

1 概述

过程目的：

传热，伴有传质

如热水直接空气冷却

传质，伴有传热

如气体增减湿

原理：温度差、分压差(判据没变)

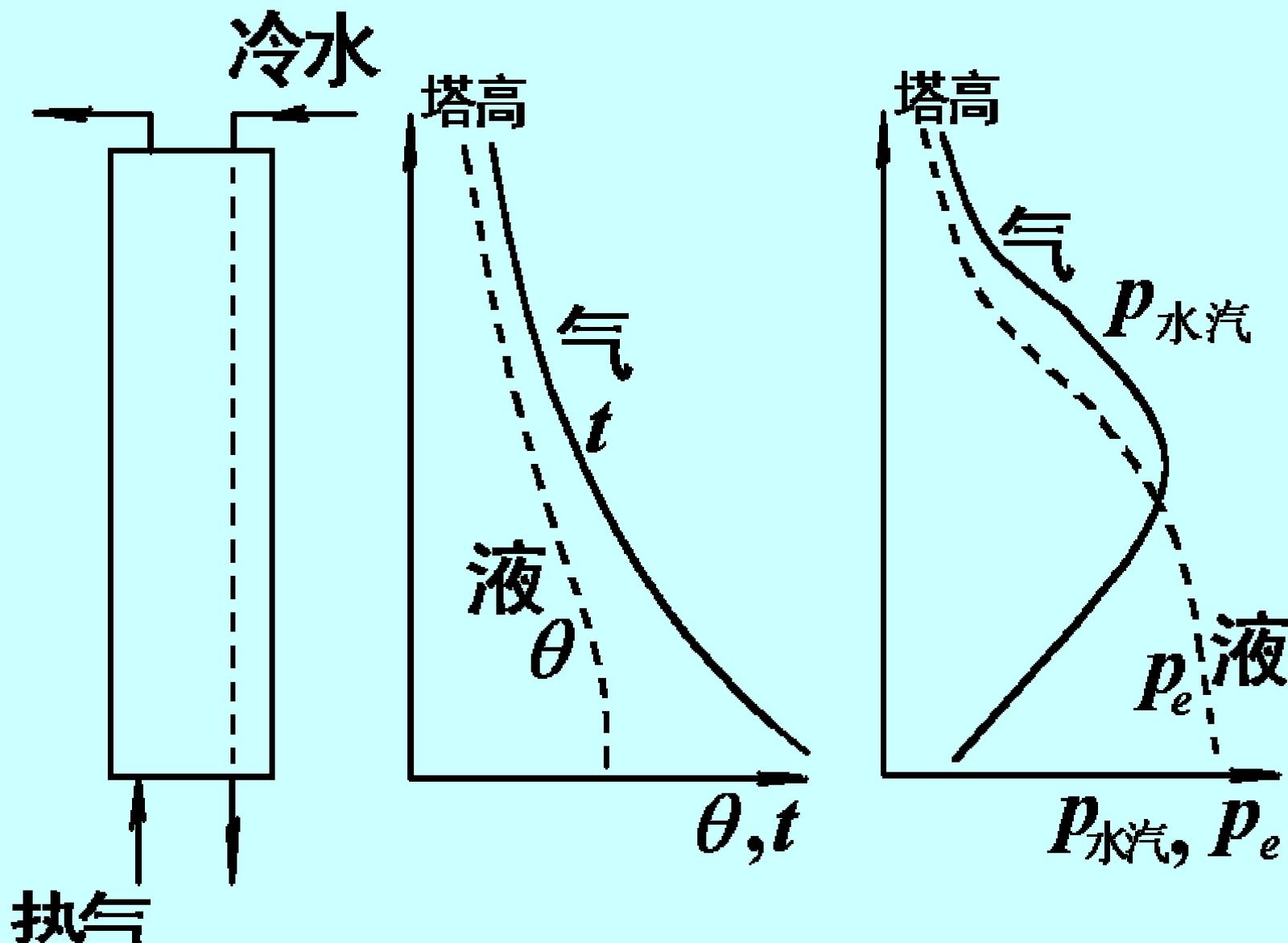
实施方法：气液直接接触

操作费用：热量(汽化、冷凝)

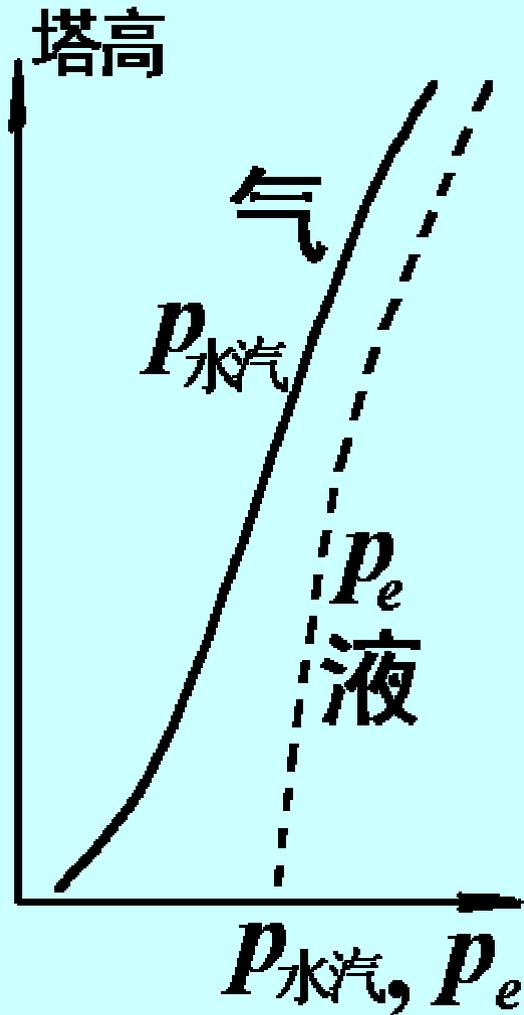
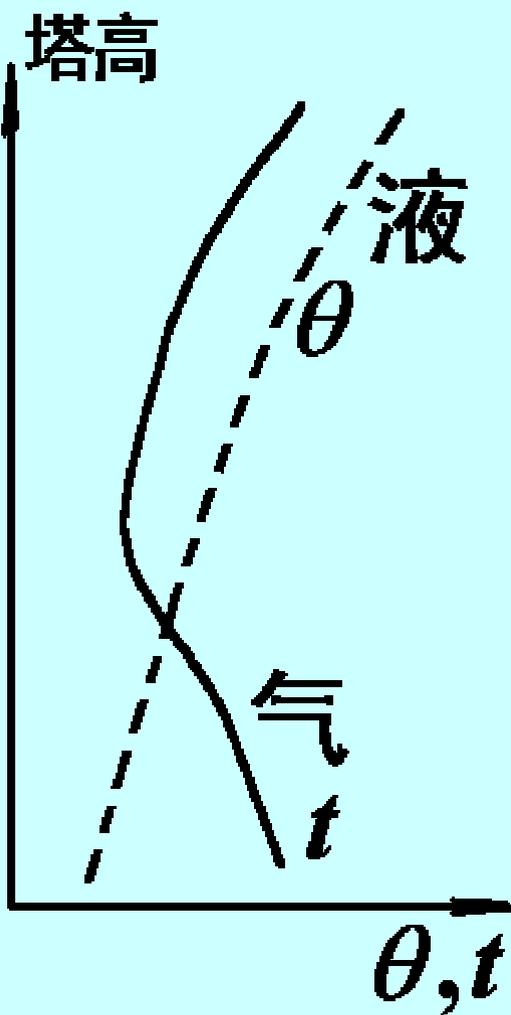
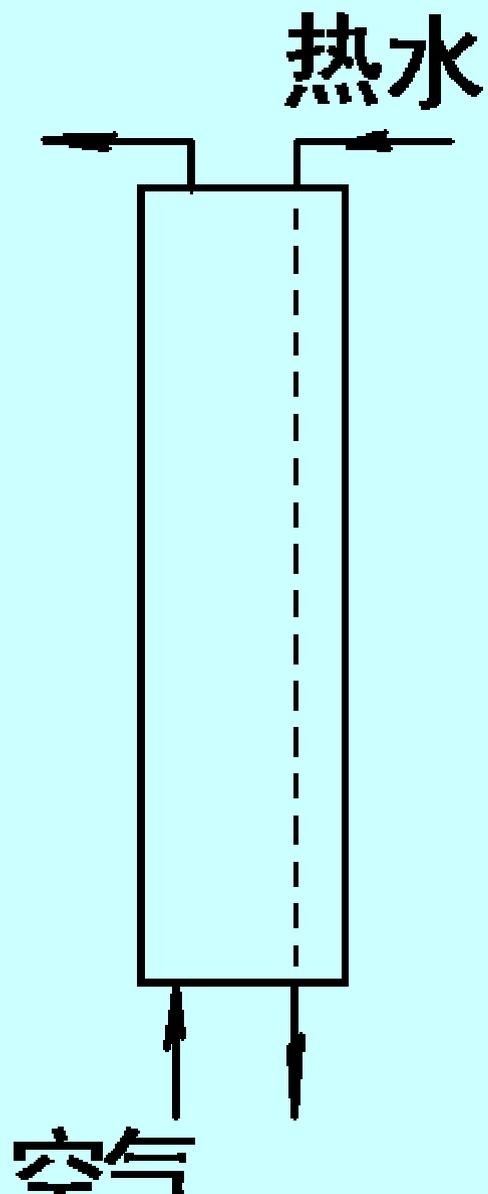
输送机械能

工业实例：

热气体直接水冷



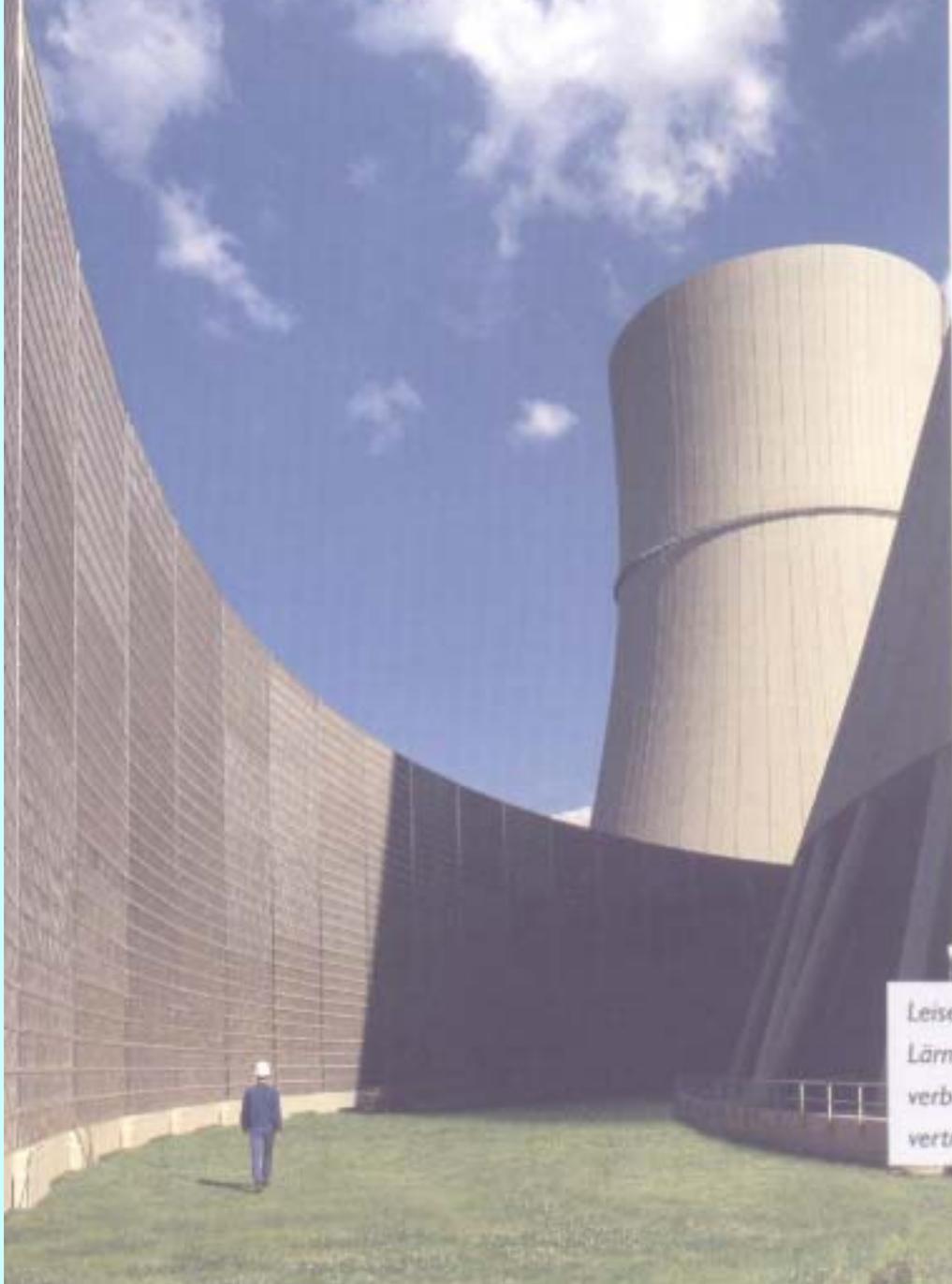
工业实例：
凉水塔



冷却塔外观



der VEAG stammen aus
dem neuen Kraftwerk.

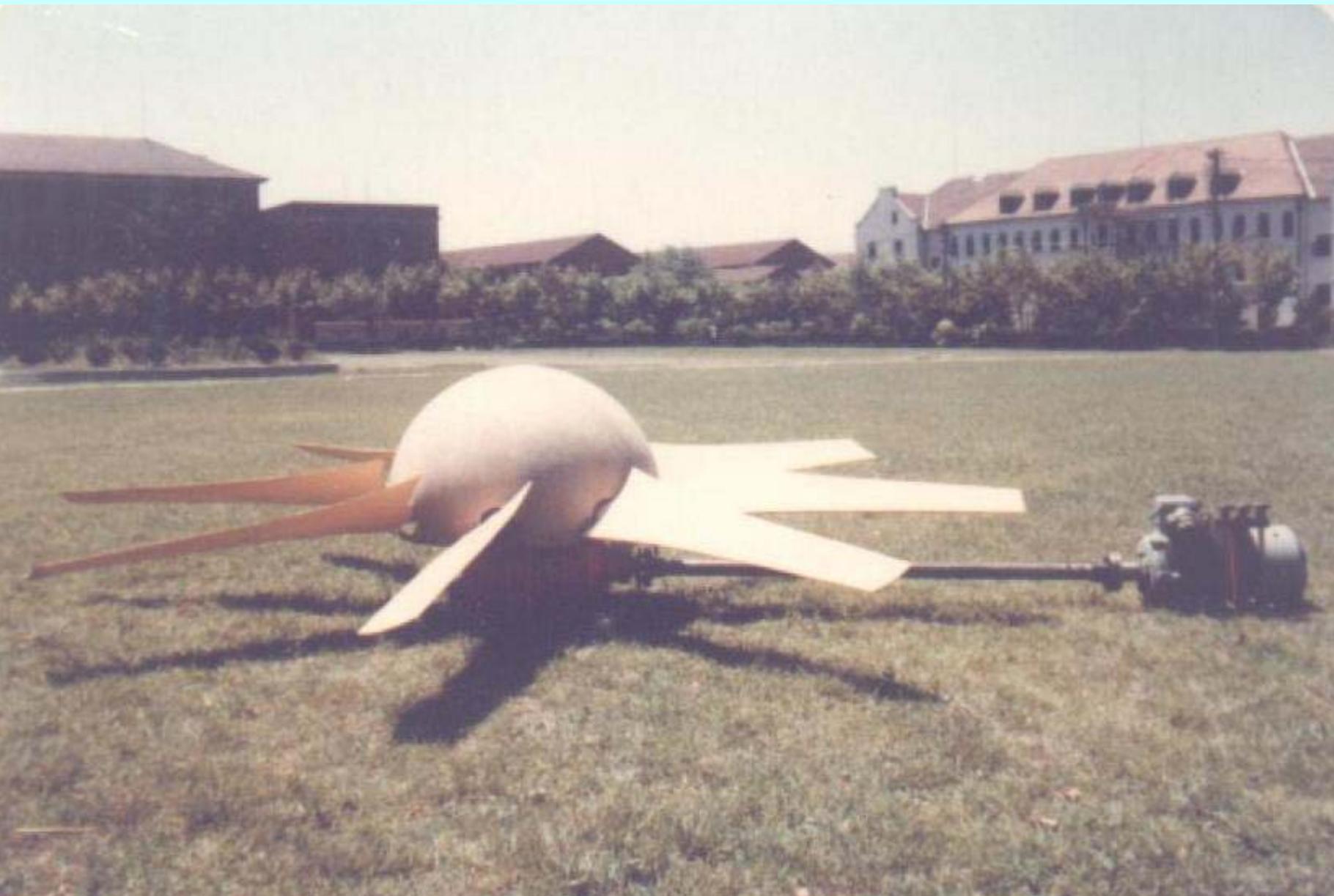


冷却塔 下部

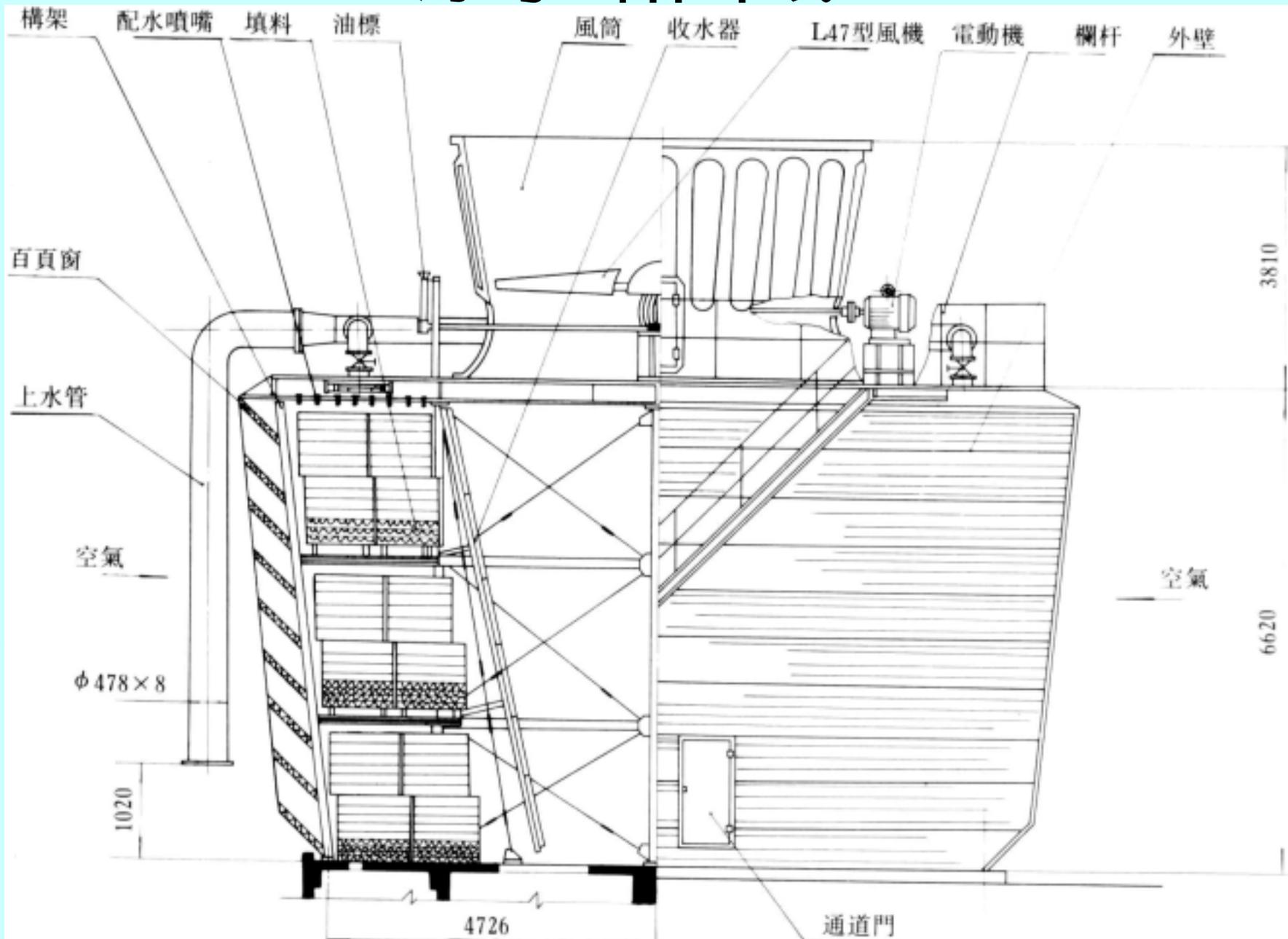
凉水塔外观



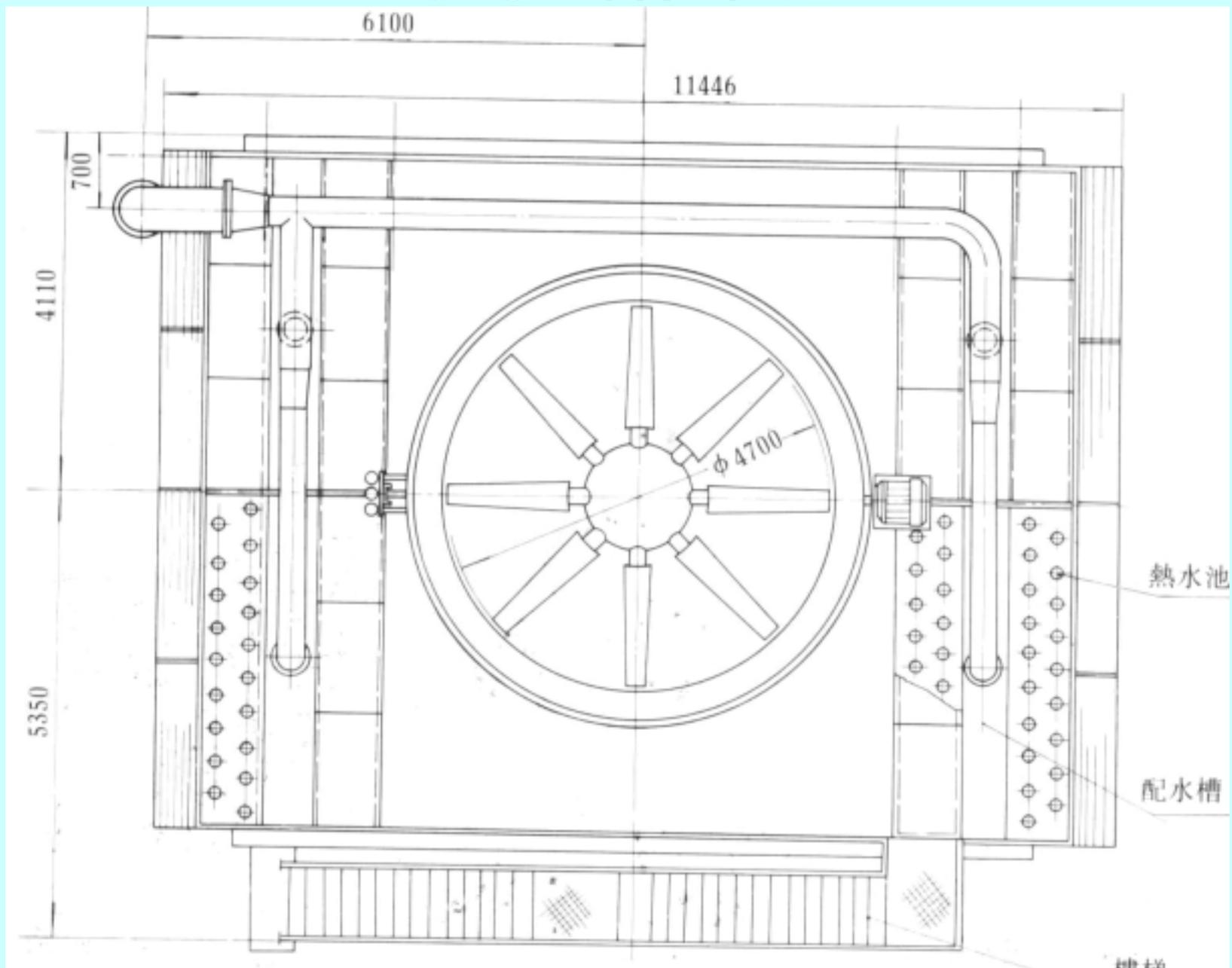
凉水塔风机



凉水塔图纸



凉水塔图纸



过程新特点：

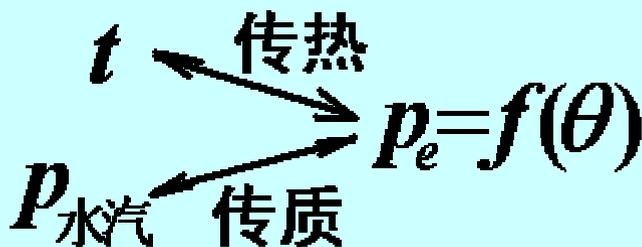
传热方向或传质方向可能发生逆转

极限不一定是 $\theta=t$, $p_{\text{水汽}}=p_e$

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 $p_e=f(\theta)$



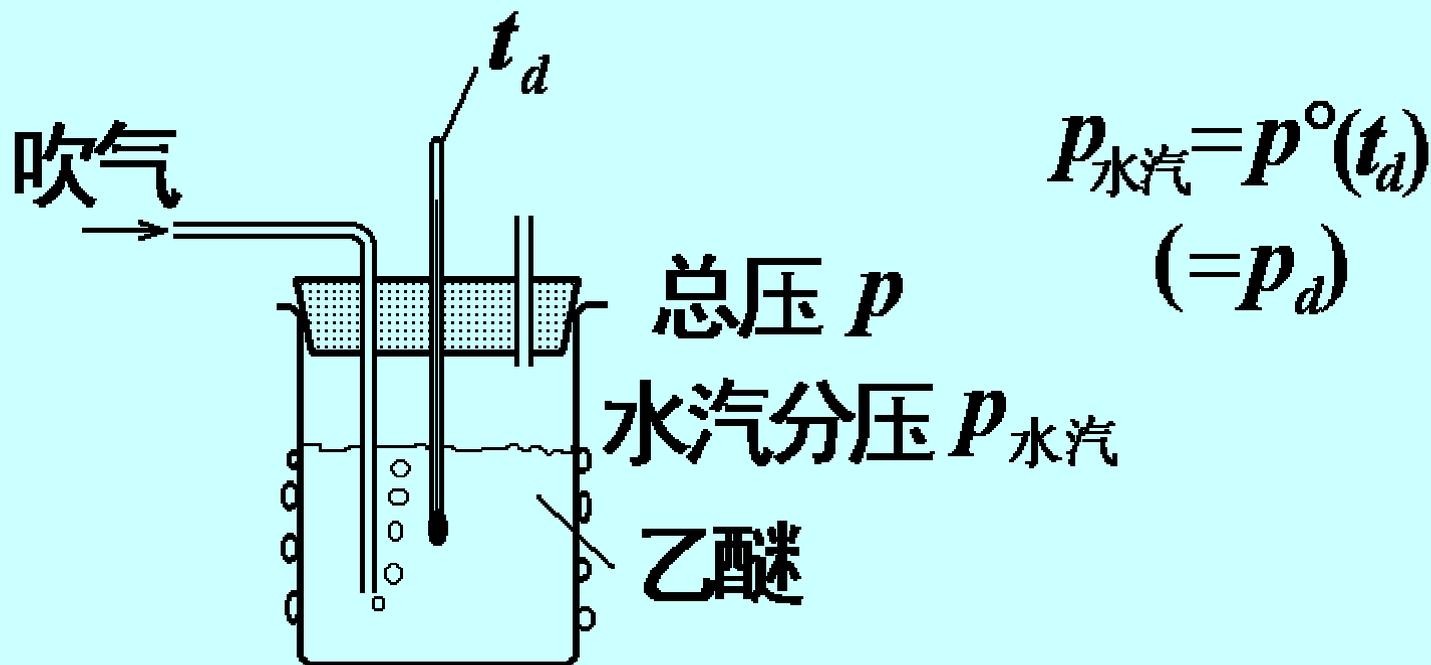
传热传质相互牵制，

一个过程的继续可打破另一过程的平衡

条件：大量气体，少量液体

2 湿空气状态的描述

水汽分压 $p_{\text{水汽}}$ 或露点温度 t_d (录像)



湿度 H kg水汽/kg干气

$$H = \frac{M_{\text{水}}}{M_{\text{气}}} \frac{P_{\text{水汽}}}{p - P_{\text{水汽}}} = 0.622 \frac{P_{\text{水汽}}}{p - P_{\text{水汽}}}$$

相对湿度 φ

$$\varphi = \frac{p_{\text{水汽}}}{p_s} \quad (\text{当 } p_s = p)$$

p_s 为t温度下的饱和蒸汽压

$$\varphi = \frac{p_{\text{水汽}}}{p} \quad (\text{当 } p_s = p)$$

湿空气的焓 I kJ/kg干气

$$I = (c_{pg} + c_{pV}H)t + r_0H$$

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

湿空气的比容 v_H m³/kg干气

常压下，

$$v_H = \left(\frac{22.4}{M_{\text{气}}} + \frac{22.4}{M_{\text{水}}}H \right) \frac{t + 273}{273}$$

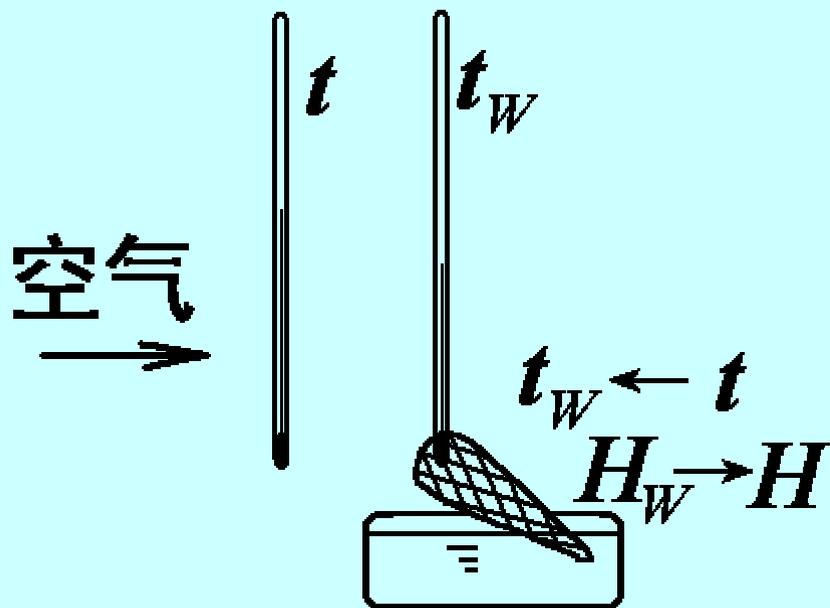
极限温度

湿球温度 t_w

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

传热速率

汽化潜热



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

t_w 的影响因素：

a. 物性， b. 气体状态: $t, p_{\text{水汽}}$ (或 H), 总压 p

c. 流动条件： α, k_H

空气-水系统，流动时 $\frac{\alpha}{k_H} = 1.09 \text{ kJ/kgK}$

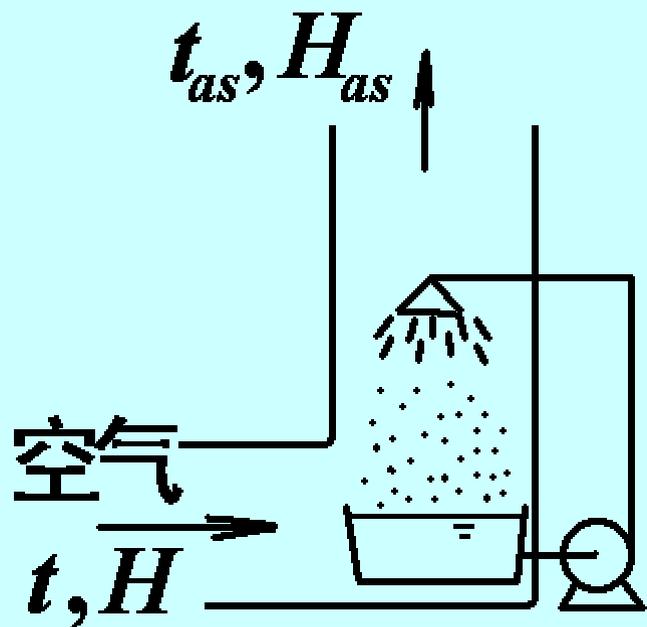
绝热饱和温度

气体在绝热条件下，
增湿至饱和(等焓过程)

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

气温下降放热 气体增湿带热

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



路易斯规则：空气-水系统： $\frac{\alpha}{k} \approx c_{pH}$ ， $t_{as} \quad t_w$

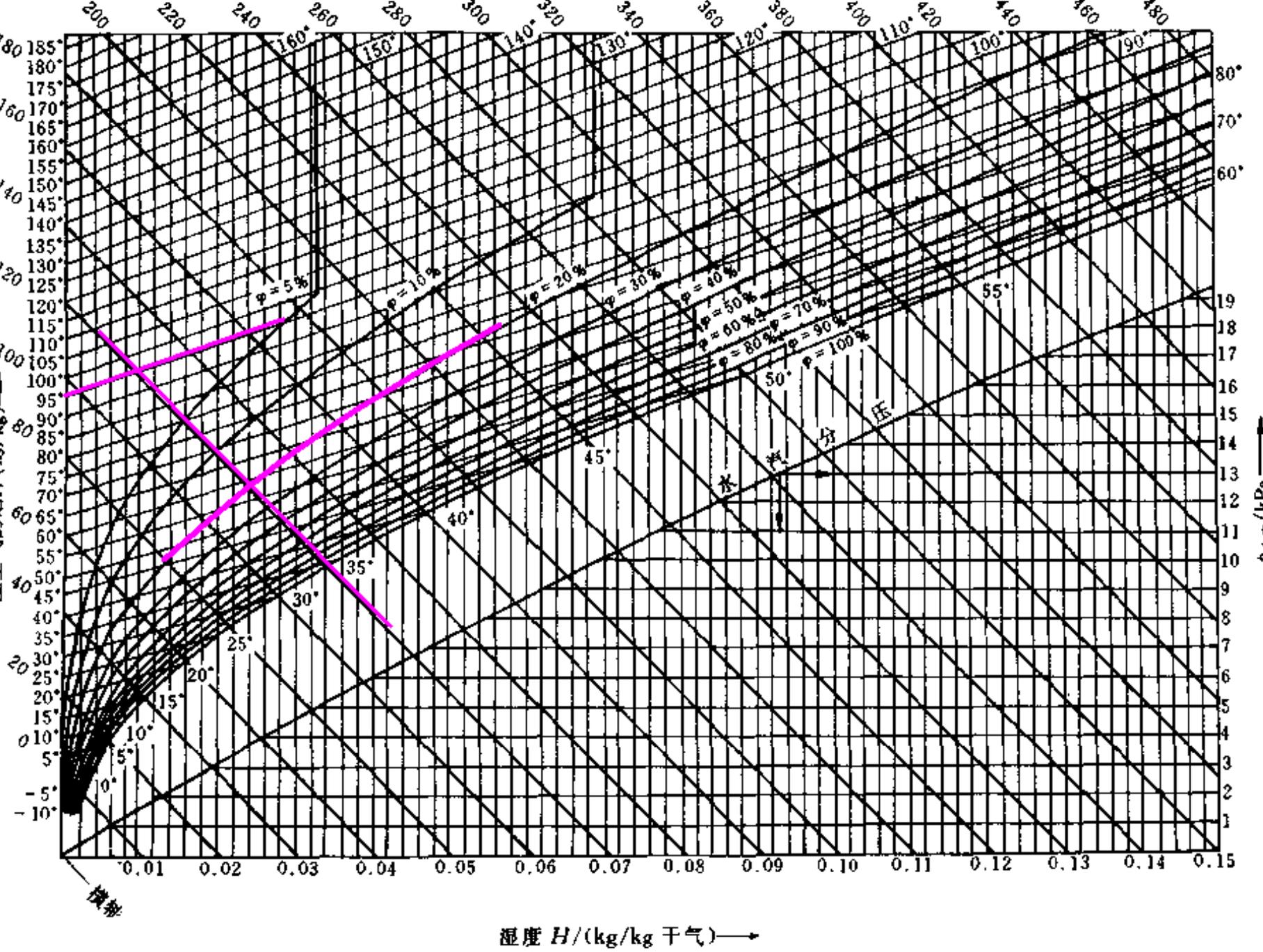
湿球温度的物理含义是什么？

绝热饱和温度的物理含义是什么？

两者有什么异同点？

焓-湿图(238页，总压一定，两个独立变量)

注意： t_d , $p_{\text{水汽}}$, H 相互不独立



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

求： φ, H, I, t_d (查表50 , $p_s=12.4\text{kPa}$)

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

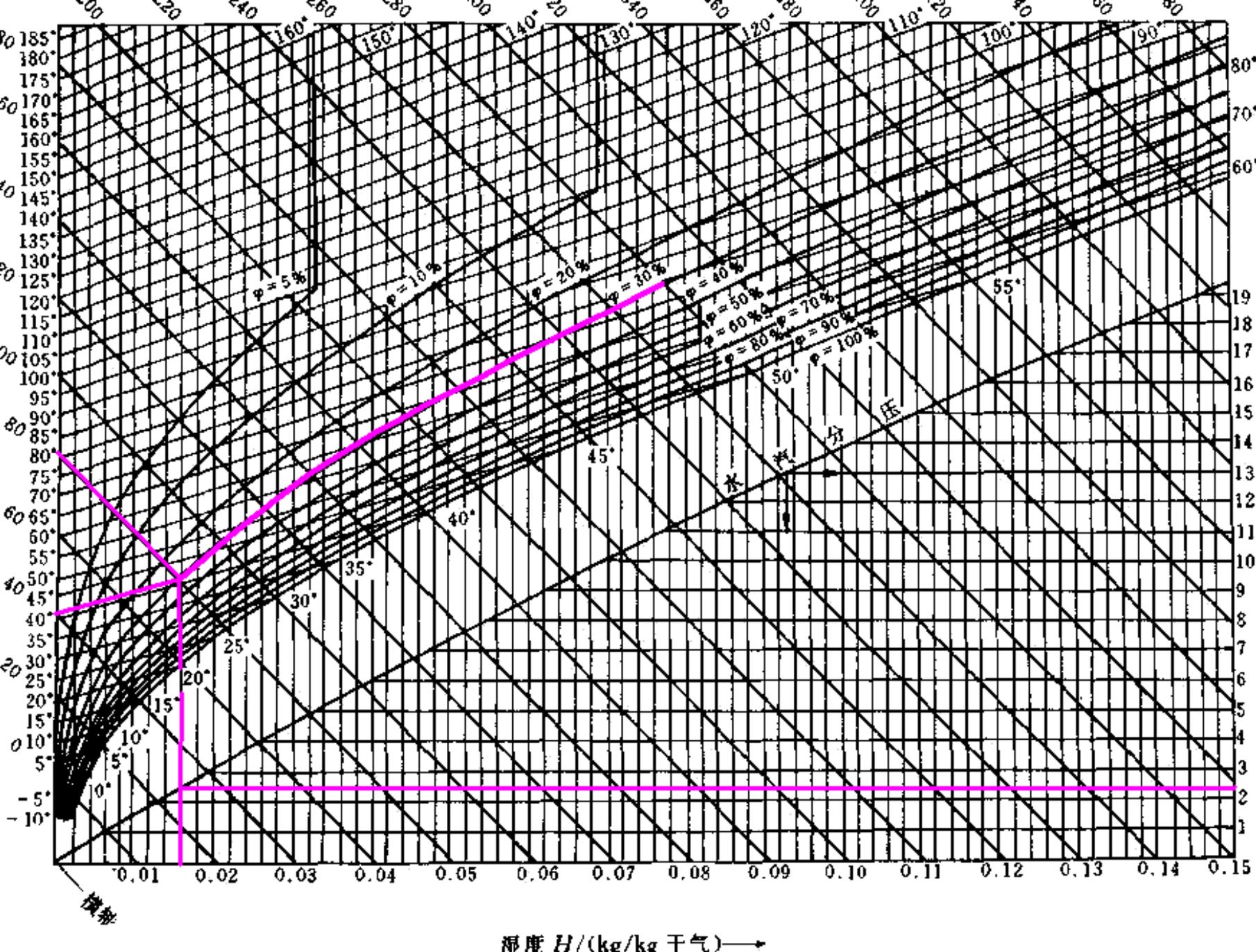
$$t_d = 29$$

查图

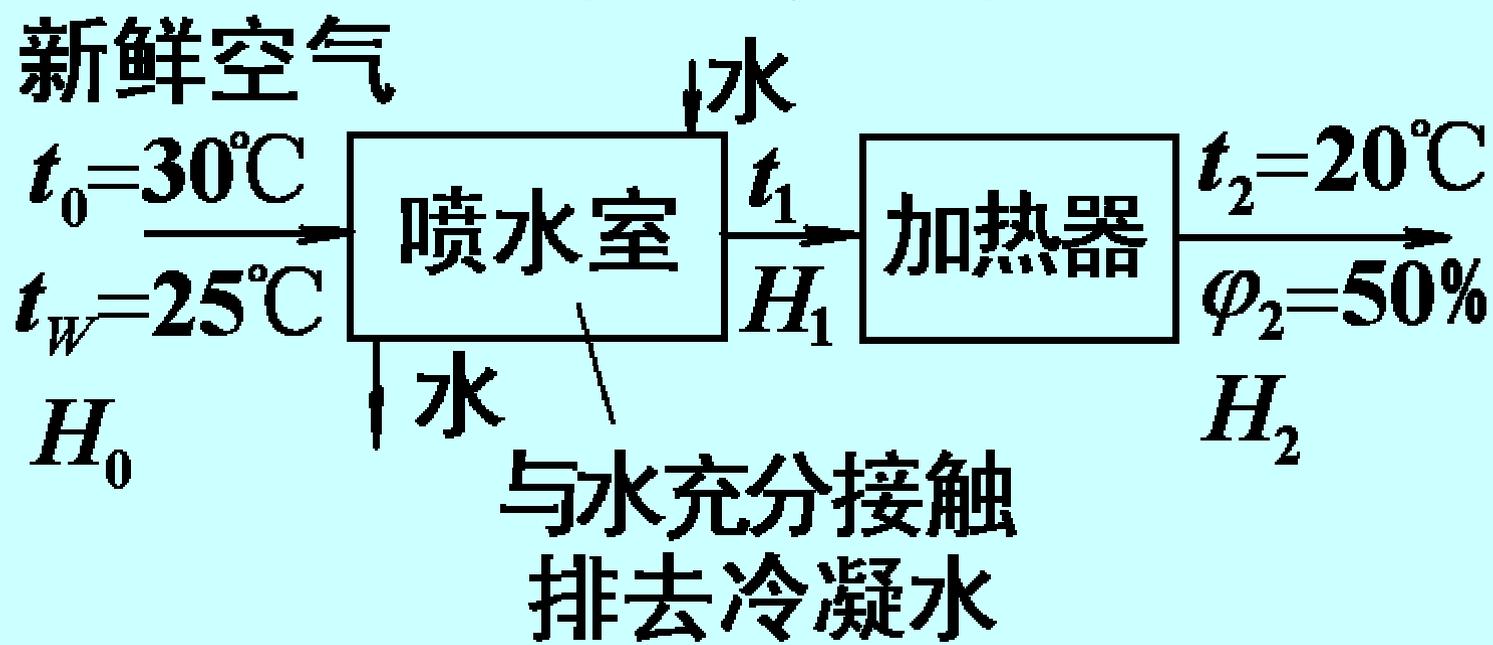
查图

例：已知： $t_d=20$, $\varphi=30\%$

查： H, t, p, I



例2 常压下，现需调节气温及湿度，新鲜空气经喷水室与水充分接触，被冷却后排去冷凝水，再经加热器升温至所需温度。试求：



H_1

t_1

整个过程前后湿度变化

设离开喷水室的气、液温度相同

解： $H_1=H_2$ ，出喷水至 $\phi_1=100\%$

先算 H_2 ，查20， $p_s=2.27kPa$

$$H_1 = H_2 = 0.622 \frac{\phi p_s}{p - \phi p_s} = 0.622 \times \frac{0.5 \times 2.27}{101.3 - 0.5 \times 2.27}$$
$$= 0.007 \text{水/kg干气}$$

$$p_{\text{水}} = 0.5 \times 2.27 = 1.14 \text{ kPa}$$

由 $\phi_1=100\%$ ，查表得 $t_1=9$

查 $t_w=25$ ， $r_w=2441\text{kJ/kg}$ ， $p_w=3.186 \text{ kPa}$

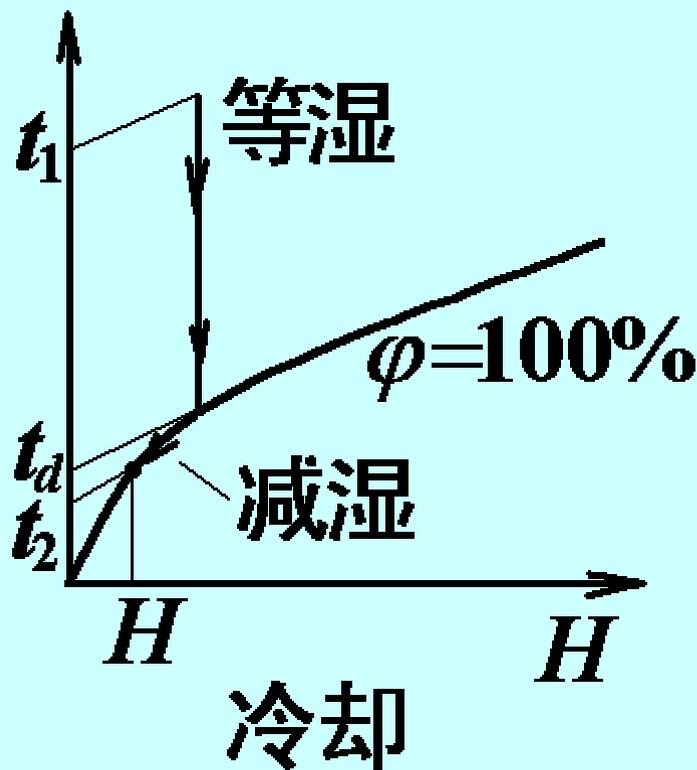
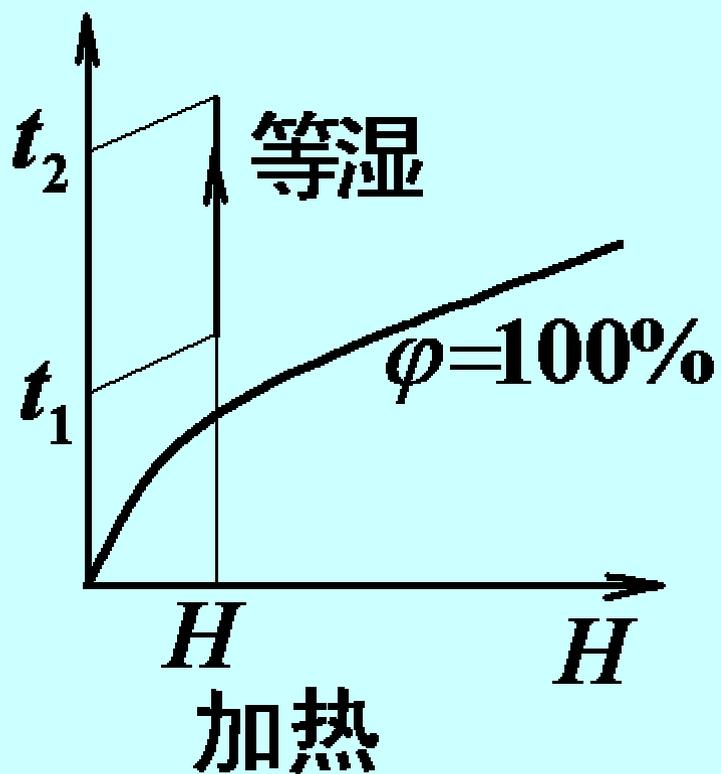
$$\alpha(t_0 - t_w) = k_H r_w (H_w - H_0)$$

$$H_0 = H_w - \frac{\alpha}{k_H r_w} (t_0 - t_w)$$

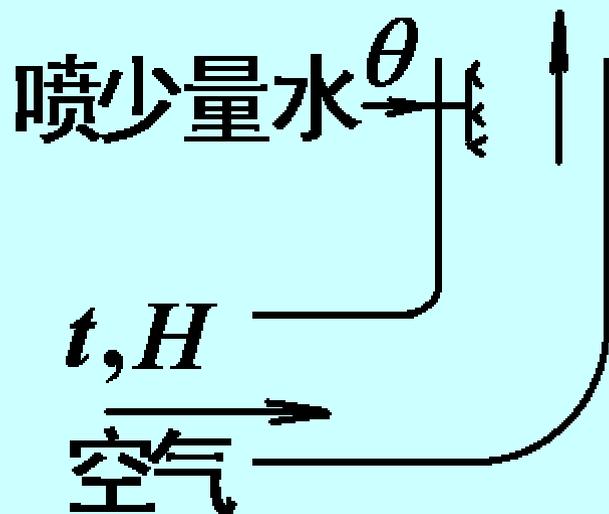
$$= 0.622 \frac{p_w}{p - p_w} - \frac{1.09}{r_w} (t_0 - t_w) = 0.0178 \text{kg水/kg干气}$$

$$\Delta H = H_2 - H_0 = 0.007 - 0.0178 = -0.0108 \text{ kg水 / kg干气}$$

3 焓湿图中表示过程变化 加热与冷却的过程



绝热增湿过程(等焓过程)



增湿量 $H_1 - H$

增焓量

$$\Delta I = 4.18\theta(H_1 - H)$$

kJ/kg干气

$$C_p\theta \ll r$$

$\Delta I \ll I$, 可忽略 ΔI

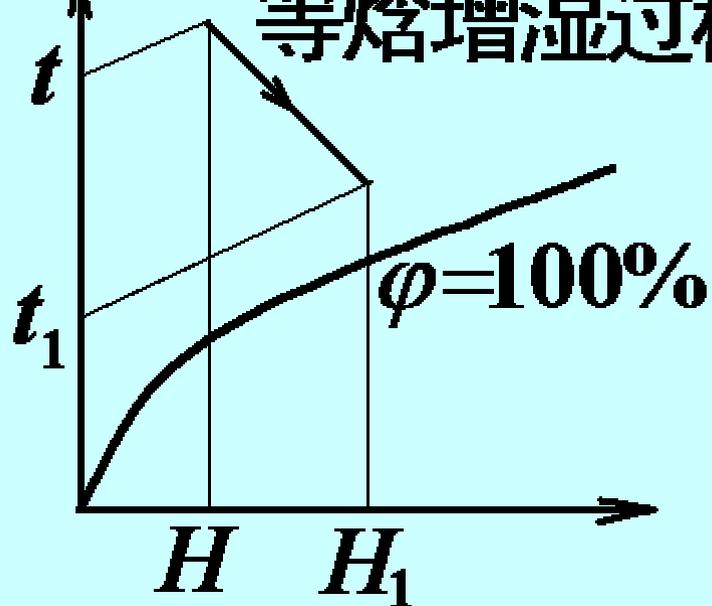
则 t_1, H_1 与 t, H 之间视为等焓, $I = I_1$

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

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

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

等焓增湿过程



达到气相中水分饱和时，则

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

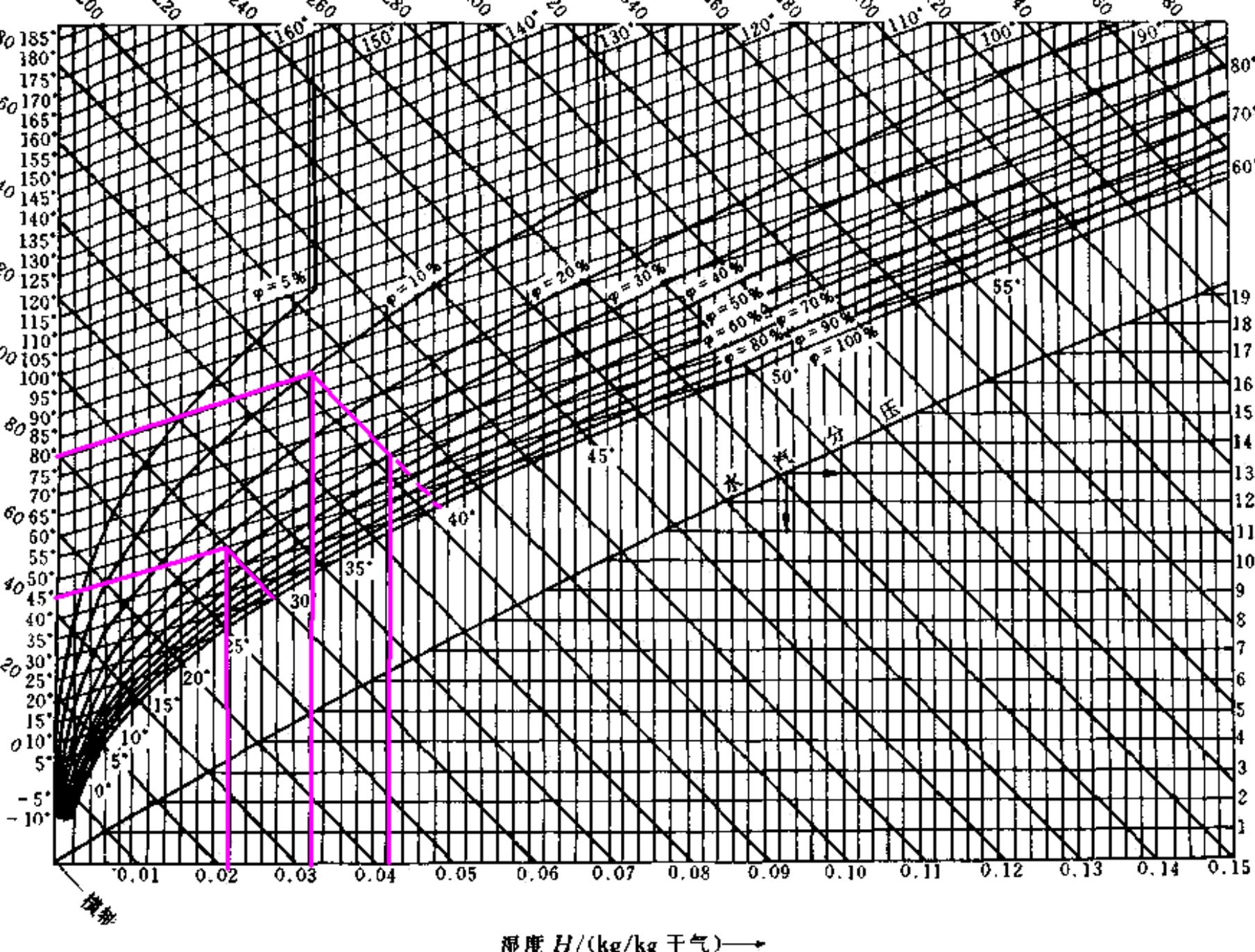
$$t_{as} = t - \frac{r_{as}}{c_{pH}}(H_{as} - H)$$

查等焓线至 $\varphi=100\%$

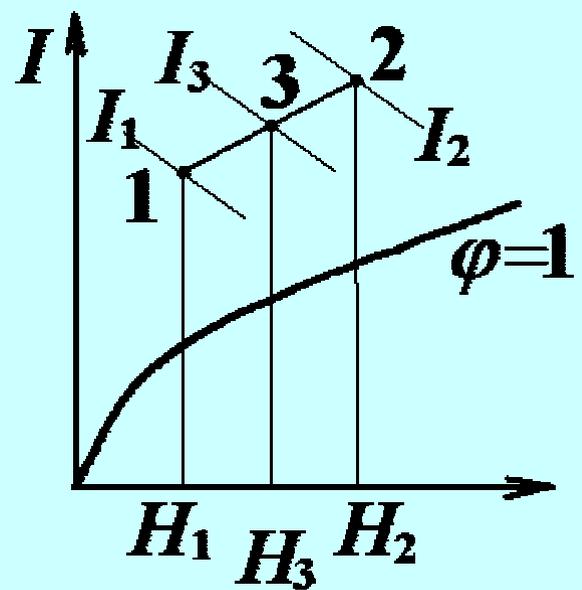
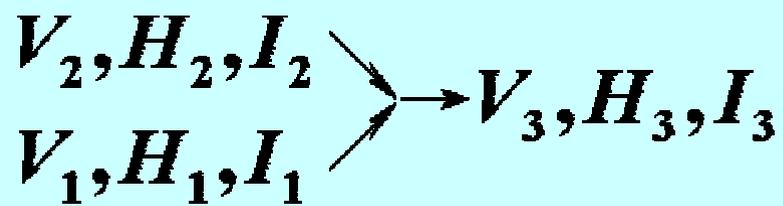
查： $t=80$ ， $H=0.03$ kg水/kg干气
等焓增湿至 55 ， $H_1=?$
此空气的 $t_{as}=?$

路易斯规则：空气-水系统 t_w t_{as}

查： $t_w=30$ ， $t=45$ ， $H=?$



两股气流的混合



$$V_1 + V_2 = V_3$$

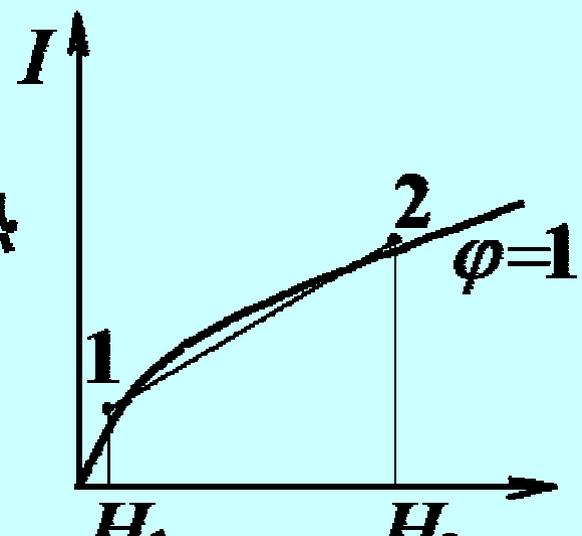
$$V_1 H_1 + V_2 H_2 = V_3 H_3$$

$$V_1 I_1 + V_2 I_2 = V_3 I_3$$

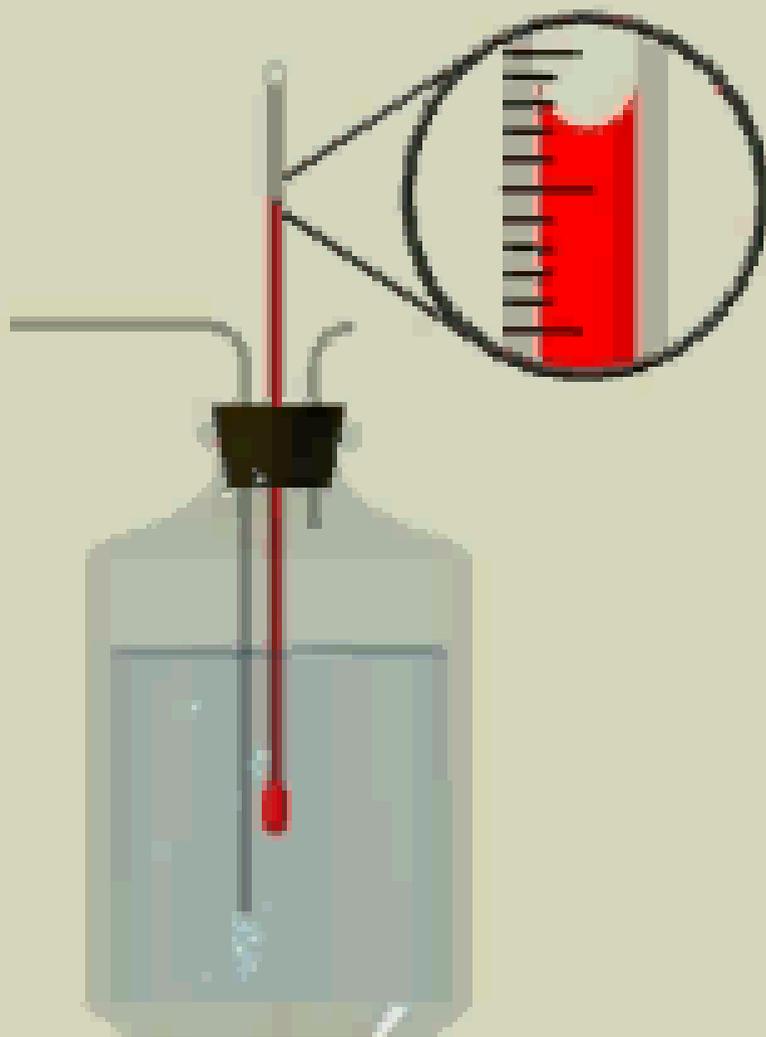
杠杆定律

特殊情况：
相对湿度较高的冷热
气体相遇，析出水

下雨的成因之一



露点温度：



25 °C

20 °C

15 °C

[返回](#)