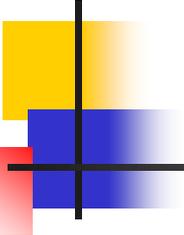




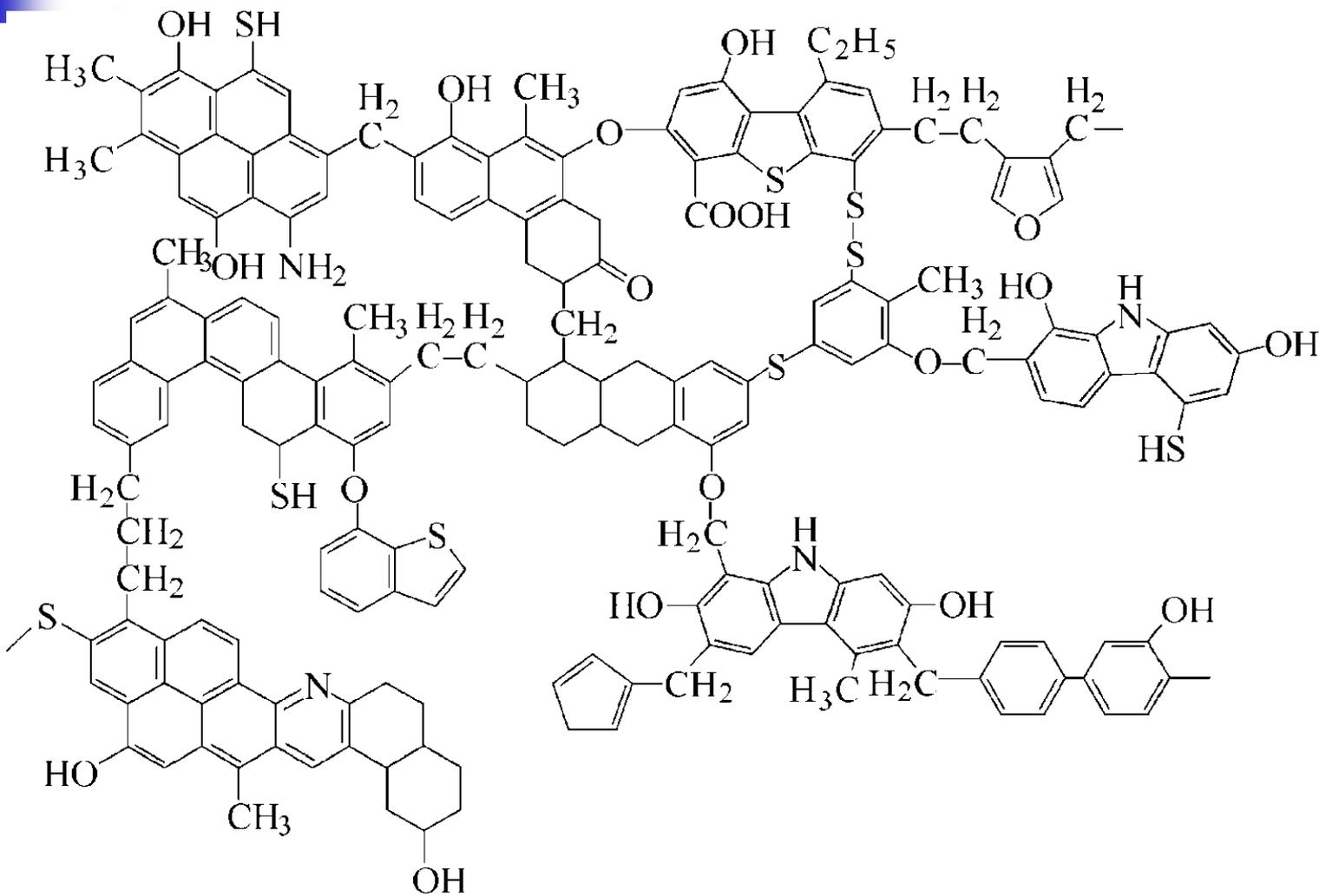
第七章 固体燃料燃烧

- 第一节 煤的燃烧过程特点及其热解
- 第二节 碳燃烧化学反应的过程
- 第三节 碳的动力燃烧与扩散燃烧
- 第四节 碳的燃烧化学反应
- 第五节 多孔碳球的燃烧
- 第六节 灰分对焦炭燃烧的影响
- 第七节 煤粉燃烧





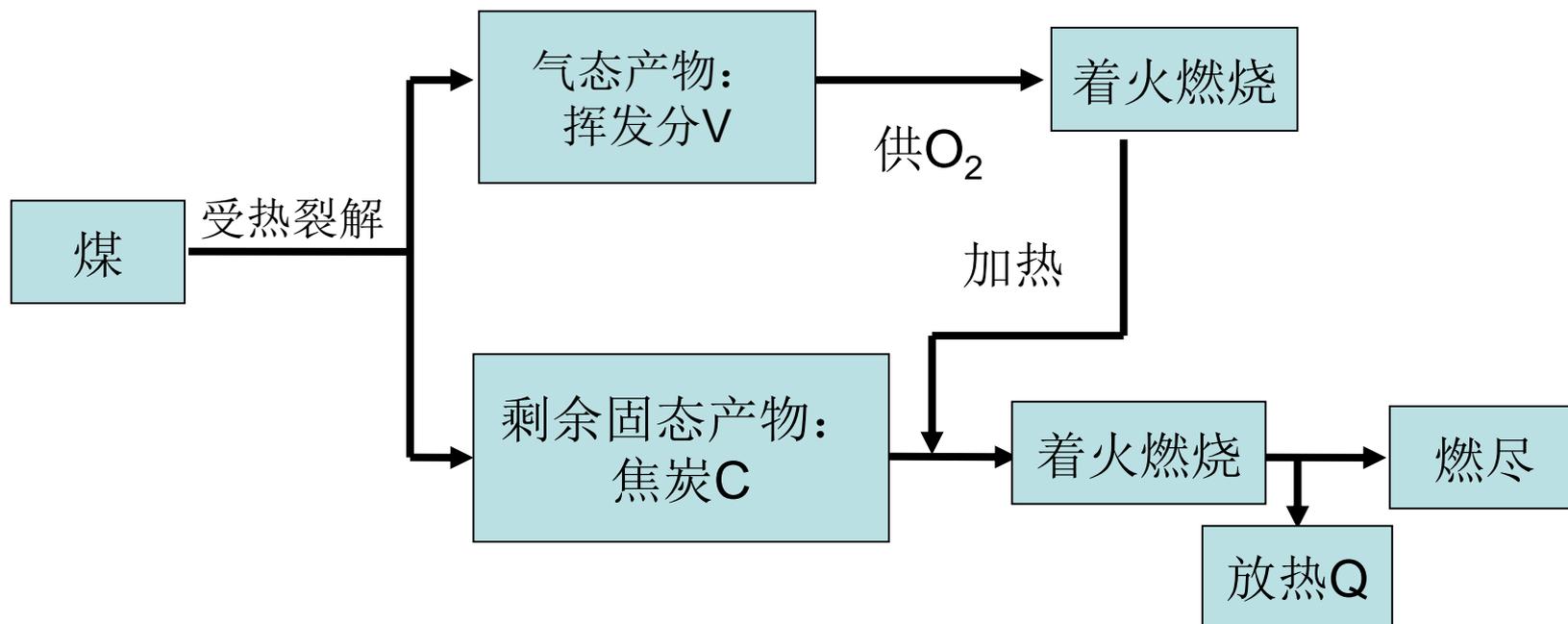
煤的Wiser分子结构模型

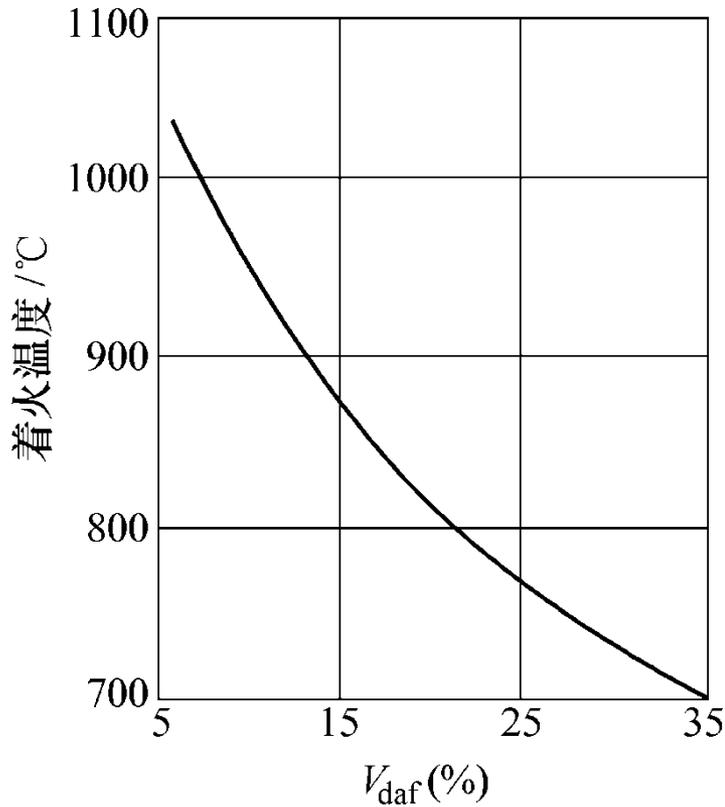




第一节 煤的燃烧过程特点及其热解

一、煤的燃烧过程的特点





挥发分的含量高低对煤的着火和稳定燃烧有显著的影响。通常用挥发分(工业分析)的高低来判断其着火特性和燃烧特性。

一般认为挥发分含量高的煤着火和燃烧都比挥发分含量低的煤要好。碳化程度浅的煤，其挥发分比碳化程度深的煤多，而且挥发分的活性也较强，所以着火也容易。

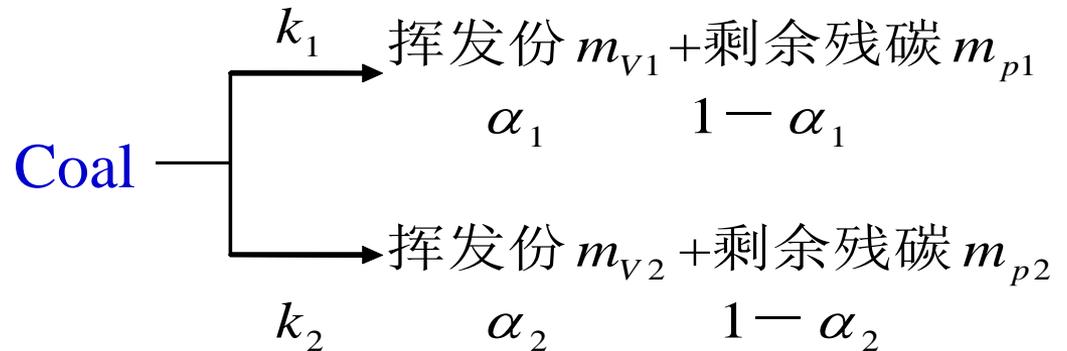


二、煤热解的数学描述

Badzioch最早提出的
单方程模型：

$$\frac{dm_V}{dt} = k_0 (m_V - m_{Vi}) \exp\left(\frac{-E}{RT}\right)$$

Stickler两个平行反
应方程模型：



$$\frac{dm_V}{dt} = \frac{dm_{V1}}{dt} + \frac{dm_{V2}}{dt} = (\alpha_1 k_1 + \alpha_2 k_2) m$$



三、煤粒的着火现象与影响因素

挥发分燃烧时，煤粒直径几乎不变，煤粒表面局部有时有挥发物喷流。膨胀特性差别很大。焦炭烧完，变成极小的粒子。

在 $T=1200\text{K}$ ， $C_{\text{O}_2}=0.23\text{ kg/m}^3$ 环境里， $d_0=750\mu\text{m}$ 褐煤粒的四个燃烧段时间为：

- 预热及挥发分着火：1.146s；
- 挥发分的燃烧：0.3s；
- 焦炭预热着火：0.35s；
- 焦炭燃烧燃尽：4.6s。

影响因素：

- 燃料的性质(包括燃料水分、灰分、挥发分)
- 煤的粒径
- 热力条件
- 空气动力参数等



第二节 碳燃烧化学反应的过程

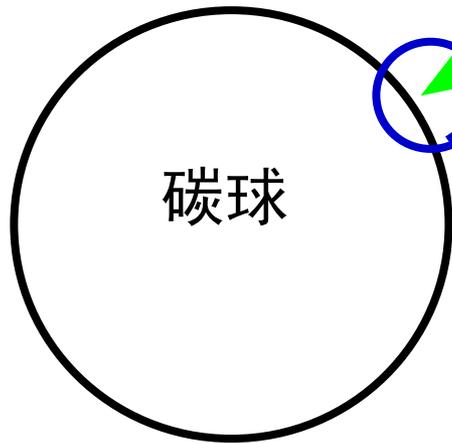
一、碳燃烧化学反应的步骤

- 碳的燃烧是一种气固两相间在碳的表面上进行的化学反应(非均相化学反应)。
- 通常气固异相反应包括如下步骤：



而整个碳表面上的
反应速度决定于其
中最慢的一步。

第一步： O_2 必须通过扩散到达碳的表面，并被碳表面吸附



碳球

第二步：在碳表面上进行碳—氧反应，并生成反应产物

第三步：反应产物从碳的表面上脱离（解吸），并从碳表面向外扩散开去



二、碳燃烧过程中的吸附和解吸

1、根据异相反应的步骤，首先需要建立的理论，是吸附（解吸）的理论

第一步： O_2 必须通过扩散到达碳的表面，并被碳表面吸附

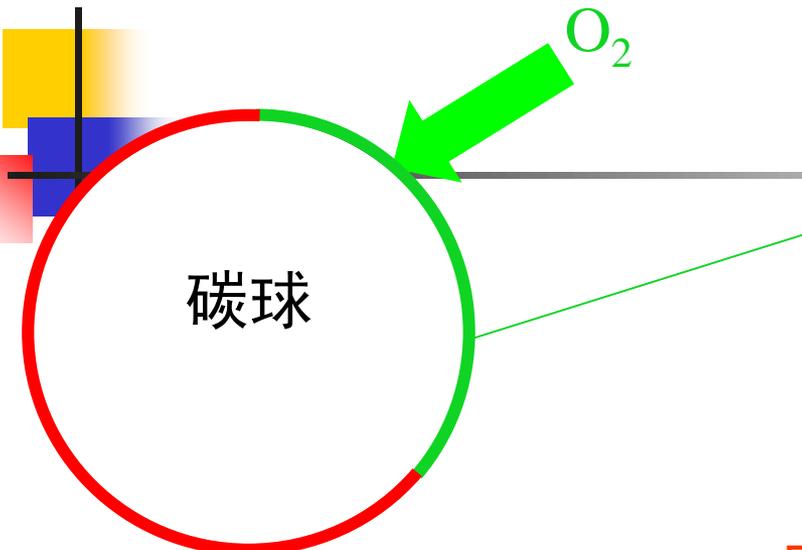




碳球表面上吸附了氧的面积份
额为 θ_A ，**表面覆盖分数**，即：

$$\theta_A = \frac{\text{吸附了 } O_2 \text{ 分子的表面积}}{\text{碳的总表面积}}$$

又称**表面遮盖率**



$$w_j = k_{-1} \theta_A$$

↓
解吸速率常数

$$w_x = k_1 c_{O_2} (1 - \theta_A)$$

↓
吸附速率常数

吸附和解吸达到动
态平衡时， θ_A 将不
再变化：

$$\theta_A = \frac{k_1 c_{O_2}}{k_1 c_{O_2} + k_{-1}} = \frac{c_{O_2}}{c_{O_2} + B}$$



假定化学反应速率
与表面覆盖分数成
正比

$$w = k_A \theta_A = k_A \frac{c_{O_2}}{c_{O_2} + B} \quad B = \frac{k_{-1}}{k_1}$$

当 $B \gg C_{O_2}$ 时

$$w = k_A \frac{c_{O_2}}{c_{O_2} + B} \rightarrow \frac{k_A}{B} c_{O_2}$$

令 $k = \frac{k_A}{B}$

$$w = kc_{O_2}$$

一级反应

当 $B \ll C_{O_2}$ 时

$$w = k_A \theta_A = k_A \frac{c_{O_2}}{c_{O_2} + B} \rightarrow k_A$$

与碳表面氧
浓度无关

当 $B \approx C_{O_2}$ 时

$$w = kc_{O_2}^n \quad 0 < n < 1$$

反应级数 n
由实验测定



温度对化学反应因素的影响

温度T	碳表面O ₂ 浓度C _{O₂}	吸附能力q	反应级数n
<800°C (低温阶段)	C _{O₂} 高	$\theta \approx 1$, 吸附强	n=0
>1200°C (高温阶段)	C _{O₂} 低	$\theta \ll 1$, 吸附弱	n \geq 1
800°C~1200°C	中等	$\theta = 0 \sim 1$	n=0~1

- 通常，在处理碳的燃烧反应时，有时为简化问题起见，可以把它当作n=1的一级反应处理。即

$$w = kC_{O_2}^1 = \left[k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \right] C_{O_2}$$



燃烧的常见现象



蜡烛的火苗一吹就会熄灭



赤壁之战的火焰越吹越旺



第三节 碳的动力燃烧与扩散燃烧

氧从远方向单位碳表面积单位时间内扩散的流量 q_m (mol/m² s) 为:

$$q_m = \alpha_{z1} (C_\infty - C_{O_2}) = \frac{C_\infty - C_{O_2}}{\left(\frac{1}{\alpha_{z1}}\right)}$$

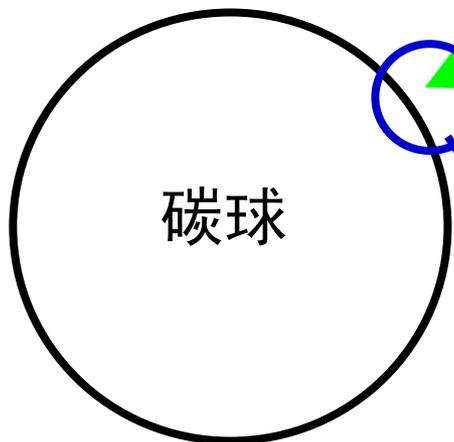
质量交换系数

远方O₂浓度

碳表面O₂浓度

$$q_m = K_b^{O_2} = \frac{C_\infty - C_{O_2}}{\frac{1}{\alpha_{z1}}} = \frac{C_{O_2}}{\frac{1}{k}} = \frac{(C_\infty - C_{O_2}) + C_{O_2}}{\frac{1}{\alpha_{z1}} + \frac{1}{k}} = \frac{C_\infty}{\frac{1}{\alpha_{z1}} + \frac{1}{k}}$$

把此两式消去C_{O2}



扩散到碳表面的O₂与碳发生化学反应, 当达到平衡时, 消耗的O₂量就是 q_m

$$q_m = K_b^{O_2} = kC_{O_2}^{n=1} = \left[k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \right] C_{O_2} = \frac{C_{O_2}}{\frac{1}{k}}$$

单位时间, 单位碳表面积上燃烧消耗的氧量, mol/m² s



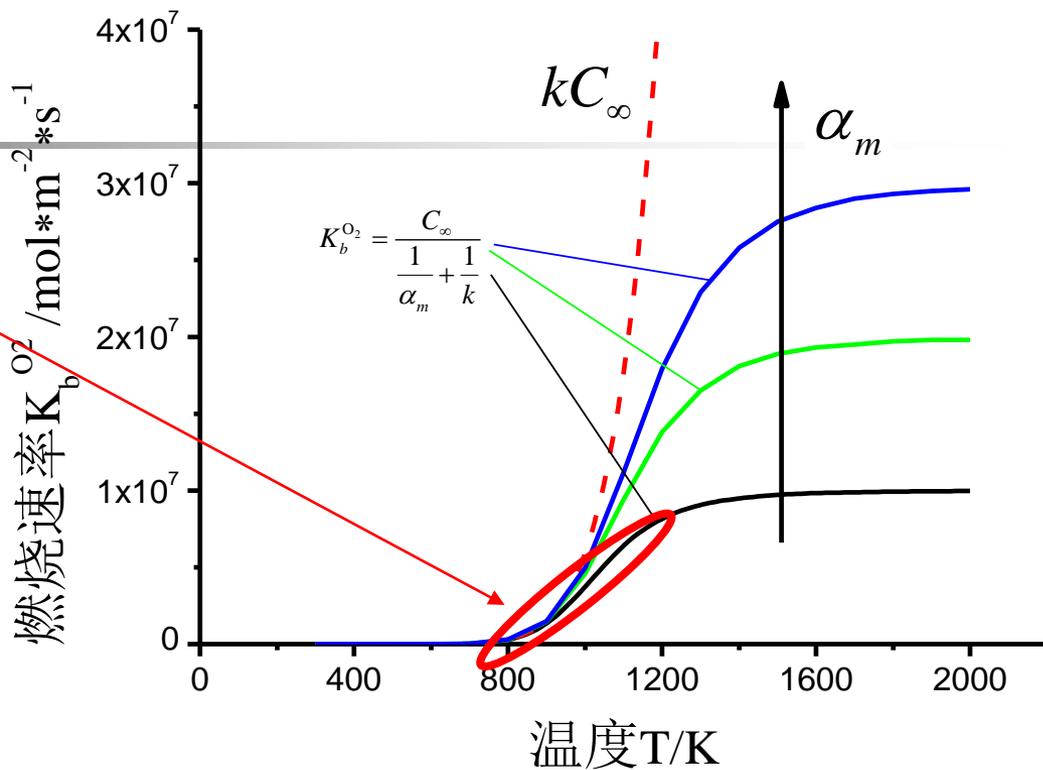
当温度T很低时 $k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$ 很小

$$\frac{1}{k} \gg \frac{1}{\alpha_{zl}} \rightarrow K_b^{O_2} = \frac{C_\infty}{\frac{1}{\alpha_{zl}} + \frac{1}{k}}$$

$$K_b^{O_2} = \frac{C_\infty}{\left(\frac{1}{k}\right)} = kC_\infty$$

结论：①此时，燃烧反应速度决定于化学反应常数 $k(T)$ ——称为**动力燃烧**（区）（或动力燃烧控制）；

②由于 k 很小，化学反应很慢，碳表面上的 O_2 消耗不掉， \therefore 表面上的 O_2 浓度 $= C_\infty$ ，化学反应速度与 O_2 浓度无关，即为0级反应。



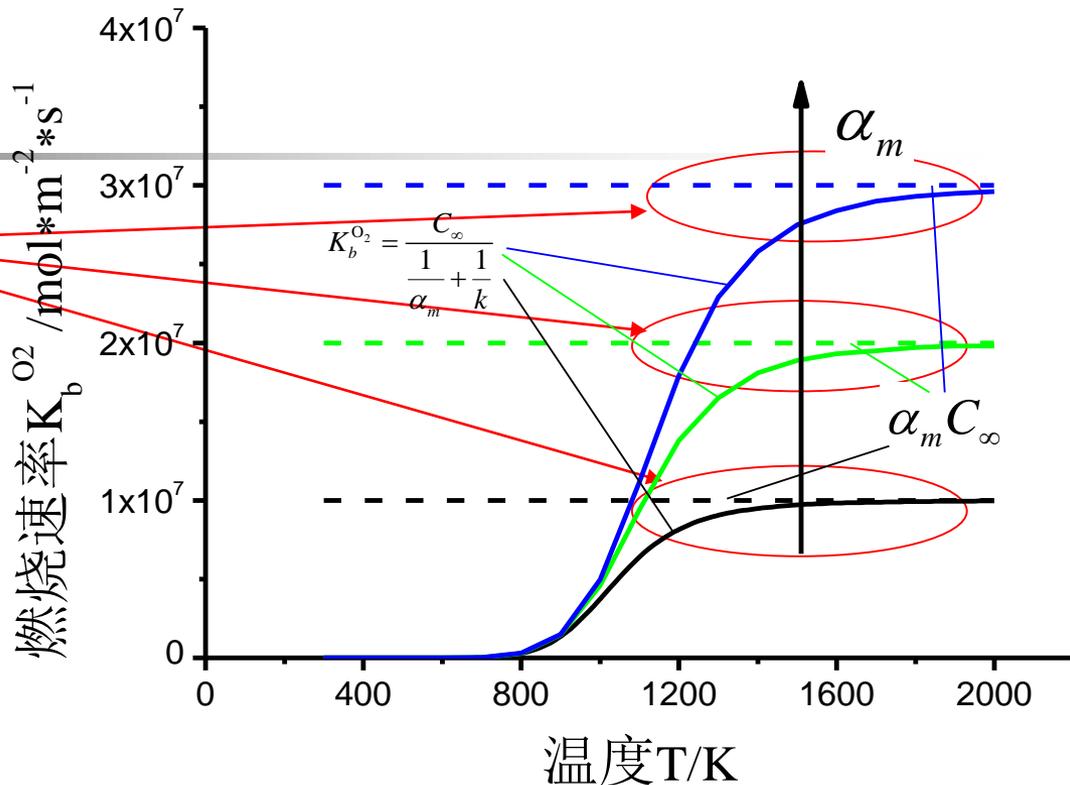
在动力燃烧区，升温可以提升燃烧速率，而提升气流速率作用不大，反而会增强散热降低温度导致燃烧速率下降



当温度T很高时 $k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$ 很大

$$\frac{1}{k} \ll \frac{1}{\alpha_{zl}} \quad \rightarrow \quad K_b^{O_2} = \alpha_{zl} C_\infty$$

$$K_b^{O_2} = \frac{C_\infty}{\frac{1}{\alpha_{zl}} + \frac{1}{k}}$$



结论：①此时燃烧反应速度完全决定于扩散 (α_{zl}) ——称为**扩散燃烧** (区) (或扩散燃烧控制)

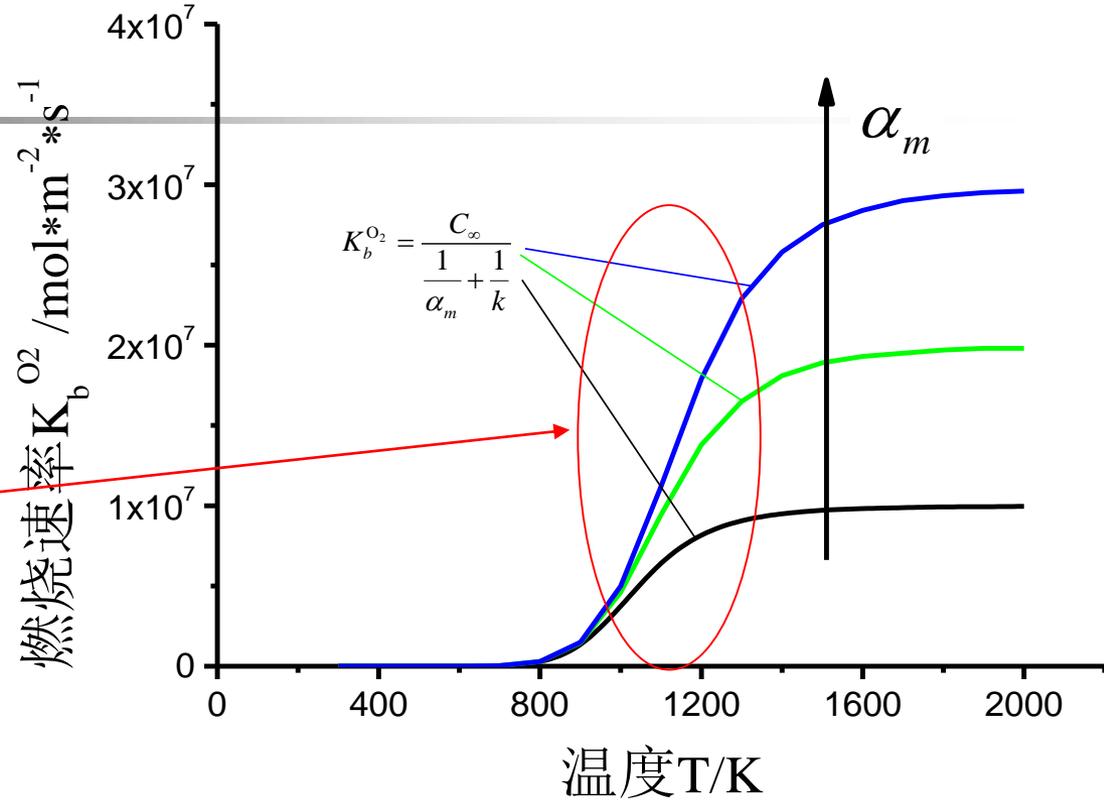
②此时，碳表面化学反应很快， $\therefore O_2$ 一扩散到碳表面就完全燃烧掉， \therefore 燃烧决定于 O_2 供应的多少，决定于碳表面的 O_2 浓度，即为 ≥ 1 级反应。

在扩散燃烧区，强化对流传质可以提升燃烧速率，而升温作用不大



当T适当， $k \approx \alpha_{zl}$ 时——**过渡区**

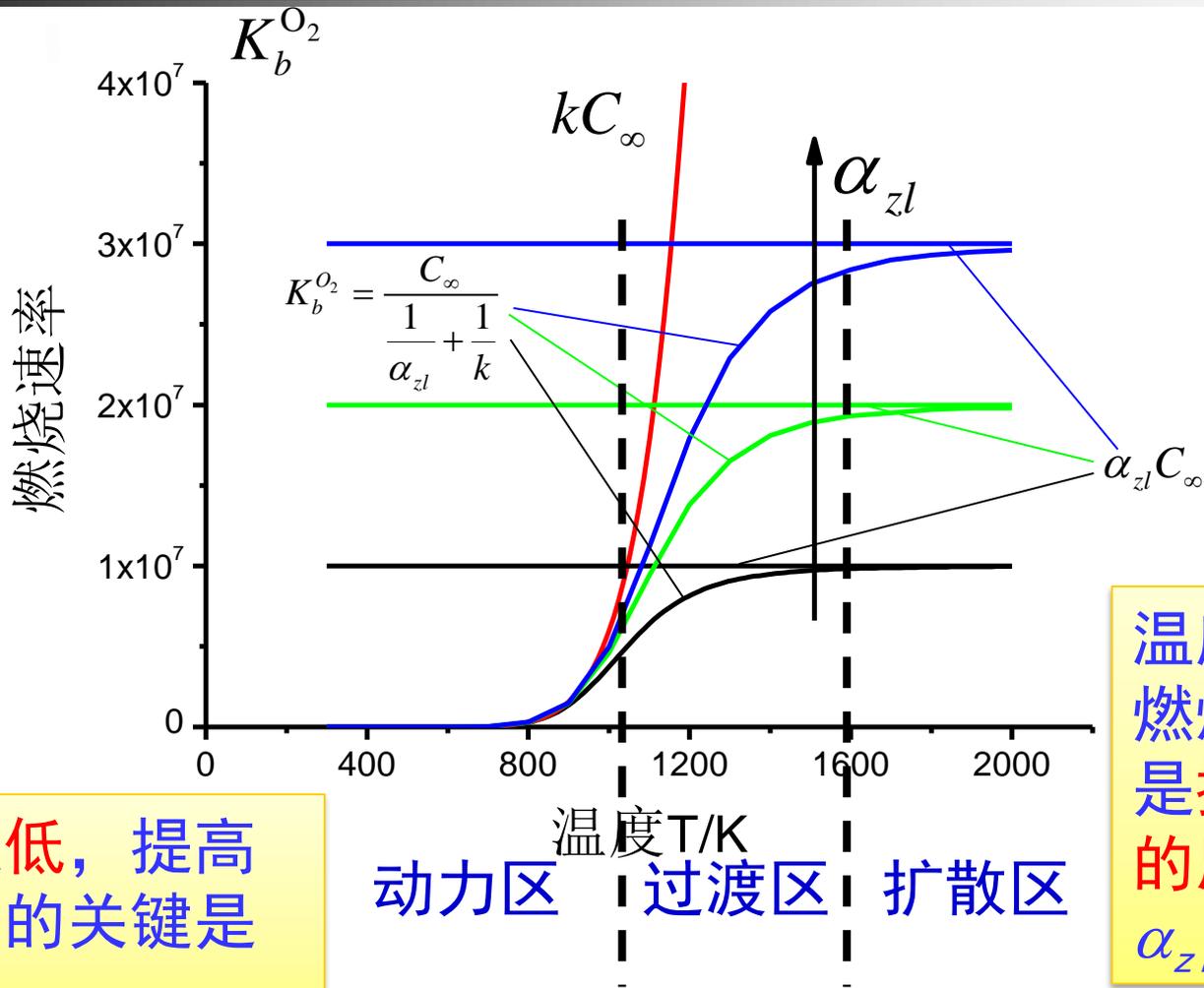
$$K_b^{O_2} = \frac{C_\infty}{\frac{1}{k} + \frac{1}{\alpha_{zl}}}$$



在过渡燃烧区，升温和提升气流速率均可起到提升燃烧速率的作用



异相化学反应的三个区域



例如：家用煤炉在生火时，强化燃烧的要点在于保温、升温

例如：家用煤炉在旺盛燃烧时，强化燃烧的要点在于加大扇风

温度比较低，提高燃烧速度的关键是提高温度

温度很高，提高燃烧速度的关键是提高固体表面的质量交换系数 α_{zl}



燃烧的常见现象的解释



蜡烛的火苗散热强，燃烧温度低，处于**动力燃烧区**，吹风的时候会加大散热导致温度下降，使得燃烧速率剧烈下降从而熄灭



旺盛燃烧的战船中心温度很高，处于**扩散燃烧区**，加大吹风能强化传质，提升氧气的供应能力，使得燃烧速率加快，火焰温度变得更高



判断燃烧区的谢苗诺夫准则 S_m 和浓度准则 $\frac{C_b}{C_\infty}$

	动力燃烧区	过渡区	扩散燃烧区
谢苗诺夫准则 $S_m = \frac{\alpha_{zl}}{k}$	>9	$0.11 \sim 9$	<0.11
浓度准则 $\frac{C_b}{C_\infty}$	>0.9	$0.1 \sim 0.9$	<0.1

$$\frac{\alpha_{zl}}{k} = \frac{Nu_{zl} \times \frac{D}{\delta_0}}{k_0 \exp(-\frac{E}{RT})} = \frac{D}{\delta_0 k_0} \times \frac{Nu_{zl}}{\exp(-\frac{E}{RT})}$$

讨论：①颗粒直径 $\delta_0 \downarrow$ $S_m = \frac{\alpha_{zl}}{k} \uparrow \rightarrow$ 向动力区移动；

②当 $T \uparrow$ $\exp(-\frac{E}{RT}) \uparrow$ $S_m = \frac{\alpha_{zl}}{k} \downarrow \rightarrow$ 向扩散区移动；

$$Nu = 2 \left(1 + c Re^m Pr^n \right)$$

③当相对速度 $Re \uparrow$ $S_m = \frac{\alpha_{zl}}{k} \uparrow \rightarrow$ 向动力区移动；



粒径对进入扩散区温度的影响

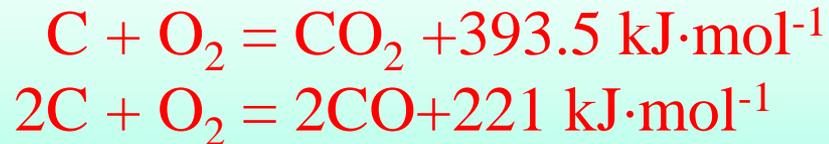
设煤的 $E=126\sim 168\text{kJ/mol}$	进入扩散区的温度 T
$\delta_0=10\text{mm}$ ↓ $\delta_0=0.1\text{mm}$	$\geq 1200\text{K}$ $\geq 2000\text{K}$



第四节 碳的燃烧化学反应

一、基本的宏观反应

- 1、一次反应——指碳与氧之间的直接反应



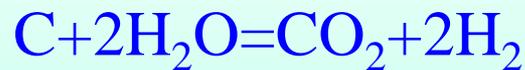
- 2、二次反应——指一次反应的产物在碳表面或空间的再反应



- 一次反应和二次反应是碳燃烧过程中的基本反应，实际过程中交叉平行进行着。



- 3、其它反应——在碳燃烧过程中如果有水蒸汽（这是经常普遍存在的）还会发生其他反应



- 以上反应究竟哪些是主要的，这需要看具体情况。实际上，一次反应只表示了反应的反应物和最终的生成物及其物质平衡及热平衡关系，并未说明碳和氧的燃烧反应的具体过程，因此应进一步研究。



二、碳与氧的反应机理（一次反应）

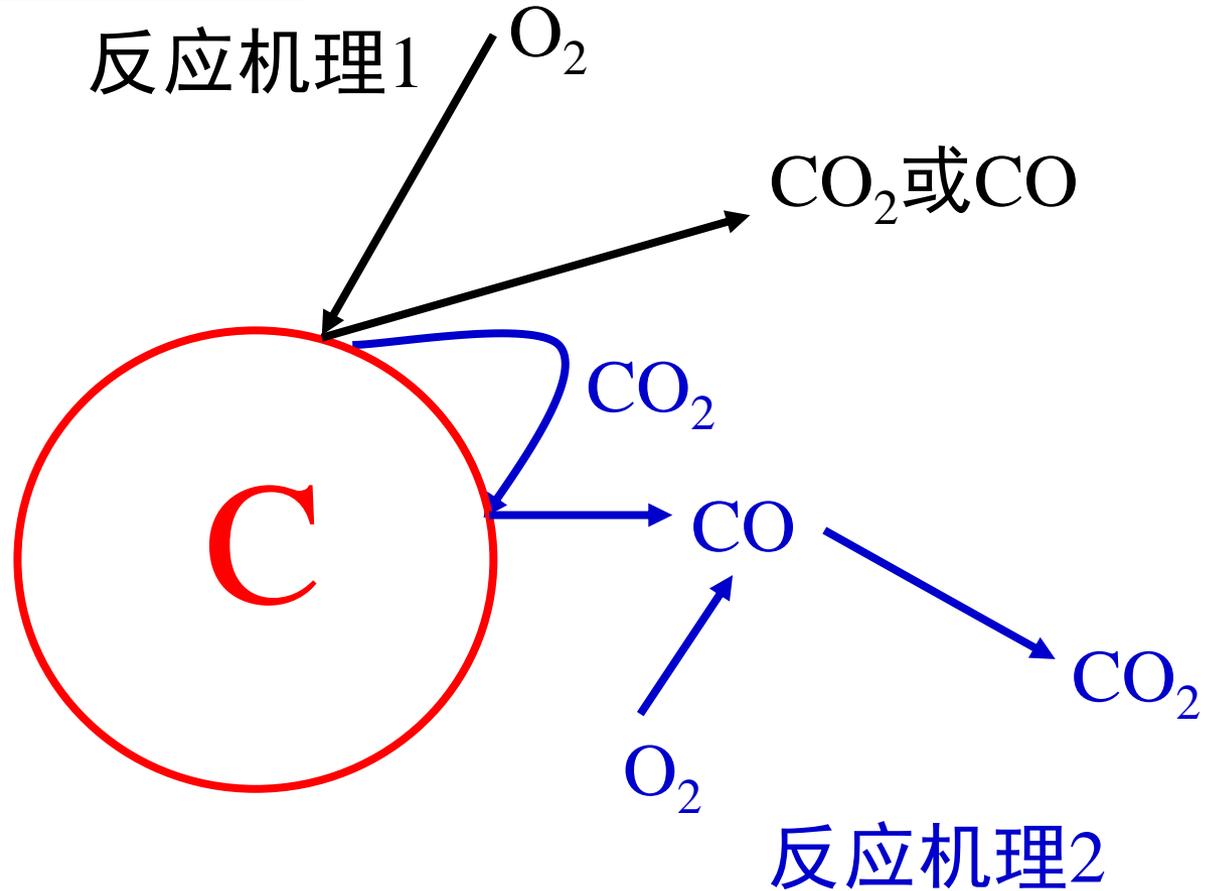
各国许多学者的研究由于实验条件的差别，结论是不尽相同。大致有三种观点：

- 1、二氧化碳学说： CO_2 是一次反应的产物，而 CO 只是 $\text{CO}_2 + \text{C}$ 的二次反应产物
- 2、一氧化碳学说： CO 是一次反应的产物，在碳表面附近 $\text{CO} + \text{O}_2$ 才生成了 CO_2
- 3、两步反应说：第一步生成络合物 $x\text{C} + y/2 \text{O}_2 = \text{C}_x\text{O}_y$ （碳氧络合物）。第二步络合物的分解 $\text{C}_x\text{O}_y = m\text{CO}_2 + n\text{CO}$ 其 n/m 随温度 T 升高而升高

- 三种观点至今尚未统一，不过普遍接受第三种观点——即碳氧反应先生成碳氧络合物，然后络合物再同时生成 CO_2 和 CO
- 结论： C 与 O_2 的异相化学反应过程是经历吸附—络合—热分解（或离解—解吸）一系列环节完成的。



碳燃烧化学反应机理简化模型





三、碳气化和氧化反应的活化能 (E) 与温度 (T) 的关系

结论:

①关于活化能特性

气化反应的活化能 E_2 总是 $>$ 氧化反应的活化能 E_1

对于同一种焦炭统计平均 $E_2 \approx 2.2 E_1$

②关于化学反应速度常数k的特性

对同一种焦炭当气化反应的速度常数 $k_2 =$ 氧化反应速度常数 k_1 的
临界温度 $T = 2347^\circ\text{C}$

$T < 2347^\circ\text{C}$ 时, $k_2 < k_1$, 氧化反应的速度大于气化反应

$T > 2347^\circ\text{C}$ 时, $k_2 > k_1$, 气化反应的速度大于氧化反应

在 $T = 1200 \sim 1300^\circ\text{C}$ 区间 $k_2 = k_1/10$



碳气化和氧化反应的活化能（E）与温度（T）的关系

结论：

③氧化反应是放热反应——自我促进机制（正反馈）

氧化反应速度↑ → 放热↑ → 温度↑ $w_m = kC_b^1 = \left[k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \right] C_b$





碳气化和氧化反应的活化能（E）与温度（T）的关系

结论：

④ 气化反应是吸热反应——自我抑制机制（负反馈）

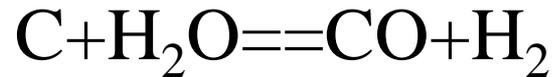
气化反应速度↑ → 吸热↑ → 温度↓ $w_m = kC_b^1 = \left[k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \right] C_b$





四、碳和水蒸气的化学反应机理 ——水煤气发生原理

- 这也是一个异相吸热化学反应



该反应与 $\text{C} + \text{O}_2$ 的氧化反应相比

共同点：

- 异相反应：吸附—络合—热解、离解—解吸过程
- 反应级数： $n=1$

不同点：

- $E_{\text{C}+\text{H}_2\text{O}} \approx 1.6E_{\text{C}+\text{O}_2}$



碳和水蒸气的化学反应机理——水煤气发生原理

- 与 $C+CO_2$ 气化反应相比

$$E_{C+H_2O} \approx 0.73 E_{C+CO_2}$$

$$(\because E_{C+CO_2} \equiv 2.2 E_{C+O_2})$$

- 所以经研究，水煤气反应比气化反应约快3倍。



五、表面反应的碳球燃烧速度

1、对于碳球在扩散燃烧区的假设

- ①燃烧反应在扩散区燃烧，即C球表面 O_2 浓度很低， $C_{O_2} \approx 0$
- ②碳球表面进行氧化一次反应 $C + O_2 = CO_2$ ，生成物 CO_2 向外扩散，没有气化反应 $CO_2 + C = 2CO$ 发生
- ③碳球相对运动 $Re = 0$ (与周围气体之间无相对运动)
- ④碳球周围气体浓度分布均匀



2、碳球表面扩散燃烧的燃烧速度

$$w_{O_2} = \alpha_{z1} C_{\infty} \quad \text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$$

- 那么单位时间单位C表面积上消耗的C量应为：

$$w_C = \beta w_{O_2} = \beta \alpha_{z1} C_{\infty} = 2\beta \frac{D C_{\infty}}{d}$$

- 单位时间内烧掉的C量应为

$$\dot{m} = (\pi d^2) w_C = (\pi d^2) 2\beta \frac{D C_{\infty}}{d}$$



单位时间内，碳球质量的减少量为

$$\dot{m} = -\frac{d}{d\tau} \left(\rho_p \frac{\pi d^3}{6} \right) = -\rho_p \frac{\pi d^2}{2} \frac{d(d)}{d\tau}$$

- 两个 \dot{m} 相等，移项积分
- 积分区间 τ : 从 $0 \rightarrow \tau$
- d : 从 $d_p \rightarrow d$

$$\int_{d_p}^d dd(d) = -\int_0^\tau \frac{4\beta DC_\infty}{\rho_p} d\tau \Rightarrow d_p^2 - d^2 = \frac{8\beta DC_\infty}{\rho_p} \tau = K_k \tau$$

式中

$$K_k = \frac{8\beta DC_\infty}{\rho_p}$$



这就是碳球扩散燃烧时的直径平方直线定律

$$d_p^2 - d^2 = K_k \tau$$

$$K_k = \frac{8\beta DC_\infty}{\rho_p}$$

- 讨论①当 $d \rightarrow 0$ 时, $\tau \rightarrow \tau_k$

$$\tau_k = \frac{d_p^2}{K_k}$$

可知：煤燃烧时，磨得越细（ $\downarrow d_p$ ），反应越快，燃尽时间 τ_k 越短，另外，**强化湍动（ $\uparrow D$ ）、提升氧浓度（ $\uparrow C_\infty$ ）是加快扩散燃烧的主要手段**

- ② K_k 的实验结果

对煤粉燃烧时 $K_k = 0.0229 \text{ mm}^2/\text{s}$

对单颗煤粉时 $K_k = 0.16 \text{ mm}^2/\text{s}$ （大约是单个油滴的 1/5~1/6）



3、碳球表面动力燃烧的燃烧速度

$$w_{O_2} = kC_\infty = C_\infty k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

- 那么单位时间单位C表面积上消耗的C量应为：

$$w_C = \beta w_{O_2} = \beta k C_\infty = \beta C_\infty k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

- 单位时间内烧掉的C量应为

$$\dot{m} = (\pi d^2) w_C = (\pi d^2) \beta C_\infty k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$



单位时间内，碳球质量的减少量为

$$\dot{m} = -\frac{d}{d\tau} \left(\rho_p \frac{\pi d^3}{6} \right) = -\rho_p \frac{\pi d^2}{2} \frac{d(d)}{d\tau}$$

■ 两个 \dot{m} 相等，移项积分

■ 积分区间 τ : 从 $0 \rightarrow \tau$

d : 从 $d_p \rightarrow d$

$$\int_{d_p}^d d(d) = -\int_0^\tau \frac{2\beta C_\infty k_0}{\rho_p} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) d\tau$$

式中

$$\Rightarrow d_p - d = \frac{2\beta C_\infty k_0}{\rho_p} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \tau = K_d \tau$$

$$K_d = \frac{2\beta C_\infty k_0}{\rho_p} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$



这就是碳球动力燃烧时的直径直线定律

$$d_p - d = K_d \tau$$

- 讨论
- ①当 $d \rightarrow 0$ 时, $\tau \rightarrow \tau_d$ $\tau_d = \frac{d_p}{K_d}$
- 可知: 煤燃烧时, 磨得越细($\downarrow d_p$), 反应越快, 燃尽时间 τ_d 越短,
- ②提升反应温度 T 是加快燃烧的主要手段

$$K_d = \frac{2\beta C_\infty k_0}{\rho_p} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$



4、过渡燃烧时

$$\frac{d(d)}{d\tau} = - \frac{2\beta C_\infty}{\rho_p \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{\alpha_{zl}} \right)}$$

■ 令 $A = \frac{\rho_p}{2\beta C_\infty}$

$$\int_0^\tau d\tau = -A \left[\int_{d_p}^d \frac{1}{k} d(d) + \int_{d_p}^d \frac{1}{\alpha_{zl}} d(d) \right] = \tau_k + \tau_d$$

过渡燃烧区中，燃尽时间为扩散燃烧时间 τ_k 和动力燃烧时间 τ_d 之和。

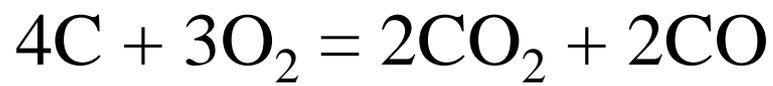
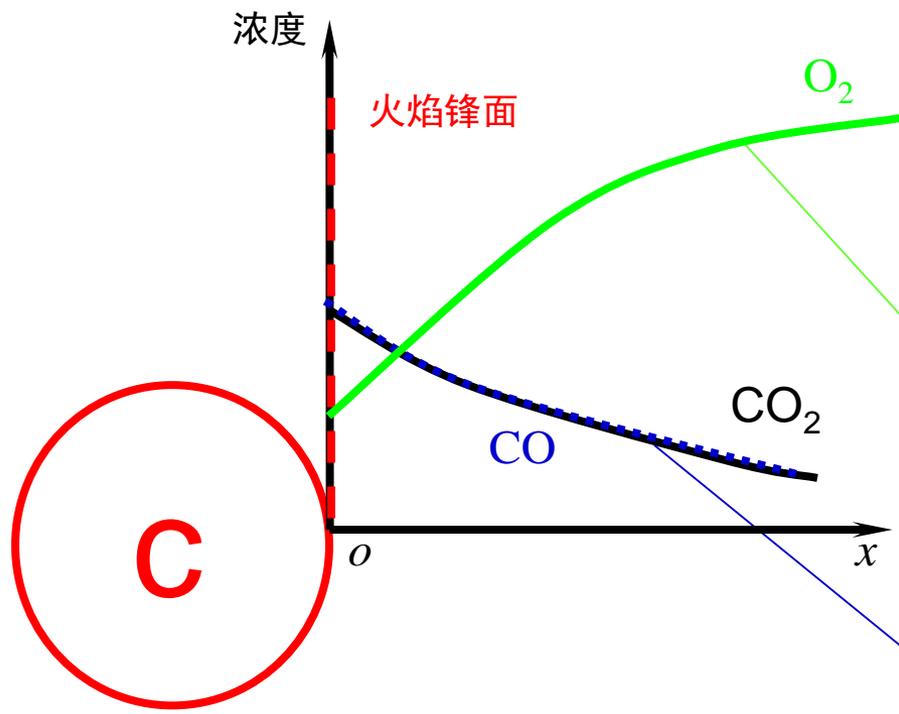
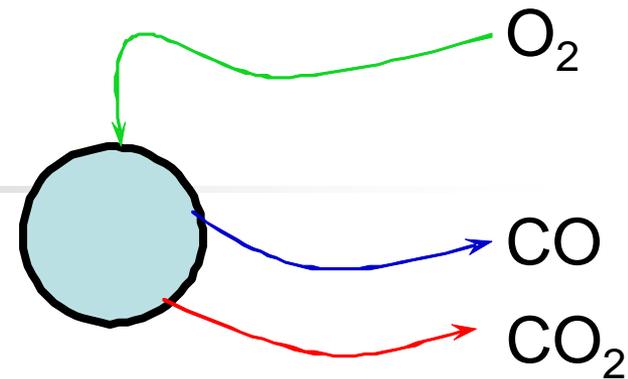


六、二次反应对碳燃烧过程的影响

- 考虑实际有二次反应($2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$ 及 $\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$)时的情况
- 由于上述反应与温度区间有关，故分别讨论



温度低于700°C



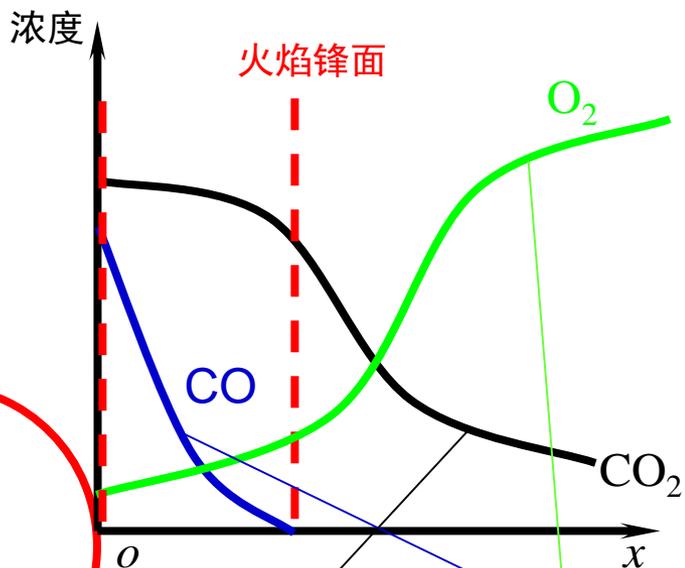
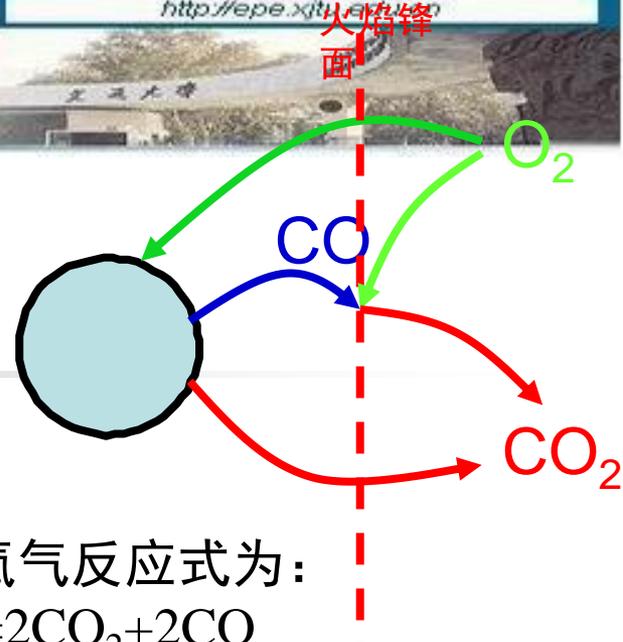
- $CO/CO_2=1$
- $\beta=(4 \times 12)/(3 \times 32)=0.5$

O_2 浓度由远处向近处一路递减，直到碳球表面。

CO_2 和 CO 由表面向远处扩散，浓度也是一路递减。



温度在800~1200°C之间



- 碳球与氧气反应式为：
 $4C+3O_2=2CO_2+2CO$
 $CO/CO_2=1$
- 空间中反应式为：
 $2CO+O_2=2CO_2$
- 总反应式为
 $4C+4O_2=4CO_2$
- 碳表面O₂浓度C_b随T↑而逐渐↓
 $\beta=(4 \times 12)/(4 \times 32)=0.375$

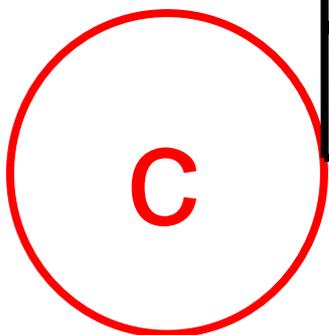
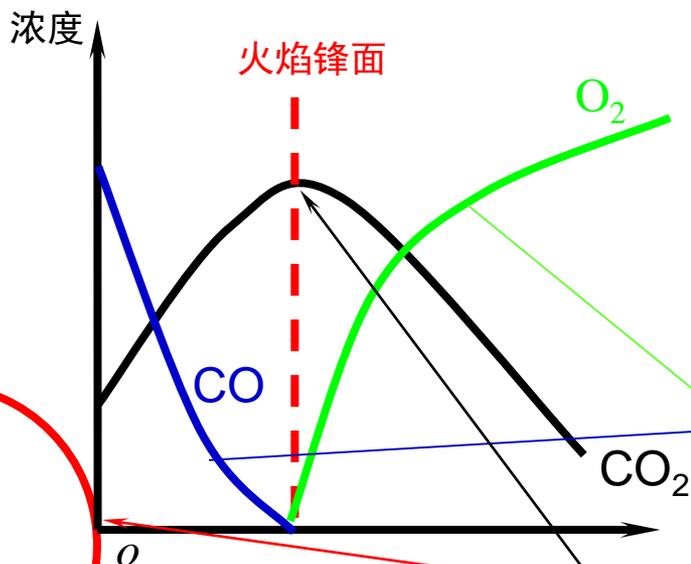
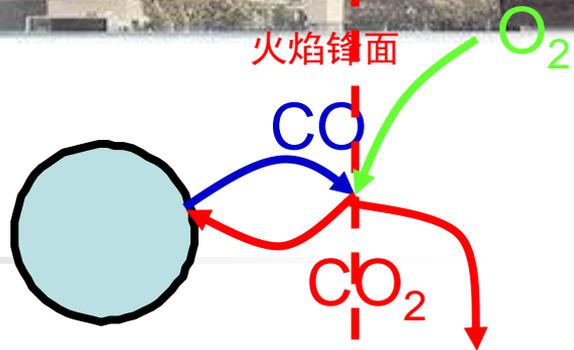
■但是，CO可以与O₂在空间发生反应。
火焰锋面以外没有CO。

■CO₂ 浓度高于 CO浓度。

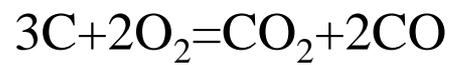
■O₂浓度由远处向近处一路递减，只有和CO反应后剩余的O₂才能扩散到碳球表面。



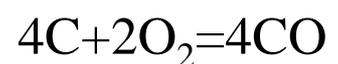
温度高于1200°C



温度高于1200°C



■ 总反应式为



$$\beta = (4 \times 12) / (2 \times 32) = 0.75$$

■ CO与O₂在空间发生反应，并把向碳球表面扩散的O₂完全消耗掉。火焰锋面以外没有CO。而火焰锋面以内没有O₂。

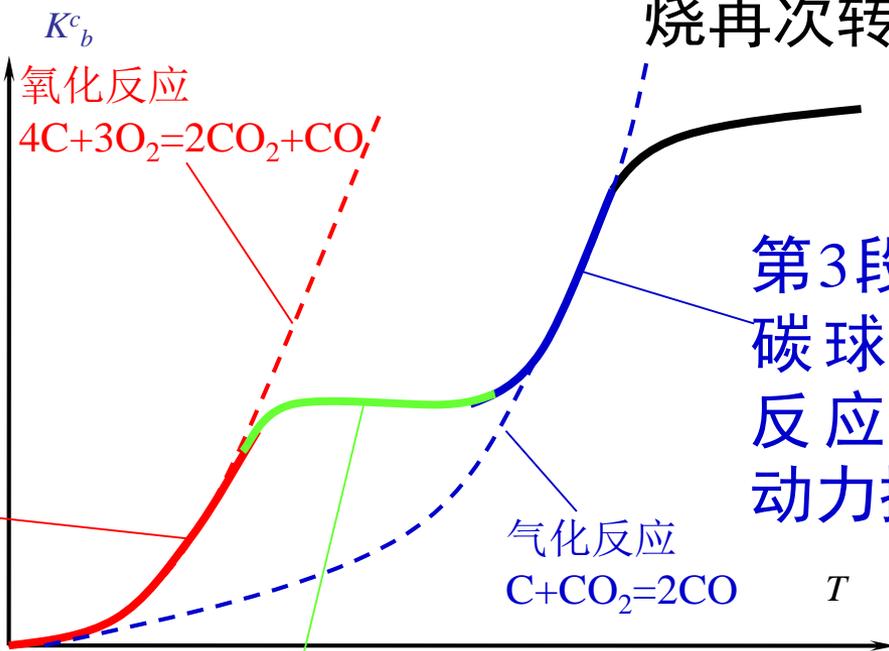
■ 碳球表面因为得不到O₂只能发生气化反应。气化反应所需的吸热由CO燃烧的放热供给。

■ 火焰锋面上CO₂浓度最高。并向两侧扩散，向内供给气化反应所需的CO₂，向外则扩散到远处。



碳球表面的C燃烧速度与温度 T 的关系

第1段：温度很低，动力控制区，只发生氧化反应



第2段：温度上升，进入扩散控制区，反应速度与T无关

第4段：温度继续提高，燃烧再次转入扩散控制

第3段：温度很高，碳球表面发生气化反应，燃烧又转入动力控制

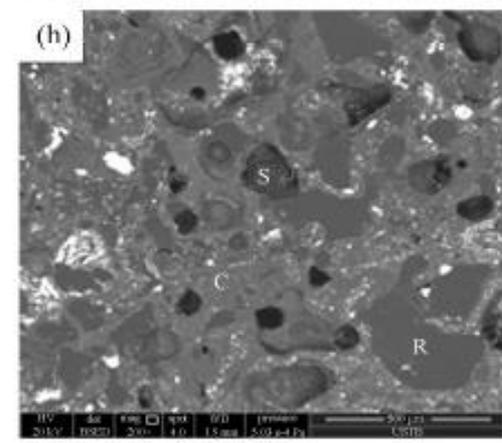
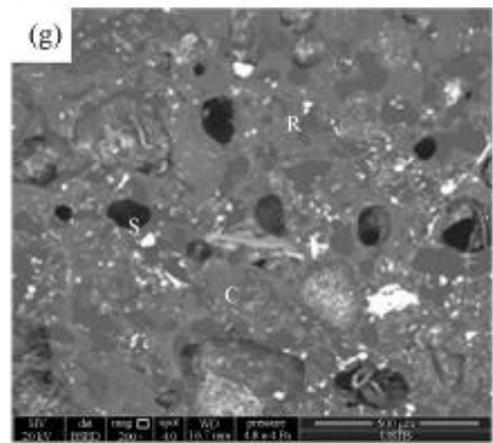
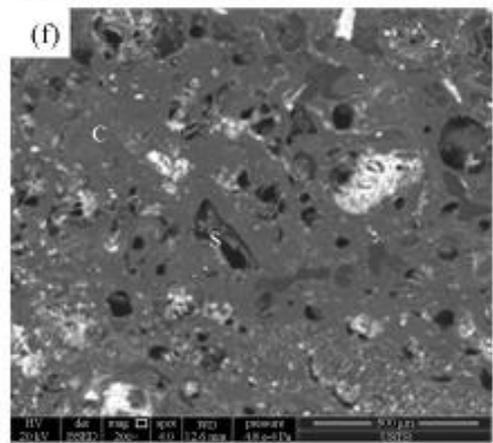
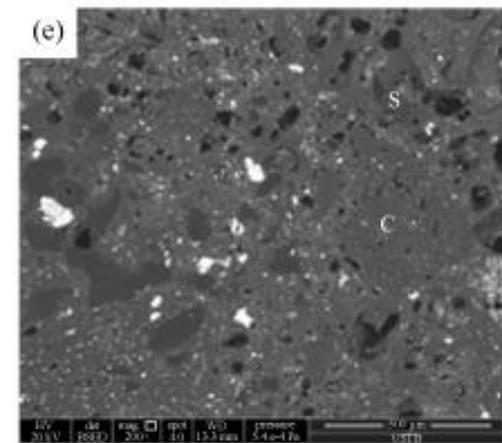
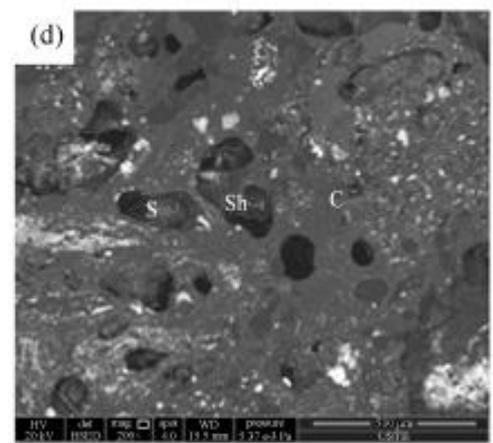
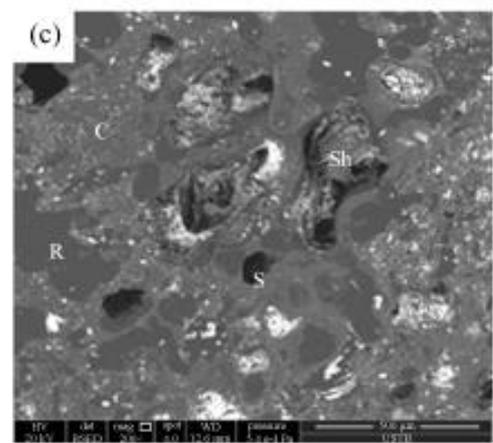
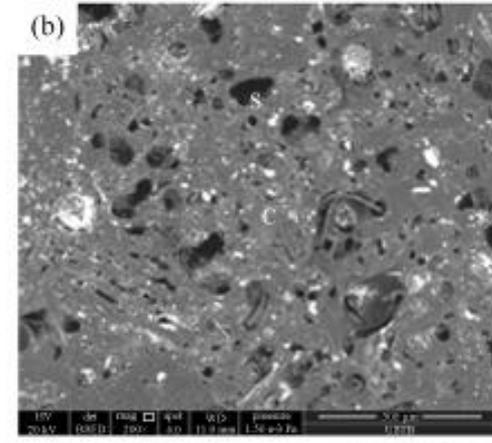
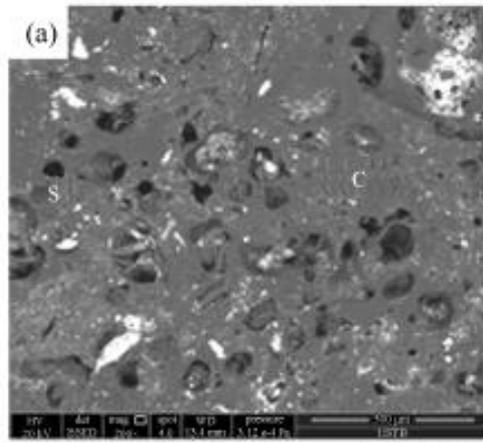
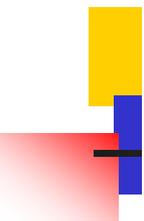


第五节 多孔焦炭球燃烧特点

- 焦炭的结构特点在于多孔性，即使对于比较紧密的无烟煤，也存在大量内孔，不同煤种的焦炭内部孔隙率很不相同。单位体积的内部表面积估算数据如下：

	木炭	电极炭	无烟煤
内比表面积 S_n (m^2/m^3)	$(0.57\sim 1.14) \times 10^4$	$(0.7\sim 5) \times 10^4$	$(1\sim 3) \times 10^4$

- 焦炭燃烧的异相反应不仅能在外表面上进行，同样能在内表面上进行。所以，内反应是不能忽视的。这就是多孔焦炭燃烧的特点。





反应总表面积 $S = S_1 + S_2$

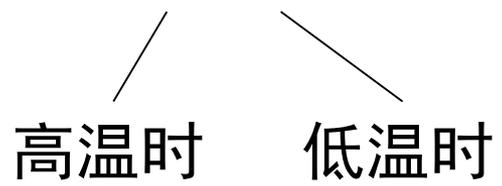
- 外表面积 $S_1 = 4\pi r^2$ (设碳球半径 r)
- 内表面积 $S_2 = \frac{4\pi r^3}{3} S_n$ (S_n 为内比表面积 m^2/m^3)
- 总表面积 $S = S_1 \left(1 + \frac{S_n r}{3}\right)$, 考虑总面积参与反应, 相当于化学反应常数 K 增加了 $\frac{S_n r}{3}$ 倍。
- 用反应气体交换常数 α_b 代替 K , 则



- 引入一个调节参数 ε
- 可以推知：温度处于高~低温之间时，
- 反应面积提高的倍数为 $1 + \varepsilon \frac{r}{3} S_n$

- 反应交换常数 α_b 为 $K (1 + \varepsilon \frac{r}{3} S_n)$
- 其中 $\varepsilon=0\sim 1$

又称 O₂ 的有效渗入深度





结论：

- 在动力区中（低温），内表面参与化学反应。
- 在扩散区中（高温），内表面对化学反应已无作用。



多孔焦炭的燃烧速度

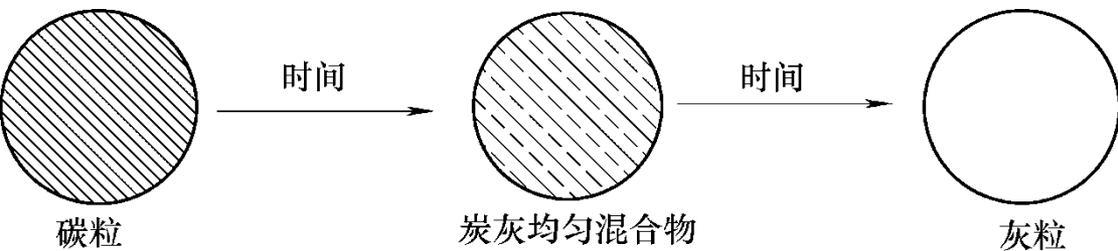
$$w_{O_2} = \frac{C_\infty}{\frac{1}{\alpha_{zl}} + \frac{1}{\alpha_b}} = \frac{C_\infty}{\frac{1}{\alpha_{zl}} + \frac{1}{K(1 + \varepsilon \frac{r}{3} S_n)}}$$

- 有人对燃用无烟煤的煤粉炉进行了计算：
- 煤粉直径 $\delta=100\mu\text{m}$ ， $E=141\text{kJ/mol}$ ，内部孔隙比表面积 $S_n=3 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ，炉温在 1427°C 下的系数 $\varepsilon \approx 0.2 \sim 0.3$
- 计算结果 $\alpha_b \approx (1.2 \sim 1.3) K$
- $\alpha_{zl} / \alpha_b \approx 0.6 \sim 0.7$ 处于过渡区

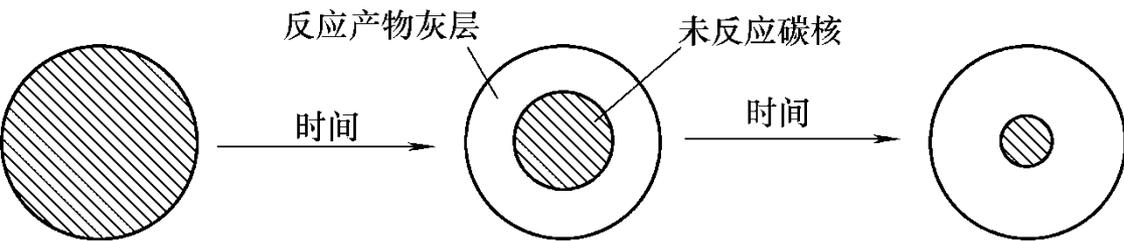


第六节 灰分对焦炭燃烧的影响

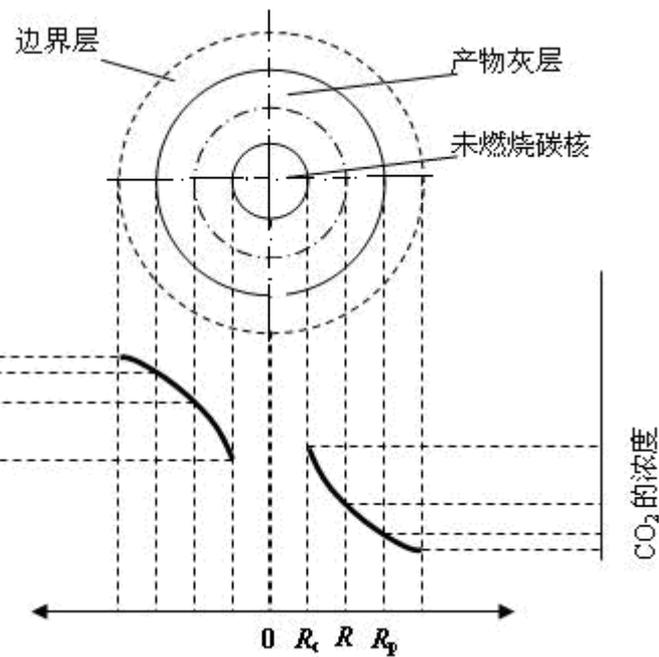
- 灰分主要成分包括 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 等酸性氧化物和 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 等碱性氧化物。



均匀反应模型



不均匀反应模型





不同燃烧温度下灰分对燃烧的影响

- 1) 当燃烧温度低于灰的软化温度时，燃煤碳粒的外表形成松积灰层（见不均匀燃烧模型），给氧气扩散增加了额外的阻力。灰层扩散的大小取决于灰层的厚度、密度等物理因素。
- 2) 当燃烧温度高于灰的熔化温度时，燃烧产生的不再是松积的灰层，而是产生具有一定流动性的熔渣。有可能完全包裹内层的未燃尽焦炭。



裹灰对焦炭球燃烧速度及燃烧时间的影响

类别	焦炭燃尽率/ %	焦炭含灰的质量分数/ %			
		10	20	30	40
由于裹灰导致焦炭球燃烧速度减少的百分数	90	-5.6	-11.8	-18.7	-26.3
	70	-3.5	-7.6	-12.4	-18.0
	50	-2.3	-4.9	-8.3	-12.1
燃尽时间增加的百分数	100	+3.7	+8.4	+14.3	+22.3



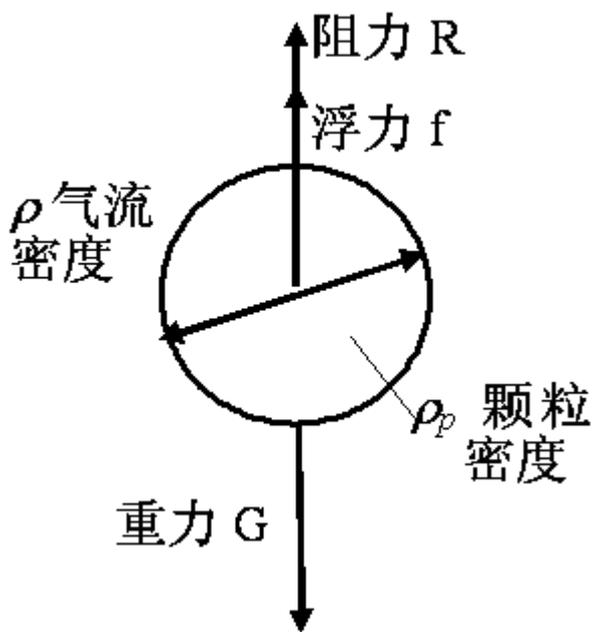
第七节 煤粉的燃烧

- 一、煤粉气流的输送与分配
- 二、煤粉气流的着火
- 三、旋转射流中煤粉的着火
- 四、直流射流中煤粉的着火
- 五、煤粉气流的燃尽过程



一、煤粉气流的输送与分配

1) 静止流体中的颗粒（终端）沉降速度



当力平衡时（即 $\sum F_i=0$ ），颗粒匀速下降。此时的速度称**颗粒（终端）沉降速度**，该速度是颗粒在气流中能达到的最大沉降速度。

$$\frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p g - \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho g = \zeta \frac{\pi}{4} d_p^2 \frac{\rho w_{xd}^2}{2}$$

重力
浮力
阻力

式中 ζ —— 气体与颗粒之间的阻力系数（摩擦+压差），由实验确定

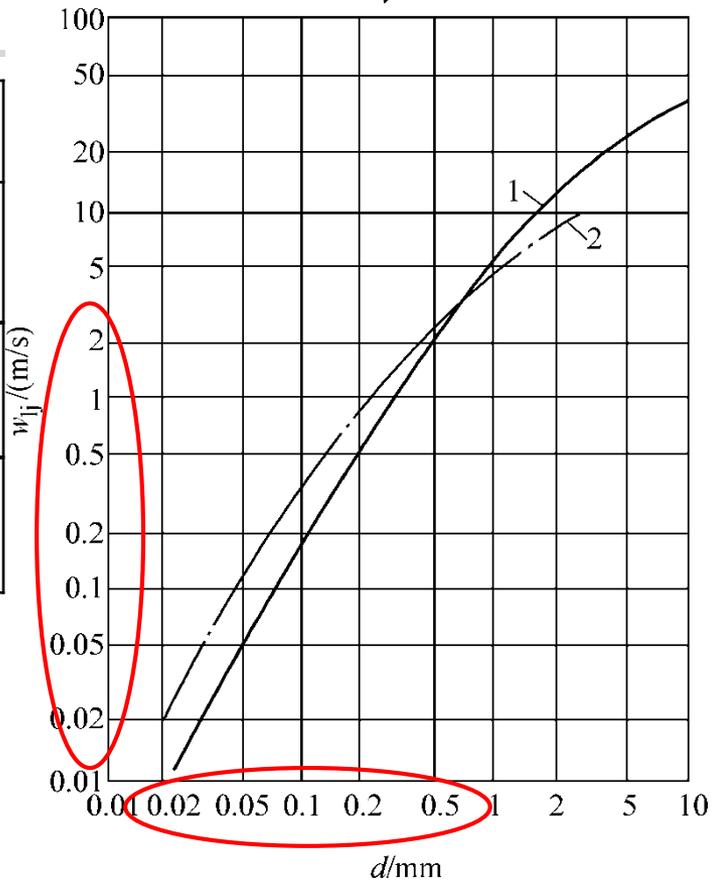


ζ的表达式

$$\zeta = f(\text{Re}) = \frac{c}{\text{Re}_p^n}$$

$$\text{Re}_p = \frac{d_p w_{xd}}{\nu}$$

Re	c	n	
<1	24	1	$\zeta = \frac{24}{\text{Re}_p}$
1~500	10	0.5	$\zeta = \frac{10}{\text{Re}_p^{0.5}}$
500~2×10 ⁵	0.44	0	$\zeta = 0.44$



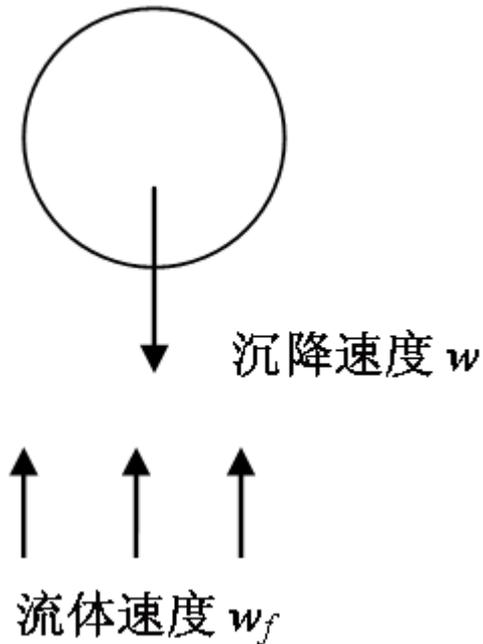
颗粒在气体中的
临界沉降速度
(终端沉降速度)
为:

$$w_{lj} = \left[\frac{4(\rho_p - \rho)d_p^{n+1}g}{3\rho c \nu^n} \right]^{\frac{1}{2-n}}$$

- 1-空气温度0°C
- 2-空气温度1000°C



2) 颗粒在垂直管内的输送



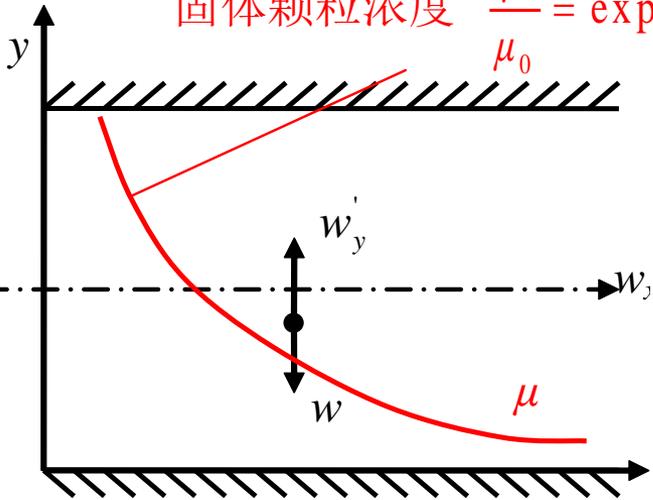
煤粉受上升气流的推力而作上升运动

- 当 $w_f = w$ 时，颗粒悬浮在流体中
- 当 $w_f > w$ 时，颗粒以 $w_f - w$ （相对运动速度）向上运动
- 当 $w_f < w$ 时，颗粒以 $w_f - w$ 向下运动



2) 颗粒在水平管内的输送

固体颗粒浓度 $\frac{\mu}{\mu_0} = \exp\left(-\frac{w}{D_t} y\right)$



当气流脉动速度 $w'_y \geq$ 沉降速度 w 时，颗粒悬浮在管中随气流流动；当气流脉动速度 $w'_y <$ 沉降速度 w 时，则沉积堵粉

一般 $w'_y \approx \left(\frac{1}{5} \sim \frac{1}{7}\right) w_x$

沉降速度 $w \approx 0.1 \sim 2 \text{m/s}$ ，所以要求 $w_x \geq 14 \text{m/s}$ 。



二、煤粉气流的着火

一次风的两个作用：

输送煤粉（要求空气流速越高越不容易堵塞）

供挥发分燃烧用 O_2 （要求空气流量控制在合适的范围之内）

对低 V_{daf} 煤，一次风供挥发分燃烧的量少，不够运送煤粉之需要，往往按送粉的需要来选用二者中较大的一次风量



煤粉气流（一次风）的着火温度

煤粉的点燃不仅要点燃煤，还要供一次空气达到煤的着火温度 T_{zh} 。

这个温度比静止煤粉本身着火温度要高得多。

煤种	V_{daf} (%)	煤粉气流着火温度 $^{\circ}C$	静止煤粉着火温度 $^{\circ}C$
褐煤	50	550	
烟煤	40	650	400-500
	30	750	
	20	840	
贫煤	14	900	650-800
无烟煤	4	1000	650-800



煤粉气流着火热 Q_{zh} 计算公式

1. 着火热传递方式

	辐射 (%)	对流 (%)
苏联 (过去)	2-5	95-98
中国 (研究总结)	10-30	70-90

2. 着火吸热组成

计算燃料量 过量空气系数 理论空气量 一次风份额 煤粉比热

$$Q_{zh} = B_j [(\alpha V^0) r_{1k} \rho_{1k} c_{1k} + c_m] (T_{zh} - T_0) \quad \text{kJ/h}$$

一次空气吸热 煤粉吸热



- 着火热随燃料性质(着火温度, 燃料水分、灰分、煤粉细度)和运行工况(煤粉气流初温、一次风率和风速)的变化而变化, 当煤粉与一次风通过对流与辐射传热获得的热量等于或大于着火热时, 再过了孕育时间, 气流才能着火。



三、 旋转射流的着火

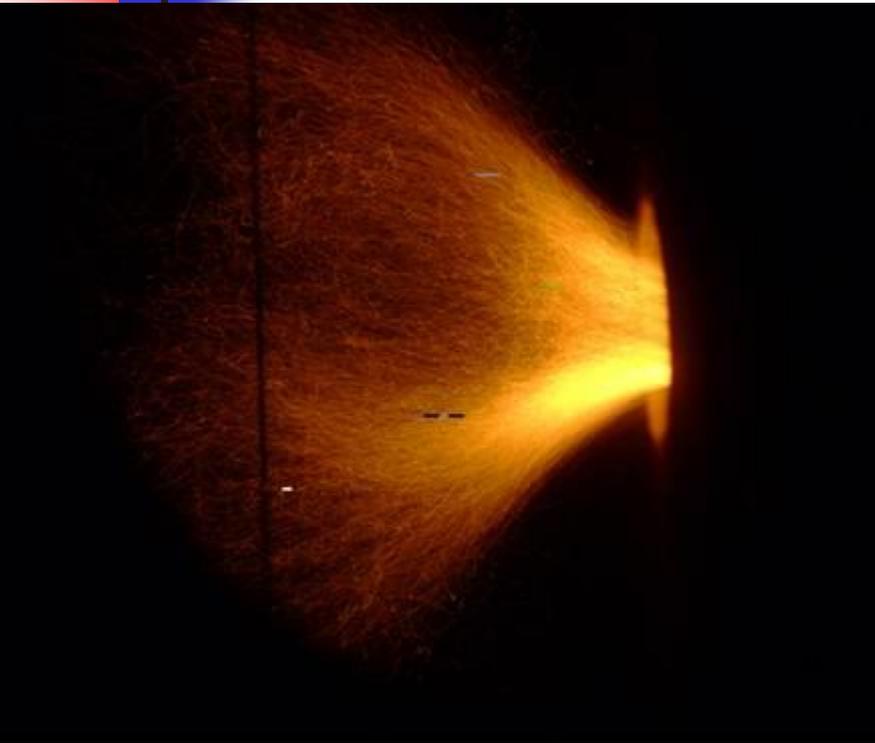


燃气燃烧器的旋流叶片

使用前墙布置旋流燃烧器的锅炉



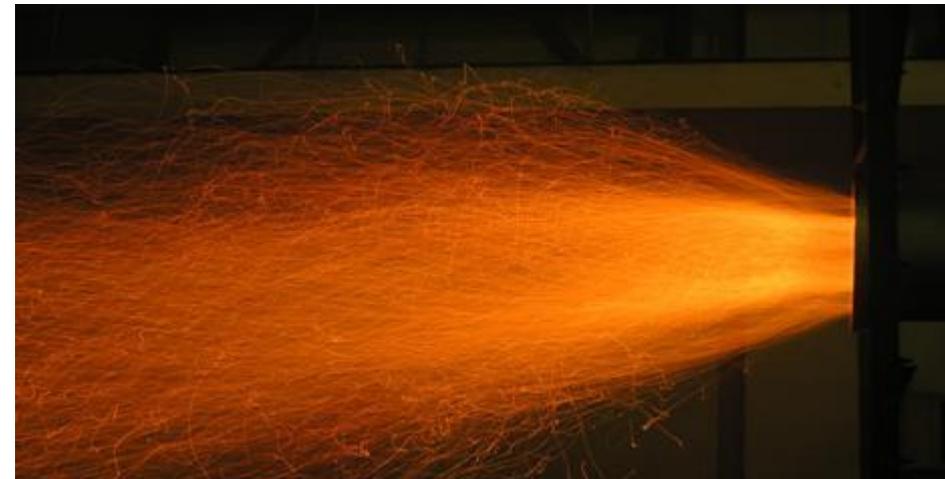
旋流燃烧器的流动形态（火花示踪）



旋流强度较大



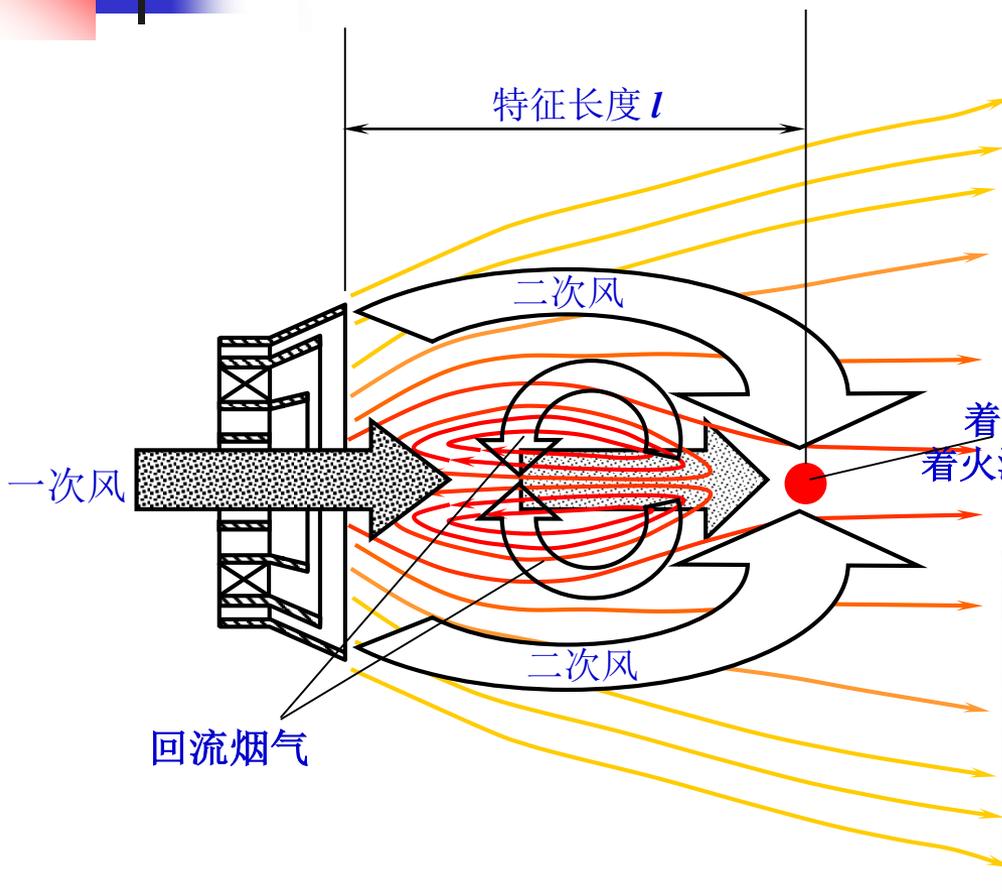
旋流强度中等



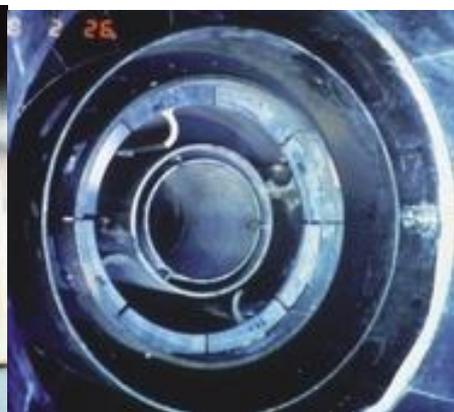
旋流强度较小



旋流燃烧器的着火过程



- 煤粉与一次风气流喷入炉膛后，与回流区流来的回流气体混合，并受到火焰的辐射，同时二次风与一次风混合，增大了着火所需的热量；在这样三个因素起作用的条件下煤粉与一次风气流升温到着火温度而着火。
- 着火后一部分煤粉与一次风气流转而流入回流区，其他部分继续与二次风混合而燃烧，并向下流去。

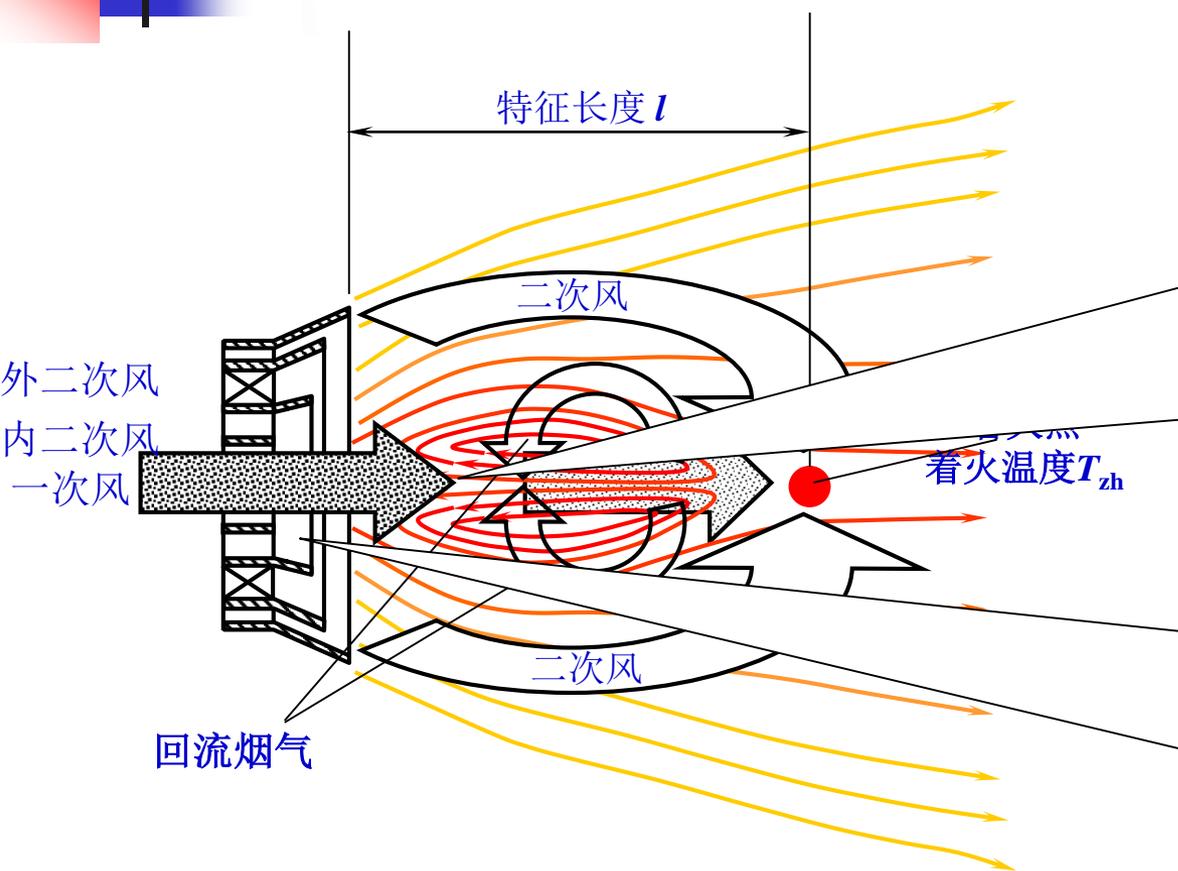




旋转射流燃烧中体现的燃烧学原理

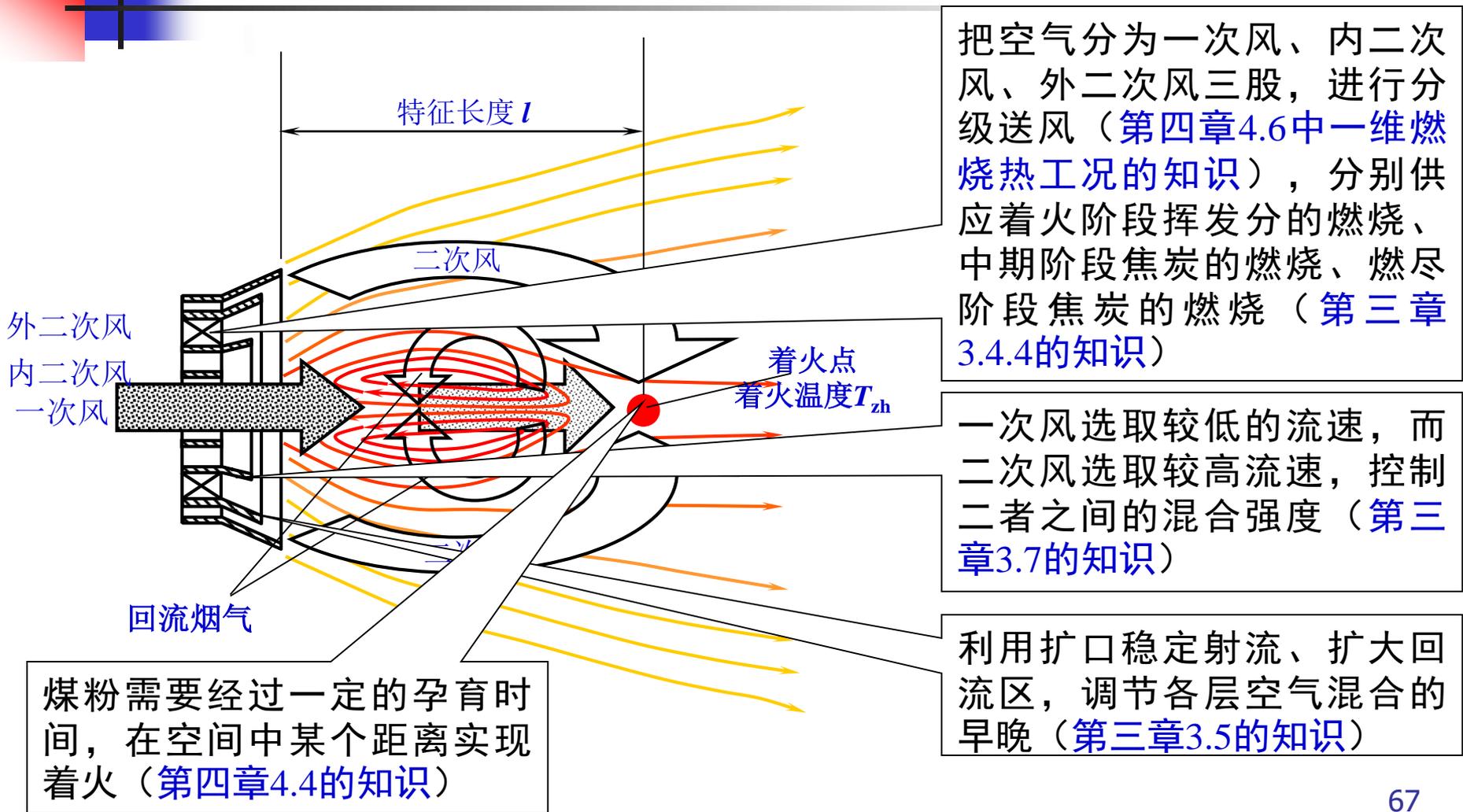
利用旋转射流的特性形成中心回流区（第三章3.5的知识），卷吸高温烟气回流到喷口加热一次风。体现了优化强迫点燃条件（第四章4.4的知识），优化燃烧热工况（第四章4.6的知识），提供充足着火热（第七章7.7.2的知识）的思想。

旋转射流的特性，以及喷口的稳燃环，强化一次风与中心回流区高温烟气之间的混合（第三章3.5的知识），加快燃料升温，提升反应速度（第二章2.3.1的知识）。同时利用稳燃环帮助火焰稳定（第五章5.2.4的知识）





旋转射流燃烧中体现的燃烧学原理



把空气分为一次风、内二次风、外二次风三股，进行分级送风（第四章4.6中一维燃烧热工况的知识），分别供应着火阶段挥发分的燃烧、中期阶段焦炭的燃烧、燃尽阶段焦炭的燃烧（第三章3.4.4的知识）

一次风选取较低的流速，而二次风选取较高流速，控制二者之间的混合强度（第三章3.7的知识）

利用扩口稳定射流、扩大回流区，调节各层空气混合的早晚（第三章3.5的知识）

煤粉需要经过一定的孕育时间，在空间中某个距离实现着火（第四章4.4的知识）



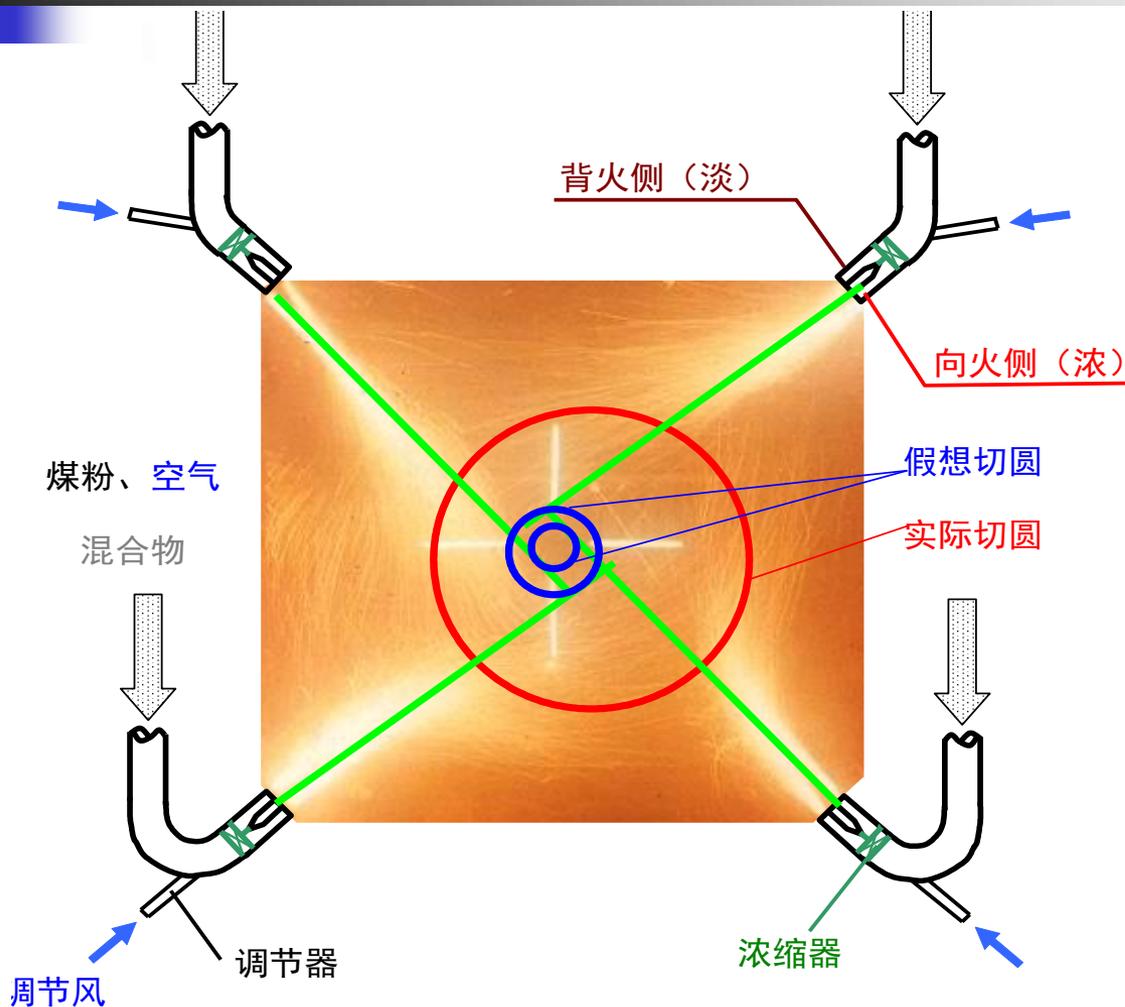
四、直流射流中煤粉的着火



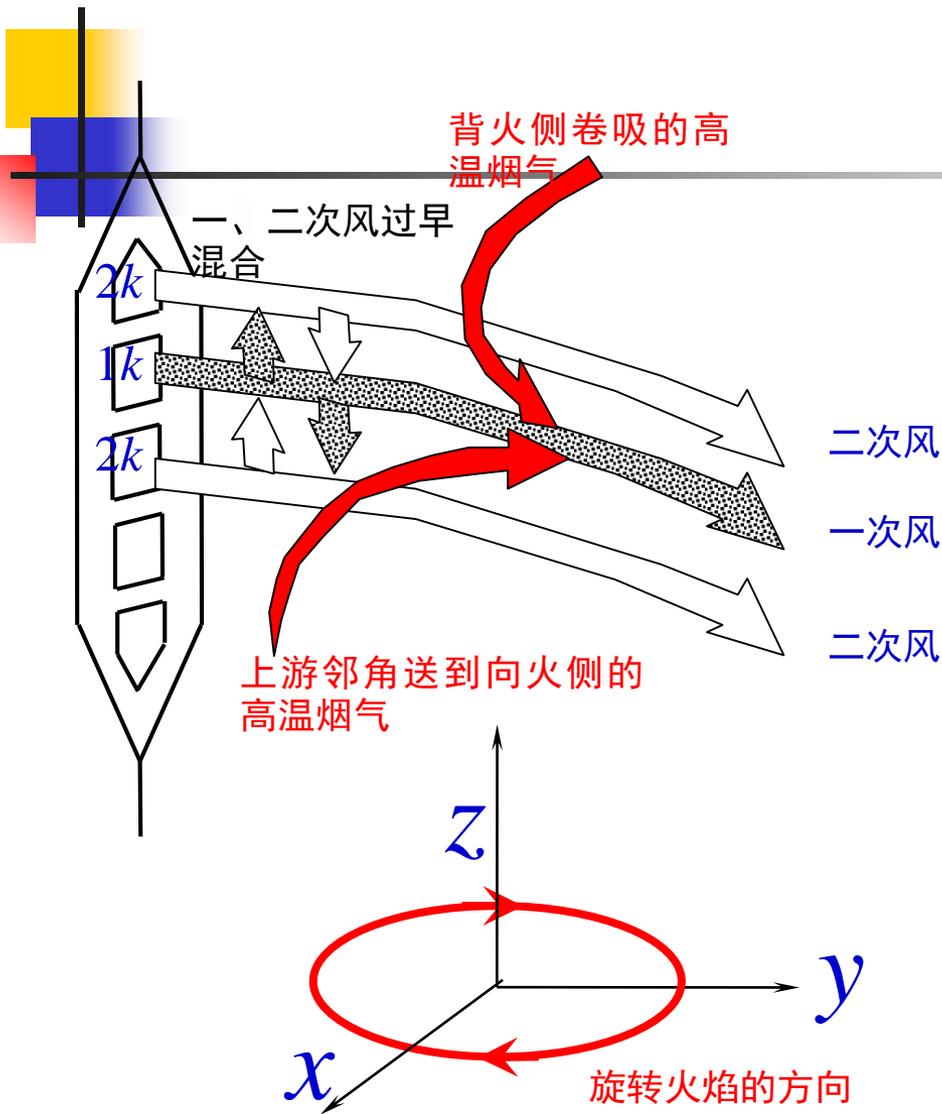
使用四角切圆直流燃烧器的锅炉



炉膛中的火焰形状



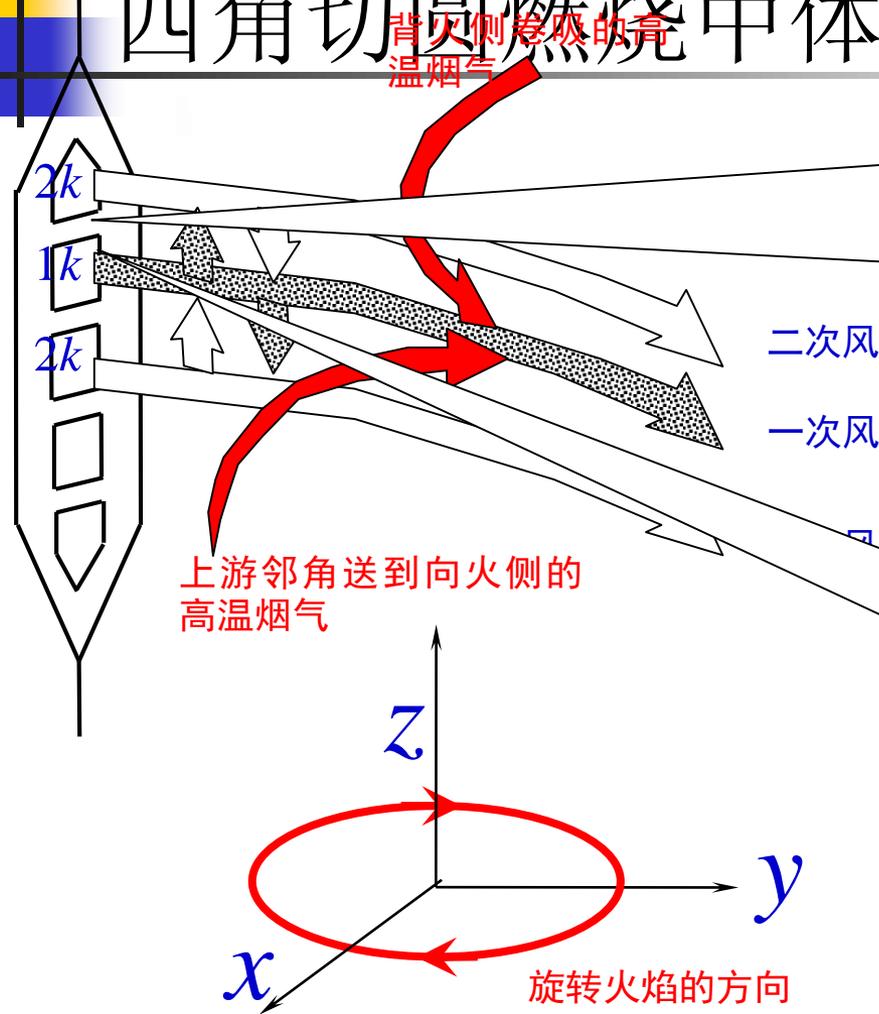
直流燃烧喷出的煤粉气流一般在炉内呈切圆布置，形成切向燃烧（四角或四墙切圆燃烧）



- 角置直流燃烧器的煤粉一次风气流所获得的对流传热来自炉内正在旋转的火焰，其中尤其是上邻角燃烧器的火炬冲撞。
- 炉内旋转火焰的旋转速度主要决定于二次风



四角切圆燃烧中体现的燃烧学原理

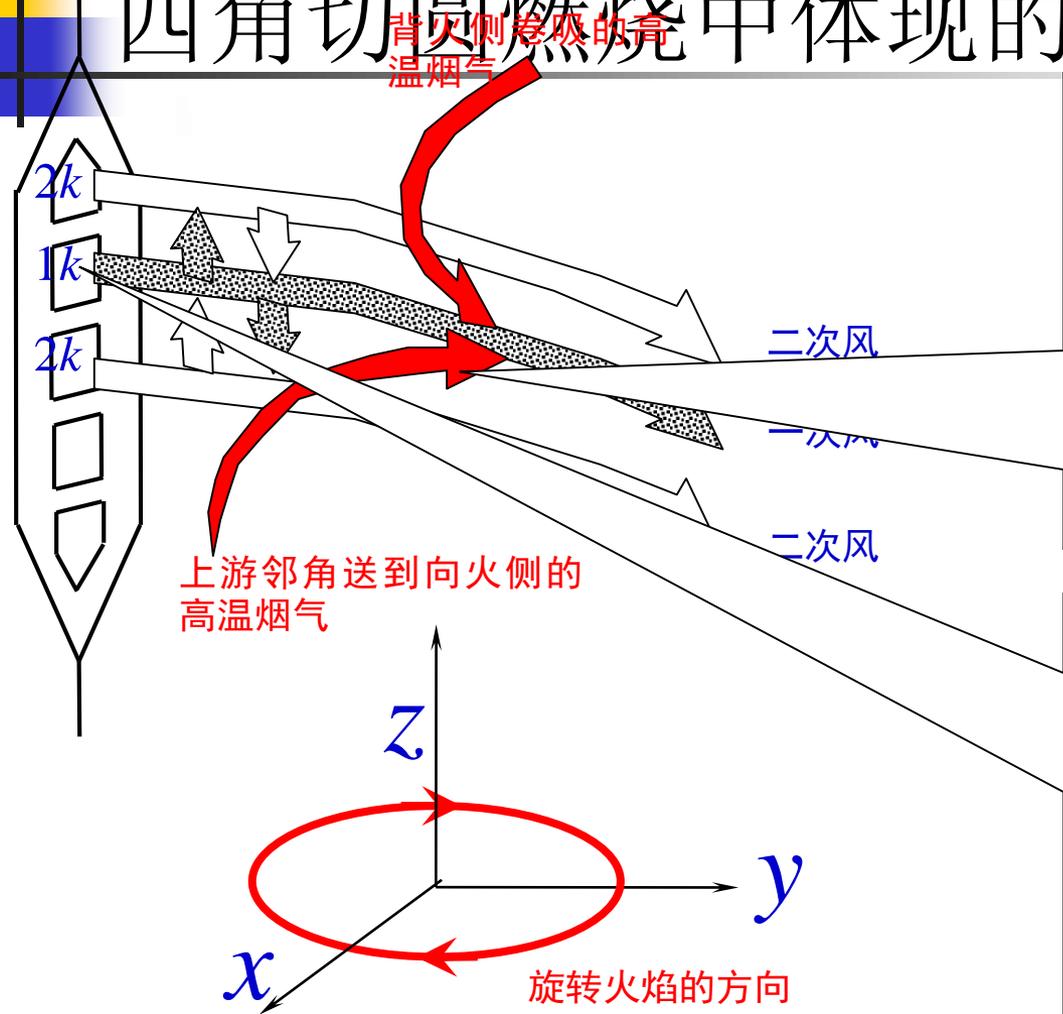


把空气分为一次风、多股二次风、燃尽风OFA，进行分级送风（第四章4.6中一维燃烧热工况的知识），分别供应着火阶段挥发分的燃烧、中期阶段焦炭的燃烧、燃尽阶段焦炭的燃烧（第三章3.4.4的知识）

一次风选取较低的流速，而二次风选取较高流速，同时合理设计各层喷口的间距，控制二者之间的混合强度和早晚（第三章3.7的知识）



四角切圆燃烧中体现的燃烧学原理

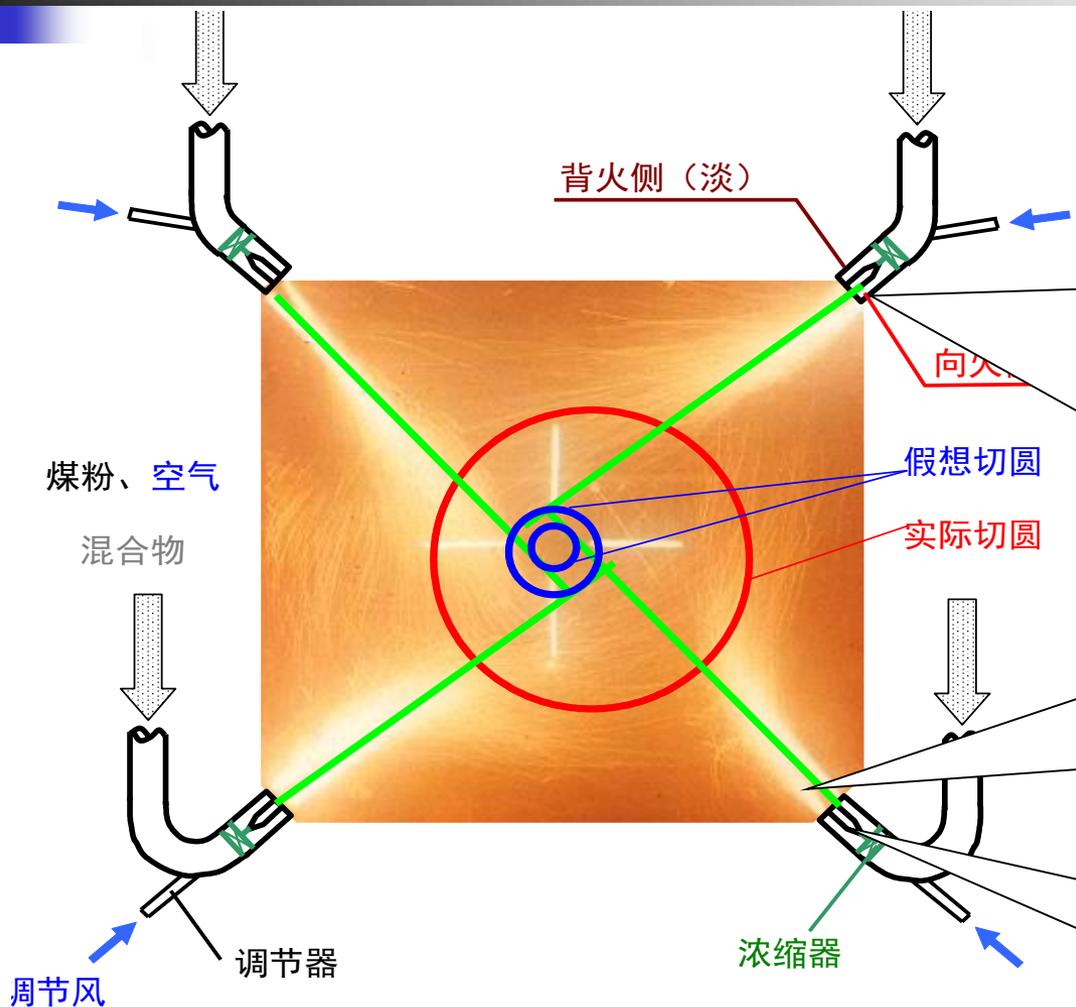


利用四角切圆的流场特性，卷吸上游火焰的高温烟气加热一次风。体现了优化强迫点燃条件（第四章4.4的知识），优化燃烧热工况（第四章4.6的知识），提供充足着火热（第七章7.7.2的知识）的思想。

利用相交射流的特性，强化一次风与上游区高温烟气之间的混合（第三章3.7的知识），加快燃料升温，提升反应速度（第二章2.3.1的知识）。同时利用钝体帮助火焰稳定（第三章3.6、第五章5.2.4的知识）



四角切圆燃烧中体现的燃烧学原理



将煤粉分离为浓淡两股，其中浓测气流迎向上游火焰，发挥向火侧着火优势。体现了优化强迫点燃条件（第四章4.4的知识），优化燃烧热工况（第四章4.6的知识），降低单位质量煤粉所需着火热（第七章7.7.2的知识）的思想。

淡煤粉气流在背火侧，保护水冷壁少受到磨损和还原性物质的侵蚀（金属材料方面的知识）。也可以设置专门的边壁风。

还可以在一次风中心设置专门的夹心风进行供氧（第三章3.4.4、3.7的知识）。



五、煤粉气流的燃尽过程

对煤粉-空气混合物：

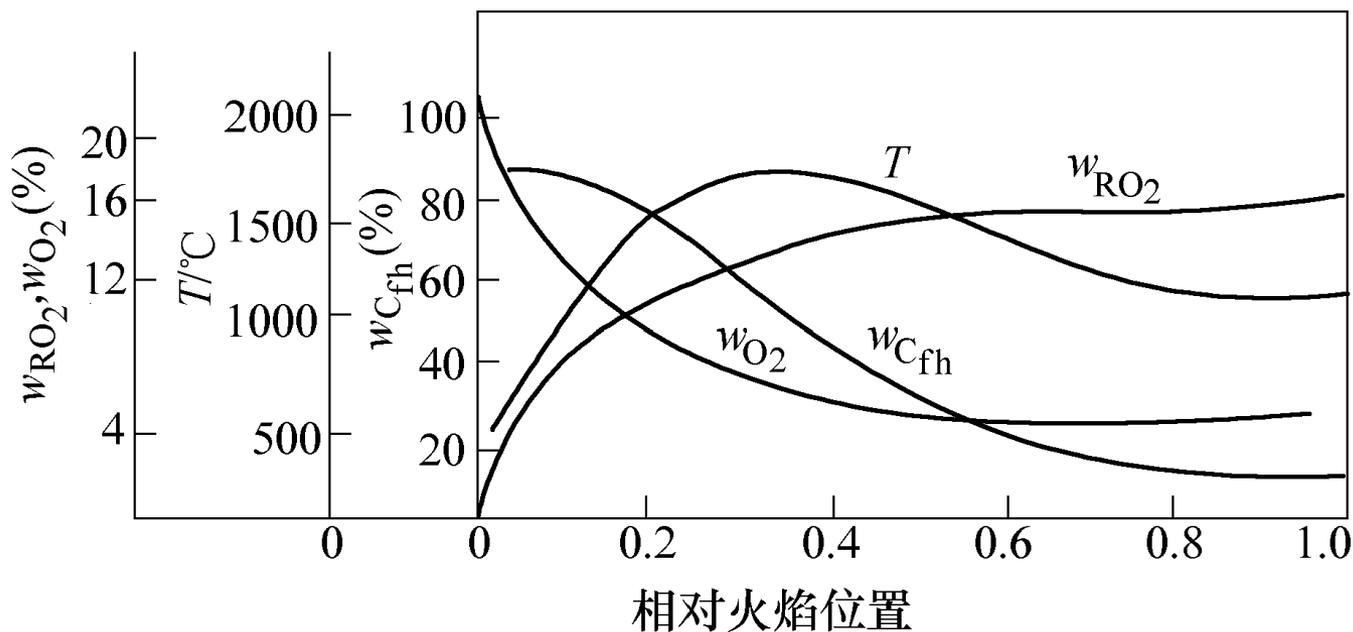
- 离喷口 $0.3\sim 0.5\text{m}$ 或 x/B (B 为燃烧器喷口宽度)
 $=0.5\sim 1$ 的距离内开始着火；
- 大部分挥发分大约离喷口 $1\sim 2\text{ m}$ 处已挥发完并燃烧掉；
- 但是焦炭的燃烧一般要延续到离喷口 $10\sim 20\text{m}$ ，燃烧过程很长，可见焦炭燃尽的难度。



实验统计的沿燃烧室长度的相对燃尽率

煤种	沿炉膛的相对长度x/L (L为炉膛总长度)					
	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50	1.0
贫煤、无烟煤	72~86%	86~90%	92~95%	93~96%	94~97%	96~97%
烟煤	90~94	92~96	95~97	96~98	98~99	98~99.5
褐煤	91~95	93~97	96~98	97~98	98~99	99~99.5
煤与重油混烧 ($\alpha=1.02$)			94~96	96~98	97~99	≈ 99.5

无烟煤煤粉炉
燃烧过程中各
种气氛和飞灰
含碳量





- 煤粉气流在炉内的燃烧要给足足够的空间和炉内停留时间，即炉膛有足够高度。

- 炉内停留时间 $\tau = \frac{V}{Q_y}$ 一般停留时间2~5秒

➤ 煤粉气流着火后，火焰会以一定速度向逆着气流方向扩展，若此速度等于从燃烧器喷出的煤粉气流的速度时，则火焰稳定于该处。反之，火焰则被气流吹向下游，在气流速度衰减到一定程度的地方稳定下来，此时，可能会导致火焰被吹灭，或出现着火不稳定的现象。（第五章5.2的知识）

➤ 降低一次风煤粉气流的速度，在相同的距离内会吸收更多的热量，有利于着火稳定。提高煤粉浓度和煤粉细度、提高一、二次风温，都有利于着火稳定。（第四章4.4强迫点燃的知识，第七章7.4.5碳球燃烧直径平方直线定律）

➤ 稳定着火后，将会有更多的空气混入煤粉气流，提供足够的氧气。此外，还必需保证足够的火焰长度，即煤粉在高温的炉膛内有足够的停留时间。（第四章4.6零元系统热工况的知识）



强化煤粉气流燃尽的措施

除以上炉膛空间（高度）、停留时间外，从燃烧化学反应速度的角度，主要还有：

- 燃烧温度的影响：对煤粉炉内温度 $1000\sim 1500^{\circ}\text{C}$ 之间（处于过渡区），进入扩散区 $\geq 2000\text{K}$ （ 1700°C ），显然提高温度 T 对焦炭燃尽有利。（第七章7.3动力燃烧与扩散燃烧的知识）
- 炉膛烟气的 O_2 浓度对燃尽影响很大，火焰最高温度大约离喷口 4m 远。适当的送入 O_2 —提高 α ；适当的送入方法——OFA（Over-Fire Air）（第四章4.6一维燃烧热工况的知识，第七章7.4.5碳球燃烧直径平方直线定律）
- 煤粉细度：挥发分越低，则 E 越大，着火燃尽时间越长，故煤粉需磨得很细。（第七章7.3动力燃烧与扩散燃烧的知识，第七章7.4.5碳球燃烧直径平方直线定律）



结渣

- 结渣：炉膛火焰内的煤粉颗粒一般已处于熔融状态，如果它在被气流携带运输水冷壁的路线上来不及凝固，它就可能粘附在水冷壁管上而引起结渣。
- 影响因素：炉膛热负荷、灰熔点、炉膛气氛（还原性气氛较易引起结渣）。



思考题1

- 前面已经讨论过，比表面积大的细小煤粉反应活性好。家用煤球炉在800多 $^{\circ}\text{C}$ 就能稳定燃烧，而大型煤粉炉却在1200 $^{\circ}\text{C}$ 以上才能稳定燃烧。这与“煤粉反应活性好”的结论矛盾吗？
- 大容量锅炉为什么要使用煤粉燃烧的方式？



思考题2

- 为什么现代的链条炉一般采取“分仓送风”（也就是沿炉排前进的方向分为不同的风仓，每个风仓的风速不同）的方式？
- 而且通常使用“延迟送风”（也就是在炉排的前段供风较少，而炉排的后段加大供风）的方法？

