

文章编号:1000-582X(2009)05-0593-05

# 茂名油页岩燃烧特性及其大型 CFB 锅炉设计分析

田红<sup>1,2</sup>, 杨晨<sup>1</sup>, 廖正祝<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 动力工程学院, 重庆 400030; 2. 茂名学院 机电工程学院, 广东 茂名 525000)

**摘要:**为了有效地利用劣质燃料油页岩,采用 ZRY-2P 综合热分析仪对茂名油页岩进行热重试验,利用热重试验数据分析了油页岩的燃烧特性,并对燃烧特性曲线进行了分析。结果表明,油页岩燃烧分为低温段和高温段,低温段挥发分的燃烧为后期高温段固定碳的前期燃烧提供了热量,试样 S3 的综合燃烧性能最好;试样 S1 的热重曲线变化异常陡峭,所有试样的微商热重曲线均呈现出挥发分燃烧和固定碳燃烧的 2 个峰。在此基础上,对大型油页岩循环流化床(circulating fluidized bed,CFB)锅炉的设计进行了分析,同时提出掺烧石油焦的大型油页岩 CFB 锅炉的设计新方案并对其优势进行了分析。

**关键词:**油页岩;燃烧特性;热重分析;循环流化床锅炉

中图分类号:TK229.66

文献标志码:A

## Combustion characteristics and design analysis of a large circulating fluidized bed boiler for Maoming oil shale

TIAN Hong<sup>1,2</sup>, YANG Chen<sup>1</sup>, LIAO Zheng-zhu<sup>2</sup>

(1. College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Maoming College, Maoming 525000, P. R. China)

**Abstract:** To use low-calorie fuel oil shale efficiently, a thermogravimetric analysis experiment of Maoming oil shale is performed using the ZRY-2P synthetic thermal analytical instrument. Combustion characteristics are analyzed, and the combustion characteristic curves are investigated. The results show that oil shale combustion is split into low-and-high-temperature phases. The combustion of oil shale volatiles in the low-temperature phase supplies the caloric energy necessary to burn the oil shale fixed carbon in the high-temperature phase. The general combustion performance of S3 is the best. The thermogravimetric curve of S1 changes very abruptly. The differential thermogravimetric curves of all the samples have two peaks of volatiles combustion and fixed carbon combustion. Based on that, the design of large Maoming oil shale circulating fluidized bed (CFB) boiler was analyzed, a new project for co-combustion of petrol coke and oil shale in a CFB boiler was put forward, and its advantages analyzed.

**Key words:** oil shale; combustion characteristics; thermogravimetric analysis; circulating fluidized bed boiler

随着当今世界能源需求的日益增加,以及石油、煤及天然气资源的日益枯竭,对于替代能源资源油

页岩的利用研究越来越重要。全世界的油页岩储量非常丰富,文献[1]指出:截至 2005 年底的数据统

收稿日期:2009-01-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50576106)

作者简介:田红(1969-),男,重庆大学博士研究生,主要从事燃烧与环保研究。

杨晨(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(Tel)023-65103512;(E-mail)yxtyc@cqu.edu.cn。

计,共计 37 个国家探明的油页岩储量总和换算成页岩油约 410 Gt,数倍于世界石油探明可采储量的 160 Gt;中国是世界上油页岩资源丰富的国家之一,已探明的油页岩储量为 315.67 亿 t,位居世界第 6 位,主要分布于茂名、桦甸和抚顺等地<sup>[2]</sup>。

油页岩属于高灰分、高挥发分、低热值的固体化石燃料,其主要用于炼制页岩油以及燃烧用于发电、供热。文献[3-5]对油页岩的燃烧特性以及与煤的混烧研究指出:油页岩的燃烧具有着火容易,着火温度低,前期反应强烈,后期燃烧反应能力差,发热量低,燃烧以挥发分为主,属于均相燃烧,其灰壳传热阻力成为碳转化率提高的主要控制因素;油页岩破碎后呈片状,投入流化床燃烧时极易造成沟流,流化特性不稳定。文献[6-8]对中国桦甸 65 t/h 的油页岩循环流化床锅炉的示范工程进行研究后指出:该锅炉运行工况良好,达到了设计要求,但也存在一些问题,由于油页岩热值低,灰含量高,所以油页岩燃料供给量大,导致除渣除灰量大,而且灰分高进而导致炉内磨损严重,烟气含尘量大即扬析量大,不利于维持炉膛温度的均匀性;同时,该锅炉容量小,设计方面比较保守,该油页岩循环流化床(circulating fluidized bed, CFB)锅炉的设计方面存在炉膛及锅炉过高,金属消耗量比普通的同等级的燃煤 CFB 锅炉多。因此,随着当今 CFB 锅炉技术的发展,急需开发高参数大容量的大型油页岩 CFB 锅炉。

但是,对于燃烧茂名油页岩的大型 CFB 锅炉的研究文献极少,因此,笔者首先对茂名油页岩进行热重实验,研究了茂名油页岩的燃烧特性,同时基于现有的油页岩 CFB 锅炉的设计、运行以及现代大型 CFB 锅炉技术的发展,提出了大型茂名油页岩 CFB 锅炉设计的一些建议。而且,为了避免大型油页岩 CFB 锅炉的一些缺陷,提出了掺烧石油焦的油页岩 CFB 锅炉设计的新方案,并分析了掺烧石油焦的优势,这样,既可以充分利用油页岩的高挥发分特性,又可以解决石油炼制的副产品即石油焦难以充分利用的难题,同时为这两种重要的替代能源资源的充分利用找到了有效的途径。

## 1 实验部分

### 1.1 实验设备及实验条件

实验采用上海天平仪器厂生产的 ZRY-2P 高温综合热分析仪,该仪器具有微机数据处理系统的

热重-差热联用热分析仪,是一种程序温度控制下,测量物质的质量和热量随温度变化的分析仪器。主要由差热放大单元、天平控制单元、微分单元、气氛控制单元、数据处理接口单元、计算机和打印机等组成。热天平精度为 1  $\mu\text{g}$ ;最大试样重量为 2 000 mg;测温范围为 293~1 623 K;升温速率为 0.1~30 K/min;气体流量小于 100 mL/min;实验气氛为空气或氮气。

实验采样温度范围为 323~1 223 K;升温速率为 20 K/min;实验气氛为压缩空气,气体流量为 80 mL/min;每个试样质量为 8.5 mg 左右。

### 1.2 试样分析

试样来自广东茂名金塘露天矿区不同层次的 3 种油页岩,试样分别记为:S1、S2、S3。利用马弗炉(有温控装置、热电偶和高温表)、电热鼓风恒温干燥箱、电子天平(精确度 0.000 1 g)等设备对油页岩进行工业分析;使用自动量热仪测定油页岩的热值。测定结果见表 1。茂名油页岩具有灰分高、挥发分高、含碳量低、发热值低的特性,属于高灰分低热值燃料,宜就地利用。

表 1 油页岩工业分析

试样	$M_{\text{ad}}/\%$	$A_{\text{ad}}/\%$	$V_{\text{ad}}/\%$	$\text{FC}_{\text{ad}}/\%$	$Q_{\text{ar.net}}/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$
S1	2.80	60.35	29.34	7.51	5 691
S2	3.07	66.37	26.51	4.05	5 187
S3	3.12	68.25	25.37	3.26	4 935

说明: $M_{\text{ad}}$ 为空气干燥基的水分含量; $A_{\text{ad}}$ 为空气干燥基的灰分含量; $V_{\text{ad}}$ 为空气干燥基的挥发分含量; $\text{FC}_{\text{ad}}$ 为空气干燥基的固定碳含量; $Q_{\text{ar.net}}$ 为收到基的低位发热量。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 热重曲线分析

根据实验结果,油页岩的热重(thermogravimetric, TG)、微商热重(differential thermogravimetric, DTG)特性曲线在图 1-3 中示出。其中  $T$  为实验温度; $\omega$  为试样质量; $\tau$  为时间。3 个试样的 DTG 曲线均有 2 个峰值,很明显油页岩燃烧过程都经历了 2 个阶段:前期挥发分的析出和燃烧,以及后期固定碳的着火和燃烧阶段,前期挥发分的燃烧为后期剩余固定碳的燃烧提供了热量。挥发分含量越高,其着火温度越低,燃烧也更剧烈。试样 S1 由于挥发分含量高,从表 2 中可以看出试样 S1 的着火温度最低,灰含量最

低,所以其 TG 失重显著,DTG 曲线峰值明显,燃烧剧烈,这与该油页岩的工业分析相吻合。各试样的灰分含量高,所以 TG 曲线显示失重幅度小。

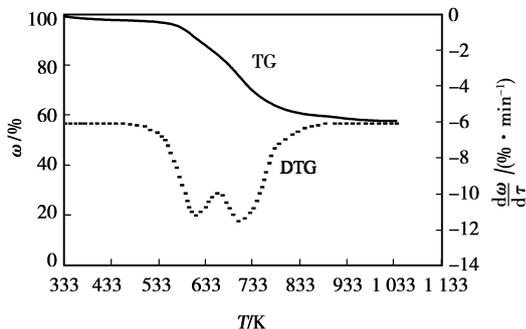


图 1 试样 S1 的燃烧 TG 及 DTG 曲线

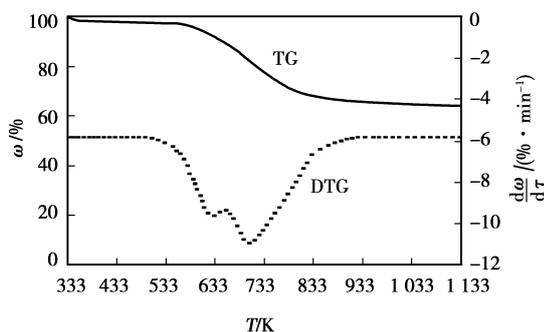


图 2 试样 S2 的燃烧 TG 及 DTG 曲线

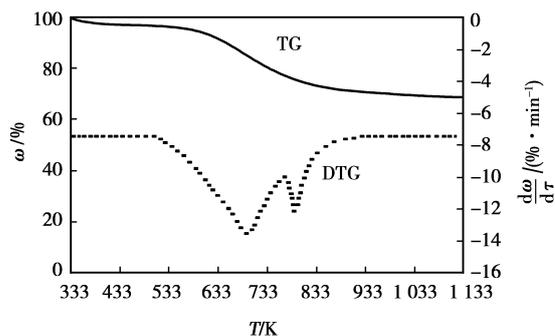


图 3 试样 S3 的燃烧 TG 及 DTG 曲线

### 2.2 着火温度和燃尽温度及燃烧速度的确定

试样的着火温度  $T_i$  是按照常用的 TG-DTG 法来定义的<sup>[9]</sup>。在 DTG 曲线上,过峰值点作垂线与 TG 曲线交于一点,过该点作 TG 曲线的切线,该切线与 TG 曲线上开始失重时的平行基线有交点,该交点所对应的温度定义为着火温度。茂名油页岩的 DTG 曲线有 2 个峰值,第一个峰值是油页岩挥发分的析出和燃烧,因此,茂名油页岩的着火温度采用过 DTG 曲线第一个峰值作垂线与 TG 曲线的交点来确定。燃尽温度的确定是按照试样失重占总失重的 99% 时所对应的温度定义为燃尽温度  $T_h$ 。采用 DTG 曲线求最大燃烧速度  $(d\omega/d\tau)_{max}, \% \cdot \text{min}^{-1}$ ; 其对应峰值点温度用  $T_{max}$  表示, K;  $(d\omega/d\tau)_{mean}$  为平均燃烧速度,  $\% \cdot \text{min}^{-1}$ 。燃烧特性参数见表 2。

表 2 油页岩的燃烧特性参数

试样	$T_i/\text{K}$	$T_h/\text{K}$	$T_{max}/\text{K}$	$(d\omega/d\tau)_{max}/(\% \cdot \text{min}^{-1})$	$(d\omega/d\tau)_{mean}/(\% \cdot \text{min}^{-1})$	$10^7 S_N/(\text{K}^{-3} \cdot \text{min}^{-2})$
S1	568	884	701	11.54	7.41	3.00
S2	578	910	699	10.98	6.95	2.51
S3	600	920	687	13.57	8.89	3.64

### 2.3 综合燃烧特性分析

燃烧特性是燃料最重要特性之一,它包括着火、燃尽等重要内容,因此需要对燃料的燃烧特性做一个综合的分析。采用常用的综合燃烧特性指数  $S_N$  对油页岩试样的燃烧特性进行描述<sup>[9]</sup>:

$$S_N = \frac{(d\omega/d\tau)_{max}(d\omega/d\tau)_{mean}}{T_i^2 T_h}$$

式中:  $S_N$  表示综合燃烧特性指数,  $\text{K}^{-3} \cdot \text{min}^{-2}$ ;  $T_i$  为着火温度, K。综合燃烧特性指数综合了燃烧速度、着火温度以及燃尽温度,所以综合燃烧特性指数全面反映了试样的着火和燃尽性能,  $S_N$  越大说明试样的综合燃烧性能越好。

油页岩综合燃烧特性参数见表 2。从表 2 可以

看出, S1 的着火温度及燃尽温度最低, S3 的着火温度及燃尽温度最高; S3 油页岩综合燃烧特性指数最大, 说明其燃烧性能最好, 这是因为该试样油页岩挥发分析出后燃烧剧烈, 燃烧速度大且燃烧彻底, 从 S3 的最大燃烧速度和平均燃烧速度均最大也可以看出这一点。

综上所述, 该实验的试样着火温度为 600 K 左右, 燃尽温度为 900 K 左右; 文献[10]对茂名油页岩进行全面半工业试烧指出: 在 663 K 时油页岩可以稳定着火, 炉膛温度为 898~1 223 K 时可以稳定燃烧, 燃尽特性好。由于实验装置以及对油页岩着火温度的定义不同, 所以结果有偏差, 但两者研究均得

出:油页岩着火温度低,易于着火燃烧,燃尽特性好。同时,文献[11]对茂名油页岩进行热解研究指出:在温度为 473~873 K 时热解反应激烈。因此,可以看出:茂名油页岩具有良好的低温着火燃烧特性,宜于采用低温 CFB 燃烧方式进行燃烧利用。

### 3 大型油页岩 CFB 锅炉的设计分析

基于前面对茂名油页岩燃烧特性实验的分析,和文献[10-11]等对茂名油页岩各种特性研究,以及近几年国内外文献[2,6-7]等对其他地方油页岩特性研究和现有油页岩循环流化床锅炉的设计、运行经验基础之上,同时结合当今大型 CFB 锅炉技术的发展,提出设计大型的茂名油页岩 CFB 锅炉(如 200 MW 级)是切实可行的。下面对大型的茂名油页岩 CFB 锅炉提出了一些设计分析。同时,为了克服油页岩低热质及灰分高等不利因素,造成设计大型的纯烧油页岩的 CFB 锅炉所需锅炉炉膛高、截面积大等因素导致整个锅炉系统的金属消耗量大,如桦甸 65 t/h 油页岩 CFB 锅炉就存在这样的问题,因此,提出了掺烧石油焦的大型油页岩 CFB 锅炉的设计新方案并进行了分析。

大型油页岩 CFB 锅炉的设计分析如下:

1)需要充分考虑油页岩燃料制备系统设计出力以及底渣冷却输送系统的处理能力。因为,油页岩具有良好的流化特性非常适合 CFB 锅炉燃料的输送,特别是在设计大型油页岩 CFB 锅炉时,由于油页岩热值低,灰含量高,油页岩的投入量很大,所以给加料系统增加了难度,同时也增加了出渣系统的难度。但是,由于油页岩具有良好的破碎特性和输送特性,对于 CFB 锅炉燃料制备系统设计和应用是非常有利的;同时需要考虑大量的底渣冷却输送系统,以便大量的底渣能够及时排除,维持炉膛的正常燃烧。

2)可以适当采用较大的炉膛截面面积,降低流化风速和物料循环倍率,维持合理的炉膛温度为 1 143 K,以利于脱硫,同时需要提高炉膛密相区耐火材料所敷设的高度,以保持炉膛密相区燃烧温度为 1 143 K。

3)由于油页岩挥发分含量高,燃烧时炉膛火焰拉得很长,需要合理设计炉膛及各受热面的吸热分配比例,应减少炉膛尤其是炉膛中下部的吸热量,维持炉膛的稳定燃烧,同时保证炉膛一定的热容量,使新投入的油页岩能够及时着火燃烧。

4)由于油页岩灰分含量高,为了维持一定量的灰循环,可以采用部分循环灰直接排放方式,提高反料风量,维持灰的平衡。设计页岩油 CFB 锅炉时应

该控制炉膛风速,选取适当的物料循环倍率和炉膛灰浓度,以减少飞灰排放的比例,从而减轻飞灰对尾部烟道受热面的磨损,而且需要维持炉膛燃料在炉内的一定储备量,以期维持炉膛一定的温度,为新投入的油页岩提供良好的燃烧环境。

5)一般情况下,CFB 锅炉的入炉燃料要求粒径小于 13 mm,但是,由于油页岩具有层状结构,其破碎后片状形状颗粒较多,即使通过破碎筛分系统后仍然会有较多的径向尺寸超过 13 mm 的油页岩片,当片状颗粒的平面与风速垂直时,迎风面的风速需要更大的风速才能使颗粒流化起来,当颗粒片状面顺着风速方向时,所需流化风速小一些,所以,需要根据实际情况调整好流化风速。另外,由于油页岩在燃烧过程中有良好的爆裂特性,大粒径的油页岩在燃烧过程中能迅速地碎裂为小粒径的油页岩颗粒,对整个燃烧过程中的稳定性影响不大。所以,设计大型的油页岩 CFB 锅炉时,可以适当放宽入炉油页岩颗粒的粒度范围,但同时要加强流化风的调整,适应颗粒粒径变化所带来的不利因素。

6)由于油页岩的含硫量低,灰含量高,同时油页岩中含有一定的 CaO 等碱金属氧化物成分,这部分碱金属氧化物对油页岩燃烧生成的  $\text{SO}_2$  有一定的自固硫能力,而且油页岩灰渣中还有诸多多孔介质对  $\text{SO}_2$  有一定的固硫作用;另外油页岩 CFB 锅炉设计的燃烧温度 1 143 K 处于 CFB 锅炉脱硫的最佳反应温度(1 123~1 153 K),所以,设计大型的油页岩 CFB 锅炉时,适当选择 Ca/S 摩尔比, $\text{SO}_2$  的排放就可以满足国家规定的排放要求。

7)由于油页岩的热值低,为了提高油页岩的燃烧效率,可以采取以下措施:控制燃烧室的燃烧温度为 1 143 K,选取适当的炉膛空塔(空床)速度和炉膛高度,合理控制炉膛内物料储存量,保证分离器有足够高的分离效率,加强二次风后期混合能力,促进炉膛充分燃烧等措施。

### 4 掺烧石油焦的大型油页岩 CFB 锅炉的优势分析

石油焦是原油提炼过程中的最终副产品,具有高碳、高热值、低灰分、低挥发分等特点,热值高达 32 MJ/kg。随着国际原油重质化、劣质化比例增大,石油焦产量将不断增加,特别是高硫石油焦所占比例较大,该种石油焦难以充分利用<sup>[12]</sup>。文献[13]对石油焦的燃烧特性研究指出:燃烧过程不稳定,呈现多阶段燃烧现象;燃烧后期的焦炭难以燃尽;燃烧特性介于烟煤和无烟煤之间。文献[14-15]对石油焦直接作为燃料在 CFB 锅炉中纯烧或与煤混烧的研

究指出:虽然有些工程取得了成功,但也存在不少问题,如结焦、脱硫、床温控制以及燃用高硫氮石油焦所带来的腐蚀问题也不容忽略;尾部飞灰含碳量高,燃烧效率低。

因此,如果在大型油页岩CFB锅炉中掺烧石油焦,就能够弥补两者燃烧方面的不足,充分利用油页岩的高挥发分和石油焦的高热值,从而发挥2种替代能源资源的燃烧优势而同时加以利用。设计掺烧石油焦的大型油页岩CFB锅炉具有以下优势。

1)掺烧石油焦时,由于油页岩高含量的挥发分优先析出并着火燃烧,为石油焦固定碳的前期着火燃烧提供了热量,有利于石油焦的着火燃烧,而且,高热值石油焦的掺烧,提高了整个燃料燃烧的发热量,可以减少炉膛高度以及受热面的面积,锅炉整体结构布局更加紧凑合理,减少锅炉钢材的用量。

2)纯烧高硫的石油焦CFB锅炉,对锅炉尾部低温省煤器腐蚀有较大影响,同时增大了烟气的二氧化硫的排放量。但是,油页岩硫含量低,碱金属含量高,灰分高,自脱硫能力高;因此,设计掺烧石油焦的大型油页岩CFB锅炉时,选择合理的Ca/S摩尔比,适当添加石灰石就能满足二氧化硫的排放要求。

3)石油焦过低的挥发分不仅不利于着火,而且使得石油焦颗粒在燃烧过程中的着火面积要低于高挥发分的油页岩颗粒,固定碳含量太高也难以完全燃尽。所以,将石油焦掺烧到油页岩CFB锅炉中,由于油页岩的高挥发分的析出燃烧,使混合燃料易于着火,燃烧速度较快,稀相区受热均匀,减少机械不完全燃烧损失和排烟热损失。

4)掺烧石油焦后,稀相区的灰浓度增加,增加了辐射换热,易于控制CFB炉膛以及尾部受热面温度,减少炉膛高温腐蚀,减少了纯烧油页岩时较多的灰粒进入尾部烟道对尾部受热面所造成的磨损,而且提高了尾部烟气温度,降低了尾部受热面的低温腐蚀。

5)掺烧石油焦之后,由于石油焦的灰分低,在一定程度上减少了床料的储有量,降低分离器的分离负荷,提高了锅炉运行的经济性;同时石油焦的加入,改变了床料的成分和物理特性,降低了燃料制备系统和除渣系统的设计、制造和运行的难度,解决了纯烧油页岩时大量的出渣所造成的问题,增加了锅炉的连续运行时间。

6)掺烧石油焦之后,由于相同粒径大小的石油焦密度小于油页岩,在炉膛内燃烧时,只需要较小的风速就能够将混合燃料颗粒送入旋风分离器,所以,可以减少炉膛风速,而且贴近墙壁的下降混合燃料颗粒的流通量将会大大加强,即边壁流增大,从而强化了炉内的传热,提高锅炉的燃烧效率。

## 5 结 论

1)DTG曲线呈现2个峰值,分别属于挥发分的析出及燃烧,以及剩余固定碳的着火及燃烧;大量挥发分的析出并燃烧为剩余碳的前期着火燃烧提供了热量。

2)S1的着火温度及燃尽温度最低,S3的着火温度及燃尽温度最高,但是,S3的综合燃烧特性指数最大,说明其综合燃烧性能最好。

3)设计大型的燃烧茂名油页岩CFB锅炉是可行且具有极大的优势,可以充分利用油页岩这种丰富的替代能源资源,对于缓解能源资源和保护环境都是有利的。

4)设计掺烧石油焦的大型油页岩CFB锅炉可以充分发挥2种资源的优势,解决石油焦难以充分利用的难题,具有很大的实际工程应用价值。

### 参考文献:

- [1] 钱家麟,王剑秋,李术元.世界油页岩综述[J].中国能源,2006,28(8):16-19.  
QIAN JIA-LIN, WANG JIAN-QIU, LI SHU-YUAN. Review on the world oil shale[J]. China Energy, 2006, 28(8):16-19.
- [2] 于海龙,江秀民.桦甸油页岩热解特性研究[J].燃料化学学报,2001,29(5):450-453.  
YU HAI-LONG, JIANG XIU-MIN. Study of pyrolysis property of Huadian oil shale[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2001, 29(5): 450-453.
- [3] ABDELMOUNAIM B, PIERRE V J. The impact of thermal pre-treatment on oil shale attrition and fragmentation in fluidized bed combustion[J]. Experiment Thermal and Fluid Science, 2004, 28(7): 677-682.
- [4] LISBOA A C L, WATKINSON A P. Operation conditions for oil shale thermogravimetry[J]. Powder Technology, 1999, 101(2): 151-156.
- [5] YAHYA H K. Batch combustion of oil shale particles in a fluidized bed reactor[J]. Fuel Processing Technology, 2005, 86(6): 691-706.
- [6] HAN X X, JIANG X M, CUI Z Q. Flow structure and combustion characteristic of 65 t/h oil shale-fired circulating fluidized bed riser-2: dilute phase[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(8): 2533-2539.
- [7] HAN X X, JIANG X M, WANG H, et al. Study on design Huadian oil shale-fired circulating fluidized bed boiler[J]. Fuel Processing Technology, 2006, 87(4): 289-295.
- [8] JIANG X M, HAN X X, CUI Z G. Progress and recent utilization trends in combustion of Chinese oil shale[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2007, 33(6): 552-575.
- [9] 王擎,姜庆贤,孙佰仲,等.桦甸油页岩燃烧性的热分析研究[J].能源工程,2006,28(2):1-5.

(下转第603页)

- JIANG FAN, PAN ZHONG-GANG, JIANG SHU-QIN, et al. Experimental study of the combustion characteristics of municipal solid waste[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 2001, 91(16):16-18.
- [6] 温俊明,池涌,罗春鹏,等. 城市生活垃圾典型有机组分混合热解特性的研究[J]. *燃料化学学报*, 2004, 32(5): 563-568.
- WEN JU-MING, CHI YONG, LUO CHUN-PENG, et al. Study on the pyrolysis characteristics of the mixture of typical organic components of MSW[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2004, 32(5):563-568.
- [7] 李钦朋,张力,唐强,等. 煤气层、煤矸石掺烧比对CFB炉内燃烧特性的影响[J]. *重庆工学院学报:自然科学版*, 2007, 21(9):74-75.
- LI QIN-PENG, ZHANG LI, TANG QIANG, et al. Influence of coal methane and coal gangue mixing ratio on the combustion characteristics of CFB boiler[J]. *Journal of Chongqing Institute of Technology: Natural Science Edition*, 2007, 21(9):74-75.
- [8] VUTHALURU H B. Investigations into the pyrolytic behaviour of coal/biomass blends using thermogravimetric analysis [J]. *Bioresource Technology*, 2004, 92(2): 187-195.
- [9] AYLLON M, GEA G, MURILLO M B, et al. Kinetic study of meat and bone meal pyrolysis; an evaluation and comparison of different possible kinetic models[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 2005, 74(1/2): 445-453.
- [10] DE JONG W, DI NOLA G, VENNEKER B C H, et al. TG-FTIR pyrolysis of coal and secondary biomass fuels: determination of pyrolysis kinetic parameters for main species and NOx precursors[J]. *Fuel*, 2007, 86(15): 2367-2376.
- [11] HU S, JESS A, XU M H, et al. Kinetic study of Chinese biomass slow pyrolysis; comparison of different kinetic models [J]. *Fuel*, 2007, 86(15): 2778-2788.
- [12] GONZALEZ J F, RAMIRO A, GONZALEZ-GARCIA C M. Pyrolysis of almond shells [J]. *Energy Application of Fraction*, 2005, 44(9): 3003-3012.
- [13] MANGUT V E, SABIO E, GANAN J, et al. Thermogravimetric study of the pyrolysis of biomass residues from tomato processing industry [J]. *Fuel Processing Technology*, 2006, 87(2): 109-115.
- [14] GOMEZ C J, VARHEGYI G, PUIGJANER L. Slow pyrolysis of woody residues and an herbaceous biomass crop: a kinetic study[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2005, 44(17): 6650-6660.
- [15] TARO S, NAKORN W. Kinetic analyses of biomass pyrolysis using the distributed activation energy model[J]. *Fuel*, 2008, 87(3): 414-421.
- [16] WANG G, LI W, LI B Q, et al. TG study on pyrolysis of biomass and its three components under syngas[J]. *Fuel*, 2008, 87(4/5): 552-558.
- [17] GRAMMELIS P, BASINAS P, MALLIOPOULOU A, et al. Pyrolysis kinetics and combustion characteristics of waste recovered fuels[J]. *Fuel*, 2009, 88(1): 195-205.

(编辑 赵 静)

(上接第 597 页)

- WANG QING, JIANG QING-XIAN, SUN BAI-ZHONG, et al. Investigation on combustion characteristics of Huadian oil shale by thermal analysis techniques[J]. *Energy Engineering*, 2006, 28(2): 1-5.
- [10] 蒋德华. 茂名油页岩燃烧特性研究[J]. *洁净煤技术*, 2006, 12(3):86-87.
- JIANG DE-HUA. Study on combustion characteristic of oil shale in Maoming[J]. *Clear Coal Technology*, 2006, 12(3):86-87.
- [11] 柏静儒,王擎,胡爱娟. 茂名油页岩的热解特性[J]. *东北电力大学学报*, 2006, 26(2): 73-78.
- BAI JING-RU, WANG QING, HU AI-JUAN. The pyrolysis characteristics of Maoming oil shale[J]. *Journal of Northeast Dianli University*, 2006, 26(2): 73-78.
- [12] 刘耕戊. 高硫石油焦的利用[J]. *石油炼制与化工*, 1998, 29(4):36-41.
- LIU GENG-WU. Using of petroleum coke with high sulphur content[J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 1998, 29(4):36-41.
- [13] 王文选,王凤君,李鹏,等. 石油焦与煤混合燃料热重分析研究[J]. *燃料化学学报*, 2004, 32(5):522-525.
- WANG WEN-XUAN, WANG FENG-JUN, LI PENG, et al. Thermogravimetric analysis on the pyrolysis and combustion characteristics of mixed fuels of petroleum coke and coal[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2004, 32(5): 522-525.
- [14] WANG J S, ANTHONY E J, ABANADES J C. Clean and efficient use of petroleum coke for combustion and power generation[J]. *Fuel*, 2004, 83(10): 1341-1348.
- [15] CHEN J H, LU X F. Progress of petroleum coke combusting in circulating fluidized bed boilers-A review and future perspectives [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, 49(3): 203-216.

(编辑 李胜春)