

# 第一章 基本运行理论

# 锅炉的概念及定义：

动力之源、供热之源

多方面应用  $\left\{ \begin{array}{l} \text{生产：动力（发电、锤击），热载体（烘干等）} \\ \text{生活：开水，蒸饭，供往浴室，集中供热等} \end{array} \right.$

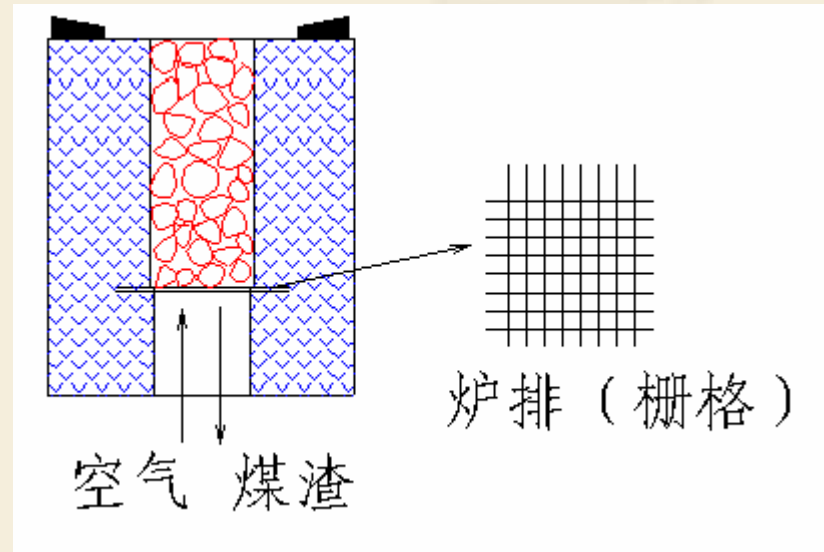
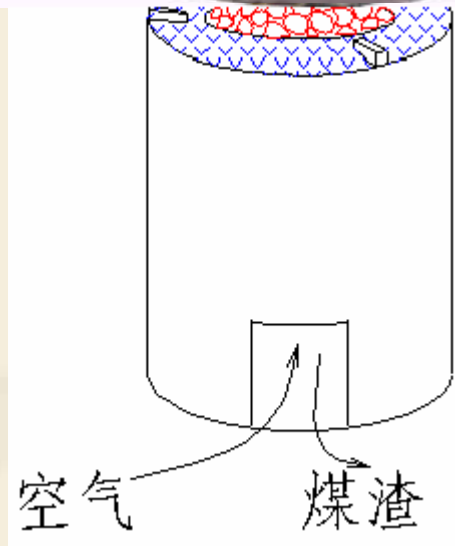
生活中也有锅炉：



煤气锅炉



电锅炉



# 锅炉的定义：

1. 组成：
  - 锅：烧水，生产热水或蒸汽
  - 炉：烧火，将电能或燃料的化学能转化热能
2. 功能：
  - 提供动力或发电：动力锅炉
  - 供热、采暖等工业用：供热锅炉或工业锅炉

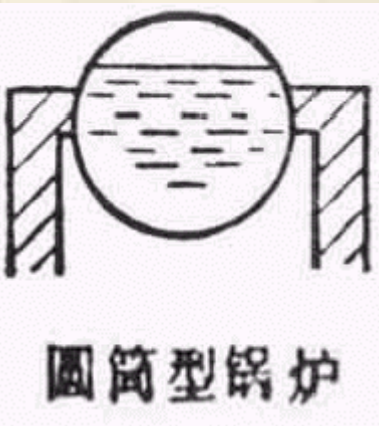


**动力锅炉：** 容量大、参数高、效率高  
(**>90%**)

**eg.** 石洞口电厂**300MW**×**4**，超临界参数，  
相当于锅炉**1000t/h**、产汽压力**23MPa**、  
**550℃**

**工业锅炉：** 中低容量（0.05T/h, 0.5T/h,  
1T/h, 4T/h, 10T/h, 20T/h, 60T/h等）  
压力不高（**0.4MPa, 1.0MPa, 2.5MPa**等）  
效率不高（燃煤：**~75%**，燃油/气：  
**85~90%**）

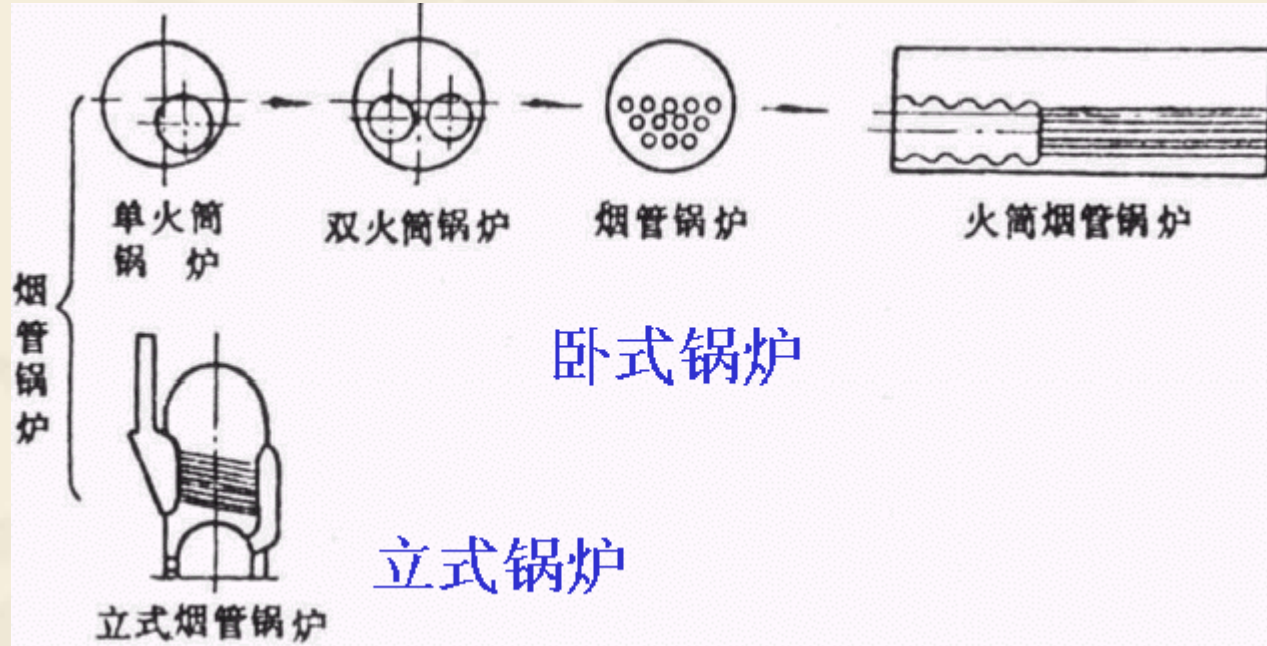
# 一、锅炉的发展过程



单锅筒锅炉

方向一：  
增加锅内  
受热面

—————>  
(烟管锅炉)



特点：结构紧凑、占地不大

但：容量一般不大。当烟管为光管时，传热效率不高

内筒

(火筒或炉胆)

外筒



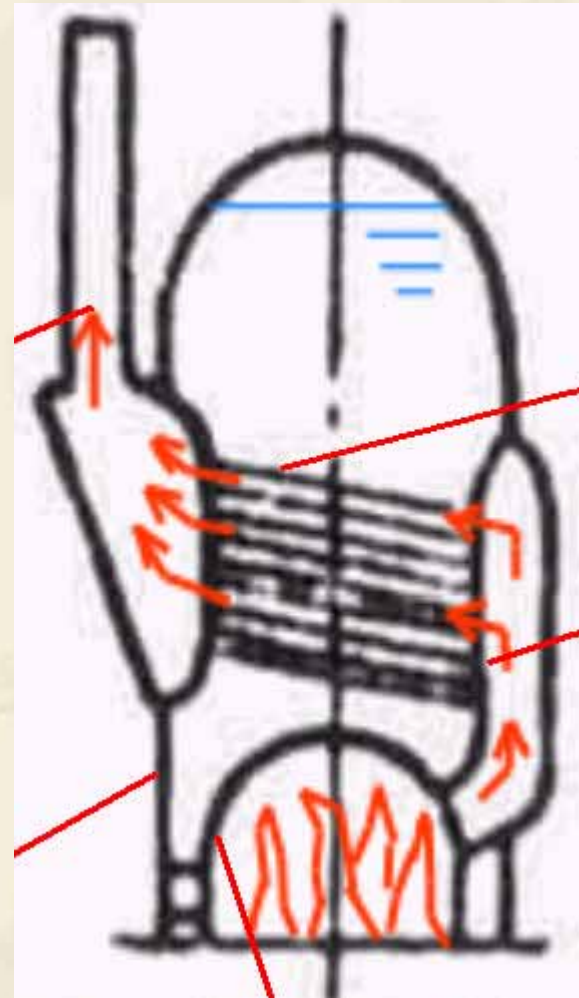
烟囱

烟管

烟室

外筒

内筒



锅内水循环

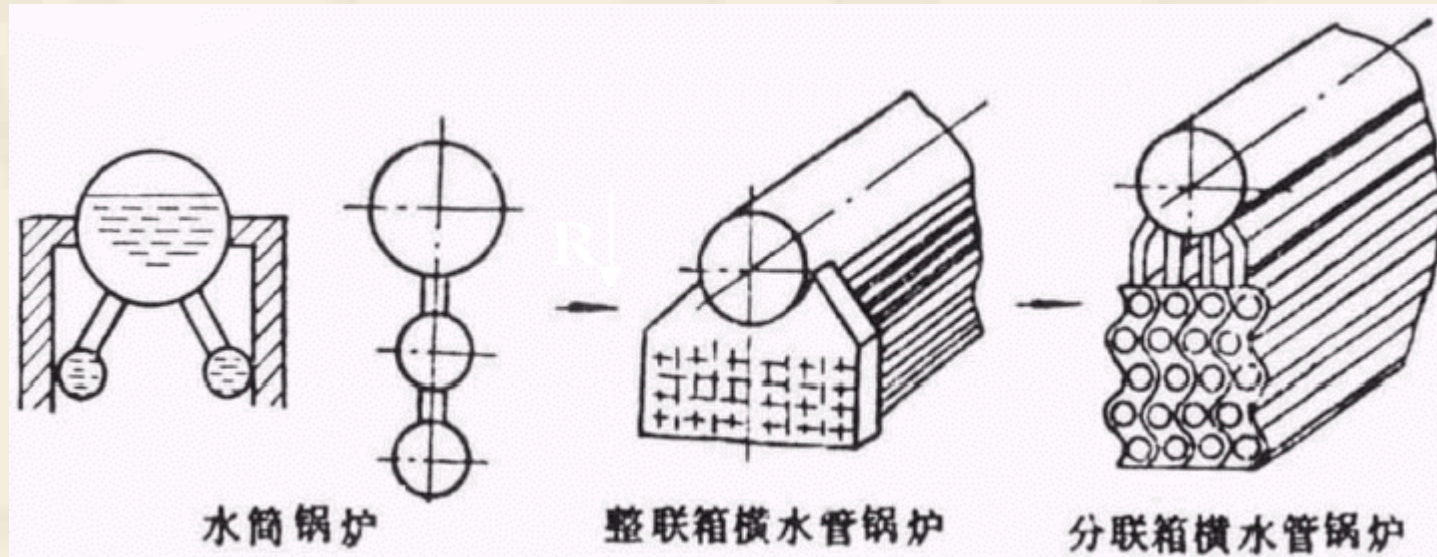


(水管锅炉)

方向二：

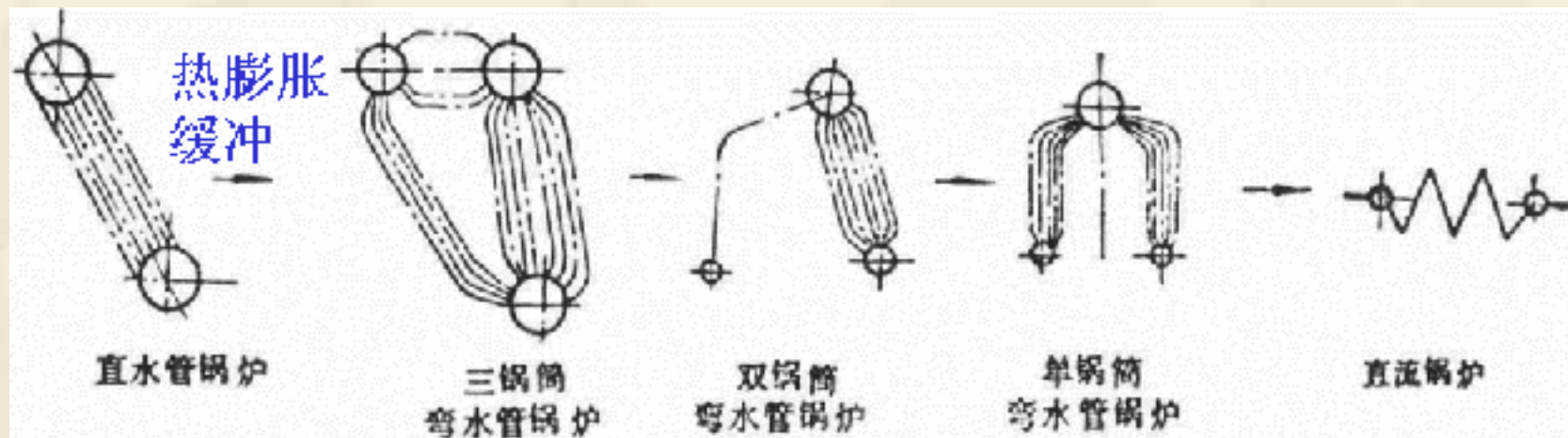
增加锅外  
受热面

直、横水管



- 特点：1、水平管，水循环不好  
2、直水管，热膨胀缓冲差，集箱安全性差

## 弯水管

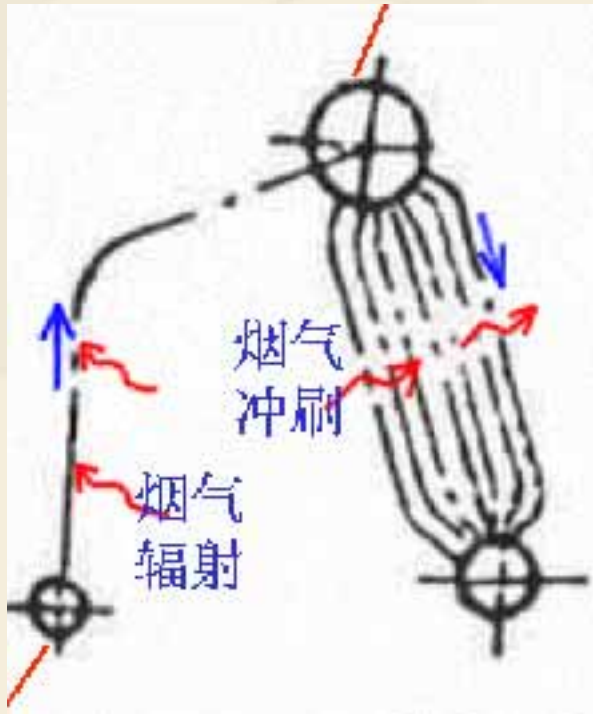


水管锅炉特点:

- 1、烟气横向冲刷水管受热面，传热效率高
- 2、炉膛空间容积不受锅筒直径限制，适用于大、中容量锅炉

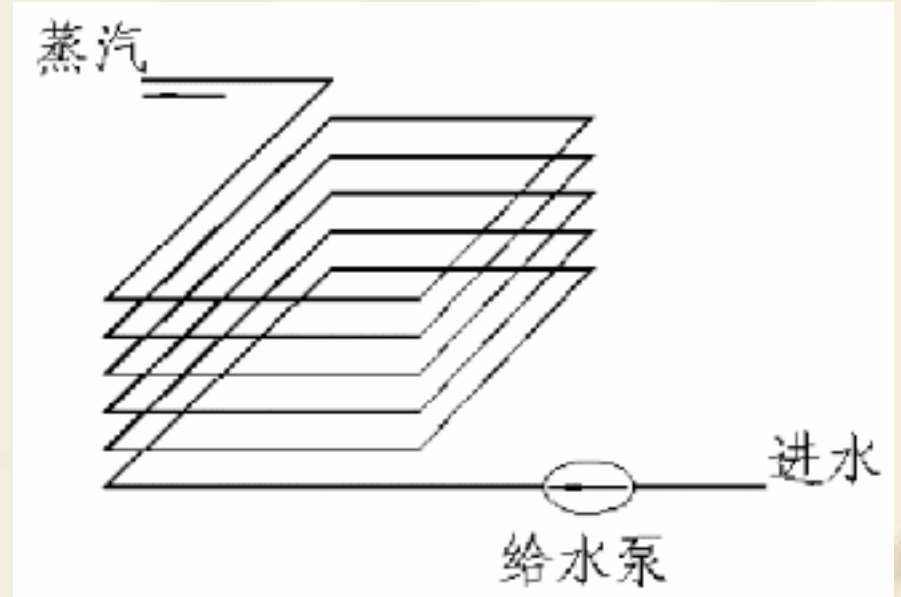
锅炉发展趋势：提高运行效率，减少燃料消耗、钢材消耗，提高运行安全

锅筒



集箱

锅外水循环



直流锅炉

## 二、锅炉运行的基本理论

### 1. 燃料化学能转化为热能——燃烧学

燃烧产物：高温烟气

### 2. 高温烟气向水放热——传热学

辐射放热：水冷壁等；对流放热：对流管束等

### 3. 水吸热：汽液两相流（水循环）

炉内放热：煤粉+空气混合燃烧（气固两相流）

油雾+空气混合燃烧（气液两相流）

烟气对受热面的流动冲刷

⇒ 流体力学



## 4. 锅炉生产蒸汽/热水的本质——热力学

(流程图)

当锅炉冷炉启动时：定容加热过程

“锅炉压力是烧火烧出的”

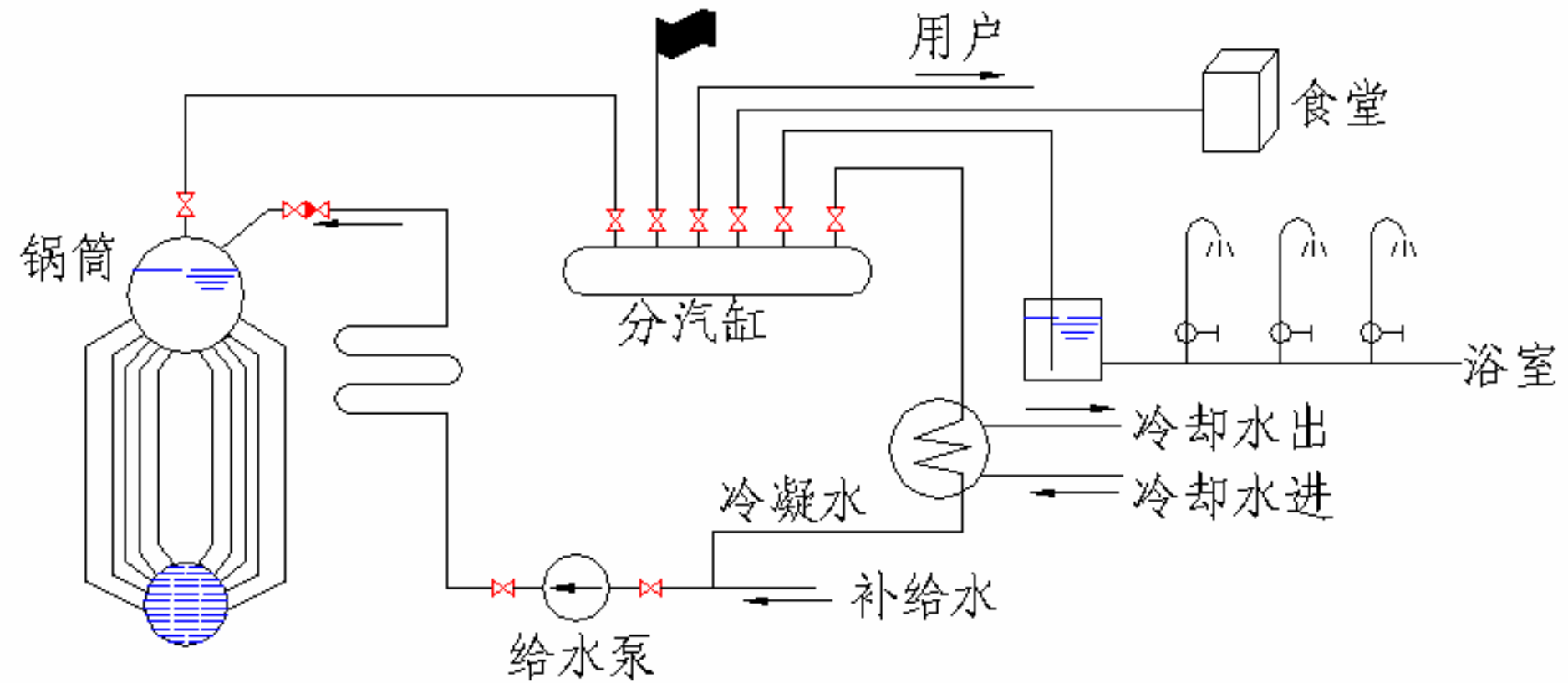
在正常运行（连续供水、产汽）：定压加热过程

给水泵补充给水，扬程 $\geq P_{\text{锅内}} + \Delta P_{\text{管道}}$

“锅炉压力是给水泵提供的”

5. 材料力学

6. 环境科学



# 三、锅炉运行的基本过程

## 1、燃料的燃烧过程

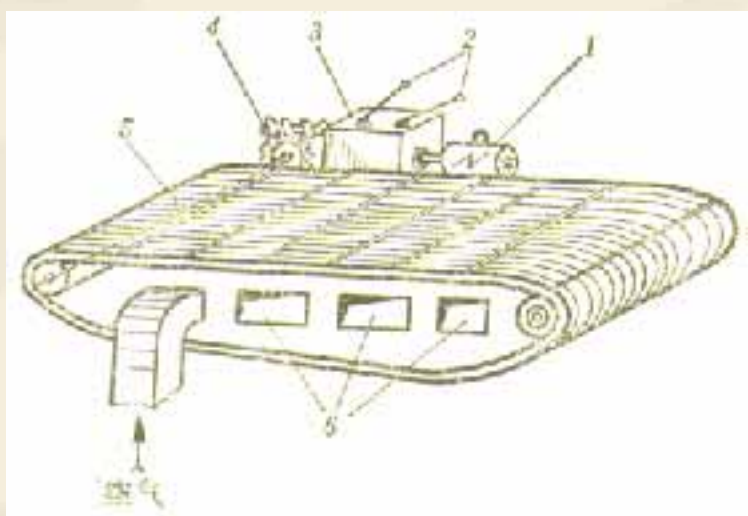
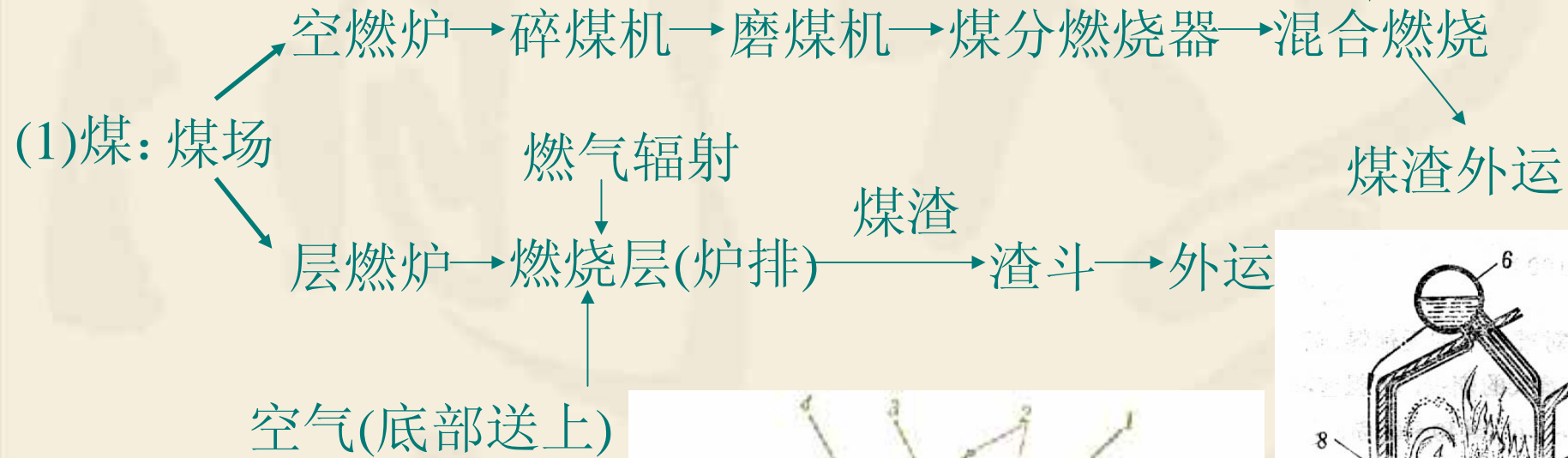


图 4-8 链条炉排示意图  
 1—电动机; 2—交流电动机; 3—变速箱;  
 4—减速机; 5—炉排; 6—进风管

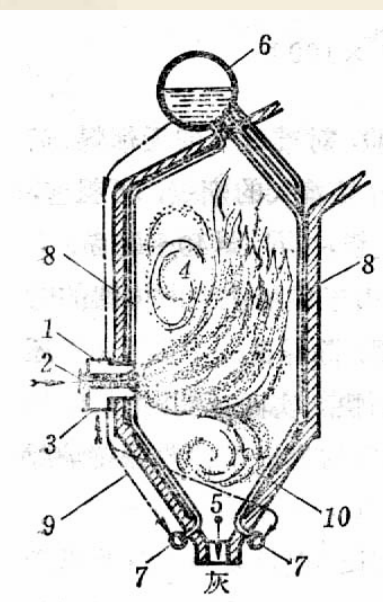
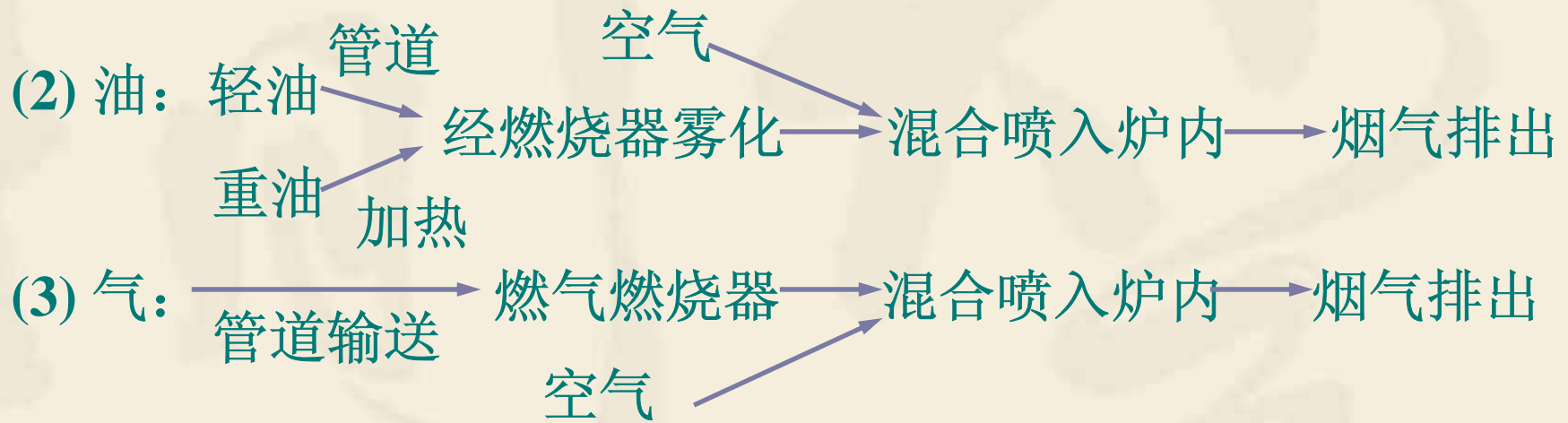


图 4-9 煤粉炉示意图  
 1—喷燃器; 2—一次风入口;  
 3—二次风入口; 4—炉膛;  
 5—出灰口; 6—锅筒; 7—下  
 联箱; 8—水冷壁管; 9—下  
 降管; 10—冷灰斗

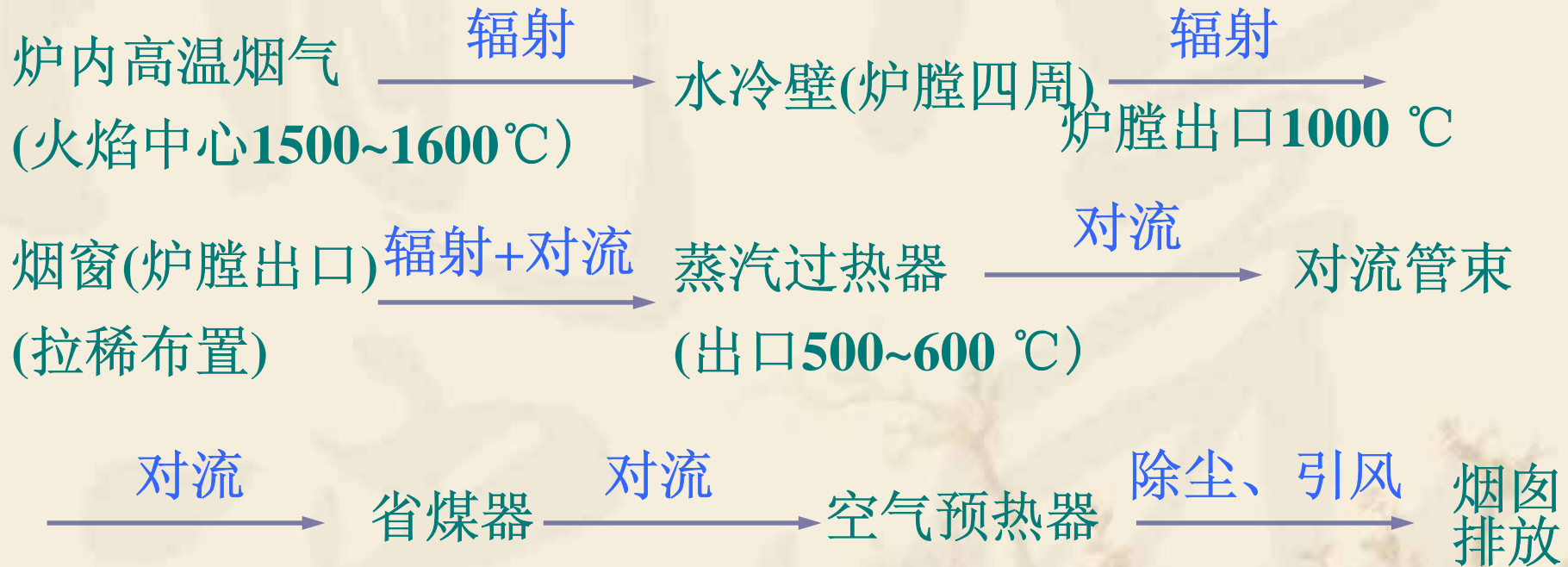


燃油/气炉，无炉渣生成



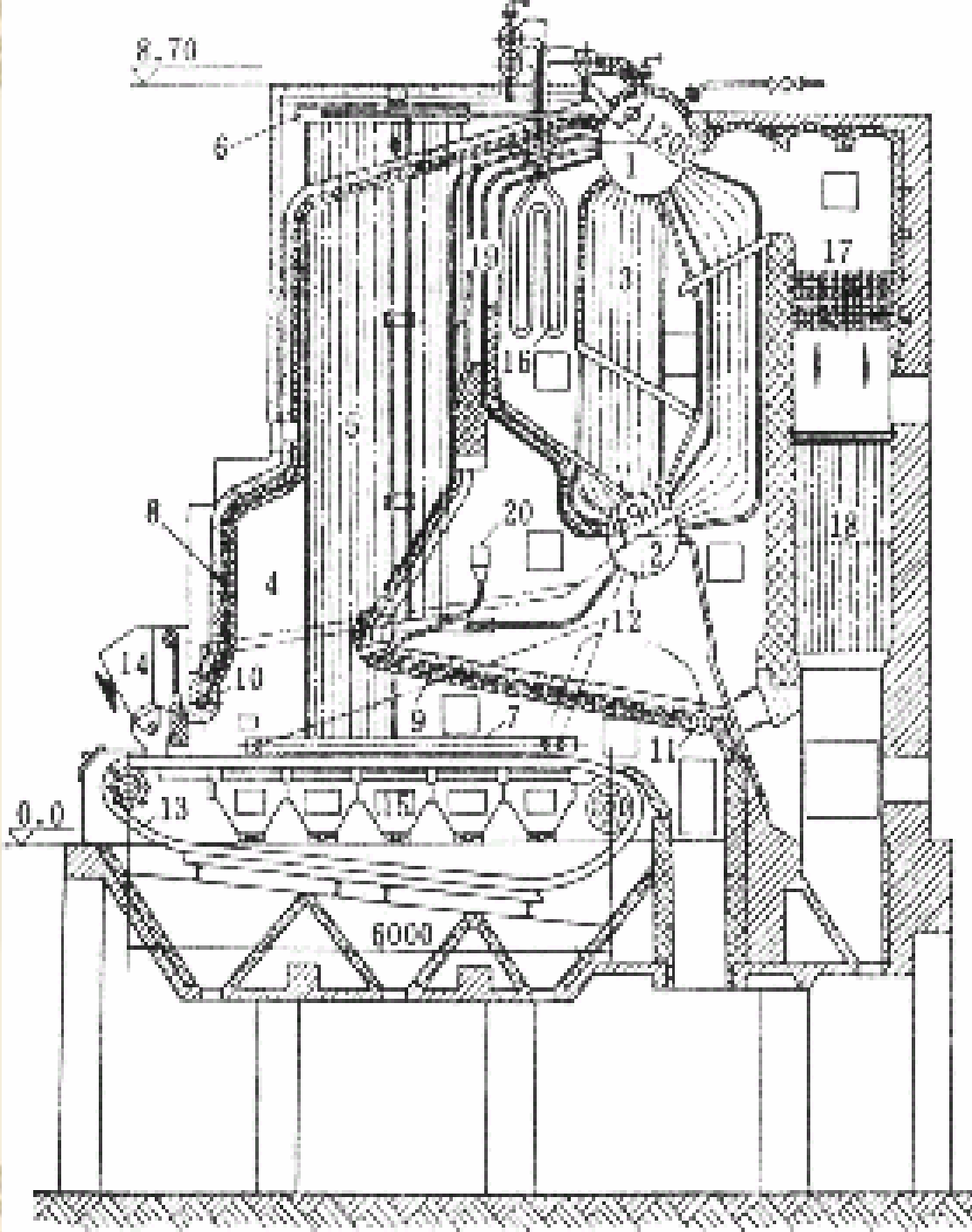
## 2.烟气向水的传热过程

### (1) 燃煤锅炉: (SHL型)



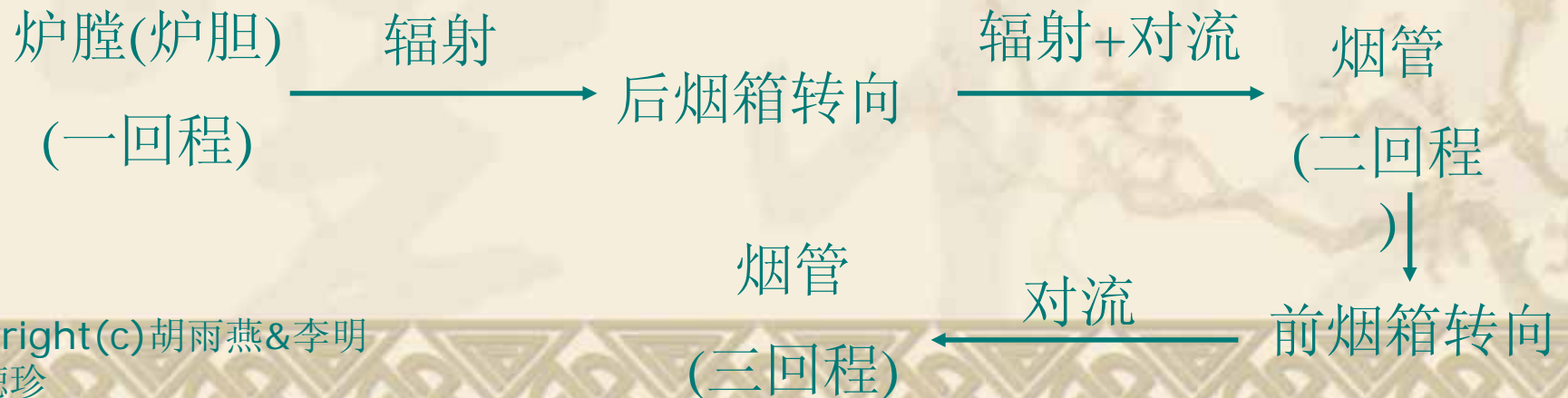
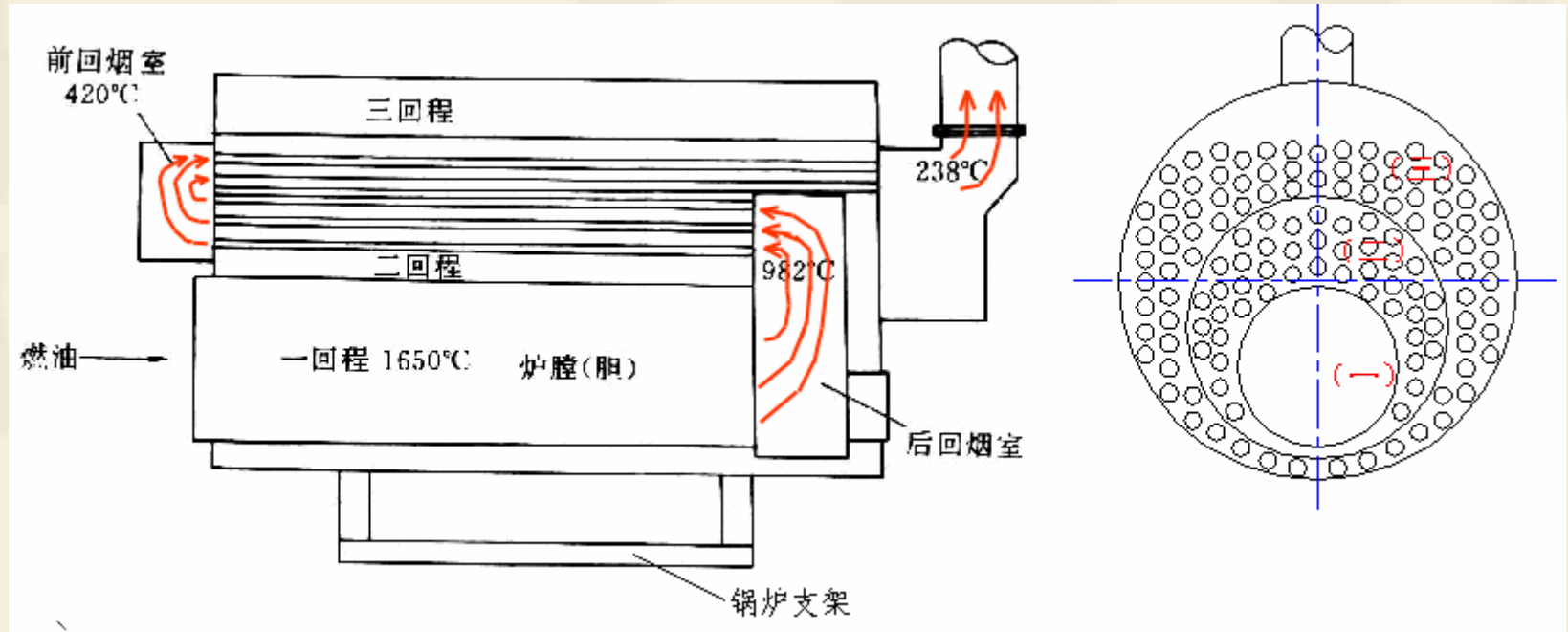
烟窗拉稀布置: (a) 防止熔融飞灰挂渣, 堵塞烟气通道

(b) 由烟窗吸收烟气热量, 保护后续受热面上不挂渣



**SHL10**  
剖面图

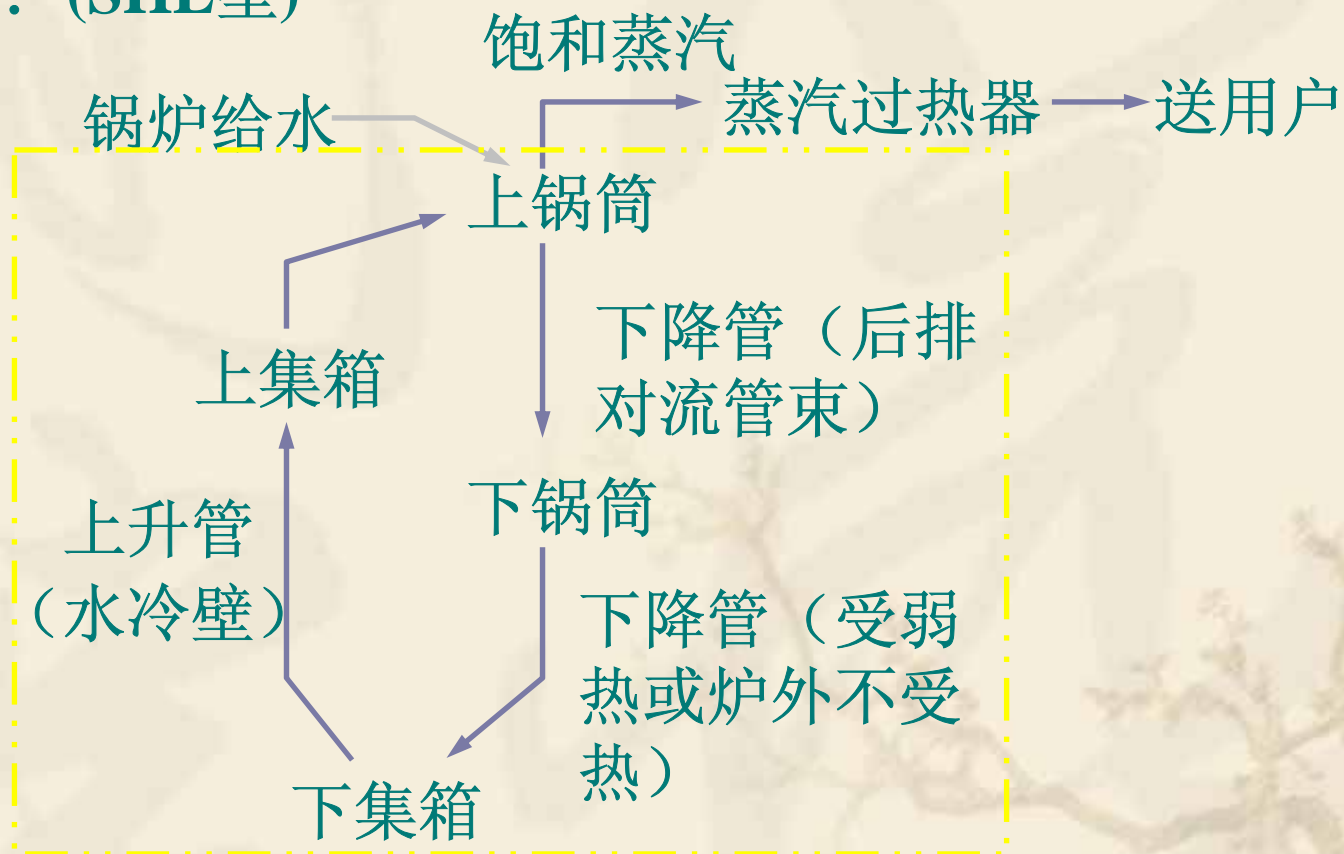
## (2)燃油/气锅炉：以WNS国产锅炉为例——烟气三回程放热



### 3.水的受热升温过程

(1) 卧式烟火管锅炉：锅内水循环

(2) 水管锅炉：(SHL型)





# 四、锅炉的基本参数

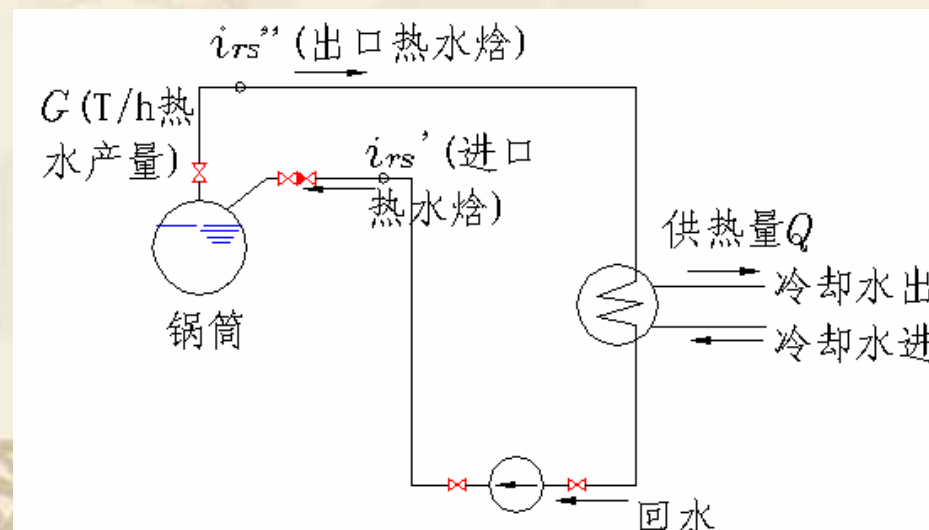
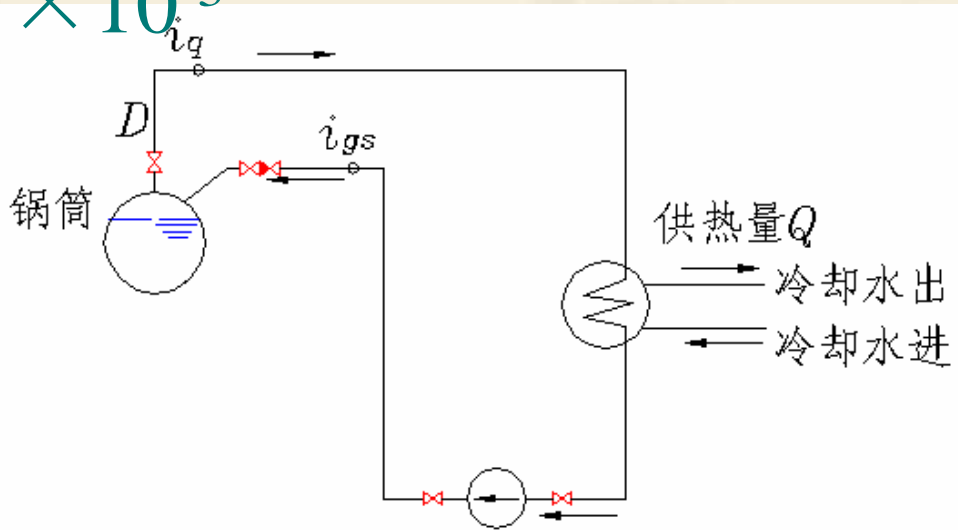
## 1.蒸发量/热功率—— D t/h, Q MW

蒸汽锅炉（供热锅炉）每hr产生的**额定**蒸发量（供热  
量）。

D~Q间关系:

1) 产生蒸汽的供热锅炉  $Q = D \times 10^3 \times (i_q - i_{gs}) / 3600 \times 10^{-3}$

2) 产生热水的供热锅炉  $Q = G \times 10^3 \times (i_{rs}'' - i_{rs}') / 3600 \times 10^{-3}$



## 2.蒸汽/热水的参数

Copyright(c)胡雨燕&李明  
&陈德珍

指锅炉出口处蒸汽的额定压力（表压）、温度。

蒸汽锅炉：生产饱和蒸汽的：P $\leftrightarrow$ t，只需标出一个参数，

常用压力

生产过热蒸汽的：P、t 均需标出

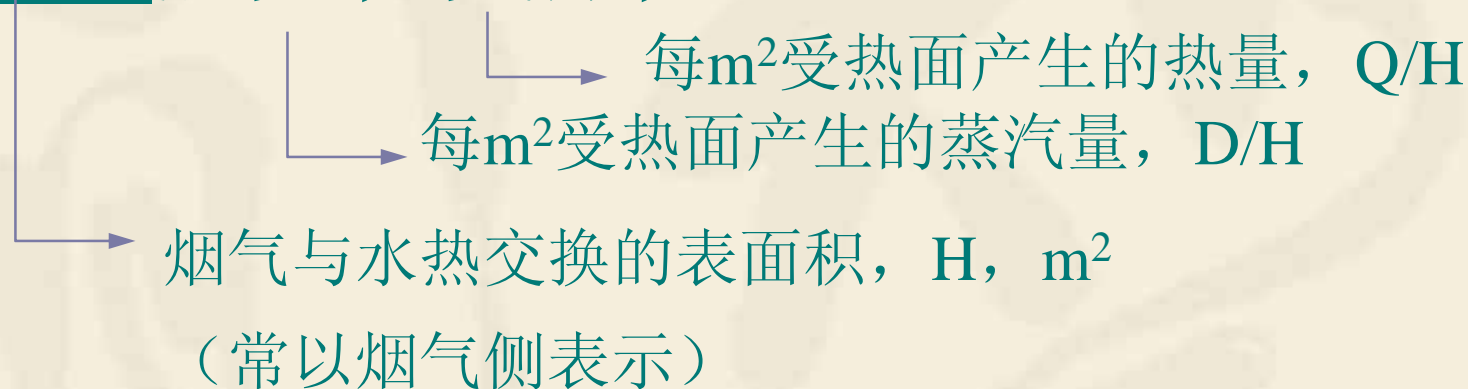
热水锅炉：指出水P、出水温度、回水温度

## 3.热效率——表明锅炉结构的合理性（运行成本）

$$\eta_{gl} = \frac{\text{同时间内被有效吸收的热量}}{\text{进入锅炉的热量}} \times 100\%$$

（锅炉类型不同、燃料不同，则效率高低不同）

#### 4. 受热面蒸发率/发热率——反映受热面传热性能



➡ 不能反映制造成本、不反映运行效率

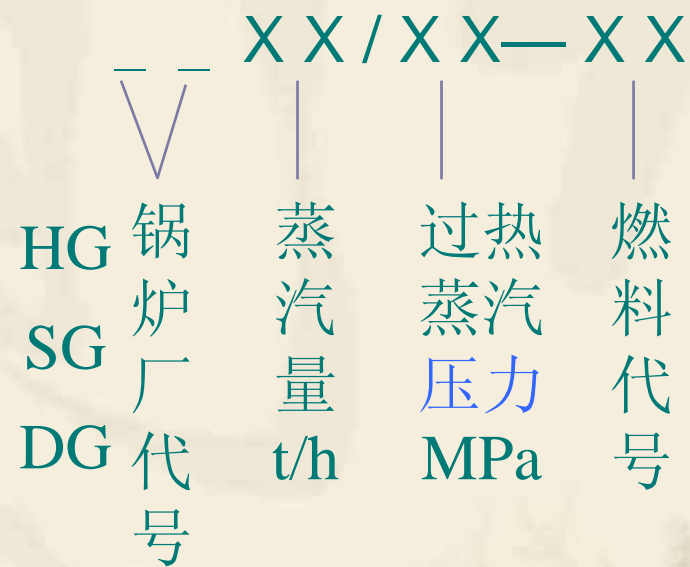
#### 5. 金属耗率, 耗电率 ➡ 可反映制造成本

——产生每T蒸汽所消耗的金属重量  $t_{\text{钢}}/t_{\text{蒸}}$   
或耗电量  $kWh/t_{\text{蒸}}$





## 2. 电站锅炉： 第一部分 第二部分 第三部分



过热蒸汽温度、再热蒸汽温度压力等只在锅炉性能中指明，型号中一般可不标出。

eg. HG670/13.7-YQ2

└─ 第二次变型  
设计

## 五、锅炉房设备

——是锅炉与保证锅炉正常、连续运行的辅助设备设备的总称。

锅炉房设备：由 锅炉本体 + 辅助设备 组成

(图)

锅+炉+附加受热面

蒸汽过热器

省煤器+空气预热器  
(尾部受热面)

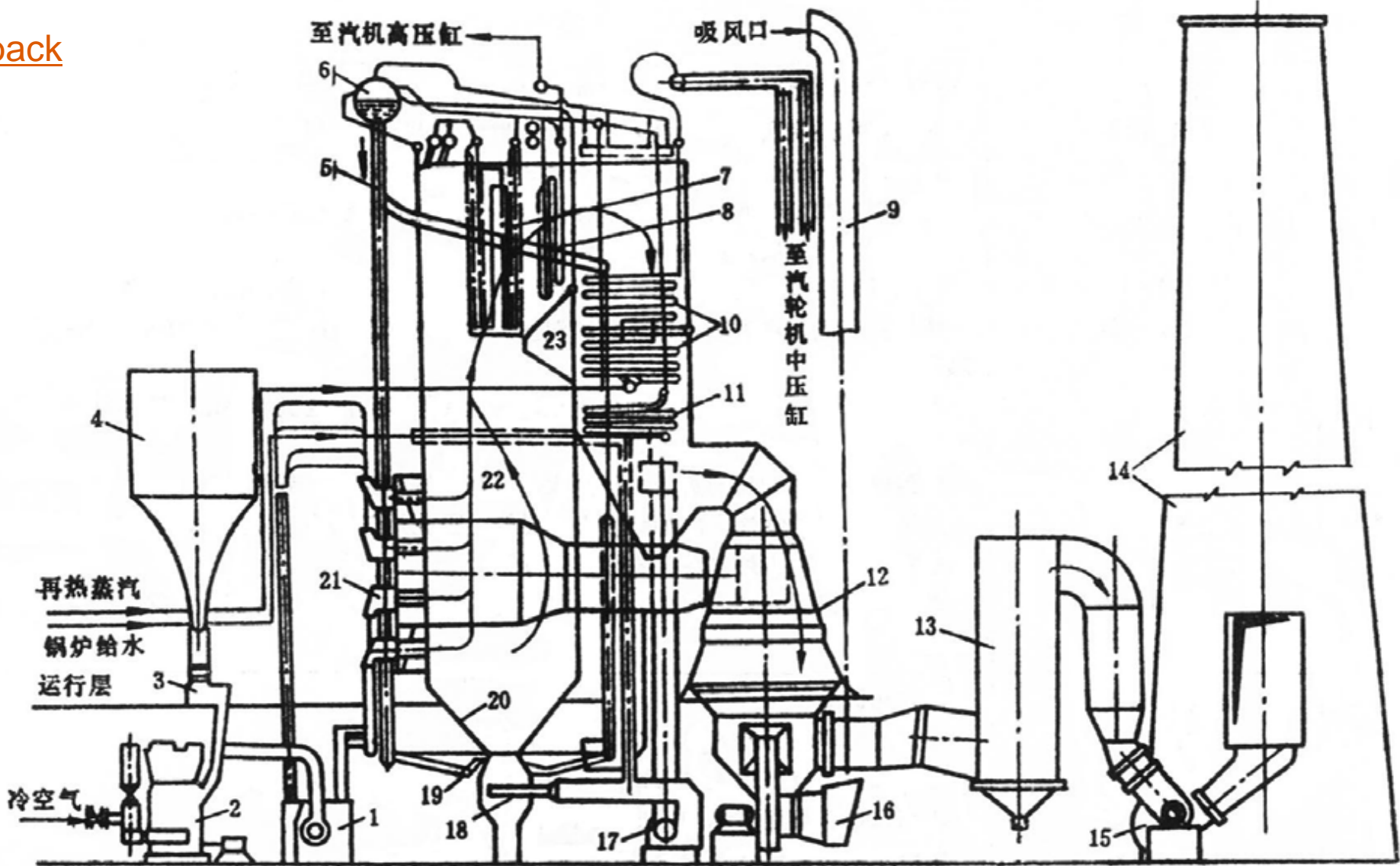
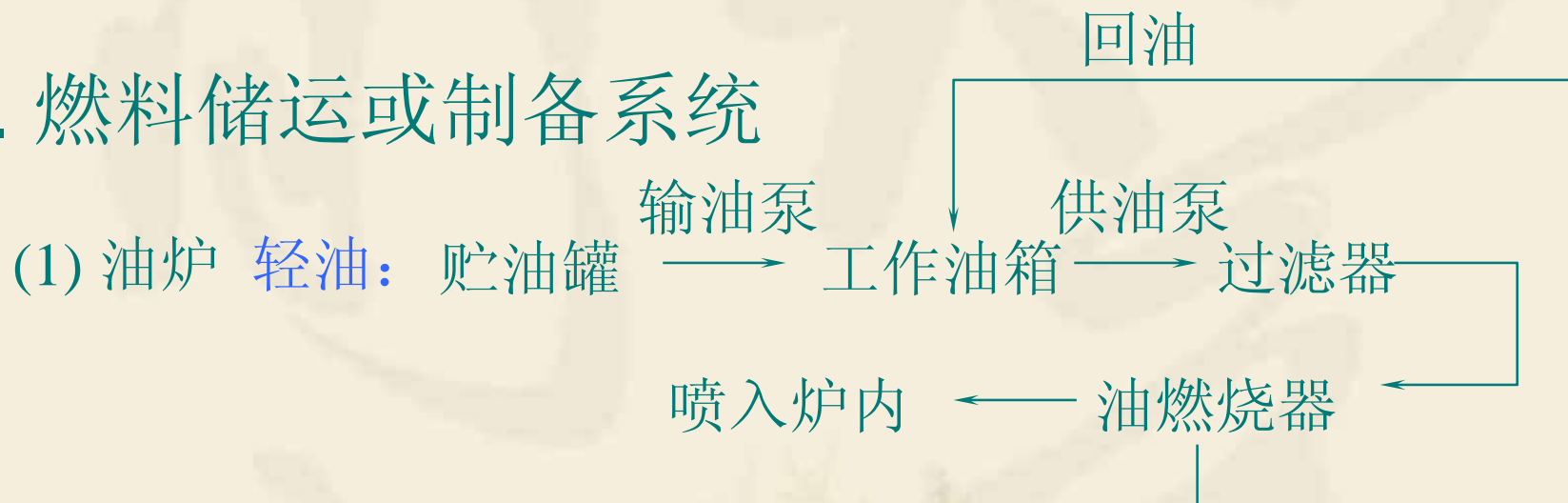


图1-4 燃用煤粉的自然循环锅炉房简图

- 1—排粉机；2—磨煤机；3—给煤机；4—煤斗；5—下降管；6—锅筒；
- 7—半辐射式过热器；8—对流过热器；9—送风机吸风管；10—再热器；11—省煤器；
- 12—空气预热器；13—除尘器；14—烟囱；15—引风机；16—送风机；17—烟气再循环风机；
- 18—灰渣斗；19—下集箱；20—水冷壁；21—燃烧器；22—炉膛；23—折烟角

# 辅助设备

## ❖ 1. 燃料储运或制备系统

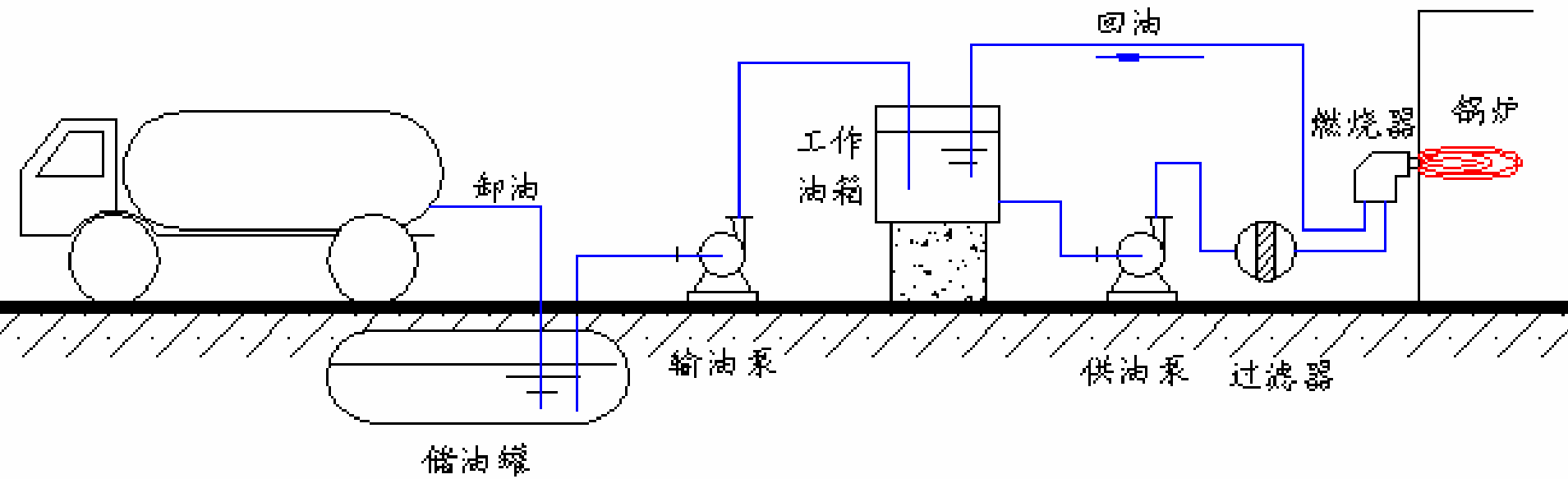


(参见下一页流程图)

重油：燃料储运系统与轻油相似，但储油罐、  
油箱、管道等均需有加热或保温装置。

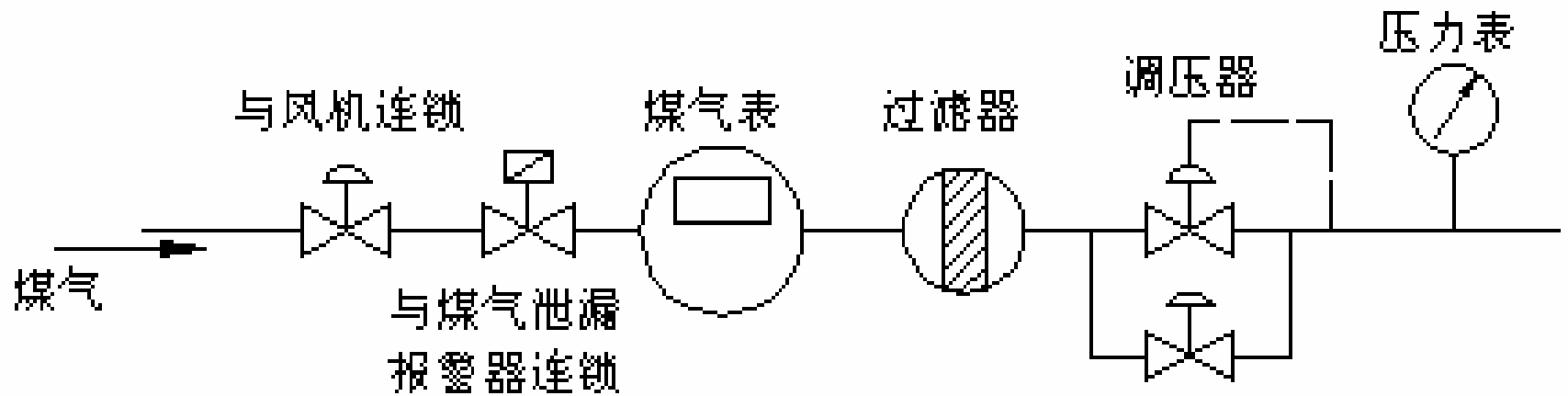


### 轻油供油流程

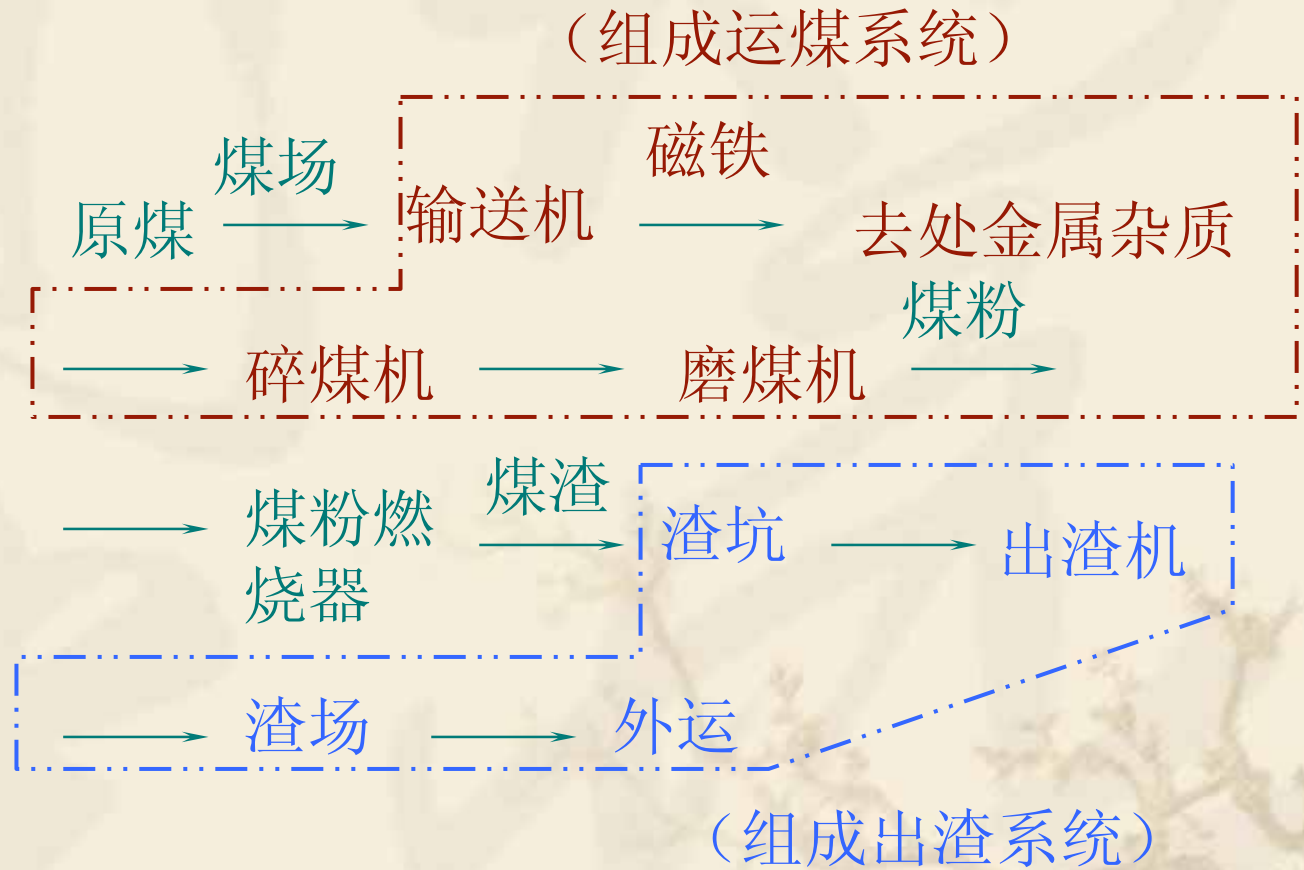


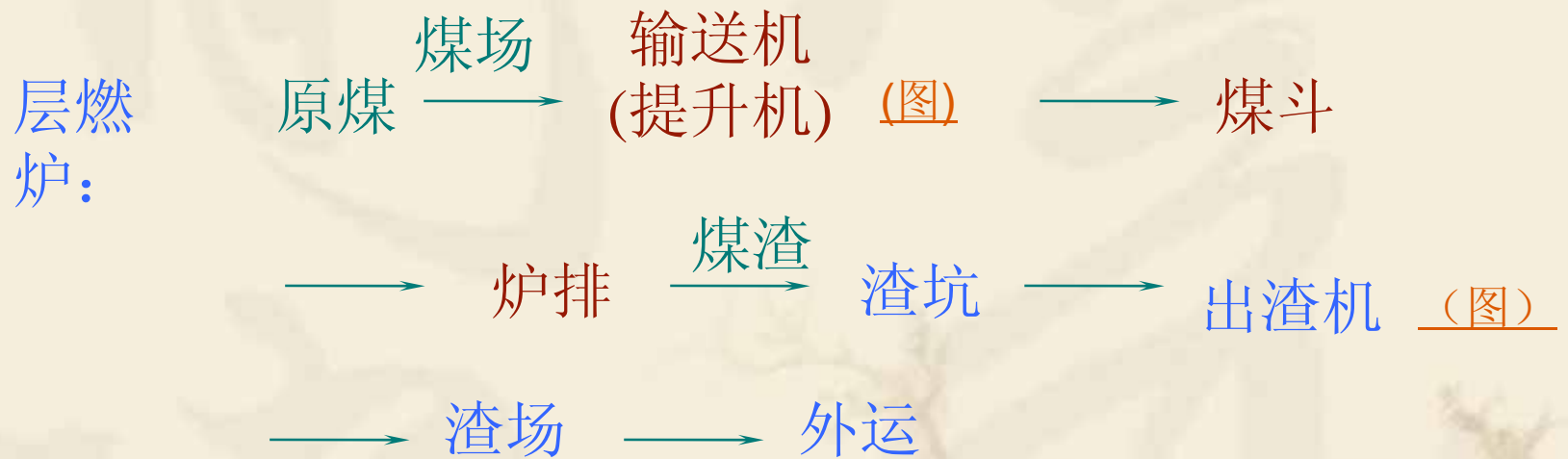
## (2)气炉：安全保护的要求高

煤气管 → 煤气表 → 过滤 → 稳压 → 气燃烧器

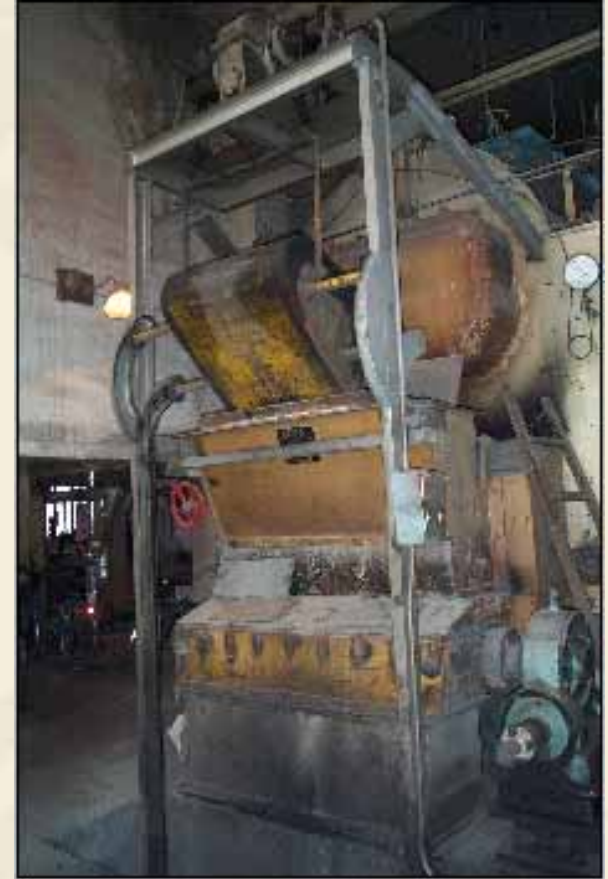


(3)煤炉 煤粉  
炉:

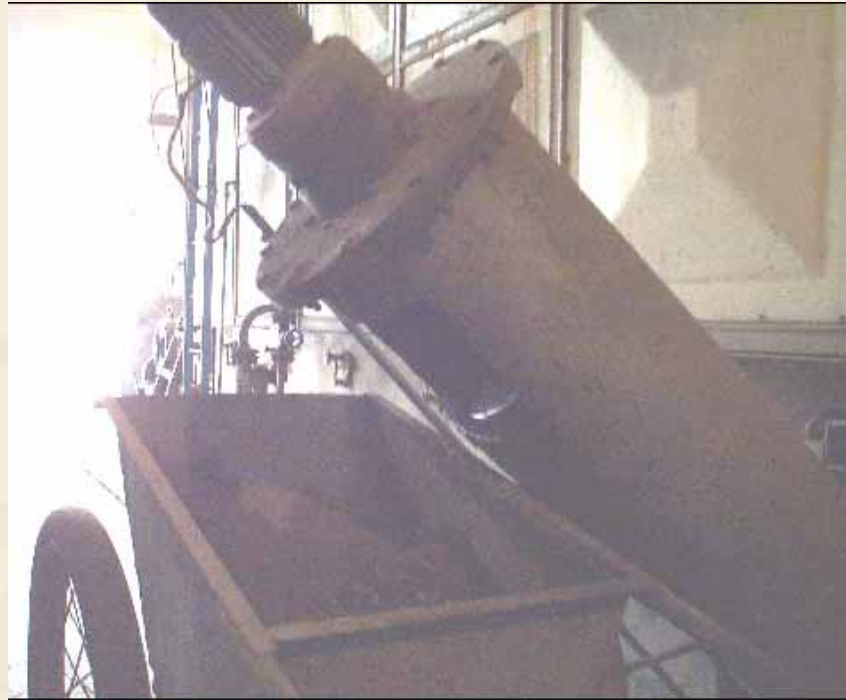






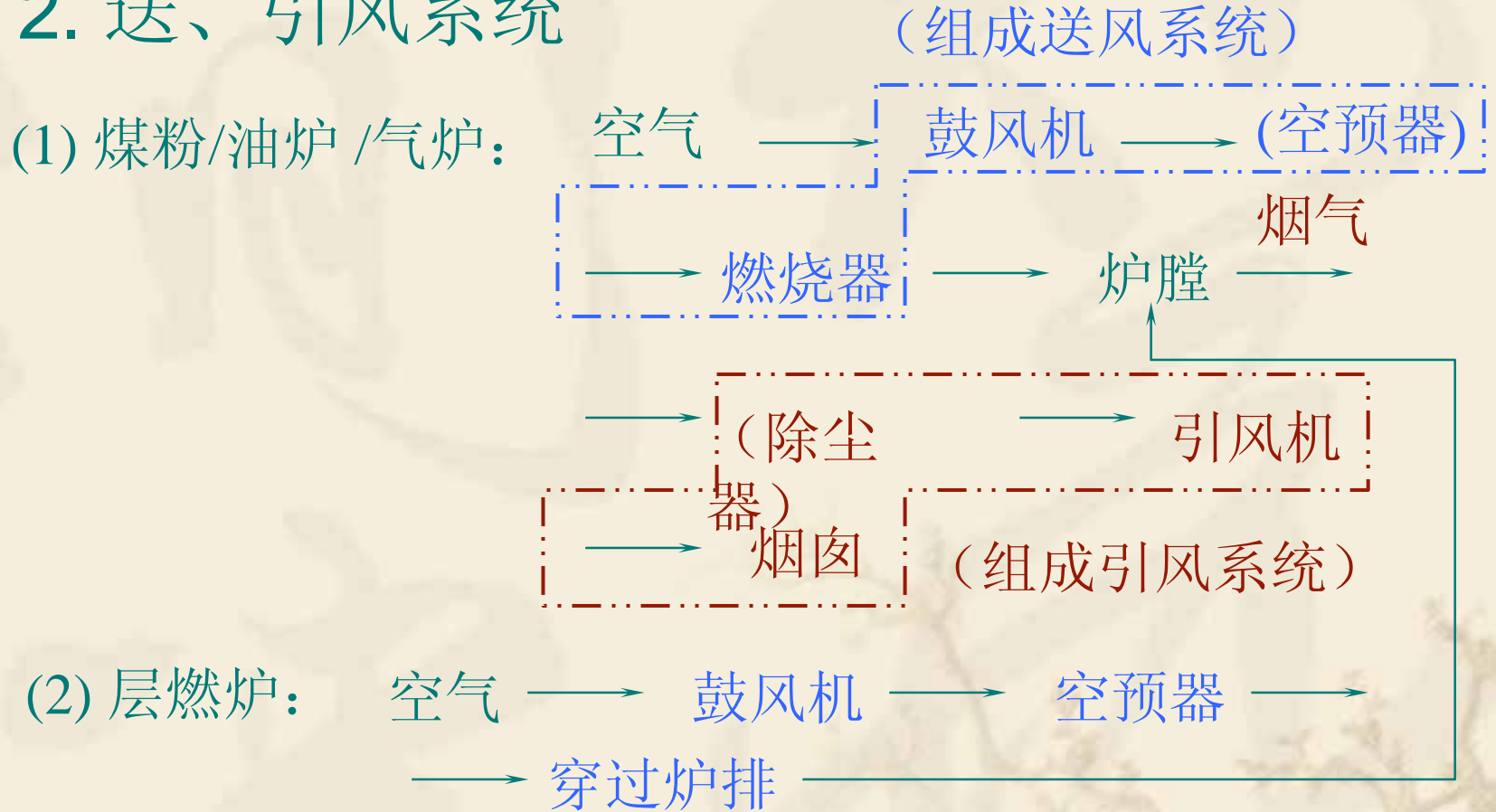


KZL4锅炉输送机(提升机)提升固体燃料



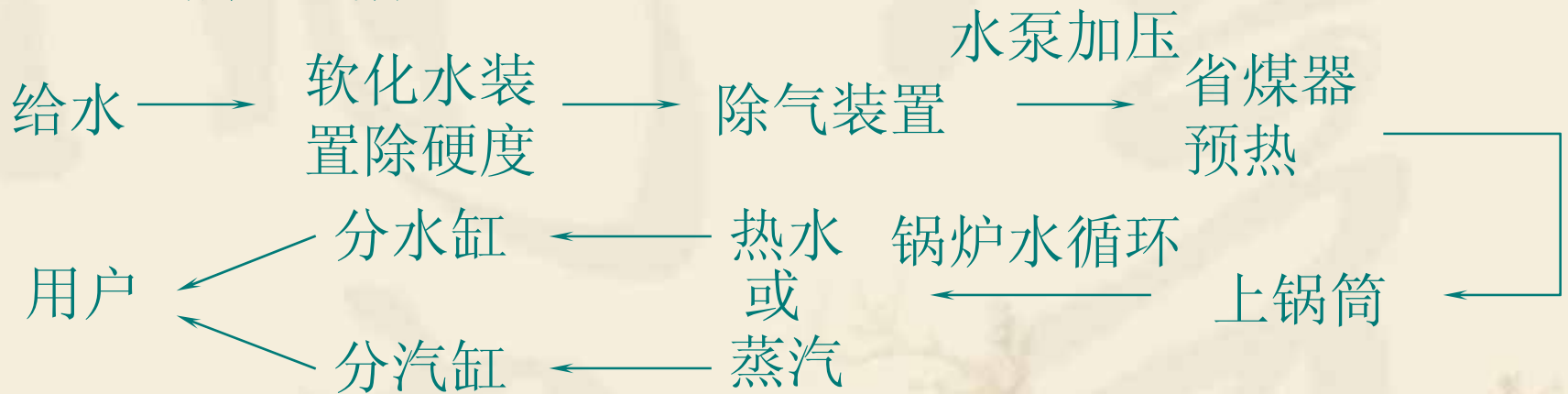
螺旋出渣机

## ❖ 2. 送、引风系统



### ❖ 3. 水、汽系统

一般，2T/h以上锅炉的给水需先水处理，去除结垢离子和腐蚀气体。





## ❖ 4. 自动控制系统

锅炉的锅内是有压甚至是高压环境，需要有良好的运行保护，因此都配备控制箱。大型电站锅炉都是全自动运行，小型燃油、燃气锅炉也都可实现全自动、无人化管理，燃煤锅炉有的还需人工操作。

基本控制如：

锅内水位高低控制和报警：

目测：玻璃水位计

自动：水位传感器，信号接至控制箱。水位过高 停给水泵；过低 开给水泵。

锅内压力监测和报警：

目测：压力表

自动：压力传感器，信号接至控制箱

压力过低 开燃烧器；压力过高 停燃烧器，向外放汽

锅内水温监测： 水温过低 开燃烧器；水温过高 停燃烧器，向外放汽  
(热水锅炉)

送、引风系统： 鼓风机、引风机启停连锁，即必须先开引风机再开鼓风机，必须先关鼓风机再关引风机。

## § 2.1 燃料的组成:

### 一、组成元素

1. 固体燃料 (1)C: 主要的可燃元素, 含量近50%  
(煤)

A. 煤中含量最多

B. 单位质量热值较高  
(33704kJ/kg)

但, 碳化程度越高, C含量越高, 燃料越不易被点燃

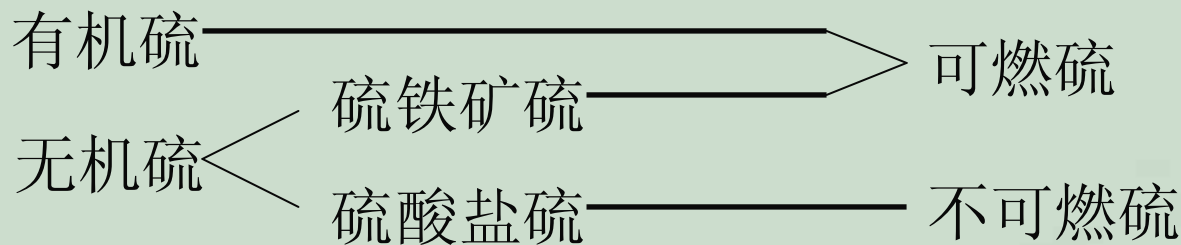
(2)H: 重要的可燃元素

单位质量热值最高 (~3.5Qc), 但要吸热

H含量越高, 燃料越易点燃。但若燃烧组织不好, 供O<sub>2</sub>不足, 则易产生黑烟, 污染环境。

(3)S: 有害的可燃元素 
 / 腐蚀  
 \ 污染

$$Q_s \approx (1/3.5)Q_c \quad 9050\text{kJ/kg}$$



(4) O,N 不可燃 (O助燃)，习惯上归在可燃分中

(5) A: 灰分，主要的杂质

(1) A↑, 则可燃分↓, 着火难。

(2) A ↑, 飞灰多, 受热面易积灰, 传热↓, 受热面易磨损

(3) 若A熔点↓ 
 / 不利燃料内部燃烬  
 \ 受热面、炉排易挂渣



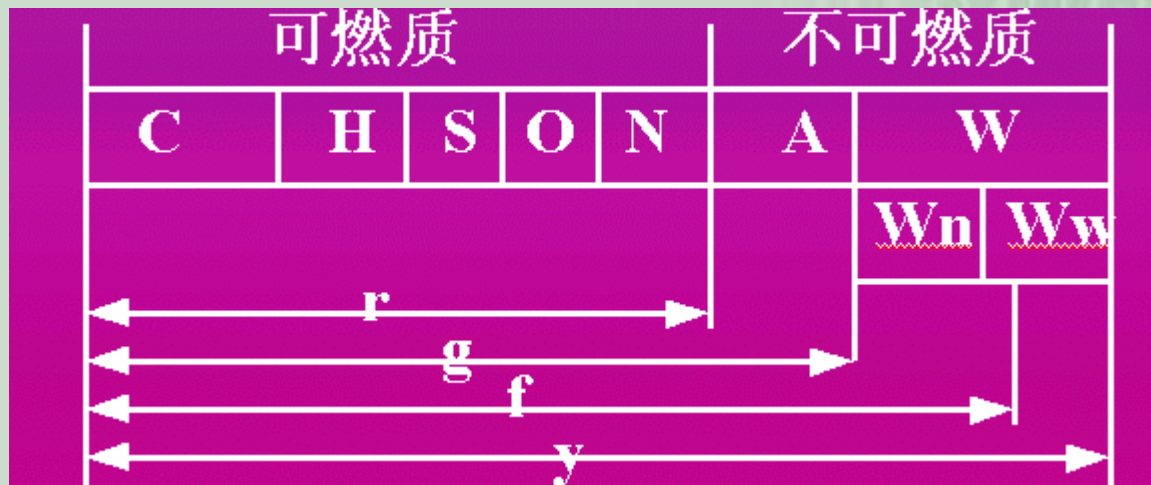
**(6)W 水分，主要的杂质。**

- (1) 须先吸热蒸发汽化
  - 着火难
  - 炉温 ↓
- (2) 烟温低 → 传热温差 ↓ → 传热量 ↓ →  $\eta_{gl}$  ↓
- (3)  $H_2O$  汽与  $SO_2$ 、 $SO_3$  形成酸性气体增加受热面腐蚀的可能。

但，层燃炉对煤含水有要求，不能过低（ $\approx 10\%$ ），以减少飞灰。

$W$ 

- $W_w$  外水分 留在表面 含量不稳定
- $W_n$  内水分 吸附于毛细孔 含量比较稳定





2. 液体燃料：主要C、H，少量S，极少O、N、A、W、机械杂质

$C > 80\%$ ,  $H > 10\%$ ,  $Q \approx 10000 \text{kcal/kg}$

主要特性：粘度、闪点、燃点、自燃点

3. 气体燃料：有天然气和各种人造煤气

为气体的混合物：

$C_nH_m$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $H_2S$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2S$ 等及少量杂质



## 二、组成的表示

液、固燃料：以**质量百分数**表示C,H,S,O,N,A,W等组分含量

气体燃料：以**容积百分数**表示各组分气体的含量

### 1.固、液燃料

(1) 应用基 以送入锅炉准备燃烧的燃料为基准，得到的各元素质量含量数值。上标“y”。（锅炉的传热、流动计算用）

$$C^y + H^y + S^y + O^y + N^y + A^y + W^y = 100\%$$

考虑W含量的不稳定性：

(2) 分析基 以实验室条件下（20℃，60%相对湿度）、自然风干后的燃料为基准，上标“f”。去除大部分W<sub>w</sub>（实验室用）

$$C^f + H^f + S^f + O^f + N^f + A^f + W^f = 100\%$$

风干掉的水分记为：W<sub>f</sub><sup>y</sup>（用应用基）

(3) 干燥基 以烘干后的燃料为基准，上标“g”。去除全部水分（煤炭公司用）

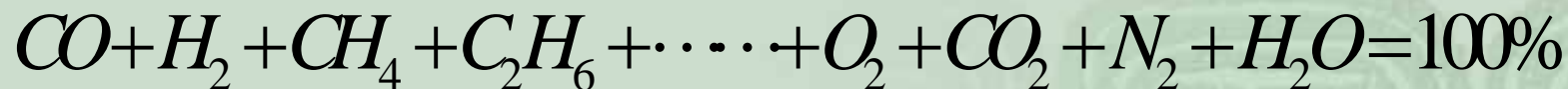
$$C^g + H^g + S^g + O^g + N^g + A^g = 100\%$$

(4) **可燃基** 以去除全部杂质 (W, A) 后的燃料为基准, 上标“r”。(煤矿煤质资料)

$$C^r + H^r + S^r + O^r + N^r = 100\%$$

## 2. 气体燃料

以分子式表示容积组分。



## 三、基间换算

## \* 固、液燃料

同一种燃料当用不同的“基”表示时，数值上应有明确的对应关系。

eg. 知某燃料的分析基 $C^f$ 、 $W^f$ 和应用基 $W^y$ 、 $W_f^y$

求 $C^y=?$

解：[法一] 直接根据“基”的定义

$$C^f = \frac{G_c}{G^f} \times 100\% = \frac{G_c / G^y \times 100\%}{(G^y - G_{\text{风干水}}) / G^y \times 100\%} \times 100\% = \frac{100}{100 - W_f^y} C^y$$

$$\longrightarrow K_{f \rightarrow y} = \frac{100 - W_f^y}{100}$$

$$C^y = K_{f \rightarrow y} C^f$$

## [法二] 间接求

$$C^g = \frac{G_c}{G^g} \times 100\% = \frac{G_c / G^f}{(G^f - G_w^f) / G^f} \times 100\% = \frac{100}{100 - W^f} C^f$$

$$C^g = \frac{100}{100 - W^y} C^y$$

$$\longrightarrow K_{f \rightarrow y} = \frac{100 - W^y}{100 - W^f} \quad C^y = K_{f \rightarrow y} C^f$$

$$\longrightarrow \frac{100 - W_f^y}{100} = \frac{100 - W^y}{100 - W^f}$$



依此：全水分

$$W^y = W^f K_{f \rightarrow y} + W_f^y$$

换算系数见表2-1。

#### 四、燃料组成分析

液体燃料：组成成分主要为烃类物质，元素C、H、S、O、N、W、A，C $\approx$ 85~88，H $\approx$ 10~13%，少量O、S、N

气体燃料：混合气体

固体燃料：分析方法简单、成熟。

# 1.煤、油的燃烧过程

阶 段	析出物	剩余物
(1)预热干燥	→>100℃, W蒸发、汽化	CHSON A
(2)V(挥发份)析出	→~180℃, 气态物质析出 并燃烧放热 挥发份V=(H、S、O、N、部分C)	大部分C+A (固定碳+A)
(3)焦炭燃烧	V析出并燃烧燃料升温, 固定碳燃烧	A
(4)灰渣形成		A

A	C	H	S	O	N	W	
	固定碳	挥发份				W <sub>n</sub>	W <sub>w</sub>
焦 炭							

## 2.燃料的工业分析

**工业分析**——测定燃料的固定碳、挥发份、**W**、**A**的含量，及发热量和灰熔点，以判断燃料燃烧特性的分析方法。是锅炉结构设计上需要的数据。

( **元素分析** ——测定燃料元素组分及含量的分析方法。是锅炉燃烧计算、传热计算、烟气流动计算的基础数据。 )

(1)**V**——实验室测定时，燃料放在有盖坩埚中**920**°C隔绝明火燃烧**7min**，减少的量扣除**W**后之值。

(2)**A**——实验室测定时，燃料放在灰皿内~**815**°C炉中灼烧**40min**，剩余物质的量。

(3)**W**——分析基燃料在**105~110**°C烘箱中干燥**1hr**，减少的量为**W<sup>f</sup>**。

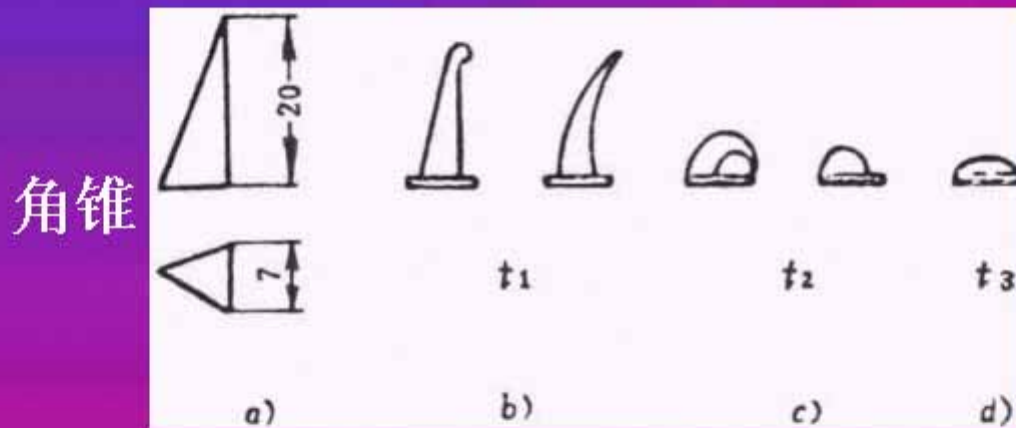
(4)固定碳 =**100-(V+A+W)**



(5)灰熔点——指灰的熔化温度。（决定炉膛结构，eg拉稀水冷壁）但灰只有熔化温度范围。

角锥法测定：变形温度 $t_1$ ，软化温度 $t_2$ ，流动温度 $t_3$

以此衡量灰熔融性



→ 炉膛受热面积应使炉膛出口烟温  $\leq t_2 - 100\text{ }^\circ\text{C}$

$t_2 > 1425\text{ }^\circ\text{C}$  难熔性灰  $1200 < t_2 < 1425\text{ }^\circ\text{C}$  可熔性灰

$1000 < t_2 < 1200\text{ }^\circ\text{C}$  易熔性灰



(6)发热量——单位质量液、固燃料/单位容积气体燃料，常压下完全燃烧时放出的热量，kJ/kg kJ/Nm<sup>3</sup>

按水分在烟气中的存在状态：

A.高位发热量 $Q_{gw}$ ——水分以液体形式存在在燃烧产物中时燃料的发热量。

B.低位发热量 $Q_{dw}$ ——水分以蒸汽形式存在在烟气中时燃料的发热量。

因此，高位热量间直接有：

$$Q_{gw}^g = \frac{100}{100 - W^y} Q_{gw}^y$$

$$Q_{gw}^y = \frac{100 - W_f^y}{100} Q_{gw}^f$$



但对  $Q_{dw}$

因  $Q_{gw} = Q_{dw} + \Delta$  水的汽化热

$$y: \text{水量} \frac{W^y}{100} + 9 \frac{H^y}{100}$$

$$\text{汽化热} \Delta = 2500(\text{kJ} / \text{kg}) * \left( \frac{W^y}{100} + 9 \frac{H^y}{100} \right) = 25(W^y + 9H^y)$$

$$f: \text{水量} \frac{W^f}{100} + 9 \frac{H^f}{100}$$

$$\text{汽化热} \Delta = 2500(\text{kJ} / \text{kg}) * \left( \frac{W^f}{100} + 9 \frac{H^f}{100} \right) = 25(W^f + 9H^f)$$

$$g、r: \text{水量} 9 \frac{H}{100}$$

$$\text{汽化热} \Delta = 2500(\text{kJ} / \text{kg}) * \left( 9 \frac{H}{100} \right) = 25(9H)$$

### C.不同基间热值换算

注意：只有高位热值间的换算才可以直接利用元素含量间的换算系数。

$$Q_{dw}^y + 226H^y + 25W^y = (Q_{dw}^f + 226H^f + 25W^f) \frac{100 - W^y}{100 - W^f}$$

$$Q_{dw}^y = (Q_{dw}^f + 25W^f) \frac{100 - W^y}{100 - W^f} - 25W^y$$

- 各种基低位发热值之间的换算关系见p15表2—2

- 新国标表示

$$Q_{dw}^y \rightarrow Q_{net,ar}$$

$$Q_{gw}^y \rightarrow Q_{gr,ar}$$



# D. 发热量的实验室测定——氧弹测热计

恒温式和绝热式

原理：在保证燃料完全燃烧下，通过测定周围水浴的吸热量求得燃料的发热量。

测定：**氧弹内**——高压、充足氧气  
(2.7~3.4MPa)

待测燃料试样

氧弹内加少量水

点火——以电极通电点火

现象：得到的热量中含硫酸、硝酸的生成热和溶解热，且水分以液体状态存在。

测得：

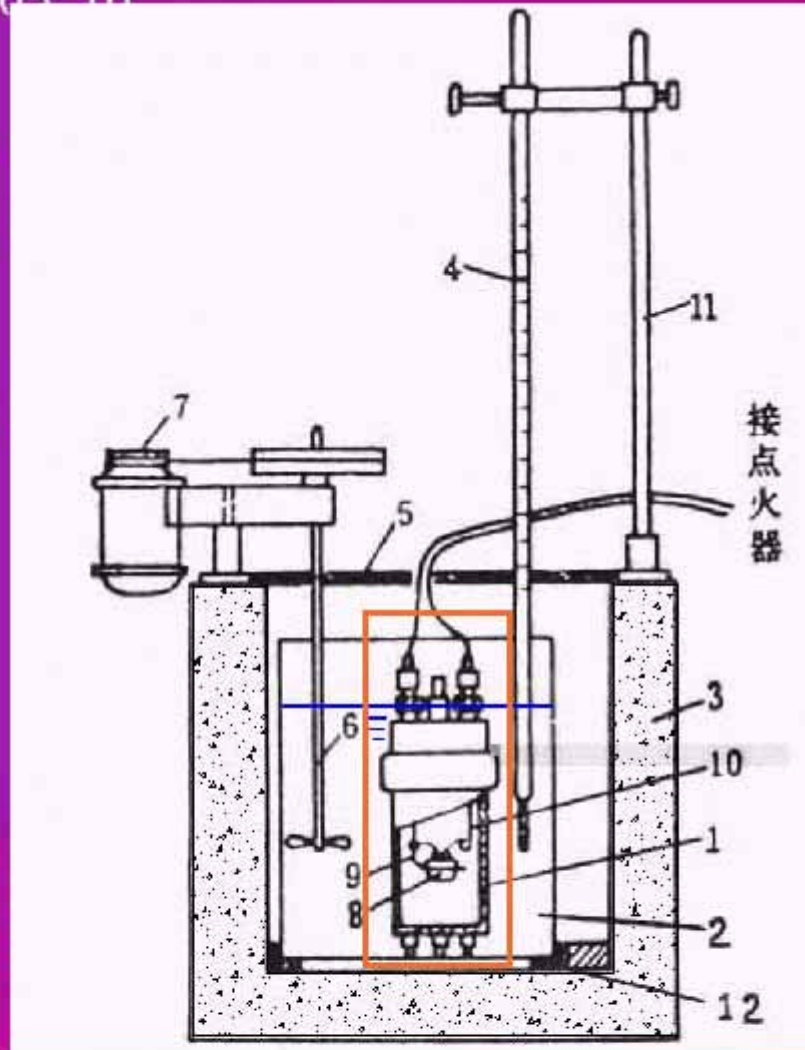
$$Q_{dt}^f$$

$$Q_{gw}^f + Q_{\text{硫酸生成热}} + Q_{\text{硝酸生成热}}$$

$$94.2S^f$$

$$\alpha Q_{dt}^f$$

( $\alpha$  取决于燃料种类)



## E.发热量的经验计算公式

根据元素含量进行拟合，

经验公式：（2-11）— 国际通用，对我国煤种误差较大，  
800~1200kJ/kg；设计手册上，式中的硫为可燃基组分

（2-12）— 复杂，需查表

$$Q^y_{gw} = 335(327)C^r + 1298(1256)H^r + 63S^r -$$

$$105O^r - 21(A^g - 10)$$

（参见设计手册）

对我国煤种较适合，误差不大于600 kJ/kg





# 液体燃料

重油：是石油提炼汽油、煤油和柴油后的剩余物；

轻油：一般使用柴油

渣油：是重油进一步提炼后的剩余物



# 燃油的主要使用特性

- 1. 发热量
- 2. 粘度—表示该种油品输送和雾化的难易程度。分类：动力粘度、运动粘度、恩氏粘度
- 3. 闪点、燃点及自燃点—反映油品着火性和安全的指标
- 4. 比热容—反映加热油品所需热量
- 5. 凝点—反映能否发生流动
- 设计用代表性燃油p23 表2—7



■ 根据油的密度估算：

$$Q_{dw}^y = 46415.6 + 3167.7 \rho - 8790 \rho^2$$

$$Q_{gw}^y = 51900 - 8790 \rho^2$$

燃油在15 °C时的密度  
(kg/L)



- 又称绝对粘度
- 两相邻液体层间，垂直于液体流动方向的速度梯度为1单位时的该液体的切应力。温度 $t^{\circ}\text{C}$ 时的动力粘度— $\eta_t$ ，单位 $\text{Pa} \cdot \text{S}$ ，当内摩擦力等于 $10^{-4}$ 时，粘度为 $1 \text{ Pa} \cdot \text{S}$



[back](#)

- 为在一恒定温度下，一定体积的液体在重力下流过一标定好的玻璃毛细管粘度计的时间与毛细管常数的乘积值。  $v_t$ ,  $m^2/s$
- 动力粘度与运动粘度的关系

$$\eta_t = v_t \rho$$

[back](#)

- 又称条件粘度
- 200ml试验重油在温度为 $t$  °C时，从恩氏粘度计中流出的时间  $\tau_t$  与200ml温度为20°C的蒸馏水从同一粘度计中流出的时间  $\tau_{20}$  之比，被称为该油在 $t$  °C时的恩氏粘度。单位：条件度（° E）
- 我国所颁布的燃料油油品牌号20、60、100、200等数字相当于该油品在油温50°C时的恩氏粘度。





- 闪点：燃油温度升高到某一值时，从油面上蒸发到空气中的油气和空气的混合物在与明火接触会发生闪光，该油温称为闪点。测试：开口杯法和闭口杯法；一般开口杯法闪点高于闭口杯法闪点**15~25 °C**
- 燃点：燃油温度升高到某一值时，从油面上蒸发到空气中的油气和空气的混合物在与明火接触时能燃烧（持续时间不少于**5s**），该油温称为燃点。高于闪点。
- 自燃点（又称为着火点）：油品在缓慢氧化下开始自行着火燃烧的温度。
- 重油：**80~130 °C**
- 燃点>闪点**10~30°C**
- 自燃点：**500~600 °C**
- 油的预热温度必须低于闪点



- $\approx 2.1 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$
- $C_t = 1.73 + 0.0025t$



- 一即油品在试管内倾斜 $45^{\circ}$ ，经过 $5\sim 10s$ 尚不流动时的最高温度。
- 密度越大，含蜡量越高则凝点越高
- 油的预热温度要高于凝点。



# 气体燃料

天然气

人工燃气：{ 液化石油气  
发生炉煤气  
焦炉煤气  
高炉煤气

# 气体燃料的主要使用特性

- 发热量—由燃气组分和单一气体的发热量计算

$$Q=Q_1 \phi_1 + Q_2 \phi_2 + \dots + Q_n \phi_n$$

可燃组分的体  
积分数

- 热容—计算气体的显热量
- 粘度—摩擦损失
- 含湿量—影响热容
- 爆炸极限—安全性→浓度检测仪表→自控





- 比热容(c)和体积热容( $c_v$ )

- $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
- $\text{kJ}/(\text{Nm}^3\cdot\text{K})$

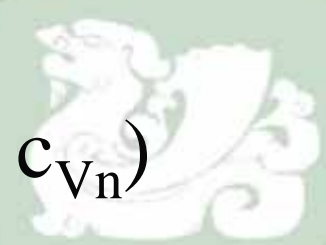
- 定压热容和定容热容

- $c_v$
- $c_p$

- 混合气体

- $c_v = 0.01 \left( \phi_1 c_{v1} + \phi_2 c_{v2} + \dots + \phi_n c_{vn} \right)$

各组分的体  
积分数



- 动力粘度和运动粘度
- 与压力和温度有关； $p \leq 1.0\text{MPa}$ ，除水蒸气外，压力影响不计。
- 与温度的关系

$$\eta_t = \eta_0 \frac{273 + C}{T + C} \left( \frac{T}{273} \right)^{3/2}$$

气体的热力学温度 (K)
↑

标态下的气体粘度, Pa·s
↓
实验系数 (查相关图表)

(查相关数据表)



- 在一定温度和压力下，燃气中最大含湿量  $d$ ，称为该燃气饱和含湿量。
- $\text{g/m}^3$ ，  $\text{g/kg}$



[back](#)

## 某些可燃气体与空气混合的爆炸极限

气体	甲烷	乙烷	乙烯	丙烷	丙烯
爆炸上限%	15.0	13.0	34.0	9.5	11.7
爆炸下限%	5.0	2.9	2.7	2.1	2.0
气体	正丁烷	异丁烷	丁烯-1	顺丁烯-2	反丁烯-2
爆炸上限%	8.5	8.5	10.0	9.7	9.7
爆炸下限%	1.5	1.8	1.6	1.8	1.8
气体	异丁烯	正戊烷	CO	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
爆炸上限%	9.7	8.3	74.2	75.9	45.5
爆炸下限%	1.8	1.4	12.5	4.0	4.3

$$L = \frac{100}{\frac{\varphi_1}{L_1} + \frac{\varphi_2}{L_2} + \dots + \frac{\varphi_n}{L_n}}$$

- 含有不可燃气体的混合气体爆炸极限：先将某一不燃气体成分与某一可燃气体成分组合在一起视为混合气体中的一种成分，其体积分数为二者之和

$$L = \frac{100}{\frac{\varphi'_1}{L'_1} + \frac{\varphi'_2}{L'_2} + \dots + \frac{\varphi'_n}{L'_n} + \frac{\varphi_1}{L_1} + \frac{\varphi_2}{L_2} + \dots + \frac{\varphi_n}{L_n}}$$

某一可燃气体成分与某一不燃气体成分组成的混合组分在混合气体中的体积分数

在该混合比时爆炸极限体积分数（查相关图）

未与不燃气体组合的可燃气体成分在混合气体中的体积分数

在该混合比时，爆炸极限体积分数，见上表



- 含有氧气的混合气体：认为混入空气，按氧含量折算成空气量，重新调整混合气体中各组分的体积分数，用只含可燃气体的混合气体爆炸极限的公式计算。



## § 2.2 燃料的燃烧计算

### 计算内容:

助燃物量 (空气量) ==> 选择鼓风机

燃烧产物量 (烟气量) ==> 选择引风机、烟道计算、烟囱计算

空气焓、烟气焓 ==> 传热计算

### 计算前提:

(1)  $1\text{kg}/1\text{Nm}^3$  燃料中的可燃成分完全燃烧

(2) 干空气仅由  $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$  组成, 且容积比为 79: 21

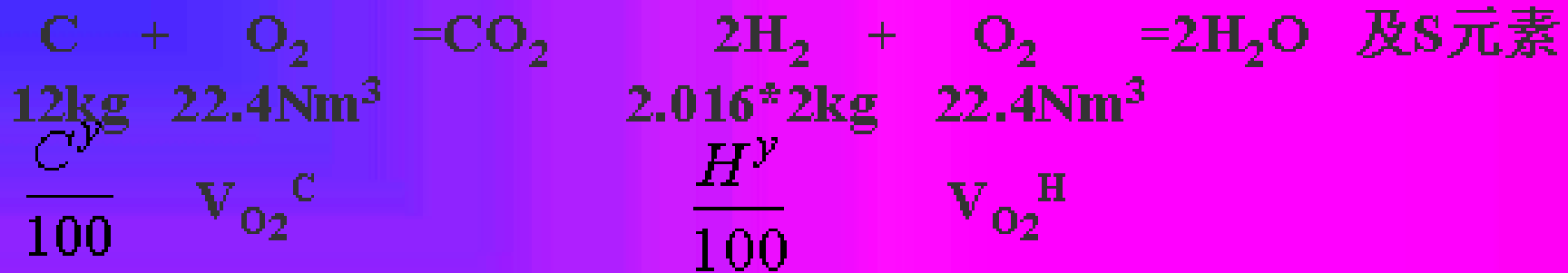
(3) 视空气、烟气为理想气体,  $1\text{kmol} \rightleftharpoons 22.4\text{Nm}^3$

♣ 固液燃料: 已知质量组成

### 一、燃烧所需空气量

1. 理论空气量  $V_k^0$  ----  $1\text{kg}$  应用基燃料完全彻底燃烧又无过剩  $\text{O}_2$  存在时提供的空气量,  $\text{Nm}^3/\text{kg}$  燃料。

以**质量组成**按化学反应式:



$$\text{O}_2 \text{ 消耗量 } V_{\text{O}_2}^{\text{C}} = \frac{22.4}{12} \frac{C^y}{100} \quad \text{Nm}^3/\text{kg燃料}$$

$$V_{\text{O}_2}^{\text{S}} = \frac{22.4}{32} \frac{S^y}{100} \quad \text{Nm}^3/\text{kg燃料}$$

$$V_{\text{O}_2}^{\text{H}} = \frac{22.4}{2 \times 2.016} \frac{H^y}{100} \quad \text{Nm}^3/\text{kg燃料}$$

$$\text{燃料自身提供 } V_{\text{O}_2}^0 = \frac{22.4}{32} \frac{O^y}{100} \quad \text{Nm}^3/\text{kg燃料}$$

$$\text{需空气中的O}_2: V_{\text{O}_2}^{\text{k}} = V_{\text{O}_2}^{\text{C}} + V_{\text{O}_2}^{\text{S}} + V_{\text{O}_2}^{\text{H}} - V_{\text{O}_2}^0 \quad \text{Nm}^3/\text{kg燃料}$$

$$\text{理论干空气量 } V_k^0 = \frac{V_{\text{O}_2}^{\text{k}}}{0.21} \quad \text{Nm}^3\text{干}/\text{kg燃料}$$

因实际空气中含有水：10g/kg干（我国平均气象数据）

$$=0.0161\text{Nm}^3/\text{Nm}^3\text{干空气}=1.61\% \text{（容积）}$$

则理论湿空气量 =  $V_k^0 + 1.61\% V_k^0 \approx V_k^0$

⇒ 即近似为干空气量数值

当未知燃料元素组分、只知 $Q_{dw}^y$ 时有经验公式估算 $V_k^0$ 。教材p26公式21—26

## 2. 实际空气量 $V_k$

因锅炉燃烧方式的限制、燃烧设备完善程度的限制，实际空气量总是 $> V_k^0$ 。

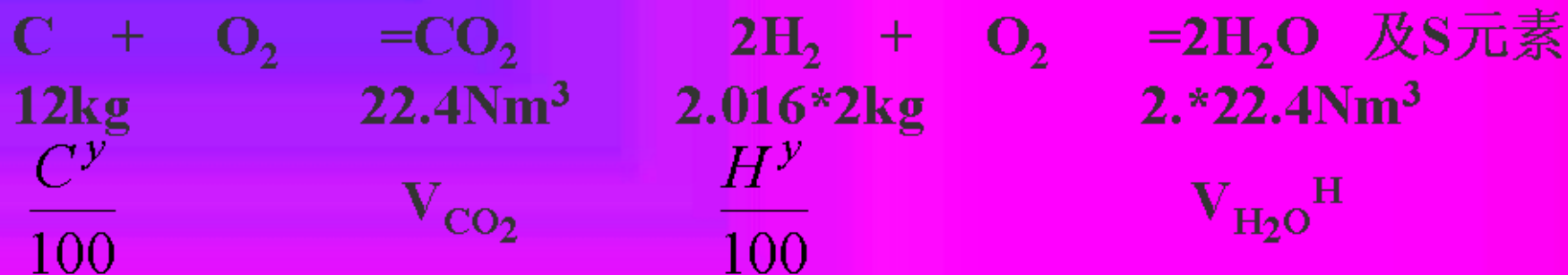
过量空气系数  $\alpha = \frac{V_k}{V_k^0}$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{层燃炉：} 1.5 \sim 1.6 \\ \text{煤粉炉：} \sim 1.2 \\ \text{油、气炉：} 1.05 \sim 1.2 \end{array} \right.$

$\alpha$  — 反映锅炉燃烧结构的合理性。对同一锅炉， $\alpha$  有最佳值

$\left\{ \begin{array}{l} \alpha \text{ 偏大} \rightarrow \text{鼓风量大} \rightarrow \text{烟气量} \uparrow \rightarrow \text{烟温} \downarrow \rightarrow \text{传热} \downarrow \rightarrow \eta_{gl} \downarrow \\ \alpha \text{ 偏小} \rightarrow \text{O}_2 \text{ 不足} \rightarrow \text{燃烧不完全} \rightarrow \eta_{gl} \downarrow \end{array} \right.$

## 二、燃烧生成的烟气体量——指湿烟气体量数值

1. 理论烟气体量  $V_y^0$ ——当提供理论空气量、且燃料完全燃烧并生成彻底的燃烧产物时的烟气体量， $\text{Nm}^3/\text{kg}$ 燃料。



烟气的组成:

$$(1) V_{\text{RO}_2} (\text{三原子气体}) \begin{cases} V_{\text{CO}_2} = \frac{22.4}{12} \frac{C^y}{100} \text{ Nm}^3/\text{kg} \text{燃料} \\ V_{\text{SO}_2} = \frac{22.4}{32} \frac{S^y}{100} \text{ Nm}^3/\text{kg} \text{燃料} \end{cases}$$



(2)  $V_{H_2O}^0$

$$V_{H_2O}^H = \frac{22.4}{2.016} \frac{H^y}{100} \quad \text{Nm}^3/\text{kg燃料}$$

$$V_{H_2O}^W = \frac{22.4}{18} \frac{W^y}{100}$$

空气含湿量  
 $d=10\text{g/kg干空气}$

$$V_{H_2O}^k = \frac{22.4}{18} (\rho_k V_k^o d \times 10^{-3}) = 0.0161 V_k^o$$

空气中水分形成的水蒸汽容积

$$V_{H_2O}^{Wh} = \frac{22.4}{18} G_{wh} \quad \text{Nm}^3/\text{kg燃料}$$

当使用蒸汽雾化重油、渣油时蒸汽带入的容积， $G_{wh}$ —— $\text{kg汽/kg燃料}$

(3) 不可燃元素构成

$V_{N_2}^0$

$$V_{N_2}^N = \frac{22.4}{28} \frac{N^y}{100} \quad \text{Nm}^3/\text{kg燃料}$$

$$V_{N_2}^k = 0.79 V_k^o \quad \text{Nm}^3/\text{kg燃料}$$

$$\begin{aligned} \text{理论烟气体量 } V_y^0 &= V_{RO_2}^0 + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 \\ &= V_{gy}^0 + V_{H_2O}^0 \quad (\text{应计入空气中的含湿量}) \end{aligned}$$

有经验公式按  $Q_{dw}^y$  估算  $V_y^0$  ——(2-33) — (2-37)

## 2. 实际烟气体量 $V_y$

$$\begin{aligned} V_k &\begin{cases} V_k^0 \rightleftharpoons V_y^0 \\ (a-1)V_k^0 \rightleftharpoons 1.0161(a-1)V_k^0 \end{cases} \end{aligned}$$

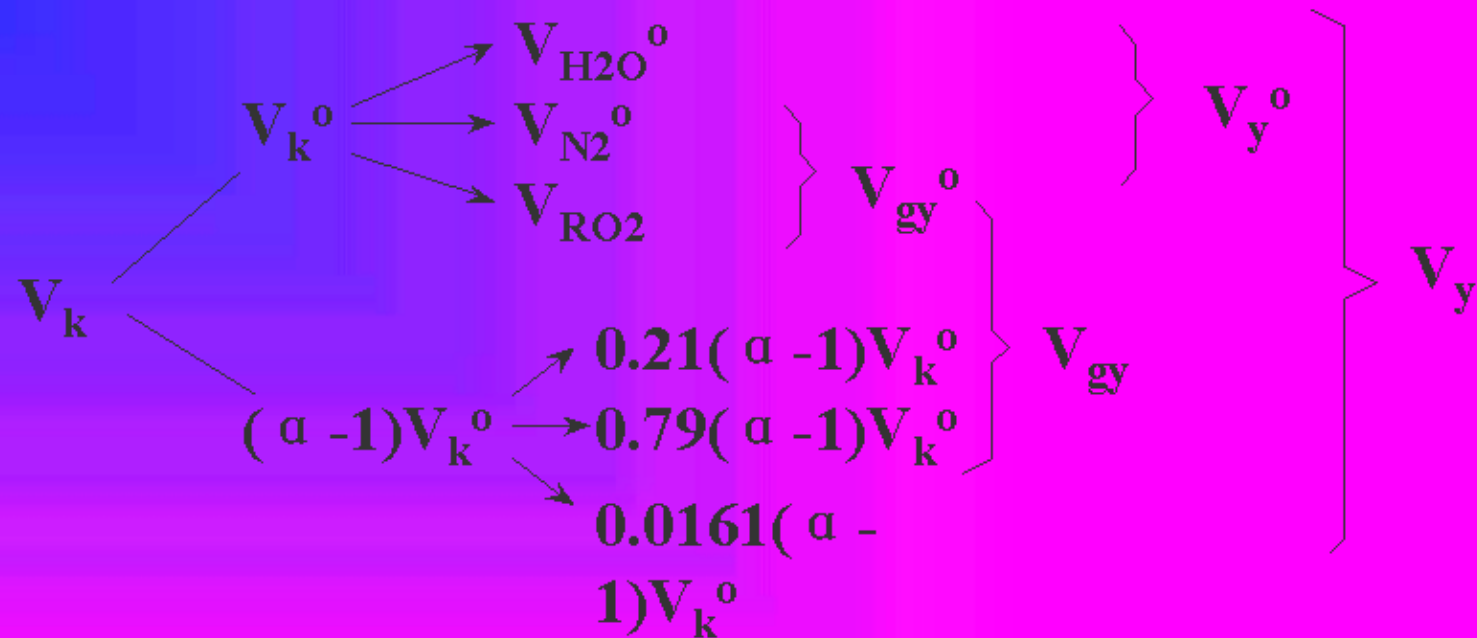
$$V_y = V_y^0 + 1.0161(a-1)V_k^0 \quad \text{Nm}^3/\text{kg} \text{燃料}$$

$$= V_y^0 + 0.21(a-1)V_k^0 + 0.79(a-1)V_k^0 + 0.0161(a-1)V_k^0$$

$$\Downarrow$$

$$V_{RO_2}^0 + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0$$

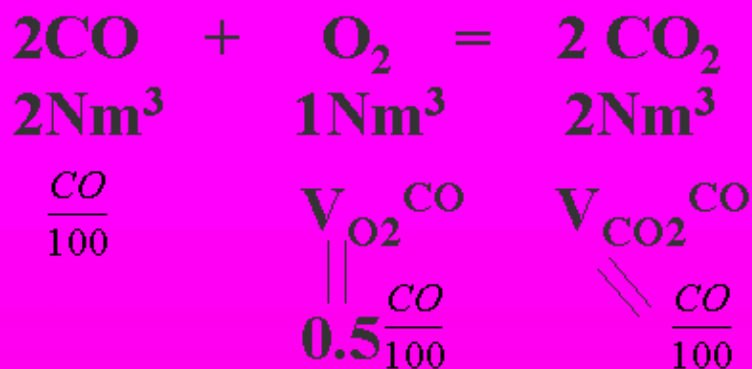
$$= V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O}$$



♣ 气体燃料：按容积组成，以化学反应式推算，基本原理同上。  
 $Nm^3/Nm^3$ 燃料。

eg. 气体燃料的组分气体容积百分含量为：

$CO$ 、 $H_2$ 、 $CO_2$ 、 $H_2S$ 、 $O_2$ 、 $C_mH_n \dots \dots$



### 三、空气和烟气的焓

——1kg或1Nm<sup>3</sup>燃料燃烧所需的空气和所生成的烟气在等压下从0℃=>θ℃所需热量，I，kJ/kg燃 或 kJ/Nm<sup>3</sup>燃。

空气： $I_k^{\circ} = V_k^{\circ} (C_{\theta})_k$   
 每Nm<sup>3</sup>干空气的湿空气焓(表2-10)，kJ/Nm<sup>3</sup>干空气

$$I_k = I_k^{\circ} + (\alpha - 1) V_k^{\circ} (C_{\theta})_k = I_k^{\circ} + (\alpha - 1) I_k^{\circ}$$

$$= \alpha I_k^{\circ}$$

烟气：视为理想气体

表2-10

$$I_y^{\circ} = V_{RO_2} (C_{\theta})_{RO_2} + V_{N_2} (C_{\theta})_{N_2} + V_{H_2O} (C_{\theta})_{H_2O}$$

$$I_y = I_y^{\circ} + \cancel{1.0161} (\alpha - 1) I_k^{\circ}$$

四、漏风系数  $\Delta \alpha$  —— 供热锅炉炉膛微负压运行，存在漏风

$$\Delta \alpha = \text{受热面出口 } \alpha'' - \text{受热面进口 } \alpha'$$

$V_y$  —— 用受热面平均  $\alpha$  计算，如p31例2-3表二

$I_y$  —— 用受热面出口处  $\alpha''$  计算，列出烟气温焓表，如p32例2-3表三



## § 2.3 实际烟气的测定及应用

§ 2.2节中为燃料完全燃烧且生成彻底的燃烧产物，而实际有不完全燃烧产物形成（ $\text{CO}$ 、 $\text{C}_n\text{H}_m$ 等） $\Rightarrow$ 需分析烟气组分；

另，烟气组分的测定可判断锅炉燃烧工况，以改进燃烧。

### 一、烟气成分的测定

红外烟气分析仪、色谱分析仪、氧化锆氧量计、奥氏烟气分析仪

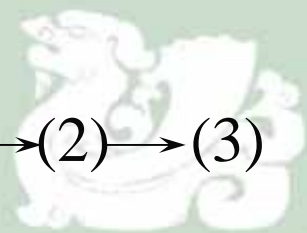
1.测定原理——选择性吸收方法测定烟气组分气体的含量

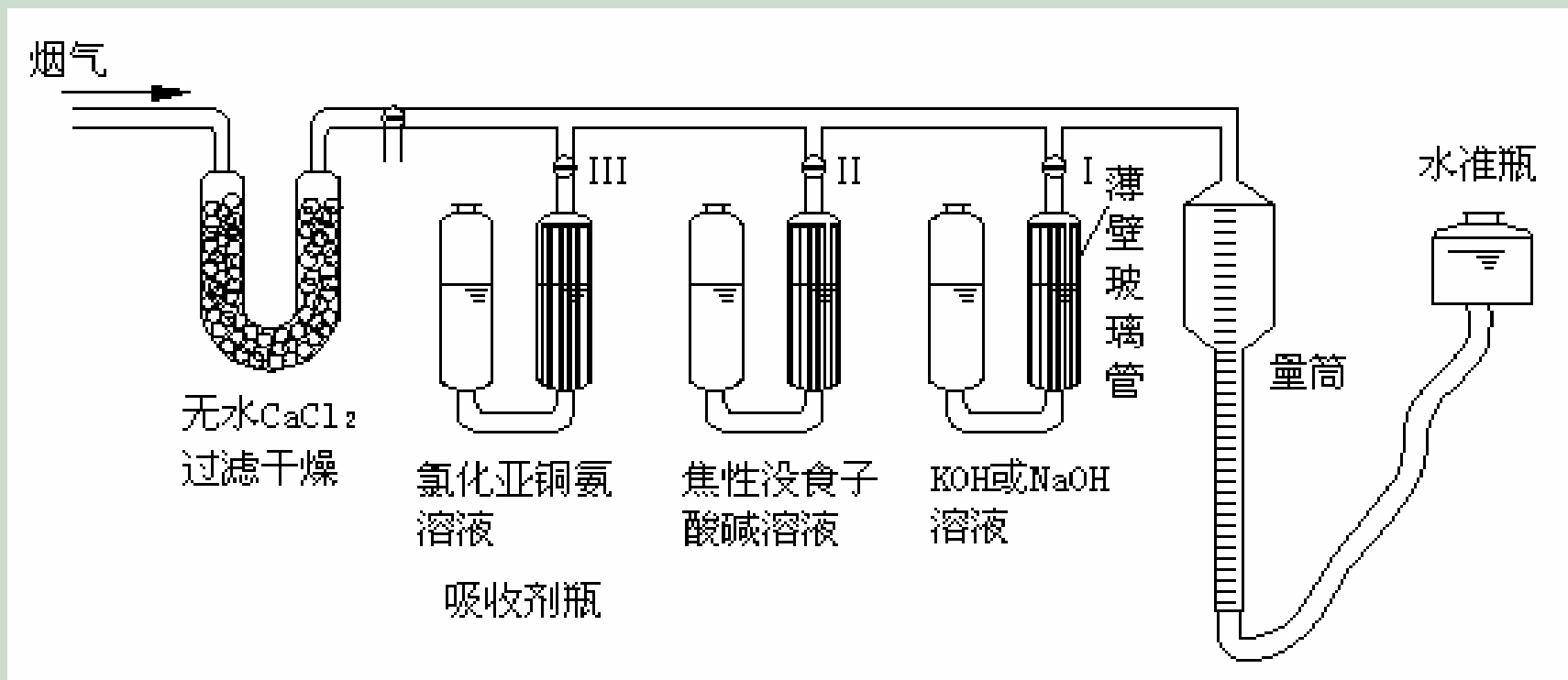
(1) $\text{KOH}$ 或 $\text{NaOH}$ 溶液——吸收 $\text{RO}_2$

(2)焦性没食子酸的碱溶液——吸收 $\text{O}_2$ 和 $\text{RO}_2$

(3)氯化亚铜氨溶液——吸收 $\text{CO}$ 和 $\text{O}_2$

$\Rightarrow$ 因而必须有严格的吸收顺序，烟气依次经(1) $\rightarrow$ (2) $\rightarrow$ (3)

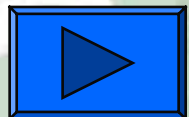
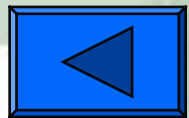




(1) 准备:

(2) 取样: 上下移动水准瓶, 吸入100ml烟气于量筒中

(3) 测定:



### 3.数据处理

奥氏仪所得数值为组分气体容积占干烟气容积的百份数

$$\text{记号 } RO_2 = \frac{V_{RO_2}}{V_{gy}} \times 100\% \quad O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_{gy}} \times 100\% \quad CO = \frac{V_{CO}}{V_{gy}} \times 100\%$$

$$\Rightarrow N_2 = 100 - RO_2 - O_2 - CO$$

### 4.局限性

CO含量的测量精度低 $\Rightarrow$ 一般只用于测定 $RO_2$ 和 $O_2$ 的含量



## 二、烟气分析的应用

### 1. 计算干烟气容积 $V_{gy}$ ——考虑有不完全燃烧产物CO生成

前提：C完全参与燃烧

$$\text{则： } V_{CO} + V_{CO_2} = \frac{22.4}{12} \frac{C^y}{100}$$

$$\therefore V_{SO_2} = \frac{22.4}{32} \frac{S^y}{100}$$

$$\therefore V_{RO_2} + V_{CO} = \frac{22.4}{12} \frac{C^y}{100} + \frac{22.4}{32} \frac{S^y}{100} = \frac{1.866C^y + 0.7S^y}{100}$$

$$\Rightarrow RO_2 + CO = \frac{1.866C^y + 0.7S^y}{V_{gy}}$$

$$\Rightarrow V_{gy} = \frac{1.866C^y + 0.7S^y}{RO_2 + CO}$$





## 2. 计算烟气中CO含量

简化：忽略燃料的 $N^y$ 含量

思路：从烟气组分中 $100-RO_2-O_2-N_2 \implies CO$

$$V_{N_2} \approx 0.79V_k = \frac{79}{21} V_{O_2}^k$$

$\swarrow$   
 空气中的氧气容积

$$= \frac{79}{21} (V_{O_2}^{RO_2} + V_{O_2}^{CO} + V_{O_2}^{H_2O} + V_{O_2})$$

$\swarrow$        $\swarrow$        $\swarrow$        $\swarrow$   
 $V_{RO_2}$        $0.5V_{CO}$        $\swarrow$       烟气中的氧气容积  
 即烟气测定所得

指生成 $H_2O$ 所消耗的**空气中的氧气**容积

燃料 $O^y$ 消耗的H的量： $\frac{2.016}{16} \frac{O^y}{100} = 0.126 \frac{O^y}{100}$  kg/kg燃料

$\implies$  燃料剩余的H的量： $\frac{H^y}{100} - 0.126 \frac{O^y}{100}$  kg/kg燃料  $\implies$  **自由氢**

$$\implies V_{O_2}^{H_2O} = \frac{22.4}{2 \times 2.016} \left( \frac{H^y}{100} - 0.126 \frac{O^y}{100} \right)$$

$$= 0.0555 (H^y - 0.126 O^y) \text{ Nm}^3/\text{kg燃料}$$



$$\therefore V_{N_2} = \frac{0.79}{0.21} [V_{RO_2} + 0.5V_{CO} + 0.0555(H^y - 0.126O^y) + V_{O_2}]$$

式两端均  $\times \frac{1}{V_{gy}} \times 100$  :

$$N_2 = \frac{0.79}{0.21} [RO_2 + 0.5CO + 5.55 \frac{(H^y - 0.126O^y)}{V_{gy}} + O_2]$$

||

$$100 - RO_2 - CO - O_2$$

带入  $V_{gy} = \frac{1.866C^y + 0.7S^y}{RO_2 + CO}$

令:  $\beta = 0.79 \frac{5.55(H^y - 0.126O^y)}{1.866C^y + 0.7S^y}$  为**燃料特性系数**

- (1) 只与可燃元素有关
- (2) 不随基而变化
- (3) 可视为自由氢与C含量之比

$\longrightarrow 21 = RO_2 + O_2 + 0.605CO + \beta(CO + RO_2)$  不完全燃烧方程式

当完全燃烧  $CO=0 \longrightarrow 21 = RO_2 + O_2 + \beta RO_2$  完全燃烧方程式

表明燃烧时烟气各组分气体含量的数值关系

由完全燃烧方程式  $21 = RO_2 + O_2 + \beta RO_2$  可得：

$$RO_2 = \frac{21 - O_2}{1 + \beta}$$

当供应理论空气量时： $O_2=0$

$$RO_2^{max} = \frac{21}{1 + \beta}$$



### 3. 计算过量空气系数 $\alpha$

$$\alpha = \frac{V_k}{V_k^o} = \frac{V_k}{V_k - \Delta V_k} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta V_k}{V_k}}$$

其中：

$$V_k = \frac{1}{0.79} V_{N_2}^k$$

$$\approx \frac{1}{0.79} V_{N_2} = \frac{1}{0.79} V_{N_2} \left( \frac{100}{V_{gy}} \right) \left( \frac{V_{gy}}{100} \right) = \frac{100 - RO_2 - CO - O_2}{79} V_{gy}$$

$$\Delta V_k = \frac{1}{0.21} \Delta V_{O_2}^k = \frac{\Delta O_2}{21} V_{gy}$$

过量空气中的O<sub>2</sub>容积

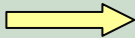
过量空气中的O<sub>2</sub>占V<sub>gy</sub>的百份含量

区别：前，符号O<sub>2</sub>表示烟气中的氧气占V<sub>gy</sub>的百份含量



燃料完全燃烧时:  $\Delta O_2 = O_2$

燃料不完全燃烧时:  $\Delta O_2 = O_2 - 0.5CO$


{

 完全燃烧:  $\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \frac{O_2}{100 - RO_2 - O_2}}$   
 不完全燃烧:  $\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \frac{O_2 - 0.5CO}{100 - RO_2 - O_2 - CO}}$





## 第三章 锅炉热平衡

本章要求掌握：热量的计算和测定方法



# 一、锅炉能量的收支平衡——kJ/kg燃 或 kJ/Nm<sup>3</sup>燃

(以0°C  
为基准)

## 1. 收入热量 $Q_r$

(1) 燃料的应用基低位热值  $Q_{dw}^y$  kJ/kg燃

(2) 燃料物理显热  $i_r$ :  $i_r = C_r^y \cdot t_r$  kJ/kg燃

常压下的饱和  
和蒸汽焓

(3) 雾化的热介质带入:  $Q_{wh} = G_{wh}(i_{wh} - 2500)$  kJ/kg燃

(4) 空气、水带入:

冷空气显热:  $Q_k = \alpha_{py} V_k^0 (c \theta)_k$  kJ/kg燃

冷水显热:  $Q_s = D \times 10^3 \times i_{gs}$  kJ/h

习惯上放在支  
出热量中考虑

热空气、热水带入:  $Q_{rk}$ 、 $Q_{rs}$  (与控制体的划分有关)

$$\longrightarrow Q_r = Q_{dw}^y + i_r + Q_{wh} + \cancel{Q_k} + \cancel{Q_s} + Q_{rk} + Q_{rs}$$

非重油锅炉  $Q_r \approx Q_{dw}^y$

## 2. 支出热量 $Q_c$ kJ/kg燃

(1) 有效利用热 $Q_1$ ——被受热面吸收生产热水（蒸汽）的热量

$$Q_1 = Q_{\text{热水（蒸汽）}} - Q_s$$

在支出热量中扣除

(2) 排烟热损失 $Q_2$ ——锅炉排烟温度高于环境温度而带走的热量

$$Q_2 = I_{\text{py}} - Q_k$$

(3) 化学（气体）不完全燃烧热损失 $Q_3$ ——燃料中的可燃气体未燃烬（未燃烧放热）所造成的热损失。

(4) 机械（固体）不完全燃烧热损失 $Q_4$ ——燃料中的固体成分未燃烬（未燃烧放热）所造成的热损失。

燃油/气锅炉： $Q_4=0$

燃煤锅炉： $Q_4 = Q_4^{\text{lm}} + Q_4^{\text{hz}} + Q_4^{\text{fh}}$

(5) 散热损失 $Q_5$ ——锅炉炉墙、钢架、管道等外表温度高于环境温度所造成的热损失。

(6) 其它热损失 $Q_6$

$$\begin{aligned}\longrightarrow Q_c &= Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \\ &= Q_1 + \sum_2^6 Q_i = Q_r\end{aligned}$$

定 义:  $q_i = \frac{Q_i}{Q_r} \times 100\%$

有:  $\eta_{gl} = q_1 = \frac{Q_1}{Q_r} \times 100\%$

正平衡热效率

$$\eta_{gl} = q_1 = 100 - \sum_2^6 q_i \%$$

反平衡热效率



## 二、锅炉热效率（热平衡试验）

1. 正平衡效率——直接测出锅炉有效利用热占进入锅炉的总热量的百分数

$$\eta_{gl} = \frac{Q_1}{Q_r} \times 100\% \approx \frac{Q_1}{Q_{dw}^y} \times 100\%$$

其中  $Q_1 = Q_{gl} / B$  kJ/kg<sub>燃</sub> （B——小时燃料消耗量 kg/h）

而  $Q_{gl} = D \times 10^3 (i_q - i_{gs}) + D_{ps} \times 10^3 (i_{ps} - i_{gs})$  kJ/h 小时有效利用热

或  $Q_{gl} = G \times 10^3 (i_{rs}'' - i_{re}') + D_{ps} \times 10^3 (i_{ps} - i_{gs}')$  kJ/h

只要测出  $D$  ( $G$ )、 $i_q$ 、 $i_{gs}$  ( $i_{rs}''$ 、 $i_{re}'$ )、 $B$ 、 $Q_{dw}^y$ ，则可得  $\eta_{gl}$

特点：方法简单，但不能给出热量损失的分析和改进的建议。

## 2. 反平衡效率——依次测出各损失项得出 $\eta_{gl}$ 的方法

$$\eta_{gl} = 100 - \sum_{i=2}^6 q_i$$

特点：方法复杂，但有利于判断锅炉需要改进的环节，为结构优化提供依据，尤其对大型锅炉适用。

## 3. 测定原则——至少2次平行试验

小型锅炉：2次正平衡      $|\Delta\eta| < 4\%$      （误差允许值）

中型锅炉：1正1反      $|\Delta\eta| < 5\%$

大型锅炉：2次反平衡      $|\Delta\eta| < 6\%$

#### 4. 锅炉净效率和毛效率

扣除锅炉房自用电、汽后的锅炉效率

自耗功率量 kWh/h

标准煤热值 kcal/kg

净效率和毛效率之差:

$$\Delta\eta = \frac{D_z(i_q - i_{gs}) \times 10^3 + N \cdot b \cdot 7000 \times 4.1868}{B \cdot Q_{dw}^y} \times 100\%$$

每kWh的标准煤耗=0.407kg/kWh

→ 净效率  $\eta_j =$  毛效率  $\eta_{gl} - \Delta\eta$

### 三、各项热损失

#### 1. $Q_4$ ( $q_4$ )

包括： $Q_4^{lm}$ ——固体可燃组分未燃烬而从炉排孔隙漏出炉外。煤粉炉 $Q_4^{lm} = 0$

$Q_4^{hz}$  ——固体可燃组分未燃烬而落入渣坑

$Q_4^{fh}$  ——固体可燃组分未燃烬而随烟气带出炉外

(1) 计算：

设 $lm$ 、 $hz$ 、 $fh$ 中含可燃固定碳百份含量为： $R_{lm}$ 、 $R_{hz}$ 、 $R_{fh}$  (%)

$lm$ 、 $hz$ 、 $fh$ 产生量： $G_{lm}$ 、 $G_{hz}$ 、 $G_{fh}$  (kg/h)

则：

固定碳热量 kJ/kg

$$Q_4 = \frac{32700}{B} \left( \frac{G_{lm} R_{lm}}{100} + \frac{G_{hz} R_{hz}}{100} + \frac{G_{fh} R_{fh}}{100} \right)$$

kJ/kg

(2)测点布置:

燃煤锅炉:

测量量	测点位置	仪器或方法
1) $G_{lm}$ $R_{lm}$	炉排下方灰斗	称重 燃烧实验 ==> 灰分 ==> 可燃份含量
2) $G_{hz}$ $R_{hz}$	炉排后渣斗	称重 燃烧实验
3) $R_{fh}$	空气预热器出口烟道	燃烧实验
4) $B_{A^y}$ $Q_{dw}^y$	煤斗前	称重 工业分析实验 氧弹测热计
5) $G_{fh}$		无法测准,由灰平衡计算



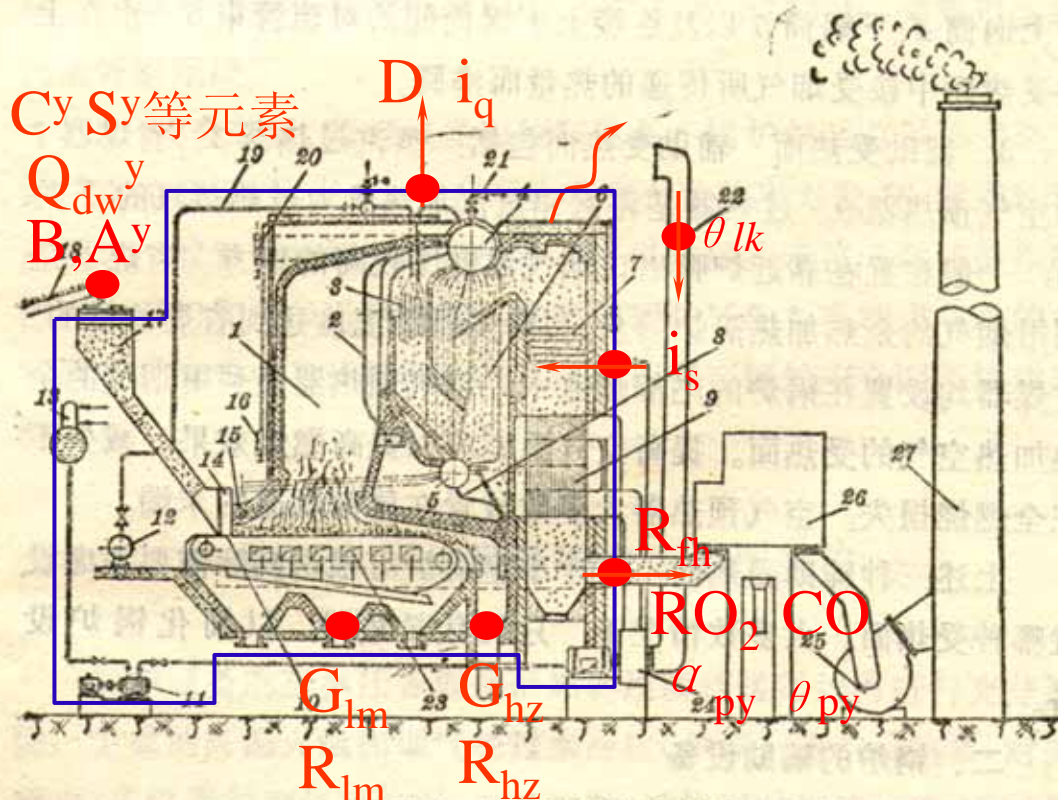


图 1-1 工业锅炉设备简图

- 1—炉膛； 2—水冷壁管； 3—蒸汽过热器； 4—上锅筒； 5—下锅筒；  
 6—对流管束； 7—省煤器； 8—下降管； 9—空气预热器； 10—链条炉排；  
 11—给水泵； 12—集汽包； 13—除氧器； 14—煤斗； 15—前联箱；  
 16—压力表； 17—煤仓； 18—皮带运煤机； 19—主蒸汽管道； 20—水位表；  
 21—安全阀； 22—进风管； 23—送风室； 24—送风机； 25—引风机；  
 26—除尘器； 27—烟囱

灰平衡:

进入锅炉的灰量 == 排出锅炉的灰量

$$\frac{BA^y}{100} = \frac{G_{lm}(100 - R_{lm})}{100} + \frac{G_{hz}(100 - R_{hz})}{100} + \frac{G_{fh}(100 - R_{fh})}{100}$$

==> 新增测量量  $A^y$

引入含灰份额:  $a_i = \frac{G_i(100 - R_i)}{BA^y} \quad (i=lm, hz, fh)$

$a_i$ 对同类型锅炉, 数值差异不大, 有经验取值, 见表4-3, 98页。

$$\begin{aligned} \Rightarrow q_4 &= \frac{32700}{BQ_r} \left( \frac{G_{lm} R_{lm}}{100} + \frac{G_{hz} R_{hz}}{100} + \frac{G_{fh} R_{fh}}{100} \right) \% \\ &= \frac{32700 A^y}{Q_r} \left( \frac{a_{lm} R_{lm}}{100 - R_{lm}} + \frac{a_{hz} R_{hz}}{100 - R_{hz}} + \frac{a_{fh} R_{fh}}{100 - R_{fh}} \right) \% \end{aligned}$$

==> 新增测量量  $Q_r \approx Q_{dw}^y$

### (3)影响因素

#### 1) 燃料种类

$\left\{ \begin{array}{l} \text{灰分含量} \uparrow, \text{熔点} \downarrow, \text{焦结性} \uparrow \longrightarrow Q_4^{\text{hz}} \uparrow \\ \text{水分低, 焦结性} \downarrow, \text{细末多} \longrightarrow Q_4^{\text{fh}} \uparrow \end{array} \right.$

#### 2) 燃烧方式

$\left\{ \begin{array}{l} \text{机械(风力)抛煤} \longrightarrow Q_4^{\text{hz}} \uparrow \\ \text{煤粉炉} \longrightarrow Q_4^{\text{lm}}=0, Q_4^{\text{fh}} \uparrow \\ \text{沸腾炉} \longrightarrow Q_4^{\text{fh}} \uparrow \end{array} \right.$

#### 3) 炉子结构

$\left\{ \begin{array}{l} \text{炉拱} \\ \text{二次风} \\ \text{炉排大小、长度, 通风孔隙} \uparrow \longrightarrow Q_4^{\text{lm}} \uparrow \\ \text{炉膛尺寸} \downarrow \longrightarrow Q_4^{\text{fh}} \uparrow \end{array} \right.$

#### 4) 运行工况

$\left\{ \begin{array}{l} \text{负荷} \uparrow, \text{烟气流速} \uparrow \longrightarrow Q_4^{\text{fh}} \uparrow \\ \text{煤层厚度} \uparrow, \text{炉排速度} \uparrow \longrightarrow q_4 \uparrow \\ \text{风量分配} \\ \alpha_1'' \downarrow \longrightarrow q_4 \uparrow \end{array} \right.$

注：燃油/气炉  $q_4=0$

## 2. $Q_3 (q_3)$ —— 有CO, $CH_4$ , $H_2$ 等气体

(1) 计算:

$$Q_3 = (V_{CO} r_{CO} + V_{CH_4} r_{CH_4} + V_{H_2} r_{H_2}) \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \quad \text{kJ/kg}$$

烟气中的气体容积  $\text{Nm}^3/\text{kg燃}$

气体的容积发热量  $\text{kJ}/\text{Nm}^3$

因 $q_4$ 而对烟气容积的修正

$$\approx V_{CO} r_{CO} \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right)$$

$$= \frac{r_{CO}}{100} CO \cdot V_{gy} \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \quad \text{kJ/kg}$$

$$\rightarrow q_3 = \frac{Q_3}{Q_r} \times 100\%$$

$$V_{gy} = \frac{1.866C^y + 0.7S^y}{RO_2 + CO}$$

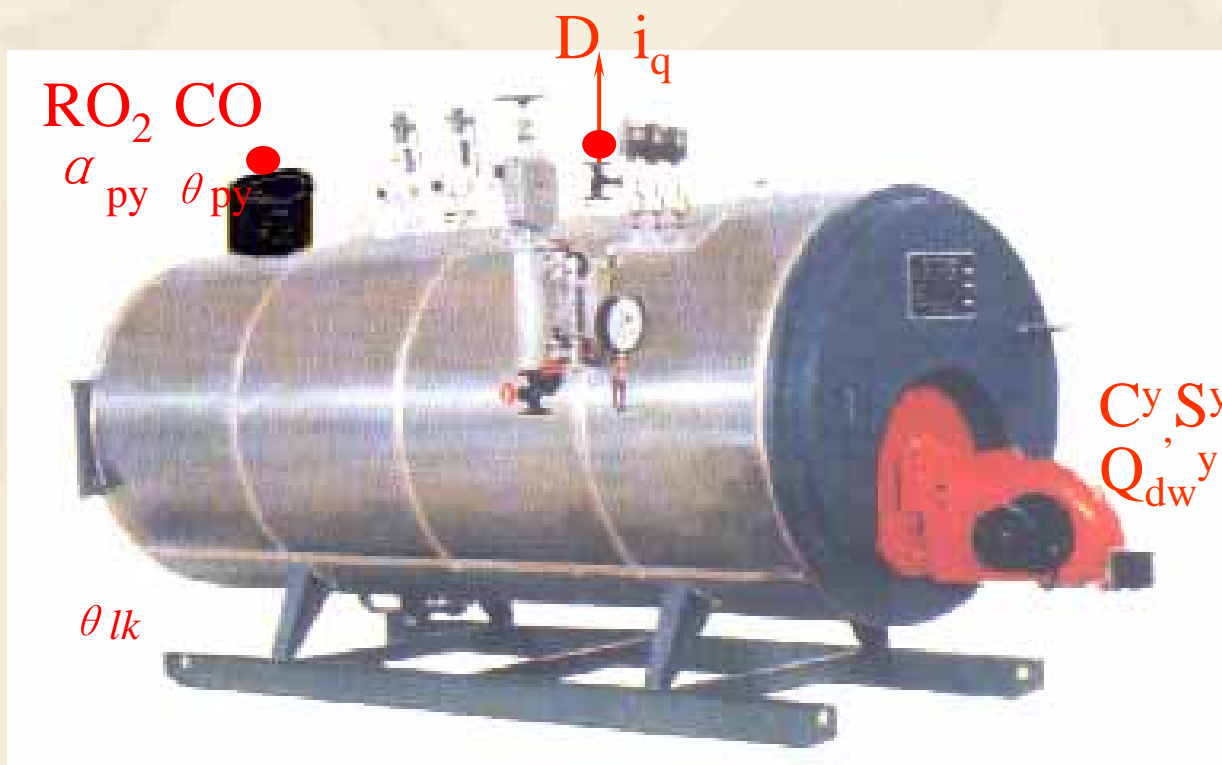


## (2)测点布置:

燃煤锅炉:

测量量	测点位置	仪器或方法
1) $q_4$	(见前)	
2) $RO_2$	空气预热器出口烟道	烟气分析
3) $CO$	(无)	烟气分析后计算
4) $C^y, S^y$	煤斗前	元素分析
5) $Q_{dw}^y$	煤斗前( $q_4$ 中已测)	氧弹测热计





WNS锅炉外型

### (3)影响因素

1) 燃料种类  $\rightarrow$  挥发分  $\uparrow$ ,  $q_3 \uparrow$

2) 炉子结构  $\rightarrow$  { 炉膛高度不够, 体积小,  $q_3 \uparrow$   
水冷壁过多, 温度  $\downarrow$ ,  $q_3 \uparrow$

3) 运行操作  $\rightarrow$  { 燃料厚度  $\uparrow$ , 还原区  $\uparrow$ , CO  $\uparrow$ ,  $q_3 \uparrow$   
负荷增加, 停留时间短,  $q_3 \uparrow$

4) 燃烧过程的组织  $\rightarrow$  { 过量空气系数  $\alpha_1'' \downarrow$ ,  $q_3 \uparrow$   
过量空气系数  $\alpha_1''$  过大,  $q_3 \uparrow$

	抛煤机炉	链条炉	振动炉排炉	推动炉排炉	煤粉炉
$Q_3$	1~2	1~2	1~2	1~2	1
$Q_4$	6~13	5~12	5~12	5~10	4~8
	沸腾炉	循环流化床炉	燃油炉	燃气炉	
$q_3$	1	1	<1	<0.5	
$q_4$	25~35	4~8	0	0	

2.  $Q_2$  ( $q_2$ )——即排烟温度高于进入锅炉的空气温度

(1) 计算:

$$Q_2 = \{ I_{py} - \alpha_{py} V_k^o [(c\theta)_k]_{\theta=lk} \} \left( 1 - \frac{q_4}{100} \right) \quad \text{kJ/kg}$$

$$[ I_{py}^o + (\alpha_{py} - 1) I_k^o ]_{\theta=py}$$

因 $q_4$ 而对烟气容积的修正

$$V_{RO_2} (C\theta)_{RO_2} + V_{N_2}^o (C\theta)_{N_2} + V_{H_2O}^o (C\theta)_{H_2O}$$

$$\rightarrow q_2 = \frac{Q_2}{Q_r} \times 100\%$$

## (2)测点布置:

燃煤锅炉:

测量量	测点位置	仪器或方法
1) $q_4$	(见前)	
2) $\alpha_{py}$	空气预热器出口烟道	烟气分析计算
3) $\theta_{py}$	空气预热器出口烟道	测温仪器
4) $\theta_{lk}$	锅炉周围	(同上)
5) 元素含量	煤斗前	元素分析

燃油/气锅炉:



$V_{py}$ :  $\alpha \uparrow \rightarrow V_{py} \uparrow \rightarrow \text{烟温} \downarrow \rightarrow \text{传热温差 } \Delta t \downarrow \rightarrow q_2 \uparrow$

$\theta_{py}$ :  $\theta_{py} \uparrow \rightarrow q_2 \uparrow$  (约有  $\Delta \theta$  升  $12^\circ\text{C}$ ,  $q_2$  增 1%  $\Rightarrow$  经济性  $\downarrow$ )

但  $\theta_{py}$  不宜过低, 否则将导致低温受热面的腐蚀  $\Rightarrow$  安全性  $\downarrow$

燃煤: 以链条、沸腾炉居多  $150-180^\circ\text{C}$

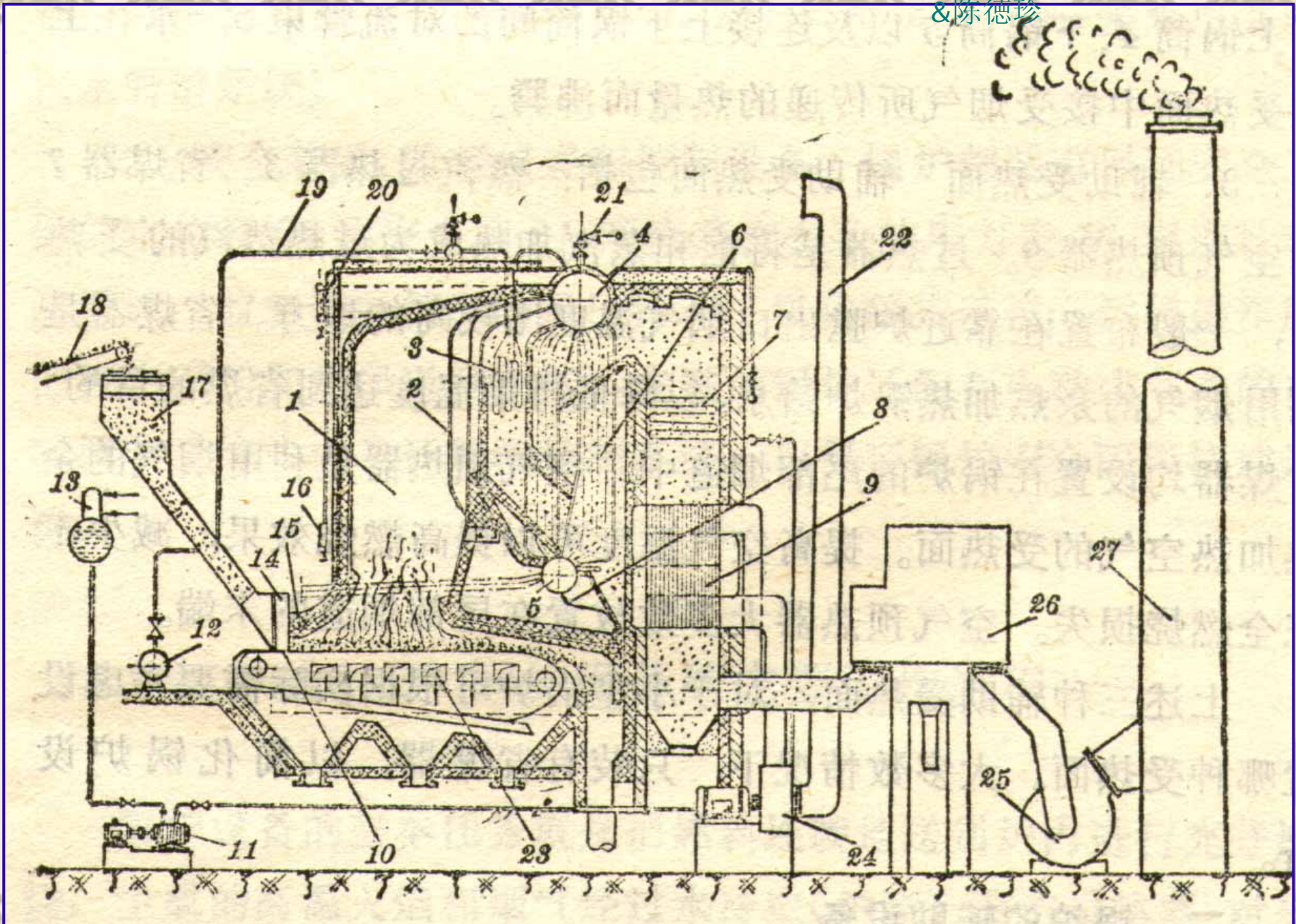
燃油燃气: WNS  $240-270^\circ\text{C}$

SZS  $165-180^\circ\text{C}$

SHS  $135-155^\circ\text{C}$

燃料种类	$\alpha_{py}$	排烟温度 $t_{py}/^{\circ}\text{C}$			
		150	200	250	300
一般煤种	1.5	6.6	9.2	11.8	14.4
	1.8	8.0	11.1	14.2	17.3
高灰分劣质煤	1.5	7.4	10.2	13.0	15.8
	1.8	8.7	12.0	15.3	18.6
燃油	1.5	7.5	10.3	13.1	16.0
	1.8	8.9	12.2	15.6	19.0
燃气	1.5	9.0	11.8	14.6	17.5
	1.8	10.4	13.7	17.1	20.5







# 第四章 炉

## 一、层燃炉

### 1.手烧炉:

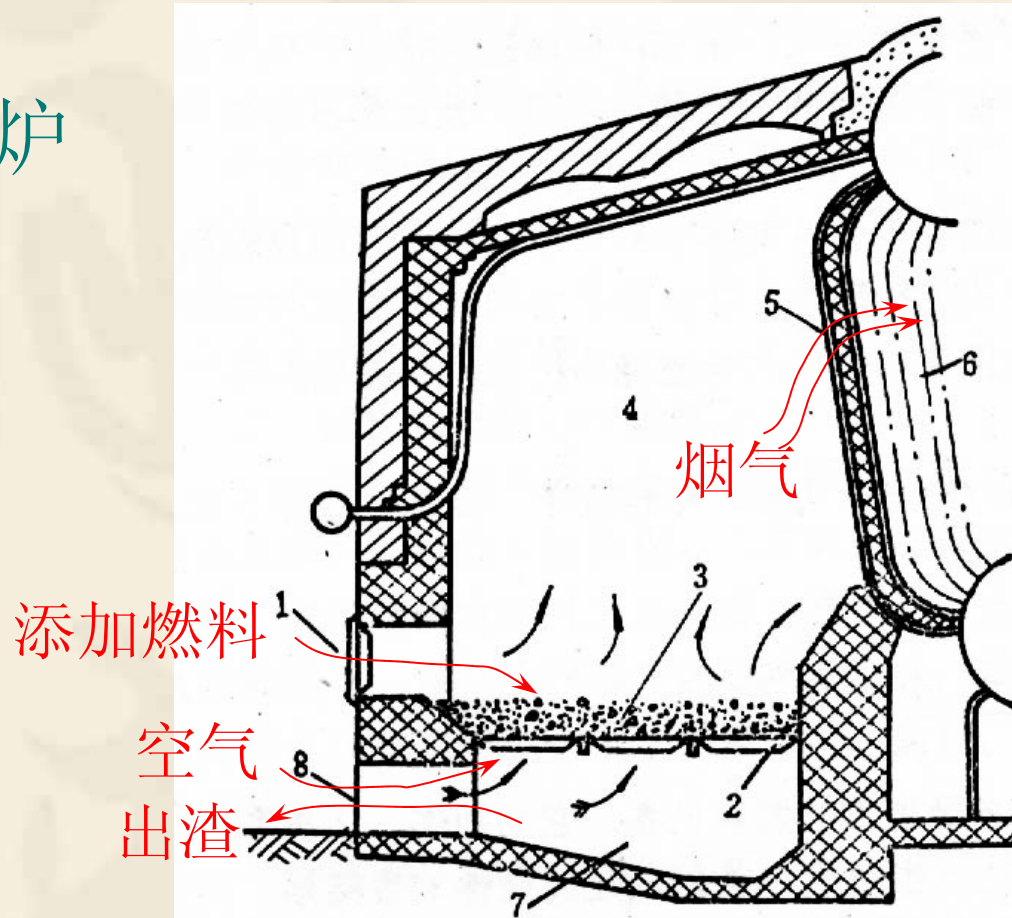


图 4-1 手烧炉构造简图

- 1—炉门; 2—炉排; 3—燃烧层; 4—炉膛; 5—水冷壁;  
6—汽锅管束; 7—灰坑; 8—灰门

❖ 构造:

❖ a. 炉膛需要具有一定的体积和高度;

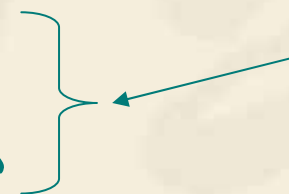
❖ b. 炉排结构要求

❖ 空气分布均匀

❖ 通风阻力小, 漏煤损失小

❖ 机械强度、耐热、散热性能好

通风截面比  
一炉排通风  
总面积/整  
个炉排面积





- ❖ **b. 常用炉排:** 20~40%
- ❖ 一条状
- ❖ 通风截面积较大, 强烈燃烧区靠近炉排, 炉排温度高 ( $\geq 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 易烧损
- ❖ 应用大块煤, 高挥发分煤
- ❖ 一板状 8~20%
- ❖ 通风截面积较小, 高温区离炉排远
- ❖ 通风阻力大
- ❖ 空气较为集中引入

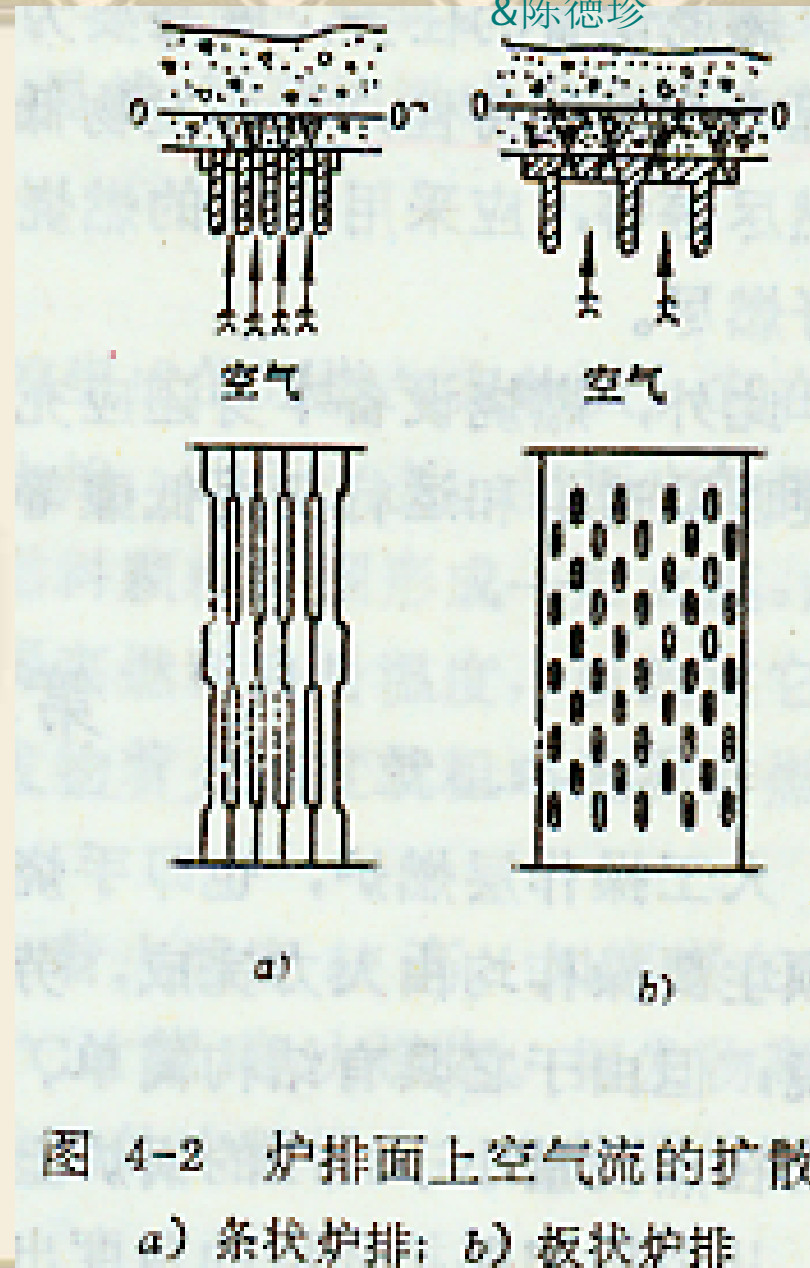


图 4-2 炉排面上空气流的扩散

a) 条状炉排; b) 板状炉排

- ❖ 工作特性：
- ❖ 燃烧过程沿高度进行
- ❖ 双面（主要为下面）预热、点火（下部引燃）

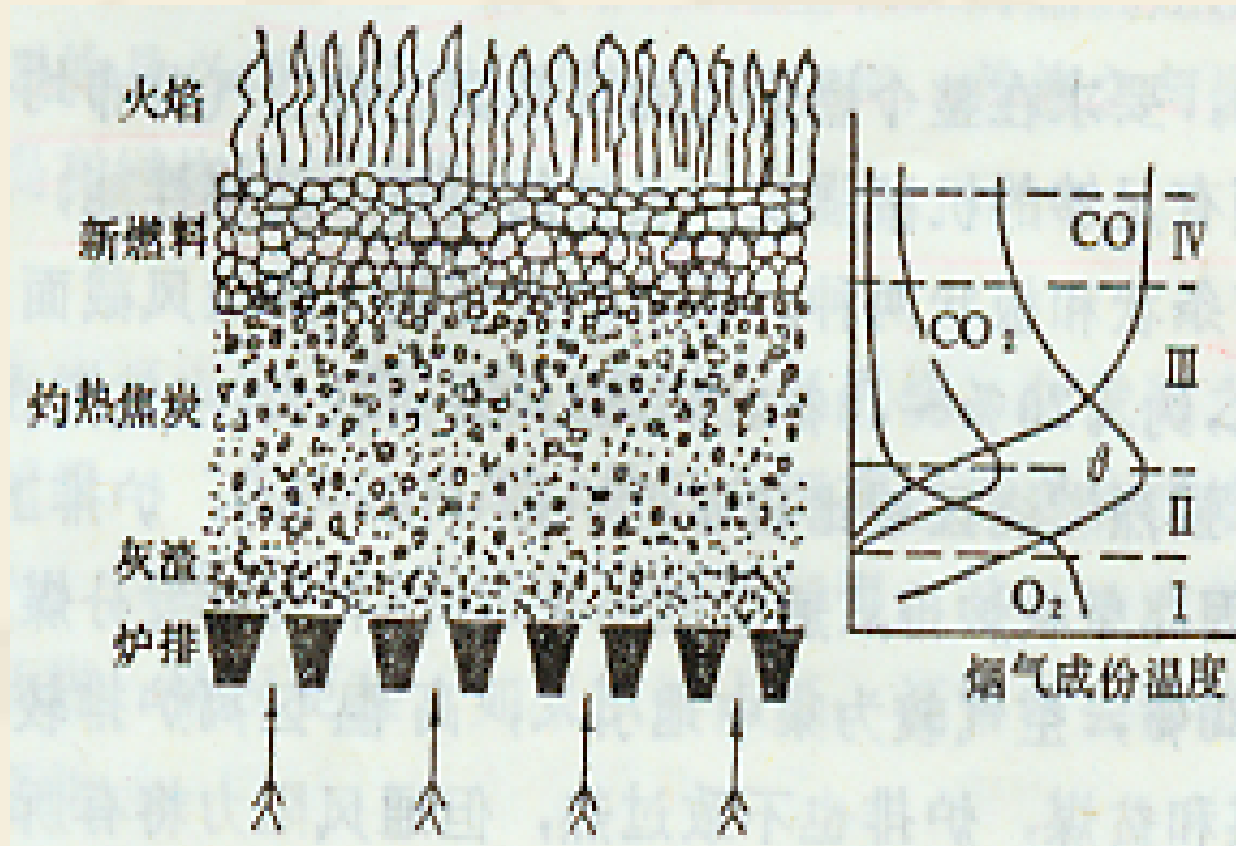


图 4-3 手烧炉燃烧层结构与层间气体成分示图

I—灰渣区； II—氧化区； III—还原区； IV—新燃料区

## ❖ a. 灰渣区

- ❖ 一 燃尽后的熔融状灰渣下流，被上升空气冷却。
- ❖ 一 灰渣区将炽热焦炭与炉排分开，保证炉排不受高温损坏，也使空气分布更均匀。

## ❖ b. 氧化区

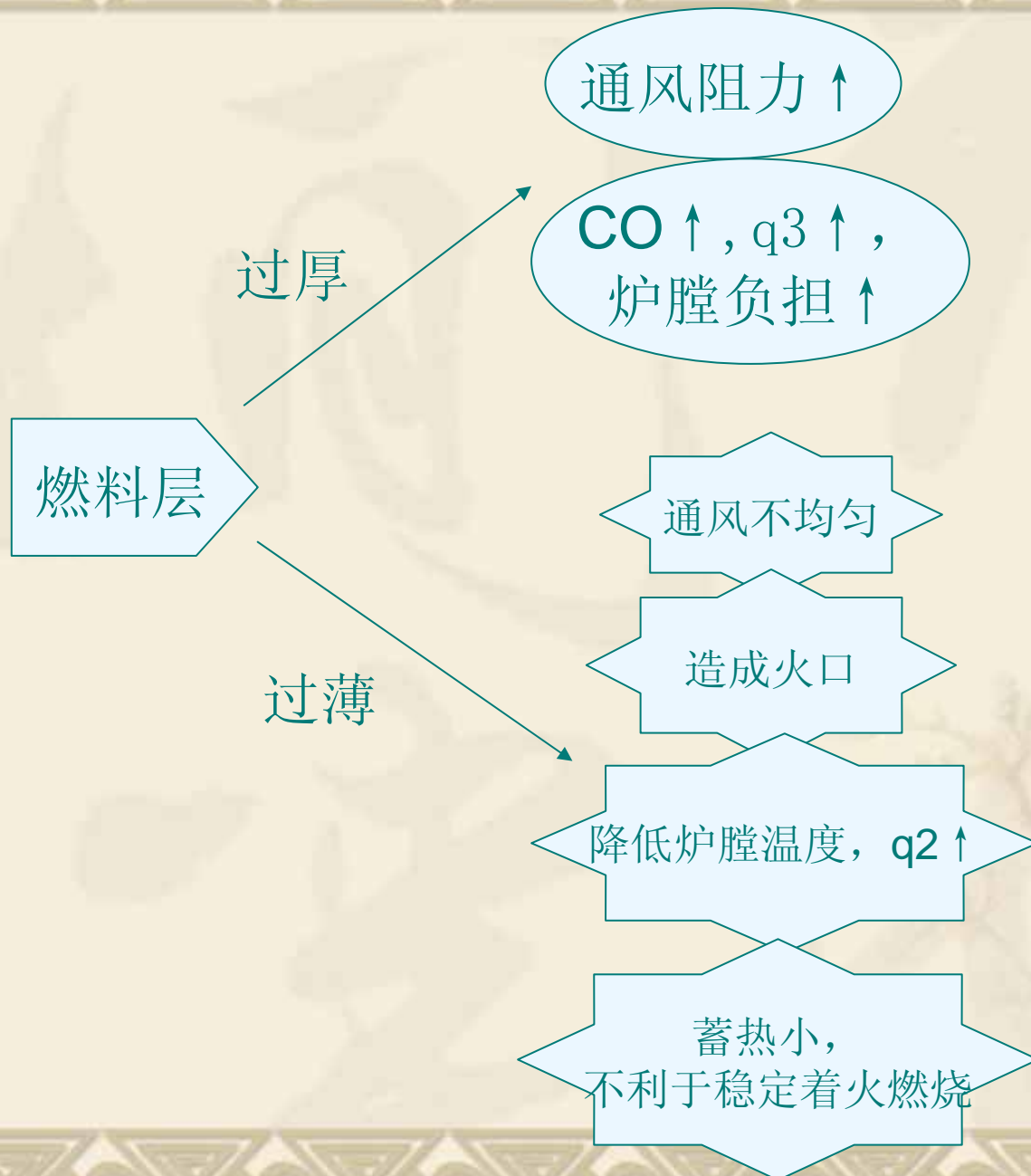
- ❖ 温度沿燃料层高度迅速增加
- ❖ 氧化反应速度快
- ❖ 氧化层高度保持不变（风量↑）
- ❖  $\text{CO}_2 \uparrow$

## ❖ c. 还原区

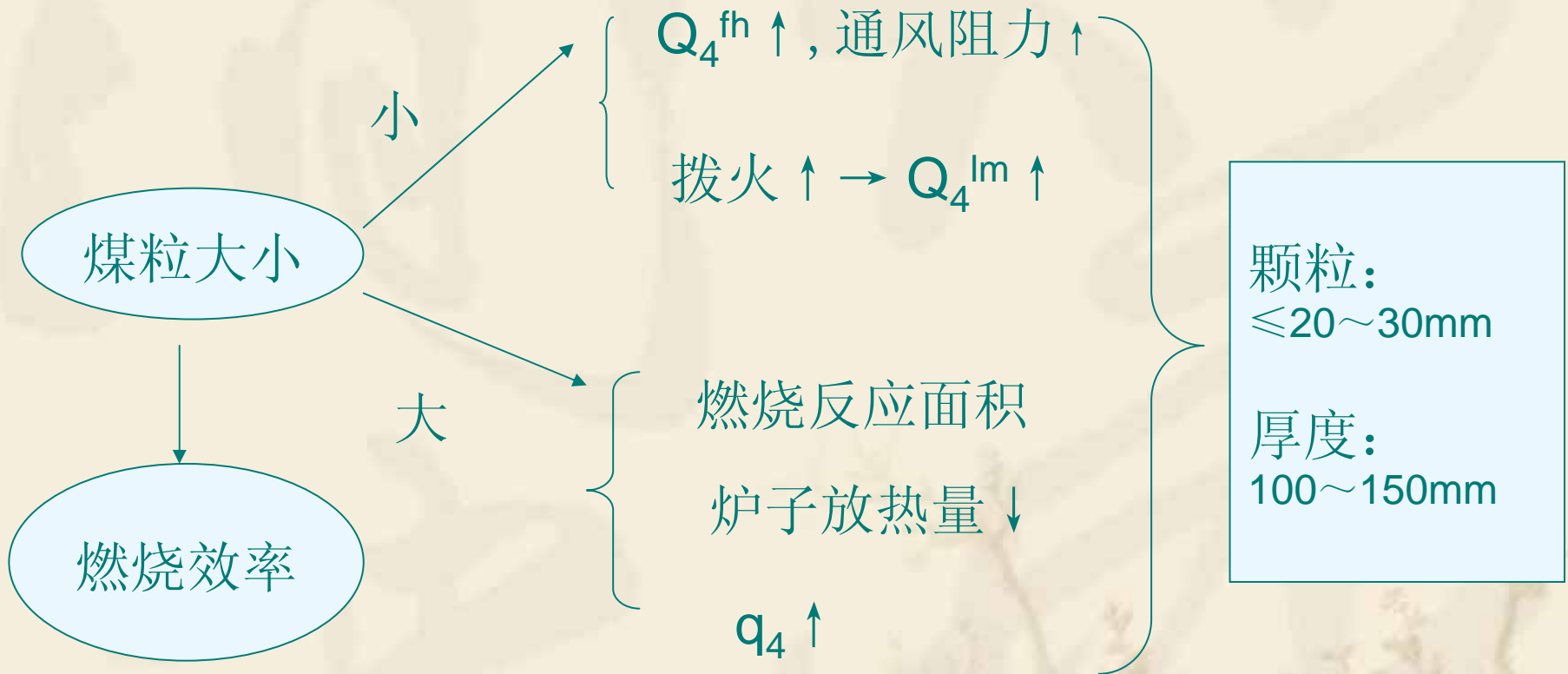
- ❖  $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow \text{CO}$
- ❖  $\text{CO}_2 \downarrow, \text{CO} \uparrow$
- ❖ 吸热反应，温度↓

氧化区和还原区的厚度取决于煤粒大小。  
煤粒↑，厚度↑

氧化区厚度约为煤粒直径的3~5倍  
还原区厚度约为氧化区的4~6倍









消除黑烟的结构改造：反烧法，eg.双层炉排炉（水冷炉排）

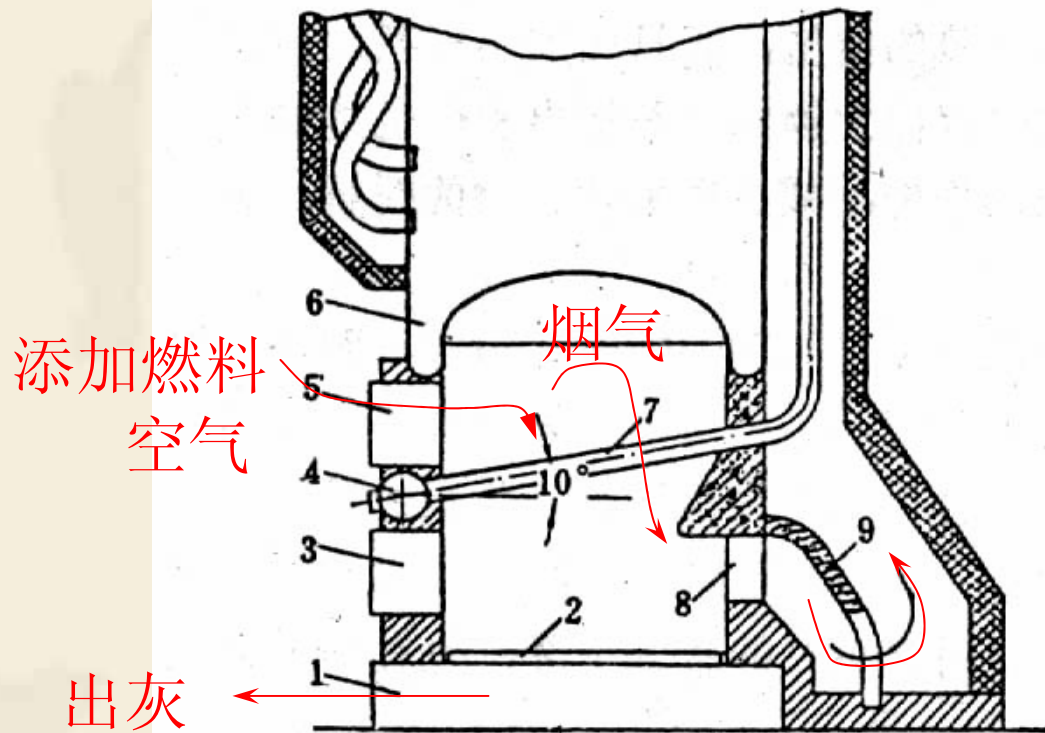


图 4-5 双层炉排手烧炉结构示意图  
 1—下炉门（灰门）；2—下炉排；3—中炉门；4—水冷炉排下集箱；5—上炉门；6—汽锅；7—水冷炉排（上炉排）；8—炉膛出口；9—烟气导向板

下炉排燃烧热通过辐射对上炉排燃料层干燥预热引燃，使挥发分较缓慢逸出

## 2.风力-机械抛煤机:

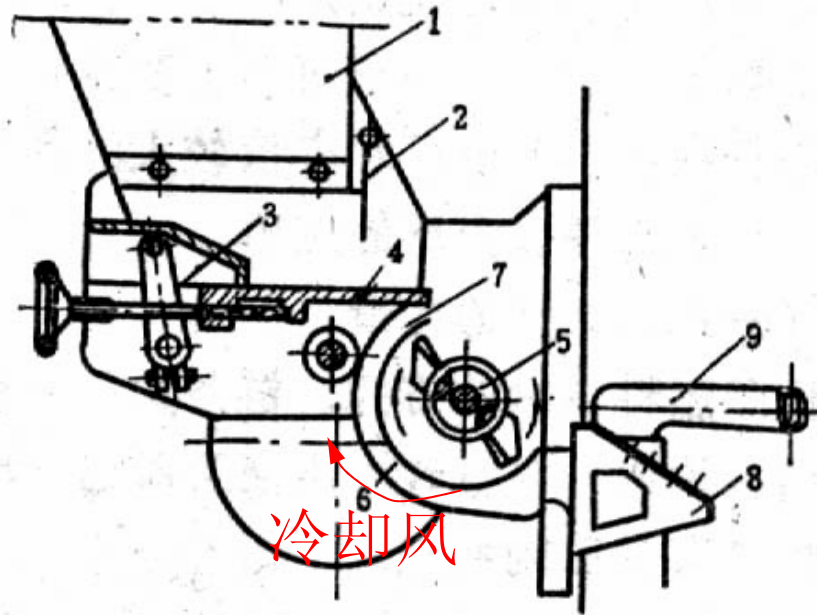


图 4-7 机械-风力抛煤机

1—煤斗；2—落煤调节板；3—给煤机滑块；4—抛煤远近调节板；5—抛煤转子及叶片；6—冷却风套；7—冷却风喷出口；8—播煤风槽及喷口；9—侧风喷口





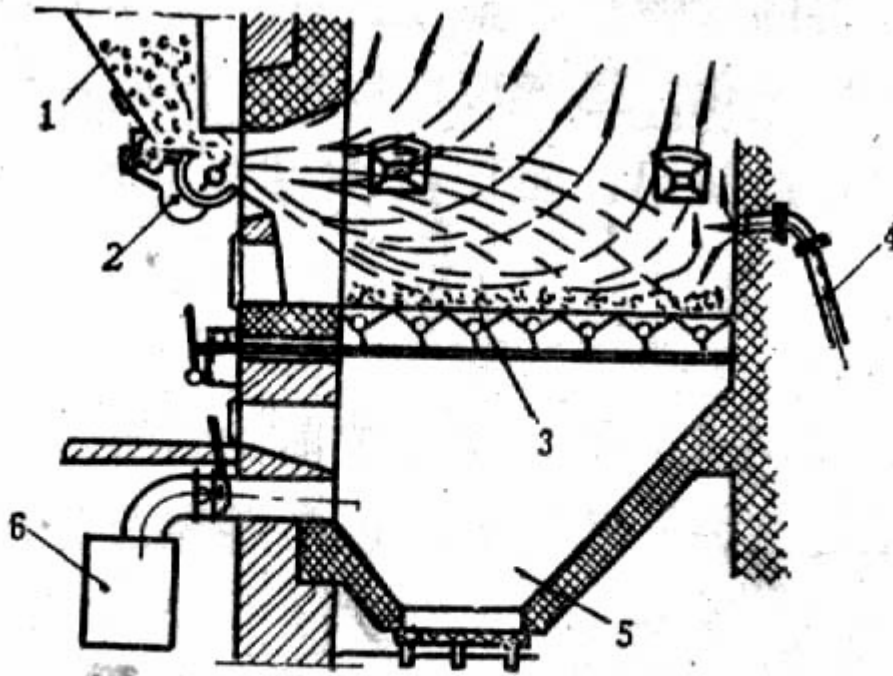
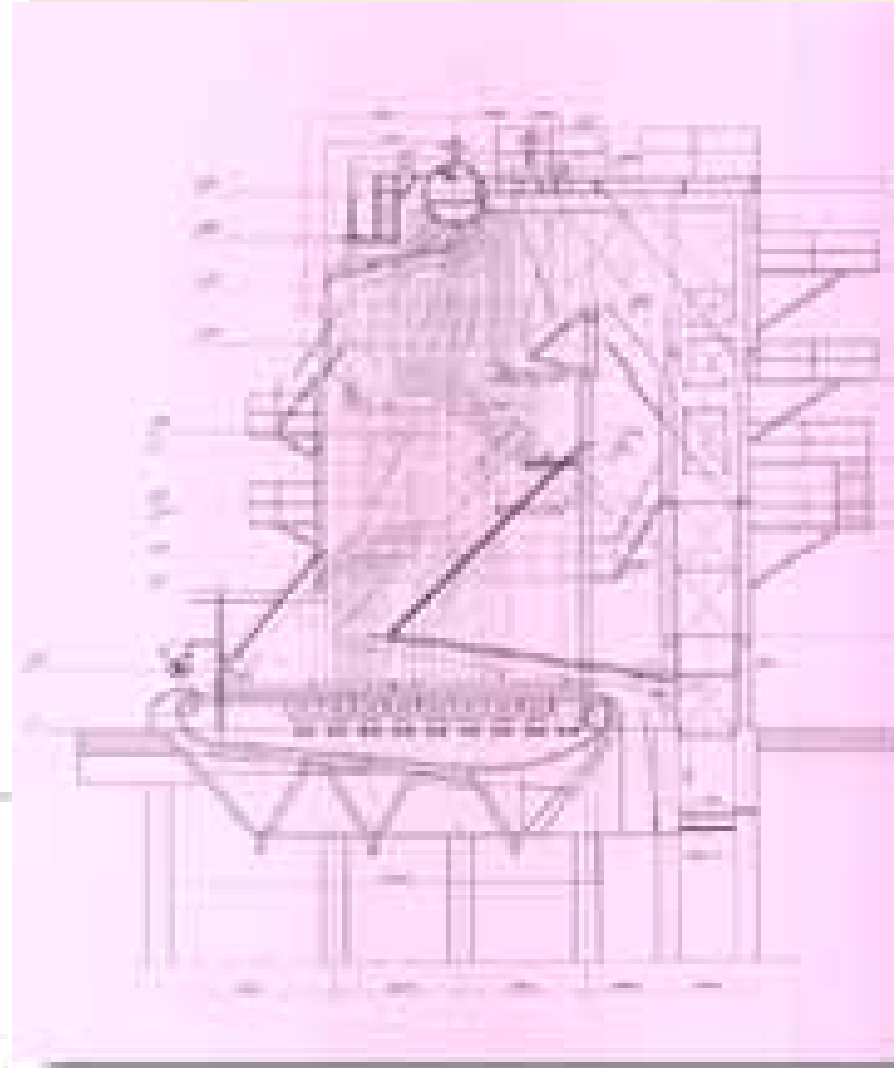
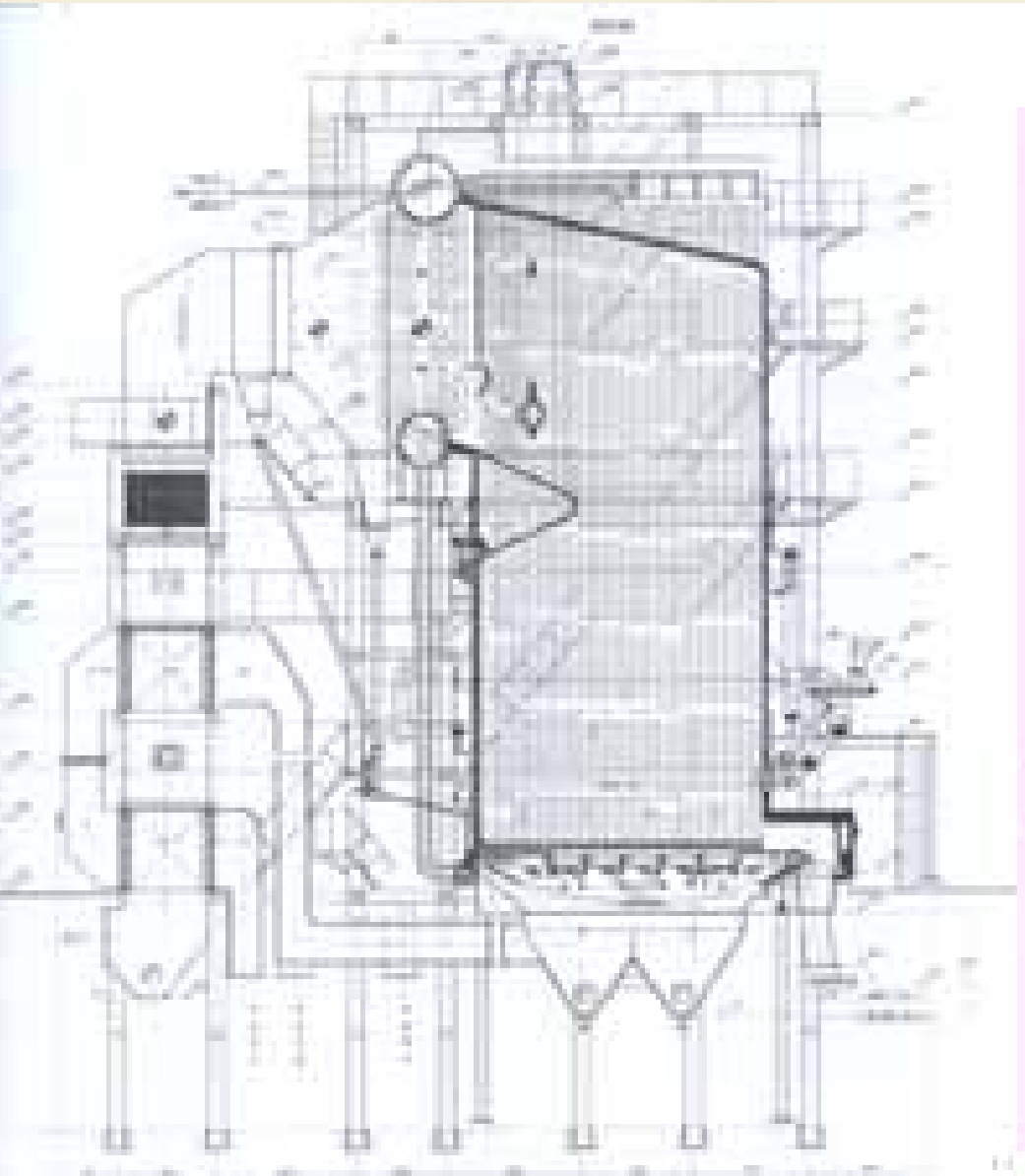


图 4-6 机械-风力抛煤机炉

1—煤斗；2—抛煤机；3—摇动炉排；4—飞灰回收再燃装置的导管；5—风室与渣斗；6—总风道

特点：1)着火具有“双面引火”的条件。  
2) 炉排上煤粒分布不均，粗在后、细在前 → 链条炉排则倒转





### 3.链条炉排炉

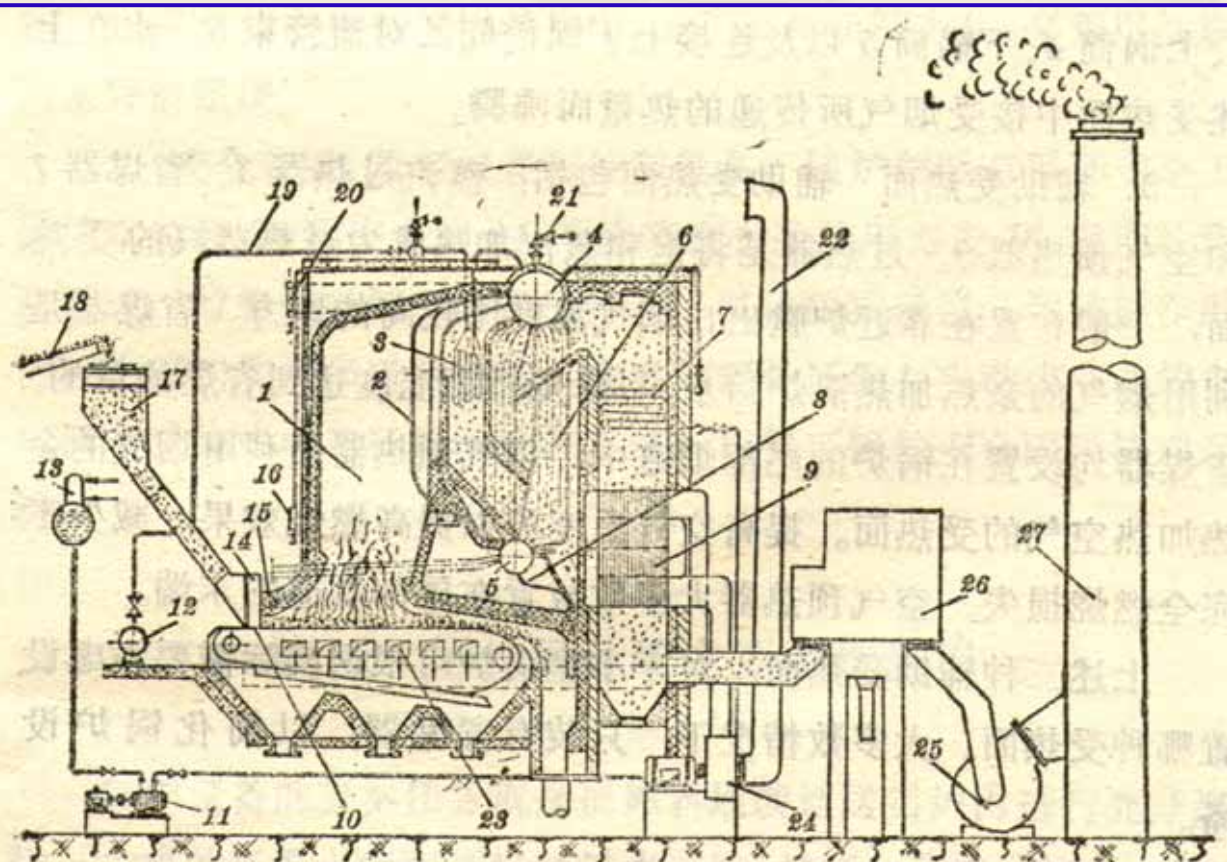
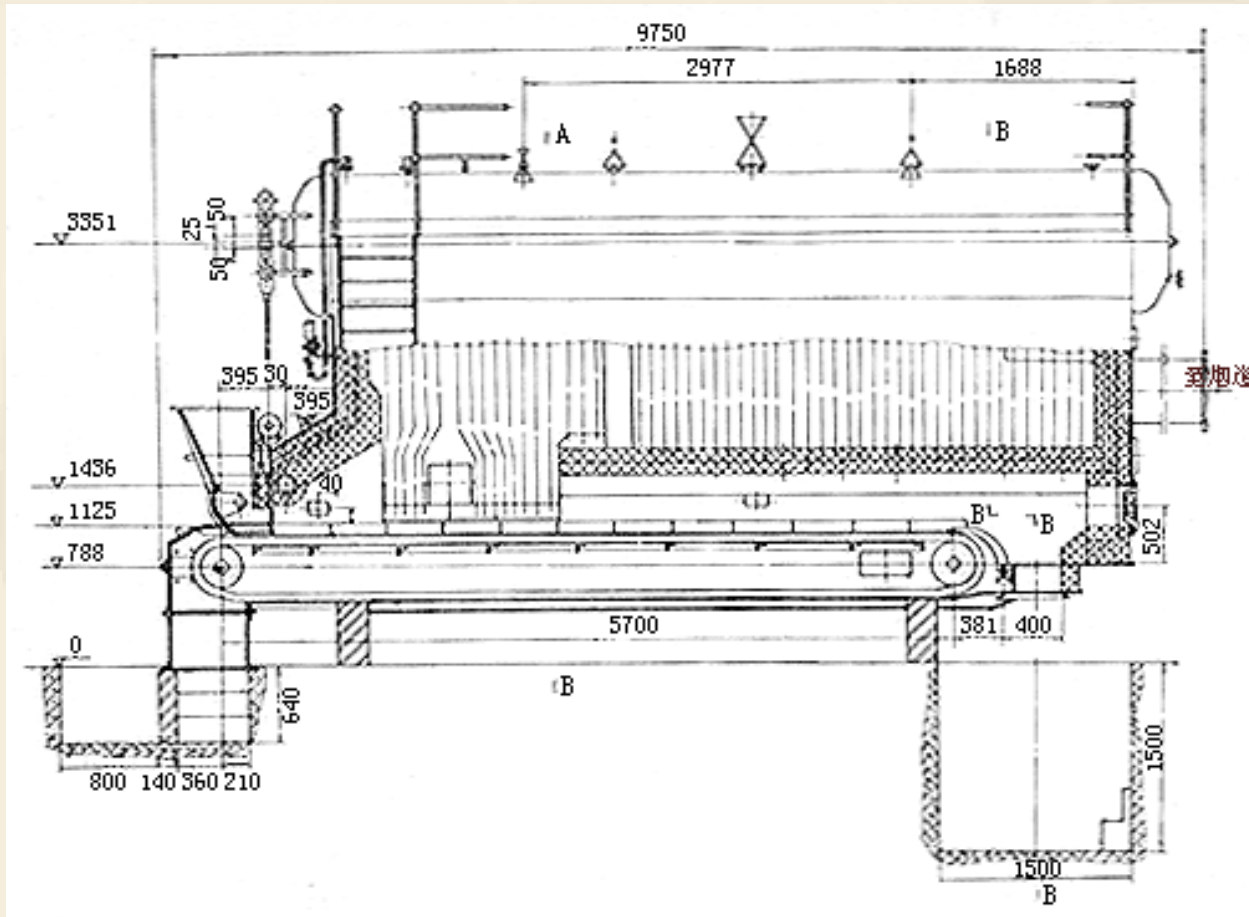


图 1-1 工业锅炉设备简图

- 1—炉膛； 2—水冷壁管； 3—蒸汽过热器； 4—上锅筒； 5—下锅筒；  
 6—对流管束； 7—省煤器； 8—下降管； 9—空气预热器； 10—链条炉排；  
 11—给水泵； 12—集汽包； 13—除氧器； 14—煤斗； 15—前联箱；  
 16—压力表； 17—煤仓； 18—皮带运煤机； 19—主蒸汽管道； 20—水位表；  
 21—安全阀； 22—进风管； 23—送风室； 24—送风机； 25—引风机；  
 26—除尘器； 27—烟囱



DZL6-1.25-A II



## ❖ (一). 构造

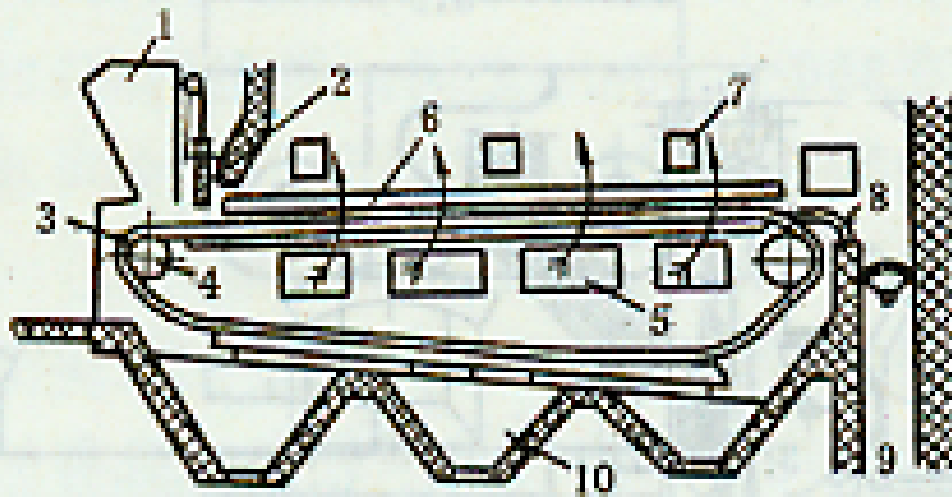


图 4-8 链条炉结构简图

1—煤斗； 2—煤闸门； 3—炉排； 4—主动链轮；  
5—分区送风仓； 6—防渣箱； 7—看火孔及检查  
门； 8—除渣板（老鹰铁）； 9—渣斗； 10—灰斗

## (二). 炉排结构型式

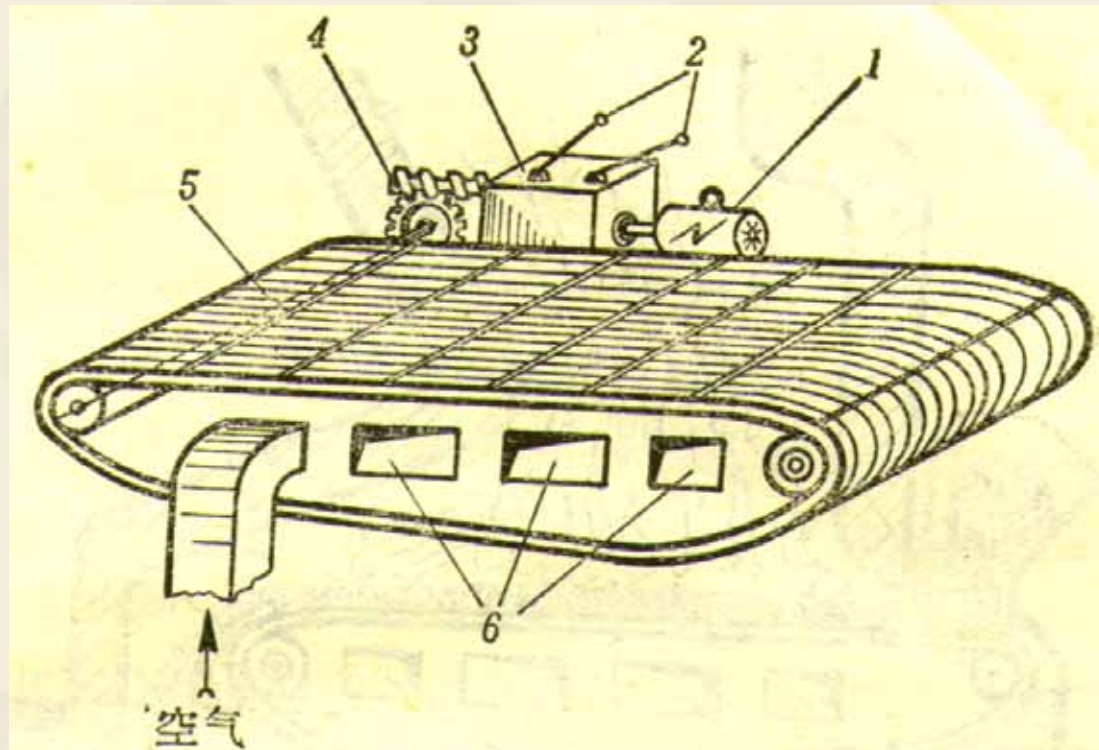


图 4-6 链条炉排示意图

1—电动机； 2—变速手柄； 3—变速箱；  
4—减速蜗轮； 5—炉排； 6—送风室

链条炉排示意



### a. 鳞片式链条炉排

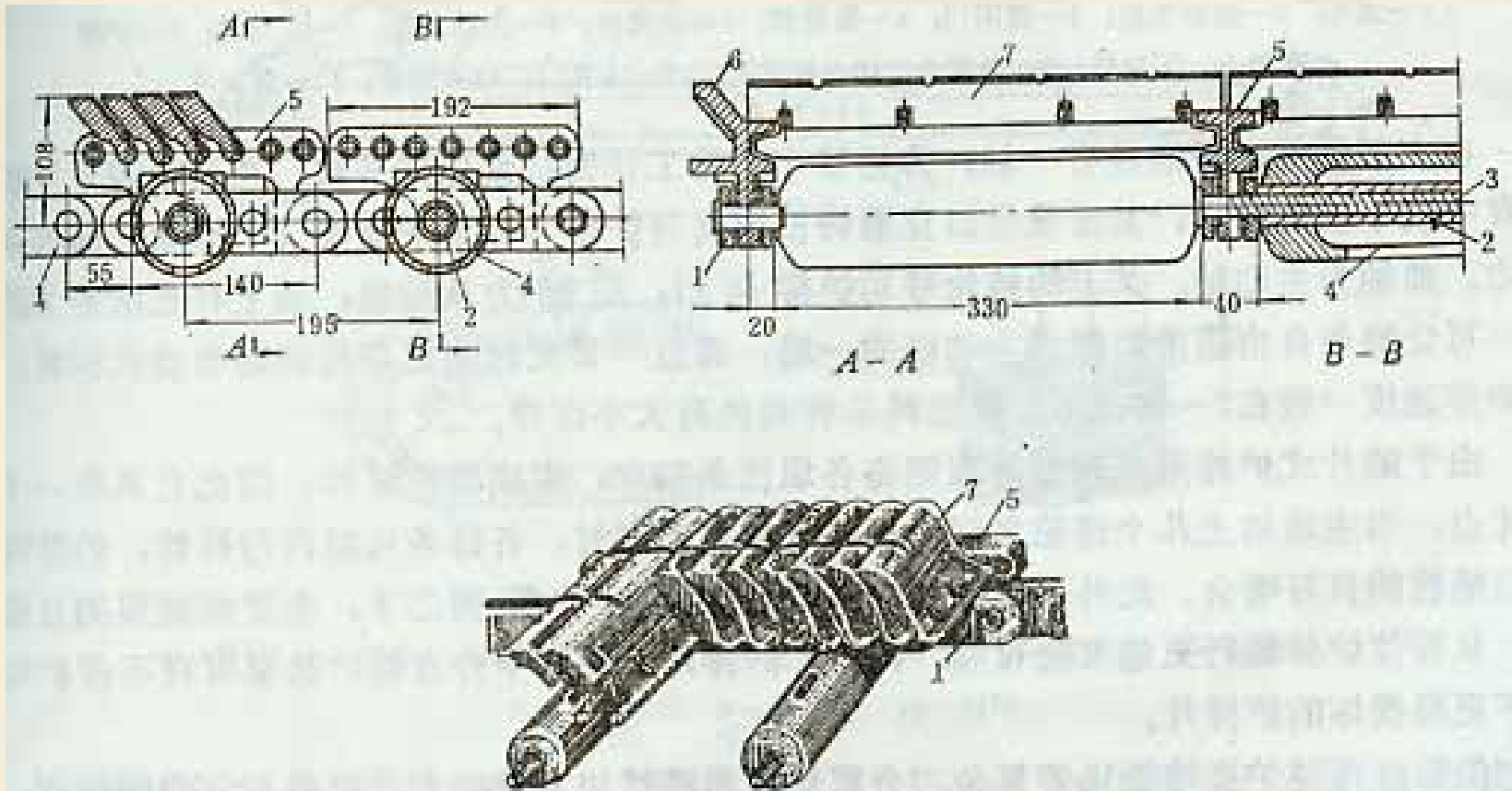


图 4-9 鳞片式炉排结构

1—链条；2—节距套管；3—拉杆；4—铸铁滚筒；5—炉排中间夹板（手枪板）；6—侧密封夹板（边夹板）；7—炉排片

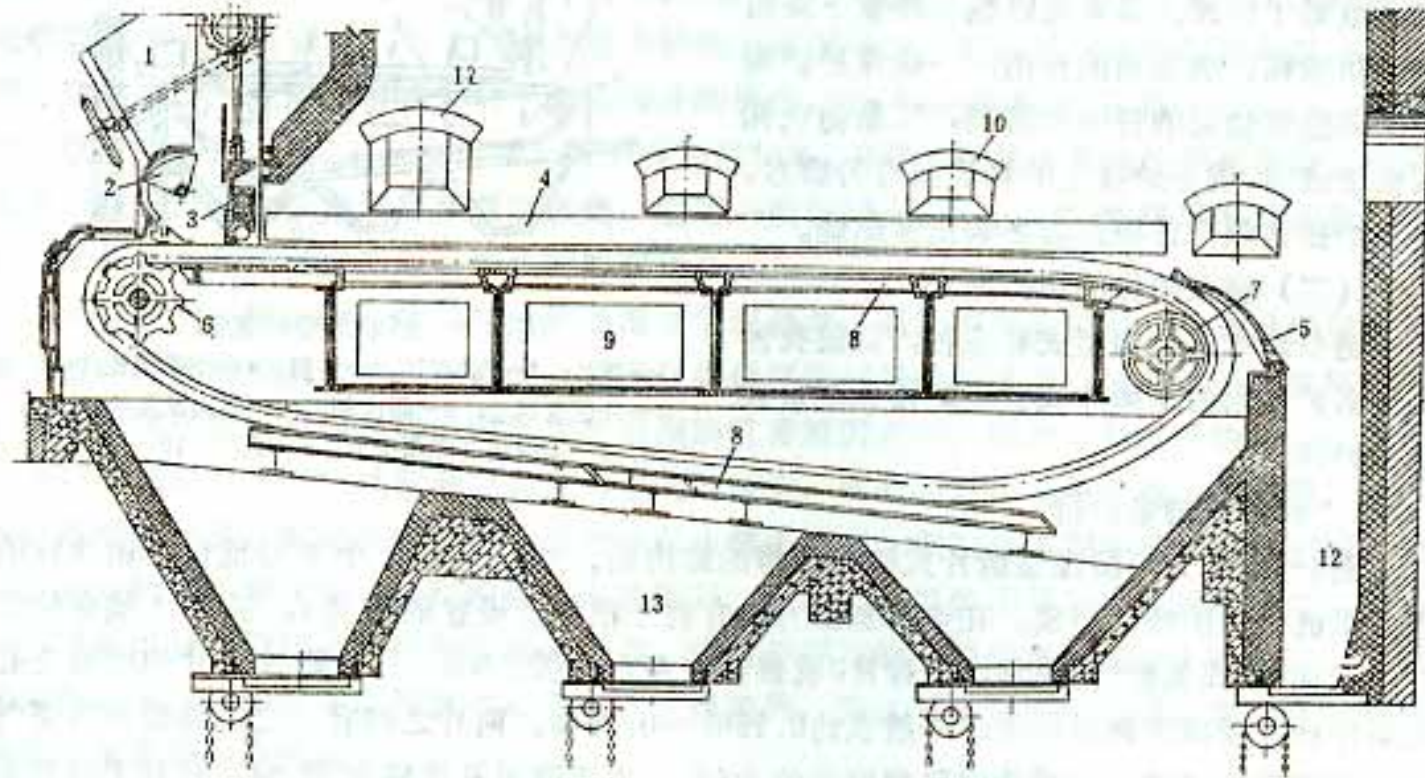
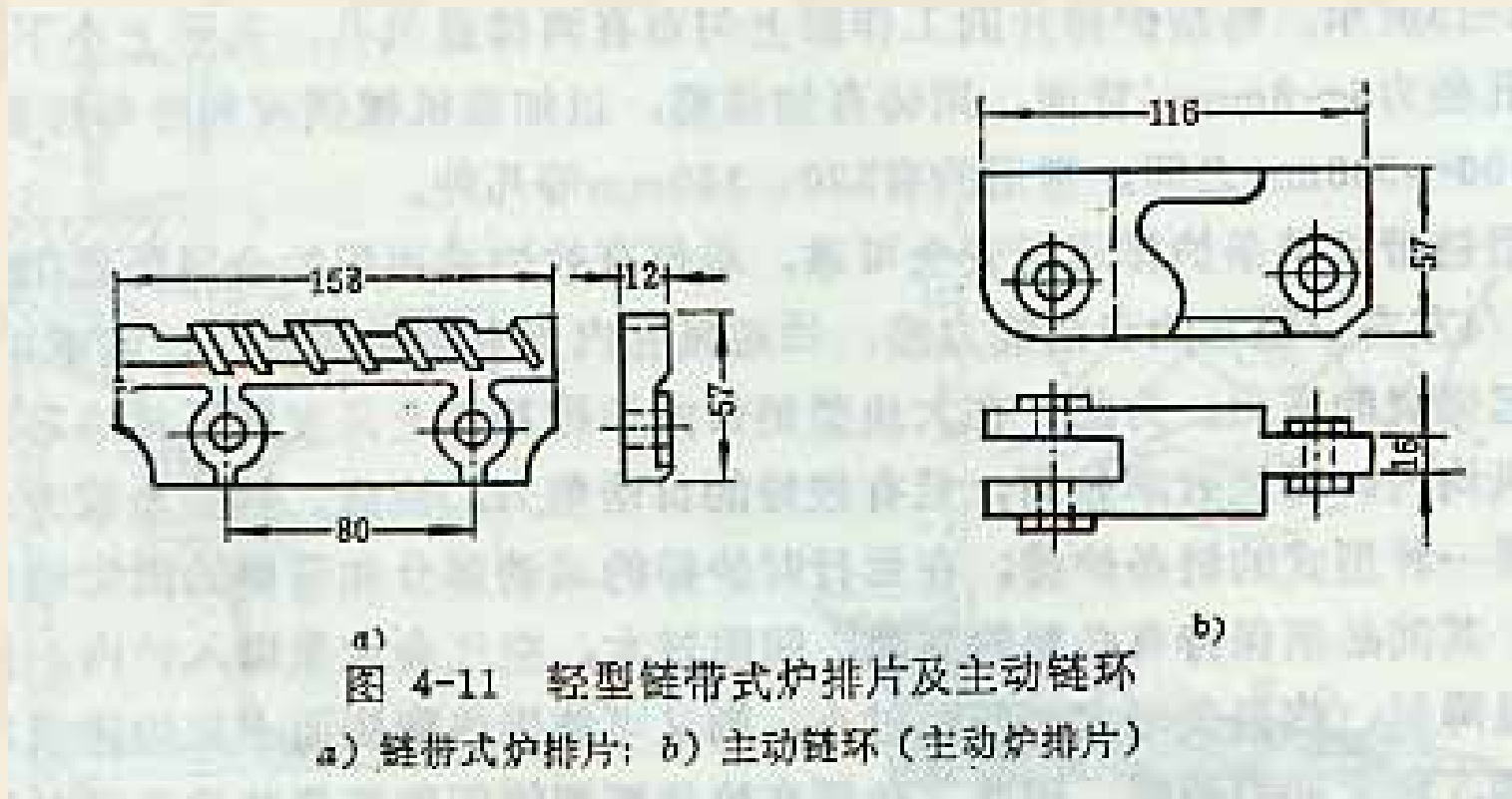


图 4-10 鳞片式炉排总图

1—煤斗；2—扇形盖板；3—煤闸门；4—防渣箱；5—老鹰铁；6—主动链轮；7—从动轮；8—炉排  
支架上、下导轨；9—送风仓；10—拨火孔；11—人孔门；12—渣斗；13—漏灰斗

## b. 链带式链条炉排



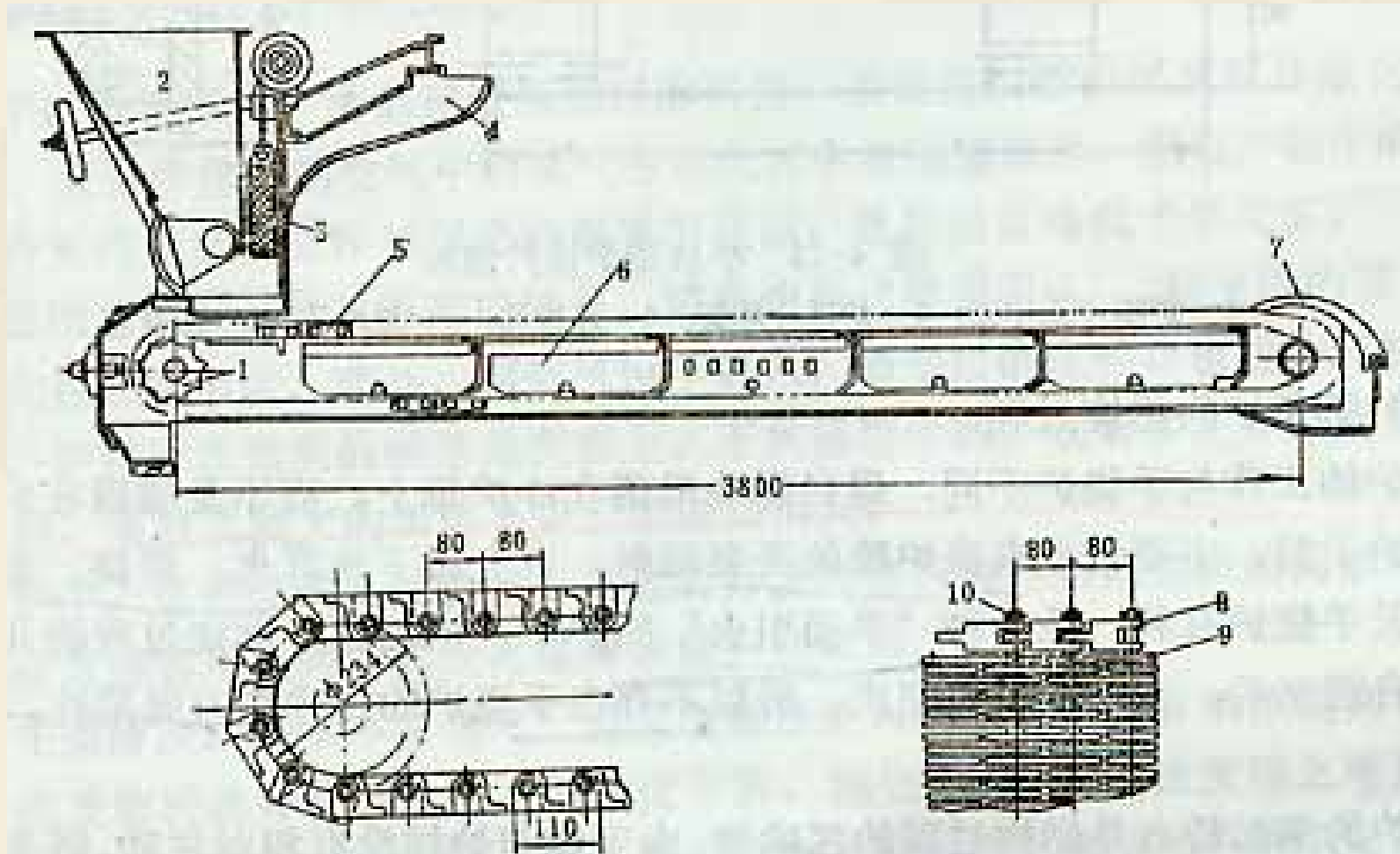


图 4-12 轻型链带式链条炉排

1—链轮； 2—煤斗； 3—煤闸门； 4—前拱砖吊架； 5—炉排； 6—隔风板； 7—老鹰铁；  
8—主动链环； 9—炉排片； 10—圆钢



### c. 炉排的密封装置

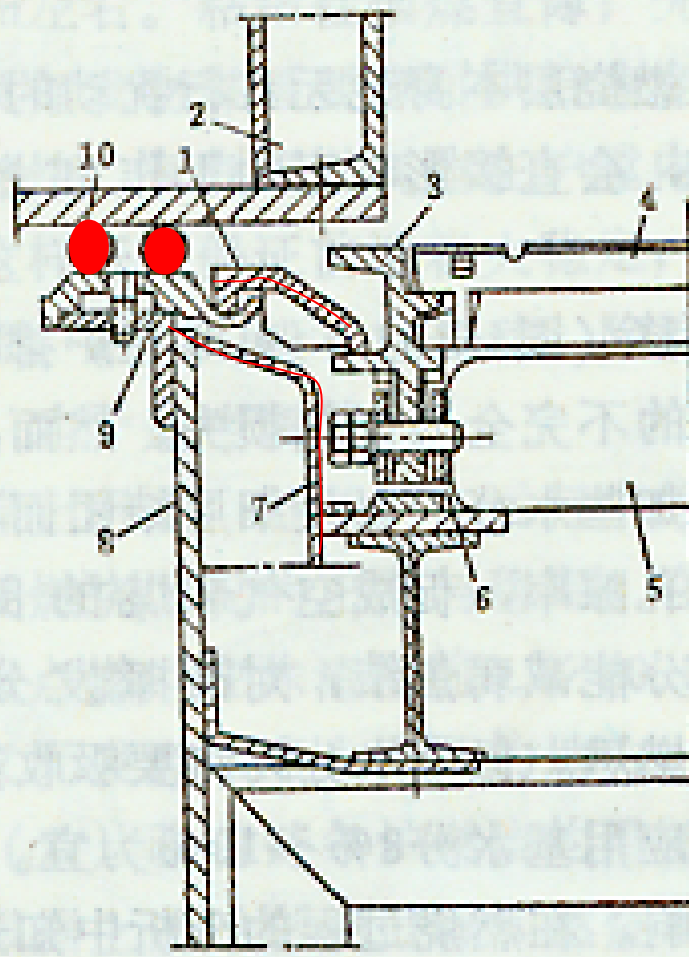


图 4-14 接触式侧密封装置

1—密封搭板； 2—防焦箱； 3—炉排边夹板； 4—炉排片； 5—铸铁滚筒； 6—链节； 7—密封薄板； 8—炉排墙板； 9—固定板； 10—石棉绳



### ❖ (三) . 链条炉燃烧过程

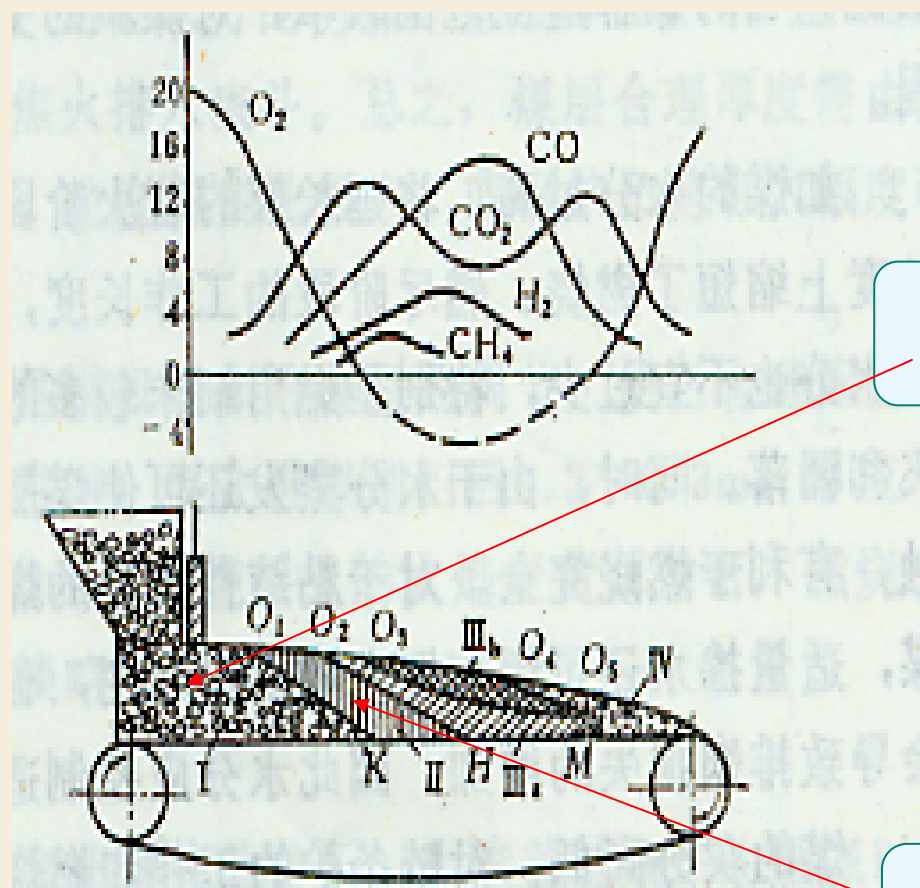
#### ❖ (1) 单面(上面)引火, 自上而下燃烧 (即上部引燃)

着火依靠炉膛的高温辐射, 烟气对流换热, 因为有一个较为缓慢的预热、干燥、 $V$ 逸出的过程, 所以不产生黑烟。



未与炽热的碳接触

#### ❖ (2) 燃烧过程具有区段性



I. 新煤区

II. 挥发物析出、燃烧区

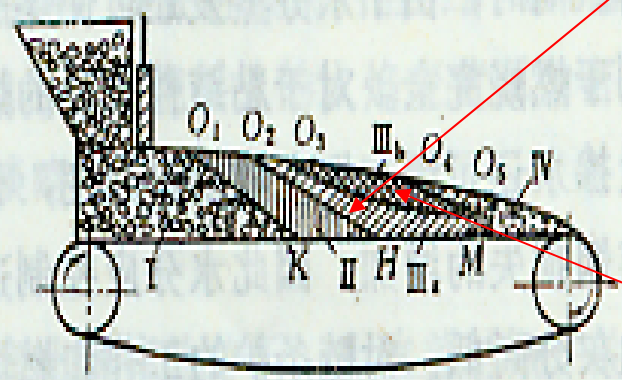
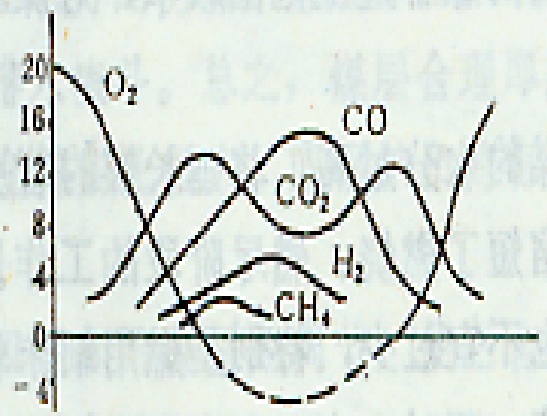
等温面

预热干燥  
 $O_1K$  斜面开始析出挥发物  
 不需要  $O_2$ ,  $O_2$  浓度不变

$O_1K \sim O_2H$  间析出全部挥发物  
 同时开始着火燃烧 (主要是挥发物)

$O_2$  浓度  $\downarrow$ ,  $CO_2$   $\uparrow$

图 4-15 链条炉燃烧过程与烟气成分示图  
 I—新煤区; II—挥发物析出、燃烧区; III—焦炭燃烧氧化区; III<sub>1</sub>—焦炭燃烧还原区; IV—灰渣形成区



IIIa. 焦炭燃烧  
氧化区

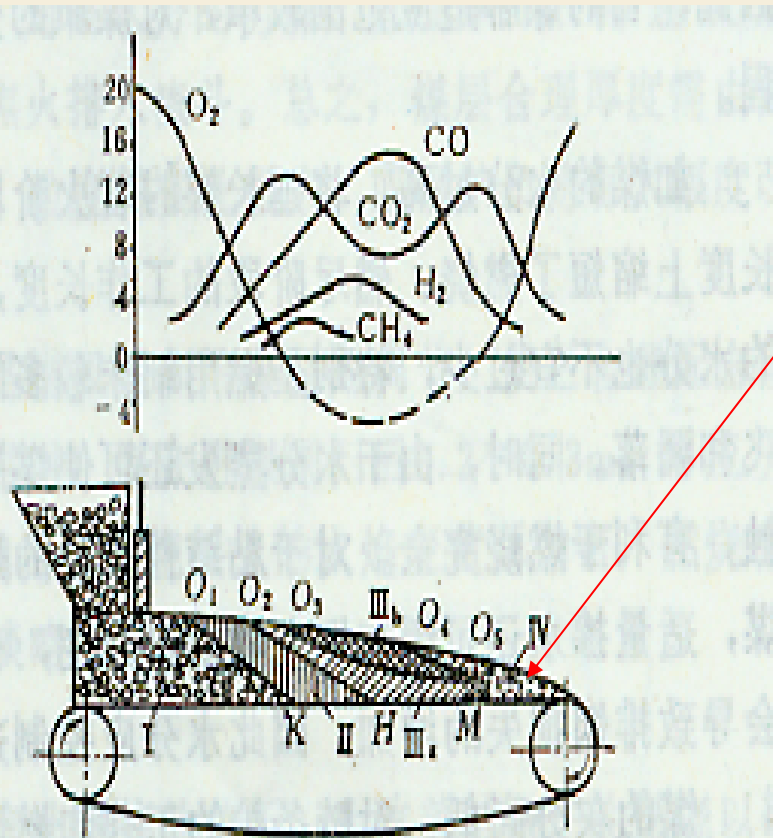
$O_2$ 开始焦炭着火燃烧  
温度迅速升高  
燃烧激烈，氧化层渐厚  
空气中的 $O_2$ 迅速耗尽， $\alpha = 1$   
 $CO_2$ 出现第一个峰值

IIIb. 焦炭燃烧  
还原区

氧化区产物 $CO_2$ 、 $H_2O$ 上升到还原区被炽热的焦炭还原 ( $\alpha < 1$ )  
此区温度略低于氧化区  
 $CO \uparrow$  ,  $CO_2 \downarrow$  ,  
 $H_2O \uparrow$

图 4-15 链条炉燃烧过程与烟气成分示图

I—新煤区；II—挥发物析出、燃烧区；III<sub>a</sub>—焦炭燃烧氧化区；III<sub>b</sub>—焦炭燃烧还原区；IV—灰渣形成区



IV. 燃尽区

- 1° 单面引火，最上层煤先点燃，灰渣先在表面形成；
- 2° 空气由下进入，最底层煤燃尽较快，较早形成灰渣；
- 3° 因此末端焦炭的燃尽夹在上、下灰渣层中，对多灰份煤，O5向后延伸，造成Q4 ↑
- 4 ° CO<sub>2</sub>浓度又达到一个峰值
- 5 ° O<sub>2</sub> ↑, CO ↓, H<sub>2</sub> ↓

图 4-15 链条炉燃烧过程与烟气成分示图

I—新煤区； I—挥发物析出、燃烧区； II<sub>1</sub>—焦炭燃烧氧化区； II<sub>2</sub>—焦炭燃烧还原区； IV—灰渣形成区

## (四). 对燃烧过程的影响因素

### ❖ 1. 拱的作用

- ❖ 改变气流方向，增强扰动，使可燃气体（或未燃尽飞灰与）空气充分混合接触，为燃尽创造条件；引燃着火的作用
- ❖ 前拱：引燃
- ❖ 后拱：对过量 $O_2$ （后炉排）起引导作用；形成“火雨”，改善着火条件

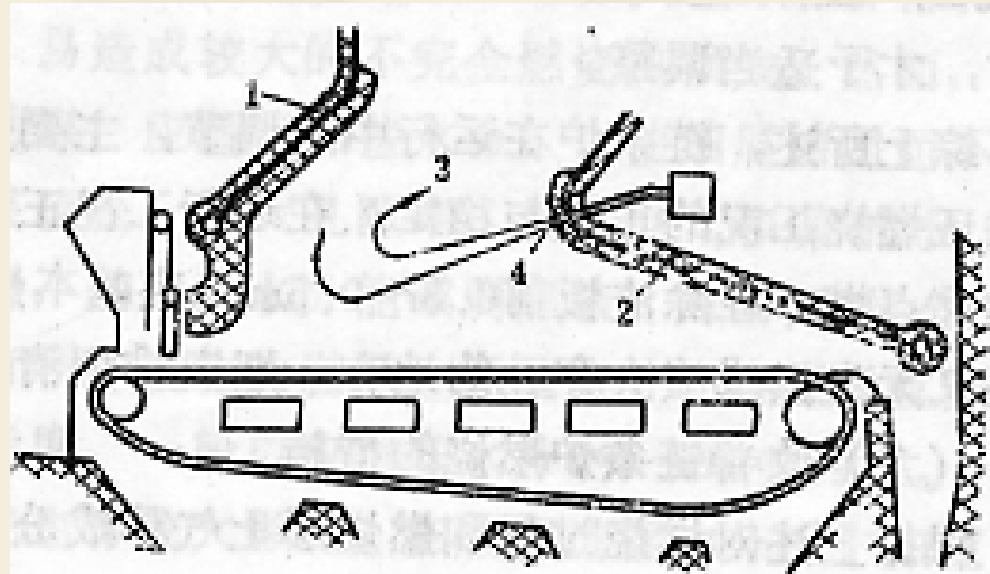


图 4-17 炉拱与喉口及二次风的关系  
1—前拱； 2—后拱； 3—喉口； 4—二次风



- ❖ 2. 二次风（布置在后拱）
- ❖ 1) 强化气流扰动，混合，降低 $q_3$ ， $\alpha \downarrow$
- ❖ 2) 将高温烟气引向炉前，引燃作用
- ❖ 3) 形成漩涡，延长细屑燃料的停留时间
- ❖ 4) 分离碎屑碳粒，减少飞灰
- ❖ 二次风的作用不在于补给空气，主要在于加强烟气扰动、混合。
- ❖ 二次风量5~15%
- ❖ 风压：2000~4000Pa
- ❖ 风速：50~80m/s
- ❖ 工质：空气、烟气、蒸汽

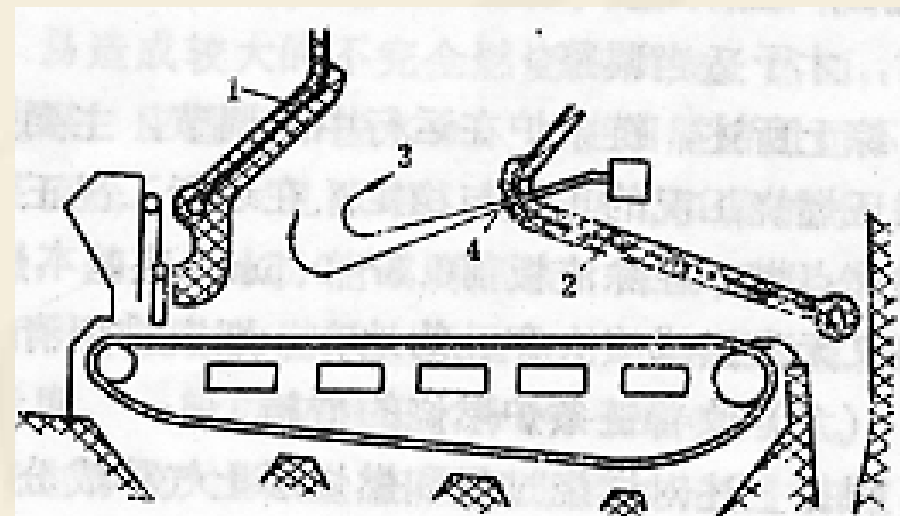


图 4-17 炉拱与喉口及二次风的关系

1—前拱；2—后拱；3—喉口；4—二次风

- ❖ 3. 分区配风
- ❖ 两端少、中间多
- ❖ 炉排下端统仓风室分成独立小风室（4~6个）
- ❖ 作用：a.有效降低  $\alpha_1''$ ，保持高温，减少  $q_2$
- ❖ ※但增大中段风量，只能增强燃烧，无法消除还原区的出现

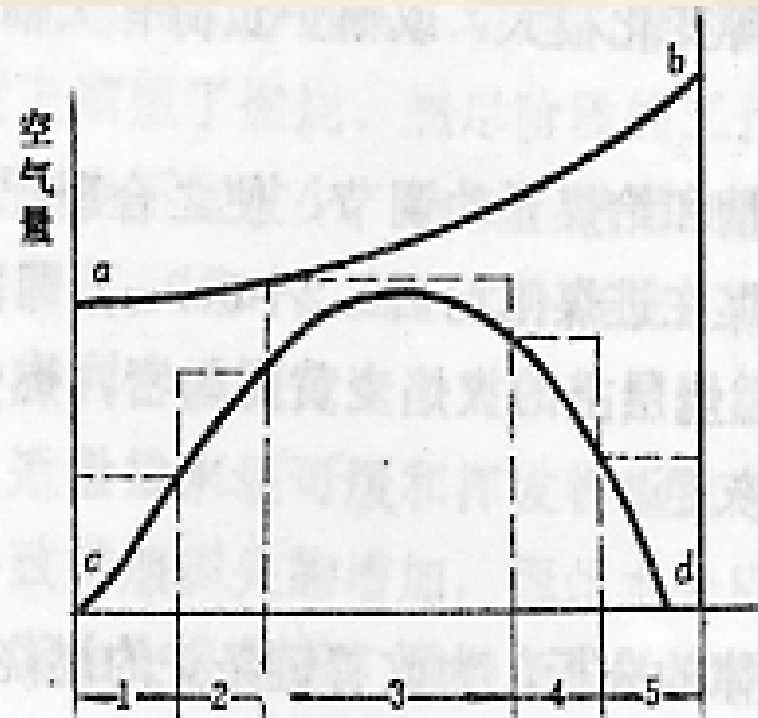


图 4-16 链条炉空气分配情况

ab—统仓送风时进风量分配情况；cd—燃烧所需空气量；----分区送风时进风量分配情况

## ❖ 4. 煤性质对燃烧的影响

单面引火，着火条件差，对煤质敏感

❖ 1° 水分 $W^y$ : 8~10%为宜

❖ 2°  $A^g \leq 30\%$

❖ 灰份熔融温度 $t_3 \geq 1200\text{ }^\circ\text{C}$

❖ 3°  $V \rightarrow$ 着火难、易

❖ 4° 粘结性适中（混用）

❖ 5° 煤的粒度20~25mm

{ 多 工作长度↓  
少 有利于结  
团、疏松  
减少焦结

## ❖ 5. 链条炉燃烧调节

- ❖ 负荷变化时，先调风量，再改变煤量
- ❖
- ❖ 炉排速度：2~20m/h（6m/h）
- ❖ 煤层高度：100~150mm
- ❖ 炉排通风截面比：6%

特点

- 1) “单面引火”
- 2) 对燃料的性质要求严，  
一经设定，则不宜经常变动。

## 4.往复炉排炉

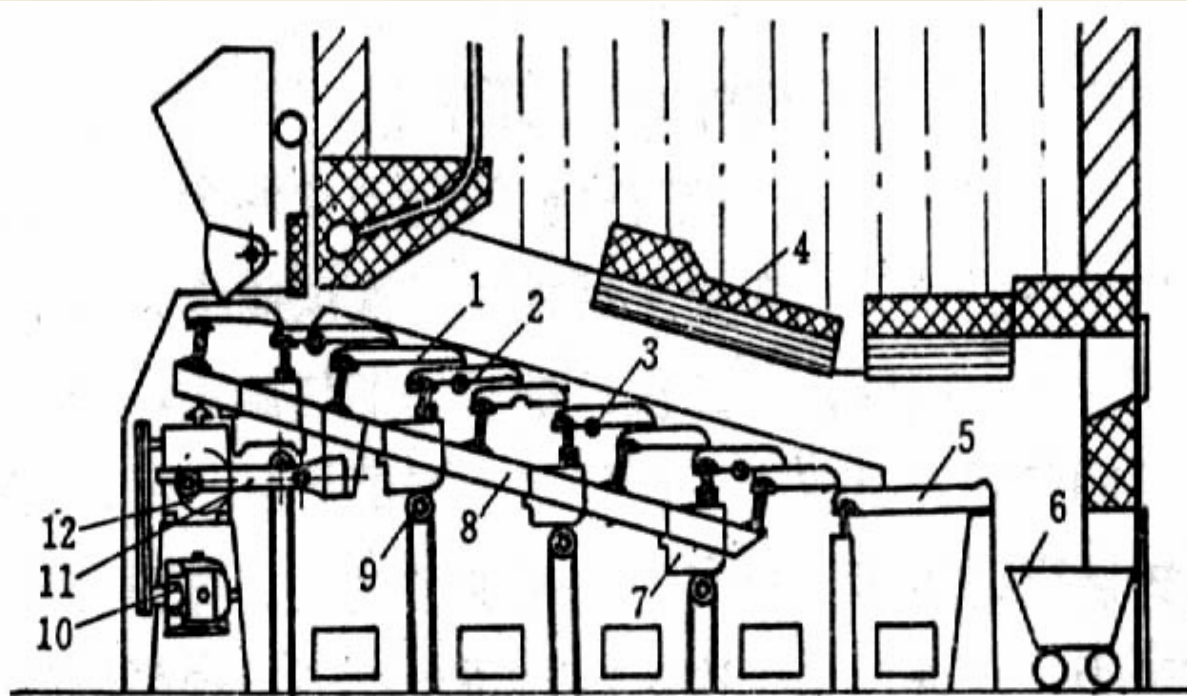


图 4-21 倾斜式往复炉结构简图

1—活动炉排；2—固定炉排；3—支承棒；4—炉拱；5—燃烬炉排；6—渣斗；7—固定梁；  
8—活动框架；9—滚轮；10—电动机；11—推拉杆；12—偏心轮

特点：实现了燃料层的相对运动，但是密封困难。



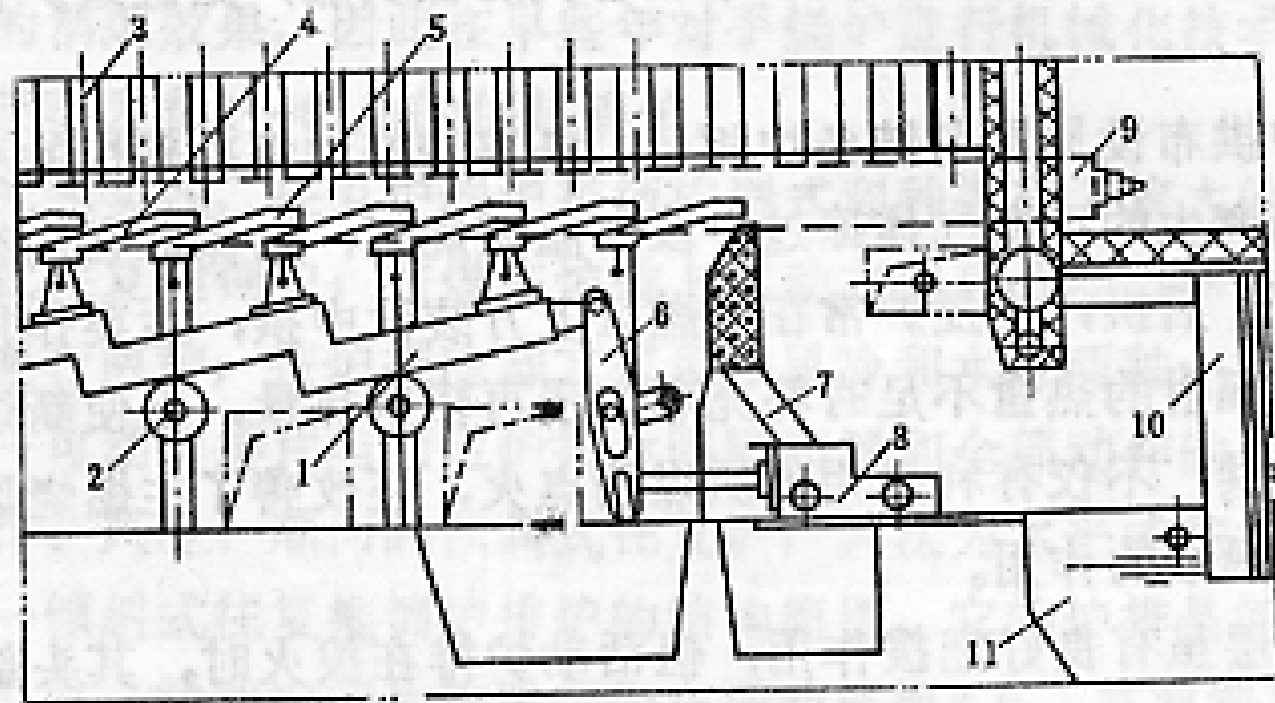
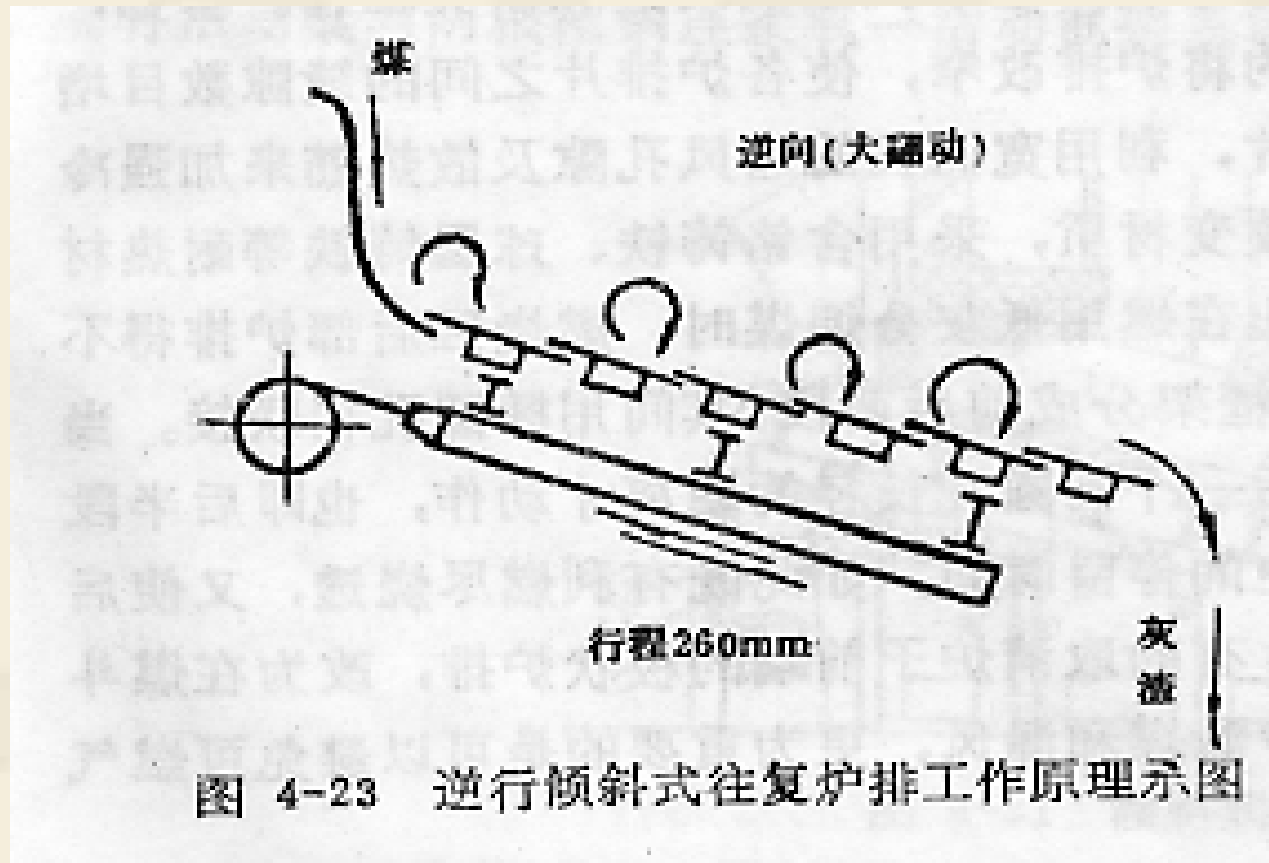
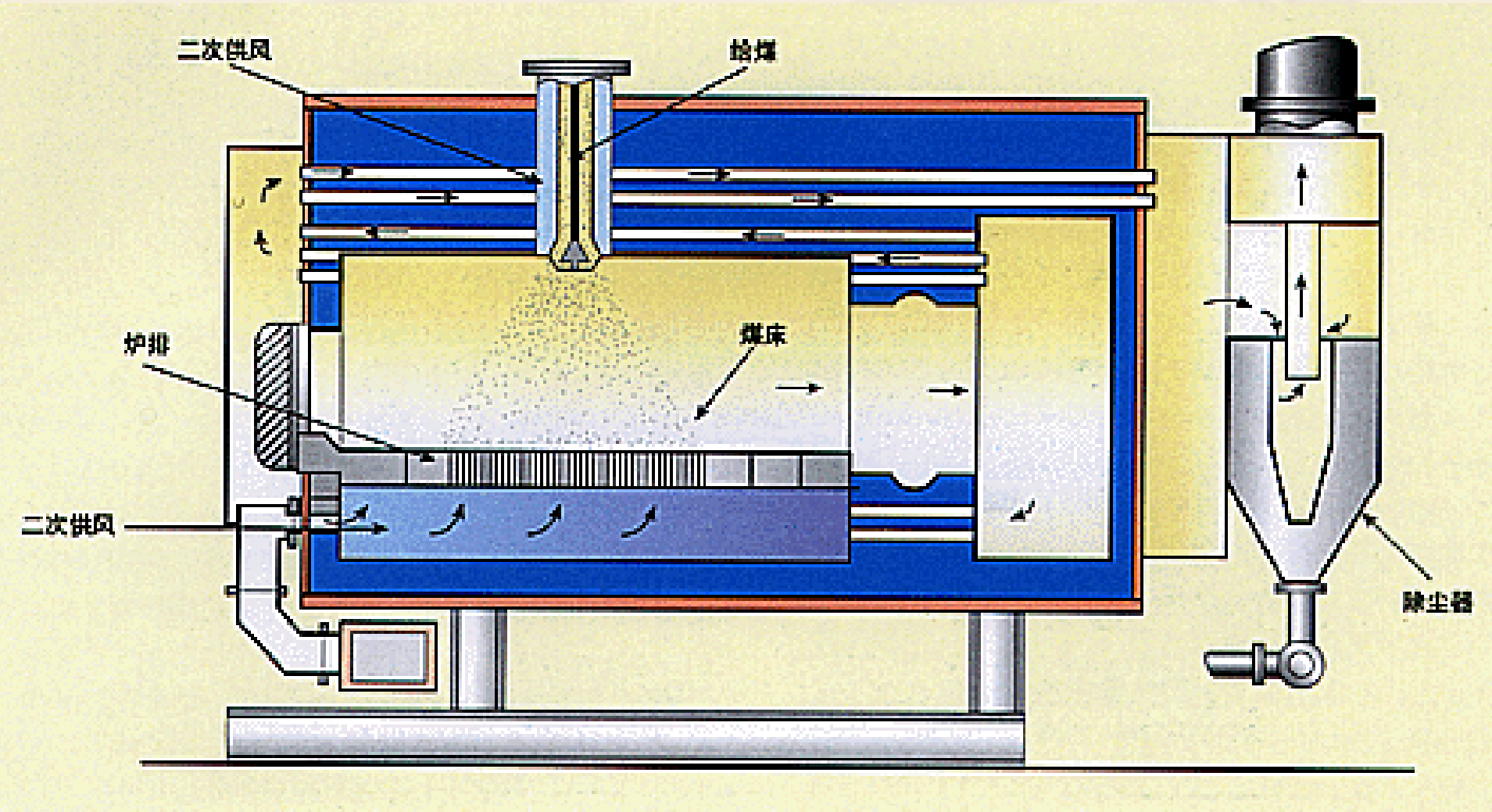


图 4-22 水平式往复推饲炉排示图

1—推拉杆；2—滚轮；3—侧水冷壁；4—活动炉排片；5—固定炉排片；6—拨动板；7—固定燃尽炉排；8—活动燃尽炉排；9—侧水冷壁下集箱；10—密封板；11—水封渣坑



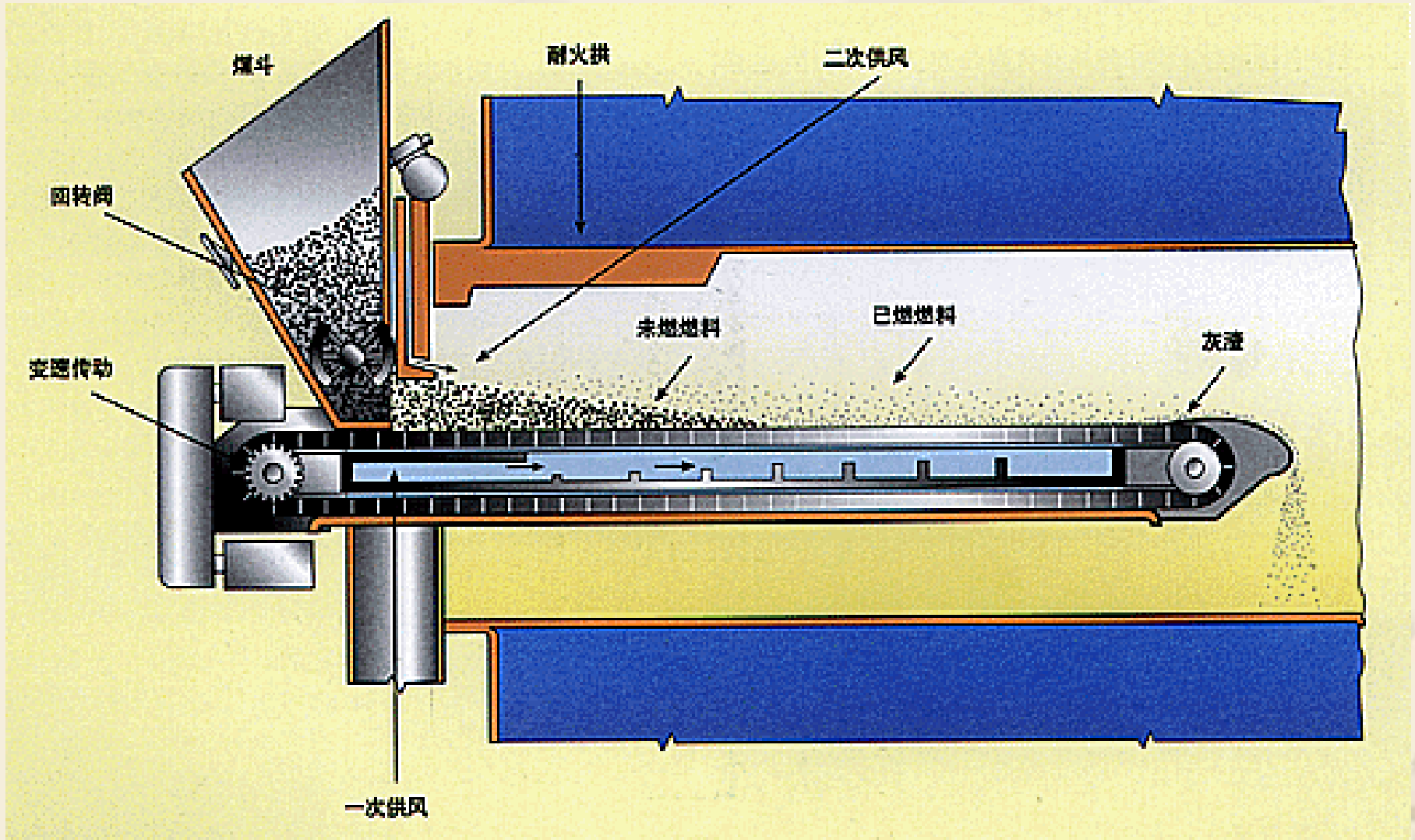
层燃炉特点：燃料在炉排上的燃烧和在炉膛空间的燃烧同时存在。



固定炉排炉

- ❖ 煤由给煤螺杆计量后，送到由许多单个钢铸炉排组成的固定炉蓖上。由人工定期对炉蓖进行除灰，除灰周期主要取决于锅炉负荷和燃料中的灰份含量。通过炉蓖供给一次风；一次风穿过炉蓖后压力下降，以确保配风均匀。煤送到炉层上时供给二次风，二次供风对于烟气净化来说至关重要。为确保良好燃烧，风量、风速和风向都必须进行优化。对于这种类型的燃煤设备来说，大量工作是放在确定最优燃烧条件上。
- ❖ 适用的锅炉功率范围很广(600kW~11MW)，且调节比最高达4：1。
- ❖ 煤的额定粒级为最大粒径12.5~32mm
- ❖ 由于除灰需要，灰分含量一般要限制，因而需要用洗选煤。



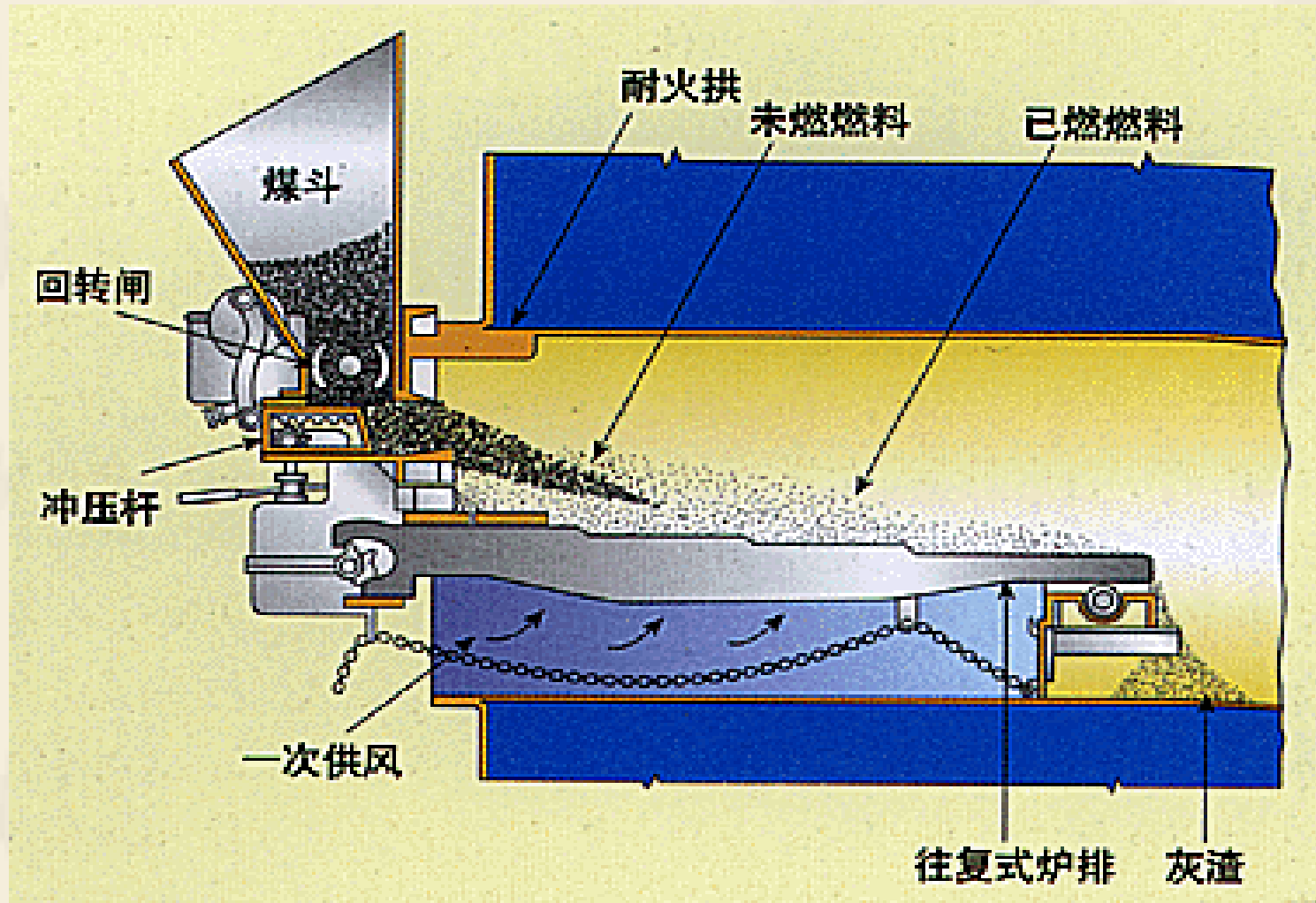


链条炉系统

- ❖ 性能良好、需极少人工控制的自动化装置。干馏式燃烧系统一般是用于功率为1.8~6MW的锅炉。煤由安装在锅炉前部的煤斗冲压杆送到由多个往复杆组成的炉蓖上。这是一个连续过程，煤点火是通过一个小耐火拱的热反射实现的。往复杆在凸轮驱动下依次移动，煤就是通过这样一种方式沿炉排运移。当煤沿炉排运移时，由鼓风机通过炉排鼓一次风，以使之燃烧。灰渣从炉排尾端落下，然后由人工或自动从炉底下清走。二次风可以从燃烧床上部供入，另一个方法是用蒸汽喷射装置在火焰上部制造紊流，由此使烟气排放量减至最小。

在煤斗和冲压杆之间，加入一个回转阀或“挡火”装置，从而排除了燃烧前移返回贮煤区的可能。

- ❖ 最大粒径为：25~32mm的煤
- ❖ 可能会增加通过炉蓖的未燃煤损失量。
- ❖ 措施：需要对往复式炉排进行定期检查和调整，以确保炉排间的间隙



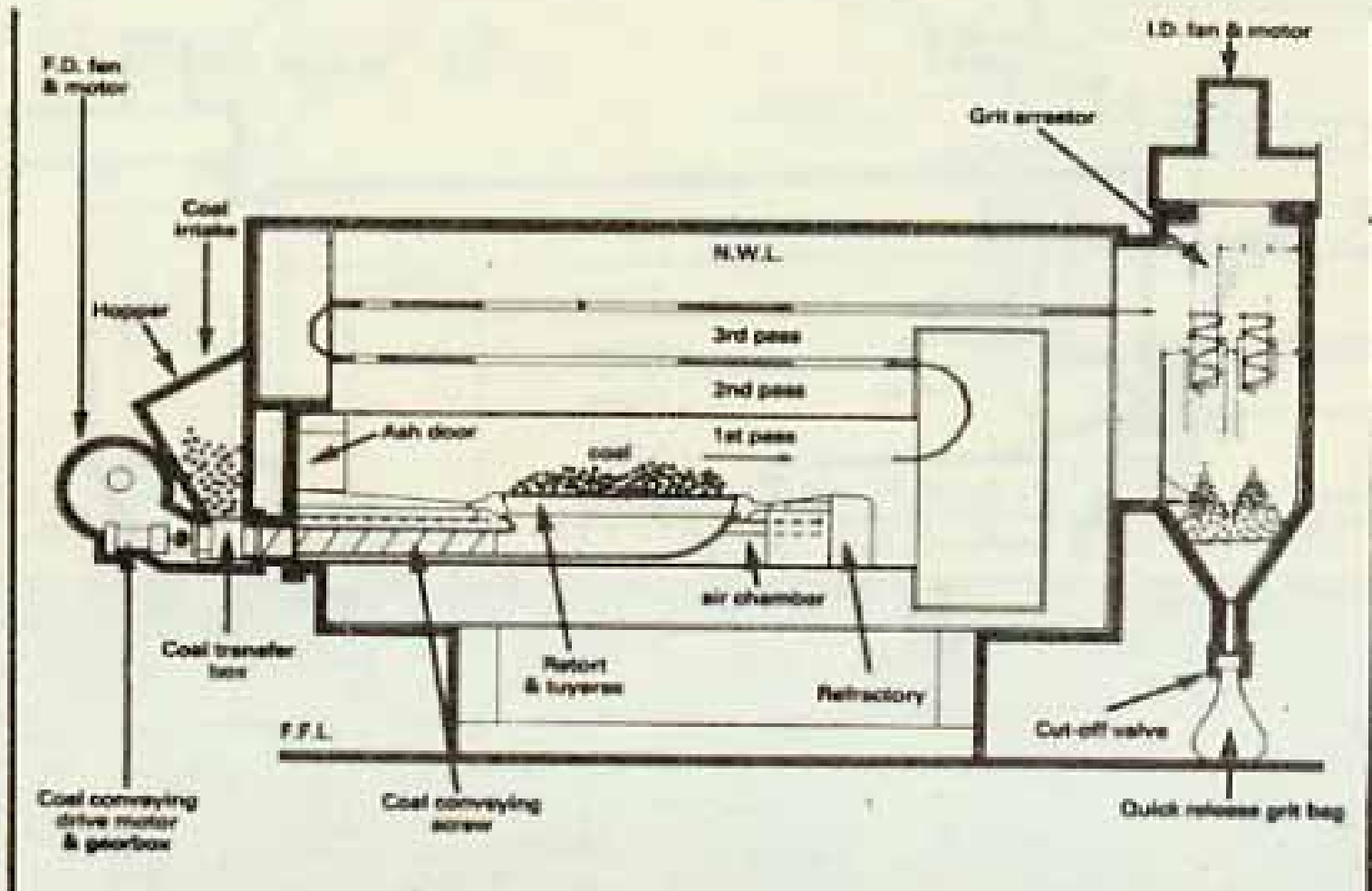
干馏式锅炉

- ❖ 性能良好、需极少人工控制的自动化装置。干馏式燃烧系统一般是用于功率为1.8~6MW的锅炉。煤由安装在锅炉前部的煤斗冲压杆送到由多个往复杆组成的炉蓖上。这是一个连续过程，煤点火是通过一个小耐火拱的热反射实现的。往复杆在凸轮驱动下依次移动，煤就是通过这样一种方式沿炉排运移。当煤沿炉排运移时，由鼓风机通过炉排鼓一次风，以使之燃烧。灰渣从炉排尾端落下，然后由人工或自动从炉底下清走。二次风可以从燃烧床上部供入，另一个方法是用蒸汽喷射装置在火焰上部制造紊流，由此使烟气排放量减至最小。

在煤斗和冲压杆之间，加入一个回转阀或“挡火”装置，从而排除了燃烧前移返回贮煤区的可能。

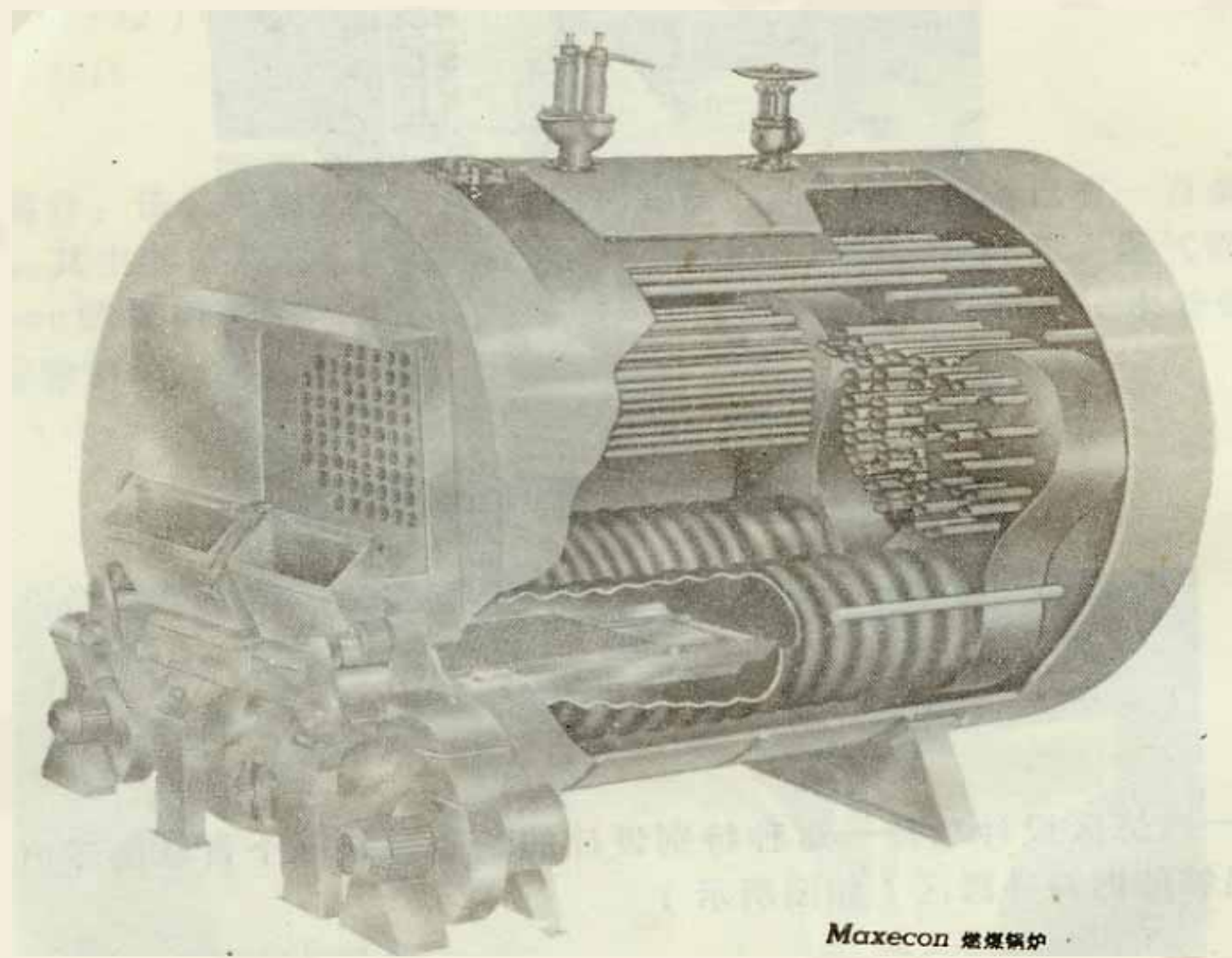
- ❖ 最大粒径为：25~32mm的煤
- ❖ 可能会增加通过炉蓖的未燃煤损失量。
- ❖ 措施：需要对往复式炉排进行定期检查和调整，以确保炉排间的间隙





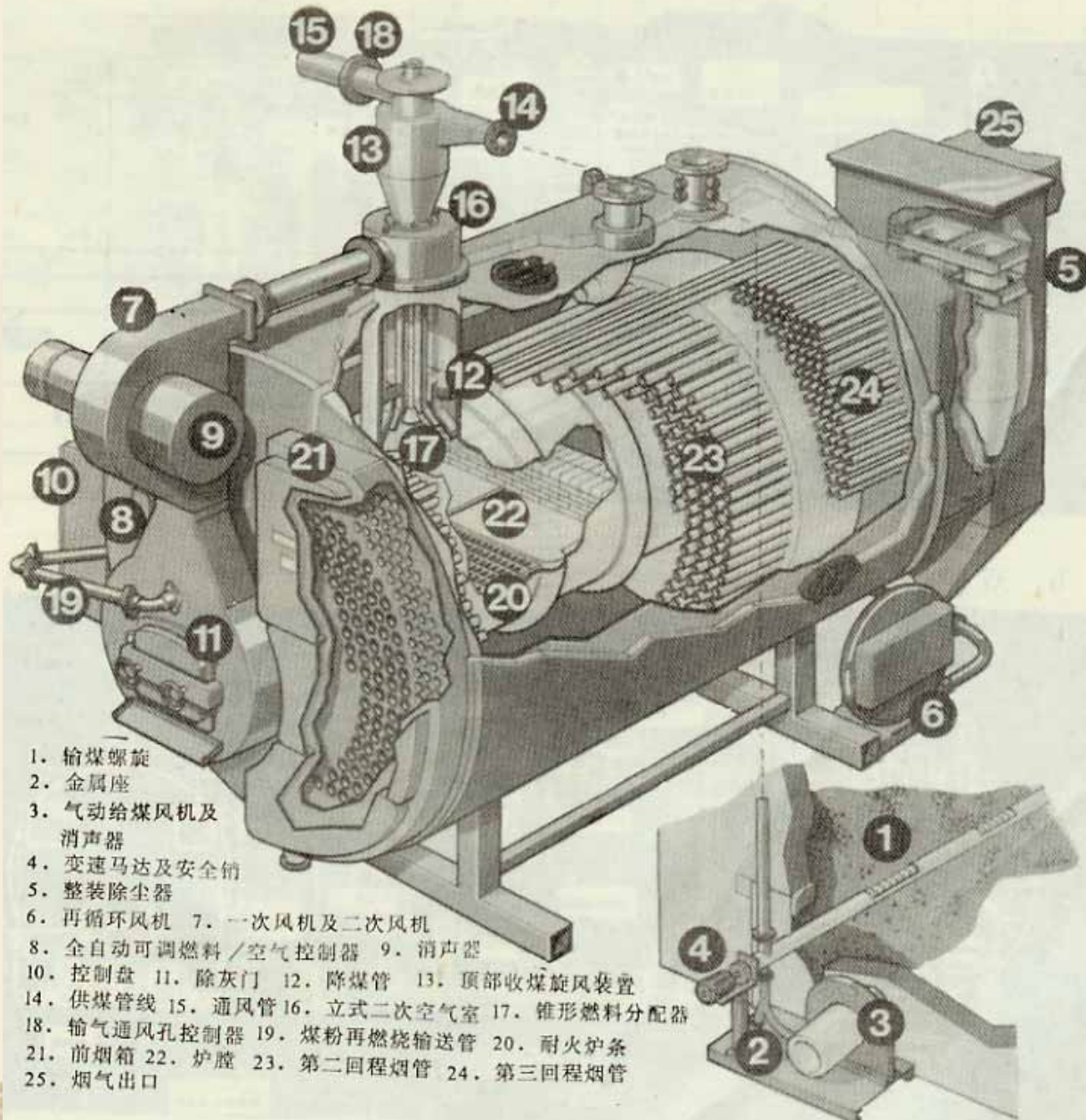
下饲式锅炉





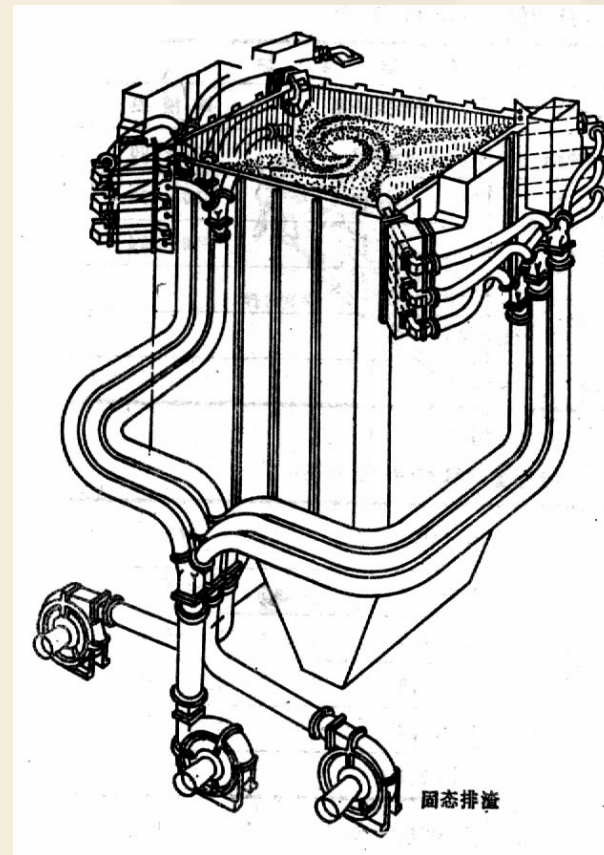
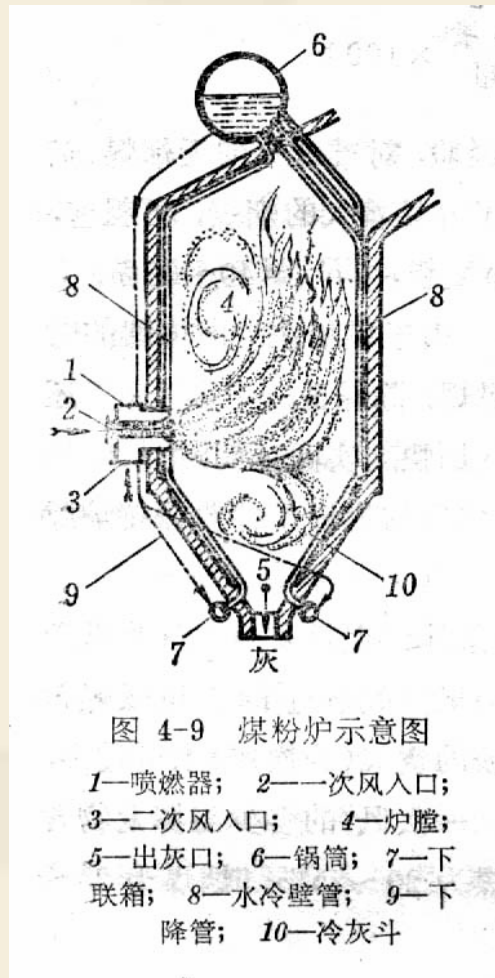
双炉膛锅炉

# 燃煤快装锅炉





## 二、煤粉炉



燃烧器四角切圆布置

特点：对负荷变化性差。

# 三、沸腾炉（流化床炉）

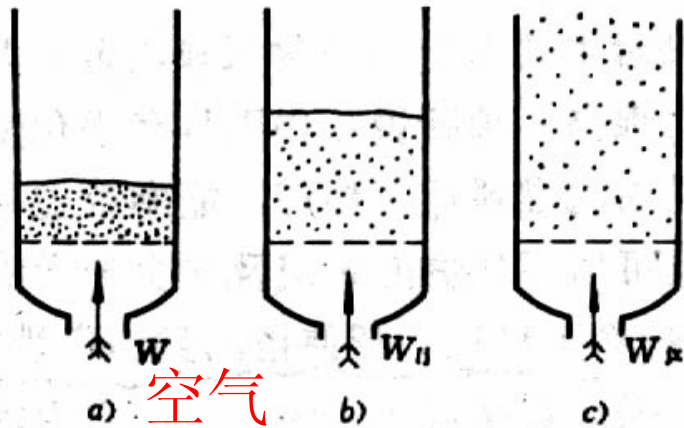


图 4-35 料层的不同状态  
a) 固定床; b) 沸腾床; c) 气力输送

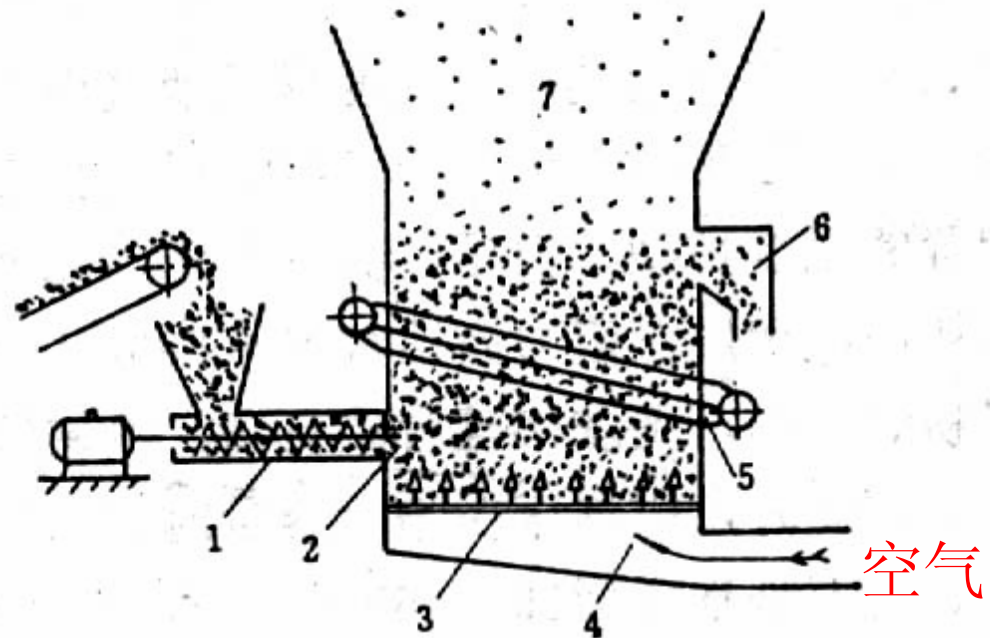


图 4-37 沸腾炉结构示意图  
1—给煤机; 2—料层; 3—风帽式炉排(布风板);  
4—风室; 5—沉浸受热面; 6—灰渣溢流口;  
7—悬浮段

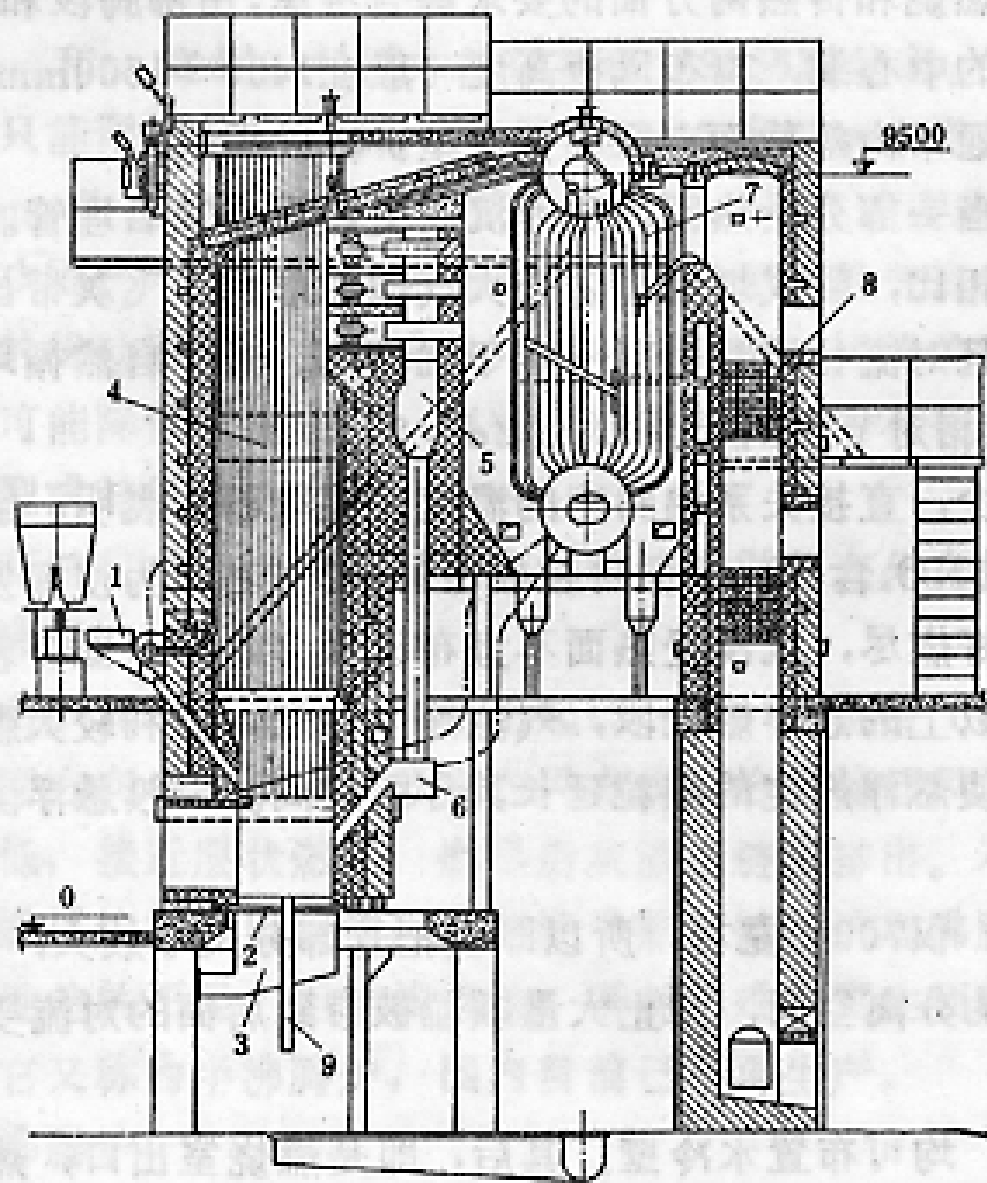


图 4-38 循环流化床炉结构简图

- 1—给煤装置；2—布风板；3—风室；4—炉膛；5—分离器；  
6—回料器；7—对流管束；8—省煤器；9—排灰口



特点：燃料沸腾燃烧，着火条件好，适用于劣质煤。

但，飞灰量大、且飞灰中可燃物含量高， $q_4$ 大， $\eta$ 低。

注意：流化的条件、流化床的压力损失特点；  
流化床的脱硫脱硝能力

# ❖ 水煤浆环保锅炉

## 1 水煤浆燃料特性

水煤浆是由65—70%不同粒度分布的煤粉、30—35%的水和约1%的添加剂制成的混合物，是七十年代石油危机中发展起来的一种新型低污染代油燃料。它既保持了煤炭原有的物理特性，又具有石油一样的流动性和稳定性，被称为液态煤炭产品。

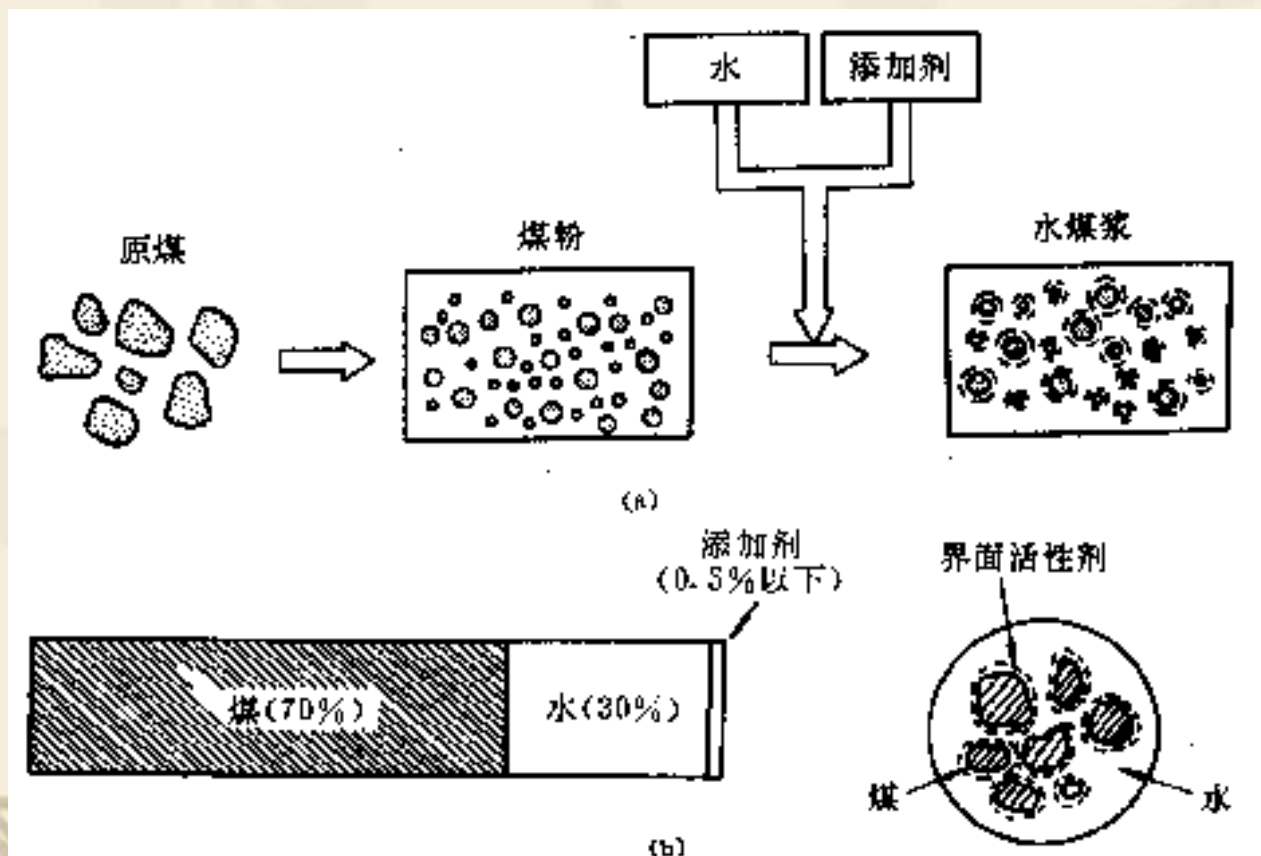


图 1-13 水煤浆成浆原理图

序号	名称	符号	单位	数值	备注
1	重量浓度		%	68% ± 1%	
2	表观粘度		CP	1200 ± 200	
3	灰份	$A_d$	%	<10	
4	硫份	$S_{t,d}$	%	±0.5	
5	挥发份	$V_{daf}$	%	>30	
6	最大粒径	$d_{max}$	μ m	<300	
7	平均粒径		dpj	<50 μ m	
8	发热量	$Q_{net.v.ar}$	KJ/kg	19288	
9	稳定性		d	90	注：该数据为 枣庄八一水煤 浆特性

一般的水煤浆均属非牛顿流体。加入了表面活性剂后降低其粘度能够获得很好的流动性，可以进行管道输送，并且达到很好的喷嘴雾化效果。

在水煤浆中加入稳定剂防止煤浆在储存和储运过程中发生硬沉淀。国产水煤浆的稳定性为保存1~3个月不产生硬沉淀。由（表1）可知，水煤浆的低位发热值大约是锅炉燃油发热量的一半，即两吨水煤浆可代一吨油燃烧。水煤浆可以像油一样和进行管道运输和喷嘴雾化燃烧。与油不同的是，水煤浆可燃成分是煤，因此水煤浆在燃烧时的特点又与煤粉的燃烧相近，会有飞灰、结渣等现象。另外，由于水煤浆中含有30~35%的水，这么多的水份导致水煤浆着火困难。

水煤浆技术包括水煤浆制备、储运、燃烧等关键技术，是一项涉及多门学科的系统技术。水煤浆具有燃烧效率高，污染物排放低等特点，可用于电站锅炉、工业锅炉和工业窑炉代油、在矿区用中高灰煤浆替代优质煤燃烧，亦可作为气化原料，用于生产合成氨、合成甲醇等。

## ❖ 2 水煤浆燃料的制备

水煤浆燃料的制备是在水煤浆制浆厂中完成的，一般包括如下的过程：原煤的洗选、添加剂（分散剂和稳定剂）的添加、水的配备、研磨、储存等。

水煤浆制备的工艺流程通常有两种，即一段磨矿工艺流程和二段磨矿工艺流程。

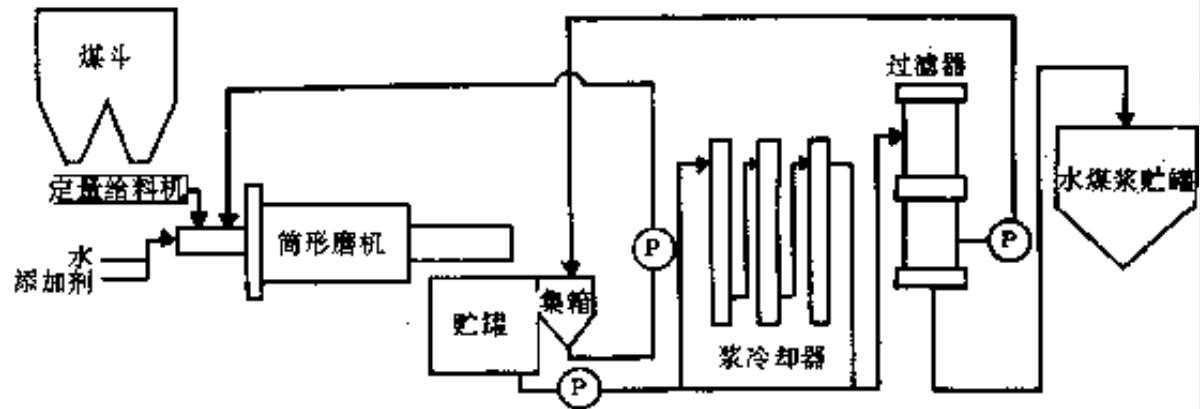


图 1-6 一段磨矿工艺

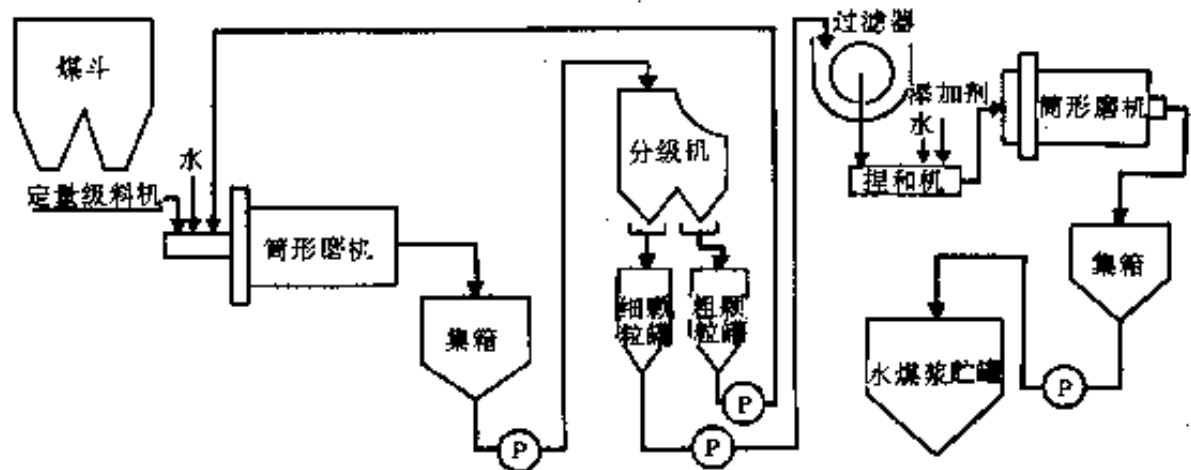
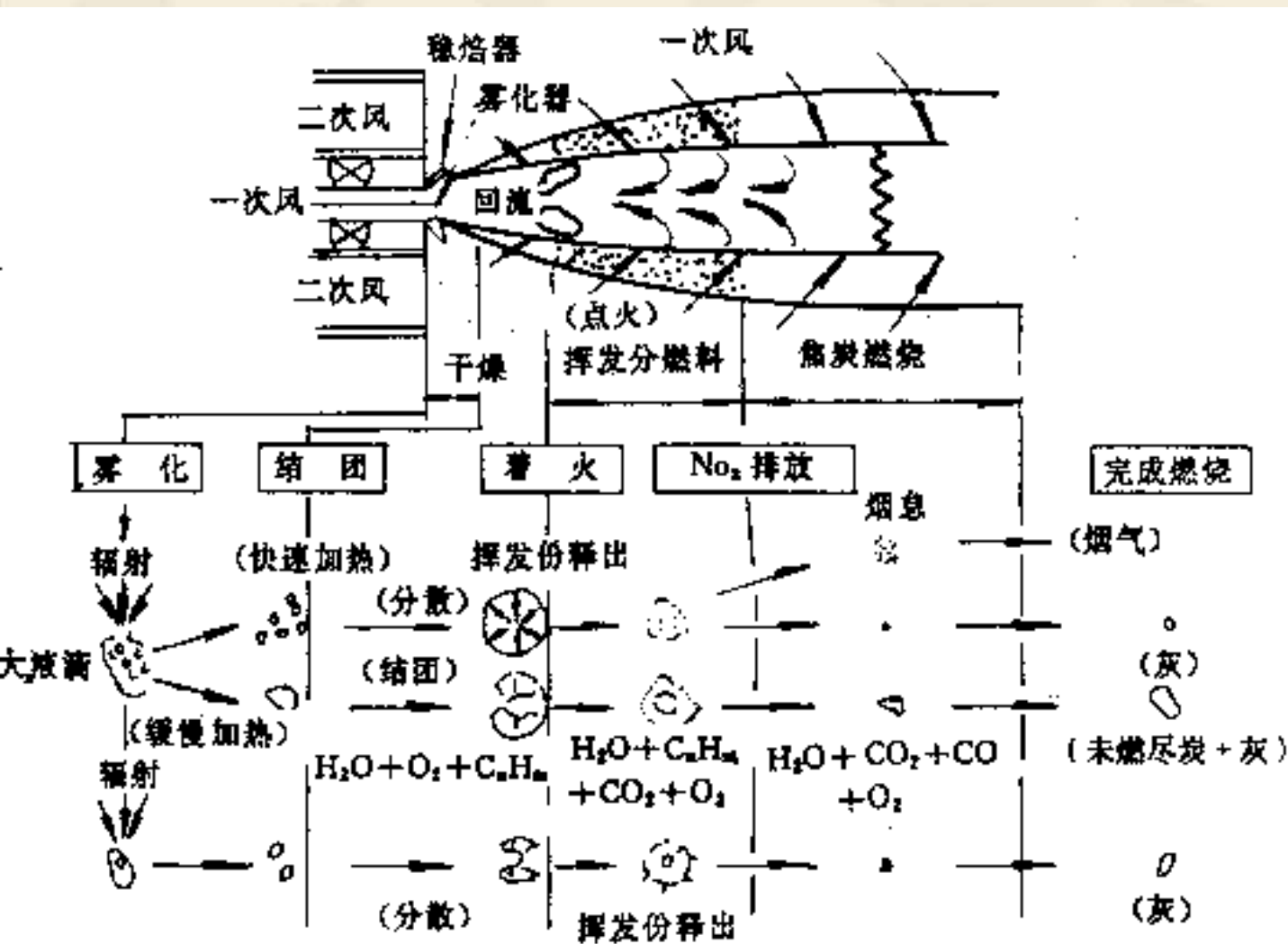


图 1-7 二段磨矿工艺



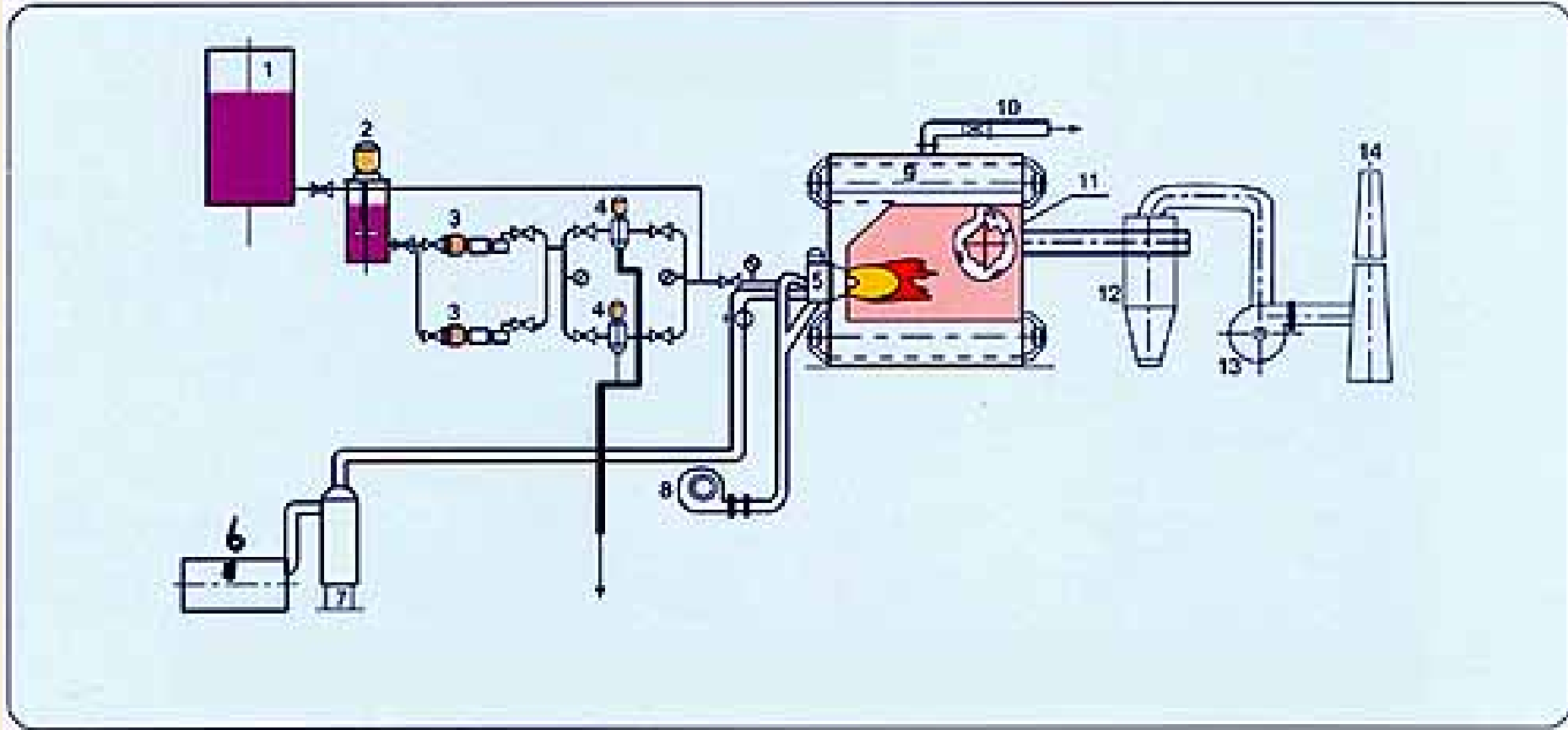
# ❖ 水煤浆燃烧机理和技术

水煤浆在锅炉中的燃烧组织与油的燃烧组织相近。水煤浆经过煤浆喷嘴，以蒸汽或压缩空气为雾化介质，雾化形成煤浆雾炬，同时液雾的周围喷入供煤浆燃烧所需的空气。煤浆液滴进入炉膛后被加热并与空气混合，首先水份蒸发，然后挥发份挥发并着火，进而引起液滴中的焦碳颗粒着火燃烧，直到燃烬。



❖ 水份对单滴水煤浆的燃烧过程有显著影响。由于水份的加热蒸发需要一定时间，待浆滴中的挥发份要待大部分水份蒸发后才大能开始析出，因此浆滴中的水份延迟了水煤浆的着火，这一点是水份对水煤浆燃烧的不利因素。由于水份的蒸发过程而使煤浆的着火大大延迟，这是水煤浆着火与煤粉着火的一个显著区别。但是通过提高雾化质量、合理配风等措施组织好燃烧，水煤浆可以表现出非常好的着火及燃烧特性。水煤浆的火焰稳定、清晰，明亮，具有很好的刚度。

- ❖ 水煤浆的燃烧特性与煤粉的燃烧特性基本相似，通常其燃烬率与煤粉燃烬率相同。汕头万丰热电有限公司#2燃油设计锅炉采用浙江大学的技术改烧水煤浆后，锅炉的燃烧效率达到**99.74%**，高于一般的同容量的煤粉炉。茂名#1炉燃烧水煤浆也同样具有高于**99%**的燃烬率。



- 1、水煤浆储罐      2、搅拌器      3、供浆泵      4、在线过滤器      5、水煤浆燃烧器  
 6、空压机          7、储气罐      8、鼓风机      9、水煤浆锅炉主机  
 10、主气管道      11、炉内除尘装置      12、除尘器      13、引风机      14、烟囱

- ❖ a) 水煤浆炉前搅拌系统（在搅拌罐中）以防止发生沉淀；
- b) 水煤浆炉前过滤系统（在线过滤器）以滤去杂质；
- c) 供浆系统如供浆泵、供浆管路等，实现连续调节浆量的供给；
- d) 炉前水煤浆雾化喷嘴，以压缩空气或蒸汽为介质进行雾化，雾化喷嘴的设计直接影响水煤浆的着火和燃烧效率；
- e) 水煤浆燃烧器，水煤浆含有30%多的水分，燃烧器的设计将直接影响水煤浆的着火和燃烧效果；
- f) 雾化后的水煤浆喷入炉内完成着火燃烧，除水煤浆喷嘴、燃烧器需进行特殊设计外，炉膛及受热面的布置需满足水煤浆着火、燃烧的要求；
- g) 其它系统，燃烧后的灰渣要经过除灰系统、排渣系统等。



## ❖ 3 水煤浆技术的优越性

### (1) 具有良好的代油燃烧效果

煤代油是我国的基本国策，水煤浆可以象油一样输送、储存和燃烧，油炉改造可利用原有设施，工作量少、灰渣处理简单，投资少、改造周期短，是煤代油的理想代用燃料。原有油炉只需经过简单改造即可燃用水煤浆。燃烧效率达**96-99%**或更高，锅炉效率在**90%**左右，达到燃油等同水平。燃烧调节方便，运行稳定可靠，一般**40%**负荷均可稳定燃烧。

### (2) 是一种很好的清洁燃料

水煤浆的原料是经过洗选的，含灰和硫都大为降低，如加石灰石脱硫，在相同条件下比原煤脱硫率高**20%**。大量水份的存在降低了炉内温度，并使炉内呈还原性气氛，**NO<sub>x</sub>**排放也很低。

茂名热电厂#1炉改烧水煤浆后，**SO<sub>2</sub>**排放浓度为**560 mg/m<sup>3</sup>**，烟尘浓度为**38mg/m<sup>3</sup>**。



### (3) 油炉改烧水煤浆投资低于改烧粉煤

水煤浆代油可充分利用原有设备,如储油罐等。生产流程简化,投资省。与改燃粉煤相比,改造费用仅为改粉煤的 $1/3-1/2$ ,改造时间为 $1/3$ 。

### (4) 解决能源的运输问题

我国煤炭资源呈北煤南运和西煤东运的格局,管道输浆具有运量大,投资少(总投资为铁路的 $1/3$ ,为输电线路的 $2/5$ ),沿途煤炭损耗少、不占地、不受地形限制等优点。

### (5) 燃油锅炉改烧水煤浆经济效益显著

以万丰电厂为例:采用八一制浆厂水煤浆,到岸价为478元/吨,到厂价按500元/吨计算,目前油价按1600元/吨,按2.1吨水煤浆代1吨油计算,发电负荷按40MW,年发电时间按5000小时计算,燃料消耗量按25.31吨/小时计算,则年节约燃料费约为3314.4万元/年。如果电厂自行制浆,其水煤浆的成本可大为降低,其中茂名热电厂正在建设50万吨的浆厂。

另外,改烧水煤浆后,由于锅炉热效率提高和灰渣综合利用均可提高经济效益。

# 炉子的工作强度

- ❖ 一 表征燃料在炉内燃烧的强烈程度

❖ 层燃炉：

❖ 1. 炉排（可见）热强度  $q_R$

❖ 一单位面积的炉排，在单位时间所燃烧的煤的放热量

燃料耗量，  
kg/h

$$q_R = \frac{BQ_{dw}^y}{3600 \cdot R}$$

燃料的应用基低位发热量，kJ/kg

炉排有效面积， $m^2$

- ❖ 2. 炉膛（体积可见）热强度  $q_v$
- ❖ 一由于挥发物和一部分飞扬小煤粒在炉膛空间燃烧放热。

$$q_v = \frac{BQ_{dw}^y}{3600 \cdot V_l}$$

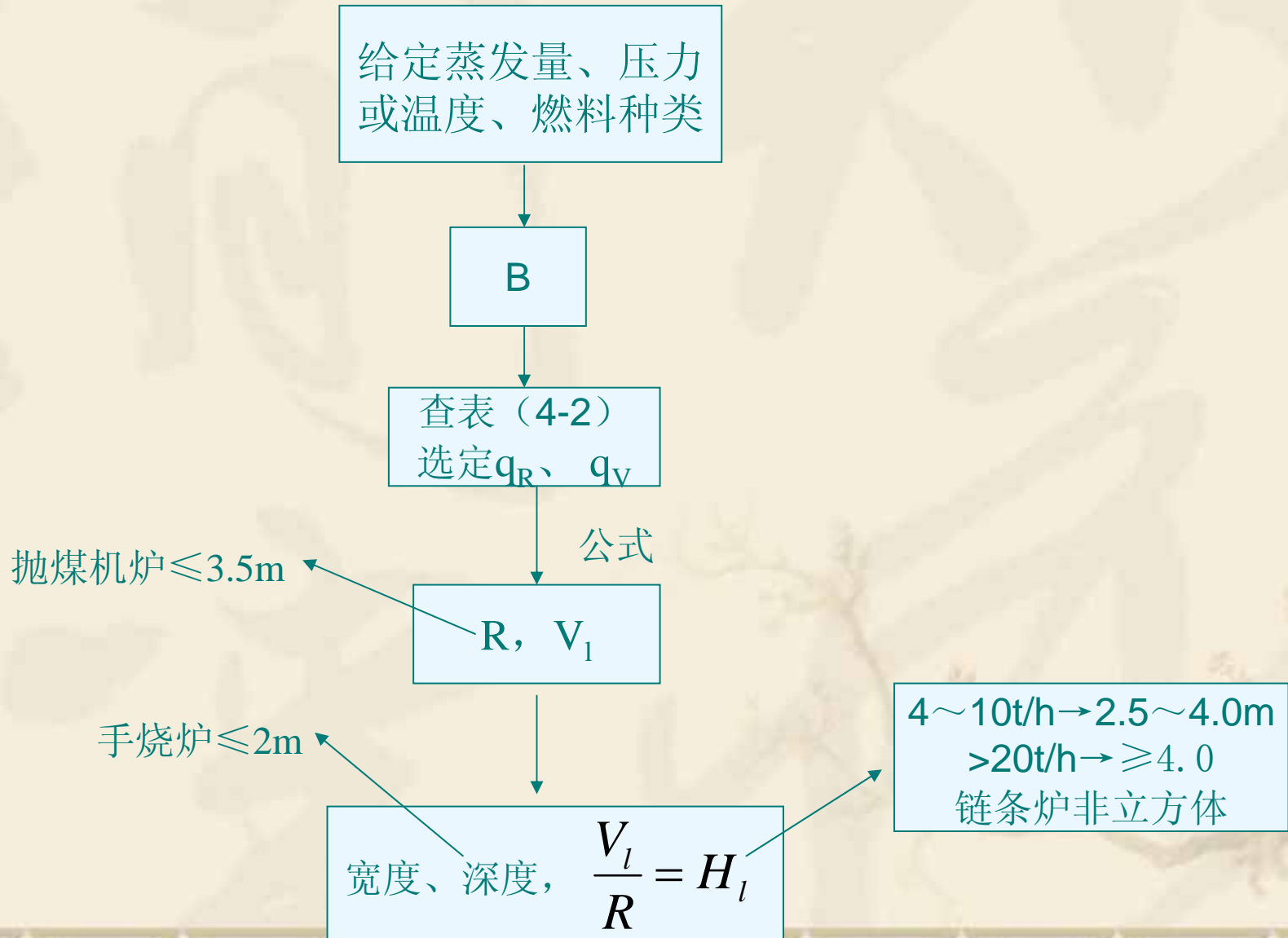
炉膛体积,  $m^3$



- ❖ 所谓“可见”——在层燃炉中要分别测出燃料在炉排表面上和炉膛体积中燃烧放热量是困难的，所以在炉排和体积热强度中，都假定把燃料燃烧的全部放热量作为热强度计算的基础。
- ❖ 层燃炉的工作强度和主要热工特性——表4-2
- ❖ 低质烟煤和无烟煤——靠近下限
- ❖ 不粘结、挥发分高的优质烟煤和无烟煤——趋于上限
- ❖  $q_R$  过高， $R$  过小，煤层厚度和空气流速  $\uparrow \rightarrow q_3 \uparrow, q_4 \uparrow$
- ❖  $q_V$  过高，烟速  $\uparrow \rightarrow q_3 \uparrow, q_4 \uparrow$



# ❖ 锅炉设计、改造



❖ 室燃炉—无需冠以“可见”（无炉排）

❖ 1.  $q_V$  反映煤粉、油和气等气流通过炉膛的时间长短

❖  $\uparrow q_V \rightarrow$  停留时间  $\downarrow \rightarrow q_3 \uparrow, q_4 \uparrow$

❖  $\downarrow \downarrow q_V \rightarrow$  体积  $\uparrow \rightarrow q_5 \uparrow, \text{cost} \uparrow$

❖ 2. 炉膛断面热强度  $q_F$

❖ 反映炉膛形状对燃烧的影响

$$q_F = \frac{BQ_{dw}^y}{3600 \cdot F}$$

炉膛横截面积,  $\text{m}^2$

❖  $\uparrow q_F \rightarrow$  瘦长型  $\rightarrow$  火炬充满情况好, 死滞涡流区少

❖  $\uparrow \uparrow q_F \rightarrow$  燃烧器射程受限, 易在燃烧器区域结渣

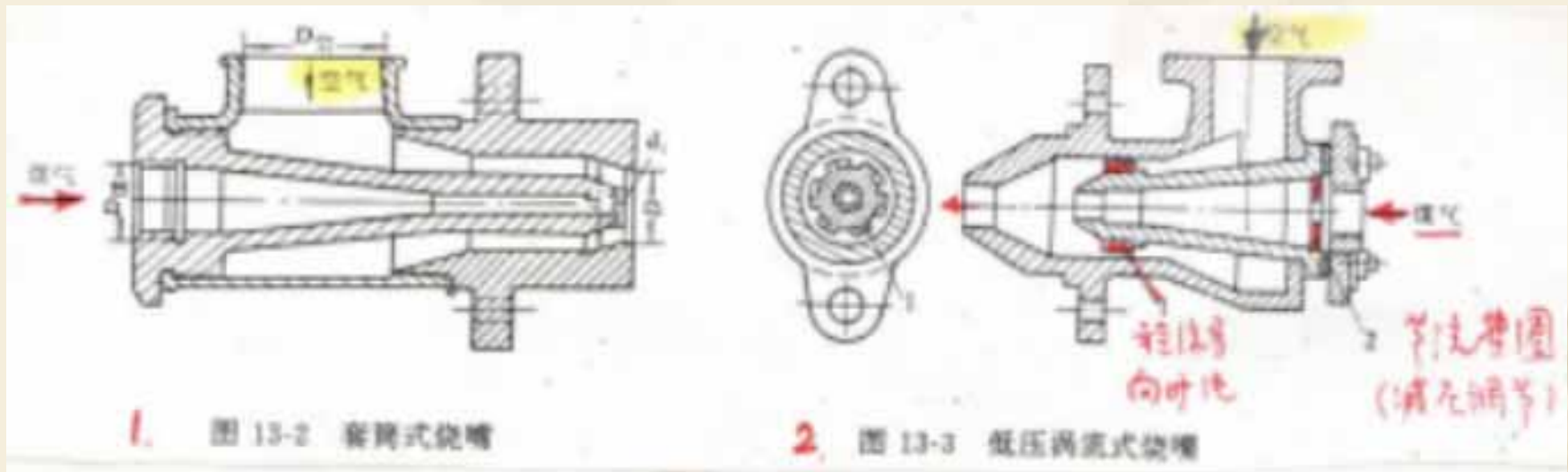
❖ 室燃炉主要热工特性—表4-3

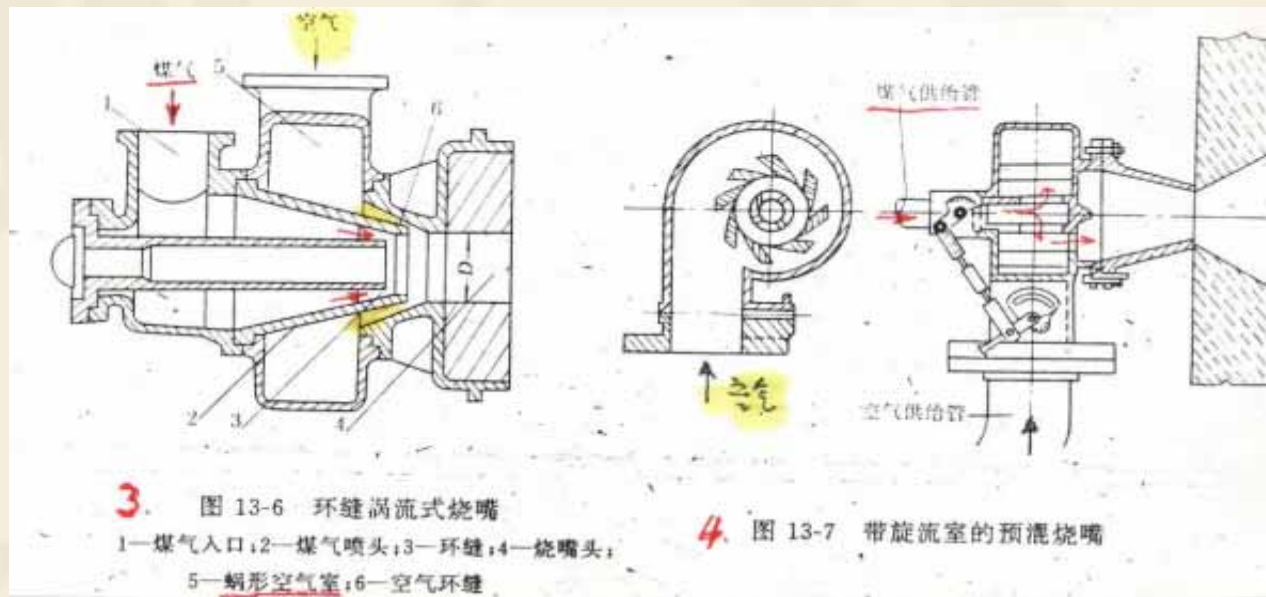
## 气体燃料的燃烧过程

- (1) 燃气与空气的流入、混合
- (2) 混合气的加热与着火
- (3) 完成燃烧化学反应

燃烧热加热新鲜混合气，维持不断燃烧。

- ❖ 1. 套筒式烧嘴  
平行流动，混合慢火焰长，结构简单 阻力小
- ❖ 2. 低压涡流式烧嘴  
混合好，火焰短，不同直径的节流垫圈可调煤气减压

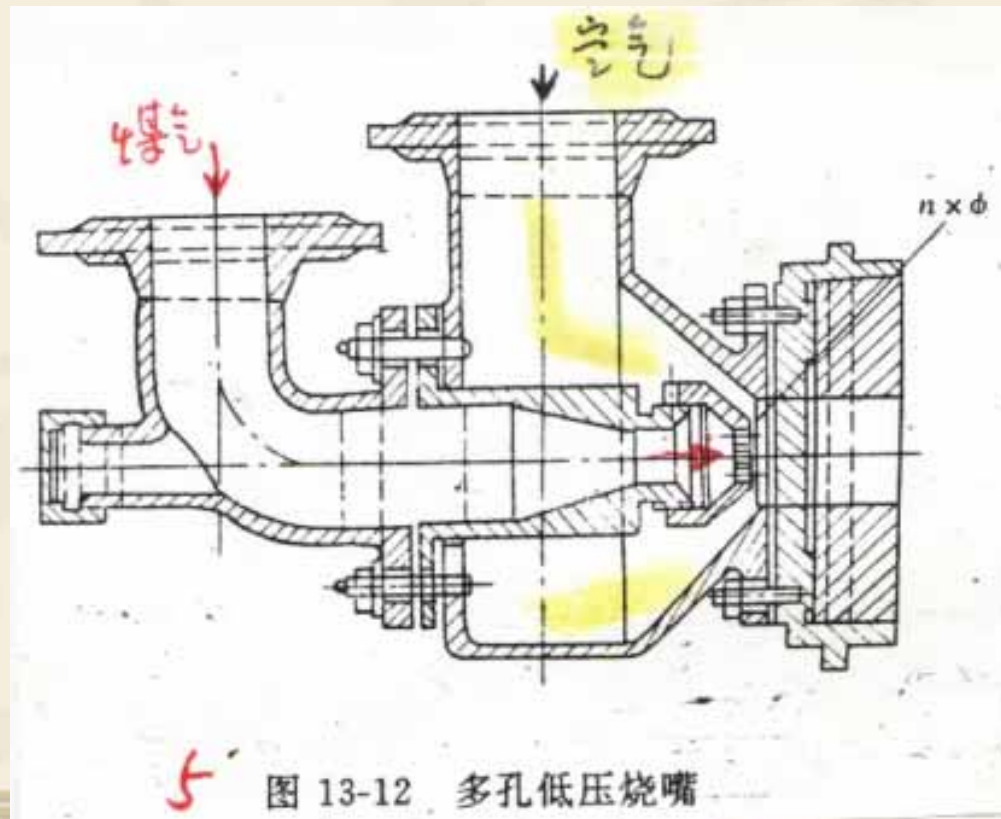




- ❖ 3. 环缝涡流式烧嘴  
 煤气呈筒状气流 空气由蜗形室从环缝旋转流出 混合良好但需较高压力：**2-4kPa**
- ❖ 4. 带旋流式的预混烧嘴  
 煤气空气均切向旋流 且反方向流入混合室混合充分火焰短

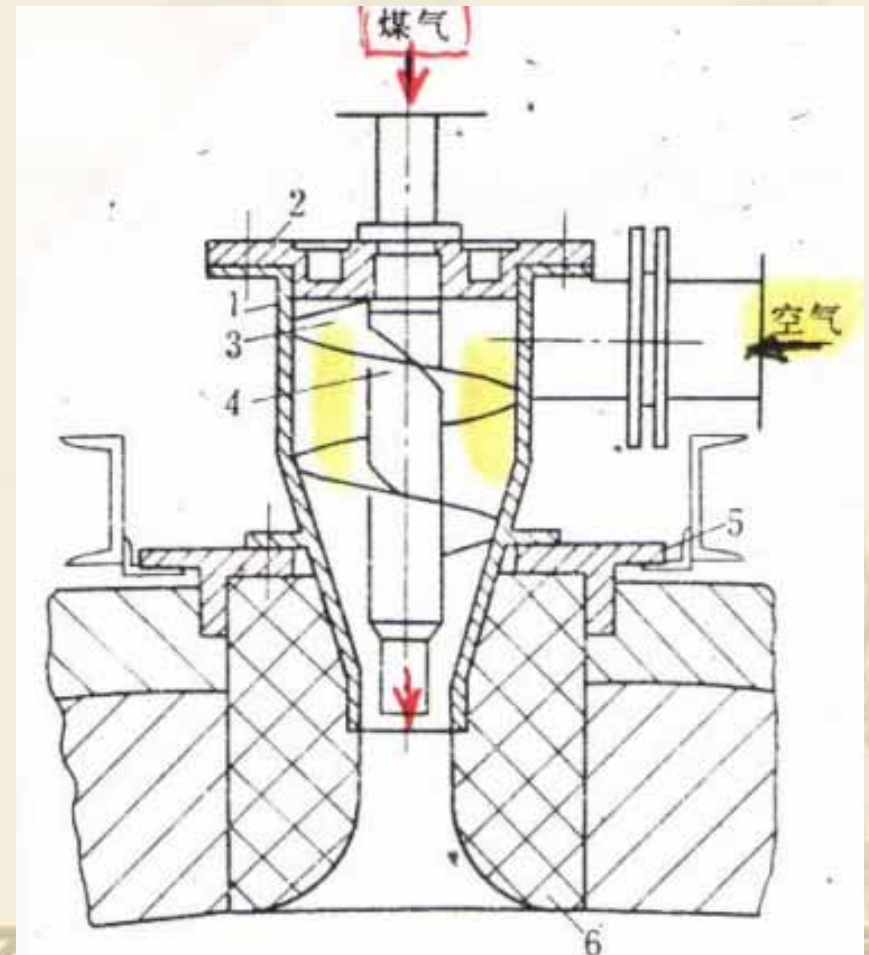


5. 天然气烧嘴 煤气多孔喷出空气需要量大 空气从环缝流出 混合良好



## 6. 平焰烧嘴嘴

空气由螺旋片切向旋转，经大张角喇叭形烧嘴砖喷出，煤气轴向喷出，靠空气旋转时形成的负压引入平展气流，边混边烧，形成平面火焰。



❖ 7.低 $\text{NO}_x$ 烧嘴

❖ (1) 废气循环式

部分烟气循环到燃烧区，降低浓度，防止局部高温，减少 $\text{NO}_x$ 生成

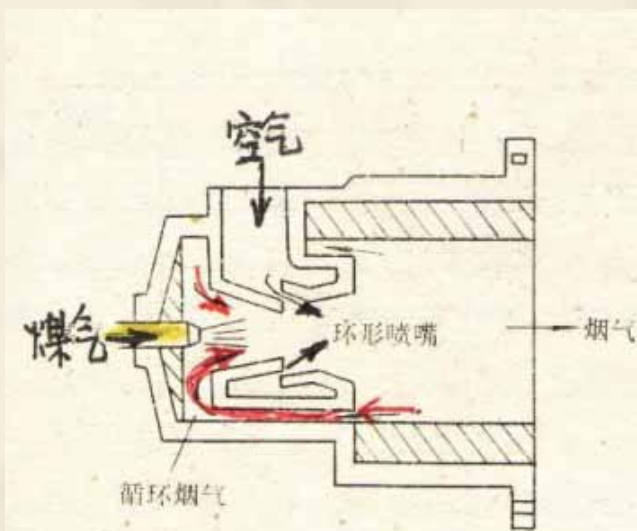


图 13-22 废气自身循环式低  $\text{NO}_x$  烧嘴

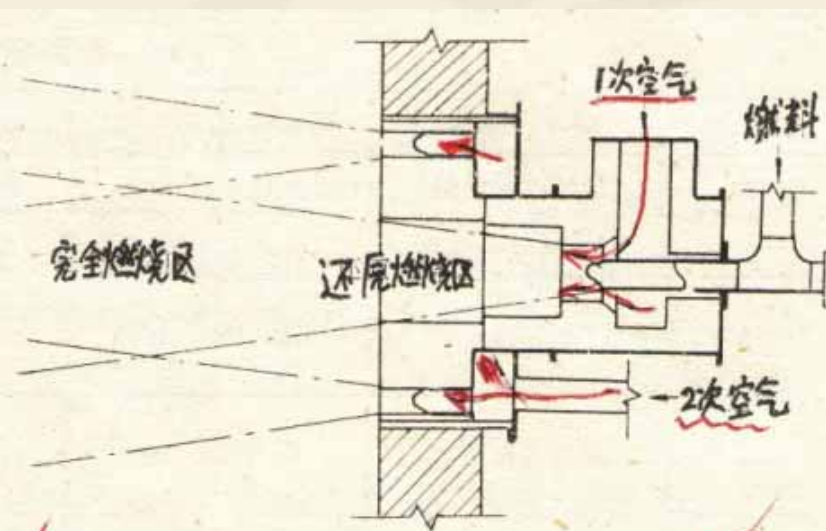
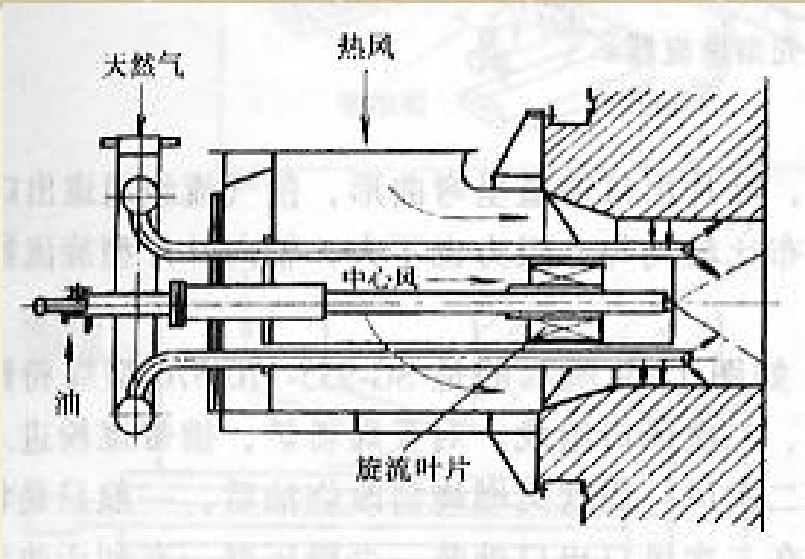


图 13-23 二段燃烧式低  $\text{NO}_x$  烧嘴

❖ (2) 两段燃烧式

一次空气供氧不足，造成还原区，降低燃烧温度。二次空气外围送入，火焰尾部达到完全燃烧。分段燃烧避免高温集中，减少 $\text{NO}_x$ 生成。



天然气-油混烧燃烧器 (一)

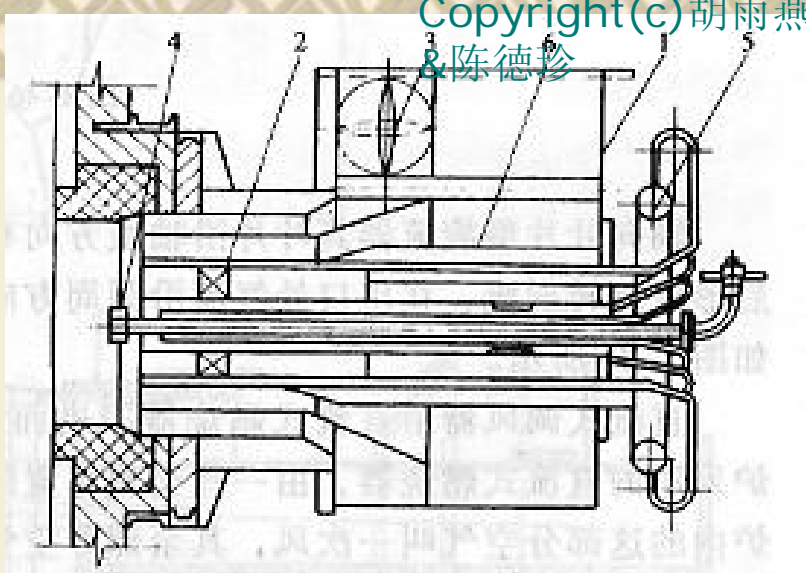


图 1-44 天然气-油混烧式燃烧器 (二)  
1—燃烧器外壳 2—旋流器 3—外流道截止阀  
4—重油喷嘴 5—天然气联箱 6—天然气进气管

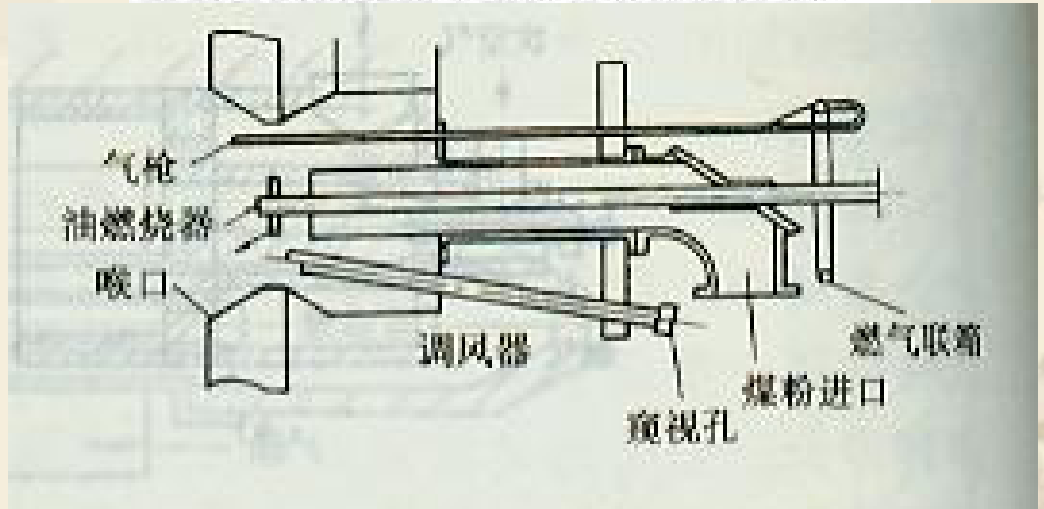


图 1-45 带有气、油换烧设备的煤粉燃烧器



# 液体燃料燃烧设备



- ❖ 燃烧过程：
- ❖ 油的雾化→油滴蒸发、高温热解与裂解→与空气混合→着火燃烧
- ❖ 燃烧过程主要受雾化和混合过程控制

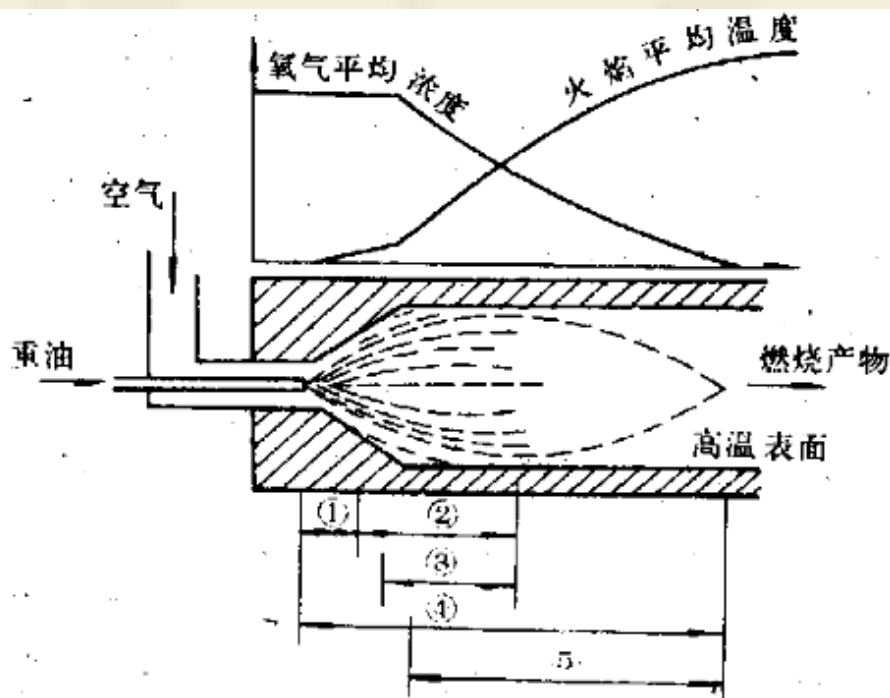


图 14-1 油雾燃烧示意图

①—雾化；②—蒸发；③—热解和裂化；④—混合；⑤—着火，形成火焰

- ❖ 一、油的雾化  
通过喷嘴使油雾化，油的颗粒不均匀，  
从几  $\mu$  到 **500  $\mu$**  。
  
- ❖ 二、混合过程  
油雾与空气两股流股的混合。  
强化混合措施：
  1. 加大流速
  2. 两股交角喷射
  - ❖ 3. 空气呈旋转气流
  4. 空气分两次送入
  - ❖ 5. 油雾化细而均匀
  
- ❖ 三、燃烧过程  
点火热源能力要求大一些

- ❖ 油的雾化
- ❖ 油雾化原理和方法

雾化过程是由于油表面外力（冲击力、摩擦力）和内力（粘性力）相互作用。外力大时油颗粒破碎，平衡时油颗粒停止雾化。

- (1) 油从喷嘴流出形成薄膜或股流
- (2) 由于油紊流、空气对油流股的作用，油表面发生弯曲波动
- (3) 在空气压力作用下，产生油薄膜
- (4) 由于表面张力作用，薄膜分裂成颗粒
- (5) 颗粒继续破裂
- (6) 颗粒互相碰撞可能聚合



图 14-3 雾化过程示意图

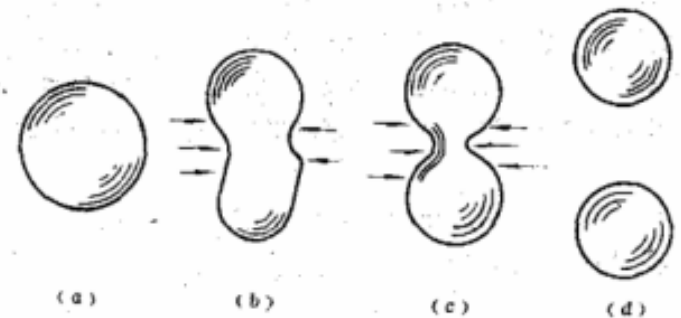


图 14-4 油粒雾化示意图

## ❖ 雾化方法（能量来源）

1. 气体介质雾化：作为雾化剂介质（空气、蒸汽、氧气、煤气）的能量提供外力。

2. 油压式（机械式）雾化：依靠有的压力高速喷入空气中或以旋流方式使油加强搅动，使油雾化。



## ❖ 影响油雾化颗粒直径的因素

### ❖ 1. 油温

提高油温可降低粘度，改善雾化质量

### ❖ 2. 雾化剂压力与流量

提高压力，喷出速度增加，颗粒平均直径减小。低压烧嘴，雾化剂流速不大，需要雾化剂多；当雾化剂量少时，影响雾化质量；高压时，需雾化剂单位耗量稍小些。

### ❖ 3. 油压力

对于气体介质雾化式，油压不宜过高，速度太高不利雾化；但油压应高于气雾剂反压力，否则油喷不出。

### ❖ 4. 烧嘴结构

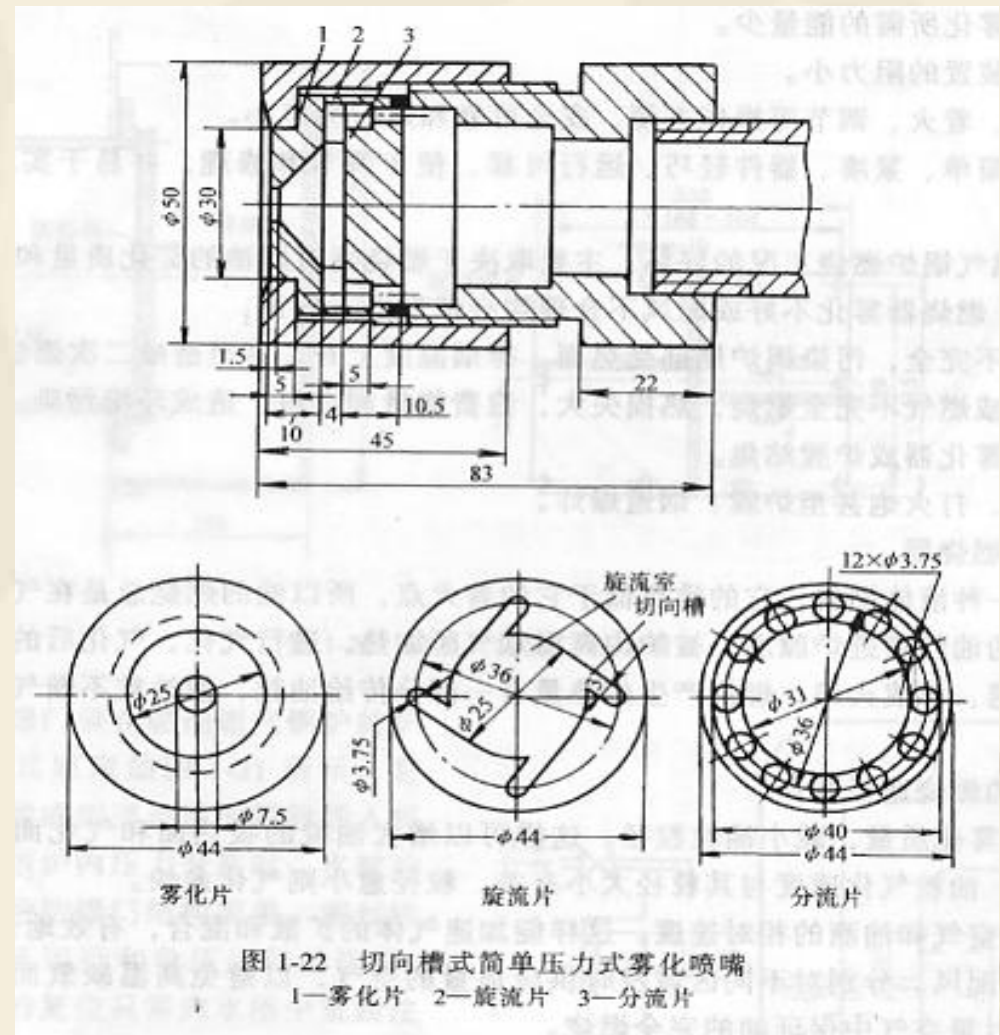
雾化剂 / 油的出口面积、夹角、旋转度、孔数、孔形状等等，要实际试验，还要考虑制造、油嘴堵塞等。

# 简单压力式油喷嘴

进油压力：2~5kPa

改变油压进行调节

调节比：1:2

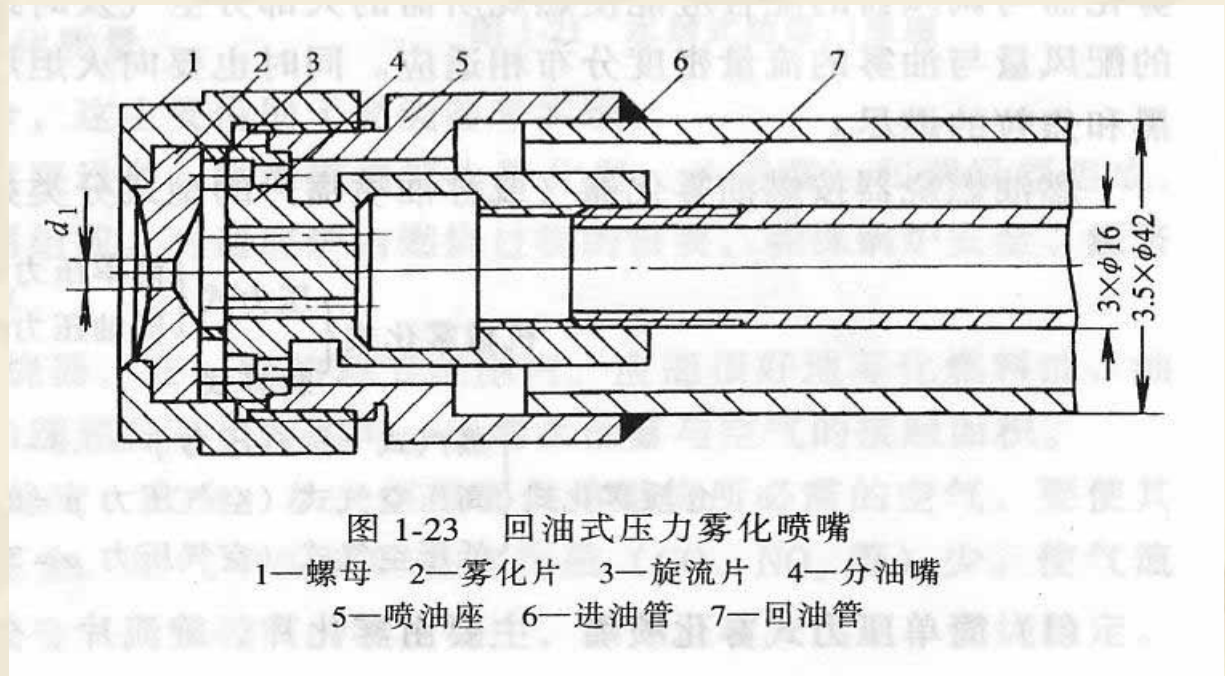


## 回油式压力油喷嘴

比作2个简单压力油喷嘴  
对叠而成

改变回油量进行调节

调节比：1：4





## 转杯式油喷嘴

不存在喷孔堵塞和磨损，对杂质不敏感，油粘度可高一些。

低负荷下不降低雾化质量

改变回油量进行调节

调节比：1：8

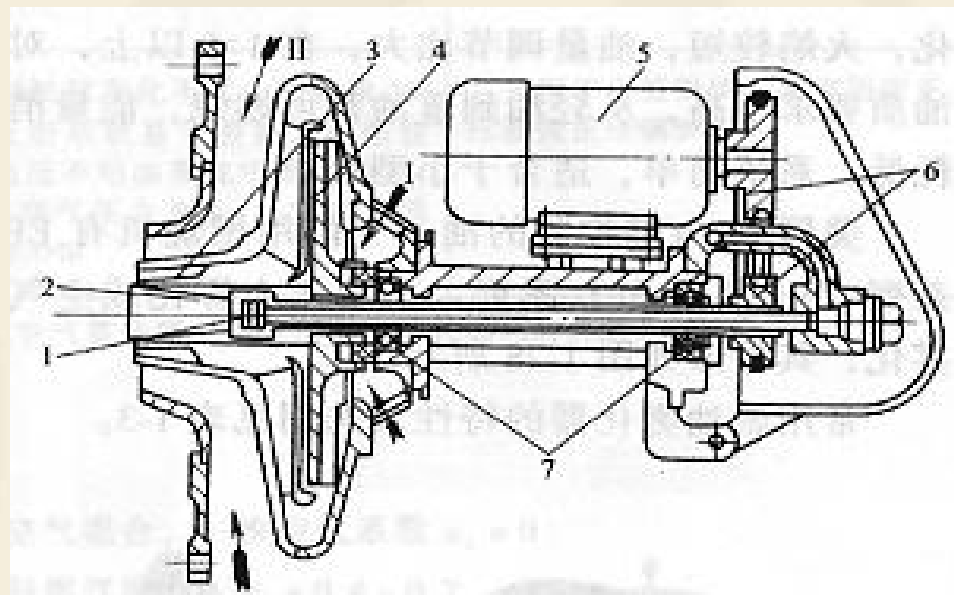


图 1-24 转杯式喷嘴结构

- 1—空心轴 2—转杯 3—一次风导流片 4—一次风机叶轮  
5—电动机 6—传动带轮 7—轴承  
I—一次风 II—二次风



# 高压介质雾化 油喷嘴

结构简单，运行可靠，雾化质量好而且稳定，油种适应性好；耗气量，有噪声

调节比：1：5

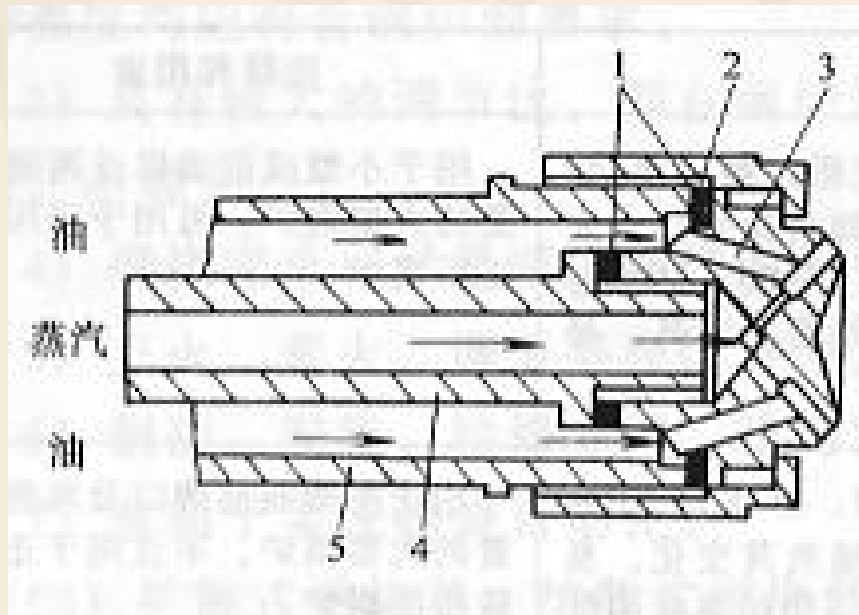


图 1-25 内混式蒸汽雾化喷嘴

1—密封垫圈 2—压盖螺母 3—油喷嘴  
4—内管 5—外管

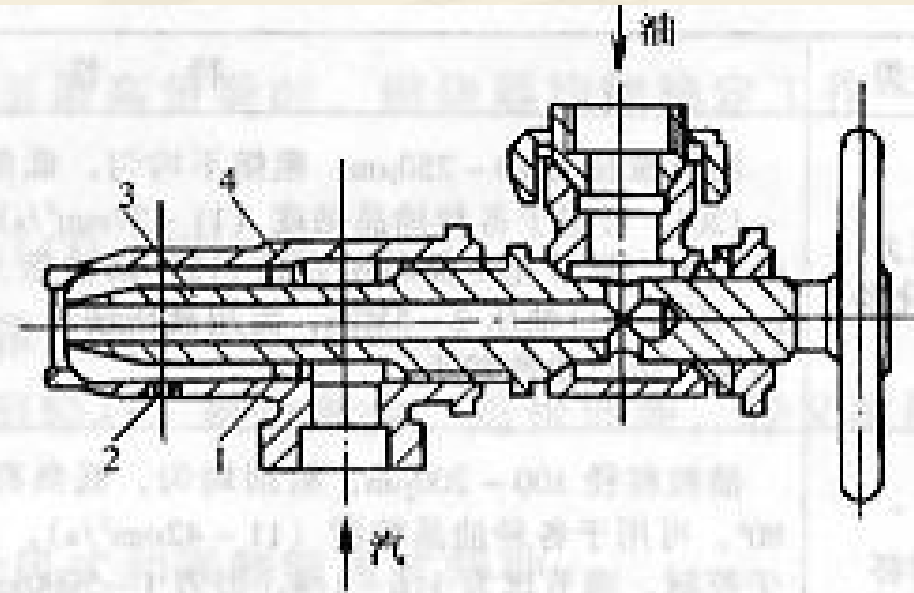


图 1-26 外混式蒸汽雾化喷嘴

1—定位爪 2—定位螺钉 3—油管 4—蒸汽套管

## 低压空气雾化油喷嘴

风压：2~7kPa

喷油量<100kg/h

调节比：1: 5

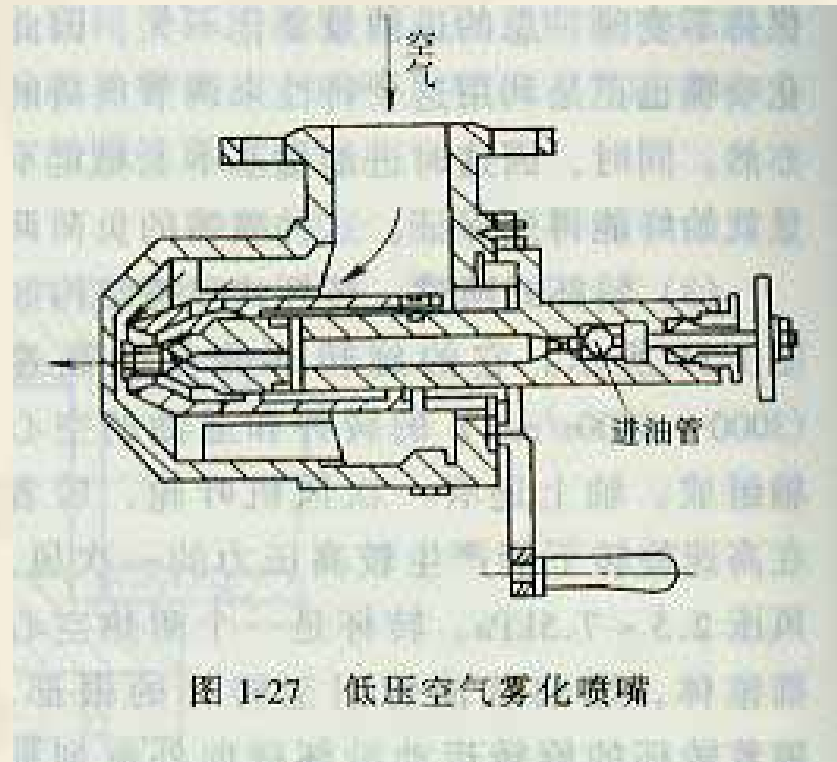


表 1-3 常用燃油雾化器的特性及选择

种类	特 性	选择和用途
压力雾化器	油粒粒径为 20~250 $\mu\text{m}$ ，粗细不均匀，低负荷时油粒变粗。雾化角 70°~120°。可用于各种油品粘度 (11~27 $\text{mm}^2/\text{s}$ )，火炬形状随负荷变化，火焰短粗。调节比，简单压力式 1:2，同轴压力式 1:4，出力 100~3500 $\text{kg}/\text{h}$ ，所需进口油压 2~5 $\text{MPa}$ ，需用高压油泵。雾化片制造维修要求高，易堵塞，运行噪声较小	用于小型或前墙以及两侧墙布置的大型锅炉，可用于正压或微正压锅炉
转杯雾化器	油粒粒径 100~200 $\mu\text{m}$ ，粗细均匀，低负荷时油滴变细。雾化角 50°~80°。可用于各种油品粘度 (11~42 $\text{mm}^2/\text{s}$ )，火炬形状不随负荷变化，易于控制，调节比为 1:6~1:8，出力 1~5000 $\text{kg}/\text{h}$ 进口油压不用油泵或用低压油泵。旋转部件制造要求高，无堵塞，运行噪声较小，转速 3000~5000 $\text{r}/\text{min}$	用于小型或前墙以及两侧墙布置的大型锅炉，不宜用于正压或微正压锅炉
蒸汽雾化器	油粒粒径小于 100 $\mu\text{m}$ ，细而均匀，低负荷时油粒变化不大。雾化角 15°~45°。可用于各种油品粘度 (56~72 $\text{mm}^2/\text{s}$ )，火炬形状容易控制，火焰较长，调节比 1:6~1:10。出力 3000 $\text{kg}/\text{h}$ 以下，进口油压不用油泵或用低压油泵。结构简单，无堵塞，运行噪声大，蒸汽压力 0.3~1.2 $\text{MPa}$ ，雾化剂耗量 (汽/油) 0.3~0.6 $\text{kg}/\text{kg}$	用于小型或四角布置的大型锅炉，可用于正压或微正压锅炉
低压空气雾化器	油粒粒径小于 100 $\mu\text{m}$ ，细而均匀，低负荷时油粒变化不大。雾化角 25°~40°。不宜用于残渣油粘度 (35 $\text{mm}^2/\text{s}$ )，火炬形状易于控制，火焰较短，调节比 1:5。出力 1000 $\text{kg}/\text{h}$ 以下，进口油压不用油泵或用低压油泵，结构简单，无堵塞，运行有噪声。雾化高压空气压力 0.3~0.7 $\text{MPa}$ ，低压空气压力 3~10 $\text{kPa}$ ，理论空气量为 75%~100%	只用于小型锅炉，不宜用于正压或微正压锅炉

注：目前大多数燃油锅炉采用机械雾化器，还有低压空气雾化器，少数用蒸汽雾化器和转杯雾化器。

- ❖ 调风器—提供并合理分配空气
- 组成：稳燃器、配风器、风箱、旋风口
- 按气流流动方式：旋流式和平流式（直流式）
- 按进风方式：蜗壳型和叶片型

### 蜗壳型旋流器

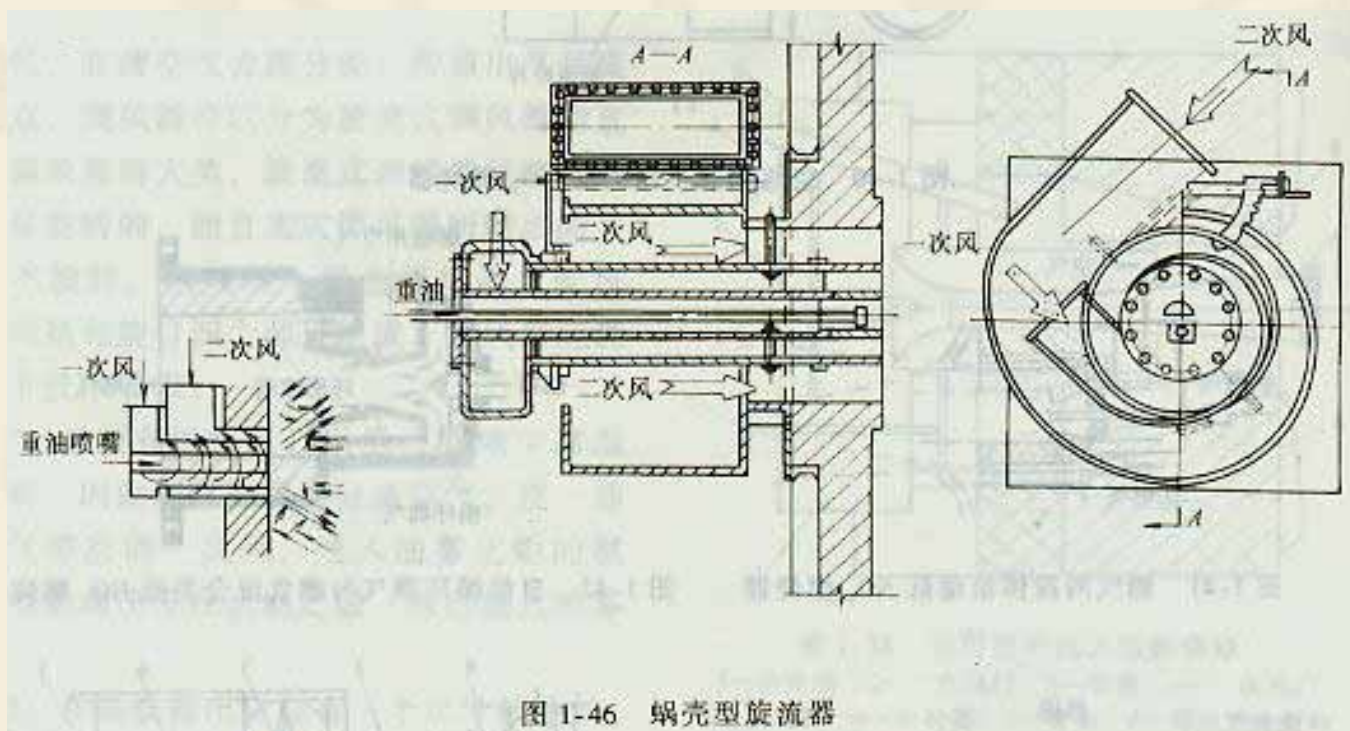


图 1-46 蜗壳型旋流器



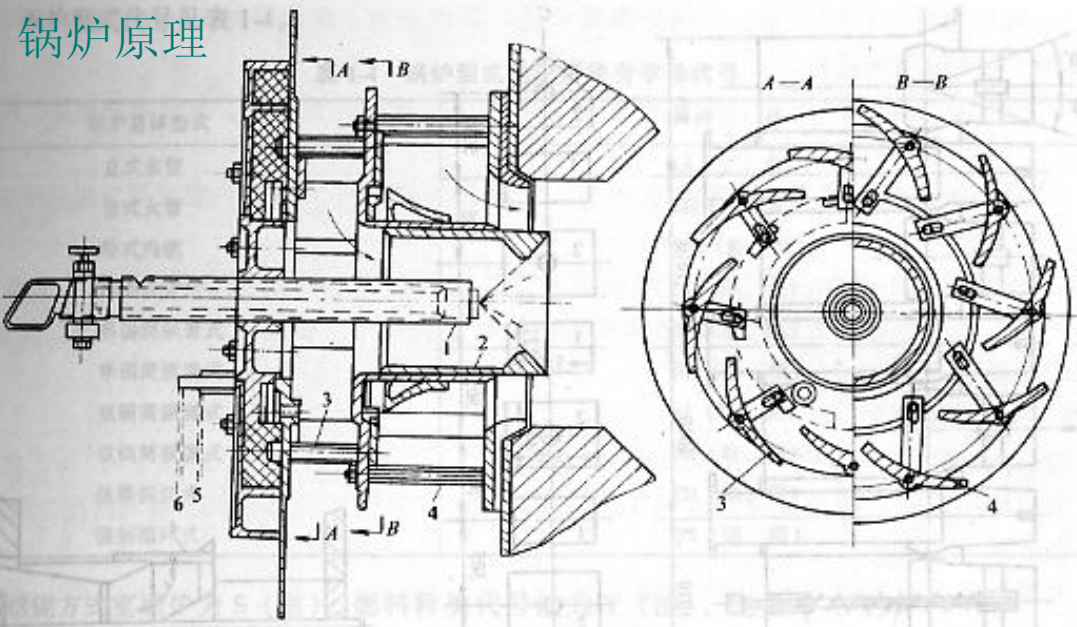


图 1-47 可调式切向叶片型旋流器

1—油嘴 2—风套 3—一次风叶片 4—二次风叶片 5—一次风手柄 6—二次风手柄

### 叶片型旋流器

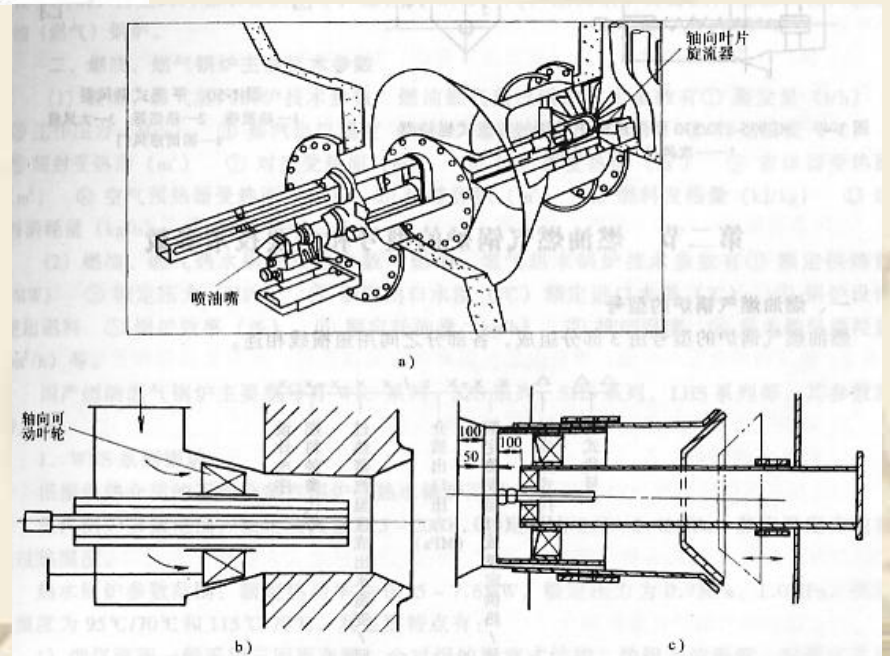


图 1-48 轴向叶片型旋流器

a) 轴向叶片型 b) 轴向可动叶轮 c) 轴向固定叶轮



### 平流式调风器

