

主要参考文献

- 1、实用热分析技术
- 2、热分析导论
- 3、分析化学手册—第八分册—热分析
- 4、热分析动力学
- 5、期刊上发表的有关热分析应用论文
- 6、《Thermochemical acta》

热分析技术

主要内容

TG-DTG方法及其应用
DTA、DSC方法及其应用
TMA方法及其应用
热分析动力学基本方法

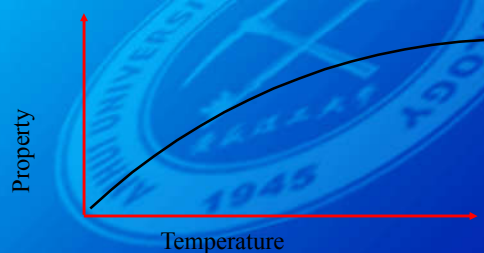
热分析基本概念及常用方法

热分析TA (Thermal Analysis) 是在程序控温下, 测量物质的物理及化学性质与温度关系的一类技术。

常用热分析技术包括: 热重法 (Thermogravimetry TG); 微商热重法 (Derivative Thermogravimetry DTG); 差热分析 (Differential Thermal Analysis DTA); 差示扫描量热法 (Differential Scanning Calorimetry DSC); 热机械分析 (Thermal Mechanical Analysis TMA); 逸出气分析 (Evolved Gas Analysis EGA)。

此外, 热分析联用技术也是热分析技术的重要组成部分, 如TG-DTA; DTG-DTA; TG-DTA-DTG; TA-MS; TA-FTIR联用等。

"A collection of techniques that measure the property of a material as a function of temperature"



热重及微商热重 (TG-DTG)

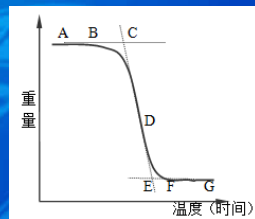
1、基本概念

热重法是在程序温度控制下, 测量物质的质量 (W) 与温度 (T) 关系的一种技术。当温度发生改变时, 质量发生相应变化的任何一个过程均可用TG方法来进行研究。

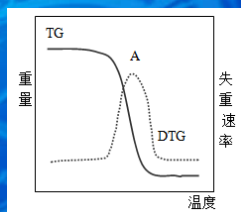
微商热重法 (Derivative Thermogravimetry 简称DTG): DTG法是利用热重曲线对时间或温度所进行的一阶微分的方法。

2、TG-DTG特征参数

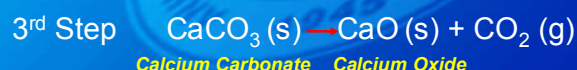
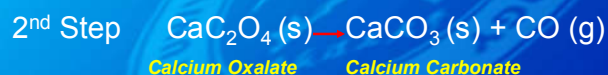
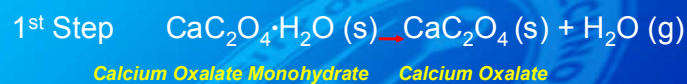
AB是基线; B点是样品开始发生分解时的温度, 称之为起始分解温度 (T_i), 从这一点开始, TG曲线偏离基线; D点是半寿温度点, 即样品失重率是50%时的温度点; C点是TG曲线下降段切线与基线的交点, 称之为外推起始温度 (T_e); 在TG曲线上, 一个分解过程完成后的平台线的反向处长线交TG曲线下降段切线于E点, 称E点为外推终止温度 (T_c); FG是一个分解过程完成后形成的平台。AB与FG间的差值为失重量。



DTG 曲线上的A点表示了TG曲线上的最大失重率。通过DTG曲线既能够知道试样的TG曲线上各点质量的变化速率，同时还能知道TG曲线下降段转折点的温度值。



3、典型实例分析



Atomic Masses:

H = 1.007

C = 12.01

O = 15.99

Ca = 40.06

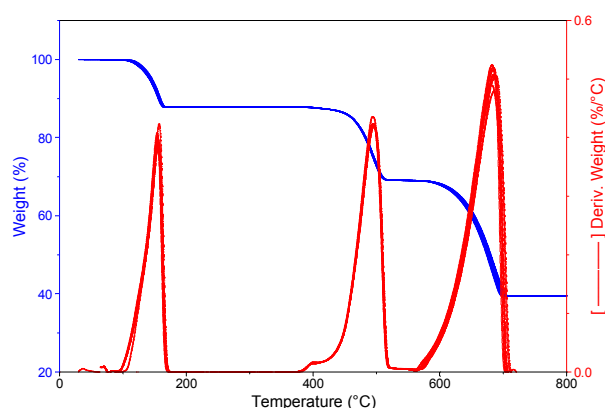
Mw of $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} = 146.064$

Theoretical % water mass loss = $18.004/146.064 = 12.3\%$

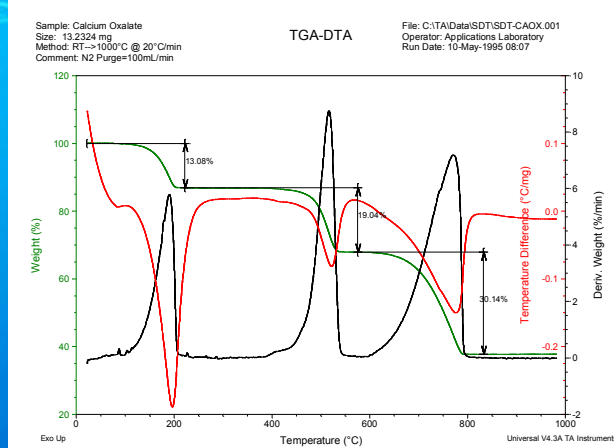
Theoretical % carbon monoxide mass loss = $28/146.064 = 19.2\%$

Theoretical % carbon dioxide mass loss = $43.99/146.064 = 30.2\%$

Overlay of 8 runs, same conditions

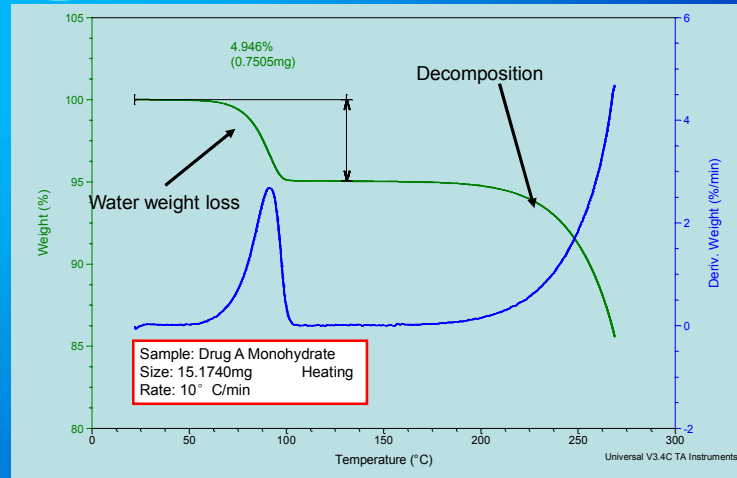


- ★ Although Calcium Oxalate is not generally accepted as a “Standard Material,” it does have practical utility for INTRA-laboratory use
- ★ Carefully control the experimental conditions; i.e. pan type, purge gases/flow rates, heating rate
- ★ Particularly control the amount (~5mg) and the particle size of the sample and how you position it in the pan
- ★ Perform multiple runs, enough to do a statistical analysis
- ★ Analyze the weight changes and peak temperatures and establish the performance of YOU and YOUR instrument
- ★ When performance issues come up, repeat the Calcium Oxalate analysis

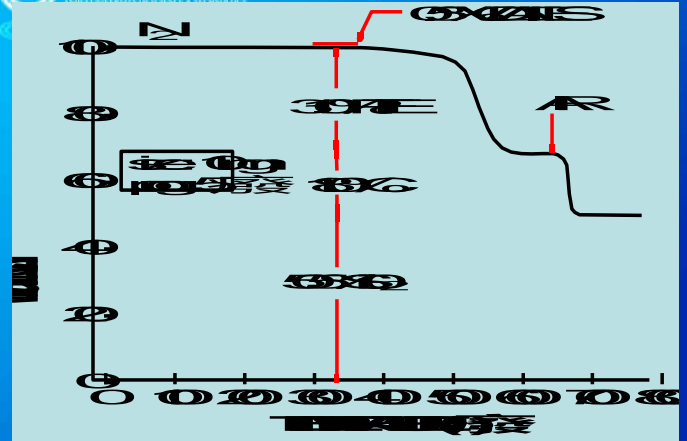
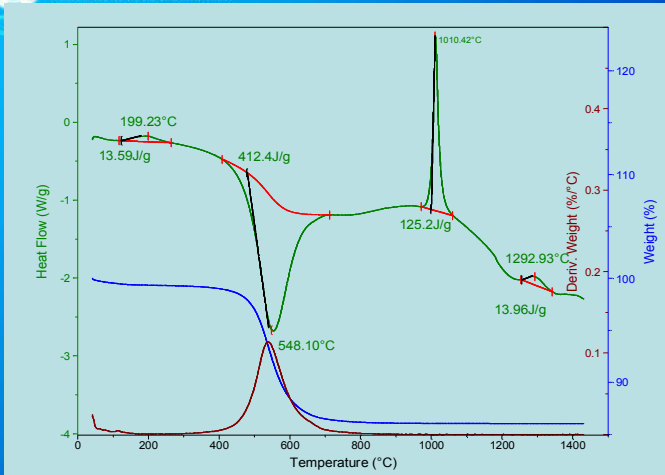


4、What TGA can measure?(实例分析)

- ★ Temperatures of Weight Change
- ★ Percent Weight Loss or Gain
- ★ Decomposition Temperature(s)
- ★ Decomposition Kinetics
- ★ Thermal/Oxidative Stability
- ★ Unbound water or solvent
- ★ Bound water or solvent (hydrate or solvate)
- ★ Moisture adsorption/desorption (Sorption Analysis)



TGA-DSC Kaolin Clay



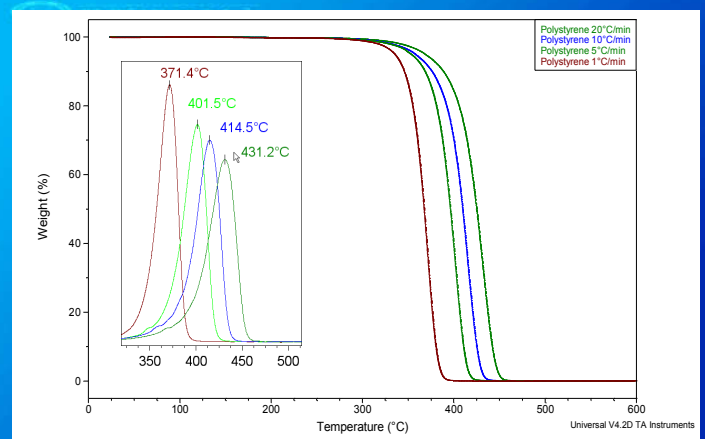
5、影响TG的主要因素

(1) 仪器的影响

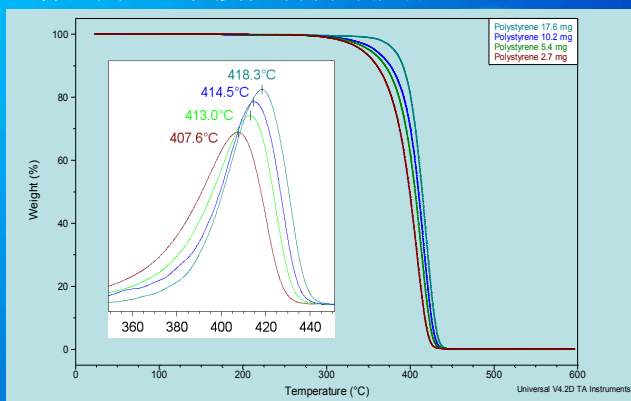
- ★ 浮力的影响: 各种气体在温度升高后, 密度减小, 天平部件受浮力减小, 出现表观增重现象。
- ★ 坩埚的影响: 坩埚不应有反应活性; 坩埚的形状、大小、重量对试验也有影响;
- ★ 挥发物再冷凝的影响: 挥发性产物在天平部件上冷凝造成假增重, 再次挥发会改变TG曲线形状。

(2) 操作条件的影响

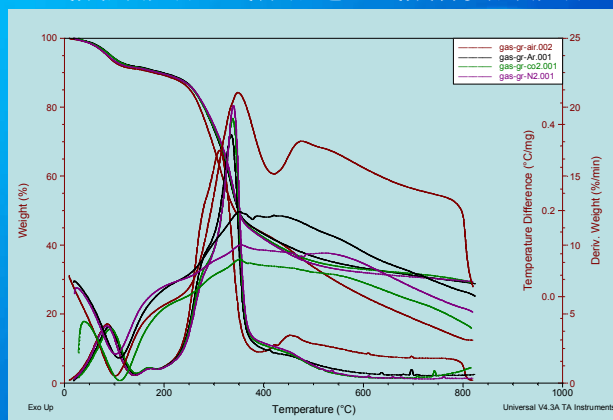
- ★ 升温速率的影响: 升温速率增大会导致温度满后的结果。传热差的材料采用5—10K/min升温速率, 传热好的采用10—20K/min升温速率, 动力学采用低升温速率。



★样品用量、粒度及装填的影响



★气氛的影响：气体流速、气氛种类的影响。



差热分析 (DTA)

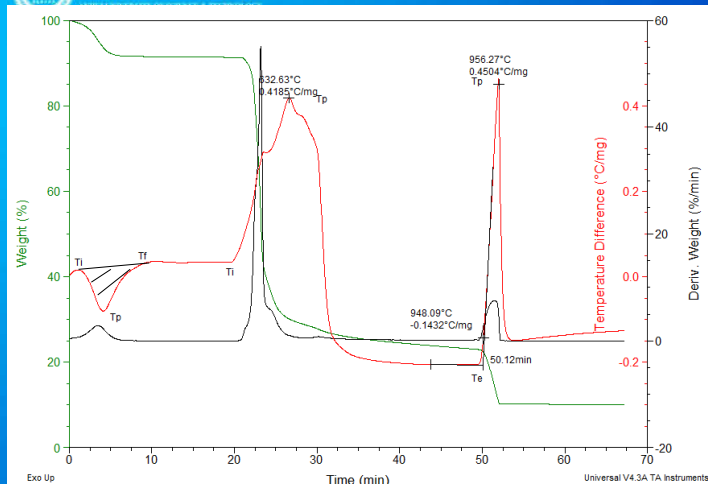
1、基本概念

差热分析 (DTA) 是在程序温度控制下，建立被测物质和参比物的温度差与温度关系的一种技术。用数学式表达为：

$$T = T_s - T_r = f(T \text{ 或 } t)$$

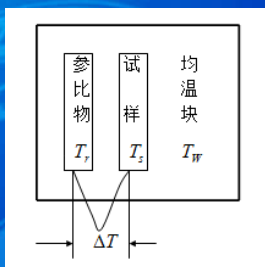
2、特征参数

由DTA曲线上 T_i 、 T_p 、 T_f 、 T_i 所包围的 $T_i T_p T_f T_i$ 区域计算得到的面积即为峰面积 S 。在分析DTA曲线时，由于 T_e 、 T_p 重复性好， S 与反应过程中的反应热有关，因此这三个参数很有分析价值，它们是DTA曲线上的主要特征参数。其中 T_e 为峰的前沿最大斜率点切线与基线延长线的交点。



3、DTA基本原理

试样热电偶与参比物热电偶是反向串接的，组成差示热电偶。当试样不发生热效应时，试样温度与参比物温度是相同的， $T_r - T_s = 0$ ，两支热电偶的热电势大小相等，方向相反，因此互相抵消，差示热电偶无信号输出。当试样发生热效应时，试样温度与参比物温度不相等，即： $T_r - T_s \neq 0$ ，两支热电偶的热电势抵消不了，差示热电偶有信号输出，经过信号放大器放大之后，就能得到DTA曲线。



差热分析法原理图

4、影响DTA曲线的主要因素

★升温速率的影响

升温速率增大，热效应增大，峰变高，峰顶温度升高；对曲线形状、分辨率也产生影响从而影响峰的面积。慢速升温有利于提高DTA曲线的分辨率。

★气氛的影响

气氛对DTA的影响很大，惰性气氛和反应气氛往往有很大区别；静态和流动气氛也会产生不同结果。

★样品的影响

试样用量大，温度梯度大，峰扩张，峰温向高温推移；试样用量过大还有可能影响反应机理。

样品粒度对DTA有较大影响，粒度小表面大，对有气体参与的反应有利于反应的进行，DTA曲线向低温推移。但对热解等有气体释放的反应，粒度的大小气体释放会产生影响从而影响DTA曲线，样品应保证粒度较为均匀。

样品的装填情况对DTA也会产生影响。

★ 参比物与稀释剂的影响

参比必须是惰性的，当用作稀释剂时不能与样品发生反应。

差示扫描量热法（DSC）

1、基本概念

差示扫描量热法（DSC）是在程序温度控制下，测量输入到物质和参比物之间的功率差与温度（或时间）的关系的一类技术。DSC是在DTA技术的基础之上发展而来的，它克服了DTA技术的重复差，分辨率不够高的缺点，同时使热量定量化变得更为简单。

DSC分为三种形式，它们分别为：功率补偿式DSC、热流式DSC和热通量式DSC。其中热流式和热通量式DSC是使用在不同温度下DTA曲线峰面积与试样焓变的校正曲线来定量的差热分析法，这两种形式的DSC实质上都是属于DTA原理的，但是由于热流式和热通量式DSC仪器在结构上与传统的DTA方法不同，因此将它们归属为DSC。

2、功率补偿型DSC基本原理

基本原理：功率补偿型DSC仪的工作原理，在程序控温条件下，当试样没有发生吸放热反应时，试样与参比物之间没有温度差，当试样发生吸放热反应时，试样与参比物间的温度不同，此时根据两者之间的温度差，改变电流，从而调整差示功率，以维持样品及参比物支持器的温度相等，记录补偿功率的大小与温度或时间的关系，便可以得到DSC曲线。

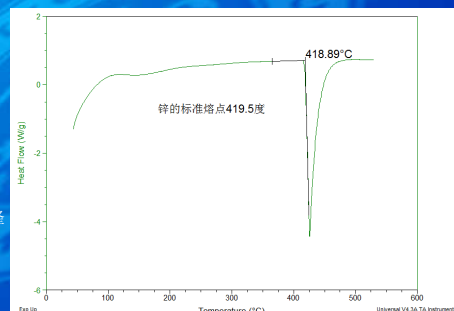
DTA、DSC的应用

1、熔点的测定

熔点是物质从晶相到液相的转变温度。采用外推温度 T_e 来表示。

DTA法测熔点注意事项

- 1) 少用试样，可用空坩埚做参比；
- 2) 在惰性气氛中测试；
- 3) 升、降温速度不超过10 K/min；
- 4) 固体样品先升温形成吸热峰、然后降温形成放热峰两峰应对称且面积相等。



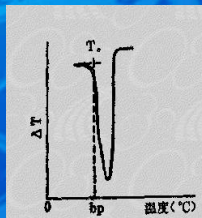
2、沸点的测定

沸点是液体的饱和蒸汽压等于标准大气压时的温度。

根据特鲁通规则

$$\Delta H/T_b \approx 21$$

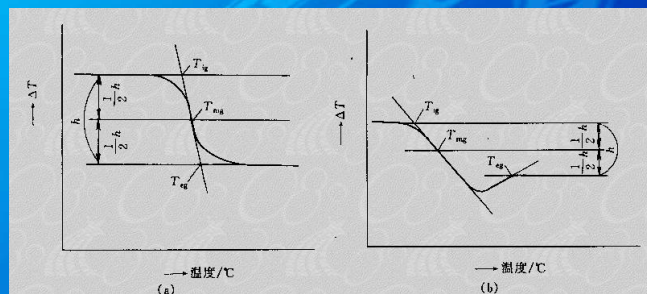
可以同时测得样品的汽化热和沸点。



用带小孔的坩埚DTA法测水的沸点

3、高聚物玻璃化转变温度的测定

高聚物从玻璃态转变为高弹态的温度。从分子结构上讲是高聚物无定形链段从冻结状态到解冻状态的一种松弛状态。



4、DTA或DSC进行热量的定量

在相同的条件下，试样燃烧所释放出的热量与DTA曲线下所包含的面积成正比。即 $A=(m \times \Delta H)/K$ ，其中A表示DTA曲线下的面积，m为样品的重量， ΔH 为反应的热焓，K为取决于设备和温度的一个装置常数。

5、DTA、DSC法测物质组成

1) 单峰法

在相同条件下做纯样的DTA、DSC实验得到曲线，然后做样品的DTA、DSC实验，根据面积比求物质组成。

2) 双峰或多峰法

设试样中只有A和B两种组分，形成的DTA峰面积分别为 S_a 和 S_b ，对应的热效应值分别为 q_a 和 q_b ，设 Q_a 和 Q_b 分别为1mol的A和B纯物质的热效应值，x为试样中A的摩尔分数或百分数，则有 $Q_a = xq_a$ ， $Q_b = (1-x)q_b$ ，所以 $q_a/q_b = S_a/S_b = Q_a x / Q_b (1-x)$ ，令 $K = Q_a/Q_b$ ， $S_a/S_b = Kx/(1-x)$ ， $X = S_a/(S_a + KS_b)$

热分析联用技术

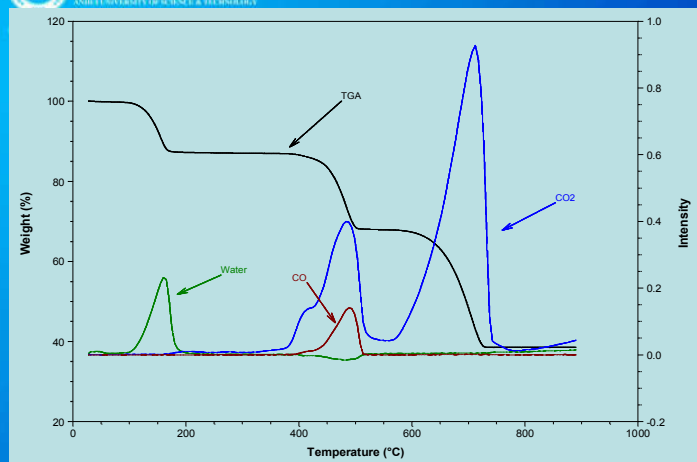
热分析联用技术主要包括不同热分析技术间的联用以及热分析技术与其它分析技术的联用。

1、热分析技术间的联用

TG-DTA、TG-DSC、TG-DTG-DTA

2、热分析与其它分析技术的联用

TG-MS、TG-FTIR、TG-GC、XRD-DSC等



热机械分析 (TMA)

1、基本概念

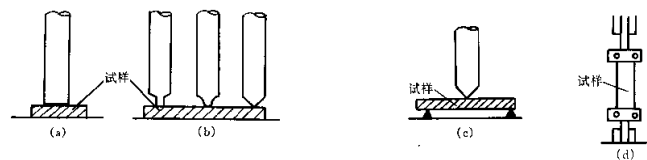
热机械分析 (TMA) 在非振动负荷 (应力) 下测量物质的形变与温度或时间关系的一种技术。

热膨胀法是测量试样的尺寸变化与温度或时间关系的一种技术。

试样可以是粉末、薄膜、纤维、液体等

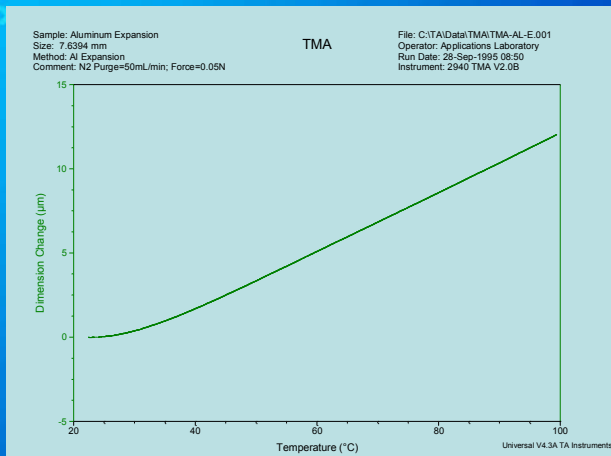
2、基本结构

一般由应力产生器、位移检测器、炉子、炉温控制系统等组成。



各类 TMA 探测器

(a) 膨胀式; (b) 压缩式; (c) 弯曲式; (d) 拉伸式



热分析动力学

1、基本概念

热分析动力学是指用化学动力学的知识解析用热分析方法测得的物理量（如质量、温度、热量、模量及尺寸等）的变化速率与温度、时间及浓度等变化的关系，最终建立动力学方程式或者只求活化能，并对该反应机理进行推论解释。

利用热分析技术研究动力学的方法主要有以下几类方法：按反应温度控制类型分：一类是等温法即稳态法；另一类是非等温法即动态法。

从数据处理方法分类，主要有：微分法、积分法和近似方法。

2、化学反应动力学基本概念

化学反应动力学是研究化学反应速度随时间、浓度、温度的变化关系，最终建立动力学方程式（或只求活化能），并对该反应机理进行推论和解释。

其数学表达式为： $v = f(c, T, t)$

式中： v 是反应速度， c 是反应物或产物浓度， T 是反应的绝对温度， t 是反应时间。

化学反应速度与浓度的关系，即质量作用定律：

$$v = -\frac{dc}{dt} = kf(c)$$

式中： k 是反应速度常数，它是反应温度的函数，反应温度不变 k 是常数， c 是反应产物浓度， $f(c)$ 是反应机理函数，在均相反应中一般用 $f(c)=(1-c)^n$ 表示反应机理， n 是反应级数。

反应速度常数 k 与温度有着密切的关系，许多研究者在19世纪末提出了两者间的关系，其中最著名、应用最多的是阿仑尼乌斯（Arrhenius）方程：

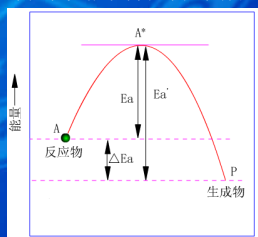
$$k = Ae^{-E/RT}$$

式中： E 为活化能 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ， A 为频率因子（或叫幂前因子） min^{-1} ， R 是气体常数 $8.314\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。其中 E ， n ， A 称为动力学参数，动力学研究的主要目的是求解出能描述某反应的动力学参数和推断反应机理。

有关活化能的理论：

物质分子间发生化学反应首先的条件是相互碰撞。在标准状态下，单位时间、单位体积内气体分子相互碰撞约 10^{23} 次。但相互碰撞的分子不一定发生反应，只有少数具有一定能量的分子相互碰撞才

会发生反应，这种分子称为活化分子。活化分子所具有的能量比普通分子高，使普通分子变为活化分子所必须的能量称为活化能。



设反应为： $A \rightarrow P$ ，反应物 A 必须获得能量 E_a 变成活化状态 A^* ，才能越过能垒变成生成物 P 。同理，对逆反应 P 必须获得的能量 $E_{a'}$ 才能越过能垒变成 A 。 $E_{a'}$ 与 E_a 之差 ΔE 等于反应热效应。

对于基元反应， E_a 可赋予较明确的物理意义，即表示活化分子的平均能量与所有分子平均能量的差值。对于复杂反应，如果得到有明确级数的总反应速率方程，总速率常数（又叫表观速率常数）是各基元步骤的速率常数因次之积，则总反应的活化能是各基元反应活化能的代数和，这时 E_a 称为总包反应的表观活化能（**apparent activation energy**）。

3、热解失重动力学模型的基本方程

热重是热分析方法的一种，下面我们以固体物质的热解失重反应为例加以讲解：

固体物质的热解过程一般可以表示为下面的反应过程：



也就是说，热解物质A在受热条件下分解成为凝固相产物B和挥发性气相产物C。该反应过程通常被假设为不可逆反应，在热分析实验中可以采用载气将反应产生的挥发性气体及时带走，使得逆反应来不及发生，从而使得实验情形与不可逆假设相符合。固体物质的失重速率可用两种不同的方程描述：

$$\frac{d\alpha}{dt} = kf(\alpha)$$

$$g(\alpha) = kt$$

$$f(\alpha) = \frac{1}{g'(\alpha)}$$

这里 α 是t时刻物质的失重百分数，它是以干燥基进行计算得到， k 是速率常数， $f(\alpha)$ 和 $g(\alpha)$ 分别是微分形式和积分形式的动力学机理函数，对于固体物质热分解反应来说，可能的反应机理是多种多样的，函数 $f(\alpha)$ 和 $g(\alpha)$ 根据反应机理的不同而具有不同的形式(表1-1)。速率常数 k 依赖于绝对温度 T ，通常假设它与 T 的关系符合阿仑尼乌斯(Arrhenius)方程。

常用机理函数形式

函数号	函数名称	机理	积分形式 $G(\alpha)$	微分形式 $f(\alpha)$	$f'(\alpha)$
1	抛物线法朗	一维扩散, 1D, D_1 恒定形 $a \cdot t$ 曲线	a^2	$\frac{1}{2}a^{-1}$	$-\frac{1}{2}a^{-2}$
2	Valensi 方程	二维扩散, 圆柱形对称, 2D, D_2 , 恒定形 $a \cdot t$ 曲线	$a + (1-a)\ln(1-a)$	$[-\ln(1-a)]^{-1}$	$\frac{-1}{[\ln(1-a)]^2(1-a)}$
3	Jander 方程	二维扩散, 2D, $n = \frac{1}{2}$	$[1 - (1-a)^{\frac{1}{2}}]^2$	$4(1-a)^{\frac{1}{2}}[1 - (1-a)^{\frac{1}{2}}]^{\frac{1}{2}}$	$-2(1-a)^{-\frac{1}{2}}[1 - (1-a)^{\frac{1}{2}}]^{\frac{1}{2}} + [1 - (1-a)^{\frac{1}{2}}]^{-\frac{1}{2}}$
4	Jander 方程	二维扩散, 2D, $n = 2$	$[1 - (1-a)^{\frac{1}{2}}]^3$	$(1-a)^{\frac{1}{2}}[1 - (1-a)^{\frac{1}{2}}]^2$	$-\frac{1}{2}(1-a)^{-\frac{1}{2}}[1 - (1-a)^{\frac{1}{2}}]^2 - \frac{1}{2}[1 - (1-a)^{\frac{1}{2}}]^{-2}$
5	Jander 方程	三维扩散, 3D, $n = \frac{1}{2}$	$[1 - (1-a)^{\frac{1}{3}}]^3$	$6(1-a)^{\frac{1}{3}}[1 - (1-a)^{\frac{1}{3}}]^{\frac{1}{2}}$	$-4(1-a)^{-\frac{1}{3}}[1 - (1-a)^{\frac{1}{3}}]^{\frac{1}{2}} + [1 - (1-a)^{\frac{1}{3}}]^{-\frac{1}{2}}$
6	Jander 方程	三维扩散, 球形对称, 3D, D_3 , 恒定形 $a \cdot t$ 曲线, $n = 2$	$[1 - (1-a)^{\frac{1}{3}}]^3$	$\frac{3}{2}(1-a)^{\frac{1}{3}}[1 - (1-a)^{\frac{1}{3}}]^{\frac{1}{2}}$	$\frac{1}{2} - \frac{1}{2}(1-a)^{-\frac{1}{3}}[1 - (1-a)^{\frac{1}{3}}]^{\frac{1}{2}}$
7	G-B 方程*	二维扩散, 球形对称, 3D, D_3 , 恒定形 $a \cdot t$ 曲线	$1 - \frac{2}{3}a - (1-a)^{\frac{1}{2}}$	$\frac{3}{2}[(1-a)^{-\frac{1}{2}} - 1]^{-1}$	$\frac{-(1-a)^{-\frac{1}{2}}}{2[(1-a)^{-\frac{1}{2}} - 1]^2}$
8	反 Jander 方程	三维扩散, 3D	$[(1+a)^{\frac{1}{3}} - 1]^3$	$\frac{3}{2}(1+a)^{\frac{1}{3}}[(1+a)^{\frac{1}{3}} - 1]^{-1}$	$\frac{(1+a)^{-\frac{1}{3}}[(1+a)^{\frac{1}{3}} - 1]^{-1}}{-\frac{1}{2}[(1+a)^{\frac{1}{3}} - 1]^{-2}}$
9	Z-L-T 方程**	三维扩散, 3D	$[(1-a)^{-\frac{1}{3}} - 1]^3$	$\frac{3}{2}(1-a)^{\frac{1}{3}}[(1-a)^{-\frac{1}{3}} - 1]^{-1}$	$\frac{-2(1-a)^{-\frac{1}{3}}[(1-a)^{-\frac{1}{3}} - 1]^{-1}}{-\frac{1}{2}[(1-a)^{-\frac{1}{3}} - 1]^{-2}}$

假设实验中使用恒定的升温速率 $\beta = \frac{dT}{dt}$ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$)，结合前面的式子可以导出如下方程：

$$\text{微分式: } \frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} f(\alpha) \exp(-E/RT)$$

$$\text{积分式: } g(\alpha) = \int_0^{\alpha} \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{A}{\beta} \int_{T_0}^T \exp(-E/RT) dT \approx \frac{A}{\beta} \int_0^T \exp(-E/RT) dT$$

式中： T_0 为初始温度。

在过去几十年间，许多研究者基于积分式和微分式提出了各种动力学分析方法，这些方法的目标，就是基于实验获得的热分析曲线，从上式导出反应动力学参数 E 和 A ，并确定函数 $f(\alpha)$ 的形式。这些方法中利用微分式进行动力学分析时通常称为微分法，利用积分式进行动力学分析时称为积分法。由于实验可以直接得到试样质量随温度

(或时间)的变化曲线，即TG曲线，而DTG曲线则要通过数值方法计算得出，因此积分法相对于微分法的一个基本优点是它不带来计算导数所伴随的数值误差。鉴于此，积分法被许多学者认为是较为精确的方法(动力学分析方法可参考《热分析动力学》一书)。

4、热解失重法动力学分析中变化率的确定

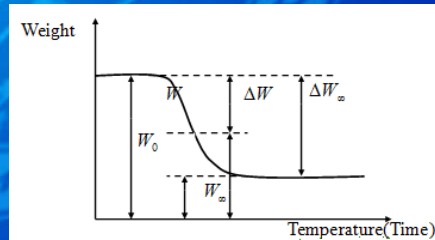
从前面的分析可知，化学反应动力学是根据反应物或产物浓度进行动力学分析的，在热分析动力学研究中往往采用变化率进行动力学分析。

在热重法动力学分析中，变化率 α (也可称为失重率)可定义为：

$$\alpha = \frac{\Delta W}{\Delta W_{\infty}} = \frac{W_0 - W}{W_0 - W_{\infty}}$$

式中： ΔW_{∞} 是最大失重量， ΔW 是 T (或 t)时的失重量， W_0 是初始重量， W 是 T (或 t)时的重量， W_{∞} 是最终重量。 $W_{\infty} = 0$ 时叫完全分解。各值的取法如下图所示。对于在热解过程中有多步过程的，应分别计算各步的变化率，如草酸钙的分解过程分为3个阶段，硫酸铜($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)分3个阶段脱水。

α 相应于经典反应动力学产物的浓度即：
 $t=0$ 时， $\alpha=0$
 $t=t$ 时， $\alpha=\alpha$
 $t=\infty$ 时， $\alpha=1$



5、热解失重法动力学参数求解举例

这里我们介绍积分法Coats-Redfern法求解动力学参数。
根据Coats-Redfern的推导，得到如下近似式：

$$\int_0^T \exp(-E/RT) dT = \frac{RT^2}{E} (1 - \frac{2RT}{E}) \exp(-E/RT)$$

由前面的式子以及Coats-Redfern近似式，可得：

$$g(\alpha) = \frac{A}{\beta} \frac{RT^2}{E} (1 - \frac{2RT}{E}) \exp(-E/RT)$$

对上式两边取对数后整理可得：

$$\ln[g(\alpha)/T^2] = \ln[\frac{AR}{\beta E} (1 - \frac{2RT}{E})] - \frac{E}{RT}$$

由于对一般的反应温区和大部分的E值而言 $\frac{E}{RT} \gg 1$, $(1 - \frac{2RT}{E}) \approx 1$ 。

所以上式可以改写为： $\ln[g(\alpha)/T^2] = \ln[\frac{AR}{\beta E}] - \frac{E}{RT}$

根据上式可知，如果物质热解反应的机理函数 $g(\alpha)$ 选择正确，则 $\ln[g(\alpha)/T^2]$ 之 $\frac{1}{T}$ 应该成线性关系，由此根据实验数据作图，则可以得 $\ln[g(\alpha)/T^2]$ 之 $\frac{1}{T}$ 的直线关系图，根据直线的斜率和截距可以求出E和A。

6、实例分析

热分析作为研究 CaCO_3 静态分解的一种重要方法,具有快速、方便、准确的优点,被广泛应用。在 CaCO_3 分解的试验中,我们采用热重(TG)技术研究 CaCO_3 分解的动力学特性,并求解动力学参数,确定反应机理。

实验条件：样品重量6.17mg，升温速率 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ ，空气流量50ml/min。

这里采用 $g(\alpha) = -\ln(1-\alpha)$ (随机成核，随后生长机理)。根据实验结果求得一系列的不同温度的下的 α ，将一系列的 (T, α) 代入式

$$\ln[g(\alpha)/T^2] = \ln[\frac{AR}{\beta E}] - \frac{E}{RT}$$

从而得到一系列的点 $(\ln[g(\alpha)/T^2], 1/T)$ ，通过线性回归便

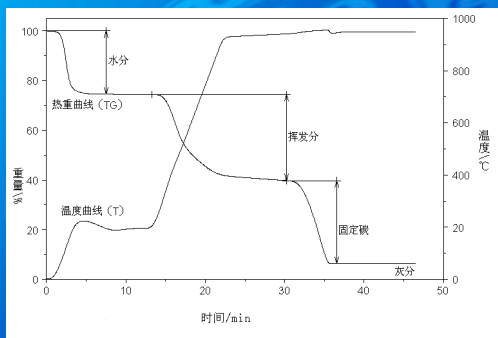
可以得到直线的斜率和截距，从而计算出E和A。回归结果表明相关系数 $r=0.9965$ ，说明机理函数正确。

计算结果为 $E=339.75\text{kJ/mol}$ ， $A=1.25 \times 10^{17} \text{ min}^{-1}$ 。

热分析技术在煤炭领域的应用

1、煤炭检测

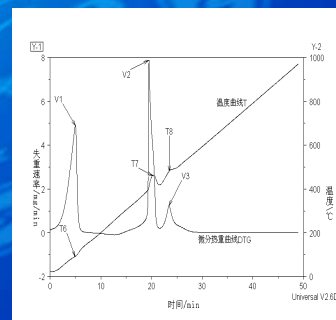
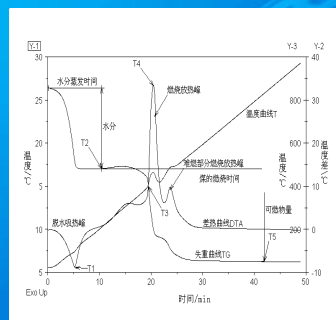
★煤的工业分析



★煤的发热量测定

2、煤的燃烧特性评定

根据热分析数据计算煤的燃烧特性指数





催化剂对煤燃烧特性的影响

煤的自然特性研究

煤的燃烧过程及自然机理研究

3、煤的热解、气化、液化研究

4、煤反应动力学研究



思考题

- 1、常用热分析基本方法有哪些，其基本原理是什么？
- 2、热分析动力学基本方法。
- 3、热分析技术在煤炭领域的应用主要体现在哪些方面？
- 4、热分析技术与自己的研究课题是否相关，如何在自己的课题中应用热分析技术？
- 5、热分析技术的发展现状如何？