

### 燃烧过程的理论基础

- **化学反应速度**
  - 化学反应速度 影响反应速度的因素
- **固体燃料的燃烧**
  - 煤燃烧四个阶段 焦炭的燃烧 煤和煤粉的燃烧特点
- **煤粉气流的着火与燃烧**
  - 着火与熄火的热力条件 煤粉气流着火热源
  - 煤粉气流的着火及影响因素 完全燃烧条件

### 化学反应速度

燃烧反应是一种发光放热的高速化学反应，同时伴随各种物理过程

**均相燃烧** 燃料和氧化剂物态相同，如气体燃料在空气中燃烧

**多相燃烧** 燃料和氧化剂物态不同，如固体燃料在空气中燃烧

**化学反应速度** 在反应系统单位体积中物质（反应物或生成物）浓度的变化率，单位是mol / (cm<sup>3</sup>·s)

对于反应式

$$\alpha A + \beta B \rightarrow \gamma C + \delta H$$

反应速度为

$$w = -\frac{1}{\alpha} \frac{dC_A}{dt} = -\frac{1}{\beta} \times \frac{dC_B}{dt} = \frac{1}{\gamma} \times \frac{dC_C}{dt} = \frac{1}{\delta} \times \frac{dC_H}{dt} \dots (4-1)$$

C<sub>A</sub>、C<sub>B</sub>、C<sub>C</sub>、C<sub>H</sub> 分别为反应物A、B和生成物G、H的浓度，mol/cm<sup>3</sup>  
 α、β、γ、δ 分别为相应的化学计量系数

### 均相反应质量作用定律

**质量作用定律** 反映浓度对化学反应速度的影响

对于均相反应，在一定温度下，化学反应速度与参加反应各反应物浓度乘积成正比，各反应物浓度的幂指数等于其相应的化学计量系数

对反应  $\alpha A + \beta B \rightarrow \gamma C + \delta H$  质量作用定律可用下式表示

$$w = k C_A^\alpha C_B^\beta \dots (4-3)$$

式中：k 为反应速度常数，表示单位物质浓度时的反应速度

在温度不变的情况下，反应物的浓度越高，分子的碰撞机会越多，化学反应速度就越快。

### 多相反应质量作用定律

**多相燃烧反应**在固体表面进行，固体燃料浓度不变（C<sub>A</sub>=常数），故多相反应速度w是指单位时间、单位表面上反应物（气相）浓度的变化率

$$w = -\frac{dC_B}{dt} = k f_A C_B^\beta$$

式中 f<sub>A</sub>—单位容积两相混合物中固相物质的表面积；  
 C<sub>B</sub>—气相反应物质的浓度

### 阿累尼乌斯定律

**阿氏定律** 反映温度对化学反应速度的影响

反应物浓度不变时，反应速度常数k随温度变化的关系

$$k = k_0 e^{-\frac{E}{RT}} \dots (4-4)$$

式中 k<sub>0</sub>—频率因子，近似为一常数  
 R、T、E—通用气体常数、热力学温度、活化能

**活化能 E** 能够破坏原有化学键并建立新化学键所必须消耗的能量，具有活化能的分子为活化分子。活化能 E与反应物种类有关，挥发分含量小的煤，E大

在一定的温度下，活化能 E越大，则反应速度常数 k值越小，反应速率越小；而在一定的活化能 E下，温度越高，则反应速度常数k值越大，反应速率越大

### 压力对反应速度的影响

在反应容积不变的情况下，反应系统压力增高，就意味着反应物浓度增加，化学反应速度增加

$$w \propto p^n \dots (4-6)$$

### 煤燃烧过程的四个阶段

- **预热干燥** 煤被加热至100℃左右，煤粒表面及煤粒缝隙间的水被逐渐蒸发出来。**大量吸热**
- **挥发份析出并着火** 温度升至一定值，煤中挥发分析出，同时生成焦炭（固定碳）。挥发分的释放量及成分主要取决于升温速度。不同的煤，开始析出挥发分的温度不同，达到一定温度，析出的挥发分就着火、燃烧。对应的温度称煤的着火温度，不同煤的着火温度不同。**少量吸热**
- **燃烧** 挥发份首先燃烧造成高温，包围焦炭的挥发分基本烧完且燃烧产物离析后，碳开始着火、燃烧。**大量放热**
- **燃尽** 残余的焦炭最后燃尽，成为灰渣。**少量放热**

上述各阶段实际是交叉进行的；其中着火和燃尽是最重要的两个阶段，着火是前提，燃尽放热是目的

### 焦炭的燃烧反应

- **一次反应** 在一定温度下，碳和氧的化学反应可能有两种  

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \quad C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$$
- **二次反应** 一次反应的生成物CO<sub>2</sub>、CO与初始反应物碳和氧再次发生反应  

$$C + CO_2 \rightarrow 2CO \quad CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$$
- **附加反应** C及CO与空气中的水蒸汽产生的反应  

$$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$$

$$C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2$$

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$$

### 焦炭燃烧的动力学特性

焦炭燃烧按下述程序进行

- 氧气从外界扩散到炭粒周围，氧气通过灰壳的阻力，到达炭粒的表面；
- 氧气吸附在炭粒表面；
- 高温下，炭粒和氧进行化学反应，生成CO<sub>2</sub>和CO，同时不可燃物生成灰渣（灰壳的一部分）；
- 燃烧产物（CO<sub>2</sub>和CO）从炭粒表面上解吸；
- 燃烧产物通过灰壳阻力向外扩散，其中CO<sub>2</sub>直接扩散在周围空气中，CO在扩散过程中遇氧气又变成CO<sub>2</sub>，然后再向远处空气中扩散

### 焦炭燃烧的动力学特性

- 焦炭的燃烧反应速度的影响因素可以是化学的（反应物的吸附作用、化学反应本身、或生成物的脱附作用）；也可以是物理扩散的（反应物或生成物向容积气相或颗粒气孔内的气相的扩散）
- 焦炭的燃烧反应速度取决于上述连续过程中最慢的某一个阶段：氧向碳粒表面的扩散或在碳表面发生的化学反应

### 碳的燃烧反应速度

焦炭的燃烧反应速度取决于温度、焦炭颗粒尺寸、氧气浓度、环境压力和气体与焦炭颗粒之间的相对速度等

$$\frac{dm_p}{dt} = -\pi k \rho_p d^2 P \chi_{O_2} \dots (4-7)$$

式中：  
 $m_p$ —焦炭颗粒质量；  
 $\rho_p$ —焦炭颗粒密度；  
 $P$ —压力；  
 $\chi_{O_2}$ —氧气浓度；  
 $d$ —焦炭颗粒的直径；  
 $k$ —焦炭颗粒的反应速率常数

### 碳的燃烧反应速度

反应速度常数 $k$  取决于碳粒表面的化学反应速度常数 $k_c$ 和氧的扩散速度常数 $k_D$

$$k = \frac{1}{1/k_c + 1/k_D} \dots (4-8)$$

其中

$$k_c = A \exp\left(-\frac{E}{RT_p}\right) \dots (4-9)$$

$$k_D = \frac{2.37D\phi}{dT_a} \dots (4-10)$$

式中  $A$  为反应前置系数； $R$  为通用气体常数  
 $d$  为碳粒直径；  
 $D$  为氧气扩散系数；  
 $\phi$  为化学当量因子。若主要产物是CO<sub>2</sub>，则 $\phi$ 等于1；若主要产物是CO，则 $\phi$ 等于2；  
 $T_p$ 、 $T_a$  分别为碳粒温度和边界层中气体平均温度

### 燃烧反应区域

根据燃烧条件的不同, 可将多相燃烧分为三种不同的区域

- **动力区** 燃烧反应的温度不高,  $k_c$  很小,  $k_p$  非常大, 焦炭燃烧处于化学动力控制下, 反应速率常数  $k = k_c$   
 燃烧反应速度  $w$  取决于碳粒表面的化学反应速度, 是随温度的升高按指数增大。强化燃烧的措施是提高反应系统的温度
- **扩散区** 燃烧反应温度较高,  $k_c$  非常大,  $k_p$  很小, 焦炭燃烧处于扩散控制下, 反应速率常数  $k = k_p$   
 燃烧反应速度  $w$  取决于氧气向碳粒表面的扩散速度。强化燃烧的措施是强化扰动, 减小煤粉颗粒
- **过渡区** 动力区与扩散区之间区域, 强化燃烧的措施是同时提高炉膛温度和扩散速度

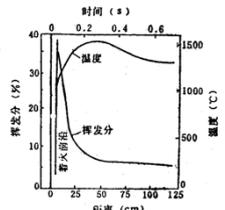
### 煤的燃烧特点

- **煤中含有水分** 煤的燃烧过程中, 水蒸气很易和C及燃烧产物CO作用, 生成CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>再与CO或CO<sub>2</sub>反应。这种催化作用, 使燃烧反应更加复杂并改变化学反应速度
- **煤中含有挥发分** 挥发分对煤的着火燃烧有利; 但另一方面, 挥发分析出燃烧, 消耗了大量氧气, 并增加了氧气向煤粒表面的扩散阻力, 使燃烧过程的初期焦炭的燃烧速度下降
- **煤中含有矿物质** 在燃烧过程会生成灰, 灰层包裹着碳粒, 会妨碍氧向碳粒表面的扩散, 或使碳粒反应表面减少, 使燃烧难以进行, 燃尽困难
- **煤是一种多孔性物质** 它受热时产生的水蒸气和挥发分, 不但向煤粒表面四周的空间扩散, 而且还会向煤粒的内部空隙扩散

### 煤粉的燃烧特点

锅炉燃用煤粉的颗粒很小 (30~100μm), 炉膛温度又很高, 煤粉在炉膛中的加热速度可以达到 (10<sup>4</sup>°C/s或更高), 总的挥发分释放时间小于1秒, 而且挥发分很快由炭粒表面逸出

- 煤粉快速加热时, 挥发分析出、着火和碳的着火燃烧几乎是同时的, 其中极小的煤粉甚至可能先着火燃烧  
 煤燃烧的四个阶段不明显, 挥发分析出过程几乎延续到燃烧的最后阶段
- 煤粉快速加热时, 煤中挥发分的含量和成分都与慢速加热的挥发分常规测试方法不同
- 煤粉快速加热时, 焦炭在孔隙结构方面与慢速加热有很大差别



煤粉火焰中挥发分的析出曲线

### 着火和熄火的热力条件

- **煤粉气流的着火** 由缓慢的氧化状态转化到快速的燃烧状态的瞬间过程称为着火, 转变时的瞬间温度称为着火温度
  - **煤粉气流着火、熄火的热力条件** 煤粉气流燃烧时要放出热量, 同时又向周围介质散热。这两个互相矛盾过程的发展, 可能使燃烧过程发生(着火)或者停止(熄火)
  - 燃烧室内煤粉空气混合物燃烧时的放热量  $Q_1$  为  

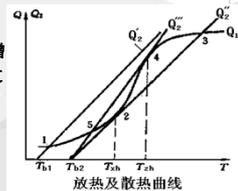
$$Q_1 = k_d e^{-E/RT} V C_{O_2}^n Q_r \dots (4-12)$$
  - 燃烧过程中向周围介质的散热量  $Q_2$  为  

$$Q_2 = \alpha F (T - T_b) \dots (4-13)$$
- 式中  $V$ 、 $F$  分别为煤粉空气混合物容积和燃烧室壁面面积  
 $\alpha$  一混合物向燃烧室壁面的综合散热系数  
 $T$ 、 $T_b$  一分别为反应系统温度和燃烧室壁面温度

### 煤粉气流的着火温度

放热曲线  $Q_1$  是一条指数曲线, 散热曲线  $Q_2$  接近于直线

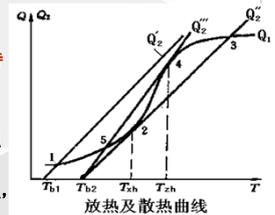
- $T_b = T_{b1}$  (很低), 散热线  $Q_2'$   
 $Q_2'$  与  $Q_1$  交点1为稳定平衡点, 煤粉处于低温缓慢氧化状态
- $T_b = T_{b2}$ , 散热线  $Q_2''$   
 $Q_2''$  与  $Q_1$  交点2为不稳定平衡点, 只要稍增加系统的温度,  $Q_1 > Q_2$ , 反应将自动加速过渡到点3高温稳定平衡点, 此时, 只要保证煤粉和空气的不断供应, 最后将稳定在高温燃烧状态  
 点2对应的温度即为着火温度  $T_{zh}$



放热及散热曲线

### 煤粉气流的熄火温度

- $T_b = T_{b2}$ , 强化散热, 散热线  $Q_2'''$   
 $Q_2'''$  与  $Q_1$  交点4为不稳定平衡点, 只要反应系统温度稍降低,  $Q_1 < Q_2$ , 反应系统温度急剧下降过渡到点5低温稳定平衡点, 此时, 煤粉只能产生缓慢地氧化, 而不能着火和燃烧, 从而使燃烧过程中止(熄火)  
 点4对应的温度即为熄火温度  $T_{sh}$
- $T_{sh}$ 、 $T_{zh}$  是在一定测试条件下的相对特征值,  $T_{sh}$  大于  $T_{zh}$ 。
- 强化着火的措施  
 在散热条件不变的情况下, 增加可燃混合物的初温、浓度和压力, 加强放热  
 在放热条件不变时, 提高燃烧室的保温, 减少散热



放热及散热曲线

### 煤粉气流的着火热源

**煤粉气流着火热源** 煤粉气流卷吸回流的高温烟气；火焰、炉墙等对煤粉的辐射

**煤粉的加热方程式**

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_m c \frac{dT_m}{dt} = 4\pi r^2 a (T_y - T_m) + 4\pi r^2 \epsilon \sigma_0 (T_h^4 - T_m^4) \dots (4-16)$$

右边第一项是高温回流烟气的对流热；第二项是火焰、炉墙等的辐射热

式中： $r$ 、 $\rho_m$ 、 $c$  分别为煤粉半径(m)、密度(kg/m<sup>3</sup>)和比热(J/(kg·°C))；  
 $T_m$ 、 $T_h$  分别为煤粉气流温度(K)、火焰温度(K)  
 $T_y$  回流烟气温度(K)  
 $\tau$  煤粉加热时间(s)；  
 $a$  烟气对煤粉的对流放热系数，(W/(m<sup>2</sup>·°C))；  
 $\epsilon$  煤粉和周围介质的系统黑度；

### 煤粉气流的着火热源

煤粉气流由初温 $T_0$ 加热到着火温度 $T_z$ 所需时间 $\tau_z$ 分别为

- 高温回流烟气对流为主要热源(曲线1)

$$\tau_z = \frac{r \rho_m c}{3a} \ln \frac{T_y - T_0}{T_y - T_z} \dots (4-18)$$

- 辐射为主要热源(曲线2)

$$\tau_z = \frac{r \rho_m c}{3\sigma_0 T_h^4} (T_z - T_0) \dots (4-19)$$

- 细煤粉升温比粗煤粉快得多；
- 煤粉气流的着火主要是靠高温回流烟气的加热

### 煤粉气流着火热

煤粉气流的着火热为将煤粉气流加热到着火温度所需的热量

对于热风送粉，煤粉气流的着火热为

$$Q_{zh} = B_r \left( V^0 \alpha_r r_1 c_{1K} \frac{100 - q_4}{100} + c_d \frac{100 - M_{ar}}{100} \right) \times (T_{zh} - T_0) + B_r \left\{ \frac{M_{ar}}{100} [2510 + c_q (T_{zh} - 100)] - \frac{M_{ar} - M_{mf}}{100 - M_{mf}} [2510 + c_q (T_0 - 100)] \right\} \dots (4-20)$$

式中  $B_r$ —每台燃烧器的燃料消耗量, kg/h  
 $\alpha_r$ —燃烧器送入炉内的空气所对应的过量空气系数  
 $r_1$ —一次风量占炉膛出口相应总风量的百分比；  
 $c_{1K}$ 、 $c_q$ 、 $c_d$ —一次风、蒸汽及煤的比热, J/(Nm<sup>3</sup>·K)  
 $M_{ar}$ 、 $M_{mf}$ —煤的收到基水分, %、煤粉的水分, %  
 $T_{zh}$ —着火温度, K  
 $T_0$ —煤粉一次风气流初温, K

### 煤粉气流着火热

$$Q_{zh} = B_r \left( V^0 \alpha_r r_1 c_{1K} \frac{100 - q_4}{100} + c_d \frac{100 - M_{ar}}{100} \right) \times (T_{zh} - T_0) + B_r \left\{ \frac{M_{ar}}{100} [2510 + c_q (T_{zh} - 100)] - \frac{M_{ar} - M_{mf}}{100 - M_{mf}} [2510 + c_q (T_0 - 100)] \right\} \dots (4-20)$$

- 第一项为加热煤粉和一次风所需热量
- 第二项为煤粉中水分蒸发、过热所需热量

### 煤特性、散热条件及初温对着火的影响

- **燃料的性质**  
 挥发分含量 $V_{daf}$ 小；水分、灰分含量高；煤粉细度大，则煤粉气流着火温度提高，着火热增大，着火所需时间长，着火点离开燃烧器喷口的距离增大
- **炉内散热条件**  
 减少炉内散热，有利于着火。敷设卫燃带是稳定低挥发分煤着火的有效措施，但需预防结渣
- **煤粉气流的初温**  
 提高初温 $T_0$ 可减少着火热。燃用低挥发分煤时应采用热风送粉制粉系统，提高预热空气温度

### 一次风量、一次风速对着火的影响

- 一次风量 $V_1$  ( $V^0 \alpha_r \gamma_1$ )
- $V_1$ 过大，着火热增加，着火延迟
- $V_1$ 过低，燃烧初期由于缺氧，化学反应速度减慢，阻碍着火继续扩展
- $V_1$ 在最佳值范围内选取 (P132表7-6)
- 一次风速 $w_1$
- $w_1$ 过高，通过单位截面积的流量增大，降低煤粉气流的加热速度，着火距离加长，着火推迟
- $w_1$ 过低，燃烧器喷口易烧坏，煤粉管道堵塞
- $w_1$ 在最佳值范围内选取 (P144表7-14 7-15)

### 锅炉的负荷对着火的影响

#### ● 锅炉负荷D

- > D降低, 煤耗量B相应减少, 水冷壁总的吸热量Q也减少, 但减少的幅度较小, 故Q/B反而增加, 炉膛平均烟温及燃烧器区域烟温降低, 对煤粉气流着火不利, 当锅炉负荷降到一定程度时, 会危及着火的稳定性, 甚至可能引起熄火
- > 着火稳定性条件限制了煤粉锅炉负荷的调节范围。一般在没有其他稳燃措施条件下, 固态排渣煤粉炉只能在高于70% 额定负荷下运行

### 煤粉气流完全燃烧的条件

#### ● 供应充足而适量的空气量 $\alpha$

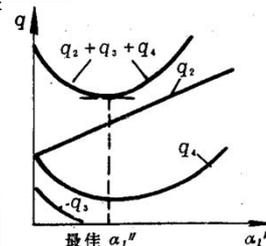
炉膛出口过剩空气系数 $\alpha_1''$ 可代表空气量对燃烧过程的影响

- >  $\alpha_1''$ 值影响 $q_2$ 、 $q_3$ 和 $q_4$   
在一定范围内 $\alpha_1''$ 减小,  $q_2$ 降低, 但 $q_3$ 、 $q_4$ 会增加

- > 最佳 $\alpha_1''$ 应使 $(q_2 + q_3 + q_4)$ 为最小  
通过燃烧调整试验确定, 并在运行中尽量保持该值

对烟煤, 可取 $\alpha_1'' = 1.15$

对无烟煤、贫煤, 可取 $\alpha_1'' = 1.2$



### 煤粉气流完全燃烧的条件

#### ● 保证足够的炉膛温度 $\theta$

- > 炉温高, 着火快, 燃烧速度快, 燃烧过程便进行得猛烈, 燃烧也易于趋向完全
- > 炉温过高, 不但会引起炉内结渣, 也会引起水冷壁的膜态沸腾
- > 炉温在(1000~2000℃)范围内比较适宜

#### ● 促进燃料与空气充分混合

煤粉完全燃烧应使煤粉和空气充分扰动混合。要求燃烧器的结构特性优良, 一、二次风配合良好, 炉内空气动力场均匀

### 煤粉气流完全燃烧的条件

#### ● 保证足够的停留时间 $\tau$

煤粉在炉内的停留时间 $\tau$  煤粉自燃烧器出口至炉膛出口所经历的时间

- >  $\tau$ 过小, 由于煤粉至炉膛出口处还没有烧完, 但炉膛出口后温度降低会使燃烧基本停止, 造成燃烧热损失增大; 同时引起炉膛出口处过热器超温和结渣
- >  $\tau$ 取决于炉膛容积热强度、炉膛截面热强度和锅炉运行负荷