

第三章 习题1

P.98-100

3-2; 3-5; 3-7; 3-8;

3-11; 3-14; 3-15; 3-16; 3-17; 3-21

工程热力学与传热学

Engineering Thermodynamics & Heat transfer

第三章 气体的热力性质

同济大学机械与能源工程学院
吴家正

目 录

3.1 理想气体的比热容

3.2 理想气体的热力学能、焓和熵

3.3 水蒸气

3.4 水和水蒸气热力性质图表及计算机程序

3.5 理想气体混合气体（自学）

3.6 湿空气

3.7 湿空气的含湿量和焓湿图

3.1 理想气体的比热容

3.1.1 理想气体的比热容

比热容定义和分类

定义：1kg物质温度升高1K所需热量称为质量热容，也称比热容。

分类：

$$c = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{q}{\Delta T} = \frac{\delta q}{dT} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} c \text{ 与过程有关} \\ c \text{ 是温度、压力的函数} \end{array} \right.$$

按物量单位

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{质量热容 (比热容)} & c \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \\ \text{体积热容} & C' \text{ J/ (m}^3 \cdot \text{K)} \\ \text{摩尔热容} & C_m \text{ J/ (mol} \cdot \text{K)} \end{array} \right\} \begin{array}{l} C_m = Mc \\ = 0.0224C' \end{array}$$

按过程性质

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{质量定压热容 (比定压热容)} & c_p \quad C_{p,m}, C'_p \\ \text{质量定容热容 (比定容热容)} & c_v \quad C_{v,m}, C'_v \end{array} \right.$$

3.1.2 理想气体比定压热容，比定容热容和迈耶公式

$$c_v = \frac{du}{dT} \Rightarrow du = c_v dT$$

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

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

$$c_p - c_v = R_g \text{ —— 迈耶公式}$$

$$C'_p - C'_v = \rho_0 R_g \qquad C_{p,m} - C_{v,m} = R$$

5) 讨论

- a. c_p 与 c_v 均为温度函数, 但 $c_p - c_v$ 恒为常数: R_g
- b. (理想气体) c_p 恒大于 c_v
- c. 气体常数 R_g 的物理意义

R_g ——1 kg某种理想气体定压升高1 K对外作的功。

3.1.3 理想气体的比热容比 γ

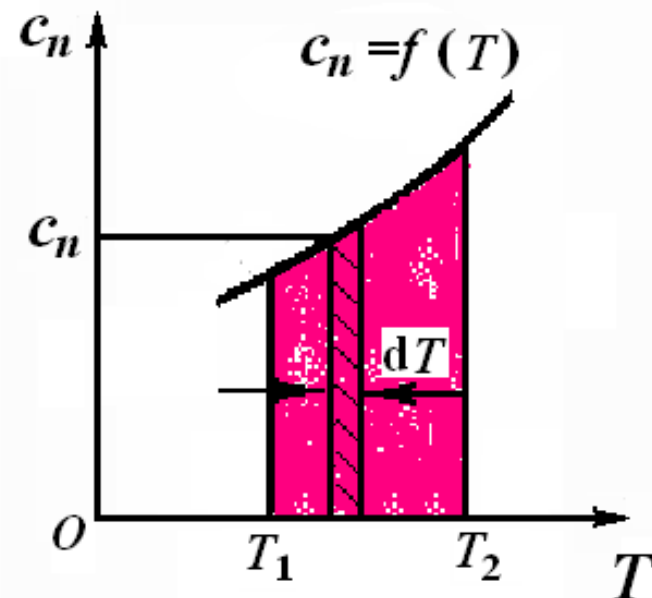
$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \Rightarrow \begin{cases} \gamma = f(T) \\ c_p - c_v = R_g \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} c_p = \frac{\gamma}{\gamma-1} R_g \\ c_v = \frac{1}{\gamma-1} R_g \end{cases}$$

注：理想气体可逆绝热过程的绝热指数 $\kappa = \gamma$

3.1.4 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

平均比热容

定值比热容

a. 利用真实比热容积分 $q = \int_{T_1}^{T_2} c_n dT = A_{amnba}$

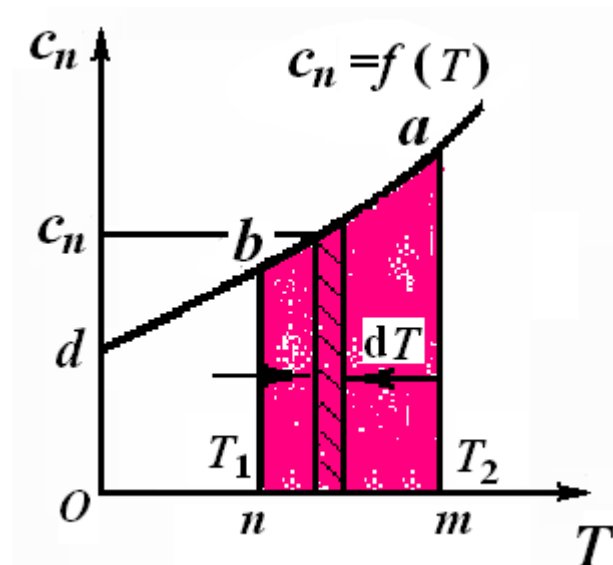
$$C_{p,m} = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 \quad \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

$$C_{v,m} = (a_0 - R) + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 \quad \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

b. 平均比热容 (利用定积分中值定理求取)

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

$$c_n \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{q}{t_2 - t_1} = \int_0^{T_2} c_n dT - \int_0^{T_1} c_n dT = \text{面积} A_{amoda} - \text{面积} A_{bnodb}$$



由此可制作出平均比热容表, 见P.67

平均比定压热容图表

$$c_p \Big|_0^t \quad q_p = c_p \Big|_0^{t_2} t_2 - c_p \Big|_0^{t_1} t_1$$

附表2 常用气体的平均比定压热容^[14]

$c_p \Big _0^t \text{ } ^\circ\text{C} / [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$							
气体 温度/ $^\circ\text{C}$	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	空气
0	0.915	1.039	1.040	0.815	1.859	0.607	1.004
100	0.923	1.040	1.042	0.866	1.873	0.636	1.006
200	0.935	1.043	1.046	0.910	1.894	0.662	1.012
300	0.950	1.049	1.054	0.949	1.919	0.687	1.019
400	0.965	1.057	1.063	0.983	1.948	0.708	1.028
500	0.979	1.066	1.075	1.013	1.978	0.724	1.039
600	0.993	1.076	1.086	1.040	2.009	0.737	1.050
700	1.005	1.087	1.098	1.064	2.042	0.754	1.061
800	1.016	1.097	1.109	1.085	2.075	0.762	1.071
900	1.026	1.108	1.120	1.104	2.110	0.775	1.081
1 000	1.035	1.118	1.130	1.122	2.144	0.783	1.091
1 100	1.043	1.127	1.140	1.138	2.177	0.791	1.100
1 200	1.051	1.136	1.149	1.153	2.211	0.795	1.108
1 300	1.058	1.145	1.158	1.166	2.243	—	1.117

c. 定值比热容

据气体分子运动理论，可导出

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

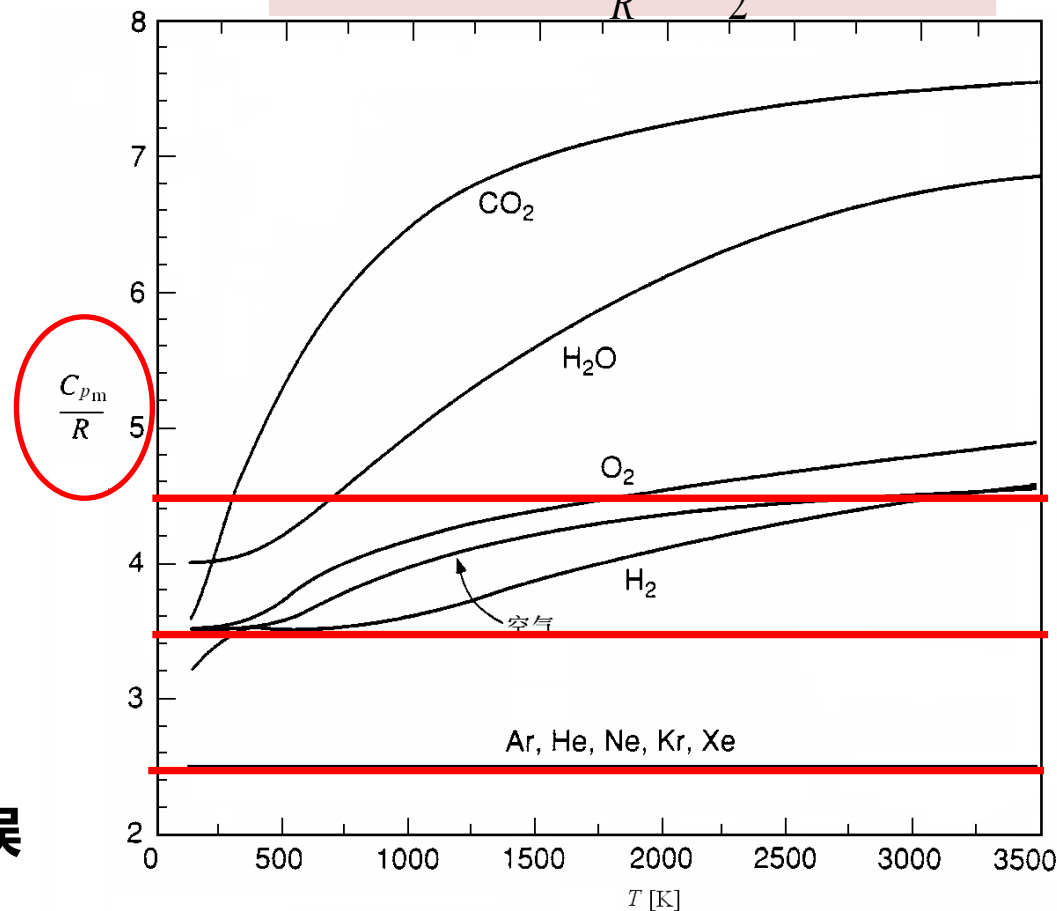
$$C_{p,m} = \frac{i+2}{2} R$$

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

其中*i*: 单原子气体 3;
双原子气体 5;
多原子气体 7。

精度要求不高时可用;
低温时相对接近, 高温时误差较大; 多原子误差更大。

单原子气体	$\frac{C_{p,m}}{R} = \frac{3+2}{2} = 2.5$
双原子气体	$\frac{C_{p,m}}{R} = \frac{5+2}{2} = 3.5$
多原子气体	$\frac{C_{p,m}}{R} = \frac{7+2}{2} = 4.5$



见P.69, 表3-3

	单原子气体 $i=3$	双原子气体 $i=5$	多原子气体 $i=7$
$C_{v,m} \text{ J / (mol} \cdot \text{K)}$	$\frac{3}{2} R$	$\frac{5}{2} R$	$7 \times \frac{R}{2}$
$C_{p,m} \text{ J / (mol} \cdot \text{K)}$	$\frac{5}{2} R$	$\frac{7}{2} R$	$9 \times \frac{R}{2}$
$\gamma = \frac{C_{p,m}}{C_{v,m}}$	1.67	1.40	1.29

3.2 理想气体热力学能、焓和熵

3.2.1 理想气体的热力学能和焓的计算

1. 理想气体热力学能和焓仅是**温度**的函数

★ 因理想气体分子间无作用力 $u = u_k = u(T) \quad du = c_v dT$

★ $h = u + pv = u + R_g T \quad h = h(T) \quad dh = c_p dT$

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。

3.2.2 理想气体热力过程的熵差计算

$$ds = \left. \frac{\delta q}{T} \right|_{\text{rev}} = \frac{du + p dv}{T} = c_v \frac{dT}{T} + \frac{p}{T} dv = c_v \frac{dT}{T} + R_g \frac{dv}{v}$$

$$du = c_v dT$$

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

$$\Delta S = \left\{ \begin{array}{l} \int_1^2 c_v \frac{dT}{T} + R_g \ln \frac{v_2}{v_1} \\ \int_1^2 c_p \frac{dT}{T} - R_g \ln \frac{p_2}{p_1} \\ \int_1^2 c_p \frac{dv}{v} + \int_1^2 c_v \frac{dp}{p} \end{array} \right. \xrightarrow{\text{定比热容}} \left\{ \begin{array}{l} c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R_g \ln \frac{v_2}{v_1} \\ c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R_g \ln \frac{p_2}{p_1} \\ c_p \ln \frac{v_2}{v_1} + c_v \ln \frac{p_2}{p_1} \end{array} \right.$$

3.3 水蒸气

水蒸气

{ 在空气中含量极小，当作理想气体
一般情况下，因离液态较近，为实际气体，使用图表

- 18世纪，蒸气机的发明，是唯一工质
- 直到内燃机发明，才有燃气工质
- 目前仍是火力发电、核电、供暖、化工的工质
- 优点: 便宜，易得，无毒，膨胀性能好，传热性能好
- 是其它实际气体的代表

蒸汽steam

水蒸气water vapor

蒸气vapor

3.3.1 饱和状态和饱和温度、饱和压力

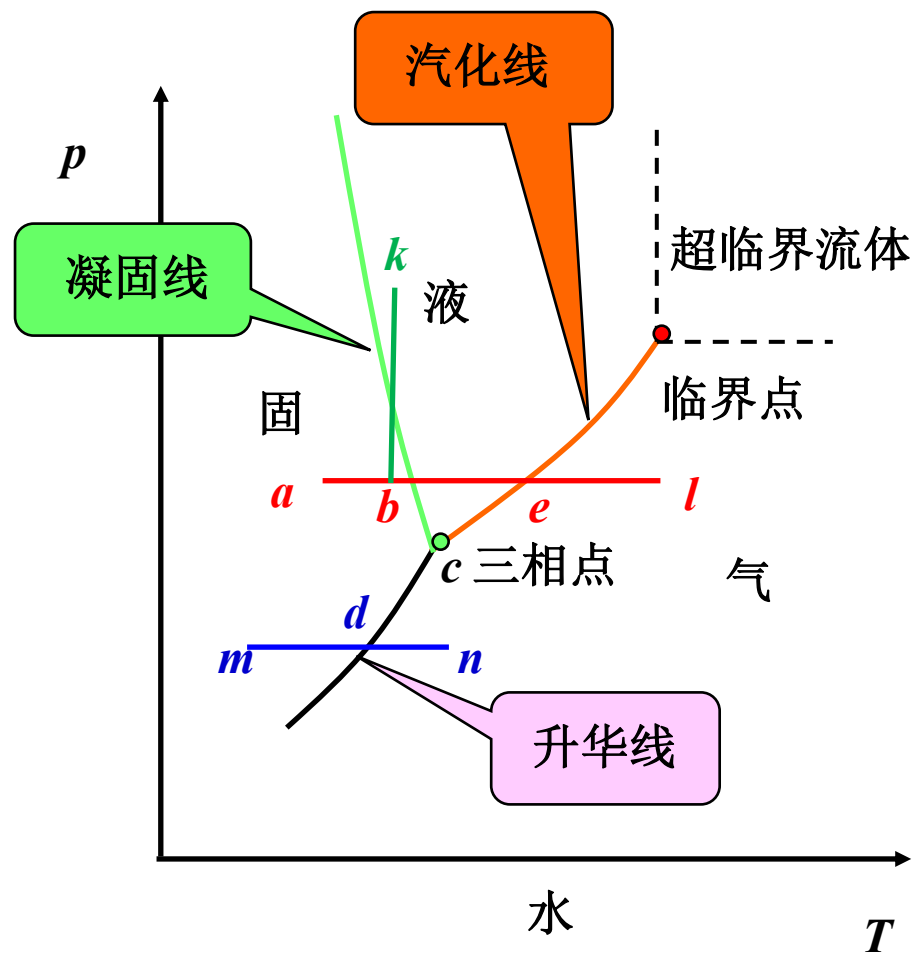
1. 水的相变及 p - T 相图

蒸 发



沸 腾





- 沿 $a \rightarrow b \rightarrow e \rightarrow l$ 加热, 会产生什么情况?
- 如果压力增加, $b \rightarrow k$ 会产生什么情况?
- 沿 $m \rightarrow d \rightarrow n$ 加热, 会产生什么情况?

汽化——由液相转变为气相的过程, T_l
 凝结——由气相转变为液相的过程, P_v
 蒸发——液体表面的汽化过程, t
 沸腾——沸点下液体内部汽化过程, t_s
 升华——由固态直接变为气态的过程
 凝华——由气态直接变为固态的过程

拓展知识

水的临界点c状态: $t_c=373.99^{\circ}\text{C}$ (647.14K) , $p_c=22.129\text{MPa}$,

$v_c=0.003106\text{m}^3/\text{kg}$ 。注: 2008年

超临界流体

温度及压力均处于临界点以上的液体叫超临界流体(supercritical fluid)。

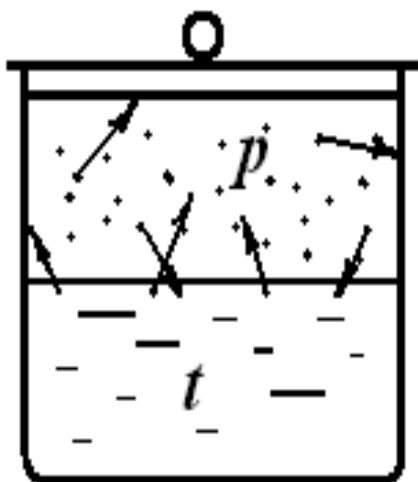
水在超临界时基本上仍是一种气态,但又不同于一般气体,是一种稠密的气态,密度比一般气体要大两个数量级,与液体相近。它的粘度比液体小,但扩散速度比液体快(约两个数量级),所以有较好的流动性和传递性能。

超超临界流体

超超临界一般是指火电方面,在物理学中没有这个分界点。目前超超临界与超临界的划分界限尚无国际统一的标准,一般认为蒸汽压力大于31MPa,蒸汽温度高于593℃时的状态属于超超临界流体。

上海外高桥第三发电厂是全球第一个将供电煤耗降到280克以下的发电厂,其机组蒸汽温度600℃,发电效率提高到了惊人的45.4%。

2. 饱和状态



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**， $t_s(T_s)$

饱和状态的压力——**饱和压力**， p_s

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

水的饱和压力和饱和温度对应关系

$t/^\circ\text{C}$	0	20	50	100	120	373.99
p/MPa	0.000 611 2	0.002 338 5	0.012 344 6	0.101 332 5	0.198 483	22.129

3. 几个名词

饱和液——处于饱和状态的液体: $t = t_s$

干饱和蒸汽——处于饱和状态的蒸汽: $t = t_s$

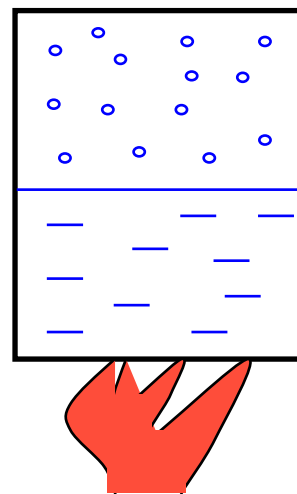
未饱和液——温度低于所处压力下饱和温度的液体: $t < t_s$

过热蒸汽——温度高于饱和温度的蒸汽: $t > t_s, t - t_s = d$ (过热度)

湿饱和蒸汽——饱和液和干饱和蒸汽的混合物: $t = t_s$

干度——湿蒸汽中干饱和蒸汽的质量分数, 用 w 或 x 表示; 湿度则相反。

$$x = \frac{m_{\text{汽}}}{m_{\text{汽}} + m_{\text{液}}} \quad x \begin{cases} 0 \\ \downarrow \\ 1 \end{cases} \begin{array}{l} \text{饱和液} \\ \text{湿饱和蒸汽} \\ \text{干饱和蒸汽} \end{array}$$



3.3.2 汽化潜热

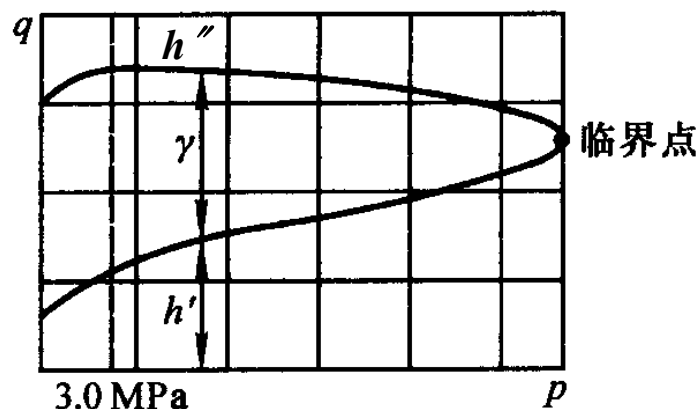
1kg饱和液体全部转变为同温下的干饱和蒸汽所吸收的热量称为 γ 。

液体在定压下沸腾汽化时，液体温度保持不变。根据分子运动理论，液体沸腾时加给液体的热量，主要是用来克服液体分子之间的引力及液体的表面张力，并增加分子的位能（液体变为蒸汽，分子之间的距离增大），蒸汽和液体分子的动能并没有增大，因而沸腾过程中液体的温度保持不变。

$$q_p = h_{\text{末}} - h_{\text{初}}$$

$$\gamma = h'' - h' \stackrel{?}{=} \text{常数}$$

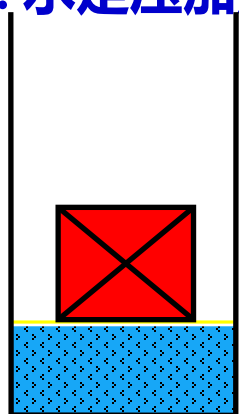
凝结热



p/MPa	0.001	0.01	0.1	1	10	22.12
$\gamma/(\text{kJ/kg})$	2 485.0	2 392.9	2 257.9	2 013.6	1 319.7	0

3.3.3 水蒸气定压产生过程

1. 水定压加热汽化过程



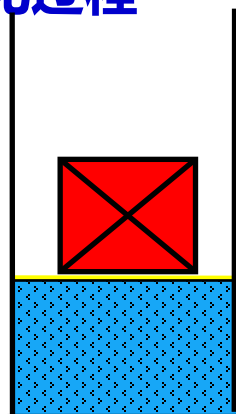
$$t < t_s$$

未饱和水

$$v < v'$$

$$h < h'$$

$$s < s'$$



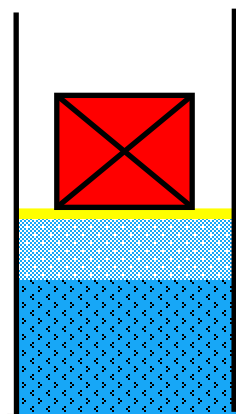
$$t = t_s$$

饱和水

$$v = v'$$

$$h = h'$$

$$s = s'$$



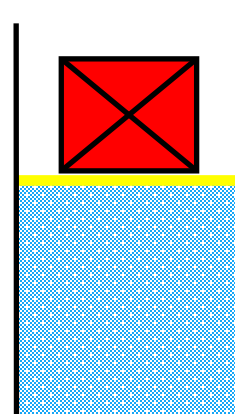
$$t = t_s$$

饱和湿蒸汽

$$v' < v < v''$$

$$h' < h < h''$$

$$s' < s < s''$$



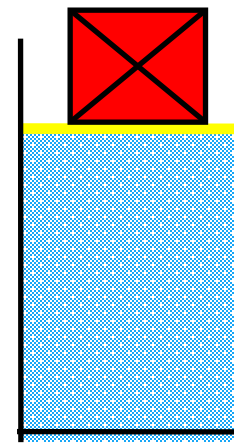
$$t = t_s$$

干饱和蒸汽

$$v = v''$$

$$h = h''$$

$$s = s''$$



$$t > t_s$$

过热蒸汽

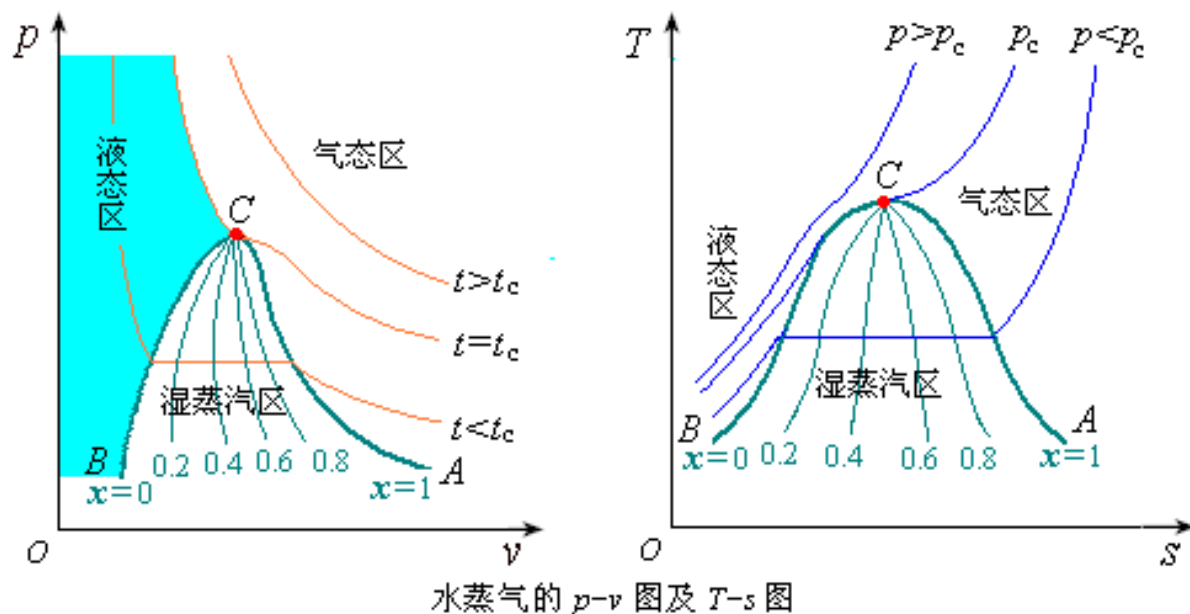
$$v > v''$$

$$h > h''$$

$$s > s''$$



2. 水定压加热汽化过程的 $p-v$ 图及 $T-s$ 图



实际气体各种工质均具有类似水的性质

一点
临界点
C

$$\begin{cases} t_{cr} = 373.99^\circ\text{C} \\ p_{cr} = 22.129\text{ MPa} \\ v_{cr} = 0.003106\text{ m}^3/\text{kg} \end{cases}$$

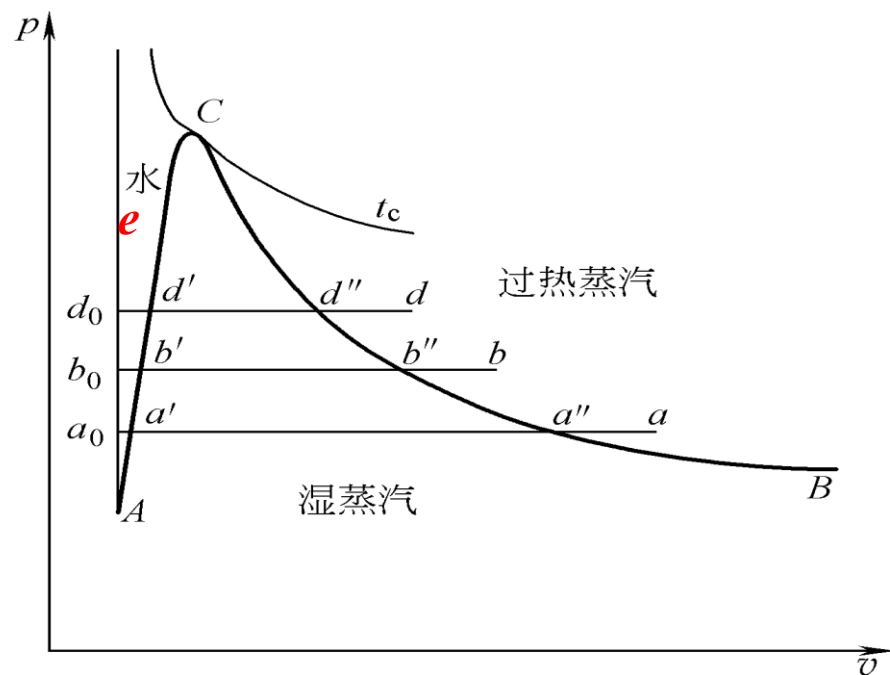
两线 { 上界限线CA (饱和蒸汽线)
下界限线CB (饱和液体线)

三区 { 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

使未饱和液 e 达饱和状态的途径:

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



3.4 水和水蒸气热力性质图表及计算机程序

- 水蒸气不是理想气体
- 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。

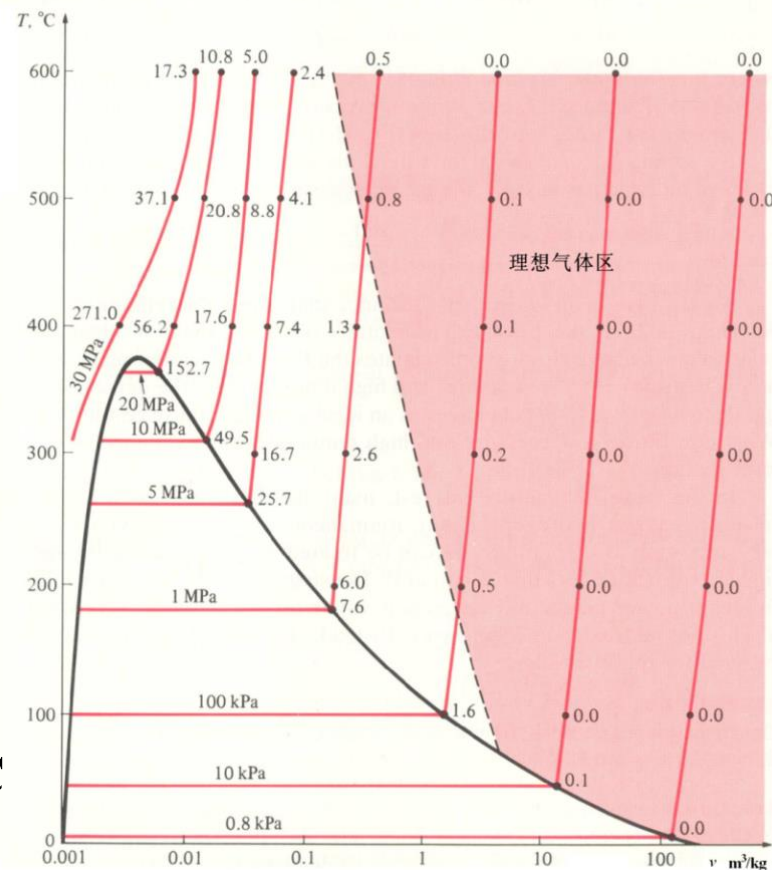
1. 水和水蒸气热力性质表及计算

(1) 三相点

——气、液、固三相平衡共存的状态

水的三相点温度和压力 $T_{tr} = 273.16\text{K}$ 0.01°C

$$p_{tr} = 611.659 \text{ Pa}$$



(2) 零点规定 三相点液态水热力学能及熵为零

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

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

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

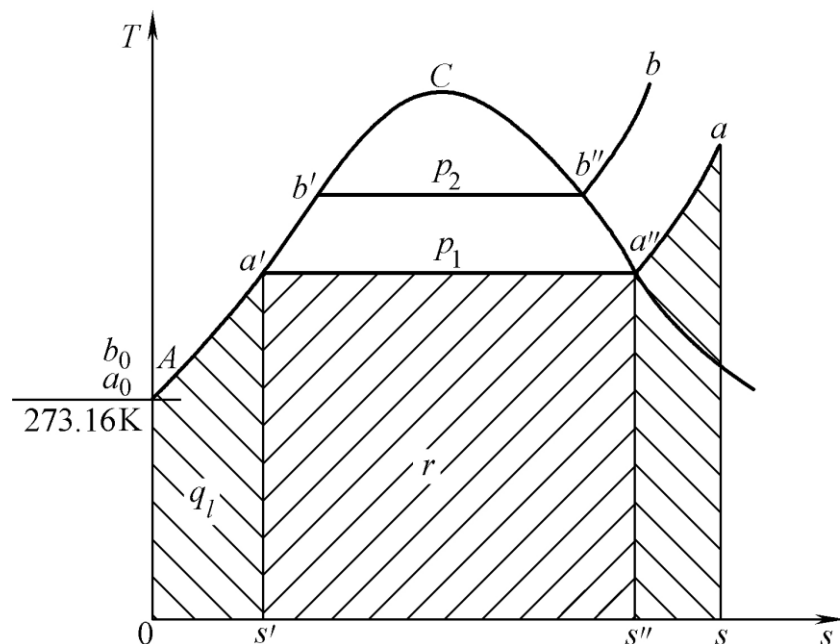
(3) 未饱和水 (t, p)

- 查图表或由专用程序计算
- 压力不太高时, 可近似 $h_t = c_p t$

(4) 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

(5) 过热蒸汽 (p, t)

查图表或由专用程序计算。



(6) 饱和水和干饱和蒸汽表

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

(7) 未饱和水和过热蒸汽表

p	0.001 MPa			0.005 MPa			0.01 MPa		
饱和 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

(8) 湿饱和蒸汽

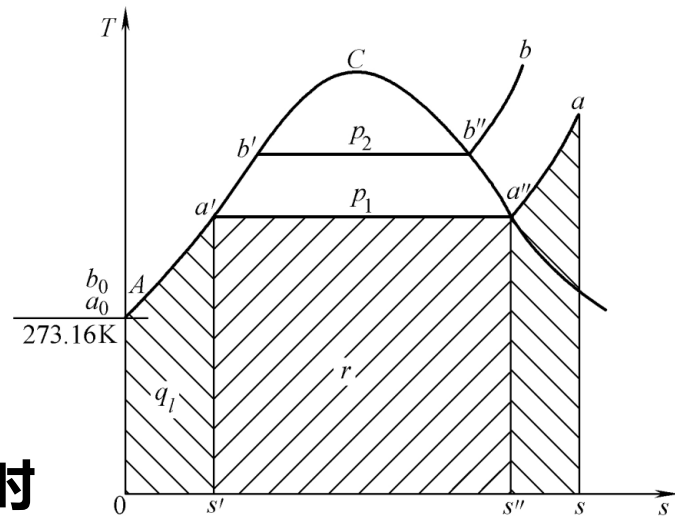
由 t_s (或 p_s) 与 x 共同确定:

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

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

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

$$u_x = h_x - p_s v_x$$

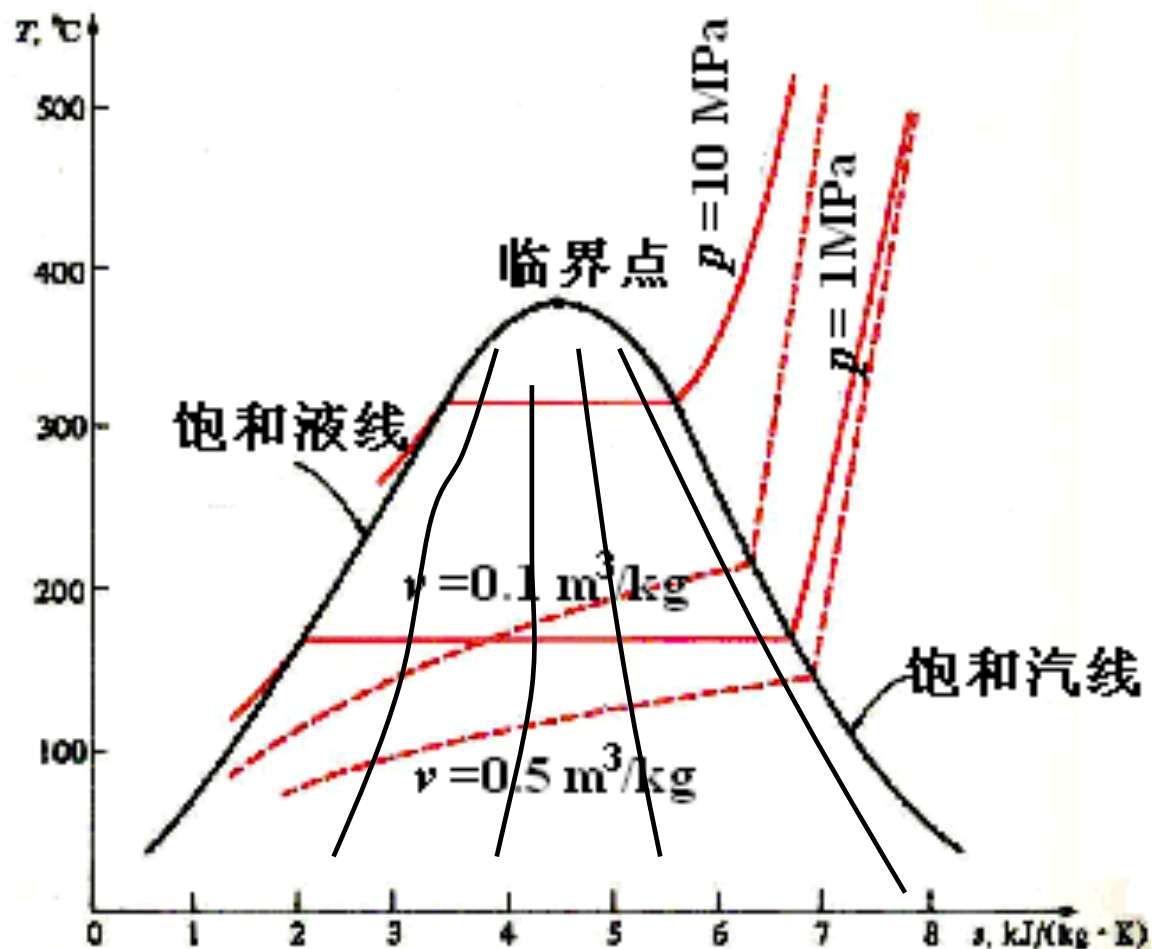


2. 水蒸气的焓—熵 ($h - s$) 图

●水蒸气的 $t - s$ 图

优点：便于循环分析

缺点：热量和功以面积表示
计算不便



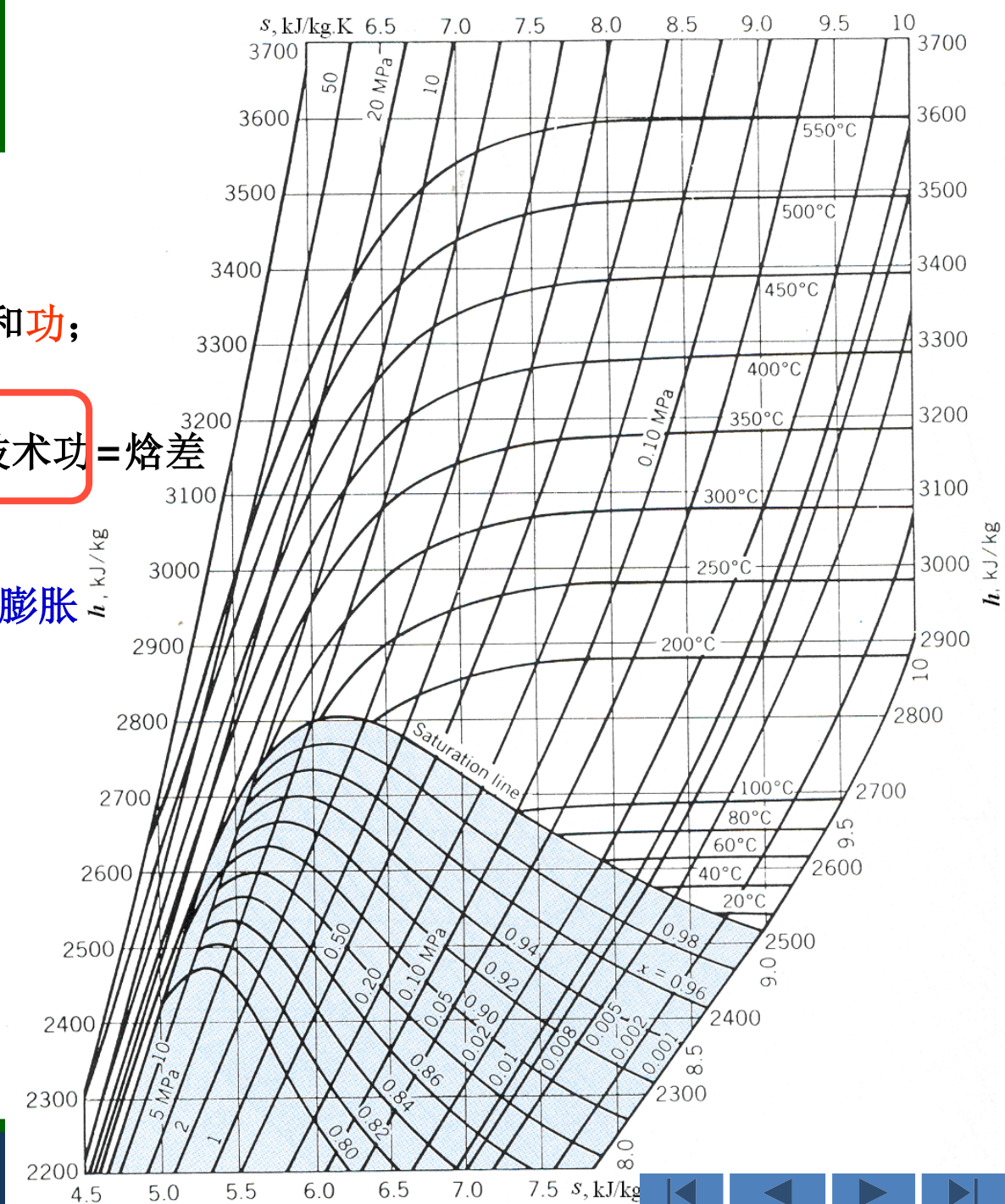
• 焓熵 ($h-s$) 图

优点：用线段的长度表示热量和功；

定压过程热量=焓差；绝热过程技术功=焓差

水蒸气在汽轮机中膨胀

锅炉蒸气产生



一点：临界点C

水蒸气 $h-s$ 图

二区：

过热蒸汽区

湿蒸汽区

粗红线为界

三线：

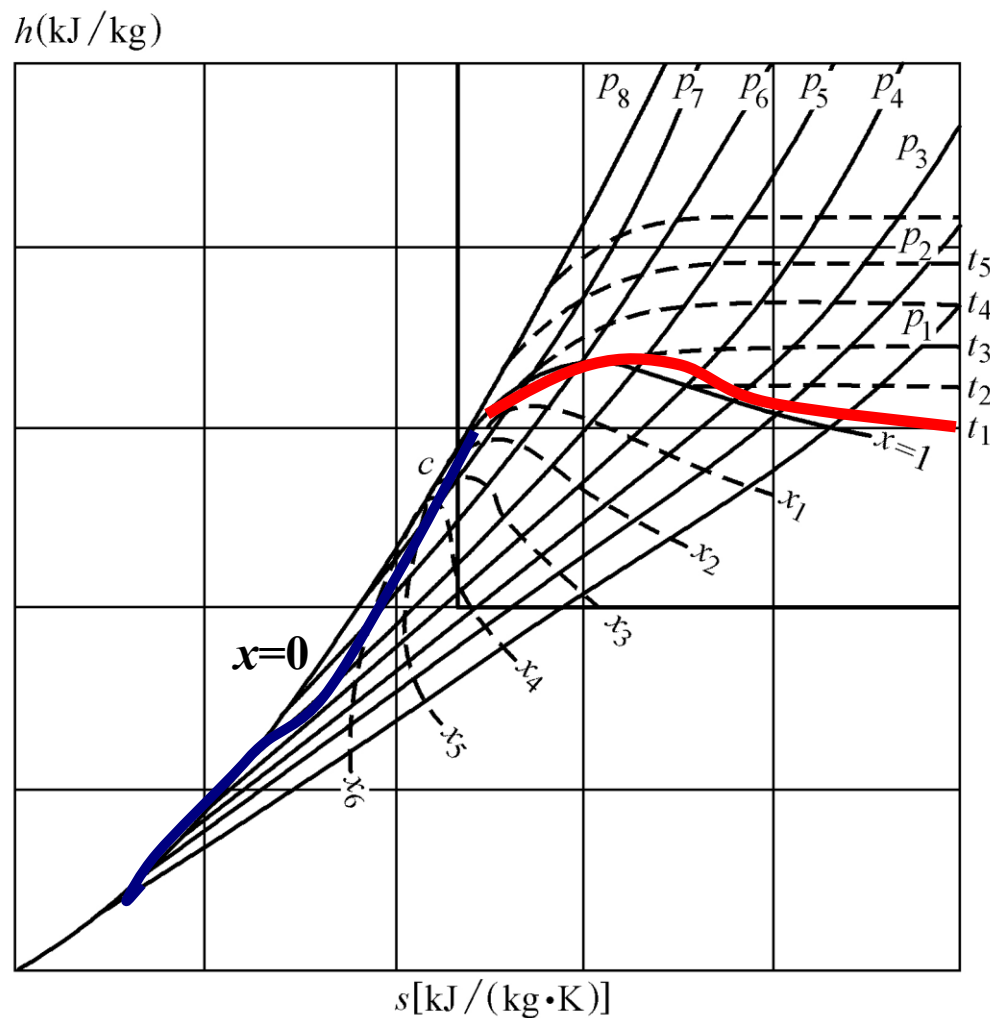
定压线

定干度线

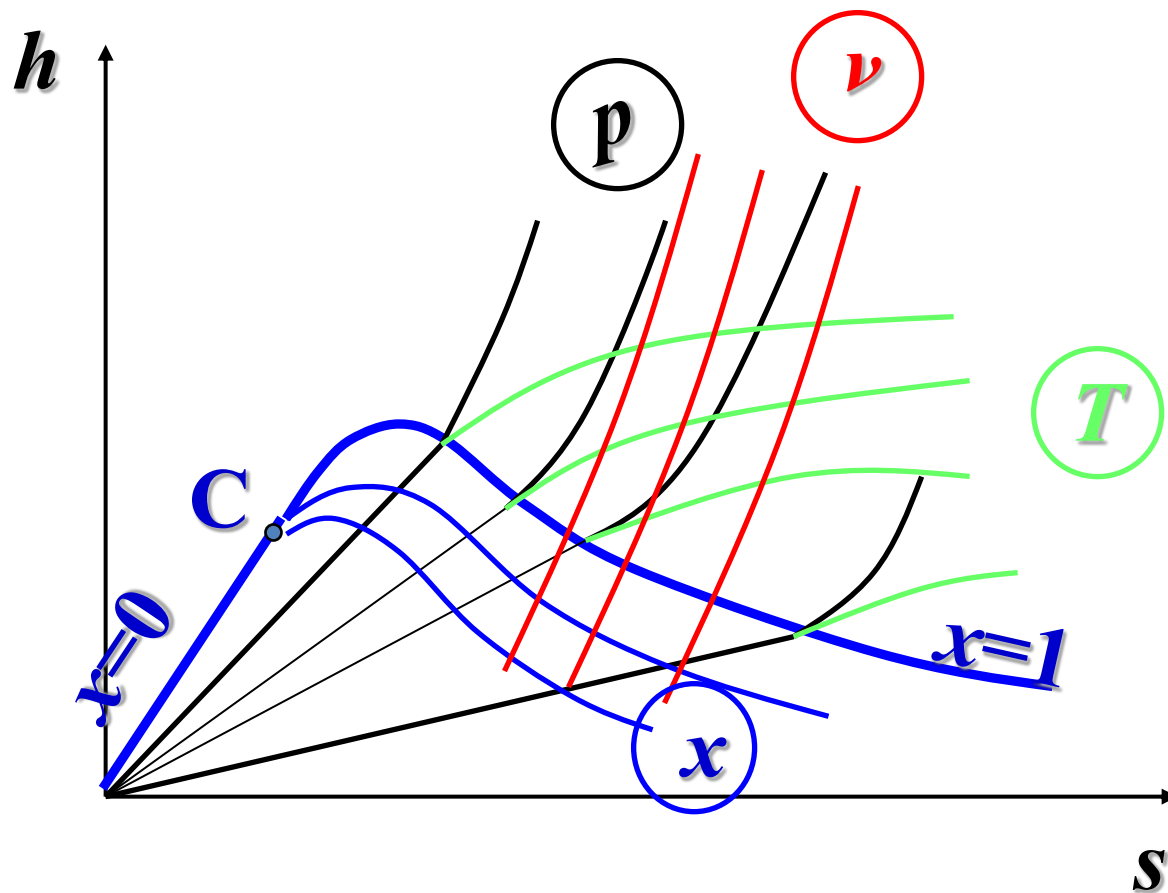
定温线

湿蒸汽区：定压线=定温线

$h-s$ 图常用范围： $x=0.8$ 以上区域



水蒸气焓熵图



例2 压力容器内100 °C时水的体积是蒸汽体积的1/10，加热终态时容器内压力2.0 MPa。试求此时容器内温度。问终态时锅内蒸汽量比初态时增大还是减小？

解：初终态容器体积不变，水的质量不变。

考察初始状态1：

$$V_l = m_l v_l = V_v / 10 = m_v v_v / 10 \quad m_v = 10m_l v_l / v_v$$

查饱和水和饱和水蒸气表，100°C时：

$$v' = 0.001044 \text{ m}^3/\text{kg} \quad v'' = 1.6729 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$x_1 = \frac{m_{v1}}{m_{v1} + m_{l1}} = \frac{10m_{l1}v_{l1} / v_{v1}}{m_{l1} + 10m_{l1}v_{l1} / v_{v1}} = \frac{10v_l}{10v_l + v_v}$$
$$= \frac{10 \times 0.001\,044 \text{ m}^3/\text{kg}}{10 \times 0.001\,044 \text{ m}^3/\text{kg} + 1.672\,9 \text{ m}^3/\text{kg}} = 0.006\,2$$

$$v_1 = v_1' + x_1(v_1'' - v_1')$$
$$= 0.001\,044 \text{ m}^3/\text{kg} + 0.006\,2 \times (1.672\,9 \text{ m}^3/\text{kg} - 0.001\,044 \text{ m}^3/\text{kg})$$
$$= 0.011\,41 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_v = m_v v_v$$

$$V_l = m_l v_l$$

最终状态2: $p_2=2\text{MPa}$ $v' = 0.001177\text{m}^3/\text{kg}$ $v'' = 0.099627\text{m}^3/\text{kg}$

$$v_2 = v_1 = 0.01141\text{m}^3/\text{kg} \quad v_2' < v_2 < v_2''$$

所以为饱和湿蒸汽状态 $t_2 = t_s(2\text{MPa}) = 212.4^\circ\text{C}$

$$x_2 = \frac{v_2 - v_2'}{v_2'' - v_2'} = \frac{0.01141 - 0.001177}{0.099627 - 0.001177} = 0.0103 > x_1 (= 0.0062)$$

由于总质量不变，干度增大，所以水蒸气量增大。

本例中容器中湿蒸汽定容加热后水蒸气的干度增大，请考虑，有没有可能出现加热后水蒸气的干度减小的现象？

提示：从 $p-v$ 图上分析初态比体积小于水的临界比体积时进行定容加热后水蒸气干度变化的趋势。

