

# 第二章 湿空气的焓湿学基础

## 2.1 湿空气的组成和状态参数

### 2.1.1 湿空气的组成及物理性质

湿空气 = 干空气 + 水蒸气

组成成分名称	质量分数 (%)	体积分数 (%)
干空气	氮	75.55
	氧	20.90
	二氧化碳	0.03
	稀有气体	0.94
水蒸气	0.2—2%	0.2—2%

干空气的标准成分(推荐)

表 1-1

成分气体(分子式)	成分体积百分比(%)	对于成分标准值的变化	分子量(C-12标准)
氮(N <sub>2</sub> )	78.084	—	28.013
氧(O <sub>2</sub> )	20.9476	—	31.9988
氩(Ar)	0.934	—	39.934
二氧化碳(CO <sub>2</sub> )	0.0314	*	44.00995
氖(Ne)	0.001818	—	21.183
氦(He)	0.000524	—	4.0026
氪(Kr)	0.000114	—	83.80
氙(Xe)	0.0000087	—	131.30
氢(H <sub>2</sub> )	0.00005	?	2.01594
甲烷(CH <sub>4</sub> )	0.00015	*	16.04303
氧化氮(N <sub>2</sub> O)	0.00005	—	44.0128
臭氧(O <sub>3</sub> ) 夏	0~0.000007	*	47.9982
冬	0~0.000002	*	47.9982
二氧化硫(SO <sub>2</sub> )	0~0.0001	*	64.0828
二氧化氮(NO <sub>2</sub> )	0~0.000002	*	46.0055
氨(NH <sub>3</sub> )	0~微量	*	17.03061
一氧化碳(CO)	0~微量	*	28.01055
碘(I <sub>2</sub> )	0~0.000001	*	253.8088
氡(Rn)	$6 \times 10^{-18}$	?	+

1、湿空气=干空气+水蒸气

2、干空气由氮、氧、氩、二氧化碳、氖、氦和其他一些微量气体组成，多数成分比较稳定，只有少数成分有微小变化。

3、研究湿空气中水蒸气含量的变化问题在空气调节中是非常重要的，为什么？

空气中水蒸气变化对空气的干燥和潮湿程度有重要的影响，且会使湿空气物理性质随之变化。



## 2.1.2 湿空气的状态参数

能够描述湿空气状态特性的物理量

### 1、湿空气是理想气体

(热力学中,常温常压下的干空气视为理想气体。

水蒸气一般处于过热状态,水蒸气数量少,分压力低,比体积很大,也可近似作为理想气体。)

### 2、满足理想气体的状态方程与道尔顿分压定律

$$p_g V = m_g R_g T \quad \text{或} \quad p_g v_g = R_g T$$

$$p_q V = m_q R_q T \quad \text{或} \quad p_q v_q = R_q T$$

当 $p=101325\text{Pa}$ , $T=273.15\text{K}$ 时,  $1\text{kmol}$ 气体分子的体积均为 $22.4145\text{m}^3/\text{kmol}$ ,因此可得摩尔气体常数 $R$

$$R_0 = \frac{101325 * 22.4145}{273.15} = 8314.66 \text{ J / (kmol} \cdot \text{K)} \quad R = \frac{R_0}{M}$$

干空气的气体常数 $R_g$

$$R_g = \frac{R_0}{M} = \frac{8314.66}{28.7} = 287 \text{ J / (kg} \cdot \text{K)}$$

水蒸气的气体常数 $R_q$

$$R_q = \frac{R_0}{M} = \frac{8314.66}{18.02} = 461 \text{ J / (kg} \cdot \text{K)}$$

## 2.1.2 湿空气的状态参数

### 1、大气压力 $p_a$

地球表面单位面积上所受的空气层的压力。

单位：帕 (Pa)，千帕 (kPa)

影响因素：海拔、季节、气候等

**标准大气压**：北纬45度、海平面的全年平均大气压，**101325 Pa**，760mmHg

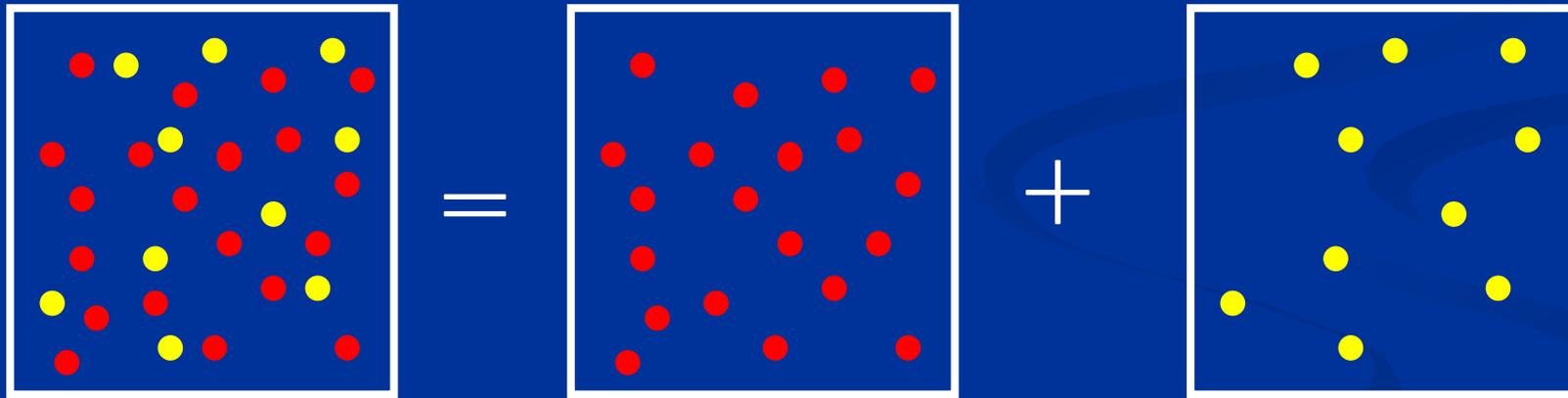
空调的设计和运行，要考虑当地气压的大小，因气压不同，空气的物理性质不同。

## 2.1.2 湿空气的状态参数

### 2、水蒸气分压力 $P_q$

(1) 湿空气中水蒸气分压力是指在某一温度下，水蒸气单占湿空气的体积时所产生的压力。

(2) 道尔顿分压定律  $p_a = p_g + p_q$



(3) 意义：反映了水蒸气含量的多少

## (4) 饱和水蒸气分压力 $P_{q.b}$

✓ 饱和空气概念

✓  $P_{q.b}$  仅取决于温度 (附录1)

空气温度 $t(^{\circ}\text{C})$	饱和空气水蒸气分压力 $P_{q.b}$ ( $\times 10^2\text{Pa}$ )	空气温度 $t(^{\circ}\text{C})$	饱和空气水蒸气分压力 $P_{q.b}$ ( $\times 10^2\text{Pa}$ )	空气温度 $t(^{\circ}\text{C})$	饱和空气水蒸气分压力 $P_{q.b}$ ( $\times 10^2\text{Pa}$ )
-20	1.02	0	6.09	20	23.31
-15	1.65	5	8.70	25	31.60
-10	2.59	10	12.25	30	42.32
-5	4.00	15	17.01	35	56.10

## 2.1.2 湿空气的状态参数

### 3、密度 $\rho$

$$\rho = \rho_g + \rho_q = \frac{p_g}{R_g T} + \frac{p_q}{R_q T}$$

$$= \frac{p_a - p_q}{R_g T} + \frac{p_q}{R_q T}$$

$$= 0.00348 \frac{p_a}{T} - 0.00134 \frac{p_q}{T}$$

$$R_g = 287 \text{ J/(Kg K)}$$

$$R_q = 461 \text{ J/(Kg K)}$$

注意角标g、q

$$\text{近似公式: } \rho_g = \frac{353}{T}$$

## 2.1.2 湿空气的状态参数

### 4、干球温度 $t_g$

- 摄氏温标  $t$
- 开尔文温标  $T$
- 华氏温标  $t$

$$t(^{\circ}C) = T(k) - 273$$

$$t(^{\circ}C) = \frac{5}{9}(t(^{\circ}F) - 32)$$



## 2.1.2 湿空气的状态参数

### 5、湿度

#### (1) 绝对湿度

$$Z = \frac{m_q}{V} = \frac{\text{水蒸气质量}}{\text{单位容积湿空气}} \quad \text{单位: kg/m}^3$$

绝对湿度很少采用，为什么？

#### (2) 含湿量

$$d = \frac{m_q}{m_g} = \frac{\text{同时并存的水蒸气量}}{\text{1kg干空气}} \quad \text{单位: kg/kg 干空气}$$

推导  $d = \frac{m_q}{m_g} = 0.622 \frac{p_q}{p_g}$

$$\begin{aligned}
 p_q V_q = m_q R_q T_q &\implies m_q = \frac{p_q V_q}{R_q T_q} \\
 p_g V_g = m_g R_g T_g &\implies m_g = \frac{p_g V_g}{R_g T_g} \\
 d = \frac{m_q}{m_g} &= \frac{p_q V_q}{R_q T_q} \cdot \frac{R_g T_g}{p_g V_g} \\
 &= \frac{R_g}{R_q} \cdot \frac{p_q}{p_g} \\
 &= \frac{287}{461} \cdot \frac{p_q}{p_g} \\
 &= 0.622 p_q / p_g
 \end{aligned}$$

$$d = \frac{m_q}{m_g} = 0.622 \frac{p_q}{p_g} = 0.622 \frac{p_q}{p_a - p_q} \text{ kg/kg 干空气}$$

✓  $p_a$  不变,  $p_q \uparrow$ , 则  $d \uparrow$

✓  $d$  不变,  $p_a \uparrow$ , 则  $p_q \uparrow$



含湿量  $d$  表示空气中水蒸气含量多少

单位: kg/kg 干空气  
g/kg 干空气

## ✓饱和含湿量 $d_b$

空气温度 $t(^{\circ}\text{C})$	饱和空气 含湿量 $d_b$ (g/kg干空气)	空气温度 $t(^{\circ}\text{C})$	饱和空气 含湿量 $d_b$ (g/kg干空气)	空气温度 $t(^{\circ}\text{C})$	饱和空气 含湿量 $d_b$ (g/kg干空气)
-20	0.63	0	3.78	20	14.7
-15	1.01	5	5.40	25	20.0
-10	1.60	10	7.63	30	27.2
-5	2.47	15	10.6	35	36.6

(3) 相对湿度  $\varphi = \frac{p_q}{p_{qb}} \times 100\%$

相对湿度表示湿空气中水蒸气含量接近饱和的程度

$\varphi = 0$  干空气

$\varphi = 100\%$  饱和空气

相对湿度能表示空气接近饱和的程度，却不能表示水蒸气含量多少

V  
S

含湿量不能表示空气接近饱和的程度，但可以表示水蒸气含量多少

空气温度 $t(^{\circ}\text{C})$	饱和空气水蒸气 分压力 $P_{q,b}$ ( $\times 10^2\text{Pa}$ )	空气温度 $t(^{\circ}\text{C})$	饱和空气水蒸气 分压力 $P_{q,b}$ ( $\times 10^2\text{Pa}$ )	空气温度 $t(^{\circ}\text{C})$	饱和空气水蒸气 分压力 $P_{q,b}$ ( $\times 10^2\text{Pa}$ )
-20	1.02	0	6.09	20	23.31
-15	1.65	5	8.70	25	31.60
-10	2.59	10	12.25	30	42.32
-5	4.00	15	17.01	35	56.10

饱和度  $\psi = \frac{d}{d_b}$

$$d = 0.622 \frac{p_q}{p_a - p_q}$$

$$d_b = 0.622 \frac{p_{qb}}{p_a - p_{qb}}$$

$$\psi = \frac{d}{d_b} = \frac{p_q}{p_{qb}} \cdot \frac{p_a - p_{qb}}{p_a - p_q} = \varphi \cdot \frac{p_a - p_{qb}}{p_a - p_q}$$

$$\therefore \varphi = \frac{d}{d_b} \cdot \frac{p_a - p_q}{p_a - p_{qb}} \times 100\% \approx \frac{d}{d_b} \times 100\%$$



## 2.1.2 湿空气的状态参数

### 6、比焓 $h$ （有时焓也用符号 $i$ 表示）enthalpy

(1) 空调工程中引入焓的意义——计算空气热交换量

定压过程中，焓差等于热交换量  $\Delta Q = q\Delta h$

(2) 湿空气的焓

湿空气的焓是以1kg干空气为计算基础，  
即  $(1+d)$ kg湿空气的焓

$$h = h_g + dh_q$$

如取0°C的干空气和0°C的水比焓值为0，则

则干空气的焓 (kJ/kg)为:  $h_g = c_{p \cdot g} t$

则水蒸气的焓 (kJ/kg)为:  $h_q = 2500 + c_{p \cdot q} t$

$$c_{p \cdot g} = 1.01 \text{kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$c_{p \cdot q} = 1.84 \text{kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K})$$

则湿空气的焓 (kJ/kg干空气) 为:

$$h = 1.01t + d(2500 + 1.84t) = \boxed{(1.01 + 1.84d)t} + \boxed{2500d}$$

显热

潜热

Sensible heat Latent heat

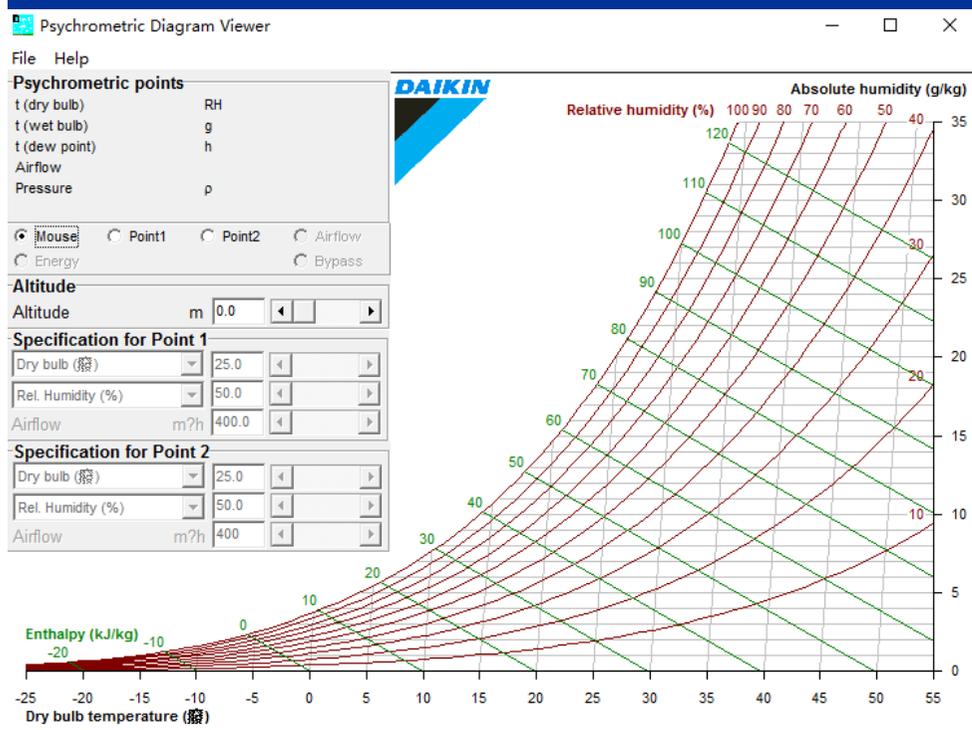
讨论: 温度升高, 湿空气的焓一定会增大吗?

例2-2：试计算在20℃条件下，大气压力  $p_a=101325\text{Pa}$ ，相对湿度为70%的湿空气的含湿量和比焓值。

解： (1) 
$$d = 0.622 \frac{\varphi p_{qb}}{p_a - \varphi p_{qb}}$$
$$= 0.622 \frac{0.7 \times 2331}{101325 - 0.7 \times 2331}$$
$$= 0.010 \text{kg} / \text{kg} \text{干空气}$$

(2) 
$$h = 1.01t + d(2500 + 1.84t)$$
$$= 1.01 \times 20 + 0.01 \times (2500 + 1.84 \times 20)$$
$$= 45.57 \text{kJ} / \text{kg} \text{干空气}$$

## 2.2 湿空气的焓湿图 psychrometric diagram



### 版权说明

湿空气焓湿图组件手机版1.0

吴如宏(清华大学建筑学院建筑技术科学系)

王攀,李中原(同方泰德国际科技(北京)有限公司建筑节能研究院)

2016-2025(c)清华大学,同方泰德国际科技(北京)有限公司.保留所有权利

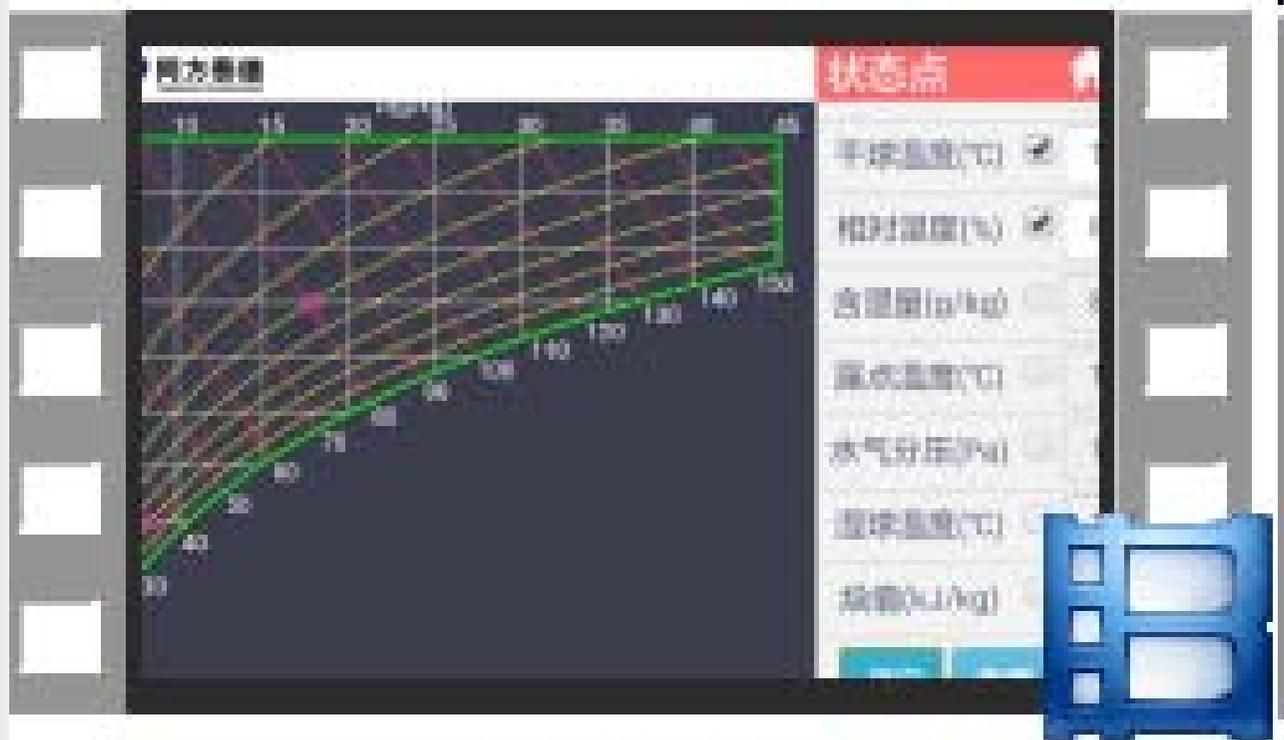
wrh.pub@gmail.com

thtfjnyjy@163.com.cn



电脑版焓湿图

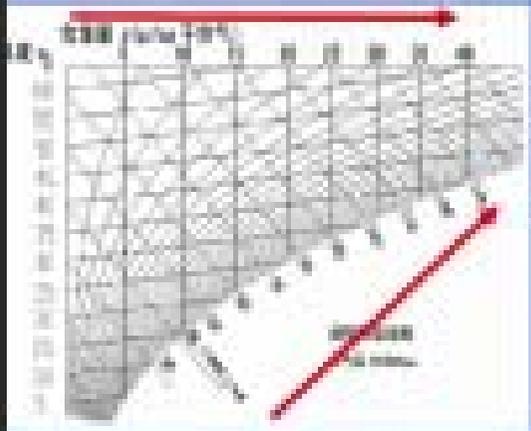
手机版焓湿图



2焓湿图软件说明.mp4



纵坐标：焓  
为使图面开阔，两坐标夹角为135°



1. 空气饱和线即湿球线  
2. 等焓线

$$h = 1.01t + d(2500 + 1.84t)$$

t=常数时，  
直线 { 截距 1.01t  
斜率 2500 + 1.84t ≈ 2500

2焓湿图的绘制.mp4

## 2.2 湿空气的焓湿图 psychrometric diagram

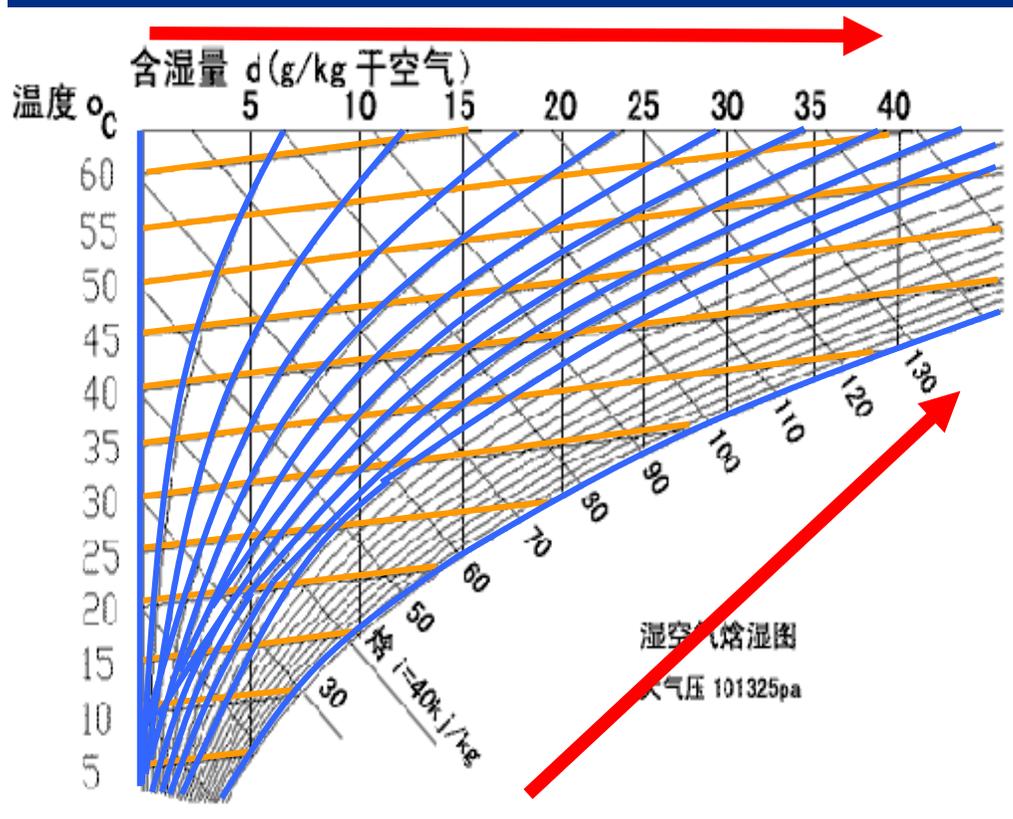
### 2.2.1 焓湿图的构成及绘制原理

- ✓ 焓湿图是对应于某一大气压力下以比焓为纵坐标，含湿量为横坐标绘制而成的。
- ✓ 图中每一点表示湿空气的一个状态。
- ✓ 图上的一条线表示湿空气状态的变化过程。

横坐标：含湿量

纵坐标：焓

为使图面开阔，两坐标夹角为135°



- 1、等含湿量线和等焓线
- 2、等温线

$$h = 1.01t + d(2500 + 1.84t)$$

t=常数时，

直线  $\left\{ \begin{array}{l} \text{截距 } 1.01t \\ \text{斜率 } 2500 + 1.84t \approx 2500 \end{array} \right.$

等温线是近似平行的一组直线

- 3、等相对湿度线

$$d = 0.622 \frac{\varphi p_{qb}}{p_a - \varphi p_{qb}}$$

$P_a$ 一定， $\varphi$ =常数时

$$d = f(p_{qb}) = f(t)$$

$\left. \begin{array}{l} t \\ d \end{array} \right\} \varphi$  一组发散型曲线

## 4、水蒸气分压力线

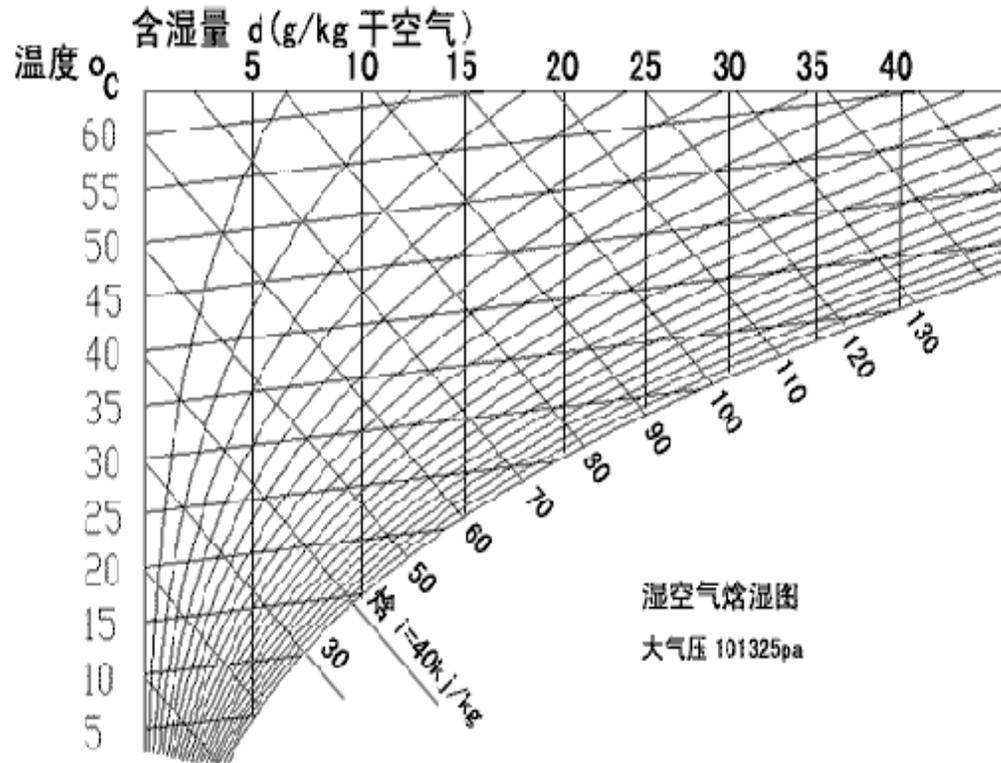
$$d = 0.622 \frac{p_q}{p_a - p_q}$$

d与 $p_q$ 一一对应，

水蒸气分压力线是  
d轴上方的一条水平线

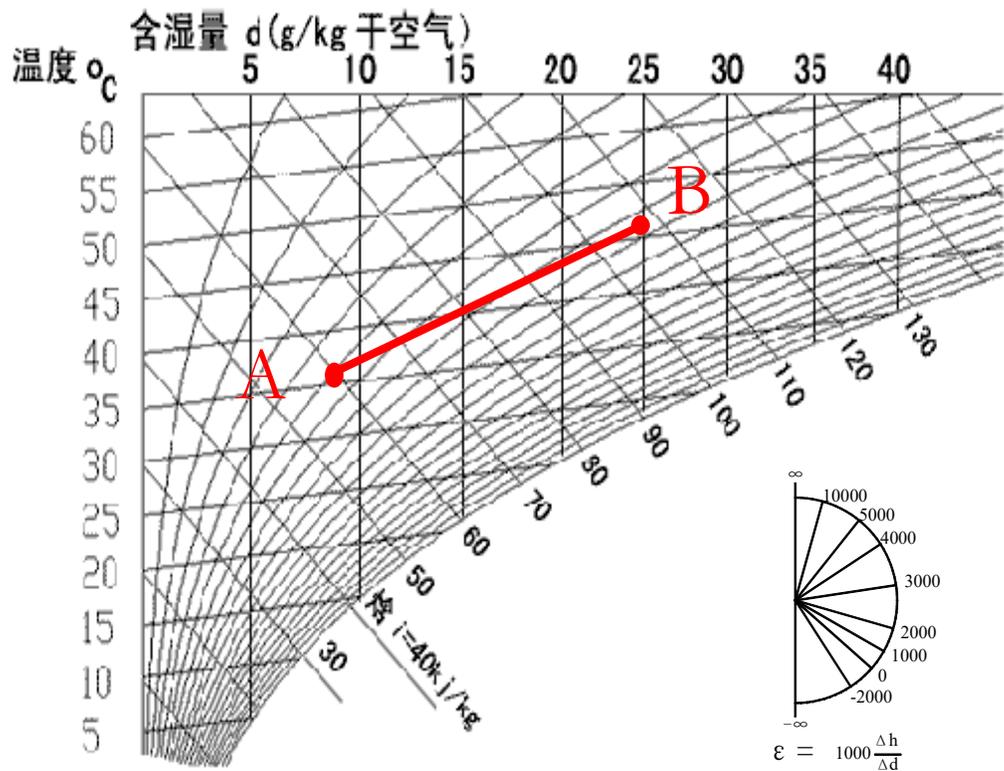
$p_q$  ( $10^2\text{Pa}$ )

0 10 20 30 40 50 60



$p_q$  ( $10^2\text{Pa}$ )

0 10 20 30 40 50 60



## 5、热湿比线

被处理的空气由一个状态A变为另一个状态B，如果认为在整个过程中，湿空气的热、湿变化是同时、均匀发生的，则在焓湿图上连接A、B的直线就代表湿空气的状态变化过程。

热湿比（角系数）

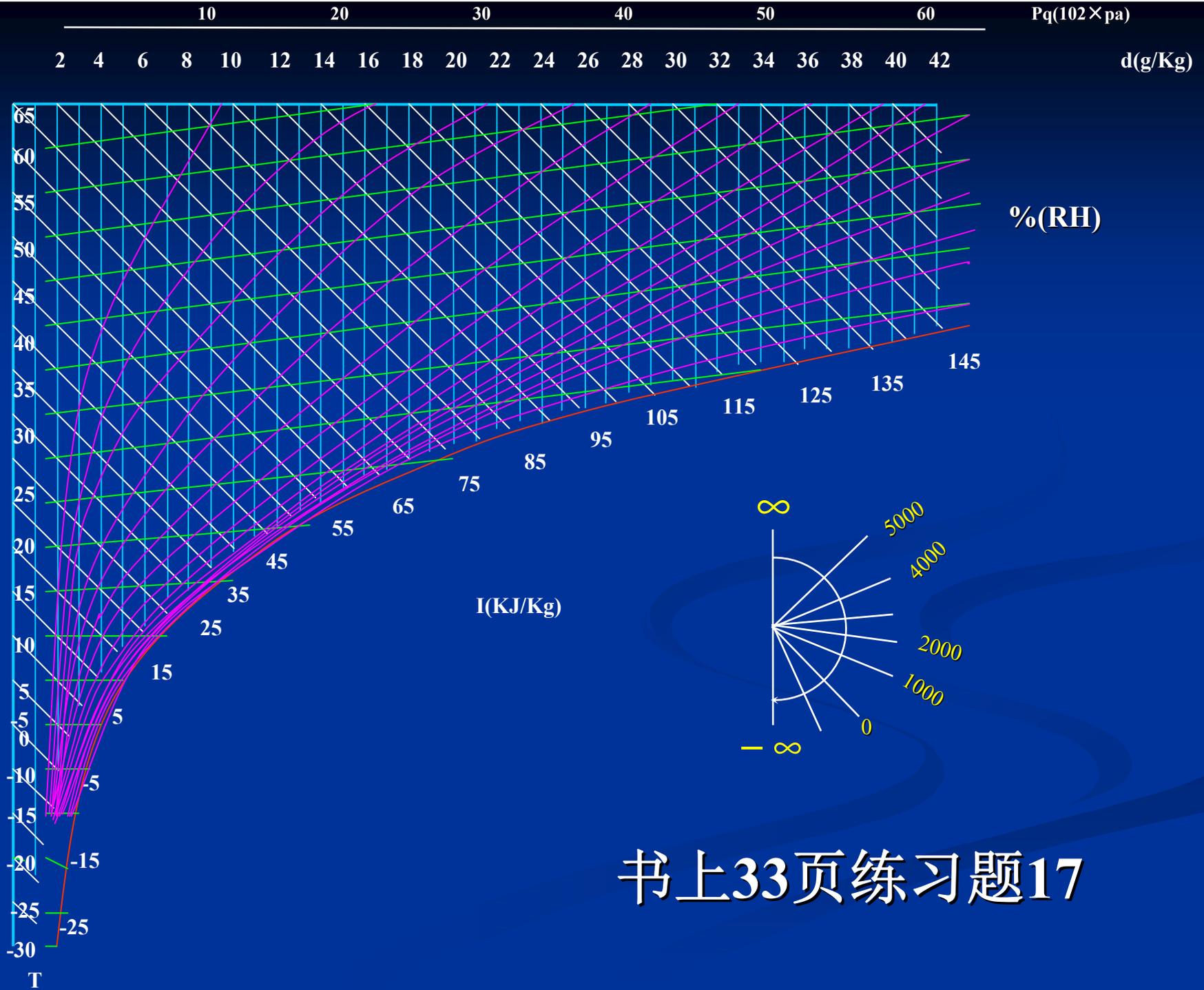
$$\varepsilon = \frac{h_B - h_A}{d_B - d_A} = \frac{\Delta h}{\Delta d} = \frac{\pm Q}{\pm W}$$

热湿比  $\varepsilon$  的单位  $\text{kJ} / \text{kg}$

不论湿空气初状态如何，只要热湿比值相等，则

得热得湿为正  
失热失湿为负

应用方法：1、平行线法 2、辅助点法



# 书上33页练习题17

例2-3：已知大气压力 $p_a=101325\text{Pa}$ ，湿空气初参数为 $t_a=20^\circ\text{C}$ ， $\varphi_a=60\%$ ，当该状态空气吸收 $20\text{kJ/s}$ 的热量和 $4\text{g/s}$ 的湿量后，相对湿度变为 $\varphi_b=50\%$ ，试确定湿空气的终状态。

解：1. 确定点A

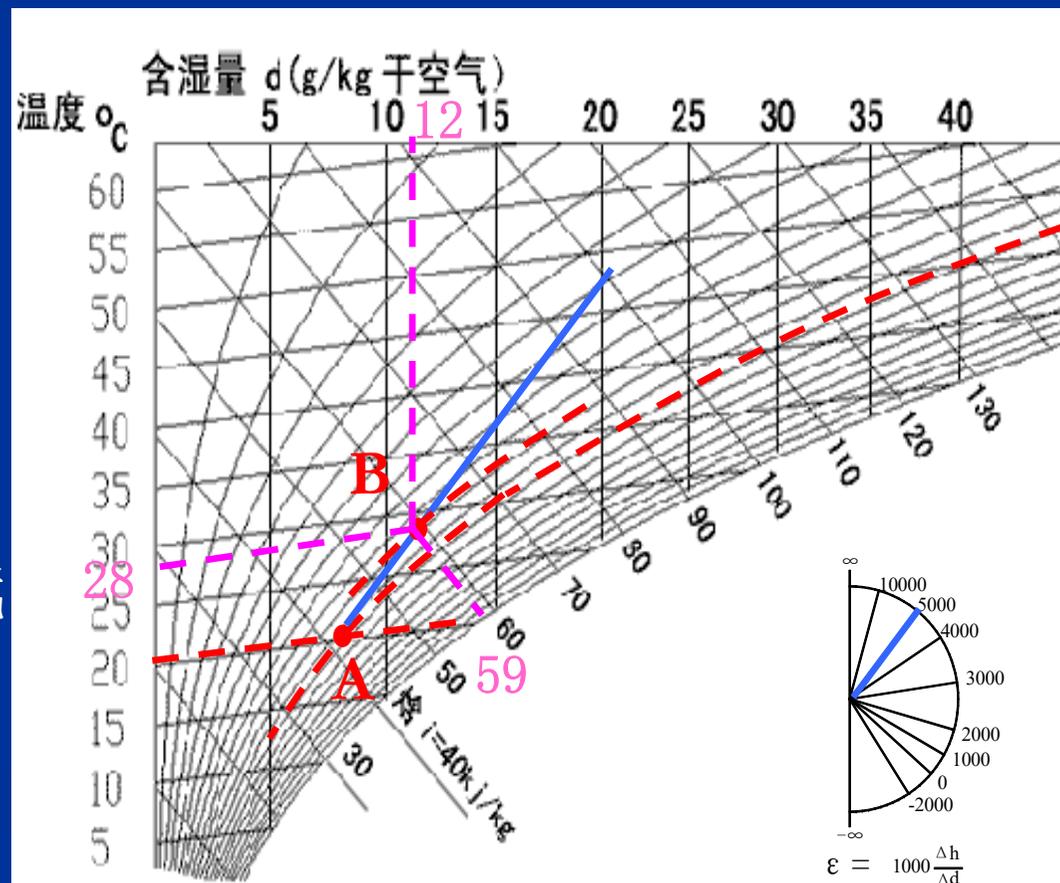
2. 计算热湿比（角系数）

$$\varepsilon = \frac{\pm Q}{\pm W} = \frac{20}{0.004} \text{kJ/kg} = 5000 \text{kJ/kg}$$

3. 过点A做5000的热湿比线

4. 确定点B

5. 由焓湿图查出各参数



## 6、大气压力变化对焓湿图的影响

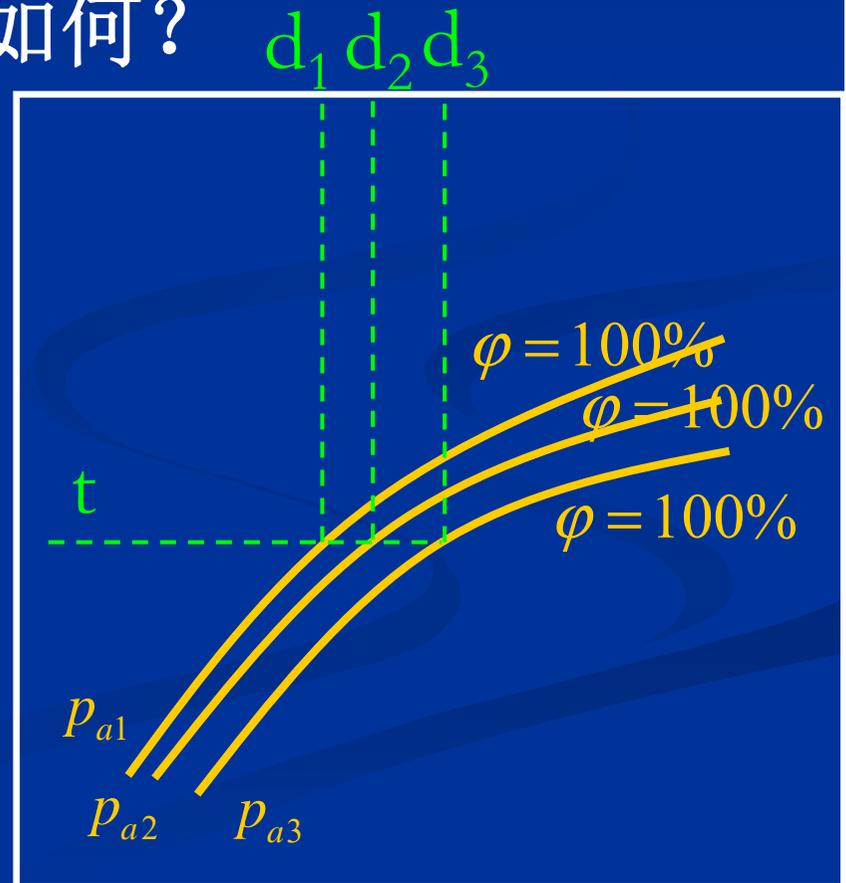
三个大气压力不同，  
其100%相对湿度线如图示，

请问 $p_{a1}$ ,  $p_{a2}$ ,  $p_{a3}$ 的大小关系如何？

$$d = 0.622 \frac{\varphi p_{qb}}{p_a - \varphi p_{qb}}$$

由图可知

$$p_{a1} > p_{a2} > p_{a3}$$



## 2.2.2 露点温度和湿球温度

### 1. 露点温度

空气温度 $t(^{\circ}\text{C})$	饱和空气 含湿量 $d_b$ (g/kg干空气)	空气温度 $t(^{\circ}\text{C})$	饱和空气 含湿量 $d_b$ (g/kg干空气)	空气温度 $t(^{\circ}\text{C})$	饱和空气 含湿量 $d_b$ (g/kg干空气)
-20	0.63	0	3.78	20	14.7
-15	1.01	5	5.40	25	20.0
-10	1.60	10	7.63	30	27.2
-5	2.47	15	10.6	35	36.6

假定将某温度为 $35^{\circ}\text{C}$ ，含湿量为 $15\text{ g/kg}_{\text{干空气}}$ 的湿空气冷却，空气的状态参数会如何变化？

露点温度即某状态空气开始结露时的临界温度。

✓ 露点温度只与 **含湿量** 有关。

✓ 露点温度在空调技术中的应用

保温材料选择

围护结构内表面结露

空气处理设备选择等

✓ 确定空气露点温度的方法

1. 查表法

2. 查图法

3. 计算法

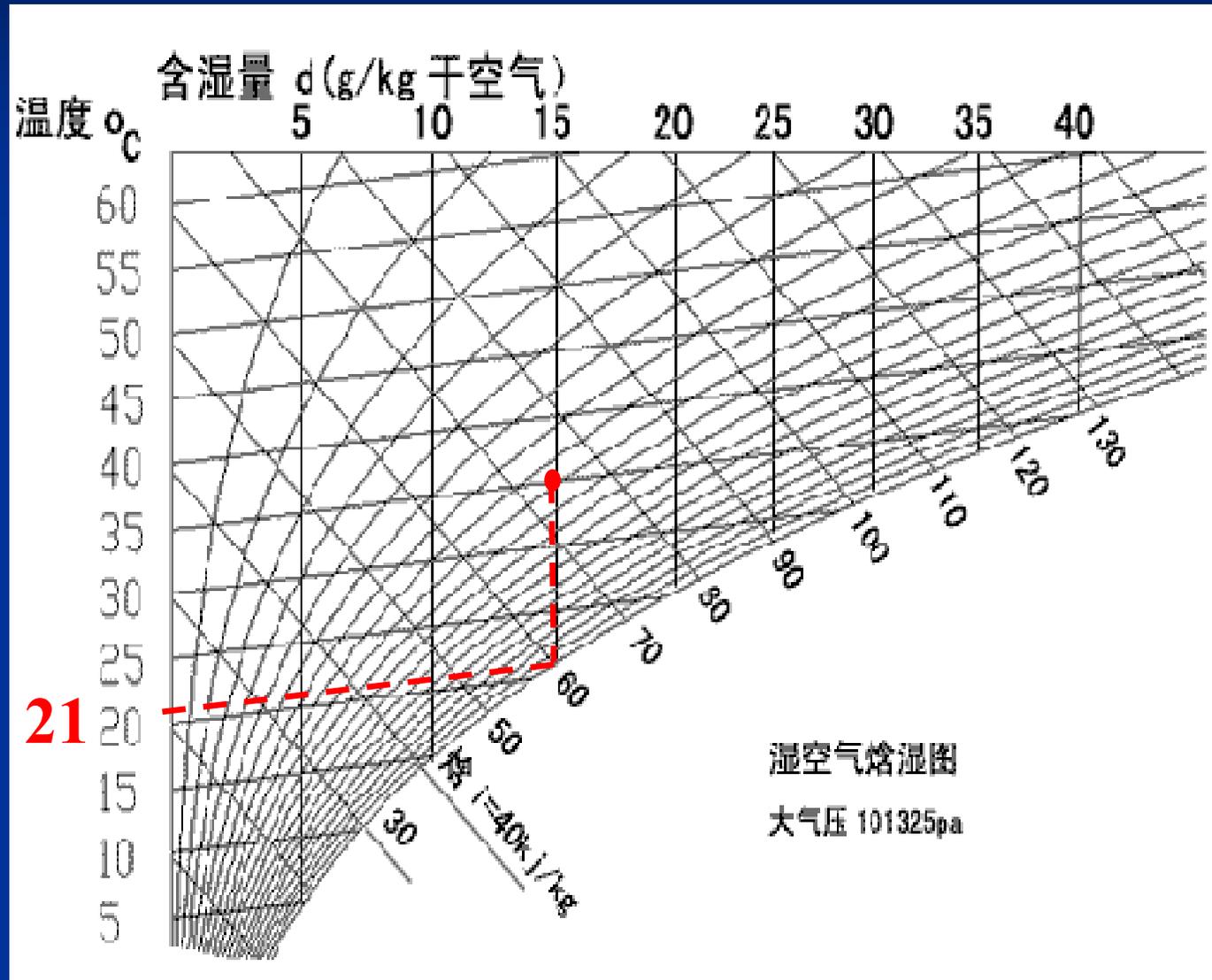
温度为35 °C，含湿量为15 g/kg<sub>干空气</sub>的湿空气的露点温度是多少？

空气温度 $t(^{\circ}\text{C})$	饱和空气 含湿量 $d_b$ (g/kg干空气)	空气温度 $t(^{\circ}\text{C})$	饱和空气 含湿量 $d_b$ (g/kg干空气)	空气温度 $t(^{\circ}\text{C})$	饱和空气 含湿量 $d_b$ (g/kg干空气)
0	3.78	20	14.7	24	18.8
5	5.40	21	15.6	25	20.0
10	7.63	22	16.6	30	27.2
15	10.6	23	17.7	35	36.6

利用插入法，则15 g/kg<sub>干空气</sub>的湿空气的露点温度为：

$$t_l = 20 + \frac{15 - 14.7}{15.6 - 14.7} = 20.3^{\circ}\text{C}$$

温度为35 °C，含湿量为15 g/kg干空气的湿空气的露点温度是多少？



注意：书中19页算法计算空气露点温度的公式中，表2-3的计算系数可能有误，不要用这个公式，直接用查图法比较简单准确。

例：空气温度40℃，相对湿度30%时

查图得露点温度为19.1℃

但算法为：

$\phi = 30\%$ 时， $A = -14.501922$ ， $B = 0.842345$

$t_L = -14.501922 * 0.3 + 0.842345 * 40 = 29.3℃$

差别很大



## 第二讲 湿空气的物理性质和焓湿图的使用

### 第2节 湿球温度和露点温度

## 2. 湿球温度

### (1) 热力学湿球温度

假设

1、绝热加湿

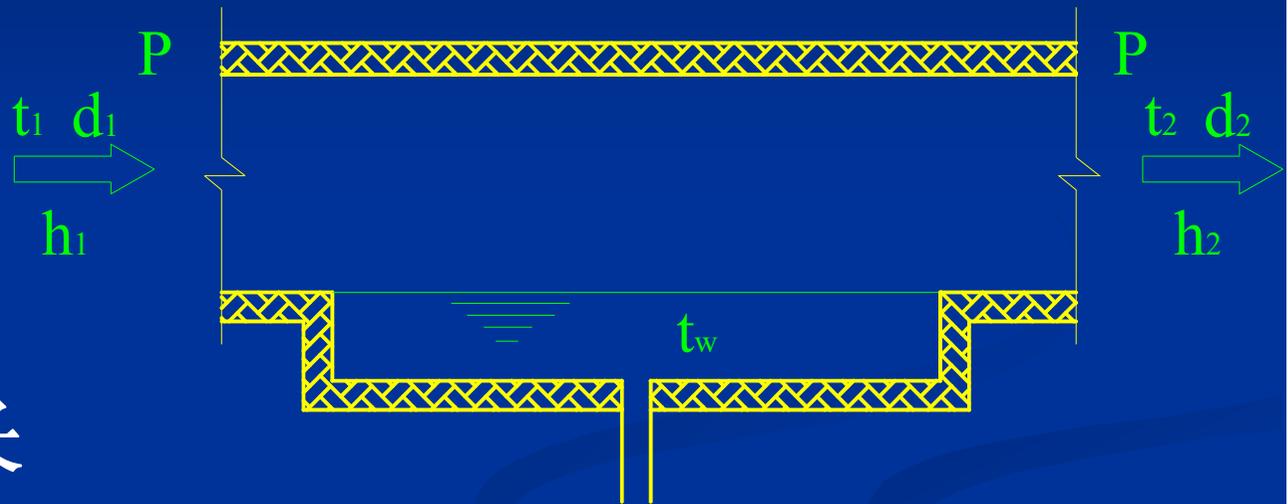
2、水温恒定 $t_w$

3、加湿器足够长

4、空气与水接触时间足够长，接触面积足够大

出口空气为饱和状态 $P, t_w, d_w, h_w$

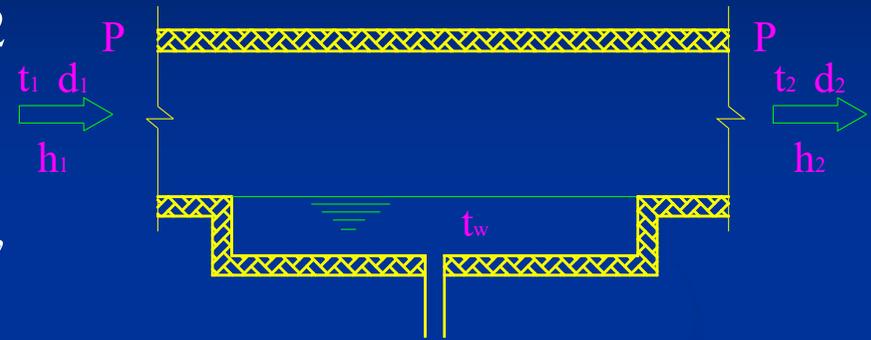
定义 $t_w$ 为具有参数 $P, t_1, d_1, h_1$ 的湿空气的热力学湿球温度



在这个绝热加湿过程中，其稳定流动能量方程式为

$$h_1 + (d_2 - d_1) \times 4.19 t_w = h_2$$

$$h_2 - h_1 = (d_2 - d_1) \times 4.19 t_w$$



空气的焓值增加了，温度呢？

虽然空气因提供水分所需的热量而温度下降，但它的比焓值却因为得到水蒸气的汽化潜热和液体热而增加，比焓值的增量等于蒸发的水分所具有的比焓。

## (2) 干湿球温度计

(1) 构造

(2) 空气流经湿球表面时的热湿交换过程

水温 > 空气温度

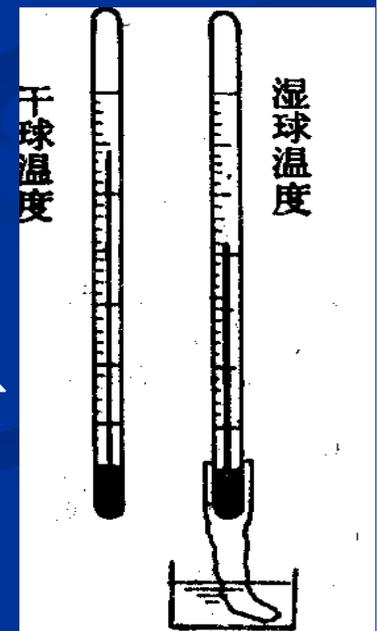
温差传热 = 蒸发需热

水温 < 空气温度

(3) 相对湿度较低时，干湿球温差大

(4) 湿球温度与空气流速有关，一般取 2.5-4m/s，实际中采用通风干湿球温度计

(5) 湿球温度  $\approx$  热力学湿球温度  
(湿球温度计)



### (3) 湿球温度在焓湿图上的表示

原空气状态A→饱和状态B

显热又由水汽分子以潜热的形式回来

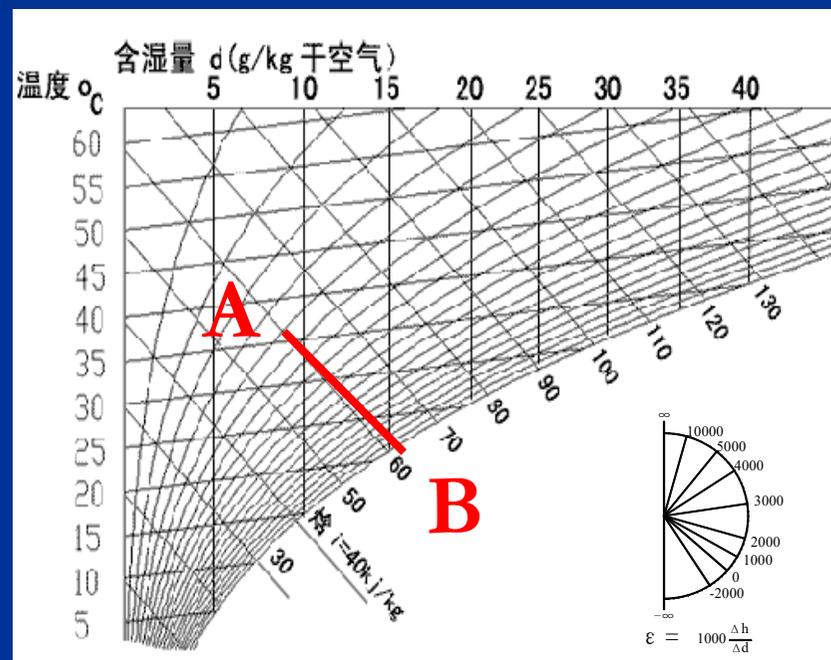
$$h_2 - h_1 = (d_2 - d_1) \times 4.19t_w$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{\Delta d} = ct_w = 4.19t_w$$

通常空调工程中， $t_w < 30^\circ\text{C}$ ， $\varepsilon = 4.19t_w$  线与  $\varepsilon = 0$  很接近，可近似用等焓线代替。

**A→B** 近似为等焓过程

实际上，这是一个**增焓**过程



## 思考题讨论

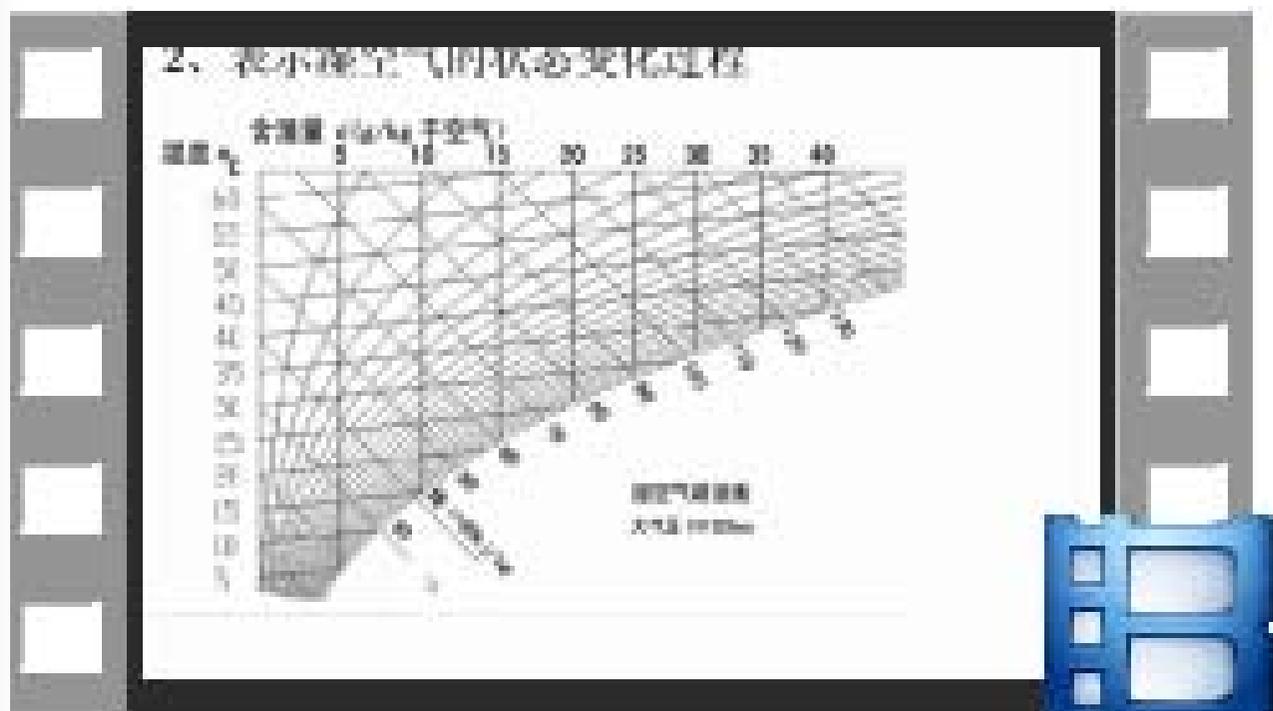
二房间室温不同，各置一相同水槽，高温房间的水槽内水温高，对不对？试分析。

一室内置二水槽，一密封，一敞口，平衡水温相同吗？

在同一个房间放置两个容量相同的开口水槽，一个是细高型的，一个是浅薄型的，两个水槽内的水温一样吗？为什么？

“空气温度低于露点温度就会结露”，这个说法对不对？

为什么结露一般发生在早晨？

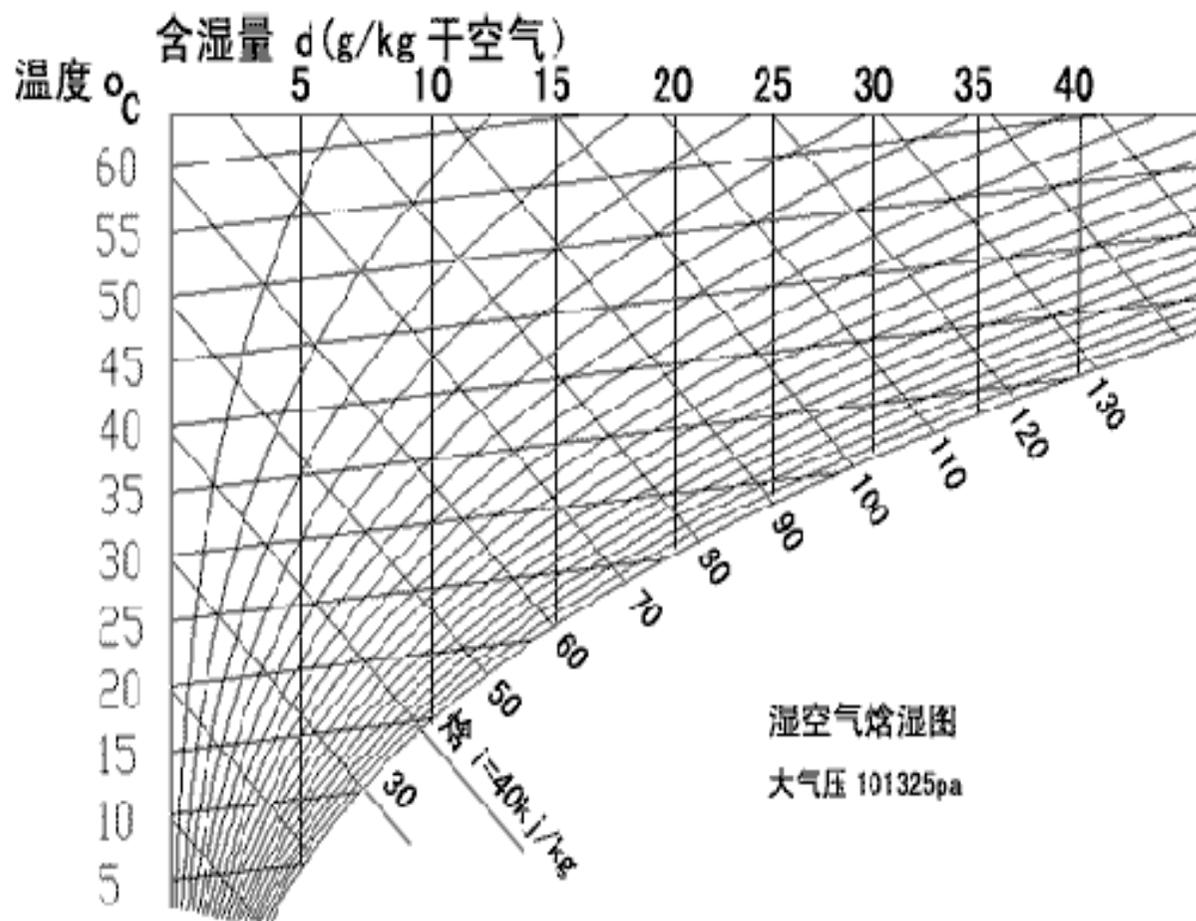


2焓湿图的应用.mp4

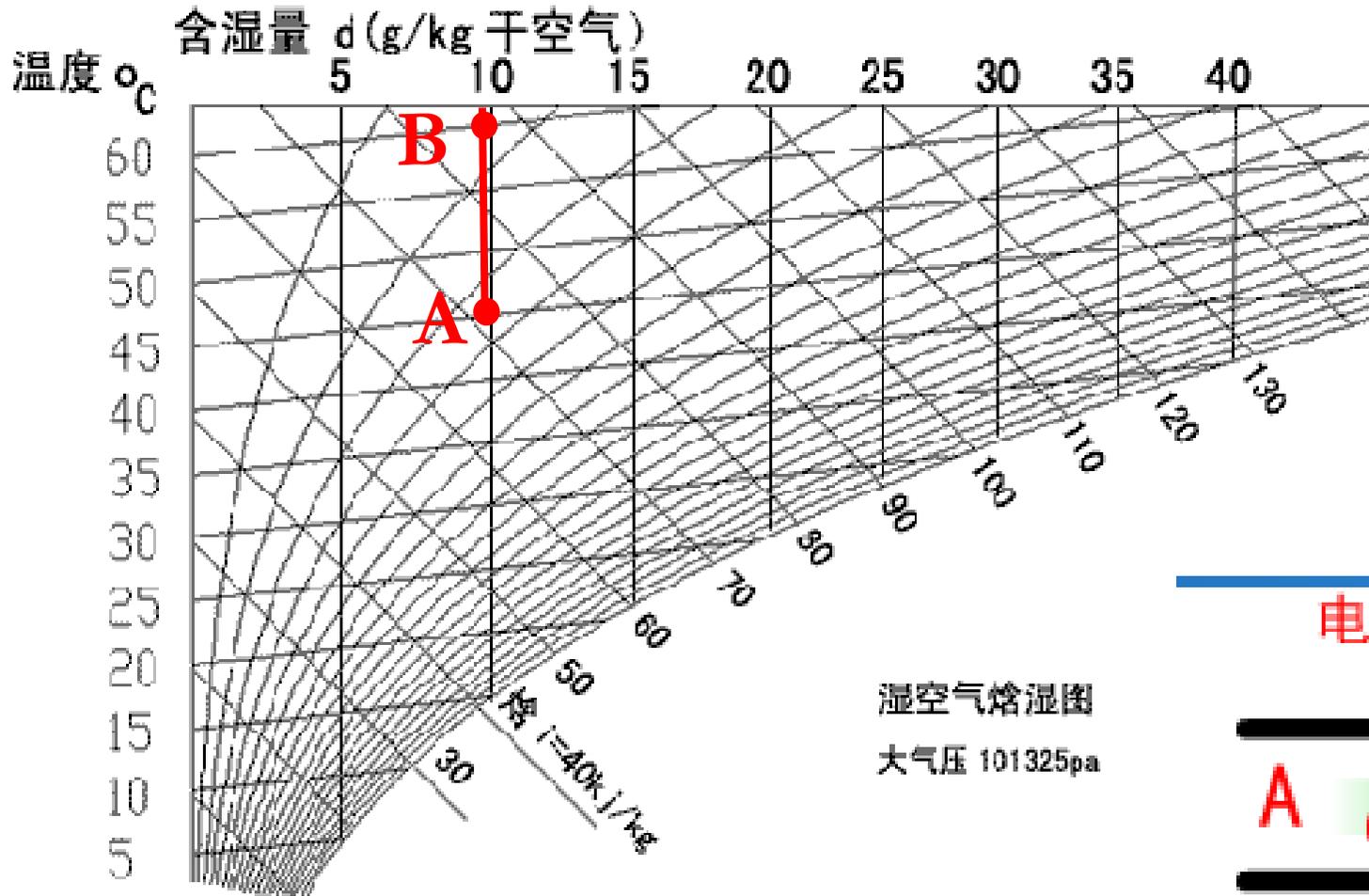
## 2.2.3 焓湿图的应用

### 1、确定湿空气状态参数

空气状态参数： $p_a, t, h, d, \varphi, p_q, p_{qb}$

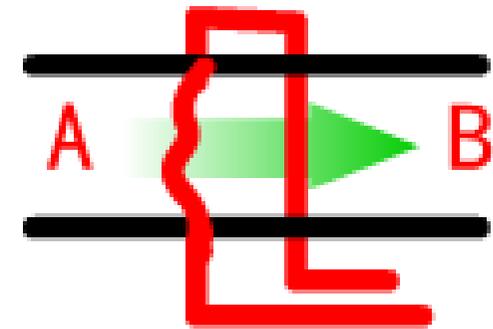


## 2、表示湿空气的状态变化过程



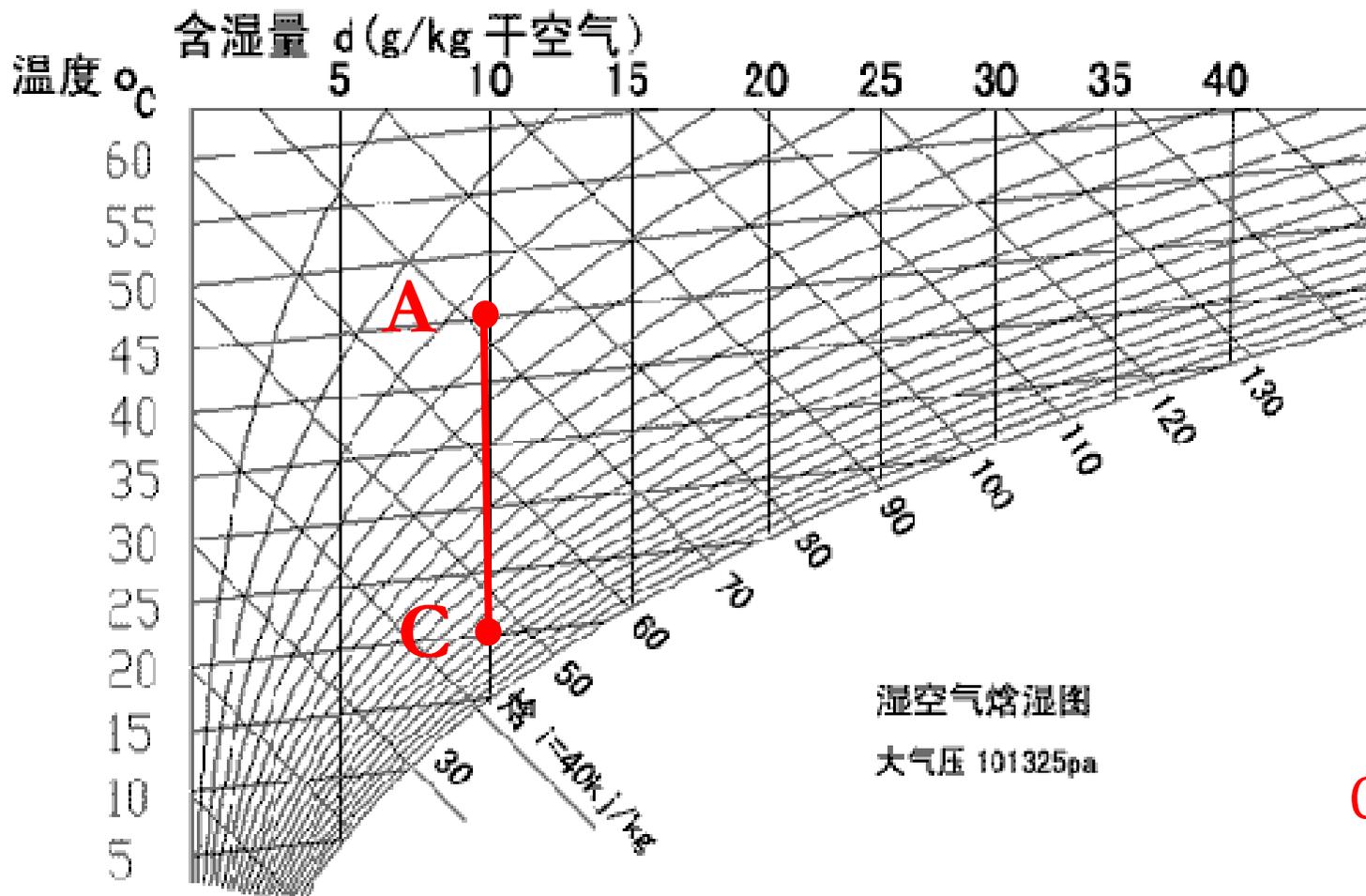
Heating

电加热器



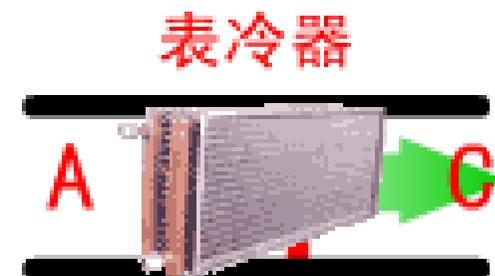
等湿加热

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{\Delta d} = \frac{h_B - h_A}{d_B - d_A} = \frac{h_B - h_A}{0} = \infty$$

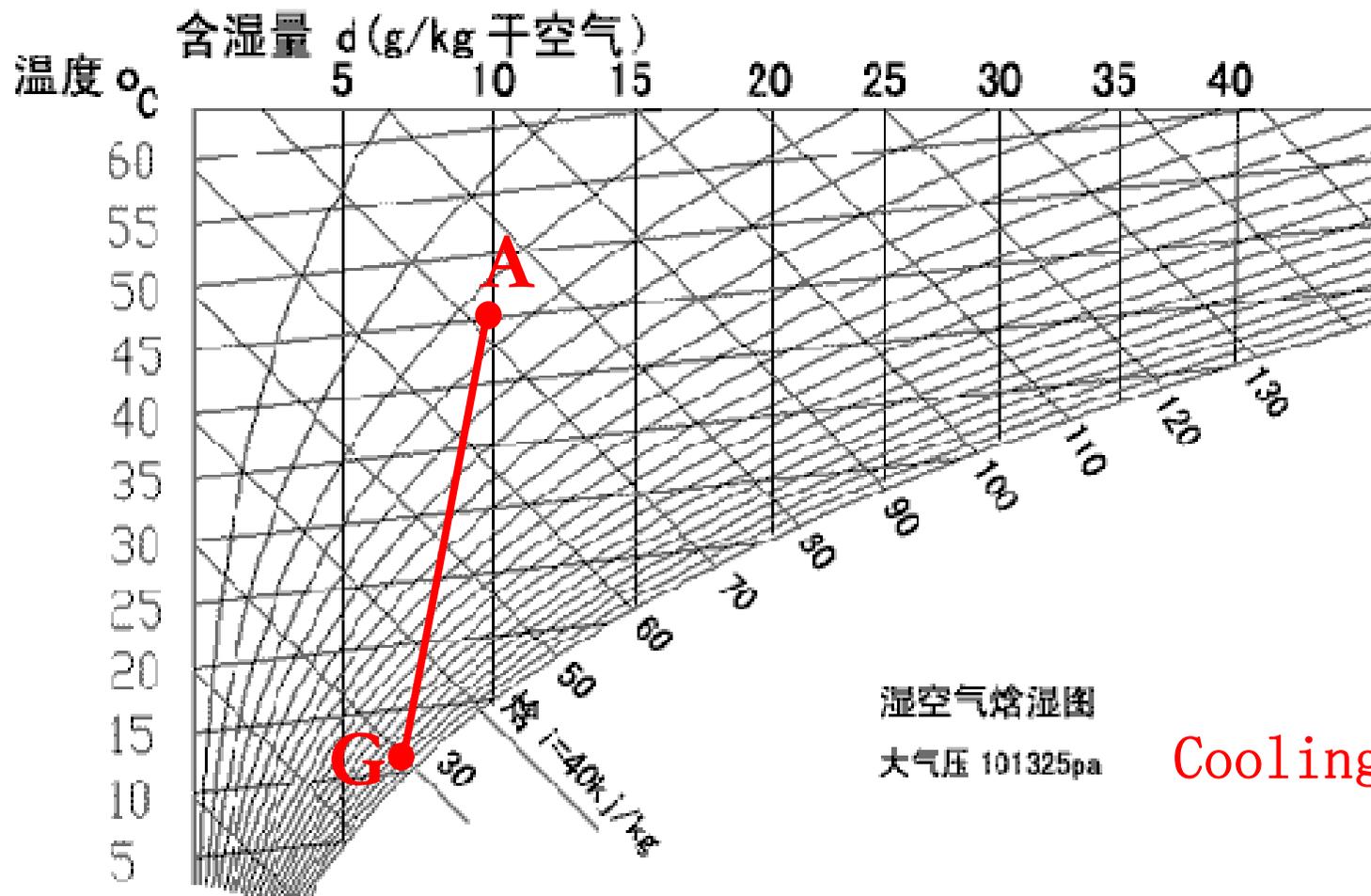


Cooling

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{\Delta d} = \frac{h_C - h_A}{d_C - d_A} = \frac{h_C - h_A}{0} = -\infty$$

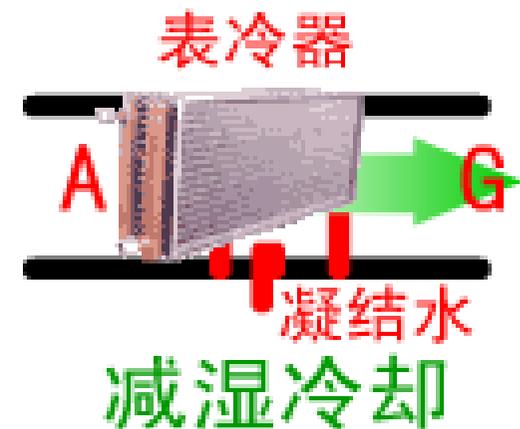


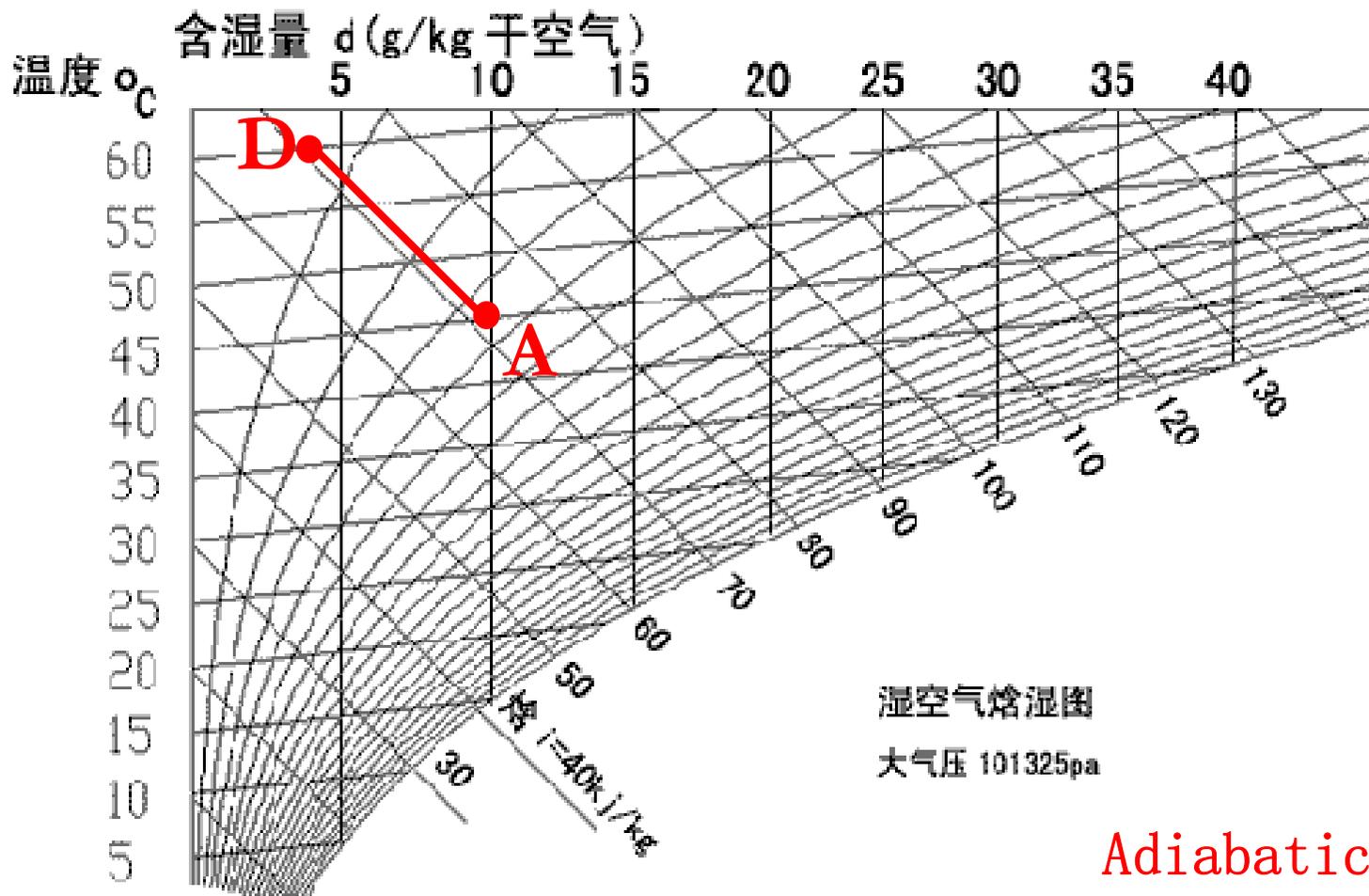
等湿冷却



Cooling dehumidify

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{\Delta d} = \frac{h_G - h_A}{d_G - d_A} > 0$$





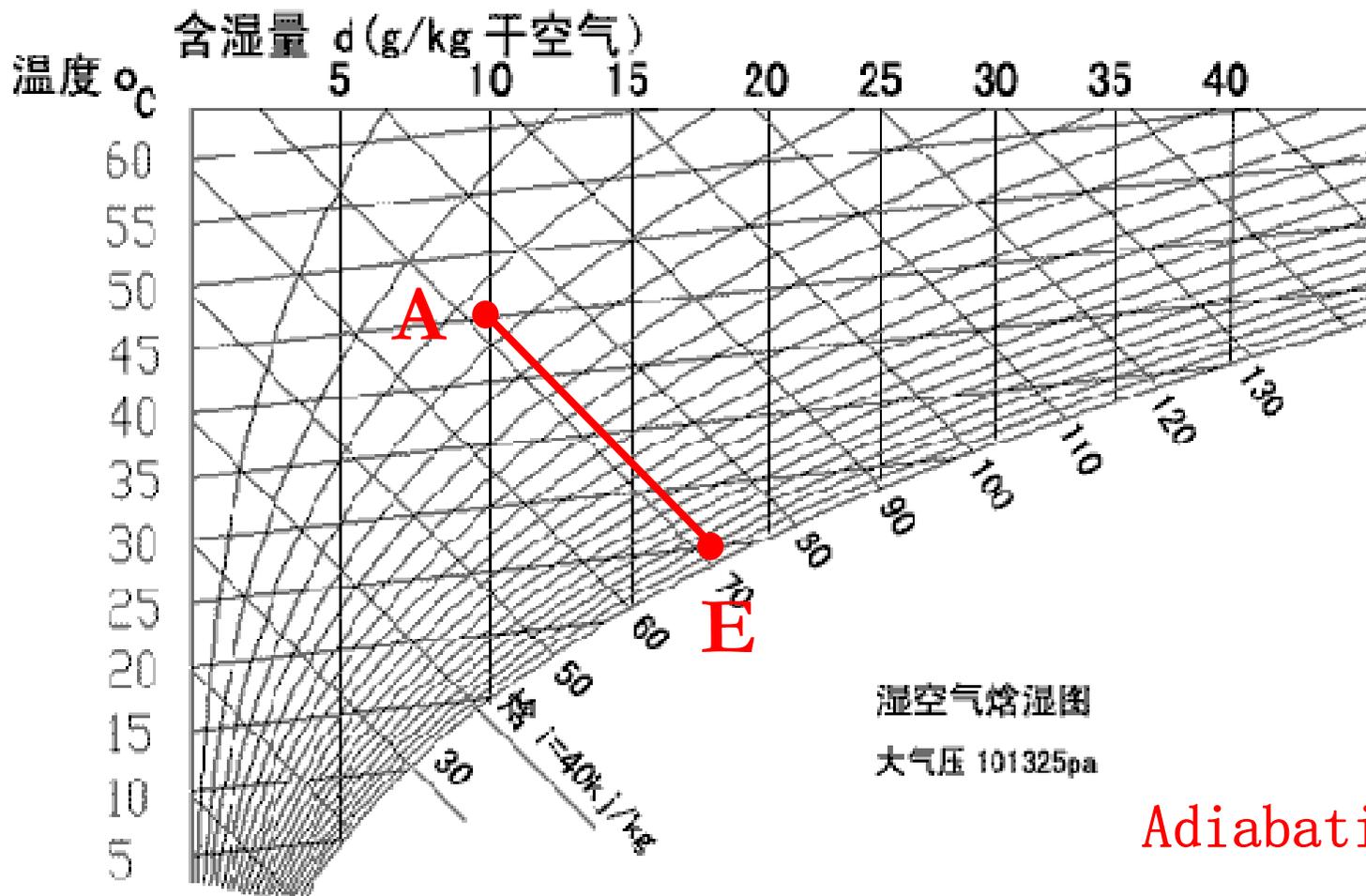
Adiabatic dehumidify

固体吸湿剂



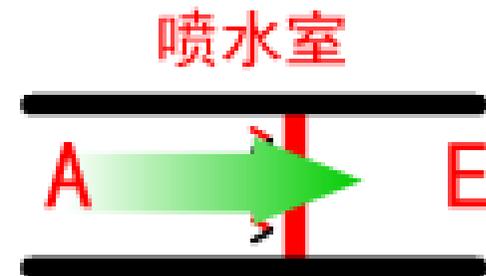
等焓减湿

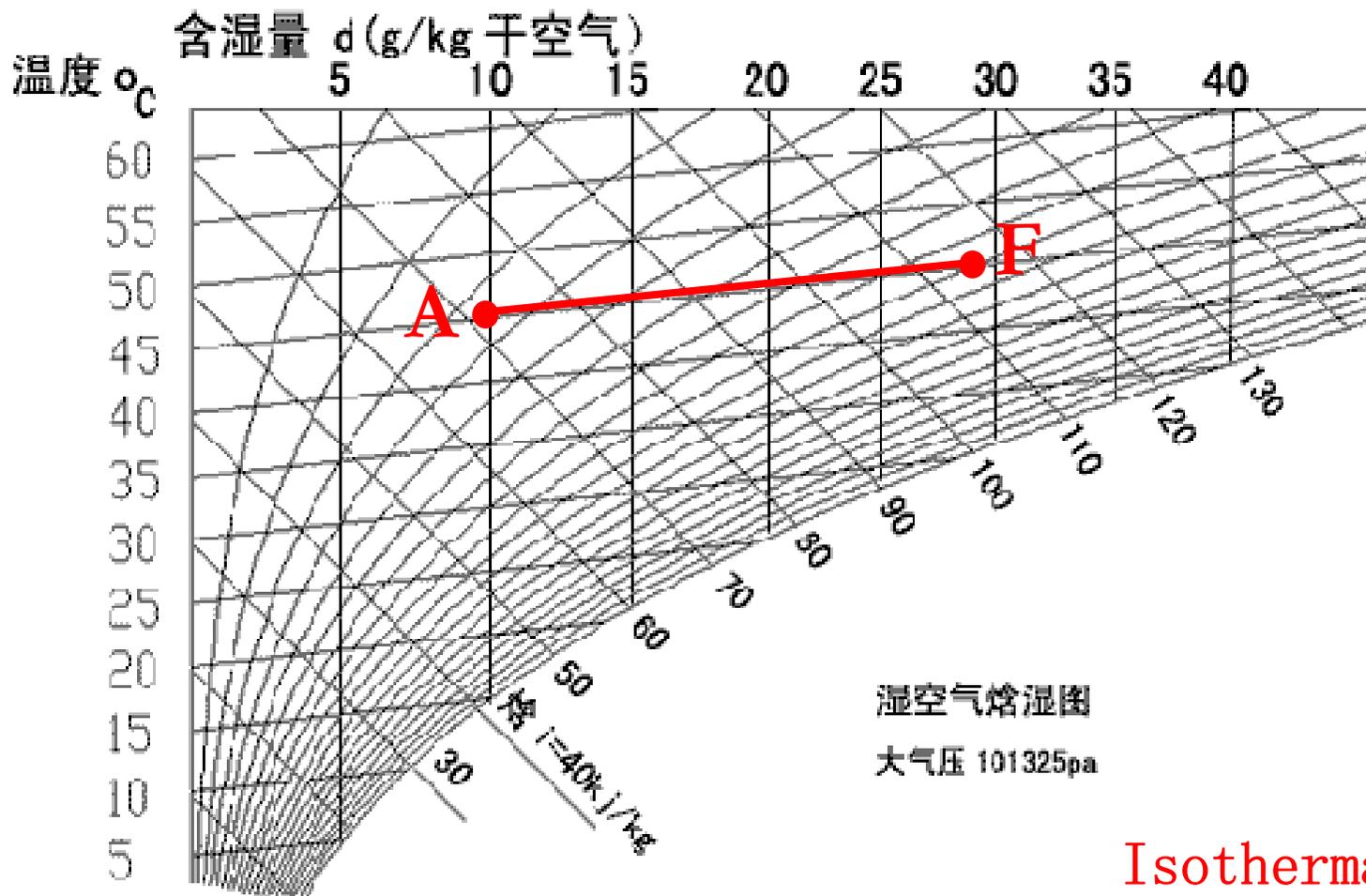
$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{\Delta d} = \frac{h_D - h_A}{d_D - d_A} = \frac{0}{d_D - d_A} = 0$$



Adiabatic humidify

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{\Delta d} = \frac{h_E - h_A}{d_E - d_A} = 4.19t_s \approx 0$$

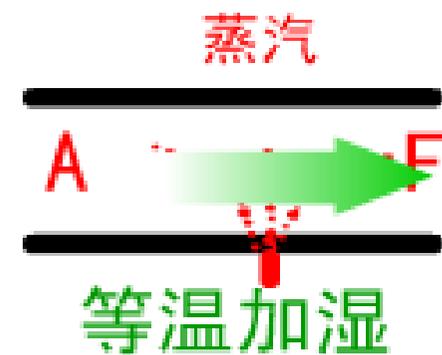


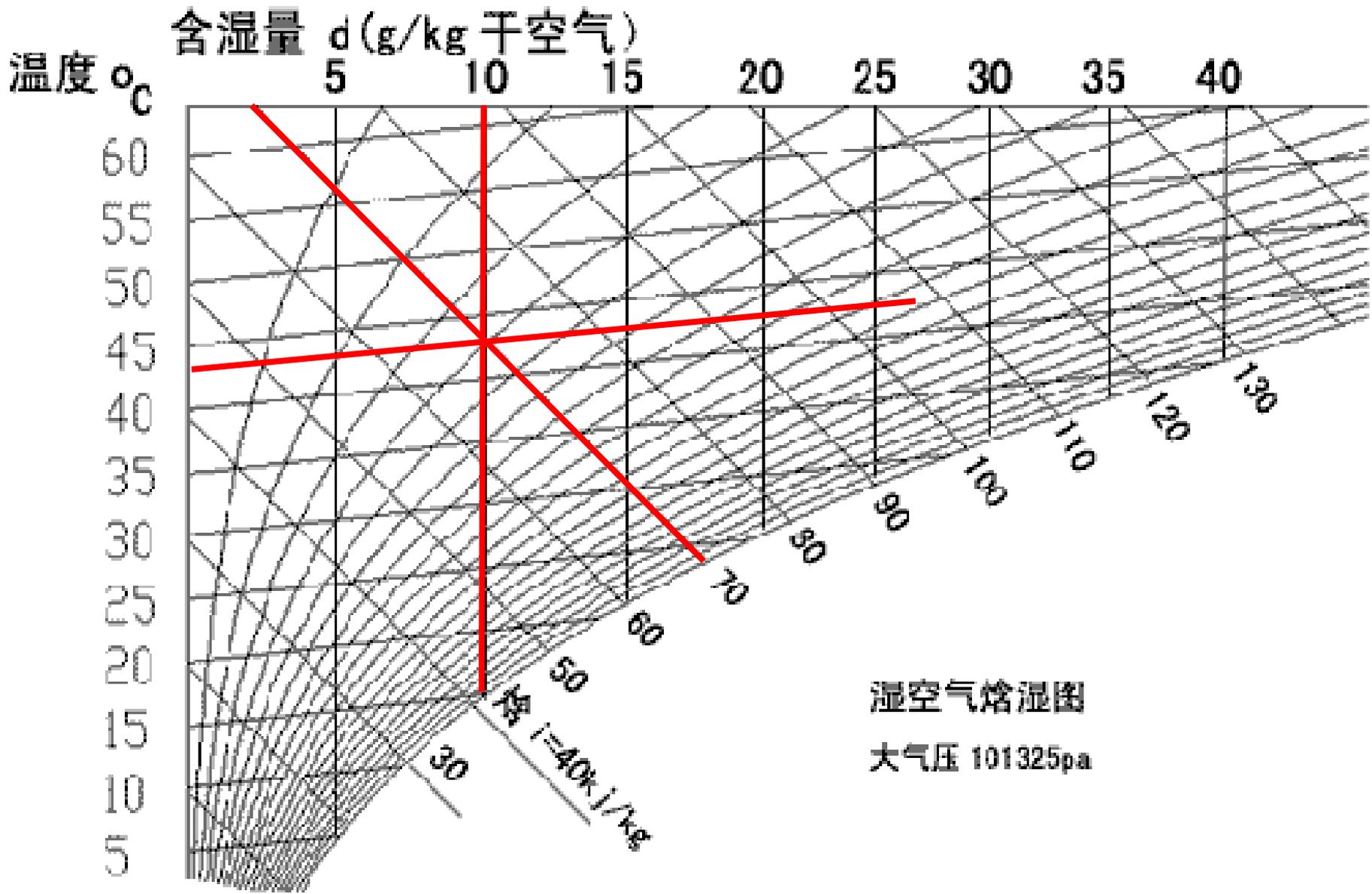


Isothermal humidify

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{\Delta d} = \frac{\Delta d(2500 + 1.84t_q)}{\Delta d} = 2500 + 1.84t_q$$

等温线的热湿比  $\varepsilon = 2500 + 1.84t$





湿空气焓湿图  
大气压 101325pa

## 课堂练习题

1. 大气压力 $B=1013.25\text{mbar}$ ， $t=20^\circ\text{C}$ ，每公斤干空气最多能容纳多少克水蒸气？
2. 已知某体积的空气，其中，干空气为119公斤，水蒸气含量为1公斤，求该空气的含湿量？
3. 在100公斤 $t=20^\circ\text{C}$ 的空气中，加入1公斤的水蒸气，如果原来的空气含湿量为5.5克/公斤，求加湿后空气的含湿量
4. 空气的干球温度 $t=22^\circ\text{C}$ ，相对湿度为50%，大气压 $B=1000\text{mbar}$ ，求干空气的分压力、水蒸气分压力、湿空气的含湿量

## 课堂练习题

5. 原有空气 $t=20^{\circ}\text{C}$ ， $d=5\text{g}/\text{kg}$ 干空气，如果空气的温度减少了5度，含湿量增加了 $4\text{g}/\text{kg}$ 干空气，求空气的焓是增加还是减少？
6. 1000公斤的空气，经过处理后，由 $35^{\circ}\text{C}$ 降到 $24^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度由50%变为90%，问此过程是加湿还是去湿过程，加湿或去湿量湿多少？
7. 室内干球温度为 $t=20^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度为70%，大气压 $B=1013.25\text{mbar}$ ，求水蒸气分压力，含湿量，湿空气密度，焓值(分别用公式和 $h-d$ 图计算)



4. 两种状态空气混合

假设A:  $G_A$  (kg/s) ( $h_A, d_A$ )

B:  $G_B$  (kg/s) ( $h_B, d_B$ )

A、B混合后→C

$G_C = G_A + G_B$  (kg/s) ( $h_C, d_C$ )

热平衡:  $G_A h_A + G_B h_B = G_C h_C$

湿平衡:  $G_A d_A + G_B d_B = G_C d_C$

$$\begin{cases} G_A h_A + G_B h_B = (G_A + G_B) h_C \\ G_A d_A + G_B d_B = (G_A + G_B) d_C \end{cases}$$


2两种状态空气混合.mp4

## 2、确定两种不同状态空气混合态参数

假设A:  $G_A$  (kg / s) ( $h_A, d_A$ )

B:  $G_B$  (kg / s) ( $h_B, d_B$ )

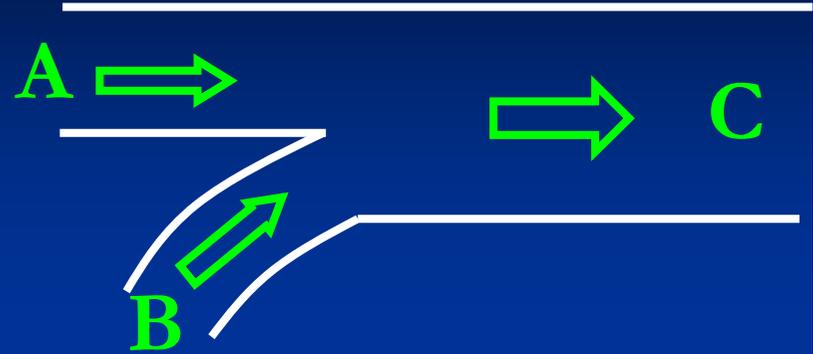
A、B混合后→C

$$G_C = G_A + G_B \text{ (kg / s)} \quad (h_C, d_C)$$

$$\text{热平衡: } G_A h_A + G_B h_B = G_C h_C$$

$$\text{湿平衡: } G_A d_A + G_B d_B = G_C d_C$$

$$\begin{cases} G_A h_A + G_B h_B = (G_A + G_B) h_C \\ G_A d_A + G_B d_B = (G_A + G_B) d_C \end{cases}$$



计算法

$$\begin{cases} G_A h_A + G_B h_B = (G_A + G_B) h_C \\ G_A d_A + G_B d_B = (G_A + G_B) d_C \end{cases}$$

$$\text{作图法} = \frac{h_C - h_A}{d_C - d_A}$$

等式两边同除以 $G_B$ ,则

$$\frac{G_A}{G_B} h_A + h_B = \frac{G_A}{G_B} h_C + h_C$$

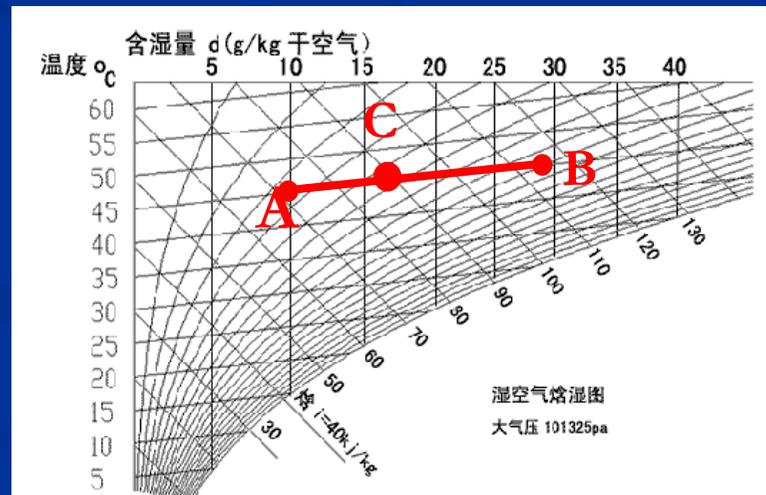
$$\frac{G_A}{G_B} d_A + d_B = \frac{G_A}{G_B} d_C + d_C$$

$$\therefore \frac{G_A}{G_B} = \frac{h_B - h_C}{h_C - h_A} = \frac{d_B - d_C}{d_C - d_A}$$

直线BC的斜率

直线CA的斜率

因为两线斜率相同，且有公共点C，所以，A、B、C三点在同一条直线上

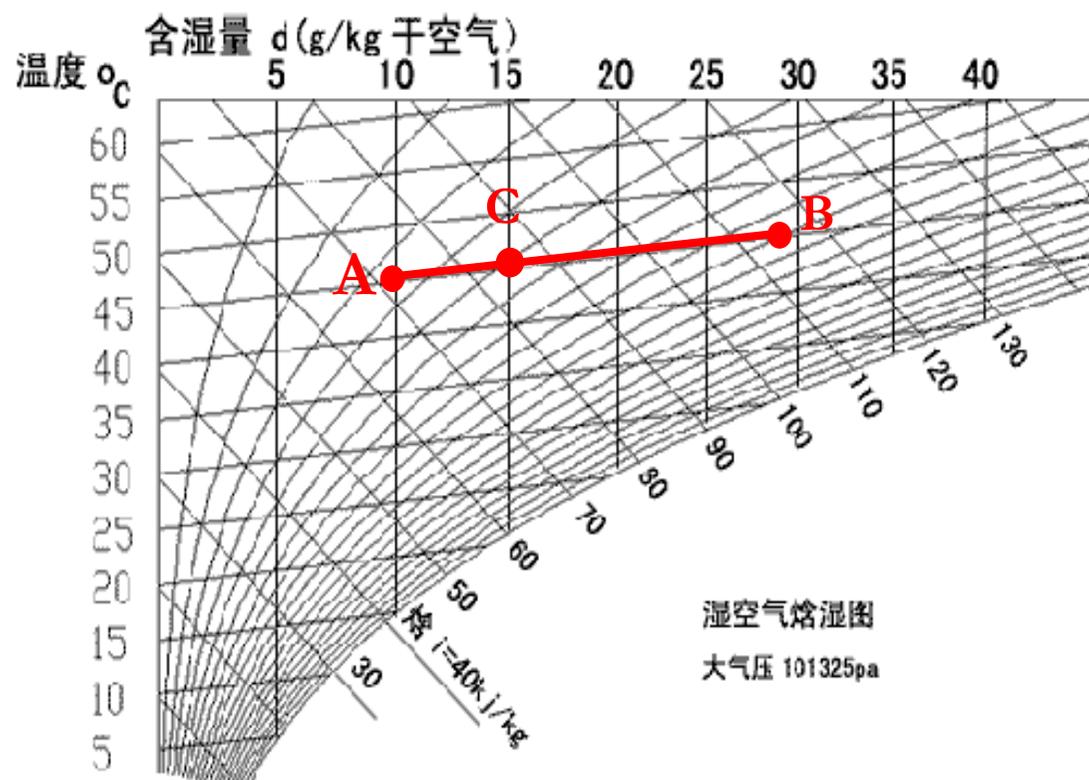


$$\therefore \frac{\overline{BC}}{\overline{CA}} = \frac{h_B - h_C}{h_C - h_A} = \frac{d_B - d_C}{d_C - d_A}$$

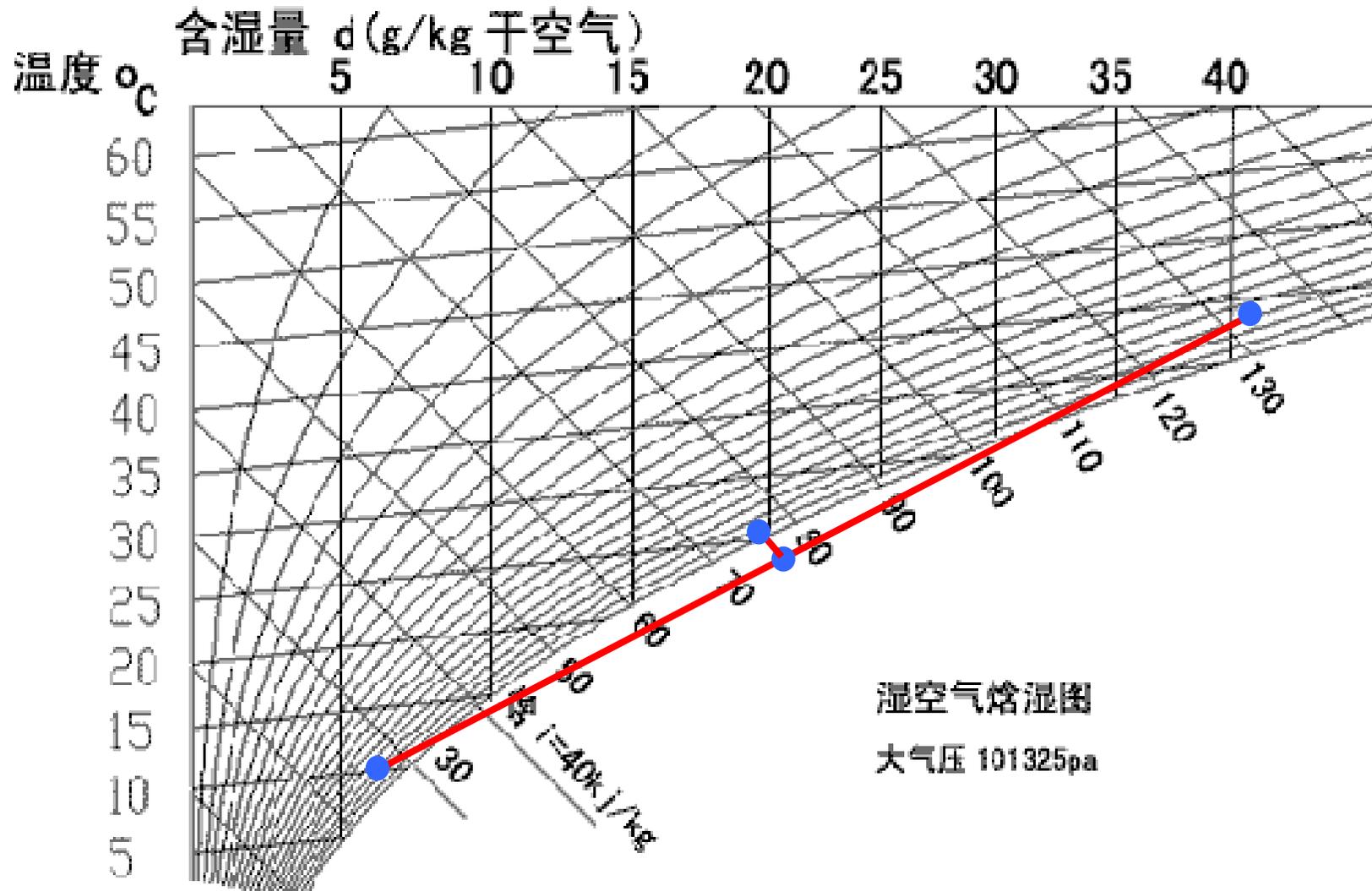
由前可知：

$$\frac{G_A}{G_B} = \frac{h_B - h_C}{h_C - h_A} = \frac{d_B - d_C}{d_C - d_A}$$

**结论：**混合点C将线段AB分成两段，两段长度与参与混合的空气质量成反比，混合点靠近质量大的空气状态一端。



如果混合点出现在100%相对湿度线以外，则按等焓过程移动到相对湿度为100%的线上。



## 思考题讨论

夏天到火锅店吃饭，常见到其空调机的送风口附近出现一团白雾，是什么原因？



例2-4：某空调工程总送风量为5.30kg/s，其中回风量为4.09kg/s，回风状态 $t_N=20^\circ\text{C}$ ， $\varphi_N=55\%$ ，新风量为1.21kg/s，新风状态参数 $t_W=34^\circ\text{C}$ ， $\varphi_W=61\%$ ，求混合空气的状态。所在地区大气压力101325Pa。

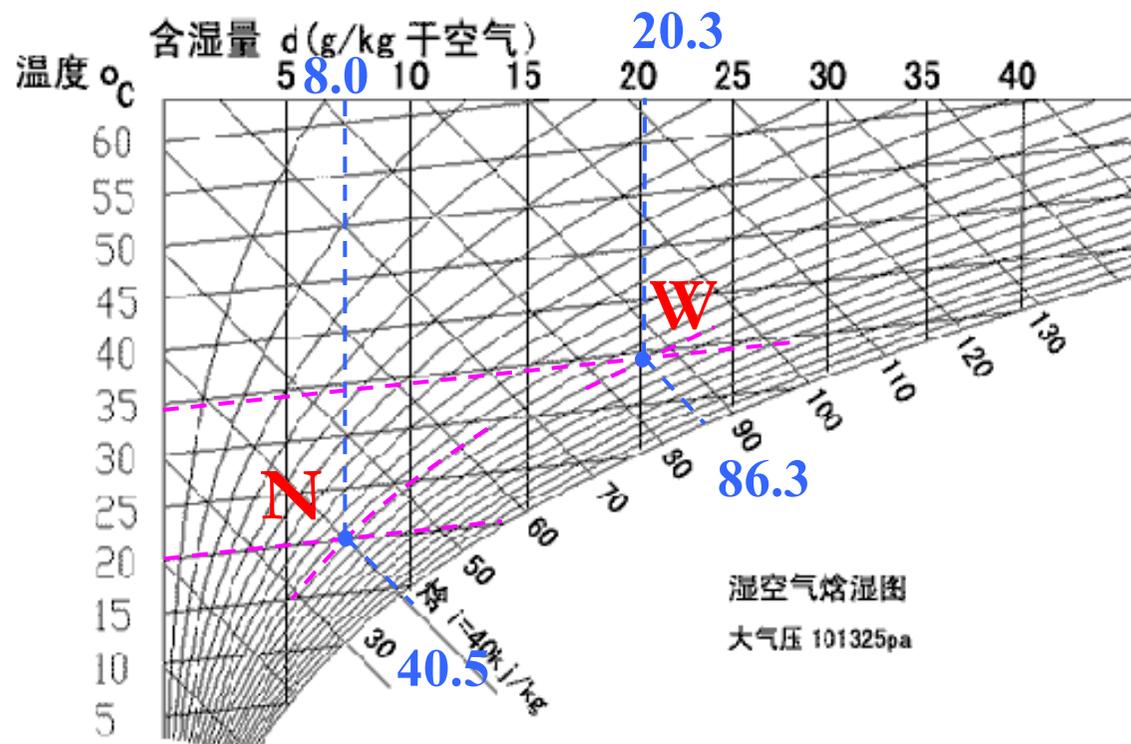
解：由焓湿图可知：

$$\begin{cases} h_N = 40.5 \text{ kJ/kg} \\ d_N = 8.0 \text{ g/kg}_{\text{干空气}} \end{cases} \quad \begin{cases} h_W = 86.3 \text{ kJ/kg} \\ d_W = 20.3 \text{ g/kg}_{\text{干空气}} \end{cases}$$

### 1. 计算法

$$\begin{cases} h_C = \frac{G_A h_A + G_B h_B}{G_A + G_B} \\ d_C = \frac{G_A d_A + G_B d_B}{G_A + G_B} \end{cases}$$

$$\begin{cases} h_C = 50.95 \text{ kJ/kg} \\ d_C = 10.80 \text{ g/kg}_{\text{干空气}} \end{cases}$$



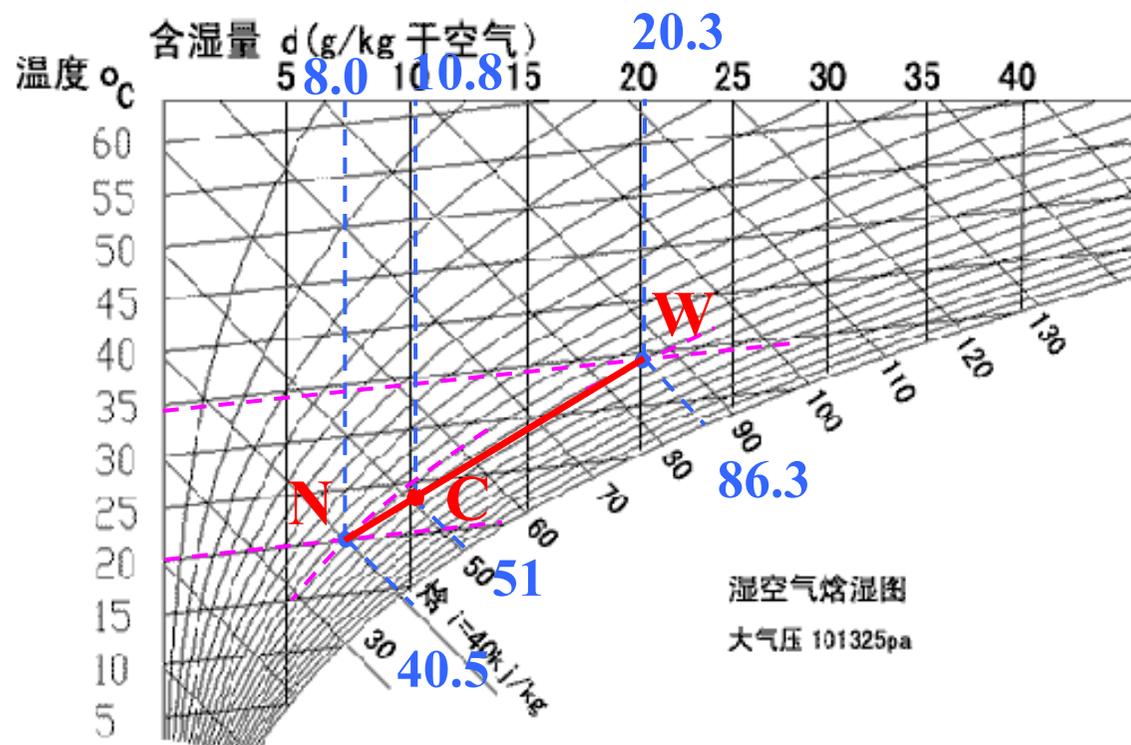
## 2. 图解法

(1) 连接NW

(2) 量出线段NW总长64mm，则混合点C距回风状态点N的距离为

$$64 \times \frac{1.21}{4.09 + 1.21} = 15\text{mm}$$

(3) 找出混合点C的位置后，由焓湿图确定空气状态参数



# 2.3 湿空气状态参数的计算方法

利用公式编制程序来进行空气状态参数的计算

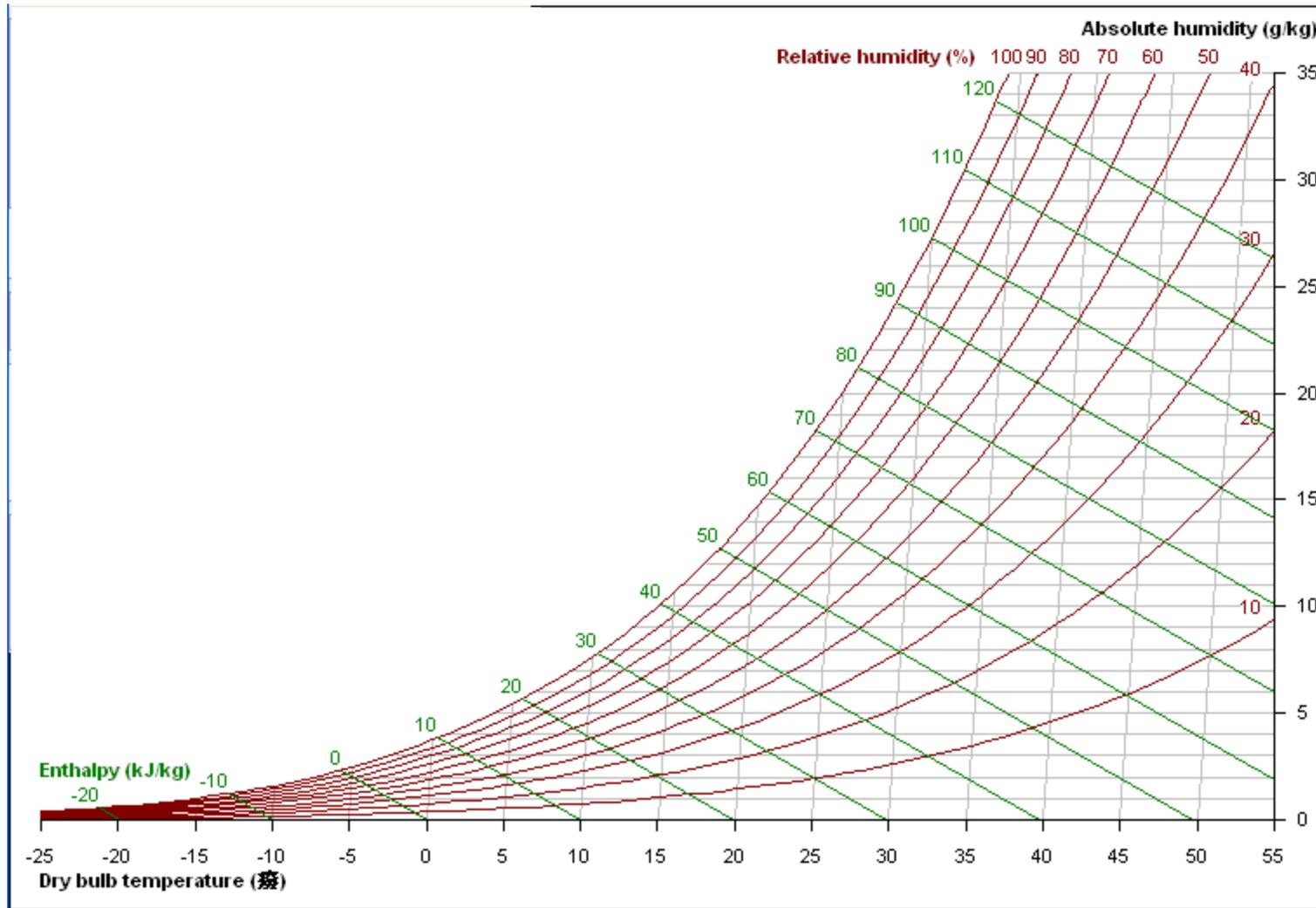
表 2-6 空气的通用性状态参数

状态参数	符号	单位	定义	表达式
温度	$t$	℃	表示空气冷热程度的参数，其数值大小用温标来衡量	$T = 273.15 + t$
压力	$p_a$	Pa	地球表面的空气层在地面单位面积上所形成的压力	$p_a = p_g + p_q$
密度	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	单位容积的空气所具有的质量	$\rho = 0.003484 \frac{p_a}{T} - 0.00134 \frac{p_q}{T}$

表 2-7 空气的特殊性状态参数

分类	序号	指标名称	符号	单位	定义	定义式	
基本指标	1	水蒸气分压力(水气分压)	$p_q$	Pa	湿空气中,水蒸气单独占有湿空气的容积,并具有与湿空气相同的湿度时,所产生的压力	$p_a = p_g + p_q$	
直接指标	绝对量	2	绝对湿度(水蒸气浓度,水蒸气密度)	$\rho_q$	kg/m <sup>3</sup>	每 1m <sup>3</sup> 湿空气中所含水蒸气的质量	$\rho_q = \frac{m_q}{V}$
		3	含湿量	$d$	kg/kg 干空气	内含 1kg 干空气的湿空气中所含水蒸气的质量	$d = \frac{m_q}{m_g}$
		4	组成成分(组分份额)	$\rho'_q$		湿空气中水蒸气的密度与湿空气总密度的比值	$\rho'_q = \frac{\rho_q}{\rho_q + \rho_g} \times 100\%$
直接指标	相对量	5	吸湿能力	$\Delta\rho$	kg/m <sup>3</sup>	空气的绝对湿度 $\rho_q$ 和同温度饱和状态下的绝对湿度 $\rho_{q,b}$ 之差的绝对值	$\Delta\rho =  \rho_q - \rho_{q,b} $
		6	相对湿度	$\varphi$	%	空气的水蒸气分压力与同温度下饱和湿空气的水蒸气分压力的比值	$\varphi = \frac{p_q}{p_{q,b}} \times 100\%$
间接指标		7	露点温度	$t_L$	℃	未饱和空气在水蒸气分压力不变情况下,冷却至饱和空气时的温度。或湿空气在含湿量不变的情况下,冷却到饱和状态时所对应的温度	$t_L = f(d)$
		8	湿球温度	$t_w$	℃	在干湿球温度计上的湿球温度计的读数下降至某一位置上稳定下来。这时所测得的温度为湿球温度	$\varphi = \frac{p_{q,b}^* - A(t - t_w)p_a}{p_{q,b}} \times 100\%$ $t_w = f(h)$

## 2.4 其他类型的焓湿图



大金焓湿图软件使用演示