

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 / (cm³·s)

对于反应式

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

反应速度为

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

C_A、C_B、C_G、C_H 分别为反应物A、B和生成物G、H的浓度，mol/cm³
 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 $\alpha A + \beta B \rightarrow \gamma G + \delta H$ 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_A=常数），故多相反应速度w是指在单位时间、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_A—单位容积两相混合物中固相物质的表面积；
 C_B—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 k₀—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CO₂、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CO₂和CO，同时不可燃物生成灰渣（灰壳的一部分）；
- 燃烧产物（CO₂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CO₂直接扩散在周围空气中，CO在扩散过程中遇氧气又变成CO₂，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；
 ρ_p —焦炭颗粒密度；
 P —压力；
 χ_{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；
 ϕ 为化学当量因子。若主要产物是CO₂，则 ϕ 等于1；若主要产物是CO，则 ϕ 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

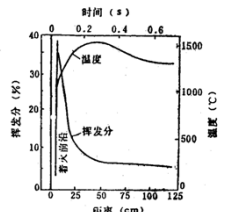
煤的燃烧特点

- **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CO₂和H₂, H₂再与CO或CO₂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 (10⁴°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

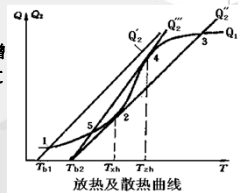
$$Q_1 = k_d e^{-E/RT} V C_{O_2}^n Q_r \dots (4-12)$$
 - 燃烧过程中向周围介质的散热量 Q_2 为

$$Q_2 = \alpha F (T - T_b) \dots (4-13)$$
- 式中 V 、 F 分别为煤粉空气混合物容积和燃烧室壁面面积
 α 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

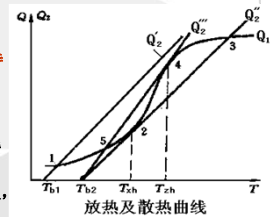
- $T_b = T_{b1}$ (很低), 散热线 Q_2'
 Q_2' 与 Q_1 交点1为稳定平衡点, 煤粉处于低温缓慢氧化状态
- $T_b = T_{b2}$, 散热线 Q_2''
 Q_2'' 与 Q_1 交点2为不稳定平衡点, 只要稍增加系统的温度, $Q_1 > Q_2$, 反应将自动加速过渡到点3高温稳定平衡点, 此时, 只要保证煤粉和空气的不断供应, 最后将稳定在高温燃烧状态
 点2对应的温度即为着火温度 T_{zh}



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_{zh} 、 T_{sh} 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 、 ρ_m 、 c 分别为煤粉半径(m)、密度(kg/m³)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)
 τ 煤粉加热时间(s)；
 a 烟气对煤粉的对流放热系数，(W/(m²·°C))；
 ϵ 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 τ_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
 α_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/(Nm³·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 ($V^0 \alpha_r r_1$)
- 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

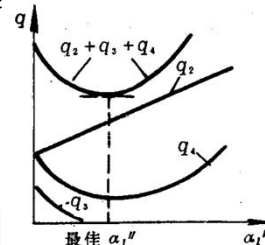
- > D降低, 煤耗量B相应减少, 水冷壁总的吸热量Q也减少, 但减少的幅度较小, 故Q/B反而增加, 炉膛平均烟温及燃烧器区域烟温降低, 对煤粉气流着火不利, 当锅炉负荷降到一定程度时, 会危及着火的稳定性, 甚至可能引起熄火
- > 着火稳定性条件限制了煤粉锅炉负荷的调节范围。一般在没有其他稳燃措施条件下, 固态排渣煤粉炉只能在高于70% 额定负荷下运行

煤粉气流完全燃烧的条件

● 供应充足而适量的空气量 α

炉膛出口过剩空气系数 α_1'' 可代表空气量对燃烧过程的影响

- > α_1'' 值影响 q_2 、 q_3 和 q_4
在一定范围内 α_1'' 减小, q_2 降低, 但 q_3 、 q_4 会增加
- > 最佳 α_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 θ

- > 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 τ

煤粉在炉内的停留时间 τ 煤粉自燃烧器出口至炉膛出口所经历的时间

- > τ 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
- > τ 取决于炉膛容积热强度、炉膛截面热强度和锅炉运行负荷