

垃圾堆酵过程水分去除及焚烧污染衍生潜力

何品晶¹, 郁醇¹, 张春燕¹, 王珂²

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 杭州新世纪能源环保工程股份有限公司, 浙江 杭州 310007)

摘要: 通过不同负载压力(分别为不加载和加载 3.20, 8.00, 12.7 kPa)的堆酵(3 d)实验, 研究了负载压力对堆酵水分去除和处理产物污染物组成的影响. 结果表明, 负载压力对水分去除的影响呈现非线性特征, 超过最优值(本实验中为 8.00 kPa)后, 水分去除率反而降低; 一次堆酵的水分去除主要集中在最初的 36 h. 堆酵产物的可燃 Cl, S 和重金属等焚烧污染因子的含量增加, 其增加率与水分去除率呈正相关; 但是, 入炉污染物总量和单位低位热值的污染因子含量降低, 整体而言, 大幅降低了生活垃圾焚烧衍生污染的潜力.

关键词: 焚烧贮坑; 水分沥滤去除; 低位热值; 二次污染物
中图分类号: X382 **文献标识码:** A

Influence of Mass Loading on Water Removal and Potential Incineration Pollution of Municipal Solid Waste During Stacking and Fermentation

HE Pinjing¹, YU Chun¹, ZHANG Chunyan¹, WANG Ke

(1. Institute of Waste Treatment & Reclamation, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Hangzhou New Century Energy and Environmental Protection Corporation, Hangzhou 310007, China)

Abstract: To investigate the relation between the mass loading and the improvement of incineration properties, four trials of municipal solid waste (MSW) stacking and fermentation under different mass loadings (0, 3.20, 8.00, 12.7 kPa) were carried out in the laboratory for 3 days. The results show that water removal mainly occurs in the first 36 hours, and it has a nonlinear relationship with the mass loading. The water removal efficiency decreases when the mass loading is higher than the optimal value (8.00 kPa in these experiments). Although the concentrations of combustible Cl, S, and heavy metals in the pretreated waste increase, which are positively correlated with the quantity of the water removed, the decline of the total amount of these pollutants

and their concentrations per unit of lower heating value is observed. Therefore, the incineration pollution potential improves greatly after the MSW stacking and fermentation process.

Key words: refuse storage pit in incineration plant; water removal; lower heating value; secondary pollution

焚烧是生活垃圾最有效的减量化方式之一, 能实现生活垃圾的无害化并回收能源^[1]. 我国生活垃圾以易腐有机物为主要组分, 含水率高, 热值偏低. 所以, 在贮坑内进行堆酵预处理是目前我国生活垃圾焚烧厂的普遍实践, 可以使其中的水分沥出, 从而降低入炉垃圾的含水率, 并提高热值^[2]. 张衍国等^[3]发现生活垃圾堆酵中 90% 的沥滤液在前 48 h 内沥出, 沥滤液沥出是生活垃圾热值发生变化的主要原因. 然而, 现有研究大多没有涉及焚烧厂普遍采用的堆高负载手段对堆酵水分去除的作用, 难以直接指导工程实践; 同时, 堆酵伴随着复杂的物质交换过程, 堆酵前后垃圾中与焚烧二次污染相关的污染因子含量也会产生显著变化, 进而会对后续焚烧过程衍生的二次污染产生影响, 此方面的研究亦鲜见报道.

为此, 本文采用模拟负载堆酵实验方法, 研究负载压力对生活垃圾堆酵过程水分去除及污染因子含量的影响, 以期对生活垃圾焚烧厂的堆酵预处理实践提供方法指导.

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

实验所用生活垃圾采自上海市某居民生活区垃圾收集站, 人工破袋后混合均匀待用. 生活垃圾的物

收稿日期: 2010-05-12

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2006BAC06B03); 上海市优秀学科带头人计划(10XD1404200)

第一作者: 何品晶(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为固体废弃物处理与资源化.

E-mail: solidwaste@tongji.edu.cn

理组成(湿基质量分数)为食品类 81.1%、纸类 12.5%、塑料 4.8%、其他 1.5%。其初始含水质量分数(湿基)为 74.1%。其元素质量分数(干燥无灰基): N 为 2.42%, C 为 41.40%, H 为 6.28%, O 为 49.89%。

1.2 实验设计

实验装置如图 1 所示,为圆柱状不锈钢制容器,高 120 cm、内径 40 cm,外包 10 cm 厚的中空棉垫保温,容器底部设 10° 倾角实心板,距底部 20 cm 设穿孔隔板(孔径 8 mm)隔断,形成沥滤液收集与导出空间。

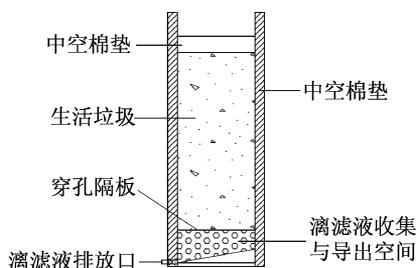


图 1 实验装置图

Fig.1 Experimental equipments

实验共设置 4 个工况。将各 15 kg(湿基)前述生活垃圾分别装入 4 个实验装置中,垃圾层初始厚度 0.35~0.40 m;垃圾填充层上加载混凝土方块以模拟堆高负载压力,工况 2、工况 3 和工况 4 的加载压力分别为 3.20, 8.00, 12.70 kPa, 工况 1 不加载作为对照。各工况实验周期均为 3 d。

1.3 采样与分析方法

实验过程每 12 h 收集 1 次沥滤液,实验前后还通过四分法分别采集 600 g 左右固体样品。

固体样品置于 70 °C 的恒温箱内干燥 48 h 至恒重,重量法测定其含水率。采用 Elementar 元素分析仪(Vario EL III, 德国)测定 N, C, H, O 的元素含量。低位热值由元素组成计算^[4]得出。HNO₃/HCl 法消解固体样品后用等离子体发射光谱仪(ICP-optmi a 2001DV, Perkin elmer, 美国)测定重金属含量。可燃 Cl 和可燃 S 的含量测定方法为:于事先预热至 850 °C 的管式马弗炉(内径 40 mm、长 710 mm)内,以流量为 100 ml·min⁻¹高纯 O₂ 为载气,将固体样品燃烧 30 min,烟气由体积分数为 1% 的 H₂O₂ 水溶液吸收,利用离子色谱(ICS-1 500, Dionex, 美国)测定其中的 Cl 和 S 含量^[5]。

2 结果

2.1 负载压力和时间对堆酵过程生活垃圾水分去除的影响

负载压力与单位生活垃圾堆酵水分去除量的关系如图 2a 所示。水分去除量多少排序为工况 3(338 ml·kg⁻¹)、工况 2(251 ml·kg⁻¹)、工况 1(204 ml·kg⁻¹)、而工况 4(325 ml·kg⁻¹)低于工况 3、工况 1、工况 2、工况 3、工况 4 相应的处理产物最终含水率分别为 72.31%, 67.70%, 62.60%, 62.70%。各工况下水分去除量的时间分布如图 2b 所示。由图可知,水分沥滤去除主要发生于前 36 h,工况 1 至 4 前 36 h 的水分去除量分别占 3 d 总去除量的 76.76%, 83.59%, 91.38% 和 93.06%。

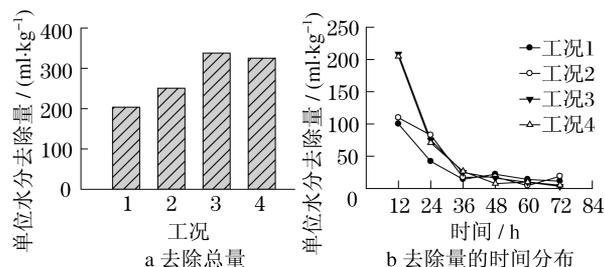


图 2 各工况单位水分去除情况

Fig.2 Water removal during the experiments

2.2 堆酵对生活垃圾热值及焚烧污染衍生潜力的影响

生活垃圾经堆酵预处理后,低位热值从原状的 1 870 kJ·kg⁻¹ 上升到 2 520 kJ·kg⁻¹ (工况 1)、3 300 kJ·kg⁻¹ (工况 2)、4 330 kJ·kg⁻¹ (工况 3) 和 3 690 kJ·kg⁻¹ (工况 4)。可见,热值的提高和水分沥滤总去除率呈正比,即热值的提高大小次序为工况 3、工况 4、工况 2、工况 1。

生活垃圾焚烧衍生污染主要包括以二噁英为代表的微量有毒有机物、重金属,以及 HCl, SO_x, NO_x, HF 等酸性气体^[1,6]。而生活垃圾中可燃 Cl、可燃 S 和重金属的含量是决定其焚烧衍生污染物生成潜力的对应污染因子。

表 1 为堆酵前后生活垃圾中可燃 Cl、可燃 S 和重金属的含量以及堆酵过程污染因子的损失(随沥滤液排出)率。可见,堆酵提高了生活垃圾中这些物质的含量:堆酵后,工况 1、工况 2、工况 3 和工况 4 的产物中可燃 Cl 质量分数分别较堆酵前提高了 0.51%, 1.74%, 12.27% 和 12.42%;可燃 S 质量分数分别上升了 1.31%, 3.09%, 0.85% 和 3.47%;重

金属质量浓度分别增加了 26.36%, 32.88%, 47.05%和 42.13%。这主要是由于水分的去除及有机物的降解使得生活垃圾中可燃 Cl、可燃 S 和重金属发生了“相对浓缩”。而以原状生活垃圾为基准时,堆酵则降低了其中可燃 Cl、可燃 S 及重金属的总含量:与堆酵前相比,堆酵后工况 1、工况 2、工况 3 和工况 4 的可燃 Cl 质量分数分别损失了 25.29%, 26.33%, 27.67%和 25.38%;可燃 S 质量分数损失了 24.70%, 25.35%, 35.03%和 31.32%;而重金属质量分数损失了 6.07%, 3.78%, 5.26%和 5.67%。

对于焚烧发电而言,发电量直接与垃圾的热值呈比例关系,则单位发电量的污染释放决定于单位低位热

值的生活垃圾中的污染因子含量。因此,可以用单位低位热值的生活垃圾中的可燃 Cl、可燃 S 和重金属含量(以 L 值表示, $\mu\text{g} \cdot \text{kJ}^{-1}$)来评价生活垃圾焚烧发电的环境污染释放潜力。表 2 为可燃 Cl、可燃 S 和重金属的 L 值。由表 2 可见,堆酵显著降低了生活垃圾的 L 值:相对于堆酵前,堆酵后工况 1、工况 2、工况 3 和工况 4 的生活垃圾中可燃 Cl 的 L 值分别降低了 25.58%, 42.48%, 51.61%和 43.12%;可燃 S 的 L 值分别减少了 25.00%, 41.72%, 56.53%和 47.65%;而重金属的 L 值分别降低了 6.44%, 24.88%, 36.61%和 28.09%。因此,堆酵可以显著降低生活垃圾焚烧单位发电量的衍生污染,而且,污染降低水平与水分去除水平呈正相关。

表 1 堆酵前后生活垃圾和单位原生生活垃圾中焚烧污染因子的含量与损失率

Tab.1 Concentrations of the pollutants in MSW and their removal rates before and after the experiments

污染因子	堆酵前 质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	堆酵后质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)				单位原生生活垃圾污染因子损失率/%			
		工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
可燃 Cl	2 750	2 770	2 800	3 090	3 100	25.29	26.33	27.67	25.38
可燃 S	1 320	1 337	1 360	1 330	1 370	24.70	25.35	35.03	31.32
As	0.21	0.24	0.27	0.28	0.29	15.55	6.39	12.72	9.25
Cu	3.94	5.39	5.29	5.89	5.72	-1.83	2.67	3.67	3.53
Zn	8.92	8.84	10.80	11.60	11.20	26.31	12.17	16.24	16.84
Pb	18.40	25.30	25.50	28.50	27.60	-1.81	-0.04	0.30	0.69
Cd	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	-0.75	9.73	6.97	4.53
Cr	0.75	1.03	1.01	1.13	1.07	-1.75	2.57	2.80	5.52
重金属总量	32.30	40.80	42.90	47.50	45.90	6.07	3.78	5.26	5.67

注:单位原生生活垃圾污染因子损失率以质量分数计,正值表示减小,负值表示增加(主要源于采样测试误差)。

表 2 堆酵前后单位低位热值生活垃圾中可燃 Cl、可燃 S 及重金属的 L 值

Tab.2 L value for combustible Cl, S, and heavy metals in MSW before and after the experiments

污染因子	堆酵前 / ($\mu\text{g} \cdot \text{kJ}^{-1}$)	堆酵后 / ($\mu\text{g} \cdot \text{kJ}^{-1}$)			
		工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
可燃 Cl	1 480	1 100	849	714	840
可燃 S	708	531	412	308	370
As	0.11	0.10	0.08	0.07	0.08
Cu	2.11	2.14	1.60	1.40	1.55
Zn	4.80	3.51	3.28	2.68	3.03
Pb	9.89	10.00	7.72	6.59	7.48
Cd	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
Cr	0.40	0.41	0.31	0.26	0.29
重金属总量	17.30	16.20	13.00	11.00	12.50

3 讨论

3.1 堆酵除水的负载压力最优值

由图 2a 可见,负载压力较低时,堆酵的水分去除量随着压力的增大而增加,但超过一定值后,再增大压力反而不利于水分去除。这是因为压力增加,机械挤压作用增强,使得生活垃圾颗粒结构破坏率上升,颗粒体内水分转化为自由水分,沥滤去除量趋于增加;但是,压力增加同样也会使堆体压实度增加,孔隙率减小,增加水分的流出阻力。因此,堆酵除水的负载压力存在最优值。此值在本研究的实验条件下为 8~12 kPa。

3.2 堆酵除水的操作模式

由图 2b 可见,生活垃圾堆酵处理过程的水分去除主要集中在前 36 h,而且,前 36 h 的水分去除量占 72 h 总去除量的比例随负载压力的提高而增加。而

生活垃圾焚烧厂操作实践中,为充分利用贮坑空间来延长堆酵预处理时间,堆酵的堆体高度普遍大于 10 m,按垃圾的容重测算,负载压力大于本研究的水平.因此,一次堆高后的发酵处理时间不应大于 36 h,如需进一步提高水分去除水平,可在 36 h 后倒垛一次进行二次堆酵处理,既可以利用倒垛使堆体内的自由水分充分流出,还可以重新形成挤压力场,产生并排出更多的自由水分.

4 结论

(1)负载压力可以增强生活垃圾焚烧前堆酵预处理的水分去除,压力对水分去除的影响呈现非线性特征,超过最优值(本实验中为 8.00 kPa)后,水分去除率反而降低.

(2)一次堆酵的水分去除主要集中在最初的 36 h.因此,一次堆高后的发酵处理时间不应大于 36 h,如需进一步提高水分去除水平,可在 36 h 后倒垛一次进行二次堆酵处理.

(3)与原状生活垃圾比较,堆酵产物的可燃 Cl,S 和重金属等焚烧污染因子的含量增加,其增加率与水分去除率正相关;但是,入炉污染物总量和单位低位热值的污染因子含量降低,整体而言,大幅降低了生活垃圾焚烧衍生污染的潜力.

参考文献:

- [1] Liu Y S. Novel incineration technology integrated with drying, pyrolysis, gasification, and combustion of MSW and ashes vitrification [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39: 3855.
 - [2] 何晶晶,冯军会,瞿贤,等.生活垃圾焚烧厂贮坑沥滤液的污染与可处理特性[J]. *环境科学研究*, 2006, 19 (2): 86. HE Pinjing, FENG Junhui, QU Xian, et al. Characteristics and treatment alternatives of leachate from refuse storage pit in municipal solid waste incineration [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19 (2): 86.
 - [3] 张衍国,李清海,龚伯勋,等.垃圾堆放发酵机理与应用工艺研究[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2005, 6 (10): 69. ZHANG Yanguo, LI Qinghai, GONG Boxun, et al. Study on fermentation mechanism and application process of municipal solid waste stacking [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2005, 6 (10): 69.
 - [4] 何晶晶,邵立明. *固体废物管理*[M]. 北京:中国高等教育出版社, 2004. HE Pinjing, SHAO Liming. *Waste management* [M]. Beijing: China Higher Education Press, 2004.
 - [5] Watanabe N, Yamamoto O, Sakai M, et al. Combustible and incombustible speciation of Cl and S in various components of municipal solid waste [J]. *Waste Management*, 2004, 24: 623.
 - [6] Zhang D Q, He P J, Shao L M. Potential gases emissions from the combustion of municipal solid waste by bio-drying [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 168: 1497.
-
- (上接第 1172 页)
- ZHANG Yu. Space analysis of the visibility [J]. *Interior Design Construction*, 2005(1): 14.
 - [3] Lam W H K, Tam Meiling, Wong S C, et al. Way-finding in the passenger terminal of Hong Kong International Airport [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2003, 9(2): 73.
 - [4] Seneviratne P N, Martel N. Criteria for evaluating quality of service in air terminals [J]. *Transportation Research Record*, 1994: 24.
 - [5] 陈振武,陈小鸿,熊文.基于视域叠加分析的导向标志设计评价[J]. *城市轨道交通研究*, 2009, 12(4): 19. CHEN Zhenwu, CHEN Xiaohong, XIONG Wen. Evaluation of guiding sign design based on isovist superposition analysis [J]. *Urban Mass Transit*, 2009, 12(4): 19.
 - [6] 武睿,陆建.视线跟踪技术在交通标志视认性中的应用研究[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2008, 6(2): 96. WU Rui, LU Jian. Application study on the drivers' visual search characteristics of traffic signs based on eye tracking techniques [J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2008, 6(2): 96.
 - [7] 陈雨人,王晓明,顾丁奕.眼球追踪技术在高速公路景观敏感区研究中的应用[J]. *公路交通科技*, 2006, 23(9): 150. CHEN Yuren, WANG Xiaoming, GU Dingyi. Eye-tracking used for impressive highway landscape area [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2006, 23 (9): 150.
 - [8] 吴娇蓉,胡山川,冯建栋.轨道站火灾疏散安全区域界定研究[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2010, 38(3): 386. WU Jiaorong, HU Shanchuan, Feng Jiandong. Study on safe area in railway station under fire [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2010, 38(3): 386.
 - [9] 丁玉兰. *人机工程学*[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2005. DING Yulan. *Ergonomics* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005.
 - [10] 中国技术监督局. GB 10000—1988 中国成年人人体尺寸[S]. 北京:中国标准出版社, 1989. China Bureau of Technical Supervision. GB 10000—1988 Human dimensions of Chinese adults [S]. Beijing: Standards Press of China, 1989.