写在前面：热能锅炉原理这门考试考点很多，细节很多，需要记忆理解的内容非常多。该笔记为本人考前一星期整理，可以作为复习参考，但也有许多纰漏，请以老师授课内容为准。

——孔令晓

绪论　锅炉工作原理及构成

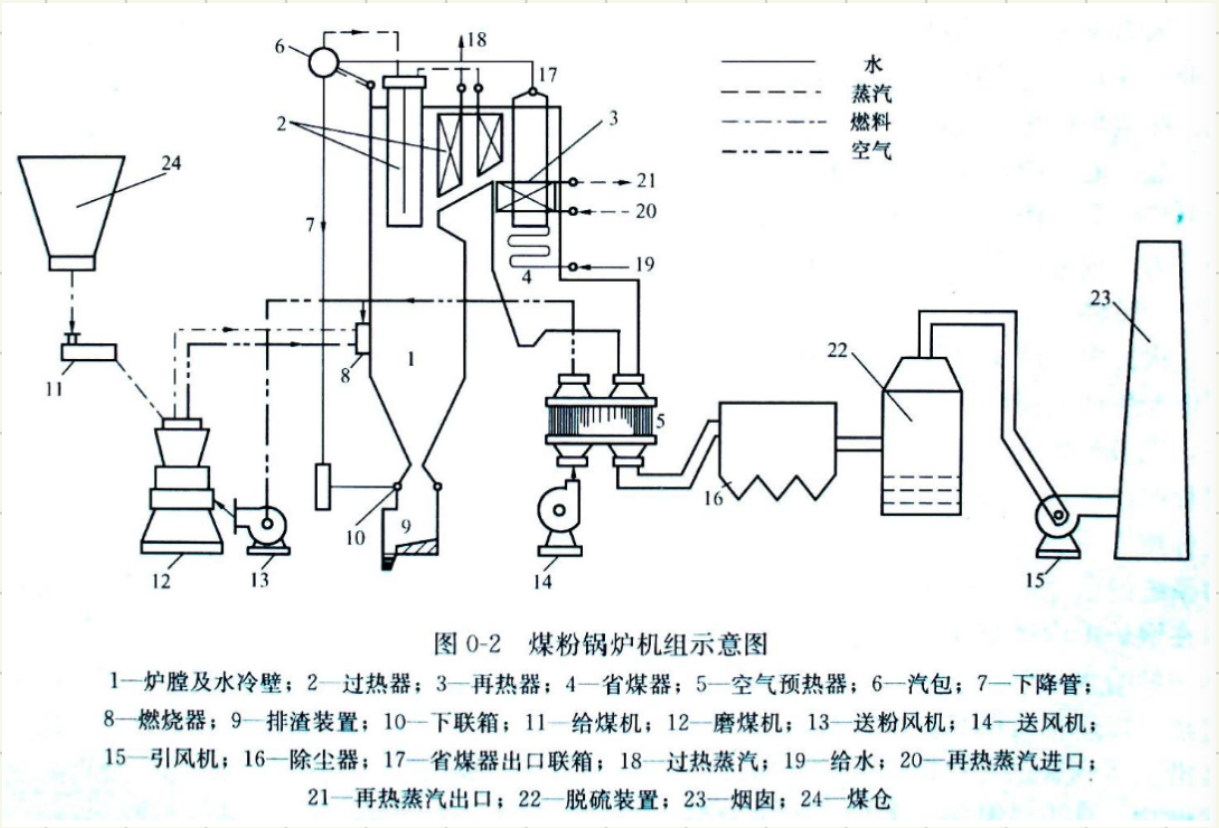


图 0-2　煤粉锅炉机组示意图

1—炉膛及水冷壁；2—过热器；3—再热器；4—省煤器；5—空气预热器；6—汽包；7—下降管；8—燃烧器；9—排渣装置；10—下联箱；11—给煤机；12—磨煤机；13—送粉风机；14—送风机；15—引风机；16—除尘器；17—省煤器出口联箱；18—过热蒸汽；19—给水；20—再热蒸汽进口；21—再热蒸汽出口；22—脱硫装置；23—烟囱；24—煤仓

锅炉系统 = 锅炉本体 + 辅助设备

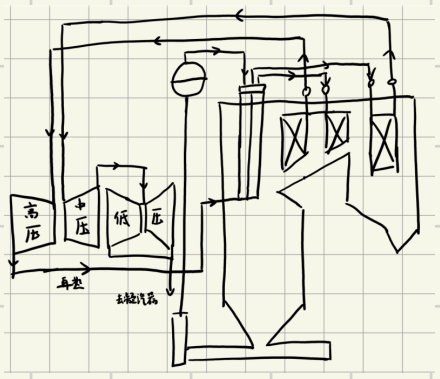
◆**锅**：汽水系统
- 容纳汽水的空间。下降管、汽包、 水冷壁、联箱、过热器、再热器、省煤器（承高压）

◆**炉**：燃烧系统
- 炉膛、燃烧器、烟道（非承高压）、空气预热器

◆**钢架与平台楼梯**
- 用于支承设备的重量及方便运行与检修

工作流程：

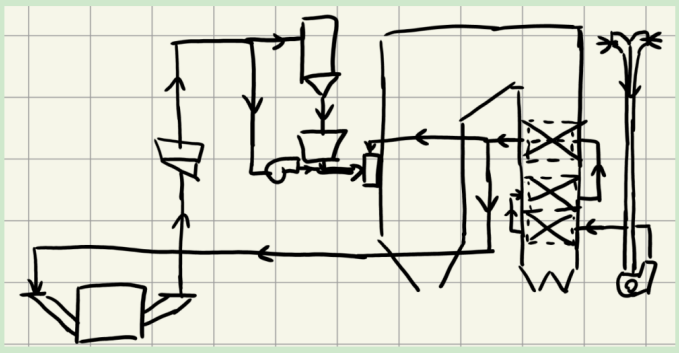
①给水与蒸汽工作流程：



◆给水进入省煤器，吸收烟气的热量，进入汽包；
◆与分离器出水混合，进下降管，分配到每根水冷壁管；
◆在水冷壁管中吸收火焰辐射热，形成汽水混合物；
◆向上流动，由汽水导管引入汽包，进行汽水分离。
◆分离出的饱和水与给水混合进入下降管。
◆分离出的饱和蒸汽从汽包顶部引出，进入各级过热器
- 主要有包覆过热器、屏式过热器、对流过热器等。

◆形成过热蒸汽，被送到汽机高压缸。
◆高压缸排汽被送到再热器，提高温度，再送到汽轮机的中低压缸。

②烟气工作流程：



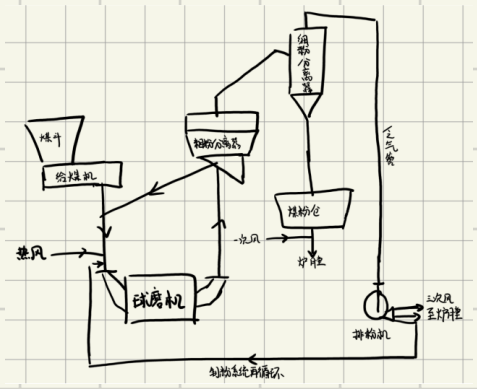
燃烧及制粉系统所需的空气由鼓风机将空气打入空器预热器，一部分送入磨煤机作为燃料的干燥剂和部分作为输送煤粉的一次风，在进入磨煤机前的管道上另分一股管道，将热空气作为二次风送入燃烧器。

◆外部冷空气由送风机提高压头后，送到空气预热器，成为热空气；
- 送入磨煤机的是干燥剂；
- 直接送到燃烧器喷口的助燃空气，叫二次风。

◆外部冷空气由一次风机提高压头后，送到空气预热器，成为热空气；
- 送到一次风母管，分配到各一次风支管；
- 与煤粉混合器中的煤粉混合，输送煤粉到燃烧器，进入炉膛。

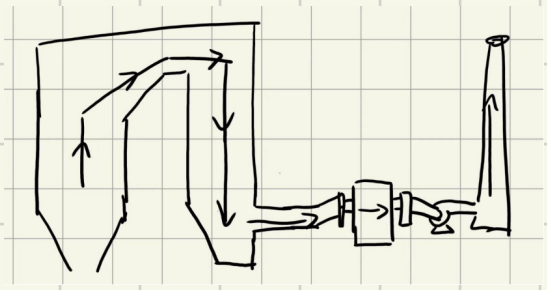
◆在炉膛中，燃料燃烧不断放出热量，产生高温烟气。
◆从炉膛流出、再进入水平烟道、垂直烟道、尾部烟道，并将热量传递给炉膛与烟道中布置的各种受热面，烟气的温度逐渐下降。
◆最后经过除尘设备、脱硫设备、引风机，由烟囱排出到大气。

③燃料工作流程：



- 煤由煤仓进入给煤机，再入磨煤机，磨成煤粉；
- 在排粉机的作用下，被干燥剂输送到粗粉分离器，将不合格的粗粉分离出，返回重磨。
- 合格的煤粉被干燥剂输送到细粉分离器，将煤粉与气体分离开来，煤粉贮存在粉仓中；
- 分离出来的气体叫乏气。乏气一部分送至磨煤机用于磨煤机的风量协调，另一部分作为三次风。
- 粉仓中的煤粉由给粉机按负荷的要求送到混合器，与一次风混合，送到燃烧器，进入炉膛燃烧。

④灰渣流程：



- 煤在炉膛内燃烧，最高温度可以达到1500~1600度（火焰中心）。
- 煤中的灰分一部分随烟气流出炉膛，进入烟道，叫飞灰，约占95%，最后由除尘器将它分离出来；
- 另一部分进入炉膛底部，由排渣装置排出，约占5%。

循环倍率 $K=\frac{\text{蒸发管内工质总流量}G}{\text{蒸发管出口蒸汽流量}D_0}$

（1）自然循环锅炉：K>1，循环动力完全依靠汽水密度差；

（2）控制循环锅炉：K>1，循环动力主要依靠炉水循环泵；

（3）直流锅炉：K=1：工质一次通过蒸发区，没有循环；

（4）复合循环锅炉：低负荷时多次循环，高负荷时纯直流。

上述（1）（2）：只能适用于临界压力以下；
（3）（4）：适用于任何压力。

作业与思考题：

1、 什么是锅炉的额定蒸发量、最大长期连续蒸发量、容量、额定压力、额定汽温？

答：**额定蒸发量：**在额定蒸汽参数，额定给水温度和实用设计燃料，保证热效率时所规定的蒸发量，单位为t/h（或kg/s）

最大长期连续蒸发量：在额定蒸汽参数，额定给水温度和使用设计燃料，长期连续运行所能达到的最大蒸发量，单位为t/h（或kg/s ）

容量：在设计条件和额定工况下，单位时间能够产生的蒸汽质量，单位为t/h或kg/s；对于热水锅炉，容量表示为单位时间的产热量，单位为MW（或万大卡/时）

额定蒸汽参数：在规定负荷范围内长期连续运行应能保证的出口蒸汽参数。

额定蒸汽压力（对应规定的给水压力），单位是MPa;

额定蒸汽温度（对应额定蒸汽压力和额定给水温度），单位是℃

3、按水循环方式不同，锅炉可以分为哪几类，各有何特点？

1.自然循环：有汽包，利用下降管和上升管中工质密度差产生工质循环。

2.强制循环：有汽包和循环泵，利用循环泵压头循环。

3.直流锅炉：无汽包，给水靠给水泵压头一次通过各受热面全变为蒸汽。

4.复合循环锅炉：低负荷时多次循环，高负荷时纯直流

4、按燃烧方式不同，锅炉可以分为哪几类，各有何特点？

1.[redacted]层燃炉固体燃料以一定厚度分布在炉排上进行燃烧的锅炉，称层状燃烧或火床燃烧锅炉

2.[redacted]室燃炉燃料以粉状、雾状或气态随同空气喷进炉膛中，以悬浮状态进行燃烧的锅炉

3.流化床炉：在适当的空气流速作用下，在沸腾床上呈流化状态进行燃烧的锅炉，也称流态休燃烧炉，为进步燃烧效率及减轻污染，在炉膛出口将烟气中的固体颗粒收集起来，送回炉膛继续燃烧

4.旋风炉：旋风炉燃料和空气在高温的旋风筒内高速旋转，部分燃料颗粒被甩向筒壁液态渣膜上进行燃烧的锅炉

5、锅炉本体主要由哪些主要部件组成?各有什么主要功能?

锅：（汽水系统）包括：下降管、汽包、 水冷壁、联箱、过热器、再热器、省煤器(承高压)

汽水系统中的水或蒸汽所流经的受热面是承压受热面。汽水系统的主要作用是将燃料燃烧所释放的热量，通过与相关受热面的热交换，安全可靠和高效地传递给受热面内的工质，使锅炉给水加热、蒸发汽化和过热，产生符合要求的过热蒸汽。再热器系统则应把在汽轮机高压缸中做过功的蒸汽再次加热到较高的额定温度。

炉：（燃烧系统）包括：炉膛、燃烧器、烟道(非承高压)、空气预热器

该系统向锅炉提供符合要求的煤粉，组织好煤粉和气流的合理流动， 在炉内实现煤粉的良好燃烧。

第二章 煤粉制备

煤粉的性质：

煤粉的一般性质

- 形状不规则：d<500μm 20～30μm多。
- 良好的流动性：表面积大，表面吸附大量的空气，输送方便。
- 自燃和爆炸性：吸附了大量空气，缓慢氧化，温升，达着火温度自燃。适当的条件下引起爆炸。

  爆炸三个必要条件：可燃物浓度，氧，点火能量。
- 水分的影响：

  煤粉水分影响流动性与爆炸性。

  水分高：流动性差，易堵，粉仓搭桥。影响着火与燃烧。

  水分低：自燃与爆炸。干燥耗能增加。

煤粉细度：

定义：一定质量的煤粉通过一定尺寸的筛孔进行筛分时，筛子上剩余煤样占总量的百分比。

$$Rx = \frac{a}{a+b} \times 100\%$$

a — 筛孔上剩余的煤粉质量，g

b — 通过筛孔的煤粉质量，g

x — 筛子的筛号或筛孔的边长，μm

颗粒组成特性

- 宽筛分
- 煤粉颗粒组成特性曲线（粒度分布特性） Rx=f(x)
- 煤颗粒分布特性：破碎公式（ Rosin-Rammler Eq. ）

$$R_x = 100\exp(-bx^n)$$

对规定的磨煤设备，在 x = 60 -200μm 范围内，n ， b 可认为是常数

$$n = \frac{\lg\ln\frac{100}{R_{200}} - \lg\ln\frac{100}{R_{90}}}{\lg\frac{200}{90}} \qquad b = \frac{1}{90^n}\ln\frac{100}{R_{90}}$$

R_{200} 一定， n↑ ，则 R_{90}↑ ，即小于 90μm 较少，说明 90μm 和 200μm 之间的煤粉颗粒较集中，较多，粒度分布均匀； n↓ ，过粗 (200μm 以上) 和过细 (90μm 以下) 较多，粒度分布不均匀

R_{90} 一定， n↑ ，则 R_{200}↓ ，即大于 200μm 较少，同样道理，粒度分布均匀。故 n 表示煤粉均匀性指数

均匀性指数 n 一定， b↑ ，则 R_{90}↓ ，表明煤粉越细；反之亦然，故 b 表示煤粉粗细的系数

n 值越大，煤粉中过粗和过细的煤粉均较少，即煤粉粒度分布较均匀。

n 取决于磨煤机和粗粉分离器的型式，一般取 n = 0.8 ～ 1.2 。

一、煤的可磨性系数

掌握三点，什么叫可磨性，可磨性系数的二种表示方法

1. 定义：煤是否易于破碎磨细的特性

可磨性系数是制粉系统 (磨煤机和系统) 选择的重要依据。煤粉磨制过程需要消耗能量，不同煤磨制成相同细度的煤所消耗的能量不等，可见煤磨制的难易程度有差异。所消耗的能量与新产生的表面积成正比：

$$E = E_A(A_2 - A_1) \approx E_A A_2$$

2. 可磨性系数表示方法一：指在风干状况下，将同一质量的标准煤和试验煤由相同的初始粒度磨碎到相同的煤粉细度时所消耗的能量之比。

$$K_{km} = \frac{E_b}{E_s} \qquad K_{km} = \frac{\ln\frac{100}{R_{90}^b}}{\ln\frac{100}{R_{90}^s}}$$

磨煤设备：

钢球磨：（低速磨）

钢球磨最佳通风量 V_{tf}^{zj}

V_{tf} 直接影响燃料沿筒体长度的分布和磨煤出力

- V_{tf} 过小　筒内风速过小，出口端钢球能量没有被充分利用，只能带出的少量的细煤粉，磨煤出力下降，单位磨煤电耗大
- V_{tf} 过大　筒内风速过大，磨煤机出口煤粉过粗，粗粉分离器回粉量增大，通风电耗增大
- 最佳通风量 V_{tf}^{zj} 磨煤和通风电耗之和最小时的通风量，V_{tf} 的大小与煤的种类、煤粉细度、筒体容积及钢球充满系数等有关。

钢球磨出力

- 磨煤出力 B_m　在电耗一定并保证所需的煤粉细度的条件下，磨煤机在单位时间磨制的煤粉量。由磨煤机的结构尺寸、被研磨的燃料特性以及磨煤机的运行状况确定
- 干燥出力 B_g　在单位时间内将煤由原有水分干燥到所要求的煤粉水分对应的煤粉量。由磨煤机的干燥条件确定

对高水分和较软的煤， $B_m > B_g$ ，而对于干和硬的煤，则 $B_g > B_m$

磨煤机的运行出力（具有一定细度和干燥程度的煤粉流量 $B_m = B_g$ ）可以通过调节进入磨煤机的干燥剂流量和温度来实现

钢球磨特性

➢磨煤的单位电耗 Em　取决于磨煤出力 B_m 和消耗的电网功率 N_{dw}

$$E_m = \frac{N_{dw}}{B_m}, kJ/kg$$

➢筒体和钢球的质量比其中的燃料大许多倍， Ndw 主要消耗在转动筒体和升举钢球上，与磨煤出力 B_m 几乎无关

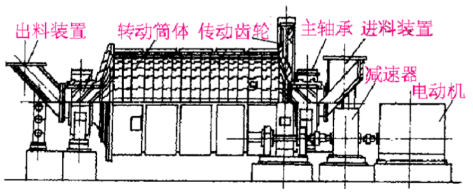
E_m 随出力 B_m 的降低而增高，在低负荷下运行不经济

➢钢球磨特性：结构简单，对煤种适应性强，出力大，运行可靠；但初投资大，对锅炉负荷适应性差；单位电耗大，噪音大。

单进单出钢球磨 (低速磨)

低速磨主要有普通筒式钢球磨、双进双出筒式钢球磨

普通筒式钢球磨的圆筒通过齿轮由电动机带动低速转动，燃料和干燥剂（热空气）从一端进入圆筒，在圆筒内煤被干燥、打碎并研磨成粉，随后被干燥剂从另一端带出。



双进双出钢球磨 (低速磨)

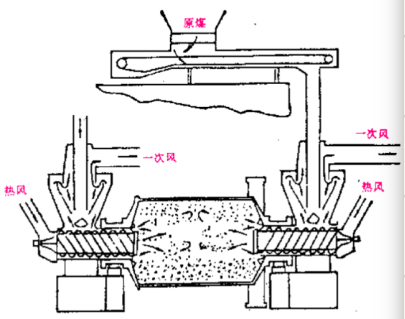
➢筒两端的空心轴内有一空心圆管。

➢圆管外装有螺旋输送装置。

➢两端的空心轴既是热风和原煤的进口，又是煤粉气流混合物的出口。

➢两个相互对称又彼此独立的磨煤回路的两个回路；

➢可以单独使用一个，这时可使磨煤出力降至 50 %以下。



中速磨：

1. 基本工作原理

➢二组碾磨部件相对运动，产生挤压或碾磨作用，使煤被磨制成粉。

➢干燥剂由下进入，携带煤粉向上进入粗粉分离器进行分离，粗粉落回碾磨区重磨。主轴垂直布置，立式磨煤机

2. 基本种类 (按两种磨煤部件的形状分)

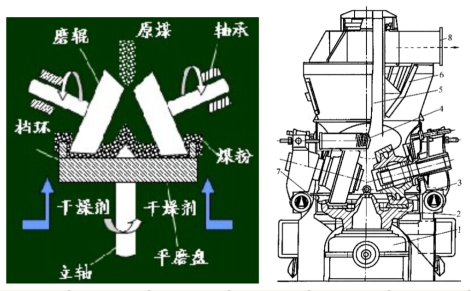
➢辊盘式—圆锥台磨辊＋平磨盘，又称平盘磨

➢辊碗式—圆锥台磨辊＋磨碗，又称ＨＰ磨或ＲＰ磨

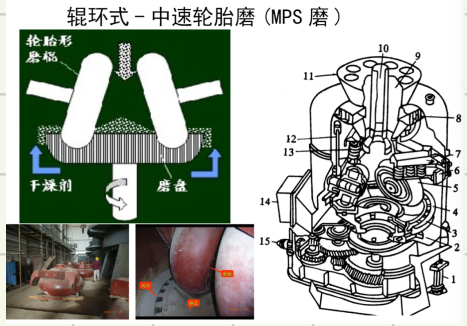
➢球环式—大直径钢球＋上下磨环，又称Ｅ型磨

➢辊环式—轮胎形磨辊＋下磨环，又称ＭＰＳ磨或轮胎磨

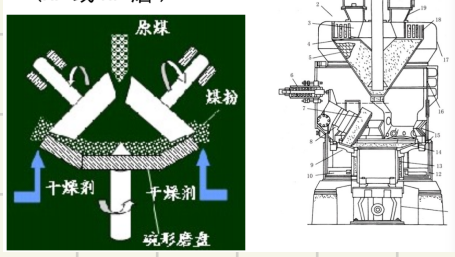
辊盘式－中速平盘磨



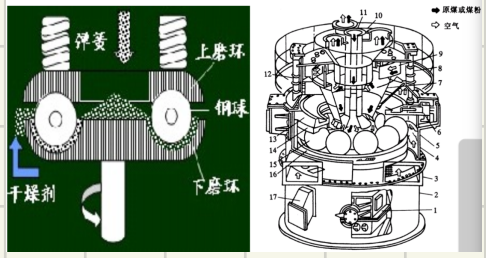
辊环式－中速轮胎磨（MPS 磨）



辊碗式－中速碗式磨（RP 或 HP 磨）



球环式－中速球式磨（E 型磨）

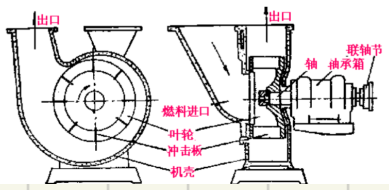


高速磨：（风扇磨）

➢高速磨由叶轮、带护甲的蜗壳和粗粉分离器组成，装有冲击板的叶轮由电动机带动高速旋转。

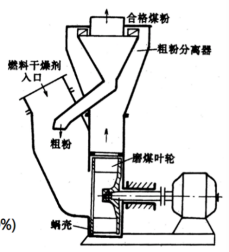
➢原煤和干燥剂一起被吸入磨煤机内，煤被转动的冲击板打碎，甩到护甲上再次被撞击成煤粉，在风机压头的作用下由干燥剂携带经粗粉分离器带出。

➢高速磨结构简单，金属耗量小，负荷适应能力强，特别适宜磨水分高的煤种；但部件磨损大，不宜磨制较硬的煤种。



利用高速旋转的风扇式冲击叶轮将煤磨成煤粉的高速磨煤机。

1. 基本工作原理—撞击
   - 用高速运动部件击碎煤；
   - 使煤高速撞击金属部件。
2. 基本类型
   - 风扇磨、竖井磨、锤击磨
3. 结构与工作过程
   - 类似风机
4. 特点
   - 既能磨煤，又能鼓风
   - 干燥条件好，可磨高水分煤（M_{ar}大于 30%）
   - 磨损严重，要求煤的磨损性小
   - 出粉较粗，不易用于低挥发分煤
   - 结构简单，制造方便，设备紧凑，耗钢少，运行电耗低。



制粉系统：

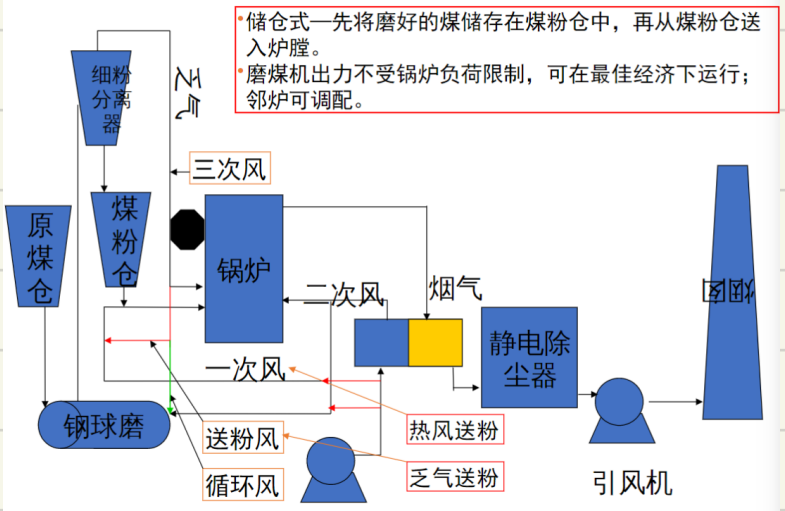
分类：

中间储仓式：将磨好的煤粉先储存在煤粉仓中，再按锅炉运行负荷的需要，从煤粉仓中经给粉机送入炉膛燃烧

Ø 直吹式：磨煤机中磨好的煤粉直接吹送到炉膛燃烧

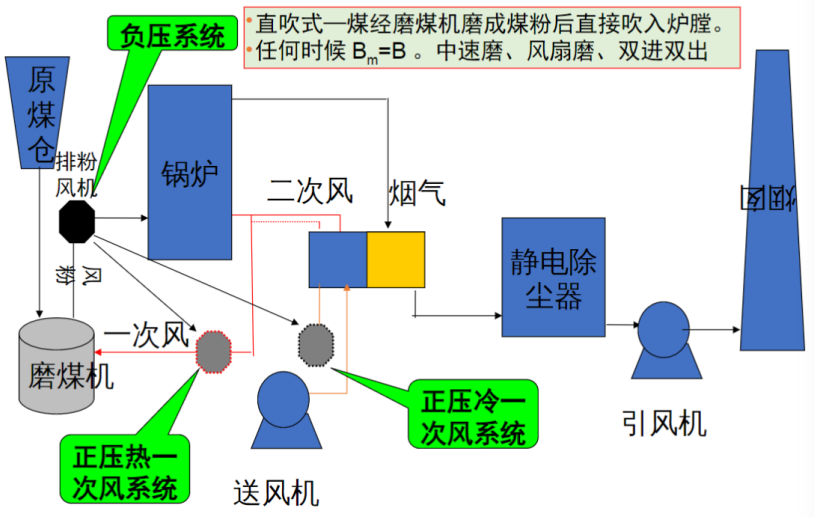
中储式制粉系统组成及流程

- 储仓式—先将磨好的煤储存在煤粉仓中，再从煤粉仓送入炉膛。
- 磨煤机出力不受锅炉负荷限制，可在最佳经济下运行；邻炉可调配。

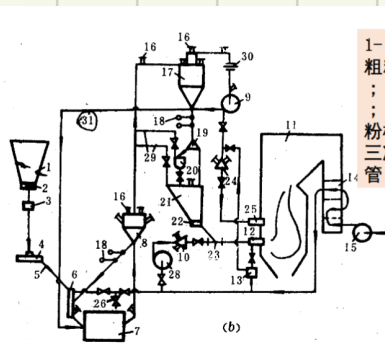


直吹式制粉系统组成及流程

- 直吹式—煤经磨煤机磨成煤粉后直接吹入炉膛。
- 任何时候 B_m=B 。中速磨、风扇磨、双进双出



热风送粉：



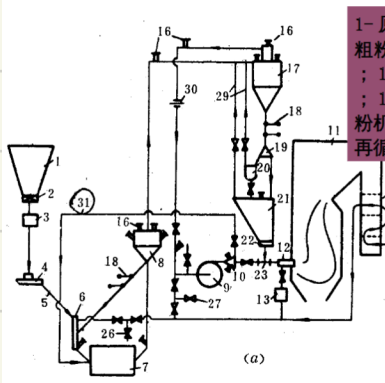
1- 原煤仓； 4- 给煤机； 7- 钢球磨； 8- 粗粉分离器； 9- 排粉机； 10- 一次风箱； 12- 燃烧器； 14- 空预器； 15- 送风机； 17- 细粉分离器； 21- 煤粉仓； 22- 给粉机； 23- 混合器； 24- 乏气风箱； 25- 三次风喷口； 28- 一次风机； 31- 再循环管

➢空气经送风机→空预器→一次风机→一次风箱→混合器（热气与煤粉）→一次风喷口

➢乏气经细粉分离器→排粉机→乏气风箱→三次风喷口

➢适用无烟煤、贫煤及劣质煤

乏气送粉：

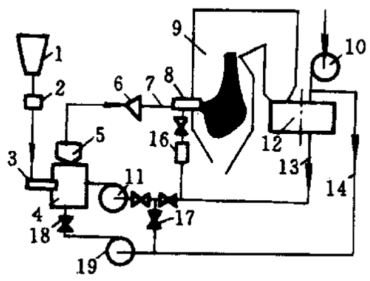


1- 原煤仓； 4- 给煤机； 7- 钢球磨； 8- 粗粉分离器； 9- 排粉机； 10- 一次风箱； 12- 燃烧器； 14- 空预器； 15- 送风机； 17- 细粉分离器； 21- 煤粉仓； 22- 给粉机； 23- 混合器； 28- 一次风机； 31- 再循环管

➢乏气经细粉分离器→排粉机→一次风箱→混合器（乏气与煤粉）→ 一次风喷口

➢适用于烟煤等挥发分含量高的煤种

中速磨直吹式正压热一次风系统



4- 磨煤机； 6- 次风箱； 10- 送风机； 11- 热一次风机； 12- 空预器； 19- 密封风机

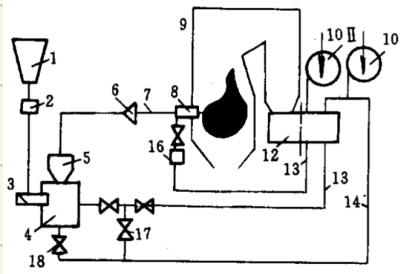
➢正压系统：一次风机布置在磨煤机之前，系统处于正压状态下工作。

➢无漏风；叶片磨损小。煤粉易外泄，需设专门的密封风机。

➢热一次风系统：配置二分仓回转式空预器。一次风机布置在空预器与磨煤机之间，输送的是热空气。

➢空气温度高，比容大，风机体积大，电耗高，易发生高温侵蚀，运行效率及可靠性低。

中速磨直吹式正压冷一次风系统



4- 磨煤机； 6- 次风箱； 10Ⅰ- 一次风机； 10Ⅱ- 二次风机； 12- 空预器

冷一次风系统：

➢配置三分仓回转式空预器。

➢一、二次风各自由单独风机输送，风机处于空预器之前，输送的是干净的冷空气。

➢空气温度低，比容小，风机体积小，电耗低；

➢高压头冷一次风机可兼作密封风机，简化系统；

➢热风温度不受一次风机的限制，可满足磨制较高水分煤种的要求。

作业与思考题：

一、什么是乏气再循环，有什么作用？

再循环管 将部分磨煤乏气从排粉风机后返回到磨煤机，然后再回到排粉风机进行循环。

再循环风 温度低，既可以调节磨煤机入口干燥剂的温度，又能增加磨煤的通风量，并能兼顾燃烧所需一次风的要求，从而协调磨煤、干燥和燃烧三方面所需的风量。

燃用挥发分高而水分不大的烟煤 要求磨煤通风量大，但干燥风量小或干燥剂温度低，出现磨煤、干燥和燃烧所需风量的矛盾。

运用再循环风，可降低磨煤机入口干燥剂的温度，增加磨煤通风量，又能兼顾燃烧所需一次风的需要。

二、制粉系统使用冷风过多对锅炉运行有什么影响？

1. 降低煤粉温度：过多的冷风会降低进入炉膛的煤粉温度，影响燃烧稳定性和燃烧效率，可能导致煤粉燃烧不完全，增加未燃尽碳的排放。
2. 增加锅炉负荷：冷风的使用增加了锅炉的通风负荷，需要更多的风机功率，进而增加了锅炉的能耗。
3. 影响蒸汽温度：过多的冷风会降低炉膛温度，影响蒸汽的过热度，可能导致蒸汽温度下降，影响汽轮机的运行效率。
4. 腐蚀和结渣：过低的燃烧温度可能导致炉膛内结渣和腐蚀的风险增加，影响锅炉的长期运行可靠性。

三、制粉系统分为几类，各有何特点？

1. 中间储仓式制粉系统：煤粉在磨煤机磨制后储存在中间储仓，再根据需要送入炉膛。特点是煤粉供给稳定，燃烧调整方便，但设备复杂，占地面积大，投资较高。
2. 直吹式制粉系统：煤粉在磨煤机磨制后直接通过一次风送入炉膛，不经过储仓。特点是系统简单，投资少，但对磨煤机运行的稳定性要求高，燃烧调整相对困难。
3. 正压直吹式制粉系统：磨煤机出口压力高于炉膛压力，煤粉由一次风直接吹入炉膛。特点是系统简单，设备少，运行费用低，但磨煤机和送粉管道需要承受较高的压力。
4. 负压直吹式制粉系统：磨煤机出口压力低于炉膛压力，煤粉由一次风通过引风机送入炉膛。特点是安全性好，系统密封要求低，但系统复杂，投资较大。

四、什么是冷、热一次风机系统，各有何特点？

冷一次风机系统和热一次风机系统是锅炉制粉系统中的两种常见风机配置方式。

冷一次风机系统：

特点：冷一次风机系统使用环境空气作为一次风源，空气不经过加热直接送入磨煤机和炉膛。系统简单，设备投资较少，适用于煤种较单一、燃烧稳定性要求不高的场合。

优点：设备和管道承受的温度较低，故障率低，维护简单。

缺点：由于空气未经加热，影响燃烧效率和稳定性，尤其在寒冷气候下，启动和运行过程可能受到影响。

热一次风机系统：

特点：热一次风机系统将环境空气先通过空气预热器加热后，再送入磨煤机和炉膛。适用于需要提高燃烧效率和燃烧稳定性的场合。

优点：预热空气提高了燃烧温度，促进燃料充分燃烧，提高锅炉效率；有助于减少冷凝和腐蚀现象。

缺点：系统复杂，设备投资和运行维护费用较高，需要对预热器进行定期维护。

五、筒式钢球磨煤机和中速磨煤机各有何特点，适于在什么情况下采用？

筒式钢球磨煤机：

特点：筒式钢球磨煤机通过钢球的冲击和摩擦作用将煤块磨成煤粉，具有结构简单、运行可靠、适应性强等特点。磨煤过程稳定，能适应煤质波动。

适用场合：适用于煤种复杂、煤质变化较大的电厂，以及需要处理大颗粒煤的场合。通常用于老旧电厂或对煤质要求不高的锅炉系统。

中速磨煤机：

特点：中速磨煤机主要通过磨辊和磨盘的相对运动将煤块磨成煤粉，具有制粉效率高、煤粉细度均匀、占地面积小等特点。运行平稳，振动小。

适用场合：适用于煤质均匀、要求燃烧效率高的现代大型电厂。特别适合高效低氮燃烧技术的应用场合。

优点：

- 煤种适应性强，可磨硬煤，高水分煤（相对中速磨），对煤中杂物不敏感（对石头、金属）。
- 磨煤最细，对无烟煤适合。
- 结构简单，运行可靠性高，事故率小，可用率高；维护方便，维修费用低。

缺点：

设备大，噪音大，磨损大，占地面积大，投资高，电耗高，不宜在低负荷运行。

中速磨存在问题：

(1) 对杂质敏感，工作条件要求苛刻；
(2) 结构复杂，运行和维修技术要求高；
(3) 不能磨制磨损指数高的煤种；
(4) 要求水分低（外在水分≤ 15%）；
(5) 储粉能力小，响应时间长。

中速磨优点：

(1) 启动迅速快，调节灵活；(2) 磨煤电耗低；6-9kWh/t(3) 结构紧凑，占地少，磨煤机与粗分装在一体；(4) 钢耗少，噪音低；(5) 金属磨损量小。(6) 转速高，碾磨效果高，效率高。

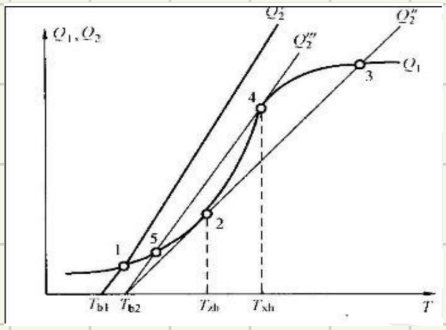
第三章 燃烧理论

- 燃烧的定义：是通过燃料和氧化剂在一定条件下，所进行的具 有发光和发热特点的剧烈的氧化反应。
- 燃烧学的定义：是研究燃烧过程基本规律及其应用技术的科学。它包括两方面的内容：燃烧理论和燃烧技术。

放热与散热曲线：

炉内煤粉空气混合物燃烧发热量 Q_1：$Q_1 = k_0 C_{O_2}^b e^{-\frac{E}{RT}} V Q_r$

向周围介质散失的热量 Q_2：$Q_2 = \alpha A (T - T_0)$



1 点：稳定的低温缓慢氧化状态

2 点：热力着火点（不稳定状态）

3 点：高温燃烧状态

4 点：热力熄火点

5 点：低温缓慢氧化状态点

Q_1 和 Q_2 相切的数学条件：散热和放热相 等，即 $Q_1 = Q_2$；在二曲线相切点 2 处的斜 率应相等，即 $dQ_1/dT = dQ_2/dT$

稳定着火条件：$Q=Q \quad \frac{dQ}{dT} \geq \frac{dQ}{dT}$

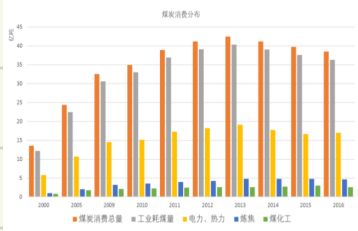
着火熄火几点说明

- 一般熄火温度 T_{zh} 是大于着火温度 T_{zh}；
- 熄火点和着火点随反应系统的热力条件（散热和发热）而变；
- 熄火温度和着火温度随热力条件而变，不是物理常数，是相对特征值；
- 各种实验方法所测得的着火温度值的出入很大，相同测试条件下，不同燃料的着火、熄火温度不同；对同一燃料，不同的测试条件也有不同，过分强调着火温度 意义不大；
- 对煤：反应能力越强（挥发份 V_{daf} 越高，焦炭活化能越小）的煤，着火点低，容 易着火，也易燃烬。反应能力弱的无烟煤着火温度高，也难燃烬。
- 加快着火的措施：加强放热、减少散热。。

散热不变 → 初温 / 浓度 / 压力 → 放热不变 → 降低气体流速 / 燃烧室保温：增加卫燃带

煤的利用方式

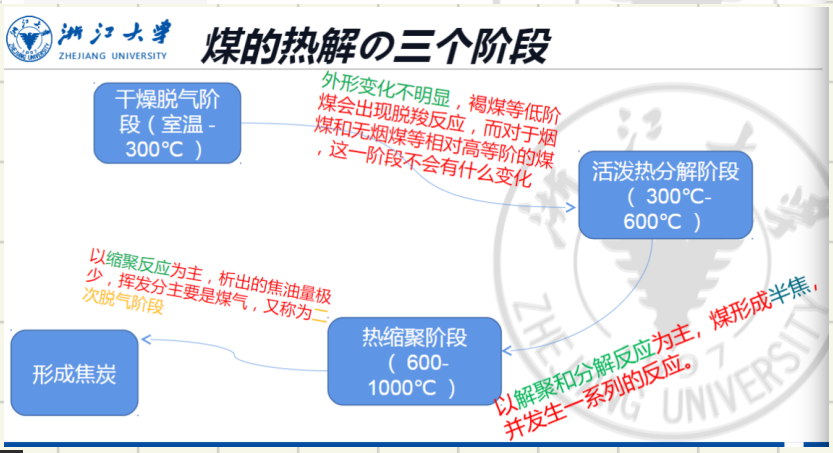
我国煤炭按用途可分为动力用煤、炼焦用煤和化工用煤



- 动力用煤主要以热能的形式利用，分别应用于电力、冶金、建材以及民用等领域
- 炼焦用煤主要是通过煤的焦化来生产焦炭，同时也伴有焦油、煤气、芳烃等副产品
- 化工用煤主要用于煤化工行业，采用煤气化、液化、热解等工艺生产烯、醇类、油品、芳烃等化工产品
- 创造性思维

煤的热解是指将煤在惰性气体气氛下持续加热至较高温度时发生的一系列物理变化和化学变化。**煤的热解过程实际上是煤中的大分子在温度较高时某些弱键从形成轻质的气态物质和焦油的过程。**

煤的热解の三个阶段



煤燃烧 4 个阶段

① 加热干燥阶段—水分蒸—吸热生效 温度<200℃；

② 挥发份析出、着火—热分解、着火—放热←>200℃ ～ 300℃；

③ 燃烧阶段—挥发分和焦碳 组成 CO_2、CO、CH_4、H_2、C_2H_2、C_mH_m、少量 H_2S、N_2；

④ 燃烬阶段—

整个过程交叉、无明显分界



最重要的是着火和燃烬两个阶段。

影响煤粉气流着火的因素

内在因素：
- 燃料的性质
- 挥发分
- 水分
- 灰分
- 细度

外在因素：
2. 煤粉气流的初温
3. 一次风量和一次风速
4. 燃烧器结构特性
5. 锅炉负荷

燃烧完全条件：

① 适量空气
② 适当高的炉温
③ 空气和煤粉良好扰动和混合
④ 在炉内有足够的停留时间

第四章 燃烧设备

电厂锅炉的燃烧设备

电厂锅炉的燃烧设备包括：煤粉燃烧器、炉膛等

对燃烧设备的总体要求：
① 炉内形成良好空气动力场，迅速稳定着火；
② 及时供应空气，与燃料适时混合，使完全燃烧；
③ 稳定燃烧，不结焦；
④ 适应煤种与负荷变化；
⑤ 低 NOx；

燃烧器按出口气流特征可以分为：
直流燃烧器和旋流燃烧器两类

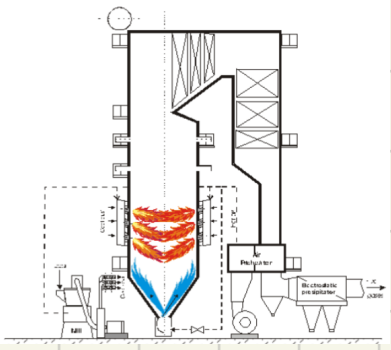
炉膛

燃烧和热交换场所

绝热面：卫燃带、稳燃室

蒸发受热面：水冷壁

过热和再热面：墙式过热器和墙式再热器



炉膛

作用：保证燃料的完全燃烧，组织炉内热交换、布置合适的受热面满足锅炉容量的要求。

设计要求：
① 适当的炉膛体积
② 合理的几何形状
③ 便于布置水冷壁
④ 燃烧器至炉膛出口有足够行程

炉膛结构必须满足以下条件：

1、良好的空气动力场能保证安全燃烧：避免火焰冲墙或局部温度过高，防止水冷壁结渣
2、能将出口烟温降低到合理数值，炉膛出口及其后受热面不结渣
3、有合适的热强度。使燃料空气流充分发展，均匀混合、完全燃烧，以及低 NOx 排放

炉膛设计参数：

1. 炉膛热容积强度 q_V：

定义：每小时送入炉膛单位容积中的平均热量。

$$q_V = \frac{BQ_{net,ar}}{V} \quad kW/m^3$$

B 为实际消耗量，并不是计算消耗量
原则：完全燃烧，满足烟气冷却条件。
影响：燃烧方式，燃料特性有关。
好煤（好烧）q_v 大，V_l 小。烟煤 > 贫煤 > 无烟煤。
煤炉 < 油炉 >200 以上 国外偏向取大。

2. 炉膛截面热负荷 q_a：

定义：按燃烧器区域炉膛单位截面所算，每小时送入炉膛平均热量，

$$q_a = \frac{BQ_{ar,net}}{A} \quad kW/m^2$$

3. 燃烧器区域壁面热强度 q_B：

$$q_B = \frac{B_{al} Q_{net,ar}}{2(a+b)(4r+3)} \quad kW/m^2$$

q_B↑→ 火焰越集中，燃烧器区的温度水平就越高
→有利于着火和维持燃烧的稳定性，
但易造成燃烧器区域壁面的结渣。

4. 燃尽区容积热强度 q_{bo}：

定义：锅炉输入热功率与燃尽区炉膛容积热比值

$$q_{bo}=\frac{B_{cal}Q_{net,ar}}{V_{bo}}\quad kW/m^3$$

q_{bo} 反应了最上层喷口喷出的煤粉在炉内的最短停留时间。q_{bo}愈小，停留时间愈长，该层煤粉射流的燃尽愈大概得到保证，也有利于降低屏区入口局部烟温，避免玷污结渣倾向。

炉中采用固态排渣、切向燃烧、配300MW~600MW 机组的燃气锅炉，q_{bo}的上限值可取 200~260KW/m³。大容量热水锅炉的 q_{bo}要比小

5、炉膛壁面热强度 q_f：

定义：单位炉膛壁面所吸收的热量的平均值。

$$q_f=\frac{B_f Q}{F}\quad kW/m^2$$

q_f：数值愈高表明单位壁面所吸收的热量愈大，说明炉内的烟温水平愈高，过大会造成水冷壁结渣。

煤粉炉的炉膛及燃烧器

燃烧器是锅炉最关键技术设备之一，前面提到的燃烧机理、热力着火条件、煤粉气流着火条件等等，都是与燃烧器有关，与它的气流特性，结构布置等有关。

一、作用：

- 快速稳定着火：着火点 200—300mm；
- 空气均匀混合：配风在时间和空间上合理；
- 稳定安全燃烧：后期扰动强烈，不结渣；
- 实现低污染 ：低 NOx 燃烧；

从这里可以看出，对燃烧器要求

直流燃烧器：

直流燃烧器通常由一列矩形、多边形或圆形喷口组成。煤粉气流和热空气从喷口射出后，形成直流射流。直流射流的主要特点是沿流动方向的速度衰减比较慢，具有比较稳定射流核心区，且一次风和二次风的后期混合比较强。

卷吸：射流带动周围介质一起流动，从而使射流质量逐渐增加的过程

卷吸能力分析

卷吸→高温烟气进入射流→着火
→ 外层空气进入射流→燃尽

主体段内流量变化规律

$$\frac{Q}{Q_0}=0.197\frac{w_m}{w_0}\left(\frac{R_m}{R_0}\right)^2=2.22\left(a\frac{x}{R_0}+0.29\right)$$

结论：小喷口有利于卷吸

外表面积大的扁喷口或多边喷口有利于卷吸

凡有利于卷吸的都不利于射程

四角切圆燃烧方式的气流偏斜及切圆直径

（2）切圆直径

炉内假想切圆直径影响着气流贴墙、结渣情况和燃烧稳定性，还影响着汽温调节和炉膛容积中火焰的充满程度。切圆直径的调整十分重要。

当切圆直径较大时，煤粉的着火条件较好，气流旋转强烈，气流扰动大，可燃物与空气流的混合加强，有利于煤粉的燃尽。

但是，切圆直径过大，会带来下述的问题：

(1) 火焰容易贴墙，引起结渣；
(2) 着火过于靠近喷口，容易烧坏喷口；
(3) 火焰旋转强烈时，产生的旋转动量矩大，这将使炉膛出口烟温分布不均匀程度加大，引起较大的热偏差，导致过热器结渣或超温。

均等配风

均等配风方式：燃烧器的一、二次风喷口通常交替间隔排列，或一次风口背火侧布置二次风口。

特点：相邻两个喷口的中心间距较小，一、二次风喷出后很快混合

适用：容易着火（挥发分含量较高）的煤，如烟煤、褐煤等

分级配风

分级配风方式：二次风分级分段地送入燃烧的煤粉中
一次风口集中布置，二次风口分层布置
一、二次风口之间保持较大距离

特点：
- 一次风口集中布置，燃烧放热集中，火焰中心温度升高，有利于劣质烟煤或无烟煤的着火燃烧；
- 二次风混合较迟，二次风分级供给
- 一次风率和一次风速低，二次风速高

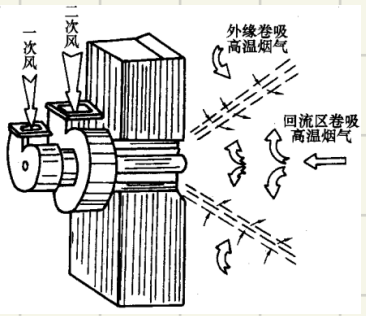
适用：不易着火（挥发分含量较低）的煤，如无烟煤、贫煤、劣质烟煤

分级配风的目的是：在燃烧过程不同时期的各个阶段，按需要送入适量空气，保证煤粉稳定着火、完全燃烧

旋流燃烧器：

旋流式燃烧器的工作原理

煤粉气流或热空气通过旋流器时，发生旋转，从喷口射出后即形成旋转射流。利用旋转射流，能形成有利于着火的高温烟气回流区，并使气流强烈混合。



旋转射流特点

三个方向速度：
- 轴向速度 W_a：衰减比切向速度 W_t 慢
- 径向速度 W_r，使扩展角比直流射流大，随旋转强度的增大而增大
- 切向分速度 W_t：衰减很快，即旋转效应衰减很快

内回流区：对着火和燃烧有非常大的影响
- 射流中心有一低压区，径向和轴向有压力梯度。
- 轴向反向压力梯度，吸引气流沿轴线反向流动，产生内回流区。
- 卷吸周围介质的能力比直流射流强。

47

扩展角：
扩展角（扩散角）大，衰减快；
扩散角：气流外边界所形成的锥角β。

旋转射流的数学特征量

决定旋转射流旋转强烈程度的特征参数是旋流强度 n
旋流强度 n 是用两个特征量——旋转动量矩 M 和轴向动量 K 为基础组成的一个无因次准则。

n↑ 回流量↑ 回流区由长瘦变为短胖型
n↑ 扩流角↑ 气流射程↓ 衰减↑

对比：

1. 气流结构

直流射流：衰减慢，造期混合差，后期扰动强烈；有假想切圆；
旋转射流：衰减快，早期混合强烈，后期扰动弱；存在内回流区；

2. 布置方式

直流：四角布置，又称角置式燃烧器，一、二次风布置灵活，有集中、均等之分，对锅炉截面尺寸有要求；
旋流：墙式布置，又称墙式燃烧器，一、二次风内外布置，对锅炉截面尺寸无要求。

3. 着火源不同

直流：以邻角（上游）火焰冲扫跟部为主，自身外回流为辅；
旋流：以自身内回流区为主，外回流为辅。

4. 烟温偏差

直流：因气流在炉内旋转，在炉膛出口存在扭转残余，造成风速差，引起烟温偏差，顺时针，左高右低；逆时针，右高左低；
旋流：无旋转，烟气温度和速度分布较均匀，向大容量发展，直流将受限制。

5. 其他

直流：四角煤粉差允许大一些，火焰中心可调，炉膛尺寸受限制。
旋流：不允许，会造成水冷壁局部热负荷不均匀，火焰中心不可调，炉膛尺寸不受限制，热负荷不均匀。

影响煤粉气流着火的主要因素：

①燃料性质：
- 挥发分↓，着火越困难
- 水分↑，着火越困难
- 灰分↑，炉内烟气温度↓，煤粉气流着火推迟
- 细度↑，着火越容易

② 炉内散热条件：卫燃带 → 减少水冷壁吸热量，提高燃烧器区域烟气的温度水平

③ 煤粉气流的初温：利用高温预热空气作为一次风来输送煤粉

④ 一次风量和风速：一次风量↑，着火过程推迟

⑤ 锅炉的运行负荷：负荷↓，烟温↓

煤粉强化着火及稳定燃烧技术

- 制粉系统方面
  1. 尽量避免煤质的大幅度变化 ；
  2. 选择经济的煤粉细度；
  3. 提高一次风粉混合物温度；
  4. 提高风粉混合物中煤粉浓度。
- 炉膛设计方面
  合理选择炉型
- 燃烧器方面
  1. 建立起有利的着火区；
  2. 合理的喷口布置和配风；
  3. 增加预燃点火稳燃装置。

低NO_x燃烧：

低 NOx 燃烧技术就是根据 NOx 的生成机理，在煤的燃烧过程中通过改变燃烧条件、或合理组织燃烧方式等方法来抑制 NOx 生成的燃烧技术。

燃煤锅炉中 NO_x 生成机理
- 热力型
- 快速型
- 燃料型

常见的低 NOx 燃烧技术

① 烟气再循环技术
② 空气分级燃烧技
③ 燃料分级燃烧技
④ 低 NOx 燃烧器技

图 3-7 燃煤锅炉的低 NO_x 燃烧控制系统

各项技术在燃煤锅炉中的布置位置不同！

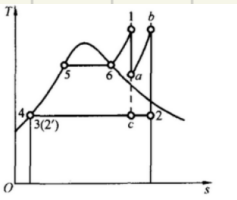
第二篇 锅炉受热面

- **重点掌握**
- 锅炉主要受热面的作用、结构和工作特点

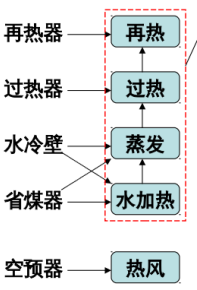
第五章 蒸发受热面

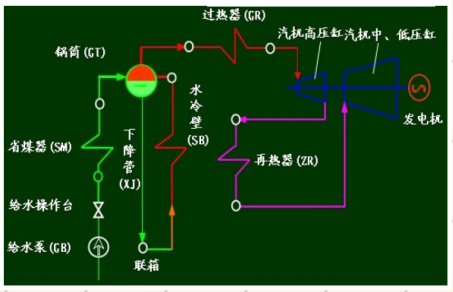
- **重点掌握**
- 锅炉水冷壁结构特点

锅炉受热面：是锅炉主要的传热设备，从放热介质中吸取热量，并传递给吸热介质的表面。属锅内过程（空预器除外），包括：省煤器、水冷壁、过热器、再热器、空预器。



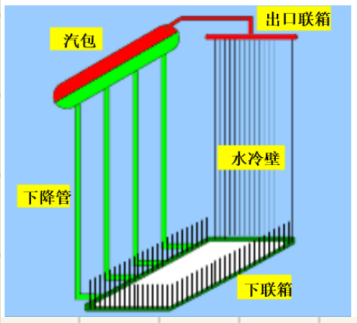
见表 5-1

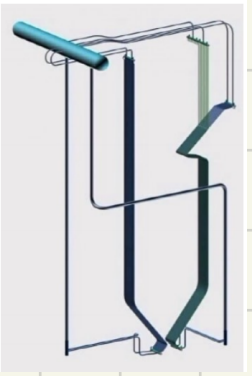




汽包锅炉蒸发受热面系统

蒸发受热面系统包括：汽包、下降管、水冷壁下联箱、水冷壁管、水冷壁上联箱、汽水引出管和汽包。





一、水冷壁：

水冷壁：敷设在锅炉炉膛内壁、由许多并联管子组成的蒸发受热面。

作用
① 强化传热
② 保护炉墙
③ 防止结渣
④ 悬吊炉墙
⑤ 蒸发过程

结构：两端连接上下联箱，管子贴墙布置。

重要设计参数：$\frac{S}{d}$ → 两管间距 / → 直径

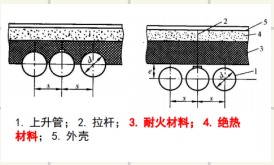


1、光管与膜式水冷壁：

1. 光管式水冷壁

结构：用外形光滑管子连接排列成平面形成。

特点：结构简单，制造成本低，安装、检修方便；管子排列较稀疏，受热面利用率高；但对炉墙保护作用下降。

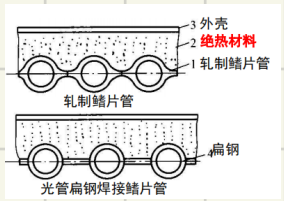


1. 上升管；2. 拉杆；3. 耐火材料；4. 绝热材料；5. 外壳

2. 膜式水冷壁

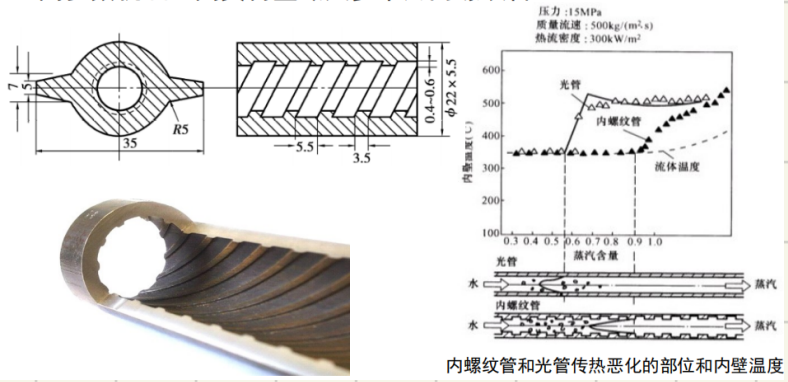
结构：在光管上轧制鳍片管和焊接鳍片管。书图 5-4，不同焊接方法。

特点：气密性好，减少炉膛漏风，改善燃烧；增加传热面积，减少钢材；减轻炉墙厚度和重量，降低成本；蓄热少，锅炉启动速度加快；炉膛抗爆能力增强；光滑（无耐火材料与火焰面接触）和温度较低减少炉内结渣可能性；可成片安装，便于悬吊，缩短工期；制造、检修工艺复杂。



2、内螺纹管：

- 增强管内扰动，强迫汽泡脱离管壁，减小热阻，强化壁面和流体间的热交换，降低壁温，防止膜态沸腾过早发生，推迟传热恶化，保证水循环安全
- 高参数机组、高负荷区域大多采用内螺纹管

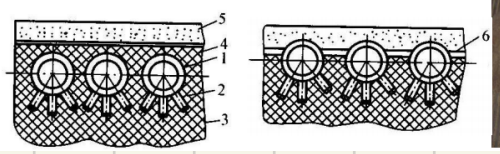


内螺纹管和光管传热恶化的部位和内壁温度

3、销钉式水冷壁（卫燃带）

- **卫燃带**—在水冷壁局面区域敷设耐火材料
- **目的：**
  - 减少水冷壁吸热，提高燃烧区域火焰温度（燃烧区域）
  - 改变炉膛出口温度，调节蒸汽温度（炉膛上部）
- **对象：**
  - 低挥发分不易着火燃料，液态排渣炉，提高蒸温
- **缺点：**
  - 易结渣，影响安全运行
  - 防结渣卫燃带：分隔布置



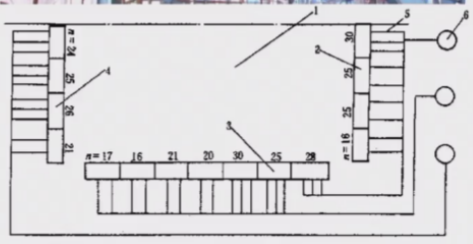




4、水冷壁回路：

- 炉膛越大，水平方向水冷壁热负荷分布不均匀，布置燃烧器的四角比炉膛中间小，受热强弱不一，冷却效果又差异。
- 通常把锅炉每面墙的水冷壁，划分为若干个（3-8）循环回路。
- DG200MW机组锅炉，24个回路；DG300MW机组锅炉84个回路



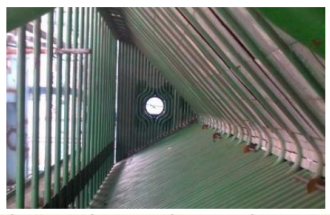


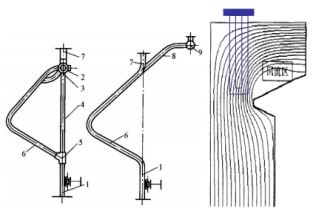
书本103-104

5、折焰角和冷灰斗：

折焰角—后墙水冷壁接近炉膛出口处向炉膛内突出的部分，由上部部分管子分叉弯制而成折焰角。突出部分占炉膛 30% 左右，好处：

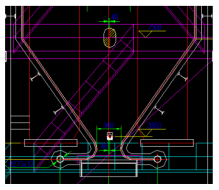
- 提高炉膛上部火焰炉内充满度，使流场更合理
- 改善屏过空气动力特性，增加横向冲刷作用
- 延长水平烟道的长度，便于对流过热器和再热器的布置
- 减少炉膛出口扭转残余

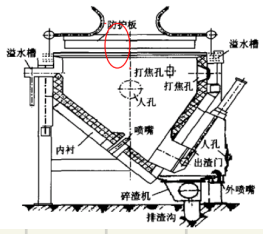




冷灰斗—对固态排渣锅炉在炉膛下部水冷壁向内弯曲形成，前后侧成 50–55 度角，两侧垂直。

- 作用：聚集、冷却，并自动排出灰渣。
- 固态出渣：水封、沙封，干出渣。
- 下向膨胀节点。





二、汽包：

- 锅炉汽包是电站锅炉最大、最重要的一个部件，也是主要受压部件。

高压以上汽包内经 1600-1800mm，相应壁厚 100-200mm，长度 14m-30m，重量 -300t。

- 结构

1. 筒身：由钢板卷制焊接制成。
2. 封头：用钢板模压制成，焊接于筒身，封头中部有椭圆形或圆形人孔门，以备安装和检修时工作人员进出。
3. 管座：汽包上的管孔，并焊上短管。
4. 内含蒸汽分离净化装置等





- **作用**
  1. 加热、蒸发、过热三个过程的连接枢纽和大致分界点；
  2. 具有一定的蓄热能力，适应外界负荷变化；
  3. 蒸汽分离、净化处理；
  4. 外接附件保证锅炉工作安全，水位计、安全阀、压力表、事故放水等
- **安全性要求高**
  - 汽包上下壁、内外壁允许温差为 40℃，最大不超过 50℃。
  - 受热不均会产生热应力：

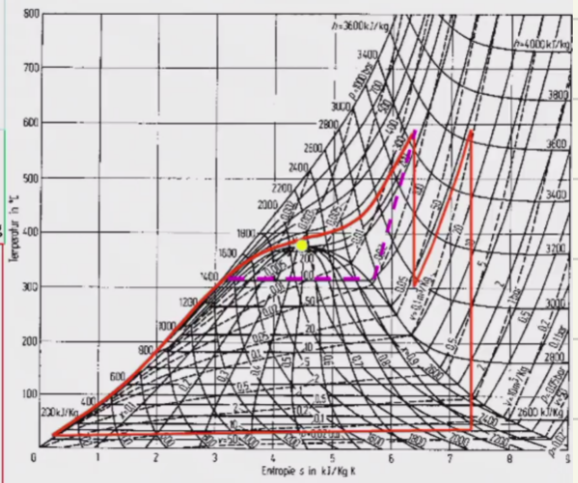
三、直流锅炉蒸发受热面系统（超临界机组）

1、超临界状态：

超临界：当流体的压力和温度超过一定的值（临界点）时，流体会处于一种介乎于液态和气态的中间态，称为超临界态。

水的临界点：
Tc=374.15 ℃
Pc=22.129MPa
临界焓 2095.2kJ/kg

低于临界压力，水加热经过汽化过程，存在水和水蒸气共存状态；在临界压力或高于临界压力，水在加热过程中没有汽水共存状态，直接从水转变为蒸汽，水的蒸发热（汽化潜热）为零，汽和水的密度差也等于零。



超临界压力下郎肯循环过程的T—S图

在超临界压力区，水冷壁管内工质具有大比热容特性，此时工质温度随吸热量变化不大。

2、超临界锅炉蒸发受热面：

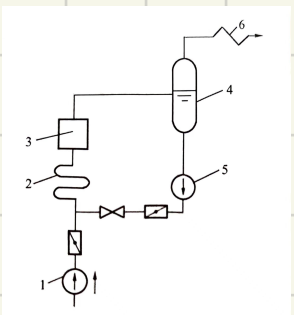
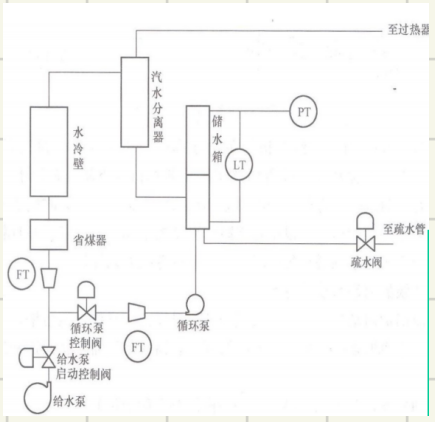


图 5-8 直流锅炉蒸发受热面系统
1—给水泵；2—省煤器；3—水冷壁；4—分离器；5—再循环泵；6—过热器



当锅炉变压到水冷壁出口的工质为汽水混合物时，切向进入的分离器起汽水分离作用，蒸汽由分离器顶端进入过热器，分离下来的锅炉水进入蓄水箱，通过再循环泵升压后与给水混合回到锅炉中循环流动。

①特点：

- 给水依靠给水泵压头在受热面中一次通过产生蒸汽，水变汽三阶段无固定分界点，汽温不易稳定。给水流量 = 蒸发流量
- 管内工质温度随吸热量变化，吸热量增加，温度提高。如 25MPa/540℃/540℃ 的超临界压力锅炉，水冷壁工质温度约提高 98 ℃。
- 管内传热与工质的热物理特性密切相关，比体积和热导率等在拟临界温度附近的大比热容区急剧变化。
- 热强度越大的管子或管屏流量越小，与自然循环汽包锅炉相反。
- 变压运行：管内工质跨越亚临界、临界和超临界压力区。

②超临界锅炉水冷壁管形式：

- 光管（膜式）垂直管屏水冷壁
- 内螺纹管垂直管屏水冷壁
- 光管螺旋管圈水冷壁
- 内螺纹管螺旋管圈水冷壁

⇒ 特点：

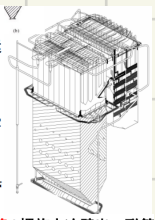
(1) 螺旋管圈在水冷壁应用

(2) 内螺纹管保证水冷壁换热安全

(3) 螺旋管圈水冷壁热偏差小

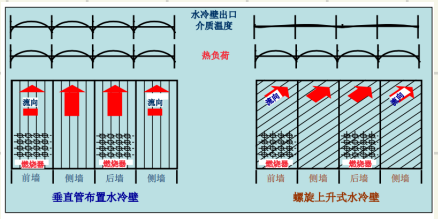
(4) 布置灵活，质量流速可选

采用螺旋管圈＋垂直管圈方式



- 螺旋管圈水冷壁是首先应用于超临界变压运行锅炉的水冷壁型式。
- 炉膛水冷壁采用螺旋管圈＋垂直管圈方式（即下部炉膛的水冷壁采用螺旋管圈［内螺纹管］，上部炉膛的水冷壁为垂直，利于穿墙和悬吊），保证质量流速符合要求。
- 水冷壁采用全焊接的膜式水冷壁
- 水冷壁采用一次中间混合联箱来实现螺旋管至垂直水冷壁管的过渡

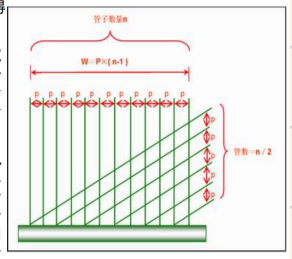
给水→省煤器→炉膛下部水冷壁→中间混合联箱（螺旋水冷壁出口联箱和垂直水冷壁进口联箱）→ 炉膛上部水冷壁→汽水分离器



螺旋管在盘旋上升的过程中，每根管子都经过炉膛下部高热负荷区域的整个周界，途经宽度方向不同热负荷分布的区域。因此，螺旋管的每个管子，以整个长度而言，热偏差很小，管间热负荷也比较均匀，容易保证水动力稳定，避免传热恶化。

布置与选择管径灵活，易于获得足够的质量流速

- 螺旋管圈水冷壁所需管子根数和管径，可通过改变管子水平倾斜角度来调整，使之获得合理的设计值，以确保锅炉安全运行与水冷壁自身的刚性。
- 管子根数大大减少，流速可以提高，适应变压运行，保证水冷壁安全，而且这种减少水冷壁管子根数的办法不加大管子之间的节距，使管子和肋片的金属壁温在任何工况下都安全



③对比：

螺旋管圈与垂直上升水冷壁

特性	螺旋管圈	垂直管圈
水冷壁出口温度均匀性	每个管通过炉膛四周，吸热均匀、温度均匀	炉膛四周各部位吸热差异很大，需装节流圈
水冷壁的安全性	出口温度均匀，并采用内螺纹管	依靠节流圈调节，难适应煤种等影响因素变化，影响水循环的可靠性和水冷壁安全性
煤种变化和负荷变化的适应性	质量流量选择有较大裕量，且不受节流圈限制，适应性强	对所有负荷流量调节有困难，节流圈易结垢损坏，适应性较差
水冷壁管质量流速选择的灵活性	螺旋管的倾角可变，管子根数可变，流速选择范围大	管子根数受炉膛尺寸的限制，流速只能通过管径来改变，灵活性有限
制造、安装	制造时间和难度长，但现场安装和调整需要总时间短	需要现场调整节流圈，困难
锅炉运行的灵活性	磨煤机、燃烧器的停投模式适应性强	磨煤机、燃烧器的停投模式适应性差

螺旋管圈单根水冷壁长（约为垂直管 2 倍），阻力大；支撑结构和刚性梁结构复杂。

第六章 过热器和再热器

- 重点掌握
  - 过热器和再热器的结构、型式、作用、工作特点等
  - 过热器和再热器的汽温特性
  - 汽温影响因素及调节方法

一、过(再)热器的作用和工作特点

过热器：将饱和蒸汽加热到额定过热温度的锅炉受热面部件

作用 ①饱和蒸汽或低温蒸汽 → 过热蒸汽

②调节蒸汽温度：一般在 -10℃ ~ +5℃

再热器：将汽轮机高压缸(或中压缸)排汽重新加热到额定再热温度的锅炉受热面部件

提高蒸汽过热（温度和热焓）目的：

- 提高循环热效率，减小热耗率
- 增大汽机做功能力，减小汽耗率
- 提高汽机排汽干度，保证叶片的安全性
- 减少管道凝结损失，提高电厂热效率

过热和再热蒸汽是电站锅炉的最终产品，而合格蒸汽标志—蒸汽温度的稳定是衡量锅炉运行质量的一个重要指标！

过热器和再热器设计和运行的原则如下：

- 防止受热面金属温度超出材料的许用温度
- 过热器和再热器温度特性好，在较大的负荷范围内能通过调节维持额定蒸汽温度
- 防止受热面管束积灰、磨损和腐蚀

过热器及其工作特点

1. 工质温度高、传热性能差、又处于高温烟气段，金属壁温高，要求使用合金材料（书本表 6-1 、 2）；此外过热器管子存在热偏差，使个别管子的管壁温度非常高，达到金属使用极限。
2. 工质流动压降有限制。（不超过工作压力的 10%）
3. 工质流动速度要合理，综合考虑压降和冷却需要。
4. 出口汽温随锅炉负荷变化，需要调温手段。（第四、五、六节运行部分讲）
5. 管间（外）烟气流速受多种因素影响，合理选择，综合考虑传热、磨损、积灰及烟气阻力等因素。

（一般额定负荷在 6m/s 以上，绝不能低于 3m/s 。尾部垂井烟道管间烟速不低于 6m/s ，水平烟道 10-14m/s 。）

6. 在锅炉启停和甩负荷时可能发生不安全现象，需要旁路和排汽系统。（见图 6-25 运行部分）

再热器及其工作特点

再热器—将汽轮机高压缸（或中压缸）排汽重新加热到额定再热温度的锅炉受热面部件。

工作特点：

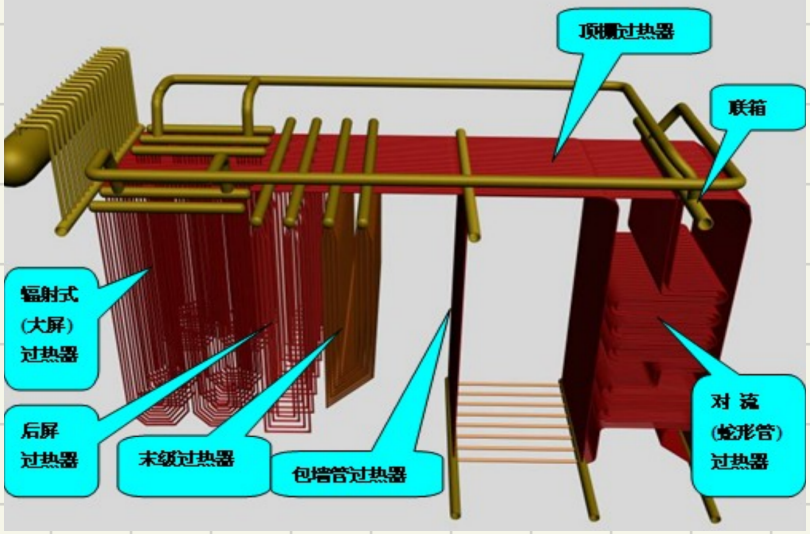
1. 管内流的是中压蒸汽，比容大，流动阻力大，为降低压损采用的蒸汽流速低，冷却更差，且也布置在高温区，工作条件更差。
2. 蒸汽对管壁的冷却作用差，密度小，传热能力差，换热系数是高压蒸汽的 1/5 。
3. 热偏差较大，蒸汽比热小，有热偏差时形成的温度偏差更大。
4. 管内易存在无蒸汽现象，使管子干烧。

结构特点：**采用大管径、多管圈，尽量减少中间混合与交叉流动，以减小再热系统压降。**

再热蒸汽基本参数：

$D_{zr} \approx 0.8 D_{gr}$ ， $P_{zr} \approx 0.2\text{-}0.25 P_{gr}$ ， $T_{zr} \approx T_{gr}$

二、过热器和再热器的型式和结构



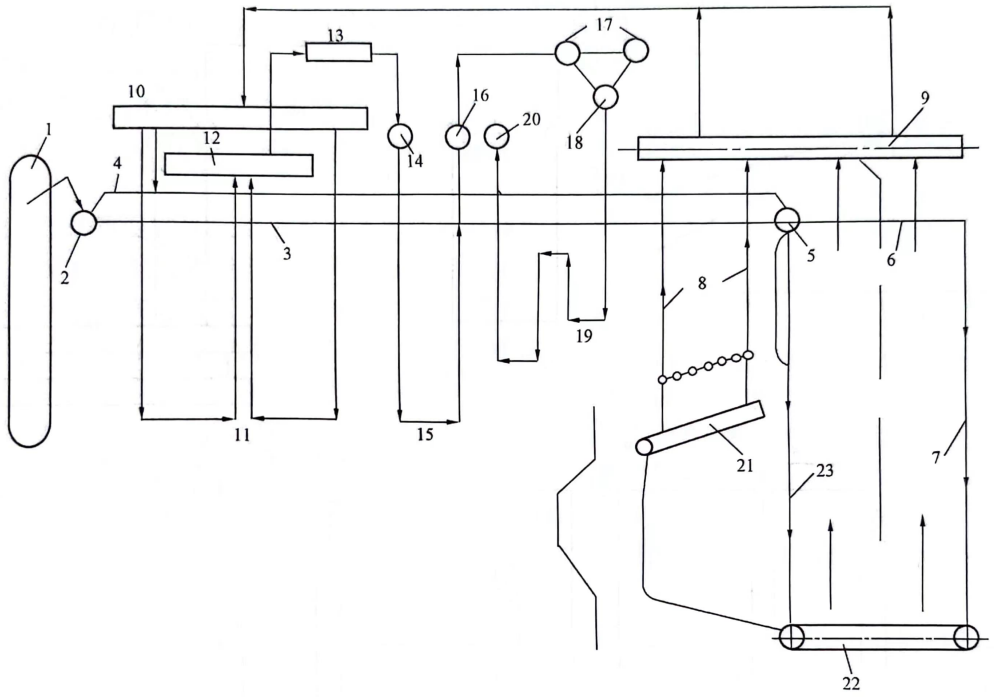


图 6-14 600MW 超临界机组锅炉过热器布置及蒸汽流程图

1—分离器；2—炉顶进口集箱；3—前炉顶管；4—炉顶管旁路管；5—炉顶出口集箱；6—后炉顶管；7—后烟井包覆；8—后烟井延伸侧墙；9—后烟井侧墙上集箱；10—前屏进口集箱；11—前屏过热器；12—前屏出口集箱；13—第一级减温器；14—后屏进口集箱；15—后屏过热器；16—后屏出口集箱；17—第二级减温器；18—末级过热器进口集箱；19—末级过热器；20—末级过热器出口集箱；21—水平烟道侧墙进口集箱；22—后烟井包覆侧墙下集箱；23—尾部竖井前墙及悬吊管

根据传热方式分为
- 对流式
- 辐射式
- 半辐射式
- 包覆壁和顶棚过热器(辐射)

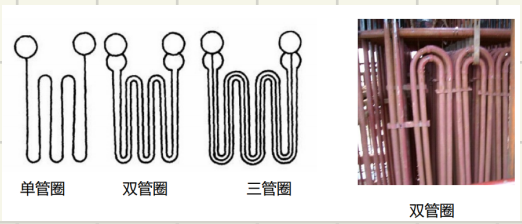
1、对流式：

对流过(再)热器布置在锅炉对流烟道内，以对流传热为主

结构：由进出口联箱连接许多并列蛇型管组成

①结构类型：

在保持烟气流速 （烟气流通截面积）不变的条件下，通过几重管圈，多管并列套弯的形式，改变蒸汽流通截面积，达到管内蒸汽流速和管外烟气流速平衡。大容量锅炉一般采用多管圈结构。因此，蛇形管有单根管圈与多重管圈之分。

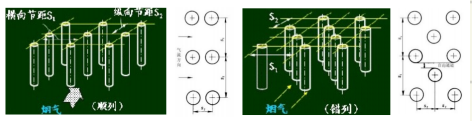


双管圈

②布置类型：

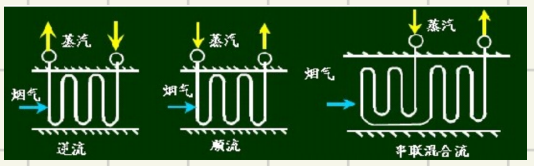
- ①按管束排列：
  - 顺列：管子固定、吊装方便，易清灰，磨损轻
  - 错列：结构紧凑，传热效果好，积灰较少

- 水平烟道考虑粘结性结灰，为清灰方便，一般顺列布置
- 尾部垂直烟井温度低，为强化传热，一般错列布置



- ②按管子轴线方向：
  - 立式：蛇型管垂直放置，布置在水平烟道，吊挂简单，膨胀自由，不易积灰，停炉后易造成积水，再次启动时会造成气塞和水击。
  - 卧式：蛇型管水平放置，布置在垂直烟道，支吊复杂，疏水方便，易积灰。

- ③按烟气与蒸汽的相对方向：
  - 逆流：传热温差较大，金属耗用少，但蒸汽出口段位于烟温最高处，管子不安全
  - 顺流：蒸汽与烟气的流向相同，蒸汽出口段位于烟温最低处，管子相对较安全，但传热温差小，金属耗用多
  - 混合流：沿着烟气流动方向，既有逆流也有顺流（串联混合流）；或者在烟道的宽度方向上，两侧为逆流，中间为顺流（并联混合流）



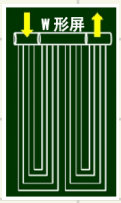
2、半辐射式：

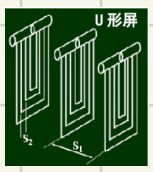
布置在炉膛上部或出口烟窗处，既接受炉内火焰的辐射换热，又接受烟气对流冲刷换热

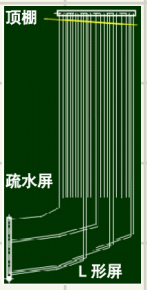
结构：由进出口联箱和管屏组成，做成一片一片"扇风"形式，管屏沿炉宽方向相互平行悬挂在炉膛上部

①布置位置
- 前屏（大屏、分隔屏）：布置在炉膛上部，悬吊，辐射式（大部分）。屏间节距较大：3m-4m
  - ⇒作用：降低炉膛出口温度，减少烟气扰动和旋转，改善过热和再热蒸汽的气温特性
- 后屏：布置在炉膛出口烟窗处，对流和辐射换热均有，半辐射。屏间节距较小：0.5m-1.0m
  - ⇒作用：有效降低进入密集的对流受热面的烟气温度，防止对流受热面结渣

②类型：W形、U形、L形



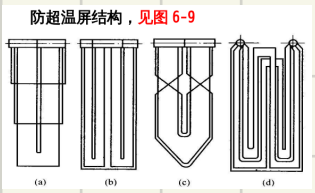




⇒便于疏水

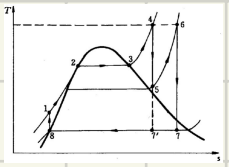
③超温现象：

- 炉内火焰辐射温度高，热负荷较高，热偏差较大。有时同屏管与管之间温差达 80-90 度。
- 最外圈管子受热最强，长度最长，阻力大，工质流量小，最易发生超温现象。



④布置屏式过热器的优势：

- 屏式过热器吸收炉膛内相对数量的辐射热量，适应大容量高参数锅炉过热器吸热量相对增加、水冷壁吸热量相对减少的需要，它补充了水冷壁吸收炉膛辐射热的不足，实现了炉膛必须的辐射传热量，以使炉膛出口烟气温度限制在合理的范围内。同时改善汽温特性。
- 对于燃烧器四角切圆布置燃烧方式的炉膛，前屏式过热器对烟气气流偏转能起到阻尼和导流作用。
- 后屏过热器的横向节距比对流管束大很多，接近灰熔点的烟气通过它时减少了灰粘结在管子上的机会，有利于防止结渣。烟气通过后屏烟温下降，也防止了其后的对流管束结渣。



3、辐射式：

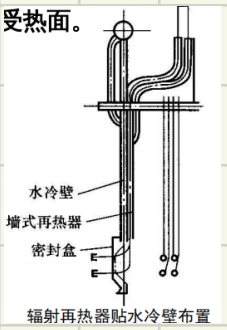
布置在炉膛内壁面上，以辐射传热为主，也叫墙式、壁式过热器(再热器)

结构：与水冷壁相似

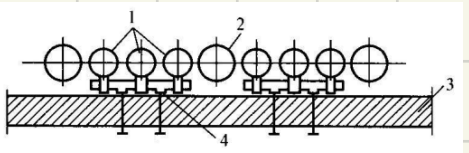
①直接布置在炉膛壁面的原因：

- 大容量高参数锅炉的过热吸热份额提高，超过 50%。30 0MW 以上的机组一般需要考虑辐射过热器。
- 降低炉膛出口烟温。
- 布置在高温区可降低金属耗量。
- 汽温特性平稳。

②布置方式：
- 紧贴炉墙布置
- 与水冷壁管相间布置



辐射再热器贴水冷壁布置



1. 辐射过热器； 2. 水冷壁管； 3. 炉墙； 4. 固定支架

辐射过热器与水冷壁间隔布置

③工作特点：

(1) 由于炉膛热负荷高，辐射温度高，且传热效果相对不如水冷壁，蒸汽冷却效果差，管壁温度比蒸汽高 100–120 ℃，一般用作低过或低再

(2) 锅炉启动和低负荷运行时会处于干烧，须有冷却保护装置

(3) 工作条件最差的锅炉受热面

4、包覆壁和顶棚过热器：

①包覆壁过热器：

布置在水平烟道和尾部竖井的壁面上，管径与对流过热器基本相同

- 结构：为保证烟道的气密性和减少金属用量，采用膜式结构。
- 作用：减少炉墙吸热，简化炉墙结构，减轻炉墙重量，便于悬吊结构 → 减少烟道漏风

②顶棚过热器：

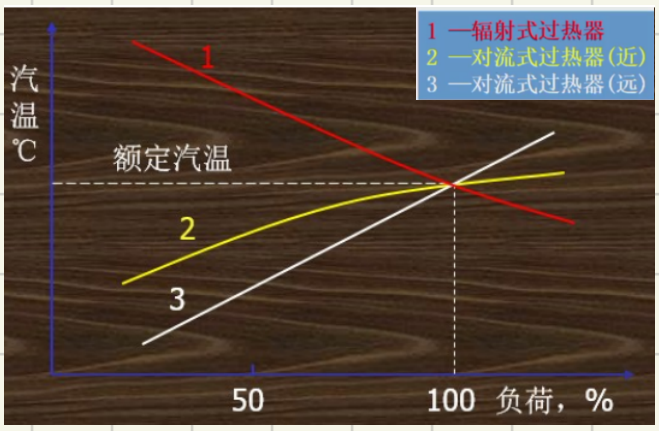
布置在炉膛顶部，一般采用膜式结构，吸热量不大

作用：支承炉顶的耐火材料和保温材料，保持锅炉严密性

三、过热器和再热器的汽温特性

汽温特性：**过热器或再热器出口蒸汽温度与锅炉负荷（或工质流量）之间的关系。**

（负荷对汽温的影响）



炉内辐射热的份数相对下降
辐射式过热器中蒸汽焓增减少

烟速和烟温提高
对流过热器中工质焓增大

- 锅炉负荷增加，辐射式过热器汽温下降，对流式过热器汽温上升。
- 对流过热器愈远，烟温愈低，辐射换热份额愈小，汽温变化愈大。
- 后屏半辐射过热器的汽温特性相对平稳一些。
- 锅炉负荷变化时，再热器由于进口汽温随之变化，使出口汽温变化幅度更大。

再热器出口汽温一般是随负荷降低而下降的。为了保持再热器出口汽温不变，必须吸收更多的热量。再热蒸汽的压力较低(2.0~5.0MPa)，蒸汽比热容较小，因此，再热汽温的变化幅度较大。

直流锅炉：在蒸发与过热受热面之间没有固定分界线，随工况变动

要保持过热蒸汽温度不变，燃料量B与给水量G必须保持一定比例，只要保持这一比例，就能保持一定汽温

四、运行中影响汽温的因素

1、过量空气系数：

过量空气系数 α ↑ {
- 烟气量、流速↑→对流过热汽温↑
- 炉内温度↓→辐射汽温（炉内）↓
- 炉内吸热↓→炉膛出口 T'' ↑?

} 汽温上升

- 布置在炉内的辐射汽温下降，烟道上对流汽温↑
- 增加过量空气系数是提高过热汽温的常用方法，但排烟损失会增加，锅炉热效率下降。
- 过量空气系数变化 10%，相应汽温变化 10–20℃ 。

2、给水温度：

- 锅炉运行时高加有可能停运，可下降 60℃
- 给水温度在 200 以上℃

高加停运→给水温度↓ —保持锅炉负荷→ 燃料量 B ↑
→ 烟温↑、烟速↑→对流过、再热器温度↑

- 辐射式过热器影响很小，因炉膛温度不大，负荷不增加。
- 实际应用中，如高压停运，一般采用降负荷运行。
- 给水温度变化 2℃，汽温反向变化接近 1℃。

3、受热面污染：

- 炉内水冷壁结渣或积灰→炉内辐射吸热量↓
→ 炉膛出口烟温↑→过热器汽温↑
- 过热器或再热器本身结渣或积灰→吸热量减少
→过热器汽温↓

4、饱和蒸汽用量（吹灰与排污）

使用饱和蒸汽吹灰，或其他辅机用汽，流经受热面的蒸汽量将减少，为保证蒸汽量，需要增加负荷，即增加燃料量↑→对流过热器汽温↑，辐射过热器汽温↓

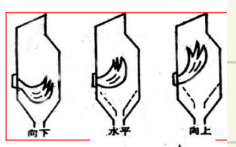
- 饱和蒸汽：吹灰，辅机、风机、水泵等
- 饱和水：排污，辅机加热等
- 饱和水排污焓值低，影响不大。

5、燃烧器运行方式：

燃烧器上倾→中心上移→炉内辐射吸热量↓

高温区上移 → 炉膛上部温压↑ → 炉膛上部过热汽温↑

出口烟温↑ → 传热温压↑ → 水平烟道汽温↑



- 对流受热面距离炉膛越远，对汽温影响越小。
- 火电机组常用的调温方法，加工工艺要求高。
- 燃烧器上倾要注意结渣。

影响火焰中心位置情况：

(1) **煤种特性，着火性能有关**

煤种差、粗→着火后延→火焰拉长→中心上移

(2) **不同燃烧器投运方式**

不同层次投运，上组或下组投运

(3) **燃烧器倾斜角度**

单个摆动，一次风摆动，整组摆动。

30 度



6、燃料种类和成分：

(1) 油、气着火快→燃烧火炬短→火焰中心低→汽温下降
(2) 煤中水分↑ →烟气流量↑ →对流汽温↑
　　炉内火焰温度↓ →辐射汽温↓

➢CWS 30%　油炉改烧水煤浆负荷下降
➢煤种灰分增加，燃料量增加，烟气量增加，汽温也会升高。

火焰中心高低：无烟煤＞烟煤＞油、气
　　难着火　着火　容易着火
　　劣质煤＞优质煤
　　粗煤粉＞细煤粉

影响因素总结

各因素对过热汽温影响

影响因素		汽温变化（℃）
锅炉负荷	±10%	±10
炉膛过剩空气系数	±10%	±10～20
给水温度	±10℃	干4～5
燃煤水分	±1%	±1.5
燃煤灰分	±10%	±5

五、蒸汽温度的调节方法

1、重要性：

过热蒸汽和再热蒸汽是电站锅炉的最终产品，直接影响到电厂经济性与安全性，锅炉最终目的是产生合格蒸汽，而合格蒸汽重要标志—**温度**

- 蒸汽温度↓ 10℃ →循环热效率↓ 0.5%
- 超出极限值 10—20℃ →寿命↓一半
- 通常规定 -10℃—+5℃

- 汽温过高：会引起锅炉和汽轮机金属材料的超温过热，加速管子金属的氧化，降低材料的使用寿命
- 汽温过低：会降低热力循环的效率，同时使汽机末级叶片处的蒸汽湿度增加，对叶片侵蚀作用增加，严重时甚至发生水冲击，影响汽机安全运行
- 再热汽温变化过大：会使汽机中压缸转子和汽缸之间的膨胀差变化，造成汽机剧烈振动

2、汽温变化原因及选择原则：

汽温变化原因：锅炉的受热面设计时，规定了锅炉的燃料特性、给水温度、过剩空气系数和各种热损失等额定参数，但实际运行时由于各种扰动，不能获得设计预定的工况，导致锅炉的蒸汽参数发生变化。

内扰—由锅炉设备本身的工作条件变化所引起，如受热面积灰、结渣，烟道漏风等因素；
外扰—由锅炉外部的条件引起时，如用户对锅炉负荷需要的变化随时间而变化。

蒸汽参数要求在一定范围内（一般在 60%-100% 额定负荷），设计时要考虑有效的调节手段，运行中要不断地调节蒸汽温度

蒸汽温度选择：
- 循环热效率
- 汽轮机末级叶片蒸汽湿度
- 高温钢材的许用温度

3、汽温允许偏差值：

汽温调节基本要求：

调节惯性或延迟时间小（灵敏）；调节范围大（60 、70—100% 负荷）；对循环热效率影响小；结构简单可靠；附加设备消耗少。

汽温调节一般与减温器紧密相连。减温器是通过冷却蒸汽来控制最终输出蒸汽温度的调节方法 。

在减温器内，蒸汽只能降温，不能升温，是单向的温度调节

过热蒸汽温度的容许偏差值

锅炉型式	过热汽温℃	允许偏差℃	备注
电站锅炉	额定过热汽温	≤±5	75%-100% 负荷
		+10	短期
	≤300	+30 ～ -20	
工业锅炉	350	±20	
	400	+10 ～ -20	

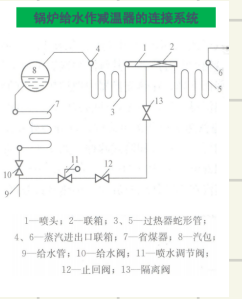
再热蒸汽允许偏差：+5℃ ～ -10℃

4、调节方法：

①蒸汽侧调节：改变蒸汽热焓

(1)喷水减温器

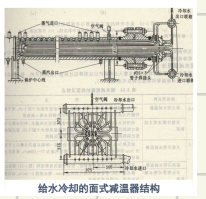
原理：水直接喷入蒸汽掺混吸热。
优点：惯性小，调节灵敏，易自动化，调温范围大，设备结构简单，应用最广，但对水质要求高。
给水：直接来自给水泵出口。
设计给水量：5%—8% 蒸发量。
汽温下降：50—60℃。
用途：用于过热器，一般不用于再热器。
数量：2个（过热器三级布置，四级3个），第1个屏前，粗调；第2个高温对流过热器前，细调。
位置：过热器中间联箱或连接管内。
单向减温，过热器设计面积大些。



1—喷头；2—联箱；3、5—过热器蛇形管；4、6—蒸汽进出口联箱；7—省煤器；8—汽包；9—给水管；10—给水阀；11—喷水调节阀；12—止回阀；13—隔离阀

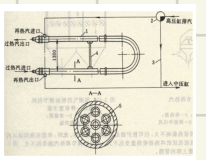
(2)表面式减温器

原理：水在管中流，蒸在外面流。
优点：非接触式，对水无要求，惯性一般。
冷却水：给水 40-60%，用完送至省煤器。
汽温下降：40—50℃。
用途：中压锅炉过热器、再热器。
缺点：不灵敏，惰性大。


给水冷却的面式减温器结构

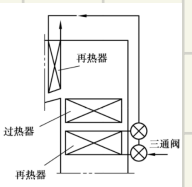
(3)汽-汽交换器

原理：过热蒸汽加热再热蒸汽，单向调节。
优点：非接触式，对水无要求，惯性尚小，金属耗量小。
用途：用于再热器。
缺点：管道连接系统复杂，制造工艺要求高，锅炉气密性降低。
形式：炉内，炉外／管式，筒式。


管式汽－汽热交换器

(4)蒸汽旁通

原理：用水平烟道的高温再热器加热尾部烟井的低温再热器。
优点：结构简单，惯性小。
缺点：金属消量增加。
用途：用于再热器，在进口装三通。



②烟气侧调节

改变辐射与对流钢吸热量分配

(1) 调节燃烧器摆角

原理：改变炉膛火焰中心位置来改变炉膛出口烟温，达到调节蒸温。

优点：调节灵敏，惯性小。

汽温变化：50—60℃（摆角上倾 10 度，下倾 20 度）。摆角 1 度，再热汽温变化 2℃，炉膛出口 4-5℃。

用途：过热器、再热器。

缺点：无法精确计量，下倾易造成结渣。

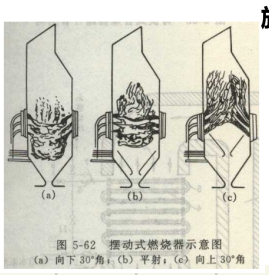
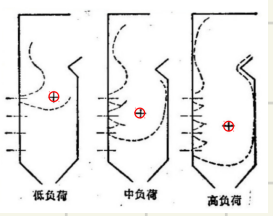


图 5-62 摆动式燃烧器示意图
(a) 向下 30°角；(b) 平射；(c) 向上 30°角

旋流燃烧器配风方式改变



(2) 烟气再循环

原理：用再循环风机将部分低温烟气（一般是省煤器后）送入炉内，改变锅炉内辐射和对流受热面的吸热量分配，达到调节汽温目的。

烟温：300-350℃。

优点：降低炉膛出口烟温（炉膛出口送入），防止高过高温腐蚀和结渣；降低水冷壁温度，提高对流受热面的吸热量；调节灵敏，幅度大，降低NOx浓度。均匀炉膛热负荷。

汽温变化：1%再循环烟气量，汽温 2℃；20-25%循环量，40-50℃。

送入点：冷灰斗、炉膛上部。

用途：一般调节再热器。（书图 6-24）

缺点：炉内温度下降，增大燃烧损失，增加飞灰磨损和受热面积灰；再循环风机高温、磨损、耗电。

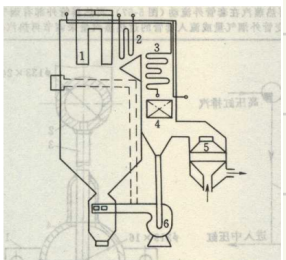
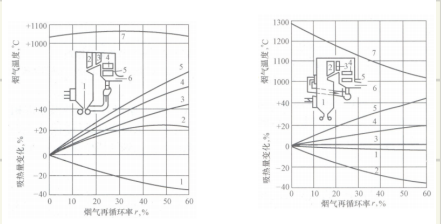


图 5-59 用烟气再循环法调节再热汽温的工作原理图
1—屏式过热器；2—对流式过热器；3—再热器；4—省煤器；5—回转式空气预热器；6—再循环风机

再循环烟气入口位置对汽温影响



1— 炉膛；2— 高过；3— 高再；4— 低过；5— 省煤器；6— 去空预器；7— 炉膛出口烟温

(3) 烟气挡板

原理：利用挡板来改变流经分烟道的烟量，达到调节汽温的目的，一般用于调节再热汽温。

优点：设备简单，操作方便，对炉膛燃烧工况影响小。目前电厂用得较多。

缺点：延迟时间较长；挡板开度与汽温变化不成线性关系；挡板易变形（开度 0-40% 较有效）；开度大流速提高引起磨损再热器，小易引起积灰。

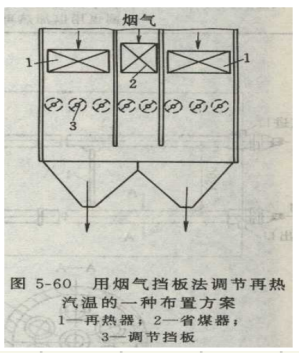
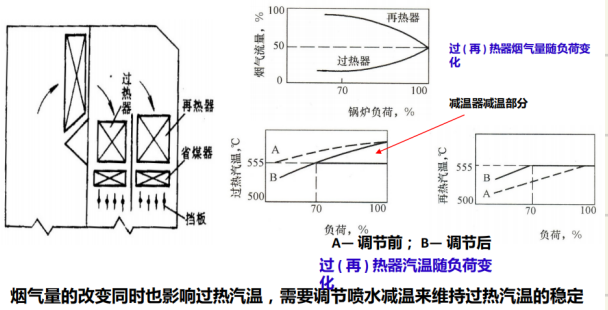


图 5-60 用烟气挡板法调节再热汽温的一种布置方案
1—再热器；2—省煤器；3—调节挡板

再热器和过热器并联方式调节汽温原理

• 用烟气挡板调节再热汽温时，必须考虑对过热汽温的影响。



烟气量的改变同时也影响过热汽温，需要调节喷水减温来维持过热汽温的稳定。

再热器进口的喷水减温器正常情况不运行，只是在再热器出口温度上升，并且不能被挡板控制的情况下作为紧急减温器使用。

三种烟气侧调温特性对比

调温方式	烟气再循环	烟道挡板	摆动燃烧器
动力消耗	有	无	无
对炉型和燃烧方式的要求	无	有	有
对燃料要求	有	无	有 / 无
主汽温变化	同向	异向	同向
调温能力（调高或调低）	单向（调高）	双向（调高或调低）	双向（调高但调低受阻）
调温幅度（℃）	～ 16	～ 40	～ 50
延迟时间（s）	65	75	90

汽温调节选择原则

★ 中参数锅炉一般采用蒸汽侧调节，如中低压锅炉通常采用面式减温器，如给水品质良好也可采用喷水减温。

★ 高参数以上大型锅炉，一般同时采用蒸汽侧和烟气侧调节手段。**发展趋势是减少喷水量，以烟气侧调温为主，约占调节量的 2/3 ，蒸汽侧调节作为细调，约占调节量的 1/3 。**

★ 高参数自然循环锅炉一般采用二级喷水调温调节过热汽温，喷水量一般为锅炉额定负荷的 3 ～ 5 %。

★ 在直流锅炉中，除了用给水 - 燃料比作为汽温的粗调手段外，一般还采用三级喷水 。

第七章 省煤器和空气预热器

- 重点掌握
  - 省煤器和空预器结构和工作特点
  - 多分仓空预器

一、省煤器

1.作用：利用低温烟气热量加热给水

1）吸收尾部烟道中烟气热量，降低排烟温度，提高锅炉效率，省燃料；
2）加热给水，减少蒸发受热面，节省初投资，降低锅炉造价；
3）提高了进汽包的水温，汽包热应力降低，机组安全性提高。

2.结构：

（1）钢管省煤器由一系列平行的蛇形管组成。
（2）各种鳍片、膜片、螺旋片管得到广泛应用，受热面的体积大大缩小




3.分类：

①按工质出口状态分：

沸腾式省煤器：省煤器出口为汽水混合物，出口水温 = 饱和温度。适用于中压以下锅炉。但蒸汽含量不超 20%。

非沸腾式省煤器：省煤器出口水温低于对应压力下的饱和温度的省煤器（一般低于 30℃ 左右）。适用于超高压及以上的高参数大容量锅炉。

中压锅炉水的压力低、汽化潜热大，加热水的热量小，蒸发所需热量大
故需把一部分水的蒸发放到省煤器中进行，以防止炉膛温度过低引起燃烧不稳定和炉膛出口烟温过低，我们成过热器受热面金属耗量增加，也有助于发挥省煤器作用

高压以上锅炉，随着压力提高，水的汽化热相应减小，加热水的热量相应增大，蒸发所需热量减少
故需把水的部分加热过程转移到炉内水冷壁管中进行，以防止炉膛温度和炉膛出口烟温过高，引起炉内及炉膛出口受热面结渣

②按材料分：

铸铁式：耐磨损、耐腐蚀、但笨重、强度低；不焊接，用法兰与弯头连接。适用于低压的非沸腾省煤器。

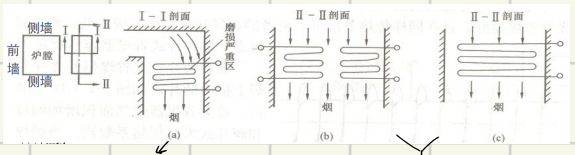
钢管式：体积小，重量轻，布置自由，价格低廉；但易受氧腐蚀，给水必须除氧。适用于任何压力和容量的锅炉，置于不同形状的烟道中。

③按管子形式分：

- 光管式、鳍片式、膜片管式和螺旋肋片管式四种。

4.布置方式：

常为错列、回式、逆流布置，结构紧凑



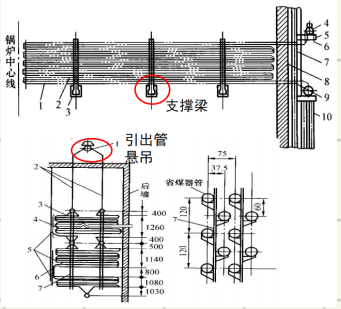
管子短，支吊简单
行管数多，水流速低、流动阻力小

管子长，支吊复杂
行管少，水速高，流动阻力大

5.支吊方式：

支承结构：省煤器蛇形管通过固定支架，支承在支持梁上，支持梁再支承在锅炉钢架上，支承梁布置在烟道内。

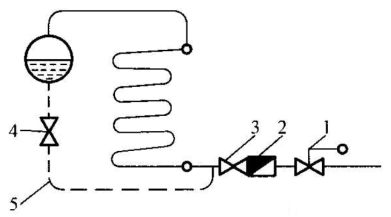
悬吊结构：省煤器联箱放置于烟道中，一般省煤器出口联箱引出管就是悬吊管，大大减少了因蛇形管穿墙造成的漏风，检修方便。



6.省煤器的启动保护：

- 在省煤器与汽包间装再循环管，锅炉启动时，当锅炉间断上水时，在汽包、再循环管、省煤器、汽包间形成自然循环，冷却省煤器管子。循环水量约为锅炉蒸发量 4%。
- 在进水时需关闭，不使给水短路

1．自动调节阀；2．止回阀；3．进口阀；4．再循环阀；5．再循环管



省煤器再循环管

其他问题：

1. 省煤器引出管与汽包连接，加装保护套管。
2. 联箱可安装在炉内，成为受热面。
3. 省煤器水阻力损失不能过大，高压锅炉，不能超出汽包压力 5%，中压锅炉不超过 8%。

二、空预器

1.空预器作用：

1. 利用烟气余热加热空气，降低排烟温度，提高锅炉效率；
2. 改善燃料的着火条件和燃烧过程，降低 q3 和 q4；提高锅炉效率；
3. 强化炉膛的辐射传热，节约金属，降低造价；
4. 热空气作为煤粉炉制粉系统的干燥剂和输送介质；
5. 降低烟气温度，改善引风机工作条件。

类型：
- 按结构分：管式、回转式、热管式、板式
- 按热方式分：传热式、蓄热式

2、空预器的类型：

1. 管式

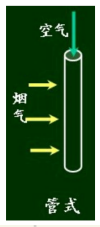
烟气通过传热壁面将热量连续传给空气，属间接传热。应用：中、小容量锅炉。

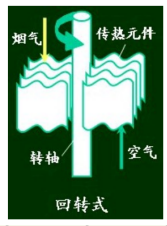
2. 回转式

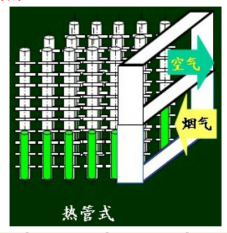
烟气和空气交替通过中间载热体（金属受热面）将热量传给空气。属于再生式空预器。应用：大容量锅炉。

3. 热管式

利用热管作为传热元件，通过管内工质的相变，实现能量由高温向低温转移，由此将烟气热量传给空气。属相变传热



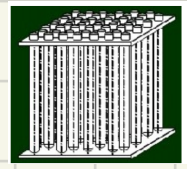


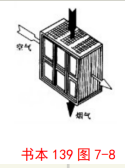


(一)管式空预器：

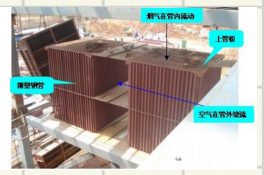
①结构特点：

- 由许多薄壁钢管焊在上下管板上形成管箱，烟气在管内流，空气在管外流（立式），有的中间加几个隔板；
- 结构简单，制造、安装、检修方便，工作可靠，漏风小；
- 尺寸大，金属用量大，尾部受热面布置困难，壁温低易造成低温腐蚀。



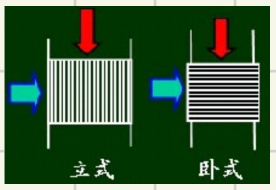


书本 139 图 7-8



②布置特点：

- **基本布置形式：**
- 立式：烟气在管内纵流，空气在管外横向冲刷
- 卧式：空气在管内纵流，烟气在管外横向冲刷
- 设计时空气流速和烟气流速比值约 0.5



- **典型流程布置和进风方式：**
- 单通道单面进风
- 多通道单面进风
- 多通道双面进风
- 多通道单面双股平行进风
- 多通道多面进风

见 P140 图 7-9" 管式空预器布置方式"

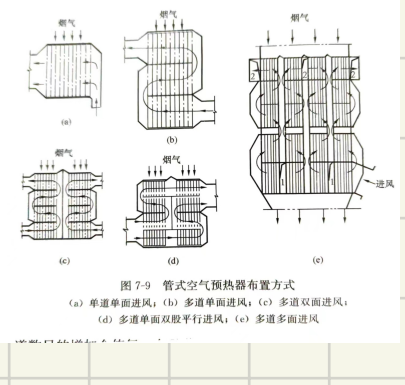


图 7-9 管式空气预热器布置方式

（a）单道单面进风；（b）多道单面进风；（c）多道双面进风；（d）多道单面双股平行进风；（e）多道多面进风

通道数增加 → 有个通道高度减小 → 空气流速增大

→ 交叉流动次数增多 → 传热效果越好

(二)回转式空预器：

①结构特点：

- 结构紧凑，尺寸小，便于布置。每立方容积内的传热面积约为管式的 8 倍。
- 耗金属少，壁厚薄，约为管式的 1/3 。
- 壁温比管式高，低温腐蚀较轻。
- 如有磨损腐蚀后不增加漏风。
- 结构复杂，密封要求高，漏风量大。
- 流通间隙小，易积灰、堵灰，热风带粉。

应用：

回转式因结构紧凑，重量轻，易于布置在锅炉任何部位，故可用于各种形式锅炉，尤其是高参数大容量锅炉。

②分类：按部件回转方式分类

1. 受热面回转：利用装满蓄热元件的转子转动，使烟气、空气交替冲刷传热元件。转子截面由烟气流通部分、空气流通部分及密封区组成。传热元件由波形板组成。
2. 风罩回转式：利用风罩转动使烟气、空气交替冲刷传热蓄热件进行换热。由定子、回转风罩、密封装置等组成。可避免笨重受热面旋转时产生的受热面变形、轴弯曲等缺点，可减轻重量，省电，但结构复杂，漏风大。

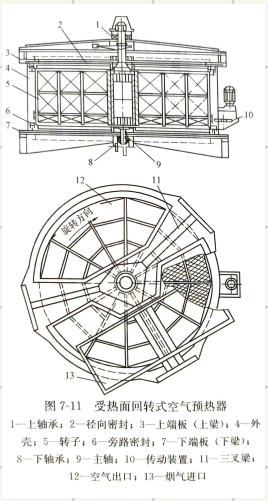


图 7-11 受热面回转式空气预热器

1—上轴承；2—径向密封；3—上端板（上梁）；4—外壳；5—转子；6—旁路密封；7—下端板（下梁）；8—下轴承；9—主轴；10—传动装置；11—三叉梁；12—空气出口；13—烟气进口

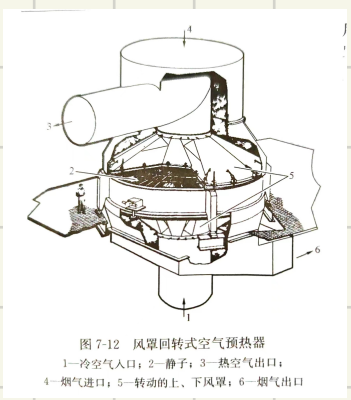


图 7-12 风罩回转式空气预热器

1—冷空气入口；2—静子；3—热空气出口；4—烟气进口；5—转动的上、下风罩；6—烟气出口

③多分仓空预器：

- 二分仓：空气和烟气都只有一个通道，分烟气区、空气区和密封区；烟气体积流量 50% ，空气 30-40% ；出口热空气（一次风和二次风）具有相同的温度和压力
- 三分仓：空气通道一分为二，烟气通道不变，分烟气区、一次风、二次风及密封区，一次风和二次风可用不同的风机，可具有不同的风温和风压，采用不同压力风机，降低送风机点好，提高制粉系统的经济性和可靠性。可采用冷一次风机
- 四分区：烟气区、一次风、 2 个二次风及密封区



三分仓空预器：

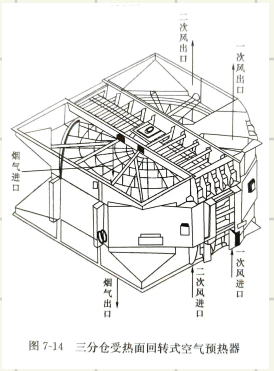


图 7-14　三分仓受热面回转式空气预热器

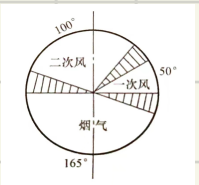


图 7-13　空气预热器的三分仓圆周角度分配

一次风区：流过次一次风机供应制粉系作为磨煤干燥和输送剂的一次风

二次风区：流过送风机供应燃烧器作二次风的空气

将扩壁高压一次风和大量压力较低的二次风分隔在两个空气区进行加热

④回转空预器漏风：

直接漏风：

- 直接漏风就是由于烟气、空气压差引起的空气向烟气的泄漏，减小引起漏风的密封间隙、空洞或压差，是降低空预器漏风的主要途径。直接漏风占 75% 。

$$Q_{zj} = k \times A \times \left(\rho \times \Delta P^{1/2}\right)$$

Q_{zj}— 直接漏风量，m^3/s；K— 漏风系数；A— 密封间隙（漏风间隙）面积，m^2；ΔP— 烟气间的压差，Pa。

漏风率：是指由空气侧漏入烟气侧的空气质量占空气预热器入口烟气质量的百分比。

- **空气预热器漏风率** $\eta_{ky} = \dfrac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_1} = \dfrac{O_2'' - O_2'}{21 - O_2'} \times 90$
- **空预器漏风系数** $\lambda_{ky} = \alpha_2 - \alpha_1$

600MW 机组漏风下降 1%，减少供电煤耗 0.18g/kwh，年节约 648 吨煤

携带漏风：

- 携带漏风是空预器固有的漏风，它是由于旋转的转子经过空气侧，再转到烟气侧，由转子的空腔携带空气而造成的。这部分漏风不可克服。携带漏风占 25% 。

$$Q_{xd} = n/60 \times \pi D^2 H \times (1-y)/4$$

Q_{xd}— 携带漏风量，m^3/s；D— 空预器转子直径，m；n— 转子的转速，m/s；y— 蓄热板金属盒灰所占转子的份额；H— 转子的高度，m。

预防措施：

- **减少间隙，减少压差，增加漏风阻力。**
- **采用合成橡胶，耐磨、耐温材料，钢丝刷等多密封技术。**
- **主动引流至空气侧。**
- **通过吹灰防止堵灰，降低压差。**

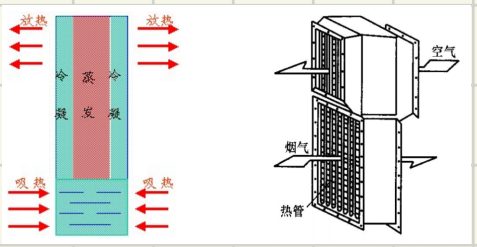
⑤管式与回转式比较：

项目	管式空预器	回转式空预器
布置方式	在锅炉尾部烟道	单独布置在锅炉后部
结构形式	结构简单、体积庞大	结构复杂、紧凑
运行特性	金属壁温较低，漏风量少	金属壁温高，漏风量大

(三)热管空预器：

①工作原理：

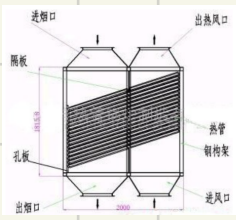
- **两端封闭管段，内装工作液体，液面上抽去空气后保持高度真空，使工作液体沸点降低。将热管蒸发段置于烟道中，吸热后液体汽化，蒸汽上升至凝结段，被空气吸热后凝结成液体又流回蒸发段。如此不断重复，使烟气热量被传递给空气。**



②优点：

- **热管具有良好的导热性能，可实现小温差传热，传热效率高；**
  加热段水汽化是核态沸腾换热，放热系数高达：5000-7000w/(m².℃)
  放热段蒸汽凝结是膜状凝结换热，放热系数高达：6000-9000w/(m².℃)
- **结构紧凑，流动阻力小；**
- **密封性好，漏风系数接近零；**
- **壁温较高，低温腐蚀轻。**

可垂直布置，也可倾斜布置。





(四)板式空预器：

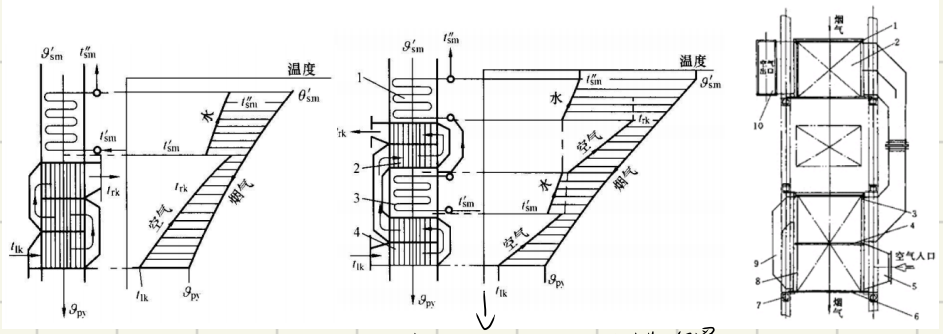
板式空气预热器的优点：

- 结构紧凑、弹性设计，避免热膨胀
- 材质选择范围宽，碳钢、不锈钢、铸铁、玻璃
- 免维修，使用寿命长达 30 年，
- 体积小，适应大型化装置需求，是管式空预器的 1/3 体积。
- 换热效率高，防止露点腐蚀。



三、尾部受热面的布置

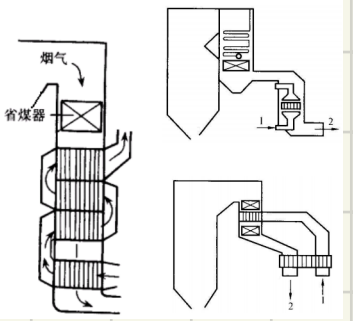
- 省煤器和空预器布置在锅炉烟道的最后，受到的烟气温度也最低，称为尾部受热面
- 尾部烟气的流量、热容量都比空气大，烟温变化比空温变化小，空预器进口处的温压可能变得很小，为提高空气温度并节省钢材，分一级空预器到高温处，形成尾部受热面分级布置。



省煤器空预器双级交错布置

燃料	无烟煤	贫煤、劣质烟煤	褐煤		烟煤、洗中煤	重油、天然气
			热风干燥	烟气干燥		
热风温度(℃)	380-400	330-380	350-400	300-350	280-350	250-300
空预器布置方式	双级布置	双级布置	双级布置	单级或双级布置	单级或双级布置	单级布置

- 一般管式空气预热器在要求热风温度高于 260-280℃ 时，就需要考虑采用双级交错布置，回转式空气预热器，在要求热风温度高于 300-350℃ 时，也需采用双级交错布置，这时，第二级采用管式空气预热器。



五、受热面经济流速

受热面经济流速

- 烟气经济流速：指受热面初投资与运行费用之和最小时及兼顾安全性流速（实际上综合考虑传热、磨损和积灰）。
- 过热器：温度高，灰粒软，速度适当高。碳素钢 10-14m/s；合金钢：15-20m/s
- 省煤器：8-11m/s，一般不能低于 6m/s，3-4m/s 以下严重积灰
- 空预器：管式：10-14m/s；回转式：8-12m/s
- $w_k:w_y$ 的最佳比值：管式：0.45-0.55；回转式：0.7-0.8

五大受热面总结

	定义	特点与作用	结构与分类
水冷壁	书上	1. 蒸发过程； 2. 防止结渣； 3. 保护炉墙； 4. 强化传热。	1. 垂直布置，直管； 2. 单面受热、双面受热； 3. 光管与膜式； 4. 螺旋管与带钉管。
过热器	使饱和蒸汽加热至过热蒸汽	1. 过热； 2. 调节蒸汽温度 -10℃～+5℃ 3. 材料要求高 540～555℃（亚临界），570～600℃ 以上（超超临界）； 4. 阻力小，流速大。	按传热方式：对流、辐射、半辐射、包覆壁； 按位置分：屏过、对流、包覆、顶棚； 屏式直管、垂直布置，对流：蛇形管
再热器	低温低压蒸汽→过热蒸汽	1. 再热； 2. 调节蒸汽温度； 3. 大管径、多管圈，尽量减少中间混合与交叉流动，减小压降；	对流和辐射二种
省煤器	加热给水，吸收烟气余热	1. 布置在尾部、低温 2. 水加热到或接近汽包内水温 3. 减少蒸发受热面	按材料：铸铁式和钢管式； 按加热程度：非沸腾与沸腾； 尾部蛇形管水平布置、疏水膜片、鳍片、错列
空预器	布置在尾部受热面，吸收烟气余热，加热空气	1. 布置在尾部、低温，锅炉后部 2. 加热空气 3. 吸热烟气余热	管式、回转式、热管式、板式； 大型锅炉回转式：结构小，节省 1/3； 漏风大；

第一章 燃烧及燃烧计算

一、锅炉用燃料

燃料：燃过程中能够产生热量的物质 （锅炉设计运行基础；输入元素）

分类：核燃料 / 金属燃料 / 有机燃料 →

可以与氧化剂发生剧烈化学反应（燃烧）而放出大量热量的有机物质

有机燃料
- 按物态分类
  - 固体（煤，木材，油页岩）垃圾
  - 液体（石油及其产品，生物质油）
  - 气体（天然气，煤气，生物质裂解气）
- 按用途分类
  - 工艺燃料（优质）
  - 动力燃料（劣质）

二、煤的常规特性

1.煤的类别：

- **煤是植物残骸经生物化学作用和地质作用形成的一种有机生物岩**

三大类：腐植煤 / 残植煤 / 腐泥煤

- 腐植煤 - 由高等植物经过成煤过程中的泥碳化作用和变质作用生成 （分布最广）

腐植煤的主要分类

特征	泥炭	褐煤	烟煤	无烟煤
颜色	棕褐色	褐色至黑褐色	黑色	灰黑色
光泽	无	大多无光泽	有一定光泽	有金属光泽
外观	土状，有原始植物残体	无原始植物残体，无明显条带	有亮暗相间的条带	无明显条带
燃烧现象	易着火，有烟	易着火，有烟	多烟	难着火，无烟
自然水分	多，(85-95%) 风干 25－35 %	较多	少	较少
硬度	很低	低	较高	很高
其他		土状褐煤、暗褐煤、亮褐煤	长焰煤、气煤、肥煤、焦煤	

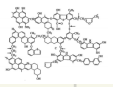
腐植煤的成煤阶段

顺序	植物——泥炭——褐煤——烟煤——无烟煤		
转变条件	地点：水中 时间：数千年至数万年 作用：生物化学作用，氧供应	地下（不太深） 数百万年 加压失水，物化作用为主	地下（深处） 数千万年 温度、压力、时间 化学作用为主
阶段	第一阶段 泥炭化阶段	第二阶段 成岩阶段 变质阶段	
化学式	$C_nH_mO_n \xrightarrow{-H_2O,-CO_2} C_nH_mO_n \xrightarrow{-CH_4} C_nH_mO \xrightarrow{-CO_2} C_nH_m \xrightarrow{-CH_4,-H_2} C_nH_x$		

2.煤的组成：

- 水分
- 有机物（显微组分） → 化学结构（低分子说 / 高分子说）：复杂性、多样性、不均匀性
- 矿物质（无机物）

- **煤的主体是三维空间的高分子化合物**
  不是由均一的单体聚合而成，而是由许多结构相似但又不完全相同的结构单元通过桥键联结而成
- **结构单元的核心为缩合芳香环**
- **结构单元的外围为烷基侧链和官能团**
- **煤的分子量一般认为数千范围内**



- 不同煤化程度煤的结构存在较大差异
  - 低煤化程度的煤含有较多的非芳香结构和含氧官能团，芳香环核心小。结构无方向性，孔隙率和比表面积大。
  - 中等煤化程度煤的含氧官能团和烷基侧链减少，结构单元的平行定向程度提高。
  - 高煤化程度煤的缩合程度高，芳香碳 - 碳交联增加，物理上出现各向异性，惰性增加。

3.煤的元素分析： —— 煤的有机组成表示法

煤的元素分析 (ultimate analysis)

- 概念：对煤中碳、氢、氧、氮、硫五种元素的总称。 煤中元素的测定
- 结果表示：用各种元素的质量百分数表示。
- 可燃质： C, H, S(SO_2, SO_3) （有机，无机，硫酸盐硫）
- 不可燃质： N(NO_x), O *(内部废物)*
- 应用：煤质研究，工业利用，环境评价

①碳(C)：



- 煤的主要热量来源，主要存在在稠环中
- 随煤化程度增加而增加。
- 煤的有机物是一种高分子叠合物，主要由稠环组成，稠环周围有许多侧链，侧链上有官能团及基。碳大部分集中在稠环中。氢、氧大部分在侧链上。随煤化程度增加，稠环不断扩大，侧链不断断裂，所以随煤化程度增加，碳含量增加，氢氧减少。泥炭：**50~60%**；褐煤：**60~77%**；烟煤：**74~92%**；无烟煤：**90~98%**

②氢(H)、氧(O)和氮(N)：

- **H**：来源于植物中，随煤化程度减少，加工时以气态产物析出。
- **O**：随煤化程度减少，变化范围大，**2~40%**
- **N**：植物中蛋白质转化而来，少量

③硫(S)：

- **S**：指有机硫和无机硫

有机硫来源于植物中蛋白质和微生物中蛋白质。由硫醚或硫化物等组成。

无机硫：黄铁矿硫（FeS_2）和硫酸盐硫（灰分）

有机硫和黄铁矿硫在燃烧时生成 SO_2，称可燃硫

4. 煤的工业分析：

- 比元素分析简便的分析方法：
- 通过把煤升温加热，依据不同温度阶段析出或剩下的物质分别分为**水分，灰分，挥发分和固定碳**四个项目
- 结果表示：质量百分数

①水分(M)：

- **外在水分**：是附着在煤颗粒表面的水分。外在水分很容易在常温下的干燥空气中蒸发，蒸发到煤颗粒表面的水蒸气压与空气的湿度平衡时就不再蒸发了。
- **内在水分**：被吸附或凝聚在煤内部毛细孔中，靠分子引力及氢键与煤质相连的水分。随煤化程度增加而降低，内在水分需在 100 ℃ 以上的温度经过一定时间才能蒸发。
- **全水分 M_t = 外在水分 + 内在水分**

  煤中全水分，是指煤中全部的游离水分，即煤中外在水分和内在水分之和。

  全水分测定：煤样在 105℃ （±5 ）下并鼓风干燥至恒重失去的重量

- 分析水分：指煤样在一定温度湿度的空气中并同空气湿度达到平衡时（这时吸附在煤毛细孔中的内在水分也会相应失去一部分，其数量随当时空气湿度的降低和温度的升高而增大），这时残留在煤中的内在水分称分析水分（与前面内在水分有区别）
- **结晶水：无机矿物质的结构水，以离子键或分子键与矿物质相连。只有在较高的温度下脱出。（105 度不析出）**。对实际应用来说，总水分只包括外在水和内在水两部分，而不包括化合水分。

②挥发分(V)：

- 在限定的条件下隔绝空气加热后，所得挥发性有机物质的产率为挥发分。主要组分：碳氢化合物、碳氧化合物、氢气和焦油蒸汽，是煤中有机质热分解的产物。
- 褐煤高， 40 %以上，无烟煤低（低至 1 %）
- 不同温度，不同时间获得的量是不一样的
- 测定：去水分后的煤样（ 0.2mm1g) 在隔绝空气条件下加热到 900±10℃ ），约 7 分钟所失去的重量

③固定碳(FC)：

- 挥发分析出后剩下的残渣除去灰分。主要成分为碳，但也含有少量的氧、氮、硫等
- 测定： 0.2mm1g 析出挥发分后的焦炭在空气中（ 815±10℃ ）下烧 1 小时后冷却（干燥箱）称重并检查性灼烧（ 30min)，失去的量即焦炭；

④灰分(A)：

- 来源煤中的矿物质，被氧化、分解，并失去结晶水后产生，（ 815±10℃ ）得到的量。
- 原生矿物质：植物本身所含的矿物质，主要为碱金属及碱土金属的盐类， 1~2% 。
- 次生矿物质：成煤初期，带入的矿物质，含量也不多
- 上述两项为内在矿物质，很难用机械方法分离，必须用化学方法。
- 外来矿物质：原来不在煤中，开采时混入的顶、底板及夹层中矸石所形成。主要成分为：SiO_2、Al_2O_3、$CaCO_3$、$CaSO_4$、FeS_2等。可以用洗煤的方法除去。

5. 煤的组成基准：

不同状态下的水分等含量有变化，基准不一致

- 收到基 -As Received(ar): 煤在所收到状态下各成分的质量百分组成；（应用基）
- 空干基－ Air Dry (ad): 干燥后的煤在室温 20℃，相对湿度 60 %下稳定后各成分质量百分组成；（分析基）
- 干燥基－ Dry (d)：把煤中水分除外的各组份质量百分组成；
- 干燥无灰基－ Dry and Ash Free(daf)：把煤中水分、灰分除外的各组份质量百分组成（可燃基）

水分 M		挥发分 V					固定碳 Fc	灰分 A	
M_f	M_{ad}	S_r	O	N	H	C	C	S_{ly}	A
							干燥无灰基（daf）		
							干燥基 (d)		
							空气干燥基 (ad)		
							收到基 (ar)		

M_f 外部水分，M_{ad} 内部水分，S_r 可燃硫（全硫），S_{ly} 硫酸盐硫（归入灰分）

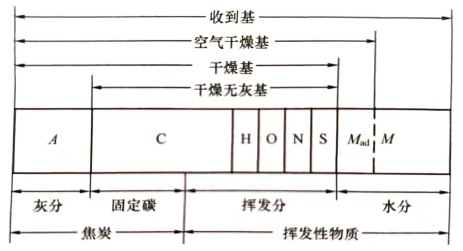


图 1-1 煤的成分及其与各种成分基准之间的关系

①计算基准：

元素分析

- 收到基（应用基）：as received basis

  $C_{ar}+H_{ar}+O_{ar}+N_{ar}+S_{ar}+A_{ar}+M_{ar}=100\%$
- 空气干燥基（分析基）：air dried basis

  $C_{ad}+H_{ad}+O_{ad}+N_{ad}+S_{ad}+A_{ad}+M_{ad}=100\%$
- 干燥基： dry basis

  $C_d+H_d+O_d+N_d+S_d+A_d=100\%$
- 干燥无灰基（可燃基）：dry ash-free basis

  最稳定的基准，燃料分类依据

  $C_{daf}+H_{daf}+O_{daf}+N_{daf}+S_{daf}=100\%$

工业分析

- 收到基：as received basis
- $M_{ar}+FC_{ar}+V_{ar}+A_{ar}=100\%$
- 空气干燥基（分析基）：air dried basis

  $FC_{ad}+V_{ad}+A_{ad}+M_{ad}=100\%$
- 干燥基： dry basis

  $FC_d+V_d+A_d=100\%$
- 干燥无灰基（可燃基）：dry ash-free basis
- $FC_{daf}+V_{daf}=100\%$

②计算基准换算：

表 1-1 不同基准之间的换算系数

已知 \ 所求	收到基	空气干燥基	干燥基	干燥无灰基
收到基	1	$\frac{100-M_{ad}}{100-M_{ar}}$	$\frac{100}{100-M_{ar}}$	$\frac{100}{100-M_{ar}-A_{ar}}$
空气干燥基	$\frac{100-M_{ar}}{100-M_{ad}}$	1	$\frac{100}{100-M_{ad}}$	$\frac{100}{100-M_{ad}-A_{ad}}$
干燥基	$\frac{100-M_{ar}}{100}$	$\frac{100-M_{ad}}{100}$	1	$\frac{100}{100-A_d}$
干燥无灰基	$\frac{100-M_{ar}-A_{ar}}{100}$	$\frac{100-M_{ad}-A_{ad}}{100}$	$\frac{100-A_d}{100}$	1

- 不同应用时基准不同
- 锅炉设计计算以收到基为基准
- 换算：新基准 x= 换算系数 K× 原基准 x_0
- 换算原则：（ 1 ）换算系数是根据质量不变的原则推导出来的；（ 2 ）找 2 个基的共同点

例：
- 已知道收到基水分 Mar=10%，空干基水分 M_{ad}=5%, C_{ad}=50%，求 C_{ar}

$$C_{ar}=\frac{100-M_{ar}}{100-M_{ad}}C_{ad}=\frac{100-10}{100-5}\times 50=47.37$$

6、煤的发热量：

① 概念：

燃料发热量（热值）：单位质量或体积的燃料完全燃烧时放出的热量

$$发热量 = \frac{煤完全燃烧发热量(kJ)}{单位质量煤(kg)}$$

- 煤中可燃物燃烧放出热量（ C,H,S)
- 高位发热量（ Q_{gr}) ：将燃烧后所产生水蒸汽的潜热计入
- 低位发热量（ Q_{net}): 不计潜热

由于锅炉排烟温度下烟气中的水蒸汽不会凝结，所以可利用热量一般为 Q_{net}

收到基：

$$Q_{net,ar} = Q_{gr,ar} - 25(9H_{ar} + M_{ar})$$

- **弹筒发热量 Q_b，实验室氧弹式量热计测得值**

  1g 煤样在氧弹内（ 2.6-3MPa) 氧气压力下燃烧放热并冷却到煤的原始温度的放热量

  $Q_{gr}=Q_b$-S 、 N 生成酸的校正值

  $Q_{ad,gr}=Q_{ad,b}-(95S_{ad,b}+\alpha Q_{ad,b})$

  硝酸放热比例

仅了解

门捷列夫公式： （对大都数煤）

$Q_{net,\ ar}$=339Car+1030Har-109(Oar-Sar)-25Mar

当 **A<6%** 时误差小于 **640kj/kg**

A>6% 时误差小于 **840kJ/kg**

- **可用来校核元素分析准确性**

② 不同基准燃料发热量计算：

- **同一基准**的高低位发热量之差是该基准燃料燃烧产物中水蒸气的气化潜热
- 不同基准的**高位**发热量可以按照前表中的折算系数进行换算
- 不同基准的低位发热量**不能**直接用换算系数进行换算。

以收到基发热量为基准的其他概念

- 标准煤： Qar.net=29270kJ/kg (7000kCal/kg)
- 折算成分（折算到每一千大卡热值）：

  折算水分 ($4190M_{ar}/Q_{ar,net}$)： 高水分燃料 (>8%)，

  折算灰分 ($4190A_{ar}/Q_{ar,net}$)： 高灰分燃料 (>4%)，

  折算硫分 ($4190S_{ar}/Q_{ar,net}$)： 高硫分燃料 (>0.2%)

→ 相对于4187 kJ/kg 发热量的成分

7、煤的工艺性质：

① 煤灰熔融性：（指明确结论）

煤灰由许多化合物组成，没有固定熔点，仅有一个相当宽的熔融范围

- GB/T219-1996 角锥法△
  - 变形温度 Deformation Temperature (DT)
    锥顶尖端或棱开始变圆或者弯曲
  - 软化温度 Softening Temperature (ST)
    锥尖变曲接触到锥托或者锥体变成球形
  - 半球温度 Hemi-sphere Temperature （ HT ）
    灰锥变形至近似半球状，高约等于底长一半时
  - 流动温度 Fluid Temperature (FT)
    灰锥熔化展开形成高度在 1.5mm 以下薄层时的温度



影响因素：

内因：化学组成 => ▲ 结渣指标 Rs=M 碱性氧化物 /N 酸性氧化物

↓

碱性化合物含量越高，灰熔融点越低，结渣风险越大

外因：环境介质(气氛)性质　　氧化性↑

② 煤灰烧结性：（对流受热面积灰）

煤灰的烧结（沉积）特性：灰分在高温对流受热面上形成高温烧结性积灰的能力



和灰熔点没有直接关系，成因复杂多变：碱金属灰成分，气氛等

8、对锅炉工作的影响：

- **挥发分**：组成，重要成分特性，分类依据，挥发分多着火、燃烧增强
- **水分**：增，有效 **Q** 降，着火热降，炉温降，损失增，锅炉效率降，风机电耗增，积灰、腐蚀强，制煤困难
- **灰分**：有害，增，可燃成分降，发热量降，排渣带热增，灰壳增，q_4 损失增，炉温降，积灰增，传热降，排烟温度增，锅炉效率降，腐蚀增，煤制备能耗增，污染增
- **硫分**： H_2SO_4，酸腐蚀，酸露点，对着火燃烧无明显影响，污染增

  易自燃
- **灰渣熔融性和烧结性**：
  - 炉膛结渣根源
  - 高温对流受热面沾污，沉积

三、煤的燃烧特性

1、燃烧过程：

水分析出 → 挥发分析出 → 焦碳燃烧 → 燃尽

2、燃烧特性：

- 碳氢比C/H：表示煤的燃烧难易程度。
- 燃料比FC/V_{daf}：说明煤着火和燃尽的难易程度。
- 反应指数T_{15}：表明煤着火和燃烧的难易程度。
- 燃烧分布曲线：表示煤样的燃烧速度（用失重率表示）随温度变化的关系。
- 热解曲线：判断煤中挥发分随温度升高析出的情况。
- 煤的燃尽曲线：可以判断煤燃烧的快慢和燃尽时间。

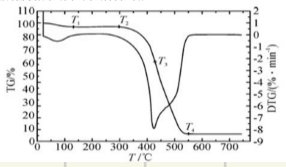
③ 煤样在氧气流中加热，使其温升速度达到15℃/min 时所需要的加热温度。（从速度角度分析）

① 碳氢比 C/H：
- 值大，含碳高，燃烧困难、燃尽困难

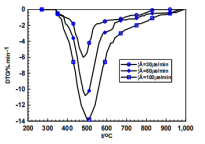
② 燃料比 FC/V_{daf}：
- 值大，固定碳高，挥发分少，着火温度越高，着火越困难，燃尽越困难

④ 燃烧分布曲线

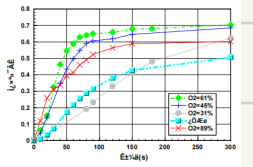
对煤样燃烧特性进行热重分析，利用热天平测得。
- 是对煤的着火、燃烧性能进行综合的判据。
- 如果煤种的燃烧分布曲线相似，它们在锅炉中的燃烧情况也基本相同。



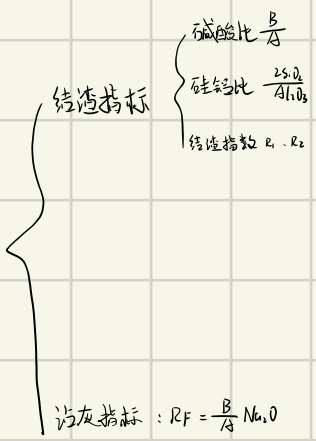
⑤ 热解曲线：
- 在热重分析测定仪上测得。



⑥ 煤的燃烬曲线：
- 在热重分析测定仪上测得。
- 全部燃尽。



四、煤的结渣性和沾污特性指标



五、煤的分类

我国主要分类指标：干燥无灰基挥发分含量（V_{daf}）

三大类：
- 褐煤（V_{daf} >37）
- 烟煤（V_{daf} >10）
- 无烟煤（V_{daf} ≤10）

- 褐煤

碳化程度低，含碳量低，约为 40 ～ 50% ，水分及灰分很高，发热量低， 约 10000 ～ 21000 kJ/kg ；

挥发分含量高，约 40 ～ 50% ，甚至 60% ，挥发分的析出温度低（< 200℃ ），着火及燃烧均较容易

- 无烟煤

碳化程度高，含碳量很高，可达 95% ，杂质很少，发热量很高，约为 25000 ～ 32500 kJ/kg ；

挥发份很少，小于 10% ， V_{daf} 析出的温度较高（可达 400℃ ），着火和燃尽均较困难，储存时不易自燃

- 烟煤

碳化程度次于无烟煤，含碳量较高，一般为 40 ～ 60%, 杂质少，发热量较高， 约为 20000 ～ 30000 kJ/kg ；

挥发分含量较高，约 10 ～ 45% ，着火及燃烧均较容易

贫煤 挥发分含量 10 ～ 20% 的烟煤

挥发份较少，性质介于无烟煤与烟煤之间，燃烧性能方面比较接近无烟煤；

劣质烟煤 挥发份 20 ～ 30% ；但水分高，灰分更高的烟煤 发热量低，为 11000 ～ 12500 kJ/kg

这两种烟煤着火及燃烧均较困难

发电厂用煤的质量等级

- 用途：锅炉设计，运行
- 原则：煤质常规特性
  - V_{daf}, A_d, M_{ar}, S_d, ST, 辅之 Q_{net}
- V_{daf}+$Q_{ar,net}$：燃烧稳定性，不完全燃烧热损失， 5 级
- M_{ar} + V_{daf} ：按水分等级分类 4 级
- A_d：经济性， 3 级
  - Q_{net}：能量价值 5 级
- 硫含量 S_d：露点， 4 级
- 软化温度 S_T：结渣性， 4 级

不细究每级如何分，仅了解分为多少级

六、液体和气体燃料

- 锅炉常用的液体燃料
  - 重油
  - 渣油
  - （油煤浆，水煤浆）
- 组成（重油为例）
  - C(81-84%), H(11-14%), O, N, S, A, M
  - 发热量： 37700-44000 kJ/kg

- 重油的特性指标
  - 粘度：流动性能（恩氏粘度，越小流动越好）
  - 凝固点：“冻结” （丧失流动性）
  - 闪点：防火指标 （与明火接触发生短促闪光）
  - 燃点：防火指标 （油气混合物遇到明火着火 5s 以上）
  - 含硫量：（受热面腐蚀）
  - 灰分：（杂质高温腐蚀）

气体燃料
- 天然气 (35000-54400 kJ/m3)
  - 气田煤气（容积含量 75-98%CH4 ）
  - 油田伴生煤气 (容积含量 30-70CH4, 5%CO)
- 人工气体
  - 高炉煤气
  - 焦炉煤气
  - 发生炉煤气
  - 液化石油气
  - 生物质裂解气

七、燃烧过程的物质平衡

1. 燃烧所需空气量和过量空气系数：

理论空气量：每kg(或每Nm³)收到基燃料完全燃烧时所需的最少空气量

- 从燃料各可燃元素完全燃烧所需的空气量之和减去燃料自身的含氧折算量而求

理论氧气量：

$$V_{O_2}^0 = 1.866\times\frac{C_{ar}}{100} + 5.55\frac{H_{ar}}{100} + 0.7\frac{S_{ar}}{100} - 0.7\frac{O_{ar}}{100}, Nm^3$$

质量 $G^0 = 1.293V^0$

理论干空气量：

$$V^0 = \frac{1}{0.21}(1.866\times\frac{C_{ar}}{100} + 5.55\frac{H_{ar}}{100} + 0.7\frac{S_{ar}}{100} - 0.7\frac{O_{ar}}{100})$$
$$= 0.0889(C_{ar} + 0.375S_{ar}) + 0.265H_{ar} - 0.0333O_{ar}, Nm^3/kg$$

过量空气系数：

- 实际运行时，供给的空气量大于理论空气量，超过的部分为过量空气量，实际空气量与理论空气量之比

$$\alpha = \frac{V_k}{V^0}$$

- 常用炉膛出口的过量空气系数表示空气量对燃烧过程的影响 -燃料燃烧一般在炉膛出口结束
- 过量空气太大，增加排烟损失
- 不完全燃烧损失与排烟损失和最小，即锅炉效率最高时的过量空气系数，称最佳过量空气系数
- 与燃料种类、燃烧方式及燃烧设备结构有关

无烟煤 α' 大

漏风系数：

- 对负压机组，空气漏入炉膛及烟道，常称漏风系数

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta V}{V^0}$$

- 炉膛出口后的沿程过量空气系数计算

$$\alpha = \alpha_l + \sum\Delta\alpha$$

尾部烟道漏风的危害

- 不增加燃烧效率
- 降低烟气温度，恶化传热，提高排烟温度
- 增加烟气体积
- 增加排烟损失和引风机电耗
- 漏风系数每增加0.1~0.2,排烟温度升高3~8℃，锅炉效率降低0.2~0.5%
- 每增加0.1,风机电耗增加2kW/MW

2. 燃烧产物(烟气量)的计算：

理论烟气量：

- α=1时，完全燃烧后的烟气体积称为理论烟气量：

$$V_y^0 = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V^0_{N_2} + V^0_{H_2O}, Nm^3/kg$$

理论干烟气量：$V_{dy}^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0$

烟气产物中影响辐射换热的因素：三原子气体、水蒸气、灰颗粒 → 飞灰浓度 $\mu = \frac{A_{ar}\alpha_{fh}}{100\,G_y}$（→飞灰份额，→烟气质量）

3. 烟气分析：

- 烟气分析（成分、含量）目的：
  - 燃烧调整；日常监督
  - *炉膛出口过量空气系数 – 炉膛空气供给量*
  - *锅炉排烟的过量空气系数 – 排烟热损失*
  - *CO, H_2, CH_4等可燃气体成分 – 化学不完全损失*
- 烟气分析方法
  - 化学吸收法
  - 电气测量法　　奥氏烟气分析仪
  - 红外吸收法　　RGH-1型全烟气分析仪
  - 色谱分析法

燃料特性系数β：只取决于燃料元素成分，与燃料中的水分和灰分无关

↓

类似氢碳比($\frac{H}{C}$)

完全燃烧方程式：$(1+\beta)RO_2 + O_2 = 21$ → $RO_2^{max} = \frac{21}{1+\beta}$

根据烟气分析确定α：$\alpha = \frac{21}{(1+\beta)RO_2} = \frac{21}{21-O_2}$

4. 焓温表：

焓概念：空气或烟气的焓都是指在等压条件下，将1kg燃料（或1Nm³气体燃料）所需的空气量或产生的烟气量从0°C加热到t°C（空气）或θ° C （烟气）时所需的热量。单位：kJ/kg

空气焓

- 概念：标准状态下理论空气量的焓。
- 计算式：

$$I_k^0 = V^0(ct)_k \quad kJ/kg$$

（空气的平均定压比热；1m³湿空气在温度t°C时的焓）

- 实际空气的焓

$$I_k = \beta I_k^0 = \beta V^0(ct)_k \quad kJ/kg$$

↓过量空气系数

烟气焓

- 特点：烟气 – 混合物
- 计算基础：热力学定律，各组成成分焓的总和。
- 计算式：$I_y = I_y^0 + (\alpha-1)I_k^0 + I_{fh} \quad kJ/kg$

理论烟气焓　过量空气焓　飞灰焓

- 理论烟气焓 $[I_y^0: (\alpha=1)]$

$$I_y^0 = V_{CO_2}(c\theta)_{CO_2} + V_{SO_2}(c\theta)_{SO_2} + V^0_{N_2}(c\theta)_{N_2} + V^0_{H_2O}(c\theta)_{H_2O} \quad kJ/kg$$

$V_{RO_2}(c\theta)_{RO_2}$

- 飞灰焓

$$I_{fh} = \frac{A_{ar}}{100}\times\alpha_{fh}\times(c\theta)_h \quad kJ/kg$$

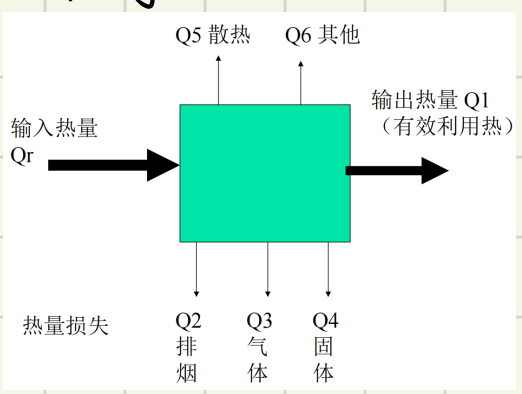
当$4187\times\frac{\alpha_{fh}\times A_{ar}}{Q_{ar,net}} \geq 6$时计算

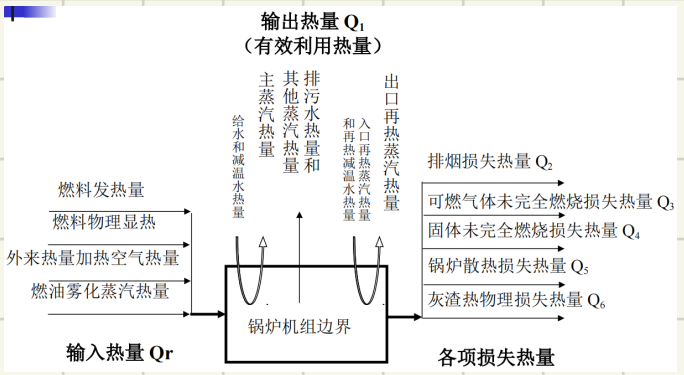
烟气焓温表（例表）

序号	温度	V_{RO2}		V_{N2}^0	V_{H2O}^0	I^0	V^0	A_{ar} $I=I^0+(\alpha"-1)I_k^0+I_{fh}$
		$(c\theta)_{RO2}$	I_{RO2}					I_{fh}(Fur, SH, SM) 各地α"
1	100							
2	200							

第八章 锅炉机组热平衡计算

一、锅炉热平衡





- 以 1kg 固体或液体燃料，或 0°C, 0.1MPa, 1m³ 气体燃料为基础
- $Q_r=Q_1+Q_2+Q_3+Q_4+Q_5+Q_6$ kJ/kg 燃料
  - Q_r – 锅炉输入热量
  - Q_1 - 锅炉有效利用热量
  - Q_2 - 排烟热损失
  - Q_3 - 可燃气体不完全损失
  - Q_4 – 固体不完全燃烧损失
  - Q_5 - 锅炉散热损失
  - Q_6 - 其他热损失（灰渣物理热损失）
- / Qr （占输入热量的百分比）⇒

  $q_1+q_2+q_3+q_4+q_5+q_6=100\%$

二、锅炉输入热量 Q_r

- 数学式： $Q_r = Q_{ar,net} + i_r + Q_{wr} + Q_{zq}$
- 组成
  - 燃料收到基低位发热量， kJ/kg 分析数据
  - 燃料物理显热 i_r， kJ/kg

    i_r = 燃料收到基定压比热$c_{p,ar}$ × 燃料温度t_r
  - 外来热源加热空气时带入的热量 Q_{wr}，

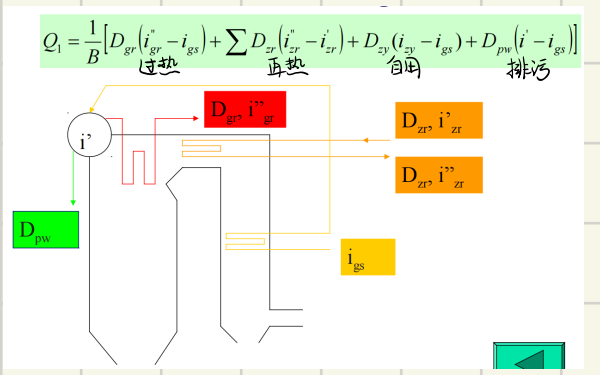
    Q_{wr} = 空预前过量空气系数β' ×（空预进口$I_k^0 - I_{lk}^0$）
  - 雾化汽量 Q_{zq} = 雾化蒸汽量Q_{zq} ×（雾化蒸汽焓i_{zq} − 2500）

    排烟中蒸汽焓近似值

三、锅炉有效利用热 Q_1

$$Q_1 = \frac{1}{B}\left[D_{gr}\left(i''_{gr}-i_{gs}\right)+\sum D_{zr}\left(i''_{zr}-i'_{zr}\right)+D_{zy}\left(i_{zy}-i_{gs}\right)+D_{pw}\left(i'-i_{gs}\right)\right]$$

过热 再热 自用 排污



四、热损失：

1、排烟热损失 Q_2：

- 排烟物理显热
- 数学式 $q_2 = \frac{(I_{py} - \alpha_{py} I_{lk}^0)(100 - q_4)}{Q_r}, \%$
- 影响因素
  - 排烟温度
  - 烟气容积
    - 通常排烟温度升高 10-20°C 可使约增加 1% 。故要经常吹灰和减少漏风。

2、可燃气体不完全燃烧损失 Q_3：

- 形成： CO, H_2, CH_4, (C_mH_n)
- 数学式：

$$Q_3 = V_{co}Q_{co} + V_{H_2}Q_{H_2} + V_{CH_4}Q_{CH_4} \quad kJ/kg$$

干烟气中容积， Nm^3/kg 12640kJ/Nm³ 10790kJ/Nm³ 35820kJ/Nm³

影响的主要因素
- 燃料的挥发分
- 炉膛过量空气系数
- 燃烧器结构
- 燃烧器布置
- 炉膛温度
- 炉内空气动力工况

3、固体不完全燃烧热损失 Q_4：

残留碳的发热量按 32700kJ/kg 计算

$$Q_4 = \frac{32700}{B}\left(G_{lz}C_{lz} + G_{lm}C_{lm} + G_{yh}C_{yh} + G_{fh}C_{fh} + G_{yl}C_{yl} + G_{lh}C_{lh}\right) \quad kJ/kg燃料$$

$$q_4 = \frac{32700}{BQ_r}\left(G_{lz}C_{lz} + G_{lm}C_{lm} + G_{yh}C_{yh} + G_{fh}C_{fh} + G_{yl}C_{yl} + G_{lh}C_{lh}\right) \quad kJ/kg燃料$$

定义炉渣灰量占入炉燃料总灰分的质量份额：

$$\alpha_{lz} = \frac{G_{lz}(100 - C_{lz})}{BA_{ar}}$$

有：

$$G_{lz} = \frac{\alpha_{lz} BA_{ar}}{100 - C_{lz}}$$

$$q_4 = \frac{32700A_{ar}}{Q_r}\left(\alpha_{lz}\frac{C_{lz}}{100-C_{lz}} + \alpha_{lm}\frac{C_{lm}}{100-C_{lm}} + \alpha_{yh}\frac{C_{yh}}{100-C_{yh}} + \alpha_{fh}\frac{C_{fh}}{100-C_{fh}} + \alpha_{yl}\frac{C_{yl}}{100-C_{yl}} + \alpha_{lh}\frac{C_{lh}}{100-C_{lh}}\right) \quad kJ/kg燃料$$

炉渣，漏煤，烟道灰，飞灰，溢流灰，冷灰（冷炉斗

影响的主要因素
- 燃料性质：煤（褐煤\烟煤\无烟煤\病煤），油
- 燃烧方式： 煤粉炉\循环床\链条炉
- 炉膛形式和结构：高度\卫燃带
- 燃烧器设计和布置
- 炉膛温度
- 锅炉负荷
- 燃料在炉内停留时间
- 燃料在炉内与空气混合情况

灰平衡：入炉煤的含灰量应等于燃烧后飞灰和灰渣中灰量之和

5、其它热损失 Q_6：

- 主要是灰渣物理显热损失 q_6^{hz}
- 数学式： $q_6 = \frac{A_{ar}\alpha_{hz}(c\theta)_{hz}}{Q_r}, \%$
- 大容量锅炉
  - 灰渣
  - 冷却水，冷却空气

6、散热损失 Q_5：

- 散热
- 额定蒸发量时的散热损失 $q_{5,ed}$
- 当锅炉在其他蒸发量运行时，$q_5 = q_{5,ed}\frac{D_{ed}}{D}$
- 影响因素
  - 锅炉外表面积大小
  - 外表面温度
  - 炉墙结构
  - 保温隔热性能
  - 环境温度

锅炉越大 Q_5 越小

保热系数 φ：表示烟气在该段烟道中所放出的热量有多少被该段烟道内的受热面吸收

锅炉设计计算中，需要计算各个受热面烟道的散热损失，为了简便起见，通常认为各段烟道的散热损失与该段烟道中烟气放出的热量成正比，且各段烟道的比例系数均相同，这时采用所谓保热系数φ来考虑：$\phi = 1 - \frac{q_5}{\eta_{gl} + q_5}$

$\varphi = \frac{\text{受热面传给工质的热量}}{\text{烟气放热量}} = \frac{\text{受热面传给工质的热量}}{\text{受热面传给工质的热量} + \text{烟道散热量}}$

五、锅炉效率

- 概念：锅炉有效利用热与锅炉送入热量比值。
- 数学式：$\eta_{gl} = \frac{Q_l}{Q_r} \times 100\%$ ← 正平衡法（直接法）
- 反平衡法 $\eta_{gl} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6), 100\%$

  η_{gl}=100-(6.5+0.5+2+0.1+0.2)=90.7%
- 燃烧效率 $\eta_r = 100 - (q_3 + q_4), 100\%$

  η_r=100-(0.5+2)=97.5%

- 锅炉有效利用热 Q_1：

$$Q_1 = \frac{1}{B}\left[D_{gr}(i''_{gr} - i_{gs}) + \sum D_{zr}(i''_{zr} - i'_{zr}) + D_{zy}(i_{zy} - i_{gs}) + D_{pw}(i' - i_{gs})\right]$$

- 燃料消耗量 B:
- B= 总有效利用热 /Q1= 总有效利用热 / (Q_r*η_{gl})
- 计算燃料消耗量 B_j: $B_j = B\left(1 - \frac{q_4}{100}\right), kg/s$

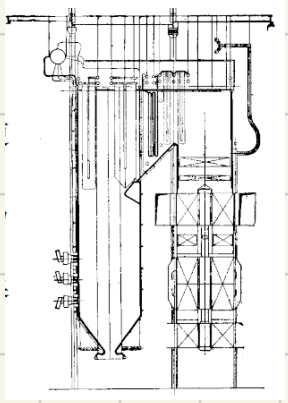
  扣除 q_4 造成的影响，为实际参加燃烧的燃料量。

  在锅炉计算中以 B 进行计算。

第十二章 锅炉本体的设计和布置

一、典型的布置炉型

1. 元型布置：



①优点：

- 锅炉高度低、安装方便
- 受热面易布置与烟气成逆流形式
- 尾部烟道烟气向下流，易吹灰
- 锅炉辅机（风机、除尘器等）可布置在地上

②缺点：

- 占地大
- 烟道转弯引起灰浓度分布不均匀，磨损大
- 转向室空间浪费，尾部受热面布置空间小
- 大容量锅炉燃烧器布置受限制 - 前后墙布置复杂

③改进：

- 无水平烟道型 — 针对占地大
- 双折焰角型 — 改善烟气流动
- T型 — 占地大，系统复杂

2. 塔型布置：适于褐煤、高灰分劣质烟煤



①优点：

- 占地小
- 便于疏水、烟道短
- 烟气流动均匀、磨损小、烟气速度高、锅炉小
- 管道、燃烧器布置方便
- 膨胀解决容易（全悬吊结构，只向下膨胀）
- 密封好（受热面管可在一侧集中穿墙）

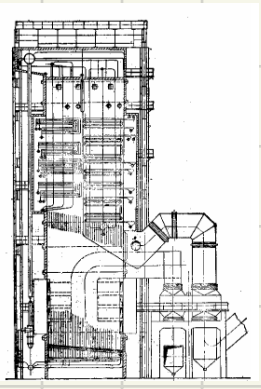
②缺点：

- 锅炉很高，安装和检修难度高
- 管道长，成本高
- 炉膛和受热面截面匹配要求高
- 空气预热器及风机在炉顶，加重构架的负荷和要求

③改进：半塔型布置

- 塔型与元型结合
- 空预器和风机落到地上

3. 箱型布置：适于中大容量燃油、燃气锅炉



优缺点：

- 布置紧凑、占地小、表面积小、密封好、全悬吊、便于疏水
- 锅炉较高、炉膛截面与烟道截面需配合
- 过热器辐射特性差
- 受热面支吊结构复杂、安装检修困难

二、燃烧方式选择

- 油、气等燃料选择悬浮燃烧
- 小型炉及优质煤可选用层燃烧
- 大型锅炉及优质煤可选用煤粉炉
- 劣质燃料或不配专门脱硫装置的电厂可选用循环流化床锅炉

三、蒸汽参数的影响

1. 蒸汽参数决定水循环系统：

①自然循环锅炉：

- 自然循环的动力是水与水汽混合物的密度差
- 压力越低，越可靠
- 可以应用到亚临界锅炉
- 小于 18.15MPa

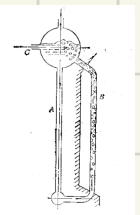
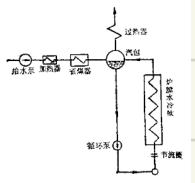


图 1-2 锅炉的水循环系统
A——下降管；B——上升管；C——给水

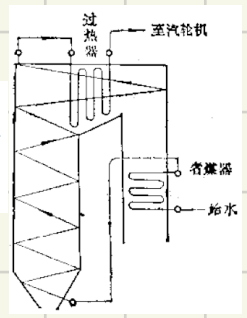
②强制循环锅炉：

- 压力的升高，使汽水密度差非常小，自然循环不可能
- 借助循环泵使汽水混合物循环
- 小于 19.62MPa 可用



③直流锅炉：

- 接近临界压力（22.12MPa）或超临界压力时，汽水混合物密度几乎一样，汽水分离很难实现，只能采用直流锅炉
- 没有汽包



2. 蒸汽参数对受热面布置的影响：

①吸热比例：

随着蒸汽压力提高，蒸发吸热比例下降，过热吸热比例大幅增加，加热水的比例增加不多

②参数变化：

低参数小容量锅炉（<1.47MPa）
- 主要是蒸发受热面：水冷壁、锅炉管束
- 蒸发吸热约 70%，过热 14%

→ 中参数锅炉（<3.9MPa, 450°C）
- 蒸发比例减少，水冷壁可满足
- 水平烟道内布置过热器
- 蒸发吸热 66%，过热 20%

→ 高参数锅炉（<9.8MPa,540 °C）
- 蒸发受热面少，炉内需布置其他受热面；
- 炉内布置顶棚过热器、屏式过热器；（辐射式过热器）
- 蒸发吸热 51%，过热 30%

→ 超高参数锅炉（<13.7MPa,540 °C）
- 蒸发受热面进一步减少，过热器、再热器进一步增加，有些增加前屏过热器。
- 蒸发吸热 37%，过热 29%，再热 17%

→ 亚临界参数锅炉(<19MPa,540°C)
- 水冷壁面积进一步减少，过热器再热器增加，炉内布置墙式再热器
- 双烟道
- 600MW
- 蒸发吸热 24%，过热 35%，再热 19%

→ 超临界压力参数（>22MPa）
- 无蒸发受热面，采用直流锅炉
- 加热吸热量比例 30%
- 2650t/h
- 800MW

3. 容量的影响：

①对炉膛结构的影响：

假设炉膛断面热强度随容量不变，则：

截面积 $A \approx ab \propto D$

周长： $U = 2(a+b) \propto D^{\frac{1}{2}}$

炉膛容积 $V_l \approx abh \propto D^{\frac{3}{2}}$

- 随锅炉容量增加，A，U，V都增加，而且炉膛容积增加得比截面积A，周长U增加得快；即单位蒸发量的炉膛尺寸减少
- 容积热强度随容量增加而降低

- 由于炉墙面积增加比容积增加的慢，所以随着容量增加，就显得水冷壁面积不够，有时需在炉内增加水冷屏；
- 为维持水冷壁管内的工质流速，水冷壁管径也需与容量相匹配，容量越小，水冷壁管内工质质量流速越小。

②对尾部受热面的影响：

- **随着容量增加，尾部烟道尺寸逐渐接近炉膛尺寸，甚至超过炉膛尺寸，所以出现 T 型布置**
- **由于随容量增加炉膛宽度相对减少，过热器等布置宽度也相对减少，所以从单圈管——到多圈管；**

③对空预器和省煤器的影响：

小容量
- 热空 <300°C：管式 单级
- 热空 >300°C：22级

大容量 回转式

从传热温差角度考虑，一般保证温差不低于 25~30 ℃，优化空气预热器
一级空预器出口空气温度比给水温度高 10~20 ℃ 以保证省煤器传热
- 较大的一级省煤器传热量，以保证二级空预器的传热温差，同时也要避免二级空预器入口烟温过高
- 低级省煤器水不汽化，保证有 40~50 ℃ 的过冷度

四、燃料特性的影响

① 燃料种类：燃油火焰短、辐射，烟速高。

② 挥发分：低挥发分：卫燃带，瘦长，热空气温高，α↑

③ 灰分：灰分多，烟速低，设灰渣置

④ 灰渣熔融性：ST↓，η_{gl}↓，出口烟温↓

⑤ 水分：水分多，烟气体积↑，炉膛吸热↓，热风温度↑

⑥ 含硫量：腐蚀、结垢

五、主要设计参数选取

① 排烟温度：
- 排烟温度低，排烟热损失少，热效率高
- 尾部烟道传热温差低，增加受热面积
- 低于露点温度时，易造成低温腐蚀、堵灰

选取因素：给水温度；燃料性质（水分、硫分）；省煤、空预器的价格比

② 热风温度：
- 干燥预热作用
- 协助着火
- 热风温度高，但要求多的受热面积及阻力，所以有合适的温度
- 烟煤、贫煤：300~350℃
- 无烟煤、褐煤：360~400 ℃
- 给水温度高、排烟温度高则热风温度可以高

③ 炉膛出口温度：
- 防止对流受热面结渣（熔融的飞灰会粘结到受热面上，污染管、堵塞、腐蚀等）
  一般小于1100 ℃；
  布置屏的锅炉，其屏后温度小于（DT-50 ℃）或（ST-150 ℃），屏前温度：不结渣煤1250 ℃；一般结渣煤1200 ℃；强结渣燃料1100 ℃

④ 工质流速：

过热器：保证冷却、适当阻力

再热器：流速较低

省煤器：低：不易带走气体
高：阻力大，增加电耗

第九章 炉内辐射传热计算

一、炉膛传热原理

1、炉膛传热特性：

数量级：煤粉炉：辐射 >90%，对流 <5%；循环流化床：辐射 50~80%，对流 20~50%

动态过程：燃烧与传热不同步，温度又变化

复杂性：传热（物理）；燃烧（化学）；灰分（受热面污染）⇒ 复杂、相互影响

2、火焰辐射：

① 炉膛火焰中具有辐射能力的成分：
- 三原子气体：CO_2, H_2O, SO_2（不发光火焰（红外区域内 0.76-1000 微米））
- 结构不对称的双原子气体（CO 等）
  对称结构的双原子气体 N_2、O_2 是辐射透明体，可忽略
- 焦碳粒子：30-50 μm 强辐射能力，发光，主要辐射成分，
- 灰粒：10-20 μm，也发光
- 碳黑粒子：烃类化合物高温裂解 0.01-0.05 μm 发光火焰

发光火焰（在可见光（0.35-0.76 微米）和红外光谱中连续辐射，三倍于三原子气体）→ 半发光火焰

② 炉膛中的辐射传热：
- 由燃料燃烧形成的高温火焰和烟气流通过辐射向受热面进行的热量传递。是容积辐射（辐射与吸收在整个容积内进行，与两个固体之间的表面辐射不同）
- 就吸收而言，投射到气体层界面上的辐射能通过吸收性气体层时，在辐射行程中被气体吸收而减弱；
- 就辐射而言，气体层界面上所感受到的辐射为到达界面上的整个容积中的气体辐射叠加后的辐射。
- 被辐射性气体（吸收性介质）所隔开的炉壁间的辐射换热计算 可忽略（温度接近）。

③ 影响火焰辐射的因素：
- 成分：火焰有效辐射成分（三原子气体，焦碳，灰粒，碳黑）
- 分布：炉膛内分布，有效辐射成分浓度场
- 燃烧方式和燃烧工况：不同结构火焰
- 各辐射成分间的相互影响：不同吸收辐射能频谱不是几何叠加

二、炉膛传热计算

1、传热基本过程：
- **烟气放热** - 高温烟气边燃烧边放热
- **辐射传热** - 烟气与受热面之间的换热
- **导热传热** - 通过金属受热面传递
- **介质吸热** - 饱和水吸热，亚临界参数锅炉一般介质温度不变

2、计算假定：

炉内物理量取平均值，认为均匀以简化计算，如 C_p，黑度，温度

以与水冷壁相切的表面为火焰辐射表面

炉壁表面温度 T_b，黑度 α_b

简化为两个互相平行的无限大平面

3、炉膛传热计算：

①理论燃烧温度（T_a）：绝热条件下，燃料完全燃烧的热量全部用来加热燃烧产物所能达到的温度

②炉膛黑度（a_l）：

- 概念
  - 是为了进行炉膛热力计算引进的对应于**火焰有效辐射**的**假想黑度**，不是火焰黑度，不是火焰与炉壁间的系统黑度，但相互间有一定的内在关系
  - 可说明火焰与炉壁间辐射热交换的关系

- 对于室燃炉：

$$a_l = \frac{a_{hy}}{a_{hy} + (1 - a_{hy})\psi_{pj}}$$

ψ_{pj}：炉壁的热有效系数

③炉壁的热有效系数（ψ）：考虑炉膛受热面吸热能力大小的系数

- 炉膛受热面辐射特性之一：
  - 热有效系数 ψ
  - 角系数 x
  - 沾污系数 ξ
- 定义式：

$$\psi = \frac{q_{hyyx} - q_{lhyx}}{q_{hyyx}}$$

q_{hyyx}：火焰的有效辐射，kW/m²

q_{lhyx}：炉壁对火焰的有效辐射，kW/m²

火焰投射到炉壁上的热量最终被受热面吸收的份额

④平均火焰黑度（a_{hy}）和火焰辐射减弱系数（k_y）：

a_{hy}：以炉膛出口烟气成分、温度来算

k_y：由三原子气体、灰粒粒径、焦碳等决定

⑤布格尔定律：辐射线穿过具有吸收性气体的混合气体时，其减弱决定于所遇到的吸收性气体分子数

⑥火焰平均温度 T_l：指整个炉膛温度平均值

三、炉内受热面的辐射特性

1、角系数（x）：

$$x = \frac{\text{投射到受热面上的热量}}{\text{投射到炉壁上的热量}}$$

- 说明投射到炉壁的热量中投射到水冷壁管上的份额；
- 依据辐射换热特性来推导，
- 仅与受热面的几何形状及相对位置有关

2、热有效系数（ψ）：

表示受热面吸热的有效性，即投射到炉壁上的热量中有多少被受热面吸收

$$\psi = \frac{\text{受热面吸收的热量}}{\text{投射到炉壁的热量}} = \frac{q_{hy} - q_{lb}}{q_{hy}}$$

- 受炉壁温度 T_b、炉壁黑度 a_b 影响
- 水冷壁无污染时，壁面温度低（*约等于饱和水温度*）、黑度大，则热有效系数大
- 受污染后，壁面上的灰垢温度高，可达 900~1000 度（当灰垢的厚度为 0.2~0.5mm）
  此时，黑度也小，则热有效系数小。

关系：$\psi \approx x\zeta$

⇒
- 当管壁受污染，管壁为非黑体时成立。
- 当 *s/d* 接近于 1，或等于 1 时，或膜式水冷壁时，ψ几乎等于ζ。

3、污染系数（ζ）：

表示水冷壁的污染情况。

$$\zeta = \frac{\text{受热面吸收的热量}}{\text{投射到受热面上的热量}}$$

四、室燃炉的传热计算

1、计算假设：

- 只考虑辐射换热，忽略 **5%** 左右的对流换热；
- 把炉内温度看作是均匀，**T1** 代表炉膛内全部烟气的平均温度，火焰以该温度辐射传热
- 引入理论燃烧温度 **Ta**
- 以炉膛出口烟气温度 T_l"
- 水冷壁相切平面作为火焰的辐射表面

2、无因次热平衡方程：

$$\theta_l = f(Bo, a_l, C_1, n)$$

- C、n 与燃料性质、燃烧条件、炉膛结构等有关

$$\theta_l = \frac{T_l''}{T_a} = \frac{Bo^{0.6}}{Ma_l^{0.6} + Bo^{0.6}}$$

- M 为经验数据，与燃料性质、燃烧方法、燃烧器布置有关；

火焰综合黑度 ε_{syn} 替代火焰黑度 a_{hy}

↑

实际炉膛温度不均匀，因此计算的辐射传热偏大，导致炉膛出口温度偏低

考虑炉内介质吸收和固体颗粒散射的综合影响

第十章 对流受热面传热计算

一、锅炉对流受热面特性

1、计算核心：

① 热流体出口温度
② 热流体入口温度
③ 被加热流体入口温度
④ 被加热流体出口温度
⑤ 传热面积/传热量

⇒

影响参数

- 被冷却介质的特性（温度，成分等）
- 被加热流体的特性（温度，成分等）
- 流动特性（冲刷、速度、流程等）
- 受热面材质（导热系数、厚度等）
- 受热面结构、面积（排列、节距等）
- 污染状况

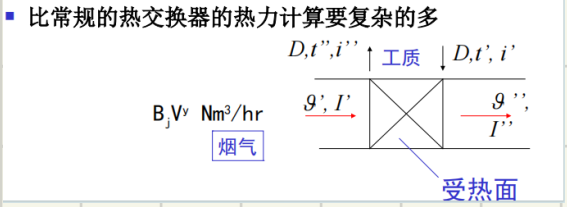
2、以对流换热为主的受热面：

- 凝渣管束（锅炉出口大间距，不易结渣，降低渣温）
- 锅炉管束
- 对流过热器
- 再热器
- 省煤器
- 空气预热器

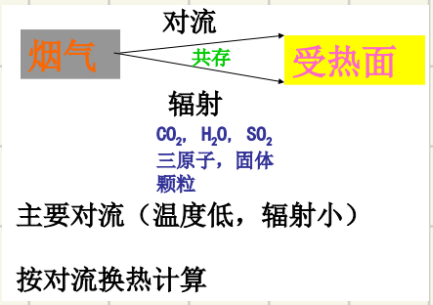
以对流方式计算：半辐射式屏 < 大屏过热器 / 后屏过热器

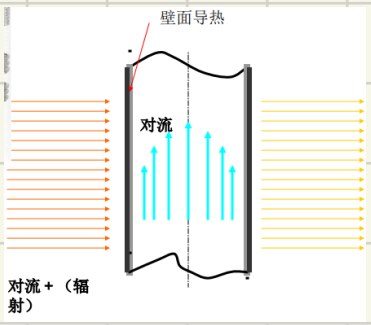
3、对流受热面特性：

- 烟气具有复杂组成：CO_2,H_2O,N_2,SO_2, 灰颗粒，焦炭
- 对流＋辐射
- 典型的管式热交换器（烟气在管外流动，水或蒸汽在管内流动）
- 多参数未知，需要迭代计算；
- 锅炉对流受热面是典型的复杂传热计算
- 比常规的热交换器的热力计算要复杂的多



① 传热方式：





② 计算要点：

- 热量平衡：
  - 输入热（烟气放热，焓降）＝输出热
- 换热方程：$Q = KF\Delta t$（平均温压，算术、对数）
  - (a) 换热系数 $K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1}+\frac{\delta}{\lambda}+\frac{1}{\alpha_2}}$
  - (b) 温压
  - (c) 面积

准则数

- 努谢尔特数：$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$ 对流换热/导热的比值，
- 雷诺准则：$Re = \frac{wd}{\upsilon}$ 惯性力/粘滞力，流动状态对换热影响
- 普朗特准则：$Pr = \frac{\upsilon}{a} = \frac{\mu c_p}{\lambda}$ 运动粘度/热扩散率 动量扩散/热量扩散 流体物性对换热影响

③ 基本方程：

- 受热面传热量 $Q_C = \frac{KH\Delta t}{B_j}$ kJ/kg
- 烟气放出热量 $Q_g = \varphi(I' - I'' + \Delta\alpha I^0_{lf})$ kJ/kg
- 工质吸收热量 $Q_d = \frac{D(i'' - i')}{B_j}$ kJ/kg
- 热平衡方程 $Q_C = Q_g = Q_d$ kJ/kg

传热系数K（kW/m²°C）：温压为1°C时，每m²受热面积的传热量，反映传热过程的强弱程度

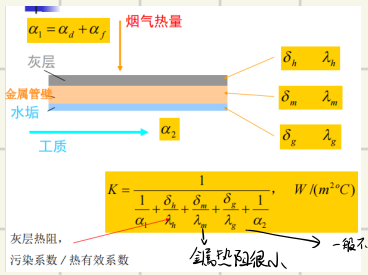
二、有关参数计算

1、传热系数K：

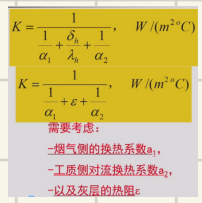
① 计算要求：

- 对复杂的传热过程进行相应的简化假设，如简单认为：对流 ＋ 辐射相互独立，传热系数可以认为两者之和
- 结构、运行参数考虑
  - 管径、节距、排列
  - 冲刷均匀性、结垢、积灰
- 不同类型和功能受热面，修正

②传热过程：



⇒



2、放热系数α：

①烟气侧对流放热系数 α_d：

概念：表征对流换热过程强弱的指标。

- 影响因素
  - 流体物性，流动状态，温度，管子布置结构，冲刷方式，管壁温度等
- 数值获取
  - 试验 + 相似理论整理
- 有关公式 $Nu = c\,\mathrm{Re}^m\,\mathrm{Pr}^n$
  - 应用条件：顺列、错列管束，横向、纵向冲刷
    Re: 1,500 – 100,000
  - 数量级
  - 公式分析

(1) Re 影响，顺列（0.65 次方）> 错列（0.6 次方）；
(2) 错列 C_s > 顺列 C_s，一般 Re 相近，故错列对流放热系数大；
(3) 横向冲刷时，d 减小，对流放热系数增大；
(4) 纵向管排数 > 10，C_z=1 。
(5) 定性尺寸，当量直径 d_{dl}=4F（流通截面积）/U（湿周）

定性尺寸；
单位；
使用范围；
线算图

②辐射放热系数 α_f：

- 概念
  - 烟气容积 —— 受热面
  - 近似认为气体层和包围它的壳壁之间的辐射传热问题
- 辐射传热量（假设壳壁为黑体）



- 实际：
  - 壳壁灰体（不是黑体，$A_b=a_b$）
  - $T_y > T_b$
  - $a_y \neq A_y$

必须计入外壳对气体辐射的多次反射，气体多次吸收，复杂，不过复杂的计算并 不完全必要。

有效辐射程度 S：

$$S = 3.6\,\frac{V(\text{辐射层容积})}{F_z(\text{围壁表面积})}$$

③蒸汽侧对流放热系数 α_2：

- 蒸汽在管内流动换热

$$\alpha_2 = 0.023 C_t C_l \frac{\lambda}{d_{dl}} \mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{0.4}$$

当量直径

Ct: 考虑管壁温度对流体物性影响的温度修正系数；
管内为蒸汽时为1
管内为空气时 $=(T/Tb)^{0.5}$

Cl: 相对长度修正系数，考虑入口段的的影响，当l/d<50时才考虑

- 在Re为10^4~$5X10^5$之间
- Pr在0.6–120之间
- 线算图参见课本355

- 由于管内管壁对蒸汽和水的放热系数α_2的数值较大，对整体传热系数影响很小。因此可以进行一些简化；
- 计算省煤器传热系数时，可以不考虑水侧的热阻 1/ α_2。

3、积灰污染相关系数：

①污染系数ε：用来表示燃用固体燃料时，管壁外表面积灰对传热的影响

定义：在同样的传热温压、传热面积及结构特数条件下，污染管壁的传热热阻 $\frac{1}{k}$ 与清洁管壁的热阻 $\frac{1}{k_0}$ 的差值

$$\varepsilon = \frac{1}{k} - \frac{1}{k_0}$$

- 与烟气流速、管子节距和直径、灰粒尺寸等有关，可依据经验式确定：

②热有效系数ψ：通过修正清洁管的传热系数来考虑外表面积灰对传热的影响

定义：污染管传热系数 k 与清洁管传热系数 k_0 之比

$$\psi = \frac{k}{k_0}$$

热有效系数和污染系数的关系

$$\psi = 1 - \frac{\varepsilon\alpha_1}{1+(\varepsilon+1/\alpha_2)\,\alpha_1}$$

- 当 a_2 很大时

$$\psi = \frac{1}{1+\varepsilon\alpha_1}$$

③利用系数 ξ：考虑烟气对受热面冲刷不均匀造成的影响

4、传热温压：

①定义：传热温压 Δt 是参与热交换的两种介质相对于整个受热面热阻的传热温差。

- 对流受热面传热计算时的传热温差是指烟气与工质之间存在的平均温度的差值
- 基本的流动形式有两种：逆流和顺流

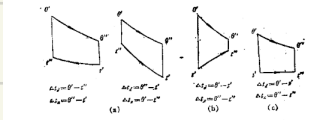


图 8-1 在逆流及顺流受热面中烟气与工质温差的变化情况及 Δt_d、Δt_x 的计算
(a) 逆流受热面；(b) 顺流受热面；(c) 混合受热面

$$\Delta t = \frac{\Delta t_d - \Delta t_x}{\ln\frac{\Delta t_d}{\Delta t_x}}$$

三、受热面布置和计算

1、传热面积确定：

2、工质和烟气流速选取：

- 由于圆管传热面的内表面和外表面积是不同的，尤其是管壁厚时差值更大，所以传热面积的计算基准是很重要的；
- 与传热系数计算方法有关，当采用平壁传热系数计算公式时，如壁面两侧放热系数相差很大，以放热系数小的一侧的湿润面积为传热面积（过热器、省煤器等）；如相近，则以内外算术平均为传热面积（空预器等）

- 依据安全可靠和技术经济的要求来确定
- 烟气速度主要考虑如下方面：
  —受热面的传热强度（高速增加传热强度，节省钢耗）
  — 烟气流动阻力（高速导致高阻力，增加风机耗电）
  — 灰尘的磨损（对油气锅炉没有该问题）、
  高烟速加重磨损，磨损与速度的3.3次方成正比
  — 积灰
  低烟速可能导致受热面积灰，影响传热，增加污染系数

四、扩展受热面的对流传热计算

分类：肋片管、鳍片管、销钉式管

肋片有效系数：考虑肋片材料的热阻对传热影响的系数

$$E=\frac{\text{扩展表面的实际传热量}}{\text{假定整个肋片表面处于肋基温度时的传热量}}$$

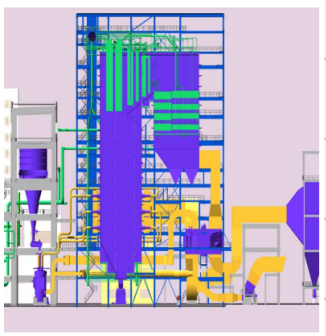
第十一章　半辐射式受热面的计算

一、半辐射式受热面及其传热特点、

1、半辐射式受热面：

- 布置在炉膛上部或炉膛出口烟窗处，既接受炉内直接辐射，又吸收烟气的对流热的受热面
- 通常是屏式过热器、屏式再热器

半辐射式屏
- 大屏过热器
- 后屏过热器



2、传热特点：

1、辐射和对流传热所占的份额都比较大；

2、接受来自炉膛的辐射热，且有一部分透射到后面的受热面；

3、工质吸热量来源：
烟气放热 ＋ 来自前面辐射受热面和炉膛的辐射热；　→　炉内直接辐射热＋屏间烟气的空间辐射热＋接触烟气的对流热

4、烟气辐射热中，有一部分透射到后面的受热面；

5、烟气辐射成分中，焦炭的作用可忽略不计；

6、换热面积按平面的双面计算；

7、来自炉膛的辐射热导致壁温较高，会降低受热面本身的对流换热烟气放热量。

二、传热系数计算

a 屏区烟气与积灰层之间的对流换热

$$q_c=\alpha_1(\vartheta-t'_{ash}) \Rightarrow \vartheta-t'_{ash}=\frac{q_c}{\alpha_1}$$

b 积灰层到金属管壁的导热

$$q_r+q_c=\frac{\lambda_{ash}}{\delta_{ash}}(t'_{ash}-t'_m)=\frac{1}{R_f}(t'_{ash}-t'_m) \Rightarrow t'_{ash}-t'_m=R_f(q_c+q_r)$$

c 金属管壁与工质的换热

$$q_r+q_c=\alpha_2(t'_m-t) \Rightarrow t'_m-t=\frac{q_c+q_r}{\alpha_2}$$

a+b+c：

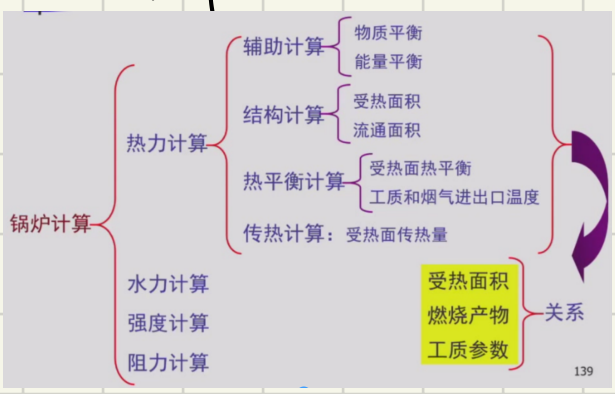
$$\Delta t=\vartheta-t=q_c\left[\frac{1}{\alpha_1}+\left(1+\frac{q_r}{q_c}\right)\left(R_f+\frac{1}{\alpha_2}\right)\right]$$

$$q_c=K\Delta t \Rightarrow K=\frac{1}{\frac{1}{\alpha_1}+\left(1+\frac{q_r}{q_c}\right)\left(R_f+\frac{1}{\alpha_2}\right)}=\frac{\alpha_1}{1+\left(1+\frac{q_r}{q_c}\right)\left(R_f+\frac{1}{\alpha_2}\right)\alpha_1}$$

工质热平衡方程：
工质从屏区烟气的吸热＝工质在屏区总的吸热－来自炉膛的辐射热

烟气热平衡方程：
屏区烟气的放热＝对主受热面的放热＋对附加受热面的放热＋对屏后受热面的放热

三、锅炉的热力计算



热力计算

- 在给定的给水温度，锅炉蒸汽参数、燃料参数的前提下，获得锅炉热效率、燃料消耗量、各受热面进出口烟气温度、工质温度、烟速、工质流速、烟气量、空气量等锅炉热力参数
- 是锅炉设计和运行的基础

设计计算和校核计算

- 设计计算：在给定的给水温度，锅炉蒸汽参数、燃料参数的前提下，确定锅炉各受热面的结构特性及传热面积。
- 校核计算：依据已有的锅炉各受热面结构参数及传热面积和热力系统的型式，确定锅炉热力参数及非设计工况下锅炉运行的经济指标以及检验改进锅炉结构参数后的效果。
- 设计计算和校核计算方法相同，区别是任务和所求数据不同。
- 常用校核计算取代设计计算，即预先布置好受热面，然后校核计算，依据要求调整结构

第十三章　蒸发受热面的工质流动和传热

一、两相流动和传热

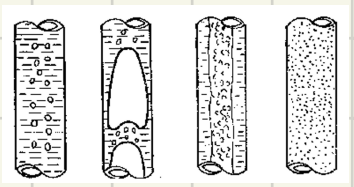
1. 两相流体的流动结构：

①垂直管作上升运动

（质量含汽率x变化，汽液两相存在相对运动；产生汽泡越靠中心位）

泡状流
弹状流
环状流
雾状流

↓ x增大

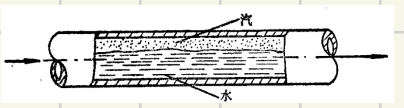


②水平管中流动：

浮力作用下，形成管子上部蒸汽偏多的不对称流动结构

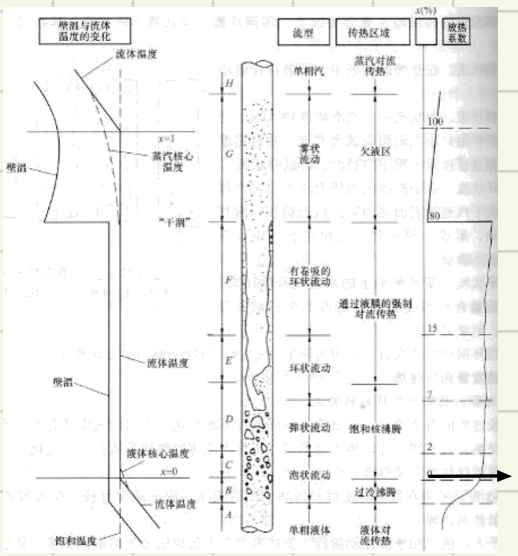
流速减小，x增大，不对称性增加。⇒ 形成分层 〈 上部蒸汽，管壁升温，传热较好
汽水交界，波动，疲劳损坏

管子倾角越小，分层越容易



垂直管内的流型与传热关系：

课本P218



2. 水冷壁管内传热：

饱和沸腾

①核态沸腾：汽泡强烈扰动，传热性能良好，管内壁温度接近于水的饱和温度，得到良好的冷却

②沸腾传热恶化

- 第一类传热恶化（膜态沸腾） 热负荷很高，管内壁汽化核心急剧增加，形成连续的汽膜，对流放热系数 α_2 急剧下降，管壁得不到液体冷却，超温破坏。特性参数为临界热负荷，对应的x 为临界含汽率
- 第二类传热恶化（蒸干） 热负荷比前者低、但含汽率很高时（出现液雾状），汽流将水膜撕破或因蒸发使水膜部分或全部消失，管壁直接与蒸汽接触而得不到液体的足够冷却，对流放热系数 α_2 急剧下降，金属壁温 t_b 急剧增加造成管子过热而烧坏，特性参数是工质的界限含汽率

二、两相流的基本参数和流动压降

1. 模型假定：

①均相模型：

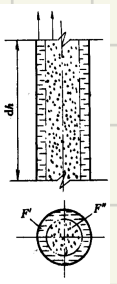
- 汽水均匀混合，与泡状流近似，只考虑汽和水的比容不同；
- 汽和水之间没有相对运动，即认为二者速度相同。

实质是把汽液两相流变成单相流（汽水混合物单相流）。

②分流模型：

针对主要流型泡状和环状，把泡状流和环状流简化如下：

- 水在管中靠管内壁流，占据管截面积F‘；
- 汽在管子中间由水形成的“水管”中流，占据管截面积F”；
- 考虑汽与水的相对速度：水的真实速度为w’；汽的真实速度为w“。



2. 基本参数：

①质量流速 ρw：单位时间流经单位流通截面的工质质量

$$\rho w = \frac{G}{F} \quad kg/(m^2 \cdot s)$$

式中 G——流经管组工质的质量流量，kg/s；
F——管组的内截面面积，m^2；
ρ——工质的密度，kg/m^3；
w——工质的流速，m/s。

容积流量：$V = \frac{G}{\rho}$ m^3/s

②循环流速 w_0：循环回路中，水在饱和温度下指上升管入口截面计算的水流速度

$$w_0 = \frac{G}{F\rho'} \quad m/s$$

式中 ρ' —— 饱和水密度，kg/m^3

③折算速度：假定蒸汽或水容积与据管子全部截面时的速度

蒸汽：$w_0'' = \frac{D}{\rho'' F} = \frac{V''}{F}$

式中 D——流经该截面的蒸汽质量流量，kg/s；
ρ''——饱和蒸汽的密度，kg/m^3；
V''——流经该截面的蒸汽容积流量，m^3/s。

水：$w_0' = \frac{G-D}{\rho' F} = \frac{V'}{F}$

式中 ρ'——饱和水的密度，kg/m^3；
V'——流经该截面的水的容积流量，m^3/s。

④混合物速度 w_{hu}：

$$w_{hu} = \frac{V'+V''}{F} = w_0' + w_0'' \quad m/s$$

⑤真实速度：

$$w'' = \frac{V''}{F''} = \frac{D}{F''\rho''} \quad m/s$$

$$w' = \frac{V'}{F'} = \frac{G-D}{F'\rho'} \quad m/s$$

⑥质量含汽率 x：汽水混合物中蒸汽质量流量与工质总的质量流量之比

$$x = \frac{D}{G} = \frac{w_0''\rho''}{w_0\rho'}$$

⑦容积含汽率 β：蒸汽容积流量与混合物总容积流量之比

$$\beta = \frac{V''}{V'+V''} = \frac{1}{1+\frac{\rho''}{\rho'}(\frac{1}{x}-1)}$$

⑧截面含汽率 φ：蒸汽所占截面与管子总截面之比

$$\varphi = \frac{F''}{F} = \frac{w_{hu}}{w''}\beta$$

$C<1$ 上升

$C>1$ 下降

混合物密度 ρ_{hu}

$$\rho_{hu} = \frac{G}{V} = \frac{\rho' V' + \rho'' V''}{V} = \rho' - \beta(\rho' - \rho'')$$

真实密度 ρ_{zs}：流通截面上的工质密度

$$\rho_{zs} = \frac{F'dh\rho' + F''dh\rho''}{Fdh} = \rho' - \varphi(\rho' - \rho''), kg/m^3$$

- 两相流体的流动阻力 为简便计算，可采用单相流体流动阻力计算公式，如下：

$$\Delta p_{mc} = \psi\lambda\frac{L}{d}\frac{w_{hu}^2\rho_{hu}}{2} \qquad \psi = f(\rho w, x, p)$$

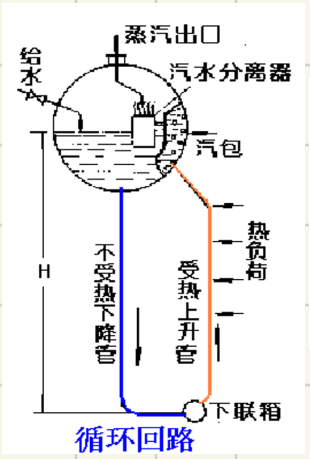
- 两相流体的重位压降

$$\Delta p_{zw} = \sum_{i=1}^{N} H_i \rho_i g$$

上升管中汽水混合物 ρ 与x不断变化，流动阻力和重位压降都分段计算，再叠加求和。

三、自然循环原理及计算

1.基本概念：



- 自然循环的工作原理

下降管中水与上升管中汽水混合物间的重位压头差 $H(\rho'-\rho_{hu})g$ 使水在回路中产生环形流动，又称为水循环

①运动压头 S_{yd}：下降管与上升管中汽水混合物重位差。

$$H(\rho_{xj}-\rho_{hw})g=\Delta p_m+\Delta p_j=S_{yd}$$

作用：维持回路自然循环的动力，用以克服下降管与上升管中工质流阻

⇒ 影响因素：

- 回路高度
- 工质密度差：压力（压力越高，汽水密度差越低）；水冷壁吸热强度（吸热越多，密度差越大）

②循环倍率 K：进入上升管的循环水流量G与上升管出口蒸汽流量D之比

$$K=\frac{G}{D}=\frac{1}{x}$$

名义循环倍率K_0 按锅筒引出的饱和蒸汽量计算的循环倍率

$$K_0=\frac{G}{D_0}$$

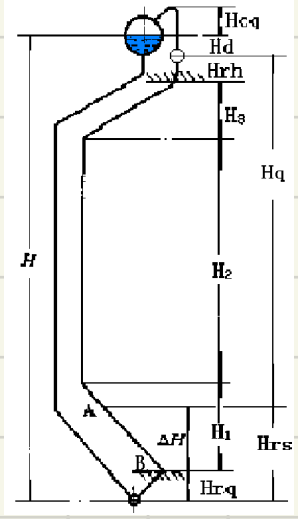
- 锅筒水室凝汽量D_{nq} 在锅筒水室中被凝结的蒸汽量

$$D_{nq}=D-D_0$$

- 凝汽率x_{nq} 凝汽量与循环流量的比值

$$x_{nq}=\frac{\Delta D}{G}$$

2.上升管区段划分：



- 热水段H_{rs} 从下联箱到A点是热水段，其中H_{rq}为热前段。采用单相流动计算公式

上升管进入炉膛（B点），水具有一定欠焓，开始沸腾点A的位置需计算确定

- 含汽段H_{hq} 热水段以外的上升管管段均为含汽段，采用两相流体公式进行计算

➢ 当热负荷、管径或管倾斜角度变化较大、 水冷壁敷设卫燃带时含汽段应再分段

➢ 热后段H_{rh} 上升管离开炉膛到上联箱间管段，该管段不受热，若>10%上升管总长，则分开单独计算

- 导汽管不受热，含汽率不变

对引入汽包汽空间的导汽管，导汽管最高点到超过水位那一段高度为提升段高度H_{cq}，应与导汽管分开计算

3.图解法：

①简单回路：

➢ 假定三个循环流速 w_{0i}

➢ 计算热水段高度 H_{rsi}

➢ 计算密度 $w_{0i}\rightarrow G_i$、$D_i\rightarrow X_i\rightarrow\beta_i\rightarrow\phi_i\rightarrow\rho_i$

➢ 计算重位压头 $h_i\rho_i g$

➢ 计算上升管流动阻力 Δp_{ssi}

确定上升管系统压差 Y_{ssi} $(\sum H_i\rho_i g+\Delta p_{ssi})$

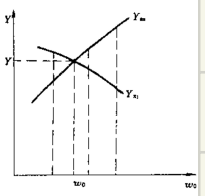
➢ 计算下降管流动阻力 Δp_{xji}

确定下降管系统压差 Y_{xji} $(H\rho_{xj}g-\Delta p_{xji})$

- 分别作出 $Y_{ss}-w_0$ 与 $Y_{sj}-w_0$ 曲线，两曲线的交点即为系统工作点，从而确定该回路总压差Yss、循环流速w_0、循环流量G及循环倍率K_h

- 确定整台锅炉循环倍率的计算值 $K_g=\frac{\sum G}{\sum D}$

锅水欠焓的计算值 Δh_{qh}



简单回路的三点图解法 42

②复杂回路：

- 复杂回路：多个简单回路的串、并联

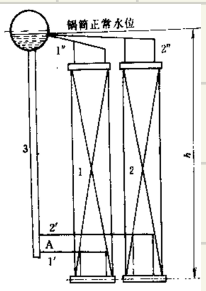
区分独立循环回路：工质独立

- 原则：

➢ 确定下降与上升系统分界点，确定串、并联系统

➢ 串联：流量G（W_0）相同，压差Y相加；并联：压差相同，流量相加

➢ 工作点：$Y_{XJ}=Y_{SS}$



大直径下降管复杂回路 44

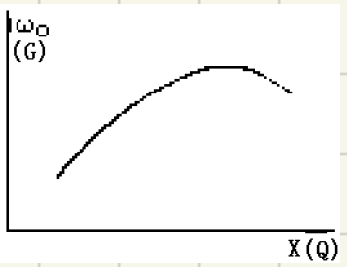
四、自然循环的安全性

1.自然循环特性：

热负荷与循环流速之间的关系

锅炉热负荷 Q上升，D上升，x上升：

- β上升 → ρ_{hu} 下降 → H（ρ' - ρ_{hu}）g 上升 → S_{yd} 上升→ w_0 上升
- Δp_{ss} 上升 → w_0 下降



Q增加，S_{yd}增加起主要作用，w_0上升；而Q增加过大，阻力增加起主要作用，反使w_0下降

自补偿能力：

随锅炉热负荷Q(质量含汽率x)的增加，循环回路水流量G(循环水流速w_0)相应增大的能力

2、安全性指标：

循环倍率K　衡量锅炉水循环可靠性的指标之一

K过大（x 过小），运动压头太小，可能出现循环停滞等水循环故障；

K过小（x 过大），将失去自补偿能力，造成管壁超温

界限循环倍率K_{jx}　对应自然循环失去自补偿能力（最高循环流速）时的循环倍率

回路循环倍率K 应大于界限循环倍率K_{jx}，对应的质量含汽率X应小于临界质量含汽率X_{li}

3、故障及安全性检查：

蒸发受热面金属安全工作条件：保证管子内壁有连续水膜覆盖

- 受热最弱上升管不出现流动的停滞、倒流、汽水分层等水循环故障；
- 受热最强上升管不发生沸腾传热恶化
- 下降管不出现带汽或汽化

1）循环异常：

并联的上升管组在共同的压差Y_{ss}下运行。当管组中各管受热不均匀时，受热弱的管中含汽率少，运动压头小，循环流速降低，可能发生循环异常

①循环停滞：回路中受热最弱的上升管内的循环流速为0。水流量等于蒸发量即G=D时，将出现循环停滞现象

危害 →

- 循环停滞　汽泡通过基本静止的水面上浮，管子弯头处蒸汽积累，出现自由水面时，水面以上管壁与蒸汽接触，使冷却能力下降，管子易超温爆管；自由水面上下波动，还会引起疲劳破坏

②自由水面：

发生循环停滞时管中工质无法到达上升管的最高点，出现自由水面。自由水面以下区域，产生少量蒸汽，以上的区域为缓慢流动的蒸汽

③倒流：

当管组压差Y小于受热弱管子液柱重 H_hg 时，受热管中的水就自上往下流，称为倒流

危害 →

- 倒流　只有当水的倒流速度与汽泡上浮速度相等，即汽泡处于上、下波动状态而形成汽塞时，会把管子烧坏，很少发生。

2）下降管带汽与汽化：

下降管带汽或汽化，会使管中工质密度减小，运动压头下降，影响回路水循环

- 汽包中的水进入下降管时，因流阻和加速产生压降使进口处发生自汽化
- 下降管进口截面上部形成涡漩漏斗状，蒸汽被吸入下降管中
- 汽包水容积内所含蒸汽被带入下降管中
- 下降管受热产生蒸汽

五、在锅炉设计与运行中，可以采用哪些措施以提高自然循环提高水循环的安全性？

1. 减小并联管子吸热不均，保持炉内温度场均匀：

设计时将整面水冷壁划分为若干个独立的循环回路；采用四角布置燃烧器；将炉膛四角上 1～2 根管子取消或将炉膛设计成八角形；

运行中避免火焰偏斜；防止水冷壁管积灰和结渣；限制最小负荷，避免因部分燃烧器停用造成更大的吸热不均；

沿高度方向采用多个小功率燃烧器；减小炉内热偏差，避免局部热负荷过高。

2. 降低汽水导管和下降管中的流动阻力，提高循环流速和循环倍率：

可采用增加管子的流通截面、采用大直径的管子、减少管子的长度和弯头等措施。

3. 水冷壁管采用适当的管径：

较小的管径可以节省金属耗量；但从水循环安全方面考虑，应维持足够大的循环流速W_0和不太高的含汽率 X，故大容量锅炉不应采用过小的管径；

大容量锅炉炉膛周界的相对长度减小，水冷壁管数量减少，但高度增加，即每根管产生的蒸汽量增加，出口含汽率 X 和循环流速 W_0都比较高；

在一定负荷和工作压力下，随着的ℓ/d增大，W_0、X 值升高。

4. 避免下降管带汽或自汽化：

防止下降管进口自汽化：下降管进口之上应保证一定的水柱高度，且水速不能过大；

防止下降管带汽：对高压以上锅炉，在下降管入口处加装栅格板；采用大直径集中下降管时，应在入口处加装十字板或栅格板。

4、提高循环安全性措施（见作业）

- 影响循环安全性的主要因素
  - 水冷壁受热不均或受热强度过高
  - 下降管带汽或自汽化
  - 水冷壁管内壁结垢
  - 上升系统的流动阻力
  - 变负荷速度过快或低负荷运行

第十四章 受热面的热偏差

一、热偏差的基本概念

1.热偏差的概念：

热偏差是沿烟道宽度方向并列管子间因吸热不均和工质流量不均引起的现象。

蒸汽焓增大于管组平均值的管子称偏差管，热偏差程度用热偏差系数φ表示.

$$\varphi = \frac{\Delta h_p}{\Delta h_0}$$

式中： Δh_p 为偏差管焓增，$\Delta h_p = q_p F_p / G_p$；

Δh_0 为管组平均焓增，$\Delta h_0 = q_0 F_0 / G_0$

q、F、G 分别为管外壁热负荷、受热面积及工质流量

令 $\eta_q = q_p/q_0 ; \eta_F = F_p/F_0 ; \eta_G = G_p/G_0$

则有 $\varphi = \eta_q \eta_F / \eta_G$

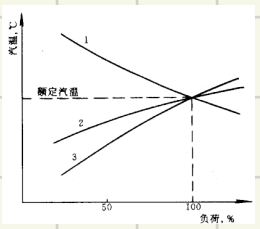
式中：η_q、η_F 和 η_G 分别为吸热、结构和流量不均匀系数

φ越大，偏差管与管组工质平均温度偏差大，偏差管易超温

原因：

- 烟气侧热力不均（吸热不均）
  - 沿烟道宽度方向烟气速度场和温度场不均匀　炉膛四壁水冷壁的吸热与粗糙表面使炉壁附近烟气温度及流速远比火焰中心低，并延伸到对流烟道，是造成过热器并列管组热力不均的主要原因
  - 烟气走廊　并列过热器管中个别管排间较大的节距形成。较大的烟气流通截面使流阻小，烟速大，对流传热强；且具有较大的辐射层厚度，辐射吸热增加，造成热力不均
  - 受热面不同程度的污染
  - 燃烧器负荷不一致，火焰中心偏斜；炉膛上部或过热器局部地区发生煤粉再燃烧
  - 炉膛出口烟气流的残余扭转
- 工质侧水力不均（流量不均）
  - 各并列管圈进、出口压降△p　取决于进、出口联箱中压力的变化，而后者又取决于受热面的连接方式，　Z形连接方式各并列管圈的△p 偏差最大，多管连接方式最小
  - △p大的管圈，蒸汽流量大，　△p 的偏差造成各管流量的不均
  - 管圈的阻力特性 K　与管子的结构尺寸、粗糙度等有关，管圈的K　值越大，即阻力越大，流量越小
  - 工质比容 υ　并列管受热不均时，受热强的管吸热量多、工质温度高、比容 υ 增大，蒸汽流量减小

2.运行中影响汽温的因素：



①锅炉负荷（汽温特性）

- 辐射受热面：（曲线1）负荷↑增加，工质流量和煤耗量B相应增加
  炉内热辐射份额相对下降，辐射受热面中蒸汽焓增减少，出口汽温下降
- 对流受热面：（曲线2）负荷↑增加，流经对流受热面的烟速、烟温提高，工质焓增加，出口汽温上升

②过量空气系数α：

α增加，炉膛温度水平降低，辐射传热减弱，辐射受热面出口汽温降低；对流过热器则由于燃烧生成的烟气量增多，烟气流速增大，对流传热加强，导致出口过热汽温升高，以后者为主

③给水温度 t_{gs}：

t_{gs} 降低，煤耗量 B 增加，炉内烟气量增加，出口烟温增加，对流受热面出口蒸汽温度因此升高。辐射式受热面的出口汽温影响不大

④燃料性质：

燃煤中的 M 和 A 增加，烟气容积增大，烟速提高；而炉内温度水平降低，出口烟温升高，过热器出口汽温升高。煤粉变粗时，煤粉在炉内燃烬时间增长，火焰中心上移，导致汽温升高

⑤受热面污染情况：

过热器之前的受热面发生积灰或结渣时，进入过热器区域的烟温增高，过热汽温上升；过热器本身严重积灰、结渣或管内结垢时，导致汽温下降

⑥燃烧器运行方式：

摆动燃烧器喷嘴向下倾斜或多排燃烧器从上排喷嘴切换至下排，由于火焰中心下移，会使汽温下降。反之，汽温则会升高

二、蒸汽温度调节

偏离值波动不超过 -10℃～+5℃

- 过高：金属许用应力下降
- 过低：循环热效率降低，汽机振动增加

⇒ 调节方法：

- **蒸汽侧调节**　通过改变蒸汽热焓调节汽温，主要有喷水减温、汽－汽热交换。
- **烟气侧调节**　通过改变锅炉内辐射受热面和对流受热面的吸热量分配比例的方法（如烟气再循环、摆动燃烧器）或改变流经过热器、再热器烟气量的方法（如分隔烟道挡板）调节汽温

减少热偏差的措施
- ①受热面分级
- ②受热面各级间联箱连接管左右交叉
- ③采用流量分配均匀的U形或多管连接方式
- ④采用各种定距装置，保证受热面节距
- ⑤利用不同管径和不同壁厚的屁股弯管圈
- ⑥再热器/过热器 高温布置，增强辐射性热

第十五章 蒸汽净化及锅炉水质

一、蒸汽的品质与污染

1、蒸汽品质的影响：

蒸汽品质：指蒸汽中钠盐、硅酸、CO_2和NH_3等杂质含量的多少

影响
- **过热器** 杂质沉积在管子内壁形成盐垢，使蒸汽流通截面变小，流阻增加；传热减弱，管壁温度升高
- **蒸汽管道阀门** 可能引起阀门动作失灵、漏汽
- **汽轮机通流部分** 改变叶片型线，减少蒸汽流通面积，增加阻力，出力及效率降低；严重时，调速机构卡涩、轴向力增大，破坏转子止推轴承；还可能影响转子的平衡而造成重大事故

2、饱和蒸汽的机械携带：

机械携带：饱和蒸汽携带含盐浓度较大的锅水水滴

机械携带量的多少取决于蒸汽的带水量及锅水含盐浓度。前者以蒸汽湿度 ω 表示，即蒸汽含水量占湿蒸汽重量的百分比

影响因素
- 锅炉负荷
- 锅水含盐量
- 汽包水位
- 工作压力

- 由于机械携带，蒸汽的含盐量S_q^s

$$S_q^s = \frac{\omega}{100} S_{lk},\ mg/kg$$

式中 S_{lk} 为锅水含盐量，mg／kg

3、蒸汽的选择性携带：

选择性携带（溶解性携带）：

饱和蒸汽具有直接溶解盐分的能力，即蒸汽溶盐，蒸汽对不同盐分的溶解能力不同，蒸汽的溶盐具有选择性

分配系数 a：某物质溶解于蒸汽的量（mg/kg）与该物质溶解于锅水中的量（mg/kg）之比

$$a = \frac{S_q^m}{S_{lk}} \times 100\%$$

影响因素
- 工作压力
- 含盐种类
- 锅水pH

4、大容量锅炉蒸汽污染：

蒸汽污染
- 带水
- 溶盐

携带系数 K：蒸汽中的含盐量相对于锅水含盐量的百分比

$$K = w + a$$

二、蒸汽的净化

1、汽水分离：

汽水分离装置的主要工作原理是利用水和汽的密度差和离心力作用

汽水分离装置包括挡板、孔板（有水下孔板和集汽孔板）、百叶窗分离器（波形板分离器）、旋风分离器

解决机械携带

2、蒸汽清洗：

- **蒸汽清洗** 使蒸汽通过洁净的清洗水（一般为给水），利用清洗水与锅水含盐浓度差来降低蒸汽溶解携带的盐分。

- **蒸汽清洗**主要用于减少溶解性携带，也可减少蒸汽机械携带的盐分，因为经清洗的蒸汽带出的水为含盐浓度较低的清洁水，而不是锅水。

3、排污：

①锅炉排污：为保证锅水含盐浓度维持在允许的范围，将部分含盐较浓的锅水从锅炉中的水渣排出，并补充一些较清洁的给水

- **连续排污**

连续不断地从汽包中排出因水蒸发含盐量不断增大的部分锅水，代之以比较纯净的给水，以获得符合品质要求（含盐量和碱度保持在规定值内）的蒸汽

连续排污应从锅水含盐量最大的部位（通常是汽包水容积靠近蒸发面处）引出

- **定期排污**

用以排除水中的沉渣、铁锈，以防这些杂质在水冷壁管中结垢和堵塞

定期排污应从循环回路的最低位置，即沉淀物积聚最多的地方（如水冷壁下部联箱或大直径下降管底部）引出，间断进行

②确定排污量：

利用锅炉监督试验：进入蒸发系统的盐的质量 = 离开蒸发系统的盐的质量

排污率：排污量与锅炉蒸发量之比

$$P = \frac{D_{pw}}{D} \times 100\%$$

第十六章 结渣和高温积灰及高温腐蚀

- **重点掌握**
  - 受热面高温结渣、腐蚀的特点、机理、影响因素与预防措施
  - 受热面结渣、积灰倾向预测

一、积灰(沾污)结渣

1、积灰结渣定义：

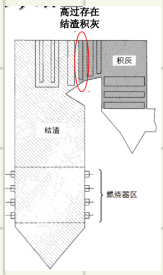
主要区别：温度

积灰或沾污：指温度低于灰熔点时灰沉积物在受热面上的积聚，多发生在锅炉对流受热面上（过热器、再热器、省煤器、空预器）。一般能用吹灰器清除。

结渣（结焦）：指在受热面壁上熔化了的粘性灰沉积物的积聚，与灰成分、熔融温度、粘度及壁面温度有关，多发生在高温受热面上（炉膛、过热器、再热器）。一般不能用吹灰器清除。

未燃尽炭

燃烧器附近：温度高，老吸



2、形成原因和过程：

①积灰结渣三要素

- 煤燃烧→矿物质→灰份(粘土类)
- 炉内具有一定的温度(＞灰熔点)
- 炉内受热面存在(提供结渣场所)

说明：
必要条件，而非充分条件
火焰冲刷，还原性气氛（缺氧燃烧、富燃料燃烧）

②积灰(沾污)结渣过程：

A. 初期沉积物-富铁熔渣撞击管壁，粘性大；升华物质；
B. 基质上部粘附飞灰颗粒；
C. 温度升高，沉积速率提高，表面烧结→硬性渣物。

初期沉积物形成机理
① 热扩散和涡流扩散；
② 气化物质的凝结；
③ 碰撞或惯性碰撞。

③积灰结渣位置：

- 结渣—炉膛内及出口高温对流受热面
- 积灰—炉膛内及尾部低温受热面、高温都有
- 易发生部位：炉内卫燃带、未敷水冷壁的炉墙、燃烧器喷口附近

3、对锅炉运行的影响：

沾污结渣 → 热阻↑ → 水冷壁吸热↓ → 锅炉出力↓

- 影响传热，下降 30%～60%，因炉膛出口温度高，只能低负荷运行，甚至停炉清渣。**经济性差**。
- 结渣、堵灰，热偏差、管壁超温，爆管，落渣熄火。**安全性差**。

4、影响结渣的主要因素：

① 炉内温度水平和炉内热负荷：温度↑，结渣↑；负荷↑，结渣↑

② 煤灰熔点和灰成分组成：熔点低，易结渣；硫铁矿和碱金属含量高易结渣

③ 炉内燃烧气氛：缺氧；还原性

④ 炉内流场：如固相煤粉颗粒刷墙，煤粉气流的分离和存在旋涡死角，切圆燃烧时切圆直径过大，旋流燃烧时煤粉气流向炉墙水冷壁的扩散等，都会导致炉内熔化灰渣与水冷壁面的接触形成结渣

5、积灰结渣类型：

A. 低温积灰 ⟶ 低温受热面腐蚀

多发生在低温区的省煤器和空预器上，与管子表面酸或水蒸汽凝结有关。一类是由于酸腐蚀所产生，二类是喷撞到管子上的飞灰，三类是酸与飞灰中的铁、钠、钙等反应生成的硫酸盐。

B. 高温粘结性积灰 ⟶ 高温对流受热面腐蚀

一般发生在对流受热面上，有一定的粘结性，一定温度，与煤种有很大关系。

C. 熔融性结渣 ⟶ 水冷壁高温腐蚀

烟气中携带熔化或粘性很强的灰粒，在熔渣上积聚。

6、炉内结渣预测方法：

1) **燃料特性**
主要根据煤灰特性和成分，如灰熔点、硅碳比等。30 多种。

2) **运行特性**
热流变化，烟温、蒸汽温度变化等。

3) **综合指标**
燃料特性和运行特性、设计参数结合考虑，如模糊数学、神经网络等。

⇒ ① 灰熔点温度(ST)；② 灰渣单一成分含量(碱金属)；③ 煤灰成分综合比值：硅比 G；碱酸比 $\frac{B}{A}$；硅铝比 $\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$

准确度不高的原因：①矿物质分布不均匀；②赋存形态不同；③测量时环境条件不同；④与燃烧过程有关，如锅炉形成、空气动力场

7、防止措施和运行优化：

(一)运行方面：

① 调整氧量（合理）：一般增加过量空气系数，有利于减轻结渣积灰（太多，高温腐蚀 SO_3）

② 合理配风：
- 有合理的空气动力场和切圆大小；
- 射流有刚性、不倾斜、不冲刷炉墙；
- 不能缺角运行，射流两侧补气条件良好；
- 燃烧器有合理的长宽比和间隙；
- 保证空气和燃料良好混合，避免还原性气氛。

③ 控制降低炉内温度水平和锅炉热负荷；

④ 煤粉细度：粗会冲击炉墙；细沉积物增多

⑤ 加添加剂：提高灰熔点、减少粘结性

⑥ 配煤：通过不同结渣特性燃料的配混，达到改善结渣目的。煤场配煤，锅炉不同喷口配烧。

⑦ 烟气再循环

⑧ 四角煤粉均匀化

⑩ 吹灰器

(二)设计方面：

① 燃烧方式选择：固态排渣—灰熔点高；液态排渣—灰熔点低

② 炉膛出口温度设计合理

③ 锅炉热负荷：影响炉膛和燃烧器温度水平的重要因素。qV、qF高则炉膛和燃烧器温度结渣倾向高。

④ 假想切圆直径：易结渣煤，采用小切圆

⑤ 注意燃烧器和炉墙之间的距离

⑥ 卫燃带的合理布置设计 卫燃带的位置、数量和形式

⑦ 合适的对流受热面截距 易沾污，适当加大节距

二、受热面的高温腐蚀

1、高温腐蚀基本特点：

①高温腐蚀：燃烧产生有腐蚀性**气体（气相）**或**化合物（固相）**对金属管的腐蚀。大部分是燃用高硫贫煤、无烟煤和高、中硫烟煤。

②位置：水冷壁(一般是向火面)，高温受热面(过热器、再热器)

③水冷壁腐蚀的基本条件：

① 积灰和烟气中的腐蚀性物质
如烟气中的 SO_2、SO_3、H_2S、HCl 等，气相腐蚀；积灰中的硫酸盐、硫化物、碱金属，固相腐蚀。

② 管壁及附近区域高温

③ 管壁附近区域还原性气氛
火焰冲刷、积渣、磨损等加重腐蚀。

2、影响因素：

- **燃料性质（灰熔点和灰成分，特别是燃煤的含硫量、含氯量等）** S加快腐蚀，H_2S比SO_2严重
- **炉内温度和热负荷影响（主要指管壁温度和烟气温度）** 温度越高，腐蚀越快
- **炉内燃烧气氛影响（特别是水冷壁附近）**
- **空气动力场和燃烧工况**
- **积灰（结渣）程度**

3、防止措施：

- 控制管壁温度
- 控制燃烧气氛特别是水冷壁壁面附近的气氛
- 合理组织炉内燃烧工况，防止水冷壁结渣、火焰中心偏斜或冲、刷墙等可能引起热偏差的现象发生
- 保证水动力的稳定以避免传热恶化的出现

第十七章 尾部受热面的磨损和低温腐蚀及积灰

- **重点掌握**
- **尾部受热面的磨损与预防措施**
- **酸露点与空预器低温腐蚀及预防措施**

一、尾部受热面的磨损

1、定义：

冲蚀(冲击磨损)：含有硬颗粒的流体相对于固体运动，使固体表面产生的磨损

冲蚀类型：
- 冲刷磨损—颗粒相对于固体表面冲击角较小，甚至接近平行
- 撞击磨损—颗粒相对于固体表面冲击角较大，或接近于垂直

发生位置：低过、低再、省煤器和空预器区域

2、受热面磨损的区域：

管道：
- 管外横向冲刷：
  - 圆周方向：最大磨损量位置与管径及管节距有关，管径大，半角小。
  - 管排位置：错列管束，s1/d=s2/d=2时，最大磨损管排是第二排。以后各排磨损量大于第一排，小于第二排。s1/d>2时，最大磨损的管排不是在第二排，而是管束深处
    - 顺列管束布置，第一排管磨损最为严重
- 管内纵向冲刷：明显产生磨损的部位，在烟气进口约100～150 mm或(1-3) d长的一段管壁处

炉内：

炉内易受热面磨损的区域
- **烟气流动方向变化** → 转向室
- **烟气走廊** → 水平烟道过热器两侧及底部；尾部烟道省煤器前后
- **吹损** → 吹灰器

3、磨损的危害：

- 受热面壁厚减小，强度降低，甚至破坏，导致管子泄漏，影响锅炉的安全运行。
- 增加检修工作量和钢材（修复或更换）耗量

4、飞灰冲磨损的影响因素：

- 烟气速度的影响　书本 310 图 17-5
- 飞灰浓度的影响　书本 310 表 17-6
- 飞灰粒径的影响　书本 308 表 17-3
- 烟气 (煤种) 成分的影响　飞灰磨损系数 a
- 管子排列方式的影响
- 管壁材料硬度的影响　抗磨损系数 M
- 管壁温度的影响　通过氧化膜厚度影响磨损程度
- 气流方向的影响
- 烟气走廊

5、尾部受热面的防磨措施：

- 设计时合理选择烟气流速（书本 311-312 ）
- 降低速度分布不均匀和飞灰浓度分布不均匀（书本 312-313 ）
- 在磨损严重部位加装防磨装置（书本 313-314 ）
- 局部磨损严重的管排改用厚壁管
- 降低烟气中飞灰浓度
- 采用膜式省煤器或鳍片管式省煤器
- 采用较大的管排横向节距，增大烟气流通面积
- 减小灰粒直径　书本：第三节内容

二、空预器烟气侧低温腐蚀与堵灰

1、基本概念：

①水露点：烟气中水蒸汽开始凝结的温度。烟气中水蒸汽的露点低达 40~44℃

②酸露点：烟气中硫酸蒸汽的凝结温度。烟气酸露点可达 140~160℃甚至更高，SO_3（或硫酸蒸汽）浓度越高，酸露点越高

③低温腐蚀：

- 当燃用含硫燃料时，硫燃烧后形成 SO_2，其中一部分会进一步氧化成 SO_3，SO_3 与烟气中水蒸汽结合成为硫酸蒸汽；
- 当受热面的金属壁温低于酸露点时，硫酸蒸汽就会在壁面上凝结，对金属产生严重的腐蚀作用。

④堵灰：

- 硫酸蒸汽凝结成液态硫酸，不仅会腐蚀金属，而且还会粘结烟气中的灰颗粒，引起积灰，此外，沉积灰中的金属氧化物与酸液反应生成水硬性硫酸盐，使积灰硬化，严重时将造成烟气通道堵灰。
- 腐蚀与堵灰往往是相互促进的。

位置：空气预热器、省煤器、烟道、引风机、炉墙护板和烟囱

2、硫是形成低温腐蚀的主要因素：

(1) 烟气中 SO_3 的主要形成方式：

一是燃烧反应中火焰里的部分氧分子与二氧化硫反应生成三氧化硫

燃料含硫量愈大，炉膛温度愈高，过量空气量愈多，生成的三氧化硫愈多

二是烟气中二氧化硫流经对流受热面遇到催化剂时，会与烟气中的过剩氧反应生成三氧化硫

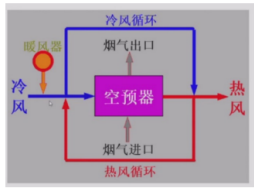
(2) 影响烟气中 SO_3 含量的因素：

- 煤的硫分 Sar ： Sar 增大时， SO_3 增多
- 炉膛温度 T_L ： T_L 升高时 SO_3 增多 (温度升高，氧气分解成自由氧原子 [O] 直接与 SO_2 化合)
- 过量空气系数： a_L 增大， SO_3 增多
- 煤的灰分 Aar ： Aar 较大时， SO_3 较少

3、低温腐蚀的预防措施：

① 设计上

- 提高排烟温度
- 热空气再循环，提高进风温度，从而提高排烟温度
- 空预器进口冷风旁（短）路，减少吸热量，提高排烟温度
- 加暖风器，提高进风温度
- 采用抗腐蚀材料



② 结构布置上

- 顺逆流交叉布置
- 卧式管式空预器布置
- 可采用回转式空预器
- 将低于露点部分的空预器设计成整体独立式，以便更换

③ 运行上

- 采用低氧燃烧
- 控制炉内温度水平
- 控制炉内温度水平
- 避免或减少尾部受热面漏风
- 加添加剂
- 烟气再循环
- 防止积灰和腐蚀的相互促进