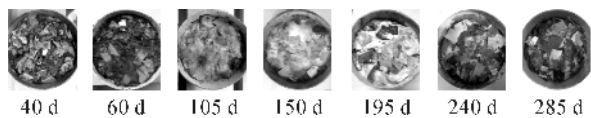


图3 不同降解龄期的垃圾

降解龄期在60 d时,有小范围白色菌落产生,降解程度明显,多种材料难以辨认。降解龄期在105 d时,白色菌落大致覆盖垃圾表面,渗滤液在垃圾表面有所堆积,刺鼻气味加重。降解龄期在150 d时,白色菌落完全覆盖整个垃圾表面,刺鼻气味浓烈。降解龄期在195 d时,白色菌落完全覆盖垃圾表面并有一定的厚度,渗滤液产量也最大。该阶段的垃圾由好氧阶段转化到厌氧酸化阶段,垃圾内部氧气逐渐消耗殆尽,开始产生一些酸性物质,该阶段产生的细颗粒逐渐向孔隙移动,使得垃圾体积进一步减小,密度进一步增大。降解龄期在105~195 d时,进入甲烷加速生成阶段,此时的环境适合厌氧菌的繁殖,在厌氧菌的降解活动下,上一阶段产生的酸性物质逐渐分解为甲烷和二氧化碳,甲烷和二氧化碳气体产量逐渐增大,降解过程中产生了液态物质,导致渗滤液产量随之增加。

降解龄期在240 d时,白色菌落基本消失,除难降解和不降解物质外,其余物质已经无法辨认。降解龄期在285 d时,垃圾颜色进一步加深,沉降明显。该阶段垃圾进入甲烷减速生成阶段,酸性物质分解殆尽,甲烷生成速度降低,纤维素和半纤维素的分解限制了甲烷的生成。

### 3.2 垃圾的密度与降解龄期的关系

根据降解后垃圾试样的高度和直径计算降解后垃圾的体积,称量降解后垃圾的质量,计算出垃圾的密度。不同降解龄期垃圾的密度见表3,垃圾的密度与降解龄期的关系曲线见图4。

表3 不同降解龄期垃圾的密度

T/d	0	40	60	105	150	195	240	285
$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	0.800	0.832	0.864	0.884	0.888	0.896	0.931	0.934

如图4所示,垃圾的密度随着降解龄期的增加而增加,增加的趋势逐渐减小。降解初期,垃圾在自重和好氧降解双重作用下产生沉降,密度增加速度快,随后酸化阶段自重作用影响逐渐减少,好氧降解转化为厌氧降解,密度增大幅度逐渐减弱,随着有机质进一步分解,密度逐渐趋于稳定值。密度与降解龄



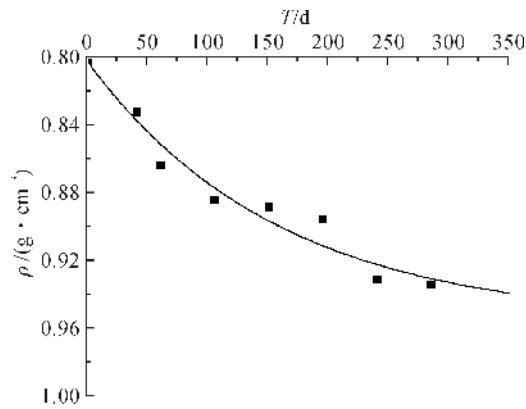


图4 垃圾的密度与降解龄期的关系曲线

期的关系可用指数函数进行拟合,拟合系数为 0.94,拟合方程见式(2):

$$\rho = 0.95 - 0.15e^{-6.29 \times 10^{-3} T} \quad (2)$$

### 3.3 垃圾的自然应变与降解龄期的关系

新鲜垃圾试样的初始高度为 250 mm,垃圾的自然应变由沉降量和试样初始高度计算得出,不同降解龄期垃圾的沉降量和应变见表 4,垃圾的自然应变与降解龄期的关系见图 5。

表4 不同降解龄期垃圾的沉降量和自然应变

T/d	0	40	60	105	150	195	240	285
s/mm	0	18.83	29.17	31.00	31.67	38.00	38.67	43.33
ε/%	0	7.53	11.67	12.40	12.67	15.20	15.47	17.33

注:s为沉降量,ε为自然应变。

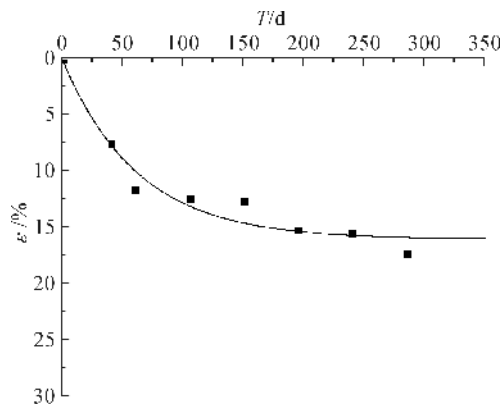


图5 垃圾的自然应变与降解龄期的关系

如图 5 所示,垃圾的自然应变随着降解龄期的增加而增加,增加趋势逐渐变缓。降解初期,垃圾在自重和好氧降解双重作用下产生沉降,自然应变增长幅度较大,随后厌氧酸化阶段自重作用影响逐渐减少,酸性物质不利于厌氧菌繁殖,有机质分解受限,自然应变增大幅度变小,第三阶段时,厌氧菌繁殖条件适宜,有机质进一步分解,自然应变继续增大,随着有机质的分解,自然应变会逐渐趋于稳定值。垃圾的自然应变与降解龄期的关系可用指数函

数进行拟合,拟合系数为 0.94,拟合方程见式(3)。

$$\epsilon = 15.96 - 15.69e^{-0.016 T} \quad (3)$$

式(3)与张振营等<sup>[5]</sup>建立的有机物降解沉降量随填埋时间的数学模型一致。张振营等<sup>[5]</sup>的模型表明,沉降量在填埋时间超过 40 a(年)后才逐渐趋于稳定,而在本文中,垃圾的自然应变在 200 d 后逐渐趋于稳定值。这是因为本文将试验温度控制在最适宜降解的温度,采用温度控制降解箱加速了降解过程,使得沉降量较快趋于稳定,降解速率显著。

### 3.4 垃圾的有机质含量与降解龄期的关系

新鲜垃圾试样的初始有机质含量为 40%,有机质含量计算见式(1),不同降解龄期有机质的含量见表 5,有机质含量与降解龄期的关系见图 6。

表5 不同降解龄期的有机质含量

T/d	0	40	60	105	150	195	240	285
A/%	40.00	26.20	21.92	20.86	20.32	20.01	18.79	18.64

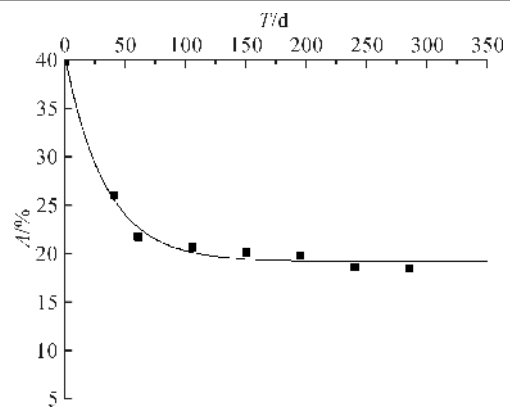


图6 垃圾的有机质含量与降解龄期的关系曲线

如图 6 所示,垃圾的有机质含量随着降解龄期的增加而减少,增加的趋势逐渐平缓。降解初期,垃圾进行好氧降解,有机质含量减少幅度大,随后厌氧酸化阶段产生的酸性物质不利于厌氧菌繁殖,有机质分解受限,有机质含量减少幅度很小,第三阶段时,厌氧菌繁殖条件适宜,有机质进一步分解,有机质含量会逐渐趋于稳定值。有机质含量与降解龄期的关系可用指数函数进行拟合,拟合系数为 0.99,拟合方程见式(4):

$$A = 19.36 + 20.65e^{-0.03 T} \quad (4)$$

## 4 结 论

采用自制密封桶及恒温降解箱对生活垃圾进行加速厌氧降解,对降解后的垃圾试样进行了降解特性相关试验,得到以下研究结论:

a)生活垃圾的密度随着降解龄期的增加而增加,密度与降解龄期的关系可用指数函数进行拟合,

拟合系数为 0.94,建立了指数函数模型。据此模型,可以预测不同降解龄期垃圾的密度。

b)生活垃圾的自然应变随着降解龄期的增加而增加,自然应变与降解龄期的关系可用指数函数进行拟合,拟合系数为 0.94,建立了指数函数模型。据此模型,可以预测不同降解龄期垃圾的自然应变和沉降。

c)生活垃圾有机质的含量随着降解龄期的增加而减小,有机质含量与降解龄期的关系可用指数函数进行拟合,拟合系数为 0.99,建立了指数函数模型。据此模型,可以预测不同降解龄期垃圾有机质的含量。

本文建立了降解龄期与密度、应变和有机质含量的相关关系,可以为垃圾填埋场的库容分析提供理论依据。

#### 参考文献:

- [1] Hossain M D, Penmethsa K K, Hoyos L. Permeability of municipal solid waste (MSW) in bioreactor landfill with degradation[J]. Geotechnical Special Publication, 2008,9(12):120-127.
- [2] 徐晓兵. 基于降解—渗流—压缩耦合模型的填埋场垃圾固液气相互作用分析及工程应用[D]. 杭州:浙江大学, 2011:15-24.
- [3] 朱青山,赵由才,徐迪民. 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(自然科学版),1996,24(5):596-600.
- [4] 谢强. 城市生活垃圾卫生填埋场沉降特性研究[D]. 重庆:重庆大学,2004:34-40.
- [5] 张振营,陈云敏. 城市垃圾填埋场有机物降解沉降模型的研究[J]. 岩土力学,2004,25(2):238-241.
- [6] 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):38-42.
- [7] 孔宪京,孙秀丽,邹德高,等. 垃圾土中有机物降解引起的体积缩减量与时间的关系研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(12):2060-2065.
- [8] Hartz K E, Klink R E, Ham R K. Closure of "Temperature Effects: Methane Generation from Landfill Samples"[J]. Journal of Environmental Engineering, 1983,109(4):982-983.
- [9] Barlaz M A, Ham R K, Mike M W. Gas production parameters in sanitary landfill simulators[J]. Waste Management and Research,1987,5(1):27-39.
- [10] McBean E A, Rovers F A, Farquhar G J. Solid Waste Landfill Engineering and Design[M]. New Jersey: Prentice Hall,1995:73-80.
- [11] 王罗春. 城市生活垃圾填埋场稳定化进程研究[D]. 上海:同济大学,1999:25-40.
- [12] 罗锋,陈万志,李小鹏. 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,2004,24(4):474-479.
- [13] 刘辉,黄涛. 城市生活垃圾降解率分析研究[J]. 环境污染与防治,2010,32(3):14-17.
- [14] 张振营,吴世明,陈云敏. 天子岭垃圾填埋场有机物降解规律的研究[J]. 岩土力学,2002,23(1):60-62.

## Laboratory study on the degradation characteristics of municipal solid waste

WANG Yingfeng, ZHANG Zhenying, DING Zhengkun, FANG Yuehua

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** According to the composition of municipal solid waste in Tianziling waste landfill in Hangzhou, China, fresh municipal solid waste samples were prepared manually and placed in sealed polyvinyl chloride (PVC) barrels, and the barrels were placed in thermostatic degradation barrels for anaerobic degradation. When the municipal solid waste samples reached the specified degradation age, the related tests on degradation characteristics were carried out. The results show that: with increasing degradation age, the density of municipal solid waste increases gradually. The relationship between density and degradation age could be fitted with an exponential function, with the fitting coefficient of 0.94. With the increase of degradation age, the natural strain of municipal solid waste increases gradually. The relationship between the natural strain and degradation age could be fitted with an exponential function, with the fitting coefficient of 0.94. With the increase of degradation age, the organic matter content of municipal solid waste decreases gradually. The relationship between organic matter content and degradation age could be fitted with an exponential function, with the fitting coefficient of 0.99. And three corresponding exponential function expressions were established. The results can provide reference basis for the capacity analysis of a large-scale waste landfill.

**Key words:** municipal solid waste; degradation age; density; natural strain; organic matter content

(责任编辑:康 锋)