

## 科研与开发

## 煤与垃圾衍生燃料的流化床混烧试验研究

孙红杰<sup>1</sup>, 赵明举<sup>1</sup>, 王亮<sup>1</sup>, 谢克昌<sup>2</sup>

(1. 大连民族学院生命科学学院化工系, 辽宁大连 116600;

2. 太原理工大学煤科学与技术山西省和教育部重点实验室, 山西太原 030024)

**摘要:** 使用鼓泡流化床燃烧炉进行了煤与垃圾衍生燃料(RDF)的混烧实验研究, 分析了燃烧尾气中 O<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、NO<sub>x</sub>、CH<sub>4</sub>、SO<sub>2</sub>、HCl、HCN 浓度的变化, 并对各成分之间的浓度进行了相关性分析。研究结果表明在 750 ~ 900℃ 的范围内, 高温利于 SO<sub>2</sub> 的脱除; NO 的浓度随床温的提高而增加, NO<sub>2</sub> 的浓度与床温的关系不大; HCl 的浓度随床温的升高而增加, 说明高温不利于 HCl 的脱除; 在空气量较低的情况下, CO、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、HCN 等气体的浓度较高, 相关分析表明, 这些气体浓度之间有较强的正相关关系, 说明这些气体适宜于还原气氛下生成; 随着 HCl 气体浓度的增加, SO<sub>2</sub> 浓度降低, 说明 HCl 的存在可促进石灰石脱除 SO<sub>2</sub> 的反应, 同时还证实煤与 RDF 混烧可使尾气中的 SO<sub>2</sub> 和 HCl 气体浓度均有所下降。

**关键词:** 煤; 垃圾衍生燃料; 混烧; 流化床; 尾气

中图分类号: TQ038.2; TQ517.3; X705; TK09

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2006)01-0028-04

## Flue gas analysis of coal co-fired with refuse derived fuel

SUN Hong-jie<sup>1</sup>, ZHAO Ming-ju<sup>1</sup>, WANG Liang<sup>1</sup>, XIE Ke-chang<sup>2</sup>

(1. Department of Chemical Engineering, College of Life Science, Dalian Nationalities University, Dalian 116600, China;

2. Key Laboratory for Coal Science and Technology of Shanxi Province and Ministry of Education,

Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Co-firing of coal and refuse derived fuel (RDF) was carried out in a bubbling fluidized bed combustor, the components of O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub>, HCl, HCN in flue gas were measured, and the correlation among concentration was analyzed also. The experimental results indicated that higher temperature improved the SO<sub>2</sub> removal but decreased the removal of HCl and increased the concentration of NO in the temperature range of 750 ~ 900℃. In the condition of less excess air, more CO, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O and HCN were detected, which were usually formed in a reducing atmosphere. With the increase of HCl concentration in flue gas, the concentration of SO<sub>2</sub> in flue gas decreased, and the co-firing of coal and RDF decreased the concentrations of both SO<sub>2</sub> and HCl.

**Key words:** coal; refuse derived fuel(RDF); co-firing; fluidized bed; flue gas

城市生活垃圾已经成为世界上最严重的公害之一, 我国城市垃圾的可燃成分普遍较低<sup>[1]</sup>, 大多不宜直接焚烧。而目前我国采用的垃圾焚烧处理方法多采用炉排炉直接焚烧工艺, 由于垃圾的热值低、水分高, 有时还需补充煤或燃油, 所以此法运行成本较高, 吨处理成本达 300 元左右; 并且建设投资也非常大, 建设一座处理能力 1 000 t/d 城市垃圾的电站需一次性投资 6 亿 ~ 7 亿元人民币<sup>[2]</sup>, 而发电能力只相当于一个小型燃煤电站。为提高垃圾的热值, 通常的做法是将垃圾制成垃圾衍生燃料 (RDF, Refuse Derived Fuel)<sup>[3-4]</sup>。RDF 的工艺大致为分选、去除不可燃物、破碎、成型和干燥等<sup>[3,5]</sup>, 建设一座 1 000 t/d

城市垃圾的 RDF 工厂, 需要投资大约 1 亿 ~ 1.5 亿元人民币<sup>[6]</sup>。RDF 可以单独燃烧, 也可与其他燃料混烧。如果将 RDF 掺入现运行的燃煤锅炉中, 可节约大量的一次性建设投资费用, 比较适合我国国情。

近年来国内一些机构<sup>[7-12]</sup>已开始从事煤与原生垃圾 (MSW) 的混烧研究, 为我国的垃圾处理技术奠定了较好的基础。但我国目前大多数城市的生活垃圾仍以混装为主, 且相当一部分的可燃成分已被分离出, 不适宜与煤混烧, 如借鉴国外经验则应将垃圾制成 RDF, 以提高其品质, 再进行混烧。流化床具有燃料适应性广、氮氧化物排放低、还可实现炉内低成本石灰石脱硫等特点, 故选择了流化床燃煤锅炉

收稿日期: 2005-09-28; 修回日期: 2005-11-15

基金项目: 大连民族学院人才引进科研项目启动基金 (20036208; 20056101)

作者简介: 孙红杰 (1973-), 女, 硕士, 讲师, 从事大气污染控制、工业水处理、流态化工程等方面的研究; 王亮 (1972-), 男, 满族, 博士, 副教授, 从事电化学工程、流态化工程等方面的研究, 通讯联系人, wangl@dlmu.edu.cn。

作为研究炉型,进行混烧试验研究。

## 1 实验部分

### 1.1 实验样品

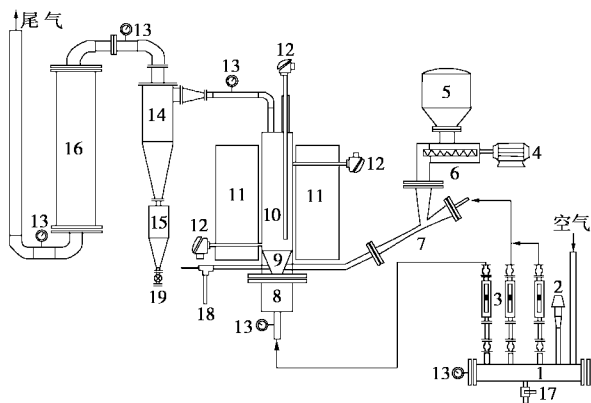
燃料为太原东山煤和垃圾衍生燃料(太原环卫局提供),粒径分别为20目(0.83 mm)和8目(2.36 mm)筛下物,成分分析见表1。石灰石采自太原西山,粒径为35目(0.42 mm)筛下物,CaCO<sub>3</sub>质量分数为87.33%(干基)。

表1 东山煤和 RDF 的工业分析和元素分析

工业分析(收到基,质量分数)/%			元素分析(干基)/%							高位发热量/ MJ·kg <sup>-1</sup>
水分	固定碳	挥发分	灰分	C	H	O	N	S	Cl	
煤	8.62	69.97	16.92	13.11	77.09	3.92	2.82	0.92	2.14	29.90
RDF	20.80	14.76	74.34	10.90	56.67	7.71	22.39	0.80	0.29	1.05

### 1.2 实验装置

实验在鼓泡流化床设备上进行,床高750 mm,内径150 mm,布风板直径100 mm。进料系统由双螺杆喂料机和吹料器组成,煤、RDF和石灰石按照研究计划制定的比例混合,进料速率由双螺杆喂料机的转速控制,落入吹料器后由少量空气吹入流化床反应器。床料为石英砂,粒径为35目(0.417 mm)和65目(0.295 mm)之间的筛分组分,流化气体为空气。实验装置流程见图1。



1—缓冲器;2—安全阀;3—转子流量计;4—送料电机;5—料斗;  
6—双螺杆给料机;7—吹料器;8—风室;9—底部缩口;10—流化床反应器;11—加热保温电炉;12—热电偶;13—气体采样口和压力采样口;14—旋风除尘器;15—飞灰收集器;16—袋式除尘器;  
17—冷凝水出口;18—床灰出口;19—飞灰出口

图1 实验装置流程示意图

### 1.3 实验内容

燃烧尾气由英国 Kane-May KM-9106 燃烧烟气

分析仪和芬兰 Gasmet Dx-4000 便携式红外光谱仪同时测定,可测定燃烧尾气中的 O<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、NO、NO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>、SO<sub>2</sub>、HCl、HCN 等气体的浓度,测量数据经 RS-232 总线传输给计算机进行数据解析处理和统计分析。飞灰和底灰的组成分别由 X 射线衍射仪(日本理学 D/max 2000)、离子色谱仪(美国 Dionex DX500)和扫描电镜进行分析。

考察了床层温度(750~900℃)、空气过剩系数(1.3~2.0)和 RDF 的质量掺混比例(0、10%、20%、30%)对燃烧特性的影响。为研究煤与 RDF 的流化床混烧过程中 Cl 和 S 的迁移,给石灰石脱硫和脱氯提供参考,进行了流化床燃烧过程中的物料衡算。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 燃烧温度对尾气组成的影响

分别在750、800、850、900℃下,空气过剩系数为1.5,钙硫摩尔比为3的条件下,考察温度对煤与 RDF(质量分数为20%)混烧的影响,实验结果见表2。由表2可以看出,随着床温的提高,SO<sub>2</sub>浓度下降,说明床温的提高有利于 SO<sub>2</sub> 的脱除;CO 的浓度随床温的增加而降低,说明床温的提高可以使燃烧强度增加,从而使 CO 的浓度降低;NO 的浓度随床温的提高而增加,与董长青等人<sup>[13]</sup>的研究结果一致,NO<sub>2</sub> 的质量浓度与床温的关系不大,一直维持在4 mg/m<sup>3</sup>;HCl 的浓度随床温的升高而增加,说明高温不利于石灰石对 HCl 的脱除,这一结果与蒋旭光等人<sup>[7-8]</sup>研究的结果一致,同时本研究还观察到,随着床层温度的提高,SO<sub>2</sub> 和 HCl 的析出量也增加<sup>[14]</sup>。

表2 不同温度下的尾气分析结果

床温/ ℃	O <sub>2</sub> 体 积分 数/%	SO <sub>2</sub> 质量 浓度/ mg·m <sup>-3</sup>	CO 质量 浓度/ mg·m <sup>-3</sup>	NO 质量 浓度/ mg·m <sup>-3</sup>	NO <sub>2</sub> 质量 浓度/ mg·m <sup>-3</sup>	HCl 质量 浓度/ mg·m <sup>-3</sup>	CO <sub>2</sub> 体 积分 数/%
750	6.8	457	1058	161	4	21	11.4
800	6.9	440	809	169	4	38	11.3
850	6.9	360	725	177	4	47	11.3
900	6.8	340	489	174	4	57	11.4

### 2.2 空气过剩系数对尾气成分的影响

考虑到由于气体量增加,使得气体浓度被稀释,将实验数据统一转换成氧气体积分数为6%时的标准浓度。尾气中 CO 和 CH<sub>4</sub> 气体的浓度,可用来判断燃烧的完全程度。由图2可以看出,对于煤与 RDF(质量分数为20%)的混合燃烧,当空气过剩系数为1.6时,尾气中 CO 和 CH<sub>4</sub> 的浓度最低,燃烧较

彻底。

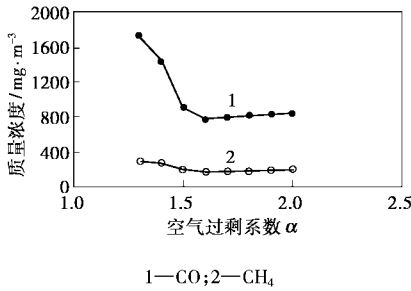


图 2 空气过剩系数(修正后)对废气中 CO 和 CH<sub>4</sub> 气体浓度的影响

煤与 RDF 混合燃烧时,必须控制的有害污染物主要指 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和 HCl,它们与空气过剩系数的关系见图 3。

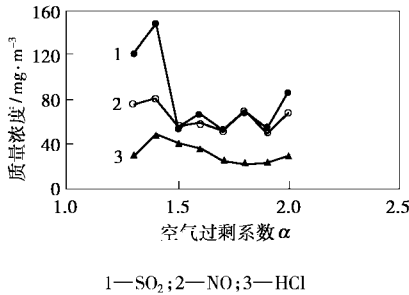


图 3 空气过剩系数(修正后)对废气中 SO<sub>2</sub>、NO 和 HCl 气体浓度的影响

由图 3 可以看出,当  $\alpha = 1.5 \sim 1.9$  时,SO<sub>2</sub> 和 NO 的质量浓度基本维持在 80 mg/m<sup>3</sup> 左右,而 HCl 气体的浓度则在  $\alpha = 1.8$  时达到最低。观察图 3 还可以发现,当  $\alpha = 1.4$  时,3 种有害气体的浓度都为最大值。同时傅里叶变换红外光谱 (FT-IR) 还检测到了另外 3 种低浓度的氮化物,即 HCN、N<sub>2</sub>O 和 NO<sub>2</sub>,它们与空气过剩系数的关系见图 4。

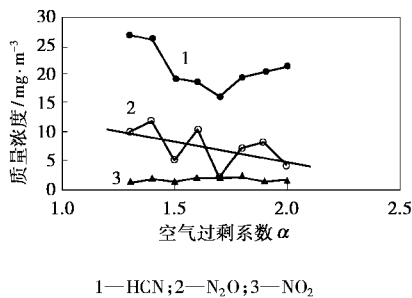


图 4 空气过剩系数(修正后)对废气中 HCN、N<sub>2</sub>O 和 NO<sub>2</sub> 气体浓度的影响

由图 4 可以看出,NO<sub>2</sub> 的浓度一直较低,维持在 2~4 mg/m<sup>3</sup>;HCN 的浓度在  $\alpha = 1.7$  时最低,曲线呈

较规律的锅底形;N<sub>2</sub>O 气体的浓度似乎无规律可言,呈锯齿状,但趋势上随着  $\alpha$  的增加而降低。

### 2.3 尾气中各种气体成分浓度之间的相关性分析

在分析尾气中气体浓度时观察到,某些气体浓度的变化呈同一趋势,推测它们之间必然有某种关联。在 850℃、RDF 质量掺混比例为 20%、钙硫摩尔比为 3 的燃烧工况下,通过改变空气过剩量,得到相应的气体浓度,将它们进行线性相关分析,结果见表 3。CO<sub>2</sub> 与 CO 和 CH<sub>4</sub> 为负相关,说明随着 CO<sub>2</sub> 气体浓度的增加,这 2 种气体的浓度线性降低,说明随着 CO<sub>2</sub> 气体浓度的增加,燃烧程度加强、燃烧较彻底,CO 和 CH<sub>4</sub> 的浓度必然要降低;CH<sub>4</sub> 与 CO 浓度之间有较强的正相关关系,相关系数大于 0.99 这 2 种气体的增减都与燃料的燃烧完全程度有关,原因同上;HCN 与 CO 和 CH<sub>4</sub>(以及 SO<sub>2</sub>)气体都有较强的正相关关系,说明 HCN 气体在还原气氛中的量较大,是由不完全燃烧或热解造成的。

进一步从相关系数 ( $R$ ) 的正负号方面来分析,观察表 3 可以发现,H<sub>2</sub>O 与 CO<sub>2</sub> 之间呈正相关关系,与其他气体成分的浓度都呈负相关关系(NO<sub>2</sub> 例外),说明燃烧愈完全,有害物的排放量愈低;CO 与 CH<sub>4</sub> 之间有非常高的正相关系数,并且与所有有害物的浓度呈正相关关系(NO<sub>2</sub> 例外),这 2 种气体浓度的增高,其他有害气体的浓度也将增加,所以燃烧工况对气体有害物的排放有关联。工业流化床锅炉还增加了二次风进风装置,一方面是为了使有害气体 CO 和 CH<sub>4</sub> 充分燃烧,另一方面可以减少有害物的排放量。

表 3 尾气中各种气体浓度之间的线性相关分析结果

$R$	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO	CH <sub>4</sub>	SO <sub>2</sub>	NO	HCl	HCN	N <sub>2</sub> O	NO <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub>	1									
H <sub>2</sub> O	0.68	1								
CO	-0.90	-0.79	1							
CH <sub>4</sub>	-0.91	-0.77	0.99	1						
SO <sub>2</sub>	-0.75	-0.60	0.86	0.90	1					
NO	-0.44	-0.43	0.70	0.73	0.89	1				
HCl	-0.44	-0.59	0.39	0.44	0.58	0.42	1			
HCN	-0.85	-0.57	0.92	0.94	0.91	0.79	0.43	1		
N <sub>2</sub> O	-0.51	-0.52	0.58	0.59	0.66	0.49	0.47	0.68	1	
NO <sub>2</sub>	0.71	0.39	-0.52	-0.51	-0.27	-0.10	-0.30	-0.53	-0.07	1

### 2.4 RDF 掺混量对尾气中气体组成的影响

在 850℃,空气过剩系数为 1.5 的条件下进行实验,RDF 掺混量对尾气中气体组成的影响见图 5。

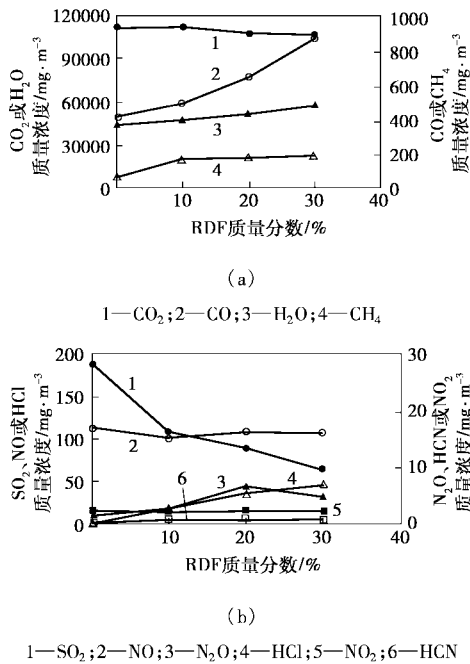


图5 RDF掺混比例对尾气组成的影响

由图5可以看出,随着RDF掺混量的增加,CO<sub>2</sub>浓度略有下降,水蒸气浓度逐渐增加,这2项的增减与燃料特性有关,因为煤与RDF按一定比例混合后,燃料的水分和其他组成都发生了变化。随着掺混量的增加,CO浓度大幅增加,CH<sub>4</sub>浓度也逐步增加,说明RDF的混入需要更高的空气量,也说明RDF比煤难燃烧。还可看出随着RDF掺混量的增加,尾气中SO<sub>2</sub>浓度大幅下降,HCl气体的浓度在逐步增加。

用测得的烟气中SO<sub>2</sub>、HCl和NO浓度分别除以燃料中的S含量、Cl含量和N含量,得到表4所示的结果。可以看出,经这种“规一化”处理后,随着RDF掺混量的增加,HCl气体和SO<sub>2</sub>的浓度实际是下降的,这说明2种酸性气体同时存在时,具有互相促进石灰石对它们的脱除。图5也显示出尾气中的NO气体随RDF掺混量变化无明显趋势。随着RDF掺混比例的增加,N<sub>2</sub>O浓度呈增加趋势,NO<sub>2</sub>浓度变化不大,HCN浓度逐渐增加。

表4 “规一化”处理后的烟气中组分的浓度 mg/m<sup>3</sup>

组分	RDF质量分数/%			
	0	10	20	30
SO <sub>2</sub>	96.1	60.8	55.3	43.5
HCl	0	210.0	208.2	176.0
NO	133.8	124.4	135.0	135.9

### 2.5 Cl和S物料平衡计算

对于本实验使用的流化床燃烧炉,输入物料有:

①燃料,煤或煤与RDF的混燃料;②石灰石脱硫剂;③流化空气;④喷粉器带入空气。输出物料有:①燃烧废气;②飞灰;③底灰。经推导,混合燃料的理论空气量计算公式为:

$$V_0 = \frac{22.4}{20.9} \left( \frac{\omega_C}{12} + \frac{\omega_H}{4} + \frac{\omega_S}{32} - \frac{\omega_O}{32} - \frac{\omega_{Cl}}{142} \right) (\text{m}^3/\text{kg})$$

式中,ω<sub>C</sub>、ω<sub>H</sub>、ω<sub>S</sub>、ω<sub>O</sub>和ω<sub>Cl</sub>分别为各元素在混合燃料中的质量分数。

在如表5所列的工况下,进行了东山煤与RDF的混烧实验研究。

表5 实验条件

流化空气量/ m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	喷粉器空气量/ m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	燃料量/ kg·h <sup>-1</sup>	石灰石量/ kg·h <sup>-1</sup>
1.53	0.44	0.207	0.038
空气过剩系数	Ca/S摩尔比	床层温度/℃	
1.5	3	850	

注:燃料为质量分数80%的煤与质量分数20%的RDF。

可以计算出混合燃料的收到基氯和硫质量分数分别为0.087%和1.718%。由实验条件可知Cl和S的输入量分别为182、3556 mg/h,使用Dx-4000便携式红外光谱仪测得烟气中HCl和SO<sub>2</sub>气体的浓度平均值分别为55.4、446.3 mg/m<sup>3</sup>,经计算,烟气总量为2.039 m<sup>3</sup>/h,则烟气中HCl和SO<sub>2</sub>的量分别为113.0、910.1 mg/h,再折算成Cl流量和S流量分别为110.0、455.1 mg/h,这样可以计算出Cl和S在气相中的分配量,分别为61.0%、12.8%,可以看出石灰石脱硫的效率要比脱氯的效率4~5倍。

通过离子色谱法测定飞灰和底灰中的Cl<sup>-</sup>浓度,计算出飞灰中的氯含量占总氯量的27.3%,底灰中的氯含量占总氯量的4.6%,两项合计31.9%,加上烟气中的61%,总共是92.9%,还有7.1%的氯损失,基本上满足要求。

另外使用XRD方法检测了飞灰和底灰的成分,也证实了飞灰中CaCl<sub>2</sub>比底灰中的含量高,CaSO<sub>4</sub>则主要富集在底灰中。

### 3 结语

通过实验可得出以下结论:在750~900℃的温度内,高温有利于SO<sub>2</sub>的脱除,但不利于HCl的脱除;HCl的存在可使促进石灰石脱除SO<sub>2</sub>的反应;随着空气过剩系数的增加,烟气中CO<sub>2</sub>和水蒸气含量也增加,CO和CH<sub>4</sub>气体的浓度在减少;NO<sub>x</sub>主要以

(下转第33页)

此溶液,室温搅拌 12 h,然后在 100℃干燥 10 h,干燥后的固体物在马弗炉中 500℃焙烧 4 h,然后筛分成 60~30 目待用。

催化剂的制备:也采用浸渍法制备,将一定量的硝酸铜溶于适量的去离子水,用以上载体浸渍此溶液,其中 CuO 的负载量(质量分数)为 10%,并同上法制得催化剂。

### 1.2 催化剂的表征

催化剂样品的 X 射线衍射(XRD)分析在 D/Max-2400 Rigaku X-射线粉末衍射仪上进行,Cu K<sub>α</sub> 辐射,λ = 0.15418 nm;催化剂的形貌分析用日本 JEOL 设备仪器公司生产的 JEM-200CX 透射电镜(TEM);催化剂的 X 射线光电子能谱(XPS)分析在 PHI550 电子能谱仪上进行,以 Al K<sub>α</sub> (hν = 1486.60 eV)为激发光源;催化剂样品经研磨、压片后进行测试。能谱测试室温度为室温,压力小于 3.0 × 10<sup>-7</sup> Pa。所有结合能数据以 C(1 s)的结合能 285.0 eV 为基准进行校正,误差不超过 0.2 eV。

### 1.3 催化剂的活性评价

乙酸乙酯催化燃烧活性的测试在常压固定床反应器中进行,反应管内径为 6 mm,催化剂用量 0.5 mL,气体空速为 10 000 h<sup>-1</sup>。反应气中乙酸乙酯摩尔分数为 0.6%,平衡气用空气,有机产物的分析在

GC MiNi3 型气相色谱仪上进行,采用聚乙二醇(PEG)柱,火焰离子化检测器(FID)检测,柱温 80℃;CO<sub>2</sub> 的分析在 GC8800 色谱仪上进行,热导检测器(TCD)检测,碳分子筛柱,柱温 130℃。以碳平衡计算乙酸乙酯转化率和产物分布。

## 2 结果与讨论

### 2.1 催化剂的活性分析

由图 1 可见,在经改性的载体上 CuO 对乙酸乙酯的催化活性有明显的增加,而 CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 双组分改性的载体对活性的改善效果最为突出,乙酸乙酯可以在 280℃达到完全转化,并且 CO<sub>2</sub> 的选择性也达到 100%。同样由图中乙醛和 CO<sub>2</sub> 生成量的比较可以看出,双组分改性的负载 CuO 催化剂上乙酸乙酯的完全转化程度大大提高,其中副产物乙醛在 200℃左右最大值也不超过 5%。CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 对载体的这种改性作用可归因于其储氧能力的提高以及晶格氧传递能力的增加<sup>[6]</sup>。结合 XRD 和 TEM 结果,可以认为经 CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 改性后 CuO 在载体的表面易于分散,从而有效提高了催化剂的活性。由此可见,通过载体改性提高 CuO/TiO<sub>2</sub> 催化剂的催化性能是一种行之有效的方法。

(上接第 31 页)

NO 的形式析出;空气过剩系数为 1.6 左右,为较理想的燃烧区间;HCN 在热解气氛条件下会大量产生;RDF 的混入需要更高的空气量,RDF 比煤难燃烧。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 赵明举,孙红杰,赵不凋.煤与垃圾衍生燃料的混烧技术[J].现代化工,2003,23(8):50-53.
- [3] Chang Y H, Chen W C, Chang N B. Comparative evaluation of RDF and MSW incineration [J]. Journal of Hazardous Materials, 1998, 58(1/2/3):33-45.
- [4] Piao G, Aono S, Kondoh M, et al. Combustion test of refuse derived fuel in a fluidized bed[J]. Waste Management, 2000, 20(5/6):443-447.
- [5] 郭小汾.垃圾衍生燃料(RDF)洁净燃烧技术的基础性研究[D].太原:太原理工大学,2000.
- [6] 赵明举,孙红杰,赵不凋.煤与垃圾衍生燃料的混烧技术展望[J].化工进展,2003,22(11):1143-1146.
- [7] 旭光,杨家林,严建华,等.煤与生活垃圾流化床混烧试验研究[J].煤炭学报,2000,25(2):186-189.
- [8] 蒋旭光,李琦,李香排,等.燃煤过程中钙基及镁基吸收剂对 HCl 吸收作用的试验研究[J].煤炭学报,2003,28(6):626-630.
- [9] 董长青,金保升,仲兆平,等.城市生活垃圾(MSW)与煤混烧过程中气体污染物的排放[J].热能动力工程,2001,16(6):587-596.
- [10] 吕清刚,那永洁,包绍麟,等.城市垃圾与煤在 CFBC 试验台上的混烧试验[J].工程热物理学报,2003,24(2):347-350.
- [11] 车得福,刘艳华,徐通模,等.城市垃圾与高硫煤混烧排放特性的模拟[J].燃烧科学与技术,2002,8(3):207-210.
- [12] 胡建杭,王华,何方,等.城市生活垃圾与煤混烧灰渣的熔融特性及成分分析[J].环境科学学报,2003,23(4):540-545.
- [13] 董长青,金保升,兰计香,等.城市生活垃圾(MSW)与煤混烧过程中气体污染物的排放[J].环境科学学报,2002,22(2):183-187.
- [14] Xie K C, Zhao M J. Cofiring of coal and refuse-derived fuel in a new type of internally circulating fluidized bed system[J]. Energy Sources, 2003, 25(11):1073-1081. ■