

華東理工大學

EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



第七章 水蒸气



主要内容

- 7.1 水的相变及相图
- 7.2 水蒸气的定压发生过程
- 7.3 水蒸气表和焓-熵图
- 7.4 水蒸气的基本热力过程





本章要点

- 基本知识点：水蒸气的产生过程、水蒸气状态参数的确定、水蒸气图表的结构和应用、水蒸气在热力过程中功量和热量的计算。
- 本章重点：工业上水蒸气的定压生成过程，学会使用水蒸气热力学性质的图表，并能熟练的运用于各种热力过程的计算(实际气体热力过程计算方法，理想气体状态方程及过程方程式不适用)。

7.1 水的相变和相图

□ 水蒸气的特点

- ✓ 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
- ✓ 在空气中含量极小，当作理想气体；一般情况下，为实际气体，使用图表(实际气体热力过程)。

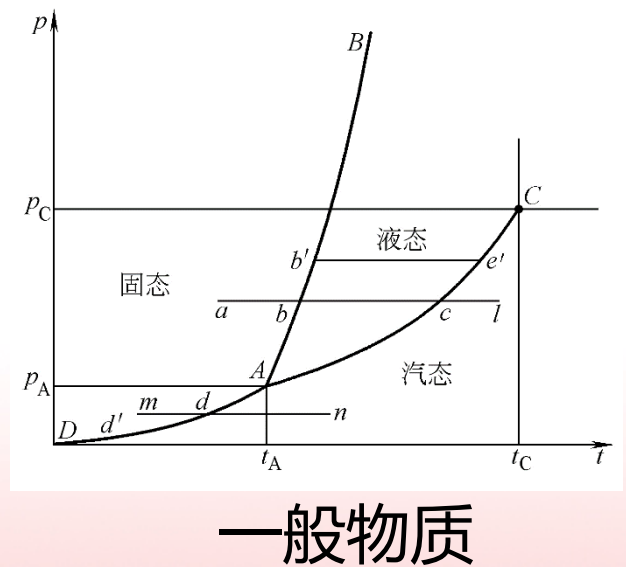
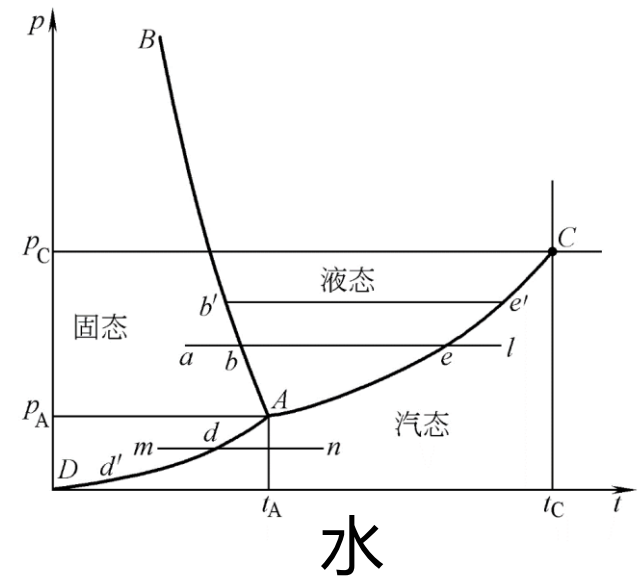
7.1 水的相变和相图

□ 水的相变及相图特征

- ✓ 三个单相区(**水、冰、蒸气**)
- ✓ 三根饱和线(**升华、融解和汽化曲线**)
- ✓ 一个三相点(611.2Pa , 0.01°C)
- ✓ 一个临界点(22.13MPa , 374.15°C)

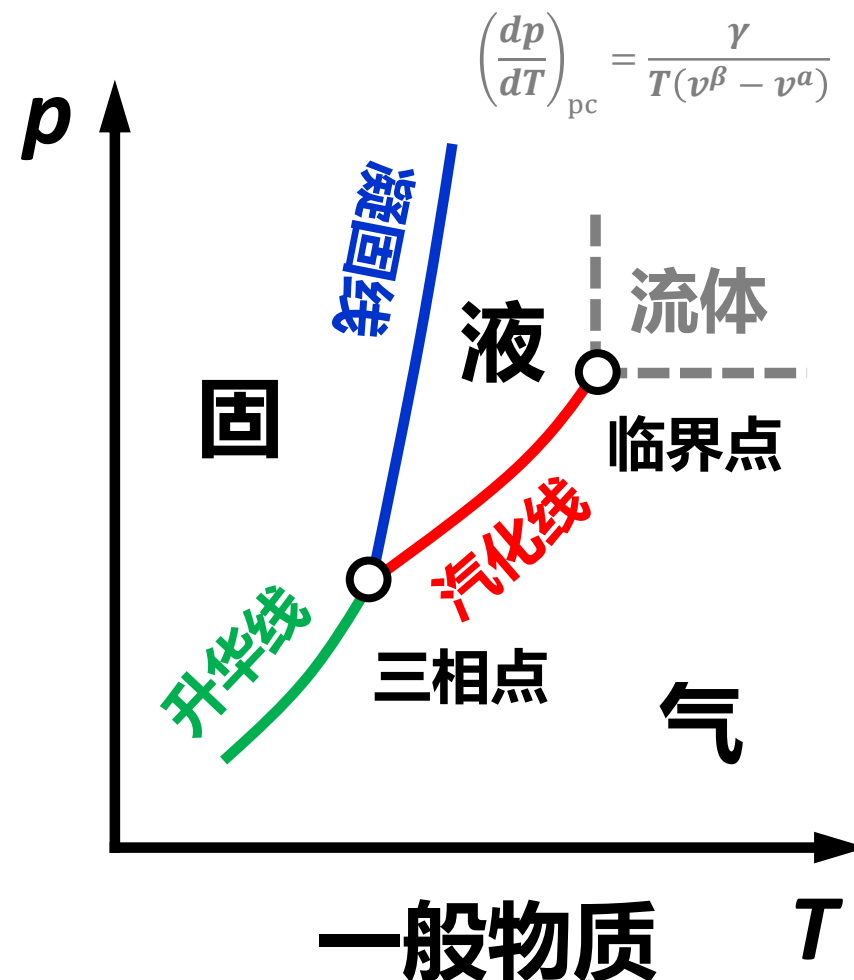
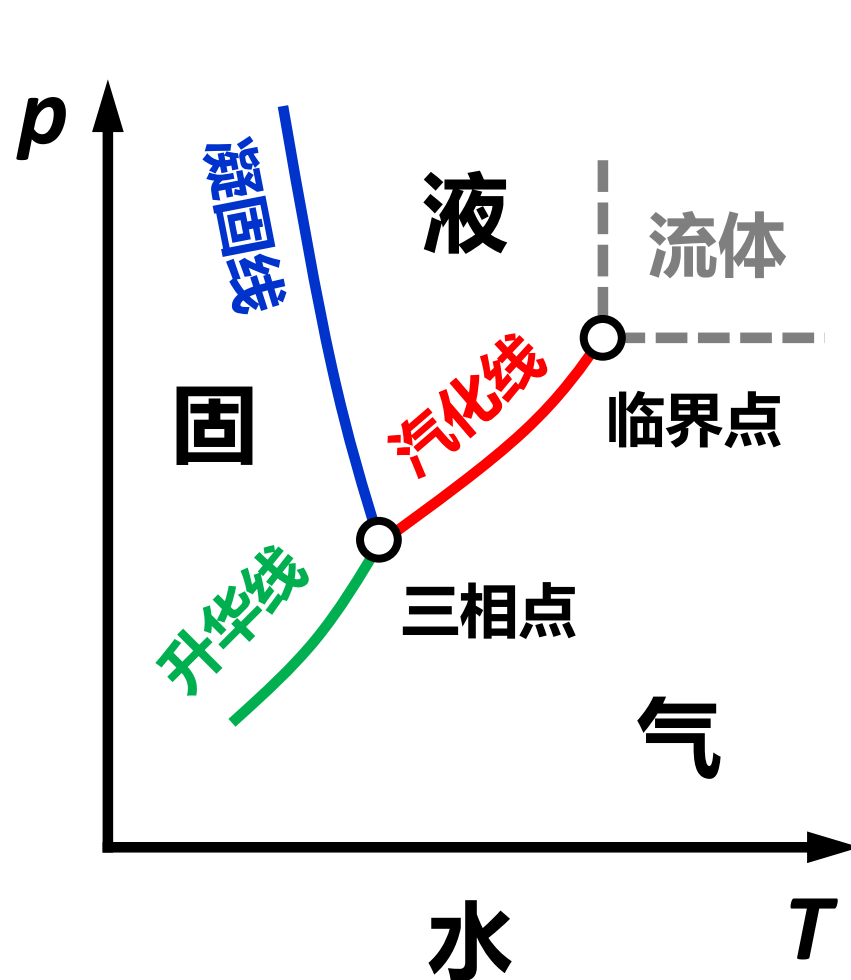
□ 水相图的特征性

- ✓ **水蒸汽的相图与其他物质相图的区别(冰刀)**
- ✓ **水性质的特殊性(水凝固后体积增大, 密度减小)**



7.1 水和纯物质的 p - T 相图

□ 凝固 (Melting), 汽化 (Vaporization), 升华 (Sublimation)



7.1 水的相变和相图

□ 基本概念

✓ **汽化**: 由液态变成气态的物理过程(不涉及化学变化);

蒸发: 在液体表面进行的汽化过程, 任何温度下均可发生

沸腾: 在液体表面及内部进行的强烈汽化过程, 达到沸点温度才会发生

✓ **液化(凝结)**: 汽化的反过程, 凝结速度取决于蒸汽的压力



7.1 水的相变和相图

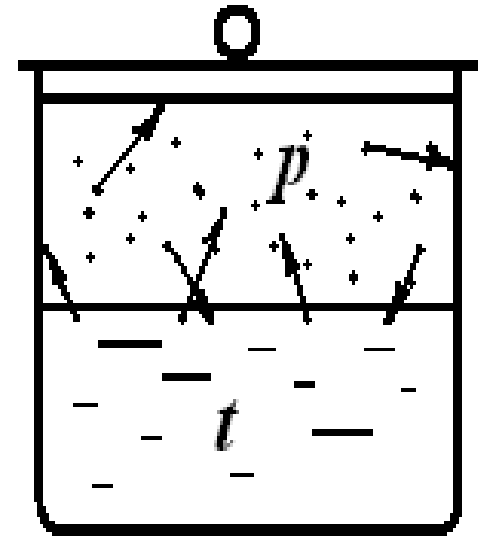
✓ 饱和状态

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**， $t_s(T_s)$

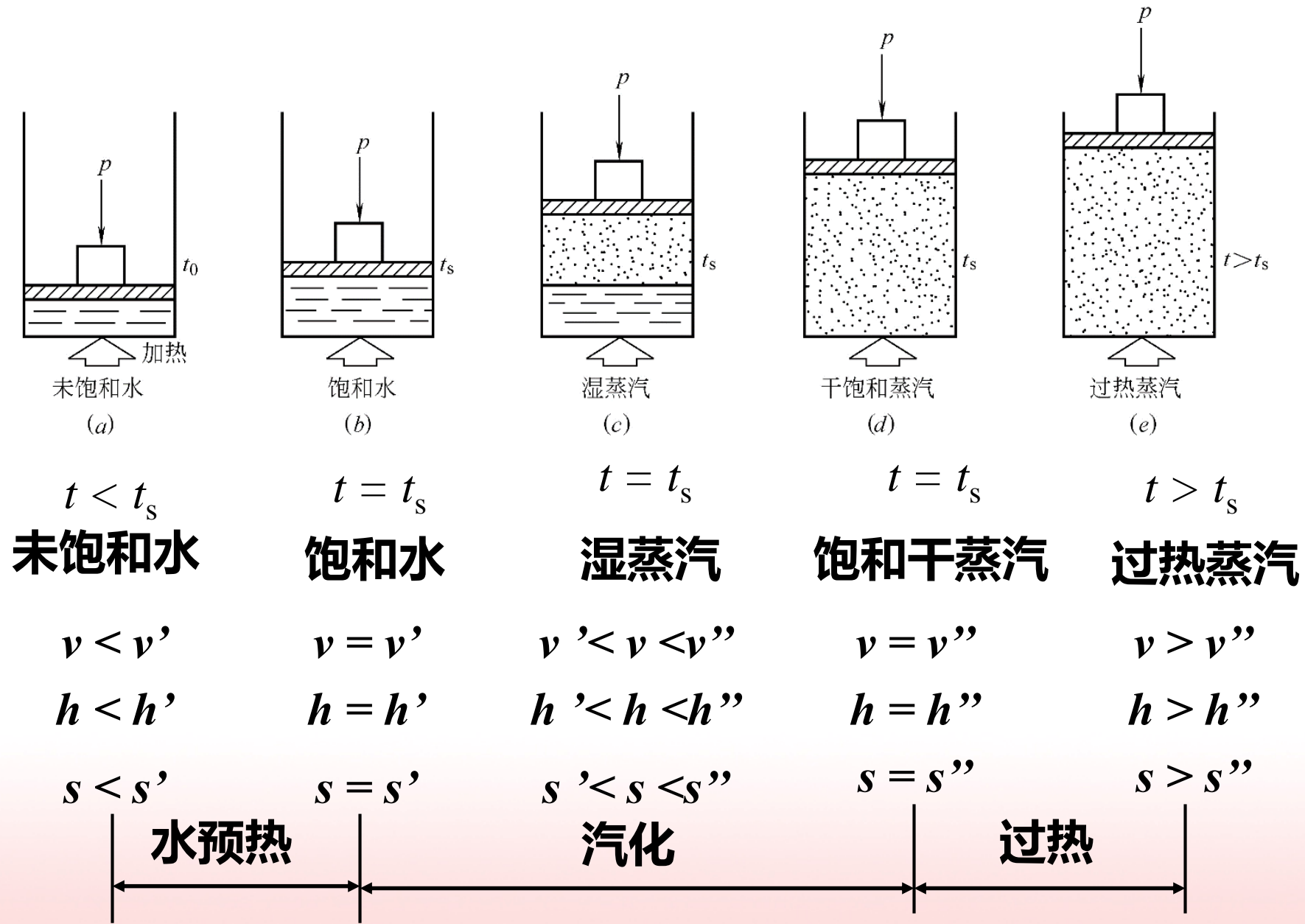
饱和状态的压力——**饱和压力**， p_s

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

7.2 水蒸气的定压发生过程



7.2 水蒸气的定压发生过程

□ 相关名词

未饱和水 — 温度低于所处压力下饱和温度的水: $t < t_s$

饱和水 — 处于饱和状态的水: $t = t_s$

湿饱和蒸汽(湿蒸汽) — 饱和水和干饱和蒸汽的混合物: $t = t_s$

干饱和蒸汽 — 处于饱和状态的蒸汽: $t = t_s$

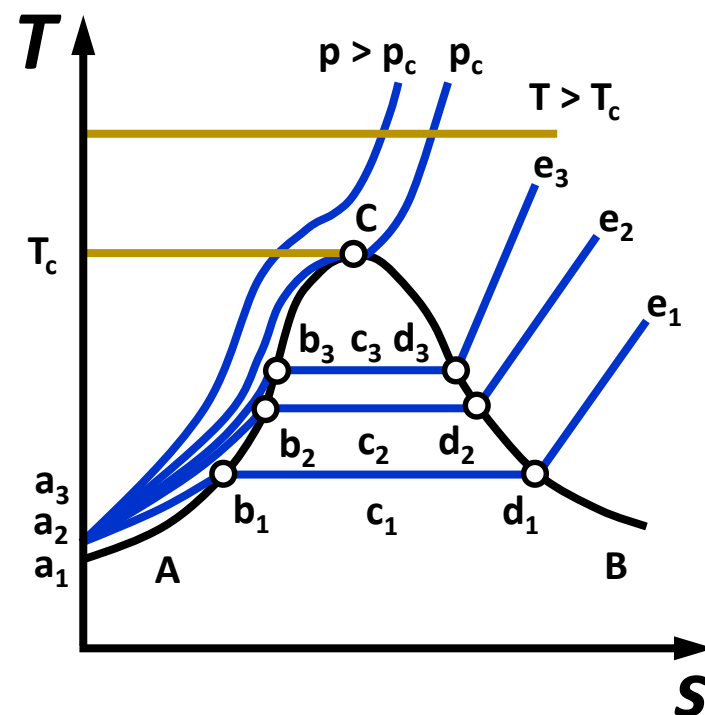
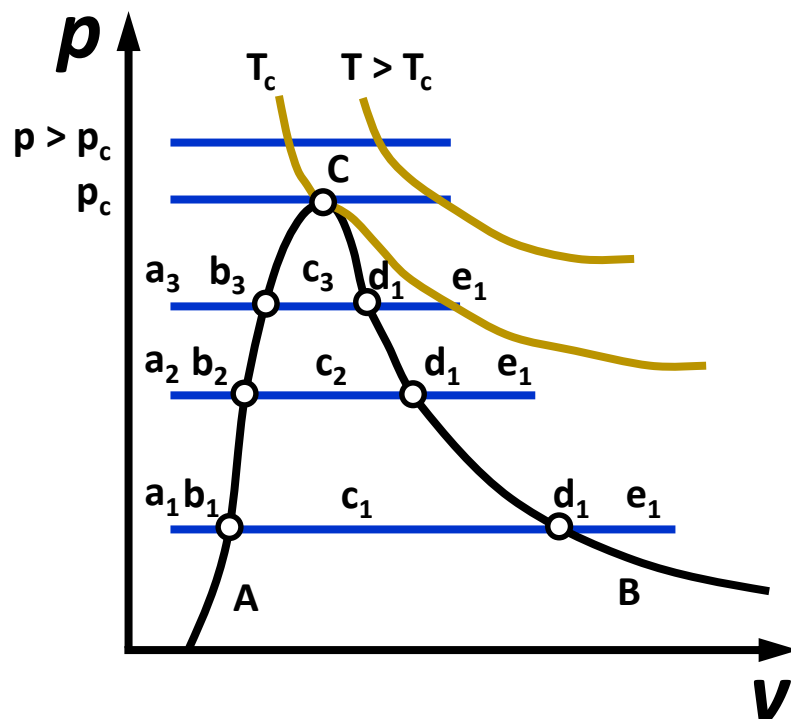
过热蒸汽 — 温度高于饱和温度的蒸汽: $t > t_s$, $t - t_s = d$ 称为过热度。

干度: 湿蒸汽中干饱和蒸汽的质量分数, 用 x 表示

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

使未饱和液达饱和状态的途径: $(t, p) \begin{cases} t < t_s(p) - \text{保持 } p \text{ 不变, } t \uparrow \\ p > p_s(t) - \text{保持 } t \text{ 不变, } p \downarrow \end{cases}$

$p-v$ / $T-s$ 图上的水蒸气定压加热过程



一点
临界点

$$\begin{cases} P_c = 22.129 \text{ MPa} \\ T_c = 647.30 \text{ K} \\ v_c = 0.00326 \text{ m}^3/\text{kg} \end{cases}$$

两线

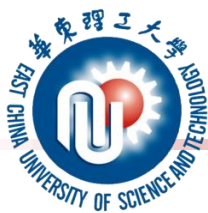
饱和液线
饱和气线

三区

液
汽液共存
汽

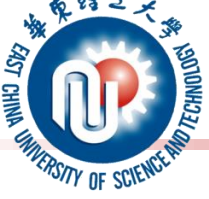
五态

未饱和水
饱和水
湿蒸汽
饱和蒸汽
过热蒸汽



水和水蒸气状态参数及其图表

- **状态公理**：简单可压缩系统，**两个**独立变量
- **未饱和水及过热蒸汽**，一般已知 **p 和 T** 即可
饱和水和饱和蒸汽，只需确定 **p 或 T**
湿蒸汽， p 和 T 不独立，汽液两相，如何确定？
- 1875年，吉布斯提出了**吉布斯相律** (Gibbs Phase Rule)
- 无化学反应时，热力系独立参数的个数 $\gamma = K - f + 2$
 K 是组元数 (对于纯水, $K = 1$), f 是相数
- **单相**: $f = 1 \rightarrow \gamma = 2 \rightarrow$ 2个独立参数, **p 和 T**
两相: $f = 2 \rightarrow \gamma = 1 \rightarrow$ 1个独立参数, **p 或 T**



水和水蒸气状态参数确定的原则

- **未饱和水/过热蒸汽**：确定任意两个独立参数，如 p 和 T
- **饱和水/饱和蒸汽**：确定 p 或 T
- **湿蒸汽**：除 p 或 T 外，还需其它与两相比比例有关的参数
- **干度 x** ：
$$x = \frac{\text{干饱和蒸汽质量}}{\text{湿饱和蒸汽质量}} = \frac{m_v}{m_v + m_f}$$
- **饱和水**： $x = 0$
饱和蒸汽： $x = 1$
湿蒸汽： $0 < x < 1$
在未饱和水和过热蒸汽区域， x 没有明确的物理意义

7.3 水蒸气表和焓-熵图

□ 水蒸气状态参数

在工程计算中，水和水蒸气的状态参数可查表或图(p 、 v 、 T 、 h 和 s)，任何图表都有基准点。

✓ 基准点的规定

水的三相点即为基准点（热力学能和熵为零）。

✓ 水蒸气定压发生过程说明

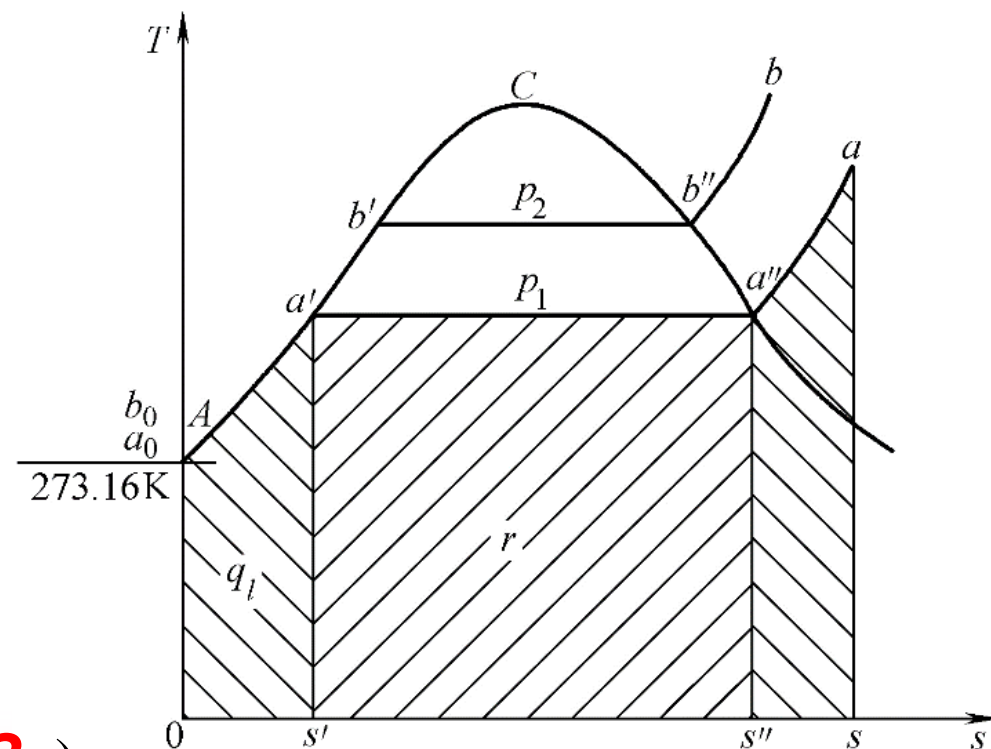
$$Q = \Delta U + W = \Delta U + \int p dV$$

$$= \Delta U + p \Delta V = \Delta U + \Delta(pV) = \Delta H$$

(1) 预热段-液体热 q_l

(2) 汽化段-气化潜热 r (**压力变化，气化潜热是否变化？**)

(3) 过热蒸汽段-过热热量





7.3 水蒸气表和焓-熵图

□ 理想气体 $h = f(T)$

□ 实际气体汽化时, $T=T_s$ 不变, 但 h 增加;

$$h'' - h' = r \quad \text{汽化潜热}$$

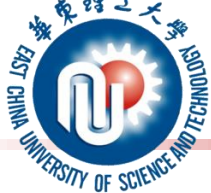


7.3 水蒸气表和焓-熵图

□ 水蒸气表

- ✓ 饱和水和饱和蒸汽表(按照饱和温和和饱和压力列表)
- ✓ 未饱和水与过热蒸汽表

缺陷：离散的数值，需要根据相邻同相状态点的参数值做线性内插计算。



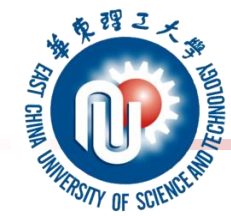
饱和水与饱和水蒸气表

(按**温度**排列)

温度	饱和压力	比容		焓		气化潜热	熵	
		饱 和 水	饱和蒸气	饱和水	饱和蒸气		饱和水	饱和蒸气
T (°C)	P_a P_a	v' M^3/Kg	v'' M^3/Kg	h' KJ/Kg	h'' KJ/Kg	r KJ/Kg	s' $KJ/(Kg \cdot K)$	s'' $KJ/(Kg \cdot K)$
0	0.0006 108	0.001 000 2	206.321	-0.04	2 501.0	2 501.0	-0.000 2	9.156 5
0.01	0.0006 112	0.001 000 22	206.175	0.000 614	2 501.0	2 501.0	0.000 0	9.156 2
1	0.0006 566	0.001 000 1	192.611	4.17	2 502.8	2 498.6	0.015 2	9.129 8
2	0.0007 054	0.001 000 1	179.935	8.39	2 504.7	2 496.3	0.030 6	9.103 5
4	0.0008 129	0.001 000 0	157.267	16.80	2 508.3	2 491.5	0.061 1	9.051 4
6	0.0009 346	0.001 000 0	137.768	25.21	2 512.0	2 486.8	0.091 3	9.000 3

(按**压力**排列)

压力	饱和温 度	比容		焓		汽化潜热	熵	
		饱 和 水	饱和蒸气	饱和水	饱和蒸气		饱和水	饱和蒸气
P_a MPa	t (°C)	v' m^3/Kg	v'' m^3/Kg	h' KJ/Kg	h'' KJ/Kg	r KJ/Kg	s' $KJ/(Kg \cdot K)$	s'' $KJ/(Kg \cdot K)$
0.0010	6.982	0.001 000 1	129.208	29.33	2 513.8	2 484.5	0.106 0	8.975 6
0.0020	17.511	0.001 001 2	67.006	73.45	2 533.2	2 459.8	0.260 6	8.723 6
0.0030	24.098	0.001 002 7	45.668	101.00	2 545.2	2 444.2	0.354 3	8.577 6
0.0040	28.981	0.001 004 0	34.803	121.41	2 554.1	2 432.7	0.422 4	8.474 7
0.0050	32.90	0.001 005 2	28.196	137.77	2 561.2	2 423.4	0.476 2	8.395 2
0.0060	36.18	0.001 006 4	23.742	151.50	2 567.1	2 415.6	0.520 9	8.330 5



未饱和水与过热蒸汽表

p	0.001MPa			0.005MPa		
	$(t_s = 6.949^{\circ}\text{C})$			$(t_s = 32.879^{\circ}\text{C})$		
	v'	h'	s'	v'	h'	s'
	0.001001	29.21	0.1056	0.0010053	137.72	0.4761
	m^3/kg	kJ/kg	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	m^3/kg	kJ/kg	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
	v''	h''	s'	v''	h''	s'
	0.001001	29.21	0.1056	28.191	2560.6	8.3930
	m^3/kg	kJ/kg	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	m^3/kg	kJ/kg	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
t	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	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
0	0.001002	-0.05	-0.0002	0.0010002	-0.05	-0.0002
10	130.598	2519.0	8.9938	0.0010003	42.01	0.1510
20	135.226	2537.7	9.0588	0.0010018	83.87	0.2963
40	144.475	2575.2	9.1823	28.854	2574.0	8.43466
60	153.717	2612.7	9.2984	30.712	2611.8	8.5537
80	162.956	2650.3	9.4080	32.566	2649.7	8.6639

离散数值，线性内插；可多次线性内插；未饱和水和饱和水可线性内插，饱和干蒸汽和过热蒸汽可线性内插；

未饱和水焓值可近似等于饱和水焓值（相同温度下）；

7.3 水蒸气表和焓-熵图

□ 压力为P的湿蒸汽

$$v_x = xv'' + (1-x)v' = v' + x(v'' - v')$$

$$v_x \approx xv'' \quad (\text{当} p \text{不太大, } x \text{不太小时})$$

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

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

$$u_x = h_x - pv_x$$

$$y = x \cdot y'' + (1-x) \cdot y' \rightarrow x = \frac{y-y'}{y''-y'}$$



查表法举例

- **查表时先要确定在五态中的哪一态**
- 已知 $p = 1 \text{ MPa}$, 试确定 $t = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时各处于哪个状态, 各自的 h 是多少?
- 已知 $t = 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 5 kg 蒸汽占有 0.2 m^3 容积, 试问蒸汽所处状态, 以及对应的 h ?
- 已知 $t = 85 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 0.015 \text{ MPa}$, 试确定状态和 h ?
- 有没有 500°C 的水? 有没有 -3°C 的水蒸气?

没有; 有

7.3 水蒸气表和焓-熵图

例7.1 试确定以下三种情况下是什么样的蒸汽？

(1) $P=0.8\text{MPa}$, $v=0.22\text{m}^3/\text{kg}$

(2) $P=0.6\text{MPa}$, $t=190^\circ\text{C}$

(3) $P=1\text{MPa}$, $t=179.88^\circ\text{C}$

例7.2 在容积为85L的容器中，盛有0.1kg的水及0.7kg的干饱和蒸汽，求容器中的压力。

$$v_x = xv'' + (1-x)v' = v' + x(v'' - v')$$

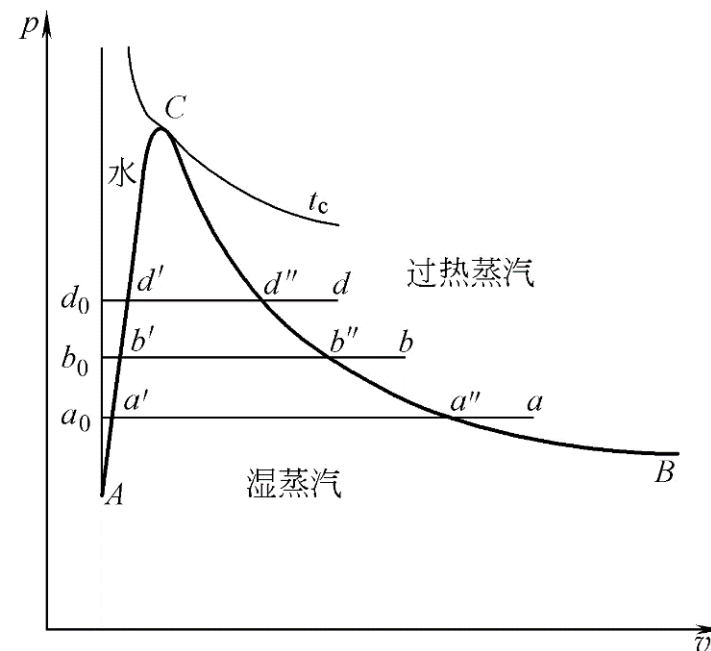
$$v_x \approx xv'' \quad (\text{当 } p \text{ 不太大, } x \text{ 不太小时})$$

7.3 水蒸气表和焓-熵图

例7.3 (1) 150°C的液态水放在密闭容器内，试问其压力范围？

(2) 刚性容器中湿蒸汽加热时，干度增大还是减小？

(1) $P \geq 0.47597 \text{ MPa}$ (饱和水也是液态)



如何在图上表示功和热?

- 插值法在实际使用时过于麻烦
- p - v 图 (面积代表功)、 T - s 图 (面积代表热) → 仍需计算
- 能否用线段表示热和功?

- 锅炉、冷凝器: 等压过程

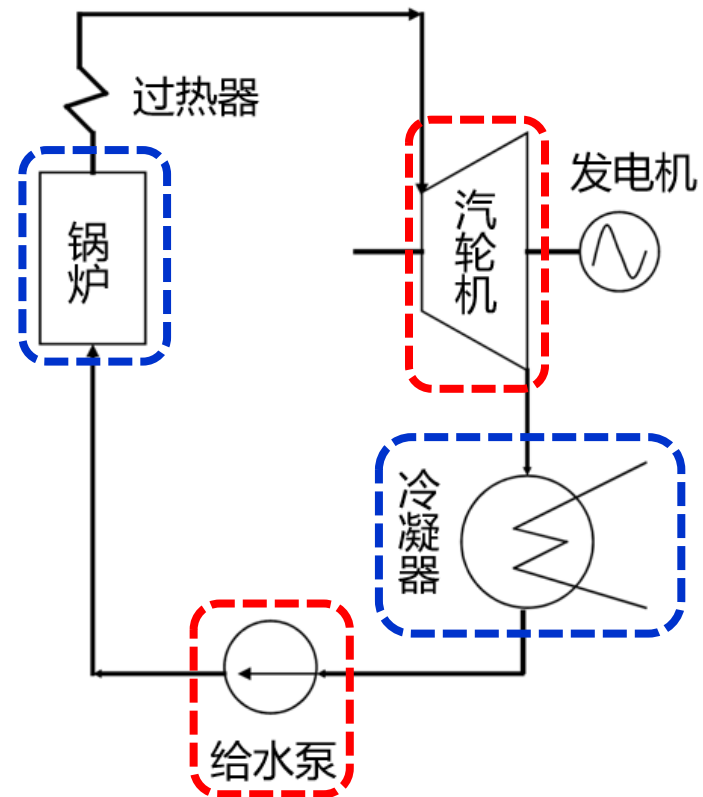
$$q = \Delta h + w_t = \Delta h$$

- 汽轮机、给水泵: 等熵过程

$$w_t = -\Delta h, \Delta s = 0$$

- 焓熵图 (附图1)

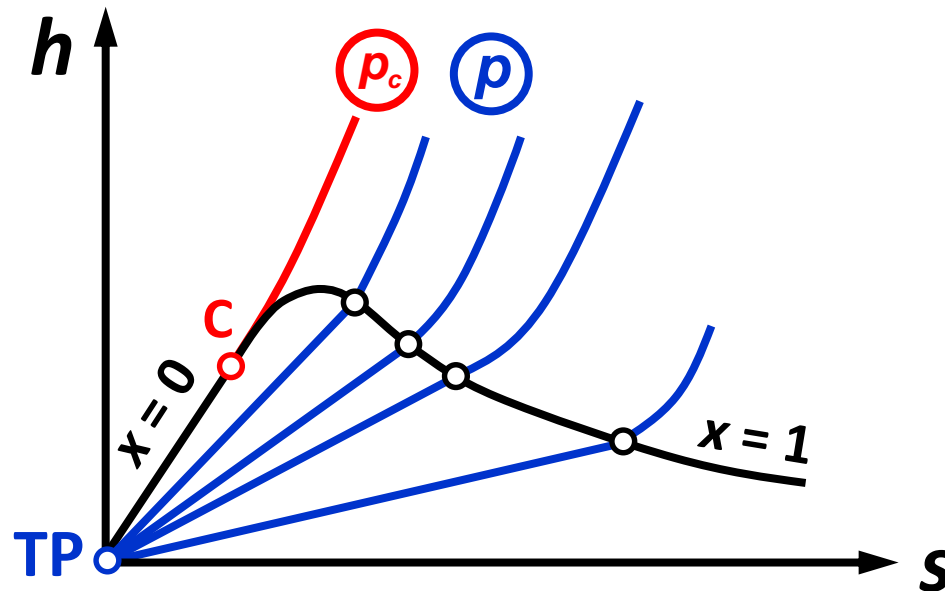
Enthalpy-Entropy / Mollier Diagram



焓熵图的画法

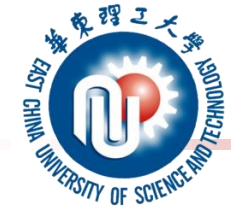
- **零点**: $h = 0, s = 0$ (三相点)
- **饱和汽线 (上界线)、饱和液线 (下界线)**
- **C点**为分界点, 不在极值点上
- **等压线群**: $\delta q = Tds = dh \rightarrow \left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)_p = T > 0$
两相区: T 不变, 斜直线; 单相区: 上翘发散形线

- $\left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)_{p_c} = T_c > 0$





-



7.4 水蒸气热力过程

□ 热力过程：(p) (s) (T) (v)

□ 任务：初终态参数，过程功与热， $p-v$ / $T-s$ / $h-s$ 作图

□ 注意理想气体过程的区别

□ 第一定律与第二定律表达式均成立：

$$\delta q = du + \delta w \rightarrow \text{可逆过程：} \delta w = p dv$$

$$\delta q = dh + \delta w_t \rightarrow \text{可逆过程：} \delta w_t = -v dp$$

$$ds_{iso} \geq 0 \rightarrow \text{可逆过程：} \delta q = T ds$$

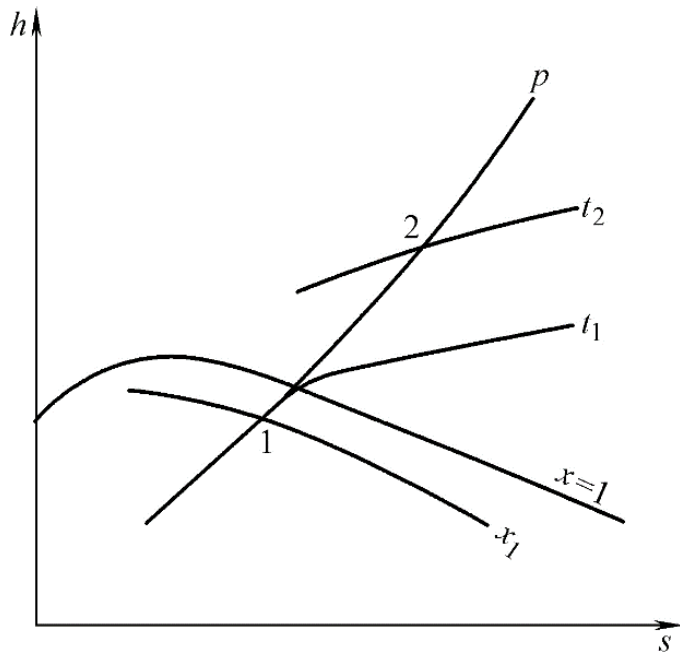
□ 理想气体特有的性质和表达式不能用（水蒸气的 c_p 、 c_v 以及 h 和 u 都不是温度的单值函数）：

$$pv = RT, \quad c_p - c_v = R, \quad c_p / c_v = k$$

$$\Delta u = c_v \Delta T, \quad \Delta h = c_p \Delta T, \quad \Delta s = c_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

7.4 水蒸气的基本热力过程

□ 定压过程



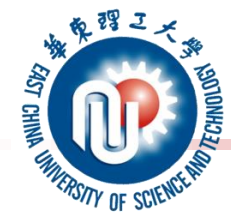
$$q = \Delta h = h_2 - h_1$$

$$\Delta u = h_2 - h_1 - p(v_2 - v_1)$$

$$w = q - \Delta u$$

$$w = p(v_2 - v_1)$$

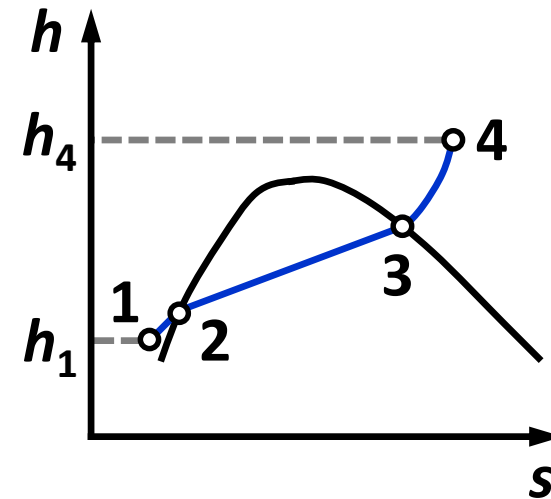
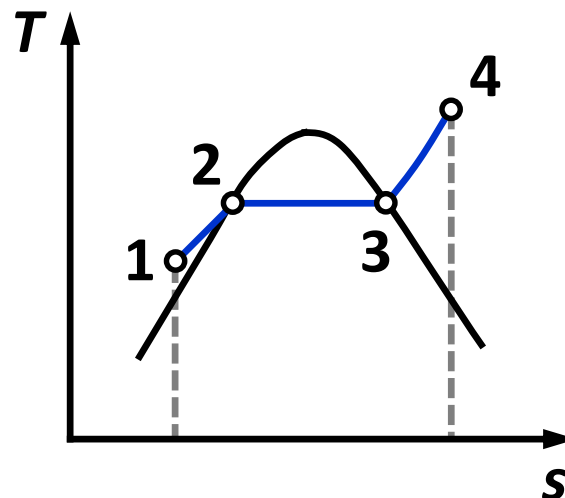
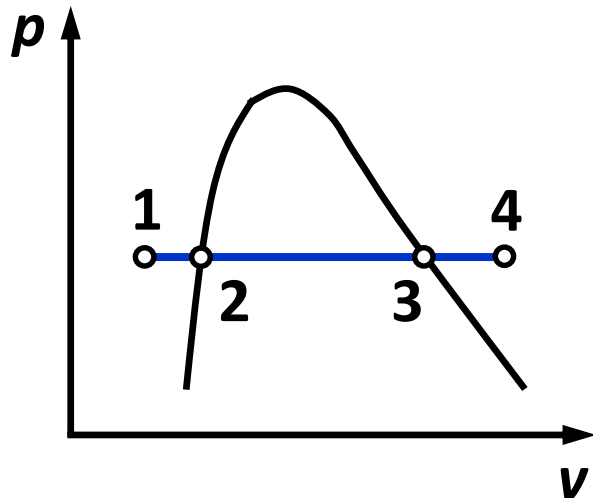
$$w_t = -\int v dp = 0$$



水蒸气的定压 (Isobaric) 过程

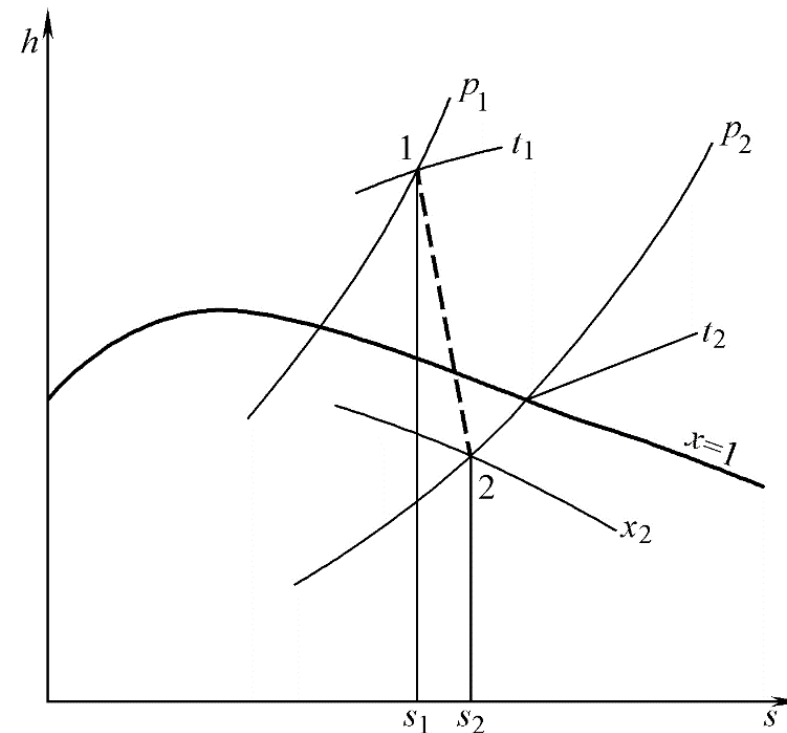
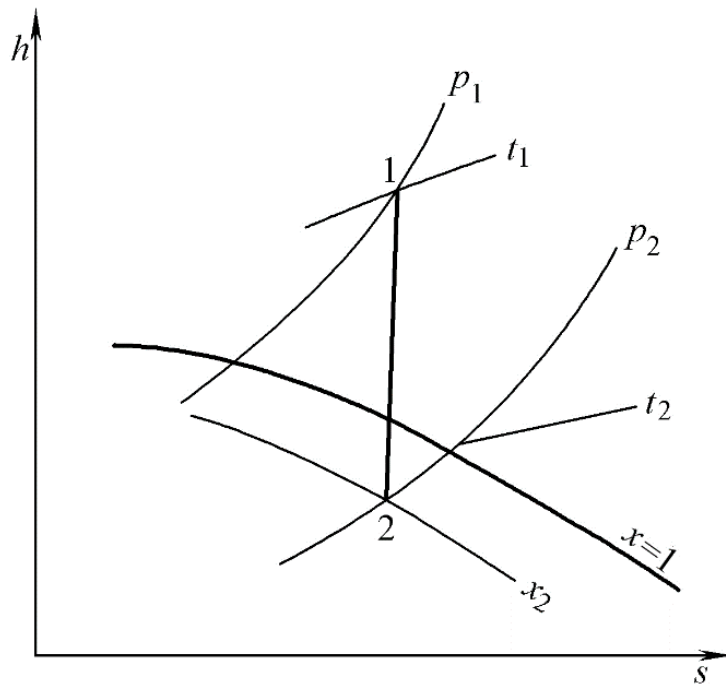
- 锅炉、换热器: $q = \Delta h, w_t = 0$
- 锅炉中, 水从 $30^\circ\text{C} / 4\text{ MPa}$, 定压加热到 450°C
- 查表得 4 MPa 对应 $t_s = 250.33^\circ\text{C} \rightarrow 450^\circ\text{C}$ 为**过热蒸汽**
- 查表得: $h_1 = 129.3\text{ kJ/kg}, h_4 = 3330.7\text{ kJ/kg}$

$$q = h_4 - h_1 = 3201.4\text{ kJ/kg}$$



7.4 水蒸气的基本热力过程

□ 定熵过程

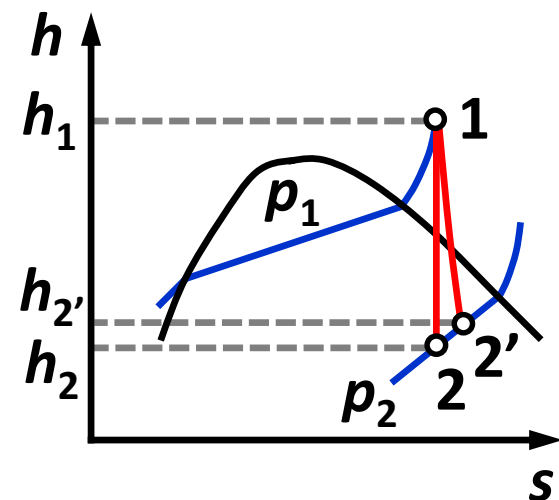
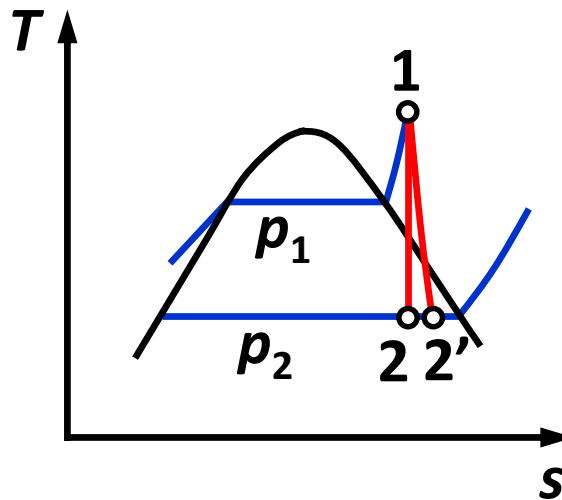
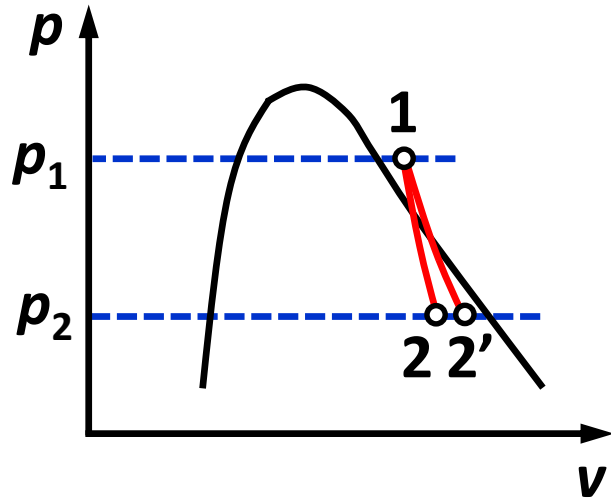


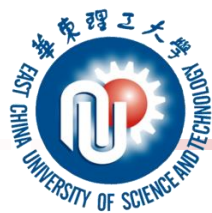
$$q = 0 \quad w_t = -\Delta h$$

$$w = -\Delta u \quad \Delta u = h_2 - h_1 - (p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

水蒸气的绝热 (Isentropic) 过程

- 汽轮机、水泵: $q = 0, w_t = -\Delta h$
- 可逆过程: $1 \rightarrow 2, w_t = h_1 - h_2$
- 不可逆过程: $1 \rightarrow 2', w_{t'} = h_1 - h_{2'}$
- 透平内效率: $\eta_{oi} = \frac{h_1 - h_{2'}}{h_1 - h_2}$





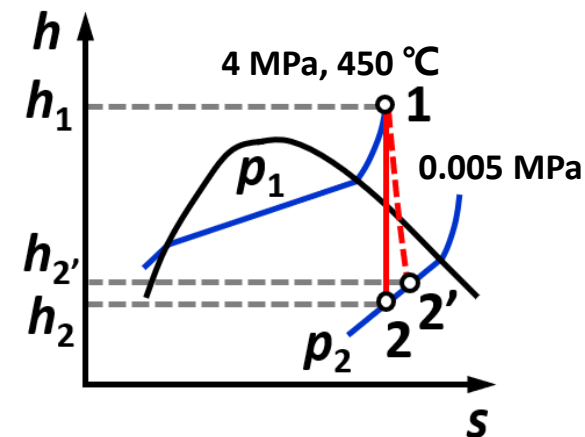
水蒸气的绝热过程举例

□ 汽轮机, $p_1 = 4 \text{ MPa}$, $t_1 = 450^\circ\text{C}$, $p_2 = 0.005 \text{ MPa}$,

$\eta_{oi} = 0.9$, 求: w_t' , $h_{2'}$, $x_{2'}$

□ 方法一: 直接通过焓熵图 (如有)

□ 方法二: 查表



$$p_1, t_1 \rightarrow h_1 = 3330.7 \text{ kJ/kg}, s_1 = 6.9379 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

$$s_2 = s_1 \rightarrow x_2 = \frac{s_2 - s_2'}{s_2'' - s_2'} = \frac{(6.9379 - 0.4762) \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}}{(8.3852 - 0.4762) \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}} = 0.8160$$

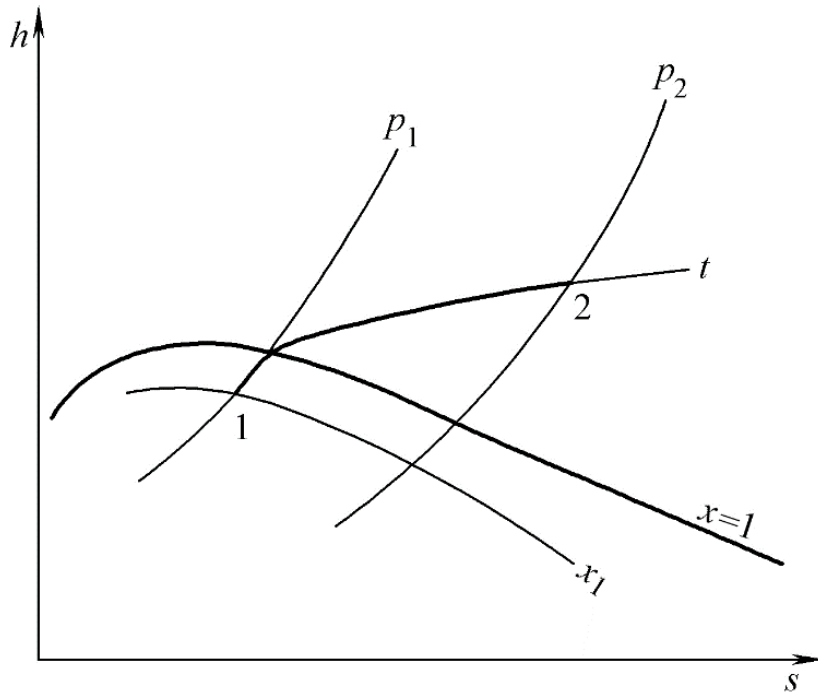
$$h_2 = x_2 h_2'' + (1 - x_2) h_2' = 2115.3 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

$$\eta_{oi} = \frac{h_1 - h_{2'}}{h_1 - h_2} = \frac{w_t'}{w_t} \rightarrow w_t' = (h_1 - h_2) \eta_{oi} = 1093.9 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

$$h_{2'} = h_1 - w_t' = 2236.8 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}, x_{2'} = \frac{h_{2'} - h_2'}{h_2'' - h_2'} = 0.866$$

7.4 水蒸气的基本热力过程

□ 定温过程



$$q = T(s_2 - s_1)$$

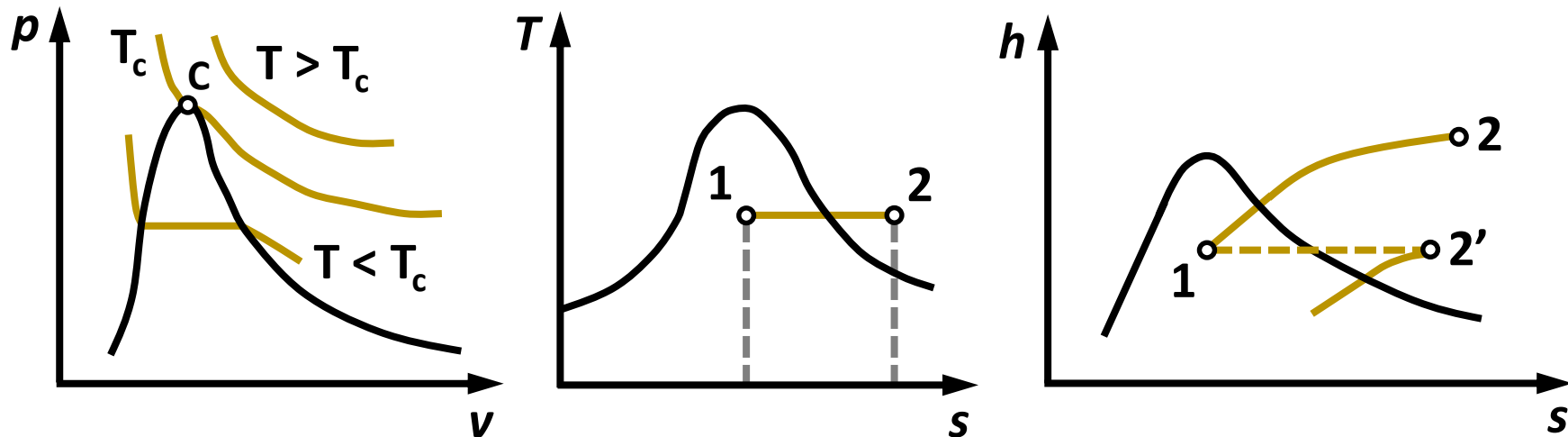
$$w = q - \Delta u$$

$$w_t = q - \Delta h$$

$$\Delta u = h_2 - h_1 - (p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

水蒸气的定温 (Isothermal) 过程

- 实际设备中很少见
- p - v 图：远离饱和线时，接近于理想气体
- 可逆过程： $q = T\Delta s$, $w_t = q - \Delta h$
- 理想气体： $1 \rightarrow 2'$
- 绝热节流：焓不变，但温度发生变化（实际气体）
- 干度的测量原理

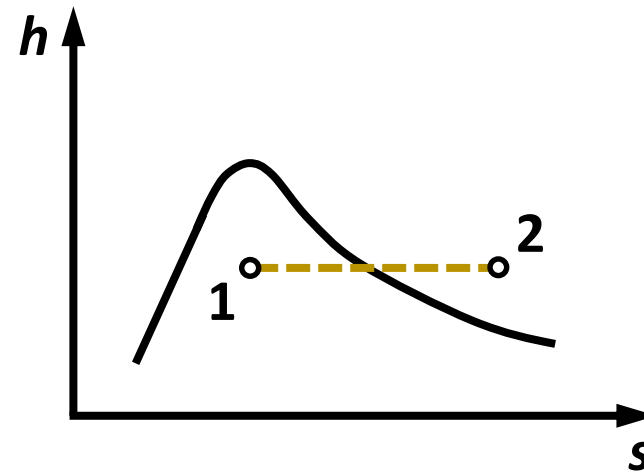
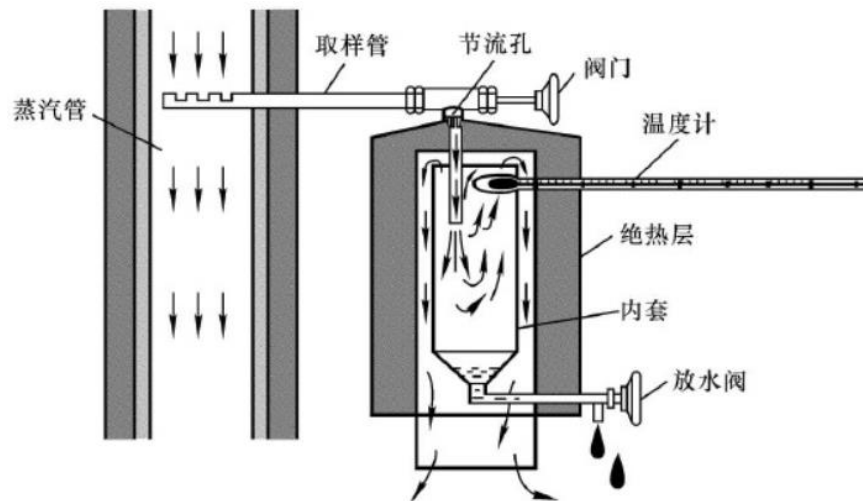


湿蒸汽的干度测量装置

- 湿蒸汽的 p 和 T 相互依赖，因此无法直接确定干度 x
- 蒸汽节流法检测原理：

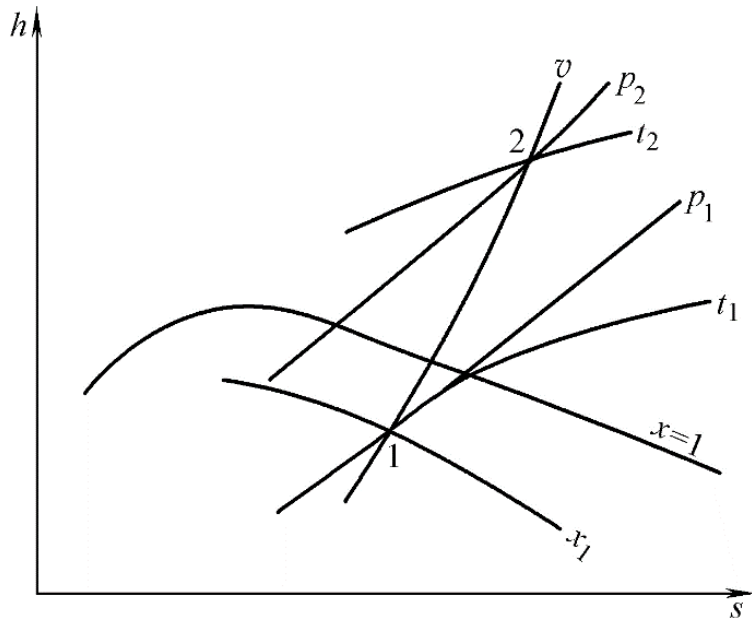
湿蒸汽 \rightarrow 节流阀降压 \rightarrow 过热蒸汽 (p_2 和 T_2 相互独立)

分别测得 p_2 和 $T_2 \rightarrow h_2 \rightarrow h_1 = h_2 \rightarrow x = \frac{h_1 - h_1'}{h_1'' - h_1'}$



7.4 水蒸气的基本热力过程

□ 定容过程

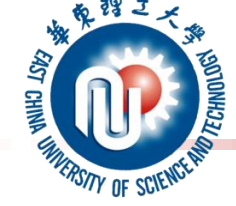


$$w = \int p dv = 0$$

$$q = \Delta u$$

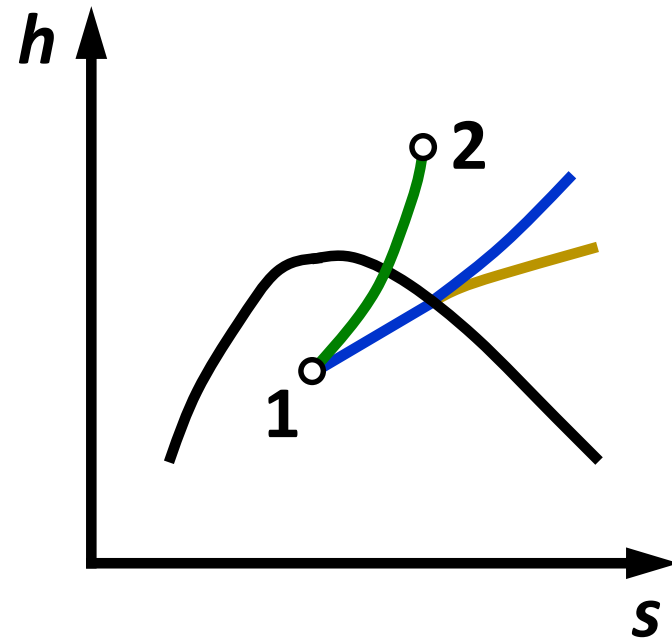
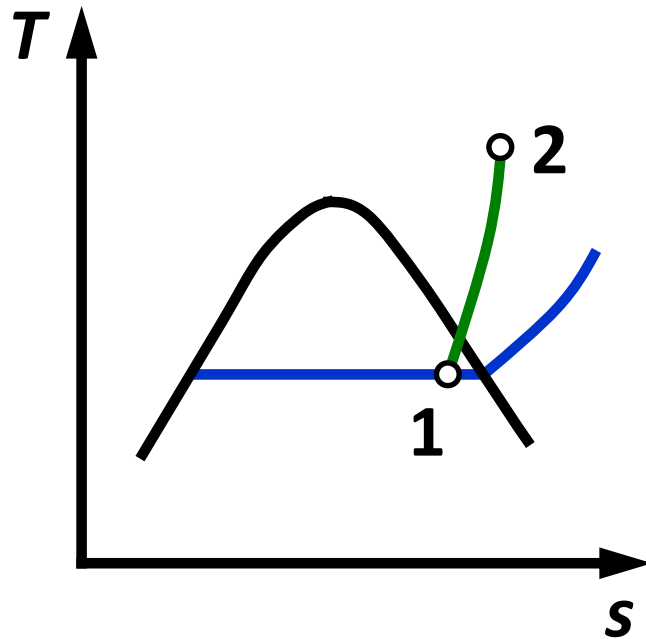
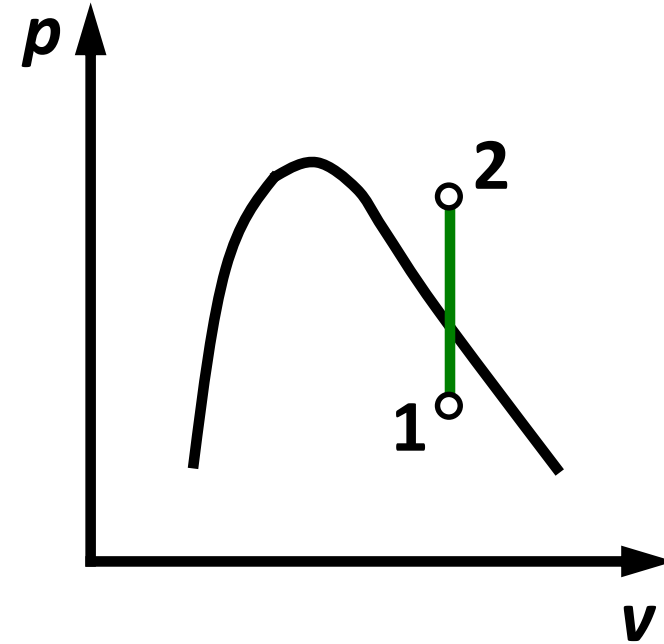
$$\Delta u = h_2 - h_1 - v(p_2 - p_1)$$

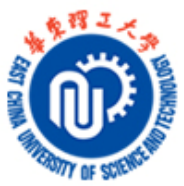
$$w_t = -\int_{p_1}^{p_2} v dp = v(p_1 - p_2)$$



水蒸气的定容 (Isochoric) 过程

- 实际设备中不常见
- $\left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)_v = T + v \left(\frac{\partial p}{\partial s}\right)_v$
- 比等压线陡





7.4 水蒸气的基本热力过程

例7.4 试在 p - v 图和 T - s 图上表示出下列过程

- (1) 过热蒸汽在定压下冷却到刚开始形成液体;
- (2) $x=0.6$ 的湿饱和蒸汽在定容下加热到 $x=1$;
- (3) $x=0.5$ 的湿饱和蒸汽在 200°C 下定温加热到体积增加4.67倍。



7.4 水蒸气的基本热力过程

例7.5 将2kg水盛于容积为 0.2m^3 的抽空了的密闭刚性容器中,然后加热到 200°C ,试求容器中(1)压力;(2)焓;(3)蒸汽的质量和体积。

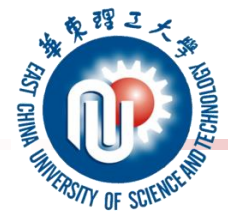
例7.6 过热蒸汽在 0.6MPa 压力下,从 200°C 定压加热至 300°C ,试求此过程中热量、功量及热力学能的变化量。



7.4 水蒸气的基本热力过程

例7.7 某锅炉，由锅筒出来的蒸汽，经测定其压力 $P=0.8\text{MPa}$ ，干度 $x=0.9$ ，进入过热器在定压下加热，温度升高至 $t_2=250^\circ\text{C}$ ，求每千克蒸汽在过热器中吸收的热量。

例7.8 5MPa , $t_1=400^\circ\text{C}$ 的蒸汽进入汽轮机绝热膨胀至 0.005MPa 。设环境温度为 20°C ，求(1)若过程可逆， 1kg 蒸汽所做的膨胀功和技术功各为多少？(2)若汽轮机实际过程做的功为可逆过程的88%，其做功能力损失为多少？



第七章 小结 (Summary)

- 熟悉 p - T 相图 (三维图无需记忆)
- 熟悉 “1点、2线、3区、5态”
- 会查图和表
- 熟练掌握基本热力过程在 p - v 、 T - s 、 h - s 图上的表示,
并能计算 q 、 w_t (“蒸汽动力循环” 会用到)
- 注意与理想气体比较, 哪些公式可用、 哪些不能用