

第 10 章 自然循环

第一节 自然循环工作原理和基本方程组

第二节 蒸发受热面的安全工作问题

第三节 两相流体流动阻力和两相流体质量、容积参数

第四节 两相流体重位压差和两相流体真实容积参数

第五节 自然循环特性的计算（了解）

第六节 自然循环安全性检查（了解）

第七节 提高自然循环安全性措施

第一节 自然循环工作原理和基本方程组

一、自然循环工作原理

二、自然循环基本方程组

一、自然循环工作原理

工作原理：工质依靠上升管受热所产生的密度差沿着闭合的路线运动。

二、自然循环基本方程组

1 定义物理量

(1) 循环流速：上升管开始沸腾处的饱和水速

$$w_0 = \frac{G}{F\rho'} \quad , \quad \text{m/s} \quad (10-1)$$

表征流动的快慢，是反应循环水动力特性的指标，称为循环特性参数

(2) 质量含汽率：上升管中蒸汽的质量份额

$$X = D/G \quad (10-2)$$

(3) 循环倍率：上升管循环水量与出口产汽量之比

$$K = G/D_c = G/(GX_c) = 1/X_c \quad (10-3)$$

2 基本方程组

$$Q = G(i' - ig + Xr) = G(\Delta i - Xr)$$

由上升系统压差=下降系统压差

$$Y_{xj} = Y_{ss}$$

忽略加速阻力后

$$H \rho' g - \Delta P_{xj} = H \rho_h g + \Delta P_{ss} = P_2 \text{ (下联箱)} - P_1 \text{ (汽包)}$$

运动压头:

$$S_{yd} = H(\rho' - \rho_h)g = \Delta P_{ss} + \Delta P_{xj} \quad (10-14)$$

有效压头:

$$S_{yx} = S_{yd} - \Delta P_{ss} = \Delta P_{xj} \quad (10-15)$$

当 $H \rho_h g = P_2 - P_1$ 则 $\Delta P_{ss} = 0$ 停滞

$H \rho_h g > P_2 - P_1$ $\Delta P_{ss} < 0$ 倒流

第二节 蒸发受热面的安全工作问题

一、蒸发受热面安全工作与水循环关系

二、汽液两相流

三、传热恶化

四、循环故障

一、蒸发受热面安全工作与水循环关系

安全： T_b （壁温） < T_r （容许壁温）

水循环故障 α_2, T_b 爆管

积灰，结渣

腐蚀

二、汽液两相流

汽泡趋中效应（运动向阻力小处）

流型：随质量含汽率 X ：图10-4

(a) (b) (c)
泡状 弹状 柱状

连续水膜 α_2 大

(d)
液雾状

无水膜 α_2 小

自然循环应避免

三、传热恶化

膜态沸腾（第一类传热恶化）：当热负荷 q 很高时，汽泡生成速度 \gg 汽泡脱离速度，形成壁面连续蒸汽膜， α_2 急剧下降，壁面温度 T_b 急剧上升。

特性参数：临界 q_{1j} ， 含汽率 X_{1j} ；

蒸干（第二类传热恶化）：当含汽率 X 很大时，连续水膜撕破，出现液雾状流， α_2 急剧下降，壁面温度 T_b 急剧上升。

特性参数：界限 X_{jx}

四、循环故障

1. 停滞

当压差 $Y = H \rho_h g$ 时

停滞 蒸汽塞（弯头、焊缝处） 爆管

2. 倒流 Y : 管屏压差 $Y = P_2 - P_1$

当 $Y < H \rho_h g$ $Y = H \rho_h g + \Delta P_{ss}$ $\Delta P_{ss} < 0$ 时

倒流 $W =$ 汽泡上浮 w 汽塞 管壁超温破坏

上升管接汽空间：自由水面 管壁疲劳破坏

3. 下降管带汽

S_{yd} 停滞、倒流

第三节 两相流体流动阻力和两相流体质量、 容积参数

一、两相流摩阻物理模型及公式

二、两相流质量参数和容积参数

一、两相流摩阻物理模型及公式

汽水相对运动，流阻不同于单相流

蒸汽分布不同，流型不同，流阻不同

1 均相模型及公式

均相模型假定：

(1) 汽水均匀、只比容不同

(2) 汽水无相对运动 单相摩阻

$$\Delta P = \lambda (L/d_n)(W_{hu}^2 \rho / 2), \quad \text{Pa} \quad (10-21)$$

2 以均相模型为基础的公式

$$\Delta P_m = \psi \Delta P_{mo} \quad (10-23)$$

相对流速和流型影响系数， ψ -式 (10-24)~(10-27)，查

图一西安交大

二、两相流质量参数和容积参数

质量参数（根据物质平衡式计算得的参数）： G （汽水）、 D 、 X 、 W_0

容积参数 V 、 W_{hu} 、 ρ

1 汽水混合物 W_{hu} 及折算流速 W_0'' 、 W_0'

$$(1) \cdot W_{hu} = V/F = (V' + V'')/F \cdot \dots \cdot \text{m/s} \cdot \dots \cdot (10-28)$$

$$(2) \cdot \text{折算: } W_0'' = D/F \rho'' = V''/F \cdot \dots \cdot \text{m/s} \cdot \dots \cdot (10-29)$$

$$W_0' = (G-D)/F \rho' = V'/F \cdot \dots \cdot \text{m/s} \cdot \dots \cdot (10-30)$$

$$W_{hu} = W_0' + W_0'' \cdot \dots \cdot (10-31)$$

$$(3) \cdot W_{hu} = W_0 [1 + X(\rho' / \rho'' - 1)] \cdot \dots \cdot \text{m/s} \cdot \dots \cdot (10-36)$$

ρ 、 β

2 质量 $\rho = (G-D+D) / V = (V' \rho' + V'' \rho'') / V$

令容积含汽率 $\beta = V'' / V$

3. $P_w = G/F$ $\text{kg/m}^2\text{s}$

第四节 两相流体重位压差和两相流体真实容积参数

一 计算 ΔP_{zw} 模型与公式

二 Φ 的计算与真实容积参数 W' 、 W''

三 $\Phi - \beta$ 试验关系

一 计算 ΔP_{zw} 模型与公式

1. 分流模型

流型：泡、弹、柱、雾， 主要：泡 柱

简化：

- (1) 水贴壁流，占据管截面积 F' ；
- (2) 汽中流，占据管截面积 F'' ；
- (3) 真实（考虑相对 W ），水的流速 W' ，汽的流速 W'' 。

2. ΔP_{Zw} 图10-11

真实 ρ_{zs} =汽水总质量/体积 =

$$(F' dh \rho' + F'' dh \rho'') / (F dh) = F' \rho' / F + F'' \rho'' / F$$

令截面含汽率 $\phi = F'' / F$, $F' / F = (F - F'') / F = 1 - \phi$

真实容积密度: ρ_{zs}

$$\rho_{zs} = (1 - \phi) \rho' + \phi \rho'' = \rho' - \phi (\rho' - \rho'') \quad \text{kg/m}^3 \quad (10-46)$$

$$\Delta P_{Zw} = hg \rho_{zs} = hg [\phi \rho'' + (1 - \phi) \rho'] \quad \text{Pa} \quad \dots \quad (10-47)$$

二、 Φ 的计算与真实容积参数 W' 、 W''

真实容积参数——考虑汽水相对速度的参数： F' 、 F'' 、 W' 、 W'' 、 ϕ 、 ρ_{zs}

$$W' = V' / F' = (G-D) / (F' \rho') \text{ m/s} \dots \dots \dots (10-48)$$

$$W'' = V'' / F'' = D / (\rho'' F'') \text{ m/s} \dots \dots \dots (10-49)$$

截面含汽率： $\phi = F'' / F = V'' / (F \cdot W'') = W''_0 / W'' \dots \dots \dots (10-50)$

定义滑动比： $S = W'' / W' \dots \dots \dots (10-51)$

则 $\phi = F'' / F = F'' / (F' + F'') = 1 / (F' / F'' + 1) = 1 / [(V' / W') / (V'' / W'') + 1]$

$$= 1 / [1 + (W'' / W') (V' / V'')] = 1 / [1 + S (1 - \beta) / \beta]$$

$$S = (V' + V'' - V'') / V'' = V / V'' - 1 = 1 / \beta - 1$$
$$= (1 - \beta) / \beta$$

三、 $\Phi - \beta$ 试验关系

$$\beta = V'' / V = V'' / (V' + V'') = (W'' F'') / (W_{hu} F) = (W'' / W_{hu}) \Phi \quad \leftarrow$$

$$\Phi = C \beta, \quad \dots \quad C = W_{hu} / W'' \quad \leftarrow$$

分析：上升 $\dots W'' > W_{hu} \dots C < 1 \dots \Phi < \beta \dots \dots \dots \leftarrow$

$\dots \dots \dots$ 下降 $\dots W'' < W_{hu} \dots C > 1 \dots \Phi > \beta \quad \leftarrow$

第五节 自然循环特性的计算（了解）

- 一、目的、内容与范围
- 二、简单与复杂回路
- 三、上升段划分
- 四、热负荷分配 (q_i)
- 五、略
- 六、锅水欠焓（自学）
- 七、水循环计算（图解）

一、目的、内容与范围

1. 目的：（1）. 设计；（2）. 系统改造；（3）. 运行检验
2. 内容：（1）. 各回路 W_0 、 K ；（3）. 可靠性
- 3 . 范围：额定负荷 D_e 、压力 P_e 、最差回路（受热不均、热负荷低、结构复杂）

二、简单与复杂回路

- 1 简单循环回路：单下降管、单管屏
- 2 复杂循环回路：多简单回路的串、并联系统\区分独立回路
- 3 独立循环回路特征：工质独立
独立循环回路举例

- 4 具体计算回路：特殊回路：受热最弱或阻力大、受热最强上升管
平均回路

三、上升段划分

由于两相参数沿流程变化，故分段计算，每段参数平均。

图10-14

1 热水段：单相

2 热后段：炉膛外 $L_{rh} > 10\%H$ 应分开计算

3 含汽段分段：

特殊：

(1). Δq 段 ($\Delta q > 5\%$) ；

(2). q 段（燃烧带、耐火层 $L > 10\%H$ ） ；

(3) .结构特殊（管径变化大）

四、热负荷分配 (q_i)

1 蒸发面总吸热量

(1) 由炉内换热计算结果计算

水冷壁平均热负荷 q : $q_L = B_j Q_{zf} / F \quad \text{kW/m}^2 \quad (10-64)$

(2) 根据锅内吸热量 (工质吸热)

$Q_z = D(i'' - i_{sm}'') \text{kw} \quad (10-65)$

2 热负荷分配 (q_i)

各区段 q_i 沿高、宽均匀 \rightarrow 计算 W_0 、 K

七、水循环计算（图解）

1 计算前的准备工作

- 结构数据按图纸查取
- 热力数据按照锅炉热力计算书和本节四中内容进行。
- 详细画出蒸发汽水系统图
- 区分孤立循环回路管屏分组（划分计算回路），上升管分段
- 确定上升系统与下降系统的分解点；分配热负荷：把热负荷分配到每面墙、每面墙上每个回路、每个回路每个区段上。

2 简单回路水循环计算程序

- (1) 假定循环流速 W_0
- (2) 求出下降系统压差 Y_{XJ} (式10-8)
- (3) 假定 K , 计算出锅水欠焓 $\Delta \eta_{qh}$ (表10-1), 热水段高度 H_{rs} (式10-66), 上升系统压差 Y_{ss} (式10-9)
- (4) 判断 $Y_{XJ}=Y_{ss}$ 是否成立, 若不成立再假定 W_0 重算, 直至 $Y_{XJ}=Y_{ss}$
- (5) 计算 K 及计算合格问题: 回路循环倍率 $K_h=G/D$ 锅炉循环倍率 $K_g=\Sigma G/\Sigma D$ 。根据 K_g 计算出锅水欠焓 $\Delta \eta_{qh}$ 。若由预先假定的 K 算出的 $\Delta \eta_{qh}$ 与最后计算出的 $\Delta \eta_{qh}$ 之差不大, 即认为水循环计算合格。否则重新假定 K 进行计算

第六节 自然循环安全性检查（了解）

上节算出的 W_0 ， K 为循环回路的平均数据

高压炉（ $P=9.8-11.76\text{Mpa}$ ）

$W_0=0.7-1.2\text{m/s}$

$K=8-15$

水循环安全确切判断：

受热最弱管是否 停滞、倒流？

受热最强管是否 传热恶化？ $K > K_{jx}$ ？

- 一、自然循环特性
- 二、停滞
- 三、倒流
- 四、 K_{jx} 与传热恶化
- 五、下降管带汽和汽化

一、自然循环特性

图10—19

二、停滞

1. $G > D$ 不停; $G=D$ 停滞; $G < D$ 不稳定停滞

校验管流量 G , 蒸发量 D

D —(10—6)式; ΔP — G 特性曲线图(图10—20)

2. 判别式

由上图, 若 $\Sigma \Delta P_s > \Sigma \Delta P_{Stz}$, 则必 $G > D$

所以, 判别式 $\Sigma \Delta P_s / \Sigma \Delta P_{Stz} \geq 1.05$ (10—67)

三、倒流

上升管工质从上至下流动

1 循环完全特性曲线

水动力特性：热负荷不变， $\Delta P=f(G)$

循环完全特性曲线：热负荷不变，正—倒流的 $\Delta P=f(G)$ ，
见图10—21

正流 $Y_s = \Sigma \Delta P_s = H \rho_h g + \Delta P_{LZ}$

倒流 $Y_s = \Sigma \Delta P_s = H \rho_h g - \Delta P_{LZ}$

渐进线A、 $L - \Delta P_{ZW}$

G ΔP_{LZ}

抛物线B、M

$$Y_s = \Delta P_{ZW} + \Delta P_{LZ}$$

B+A \rightarrow C (图10—21)

L-M \rightarrow N (图10—21)

$$\Sigma \Delta P_{dL}^{MAX}$$

2 倒流判别及倒流条件

由完全特性曲线:

$$(1) \quad \Sigma \Delta P_s > \Sigma \Delta P_{dl}^{Max}, \text{ 不倒流, 判别式 } \Sigma \Delta P_s / \Sigma \Delta P_{dl}^{Max} \geq 1.05, (10-76)$$

$$(2) \quad \Sigma \Delta P_{stz} < \Sigma \Delta P_s < \Sigma \Delta P_{dl}^{Max}$$

工作点: b-不稳定; a、c—稳定, 可能倒流

$$(3) \quad \Sigma \Delta P_s < \Sigma \Delta P_{stz} \quad \text{不稳定停滞, 周期波动}$$

3 倒流校验的讨论

(1) 倒流难出现:

a) 上联箱有蒸汽, 倒流 $\Delta P_{ZW} \quad \Sigma \Delta P_{dl}^{Max} < \Sigma \Delta P_s$

b) 吸热不均匀非常严重时才可能出现停滞、倒流

(2) 难成危害:

a) 一般倒流 $W > 1\text{m/s}$, 无害;

b) 倒流爆管无实例

4 倒流校验

倒流校验：

$$\Sigma \Delta P_s / \Sigma \Delta P_{dlMax} \geq 1.05, \quad (10-76)$$

(10-77)

四、 K_{jx} 与传热恶化

要求：回路循环倍率大于界限循环倍率，受热最强管质量含汽率 X 小于临界质量含汽率

1 界限循环倍率概念： K_{jx} —最高循环流速对应下的 K

2 限定 K

(1) . 超高压以下： $K > K_{jx}$ 自补偿； $K < K_{jx}$ 不能进行自补偿

(2) . 压力较高时（亚临界）： K 小，第二类传热恶化（蒸干）易出现

3 传热最强管，传热恶化检查

中、低参数， K 大 X 小 无传热恶化危险

高参数（ q 大， X 小）传热恶化检查： $X < X_{jx}$ （蒸干）；
 $X < X_{LJ}$ （膜态沸腾）

五、下降管带汽和汽化

带汽和汽化 S_{yd} 小 对水循环不利

1. 自汽化：下降管进口：流阻+加速阻力 过饱和汽化

进口不汽化条件： $h > 1.5W_{0XJ}^2/(2g)$, m (10-83)

2. 防止旋涡斗：图10-26 进口格栅

3. 下降管带汽：控制进口W

第七节 提高自然循环安全性措施

措施:

- (1) η_q ;
- (2) 合适上升管 Q ;
- (3) 合适上升管 H 和 d ;
- (4) 合适汽水导管 h 、 F ;
- (5) 旋风分离器 ΔP ;
- (6) 下降管 ΔP_{XJ} 。