

中国工程热物理学会

燃烧学学术会议文集

下 册

一九八九年十一月

添加剂对煤粉点火性能的影响

杨建军

(空军导弹学院)

提 要

本文采用 CO_2 激光器点火源,对含有添加剂的煤粉试样的点火性能进行了实验研究。

实验中对煤粉试样的点火延迟期进行了实验测定。实验结果表明,添加剂的加入可使煤粉试样的点火延迟期缩短、燃烧反应强化。在所选用的三种添加剂中(K_2CO_3 、 Na_2CO_3 、 CaCO_3),以 K_2CO_3 的催化效果最佳。

实验过程和结果表明,激光点火实验系统使用方便、实验重复性好,是较为理想的静态点火实验系统。

1、概 述

我国煤的蕴藏量十分丰富,在我国目前的能源结构中,煤占有十分重要的地位。因而进一步深入地进行煤应用的研究,探讨以煤代油的途径将具有十分积极的意义。

为实现以煤代油,原航空工业部提出了开展燃煤燃气轮机研究的设想。本文所做的工作既为这一研究课题中的一部分基础研究项目。

煤粉做为固体燃料,在燃烧特性上与液体燃油相比有以下特点:热值低、着火温度高、点火延迟期长、燃尽时间长、燃烧产物中含有固体颗粒与有害成分。

由于煤粉燃烧存在上述特点,使其在燃气轮机中的应用受到限制。为了克服这些不利因素,本文采用化学动力学方法,利用添加剂来改善煤粉的燃烧特性。本文重点研究了添加剂对煤粉点火性能的影响。

2、激光点火实验装置

在本文的实验研究中,点火源采用的是 CO_2 连续激光器,其波长为 10.6 微米,最大输出功率为 38W 。激光点火实验装置示意图见图1。

激光点火源具有单色性高、能量集中、重复性好的特点,采用激光点火

源可完全消除点火源对实验的干扰。

燃烧器内的气氛和压力可通过充气调压系统进行调节。实验环境可分别为充氧、充氮、充压缩空气或混合充气。本文所进行的实验是在常压空气条件下进行的。

实验测量采用光谱法进行。用单色仪接收燃烧产物的某些特征辐射光谱或燃烧明焰光谱，单色仪所接收的光谱信号经光电倍增管转换成电信号，而后送入快速富利叶变换(FFT)分析系统进行处理。实验曲线由FFT分析系统所配置的绘图仪绘出。在本文的实验中，采用的测量波长为 $5893\text{\AA}$ ，这一波长位于可见光的黄光区内，采用这一波长是以煤粉试样出现明焰为判据的。

激光点火实验系统具有操作方便、实验周期短、实验重复性好和实验曲线易于判读的特点，在点火实验研究中具有很广的应用前景。

3、试样准备

实验采用的煤样为陕西神木低灰分烟煤，其工业分析和化学分析结果见表1。

表1、神木煤分析结果

成分	wt%	元素	wt%
碳	73.77	氢	4.53
挥发分	35.21	氧	13.47
固有水分	4.76	氮	1.03
灰分	2.12	硫	0.32

煤粉试样的粒度为 $30\sim 45$ 微米。

实验选用了 K_2CO_3 、 Na_2CO_3 和 CaCO_3 三种碳酸盐添加剂，这三种添加剂单独或混合添加在煤粉试样中。

配制好的煤粉粉状试样用专用模具在推力标定台上压制成直径为 10mm 的圆柱形试样，压制压力为 $600\text{Kg}/\text{cm}^2$ ，持续5分钟成型，成型后的试样放入干

燥器内保存。

为保证沿激光光束方向试样长度的同一性，提高试验的重复性，对圆柱形试样采用侧面点火。由于试样在直径方向的尺寸误差较小，从而使试验的重复性极好。在实验中曾对同一试样进行了三次点火（如图 2 所示），所测得的点火延迟期之间的误差小于万分之一秒。

4、实验结果分析

实验中，对煤粉试样的点火延迟期进行了测定。点火延迟期的定义为：从激光照射到试样上起，到试样出现明焰为止之间的时间间隔。

实验曲线见图 3 ~ 图 9。实验数据见表 2。

表 2、实 验 数 据

添加剂	点火延迟期 (s)
5%K ₂ CO ₃	0.0400
2.5%K ₂ CO ₃ and 2.5%Na ₂ CO ₃	0.0440
无	0.0781
5%Na ₂ CO ₃	0.0957
2.5%K ₂ CO ₃ and 2.5%CaCO ₃	0.1570
2.5%Na ₂ CO ₃ and 2.5%CaCO ₃	0.2060
5%CaCO ₃	0.3138

从图 3 可看出，纯煤粉试样的实验曲线从起火到达到峰值需经一段时间，上升速率较为缓慢。而含有添加剂的试样，其实验曲线却能迅速达到峰值，曲线上升十分迅速。这一点在图 4、5、6 中尤为明显。这一结果说明添加剂的存在可使煤粉的燃烧得到强化。

图 9 是含 5%CaCO₃ 添加剂的实验曲线，其峰值明显地低于 K₂CO₃ 或 Na₂CO₃，

添加剂试样的实验曲线的峰值，并且低于纯煤粉试样的峰值，这一特性说明， CaCO_3 的催化活性要远低于 K_2CO_3 和 Na_2CO_3 。 CaCO_3 的这一特性也影响到其他含有 CaCO_3 添加剂的试样（图7，8）。从实验数据的顺序和实验曲线的分析可知，添加剂的催化活性顺序为： $\text{K}_2\text{CO}_3 > \text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{CaCO}_3$ ，在混合添加剂试样中，催化活性低的添加剂起控制作用。

为了解释实验曲线在初始峰后出现峰值下降，而后上升的原因，对试样的燃烧情况进行了高速摄影，实验照片见图10。从实验照片可看出，煤粉试样在点燃后火焰逐渐增大，约经0.004秒，火焰明显减小，约0.01秒后，火焰又重新增大并出现向上窜动的火焰。这一现象与实验曲线的形状是相符的。这说明，当激光照射到试样上后，首先有一个能量积累过程，当能量积累到一定程度后，表面层点燃，出现辐射尖峰。而后是能量向内层传递和空气与热解气体的相互扩散过程，在这一过程中，燃烧反应减弱，火焰辐射降低，曲线峰值下降。在这一过程进行到一定程度后，火焰重新增大。能量积累过程与扩散过程的快慢与添加剂的种类有密切的关系，添加剂对前一过程的影响尤为显著。

从点火延迟期的实验数据可知，在常压条件下，添加剂的存在对缩短点火延迟期的效果不十分明显，远不如在充氧燃烧器试验中所观测到的催化效果，但强化燃烧的效果仍十分明显，这一结果与充氧燃烧器的试验结果是一致的。

5、结 论

通过以上试验有如下结论：

- (1)、添加剂的加入可使煤粉的燃烧过程强化，添加剂的催化活性依次为 $\text{K}_2\text{CO}_3 > \text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{CaCO}_3$ 。
- (2)、在常压下，添加剂对缩短煤粉点火延迟期的作用不明显。
- (3)、激光点火试验装置具有操作方便，实验周期短，实验重复性好的优点，是较理想的静态点火实验手段。

6、致 谢

本文的研究工作得到了西北工业大学汪亮副教授的精心指导，实验工作得

到了原航天部四院四十一所的大力协助，在此表示深切的谢意。

参考文献

- (1) 汪亮等，粉煤点火延迟时间的实验测定
- (2) 杨建军，添加剂强化煤粉燃烧

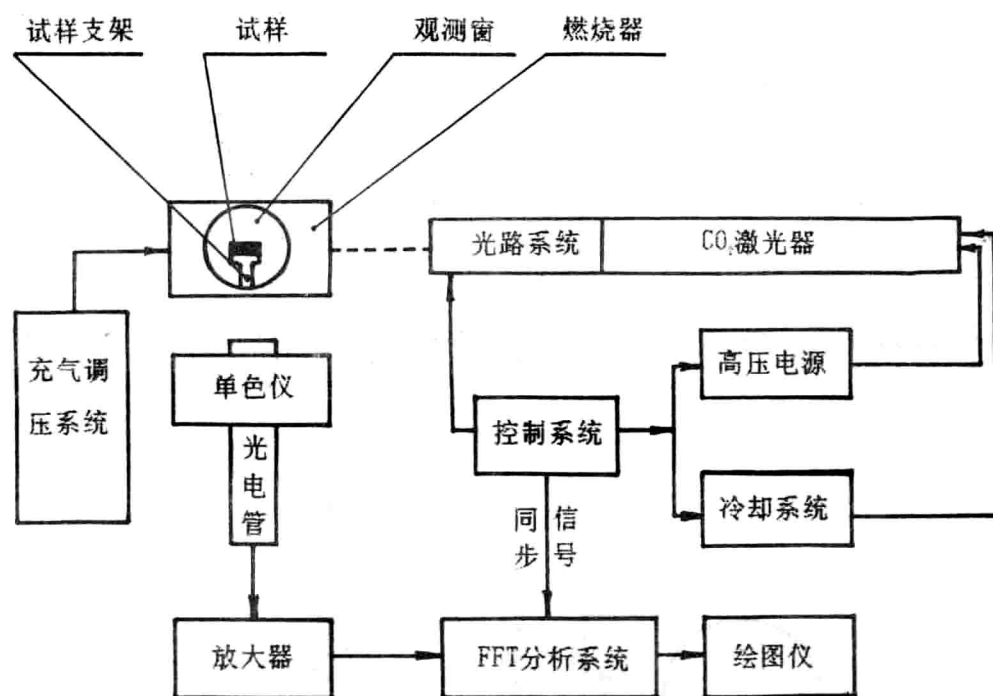


图 1、激光点火实验装置

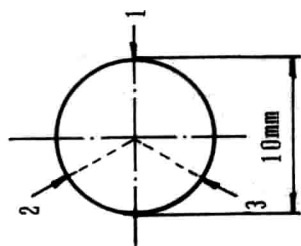


图 2、点火示意图

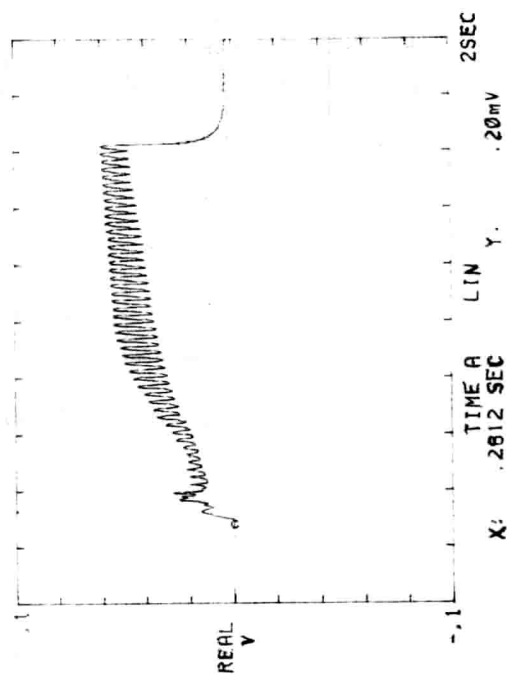


图 3、纯煤粉

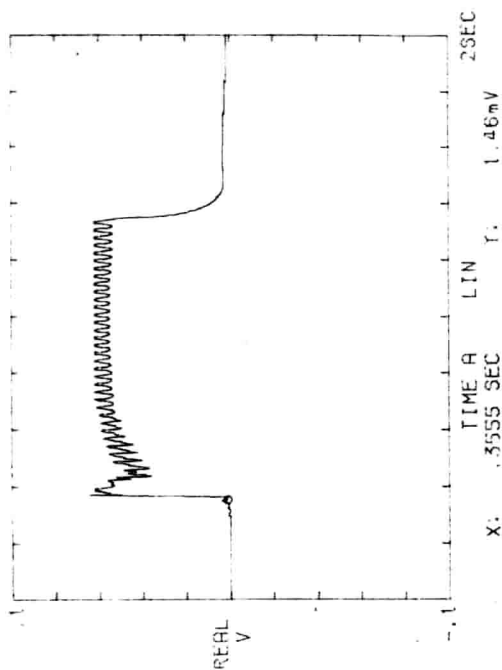


图 4、5%碳酸钾

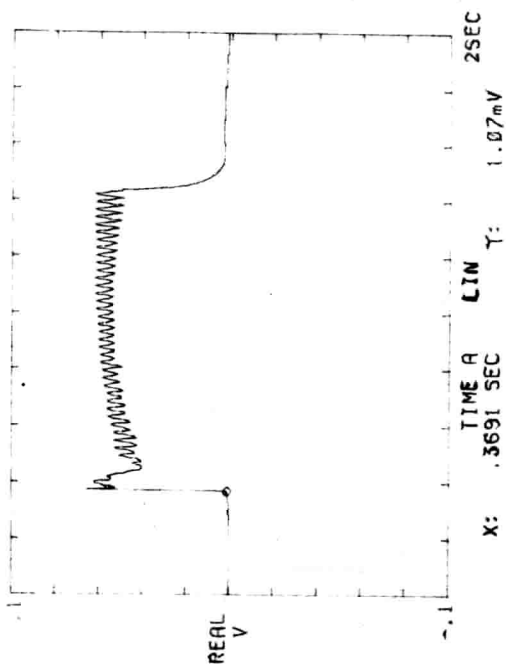


图 5、2.5%碳酸钾和2.5%碳酸钠

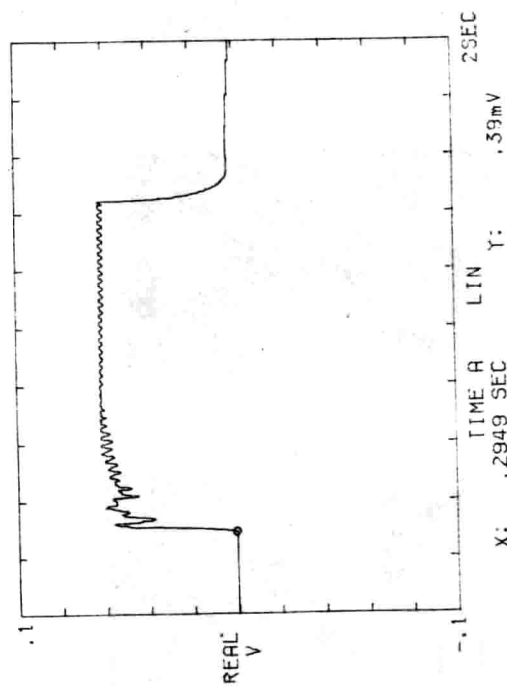


图 6、5%碳酸钠

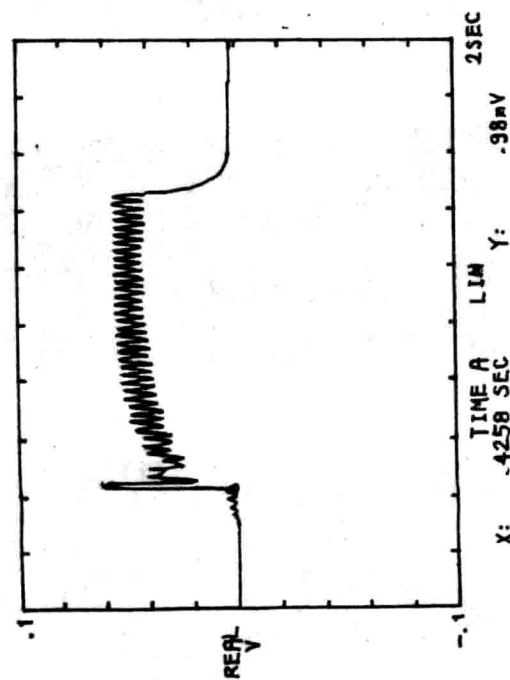


图 7、2.5%碳酸钾和2.5%碳酸钙

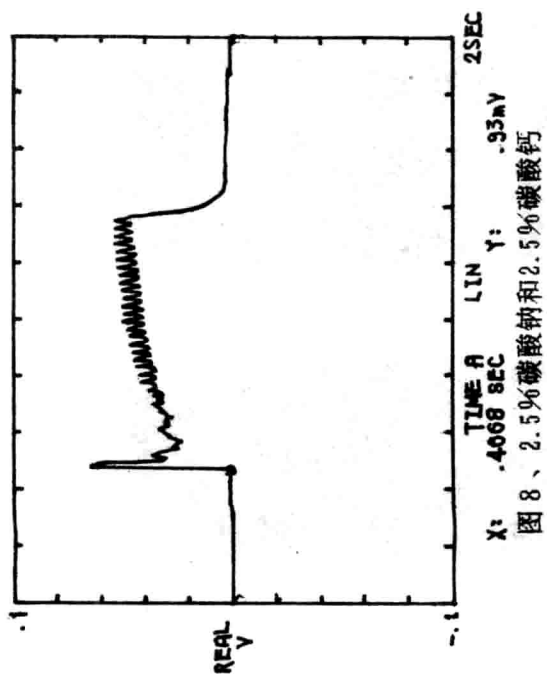


图 8、2.5%碳酸钠和2.5%碳酸钙

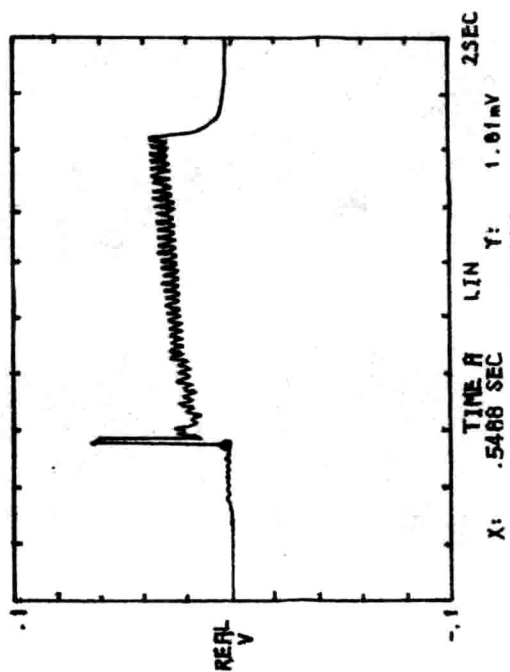


图 9、5%碳酸钙

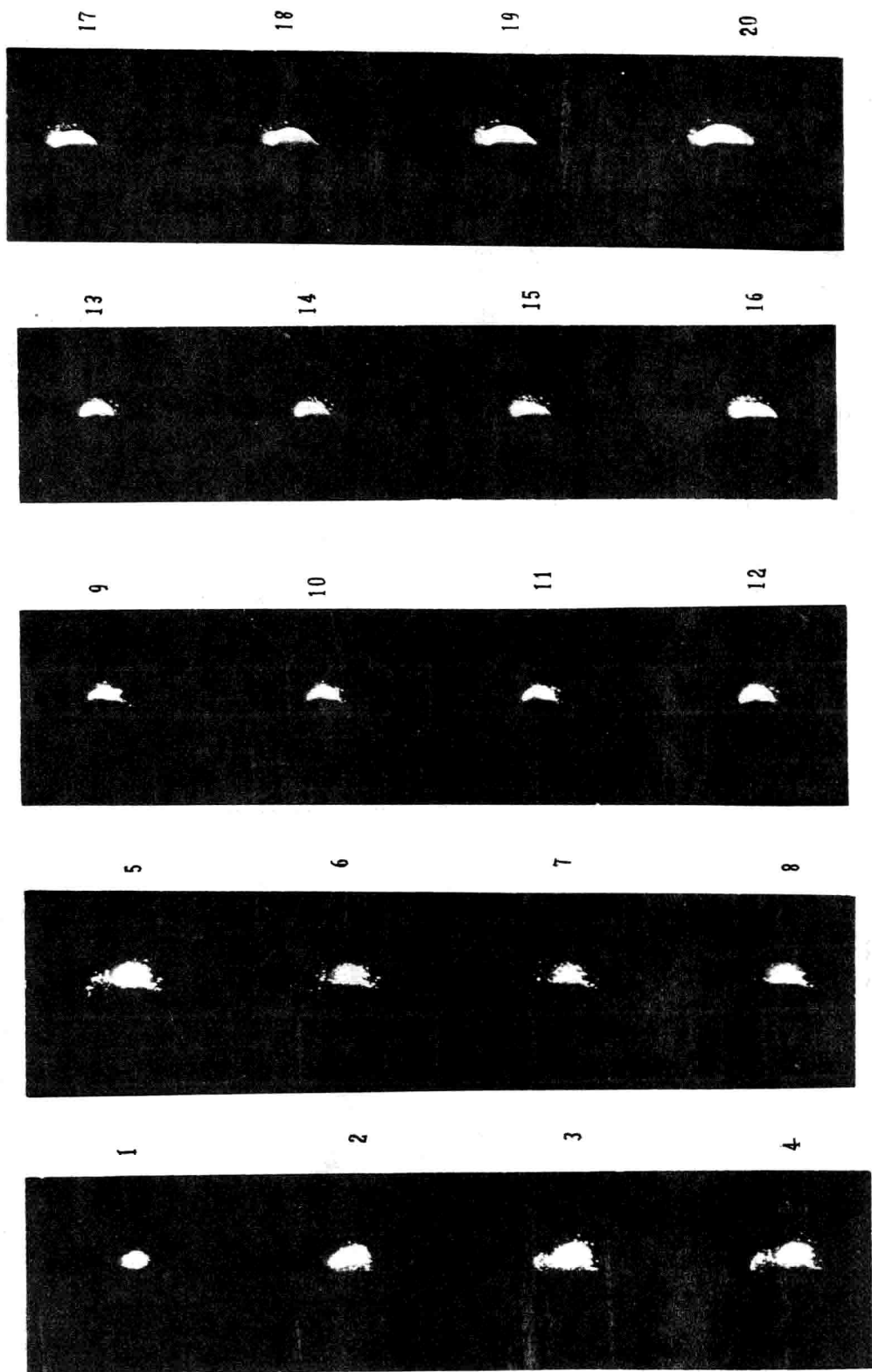


图10、激光点高速摄影照片(每格1/1000秒)

用热天平研究煤的可燃性指标

韩 洪 樵 王 涤 非 唐 林

(清 华 大 学 力 学 系)

摘 要

本文介绍了一种新型快速加热热天平系统的设计、调试及初步实验结果。在对以往热天平的结构及实验方法[1][2]分析和研究的基础上,改变了试样的安放、测温及加热方式,从而大大提高了煤样的加热速率(10^3 k/s),使实验结果更加符合工业实际。采用计算机进行过程控制及A/D采样,建立了一套完整的数据采集和数据处理系统。应用本系统进行了八个典型煤种的燃烧性能测定。根据实验结果及理论分析,初步提出了一种煤的可燃性指标。

一. 前 言

我国近年来在煤的燃烧特性方面进行了大量的研究,取得了不少成果。但总体来说,这方面工作还很不完善,尤其是煤在燃烧过程中的一些基本规律。因此,我们希望能建立一套先进完备的实验系统,通过一些规范化的实验,得出一套较完整的煤的燃烧特性基本数据。

煤的燃烧可大致分为加热、挥发份析出及着火、固定炭的着火及燃烬等过程。其中挥发份的析出量、着火温度、燃烧速率及燃烬时间等是确定煤的可燃性指数的重要参数。在这方面前人已经作了不少工作,得到了很多实验数据。有些作者还综合实验数据,得到了煤的可燃性准则[3]-[15]。但这些方法都有一定的相对性和局限性,只反映了燃烧过程中的某一个侧面,没有综合反映煤的可燃性,给应用带来一定困难。近年来普遍采用的热天平分析技术为煤的可燃性指标的综合研究提供了先进的实验方法,例如西安热工所及华中理工大学等,分别通过热天平记录的坩埚中煤粉失重及温度变化对煤的燃烧特性进行了研究[5][6]。但他们的热天平系统都有一个共同的弱点,就是煤粉与热气流接触不充分、加热速率很低($1 \sim 2 \text{ k/s}$),与工业实际相差甚远。

我们在参照一些国内外文献及实验设备的基础上,建立了一套快速加热、快速分析的新型热天平实验系统,既提高了实验的精度又缩短了实验的周期,

从而可以更迅速更有效地测定出符合工业实际条件的煤的可燃性参数。

二. 实验系统

天平本体放于带有隔振橡胶的大理石板上, 热天平配有测重放大器及两个微分器。炉体由气缸控制自动升降, 微机可对实验过程进行控制并通过 A / D 板实现在线数据采集及实时处理, 并同时建立实验及分析结果的数据文件库, 为大量的分析和归纳创造了条件。加热炉内的反应气氛可以根据需要进行改变, 分别进行热解及燃烧等实验, 实验系统框图见图 2-1。

1. 热天平系统

为了提高实验的精度, 我们选用了张丝吊带式热天平, 并将天平改为下皿式, 这样就可以在下垂的悬丝上加挂试样。天平为指零型, 复位装置采用无阻尼有源 P I D 控制的称重系统。位移传感器采用小型红外光源反串联差动硅光电池, 将不平衡的信号输入 P I D, 最后由差动线圈将天平恢复到初始的位置。天平的最大称重量程为 5 0 0 m g, 最小量程 1 m g。微分器可对煤样失重信号及温升信号进行微分处理, 找到极值点。但我们实际应用中通常对输入计算机的失重信号及温升信号直接进行数字滤波及数值微分, 大大提高了信噪比及微分精度, 给数据处理带来很大方便。

2. 加热系统

(1) 炉体结构

热天平的加热炉对热分析结果有较大影响, 应根据测量系统及具体实验要求设计, 一般分为如下几种: 电阻加热炉、辐射聚焦式加热炉、电磁感应炉、等离子加热炉等。为提高气流温度, 我们采用了两段式硅碳管加热炉, 即两支硅碳管串联使用 (如图 2-2)。双螺纹硅碳管满足无感绕法, 防止了对热天

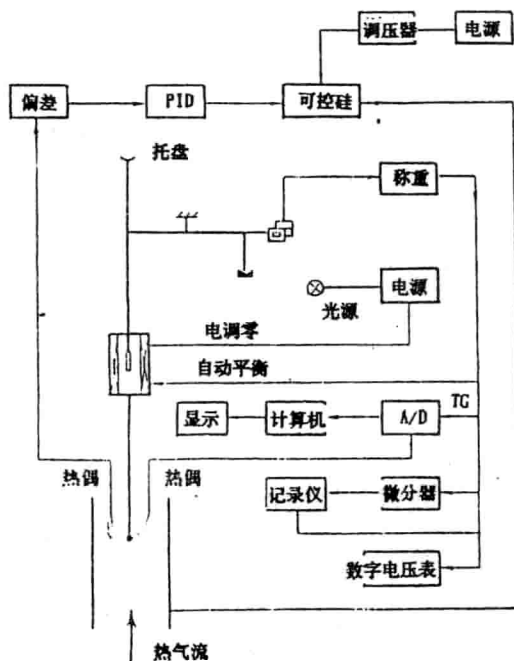


图 2-1: 热天平系统图

平产生电磁干扰。硅碳管由“U”型石英管构成实验段，内径为 $\Phi 40\text{ mm}$ ，高为 480 mm ，保证有足够长的均温区及稳定的流动工况。

(2) 温控系统

由于硅碳管电阻很小 ($5\ \Omega/\text{支}$)，只能工作在大电流工况，我们自己安装了控制电源，由调压器可控硅整流调节器及PID自动温控调节器构成。炉温采用 0.1 mm 的铂铑—铂热偶丝测量的信号进行反馈，保证了煤样在反应过程中环境温度的恒定。温控热偶位置见图2-3。

(3) 升降系统

传统热天平大多将试样放入坩埚中，由室温缓慢升到某一温度。为了模拟煤粉燃烧的实际情况，我们对这个实验方法进行了大胆的改进，即先将炉膛加热至所需温度后迅速使试样进入反应区域。由于试样悬挂在天平吊丝上而不易移动，必须能使炉体迅速升降。

由于手动升降既费力又不方便，电机传动结构复杂、震动大，经综合考虑后，我们采用了气动升降技术，通过一直径 $\Phi 40\text{ mm}$ 的汽缸实现了炉体的升降。升降动作由电磁四通阀控制，节流阀可调整升降速度，如图2-4。这种

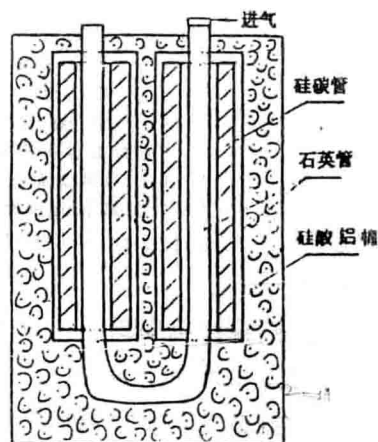


图2-2: 炉体结构图

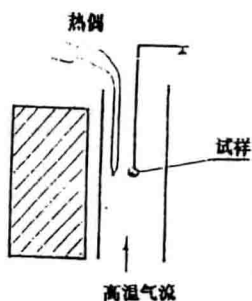


图2-3: 热偶位置图

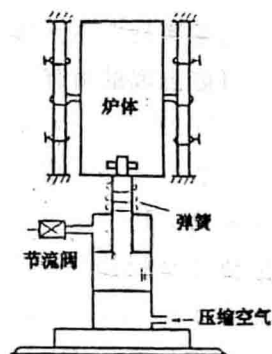


图2-4: 炉体升降系统图

方法结构简单，升降迅速、平稳。对于终温为 1273 K 的工况，升温速率可由常规热天平的 $1\sim 2\text{ k/s}$ 提高到 10^3 k/s 。

三. 实验结果及分析

对我国八种典型煤种进行了实验研究, 实验用煤的工业分析见表 1:

№	煤 种	V _t	C _t	W _t	A _t
1	顺义烟煤	24.60	48.50	2.30	24.70
2	淮南烟煤	25.40	44.20	1.50	28.90
3	淮北贫煤	14.80	54.30	1.00	30.00
4	津 阳 煤	5.80	59.82	1.70	33.04
5	合山劣质烟煤	10.34	34.93	2.50	52.23
6	京西无烟煤	3.70	67.30	2.33	26.84
7	营林河褐煤	29.76	44.26	20.12	16.83
8	永 安 无 烟 煤	5.00	65.78	1.72	32.00

实验环境温度 $T = 1173 \text{ K}$, 空气流速为 $U = 0.531 \text{ m/s}$, 煤粒直径为 $\Phi 5 \text{ mm}$ 。

数据采集及处理的程序框图见图 3-1, 采样间隔为 0.2 s/点 。实验所得到的 TG 曲线, DTG 曲线见图 3-2 至图 3-9。通过这些曲线, 我们很容易得到一些特征参数, 它们反映了不同煤的可燃性。对这些曲线及特征参数的分析结果如下:

(1) DTG 曲线下包围的面积代表煤可燃质的失重量。DTG 曲线的峰值 $(dw/dt)_{\max}$ 代表燃烧速率最大点, 如果峰值越大则燃烧越猛烈。峰值出现的时间 $t_{\max}$ 越短燃烧性能越好。实验发现, $t_{\max}$ 越小则着火温度 T_i 越低。实验曲线表明, 烟煤的 $(dw/dt)_{\max}$ 要比无烟煤的高, $t_{\max}$ 要比无烟煤的小, 这与实际情况是相符的。

(2) $(dw/dt)_{\max}$ 对煤的燃烧及燃烬特性表达并不全面, 因为不同的煤即使其燃烧峰值一致, 但峰的钝锐也许不同, 燃烬时间也不一定相同, 因此煤的可燃性应考虑整个燃烧过程。

(3) 由实验曲线可知, 挥发份含量高的煤不仅燃烧速率高且燃烬时间也短, 如图 3-2, 图 3-3; 而挥发份含量低的煤象永安无烟煤、京西无烟煤, 燃烬时间大约是前者的 2~4 倍。

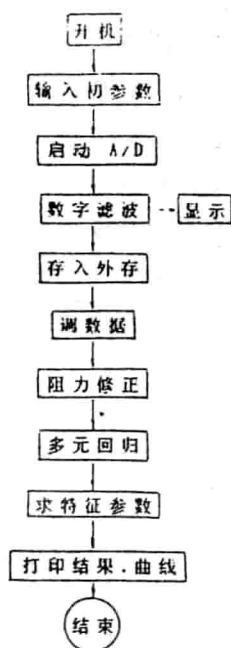


图 3-1: 程序框图

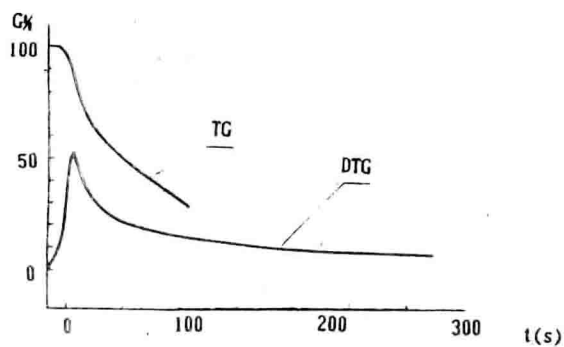


图3-2: 顺义烟煤

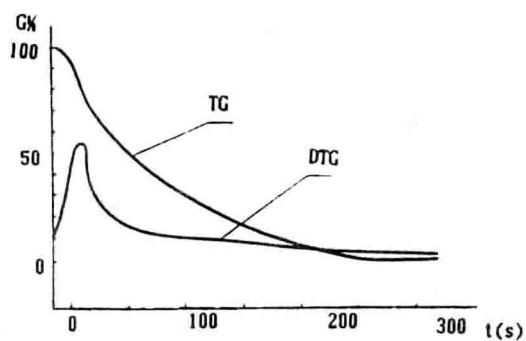


图3-3: 淮南烟煤

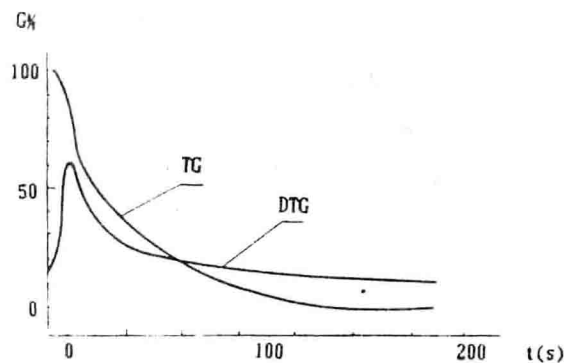


图3-4: 淮北贫煤

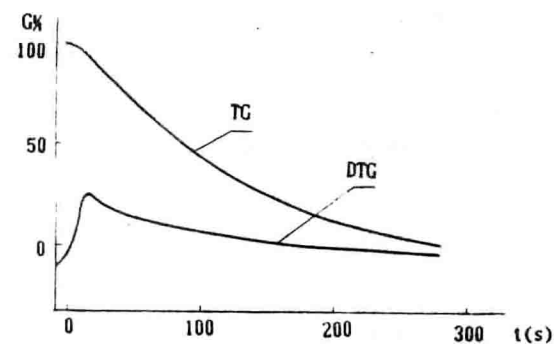


图3-5: 莱阳煤

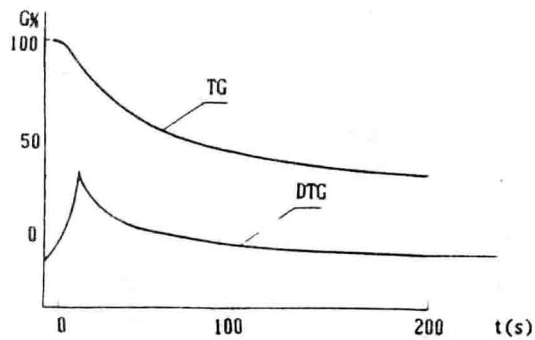


图3-6: 合山劣质煤

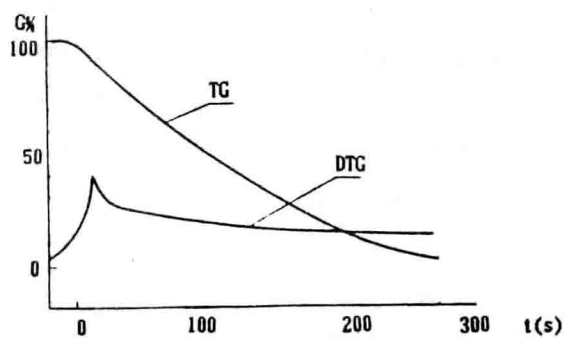


图3-7: 京西无烟煤

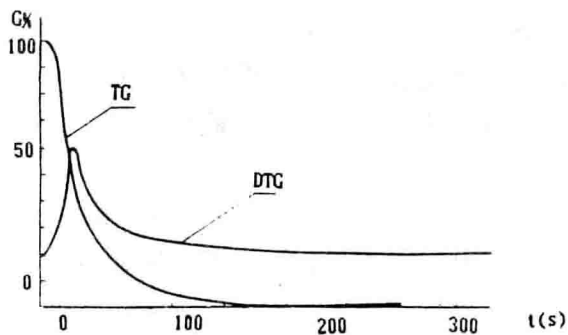


图3-8: 霍林河褐煤

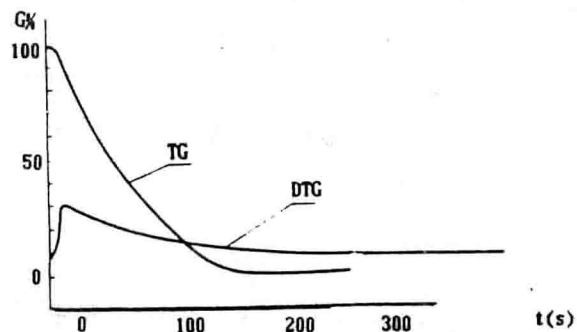


图3-9: 永安无烟煤

(4)由实验数据很容易求出煤的 V^f 、 C^f 、 A^f 等,而且此数据可靠性高。这也为工业分析提供了一个快速、方便的手段。

四. 可燃性指标的提出与讨论

1. 常见的可燃性指标

最初人们仅用工业分析来判别煤的可燃性,但大量实践已证明仅凭这种方法很不可靠。往往有些工业分析非常接近的煤,它们在实际燃烧过程中的燃烧性能相差很远。因此,许多研究者都在从不同的角度对煤的可燃性指标进行研究,如挥发份的释放特性[12]、可燃质燃烬速度、着火温度[3]、燃烧特性指数[5]等,但这些参数或是没有考虑燃烧的全过程,或是试验条件与工业实际条件相差甚远。因此,我们试图通过从接近工业实际条件下得到的一些实验数据中归纳出一些特征参量,通过这些特征参量,从宏观上定义一个能较好地反映煤整个燃烧过程的参数,便于工业设计的应用。

2. 可燃性指数 S

综合前人提出的一些指标及上面对实验结果的分析,我们初步提出了如下形式的煤的可燃性指数 S 的表达式:

$$S = (dw/dt)_{\max} (dw/dt)_{10}^{1.5} / (t_{\max} \cdot t_f^{0.5})$$

(1) $(dw/dt)_{\max}$ 表示了燃烧的猛烈程度,它是燃烧中起主要作用的因素。一般来讲,挥发份高的煤,此项数值都较大。

(2) $(dw/dt)_{10}$ 项表示了燃烧曲线峰的钝锐程度,它的大小也影响着后期燃烬过程,此项具有一个平均的概念。这是我们取峰值两边十秒钟的 (dw/dt) 的平均值。

(3) $t_{\max}$ 为燃烧峰出现的时间,即着火出现的早晚。因此, $t_{\max}$ 越小的煤越好烧。另外,此项亦隐含了着火温度的因素。无论从实验曲线还是文献的结果中都可以看出,着火温度 T_i 小的煤 $t_{\max}$ 也小。所以,为了处理简单,我们的指标中暂时没有加进 T_i 项。

(4) t_f 为煤的燃烬时间,它与煤的含炭量有关,含炭量越高则 t_f 越长。但在工业实际中,特别是电站锅炉,燃料的滞留时间是有限的。燃烬时间过长则会带来燃烧不完全、飞灰损失大等问题。另外,含炭量越大着火越困难,燃烧峰也越钝。

(5)在可燃性指数 S 中,由于受现有仪器的限制,还没有体现挥发份成份的影响。因为不同煤种其挥发份各组份含量不同,其着火温度、燃烧热值等也不尽相同,这还要在今后的工作中不断完善。

由定义所得到的八种煤的可燃性指数见表2，其S值越大则表明该种煤的可燃性能越好。这些结果与这些煤的实际燃烧性能是完全一致的，但最后还要进行大量煤种的检验，不断修正。

N_0	$(dW/dt)_{\max}$	$t_{\max}$	$(dW/dt)_{10}$	t_f	$S \times 10^{-4}$
1	0.47	8.28	0.17	113.04	3.15
2	0.49	10.96	0.29	113.04	3.73
3	0.35	8.88	0.18	127.92	2.10
4	0.34	7.99	0.16	195.77	1.76
5	0.39	16.92	0.23	114.83	1.20
6	0.38	16.92	0.20	171.37	0.83
7	0.48	12.45	0.17	57.69	2.45
8	0.36	31.2	0.16	296.06	0.19

五. 结 论

1. 用我们设计的热天平对煤在快速加热条件下进行热解和燃烧特性的研究是可行的，分析速度快，结果精度高。

2. 本实验系统所测得的实验结果不仅能从直观和定性的角度，而且能从定量的角度上给出整个燃烧过程的特征，为理论分析及实际应用提供了可靠的数据。

3. 本文提出的可燃性指数S基本上反映了煤的燃烧特性，实验表明，S值越大可燃性越好。实验值与实际情况符合较好。

4. 可燃性指数S还很不完善，有些重要因素还没有考虑进去，这还需要在今后的实验中不断地合理化。

本文得到国家自然科学基金的资助，在此表示感谢！

参 考 文 献

1. 宋鸿恩 <热天平> 计量出版社 1985
2. 陈镜泓 李传儒 <热分析及应用> 科学出版社 1985
3. 章明川, 相大光, 王春昌 <无烟煤粉燃烧动力学参数及着火温度的测定>
中国工程热物理学会第五届年会 (1985)
4. <我国典型动力用煤的实验研究> 哈尔滨成套所科研报告 1985
5. 陈建原 孙学信 <煤的挥发分释放特性指数及燃烧特性指数的确定>
动力工程 1987 第5期

6. “煤质着火特性研究综述” <燃料化学学报>
7. Chen, M.R., Fan, L.S. and Essenhigh R.h. "Prediction and Measurement of Ignition Temperature of coal Particles." Twentieth Symposium (International) on Combustion, 1984, PP.1513-1521
8. 哈志得 张永礼 <劣质烟煤着火特性得探讨> 电机工程学报 № 1, 1980
9. 何佩放 <对我国固体燃料分类和特性探讨及其对锅炉的影响> 1980
10. 林灏 <我国动力用煤的燃烧特性> 1981
11. Cassel H.M. and Liebmann, "Combustion of Magnesium Particles" Combustion and Flam, 6, 153-156(1962)
12. Weibiao Fu (傅维标) et al. "A Study on Devolatilization of Large Coal Particles" Combustion and Flame 70, 253-266(1987)
13. Bhandyopadhyay, S. and Bhaduri, D.B. "Prediction of Ignition Temperature of a Single Coal Particle" Combustion and Flame 3, 467-475(1959)
14. Thomas, G.R., Stewansen, A.J. and Evans, D.G. "Ignition of Coal Particles without Temperature Jump." Combustion and Flame 21, 133-136(1973)
15. 刘文珍 <煤的热天平分析初探> “热力发电” 1982 第5期