

一种天然焦燃烧特性的试验研究

董 勇, 王春冰, 王文龙, 马春元

(山东大学 能源与环境研究所, 山东 济南 250061)

摘 要:天然焦是煤接触岩浆岩受热分解后的固体残余物,它是岩浆岩侵入煤层或煤层附近,由煤层受热烘烤而干馏变成的,天然焦一般作为难以利用的能源考虑。为了开拓天然焦综合利用新途径,本文利用热重分析法对该天然焦、济宁煤及二者混合燃料的着火、燃尽等燃烧特性进行了实验研究。热重试验结果表明,天然焦的着火温度为 876.3 K,其着火温度最高,其次是混煤,济宁燃煤着火温度最低,但是天然焦的燃尽时间最短,济宁煤燃尽时间居中,混煤燃尽所需时间最长。综合试验研究及理论分析,天然焦混煤燃料可以作为电站锅炉燃料,本研究可为天然焦用作电厂燃料提供依据。

关 键 词:天然焦;热重分析;燃烧特性;着火;燃尽

中图分类号:TK16 文献标识码:A

1 前 言

天然焦是煤接触岩浆岩受热分解后的固体残余物,它是岩浆岩侵入煤层或煤层附近,由煤层受热烘烤而干馏变成的。在我国煤炭资源相当紧缺的华东地区,天然焦的储量非常丰富,如山东巨野煤田天然焦储量 $7.8 \times 10^8 \text{ t}^{[1]}$ 。但在以往的煤田详查报告、矿区整体规划以及燃煤电厂中,天然焦一般作为难以利用的能源考虑^[2]。

随着国民经济的快速发展,能源需求日益增加,煤炭资源量急剧减少,合理利用有限的煤炭资源已成当务之急。近年来,国内诸多单位对天然焦的综合利用进行研究,如天然焦制型煤技术、用于煤化工生产原料、用于建材工业原料等^[3~4],这些研究为天然焦的综合利用进行了有益地探索和实践。

为了开拓天然焦综合利用新途径,某 300 MW 燃煤机组拟用一种天然焦及一种济宁煤的混合煤种作为该锅炉燃料。为此本文利用热重分析法对该天然焦、济宁煤及二者混合燃料的燃烧特性进行了实验研究。研究表明,天然焦可以作为电站锅炉燃料,但是天然焦比一般燃煤着火温度高,混烧时燃尽稍差,本研究为中试试验及天然焦在电厂的应用提供

了依据。

2 实验装置及实验内容

2.1 实验装置

本文所用的热重分析法是在程序控制温度下,测量物质质量与温度关系的一种技术。热重法试验得到的曲线称为热重曲线(即 TG 曲线)^[5];同时还得到了差热曲线(即 DTA 曲线)。将 TG 曲线对温度(或时间)取一阶导数即得微商热重曲线(DTG 曲线)。

本文实验装置为瑞士 Mettler-Toledo 公司的 TGA/SDTA851e 热分析系统。主要技术指标为:

- (1) 测量温度范围为室温 293 ~ 1 873 K;
- (2) 线性升温速率可在 0.01 ~ 100 K/min 范围内选择;
- (3) 温度准确度 $\pm 0.25 \text{ K}$; 温度重复性 $\pm 0.15 \text{ K}$;
- (4) SDTA 分辨率 0.005 K。

2.2 实验内容

研究的主要内容是对天然焦、济宁燃煤及其混合燃料进行热重实验,分析其燃烧特性。济宁煤和天然焦的工业分析、元素分析如表 1 所示。混煤为天然焦与济宁煤 1:4 混合。

表 1 煤质分析

| | 济宁煤 | 天然焦 |
|--|-------|-------|
| 工业分析 | | |
| 收到基水份 $M_1/\%$ | 2.8 | 4.3 |
| 空气干燥基水份 $M_{ad}/\%$ | 2.20 | 2.72 |
| 空气干燥基灰份 $A_{ad}/\%$ | 26.24 | 41.28 |
| 空气干燥基挥发份 $V_{ad}/\%$ | 28.55 | 7.62 |
| 空气干燥基固定碳 $FC_{ad}/\%$ | 43.01 | 48.38 |
| 元素分析 | | |
| 空气干燥基碳 $C_{ad}/\%$ | 59.18 | 50.20 |
| 空气干燥基氢 $H_{ad}/\%$ | 3.69 | 1.16 |
| 空气干燥基氮 $N_{ad}/\%$ | 0.99 | 0.79 |
| 空气干燥基氧 $O_{ad}/\%$ | 7.38 | 3.30 |
| 空气干燥基全硫 $S_{ad}/\%$ | 0.32 | 0.55 |
| 空干基高位发热量 $Q_{gr,ad}/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 23.57 | 17.70 |
| 收到基低位发热量 $Q_{net,ar}/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 22.61 | 17.08 |

收稿日期: 2005-11-28; 修订日期: 2006-05-22

作者简介: 董 勇(1967-)男, 山东寿光人, 山东大学副教授。

3 着火特性

3.1 实验条件

着火特性的实验条件如下:

- (1)升温速率 20 K/min;
- (2)工作气氛为氧气, 气体流量 50 mL/min;
- (3)煤样质量 10 ± 0.5 mg, 煤粉粒径小于 $90 \mu\text{m}$ 。

试验时, 以 20 K/min 的升温速率升温, 使试样在等速升温条件下燃烧, 得燃烧特性曲线 (TG 和 DTG 曲线) 和差热曲线 (DTA 曲线), 如图 1 和图 2 所示。

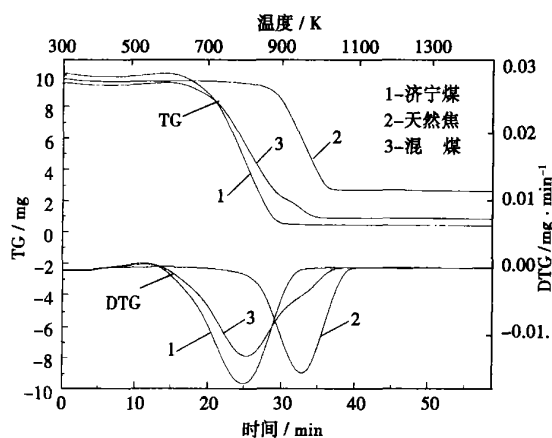


图 1 燃烧特性曲线

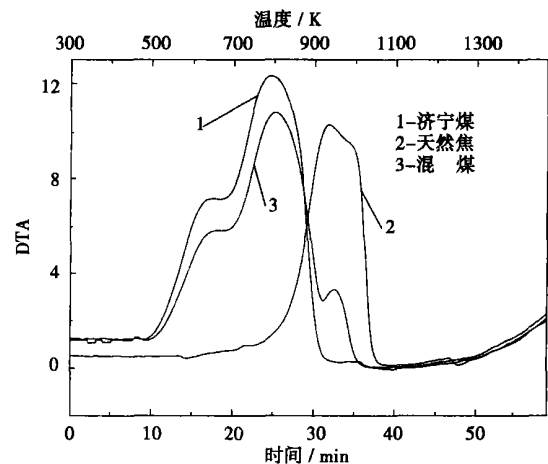


图 2 差热曲线

3.2 混煤的着火

根据各煤种 TG 和 DTG 曲线计算得到着火温度 (见表 1)^[9]。从表 1 中看出, 天然焦的着火温度最高, 其次是混煤, 济宁燃煤着火温度最低。这说明济

宁燃煤的着火性能最好, 天然焦的着火性能最差。混煤着火温度基本处于组分煤种之间, 由于济宁煤占的比例比较大, 所以混煤的着火温度与济宁煤比较接近。

表 2 3 种煤样的着火温度

| | 济宁煤 | 天然焦 | 混煤 |
|--------|--------|--------|--------|
| 着火温度/K | 700.90 | 876.34 | 706.65 |

4 燃尽特性

4.1 燃尽温度与时间

燃尽时间定义为烧掉 98% 燃料量时所需的时间 (见表 3)。一般来说, 燃尽所需时间越长, 燃尽性能越差。根据各煤种 TG 曲线, 可以得出各煤种燃尽时间, 天然焦的燃尽时间最短, 混煤燃尽所需时间最长, 济宁煤燃尽时间居中, 说明混煤不利于燃尽。

表 3 燃尽时间及燃尽温度

| | 济宁煤 | 天然焦 | 混煤 |
|----------|--------|----------|----------|
| 燃尽时间/min | 16.3 | 13.15 | 20.75 |
| 燃尽温度/K | 933.25 | 1 055.15 | 1 013.36 |

4.2 最大失重率

最大失重率反映出煤样在着火后燃烧的强度, 最大失重率越大, 煤样在着火后的燃烧越强烈, 燃烧温度也越高, 燃烧越稳定。图 3 给出了煤样最大失重率的变化趋势, 可以看出单烧煤或者天然焦时最大失重率较大, 说明煤样越单一, 煤样在着火后燃烧越迅速, 越容易形成较高的燃烧温度; 而混煤燃烧最大失重率较小, 说明混煤会造成燃烧强度降低, 燃尽时间增长。

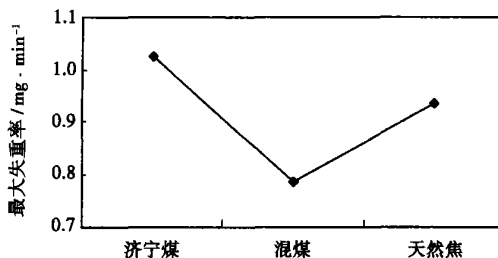


图 3 最大失重率与煤样的关系曲线

4.3 放热峰宽

煤样的放热峰宽 (定义为 DTA 曲线中开始上升温度与下降结束时的温度之差) 反映出与上述相同

的趋势。热天平实验过程中升温速率是不变的,因此放热峰宽在本质上反映出煤样从开始反应直到燃尽所用时间,放热峰宽越小,燃烧所经历时间越短,说明燃烧越迅速、剧烈,越易于形成较高的燃烧温度,煤的燃尽也更加充分。

放热峰宽随掺混比的变化规律见图 4。图中曲线反映出,两种品质相差较大的煤进行掺混时,煤样燃烧过程放热峰宽增加。因为在热天平加热燃烧过程中,济宁煤在较低温度下即开始燃烧放热,对天然焦起到加热作用,使天然焦具有提早燃烧的趋势,但由于济宁煤燃烧活性大,易于与空气中的氧反应并燃烧,在燃烧初期抑制了氧与天然焦的接触,因而又抑制了天然焦的提前着火。这样混煤的燃烧分为两个阶段进行,在温度较低时以济宁煤燃烧为主,在温度较高时济宁煤燃烧接近尾声,以天然焦燃烧为主。煤样的着火温度在很大程度上取决于济宁煤的比例,燃尽温度则主要取决于天然焦的着火温度。

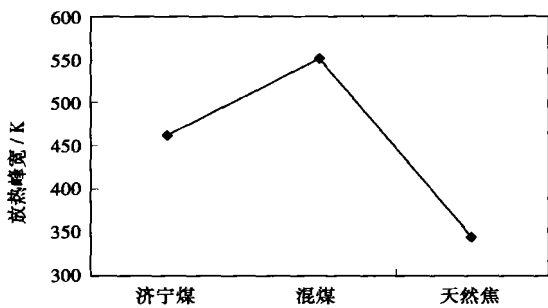


图 4 放热峰宽与煤样的关系曲线

5 综合燃烧特性

通过燃烧特性指数 S 来反映煤的着火和燃尽的综合性指标^[7]。

根据 Arrhenius 定律,有:

$$(dW/dt)^c = A \exp[-E/(RT)]$$

式中: $(dW/dt)^c$ — 燃烧速度; A — 指前因子。对上式求导,整理得:

$$\frac{R}{E} \cdot \frac{d}{dT} \left(\frac{dW}{dt} \right)^c = \left(\frac{dW}{dt} \right)^c \cdot \frac{1}{T_i^2}$$

在着火点有:

$$\frac{R}{E} \cdot \frac{d}{dT} \left(\frac{dW}{dt} \right)^c_{T=T_i} = \left(\frac{dW}{dt} \right)^c_{T=T_i} \cdot \frac{1}{T_i^2}$$

或

$$\frac{R}{E} \cdot \frac{d}{dT} \left(\frac{dW}{dt} \right)^c_{T=T_i} \cdot \frac{(dW/dt)^c_{\max}}{(dW/dt)^c_{T=T_i}} \cdot \frac{(dW/dt)^c_{\text{mean}}}{T_h}$$

$$= \frac{(dW/dt)^c_{\max} \times (dW/dt)^c_{\text{mean}}}{T_i^2 \times T_h}$$

式中: $(dW/dt)^c_{\max}$ — 最大燃烧速度, mg/min ; $(dW/dt)^c_{T=T_i}$ — 着火温度下的燃烧速度, mg/min ; $(dW/dt)^c_{\text{mean}}$ — 平均燃烧速度, mg/min ; T_h — 燃尽温度, K ; T_i — 着火温度, K 。

上式左边可作如下解释: R/E — 煤的活性, E 值越小,反应能力越高; $\frac{d}{dT} \left(\frac{dW}{dt} \right)^c_{T=T_i}$ — 燃烧速度在着火点的转化率,其值越大,表明着火越猛烈; $\frac{(dW/dt)^c_{\max}}{(dW/dt)^c_{T=T_i}}$ — 燃烧速度峰值与着火时的燃烧速度之比; $\frac{(dW/dt)^c_{\text{mean}}}{T_h}$ — 平均燃烧速度与燃尽温度之比,其值越大,表明燃尽越快。这几项的乘积综合反映了煤的着火与燃烧特性。将上式右边定义为燃烧特性指数 S ,它是煤的综合特性指标。 S 值越大,煤的燃烧特性越佳。 S 值相差较大的煤种,燃尽性能差异越大; S 值相近的煤种,燃烧性能也比较接近。

表 4 各煤种的综合燃烧特性指数

| | T_i/K | $(dW/dt)^c_{\max}/\text{mg} \cdot \text{min}^{-1}$ | $(dW/dt)^c_{\text{mean}}/\text{mg} \cdot \text{min}^{-1}$ | T_h/K | $S(\times 10^{-9})/\text{mg}^2 \cdot \text{min}^{-2} \text{K}^{-3}$ |
|-----|----------------|--|---|----------------|---|
| 济宁煤 | 700.90 | 1.026 | 0.658 | 933.25 | 1.473 |
| 天然焦 | 876.34 | 0.936 | 0.642 | 1055.15 | 0.742 |
| 混煤 | 706.65 | 0.786 | 0.545 | 1013.36 | 0.847 |

从表 4 中可以看出,济宁煤的综合燃烧性能最好,混煤次之,天然焦最差。显然,这与前面分析的着火特性与燃尽特性的排序十分吻合。因此,综合燃烧特性指数 S 能较好地反映煤种的燃烧特性,这对于判别单煤及混煤的燃烧特性有着应用价值。

6 结 论

本文利用瑞士 Mettler-Toledo 公司的 TGA/SD-TA851e 热分析系统对一种天然焦及其混煤进行了燃烧热性研究并得出:

- (1) 天然焦属于难燃煤,着火温度比较高,易燃尽;
- (2) 天然焦单烧时,燃烧强度高;混煤时燃尽时间延长,且燃烧强度降低;
- (3) 天然焦混合燃料可以用于电站锅炉燃料,其燃烧温度比单烧时大幅降低,但燃尽时间延长;
- (4) 综合燃烧指数 S 与实际结果符合较好,能

够较全面地反映天然焦的燃烧特性。

参考文献:

- [1] 何玉梅, 张俊宝. 天然焦型煤层气储存特征[J]. 中国煤田地质, 2003, 15(3): 18-19.
- [2] 汤振清, 梁奉奎. 巨野煤田天然焦、无烟煤综合方法划分研究[J]. 中国煤田地质, 2001, 13(2): 4-5.
- [3] 张立文. 天然焦的特性及其开发[J]. 粉煤灰综合利用, 1994(2): 34-36.
- [4] 江明. 天然焦及其综合利用[J]. 煤炭加工与综合利用, 1995(6): 46-48.
- [5] 陈镜泓, 李传儒. 热分析及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [6] 海枫, 项秀梅, 臧诺. 几种烟煤及其混煤燃烧特性的热分析[J]. 东北电力技术, 2004(4): 25-36.
- [7] 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(1): 72-76.

(何静芳 编辑)

维修经验

具有残留挠曲的转子工作能力恢复的经验

据《Электрические станции》2005年10月号报道, 汽轮机转子最常见的破坏之一是残留挠曲(简单说就是挠曲), 分析了挠曲产生的各种原因。

在修理期间, 可以利用两种方法恢复已弯曲转子的工作能力: 把转子发送到制造工厂, 在工厂挠曲将被弄直, 然后转子将被平衡; 根据ЛМЗ专门的试验—计算方法, 在工厂专家的指导下, 修理转子并在低转速的平衡机上平衡转子。

例如:

石巴特拉—西比尔斯基热电站1号机组ПТ—65—130汽轮机的高压转子残留挠曲的特征是调节级前的最大径向跳动为1.22 mm。

在车床上车削:

借助于转轴向挠曲一侧移动车削转子轴颈的外圆; 通流部分内最大的径向跳动减小到0.73 mm;

相对于新的转轴车削半联轴节的径向表面;

相对于新的转轴车削半联轴节的端面。

按照ЛМЗ(列宁格勒金属工厂)的方法, 利用“Вибро—порт—41”仪表在低转速平衡机上平衡转子。安装总质量为3 700 g的14块平衡配重。在空转时, 利前3个轴承上的振动不超过1.5 mm/s。经过3 min运行, 转子的最大径向跳动减少0.40 mm。在平衡机上重新平衡转子, 取下大部分平衡配重, 汽轮机处在运行中。

(吉桂明 供稿)

rous media under the condition of reciprocal flows. The solution under discussion comprises two constant differential equations, in which all control parameters have been included, thus contributing to an in-depth understanding of the effect of these control parameters on the characteristics of burners. Compared with the results of a numerical simulation, the temperature curves of porous-medium solids can be predicted exceedingly well by use of sectioned linear functions of the simplified solution. The maximal temperatures inside the burners obtained by making use of the simplified theoretical solution exhibit an identical tendency as that of the experimental values. However, the above maximal temperatures are usually greater than the experimental ones with the error between them being assessed at about 20%. **Key words:** theoretical solution, super-adiabatic combustion, porous medium, reciprocating

一种天然焦燃烧特性的试验研究 = **An Experimental Study on the Combustion Characteristics of a Kind of Natural Coke** [刊, 汉] / DONG Yong, WANG Chun-bing, WANG Wen-long, et al (Energy Source and Environment Research Institute Affiliated to Energy Source and Power Engineering College under the Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 387 ~ 390

Natural coke is a kind of solid residue produced after coal has been heated and decomposed following its contact with magmatic rocks. It has been formed by destructive distillation after coal layers are subjected to heating and baked when magmatic rocks have intruded into coal layers or thereabouts. Natural coke is usually regarded as a kind of energy source difficult to be utilized. With a view to exploring new ways of comprehensive utilization of natural coke, an experimental study has been performed of such combustion characteristics as ignition and burn-up etc. of the natural coke and Jining-originated coal as well as a mixture of the two with the help of a thermogravimetry analytic method. The thermogravimetric test results show that the ignition temperature of natural coke is 876.3 K, regarded as the highest ignition temperature followed by a second highest specific to blended coals. Jining-originated coal is characterized by the lowest ignition temperature. The natural coke, however, has the shortest burn-up time, Jining-originated coal an intermediate one and the blended coals require the longest burn-up time. Summing up the experimental study and theoretical analysis, the authors conclude that natural coke-blended coal fuel can be used in power-plant boilers. The present research findings can provide a basis for employing natural coke as power plant fuels. **Key words:** natural coke, thermogravimetry, combustion characteristics, ignition, burn-up

燃煤飞灰粒度对比电阻影响机制的试验研究 = **An Experimental Study of the Mechanism Governing the Impact of the Size of Coal-fired Fly Ash Particle on Specific Resistance** [刊, 汉] / QI Li-qiang, YAN Wei-ping, YUAN Yong-tao (Environment Science and Engineering College under the North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 391 ~ 394

After the ash samples have been collected from three domestic power plants and fully incinerated in a high temperature furnace, they were sifted by employing a mechanical sifting method into four categories of particle diameters, i. e. $> 145 \mu\text{m}$, $90 \sim 154 \mu\text{m}$, $45 \sim 90 \mu\text{m}$ and $< 45 \mu\text{m}$. On a self-developed DR type high-pressure dust specific-resistance test rig, the specific resistance of fly ash of various particle diameters were determined. The test results show that superficial and volumetric electric conduction will jointly affect the specific resistance of fly ash and, furthermore, fine particles have a higher porosity. As a result, the fly ash with relatively small particle diameters has a higher peak value of specific resistance. Moreover, before the latter reaches its peak value, the more coarse the ash samples, the higher their specific resistance. After the specific resistance has reached its peak value, however, the governing rule will evolve in an exactly opposite way. **Key words:** fly ash, ash incineration, particle diameter, specific resistance

水煤浆热解过程中 HCN 和 NH_3 释放特性的分析 = **An Analysis of HCN and NH_3 Release Characteristics of Coal-water Slurry in its Pyrolysis Process** [刊, 汉] / MENG De-run, ZHAO Xiang, ZHOU Jun-hu, et al (Education Ministry Key Laboratory on the Clean Utilization of Energy Resources and Environmental Engineering under the Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 394 ~ 396, 400

A pyrolysis test was performed of coal-water slurry and its raw coal in an inertial atmosphere and of its raw coal in a vapor atmosphere on a fixed bed reactor to study HCN and NH_3 release characteristics. The results show that with an increase in temperature the amount of HCN released from the raw coal and coal-water slurry changes slowly and finally tends to be constant. In the vapor atmosphere, however, the amount of HCN released from the raw coal will with a change in temper-