

11-1 概述

11-2 压缩气体制冷循环

11-3 压缩蒸汽制冷循环

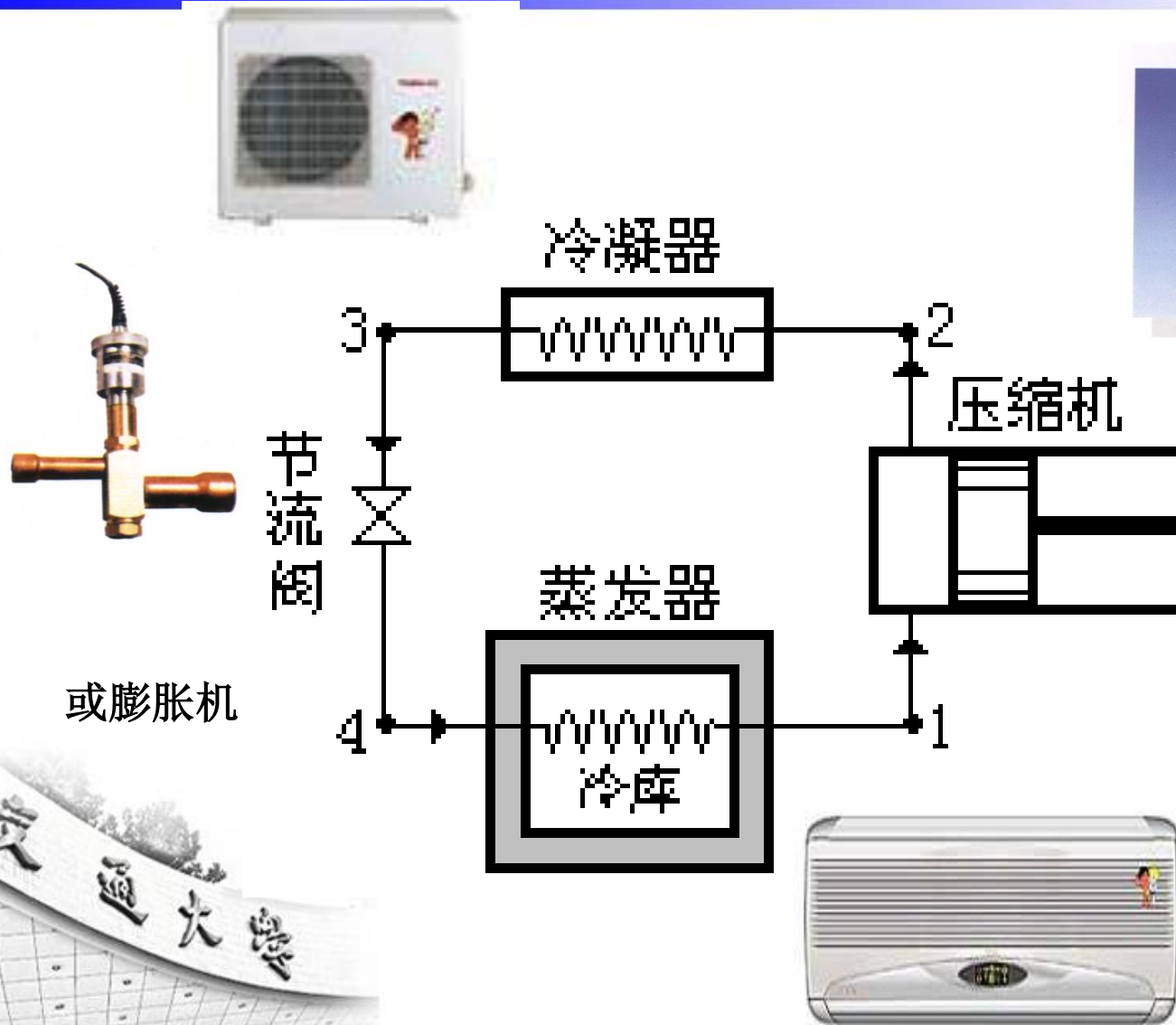
11-4 制冷剂的性质

11-5 其他制冷循环

11-6 热泵循环



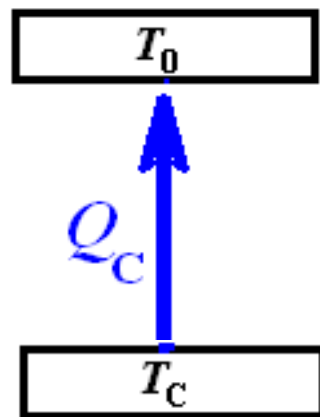
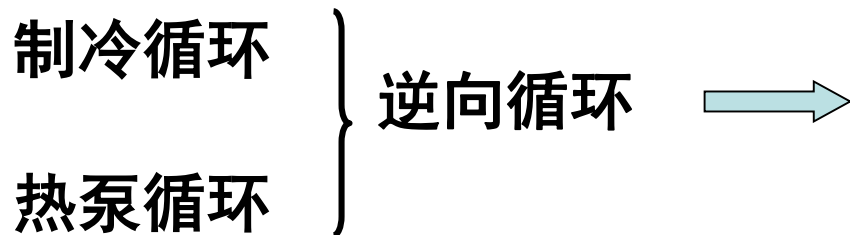
制冷空调装置



11-1 概述



一、制冷循环和热泵循环

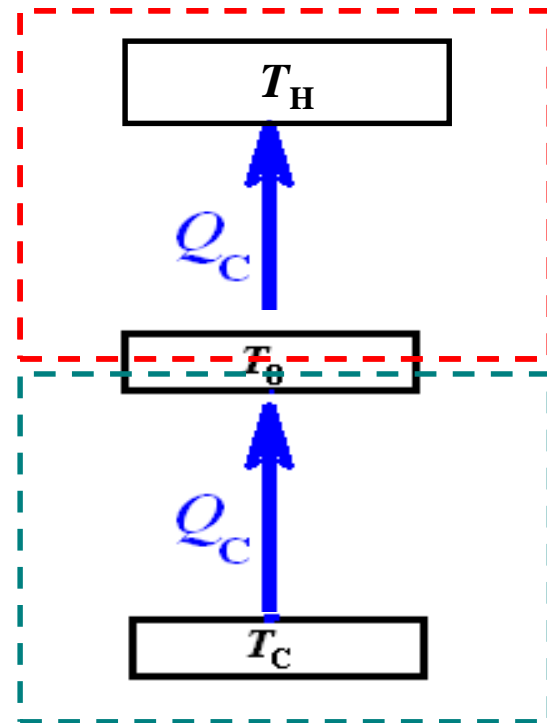


区别:

制冷循环:不断地从低温热源取走热量,以维持其低温。

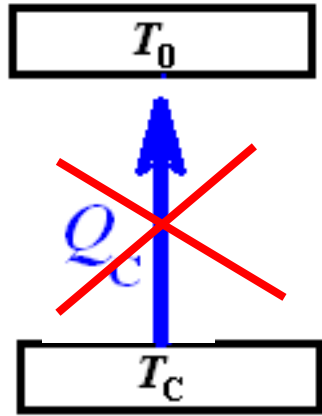
热泵循环:不断地向高温热源提供热量,以维持其高温。

热泵循环

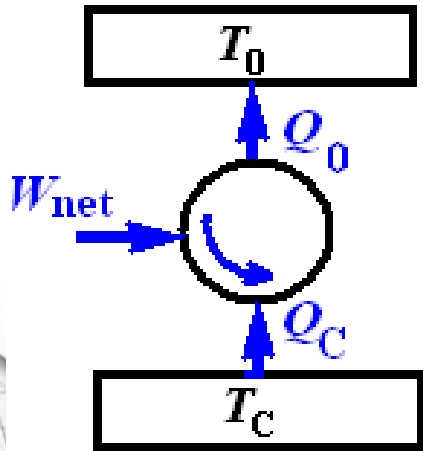




二、逆向循环的补偿条件



$$\Delta S_{\text{iso}} = \Delta S_0 + \Delta S_c < 0$$



$$\Delta S_{\text{iso}} = \Delta S_0 + \Delta S_c \geq 0$$

补偿条件可以是机械能——压缩式制冷循环；
补偿条件也可以是热能——吸收式制冷循环。



三、经济性指标

制冷系数 $\varepsilon = \frac{q_c}{w_{\text{net}}}$

工作性能系数

$$\text{COP} = \varepsilon = \frac{q_c}{w_{\text{net}}}$$

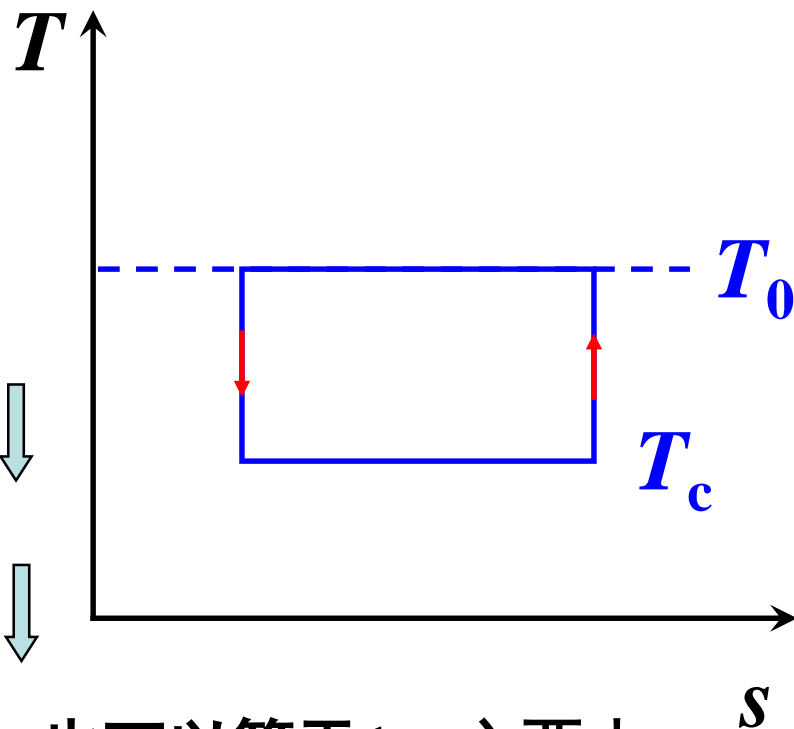
卡诺逆循环

$$\varepsilon_C = \frac{q_c}{w_{\text{net}}} = \frac{q_c}{q_0 - q_c} = \frac{T_c}{T_0 - T_c}$$

$$= \frac{1}{\frac{T_0}{T_c} - 1}$$

T_0 不变, $T_c \downarrow \Rightarrow \varepsilon_C \downarrow$

T_c 不变, $T_0 \uparrow \Rightarrow \varepsilon_C \downarrow$



制冷系数可以小于1, 可以大于1, 也可以等于1, 主要由低温热源的温度确定, 制冷温度越低, 制冷系数越小。



供热系数

$$\text{COP} = \varepsilon' = \frac{q_H}{w_{\text{net}}}$$

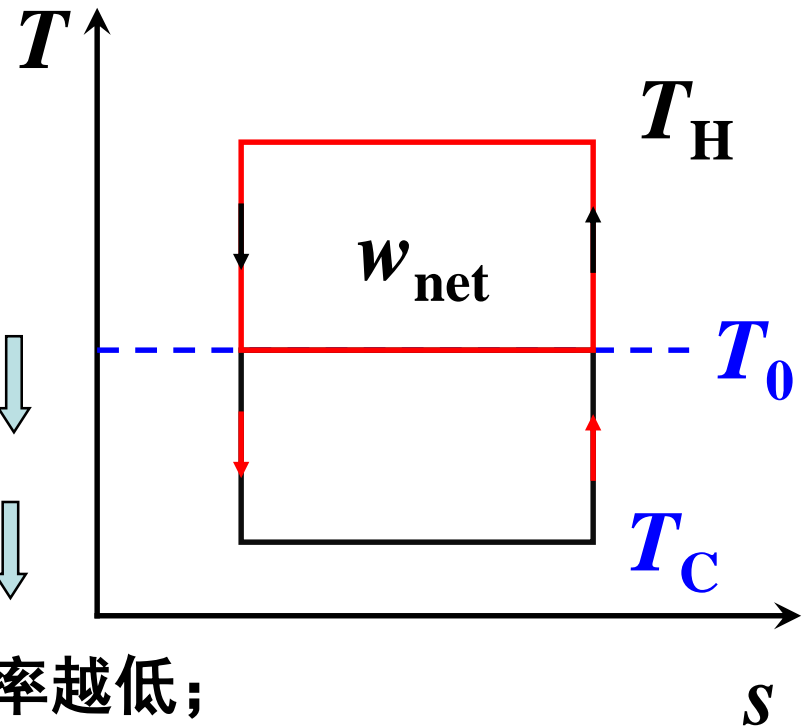
卡诺逆循环

$$\varepsilon'_C = \frac{q_H}{w_{\text{net}}} = \frac{q_H}{q_H - q_0} = \frac{T_H}{T_H - T_0}$$

$$= \frac{1}{1 - \frac{T_0}{T_H}}$$

T_H 不变, $T_0 \downarrow \Rightarrow \varepsilon_C \downarrow$

T_0 不变, $T_H \uparrow \Rightarrow \varepsilon_C \downarrow$

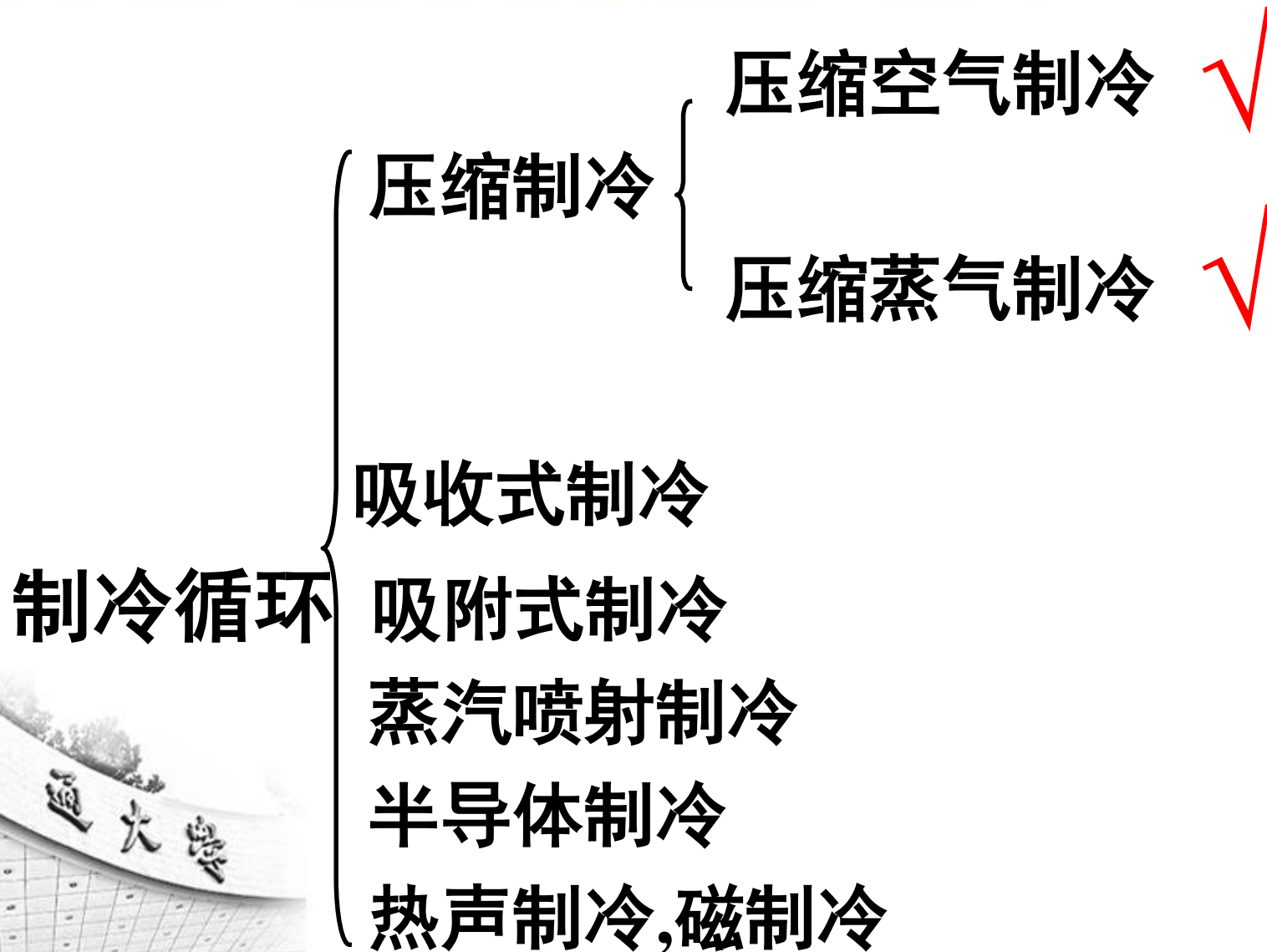


冷源温度越低, 效率越低;

热源温度越高, 效率越低, 供热系数恒大于1。



制冷循环种类



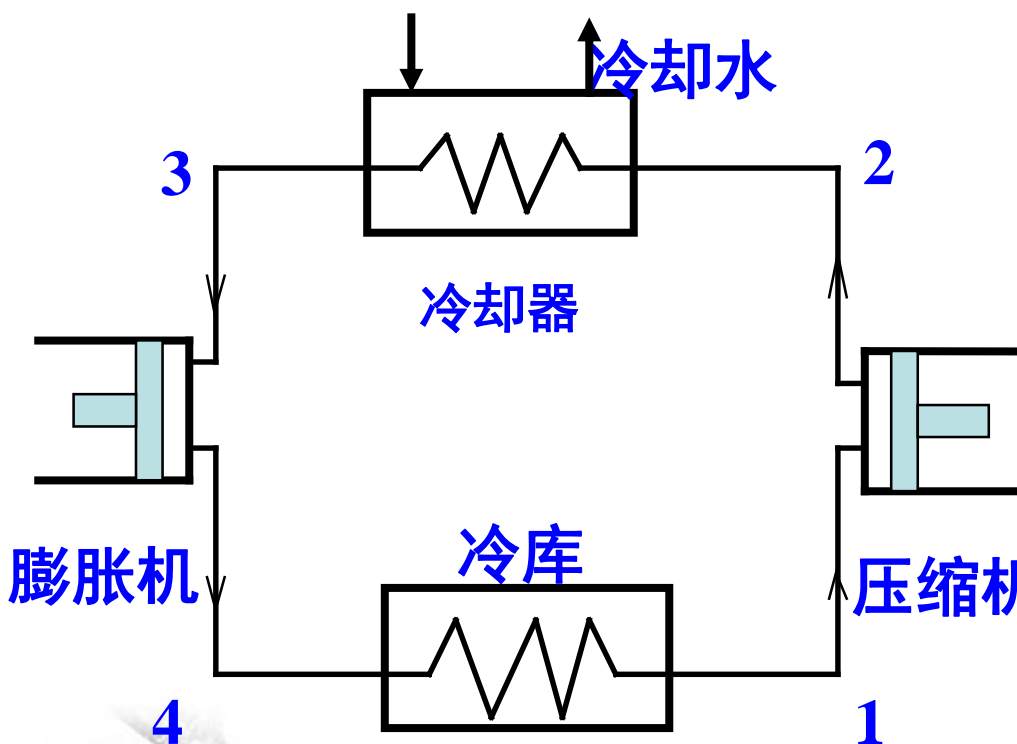
11-2 压缩空气制冷循环



一、压缩空气制冷循环简介

四个主要部件；

工质：空气



1 → 2, 绝热压缩 $p \uparrow$ $T \uparrow$

2 → 3, 等压冷却, $T \downarrow$

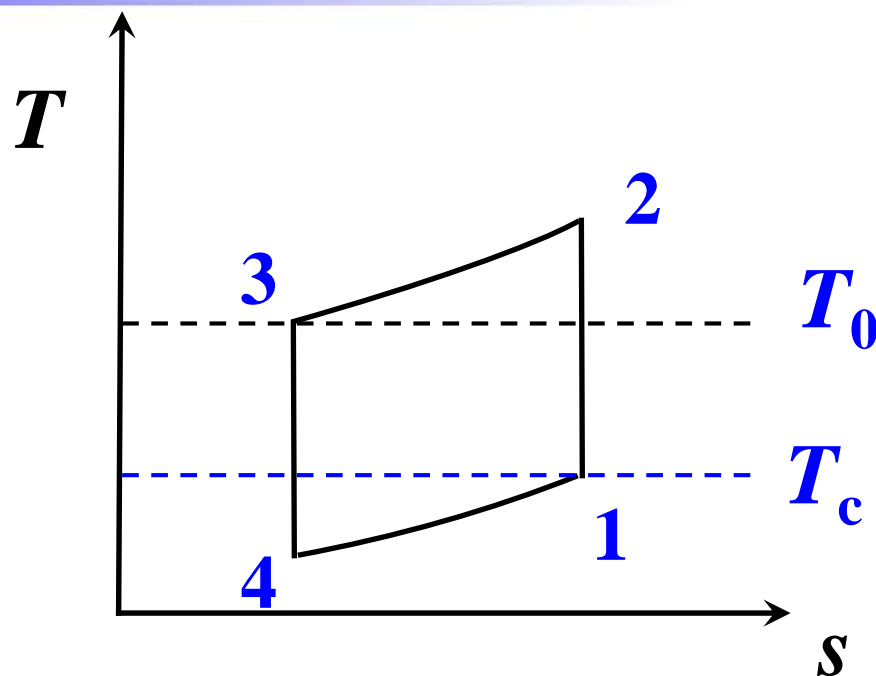
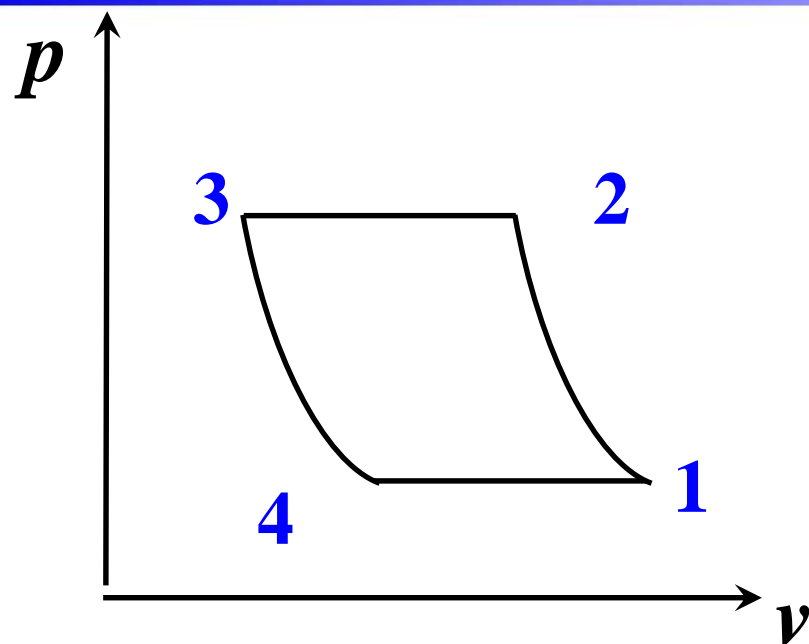
3 → 4, 绝热膨胀, $T \downarrow < T_1$

4 → 1 等压吸热, $T \uparrow$ $T_1 \rightarrow$

理想化处理：①理气； ②定比热； ③可逆；



p - v 图和 T - s 图



1 \longrightarrow 2 绝热压缩 \textcircled{s}
2 \longrightarrow 3 等压冷却 \textcircled{p}

3 \longrightarrow 4 绝热膨胀 \textcircled{s}
4 \longrightarrow 1 等压吸热 \textcircled{p}

逆布雷顿循环

循环增压比 $\pi = \frac{p_2}{p_1}$



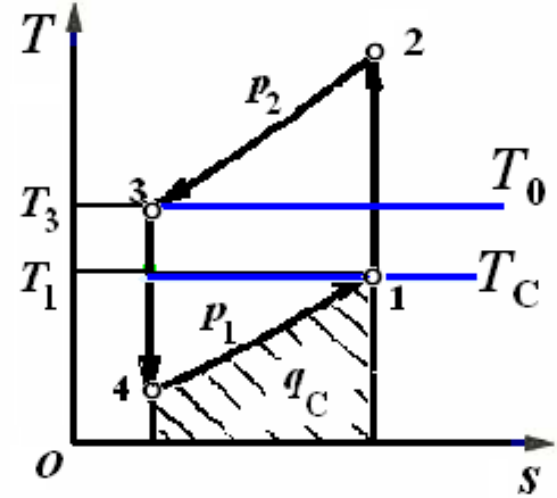
制冷系数 (the coefficient of performance COP)

放热量: $q_0 = h_2 - h_3$

吸热量: $q_C = h_1 - h_4$

净功量:

$$\begin{aligned} W_{\text{net}} &= W_c - W_t = q_0 - q_c \\ &= h_2 - h_1 - (h_3 - h_4) = (h_2 - h_3) - (h_1 - h_4) \end{aligned}$$



制冷系数:

定值比热

$$\varepsilon = \frac{q_C}{W_{\text{net}}} = \frac{h_1 - h_4}{(h_2 - h_3) - (h_1 - h_4)} = \frac{T_1 - T_4}{(T_2 - T_3) - (T_1 - T_4)}$$

$$T_2 = T_1 \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$$T_3 = T_4 \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$$= \frac{1}{\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1} = \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$

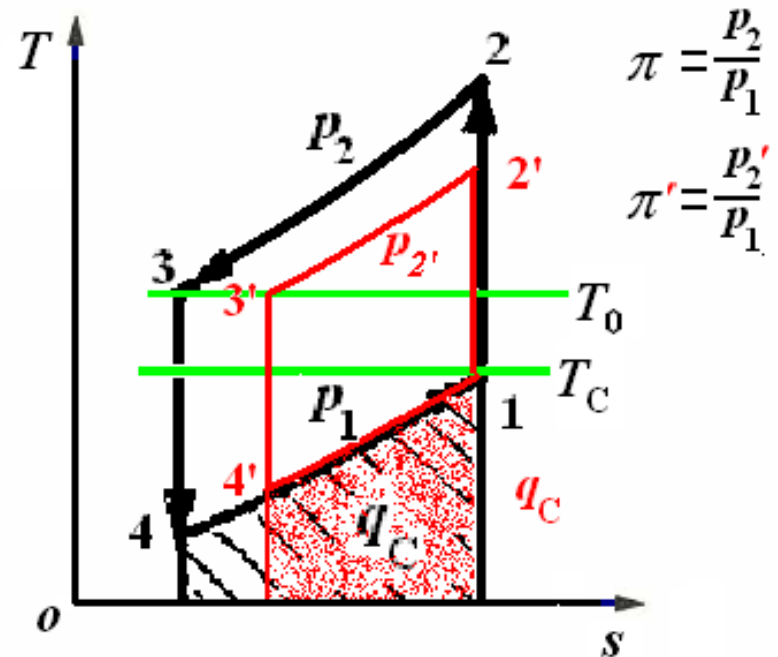
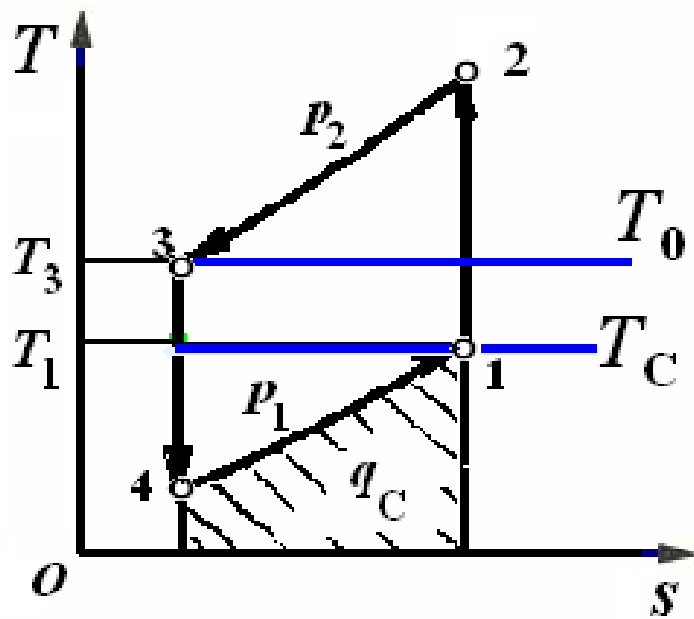


讨论:

1) 相同温度的 T_0 和 T_C

$$\varepsilon_c = \frac{T_C}{T_0 - T_C} > \frac{T_1}{T_2 - T_1} = \varepsilon$$

2) $\pi \uparrow$ $q_C \uparrow$ $\varepsilon \downarrow$,





空气压缩制冷循环特点

- **优点：**工质无毒，无味，不怕泄漏。
- **缺点：**
 1. 无法实现 T , $\varepsilon < \varepsilon_C$
 2. $q_c = c_p(T_1 - T_4)$, 空气 c_p 很小, $(T_1 - T_4)$ 不能太大, q_c 很小。
若 $(T_1 - T_4) \uparrow$ $\varepsilon \downarrow$
 3. 活塞式流量 m 小, 制冷量 $Q_c = m q_c$ 小,

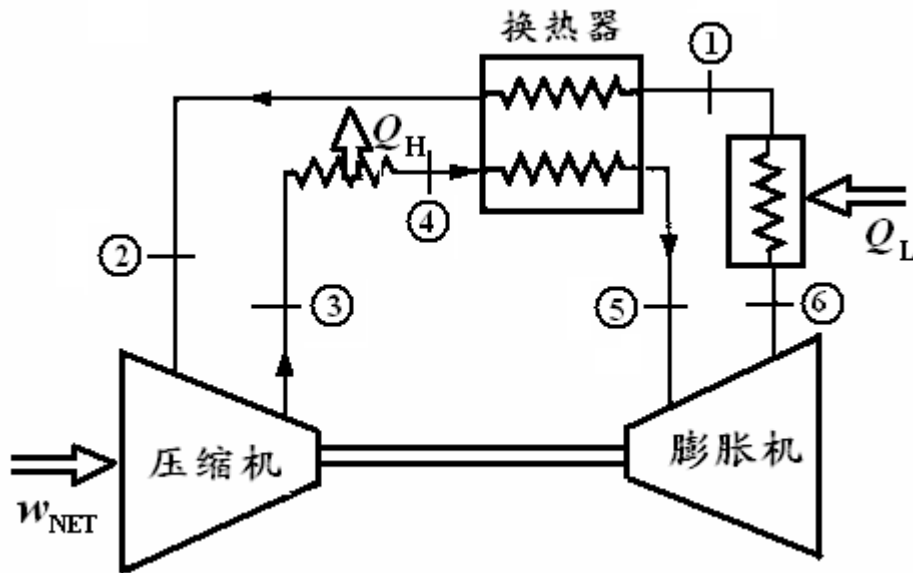


如何提高空气压缩制冷循环制冷量

使用叶轮式压气机，质量流量可以得到提高： $Q_c = m q_c$

但压比小，单位工质制冷量减小，如何弥补这一缺点呢？

回热：在回热基础上的叶轮式压缩空气制冷循环。

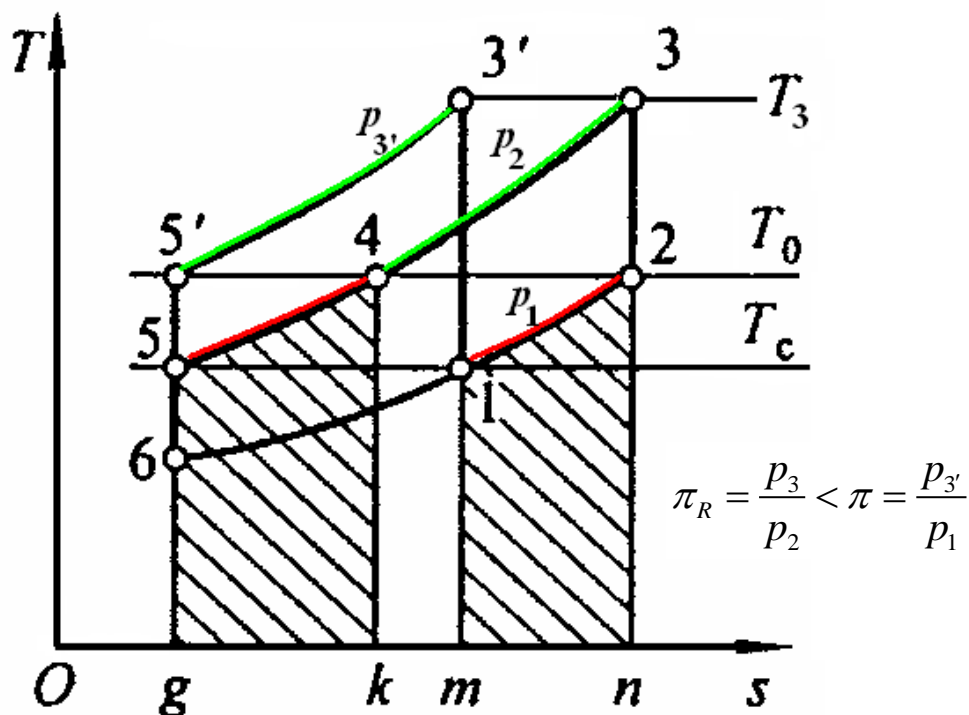
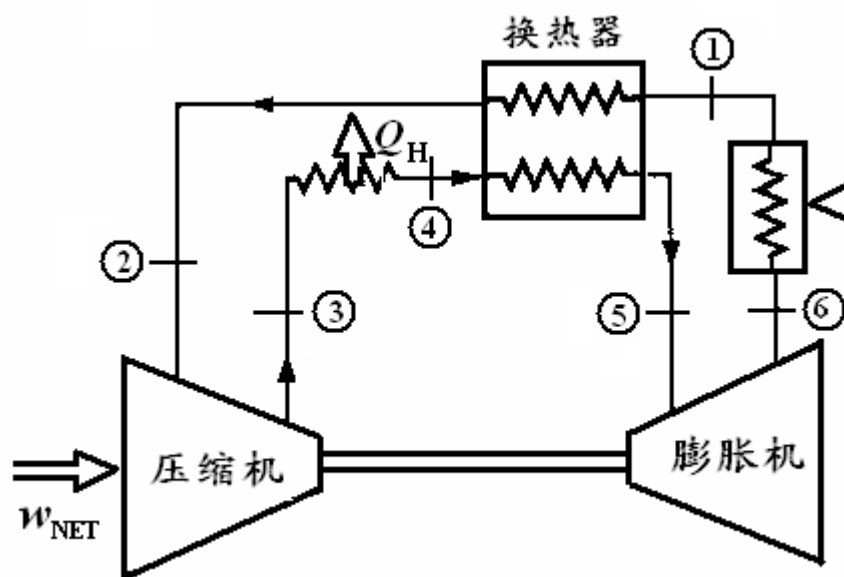




二、回热式压缩空气制冷循环

基本循环：1-3'-5'-6-1 \Rightarrow 回热循环：2-3-4-5-6-1-2

原则：冷却器进口温度相等。





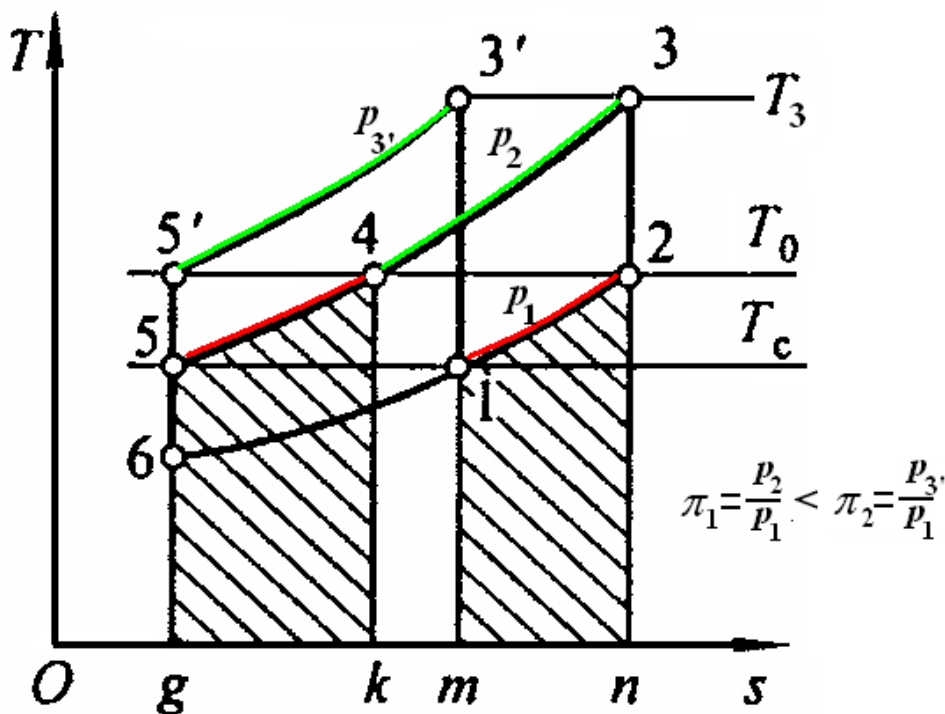
回热循环的制冷系数

放热量: $q_0 = h_3 - h_4$

制冷量: $q_C = h_1 - h_6$

制冷系数:

$$\varepsilon = \frac{q_C}{q_0 - q_C} = \frac{h_1 - h_6}{(h_3 - h_4) - (h_1 - h_6)}$$





回热后：

$$q_c = c_p(T_1 - T_6)$$

不变

$$q_0 = c_p(T_{3'} - T_{5'})$$

非回热

$$q_0 = c_p(T_3 - T_4)$$

回热

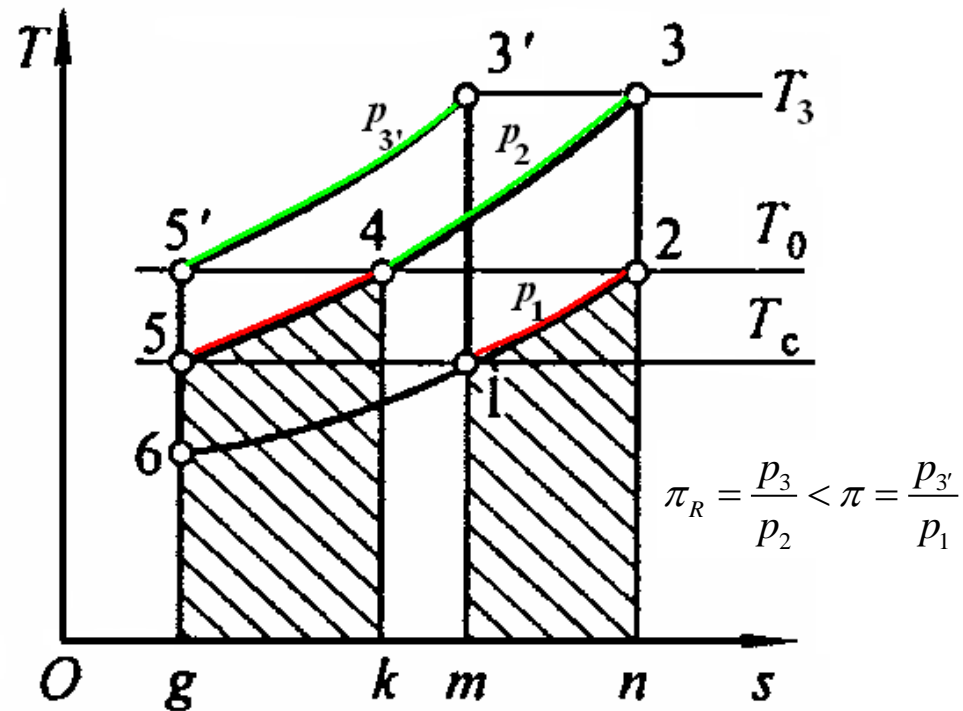
相等

1) 可以采用叶轮机械，提高空气质量流量，提高制冷量；

2) 压缩机的功耗减小，压缩过程及膨胀过程中的不可逆损失减小。

$$\varepsilon_{\text{回热}} = \varepsilon_{\text{非回热}}$$

$$\pi_R = \frac{p_3}{p_2} < \pi = \frac{p_{3'}}{p_1}$$





例题1:

压缩空气制冷循环，空气进入压气机时的状态为 $p_1=0.1\text{MPa}$ ， $t_1=-20^\circ\text{C}$ ，在压气机内定熵压缩到 $p_2=0.5\text{MPa}$ ，进入冷却器。离开冷却器时空气的温度为 $t_3=20^\circ\text{C}$ 。若 $t_c=-20^\circ\text{C}$ ， $t_0=20^\circ\text{C}$ ，空气视为定比热容的理想气体， $\kappa=1.4$ 。

试求：(1)无回热时的制冷系数及1kg空气的制冷量；
(2)若 ε 保持不变而采用回热，理想情况下压缩比是多少？

解：(1)无回热

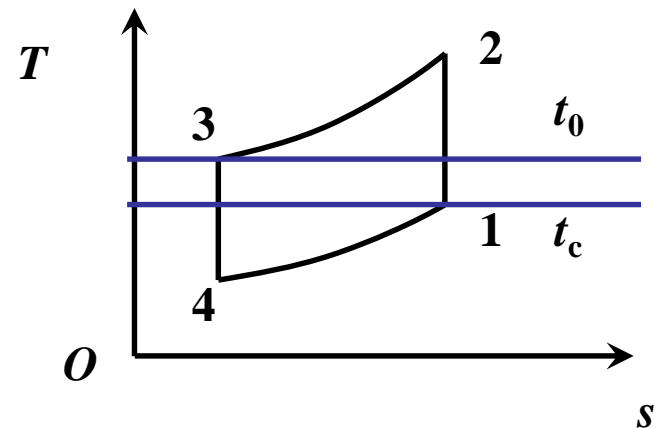
$$T_1 = T_c = 253.15\text{K}$$

$$T_3 = T_0 = 293.15\text{K}$$

$$\pi = \frac{p_2}{p_1} = \frac{0.5\text{MPa}}{0.1\text{MPa}} = 5$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\kappa-1/\kappa} = \frac{T_3}{T_4}$$

$$T_2 = T_1 \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 253.15\text{K} \times 5^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 401.13\text{K}$$

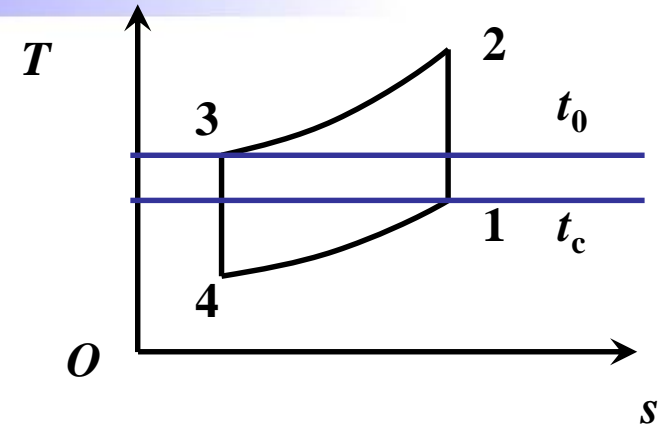




$$T_4 = T_3 \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 293.15\text{K} \times 5^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 185.01\text{K}$$

压缩机耗功

$$\begin{aligned} w_C &= h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1) \\ &= 1.005 \times (401.13 - 253.15) = 148.72 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$



膨胀机作出的功

$$\begin{aligned} w_T &= h_3 - h_4 = c_p (T_3 - T_4) \\ &= 1.005 \times (293.15 - 185.01) = 108.68\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

空气在冷却器中放热量

$$\begin{aligned} q_0 &= h_2 - h_3 = c_p (T_2 - T_3) \\ &= 1.005 \times (401.13 - 293.15) = 108.52\text{kJ/kg} \end{aligned}$$



1kg空气在冷库中的吸热量即为1kg空气的制冷量

$$\begin{aligned} q_C &= h_1 - h_4 = c_p (T_1 - T_4) \\ &= 1.005 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \times (253.15 - 185.01) \text{K} = 68.48 \text{kJ/kg} \end{aligned}$$

循环的净功

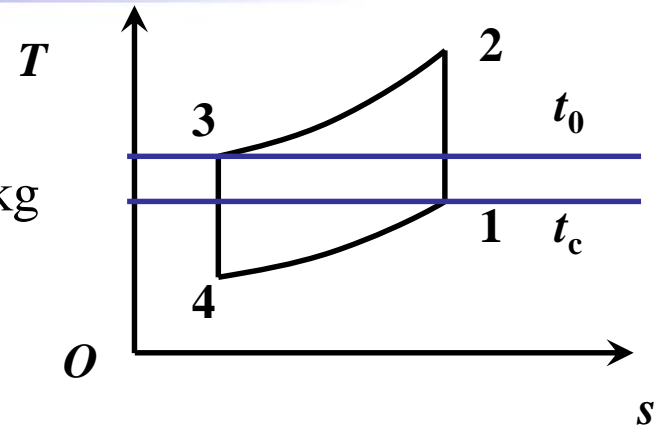
$$w_{\text{net}} = w_c - w_T = 148.72 \text{kJ/kg} - 108.68 \text{kJ/kg} = 40.04 \text{kJ/kg}$$

循环的净热量

$$q_{\text{net}} = q_0 - q_C = 108.52 \text{kJ/kg} - 68.48 \text{kJ/kg} = 40.04 \text{kJ/kg}$$

循环的制冷系数

$$\varepsilon = \frac{q_c}{w_{\text{net}}} = \frac{68.48 \text{kJ/kg}}{40.04 \text{kJ/kg}} = 1.71$$





(2) 有回热时的压力比

$$T_{2'} = T_2 = 401.13\text{K} \quad T_{1'} = T_3 = 293.15\text{K}$$

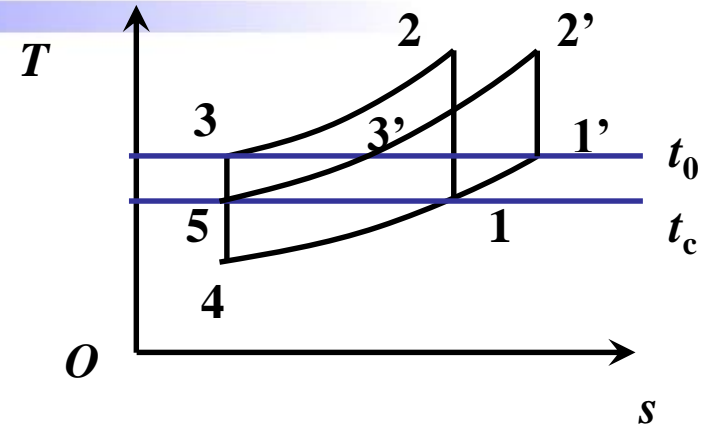
$$\frac{T_{2'}}{T_{1'}} = \left(\frac{p_{2'}}{p_{1'}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \pi_R^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$$\pi_R = \left(\frac{T_{2'}}{T_{1'}} \right)^{\kappa/\kappa-1} = \left(\frac{401.13\text{K}}{293.15\text{K}} \right)^{1.4/1.4-1} = 3.0$$

$\pi_R < \pi$ **压力比减小，对使用叶轮式机械有利。**

逆卡诺循环： $\varepsilon_c = \frac{T_c}{T_0 - T_c} = \frac{253.15}{293.15 - 253.15} = 6.33$

同样冷库温度和环境温度条件下逆向卡诺循环的制冷系数是6.33，远大于本例计算值1.71。





空气制冷循环的缺点：

- 1) 不能实现定温吸热、放热，因此偏离逆卡诺循环较远，制冷系数低；
- 2) 空气的比定压热容较小，单位质量工质的制冷量低。

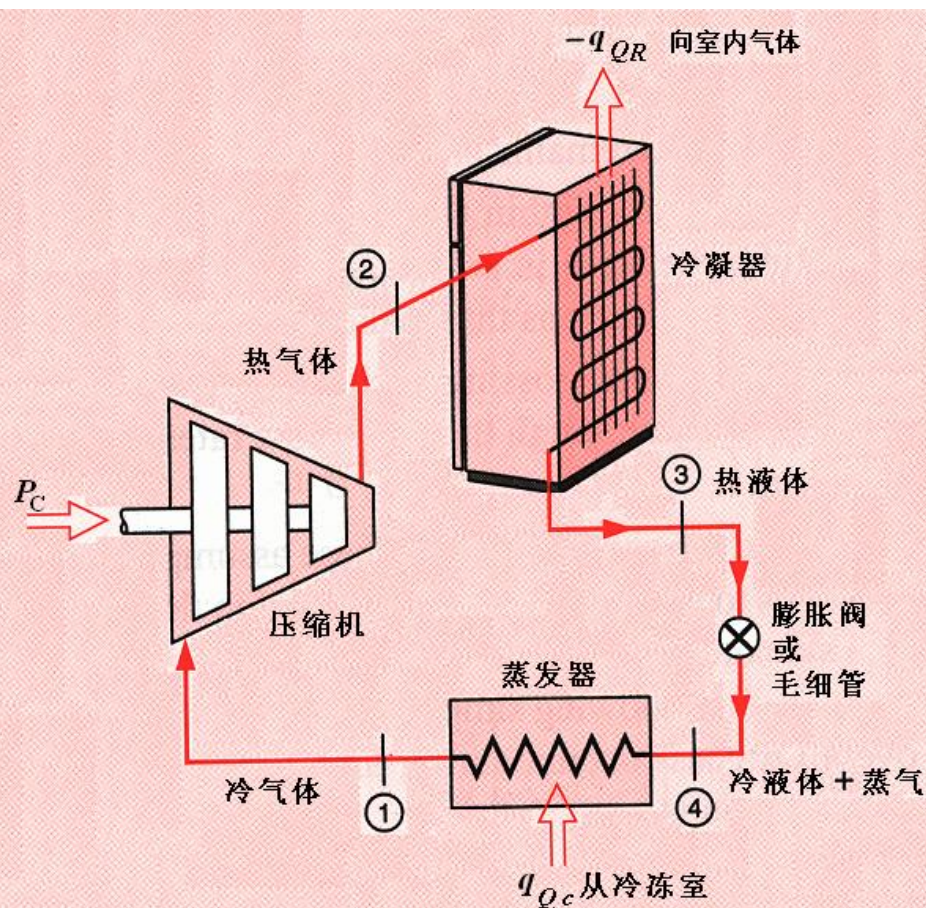
这是由气体的热力性质决定的（等压和等温过程不可能同时实现），虽然采用回热可以使之得到一定的改善，但不能根本消除，为了解决这两个缺点，需要对制冷工质进行选择。

- 蒸气在两相区易实现 T
- 汽化潜热大，制冷能力大

11-3 压缩蒸气制冷循环



一、设备流程及 $T-s$ 图

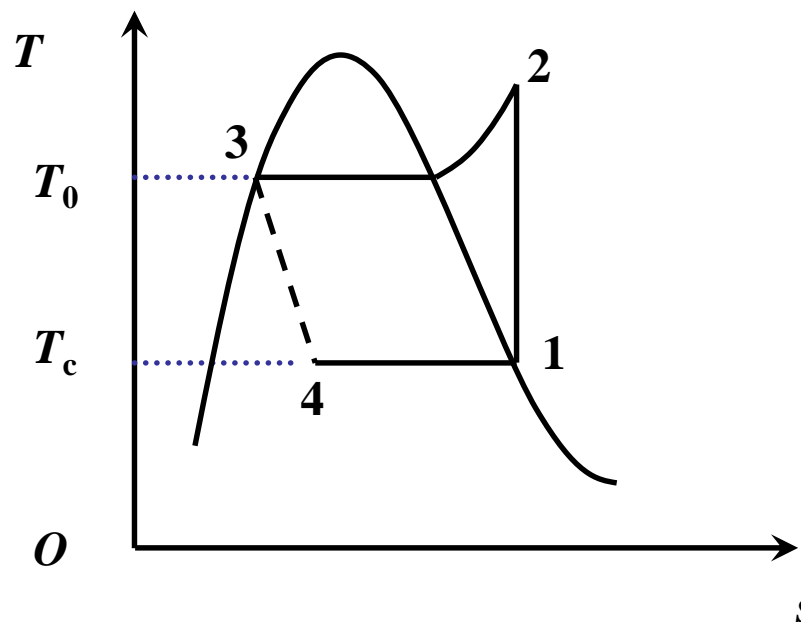


1-2: 定熵压缩过程

2-3: 定压放热过程

3-4: 绝热节流过程

4-1: 定压吸热过程





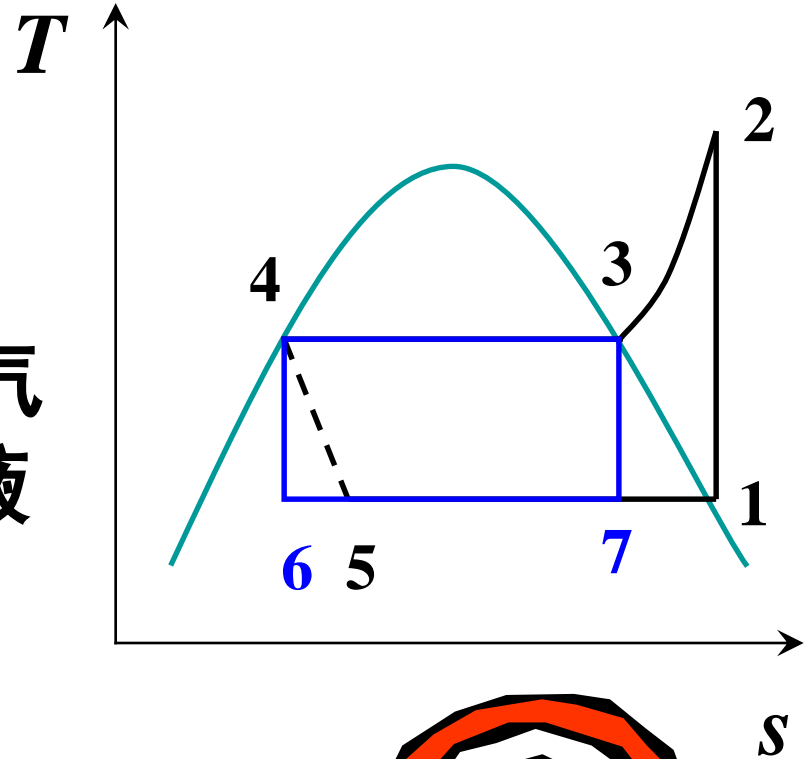
压缩蒸气制冷循环

比较逆卡诺循环3467

$$\varepsilon < \varepsilon_c$$

逆卡诺 7-3、4-6 湿蒸气
压缩、膨胀，液
击”现象

实际 12 既安全，又
增加了单位质量
工质的制冷量71



4-5 节流阀代替了膨胀机





节流阀代替膨胀机分析

缺点：

1. 损失功量

$$h_4 - h_6$$

84越陡越好

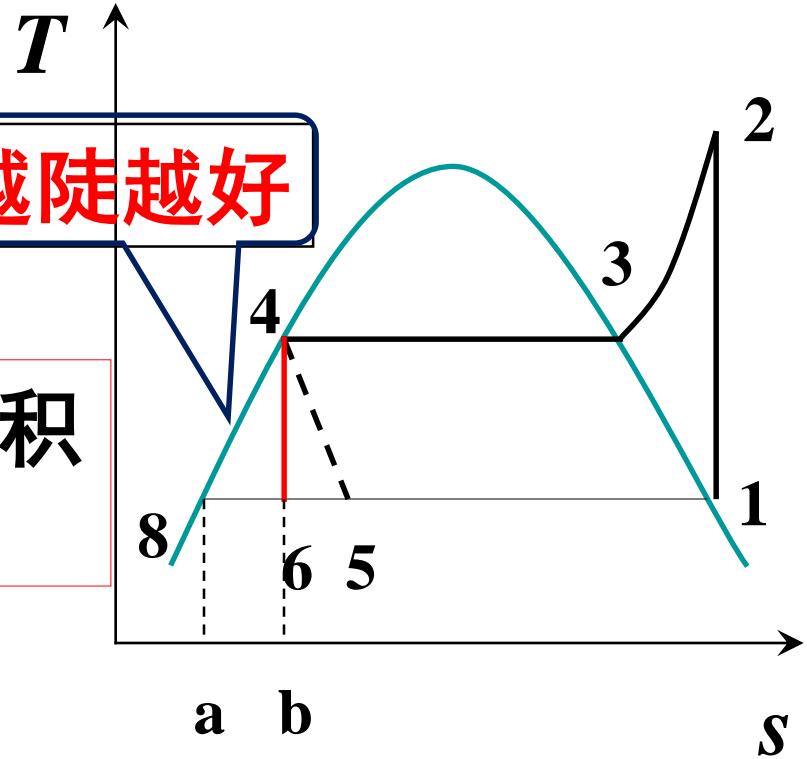
2. 少从冷库取走热量

$$h_5 - h_6 =$$

$$h_4 - h_6$$

近似面积
8468

$$h_4 - h_8 - (h_6 - h_8)$$



面积a84ba

面积a86ba

利>弊

优点：

1. 省掉膨胀机，设备简化；

思考题：压缩空气制冷是否可以使用节流阀？
理想气体（等温节流）



二、制冷系数 ε

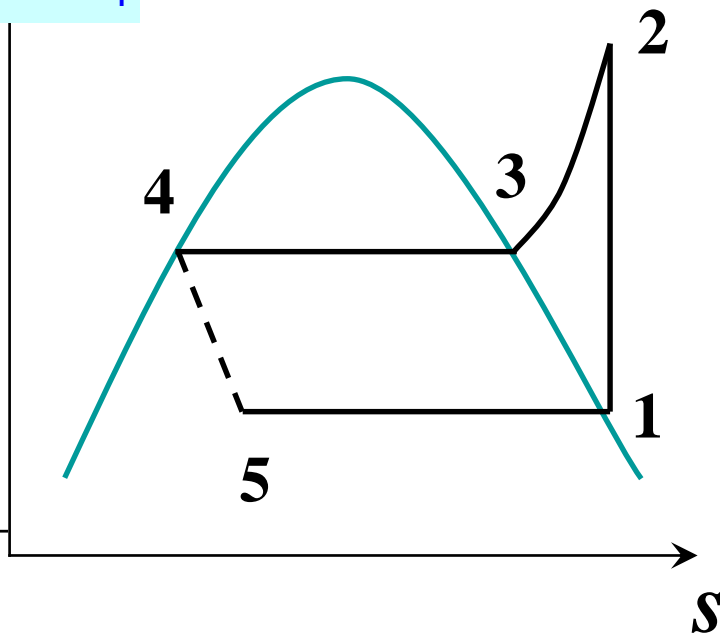
蒸发器中吸热量 $q_c = h_1 - h_5 = h_1 - h_4$

冷凝器中放热量 $q_0 = h_2 - h_4$

制冷系数

$$\varepsilon = \frac{q_c}{w_{\text{net}}} = \frac{q_c}{q_0 - q_c}$$

$$= \frac{h_1 - h_4}{(h_2 - h_4) - (h_1 - h_4)} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \neq \frac{T_1 - T_4}{T_2 - T_1}$$



三、影响因素分析

提高制冷系数的途径：

- 1、降低冷凝温度 T_0 ——受限于环境温度
 - 2、提高蒸发温度 T_c ——受限于制冷温度
- 效果不明显



3、采用过冷

4-4': 过冷段

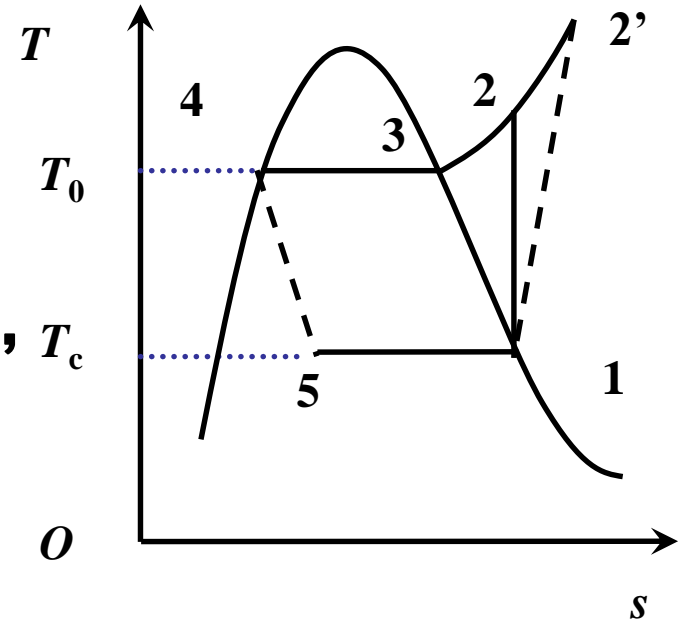
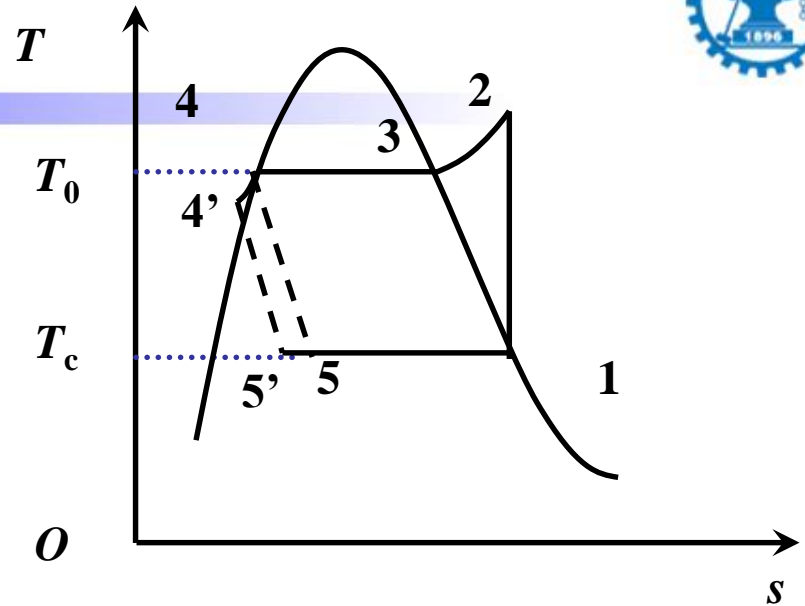
$$q_c = h_1 - h_{5'} = h_1 - h_{4'} > h_1 - h_4$$

$$q_0 = h_2 - h_{4'} > h_2 - h_4$$

$$w_{\text{net}} = q_0 - q_c = h_2 - h_1$$

可见，采用过冷以后，循环单位制冷量增加，耗功不变，因此其制冷系数增大。

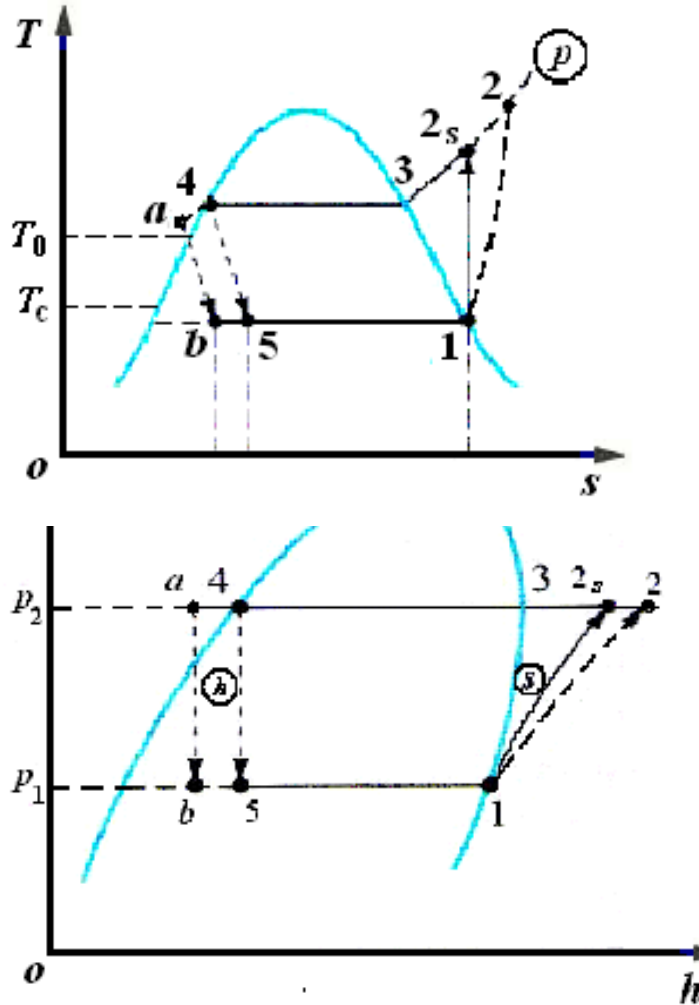
4、若采用叶轮式压气机，由于流速较高，一般摩擦不能忽略，因此压缩过程应为不可逆绝热过程，1-2'。





四、状态参数确定

T - s 图和 $\log p$ - h 图



$$q_c = h_1 - h_5 = h_1 - h_4$$

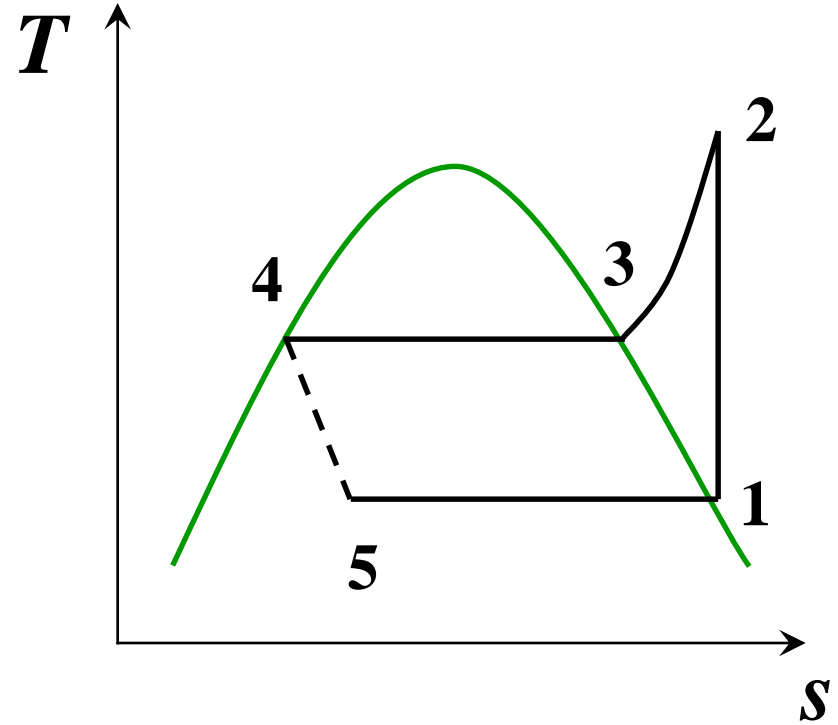
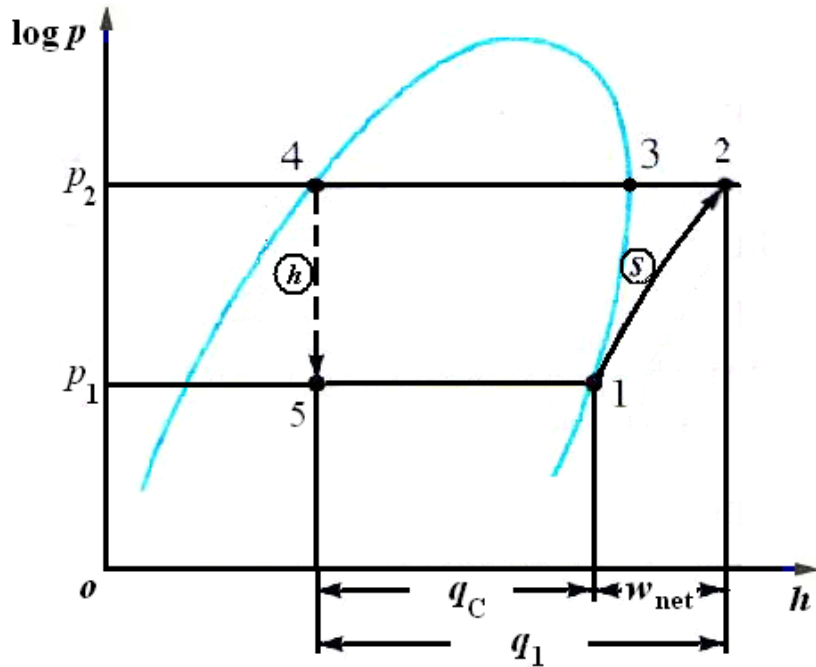
$$q_0 = h_2 - h_4$$

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{q_c}{w_{\text{net}}} = \frac{q_c}{q_0 - q_c} \\ &= \frac{h_1 - h_4}{(h_2 - h_4) - (h_1 - h_4)} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}\end{aligned}$$

循环的**制冷量、放热量、净功**都可以由状态点的**横标值（焓值）之差表示**，工程应用非常方便，因此在制冷行业中，通常采用压焓图，来表示循环过程。



lgp-h图及计算

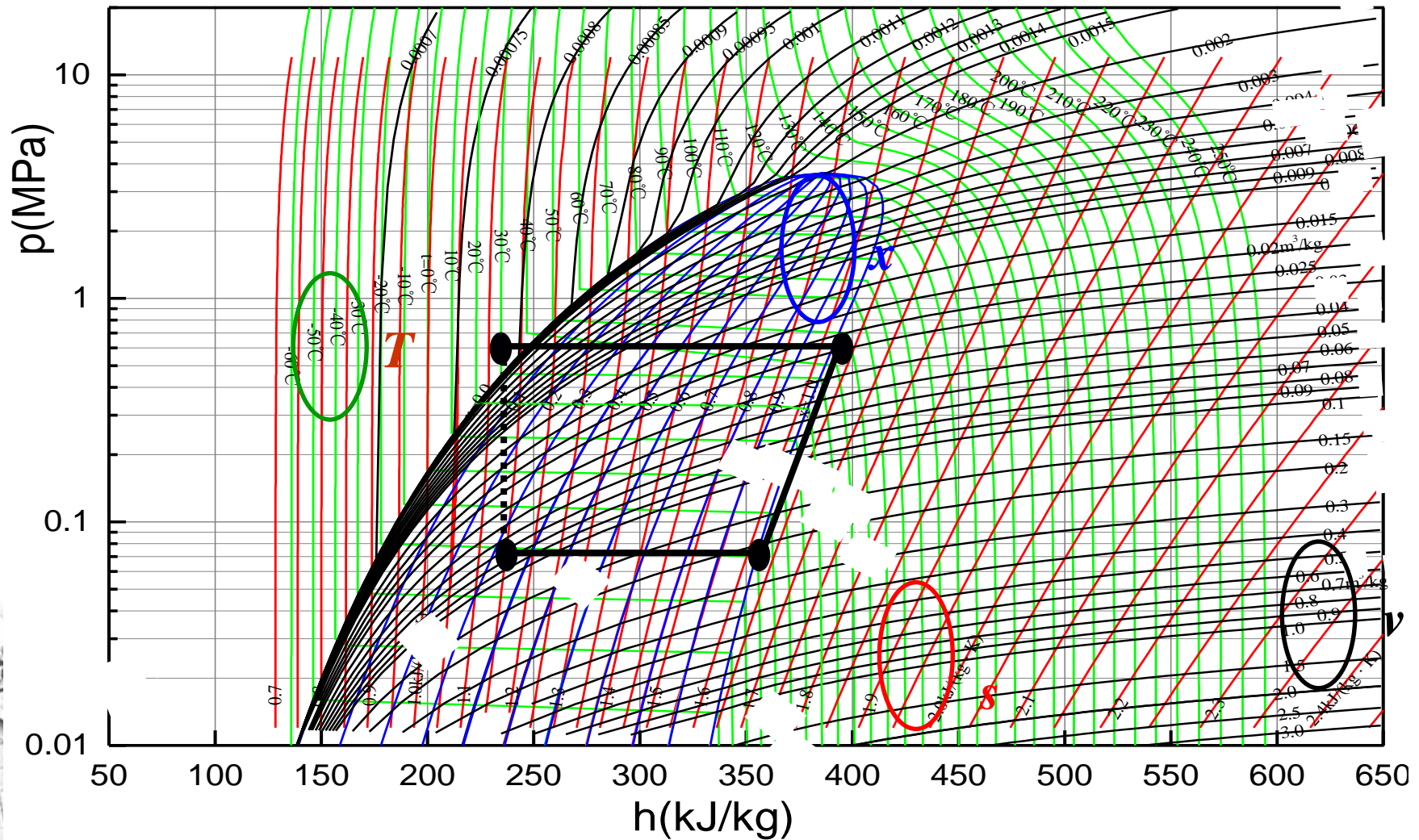


$$q_c = h_1 - h_5 = h_1 - h_4$$

$$q_0 = h_2 - h_4$$

$$\varepsilon = \frac{q_c}{w} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

压焓图 P - h diagram





例题2

某压缩蒸汽制冷装置用氨作制冷剂，制冷率 10^5 kJ/h，若已知冷凝温度为 27°C ，蒸发温度为 -5°C ，试求：制冷剂的质量流量；压缩机功率及增压比；冷凝器放热量及循环制冷系数。

解：由已知， $t_1=t_5=-5^\circ\text{C}=268\text{K}$ ， $t_3=t_4=27^\circ\text{C}=300\text{K}$ ，

查 $\log p$ - h 图，可确定状态点4和1，可得：

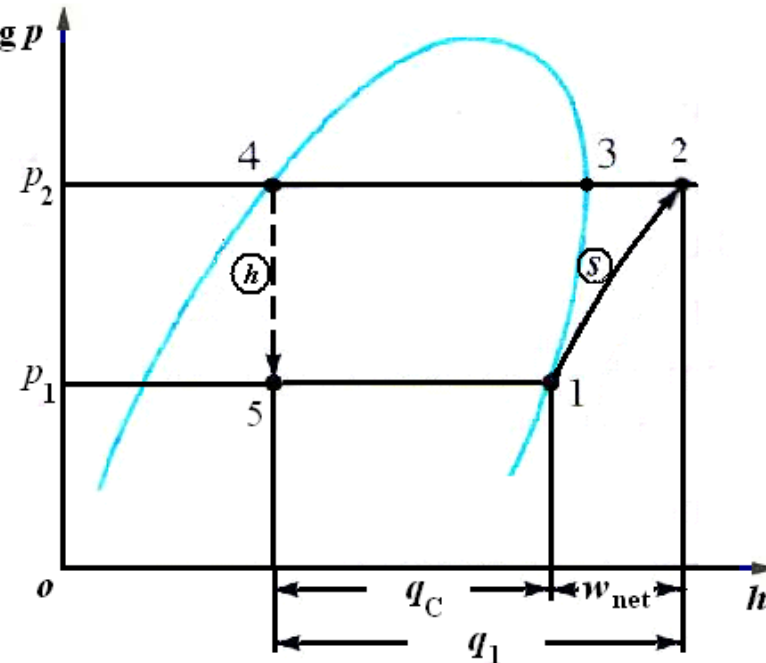
$$p_4 = 1.1 \text{ MPa} \quad h_4 = 450 \text{ kJ/kg},$$

$$p_1 = 0.35 \text{ MPa} \quad h_1 = 1570 \text{ kJ/kg}$$

由 $h_5=h_4$, $p_5=p_1$ ，可确定状态点5。

由 $p_2=p_4$, $s_2=s_1$ ，可确定状态点2，可得：

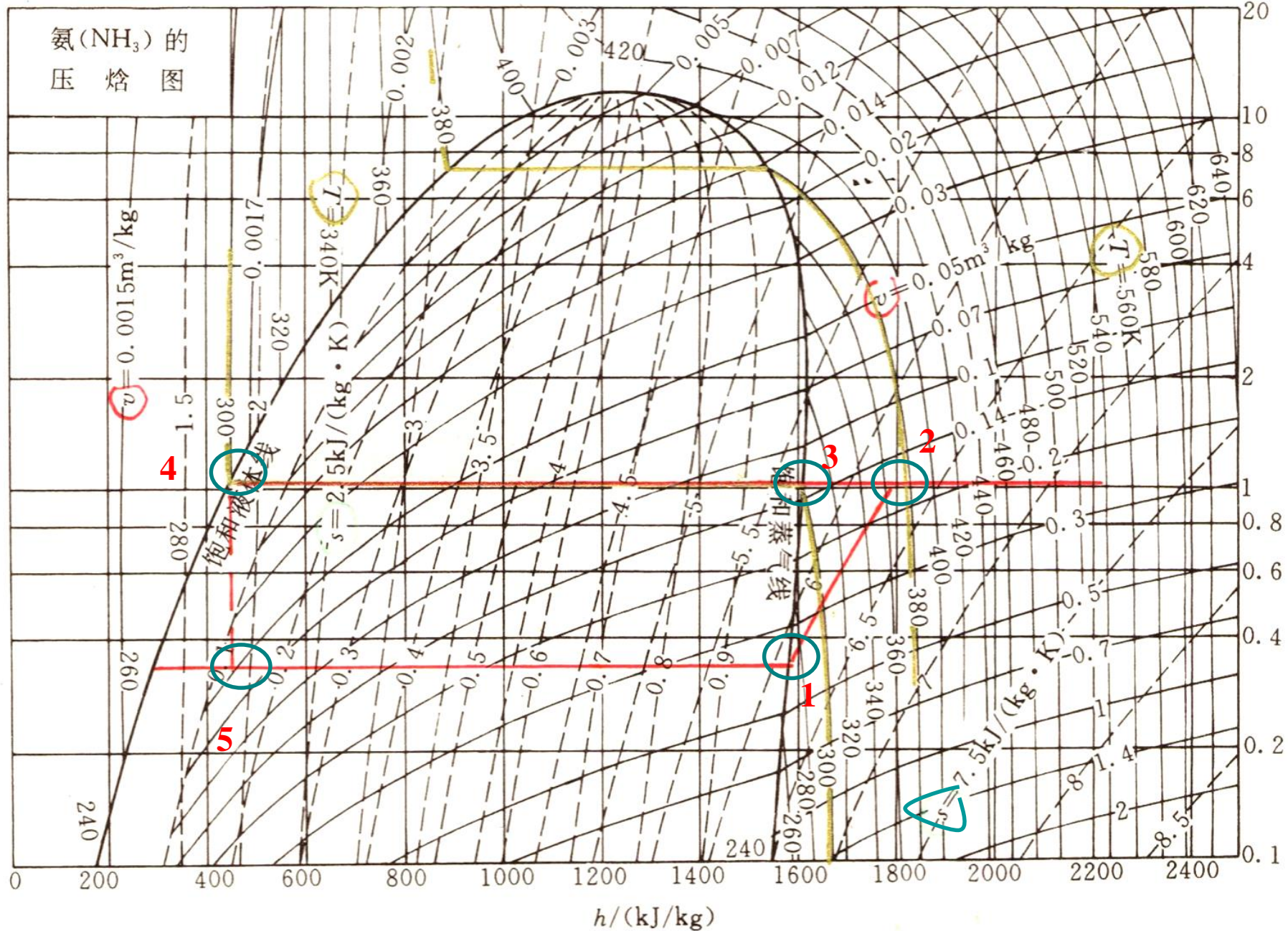
$$h_2 = 1770 \text{ kJ/kg}$$



各状态点的焓值都确定了，然后可以直接通过焓值进行热力性能计算。



氨(NH₃) 的
压 焓 图



$$q_c = h_1 - h_5$$

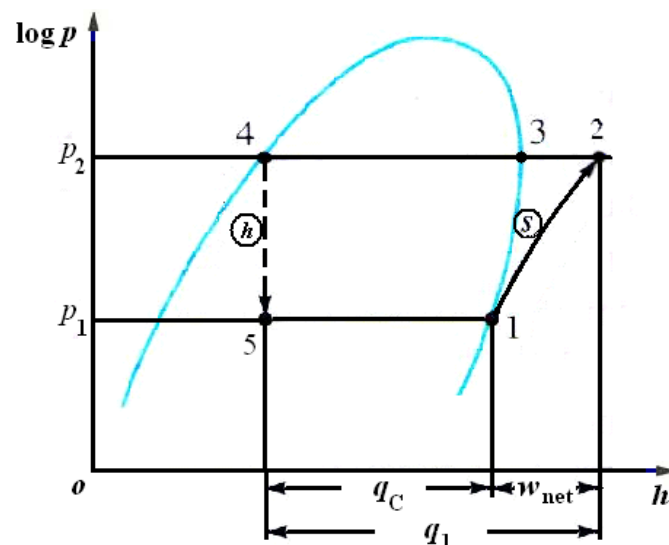
$$= 1\,570 \text{ kJ/kg} - 450 \text{ kJ/kg} = 1\,120 \text{ kJ/kg}$$

$$q_m = \frac{Q_c}{q_c} = \frac{1 \times 10^5 \text{ kJ/h}}{3\,600 \times 1\,120 \text{ kJ/s}} = 0.024\,8 \text{ kg/s}$$

$$P = q_m (h_2 - h_1) = 0.024\,8 \text{ kg/s} \times (1\,770 - 1\,570) \text{ kJ/kg} = 4.96 \text{ kW}$$

$$Q_0 = q_m (h_4 - h_2) = 0.024\,8 \text{ kg/s} \times (450 - 1\,770) \text{ kJ/kg} = -32.7 \text{ kW}$$

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{P} = \frac{1 \times 10^5 \text{ kJ/h}}{3\,600 \times 4.96 \text{ kW}} = 5.6$$



可见，压缩蒸汽制冷循环的制冷系数（5.6），要明显高于压缩空气制冷循环的制冷系数（1.71），更接近逆卡诺循环的制冷系数（6.33），因此，目前使用的压缩制冷循环，绝大部分都采用压缩蒸汽制冷循环。

11-4 制冷剂性质



一、制冷剂热力性质

1. 对应制冷装置工作温度（蒸发温度、冷凝温度）的饱和压力适中——蒸发压力过低，造成密封问题；冷凝压力过高，提高材料耐压要求，成本增加；
2. 汽化潜热大——提高单位质量工质的制冷能力；
3. 临界温度应高于环境温度——使冷却过程更可能接近等温过程；
4. 蒸汽比体积小，传热性能好——使装置更加紧凑；
5. 三相点低于制冷循环下限温度——避免出现凝固现象，堵塞管路；
6. 上、下界限线（在T-s图）陡峭，使冷凝更接近定温放热，并可减少节流引起制冷能力损失。



二、制冷剂其他性质

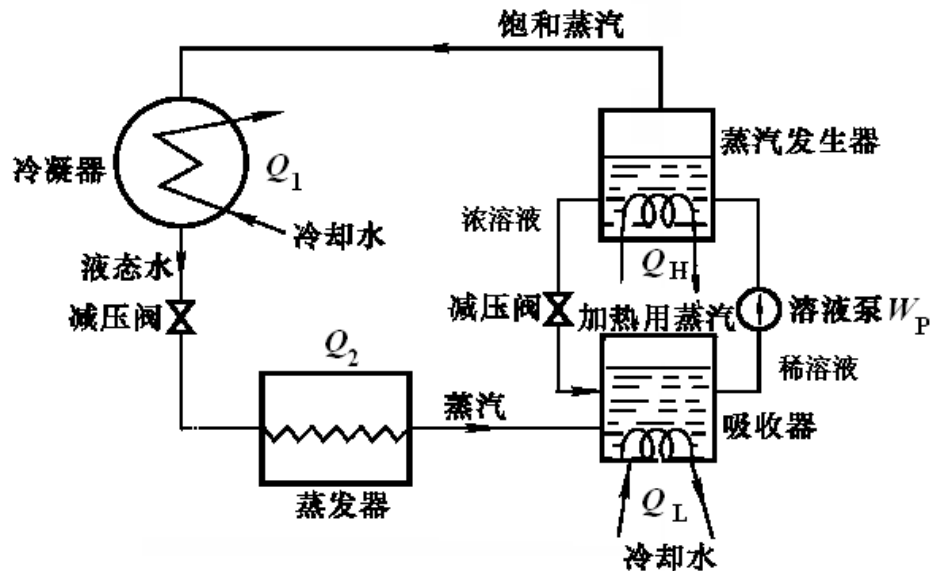
1. 对环境友善；
2. 安全无毒；
3. 溶油性好，化学稳定性好，等等。

11-5 其他制冷循环



一、吸收式制冷循环

$$\text{COP} = \frac{Q_C}{Q_H + W_P} \approx \frac{Q_C}{Q_H}$$

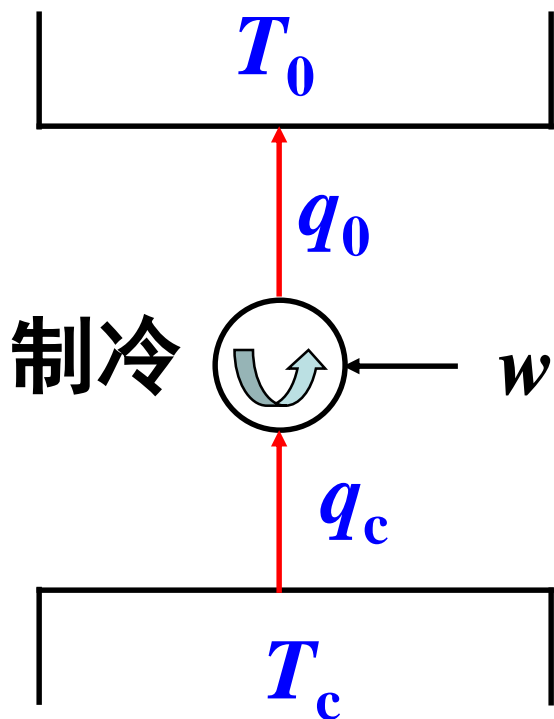


优点： 功耗小，只有一个溶液泵耗功，可以利用品位较低的余热资源，实现废热利用；

缺点： 性能系数较低，通常在1左右，设备体积大，只适用于冷负荷稳定的场合。

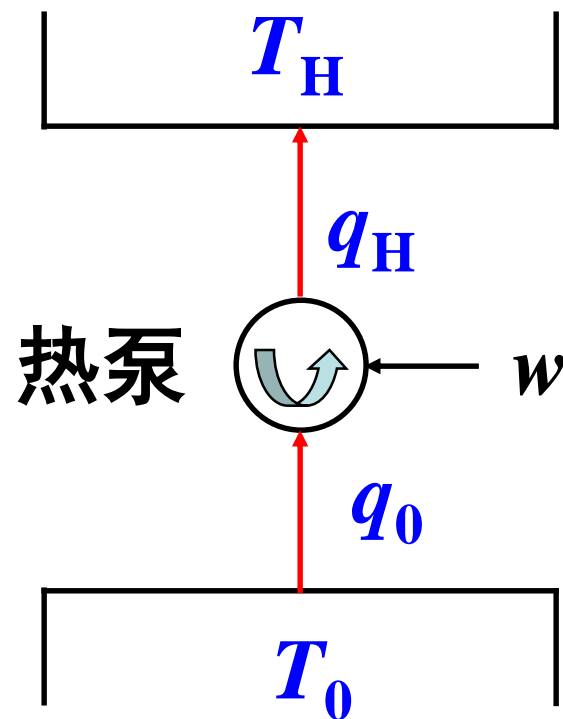


11-6 热泵循环



制冷
系数

$$\varepsilon = \frac{q_c}{w}$$

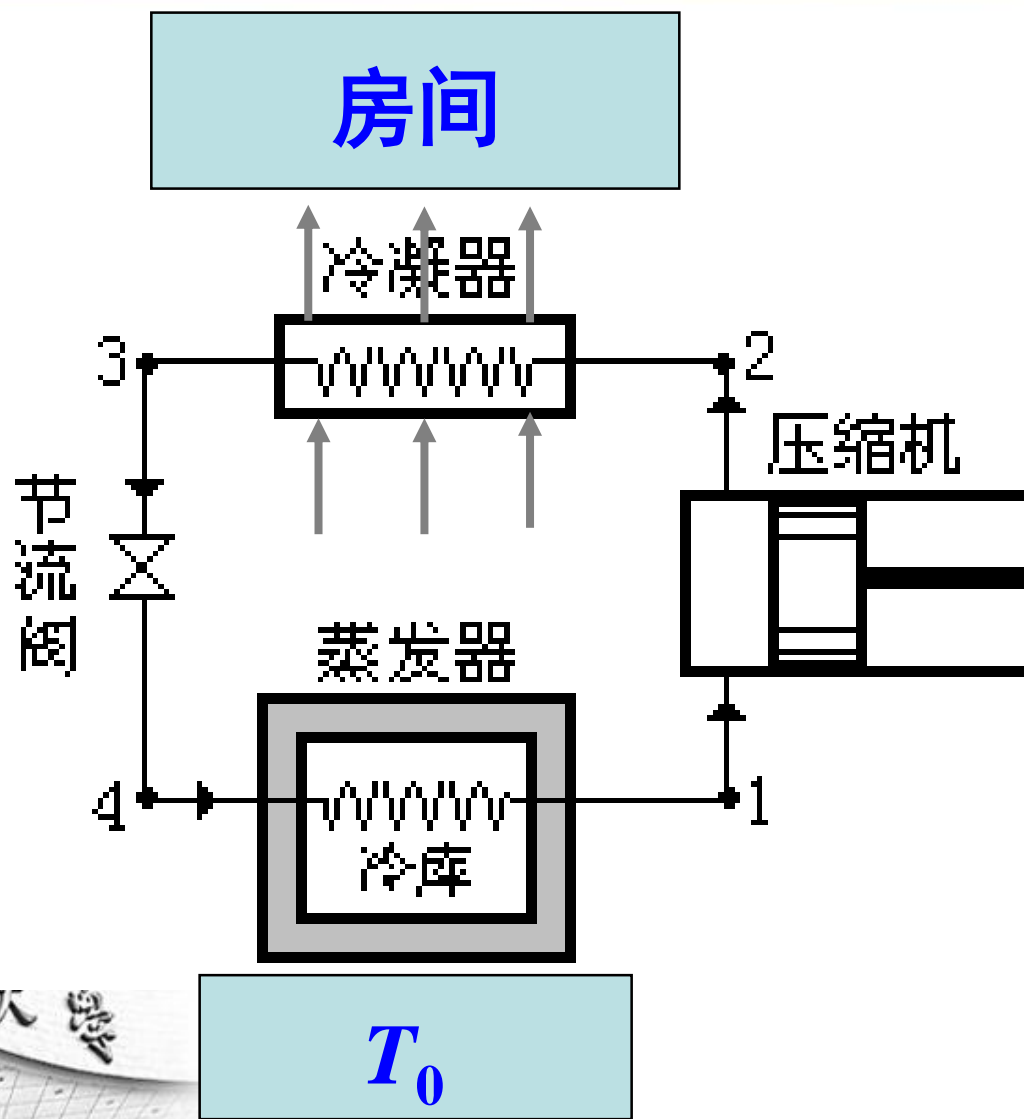


制热
系数

$$\varepsilon' = \frac{q_H}{w} = \frac{q_0 + w}{w} = \varepsilon + 1$$

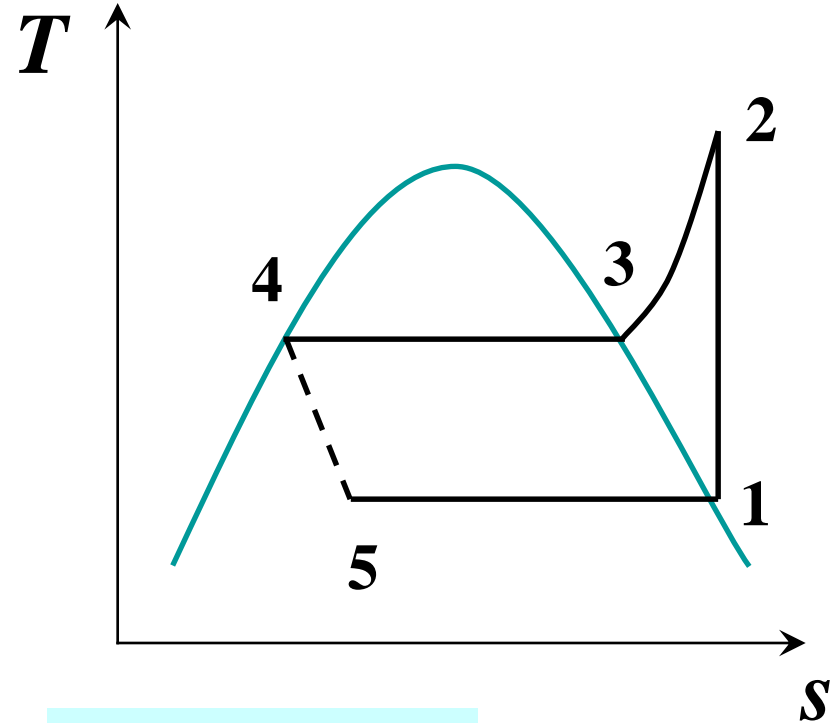
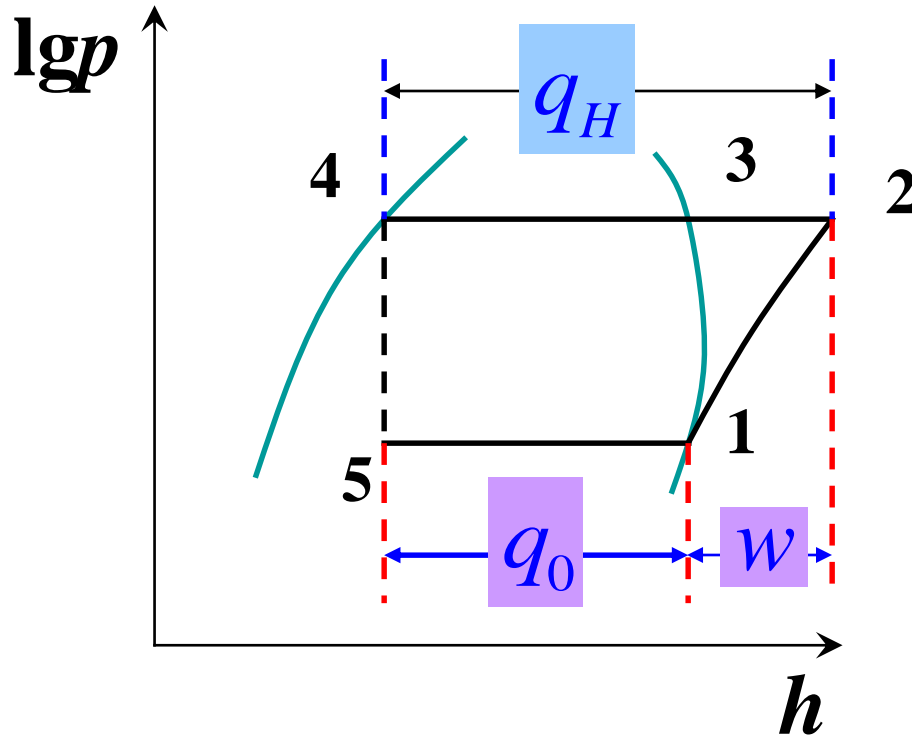


蒸气压缩式热泵装置





热泵lnp-h图及计算



$$q_0 = h_1 - h_5 = h_1 - h_4$$

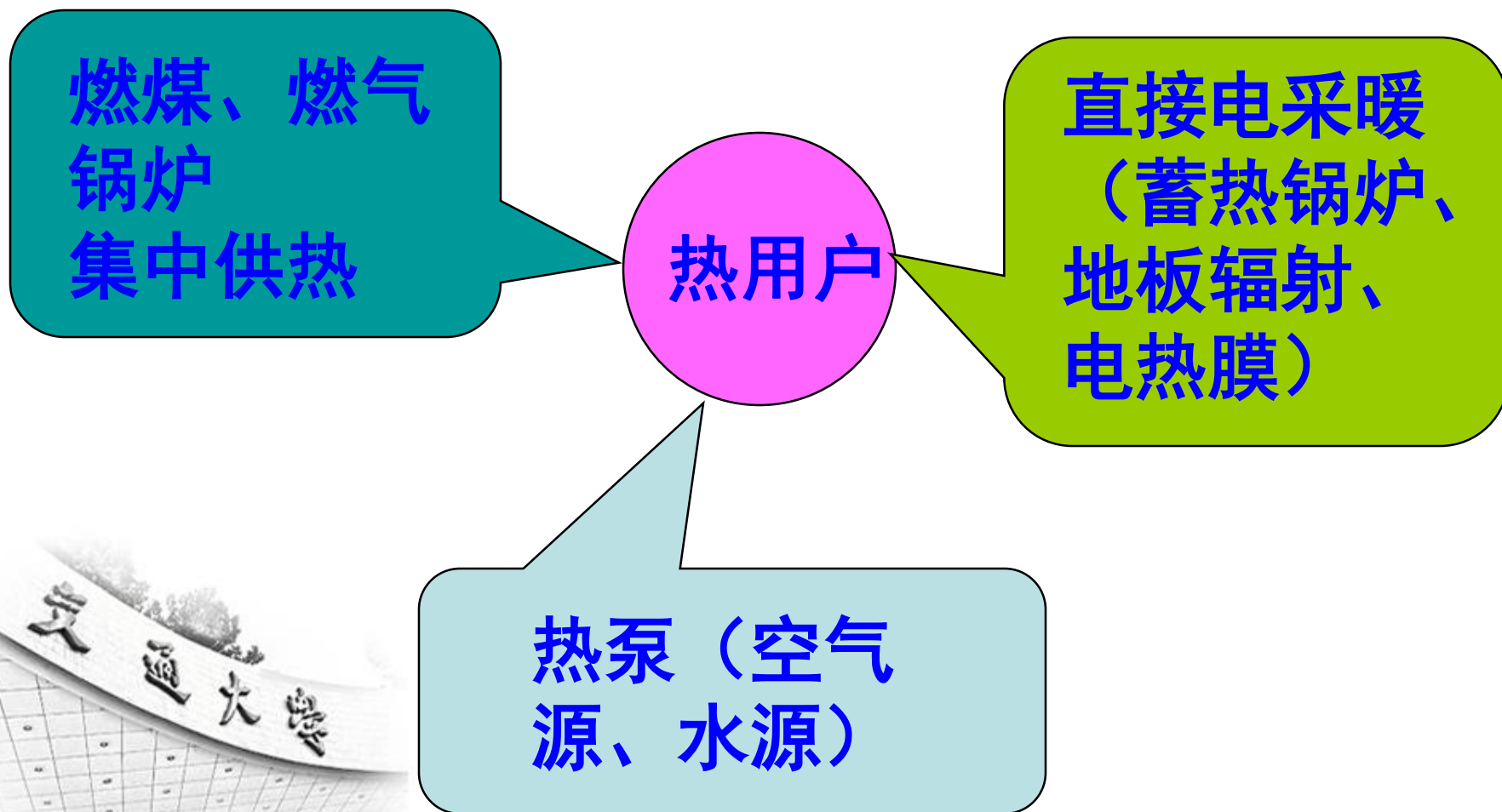
$$q_H = h_2 - h_4$$

$$w = h_2 - h_1$$

$$\varepsilon' = \frac{q_H}{w} = \frac{h_2 - h_4}{h_2 - h_1}$$

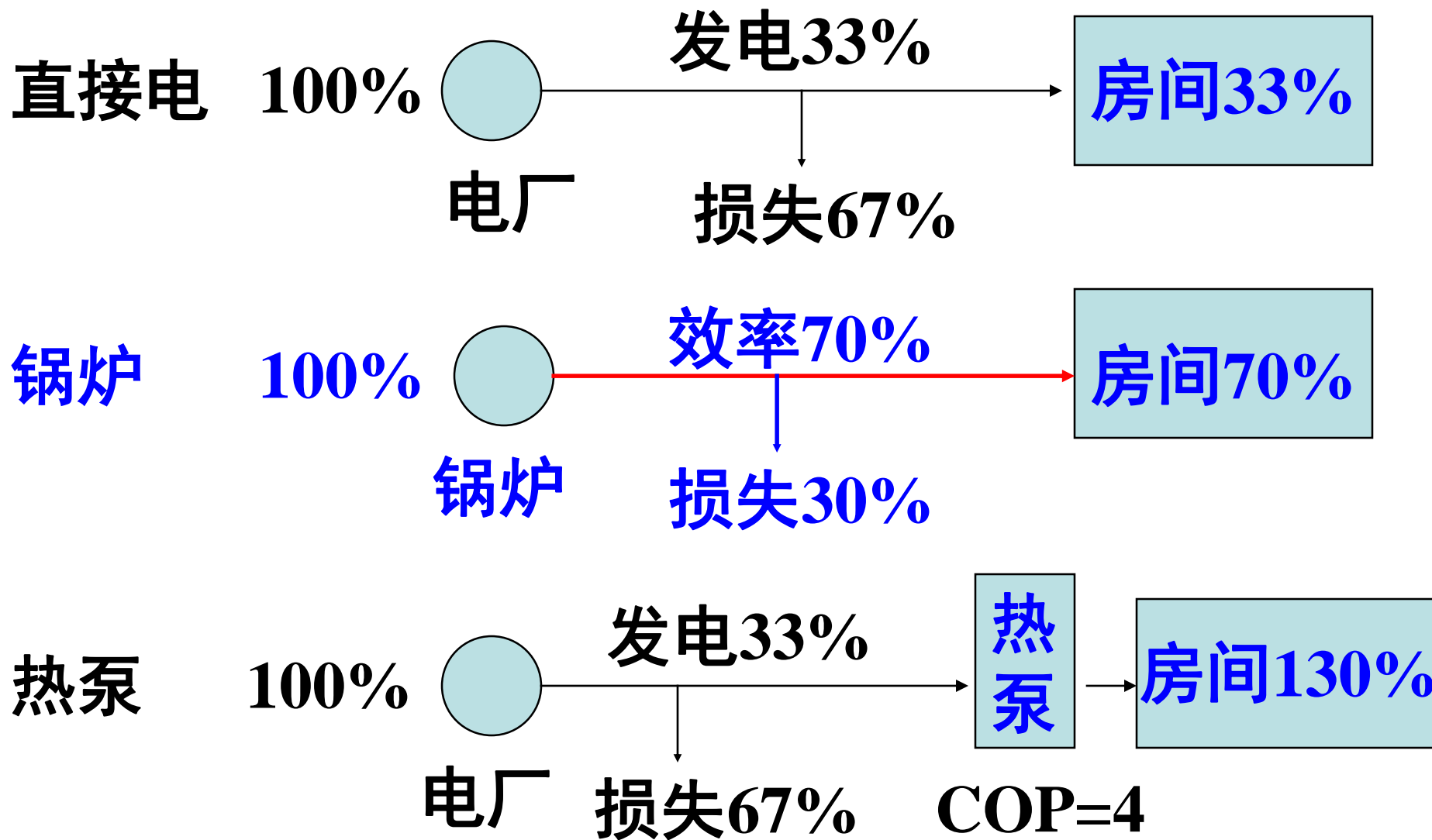


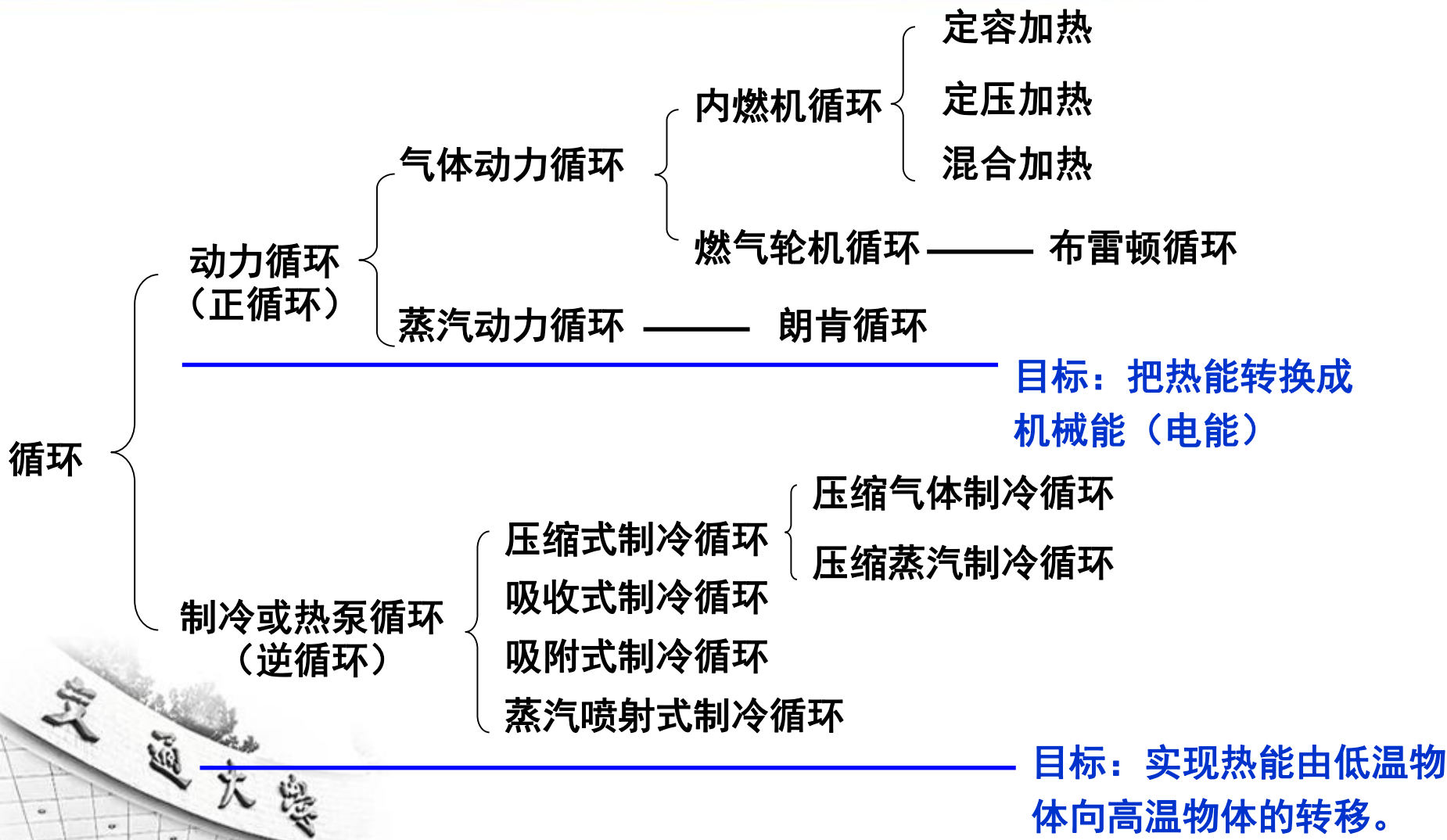
主要供暖方式





能量利用系数





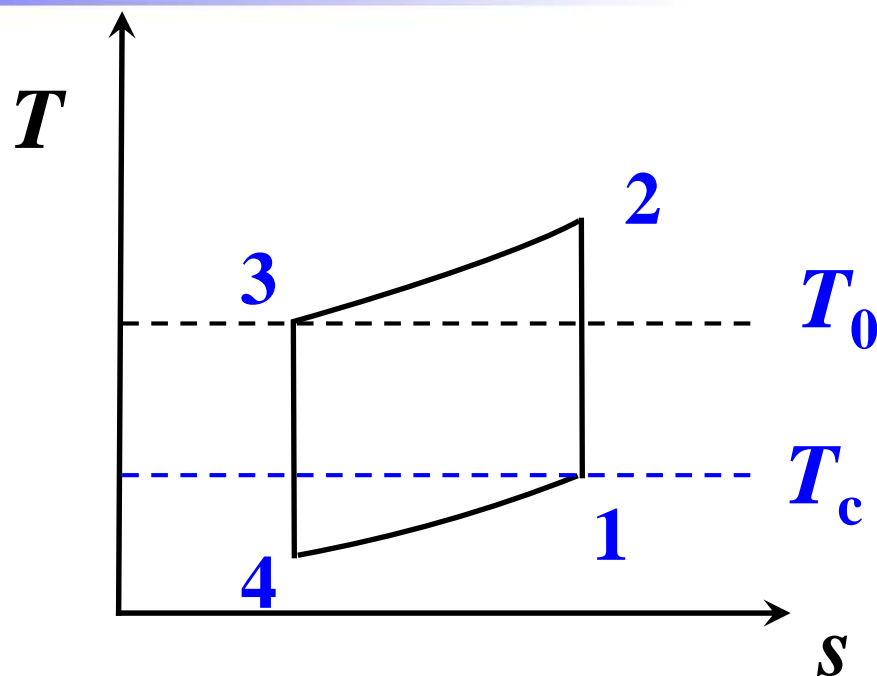
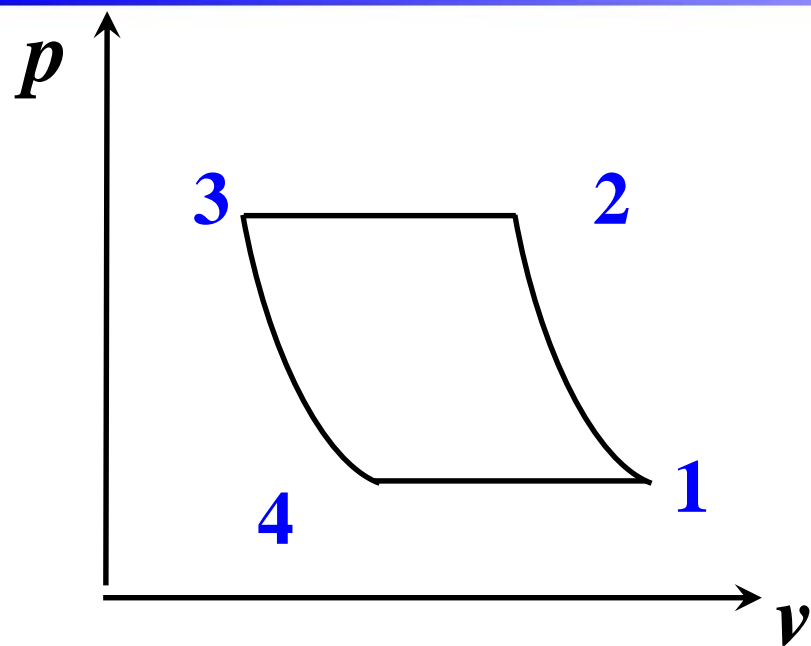


第11章 小结

1. 压缩空气制冷，分析、计算、回热；
2. 压缩蒸汽制冷，分析、计算；
3. 热泵循环



一、简单压缩空气制冷循环



1 → 2 绝热压缩 $\odot s$
2 → 3 等压冷却 $\odot p$

3 → 4 绝热膨胀 $\odot s$
4 → 1 等压吸热 $\odot p$

逆布雷顿循环

循环增压比 $\pi = \frac{p_2}{p_1}$



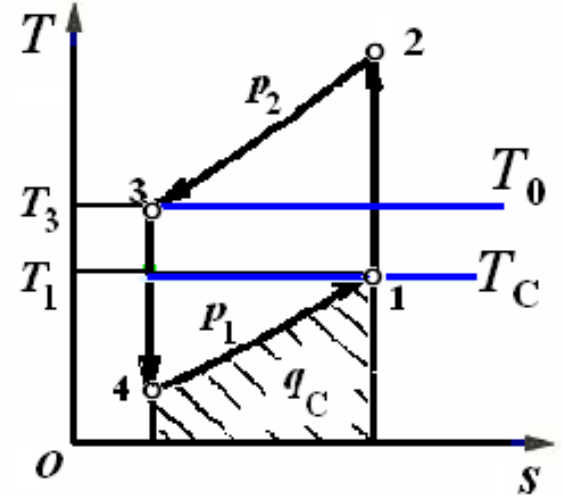
制冷系数 (the coefficient of performance COP)

放热量: $q_0 = h_2 - h_3$

吸热量: $q_C = h_1 - h_4$

净功量:

$$\begin{aligned} W_{\text{net}} &= W_c - W_t = q_0 - q_c \\ &= h_2 - h_1 - (h_3 - h_4) = (h_2 - h_3) - (h_1 - h_4) \end{aligned}$$



制冷系数:

$$\varepsilon = \frac{q_C}{W_{\text{net}}} = \frac{h_1 - h_4}{(h_2 - h_3) - (h_1 - h_4)} = \frac{T_1 - T_4}{(T_2 - T_3) - (T_1 - T_4)}$$

$$= \frac{1}{\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1} = \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$



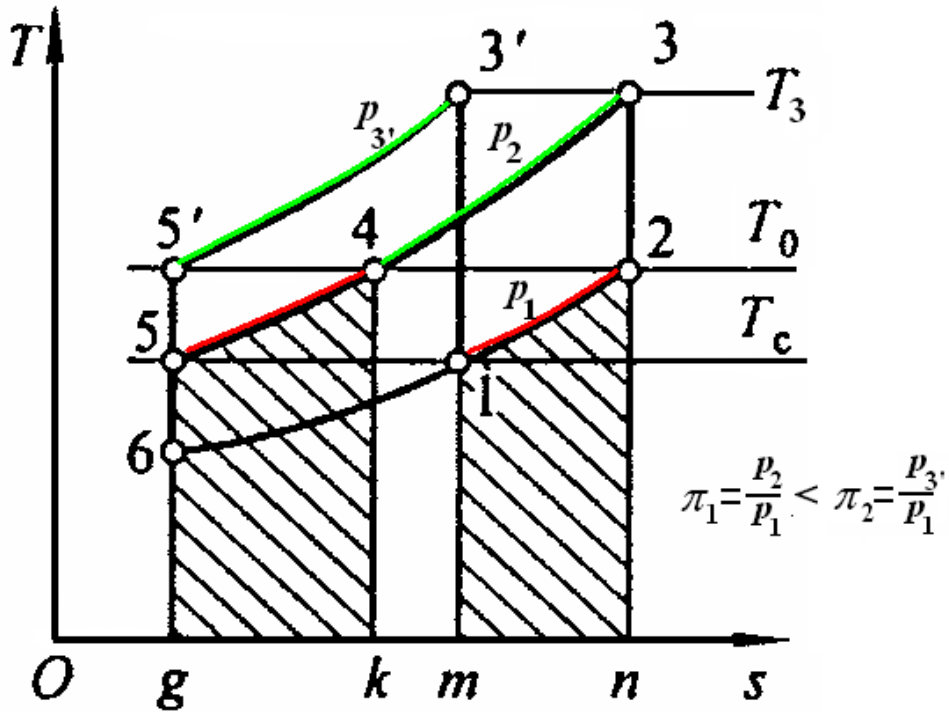
二、回热式压缩空气制冷循环

放热量: $q_0 = h_3 - h_4$

制冷量: $q_C = h_1 - h_6$

制冷系数:

$$\varepsilon = \frac{q_C}{q_0 - q_C} = \frac{h_1 - h_6}{(h_3 - h_4) - (h_1 - h_6)}$$





回热后：

$$q_c = c_p(T_1 - T_6)$$

不变

$$q_0 = c_p(T_{3'} - T_{5'})$$

非回热

$$q_0 = c_p(T_3 - T_4)$$

回热

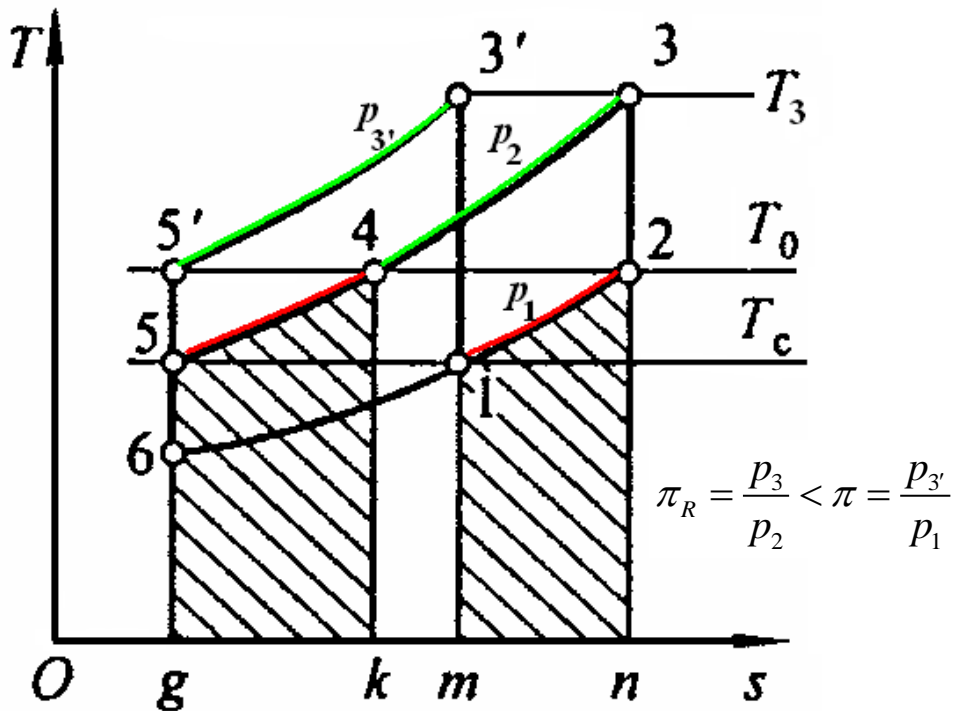
相等

$$\varepsilon_{\text{回热}} = \varepsilon_{\text{非回热}}$$

$$\pi_R = \frac{p_3}{p_2} < \pi = \frac{p_{3'}}{p_1}$$

1) 可以采用叶轮机械，提高空气质量流量，提高制冷量；

2) 压缩机的功耗减小，压缩过程及膨胀过程中的不可逆损失减小。





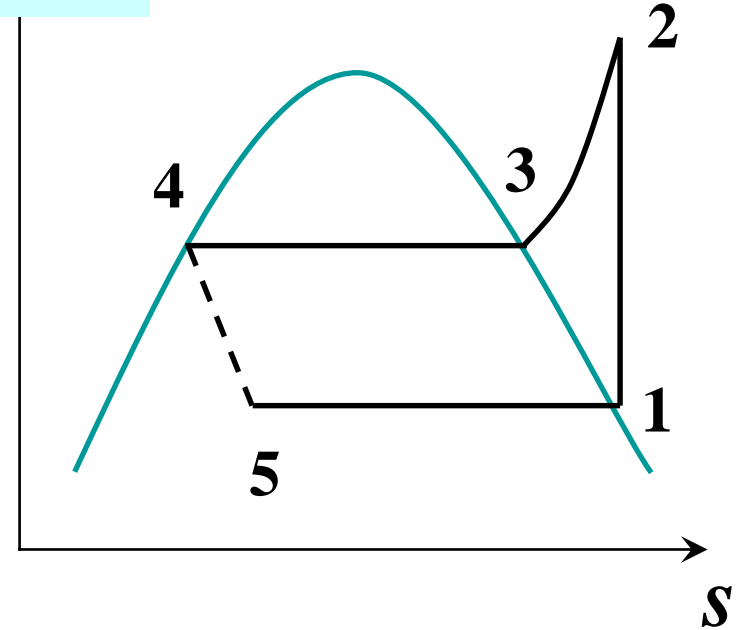
三、压缩蒸汽制冷循环

蒸发器中吸热量 $q_c = h_1 - h_5 = h_1 - h_4$

冷凝器中放热量 $q_0 = h_2 - h_4$

制冷系数

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{q_c}{w_{\text{net}}} = \frac{q_c}{q_0 - q_c} \\ &= \frac{h_1 - h_4}{(h_2 - h_4) - (h_1 - h_4)} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}\end{aligned}$$

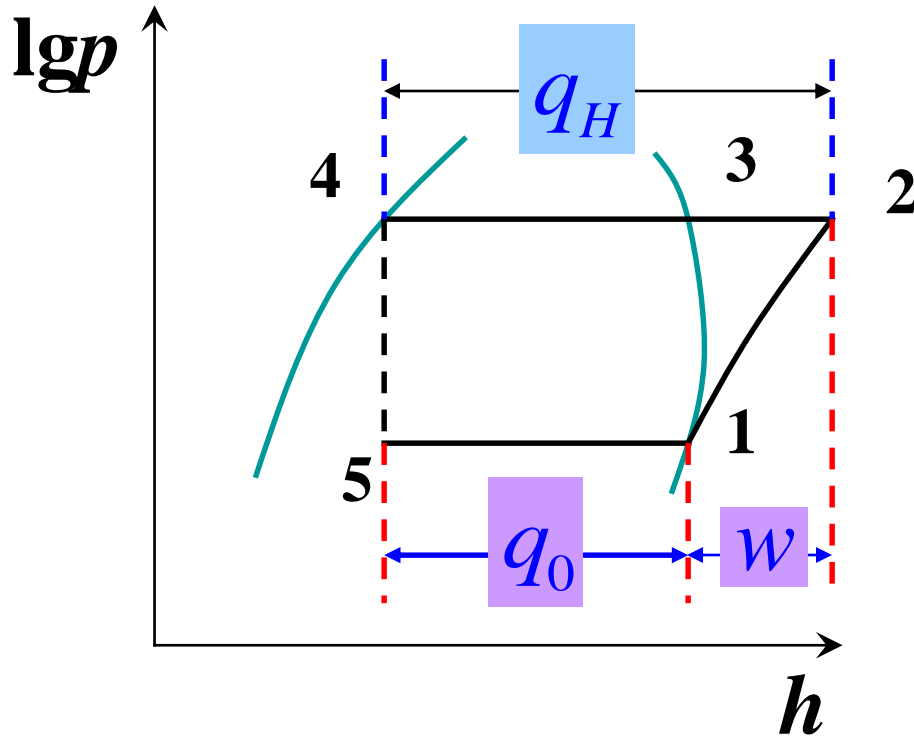


提高制冷系数的途径：

- 1、降低冷凝温度 T_0 ——受限于环境温度
- 2、提高蒸发温度 T_c ——受限于制冷温度
- 3、采用过冷

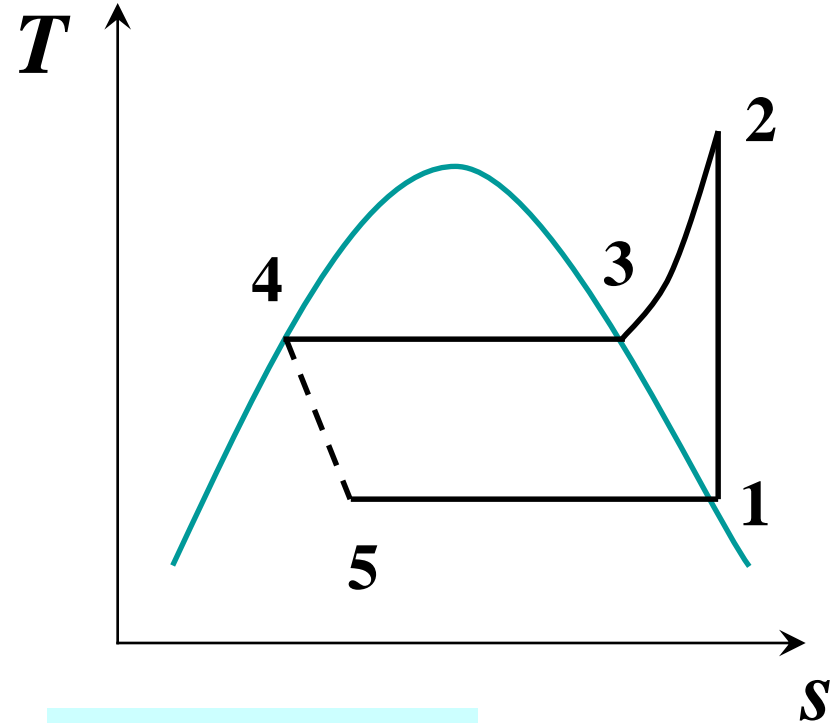


四、热泵循环



$$q_0 = h_1 - h_5 = h_1 - h_4$$

$$q_H = h_2 - h_4$$



$$w = h_2 - h_1$$

$$\varepsilon' = \frac{q_H}{w} = \frac{h_2 - h_4}{h_2 - h_1}$$



作业

11-5, 11-6, 11-10, 11-13

