

第八章 过热器及再热器

Superheater and reheater

- 第一节 过热器和再热器的作用和工作特点
- 第二节 过热器和再热器的结构型式及汽温特性
- 第三节 热温差
- 第四节 蒸汽温度的影响因素及调节
- 第五节 过热器、再热器的高温积灰与高温腐蚀

本章要求：

- 掌握过热器和再热器的作用、特点，蒸汽温度选择要考虑的因素，锅炉受热面布置的发展
- 掌握过热器和再热器的结构、型式及不同的分类，掌握结构特点。
- 掌握热偏差的概念，热偏差的产生原因、影响因素及减轻措施。
- 掌握不同受热面的汽温特性，调节汽温常用的方法。
- 掌握过热器积灰和高温腐蚀的机理，危害及减轻的措施。

第一节 过热器和再热器的作用 和工作特点

The function and characteristics of superheater and reheater

一、作用 Function

过热器：将饱和蒸汽加热成过热蒸汽；

再热器：将汽轮机高压缸排汽加热成再热蒸汽，降低汽轮机末级叶片蒸汽湿度；提高电厂循环热效率。

二、工作特点 *Characteristics*

- (1) 管壁温度最高，对材质要求高，工作安全性较差
- (2) 过热器、再热器的阻力不能太大。
- (3) 高热负荷区的过热器与再热器工质流速高。
- (4) 过热器和再热器出口汽温将随锅炉负荷的改变而变化。
- (5) 过热器和再热器布置受锅炉参数影响。
- (6) 在锅炉点火升炉或汽轮机甩负荷时，过热器、再热器需要采取保护措施。

三、设计运行要求 Design

- (1) 汽温稳定
- (2) 调温手段可靠
- (3) 减少热偏差
- (4) 节省钢材，尤其是合金钢。
- (5) 较小的流阻。
- (6) 运行安全可靠，制造及检修方便。

四、 蒸汽温度的选择 The selection of steam temperature

1. 循环热效率;
2. 汽轮机末级叶片的蒸汽湿度;
3. 高温钢材的许用温度。

五、 过热器和再热器布置的发展 Development of the arrangement for superheater and reheater

1. 进入锅炉的水经历三个阶段：
水的预热-----水的蒸发-----蒸汽的过热
2. 三个阶段所占份额
随着压力的变化，各个阶段所占的份额不同。

第二节 过热器和再热器的结构 型式及汽温特性

按传热方式不同分：

- 对流式（水平或竖井烟道）
- 辐射式（炉膛顶部、上部）
- 半辐射式（炉膛出口）

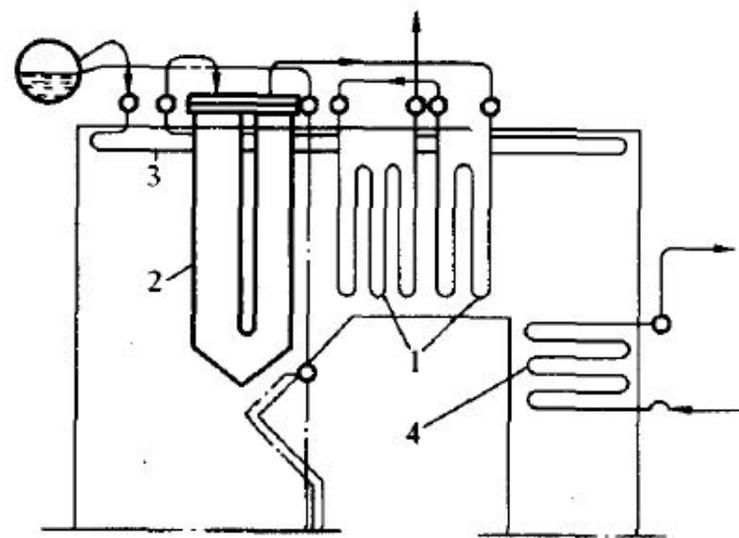


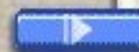
图 8-1 过热器与再热器的布置
1—对流式过热器；2—屏式半辐射式过热器；
3—炉顶辐射式过热器；4—再热器

一、对流式过热器和再热器

分类：

- (1) 根据传热方式分：
对流、辐射和半辐射式。
- (2) 根据烟气与管内蒸汽的相对流动方向分：
逆流、顺流和混合流。
- (3) 根据对流受热面的放置方式分：立式、卧式。
- (4) 根据管子排列方式分：顺列、错列。
- (5) 根据管圈数分：单管圈、双管圈、多管圈。
- (6) 根据结构分：
屏式过热器、壁式过热器、对流过热器。

过热器——低过



每以级的低过过热器的蛇形管
排，一般布置在竖井烟道内。

1. 按流动方式分：

顺流、逆流、双逆流、混合流

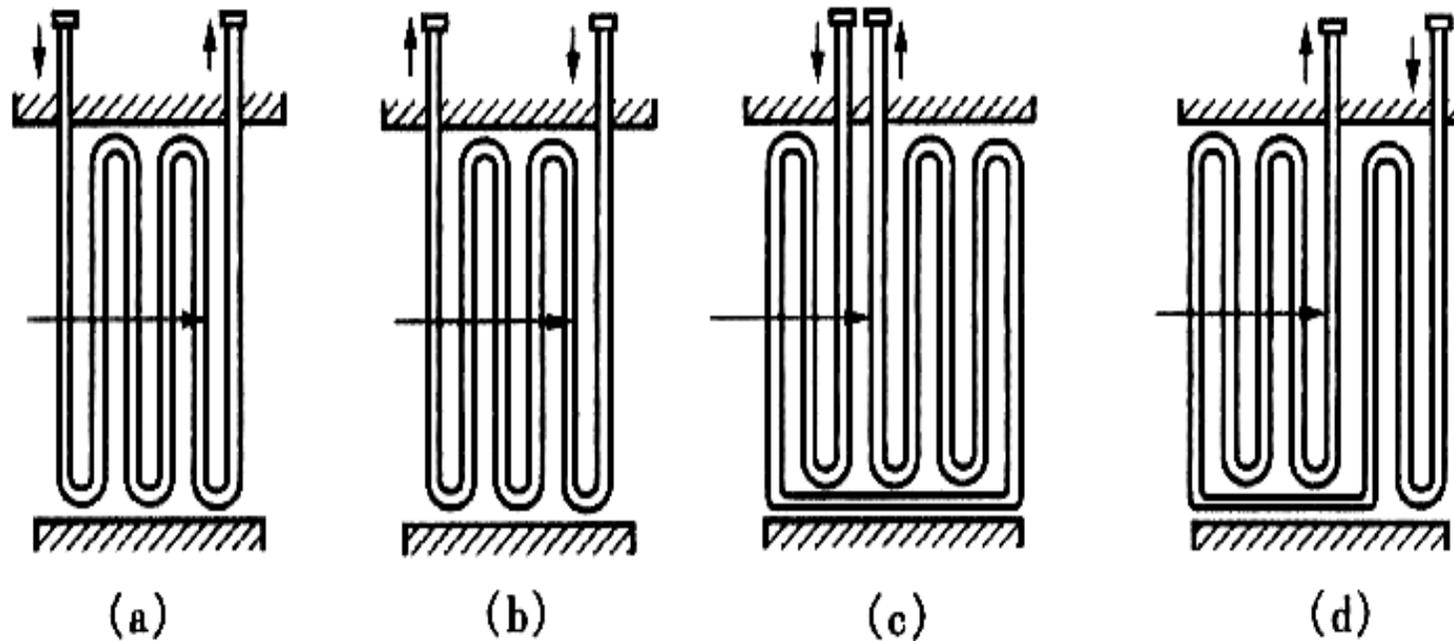


图8-2 过热器和再热器的顺流、逆流、双逆流及混合流布置
(a) 顺流式； (b) 逆流式； (c) 双逆流式； (d) 混流式

2.蛇形管放置方式分:

立式: 吊挂方便、疏水困难

卧式: 疏水困难、支吊复杂

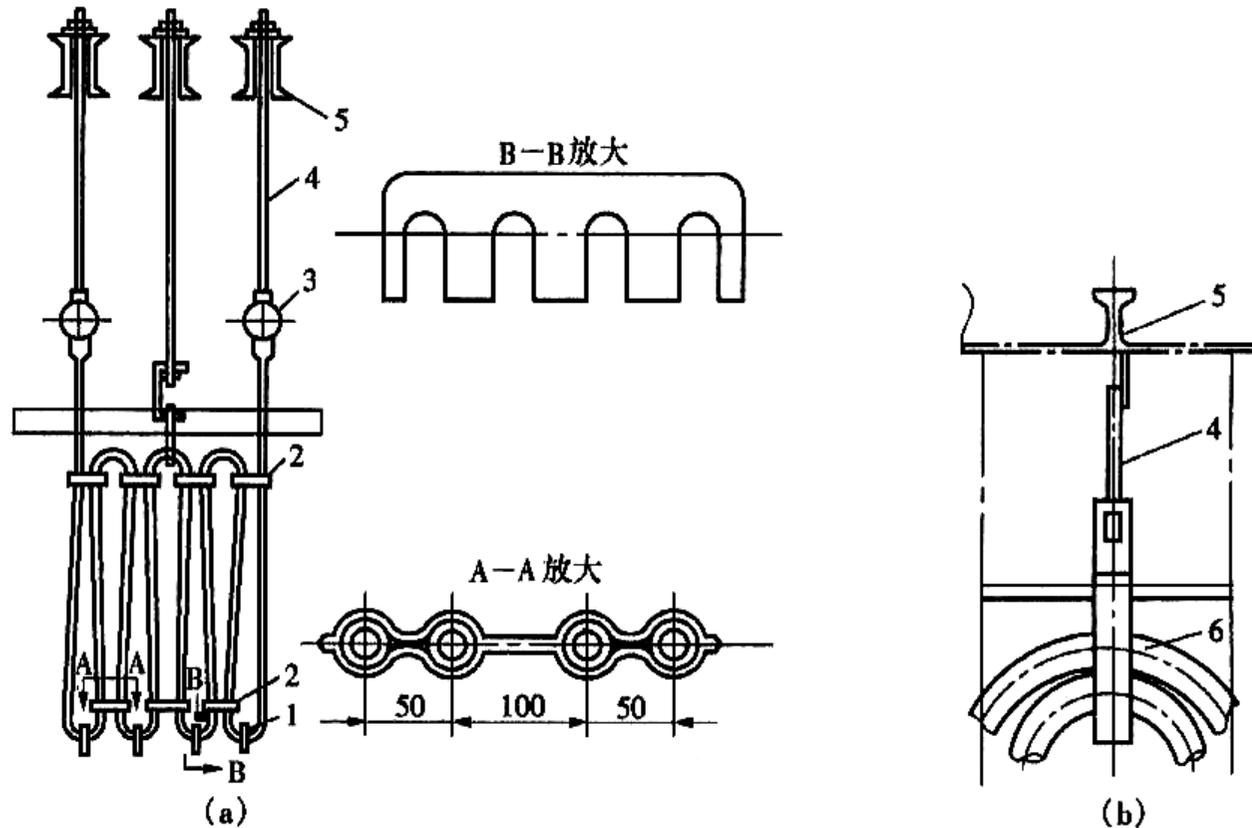


图8-3 立式对流过热器及其支吊结构

(a) 立式对流过热器; (b) 立式对流过热器的支吊结构

1—梳形板; 2—管夹; 3—联箱; 4—吊杆; 5—钢梁; 6—蛇形管弯头

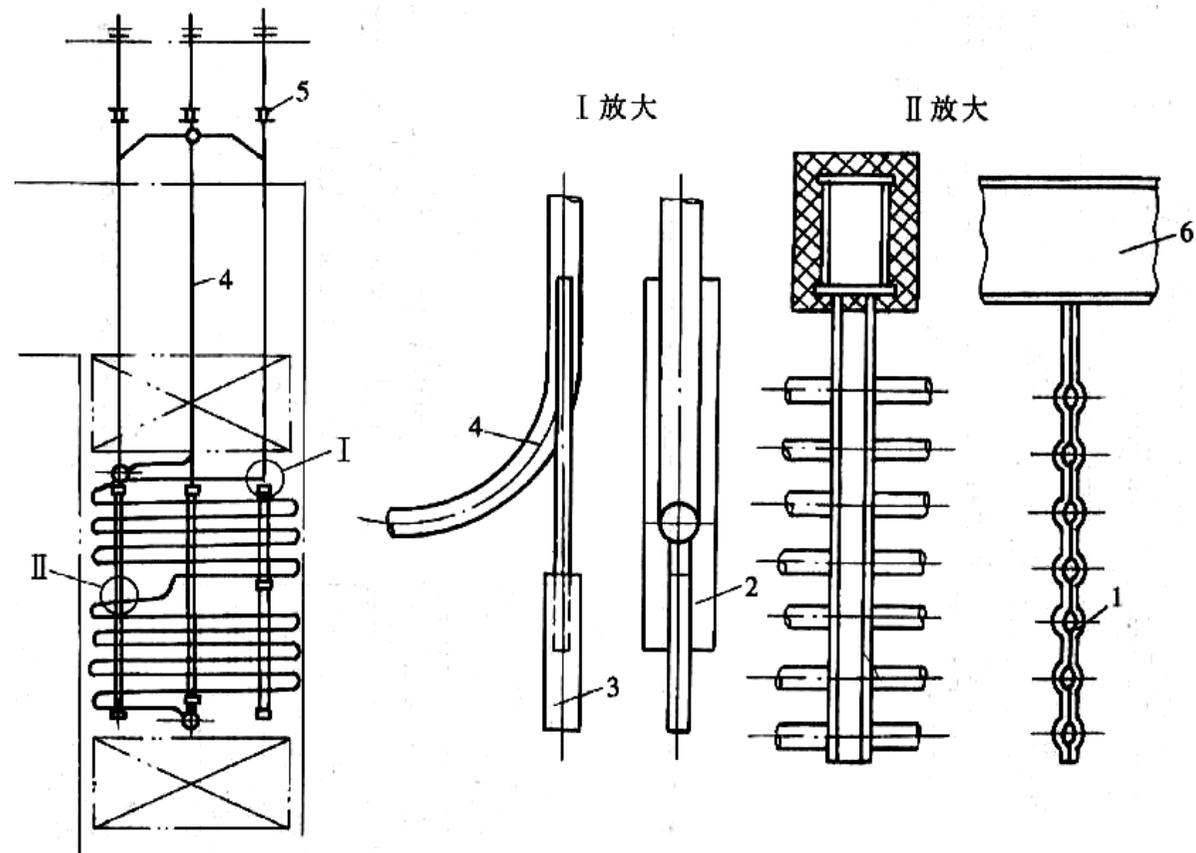


图8-4 卧式对流过热器及其吊挂结构
 1—管夹； 2、3—连接扁钢； 4—悬吊管； 5—过渡梁； 6—横梁

3.蛇形管排列方式： 顺列、错列

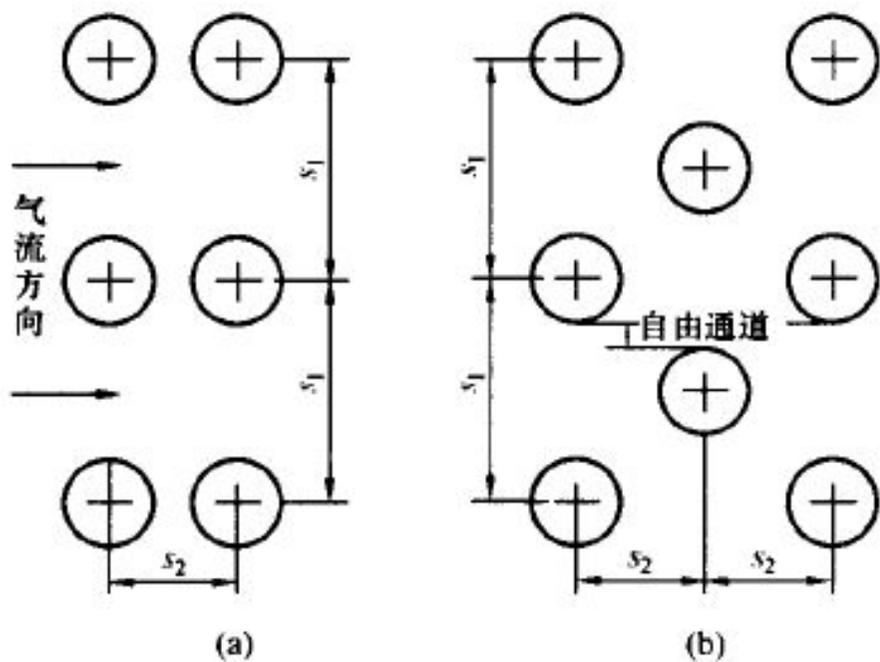


图 8-5 管子的排列方式
(a) 顺列；(b) 错列

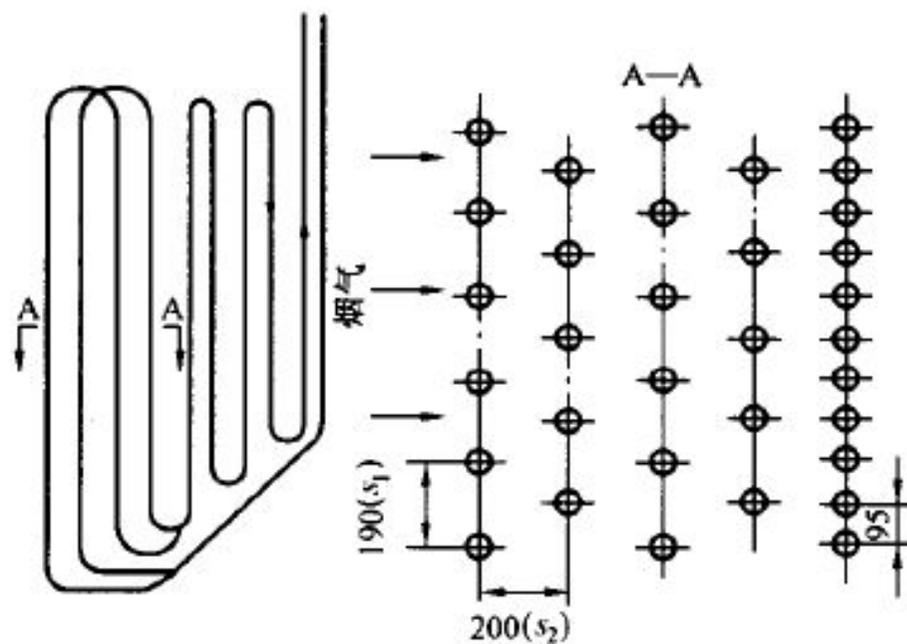


图 8-6 靠近炉膛出口处的
对流过热器管束结构

4.蛇形管结构:

横向节距选取（取决于烟）、

纵向节距（决定于管子弯曲半径）

管圈数（取决于烟速、工质流速）

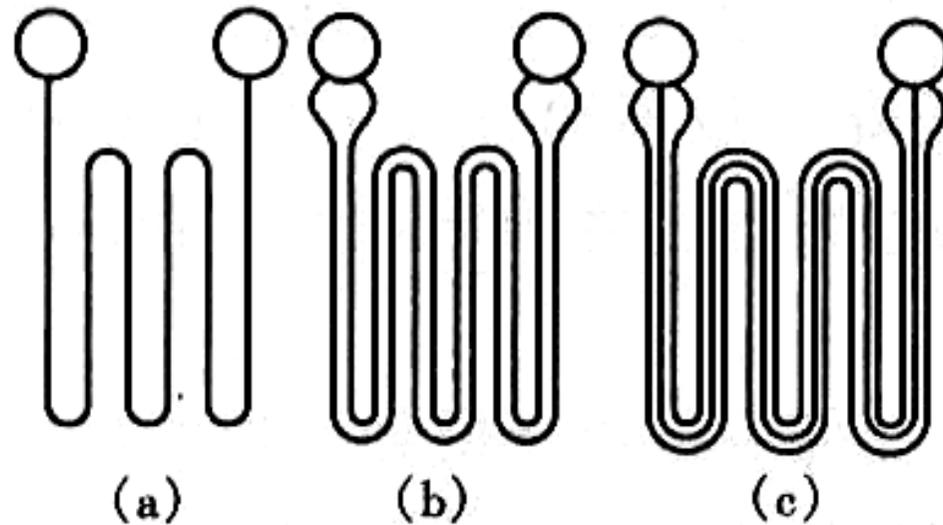
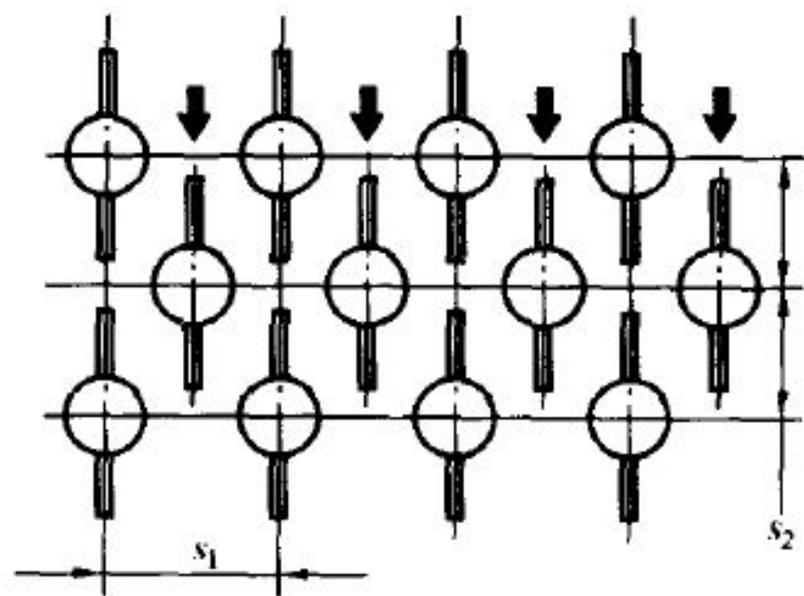
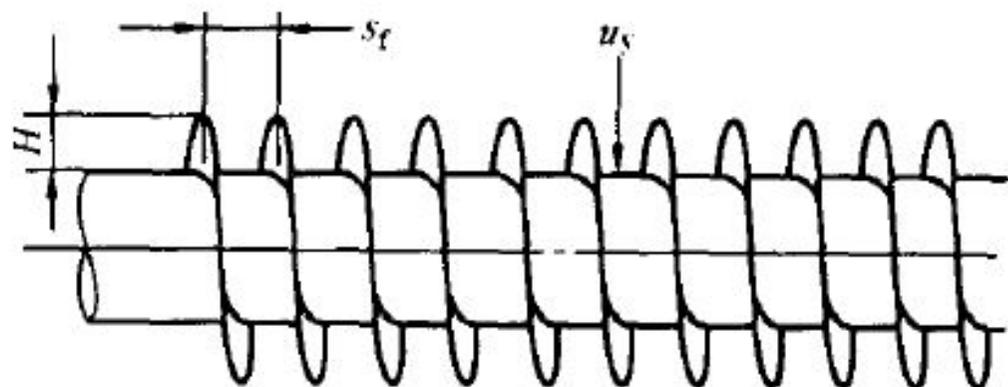


图8-7 对流过热器的管圈结构
(a) 单管圈； (b) 双管圈； (c) 多管圈



(a)



(b)

图 8-8 对流过热器的鳍片管或肋片管

(a) 鳍片管束; (b) 横肋片管

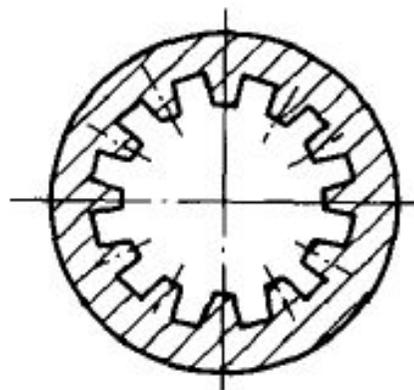


图 8-9 用于再热器的纵向内肋片管断面的

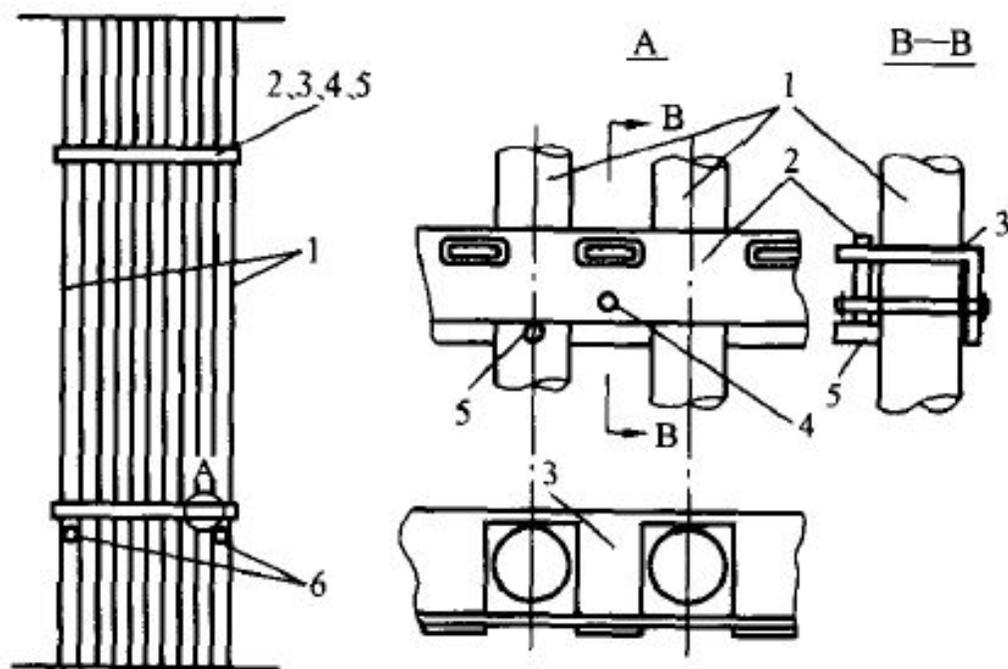


图 8-10 带状管夹与汽冷定位管
 1—蛇形管；2—扁钢；3—梳形弯管；4—圆柱销；
 5—支撑圆钢；6—汽冷定位管

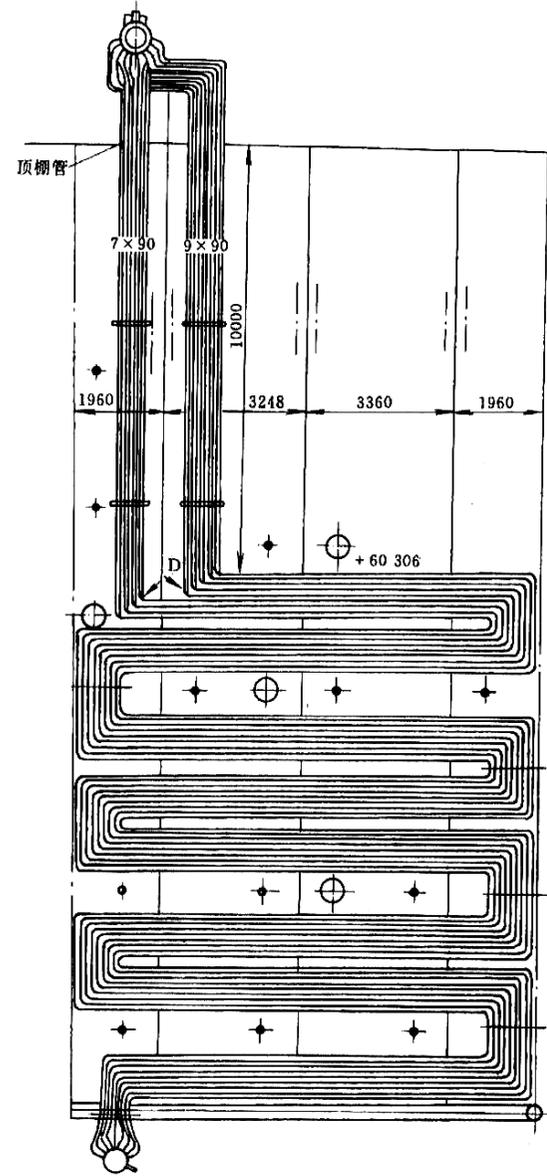
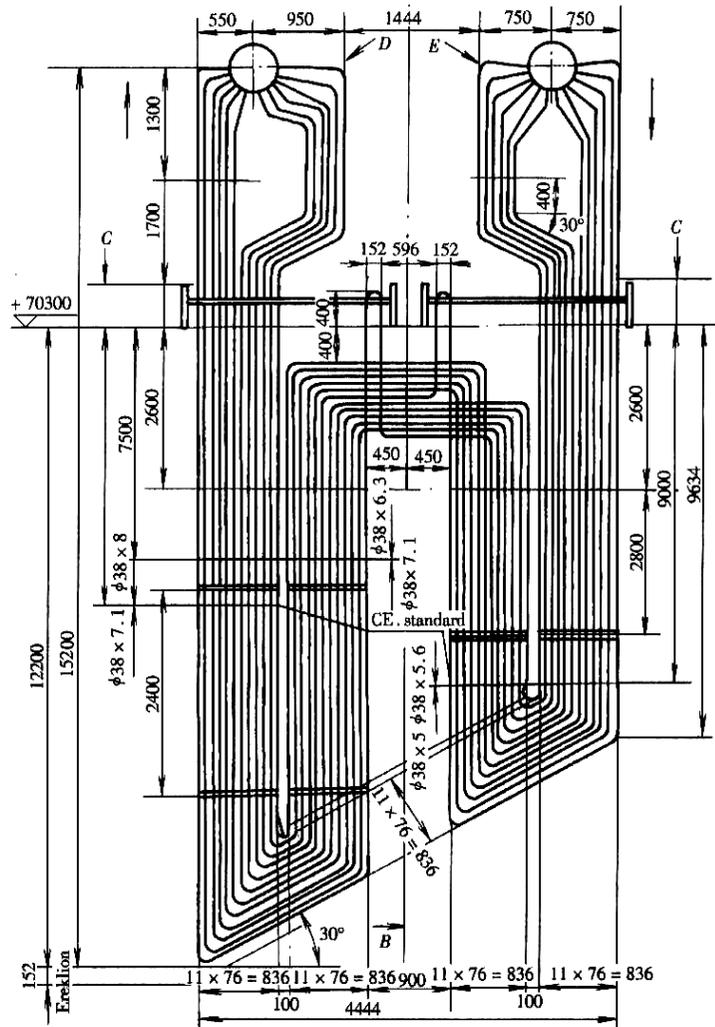
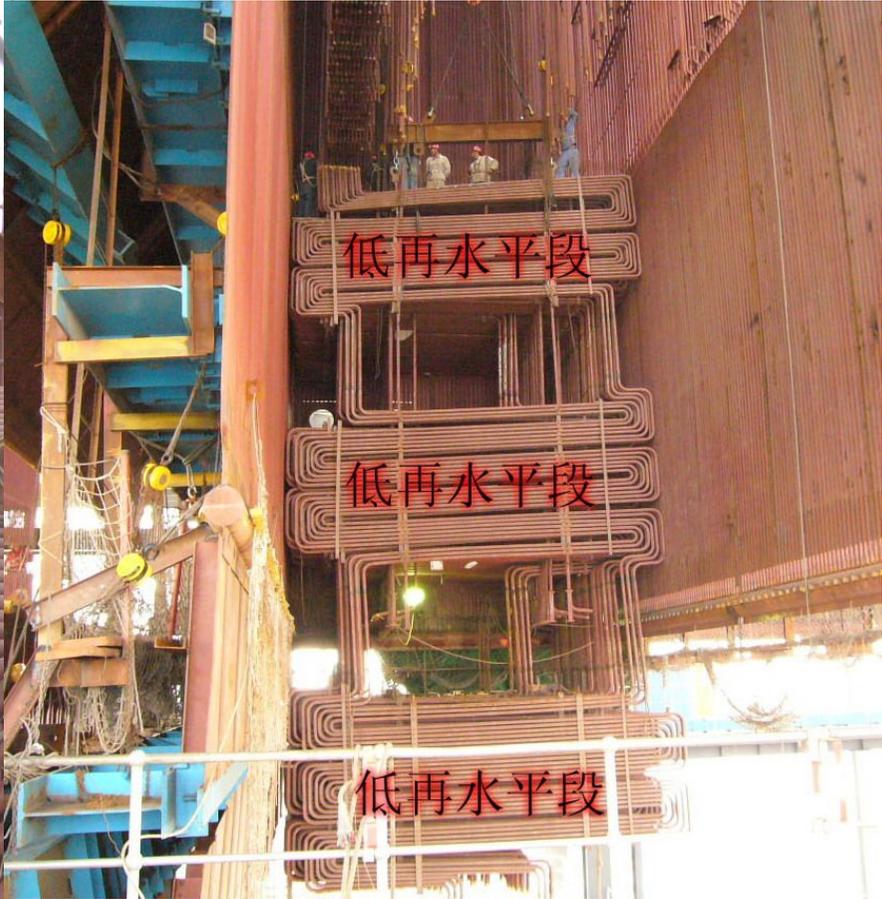


图8-11 某锅炉高温对流过热器和低温对流再热器结构实例
 (a) 高温对流过热器； (b) 低温对流再热器



低温再热器
垂直管段
管径51 壁厚4.5
材料12Cr1MoV

低温再热器垂直管段
管径 $\phi 51 \times 4.5$
材料 12Cr1MoV
施工组长: 杨森



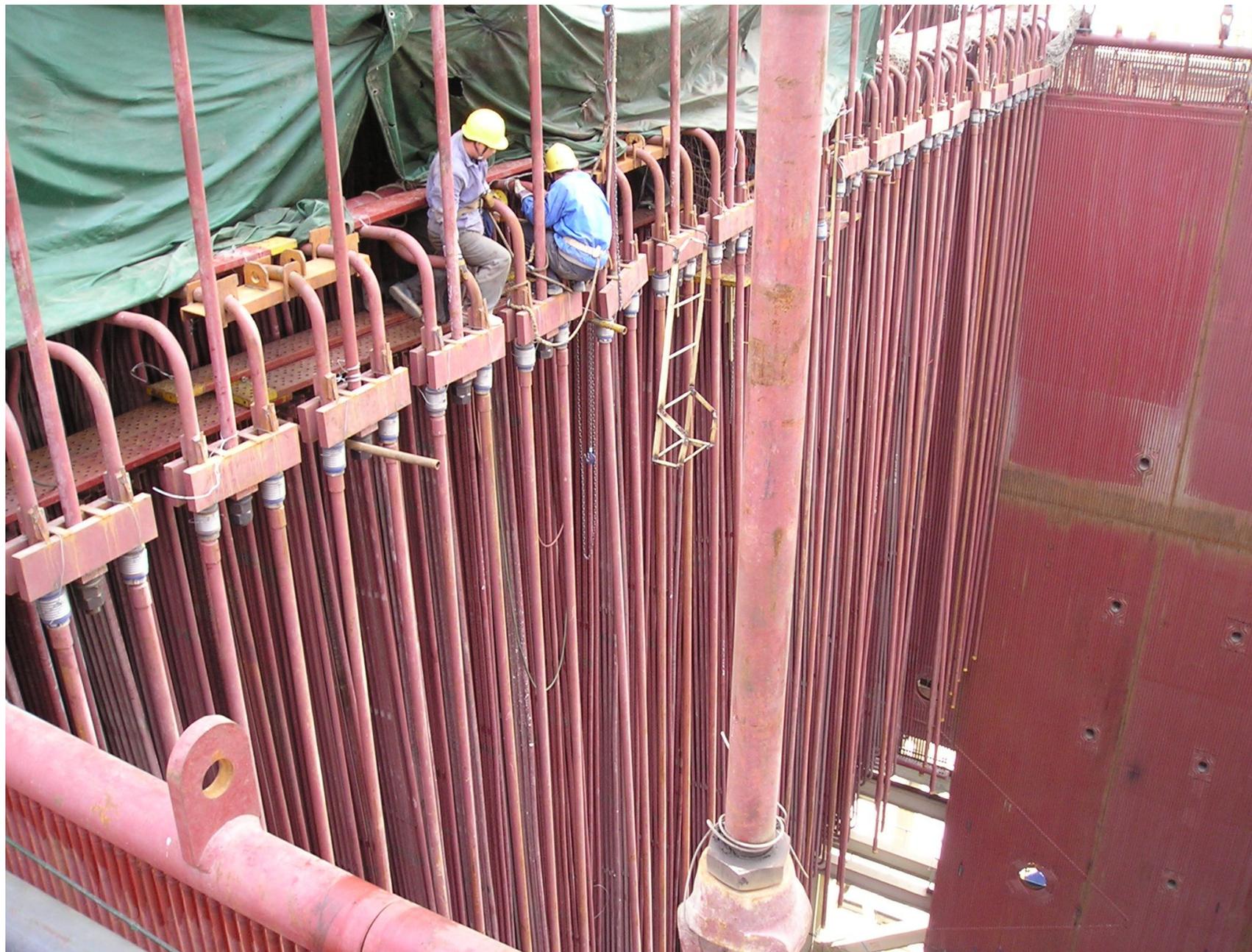
低再水平段

低再水平段

低再水平段



低再水平段出口



高温过热器

二、辐射和半辐射式过热器、再热器

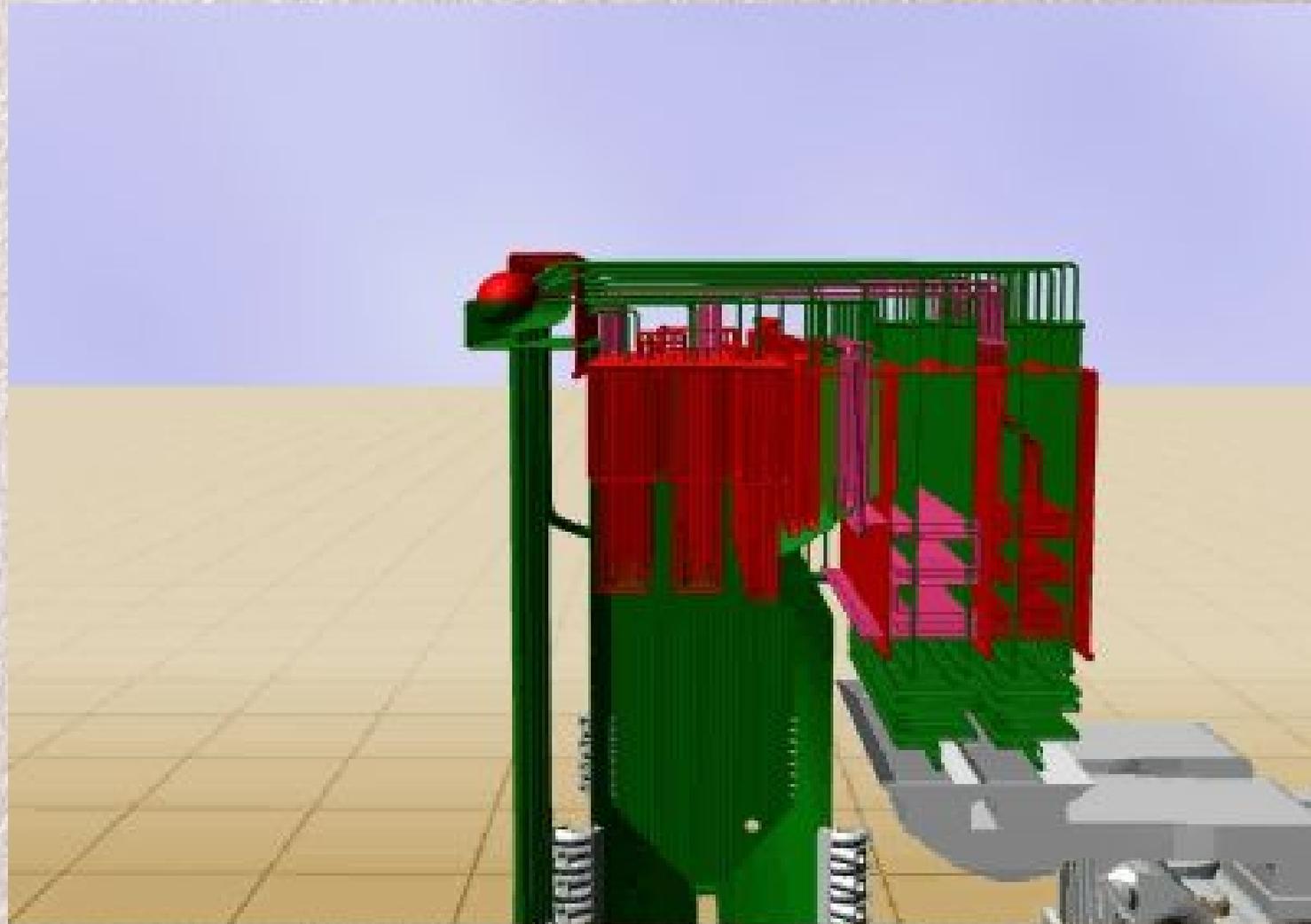
➤ 辐射式：前屏、大屏、壁式、顶棚、包覆

屏式

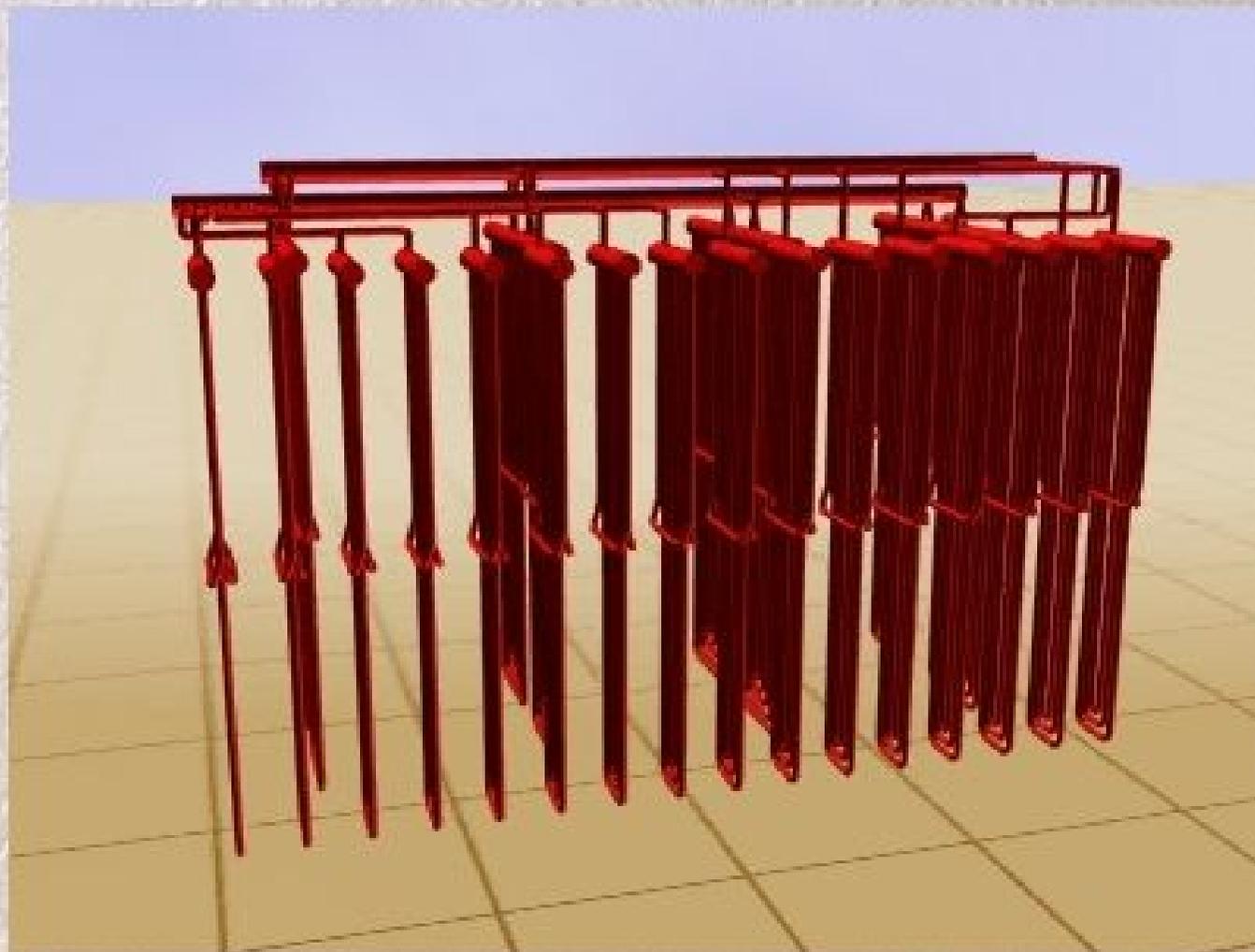
墙式

➤ 半辐射式：后屏

屏式过热器



屏式过热器



1.前屏和大屏

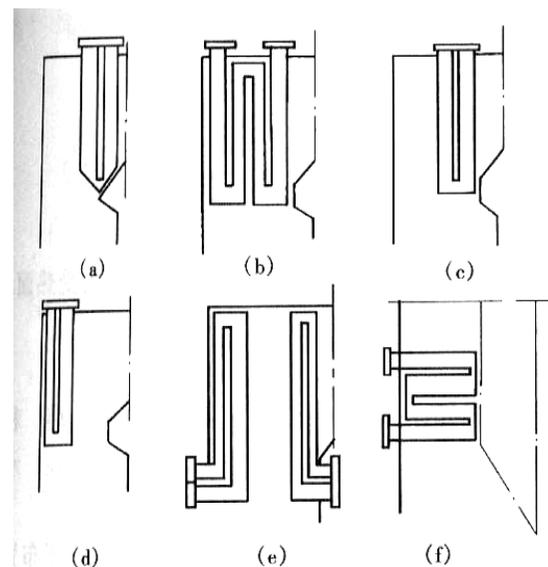


图8-12 屏式过热器的典型布置
 (a)后屏； (b)大屏； (c)半大屏； (d)前屏； (e)能疏水的屏； (f)卧式屏

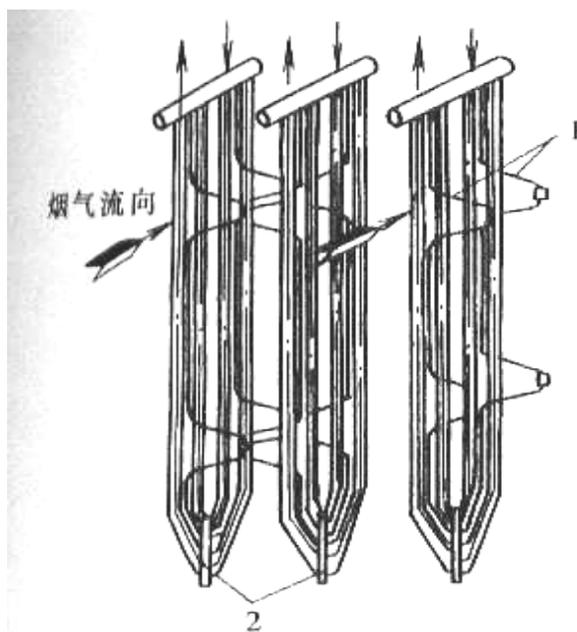


图8-13 屏式过热器结构及屏间定位
 1—连接管； 2—扎紧管

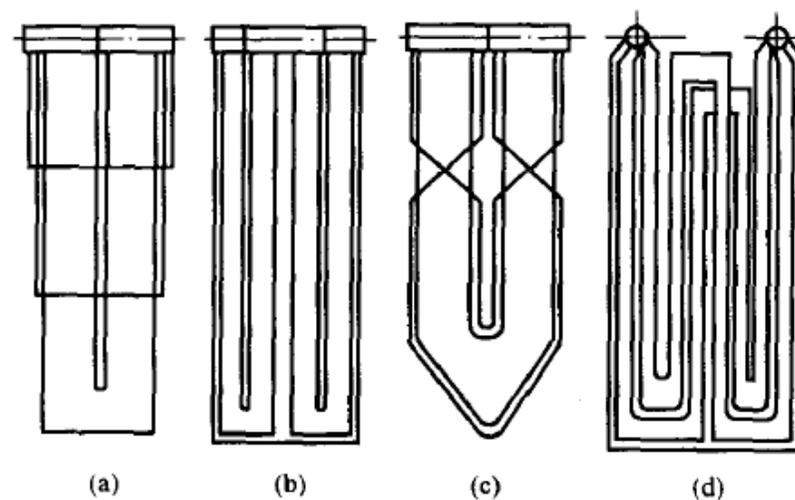


图 8 - 14 屏的外圈管减小热偏差的措施
 (a) 外圈管子截短； (b) 外圈管子短路；
 (c) 内外圈管子交叉； (d) 内外圈管子交换

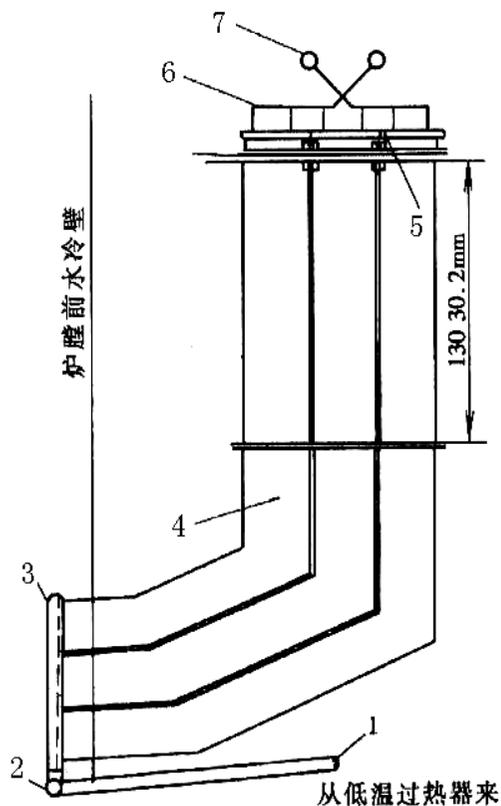
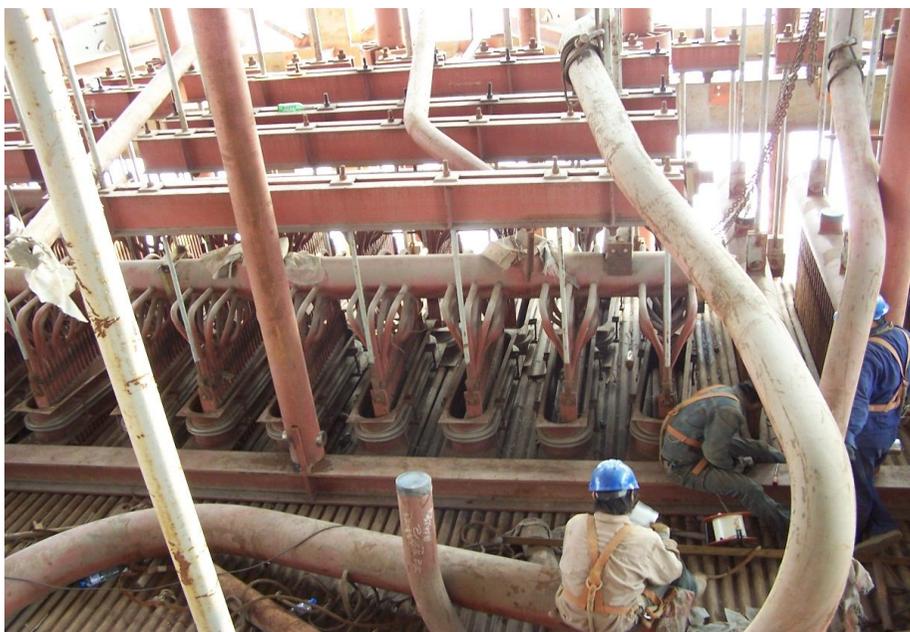
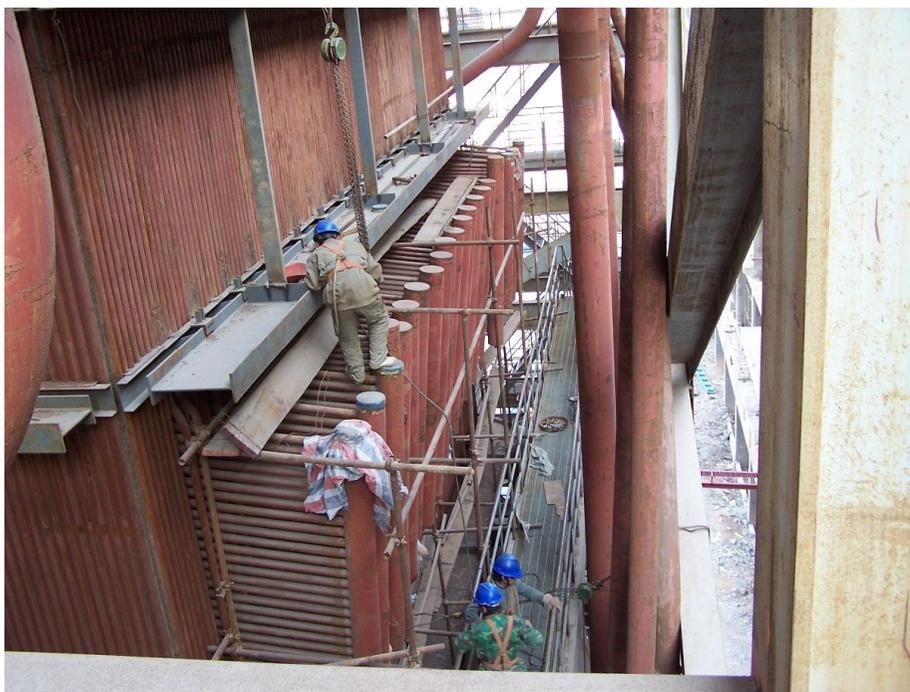


图8-15 某2020t/h亚临界压力自然循环锅炉的前屏过热器
1—低过至前屏的连接管；2—前屏总入口联箱；3—各屏入口联箱；4—前屏；5—出口联箱；6—出口联箱至减温器的连接管；7—二级减温器

过热器——前屏



过热器——前屏



在炉膛里向前看，前屏过热器的中部。与后屏过热器相比，前屏过热器的横向节距较大。

过热器——前屏



Navigation controls including a blue right arrow button, a yellow up arrow button, and a pink down arrow button.

过热器前屏位于炉膛的上部，其作用是吸收炉膛上部辐射热，使过热蒸汽温度进一步升高。

2.后屏

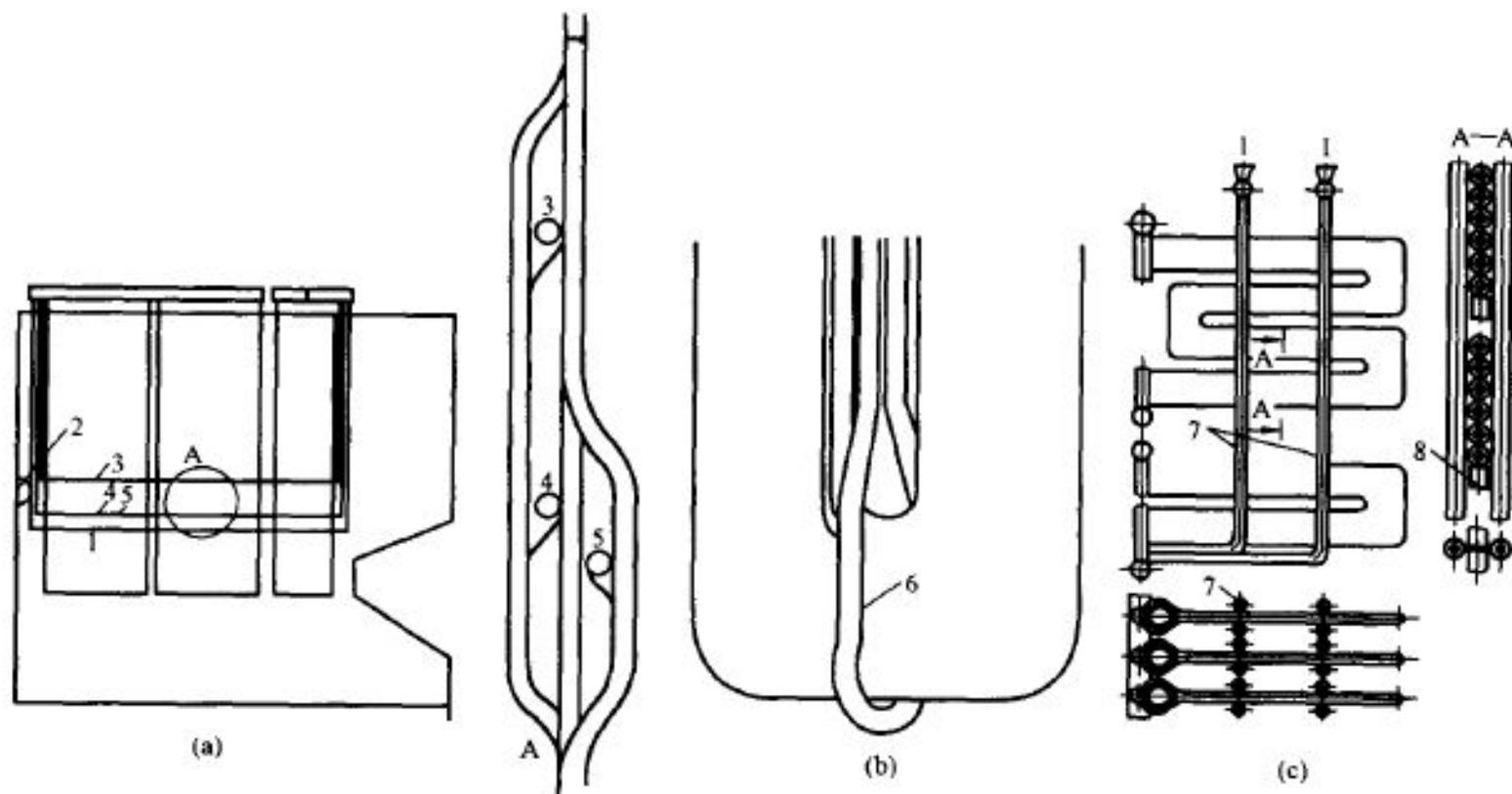


图 8-16 汽冷管夹类型

(a) 固定屏间距与平整管屏的汽冷管夹；(b) 屏底部的汽冷管夹；(c) 水平布置屏的汽冷管夹

1、3、4、5、6、7—汽冷管夹；2—水冷壁拉件；8—支承管子的结构

过热器——后屏



在炉膛里仰视，这是后屏过热器
上部，上面为顶棚过热器，后屏过
热器出来的蒸汽送往高温过热器。

3. 墙式过热器和再热器

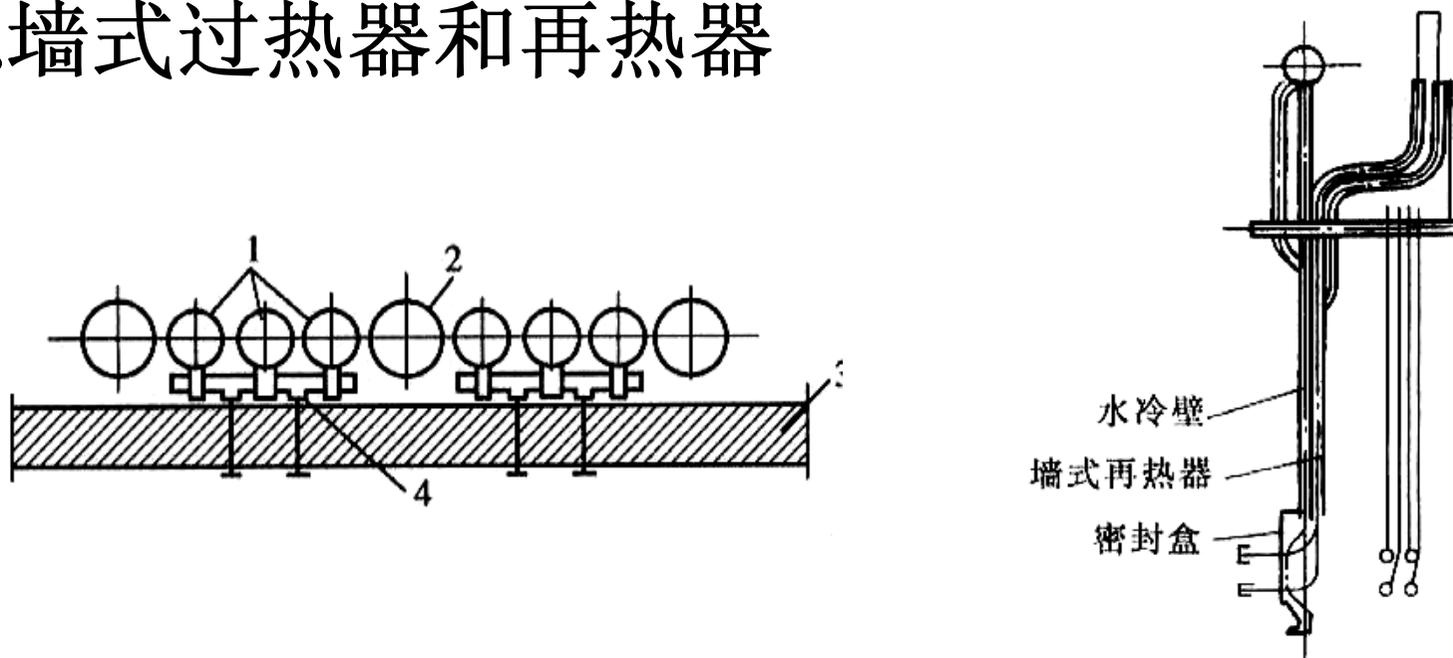


图8-17 壁式过（再）热器的结构及布置

(a) 墙式过热器与水冷壁间隔布置； (b) 墙式过热器贴水冷壁布置

1—墙式辐射过热器； 2—水冷壁管； 3—炉墙； 4—固定支架

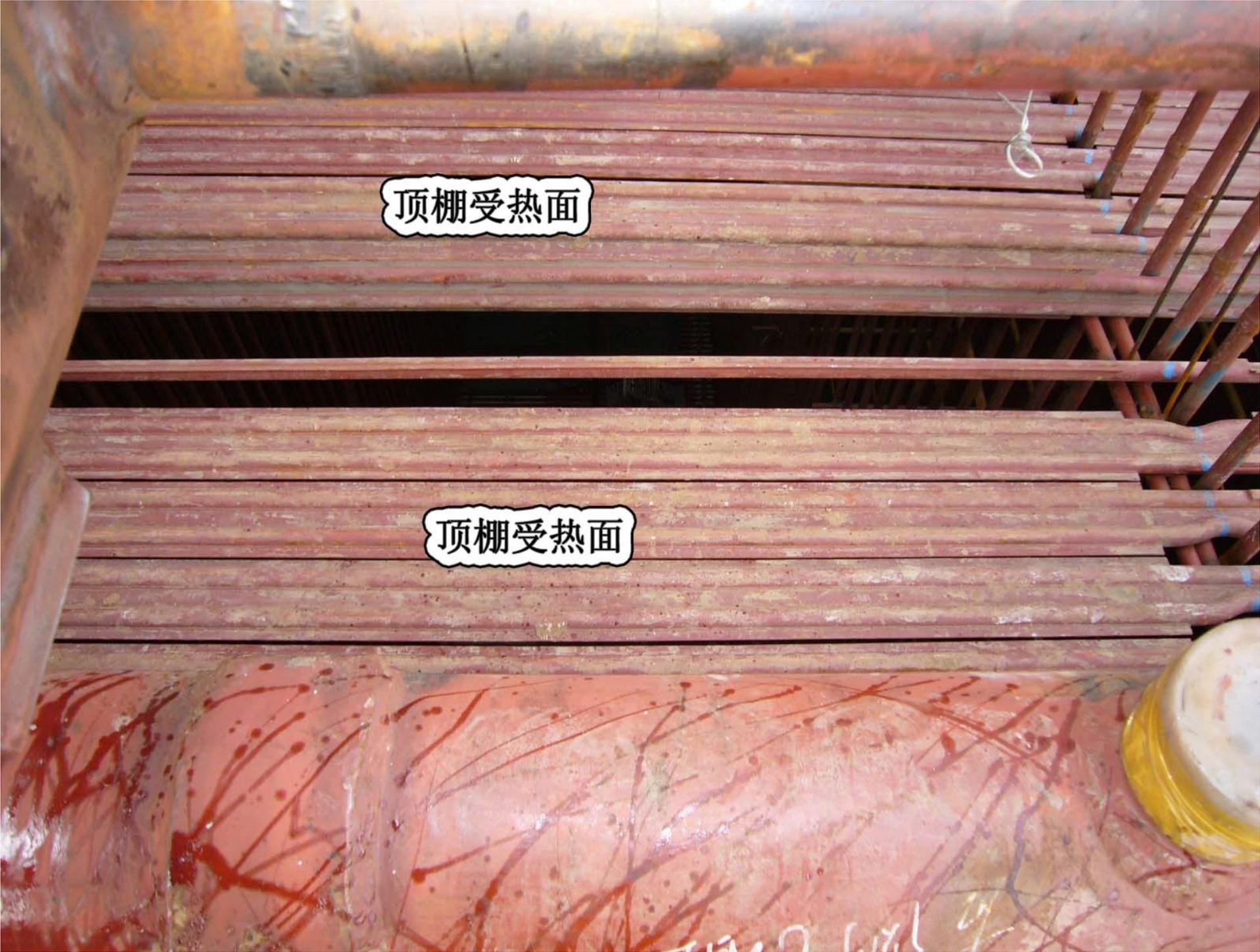
三、顶棚和包覆过热器

- **顶棚：**布置在炉膛顶部，采用膜式结构，简化炉顶的结构
- **包覆过热器：**布置在水平和竖井烟道的墙壁上，简化烟道结构

过热器——顶棚包覆



这是顶棚过热器管和悬吊顶棚过热器
的吊杆，顶棚管通过吊杆悬吊在
炉顶大板梁上。



顶棚受热面

顶棚受热面

四、汽温特性

1.概念: $t=f(D)$

2.不同型式过热器汽温特性

➤ 对流式: $D \uparrow \rightarrow t \uparrow$

➤ 辐射式: $D \uparrow \rightarrow t \downarrow$

➤ 半辐射式: 平缓

组合式过热器系统:

呈半辐射式 (微对流特性)

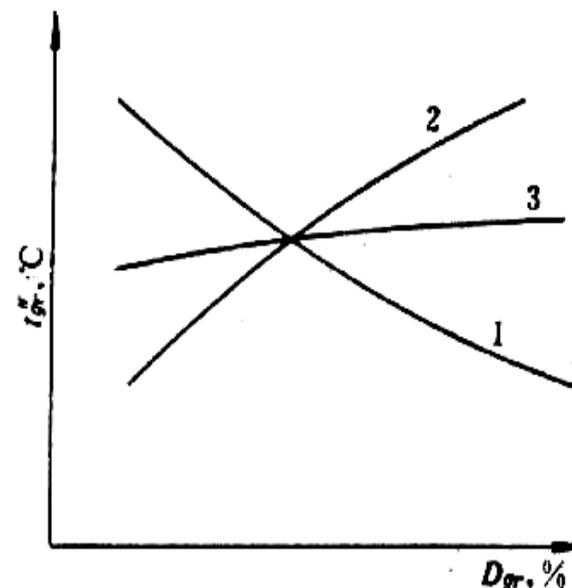


图8-18过热器与再热器的
汽温特性

1—辐射式过热器; 2—对
流式过热器; 3—半辐射式
过热器

五、大型锅炉过热器、再热器系统

- 典型过热器系统：

- 汽包—顶棚（辐射）—包覆（辐射）—低过（对流）—前屏（辐射）—后屏（半辐射）—高过（对流）—汽轮机高压缸

- 典型再热器系统：

- (1) 汽轮机高压缸排汽—低温对流再热器—高温对流再热器——汽轮机中压缸

- (2) 汽轮机高压缸排汽—墙式辐射再热器—半辐射屏式再热器—高温对流再热器——汽轮机中压缸

第三节 热偏差

一、热偏差的概念

- 热偏差：管组中个别管子的焓增偏离管组平均焓增的现象。
- 热偏差系数：偏差管的焓增与管组的平均焓增的比值称为热偏差系数，用 φ 表示，则

$$\varphi = \frac{\Delta i_p}{\Delta i_0}$$

$$\varphi = \frac{q_p F_p}{G_p} \bigg/ \frac{q_0 F_0}{G_0} = \frac{q_p}{q_0} \frac{F_p}{F_0} \frac{G_0}{G_p} = \frac{\eta_q \eta_F}{\eta_G}$$

- 影响热偏差的因素：热负荷不均、结构不均和流量不均

二、影响热偏差的因素

1.吸热不均

(1) 受热面的污染

(2) 炉内温度场和速度场不均

- 炉膛温度场和速度场不均的延续，中间温度、烟速高于两侧
- 燃烧器设计或锅炉运行等原因，如风速不均、煤粉浓度不均、火焰中心的偏斜、四角切圆燃烧所产生的旋转气流在对流烟道中的残余旋转等
- 横向节距不均匀形成的烟气走廊
- 屏式过热器，外圈管受热强于内圈管，但流量最少

2.流量不均

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \left(\sum \xi + \lambda \frac{l}{d} \right) \frac{\rho w^2}{2} \pm \rho g h = KG^2 / \rho \pm \rho g h$$

忽略重位压头

$$\Delta p = KG^2 / \rho$$

即有：

$$G = \sqrt{\frac{\Delta p \cdot \rho}{K}}$$

G 的影响因素： Δp 、 ρ 、 K

(1) 管圈进出口压差（取决于联箱连接方式）

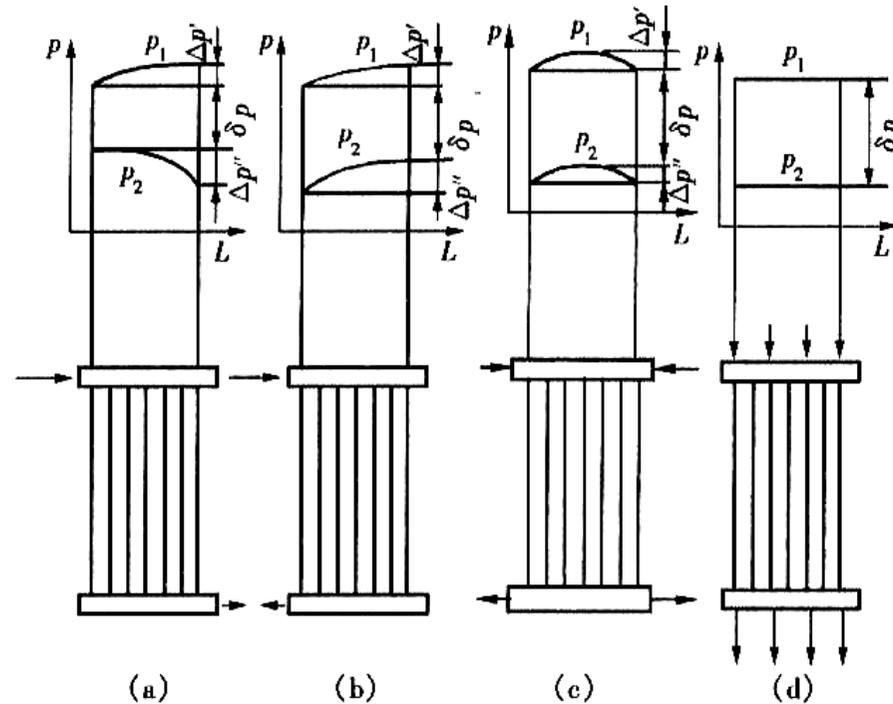


图8-24 不同连接方式联箱的压力分布

(a)Z型连接；(b)U型连接；(c)双Π型连接；(d)多点引入、引出型连接
 δp —管圈的阻力； $\Delta p'$ —进口联箱中压降； $\Delta p''$ —出口联箱中压降

结论：Z型最不均匀，U型较好，多点引入引出最均匀

(2) 管内工质密度（取决于吸热量的差别）

➤ 吸热量越多，蒸汽温度越高，密度越小，流量也就越少；

➤ 吸热量越少，密度越大，流量越多。

（吸热不均导致流量不均——强制流动特性：吸热多流量少）

(3) 管子的阻力系数

阻力系数越大，管子内部的流量越少

三、减轻热偏差的措施

- 设计上：

- (1) 将受热面分级，并进行级间混合。
- (2) 两级间进行左右交叉流动，以消除烟道两侧烟温偏差
- (3) 蒸气引入引出联箱时避免采用Z型连接，应采用U型连接或多管引入引出的连接。
- (4) 适当均衡并列各管的长度和吸热量，增大分管段的管径，减少其阻力，受热面可按受热条件、壁温工况采用不同材料、不同管径。

(5) 减少炉膛出口烟气残余旋转，以减少炉膛出口及水平烟道左右烟温偏差

(6) 对于屏式过热器，对其外圈管采取措施改善其受热条件。

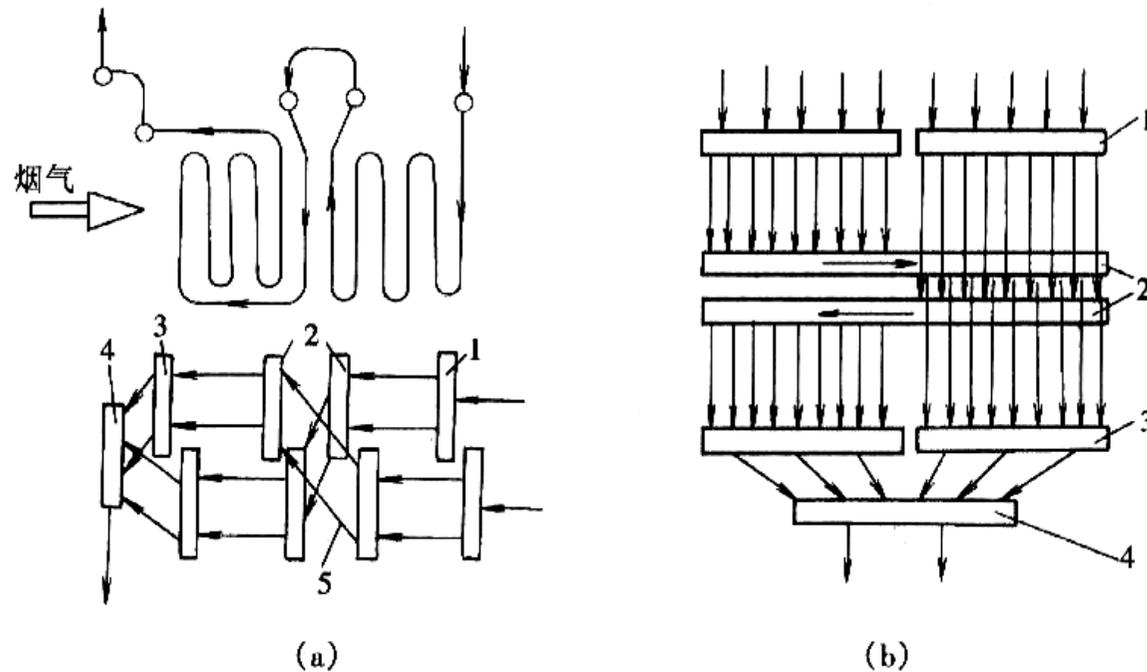


图8-25 蒸汽左右交叉流动连接系统
(a)利用蒸汽连接管进行交换； (b)利用中间联箱进行交换

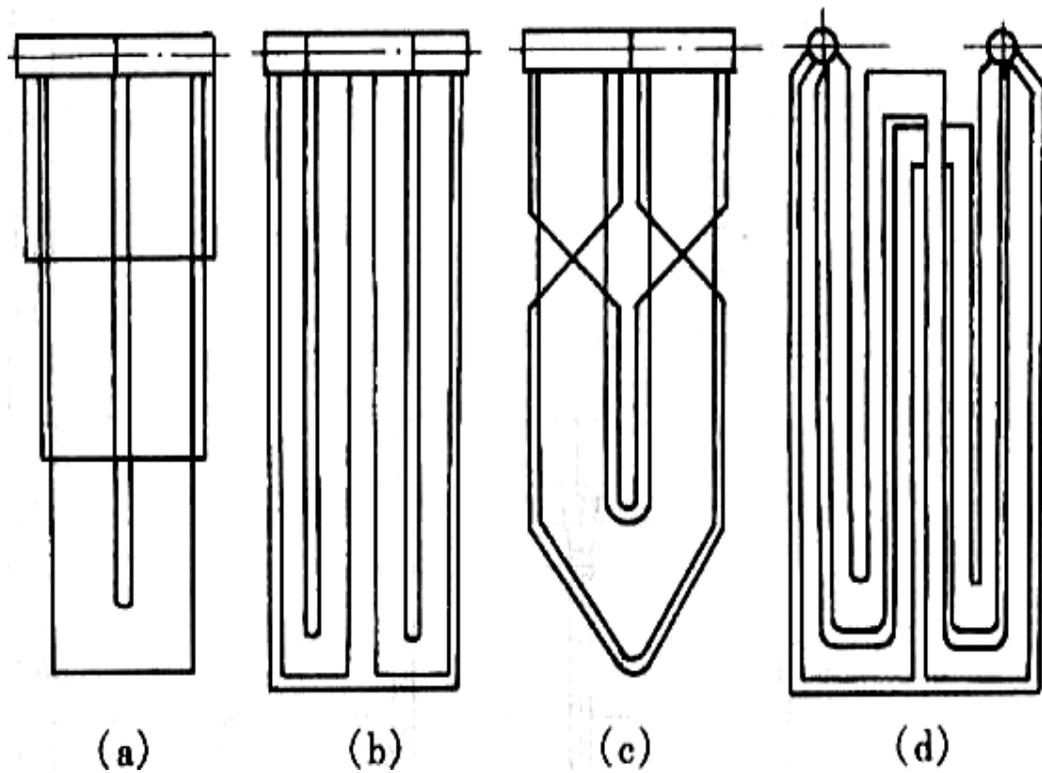


图8-14 屏的外圈管减小热偏差的措施
(a)外圈管子截短； (b)外圈管子短路； (c)内外圈管子交叉；
(d) 内外圈管子交换

● 运行措施：

- (1) 设备投运前做好炉内冷态空气动力场试验和燃烧调整试验，为正常运行调整提供依据；
- (2) 在正常运行时，正确进行燃烧调整，保证燃烧稳定，以减少烟温、烟速不均；
- (3) 保持受热面清洁。及时吹灰，打渣。

四、过热器热偏差的计算（略）

5个假设

$$\frac{\Delta G}{G_0} = -\frac{1}{4} \frac{\Delta Q}{c_{p0} G_0 T_0} = -\frac{1}{4} \frac{(T_2 - T_1)_0}{T_0} \cdot \frac{\Delta Q}{Q_0} = -\frac{1}{4} \frac{(t_2 - t_1)_0}{(t_0 + 273)} \cdot \frac{\Delta Q}{Q_0}$$

第四节 蒸汽温度的影响因素及调节

一、蒸汽温度的影响因素

1. 锅炉负荷

锅炉负荷 ↑ (或 ↓)  汽温也 ↑ (或 ↓)

2. 过量空气系数

过量空气系数 ↑  燃烧生成的烟气量 ↑，
烟气流速 ↑，对流传热 ↑，导致过热汽温 ↑

3. 给水温度

给水温度 ↓  产生一定蒸汽量所需的燃料量 ↑，燃烧产物的容积 ↑，同时炉膛出口烟温 ↑，所以，过热汽温 ↑

4. 受热面的污染情况

炉膛受热面的结渣或积灰：过热汽温 ↑

过热器本身的结渣或积灰：汽温 ↓

5. 饱和蒸汽用汽量

6. 燃烧器的运行方式

7. 燃料种类和成分

煤粉锅炉中，煤粉变粗，水分增大或灰分增加，都会使过热汽温有所提高

二、蒸汽温度的调节

- 对蒸汽温度调节设备的基本要求：
 - (1) 设备结构简单，运行可靠。
 - (2) 调节灵敏，汽温偏差小，且易于实现自动化。
 - (3) 不影响锅炉或热力系统的效率。
 - (4) 在一定的负荷范围内（60%~100%）保持额定的蒸汽温度。
- 蒸汽温度调节方法：蒸汽侧、烟气侧

（一）蒸气侧调节汽温

1. 表面式减温器（中小容量炉用）
2. 汽—汽热交换器（用过热蒸汽来加热再热蒸汽，主调再热蒸汽温度）

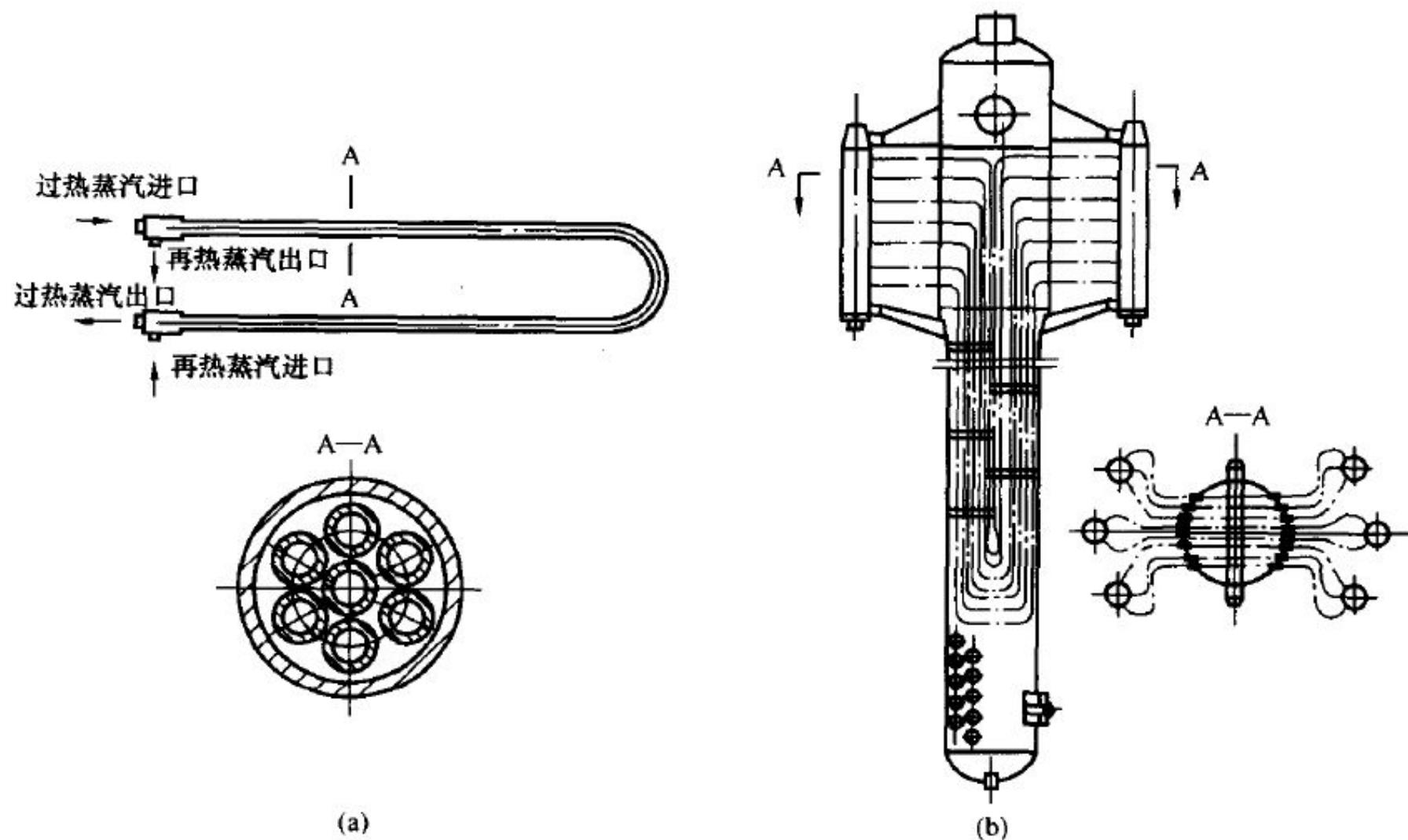
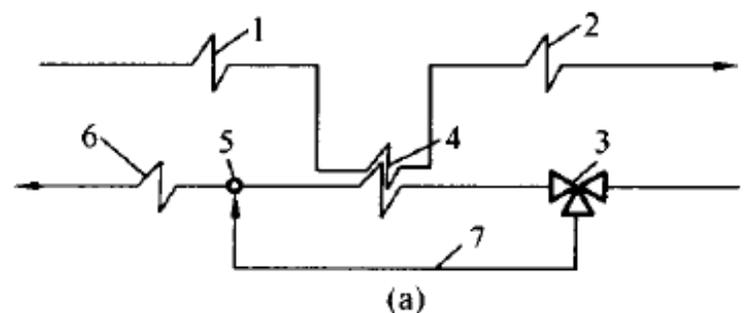
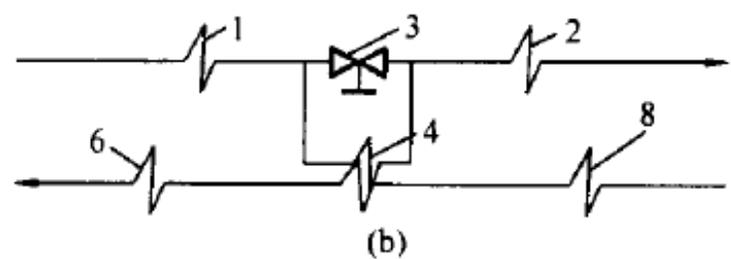


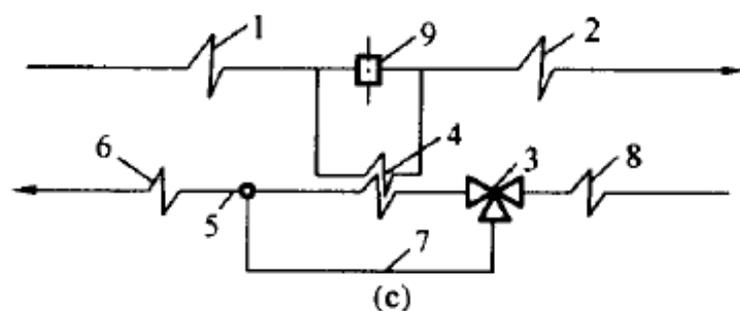
图 8-26 汽-汽热交换器的结构
 (a) 管式; (b) 筒式



(a)



(b)



(c)

图 8-27 汽-汽热交换器在系统中的连接
 (a) 改变再热蒸汽流量; (b) 改变过热蒸汽流量;
 (c) 同时改变再热蒸汽和过热蒸汽流量
 1—辐射与半辐射过热器; 2—对流过热器; 3—旁路调节阀; 4—汽-汽热交换器; 5—混和器; 6—对流再热器; 7—旁路阀; 8—对流再热器; 9—节流孔板

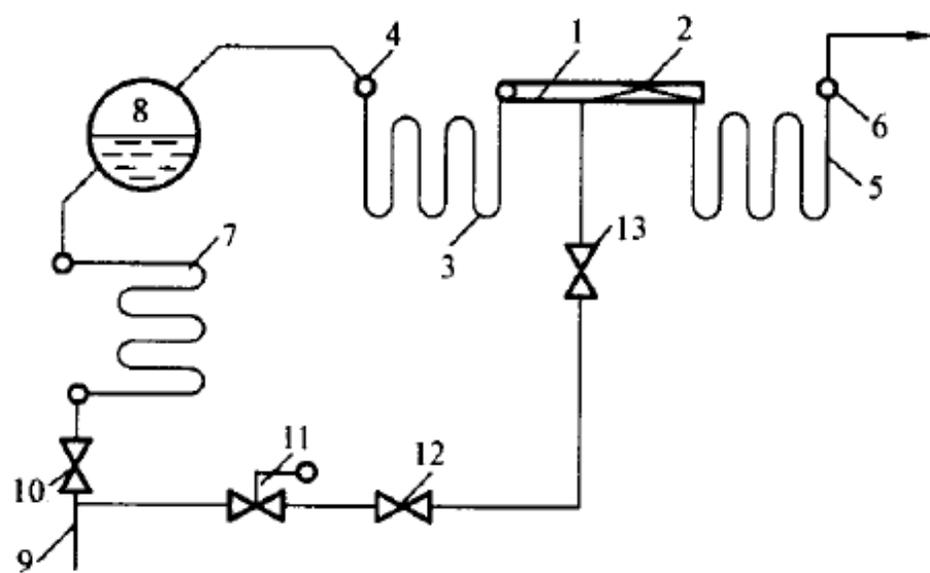


图 8-28 锅炉给水做减温水的连接系统
 1—喷头; 2—联箱; 3、5—过热器蛇形管;
 4、6—蒸汽进出口联箱; 7—省煤器; 8—汽包;
 9—给水管; 10—给水阀; 11—喷水调节阀;
 12—止回阀; 13—隔离阀

3. 喷水减温器

(1) 喷水减温器的调温原理及特点

- **原理**：将减温水通过喷嘴雾化后直接喷入过热蒸汽中，使其雾化、吸热蒸发，达到降低蒸汽温度的目的
- **特点**：喷水减温器结构简单，调节幅度大，惯性小，调节灵敏，有利于自动调节
- **减温水**：锅炉给水（大容量锅炉用）或自制凝结水（小容量炉用）

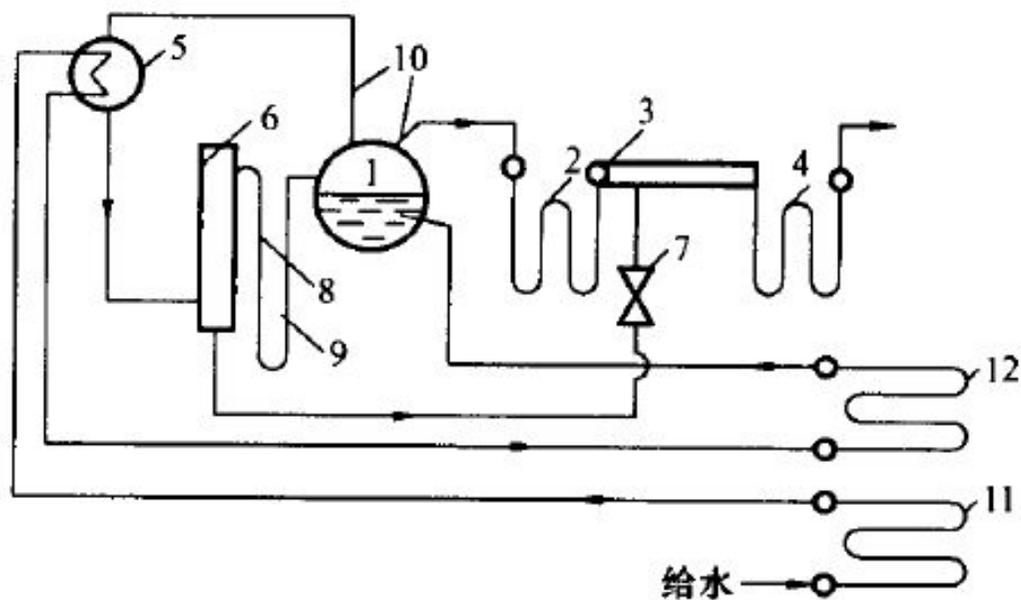


图 8-29 自制凝结水减温水系统

1—汽包；2、4—过热器；3—喷水减温器；5—冷凝器；6—贮水器；7—喷水调节阀；8—溢流管；9—水封；10—饱和蒸汽；11、12—省煤器

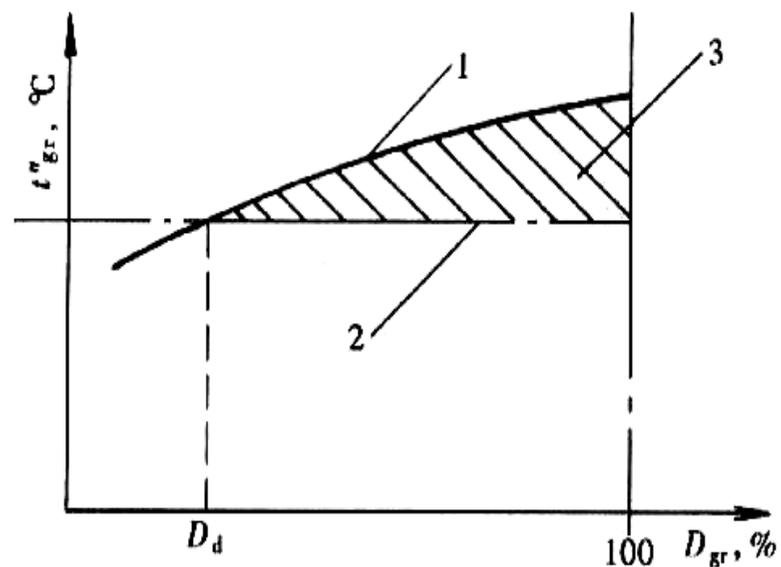


图8-30 喷水减温器调节汽温原理
1—汽温特性；2—额定汽温；3—减温器减温部分

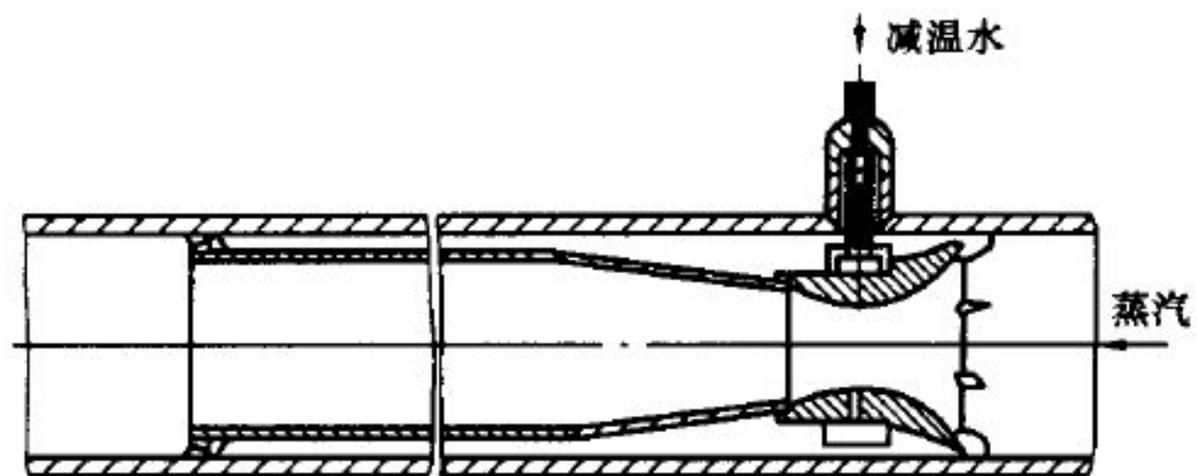


图 8 - 33 文氏管喷水减温器

(3) 减温器在过热器系统中的布置

- **布置原则：** 一是保证调温的灵敏性（出口端）
二是保护过热器不超温（入口端）

- **典型布置：**

汽包—顶棚—包覆—低过—前屏—后屏—高 过—

两级喷水减温（高压和超高压锅炉）：分别布置于后屏入口和高过入口

三级喷水减温（亚临界、超临界压力锅炉）：分别布置于前屏、后屏、高温对流过热器的入口

(二) 烟气侧调节汽温 (主调再热汽温)

1. 烟气挡板

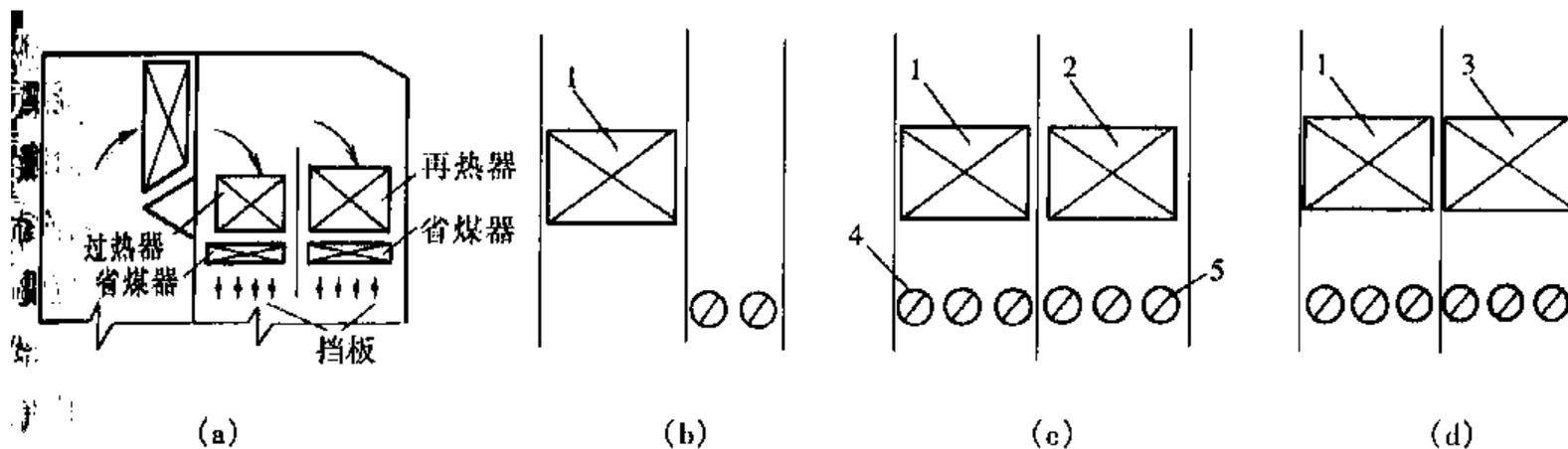


图8-34 烟气挡板调节汽温装置

(a)再热器与过热器并联结构；(b)旁通烟道；(c)再热器与过热器的平行烟道；(d)再热器与省煤器并联的平行烟道
1—再热器；2—过热器；3—省煤器；4、5—烟气挡板

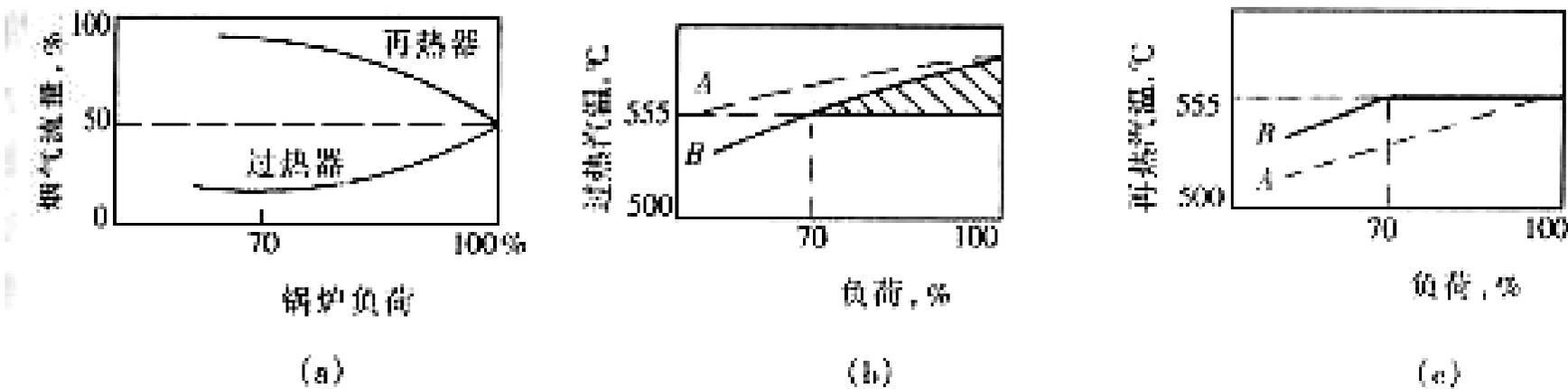


图8-35 再热器与过热器并联方式挡板调节汽温的原理

(a)再热器与过热器烟气流量随锅炉负荷的变化；(b)过热汽温随负荷变化；(c)再热汽温随负荷变化

A—调节前汽温；B—调节后汽温

2. 烟气再循环

将省煤器后的烟气（ $250\sim 350^{\circ}\text{C}$ ）由再循环风机抽出再送入炉膛，改变烟气的热容量，达到调节再热汽温的目的

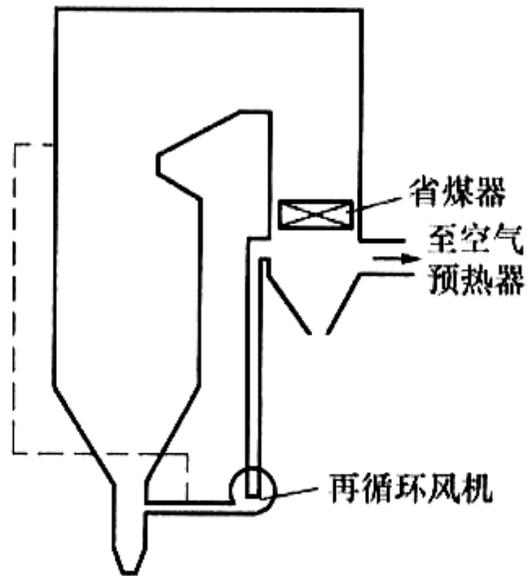


图8-36烟气再循环系统

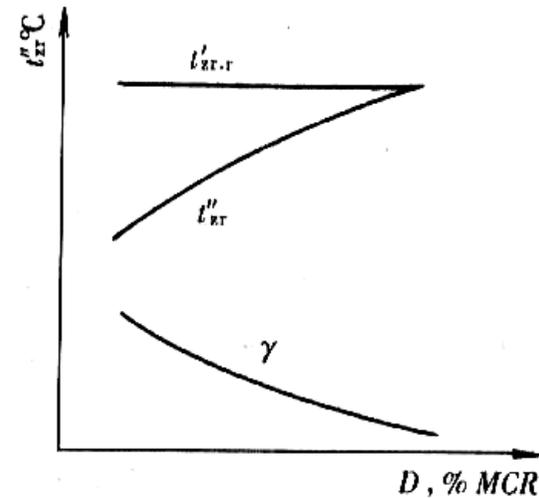
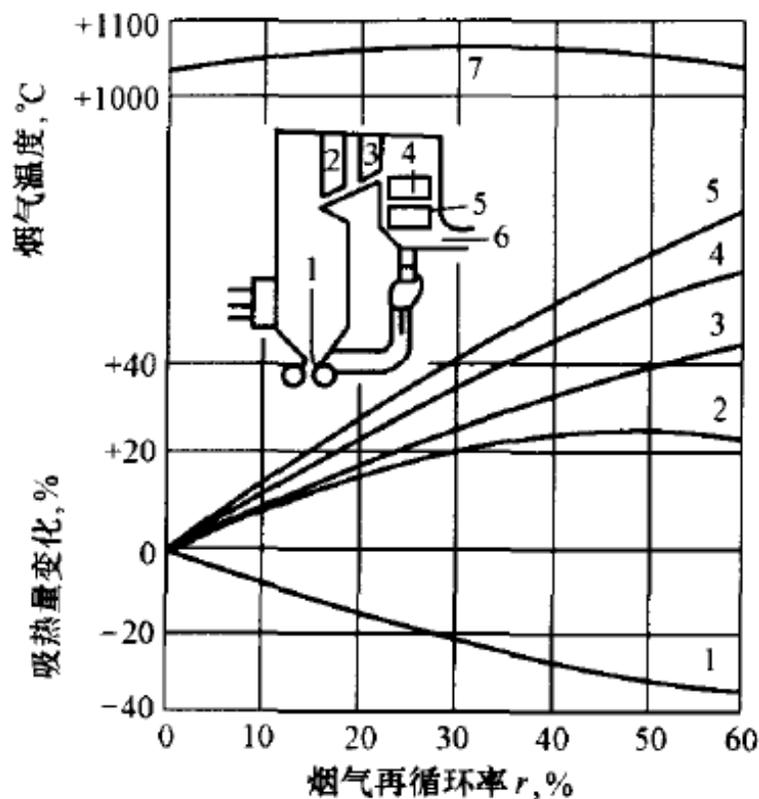
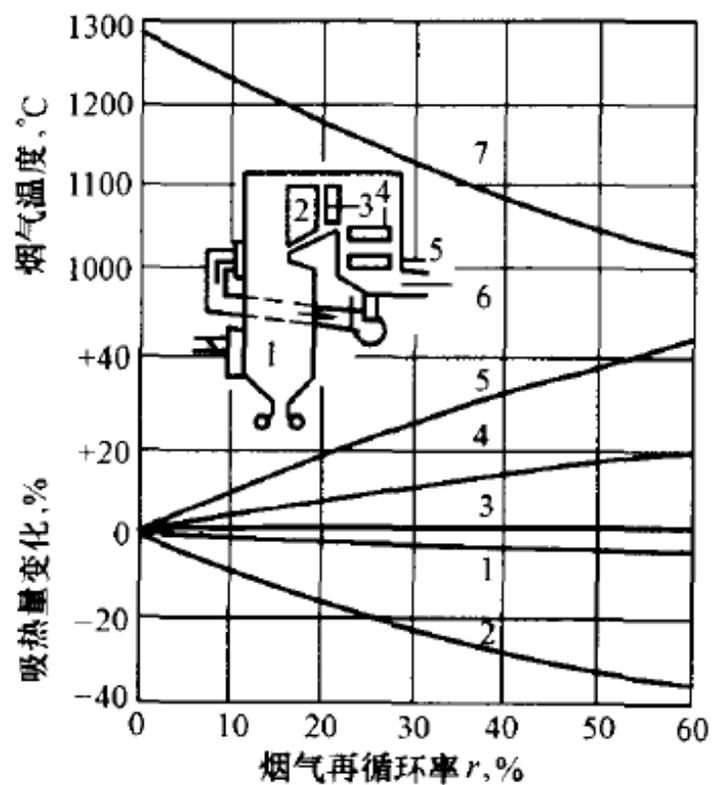


图8-38烟气再循环调节再热汽温



(a)



(b)

图 8-37 烟气再循环对锅炉热力特性的影响

(a) 再循环烟气从炉膛下部送入；(b) 再循环烟气从炉膛上部送入

1—炉膛；2—高温过热器；3—高温再热器；4—低温过热器；5—省煤器；6—去空气预热器；7—炉膛出口烟温

3. 摆动式燃烧器

- 调节摆动式燃烧器喷嘴的上下倾角，可以改变炉内火焰的中心位置，从而改变炉膛出口烟温，达到调节再热汽温的目的
- 负荷降低时，汽温降低，调高火焰中心位置；反之调低火焰中心位置。

第五节 高温积灰与高温腐蚀

一、高温积灰

1. 积灰的组成

内层——烧结强度

外层

2. 积灰的影响

传热热阻增加、烟气流动阻力增加、受热面腐蚀

3. 积灰的分类

低熔灰

中熔灰

高熔灰（主要）

4. 减少措施

设计时增大管子横向节距；

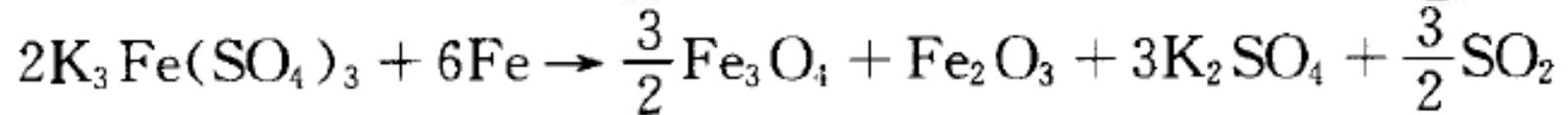
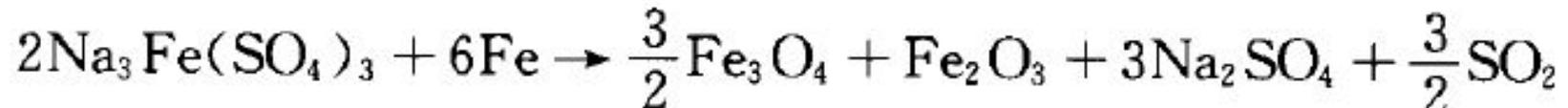
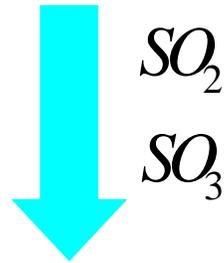
减少管束深度、采用立式管束；

装设高效吹灰器

二、高温腐蚀

1. 燃煤锅炉的高温腐蚀

由于管壁外存在高温黏结性灰层（碱性金属）



限制汽温来控制高温腐蚀

2. 燃油锅炉的高温腐蚀

高温区产生 V_2O_5 气体 + 灰中的 Na_2O

 钒腐蚀

采取措施：加入碱性添加剂、采用低氧燃烧
或添加金属锰及白云石等添加剂