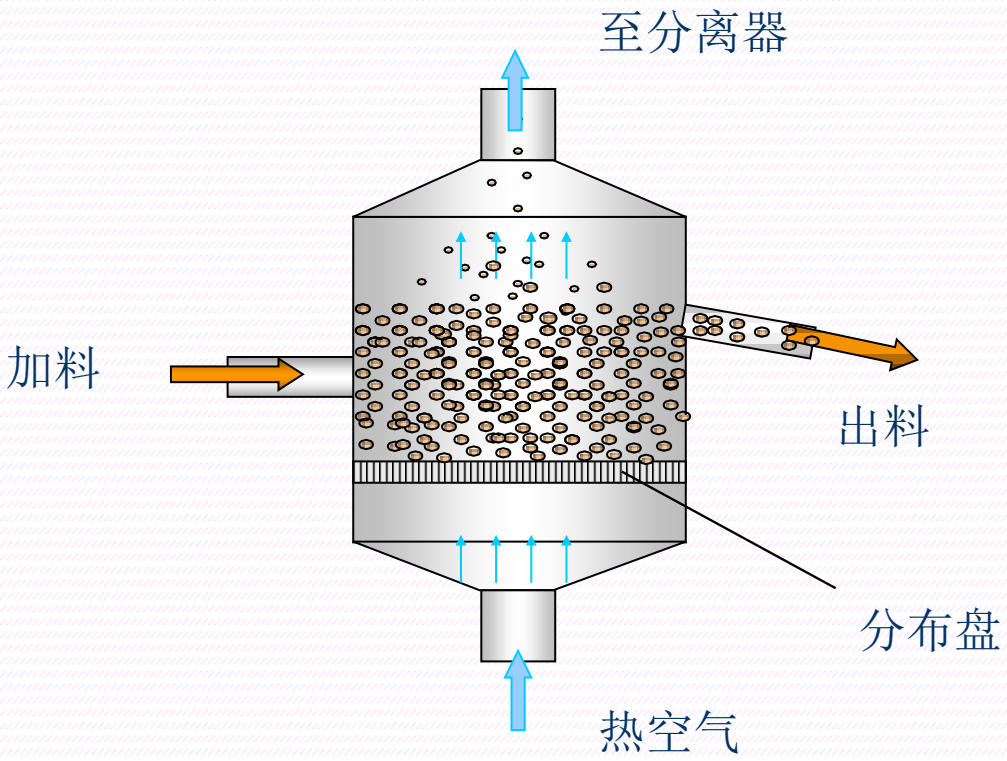
第十章　干 燥



单层圆筒沸腾床干燥器

10.1 概述

10.1.1 干燥的目的、本质及分类

10.1.1.1 目的

将湿固体物料除去湿分（水或其他液体）——去湿。

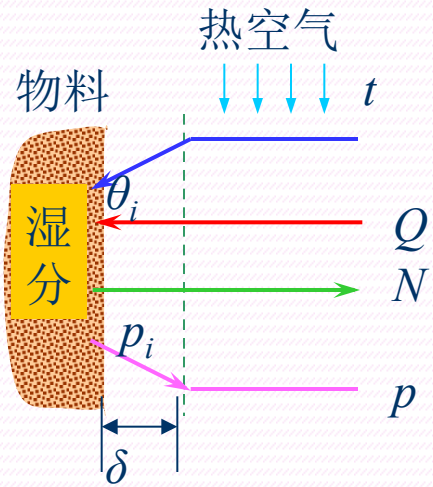
去湿的方法：

（1）机械去湿，即通过压榨、过滤、离心分离等方法去湿，这是一种低能耗的去湿方法，但这种方法湿分的除去不完全。

（2）热能去湿，即借热能使物料的湿分汽化，并将汽化产生的蒸汽由惰性气体带走或用真空抽吸而除去的方法，这种方法简称为干燥。

10.1.1.2 本质

本质：水分从物料表面向气相转移的过程。干燥过程是传质和传热相结合的过程（热、质反向传递），干燥速率同时由传热速率和传质速率所支配。



热空气与物料间传热和传质

必要条件：被干燥物料表面上的蒸汽压超过干燥介质中的蒸汽分压，即$p_m > p_w$。

$\Delta p = (p_m - p_w)\uparrow$，干燥速率↑

因此，作为干燥介质的热空气必须不断提供热量给湿物料，使湿物料表面的水分不断汽化$p_m\uparrow$，物料内部的水分可继续扩散到表面来。另一方面，干燥介质应及时将汽化的水汽带走$p_w\downarrow$，以保持一定的传质推动力Δp。

10.1.1.3 分类

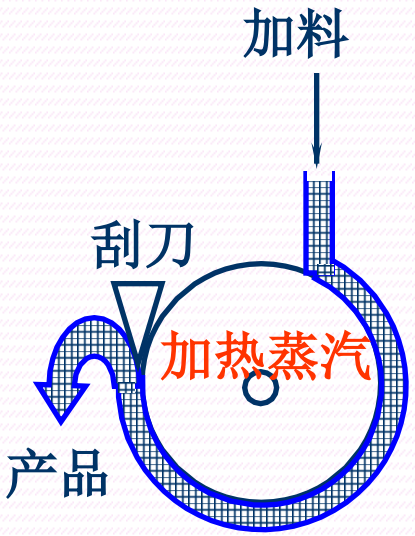
根据热能传递方式的不同分成以下四类：

（1）传导干燥

能通过传热壁面以传导方式传给与壁面接触的湿物料。

优点：热能利用程度较高；

缺点：与金属壁面接触的物料在干燥时易形成过热而变质。



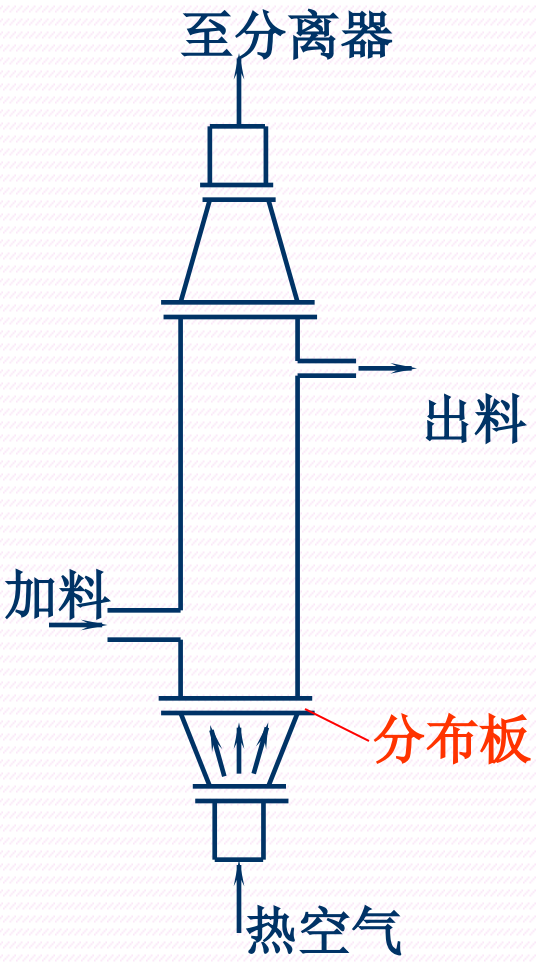
传导干燥—滚筒干燥器

（2）对流干燥

热能以对流方式由热空气传给与其直接接触的湿物料，产生的蒸汽也由热空气带走。

优点：热空气的温度调节比较方便，物料不至于被过热。

缺点：热空气离开干燥器时尚带有相当大的一部分热能，因此对流干燥的热能利用程度比传导干燥差。



（3）辐射干燥

热能以电磁波的形式由辐射器发射到达湿物料表面，被湿物料吸收后又转变为热能将水分加热汽化而达到干燥的目的。

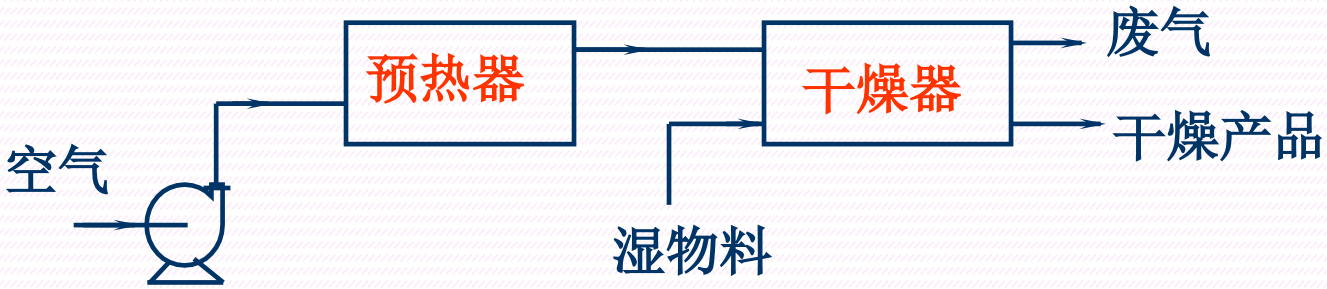
优点：生产强度大，产品干燥均匀而洁净，设备紧凑使用灵活，可以减少占地面积，缩短干燥时间。

缺点：电能消耗大。

（4）介电加热干燥

将需要干燥的物料置于高频电场内，依靠电能加热物料并使湿分汽化。此法由于加热的能量是由高频装置产生的，其所需的费用较大，故在工业上的应用受到限制。

10.1.2 对流干燥流程及其经济性



对流干燥流程示意图（并流、连续）

经济性：能耗和热的利用率

10.2 湿空气的性质及湿度图

10.2.1 湿空气的性质

1 水蒸气分压p_v

空气中水蒸气分压愈大，水分含量就愈高，根据气体分压定律，则有

$$\frac{p_v}{p_g}=\frac{p_v}{P-p_v}=\frac{n_v}{n_g}$$

2 湿度(*humidity*)*H*

又称为湿含量或绝对湿度(absolute humidity)。它以湿空气中所含水蒸汽的质量与绝对干空气的质量之比表示，使用符号H，其单位为：kg水气/kg干空气 。

$$H=\frac{\text{湿空气中水气的质量}}{\text{湿空气中绝干空气的质量}}=\frac{n_v M_v}{n_g M_g}$$

常温下，湿空气可视为理想气体，则有

$$H=\frac{18p_v}{29(P-p_v)}=0.622\frac{p_v}{P-p_v}$$

在饱和状态时，湿空气中水蒸气分压p_v等于该空气温度下纯水的饱和蒸气压p_s，则有

$$H_s=0.622\frac{p_s}{P-p_s}$$

由于水的饱和蒸气压仅与温度有关，故湿空气的饱和湿度是温度和总压的函数，即

$$H_s=f(t,P)$$

3 相对湿度 φ

在一定温度及总压下，湿空气的水汽分压p_v与同温度下水的饱和蒸汽压 p_S 之比的百分数，称为相对湿度(*relative humidity*)，用符号φ表示，即

$$\varphi = \frac{p_v}{p_s} \times 100\%$$

当p_v=0时，φ=0，表示湿空气不含水分，即为绝干空气。

当p_v=p_s时，φ=1，表示湿空气为饱和空气。

相对湿度和绝对湿度的关系

◆相对湿度：可以说明湿空气偏离饱和空气的程度，能用于判定该湿空气能否作为干燥介质，φ值与越小，则吸湿能力越大。

◆湿度：是湿空气含水量的绝对值，不能用于分辨湿空气的吸湿能力。

在一定总压和温度下，两者之间的关系为

$$H = 0.622 \frac{\varphi p_s}{P - \varphi p_s}$$

4 湿空气的比热c_H

在常压下，将湿空气中1kg绝干空气及相应H kg 水汽的温度升高（或降低）1°C所需要（或放出）的热量，称为比热，又称为湿热，用符号C_H表示，单位是kJ/(kg绝干气·°C)，即

$$c_H = c_g + Hc_v$$

式中 c_H——湿空气的比热， kJ/(kg绝干气·°C)；

c_g——绝干空气的比热， kJ/(kg绝干气·°C)；

cv——水气的比热， kJ/(kg水气·°C)

在常用的温度范围内，有

$$c_H = 1.01 + 1.88H$$

上式说明：湿空气的比热只是湿度的函数。

5 湿空气的焓 I

湿空气中1kg绝干空气的焓与相应水汽的焓之和，称为湿空气的焓，用符号I表示，单位是kJ/kg干空气。

$$I=I_g+I_vH$$

式中 I——湿空气的焓，kJ/kg绝干气；

I_g——绝干空气的焓，kJ/kg绝干气；

I_v——水气的焓，kJ/kg水气。

注：空气的焓是根据干空气及液态水在0 °C时焓为零作基准而计算的，因此，对于温度为t 及湿度为H 的湿空气，其焓包括由0° C的水变为0° C的水汽所需的潜热及湿空气由0°C升温至t °C所需的显热之和，即

$$I=(c_g+Hc_v)t+Hr_0^{\ 0}$$
$$=(1.01+1.88H)t+2490H$$

6 湿空气的比容v_H

在湿空气中，1kg绝干气体积和相应的Hkg水气体积之和，称为湿空气的比容，亦称湿容积(humid volume)，用符号v_H表示，单位为：m^3湿空气/kg绝干气。

$$v_H = \frac{m^3\text{绝干气} + m^3\text{水气}}{kg\text{绝干气}}$$

$$v_H = \left(\frac{1}{29} + \frac{H}{18}\right) \times 22.4 \times \frac{273+t}{273} \times \frac{1.013\times10^5}{P}$$

$$= (0.772 + 1.244H) \times 22.4 \times \frac{273+t}{273} \times \frac{1.013\times10^5}{P}$$

7 露点 t_d

不饱和的空气在湿含量H不变的情况下冷却，达到饱和状态时的温度，称为该湿空气的露点(dew piont),用符号t_d表示。

在露点时，空气的湿度为饱和湿度，φ=1。

$$H_{s,t_d}=\frac{0.622p_{s,t_d}}{P-p_{s,t_d}}$$

$$p_{s,t_d}=\frac{H_{s,t_d}P}{0.622+H_{s,t_d}}$$

当空气从露点继续冷却时，其中部分水蒸汽便会以露珠的形式凝结出来。空气的总压一定，露点时的饱和水蒸汽压$p_{s,td}$仅与空气的湿度$H_{s,td}$有关，即 $p_{s,td}=f(H_{s,td})$ 或 $t_d=(H_{s,td})$ 湿度越大，t_d 越大。

8干球温度t和湿球温度t_w

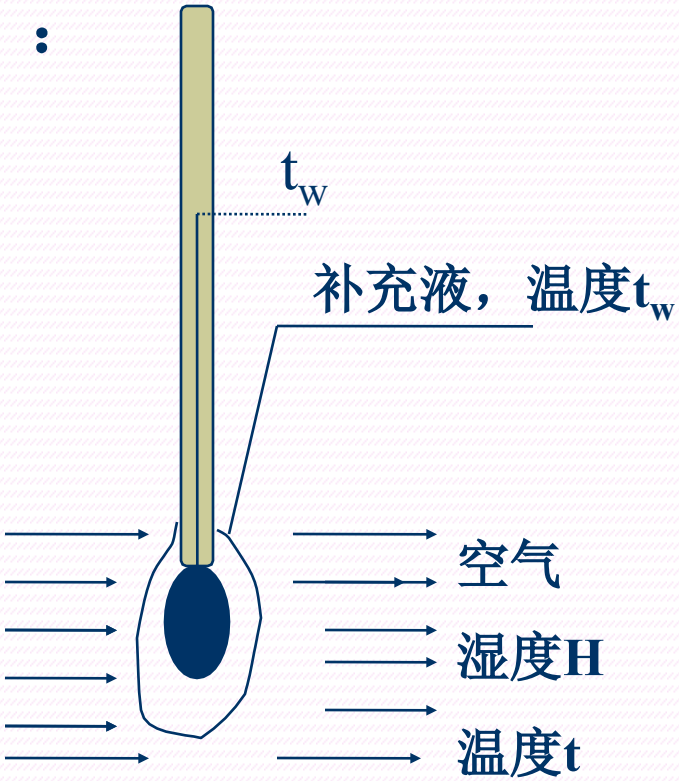
干球温度t和湿球温度tw

干球温度t：空气的温度

湿球温度t_w：

不饱和空气的湿球温度t_w低于干球温度t。

形成原理（如图所示）：



在稳定状态时，空气向湿纱布表面的传热速率为： $Q=\alpha S（t-t_w）$

气膜中水气向空气的传递速率为：$N=k_H（H_{s,tw}-H）S$

在稳定状态下，传热速率和传质速率之间的关系为：$Q=Nr_{tw}$

$$t_w = t - \frac{k_H r_{tw}}{\alpha}(H_{s,tw} - H)$$

对空气~水蒸气系统而言， $\alpha/k_H=1.09$

强调：

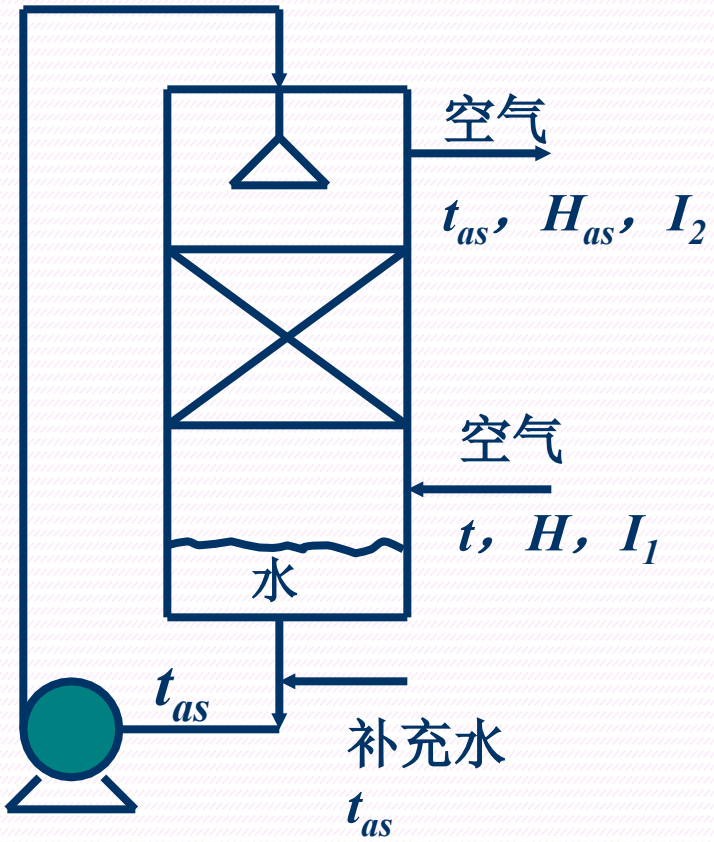
- 湿球温度实际上是湿纱布中水分的温度，而并不代表空气的真实温度，由于此温度由湿空气的温度、湿度所决定，故称其为湿空气的湿球温度，所以它是表明湿空气状态或性质的一种参数。

- 对于某一定干球温度的湿空气，其相对湿度越低，湿球温度值越低。对于饱和湿空气而言，其湿球温度与干球温度相等。

9 绝热饱和温度t_{as}

形成原理：

绝热降温增湿过程及等焓过程



绝热增湿过程进行到空气被水汽所饱和，则空气的温度不再下降，而等于循环水的温度，称此温度为该空气的绝热饱和温度，用符号t_{as}表示，其对应的饱和湿度为H_{as}，此刻水的温度亦为t_{as}。

在空气绝热增湿过程中，空气失去的是显热，而得到的是汽化水带来的潜热，空气的温度和湿度虽随过程的进行而变化，但其焓值不变。

塔顶和塔底处湿空气的焓分别为：

$$I_1 = (c_g + Hc_v)t + Hr_0^{\ 0}$$

$$I_2 = (c_g + H_{as}c_v)t_{as} + H_{as}r_0^{\ 0}$$

湿空气在绝热增湿过程中为等焓过程，即：$I_1=I_2$

由于H和Has值与I相比皆为一很小的数值，故可视为C_H 、C_{Has}不随湿度而变，即$C_H=C_{Has}$。则有

$$t_{as} = t - \frac{r_0^{\ 0}}{c_H}(H_{as} - H)$$

实验测定表明，对于在湍流状态下的空气－水蒸气系统而言，$a/k_H \approx C_H$， 同时 $r_0^0 \approx r_{tw}$，故在一定温度t和湿度H下，有

$$t_w \approx t_{as}$$

强调：绝热饱和温度t_{as}与湿球温度t_w是两个完全不的概念。但是两者都是湿空气状态(t和H)的函数。特别是对空气－水气系统，两者在数值上近似相等，对其他系统而言，不存在此关系。

对空气－水蒸气系统，干球温度、绝热饱和温度（或湿球温度）及露点之间的关系为：

对于不饱和湿空气：$t > t_{as}$（或t_w）$> t_d$

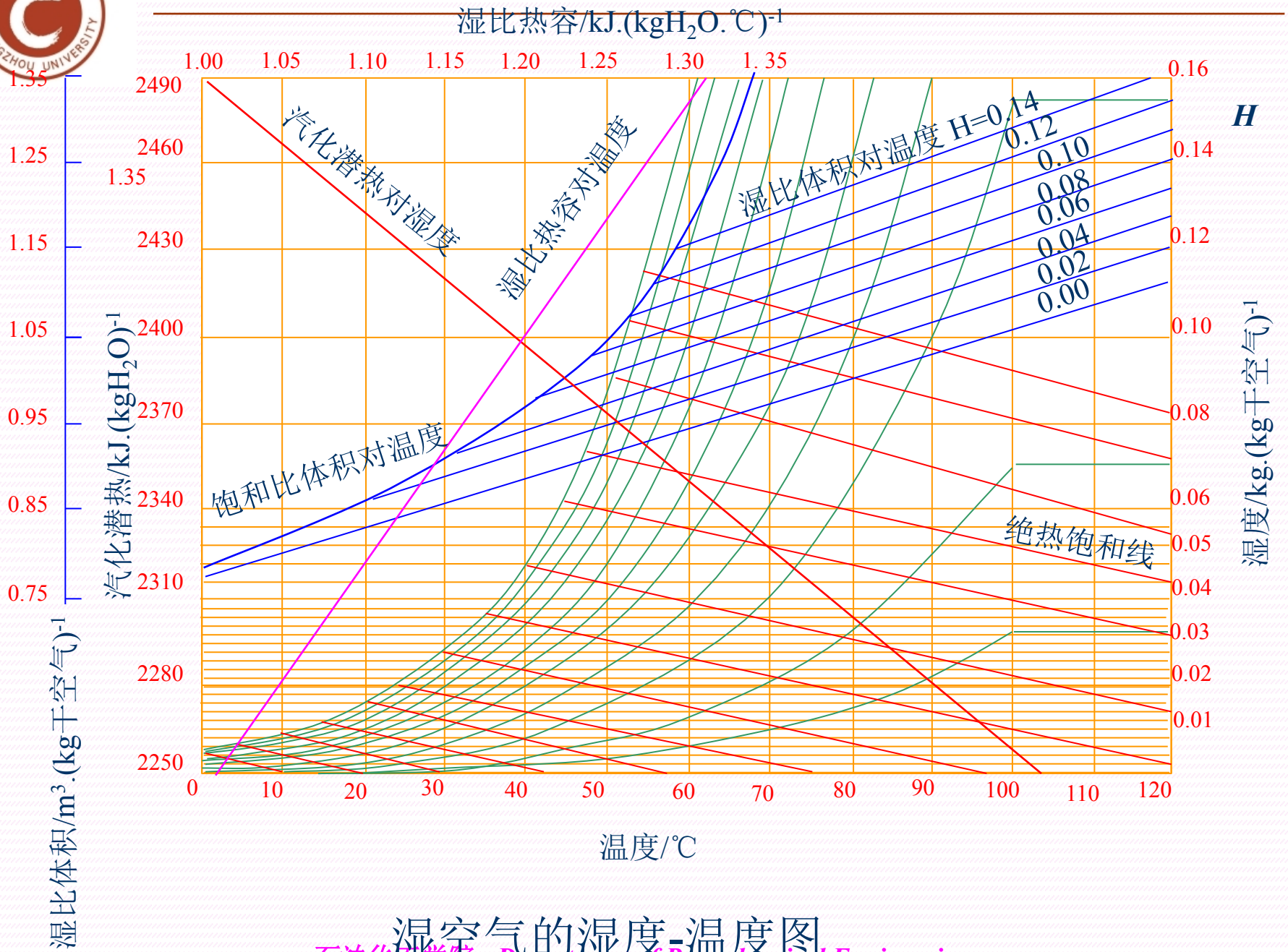
对于饱和的湿空气：$t = t_{as}$（或t_w）$= t_d$

10.2.2 湿空气的湿度图

在工程计算中，常用的是以湿空气的焓值I为纵坐标，湿度H为横坐标的焓湿图，即*I-H*图。

图上共有五种线，图上任一点都代表一定温度*t*和湿度 *H*的湿空气状态。

- 等湿度线(等*H*线)：
- 等焓线(等*I*线)：
- 等温线(等 *t*线)：
- 等相对温度线（等 ϕ线）
- 水蒸汽分压线：


湿比热容/kJ.(kgH2O.℃)-1
1.00
1.05
1.10
1.15
1.20
1.25
1.30
1. 35
2490
2460
2430
2400
2370
2340
2310
2280
2250
汽化潜热/kJ.(kgH2O)-1
1.35
1.25
1.15
1.05
0.95
0.85
0.75
湿比体积/m3.(kg干空气)-1
汽化潜热对湿度
湿比热容对温度
湿比体积对温度 H=0.14
0.12
0.10
0.08
0.06
0.04
0.02
0.00
饱和比体积对温度
绝热饱和线
H
0.16
0.14
0.12
0.10
0.08
0.06
0.05
0.04
0.03
0.02
0.01
湿度/kg.(kg干空气)-1
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
温度/℃

湿空气的湿度-温度图

1 等湿度线(等H线)

一组与纵轴平行的直线。在同一条等H线上，湿空气的露点t_d不变。

2 等焓线(等I线)

一组与斜轴平行的直线 。在同一条等I线上，湿空气的温度t随湿度H的增大而下降，但其焓值不变。

3 等温线(等t线)

$$I=(1.88t+2490)H+1.01t$$

当空气的干球温度t不变时，I与H成直线关系，故在I-H图中对应不同的t，可作出许多等t线。 各种不同温度的等温线，其斜率为(1.88t+2492)，故温度愈高，其斜率愈大。因此，这许多成直线的等t线并不是互相平行的。

4 等相对温度线（等φ线）

$$H = 0.622\frac{\varphi p_s}{P - \varphi p_s}$$

当湿空气的湿度 H 为一定值时，温度愈高，其相对湿度φ值愈低，即其作为干燥介质时，吸收水汽的能力愈强，故湿空气进入干燥器之前必须经过预热器预热提高温度，目的除了提高湿空气的焓值使其作为载热体外，也是为了降低其相对湿度而作为载湿体。

5 水蒸汽分压线

$$p_v = \frac{HP}{0.622 + H}$$

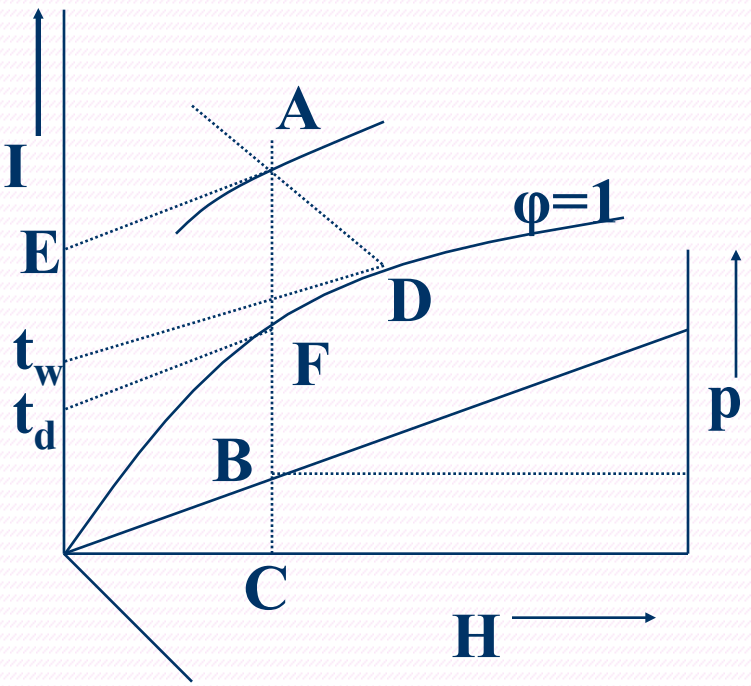
该线表示空气的湿度 H 与空气中的水蒸汽分压 p_v 之间关系曲线。当湿空气的总压 P 不变时，水蒸汽的分压 p_v 随湿度 H 而变化。水蒸汽分压标于右端纵轴上，其单位为 kN/m^2。

湿焓图的说明与应用

根据湿空气任意两个独立的参数，就可以在H-I图上确定该空气的状态点，然后查出空气的其他性质。

非独立的参数如：t_d~H，p~H，t_d~p，t_w~I，t_{as}~I等，它们均在同一等H线或等I线上。

干球温度t、露点t_d、湿球温度t_w（或绝热饱和温度t_{as}）都是由等t线确定的。

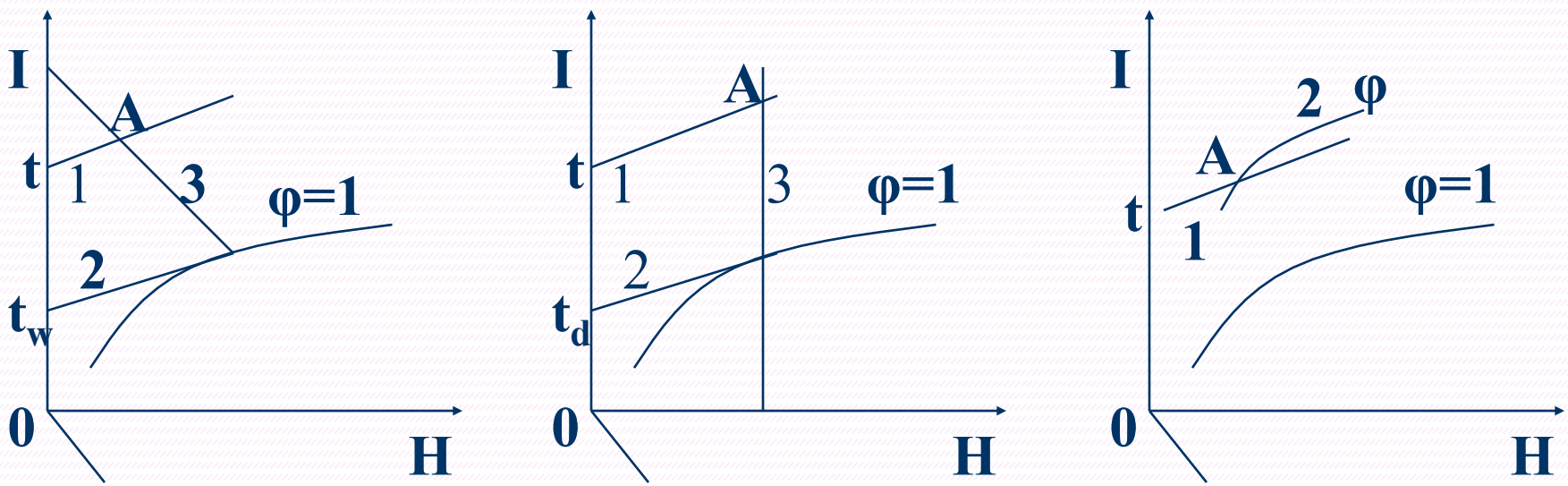


通常根据下述已知条件之一来确定湿空气的状态点，已知条件是：

（1）湿空气的干球温度t和湿球温度t_w；

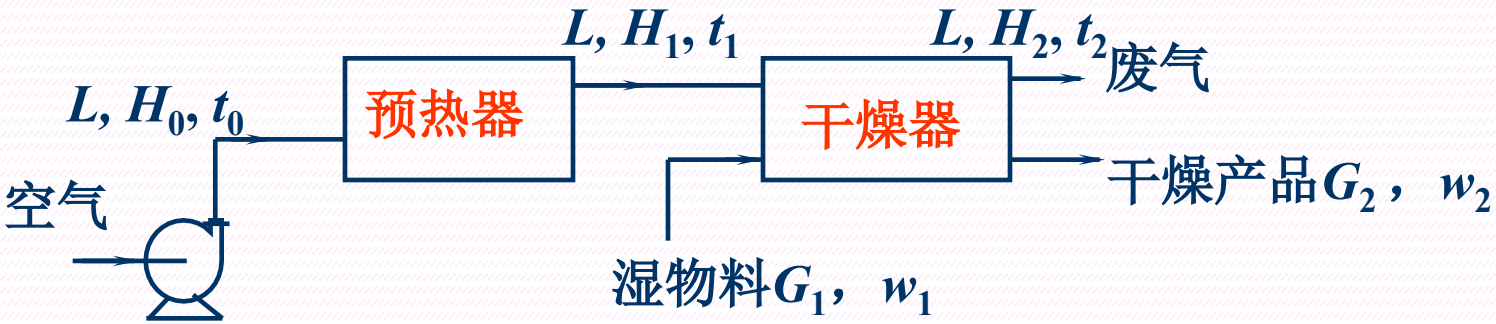
（2）湿空气的干球温度t和露点t_d；

（3）湿空气的干球温度t和相对湿度φ。



10.3 干燥器的物料衡算及热量衡算

10.3.1 对流干燥流程及操作原理



对流干燥流程示意图（并流、连续）

10.3.2 物料衡算

（1）物料中的含水率

①以湿物料为基准的含水率（湿基含水率）w

$$w=\frac{\text{湿物料中水分含量}}{\text{湿物料总质量}}\times 100\%$$

②以绝干物料为基准的含水率——干基含水率X

$$X=\frac{\text{湿物料中水分含量}}{\text{绝干物料质量}}\times 100\%$$

③X与w的关系

$$\boxed{X=\frac{w}{1-w} \qquad w=\frac{X}{1+X}}$$

（2）干燥后的物料质量G_2和水分蒸发量W

总物料衡算：　　$G_1 = G_2 + W$

绝干物料衡算：　$G_c = G_1（1-w_1）= G_2（1-w_2）$

式中 G_c——湿物料中绝对干物料的质量，kg/h;

G_1——进入干燥器的湿物料质量， kg/h;

G_2——离开干燥器的物料质量， kg/h;

w_1——干燥前物料中的含水率，湿基;

w_2——干燥后物料中的含水率，湿基。

$$G_2 = G_1 \frac{1-w_1}{1-w_2} \quad \text{或} \quad G_1 = G_2 \frac{1-w_2}{1-w_1}$$

$$W = G_1 - G_2 = G_1 \frac{w_1 - w_2}{1-w_2} = G_2 \frac{w_1 - w_2}{1-w_1}$$

若用干基含水率计算，则蒸发水分量W为

$$W = G_c (X_1 - X_2)$$

（3）空气用量的确定

通过干燥器的绝干空气质量是不变的，故用它作为计算的基准。

水分衡算：

$$W = L(H_2 - H_1) = G_c(X_1 - X_2)$$

或

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

式中 L——绝干空气的质量流量，kg/h;

H_1、H_2——进、出干燥器的空气湿度，kg/ kg;

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

令$l=L/W$为比空气用量，即从湿物料中汽化1kg水分所需的干空气用量，kg干空气/kg水，则

$$\frac{L}{W}=\frac{1}{H_2-H_1}$$

通过预热器前后，空气的湿度不变，若以H_0表示进入预热器时的空气湿度，则$H_1=H_0$

$$L=\frac{W}{H_2-H_1}=\frac{W}{H_2-H_0}\text{或}\qquad l=\frac{1}{H_2-H_1}=\frac{1}{H_2-H_0}$$

实际空气（新鲜）用量：

$$l' = l(1+H_1) = l(1+H_0)$$

或

$$L' = L(1+H_1) = l(1+H_0)$$

湿空气的体积流量V_h（m^3/h）

$$V_h = L\nu_H = L(0.773+1.244H)\times\frac{273+t}{273}\times\frac{101.3}{p}$$

式中t、H由风机所在部位的空气状态而定。

10.3.3 热量衡算

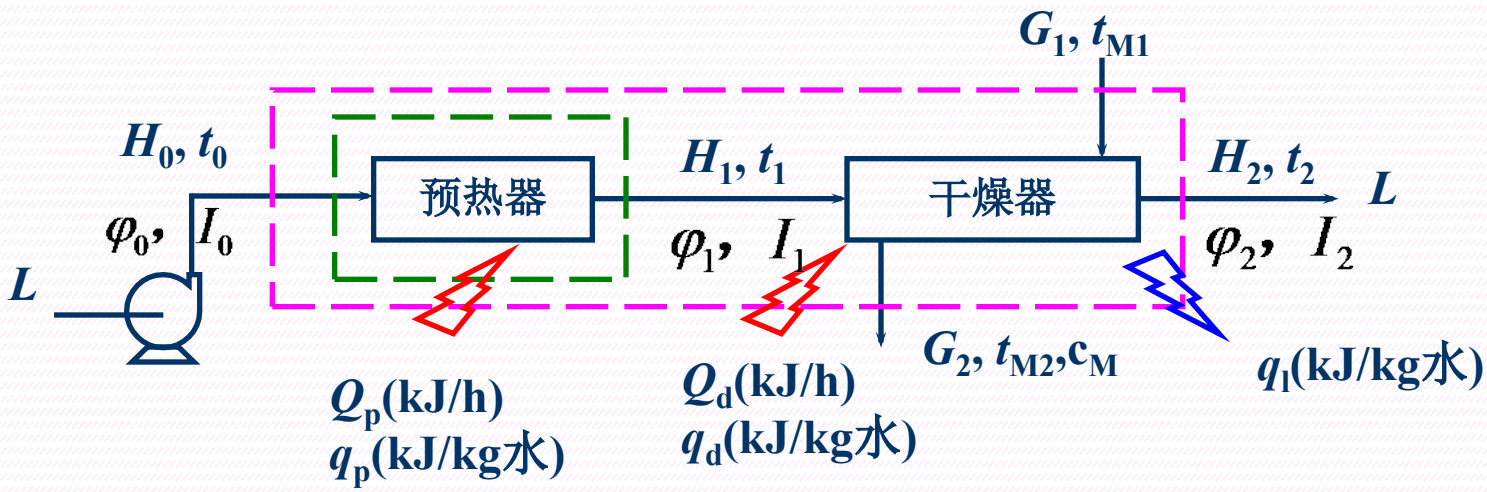


图10-7 干燥器的热量衡算

每千克水分所需的全部热量

$$q = \frac{Q}{W} = \frac{Q_p + Q_d}{W} = q_p + q_d$$

预热器加入的热量 $q_p = \dfrac{Q_p}{W}$ kJ/kg水

干燥室内补充的热量 $q_d = \dfrac{Q_d}{W}$ kJ/kg水

干燥所需的全部热量 $q = q_p + q_d$ kJ/kg水

干燥后物料的比热 $c_M = (1 - w_2)c_s + w_2 c_l$

绝干物料的比热，kJ/kg·K 水的比热，kJ/kg·K

对整个干燥系统进行热量衡算：输入热量=输出热量

$$\frac{G_2 c_M t_{M1}}{W} + c_l t_{M1} + lI_0 + q_p + q_d = \frac{G_2 c_M t_{M2}}{W} + lI_2 + q_l$$

干燥系统所需的总热量为：

$$q = q_p + q_d = l(I_2 - I_0) + q_1 + \frac{G_2 c_M (t_{M2} - t_{M1})}{W} - c_l t_{M1}$$

令 $$q_M = \frac{G_2 c_M (t_{M2} - t_{M1})}{W}$$ $$\sum q = q_1 + q_M$$

$$q = q_p + q_d = l(I_2 - I_0) + \sum q - c_l t_{M1}$$

$l=1/(H_2-H_0)$

$$q = q_p + q_d = \frac{I_2 - I_0}{H_2 - H_0} + \sum q - c_l t_{M1}$$

注：

① 预热器加入热量 $q_p = l(I_1 - I_0)$ 或 $Q_p = L(I_1 - I_0)$

②干燥室内所需补充的热量

$$q_d = l(I_2 - I_1) + \sum q - c_l t_{M1} \quad 或 \quad Q_d = W q_d$$

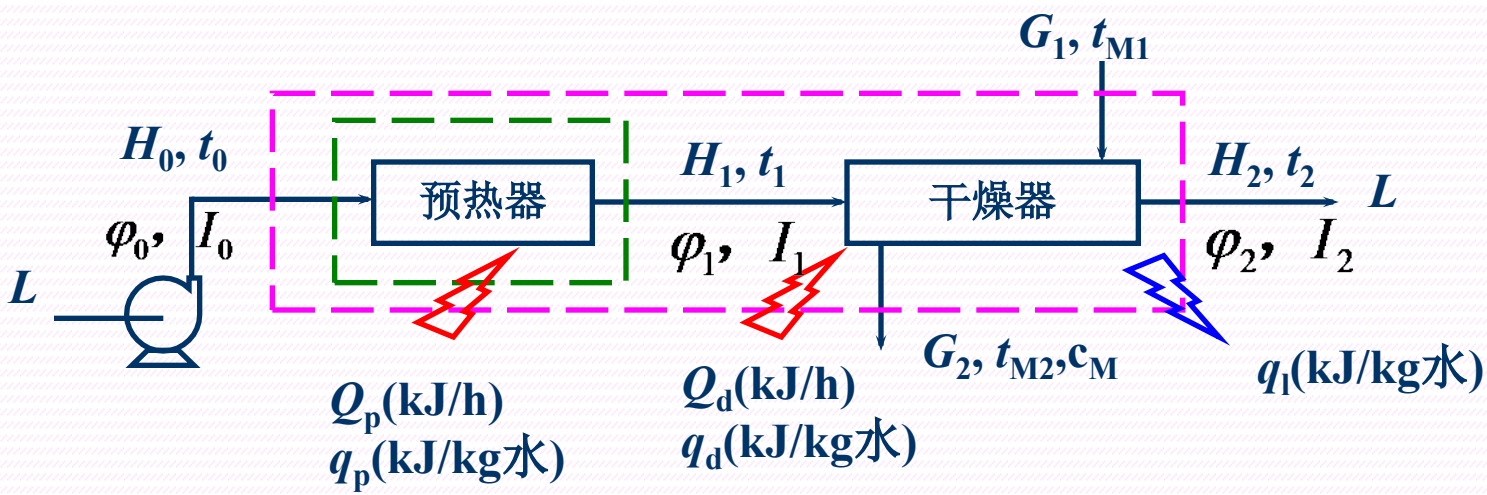


图10-7 干燥器的热量衡算

$$q = q_{\mathrm{p}} + q_{\mathrm{d}} = l(I_2 - I_0) + \sum q - c_l t_{\mathrm{M1}} \quad)$$

$$q_{\mathrm{p}} = l(I_1 - I_0)$$

$$\Rightarrow \quad l(I_2 - I_1) = q_{\mathrm{d}} + c_l t_{\mathrm{M1}} - \sum q \equiv \Delta$$

即 $$\frac{I_2 - I_1}{H_2 - H_1} = \Delta$$

式中 $$\Delta = (q_{\mathrm{d}} + c_l t_{\mathrm{M1}}) - \sum q = (q_{\mathrm{d}} + c_l t_{\mathrm{M1}}) - (q_{\mathrm{M}} + q_{\mathrm{l}})$$

10.3.4.1 等焓干燥

$$\frac{I_2 - I_1}{H_2 - H_1} = q_d + c_l t_{M1} - \sum q \equiv \Delta$$

$\Delta = 0$ 则 $I_2 = I_1$称为理想干燥过程或等焓干燥过程、绝热过程

$\Delta = 0$ 即 $q_d + c_l t_{M1} = q_M + q_l$

“补充的热量” = “损失的热量”

工程上符合下列条件的干燥过程可认为是等焓干燥过程：

① 干燥器内不补充热量，$q_d=0$；

② 干燥器绝热良好，$q_l=0$；

③ 物料进出干燥器时的温差不大，$t_{M1} \approx t_{M2}$。

等焓干燥过程湿空气出口状态的确定可采用以下方法：

（1）解析法（已知空气出口温度 t_2 时用此法方便）

$$I_2 = I_1$$

$$(1.01+1.88H_2)\,t_2+2492H_2=(1.01+1.88H_1)\,t_1+2492H_1$$

若已知干燥器出口湿空气的温度或湿度，则可根据上式确定另一参数从而确定出口湿空气状态。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：https://d.book118.com/386013145110010220