

城市生活垃圾低污染气化熔融系统研究

肖刚,倪明江,池涌*,金余其,张加权,缪麒,岑可法

(浙江大学机械与能源工程学院热能工程研究所 能源清洁利用国家重点实验室,杭州 310027)

摘要:为彻底消除城市生活垃圾焚烧过程中的二次污染,对流化床气化与旋风燃烧熔融系统进行了研究。我国典型城市生活垃圾流化床气化试验表明,最佳气化温度为600℃左右;对垃圾焚烧飞灰进行熔融特性试验表明,垃圾焚烧飞灰在1300℃左右、垃圾掺煤焚烧飞灰在1400℃左右时,能顺利熔融,二噁英分解率99.99%以上,重金属有效固化。结合我国实际,提出了2种气化熔融系统方案:①基于垃圾综合处理的筛上物气化熔融技术方案;②原生垃圾+辅助燃料气化熔融技术方案;并进行相应的热力学性能分析,研究表明2种方案都能较好地满足气化熔融要求。

关键词:城市生活垃圾(MSW);低污染;气化熔融;二噁英;重金属;系统方案

中图分类号:X705 **文献标识码:**A **文章编号:**0250-3301(2006)02-0381-05

Research on Low Emission MSW Gasification and Melting System

XIAO Gang, NI Ming-jiang, CHI Yong, JIN Yu-qi, ZHANG Jia-quan, MIAO Qi, CEN Ke-fa

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Institute for Thermal Power Engineering, College of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to eliminate the secondary pollution caused by MSW incineration, fluidized bed gasification and swirl-flow melting process is proposed which produces less emission. MSW of China can be effectively gasified in fluidized bed at about 600℃. Combustion fly ash of MSW can be melted into vitrification at about 1300℃ and that of MSW combusted with coal can be done at about 1400℃, during which dioxins(PCDD/Fs) is decomposed over 99.99% and heavy-metals are mostly solidified. Two novel and improved MSW gasification and melting schemes are brought forward preferably: ① The gasification and melting system based on integrated disposal of MSW. ② The gasification and melting system of original MSW + assistant fuel. It is testified that the two schemes are suitable for China by thermo-performance analysis.

Key words: municipal solid waste (MSW); low emission; gasification and melting; dioxins; heavy-metal; schemes

随着人民生活水平的提高,物质消费带来的废弃物越来越多,污染越来越严重,能源问题日益突出。据统计,我国2002年的垃圾清运量已达13650万t^[1],绝大部分都没有得到有效地无害化处理,生态环境受到了严峻的挑战。因此,迫切需要开发处理量大、二次污染小及能源回收率高的城市生活垃圾处理系统。

世界各发达国家都在积极开发先进的城市生活垃圾处理技术,其中,气化熔融技术^[2~6]以其优异的环保性能(二噁英排放毒性当量<0.01ng/m³,我国标准为二噁英毒性当量<1.0 ng/m³;重金属绝大部分都固化在熔渣中)、较高的能源转化率(发电效率可达30%~40%)以及最大的减量化效果(减量化可达90%以上),而成为各国竞相开发的前沿技术。国外技术只针对高热值的城市生活垃圾(8000~11000kJ/kg)而开发。对于广大发展中国家,生活垃圾热值较低(4000~6000kJ/kg^[7]),而专门针对低热值垃圾开发的气化熔融技术,则鲜见报道,因此,非常有必要开展相关的系统研究与开发。

目前主要的气化熔融技术如 Thermoselect 技

术、Siemens 技术、Ebara 技术等,虽然流程布置各异,但其主要的设计原则及污染物控制机理却大致相同:首先,城市生活垃圾被送入气化炉或热解炉,垃圾中的有机物迅速气化,生成的气化合成气(含飞灰)进入燃烧熔融炉,气化炉中的大部分金属(如Fe、Al、Cu等)不会被氧化,并随底渣排出,分选后的底渣中含二噁英、重金属很少,可以回收利用;燃烧熔融炉中合成气高温燃烧,飞灰熔融为玻璃态物质,二噁英完全分解、重金属被固化。典型气化熔融系统如图1所示。

1 城市生活垃圾理化特性分析及气化熔融系统选择

1.1 城市生活垃圾理化特性分析

我国城市生活垃圾随着季节变化,地域迁移,理化性质波动较大。考虑到气化熔融技术对垃圾发热

收稿日期:2004-11-30;修订日期:2005-01-05

基金项目:国家自然科学基金重点项目(N59836210)

作者简介:肖刚(1979~),男,博士研究生,主要研究方向为城市生活垃圾气化熔融技术,E-mail: xiaogangtianmen@yahoo. cn

* 通讯联系人,E-mail: chiyoung@zju. edu. cn

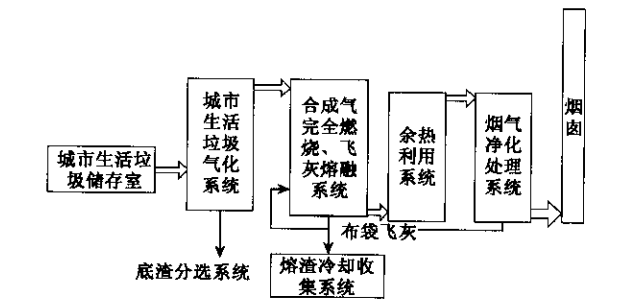


图 1 典型城市生活垃圾气化熔融系统
Fig.1 Typical system of MSW gasification and melting process

量具有较高要求,更适宜首先在较发达城市推广利用,本文选取具有代表性的杭州市城市生活垃圾进

表 1 杭州市城市生活垃圾组分/%
Table 1 Major composition in MSW of Hangzhou/%

厨余	灰渣砂石	纸类	布类	木竹	塑料	橡胶	玻璃	金属	容重/t·m ⁻³
58.19	24.00	3.68	2.23	1.20	6.62	1.01	2.09	0.98	0.36

表 2 杭州市城市生活垃圾工业分析及元素分析/%
Table 2 Proximate and ultimate analysis of MSW of Hangzhou/%

工业分析					元素分析				低位发热量/kJ·kg ⁻¹
水分	挥发分	固定碳	灰分	碳	氢	氧	硫	氮	
51.57	18.48	3.04	26.91	12.27	1.75	7.43	0.09	0.40	4452

2 城市生活垃圾气化规律及飞灰熔融特性

2.1 城市生活垃圾及其典型组分流化床气化试验

城市生活垃圾流化床气化试验装置如图 2,炉膛主体高 560mm,内径 300mm,外径 150mm.温控

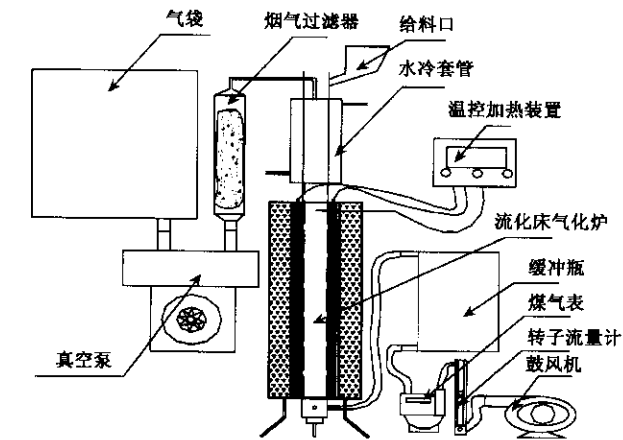


图 2 流化床气化系统
Fig.2 Fluidized bed gasifier system

行理化特性分析(表 1、表 2)。
组分中厨余含量高达 58%;工业分析及元素分析中不可燃物(主要是水分和灰分)达到 70%左右,而干基可燃物只占 30%左右;这是我国城市生活垃圾热值不高的一个重要原因。

1.2 气化熔融系统选择

流化床中有大量循环床料,蓄积大量热能,传热质速率很高,对垃圾热值要求较低,能高效气化低热值垃圾,有效抵御垃圾差异带来的波动,且技术发展成熟,广泛作为低热值燃料热处理炉型;旋风熔融炉能够促使气化合成气迅速燃烧完全,达到设计熔融温度,高效捕获熔渣并顺利排出;所以,流化床气化与旋风燃烧熔融系统比较适合处理低热值城市生活垃圾。

装置自动调节控制温度,流化床上方加水冷套管,物料由炉膛上方连续给入,流化风速 0.35m/s 左右,通过控制给料量调节过量空气系数,气化温度试验范围 400℃ ~ 700℃,过量空气系数试验范围 0.2~0.8。

生活垃圾(空气中干燥后)及部分典型组分在不同的过量空气系数和温度下的气化合成气热值如表 3、表 4,以简要表征垃圾流化床气化规律(具体规律将另文讨论)。

表 3 600℃ 时流化床气化合成气热值
与过量空气系数的关系¹⁾/kJ·m⁻³

Table 3 Relation between LHV of synthesis gas and excessive air ratio when temperature is 600℃ in fluidized bed gasifier/kJ·m⁻³

过量空气系数 α	PE 塑料	PVC 塑料	木头	厨余(干燥)	生活垃圾
0.2	8 333	3 361	4 996		
0.4	4 754	1 948	5 824	1 495	3 700
0.6	2 323	1 231	3 858		2 300
0.8	1 326	953	2 390		

1)合成气不包括其中所携带的碳黑和焦油

表 4 过量空气系数为 0.4 时流化床气化合成
气热值与温度的关系¹⁾/kJ·m⁻³

Table 4 Relation between LHV of synthesis gas and temperature when
excessive air ratio is 0.4 in fluidized bed gasifier/kJ·m⁻³

气化反应温度/℃	PE 塑料	PVC 塑料	木头	生活垃圾 ²⁾
400	3 179		2 564	
500	3 559	1 604	3 613	
600	4 754	1 948	5 845	3 000
700	5 315	1 880	4 482	

1)合成气不包括其中所携带的碳黑和焦油;2)过量空气系数为 0.5

由表 3、表 4 可知,流化床气化时,过量空气系数应控制在 0.3~0.5,温度应控制在 600℃左右.如果过量空气系数或者气化温度过高,合成气热值会因过度氧化而降低;如果过量空气系数或者气化温度过低,合成气热值则会因气化不充分而较低.

2.2 城市生活垃圾焚烧飞灰高温熔融特性试验

对垃圾焚烧飞灰及垃圾混煤焚烧飞灰的熔融温度试验分析如图 3,垃圾焚烧飞灰熔融温度大约为 1 150℃;垃圾混煤飞灰熔融温度大约为 1 350℃.所以,对于原生垃圾飞灰来说,熔融温度需 1 200℃以上,而混煤垃圾熔融温度则需达到 1 400℃.

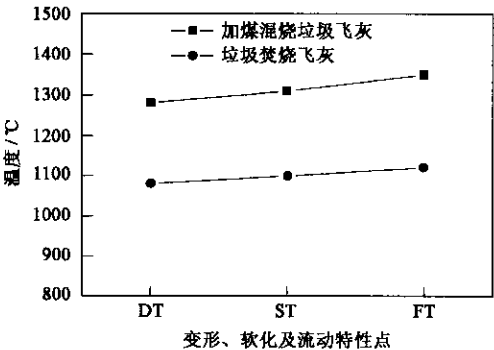


图 3 飞灰熔融温度特性

Fig. 3 Character of fly ash melting temperature

表 6 重金属固化率与熔融温度的关系

Table 6 Relation between heavy-metals solidified ratio and melting temperature

参数	Ni		Cd		Cr		Cu		Pb		Zn	
飞灰中重金属初始含量/mg·kg ⁻¹	135.1		54.4		271.6		977.1		1 300		809.0	
熔融温度/℃	1 300	1 400	1 300	1 400	1 300	1 400	1 300	1 400	1 300	1 400	1 300	1 400
固化率/%	100	100	100	68	70	68	73	50	43	41	80	78

综上所述,流化床气化与旋风燃烧熔融系统应该把气化温度控制在 600℃左右,过量空气系数控制在 0.3~0.5,燃烧熔融温度控制在大约 1 300℃(原生垃圾气化熔融)或者 1 400℃(垃圾混煤气化熔融).

飞灰熔融污染物特性研究试验装置如图 4,炉膛内径 100mm,高 600mm,最高设计炉温 1600℃.试验时,通入氮气或者空气调节炉内气氛,将炉温加热到试验温度,然后将飞灰(大约 60g)盛在坩锅中放入炉内,保持 5min 取出后在空气中冷却或者在水中骤冷,对熔渣以及吸收液进行二噁英和重金属分析.

由于气氛、冷却方式以及加煤与否与二噁英分解及重金属固化关系不大,所以此处仅列出典型试验结果如表 5、表 6.研究表明,熔融温度达到 1 300℃及以上时,二噁英分解率可达 99.99% 以上,重金属有效固化.

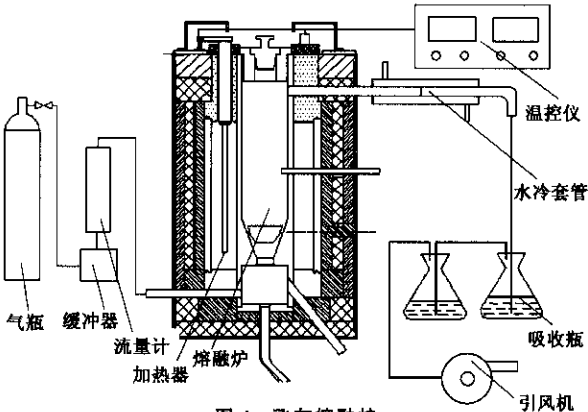


图 4 Fly ash melting furnace

表 5 熔渣中二噁英含量与熔融温度的关系¹⁾

Table 5 Relation between dioxins content and melting temperature

熔融温度/℃	二噁英毒性当量含量/ng·kg ⁻¹	二噁英分解率/%
1 100	0.042	99.968
1 300	0.026	99.990
1 460	0	100.000

1)飞灰取自浙江某垃圾焚烧发电厂,飞灰中二噁英初始含量为 275ng/kg

3 城市生活垃圾气化熔融系统方案及其热力性能分析

以上研究确定了适合我国城市生活垃圾气化熔融的基本运行参数,为使之适用于工程实际,提出以

下2种技术方案,并进行相应的热力性能分析.

3.1 基于垃圾综合处理的筛上物气化熔融技术方案(方案一)

垃圾经过筛分后,大部分的无机物和含水量较高的碳水化合物被筛除^[8].占原生垃圾30%左右的筛上物具有较高热值,适宜气化熔融.筛下物可利用填埋、堆肥等技术处理.城市生活垃圾筛上物理化特性如表7所示.

表7 垃圾筛上物的质量分数¹⁾/%

Table 7 Mass percent of the part above sieve of MSW/%

筛上物成分				筛上物主要元素				
塑胶	织物	竹木	其他	碳	氢	氧	水分	灰分
38.3	21.7	13.4	26.6	30.75	4.26	10.57	33.87	20.43

1)筛上物低位热值为9 272kJ/kg.

由于筛上物气化熔融飞灰与原生垃圾相近,所以取气化温度600℃,燃烧熔融温度1 300℃,总体过

量空气系数1.2,燃烧效率95%,进行气化熔融热力性能分析(图5).

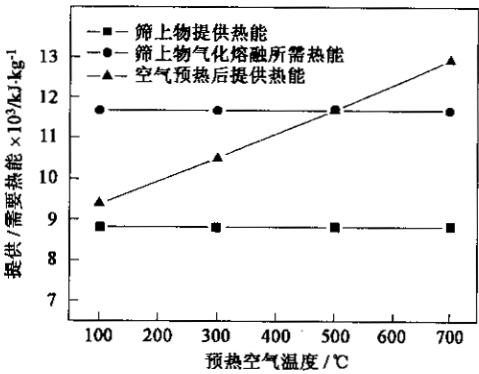


图5 城市生活垃圾筛上物气化熔融热力性能分析
Fig. 5 Thermo-performance analysis of the part above sieve of MSW gasification and melting process

筛上物气化熔融只需气化空气预热到500℃,

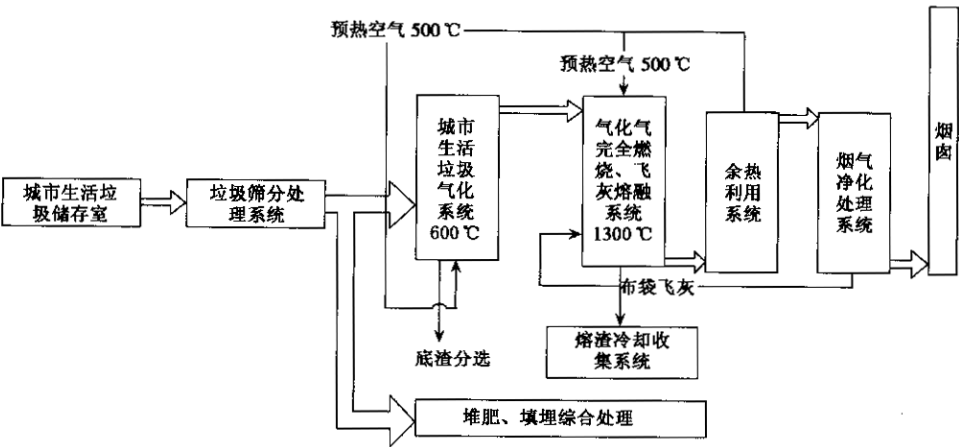


图6 基于垃圾综合处理的筛上物气化熔融系统
Fig. 6 Gasification and melting system based on integrated disposal of MSW

就能满足临界热力要求.其综合处理系统如图6.

3.2 原生垃圾+辅助燃料气化熔融技术方案(方案2)

原生垃圾中添加辅助燃料,提高进料热值,使之达到气化熔融技术要求.以杭州市城市生活垃圾添加大同烟煤(以下称为混合垃圾)为例,大同烟煤特性如表8.

表8 大同烟煤特性参数/%

Table 8 Character of Datong soft coal/%

水分	灰分	碳	氢	氧	氮	硫	低位发热量/kJ·kg ⁻¹
3.0	11.3	70.8	4.5	7.1	0.7	2.2	27 800

由于混合垃圾混有烟煤,所以取气化温度

600℃,燃烧熔融温度1 400℃,总体过量空气系数1.2,燃烧效率95%,进行气化熔融临界热力性能分析,大同烟煤含量与预热空气温度相互变化规律如图7.考虑到空气预热技术的限制,选取空气温度为500℃较为合适,此时所需加煤量占到混合垃圾的7.56%.为了进一步降低煤耗量,可利用发酵、干燥等方法对垃圾进行预脱水处理,在预热空气温度为500℃时,其临界热力性能分析如图8.

城市生活垃圾预脱水后,不仅能够减少煤耗量,也能减少空气量,具有很大的节能潜力.可以推论,当我国城市生活垃圾含水率降到40%左右时,不需要添加辅助燃料(预热空气500℃),就可以达到气

化熔融的技术要求,其系统如图 9.

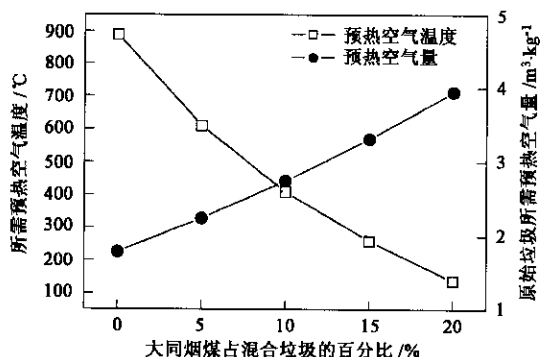


图 7 原生垃圾 + 大同烟煤临界热力性能分析

Fig.7 Critical thermo-performance analysis of original MSW + Datong soft coal

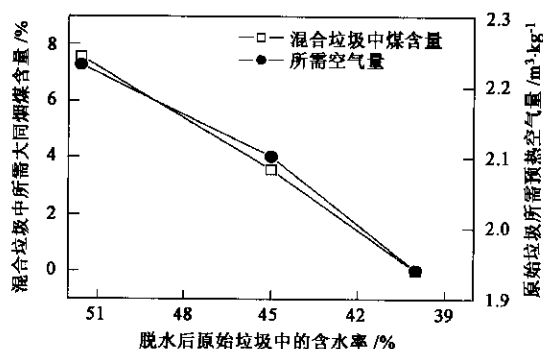


图 8 预脱水后原生垃圾 + 大同烟煤临界热力性能分析

Fig.8 Critical thermo-performance analysis of pre-dehydrated MSW + Datong soft coal

4 结论

(1) 试验证明了流化床气化(大约 600℃)与旋风炉燃烧熔融(1 300℃ ~ 1 400℃)技术适用于我国城市生活垃圾处理;利用流化床气化垃圾,合成气低位热值大约 3 000 kJ/m³;垃圾焚烧飞灰高温熔融后,二噁英分解率可达 99.99%,绝大部分重金属固化在熔渣中(固化率: Ni 100%; Cd 100%; Cr 70%; Cu 73%; Pb 43%; Zn 80%).

(2) 提出了 2 种可行的城市生活垃圾气化熔融

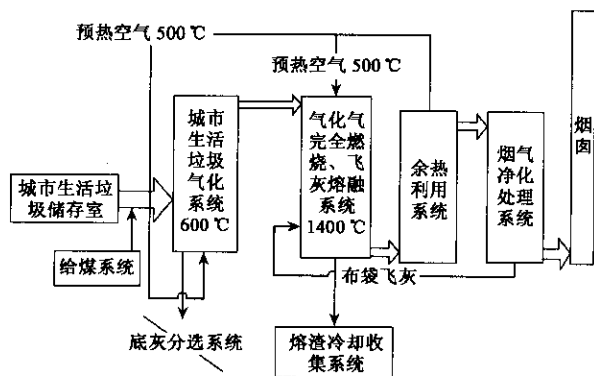


图 9 原始垃圾 + 辅助燃料气化熔融系统

Fig.9 Gasification and melting system of original MSW + assistant fuel

技术方案:①基于垃圾综合处理的筛上物气化熔融技术方案;②原生垃圾 + 辅助燃料的气化熔融技术方案.

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2003[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004. 402.
- [2] Tomas Malkow. Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal[J]. Waste Management, 2004, 24: 53~79.
- [3] Morris M, Waldheim L. Energy recovery from solid waste fuels using advanced gasification technology[J]. Waste Management, 1998, 18: 557~564.
- [4] 李润东. 城市生活垃圾焚烧飞灰熔融过程机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- [5] Bernd Calaminus, Stahlberg R. Continuous in-line gasification/vitrification process for thermal waste treatment: process technology and current status of projects [J]. Waste Management, 1998, 18: 547~556.
- [6] Seock-joon Kim. Development and Perspectives of MSW Pyrolysis and Melting System in Korea[A]. In: Cen Ke-fa, et al. Proceeding of the 3rd international Conference on Combustion, Incineration/Pyrolysis and Emission Control[C]. Hangzhou, China: International Academic Publishers World Publishing Corporation, 2004. 10~15.
- [7] 李晓东, 陆胜勇, 徐旭, 等. 中国部分城市生活垃圾热值的分析[J]. 中国环境科学, 2001, 21(2): 156~160.
- [8] 赵树青, 廖利, 吴学龙, 等. 深圳盐田垃圾场处置工程方案研究[J]. 环境卫生工程, 2001, 9(4): 167~169.