

城市污泥和煤混燃特性的热重分析法研究

顾利锋, 陈晓平, 赵长遂, 吴 新

(东南大学 洁净煤电与燃烧技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘 要: 利用热重分析法对某城市污泥和某煤种及其两者混合物的着火温度、活化能及综合燃烧特性等参数进行了研究。试验结果表明, 混合试样和煤相比其活化性能得到了提高, 着火温度提前, 综合燃烧性能下降。在混燃过程中, 煤和城市污泥基本上保持了各自的挥发分析出特性, 煤的燃烧表现得更为明显。

关 键 词: 城市污泥; 煤; 混燃; 热重分析法

中图分类号: TK16 文献标识码: A

1 前 言

城市污泥是城市废水处理的终端产物。城市污泥即使经过脱水处理后水分仍较多, 热值较低, 若直接作为燃料不易稳定燃烧, 而且燃烧产生的热量较难满足工业锅炉供热和发电的需要。因此考虑将城市污泥脱水后和煤混合作为锅炉燃料, 为城市污泥的最终处理寻求一条经济合理的途径, 以便达到节约能源、提高企业经济效益和保护环境的目。为了对城市污泥和煤的混料的燃烧规律有一个基本的了解, 我们利用热重分析法对其进行了初步的研究, 为其今后的工业应用提供一定的理论依据。

2 试验部分

2.1 试验装置

试验采用法国 Setaram 公司 TGA92 型热重-差热分析仪, 可获得试样的热重曲线、微商热重曲线、差热曲线和热流曲线。主要技术数据如下:

热天平精度: 0.1 μg; 最大试样量 200 mg; 温度精度: ±2 °C; 温度范围: 室温 ~ 1 600 °C; 试验气氛: 空气、惰性气体; 升温速率: 0.01 ~ 99.99 °C/min。

2.2 试验条件

试样粒度: < 200 目 (0.074 mm), 按比例混合均匀后取样;

试验氛围: 空气, 流量 85 mL/min 左右;

试样质量: 6 mg 左右;

升温速率: 20 °C/min, 升温至 1 000 °C 后恒温 5 min。

2.3 试验内容

通过对 TG 曲线和 DTG 曲线的分析来研究某城市污泥和某煤种按不同比例掺混后着火温度、活化能和综合燃烧特性指数等参数的变化规律。各试样的成分分析如表 1 所示。本文采用加权平均的方法来计算污泥和煤混合后的成分。

表 1 试样成分分析

| 试样编号 混合比例(煤:污泥) | | 1号试样 | 2号试样 | 3号试样 | 4号试样 | 5号试样 |
|--------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1:0 | 2:1 | 1:1 | 1:2 | 0:1 |
| 工业分析 | 水分 M _{ad} | 2.18 | 4.68 | 5.93 | 7.17 | 9.67 |
| | 挥发分 A _{ad} | 29.56 | 37.30 | 41.17 | 45.03 | 52.77 |
| | 固定碳 FC _{ad} | 44.61 | 32.91 | 27.06 | 21.20 | 9.50 |
| | 灰分 A _{ad} | 23.65 | 25.11 | 25.84 | 26.60 | 28.06 |
| 元素分析 | 碳 C _{ad} | 58.84 | 47.13 | 41.27 | 35.41 | 23.70 |
| | 氢 H _{ad} | 3.53 | 4.10 | 4.39 | 4.67 | 5.24 |
| | 硫 S _{ad} | 0.56 | 0.66 | 0.71 | 0.76 | 0.86 |
| | 氮 N _{ad} | 0.94 | 2.21 | 2.85 | 3.49 | 4.76 |
| | 氧 O _{ad} | 10.30 | 16.11 | 19.01 | 21.90 | 27.71 |

3 试验结果与分析

3.1 单一及混合试样的动力学分析

忽略温度对活化能的影响, 并假设反应符合简单动力学方程, 即:

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

式中: τ—反应时间; k—速率常数; n—反应级数; α—转化率; 定义如下:

收稿日期: 2003-02-28; 修订日期: 2003-04-15

基金项目: 江苏省建设厅基金资助项目(JS200106); 江苏省科技厅基金资助项目(BS2001029)

作者简介: 顾利锋(1978-), 男, 江苏海门人, 东南大学硕士研究生。

$$\alpha = \frac{W_0 - W_\tau}{W_0 - W_f} \quad (2)$$

式中: W_0 和 W_f 分别为试样的初始质量和反应结束时的质量, W_τ 是时间 τ 时试样的质量。由 Arrhenius (阿累尼乌斯) 公式得:

$$k = Ae^{-\frac{E}{RT}} \quad (3)$$

式中: A — 频率因子; E — 活化能, R — 理想气体常数; T — 试样温度。

定义升温速率:

$$\varphi = \frac{dT}{d\tau} \quad (4)$$

联立式(1) ~ 式(4), 可以得到:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\varphi} e^{-\frac{E}{RT}} (1 - \alpha)^n \quad (5)$$

移项积分得:

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

试取 $n = 1$, 参考文献[1], 积分并整理上式后得到:

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

令 $a = \ln \left[\frac{AR}{\varphi E} \left(1 - \frac{2RT}{E} \right) \right]$, 由于大部分 E 的数值较大, 对一般范围的反应温区而言 a 的值几乎都是常数。令 $b = -\frac{E}{R}$, $X = \frac{1}{T}$, $Y = \ln \left[-\frac{\ln(1 - \alpha)}{T^2} \right]$, 则有:

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

由上式作图求出该直线的斜率, 即可方便地求出活化能 E 和频率因子 A 。各试样的动力学参数如表 2 所示。由表 2 可知, 我们将单一试样和混合试样的整个燃烧过程当作一级反应来描述是比较合理的。

3.2 燃烧特性参数的确定

3.2.1 着火温度的确定

本文采用 TG-DTG 法^[3] 来确定试样的着火温度 t_i 。

3.2.2 燃尽温度的确定

本文将试样失重占总失重 99% 时对应的温度定义为燃尽温度 t_h 。

3.2.3 综合燃烧特性指数的确定

为了全面评价试样的燃烧情况, 我们采用文献[3] 中描述煤的综合燃烧特性指数 S 来对我们试验中的单一试样和混合试样的燃烧情况进行描述:

$$S = \frac{(dw/d\tau)_{\max} (dw/d\tau)_{\text{mean}}}{T_i T_h} \quad (9)$$

式中: S — 综合燃烧特性指数, $(dw/d\tau)_{\max}$ 为最大燃烧速度, %/min; $(dw/d\tau)_{\text{mean}}$ 为平均燃烧速度, %/min; T_i 为着火温度, K; T_h 为燃尽温度, K。综合燃烧特性指数全面反映了试样的着火和燃尽性能, S 的值越大说明试样的综合燃烧性能越好。

各试样燃烧特性参数如表 3 所示。各试样燃烧特性曲线见图 1。

3.3 燃烧特性分析

比较表 3 中的数据, 我们发现随着在煤中掺入污泥比重的增大, 试样的着火温度由 390 °C 提前到 280 °C, 燃尽温度也相应地由 740 °C 提前到 704 °C。由表 1 中的数据我们看到污泥中的挥发分含量很高, 达到 52.77%, 而比较难燃的固定碳的比重相当小, 为 9.50%, 因此污泥极易燃烧, 燃尽温度相对较低。煤和城市污泥相混后, 由于污泥中的挥发分能够在较低的温度下迅速析出, 使得试样的着火性能得到了较大的改善。在燃烧动力学参数中, 活化能是一个十分重要的参数, 它代表反应物的分子由初始稳定状态变为活化分子所需吸收的能量。活化能比着火温度更能从本质上描述试样的着火性能。比较表 2 中的数据, 我们发现 1 号试样(煤)的活化能为 96.1 kJ/mol, 而 2 号试样(2:1 煤/污泥)的活化能即减少为 56.0 kJ/mol, 这说明在煤中加入少量的污泥就可使其活化性能得到较大的提高。随着试样中污泥比重的增大, 着火温度提前, 活化性能提高, 两者的变化趋势是一致的。

表 2 试样燃烧动力学参数表

| 试样编号 | 拟合方程 | 相关系数 | 频率因子/min ⁻¹ | 活化能/kJ·mol ⁻¹ |
|------|------------------------------|---------|------------------------|--------------------------|
| 1号试样 | $Y = 1.43634 - 11564.21900X$ | 0.99300 | 1105980.8 | 96.1 |
| 2号试样 | $Y = -4.41093 - 6740.08812X$ | 0.99085 | 2077.2 | 56.0 |
| 3号试样 | $Y = -4.43719 - 6646.34129X$ | 0.97982 | 2002.9 | 55.3 |
| 4号试样 | $Y = -5.95300 - 5252.35640X$ | 0.96169 | 371.0 | 43.7 |
| 5号试样 | $Y = -7.76766 - 3590.46928X$ | 0.96770 | 50.0 | 29.9 |

表 3 试样燃烧特性参数表

| 试样编号 | $t_i / ^\circ\text{C}$ | $t_f / ^\circ\text{C}$ | $(dw/d\tau)_{\max} / \% \cdot \text{min}^{-1}$ | $(dw/d\tau)_{\text{mean}} / \% \cdot \text{min}^{-1}$ | $S \times 10^{11} / \text{min}^{-2}\text{K}^{-3}$ |
|------|------------------------|------------------------|--|---|---|
| 1号试样 | 390 | 740 | 9.974 | 3.982 | 0.892 |
| 2号试样 | 370 | 730 | 7.462 | 3.345 | 0.602 |
| 3号试样 | 350 | 725 | 7.375 | 2.933 | 0.558 |
| 4号试样 | 300 | 718 | 4.756 | 2.759 | 0.403 |
| 5号试样 | 280 | 704 | 5.328 | 2.235 | 0.399 |

从表 3 中的数据还发现, 随着试样中污泥比重的增大, 试样的综合燃烧特性指数由 $0.892 \times 10^{-11} \text{min}^{-2}\text{K}^{-3}$ 减小为 $0.399 \times 10^{-11} \text{min}^{-2}\text{K}^{-3}$, 表明其综合燃烧性能逐渐下降。分析表 1 中的数据, 我们发现尽管污泥中挥发分的含量很大, 但是所占份额最多的是氧元素, 占整个挥发分含量的 52.5%。氧虽然能助燃, 但是它在试样中的含量比之大气中氧含量是微不足道的。城市污泥中的氮元素含量 (4.76%) 也要比煤中的含量 (0.94%) 大很多, 但是氮既不可燃烧又无助燃作用, 而且在燃烧反应中会生成有害气体 NO_x 。氢和硫是可燃元素, 其中硫的发热量较低, 而氢的发热量最高。但是不管是在煤中还是在城市污泥中两者的含量都很小且相差不大。碳元素在煤和城市污泥中的比重都是最大的, 且碳的发热量很高, 在燃烧中起主导作用。通过比较表 1 中的数据我们发现, 煤中碳元素的含量为 58.84%, 而城市污泥中碳元素含量为 23.70%, 前者将近为后者的 2.5 倍。从表 3 中的数据还发现, 煤的最大燃烧速度和平均燃烧速度分别为 $9.974 \%/\text{min}$ 和 $3.982 \%/\text{min}$, 分别大于城市污泥的 $5.328 \%/\text{min}$ 和 $2.235 \%/\text{min}$, 可见煤燃烧起来要比城市污泥剧烈得多。当煤和城市污泥混合后尽管着火温度和燃尽温度有所提前但是燃烧的剧烈程度明显下降, 其综合燃烧性能下降。

由图 1 我们发现混合试样 DTG 曲线上的最大燃烧峰对应温度在 500°C 左右, 和煤的 DTG 曲线燃烧峰所对应的温度基本一致; 从 DTG 曲线上还可以看到在此之前有一个次峰, 所对应的温度在 320°C 左右, 和污泥 DTG 曲线燃烧峰所对应的温度基本一致, 这表明混合试样燃烧时, 试样中的煤和污泥基本上保持了各自的挥发分析出特性。当混合试样中污

泥含量较小或者和煤的含量相当时, 次峰并不明显, 只有当污泥的含量较大时次峰表现得才较为突出; 在发生燃烧反应的温度区间内, 混合试样 DTG 曲线的变化趋势和煤的 DTG 曲线变化趋势更为接近, 这些表明在混合试样的燃烧过程中煤的燃烧表现得更为明显。

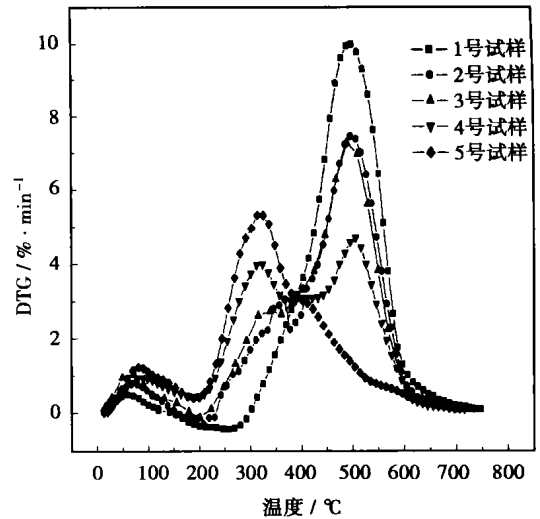


图 1 试样燃烧特性曲线

4 结 论

针对我们所选的某城市污泥和某煤种, 对其单独及按不同比例混合后进行的热重试验表明: 在煤中掺入城市污泥后, 混合试样和煤相比其活化性能得到提高, 着火温度提前, 但是综合燃烧性能却是下降的。在混合试样的燃烧过程中, 煤和污泥基本上保持了各自的挥发分析出特性, 煤的燃烧表现得更为明显。

参考文献:

- [1] 陈镜泓, 李传儒. 热分析及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [2] 聂其红, 孙绍增. 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.
- [3] 陈建原. 煤粉着火过程与着火模型的研究[D]. 武汉: 华中理工大学, 1989.

(辉 编辑)

emerge with regard to the definition of the exergy efficiency. In such a case a similar method for coping with the defect can be put into use. **Key words:** exergy efficiency, definition method, analysis, mathematical expression, heat pump
壳管式海水换热器污垢状况的可用评价方法研究 = **An Investigation of the Method for Evaluating the Exergy Loss Relating to a Shell-and-tube Seawater Heat Exchanger Fouling Condition** [刊, 汉] / JIANG Zhu-xing, LIU Xiao-hong (Guangzhou High Technical School of Navigation, Guangzhou, China, Post Code: 510725) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(6). — 558 ~ 560

An analysis is given of the impact, which the fouling of a shell-and-tube seawater heat exchanger at the tube side and the resulting changes in heat transfer intensity and flow pressure drop will have on the exergy loss of the heat exchanger. A method is proposed to evaluate heat exchanger fouling condition by making use of the exergy loss factor. This method has been found to be more comprehensive and straightforward for evaluating heat exchanger fouling than the one based on heat resistance detection and measurement. **Key words:** heat exchanger, exergy loss, fouling

城市污泥和煤混燃特性的热重分析法研究 = **A Study of the Characteristics of Mixed Burning of Municipal Sewage Sludge and Coal by a Thermogravimetric Method** [刊, 汉] / GU Li-feng, CHEN Xiao-ping, ZHAO Chang-sui, et al (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(6). — 561 ~ 563

A thermogravimetric method is employed to study such parameters as ignition temperature, activation energy and comprehensive combustion characteristics in connection with the burning of municipal sewage sludge and coal as well as their blends. The result of the study indicate that as compared with the case of burning only coal the combustion of blends has resulted in an enhanced activation energy with a lowering of the ignition temperature and a reduction of comprehensive combustion performance. During the blend burning process the municipal sewage sludge and coal have basically maintained their respective devolatilization characteristics with the coal burning exhibiting a more conspicuous behavior in this respect. **Key words:** municipal sewage sludge, coal, mixed combustion of sewage sludge and coal, thermogravimetric method

余热多级动力回收系统及其优化 = **Waste Heat Multi-stage Recovery System and It Optimization** [刊, 汉] / LIU Ye-kui, WANG Li, YAN Wen-jun, et al (College of Environmental and Chemical Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(6). — 564 ~ 567, 576

Taking into account the commonly seen phenomenon of incomplete recovery of waste heat from reactors a multi-stage system of reaction heat recovery is proposed based on a single-stage system of waste heat recovery. With the net power output serving as an objective function an optimization of the multi-stage recovery system was conducted. It can be demonstrated that the multi-stage system of waste heat recovery is markedly superior as compared to the single-stage one in terms of heat recovery efficiency. **Key words:** heat recovery, waste heat, optimization, multiple stage, model

离心叶轮内三维湍流流场的数值分析 = **Numerical Analysis of a Three-dimensional Turbulent Flow Field in a Centrifugal Impeller** [刊, 汉] / TAN Da-zhi, YUAN Xin (Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(6). — 568 ~ 571

Through the use of a LU-SGS-GE implicit scheme and an improved version of high-order MUSCL TVD scheme and by solving for a full three-dimensional compressible Reynolds time-averaged Navier-Stokes equation and low Reynolds number $q-\omega$ dual equation turbulent flow model calculated is the complicated three-dimensional flow in the impeller passage of a centrifugal compressor. The results of the calculation are in good agreement with those obtained by tests. This shows that