

研究论文

热重-红外联用分析制革污泥的燃烧特性

李春雨¹, 蒋旭光¹, 费振伟¹, 安春国¹, 池 涌¹, 严建华¹,
俞 恺², 傅娟娟², 潘金华², 施 政²

(¹ 能源清洁利用国家重点实验室(浙江大学), 浙江 杭州 310027;

² 湖州市工业和医疗废物处置中心有限公司, 浙江 湖州 313000)

摘要: 利用 TG-FTIR 对制革污泥的燃烧特性和燃烧过程气体释放情况进行了研究。研究发现, 制革污泥挥发分和灰分含量较高, 固定碳含量低、热值低。不同升温速率下, 制革污泥的燃烧在 800℃ 时已经比较充分, 随着升温速率的增加, 制革污泥碳燃烧的失重速率和峰值温度有所增加。运用 Ozawa 法进行活化能计算表明, 制革污泥燃烧所需活化能随着反应程度的深入而增加。制革污泥的挥发分燃烧阶段符合三维扩散的 Z-L-T 方程反应模型, 固定碳燃烧阶段符合自催化反应的 P-T 方程反应模型, 且制革污泥在不同升温速率下燃烧动力学参数存在动力学补偿效应。TG-FTIR 分析表明, 不同升温速率对气体析出基本特征没有影响, 在低温阶段, 制革污泥的燃烧产物中有少量的有机酸组分析出。

关键词: 制革污泥; 热重-红外联用; 燃烧; 动力学特性; 活化能

中图分类号: X 705

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2010) 05-1301-06

TG-FTIR analysis on combustion characteristics of tannery sludge

LI Chunyu¹, JIANG Xuguang¹, FEI Zhenwei¹, AN Chunguo¹, CHI Yong¹, YAN Jianhua¹,
YU Kai², FU Juanjuan², PAN Jinhua², SHI Zheng²

(¹ State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China;

² Huzhou Industry and Hospital Waste Treatment Center Co., Ltd., Huzhou 313000, Zhejiang, China)

Abstract: The combustion and emission characteristics of tannery sludge at different heating rates were investigated by using thermogravimetric analysis-Fourier transform infrared spectrometer (TG-FTIR). It was found that the original tannery sludge contained high contents of volatile mater and ash while low content of fixed carbon, and had a low calorific value. The combustion of combustible matter in tannery sludge almost finished before 800℃. The Ozawa method was used to analyze the activation energy of tannery sludge combustion, and it was found that the activation energy in the tannery sludge combustion process increased with the extent of combustion reaction. The combustion of volatile matter in tannery sludge followed the three-dimensional diffusion model and Z-L-T equation was the most probable kinetic function, and the combustion of fixed carbon followed the self-catalyzed reaction and P-T equation was the most probable kinetic function. It was found that kinetic compensation relationship existed between

2009-10-25 收到初稿, 2010-01-07 收到修改稿。

联系人: 蒋旭光。第一作者: 李春雨 (1980—), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家高技术研究发展计划重点项目 (2007AA061302, 2007AA06Z336); 浙江省重大科技专项 (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)。

Received date: 2009-10-25.

Corresponding author: Prof. JIANG Xuguang, jiangxg@zju.edu.cn

Foundation item: supported by the High-tech Research and Development Program of China (2007AA061302, 2007AA06Z336).

combustion activation energy and pre-exponential factor at different heating rates. Some organic gaseous product emitted at the low temperature stage during tannery combustion.

Key words: tannery sludge; thermogravimetric analysis-Fourier transform infrared spectrometer; combustion; kinetic characteristics; activation energy

引 言

2008 年我国成品革产量 6.4 亿平方米, 占世界 20% 左右, 制革行业年废水排放量约 1.2 亿吨, 大量制革污泥需要处理。由于含有丰富的有机质, 制革污泥曾被广泛用作农业肥料, 但污泥中的重金属会对土壤造成严重污染^[1], 随着环境政策越来越严格, 采用堆肥处理的污泥将越来越少^[2]。焚烧已经成为最有发展前景的污泥处置方法^[3], 焚烧不但可以彻底消除污泥中的有机物和病原体, 在实现污泥的减量化、无害化处理的同时, 还可以实现部分热能的回收。污泥通常具有较高的挥发分和灰分含量, 虽然热值较低, 但具有较好的着火和燃尽特性^[4], 研究发现污泥的燃烧过程中起主要作用的是挥发分的燃烧^[5], 由于灰分含量较高, 污泥燃烧高温阶段存在明显的无机盐分解^[6]。

通过热重实验研究来判断燃料特性, 并进行动力学分析已经成为燃料特性研究的一种重要手段^[7-10], 但目前对制革污泥燃烧特性的研究尚少。浙江省是皮革生产大省, 堆积的大量制革污泥已经成为环境隐患, 本文利用热重-红外联用方法对取自浙江温州某制革污水处理厂的污泥进行燃烧特性研究和动力学分析, 并对燃烧过程气体释放情况进行分析, 为制革污泥的焚烧处理提供参考。

1 实验方法与样品

实验采用的仪器是 Nicolet NETXUS 670 型傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR) 和梅特勒-托利多 TGA/SD—TA851^o 热重分析 (TGA) 仪。热天平出口与 FTIR 用聚四氟乙烯管连接, 并把连接管和红外气体池预热到 180℃, 燃烧产生的气体被带入

FTIR 气体池分析。

污泥样品在 105℃ 下烘干后研磨, 试样工业分析和元素分析如表 1 所示。可以发现, 制革污泥中含有较高的挥发分和灰分, 但固定碳含量较低, 导致制革污泥的热值较低。热重实验中放入试样 15 mg 左右, 空气流量 60 ml · min⁻¹, 升温速率采用 10、30、50℃ · min⁻¹, 实验温度范围 50~950℃。

2 实验结果与分析

2.1 TG 实验结果分析

由于升温速率对燃烧有重要影响^[11-12], 所以本文在 10、30、50℃ · min⁻¹ 三个升温速率下对制革污泥的燃烧进行研究, 图 1 是制革污泥在不同升温速率下失重 (thermogravimetric, TG) 曲线, 可以发现随着升温速率的提高, 制革污泥的燃烧过程有向高温区偏移的趋势。在三个升温速率下, 制革污泥燃烧最终失重份额几乎完全相同, 热重分析显示, 在 800℃ 时制革污泥燃烧反应程度已经达到 98%。

图 2 是制革污泥燃烧失重速率 (differential thermogravimetric, DTG) 曲线, 根据制革污泥失重速率随温度的变化, 可以发现其燃烧过程主要包括挥发分的析出和燃烧以及固定碳燃烧两个阶段, 挥发分燃烧阶段持续时间长, 温度范围较宽, 制革污泥在燃烧过程中的大部分失重都在挥发分燃烧阶段完成, 这与其他学者的研究相同^[5]。从图 2 还可以发现, 制革污泥燃烧过程的最大失重速率出现在固定碳燃烧阶段, 且固定碳的燃烧时间较为集中。由于大部分污泥中有机组分含量较低, 所以污泥的固定碳燃烧阶段并不明显, 而且占燃烧总失重份额较低^[4,6], 与其他污泥相比, 制革污泥中有机

表 1 制革污泥工业分析和元素分析
Table 1 Proximate analysis and ultimate analysis of sample

Approximate analysis/%					Ultimate analysis/%				
M _{ad}	A _{ad}	V _{ad}	FC _{ad}	Q _{b,ad} /kJ · kg ⁻¹	C _{ad}	H _{ad}	N _{ad}	S _{t,ad}	O _{ad}
0.14	47.56	42.45	9.85	8.52	25.08	3.02	1.27	0.26	22.67

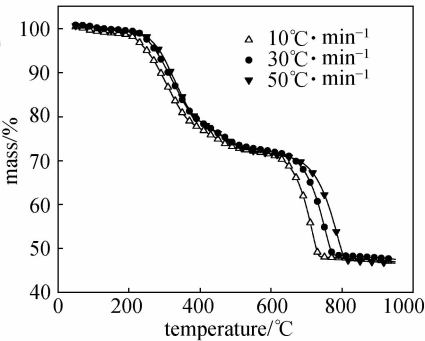


图1 制革污泥在不同升温速率下的燃烧失重曲线

Fig.1 TG curves of tannery sludge at different heating rate

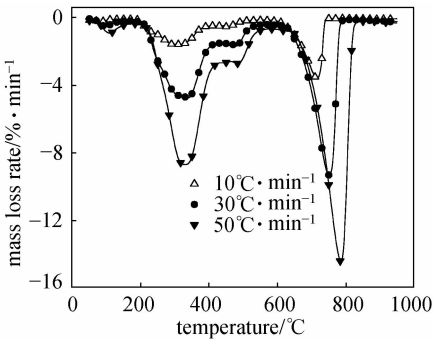


图2 制革污泥在不同升温速率下的燃烧失重速率曲线

Fig.2 DTG curves of tannery sludge at different heating rate

组分含量较高，所以在本实验中固定碳燃烧阶段有较明显的失重现象。

为便于比较不同升温速率对制革污泥燃烧的影响，将不同升温速率 β 下制革污泥燃烧的主要特征参数在表2中列出， $\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_{\max1}$ 和 $\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_{\max2}$ 分别为挥发分及固定碳燃烧阶段最大失重速率， $T_{\max1}$ 和 $T_{\max2}$ 为最大失重速率的对应峰值温度， W_f 为反应结束时最终失重率。从表2可以发现，随着实验中升温速率的提高，挥发分燃烧阶段和固定碳燃烧阶段最大失重速率都明显增加，但随着升温速率的提高，增速有所降低。燃烧升温速率从 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 增加到 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ，挥发分燃烧阶段和固定碳燃烧阶段的最大失重速率分别增加了200%和160%，而从 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 增加到 $50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ，则增加了80%和50%，升温速率增加，热失重峰值对应温度也有增加的趋势。

2.2 动力学及机理函数的分析

2.2.1 Ozawa 法计算活化能 采用 Ozawa 法可以根据多组不同升温速率下的热重实验结果，避开反

表2 制革污泥燃烧特性参数
Table 2 Characteristic parameters of tannery sludge combustion

β / $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$	$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_{\max1}$ / $\% \cdot \text{min}^{-1}$	$T_{\max1}$ / $^{\circ}\text{C}$	$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_{\max2}$ / $\% \cdot \text{min}^{-1}$	$T_{\max2}$ / $^{\circ}\text{C}$	W_f / $\%$
10	-1.576	300	-3.571	715	53.21
30	-4.733	338	-9.319	751	52.81
50	-8.691	330	-14.449	785	53.65

应机理函数的选择而直接求出燃烧反应活化能 E 值，由此可以避开选择反应机理函数带来的误差，所以 Ozawa 法计算活化能 E_{Ozawa} 常被用来验证由假设的反应机理函数所得活化能值。

根据 Ozawa 公式^[13]

$$\lg\beta = \lg\left(\frac{AE}{RG(\alpha)}\right) - 2.315 - 0.4567\frac{E}{RT} \tag{1}$$

式中 β 为升温速率， $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ； A 为表观频率因子， s^{-1} ； E 为表观活化能， $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ； α 为反应程度， $\%$ ， $\alpha = \frac{m_0 - m}{m_0 - m_{\infty}}$ ，其中 m_0 为初始质量， m 为 TG 曲线上某时刻的质量， m_{∞} 为反应终温剩余质量； R 为气体常数， $8.314\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ； $G(\alpha)$ 是积分形式的动力学机理函数； T 为热力学温度， K 。

在不同的 β 下，选择相同的 α ，则 $G(\alpha)$ 是一个恒定值，这样 $\lg\beta$ 与 $\frac{1}{T}$ 就呈线性关系，根据斜率可以求出 E 值，在计算中， α 分别选取0.10，0.15，0.20，…，0.80。根据热重实验数据用 Ozawa 法计算得到的活化能和相关系数如表3所示。从表3可以看出，相关系数较高，表明采用 Ozawa 法计算得到的活化能数据是可靠的，从计算结果可以发现不同反应阶段，活化能的差别较大，燃烧初期较低，随着反应程度的加深而增加，但是在燃烧的后期又逐渐降低。与王子曦等^[14]的研究相比较，可以发现制革污泥燃烧过程活化能要高于热解所需活化能。

2.2.2 Satava 法推断最概然机理函数 对于固定的升温速率下的燃烧，采用常见机理函数的积分形式 $G(\alpha)$ ，利用 Satava 方法可以计算出活化能 E 和频率因子 A ，该方法的优点是只需要一条热重曲线就可以实现对燃料的燃烧进行动力学分析，但是可能同时存在数个相关性较好、但每个机理函数所求得的活化能相差较大的情况。这时就需要结合

表 3 制革污泥不同燃烧程度下活化能

Table 3 Activation energy at different extent of tannery sludge combustion

α /%	E /kJ·mol ⁻¹	r	α /%	E /kJ·mol ⁻¹	r
0.1	104.96	1.000	0.5	264.80	0.965
0.15	131.05	1.000	0.55	243.51	0.998
0.2	142.79	1.000	0.6	213.76	0.996
0.25	161.45	0.995	0.65	209.70	0.991
0.3	178.61	0.995	0.7	203.25	0.990
0.35	177.21	0.997	0.75	201.27	0.990
0.4	163.46	0.983	0.8	198.95	0.989
0.45	203.51	0.985			

E_{Ozawa} 进行分析, 得到最概然机理函数。

根据公式

$$\lg[G(\alpha)] = \lg\left(\frac{AE}{\beta R}\right) - 2.315 - 0.4567 \frac{E}{RT} \quad (2)$$

由于 $\lg\left(\frac{AE}{\beta R}\right)$ 与温度无关, 所以对于正确的 $G(\alpha)$,

$\lg[G(\alpha)]$ 对 $\frac{1}{T}$ 必然是一直线, 根据直线的斜率求出表观活化能 E , 截距求得表观频率因子 A 。如果只有一个 $G(\alpha)$ 满足线性关系, 则这一 $G(\alpha)$ 就是所选的最概然机理函数, 如果同时有几个 $G(\alpha)$ 都满足线性关系, 则选择满足 $E \approx E_{Ozawa}$ 条件的 $G(\alpha)$ 为最概然机理函数。

对制革污泥每个升温速率下的热重分析数据, 将 41 种常见动力学机理函数的积分形式代入式 (2) 中, 由于污泥燃烧的不同阶段, 总反应速率控制因素不同^[15-16], 本文分别选择挥发分燃烧阶段和固定碳燃烧阶段作为分析区间, 计算表观活化能和表观频率因子。计算中, 虽然运用有的机理函数得到的 $\lg[G(\alpha)]$ 对 $\frac{1}{T}$ 具有较好的线性关系, 但是

这些机理函数得到的表观活化能 E 与 E_{Ozawa} 相差较大。综合分析发现, 在三种升温速率下, 制革污泥的挥发分燃烧阶段符合 9 号机理函数 Z-L-T 方程, 固定碳燃烧阶段符合 21 号自催化反应函数 P-T 方程模型 (如表 4 所示)。表 5 列出了制革污泥在最概然机理函数下的挥发分燃烧阶段和固定碳燃烧阶段活化能 E 、频率因子 A 以及相关系数 r 。

2.2.3 制革污泥燃烧过程动力学补偿效应分析
通常将热分析动力学中 $\ln A$ 与 E 呈现线性关系的现象称为动力学补偿效应, 对同一反应采用不同机理函数处理的系统, 以及同一物质在不同实验条件

表 4 制革污泥燃烧反应最概然机理函数

Table 4 The most probable kinetic function of tannery sludge combustion

Reaction stages	Function	Reaction mechanism	$G(\alpha)$
combustion of volatile	Z-L-T	three-dimensional diffusion	$[(1-\alpha)^{-\frac{1}{3}} - 1]^2$
combustion of fixed carbon	P-T	self-catalyzed reaction	$\ln\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)$

表 5 制革污泥燃烧动力学参数

Table 5 Kinetic parameters in tannery sludge combustion

β /℃·min ⁻¹	Temperature range/℃	E	A	r
10	195—380	87.00	2.54×10^8	-0.994
	610—740	173.52	7.93×10^{11}	-0.992
30	195—410	111.04	1.34×10^{10}	-0.985
	610—780	154.81	3.80×10^{10}	-0.987
50	195—410	104.52	2.91×10^9	-0.993
	610—830	133.20	1.88×10^9	-0.976

下发生不同反应的系统, 动力学补偿效应都具有普遍性^[17]。可以根据这种补偿效应在已知 A 或 E 的情况下, 预测另一个动力学参数, 其表达式为

$$\ln A = a + bE \quad (3)$$

式中 a 和 b 为补偿参数, b 的单位为 mol·kJ⁻¹。式 (3) 表明, A 对 E 变化的效应得到部分补偿。根据表 5 中所得到的动力学参数, 对制革污泥在不同加热速率下的燃烧进行动力学补偿效应分析, 得到如下的方程, 而且有较好的相关性:

挥发分燃烧阶段

$$\ln A = 5.38 + 0.16E, r = 0.99193 \quad (4)$$

固定碳燃烧阶段

$$\ln A = 3.30 + 0.14E, r = 0.99962 \quad (5)$$

式 (4) 和式 (5) 说明制革污泥在不同升温速率下的动力学参数存在动力学补偿效应。

2.3 制革污泥燃烧产物 FTIR 分析

为了研究制革污泥在燃烧过程中污染物以及燃烧产物的释放情况, 利用与热重分析仪联用的红外光谱分析仪, 对不同升温速率下燃烧过程中所释放的气体进行了分析。

图 3 是 10、30、50℃·min⁻¹ 升温速率下, 制革污泥燃烧释放气体的 Gram-Schmidt 曲线, 可以发现其强度与 DTG 曲线显示的失重速率变化趋势完全相同, 随着升温速率的提高, 燃烧气体析出强度增加。对制革污泥在三种升温速率下燃烧生成气

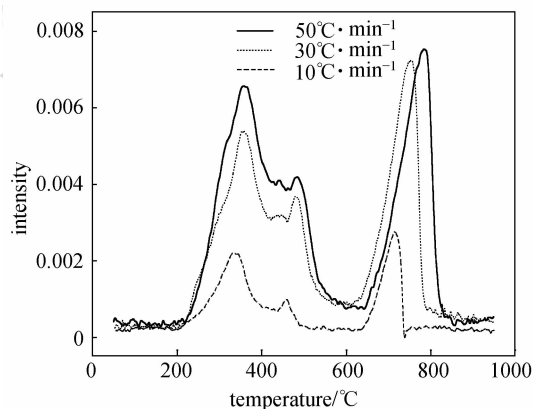


图3 不同升温速率下制革污泥燃烧过程中Gram-Schmidt 曲线

Fig. 3 Gram-Schmidt curve of tannery sludge combustion at different heating rate

体的红外分析发现，制革污泥在不同的升温速率下，析出气体成分完全相同，但是升温速率太低，将导致生成气体析出强度较低，不利于分辨气体组分，所以在TG-FTIR实验研究中，选取合适的升温速率十分重要，本文以 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温速率下的TG-FTIR分析结果为例进行分析。

图4是在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温速率下，制革污泥在燃烧时挥发分燃烧的峰值时刻 $338\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和固定碳燃烧阶段峰值时刻 $751\text{ }^{\circ}\text{C}$ 释放气体红外谱图。可以发现，虽然制革污泥在不同燃烧阶段主要气体成分是 CO_2 和 H_2O ，但是在低温段（挥发分燃烧阶段）有少量的CO气体释放，说明除了氧化条件，温度对充分燃烧也有重要的影响。

朱晓琬等^[18]的研究发现，污泥受热以后，会释放出烃类、脂肪酸类等有机气体，在低温燃烧阶

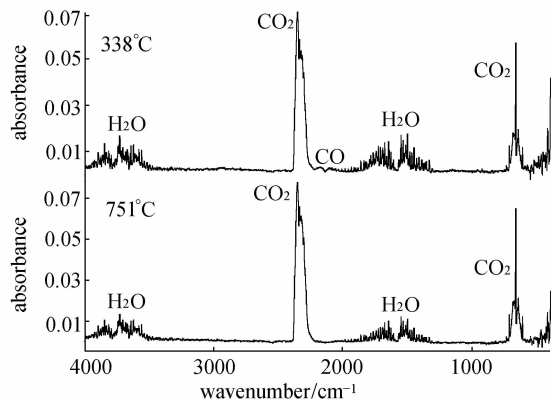


图4 $338\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $751\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时制革污泥燃烧释放气体红外谱图

Fig. 4 FTIR spectrogram in tannery sludge combustion at $338\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $751\text{ }^{\circ}\text{C}$

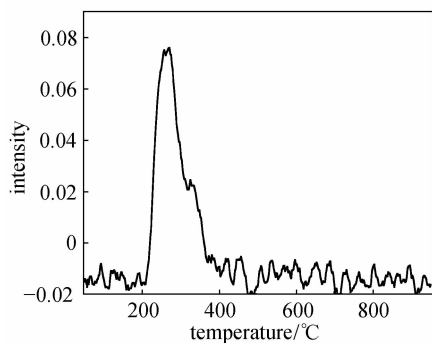


图5 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温速率下燃烧时有机气体析出情况

Fig. 5 Evolution of cyclohexanecarboxylic acid with temperature at heating rate of $30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$

段，由于燃烧不完全，这些有机气体会成为污染物排入环境。虽然制革污泥燃烧过程中释放的气体主要是 CO_2 和 H_2O ，但是TG-FTIR分析发现，在三个升温速率下，挥发分燃烧的初期都有有机气体析出。图5是 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温速率下，有机气体组分环己烷羧酸（cyclohexanecarboxylic acid）在制革污泥燃烧温度范围内的析出强度情况，可以发现，有机酸的析出从 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 开始，在 $270\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时达到峰值，在温度达到 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之前析出结束。研究表明在氧化气氛下，制革污泥在低温段燃烧时仍有有机组分析出，随着温度的升高，制革污泥分解所产生的有机气体在氧气存在的条件下被氧化，所以在工程应用中，在保持足够氧量的同时，还要考虑制革污泥燃烧温度的控制，以减少有机污染物的排放。

3 结 论

通过对制革污泥在不同升温速率下燃烧的TG-FTIR研究，得到如下结论：

(1) 制革污泥中含有较高的挥发分和灰分，但固定碳含量较低，所以制革污泥的热值较低。

(2) 随着升温速率的提高，制革污泥的燃烧过程有向高温区偏移的趋势。在不同升温速率下，制革污泥燃烧最终失重份额几乎完全相同，且在 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时制革污泥已经基本燃尽。制革污泥燃烧过程主要包括挥发分的析出和燃烧阶段及固定碳燃烧阶段，挥发分燃烧阶段持续时间较长，最大失重速率出现在固定碳燃烧阶段。

(3) 提高升温速率，挥发分燃烧阶段和固定碳燃烧阶段最大失重速率都明显增加，但增幅有所降低。升温速率增加，热失重峰值对应温度也有增加的趋势。

(4) 制革污泥燃烧初期活化能较低, 随着反应程度的加深而增加, 然后又逐渐降低。制革污泥的挥发分燃烧阶段符合 9 号机理函数 Z-L-T 方程, 固定碳燃烧阶段符合 21 号自催化反应函数 P-T 方程模型。不同升温速率下的燃烧动力学参数存在动力学补偿效应。

(5) 升温速率对制革污泥燃烧过程中气体释放组分没有影响, 在挥发分燃烧阶段有少量的 CO 气体析出。在制革污泥的燃烧初期, 检测到有机酸的析出, 析出从 200℃ 开始, 在 270℃ 时达到峰值, 在温度达到 400℃ 之前析出结束。

References

- [1] Mahdi H, Azni I, Syed S R. A study of heavy metals and their fate in the composting of tannery sludge. *Waste Management*, 2007, **27** (11): 1541-1550
- [2] Jensen J, Jepsen S E. The production, use and quality of sewage sludge in Denmark. *Waste Management*, 2005, **25** (3): 239-247
- [3] Werther J, Ogada T. Sewage sludge combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1999, **25** (1): 55-116
- [4] Wang Yuming (王裕明), Hu Jianhong (胡建红), Ran Jingyu (冉景煜), *et al.* Experimental study on combustion and kinetic characteristics of mixed industrial sludge. *Proceedings of the CSEE* (中国电机工程学报), 2007, **27** (17): 44-50
- [5] Liu Wentie (刘文铁), Wang Shuyan (王淑彦), Lu Huilin (陆慧林), *et al.* An investigation of sludge pyrolytic dynamics and its mechanism. *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power* (热能动力工程), 2006, **21** (5): 529-531
- [6] Wang Xingrun (王兴润), Jin Yiyi (金宜英), Wang Zhiyu (王志玉), *et al.* Study on pyrolysis and combustion of different sewage sludges by TGA-FTIR analysis. *Journal of Fuel Chemistry and Technology* (燃料化学学报), 2007, **35** (1): 27-31
- [7] Zhao Weidong (赵卫东), Liu Jianzhong (刘建忠), Zhang Baosheng (张保生), *et al.* Kinetic parameters of petroleum coke water slurry combustion by different methods. *Proceedings of the CSEE* (中国电机工程学报), 2008, **28** (17): 55-60
- [8] Chen Yi (陈祎), Duan Jia (段佳), Lin Peng (林鹏), *et al.* Effect of oxygen concentration on combustion characteristics of typical biomass materials. *Proceedings of the CSEE* (中国电机工程学报), 2008, **28** (2): 43-48
- [9] Han Xiangxin (韩向新), Jiang Xiumin (姜秀民), Cui Zhigang (崔志刚), *et al.* Pyrolysis behavior of oil shale semi-coke. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2006, **57** (1): 126-130
- [10] Xu Chaofen (徐朝芬), Sun Xuexin (孙学信). Combustion characteristic of biomass by using TG-DTG-DSC thermoanalysis. *Journal of Huazhong University of Science & Technology: Nature Science Edition* (华中科技大学学报: 自然科学版), 2007, **35** (3): 126-128
- [11] Han Xiangxin (韩向新), Jiang Xiumin (姜秀民), Cui Zhigang (崔志刚), *et al.* Study of combustion performance of oil shale semi-coke. *Proceedings of the CSEE* (中国电机工程学报), 2005, **25** (15): 106-110
- [12] Yang Haiping (杨海平), Chen Hanping (陈汉平), Yan Rong (晏蓉), *et al.* Thermodynamic analysis of palm oil wastes and biomass components. *Acta Energiæ Solaris Sinica* (太阳能学报), 2007, **28** (6): 626-631
- [13] Hu Rongzu (胡荣祖), Shi Qizhen (史启祯), Gao Shengli (高胜利), *et al.* Thermal Analysis Kinetics (热分析动力学). 2nd ed. Beijing: Science Press, 2008: 57-58
- [14] Wang Zixi (王子曦), Li Guiju (李桂菊), Zhang Xiaolei (张晓镭). Study on pyrolysis kinetics of tannery sludge. *China Leather* (中国皮革), 2008, **37** (3): 34-38
- [15] Li Peisheng (李培生), Li Jie (李洁), Hu Yi (胡益), *et al.* Combustion reaction kinetics of sewage sludge/coal mixtures based DTA method. *Journal of Huazhong University of Science & Technology: Nature Science Edition* (华中科技大学学报: 自然科学版), 2008, **36** (6): 119-121
- [16] Hua Yulong (华玉龙), Lu Jidong (陆继东), Sun Lushi (孙路石), *et al.* Kinetics of sewage sludge combustion. *Journal of Fuel Chemistry and Technology* (燃料化学学报), 2000, **28** (6): 542-545
- [17] Wang Shuang (王爽), Wang Ning (王宁), Yu Lijun (于立军), *et al.* Analysis on pyrolysis characteristics of seaweed. *Proceedings of the CSEE* (中国电机工程学报), 2007, **27** (14): 102-106
- [18] Zhu Xiaowan (朱晓婉), Deng Wenyi (邓文义), Wang Fei (王飞), *et al.* Emission characteristics of thermal processing of tannery sludge in paddle dryer. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2008, **59** (8): 2083-2088