

目录

第十三章 干燥

第一节 概述 ▶

第二节 湿空气的性质及湿度图 ▶

- 一、湿空气的性质
- 二、湿度图
- 三、湿度图的应用

第三节 干燥过程的计算 ▶

- 一、湿物料中含水率的表示方法
- 二、物料衡算
- 三、热量衡算

目录

习题课 ▶

第四节 干燥速率和干燥时间 ▶

- 一、干燥速率
- 二、物料中的几种水分
- 三、干燥过程及机理
- 四、恒定干燥条件下干燥时间的计算

第五节 干燥器 ▶

- 一、常用工业干燥器

第十三章 小结 ▶

第三版第18次印刷的教材更正 ▶

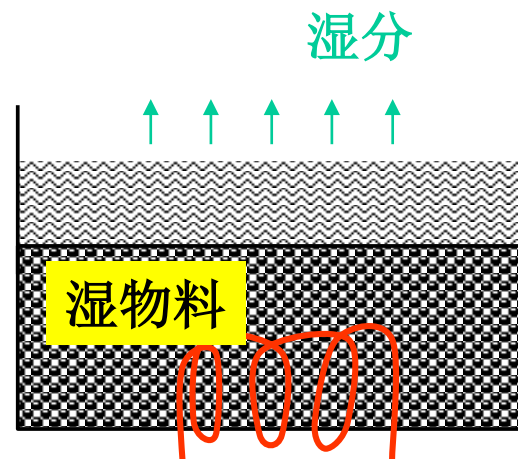
第十三章 干燥

第一节 概述

湿物料:

湿分----水分或其它液体

除湿方法:



(1) 机械分离法-----即通过压榨、过滤和离心分离等方法去湿。

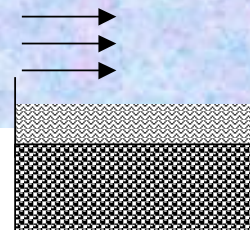
这种方法无法彻底去除湿分。

(2) 吸附脱水-----即用固体吸附剂，如 CaCl_2 、硅胶等吸去物料中所含的水分。这种方法只能除去少量湿分。

(3) 干燥法-----指利用热能，使湿物料中的湿分气化而除去的方法。

本章将介绍

第一节 概述



传导干燥

-----热能通过传热壁面以传导方式传给物料，产生的湿分蒸气被气相（又称干燥介质）带走，或用真空泵排走。例如纸制品可以铺在热滚筒上进行干燥。

本章介绍的内容，干燥介质以热空气、湿分以水为例。

对流干燥

---热能以对流方式加入物料，产生的蒸气被干燥介质所带走。

辐射干燥

----由辐射器产生的辐射能以电磁波形式达到物料表面，被物料所吸收而重新变为热能，从而使湿分汽化。例如用红外线干燥法将自行车表面油漆干燥。

介电加热干燥

----将需要干燥的电解质物料置于高频电场中，电能潮湿的电介质中转变为热能，例如微波干燥食品。

干燥法

第二节 湿空气的性质及湿度图

一. 湿空气的性质

湿空气---气体混合物

本章用到的湿空气性质包括:

水的浓度、比热容、比容(密度)、焓、温度等。

1. 湿空气中水蒸气含量的表示方法

(1) 水汽分压 p_w

总压 P

p_a 干空气
 p_w 水蒸汽

(2) 湿度 --- 又称湿含量, 单位kg水/kg干空气

$$H = \frac{\text{水汽的质量}}{\text{绝干空气的质量}} = \frac{\text{水汽的摩尔数}}{\text{绝干空气的摩尔数}} \times \frac{M_v}{M_a} = \frac{p_w}{P - p_w} \times \frac{18}{29}$$

思考1: H属于前面介绍的哪一类浓度?

质量比

思考2: 取1kg干空气作为湿度定义基准又何好处?


干燥过程中干空气的质量不变

5/101

第二节 湿空气的性质及湿度图

一. 湿空气的性质

1. 湿空气中水蒸气含量的表示方法

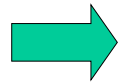

$$H = 0.622 \frac{p_w}{P - p_w}$$

(3) 相对湿度 ---- 水汽分压与其可能达到的最大值之比。

ϕ 值愈大，表示空气的吸湿能力越小； $\phi=1$ 时，饱和。

$$\phi = \frac{p_w}{p_s}$$

此式只能用于 $p_s \leq P$ 情形；
当 $p_s > P$ 时， $\phi = p_w / P$ 。


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

因为 p_w 最大只能达到总压 P 。

$\phi=1$
 饱和湿度

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

一. 湿空气的性质

比容的一般定义：
比容 = $\frac{1\text{kg物质的体积}}{1\text{kg物质}}$

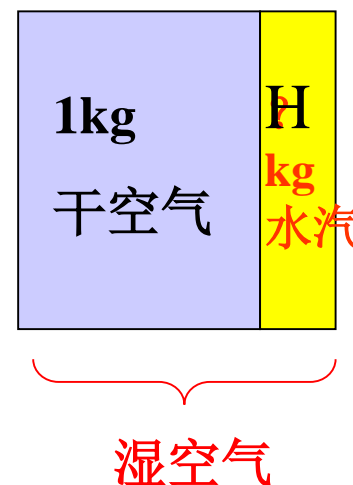
2. 湿比容 v_H

-----**1kg干空气**及其所带的湿空气的总体积，单位为 m^3/kg

$$v_H = \frac{1\text{kg干空气的体积} + H\text{kg水气体积}}{1\text{kg干空气}}$$

$$= \left(\frac{1}{29} + \frac{H}{18} \right) \times 22.4 \times \frac{273+t}{273} \times \frac{1.013 \times 10^5}{P}$$

$$v_H = (0.773 + 1.244H) \times \frac{273+t}{273} \times \frac{1.013 \times 10^5}{P}$$



思考1：为什么取1kg干空气作为定义基准？

思考2：1kg干空气对应的湿空气的质量为多少kg？体积呢？

$$V = \frac{nRT}{P} \rightarrow \frac{V}{V_{0\text{标态}}} = \frac{T}{T_0} \cdot \frac{P_0}{P} \rightarrow \frac{V}{n \times 22.4} = \frac{T}{273} \cdot \frac{1.013 \times 10^5}{P}$$

7/101

一. 湿空气的性质

比热容的一般定义：

$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

3. 湿比热容 c_H

---- $\text{kJ}/(\text{kg干气}\cdot\text{K})$

此时，湿空气的质量 = $(1+H) \text{ kg}$

$$c_H = c_a + c_w H = 1.01 + 1.88H$$

c_a ——干空气的比热， $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}) \approx 1.01 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

c_w ——水气的比热， $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}) \approx 1.88 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

一. 湿空气的性质

4. 湿空气的焓I

----kJ/ kg干气

此时，湿空气的质量 = $(1+H)$ kg

$$I = I_a + I_w H$$

$$= (c_a + c_w H) t + r_0 H$$

$$I \approx (1.01 + 1.88H) t + 2500 H$$

焓的一般定义：

kJ/ kg

通常规定，0°C 时绝干空气及液态水的焓为零。

$$I_a = c_a (t - 0)$$

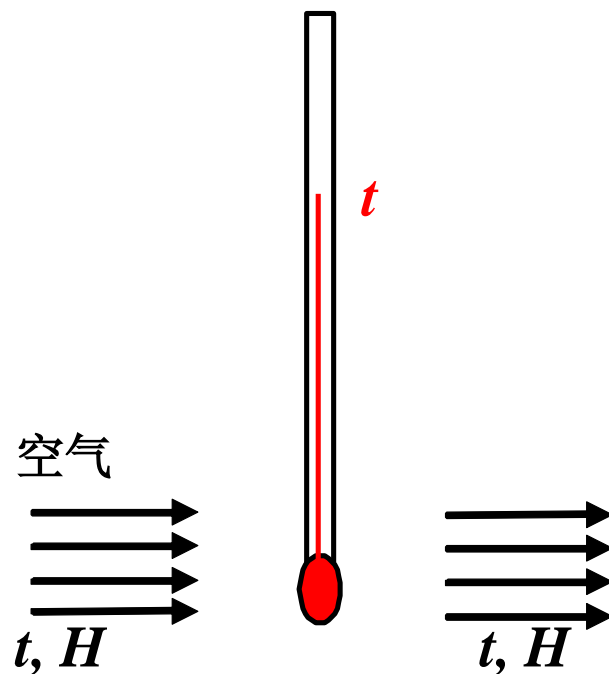
$$I_w = r_0 + c_w (t - 0)$$

0°C 时水的汽化潜热，
 $r_0 \approx 2500$ kJ/kg

一. 湿空气的性质

5. 干球温度 t

——用普通温度计测出的空气温度，简称温度，
是空气的真实温度



一. 湿空气的性质

6、湿球温度 t_w

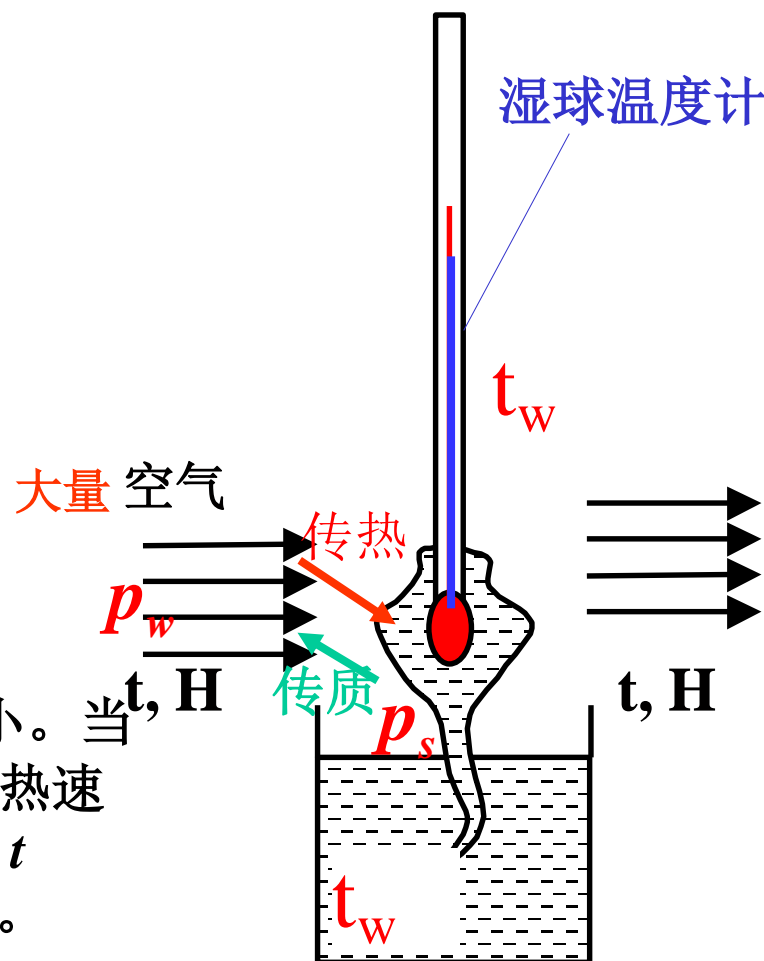
——用湿球温度计测出的空气温度

✓大量、快速流动的空气（空气的流速应大于5m/s）与少量水接触；

✓传质----因存在传质推动力，湿纱布中的水汽化进入空气，此过程需要吸热（水提供），因此水温下降；

✓传热——产生传热温差，热量将从空气传入湿纱布；

开始时，传质速率最大，传热速率最小。当达到平衡时，传质所需的热量速率等于传热速率，湿纱布中的水温达到稳定值（肯定比 t 低），这一温度就是湿球温度，用 t_w 表示。



思考1：为什么酷暑的季节，在水里比在岸上凉快？

$$t > t_w$$

11/101

湿球温度计

一. 湿空气的性质

思考2: 上述传热、传质平衡为动态平衡，为什么？

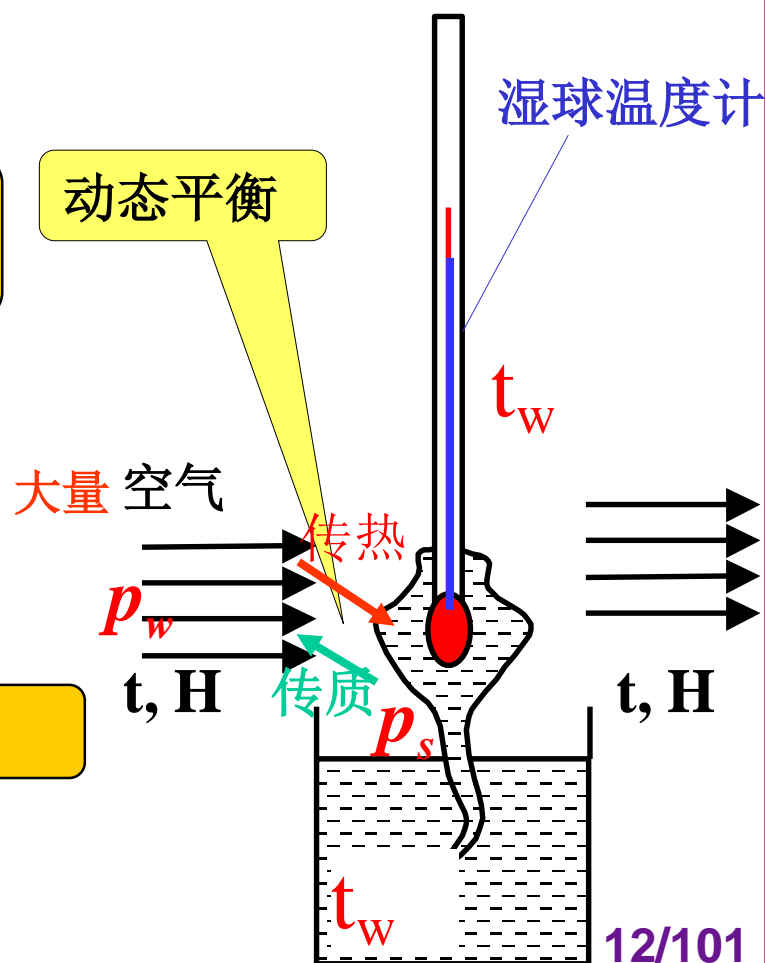
传热、传质终了（即达到平衡）时，
传热、传质仍在进行。

思考3: 若空气（大量）静止，湿球温度计测出的温度与 t_w 相比高还是低？

若空气大量，则测出的温度就是 t_w ，只不过，达到 t_w 所需时间要更长，因为传热方式此时以导热、自然对流为主，比强制对流要小。

思考4: 为什么空气要大量、快速流动？

为了快速、准确地测出 t_w 。



一. 湿空气的性质

6、湿球温度 t_w ---是水温，但是却由空气决定，与水无关。

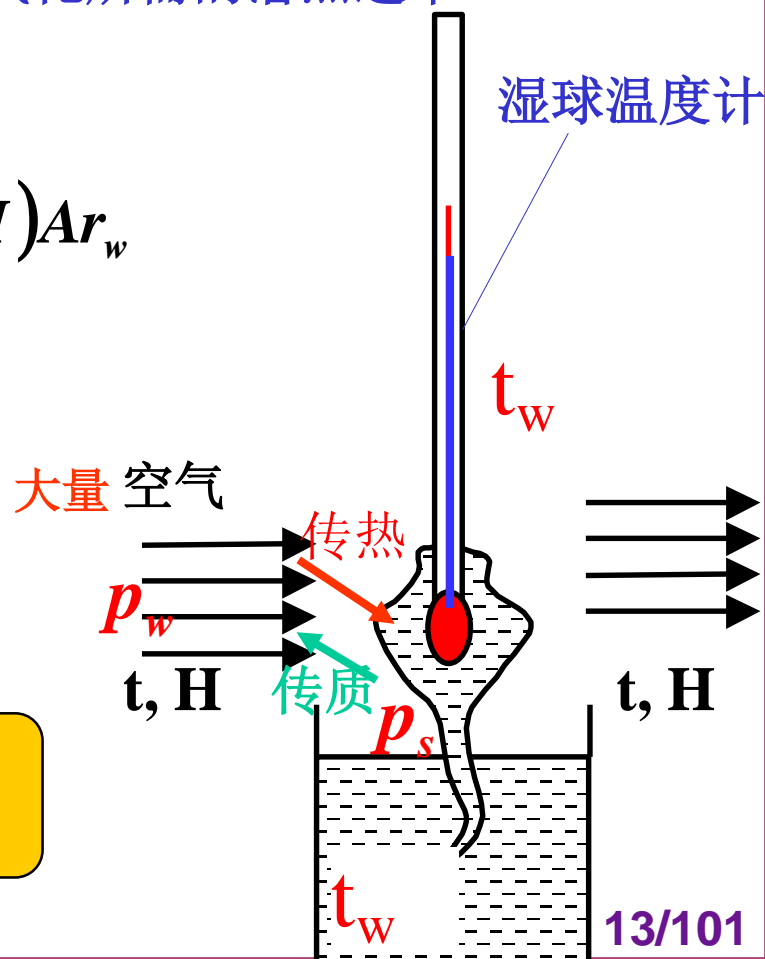
空气以对流方式传给水的热量速率=水分汽化所需的潜热速率

$$\begin{aligned}\alpha A(t - t_w) &= N_w A r_w \\ &= k_H (H_w - H) A r_w\end{aligned}$$

$$\longrightarrow t_w = t - \frac{k_H r_w}{\alpha} (H_w - H)$$

可见， $t_w = f(t, H)$ ，而与水
的初始状态无关。

思考5：湿球温度是水温，为什么要在
湿空气性质里介绍？



一. 湿空气的性质

$$t_w = t - \frac{k_H r_w}{\alpha} (H_w - H)$$

◆ k_H 、 α 主要与空气流速有关，

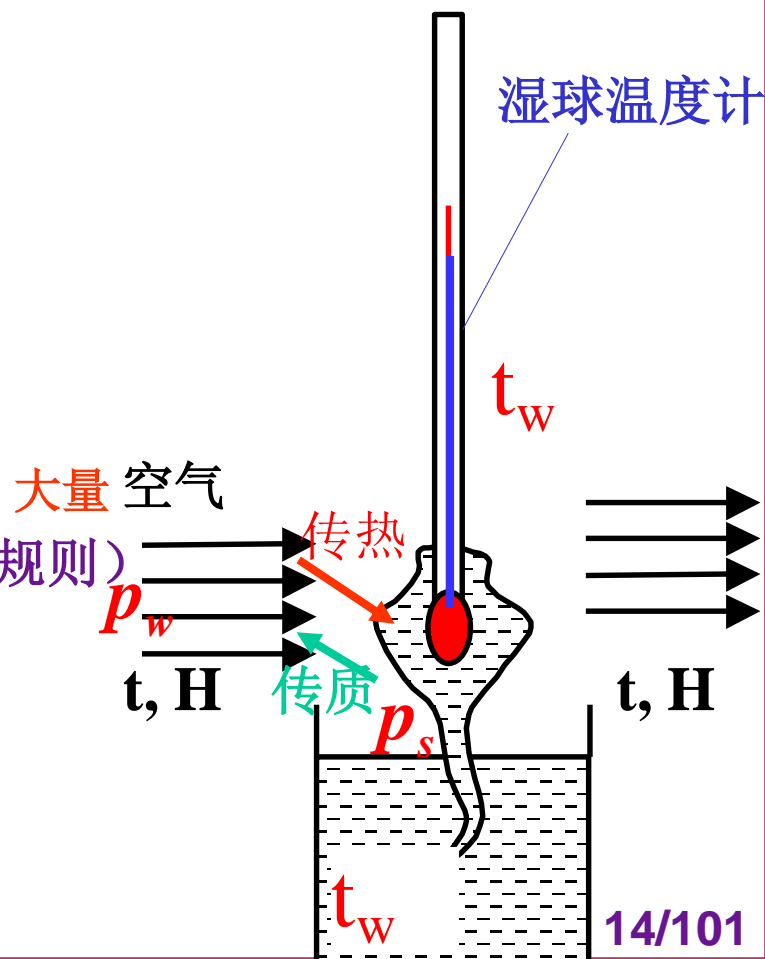
◆ $\frac{\alpha}{k_H}$ 却几乎与流速无关；

◆ 对空气—水系统，当被测气体温度不太高、流速 $> 5\text{m/s}$ 时，

$$\frac{\alpha}{k_H} \approx c_H \approx 1.09 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \quad (\text{称为Lewis规则})$$

思考6： 上述湿球温度测定过程中，湿空气是等焓的吗？

因空气 t 、 H 不变，故湿空气为等焓



一. 湿空气的性质

7. 绝热饱和温度 t_{as} ---是水温

- ◆少量空气与大量水;
- ◆经过无限长时间接触;
- ◆空气温度与水温相等

思考1: 绝热饱和温度在什么场合下能遇到?

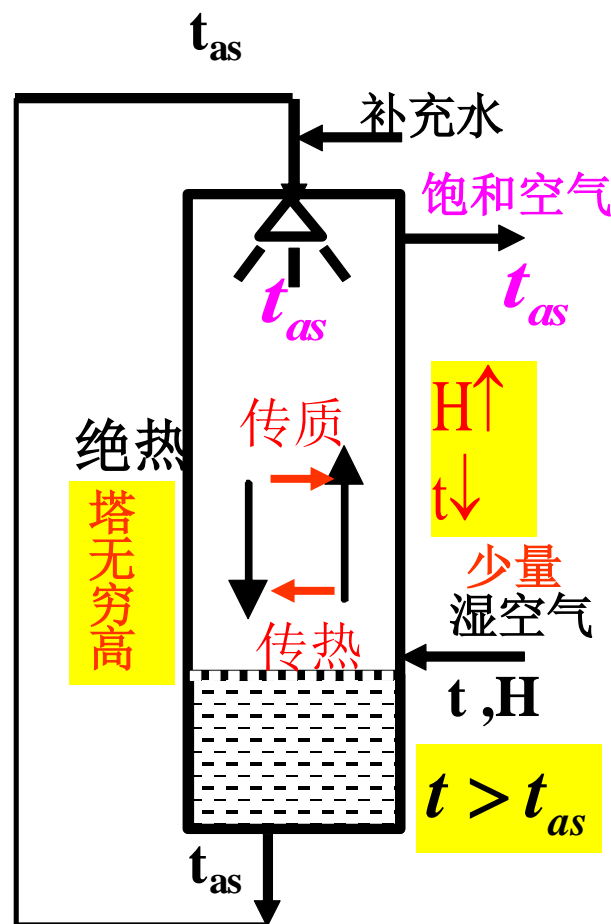
设备在绝热条件下干燥湿物料时

思考2: 上述绝热塔中, 湿空气等焓吗?

是的。因为空气降温放出的显热给了水, 但水并没有升温, 这部分能量又被水蒸汽以潜热的形式带回空气中。

思考3: 上述传热、传质平衡为静态平衡, 为什么?

塔顶没有净的质量、热量传递进行。



绝热饱和塔示意图 01

一. 湿空气的性质

7. 绝热饱和温度 t_{as} ---是水温

但是却由空气决定，与水无关。

思考4: 绝热温度是水温，为什么要在湿空气性质里介绍？

原因如下：

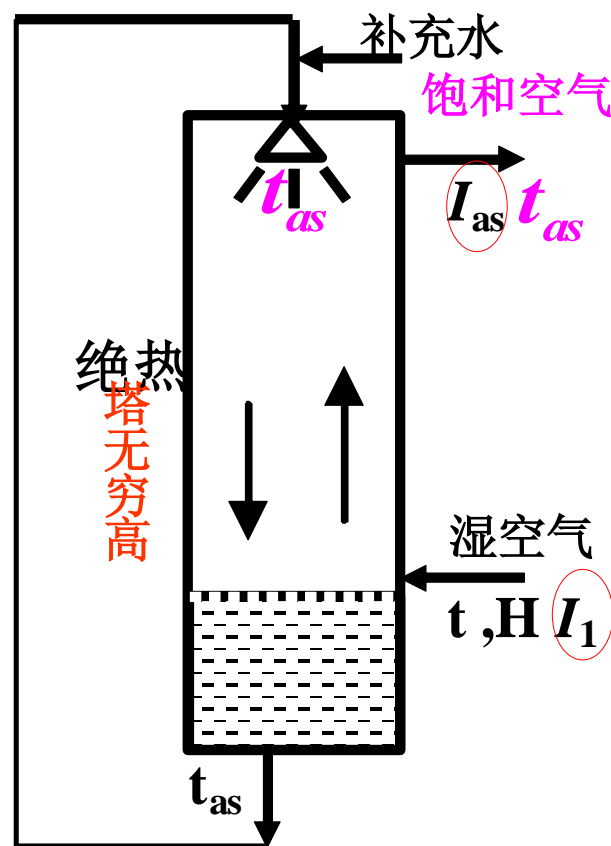
湿空气为等焓变化 $I_1 = I_{as}$

$$(c_a + c_w H)t + r_0 H = (c_a + c_w H_{as})t_{as} + r_0 H_{as}$$

假设 $c_a + c_w H \approx c_a + c_w H_{as} = c_H$

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

可见， $t_{as} = f(t, H)$



$$I = (c_a + c_w H)t + r_0 H$$

绝热饱和塔示意图

一. 湿空气的性质

湿球温度 t_w 与绝热饱和温度 t_{as} 的异同:

相同之处:

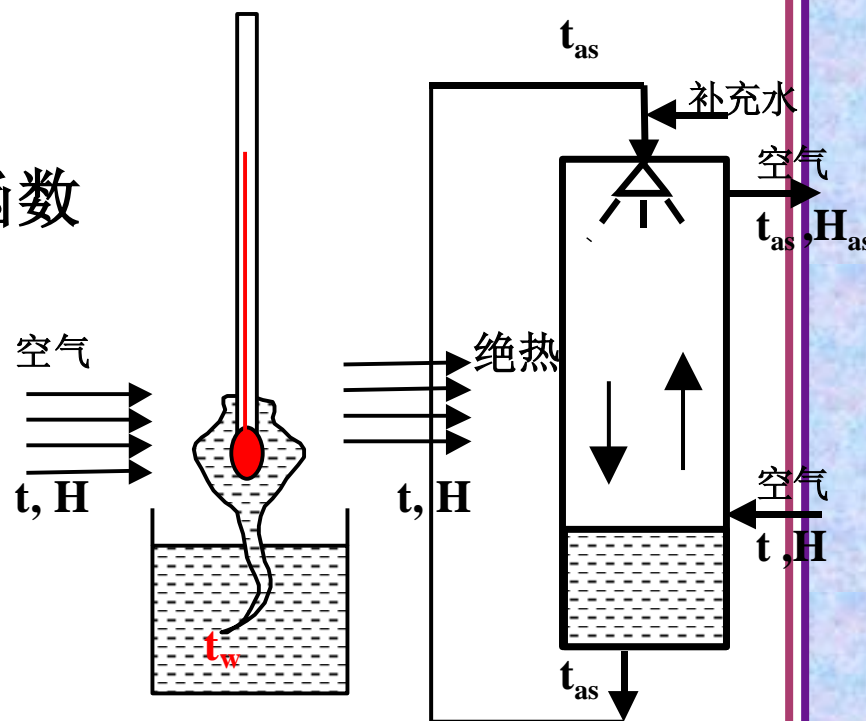
- ❖ 湿空气均为等焓变化、
- ❖ 均为空气状态 (t 、 H) 的函数
- ❖ 空气-水体系, 有 $t_w \approx t_{as}$

$$\because \frac{\alpha}{k_H} \approx c_H, r_0 \approx r_w$$

但对其它体系, 例如空气—甲苯系统, $\alpha/k_H=1.8c_H$, 这时 t_w 与 t_{as} 就不等了。

$$t_w = t - \frac{k_H r_w}{\alpha} (H_w - H)$$

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



湿球温度计 绝热饱和塔示意图

一. 湿空气的性质

湿球温度 t_w 与绝热饱和温度 t_{as} 的异同:

不同之处:

t_w ----大量空气与少量水接触后的稳定的水温;

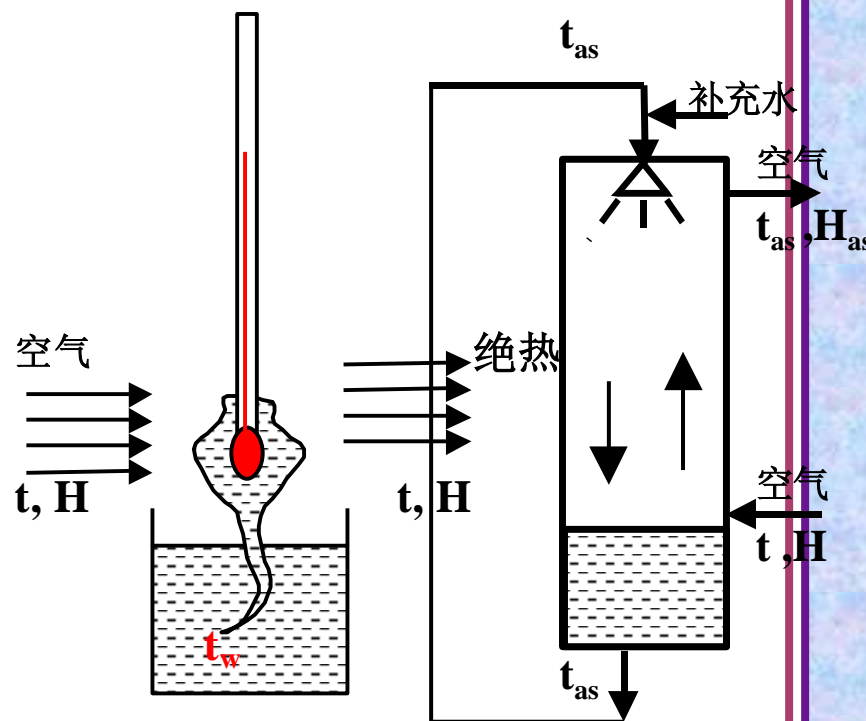
空气的状态 (t, H) 不变;

属动态平衡。

t_{as} ----少量空气与大量水经过接触后达到的稳定温度;

空气增湿、降温;

属静态平衡;



湿球温度计 绝热饱和塔示意图

一. 湿空气的性质

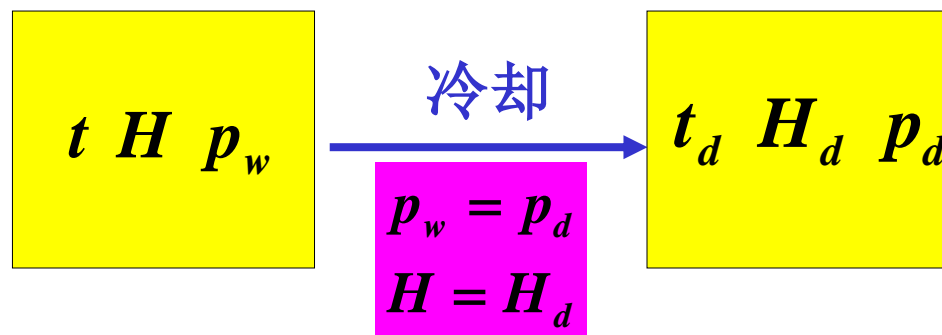
8. 露点 t_d

在总压不变的条件下，将不饱和湿空气冷却，直至冷凝出水珠为止（即达到饱和状态），此时，湿空气的温度称为露点，用 t_d 表示。

特点: $\varphi_d = 1$

$$p_w = p_d$$

$$H = H_d$$



思考：若已知 t 、 H ，如何求 t_d ？

$$H_d = H = 0.622 \frac{p_d}{P - p_d} \rightarrow p_d \rightarrow \text{查饱和蒸汽压表}$$

思考：若已知 t 、 t_d ，如何求 H ？

一. 湿空气的性质

汇总: $H = 0.622 \frac{p_w}{P - p_w} = 0.622 \frac{\varphi p_s}{P - \varphi p_s} \quad \varphi = \frac{p_w}{p_s} \times 100\%$

$$v_H = (0.773 + 1.244H) \times \frac{273 + t}{273} \times \frac{1.013 \times 10^5}{P}$$

$$c_H = 1.01 + 1.88H \quad I = (1.01 + 1.88H)t + 2492H$$

$$t_w = t - \frac{k_H r_w}{\alpha} (H_w - H) \quad t_{as} = t - \frac{r_0}{c_H} (H_{as} - H) \quad t_d$$

不饱和湿空气性质: P 、 H 、 p_w 、 φ 、 c_H 、 I 、 t 、 t_w 、 t_{as} 、 t_d , 共10个

自由度 数 $F = C - \Phi + 2 = 2 - 1 + 2 = 3$

只需已知3个变量, 其他均可通过上述函数关系计算得到, 但有时需试差。

若用图求解就不用试差了。

二. 湿度图

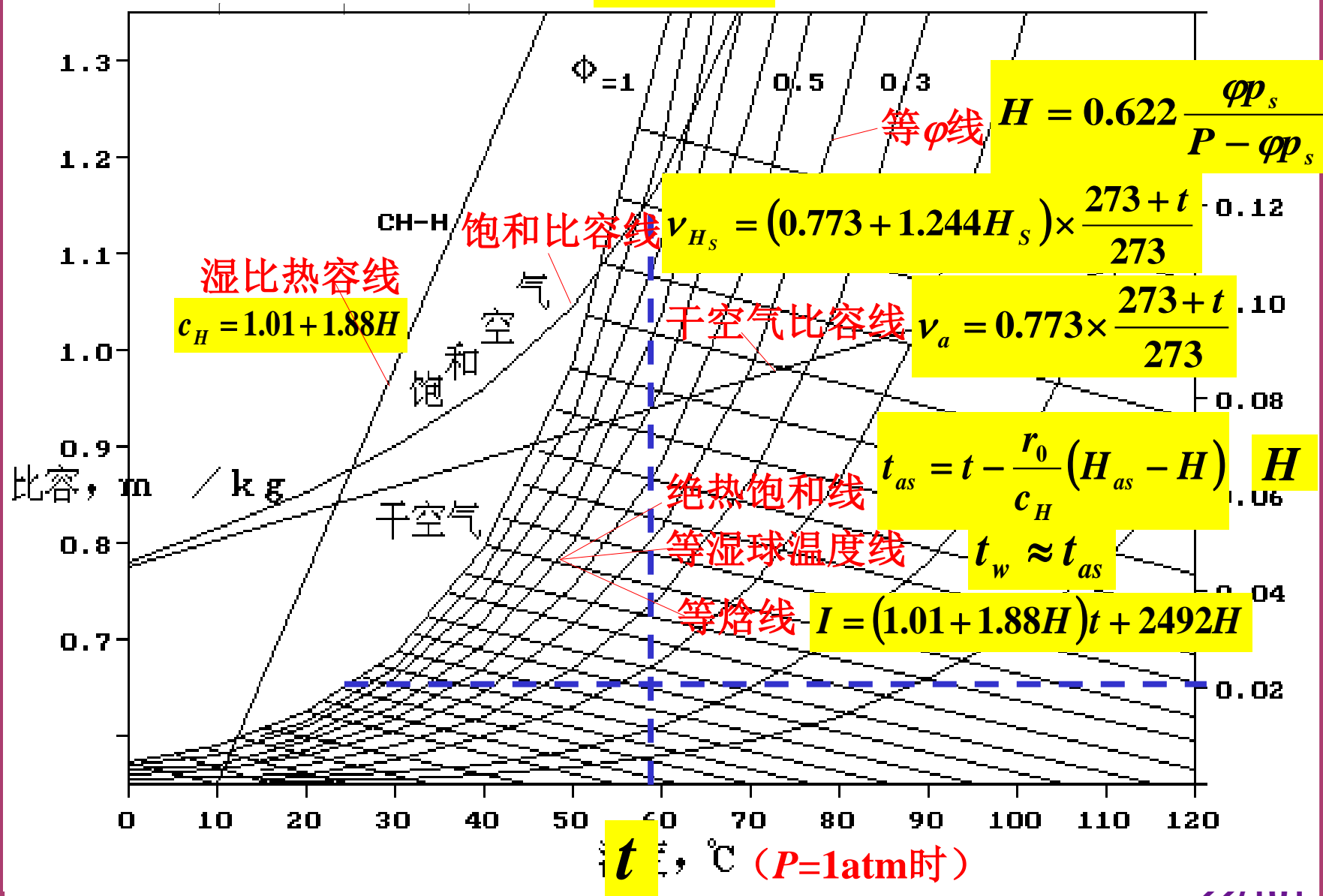
常用的湿度图:

3个独立变量取为 P 、 t 、 H ——**温湿图** (t - H 图) ✓

P 、 I 、 H ——**焓湿图** (I - H 图) ✗

湿比热容线 c_H , kJ/kgK

湿度图

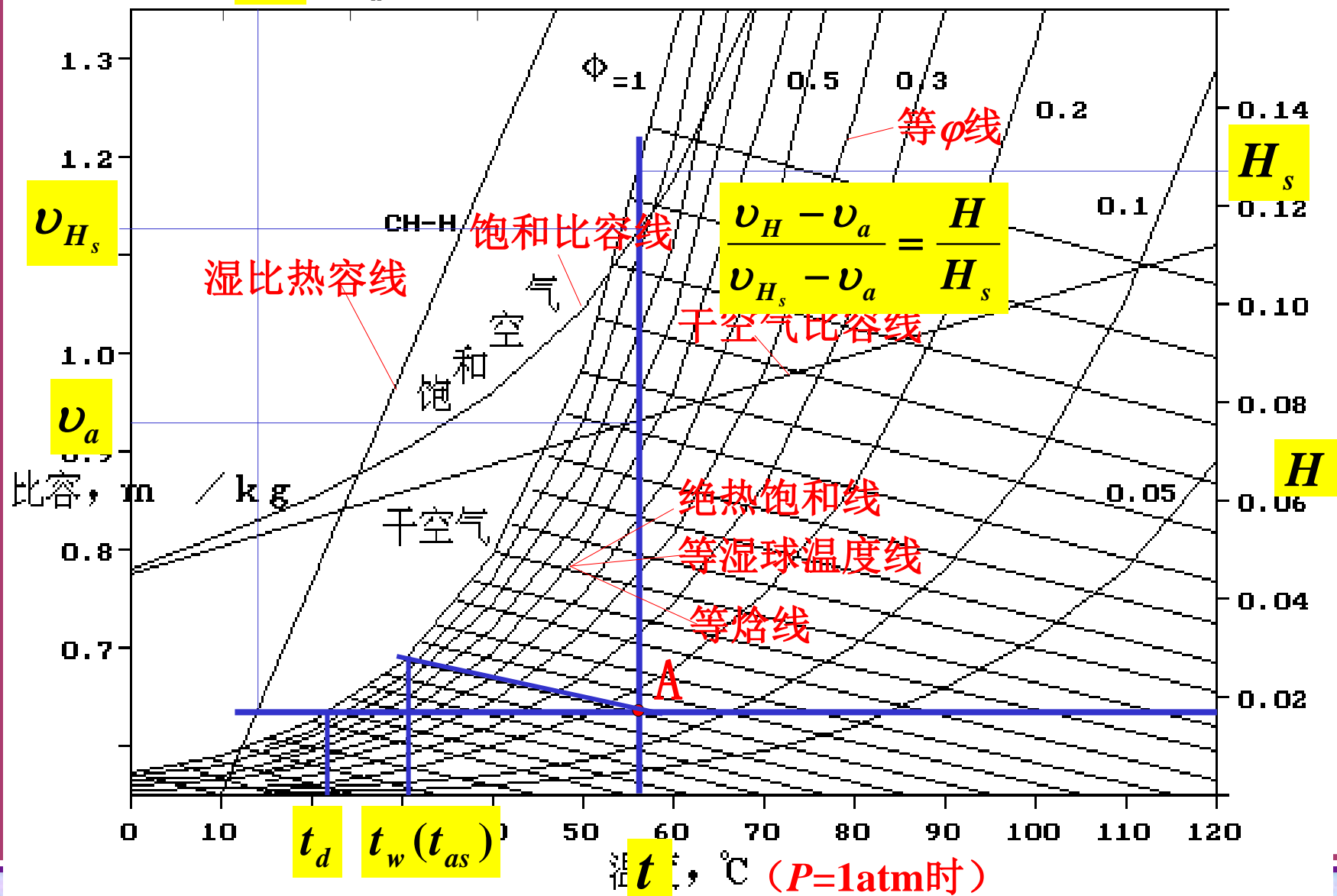


三、湿度图的应用

1、查湿空气性质

例如：已知 t 、 H ϕ 值需用线性内插求

湿比容线 c_H 容线 c_H , kJ/kgK



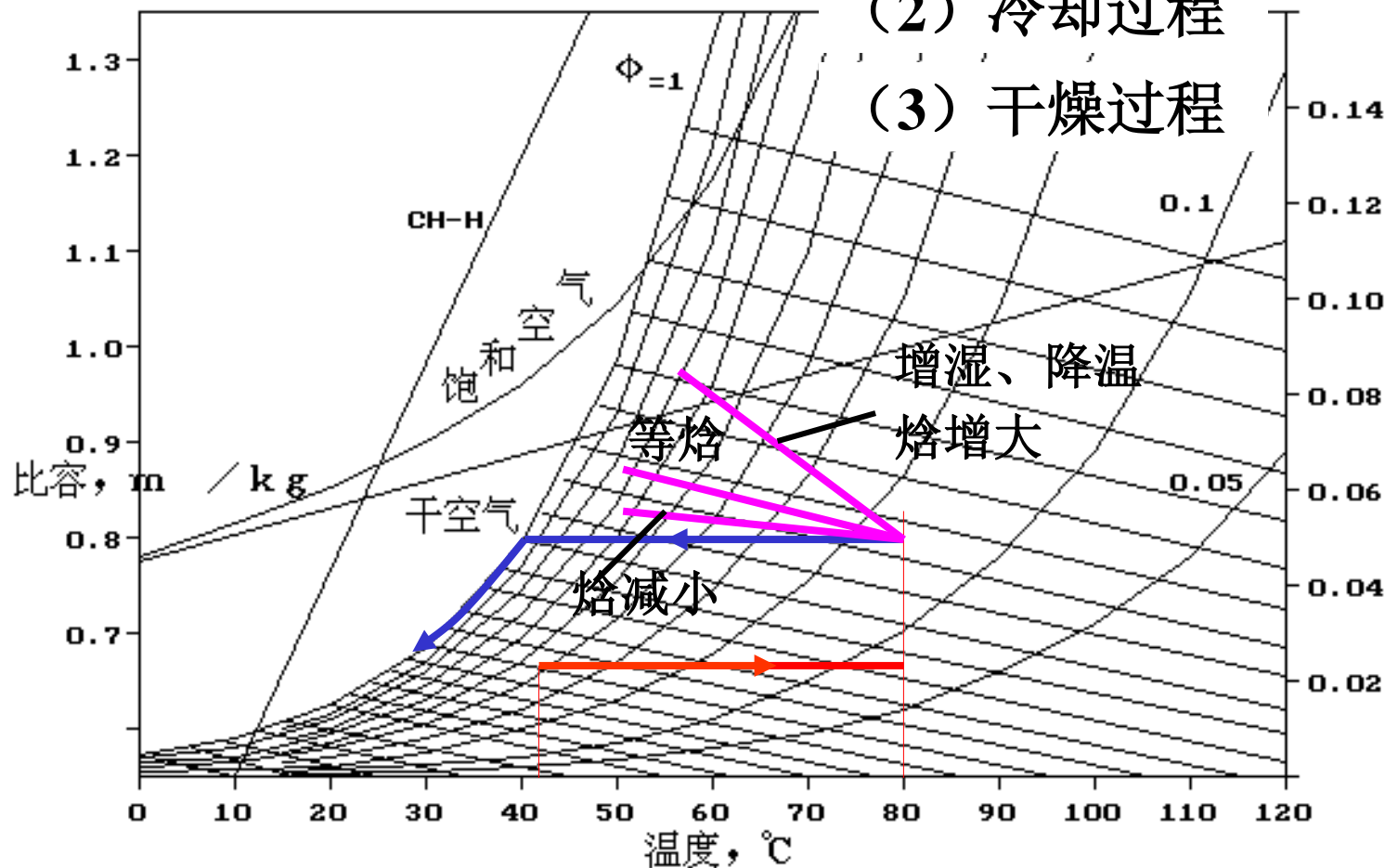
三、湿度图的应用

2. 表示湿空气的状态变化过程

(1) 加热过程

(2) 冷却过程

(3) 干燥过程



三、湿度图的应用

2. 表示湿空气的状态变化过程

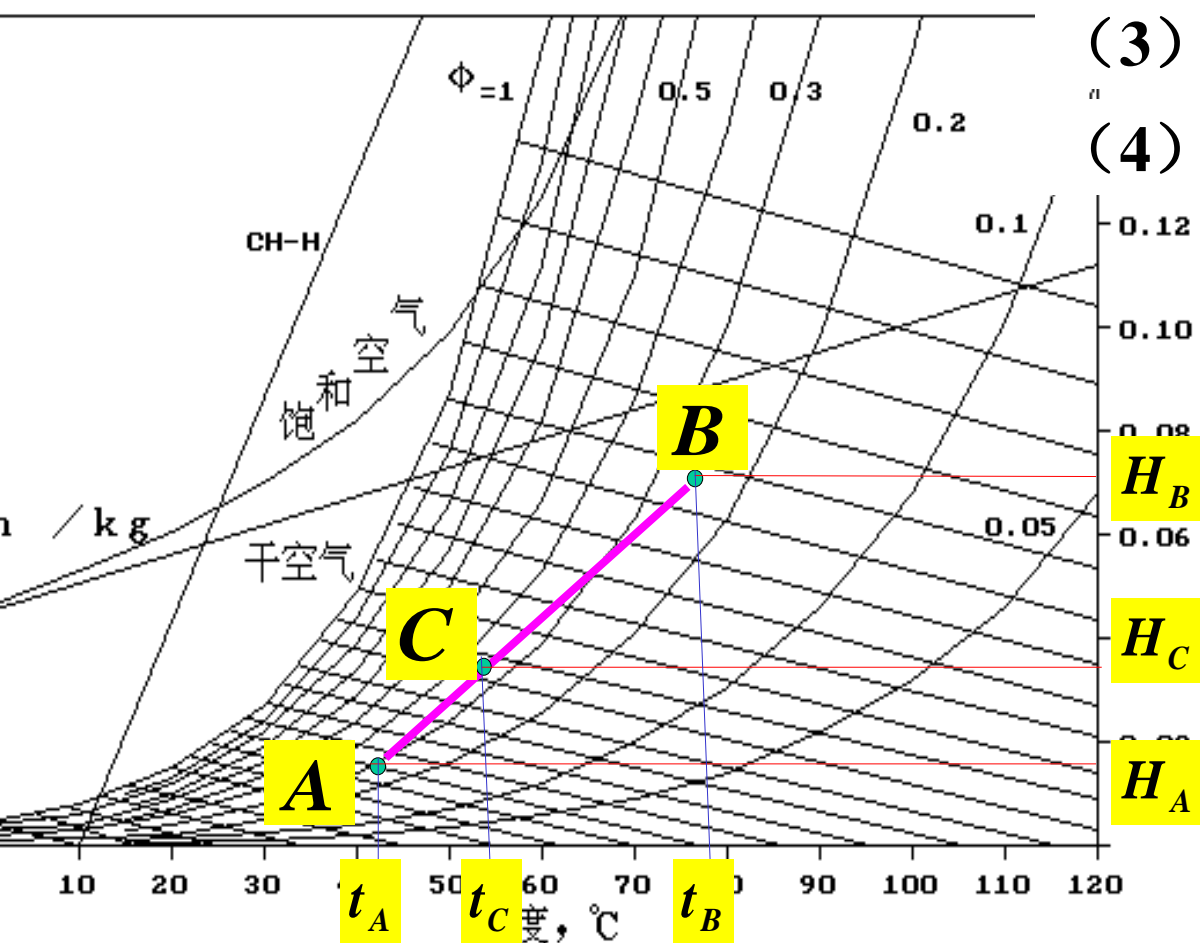
(1) 加热过程

(2) 冷却过程

(3) 干燥过程

(4) 两股湿空气混合

----杠杆原则



$$\frac{L_B}{L_A} = \frac{H_C - H_A}{H_B - H_C} \approx \frac{t_C - t_A}{t_B - t_C}$$

杠杆原则证明： 回忆： 杠杆原则就是物料衡算

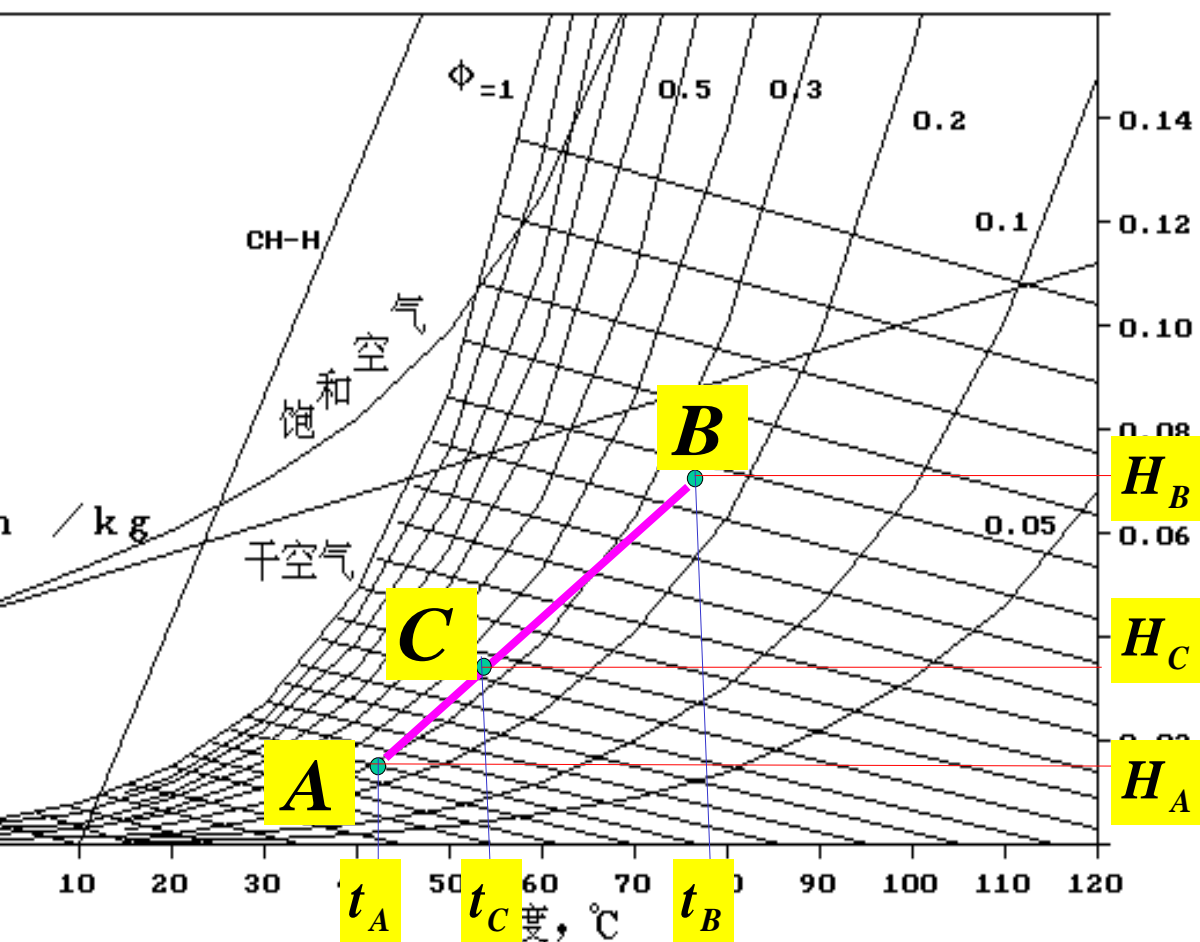
由物料衡算可得：

$$L_A + L_B = L_C$$

$$L_A H_A + L_B H_B = L_C H_C$$

$$\left. \begin{array}{l} L_A + L_B = L_C \\ L_A H_A + L_B H_B = L_C H_C \end{array} \right\} \rightarrow \frac{L_B}{L_A} = \frac{H_C - H_A}{H_B - H_C} = \frac{\overline{AC}}{\overline{CB}}$$

L ---绝干空气流量



$$\frac{L_B}{L_A} = \frac{H_C - H_A}{H_B - H_C} \approx \frac{t_C - t_A}{t_B - t_C}$$

杠杆原则证明:

由热量衡算可得:

$$L_A I_A + L_B I_B = L_C I_C \quad \longrightarrow$$

$$L_A (c_{H_A} t_A + 2492 H_A) + L_B (c_{H_B} t_B + 2492 H_B) = L_C (c_{H_C} t_C + 2492 H_C)$$

$$L_A + L_B = L_C$$

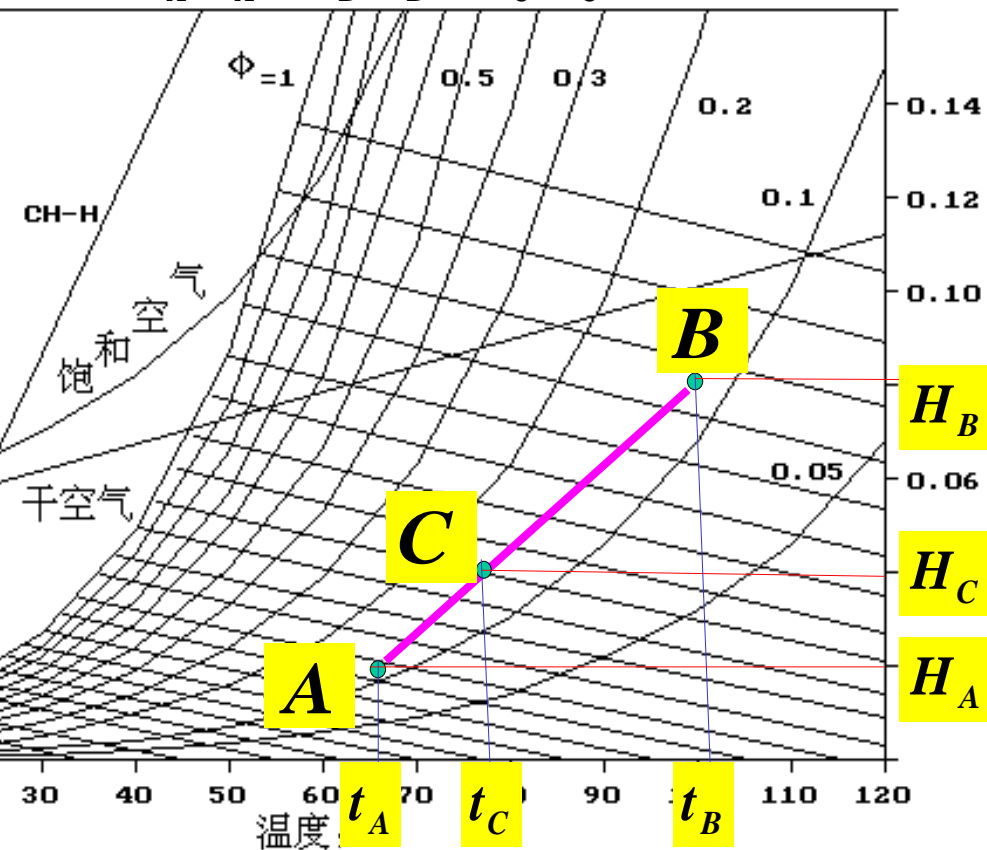
$$L_A H_A + L_B H_B = L_C H_C$$

$$L_A c_{H_A} t_A + L_B c_{H_B} t_B = (L_A + L_B) c_{H_C} t_C$$

$$\frac{L_B}{L_A} = \frac{c_{H_C} t_C - c_{H_A} t_A}{c_{H_B} t_B - c_{H_C} t_C}$$

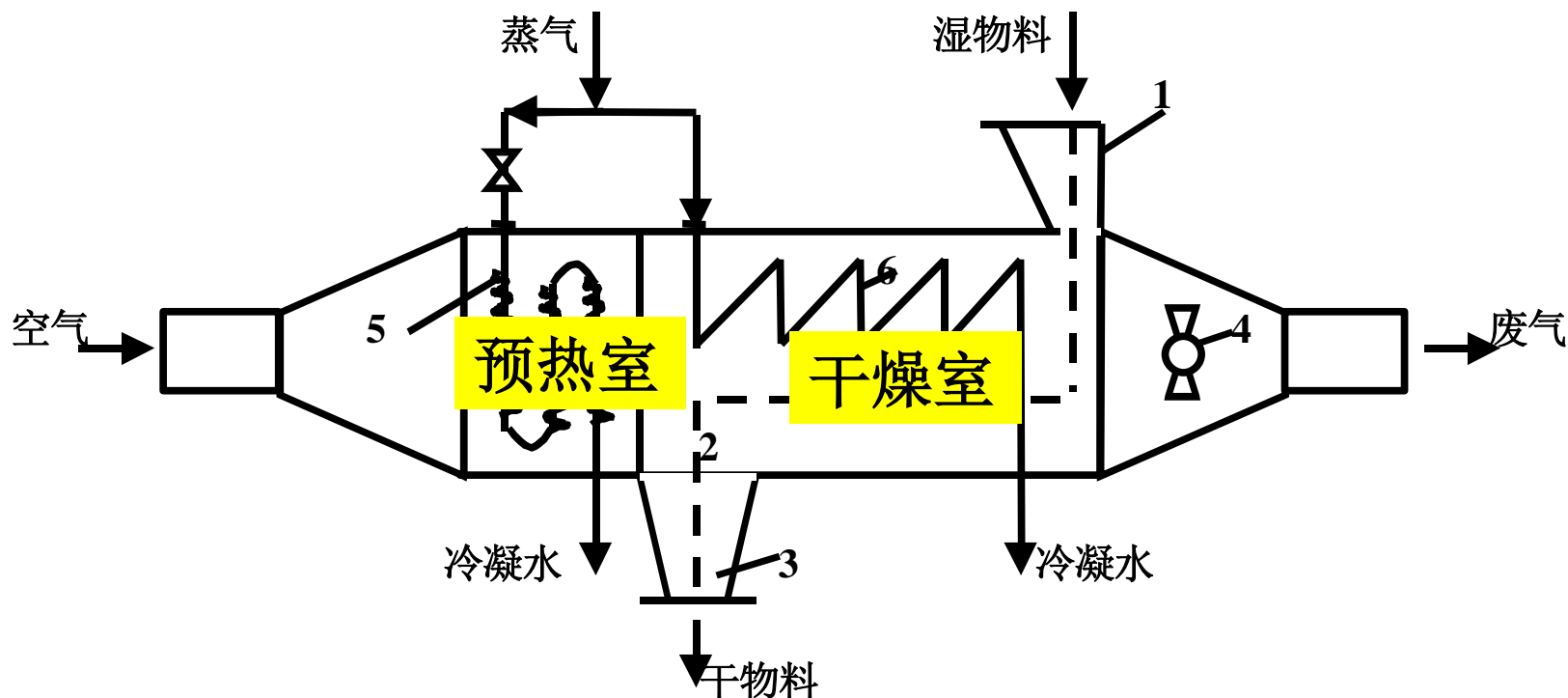
$$c_{H_A} \approx c_{H_B} \approx c_{H_C}$$

$$\frac{L_B}{L_A} = \frac{H_C - H_A}{H_B - H_C} \approx \frac{t_C - t_A}{t_B - t_C}$$



第三节 干燥过程的计算

干燥过程



空气干燥器的流程图

1—进料口；2—干燥室；3—卸料口；4—抽风机；5、6—空气加热器

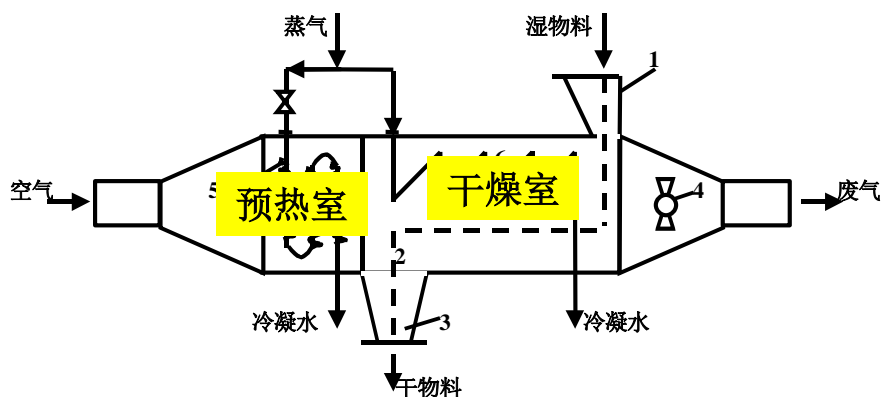
第三节 干燥过程的计算

思考：

- 1、试在湿度图上画出干燥全过程
- 2、为什么空气要预热？

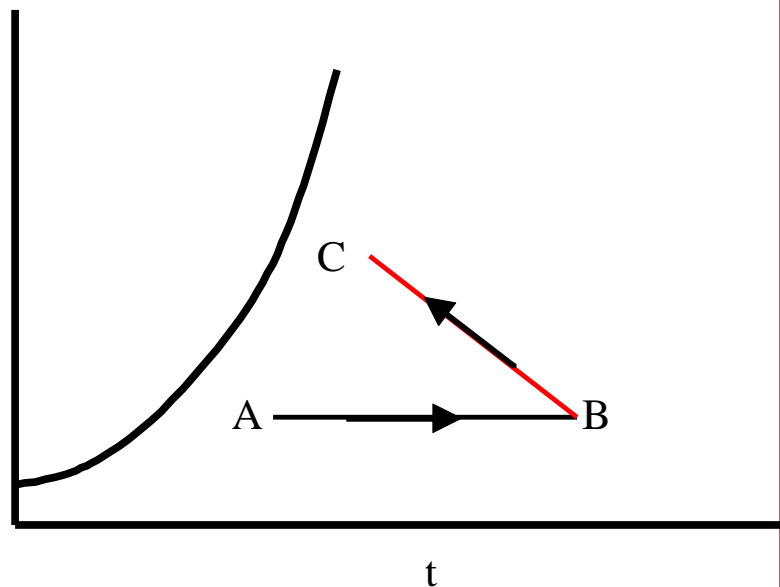
空气预热有两个好处：

- (1) 相对湿度下降，吸水能力增强；
- (2) 空气温度高，物料温度就高，水汽化速率就快。



空气干燥器的流程图

1—进料口；2—干燥室；3—卸料口；4—抽风机；5、6—空气加热器



干燥过程中湿空气状态变化示意图

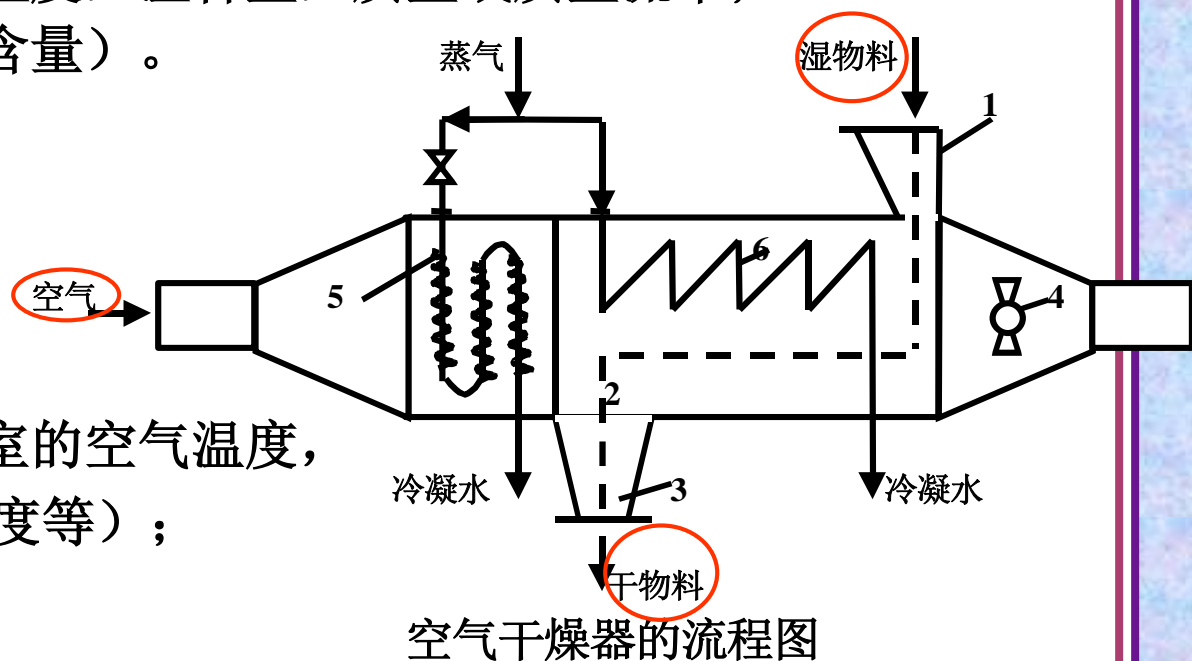
第三节 干燥过程的计算

已知：

- ❖ 干燥介质（空气）的进口条件，如温度、湿度、压力等；
- ❖ 物料的进口条件，如温度，湿含量，质量或质量流率；
- ❖ 物料的干燥要求（湿含量）。

求解：

- ❖ 干燥介质用量；
 - ❖ 干燥条件（如进干燥室的空气温度，出干燥室的空气温度和湿度等）；
 - ❖ 整个设备的热能消耗；
 - ❖ 干燥室尺寸
- 等等。



1—进料口；2—干燥室；3—卸料口；4—抽风机；5、6—空气加热器

第三节 干燥过程的计算

一、湿物料中含水率的表示方法

湿基含水率 ---- 质量分率

$$\omega = \frac{\text{水分质量}}{\text{湿物料的总质量}} \times 100\%$$

干基含水率 ---- 质量比

$$X = \frac{\text{水分质量}}{\text{湿物料中绝干物料的质量}} \times 100\%$$

思考：两种含水率之间的换算关系？

$$\omega = \frac{X}{1 + X} \qquad X = \frac{\omega}{1 - \omega}$$

第三节 干燥过程的计算

二、物料衡算 -----可解出干燥介质用量，蒸发的水分量等

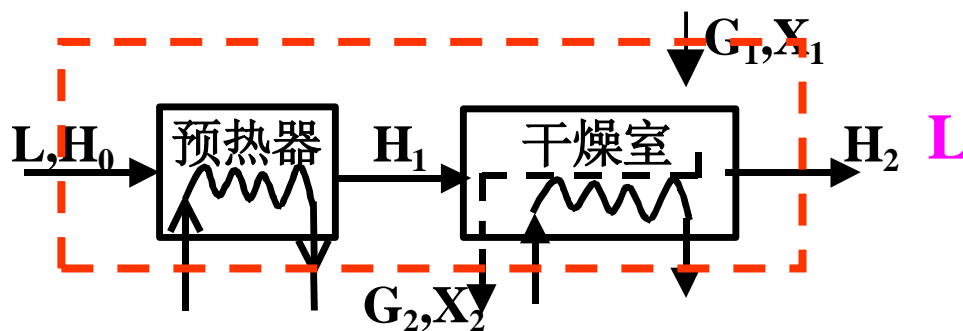
蒸发的水分量

$$\begin{aligned} W &= G_1 - G_2 \\ &= G_c (X_1 - X_2) = G_1 \frac{\omega_1 - \omega_2}{1 - \omega_2} = G_2 \frac{\omega_1 - \omega_2}{1 - \omega_1} \\ &= L(H_2 - H_0) \end{aligned}$$

绝干空气用量

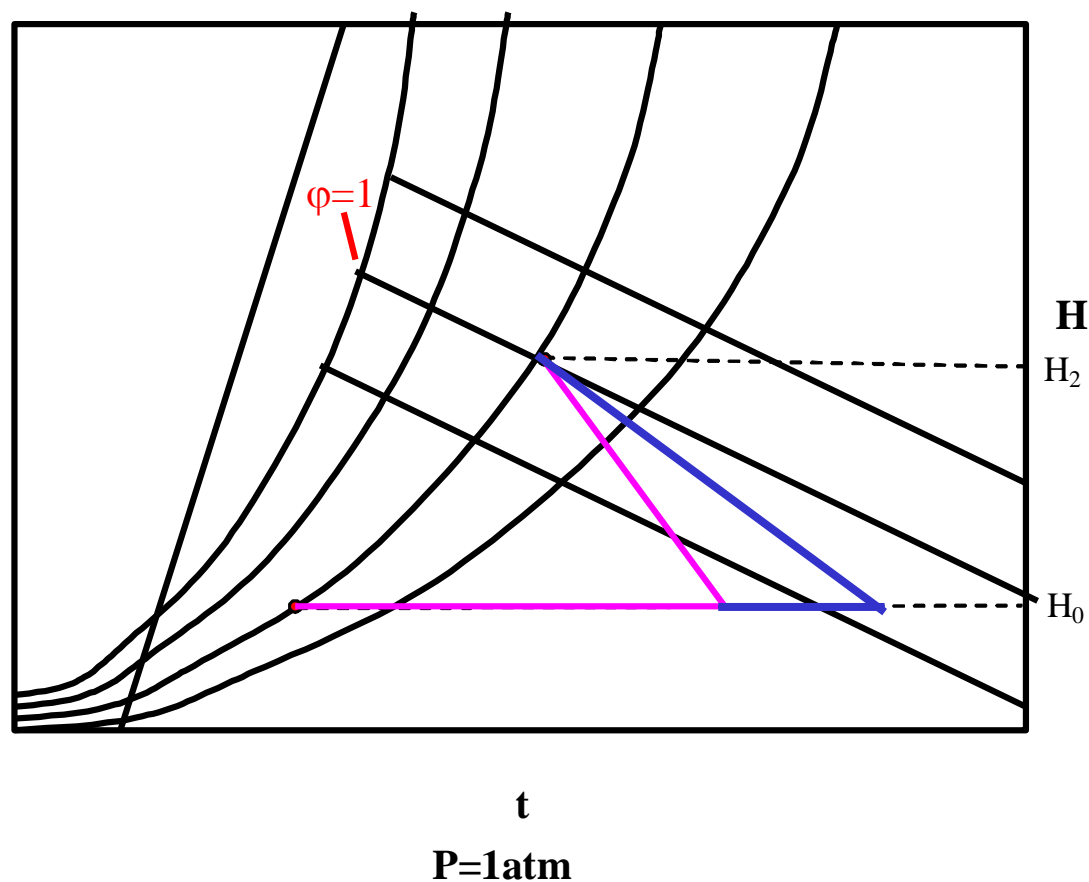
$$L = \frac{W}{H_2 - H_0}$$

$$G_c = G_1(1 - \omega_1) = G_2(1 - \omega_2)$$



第三节 干燥过程的计算

比干空气用量 $l = \frac{L}{W} = \frac{1}{H_2 - H_0}$



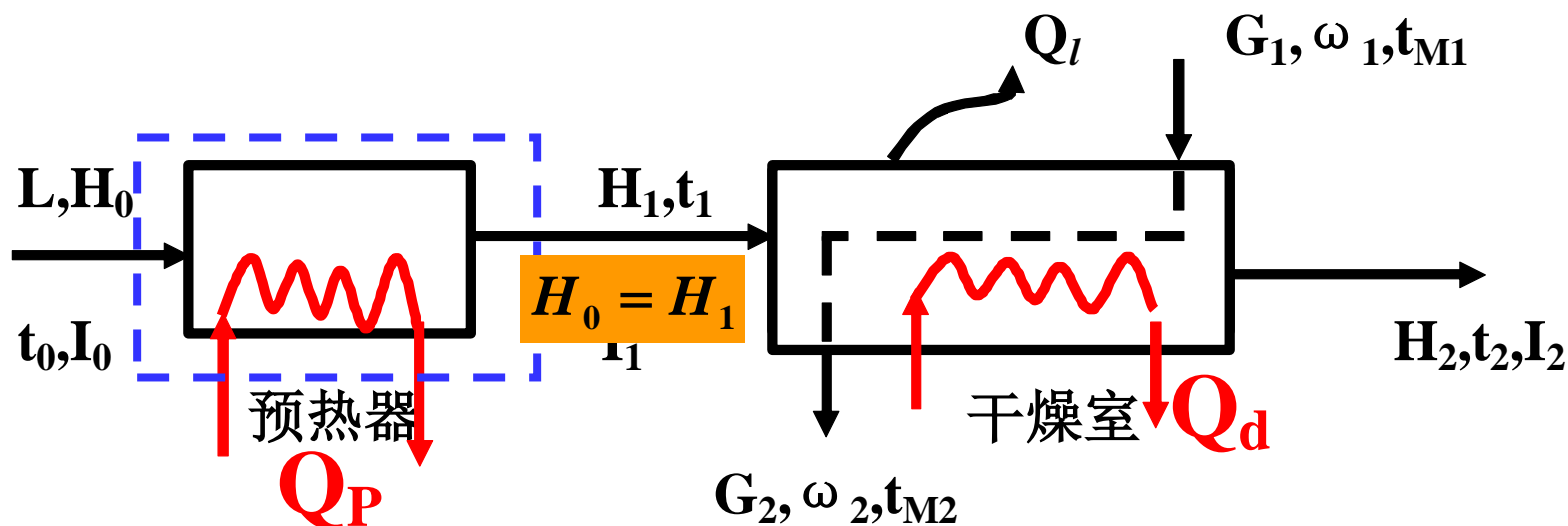
l 与干燥过程所经历的途径无关。

第三节 干燥过程的计算

三、热量衡算 ----可求解整个设备的热能消耗

1、预热器的热量衡算

$$Q_P = L(I_1 - I_0) = Lc_{H_0}(t_1 - t_0)$$



$$I = (1.01 + 1.88H)t + 2492H$$

第三节 干燥过程的计算

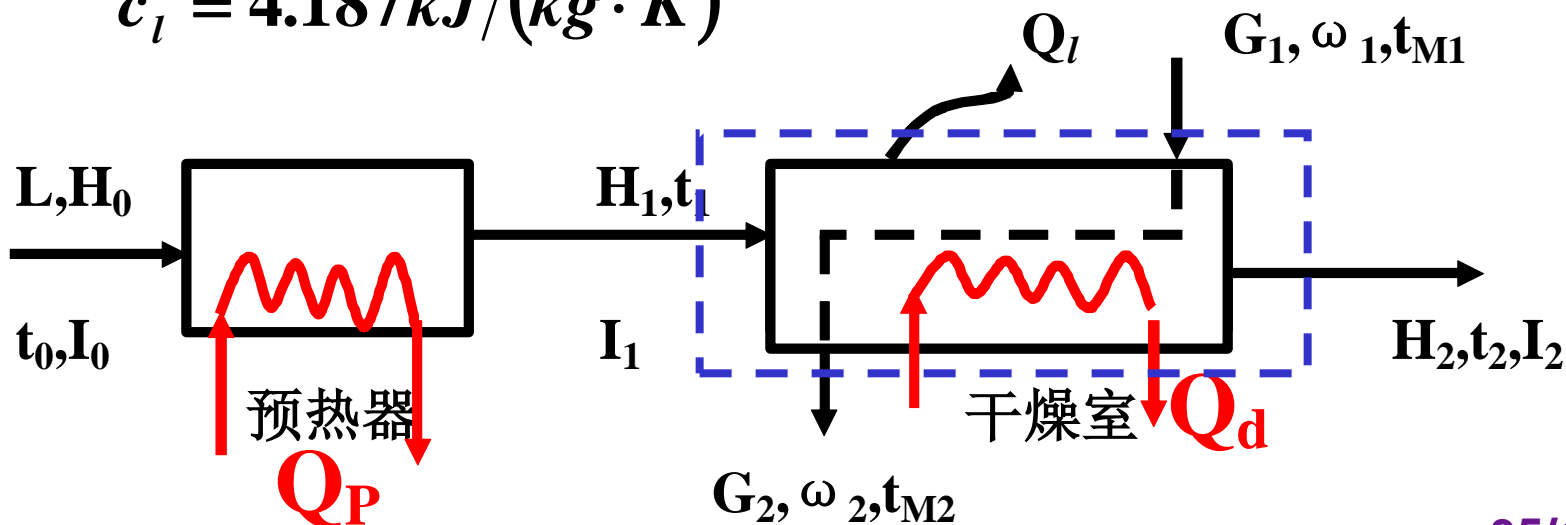
三、热量衡算 ----可求解整个设备的热能消耗

2、干燥室的热量衡算

$$LI_1 + G_1 c_{M_1} t_{M_1} + Q_d = LI_2 + G_2 c_{M_2} t_{M_2} + Q_l$$

$$c_M = (1 - \omega)c_s + \omega c_l$$

$$c_l = 4.187 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$



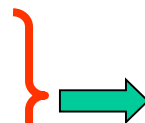
$$I = (1.01 + 1.88H)t + 2492H$$

三、热量衡算

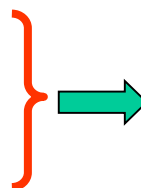
将以下两个热量衡算式相加 或对整个干燥流程进行热量衡算：

$$Q_P = L(I_1 - I_0)$$

$$LI_1 + G_1 c_{M_1} t_{M_1} + Q_d = LI_2 + G_2 c_{M_2} t_{M_2} + Q_l$$

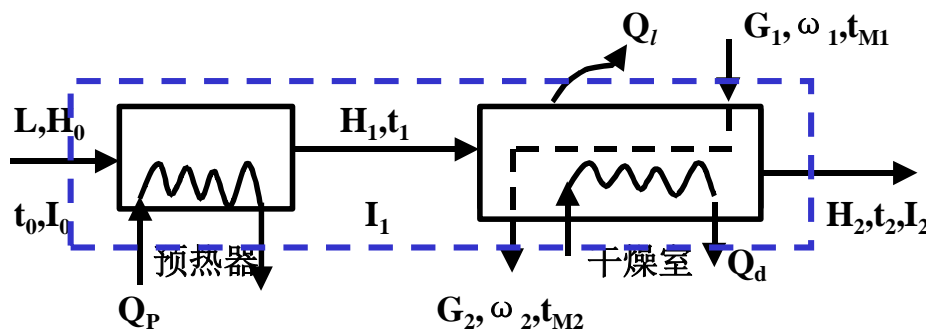


$$Q = Q_P + Q_d = L(I_2 - I_0) + G_2 c_{M_2} t_{M_2} - G_1 c_{M_1} t_{M_1} + Q_l$$



$$\text{又 } G_1 = G_2 + W \quad \therefore G_1 c_{M_1} t_{M_1} = G_2 c_{M_2} t_{M_1} + W c_l t_{M_1}$$

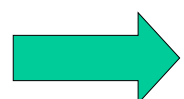
$$Q_P + Q_d = L(I_2 - I_0) + G_2 c_{M_2} (t_{M_2} - t_{M_1}) - W c_l t_{M_1} + Q_l$$



三、热量衡算

$$Q_P + Q_d = L(I_2 - I_0) + G_2 c_{M_2} (t_{M_2} - t_{M_1}) - W c_l t_{M_1} + Q_l$$

$$\begin{aligned}\text{而 } L(I_2 - I_0) &= L[(c_{H_2} t_2 + 2492 H_2) - (c_{H_0} t_0 + 2492 H_0)] \\ &= L[(c_{H_2} - c_{H_0}) t_2 + 2492(H_2 - H_0) + c_{H_0} (t_2 - t_0)] \\ &= L(H_2 - H_0)(1.88 t_2 + 2492) + L c_{H_0} (t_2 - t_0) \\ &= W(1.88 t_2 + 2492) + L c_{H_0} (t_2 - t_0)\end{aligned}$$


$$Q_P + Q_d = L c_{H_0} (t_2 - t_0) + W [(1.88 t_2 + 2492) - c_l t_{M_1}] + G_2 c_{M_2} (t_{M_2} - t_{M_1}) + Q_l$$

$$c_H = 1.01 + 1.88 H$$

三、热量衡算

这是干燥的真正目的所在。

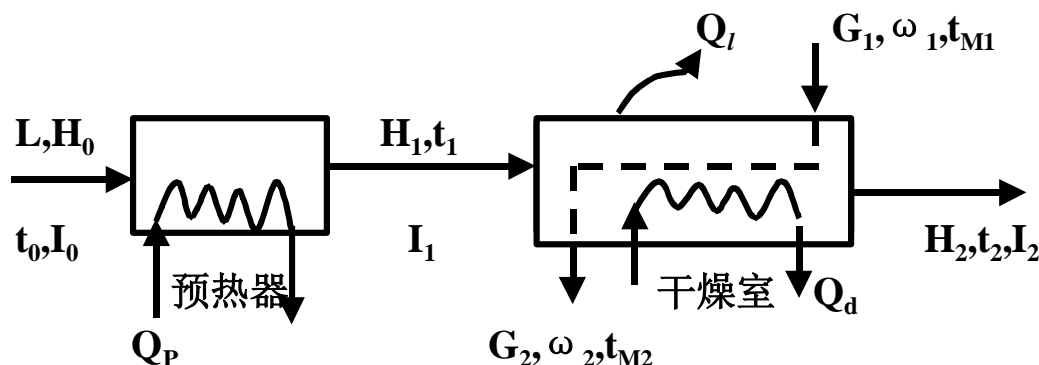
供能方 \uparrow 新鲜空气被加热所耗的能量 \uparrow 物料中水分蒸发所耗的能量 \uparrow

$$Q_P + Q_d = Lc_{H_0}(t_2 - t_0) + W[(1.88t_2 + 2492) - c_l t_{M_1}] + G_2 c_{M_2}(t_{M_2} - t_{M_1}) + Q_l$$

\downarrow 物料升温所耗能量 \downarrow 热损失

加入干燥系统的全部能量有四个用途：

加热空气、蒸发水分、加热物料和热损失



三、热量衡算

物料中水分蒸发所耗的能量



$$Q_P + Q_d = Lc_{H_0}(t_2 - t_0) + W[(1.88t_2 + 2492) - c_l t_{M_1}] + G_2 c_{M_2}(t_{M_2} - t_{M_1}) + Q_l$$

3、干燥设备的热效率

$$\text{热效率 } \eta = \frac{\text{蒸发水分所需的热量 } Q_{\text{气化}}}{\text{输入干燥设备的总热量 } Q} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{W[(2492 + 1.88t_2) - c_l t_{M_1}]}{Q_P + Q_d} \times 100\%$$

一般, $\eta=30\sim60\%$,

在应用部分废气循环时, $\eta=50\sim70\%$

三、热量衡算

$$Q_P + Q_d = Lc_{H_0}(t_2 - t_0) + W[(1.88t_2 + 2492) - c_l t_{M_1}] + G_2 c_{M_2}(t_{M_2} - t_{M_1}) + Q_l$$

$$l = \frac{1}{H_2 - H_0}$$

$$\eta = \frac{W[(2492 + 1.88t_2) - c_l t_{M_1}]}{Q_P + Q_d} \times 100\%$$

思考：

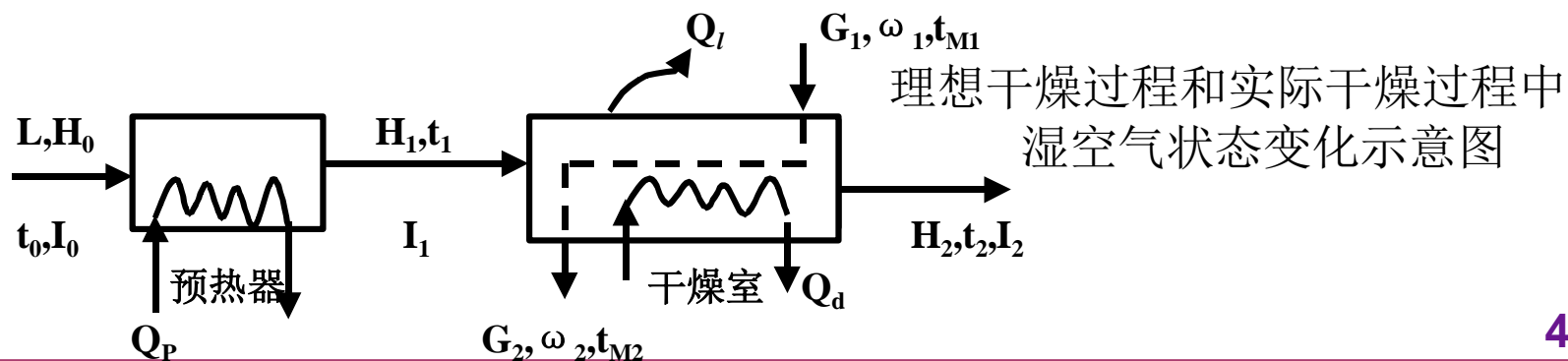
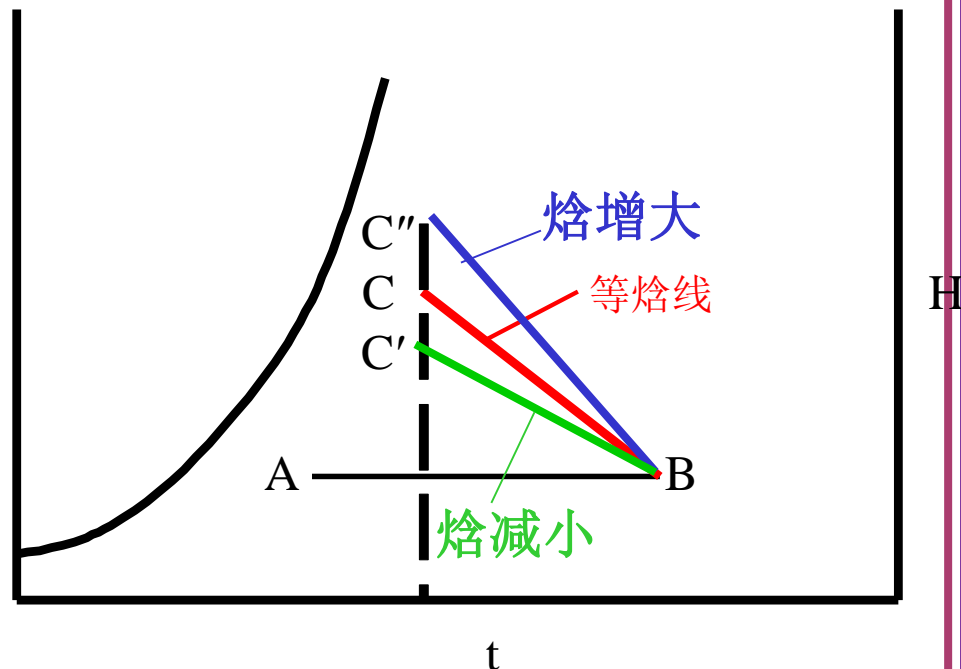
- 1、如何提高热效率？
- 2、为什么废气循环时热效率较高？

设法减少加热空气、加热物料和热损失所耗热量，如将 $H_2 \uparrow$ ，则 $L \downarrow$ 。如将 $t_2 \downarrow$ 。如将 $Q_l \downarrow$ ，均可提高 η 。

此外，尽量利用废气中的热量，例如用废气预热冷空气或湿物料，或将废气循环使用，也将有助于热效率的提高。

三、热量衡算

由于热量的加入，实际干燥过程中，空气的焓可能增大，也可能减小。



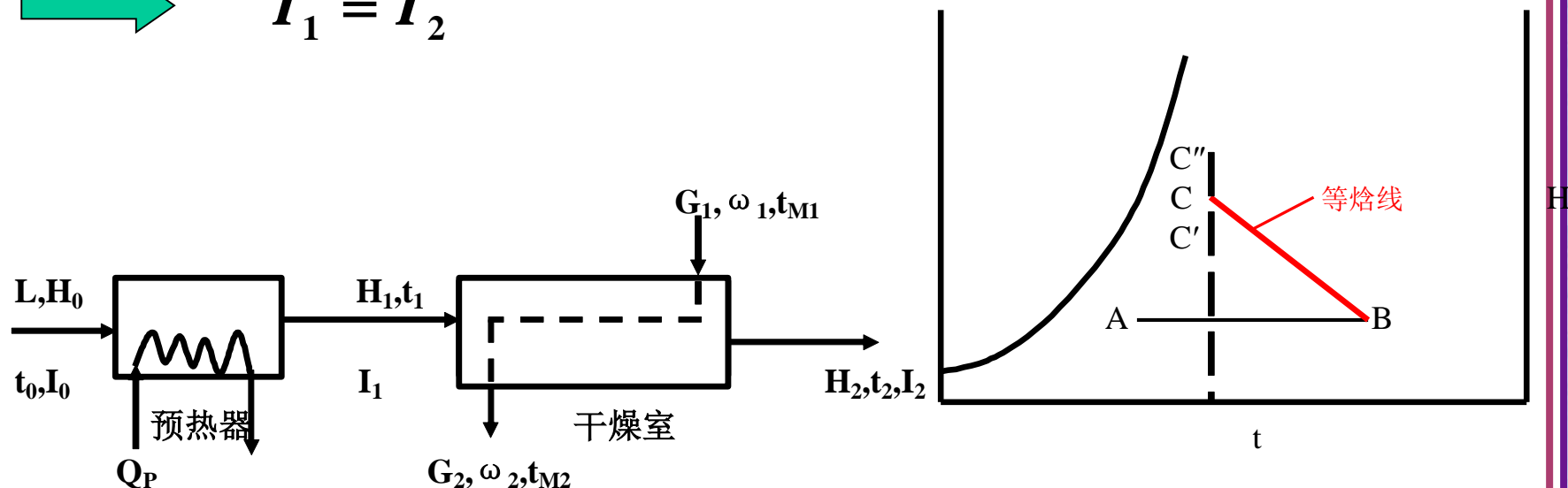
三、热量衡算

4、理想干燥过程（又称等焓或绝热干燥过程）

$Q_d=0$ 、 $Q_l=0$ 、物料带进、带出的热量均可忽略不计，

$$LI_1 + G_1 c_{M1} t_{M1} + \cancel{Q_d} = LI_2 + G_2 c_{M2} t_{M2} + \cancel{Q_l}$$

→ $I_1 = I_2$



理想干燥过程和实际干燥过程中
湿空气状态变化示意图

42/101

三、热量衡算

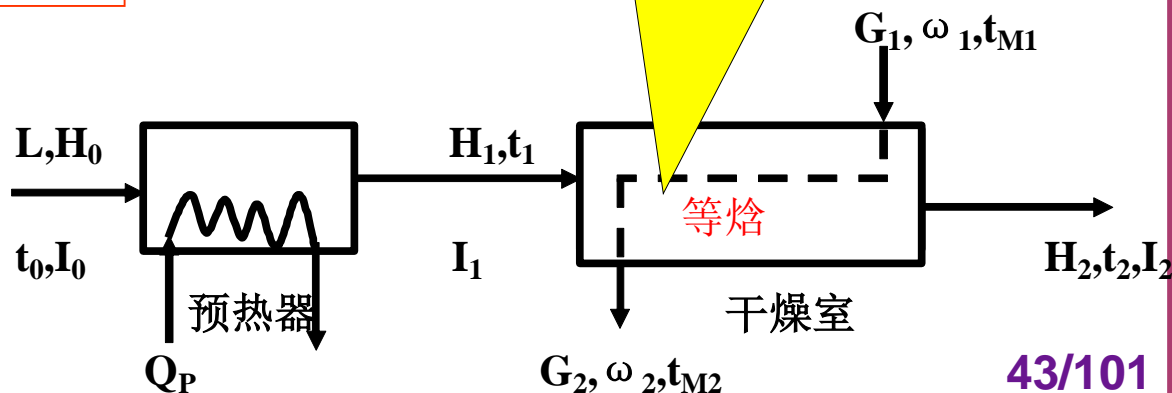
$$\eta = \frac{\text{蒸发水分所需的热量 } Q_{\text{气化}}}{\text{输入干燥设备的总热量 } Q} \times 100\%$$

$$= \frac{Lc_{H_1}(t_1 - t_2)}{Lc_{H_0}(t_1 - t_0)} \times 100\%$$

$$\therefore \eta_{\text{理想}} = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_0} \times 100\%$$

空气 (t_1 、 H_1) 降温，但焓不变，这是因为空气不断增湿的缘故，即水汽 (W) 将蒸发水分所需的热量以汽化潜热的形式带回空气中。

所以空气降温放出的显热 = 蒸发水分所需的热量



[返回目录](#)

43/101

习题课

汇总：

物料衡算 $W = G_1 - G_2 = G_c (X_1 - X_2) = G_1 \frac{\omega_1 - \omega_2}{1 - \omega_2}$

$$L = \frac{W}{H_2 - H_0}$$

热量衡算 $Q_P = L(I_1 - I_0) = Lc_{H_0}(t_1 - t_0)$

$$LI_1 + G_1c_{M_1}t_{M_1} + Q_d = LI_2 + G_2c_{M_2}t_{M_2} + Q_l$$

$$\eta = \frac{W[(2492 + 1.88t_2) - c_l t_{M_1}]}{Q_P + Q_d} \times 100\%$$

理想干燥过程（等焓干燥过程） $I_1 = I_2$

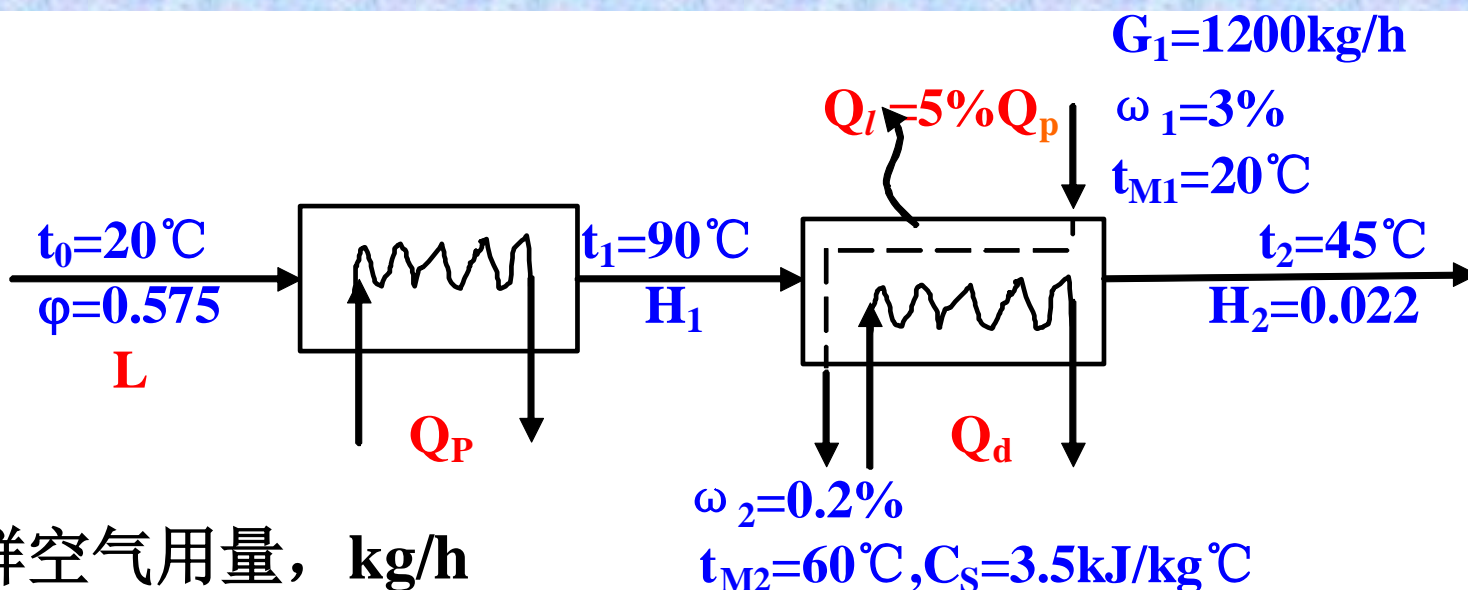
$$\eta_{\text{理想}} = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_0} \times 100\%$$

实际干燥过程举例

【例1】常压下拟用温度为 20°C 、相对湿度为 57.5% 的空气干燥某种湿物料。空气在预热器中被加热到 90°C 后送入干燥室，离开时的温度为 45°C 、湿度为 0.022kg水/kg干气 。现要求每小时将 1200kg 的湿物料由含水率 3% （湿基）干燥至 0.2% （湿基），已知物料进、出口温度分别为 20°C 和 60°C ，在此温度范围内，绝干物料的比热为 $3.5\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，水的平均比热为 $4.19\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。干燥设备热损失可按预热器中加热量的 5% 计算。试求：

- (1)新鲜空气用量， kg/h ；
- (2)预热器的加热量 Q_p ， kW ；
- (3)干燥室内补充的热量 Q_d ， kW ；
- (4)热效率 η ；
- (5)画出湿空气状态变化

实际干燥过程举例



【解】

(1) 新鲜空气用量, kg/h

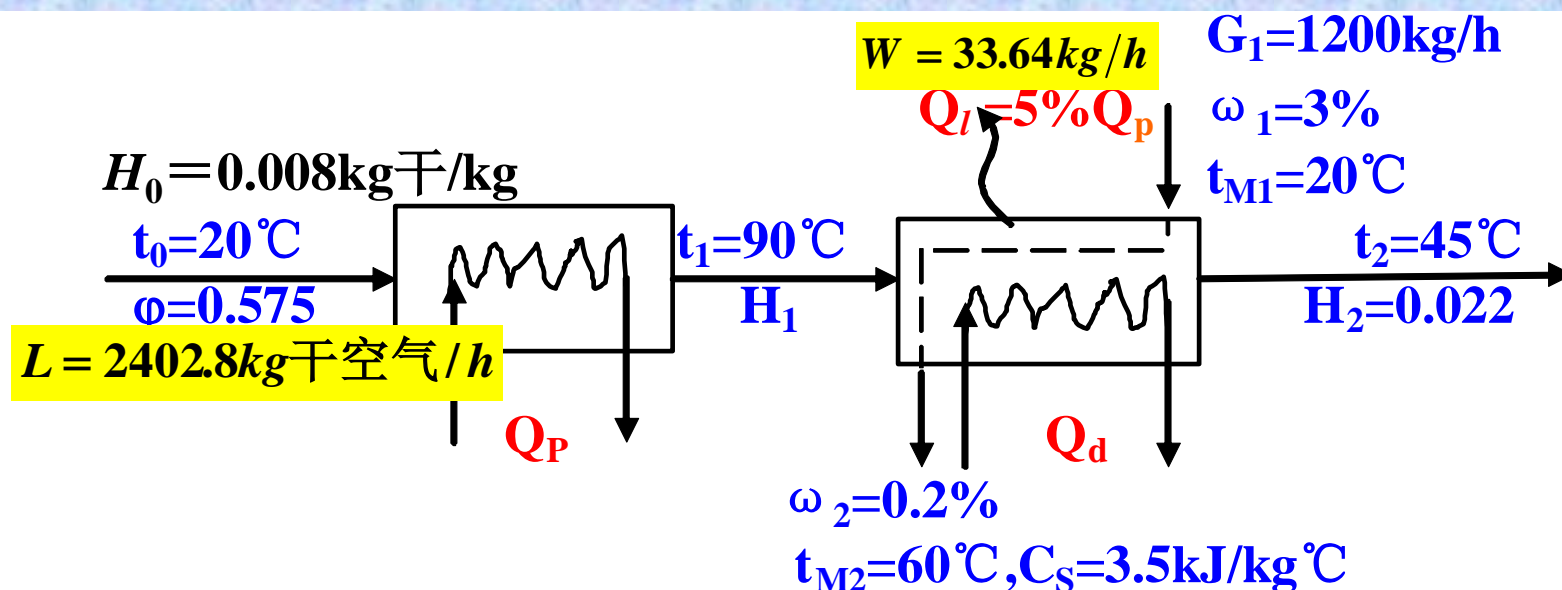
查图或计算得 $H_0=0.008\text{kg干/kg}$

$$W = G_1 \frac{\omega_1 - \omega_2}{1 - \omega_2} = 1200 \times \frac{0.03 - 0.002}{1 - 0.002} = 33.64\text{kg/h}$$

$$L = \frac{W}{H_2 - H_0} = \frac{33.64}{0.022 - 0.008} = 2402.8\text{kg干空气/h}$$

$$L' = L(1 + H_0) = 2402.8 \times (1 + 0.008) = 2422.1\text{kg/h}$$

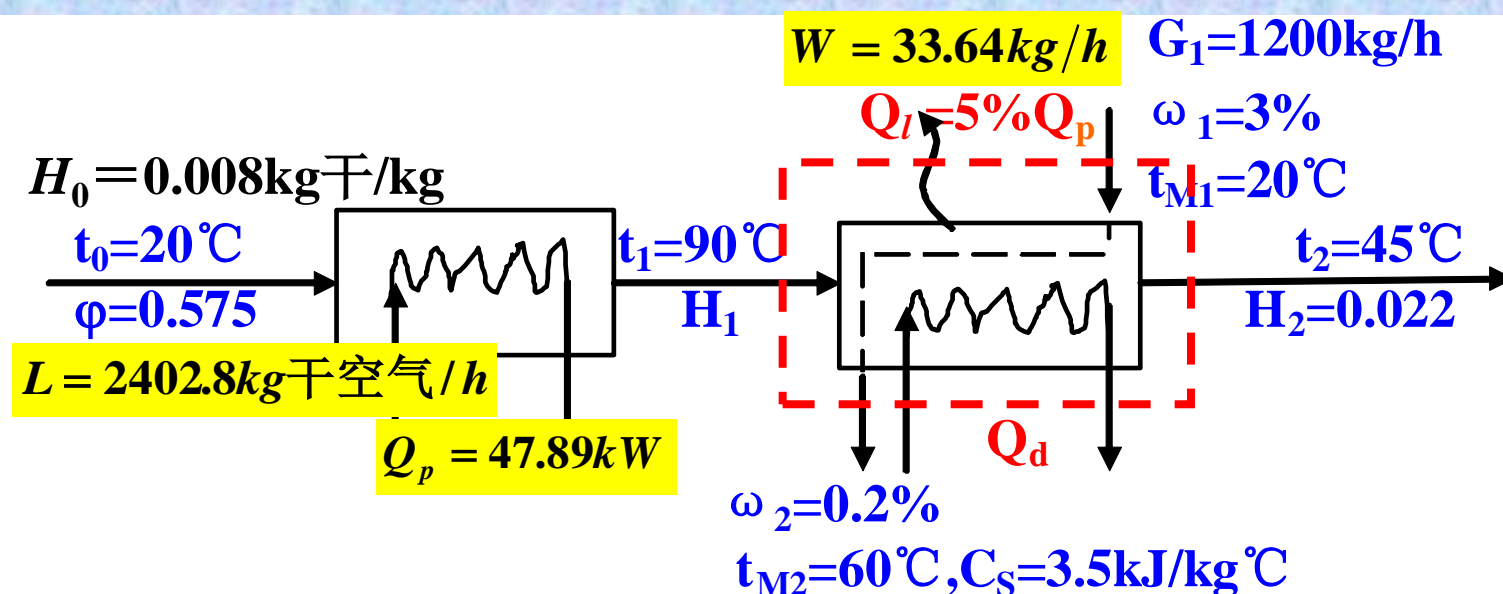
实际干燥过程举例



(2) 预热器的加热量 Q_P , kW

$$\begin{aligned}
 Q_P &= L(I_1 - I_0) = Lc_{H_0}(t_1 - t_0) \\
 &= 2402.8 \times (1.01 + 1.88 \times 0.008)(90 - 20) \\
 &= 172407.63 \text{ kJ/h} = 47.89 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

实际干燥过程举例



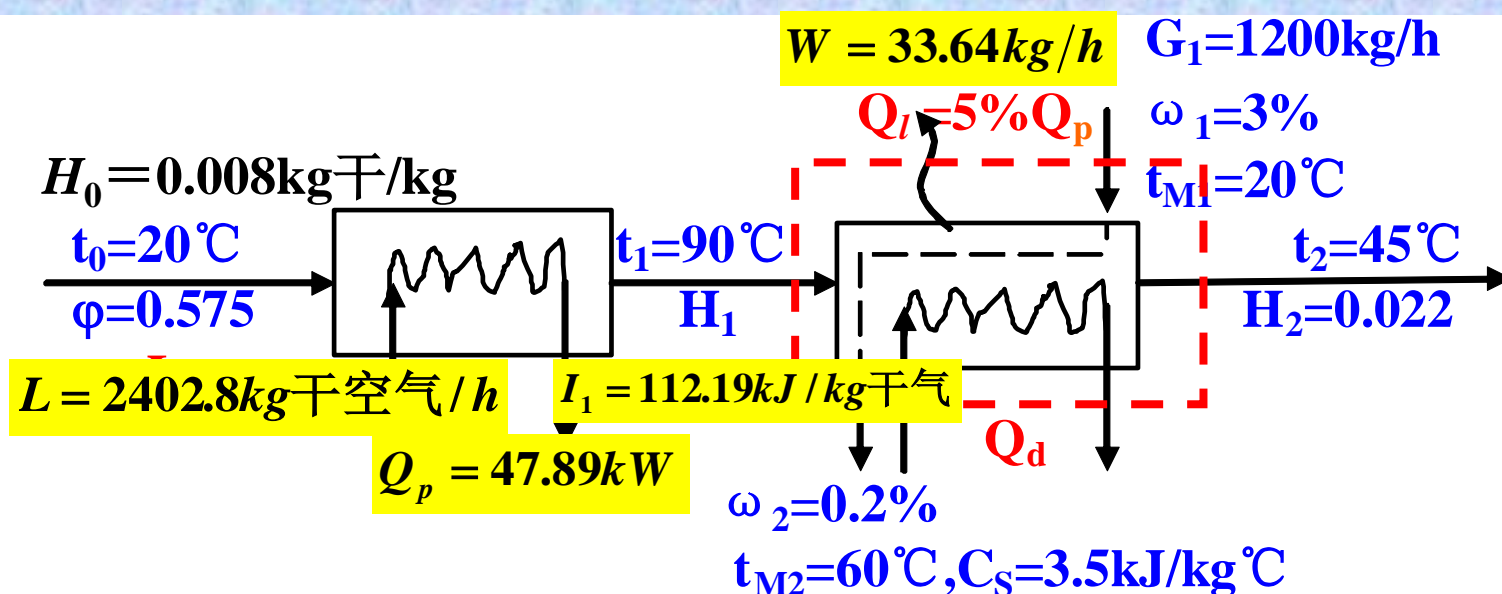
(3) 干燥室内补充的热量 Q_d , kW

$$Q_d = L(I_2 - I_1) + G_2 c_{M_2} t_{M_2} + Q_l - G_1 c_{M_1} t_{M_1}$$

其中:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= (1.01 + 1.88 H_0) t_1 + 2492 H_0 \\
 &= (1.01 + 1.88 \times 0.008) \times 90 + 2492 \times 0.008 \\
 &= 112.19 \text{ kJ/kg干气}
 \end{aligned}$$

实际干燥过程举例

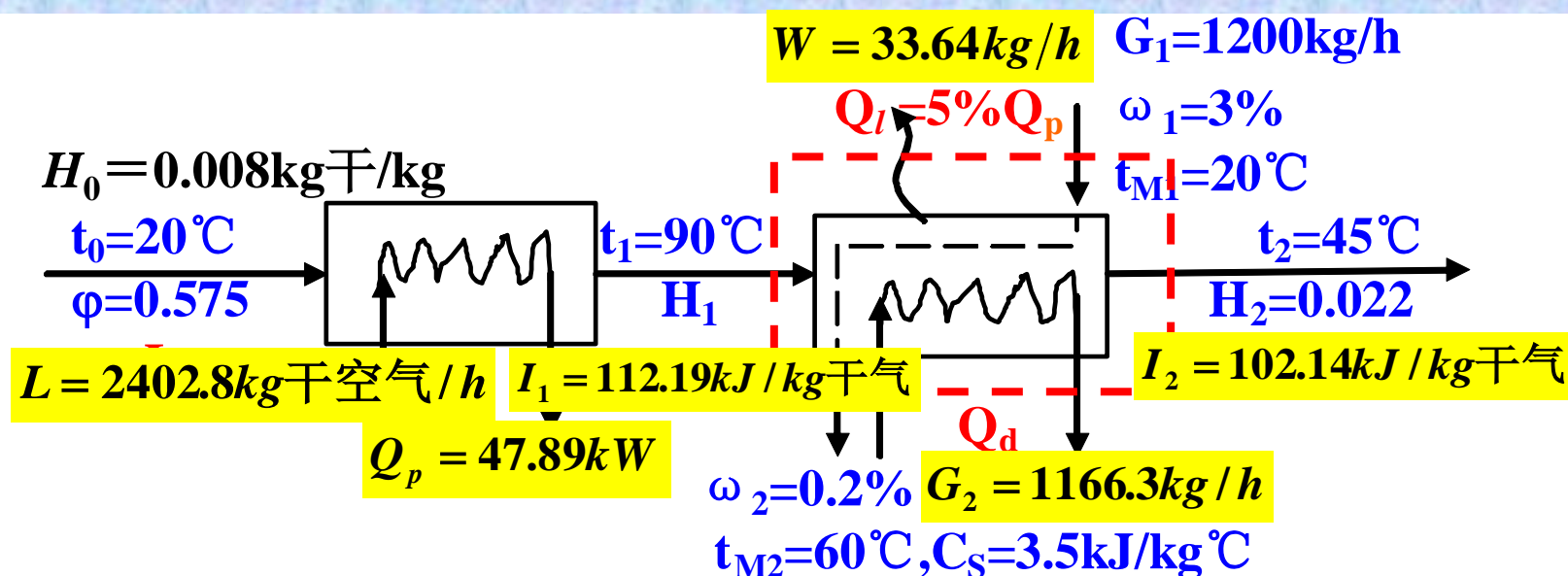


$$Q_d = L(I_2 - I_1) + G_2 c_{M_2} t_{M_2} + Q_l - G_1 c_{M_1} t_{M_1}$$

$$\begin{aligned}
 I_2 &= (1.01 + 1.88 H_2) t_2 + 2492 H_2 \\
 &= (1.01 + 1.88 \times 0.022) \times 45 + 2492 \times 0.022 \\
 &= 102.14 \text{ kJ/kg干气}
 \end{aligned}$$

$$G_2 = \frac{G_1 (1 - \omega_1)}{1 - \omega_2} = \frac{1200 \times (1 - 3\%)}{1 - 0.2\%} = 1166.3 \text{ kg/h}$$

实际干燥过程举例



$$c_{M_1} = (1 - \omega_1)c_s + \omega_1 c_l = (1 - 3\%) \times 3.5 + 3\% \times 4.19 = 3.52 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

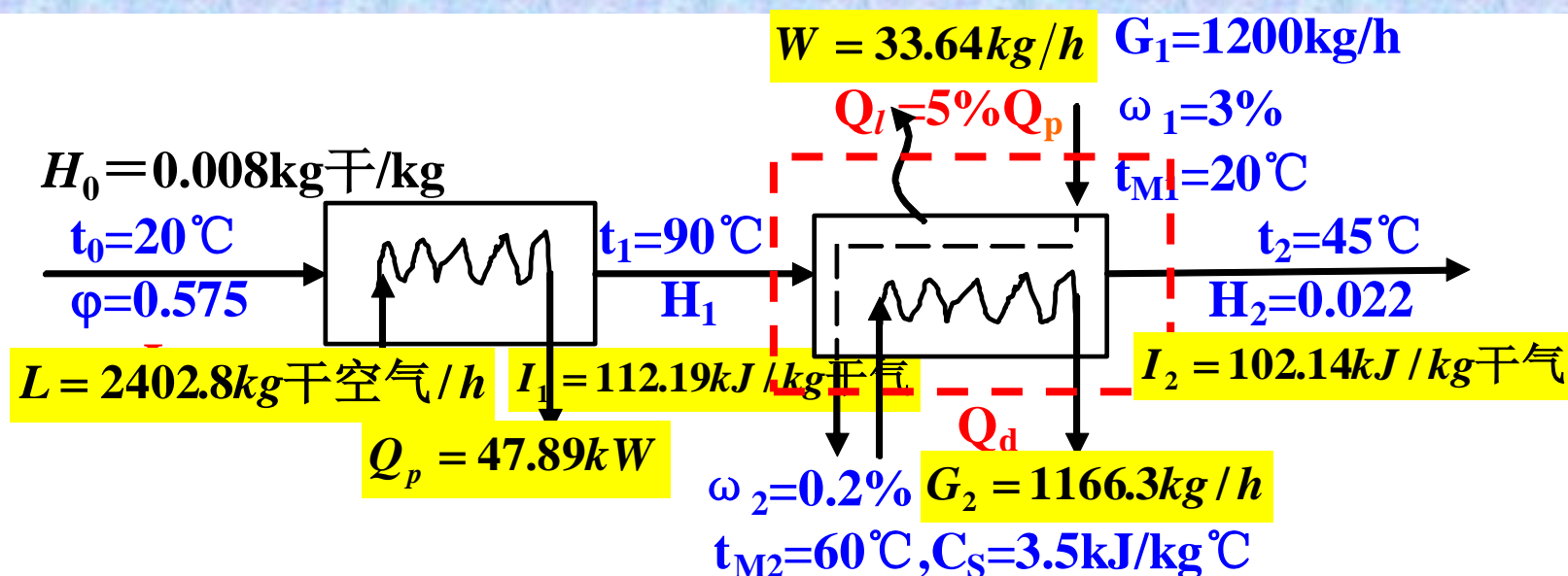
$$c_{M_2} = (1 - \omega_2)c_s + \omega_2 c_l = (1 - 0.2\%) \times 3.5 + 0.2\% \times 4.19 = 3.50 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$Q_l = 5\% Q_p = 47.89 \times 5\% = 2.39 \text{ kW}$$

代入式 $Q_d = L(I_2 - I_1) + G_2 c_{M_2} t_{M_2} + Q_l - G_1 c_{M_1} t_{M_1}$ 中得:

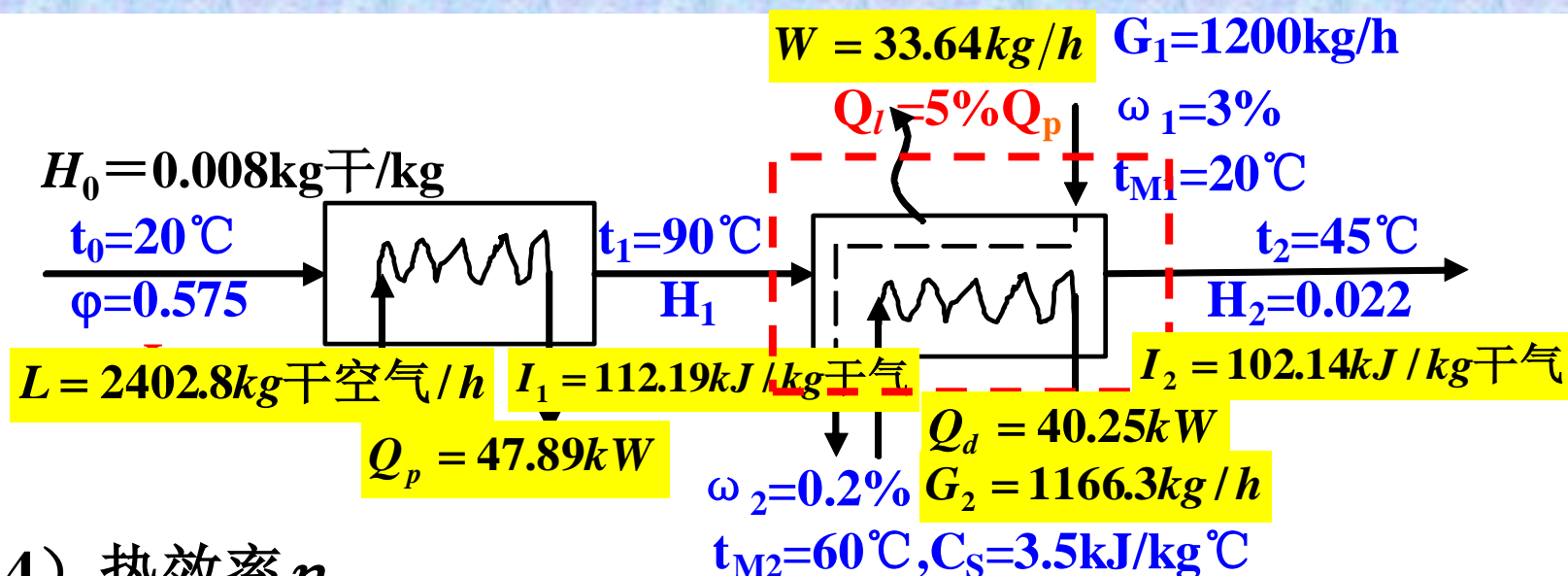
50/101

实际干燥过程举例



$$\begin{aligned}
 Q_d &= \frac{2402.8}{3600} \times (102.14 - 112.19) + \frac{1166.3}{3600} \times 3.50 \times 60 + 2.39 \\
 &\quad - \frac{1200}{3600} \times 3.52 \times 20 \\
 &= 40.25 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

实际干燥过程举例

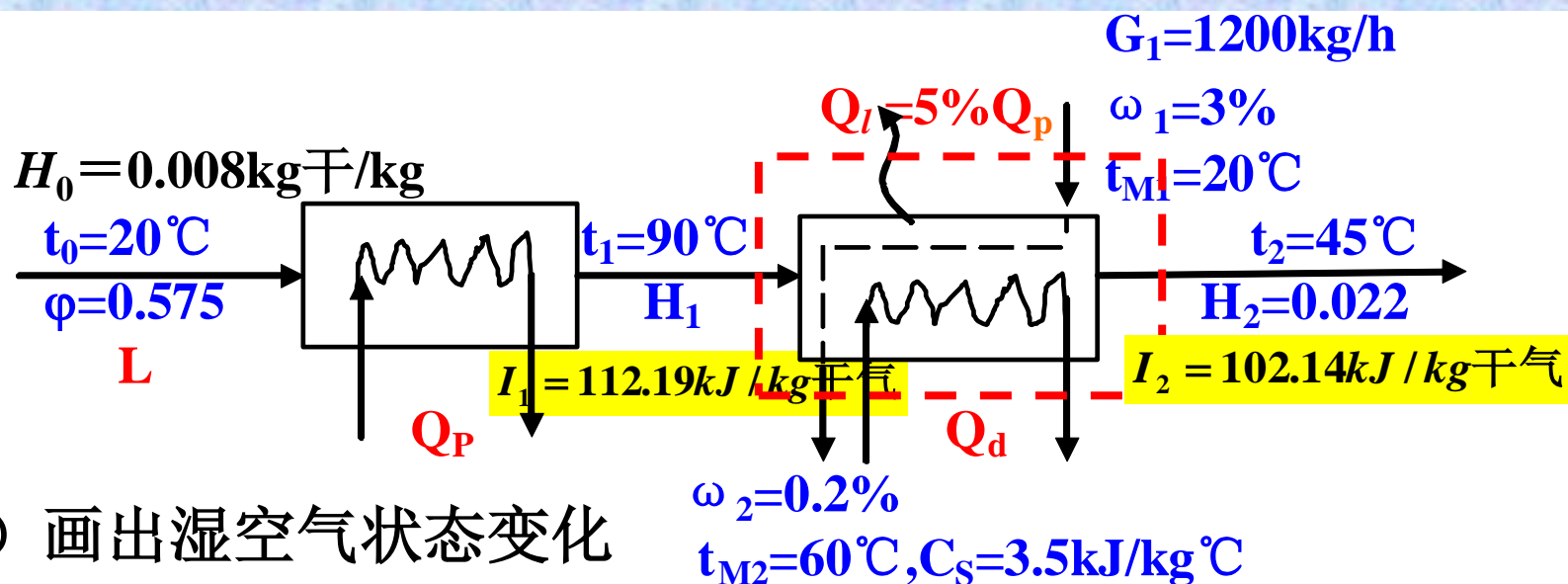


(4) 热效率 η

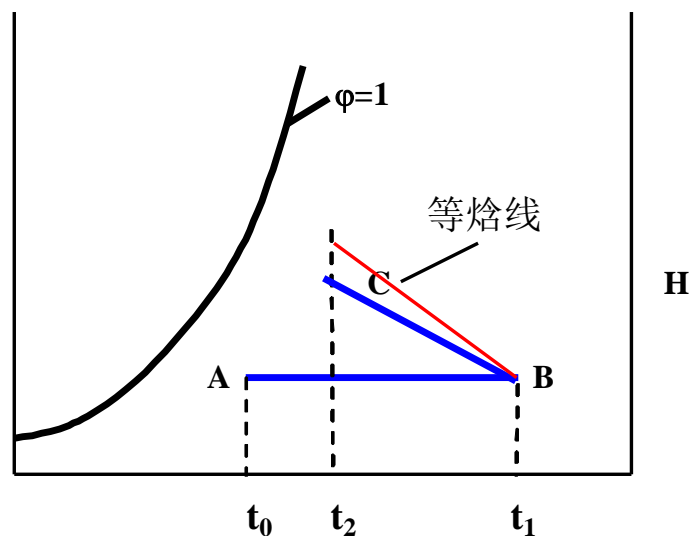
$$\eta = \frac{\text{蒸发水分所需的热量 } Q_{\text{气化}}}{\text{输入干燥设备的总热量 } Q} \times 100\% = \frac{W [(2492 + 1.88t_2) - c_l t_{M1}]}{Q_p + Q_d} \times 100\%$$

$$= \frac{\frac{33.64}{3600} \times (2492 + 1.88 \times 45 - 4.19 \times 20)}{47.89 + 40.25} = \frac{23.29}{47.89 + 40.25} \times 100\% = 26.4\%$$

实际干燥过程举例

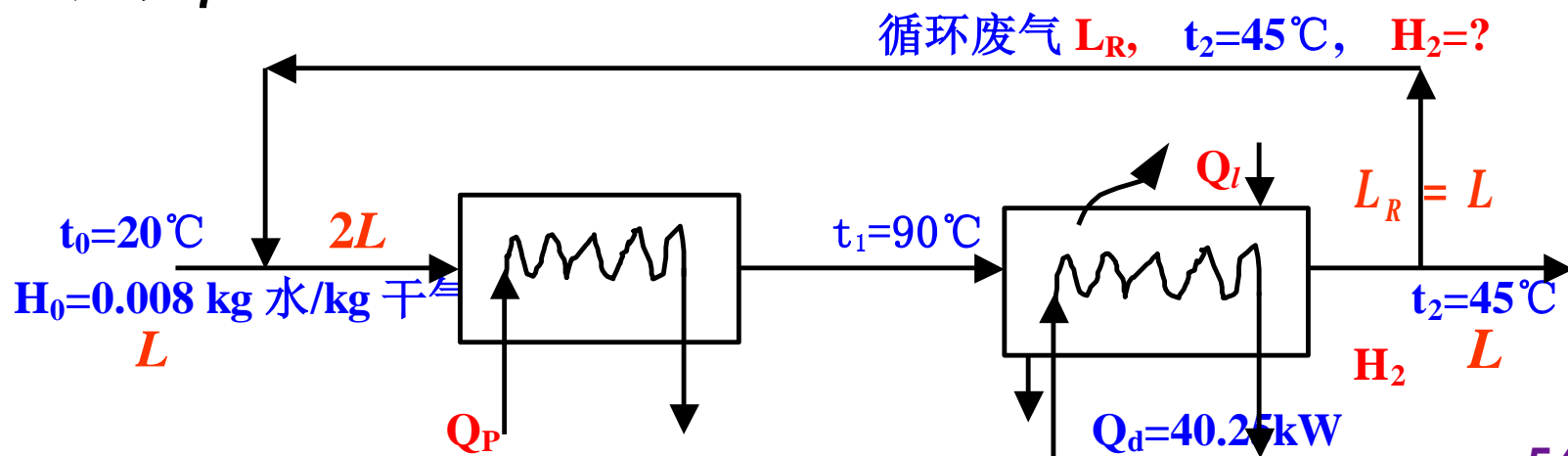


(5) 画出湿空气状态变化



有废气循环的实际干燥过程举例

【例2】现将例1流程改为废气循环流程设计，如图所示。将出口废气中的50%引到新鲜空气处与新鲜空气混合。混合气经预热器仍加热至 90°C 后，再送入干燥室，出干燥室的废气温度仍为 45°C ，干燥室加热量 Q_d 不变，仍为 40.25kW ，被干燥的物料及干燥要求不变，热损失仍可取为 Q_p 的5%。试计算：（1）画出湿空气状态变化，并与例1对比。（2）新鲜空气的用量， kg/h ；（3）预热器的加热量 Q_p ， kW ；（4）热效率 η

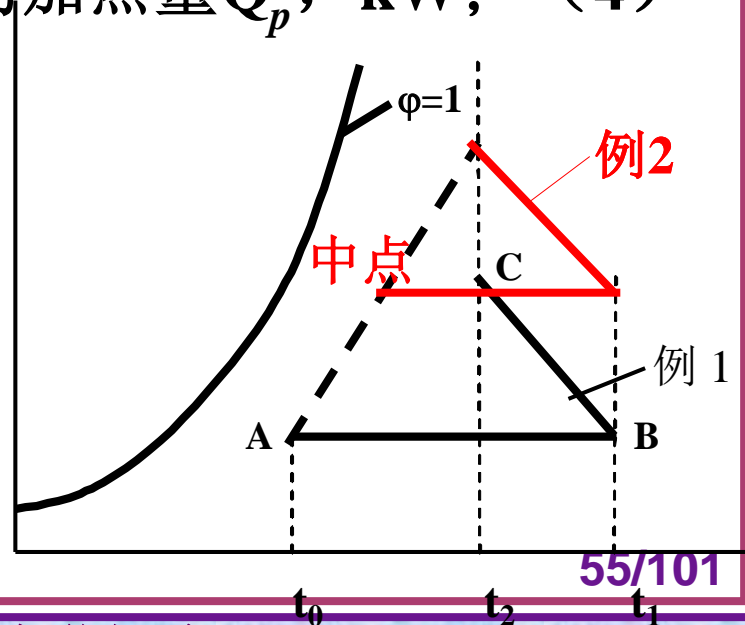


有废气循环的实际干燥过程举例

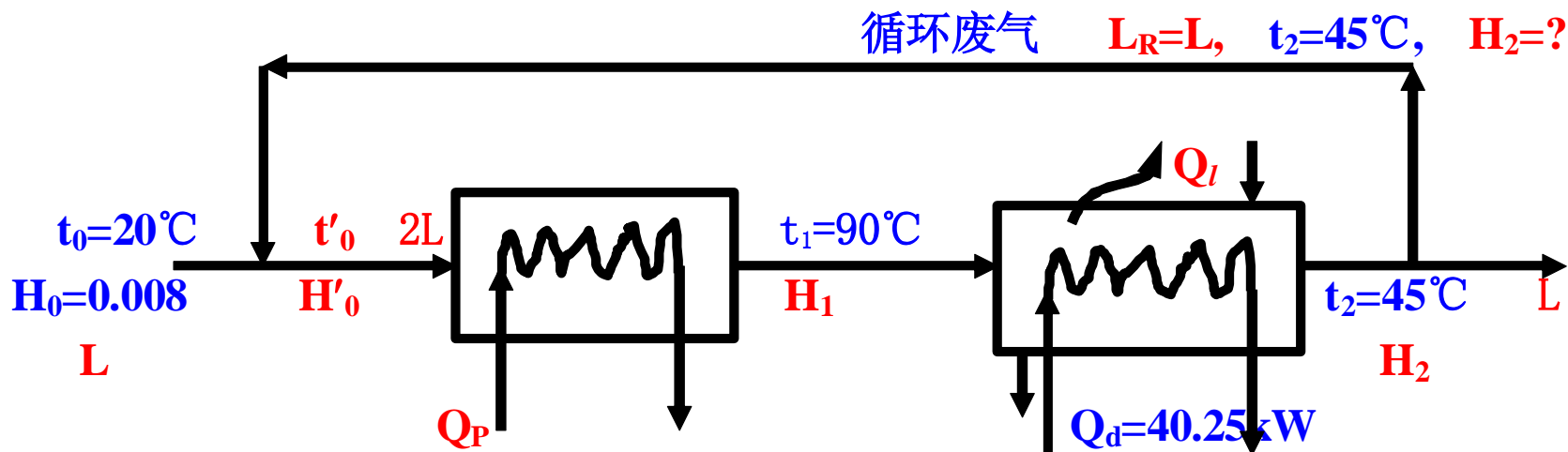
【例2】现将例1流程改为废气循环流程设计，如图所示。将出口废气中的50%引到新鲜空气处与新鲜空气混合。混合气经预热器仍加热至 90°C 后，再送入干燥室，出干燥室的废气温度仍为 45°C ，干燥室加热量 Q_d 不变，仍为 40.25kW ，被干燥的物料及干燥要求不变，热损失仍可取为 Q_p 的5%。试计算：（1）画出湿空气状态变化，并与例1对比。（2）新鲜空气的用量， kg/h ；（3）预热器的加热量 Q_p ， kW ；（4）热效率 η

【解】

（1）画出湿空气状态变化，并与例1对比。



有废气循环的实际干燥过程举例

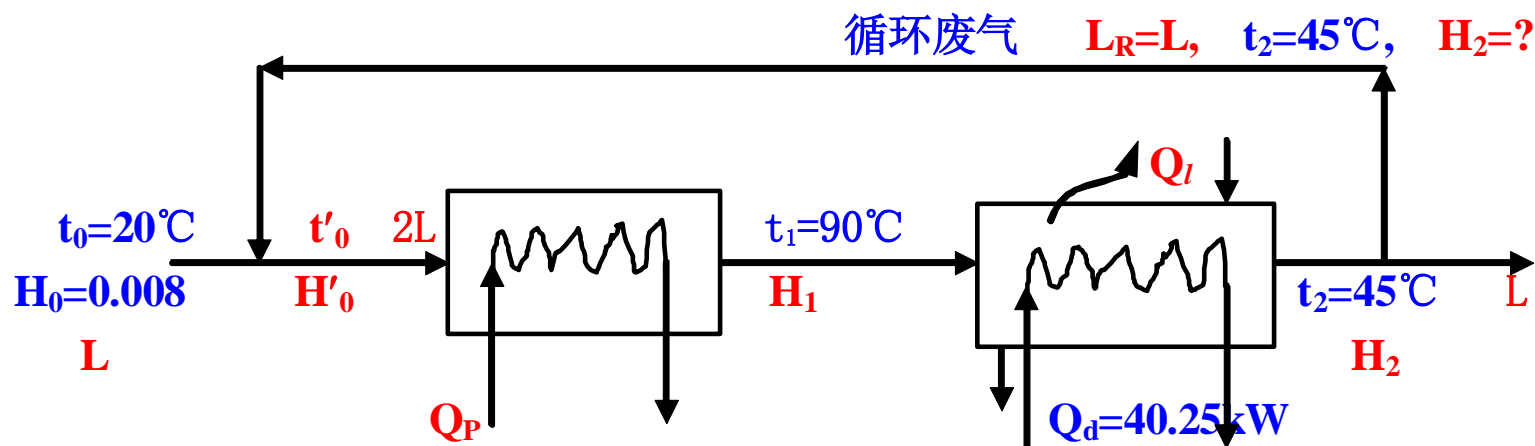


(2) 新鲜空气用量, kg/h

由例1知: $W = 33.64\text{ kg/h} = 0.00934\text{ kg/s}$

$$L = \frac{W}{H_2 - H_0} \quad \rightarrow \quad 0.00934 = L(H_2 - 0.008) \quad \text{-----} \quad (1)$$

有废气循环的实际干燥过程举例



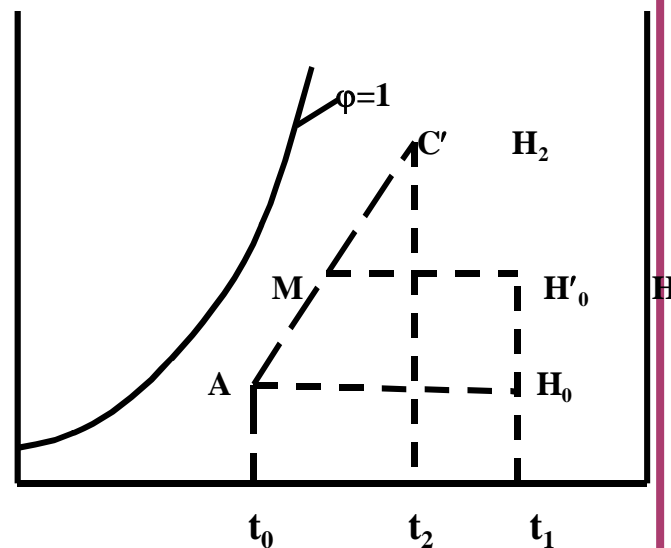
(3) 预热器的加热量 Q_p , kW

$$Q_P = (L + L_R)(I_1 - I'_0)$$

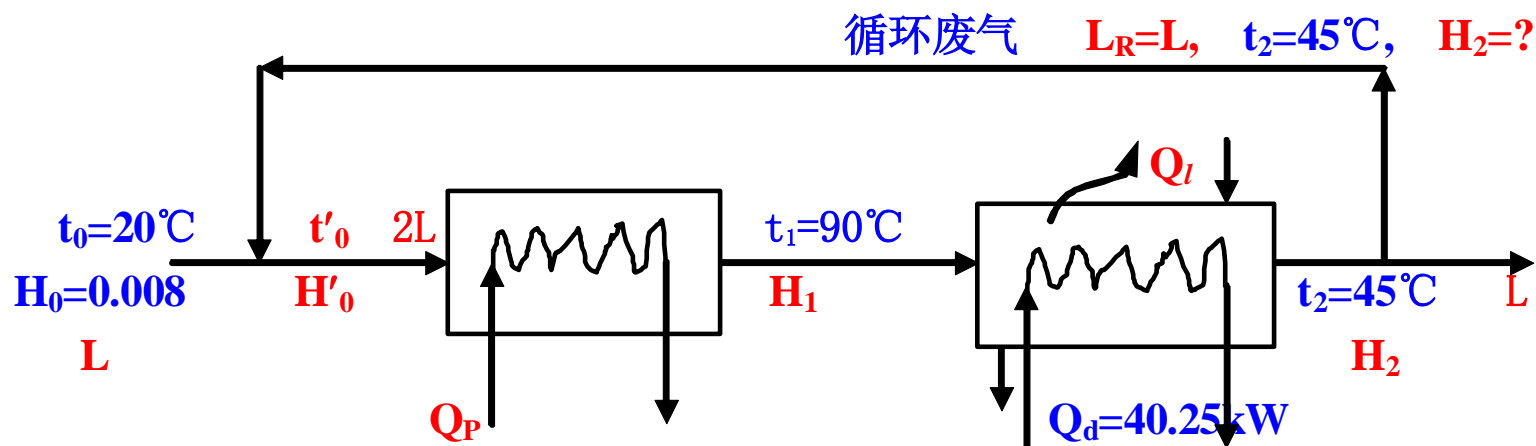
$$I'_0 = (1.01 + 1.88H'_0)t'_0 + 2492H'_0$$

杠杆原理
$$\frac{H_2 - H'_0}{H'_0 - H_0} = \frac{t_2 - t'_0}{t'_0 - t_0} = \frac{L}{L_R} = 1$$

→
$$H'_0 = \frac{H_2 + H_0}{2} = \frac{1}{2}H_2 + 0.004 \text{ kg/kg干气}$$



有废气循环的实际干燥过程举例



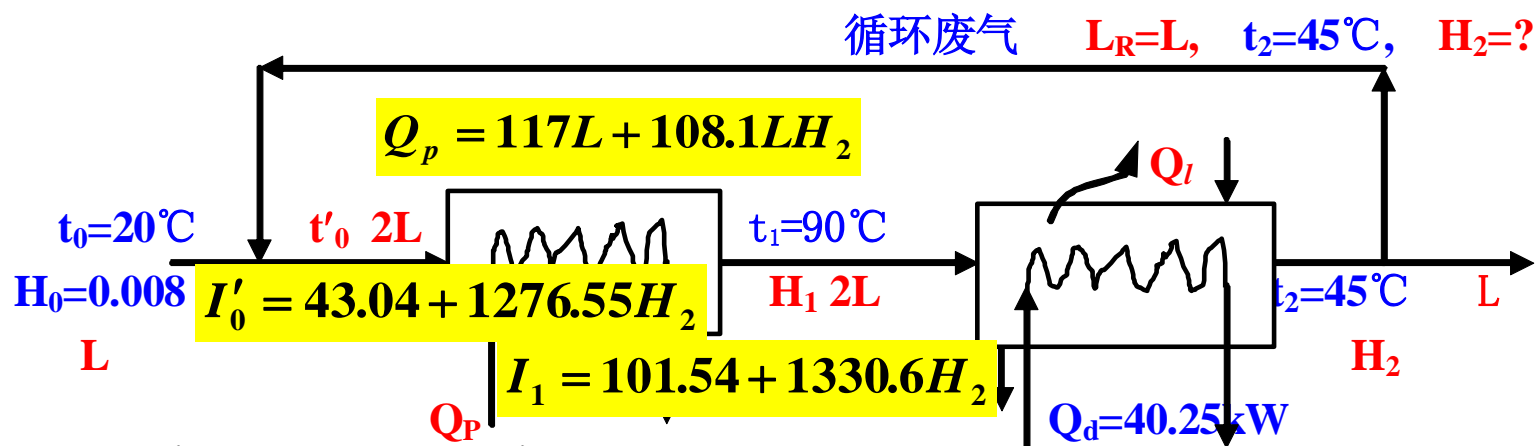
$$t'_0 = \frac{t_2 + t_0}{2} = \frac{45 + 20}{2} = 32.5^\circ\text{C}$$

$$\rightarrow I'_0 = (1.01 + 1.88H'_0)t'_0 + 2492H'_0 = 43.04 + 1276.55H_2$$

$$I_1 = (1.01 + 1.88H'_0)t_1 + 2492H'_0 = 101.54 + 1330.6H_2$$

$$\begin{aligned} Q_P &= (L + L_R)(I_1 - I'_0) \\ &= 2L[(101.54 + 1330.6H_2) - (43.04 + 1276.55H_2)] \\ &= 117L + 108.1LH_2 \end{aligned}$$

有废气循环的实际干燥过程举例



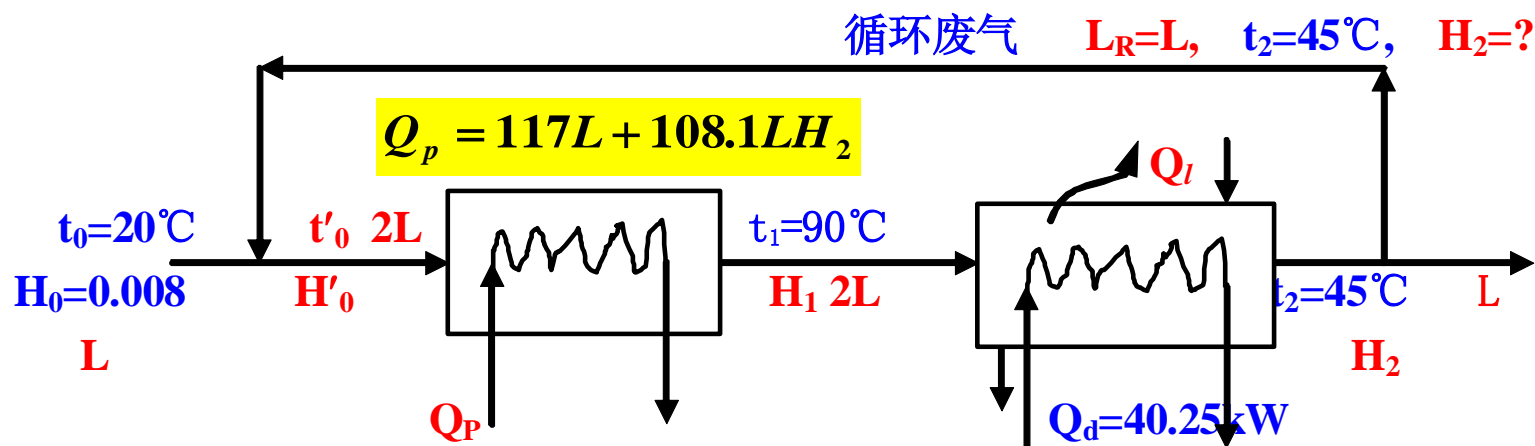
$$\begin{aligned}
 I_2 &= (1.01 + 1.88H_2)t_2 + 2492H_2 \\
 &= (1.01 + 1.88 \times H_2) \times 45 + 2492 \times H_2 \\
 &= 45.45 + 2576.6H_2
 \end{aligned}$$

求解见例1

$$Q_d = 2L(I_2 - I_1) + G_2 c_{M_2} t_{M_2} + 0.05Q_p - G_1 c_{M_1} t_{M_1}$$

$$\begin{aligned}
 40.25 &= 2L[(45.45 + 2576.6H_2) - (101.54 + 1330.6H_2)] \\
 &\quad + \frac{1166.3}{3600} \times 3.50 \times 60 + 0.05(117L + 108.1LH_2) - \frac{1200}{3600} \times 3.52 \times 20
 \end{aligned}$$

有废气循环的实际干燥过程举例



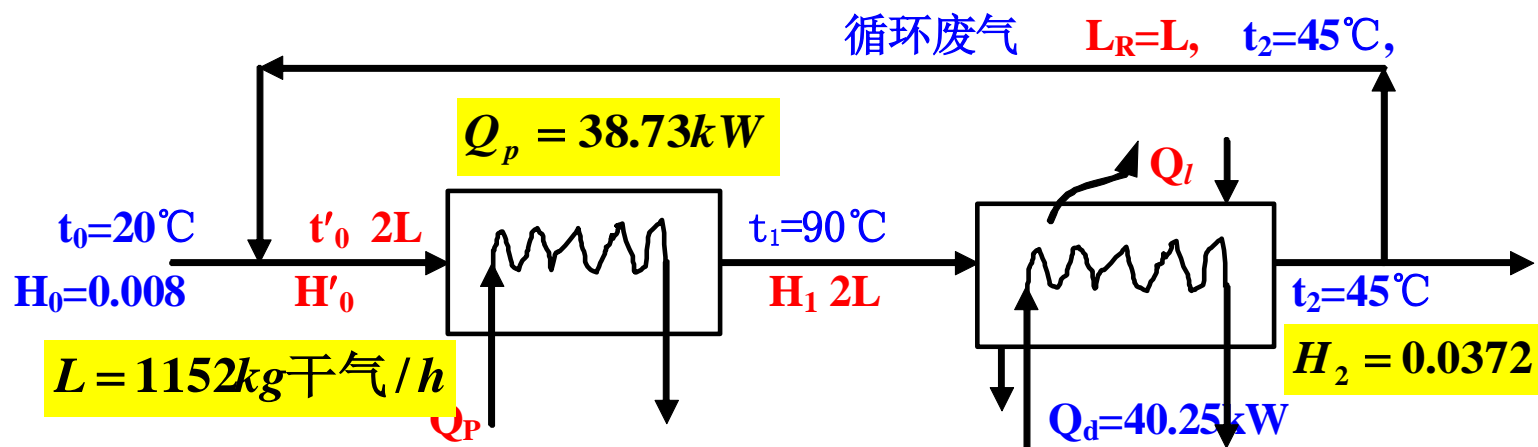
$$\longrightarrow L(2497.405H_2 - 106.33) + 4.317 = 0 \quad \text{----- (2)}$$

联立式 (1)、(2) 得: $L = 0.32\text{kg干气/s} = 1152\text{kg干气/h}$

$$H_2 = 0.0372\text{kg水/kg干气}$$

$$\begin{aligned} \longrightarrow Q_p &= 117L + 108.1LH_2 \\ &= 117 \times 0.32 + 108.1 \times 0.32 \times 0.0372 \\ &= 38.73\text{kW} \end{aligned}$$

有废气循环的实际干燥过程举例

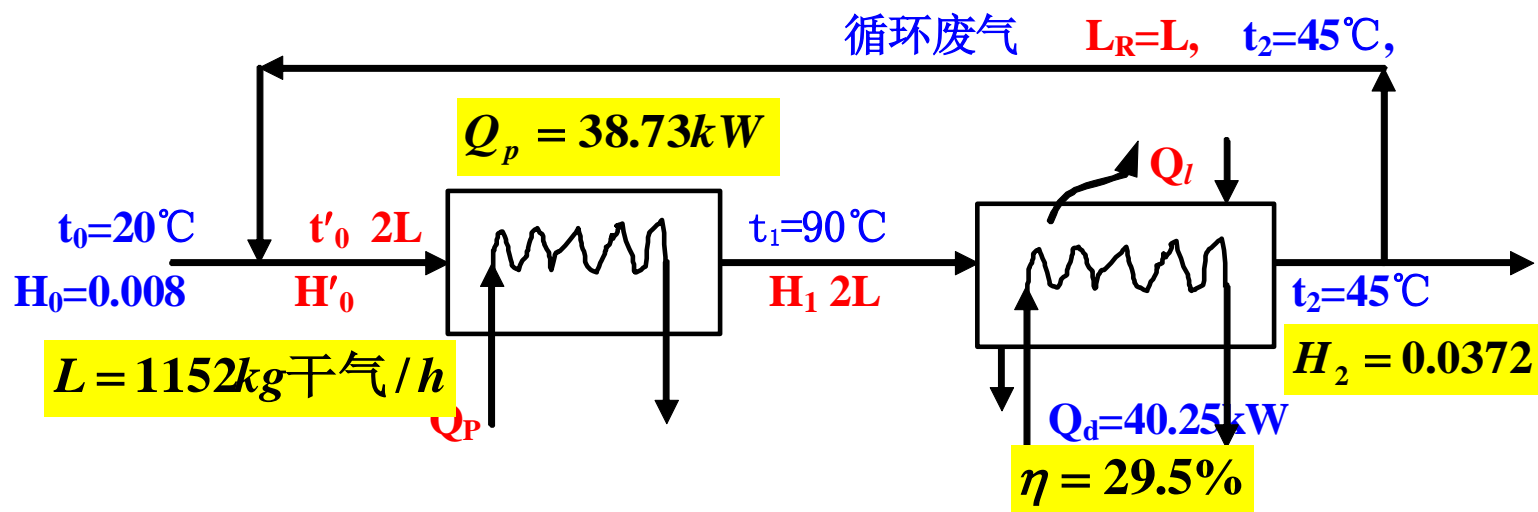


(4) 热效率 η

由例1可知 $Q_{\text{汽化}} = 23.29\text{kW}$

$$\eta = \frac{Q_{\text{汽化}}}{Q_p + Q_d} \times 100\% = \frac{23.29}{38.73 + 40.25} \times 100\% = 29.5\%$$

有废气循环的实际干燥过程举例



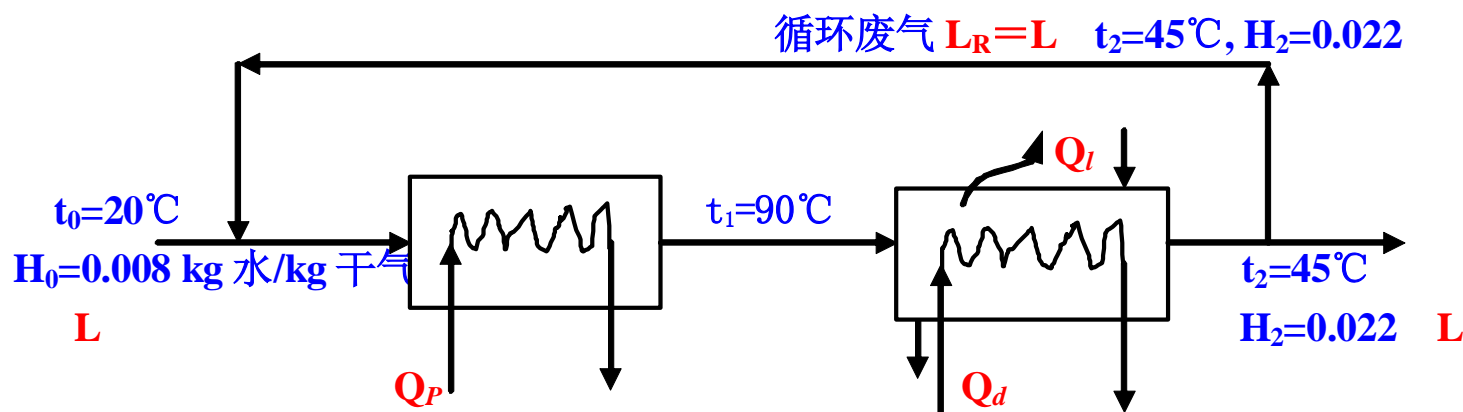
例 1 结果	$L = 2402.8\text{kg干气/h}$	$Q_P=47.89\text{kW}$	$H_2=0.022$	$\eta = 26.4\%$
例 2 结果	$L = 1152\text{kg干气/h}$	$Q_P=38.72\text{kW}$	$H_2=0.0372$	$\eta = 29.5\%$

结论：在完成同样的生产任务条件下，若采用废气循环流程，新鲜干空气用量减少，预热器热负荷减小，干燥效率提高，但出口废气湿度增大，故干燥过程速率下降，干燥设备将变大。

练习

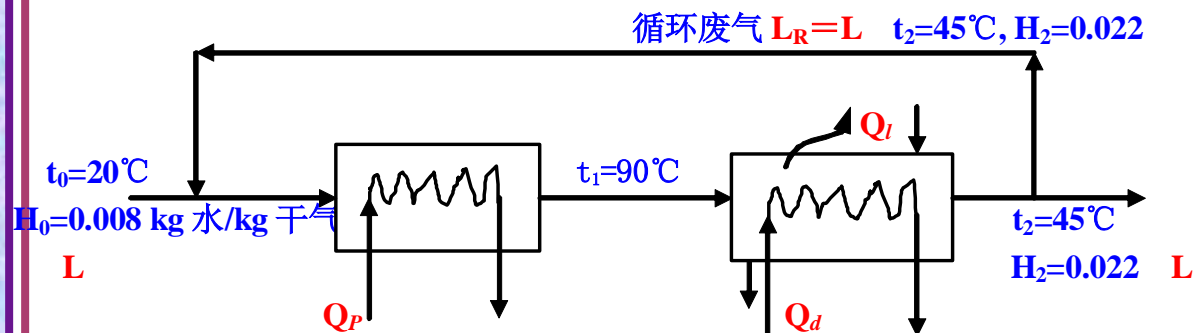
【练习】现将例1流程改为废气循环流程设计，如图所示。将出口废气中的50%引到新鲜空气处与新鲜空气混合。混合气经预热器仍加热至 90°C 后，再送入干燥室，出干燥室的废气温度仍为 45°C ，湿度仍为 0.022kg水/kg干气 ，被干燥的物料及干燥要求不变，热损失仍可取为 Q_p 的5%。试计算：

(1) 画出湿空气状态变化，并与例2对比 (2) 新鲜空气的用量， kg/h ； (3) Q_p 、 Q_d ， kW ； (4) 热效率 η ；。



练习

作业:



第四节 干燥速率和干燥时间

----干燥动力学

干燥动力学可以解决干燥室尺寸问题

求解：

干燥介质用量；✓

干燥条件（如进干燥室的空气温度，✓
出干燥室的空气温度和湿度等）；

整个设备的热能消耗；✓

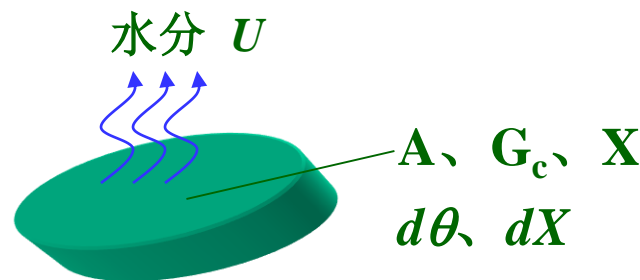
干燥室尺寸

第四节 干燥速率和干燥时间

一、干燥速率

单位时间、单位干燥表面所汽化的水分量，称为 \sim ，单位 $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ 。就是第八章提到的传质速率。

$$U = - \frac{G_c dX}{A d\theta}$$



其中 G_c ——绝干物料质量， kg ；

A ——干燥面积， m^2 ；

X ——物料中干基含水率， $\text{kg水}/\text{kg干料}$ 。

二、物料中的几种水分

1、结合水分与非结合水分

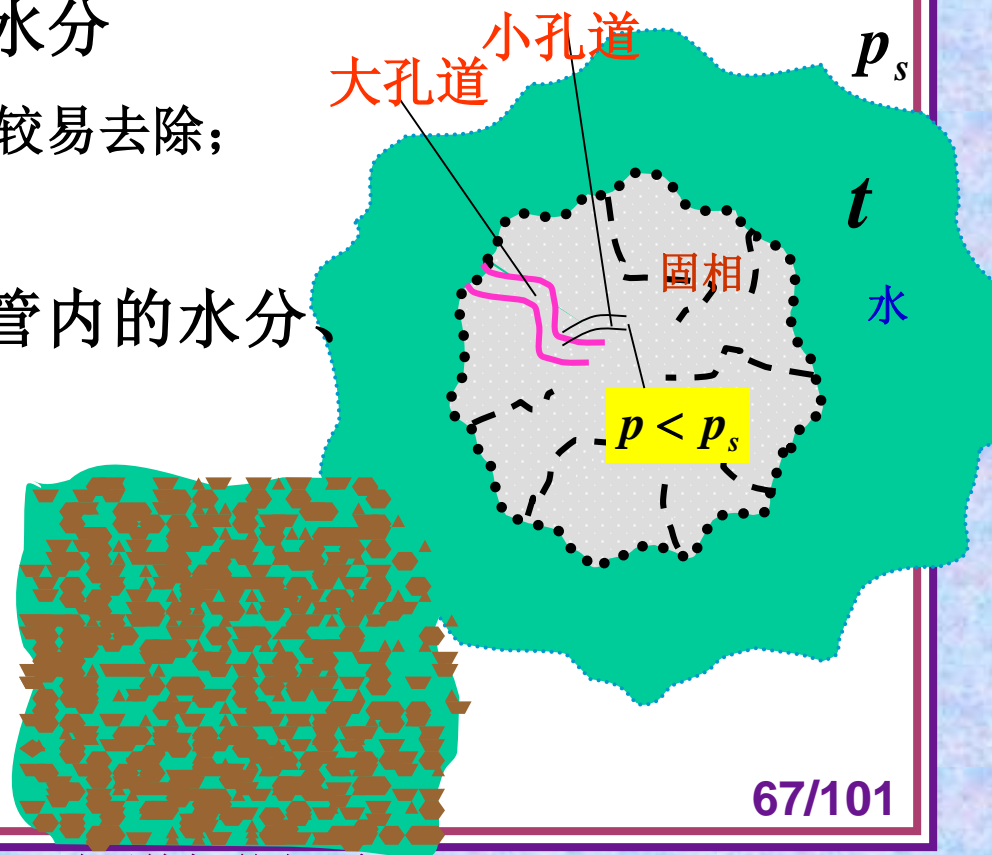
——取决于物料本身的性质，与空气状况无关。

非结合水-----机械地附着在物料表面的水分，或物料堆积层中大空隙中的水分

特点：与固体相互结合力较弱，较易去除；
性质与纯水的相同；

结合水-----结晶水、小毛细管内的水分、
细胞内的水分等。

特点：结合水的蒸气压低于同温下水的饱和蒸气压；
借化学力或物理化学力与固体相结合，较难去除。



二、物料中的几种水分

2、平衡水分与自由水分

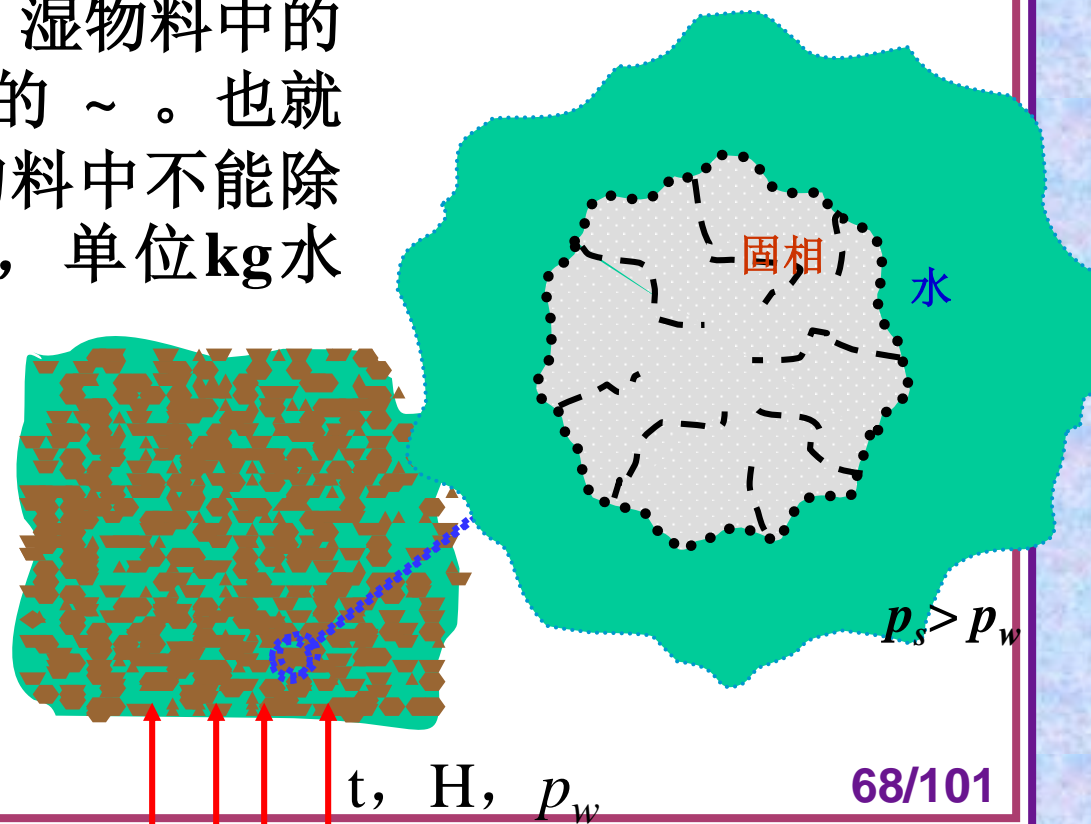
——取决于物料本身的性质及空气状态。

什么是平衡水分？-----在一定空气状态下的干燥极限

在一定空气状态下，湿物料中的恒定含水量称为该物料的 \sim 。也就是在一定空气状态下物料中不能除去的水分。用 X^* 表示，单位 $\text{kg水}/\text{kg干料}$ 。

什么是自由水分？

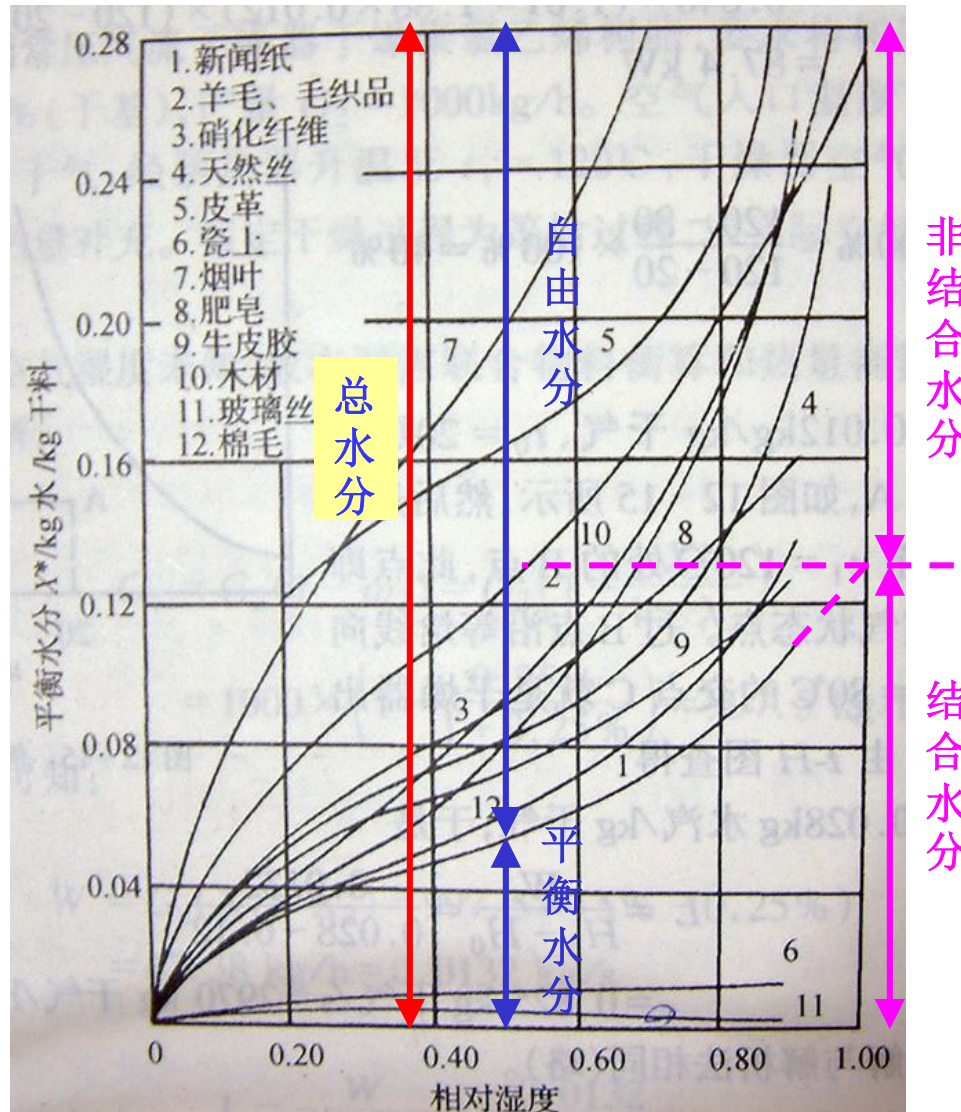
物料总水分中，除了平衡水分以外的那部分水，称为 \sim 。



二、物料中的几种水分

思考：“在一定空气状态下物料中不能除去的水分”这句话是否意味着这部分水再也无法除去了？

二、物料中的几种水分



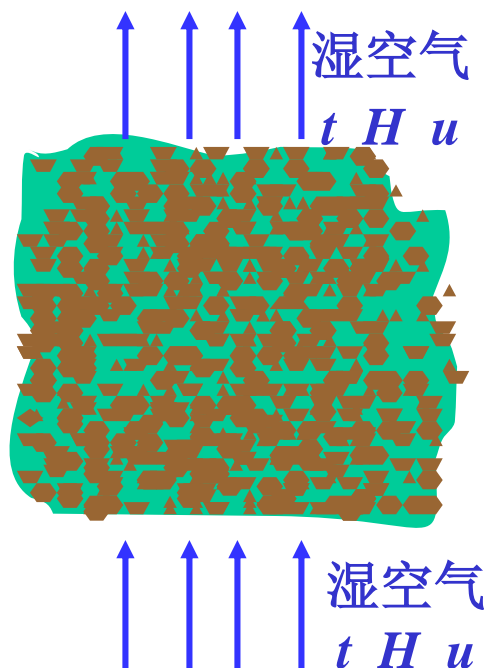
Why?

图 12-16 某些物料的平衡水分(25℃)

三、干燥过程及机理

前提:

恒定干燥条件----- 湿空气的状态（温度、湿度）不变、
空气流速不变、
与物料的接触方式不变



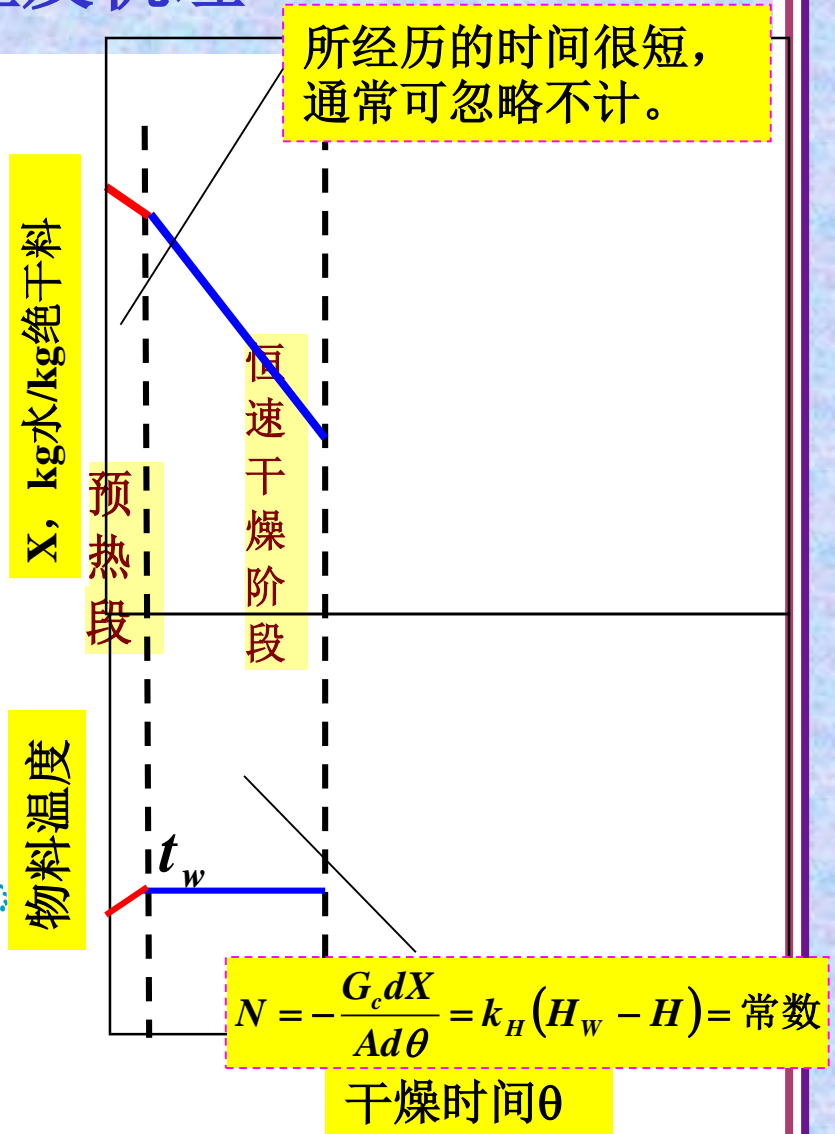
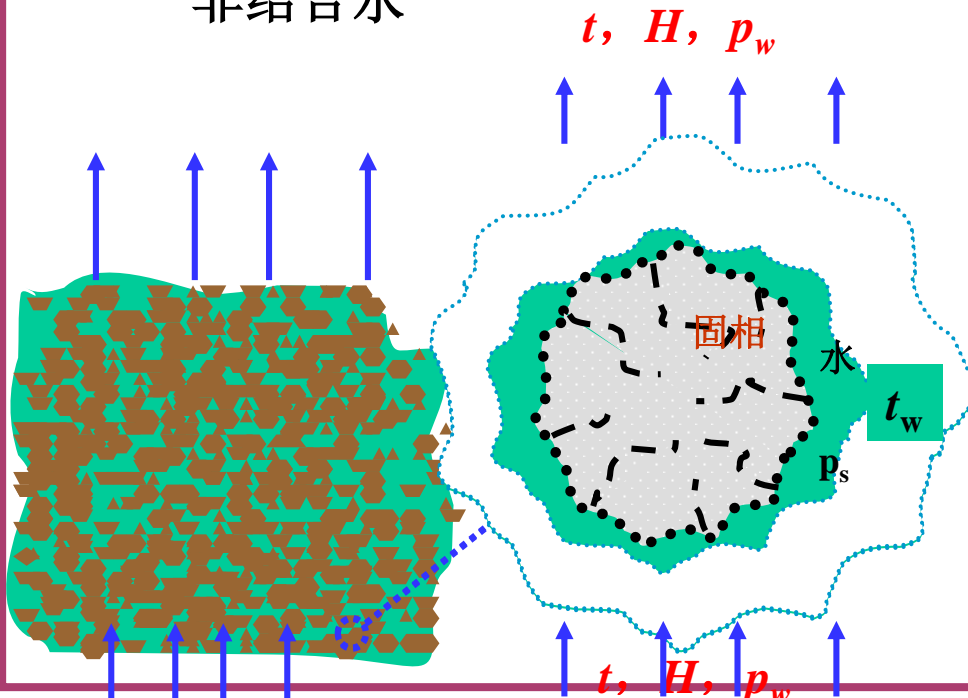
三、干燥过程及机理

预热段

恒速干燥阶段

思考：恒速段除去的是什么水？

非结合水

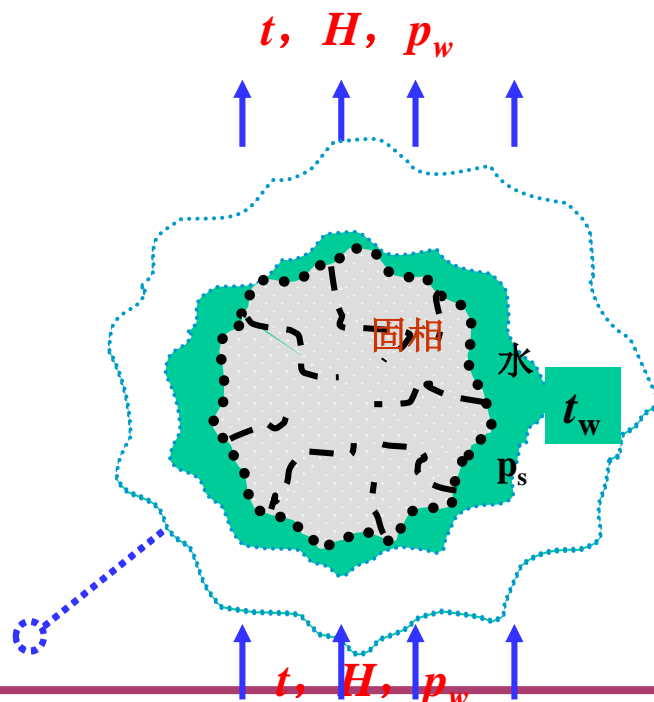


三、干燥过程及机理

恒速段干燥机理： 表面气化控制

思考：影响恒速阶段干燥速率的因素？

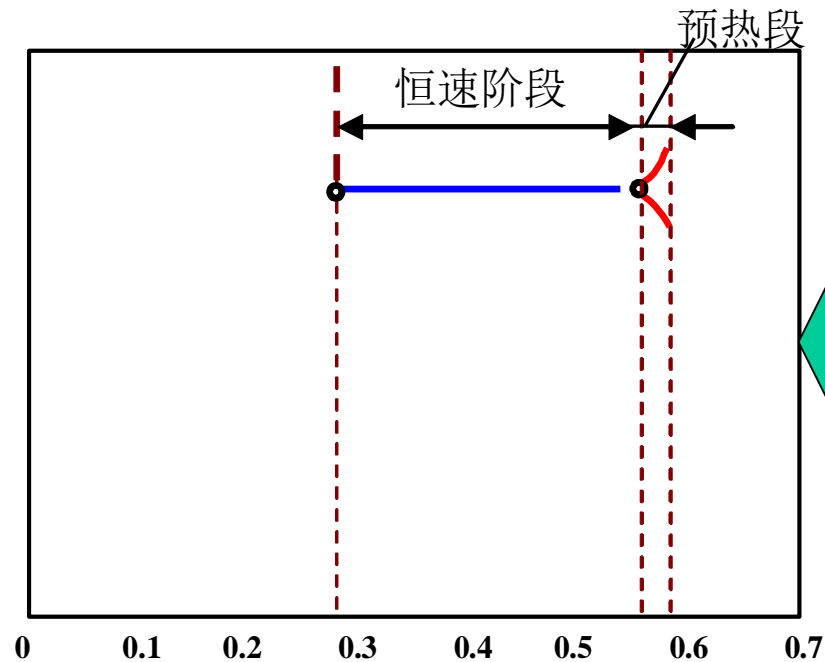
空气条件



三、干燥过程及机理

恒速段干燥速率曲线：

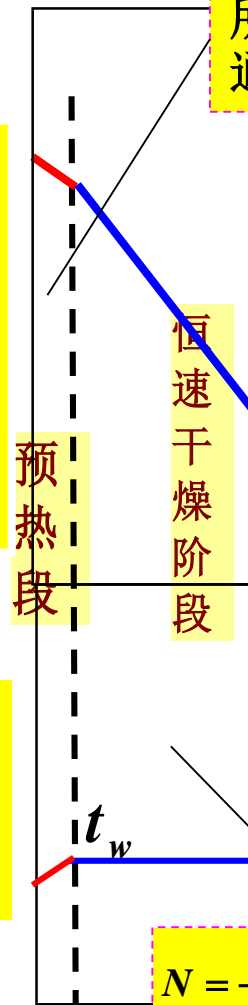
干燥速率 $N, \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$



干基含水率 X
恒定干燥条件下的干燥速率曲线

$X, \text{kg水/kg绝干料}$

物料温度



所经历的时间很短，通常可忽略不计。

$$N = -\frac{G_c dX}{A d\theta} = k_H (H_w - H) = \text{常数}$$

干燥时间 θ

74/101

三、干燥过程及机理

整个干燥过程可分为三个阶段：

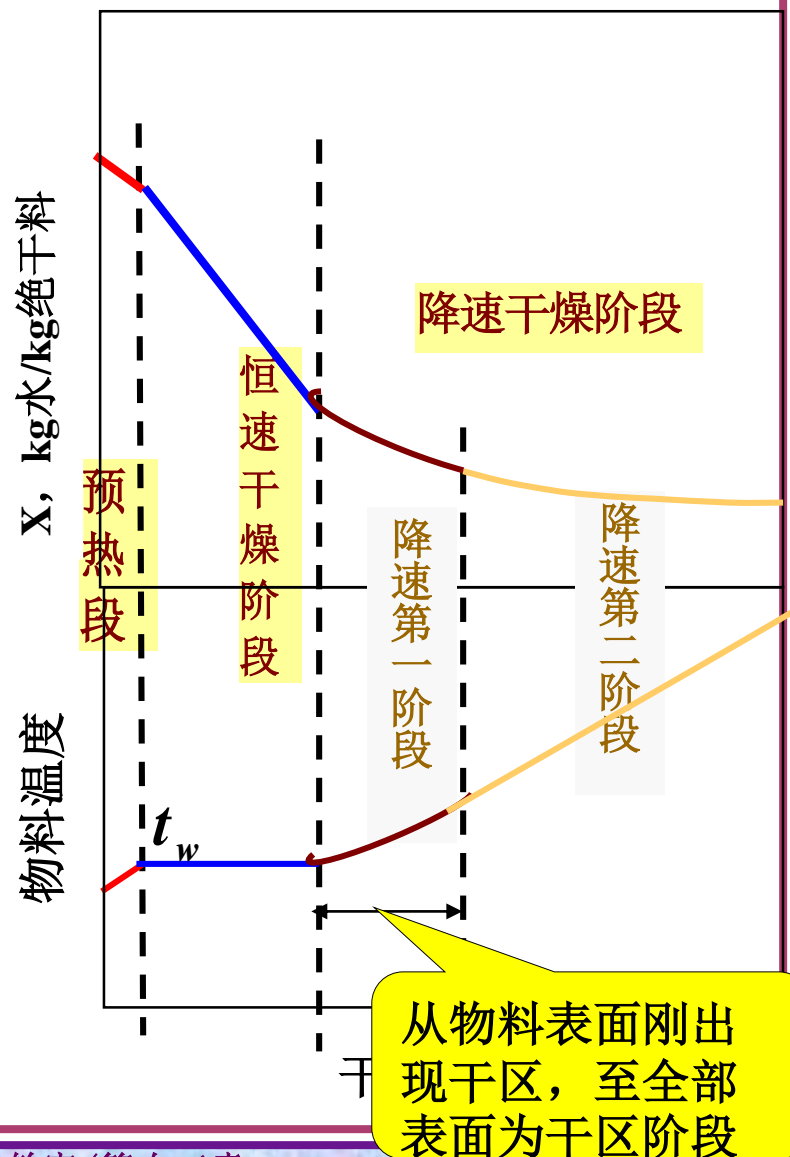
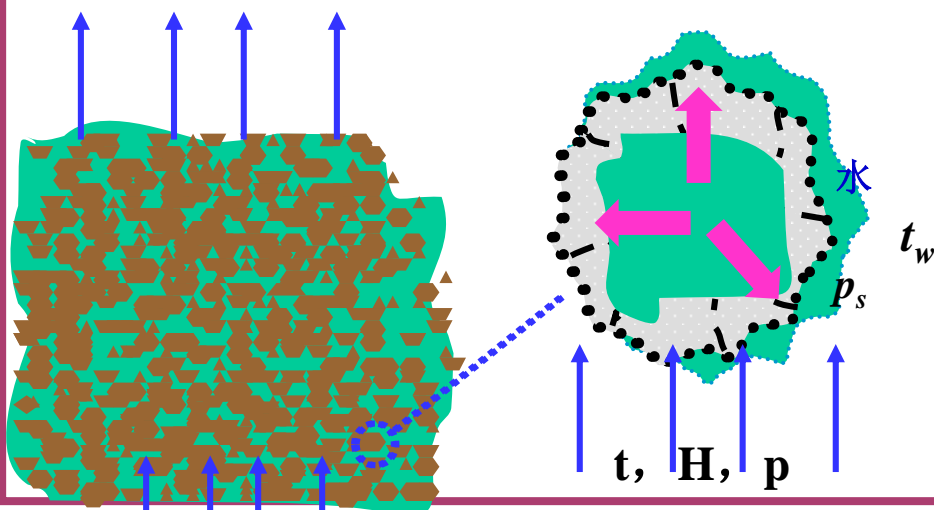
预热段

恒速干燥阶段

降速干燥阶段

思考：降速阶段除去的是什么水？

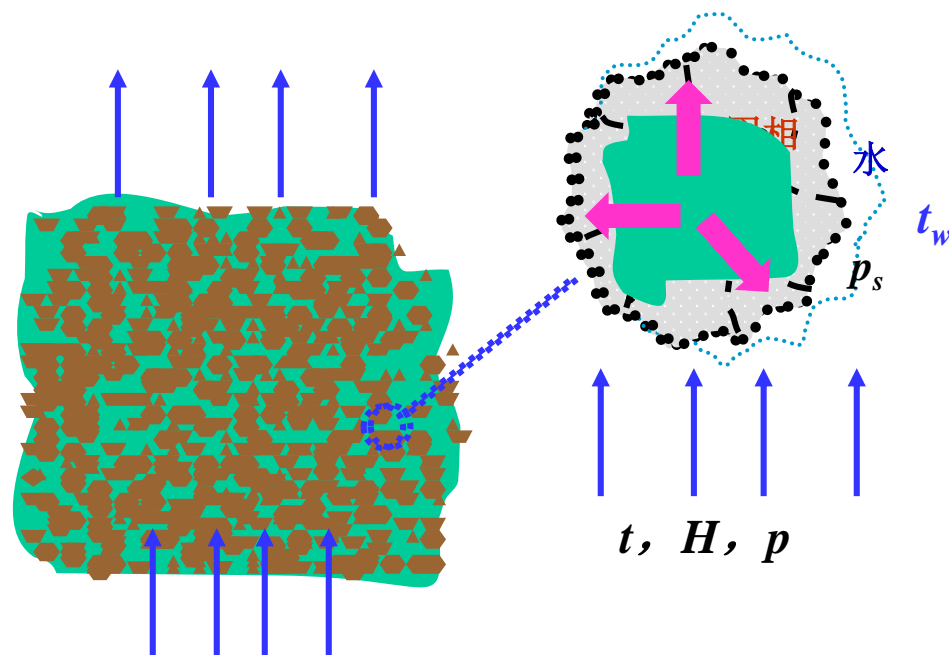
非结合水和部分结合水



三、干燥过程及机理

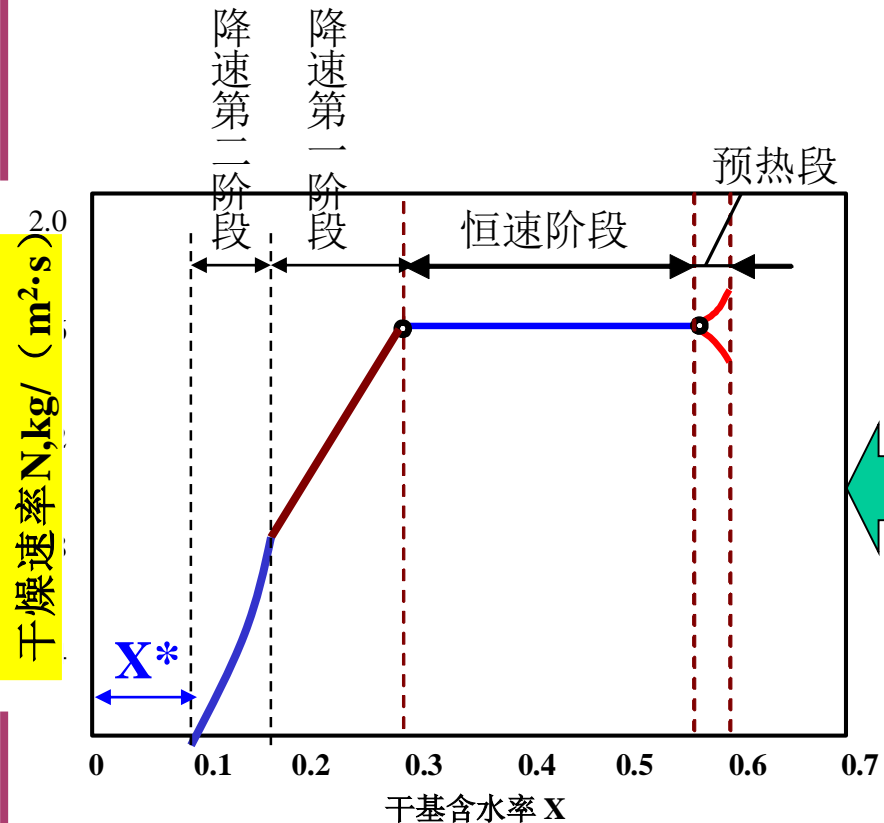
降速段干燥机理：

物料内部水分迁移控制



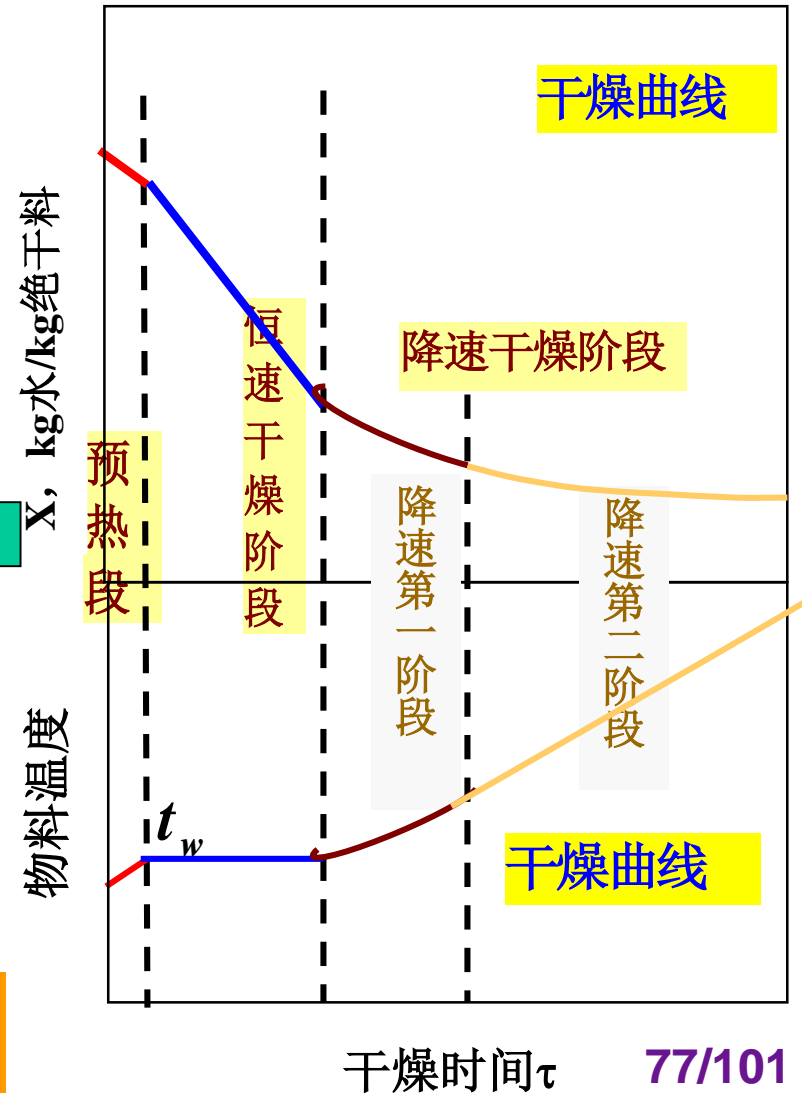
三、干燥过程及机理

降速段干燥速率曲线:



恒定干燥条件下的干燥速率曲线

$$N = - \frac{G_c dX}{A d\tau}$$



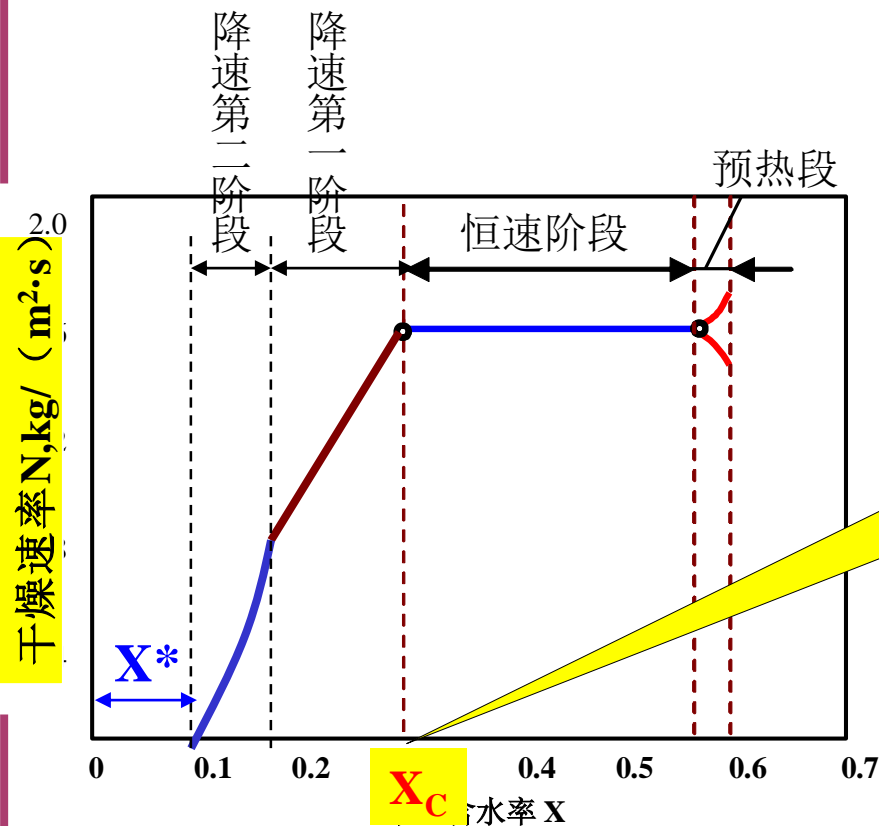
三、干燥过程及机理

临界含水率:

思考: 临界含水量大好, 还是小好?

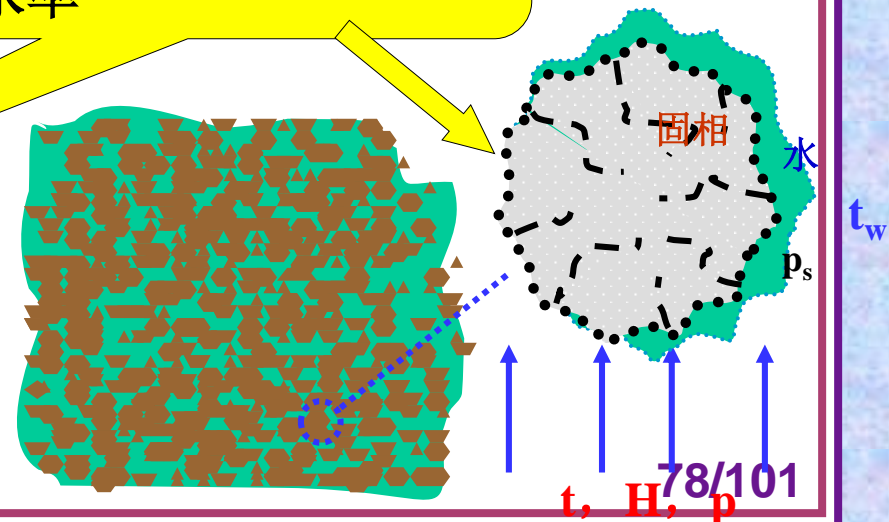
小好,

因为一旦达到临界含水量, 就意味着干燥进入了降速阶段, 干燥时间将大大加长。



恒定干燥条件下的干燥速率曲线

临界含水率: 物料表面一出现干区时的含水率



三、干燥过程及机理

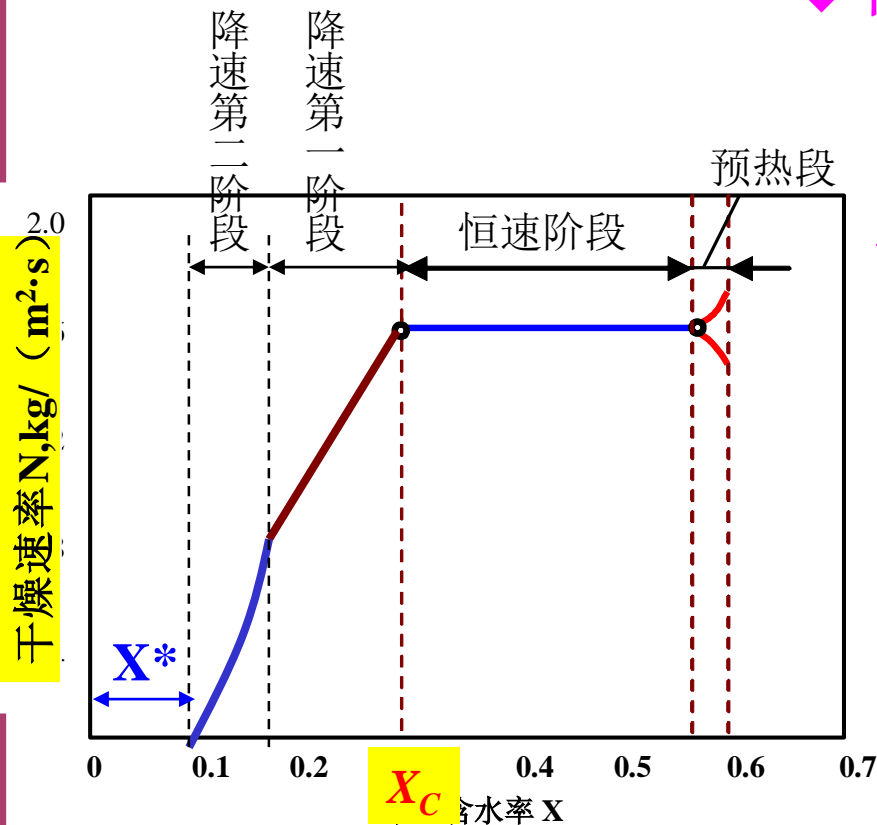
临界含水率:

思考: 影响临界含水量大小的因素?

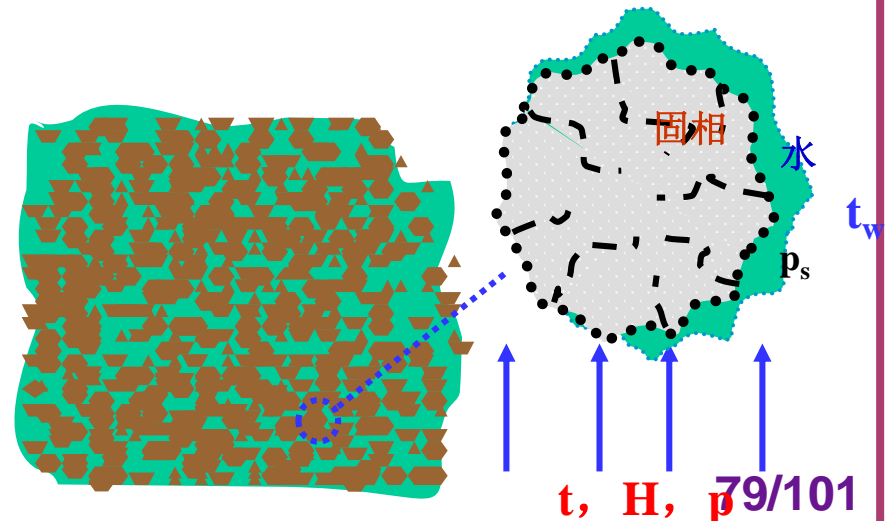
◆干燥介质状况 (流速、温度、湿度等)

流速越小、温度越低、湿度越大, 则恒速干燥速率越小, X_C 越小

◆物料本身的结构、性质、厚度等
物料层越薄, 则 X_C 越小



恒定干燥条件下的干燥速率曲线



四、恒定干燥条件下干燥时间的计算

1、恒速段干燥时间 θ_1 的计算

$$\because U = -\frac{G_c dX}{Ad\theta} = \text{常数} = U_C$$

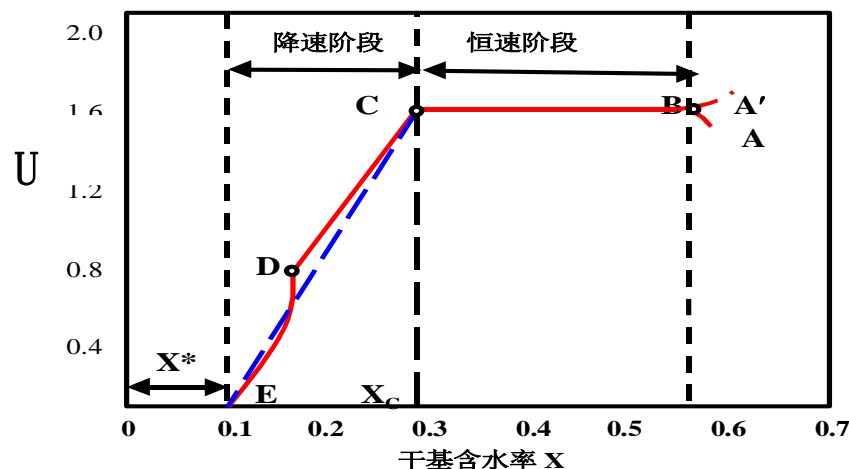
$$\therefore \int_0^{\theta_1} d\theta = \frac{G_c}{AU_C} \int_{X_c}^{X_1} dX$$

$$\theta_1 = \frac{G_c (X_1 - X_c)}{AU_C}$$

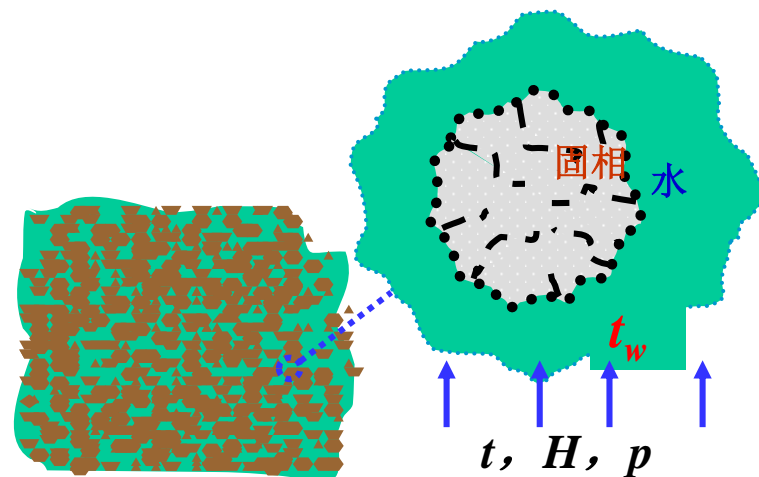
根据热量衡算，知

$$U_C r_w = \alpha(t - t_w)$$

其中 $U_C = k_H (H_w - H)$



恒定干燥条件下的干燥速率曲线



四、恒定干燥条件下干燥时间的计算

2、降速段干燥时间 θ_2 的计算

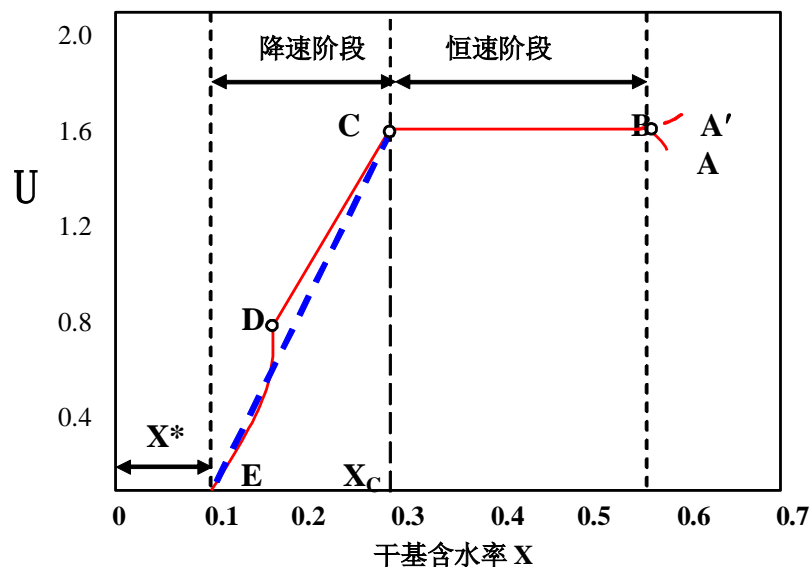
$$U = -\frac{G_c dX}{Ad\theta} \neq \text{常数} \Rightarrow \theta_2 = \int_0^{\theta_2} d\theta = \frac{G_c}{A} \int_{X_2}^{X_c} \frac{dX}{U}$$

如图，若降速段的干燥曲线可近似为直线，则

$$\text{斜率 } K_X = \frac{U}{X - X^*} = \frac{U_c}{X_c - X^*}$$

$$\therefore U = U_c \frac{X - X^*}{X_c - X^*}$$

$$\Rightarrow \theta_2 = \frac{G_c (X_c - X^*)}{AU_c} \ln \frac{X_c - X^*}{X_2 - X^*}$$



恒定干燥条件下的干燥速率曲线

第五节 干燥器

按加热方式可分为：

- 对流式
- 传导式
- 辐射式
- 介电加热式

根据操作压力又可分为

- 常压式
- 减压式

按操作方式则可分为

- 连续式
- 间歇式

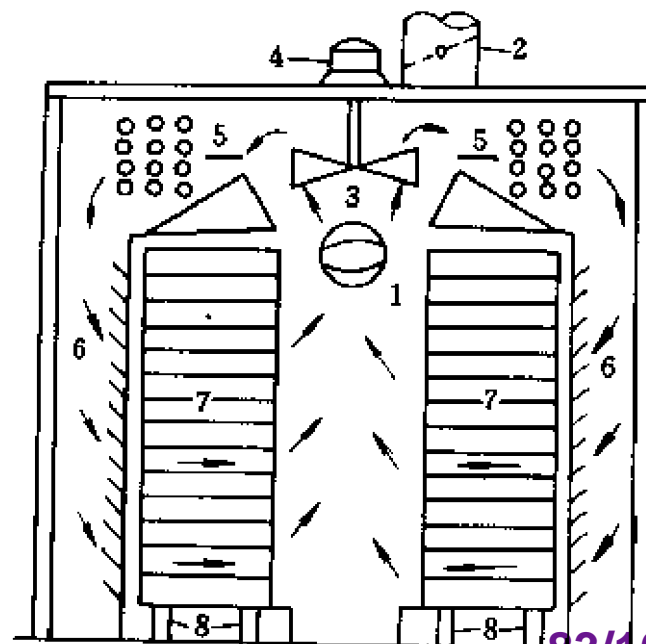
一、常用工业干燥器

厢式干燥器 (Disc Type Drier) 小型的称为烘箱，大型的称为烘房，是典型的**常压、间歇式、对流**干燥设备。

适用场合：任何形状的物料

优点：对物料的适应性强。

缺点：物料得不到分散，干燥速率低，热利用率较差、且产品质量不均匀。产量不大。



83/101

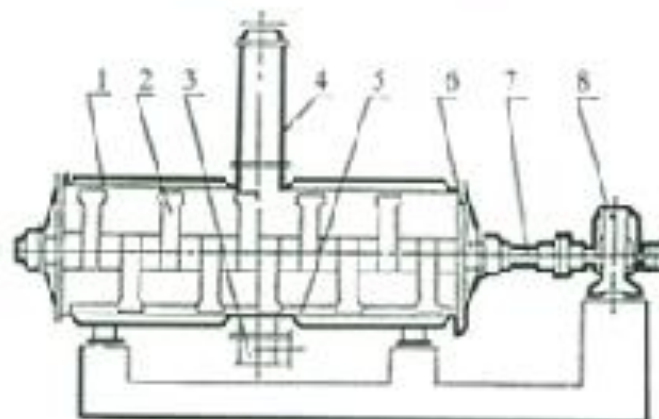
一、常用工业干燥器

耙式真空干燥器：属减压、间歇、导热式

适用场合： 热敏性物料、易产生粉末的物料、易爆物料、排出蒸汽需回收的物料

优点： 干燥温度不致过高

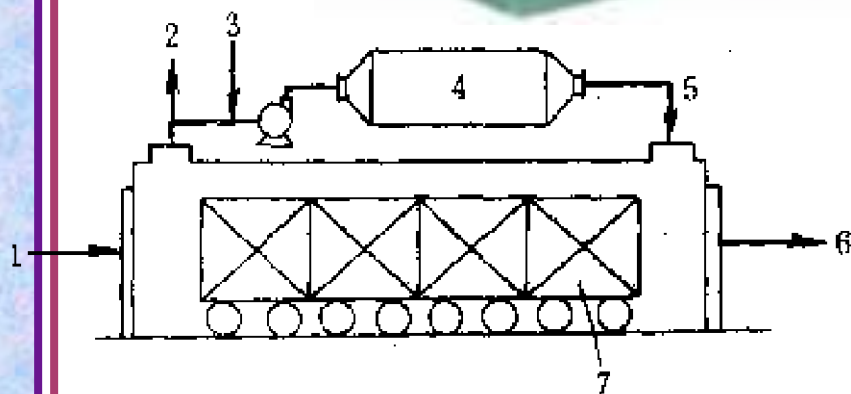
缺点： 整套设备均需密封，不易。



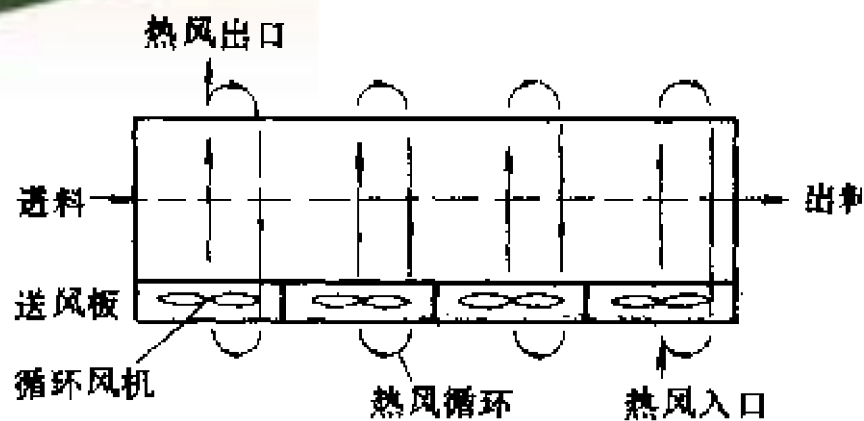
一、常用工业干燥器

洞道式干燥器 (Series Flow Through Rotation Drier)

连续的或半连续操作



逆流式



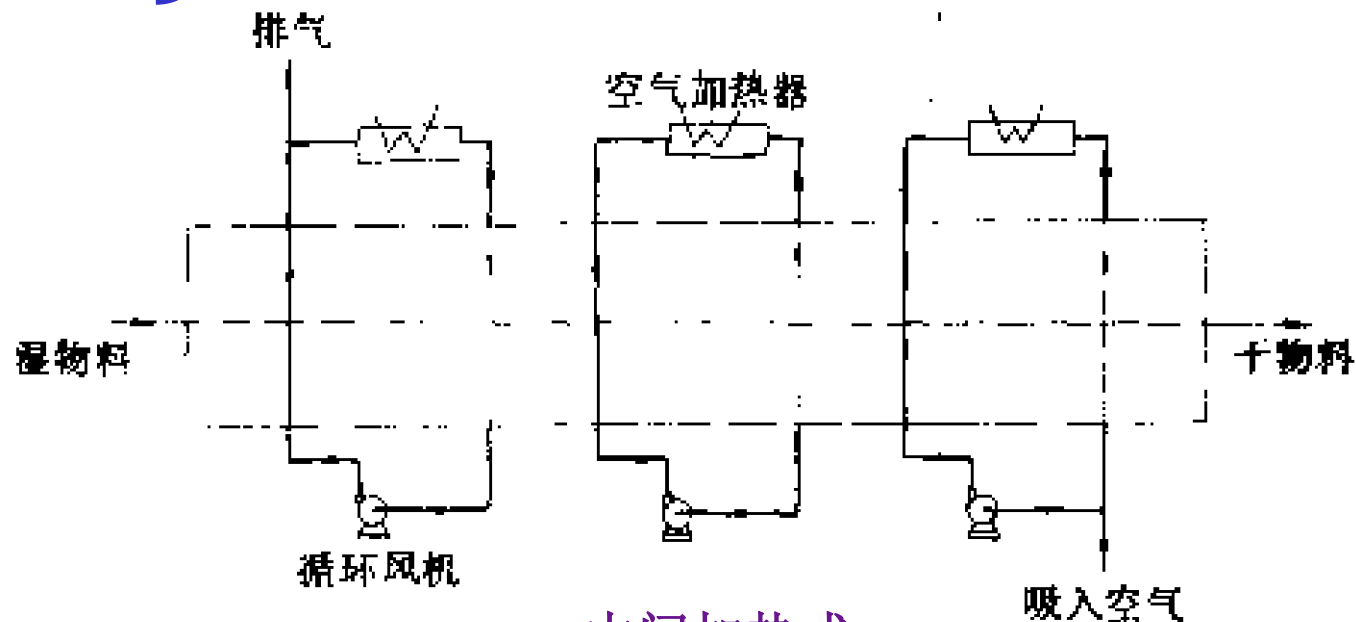
错流式

一、常用工业干燥器

洞道式干燥器 (Series Flow Through Rotation Drier)

适用场合：处理量大、干燥时间长的物料

优点： }
缺点： } 同厢式干燥器



中间加热式

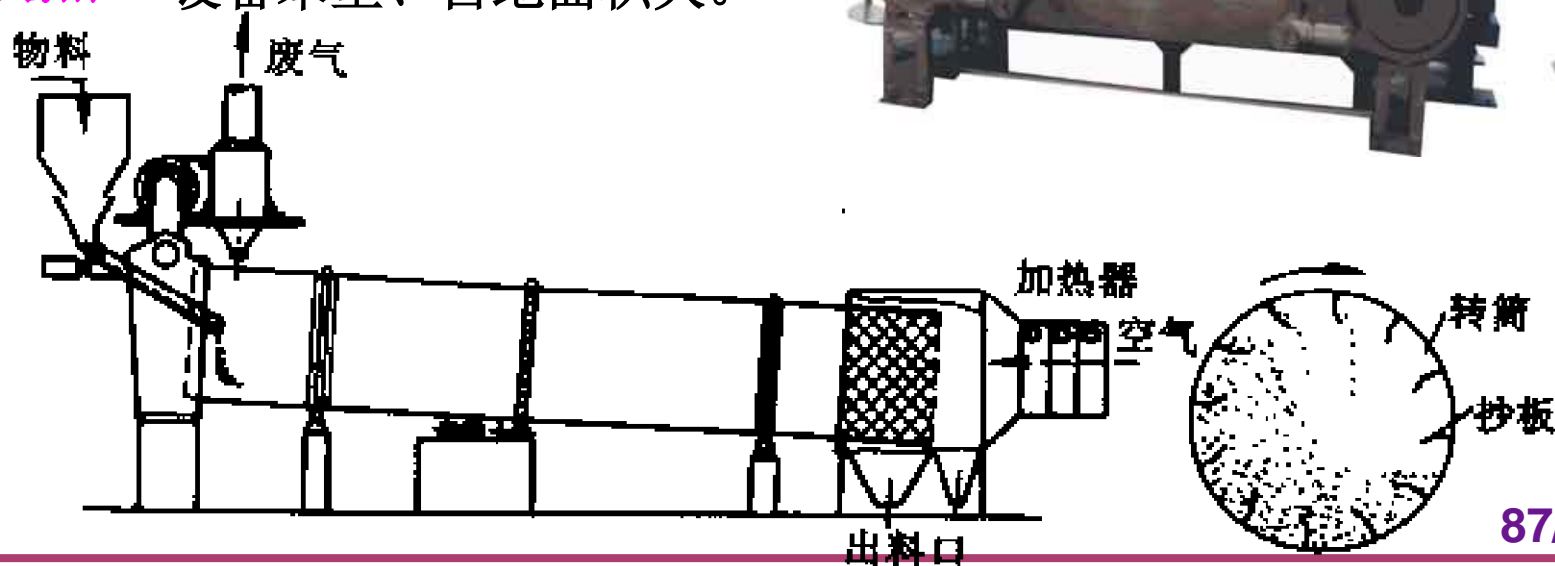
一、常用工业干燥器

转筒干燥机 (rotaty cylinder dryer) 连续操作、对流或导热式

适用场合：粒状、块状物料、膏糊状物料、甚至液体物料。

优点：处理量大；操作稳定可靠；与气流干燥器、流化床干燥器相比适应性强。

缺点：设备笨重、占地面积大。



87/101

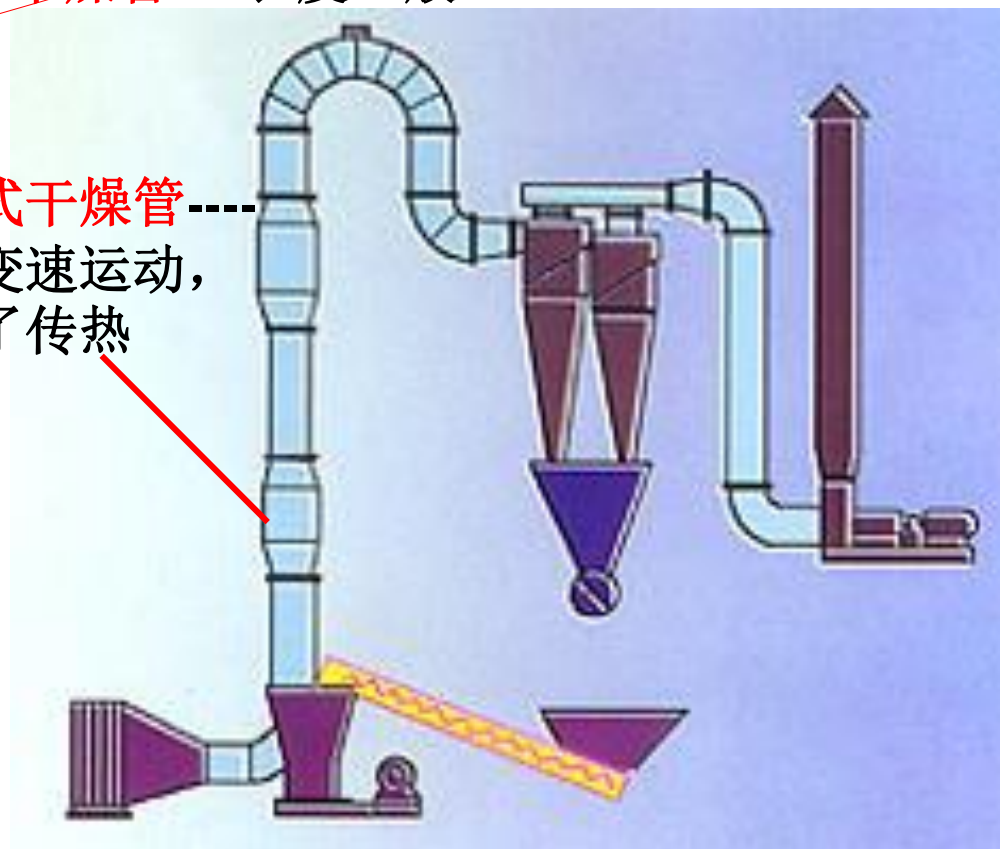
一、常用工业干燥器

气流干燥器（pneumatic conveying dryer）连续、对流式



干燥管----长度一般10~20m

脉冲式干燥管----
颗粒变速运动，
强化了传热



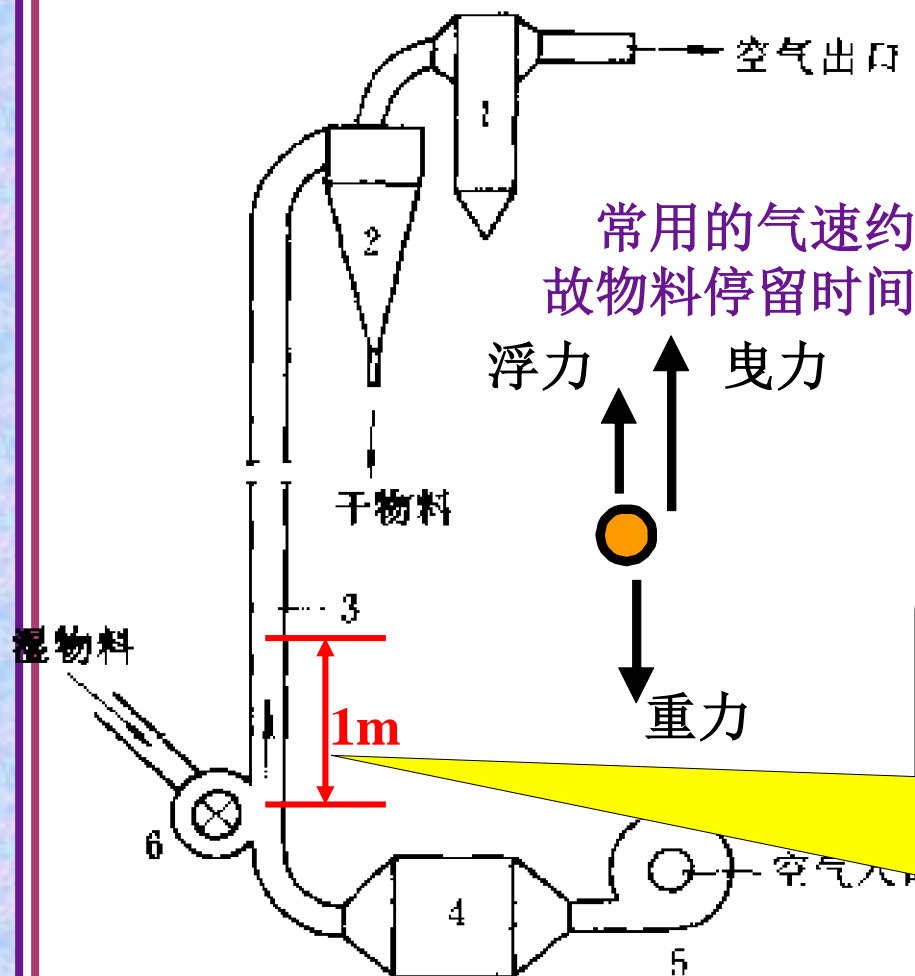
一、常用工业干燥器

气流干燥器

适用场合：

晶体和小颗粒物料，尤其是热敏性、易氧化、不宜粉碎的物料

常用的风速约为 $10\sim 20\text{m/s}$ 以上，
故物料停留时间 $0.5\text{秒}\sim$ 几秒。

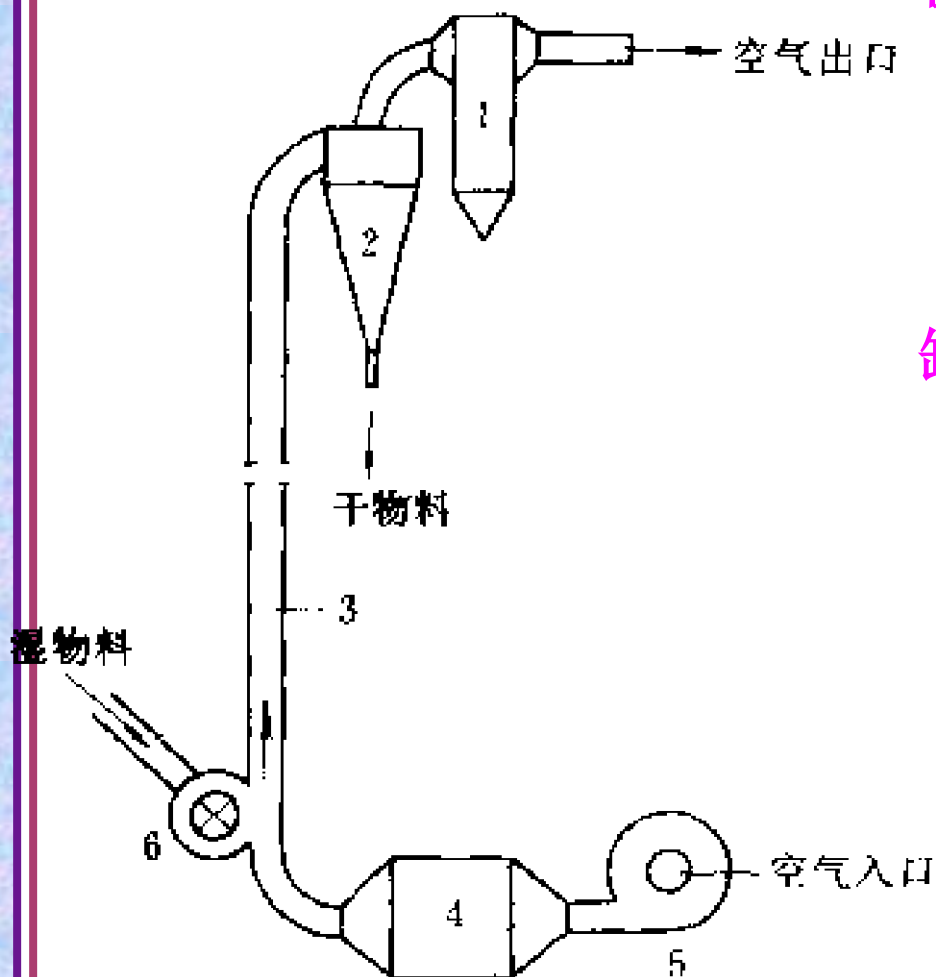


最有效的干燥段：干燥速率较快

- ◆ 传热温度差较大
- ◆ 空气湿度较小
- ◆ 颗粒处在加速阶段
- ◆ 与气流的相对速度较大

一、常用工业干燥器

气流干燥器



优点:

- ◆干燥时间短
- ◆热效率高，可高达60%
- ◆易实现自动化、连续生产

缺点:

- ◆系统的流动阻力大
- ◆物料磨损大
- ◆要求的厂房高
- ◆对除尘系统要求高

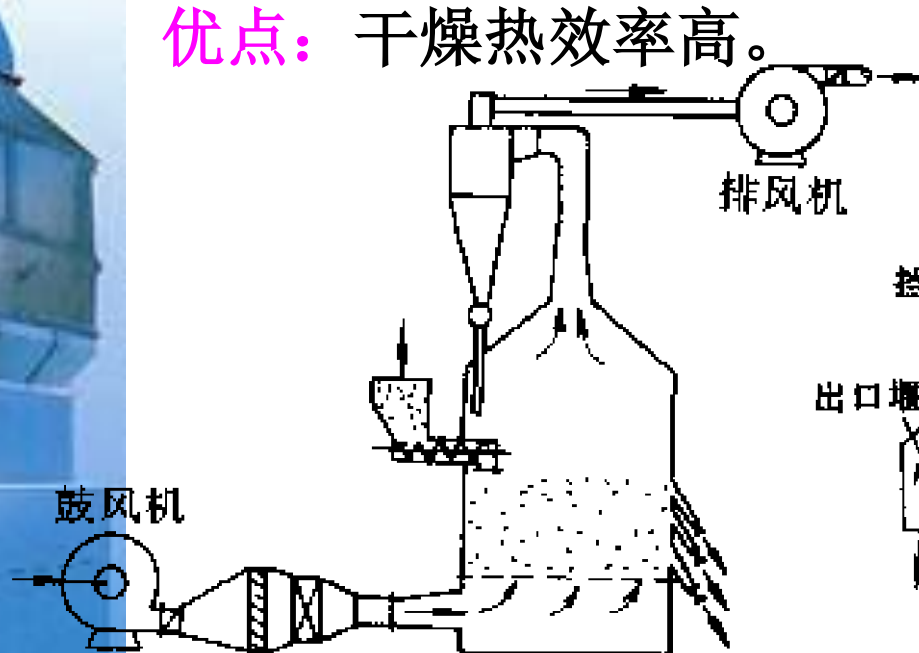
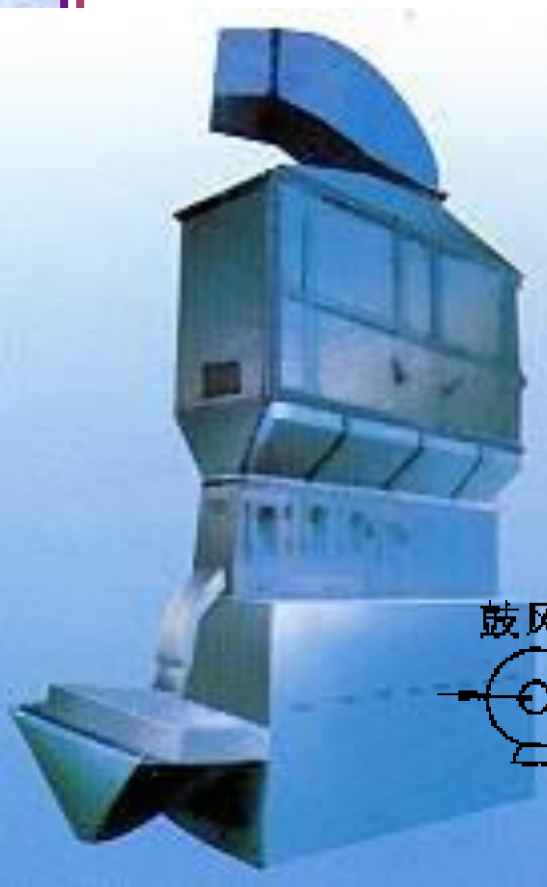
一、常用工业干燥器

沸腾床干燥器（boiling dryer）

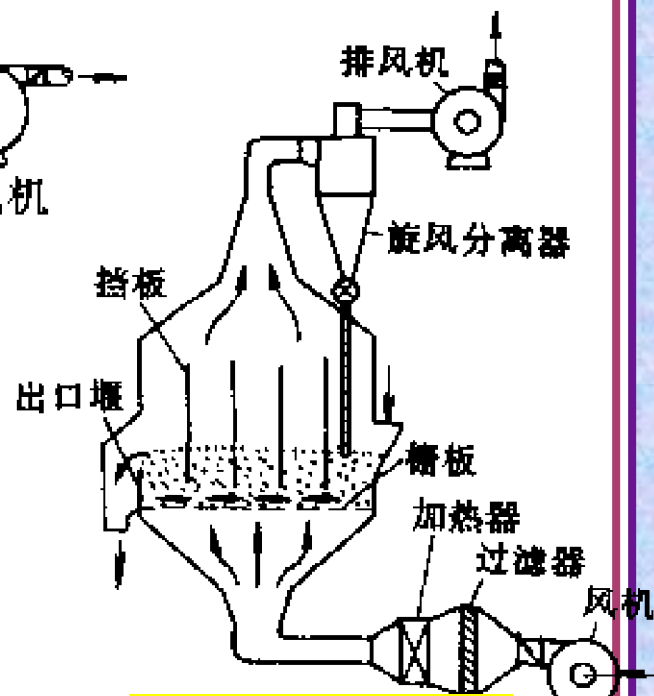
又称流化床干燥器（fluid-bed dryer）

适用场合：主要用于干燥晶体和小颗粒物料，尤其适合含结合水分较多的物料

优点：干燥热效率高。



单层流化床



多室流化床

一、常用工业干燥器

流化床干燥器与气流干燥器对比：

- ◆颗粒的停留时间长，干燥得到的产品含水率较低，尤其适合含结合水分较多的物料；
- ◆操作气速低，阻力小；
- ◆物料和设备的磨损较轻；
- ◆除尘器的负荷较轻；
- ◆设备紧凑、高度低。

一、常用工业干燥器

喷雾干燥器 (spray dryer)

雾化器——关键部件

适用场合:

热敏性物料

优点:

◆干燥时间短

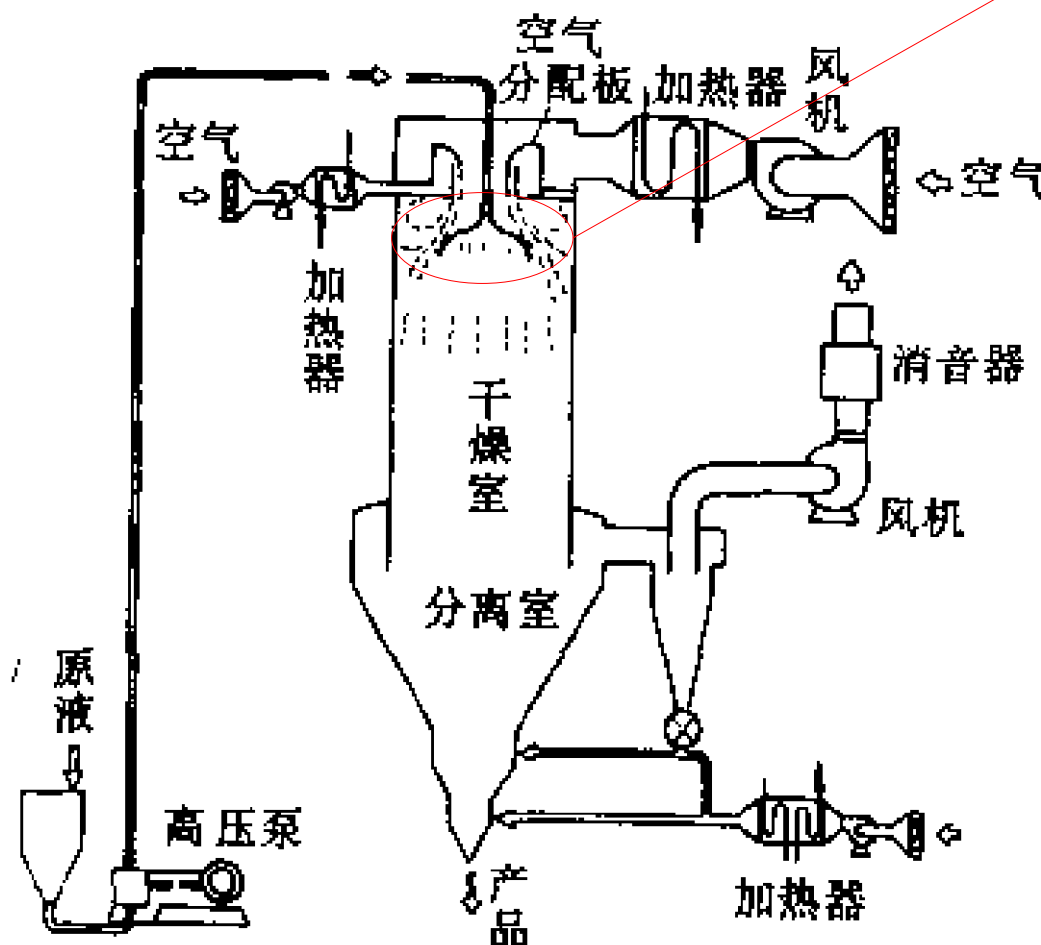
缺点:

◆能耗大、热效率低;

◆设备庞大

[返回目录](#)

93/101



第十三章 小结

一、湿空气性质及湿度图

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

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

$$c_H = c_a + c_w H$$

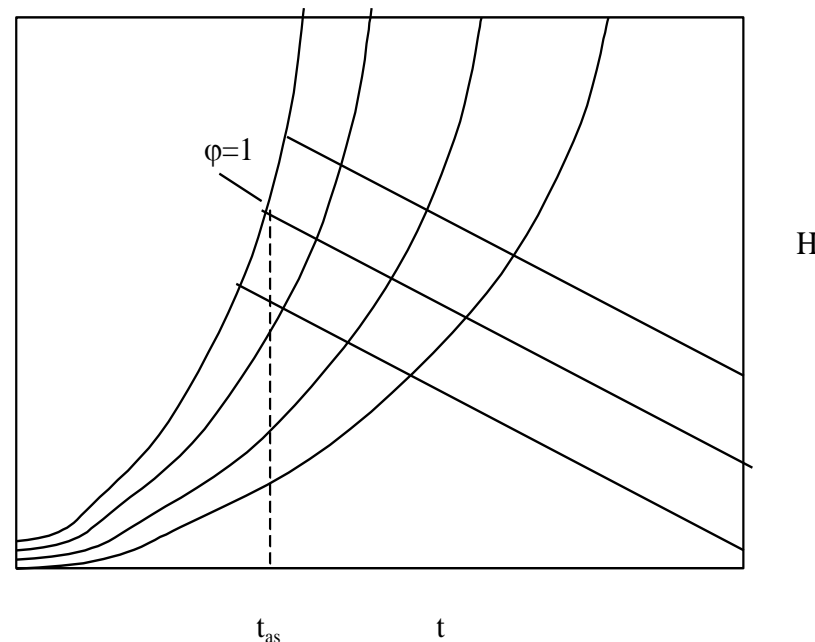
$$c_H = 1.01 + 1.88H$$

$$v_H = (0.773 + 1.244H) \times \frac{273 + t}{273}$$

$$I = (c_a + c_w H)t + r_0 H$$

$$\approx (1.01 + 1.88H)t + 2492H$$

$$t、t_w、t_{as}、t_d$$



第十三章 小结

二、湿物料性质

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

三、干燥计算

物料衡算: $W = G_1 - G_2 = G_1 \frac{\omega_1 - \omega_2}{1 - \omega_2}$
 $= G_c (X_1 - X_2)$

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

热量衡算: $Q_P = L(I_1 - I_0)$

$$LI_1 + G_1 c_{M_1} t_{M_1} + Q_d = LI_2 + G_2 c_{M_2} t_{M_2} + Q_l$$

$$I_1 = I_2 \text{ (等焓干燥)}$$

$$c_M = (1 - \omega)c_s + \omega c_l \quad c_l = 4.187 \text{ kJ/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$$

第十三章 小结

热效率:

$$\eta = \frac{W \left[(2492 + 1.88t_2) - c_l t_{M_1} \right]}{Q_P + Q_d} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{理想}} = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_0} \times 100\% \quad (\text{等焓干燥过程})$$

第十三章 小结

四、干燥动力学

概念：

平衡水分 自由水分 结合水分

非结合水分 恒定干燥条件 干燥的两个阶段（干燥机理）、
临界含水率 X_c 干燥速率

影响 N_c 、 X_c 的因素、影响降速阶段干燥速率的因素

公式：

$$\text{恒速段 } \theta_1 = \frac{G_c (X_1 - X_c)}{AN_c}$$

$$\text{降速段 } \theta_2 = \frac{G_c}{A} \int_{X_2}^{X_c} \frac{dX}{N_A}$$

$$\text{干燥曲线可近似作为直线时, 斜率 } K_X = \frac{N}{X - X^*} = \frac{N_c}{X_c - X^*}$$

五、常用干燥器的结构、适用场合、优缺点。