

12-1 理想气体混合物

12-2 混合物的比热容、热力学能、焓和熵

12-3 湿空气

12-4 湿空气的状态参数

12-5 湿球温度和绝热饱和温度

12-6 湿空气焓-湿图

12-7 湿空气的热力过程

本章教学要求



1. 掌握理想气体混合物及其成分的定义与概念；
2. 掌握理想气体混合物状态参数的计算；
3. 掌握湿空气状态参数的意义及计算；
4. 能用解析法及图解法计算湿空气基本热力过程。





12-1 理想气体混合物

一、处理气体混合物的基本原则

- ▲各组分都处于理想气体状态，则混合气体也处于理想气体状态；
- ▲混合气体可作为某种假想气体，其质量和分子数与组分气体质量之和及分子数之和相同。

$$pV = mR_{g,eq}T$$

平均气体常数，
折合气体常数

平均摩尔质量，
折合摩尔质量

$$M_{eq}R_{g,eq} = R$$

理想气体混合物可作为 $R_{g,eq}$ 和 M_{eq} 的“某种”理想气体。



二、理想气体的分压力定律及分体积定律

(1)、分压力定律

分压力：当理想气体混合物的各组分在**相同温度下**，分别单独占据混合物的体积 V 时具有的压力 p_i 称为各组分的分压力。

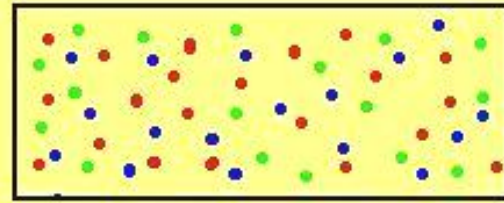
混合物的状态方程 $pV = nRT$

各组分的状态方程 $p_i V = n_i RT$

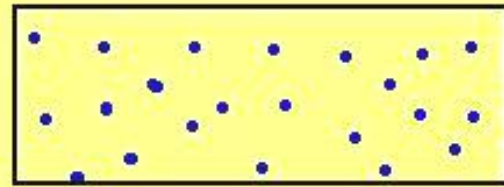
由质量守恒得：

$$n = \sum n_i$$

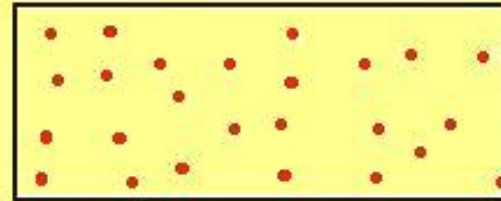
$$m = \sum m_i$$



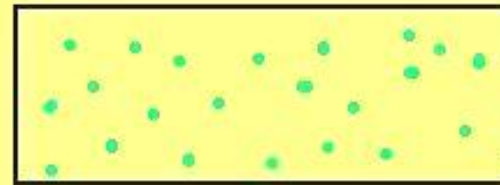
$$T \quad V \quad p \quad n \quad m$$



$$T \quad V \quad p_1 \quad n_1 \quad m_1$$



$$T \quad V \quad p_2 \quad n_2 \quad m_2$$



$$T \quad V \quad p_3 \quad n_3 \quad m_3$$



对各组分状态方程两边求和：

$$\sum (p_i V) = \sum (n_i RT)$$

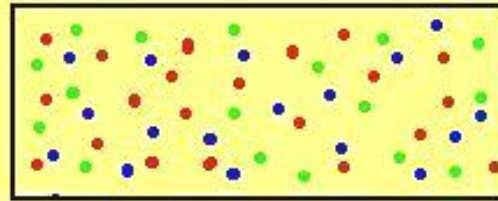
$$\Rightarrow (\sum p_i) V = nRT$$

对比混合物的状态方程 $pV = nRT$

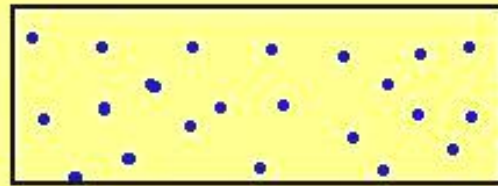
$$p = \sum p_i$$

上式称为道尔顿分压力定律。

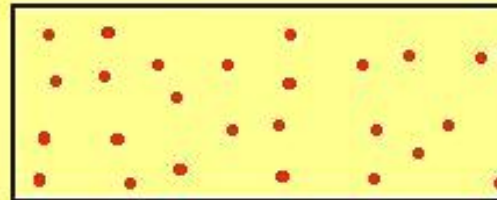
即：理想气体混合物的总压力等于各组分气体的分压力之和。



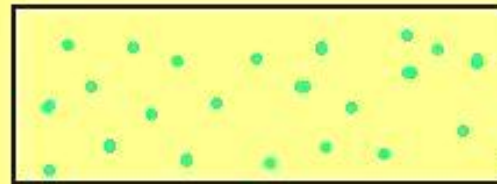
$$T V p n m$$



$$T V p_1 n_1 m_1$$



$$T V p_2 n_2 m_2$$



$$T V p_3 n_3 m_3$$

(2)、理想气体的分体积定律

分体积：混合物的各组分在与混合物**相同的温度、压力下**，各自单独占据的体积 V_i 称为各组分**的分体积**。

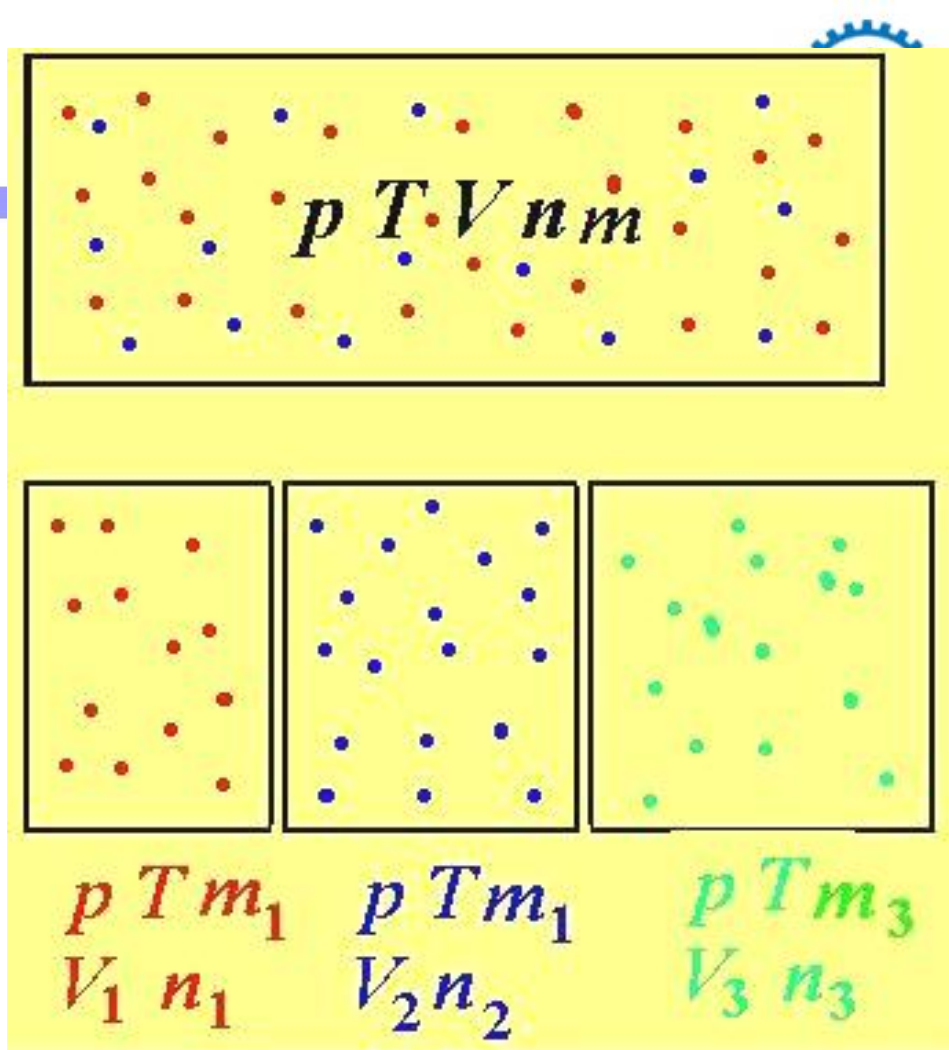
混合物的状态方程 $pV = nRT$

各组分的状态方程 $pV_i = n_iRT$

由质量守恒得：

$$n = \sum n_i$$

$$m = \sum m_i$$



对各组分状态方程两边求和：

$$\sum (pV_i) = \sum (n_iRT)$$

$$\Rightarrow p \sum V_i = nRT$$

对比混合物的状态
方程

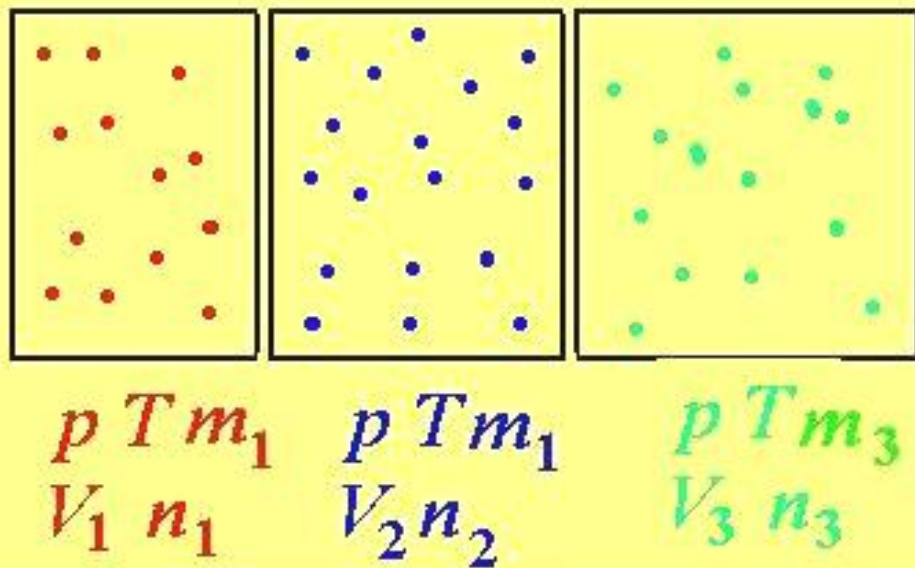
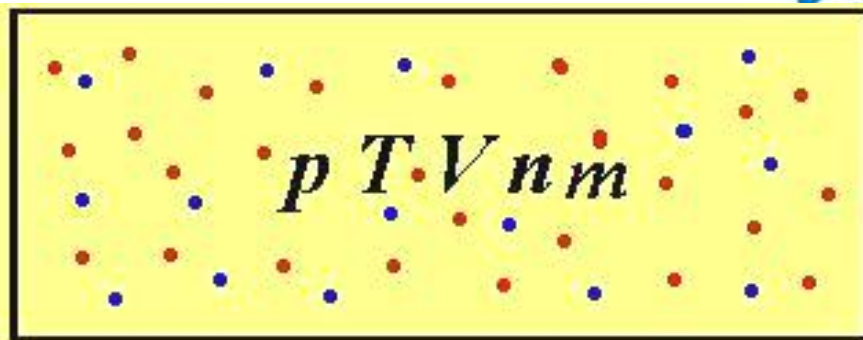
$$pV = nRT$$

$$V = \sum V_i$$

上式称为亚美格分体积定律。

即，混合气体的总体积等于各组分气体的分体积之和。

注意：道尔顿分压力定律和亚美格分体积定律仅适用于理想气体。
(没有考虑分子本身的体积和分子间的相互作用力。)





三、混合物的成分

混合物的成分：各组分的含量占总量的比例，常用的有质量分数、摩尔分数和体积分数。

(1) 质量分数：各组分气体的质量与混合物的总质量之比。

$$w_i = \frac{m_i}{m} \quad \text{由质量守恒可得} \quad \sum w_i = \sum \frac{m_i}{m} = \frac{\sum m_i}{m} = 1$$

(2) 摩尔分数：各组分气体物质的量与混合气体总物质的量之比。

$$x_i = \frac{n_i}{n}$$

$$\text{由物质的量守恒可得} \quad \sum x_i = \sum \frac{n_i}{n} = \frac{\sum n_i}{n} = 1$$



(3) 体积分数：各组分气体的分体积与混合气体的总体积之比。

$$\varphi_i = \frac{V_i}{V} \quad \sum \varphi_i = 1$$

由分体积定律

$$\begin{array}{l} pV_i = n_i RT \\ pV = nRT \end{array} \Rightarrow \frac{V_i}{V} = \frac{n_i}{n}$$

由分压力定律

$$\begin{array}{l} p_i V = n_i RT \\ pV = nRT \end{array} \Rightarrow \frac{p_i}{p} = \frac{n_i}{n}$$

$$\varphi_i = \frac{V_i}{V} = \frac{p_i}{p} = \frac{n_i}{n} = x_i$$

体积分数与摩尔
分数等价。





四、混合气体的平均摩尔质量和平均气体常数

基本原则二：混合气体可作为某种假想气体，其质量和分子数与组分气体质量之和及分子数之和相同。

理想气体混合物也满足状态方式 $pV=nRT$ 。

$$m = \sum m_i = \sum n_i M_i = n M_{eq}$$

$$M_{eq} = \sum x_i M_i$$

M_{eq} 称为混合气体的平均摩尔质量（折合摩尔质量）。

折合气体常数 $R_{g,eq}$ 可写成

$$R_{g,eq} = \frac{R}{M_{eq}}$$

$$pV = \sum m_i R_{gi} T = m R_{g,eq} T$$

$$R_{g,eq} = \sum w_i R_{gi}$$



由摩尔成分的定义可得：

$$x_i = \frac{n_i}{n} = \frac{m_i / M_i}{m / M_{\text{eq}}} = \frac{M_{\text{eq}}}{M_i} w_i$$

考虑到： $R = M_i R_{\text{g},i} = M_{\text{eq}} R_{\text{g,eq}}$

$$x_i = \frac{R_{\text{g},i}}{R_{\text{g,eq}}} w_i$$

例题1：由两种气体组成的混合气体，若质量分数 $w_A > w_B$ ，是否一定有摩尔分数 $x_A > x_B$ ，为什么？试以 H_2 和 CO_2 混合物， $w_{H_2} = 0.1$ $w_{CO_2} = 0.9$ 说明之。

解：

$$x_i = \frac{n_i}{n} = \frac{m_i / M_i}{m / M_{eq}} = \frac{M_{eq}}{M_i} w_i = \frac{R_{g,i}}{R_{g,eq}} w_i$$

可见，摩尔分数不仅取决于质量分数，还和各组分气体的气体常数（或摩尔质量）有关。

$$\begin{aligned} R_{g,eq} &= \sum R_{g,i} w_i = R_{g,H_2} w_{H_2} + R_{g,CO_2} w_{CO_2} \\ &= 4.124 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \times 0.1 + 0.189 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \times 0.9 \\ &= 0.5825 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \end{aligned}$$



$$\left. \begin{aligned} x_{\text{H}_2} &= \frac{R_{\text{g,H}_2}}{R_{\text{g,eq}}} w_{\text{H}_2} = \frac{4.124 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})}{0.5825 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})} \times 0.1 = 0.708 \\ x_{\text{CO}_2} &= \frac{R_{\text{g,CO}_2}}{R_{\text{g,eq}}} w_{\text{CO}_2} = \frac{0.189 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})}{0.5825 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})} \times 0.9 = 0.292 \end{aligned} \right\} x_{\text{CO}_2} < x_{\text{H}_2}$$

可见，质量分数高的组分，摩尔分数未必高。





12-2 混合物的比热容、热力学能、焓和熵

一、比热容

混合气体吸收的总热量 $Q = \sum Q_i$

1kg混合物吸收的热量应等于各组分吸收热量之和，即

$$q = \sum w_i q_i$$

根据比热容的定义式得

$$c = \frac{\delta q}{dT} = \sum (w_i \frac{\delta q_i}{dT}) = \sum w_i c_i$$

定压比热容和定容比热容可写成：

$$c_p = \sum w_i c_{pi}$$

$$c_v = \sum w_i c_{vi}$$





二、热力学能和焓

理想气体混合物满足理想气体假设，分子之间不存在相互作用力，因此总热力学能和焓，应等于各组分气体在相同温度和体积下的热力学能和焓之和。

$$U = \sum U_i(T) = \sum m_i u_i(T)$$

$$H = \sum H_i(T) = \sum m_i h_i(T)$$

$$u = \frac{U}{m} = \frac{\sum m_i u_i}{m} = \sum w_i u_i(T)$$

$$h = \frac{H}{m} = \frac{\sum m_i h_i}{m} = \sum w_i h_i(T)$$

$$U_m = \frac{U}{n} = \frac{\sum n_i U_{m,i}}{n} = \sum x_i U_{m,i}(T)$$

$$H_m = \frac{H}{n} = \frac{\sum n_i H_{m,i}}{n} = \sum x_i H_{m,i}(T)$$

组分给定，混合物的比热力学能和比焓也仅是温度的单值函数。

混合物热力学能和焓的变化量

$$\Delta u = \sum w_i \Delta u_i(T)$$

$$\Delta h = \sum w_i \Delta h_i(T)$$



三、混合气体的熵

理想气体混合物满足理想气体假设，分子之间不存在相互作用力，因此总熵，应等于各组分气体在相同温度和体积（分压力）下的熵之和。

$$S = \sum S_i \quad s = \sum w_i s_i \quad s_i = f(T, p_i) = f(T, V)$$

$$ds_i = c_{pi} \frac{dT}{T} - R_{g,i} \frac{dp_i}{p_i}$$

$$ds = \sum (w_i c_{pi} \frac{dT}{T}) - \sum (w_i R_{g,i} \frac{dp_i}{p_i})$$

$$dS_m = \sum (x_i c_{p,mi} \frac{dT}{T}) - \sum (x_i R \frac{dp_i}{p_i})$$

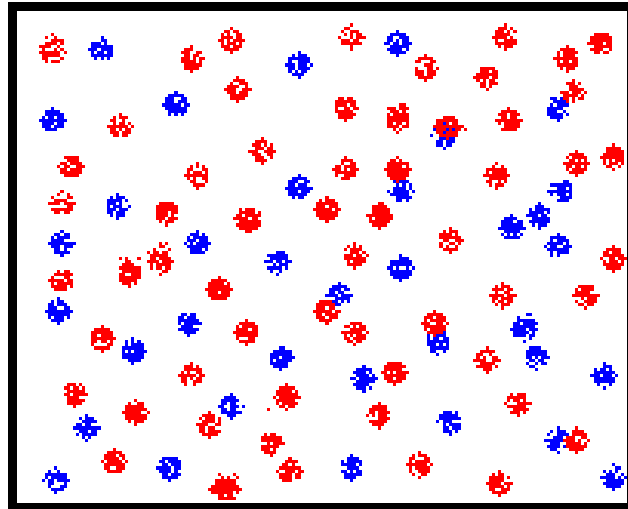


如某种混合气体由A，B两种气体组成，混合气体压力 p ，

分压力为 p_A ， p_B 温度为 T ，则

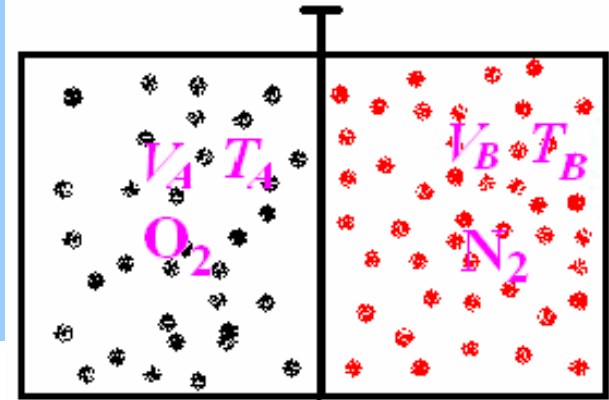
$$S = w_A s_A (p_A, T) + w_B s_B (p_B, T)$$

分压力





例题2：刚性绝热容器隔板两侧各储有1 kmol O_2 和 N_2 。且 $V_A=V_B$, $T_A=T_B$ 。抽去隔板，系统平衡后，求：熵变。



解： 取容器内全部气体为系统

$$V_A = V_B \quad T_A = T_B \quad \text{且均为1kmol}$$

混合前：

$$p_{A1} = \frac{n_A RT_A}{V_A} = p_{B1} = \frac{n_B RT_B}{V_B}$$



$$\overset{0}{\cancel{Q}} = \Delta U + \overset{0}{\cancel{W}}$$

$$\begin{aligned} \Delta U &= C_{VmO_2} (T_2 - T_A) + C_{VmN_2} (T_2 - T_B) \\ &= (C_{VmO_2} + C_{VmN_2}) (T_2 - T_A) = 0 \end{aligned}$$

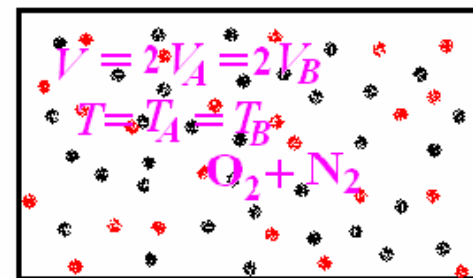
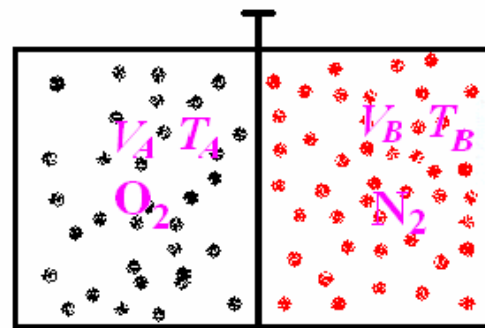
$$T_2 = T_A = T_B$$

混合后: $\therefore n_{\text{混}} = n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} = 2 \text{ kmol}$

$$\therefore x_{\text{O}_2} = \frac{1}{2} \quad x_{\text{N}_2} = \frac{1}{2}$$

$$p_2 = \frac{n_{\text{混}} RT_2}{V_2} = \frac{2RT_2}{2V_A} = \frac{RT_A}{V_A} = p_{A1} = p_{B1}$$

$$\therefore p_{\text{O}_2,2} = x_{\text{O}_2} p_2 = \frac{1}{2} p_{A1} \quad p_{\text{N}_2,2} = x_{\text{N}_2} p_2 = \frac{1}{2} p_{B1}$$





$$dS_{\text{混m}} = \sum x_i C_{p,m_i} \frac{dT}{T} - \sum x_i R \frac{dp_i}{p_i} = -R \sum x_i \frac{dp_i}{p_i}$$

0

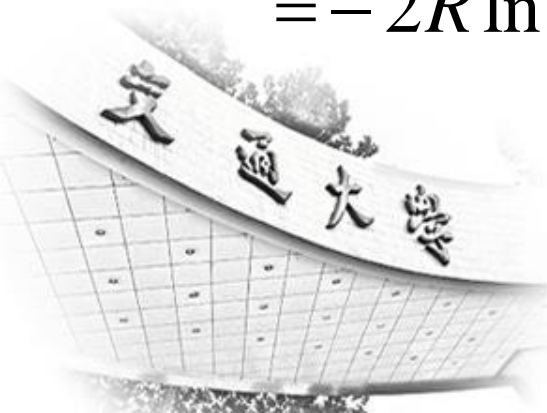
$$\Delta S = n_{\text{混}} \times \Delta S_{\text{混m}} = 2 \times \left(-R \sum x_i \ln \frac{p_{i2}}{p_{i1}} \right)$$

$$= -2R \left[\frac{1}{2} \ln \frac{p_{\text{O}_2,2}}{p_{A1}} + \frac{1}{2} \ln \frac{p_{\text{N}_2,2}}{p_{B1}} \right]$$

$$= -2R \ln \frac{1}{2} = 2R \ln 2$$

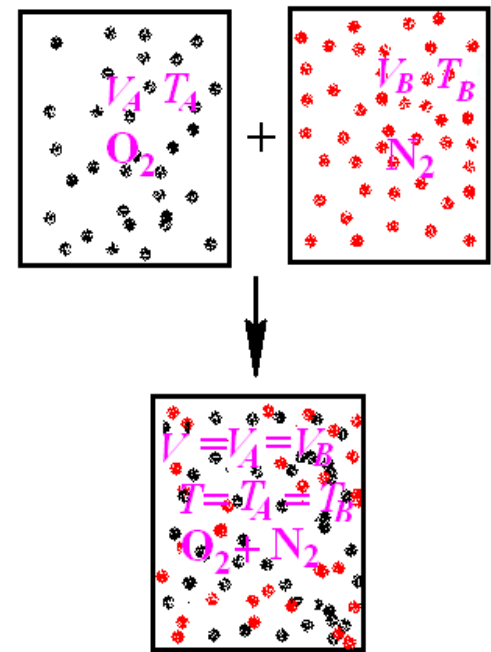
若为同种气体，情况会怎么样？

$$\Delta S = 0$$





例题3：刚性容器A，B分别储有1 kmol O_2 和 N_2 ，将它们混合装于C，若 $V_A=V_B=V_C$ ， $T_A=T_B=T_C$ 。求：熵变。



解：混合前 $p_{A1} = \frac{n_A RT_A}{V_A} = p_{B1} = \frac{n_B RT_B}{V_B}$

混合后 $p = \frac{n_{\text{混}} RT_c}{V_c} = 2p_{A1} = 2p_{B1}$

$$p_{O_2,2} = x_{O_2} p = \frac{1}{2} \times 2p_{A1} = p_{A1} \quad p_{N_2,2} = x_{N_2} p = p_{B1}$$

$$\Delta S = -2R \left[\frac{1}{2} \ln \frac{p_{O_2,2}}{p_{A1}} + \frac{1}{2} \ln \frac{p_{N_2,2}}{p_{B1}} \right] = 0$$



讨论:

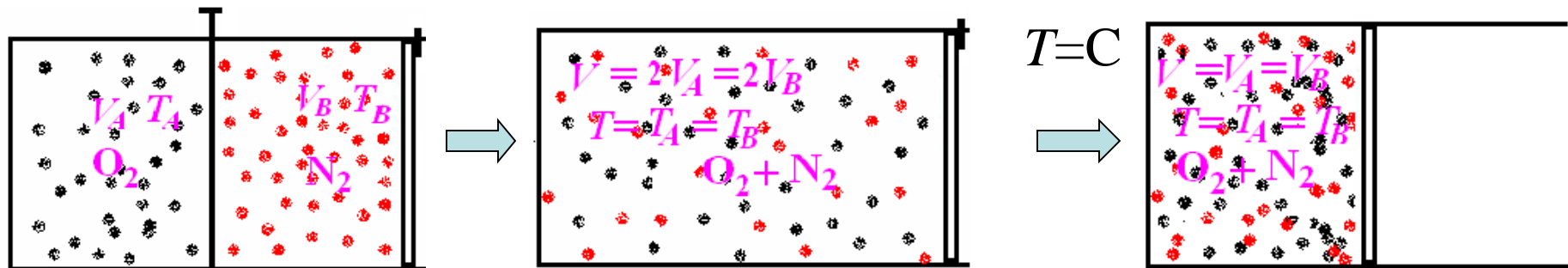
若 O_2 改成 N_2 , $\Delta S'=?$

$$\Delta S' = 2 \left[C_{pm} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} \right] = -2R \ln 2$$

为什么 ΔS 与 $\Delta S'$ 不同?



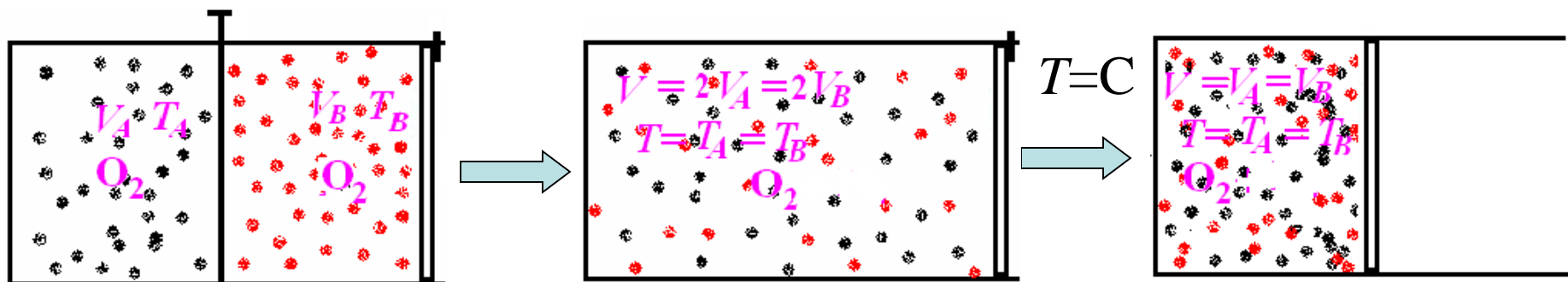
混合熵变



$$\Delta S_{12}=?$$

$$\Delta S_{23}=?$$

$$\Delta S_{13}=?$$





12-3 湿空气

一、干空气和湿空气

地球上的大气由氮气、氧气、氩气、二氧化碳、水蒸气及极微量的其他气体组成。含有水蒸气的空气，称为湿空气。

水蒸气以外的所有组成气体称为干空气。

大气是干空气与水蒸气组成的混合气体。

湿空气中的水蒸气在一定条件下会发生集态的变化：液化、凝固或蒸发等。

因此，严格意义上说湿空气不是理想气体。

但工程应用中的湿空气通常都处于大气压力或低于大气压力的较低压力下，可以简化成理想气体混合物处理。



湿空气=干空气+水蒸气

湿空气处理成理想气体混合物

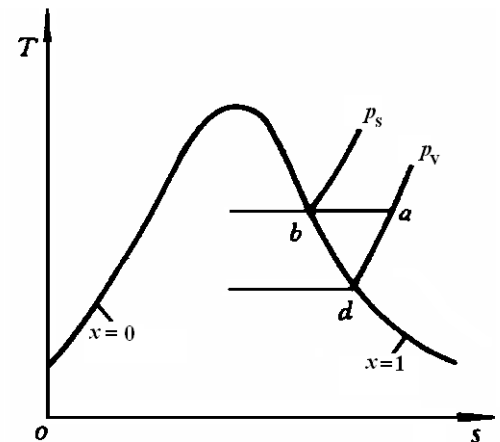
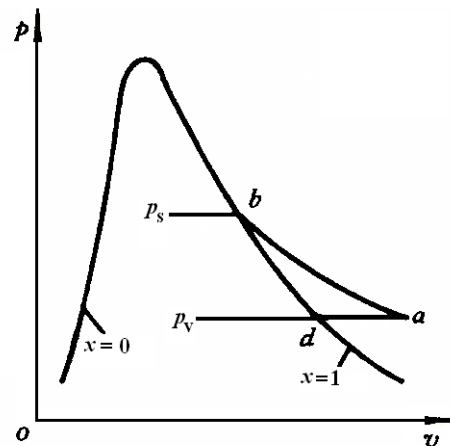
$$\left\{ \begin{array}{l} p = p_a + p_v \\ R_g = \frac{R}{M} \\ pv = R_g T \\ pV = nRT = mR_g T \end{array} \right.$$



二、未饱和空气和饱和空气

未饱和空气：湿空气中水蒸气分压力 p_v 低于湿空气温度所对应的饱和压力 p_s ，水蒸气处于过热状态(a点)，这种湿空气称为未饱和空气。具有吸收水分的能力。

饱和空气：湿空气中水蒸气的分压力 p_v 达到湿空气温度所对应的饱和压力 p_s ，水蒸气处于饱和状态（b），这种湿空气称为饱和空气。不具有吸收水分的能力。





空气中的水蒸气	过热 $[t > t_s(p_v) \text{ 或 } p_v < p_s(t)]$	空气未饱和, 具有吸湿能力
	饱和 $[t = t_s(p_v) \text{ 或 } p_v = p_s(t)]$	空气饱和, 不具有吸湿能力

空气饱和与否取决于 t, p_v

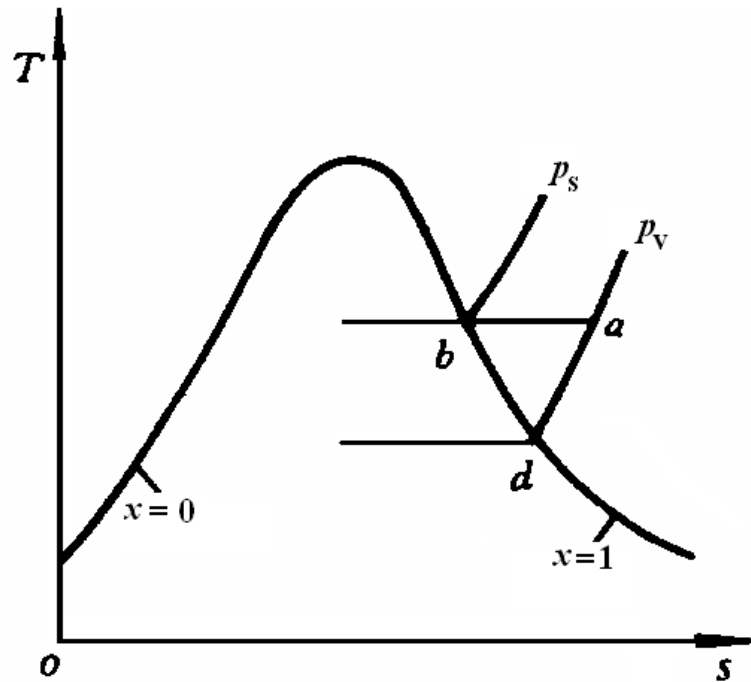
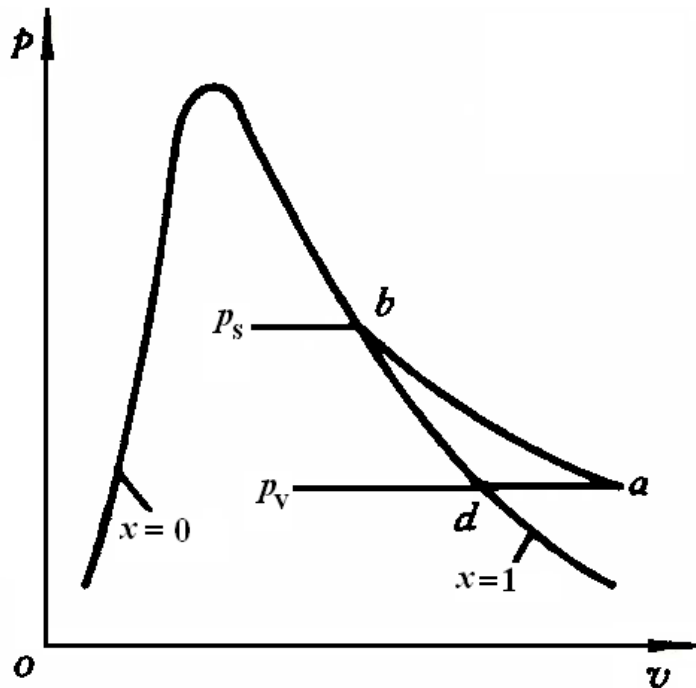
如	$t / ^\circ \text{C}$	1	10	20	30
	p_s / kPa	0.6556	1.2279	2.3385	4.2451

当	$p_v = 0.6556 \text{ kPa}$	$20^\circ \text{C} \quad p_v < p_s$	空气未饱和
		$1^\circ \text{C} \quad p_v = p_s$	空气饱和



空气达到饱和的途径

$\left\{ \begin{array}{l} t \text{ 不变, } p_v \text{ 上升, } p_v = p_s(t) \text{——a-b} \\ p_v \text{ 不变, } t \text{ 下降, } t = t_s(p_v) \text{——a-d} \end{array} \right.$



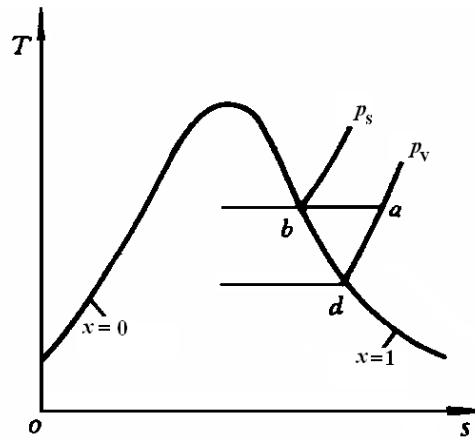
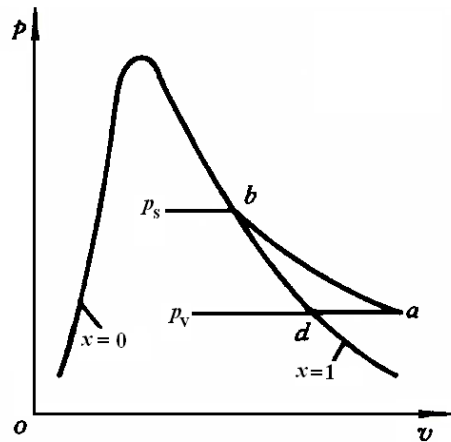


12-4 湿空气的状态参数

一、露点温度 t_d

湿空气中水蒸气分压力 p_v 所对应的饱和温度， $t_d=t_s(p_v)$ ，是 p_v 的单值函数。

在湿空气温度一定的条件下，露点温度越高说明湿空气中水蒸气的分压力越高，水蒸气含量越多，湿空气越潮湿，反之湿空气越干燥。因此露点温度反应湿空气的潮湿程度。



二、压力

总压力： p ，
干空气的分压力 p_a ，
水蒸气的分压力 p_v

$$p = p_a + p_v$$



三、相对湿度

湿度—空气的潮湿程度，与空气中所含水蒸气量有关。

1、绝对湿度(absolute humidity)

每立方米湿空气中水蒸气的质量，即湿空气中水蒸气的密度 ρ_v ，单位 kg/m^3

$$1) \quad \rho_v = \frac{1}{v_v} \quad \text{理想气体} \quad p_v v_v = R_{gv} T \Rightarrow \rho_v = \frac{1}{v_v} = \frac{p_v}{R_{gv} T}$$

$$2) \quad p_v \leq p_{v,\max} = p_s \quad \rho_v \leq \rho_s = \rho_{v,\max} = \rho''$$

3) ρ_v 值不能直接反映湿空气吸湿能力大小，还与温度有关。

如 $\rho_v = 0.009 \text{ kg/m}^3$,

$10^\circ\text{C}, \rho_s = 0.0094 \text{ kg/m}^3$ ，几乎无吸湿能力；

$25^\circ\text{C}, \rho_s = 0.0244 \text{ kg/m}^3$ ，有较强的吸湿能力。

2、相对湿度（饱和度）（humidity） φ

—绝对湿度与同温度下可能达到最大绝对湿度之比。

—湿空气中水蒸气分压力与同温下最大可能的水蒸气分压力之比。

$$\varphi = \frac{\rho_v}{\rho_s} \quad \rho_v = \frac{1}{v_v} = \frac{p_v}{R_{gv}T} \quad \rho_s = \frac{1}{v_s} = \frac{p_s}{R_{gs}T}$$

$$1. \quad \boxed{\varphi = \frac{p_v}{p_s}} \quad \boxed{p_v = \varphi p_s}$$

$$2. \quad 0 \leq \varphi \leq 1 \quad \left\{ \begin{array}{ll} \varphi = 0 & \text{干空气} \\ 0 < \varphi < 1 & \text{未饱和空气} \\ \varphi = 1 & \text{饱和空气} \end{array} \right. \quad \downarrow \quad \text{吸湿能力下降}$$

相对湿度反映了湿空气的干燥程度（吸湿能力）。

取决于水蒸气的分压力和湿空气温度。分压力一定，温度越高，相对湿度越低；温度一定，分压力越高，相对湿度越高。



四、湿空气的含湿量

若湿空气中的干空气质量为 m_a ，水蒸气的质量为 m_v ，
则含湿量的定义为

$$d = \frac{m_v}{m_a} \quad \text{kg(水蒸气)/kg(干空气)}$$

$$d = \frac{m_v}{m_a} = \frac{p_v V / (R_{g,v} T)}{p_a V / (R_{g,a} T)} = \frac{M_v}{M_a} \frac{p_v}{p_a} = \frac{18.06}{28.97} \frac{p_v}{p_a} = 0.622 \frac{p_v}{p_a}$$

$$d = 0.622 \frac{p_v}{p - p_v} = 0.622 \frac{\varphi p_s}{p - \varphi p_s}$$

讨论：

a) 当 p 一定时, $d \leftrightarrow p_v$

b) p 、 φ 一定, $t \uparrow \Rightarrow p_s \uparrow \Rightarrow d \uparrow$ **升温吸湿原理**



五、湿空气的焓

湿空气是干空气和水蒸气的混合物，因此湿空气的焓是干空气的焓和水蒸气的焓之和。

湿空气的总焓为 H ，干空气的焓为 H_a ，水蒸气的焓为 H_v ，则：

$$H = H_a + H_v = m_a h_a + m_v h_v$$

湿空气的比焓：湿空气在热力过程中，仅干空气的量是常量，因此湿空气的比焓是相对于单位质量干空气的比焓

$$h = \frac{H}{m_a} = h_a + \frac{m_v}{m_a} h_v = h_a + dh_v$$





取0℃时干空气的焓值为零，则任意温度 t 的干空气的比焓为：

$$\text{干空气的比焓 } h_a = h_0 + c_{p,a}t = 1.005t$$

$$\text{水蒸气的比焓 } h_v = h_c + c_{p,v}t = 2501 + 1.86t$$

其中， $c_{p,a}=1.005\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，为干空气的比定压热容；

$h_c=2501\text{kJ/kg}$ ，为0℃时干饱和蒸汽的比焓；

$c_{p,v}=1.86\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，为水蒸气处于理想气体状态下的比定压热容

注意：温度的单位为℃。零点规定时采用的是0℃，实际应该是 $(t-t_0)$

干空气比焓的计算公式：

$$h = h_a + dh_v = 1.005t + d(2501 + 1.86t) \quad (\text{kJ/kg干空气})$$



例题1： 设大气压力为0.1MPa，温度为30℃，相对湿度为40%，试求湿空气的露点温度，含湿量及比焓。

解（1）求露点温度

由已知 $t=30^{\circ}\text{C}$ ，查饱和水及饱和水蒸气表，得 $p_s=4.2451\text{kPa}$ 。

$$p_v = \varphi p_s = 40\% \times 4.2451 = 1.698\text{kPa}$$

露点温度就是水蒸气分压力 p_v 对应的饱和温度，因此

由 $p_v=1.698\text{kPa}$ ，查饱和水及饱和水蒸气表，得 $t_s=14.3^{\circ}\text{C}$ ，即 $t_d=14.3^{\circ}\text{C}$ 。

（2）求含湿量 d

$$\begin{aligned} d &= 0.622 \frac{p_v}{p - p_v} = 0.622 \times \frac{1.698}{100 - 1.698} \text{kg/kg(a)} \\ &= 10.7 \times 10^{-3} \text{kg/kg(a)} \end{aligned}$$



(3) 求比焓

$$\begin{aligned} h &= 1.005t + d(2501 + 1.86t) \quad \text{kJ/kg(a)} \\ &= 1.005 \times 30 + 10.7 \times 10^{-3} \times (2501 + 1.86 \times 30) \quad \text{kJ/kg(a)} \\ &= 57.51 \text{ kJ/kg(a)} \end{aligned}$$

注意：

- 1) 比焓的单位；
- 2) 求总焓时，乘以干空气的质量，而不是总质量；
- 3) 含湿量和焓的计算，均要用到相对湿度，因此，相对湿度是一个非常重要的参数。



12-5 湿球温度

一、湿球温度

湿空气的状态参数有

$$p, t, \quad p_v, t_d, \varphi, d, h$$

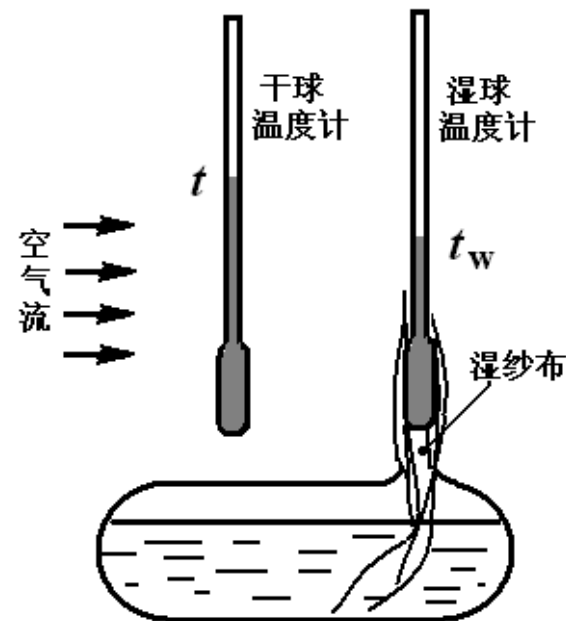
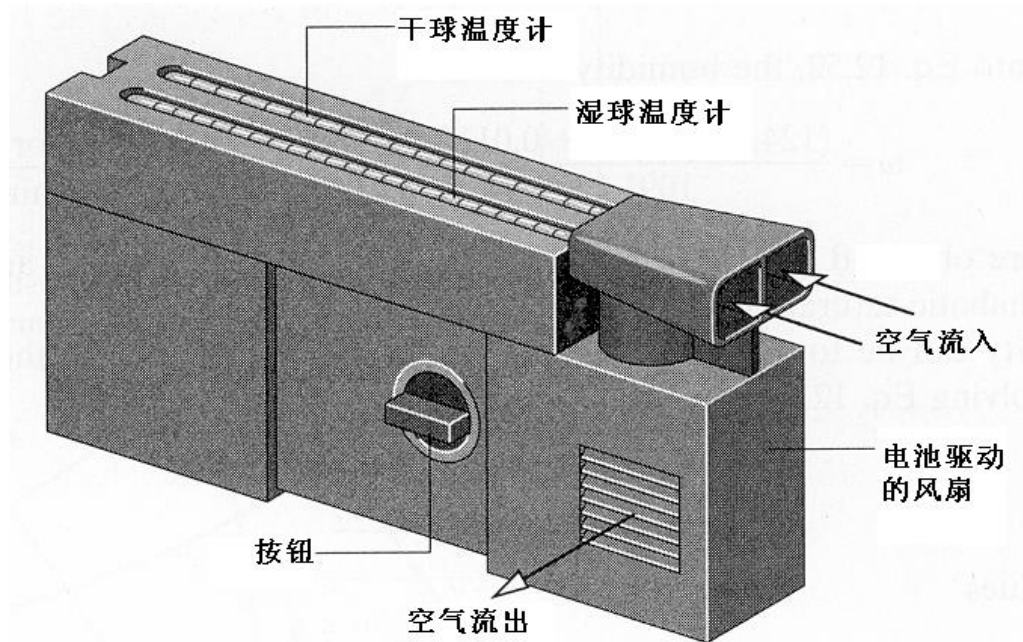
在 p 、 t 确定之后，后五个参数只有一个独立变量，也就是五个中只要知道一个参数，状态就确定了。

通常都是先测得相对湿度——干湿球温度计。





干湿球温度计测量相对湿度的原理



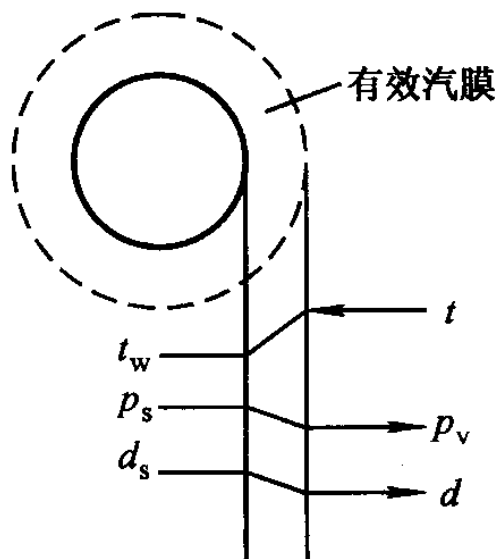
干湿球温度哪个较高？

$$t \geq t_w$$





湿球温度计被湿纱布包着，当未饱和空气流吹过湿纱布时，纱布内的水汽化，在纱布表面形成有效气膜，气膜内的湿空气接近饱和。



$$p_{v, \text{汽膜}} > p_{v, \text{主流}}$$

$$t_w \geq t_d$$

$$d = 0.622 \frac{p_v}{p_a} = 0.622 \frac{p_v}{p - p_v} \approx 0.622 \frac{p_v}{p}$$



$$d_{\text{汽膜}} > d_{\text{主流}}$$

水不断汽化，吸收热量，使水分的温度降低，同时周围的空气将热量传递给湿纱布中的水分，传热速率随湿纱布和空气温差的增加而增加。当单位时间内空气向纱布传热等于纱布内水汽化所需热量时，湿纱布中水温度保持恒定，湿球温度。

$$t \geq t_w \geq t_d \quad \text{当湿空气为饱和空气时取等号。}$$

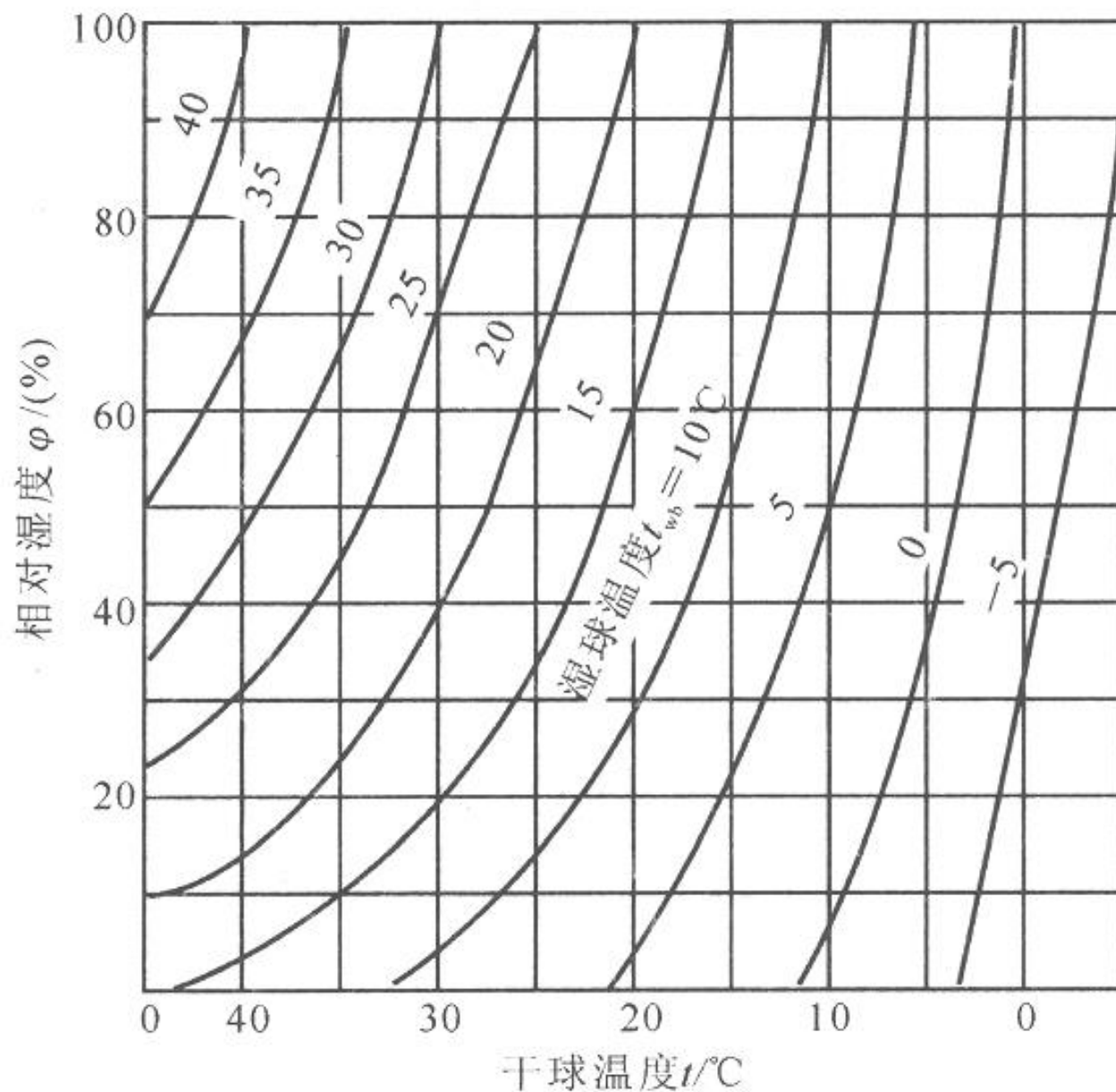


湿球温度 t_w 也是状态参数

湿球温度的测量过程，近似于绝热加湿（蒸发冷却）过程，该过程中湿空气的焓值近似不变。因此，湿球温度实际就是绝热加湿过程中，湿空气加湿到饱和状态时，对应的温度。

$$\varphi = f(t, t_w) = f(t, \Delta t)$$

实际应用中，列出 $t, \Delta t$ 的表格，可得到相对湿度的值。



干球温度一定时，
相对湿度越低，湿
球温度越低。



湿空气的状态参数

- 1、湿空气的压力, p
- 2、湿空气的温度, t
- 3、水蒸气的分压力, p_v
- 4、干空气的分压力, p_a
- 5、露点温度, t_d
- 6、含湿量, d
- 7、焓, h
- 8、相对湿度, φ
- 9、湿球温度, t_w

总压力给定的情况下, 剩下状态参数中, 只要知道其中任意两个, 就可以通过解析计算或查图查表的方法, 获得其它未知参数。

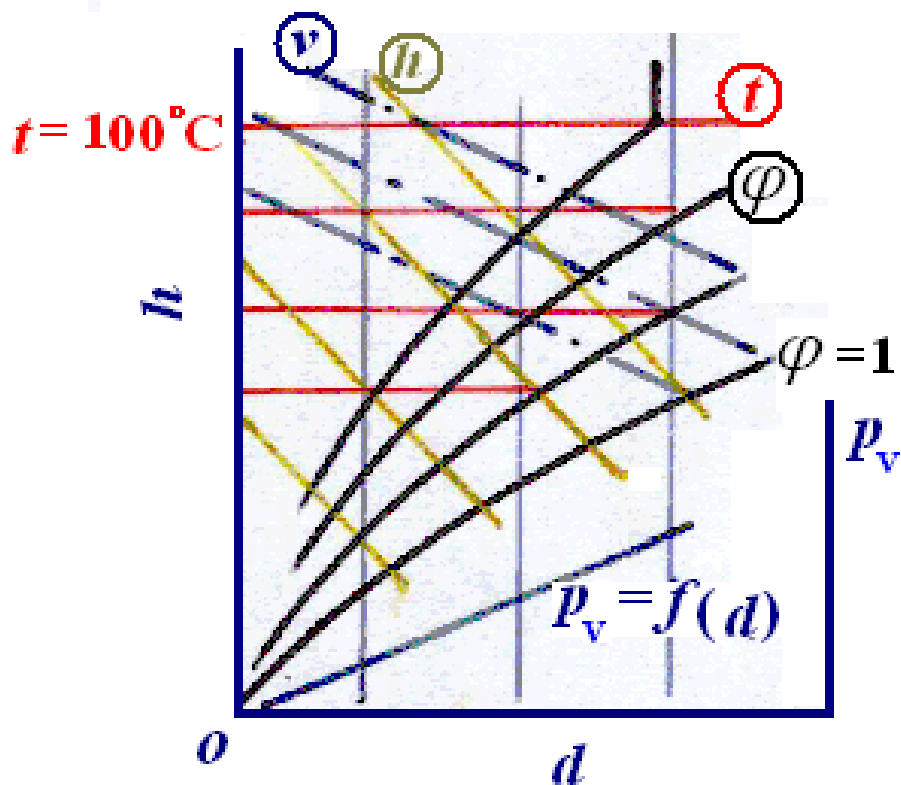


12-6 湿空气的焓湿图 (h — d)

1. 制图依据

$$d = 0.622 \frac{p_v}{p_a} = 0.622 \frac{\varphi p_s}{p - \varphi p_s}$$

$$h = 1.005t + d(2501 + 1.86t)$$



注意： h - d 图随 p 改变而改变；
使用时一定要注意，选用和当地
大气压力相符的 h - d 图。

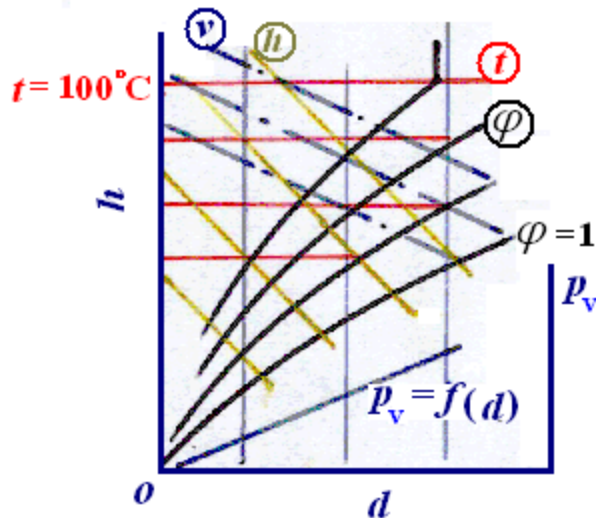


2. 线群介绍

1) 定 d 线

一组平行于纵坐标的直线群。

露点 t_d 是湿空气冷却到 $\varphi = 100\%$ 时的温度。因此，含湿量 d 相同、状态不同的湿空气具有相同的露点。



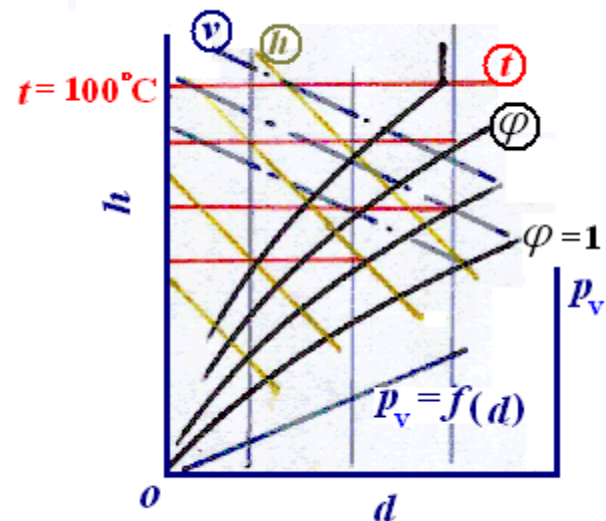
2) 定 h 线——应该是一组平行于横坐标的直线群，但是为了图形清晰，把等焓先画成一系列与纵坐标成 135° 夹角的平行线。

3) 定 t 线

由 $h = 1.005t + (2501 + 1.86t)d$ ，当湿空气的干球温度 $t = \text{定值}$ 时， h 和 d 间成直线变化关系。 t 不同时斜率不同。因此等 t 线是一组互不平行的直线， t 愈高，等 t 线斜率愈大。总体来说，等温线近似于水平线。

4) 定 t_w 线

湿空气的湿球温度 t_w ，是沿等 h 线冷却到 $\varphi=100\%$ 时的温度。因此，焓值相同状态不同的湿空气具有相同的湿球温度。



5) 定 φ 线 **等 φ 线是一组上凸形的曲线。**

$h-d$ 图都是在一定的总压力 p 下绘制的，水蒸气的分压力最大也不可能超过 p ($p_s < p$)。因此当湿空气温度等于或高于 100°C 时 φ 定义为 $\varphi = p_v / p$ 。此时

$$d = 0.622 \frac{p_v}{p - p_v} = 0.622 \frac{\phi}{1 - \phi}$$

等 φ 线就是等 d 线，所以各等 φ 线与 $t = 100^{\circ}\text{C}$ 的等温线相交后，向上折与等 d 线重合。

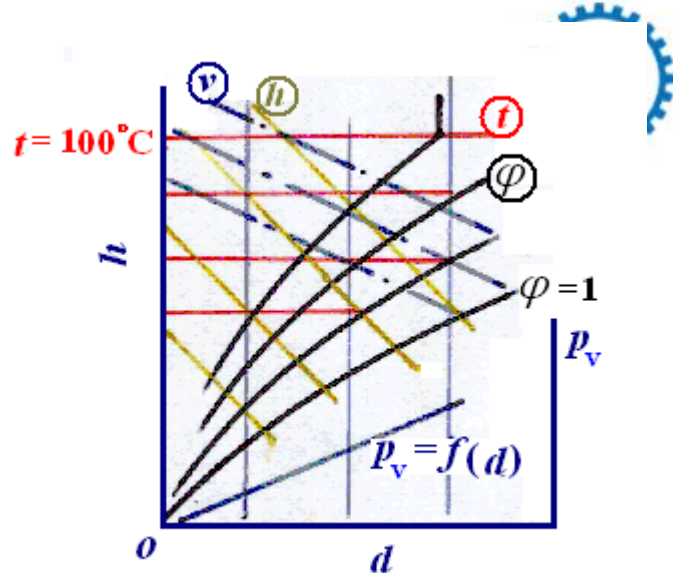
$\phi=0$ ，即干空气状态，这时 $d=0$ ，所以它和纵坐标线重合。

$\phi=1$ ，饱和空气线，也是对应不同水蒸气分压力的露点线。

6) $p_v = f(d)$ 线

$$d = 0.622 \frac{p_v}{p_a} = 0.622 \frac{p_v}{p - p_v} \quad \longrightarrow \quad p_v = \frac{pd}{0.622 + d}$$

当 $d \ll 0.622$ 时，则 p_v 与 d 近似成直线关系。所以，图中 d 很小那段的 p_v 为直线。该曲线画在 $\phi=100\%$ 等湿线下方，在图右边的纵坐标上可以读出 p_v 的值，单位为 kPa。





3. h - d 图应用

例2 已知湿空气参数

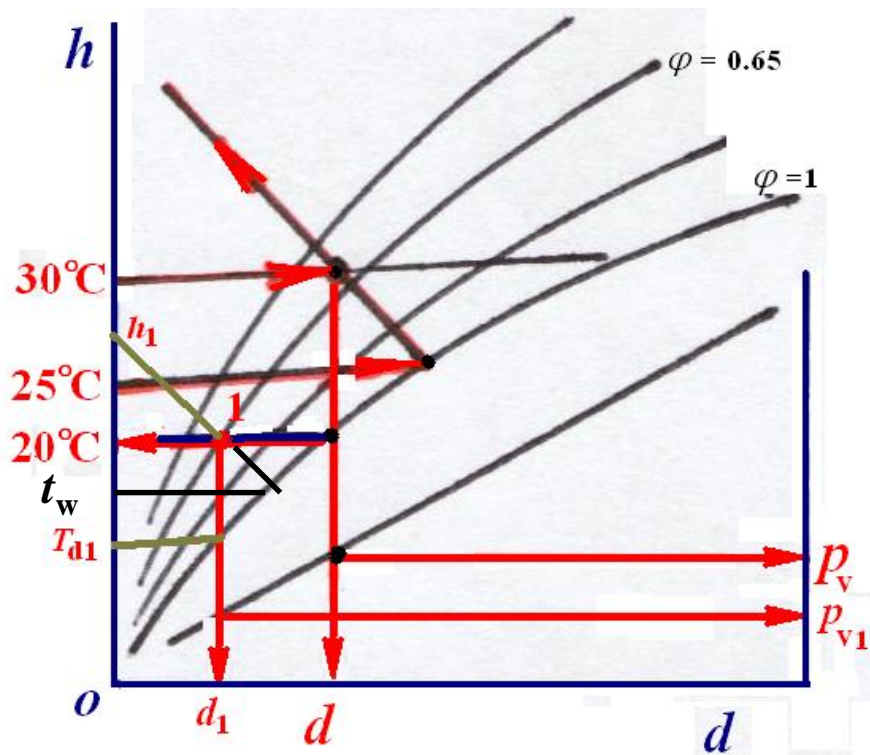
$$p_1 = 0.1 \text{ MPa}, t_1 = 20^\circ \text{C}, \varphi_1 = 65\%$$

求其他参数: d , h , t_d , t_w , p_v

解: 由温度及相对湿度在 h - d 图上确定点1的位置, 由此读出

$$h_1 = 44.0 \text{ kJ/kg 干空气}$$

$$d_1 = 9.3 \text{ g/kg 干空气}$$



由 h_1 与 $\varphi = 100\%$ 交点读出 $t_w = 16.8^\circ \text{C}$

由点1作垂线, 与交 $\varphi = 100\%$ 点读出 $t_d = 13.5^\circ \text{C}$

与 p_v 线交点读出 $p_v = 1.3 \text{ kPa}$



例3 已知湿空气参数

$p_1 = 0.1\text{MPa}, t_1 = 30^\circ\text{C}, t_{w1} = 25^\circ\text{C}$

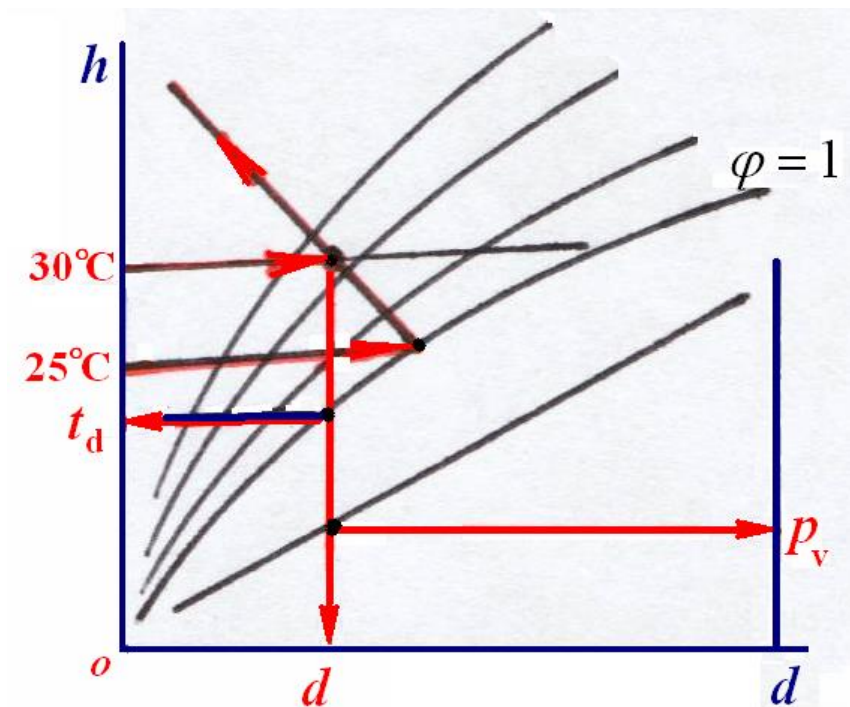
求:其他.

解: 利用 h - d 上等湿球温度线与等焓线平行及 $\varphi = 100\%$ 时干球温度等于湿球温度确定点1。

$h = 76.0\text{kJ/kg干空气} \quad \varphi = 67\%$

$d = 18.2\text{g/kg干空气} \quad t_d = 23^\circ\text{C}$

$p_v = 2.8\text{kPa}$





12-7 湿空气的热力过程

一、湿空气热力过程求解的共同步骤：

1. 在 $h-d$ 图上画出过程；
2. 写出水及干空气的质量守恒方程；
3. 写出能量方程；
4. 利用解析法或 $h-d$ 图确定质、能方程中各参数；
5. 求解。

二、基本方程

- 1、质量守恒方程；
- 2、能量守恒方程（热力学第一定律）。



1、加热过程

2、冷却过程

3、冷却除湿过程

4、绝热加湿过程

5、加热增湿过程

6、绝热混合过程



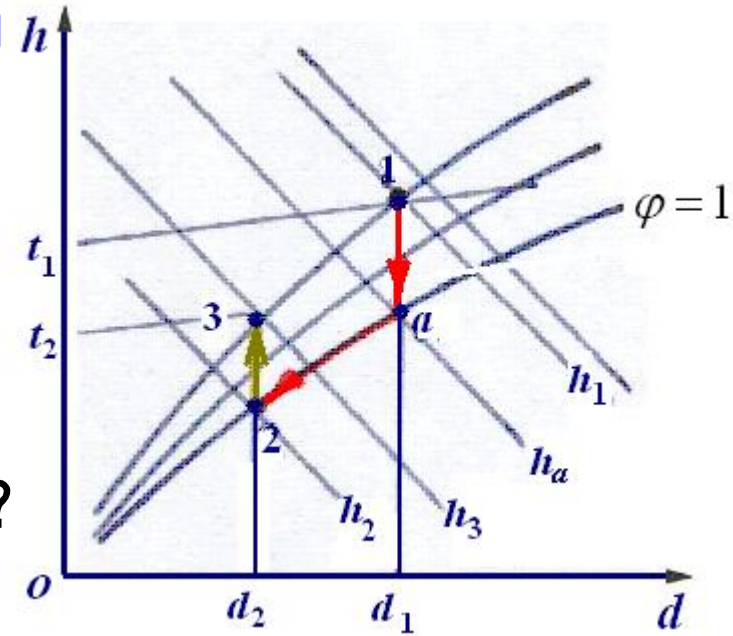
一、加热或冷却过程

单纯的加热或冷却过程，**含湿量不变**。

1→a **冷却过程**，**d不变**，**t降低**，**h减少**，
相对湿度增加。

水蒸气的分压力？露点温度？湿球温度？

不变，不变，降低。



$$d_1 = d_a, \quad m_{v1} = m_{va}, \quad m_{a1} = m_{aa} = m_a$$

$$Q_{1-a} = H_a - H_1$$

$$= m_a (h_{aa} - h_{a1}) + m_v (h_{va} - h_{v1})$$

$$= m_a [(h_{aa} - h_{a1}) + d_1 (h_{va} - h_{v1})]$$

$$\{h_a\}_{\text{kJ/kg}} = 1.005 \{t\}_{\text{°C}}$$

$$\{h_v\}_{\text{kJ/kg}} = 2501 + 1.86 \{t\}_{\text{°C}}$$



2→3 加热过程， d 不变， t 升高， h 增加，相对湿度减少。

水蒸气的分压力？露点温度？湿球温度？

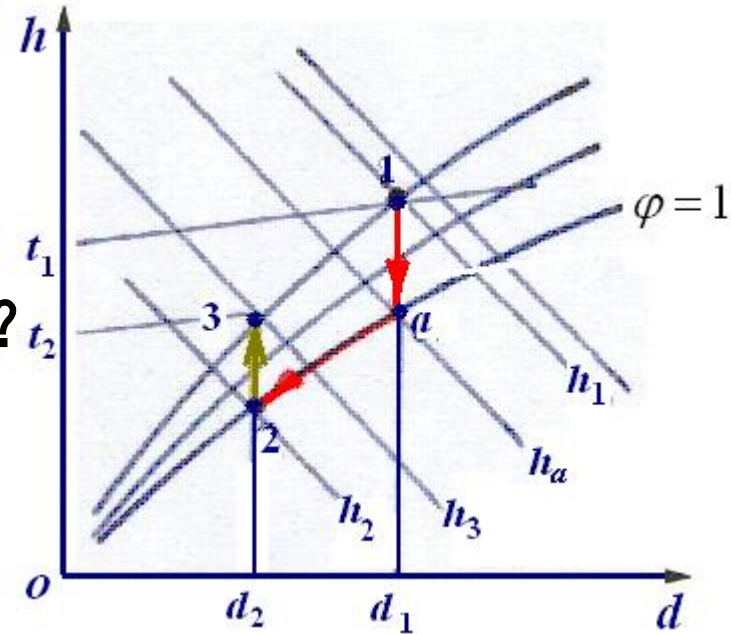
不变，不变，升高。

$$d_2 = d_3, \quad m_{v2} = m_{v3}, \quad m_{a2} = m_{a3} = m_a$$

$$Q_{2-3} = H_3 - H_2$$

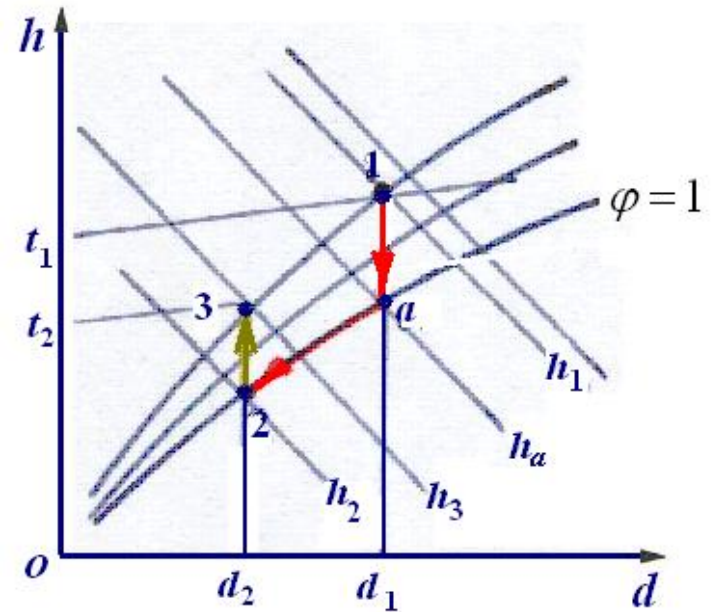
$$= m_a (h_{a3} - h_{a2}) + m_v (h_{v3} - h_{v2})$$

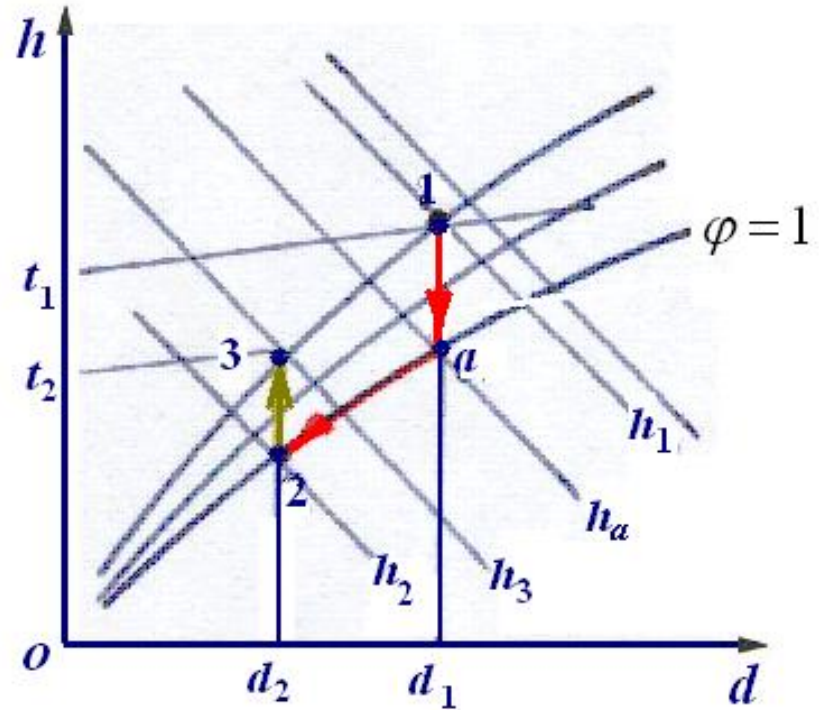
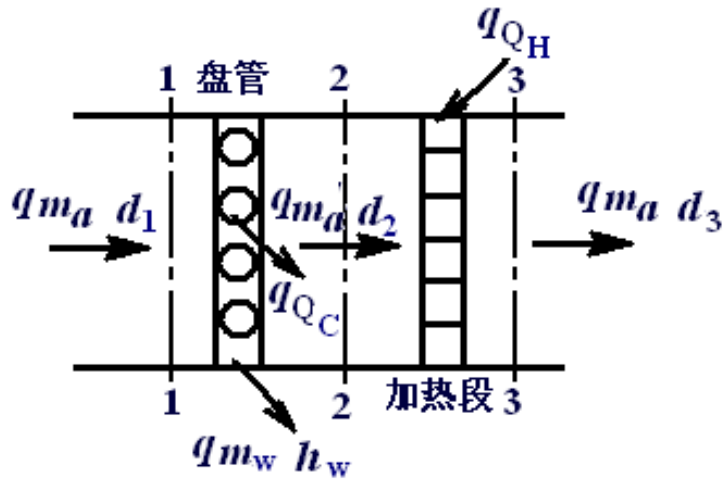
$$= m_a [(h_{a3} - h_{a2}) + d_2 (h_{v3} - h_{v2})]$$



$$\{h_a\}_{\text{kJ/kg}} = 1.005 \{t\}_{^\circ\text{C}}$$

$$\{h_v\}_{\text{kJ/kg}} = 2501 + 1.86 \{t\}_{^\circ\text{C}}$$


$$\begin{aligned} Q_c &= H_2 + H_w - H_1 \\ &= m_a (h_2 - h_1) + m_w h_w \\ &= m_a \left[(h_2 - h_1) - (d_2 - d_1) h_w \right] \end{aligned}$$



对于加热段：

$$Q_H = m_a (h_3 - h_2)$$

$$\text{即 } Q_H = m_a \left[(h_{a3} - h_{a2}) + d_2 (h_{v3} - h_{v2}) \right]$$

$$\{h_a\}_{\text{kJ/kg}} = 1.005 \{t\}_{^\circ\text{C}} \quad \{h_v\}_{\text{kJ/kg}} = 2501 + 1.86 \{t\}_{^\circ\text{C}}$$



三、绝热加湿（蒸发冷却）

水蒸气质量守恒：

$$m_w = m_{v2} - m_{v1} = m_a (d_2 - d_1)$$

能量守恒：

$$Q = H_2 - (H_1 + H_w)$$

$$= m_a (h_2 - h_1) - m_w h_w$$

$$= m_a (h_2 - h_1) - m_a (d_2 - d_1) h_w$$

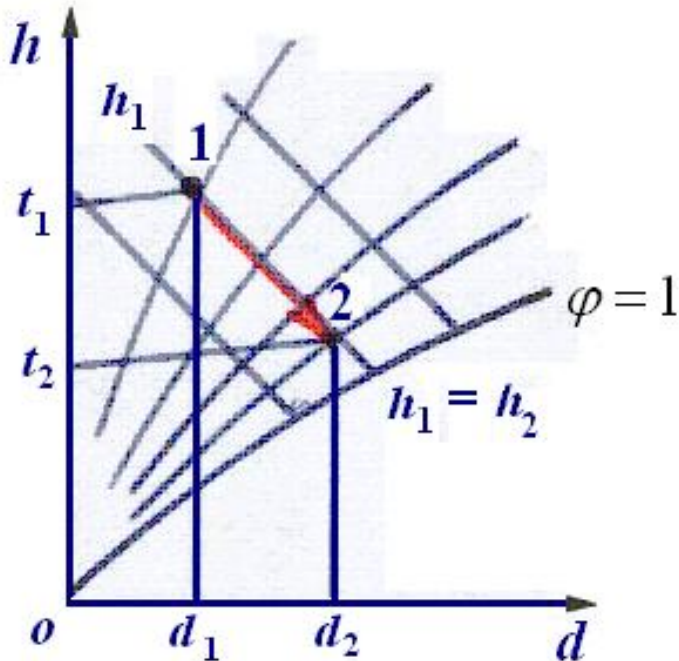
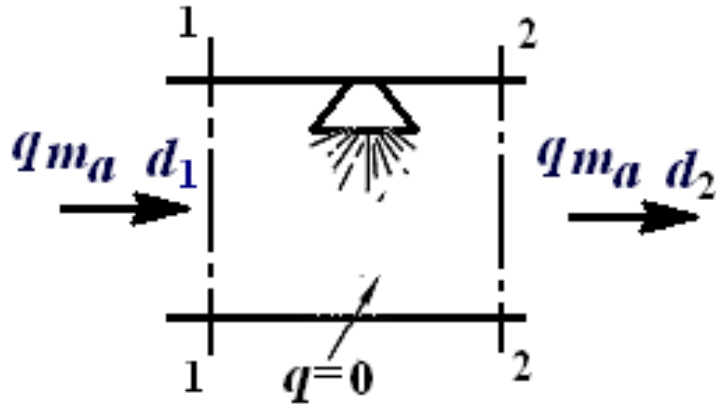
即

$$h_2 - h_1 = (d_2 - d_1) h_w$$

$h_w \ll h_v$ ，且 d_2 与 d_1 相差不大

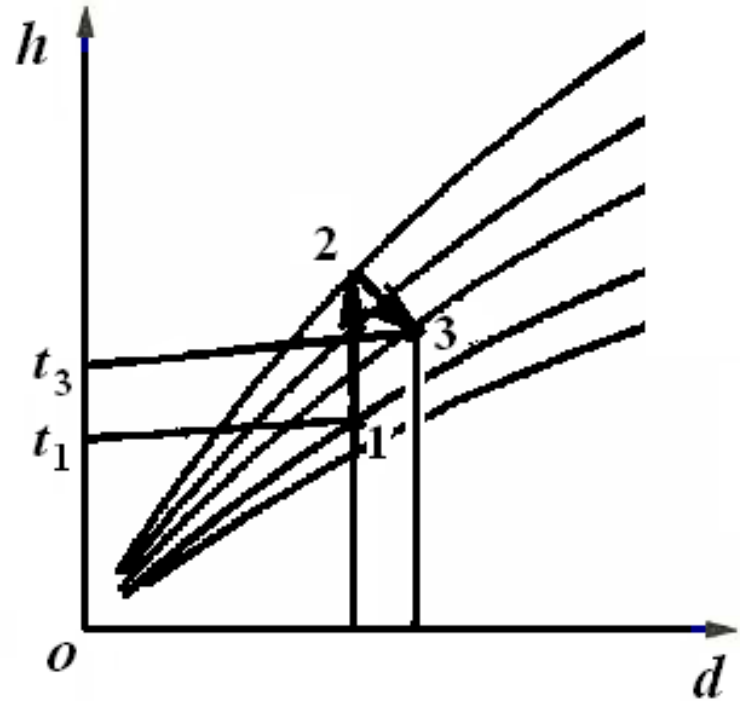
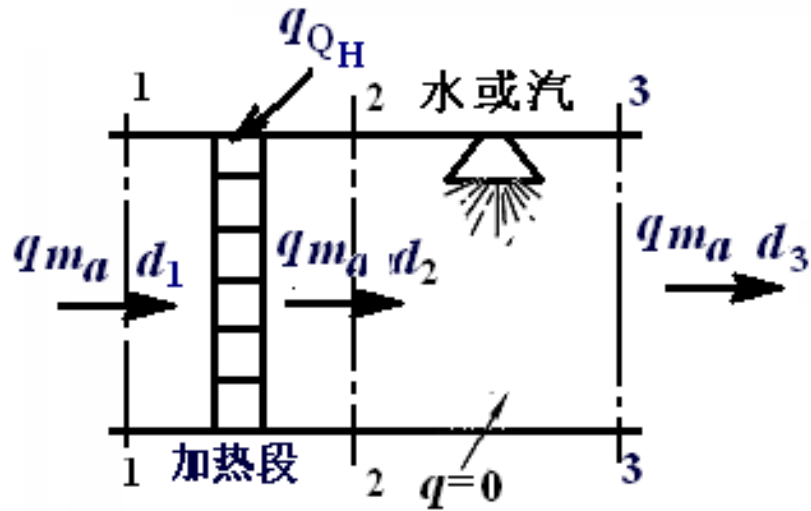
$$h_1 \approx h_2$$

可近似看作湿空气
焓值不变的过程。





四、加热增湿



水蒸气质量守恒：

$$m_w = m_{v3} - m_{v1} = m_a (d_3 - d_1)$$

湿空气能量守恒：

$$\begin{aligned} Q &= m_a h_3 - (m_a h_1 + m_w h_w) \\ &= m_a (h_3 - h_1) - m_w h_w \\ &= m_a (h_3 - h_1) - m_a (d_3 - d_1) h_w \end{aligned}$$



五、绝热混合

干空气质量守恒

$$m_{a1} + m_{a2} = m_{a3}$$

水蒸气质量守恒

$$m_{v1} + m_{v2} = m_{v3}$$

$$m_{a1}d_1 + m_{a2}d_2 = m_{a3}d_3$$

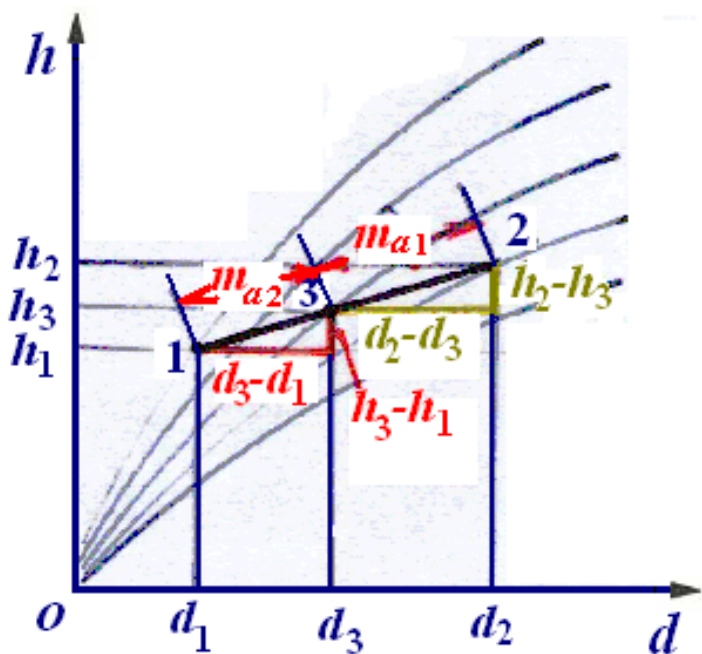
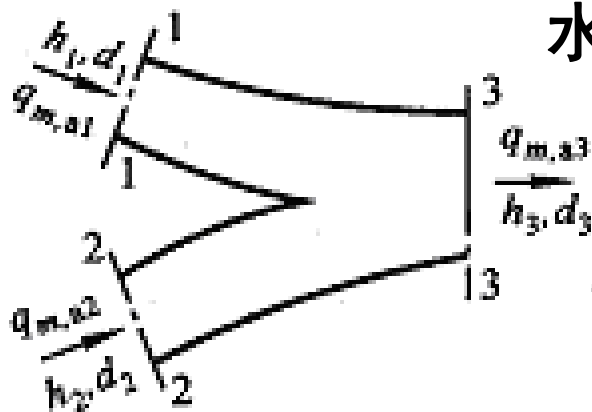
$$m_{a1}(d_3 - d_1) = m_{a2}(d_2 - d_3)$$

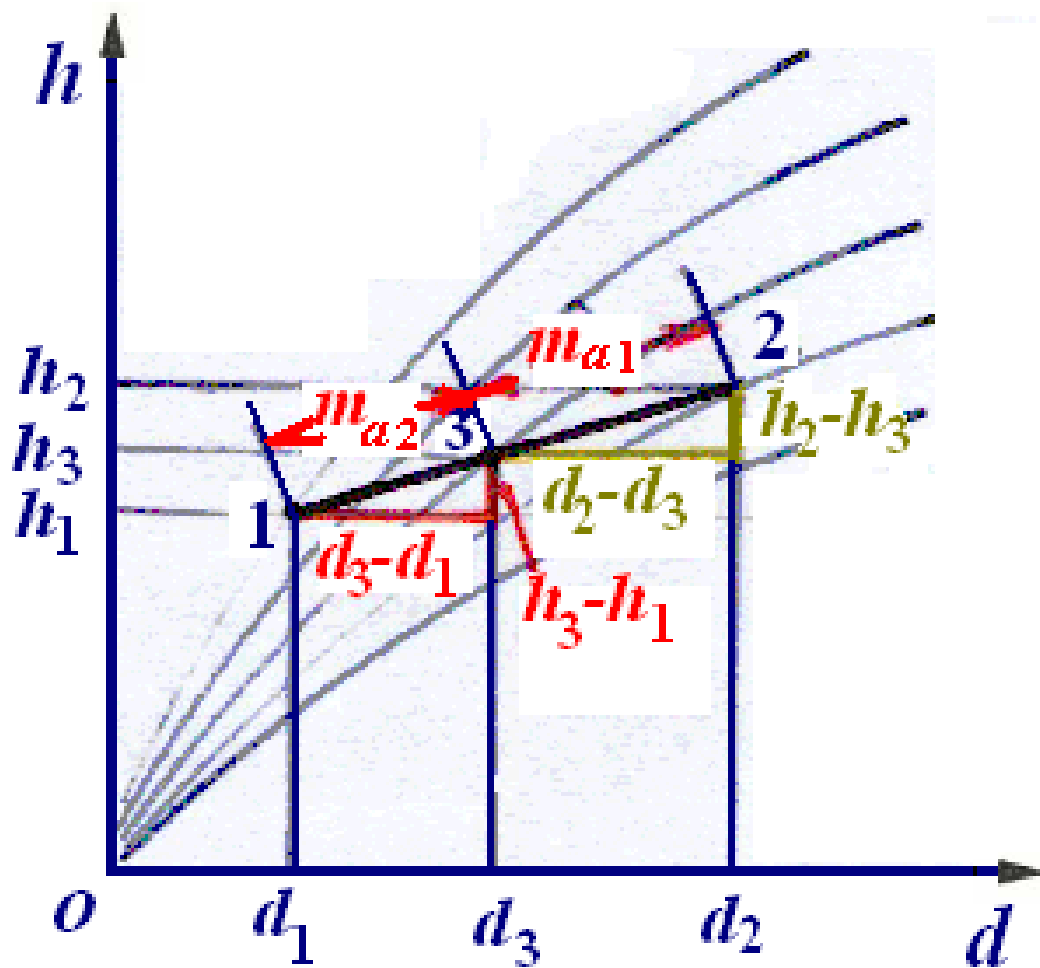
$$\Rightarrow \frac{m_{a1}}{m_{a2}} = \frac{d_2 - d_3}{d_3 - d_1}$$

$$m_{a1}h_1 + m_{a2}h_2 = m_{a3}h_3$$

$$m_{a1}(h_3 - h_1) = m_{a2}(h_2 - h_3)$$

$$\Rightarrow \frac{m_{a1}}{m_{a2}} = \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1} = \frac{d_2 - d_3}{d_3 - d_1}$$





1) 采用查图法，直接得到的就是单位质量的干空气所含的干空气和水蒸气总的焓值 h ，乘以干空气质量就是流入、流出系统的能量 H ；

2) 采用解析法时，流入、流出的系统的能量 H 不仅包括干空气携带的能量 $m_a h_a$ ，还应包括水蒸气携带的能量 $m_v h_v$ 。

$$h = h_a + dh_v$$

$$\frac{m_{a1}}{m_{a2}} = \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1} = \frac{d_2 - d_3}{d_3 - d_1}$$



小结

一、湿空气的状态参数

1、露点温度 T_d

湿空气中水蒸气压力 p_v 所对应的饱和温度， $t_d=t_s(p_v)$ 。

2、压力

总压力： p ，干空气的分压力 p_a ，水蒸气的分压力 p_v

$$p = p_a + p_v$$

3、相对湿度

$$\varphi = \frac{\rho_v}{\rho_s} = \frac{p_v}{p_s} \quad 0 \leq \varphi \leq 1 \quad \left\{ \begin{array}{ll} \varphi = 0 & \text{干空气} \\ 0 < \varphi < 1 & \text{未饱和空气} \\ \varphi = 1 & \text{饱和空气} \end{array} \right. \quad \downarrow \quad \begin{array}{l} \text{吸湿} \\ \text{能力} \\ \text{下降} \end{array}$$

反映了湿空气干燥的程度，同时也反映了湿空气吸收水分有能力



4、含湿量

$$d = \frac{m_v}{m_a} \quad \text{kg(水蒸气)/kg(干空气)}$$

$$d = \frac{m_v}{m_a} = \frac{p_v V / (R_{g,v} T)}{p_a V / (R_{g,a} T)} = 0.622 \frac{p_v}{p_a}$$

$$d = 0.622 \frac{p_v}{p - p_v} = 0.622 \frac{\varphi p_s}{p - \varphi p_s}$$

大气压力给定时，含湿量、水蒸气分压力、露点温度之间呈单值函数关系。

5、湿空气的焓

$$H = H_a + H_v = m_a h_a + m_v h_v$$

$$h = \frac{H}{m_a} = h_a + \frac{m_v}{m_a} h_v = h_a + d h_v$$

$$h = 1.005t + d(2501 + 1.86t) \quad (\text{kJ/kg干空气})$$



二、湿空气的热力过程

湿空气热力过程求解的共同步骤：

1. 在 $h-d$ 图上画出过程；
2. 写出水及干空气的质量守恒方程；
3. 写出能量方程；
4. 利用解析法或 $h-d$ 图确定质、能方程中各参数；
5. 求解。





湿空气的状态参数

- 1、湿空气的压力, p
- 2、湿空气的温度, t
- 3、水蒸气的分压力, p_v
- 4、干空气的分压力, p_a
- 5、露点温度, t_d
- 6、含湿量, d
- 7、焓, h
- 8、相对湿度, φ
- 9、湿球温度, t_w

总压力给定的情况下, 剩下状态参数中, 只要知道其中任意两个, 就可以通过解析计算或查图查表的方法, 获得其它未知参数。

