

城市生活垃圾机械生物处理效果

屈阳 张进锋 朱卫兵 潘天高 王庆国 金慧宁

(江苏维尔利环保科技股份有限公司 常州 213125)

摘要 采用机械生物处理工艺研究了淋洗水解、脱水与好氧生物干燥对城市生活垃圾的处理效果。结果表明:在淋洗水解及压榨脱水机械生物处理阶段,控制淋洗液与生活垃圾重量比2:1,停留时间1.2~1.4 d条件下,生活垃圾可以减量49.7%。而过程中产生的淋滤液COD为32 939 mg/L、pH为5.1、COD:N:P=261:5:3.6,可以进行厌氧消化处理或作为碳源进行资源化利用。在好氧生物干燥阶段,通风量采用0.08 m³/min,2~3 d堆体温度可升至73℃,7 d左右即可产出LCV高达15 000 kJ/kg左右的高品位垃圾衍生燃料(RDF),其产率为38.2%,氯元素含量低于0.5%,重金属含量较低,满足燃料要求。

关键词 生活垃圾 机械生物处理 垃圾衍生燃料 淋滤液 减量

中图分类号 X705 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2015)01-0401-06

Mechanical biological treatment effect of MSW

Qu Yang Zhang Jinfeng Zhu Weibing Pan Tiangao Wang Qingguo Jin Huining

(Jiangsu WELLE Environmental Co. Ltd, Changzhou 213125, China)

Abstract The influence of percolation hydrolysis, dewatering and aerobic biodrying on the treatment of municipal solid waste (MSW) using mechanical biological treatment (MBT) plants was discussed. The output quality, total solid in MSW, refined derived fuel (RDF) content and leachate properties were critically examined. The results showed that the quality of MSW could decrease 49.7% when the mass ratio of percolation water to MSW was 2:1 and the residence time was 1.2~1.4 d during the stage of percolation hydrolysis and dewatering in the MBT. Moreover, the COD concentration and pH value of leachate were 32 939 mg/L and 5.1, respectively. The ratio of COD, total nitrogen and total phosphorus was 261:6:3.6, meaning that the leachate could be processed by anaerobic digestion treatment or used as a carbon source for resources utilization. In addition, the body temperature of MSW could rise to 73℃ when the ventilation rate was 0.08 m³/min and the residence time was 2~3 d during the aerobic biodrying state. Furthermore, a high quality RDF was produced, which the low calorific value, recovery rate and chlorine content was 15 000 kJ/kg, 38.2% and less than 0.5%, respectively after 7 d. Besides, the heavy metal content in RDF was very low and will well meet the requirements of fuel.

Key words municipal solid waste; mechanical biological treatment; refined derived fuel; leachate; reduction

机械生物处理(mechanical biological treatment, MBT)技术结合了一系列机械和生物过程,用于处理未经任何预处理的原始城市生活垃圾,是新兴的城市生活垃圾处理技术,通常作为焚烧、卫生填埋和资源化回收等处理方式的预处理技术^[1-2],因此,也称为机械生物预处理技术(mechanical biological pre-treatment, MBP)^[3]。

MBT技术可增加资源的回收率,如高效回收原始垃圾中的金属、玻璃和纸制品等材料进行循环利用;降低垃圾中可利用有机物的含量,增加填埋处理垃圾的生物稳定性,同时限制了甲烷的排放量和渗滤液的污染^[4];产生并回收沼气进行资源化利用,制作高品位的固体燃料(refined derived fuel,

RDF)等。机械技术主要包括破碎、筛分、风选、搅拌和磁选等过程,而生物过程则为好氧和厌氧生物技术的单独或组合利用。机械和生物技术都可作为单独技术处理生活垃圾,但是2种技术的组合则可大大提高处理效率。

结合机械技术和生物处理技术的机械生物处理

基金项目:住房和城乡建设部2013年科学技术项目计划—研究开发项目(2013-K7-43, K7201333)

收稿日期:2013-12-06; 修订日期:2014-01-11

作者简介:屈阳(1985—)男,硕士,工程师,主要从事固废处理及研发工作。E-mail:quyang@jswelle.com

技术有多种,典型的代表有生物干化和淋洗处理。

Zhang Dongqing 等^[5]研究了生物干化对城市固体废弃物有机组分(organic fraction of municipal solid waste, OFMSW)和混合垃圾潜在的燃烧气体排放的影响,并指出生物干化过程能显著改善垃圾的燃烧性能,并减少了输入垃圾的潜在燃烧气体总排放量。韩竞耀等^[6]研究了恒定通风量和机械搅拌对混合垃圾生物干化过程的影响,研究表明,最适通风量为 $0.064 \text{ m}^3 / (\text{h} \cdot \text{kg})$,该工况下经13 d的生物干化处理,垃圾含水率从70%降至56%。

对于生活垃圾,通过破碎与分选等方式的机械处理,可以从垃圾中分离出惰性物质,回收利用垃圾中金属和玻璃等,从而将有机质组分加以均质化。经过机械预处理的剩余垃圾进入生物处理环节,通过好氧或厌氧等生物处理技术加以降解和稳定^[7,8]。预处理后的垃圾减量、减容效果非常明显,极大限度地减少了垃圾填埋场的占地面积。

我国生活垃圾含水率高,有机质含量高,热值较低^[9],生物处理时间长。本研究将尝试利用中试规模的机械生物处理技术处理城市生活垃圾,考察生活垃圾快速减量及资源化的可行性。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

取自常州市生活垃圾填埋场的原始新鲜生活垃圾为实验材料,其具体指标为总固体(total solid, TS) 47.5%、湿基(volatile solid, VS) 29.7%、密度 325.6 kg/m^3 、LCV $4\,360 \text{ kJ/kg}$ 。主要成分为有机物50.7%、塑料及橡胶类18.4%、纸类8.6%、木竹类

2.0%、纺织类6.5%、金属类0.5%、玻璃砖瓦类3.4%、骨头类0.7%、其他9.2%(主要为小于10 mm的无机颗粒)。

1.2 实验装置与工艺流程

研究装置由辊式破碎机、机械生物反应器、压榨脱水机、格栅机、好氧生物处理装置、碳源利用单元和其他附属单元共7部分组成,工艺流程如图1所示。

装载机把原始生活垃圾送入破碎机进料口,辊式破碎机利用辊面的摩擦力将物料咬入破碎区,使之承受挤压、剪切、啮合而破碎(粒径小于20 cm),以便于后续处理工艺的进行和提高垃圾资源化的效率^[10]。实际操作时,要人工挑选出大件织物及金属,避免设备卡死。破碎后的垃圾被输送至机械生物反应器(卧式带搅拌)。此时,开启泵IV,使混合过程罐中淋洗液均匀喷淋至物料表面。生活垃圾中易降解有机物不断发生水解酸化反应并进入淋洗液中形成淋滤液,经过孔径为0.5 mm刮板格栅机过滤后进入储罐。反应时间结束后,一部分淋滤液泵送进入混合过程罐接种,大部分进入垃圾渗滤液处理系统反硝化单元进行碳源利用。而机械生物反应器自带螺旋输送机则把剩余固相物料输送至压榨脱水机脱水处理,压榨脱水机压榨部分由滤水段和缩口段(出料方向逐渐变小,50 cm距离内直径由35 cm变为22 cm)组成,由此形成机械挤压作用,压榨出水由滤水段滤孔通过进入淋滤液储罐。脱水物料由装载机铲入好氧生物处理装置通过定量鼓风和定时翻堆,使脱水物料发生好氧干化反应,最后形成高热值固体燃料RDF。

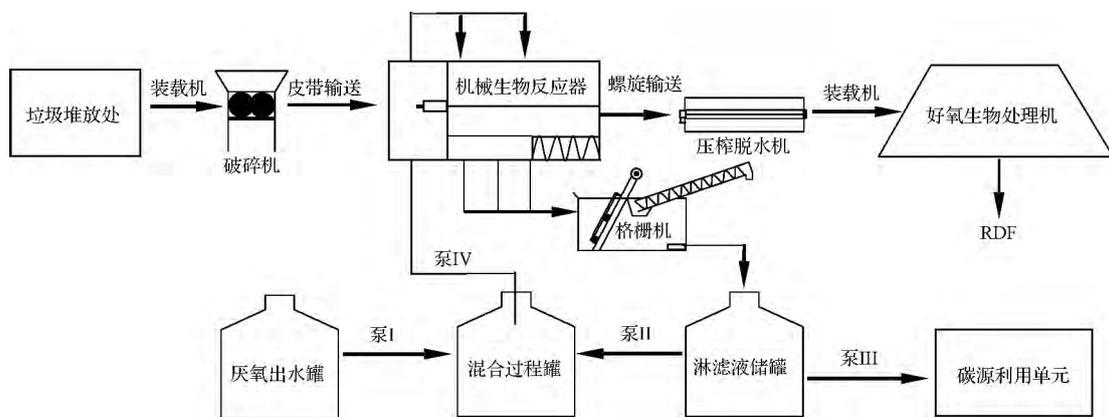


图1 城市生活垃圾 MBT 工艺流程图
Fig. 1 Diagram of MBT process for MSW

1.3 实验设计

为了排除各个部分实验的偶然性,实验分 4 个阶段,每个阶段有 5~6 个批次,每批次垃圾进料量为 2 000 kg 左右,机械生物反应器停留时间为 1.2~1.4 d,容积 17 m³,搅拌轴转速为 2 r/min。淋洗液与生活垃圾重量比为 2:1,淋洗液由厌氧出水和淋滤液按 5:1 混合而成,其中含有丰富接种微生物,利于水解酸化反应。实验在夏季进行,机械生物反应器有保温夹层,且物料有一定的反应热,因此,内部温度基本维持在 35℃ 以上。

通风间隔时间过长,不能供给堆体内微生物生命活动所需的适宜的氧量,将会降低微生物活性;频率过高(间隔时间过短),影响堆体内热量的累积,进而可能影响生物干化效果^[11]。根据《城市生活垃圾堆肥处理厂运行、维护及其安全技术规程》的建议值,每立方米物料取通风量为 0.08 m³/min^[12],风机运行时间为开启 4 min,停止 10 min。随后开启自动翻堆模式,翻堆浆片运行 10 min,停止 3 h,转速为 0.5 r/min。

1.4 分析方法

实验中测试指标和测定方法如下:TS、灰分、密度、高位热值、低位热值、氯、铬、铜和汞元素含量等指标测定方法参考《生活垃圾采样和分析方法 CJ/T 313-2009》;COD、NH₃-N、NO₃⁻-N、TN 和 PO₄³⁻-P 采用 HACH 分光光度法测定;温度采用玻璃温度计测定;pH 和 ORP 测定方法参考 GB6920-86 玻璃电极法和 SL94-94 电极法;电导率测定方法参考 SL78-94 电导仪法。

2 实验结果与讨论

2.1 MBT 过程固相分析

2.1.1 机械生物反应器进出料统计

实验过程中机械生物反应器的进料和压榨脱水机后的出料质量统计见图 2。

实验共进行 4 个阶段,每个阶段实验进行 7 d(5~6 批次),大部分时间机械生物反应器每天进料维持在 2 000 kg 以上,平均值为 2 110 kg/d。由于第 1 天的进料填充反应器,当天出料为 0,除此之外,每天压榨脱水后物料在 520~1 440 kg 范围内波动,平均值为 1 062 kg/d。(1 062/2 110)×100%=50.3%,压榨出料为原始进料的 50.3%。因此,可以判断平均 1 048 kg/d 进入了液相(包括砂石、玻璃等沉淀残渣)及降解损失掉。

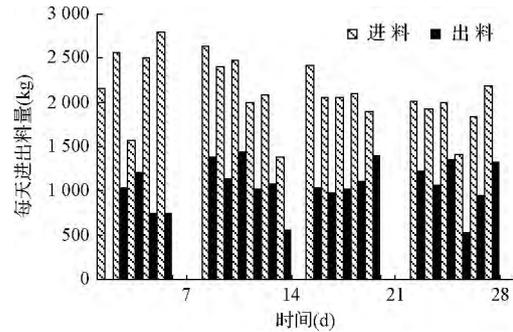


图 2 每天进出料质量统计图

Fig. 2 Daily pilot plant input and output quantities

定量统计每天淋滤液和淋洗的水量,两者相减,可以算出平均每天有 510 L 液相产生(约 510 kg),另外,格栅出渣(无机大颗粒为主)平均 89 kg,因此,每天有 449 kg 物质降解蒸发及实验过程中损失掉,由于机械生物反应器上部加盖,蒸发量较少(<10%)。

2.1.2 机械生物反应器内部及压榨脱水后出料 TS 统计

机械生物反应器内部物料和压榨脱水后的出料干物质含量 TS 统计见图 3。

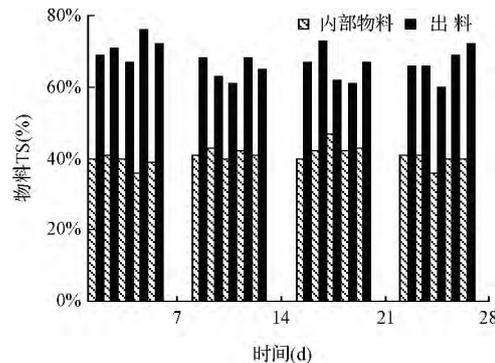


图 3 反应器内部物料及压榨出料 TS 统计

Fig. 3 Total solid of material in biobunk and output after dewatering

机械生物反应器内部干物质含量基本稳定在 36%~47% 之间,平均值为 41%。压榨脱水机出料最高 TS 为 76%,平均值为 67%,压榨脱水效果很好,这可能是由于塑料橡胶类物料含量较高原因引起的。

2.1.3 机械生物反应器进料及压榨脱水后出料干基 VS 统计

第 1 阶段进料和压榨脱水出料 VS 均值分别为 59.7% 和 53.1%,其余 3 个阶段进料和压榨脱水出料

VS 均值分别为 63.1% 和 55.3% ,而 4 个阶段进料和压榨脱水出料 VS 均值为 62.3% 和 54.7% ,因此 ,可以判断通过机械生物反应阶段 ,VS 平均降低 7.6% 。

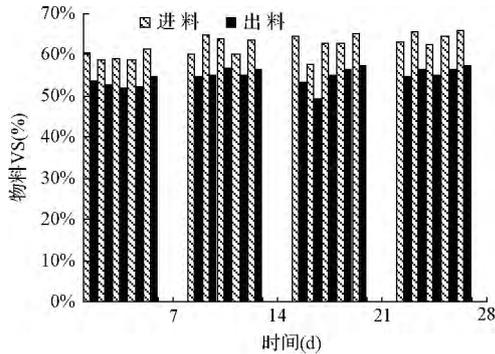


图 4 反应器进料及压榨出料 VS 统计图
Fig. 4 Volatile solid of material into biobunk and output after dewatering

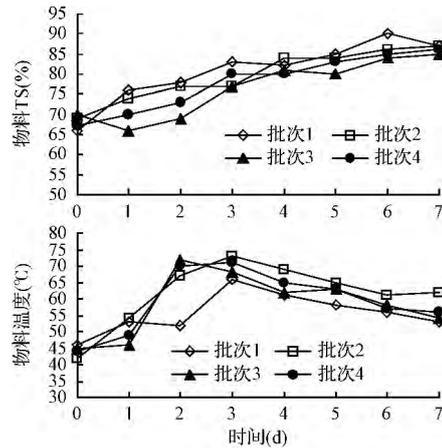


图 5 好氧生物处理过程中 TS 和温度的变化
Fig. 5 TS and temperature change during aerobic biological treatment

2.1.4 好氧生物干燥实验结果分析

每个星期约 1 000 kg 压榨脱水物料被铲入好氧生物处理装置内进行好氧干化实验 ,共进行 4 个批次。

在强制好氧通风作用下 ,好氧微生物降解生活垃圾中的有机物并大量繁殖 ,并释放生物反应热达到高温 ,水分快速挥发^[13]。

时间为 0 代表初始堆体温度 ,其值在 42 ~ 46℃ 之间 ,这可能是由于物料在进入好氧生物处理装置前已经在发生轻微的兼氧降解产热反应。堆体在好氧生物处理装置内 2 ~ 3 d 温度迅速升高到 73℃ ,升温速度较快^[14] ,随后温度逐渐降低到 53 ~ 62℃ 左右。堆体在 2 ~ 3 d 内经历了从中温降解到高温降解的过程 ,且中温过程较短 ,直到反应 7 d 后 ,堆体温度仍在 50℃ 以上的温度。

堆体的 TS 在 7 d 内持续增加。反应 3 d 后 ,最大值可达到 83% ,而 7 d 后 ,最大值可达 87%。从图 5 变化趋势可以预测随着时间延长 ,好氧生物干燥作用仍然在缓慢进行。

2.1.5 RDF 产率分析

压榨脱水后的出料经过 7 d 好氧生物干燥作用 ,变成为了 RDF 产品。图 6 显示了 RDF 产品占原始进料的比重。同样 ,经过图 1 工艺设备的处理 ,原始进料一部分溶入淋洗液形成淋滤液(包括砂石、玻璃等沉淀物) ,另一部分则被生物降解和蒸发掉 ,这 2 部分的重量占原始进料的比重也展示在图中。

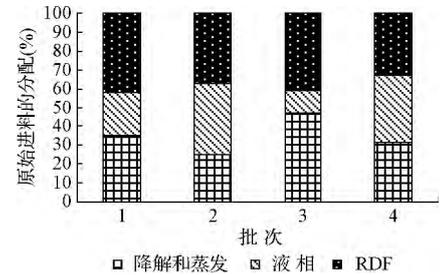


图 6 生物反应器输出物 3 种主要去向分配图
Fig. 6 Distribution of three main output fractions of the BIOBUCK pilot plant

4 个批次蒸发降解和液相比比例变化较大 ,这可能由于环境温度、太阳光强度、垃圾成分和测量误差等多因素变化导致的。然而 ,RDF 比例稳定在 33% ~ 42% 之间。4 个批次实验结果来看 ,RDF 产率为 38.2% ,而其含水率平均为 13.8% ,因此 ,每 1 000 千克原始垃圾进料干燥 RDF 产率为 32.9% 。

原始垃圾含有 24.3% 塑料及橡胶 ,绝大部分进入到 RDF 中 ,只有很少部分进入淋滤液中 ,因此 ,RDF 中最多含有 63.6% 塑料及橡胶 (24.3% : 38.2%) 。

2.1.6 脱水物料及分选后的 RDF 指标分析

RDF 含有 63.6% 的塑料及橡胶、13.8% 的水分 ,而剩下的 22.6% 则为难降解有机物、金属、玻璃和大颗粒砂石等物质。人工分选出惰性物料 ,实验室对批次 1 和 2 分选后的脱水物料和 RDF 进行实验室分析。

分选后脱水物料 LCV 均值为 21 961 kJ/kg ,灰

分低于 25%。而分选后的 RDF 的 LCV 为 15 167 kJ/kg,这是由于在好氧生物处理过程中高热量的有机物,如碳水化合物、脂肪、脂肪酸和蛋白质在类似堆肥化的生物过程中被降解掉^[15]。灰分均值从之前的 29.2% 升高到 36.9% 可以间接证明这一点。Shao Liming 等^[16]对上海当地采样的混合垃圾使用柱形反应器进行了生物干化实验,经过 16 d 的反应过程,垃圾 VS 从 82.5% 降至 68.8%,含水率从 73.0% 降至 48.3%,LHV 增加了 157%。

表 1 分选后的脱水物料和 RDF 实验室分析

Table 1 Laboratory analysis of selected dewatered materials and RDF samples

指标	单位	脱水物料		分选后的 RDF	
		批次 1	批次 2	批次 1	批次 2
HCV	kJ/kg	21 998	21 923	14 987	17 699
LCV	kJ/kg	20 533	20 407	13 826	16 508
灰分	%	29.4	28.9	42.1	31.7
氯	%	0.41	0.43	0.32	0.27
铝	mg/kg	6 320	6 380	9 800	7 400
铬	mg/kg	34	32	57	275
铜	mg/kg	130	97	280	150
汞	mg/kg	0.78	0.43	1.20	0.39

注: HCV: 高位热值; LCV 低位热值。

RDF 中氯元素含量低于 0.5%,而重金属的含量也在可以接受的范围内。因此,是水泥工业等行业很好的固体燃料。

2.2 MBT 过程淋滤液分析

每天早中晚平均取 3 次淋滤液样品进行相关指标分析,4 个批次实验淋滤液的物理化学指标平均值统计如表 2 所示。

表 2 淋滤液测试平均值

Table 2 Average measurement values of leachate

物理指标分析			化学指标分析		
指标	单位	数值	指标	单位	数值
温度	°C	32.2	COD ₁	mg/L	32 939
pH	-	5.1	COD _p	mg/L	8 333
ORP	mV	+81.7	NH ₃ -N	mg/L	183.4
电导率	mS/cm	15.0	NO ₃ ⁻ -N	mg/L	11.0
SS	g/L	11.9	TN	mg/L	631.8
TS	g/L	23.7	PO ₄ ³⁻ -P	mg/L	455

注: COD₁为淋滤液化学需氧量; COD_p为淋洗液化学需氧量。

由于生物活动和白天阳光的辐射,机械生物反应器内部温度相对较高,因此,淋滤液的温度也略高于环境平均温度。有机物水解酸化产生大量挥发性脂肪酸导致 pH 降低到 5.1。由于系统在好氧环境中工作,淋滤液也为好氧环境,其 ORP 为 +81.7。电导率为 15 mS/cm 相当于 7 g NaCl/L 的浓度对应值,这可能是由于常州生活垃圾中含有很大一部分厨余垃圾,机械生物反应过程中,盐分不断溶入淋滤液。

TS 基本为 SS 的 2 倍,表明 50% 左右的干物质为能透过滤膜的细颗粒。典型污水厌氧降解营养比例 C:N:P 为 300:5:1 到 500:5:1,而淋滤液 COD:N:P = 261:5:3.6。由此可以判断,对于后续淋滤液的生物处理,N 和 P 营养物的浓度是足够的,甚至更高 COD 的淋滤液都可以处理。欧洲国家利用厌氧消化方法处理淋滤液产沼进行资源化利用。

常州垃圾渗滤液 COD 为 11 000 mg/L, TN 3 000 mg/L, C/N = 3.7,而合适的渗滤液 C/N = 5:1 ~ 6:1(现场经验)。因此,只需要通入渗滤液水量 1/7 的淋滤液,即可不需要另外投加碳源处理渗滤液。中试中,把大部分淋滤液泵送至渗滤液生化处理单元的反硝化系统作为部分碳源进行资源化利用。

3 结 论

(1) 机械生物法处理生活垃圾,停留时间为 1.2 ~ 1.4 d,压榨出料(含水率 33%)为原始进料的 50.3%,停留时间短,垃圾减量明显,机械生物过程可使进出料 VS 降低 7.6%。

(2) 好氧生物处理装置处理脱水物料,RDF 产率为 38.2%。通风量采用 0.08 m³/min,2 ~ 3 d 堆体温度可升至 73°C,7 d 左右即可产出 LCV 高达 15 000 kJ/kg 左右的高品位 RDF(含水率 13.8%),其氯元素含量低于 0.5%,重金属含量较低,满足燃料要求。

(3) 淋滤液 COD 为 32 939 mg/L, TN 为 631.8 mg/L, PO₄³⁻-P 455 mg/L,可生化性能很好,可以进行厌氧消化处理产沼或作为碳源进行资源化利用。

参 考 文 献

- [1] Trois C., Griffith M., Brummack J., et al. Introducing mechanical biological waste treatment in South Africa: A comparative study. *Waste Management*, 2007, 27(11):

- 1706-1714
- [2] Boni M. R. ,Leoni S. ,Sbaffoni S. Co-landfilling of pretreated waste: Disposal and management strategies at lab-scale. *Journal of Hazardous Materials* **2007** ,147(1-2) : 37-47
- [3] 罗建华. 机械生物法处理生活垃圾的分析与评述. *中国资源综合利用* **2006** ,24(2) : 19-21
Luo Jianhua. Analysis and review on disposal of life-garbage by the machinical-biology disposal method. *China Resources Comprehensive Utilization* ,**2006** ,24(2) : 19-21 (in Chinese)
- [4] Soyez K. ,Plickert S. Mechanical-biological pre-treatment of waste: State of the art and potentials of biotechnology. *Acta Biotechnologica* **2002** ,22(3-4) : 271-284
- [5] Zhang Dongqing ,He Pinjing ,Shao Liming. Potential gases emissions from the combustion of municipal solid waste by bio-drying. *Journal of Hazardous Materials* ,**2009** ,168(2-3) : 1497-1503
- [6] 韩竞耀,何品晶,张冬青,等. 通风量和翻堆对生活垃圾好氧生物干化的影响. *环境卫生工程* ,**2008** ,16(3) : 23-25
Han Jingyao ,He Pingjing ,Zhang Dongqing ,et al. Influence of air-flow rate and turning on aerobic bio-drying of domestic waste. *Environmental Sanitation Engineering* ,**2008** ,16(3) : 23-25(in Chinese)
- [7] Bayard R. ,de Araújo Morais J. ,Ducom G. ,et al. Assessment of the effectiveness of an industrial unit of mechanical-biological treatment of municipal solid waste. *Journal of Hazardous Materials* **2010** ,175(1-3) : 23-32
- [8] Lornage R. ,Redon E. ,Lagier T. ,et al. Performance of a low cost MBT prior to landfilling: Study of the biological treatment of size reduced MSW without mechanical sorting. *Waste Management* **2007** ,27(12) : 1755-1764
- [9] 李爱民,李东风,徐晓霞. 城市垃圾预处理改善焚烧特性的探讨. *环境工程学报* **2008** ,2(6) : 830-834
Li Aimin ,Li Dongfeng ,Xu Xiaoxia. A discussion on pre-treatment to improve MSW incineration. *Chinese Journal of Environmental Engineering* **2008** ,2(6) : 830-834(in Chinese)
- [10] Luo Siyi ,Xiao Bo ,Hu Zhiqian ,et al. An experimental study on a novel shredder for municipal solid waste (MSW) . *International Journal of Hydrogen Energy* **2009** ,34(3) : 1270-1274
- [11] 文昊深,彭绪亚. 重庆城市生活垃圾高温好氧堆肥试验研究. *四川建筑* **2004** ,24(5) : 84-86
Wen Haosen ,Peng Xuya. Experimental study about Chongqing MSW thermophil aerobic composting. *Sichuan Architectural* **2004** ,24(5) : 84-86(in Chinese)
- [12] 武汉城市建设学院. 城市生活垃圾堆肥处理厂运行、维护及其安全技术规程 CJJ/T 86-2000. 北京: 中国建筑工业出版社 **2000**
- [13] Jewell W. J. ,Dondero N. C. ,Van Soest P. J. ,et al. High temperature stabilization and moisture removal from animal wastes for by-product recovery. //USDA. Final Report Prepared for the Cooperative State Research Service. Washington ,D. C. : **1984** ,SEA/CR 616-15-168-169
- [14] 陈海滨,汪俊时,万迎峰,等. 重力翻板式有机生活垃圾快速堆肥中试研究. *环境工程学报* ,**2009** ,3(5) : 923-926
Chen Haibin ,Wang Junshi ,Wan Yingfeng ,et al. Pilot-plant test of gravity tipping rapid composting device for organic municipal solid waste. *Chinese Journal of Environmental Engineering* **2009** ,3(5) : 923-926(in Chinese)
- [15] Adani F. ,Baido D. ,Calcaterra E. ,et al. The influence of biomass temperature on biostabilization-biodrying of municipal solid waste. *Bioresource Technology* ,**2002** ,83(3) : 173-179
- [16] Shao Liming ,Ma Zhonghe ,Zhang Hua ,et al. Bio-drying and size sorting of municipal solid waste with high water content for improving energy recovery. *Waste Management* **2010** ,30(7) : 1165-1170