

第三章 气体和蒸气的性质

Properties of gas and vapor

3-1 理想气体

3-2 理想气体的比热容

3-3 理想气体的热力学能、焓和熵

3-4 饱和状态、饱和温度和饱和压力

3-5 水的定压加热汽化过程

3-6 水和水蒸气状态参数

3-7 水蒸气图表和图

3-1 理想气体

一、理想气体(perfect gas or ideal gas)的基本假设

- 分子为不占体积的弹性质点
- 除碰撞外分子间无作用力 $\Rightarrow u = u(T)$

理想气体是实际气体在**低压高温**时的抽象。

二、理想气体的状态方程(ideal-gas equation)

$$\begin{array}{l}
 \text{Pa} \quad \text{m}^3 \\
 pV = mR_g T \Rightarrow \left\{ \begin{array}{ll} pv = R_g T & 1\text{kg} \\ pV = nRT & n \text{ mol} \\ p_0V_0 = RT_0 & 1\text{mol标准状态} \end{array} \right.
 \end{array}$$

气体常数,单位为J/(kg·K) $R=MR_g=8.314 5 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$


考察按理想气体状态方程求得的空气在表列温度、压力条件下的比体积 v ，并与实测值比较。空气气体常数 $R_g=287.06 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

T/K	p/atm	$v/\text{m}^3/\text{kg}$	$v_{\text{测}}/\text{m}^3/\text{kg}$	误差 (%)
300	1	0.84992	0.84925	0.02
300	10	0.084992	0.08477	0.26
300	100	0.0084992	0.00845	0.58
200	100	0.005666	0.0046	23.18
90	1	0.25498	0.24758	2.99

计算依据

$$v = \frac{R_g T}{p} = \frac{287.06 \times 300}{101325} = 0.84992 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$\text{相对误差} = \frac{v - v_{\text{测}}}{v_{\text{测}}} = \frac{0.84992 - 0.84925}{0.84925} = 0.02\%$$

- 
- (1) 温度较高，随压力增大，误差增大；
 - (2) 虽压力较高，当温度较高时误差还不大，但温度较低，则误差极大；
 - (3) 压力低时，即使温度较低误差也较小。

本例说明：低温高压时，应用理想气体假设有较大误差。

例A411133

讨论理想气体状态方程式

3-2 理想气体的比热容



一、比热容(specific heat)定义和分类

定义: $c = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{q}{\Delta T} = \frac{\delta q}{dT} \Rightarrow$ c 与过程有关
 c 是温度的函数

分类:

按物量

质量热容 (比热容) c J/(kg·K) (specific heat capacity per unit of mass)	} $C_m = Mc$ $= 0.0224C'$
体积热容 C' J/(Nm ³ ·K) (volumetric specific heat capacity)	
摩尔热容 C_m J/(mol·K) (mole specific heat capacity)	

注: Nm³为非法定表示法, 标准表示法为“标准m³”。

按过程

质量定压热容 (比定压热容)
(constant pressure specific heat
capacity per unit of mass)
质量定容热容 (比定容热容)
(constant volume specific heat
capacity per unit of mass)

c_p $C_{p,m}, C'_p$
及
 c_v $C_{v,m}, C'_v$

二、理想气体比定压热容, 比定容热容和迈耶公式

1. 比热容一般表达式

$$c = \frac{\delta q}{dT} = \frac{du + \delta w}{dT} = \frac{du}{dT} + \frac{pdv}{dT} \quad (A)$$

$$u = u(T, v) \quad du = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T dv$$

代入式 (A) 得

$$c = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v + \left[\left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + p \right] \frac{dv}{dT}$$

比热容的一般表达式

2. c_V

定容过程 $dv=0$

$$c_V = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$$

若为理想气体

$$u = u(T) \quad \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v = \frac{du}{dT} \Rightarrow c_V = \frac{du}{dT} (\Rightarrow du = c_V dT)$$

$\longrightarrow c_V = c_V(T)$ 温度的函数

3. c_p

据一般表达式

$$c_p = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v + \left[\left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + p \right] \frac{dv}{dT} = c_v + \left[\left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + p \right] \frac{dv}{dT}$$

若为理想气体

$$u = f(T)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = 0 \Rightarrow$$

$$dp = 0$$

$$c_p = c_v + p \frac{dv}{dT} = \frac{du}{dT} + \frac{pdv}{dT} = \frac{d(h - pv) + pdv}{dT} = \frac{dh - vdp}{dT}$$

$$c_p = \left(\frac{dh}{dT} \right) (\Rightarrow dh = c_p dT) \Rightarrow c_p = c_p(T)$$

c_p 是温度函数

4. $c_p - c_v$

$$\begin{aligned}c_p - c_v &= \frac{dh - du}{dT} = \frac{d(u + pv) - du}{dT} \\ &= \frac{d(u + R_g T) - du}{dT} = R_g\end{aligned}$$

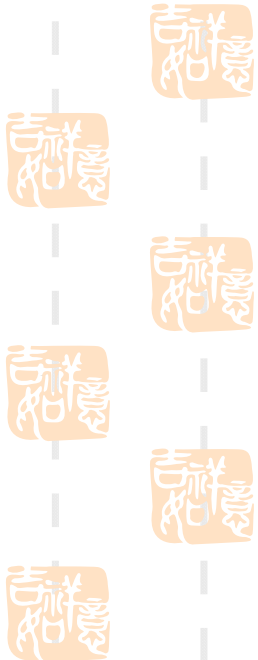
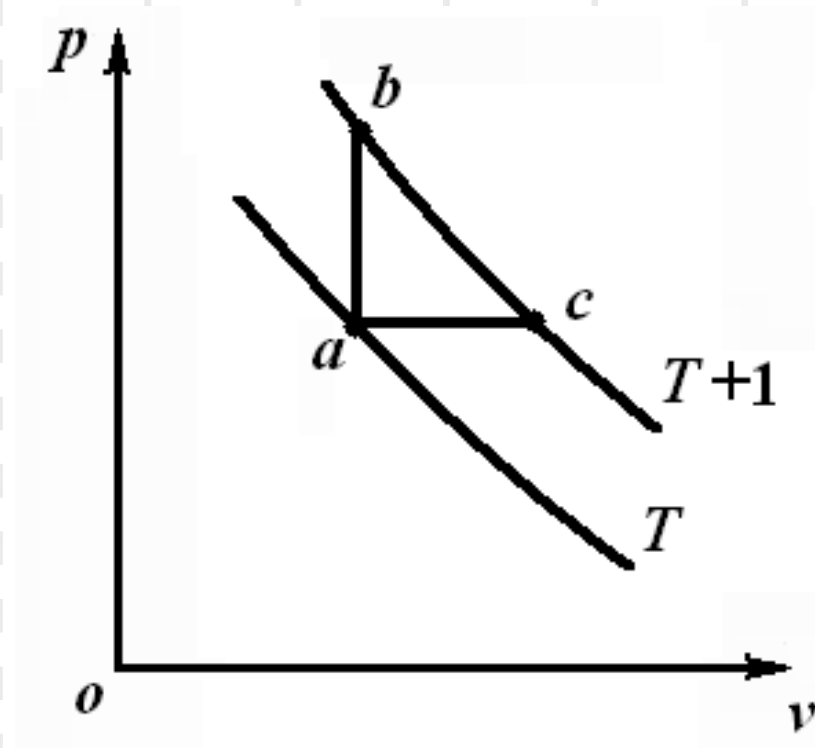
$c_p - c_v = R_g$ —— 迈耶公式 (Mayer's formula)

5. 讨论

1) c_p 与 c_v 均为温度函数, 但 $c_p - c_v$ 恒为常数: R_g

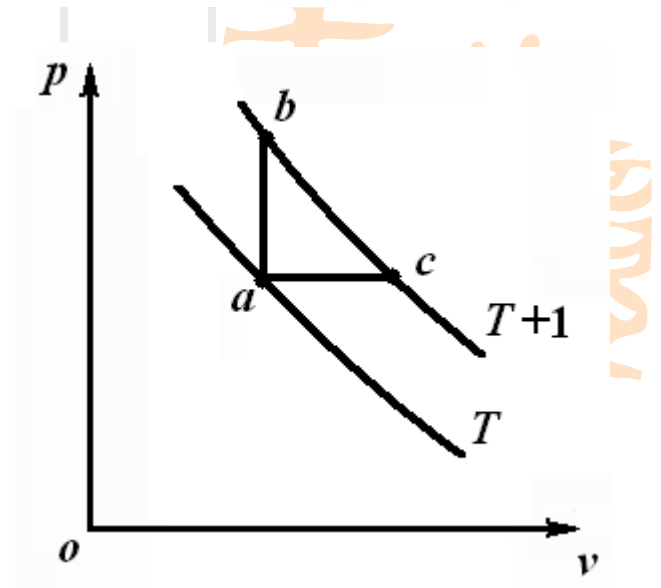
2) (理想气体) c_p 恒大于 c_v

物理解释: $a \xrightarrow{v} b; a \xrightarrow{p} c$



定容 $q_v = \Delta u_{ab} + \overset{0}{w_{ab}}$

定压 $q_p = \Delta u_{ac} + w_{ac}$
 $= \Delta u_{ac} + p(v_c - v_a)$



b与c温度相同，均为(T+1)K

$\Delta u_{ab} = \Delta u_{ac}$

$v_c > v_a \quad p(v_c - v_a) > 0 \quad \text{即 } q_p > q_v$

而 $q_p = c_p (T_c - T_a) = c_p (T + 1 - T) = c_p$

$q_v = c_v (T_b - T_a) = c_v (T + 1 - T) = c_v$

$c_p > c_v$

c) 气体常数 R_g 的物理意义

$$c_p - c_v = q_p - q_v = w_p = R_g$$

R_g 是 1 kg 某种理想气体定压升高 1 K 对外作的功。

三、理想气体的比热容比 γ

(specific heat ratio; ratio of specific heat capacity)

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \Rightarrow \begin{cases} \gamma = f(T) \\ c_p - c_v = R_g \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} c_p = \frac{\gamma}{\gamma - 1} R_g \\ c_v = \frac{1}{\gamma - 1} R_g \end{cases}$$

注：理想气体可逆绝热过程的绝热指数 (adiabatic exponent; isentropic exponent) $\kappa = \gamma$

[例A902355](#)

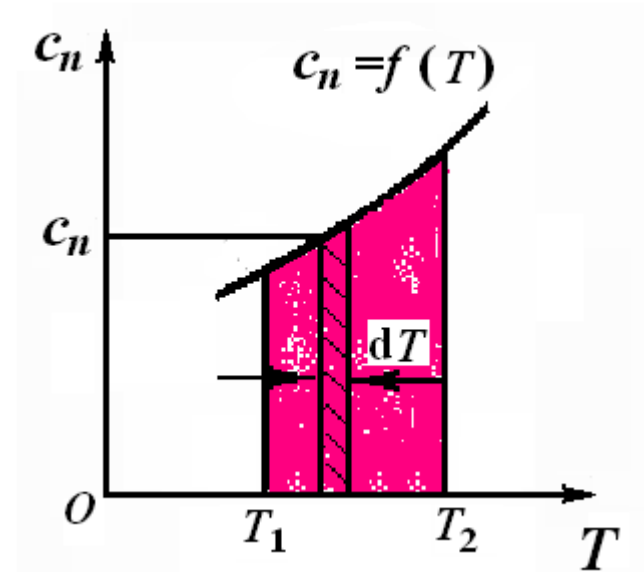
三、利用比热容计算热量

原理:

$$c = \frac{\delta q}{dT}$$

$$\delta q = c dT$$

$$q = \int_{T_1}^{T_2} c_n dT$$



对 c_n 作不同的技术处理可得精度不同的热量计算方法:

真实比热容积分

利用平均比热表

利用平均比热直线

定值比热容

1. 利用真实比热容(true specific heat capacity)积分

$$q = \int_{T_1}^{T_2} c_n dT = \text{面积} amnba$$

附表4

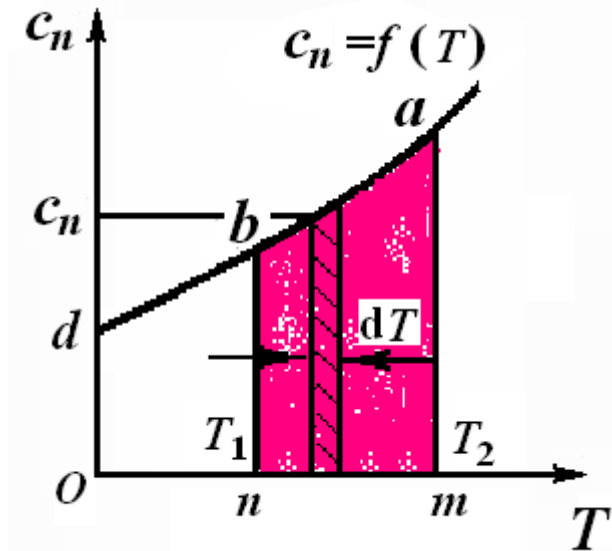
2. 利用平均比热容表(mean specific heat capacity)

$$q = \int_{T_1}^{T_2} c_n dT = c_n \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1)$$

$$c_n \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{q}{t_2 - t_1} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} c_n dt}{t_2 - t_1}$$

T_1, T_2 均为变量, 制表太繁复

$$q = \int_0^{T_2} c_n dT - \int_0^{T_1} c_n dT = \text{面积} amoda - \text{面积} bnodb$$



而

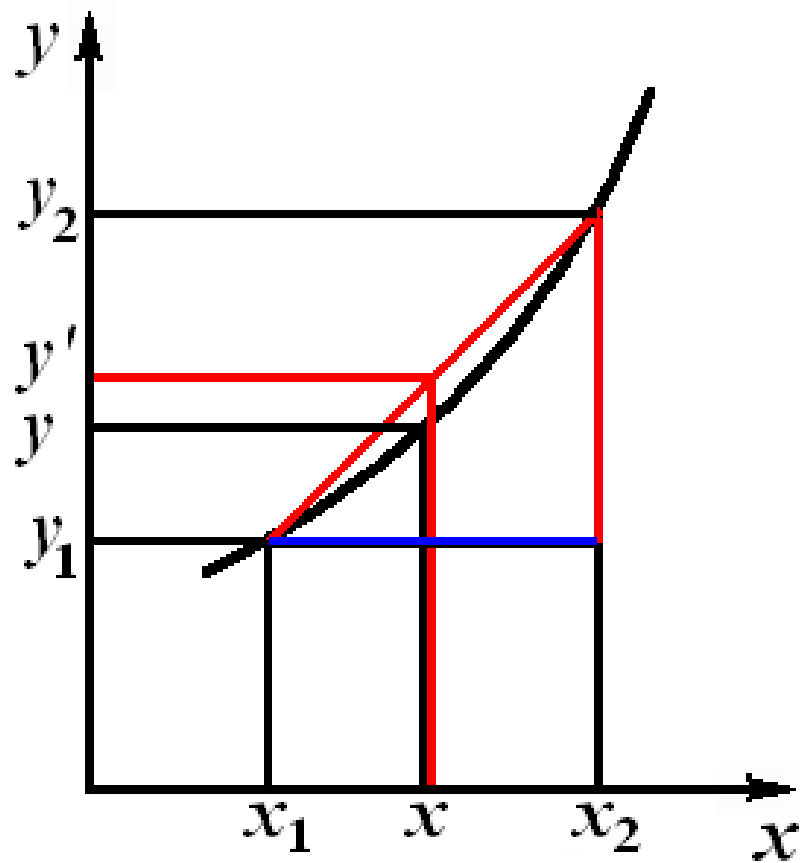
$$c_n \Big|_0^T = \frac{\int_0^T c_n dT}{T - 0}$$

由此可制作出平均比热容表

$$c_n \Big|_{T_1}^{T_2} = \frac{q}{\Delta T} = \frac{\int_0^{T_2} c_n dT - \int_0^{T_1} c_n dT}{T_2 - T_1} = \frac{c_n \Big|_0^{T_2} T_2 - c_n \Big|_0^{T_1} T_1}{T_2 - T_1}$$

附表5

附:线性插值



$$\frac{y' - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}$$

$$y' = y_1 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} (y_2 - y_1)$$

$$x_1 \rightarrow x_2$$

$$y' \rightarrow y$$

3. 平均比热直线式

令 $c_n = a + bt$, 则

$$q = \int_{t_1}^{t_2} c_n dt = \int_{t_1}^{t_2} (a + bt) dT$$

$$= \left[a + \frac{b}{2}(t_2 + t_1) \right] (t_2 - t_1)$$

$$c_n \Big|_{t_1}^{t_2} = a + \frac{b}{2}(t_2 + t_1)$$

即为 $t_1 \rightarrow t_2$ 区间的平均比热直线式

附表6

注意:

$$c_n \Big|_{t_1}^{t_2} = a + bt$$

1) t 的系数已除过2

2) t 需用 $t_1 + t_2$ 代入

4. 定值比热容(invariable specific heat capacity)

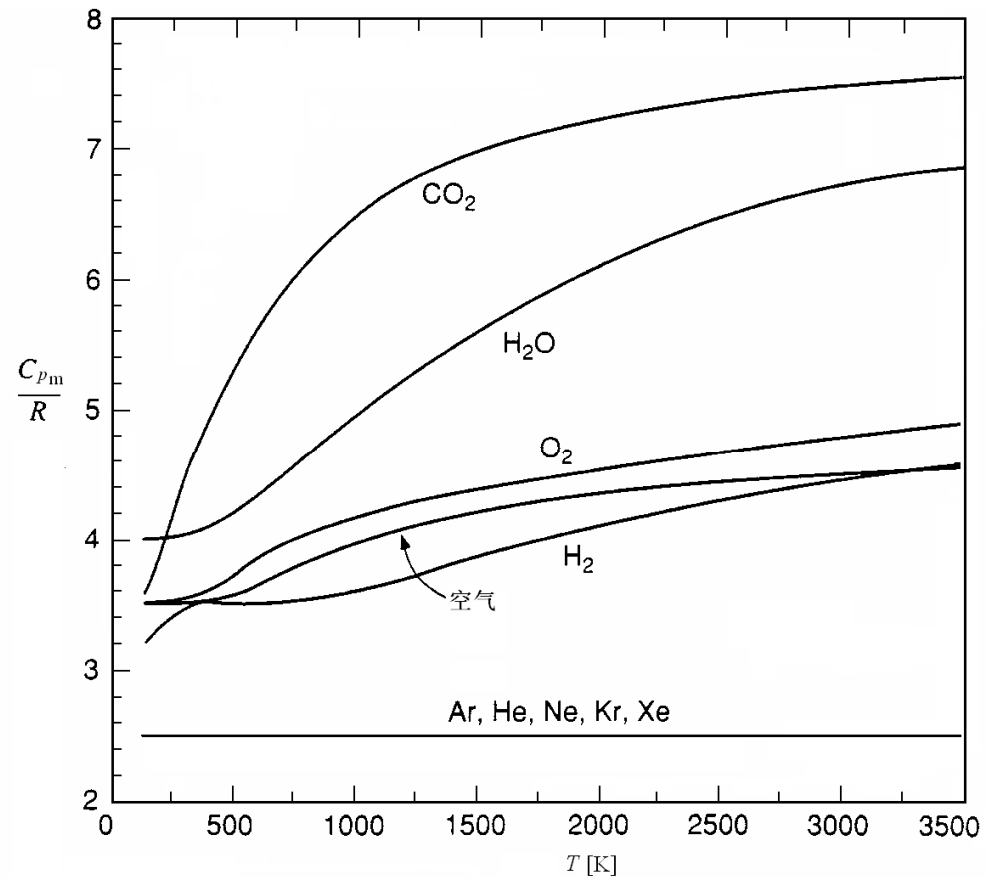
据气体分子运动理论, 可导出

$$C_{V,m} = \frac{i}{2} R \quad (i - \text{自由度})$$

$$C_{p,m} = \frac{i+2}{2} R$$

$$\gamma = \frac{i+2}{i}$$

多原子误差更大



单原子气体
 $i=3$

双原子气体
 $i=5$

多原子气体
 $i=6$

$C_{V,m} \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$

$$\frac{3}{2}R$$

$$\frac{5}{2}R$$

$$7 \times \frac{R}{2}$$

$C_{p,m} \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$

$$\frac{5}{2}R$$

$$\frac{7}{2}R$$

$$9 \times \frac{R}{2}$$

$$\gamma = \frac{C_{p,m}}{C_{v,m}}$$

$$1.67$$

$$1.40$$

$$1.29$$

3-3 理想气体热力学能、焓和熵



一、理想气体的热力学能和焓

1. 理想气体热力学能和焓仅是温度的函数

1) 因理想气体分子间无作用力



$$u = u_k = u(T) \quad du = c_v dT$$



2) $h = u + pv = u + R_g T$



$$h = h(T) \quad dh = c_p dT$$



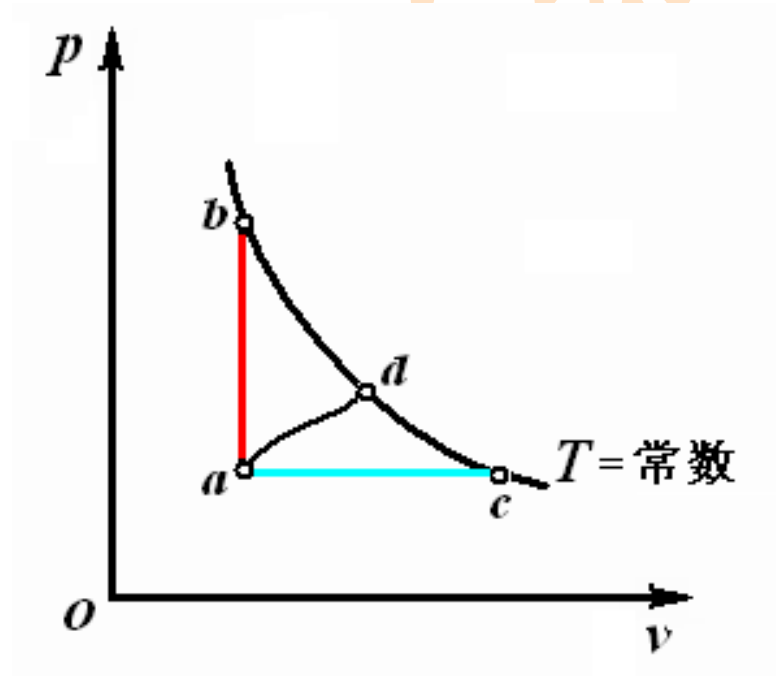
讨论:

如图:

$$T_b = T_c = T_d$$

$$\Delta u_{ab} = \Delta u_{ac} = \Delta u_{ad}$$

$$\Delta h_{ab} = \Delta h_{ac} = \Delta h_{ad}$$



$$\Delta u_{ab} + w_{ab} = q_{a-b}$$

$$\Delta u_{ab} = c_V (T_b - T_a) = \Delta u_{ac} = \Delta u_{ad}$$

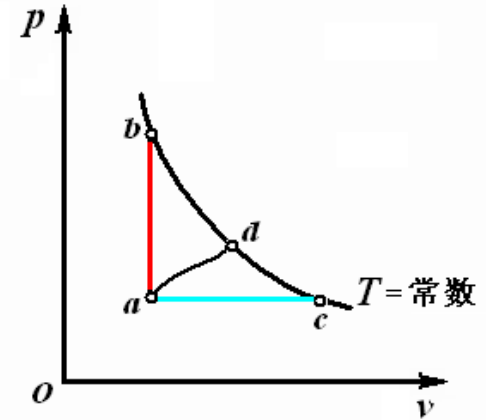
$$\Delta h_{ac} + w_{a-c} = q_{a-c}$$

$$\Delta h_{ac} = c_p (T_c - T_a) = \Delta h_{ab} = \Delta h_{ad}$$

若为任意工质

$$\Delta u_{ab} \stackrel{?}{=} c_V (T_b - T_a) \Delta u_{ac}, \Delta u_{ad} \quad ?$$

$$\Delta h_{ac} \stackrel{?}{=} c_p (T_c - T_a) \Delta h_{ab}, \Delta h_{ad} \quad ?$$



对于理想气体一切同温限之间的过程 Δu 及 Δh 相同,且均可用 $c_V \Delta T$ 及 $c_p \Delta T$ 计算;

对于实际气体 Δu 及 Δh 不仅与 ΔT 有关,还与过程有关且只有定容过程 $\Delta u = c_V \Delta T$,定压过程 $\Delta h = c_p \Delta T$ 。

2. 热力学能和焓零点的规定

可任取参考点,令其热力学能为零,但通常取 0 K 。

$$\Delta u = u(T) - u(T_0) = u(T) = c_V \Big|_0^T T$$

$$\Delta h = h(T) - h(T_0) = h(T) = c_p \Big|_0^T T$$



二、利用气体热力性质表计算热量

$$q = \Delta u + w$$

$$q_v = \Delta u = u_2 - u_1 = u(T_2) - u(T_1)$$

$$q = \Delta h + w_t$$

$$q_p = \Delta h = h_2 - h_1 = h(T_2) - h(T_1)$$



附表7

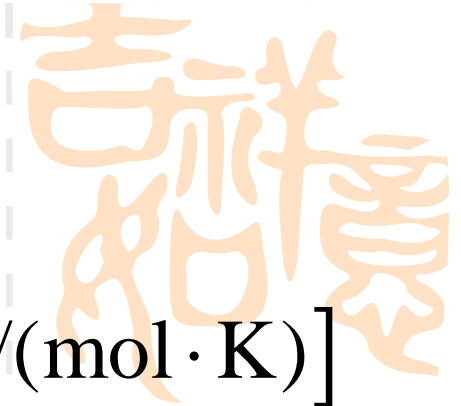


例A413277



例A411197





三、理想气体的熵 (entropy)

1. 定义

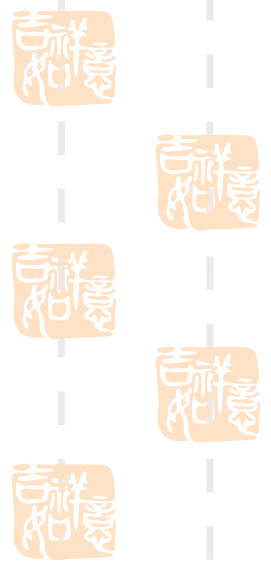
$$ds = \frac{\delta q}{T} \Big|_{\text{可逆}} \quad \left[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \quad \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) \right]$$

2. 理想气体的熵是状态参数

$$ds = \frac{\delta q}{T} \Big|_{\text{可逆}} = \frac{du + p dv}{T} = c_v \frac{dT}{T} + \frac{p}{T} dv = c_v \frac{dT}{T} + R_g \frac{dv}{v}$$

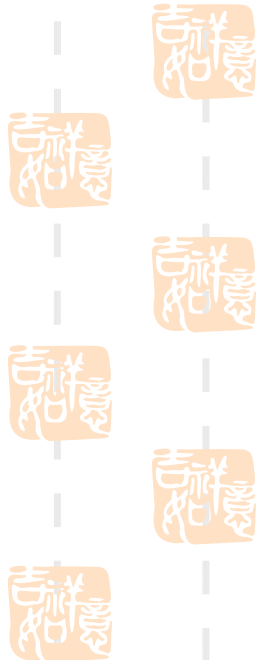
$$du = c_v dT$$

$$pv = R_g T \rightarrow \frac{p}{T} = \frac{R_g}{v}$$





$$\Delta s = \int_1^2 ds = \left\{ \begin{array}{l} \int_1^2 c_V \frac{dT}{T} + R_g \ln \frac{v_2}{v_1} \\ \int_1^2 c_p \frac{dT}{T} - R_g \ln \frac{p_2}{p_1} \\ \int_1^2 c_p \frac{dv}{v} + \int_1^2 c_V \frac{dp}{p} \end{array} \right.$$



定比热

$$\left\{ \begin{array}{l} c_V \ln \frac{T_2}{T_1} + R_g \ln \frac{v_2}{v_1} \\ c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R_g \ln \frac{p_2}{p_1} \\ c_p \ln \frac{v_2}{v_1} + c_V \ln \frac{p_2}{p_1} \end{array} \right.$$

3. 零点规定：通常取**标准状态**下气体的熵为零

例A9101331

4. 理想气体变比热熵差计算

$$\Delta s = \int_1^2 c_p \frac{dT}{T} - R_g \ln \frac{p_2}{p_1} \quad \text{令} \quad \int_0^T c_p \frac{dT}{T} = s^0(T)$$

则 $\int_1^2 c_p \frac{dT}{T} = s^0(T_2) - s^0(T_1) = s_2^0 - s_1^0$

制成表则

$$\Delta s = s_2^0 - s_1^0 - R_g \ln \frac{p_2}{p_1}$$

附表7

例A4111551

例A4111552



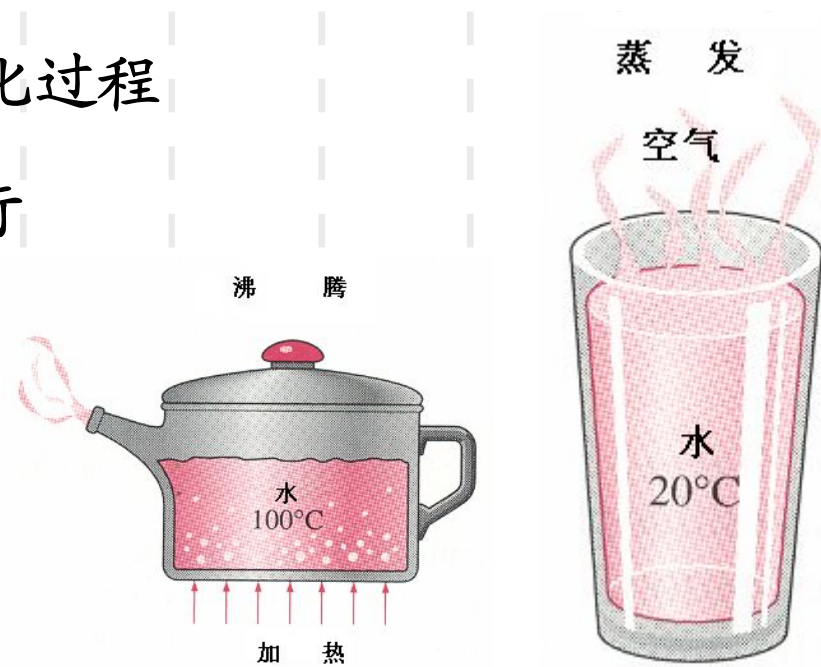
3-4 饱和状态、饱和温度和饱和压力

一、汽化和液化(vaporization and liquefaction)

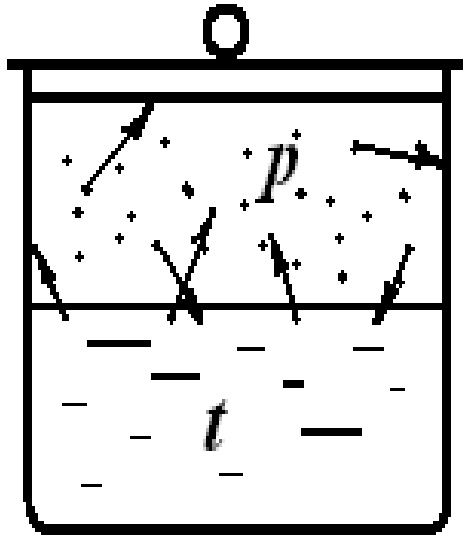
汽化：由液态到气态的过程

蒸发：在液体表面进行的汽化过程
沸腾：在液体表面及内部进行的强烈汽化过程。

液化：由气相到液相的过程



二、饱和状态(Saturated state)



当汽化速度=液化速度时，系统处于**动态平衡**，宏观上气、液两相保持一定的相对数量——**饱和状态**。

饱和状态的温度——**饱和温度**， $t_s(T_s)$
(Saturated temperature)

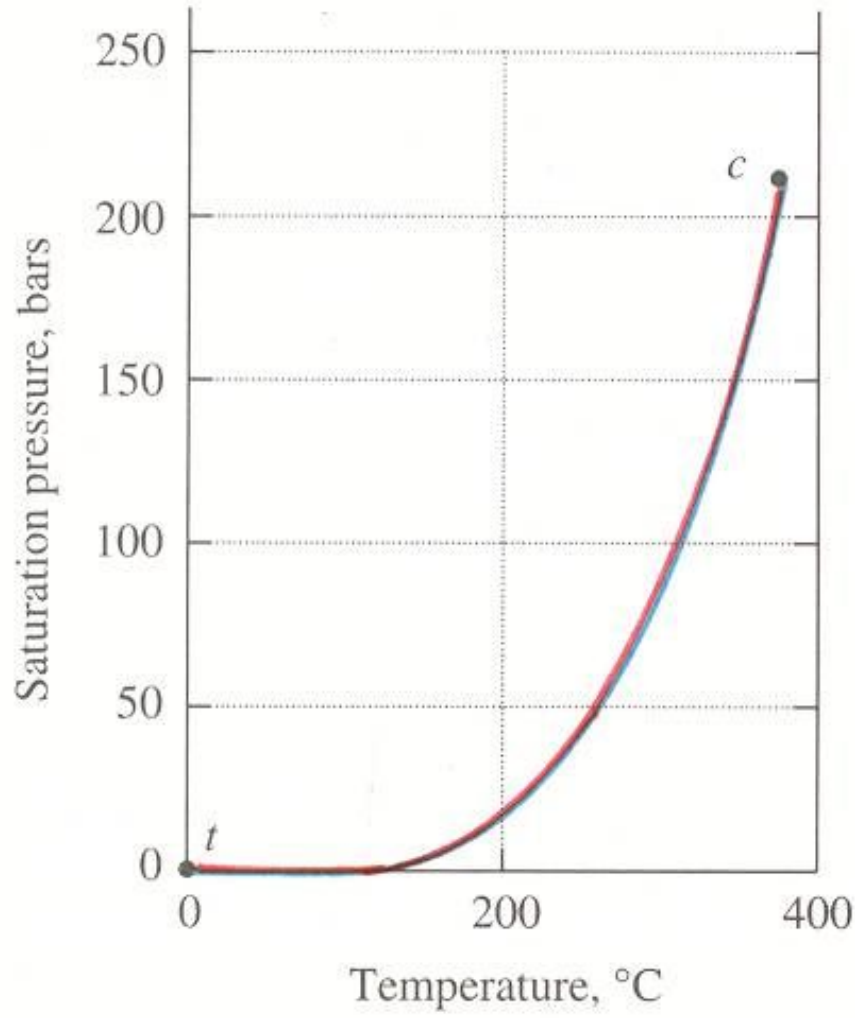
饱和状态的压强——**饱和压力**， p_s
(Saturated pressure)

加热，使温度升高如 t' ，保持定值，系统建立新的动态平衡。与之对应， p 变成 p_s' 。

所以 $T_s \Leftrightarrow p_s$ **一一对应**，只有一个独立变量，即 $t_s = f(p_s)$

如
$$p_s = \left(\frac{t_s}{100} \right)^4$$
 $p_s - \text{atm}$ $t_s - ^\circ \text{C}$

吉祥



$t / ^\circ\text{C}$	0	20	50	100	120	150
p / MPa	0.0 006 112	0.0 023 385	0.0 123 446	0.1 013 325	0. 198 483	0.47 571

三、几个名词

饱和液(saturated liquid)—处于饱和状态的液体: $t = t_s$

干饱和蒸汽(dry-saturated vapor; dry vapor)

—处于饱和状态的蒸汽: $t = t_s$

未饱和液(unsaturated liquid)

—温度低于所处压力下饱和温度的液体: $t < t_s$

过热蒸汽(superheated vapor)

—温度高于饱和温度的蒸汽: $t > t_s, t - t_s = d$ 称过热度(degree of superheat)。

湿饱和蒸汽(wet-saturated vapor; wet vapor)

—饱和液和干饱和蒸汽的混合物: $t = t_s$

使未饱和液达饱和状态的途径:

$$(t, p) \begin{cases} t < t_s(p) - \text{保持 } p \text{ 不变, } t \uparrow \\ p > p_s(t) - \text{保持 } t \text{ 不变, } p \downarrow \end{cases}$$

干度 (dryness)

定义：湿蒸汽中干饱和蒸汽的质量分数，用 w 或 x 表示。

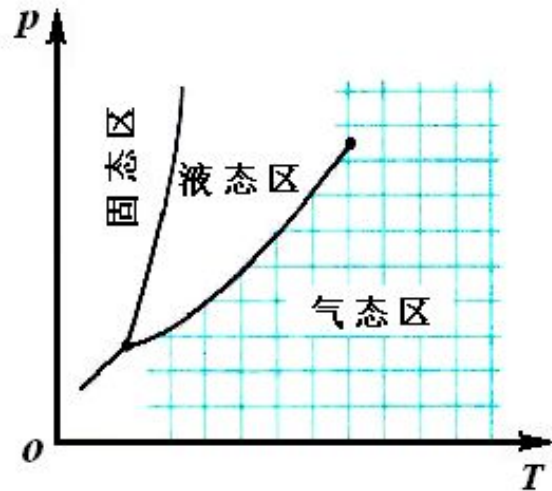
$$x = \frac{m_{\text{汽}}}{m_{\text{汽}} + m_{\text{液}}} \quad (\text{湿度 } y = 1 - x)$$

x $\left\{ \begin{array}{l} 0 \quad \text{饱和液} \\ \downarrow \quad \text{湿饱和蒸汽} \\ 1 \quad \text{干饱和蒸汽} \end{array} \right.$



四、饱和状态压力和温度的关系

1. 吉布斯相律



对于多元（如 k 个组元）多相（如 f 个相）元化学反应的热力学系，其独立参数，即自由度 $n = k - f + 2$

例：水在液相（或固相、气相） $k = 1$ ， $F = 1$ ，故 $n = 1 - 1 + 2$ ，此时压力，温度均可独立变化。水在汽液共存时 $k = 1$ ， $f = 2$ ，故 $n = 1$ ，此时压力和温度中仅有一个可自由变化。三相点： $k = 1$ ， $f = 3$ 故 $n = 0$

一些物质的三相点数据

	温度 °C	压力 kPa
氢	-259	7.194
氧	-219	0.15
氮	-210	12.53
二氧化碳	-56.4	520.8
水银	-39	0.0000013
水	0.01	0.6113
锌	419	5.066
银	961	0.01
铜	1083	0.000079

水的三相点(triple point):

$$p_{\text{tri}} = 611.6 \text{ Pa}$$

$$t_{\text{tri}} = 0.01^\circ \text{C}$$

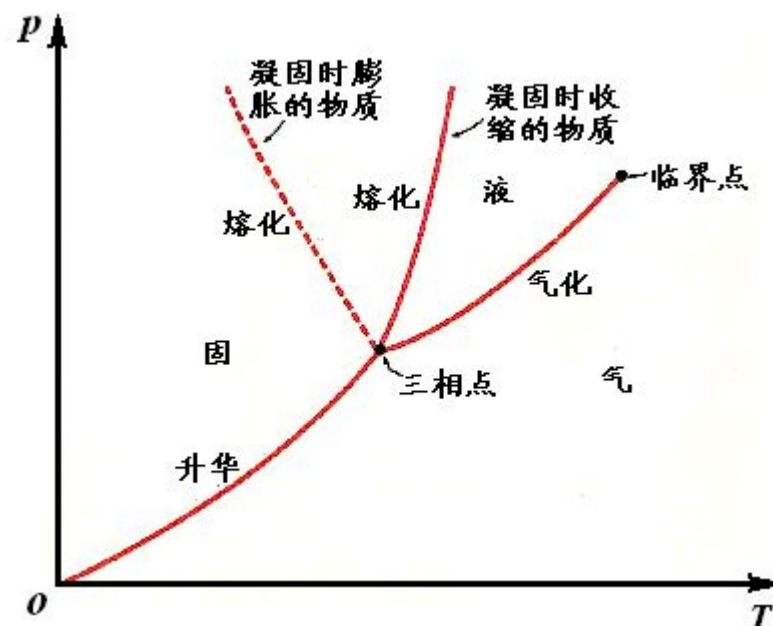
$$v_{\text{tri}} = 0.00100022 \text{ m}^3/\text{kg}$$

2. 克拉贝隆方程

$$\left. \frac{dp}{dT} \right|_{\text{相平衡}} = \frac{\gamma}{T_s (v'' - v')}$$

$$\left. \frac{dp}{dT} \right|_{\text{相平衡}} = \frac{\lambda}{T (v_l - v_s)}$$

$$\left. \frac{dp}{dT} \right|_{\text{相平衡}} = \frac{\sigma}{T (v_v - v_s)}$$



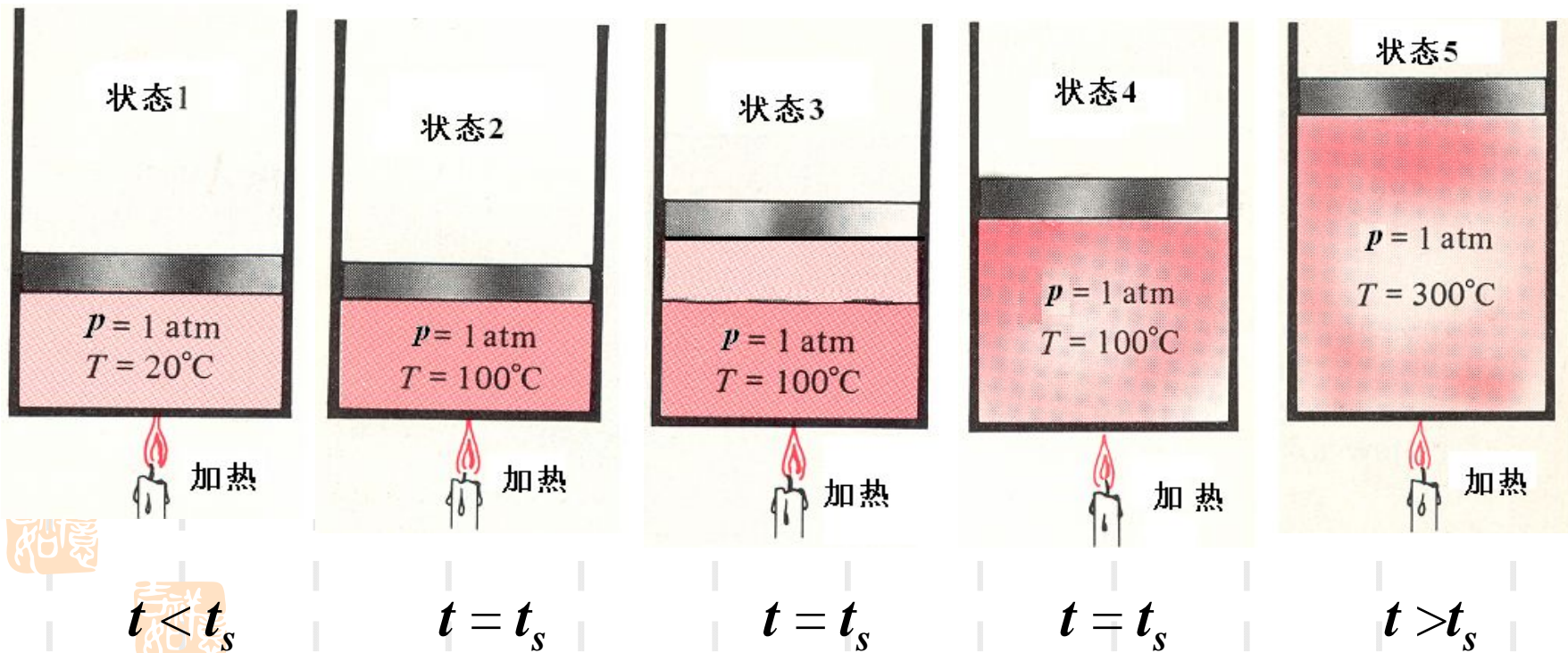
γ 、 λ 、 σ 分别为汽化潜热(heat of vaporization)、熔解热(heat of fusion)和升华热(heat of sublimation)。

- 分析：1) 因 γ 、 λ 、 σ 为“+”； T 为“+”；故相平衡线斜率正负由体积差决定；
- 2) 三相点处不光滑。

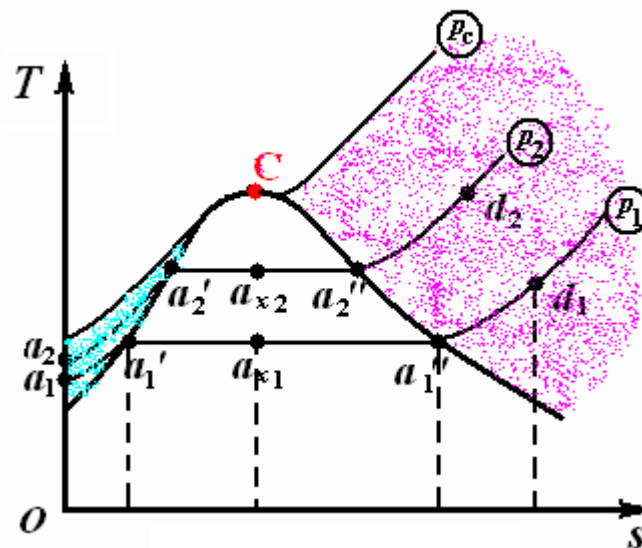
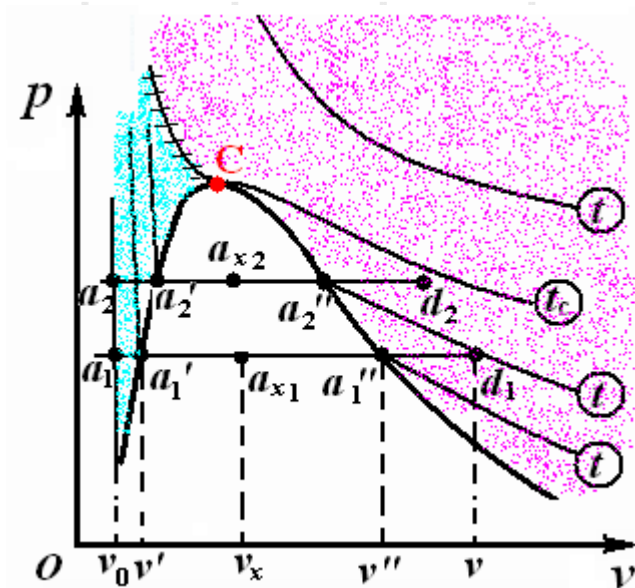
3-5 水定压加热汽化过程



一、水定压加热汽化过程



二、水定压加热汽化过程的 $p-v$ 图及 $T-s$ 图



一点
 临界点
 Critical point

$p_{cr} = 22.12 \text{ MPa}$
 $t_{cr} = 374.15^\circ \text{ C}$
 $v_{cr} = 0.00317 \text{ m}^3/\text{kg}$

两线
 三区

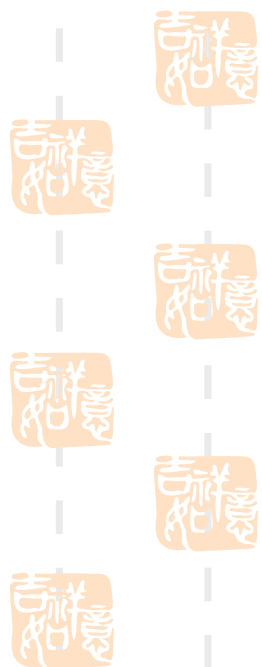
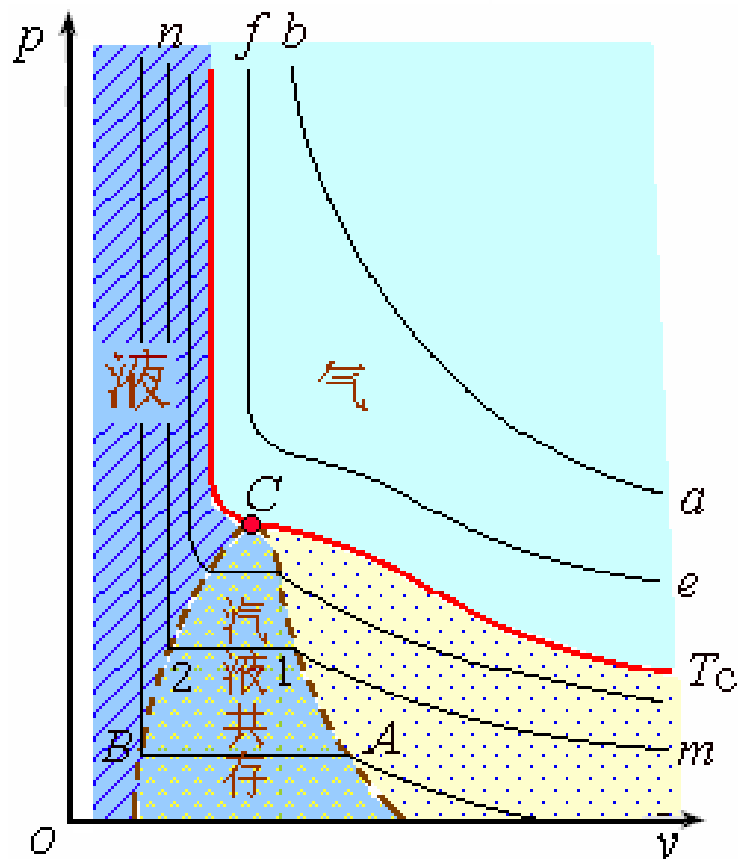
{ 上界限线
 { 下界限线

{ 液
 { 汽液共存
 { 汽

五态

{ 未饱和水
 { 饱和水
 { 湿蒸汽
 { 干饱和蒸汽
 { 过热蒸汽

各种工质均具有类似水的性质

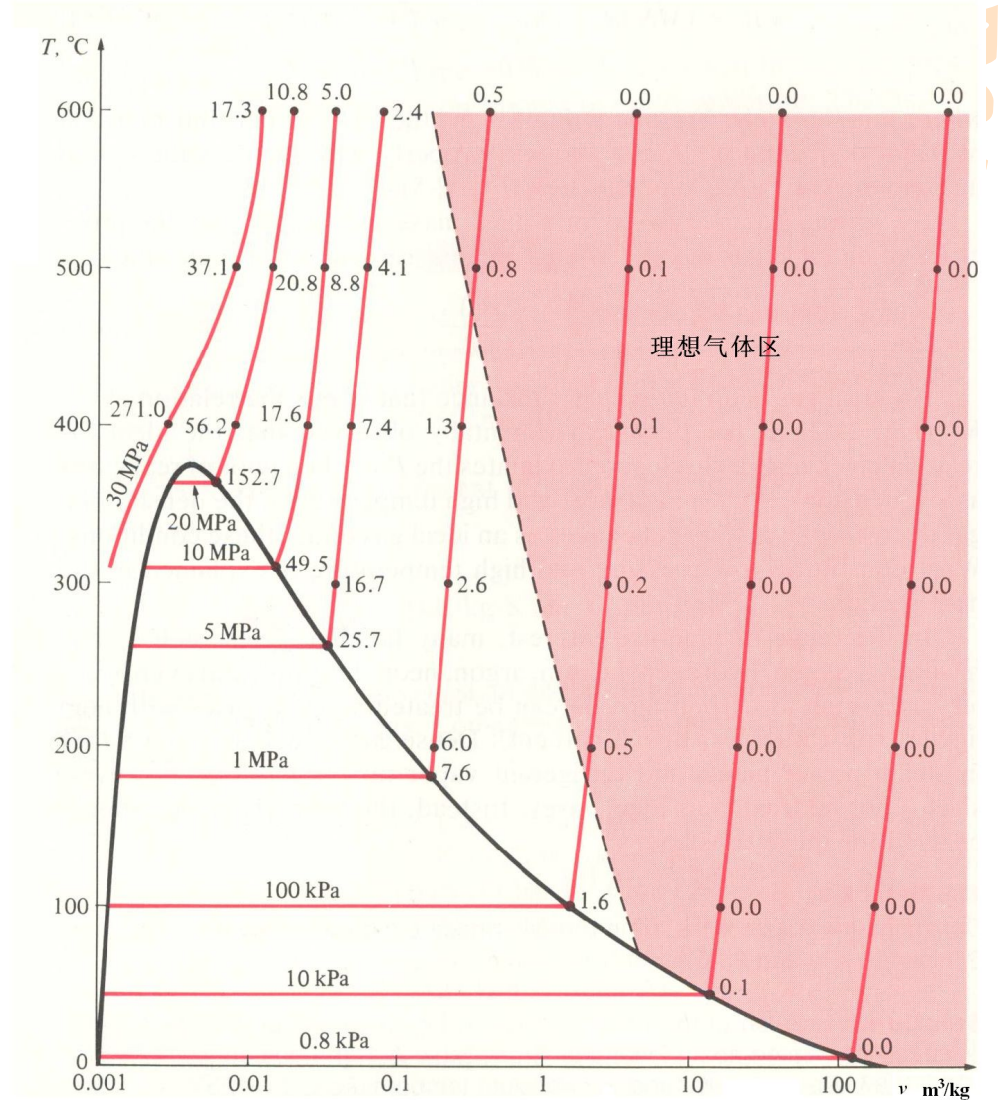


3-6 水和水蒸气状态参数



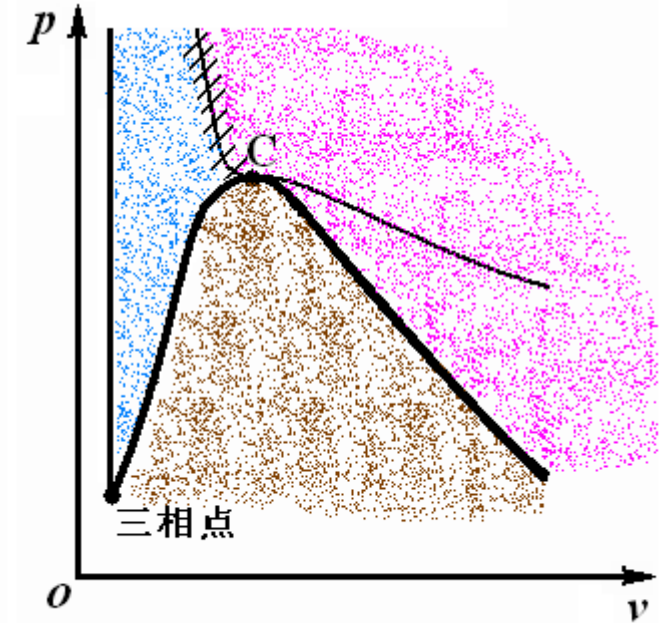
- 在动力工程中水蒸气不宜利用理想气体性质计算

- 水和水蒸气的状态参数可按不同区域，由给出的独立状态参数通过实际气体状态方程及其他一般关系式计算（通常由计算机计算）或查图表确定。



一、零点规定

规定：三相点液态水
热力学能及熵为零



$$u'_{273.16} = 0 \quad s'_{273.16} = 0$$

$$v'_{273.16} = 0.00100021 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\begin{aligned} \therefore h' &= u' + pv' \\ &= 0 + 611.6 \times 0.00100021 \\ &= 0.612 \text{ J} \quad \text{可近似为零} \end{aligned}$$



二、未饱和水 (t, p)

- 查图表或由专用程序计算
- 压力不太高时，可近似

$$h_t = c_p t \quad s_t = c_p \ln \frac{T}{273.16}$$

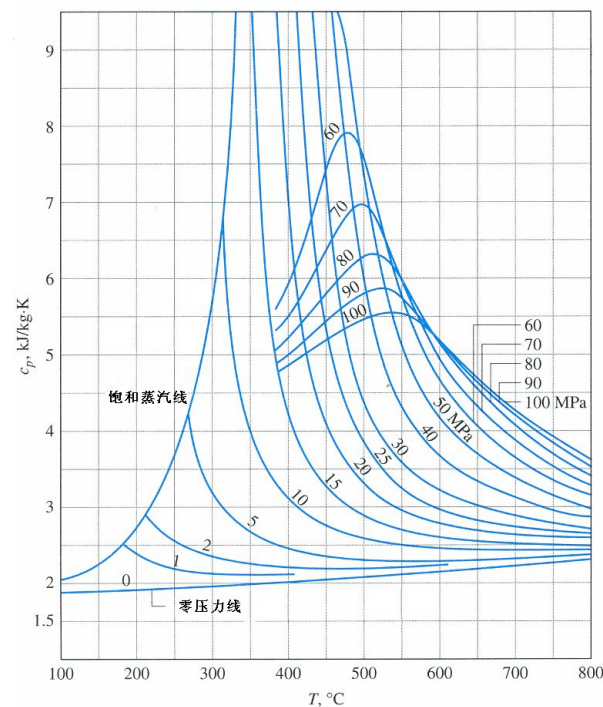
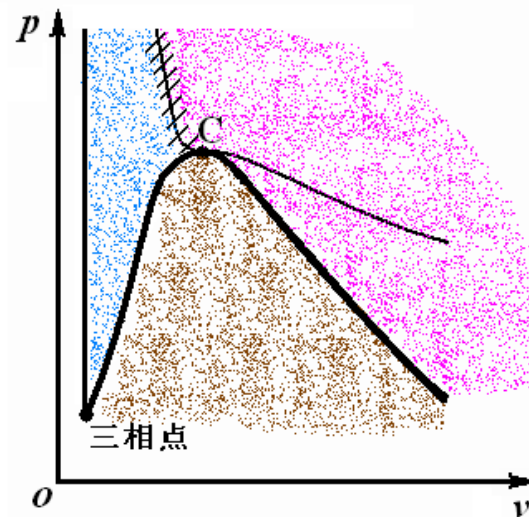
三、饱和水和饱和水蒸气 (p_s 和 t_s)

查图表或由专用程序计算

四、过热蒸汽 (p, t)

查图表或由专用程序计算。

注意：过热蒸汽不可用类似未饱和水的近似式，因 c_p 变化复杂。





五、湿饱和蒸汽

由 t_s (或 p_s) 与 x 共同确定:

$$v_x = xv'' + (1-x)v' = v' + x(v'' - v') \approx xv'' \quad x \text{较大时}$$

$$h_x = xh'' + (1-x)h' = h' + x\gamma$$

$$s_x = xs'' + (1-x)s' = s' + x(s'' - s') = s' + x\frac{\gamma}{T_s}$$

$$u_x = h_x - p_s v_x$$



$$0 < x < 1 \quad \left\{ \begin{array}{ll} v < v' & \text{未饱和水} \\ v' < v < v'' & \text{湿饱和蒸汽} \\ v > v'' & \text{过热蒸汽} \end{array} \right.$$

3-7 水蒸气表和图

一、水蒸气表

1. 饱和水和干饱和蒸汽表

表 7-1 饱和水和饱和水蒸气表 (节录) *

单位: p MPa; t °C; v m³/kg; h kJ/kg; s kJ/(kg·K)

(依温度排列)

t	p	v'	v''	h'	h''	γ	s'	s''
0.00	0.0006112	0.00100022	206.154	-0.05	2500.51	2500.6	-0.0002	9.1544
0.01	0.0006117	0.00100021	206.012	0.00	2500.53	2500.5		
5	0.0008725	0.00100008	147.048	21.02	2509.71	2488.7	0.0763	9.0236
15	0.0017053	0.00100094	77.910	62.95	2528.07	2465.1	0.2243	8.7794
25	0.0031687	0.00100302	43.362	104.77	2546.29	2441.5	0.3670	8.5560
35	0.0056263	0.00100605	25.222	146.59	2564.38	2417.8	0.5050	8.3511
70	0.031178	0.00102276	5.0443	293.01	2626.10	2333.1	0.9550	7.7540
100	0.101325	0.00104344	1.6736	419.06	2675.71	2256.6	1.3069	7.3545
150	0.47571	0.00109046	0.39286	632.28	2746.35	2114.1	1.8420	6.8381
373.99	22.064	0.003106	0.003106	2085.9	2085.87	0.0	4.4092	4.4092

(依压力排列)

p	t	v'	v''	h'	h''	γ	s'	s''
0.001	6.9491	0.0010001	129.185	29.21	2513.29	2484.1	0.1056	8.9735
0.004	28.9533	0.0010041	34.796	121.30	2553.45	2432.2	0.4221	8.4725
0.005	32.8793	0.0010053	28.191	137.72	2560.55	2422.8	0.4761	8.3930
0.01	45.7988	0.0010103	14.673	191.76	2583.72	2392.0	0.6490	8.1481
0.05	81.3388	0.0010299	3.2409	340.55	2645.31	2304.8	1.0912	7.5928
0.1	99.634	0.0010432	1.6943	417.52	2675.14	2257.6	1.3028	7.3589
0.5	151.867	0.0010925	0.37486	640.35	2748.59	2108.2	1.8610	6.8214
1.0	179.916	0.0011272	0.19438	762.84	2777.67	2014.8	2.1388	6.05859
5.0	263.980	0.0012862	0.039439	1154.2	2793.64	1639.5	2.9201	5.9724
22.064	373.99	0.003106	0.003106	2085.9	2085.87	0.0	4.4092	4.4092

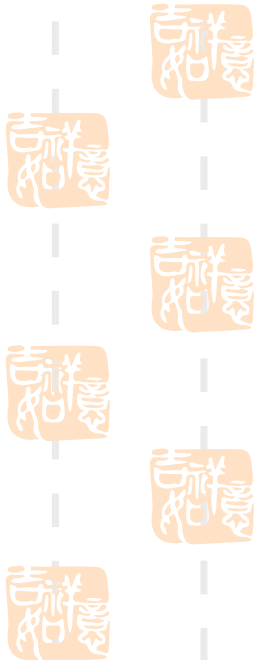
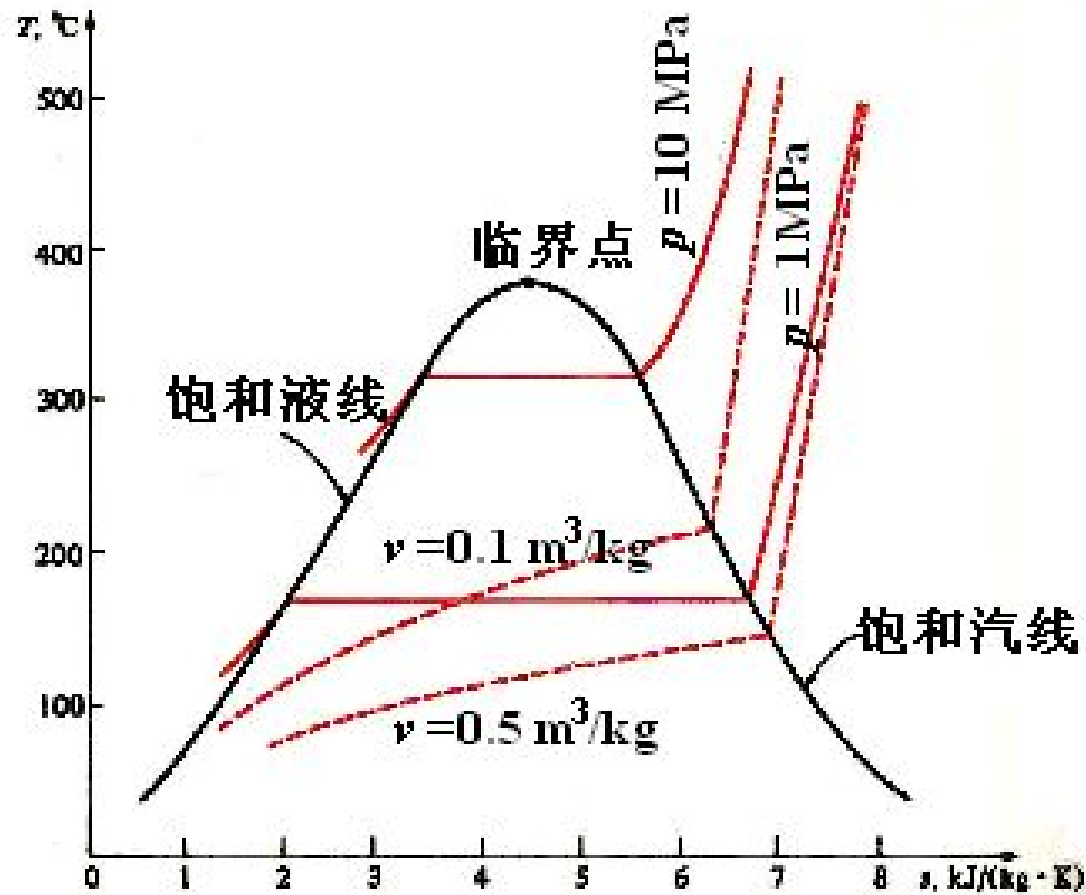


2. 未饱和水和过热蒸汽表

p	0.001 MPa			0.005 MPa			0.01 MPa		
饱和参数	$t_s=6.949\text{ }^\circ\text{C}$ $v'=0.001\ 000\ 1, v''=129.185$ $h'=29.21, h''=2513.3$ $s'=0.105\ 6, s''=8.9735$			$t_s=32.879\text{ }^\circ\text{C}$ $v'=0.001\ 005\ 3, v''=28.191$ $h'=137.72, h''=2\ 560.6$ $s'=0.4761, s''=8.3930$			$t_s=45.799\text{ }^\circ\text{C}$ $v'=0.001\ 010\ 3, v''=14.673$ $h'=191.76, h''=2583.7$ $s'=0.649\ 0, s''=8.1481$		
t	v	h	s	v	h	s	v	h	s
$^\circ\text{C}$	m^3/kg	kJ/kg	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	m^3/kg	kJ/kg	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	m^3/kg	kJ/kg	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
0	0.0010002	-0.05	-0.0002	0.0010002	-0.05	-0.0002	0.0010002	-0.04	-0.0002
10	130.598	2519.0	8.9938	0.0010003	42.01	0.1510	0.0010003	42.01	0.1510
20	135.226	2537.7	9.0588	0.0010018	83.87	0.2963	0.0010018	83.87	0.2963
40	144.475	2575.2	9.1823	28.854	2574.0	8.4366	0.001009	167.51	0.5723
50	149.096	2593.9	9.2412	29.783	2592.9	8.4961	14.869	2591.8	8.1732
60	153.717	2612.7	9.2984	30.712	2611.8	8.5537	15.336	2610.8	8.2313
80	162.956	2650.3	9.4080	32.566	2649.7	8.6639	16.268	2648.9	8.3422
100	172.192	2688.0	9.5120	34.418	2687.5	8.7682	17.196	2686.9	8.4471
120	181.426	2725.9	9.6109	36.269	2725.5	8.8674	18.124	2725.1	8.5466

二、水蒸气的焓—熵 ($h - s$) 图

● 水蒸气的 $t - s$ 图



● 焓熵图

定压线

定温线

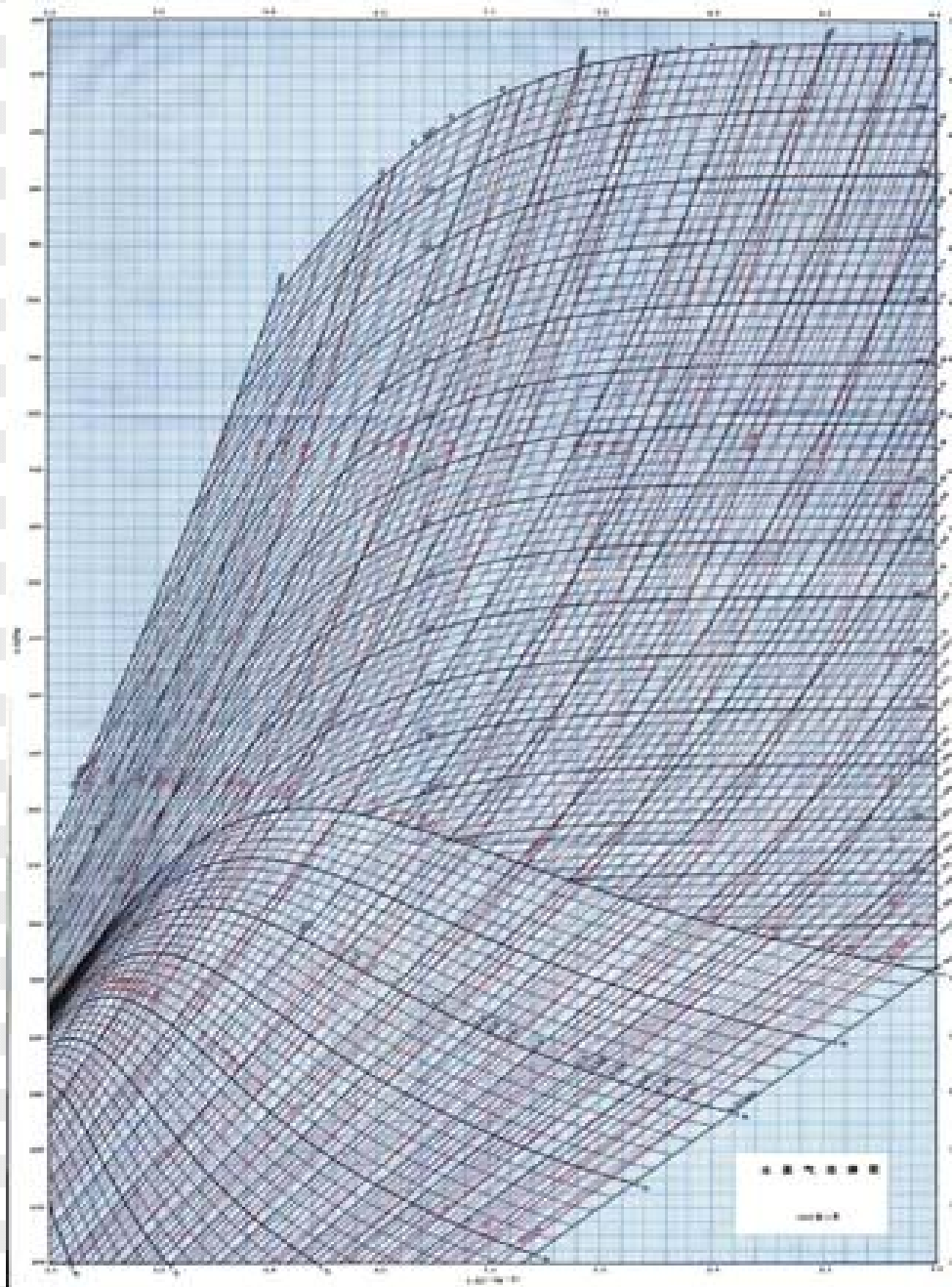
定容线

定干度线

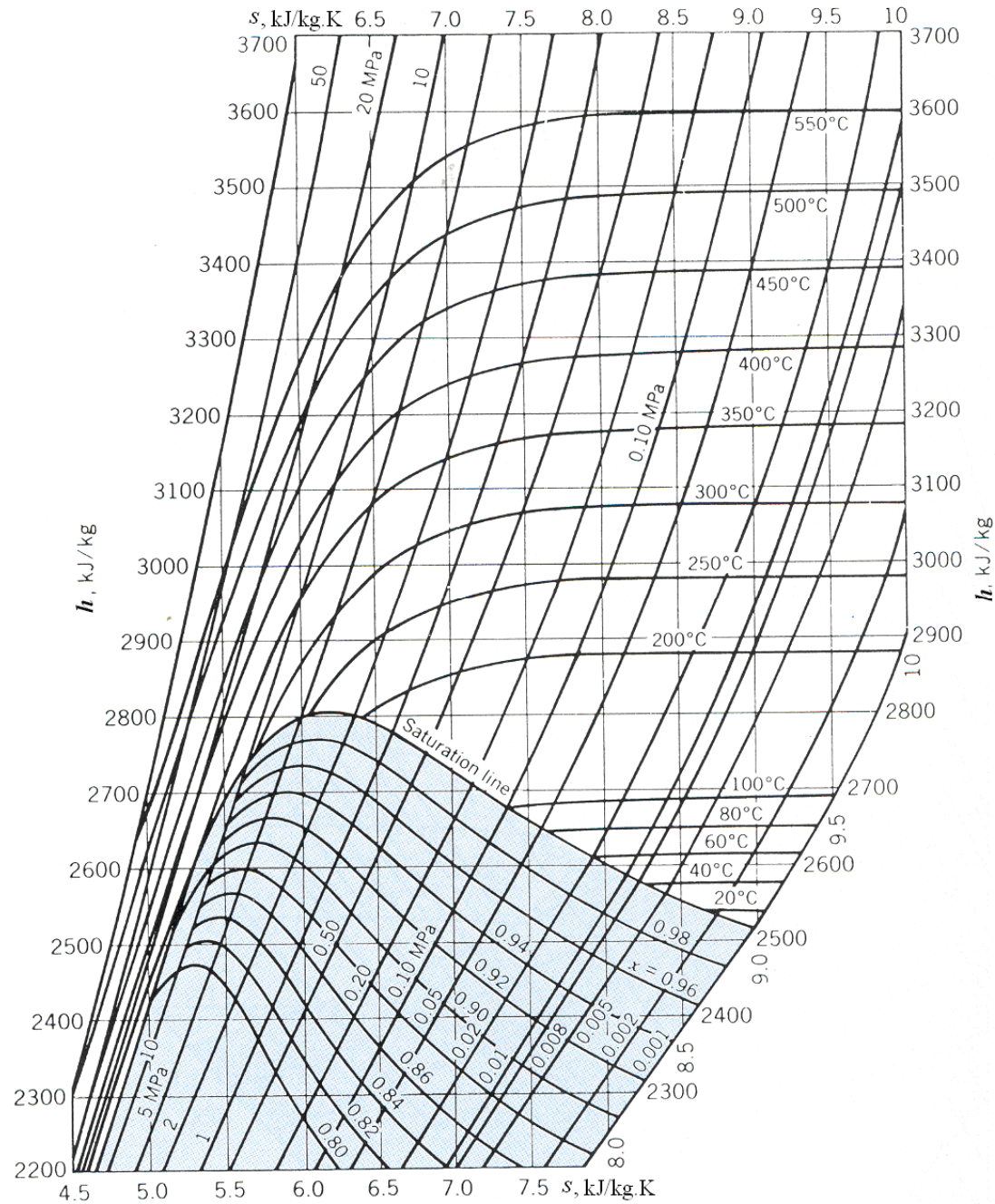
斜率 $\left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)_n$

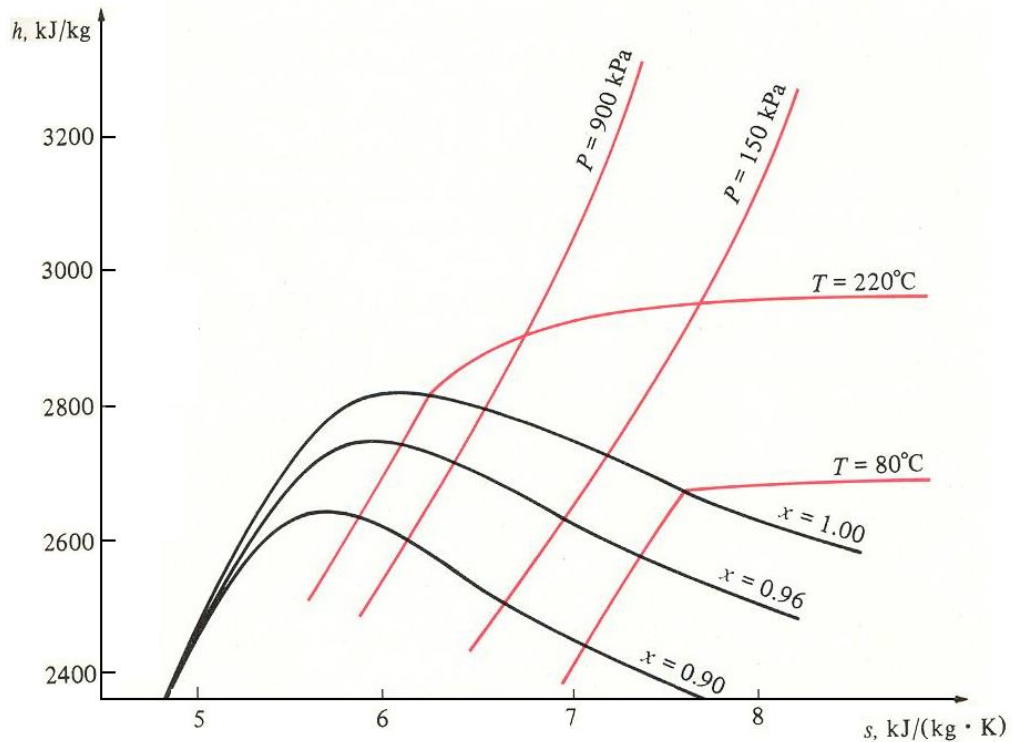
$$dh = Tds + vdp$$

$$\left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)_n = T + v \left(\frac{\partial p}{\partial s}\right)_n$$



焓熵图





1) 定压线群

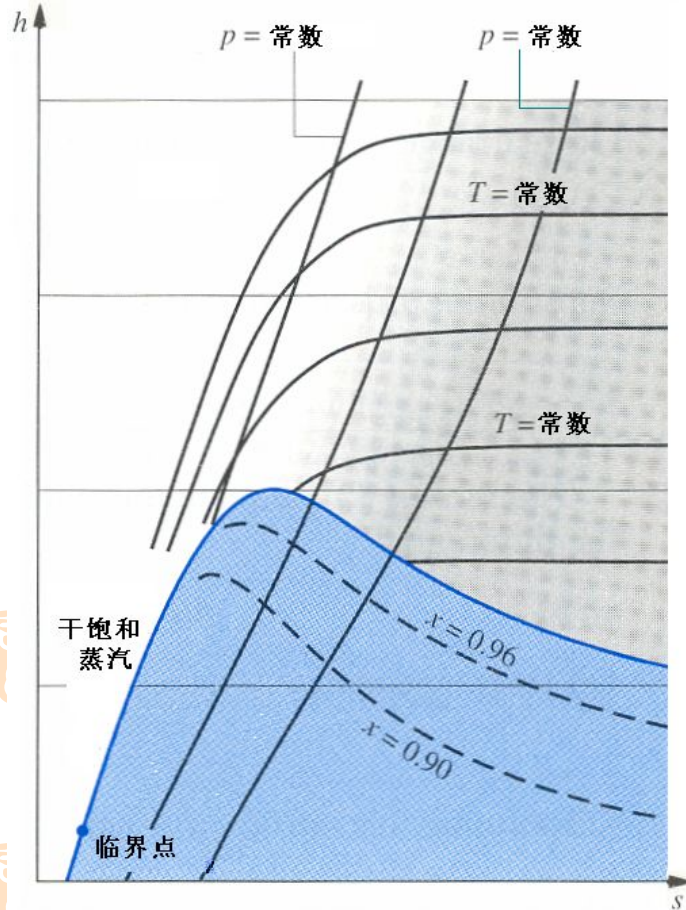
$$\left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)_n = T + v \left(\frac{\partial p}{\partial s}\right)_n$$

0

$$\left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)_p = T$$

湿蒸汽区, $T = T_s$, 直线
 过热蒸汽区, 斜率随 T 增大而增大

2) 定温线群
$$\left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)_T = T + v\left(\frac{\partial p}{\partial s}\right)_T$$



湿蒸汽区:

$$dp = 0 \quad \left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)_T = T_s$$

直线, 与等压线重合

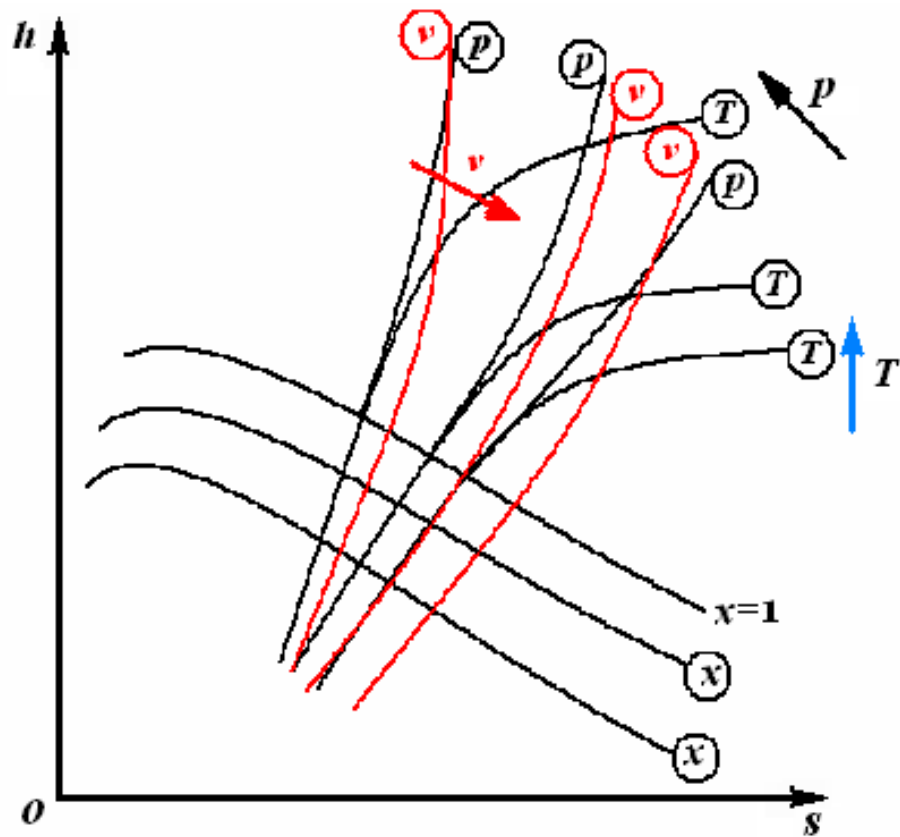
过热蒸汽区:

$$\left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)_T = T - \frac{1}{\alpha_v} < T$$

等温线较等压线平坦,
低压时趋于水平。

$$\alpha_v = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$$

体积膨胀系数



3) 等容线群

$$\left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)_v = T + v \left(\frac{\partial p}{\partial s}\right)_v$$

等熵条件

$$\left(\frac{\partial p}{\partial s}\right)_v > 0$$

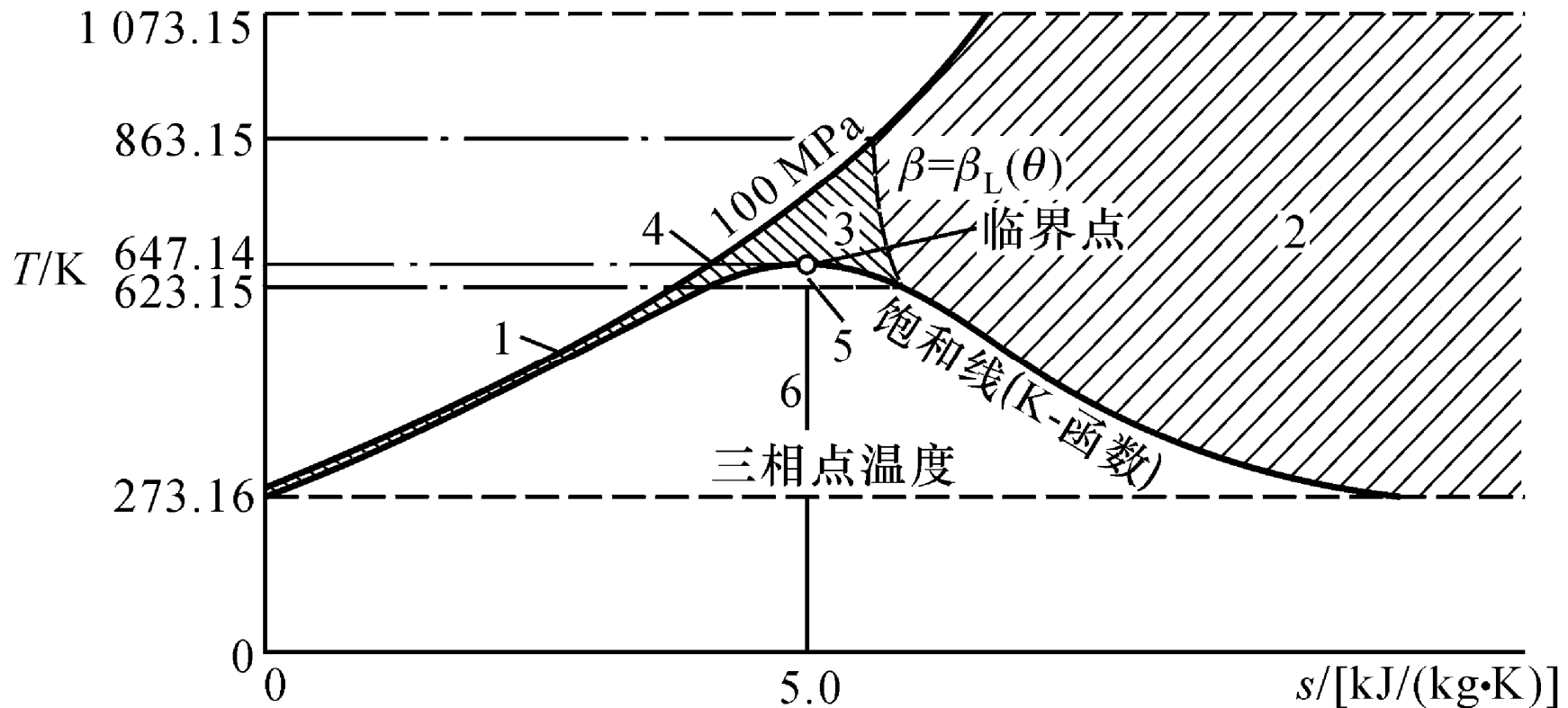
$$\left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)_v > \left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)_p$$

等容线比等压线陡

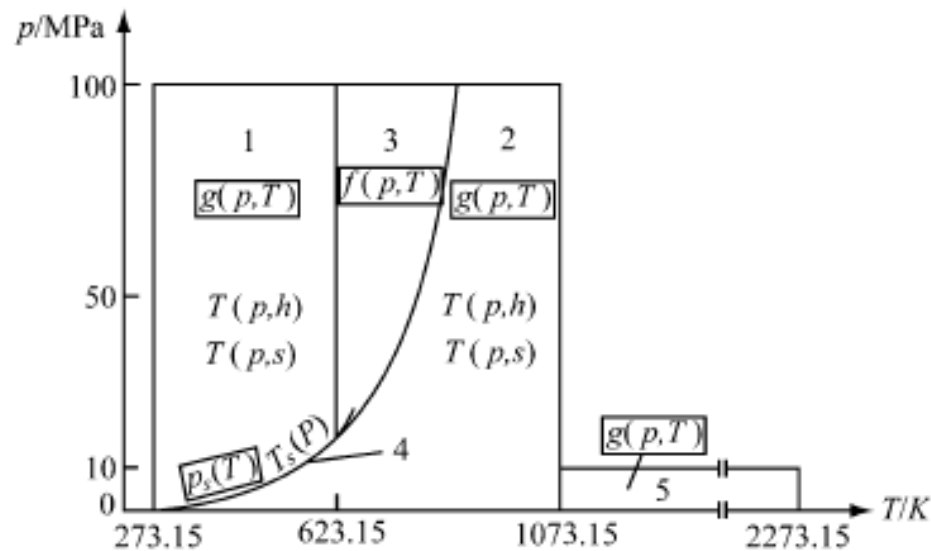
4) 等干度线

3-8 水和水蒸气热力性质程序简介

目前，多数软件采用IFC公式，适用范围： $273.16\sim 1\,073.15\text{ K}$ ； $0\sim 100\text{ MPa}$ ；将整个区域分成6个子区域，用不同的公式描述，它们的边界线也用不同的函数表达。



1997年,国际水和蒸汽性质协会 (IAPWS) 推出IAPWS-IF97作为水和水蒸汽热力学性质的国际工业标准, 适用范围为: $273.15 \text{ K} \leq T \leq 1073.15 \text{ K}$, $p \leq 100 \text{ MPa}$; $1073.15 \text{ K} < T \leq 2273.15 \text{ K}$, $p \leq 10 \text{ MPa}$ 。IAPWS-IF97将此有效范围分为5个计算子区域:
 1—未饱和水区, 2—过热蒸汽区, 3—临界水和临界蒸汽区, 4—饱和区, 5—超高温 (过热) 蒸汽区。



严家騄教授推算出统一公式, 满足新骨架表的要求。

张喻研究员研制了科学研究用水和水蒸气热力学性质程序。

例A122233

例A8221552

例A422155

例A4221661



下一章

