

农药生产废渣燃烧/热解特性研究

李春雨, 蒋旭光, 安春国, 费振伟, 池涌, 严建华
(能源清洁利用国家重点实验室(浙江大学), 浙江省 杭州市 310027)

Combustion and Pyrolysis Characteristics of Pesticide Residue

LI Chun-yu, JIANG Xu-guang, AN Chun-guo, FEI Zhen-wei, CHI Yong, YAN Jian-hua

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization (Zhejiang University), Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: The pyrolysis and combustion characteristics of pesticide residue were investigated using thermogravimetric analysis(TGA) in the atmosphere of nitrogen and air. The heating rate profile of 30 °C/min was applied. The results indicate that the entire combustion process under the experimental conditions of this investigation consists of two distinct stages: 150-400 °C and 400-600 °C. Around 96% of total combustion degradation was finished before 600 °C. It is found that there was a superposition phenomenon between the first stage of combustion and the pyrolysis. The kinetic parameters and the mechanism function were obtained by using the Achar method, which indicates that the kinetic function of pyrolysis mechanism is in perfect accordance with the first stage of combustion process. The gaseous products evolving from pyrolysis of pesticide residue were investigated using thermogravimetric analysis in conjunction with Fourier transform infrared spectroscopy (TG-FTIR) at the heating rate of 30 °C/min. The results show that SO₂ is the main gaseous product in the temperature range of 300~ 600 °C, accompanied with a little amount of other gases such as CO₂ and H₂O, and CO emitted at high temperature during pyrolysis. It was found that the emitted of SO₂ was accelerated by O₂. The nitrogen-containing gaseous product was NH₃ at a lower temperature during combustion of pesticide residue, and HCN is emitted as the main nitrogen-containing gaseous product at high temperature during pyrolysis.

KEY WORDS: pesticide residue; pyrolysis; combustion; thermogravimetric analysis-Fourier transform infrared spectrometer; activation energy

基金项目: 国家863计划重点项目(2007AA061302,2007AA06Z336); 浙江省重大科技专项项目(2007C13084); 浙江省自然科学基金项目(X506312, R107532); 浙江省科技计划项目(2008C23090); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0524)。

The National High Technology Research and Development Key Program of China(2007AA061302, 2007AA06Z336).

摘要: 在 30 °C/min升温速率下, 利用热重分析方法对农药生产废渣热解和燃烧过程进行了分析, 发现农药废渣燃烧过程可以分为两个阶段: 150~400 °C和 400~600 °C。在 600 °C 时, 农药废渣的燃烧反应程度已经达到了 96%。农药废渣热解和燃烧过程的第 1 个失重阶段基本重合。利用Achar法求得了农药废渣燃烧和热解过程的反应机理函数, 以及表观动力学参数。分析发现热解与燃烧第 1 阶段的反应机理函数相同。利用热重-傅里叶变换红外光谱分析对 30 °C/min升温速率下农药废渣热解和燃烧过程中的气体析出情况进行了分析, 发现农药废渣热解过程中, 有大量的SO₂析出, SO₂的析出集中在 300~600 °C区间内, 在此区间内, 还有少量的CO₂和H₂O析出, CO的析出主要在高温段发生。对燃烧条件下的FTIR分析表明, 氧气的存在使得SO₂的析出提前, 农药废渣中的N在较低温度下以NH₃的形式释放, 而在热解条件下, 农药废渣中的N的释放主要是高温区生成的HCN。

关键词: 农药废渣; 热解; 燃烧; 热重-傅里叶变换红外光谱分析; 活化能

0 引言

危险废物来源于工业生产, 如果不对其进行妥善管理和安全处置, 会对人类健康和环境严重威胁, 甚至造成生态灾难^[1]。

焚烧曾经被认为是最好的处理方式, 也是我国危险废物处理的推荐方法。但在控制措施不当的情况下, 危险废物的燃烧过程中可能产生大量的二恶英等持久性有机污染物^[2], 燃烧产生的高温还会导致危险废物中的重金属成分挥发, 以及大量细小颗粒的产生, 增加了烟气处理成本^[3], 所以发达国家对危险废物的焚烧处理做了严格规定^[4-5]。2005 年中国工业危险废物产生量达到 1 162 万吨^[6]。2008 年 8 月起新执行的《国家危险废物名录》按照不同行业来源, 将工业生产中的危险废物分为 49 类,

农药废物属于HW04, 农药废物又分为12种, 包括农药生产过程中产生的废弃物和失效农药, 危险特性等级都为T级。这些废弃物几乎都不能被自然降解, 而且可以通过生物链累积, 并以各种途径传播^[7], 必须对其进行无害化处理。

热解是缺氧(或无氧)条件下的热处理, 对危险废物进行高温热解不但可以破坏其分子结构, 实现无害化, 还可以从固体危险废弃物中制取燃料油、活性炭等资源^[8-14]。不同的预处理工艺^[15]和催化剂都会对热解产生影响, 在众多影响因素中, 温度是危险废物处置过程中污染物产生的决定因素^[16-18]。

虽然不同物料混合热解会对污染物的排放产生影响^[19], 但也有研究表明有机废物热解过程中, 混合组分间影响很小^[20-21], 在热重分析中的燃烧特性可以用各个单一组分试样的燃烧特性进行叠加来表示^[22]。所以对不同危险废物进行热解和燃烧特性的研究具有重要意义。对有机废弃物的研究发现, 燃烧和热解在挥发分析出阶段有很大的相似性^[23], 热重分析也显示有机组分的燃烧和热解初期阶段的DTG曲线基本重合^[24], 但氧气的存在使得燃烧反应程度通常比热解和气化更为剧烈^[25]。本文用TGA对生物农药生产过程中的废渣进行燃烧和热解试验研究, 并利用热重-傅里叶变换红外光谱分析(thermogravimetric analysis in conjunction with Fourier transform infrared spectrometer, TG-FTIR)对农药生产废渣热解和燃烧过程中的气体析出过程进行分析, 为农药生产废渣的无害化热处置提供相应支持。

1 试验

试验采用的仪器是Nicolet NETXUS 670型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)和梅特勒-托利多TGA/SD—TA851e热重分析(TGA)仪。热重分析仪的温度范围可以实现室温~1600℃, 温度准确度±0.25℃, 温度重复性±0.15℃, 线性升温速率0.01~100℃/min, 冷却速率25 min(LF1600℃), 冷却方式为水浴槽冷却, 样品测量范围: 0~5000mg, 灵敏度0.01μg, 样品最大容量900μL, SDTA分辨率0.005℃, 传感器为R型热电偶, DSC数据量热准确度±5%。

TG-FTIR联用是将热天平出口与FTIR用一根聚四氟乙烯管联接, 并把聚四氟乙烯管和红外气体池预热到180℃。热解产生的气体将通过高纯氮气带入FTIR气体池分析, Nicolet NETXUS 670型傅里

叶变换红外光谱的光谱范围为4000~400cm⁻¹, 试验设定分辨率为4cm⁻¹。

试验所分析农药废渣来自浙江省北部某生物农药、兽药生产公司, 样品在105℃下烘干并研磨, 试样工业分析和元素分析如表1所示。TG试验中, 放入试样质量9mg左右, 气体流量60mL/min, 升温速率30℃/min(超过1000℃以后, 升温速率为10℃/min), 试验温度范围50~1200℃。

表1 农药废渣工业分析和元素分析

Tab. 1 Proximate analysis, ultimate analysis of the sample

| 工业分析/% | | | | 元素分析/% | | | | | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------|--|
| M _{ad} | A _{ad} | V _{ad} | FC _{ad} | C _{ad} | H _{ad} | N _{ad} | S _{ad} | O _{ad} | Cl | |
| 3.7 | 7.85 | 67.31 | 21.14 | 36.27 | 3.76 | 4.89 | 7.86 | 35.67 | 1.19 | |

2 试验结果与分析

2.1 TG试验结果分析

图1是农药废渣在空气和氮气气氛下30℃/min升温速率时失重/失重速率(thermogravimetric/differential thermogravimetric, TG/DTG)曲线的比较。可以发现, 农药废渣的燃烧主要包括2个失重阶段, 分别在150~400℃和400~600℃区间, 1200℃试验结束时, 仍有8.6%的固体残余物, 600℃时燃烧完全程度已经达到96%, 可以认为燃烧基本完成。农药废渣的热解过程只有一个明显失重区间, 而且该区间与燃烧的第1个失重过程基本重合, 此后以较低的速率持续失重, 直到试验温度结束。

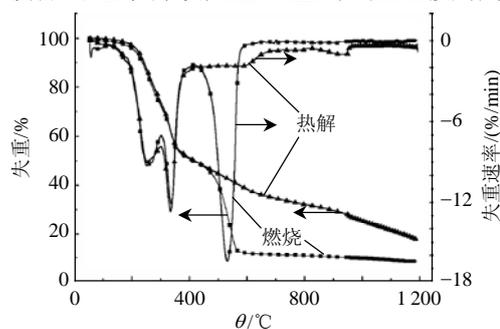


图1 农药生产废渣燃烧/热解TG/DTG曲线
Fig. 1 TG/DTG of pyrolysis and combustion of pesticide residue

虽然400℃以后农药废渣的热解没有明显失重峰, 但农药废渣在400℃之后的热解过程仍然表现出阶段性: 400~600℃区间内, 失重速率较为稳定, 然后失重行为开始变缓, 直到830℃以后出现一个较小的失重峰, 由于相同条件下的燃烧过程中, 830℃左右的温度区间并没有失重峰出现, 可以认为该失重峰并不是无机物的分解造成的, 而是由于热解生成焦炭的进一步裂解。农药废渣在150~400℃温度

区间内的失重主要是挥发分的析出, 温度继续升高后, 农药废渣的失重过程为固体残留物在高温下进一步裂解的结果, 所以直到试验结束, 热解的失重过程仍未结束。温度达到 1200 °C 时, 燃烧固体残余物为 8.43%, 而热解的固体残余物为 17.63%, 即使在 1200 °C 高温下热解, 农药废渣中仍有 50% 左右的可燃物。如果热解温度选择 800 °C, 热解固体残余物中将有 70% 左右的可燃成分, 所以农药废渣热解后还需进行焚烧处理。

2.2 农药废渣热解和燃烧的动力学分析

采用Achar法对热分解的非等温动力学数据进行分析, 推断可能的热分解反应机理模式。使用的Achar方程如(1)式所示^[26]:

$$\ln\left(\frac{d\alpha/dt}{f(\alpha)}\right) = \ln A - \frac{E}{RT} \quad (1)$$

将 30 种常见机理函数的微分形式 $f(\alpha)$ 代入(1)式中, 以 $\ln((d\alpha/dt)/f(\alpha))$ 对 $1/T$ 用最小二乘法对燃烧和热解 TG 数据进行计算, 求得不同机理函数时农药废渣热解和燃烧过程中的动力学参数表观活化能 E 、表观频率因子 A 、及相关系数 R , 相关系数最好的即为最佳机理函数。表 2 列出了农药废渣热解/燃烧动力学机理函数和动力学参数, 可以发现, 农药废渣的热解与燃烧的第 1 失重区间具有相同的反应机理函数, 可以认为燃烧是氧气存在条件下的热解, 而且氧的存在促进了热解反应的进行, 所以

表 2 农药废渣热解/燃烧动力学机理函数和动力学参数

Tab. 2 Thermal decomposition kinetics parameters and the mechanism functions during the pyrolysis and combustion of pesticide residue

| 项目 | 温度区间/°C | 机理 | $f(\alpha)$ | 函数名称 | $E/(kJ/mol)$ | A/s^{-1} | R |
|----|---------|------|---|--------------------------------|--------------|--------------------|-----------|
| 热解 | 136~407 | 三维扩散 | $3/2(1-\alpha)^{4/3}[(1-\alpha)^{-1/3}-1]^{-1}$ | 反 Jander 方程 | 93.08 | 3.13×10^7 | -0.994 78 |
| 燃烧 | 136~407 | 三维扩散 | $3/2(1-\alpha)^{4/3}[(1-\alpha)^{-1/3}-1]^{-1}$ | 反 Jander 方程 | 80.02 | 1.32×10^6 | -0.992 81 |
| | 417~563 | 三维扩散 | $(1-\alpha)$ | Zhuralev-Lesokin-Tempelmann 方程 | 133.45 | 2.54×10^9 | -0.984 21 |

该温度区间燃烧的表现活化能要略低于热解过程, 分别为 80.02 和 93.08 kJ/mol。

2.3 FTIR 结果分析

图 2 的三维谱图显示了 30 °C/min 升温速率下农药废渣热解过程中气体释放情况。从图中可以发现比较突出的是 SO_2 (波数 1373 cm^{-1} 位置)。对农药废渣热解 FTIR 谱图进行分析可以发现, 农药废渣热解过程中, 从 240 °C 开始便有 SO_2 析出, 此后一直到 800 °C 左右, 主要的热解产物都为 SO_2 , 从 640 °C 左右开始, 有 HCN (波数 712 cm^{-1} 位置) 析出, CO 的析出主要在热解反应的高温段, 是热解高温段的主要气体产物。

由于热解过程在 337 °C 时失重速率达到最大值, HCN 的析出在 640 °C 以后才开始, 所以选择 337 °C 以及 710 °C 时的红外谱图进行分析(如图 3 所

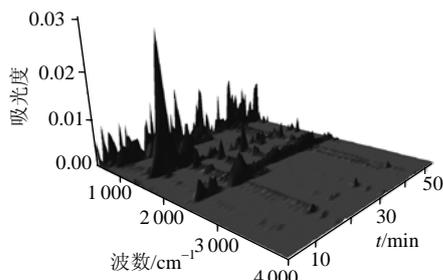


图 2 农药废渣热解 FTIR 三维谱图
Fig. 2 3-D FTIR spectrum during pyrolysis of pesticide residue

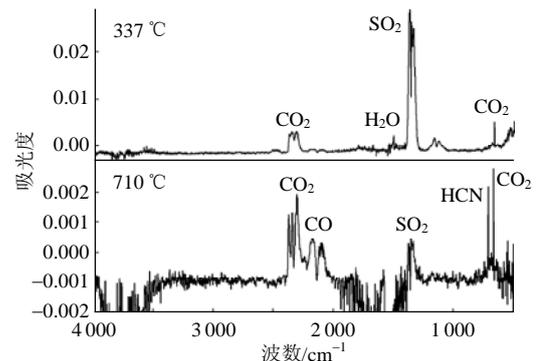


图 3 热解条件下 337 和 710 °C 时刻红外谱图
Fig. 3 FTIR spectrum during pyrolysis of pesticide residue at 337 and 710 °C

示)。从图 3 中可以发现, 在 337 °C 时, 农药废渣的热解产物主要是 SO_2 , 并伴随少量 CO_2 和 H_2O 。在氮气气氛下仍然生成大量 SO_2 , 其 O 应来自于农药废渣中较高的 O 含量。710 °C 左右时, SO_2 的释放基本结束, 此时农药废渣的热解气体产物中仅有少量的 SO_2 , 较为明显的是 HCN, 以及固体残渣在进一步高温下生成的 CO, 和少量的 CO_2 气体。

图 4 显示了 SO_2 , HCN, CO, CO_2 等气体在农药废渣的热解过程中析出强度随时间的变化情况。从图 4 可以明显看出, SO_2 的产生主要集中在 300~600 °C 的区间内, HCN 的产生则集中在 700~900 °C 的区间内, CO 的释放主要在高温段发生, 与 CO_2 的释过程相反, 进入高温区以后, CO_2 的释放强

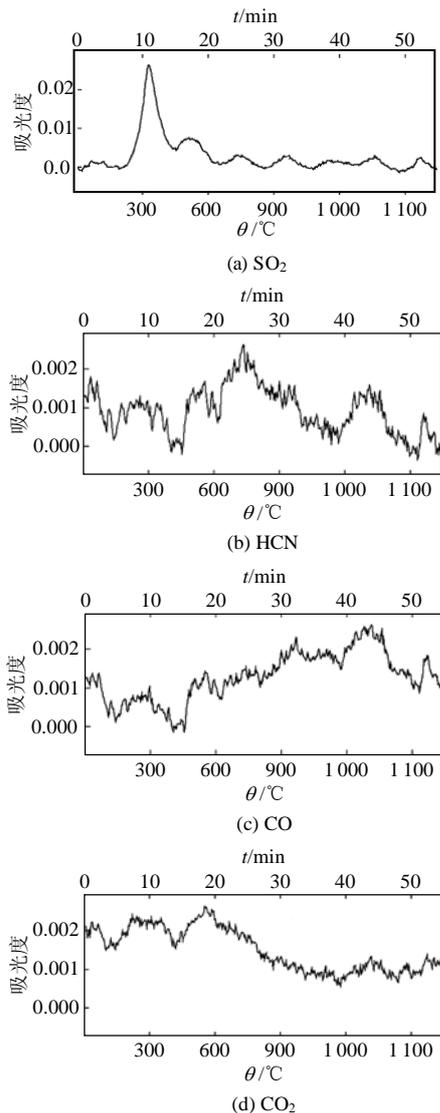


图4 农药废渣主要热解气体随时间/温度析出情况
Fig. 4 Emission of the main gaseous products with temperature during the pyrolysis of pesticide residue

度开始降低。

图5是农药废渣在30℃/min升温速率条件下燃烧气体生成物的三维FTIR谱图,可以发现在该谱图中较为突出的是在燃烧进入高温段产生的CO₂(2359 cm⁻¹)气体,与热解工况不同,在燃烧阶段产生的HCN气体较少,SO₂的释放大部分在380℃以前完成,在燃烧条件下超过410℃以后,生成气体主要由CO₂组成。

图6是农药生产废渣在燃烧工况下DTG峰值336℃和535℃时刻红外谱图,可以发现在燃烧DTG第1个峰值时刻析出气体与热解条件下生成气体基本相同。在燃烧到达第2个失重峰时,生成气体主要为CO₂, H₂O, 以及少量的CO。

图7是农药生产废渣在燃烧工况下SO₂, CO₂

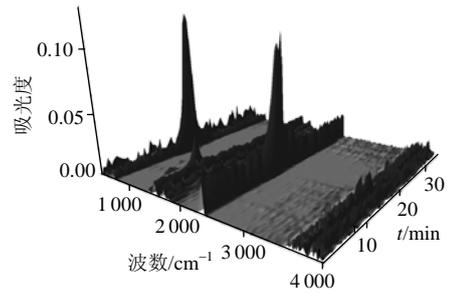


图5 农药废渣燃烧 FTIR 三维谱图
Fig. 5 3-D FTIR spectrum during combustion of pesticide residue

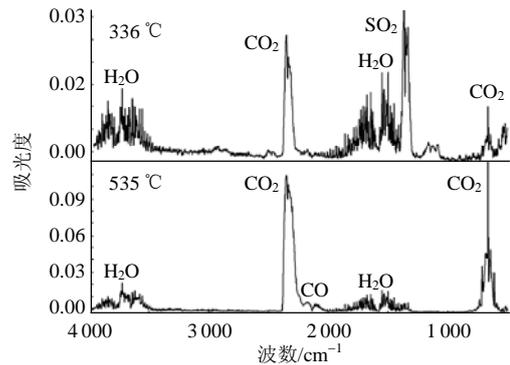


图6 农药废渣燃烧336和535℃时刻红外谱图
Fig. 6 FTIR spectrum during combustion of pesticide residue at 336 and 535℃

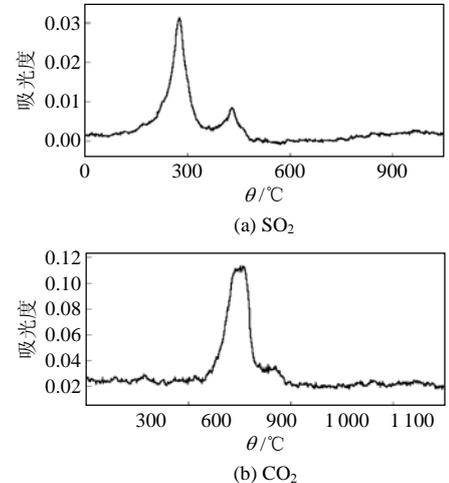


图7 农药废渣主要燃烧气体随时间/温度析出情况
Fig. 7 Emission of the main gaseous products with temperature during the combustion of pesticide residue

析出强度随温度变化情况。可以发现,与热解不同的是在燃烧条件下300~600℃有明显的CO₂存在,表明农药废渣的燃烧过程主要在此阶段完成。燃烧条件下SO₂的析出温度区间也较热解条件下有明显提前,表明氧气的存在使得反应更加剧烈,并使硫的污染物生成提前,与文献[25]的结果一致。燃烧条件下的红外分析还发现,农药废渣中的N在350℃以NH₃形式析出,与热解条件下农药废渣中的N

在高温区以HCN形式析出有较大区别。

3 结论

利用 TG-FTIR 对某生物农药、兽药生产公司的农药生产残渣进行燃烧和热解分析, 得到以下结论:

1) 农药废渣燃烧过程可以分为 150~400 °C 和 400~600 °C 2 个阶段, 在 600 °C 时, 农药废渣的燃烧反应程度已经达到了 96%。

2) 农药废渣的热解只有一个明显的挥发分析出峰, 而且农药废渣的热解过程和燃烧的第 1 个失重阶段基本重合。

3) 利用 Achar 法确定了农药废渣燃烧和热解过程的反应机理函数, 以及表观动力学参数, 而且热解和燃烧第 1 阶段的反应机理函数相同。动力学分析表明, 氧气的存在降低了农药废渣挥发分析出过程的表观活化能。

4) 30 °C/min 升温速率下农药废渣热解过程中有大量的 SO₂ 产生, SO₂ 的生成主要集中在 300~600 °C 的区间内, 当温度继续升高, 在 700~900 °C 的区间内出现了 HCN 的析出。

5) 农药废渣热解过程中, CO 的析出主要在高温段发生, CO₂ 则出现在相对应的低温段。

6) 燃烧条件下, 农药残渣中的 S 以 SO₂ 的形式析出, 且氧气的存在使得农药废渣中 S 的析出提前, SO₂ 的析出大部分在 380 °C 以前基本完成。

7) 燃烧条件下, 农药废渣中的 N 以 NH₃ 的形式在低温段析出。

参考文献

- [1] Saxena S C, Jotshi C K. Management and combustion of hazardous wastes[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1996, 22(5): 401-425.
- [2] 严建华, 陈彤, 谷月玲, 等. 垃圾焚烧炉飞灰中二噁英的低温热处理试验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(23): 95-99.
Yan Jianhua, Chen Tong, Gu Yueling, et al. experimental study on low temperature thermal treatment of PCDD/Fs in fly ash[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(23): 95-99(in Chinese).
- [3] 孙路石, 陆继东, 李敏, 等. 垃圾焚烧中 Cd、Pb、Zn 挥发行为的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(8): 157-161.
Sun Lushi, Lu Jidong, Li Min, et al. Volatilization of Cd, Pb, and Zn during incineration of municipal solid waste[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(8): 157-161(in Chinese).
- [4] Chris S H, Michael H, Torin J, et al. Development of a metabolism factor for polycyclic aromatic hydrocarbons for use in multipathway risk assessments of hazardous waste combustion facilities[J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2001, 33(1): 60-65.
- [5] Slack R J, Gronow J R, Voulvoulis N. The management of household hazardous waste in the United Kingdom[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(1): 6-42.
- [6] Duan Huabo, Huang Qifei, Wang Qi, et al. Hazardous waste generation and management in China: A review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 158(2-3): 221-227.
- [7] Doan T T, Nguyen H H, Tao M Q, et al. Environmentally sound destruction of obsolete pesticides in developing countries using cement kilns[J]. *Environmental Science & Policy*, 2006, 9(6): 577-586.
- [8] Marco I, Caballero B M, Cabrero M A, et al. Recycling of automobile shredder residues by means of pyrolysis[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2007, 79(1-2): 403-408.
- [9] Chang C Y, Shie J L, Lin J P, et al. Major products obtained from the pyrolysis of oil sludge[J]. *Energy & Fuels*, 2000, 14(6): 1176-1183.
- [10] Travis F, Mohammad H, Bruce W, et al. Pyrolysis behavior and kinetics of biomass derived materials[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2002, 62(2): 331-349.
- [11] Liu Jianguo, Jiang Xiumin, Zhou Lingsheng, et al. Pyrolysis treatment of oil sludge and model-free kinetics analysis[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161(2-3): 1208-1215.
- [12] 宋薇, 刘建国, 聂永丰. 含油污泥的热解特性研究[J]. *燃料化学学报*, 2008, 36(3): 286-290.
Song Wei, Liu Jianguo, Nie Yongfeng. Pyrolysis properties of oil sludge[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2008, 36(3): 286-290(in Chinese).
- [13] Marco R I, Laresgoiti M F, Cabrero M A, et al. Pyrolysis of scrap tyres[J]. *Fuel Processing Technology*, 2001, 72(1): 9-22.
- [14] Meng Meng, Hu Haoquan, Zhang Qiumin, et al. Pyrolysis behaviors of tumuji oil sand by thermogravimetry (TG) and in a fixed bed reactor[J]. *Energy & Fuels*, 2007, 21(4): 2245-2249.
- [15] Boudou J P, Bimer J, Salbut P D, et al. Effects of methanol-NaOH treatment of coal on tar and gas formation during pyrolysis[J]. *Fuel*, 1995, 74(6): 846-852.
- [16] Encinar J M, Beltran F J, Ramiro A, et al. Pyrolysis/gasification of agricultural residues by carbon dioxide in the presence of different additives: influence of variables[J]. *Fuel Processing Technology*, 1998, 55(3): 219-233.
- [17] 王爽, 王宁, 于立军, 等. 海藻的热解特性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(14): 102-106.
Wang Shuang, Wang Ning, Yu Lijun, et al. Analysis on pyrolysis characteristics of seaweed[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(14): 102-106(in Chinese).
- [18] 谭中欣, 严建华, 蒋旭光, 等. 染料残渣焚烧过程中 HCl 的排放特征及其对重金属形态转化的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(5): 13-17.
Tan Zhongxin, Yan Jianhua, Jiang Xuguang, et al. HCl emission and its influence on the transformation of heavy metals' speciation during the incineration of dyestuff residue[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(5): 13-17(in Chinese).
- [19] 尚琳琳, 程世庆, 张海清, 等. 生物质与煤混合热解时硫化氢的析出特性[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(10): 1079-7083.
Shang Linlin, Cheng Shiqing, Zhang Haiqing, et al. Characteristics of hydrogen sulphide released from coal and biomass blends during co-pyrolysis[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(10): 1079-7083(in Chinese).

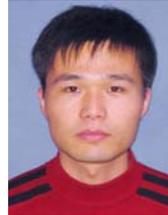
- [20] 祝红梅, 蒋旭光, 池涌, 等. 热重-红外联用分析医疗垃圾的热动力学特性[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(3): 519-522.
Zhu Hongmei, Jiang Xuguang, Chi Yong, et al. Study on kinetic characteristic of medical waste by using TG-FTIR analysis[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(3): 519-522(in Chinese).
- [21] 严建华, 祝红梅, 蒋旭光, 等. 医疗垃圾多组分热解气化特性[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2008, 42(5): 885-889.
Yan Jianhua, Zhu Hongmei, Jiang Xuguang, et al. Pyrolysis and gasification characteristic of multi-component medical waste[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2008, 42(5): 885-889(in Chinese).
- [22] 王裕明, 胡建红, 冉景煜, 等. 混合工业污泥燃烧及动力学特性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(17): 44-50.
Wang Yuming, Hu Jianhong, Ran Jingyu, et al. Experimental study on combustion and kinetic characteristics of mixed industrial sludge [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(17): 44-50(in Chinese).
- [23] Fuentes M J, Font R, Gómez-Rico M F, et al. Pyrolysis and combustion of waste lubricant oil from diesel cars: decomposition and pollutants[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2007, 79(1-2): 215-226.
- [24] Conesa J A, Fullana A, Font R. Thermal decomposition of meat and bone meal[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2003, 70(2): 619-630.
- [25] 王俊琪, 方梦祥, 骆仲泱, 等. 煤的快速热解动力学研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(17): 18-22.
Wang Junqi, Fang Mengxiang, Luo Zhongyang, et al. Research on fast thermolysis kinetics of coal[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(17): 18-22(in Chinese).
- [26] 胡荣祖, 高胜利, 赵凤起, 等. 热分析动力学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2008: 116-117.

收稿日期: 2008-11-19。

作者简介:

李春雨(1980—), 男, 河南南阳人, 博士研究生, 主要从事固体废弃物资源化利用及燃烧过程中污染物排放控制的研究;

蒋旭光(1965—), 男, 浙江缙云人, 教授, 博士生导师, 主要从事洗煤泥、洗煤泥煤矸石混烧、污泥、城市生活垃圾、医疗垃圾以及危险废物等废弃物焚烧技术研究, 本文通讯联系作者, jiangxg@zju.edu.cn。



李春雨

(责任编辑 王庆霞)