

# 第五章

# 水蒸气及其热力过程



# 本章需掌握内容

## 基本概念：

- ① 水的pT相图 (P12)
- ② 1点2线3区5态 (P19)

## 知识运用：

- ① 查表
- ② 基本热力过程计算

# 作业

**5-1**

**5-3**

**5-7**

**5-8**

# 主要内容

**§5-1 水蒸气的产生过程**

**§5-2 水和水蒸气状态参数**

**§5-3 水蒸气的热力过程**

# 水蒸气是实际气体的代表

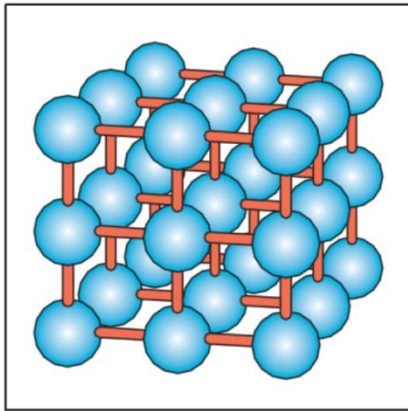
**水蒸气** { 在湿空气中含量极小，当作**理想气体**  
一般情况下，为**实际气体**，使用图表

- ➡ 18世纪，蒸汽机的发明，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

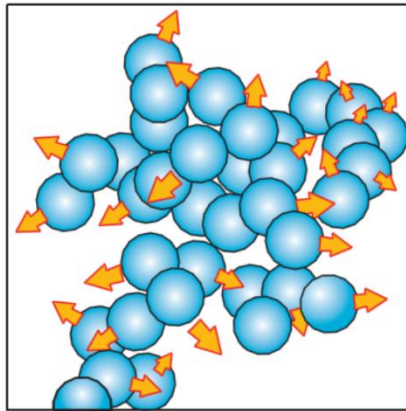
# 水的三态

物质三种聚集状态: **Solid** 固态、**Liquid** 液态、**Gas** 气态

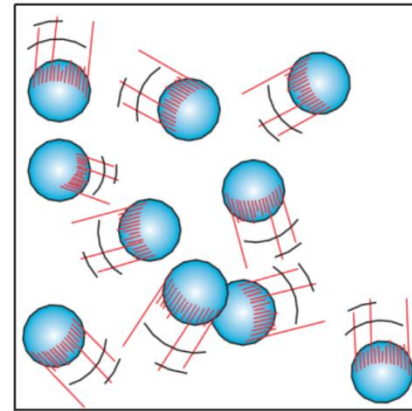
水的三态: **冰**、**水**、**蒸汽**  
**Ice** **Water** **Steam**



(a)



(b)

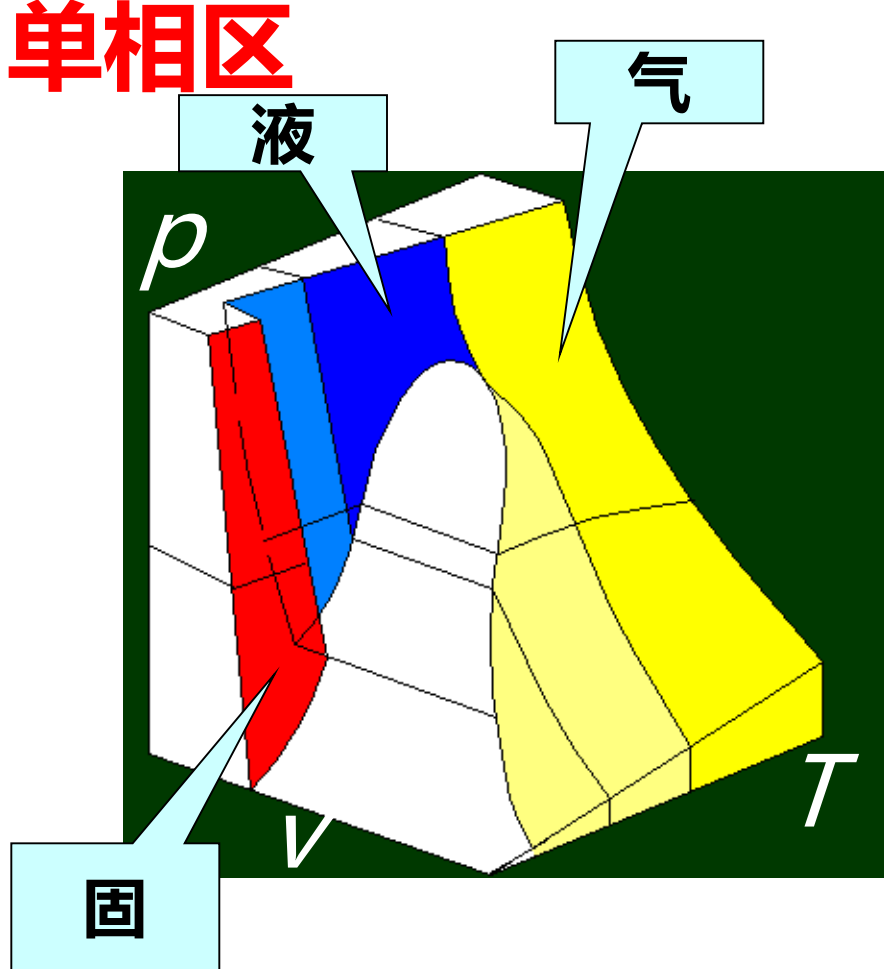


(c)

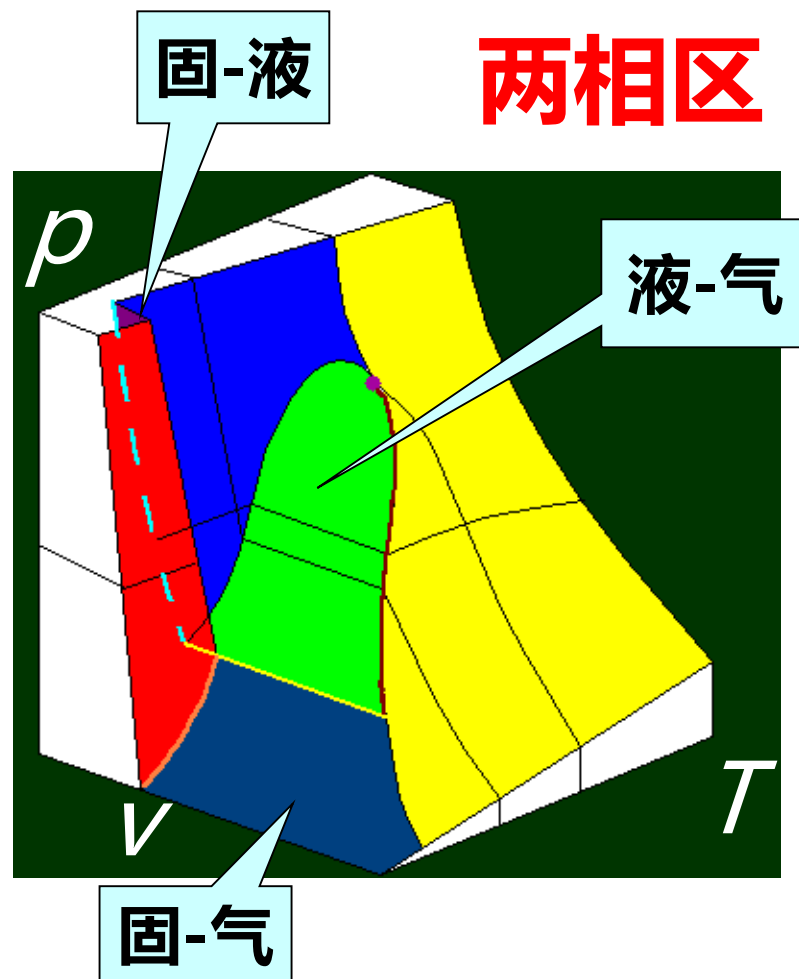
**热力学面:** 以 $p, v, T$ 表示的物质各种状态的曲面

# 水的热力学面

单相区



两相区

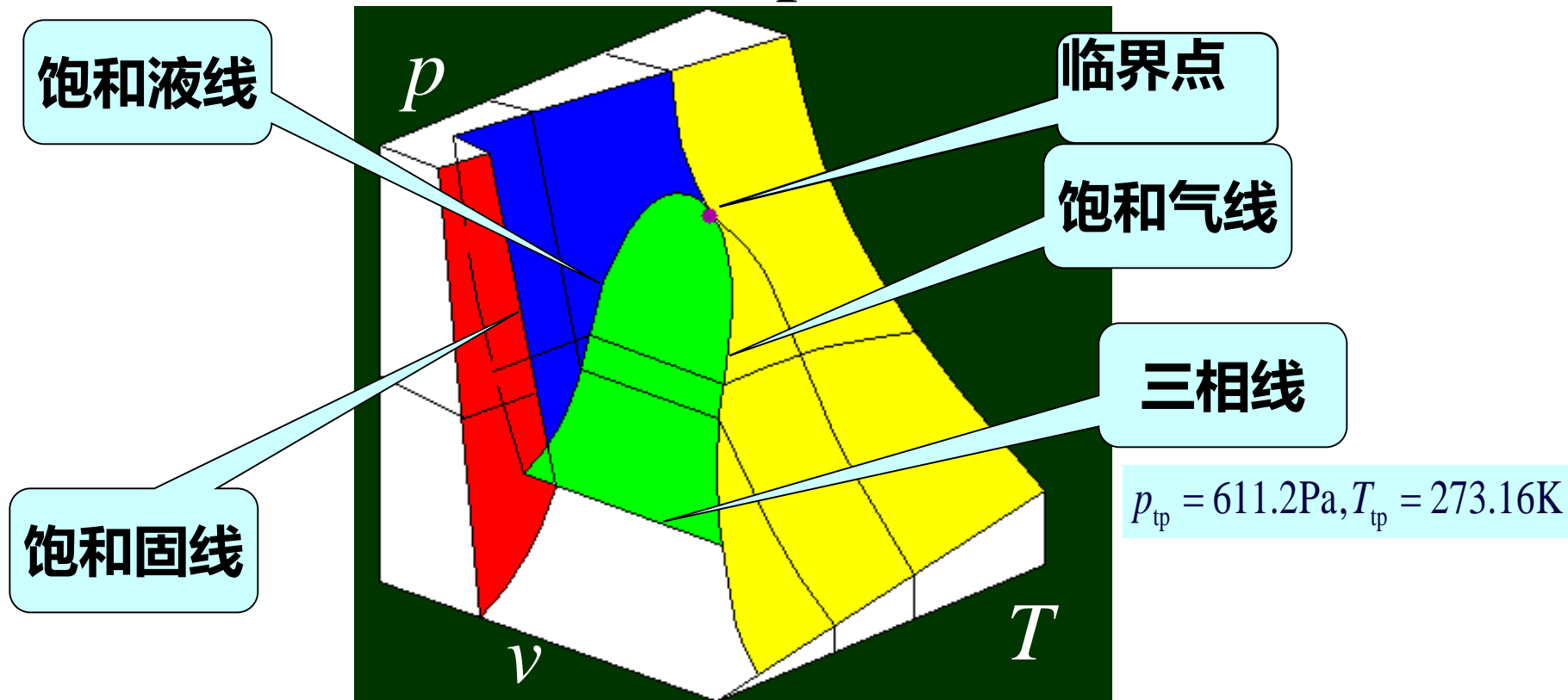


六个区：三个单相区、三个两相区

# 饱和线、三相线和临界点

Saturation line

Triple line



四个线：三个饱和线、一个三相线

一个点：临界点

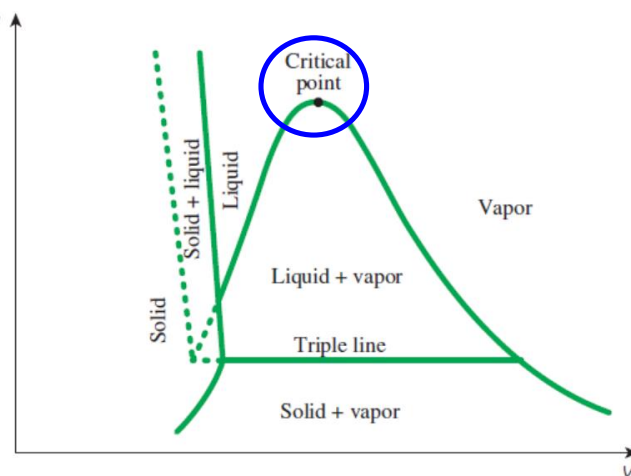


# 临界点 Critical point

临界点

饱和液线与饱和气线的交点  
气液两相共存的  $p_{\max}, T_{\max}$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_{T_c} = 0, \left(\frac{\partial^2 p}{\partial v^2}\right)_{T_c} = 0$$

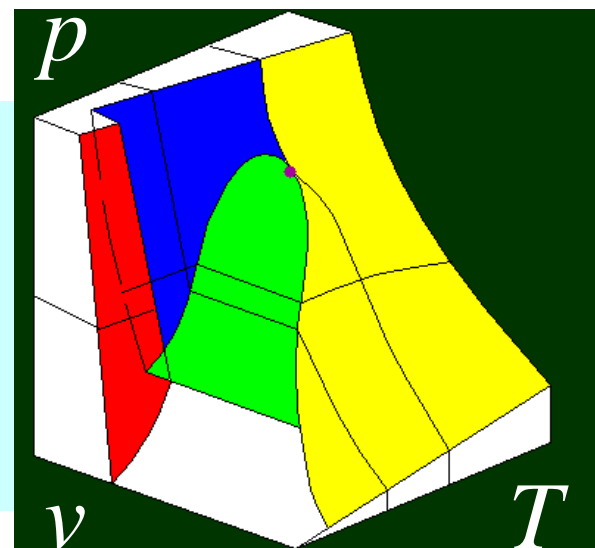


水的  
临界点  
状态

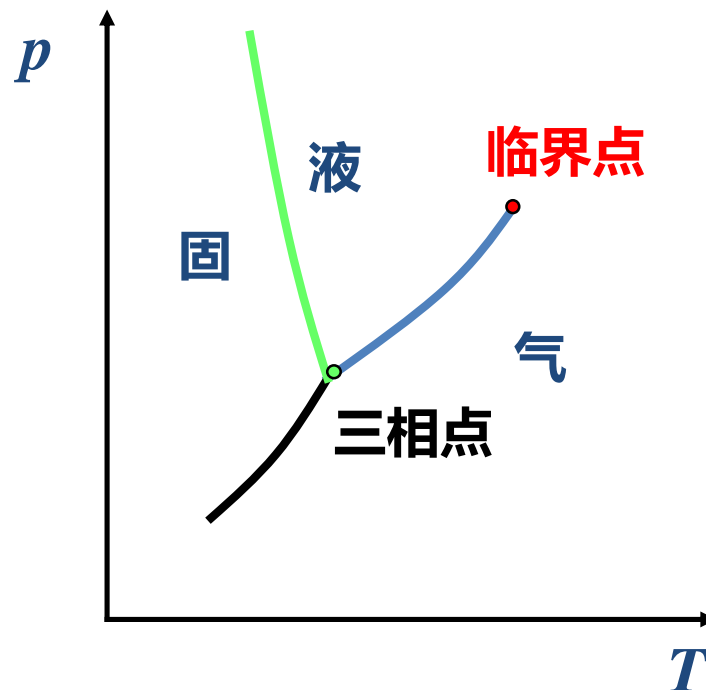
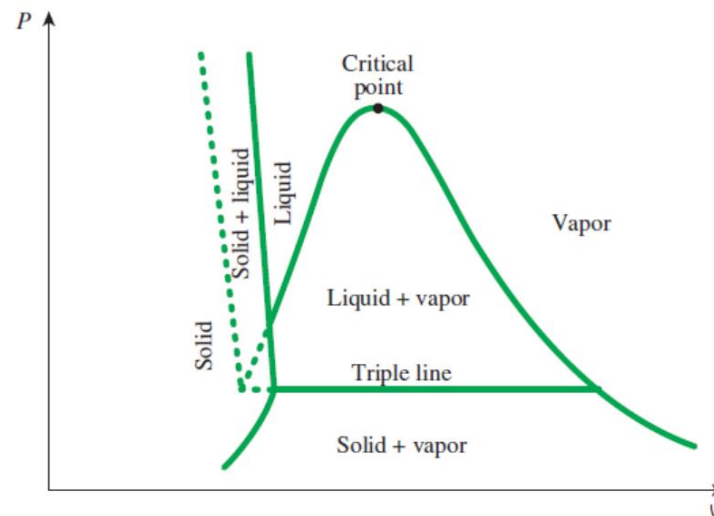
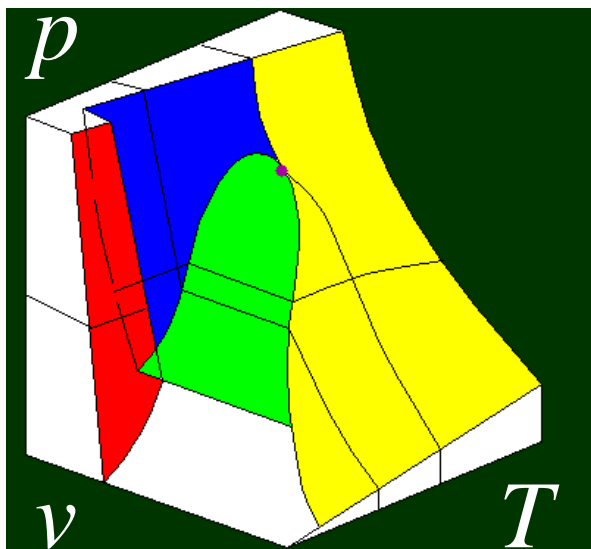
$$p_c = 22.129 \text{ MPa}$$

$$T_c = 647.30 \text{ K} \quad (374.15^\circ \text{C})$$

$$v_c = 0.00326 \text{ m}^3/\text{kg}$$



# $P$ - $T$ 和 $P$ - $v$ 图



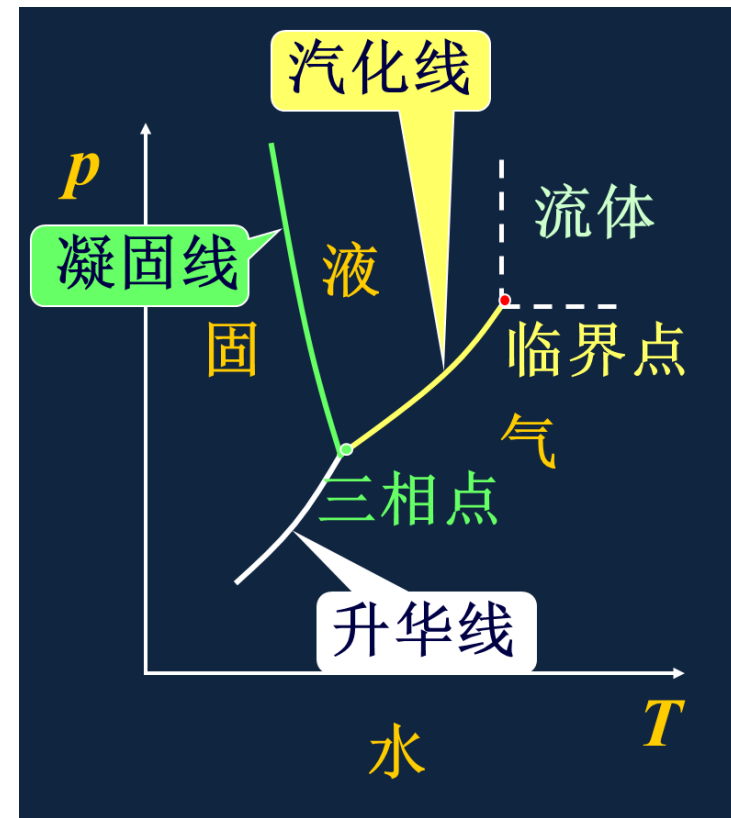
- 两相区: 定 $p$ 即定 $T$ , 两相区的面都平行于 $v$ 坐标, 称为规则面, 在 $p$ - $T$ 图上投影为线;

- 三相共存线: 定 $p$ 定 $T$ 线, 在 $p$ - $T$ 图上为一点;

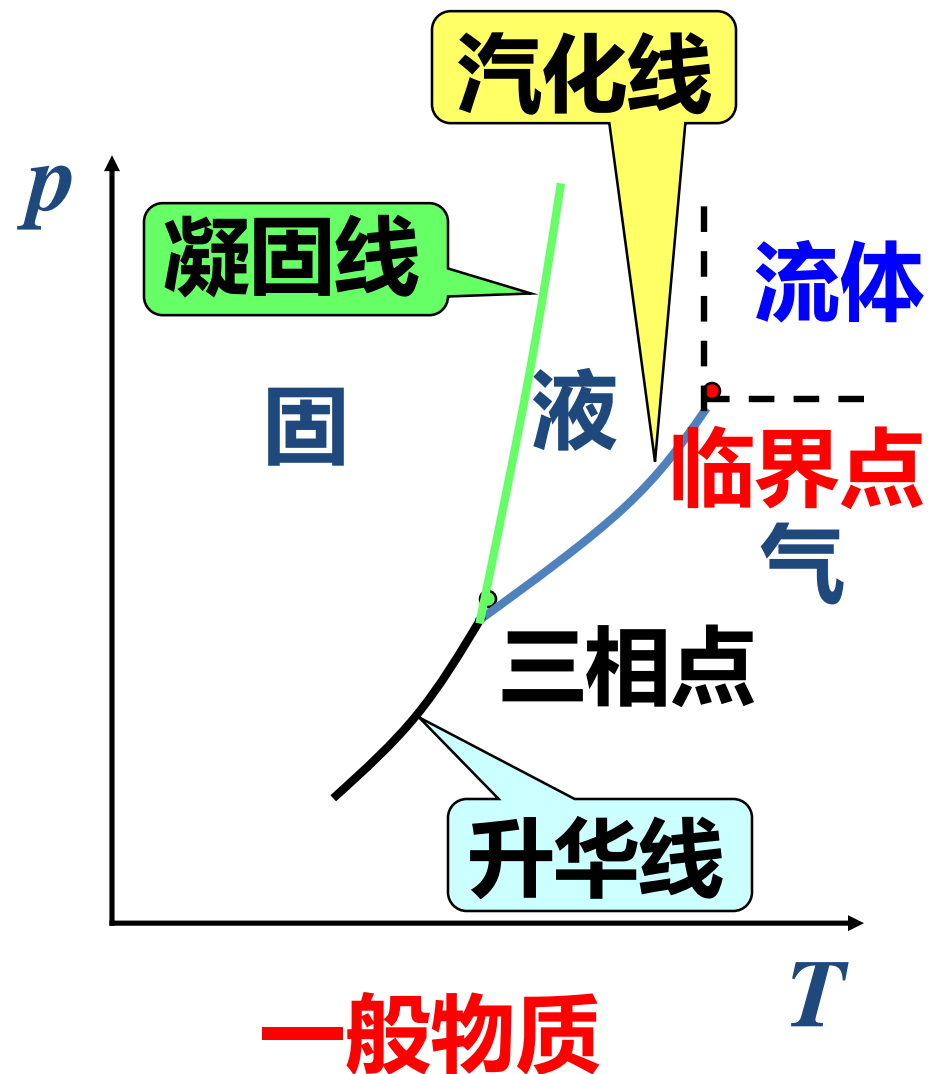
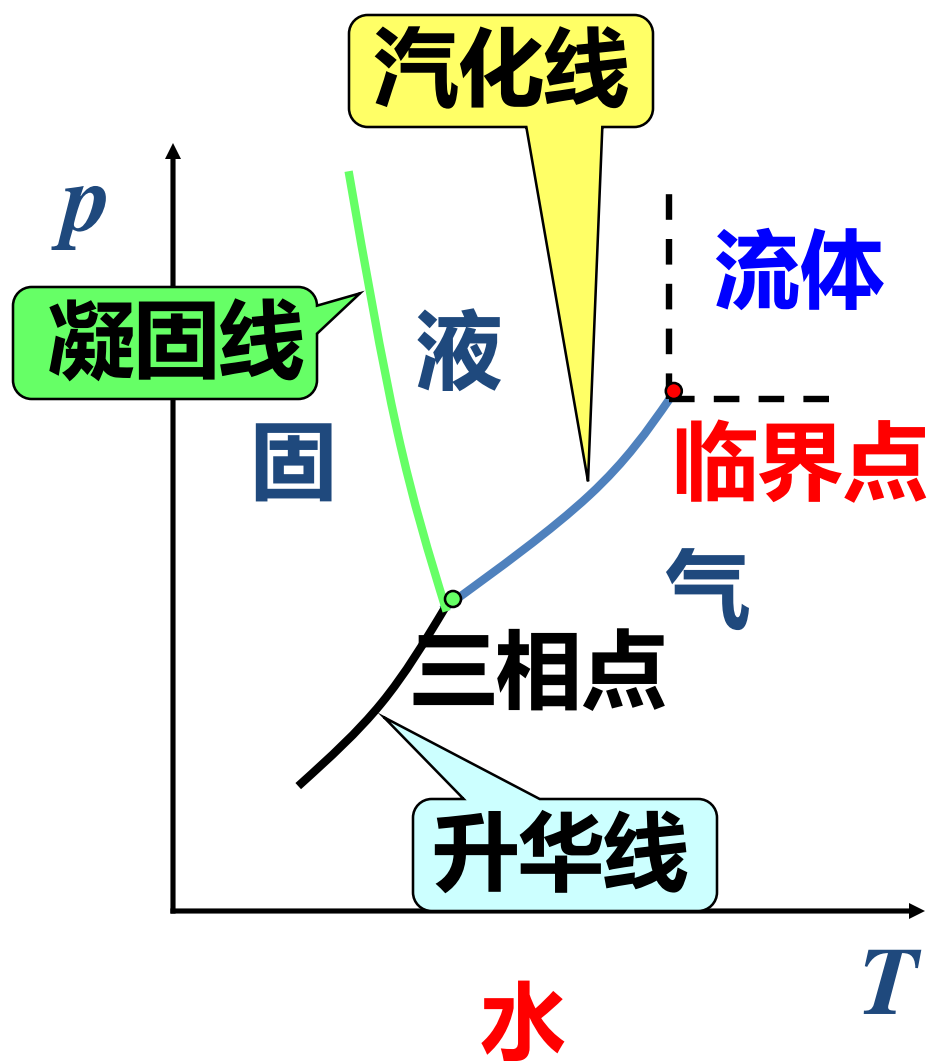
- 临界点C: 标志着液相与蒸汽相区别的终止, C以外两相合并;

- 液相: 定 $T$ 下,  $p$ 降低, 液相转化为气相; 汽相: 定 $p$ ,  $T$ 下降, 汽相转化为液相;

- 流体区: 在C点以上的区, 汽液分不清, 人为定义为流体区, 定 $p$ 下 $T$ 下降, 不液化, 定 $T$ 时 $p$ 下降, 不汽化。



# 纯物质的 $p$ - $T$ 相图



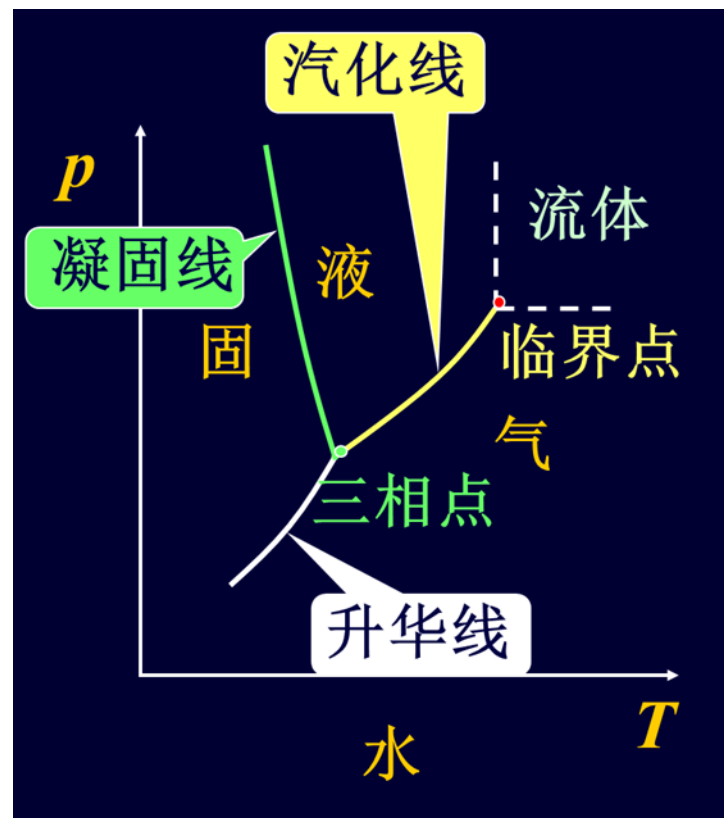
水的重要特性：当液变固(水变冰)时体积膨胀，熔解线向左倾斜。

- **升华：**

低于三相点温度

北方冬天晾在外边的衣服

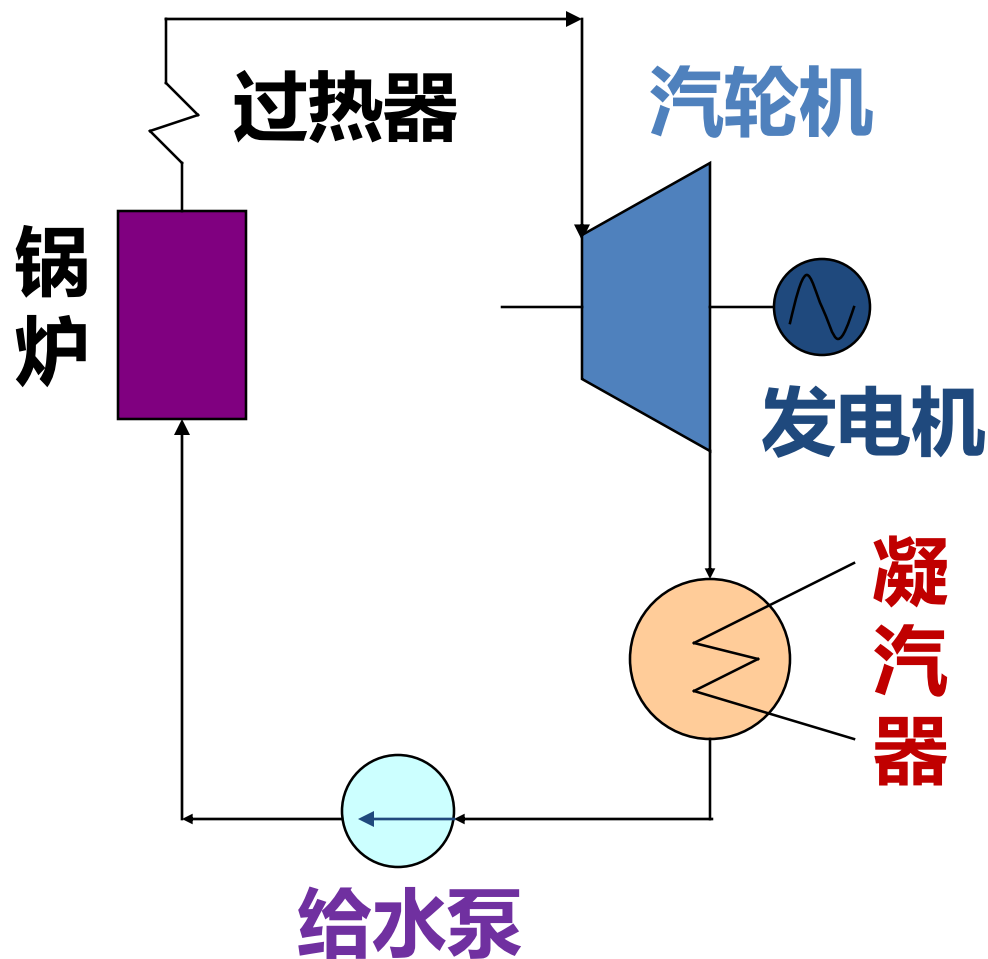
虽然冻硬，仍可变干



**思考题：** 有没有500 °C的水？ 没有。  $t > 374.15\text{ °C}$   
有没有-3 °C的蒸汽？ 有。

# 汽相和液相

因固相不流动，  
更关心汽液两相



# §5-1 水蒸气的产生过程

**汽化：**由液态变成气态的物理过程  
(不涉及化学变化)

{ **蒸发：**汽液表面上的汽化(大海表面) **Vaporization**  
{ **沸腾：**表面和液体内部同时发生的汽化(烧开水) **Boiling**

**饱和状态：汽化与凝结的动态平衡**

在密闭容器中，加热液体达到一定温度 $T$ ，液体汽化，同时气体分子回到液体中凝结。刚开始汽化占优势，随着蒸气密度的上升，返回液体凝结的分子增加。过一段时间总有汽化分子数与凝结分子数平衡，即达到一个动态的平衡。

# 饱和状态 Saturation state

饱和状态：汽化与凝结的动态平衡

Saturation temperature

饱和温度  $T_s$   
饱和压力  $p_s$  } 一一对应

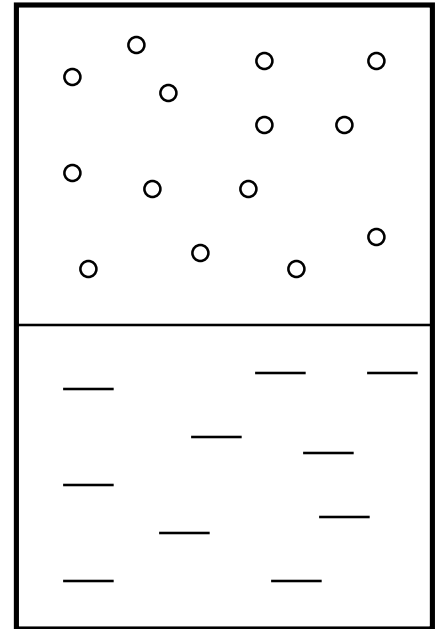
Saturation pressure

$T_s$  ↑  $p_s$  ↑

$p_s = 1.01325 \text{ bar}$  →  $T_s = 100 \text{ }^\circ\text{C}$

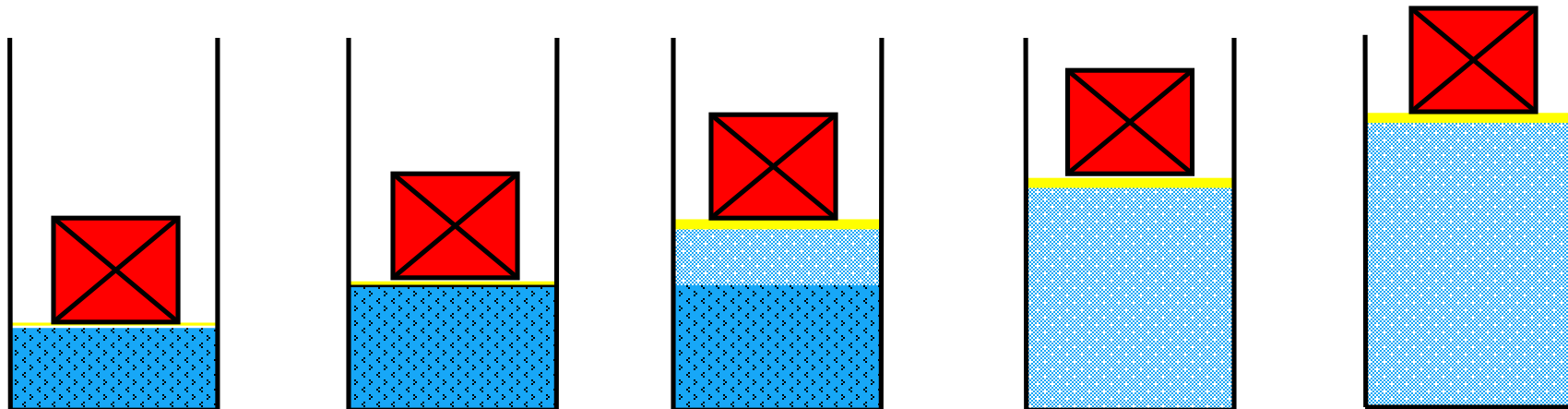
青藏  $p_s = 0.6 \text{ bar}$  →  $T_s = 85.95 \text{ }^\circ\text{C}$

高压锅  $p_s = 1.6 \text{ bar}$  →  $T_s = 113.32 \text{ }^\circ\text{C}$





# 水蒸气的定压发生过程



$$t < t_s$$

未饱和水

$$v < v'$$

$$h < h'$$

$$s < s'$$

$$t = t_s$$

饱和水

$$v = v'$$

$$h = h'$$

$$s = s'$$

$$t = t_s$$

饱和湿蒸气

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

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

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

$$t = t_s$$

饱和干蒸气

$$v = v''$$

$$h = h''$$

$$s = s''$$

$$t > t_s$$

过热蒸气

$$v > v''$$

$$h > h''$$

$$s > s''$$

水预热

汽化

过热



# 水蒸气定压发生过程说明



(1) 
$$Q = \Delta U + W = \Delta U + \int p dV$$
$$= \Delta U + p\Delta V = \Delta U + \Delta(pV) = \Delta H$$

(2) 理想气体  $h = f(T)$

实际气体汽化时,  $T = T_s$  不变, 但  $h$  增加

$$h'' - h' = \gamma \quad \text{汽化潜热}$$

(3) 
$$\Delta S = \Delta S_f + \Delta S_g > 0$$

只有熵加热时永远增加

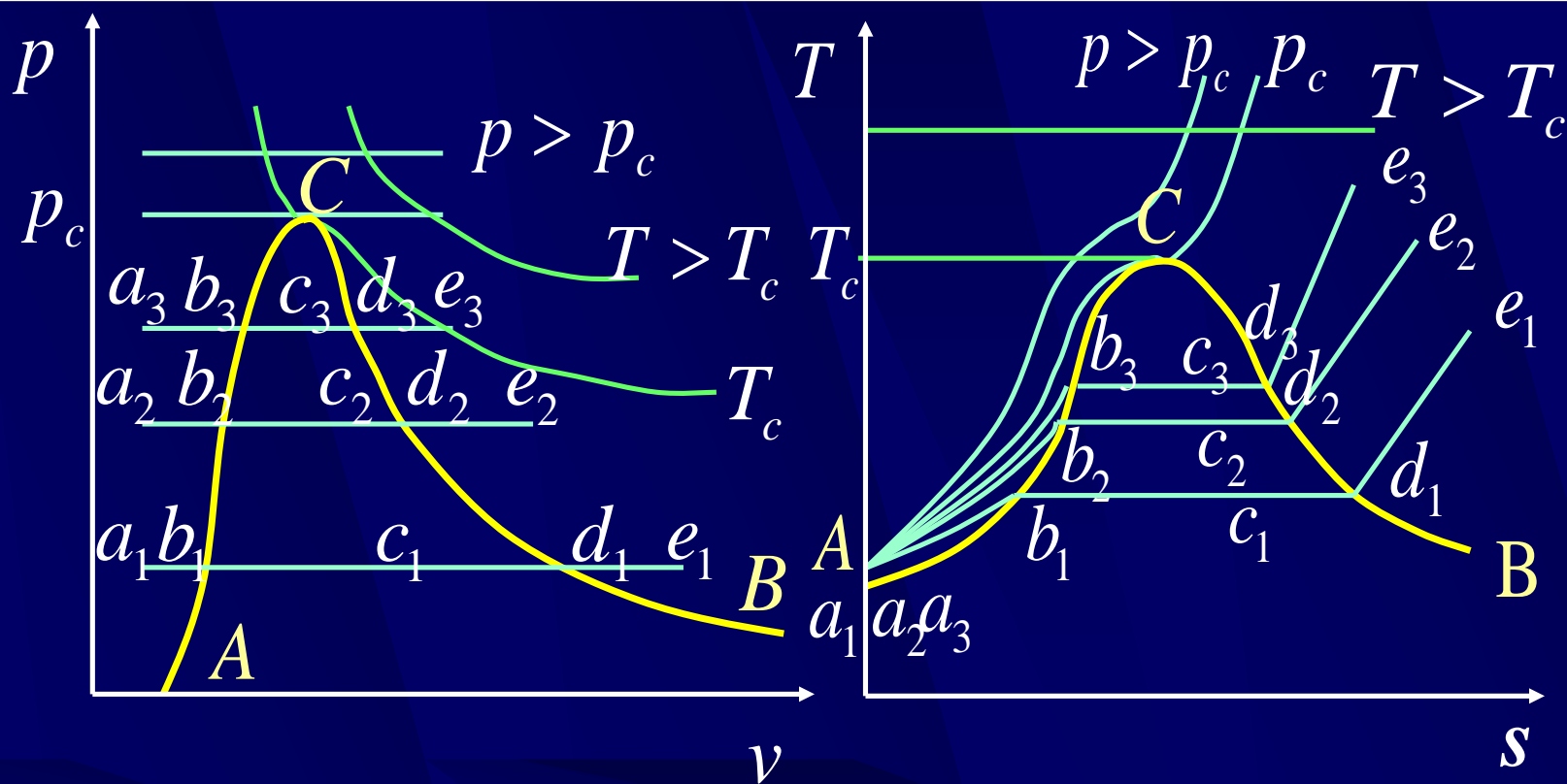
(4) 未饱和水      过冷度       $\Delta t_{\text{过冷}} = t_s - t$       过冷水  
过热蒸汽      过热度       $\Delta t_{\text{过热}} = t - t_s$

# p-v图, T-s图上的水蒸气定压加热过程

临界点, 饱和水线和饱和汽线,

过冷水、湿蒸汽、过热蒸汽三区,

过冷水、饱和水、湿蒸汽、饱和蒸汽、过热蒸汽



# 等压线上饱和态参数

$p$ (bar)	$t_s$ (°C)	$\nu'$ (m <sup>3</sup> /kg)	$\nu''$	$s'$ kJ/(kg.K)	$s''$
0.006112	0.01	0.00100022	206.175	0.0	9.1562
1.0	99.63	0.0010434	1.6946	1.3027	7.3608
5.0	151.85	0.0010928	0.37481	1.8604	6.8215
50.0	263.92	0.0012858	0.03941	2.9209	5.9712
221.29	374.15	0.00326	0.00326	4.429	4.429
		$b$	$d$	$b$	$d$

# §5-2 水和水蒸气状态参数

$p$ 、 $T$ 、 $v$ 、 $h$ 、 $s$

## 水和水蒸气状态参数确定的原则

### 1. 未饱和水及过热蒸汽

确定任意两个独立参数，如： $p$ 、 $T$

### 2. 饱和水和干饱和蒸汽

确定 $p$ 或 $T$

### 3. 湿饱和蒸汽

除 $p$ 或 $T$ 外，其它参数与两相比比例有关

# 两相比比例由干度 $x$ 确定

定义

$$x = \frac{\text{干饱和蒸汽质量}}{\text{湿饱和蒸汽质量}} = \frac{m_v}{m_v + m_f}$$

干饱和蒸汽

饱和水

对干度 $x$ 的说明：

- $x = 0$  饱和水  $x = 1$  干饱和蒸汽
- 湿蒸汽  $0 \leq x \leq 1$
- 在过冷水和过热蒸汽区域,  $x$  无意义

# 湿饱和蒸汽区状态参数的确定

如果有**1**kg湿蒸汽，干度为 **$x$** ，即有 **$x$** kg饱和蒸汽， **$(1-x)$** kg饱和水。

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

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

$$s = xs'' + (1-x)s'$$

$$x = \frac{h - h'}{h'' - h'}$$

$$= \frac{v - v'}{v'' - v'}$$

$$= \frac{s - s'}{s'' - s'}$$

已知 **$p$** 或 **$T$** ( $h', v', s', h'', v'', s''$ )

+**干度** $x \rightarrow h, v, s$

# 水和水蒸气表

## 两类水及水蒸气表

### 1. 饱和水和干饱和蒸气表

附表5、附表6

### 2. 未饱和水和过热蒸汽表

附表7



# 饱和水和饱和水蒸气表（按温度排列）



$t / ^\circ\text{C}$	$T / \text{K}$	$p / \text{MP}_a$	$v' / \text{m}^3 / \text{kg}$	$v'' / \text{m}^3 / \text{kg}$	$h' / \text{kJ} / \text{kg}$	$h'' / \text{kJ} / \text{kg}$	$s' / \text{kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K})$	$s'' / \text{kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K})$
0.01	273.16	0.000611	0.00100022	206.175	0.000614	2501.0	0.0000	9.1562
100	373.15	0.101325	0.0010437	1.6738	419.06	2676.3	1.3069	7.3564
200	473.15	1.5551	0.0011565	0.12714	825.4	2791.4	2.3307	6.4289
300	573.15	8.5917	0.0014041	0.02162	1345.4	2748.4	3.2559	5.7038

# 饱和水和饱和水蒸气表（按压力排列）

$p / \text{MP}_a$	$r / \text{kJ} / \text{kg}$	$t / ^\circ\text{C}$	$v' / \text{m}^3 / \text{kg}$	$v'' / \text{m}^3 / \text{kg}$	$h' / \text{kJ} / \text{kg}$	$h'' / \text{kJ} / \text{kg}$	$s' / \text{kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K})$	$s'' / \text{kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K})$
0.001	2484.5	6.982	0.0010001	129.208	29.33	2513.8	0.1060	8.9756
0.1	2258.2	99.63	0.0010434	1.6946	417.51	2675.7	1.3027	7.3608
1.0	2014.4	179.88	0.0011274	0.19430	762.6	2777.0	2.1382	6.5847
10	1315.8	310.96	0.0014526	0.01800	1408.6	2724.4	3.3616	5.6143

# 未饱和水和过热蒸汽表（节录）



$p$	$0.01MPa$			$0.02MPa$		
饱和参数	$t_s = 45.83$			$t_s = 60.09$		
	$v' = 0.0010102$	$v'' = 14.676$		$v' = 0.0010172$	$v'' = 7.6515$	
	$h' = 191.84$	$h'' = 2584.4$		$h' = 251.46$	$h'' = 2609.6$	
	$s' = 0.6493$	$s'' = 8.1505$		$s' = 0.8321$	$s'' = 7.9092$	
$t$	$v$	$h$	$s$	$v$	$h$	$s$
0	0.0010002	0.0	-0.0001	0.0010002	0.0	-0.0001
40	<u>0.0010078</u>	<u>167.4</u>	<u>0.5729</u>	0.0010078	167.5	0.5721
60	15.34	2611.3	8.1752	<u>0.0010171</u>	<u>251.1</u>	<u>0.8310</u>
80	16.27	2649.3	8.3437	8.119	2647.8	8.0205
120	18.12	2725.4	8.5479	9.052	2724.4	8.2261

# 说明1：表的出处和零点的规定

表依据1963年第六届国际水和水蒸气会议发表的国际骨架表编制，尽管IFC（国际公式化委员会）1967和1997年先后发表了分段拟合的水和水蒸气热力性质公式，但图表更加直观。

## 焓、内能、熵零点的规定：

原则上可任取零点，国际上统一规定。

水的三相点  $T = 273.16K$      $u = 0$      $s = 0$

$h = u + pv$  原则上不为0

$$p = 611.2Pa \quad v = 0.00100022 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h = u + pv = 0.6 \text{ J/kg} = 0.0006 \text{ kJ/kg} \approx 0$$

## 说明2：直线内插法

已知某一参数(如P)值为a、b，其对应的另一参数值(如h)查表为m、n，欲求P为c时h的值q，则由直线内插法得：

$$q = m + \frac{c - a}{b - a} (n - m)$$

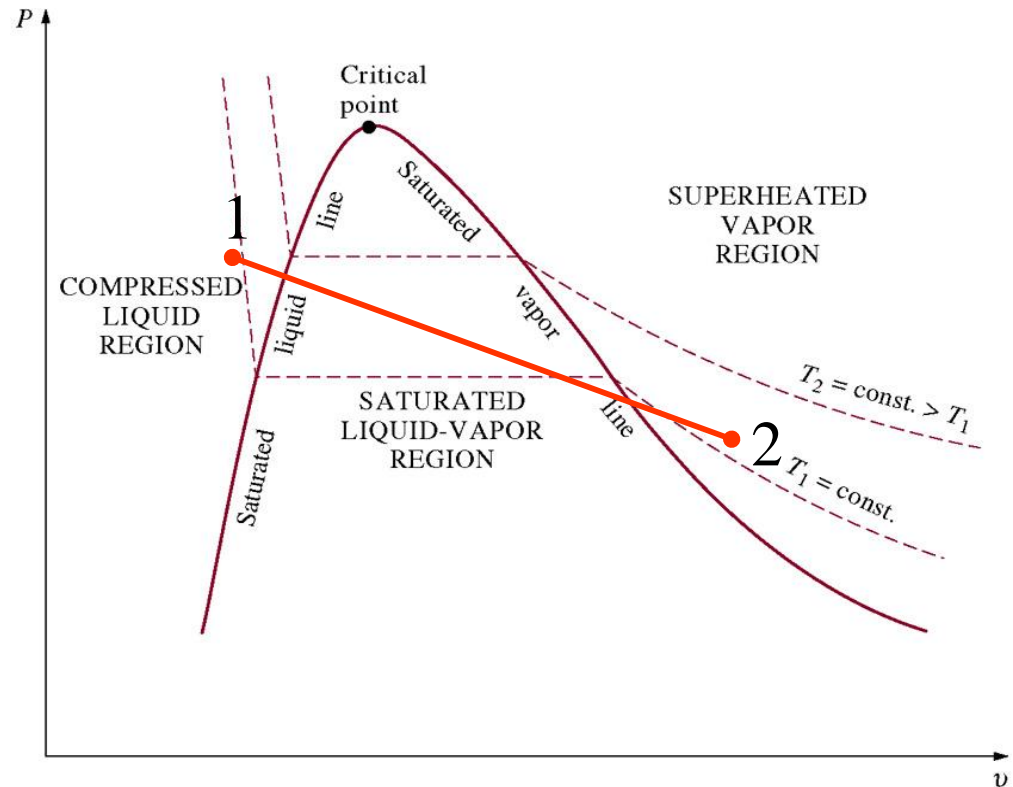
例： 由表知： T=373.15K时，  $v'=0.001043 \text{ m}^3/\text{kg}$

T=473.15K时，  $v'=0.001156 \text{ m}^3/\text{kg}$

可求得： T=400K时，  $v'=0.001073 \text{ m}^3/\text{kg}$

# 注意： 未饱和水和过热蒸汽表中

- 粗线上方代表液相未饱和
- 粗线下方代表过热蒸汽
- 中间是饱和态，不能内插
- 饱和态内插应用 饱和态表



# 说明3：关于查表

对饱和水和饱和蒸汽表，可用T为序，也可以P为序，按已知参数查表。

EXP.1 北京大气压为1bar, 按P查表得,  $t_s = 99.63C^\circ$

此时水达到饱和，即水开了。

EXP.2 西藏海拔3000米，大气压为0.6bar，查表得：

$t_s = 89.85C^\circ$  在这个温度下水也开了。

查表时先要确定在哪个区，既**五态**中的哪一态。

# 查表举例 (1)

查表时先要确定在五态中的哪一态。

例.1 已知： $p=1\text{MPa}$ ,试确定 $t=100^\circ\text{C}$ ,  $200^\circ\text{C}$   
各处于哪个状态, 各自 $h$ 是多少?

$$t_s(p)=179.916^\circ\text{C}$$

$t=100^\circ\text{C} < t_s$ , 未饱和水

$$h=419.74\text{kJ/kg}$$

$t=200^\circ\text{C} > t_s$ , 过热蒸汽

$$h=2827.3\text{kJ/kg}$$

## 查表举例 (2)

已知  $t=250^{\circ}\text{C}$ , 5kg 蒸气占有 $0.2\text{m}^3$ 容积, 试问蒸气所处状态?  $h=?$

$$t=250^{\circ}\text{C}, \quad v' = 0.00125145 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v'' = 0.050112 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v = \frac{0.2}{5} = 0.04 \text{ m}^3/\text{kg}$$

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

**湿蒸汽状态**

$$x = \frac{v - v'}{v'' - v'} = \frac{0.04 - 0.0012513}{0.05002 - 0.0012513} = 0.795$$



## 查表举例 (2)

已知  $t=250^{\circ}\text{C}$ ,  $5\text{kg}$  蒸气占有  $0.2\text{m}^3$  容积, 试问蒸气所处状态?  $h=?$

湿蒸汽状态

$$x = 0.795$$

$t=250^{\circ}\text{C}$ ,

$$h' = 1085.3 \text{ kJ/kg}$$

$$h'' = 2800.66 \text{ kJ/kg}$$

$$h = xh'' + (1-x)h' = 2448.2 \text{ kJ/kg}$$

在一刚性容器内充满 $p=0.1\text{MPa}$ ,  $t=20^\circ\text{C}$ 的水。由于太阳照射, 使其温度升为 $40^\circ\text{C}$ , 求容器承受的压力。

- ☐ A 1
- ☐ B 5
- ☐ C 10
- ☐ D 14

提交

## §5-3 水蒸气的热力过程

**热力过程：**  $(p)$   $(s)$   $(T)$   $(v)$

**方法：** 第一、二定律基本方程和状态参数的定义是分析的基本依据，由于状态方程的复杂性，采用h-s图建立状态参数间关系。

**任务：** 确定初终态参数；计算过程中的功和热；在 **$T-s$** 图上表示

# 注意与理想气体过程的区别

第一定律与第二定律表达式均成立

$$\delta q = du + \delta w$$

$$\delta q = dh + \delta w_t$$

$$ds_{\text{iso}} \geq 0$$

准平衡

$$\delta w = p dv$$

$$\delta w_t = -v dp$$

可逆

$$\delta q = T ds$$

理想气体特有的性质和表达式不能用

$$pv = R_g T$$

$$c_p - c_v = R_g$$

$$u = f(T)$$

$$h = f(T)$$

$$\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R_g \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$c_p = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R_g$$
$$c_v = \frac{1}{\kappa - 1} R_g$$

# 水蒸气的定压(Isobaric)过程

## 锅炉、换热器

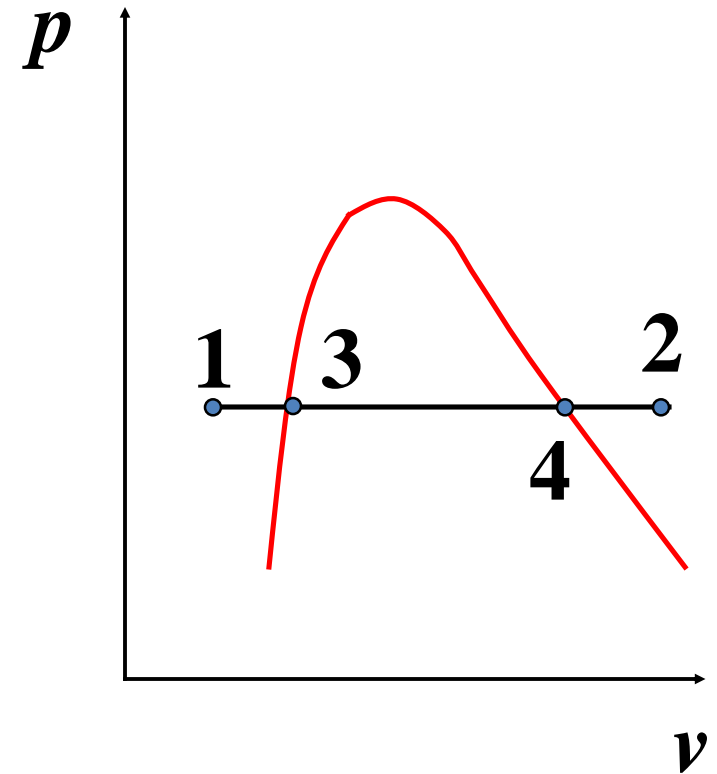
$$q = \Delta h$$

$$w_t = 0$$

例：锅炉中，水从30°C，  
4MPa, 定压加热到450 °C

$$t_s(4\text{MPa})=250.33^\circ\text{C}$$

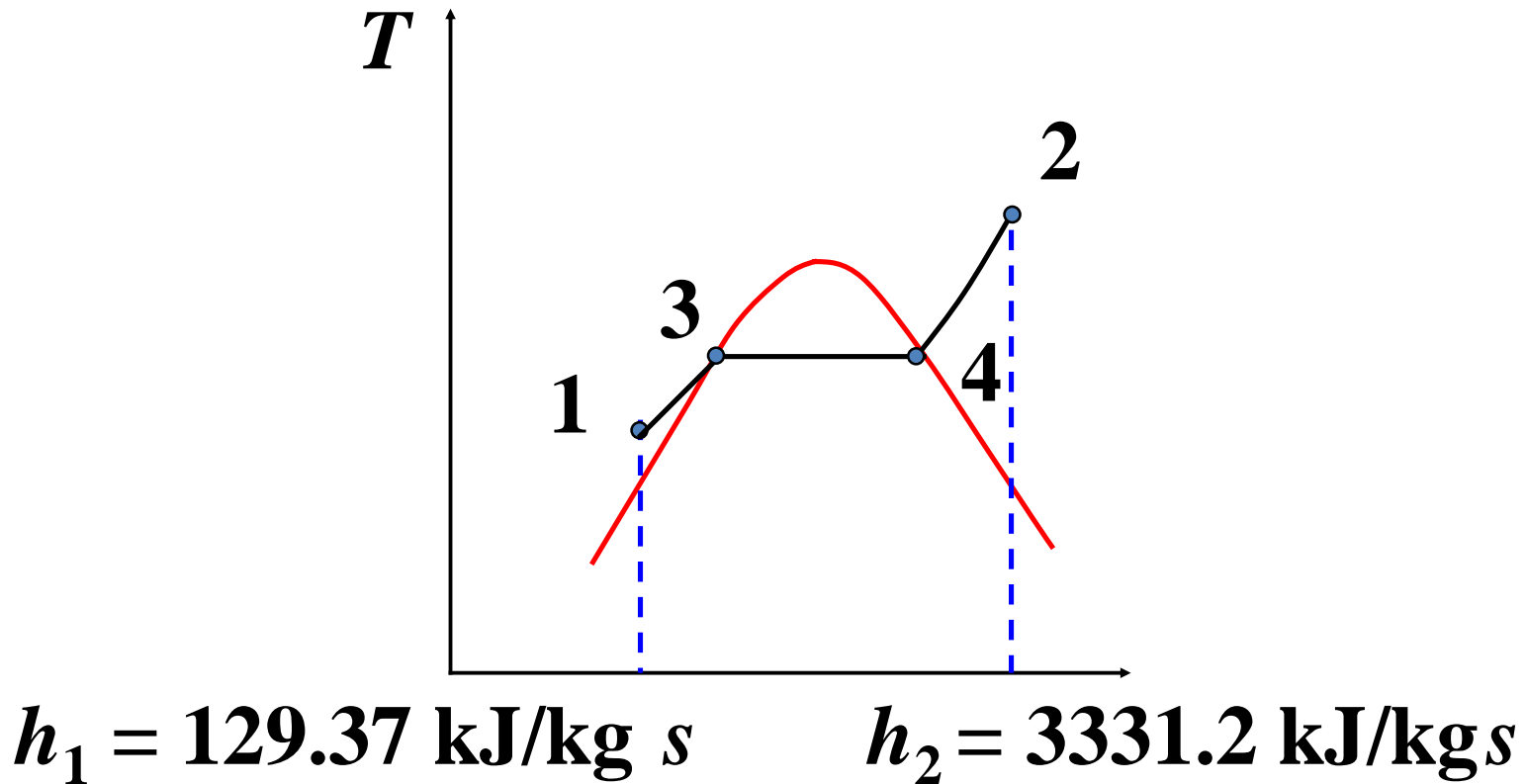
$$q = h_2 - h_1$$



# 水蒸气的定压过程

例：水从30°C , 4MPa, 定压加热到450 °C

$$q = h_2 - h_1 = 3201.83 \text{ kJ/kg}$$



# 汽轮机 水蒸气的等熵过程

例：汽轮机  $p_1 = 4\text{MPa}$   $t_1 = 450^\circ\text{C}$

$p_2 = 0.005\text{MPa}$

$$w_t = ? = h_1 - h_2$$

$$h_1 = 3330.7 \text{ kJ/kg}$$

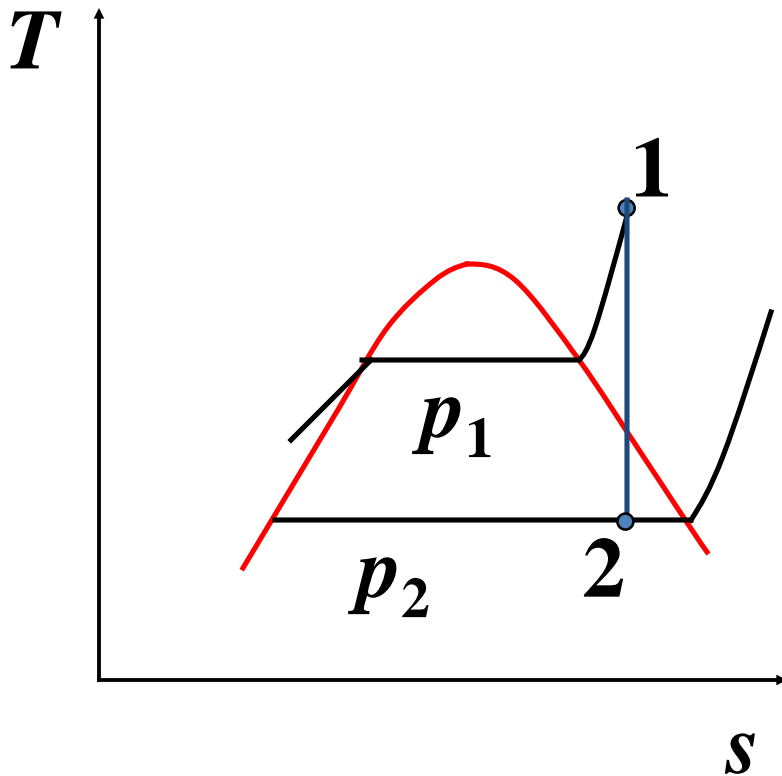
$$s_2 = s_1$$

$$s_1 = 6.9379 \text{ kJ/kg.K}$$

由  $p_2$  查表

$$s_2' = 0.4762 \text{ kJ/kg.K}$$

$$s_2'' = 8.3952 \text{ kJ/kg.K}$$

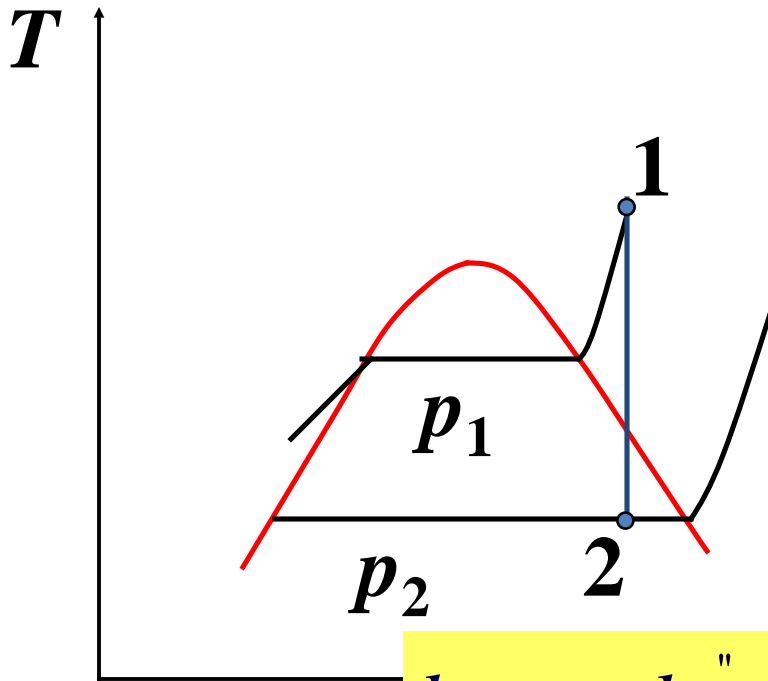


# 汽轮机中水蒸气的等熵过程

例：汽轮机  $p_1 = 4\text{MPa}$   $t_1 = 450^\circ\text{C}$

$p_2 = 0.005\text{MPa}$

$$w_t = h_1 - h_2$$



$$x_2 = \frac{s_2' - s_2''}{s_2' - s_2} = 0.8160$$

$$h_2' = 137.77\text{kJ/kg}$$

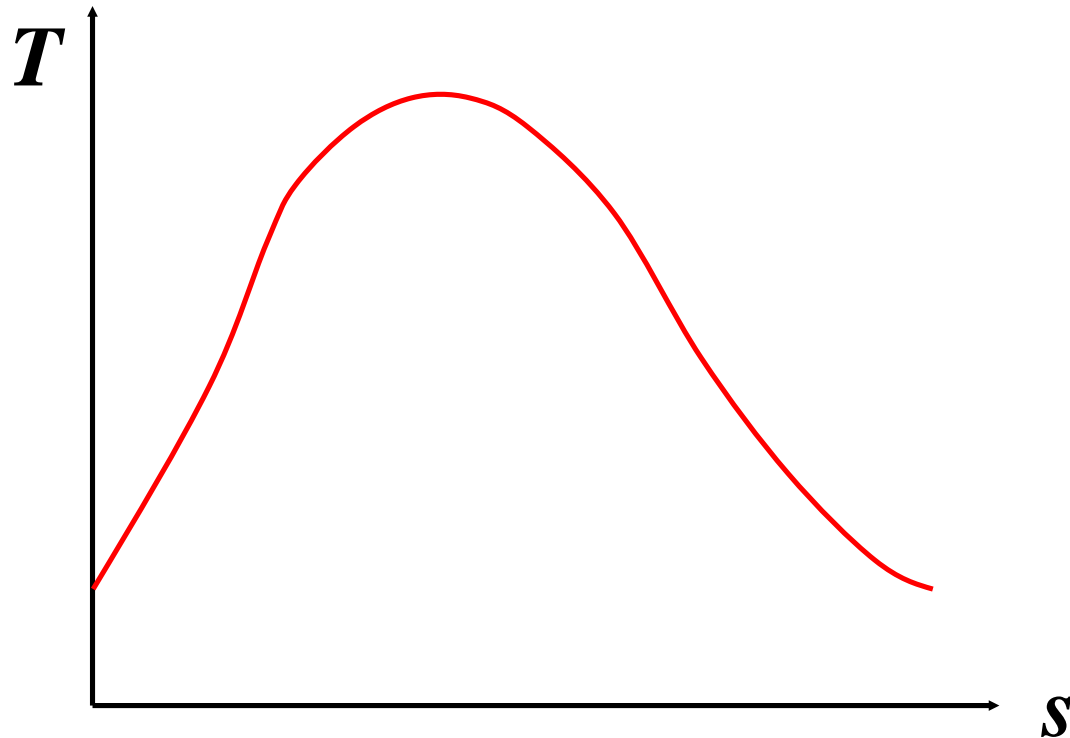
$$h_2'' = 2561.2\text{kJ/kg}$$

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



# 课堂练习：

10 MPa的过冷水, 定压加热到500 °C, 然后等熵膨胀到0.5MPa, 接着等压加热到500 °C, 接着等熵膨胀到0.1 MPa, 然后在凝汽器中被冷却至饱和液体, 最后由水泵增压至10 MPa, 构成循环。请在T-s图中画出过程



# 第五章 小结

- 1、熟悉 $p$  $T$ 相图
- 2、熟悉1点2线3区5态
- 3、会查图表
- 4、基本热力过程在 $p$ - $v$ 、 $T$ - $s$ 图上的表示，  
计算  $q$ 、 $w_t$

# 第五章习题课

## 例5-1

已知  $t=300^{\circ}\text{C}$ ,  $p=0.8\text{MPa}$  , 试确定状态?  $h=?$

$t_s(p)=170.444^{\circ}\text{C} < t$     过热状态    内插法

0.5MPa, 300°C时

$$h_{0.5} = 3063.6 \text{ kJ/kg}$$

1.0MPa, 300°C时

$$h_{1.0} = 3050.4 \text{ kJ/kg}$$

0.8MPa, 300°C时

$$\frac{0.8 - 0.5}{1.0 - 0.5} = \frac{h - h_{0.5}}{h_{1.0} - h_{0.5}}$$

$$h_{NIST} = 3056.9 \text{ kJ/kg}$$

$$h = 3055.68 \text{ kJ/kg}$$

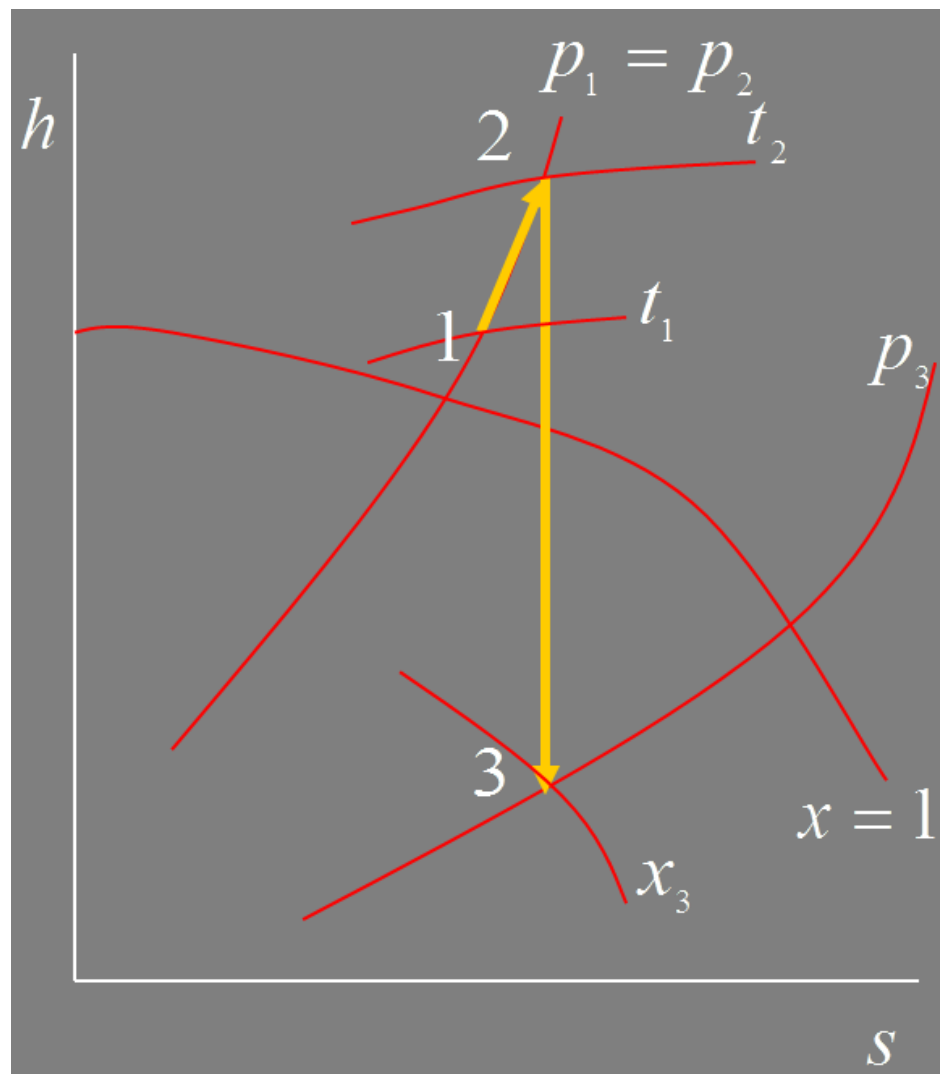
## 例5-2

将1kg,  $p_1=0.6\text{MPa}$ ,  
 $t_1=200^\circ\text{C}$ 的蒸汽定压  
下加热到 $t_2=300^\circ\text{C}$

求:

(1)  $q_p$ 、 $\Delta u_p$

(2) 加热后蒸汽在气缸  
中定熵膨胀到  
 $p_3=0.05\text{MPa}$ , 求 $w_p$ 。



解：画h-s图如上图。

**(1) 1点状态参数：**

$$p_1 = 0.6\text{MPa} \quad t_1 = 200^\circ\text{C}$$

$$h_1 = 2849.6\text{kJ} / \text{kg} \quad v_1 = 0.35197\text{m}^3 / \text{kg}$$

**2点状态参数：**

$$p_2 = 0.6\text{MPa} \quad t_2 = 300^\circ\text{C}$$

$$h_2 = 3061\text{kJ} / \text{kg} \quad v_2 = 0.43436\text{m}^3 / \text{kg}$$

$$q_p = h_2 - h_1 = 211.4\text{kJ} / \text{kg}$$

$$\Delta u = h_2 - h_1 - p_1(v_2 - v_1) = 162\text{kJ} / \text{kg}$$

## (2) 3点状态参数:

$$p_3 = 0.05 \text{MPa}$$

$$h_3 = 2566.8 \text{kJ} / \text{kg} \quad v_3 = 3.1305 \text{m}^3 / \text{kg} \quad ?$$

$$w_p = h_2 - h_3 - (p_2 v_2 - p_3 v_3) = 390.1 \text{kJ} / \text{kg} \quad ?$$