

## 湿空气的性质与湿度图

湿气体 = 绝干气体 + 湿份蒸汽

湿空气 = 绝干空气 + 水蒸气

干燥过程中，物料中的湿份汽化，气体中湿份蒸汽量增加，但绝干气体和绝干物料的量保持不变。

### 湿空气的干球温度和总压

**干球温度  $t$** ：湿空气的真实温度，简称温度/ $^{\circ}\text{C}$ 。将温度计直接置于湿空气中测得。

**系统总压  $P$** ：湿空气的总压 ( $\text{kN/m}^2$ )。干燥过程中系统总压可视为不变。

干燥操作通常在常压下进行，减压干燥适合于热敏性物料。

# 湿空气中湿份的表示方法

## 湿份分压

湿空气中湿份蒸汽的压力，用  $p$  表示 ( $\text{kN/m}^2$ )；  
当空气为湿份蒸汽所饱和时，湿份分压达到最大值，即  
系统温度下湿份的饱和蒸汽压。

## 绝对湿度(湿度) $H$

湿空气中湿份蒸汽的质量与绝干气体的质量之比。已知湿份  
蒸汽和绝干气体的摩尔数 ( $n_w, n_g$ ) 和摩尔质量 ( $M_w, M_g$ )，则

$$H = \frac{n_w M_w}{n_g M_g} = \frac{M_w}{M_g} \cdot \frac{p}{P - p} \quad \text{kg湿份蒸汽/kg绝干气体}$$

对于空气-水系统：

$$M_w = 18.02 \text{ kg/kmol}, \quad M_g = 28.96 \text{ kg/kmol}$$

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

总压一定时，气体的湿度只与湿份蒸汽的分压有关。

## 相对湿度

湿度只表示湿空气中所含湿份的绝对数，不能反映空气偏离饱和状态的程度。

**相对湿度：**一定的系统总压和温度下，空气中湿份蒸汽的分压  $p$  与系统温度下湿份的饱和蒸汽压  $p_s$  之比。

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

$\varphi$  值越低，空气偏离饱和的程度越远，吸湿潜力越大；  
 $\varphi = 100\%$  时， $p = p_s$ ，空气被湿份蒸汽所饱和，不能再吸湿

**对于空气-水系统：**

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

湿份为水时，可按下式由系统温度  $t$  计算饱和蒸汽压

$$p_s = \frac{2}{15} \exp\left(18.5916 - \frac{3991.11}{t + 233.84}\right) \quad \text{可见 } \varphi = f(H, t)$$

$p_s$  随温度的升高而增加， $H$  不变， $\uparrow t$ ， $\varphi \downarrow$ ，故预热空气能增强干燥介质的吸湿能力。

保持  $H$  不变而降低  $t$ ， $\varphi \uparrow$ ，空气趋近饱和状态。

当空气达到饱和状态(露点)而继续冷却时，空气中的湿份将呈液态析出，此时空气中的湿度  $H \downarrow$ 。

## 湿比容 $v_H$ 或干基湿比容 ( $\text{m}^3/\text{kg}$ 绝干空气)

1kg 绝干空气及其所含水份蒸汽所共有的体积

$$v_H = f(H, t)$$

$$v_H = \left( \frac{1}{29} + \frac{H}{18} \right) \times 22.4 \times \frac{t + 273}{273} \times \frac{101.325}{P} = (0.287 + 0.462H) \frac{t + 273}{P}$$

常压下 ( $P=101.325\text{kN/m}^2$ ):  $v_H = (0.002835 + 0.004557H)(t + 273)$

## 湿比热 $c_H$ 或干基湿比热 $\text{J}/(\text{kg}$ 绝干空气 $\cdot^\circ\text{C}$ )

1kg 绝干空气及所含水份蒸汽温度升高  $1^\circ\text{C}$  所需要的热量

$$C_H = C_g \times 1 + C_w \times H$$

式中:  $C_g$  — 绝干空气的比热,  $\text{J}/(\text{kg}$ 绝干空气  $\cdot^\circ\text{C})$ ;  
 $C_w$  — 水份蒸汽的比热,  $\text{J}/(\text{kg}$ 水份蒸汽  $\cdot^\circ\text{C})$ 。

$$C_g = 1.005 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot^\circ\text{C}), \quad C_w = 1.884 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot^\circ\text{C})$$

$$C_H = 1.01 + 1.88H$$

## 湿焓 $i_H$ 或干基湿焓 (kJ/kg绝干气体)

1kg 绝干空气及所含水汽所具有焓的总和

$$I_H = I_g + HI_w$$

由于焓是相对值，计算焓值时必须规定基准状态和基准温度，若取 $0^\circ\text{C}$ 下的绝干空气和液态湿份的焓为零，则

$$I_H = (C_g + HC_w)t + r_0H = C_H t + r_0H$$

显热项

汽化潜热项

对于空气-水系统：

$$\begin{aligned} I_H &= (1.005 + 1.884H)t + 2491.27H \\ &= (1.01 + 1.88H)t + 2490H \end{aligned}$$

$$i_H = f(H, t)$$

**【例11-1】** 常压下某湿空气的温度为20℃，湿度为0.0147kg/kg绝干气，求：(1)湿空气的相对湿度；(2)湿空气的比体积；(3)湿空气的比热容；(4)湿空气的焓。若将上述空气加热到50℃，再分别求上述各项。

20℃的性质：

(1)相对湿度

从附录查出20℃时水蒸气的饱和蒸气压 $p_s=2.3346\text{kPa}$ 。则相对湿度：

$$H = \frac{0.622\varphi p_s}{p - \varphi p_s} \quad 0.0147 = \frac{0.622 \times 2.3346\varphi}{101.33 - 2.3346\varphi} \quad \text{解得： } \varphi=1=100\%$$

(2)比体积

该空气已被水汽饱和，不能做干燥介质用。

$$\begin{aligned} v_H &= (0.772 + 1.244H) \times \frac{273+t}{273} \times \frac{1.0133 \times 10^5}{p} \\ &= (0.772 + 1.244 \times 0.0147) \times \frac{273+20}{273} \quad v_H = 0.848 \text{m}^3 \text{湿空气/kg绝干气} \end{aligned}$$

(3)比热容

$$C_H = 1.01 + 1.88H \quad \text{或} \quad C_H = 1.01 + 1.88 \times 0.0147 = 1.038 \text{ kJ/ (kg绝干气} \cdot \text{℃)}$$

(4)焓

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

$$\text{或} \quad I = (1.01 + 1.88 \times 0.0147) \times 20 + 2490 \times 0.0147 = 57.36 \text{ kJ/kg绝干气}$$

## 50℃的性质:

### (1)相对湿度

从附录查出50℃时水蒸气的饱和蒸气压 $p_s=12.340\text{kPa}$ 。当空气从20℃加热到50℃时，湿度没有变化，仍为0.0147 kg/kg绝干气，故

$$0.0147 = \frac{0.622 \times 12.340 \varphi}{101.33 - 12.340 \varphi} \quad \text{解得: } \varphi = 0.1892 = 18.92\%$$

结果显示：湿空气被加热后湿度不变，相对湿度下降了。所以在干燥操作中，先将空气加热再送入干燥器，目的是降低相对湿度以提高吸湿能力。

### (2)比体积

$$v_H = (0.772 + 1.244 \times 0.0147) \times \frac{273 + 50}{273} = 0.935 \text{m}^3 \text{湿空气/kg绝干气}$$

湿空气被加热后湿度不变，但体积膨胀，比体积加大。

常压下湿空气可视为理想气体，故50℃时的体积可用下式计算

$$v_H = 0.848 \times \frac{273 + 50}{273 + 20} = 0.935 \text{m}^3 \text{湿空气/kg绝干气}$$

### (3)比热容

湿空气的比热容只是湿度的函数，因此20℃与50℃时的湿空气比热容相同。

### (4)焓

$$I = (1.01 + 1.88 \times 0.0147) \times 50 + 2490 \times 0.0147 = 88.48 \text{ kJ/kg绝干气}$$

湿空气被加热后湿度没变化，但温度增高，焓值加大。



# 空气的湿球温度

## 湿球温度的测定

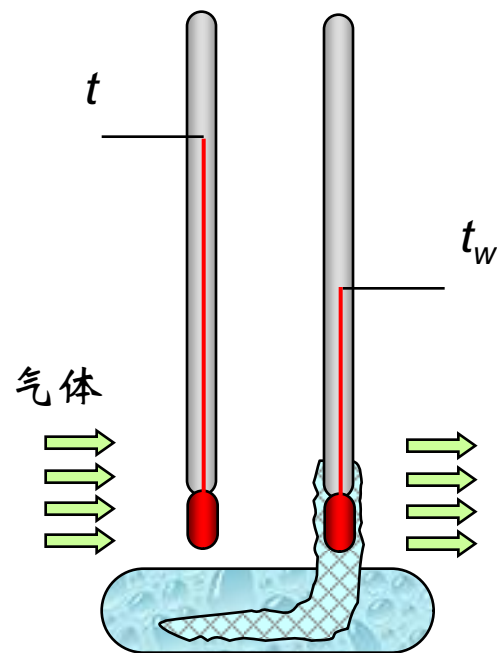
当热、质传递达平衡时，空气对水的供热速率恰等于水汽化的需热速率时

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

测定湿球温度的条件是保证纯对流传热，即气体应有较大的流速和不太高的温度，**否则**，热传导或热辐射的影响不能忽略，测得的湿球温度会有较大的误差。

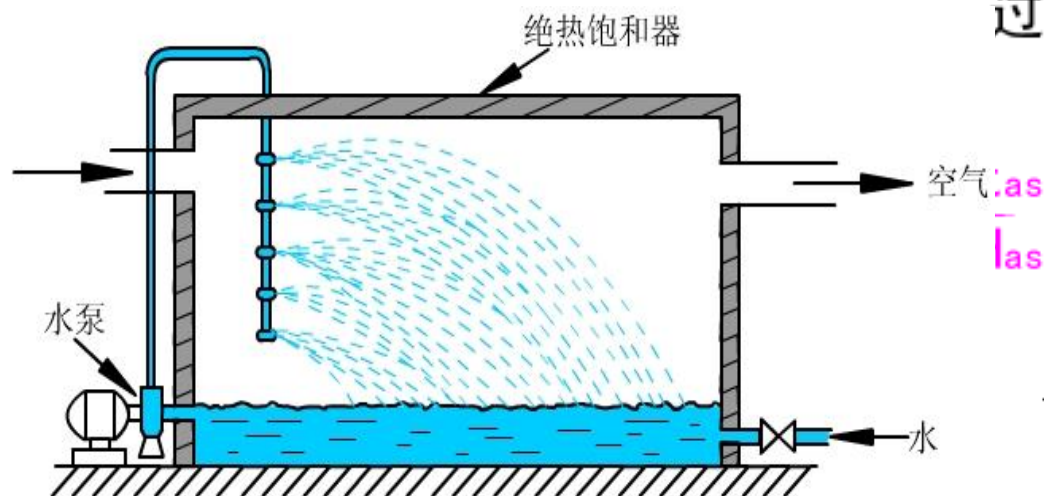
通过测定气体的干球温度和湿球温度，可以计算气体的湿度

饱和气体： $H = H_w$ ， $t_w = t$ ，饱和气体的干、湿球温度相等  
不饱和气体： $H < H_w$ ， $t_w < t$ 。



## 绝热饱和温度 $t_{as}$ :

总压一定，湿气体绝热降温增湿至饱和状态的温度。



过程实质:

液体温度不变，气体放出的显热以潜热的形式返还气体。

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

$t_{as} = f(t, H)$  是气体状态函数

对空气-水系统:  $t_w \approx t_{as}$ 。

露点  $t_d$ :

等压降温至饱和时对应的温度。是测量湿气体分压  $p$  常用的方法，

$$p = p_s(t_d)$$

**湿球温度和绝热饱和温度**的物理意义完全不同。

**湿球温度**是大量空气与少量水经长时间绝热接触后达到的稳定温度，湿空气在此过程中 $t$ 、 $H$ 均不变（因而焓不变）；达到湿球温度时，传质、传热仍在进行，过程处于动态平衡。

**绝热饱和温度**是少量空气与大量水经过足够长时间绝热接触后达到的稳定温度，湿空气在此过程中增湿、降温，但焓不变。达到绝热饱和温度时，没有净的质量、热量传递进行，过程处于热力学平衡。

**干球温度、湿球温度、绝热饱和温度、露点的关系：**

不饱和空气  $t > t_w (\approx t_{as}) > t_d$

饱和空气  $t = t_w = t_d$

**【例11-2】**常压下湿空气的温度为 $30^{\circ}\text{C}$ 、湿度为 $0.02403\text{kg}$ 水汽/ $\text{kg}$ 绝干气，试计算湿空气的相对湿度 $\varphi$ 、露点 $t_d$ 、绝热饱和温度 $t_{as}$ 、湿球温度 $t_w$ 。

### 相对湿度 $\varphi$

$$H = 0.622 \frac{p_w}{p - p_w} \rightarrow 0.02403 = 0.622 \frac{p_w}{101.3 - p_w} \rightarrow p_w = 3.768\text{kPa}$$

查得 $30^{\circ}\text{C}$ 时水的饱和蒸气压 $p_s = 4.242\text{kPa}$ ，故  $\varphi = \frac{p_w}{p_s} \times 100\% = \frac{3.768}{4.242} \times 100\% = 88.8\%$

### 露点 $t_d$

因 $p_w = p_d = 3.768\text{kPa}$ ，查水的饱和蒸气压表，得饱和温度 $27.5^{\circ}\text{C}$ ，此温度即为露点

**绝热饱和温度 $t_{as}$ 和湿球温度 $t_w$**  (对空气而言，两者近似相等)

因为 $H_{as}$ 与 $t_{as}$ 有关，故需试差。又 $t_d \leq t_{as} \leq t$ ，故设 $t_{as}$ 的初始值为

$$t_{as1} = \frac{1}{2}(t_d + t) = \frac{1}{2}(27.5 + 30) = 28.75$$

由 $t_{as1}$ 查取 $r_{as1} = 2426.3\text{kJ/kg}$ ， $C_H = 1.01 + 1.88H = 1.01 + 1.88 \times 0.02403 = 1.055\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，则

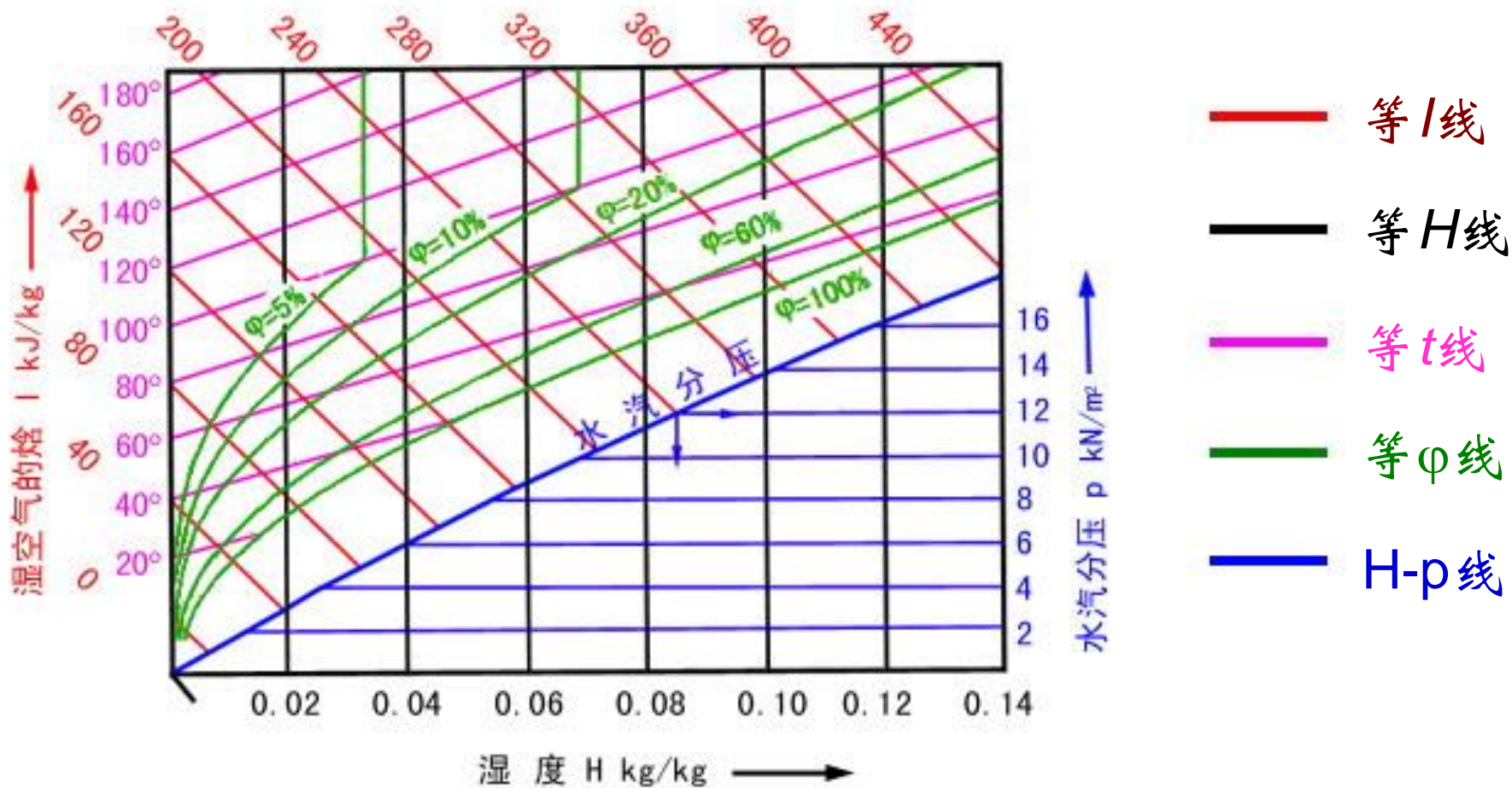
$$H_{as1} = (t - t_{as1}) \frac{C_H}{r_{as1}} + H = (30 - 28.75) \times \frac{1.055}{2426.3} + 0.02403 = 0.02457\text{kg水汽/kg绝干气}$$

$$H_{as} = 0.622 \frac{p_{as}}{p - p_{as}} \rightarrow p_{as1} = \frac{H_{as1} p}{H_{as1} + 0.622} \rightarrow p_{as1} = 3.85\text{kPa} \xrightarrow{\text{水饱和蒸汽压表}} t_{as2} = 28.31^{\circ}\text{C}$$

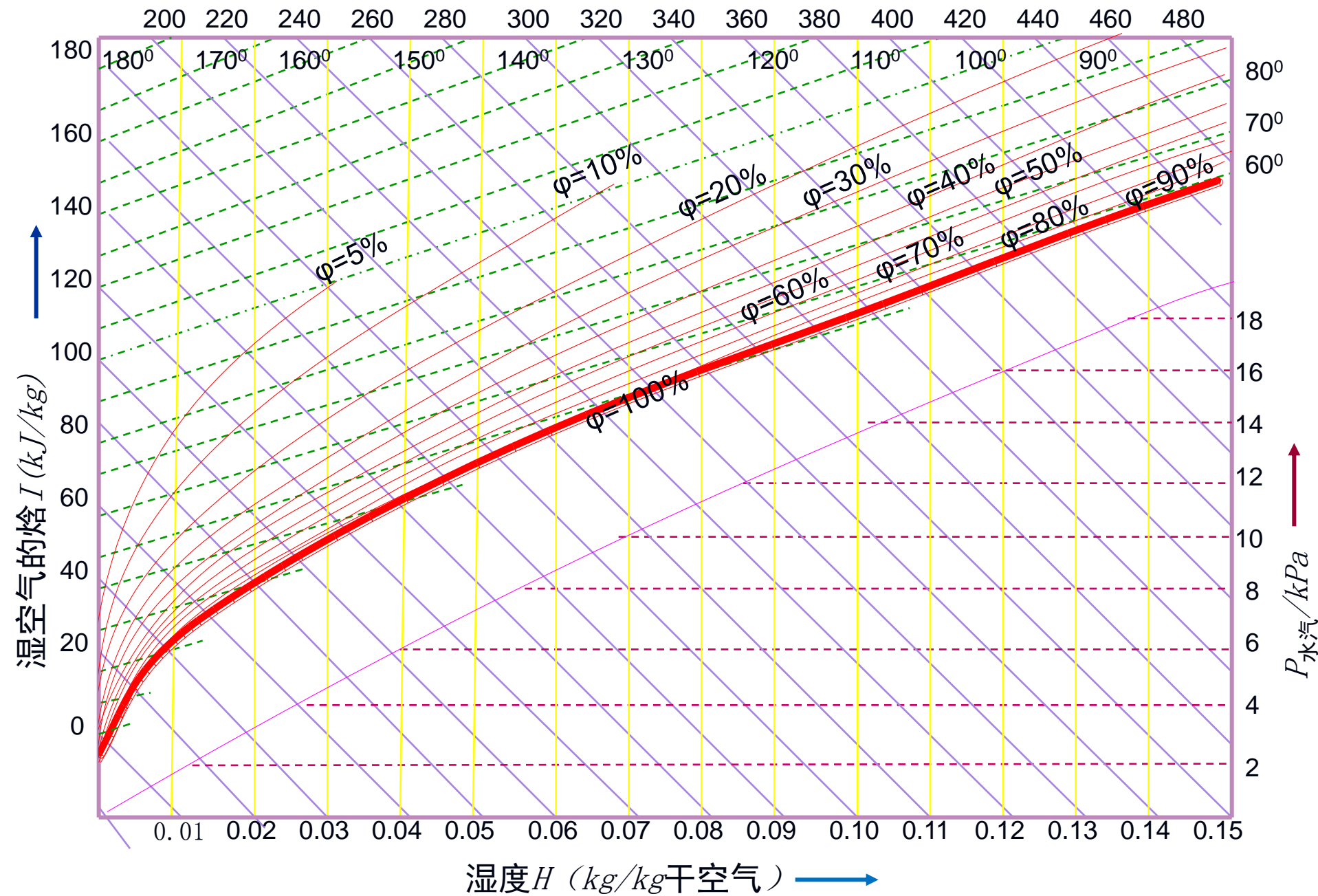
试算成功。故 $t_{as} = 28.4^{\circ}\text{C}$ 。

$$p_{as2} = 3.88\text{kPa}, t_{as3} = 28.44^{\circ}\text{C} \leftarrow H_{as2} = 0.02476\text{kg水汽/kg绝干气} \leftarrow r_{as2} = 2427.1\text{kJ/kg}$$

# 空气湿度图：I~H图



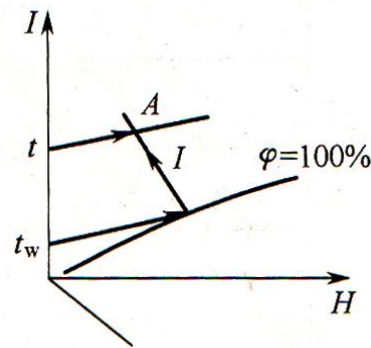
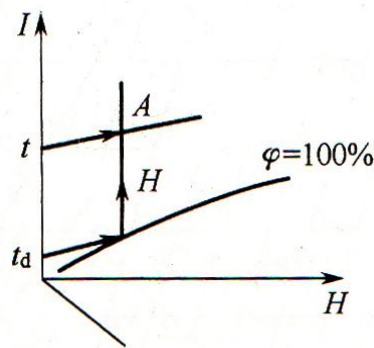
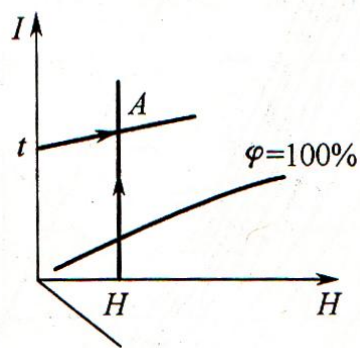
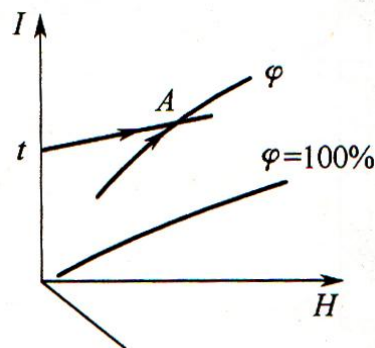
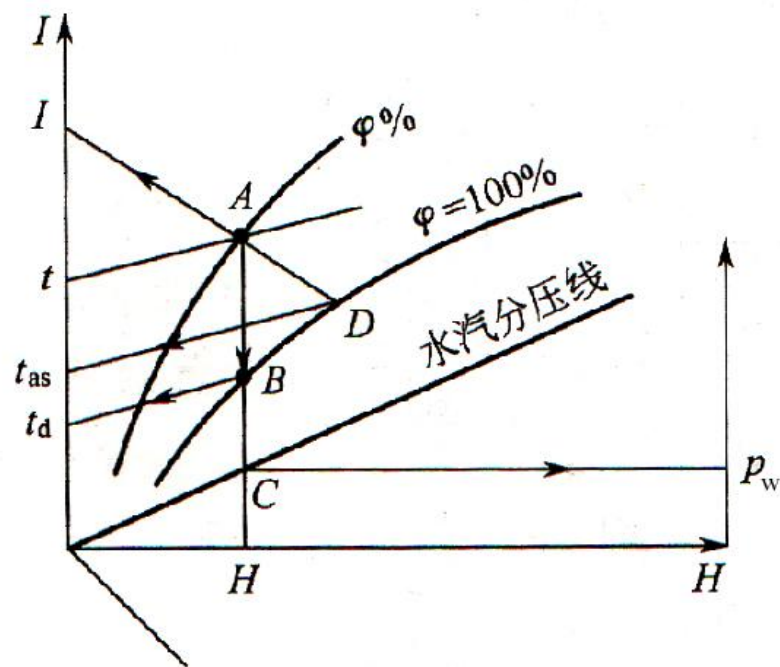
# 空气的湿-焓图



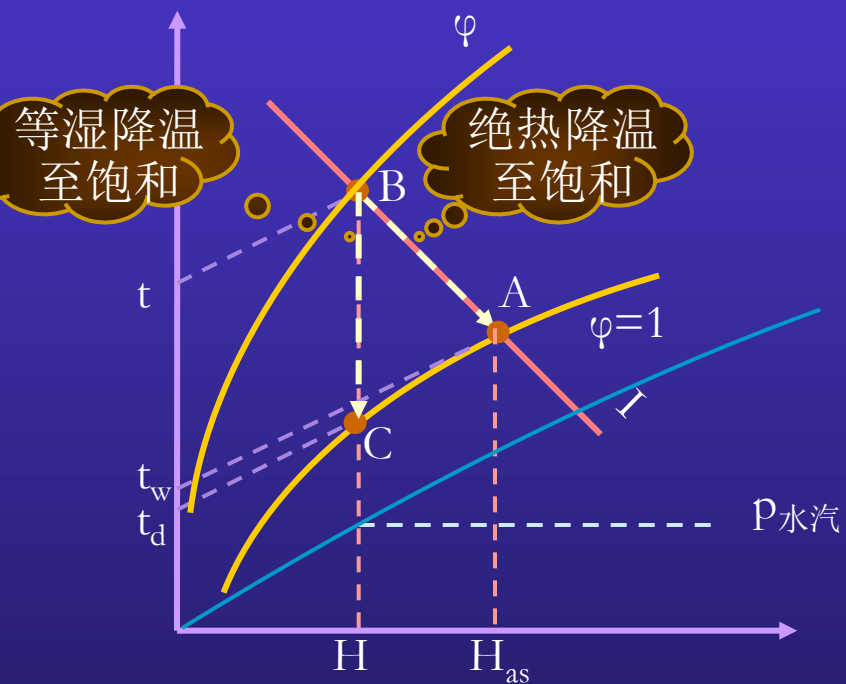
## 空气 $I-H$ 图的用法

湿度图中的任意点均代表某一确定的湿空气状态，只要已知任意两个独立参数，即可在  $I-H$  图中定出其状态点，由此可查得湿空气其他性质。

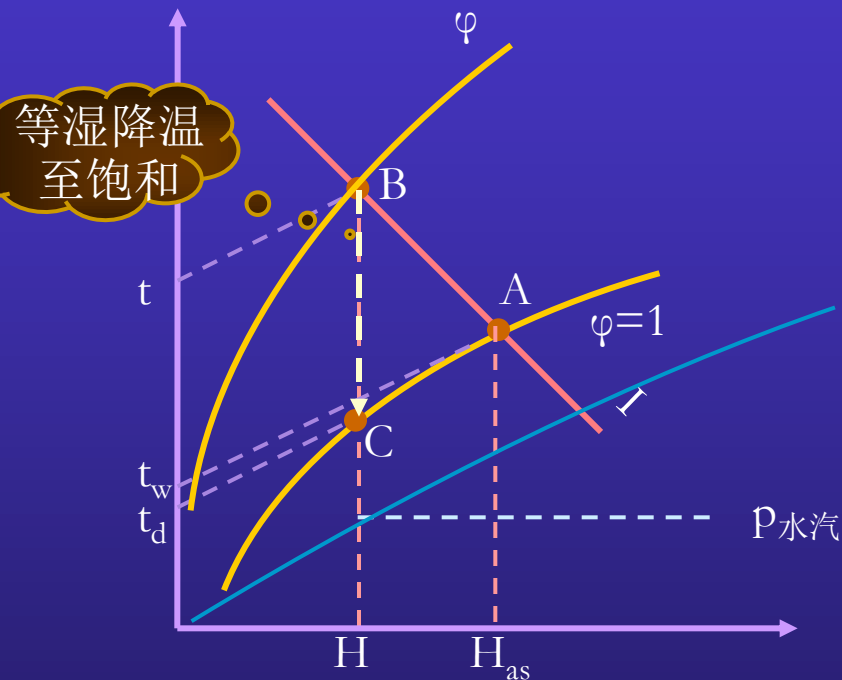
部分湿空气状态参数具有关联，例如  $t_d-H$ 、 $p_w-H$ 、 $t_w$ （或  $t_{as}$ ）- $I$  均彼此不独立，在  $I-H$  图中无法确定其状态点。



# I-H图的用法

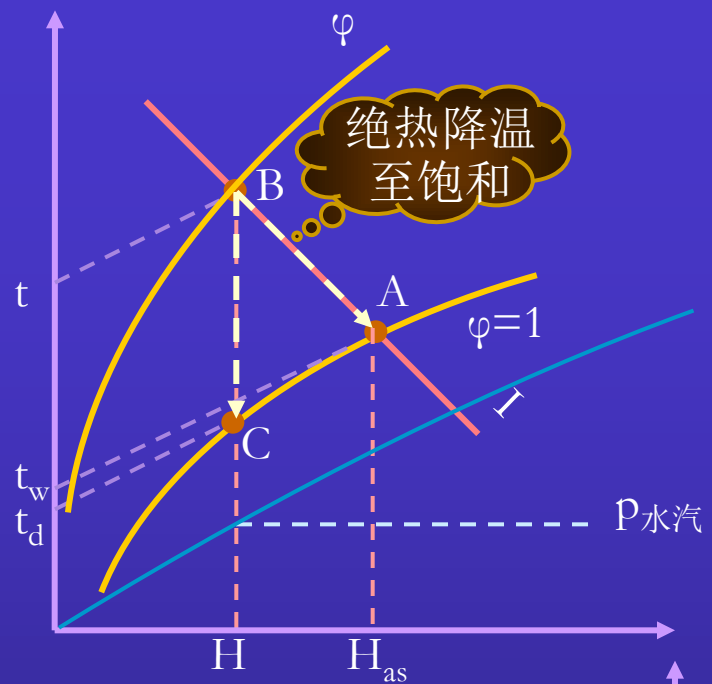


(已知 $t$ 、 $H$ )

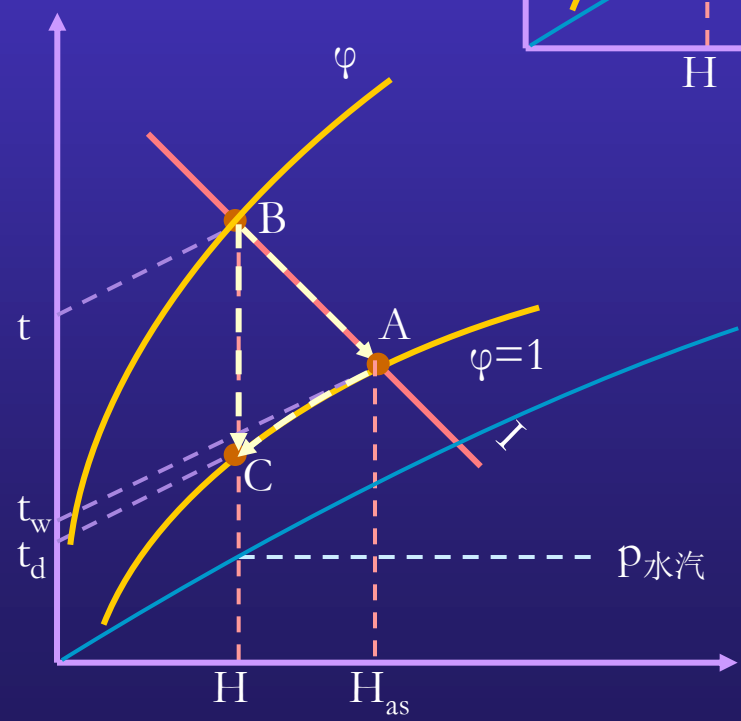


(已知 $t$ 、 $t_w$ )

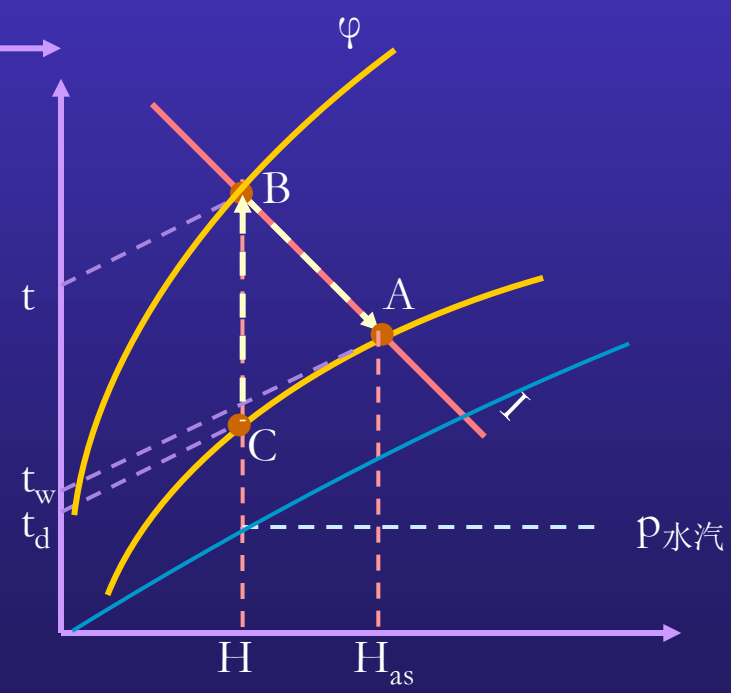




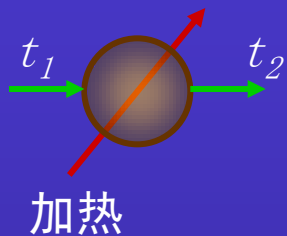
(已知  $t$ 、 $t_d$ )



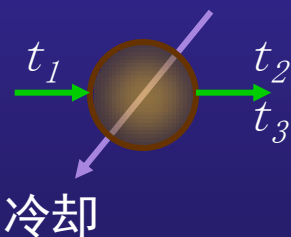
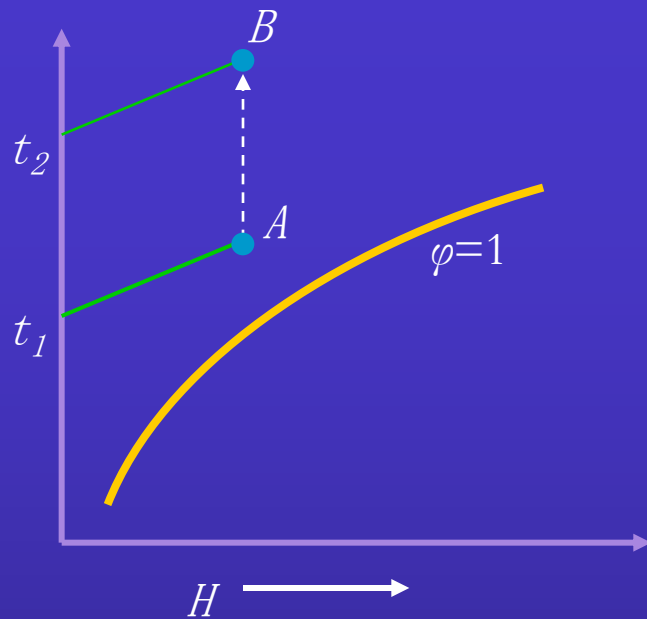
(已知  $t_d$ 、 $t_w$ )



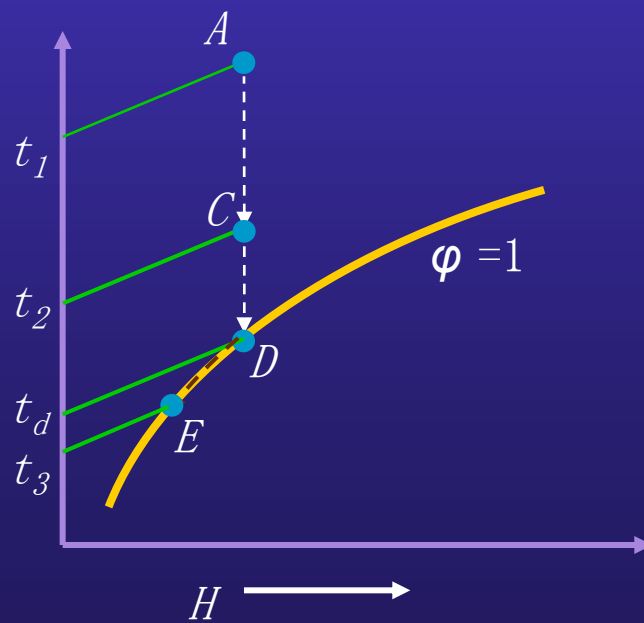
(已知  $t$ 、 $p_{\text{水汽}}$ )



加热过程示意

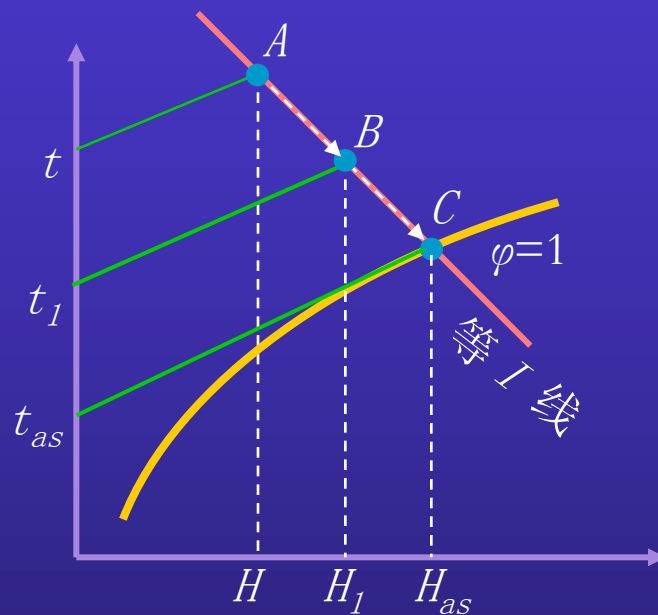


冷却过程示意



# 绝热增湿过程

一般忽略绝热增湿过程的焓增量，将其视为等焓过程。



# 两股气流的混合

物料衡算:

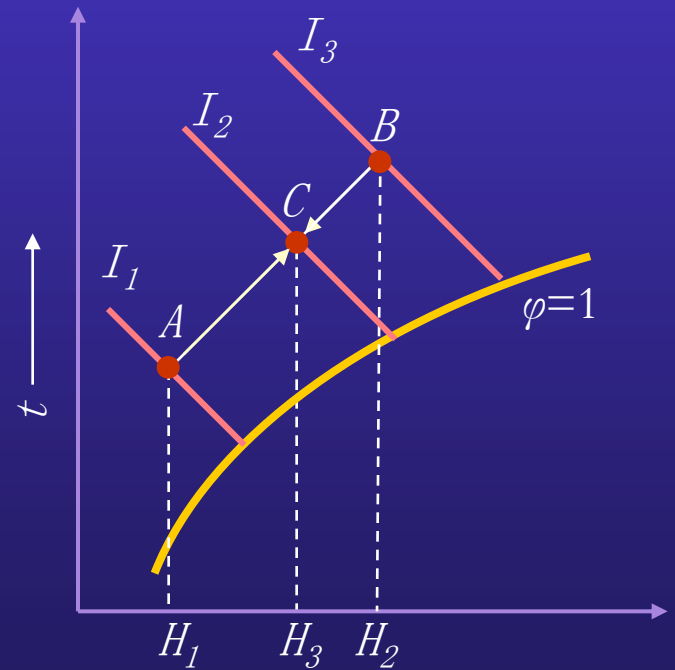
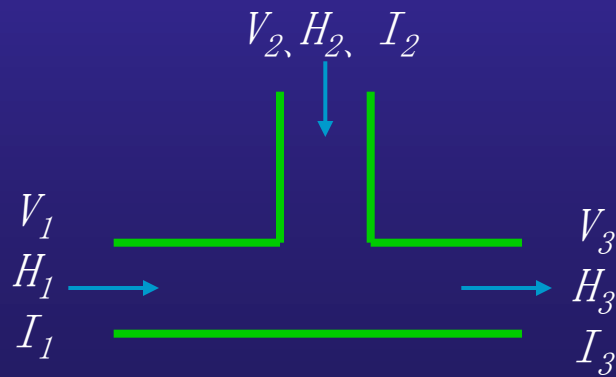
$$\text{干气 } V_1 + V_2 = V_3$$

$$\text{水分 } V_1 H_1 + V_2 H_2 = V_3 H_3$$

$$\text{焓衡算: } V_1 I_1 + V_2 I_2 = V_3 I_3$$

显然, 混点C在A、B联线上,

且符合杠杆规则。



**【例11-3】** 总压101.3kPa时，用干-湿球温度计测得湿空气的 $t=20^{\circ}\text{C}$ ， $t_w=14^{\circ}\text{C}$ ，试在 $I-H$ 图中查取其它性质：(1)湿度 $H$ ；(2)水汽分压 $p_w$ ；(3) $\varphi$ ；(4)焓 $I$ ；(5) $t_d$ 。

如图所示，作 $t_w=14^{\circ}\text{C}$ 的等温线与 $\varphi=100\%$ 相交于 $D$ 点，再过 $D$ 点作等焓线与 $t=20^{\circ}\text{C}$ 的等温线相交于 $A$ 点，则 $A$ 点即为该湿空气的状态点。

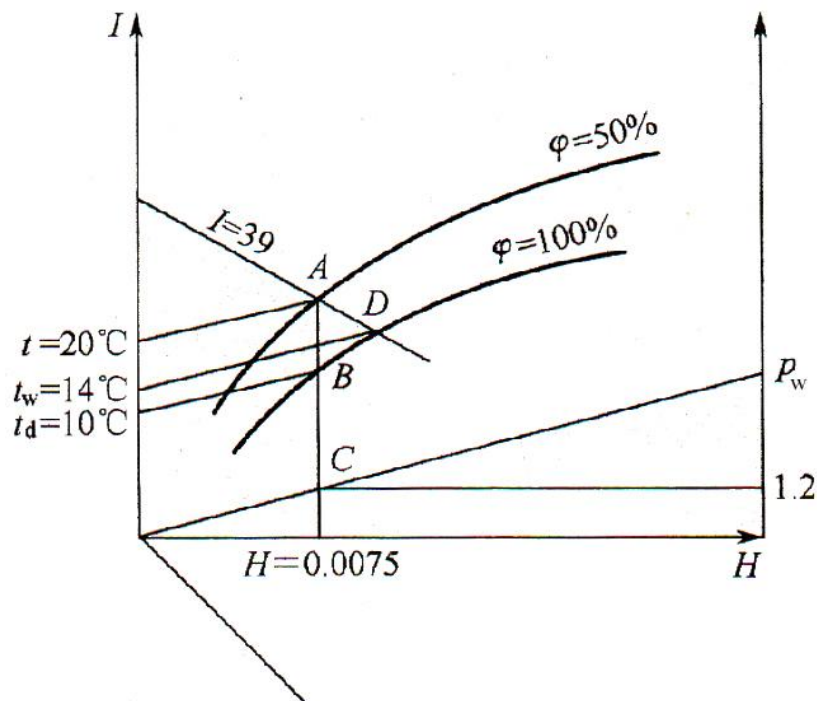
(1)  $H$  由 $A$ 点沿等 $H$ 线向下与辅助水平轴交点读数为 $H=0.0075\text{kg/kg}$ 绝干气。

(2)  $p_w$  由 $A$ 点沿等 $H$ 线与水汽分压线相交于 $C$ 点，在右纵坐标上读出水汽分压值 $p_w=1.2\text{kPa}$ 。

(3)  $\varphi$  由 $A$ 点所在的等 $\varphi$ 线，读得相对湿度 $\varphi=50\%$ 。

(4)  $I$  通过 $A$ 点沿等焓线与纵轴相交，读出焓值 $I=39\text{kJ/kg}$ 绝干气。

(5)  $t_d$  由 $A$ 点沿等湿线向下与 $\varphi=100\%$ 相交于 $B$ 点，由通过 $B$ 点的等 $t$ 线得 $t_d=10^{\circ}\text{C}$ 。



图中显示：不饱和湿空气的 $t$ 、 $t_w$ 及 $t_d$ 的大小关系。