

混煤热天平燃烧模型研究

(哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

张晓杰 聂其红 孙绍增 朱群益 吴少华 秦裕琨

摘 要: 在混煤中, 各组分煤在燃烧过程中将保持各自的燃烧特性基础上建立了混煤热天平燃烧模型, 该模型与试验结果符合较好。

关 键 词: 混煤; 燃烧; 模型; 热天平

中图分类号: TQ038.1 文献标识码: A

1 概述

由于我国幅员辽阔, 各地发展又极不平衡, 并且受现阶段燃煤政策的影响, 造成火电机组经常燃用混煤。如果混配得当, 能够最大限度的发挥混煤的优势, 取长补短, 还会取得一定的经济效益。但是, 如果混配不当, 将会对发电企业造成较大的损失。因此, 对混煤的研究具有重大的实际意义。

国内外有些学者对混煤燃烧问题已经进行了一些研究^[1~4], 但通过建立燃烧模型后对之进行定量研究的还未见报道。混煤中各组分煤在燃烧过程中将保持各自的燃烧特性, 在此基础上建立了混煤热天平燃烧模型, 通过与热天平试验结果的对比, 说明该模型与试验结果符合较好。

2 模型的建立

如果两个煤种相混合, 在已知两个煤种的煤质和化学动力特性参数的条件下, 由计算模型就可以得到混煤的燃烧速率与温度的关系。混煤在燃烧中组分煤将保持各自的燃烧特性, 得到下面混煤的燃烧模型。模型方程有:

$$q = n_1 \cdot S_1^m \cdot K_{s,1} \cdot P_s^n + n_2 \cdot S_2^m \cdot K_{s,2} \cdot P_s^n \quad (1)$$

$$q = \frac{12 \cdot \varphi}{32} m_{O_2} \quad (2)$$

$$m_{O_2} = \pi \cdot r^2 \cdot \frac{D \cdot 32}{R \cdot T \cdot h_c} (P_A - P_b) \quad (3)$$

$$P_A = P_\infty \left(1 - \frac{32}{12 \cdot \varphi} \frac{q}{W_{O_2}} \right) \quad (4)$$

式中, q —— 热天平试样的燃烧速度, g/s

n_1, n_2 —— 分别为混煤中各组分煤的煤粒数,

采用下面的公式计算:

$$n_1 = \frac{G_o \cdot \theta_1}{\rho_{d,1} \cdot V_{d,1}} \quad (5)$$

$$n_2 = \frac{G_o \cdot \theta_2}{\rho_{d,2} \cdot V_{d,2}} \quad (6)$$

式中, G_o —— 干燥后混煤煤样原始重量, g;

$\rho_{d,1}, \rho_{d,2}$ —— 分别为各组分煤的密度;

$V_{d,1}, V_{d,2}$ —— 分别为各组分煤的煤粒体积;

θ_1, θ_2 —— 分别为各组分煤占混煤总量的份额, 如果两种煤相混合, 则:

$$\theta_1 + \theta_2 = 1;$$

S_1, S_2 —— 分别为各组分煤的颗粒未燃核外表面积, cm^2 ; 采用缩核模型进行计算, 则:

$$S_1 = S_{o,1} (1 - B_{r,1})^{2/3} \quad (7)$$

$$S_2 = S_{o,2} (1 - B_{r,2})^{2/3} \quad (8)$$

式中, $S_{o,1}, S_{o,2}$ —— 分别为各组分煤的原始表面积, cm^2

$B_{r,1}, B_{r,2}$ —— 分别为各组分煤的燃尽度, —;

m, n —— 参数; 由文献[5]分析, $m = 1.0, n = 0.75$;

$K_{s,1}, K_{s,2}$ —— 分别为各组分煤的表面反应速率系数, $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{MPa}$; 采用下式计算:

$$K_{s,1} = A_1 \exp(-E_1/R \cdot T) \quad (9)$$

$$K_{s,2} = A_2 \exp(-E_2/R \cdot T) \quad (10)$$

式中, A_1, A_2 —— 分别为各组分煤的频率因子, $1/\text{min}^{-1}$;

E_1, E_2 —— 分别为各组分煤的活化能, kJ/mol ;

R —— 气体常数, $8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$;

T —— 试样燃烧时对应的气体温度, 可取为热

天平程序温度, K;

P_s ——颗粒表面氧分压; 由于在低温下 (900 ℃ 以下) 氧的扩散速度与化学反应速度相差 1 ~ 2 个数量级, 因此, 在热天平条件下, 颗粒表面分压可以认为与试样层表面氧分压相同;

φ ——反应机理因子, 当碳与氧反应全部生成 CO 时, 其值为 2; 当全部生成 CO₂ 时, 其值为 1; 本文采用 Arthur^[9] 的方法, 即:

$$\text{CO/CO}_2 = 2\,500\exp\left(-\frac{51\,910}{8.314\times T}\right)$$

(11)

m_{O_2} ——氧通量, g/s;

r ——热天平坩埚支架半径, cm;

D ——氧气质扩散系数, cm²/s;

R ——气体常数, 8.206 MPa·cm²/(mol·K);

h_c ——热天平试样表面至坩埚出口截面距离, cm;

P_A ——坩埚出口截面的氧分压, MPa;

P_b ——热天平试验表面的氧分压, MPa;

P_∞ ——来流氧分压, 因为采用空气进行试验, 所以取为 0.021, MPa;

W_{O_2} ——来流的质量流量, g/s。

如果已知混煤的各组分煤的煤质特性和化学动力参数, 就可以通过上面的公式计算出温度与混煤燃烧速度之间的关系。

3 混煤热天平试验结果与模型计算结果的比较

选出三个煤种, 即霍林河褐煤(H 煤)、鹤岗烟煤(G 煤)和福建无烟煤(F 煤), 首先进行三个单煤的热天平试验, 以得到单煤的活化能和频率因子; 之后两两混配, 再进行热天平试验。最后采用混煤热天平燃烧模型计算出混煤的温度与燃烧速率关系, 与热天平试验结果相比较, 以考察模型与试验结果的符合程度, 验证模型的正确性。

本文采用日本理学电机 RIGAKU8150 型热天平, 配有高温型电阻炉和红外线加热炉^[7]。主要技术指标为:

(1) 测量温度范围: TG—DSC, 室温 ~ 800 ℃; TG—DTA, 室温 ~ 1 500 ℃。

(2) 重量测量灵敏度: 10 μg (量程为 1 mg 时); 最大试样量 500 mg;

(3) 测定气氛: 空气、惰性气体。

升温速度: 电阻炉, 1 ~ 20 ℃/min; 红外线加热炉, 1 ~ 999 ℃/min。

试验条件如下:

(1) 升温速率 40 ℃/min;

(2) 工作气氛为压缩空气, 气体流量 130 mL/min;

(3) 煤样质量 20±1mg, 煤粉细度 56 μm;

试验时, 先以 40 ℃/min 的升温速率升至 105 ℃, 在此温度下恒温 3 分钟, 以脱去水分, 而后以 40 ℃/min 的升温速度升温, 试样在等速升温条件下燃烧, 得燃烧特性曲线(TG 和 DTG 曲线), 分别见图 1、图 2 和图 3。

经过对三个煤种的常规分析和热天平试验分析, 所得的煤质特性和化学动力参数见表 1。

表 1 三个单煤的煤质分析和化学动力参数

名称	固定碳	挥发份	碳	氢	氧	氮	硫	灰分	活化能 (I 阶段)	指前因子 (I 阶段)
符号	FC _{daf}	V _{daf}	C _d	H _d	O _d	N _d	S _d	A _d	E	A
单位	%	%	%	%	%	%	%	%	kJ/mol	g/(cm ² ·s·MPa)
H 煤	52.74	47.26	50.30	4.32	19.71	1.10	0.87	23.70	78.73	462.65
G 煤	61.79	38.21	65.18	4.24	6.53	0.61	0.48	22.96	81.54	96.37
F 煤	94.43	5.57	70.65	1.84	2.52	0.7	0.71	23.58	103.45	167.07
名称	最大燃烧速率 对应温度		活化能 (II 阶段)		指前因子 (II 阶段)		发热量			
符号	$T_{\max}$		E		A		$Q_{\text{net,d}}$			
单位	℃		kJ/mol		g/(cm ² ·s·MPa)		kJ/kg			
H 煤	456		7.625		0.0034		18190			
G 煤	532		15.094		0.0027		25359			
F 煤	674		22.864		0.0051		25382			

表 1 中煤的活化能与频率因子是采用文献[5] 的零维燃烧模型计算得到的。计算时, 以 DTG 曲线上最大燃烧速率对应的温度 $T_{\max}$ 为分界点, 从失重

到该温度为第一阶段, 之后为第二阶段。因此表中分别给出了两个阶段的活化能和频率因子。采用两阶段的方法处理试验数据, 使得到的化学动力参数精

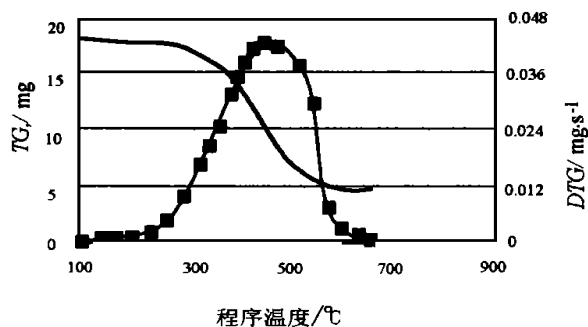


图 1 H 煤热天平试验结果

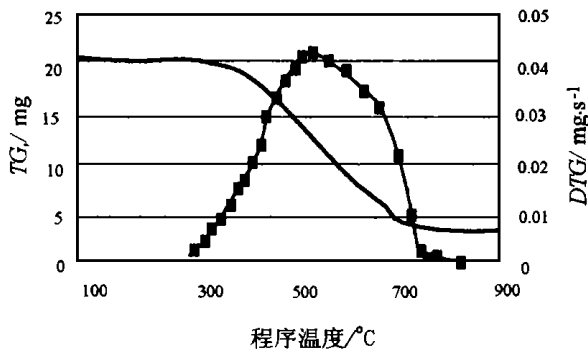


图 2 G 煤热天平试验结果

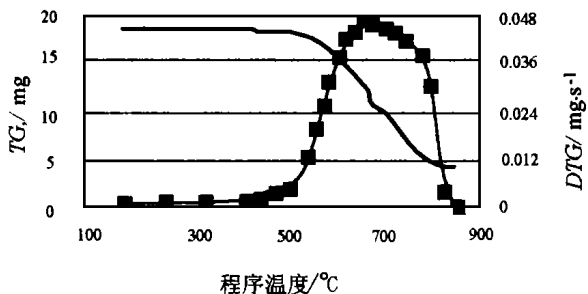


图 3 F 煤热天平试验结果

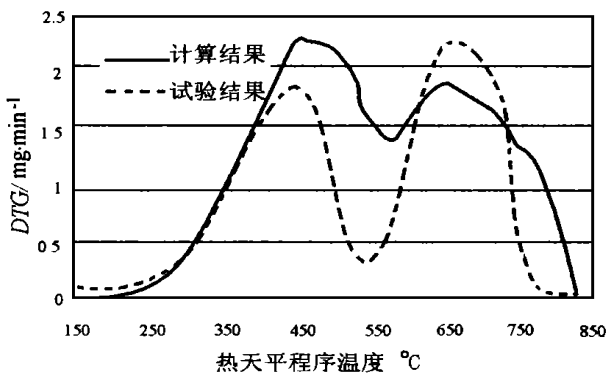


图 4 H 煤与 F 煤(1:1) 混煤试验与模型计算比较

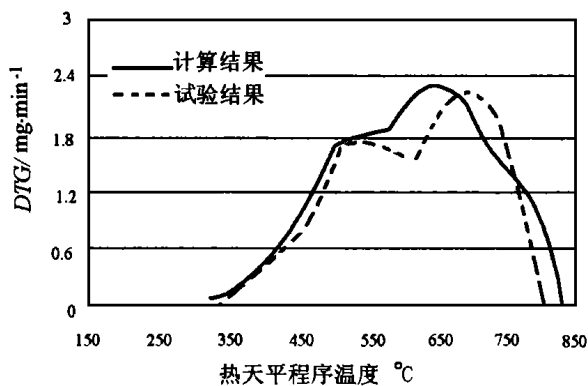


图 5 G 煤与 F 煤(1:1) 混煤试验与模型计算比较

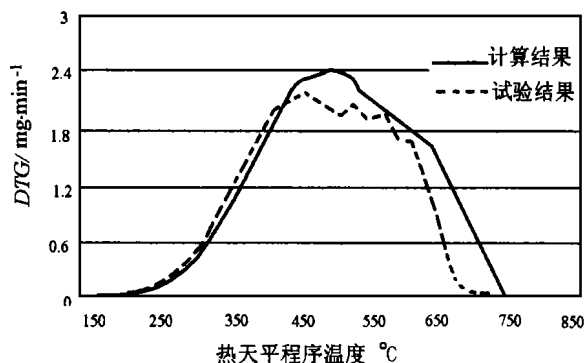


图 6 H 煤与 G 煤(1:1) 混煤试验与模型计算比较

三个煤种以 1:1 的比例两两混配, 然后利用热天平得到混煤的热天平试验数据。分别见图 4、图 5 和图 6。图中的虚线即为试验得到的混煤 DTG 曲线。由图 4 ~ 图 6 可见, 最大燃烧速率温度相差较大的 H 褐煤和 F 无烟煤的热天平 DTG 曲线有两个峰值, 分别与单煤热天平 DTG 曲线上的最大燃烧速率温度相对应, 这也说明混煤在燃烧过程中各自保持了各自的燃烧特性。同样的情况也在 G 烟煤和 F 无烟煤的热天平 DTG 曲线上有所体现。

图 4 ~ 图 6 中的实线分别为混煤热天平燃烧模型计算的结果, 由此可见, 模型计算的结果与试验总的来说符合较好, 当然还有一定的误差。这些误差主要来源于:

氧在试样层中的扩散被忽略; 由于采用零维燃烧模型计算单煤的活化能和频率因子, 并且混煤热天平燃烧模型也是建立在零维燃烧模型的基础上的, 因此氧在试样层中的扩散未被考虑, 这会给计算带来一定误差。

单煤燃烧研究还存在一些缺陷; 本文在计算反应机理因子时, 采用了 Arthur 提出的方法, 而在燃烧过程中 CO/CO₂ 如何随温度而变化, 还存在许多争

度得以提高。由表 1 可见, 三个试验煤种分别为典型的褐煤、烟煤和无烟煤, 采用这三种煤进行混配研究, 更能反映出混煤的特点。

议。

程序温度与实际温度存在差异; 计算中采用的是程序温度代替气体在坩埚中的实际温度, 而这两个温度是有差异的, 尤其是进行混煤试验时, 如果组分煤各自保持各自的燃烧特性, 易着火的煤先着火燃烧, 实际温度将高于程序温度, 但燃烧后, 难燃烧的煤还未进行燃烧, 在压缩空气的冷却下会很快下降, 这时的程序温度将高于实际温度, 在热天平加热器的控制下继续升温, 接着难燃烧的煤也剧烈燃烧起来, 这样, 程序温度又将低于实际气体温度。

(4) 试验用混煤的混配比例与计算时采用的比例存在差异; 试验时是采用先将两种煤的煤粉以 1:1 的比例充分混合, 而后取用 20 mg 左右进行试验的方法, 这会产生所取的 20 mg 的煤其混配比例偏于 1:1 的情况。

考虑以上产生误差的原因, 可以认为计算模型结果与试验结果符合较好。

4 结论

(1) 在混煤各组分煤在燃烧过程中各自保持各

自的燃烧特性的基础上建立的混煤热天平燃烧模型与试验结果符合较好;

(2) 本文建立的混煤燃烧模型虽然是用于计算热天平结果的, 但该模型的处理方法和主要公式可为其它混煤燃烧过程所借鉴。

参考文献:

- [1] 曾汉才, 姚斌, 邱建荣, 喻秋梅. 无烟煤与烟煤的混合煤燃烧特性与结渣特性研究[J]. 燃烧科学与技术, 1996, 2(2): 181—189.
- [2] 侯栋岐, 冯金梅, 陈春元, 闻培音. 混煤煤粉着火和燃尽特性的试验研究[J]. 电站系统工程, 1995, 11(2): 30—34.
- [3] 陈东林, 李立. 石门电厂锅炉燃用混煤的技术措施[J]. 华中电力, 1996, 9(3): 40—45.
- [4] Maier H, Splithoff H. Effect of coal blending and particle size on NO_x Emission and burnout[J]. **Fuel**, 1994, 73(9): 1447—1452.
- [5] 朱群益. 煤粉热解、燃烧热天平模型及结渣性快速测定方法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1996.
- [6] Field, M A, Gill D W. 煤粉燃烧[M]. 章明川, 许方洁译. 北京: 水力电力出版社, 1989. 110—265.

(渠 源 编辑)

(上接第 335 页)

参考文献:

- [1] Sasaki H. A decentralized load frequency control method by means of frequency measurement of adjacent power system[C]. Brussels: IFAC, 1988. 387—393.
- [2] Kure-Jensen J, Hanisch R. Integration of steam turbine controls into power plant system[J]. **IEEE Transaction on Energy Conversion**, 1991, 16(1): 177—185.
- [3] Ham P A L, Green N J. Developments and experience in digital turbine control[J]. **IEEE Transaction on Energy Conversion**, 1988, 3(3): 568—574.
- [4] Dimeo Robert, Lee Kwang Y. Boiler-turbine control system design using a genetic algorithm[J]. **IEEE Transaction on Energy Conversion**, 1995, 10(4): 752—759.
- [5] Ben-Abdeennour Adel, Lee Kwang Y. A decentralized controller design for a power plant using robust local controllers and functional mapping[J]. **IEEE Transaction on Energy Conversion**, 1996, 11(2): 394—399.
- [6] Ben-Abdeennour Adel, Lee Kwang Y. An autonomous control system for boiler-turbine units[J]. **IEEE Transaction on Energy Conversion**, 1996, 11(2): 401—406.
- [7] Stubbe M. Study of 1000 MW turbine control by means of a new short-

and long term stability program(STAG)[C]. Brussels: IFAC, 1988. 349—356.

- [8] Eichler R. Optimal power flow functions: Application and modelling aspects[C]. Brussels: IFAC, 1988. 379—386.
- [9] Yu Glazer F. Tuning and testing the automatic control system for the 1000-60/3000 turbine[J]. **Thermal Engineering**, 1990, 37(11): 235—241.
- [10] 饶经杭. 我国大容量汽轮机电液控制系统的现状[J]. 中国电力, 1997, 2: 3—6.
- [11] 周或堂. 一种单元协调控制系统的设计方法[J]. 中国电机工程学报, 1998, 1: 38—44.
- [12] 徐晶. 彭城电厂 300 MW 汽轮机控制系统 DEH-III 的调试[J]. 上海汽轮机, 1996, 2: 34—37.
- [13] 刘福军, 王晓溪. 单元机组协调控制功能应用种的问题及解决途径[J]. 中国电力, 1997, (8): 45—49.
- [14] 倪维斗, 徐基豫. 自动调节原理与透平机械自动调节[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [15] 郎意安, 陈胜利. 协调控制策略的探讨与实践[J]. 华东电力, 1999, (2): 12—14.
- [16] 于达仁, 徐志强. DEB 的新认识——增益调度控制[J]. 热能动力工程, 1999, 14(5): 379—381, 396.

(复 编辑)

Described in this paper is a new type of high temperature air-fired boiler featuring the following key techniques: high-temperature air combustion, a ceramic honeycomb heat storage bed, a burner adapted for graded burning of fuel, in-furnace re-circulation of flue gases and a four-way high-frequency switch-over valve. The boiler working principle and process was explained in detail and the basic innovative approach for further development of the boiler explored along with an analysis of its main technical characteristics. In addition, the authors have also assessed the potential significance of popularizing this new type of boiler in China. **Key words:** high-temperature air combustion, new type of boiler, heat exchanger, burner, analysis of characteristics

移动颗粒层过滤 高温除尘器中循环清灰系统的试验研究 = Experimental Study of a Pneumatic Conveyor-based Ash-removal System for a High-temperature Precipitator Featuring a Moving Granular Bed Filter [刊, 汉] / XU Shi-Sen (Thermotechnical Research Institute of China National Electric Power Corporation, Xi'an, Shaanxi, China, Post Code 710032) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(4). — 352 ~ 355, 363
Described in this paper is a pneumatic-conveying and filtrating media-based ash removal system capable of uninterrupted steady and high-efficiency operation. An experimental study aimed at structure optimization has been performed of the granular media feeding device, a transport system and the ash removal device. The operation experience of the above-cited ash removal system demonstrates the feasibility of a continuous and stable process of pneumatic-conveyor-based ash removal. The detailed information presented in the paper can serve as helpful hints and valuable reference data for the development of high-temperature ash removal technology based on the use of a moving granular bed filter. **Key words:** moving granular bed filter, pneumatic cycle ash removal, high-temperature dust elimination

混煤热天平燃烧模型研究 = A Study of Thermobalance Model for the Burning of Blended Coals [刊, 汉] / ZHANG Xiao-jie, NIE Qi-hong, SUN Shao-zeng, ZHU Qun-yi, WU Shao-hua, QIN Yu-kun (Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(4). — 356 ~ 359

Each coal component in blended coals will keep its individual combustion characteristics during the combustion process. On this basis set up is a thermogravimetric combustion model of blended coals. The results obtained from the model are in fairly good agreement with those of experimental tests. **Key words:** blended coals, combustion, model, thermobalance

油田火筒加热炉大开孔封头强度研究 = A Study of the Strength of a Crude Oil Heating Boiler Head Perforated by Large Openings [刊, 汉] / WANG Huai-bin, XING Zhi-dong, DU Jun, *et al* (College of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(4). — 363 ~ 363

At present there exist no applicable standards or specifications for calculating the strength of crude oil heating boiler (COHB) heads perforated by densely distributed large openings. This has to a certain extent hampered the further development of crude oil heating boilers in China. In this paper a finite-element strength analysis and calculation for the following three types of boiler head perforated by large openings is performed with the help of a plate-shell model: i.e., one without any reinforcement, another one with a reinforcement and a third one with a cross-shaped reinforcement. The results of a theoretical and experimental study indicate that the finite-element model set up by the authors is feasible and effective for the strength analysis of boiler heads perforated by large openings. The calculation results agree quite well with those obtained through tests. The actual stress sustained by the heads has not surpassed the allowable stress of the relevant material used. **Key words:** head, strength, large openings, finite-element analysis, experimental study, heating boiler

储冰桶换热管组流动特性研究 = A Study of the Flow Characteristics of a Heat Exchange Tube Bank in an Ice Storage Tank [刊, 汉] / QIAN Huan-qun, MIAO Zheng-qing, HU Zhi-hua, *et al* (Xi'an Jiaotong University, Xi'an,