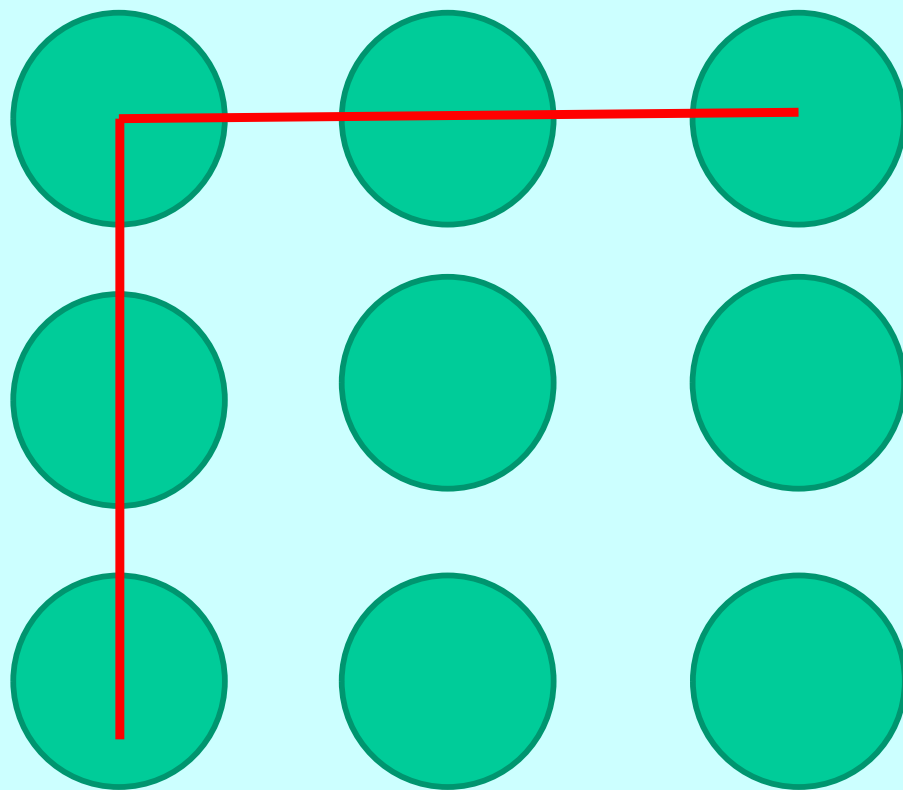
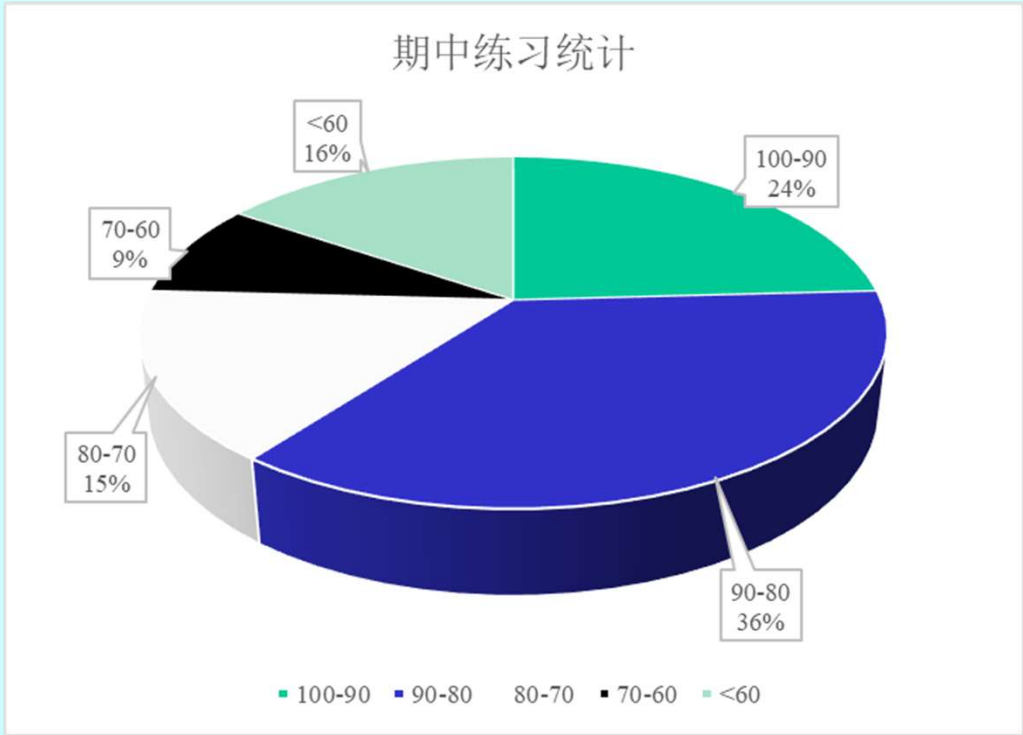


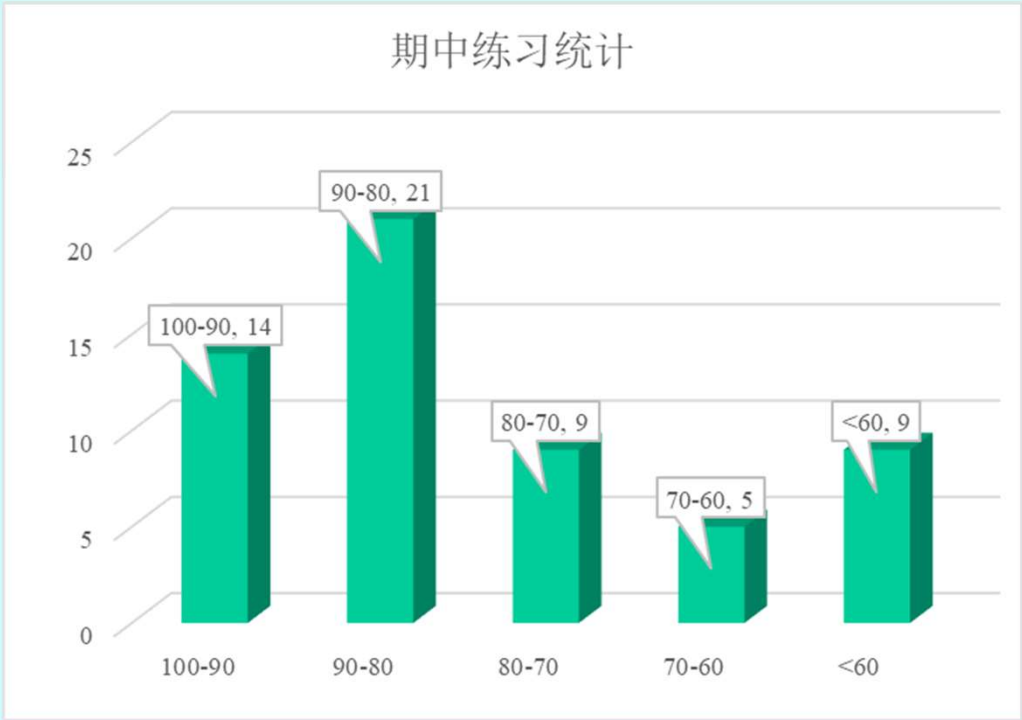
# 手势签到



# 期中练习情况



分数段	人数	比例/%
100-90	14	24
90-80	21	36
80-70	9	16
70-60	5	9
<60	9	16



# 第13章 热质同时传递的过程

## 13.1概述

### (1) 过程目的:

①传热，伴有传质

如热水在空气中冷却

②传质，伴有传热

如气体增湿过程

(2) 原理：温度差、分压差

(3) 实施方法：气液直接接触

(4) 操作费用：热量(汽化、冷凝)  
输送机械能

## 问题1

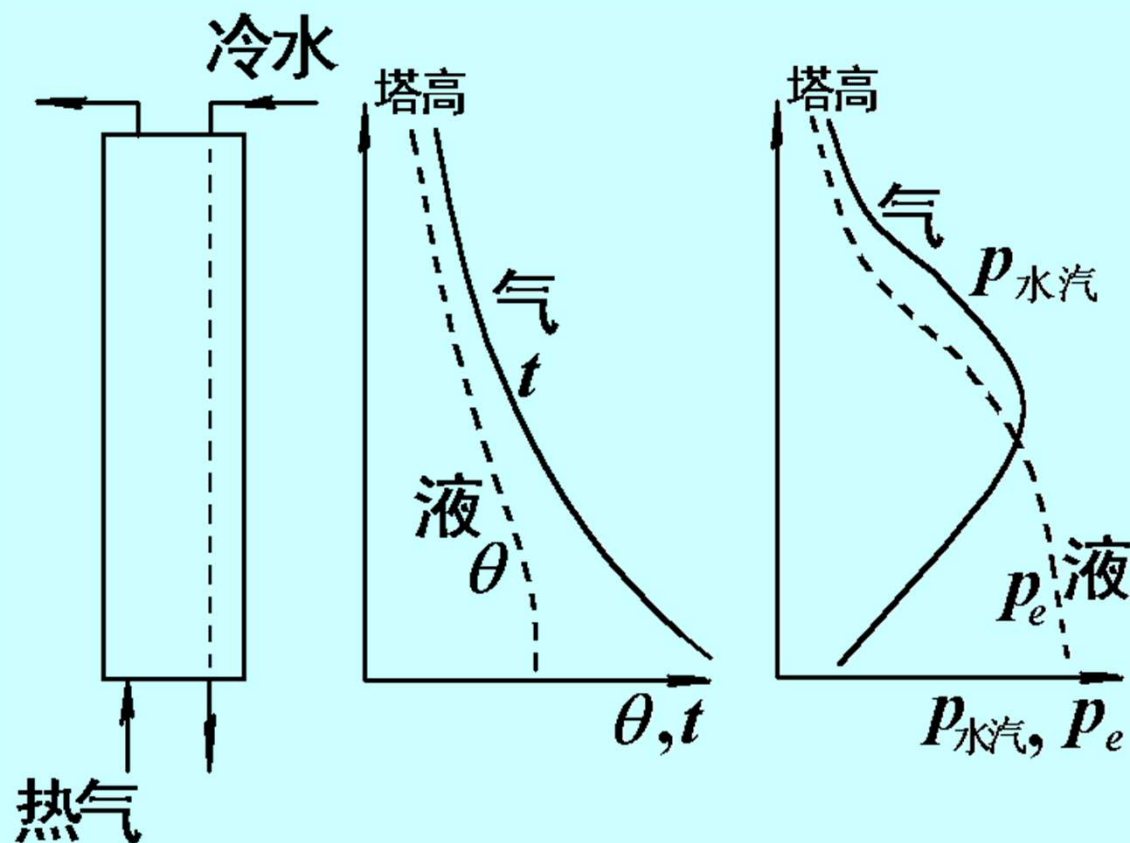
如何理解热质同时传递的过程：

- ① 传热方向或传质方向可能发生逆转
- ②  $\theta=t, p_{\text{水汽}}=p_e$ 不代表极限状况

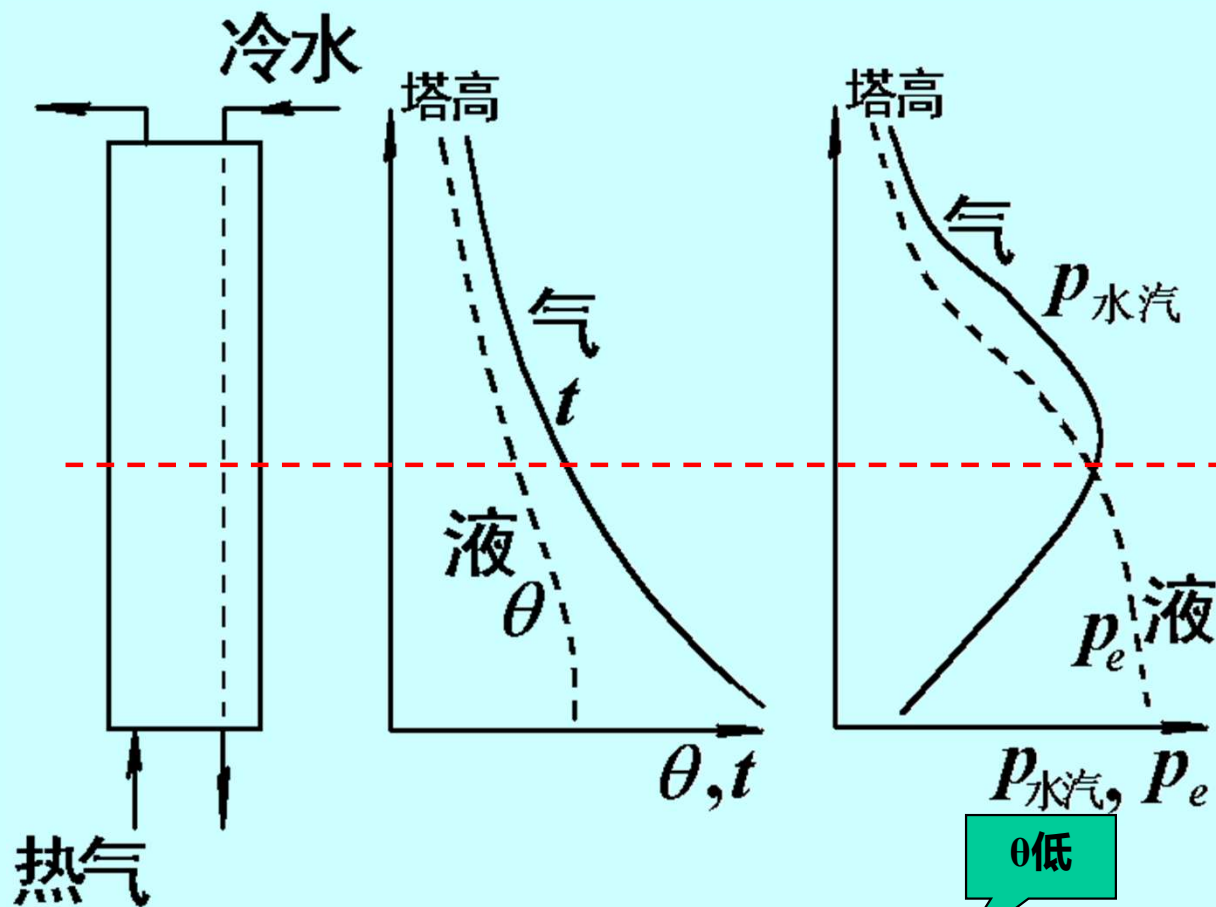
## (5) 过程新特点:

- ① 传热方向或传质方向可能发生逆转
- ②  $\theta=t, p_{\text{水汽}}=p_e$  不代表极限状况

### 热气体直接水冷



# 热气体直接水冷过程分析



$$p_e = f(\theta)$$

**塔上部，热质同向进行，**

$$Q_{\text{液}} = Q_{\text{气相显热}} + Q_{\text{水汽冷凝潜热}}$$

**塔下部，热质反向进行，**

液相获得气相显热，  
又以潜热形式随  
汽化的水分返回气相。

**塔上部， $t > \theta$ ，** 气体  $\xrightarrow{q}$  液体

$p_e$  (水的饱和蒸汽压) <  $p_{\text{水汽}}$  (气相中水汽分压)，气相  $\xrightarrow{\text{水}}$

$\theta$ 低

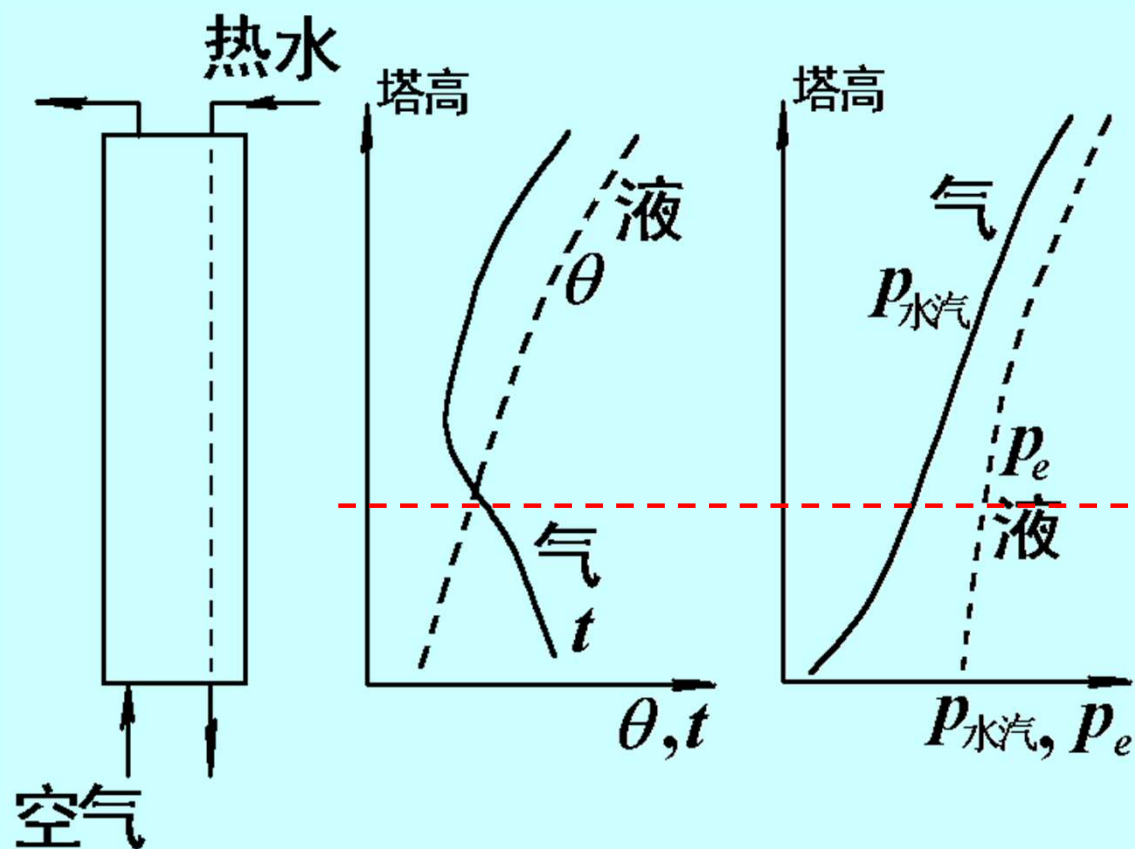
$\theta$ 升高

水汽  
冷凝

液相  
蒸发

**塔下部， $t > \theta$ ，** 气体  $\xrightarrow{q}$  液体  $p_e$  (水的饱和蒸汽压) >  $p_{\text{水汽}}$  (气相中水汽分压)，液相  $\xrightarrow{\text{水}}$  气相

# 凉水塔



$$p_e = f(\theta)$$

**塔上部，热质同向进行。**

$$p_e > p_{\text{水汽}}$$

**液相汽化转向气相**

**$\theta > t$ ，液相热水传热给空气**

$$Q_{\text{气}} = Q_{\text{液相显热}} + Q_{\text{汽化潜热}}$$

**热水 $\theta$ 下降很快**

**塔下部，热质反向进行。**

**空气干燥，水发生较为剧烈汽化**

$$p_e > p_{\text{水汽}}$$

**液相汽化转向气相**

**热水汽化所需潜热使得 $\theta \downarrow$**

$$\theta < t, \quad \text{气} \xrightarrow{Q_{\text{显热}}} \text{液}$$

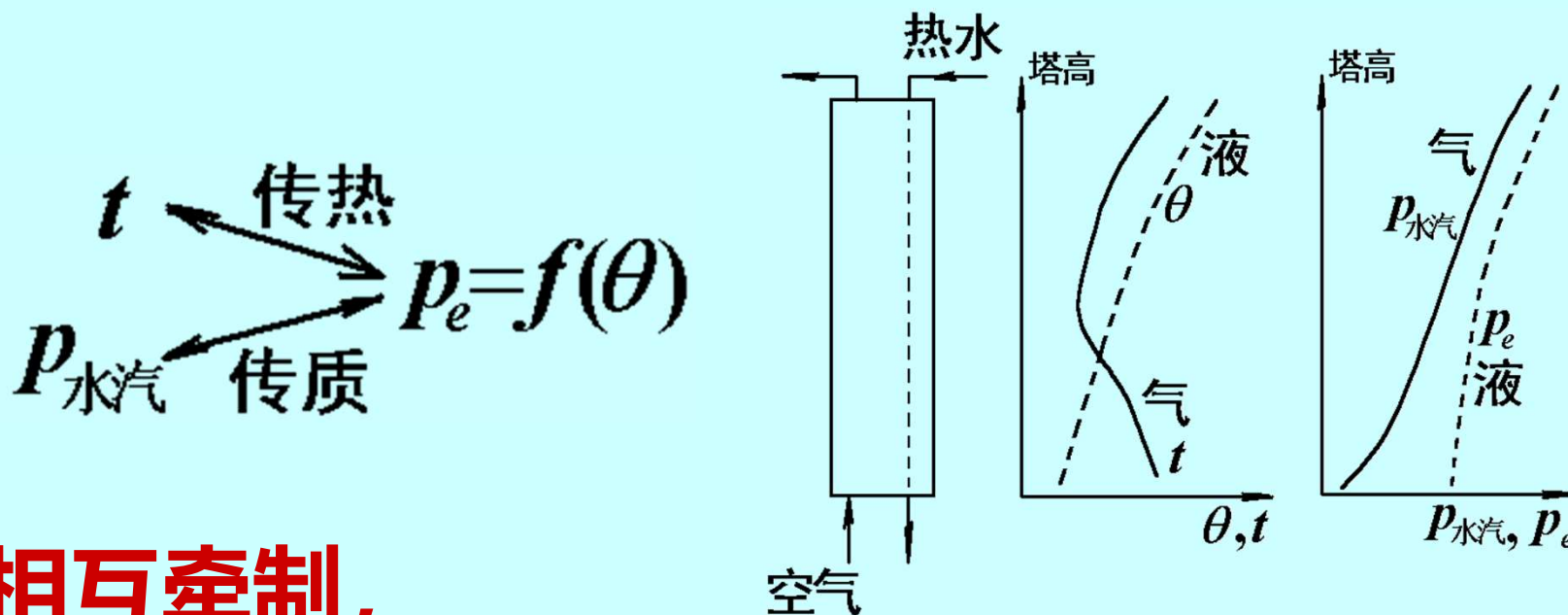
**不足以补充水分汽化带走的潜热， $\theta$ 继续 $\downarrow$**

传热方向或传质方向可能发生逆转

## 传递方向会逆转的原因：

气相双组分，有两个独立变量  $t, p_{\text{水汽}}$

液相单组分，只有一个独立变量  $p_e = f(\theta)$



传热传质相互牵制，

一个过程的继续可打破另一过程的平衡

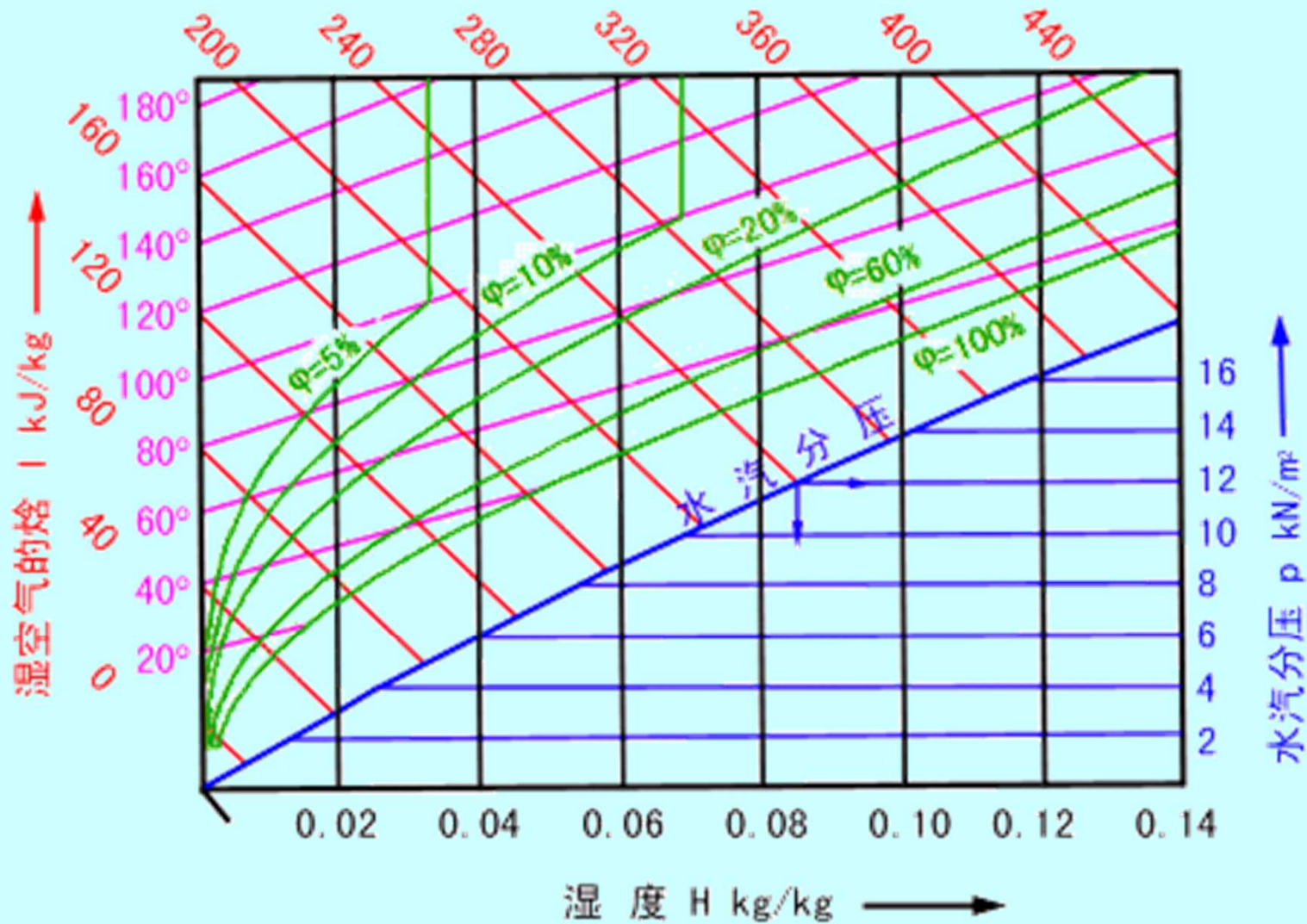


## 问题2

湿空气状态的描述有哪几个参数？

请在空气-水系统的I-H图(总100kPa)中表示这些参数。

# 空气-水系统的I-H图(总压100kPa)



- 等 $I$ 线
- 等 $H$ 线
- 等 $t$ 线
- 等 $\phi$ 线
- $p$ 线

## 13.2 湿空气状态的描述

### 一. 湿空气的性质

#### 1. 湿空气中水蒸气含量的表示方法

(1) 湿度 又称湿含量  $\text{kg 水/kg 干空气}$

$$H = \frac{\text{湿气的质量}}{\text{绝干空气的质量}}$$

$$= \frac{\text{水气的摩尔数}}{\text{绝干空气的摩尔数}} \times \frac{M_v}{M_a} = \frac{p}{P - p} \times \frac{18}{29}$$

水蒸汽  
空气

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

$p$ 为空气中的水汽分压  
 $P$ 为总压

饱和湿度  $H_s = 0.622 \frac{p_s}{P - p_s}$   $p_s$ 为  $t$  下的水的饱和蒸汽压

## (2)相对湿度

$p$  为空气中的水汽分压,  $p_s$  为  $t$  下的水的饱和蒸汽压

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

$\varphi$ 值愈小,

表示空气的吸湿能力越大

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

2. 湿比容  $\nu_H$  单位为  $\text{m}^3$ 湿空气 /  $\text{kg}$ 干空气

湿气体比体积  $\nu_H$ : 1kg  
干气及其所带的  $H$  kg  
水汽所占的总体积

**居室里舒适的气象条件是:**

室温达  $25^\circ\text{C}$  时, 相对湿度控制在  $40\%—50\%$  为宜;  
室温达  $18^\circ\text{C}$  时, 相对湿度应控制在  $30\%—40\%$ 。

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

常压下温度为 $t^{\circ}\text{C}$ 、湿度为 $H$ 的湿气比容为

$$v_H = \frac{22.4}{M_{\text{气}}} \times \frac{t + 273}{273} + H \times \frac{22.4}{M_{\text{湿}}} \times \frac{t + 273}{273}$$

**对空气-水系统的湿比容**

$$v_H = (2.83 \times 10^{-3} + 4.56 \times 10^{-3} H) \times (t + 273)$$

### 3. 湿比热 $c_H$

比热——表示物体吸热或散热能力。比热容越大，物体的吸热或散热能力越强。

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

$(1+H) \text{ kg 湿空气}$

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

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

$$c_H = c_g + c_v H = 1.01 + 1.88H$$

## 4. 湿空气的焓（表示能量） $I_H$

**$\text{kJ/kg}$  干气**

焓---- **$\text{kJ/kg}$**

湿气体的焓 $I$ ：每 **$\text{kg}$** 干气及所带 **$H\text{kg}$** 湿汽所具有的焓， **$\text{kJ/kg}$** 干气。

$$I = c_g t + H(c_v t + r_0) = (c_g + c_v H)t + r_0 H$$

基准：干气—— $0^\circ\text{C}$ 气，湿汽—— $0^\circ\text{C}$ 液。

式中： $C_g$ ——干气比热， $1.01\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ ；

$C_v$ ——湿汽比热， $1.881.01\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ ；

$r_0$ —— $0^\circ\text{C}$ 时湿分的汽化热， $2500\text{kJ/kg}$ 。

**对空气-水系统**

$$I = (1.01 + 1.88 H)t + 2500 H$$

## 问题3

- 1、湿球温度 $t_w$ 与绝热饱和温度 $t_{as}$ 的异同
- 2、 $\phi=1$ 和 $\phi<1$ 两种情况比较： $t$ 、 $t_w$ 、 $t_{as}$ 、 $t_d$ 关系
- 3、测量湿汽含量的简易方法是什么？为什么？
- 4、如何测空气中的水汽分压？



## 5. 干球温度 $t$ 和湿球温度 $t_w$

**干球温度**简称温度，是指空气的真实温度

大量流动的空气（空气的流速应大于  $5\text{m/s}$ ）与少量水接触，达到稳定时（动态平衡），湿球温度计所指示的温度就称为**湿球温度**，用  $t_w$  表示。

空气以对流方式传给水的热量速率  
= 水分气化所需的潜热速率

$$\alpha A(t - t_w) = k_H A(H_w - H)r_w$$

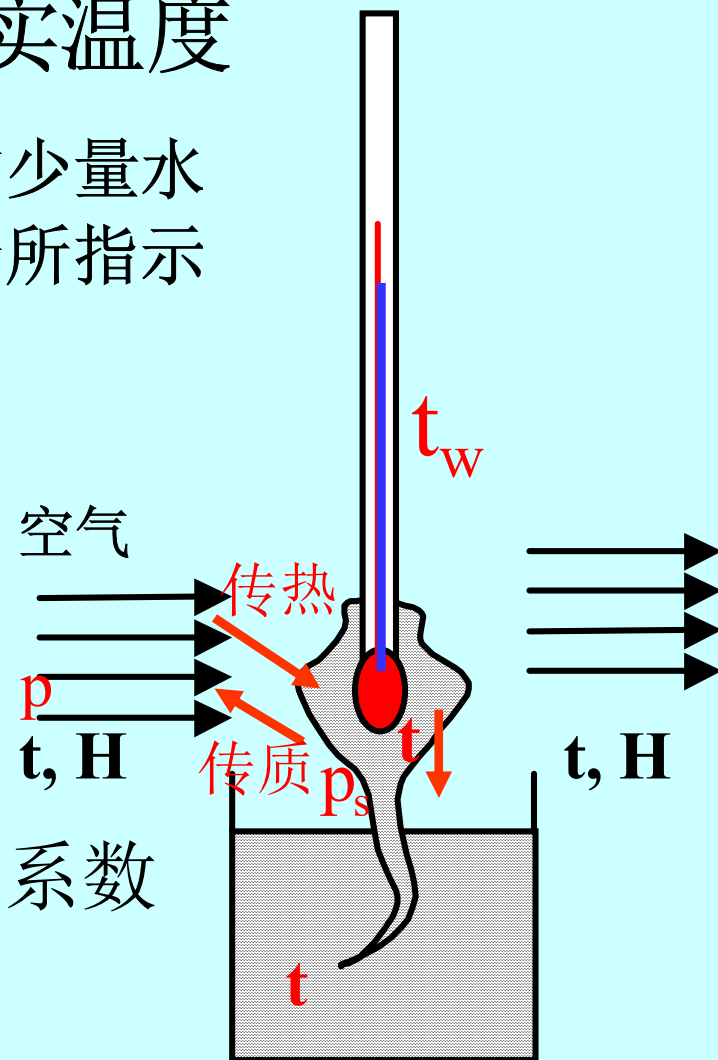
气液      水汽化

传热速率

汽化潜热

$k_H$  为传质系数

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

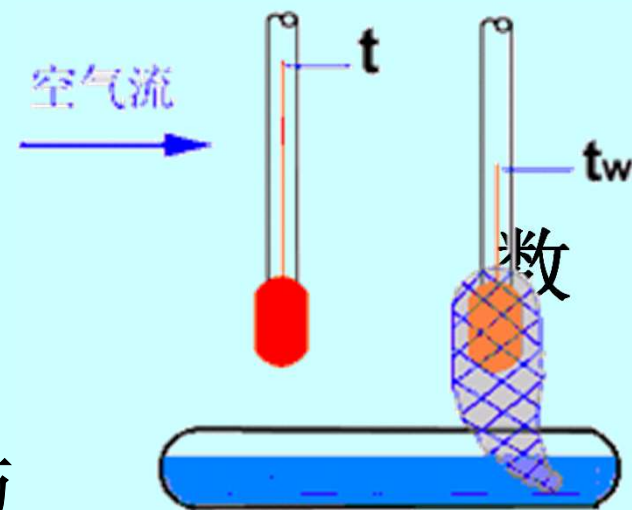


湿球温度计

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

式中： $k_H, \alpha$ ——分别为气相的传质系数与给热系数；

$H_w, r_w$ ——分别为湿球温度下的湿度与汽化热



湿球温度的测量

**对空气-水系统：** 当温度不太高，流速 $>5\text{m/s}$

$$\alpha/k_H \approx 1.09 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

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

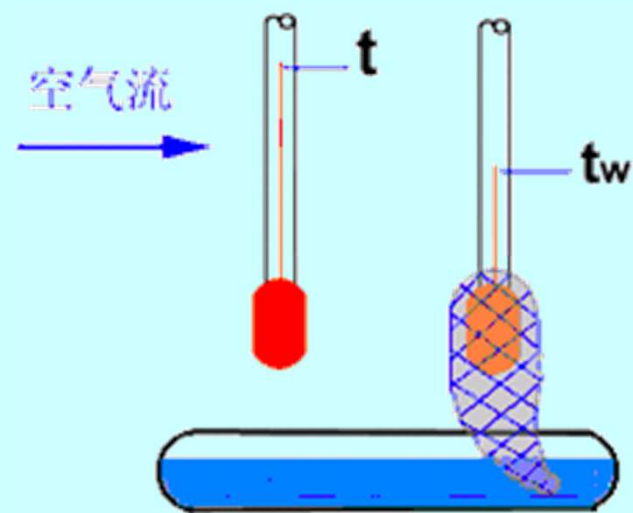
$$t_w = f(t, H),$$

而与水的初始状态无关

$k_H$ 、 $\alpha$  主要与空气流速有关，  
但比值 却几乎与流速无关。

## 思考

- $t_w$ 与 $t$ 差距越大，表明空气中水分含量越多还是越少？空气干燥还是湿润？
- 相对湿度 $\phi=1$ 时， $t_w$ 和 $t$ 关系？
- 如何用干湿球温度计测定空气中的湿度？



湿球温度的测量

① 少，干燥 ②  $t_w = t$

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

③ 测量干湿球温度是  
测量湿汽含量的简易方法

## 6. 绝热饱和温度 $t_{as}$

在与外界绝热情况下，空气与大量水经过无限长时间接触

当空气温度与水温相等，称这一稳定的温度为湿空气的**绝热饱和温度**，用 $t_{as}$ 表示。

**湿空气为等焓变化**

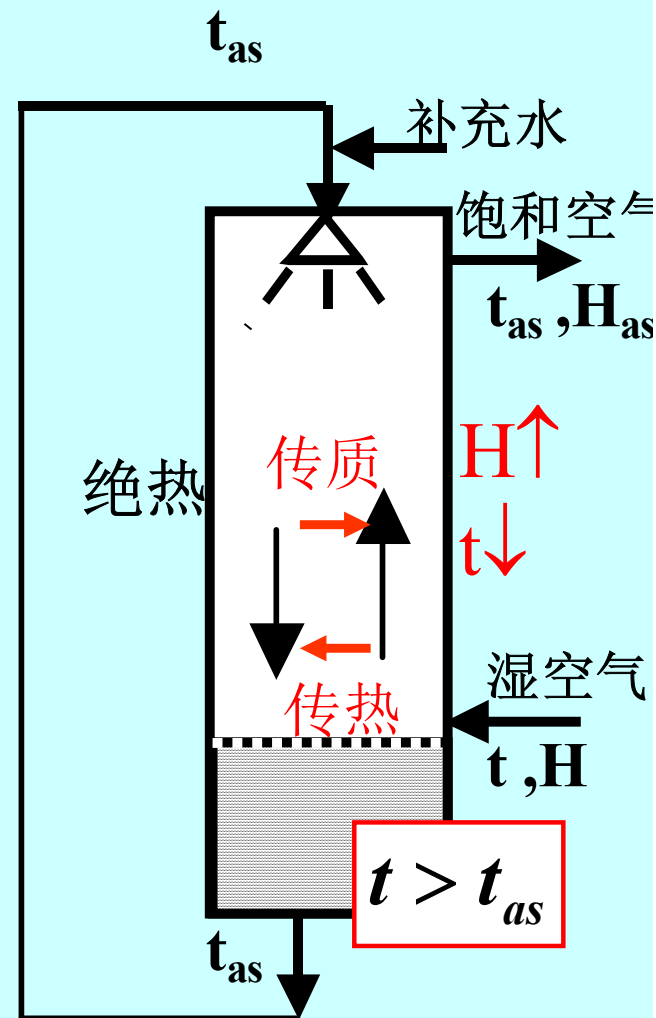
$$I_1 = I_{as}$$

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

气温下降放热      气体增湿带热

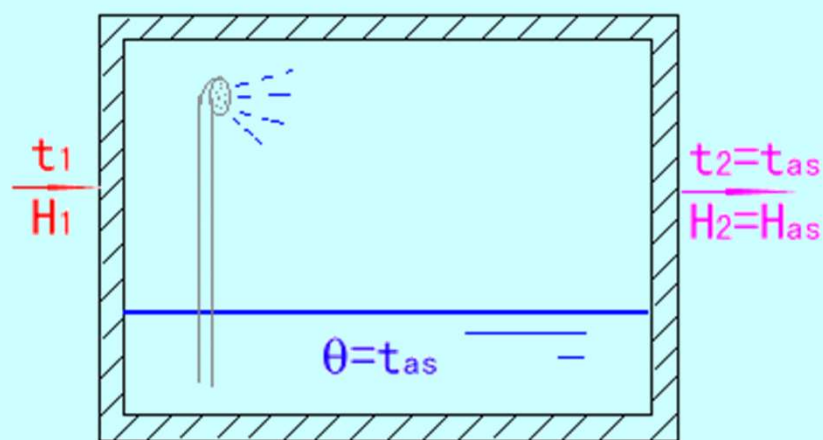
**湿空气发生降温增湿过程，直至湿空气饱和**

**大量水  
少量空气**



绝热饱和塔示意图

# 绝热饱和和温度的过程实质



绝热饱和过程

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。绝热饱和温度是气体状态函数。

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

**Lewis 规则:**

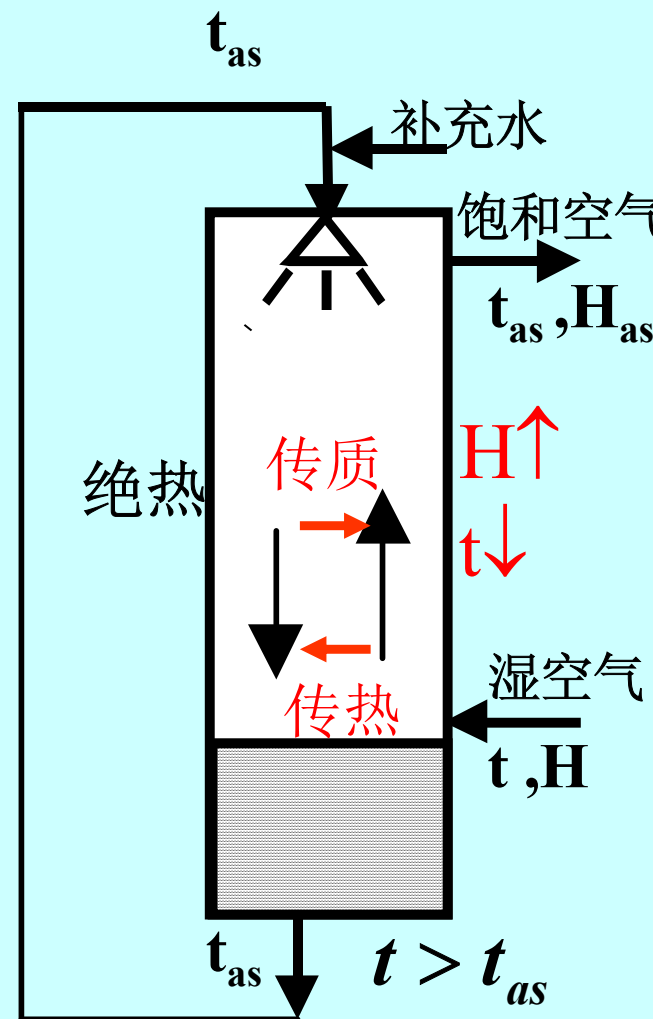
对于空气—水体系,  $\frac{\alpha}{k_H} \approx c_H$ ,  $r_0 \approx r_{as}$ ,

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

$t_{as}$  是湿空气的性质, 而与 水的状态无关

$$c_H = c_g + c_v H = 1.01 + 1.88H$$

饱和湿度  $H_s = 0.622 \frac{p_s}{P - p_s}$



绝热饱和塔示意图

# 湿球温度 $t_w$ 与绝热饱和温度 $t_{as}$ 的异同:

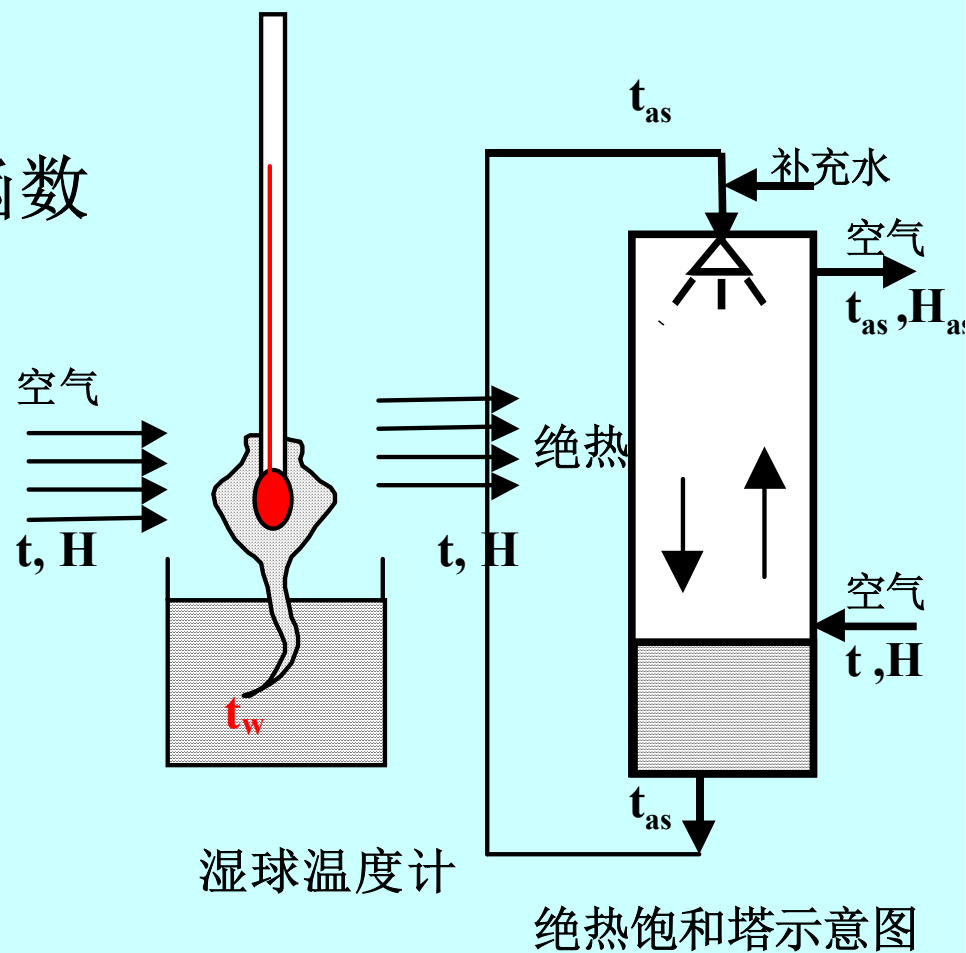
相同之处:

- 1、湿空气均为等焓变化、
- 2、均为空气状态 ( $t$ 、 $H$ ) 的函数
- 3、对于空气—水体系,  $\frac{\alpha}{k_H} \approx c_H$

(称为 **Lewis 规则**),  $r_0 \approx r_w$ ,  
因此,  $t_w \approx t_{as}$  (数值上)

但对其它体系, 例如空气—甲苯系统,  $\frac{\alpha}{k_H} = 1.8c_H$ , 这时  $t_w \neq t_{as}$ 。

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

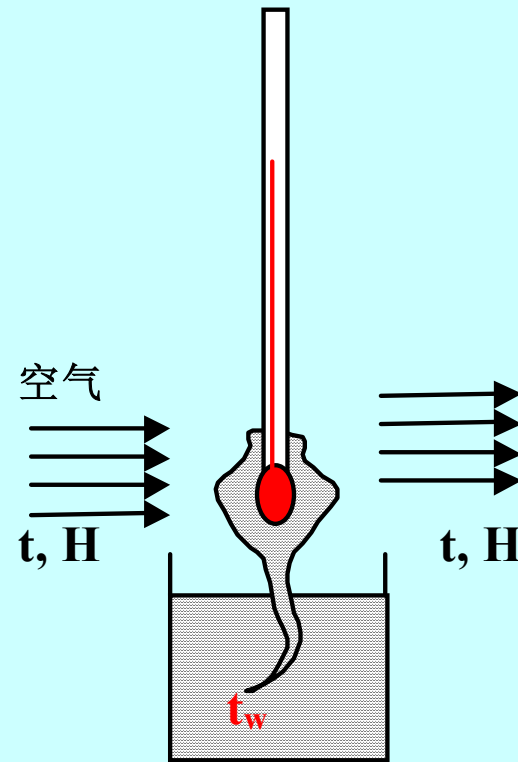


# 湿球温度 $t_w$ 与绝热饱和温度 $t_{as}$ 的异同：

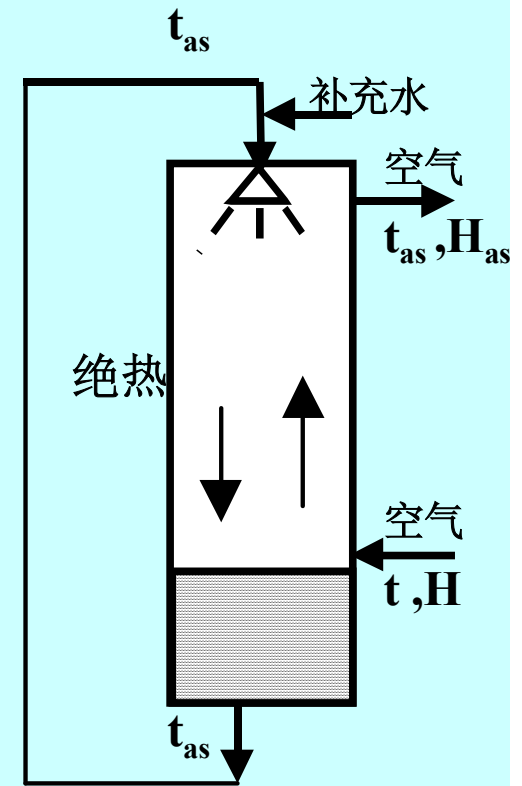
不同之处：

湿球温度 $t_w$ ：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。

绝热饱和温度 $t_{as}$ ：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，水的状态不变。



湿球温度计



绝热饱和塔示意图



## 7. 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，此时，湿空气的温度称为露点，用 $t_d$ 表示。

特点：  $p = p_s$

$$H = H_s$$

$$\varphi_d = 100\%$$

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

$$\varphi_d = \frac{p}{p_s} \times 100\% = 1$$

露点 $t_d$ ：

等压降温至饱和时对应的温度。是测量湿  
气分压 $p$ 常用的方法，  
 $p = p_s(t_d)$ 。

## 湿空气性质

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

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

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

$$c_H = 1.01 + 1.88H$$

$$I_H = (1.01 + 1.88H)t + 2500H$$

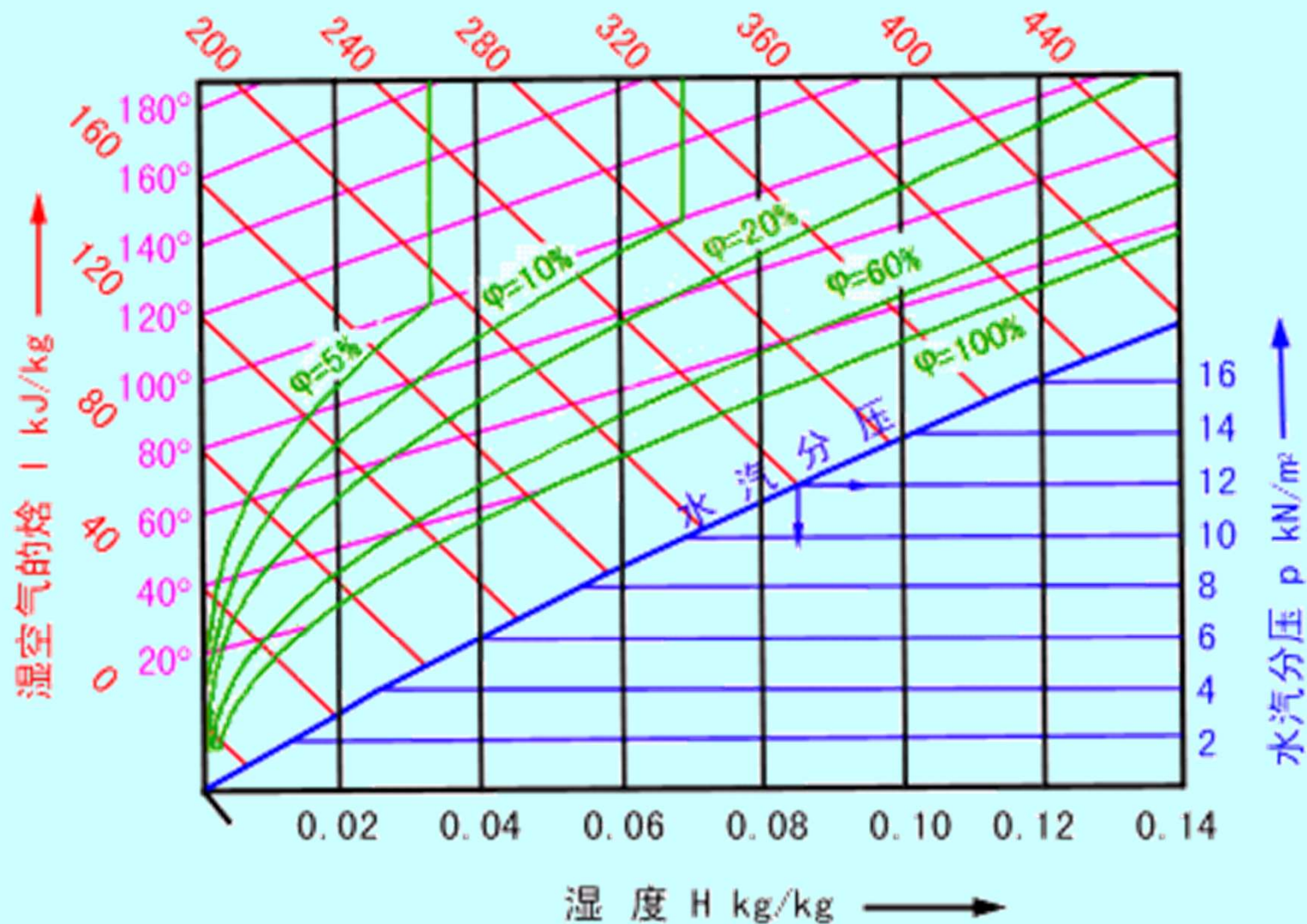
$$t_w = t - \frac{k_H r_w}{\alpha} (H_w - H)$$

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

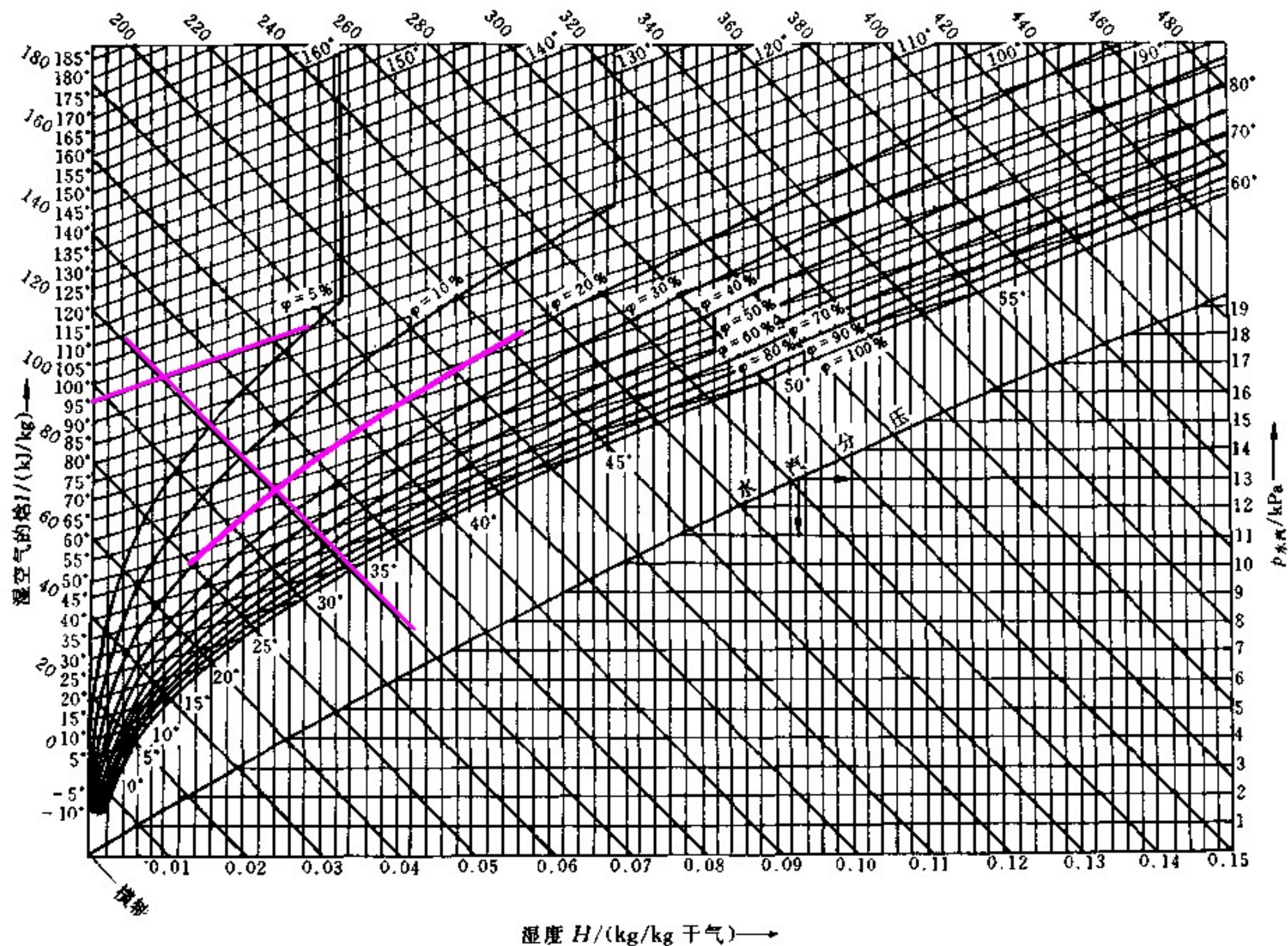
$$t_d$$

两个参数决定空气状态

# 空气-水系统的I-H图(总压100kPa)



- 等 $I$ 线
- 等 $H$ 线
- 等 $t$ 线
- 等 $\phi$ 线
- $p$ 线





例：已知：100kPa,  $t=50^{\circ}\text{C}$ ,  $p_{\text{水汽}}=4\text{kPa}$

求： $\varphi, H, I, t_d$  (查表 $50^{\circ}\text{C}$ ,  $p_s=12.4\text{kPa}$ )

计算：
$$\varphi = \frac{p_{\text{水汽}}}{p_s} = \frac{4}{12.4} = 32.3\%$$

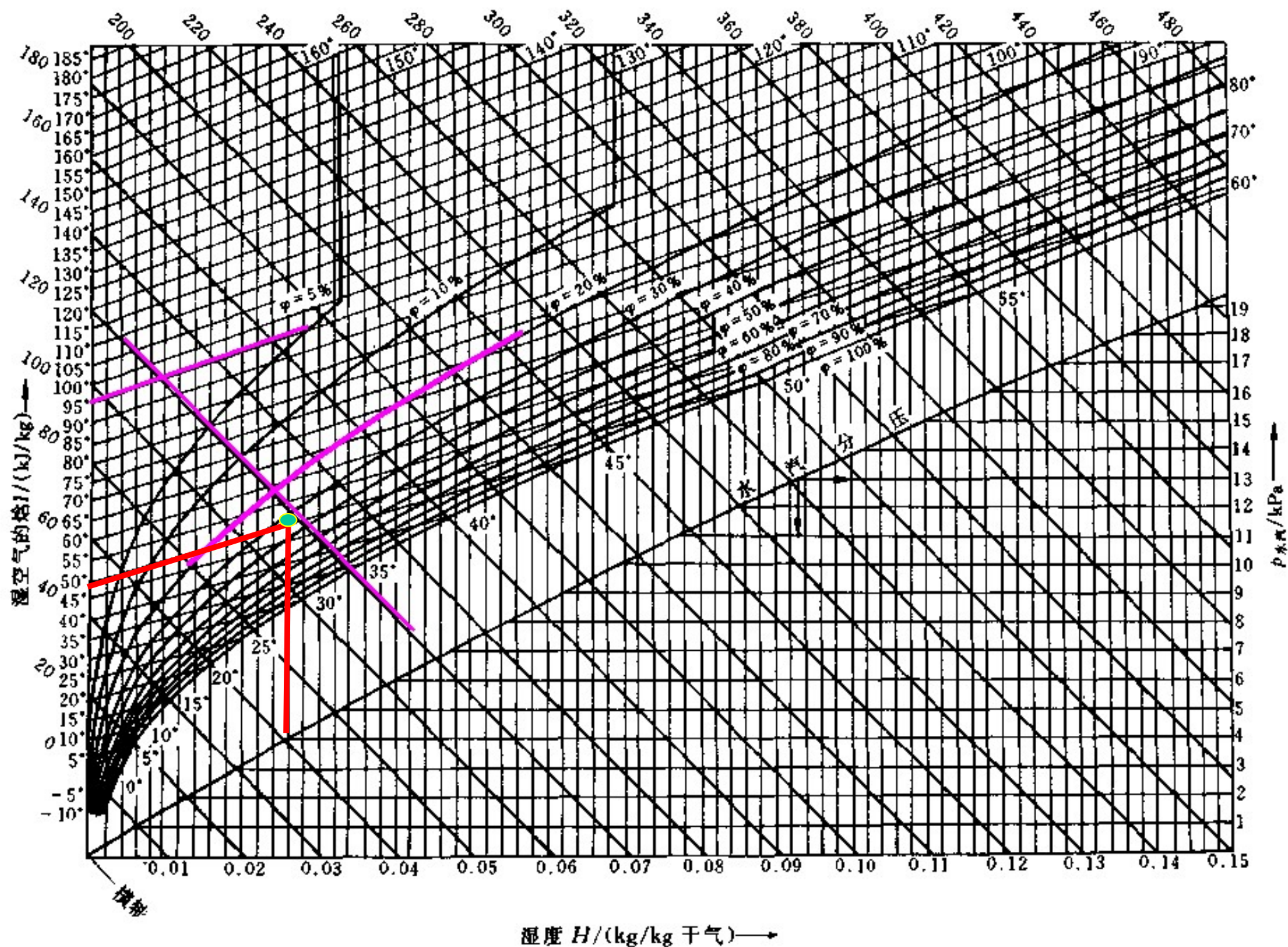
$$H = 0.622 \frac{p_{\text{水汽}}}{p - p_{\text{水汽}}} = 0.622 \times \frac{4}{100 - 4}$$
$$= 0.026 \text{kg水/kg干气}$$

$$I = (1.01 + 1.88H)t + 2500H = 118 \text{kJ/kg干气}$$

查表 $p_{\text{水汽}}=4\text{kPa}$ 的饱和温度 $29^{\circ}\text{C}$

$$t_d = 29^{\circ}\text{C}$$

查图



查图

例：已知：  $t_d=20^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi=30\%$

查：  $H, t, p, I$



查图

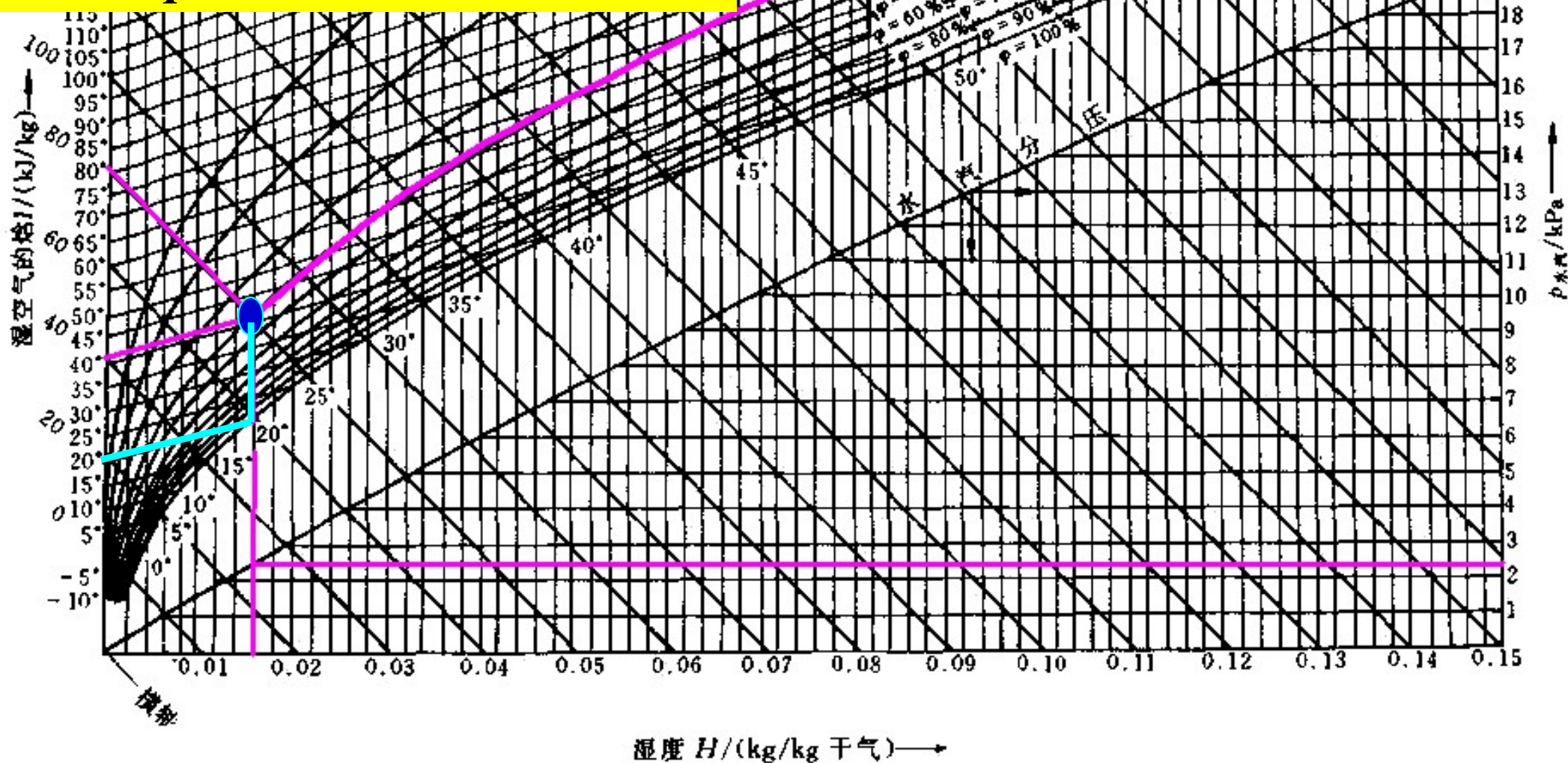
已知:  $t_d=20^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi=30\%$

查得:  $H=0.015\text{kg水/kg干气}$

$t=40^{\circ}\text{C}$

$I=80\text{kJ/kg}$

$p=2.2\text{kPa}$





## 问题4

在焓湿图（**I-H**）中表示加热、冷却和绝热增湿过程。

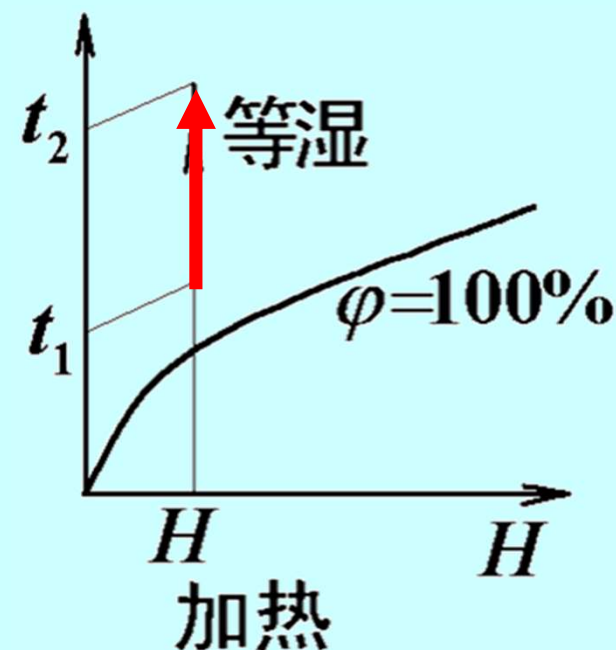
## 13.3 湿空气状态变化过程图示

- (1) 加热与冷却过程

不计阻力，湿空气经间壁加热或冷却过程属等压过程。

- 加热:

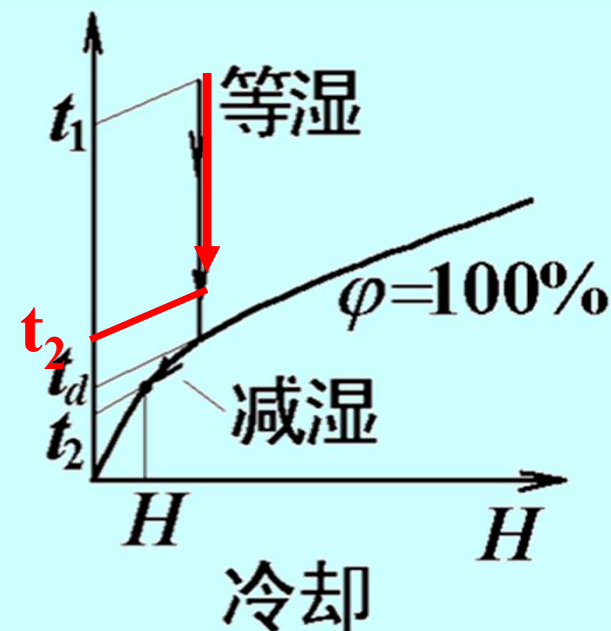
- $t$  升高  $p$  不变,  $p$  不变,  $H$  不变,  $\phi$  减小, 表明湿空气接纳水汽的能力增强。



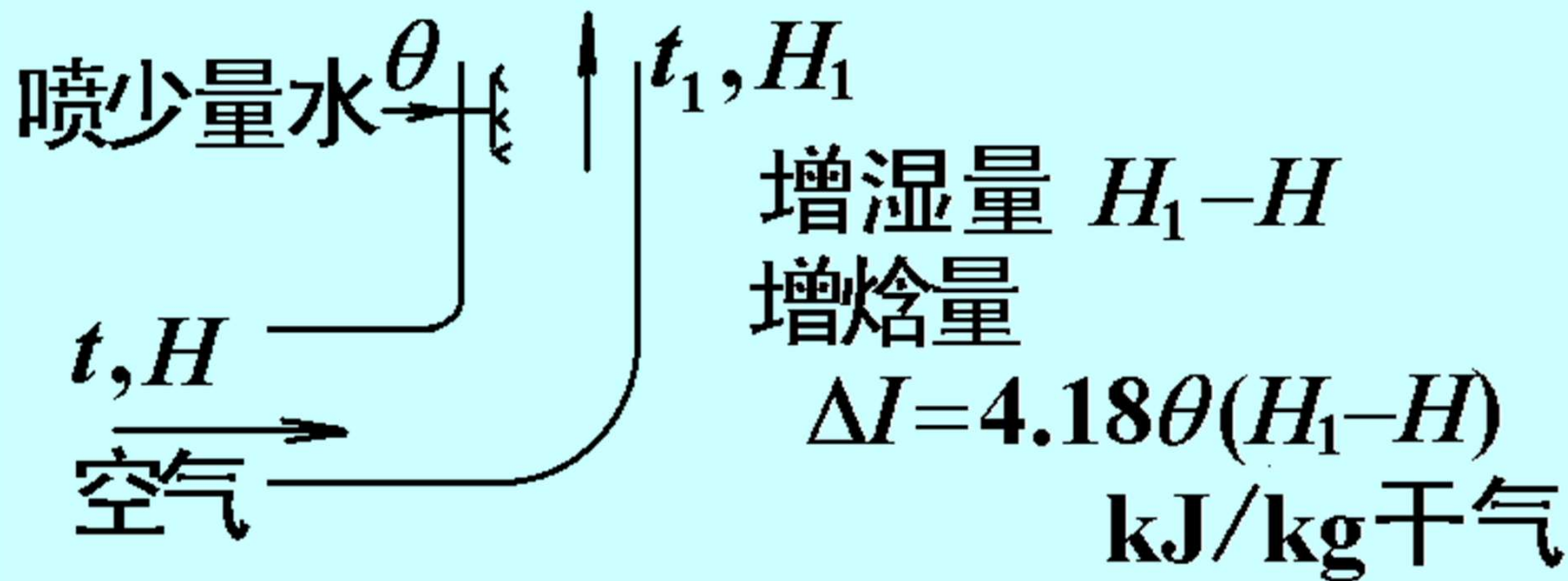
## 13.3 湿空气状态变化过程图示

### 冷却:

- 若 $t_2$ 高于露点，则为等湿过程；  
若 $t_2$ 低于露点，则必有部分水汽凝结出来，湿度降低。



## (2)绝热增湿过程(等焓过程)



$$\because C_p\theta \ll r$$

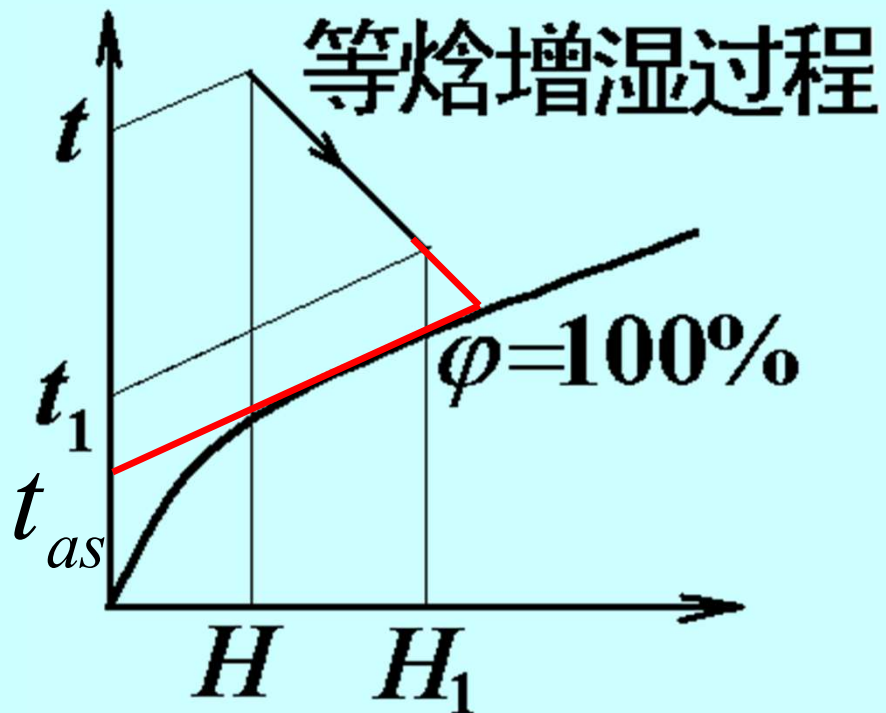
$$\therefore \Delta I \ll I, \text{ 可忽略 } \Delta I$$

则  $t_1, H_1$  与  $t, H$  之间视为等焓,  $I = I_1$

$$(1.01 + 1.88H)t + 2500H = (1.01 + 1.88H_1)t_1 + 2500H_1$$

$$H_1 = \frac{(1.01 + 1.88H)t + 2500H - 1.01t_1}{1.88t_1 + 2500}$$

$$\boxed{\text{或}} \quad t_1 = \frac{(1.01 + 1.88H)t + 2500(H - H_1)}{1.01 + 1.88H_1}$$



达到气相中水分饱和时，则

$$Vc_{pH}(t - t_{as}) = V(H_{as} - H)r_{as}$$

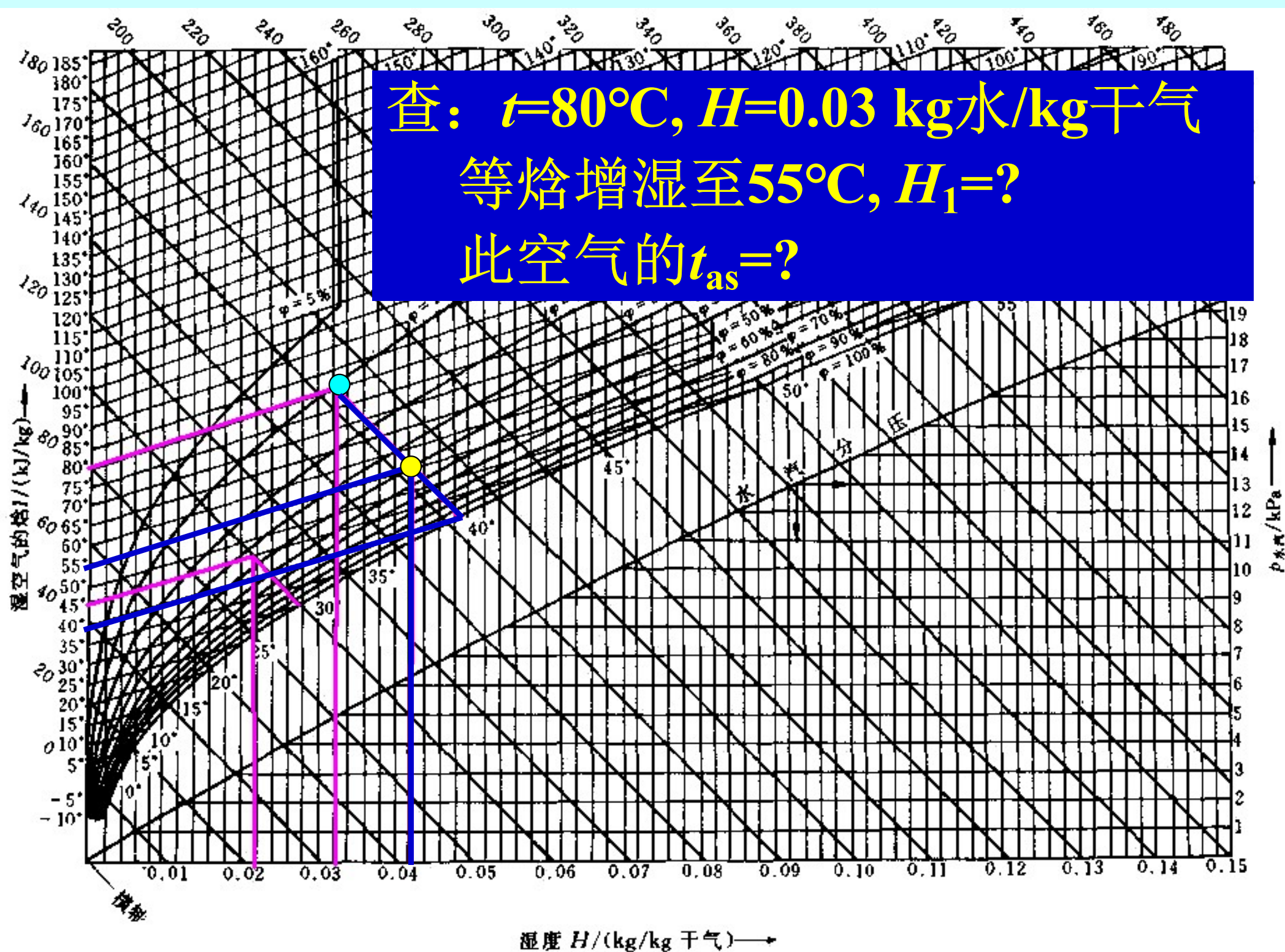
$$t_{as} = t - \frac{r_{as}}{c_{pH}}(H_{as} - H)$$

查等焓线至 $\varphi=100\%$

## 问题5

通过I-H图，解下列问题： $t=80^{\circ}\text{C}$ ,  $H=0.03$   
 $\text{kg水/kg干气}$ 等焓增湿至 $55^{\circ}\text{C}$ ,  $H_1=?$  此空气  
的 $t_{\text{as}}=?$

查:  $t=80^{\circ}\text{C}$ ,  $H=0.03 \text{ kg水/kg干气}$   
 等焓增湿至  $55^{\circ}\text{C}$ ,  $H_1=?$   
 此空气的  $t_{as}=?$



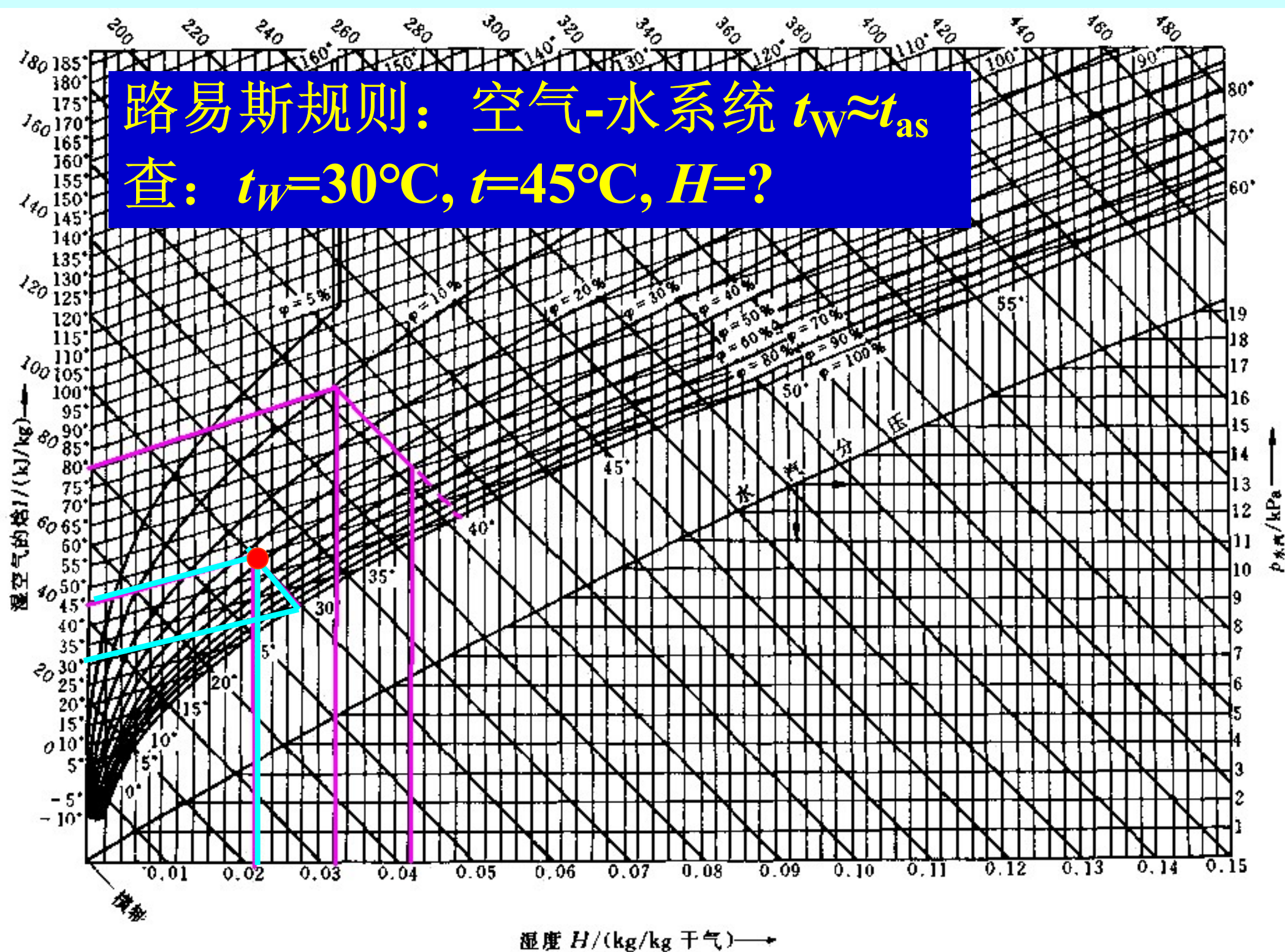
## 问题6

通过I-H图，解下列问题

$$t_w=30^{\circ}\text{C}, t=45^{\circ}\text{C}, H=?$$



路易斯规则：空气-水系统  $t_w \approx t_{as}$   
 查：  $t_w = 30^\circ\text{C}$ ,  $t = 45^\circ\text{C}$ ,  $H = ?$



## 湿空气性质小结

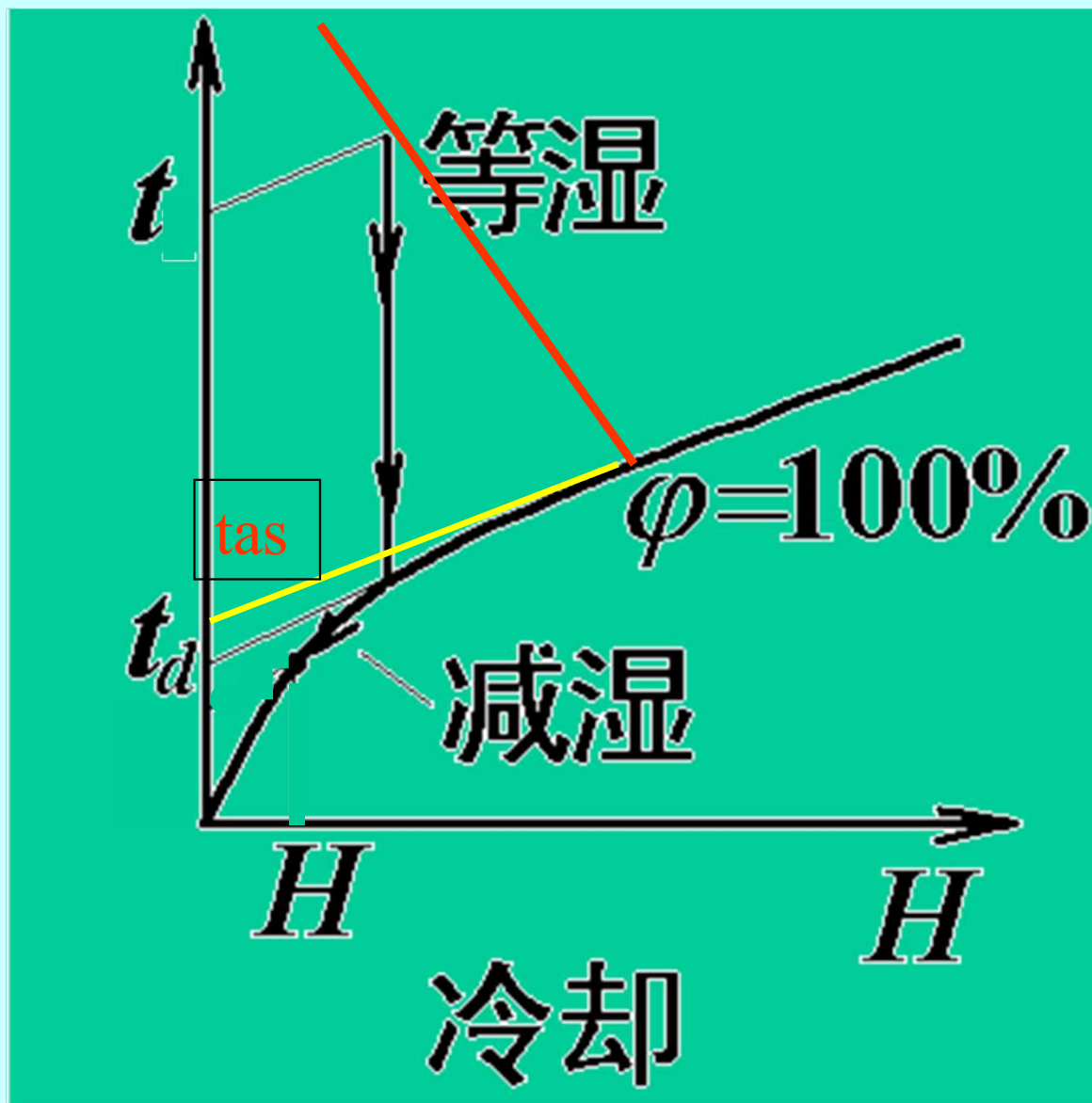
(1) 当总压一定时，表征空气状态只有两个独立参数。即已知两个相互独立的参数即可（在I-H图上）确定一个湿空气状态点，其他参数也可以或确定。

(2)  $t$ 、 $t_w$ 、 $t_{as}$ 、 $t_d$ 关系（ $\varphi=1$ ， $\varphi<1$ ）

$$\varphi=1, \quad t=t_w=t_{as}=t_d$$

$$\varphi<1, \quad t>t_w=t_{as}>t_d$$

图示  $t$ 、 $t_w$ 、 $t_{as}$ 、 $t_d$



$\varphi=1$ ,  $\varphi<1$ ,  
四个温度的关系?

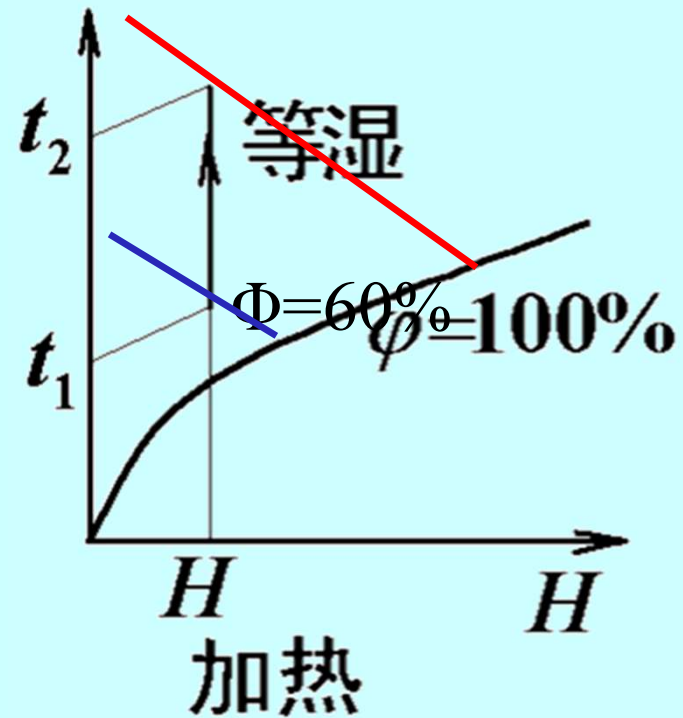
$\varphi=1$ ,  $t=t_w=t_{as}=t_d$

$\varphi<1$ ,  $t>t_w=t_{as}>t_d$

## 练习

在1atm下，不饱和湿空气的温度为295K，相对湿度为60%，当加热到373K时，该空气下列状态参数将如何变化？湿度 $H$ \_\_\_，相对湿度 $\Phi$ \_\_\_，湿球温度  $t_w$ \_\_\_，露点  $t_d$ \_\_\_，焓 $I$ \_\_\_。  
(升高，降低，不变，不确定)

不变    降低    升高    不变    升高



本次习题:

**第13章 1, 2, 3, 4, 5**