

# 化合物热解分离过程的质量和能量恒算\*

秦建昭 尹华杰

(郑州工学院化工系)

**摘要:** 本文在[1]文颗粒状化合物热解分离的质热传递规律研究基础上, 建立了工程设计的能量和质量恒算方法。采用本文方法可确定分解成气体物质的速率和分解气体出解室的温度与时间的函数关系。为分解气体的引出和冷却装置设计, 提供依据。

**关键词:** 化合物, 热解分离, 质量和能量恒算

**中图分类号:** TQ028.6

化合物颗粒物料在加热解室内加热分解, 分解出的气体要及时引出, 以便分解过程继续。引出的气体如果作为产品要冷却, 或参与另外的反应, 应能准确确定其分解速率及温度, 为引出气体的装置, 冷却器或反应器设计提供设计参数。本文根据[1]文, 对化合物热解分离这个不稳定的传热传质过程质热传递计算方法的研究, 建立在工程设计中的能量和质量恒算方法。

## 1 分解气体质量速率的计算

在[1]文中, 求解质热传递偏微分方程得到在料层任意高度, 分解升温扩散阶段开始后的任意时间, 要被分解成气态的物质的含量为:

$$X(y, \tau) = X_0 + \frac{D_e \delta C_1 \sqrt{\pi}}{2\sqrt{\alpha_m \beta}} [G(\xi) - G(\sqrt{\frac{\alpha_m}{4\beta}} \cdot \frac{C_1 y}{\delta_m (T_s - T_f)})] \quad (1)$$

式中:  $y$  以料层与加热壁接触面为原点料层高度坐标,  $m$

$\tau$  时间,  $s$

$D_e$  扩散系数  $m^2/s$

$\delta$   $Sort$ 系数  $1/^\circ C$

$\alpha_m$  导温系数  $\alpha_m = \frac{\lambda_m}{C_m \rho_m} m^2/s$

$\lambda_m$  颗粒状化合物的导热系数  $kJ/m \cdot s \cdot ^\circ C$

\* 收稿日期: 1994-08-07

$C_m$  颗粒状化合物的恒压比热  $\text{kJ} / \text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$

$\rho_m$  颗粒状化合物的密度  $\text{kg} / \text{m}^3$

$G(\cdot)$  高斯误差函数

$\beta$  参数  $\beta = \alpha_m + \frac{\gamma}{C_m} D_e \delta \quad \text{m}^2 / \text{s}$  (2)

$\gamma$  分解热  $\text{kJ} / \text{kg}$

$C_1$  常数  $^\circ\text{C}$ 。根据[1]文推导,  $C_1$  从下式解出:

$$T_s - T_f = \frac{\sqrt{\pi}}{2} C_1 \{ G[\frac{C_1}{2(T_s - T_f)}] - 1 \} \quad (3)$$

$T_f$ 、 $T_s$  颗粒状化合物的初始温度和初始分解温度,  $^\circ\text{C}$

$\delta_m$  料层总高度,  $\text{m}$

$\xi$  参变量  $\xi = \frac{\gamma}{\sqrt{4\beta\tau}}$

式(1)表示被分解成气态的物质与化合物中不被分解成气态物质的比值, 类似湿含量的定义。它对时间的导数乘以不被分解成气态物质的质量  $m_l$ , 就是在时间  $\tau$  时料层高度  $y$  处的分解速率。整个料层内的平均分解速率  $\dot{m}$  为这个分解速率沿料层高度的积分均值, 即:

$$\dot{m} = m_l \frac{1}{\delta_m} \int_0^{\delta_m} \frac{\partial x}{\partial \tau} dy$$

由式(1)得:  $\frac{\partial x}{\partial \tau} = -\frac{D_e \delta C_1}{\beta \sqrt{\alpha_m}} \frac{y}{\tau^{3/2}} e^{-\frac{y^2}{4\beta\tau}}$

$$\therefore \dot{m} = -\frac{D_e \delta C_1 m_l}{\beta \sqrt{\alpha_m} \delta_m} \int_0^{\delta_m} \frac{y}{\tau^{3/2}} e^{-\frac{y^2}{4\beta\tau}} dy = \frac{2D_e \delta m_l C_1}{\sqrt{\alpha_m} \tau \delta_m} \left[ e^{-\frac{y^2}{4\beta\tau}} - 1 \right] \quad \text{kg} / \text{s} \quad (4)$$

因热分解室内无其它气体介质, 分解气体从料层内颗粒间向料层上方扩散, 主要是克服流道阻力。浓差扩散可以不计。由文献[2]厄冈对非流化充填床内的压力降  $\Delta P$  的研究结果, 孔隙度  $\epsilon$  在 0.40 到 0.65 之间时:

$$\frac{\Delta P}{\delta_m} \frac{d_p}{\rho_g V_g^2} \frac{\epsilon^3}{1 - \epsilon} = 150 \frac{1 - \epsilon}{R_{ep}} + 1.75 \quad (5)$$

式中:  $d_p$  颗粒直径,  $\text{m}$

$\rho_g$  气体密度,  $\text{kg} / \text{m}^3$

$V_g$  按加热壁面积计算的流体速度,  $\text{m} / \text{s}$ , 用(3)式及气体比容和加热壁面积计算;

$$R_{ep} \text{ 雷诺数, } R_{ep} = \frac{V_0 d_p}{V_g}$$

$V_g$  气体运动粘度,  $m^2/s$

只要抽气装置给加热分解室建立的真空度大于等于上式计算的  $\Delta P$ , 分解气体便能及时抽出料层。

## 2 能量平衡方程

图 1 为整个料层厚度的热量传递示意图。从加热壁传递的热流使化合物物料吸热分解, 同时随温度升高, 物料的热焓也在增加。一般加热室上方空间较大, 气体流速很低, 气体流出料层后到抽出加热室过程的传热可认为主要是热传导。根据能量守恒原理, 传入料层的热量与料层吸收、化合物分解及传出料层的热量平衡, 忽略幅射热, 即:

$$q_2 = \dot{m}(\gamma + i_g) + \lambda_g / \delta_g (T_m - T_k) + C_m \bar{T} m_m \quad (6)$$

式中:  $q_2$  加热壁传给物料的热流速率,  $KJ/m^2 \cdot s$

$$\text{由文[1], } q_2 = - \frac{C_1 \lambda_m}{\sqrt{4\alpha_m \tau}} \quad (7)$$

$i_g$  分解气体的热焓,  $i_g = C_{p.g} T_m$   $KJ/kg$

$C_{p.g}$  分解气体的等压比热,  $KJ/kg \cdot ^\circ C$

$T_m$  料层上表面的温度,  $^\circ C$

$\lambda_g$  分解气体的导热系数,  $KJ/m \cdot s \cdot ^\circ C$

$\delta_g$  料层上方的空间高度,  $m$

$T_k$  气体出分解室的温度  $^\circ C$

$\bar{T}$  物料层内的温度变化度  $\frac{dT}{d\tau}$   $^\circ C/s$

$m_m$  瞬时物料质量,  $m_m = \rho_m A \delta - \int_{\tau_1}^{\tau} m d\tau$ ,  $kg$

$$\tau_1 \text{ 预热阶段结束时间, } \tau_1 = \frac{\delta_m^2 (T_s - T_f)^2}{C_1^2 \alpha_m} \quad (8)$$

通过 (5) 式可求出气体出分解室的温度  $T_k$ 。下面给出 (6) 式中的  $\bar{T}$  和  $m_m$  的计算式。

由 [1] 文在化合物热分解阶段的料层内温度计算式为:

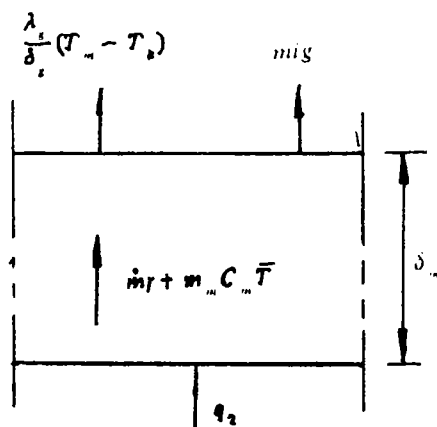


图 1 料层的能量传递

$$T - T_0 = C_1 \sqrt{\frac{\pi\beta}{4\alpha_m}} G(\xi) \quad (9)$$

式中:  $T_0$  与加热表面接触的物料温度  $^{\circ}\text{C}$

$$\bar{T} = \frac{dT}{d\tau} = \frac{1}{\delta_m} \int_0^{\delta_m} \frac{\partial T}{\partial \tau} dy = \frac{\beta C_1}{2\delta_m \sqrt{\alpha_m \tau}} [e^{-\frac{\delta_m^2}{4\beta\tau}} - 1] \quad (10)$$

$$m_m = \rho_m A \delta_m - \frac{4D_e \delta m_1 C_1}{\sqrt{\alpha_m} \cdot \delta_m} \left\{ \frac{\delta_m (T_s - T_f)}{C_1 \sqrt{\alpha_m}} \left[ 1 - e^{-\frac{C_1^2 \alpha_m}{4\beta(T_s - T_f)^2}} \right] - \sqrt{\tau} (1 - e^{-\frac{\delta_m^2}{4\beta\tau}}) + \frac{\sqrt{\pi} \delta_m}{2\sqrt{\beta}} \left[ G\left(\frac{\delta_m}{\sqrt{4\beta\tau}}\right) - G\left(\frac{C_1}{2(T_s - T_f)} \sqrt{\frac{\alpha_m}{\beta}}\right) \right] \right\} \quad (11)$$

### 3 物料参数的确定

本文和 [1] 文中用到了许多物性参数, 其中大部分可查手册或用公式推算得到。而颗粒状化合物的导热系数  $\lambda_m$ , 扩散系数  $D_e$  和 Sort 系数一般查不到, 为减少实验, 本文给出它们的确定方法。

#### 3.1 $\lambda_m$ 的确定

由文献 [2], 颗粒状物料广义地说为固体的无定形材料的混合物。而无定形固体材料的导热系数随温度成正比变化。混合物的导热系数取决于不同组分的导热系数和容积百分比, 空隙间的对流和辐射能量交换。根据 [2], P68 图 2-12 无定形材料导热系数与温度间关系曲线, 导热系数随温度变化偏离线性。空隙的影响考虑在热解分离后固体产品的导热系数  $\lambda_s$  内。颗粒化合物的导热系数实验关联式, 可采用:

$$\lambda_m = \lambda_s + AXTe^{-\beta T} \quad (12)$$

式中:  $A$ 、 $B$  待定系数, 由实验数据得到。

#### 3.2 $D_e \delta$ 的确定

颗粒状化合物的热解分离, 物料层首先被预热到初始分解温度。然后从加热壁面先达到快速分解温度, 逐渐使达到快速分解温度的位置上移, 最终料层上表面也达到快速分解温度, 完成分解过程。当料层上表面达到快速分解温度  $T_q$  时, 由 (8) 式:

$$T_q - T_0 = C_1 \sqrt{\frac{\pi\beta}{4\alpha_m}} G\left(\frac{\delta_m}{\sqrt{4\beta\tau_e}}\right) \quad (13)$$

得到对应分解完成时间  $\tau_e$  的关系式。对应分解完成时间  $\tau_e$ , 在料层上表面处的  $X(\delta_m, \tau_e) = 0$ 。由 (1), (2) 和 (13) 式得:

$$G\left[\sqrt{\frac{\alpha_m}{4\beta}} \frac{C_1}{T_s - T_f}\right] = \frac{2X_0 \sqrt{\alpha_m \beta \gamma}}{(\beta - \alpha_m) C_m C_1 \sqrt{\pi}} - \frac{T_0(\tau_e) - T_q}{C_1} \sqrt{\frac{4\alpha_m}{\pi\beta}} \quad (14)$$

从上式解得  $\beta$ , 然后用下式求出综合参数  $D_e \delta$ :

$$D_e \delta = (\beta - \alpha_m) - \frac{C_m}{-\gamma} \quad (15)$$

## 4 结 论

4.1 本文方法适用计算化合物热解离时的分解速率和气体出分解室的温度。为设计气体引出装置和冷却器或反应器提供较准确的设计参数。

4.2 综合参数  $D_e \delta$  的计算与  $T_0(\tau_e)$  的值有关, 而  $T_0(\tau_e)$  的值取决于加热设备的加热方式和加热介质的温度。因此,  $D_e \delta$  的计算要通过实验测定  $T_0(\tau_e)$  求得。

## 参 考 文 献

- 1 尹华杰. 颗粒化合物传导热解离质热传递. 《郑州工学院学报》待发表.
- 2 E.R.G. 埃克特, R.M. 德雷克著[美]. 航青译. 金如山校. 传热与传质分析. 科学出版社, 1986

# Mass and Energy Balance of the Thermolysis Separation Process of Compound Particles

Qin Jianzhao Yin Huajie  
(Zhengzhou Institute of Technology)

**Abstract:** Based on the study of mass and heat transfer law about thermolysis separation of compound particles in (1) paper, the energy and mass balance method was carried out in engineering design. By use of method in this paper, the mass rate which was dissociated into gas could be solved and the functional relations between temperature and time could fix of disintegrated gas which was drawn out separating room. The base was proposed for the drawing out and cooling equipment design of disintegrated gas.

**Keywords:** Compound Particles, The rmolysis Separation, Mass and Energy Balance.