

城市固体废弃物的燃烧特性实验研究

姜 凡, 潘忠刚, 江淑琴, 方建华

(中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100080)

摘 要: 通过热分析技术, 对城市固体废弃物中几种典型组分进行实验研究, 得到了混合垃圾在热重分析仪中的燃烧特性, 并对城市固体废弃物的混烧规律开展了有益的探讨。

关 键 词: 热重分析; 城市固体废弃物; 燃烧特性

中图分类号: X705; TQ038. 1 文献标识码: A

1 引言

随着人口的激增, 社会的进步, 人类社会赖以生存的生态环境已经逐步成为全球瞩目的焦点。其中, 垃圾的有效处理是保护领域里的重要环节。在我国, 垃圾的历年堆存量已达 60 多亿吨, 侵占土地面积 5 亿多平方米。垃圾年产量超过 1 亿吨, 城市垃圾的年排放量以约 9.5% 的速度逐年增长。如此庞大的垃圾, 处理不善将会造成严重的环境污染。

垃圾的处理遵循着减量化、无害化、资源化的原则。焚烧法对于垃圾的有效减容、消除病菌、回收能源尤为有效。综合考虑我国的实际情况, 目前垃圾焚烧以直接烧原生垃圾为主。然而, 垃圾组分随时间、地域不同而差异极大的特点又为垃圾焚烧带来诸多问题, 使焚烧炉常常处于非设计工况下运行。为了对混合垃圾的焚烧特性和规律有更多的基本了解, 我们开展了最基本的混合垃圾燃烧特性热重分析研究。

2 实验部分

2.1 实验装置介绍

实验仪器是北京光学仪器厂产 LCT-2 型高温微分差热天平。本实验主要对试样进行热重测量、热重微分测量和差热分析。

2.2 试样

在研究混合垃圾的燃烧特性之前, 作为参照系, 首先以直径小于 1 mm 的纸张、塑料(食品袋)、厨余

(菜花叶子)、橡胶、棉布、木筷各 9 mg 作为垃圾试样的代表物进行单一组分垃圾热重分析研究, 混合垃圾代表物的实验组分见表 1 所示。

表 1 混合垃圾试样

序号	混合垃圾代表物实验组分		
1	塑料 4.5 mg	纸张 4.5 mg	
2	棉布 4.5 mg	厨余 4.5 mg	
3	木筷 4.5 mg	橡胶 4.5 mg	
4	木筷 3 mg	厨余 3 mg	棉布 3 mg

2.3 实验条件

实验时, 将准备分析的试样放在坩埚中, 通以空气, 使混合料样在空气氛围中以一定速度连续升温, 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。采用的实验条件为:

升温速度: 20 °C/min 测重量程: 10 mg
 测重微分量程: 10 mv/min 差热量程: 100 μV
 测温量程: 10 mv 走纸速度: 4 mm/min

3 实验结果分析

3.1 实验结果如图 1 所示。

3.2 单一及混合垃圾的燃烧动力学分析

根据质量作用定律可以得到试样燃烧速率方程:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(1 - \alpha)^n \quad (1)$$

$$\text{Arrhenius 定律: } k = Ae^{-E/RT} \quad (2)$$

$$\text{升温速率: } \Phi = \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

试样燃烧转化率 α 可以由失重(TG)曲线求得:

$$\alpha = \frac{W_0 - W_t}{W_0 - W_f} \quad (4)$$

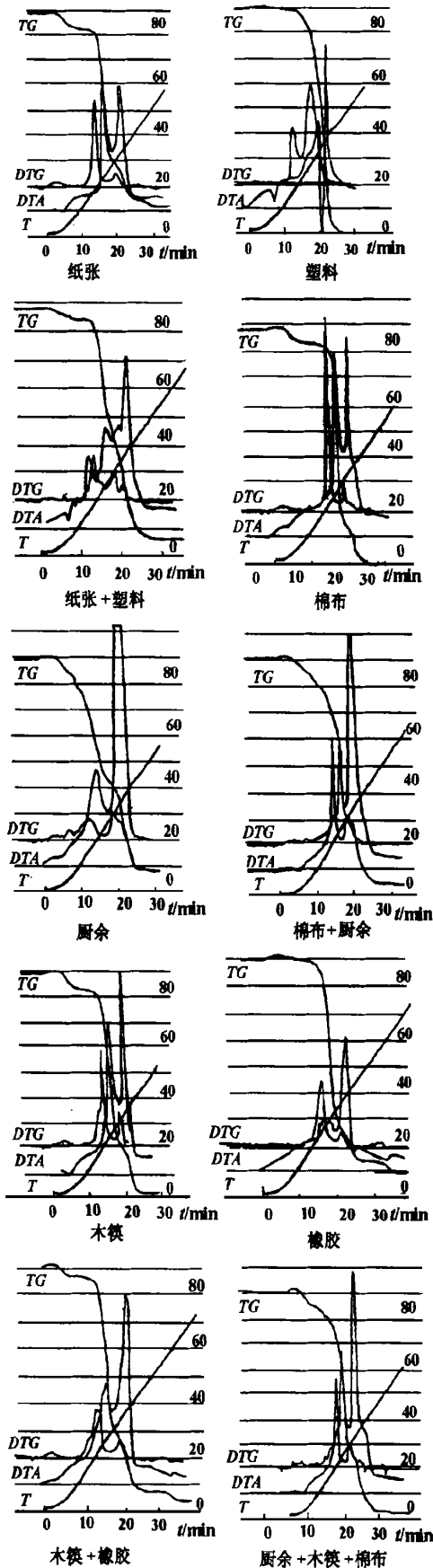


图 1 垃圾热重分析实验结果

式中: W_0 、 W_t 、 W_f 分别为试样的初始质量, 在 t 时刻的质量和该反应区段的终止质量。

由式(1)、(2)、(3)、(4) 可以得到: $\frac{d\alpha}{dt} = Ae^{-E/RT} (1-\alpha)^n$ (5)

移项积分得

$$\int_0^\alpha \frac{d\alpha}{(1-\alpha)^n} = \frac{A}{\phi} \int_{T_0}^T e^{-E/RT} dT$$
 (6)

根据经验选 $n = 1$, 并采用 Coast-Redfern 法积分并整理上式, 得

$$\ln\left[-\frac{\ln(1-\alpha)}{T^2}\right] = \ln\left[\frac{AR}{\phi E}\left(1-\frac{2RT}{E}\right)\right] - \frac{E}{RT}$$
 (7)

令 $a = \ln\left[\frac{AR}{\phi E}\left(1-\frac{2RT}{E}\right)\right]$ 在本实验温度范围内,

可以看作常数。令 $Y = \ln\left[-\frac{\ln(1-\alpha)}{T^2}\right]$ 、 $b = -E/R$ 、 $X = 1/T$, 则

$$Y = a + bX$$
 (8)

由式(8), 可以方便地求出活化能 E 和频率因子 A 。具体计算结果见表 2, 其中列出了拟合方程与实验数据的相关系数, 它们一般都大于 0.97, 说明了这一分析方法的可行性。也就是说, 对就所研究的单一组分和混合组分垃圾试样, 在燃烧进程的两个不同反应区段, 均可以用一级反应来描述。

3.3 混合垃圾燃烧特性分析 (见表 3)

DTG 曲线反映了试样燃烧过程中的质量变化率随时间或温度变化的规律。由单一试样及混合试样进一步观察组分和混合物的 *DTG* 曲线的形状, 可以看到各个单独组份的燃烧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。而且试样单独燃烧时 *DTG* 曲线的峰值对应的温度与混合试样 *DTG* 曲线上的峰值所对应的温度基本一致而有的略有偏移。这也说明在热重仪内的燃烧环境下, 一些混合组份的燃烧过程会因为相互间的影响而使燃烧特性稍稍改变。

DTA 曲线反映了试样在整个燃烧过程中热量随时间的变化规律。由混合试样与单一组分试样的 *DTA* 曲线的放热峰形状, 可以看到试样单独燃烧时 *DTA* 曲线的各峰值所对应的温度与混合试样燃烧时 *DTA* 曲线上的各峰值所对应的温度基本一致。说明燃烧的放热量虽有一些变化, 但并不十分显著。

从 *DTA* 曲线上还可以看到, 当试样所含单独组分燃烧的燃烧峰对应的温度区间相差较大时, 在混合物的燃烧曲线上就可以很明显地找到单独组分燃烧时的燃烧峰; 当试样所含几个组分单独燃烧的燃烧峰温

度区间接近时, 在混合试样燃烧曲线上出现几个组分燃烧叠加的新区间和新峰值。

由以上分析, 可以认为在用热重分析仪研究混合试样的燃烧特性时, 某些混合试样的组分之间会表现

出有相互影响, 但一般说来并不强烈。所以, 在所研究的试样内, 可以认为混合物质在热重分析仪中的燃烧特性是简单的单组分燃烧特性的叠加关系。

表 2 垃圾燃烧动力学参数表

名 称	温度范围 / °C	拟合方程	相关系数	活化能	
				频率因子 A/min^{-1}	$E/\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
纸张	231 ~ 416	$Y = -11.652 + 15.341x$	0.994 3	$3.82e + 10$	127.55
	416 ~ 518	$Y = -15.345 + 21.214x$	0.990 0	$2.108e + 12$	176.38
塑料	238 ~ 331	$Y = -13.098 + 15.015x$	0.999 9	$1.59e + 11$	124.84
	331 ~ 478	$Y = -4.663 + 12.850x$	0.998 0	$3.05e + 7$	106.84
塑料 + 复印纸	237 ~ 416	$Y = -6.361 + 12.178x$	0.9782	$1.57e + 8$	101.25
	416 ~ 486	$Y = -27.784 + 29.973x$	0.999 9	$7.34e + 17$	249.21
棉布	265 ~ 436	$Y = -18.861 + 20.847x$	0.990 3	$6.89e + 13$	173.3
	436 ~ 488	$Y = -54.012 + 49.592x$	0.991 2	$2.93e + 29$	412.3
厨余	196 ~ 395	$Y = 1.650 + 6.455x$	0.992 6	$3.02e + 4$	53.67
	395 ~ 538	$Y = -13.761 + 20.335x$	0.996 0	$4.15e + 11$	169.07
厨余 + 棉布	208 ~ 416	$Y = 0.896 + 7.553x$	0.9735	$7.32e + 4$	62.80
	416 ~ 538	$Y = -13.657 + 20.422x$	0.9483	$3.76e + 11$	169.80
木筷	331 ~ 416	$Y = -2.957 + 9.987x$	0.9853	$4.415e + 6$	83.03
	416 ~ 478	$Y = -44.978 + 42.286x$	0.997 0	$2.99e + 25$	351.58
橡胶	231 ~ 447	$Y = -4.842 + 12.116x$	0.9825	$3.43e + 7$	100.74
	447 ~ 548	$Y = -13.23 + 20.84x$	0.997 6	$2.51e + 11$	173.27
木筷 + 橡胶	231 ~ 426	$Y = -5.997 + 12.125x$	0.997 9	$1.09e + 8$	100.81
	426 ~ 548	$Y = -12.005 + 19.444x$	0.999 96	$6.91e + 10$	161.67
厨余 + 木筷 + 棉布	242 ~ 411	$Y = -5.313 + 11.404x$	0.995 9	$5.18e + 7$	94.82
	411 ~ 528	$Y = -8.929 + 16.571x$	0.995 7	$2.75e + 9$	137.78

表 3 垃圾燃烧微分与差热曲线比较

试样	微分曲线 DTG				差热曲线 DTA			
	第一峰		第二峰		第一峰		第二峰	
	峰值 / °C	出现时间 / min	峰值 / °C	出现时间 / min	峰值 / °C	出现时间 / min	峰值 / °C	出现时间 / min
棉布	374	17.8	467	22.45	384	18.3	462	22.2
厨余	309	14.55	447	21.45	320	15.1	467	22.45
棉布 + 厨余	363	17.25	447	21.45	374	17.8	457	21.95
木筷	352	16.7	447	21.45	395	18.85	478	23
橡胶	400	19.1	518	25	374 426	17.8, 20.4	508	24.5
木筷 + 橡胶	352(379)	16.7(18.05)	488(518)	23.5(25)	384(426)	18.3(20.4)	(478), 483(508)	(23), 23.25 (24.5)
纸张	342	16.2	465	22.35	363	17.25	457	21.95
塑料			488	23.5	276	12.9	405, 498	19.35, 24
纸张 + 塑料	342	16.2	463, 498	22.25, 24	276 384	12.9, 18.3	457, 498	21.95, 24
厨余 + 木筷 + 棉布	(309) 352	(14.55) 16.7	447	21.45	363	17.25	447	21.45

(注: 括号内数字表示次峰值)

4 结 论

针对我们所选的几种典型组分垃圾代表物进行热重分析实验的研究结果表明:

整个燃烧过程可以分为三个阶段, 所选试样基本上都呈现两个放热峰, 说明有两个主要的燃烧放热区段, 即挥发份析出燃烧和固定可燃成分的燃烧;

(2) 对于垃圾典型组分代表物反应进程中主要的两个不同燃烧区段, 都可以用一级反应来描述;

(1) 单独组分和混合试样在测试环境下燃烧时,

(转 38 页)

和 NASA 数据进行了比较,如图 1 至图 4 所示,计算中考虑了碰撞增宽和多普勒增宽的影响。结果表明,计算光谱与实验光谱符合很好,仅在几个局部峰值

与实验数据有较大偏差,而这可能是由于计算数据分辨率和实验数据分辨率不同造成的。总的看,本文得到参数是准确、可靠的。

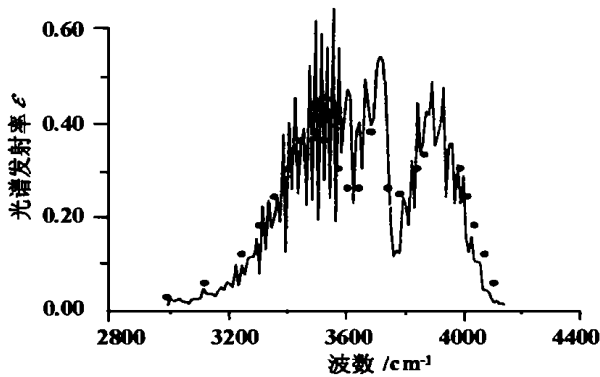


图 3 2.7 μ 带发射率计算值(—)与实验值^[9](°)比较

$P_{tot} = 0.0921 \text{ MPa}$, $X_{H_2O} = 0.621$, $T = 1273 \text{ K}$, $L = 12.72 \text{ cm}$

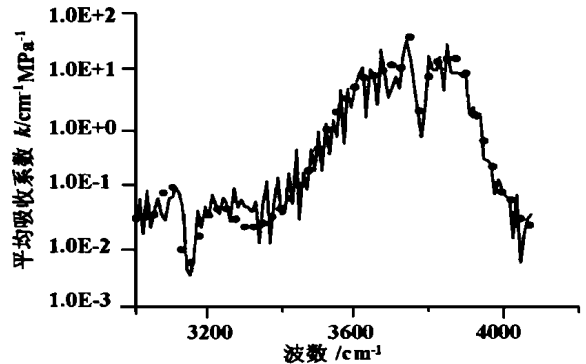


图 4 2.7 μ 吸收系数计算值(—)与 NASA 数据^[7](°)比较

$P_{tot} = 0.1 \text{ MPa}$, $T = 300 \text{ K}$

4 结 论

本文以最新的 HITEMP 数据库为基础计算得到了水蒸气 $50 \sim 10\,000 \text{ cm}^{-1}$ 光谱区间的谱带模型参数 k , $1/d$ 和 γ 数据表。通过与实验值比较表明本文所建立的数据表是可靠的,比 NASA 提供的数据表有了较大改进,使用起来也十分方便。特别是 $6.3 \mu\text{m}$, $2.7 \mu\text{m}$ 谱带的参数表对飞行器尾喷焰的红外目标特性计算很急需。由于篇幅所限,本文仅给出了 $2.7 \mu\text{m}$ 谱带的模型参数表,供工程计算引用,其它的模型参数收录在我们建立的尾喷焰气体分子红外辐射特性模型参数库中。

参 考 文 献:

[1] ROTHMAN L.S. The HITRAN molecular spectroscopic database and

HAWKS (HITRAN atmospheric workstation)[J]. *JQSRT*, 1998, **60** (5): 665—710.
 [2] YOUNG S.J. Nonisothermal band model theory[J]. *JQSRT*, 1976, **18**: 1—28.
 [3] 王福恒,王嵩薇.现代科学技术中的原子分子辐射理论[M].成都:成都科技大学出版社,1991.
 [4] FERRISO C.C., LUDWING C.B. Spectral emissivities and integrated intensities of the $2.7 \mu\text{m}$ H_2O band between 530 and 2200 K[J]. *JQSRT*, 1964, **4**: 215—227.
 [5] TORIN R.H., HENRY P.M. Infrared spectral emissivities and internal energy distributions of carbon dioxide and water vapor at high temperatures[R]. AFCRC-TR-60-203, Cambridge Massachusetts: The Warner and Swasey Co., 1959.
 [6] LUDWING C.B., MAIKMUS W., REARDON J.E., et al. Handbook of infrared radiation from combustion gases[R]. NASA—SP—3080, Hampton Virginia: Langley Research Center, 1973.

(何静芳 编辑)

(接 18 页)

(3) 混合物在热重分析中的燃烧特性可以用单组分的物质燃烧特性的叠加来表示。某些混合试样的组分之间会表现出有相互影响,但一般说来并不强烈。

参 考 文 献:

[1] 江淑琴.生物质燃料的燃烧与热解特性[J].太阳能学报, 1995, **16**(1): 40—47.
 [2] 陈镜泓,李传儒.热分析及其应用[M].北京:科学出版社,1985.
 [3] VALERIO Cozzani, LUIGI Petarca, LEONARDO Tognotti. De-

volatilization and pyrolysis of refuse derived fuels: characterization and kinetic modelling by a thermogravimetric and calorimetric approach [J]. *Fuel*, 1995, **74**(6): 903—912.
 [4] ROLANDO Zanzi. Rapid pyrolysis of agricultural residues at high temperature[A]. *4th Asian-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization*[C]. Thailand: Bangkok, 1997. 651—656.
 [5] 杨国清,刘康怀.固体废物处理工程[M].北京:科学出版社,2000.
 [6] JOSEPH L. Durante. Industrial waste and sludge fired FBC experience [A]. *Proceedings of the 12th International Conference Fluidized Bed Combustion*[C]. ASME, 1993. 743—749.

(复 编辑)

现代燃煤电站锅炉火焰检测综述 = **A Comprehensive Survey of Flame Detection Techniques Used in Modern Coal-fired Utility Boilers** [刊, 汉] / Hua Yan Ping, Zou Yu, Lu Zhen-zhong (Power Engineering Department, South-eastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 1 ~ 5

A comprehensive review is given of the flame detection techniques employed for modern coal-fired utility boilers, pinpointing some problems involved in their applications. Such problems include a small visual angle of the flame detection probe, a divergence between the static-state set values and actual operation dynamic ones, etc. The present paper focuses on some novel digital and image flame detection methods, which have emerged in recent years. The results of their practical application have confirmed their outstanding performance. After an assessment of their prospects for future development the authors have depicted a flame image detection system designed by them. **Key words:** utility boiler, furnace safety protection, flame detection, flame image, image flame detection

齿轮动态设计分析研究的现状及展望 = **Present Status and Future Prospects of the Analytic Research of Power Transmission Gear Dynamic Design** [刊, 汉] / Chang Shan, Wen Xue-you, Xu Zhen-zhong (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 6 ~ 10

A fairly comprehensive assessment is given of the present status of the analytic research on the dynamic design of power transmission gears both at home and abroad. In the light of the actual situation prevalent in China proposed in this paper are the major study objectives concerning the comprehensive transmission performance of gear units and the related key techniques. **Key words:** gear transmission, dynamic design, reliability design, modal experimental technique

循环流化床流体动力学研究进展 = **Recent Progress in the Study of Circulating Fluidized Bed Hydrodynamics** [刊, 汉] / Zhu Ting-yu, Xiao Yun-han (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 11 ~ 15
Discussed in this paper is the recent progress in the study both at home and abroad of circulating fluidized bed hydrodynamics. The overview has been focused on a variety of hot topics, such as the problem of circulating fluidized particle flow, particle agglomeration and heat transfer, and a circulating fluidization mathematical model, etc. In addition, some new development trends have been highlighted in the current study of circulating fluidized bed hydrodynamics. **Key words:** progress, hydrodynamics, circulating fluidized bed, mathematical model

城市固体废弃物的燃烧特性实验研究 = **Experimental Study of the Combustion Characteristics of Municipal Solid Waste** [刊, 汉] / Jiang Fan, Pan Zhong-gang, Jiang Shu-qin, Fang Jian-hua (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 16 ~ 18, 38

Through the use of thermogravimetry technology an experimental study was conducted of several typical components in city municipal solid waste, resulting in the determination of the combustion characteristics of mixed solid waste in a thermogravimeter. Furthermore, a fruitful discussion has been carried out regarding the mechanism of mixed burning of city solid waste. **Key words:** thermogravimetric analysis, municipal solid waste, combustion characteristics

W 型火焰锅炉冷态空气动力特性的测试研究 = **Experimental Study of the Cold-state Aerodynamic Characteristics of a W-shaped Flame Boiler** [刊, 汉] / Che Gang, Xu Tong-mo, Hui Shi-en (Thermal Energy Engineering Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 19 ~ 22

A study on a cold-state model of aerodynamic characteristics was conducted of a W-shaped flame boiler equipped with a