

文章编号:1000-582X(2009)05-0598-06

城市生活垃圾可燃成分燃烧特性热重分析

蒲 舸,王 炯,张 力

(重庆大学 动力工程学院,重庆 400030)

摘 要:通过热重分析仪研究城市生活垃圾单组分试样以及混合试样的燃烧特性,分别确定各试样的着火温度、燃尽温度及综合燃烧特性指数,并通过燃烧动力学分析得到各试样的活化能。垃圾在燃烧过程中表现为热解小分子气体的燃烧过程和剩余的固定碳燃烧过程。纸、织物燃烧猛烈,但持续时间短,塑料燃烧持续时间最长,最耐烧。尽管峰值有一些改变,各单一成分的燃烧特性在混合试样的燃烧特性曲线上均有所体现。

关键词:城市生活垃圾;燃烧特性;热重分析

中图分类号:TK16

文献标志码:A

Combustion characteristics of combustibles of municipal solid waste analyzed by thermogravimetry

PU Ge, WANG Jiong, ZHANG Li

(College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: We analyze the combustion characteristics of single component samples and mixed samples of municipal solid waste (MSW) using thermogravimetry. The ignition temperature, burnout temperature and comprehensive combustion characteristic parameters are obtained. The activation energy of samples is acquired by analyzing combustion kinetics. The results show that the MSW combustion process includes pyrolysis, a small molecule combustion process, and a fixed carbon combustion process. Paper and fabric have the most violent and shortest duration combustion, while plastic has the longest duration. Although the thermogravimetric peak value changed little, as a whole, the combustion characteristics of every component are expressed on the combustion characteristic curves of the mixture samples.

Key words: municipal solid waste; combustion characteristic; thermogravimetric analysis

随着经济的持续高速增长,城市生活垃圾已成为中国城市环境卫生面临的紧迫问题。垃圾焚烧由于其具有“无害化、减量化、资源化”等方面的优势,在中国得到了快速发展。准确掌握垃圾可燃成分的燃烧特性是设计燃烧装置、优化运行的前提条件。

法》,对重庆市主城区的居民小区、文教单位集中区、工业集中区、商业集中区的垃圾站进行采样、制样,对制成的垃圾样进行了成分分析,结果见表1。将其中典型的可燃成分及其混合物作为实验样品。

1 实验样品

依据中华人民共和国城镇建设行业标准(CJ/T3039-95)《城市生活垃圾采样和物理分析方法》

表1 重庆市主城区垃圾的组成(湿基) %

成分	纸	橡塑	叶果	竹木	厨余	金属	玻璃	织物	其它
重庆主城区垃圾	9.6	12.1	4.8	4.2	54.6	1.2	2.9	3.2	7.4

收稿日期:2008-12-11

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(CSTC,2007BB6182)

作者简介:蒲舸(1969-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事燃烧与环保方向的研究,(E-mail)pujiayi@163.com。

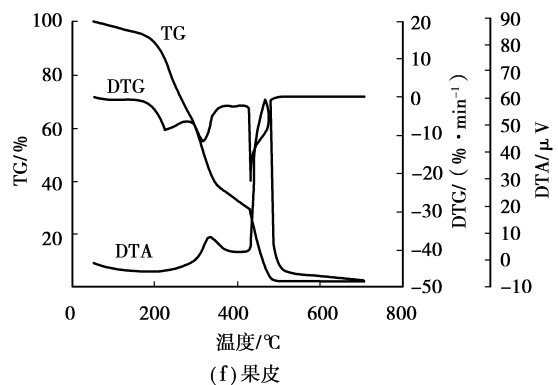
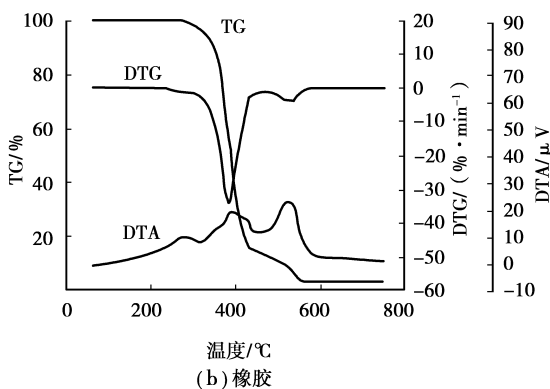
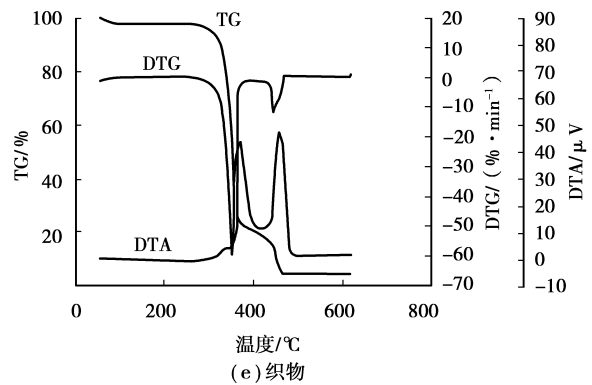
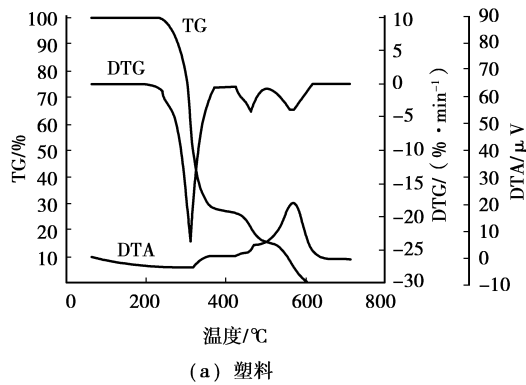
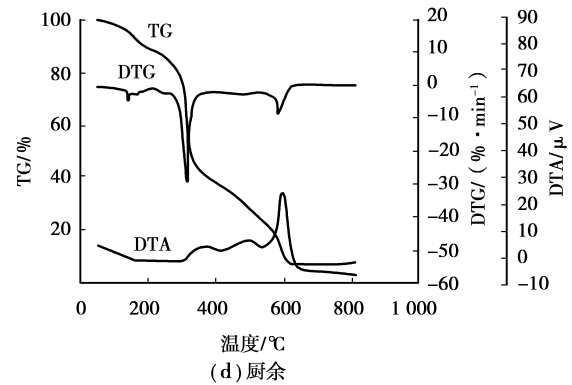
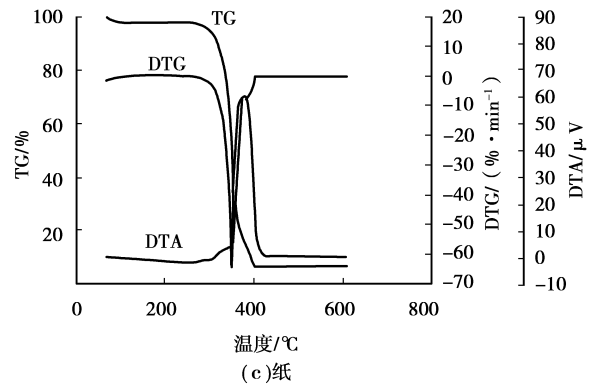
2 实验仪器及方法

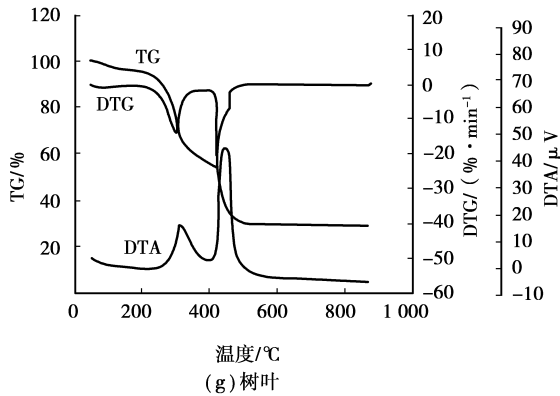
实验采用 ZRY-2P 型综合热分析仪。实验前,将试样放入 105 °C 的恒温炉中干燥 2 h。为使试样燃烧完全,将试样尺寸破碎到 0.5 mm 以下。实验时,将准备分析的 9 mg 左右的试样与参比物($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)分别放在综合热重分析仪 2 只坩埚中,通以流量为 80 mL/min 干燥空气,升温速率 20 °C/min,用热分析仪记录试样重量(TG 曲线)、重量变化率(DTG 曲线)与试样在反应过程中的热量(DTA 曲线)随温度的变化曲线。

3 实验结果与分析

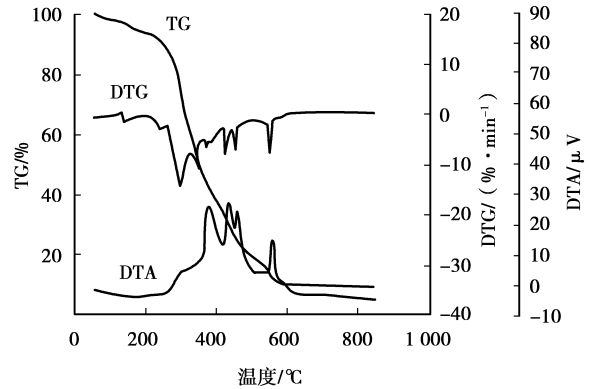
3.1 实验结果

对城市生活垃圾中垃圾主要可燃成分:塑料、橡胶、纸、厨余(米饭)、织物(棉布类)、果皮(广柑皮)、树叶(黄桷树叶)、竹筷及混合垃圾试样 1(塑料 2.8 mg、纸 2.6 mg、织物 2 mg、竹筷 1.6 mg)、混合试样 2(塑料 1.87 mg、纸 1.15 mg、厨余 3.75 mg、树叶 1.88 mg)进行热重实验研究实验,其 TG、DTD、DTA 曲线见图 1。



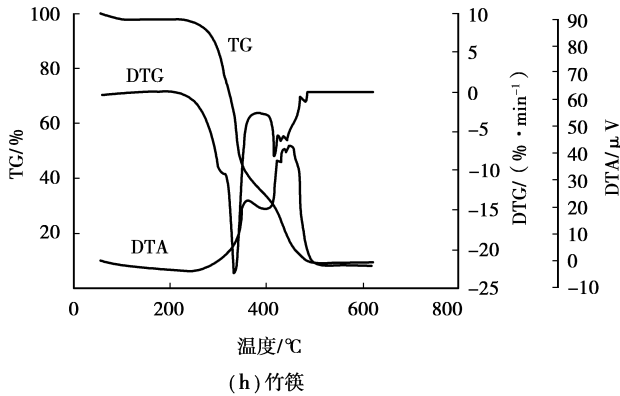


(g) 树叶

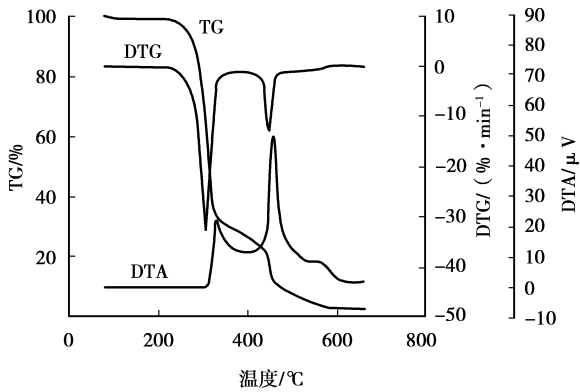


(j) 混合样品2

图 1 垃圾燃烧特性实验结果



(h) 竹篾



(i) 混合样品1

3.2 燃烧特征参数的确定

3.2.1 DTG、DTA 峰值温度

DTG 的峰值代表燃烧失重速率的最大值,DTA 的峰值代表放热速率的最大值,其数据见表 2。

表 2 垃圾 DTG 与 DTA 曲线峰值温度

试样	DTG 曲线			DTA 曲线		
	第 2 峰 温度	第 2 峰 温度	第 3 峰 温度	第 1 峰 温度	第 2 峰 温度	第 3 峰 温度
塑料	314.6	466.3	576.3	577.8	—	—
橡胶	384.9	514.6	—	395.1	524.4	—
纸	352	388.9	—	382.5	—	—
厨余	313.8	581.6	—	364.1	593.4	—
织物	359.3	454.7	—	381.7	467.8	—
果皮	320.3	434.5	—	335.9	467.8	—
树叶	301.5	423.5	—	318.8	447.7	—
竹篾	335.9	418.1	—	367.3	457.8	—
混合试样 1	307.2	448.5	—	339.9	459.3	—
混合试样 2	298.1	425.9	550.1	377.7	435.3	557.6

3.2.2 着火温度

采用文献[1]的方法来确定试样的着火温度 t_i , 结果见表 3。

表 3 垃圾综合燃烧特性指数

试样	t_i /°C	t_h /°C	$(d\omega/d\tau)_{max}$ /(%·min ⁻¹)	$(d\omega/d\tau)_{mean}$ /(%·min ⁻¹)	$10^{11} S_N$ /min ² ·K ⁻³
塑料	302	597	23.72	5.61	4.63
橡胶	376	551	33.99	6.82	4.66
纸	349	399	64.59	14.93	37.09
厨余	309	618	28.92	4.16	3.99
织物	347	470	59.73	9.53	19.93
果皮	313	479	22.13	6.18	5.29
树叶	286	519	24.60	4.51	4.48
竹篾	316	498	23.10	7.29	6.30
混合试样 1	299	566	32.54	5.61	6.65
混合试样 2	285	594	14.57	4.59	2.48

3.2.3 燃尽温度

将试样失重占总失重 99% 时对应的温度定义为燃尽温度 t_b ^[1], 数据见表 3。

3.2.4 燃尽特性分析

采用燃尽指数 C_b ^[2] 来描述垃圾燃尽特性

$$C_b = \frac{f_1 \cdot f_2}{\tau_0}, \quad (1)$$

式中 f_1 为 TG 曲线上着火点对应的试样失重量与试样中可燃质含量的比值; 将试样燃烧失重从开始到燃烧 99% 可燃质的时间定义为燃尽时间 τ_0 , τ_0 时刻所对应的试样失重量与试样中可燃质含量的比值定义为总燃尽率 f , 则后期燃尽率 $f_2 = f - f_1$ 。

燃尽特性指数 C_b 越大, 垃圾的燃尽性能越好, 结果见表 4。

表 4 垃圾的燃尽特性指数

样品编号	τ_0/min	$f/\%$	$f_1/\%$	$f_2/\%$	$C_b/(10^{-4} \cdot \text{min}^{-1})$
塑料	17.81	99.0	26.27	72.73	107.28
橡胶	14.22	99.0	28.87	70.13	142.38
纸	6.12	99.0	42.83	56.17	393.24
厨余	18.79	99.0	24.66	74.34	97.56
织物	9.80	99.0	17.24	81.76	143.83
果皮	14.75	99.0	41.23	57.77	161.48
树叶	14.41	99.0	17.18	81.82	97.55
竹篾	12.13	99.0	13.91	85.09	97.58
混合试样 1	17.23	99.0	26.09	72.91	110.40
混合试样 2	17.68	99.0	11.40	87.60	56.48

3.2.5 综合燃烧特性指数的确定

采用综合燃烧特性指数 S_N 来全面评价试样的燃烧情况^[1]

$$S_N = \frac{(d\bar{\omega}/d\tau)_{\max} (d\bar{\omega}/d\tau)_{\text{mean}}}{T_i^2 T_b}, \quad (2)$$

式中: S_N 为综合燃烧特性指数; $(d\bar{\omega}/d\tau)_{\max}$ 为最大燃烧速度, $\% \cdot \text{min}^{-1}$; $(d\bar{\omega}/d\tau)_{\text{mean}}$ 为平均燃烧速度, $\% \cdot \text{min}^{-1}$; T_i 为着火温度, K; T_b 为燃尽温度, K。 S_N 值越大说明燃料的燃烧特性越佳。数据见表 4。

3.3 燃烧特性分析

从塑料的燃烧特性曲线可以看出, 塑料有 3 个失重峰, 其中第 1 峰失重最大, 表明塑料的挥发分含量高, 在挥发分析出阶段失重速率大。在挥发分析出并着火时 DTA 曲线有一不明显的峰, 而在固定碳燃烧阶段有一明显的放热峰, 说明固定碳燃烧的放热量大于挥发分燃烧的放热量。

橡胶有 1 个明显和 1 个不明显的失重峰, DTA 曲线有 2 个相差不多的放热峰。

纸有 1 个失重峰和 1 个放热峰, 最大失重速率

超过 60%/min, 纸的燃烧持续时间短, 当温度上升到 400 °C 左右就已经燃尽了。

虽然在 105 °C 的热风干燥箱中干燥了 2 h, 厨余(米饭)中还是含有较多的水分, 在加热的开始阶段有较大的失重。厨余(米饭)垃圾 DTA 曲线反映出, 在固定碳的燃烧阶段有较大的放热量。

织物(棉布)有 2 失重峰, 挥发物析出阶段失重明显。而 DTA 曲线上的 2 个放热峰相差不大。

果皮(广柑皮)虽经干燥, 含水量还是较大, DTG 曲线有 3 个峰, 而且固定碳燃烧阶段失重速率更大。

树叶(黄桷树叶)有 2 个失重峰, 与余果皮一样在固定碳燃烧阶段失重速率较大, 而且燃烧剩余物较多。

竹篾有 2 个失重峰和 2 个放热峰, 在挥发物析出阶段失重速率大。

由纸、塑料、竹篾、织物组成的混合试样 1 有 2 个失重峰和 2 个放热峰, 将混合垃圾的 TG、DTG 曲线与其他 4 种样品的 TG、DTG 曲线比较, 虽然峰值有小幅改变, 但可以看到各个单独组份的失重峰在有它们参与组成的混合物燃烧 DTG 曲线上也基本上都有所体现, 单一成分叠加现象较为明显。

由纸、塑料、厨余与树叶组成混合试样 2, 有较多的失重峰和放热峰, 但仔细比较各成分的燃烧特性曲线, 仍然能够找到对应分峰值。

10 种测试样品中混合试样中与树叶与混合垃圾 2 的着火温度较低分别为 285 °C 和 286 °C (混合垃圾 2 的着火温度反映了它所含树叶的着火情况); 橡胶的着火温度最高, 为 376 °C。厨余垃圾的燃尽温度最高为 618 °C, 纸最低为 399 °C。

纸的燃尽指数最大, 为 $393.24 \times 10^{-11}/\text{min}$ 表明其燃尽性能最佳, 混合垃圾 2 的燃尽指数最小, 为 $56.48 \times 10^{-11}/\text{min}$ 其燃尽性能最差。综合燃烧特性指标 (S_N) 纸最大为 $37.09 \times 10^{-11} \text{min}^2 \cdot \text{K}^{-3}$, 混合垃圾 2 最小为 $3.38 \times 10^{-11} \text{min}^2 \cdot \text{K}^{-3}$, 表明纸的燃烧特性最佳, 混合垃圾 2 最差。

DTG 曲线的峰值代表燃烧速率最大值。DTG 峰值出现的时间越短, 则燃烧越容易发生, 峰值持续时间越长, 表明越耐烧^[3]。由图 1 可以看出, 对单一试样, 纸的 DTG 峰值出现的时间最短, 说明它最易着火燃烧, 并且 $(d\bar{\omega}/d\tau)_{\max}$ 最大, 说明它燃烧的最猛烈, 但持续时间很短, 不耐烧; 塑料 DTG 曲线有 3 个峰值, 且持续时间最长, 说明其最耐烧。

DTA 曲线上, 后面放热峰明显大于前面的放

热,表明固定碳燃烧放热量大于挥发分燃烧放热量。

尽管峰值有一些改变,总体上讲,各单一成分的燃烧特性在混合试样的燃烧特性曲线上有所体现。

3.4 燃烧动力学分析

参考文献[3-17]的方法,将实验数据进行拟合,可以计算出反应活化能 E 和频率因子 A 的值,结果见表 5。

表 5 垃圾燃烧动力学参数表

试样	温度范围/°C	拟合方程	相关系数	活化能 $E/(kJ \cdot mol^{-1})$	频率因子 A/min^{-1}
塑料	272~344	$y = 11.793 - 14.779x$	0.997 7	122.87	4.25×10^{10}
	454~487	$y = -9.918 - 2.088.1x$	0.972 9	17.36	6.86
	548~599	$y = -1.551 2 - 9.170.8x$	0.979 3	76.25	4.79×10^4
橡胶	352~429	$y = 9.401 7 - 15.119x$	0.986 9	125.70	4.03×10^9
	522~561	$y = 1.761 8 - 11.217x$	0.976 0	93.26	1.53×10^6
纸	329~355	$y = 33.293 - 28.922x$	0.989 8	240.46	1.74×10^{20}
	355~401	$y = 0.190 1 - 7.987.2x$	0.997 7	66.41	2.30×10^5
厨余	295~320	$y = 7.377 2 - 12.173x$	0.991 1	101.21	4.56×10^8
	582~621	$y = 8.207 6 - 17.868x$	0.983 3	148.55	1.46×10^9
织物	339~379	$y = 37.663 - 32.120x$	0.997 9	267.05	3.52×10^{22}
	451~473	$y = 18.087 - 22.067x$	0.993 3	183.47	3.39×10^{13}
果皮	221~337	$y = -7.171 1 - 3.503.3x$	0.970 5	29.13	80.38
	435~487	$y = 2.684 3 - 10.991x$	0.976 1	91.38	3.73×10^6
树叶	275~308	$y = 1.303 5 - 8.520.4x$	0.999 8	70.84	7.26×10^5
	421~469	$y = 2.013 5 - 10.427x$	0.999 1	86.69	1.82×10^6
竹筷	295~348	$y = 5.046 8 - 11.183x$	0.994 8	92.98	3.91×10^7
	415~484	$y = -1.138 7 - 7.943.7x$	0.972 8	66.04	6.24×10^4
混合试样 1	278~332	$y = 17.822 - 18.113x$	0.993 8	150.59	2.13×10^{13}
	446~471	$y = 2.444 7 - 1.0748x$	0.997 7	89.36	2.87×10^6
混合试样 2	295~345	$y = -6.548 5 - 4.060x$	0.995 4	33.75	165.99
	350~467	$y = -10.257 - 1.755.4x$	0.980 9	14.59	6.58
	467~552	$y = -10.783 - 1.355.6x$	0.972 5	11.27	4.59

4 结 论

对重庆市主城区的生活垃圾进行了采样分析,并利用综合热重分析仪对垃圾中的典型组分及 2 种混合试样进行了燃烧特性实验。研究结果表明:

1) 垃圾在燃烧过程中表现为热解小分子气体的燃烧过程和剩余物质燃烧过程。

2) 综合燃烧特性指数纸最大,塑料最小。

3) 纸、织物燃烧猛烈,但持续时间短,塑料燃烧持续时间最长,最耐烧。

4) 各单一成分的燃烧特性在混合试样的燃烧特性曲线上有所体现。

参考文献:

- [1] 顾利锋,陈晓平,赵长遂,等. 城市污泥和煤混燃特性的热重分析法研究[J]. 热能动力工程,2003,18(6):561-563.
GU LI-FENG, CHEN XIAO-PING, ZHAO CHANG-

SUI, et al. A study of the characteristics of mixed burning of municipal sewage sludge and coal by a thermogravimetric method[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2003, 18(6): 561-563

- [2] 姜秀民,李巨斌,邱健荣,等. 超细化煤粉燃烧特性的研究[J]. 中国电机工程学报,2000,20(6):71-74.
JIANG XIU-MIN, LI JU-BIN, QIU JIAN-RONG, et al. Study on combustion characteristic of micro-pulverized coal[J]. Proceedings of the CSEE, 2000,20(6):71-74.
[3] 秦成,田文栋,肖云汉,等. 垃圾衍生燃料热重法的燃烧特性[J]. 燃烧科学与技术,2004,10(3):232-236.
QIN CHENG, TIAN WEN-DONG, XIAO YUN-HAN, et al. Analysis of combustion characteristics of RDF by thermogravimetry[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2004,10(3):232-236.
[4] SORUM L, GRONLI M G, HUSTAD J E. Pyrolysis characteristics and kinetics of municipal solid wastes[J]. Fuel, 2001, 80(9):1217-1227.
[5] 姜凡,潘忠刚,江淑琴,等. 城市固体废弃物的燃烧特性实验研究[J]. 热能动力工程,2001,16(91):16-18.

- JIANG FAN, PAN ZHONG-GANG, JIANG SHU-QIN, et al. Experimental study of the combustion characteristics of municipal solid waste[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 2001, 91(16):16-18.
- [6] 温俊明,池涌,罗春鹏,等. 城市生活垃圾典型有机组分混合热解特性的研究[J]. *燃料化学学报*, 2004, 32(5): 563-568.
- WEN JU-MING, CHI YONG, LUO CHUN-PENG, et al. Study on the pyrolysis characteristics of the mixture of typical organic components of MSW[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2004, 32(5):563-568.
- [7] 李钦朋,张力,唐强,等. 煤气层、煤矸石掺烧比对CFB炉内燃烧特性的影响[J]. *重庆工学院学报:自然科学版*, 2007, 21(9):74-75.
- LI QIN-PENG, ZHANG LI, TANG QIANG, et al. Influence of coal methane and coal gangue mixing ratio on the combustion characteristics of CFB boiler[J]. *Journal of Chongqing Institute of Technology: Natural Science Edition*, 2007, 21(9):74-75.
- [8] VUTHALURU H B. Investigations into the pyrolytic behaviour of coal/biomass blends using thermogravimetric analysis [J]. *Bioresource Technology*, 2004, 92(2): 187-195.
- [9] AYLLON M, GEA G, MURILLO M B, et al. Kinetic study of meat and bone meal pyrolysis; an evaluation and comparison of different possible kinetic models[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 2005, 74(1/2): 445-453.
- [10] DE JONG W, DI NOLA G, VENNEKER B C H, et al. TG-FTIR pyrolysis of coal and secondary biomass fuels: determination of pyrolysis kinetic parameters for main species and NOx precursors[J]. *Fuel*, 2007, 86(15): 2367-2376.
- [11] HU S, JESS A, XU M H, et al. Kinetic study of Chinese biomass slow pyrolysis; comparison of different kinetic models [J]. *Fuel*, 2007, 86(15): 2778-2788.
- [12] GONZALEZ J F, RAMIRO A, GONZALEZ-GARCIA C M. Pyrolysis of almond shells [J]. *Energy Application of Fraction*, 2005, 44(9): 3003-3012.
- [13] MANGUT V E, SABIO E, GANAN J, et al. Thermogravimetric study of the pyrolysis of biomass residues from tomato processing industry [J]. *Fuel Processing Technology*, 2006, 87(2): 109-115.
- [14] GOMEZ C J, VARHEGYI G, PUIGJANER L. Slow pyrolysis of woody residues and an herbaceous biomass crop: a kinetic study[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2005, 44(17): 6650-6660.
- [15] TARO S, NAKORN W. Kinetic analyses of biomass pyrolysis using the distributed activation energy model[J]. *Fuel*, 2008, 87(3): 414-421.
- [16] WANG G, LI W, LI B Q, et al. TG study on pyrolysis of biomass and its three components under syngas[J]. *Fuel*, 2008, 87(4/5): 552-558.
- [17] GRAMMELIS P, BASINAS P, MALLIOPOULOU A, et al. Pyrolysis kinetics and combustion characteristics of waste recovered fuels[J]. *Fuel*, 2009, 88(1): 195-205.

(编辑 赵 静)

(上接第 597 页)

- WANG QING, JIANG QING-XIAN, SUN BAI-ZHONG, et al. Investigation on combustion characteristics of Huadian oil shale by thermal analysis techniques[J]. *Energy Engineering*, 2006, 28(2): 1-5.
- [10] 蒋德华. 茂名油页岩燃烧特性研究[J]. *洁净煤技术*, 2006, 12(3):86-87.
- JIANG DE-HUA. Study on combustion characteristic of oil shale in Maoming[J]. *Clear Coal Technology*, 2006, 12(3):86-87.
- [11] 柏静儒,王擎,胡爱娟. 茂名油页岩的热解特性[J]. *东北电力大学学报*, 2006, 26(2): 73-78.
- BAI JING-RU, WANG QING, HU AI-JUAN. The pyrolysis characteristics of Maoming oil shale[J]. *Journal of Northeast Dianli University*, 2006, 26(2): 73-78.
- [12] 刘耕戊. 高硫石油焦的利用[J]. *石油炼制与化工*, 1998, 29(4):36-41.
- LIU GENG-WU. Using of petroleum coke with high sulphur content[J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 1998, 29(4):36-41.
- [13] 王文选,王凤君,李鹏,等. 石油焦与煤混合燃料热重分析研究[J]. *燃料化学学报*, 2004, 32(5):522-525.
- WANG WEN-XUAN, WANG FENG-JUN, LI PENG, et al. Thermogravimetric analysis on the pyrolysis and combustion characteristics of mixed fuels of petroleum coke and coal[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2004, 32(5): 522-525.
- [14] WANG J S, ANTHONY E J, ABANADES J C. Clean and efficient use of petroleum coke for combustion and power generation[J]. *Fuel*, 2004, 83(10): 1341-1348.
- [15] CHEN J H, LU X F. Progress of petroleum coke combusting in circulating fluidized bed boilers-A review and future perspectives [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, 49(3): 203-216.

(编辑 李胜春)