



8.2 干燥过程的物料衡算与热量衡算

8.2.1 湿物料中含水量

8.2.2 干燥过程的物料衡算

8.2.3 热量衡算

8.2.4 空气出口状态的确定

8.2.5 干燥器的热效率





8.2.1 湿物料中含水量

两种表示方法:

一、湿基含水量 w [kg水/kg湿物料]

$$w = \frac{\text{湿物料中水分质量}}{\text{湿物料总质量}} = \frac{G_w}{G}$$





二、干基含水量 X [kg水/kg干物料]

$$X = \frac{\text{湿物料中水分质量}}{\text{湿物料中绝干物料质量}} = \frac{G_w}{G - G_w}$$

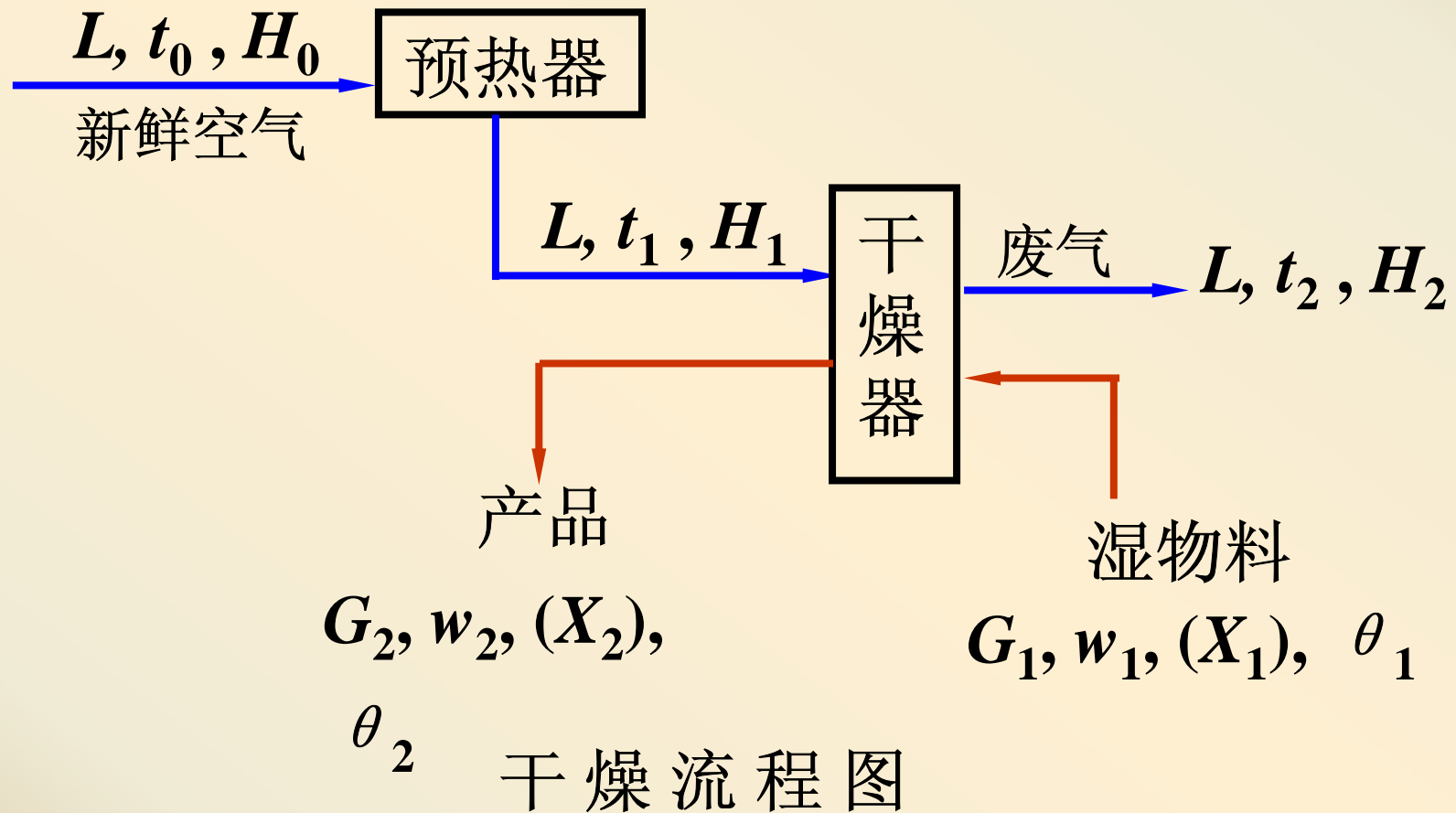
三、两者关系

$$w = \frac{X}{1 + X} \quad X = \frac{w}{1 - w}$$





8.2.2 干燥过程的物料衡算





L ——绝干空气质量流量, [kg干气/hr];

G_1 、 G_2 ——物料进出干燥器总量, [kg物料/hr]。

一、绝干物料量 G_c [kg干物料/hr]

$$G_c = G_1(1 - w_1) = G_2(1 - w_2)$$

二、汽化水分量 W [kg水/hr]

水分汽化量 = 湿物料中水分减少量 = 湿空气中水分增加量

$$\begin{aligned} W &= L(H_2 - H_1) = G_c(X_1 - X_2) = G_1 - G_2 = G_1w_1 - G_2w_2 \\ &= \frac{w_1 - w_2}{1 - w_1} G_2 = \frac{w_1 - w_2}{1 - w_2} G_1 \end{aligned}$$





三、绝干空气用量 L [kg干气/hr]

$$\because W = L(H_2 - H_1)$$

$$\therefore L = \frac{W}{H_2 - H_1}$$

$$\text{令 } l = \frac{L}{W} = \frac{1}{H_2 - H_1} = \frac{1}{H_2 - H_0} \quad [\text{kg干气/kg水}]$$

比空气用量：每汽化1kg的水所需干空气的量。
(单位空气消耗量)





四、湿空气参数

1. 湿空气用量

$$\begin{cases} L' = L(1 + H_0) & [\text{kg湿空气/hr}] \\ l' = l(1 + H_0) & [\text{kg湿空气/kg水}] \end{cases}$$

2. 湿空气体积

$$\begin{cases} V_s = L v_H & [\text{kg湿空气/hr}] \\ V_s' = l v_H & [\text{kg湿空气/kg水}] \end{cases}$$

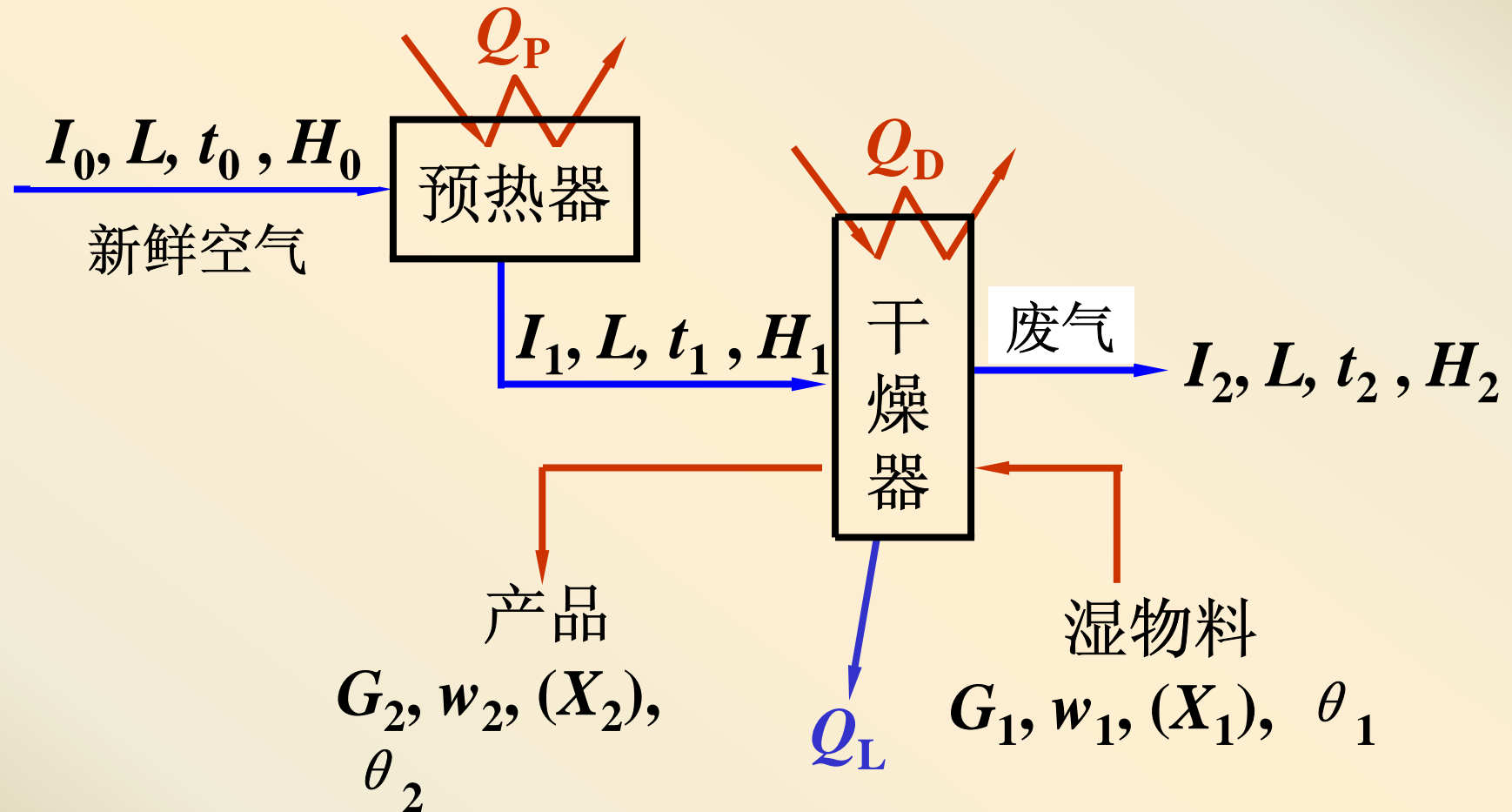
3. 湿空气密度

$$\rho = \frac{L'}{V_s} = \frac{l'}{V_s'} = \frac{1 + H_0}{v_H} \quad [\text{kg湿空气/m}^3\text{湿空气}]$$





8.2.3 热量衡算





Q_P : 预热器内加入热量, [kJ/hr];

Q_D : 干燥器内加入热量, [kJ/hr]。

外加总热量 $Q = Q_P + Q_D$

汽化1kg水所需热量:

$$q = \frac{Q}{W} = \frac{Q_P + Q_D}{W} = q_P + q_D \quad [\text{kJ/kg水}]$$





一、预热器的加热量计算 q_P

若忽略热损失，则

$$q_P = \frac{Q_P}{W} = \frac{L(I_1 - I_0)}{W} = l(I_1 - I_0) \quad [\text{kJ/kg水}]$$

二、干燥器的热量衡算

1. 输入量

(1) 湿物料带入热量（焓值） q_M'

$$q_M' = \frac{G_2}{W} c_M \theta_1 + c_w \theta_1$$





c_M : 干燥后物料比热, [kJ/kg湿料 $^{\circ}\text{C}$];

c_w : 水的比热, [kJ/kg水 $^{\circ}\text{C}$].

(2) 空气带入的焓值 $\frac{LI_1}{W} = II_1$ [kJ/kg水]

(3) 干燥器补充加入的热量

$$q_D = \frac{Q_D}{W} \quad [\text{kJ/kg水}]$$





2. 输出量

(1) 干物料带出焓值: $\frac{G_2 c_M \theta_2}{W}$

(2) 废气带出焓值: $\frac{LI_2}{W} = lI_2$

(3) 热损失: $\frac{Q_L}{W} = q_L l$

Σ 输入 = Σ 输出

$$\frac{G_2}{W} c_M \theta_1 + c_w \theta_1 + lI_1 + q_D = \frac{G_2}{W} c_M \theta_2 + lI_2 + q_L$$

$$q_D = l(I_2 - I_1) + \frac{G_2}{W} c_M (\theta_2 - \theta_1) + q_L - c_w \theta_1$$

物料升温所需热量





$$l(I_2 - I_1) = q_D - \frac{G_2}{W} c_M (\theta_2 - \theta_1) - q_L + c_w \theta_1$$

$$\text{又} \because l = \frac{1}{H_2 - H_1} = \frac{1}{H_2 - H_0}$$

$$\therefore \frac{I_2 - I_1}{H_2 - H_1} = \frac{I_2 - I_1}{H_2 - H_0} = q_D - \frac{G_2}{W} c_M (\theta_2 - \theta_1) - q_L + c_w \theta_1$$

所需外加总热量 q :

$$\begin{aligned} q = q_P + q_D &= l(I_1 - I_0) + l(I_2 - I_1) + \frac{G_2}{W} c_M (\theta_2 - \theta_1) + q_L - c_w \theta_1 \\ &= l(I_2 - I_0) + \frac{G_2}{W} c_M (\theta_2 - \theta_1) + q_L - c_w \theta_1 \end{aligned}$$





$$\text{令: } \Sigma q = \frac{G_2}{W} c_M (\theta_2 - \theta_1) + q_L$$

$$\text{则: } q_D = l(I_2 - I_1) + \Sigma q - c_W \theta_1$$

$$\text{并且有: } q = l(I_2 - I_0) + \Sigma q - c_W \theta_1$$





8.2.4 空气出口状态的确定

一、等焓干燥过程（绝热干燥过程或理想干燥过程）

——空气在进、出干燥器的焓值不变。

过程分析：

$$\therefore \begin{cases} q = l(I_2 - I_0) + \frac{G_2}{W} c_w (\theta_2 - \theta_1) + q_L - c_w \theta_1 \\ q_p = l(I_1 - I_0) \\ q_D = l(I_2 - I_1) + \frac{G_2}{W} c_w (\theta_2 - \theta_1) + q_L - c_w \theta_1 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \therefore q_p &= l(I_1 - I_0) = q - q_D \\ &= l(I_2 - I_0) + \frac{G_2}{W} c_w (\theta_2 - \theta_1) + q_L - c_w \theta_1 - q_D \end{aligned}$$





$$\therefore l(I_2 - I_1) = c_w \theta_1 + q_D - \frac{G_2}{W} c_w (\theta_2 - \theta_1) - q_L$$

$$\text{令} \begin{cases} \Delta = l(I_2 - I_1) = \frac{I_2 - I_1}{H_2 - H_1} \\ \Sigma q = \frac{G_2}{W} c_w (\theta_2 - \theta_1) + q_L \end{cases}$$

$$\text{则有: } \frac{I_2 - I_1}{H_2 - H_1} = c_w \theta_1 + q_D - \Sigma q = \Delta$$

$(c_w \theta_1 + q_D)$: 外界补充的热量及湿物料中被汽化水分带入的热量;

Σq : 热损失及湿物料进出干燥器热量之差。





等焓过程:

$$I_2 = I_1 \longrightarrow \begin{cases} \Delta = 0 \\ c_w \theta_1 + q_D - \Sigma q = 0 \end{cases}$$

等焓过程又可分为两种情况, 其一

$$\left\{ \begin{array}{l} q_L = 0 \quad \text{无热损失} \\ \frac{G_2}{W} c_w (\theta_2 - \theta_1) = 0 \quad \text{湿物料不升温} \quad \theta_2 = \theta_1 \\ q_D = 0 \quad \text{干燥器不补充热量} \\ c_w \theta_1 = 0 \quad \text{湿物料中汽化水分带入的热量很少} \end{array} \right.$$





空气放出的显热完全用于蒸发水分所需的潜热，而水蒸汽又把这部分潜热带回到空气中，所以空气焓值不变。

其二

$$\text{若 } c_w \theta_1 + q_D = \Sigma q$$

即：湿物料中水分带入的热量及干燥器补充的热量正好与热损失及物料升温所需的热量相抵消，此时，空气的焓值也保持不变。

以上两种干燥过程均为等焓干燥过程。





二、实际干燥过程

——在非绝热情况下进行的干燥过程。

1. 补充热量大于损失的热量

$$\Delta > 0 \quad \text{即} \quad I_2 > I_1$$

2. 补充热量小于损失的热量

$$\Delta < 0 \quad \text{即} \quad I_2 < I_1$$





3. 空气出口状态的确定方法

——即确定 H_2 、 I_2

(1) 计算法

$$\Delta = \frac{I_2 - I_1}{H_2 - H_1} = c_w \theta_1 + q_D - \Sigma q$$
$$I_2 = (1.01 + 1.88H_2)t_2 + 2492H_2$$

} $\longrightarrow (H_2, I_2)$

(2) 图解法

举一例题





8.2.5 干燥器的热效率

一、热效率

定义：
$$\eta_h = \frac{q'}{q} = \frac{\text{汽化1kg水分所需热量}}{\text{汽化1kg水分外界所需补充的热量}}$$

二、影响热效率的因素

1. t_0 、 t_1 一定时，
$$\begin{cases} t_2 \downarrow \rightarrow \eta_h \uparrow \\ H_2 \uparrow \rightarrow \eta_h \uparrow \end{cases}$$

传质推动力 $(t - t_w) \downarrow$ 传热推动力 $(H_w - H) \downarrow$





因此， t_2 不能过低，一般规定 t_2 比进入干燥器时空气的湿球温度 t_w 高 $20 \sim 50^\circ\text{C}$ 。

2. t_0 、 t_2 一定时， $t_1 \uparrow \rightarrow \eta_h \uparrow$

3. 回收废气中热量

4. 加强管道保温，减少热损失

