

# 第5章

# 干燥

## 第5章 干燥



### 学习目的 与要求

通过本章学习，应掌握干燥的基本概念和原理；湿空气的性质及湿焓图；干燥过程的物料衡算与热量衡算方法；干燥过程的平衡关系与速率关系，了解干燥时间的计算方法。

# 第5章 干燥



## 5.1 概述

### 5.1.1 干燥的原理

# 一、干燥过程的原理



## 分离物系

固体中的湿分。

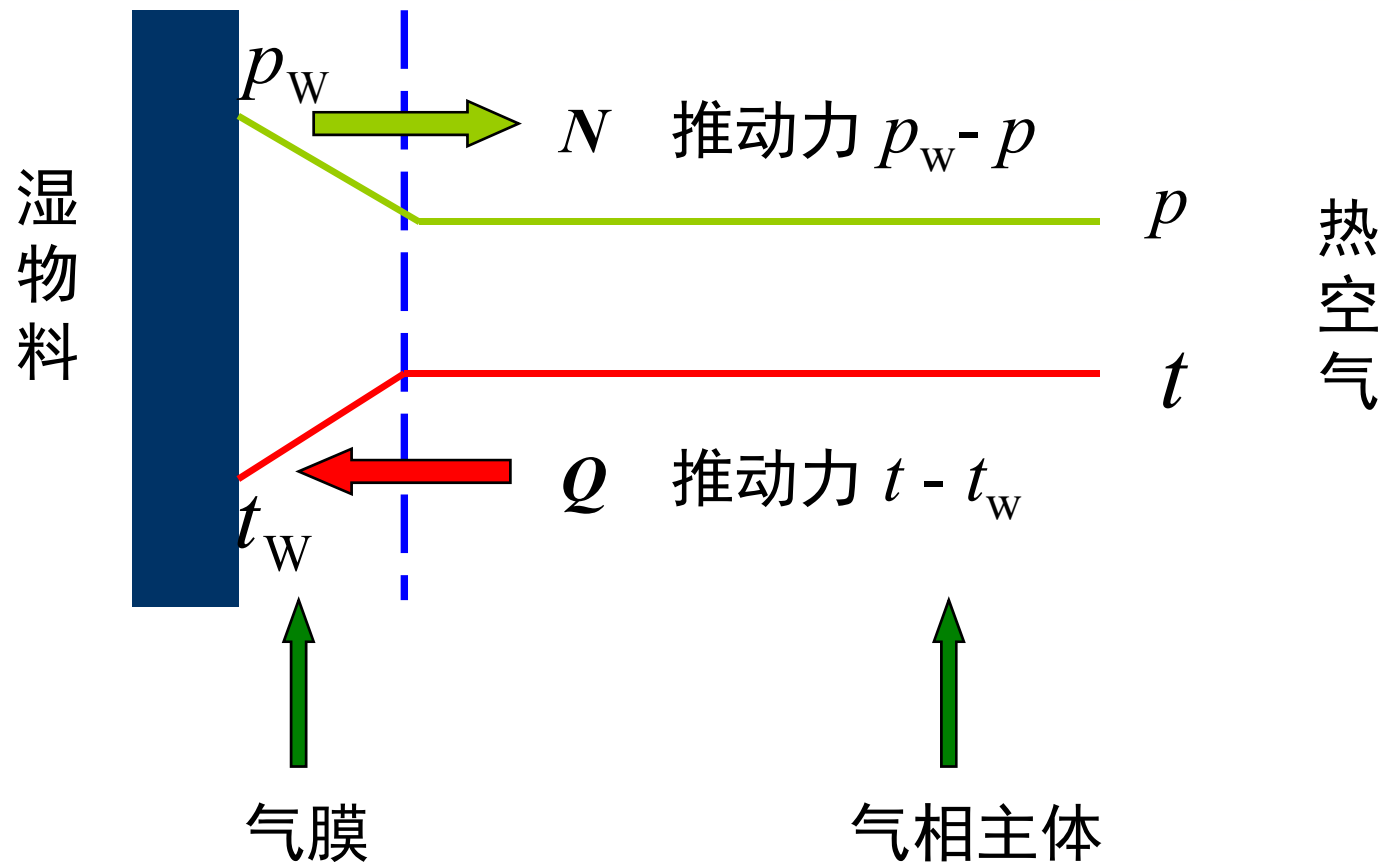
## 形成两相体系的方法

引入一气相（干燥介质）。  
(固相+气相)

## 传质原理

气、固相中所含湿分的不同。

# 一、干燥过程的原理



固体物料干燥过程

## 二、干燥过程与其他除湿方法的比较



工程中的常用除湿方法：

- ① 机械除湿 ← 沉降、过滤、离心；
- ② 物理除湿 ← 吸附；
- ③ 利用热能除湿 ← 干燥。

干燥除湿的特点：

- ① 除湿彻底，为节能工业上多采用联合除湿；
- ② 能耗高，机械除湿 → 干燥除湿。

# 第5章 干燥



## 5.1 概述

### 5.1.1 干燥的原理

### 5.1.2 干燥的分类与应用

# 一、干燥过程的分类



## 1.按操作压力分类

干燥 { 常压干燥✓  
真空干燥✓

## 3.按操作方式分类

干燥 { 间歇干燥✓  
连续干燥✓

## 2. 按传热方式分类

干燥 { 传导干燥✓  
对流干燥✓  
辐射干燥  
介电加热干燥



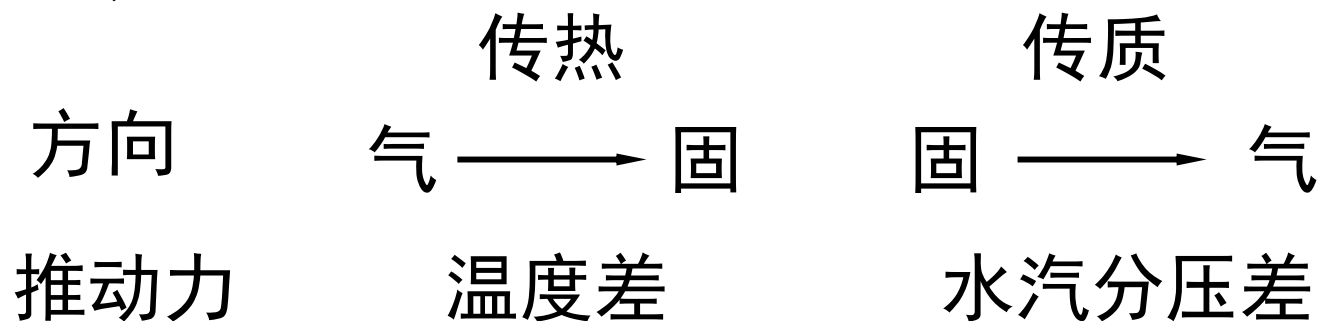
# 一、干燥过程的分类



本章主要讨论连续操作的对流干燥，干燥介质是**不饱和的热空气**，除去的湿分是**水分**。

干燥介质既是载热体又是载湿体。

干燥是传热、传质同时进行的过程，但传递方向不同，是热、质反向传递过程：



干燥操作的**必要条件**：

物料表面水汽压强**大于**干燥介质中水汽的分压。

## 二、干燥过程的应用



应用示例：

湿尿素干燥成尿素产品。

含水量 3%  $\xrightarrow{\text{干燥}}$  含水量  $\leq 0.5\%$

湿聚氯乙烯干燥成聚氯乙烯产品

含水量 2%  $\xrightarrow{\text{干燥}}$  含水量  $\leq 0.3\%$

## 第5章 干燥



### 5.1 概述

### 5.2 湿空气的性质及湿焓图

#### 5.2.1 湿空气的性质

## 一、湿度 $H$ (湿含量)



干燥介质： 湿空气

干燥湿分： 水分

计算基准： 1kg 绝干气

定义：湿空气中水汽的质量与绝干空气的质量之比

符号：  $H$

单位： kg（水汽） / kg（绝干气） , kg / kg（绝干气）

## 一、湿度 $H$ (湿含量)



$$H = \frac{\text{湿空气中水汽的质量}}{\text{湿空气中绝干气的质量}}$$

$$= \frac{n_v M_v}{n_g M_g} = \frac{18 n_v}{29 n_g} = 0.622 \frac{n_v}{n_g}$$

常压下湿空气可视为理想气体

$$H = \frac{0.622 p_v}{p - p_v}$$

水汽  
的分压

总压

## 一、湿度 $H$ (湿含量)



若  $p_v = p_s$

空气温度下纯  
水的饱和蒸汽  
压

湿空气被水所饱和  $\longrightarrow$  饱和湿空气

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

$$p_s = f(t)$$

## 二、相对湿度



定义：湿空气中水汽分压与同温度水的饱和蒸汽压之比。

符号：  $\varphi$

单位： %

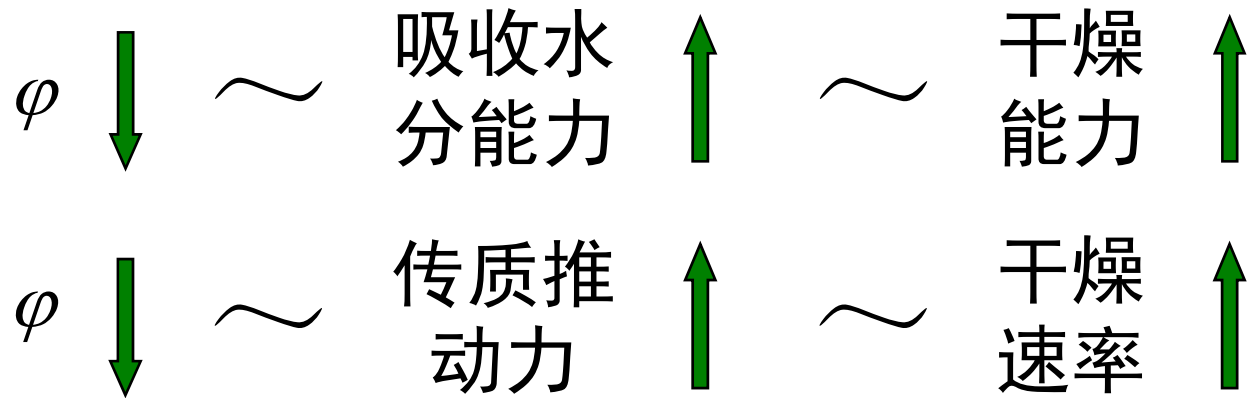
$$\varphi = \frac{p_v}{p_s} \times 100\%$$

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

## 二、相对湿度



分析：



$p_v = 0 \longrightarrow \varphi = 0 \longrightarrow$  绝干空气

$p_v = p_s \longrightarrow \varphi = 100\% \longrightarrow$  饱和空气



### 三、比体积 $v_H$



定义：以1 kg 绝干气为基准的湿空气的体积

符号：  $v_H$

单位：  $M^3$ （湿空气） / kg（绝干气）

$$v_H = \frac{m^3(\text{湿空气})}{kg(\text{绝干气})}$$
$$= \frac{m^3(\text{绝干气}) + m^3(\text{水汽})}{kg(\text{绝干气})}$$

### 三、比体积 $v_H$



设：湿空气的温度为  $t$ ，湿空气的湿度为  $H$ ，  
湿空气的总压力为  $p$ ，则

$$\begin{aligned} v_H &= \left( \frac{1}{29} + \frac{H}{18} \right) \times 22.4 \times \frac{273+t}{273} \times \frac{1.013 \times 10^5}{p} \\ &= (0.772 + 1.244H) \times \frac{273+t}{273} \times \frac{1.013 \times 10^5}{p} \end{aligned}$$

## 四、比热容 $c_H$



定义：常压下将以 1kg 绝干气为基准的湿空气的温度升高（或降低）1 °C 所吸收（或放出）的热量

符号： $c_H$

单位：kJ / (kg（绝干气）·°C)

设湿空气的湿度为  $H$

绝干气  
比热容

则  $c_H = c_g + Hc_v$

水汽的  
比热容

## 四、比热容 $c_H$



在常用温度范围内

$$c_g = 1.01 \text{ kJ} / (\text{kg} (\text{绝干气}) \cdot ^\circ\text{C})$$

$$c_v = 1.88 \text{ kJ} / (\text{kg} (\text{水汽}) \cdot ^\circ\text{C})$$

故有

$$c_H = 1.01 + 1.88H$$

## 五、焓 $I$



定义：以1 kg 绝干气为基准的湿空气的焓值

符号：  $I$

单位： kJ/kg（绝干气）

设绝干气的焓值为  $I_g$ ，水汽的焓值为  $I_v$ ，则

$$I = I_g + HI_v$$

## 五、焓 $I$



以 $0^{\circ}\text{C}$ 为基准，设湿空气的温度为 $t$ ，湿空气的湿度为 $H$ ，

$$\begin{aligned} I &= c_g(t - 0) + Hc_v(t - 0) + Hr_0 \\ &= (c_g + Hc_v)t + Hr_0 \end{aligned}$$

则  $I = (1.01 + 1.88H)t + 2490H$

## 六、温度



### 1. 干球温度与湿球温度

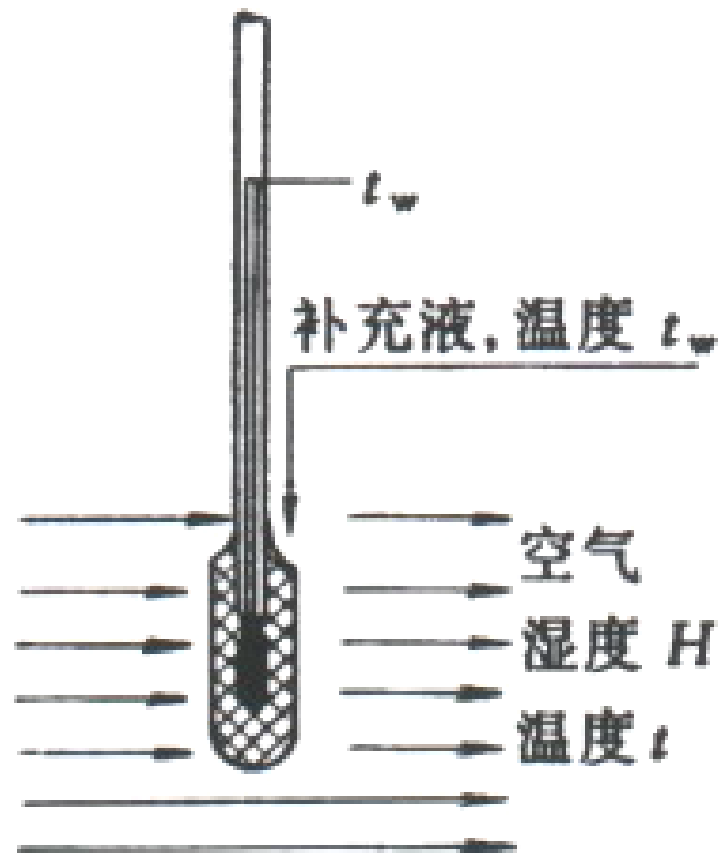
#### (1) 干球温度 $t$

用普通温度计直接测得的湿空气的温度，称为干球温度，简称温度，以  $t$  表示。它是湿空气的真实温度。

#### (2) 湿球温度 $t_w$

用湿球温度计测得的湿空气的温度，称为湿球温度。湿球温度可度量湿空气的湿度大小。

## 六、温度



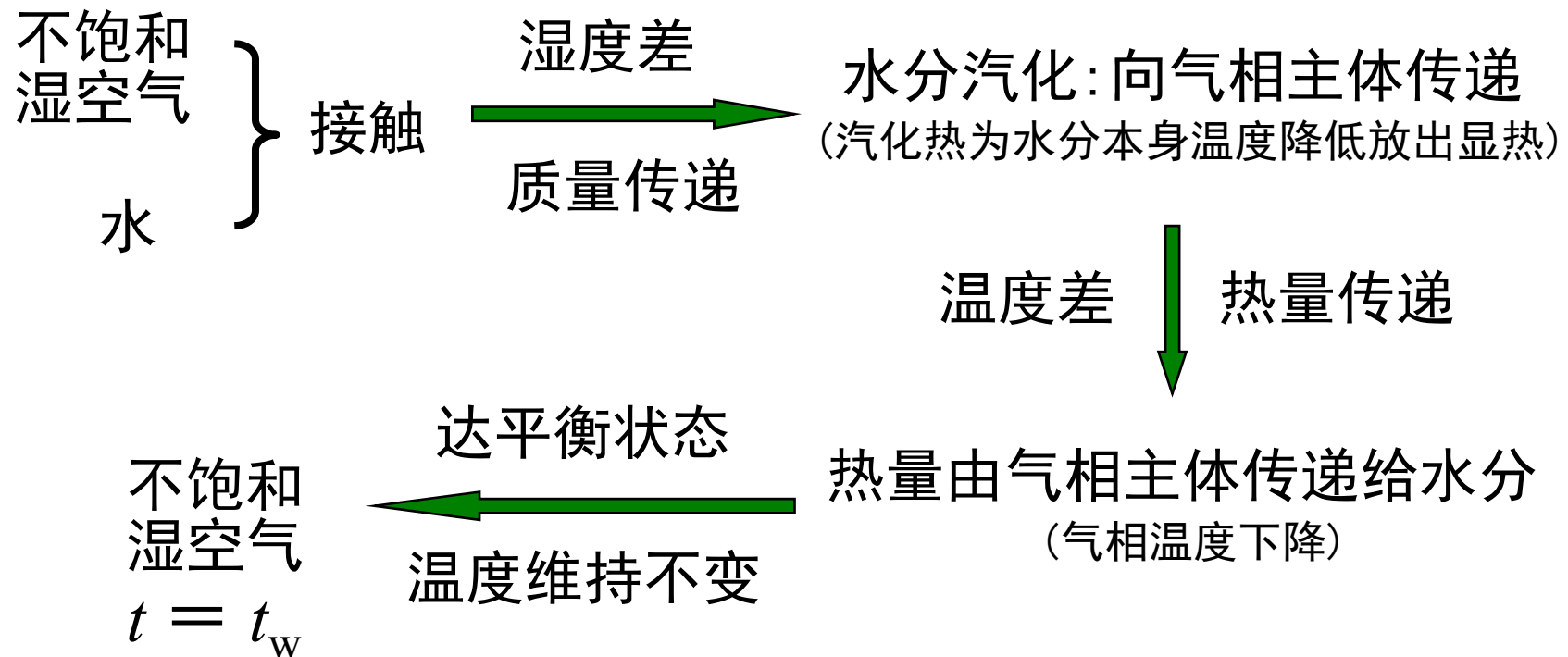
湿球温度计示意图



## 六、温度



### 湿球温度的测量机理



## 六、温度



### (3) 湿球温度与干球温度及湿度的关系

设湿空气的干球温度为  $t$ ，湿空气的湿球温度为  $t_w$ ，湿空气的湿度为  $H$ ，气膜中饱和湿度为  $H_{s,t_w}$ ，则

$$\text{传热速率为 } Q = \alpha S(t - t_w) \quad \text{J/s}$$

$$\text{传质速率为 } N = k_H S(H_{s,t_w} - H) \quad \text{kg/s}$$

## 六、温度



稳态下  $Q = Nr_{t_w}$

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

测定  $t$ 、 $t_w$   $\longrightarrow$  湿度  $H$

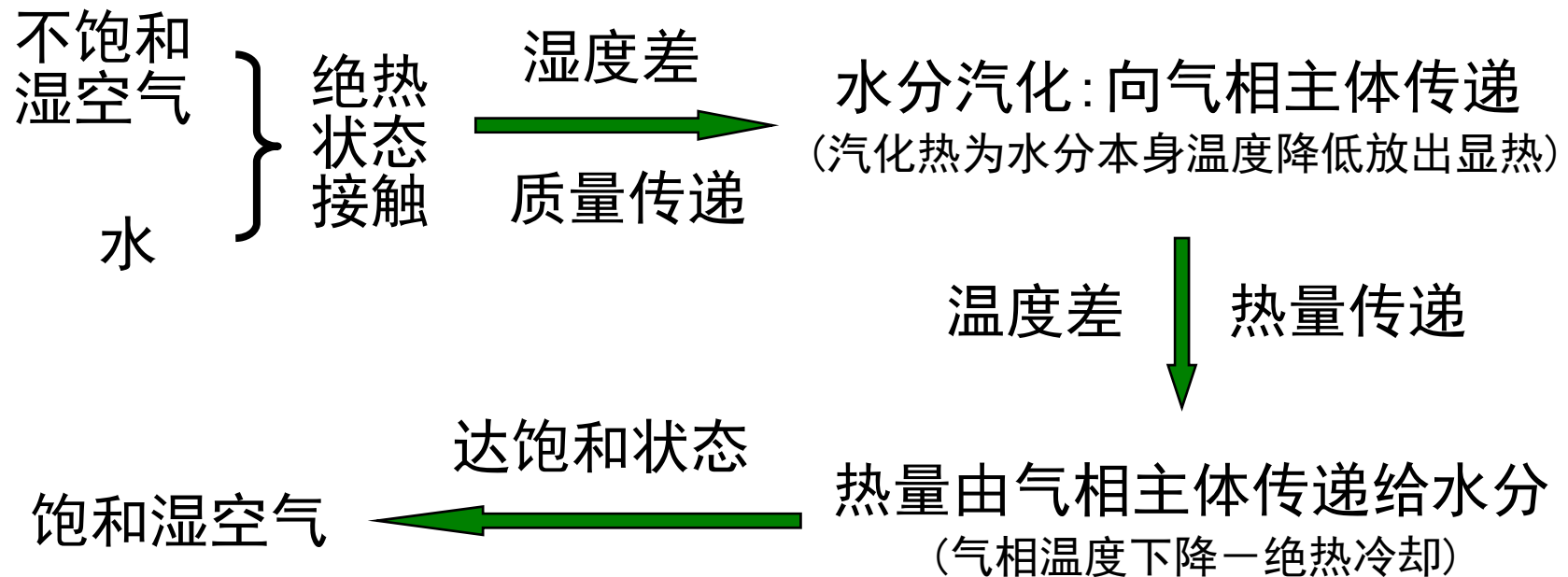
未饱和湿空气,  $t > t_w$

饱和湿空气,  $t = t_w$

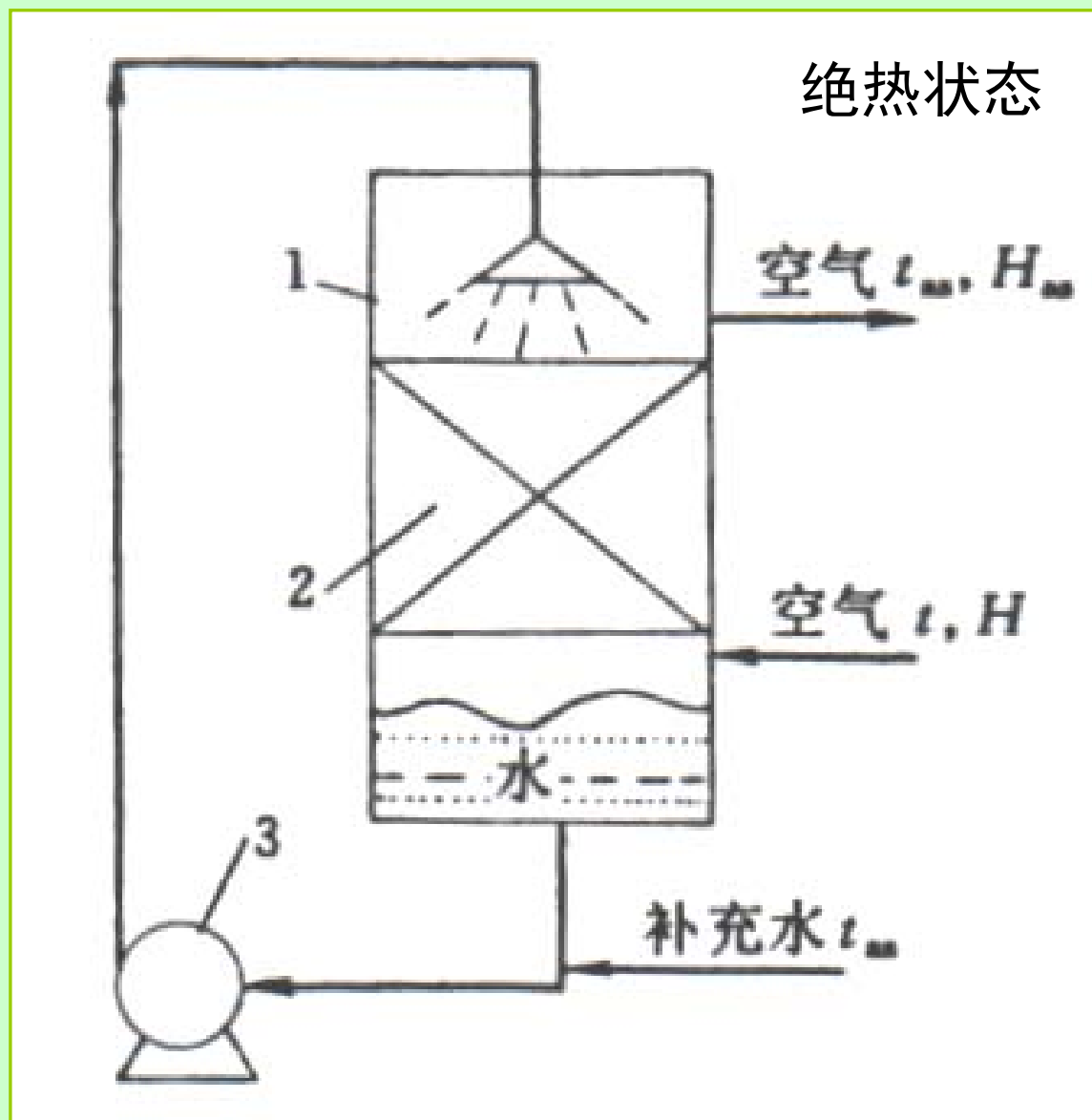
## 六、温度



### 2. 绝热饱和冷却温度 $t_{as}$



$$t = t_{as} \quad H = H_{as} \quad \varphi = 100\%$$



绝热饱和冷却塔示意图

## 六、温度



绝热饱和温度与干球温度及湿度的关系如下：

未饱和湿空气的焓

$$I_1 = (c_g + Hc_v)t + Hr_0$$

饱和湿空气的焓

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

绝热过程

$$I_1 = I_2$$

## 六、温度



因为 $H$ 、 $H_{\text{as}}$ 值很小，故

$$c_g + Hc_v \approx c_g + H_{\text{as}}c_v \approx c_H$$

整理得

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

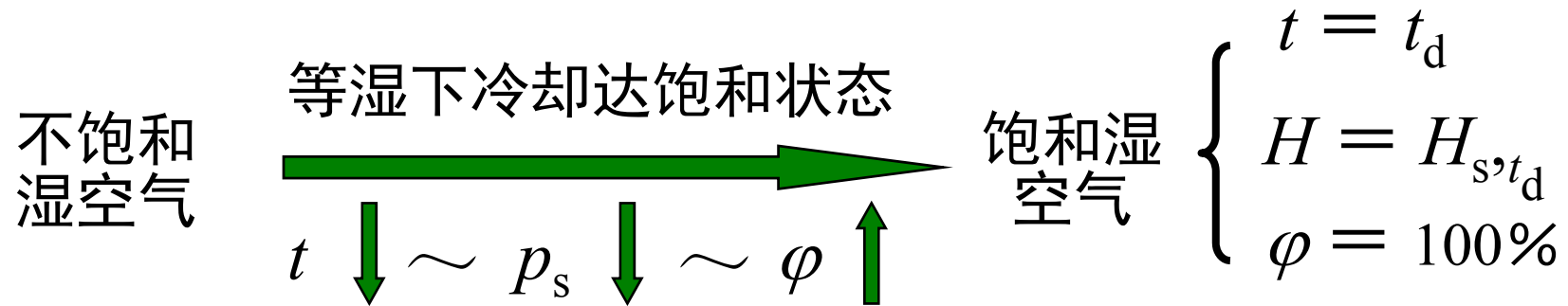
通常  $\alpha / k_H \approx c_H \quad r_0 \approx r_{t_w}$

比较得  $t_w \approx t_{\text{as}}$

## 六、温度



### 3. 露点 $t_d$



示例：露珠的产生

不饱和湿空气，  $t > t_w (t_{as}) > t_d$

饱和湿空气，  $t = t_w (t_{as}) = t_d$



# 练习题目



## 思考题

1. 湿空气的湿度、相对湿度、比体积、比热容和焓各表示何意义？如何计算？
2. 湿空气的干球温度、湿球温度、绝热饱和冷却温度、露点各表示何意义？其关系如何？

# 第5章 干燥



## 5.1 概述

## 5.2 湿空气的性质及湿焓图

### 5.2.1 湿空气的性质

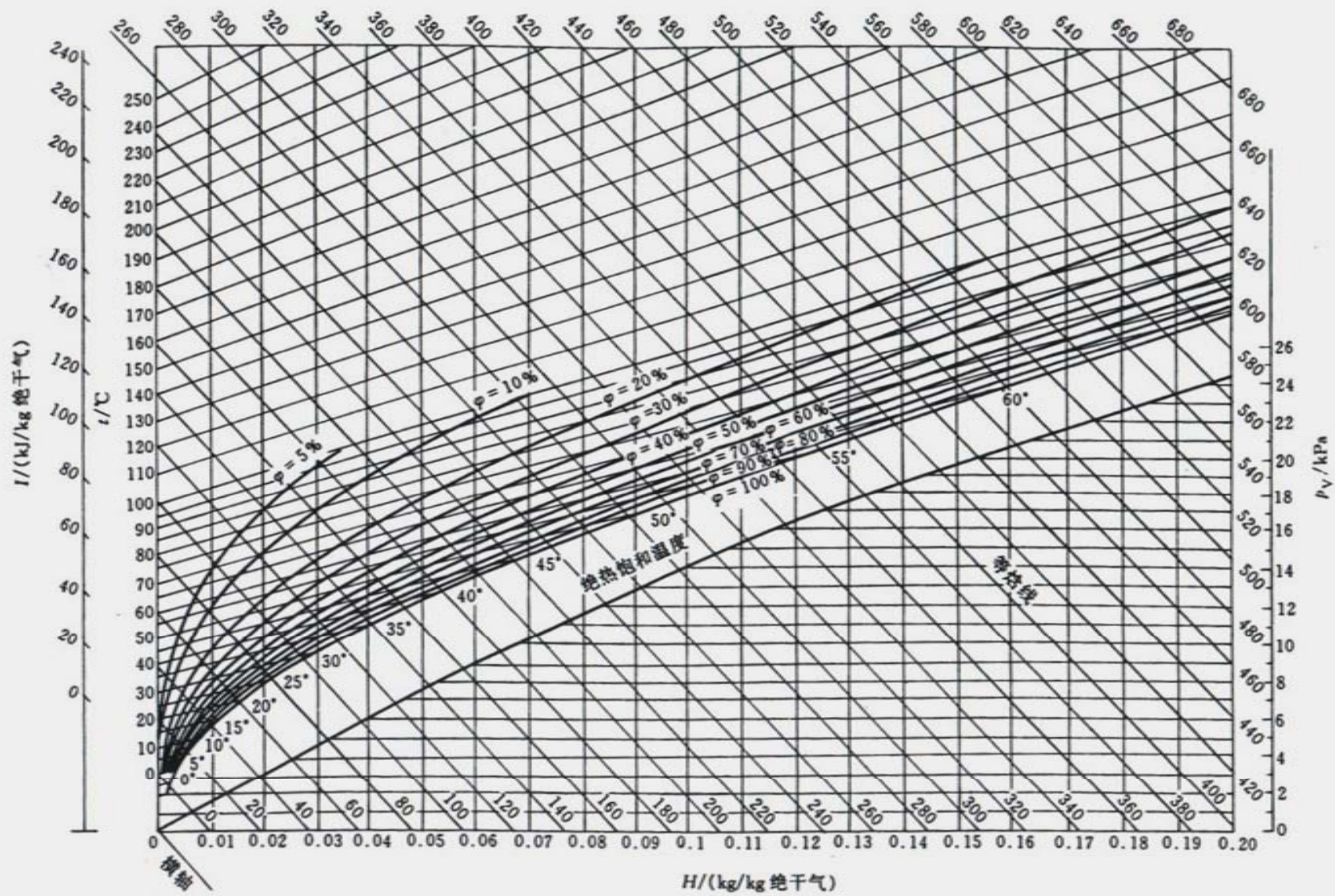
### 5.2.2 湿空气的 $H-I$ 图

## 一、 $H-I$ 图的构造

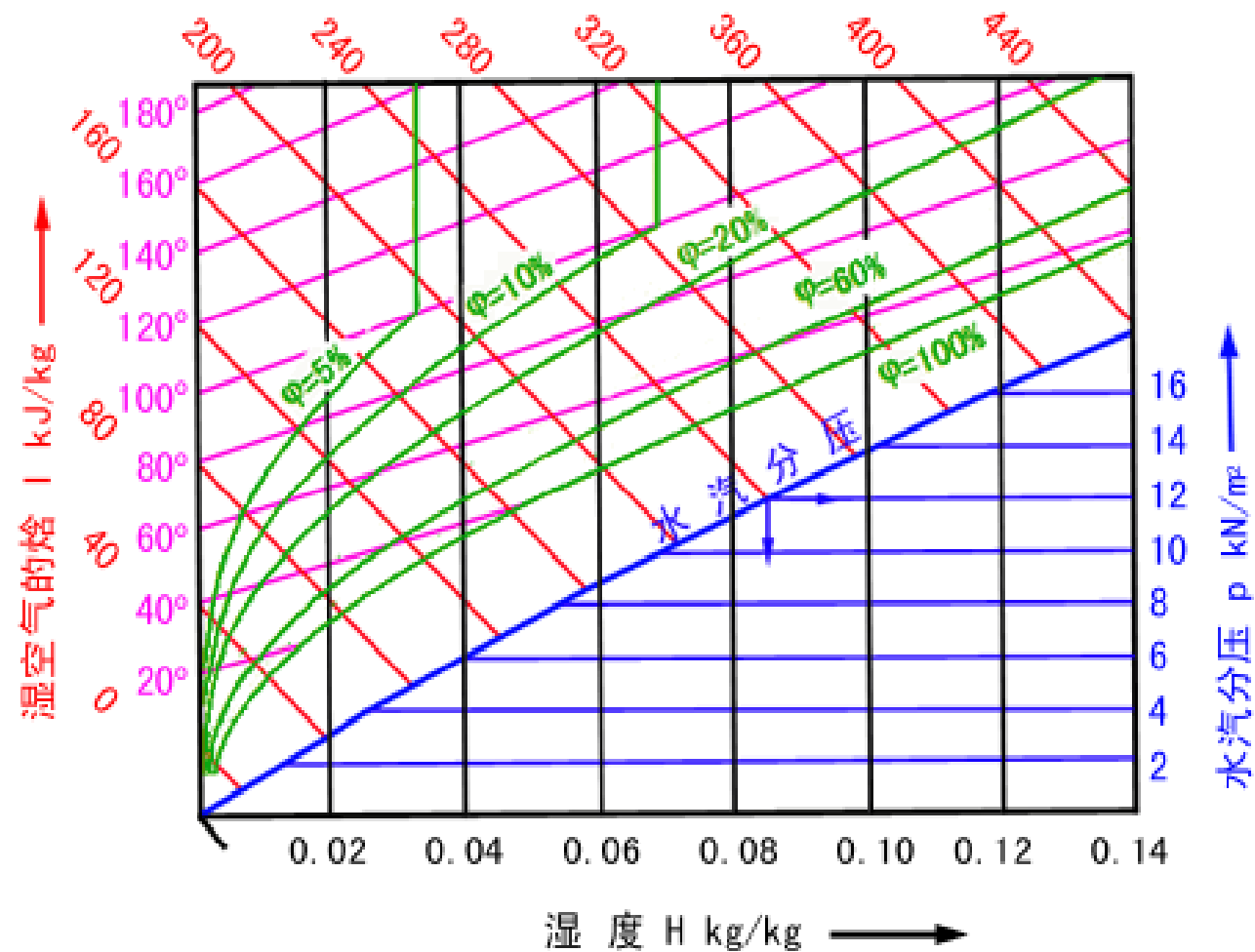


在一定总压下，湿空气的各参数中，只有两个是独立的，只要确定了湿空气的两个独立参数，湿空气的状态就确定了。工程上为了方便计算，常将湿空气各参数标绘成图，称为湿空气的湿度图。

湿空气的湿度图 { 湿度—焓 ( $H-I$ ) 图 ✓  
湿度—温度 ( $H-t$ ) 图



湿空气的 $H-I$ 图



五条线群:

- 1) 等  $I$  线群;
- 2) 等  $H$  线群;
- 3) 等  $t$  线群;
- 4) 等  $\varphi$  线群;
- 5) 蒸气分压线。

湿空气的  $H-I$  图

## 一、 $H-I$ 图的构造



$H-I$  图由以下线群组成:

- ①等湿线(等 $H$  线), 范围 $0\sim 0.2\text{ kg/kg}$ (绝干气);
- ②等焓线(等 $I$  线), 范围 $0\sim 680\text{ kJ/kg}$ (绝干气);
- ③等温线(等 $t$  线), 范围 $0\sim 250^{\circ}\text{C}$ ;
- ④等相对湿度线(等 $\varphi$  线), 范围 $5\% \sim 100\%$ ;  
 $\varphi = 100\%$  饱和空气线
- ⑤蒸气分压线( $p_v$  线), 范围  $0\sim 26\text{ kPa}$ 。

## 二、 $H-I$ 图的应用



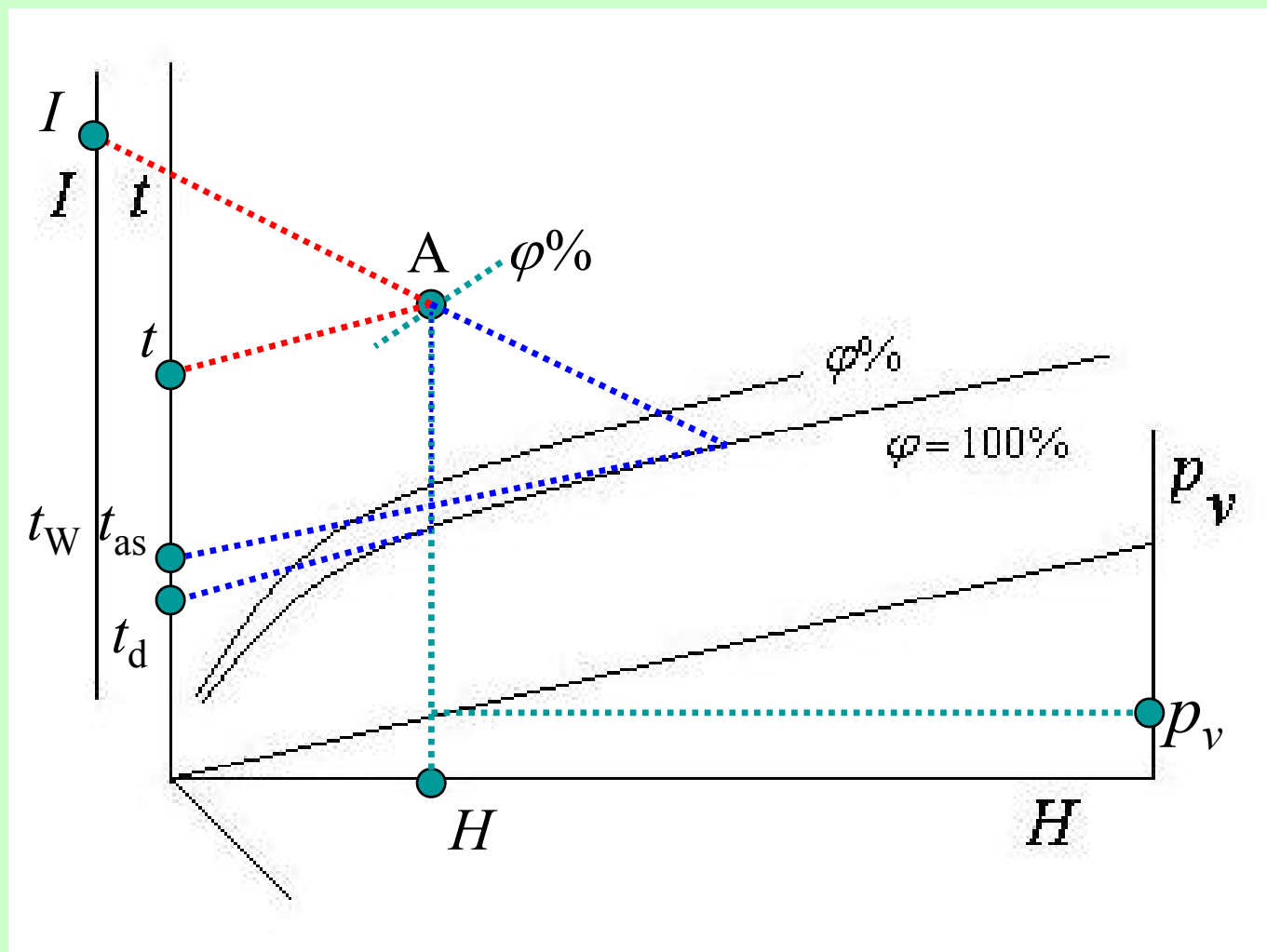
### 1. 已知状态点求湿空气的参数

已知状态点可由  $H-I$  图求出湿空气的各参数值：

湿度  $H$ ，                    焓  $I$ ，

相对湿度  $\varphi$ ，            蒸气分压  $p_v$ ，

温度，包括干球温度  $t$ 、露点  $t_d$ 、绝热饱和冷却  
温度  $t_{as}$  (湿球温度  $t_w$ )。



## 已知状态点求湿空气的参数



## 二、 $H-I$ 图的应用

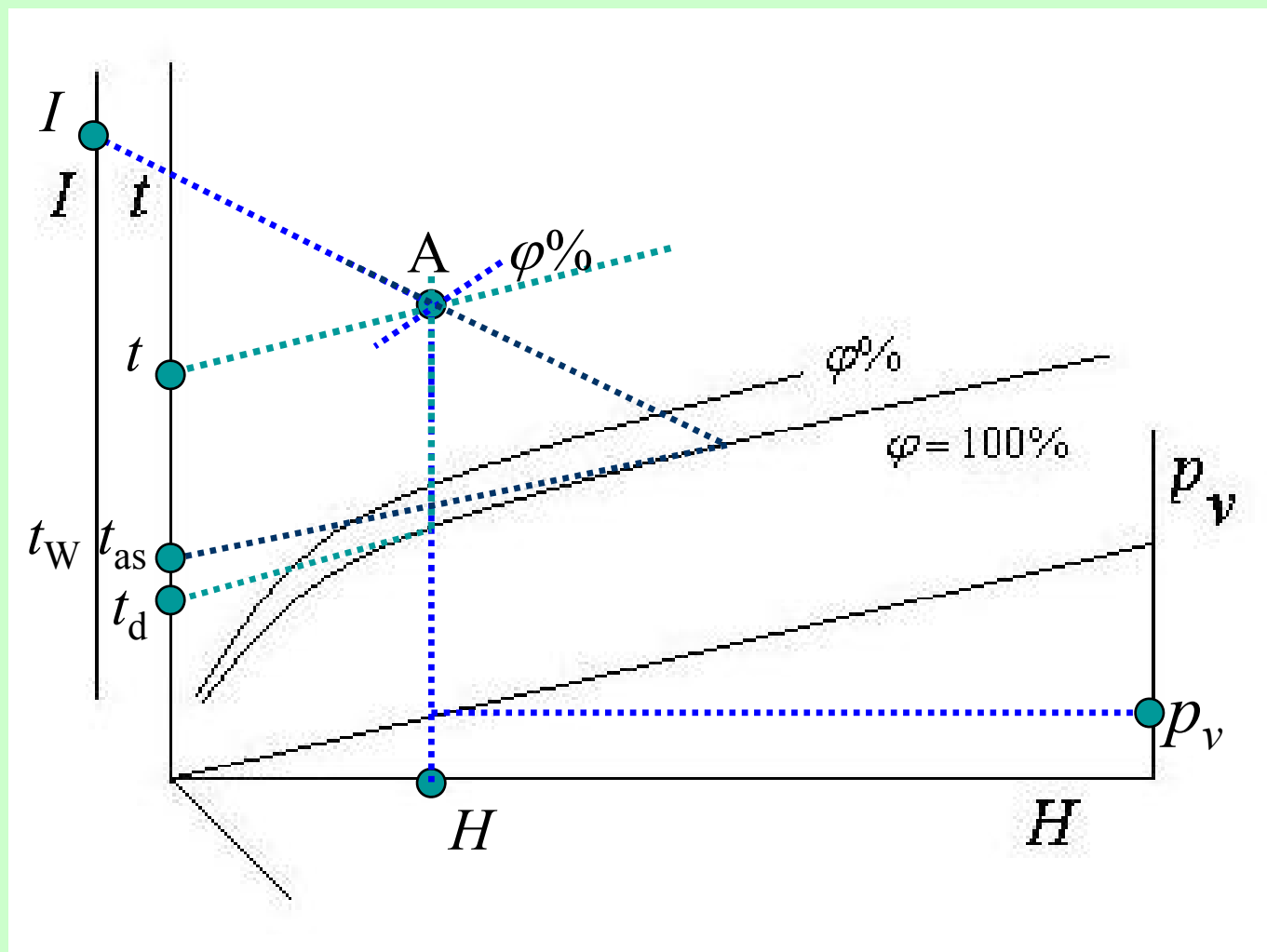


### 2. 由两个独立参数确定其他参数

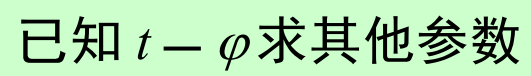
已知两个独立参数可由  $H-I$  图确定湿空气的状态点，继而求出湿空气的各参数值。

- ① 已知温度  $t$  — 湿球温度  $t_w$ ;
- ② 已知温度  $t$  — 露点  $t_d$ ;
- ③ 已知温度  $t$  — 相对湿度  $\varphi$ 。





已知  $t - t_d$  求其他参数



已知  $t - \varphi$  求其他参数

## 二、 $H-I$ 图的应用



简单分析：

$a.$  当  $H$ 、 $p$  一定时， $t \uparrow \rightarrow \varphi \downarrow$ 。

因此，提高湿空气温度  $t$ ，不仅提高了湿空气的焓值，使其作为载热体外，也降低了相对湿度使其作为载湿体。

$b.$  因  $p_v = py$ 、 $p_s = f(t)$  及  $\varphi = \frac{p_v}{p_s} \times 100\%$

故  $t$  一定时， $p \uparrow \rightarrow \varphi \uparrow$ ，故加压对干燥不利。  
干燥过程一般在常压或真空状态下进行。

## 第5章 干燥



### 5.1 概述

### 5.2 湿空气的性质及湿焓图

### 5.3 干燥过程的物料衡算与热量衡算

#### 5.3.1 干燥过程的物料衡算

# 一、湿物料含水量的表示方法



## 1. 湿基含水量

湿基含水量是指湿物料中水分的质量分数。

$$w = \frac{\text{湿物料中水分质量}}{\text{湿物料的总质量}} \quad (\text{kg} / \text{kg} \text{ (湿物料)})$$

**注意**

工业上通常用湿基含水量表示湿含量。

# 一、湿物料含水量的表示方法



## 2. 干基含水量

干基含水量是指湿物料中水分质量与绝干物料的质量比。

$$X = \frac{\text{湿物料中水分质量}}{\text{湿物料中绝干物料质量}} \quad (\text{kg} / \text{kg} \text{ (绝干料)})$$

两种含水量之间的关系

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



# 一、湿物料含水量的表示方法



## 3. 湿物料的比热容

$$c_m = c_s + Xc_w = c_s + 4.187X$$

湿物料的  
比热容

水分的  
比热容

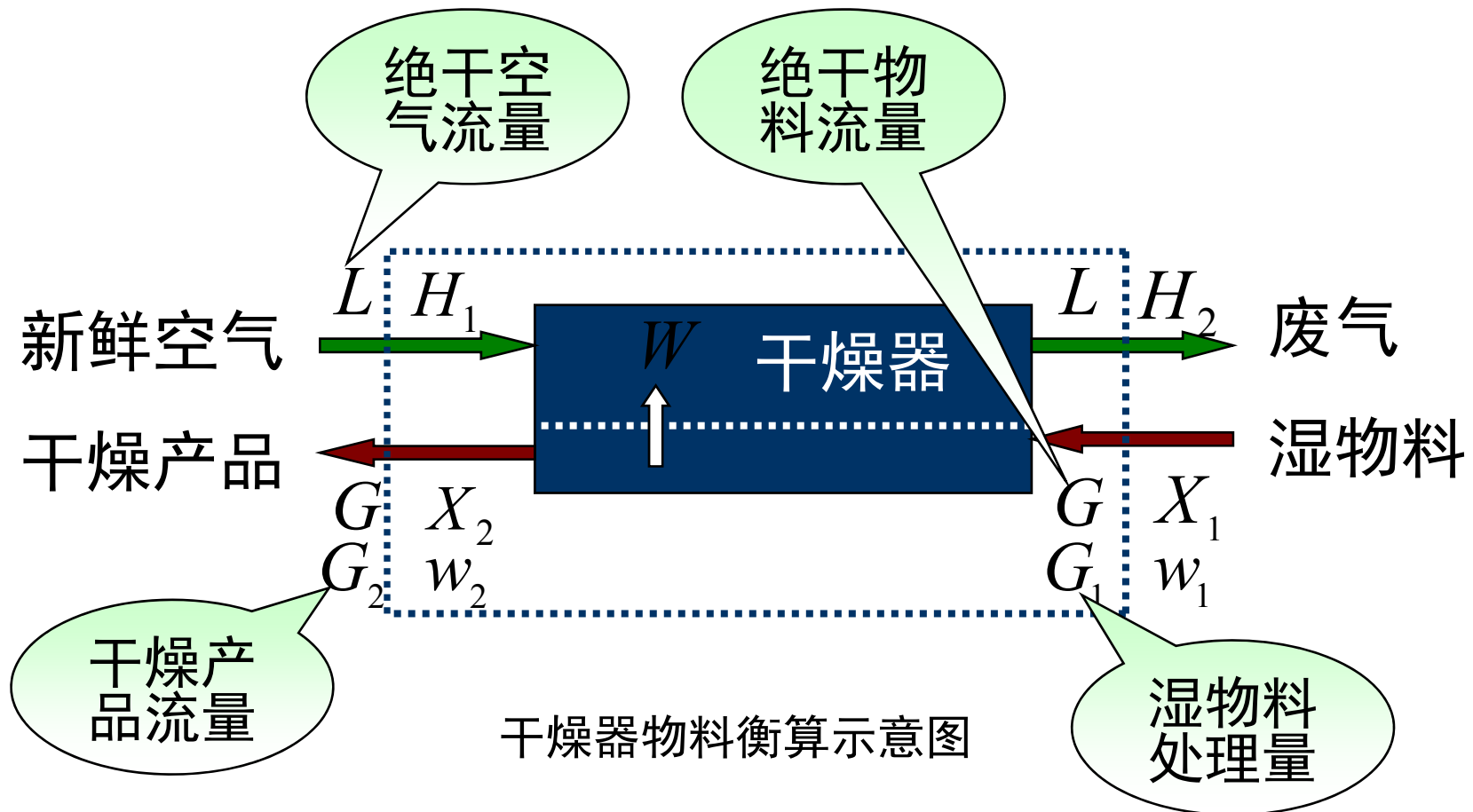
绝干物料  
的比热容

## 4. 湿物料的焓 $I'$

$$I' = c_s \theta + Xc_w \theta = (c_s + 4.187X)\theta = c_m \theta$$

湿物料的  
温度

## 二、干燥系统的物料衡算



## 二、干燥系统的物料衡算



### 1. 水分蒸发量

$$W = G(X_1 - X_2) = L(H_2 - H_1) \quad (\text{kg/s})$$

### 2. 空气消耗量

绝干空气消耗量

$$L = \frac{G(X_1 - X_2)}{H_2 - H_1} = \frac{W}{H_2 - H_1} \quad (\text{kg绝干气/s})$$

## 二、干燥系统的物料衡算



新鲜空气消耗量

$$L_0 = L(1 + H_1) \quad (\text{kg (新鲜气) /s})$$

新鲜空气体积消耗量

$$V'' = Lv_H \quad (\text{m}^3 \text{ (新鲜气) /s})$$

单位空气消耗量

$$l = \frac{L}{W} = \frac{1}{H_2 - H_1} \quad (\text{kg (绝干气) /kg (水) })$$

## 二、干燥系统的物料衡算



### 3. 湿物料处理量及干燥产品流量

绝干料衡算

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

湿物料处理量

$$G_1 = \frac{G_2(1 - w_2)}{1 - w_1} = \frac{G}{1 - w_1} \quad (\text{kg/s})$$

干燥产品流量

$$G_2 = \frac{G_1(1 - w_1)}{1 - w_2} = \frac{G}{1 - w_2} \quad (\text{kg/s})$$

例：在一连续干燥器中盐类结晶，每小时处理湿物料为1000 kg，经干燥后物料的含水量由40%减少至5%（均为湿基），以热空气为干燥介质，初始湿度 $H_1$ 为0.009 kg水/kg绝干气，离开干燥器时湿度 $H_2$ 为0.039 kg水/kg绝干气，假定干燥过程中无物料损失，试求：

- (1) 水分蒸发量 $W$  (kg水/h) ；
- (2) 绝干空气消耗量 $L$  (kg绝干气/h)，原湿空气消耗量 $L_0$  (kg原空气/h) ；
- (3) 干燥产品量 (kg湿物料/h) 。

解：(1) 由题意得

$$X_1 = \frac{w_1}{1 - w_1} = \frac{0.40}{1 - 0.40} = 0.667 \text{ kg水 / kg绝干料}$$

$$X_2 = \frac{w_2}{1 - w_2} = \frac{0.05}{1 - 0.05} = 0.053 \text{ kg水 / kg绝干料}$$

$$G = G_1(1 - w_1) = 1000 \times (1 - 0.4) = 600 \text{ kg绝干料/h}$$

则水分蒸发量为

$$W = G(X_1 - X_2) = 600 \times (0.667 - 0.053) = 368.4 \text{ kg水/h}$$

(2) 绝干空气消耗量为

$$L = \frac{W}{H_2 - H_1} = \frac{368.4}{0.039 - 0.009} = 12280 \text{kg绝干气/h}$$

原空气消耗量为

$$L_0 = L(1 + H_1) = 12280 \times (1 + 0.009) = 12390.5 \text{kg原空气/h}$$

(3) 干燥产品量

方法一

$$G_2 = G_1 - W = 1000 - 368.4 = 631.6 \text{kg湿物料/h}$$

方法二

$$G_2 = \frac{G}{1 - w_2} = \frac{600}{1 - 0.05} = 631.6 \text{kg湿物料/h}$$

## 第5章 干燥



### 5.1 概述

### 5.2 湿空气的性质及湿焓图

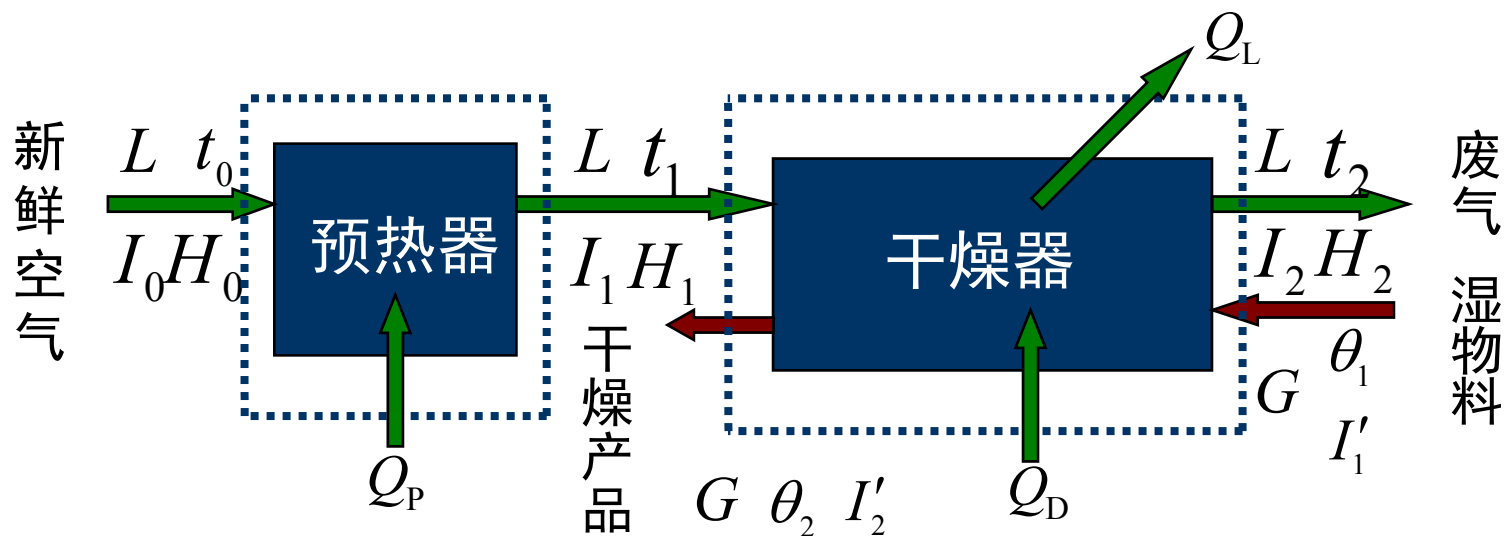
### 5.3 干燥过程的物料衡算与热量衡算

#### 5.3.1 干燥过程的物料衡算

#### 5.3.2 干燥过程的热量衡算



# 一、热量衡算基本方程



干燥器热量衡算示意图

$Q_p$ - 预热器消耗热量, kW;

$Q_D$ - 干燥器补充热量, kW;

$Q_L$ - 热损失速率, kW。

# 一、热量衡算基本方程



预热器热量衡算

$$LI_0 + Q_p = LI_1 \quad Q_p = L(I_1 - I_0)$$

干燥器热量衡算

$$Q_D = L(I_2 - I_1) + G(I'_2 - I'_1) + Q_L$$

整个系统热量衡算

$$Q = Q_p + Q_D = L(I_2 - I_0) + G(I'_2 - I'_1) + Q_L$$

# 一、热量衡算基本方程



由  $I = I_g + HI_v = c_g t + HI_v$

绝干  
空气  
的焓

水汽  
的焓

$$I_0 = c_g t_0 + H_0 I_{v0}$$

$$I_2 = c_g t_2 + H_2 I_{v2}$$

设  $I_{v0} \approx I_{v2}$

则  $I_2 - I_0 = c_g (t_2 - t_0) + I_{v2} (H_2 - H_0)$

# 一、热量衡算基本方程



以0 °C 为基准

$$I_{v2} = r_0 + c_v t_2$$

$$r_0 = 2490$$

$$c_v = 1.88$$

$$c_g = 1.01$$

$$\text{故 } I_2 - I_0 = 1.01(t_2 - t_0) + (2490 + 1.88t_2)(H_2 - H_0)$$

# 一、热量衡算基本方程



物料的焓值

$$I'_1 = c_m \theta_1$$

湿物料的平均比热容

$$I'_2 = c_m \theta_2$$

$$I'_2 - I'_1 = c_m (\theta_2 - \theta_1)$$

水的比热容

$$c_m = c_s + Xc_w = c_s + 4.187X$$

绝干料的平均比热容

## 一、热量衡算基本方程



由  $Q = Q_p + Q_D = L(I_2 - I_0) + G(I'_2 - I'_1) + Q_L$

整理得

$$Q = \underbrace{1.01L(t_2 - t_0)}_{\text{加热空气}} + \underbrace{Gc_m(\theta_2 - \theta_1)}_{\text{加热物料}} + \underbrace{W(2490 + 1.88t_2)}_{\text{蒸发水分}} + \underbrace{Q_L}_{\text{损失热量}}$$

加热  
空气

加热  
物料

蒸发  
水分

损失  
热量

## 二、干燥系统的热效率



### 干燥系统的热效率定义

$$\eta = \frac{\text{蒸发水分所需的热量}}{\text{向干燥系统输入的总热量}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{W(2490 + 1.88t_2)}{Q} \times 100\%$$

# 练习题目



## 思考题

1. 如何对干燥系统进行物料衡算？
2. 热量衡算的基本方程式是如何获得的？
3. 干燥系统的热效率表示何意义？如何计算？



## 第5章 干燥



### 5.1 概述

### 5.2 湿空气的性质及湿焓图

### 5.3 干燥过程的物料衡算与热量衡算

#### 5.3.1 干燥过程的物料衡算

#### 5.3.2 干燥过程的热量衡算

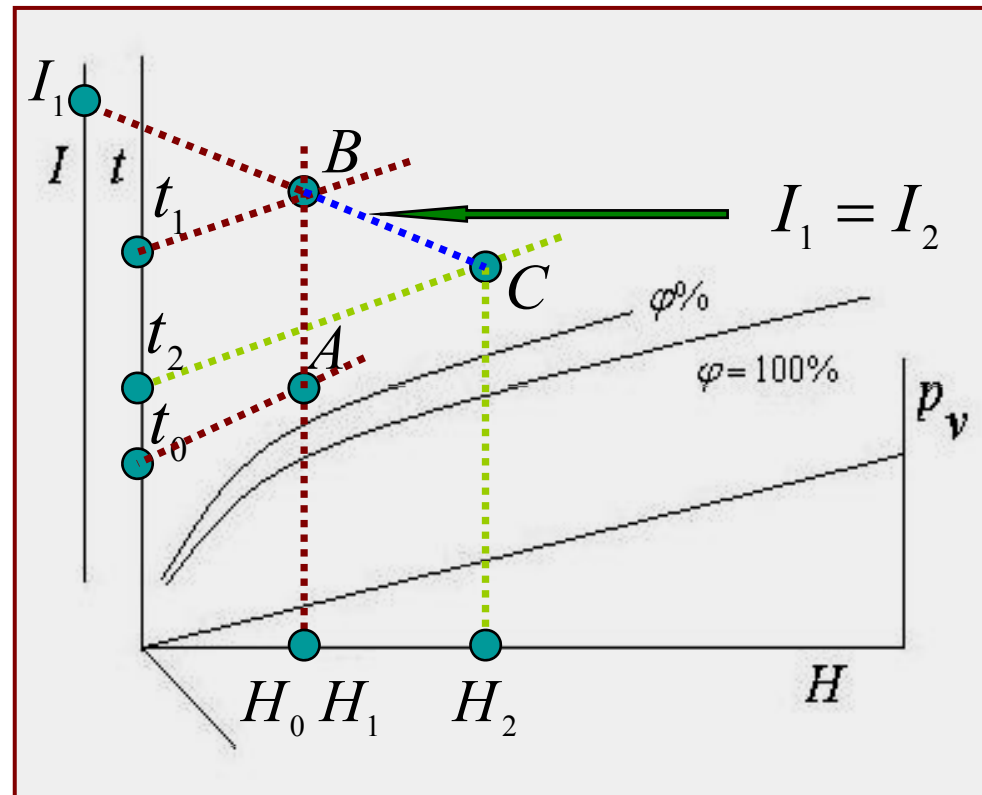
#### 5.3.3 空气通过干燥器时的状态变化

# 一、等焓干燥过程



## 1. 等焓干燥过程的状态变化

理想干燥  
绝热干燥



# 一、等焓干燥过程



## 2. 等焓干燥过程的条件

①不向干燥器补充热量，  $Q_D=0$  ；

②干燥器的热损失可忽略，  $Q_L=0$ ；

③物料进出干燥器的焓相等，  $I'_2 = I'_1$ 。

$$Q = Q_P + Q_D = L(I_2 - I_0) + G(I'_2 - I'_1) + Q_L$$

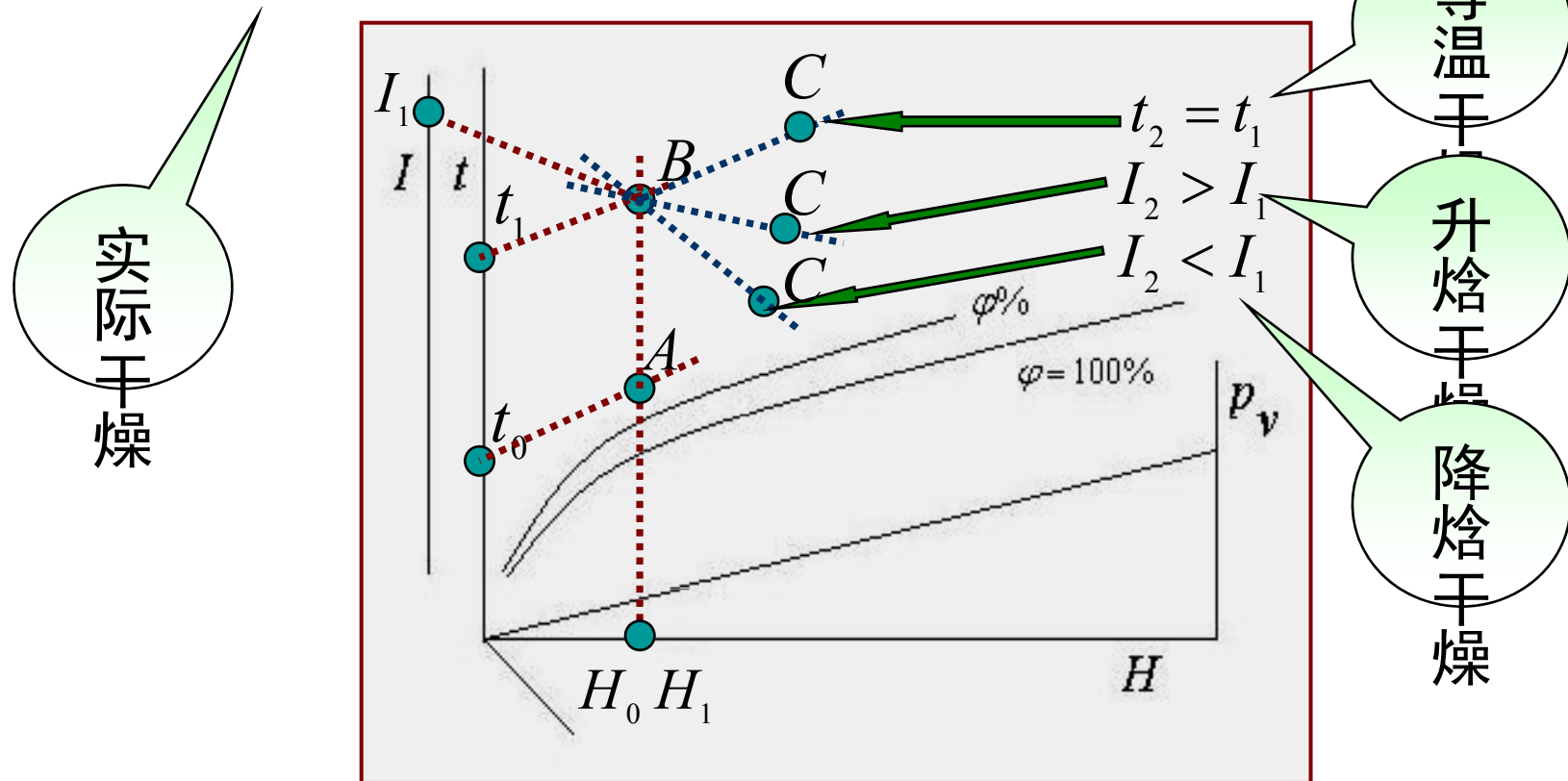
$$Q = L(I_1 - I_0) + \cancel{Q_D} = L(I_2 - I_0) + G(\cancel{I'_2} - \cancel{I'_1}) + \cancel{Q_L}$$

$$L(I_1 - I_0) = L(I_2 - I_0) \quad I_2 = I_1$$

## 二、非等焓干燥过程



### 1. 非等焓干燥过程的状态变化



## 二、非等焓干燥过程



### 2. 非等焓干燥过程的条件

降焓干燥过程应满足以下条件：

- ①不向干燥器补充热量， $Q_D=0$ ；
- ②干燥器的热损失不能忽略， $Q_L>0$ ；
- ③物料进出干燥器的焓不相等， $I'_2 > I'_1$ 。

$$Q = L(I_1 - I_0) + \cancel{Q_D} = L(I_2 - I_0) + G(I'_2 - I'_1) + Q_L$$

$$L(I_1 - I_0) > L(I_2 - I_0) \quad I_1 > I_2$$

## 二、非等焓干燥过程



升焓干燥过程应满足以下条件：

- ①需向干燥器补充热量，且  $Q_D > G(I'_2 - I'_1) + Q_L$ 。
- ②干燥器的热损失不能忽略， $Q_L > 0$ 。
- ③物料进出干燥器的焓不相等， $I'_2 > I'_1$ 。

$$Q = L(I_1 - I_0) + Q_D = L(I_2 - I_0) + G(I'_2 - I'_1) + Q_L$$

$$L(I_1 - I_0) < L(I_2 - I_0) \quad I_1 < I_2$$

## 二、非等焓干燥过程



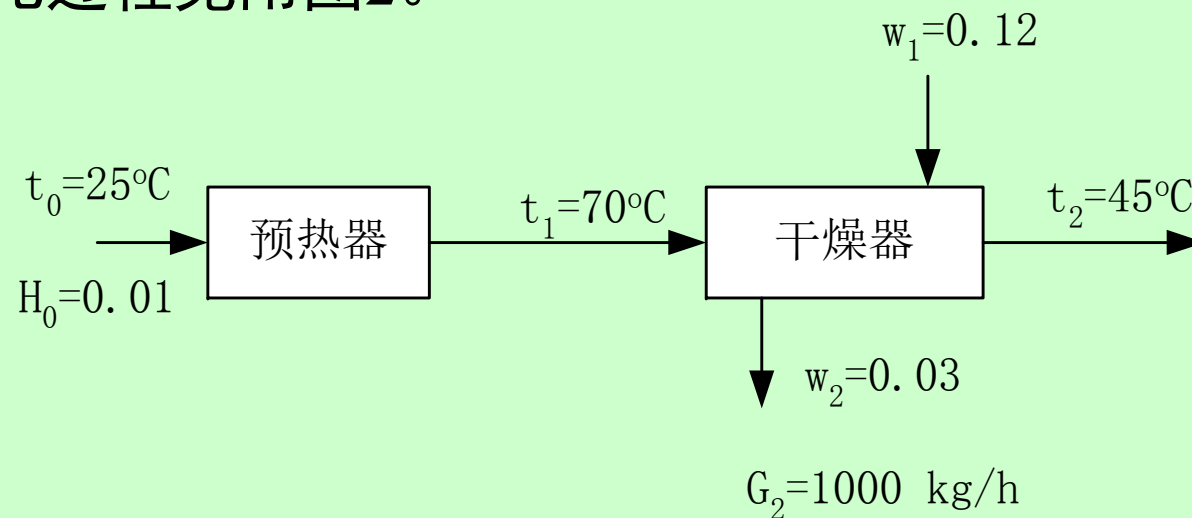
等温干燥过程应满足以下条件：

- ①需向干燥器补充热量，且  $Q_D$  足够大，维持  $t_1=t_2$ ；
- ②干燥器的热损失不能忽略， $Q_L>0$ ；
- ③物料进出干燥器的焓不相等， $I'_2>I'_1$ 。

例：有一连续干燥器在常压下操作，生产能力为1000 kg/h (以干燥产品计)。物料水分由12%降至3%（均为湿基），空气的初温为25℃，湿度为0.01 kg水/kg干空气，经预热器后升温至70℃，干燥器出口废气的干球温度为45℃。设空气在干燥器进出口处焓值相等。试求：

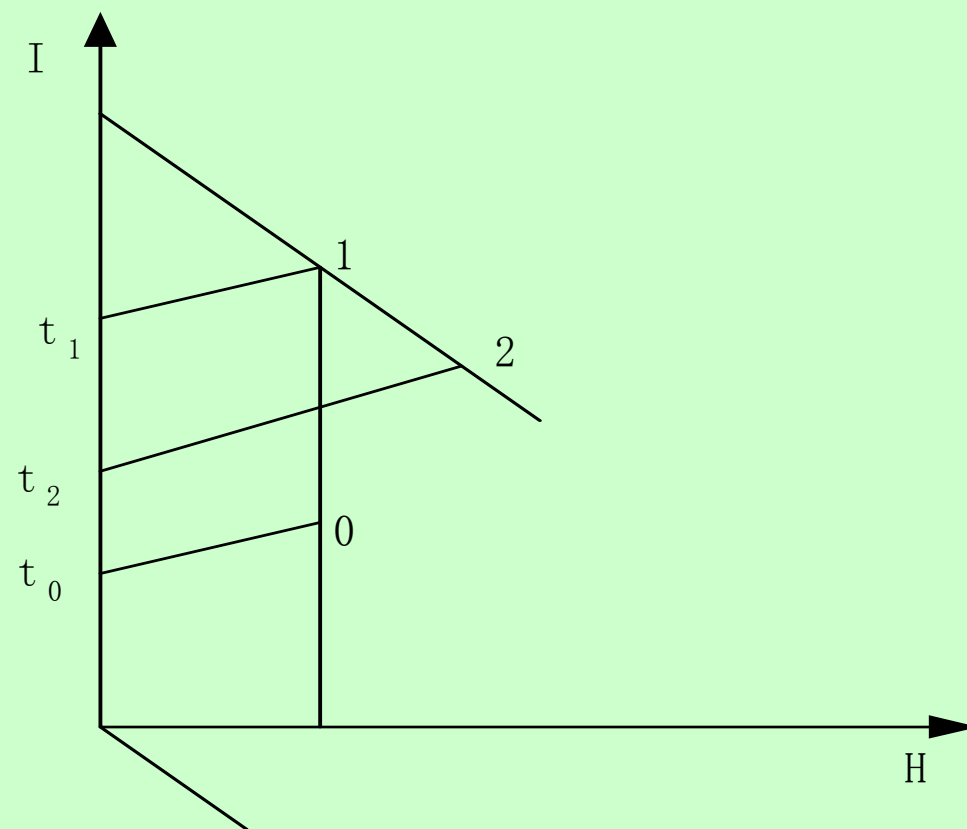
- (1) 在H-I图上表示空气的状态变化过程；
- (2) 初始状态下的空气用量为多少 $\text{m}^3/\text{s}$ ？

解：（1）干燥系统示意图见附图1。在H-I图上的空气状态变化过程见附图2。



附图1 干燥系统示意图





附图2 空气状态变化图

(2) 由题意得

$$X_1 = \frac{w_1}{1 - w_1} = \frac{0.12}{1 - 0.12} = \frac{3}{22} \text{kg水/kg绝干料}$$

$$X_2 = \frac{w_2}{1 - w_2} = \frac{0.03}{1 - 0.03} = \frac{3}{97} \text{kg水/kg绝干料}$$

$$G = G_2(1 - w_2) = 1000 \times (1 - 0.03) = 970 \text{kg绝干料/h}$$

则水分蒸发量为

$$W = G(X_1 - X_2) = 970 \times \left( \frac{3}{22} - \frac{3}{97} \right) = 102.3 \text{kg水/h}$$

因空气在干燥器进出口处焓值相等，所以 $I_1=I_2$ ，即

$$(1.01+1.88H_1)t_1+2490H_1=(1.01+1.88H_2)t_2+2490H_2$$

又因 $H_1=H_0=0.01$  kg水/kg干空气,  $t_1=70^\circ\text{C}$ ,  $t_2=45^\circ\text{C}$ , 故有

$$(1.01+1.88\times 0.01)\times 70+2490\times 0.01=(1.01+1.88H_2)\times 45+2490H_2$$

得  $H_2=0.02$  kg水/kg干空气

则绝干空气用量

$$L=W/(H_2-H_1)=102.3/(0.02-0.01)=10230\text{kg绝干气/h}$$

空气的湿比容

$$\begin{aligned}v_H &= (0.772 + 1.244H_0) \frac{273 + t_1}{273} = (0.772 + 1.244 \times 0.01) \times \frac{273 + 25}{273} \\&= 0.856 \text{ m}^3/\text{kg干空气}\end{aligned}$$

初始状态下的湿空气体积流量

$$V = 0.856 \times 10230 = 8756.9 \text{ m}^3/\text{h} = 2.432 \text{ m}^3/\text{s}$$

## 第5章 干燥



### 5.1 概述

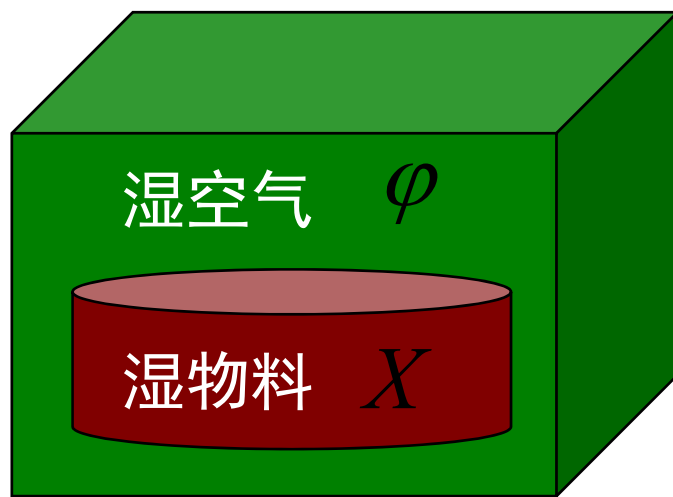
### 5.2 湿空气的性质及湿焓图

### 5.3 干燥过程的物料衡算与热量衡算

### 5.4 干燥过程的平衡关系与速率关系

#### 5.4.1 干燥过程的平衡关系

# 一、平衡曲线



接触时间  $\uparrow \sim X \downarrow$

达平衡状态时

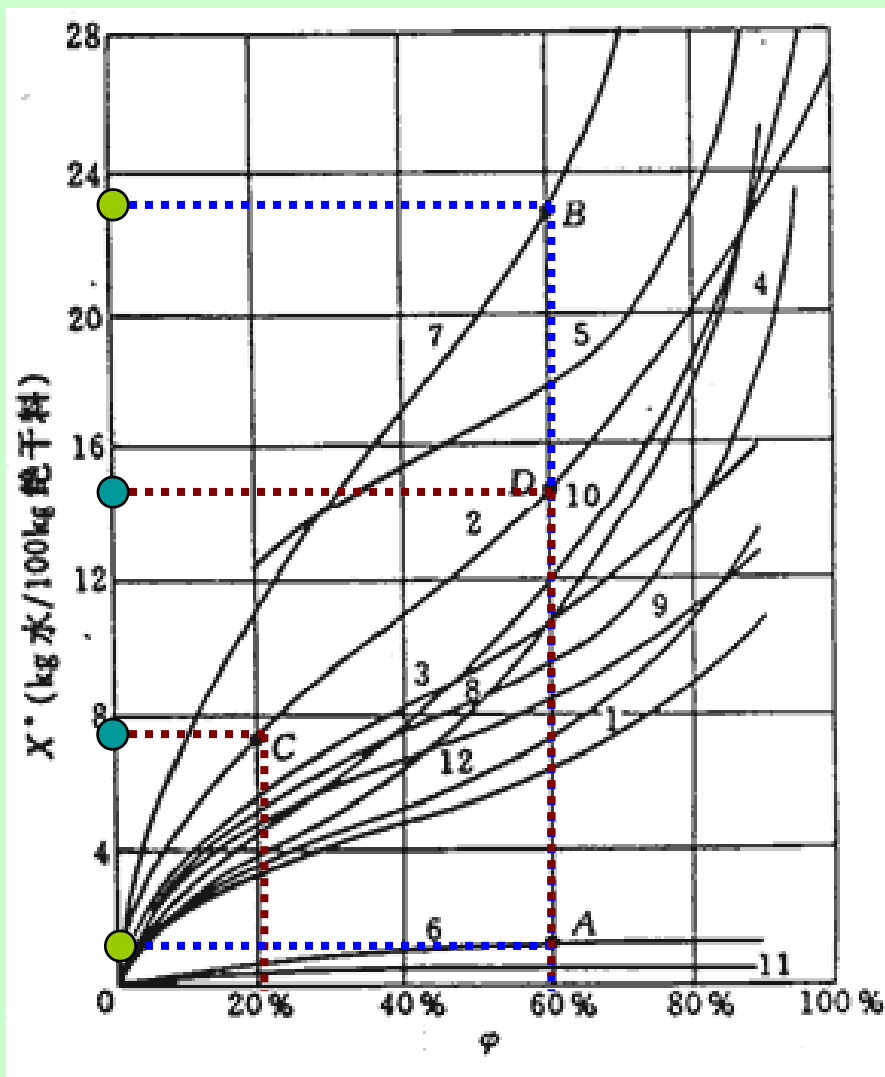
$$X = X^*$$

平衡湿含量

$$\varphi \downarrow \sim X^* \downarrow$$

$$X^* = f(\varphi)$$

平衡曲线



- 1—新闻纸
- 2—羊毛、毛织物
- 3—硝化纤维
- 4—丝
- 5—皮革
- 6—陶土
- 7—烟叶
- 8—肥皂
- 9—牛皮胶
- 10—木材
- 11—玻璃绒
- 12—棉花

平衡含水量 $X^*$ 与空气相对湿度 $\phi$ 的关系 (25°C )

## 二、物料中所含水分的性质



### 1. 平衡水分与自由水分

在一定的干燥条件下

不能被除去的水分  $\longrightarrow$  平衡水分  $X^*$

大于平衡水分的水分  $\longrightarrow$  自由水分  $X - X^*$

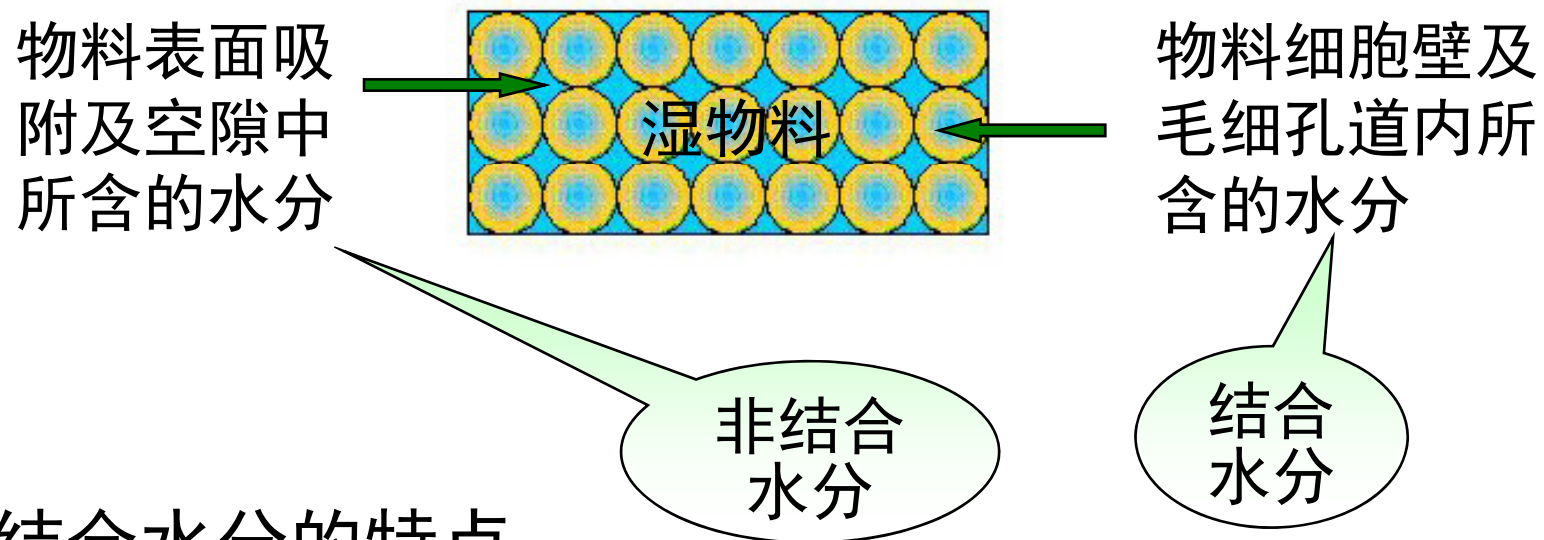
物料所含水分 = 平衡水分 + 自由水分

平衡水分	}	按能否被除去划分，取决于 物料的性质和空气的状态
自由水分		

## 二、物料中所含水分的性质



### 2. 结合水分与非结合水分



结合水分的特点：

$p_v < p_s$  ，结合力强，不易除去。



## 二、物料中所含水分的性质

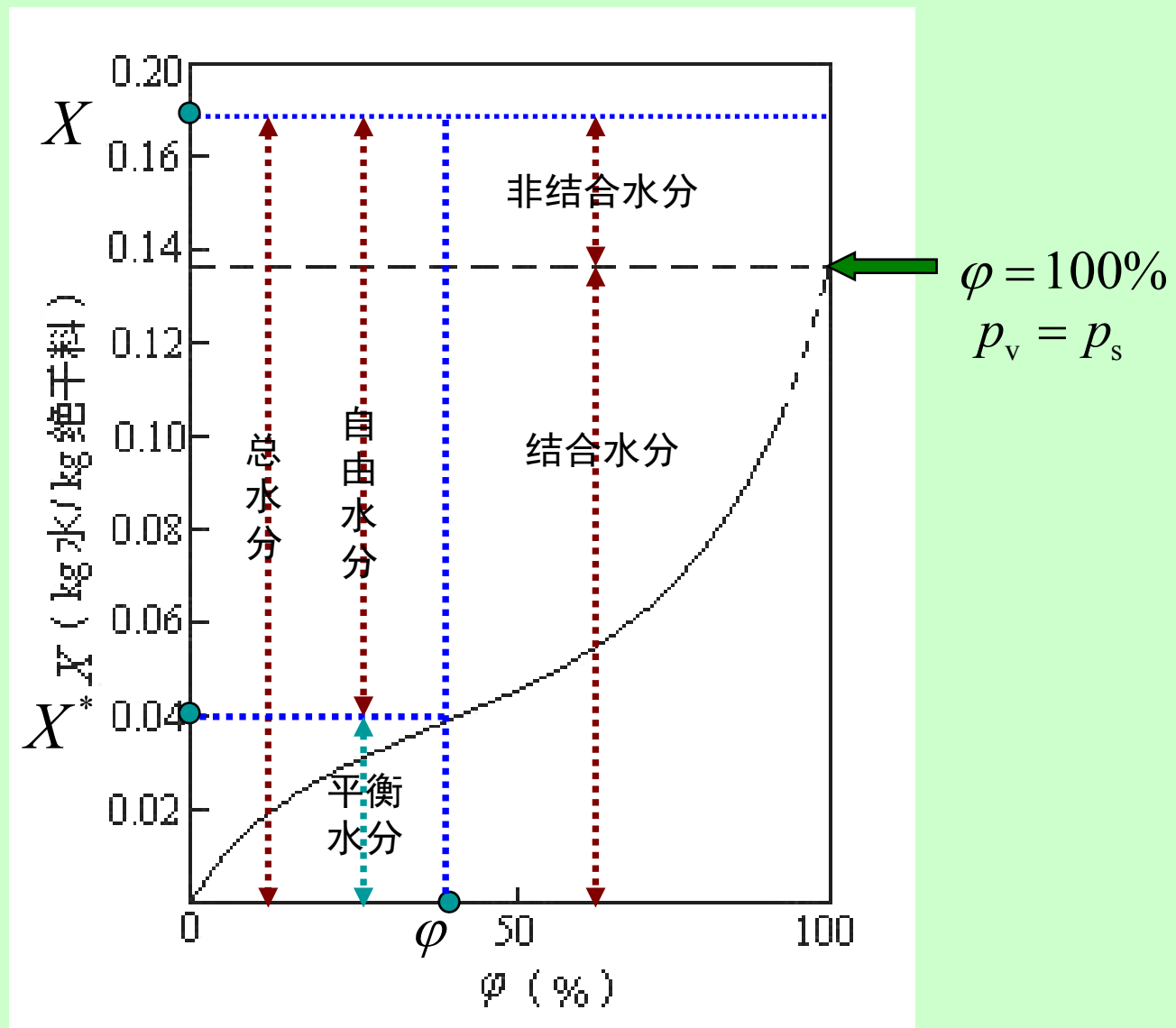


非结合水分的特点：

$p_v = p_s$ ，结合力弱，容易除去。

物料所含水分 = 结合水分 + 非结合水分

结合水分	}	按除去的难易程度划分，仅取决于物料的性质，而与空气的状态无关
非结合水分		



固体物料中所含水分的性质

## 第5章 干燥



### 5.1 概述

### 5.2 湿空气的性质及湿焓图

### 5.3 干燥过程的物料衡算与热量衡算

### 5.4 干燥过程的平衡关系与速率关系

#### 5.4.1 干燥过程的平衡关系

#### 5.4.2 干燥过程的速率关系

# 一、干燥实验和干燥曲线



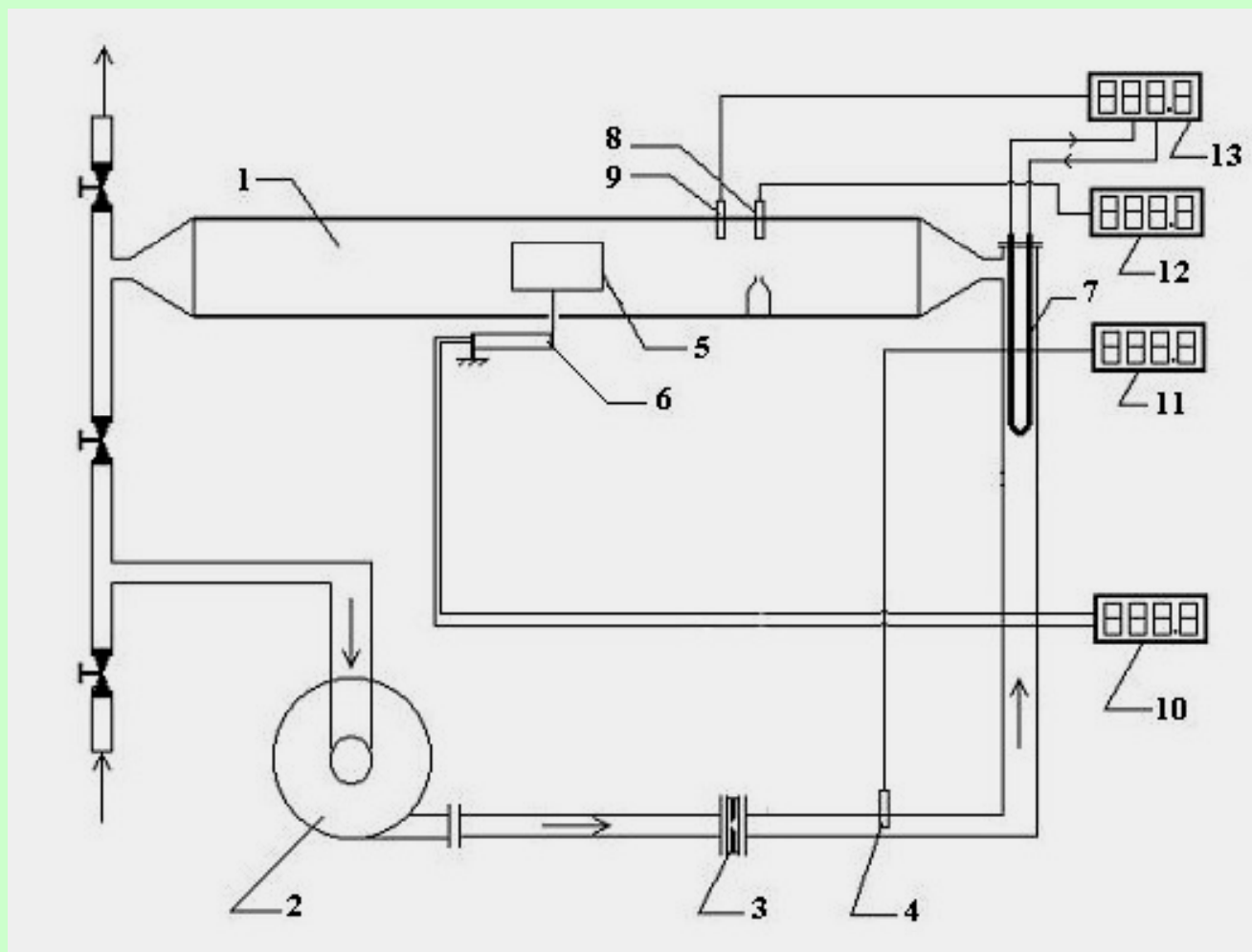
## 1. 恒定干燥实验

恒定干燥条件如下：

- ①间歇操作；
- ②用大量的空气干燥少量的物料；
- ③维持空气的速度及与物料的接触方式不变。

实验数据：

时 间 $\tau$	
物料温度 $\theta$	
物料湿含量 $X$	



- 1—洞道干燥室
- 2—离心鼓风机
- 3—孔板流量计
- 4—温度计
- 5—干燥物料
- 6—重量传感器
- 7—加热器
- 8—湿球温度计
- 9—干球温度计
- 10—重量显示仪
- 11—温度显示仪
- 12—湿球温度显示仪
- 13—电加热控制仪表

洞道干燥实验流程示意图

# 一、干燥实验和干燥曲线



## 干燥阶段

热量主要用于  
物料升温

预热阶段

$$\tau \uparrow \sim X \downarrow \sim \theta \uparrow \sim \frac{dX}{d\tau} \text{较小}$$

热量用于  
汽化水分

恒速干燥阶段（第一干燥阶段）

$$\tau \uparrow \sim X \Downarrow \sim \theta \text{不变} \sim \frac{dX}{d\tau} \text{很大}$$

热量用于汽化水分  
和加热物料

降速干燥阶段（第二干燥阶段）

$$\tau \uparrow \sim X \downarrow \sim \theta \uparrow \sim \frac{dX}{d\tau} \text{逐渐减小趋近于零}$$

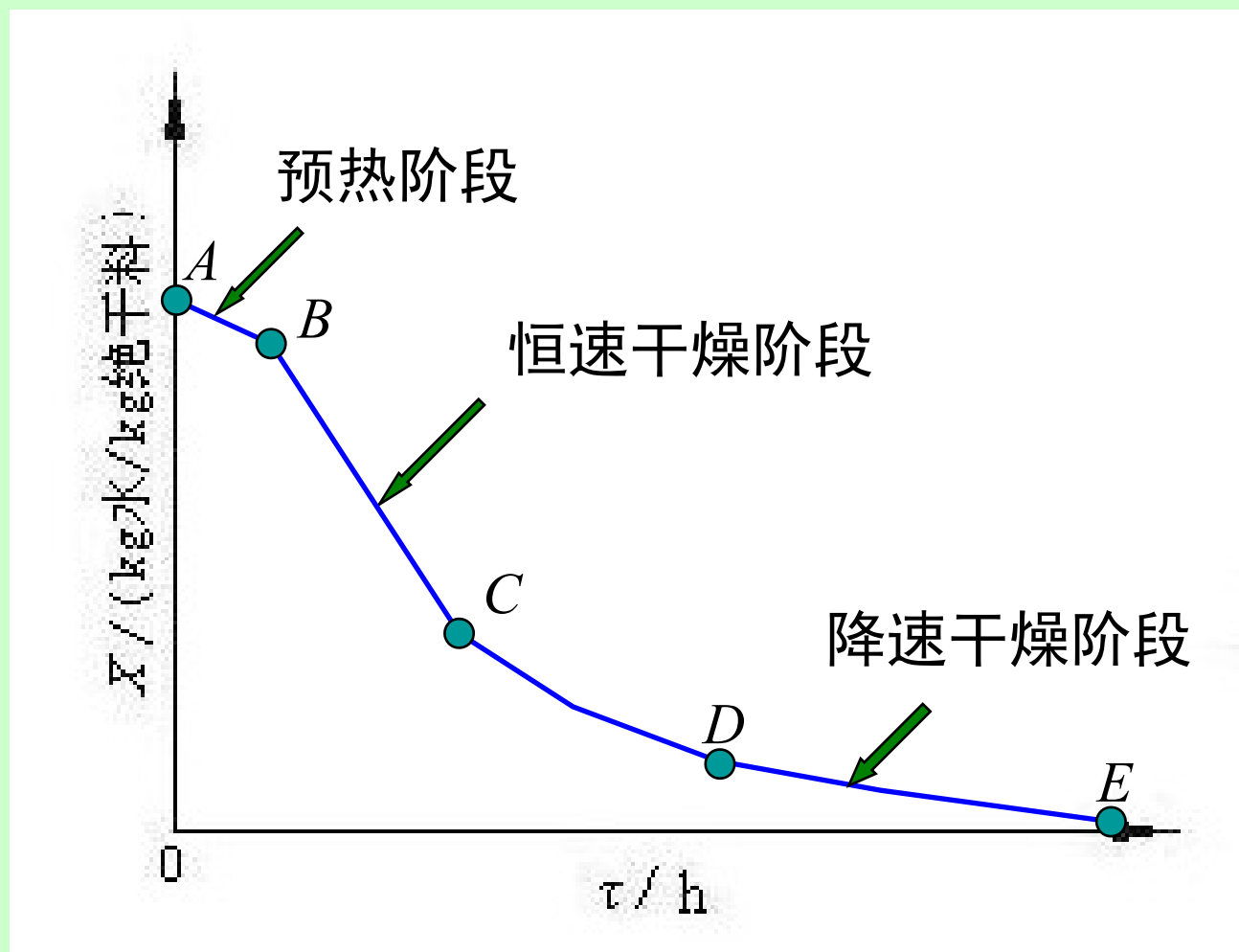
# 一、干燥实验和干燥曲线



## 2. 干燥曲线

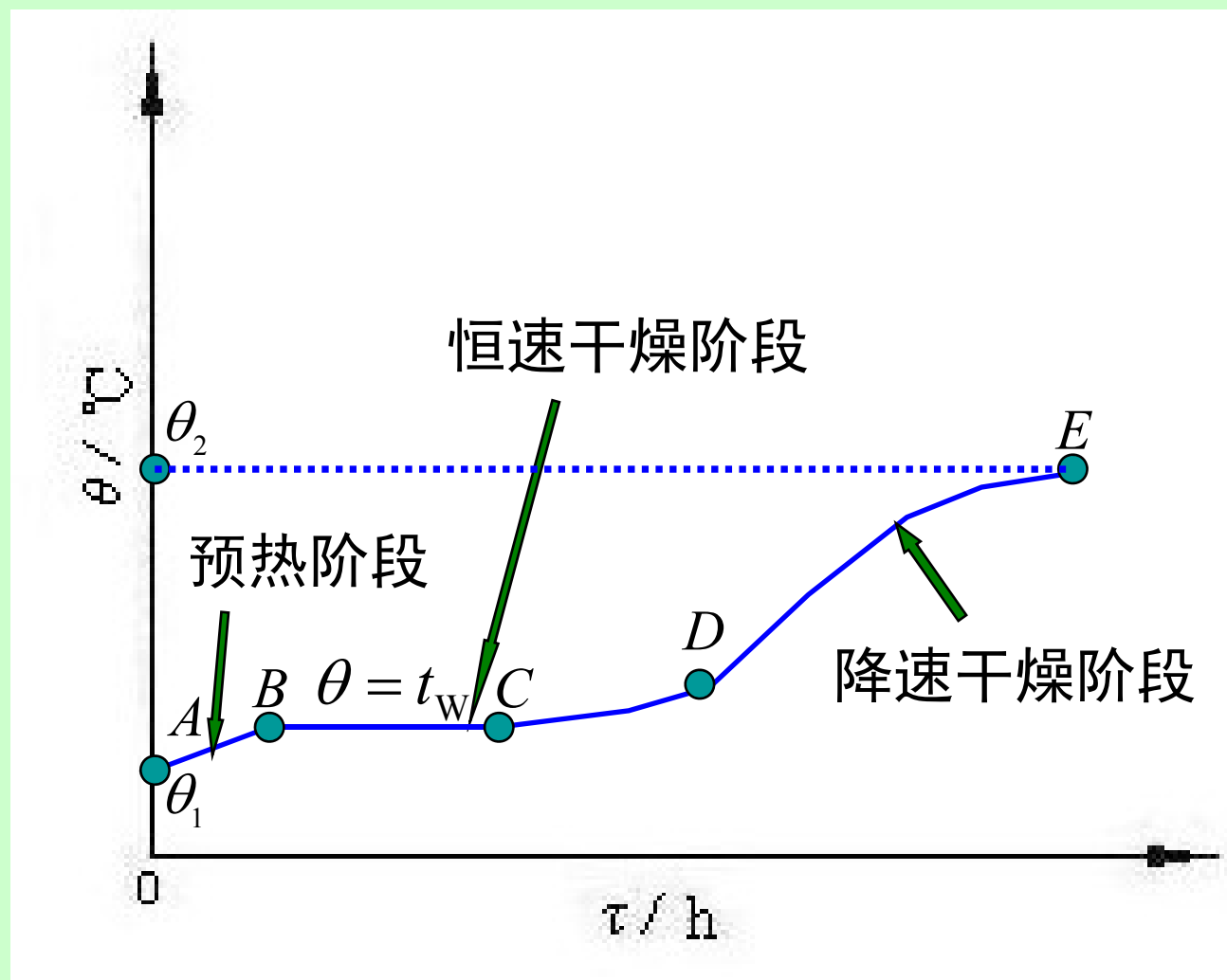
将物料含水量  $X$ （或物料表面温度  $\theta$ ）对干燥时间  $\tau$  绘图，所得图形称为干燥曲线。

干燥曲线  $\left\{ \begin{array}{l} X-\tau \text{ 曲线} \\ \theta-\tau \text{ 曲线} \end{array} \right.$



干燥曲线 ( $X-\tau$ 关系)





干燥曲线 ( $\theta$ - $\tau$ 关系)

## 二、干燥速率与干燥速率曲线



### 1. 干燥速率

定义：单位时间单位干燥面积上汽化的水分质量。

干燥  
速率

$$U = \frac{dW'}{Sd\tau} \quad (\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$$

$$dW' = -G'dX$$

$$U = -\frac{G'dX}{Sd\tau}$$

干燥速率定义式

## 二、干燥速率与干燥速率曲线

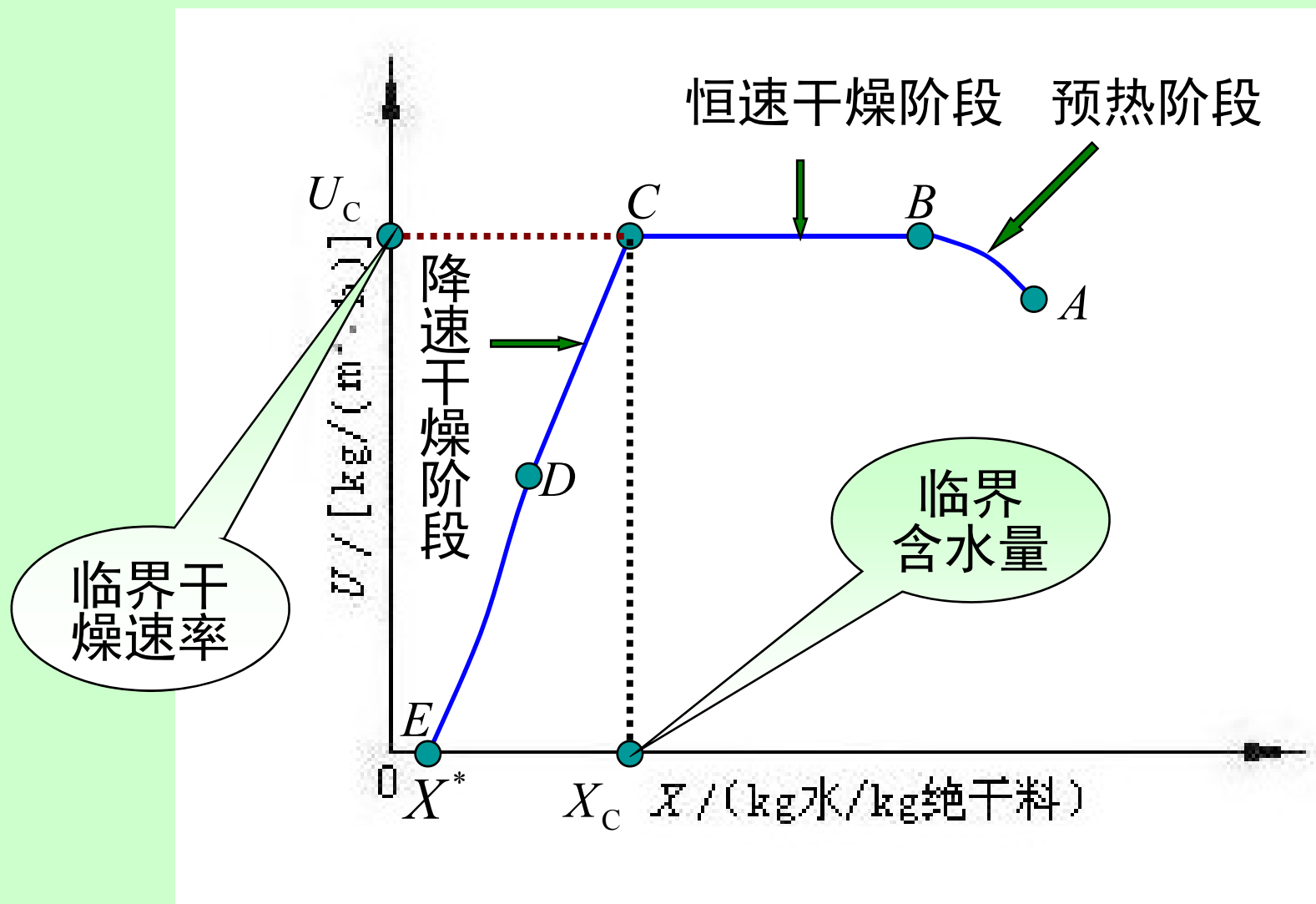


### 2. 干燥速率曲线

$U$  与  $X$  的关系曲线——干燥速率曲线。

干燥曲线  $X = f(\tau)$   $\longrightarrow \frac{dX}{d\tau}$   $\longrightarrow U$   $\longrightarrow$  干燥速率曲线  $U = f(X)$

曲线斜率



恒定干燥条件下干燥速率曲线

# 练习题目



## 思考题

1. 何为平衡水分与自由水分？根据什么划分？
2. 何为结合水分与非结合水分？根据什么划分？
3. 干燥曲线有何形式？其构造如何？
4. 何为干燥速率？干燥速率曲线的构造如何？

作业题： P297 5、6

## 第5章 干燥



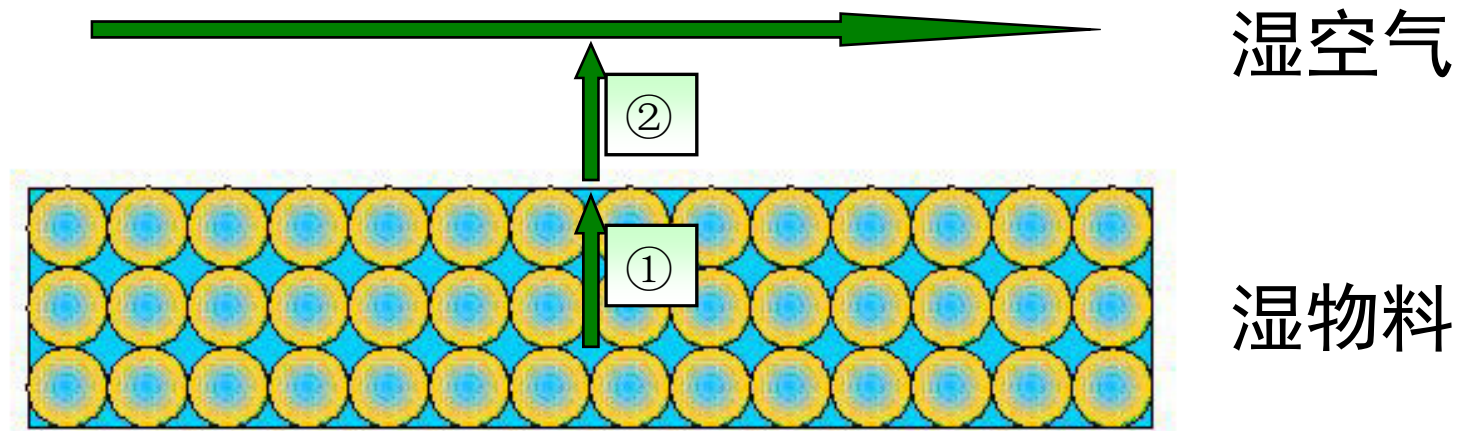
### 5.4 干燥过程的平衡关系与速率关系

#### 5.4.1 干燥过程的平衡关系

#### 5.4.2 干燥过程的速率关系

#### 5.4.3 干燥机理及干燥时间的计算

# 一、干燥过程机理



水分传递 { ① 由内部向表面迁移  
② 由表面向空气中汽化

# 一、干燥过程机理



## 1. 恒速干燥阶段

内部迁移速率  $\gg$  表面汽化速率

表面汽化  
控制阶段

特征：

- ①表面维持润湿状态，汽化的水分为非结合水分；
- ②空气传给湿物料显热 = 水分汽化所需潜热。



# 一、干燥过程机理



## 2. 降速干燥阶段

内部迁移  
控制阶段

内部迁移速率 < 表面汽化速率

特征：

- ①表面逐渐变干，汽化的水分为结合水分；
- ②干燥速率。

$$U = f(\text{物料本身结构、形状、尺寸})$$

## 二、干燥时间的计算



### 1. 恒定干燥条件下干燥时间的计算

#### (1) 恒速干燥阶段

$$U = U_c = \text{const}$$

由

$$U = -\frac{G' dX}{S d\tau}$$

$$\int_0^{\tau_1} d\tau = -\frac{G'}{U_c S} \int_{X_1}^{X_c} dX$$

## 二、干燥时间的计算



积分得

$$\tau_1 = \frac{G'}{U_c S} (X_1 - X_c)$$

恒速干燥阶段干燥时间

$U_c$ 的来源:

- ①由干燥速率曲线得出;
- ②由经验公式计算。

$X_c$ 的来源

- ①由干燥速率曲线得出;
- ②由手册查出。

## 二、干燥时间的计算



### (2) 降速干燥阶段

$$U \neq \text{const}$$

由

$$U = -\frac{G' dX}{S d\tau}$$

$$\tau_2 = \int_0^{\tau_2} d\tau = -\frac{G'}{S} \int_{X_c}^{X_2} \frac{dX}{U}$$

## 二、干燥时间的计算



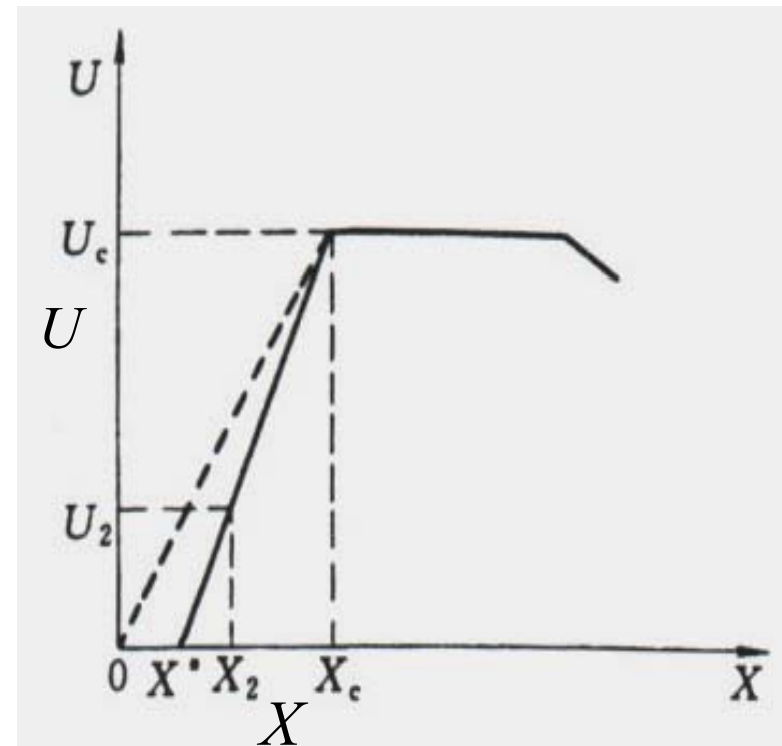
设  $U$  与  $X$  为线性关系

$$k_X = \frac{U_c - 0}{X_c - X^*}$$

$$U_c = k_X (X_c - X^*)$$

$$k_X = \frac{U - 0}{X - X^*}$$

$$U = k_X (X - X^*)$$



## 二、干燥时间的计算



$$\tau_2 = \int_0^{\tau_2} d\tau = \frac{G'}{S} \int_{X_2}^{X_c} \frac{dX}{k_X (X - X^*)}$$

积分得

$$\tau_2 = \frac{G'}{S k_X} \ln \frac{X_c - X^*}{X_2 - X^*}$$

$$\tau_2 = \frac{G'}{S} \frac{X_c - X^*}{U_c} \ln \frac{X_c - X^*}{X_2 - X^*}$$

降速干燥阶段干燥时间

## 二、干燥时间的计算



若  $X^*$  很低或缺乏  $X^*$  数据，令

$$X^* \approx 0$$

则

$$U = k_X (X - X^*) = k_X X$$

故

$$\tau_2 = \frac{G'}{S} \frac{X_c}{U_c} \ln \frac{X_c}{X_2}$$

降速干燥阶段干燥时间

## 二、干燥时间的计算



总干燥时间

$$\tau = \tau_1 + \tau_2$$

若

$$X^* \approx 0$$

$$\tau = \frac{G'X_c}{U_c S} \left( \frac{X_1}{X_c} - 1 + \ln \frac{X_c}{X_2} \right)$$

2. 变动干燥条件下干燥时间的计算(选读)



## 第5章 干燥



5.4 干燥过程的平衡关系与速率关系

5.5 干燥设备

5.5.1 干燥器的基本要求与分类

# 一、干燥器的基本要求



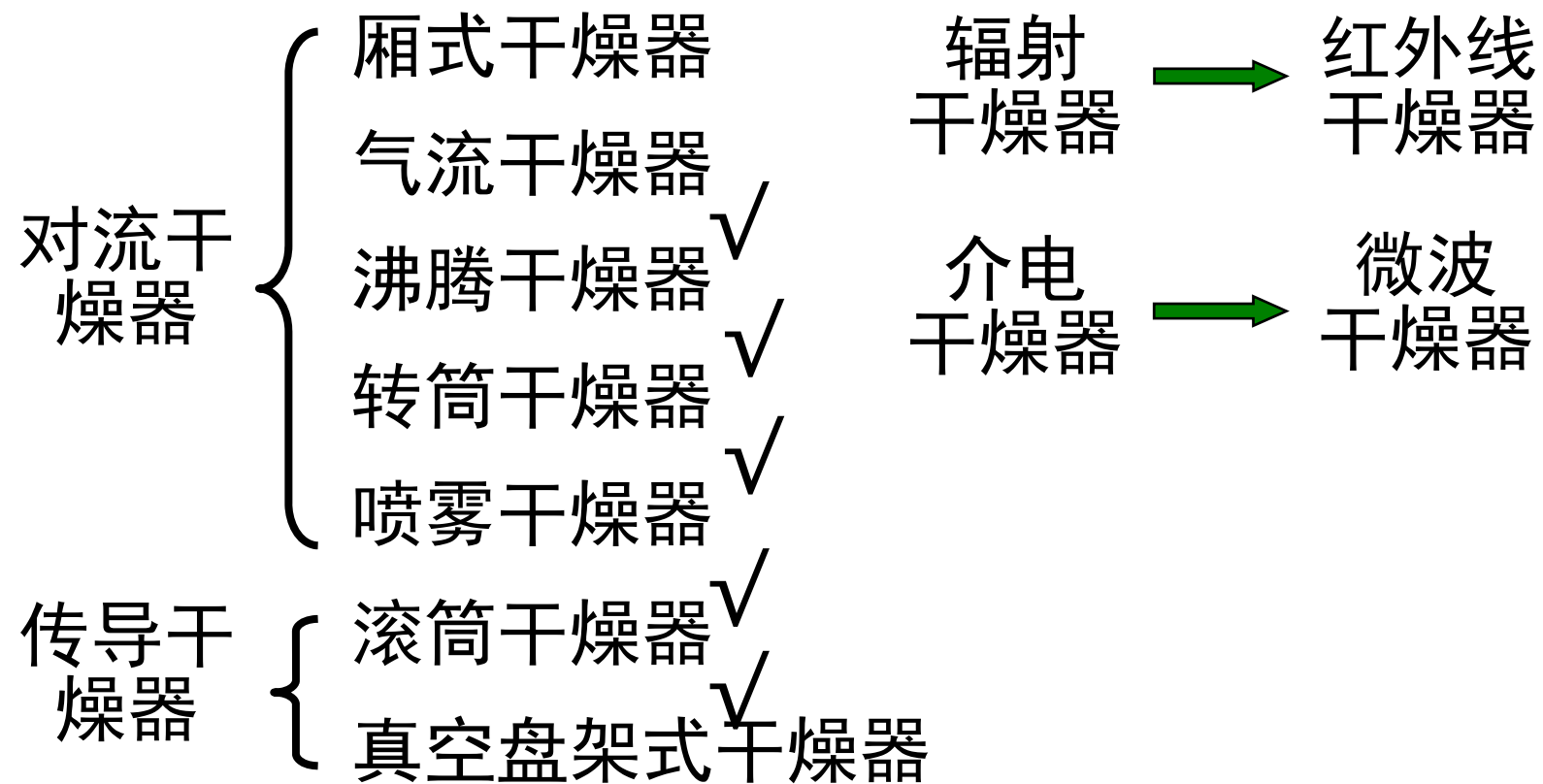
干燥器的基本要求：

- ① 保证干燥产品的质量要求  
含水量、形状、强度；
- ② 干燥速率快；
- ③ 热效率高；
- ④ 操作控制方便、劳动条件好。

## 二、干燥器的分类



按传热方式分类：



## 第5章 干燥



5.4 干燥过程的平衡关系与速率关系

5.5 干燥设备

5.5.1 干燥器的基本要求与分类

5.5.2 干燥器的主要类型(选读)

5.5.2 干燥器的设计(选读)

# 练习题目



## 思考题

1. 干燥过程的机理如何？
2. 恒速干燥阶段的时间如何计算？
3. 干燥器有哪些主要类型？

# 本章小结



## 本章重点掌握内容

### 1.湿空气的性质及湿焓图

- ①湿空气的性质；
- ②湿焓图的构造及应用。

### 2.干燥过程的物料衡算与热量衡算

- ①干燥系统的物料衡算；
- ②干燥系统的热量衡算；
- ③空气通过干燥器时的状态变化。

## 本章小结



干燥过程的平衡关系与速率关系：

- ①平衡曲线；
- ②物料中所含水分的性质；
- ③干燥曲线；
- ④干燥速率与干燥速率曲线；
- ⑤干燥过程机理。