

# 第十章 自然循环原理及计算

- 第一节 基本原理
- 第二节 汽水两相流的流型和传热
- 第三节 汽水两相流的流动特性参数及管内压力降
- 第四节 自然水循环的可靠性指标
- 第五节 自然水循环的基本计算
- 第六节 自然水循环常见问题及防止

# 第一节 自然循环的基本原理

## 一、自然循环的概念

自然循环：依靠汽水密度差推动工质在回路中流动的循环

## 二、自然循环的基本原理

### 1. 自然循环回路的总压差

压差法：

$$\sum \Delta p_{xj} = p_1 - p_0 = \bar{\rho}_{xj}gh - \Delta p_{xj}$$

$$\sum \Delta p_{ss} = p_2 - p_0 = \bar{\rho}_{ss}gh + \Delta p_{ss}$$

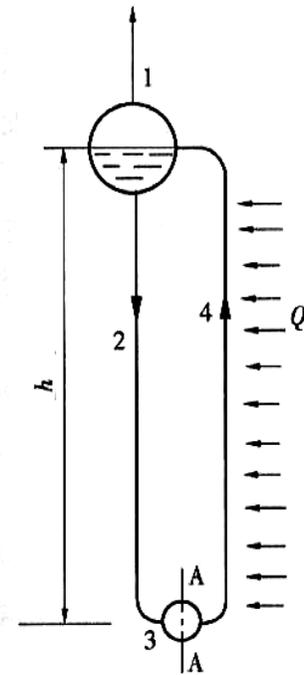


图10-1 循环回路示意图  
1—汽包；2—下降管；3—  
下联箱；4—水冷壁

稳定流动时:

$$\sum \Delta p_{xj} = \sum \Delta p_{ss}$$



$$\bar{\rho}_{xj} gh - \Delta p_{xj} = \bar{\rho}_{ss} gh + \Delta p_{ss}$$

基本公式

## 2. 循环回路的运动压头

$S_{yd}$

压差公式移项并整理得

$$(\bar{\rho}_{xj} - \bar{\rho}_{ss}) gh = \Delta p_{xj} + \Delta p_{ss}$$



$$S_{yd} = (\bar{\rho}_{xj} - \bar{\rho}_{ss}) gh$$

(1) 运动压头：回路中工质流动的推动力

稳定流动时：

$$S_{yd} = (\bar{\rho}_{xj} - \bar{\rho}_{ss})gh$$

$$S_{yd} = \Delta p_{xj} + \Delta p_{ss}$$

(2) 有效压头：运动压头扣除上升系统的总阻力后的剩余压头

$$S_{yx} = S_{yd} - \Delta p_{ss}$$

$$S_{yx} = \Delta p_{xj}$$

### (3) 运动压头的影响因素：

- 回路高度：增加循环回路的高度，运动压头增大。
- 下降管工质密度：下降管含汽，下降管内工质的平均密度将减小，运动压头也随之降低。
- 上升管内工质密度：上升管受热增强时，产汽量增多，汽水混合物的平均密度减小，运动压头随之增大。
- 锅炉的工作压力：随压力的提高，饱和水和饱和汽的密度差减小，运动压头也减小。目前自然循环锅炉的最高汽包压力约为**19MPa**。

## 第二节 汽水两相流的流型和传热

### 一、汽水两相流的流型和传热

均匀受热垂直上升蒸发管中两相流的流型和传热  
工况

- **单相水的流动（A区）**：如受热不太强烈，管内水温低于饱和温度，此时进行的是单相水对流换热，管壁金属温度稍高于水温。
- **过冷汽泡状流动（B区）**：紧贴壁面的水达到饱和并产生汽泡，管子中心处于欠热状态，生成的汽泡脱离壁面后凝结并将水加热，壁温高于饱和温度，进行着过冷核态沸腾传热。

- **饱和汽泡状流动结构（C区）**：管内工质已达到饱和状态，传热转变为饱和核态沸腾传热，此后生成的汽泡不再凝结，沿流动方向的含汽率逐渐增大，汽泡分散在水中。
- **弹状流动结构（D区）**：随着汽泡增多，小汽泡在管子中心聚合成大汽弹，形成弹状流型，汽弹与汽弹之间有水层。

- **环状流型**（E区和F区）：当汽量增多汽弹相互连接时，就形成中心为汽而周围有一圈水膜的环状流。环状水膜减薄后的导热能力很强，成为强制水膜对流传热，热量由管壁经强制对流水膜传至管子中心汽流与水膜之间的表面上，而水在此表面上蒸发。
- **雾状流型**（G区）：当壁面上的水膜完全被蒸干后就形成雾状流。这时汽流中虽仍有一些水滴，但对管壁的冷却作用不够，传热恶化，管壁金属温度突然升高，此后随汽流中水滴的蒸发，蒸汽流速增大，壁温又逐渐下降。
- **单相汽流动**（H区）：当气流中的小液滴全部汽化后，随着不断的吸热，蒸汽进入过热状态。由于汽温逐渐上升，管壁温度又逐渐上升。

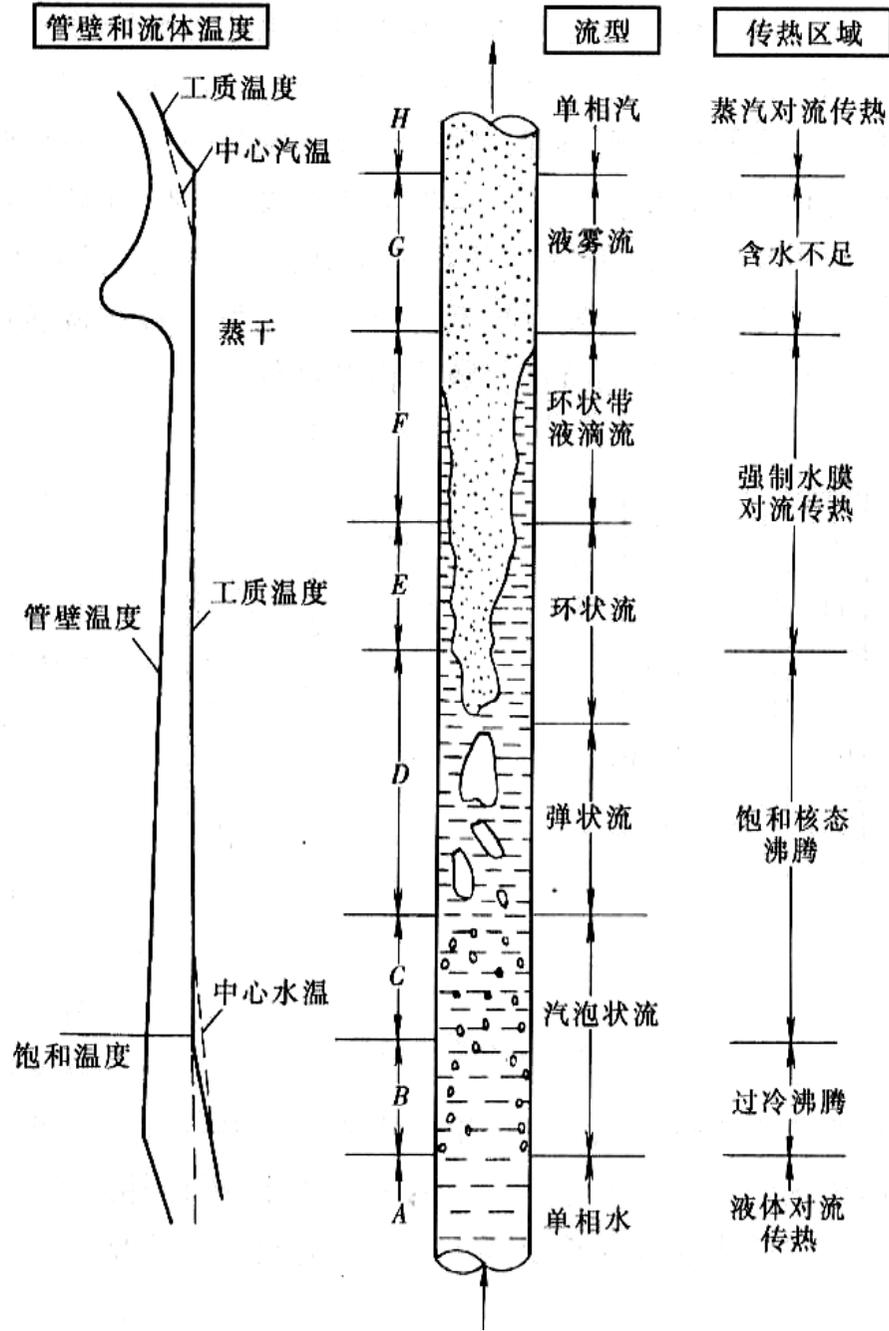


图10-2 均匀受热垂直上升蒸发管中两相流的流型和传热工况

## 二、汽水两相流的沸腾传热恶化

### 1. 沸腾传热恶化的现象及发生条件

#### (1) 第一类沸腾传热恶化

##### ➤ 现象:

热负荷很高，在过冷沸腾区，汽泡生成速度过快，管中心为水，贴壁层为一圈水膜，传热恶化，壁温飞升。

##### ➤ 条件: 热负荷 $q > q_c$

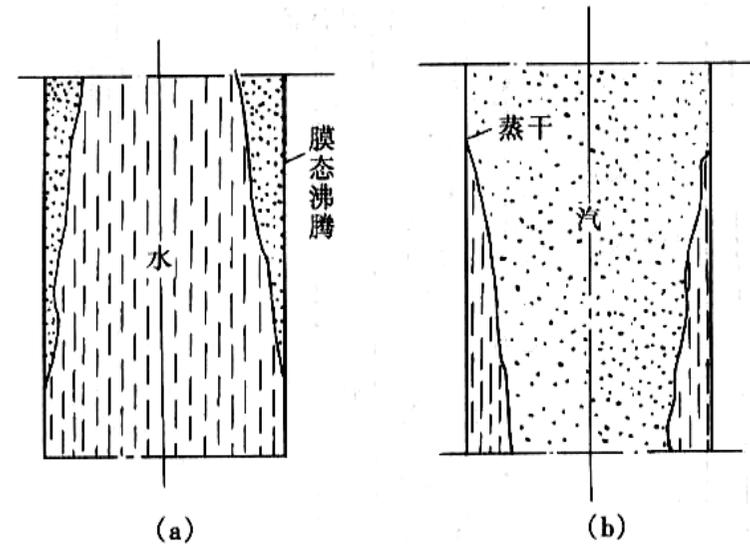


图10-3 传热恶化示意图

(a) 第一类沸腾传热恶化;

(b) 第二类沸腾传热恶化

## (2) 第二类沸腾传热恶化两类

- 现象：热负荷不太高时，环状流的水膜被蒸干，传热恶化，壁温飞升
- 条件：含汽率  $x > x_c$

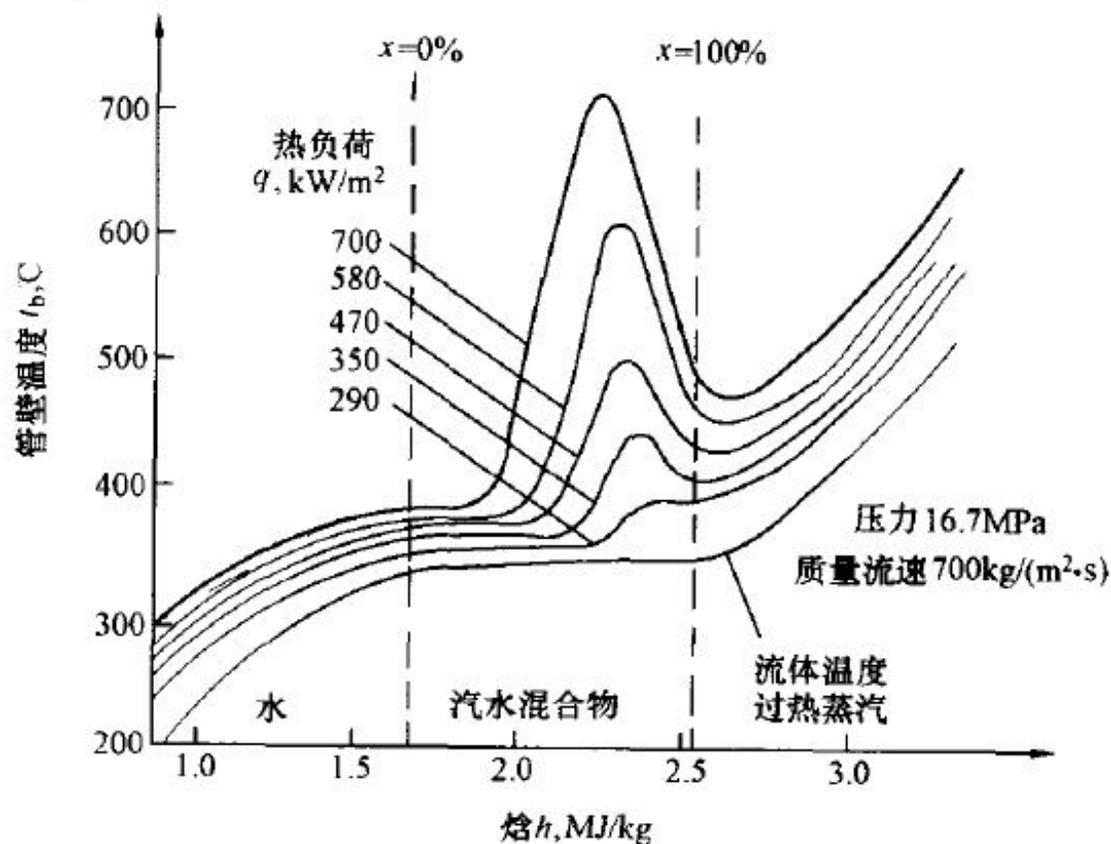


图 10-4 第二类传热恶化时管壁温度与工质焓的关系

## 2. 自然循环锅炉沸腾传热恶化特点

### (1)

- 第一类沸腾传热恶化通常发生在含汽率较小或水存在欠热、以及热负荷高的区域。
- 第二类沸腾传热恶化发生在  $x$  较大、热负荷不太高的情况下，放热系数  $a_2$  的下降较第一类沸腾传热恶化时小，因而  $\Delta t$  飞升值较第一类沸腾传热恶化时低。



- 由于发生**第二类**时的热负荷比发生第一类恶化时的低得多，因此，它发生的可能性比第一类要大得多。

- (2) 对于自然循环锅炉，在水循环正常的情况下，水冷壁局部最高热负荷均低于其临界热负荷，因此一般不会发生第一类沸腾传热恶化。
- (3) 第二类传热恶化

超高压以下的自然循环锅炉，正常情况下的水冷壁出口工质含汽率  $x$  都低于临界含汽率  $x_c$ ，故也不会发生第二类沸腾传热恶化。

亚临界压力的自然循环锅炉，其水冷壁内工质的实际含气率相对较大，很接近其临界含汽率值，故发生第二类沸腾传热恶化的可能较大。

### 3. 沸腾传热恶化的防止措施

- (1) 保证一定的质量流速
- (2) 降低受热面的局部热负荷
- (3) 采用内螺纹管
- (4) 加装扰流子

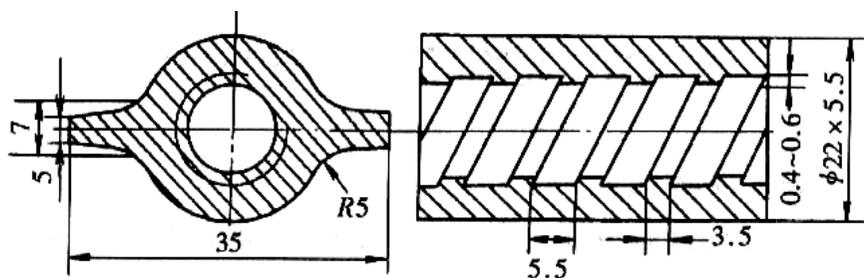


图10-5 内螺纹管结构

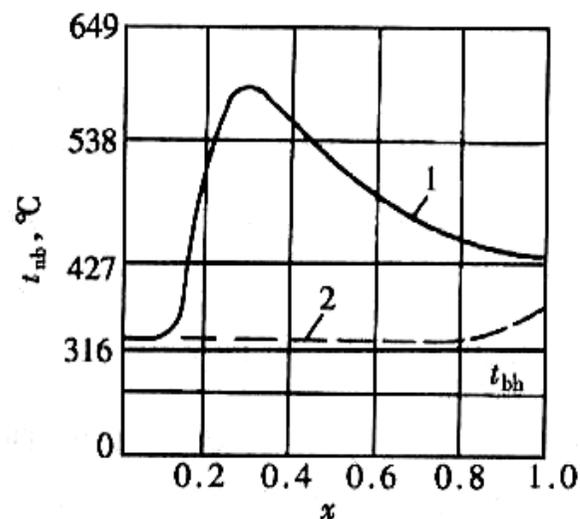


图10-6 内螺纹管降温效果

1—光管；2—内螺纹管；  
 $t_{bh}$ —饱和温度； $t_{nb}$ —内壁温度

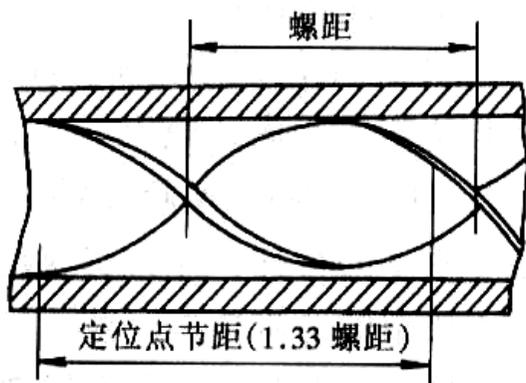


图10-7 扰流子结构

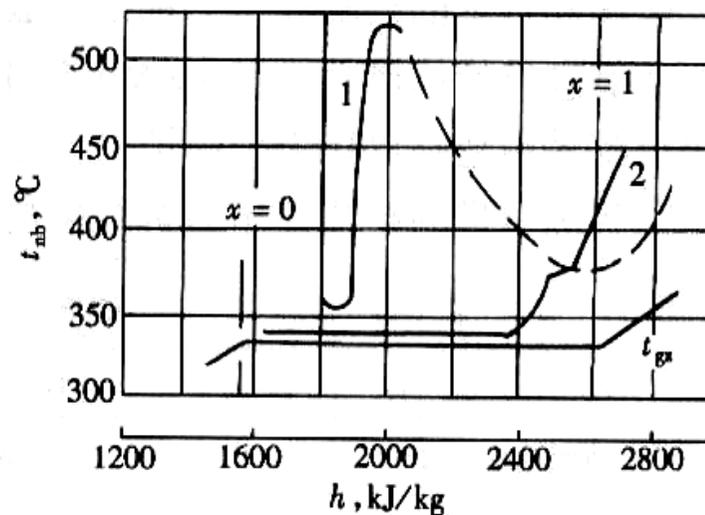


图10-8 扰流子降温效果

$p=18.5\text{MPa}$ ;  $\rho w=1500\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$

1—无扰流子,  $q=500\text{kJ}/\text{m}^2$ ; 2—装扰流子,  $q=400\text{kJ}/\text{m}^2$ ;  $t_{gz}$ —饱和温度;  $t_{nb}$ —内壁温度

# 第三节 汽水两相流的流动特性

## 参数及管内压力降

汽水两相流特性参数：描述汽水两相流动特性的物理量

流速参数

管内含汽率参数

两相流的密度

管内两相流动的压力降

# 一、流速参数

## 1. 质量流速

单位时间内流经单位流通截面的工质质量称为**质量流速**

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

## 2. 循环流速

循环回路中水在饱和温度下按上升管入口截面计算的水流速度称为**循环水速**

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

### 3. 折算流速

折算蒸汽流速

$$w'_0 = \frac{G - D}{\rho'F} = \frac{V'}{F}$$

m/s

折算水速

$$w''_0 = \frac{D}{\rho''F} = \frac{V''}{F}$$

m/s

### 4. 混合物流速

$$w_{\text{hu}} = \frac{V' + V''}{F} = w'_0 + w''_0 \quad \text{m/s}$$

### 5. 真实流速

蒸汽真实流速:

$$w'' = \frac{D}{F''\rho''} = \frac{V''}{F''}$$

m/s

水真实流速:

$$w' = \frac{G - D}{F'\rho'} = \frac{V'}{F'}$$

m/s

## 二、含汽率

### 1. 质量含汽率

在汽水混合物中，流过蒸汽的质量流量 $D$ 与流过工质总的流量 $G$ 之比。

$$x = \frac{D}{G} = \frac{\rho'' w_0'' F}{\rho' w_0' F} = \frac{\rho'' w_0''}{\rho' w_0'} = \frac{h - h'}{r}$$

### 2. 容积含汽率

$$\beta = \frac{V''}{V' + V''} = \frac{w_0'' F}{w_0' F + w_0'' F} = \frac{w_0''}{w_0' + w_0''} = \frac{w_0''}{w_{\text{hu}}} = \frac{w_0''}{w_0' + w_0'' \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'}\right)}$$

### 3. 截面含汽率

$$\varphi = \frac{F''}{F} = 1 - \frac{F'}{F}$$

### 三、两相流的密度

#### 1. 流动密度

两相流的质量流量与体积流量之比称为**流动密度**

$$\rho_{\text{hu}} = \frac{G}{V} = \frac{\rho''V'' + \rho'V'}{V} = \beta\rho'' + (1-\beta)\rho'$$

#### 2. 真实密度

某段管子中汽水混合物实际存在的密度称为**真实密**

$$\rho_{\text{zs}} = \frac{F''\Delta l\rho'' + F'\Delta l\rho'}{F\Delta l} = \frac{\varphi F\Delta l\rho'' + (1-\varphi)F\Delta l\rho'}{F\Delta l} = \varphi\rho'' + (1-\varphi)\rho'$$

## 四、管内两相流动的压力降计算

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \Delta p_{lz} + \Delta p_{js} \pm \Delta p_{zw}$$

1. 重位压头  $\Delta p_{zw} = h \rho_{zs} g$

2. 流体加速压降  $\Delta p_{js} = \rho w (w_2 - w_1)$

### 3. 流动阻力

对不受热管，摩擦阻力：
$$\Delta p_{mc} = \lambda_0 \frac{l}{d} \frac{(\rho' w_0)^2}{2\rho'} \left[ 1 + \overline{x\psi} \left( \frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right]$$

局部阻力：
$$\Delta p_{jb} = \sum \xi \frac{\rho' w_0^2}{2} \left[ 1 + x \left( \frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right]$$

## 第四节 自然水循环的可靠性指标



循环流速和循环水速

### 一、循环流速

$$w_0 = \frac{G}{\rho'F} = \frac{\rho w}{\rho'}$$

循环流速的大小直接反映了管内工质带走管外传入的热量及所产生汽泡的能力。循环流速越大，单位时间进入上升管的工质越多，从管壁带走的热量及所产生的汽泡越多，管壁的冷却条件越好。



不是反映水循环安全的唯一指标

## 二、循环倍率与自补偿特性

### 1. 循环倍率的概念

- **概念：**循环倍率是指在循环回路中，上升管的入口循环水量 $G$ 与出口蒸汽量 $D$ 之比，即

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

- **意义：**上升管中每产生1kg蒸汽需要进入上升管的循环水量，或进入上升管的水全部变成蒸汽需要在循环回路中循环的次数

## 2. 自补偿特性

当 $x < x_{jx}$  范围内，自然循环回路上升管受热增强时，循环水量和循环流速也随之增大，这种循环特性称自补偿性（回路工作安全）

当 $x > x_{jx}$  范围内，失去自补偿能力

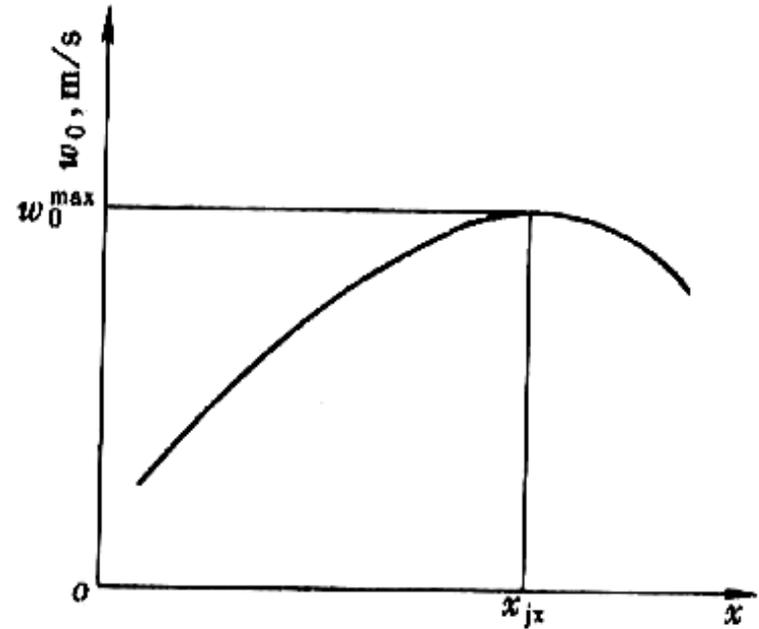


图10-12 循环流速与上升管质量含汽率的关系

### 3. 界限循环倍率

➤ 定义：界限循环倍率是自然循环的安全限值。

➤ 界定条件：

一要保证锅炉具有自补偿特性

$$(x < x_{jx} = 1/K_{jx})$$

二要保证不出现沸腾传热恶化( $x < x_c$ )

➤ 回路安全工作条件： $K > K_{jx}$

# 第五节 自然水循环的基本计算

## 水循环计算的目的是和方法

### ➤ 目的:

根据回路的压差和压头公式，确定回路的安全指标，鉴定回路工作可靠性

### ➤ 方法:

建立方程（压差法、压头法）

解方程（计算机试算法、特性曲线图解法）

# 一、循环回路

## ➤ 简单回路：

一根下降管单独与一个水冷壁管屏组成的回路

## ➤ 复杂回路：

多个管屏共用一根下降管系统的回路

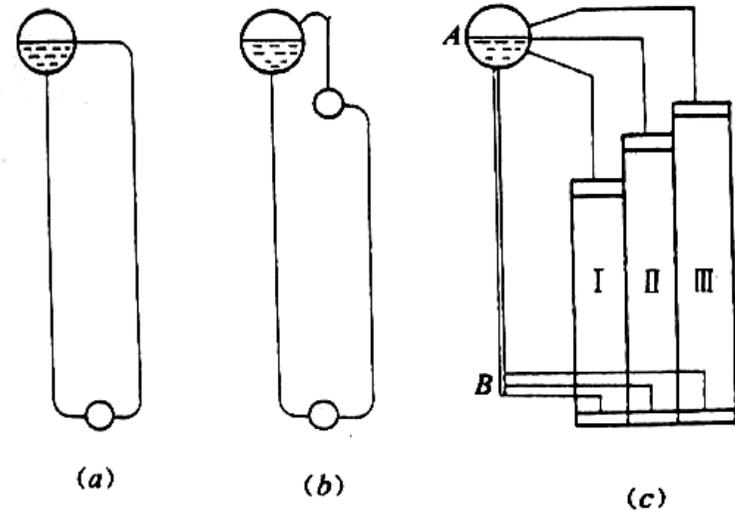


图10-13 简单回路与复杂回路的简图

- (a) 无上联箱的简单回路；
- (b) 有上联箱的简单回路；
- (c) 复杂回路

## 二、基本方程式

### 1. 压差法

$$\sum \Delta p_{xj} = \sum \Delta p_{ss}$$

$$\sum \Delta p_{xj} = \bar{\rho}_{xj} gh - \Delta p_{xj}$$

$$\sum \Delta p_{ss} = (\sum h_i \bar{\rho}_i gh)_s + \Delta p_{js} + \Delta p_{lz} + \Delta p_{fl}$$

### 2. 压头法

$$S_{yx} = \Delta p_{xj}$$

$$S_{yx} = S_{yd} - (\Delta p_{lz} + \Delta p_{js} + \Delta p_{fl})$$

$$S_{yd} = h \bar{\rho}_{xj} g - (\sum h_i \bar{\rho}_i g)_s$$

公式中的各项在确定时参见图10-14进行

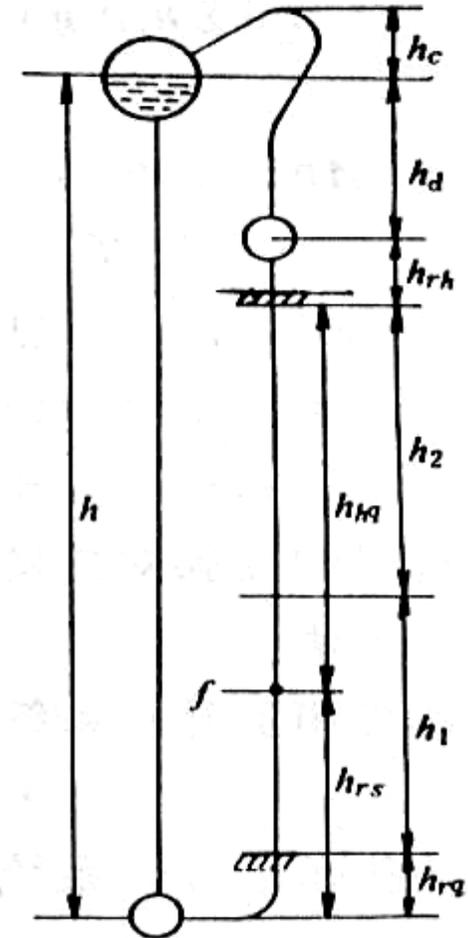


图10-14 简单回路  
的分段实例

### 三、循环回路特性曲线与工作点

**概念：** 在热负荷一定的条件下，回路的压头、压差、阻力等与循环水量和循环水速之间的函数关系曲线

#### 1. 简单回路自然循环特性曲线图解法

假定三个循环水速，计算三个对应的下降系统、上升系统的总压差，然后将各压差与 $G$ 的对应点在 $\Delta p-G$ 坐标上标出，并分别将三点连成两条平滑的 $\Sigma \Delta p_{xj}-G$ 和 $\Sigma \Delta p_{ss}-G$ 曲线。这两条曲线的交点就是这个简单回路的工作点。

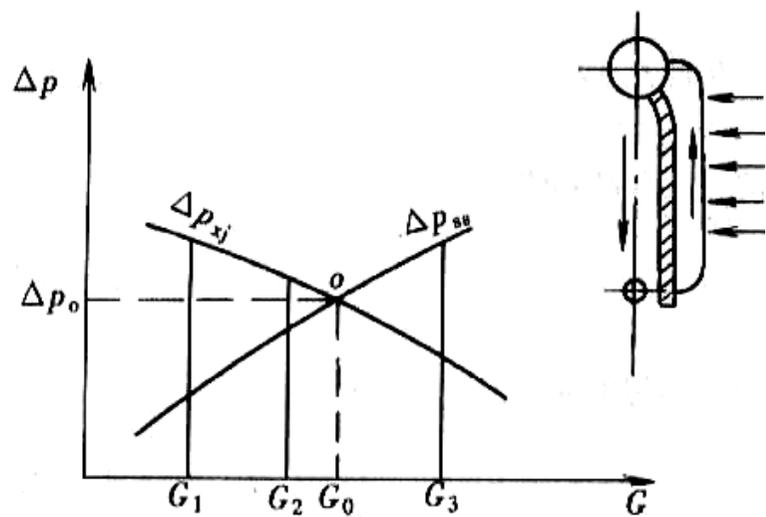


图10-15压差法确定简单回路工作点的图解曲线

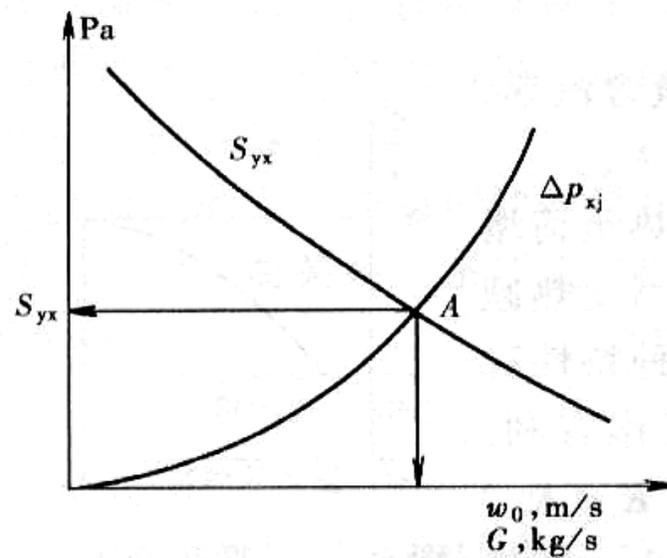
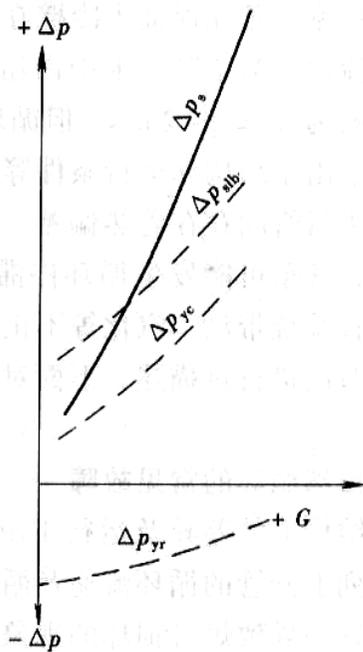


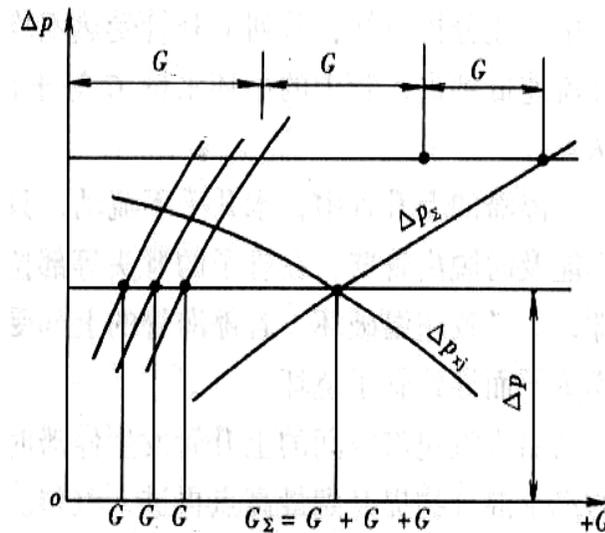
图10-16压头法确定简单回路工作点的图解曲线

## 2.复杂回路特性曲线图解法

参见图10-13 (c) 的复杂回路，弄清各串联、并联关系  
叠加原则：串联系统，同一流量下，压差（头）相加；  
并联系统，同一压差（头）下，流量相加



10-17 串联上升系统的特性曲线



10-18 并联上升系统的总特性曲线及回路工作点的图解法

## 第六节 自然水循环常见问题及防止

受热强管：沸腾传热恶化

受热弱管：循环停滞、倒流、自由水位

# 一、下降管带汽

## 1. 下降管入口锅水自汽化

因为 
$$p_r = p_b + \rho'gh - \left(\rho' \frac{w_{xj}^2}{2} + \xi \rho' \frac{w_{xj}^2}{2}\right)$$

所以，不汽化的条件

$$\rho'gh > (1 + \xi) \rho' \frac{w_{xj}^2}{2}$$

即

$$h > (1 + \xi) \frac{w_{xj}^2}{2g}$$

**措施：** 提高水位、减小入口流速、增大入口水欠焓

## 2. 漩涡斗带汽

**措施：** 维持水位、加装格栅、  
十字隔板

## 3. 汽包内锅水含汽

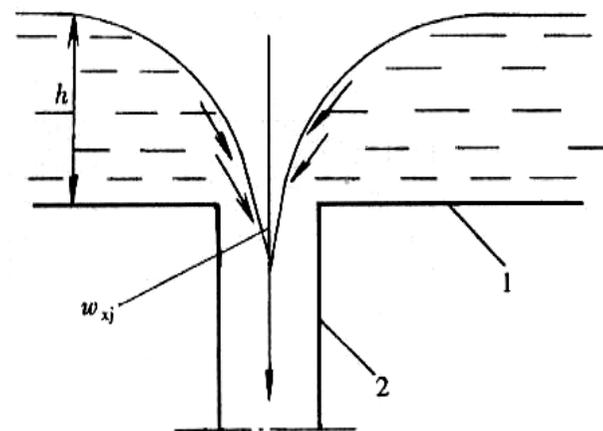


图10-20 下降管  
入口处的漩涡斗

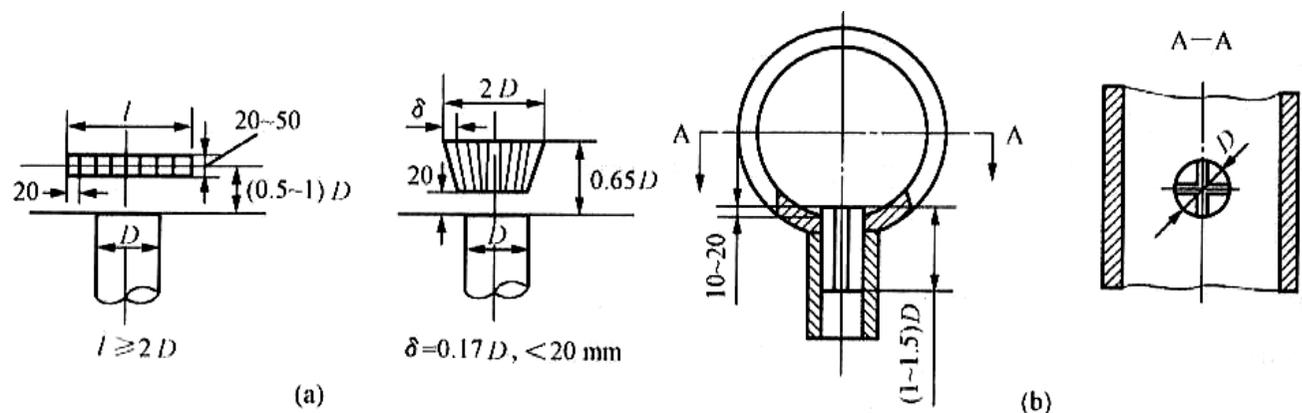


图10-21 格栅和十字隔板的结构与布置  
(a) 格栅； (b) 十字隔板

## 二、循环停滞、倒流、汽水分层

### 1. 循环停滞

- 并列上升管受热不均时，受热弱的上升管产汽量少，循环流速低。当循环流速低到接近或等于零，为循环停滞。
- 引入汽包汽空间的上升管：自由水位
- 安全校验：

$$\frac{\sum \Delta p_0}{\Delta p_{tz}} \geq 1.1$$

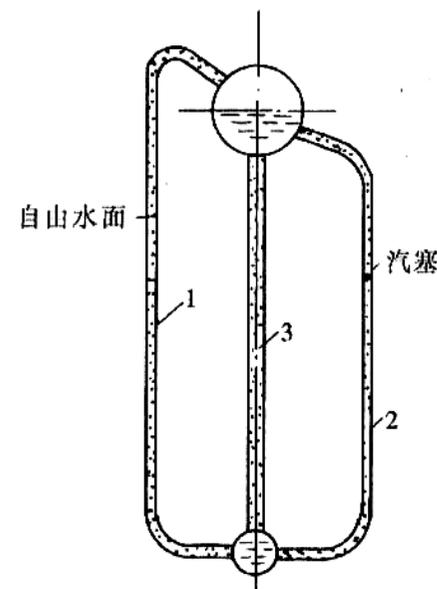


图10-22 循环停滞示意图

## 2. 循环倒流

➤ 引入汽包水空间的上升管或具有上下联箱的水冷壁管组中，且该管受热较弱以致其重位压差大于回路工作压差。这时，该上升管内工质是自上向下流动，即该管实际成为一根受热的下降管。

➤ 安全校验条件：
$$\frac{\sum \Delta p_0}{\Delta p_{dl}^{\max}} \geq 1.05 \sim 1.1$$

### 3. 汽水分层

- 对于水平或微倾斜管，若管内工质流速低，则会出现汽水分层。
- 尽可能的不布置水平或倾斜度小于 $15^\circ$ 的蒸发管

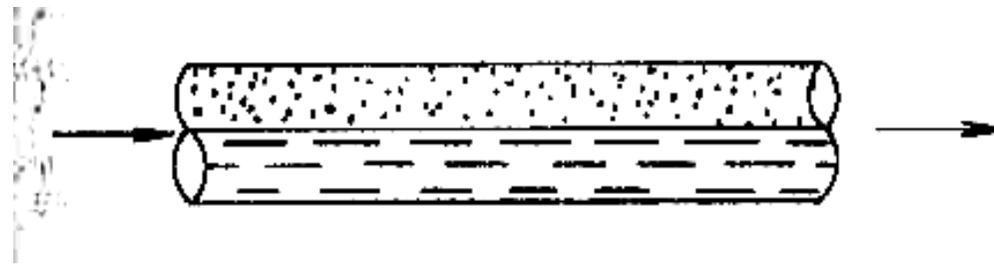


图10-24 汽水分层

### 三、沸腾传热恶化校验

- 第一类沸腾传热恶化发生的特性参数是临界热负荷，不发生此类传热恶化的条件是：受热最强管的热负荷 $q$ 低于临界热负荷 $q_c$ ，即校验条件是

$$q < q_c$$

- 第二类沸腾传热恶化的特性参数是临界含汽率，不发生此类传热恶化的条件是：管内的含汽率 $x$ 小于临界含汽率 $x_c$ ，即

$$x < x_c$$

# 四、提高水循环安全性的措施

## 1. 减小并列蒸发管吸热不均

### ➤ 在结构和布置上

- (1) 按受热面热负荷的大小划分循环回路
- (2) 改善炉膛四角边管的受热状况。
- (3) 采用平炉顶结构

### ➤ 运行方面

- (1) 保持炉膛火焰中心位置，避免火焰偏斜。
- (2) 保持水冷壁清洁，防止局部结渣积灰。
- (3) 避免锅炉长时间低负荷运行。

## 2. 降低下降管和汽水导管的阻力

降低下降管和汽水导管的阻力，可以有更多的剩余压头克服上升管的阻力，从而提高循环流速和循环倍率，措施有：

- (1) 采用大直径下降管
- (2) 选择较大的下降管截面积比和汽水引出管截面积比
- (3) 防止下降管带汽

### 3. 确定合适的上升管高度、管径及上升管单位截面蒸发量

表 10-4 下降管及汽水引出管的截面比的推荐值

汽包压力 (MPa)		4~6	10~12	14~16	17~19*
锅炉蒸发量 (t/h)		35~240	160~420	400~670	≥800
下降管截面与 上升管截面比	大直径集中下降管	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6
	小直径分散下降管	0.2~0.35	0.35~0.45	0.5~0.6	0.6~0.7
汽水引出管的截面与上升管截面比		0.35~0.45	0.4~0.5	0.5~0.7	0.6~0.8
上升管内径 (mm)		36~54	35~50	34~48	40~60
上升管外径 (mm)		42~60	42~60	42~60	51~76
下降管入口流速 (m/s)		≤3		≤3.5	≤4

\* 实际亚临界自然循环锅炉所采用的截面比高于表

捕捉屏幕上指定的区域  
按Tab切换至徒手任意捕捉



Thank you!!

