

第十一章 强制流动锅炉及水动力特性

- 第一节 直流锅炉
- 第二节 控制循环锅炉
- 第三节 复合循环锅炉
- 第四节 强制流动锅炉蒸发受热面的水动力特性
- 第五节 超临界机组锅炉实例

第一节 直流锅炉

一、直流锅炉的工作原理（重点）

给水 → 给水泵 → 省煤器 → 水冷壁 → 过热器 →

蒸发受热面的循环倍率 $K=1$

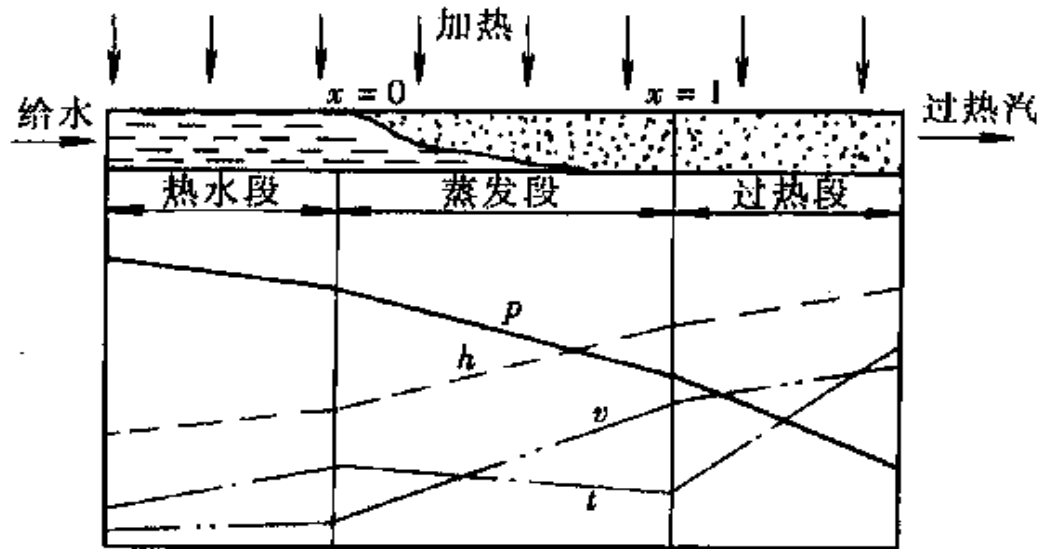


图11-1 直流锅炉的工质状态和参数的变化规律

p —工质压力； h —工质焓； v —工质比体积； t —工质温度

二、直流锅炉的特点

- (1) 没有汽包，节约20~25%钢材。
- (2) 没有汽包，蓄热能力降低，压力变化速度也比较快，调节控制系统灵敏度要求高。
- (3) 由于没有汽包和汽水分离装置，不能连续排污，给水品质要求高。
- (4) 启、停速度快。
- (5) 适用于任何压力的锅炉。
- (6) 受热面可自由布置。
- (7) 给水泵功率消耗大。

三、直流锅炉蒸发受热面的结构（重点）

（一）直流锅炉的类型

- ▶ 水平围绕管圈式 → 螺旋管圈型
- ▶ 垂直管屏式 → 一次垂直上升管屏型（UP型）
两段垂直上升管屏型（FW型）
- ▶ 迂回管圈式（已淘汰）

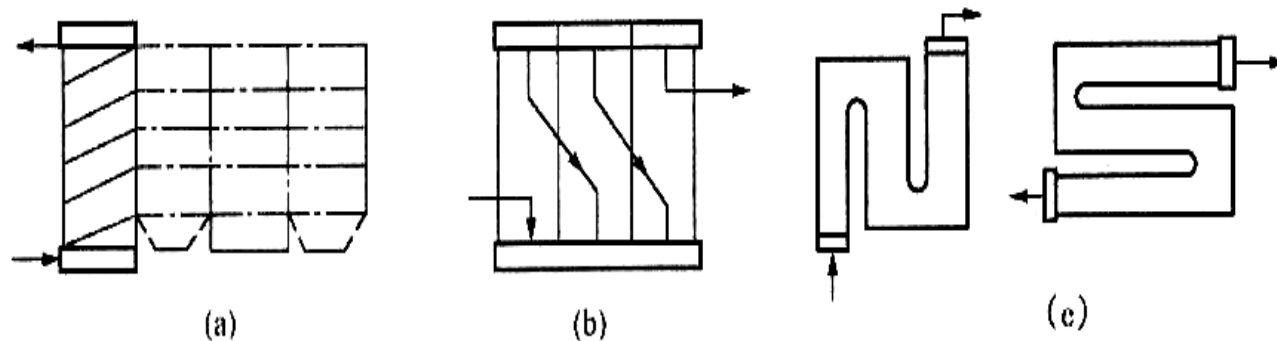


图11-2 传统的水冷壁基本形式

(a) 水平围绕管圈型； (b) 垂直多管屏型； (c) 回带管圈型

(二) 螺旋管圈型水冷壁

- ◆ 水冷壁管组成管带，沿炉膛周界四面倾斜螺旋上升
- ◆ **优点**：平行管热偏差小，可采用整体焊接膜式水冷壁。燃料的适应性广，适用滑压运行
- ◆ **缺点**：水冷壁支吊结构较复杂，制造、安装工艺要求较高，安装组合率低。

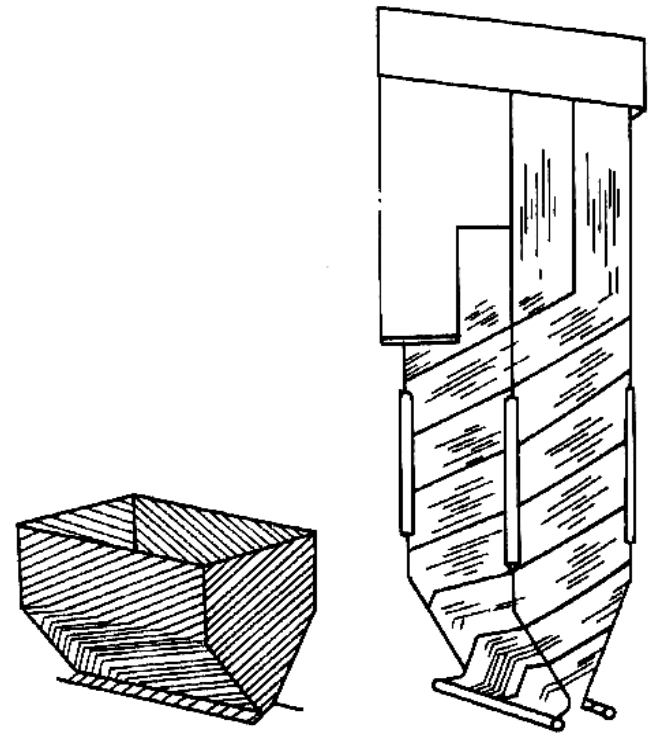


图11-3 螺旋管圈型水冷壁与冷灰斗

- (a) 螺旋管圈型冷灰斗；
- (b) 螺旋管圈型水冷壁

1.水冷壁布置与支吊

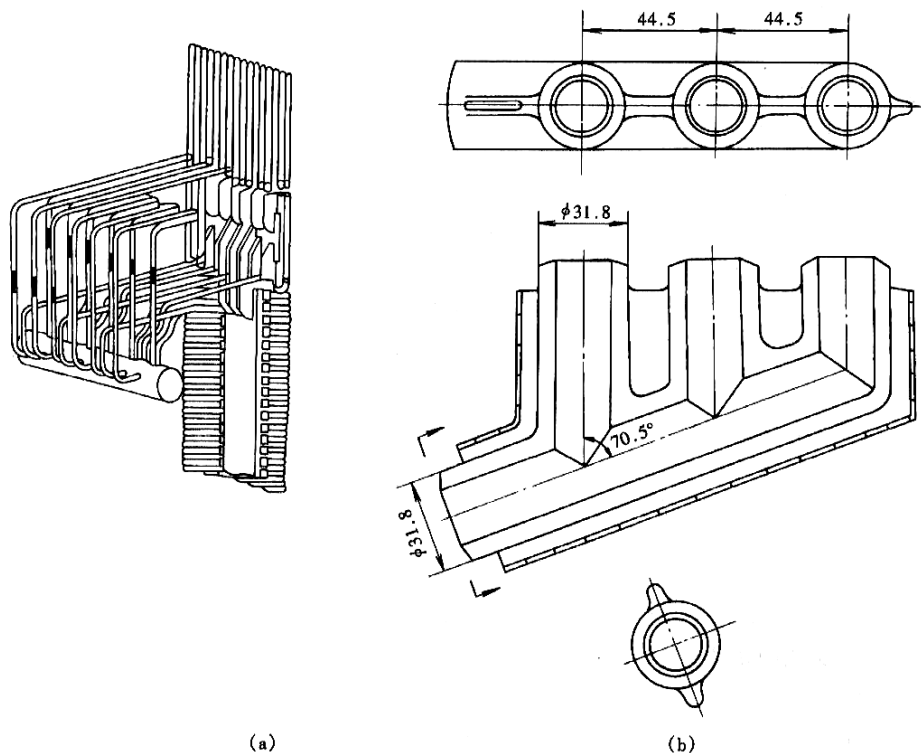


图11-5 螺旋管与垂直管之间的连接
(a) 联箱连接方式； (b) 分叉管
连接方式

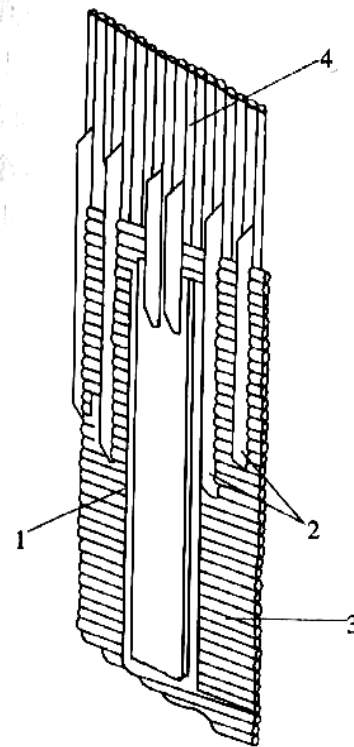
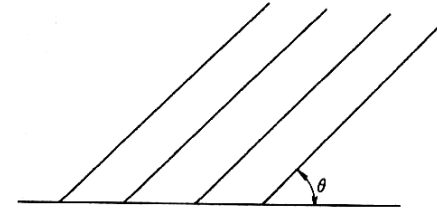


图11-6 螺旋管圈的支吊方式
1—定位块； 2—吊板； 3—螺
旋管圈； 4—垂直水冷壁管

2.螺旋管倾斜角 θ

$$n = \frac{L}{s} \sin \theta$$



减小螺旋管圈的倾斜角 θ ，可提高 ρw

例如，对于垂直管 $\theta=90^\circ$ ， $\sin \theta=1$ ；

螺旋管 $\theta=14^\circ\sim 30^\circ$ ， $\sin \theta=0.242\sim 0.5$ 。

可见垂直管的管数是螺旋管数的4.13~2倍，即在相同的炉膛周界与管子中心节距的情况下，螺旋管圈的并联管数可减少1~3倍，亦即在管径不变的情况下，质量流速可提高1~3倍。

3.螺旋管圈围绕炉膛圈数 Z ——优点

$$Z = \frac{h}{L \operatorname{tg} \theta}$$

，一般情况下， $Z=1.25\sim 1.5$ 圈

(三) 垂直管屏型水冷壁 一次上升型 (UP型)、两段垂直上升型 (FW型)

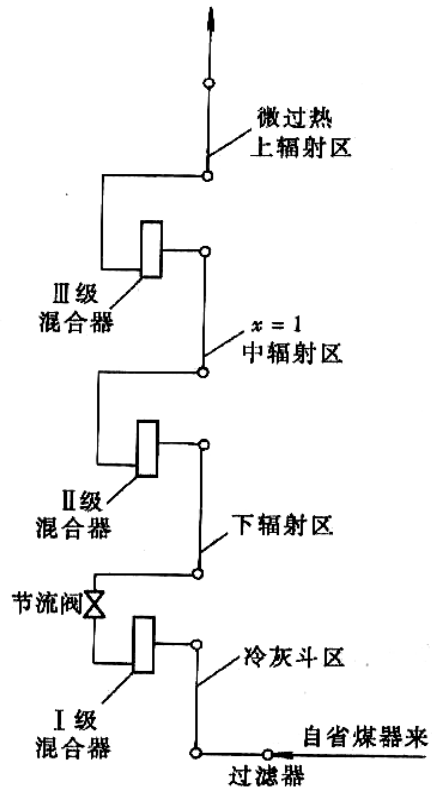


图11-8 一次上升型垂直管屏结构示意图

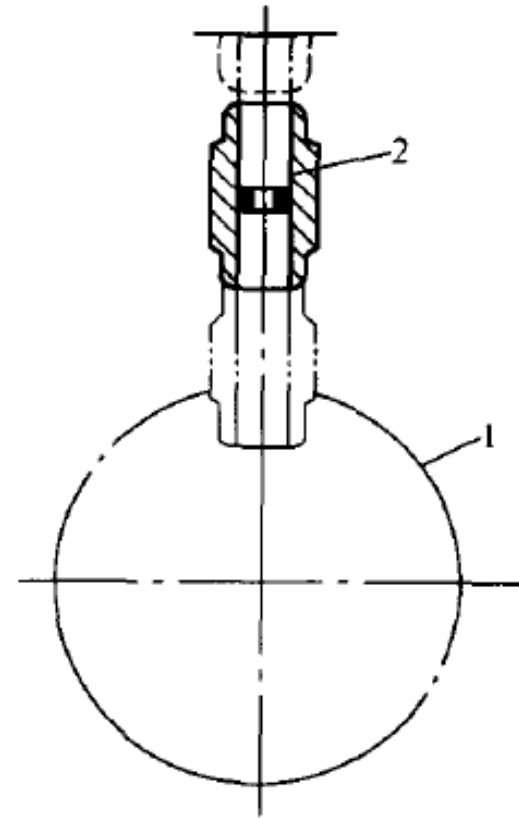


图 11-9 水冷壁进口节流圈的结构

1—联箱；2—节流圈

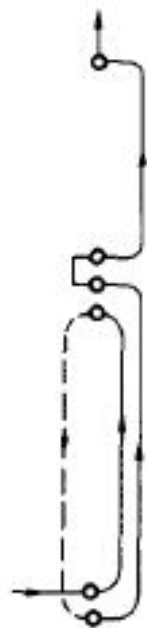


图 11-10 两次垂直上升管屏结构示意图

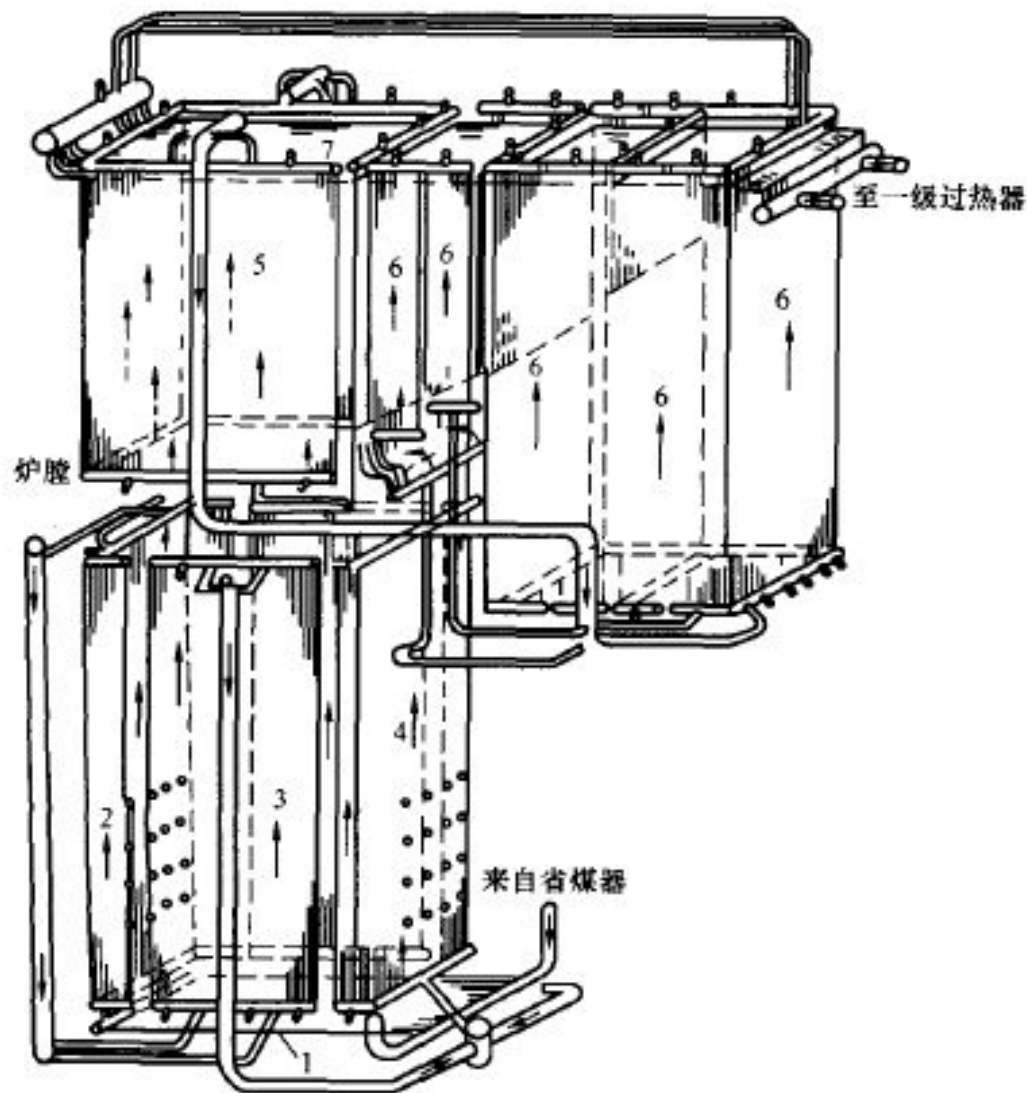
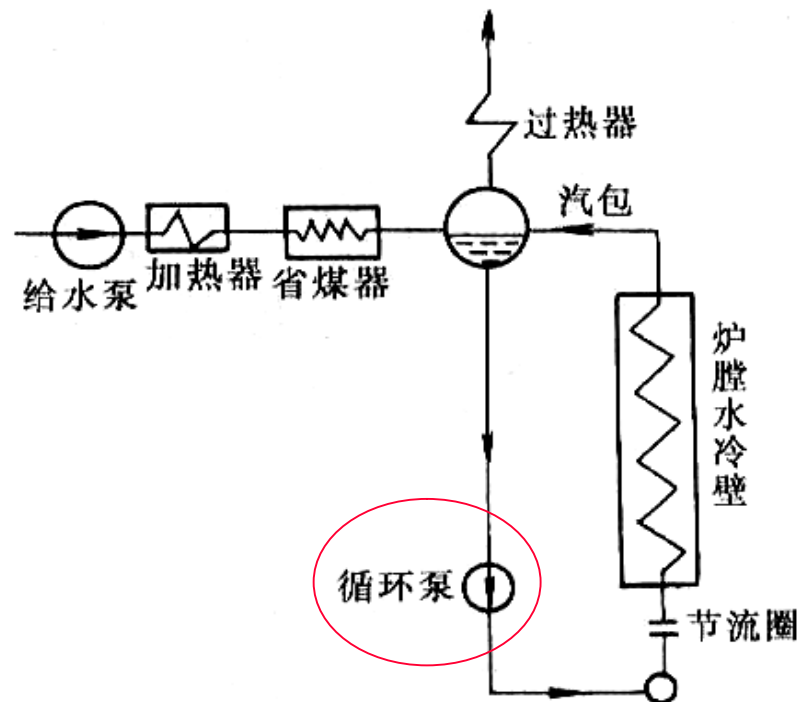


图 11-11 1950t/hFW 型超临界压力直流锅炉水冷壁布置和工质流程图
 1—回路 1, 炉膛底部; 2—回路 2, 下辐射区域前墙和两侧墙 (前部); 3—回路 3, 下辐射区域两侧墙 (中间); 4—回路 4, 下辐射区域后墙和两侧墙 (后部); 5—回路 5, 上辐射区域水冷壁; 6—回路 6, 对流烟道区域壁面; 7—顶棚

第二节 控制循环锅炉

一、控制循环锅炉的工作原理（重点）

- ▶ 循环压头=循环泵提升压头+自然循环运动压头
- ▶ 循环泵提升压头为**0.25~0.5MPa**；
- ▶ 自然循环运动压头为**0.05~0.1MPa**。



二-12 控制循环锅炉
的工作原理

二、控制循环锅炉的特点（了解）

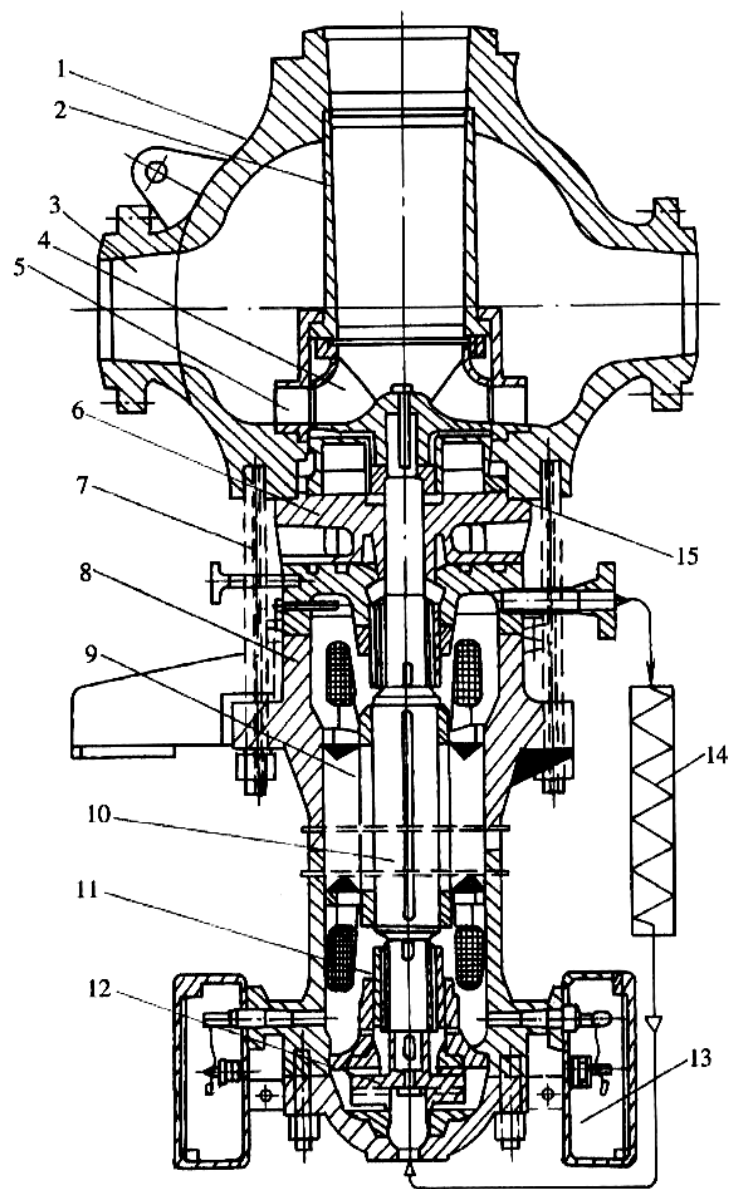
因压头大，可克服更多阻力，所以有

- 水冷壁管径小，管壁薄，金属耗量少，布置较自由。
- 管内工质质量流速较大，对管子的冷却条件较好。
- 水冷壁下联箱的直径较大，在水冷壁的进口处装置有滤网和不同孔径的节流圈，合理分配流量。
- 汽包尺寸小。
- 可提高启动及升降负荷的速度，适用于滑压运行等。
- 由于采用了循环泵，增加了设备的投资费用和运行费用。另外，循环泵长期在高温、高压下运行，工作可靠性差。

三、循环泵

由一个水泵和一个电动机组成，采用无轴封结构

图11-14 锅水循环泵的结构示意图
1—泵体；2—吸入管；3—出口管；4—叶轮；
5—导叶；6—隔热体；7—主螺杆；8—电机壳；
9—定子线圈；10—电动机转子；11—水
润滑导向轴承；12—水润滑止推轴承；13—接
线盒；14—冷却器；15—密封垫



四、控制循环汽包锅炉实例

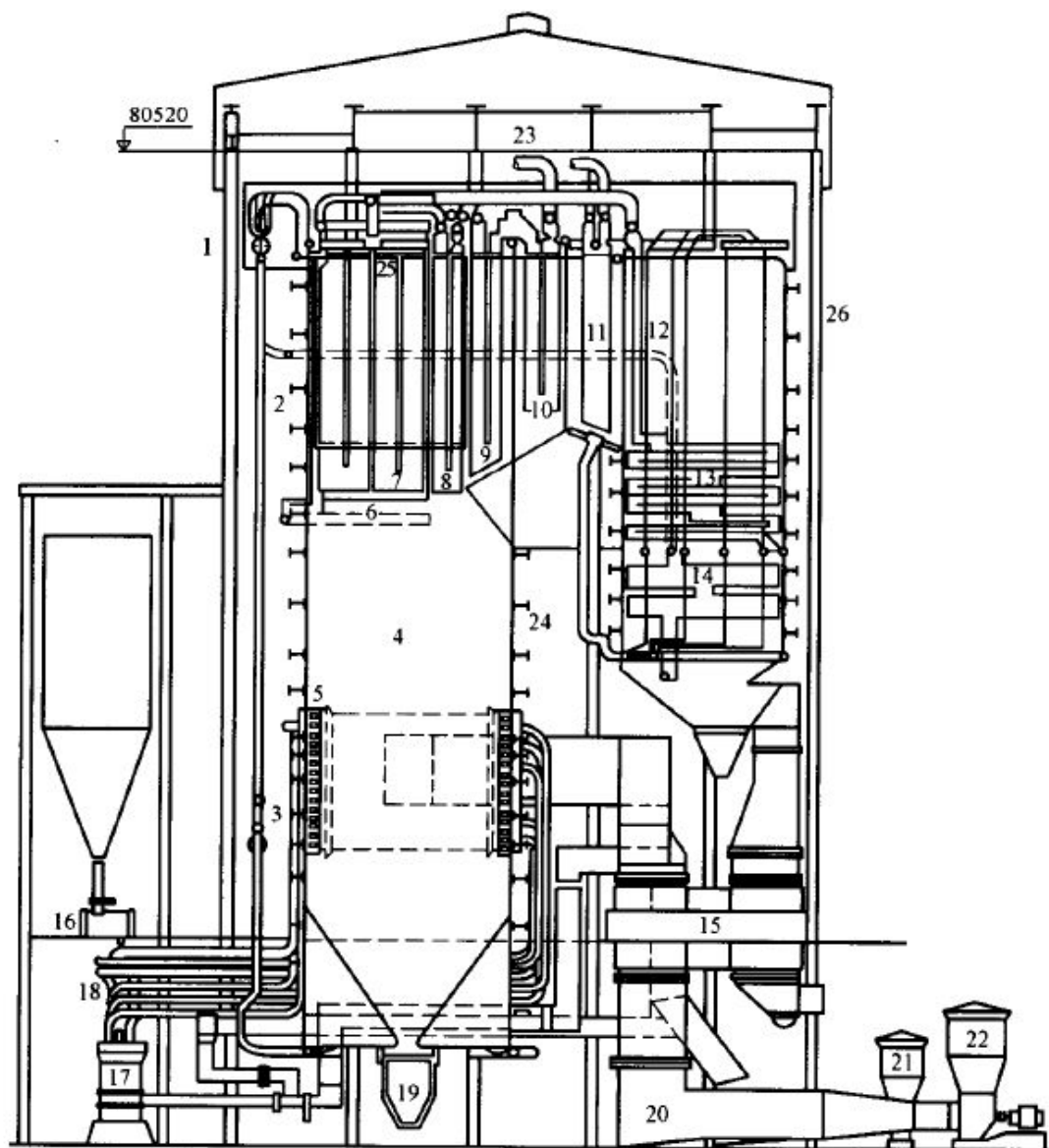
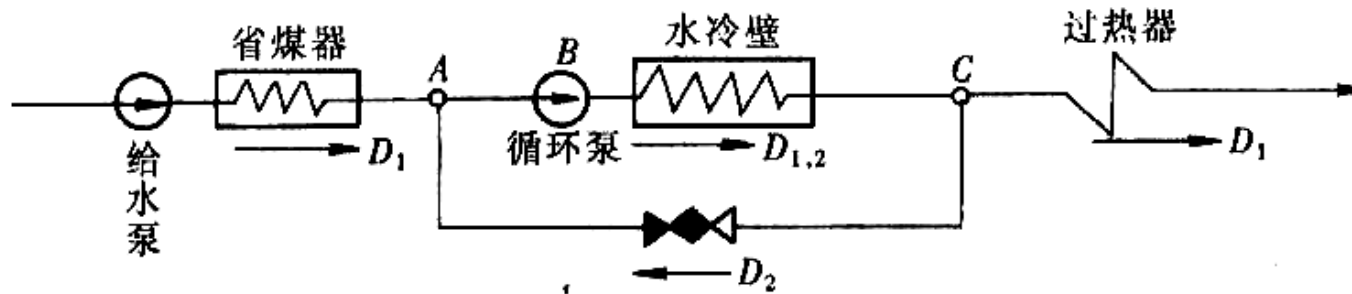


图 11 - 15 HG-2008/186-M 型的亚临界压力燃煤控制循环锅炉

第三节 复合循环锅炉

一、复合循环锅炉的工作原理（重点）



$$p_C = p_A + \Delta p_b - \Delta p_{lz}$$

➤全负荷复合循环锅炉：

0~100%De, $\Delta p_b > \Delta p_{lz}$, 都有工质再循环

➤部分负荷循环锅炉：

低负荷时 $\Delta p_b > \Delta p_{lz}$, 循环管路有再循环；

高负荷时 $\Delta p_b \leq \Delta p_{lz}$, 无工质再循环, 按直流原理工作。

二、复合循环锅炉的工作特点（了解）

- 由于水冷壁管壁温度工况由再循环得到可靠的保证，可选用较大直径的水冷壁管和采用垂直一次上升管屏而不必装中间混合联箱，也不需采用内螺纹管，结构简单可靠。
- 额定负荷时的质量流速可选得低些，以减小流动阻力和水泵能耗。
- 启动旁路系统可按额定负荷的5%~10%设计，既减小设备投资又减少启动时的工质和热量损失。

- 再循环工质使水冷壁进口工质的焓提高，工质在蒸发管内焓增减少，有利于减少热偏差和提高管内工质流动的稳定性。
- 循环泵长期在高温高压下工作，制造工艺复杂，且技术性能要求高。另外，循环泵要消耗一定量的电能，致使机组运行费用提高。
- 锅炉在低负荷范围内运行时，工质流量变化小，温度变化幅度小，减小了热应力，有利于改善锅炉低负荷运行时的条件。
- 不仅应用于超临界压力锅炉，而且还应用在亚临界压力锅炉上。

三、全负荷复合循环锅炉（低循环倍率锅炉）

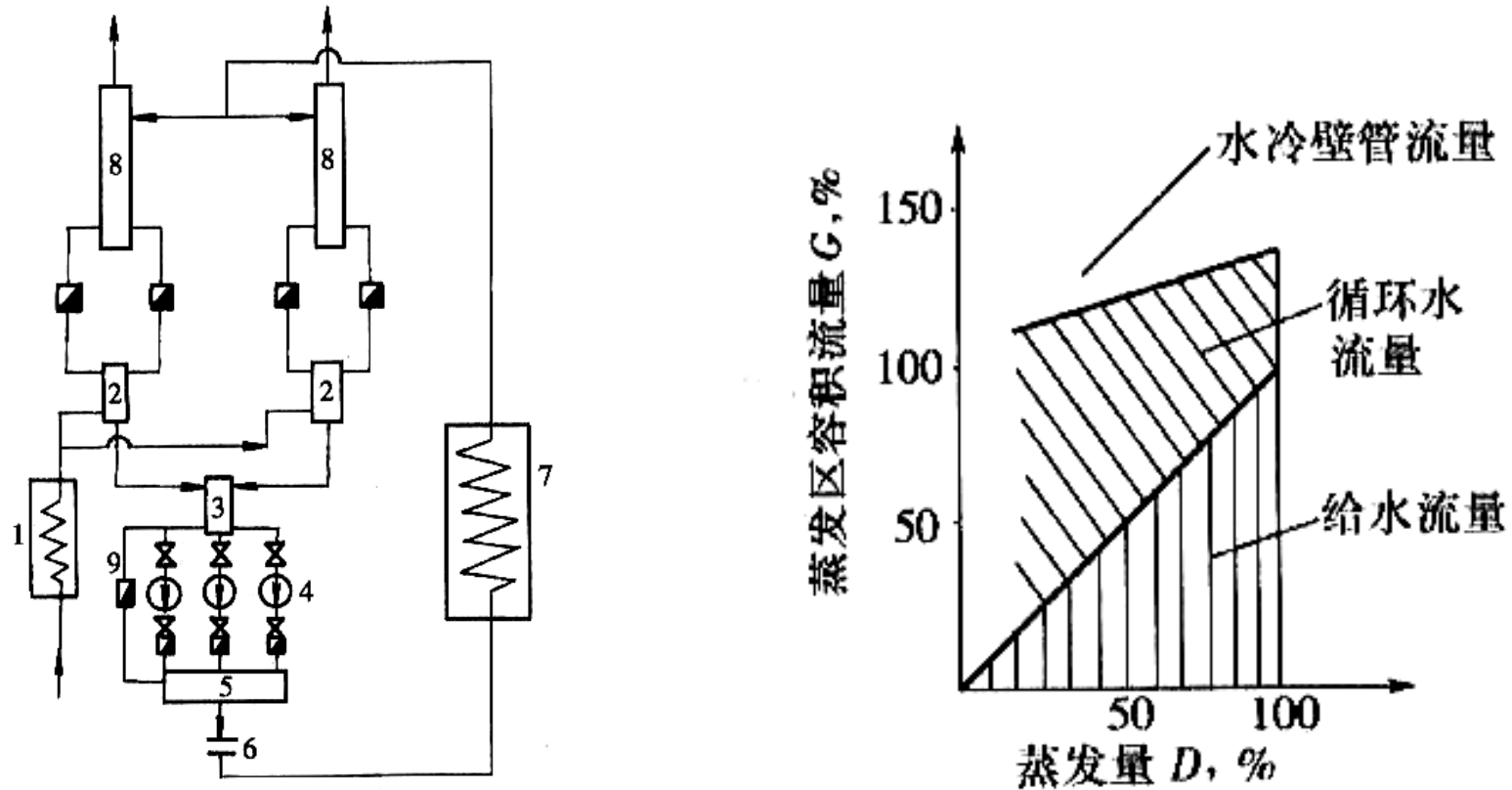


图11-18 亚临界压力低循环倍率锅炉系统和循环流量曲线
 (a) 亚临界参数低循环倍率锅炉系统；(b) 循环流量曲线
 1—省煤器；2—混合器；3—过滤器；4—再循环泵；5—分配器；
 6—节流圈；7—水冷壁；8—汽水分离器；9—备用管路

四、部分负荷复合循环锅炉

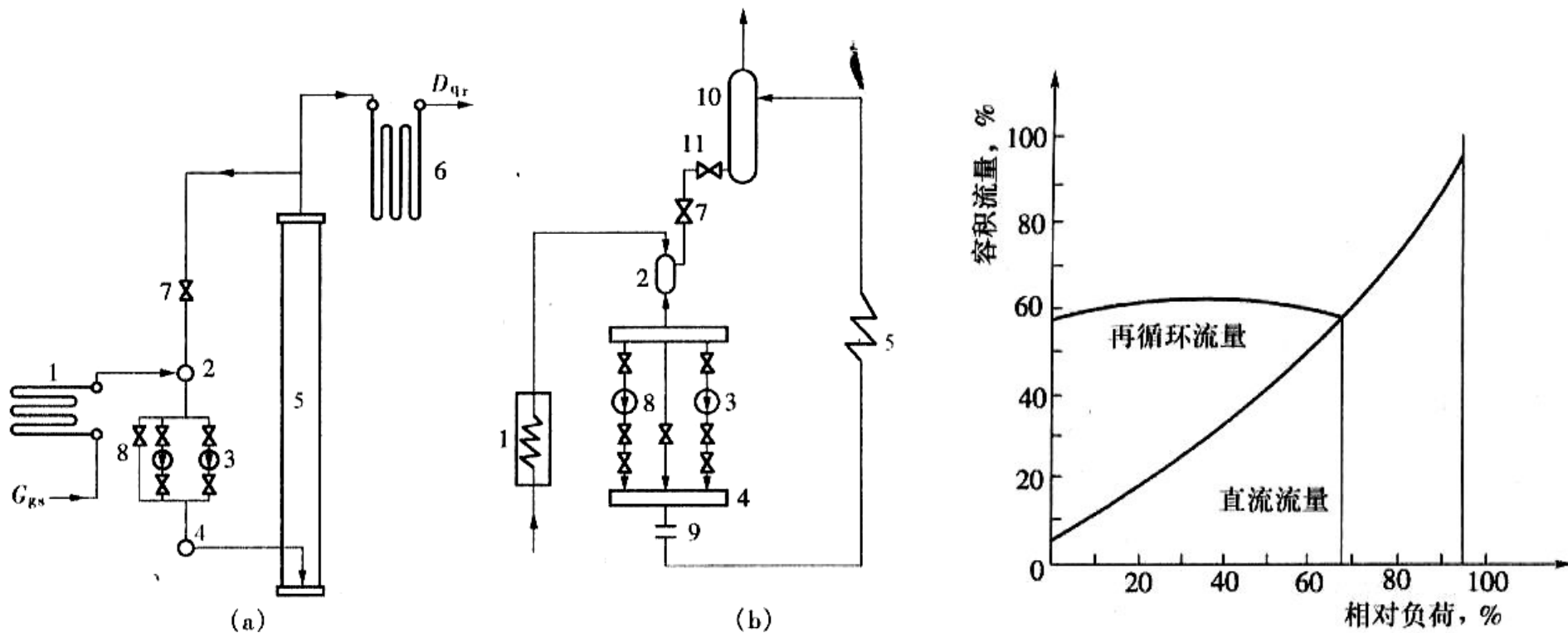


图11-20 部分负荷复合循环锅炉的循环系统

(a) 超临界压力的复合循环锅炉;

(b) 亚临界压力复合循环锅炉

- 1—省煤器; 2—混合器; 3—循环泵; 4—分配器; 5—水冷壁; 6—过热器; 7—循环限制阀; 8—循环旁路; 9—节流圈; 10—汽水分离器; 11—止回阀

图11-19 部分负荷复合循环锅炉的工作原理

第四节 强制流动锅炉蒸发受热面的水动力特性

一、强制流动蒸发受热面中的流动多值性

1. 流动多值性的概念

➤ 水动力特性: $\Delta p = f(G)$ 或

$$\Delta p = f(\rho w)$$

➤ 流动多值性: 如果对应一个压降可能有二个甚至三个流量, 则称为水动力不稳定性, 或者多值性

$$\Delta p = \left(\sum \xi + \lambda \frac{l}{d} \right) \frac{(\overline{\rho w})^2}{2\rho} \pm \overline{\rho} gh$$

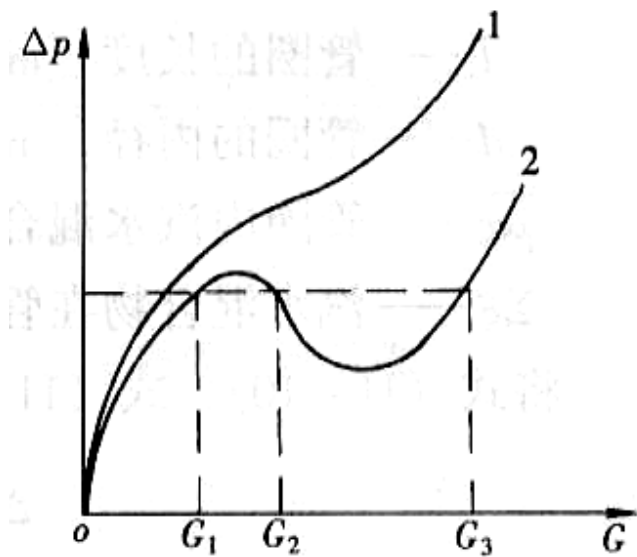


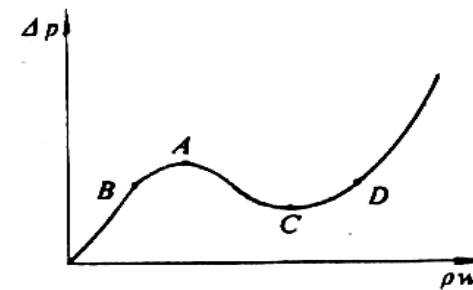
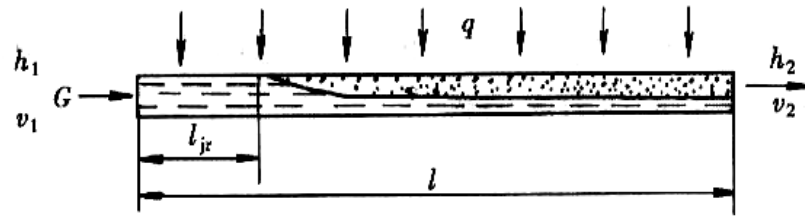
图11-21 水动力特性曲线
1—单值特性曲线; 2—多
值特性曲线

2.水平蒸发受热面中的水动力特性

$$\Delta p = \left(\sum \xi + \lambda \frac{l}{d} \right) \frac{(\overline{\rho\omega})^2}{2\rho} = \left(\sum \xi + \lambda \frac{l}{d} \right) \frac{1}{2A^2} G^2 \bar{v} = KG^2 \bar{v}$$

- 当G很小时：管内为单相汽，流动呈单值性（B点之前）；
- 当G很大时：管内为单相水，流动呈单值性（D点之后）；
- 当G介于上述流量之间时：G增大， Δp 增大；同时，x减小，v减小， Δp 减小。B-A、C-D段，G增大占主要，A-C段，v减小占主要。

多值性根本原因：饱和水、饱和汽密度差



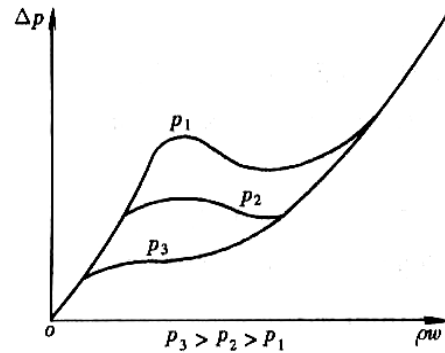
11-22 均匀受热的水平蒸发管圈

图11-23 水平管圈的水动力特性曲线

3.影响水动力多值性的主要因素

(1) 工作压力：**P**升高，稳定性增强

(2) 入口焓值：入口工质温度或焓值越高，水动力特性趋向越稳定



11-24 压力对水动力特性的影响

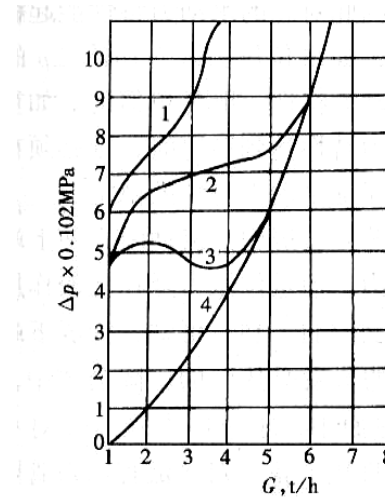


图11-26 进口工质温度对水动力特性的影响

(3) 管圈热负荷和锅炉负荷

锅炉负荷及热负荷越高，水动力特性趋向于稳定

4. 垂直布置蒸发管中的水动力特性

- 在垂直上升管屏中，重位压头使稳定性增强；
- 在下降流动的管屏中，重位压头使水动力不稳定性更严重。

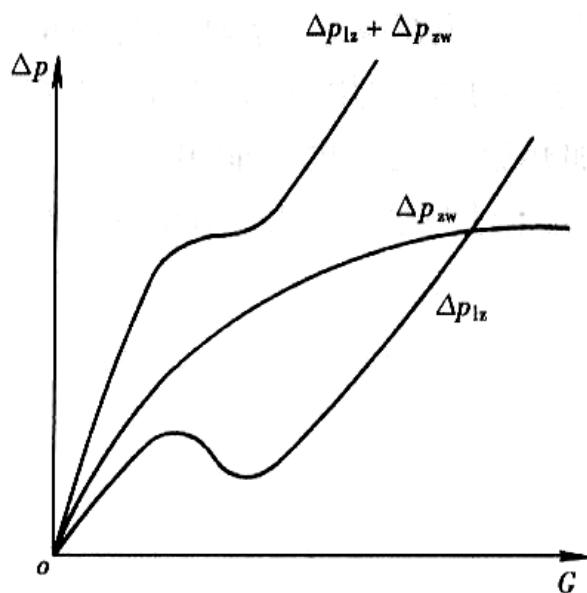


图11-28垂直上升管水动力特性曲线

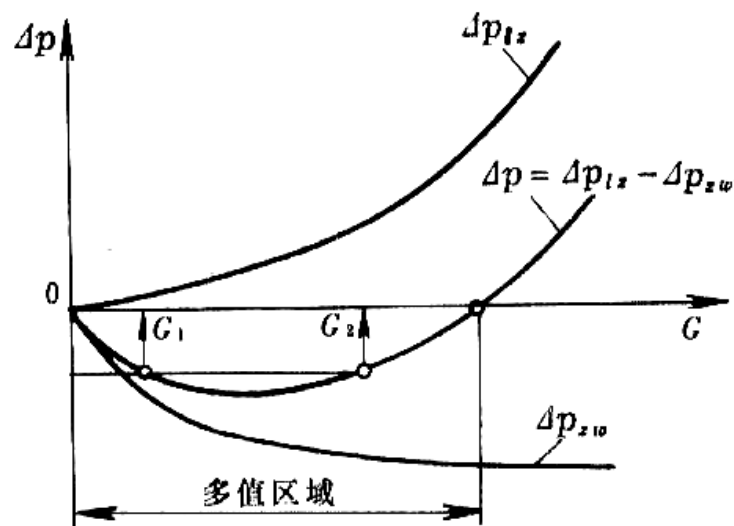


图11-29垂直下降管水动力特性曲线

5. 消除或减轻水动力多值性的措施

- (1) 提高工作压力
- (2) 适当减小蒸发区段进口水的欠焓
- (3) 管圈进口处加装节流圈

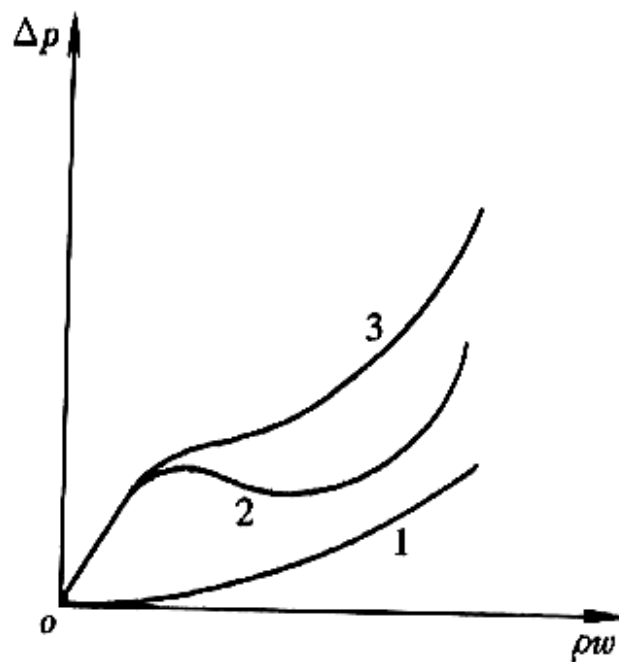


图11-30 节流圈对水动力特性的影响
1—节流圈阻力特性；2—未加节流圈的水动力特性；3—加节流圈后的水动力特性

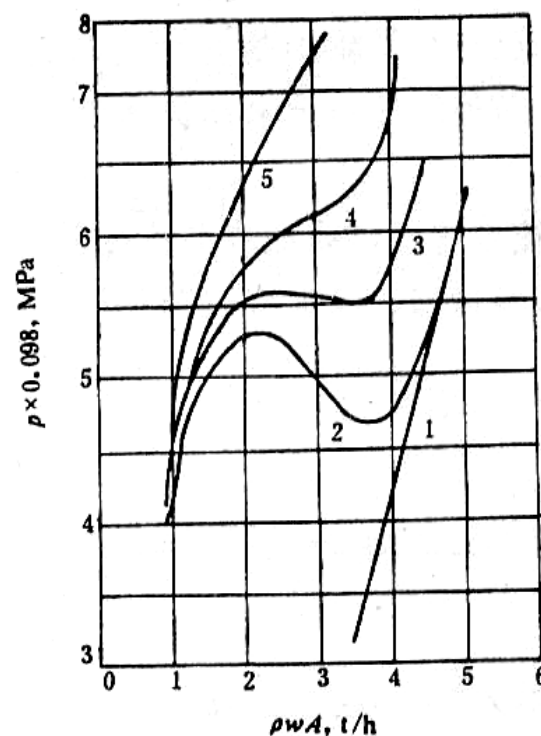


图11-31 节流圈孔径大小对蒸发管水动力特性的影响
1—不受热管；2—无节流圈时的水动力特性；3—加装节流圈孔径 $d_{ji}=10\text{mm}$ 时的水动力特性；4—加装节流圈孔径 $d_{ji}=7.5\text{mm}$ 时的水动力特性；5—加装节流圈孔径 $d_{ji}=10\text{mm}$ 时的水动力特性

二、强制流动蒸发受热面中的脉动

1. 脉动现象

- ◆ 概念：受热面中流量随时间发生周期性变化的现象
- ◆ 分类：管间脉动、屏间脉动、全炉脉动

2. 发生脉动的原因

- 外因：在蒸发开始区段受到外界热负荷变动的扰动；
- 内因：该区段工质及金属的蓄热量发生周期性变化；
- 根本原因：饱和水与饱和蒸汽的密度差

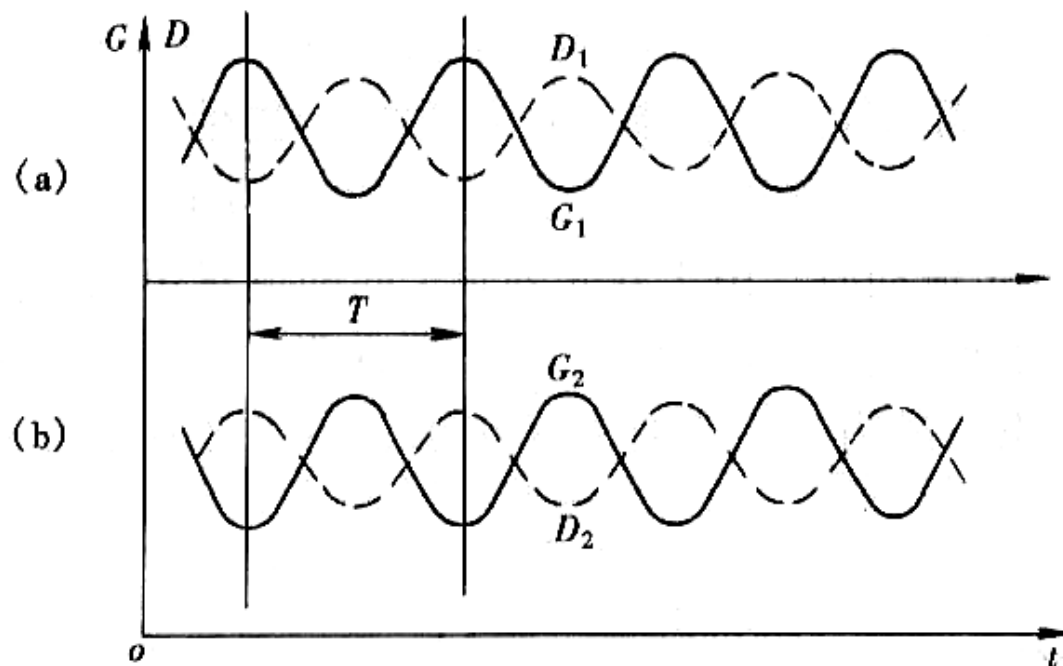


图11-32 管间脉动示意图

(a) 管屏中一部分管子内流量的变化； (b) 管屏中
另一部分管子内流量的变化

G—进口水量； **D**—出口蒸汽量； **T**—变化周期

3. 防止脉动的措施

- (1) 提高工作压力
- (2) 增大加热段与蒸发段的阻力比值
 - ✓ 管圈进口装节流圈、
 - ✓ 加热区段采用较小直径的管子、
 - ✓ 增加管圈进口工质欠焓

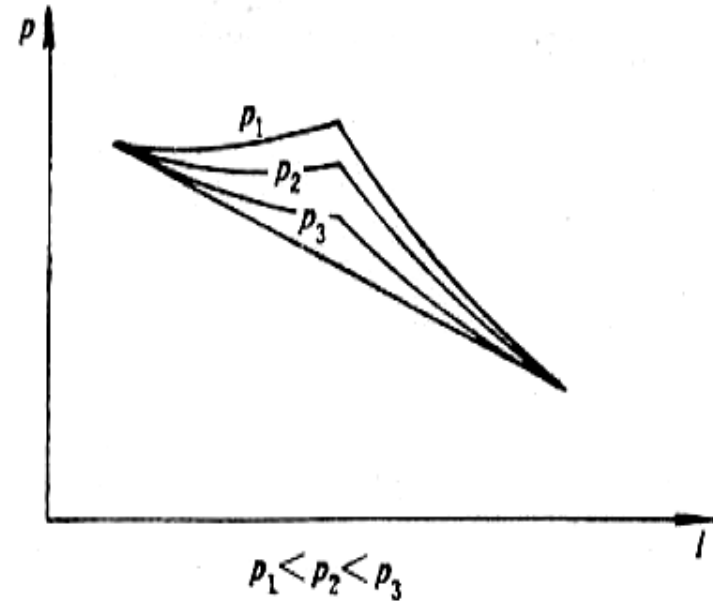
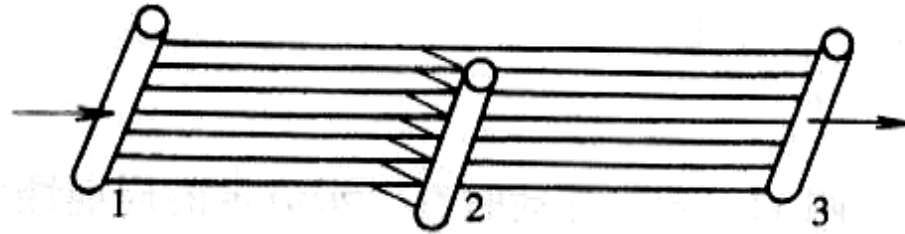


图11-33 压力对脉动的影响

(3) 提高质量流速

(4) 在蒸发区段装中间联箱及呼吸联箱



(5) 锅炉启停和运行方面的措施

三、蒸发受热面中的热偏差

1. 热偏差的影响因素

(1) 热力不均

(2) 水力不均

1) 流动阻力的影响（水平管、螺旋管）

- 管圈的阻力系数越大，流量越小，热偏差越严重
- 吸热多的个别管圈，工质平均比体积大，阻力大，管圈中的工质流量低（吸热多，流量少，热偏差越严重）

2) 重位压头的影响

- 垂直上升蒸发管屏：重位压力降（阻力因素）减小流量偏差
- 向下流动的蒸发管屏：重位压力降（动力因素）增大流量偏差

2. 减轻与防止热偏差的措施

- 1) 加装节流阀或节流圈
- 2) 减小管屏或管带宽度
- 3) 装设中间联箱和混合器
- 4) 采用较高的工质流速
- 5) 合理组织炉内燃烧工况

四、强制流动蒸发受热面的沸腾传热恶化

对于直流锅炉来讲，沸腾传热恶化是不可避免的，从减轻措施来看，与自然循环蒸发受热面的沸腾传热恶化的预防措施并无差异，如提高质量流速、限制热负荷、采用内螺纹管或加装扰流子等。

第五节 超临界机组锅炉实例

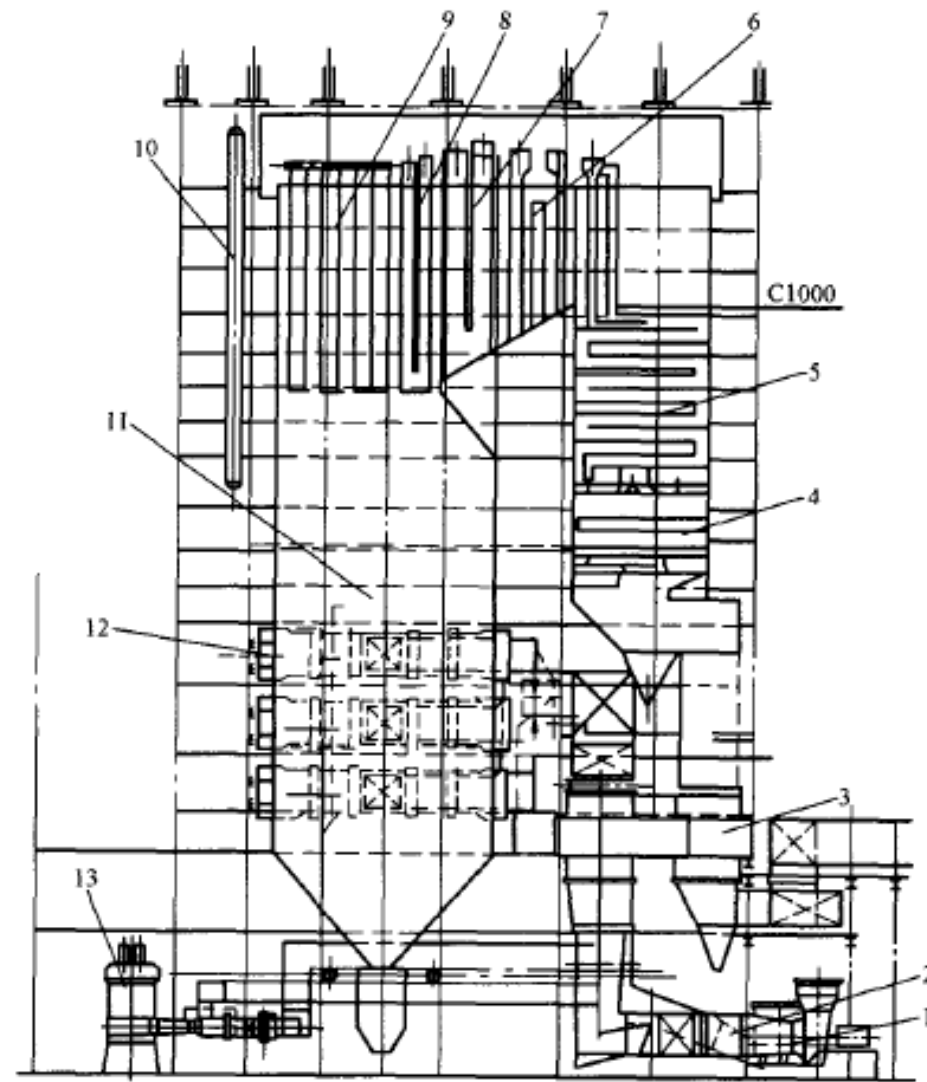


图 11-38 1900t/h 超临界压力直流锅炉布置图

- 1—一次风机；2—送风机；3—空气预热器；4—省煤器；5—低温再热器；6—高温过热器；7—高温再热器；
8—后屏过热器；9—前屏过热器；10—汽水分离器；11—炉膛；12—燃烧器；13—磨煤机