

# 化工原理多媒体教学

## Unit Operation CAI

西北大学化工学院化工原理教学组

## 第一节 概述

### 一、固体去湿方法和干燥过程

#### 1、干燥的应用

在化工生产过程中，为使物料便于加工、运输、储藏和使用等，需要从含有水分的固体中除去水分。

把固体物料中多余的湿分去掉的操作过程称作去湿或干燥。



## 2、去湿的方法

(1) **机械去湿法**：即通过压缩、抽吸、过滤和离心分离、沉降等除去物料中大量的水。

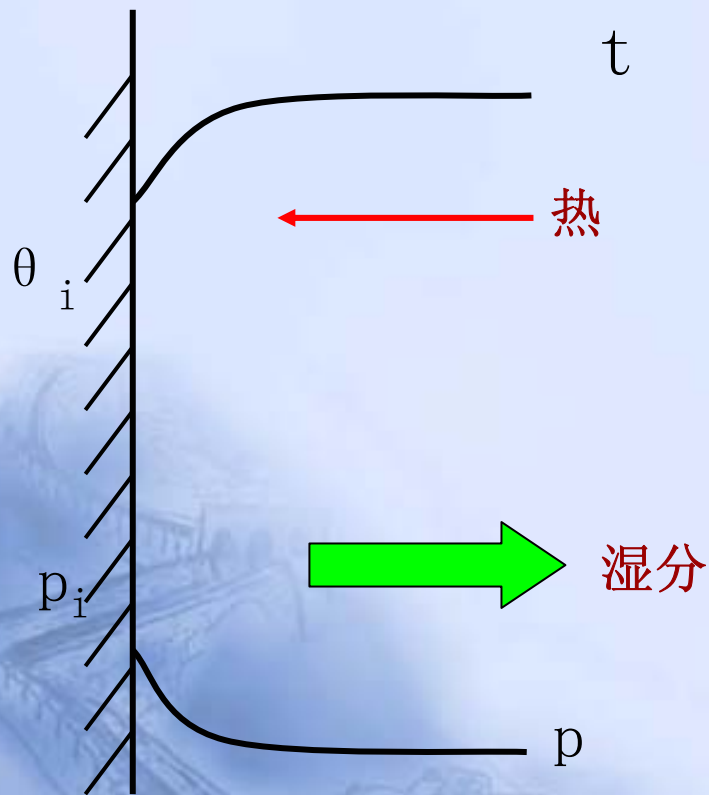
(2) **物理化学去湿法**：用某种吸湿性物料如石灰、硫酸、无水氯化钙、硅胶等与湿物料并存，使物料中的水分经气相而转入干燥剂内。

(3) **热能去湿法**：向物料供热以汽化其中的水分。

工业干燥操作大多是用热空气或其它高温气体为介质，使其经过物料表面，介质向物料供热并带走其后汽化的水分，此种干燥为**对流干燥**。



### 3、对流干燥过程的特点



物料表面温度  $\theta_i < \text{气体主体温度 } t$

传热方向: 气体  $\rightarrow$  物料

气流中的水汽分压  $p < \text{固体表面水的分压 } p_i$

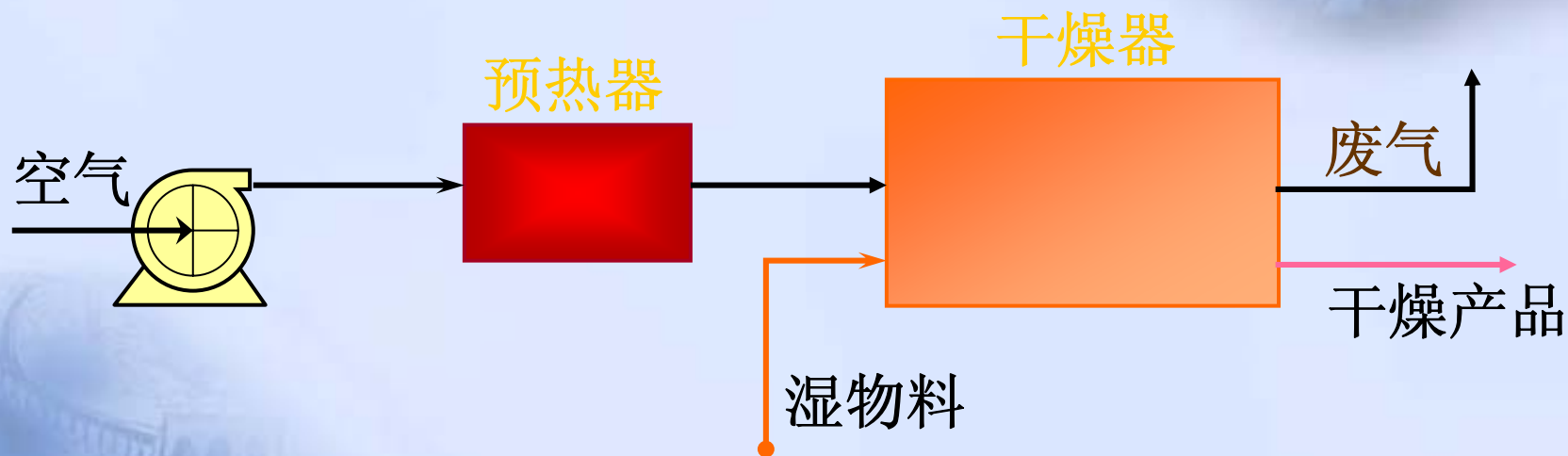
传质方向: 水  $\rightarrow$  气相。

**结论:** 对流干燥过程是热质反向传递的过程。另外，干燥过程能够进行的条件是  $p_i < p$ ，压差越大，干燥进行得越迅速，如果压差为零，表示干燥介质与物料间的水汽达到平衡。

干燥过程所使用的干燥介质有不饱和的热空气、烟道气、过热水蒸气等。

图14-1 对流干燥过程的热、质传递

## 4、对流干燥过程的流程



对流干燥可以是连续过程，也可以是间歇过程。





## 第二节 干燥静力学

### 一、湿空气的性质

**湿空气**一是干空气和水的混合物。湿空气的状态参数除压力、温度以外，与过程有关的是水分在空气中的含量。

#### 1、温度和压力

湿空气的温度：一般指的是干球温度。

干燥过程的操作压力不高，对压力不太高的湿空气通常可当作理想气体处理， $P = p_g + p_w$ 。



2、湿度H：每千克干空气所带有的水汽量。

$$H = \frac{\text{湿空气中蒸汽量}}{\text{湿空气中干空气量}} = \frac{M_{H_2O} \cdot n_w}{M_g \cdot n_g}$$

$$= \frac{18}{29} \cdot \frac{p_w}{p_g} = 0.622 \frac{p}{P - p}$$

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

H也叫绝对湿度或湿含量。



3、相对湿度：指在一定温度及总压下，湿空气的水汽分压 $p$ 与饱和空气中水汽分压 $p_s$ 之比的百分数。

$$\varphi = \frac{p}{p_s} \cdot 100 \%$$

若 $\varphi=100\%$ ，表示湿空气中的水汽已达到饱和。 $\varphi$ 值越低，距饱和越远，表示该湿空气吸收水分的能力越强。

**结论**：湿度 $H$ 只能表示水汽含量的绝对值；相对湿度 $\varphi$ 才能表示湿空气吸收水汽的能力。





根据相对湿度的定义，将  $p = \varphi p_s$  代入湿度公式，即：

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

当总压一定时， $H = f(\varphi, t)$ ，又当  $\varphi = 1$  时（即湿空气达饱和）， $H = 0.622 \frac{p_s}{P - p_s}$ ，此时的湿度称为饱和湿度。





4、**湿容积**：即湿空气的比容。表示1Kg干空气以及所携带的H千克的水汽所占的总体积。

$V_h = v_g + v_w H$ ,  $v_g$ —干空气的比容;  $v_w$ —水汽的比容。在总压1atm下:

$$v_g = \frac{22.4}{29} \cdot \frac{t+273}{273} = 0.773 \times \frac{t+273}{273};$$

$$v_w = \frac{22.4}{18} \cdot \frac{t+273}{273} = 1.244 \times \frac{t+273}{273};$$

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

若压力不为1atm, 还需对压力校正。一般情况下, 干燥过程的湿度不大, 除特殊需要外, 用绝干空气的比容代替湿空气的比容所造成的误差不大。即  $v_H = v_w$



5、**湿热**：即湿空气的比热 $C_H$ 。在常压下将1Kg干空气和其所携带的H Kg水汽温度升高1度所需的热量。

对空气-水系统：

$$C_H = C_g + C_v H = 1.01 + 1.88H \quad \text{KJ/Kg干气} \cdot ^\circ\text{C}$$



6、湿空气的焓：指每千克干空气以及H  
 千克水汽所具有的焓之和（KJ/Kg干气）。

取干气体的焓以0℃的气体为基准，水汽的焓以  
 0℃ 的液态水为基准。

1Kg干气体的焓为  $C_g t$

H Kg水汽的焓为  $t + r_0 H$

所以，湿空气的焓

$$I = (C_g + C_v H) t + r_0 H$$

对空气-水系统： $I = (1.01 + 1.88H) t + 2500H$

可见，湿空气的焓  $I = f(t, H)$



7、露点 $t_d$ ：不饱和空气在总压 $P$ 及湿度 $H$ ，当温度降低到某个值时，水汽分压等于该温度下的饱和蒸汽压（不与水或湿物料接触）的情况下，不断降低温度和蒸汽压，开始出现液滴，此温度称为露点温度。当达到露点时：

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

可知，在总压 $P$ 一定时，露点与水汽分压之间有单一函数关系。





8、湿球温度  $t_w$  : 即大量空气与少量水长时间接触后的水面温度。

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

对空气 - 水系统, 当被测气流的温度不太高、流速大于  $5m/s$ ,  $\alpha / k_H = 1.09 KJ / Kg \cdot$

$$t_w = t - \frac{r_w}{1.09} (H_w - H)$$

$t_w$  总是小于  $t$ ,  $t - t_w$  愈大, 传质推动力愈大。  
对饱和空气  $t_w = t$





9、绝热饱和温度  $t_{as}$ ：不饱和的空气与足量的水接触，在绝热情况下，气体逐渐增湿冷却而达到饱和状态时的温度称为绝热饱和温度。

$$t_{as} = t - \frac{r_{as}}{C_H} (H_{as} - H)$$

如果  $\alpha / K_H = C_H$ ，则  $t_w = t_{as}$ ，实验证明，当空气温度不太高、相对湿度不太低时，对空气—水系统的计算，可认为  $t_w = t_{as}$ ，而对于有机液体如乙醇、苯等与水的系统，其不饱和混合气体的因此的湿空气： $t > t_w > t_{as} > t_d$

对饱和湿空气： $t = t_w = t_{as} = t_d$



## 【例】湿空气中水的蒸汽分压

$p_w = 17.5 \text{ mmHg}$ , 总压  $P = 760 \text{ mmHg}$ , 求  $20^\circ\text{C}$  时的相对湿度  $\varphi$ ; 若空气分别被加热到  $50^\circ\text{C}$  和  $120^\circ\text{C}$ , 求  $\varphi$  值。



## 二、湿空气的湿度图及其用法

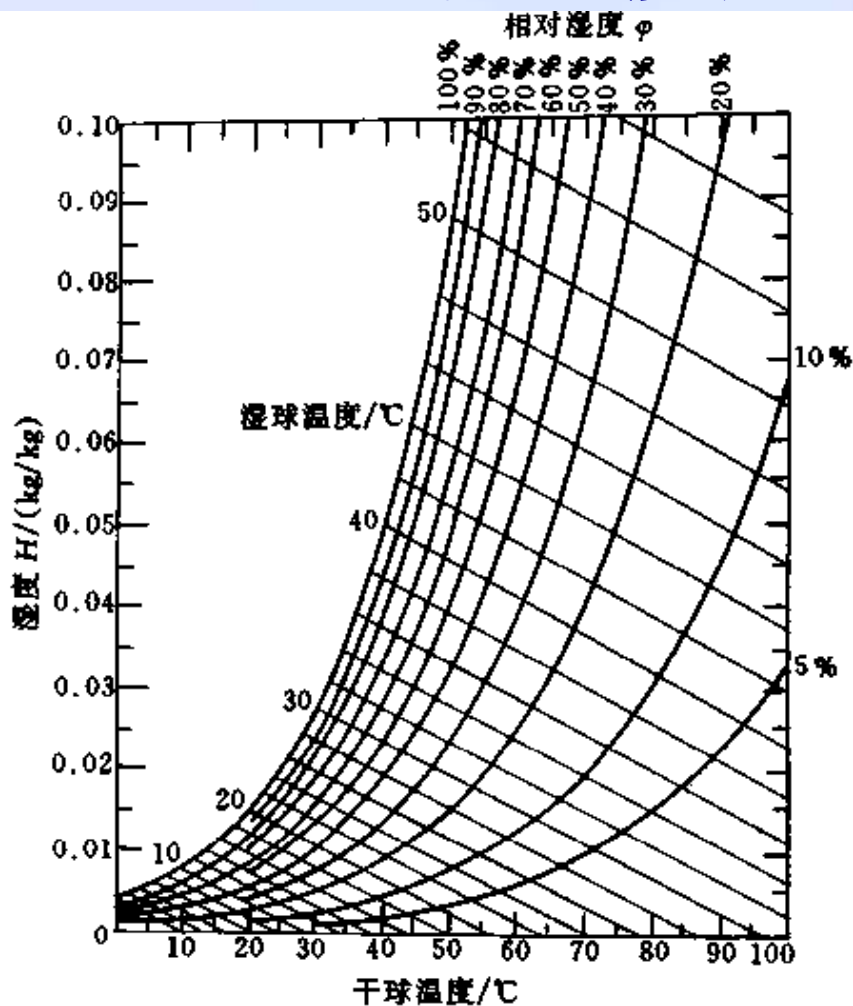


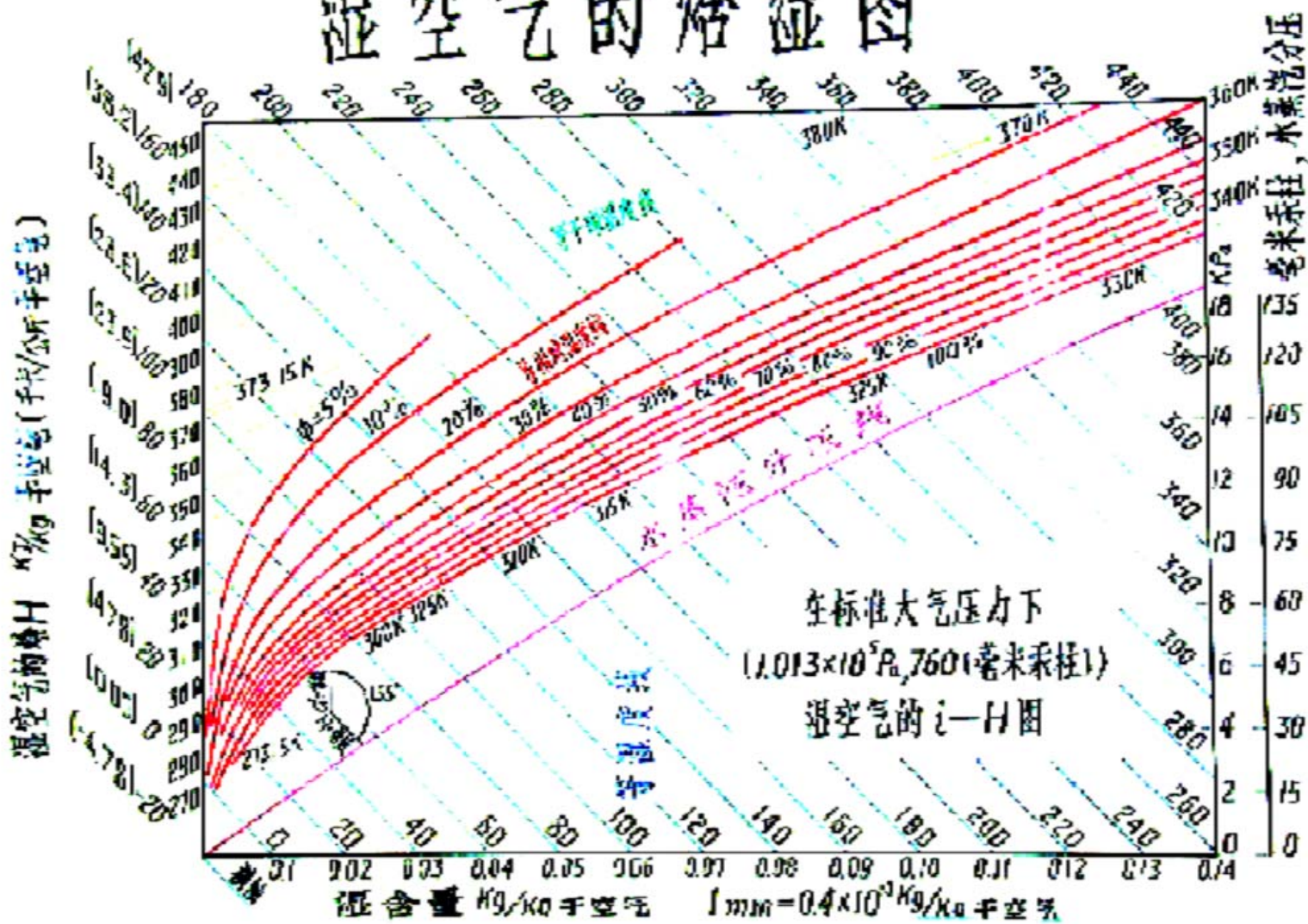
图 14-3 空气-水系统的湿度-温度图 (100kPa)

利用公式计算湿空气的各种状态参数，相当繁琐。工程上为了方便起见，将各个参数之间的关系在平面坐标上绘制成湿度图。若选不同的独立参数作为坐标，就可得到不同的湿度图。





# 湿空气的焓湿图





# 1、I--H图的结构

(1)等I线                      (2)等H线                      (3)等t线

(4)等 $\phi$ 线:当H一定时, t越高,  $\phi$ 越低, 表明湿空气的吸湿能力越强, 所以实际操作中, 湿空气进入干燥器之前须先经过预热以提高温度, 这不仅提高了湿空气的焓以使其做为载热体, 更重要的是降低了其相对湿度以作为载湿体。对干燥过程有意义的是 $\phi < 100\%$ 的不饱和区域。

(5)分压线



## 2、湿度图的应用

利用湿度图查取各参数时，必须先确定湿空气的状态。而要确定空气的状态，必须已知两个参数。

(1) 已知  $t$ ,  $t_d$

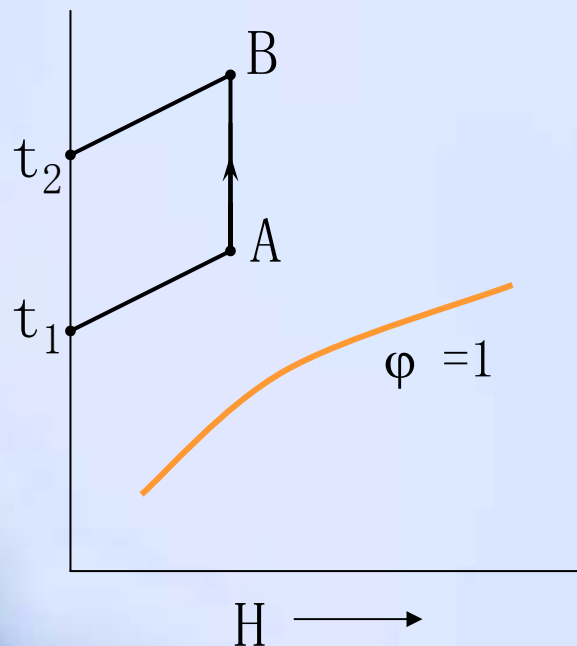
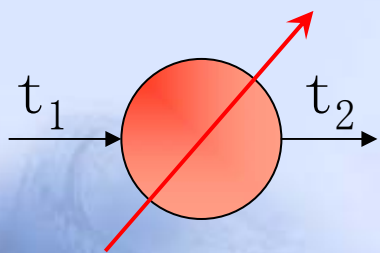
(2) 已知  $t$ ,  $t_w$

(3) 已知  $t$ ,  $\varphi$

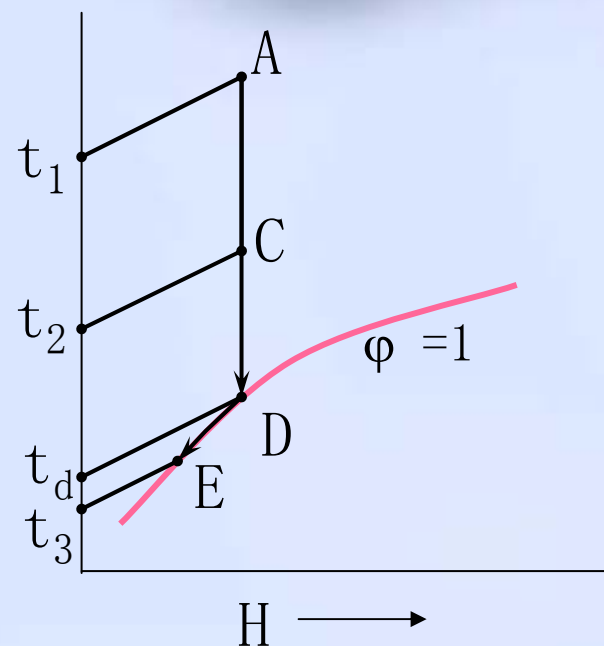


### 三、湿空气状态变化过程

1、加热和冷却过程：若不计换热器的流动阻力，湿空气的加热和冷却属等压过程。



(a) 加热



(b) 冷却

图 14-5 加热、冷却过程的图示



## 2、绝热增湿过程

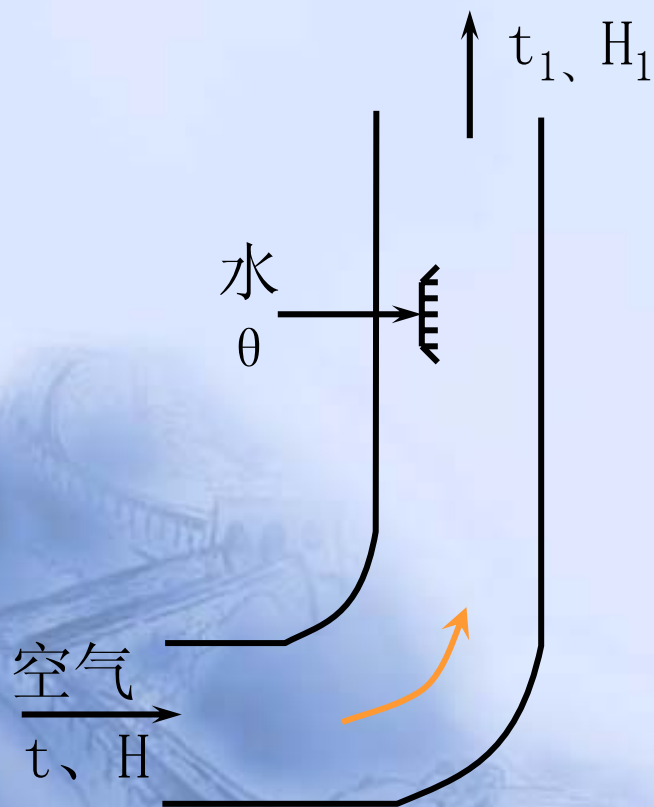
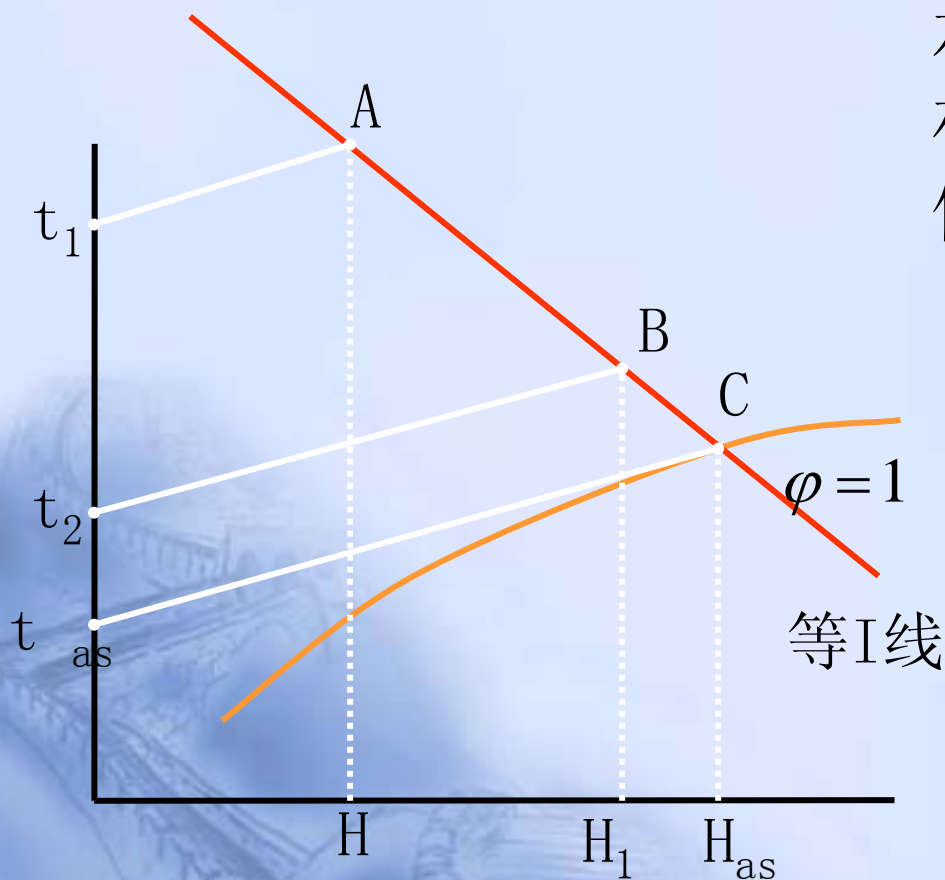


图 14-6 绝热增湿过程

如图气流给水滴热量，使水滴全部汽化混入气流中，使空气温度下降、湿度升高。假如没有热损失，空气给水的显热全部变为水分汽化的潜热返回空气，所以称为绝热增湿过程。整个过程中焓变忽略。如喷洒水量足够，两相接触充分，出口气体的湿度可达饱和值。



## 2、绝热增湿过程



水温与出口饱和空气的温度相等，即为绝热饱和温度。  
做热量衡算：

$$(H_{as} - H) r_{as} = C_H (t - t_{as})$$

$$t_{as} = t - \frac{r_{as}}{C_H} (H_{as} - H)$$

图 13-6 绝热增湿过程





## 结论:

1. 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。

2.  $t$ 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。



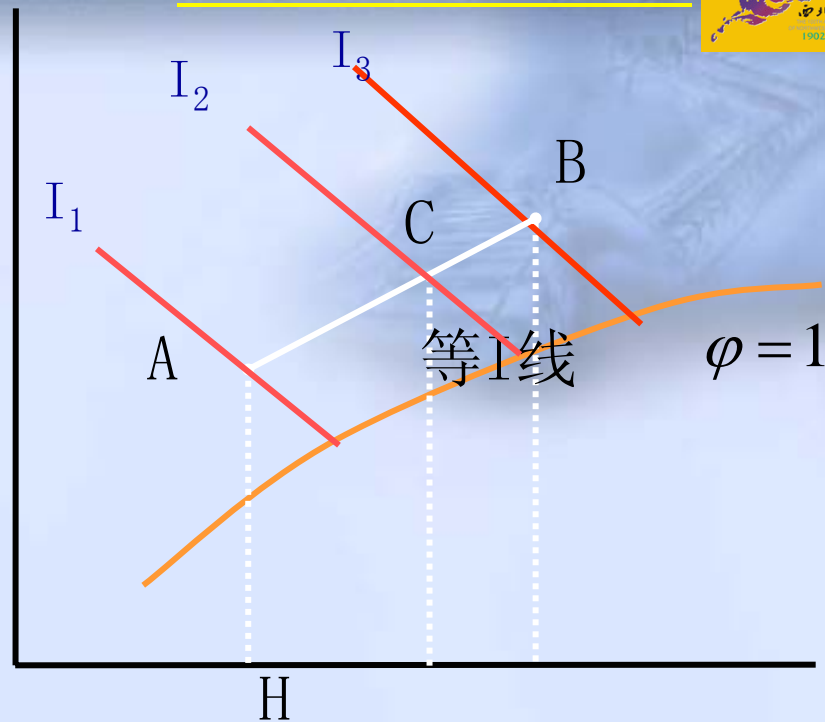
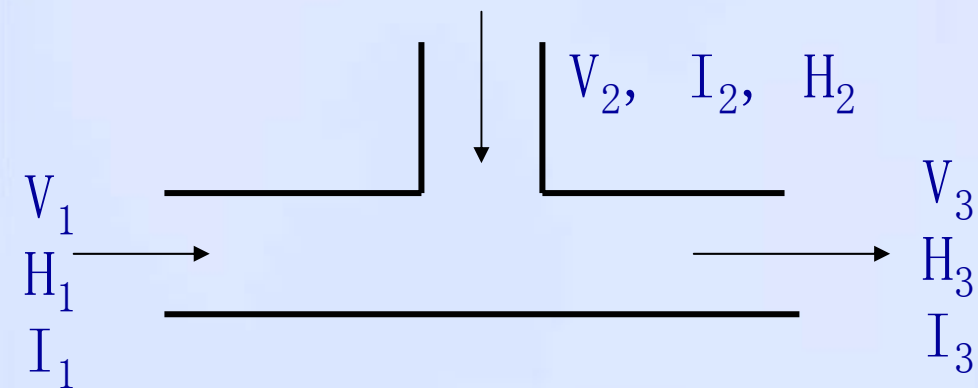
【例】在总压为101.3kpa下，空气的温度为20℃，湿度为0.01 kg水/kg干气。试求：

1.  $\phi$ 、 $t_d$ 、 $t_w$ ；
2. 总压 $P$ 与湿度 $H$ 不变，将空气温度提高至50℃时的 $\phi$ ；
3. 温度 $t$ 与湿度 $H$ 不变，将空气总压提高至120kpa时的 $\phi$ ；
4. 若总压提高至300kpa，温度仍20℃，每100m<sup>3</sup>原来的湿空气所冷凝出来的水分量？





# 3、两股气流混合



总物料衡算： $V_1 + V_2 = V_3$

水分衡算： $V_1 H_1 + V_2 H_2 = V_3 H_3$

焓衡算： $V_1 I_1 + V_2 I_2 = V_3 I_3$

混合气体的状态点C必在AB联线上，它的位置可由杠杆规则定出

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\overline{BC}}{\overline{AC}}$$



## 四、水分在气-固两相间的平衡

### 1、结合水分与非结合水分

结合水分：包括以化学力与固体相结合的结晶水分、以溶液的形态存在于固体中的水分、存在于物料细孔中并受到孔壁毛细管力作用的水分以及受吸附力而结合于固体内、外表面上的那部分水分。这种以化学力或物理化学力与固体物料相结合的水分称为结合水分。

非结合水分：机械地附着于固体表面或颗粒堆积层中的大空隙中的这部分水分称为非结合水分。

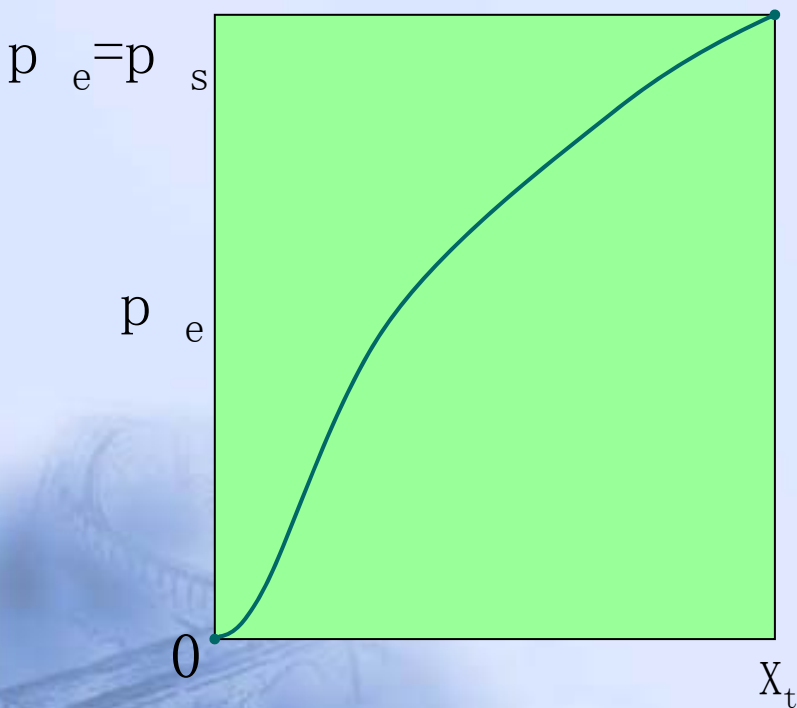
区别：非结合水的性质和纯水相同，表现为平衡蒸汽压与同温度下的水的饱和蒸汽压相同。因化学或物理化学力的作用，结合水表现的蒸汽压低于同温度下纯水的蒸汽压。





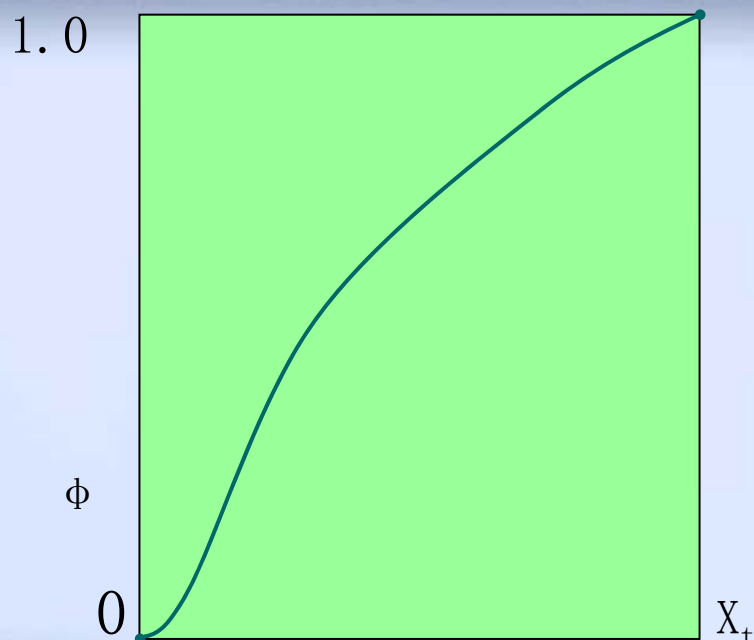
## 2、平衡蒸汽压曲线

物料中只要有非结合水存在，不论其数量多少，其平衡蒸汽压不会变化。在干燥过程中，首先除去的是非结合水，其次除去的是结合较弱的水。此时，蒸汽压逐渐开始下降。



**结论:**测定平衡蒸汽压曲线就可知道固体中有多少水分属结合水，多少水分属非结合水。





另外，可用相对湿度 $\phi$  ( $p / p_s$ ) 代替 $p_e$ 作为纵坐标。固体中只要存在非结合水，则 $\phi=1$ 。除去非结合水后， $\phi$ 逐渐下降。

$\phi$ 代替 $p_e$ 的优点是受温度影响小。

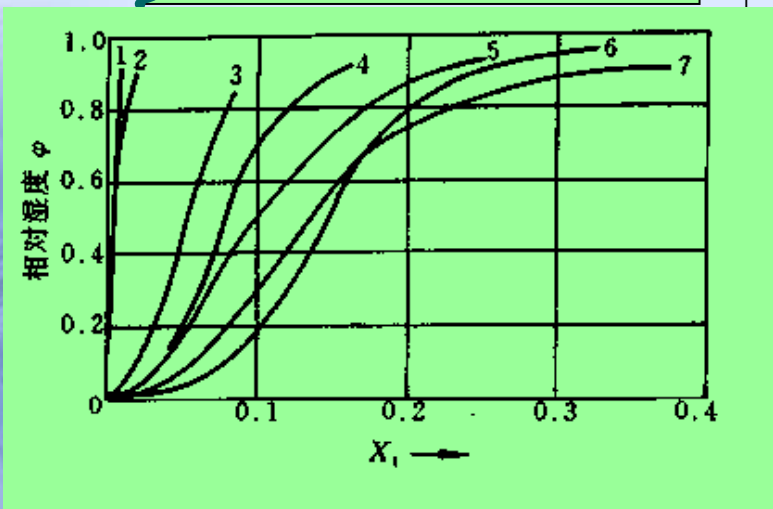


图 14-11 室温下几种物料的平衡曲线<sup>[3]</sup>

1—石棉纤维板；2—聚氯乙烯粉 (50℃)；3—木炭；  
4—牛皮纸；5—黄麻；6—小麦；7—土豆



### 3、平衡水分与自由水分

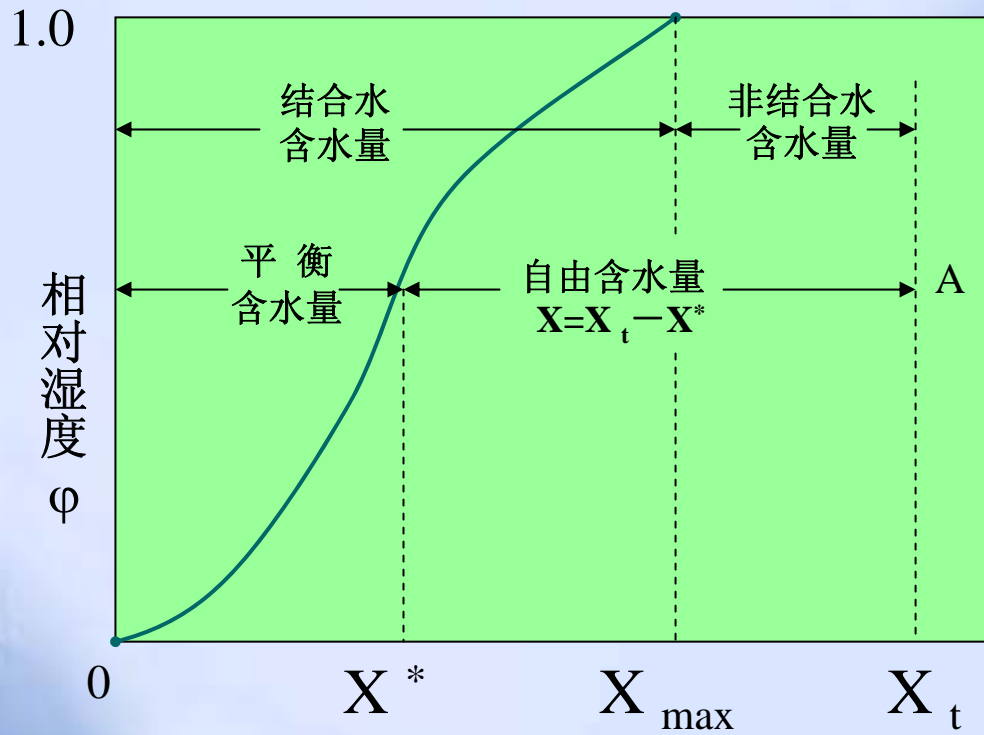


图 平衡水分与自由水分



**平衡水分**：如将某一物料与一定温度和相对湿度为 $\varphi$ 的空气接触，当物料表面所产生的水蒸汽压与空气中的水蒸汽分压相等时，物料中的水分与空气则达到平衡，物料中所含水分不再因为与空气接触时间延长而有所增减。在这个空气状态下，物料中所含水分称为该物料的平衡水分。**即为在指定空气条件下被干燥的极限。**

**自由水分**：所有能被指定状态的空气带走的水分成为自由分。

**结论**：结合水与非结合水的区分是固体物料的性质而与空气的状态无关。而平衡水分与非结合水分的区分与空气状态有关。





【例】在常压 $25^{\circ}\text{C}$ 下，水分在 $\text{ZnO}$ 与空气间的平衡关系为：相对湿度 $\phi = 100\%$ ，平衡含水量 $X^* = 0.02 \text{ kg水/kg干料}$ 相对湿度 $\phi = 40\%$ ，平衡含水量 $X^* = 0.007 \text{ kg水/kg干料}$ 现 $\text{ZnO}$ 的含水量为 $0.25 \text{ kg水/kg干料}$ ，令其与 $25^{\circ}\text{C}$ ， $\phi = 40\%$ 的空气接触，求物料的自由水分、平衡水分、结合水分和非结合水分。

