

新能源动力技术

文章编号: 1001-2060(2011)05-0609-06

污水污泥的燃烧特性及动力学研究

何艳峰,卓建坤,李水清,姚强

(清华大学热能工程系,北京 100084)

摘要: 利用热重法研究了四川成都 4 种污水污泥的燃烧特性及动力学规律。结果表明: 污水污泥的燃烧过程可以分为 3 个阶段: 水分析出阶段、挥发分析出阶段和固定碳燃烧阶段。对主要的挥发分析出阶段, 采用两阶段反应模型求得 4 种污泥的燃烧反应不能单纯用一级反应来描述, 低温和高温阶段的活化能分别为 36.65 ~ 67.34 和 50.47 ~ 84.51 kJ/mol。污泥转化率的实验值和计算值拟合程度很高, 相关系数在 0.998 以上。污泥的着火温度在 496.35 ~ 512.85 K 之间, 着火温度相对较低, 污泥易着火燃烧。4 种污泥的综合燃烧特性指数为 $(2.75 \sim 9.31) \times 10^{-10} \text{ mg}^2 / (\text{K}^3 \cdot \text{min}^2)$, 远小于煤的综合燃烧特性指数。

关键词: 污水污泥; 燃烧特性; 综合燃烧特性指数; 热重分析; 动力学

中图分类号: TK16 文献标识码: A

引 言

利用热重分析法研究污泥的燃烧机理和动力学特性, 在研究中为了简化复杂的计算过程, 多数将污泥热分解和燃烧直接假定为一级反应而进行数值拟合^[1-5]。实际上污泥是一种非均质的复杂有机物质的组合体, 其燃烧特性是许多相互竞争或平行反应

的综合体现, 不同来源、不同地区的污泥其本身的性质都会对燃烧过程产生不同的影响, 因此简单的假设容易掩盖反应过程的复杂性和机理。

为了更深入认识污泥的燃烧过程, 本研究利用热重分析法分析了四川成都 4 种污水污泥的着火、燃尽、综合燃烧特性, 并采用文献 [6] 介绍的一种简单的没有采用任何简化的计算方法, 假设不同的反应级数对污泥的燃烧机理和动力学特性进行分析, 计算得到燃烧动力学参数, 以期对污泥焚烧设备的设计、运行以及污染物的控制提供指导。

1 实 验

1.1 样品

本实验使用的污泥取自四川成都 4 个污水处理厂的污泥。取回的污泥含水量很高, 先在 105 °C 的干燥箱里干燥 48 h 后, 取一定量的干燥污泥研磨, 并过 150 目筛。干燥污泥样品的工业分析及元素分析结果见表 1。可以看出, 污泥具有高挥发分、低固定碳和低热值的特点。同时污泥的碳元素和氧元素的含量也较高。

表 1 污泥工业分析及元素分析

Tab. 1 Industrial and elementary analysis of sludge

样品	工业分析 / %				元素分析 / %					低位发热量 / MJ · kg ⁻¹
	M _{ad}	A _{ad}	V _{ad}	FC _{ad}	C _{ad}	H _{ad}	O _{ad}	N _{ad}	S _{ad}	
一厂	0.77	51.46	42.72	5.05	24.57	3.38	17.97	3.59	1.44	10.94
二厂	4.02	33.17	54.71	8.10	34.16	4.81	23.59	5.97	1.01	15.07
三厂	1.61	38.16	52.65	7.58	30.96	4.50	22.92	5.77	0.82	13.94
四厂	3.01	43.82	50.71	2.46	27.66	4.09	25.65	4.74	0.77	12.38

收稿日期: 2010-09-08; 修订日期: 2010-10-19

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(20090460275)

作者简介: 何艳峰(1977-), 女, 福建闽清人, 清华大学博士后。

1.2 热重分析

采用德国 STA 409 Cell 热重与差热分析仪对 4 种污泥进行热重分析。实验中,采用流量为 100 mL/min 的空气流作为载气。与其它热重分析一样,实验中样品一般采用很小的量,以忽略宏观的传热传质过程对失重过程的影响,本实验约为 10 mg。升温速率为 10 K/min,从室温加热到 1 200 °C。热重(TG)曲线和微分热重(DTG)曲线由仪器同时给出。

2 实验结果与分析

2.1 燃烧曲线分析

图 1 ~ 图 4 分别是 4 种样品的 TG 和 DTG 曲线。由图中可以看出,污泥的燃烧过程可以分为 3 个阶段,各阶段的温度区间及失重率如表 2 所示。温度区间的分界点取 DTG 曲线上两区间相邻处的极小值点^[7]。第 1 个阶段是污泥的脱水阶段,此阶段失重主要是由于污泥中的自由水和化学结合水的损失引起的。由于采用的是干燥后的污泥,所以此阶段的失重很少,小于 5%;第 2 阶段有两个峰,主要是由于污泥中挥发分的析出和燃烧引起的^[8]。这一阶段为燃烧的主要阶段,其失重率占总失重率的 90% 以上。由于污泥中所含挥发分成分比较复杂,各成分的化学键强弱不一而造成此阶段 4 种污泥的峰值大小不一样;第 3 阶段是污泥中少量固定碳的燃烧过程,主要是污泥中高沸点有机物被分解,如纤维素等难降解物质的燃烧,这与污泥的成分有较大的关联。这一阶段的失重也较少。由表 1 和表 2 可知,热重实验中污泥的总失重率基本等于工业分析的挥发分和固定碳含量之和,并且试样的最大失重率随着污泥挥发分含量的增加而增大。

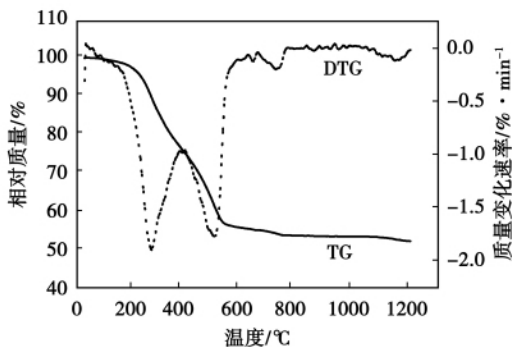


图 1 一厂污泥的 TG 和 DTG 曲线

Fig. 1 TG and DTG curves of sludge in No. 1 plant

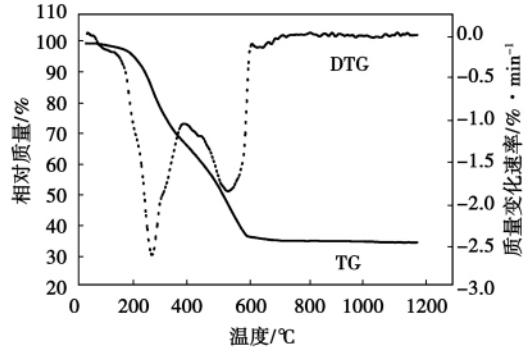


图 2 二厂污泥的 TG 和 DTG 曲线

Fig. 2 TG and DTG curves of sludge in No. 2 plant

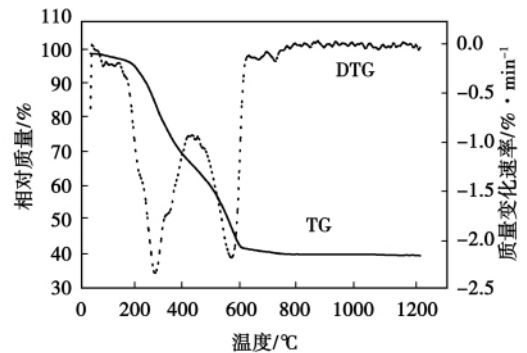


图 3 三厂污泥的 TG 和 DTG 曲线

Fig. 3 TG and DTG curves of sludge in No. 3 plant

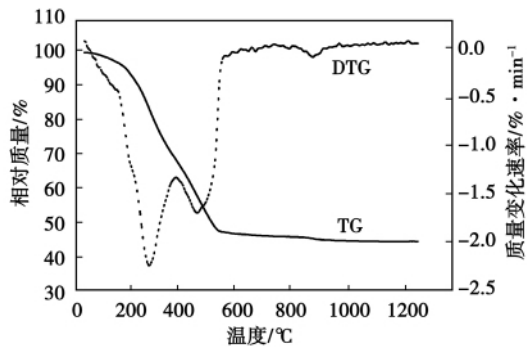


图 4 四厂污泥的 TG 和 DTG 曲线

Fig. 4 TG and DTG curves of sludge in No. 4 plant

2.2 污泥燃烧反应动力学参数的确定

污泥燃烧的反应动力学参数可以通过差热曲线计算出来。一般来说,污泥的燃烧反应可以表示为:
 污泥(固体) → 残渣(固体) + 挥发分(气体)

表 2 污泥燃烧各失重阶段的温度区间和失重率

Tab.2 Temperature limits and weight loss rates at various weight loss stages in the process of sludge combustion

样品	第 1 阶段		第 2 阶段		第 3 阶段		总失重率/%
	温度区间/℃	失重率/%	温度区间/℃	失重率/%	温度区间/℃	失重率/%	
一厂	室温 ~ 176.5	1.58	176.5 ~ 650.9	43.13	650.9 ~ 1200	2.83	47.54
二厂	室温 ~ 207.4	4.90	207.4 ~ 616.8	58.74	616.8 ~ 1200	1.71	65.35
三厂	室温 ~ 134.7	1.57	134.7 ~ 591.9	56.36	591.9 ~ 1200	1.07	59.80
四厂	室温 ~ 163.4	3.60	163.4 ~ 619.8	49.67	619.8 ~ 1200	1.87	55.14

忽略温度对活化能的影响,根据质量作用定律并结合阿累尼乌斯(Arrhenius)方程,污泥燃烧的反应速率可以表示为^[9]:

$$\frac{dX}{dt} = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) f(X) \quad (1)$$

式中: t —反应时间, min; T —反应温度, K; A —指前因子, K^{-1} ; E —活化能, kJ/mol; R —气体常数, kJ/(mol · K), X —转化率, 可计算为:

$$X = \frac{w_0 - w_t}{w_0 - w_f} \quad (2)$$

式中: w_0 —试样初始质量, mg; w_f —试样反应结束时的质量, mg; w_t —试样在 t 时刻的质量, mg。

$f(X)$ 为由反应机理决定的函数,对 n 级简单反应,可设:

$$f(X) = (1 - X)^n \quad (3)$$

采用恒升温速率非等温法,升温速率 β 可以表示为:

$$\beta = dT/dt \quad (4)$$

因此,式(1)可以表示为:

$$\frac{dX}{dT} = \frac{A}{\beta} \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) (1 - X)^n \quad (5)$$

用天津大学的 Ji Aimin 等人提出的一种简单的没有采用任何简化的方法来求解污泥燃烧的动力学参数^[6]。

在很短的时间间隔内,式(5)可以转化为式(6)的形式:

$$\frac{dX_i}{dT_i} = \frac{\Delta X_i}{\Delta T_i} = \frac{X_{i+1} - X_i}{T_{i+1} - T_i} = \frac{A}{\beta} \left(\frac{-E}{RT_i}\right) (1 - X_i)^n \quad (6)$$

($T_{i+1} > T_i$)

其中 i —TG 曲线上的数值点。经过整理得到:

$$\ln\left[\frac{X_{i+1} - X_i}{(T_{i+1} - T_i) \times (1 - X_i)^n}\right] = \ln\left(\frac{A}{\beta}\right) - \frac{E}{RT_i} \quad (7)$$

求解时,选定不同的 n 值,以 $1/T_i$ 为自变量,

$\ln\left[\frac{X_{i+1} - X_i}{(T_{i+1} - T_i) \times (1 - X_i)^n}\right]$ 为函数进行直线拟合,

拟合程度最好的 n 值即为反应的级数, Y 轴截距为 $\ln(A/\beta)$, 斜率即为 $-E/R$, 则动力学参数 A 和 E 可以求得:

理论转化率可以用式(8)求得:

$$X_{i+1}^{cal} = \frac{A}{\beta} \exp\left(\frac{-E}{RT_i}\right) (1 - X_i^{cal})^n (T_{i+1} - T_i) + X_i^{cal} \quad (8)$$

对污泥燃烧的第 2 阶段进行求解,由于 4 种污泥燃烧的 DTG 曲线在第 2 阶段出现有两个峰,将此阶段再划分为两个小的阶段即低温段和高温段,并分别进行求解,其结果如表 3 所示。

表 3 污泥燃烧第 2 阶段的动力学参数

Tab.3 Dynamic parameters at the second stage of sludge combustion

样品	失重温度范围/℃	级数	活化能 E /kJ · mol ⁻¹	指前因子 A /min ⁻¹	相关系数 R^2
一厂	176.5 ~ 391.5	7	67.34	4.95×10^5	0.996
	391.5 ~ 650.9	2	84.51	3.49×10^5	0.980
二厂	207.4 ~ 394.4	5	42.82	1.47×10^3	0.980
	394.4 ~ 616.8	1	50.47	280.50	0.970
三厂	134.7 ~ 394.4	5.5	49.15	8746.29	0.998
	394.4 ~ 591.9	1	59.34	1277.40	0.984
四厂	163.4 ~ 353.4	3.5	36.65	443.45	0.997
	353.4 ~ 619.8	2	76.09	2.29×10^5	0.992

由表 3 可以看出,线性拟合的相关系数在 0.970 ~ 0.997 之间,拟合效果比较好。4 种污泥在低温段的反应级数分别为 7、5、5.5 和 3.5,均大于高温段 1 ~ 2 级的反应级数,低温段的活化能在 36.65 ~ 67.34 kJ/mol 之间,小于高温段 50.47 ~ 84.51 kJ/mol 的值,表明污泥低温段燃烧物质活化能较低,比较容易着火燃烧,随着挥发分的逐级析出,反应越不容易进行。

许多文献用各种方法对污泥降解的动力学参数进行了研究。报导的 n 值在 1.0 ~ 10 之间,活化能

为 17 ~ 350 kJ/mol 之间^[6,10~11] ,研究计算值均在此范围之内。

将计算得到的动力学参数代入式(7) ,得到污泥转化率计算值 X_{cal} ,则它与实验值 X_{exp} 作图 ,得到一条直线 ,直线的相关系数越高 ,表明拟合程度越

好。图 5 是 4 种污泥转化率计算值与实验值的拟合情况 ,可以看出 4 条曲线拟合的相关系数都非常高 ,在 0.998 以上 ,拟合的程度非常好 ,因此按照这种简化方法得出的结果误差较小。

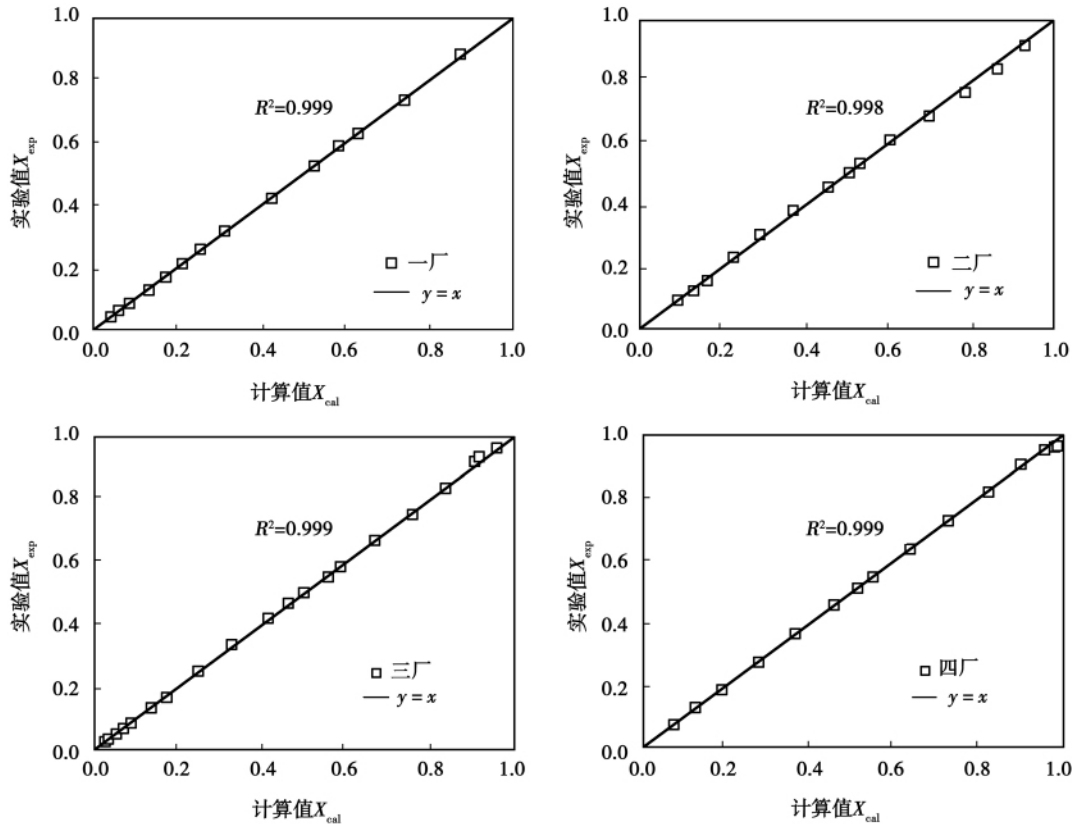


图 5 4 种污泥燃烧转化率的实验值和计算值比较

Fig. 5 Comparison of the test and calculation values of the combustion conversion rate of four kinds of sludge

2.3 污泥的燃烧特性分析

2.3.1 着火温度

着火温度 T_i 是燃料着火性能的主要指标 ,着火温度越低 ,表明燃料的着火性能越好。本研究采用 TG - DTG 方法来确定着火温度^[12]。

由表 4 污泥的着火温度可见 4 种污泥的着火温度在 496.35 ~ 512.85 K 之间 ,着火温度相对较低 ,污泥易着火燃烧 ,这是由污泥中挥发分含量较高 ,而比较难燃尽的固定碳的含量较小的特性决定的。在 4 种污泥中 ,四厂的着火温度最低 ,其着火性能最好 ,二厂的次之 ,一厂的第三 ,三厂的最差。

2.3.2 挥发分特性指数

单纯用着火温度来衡量污泥的着火特性是不够的 ,在燃料燃烧过程中 ,挥发分的析出直接影响燃料的着火燃烧。因此需要采用挥发分特性指数 D 对

污泥燃烧过程中挥发分析出情况进行描述^[12] ,即:

$$D = \left(\frac{dw}{d\tau} \right)_{\max} / (T_{\max} \cdot T_s \cdot \nabla T_{1/2}) \quad (9)$$

式中: T_s —挥发分初析温度 ,K; $(dw/d\tau)_{\max}$ —挥发分最大释放速度峰值 ,mg/min; T_{\max} —对应于 $(dw/d\tau)_{\max}$ 的温度 ,K; $\nabla T_{1/2}$ ——对应于 $(dw/d\tau) / (dw/d\tau)_{\max} = 1/2$ 时的温度区间 ,K。

显然 $(dw/d\tau)_{\max}$ 越大 ,挥发分释放得越强烈 , T_s 越小 ,挥发分越易析出; T_{\max} 越低 , $\nabla T_{1/2}$ 越小 ,挥发分的释放高峰出现得越早 ,越集中 ,对着火越有利;反之 ,则越不利于着火。

D 值越大 ,污泥的挥发分析出特性越好 ,燃烧反应越容易进行。各污泥的挥发分特性指数如表 4 所示。4 种污泥的挥发分特性指数在 $0.80 \times 10^{-8} \sim 1.14 \times 10^{-8}$ mg/(K³ · min) 之间 ,略小于煤的挥发分

特性指数^[12]。4 种污泥中, 四厂的挥发分析出特性最好, 二厂次之, 一厂的第三, 三厂的最差。此结果与着火温度的先后顺序一致。

表 4 污泥的着火温度及挥发分特性指数
Tab. 4 Ignition temperature and volatile characteristic index of sludge

样品	T_i /K	T_s /K	$\nabla T_{1/2}$ /K	T_{max} /K	$(dw/d\tau)_{max}$ /mg·min ⁻¹	$D/mg \cdot K^{-3} \cdot \min^{-1} (\times 10^{-8})$
一厂	512.25	449.65	296	542.15	0.66	0.91
二厂	508.35	480.55	375	537.15	0.96	0.99
三厂	512.85	407.85	365	536.00	0.64	0.80
四厂	496.35	436.55	300	534.15	0.82	1.17

2.3.3 污泥的燃尽特性

燃尽特性是表征可燃物燃烧性能的一个重要指标, 可燃物的燃尽特性指数为^[12]:

$$C_b = f_1 \cdot f_2 / \tau_0 \quad (10)$$

式中: f_1 —初始燃尽率, 指的是 TG 曲线上着火点对应的污泥样失重量与污泥中可燃质含量的比值; τ_0 —燃尽时间, 指的是污泥样燃烧失重从开始到燃烧 98% 可燃质的时间, min; f —总燃尽率, 指的是 τ_0 时刻所对应的煤样失重量与煤中可燃质含量的比值; f_2 —后期燃尽率 $f_2 = f - f_1$ 。其中 f_1 反映了挥发分相对含量、污泥着火特性的影响。 f_1 越大, 污泥可燃性越佳; f_2 反映了污泥中碳的燃尽性能, 与含碳量、碳的存在形态等特性有关 f_2 越大, 污泥的燃尽性能越佳。

表 5 污泥的燃尽特性指数
Tab. 5 Burn-out characteristic index of sludge

样品	τ_0 /min	f /%	f_1 /%	f_2 /%	C_b /min ⁻¹ ($\times 10^{-4}$)	燃尽 排序
一厂	106.1	98	11.17	86.83	9.14	4
二厂	61.8	98	13.22	84.78	18.14	3
三厂	61.4	98	17.14	80.86	22.57	1
四厂	77.4	98	17.57	80.43	18.26	2

燃尽特性指数综合考虑了污泥的着火和燃烧稳定性等因素对燃尽的影响。 C_b 越大, 污泥的燃尽性能越好。表 5 给出了 4 种污泥的燃尽特性指数值。从表中可以看出, 4 种污泥中, 三厂的燃尽性能最好, 四厂的次之, 二厂的第三, 一厂的最差。

2.3.4 综合燃烧特性分析

为全面评价污泥的燃烧情况, 采用燃烧特性指数 S 进行比较^[12]:

$$S = \frac{(dw/d\tau)_{max} \cdot (dw/d\tau)_{mean}}{T_i^2 \cdot T_h} \quad (11)$$

式中: $(dw/d\tau)_{max}$ —最大燃烧速率, mg/min; $(dw/d\tau)_{mean}$ —平均燃烧速率, mg/min, 其值越大, 表明燃尽越快; T_i —着火温度, K; T_h —燃尽温度, 指的是试样失重占总失重的 98% 时对应的温度, K。

表 6 污泥的综合燃烧特性指数
Tab. 6 Comprehensive combustion characteristic index of sludge

样品	T_i /K	T_h /K	$(dw/d\tau)_{max}$ /mg·min ⁻¹	$(dw/d\tau)_{mean}$ /mg·min ⁻¹	$S/mg^2 \cdot K^{-3} \cdot \min^{-2} (\times 10^{-10})$
一厂	512.25	1371.15	0.66	0.15	2.75
二厂	508.35	918.15	0.96	0.23	9.31
三厂	512.85	915.00	0.64	0.15	3.99
四厂	496.35	1079.65	0.82	0.19	5.86

综合燃烧特性指数全面反映了试样的着火和燃尽性能, S 越大说明试样的综合燃烧性能越佳。从表 6 污泥的综合燃烧特性指数结果可以看出, 虽然污泥的挥发分较高, 着火温度相对较低, 但是燃烧并不是特别剧烈, 综合燃烧特性指数 S 值的数量级为 10^{-10} , 小于文献中报道的褐煤的 S 值的数量级为 10^{-8} , 烟煤、贫煤的 S 值的数量级为 10^{-9} 的结果^[21], 其综合燃烧性能不是很高。究其原因, 与污泥的自身特性有关。从表 1 中污泥的工业分析和元素分析可知, 污泥中尽管挥发分含量很大, 但是氧元素却占其中很大一部分。氧虽然可以助燃, 但是它在试样中的含量比之大气中氧含量显得微不足道。氮既不能燃烧也不能助燃, 而且燃烧中还会生成有害气体 NO_x 。氢和硫是可燃元素, 其中硫的发热量低, 而氢的发热量高。但在污泥中这两者的含量都相对较少。污泥中碳元素含量较高, 发热量大, 在燃烧中起主导作用。

由表 6 还可以看出, 二厂污泥的综合燃烧性能最好, 四厂的次之, 三厂的第三, 一厂的最差。一般来说, 污泥中挥发分且碳元素含量越高, 其综合燃烧性能越好。四厂污泥的挥发分及碳元素含量均小于三厂, 而综合燃烧特性却优于三厂, 表明综合燃烧性能不只取决于挥发分及碳元素的含量。综合燃烧特性指数是燃料的活性、着火猛烈程度、最大燃烧速度、燃尽性能等的综合指标, 可以较全面地反映燃烧过程的特性。因此它对于判别燃料的燃烧特性有着更好的应用价值。

3 结 论

(1) 污泥具有高挥发分含量,低固定碳含量和低热值的特点,其燃烧过程可以分为 3 个阶段:水分析出阶段、挥发分析出阶段及固定碳燃烧阶段。挥发分析出阶段为燃烧的主要阶段,其失重率占总失重率的 90% 以上。

(2) 对主要的挥发分析出阶段,采用两阶段反应模型进行动力学参数的求解,计算求得 4 种污泥在低温阶段的反应级数分别为 7、5、5.5 和 3.5,高温阶段的反应级数分别为 2、1、1 和 2,表明不能单纯用一级反应来描述污泥的燃烧过程。低温和高温阶段的活化能分别为 36.65 ~ 67.34 kJ/mol, 50.47 ~ 84.51 kJ/mol。污泥转化率的实验值和计算值拟合程度很高,相关系数在 0.998 以上。

(3) 污泥的着火温度在 496.35 ~ 512.85 K 之间,着火温度相对较低,污泥易着火燃烧。4 种污泥的综合燃烧特性指数为 $(2.75 \sim 9.31) \times 10^{-10} \text{ mg}^2 / (\text{K}^3 \cdot \text{min}^2)$,远小于煤的综合燃烧特性指数,污泥的综合燃烧性能不是很高。

参考文献:

- [1] OTERO M, DIEZ C, CALVO L F, et al. Analysis of the co-combustion of sewage sludge and coal by TG-MS [J]. *Biomass and Bioenergy* 2002, 22(4): 319 - 329.
- [2] KIM J K, LEE H D. Investigation on the combustion possibility of dry sewage sludge as pulverized fuel of thermal power plant [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2010, 16(4): 510 - 516.
- [3] 贾相如, 金保升, 肖睿, 等. 污泥在空气气氛下的燃烧特性研究 [J]. *动力工程* 2005 25(增刊): 134 - 142.
JIA Xiang-ru, JIN Bao-sheng, XIAO Ri, et al. Study of the combustion characteristics of sludge in an air atmosphere [J]. *Power Engineering*, 2005 25(Supplement).
- [4] 姬鹏, 韩向新, 姜秀民. 干化污泥燃烧特性的研究 [J]. *热能动力工程* 2009 24(4): 533 - 548.
- JI Peng, HAN Xiang-xin, JIANG Xiu-min. Study of the combustion characteristics of dry sludge [J]. *Engineering for Thermal Energy & Power*, 2009, 24(4): 533 - 548.
- [5] 贾相如, 金保升, 王清华. 污水污泥着火和燃烧特性研究 [J]. *锅炉技术* 2007 38(4): 61 - 67.
JIA Xiang-ru, JIN Bao-sheng, WANG Qing-hua. Study of the ignition and combustion characteristics of sewage water and sludge [J]. *Boiler Technology* 2007 38(4): 61 - 67.
- [6] JI A M, ZHANG S T, LU X B, et al. A new method for evaluating the sewage sludge pyrolysis kinetics [J]. *Waste Management*, 2010 30(7): 1225 - 1229.
- [7] 刘乃安. 生物质材料热解失重动力学及其分析方法研究 [D]. 合肥: 中国科技大学, 2000.
LIU Nai-an. Study of biomass material pyrolysis and weight loss dynamics and its analytic methods [D]. Hefei: China University of Science and Technology, 2000.
- [8] 刘敬勇, 孙水裕, 许燕滨, 等. 造纸工业污泥燃烧特性及动力学实验研究 [J]. *环境工程学报* 2010 4(3): 693 - 699.
LIU Jing-yong, SUN Shui-yu, XU Yan-bin, et al. Experimental study of the combustion characteristics and dynamics of sludge in paper-making industry [J]. *Journal of Environment Engineering*, 2010 4(3): 693 - 699.
- [9] ZHANG C Q, JIANG X M. Research on pyrolysis characteristics and kinetics of super fine and conventional pulverized coal [J]. *Energy Conversion and Management* 2007 48(3): 797 - 802.
- [10] FONT R, FULLANA A, CONESA J. Kinetic models for the pyrolysis and combustion of two types of sewage sludge [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2005 74(1-2): 429 - 438.
- [11] 刘亮, 李录平, 周子民, 等. 污泥燃烧的热重实验研究 [J]. *电站系统工程* 2006 22(1): 11, 12, 18.
LIU Liang, LI Lu-ping, ZHOU Jie-min, et al. Thermogravimetric experimental study of sludge combustion [J]. *Power Plant Systematic Engineering* 2006 22(1): 11, 12, 18.
- [12] 聂其红, 孙绍增, 李争起, 等. 褐煤混煤燃烧特性的热重分析法研究 [J]. *燃烧科学与技术* 2001 7(1): 72 - 76.
NIE Qi-hong, SUN Shao-zeng, LI Zheng-qi, et al. Study of the thermogravimetric analytic methods for the combustion characteristics of lignite and blended coal [J]. *Combustion Science and Technology* 2001 7(1): 72 - 76.

071003) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2011 26(5) . -604 ~608

With limesone at two finenesses serving as the desulfurization agent , experimentally studied were the desulfurization characteristics of a sprinkling type desulfurization tower. The test results show that at a definite flue gas flow speed , the desulfurization efficiency will increase with an increase of the liquid-gas ratio. At a high flue gas flow speed , the tendency increasing the desulfurization efficiency with the liquid-gas ratio will be even more remarkable. The desulfurization efficiency will also increase with an increase of the pH value of the slurry and decrease with an increase of the SO₂ concentration of the flue gas at the inlet. The smaller the particle diameter of the limestone , the better the dissolvability , more favorable to improving the desulfurization efficiency. In combination with the drag force characteristics in the absorption section , an optimal operating point of the device was obtained from an analysis. When the flue gas flow speed is 2.31 m/s , the circulating slurry flow rate is 50 m³/h and the PH value in the slurry pool ranges from 5.6 to 5.8 , the desulfurization efficiency hits 93.9% . **Key words:** sprinkling tower , wet-method flue gas desulfurization , desulfurization characteristics , experimental study

污水污泥的燃烧特性及动力学研究 = **Combustion Characteristics and Dynamic Study of Sewage Water and Sludge** [刊 汉] HE Yan-feng , ZUO Jian-kun , LI Shui-qing , YAO Qiang (Department of Thermal Energy Engineering , Tsinghua University , Beijing , China , Post Code: 100084) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2011 26(5) . -609 ~614

By making use of the thermogravimetric method , studied were the combustion characteristics and dynamic regularities of four kinds of sewage water and sludge present in Chengdu City , Sichuan Province. It has been found that the combustion process of sewage water and sludge can be divided into three stages: water content separation stage , volatile content separation stage and fixed carbon combustion stage. For the main volatile content separation stage , a two-stage reaction model was used to obtain the combustion reaction of four kinds of sludge , which can not be described purely by using a single stage reaction. The activation energy at the low and high temperature stage was 36.65 ~67.34 kJ/mol and 50.47 ~84.51 kJ/mol respectively. The test and calculation value of the sludge transformation rate had a very high degree of fitting with their correlation coefficient being more than 0.998. The ignition temperature of the sludge ranged from 496.35 to 512.85 K , being relatively low and easy to ignite and burn. The comprehensive combustion characteristic index of the four kinds of sludge was $(2.75-9.31) \times 10^{-10} \text{ mg}^2 / (\text{K}^3 \cdot \text{min}^2)$, far below that of a coal , showing that the comprehensive combustion performance of the sludge is not very high. **Key words:** sewage water and sludge , combustion characteristics , comprehensive combustion characteristic index , thermogravimetric analysis , dynamics

太阳能平板空气集热器内部流动与传热分析 = **Numerical Study of the Flow and Heat Transfer Inside a Solar Energy Flat-plate-based Air Heat Accumulator** [刊 汉] HU Jian-jun , SUN Xi-shan (Department of Architectural Environment and Equipment Engineering , Yanshan University , Qinhuangdao , China , Post Code: 066004) ,