

固体燃料热重分析实验

一、实验目的

- 1) 了解热分析的基本方法;
- 2) 掌握热重分析的基本原理及测量方法;
- 3) 绘制固体燃料 TG-DTG 曲线, 分析确定固体燃料燃烧特征参数;
- 4) 测定试验煤样的活化能与频率因子;
- 5) 熟悉数据处理方法。

二、基本原理

在程序控温和一定气氛下, 测量物质质量与温度或时间的关系 (热重分析)。

物质 (固体燃料) 在温度升高的过程中会发生水分析出、氧化、热解和燃烧等物理化学变化, 从而引起物质质量的变化, 不同反应条件下, 发生质量变化的温度区间和质量变化量随着物质结构及组成而异, 因而利用物质的热重数据研究物质的热变化过程, 如物质的组成, 热稳定性, 热解温度、燃烧特性及热解和燃烧的动力学性能等。

热重分析得到的曲线为热重 (TG Thermal Gravity) 曲线, 经热重数据对温度 (或时间) 求导, 得微商热重 (DTG Differential Thermal Gravity) 曲线。

根据 TG-DTG 分析试样的燃烧特征参数, 如水分析出温度区间及失重量、热解温度区间及失重量、总失重量、着火温度 (T_i)、燃尽温度 (T_f)、最大燃烧速率 (v_p)、最大燃烧速率温度 (T_p) 和平均燃烧速率 (\bar{v})。基于热重数据根据阿累尼乌斯定律, 如式 (1) 所示, 分析试样的动力学参数活化能 E (J/mol) 和频率因子 k_0 。

$$k = k_0 \exp(-E / RT) \quad (1)$$

其中: R —气体常数, 8.314J/(K); T —热力学温度, K; k_0 —频率因子 (也称指前因子); E —活化能, J/mol; k —反应速率常数 (1级反应的单位是 s^{-1} , 煤和重油的燃烧属于1级反应)。

三、实验装置

本实验主要设备包括热重分析仪、万分之一精度分析天平、数据采集用计算机。热重分析仪和计算机组成热重分析系统, 如图1所示。

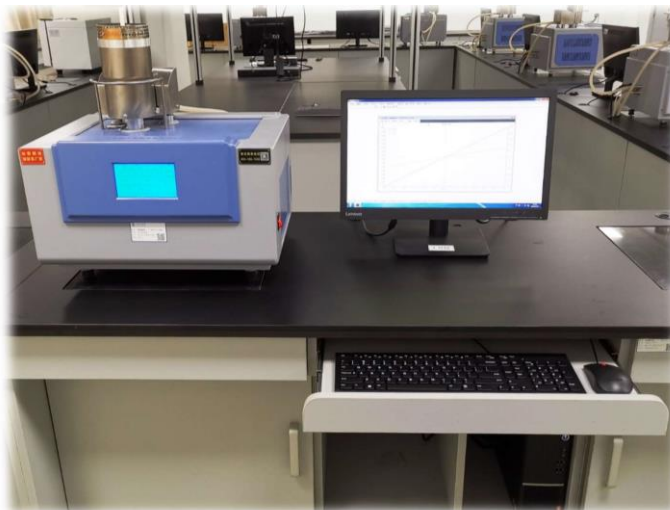


图1 热重分析系统

四、实验步骤

- 1) 打开电脑和热重分析仪电源。
- 2) 称量8.0-10.0 mg空气干燥基试样于坩埚中。
- 3) 垂直向上提升加热炉，直至出现卡顿，向左旋转，缓慢松手。
- 4) 用镊子将一空坩埚放于坩埚支撑架左侧物盘上。
- 5) 将装好试样的坩埚放于坩埚支撑架右侧物盘上。
- 6) 将加热炉向右旋转，直至出现卡顿，检查加热炉底部进口对准，缓慢放下加热炉。

7) 启动采集软件、设置实验参数（除下列设定外，严禁修改其它参数）如图2 示意。

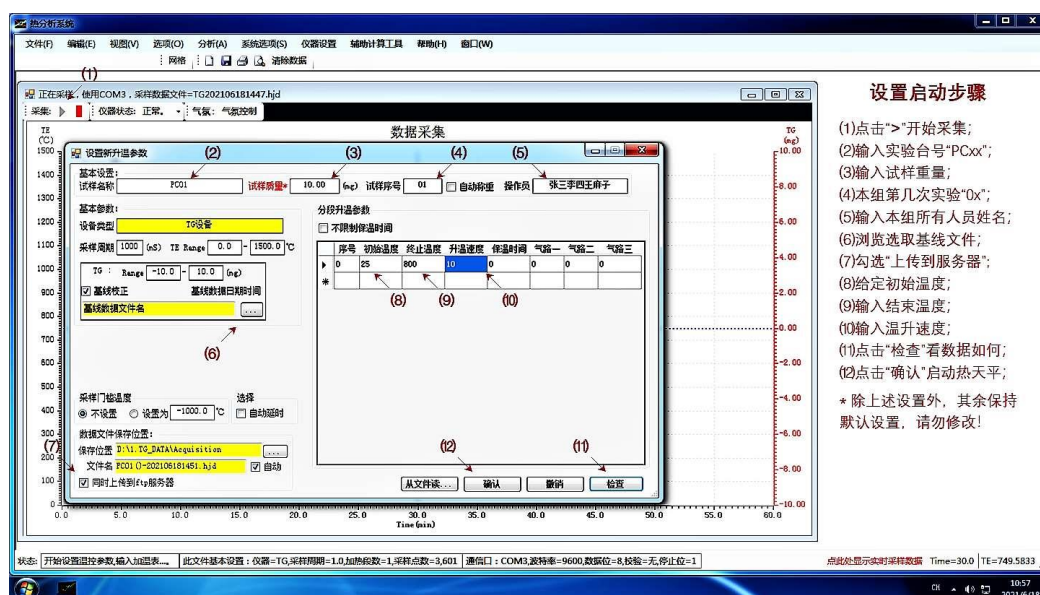


图 2 参数设置方法

- (1) 当内窗上部**仪器状态**显示为正常时，单击左边**采集**后面的【>】按钮；
- (2) 在弹出的小窗左上角的**试样名称**栏输入台位号：PCxx；
- (3) 在其后**试样质量***栏输入已放入试样的重量；
- (4) 在其后**试样序号**栏输入“0x”，本组第一次实验为“01”，依此类推；
- (5) 在最右侧的操作员栏输入本组人员的姓名（所有人、无空格）；
- (6) 在左中单击【...】按钮，浏览选择基线文件，确认黄色区域出现基线文件名；
- (7) 在左下角勾选同时上传到ftp 服务器；
- (8) 在右边主框内、序号“0”行的初始温度栏输入起始温度；
- (9) 在其右**终止温度**栏输入终止温度；
- (10) 在其右**升温速度**栏输入升温速度；
- (11) 请老师检查无误后，单击右下角【检查】按钮；
- (12) 如【确认】按钮由灰变黑，则检查通过，单击【确认】启动热天平开始测试。

8) 获取采集数据

数据导出操作如图3所示。

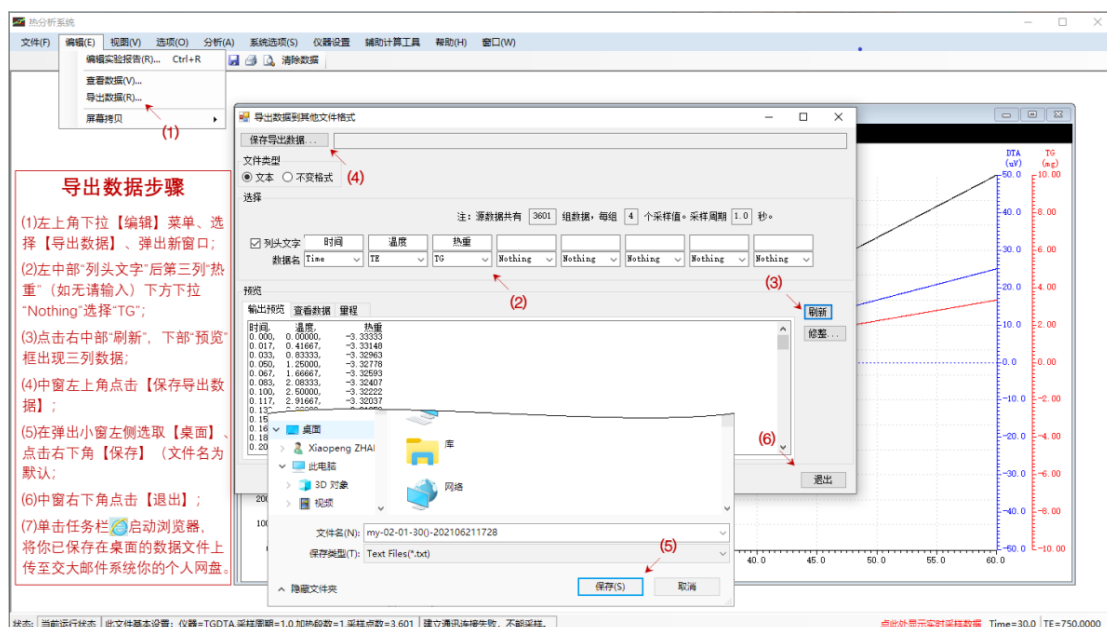


图 3 数据导出方法

- (1) 在大窗口主菜单栏单击【编辑(E)】-【导出数据(R)...】；
- (2) 在中部第三列“热重”（如无请添加）下方【Noting】栏下拉选取【TG】；

- (3) 然后单击右侧中部的【刷新】按钮，在下方预览栏即可见输出样式；
- (4) 单击左上角【保存导出数据】、选取保存位置（桌面）与文件名（默认）；
- (5) 单击小窗口右下角【保存】按钮保存数据；
- (6) 单击右下角【退出】按钮退出导出数据菜单；
- (7) 启动浏览器将数据保存至桌面，通过QQ或QQ邮箱传输数据（禁止插U盘）。
- 9) 关机、去除残样、整理桌面。

五、原始数据

- 1) 台位号见显示器座；
- 2) 试样重量自己称重；
- 3) 起始温度、结束温度、温升速率根据小组实验方案确定；
- 4) 时间、温度、重量变化数据测试完成后从软件中导出。

六、数据处理

1. 总体思路

对采集的热重数据进行计算 → 绘制热重曲线及微商热重曲线 → 去除干扰 → 读取特征点的温度 → 选取适当的动力反应区间 → 绘制动力反应区间的线段 → 回归线段的方程 → 获取线性方程的斜率与截距 → 关联阿累尼乌斯定律 → 计算动力反应区间的表观活化能和频率因子，最终完成数据处理工作。

2. 动力学参数计算方法

A. 对阿累尼乌斯（Arrhenius）定律表达式两边取自然对数：

$$\ln k = \ln k_0 - E/(RT) \quad (2)$$

假设： $y = \ln k$ ； $x = 1/T$ ； $A = E/R$ ； $B = \ln k_0$ ，则有： $y = -Ax + B$ ，为一条直线；

如果做出该直线，则斜率为 E/R 、截距为 $\ln k_0$ ，即可求出该反应的表观活化能与频率因子，表观活化能 $E = A \cdot R$ 、频率因子 $k_0 = \exp(B)$ 。

B. 导出的原始数据文件为纯文本（TXT）格式，共三列：时间 τ （min）-温度 t （℃）-重量变化 $W_i - W_0$ （mg），间隔为 1（sec）；

C. 阿累尼乌斯定律与热天平测试数据的关联：阿累尼乌斯定律与热天平测试数据的关联

$$k_0 \exp(-E/RT) = k = -(W_i - W_{i-1})/W_0 / \Delta \tau \quad (3)$$

其中： k —反应速率，1/sec； W_0 —试样的初始重量，mg； W_i —某时刻的试样重量，mg； W_{i-1} —前一时刻的试样重量，mg； $\Delta \tau$ — $i-1$ 到 i 的时间间隔为 1 sec。

3. 异常数据点处理（滤波）

滤波的方法有多种，这里介绍惯性滤波（一阶滞后滤波）供同学们参考：

假设 X_{1-n} 是待滤波序列， Y_{1-n} 是滤波后序列，则滤波计算如式（4）：

$$Y_i = a * X_i + (1-a) * Y_{i-1} \quad (4)$$

式中 a 为滤波系数（0~1），通常 $a \ll 1$ 。

选取合适的滤波系数是关键。 a 过大，截止频率过高，不能有效地滤除高频干扰； a 过小，截止频率过低，信号的正常变动也会被滤除，滤波后的曲线不能反映有效信号的变化趋势。

4. 绘制曲线

数据处理建议采用 MS Office EXCEL 或 WPS 表格，也可用 Origin 或自己编程序处理数据，要求图表清晰、标注规范，量纲单位使用正确。

5. 有效数字

- 1) 特征温度精确到 1 (°C)；
- 2) 表观活化能精确到 1 (kJ/mol)；
- 3) 指前因子科学计数法，保留 3 位有效数字；
- 4) 中间计算过程不做取舍，按软件的原始设置。EXCEL 软件的浮点数：显示是 15 位十进制有效数字、计算与存贮是 17 位十进制有效数字。

七、实验总结

实验总结通常包括两个部分：

- 1) 实验结果描述：在何种前提下、采用何种手段、通过何种计算、获得什么结果；
- 2) 实验收获总结：理论、方法、设备、软件、操作、数据处理等；

八、实验讨论

实验讨论通常是对实验结果不准确、实验方法不完善、实验设备不精密、影响因素考虑不周全等方面加以讨论。

九、注意事项

- 1) 高温：热天平加热炉温度很高，切勿用肢体触碰，当心烫伤；
- 2) 信号干扰：热天平内部测重、测温的一次信号非常微弱，请远离电子设备；
- 3) 振动：热天平属精密测重设备，请勿摇动、振动实验台架；
- 4) 电脑：本计算机为采集控制专用计算机，请勿擅自安装、删除和修改系统及软件。

附录

(一) 实验原理解析

1. 热重分析 TG (Thermal Gravity)

热重分析是在程序控温和一定气氛下，测量物质质量变化与温度或时间的关系。

热天平的工作原理是天平的物盘置于程序控温的电炉中，天平的砝码采用电磁砝码。在电炉控温的情况下，物盘中被测物质的重量因温度的变化而改变，通过增减电磁砝码使天平保持平衡。测量电磁砝码电流的大小及试样的温度，就可获得热重 TG (Thermal Gravity) 曲线。

热重数据对温度（或时间）求导，即可得到微商热重 DTG(Differential Thermal Gravity) 曲线，经过对微商热重曲线的处理与分析，就可获得该燃料的燃烧特征参数，如着火温度 (T_i)，燃尽温度 (T_f)、最大燃烧速率 (v_p)、最大燃烧速率温度 (T_p) 和平均燃烧速率 (\bar{v})。

2. TG-DTG 曲线中动力反应段确定

对于大多数反应而言，反应速率取决于反应物浓度和反应物温度。当反应物充足、且混合均匀时，反应速率主要取决于反应物的温度；随着反应速率的增加、反应物浓度的降低，反应速率逐渐受制于反应物浓度；当反应物浓度低到一定程度时，反应速率逐渐降低，直至反应结束。

例如，在碳燃烧过程中：随着温度的升高，反应速率逐渐增加，此过程称为动力燃烧阶段，温度决定反应速率；随着反应速率的增加，灰壳逐渐形成，氧气渗入量减少，反应速率从增加逐渐过渡到降低，此过程称为扩散燃烧阶段，氧气浓度决定反应速率；随着反应的进一步进行，反应物碳的含量越来越低，反应速率继续降低，直至碳燃尽，反应速率回零，此过程称为燃烬阶段，碳含量决定反应速率。

如上所述，动力反应速率主要取决于反应物的温度，而扩散反应速率则主要取决于气体分子的扩散速度。阿累尼乌斯定律描述的是动力反应速度，即反应速度与温度之间的对应关系。扩散反应速率及反应末段，则由质量作用定律 $W_m = k[A]^a[B]^b$ 与扩散（传质）方程来描述，在此不加讨论。

在热天平分析数据的微商热重曲线上，既包括水分析出部分，也包括挥发分释放（煤热解）部分和固定碳氧化（碳燃烧）部分，每个峰都分别包含动力反应段、扩散反应段和收尾段，只有单调递增线性部分是符合阿累尼乌斯定律的动力反应规律的。

3. 热天平测试数据

热天平输出的数据共有三列：

第一列： τ — 时间；

第二列： $t_i - \tau_i$ 时刻的试样温度；

第三列： ΔW_i — 初始到 τ_i 时刻试样的重量变化。

其中：试样的重量变化为 $\Delta W_i = W_i - W_0$, mg; W_0 为试样的初始重量; W_i 为 τ_i 时刻试样的重量。

实验持续时间 τ_i 、试样温度 t_i 与重量变化 ΔW_i 相对应为一组，采集系统每秒钟采集一组数据，即每分钟 60 组数据。

4. 热天平测试结果与阿累尼乌斯定律的关联

反应速率，即反应产物的生成率，也是反应物的消耗率。对于生成物全部为气态物质而言，就是试样的相对失重率。

阿累尼乌斯定律项目	k
	= 反应速率
	= 反应产物生成率
	= 反应物消耗率
热天平测试结果	= 试样失重率
	= -重量变化率
	= $-(W_i - W_{i-1})/W_0/\Delta\tau$

其中： k — 反应速率； W_0 — 试样的初始重量； W_i — 某时刻的试样重量； W_{i-1} — 前一时刻的试样重量； $\Delta\tau$ — $i-1$ 到 i 的时间间隔。

5. 热重曲线和微商热重曲线解读

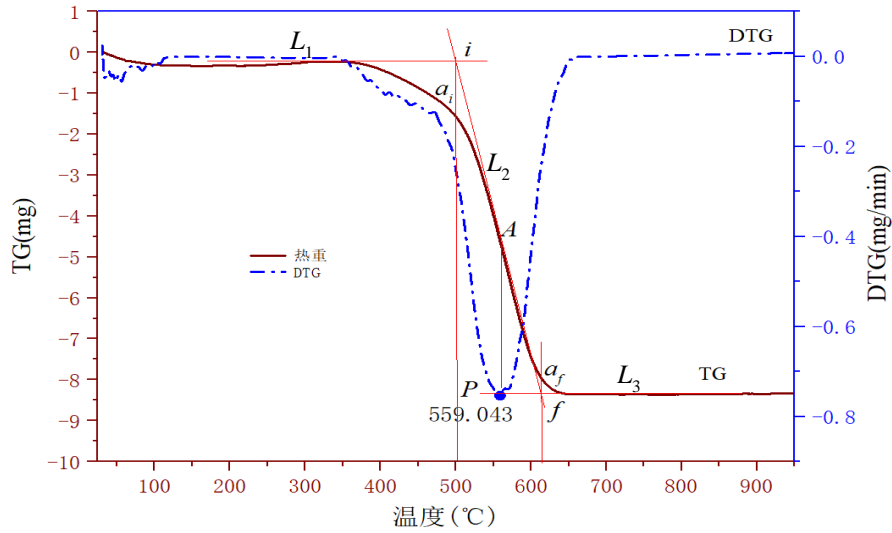
试样在加热的过程中，首先是干燥-失去水分，然后是热解-挥发分析出，最后是燃烧-固定碳氧化，理论上应该有三个失重台阶/峰值，但由于挥发分析出后马上就着火燃烧了，此时试样表面温度升高（高于测得的试样温度），固定碳很快也进入了燃烧阶段，所以后面两个台阶/峰值通常会有部分重合。

特征指标确定方法如下：

根据煤样在热重分析仪中进行燃烧特性试验所记录的热重曲线和微商热重曲线（TG-DTG 曲线，见图 1），根据 TG-DTG 曲线确定着火温度（ T_i ），燃尽温度（ T_f ）、最大燃烧速率（ v_p ）、最大燃烧速率温度（ T_p ）和平均燃烧速率

(\bar{v}) :

a) 着火温度：通过附录图 1 中 DTG 曲线峰值点 P 作垂线与 TG 曲线交于 A 点，过 A 点作 TG 曲线的切线 L_2 ，该切线与 TG 曲线上挥发分开始失重时水平线 L_1 的交点 i ， i 点所对应的横坐标值即为着火温度，符号记为 T_i 。



附录图 1 煤炭燃烧 TG-DTG 曲线

b) 燃尽温度：图 1 中切线 L_2 与 TG 曲线重量损失结束时的水平线 L_3 的交点 f ， f 所对应的横坐标值即为燃尽温度 T_f 。

c) 最大燃烧速率：图 1 中 P 点所对应的 DTG 曲线上的纵坐标值即为最大燃烧速率，符号记为 v_p 或 $(dw/dt)_{\max}$ 。

d) 最大燃烧速率温度：附录图 1 中 P 点所对应的 DTG 曲线上的横坐标值即为最大燃烧速率温度，符号记为 T_p 。

e) 平均燃烧速率：其计算公式 (1)：
$$\bar{v} = \beta \times \frac{a_i - a_f}{T_f - T_i}$$

式中： \bar{v} — 平均燃烧速率，%/min；

β — 升温速率，°C/min；

a_i — 着火温度点对应的剩余样品百分数，%；

a_f — 燃尽温度点对应的剩余样品百分数，%；

T_i — 着火温度，°C；

T_f — 燃尽温度，°C。

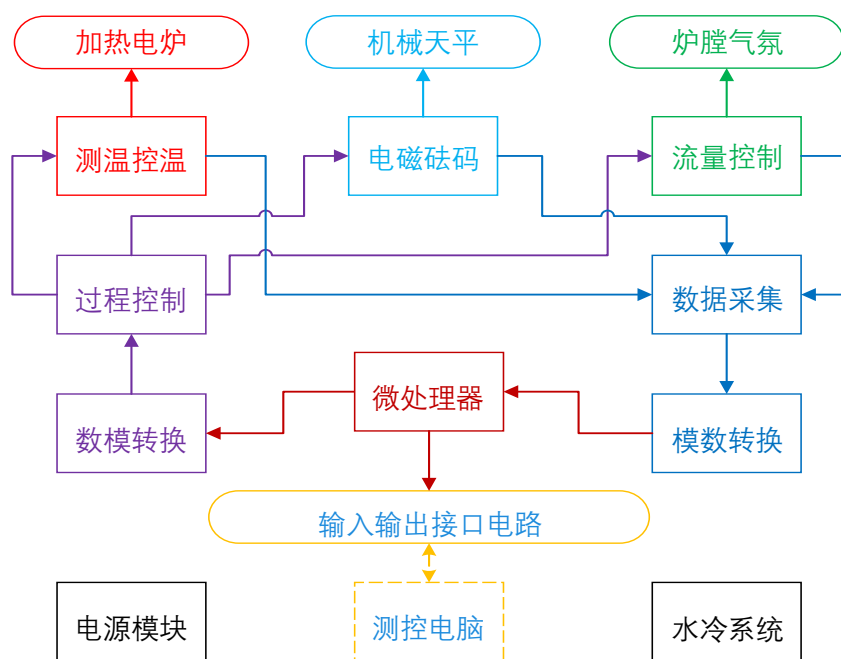
f) 选取合适的温度区间、关联阿累尼乌斯定律进行计算，即可以得到试样的热解与燃烧特性参数。

(二) 热重分析仪介绍

本实验采用北京恒久科学仪器厂“HTG-1 型差热天平”来实验，该型号的差热天平仅含热重测量单元。数据采集与记录由该厂配套的《热分析系统（ATAT2017）》V4.0.0.29844 软件完成。热重分析仪构成模块示意图，如附录图 2 所示。

1. 热天平的部件及功能

- A. 机械天平：精密机械天平及粗调机械砝码。
- B. 电磁砝码：电磁调零、自动电磁加减码。
- C. 电磁砝码部分：加热电炉：可程序控温的电炉，加热试样用。
- D. 测温控温：炉温程序测控模块。配合冷却模块，可实现线性升温、降温及保温，测量试样温度。
- E. 炉膛气氛：可调节炉膛气氛。氧化性、还原性，气氛强弱等。
- F. 流量控制：二进一出，具有可切换、可控流量功能。
- G. 数据采集与模数转换：采集电磁砝码信号、测温热电偶信号等，并转换为数字量。
- H. 微处理器：整个仪器的测控中枢。
- I. 过程控制与数模转换：将控制信号转换为模拟量，对炉温、天平的平衡等进行控制。
- J. 输入输出接口电路：经串口或USB 口与控制计算机通讯，输出到本体屏显。
- K. 电源模块：经变压、整流、稳压等模块，提供多路高稳定性的直流电源。
- L. 水冷系统：用于炉膛程序降温，以及防止内部组件和功率器件过热。

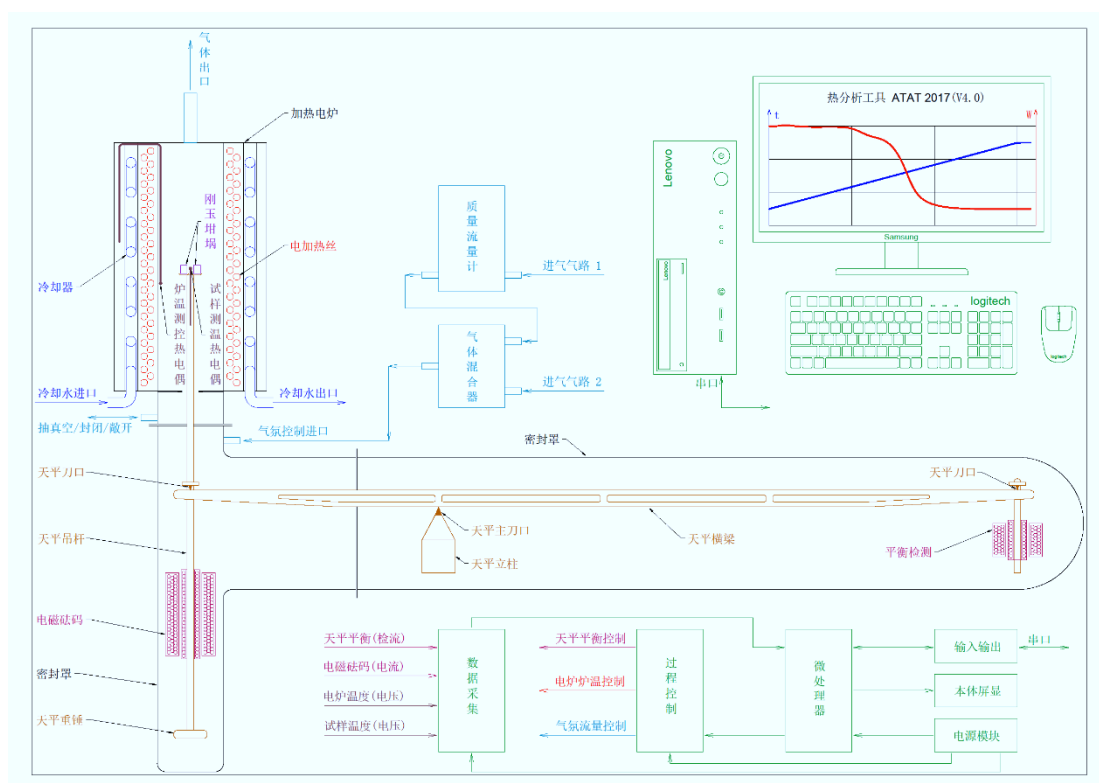


附录图 2 热重分析仪结构模块图

2. 热天平的工作原理

天平的物盘置于程序控温的电炉中，天平的砝码盘采用电磁砝码。在电炉控温的情况下，物盘中被测物质的重量因温度的变化而改变，通过增减电磁砝码使天平保持平衡。

热天平的工作原理图如附录图3所示。



附录图 3 热重分析仪结构图

各部分结构和工作原理如下：

A. 机械天平部分：天平的横梁由主刀口支撑、‘架在’天平的立柱上。天平的吊杆由侧刀口支撑、悬挂在天平横梁的两侧。左侧吊杆顶端‘安装有’两个微型‘坩埚架’、吊杆底部装有重锤。

B. 电磁砝码部分：在天平吊杆的下部，右侧的是天平平衡检测器、左侧是电磁砝码。它们的结构是一样的，都是由固定在吊杆上的可移动线圈和安装在底座上的固定线圈组成。检测器用来检测天平是否平衡，电磁砝码则是通过加减线圈中的电流来保持天平平衡。

C. 坩埚试样部分：在天平左吊杆的顶端、坩埚支架上放有坩埚。对于有差热功能的热天平，会放置两个坩埚：分别盛放参比物和试样。对于无‘叉热’功能的热天平，不用盛放参比物，或干脆只有一个坩埚。

D. 加热电炉部分：在仪器左上部，安装有加热电炉，固定在炉体上，用来加热试样，坩埚处于电炉的中心位置。电炉采用电热丝加热方式，调整加热电流的大小，可对应于不同的升温速率。

E. 水冷降温部分：在电炉中、电加热丝的外侧，安装有冷却盘管，管内通有冷却水。冷却器配合加热器，可实现程序降温。

F. 温度测量部分：在电炉炉膛内安装有热电偶，用来测量炉膛温度、控制炉温。在两个坩埚之间也安装有热电偶，用来测量试样温度。

G. 天平密封部分：由电炉和‘密封罩’构成一个密闭空间。可用于真空下的实验，或不同气氛下的实验。

H. 气氛调节部分：

由带有质量流量控制的气体流量计、气体混合器、密封罩和气体进口、出口构成。可对炉膛气氛进行调节，氧化性、还原性，气氛强弱等。

I. 测量控制部分：由内部微处理器、数据采集、过程控制等组件，和外部测控计算机组成。

J. 天平平衡过程：闭环控制。在初始以及加热失重过程中，天平的检测线圈，检测到天平的平衡偏差，信号经采集单元进入微处理器。微处理器根据预设，计算出电磁砝码所需的磁力大小、换算成电磁线圈所需的电流大小，由控制单元输出相应的电流，使天平恢复平衡。同时，再采集输出给电磁线圈的电流，以防止累计偏差。

K. 试样温控过程：闭环控制。试样温度及炉膛温度热电偶信号，经采集单元进入微处理器。微处理器根据预设的炉膛温度，计算所需的电流大小，再由试样温度进行补偿，得出加热线圈所需的电流大小，由控制单元输出相应的电流，使试样保持预设的速率升温、保温，以及配合冷却器降温。

L. 气氛控制过程：开启与关闭第一、二路进气口、炉顶出气口、炉底进出

气口，可营造真空、单一气体、两路混合气体和自由空气流通的炉膛气氛。当需要两路气体时，关闭炉底进气口，第一路气由微处理器控制气体流量计、按预设流量给出，至气体混合器与第二路气混合后，经炉膛由炉顶出气口流出。

M. 热重数据采集：试样温度：试样测温热电偶的热电势，经放大、模数转换后到微处理器。试样重量：电磁砝码的电流，由精密电阻转变为电压，经模数转换后到微处理器。微处理器通过接口电路，经串行通讯口，将试样温度和试样重量信号输出到测控计算机，再由热分析软件调取后，以图像的方式显示出来，并存储到硬盘。

N. 空白实验：相同条件下、不放试样的实验，所得到的曲线称为该条件下的基线，用以消除系统误差。将直接测量的数据与空白实验的数据逐点相减，就可以得到没有系统误差的实验数据了。

(三) 热分析标准（国内）一览

GB/T 33304-2016《煤炭燃烧特性试验方法 热重分析法》现行

GB/T 17802-2011《热不稳定物质动力学常数的热分析试验方法》现行

GB/T 27761-2011《热重分析仪失重和剩余量的试验方法》现行

JY/T 0589.1-2020《热分析方法通则（第 1 部分：总则）》现行

JY/T 0589.2-2020《热分析方法通则（第 2 部分：差热分析）》现行

JY/T 0589.3-2020《热分析方法通则（第 3 部分：差示扫描量热法）》现行

JY/T 0589.4-2020《热分析方法通则（第 4 部分：热重法）》现行

JY/T 0589.5-2020《热分析方法通则（第 5 部分：热重-差热分析和热重-差示扫描量热法）》现行

JB/T 6856-2017《热重差热分析仪》现行

JB/T 9369-2017《差热分析仪》现行

JB/T 6298-1992《用热分析仪测定煤燃烧特性试验方法》已作废

热分析涉及到的国内标准很多，如有需要可以详细查询；

GB 位国家标准、JY 为教育部标准、JB 为机械工业部标准。“/T”表示为推荐标准，无“/T”则是强制标准。

(四) 数字滤波简介

在数据采集测量过程中，由于硬件的设计不到位或应用场合的干扰严重，采集的数据所绘制的曲线往往不是很光滑、很理想，如果硬件无故障、曲线整体趋势正确，则往往采用数字滤波的方法对数据进行加工，即利用算法来去除

干扰。下面介绍几种简单常见的数字滤波

方法（ X_i 滤波前采样值、 Y_i 滤波后数值）：

1. 限幅滤波法

根据经验确定相邻两次采样允许的最大差值，如果本次采样值与上次值之差小于最大差值，则本次采样值有效，否则放弃本次采样值，用上次值代替本次值。

设最大差值为 A ，

如果 $|X_i - Y_{i-1}| \leq A$ ；则， $Y_i = X_i$ ；

如果 $|X_i - Y_{i-1}| > A$ ；则， $Y_i = Y_{i-1}$ ；

优点：能有效克服因偶然因素引起的脉冲干扰；

缺点：无法抑制那种周期性的干扰，平滑度差。

2. 中值滤波法

连续采样奇数次，把采样值按大小排列，取中间值为本次有效值。

如果连续采样 N 次，假设 X_i 到 X_{i+N-1} 已按大小排序，即 $X_i < X_{i+1} \dots < X_{i+N-2} < X_{i+N-1}$ ；则， $Y_i = X_{(i+N)/2}$ 。

优点：能有效克服因偶然因素引起的波动干扰；

缺点：对快速变化的参数不宜。

3. 加权平均滤波法

连续采样数次，对采样值进行加权平均。当权重相同时，即为算术平均。

如果连续采样 N 次，假设权重为 A_i 到 A_{i+N-1} ，则， $Y_i = (A_i X_i + A_{i+1} X_{i+1} + \dots + A_{i+N-2} X_{i+N-2} + A_{i+N-1} X_{i+N-1}) / (A_i + A_{i+1} + \dots + A_{i+N-2} + A_{i+N-1})$ 。

优点：适用于对一般具有随机干扰的信号进行滤波。

缺点：对于测量速度较慢或要求数据计算速度较快的实时控制不适用。

4. 递推平均滤波法

把连续数次采样值看成一个队列，队列的长度固定，每次新采样的数据放入队尾，挤掉原来队首的那个数据。把队列中的数据进行算术平均，即得滤波后数值。

如果队列的长度为 N ，则，

$$Y_i = (X_i + X_{i+1} + \dots + X_{i+N-2} + X_{i+N-1}) / N;$$

$$Y_{i+1} = (X_{i+1} + X_{i+2} + \dots + X_{i+N-1} + X_{i+N}) / N;$$

...

优点：对周期性干扰有良好的抑制作用，平滑度高，适用于高频振荡的系统。

缺点：灵敏度低，对偶然出现的脉冲性干扰的抑制作用较差。

5. 惯性滤波法

把本次采样值与上次滤波后数值进行加权平均，即得滤波后数值。

如果本次采样值权重（滤波系数）为 a ，则，

$$Y_{i+1} = a * X_{i+1} + (1-a) * Y_i ;$$

$$Y_{i+2} = a * X_{i+2} + (1-a) * Y_{i+1} ;$$

...。

优点：对周期性干扰具有良好的抑制作用，适用于波动频率较高的场合。

缺点：相位滞后，灵敏度低，滞后程度取决于 a 值大小。

上述数字滤波方法中，限幅滤波法主要用来去个别大干扰，滤波后的数据个数略少于原始采集数据个数；中值滤波法和加权平均滤波法适用于同一工况多次采样后的数据去干扰，滤波后数据个数是原始采集数据个数/ N ；递推平均滤波法和惯性滤波法适用于同一工况单次采样后的数据去干扰，递推平均滤波法滤波后数据个数是原始采集数据个数- $(N-1)$ ，惯性滤波法滤波后数据个数是原始采集数据个数-1。选取合适的队列长度或滤波系数是关键。取值过小，滤波不彻底，效果不好；取值过大，信号也被过滤掉了，滤波后的曲线不能反映有效信号的变化趋势。

上述数字滤波方法可以组合使用，如递推加权平均滤波法，是递推平均滤波法和加权平均滤波法的组合。此外，还有一些较为专业的滤波方法，如 **IIR** 和 **FIR** 等，如要深入了解，请参考数字信号处理方面的专业书籍。

燃烧学之《固体燃料热重分析实验》指导书

能动实验教学中心

2023.10