

# 多煤种混煤燃烧特性和动力学研究

刘艳军, 周子民

(中南大学 能源科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘 要:** 利用 SDTQ-600 热重差热分析仪, 对由不同比例的 3 种单煤组成的混煤进行热失重试验, 研究了混煤燃烧特性和动力学特性。试验结果表明: 混煤的挥发分初析温度和着火温度随挥发分含量高的单煤比例的提高而降低, 最大失重率随混煤含碳量的增加而增大; 利用 Gorbachev 积分式和一级反应动力模型对混煤活化能和频率因子进行了求解, 求解过程中动力学曲线拟合较好; 混煤煤种相同时, 混煤活化能与挥发分含量、活化能与着火温度呈良好的线性关系, 当混煤中缺少某一种单煤时, 这种线性关系会被破坏。

**关键词:** 混煤; 活化能; 挥发分; 热重分析

中图分类号: TK16 文献标识码: A

## 引 言

受供煤条件以及国家要求电站尽量燃用劣质煤政策的限制, 电厂通常使用混煤作为燃料。国内外学者对由两种单煤组成的混煤研究的较多<sup>[1~4]</sup>, 对 3 种及 3 种以上的单煤组成的混煤研究的较少。而电厂实际用煤往往是 3 种或多种单煤组成的混煤, 因此对此类混煤的燃烧特性进行研究具有重要的现实意义。

本研究采用热重分析法研究混煤的燃烧特性, 该法具有所需试样少、反应速度快及记录精确性高等优点, 是实验室研究燃料燃烧特性的常见方法<sup>[5~7]</sup>。利用 Gorbachev 近似积分法进行混煤的动力学分析<sup>[8~9]</sup>, 求解混煤动力学参数。

## 1 热重实验及燃烧特性分析

### 1.1 煤质分析

实验所用单煤样品为山西潞安煤 (LA)、浦白煤 (PB) 和长沙矿业煤 (CS), 单煤样的煤质分析数据如表 1 所示。

表 1 单煤的工业分析与元素分析数据 (%)

煤种	工业分析				元素分析			
	$M_{ad}$	$A_{ad}$	$V_{ad}$	$C_{ad}$	$H_{ad}$	$H_{ad}$	$N_{ad}$	$S_{ad}$
LA	0.76	24.71	12.72	67.3	3.36	1.16	0.31	3.37
PB	0.51	32.27	14.96	57.28	3.23	0.81	2.82	3.29
CS	1.82	33.24	22.83	53.73	3.32	1.04	3.31	4.62

混煤水分 ( $M_{ad}$ )、灰分 ( $A_{ad}$ )、固定碳 ( $C_{ad}$ ) 和分析基挥发分 ( $V_{ad}$ ) 含量具有线性加权性<sup>[12]</sup>, 因此可以得到混煤煤质分析数据, 如表 2 所示。

表 2 掺混比例及混煤煤质分析 (%)

配 比		$M_{ad}$	$A_{ad}$	$V_{ad}$	$C_{ad}$
		A1	LA:PB:CS=8:2:0	0.71	26.22
A2	LA:PB:CS=6:2:2	0.92	27.93	15.08	62.58
A3	LA:PB:CS=4:2:4	1.13	29.63	17.00	59.87
A4	LA:PB:CS=2:2:6	1.35	31.34	18.92	57.15
A5	LA:PB:CS=0:2:8	1.56	33.05	20.83	54.44

### 1.2 实验方法

热重分析法 (TGA) 是在程序温度控制下测量物质质量和温度关系的一种技术<sup>[10~11]</sup>。采用美国 SDTQ-600 热重差热分析仪对某电厂使用的混煤进行热重实验。实验条件: 样品重量为  $10 \pm 0.5$  mg, 升温速率为  $20$  K/min, 煤粉粒度为 140 目, 煤粉颗粒在流量为  $100$  mL/min 纯度为 99.99% 空气气氛中加热, 终温为  $1273$  K。

### 1.3 混煤的 TG 和 DTG 曲线

对表 2 中的 5 种混煤进行热重实验, 得到各比例混煤的重量变化曲线 (TG) 和重量变化率曲线 (DTG) 如图 1 所示。由图可以看出: 在  $383$  K 之前, 混煤 A1~A5 都有一个明显的失重阶段, 这主要是混煤外部水分蒸发造成的; 在  $383$  K 之后, 混煤重量

逐渐增加,这主要是由混煤表面化学吸附现象造成的,混煤表面吸附了大量氧分子,为煤的氧化提供了大量氧化剂,促进了煤的燃烧。623 K左右时混煤开始出现恒定失重现象,在 DTG曲线上表现为曲线大于零且逐渐升高,这是挥发分的析出造成的。随着温度的升高,挥发分开始着火,引燃煤焦,直至完全燃烧,在 DTG曲线上表现为曲线逐渐升高至最大,然后逐渐降低至零。

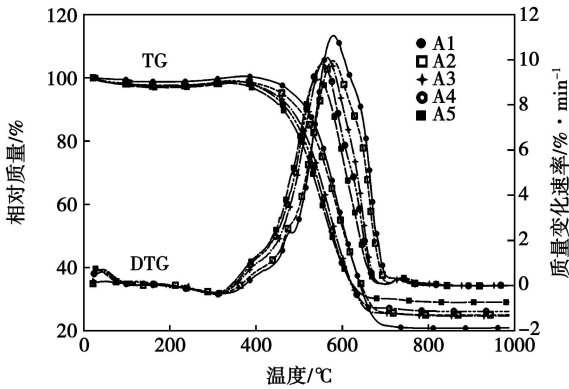


图 1 A1 ~ A5 的 TG和 DTG曲线

1.4 混煤燃烧特性分析

采用 TG-DTG法(切线法)确定混煤着火温度  $T_i^{[13]}$ ,如图 2所示。另外,通过 TG-DTG曲线还获得了挥发分初析温度  $T_s$ 、最大失重率  $(dw/dt)_{max}$ 及其所对应温度  $T_{max}$ 、燃尽温度  $T_f$ 等参数,结果如表 3所示。可以看出:从 A1 ~ A5 挥发分初析温度、着火温度、最大失重速率对应的温度和燃尽温度均降低,表明挥发分含量高的混煤容易发生反应、最先着火并达到最大反应速度、最先燃烧完全。根据均相着火理论,挥发分析出燃烧有两种作用:一是加热焦炭,二是在析出过程中疏松煤样。这两种作用可以提高煤粒温度、增加煤粉比表面积,有利于煤样燃烧。因此,挥发分含量越高,这两种作用就越强烈,混煤越容易着火和燃尽。

表 3 混煤热重实验参数

	$T_s/K$	$T_i/K$	$T_{max}/K$	$(dw/dt)_{max}/\% \cdot \text{min}^{-1}$	$T_f/K$
A1	634.42	787.85	853.71	11.06	964.35
A2	628.23	780.12	851.19	9.949	958.26
A3	611.08	760.6	837.06	10.11	936.96
A4	607.04	751.17	826.97	9.816	932.89
A5	602	740.76	815.88	9.159	927.86

混煤最大失重速率  $(dw/dt)_{max}$ 随固定碳含量增加而增加,这是因为  $(dw/dt)_{max}$ 反应了煤着火后的燃烧状况,与混煤中固定碳含量有关,混煤含碳量越高,混煤燃烧越剧烈,煤样失重速率也就越大。

2 混煤动力学分析

2.1 燃烧反应动力学模型

非等温、非均相燃烧反应动力学方程为:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{1}{\beta} k(T) f(\alpha) \tag{1}$$

式中:  $\alpha$ —煤样氧化分解过程的转化率, %;  $T$ —转化率为  $\alpha$  时所对应温度, K;  $\beta$ —升温速率, K/min;  $k(T)$ —反应速率常数;  $f(\alpha)$ —反映煤炭燃烧反应机理的函数模型。

Arrhenius定律:

$$k(T) = A \exp\left\{-\frac{E}{RT}\right\} \tag{2}$$

式中:  $A$ —前置因子;  $E$ —活化能, kJ/mol;  $R$ —普适气体常数, 值为 8.31 J/(mol·K)。

将式 (2)代入式 (1)并进行积分,得:

$$G(\alpha) = \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{A}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left\{-\frac{E}{RT}\right\} dT \tag{3}$$

式中:  $G(\alpha)$ —积分形式动力学模型函数,在数学上没有解析解,只能采用数值分析方法。

采用比常用的 Coats-Redfern更加精确的 Gorbachev积分式<sup>[14]</sup>:

$$G(\alpha) = \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{A}{\beta} \frac{RT^2}{E+2RT} \exp\left\{-\frac{E}{RT}\right\} \tag{4}$$

采用一级反应动力学模型,即:

$$f(\alpha) = 1 - \alpha \quad G(\alpha) = -\ln(1 - \alpha) \tag{5}$$

由此可得:

$$\ln\left\{\frac{-\ln(1-\alpha)}{T^2}\right\} = \ln\left\{\frac{A}{\beta} \frac{R}{E+2RT}\right\} - \frac{E}{RT} \tag{6}$$

对于一般的反应温度区和大部分的  $E$ 来说,  $E$  值远大于  $2RT$  的值,可视  $\left\{\frac{E+2RT}{E}\right\}$  为常数  $1^{[14]}$ ,因此式 (6)中  $\ln\left\{\frac{A}{\beta} \frac{R}{E+2RT}\right\} \approx \ln\left\{\frac{AR}{\beta E}\right\}$ ,是与温度  $T$  无关的项。

2.2 混煤动力学参数求解

将  $\ln\left\{\frac{-\ln(1-\alpha)}{T^2}\right\}$  对  $\frac{1}{T}$  做回归分析,通过分析得到形如  $Y = a + bX$  的方程式,根据方程的斜率和截距求得活化能  $E$  和指前因子  $A$  结果如表 4所示。

表 4 混煤动力学参数

方程形式	活化能 E /kJ·mol <sup>-1</sup>	前置因子 A	相关系数 R <sub>相关</sub>
A <sub>1</sub> Y=1.51-133306.5X	110.629	20122.51	0.9904
A <sub>2</sub> Y=-0.74-11195.2X	93.076	1783.47	0.9977
A <sub>3</sub> Y=-0.91-10759.7X	89.456	1447.653	0.9954
A <sub>4</sub> Y=-1.29-10315.8X	85.765	941.95	0.9923
A <sub>5</sub> Y=-2.4-9254.1X	76.938	275.71	0.9915

由表 4 可以看出, 曲线拟合相关系数都比较高, 这说明选用一级反应动力模型来描述混煤燃烧动力学特性是正确的, 活化能的计算结果能够真实地反映混煤燃烧的难易程度。混煤活化能随着成分的变化会有所改变, 随着混煤中长沙矿业煤的比例的增加有所下降, 这是因为长沙矿业煤挥发分含量较高, 是易燃煤种, 混煤中此种煤的含量越高, 燃烧越容易进行, 因而达到燃烧所需要的最低能量值越低。

### 2.3 混煤活化能分析

根据求解所得表 4 中的数据, 得到混煤活化能与挥发分含量之间的关系, 如图 2 所示。随着混煤挥发分含量的增加, 混煤活化能逐渐降低, 这主要是因为混煤挥发分含量越高, 相同温度条件下析出的挥发分的量越多、挥发分浓度越高, 挥发分分子间碰撞越剧烈, 普通分子更容易转化为活化分子, 煤炭氧化燃烧越容易。

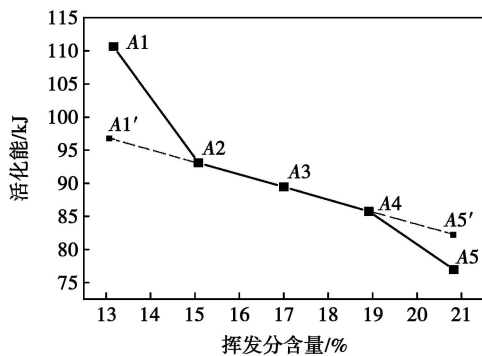


图 2 混煤活化能与挥发分含量关系

图 2 中 A<sub>1</sub> 和 A<sub>5</sub> 点是按照 A<sub>2</sub> ~ A<sub>4</sub> 线性关系确定的 A<sub>1</sub> 和 A<sub>5</sub> 的虚点, 即如果按照线性关系, 混煤 A<sub>1</sub> 和 A<sub>5</sub> 活化能值应该落在 A<sub>1</sub>' 和 A<sub>5</sub>' 附近, 但是实际 A<sub>1</sub> 与 A<sub>1</sub>' 相差约 11.7%, A<sub>5</sub> 与 A<sub>5</sub>' 相差约 8.2%。A<sub>1</sub> 和 A<sub>5</sub> 只包含有两种煤, 这表明第三种煤对混煤活化能影响比较明显, 缺少第三种煤对混煤的内部结构会产生比较大的影响, 使混煤的活化

能脱离与挥发分的线性关系。

混煤活化能是影响煤着火和燃烧的内在动力学因素, 根据表 4 中所求解结果做出了混煤活化能与混煤着火温度关系曲线, 如图 3 所示。

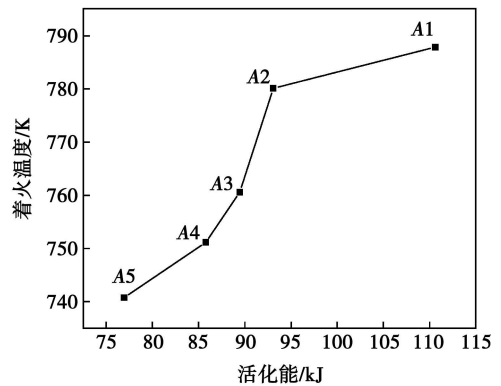


图 3 混煤活化能与着火温度关系

由图可以看出混煤着火温度随着混煤活化能的增加而逐渐升高, 这是因为活化能越高, 表明反应能够进行的最低能量越大, 混煤越不容易着火。同时, 也可以看出 A<sub>2</sub> ~ A<sub>4</sub> 煤之间, 混煤活化能与着火温度基本成线性关系, 而 A<sub>1</sub> 和 A<sub>5</sub> 则偏离这种线性关系, 可见第三种煤的缺少改变了整个混煤组织结构, 破坏了混煤着火温度与活化能的线性关系。

### 3 结 论

利用 SDTQ-600 热重差热分析仪对由不同比例的山西路安煤 (LA)、浦白煤 (PB) 和长沙矿业煤 (CS) 组成的混煤进行热失重试验, 利用 Gorbachev 积分式和一级反应动力模型对混煤活化能和频率因子进行了求解, 得到结论:

(1) 从混煤 A<sub>1</sub> ~ A<sub>5</sub> 挥发分初析温度、着火温度、最大失重速率所对应温度以及燃尽温度随着挥发分含量的增加而降低, 混煤最大失重速率 (dw/dt)<sub>max</sub> 随固定碳含量增加而增加。

(2) 利用 Gorbachev 积分式和一级反应动力学模型可以比较准确的求解出反应活化能和频率因子, 一级反应动力模型可以比较正确的反应混煤反应状况。

(3) 当混煤由 3 种单煤组成时, 混煤活化能与挥发分含量、活化能与着火温度之间呈现良好的线性关系, 如果混煤中缺少某一种单煤时, 这种线性关系会被破坏。

## 参考文献:

- [1] WANG CHUN BQ, LI YONG HUA, CHEN HONG WEI. Study on combustion characters of blends coals [ J ]. Proceedings of the CSEE 2005 25(18): 97-103.
- [2] 刘亮, 李录平. 混煤热解特性及燃烧过程的实验研究 [ J ]. 动力工程, 2006 26(1): 130-134.
- [3] 高正阳, 方立军. 混煤燃烧特性的热重试验研究 [ J ]. 动力工程, 2002 22(3): 1764-1767.
- [4] GONICH HELLE S, GARCIA X. Coal blend combustion feasibility ranking from mineral matter composition [ J ]. Fuel 2003 82(15-17): 2087-2095.
- [5] 闵凡飞, 张明旭. 热分析在煤燃烧和热解及气化动力学研究中的应用 [ J ]. 煤炭转化, 2004 27(1): 9-12.
- [6] GUPTA R P. Coal research in Newcastle: past, present and future [ J ]. Fuel 2004 84(10): 1176-1188.
- [7] 靳世平. 回流区分级着火机制研究及工业应用 [ D ]. 武汉: 华中理工大学, 1999.
- [8] ROBERTS D G. Intrinsic reaction kinetics of coal chars with oxygen, carbon dioxide and steam at elevated pressures [ D ]. Newcastle in Australia: University of Newcastle, 2000.
- [9] GILM V, CASAL D, PEV DA C et al. Thermal behavior and kinetics of coal/biomass blends during co-combustion [ J ]. Biomass Resource Technology 2010 101(14): 5601-5608.
- [10] 祝文杰. 利用热天平研究煤的着火特性 [ D ]. 浙江: 浙江大学, 2004.
- [11] SEO DONG KYUN, PARK SANG SHIN, HWANG JUNGHQ et al. Study of the pyrolysis of biomass using thermo-gravimetric analysis (TGA) and concentration measurements of the evolved species [ J ]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 2010 89(1): 66-73.
- [12] 戴财胜. 动力配煤的理论与应用研究 [ D ]. 北京: 中国矿业大学, 2000.
- [13] 喻秋梅, 庞亚军. 煤燃烧试验中着火点确定方法的探讨 [ J ]. 华北电力技术, 2001(7): 9-10.
- [14] 胡荣祖, 史启祯. 热分析动力学 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2001.

## 新技术、新工艺

## 巴基斯坦正在建造 560 MW联合循环电站

据《Gas Turbine World》2010年7~8月号报道,卡拉奇电力供应公司接受了多于两台燃气轮机供货,用于正在宾盖西姆建造的一个560 MW联合循环电站。

BQPS2号电站将由3台燃气轮机提供动力,其中的一台燃气轮机和一台汽轮机已于7月初抵达现场。

燃气轮机是由GE France制造的,汽轮机是由中国哈尔滨电站集团公司供应的。该集团公司具有针对这项工程的采购和建造的承包合同。

该工程正被开发为一个分阶段进行的建设项目。第一台燃气轮机计划作为简单循环装置将于2011年6月启动,后续的两台燃气轮机将分别于7月和8月启动。

在安装好余热锅炉和汽轮机后,整个装置计划将于2012年3月开始正式的联合循环运行。

由于增加了560 MW的装机容量,宾盖西姆电站总装机容量达到1 820 MW,它将是巴基斯坦最大的火力发电站。

(吉桂明 摘译)

Differential Control Based on a Prediction Model [刊, 汉] GUO Qi YANG Xu-li REN Fang et al (College of Environment and Chemical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, China, Post Code: 066004) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 343 ~ 346

In the light of such specific features of the temperature control over the clapping sleeve in an electrically-heated boiler as a big lagging and time variation etc., designed was a fuzzy-PID (proportional integral and differential) controller based on a prediction model. After the above-mentioned prediction model has been established by employing the fuzzy principle, the coefficient  $K$  value in the prediction model was adjusted, resulting in a great enhancement of the dynamic performance and steady state precision of the fuzzy-PID controller added by the prediction model. In Matlab, a simulation of the fuzzy-PID control was realized and also experimentally tested. From the simulation and experiment, it can be seen that the controller provided with the fuzzy control principle responds more quickly and has a smaller overshoot and greater capacity to resist the disturbance than a conventional PID controller. The test results show that the control effectiveness by adopting the control scheme in question is relatively good.

Key words: prediction model; fuzzy-PID (proportional integral and differential) control; simulation

多煤种混煤燃烧特性和动力学研究 = Study of the Combustion and Dynamic Characteristics of a Multiple Coal rank-blended Coal [刊, 汉] LIU Yan-jun ZHOU Jiem-in (College of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha, China, Post Code: 410083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 347 ~ 350

By using a SDTQ-600 type temperature difference thermogravimetric analyzer, a thermogravimetric experiment was conducted of a blended coal composed of three single coal ranks in various proportions. The combustion and dynamic characteristics of the blended coal were studied. The test results show that the initial precipitation and ignition temperature of the volatile component of the coal will decrease with an increase of the proportion of the single coal rank with a highest volatile content and the maximum weight loss rate will increase with an increase of the carbon content of the coal. The Gorbachev integral formulae and a dynamic model for primary reactions were used to seek solutions to the activation energy and frequency factor of the coal, during which the solutions are in relatively good agreement with the dynamic curves. When the coal ranks consisting of the blended coal are identical, the activation energy and volatile content of the blended coal as well as its activation energy and ignition temperature assume a good linear relationship. When the blended coal is in short of any single coal rank, such linear relationships will be destroyed.

Key words: blended coal; activation energy; volatile content; thermogravimetric analysis

主蒸汽压力与热耗修正曲线的变工况算法 = Method for Calculating Main Steam Pressure and Heat Rate Correction Curves Under Off-design Operating Conditions [刊, 汉] ZHOU Lan-xin HUA Min (College of Power Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003), WANG