

第七章

制冷装置循环

Refrigeration Cycles



本章需掌握内容

基本概念：

- ① 卡诺制冷循环
- ② 气体压缩式制冷循环
- ③ 蒸气压缩式制冷循环

知识运用：

- ① 气体压缩式制冷分析计算
- ② 蒸气压缩式制冷分析计算

作业

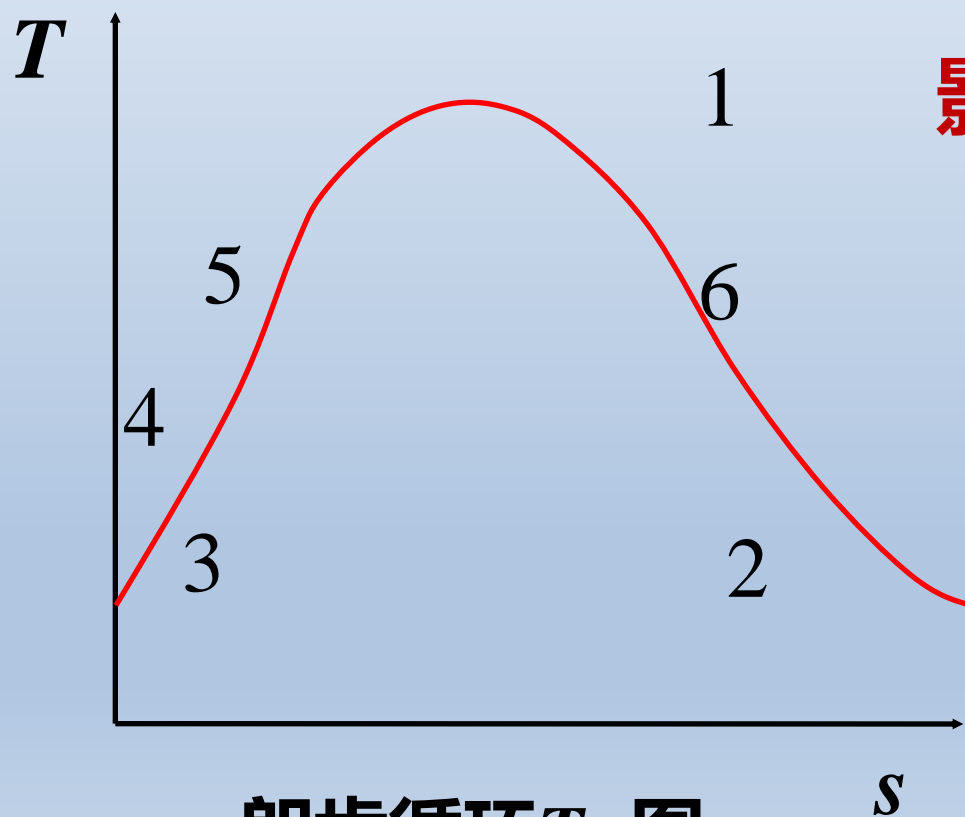
7-2

7-3

7-7

朗肯循环

$$\eta_t =$$



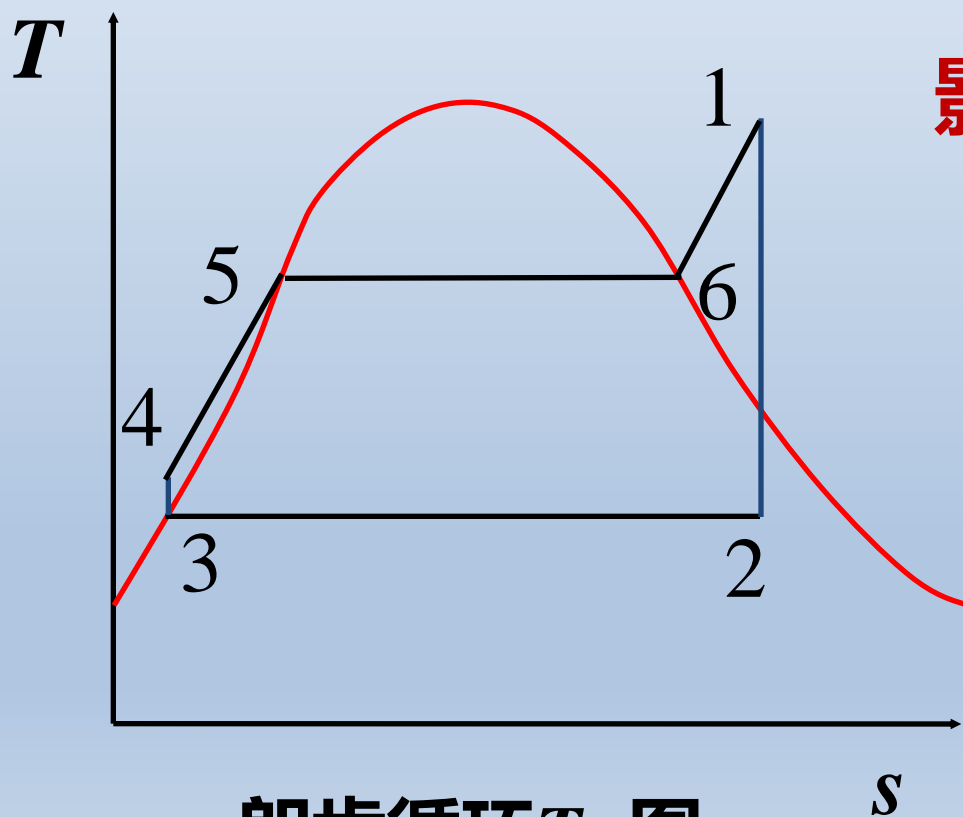
影响热效率的参数:

$$p_1 \quad t_1 \quad p_2 \quad \eta_t$$

朗肯循环 T - s 图

朗肯循环

$$\eta_t \approx \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3}$$



朗肯循环 T - s 图

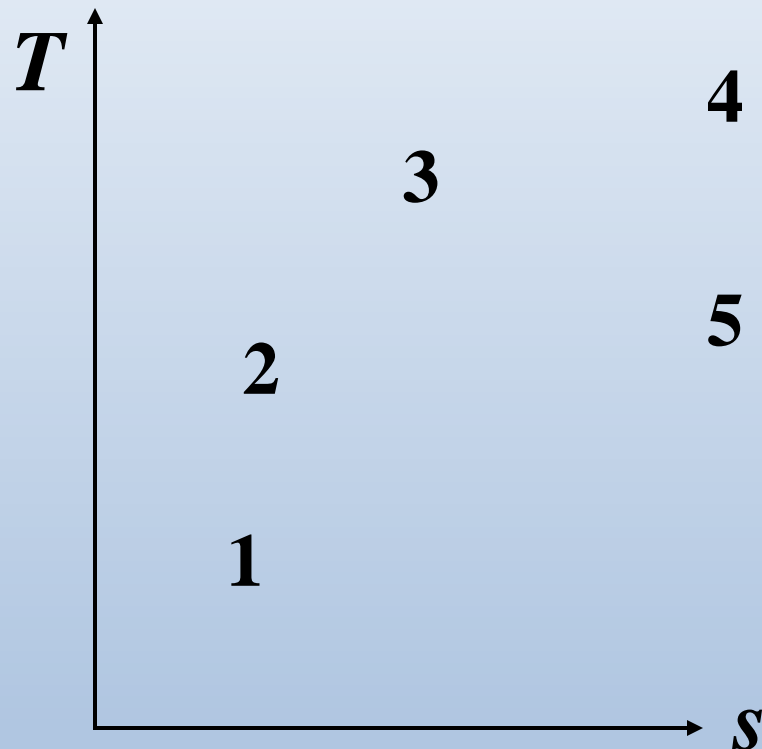
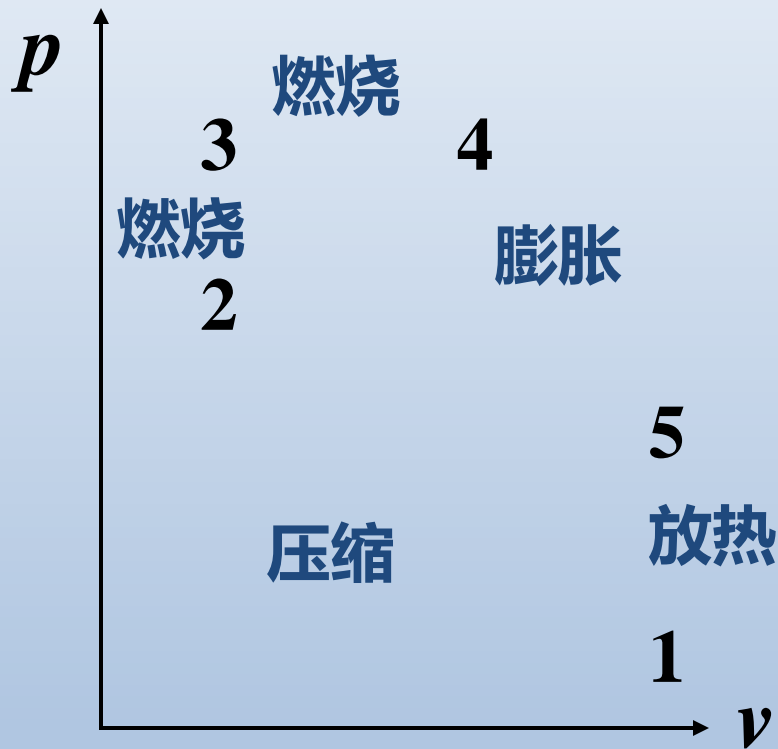
影响热效率的参数:

p_1 t_1 p_2

$p_1 \uparrow$ $t_1 \uparrow$ $p_2 \downarrow$ $\eta_t \uparrow$

理想混合加热循环（萨巴德循环）

（混合加热、定容放热）

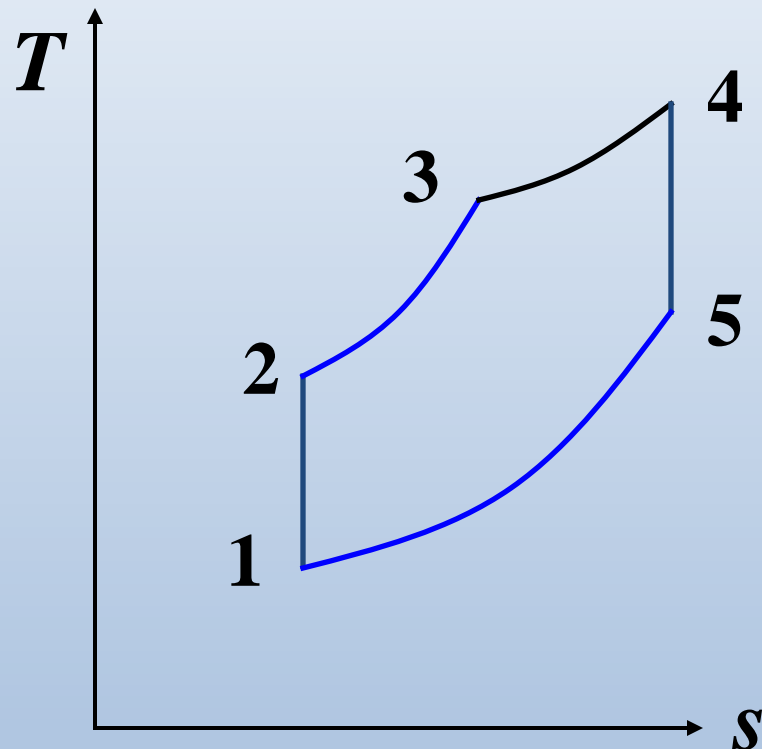
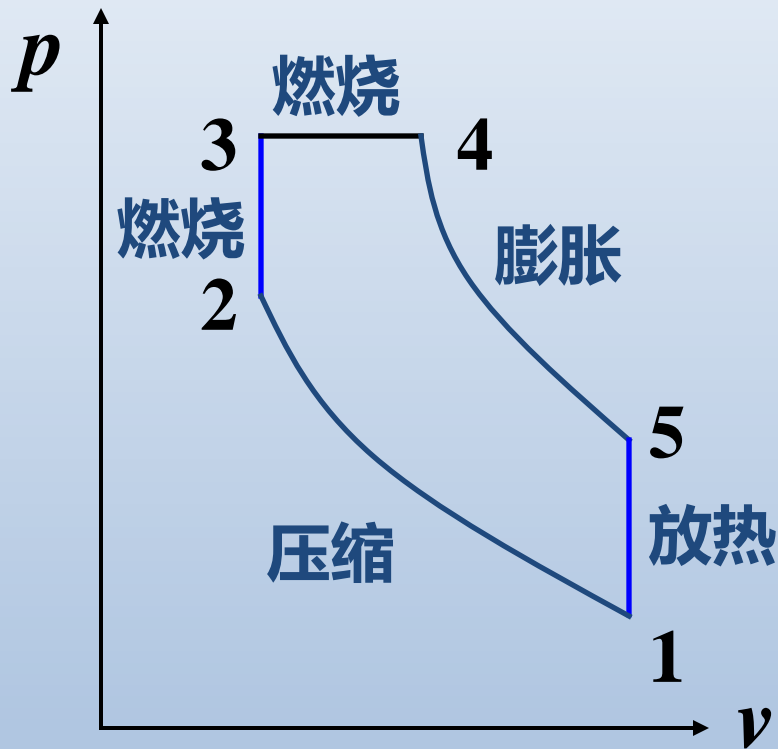


吸热量 $q_1 =$

放热量 $q_2 =$

理想混合加热循环（萨巴德循环）

（混合加热、定容放热）



吸热量 $q_1 = c_v (T_3 - T_2) + c_p (T_4 - T_3)$ 放热量 $q_2 = c_v (T_5 - T_1)$

主要内容

§7-1 空气压缩制冷循环

§7-2 蒸气压缩制冷循环

§7-3 吸收式制冷循环

§7-4 蒸气吸附式制冷

§7-5 喷射式制冷

动力循环与制冷（热泵）循环

➤ 动力循环 —正循环

输入热，通过循环输出功

➤ 制冷循环 —逆循环

输入功量（或其他代价），从低温热源取热（用户），向高温热源放热

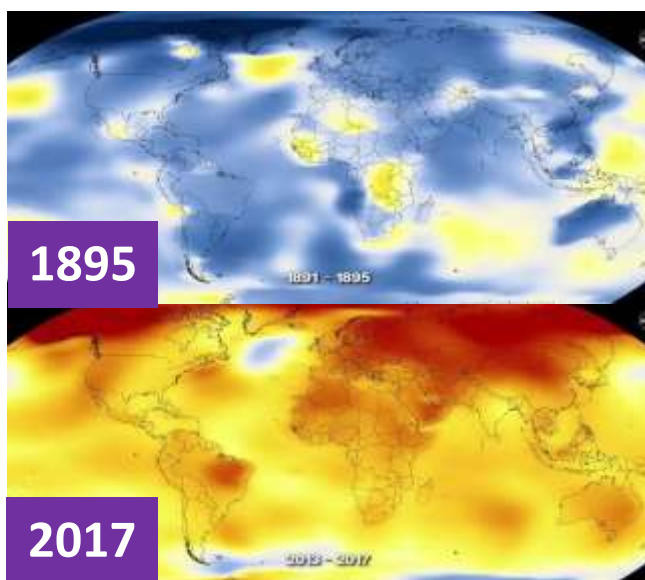
➤ 热泵循环 —逆循环

输入功量（或其他代价），从低温热源取热，向高温热源放热（用户）

制冷空调与热泵能耗

制冷能耗巨大:

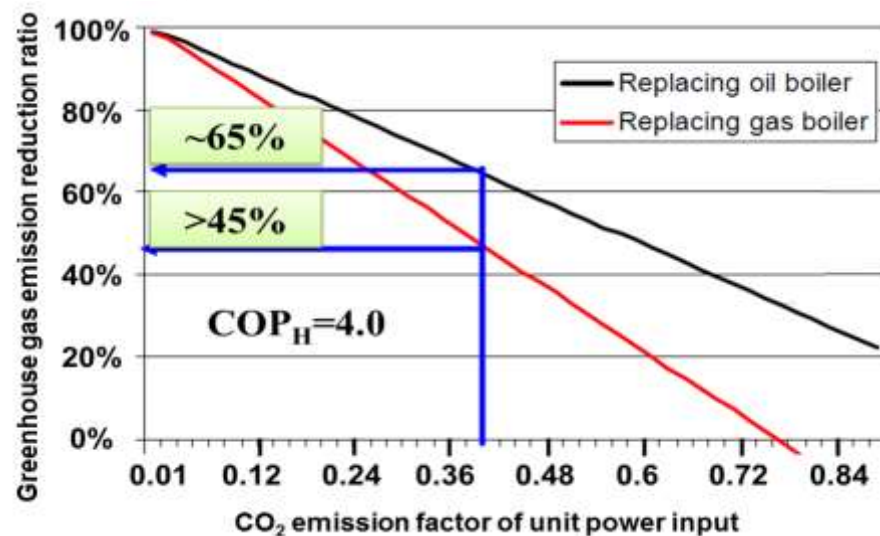
占社会总能耗~15% (发达国家>20%)



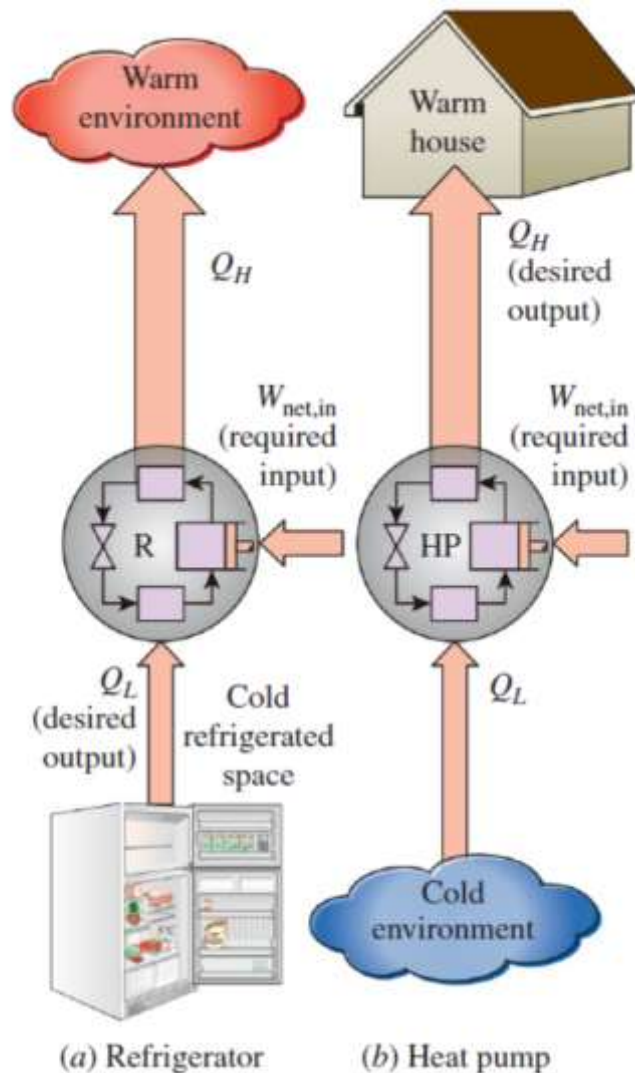
The global average surface temperature

1895: 13.75°C → 2017: 14.83°C

热泵的节能和减排作用



制冷的热力学原理



- 当以冷却某空间为目的的时，称为**制冷循环**；
- 当对某空间加热为目的的时，称为**热泵循环**；
- 性能系数分别为**制冷系数**、**供热（制热）系数**。

性能系数COP

(Coefficient of Performance)

热力学关心能量转换的经济性，即投入一定能量，可以收到多少制冷效果（制冷量）。为此，对于机械或电驱动方式的制冷机引入制冷系数来衡量；对于热能驱动方式的制冷机，引入热力系数来衡量。

$$COP = \varepsilon = Q_0 / W$$

$$COP = \xi = Q_0 / Q_g$$

式中： Q_0 为制冷机的制冷量；
 Q_g 为驱动热源向热驱动制冷机输入的热量；
 W 为机械驱动制冷机的输入功。

- COP反映制冷循环中投入与收益能在数量上的比值，不涉及二者的能量品位。
- COP的数值可能大于1、小于1或等于1。COP的大小，对于实际制冷机，与工作温度、制冷剂性质和制冷机各组成部件的效率有关；对于可逆制冷机，只与热源温度有关。所以用COP值的大小比较两台实际制冷机的循环经济性时，必须是同类制冷机，并以相同热源条件为前提。

卡诺制冷循环和制冷系数

Coefficient of Performance

$$\text{COP} = \varepsilon = \frac{q_2}{w}$$

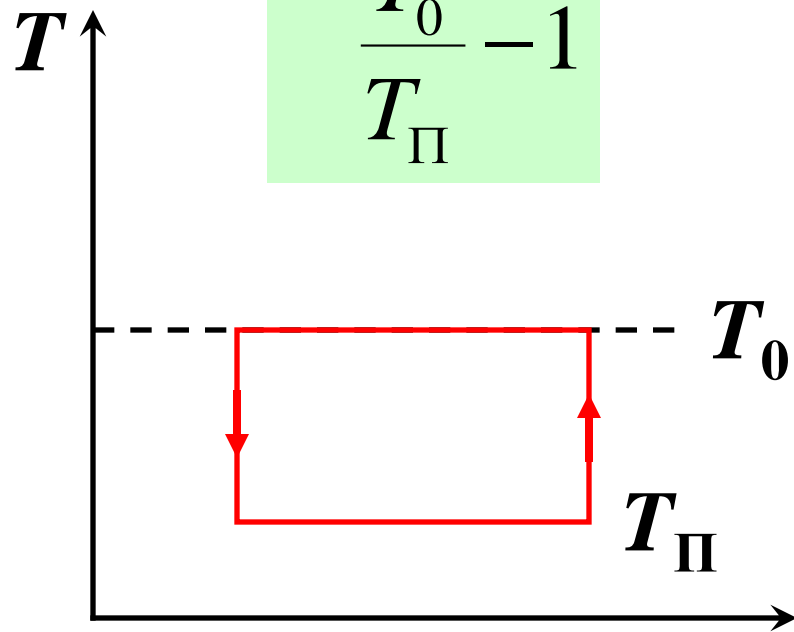
$$= \frac{1}{\frac{T_0}{T_{\Pi}} - 1}$$

卡诺逆循环（制冷）

$$\varepsilon_C = \frac{q_2}{w} = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{T_{\Pi}}{T_0 - T_{\Pi}}$$

T_0 不变, $T_{\Pi} \downarrow$ $\varepsilon_C \downarrow$

T_{Π} 不变, $T_0 \uparrow$ $\varepsilon_C \downarrow$



T_0 环境温度, T_{Π} 室内温度

卡诺热泵循环和供热系数

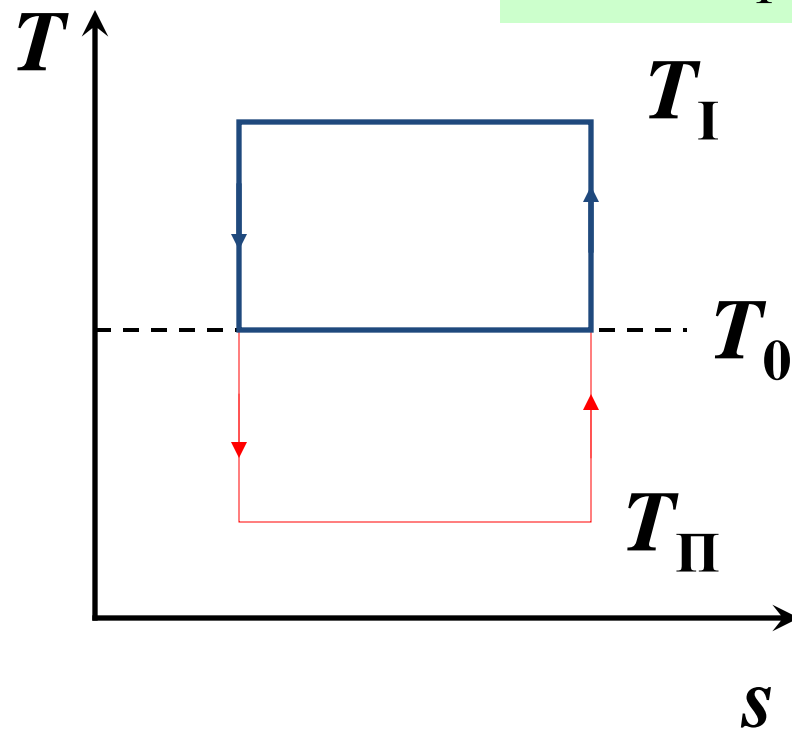
Coefficient of Performance

$$\text{COP} = \varepsilon' = \frac{q_1}{w}$$

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

卡诺逆循环 (热泵)

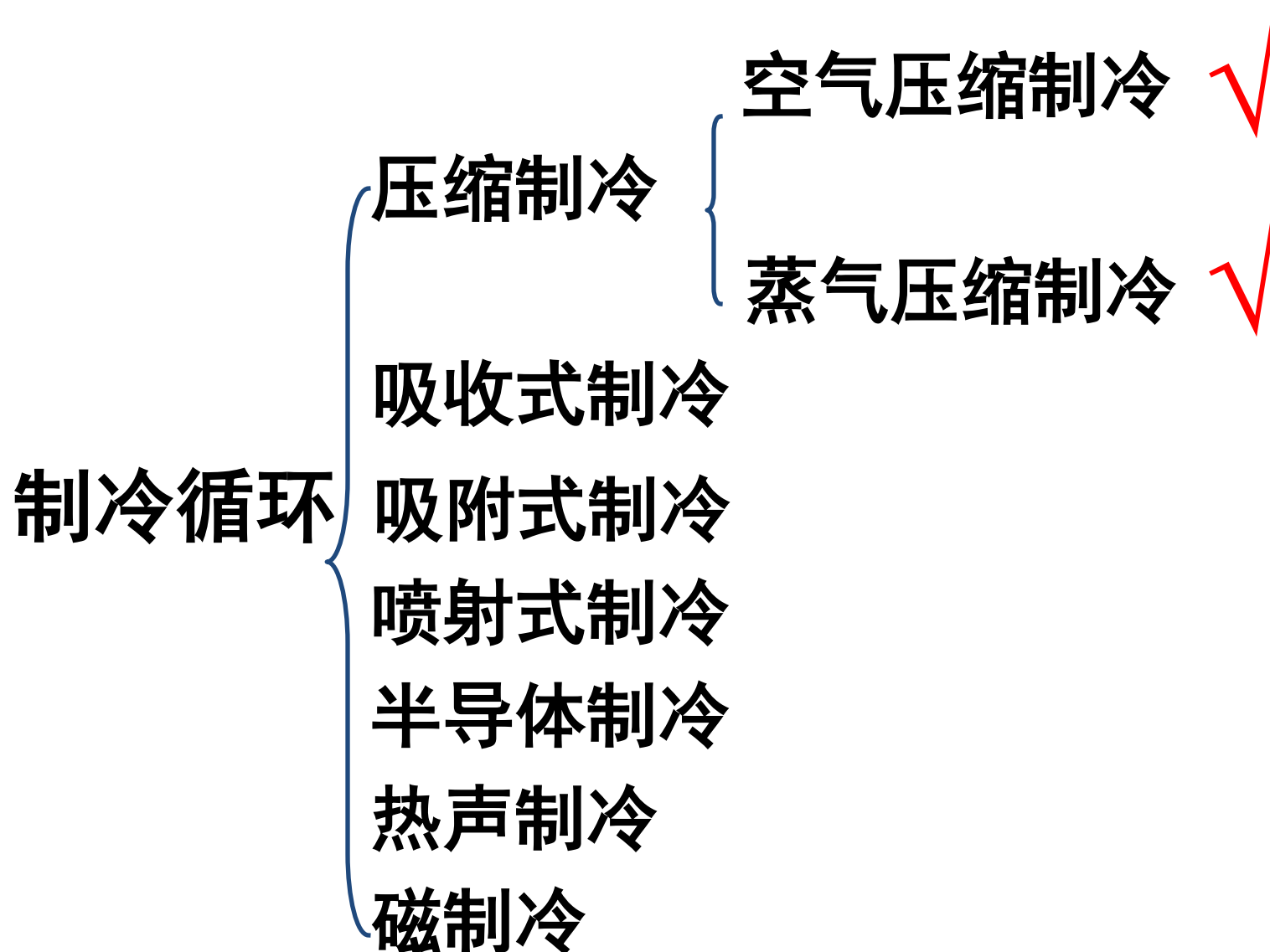
$$\varepsilon'_C = \frac{q_1}{w} = \frac{q_1}{q_1 - q_2} = \frac{T_I}{T_I - T_0}$$



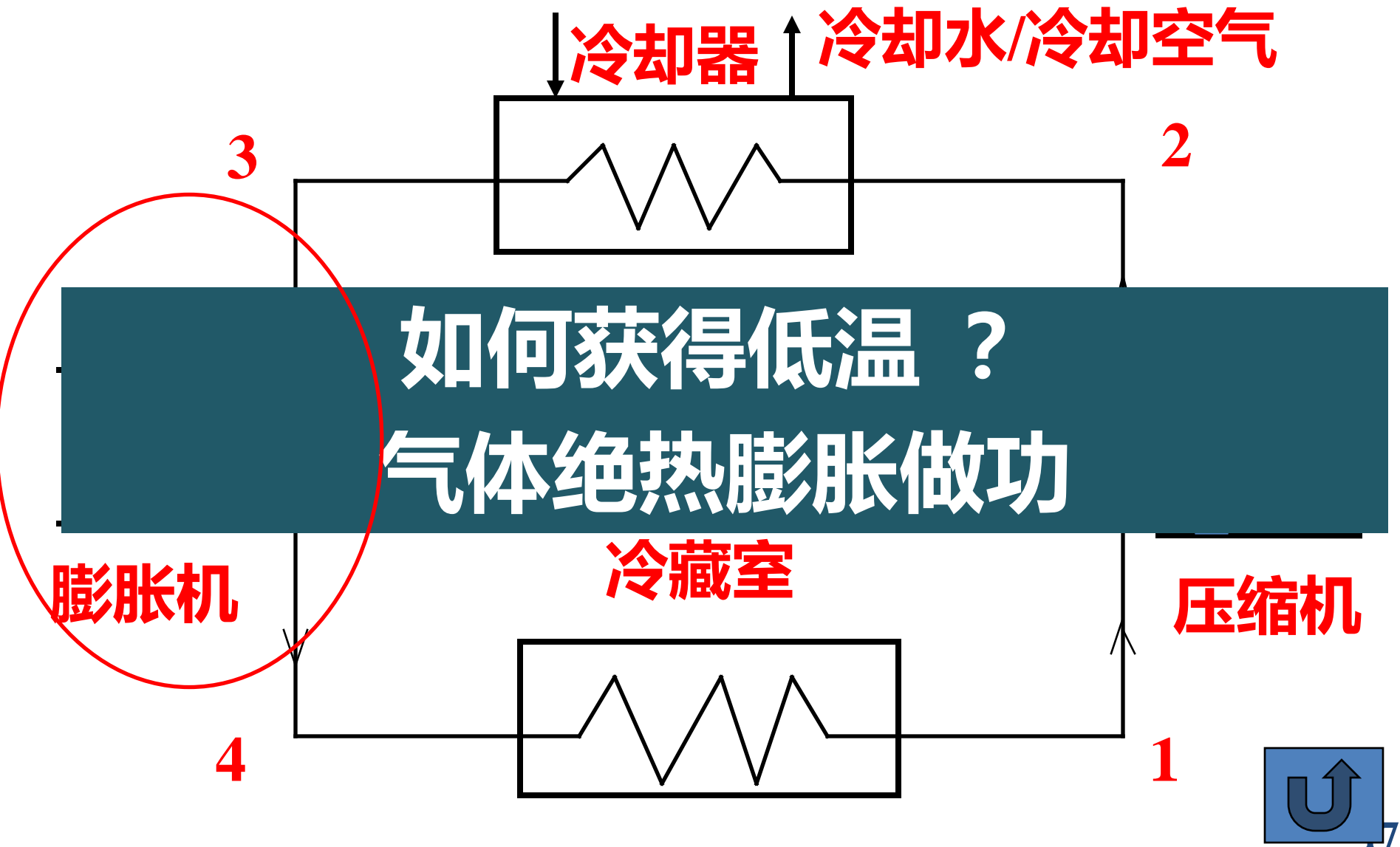
T_I 不变, $T_0 \downarrow \varepsilon'_C \downarrow$

T_0 不变, $T_I \uparrow \varepsilon'_C \downarrow$

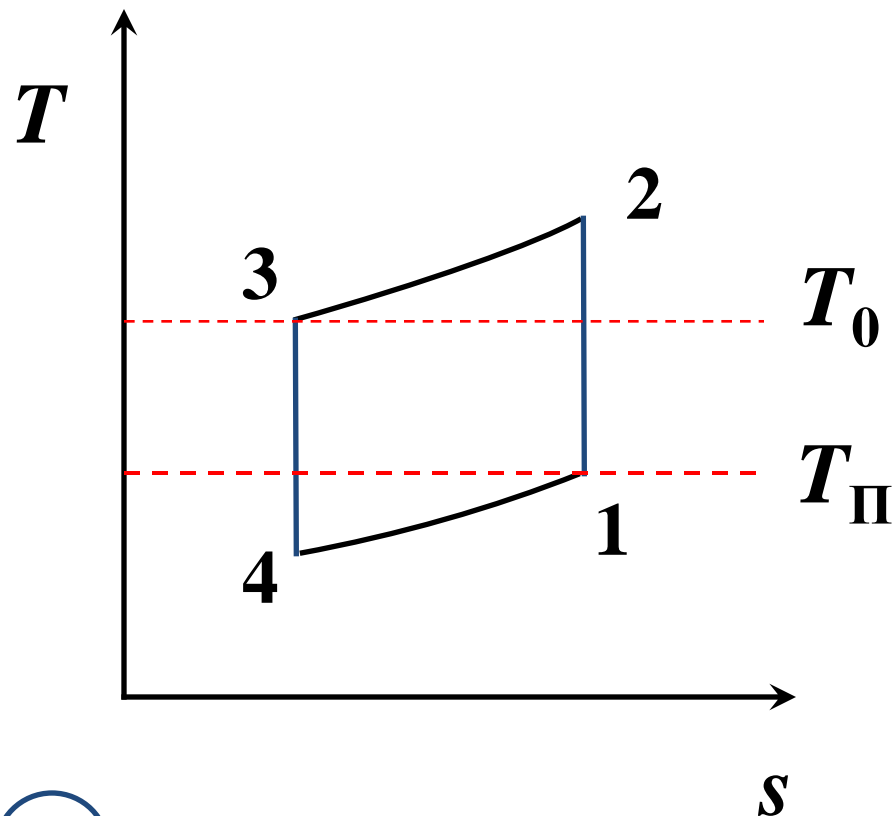
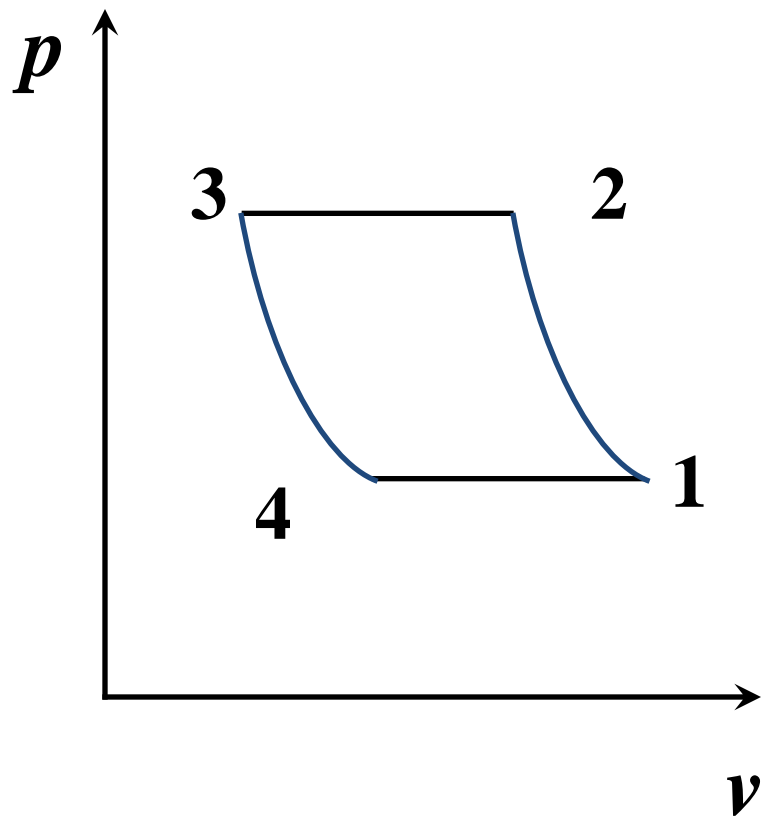
制冷循环种类



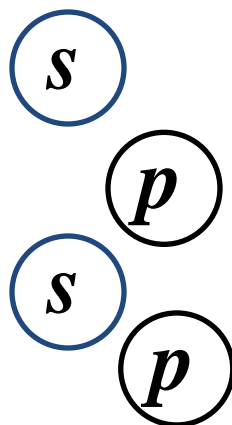
§7-1 空气压缩制冷循环



$p\nu$ 图和 Ts 图

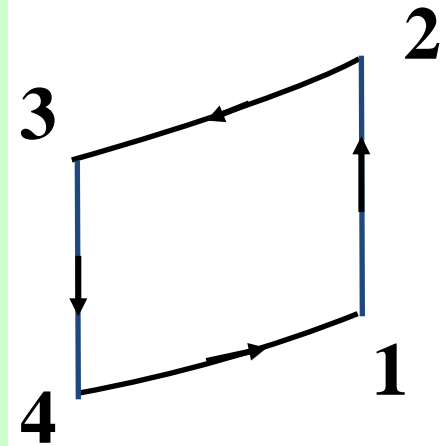


1 → 2 绝热压缩
 2 → 3 等压冷却
 3 → 4 绝热膨胀
 4 → 1 等压吸热



$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \left(\frac{p_3}{p_4} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \frac{T_3}{T_4}$$

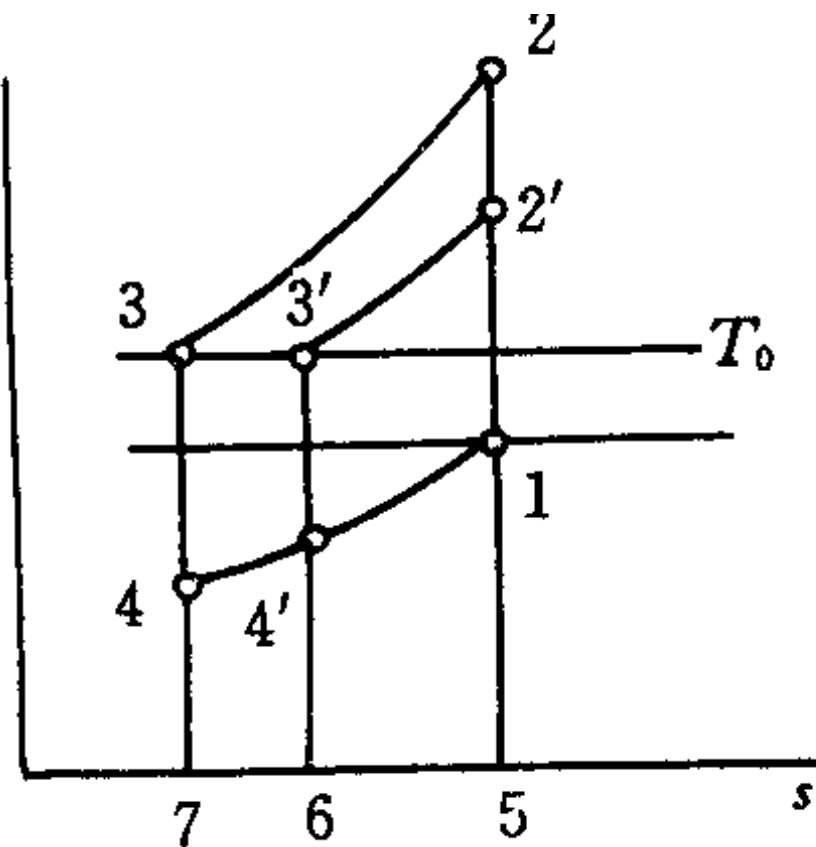
$$\Rightarrow \frac{T_2 - \overset{\text{red arrow}}{T_3}}{T_1 - T_4} = \frac{T_2 \left(1 - \frac{T_3}{T_2} \right)}{T_1 \left(1 - \frac{T_4}{T_1} \right)} = \frac{T_2}{T_1}$$



$$\begin{aligned} & c_p (T_2 - T_3) - c_v (T_1 - T_4) \\ &= \frac{1}{\frac{T_2 - T_3}{T_1 - T_4} - 1} = \frac{1}{\frac{T_2}{T_1} - 1} = \frac{1}{\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1} = \frac{1}{\overset{\text{red arrow}}{\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} - 1} \end{aligned}$$

空气压缩制冷

T



- **优点：**工质无毒，无

- **缺点：**

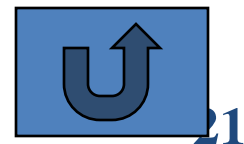
1. 无法实现 (T) , ϵ

2. $q_2 = c_p(T_1 - T_4)$, 空气太大, q_2 很小。

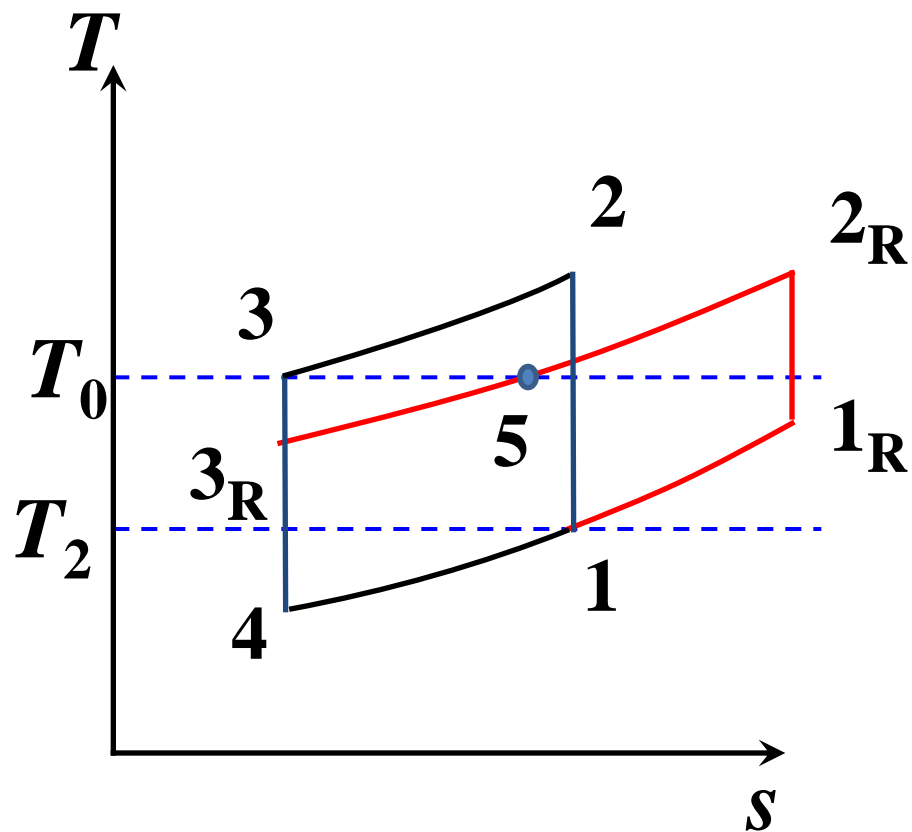
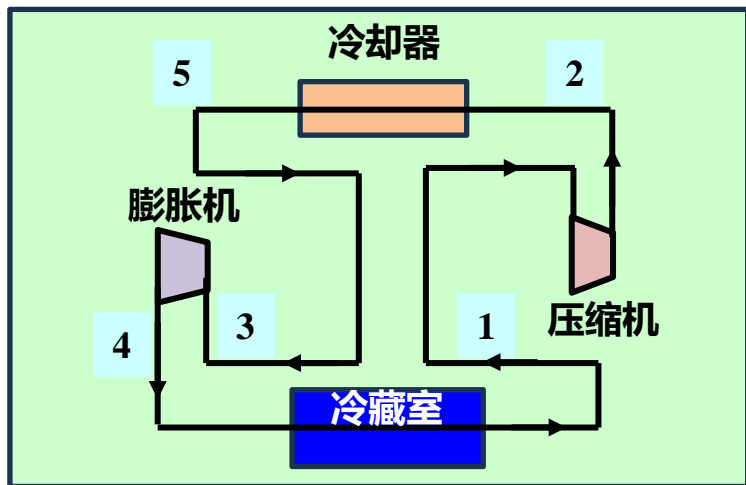
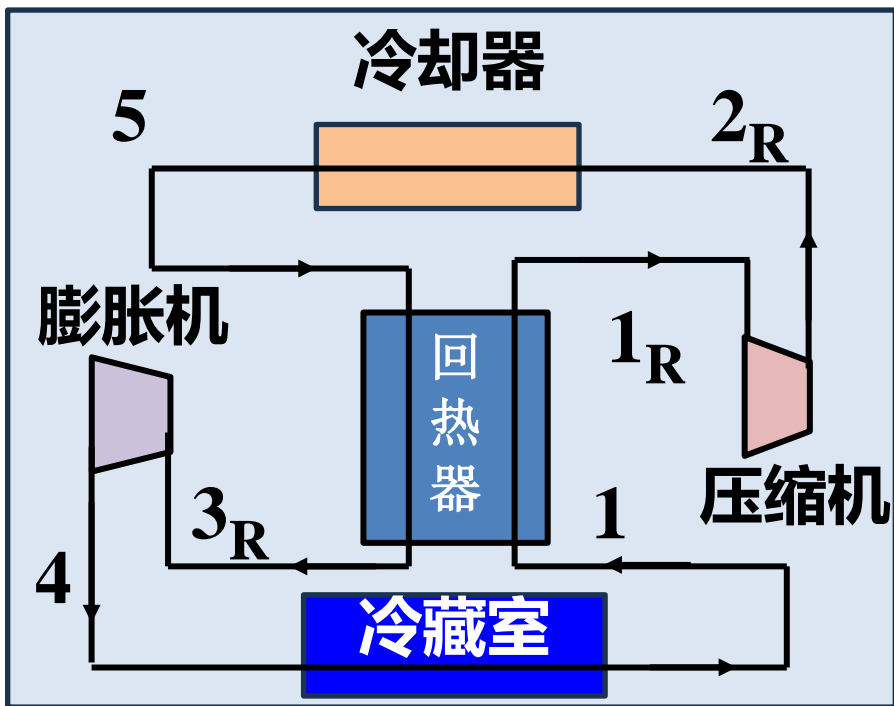
若 $(T_1 - T_4) \uparrow$ $\epsilon \downarrow$

3. 活塞式流量 m 小, 制冷量 $Q_2 = m q_2$ 小,

- 使用叶轮式, 再回热则可用。



空气回热制冷循环



空气回热制冷与非回热的比较

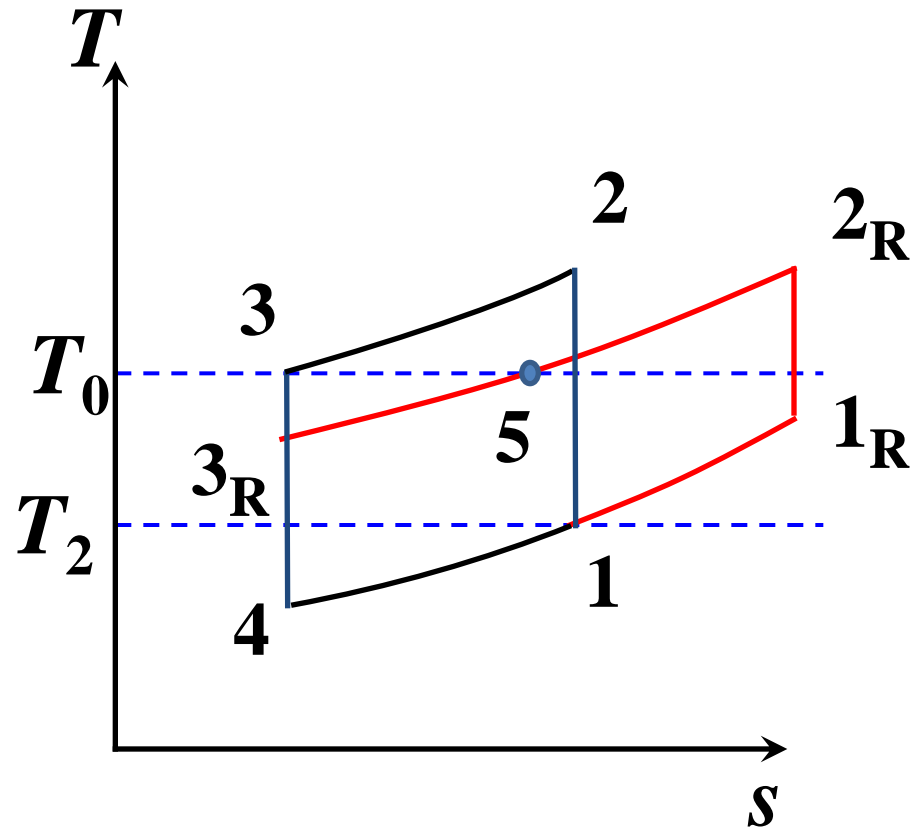
吸热量 (收益) :

$$q_2 = c_p(T_1 - T_4) \quad \text{不变}$$

放热量: 相同

$$\begin{aligned} q_1 &= c_p(T_2 - T_3) & \text{非回热} \\ &= c_p(T_{2R} - T_5) & \text{回热} \end{aligned}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_{\text{回热}} &= \varepsilon_{\text{非回热}} \\ \frac{p_{2R}}{p_{1R}} &< \frac{p_2}{p_1} \end{aligned} \right.$$



适用于小压比大流量的叶轮式
压气机空气制冷系统

空气压缩制冷的根本缺陷

1. 无法实现 \textcircled{T} , ε 低, 经济性差
2. $q_2 = c_p(T_1 - T_4)$ 小, 制冷能力 q_2 很小。

- ✓ 蒸气在两相区易实现 \textcircled{T}
- ✓ 气化潜热大, 制冷能力可能大

§7-2 蒸气压缩制冷循环

水能用否？ 0°C 以下凝固不能流动。

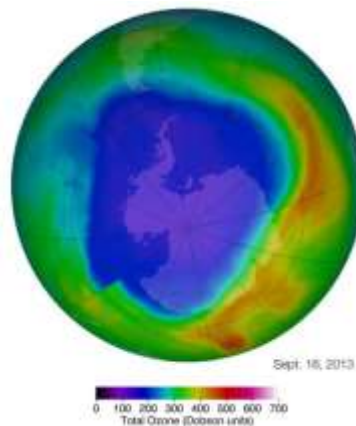
一般用**低沸点工质**，如氟利昂、氨

沸点： $T_s (p = 1 \text{ atm})$

水	100 °C
R22	- 40.8 °C
R134a	- 26.1 °C
THR01	- 30.18 °C

蒸气压缩式制冷的制冷剂

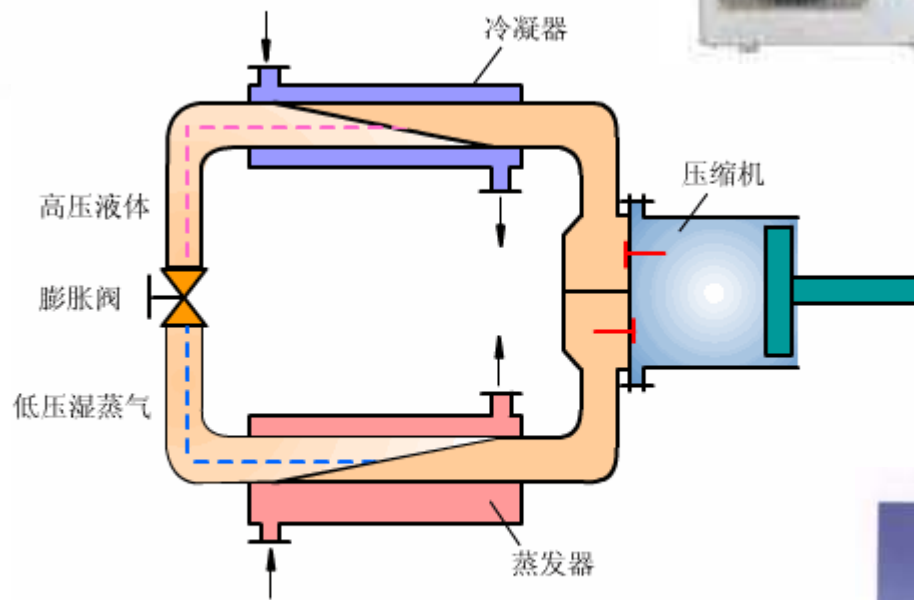
- 1830—1930, NH_3 , Air, CO_2 , HC, SO_2
- 1930—1990, CFCs & HCFCs
- 目前:
 - R22: 二氟一氯甲烷, 属氢氯氟烃类 (HCFC) **2030年完全淘汰**
 - R134a: 四氟乙烷, 属氢氟烃类 (HFC) ; R410a: 二氟甲烷和五氟乙烷混合制冷剂, 属氢氟烃类 (HFC_s) **2024年实现冻结, 2029年削减10%, 2045年削减80%**
- 未来: 自然工质如氨、丙烷、 CO_2



蒸气压缩制冷空调装置



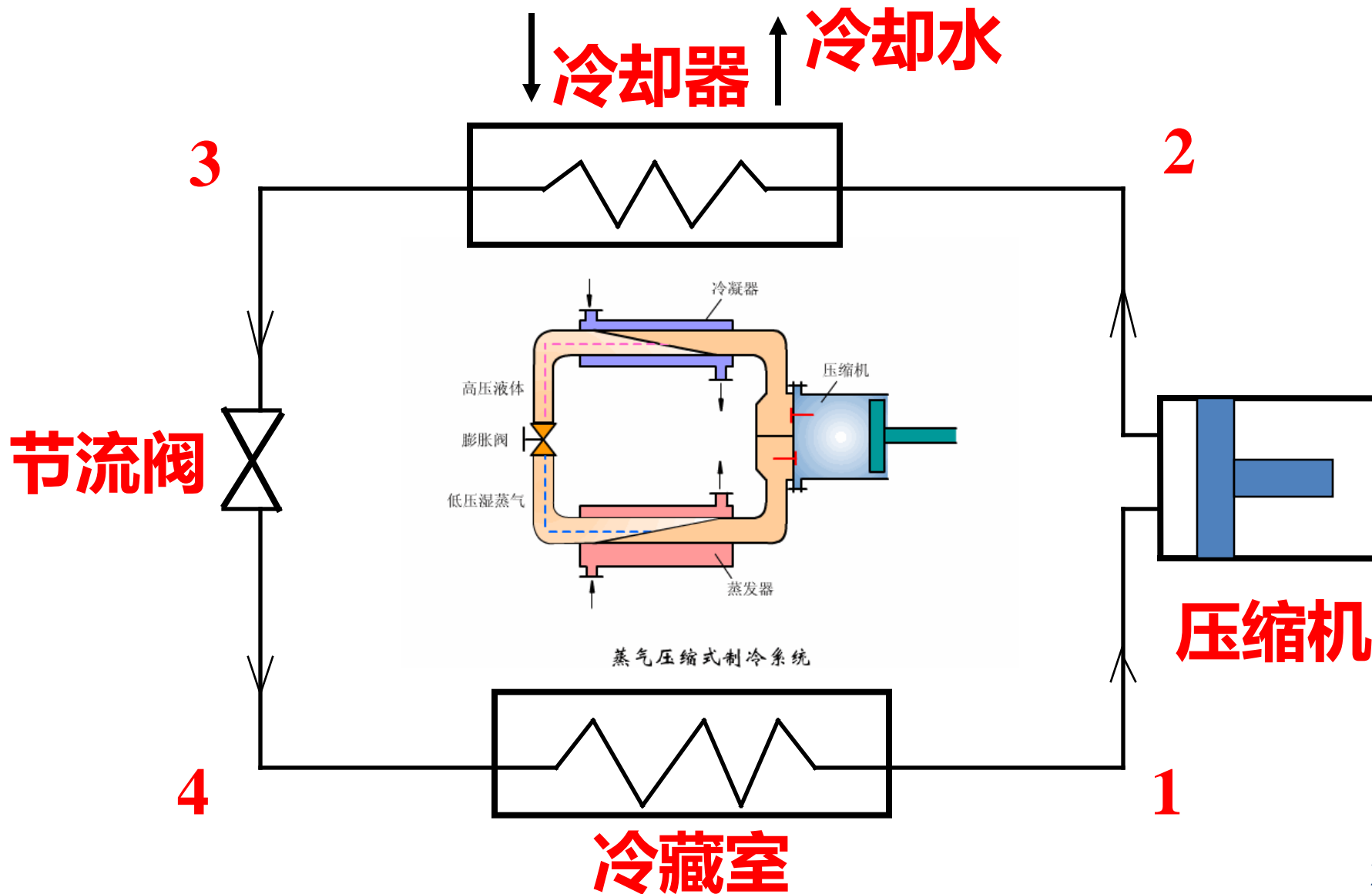
电子式膨胀阀



蒸气压缩式制冷系统



蒸气压缩制冷循环装置



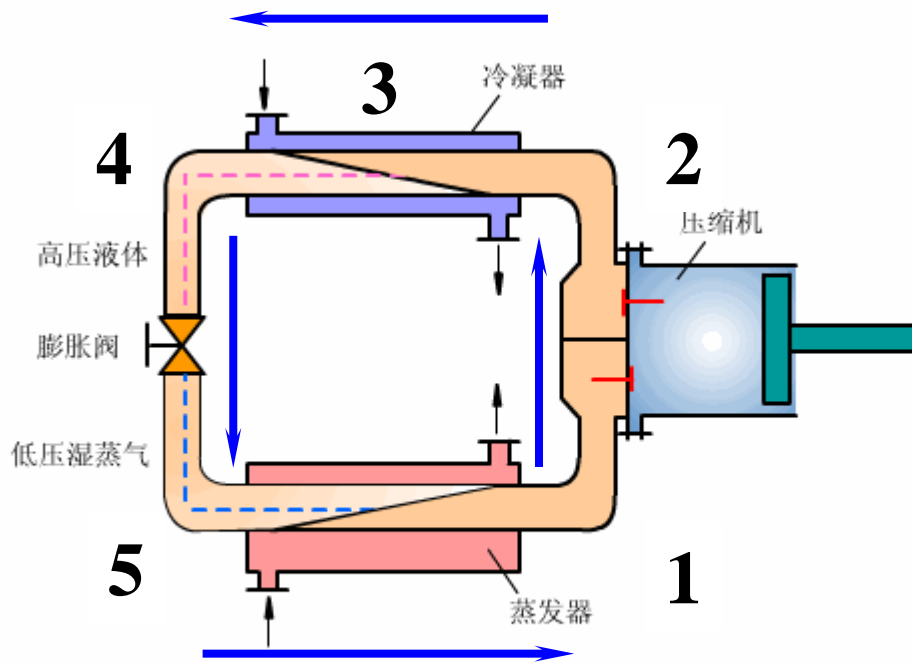
蒸气压缩制冷空调装置

1-2: 绝热压缩过程

2-4: 定压放热过程

4-5: 绝热节流过程

5-1: 定压吸热过程

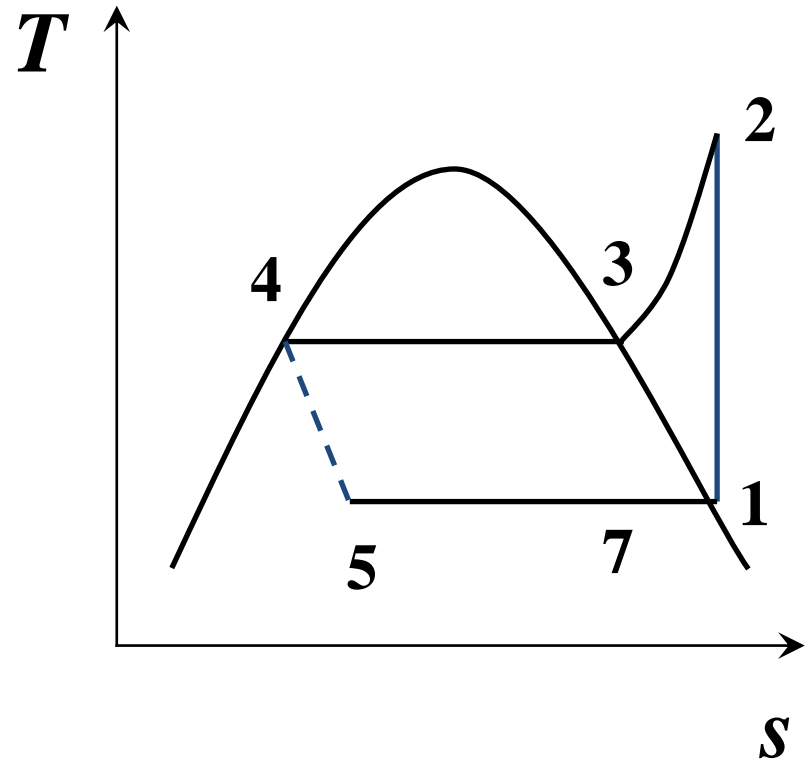


蒸气压缩式制冷系统



蒸气压缩制冷空调装置

- 1-2: 绝热压缩过程
- 2-4: 定压放热过程
- 4-5: 绝热节流过程
- 5-1: 定压吸热过程



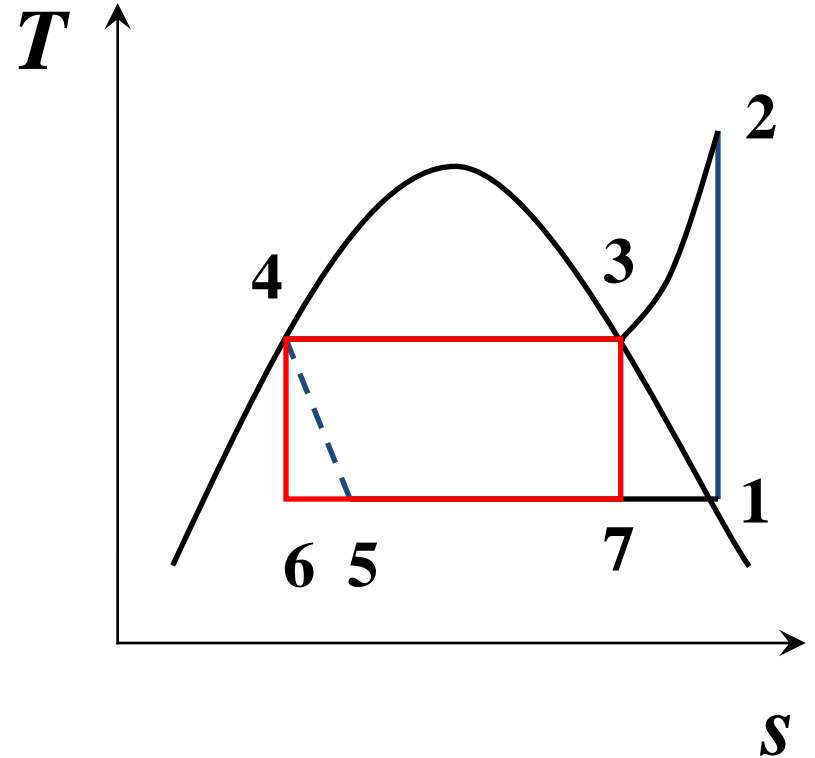
蒸气压缩制冷循环

比较逆卡诺循环3467

$$\varepsilon < \varepsilon_c$$

逆卡诺 73 湿蒸气压缩
“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



节流阀代替了膨胀机

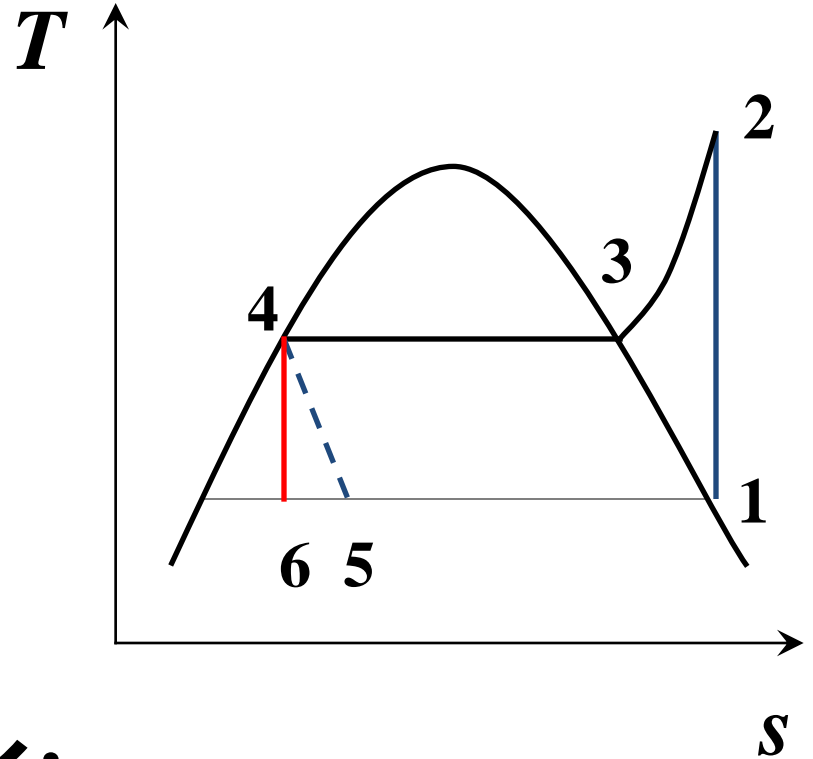


节流阀代替膨胀机分析

缺点:

1. 损失功量 $h_4 - h_6$
2. 少从冷库取走热量

$$h_5 - h_6 = h_4 - h_6$$



优点:

1. 省掉膨胀机，设备简化；
2. 易调节蒸发温度；

利>弊

蒸气压缩制冷循环的计算

蒸发器中吸热量

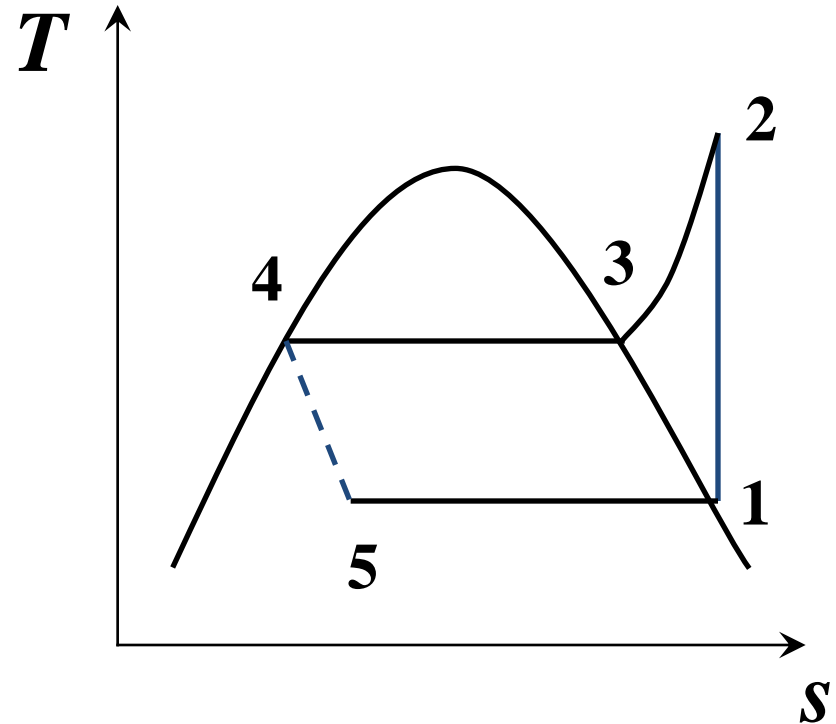
$$q_2 = h_1 - h_5 = h_1 - h_4$$

冷凝器中放热量

$$q_1 = h_2 - h_4$$

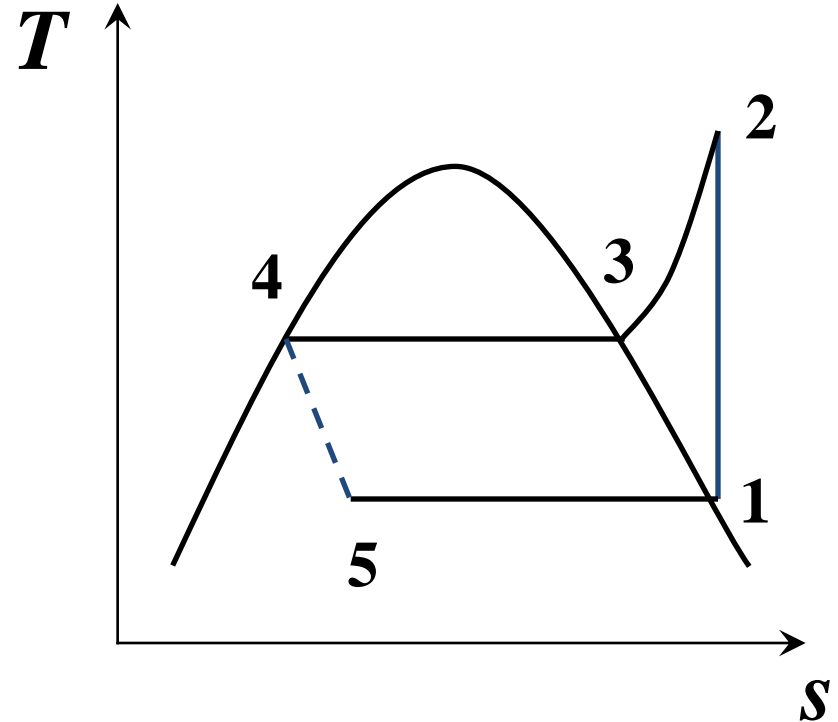
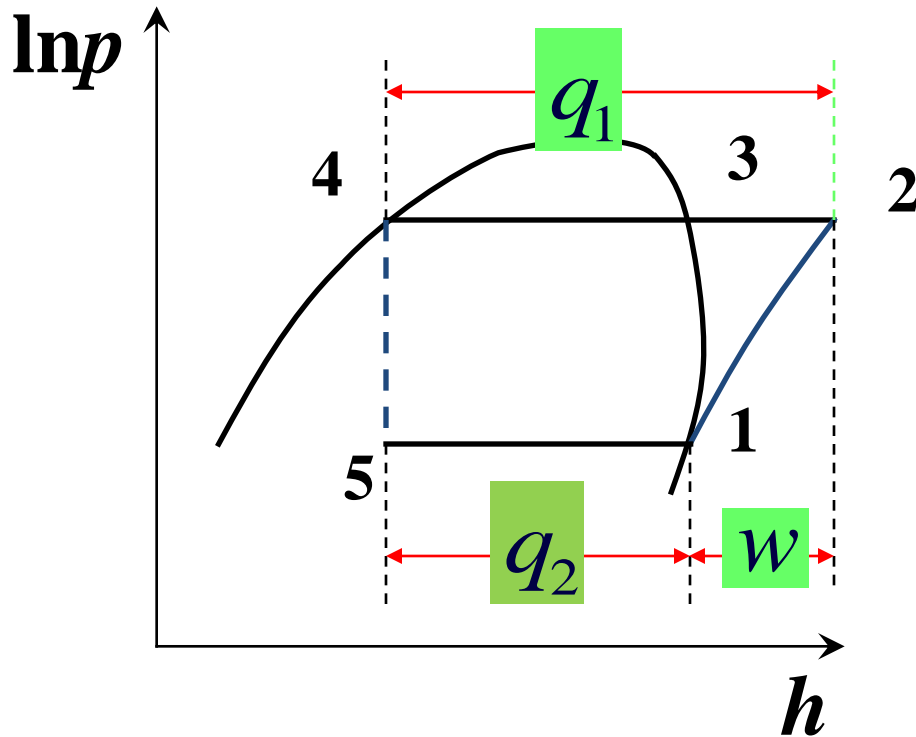
制冷系数

$$\varepsilon = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{h_1 - h_4}{(h_2 - h_4) - (h_1 - h_4)} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{q_2}{w}$$



两个等压，热与功均与焓有关 → $\ln p$ - h 图

lnp-h图及计算

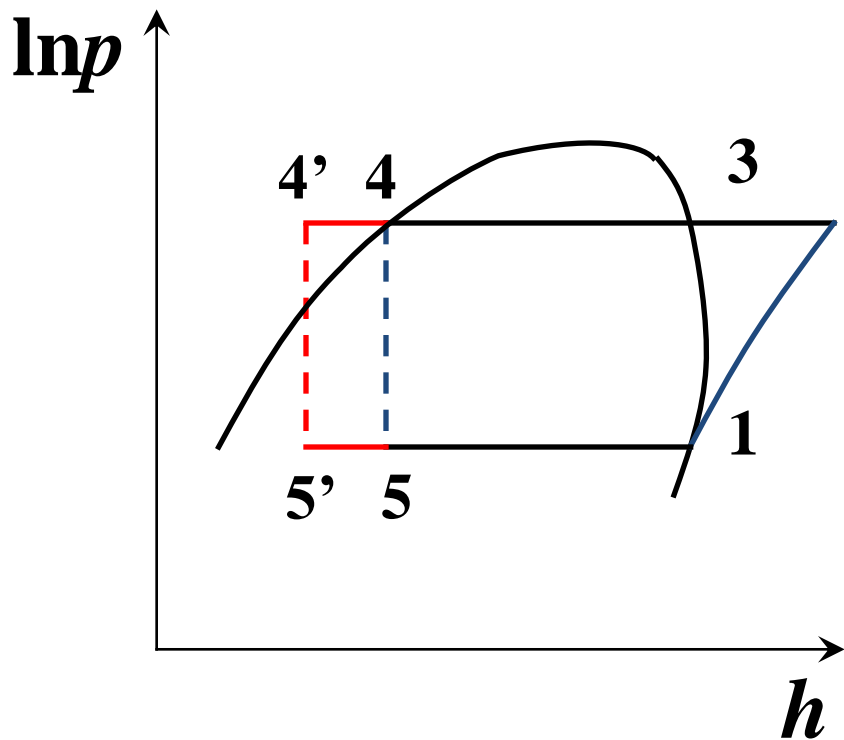


$$q_2 = h_1 - h_5 = h_1 - h_4$$

$$q_1 = h_2 - h_4$$

$$\varepsilon = \frac{q_2}{w} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

过冷措施

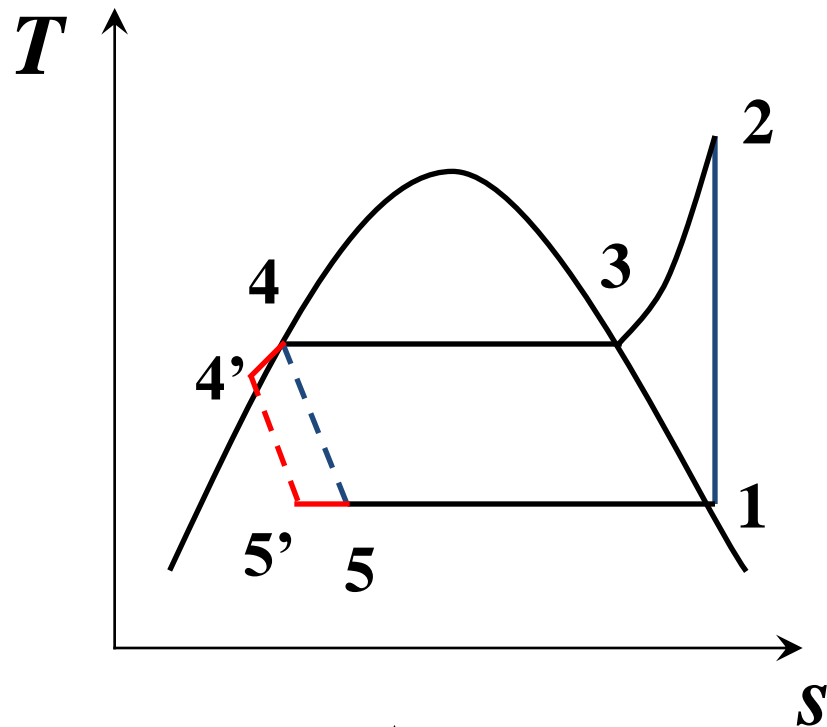


$$q_2 = h_1 - h_{5'}$$

$$q_1 = h_2 - h_{4'}$$

$$w = h_2 - h_1$$

不变



$$\varepsilon = \frac{q_2}{w} = \frac{h_1 - h_{4'}}{h_2 - h_1}$$

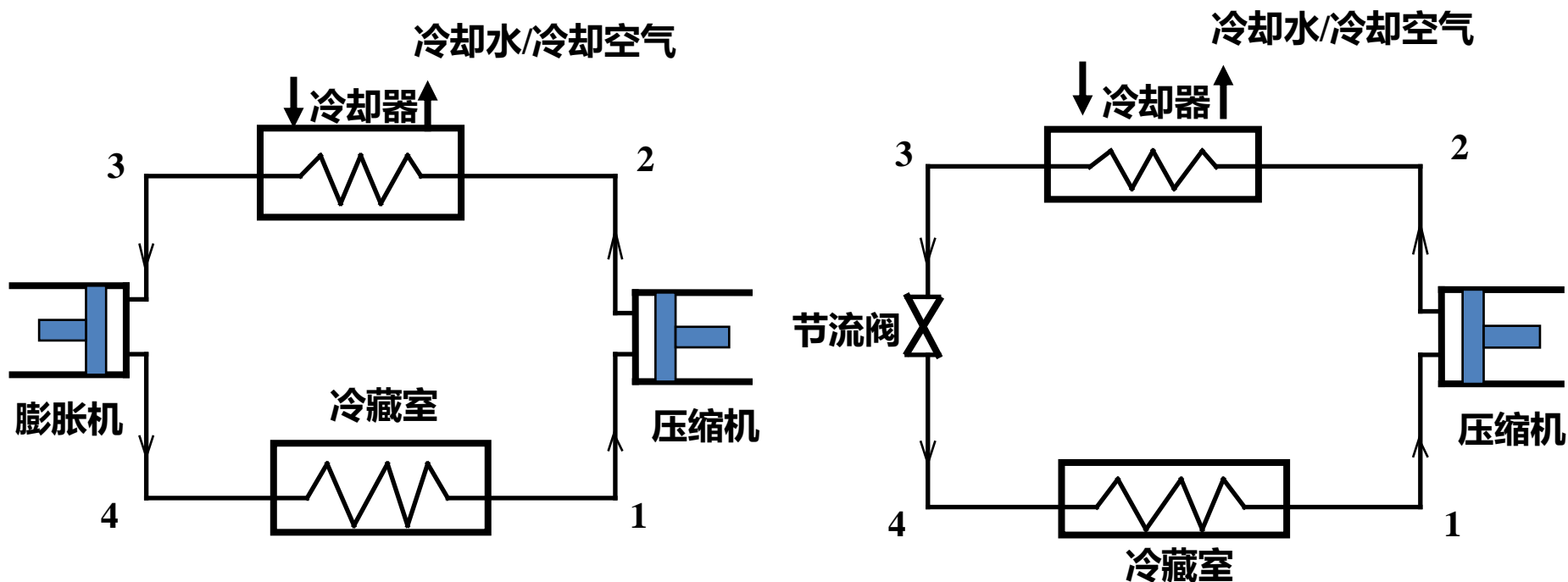
工程上常用

第七章 小结

- **理解制冷的热力学原理**
- **主要分析了两种制冷方式：气体压缩式制冷；蒸气压缩式制冷。要求能够理解概念，并能正确分析计算**

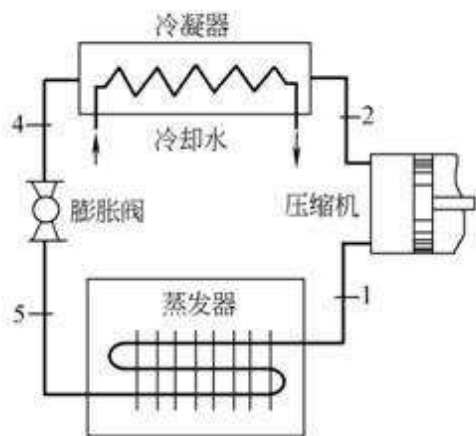
第七章 制冷循环思考与讨论

思考题1：压缩蒸汽制冷循环采用节流阀来代替膨胀机，压缩空气制冷循环是否也可以采用这种方法？为什么？

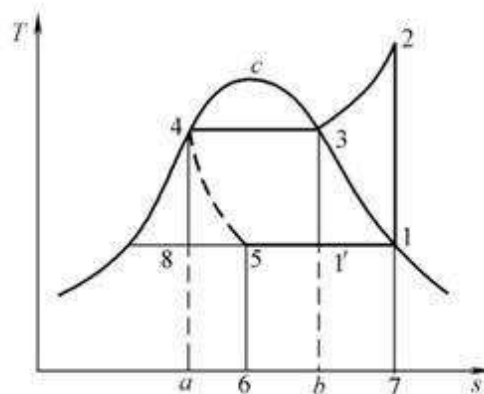


不能。压缩蒸汽制冷循环中绝热节流过程的作用在于使制冷工质降温至冷库的工作温度。但是，空气通常可视同**理想气体**，理想气体的热力性质之一是它的焓仅取决于温度，而**绝热节流过程的结果工质的焓不变**，因此压缩空气制冷循环中不可能采用节流阀以代替其中的膨胀机，否则空气将无法在冷库中工作。

思考题2：参看下图，若压缩蒸气制冷循环按1-2-3-4-8-1运行，循环耗功量没有变化，仍为 h_2-h_1 ，而制冷量却从 h_1-h_5 增大到 h_1-h_8 ，显然是“有利”的，但为什么没有被采纳？



(a)



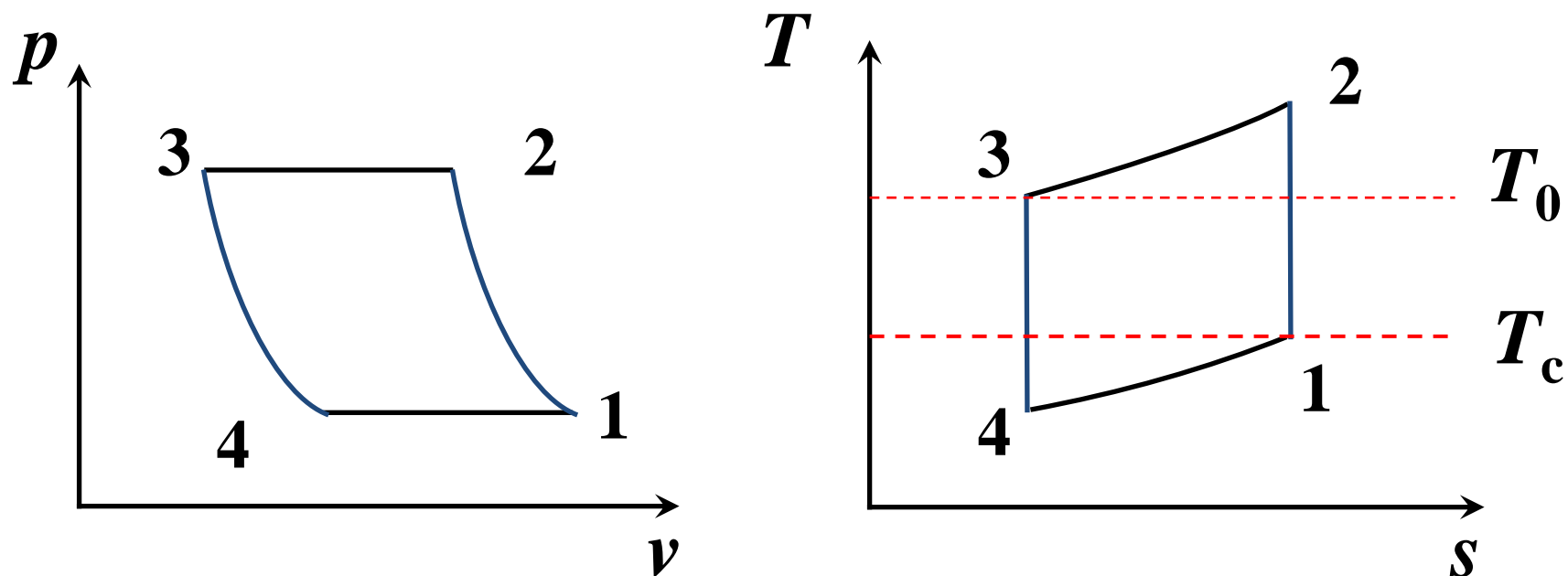
(b)

- 4-8，等熵膨胀过程，膨胀机
- 省掉膨胀机，设备简化；
- 4-5可以采用节流阀，结构简单，便于温度调节

计算题1

如图所示，假定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 $p_2=0.5\text{MPa}$ ，然后进入冷却器。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 ε 和每千克空气的制冷量 q_c 。
- 2) 若 ε 保持不变而采用回热，理想情况下的压缩比多少？



解: 1) 据题意

$$T_1 = T_c = 253.15 \text{ K}, T_3 = T_0 = 293.15 \text{ K}$$

$$\pi = \frac{p_2}{p_1} = 5 \quad \text{且由} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \frac{T_3}{T_4}$$

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

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

压缩机耗功为

$$w_c = h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1) = 1.005 * (401.13 - 253.15) = 148.72 \text{ kJ/kg}$$

膨胀机做功为

$$w_t = h_3 - h_4 = c_p (T_3 - T_4) = 1.005 * (293.15 - 185.01) = 108.68 \text{ kJ/kg}$$

空气在冷却器中放热量为

$$q_0 = h_2 - h_3 = c_p (T_2 - T_3) = 1.005 * (401.13 - 293.15) = 108.52 \text{ kJ/kg}$$

每千克空气在冷库中的吸热量，即每千克空气的制冷量

$$q_c = h_1 - h_4 = c_p (T_1 - T_4) = 1.005 * (253.15 - 185.01) = 68.48 \text{ kJ/kg}$$

循环的净功为

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

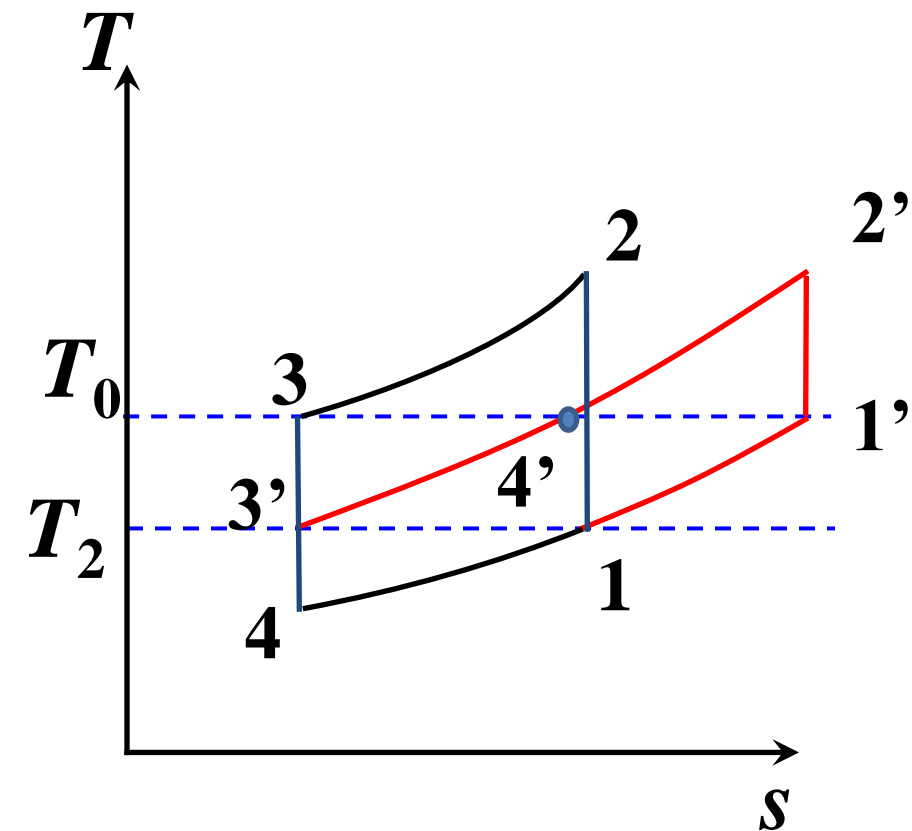
循环的净热量为

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

循环的制冷系数为

$$\varepsilon = \frac{q_c}{w_{net}} = \frac{68.48}{40.04} = 1.71$$

解: 2) 有回热时的示意图如图1'2'4'3'4循环所示



$$T_{2'} = T_2 = 401.13 \text{ K}$$

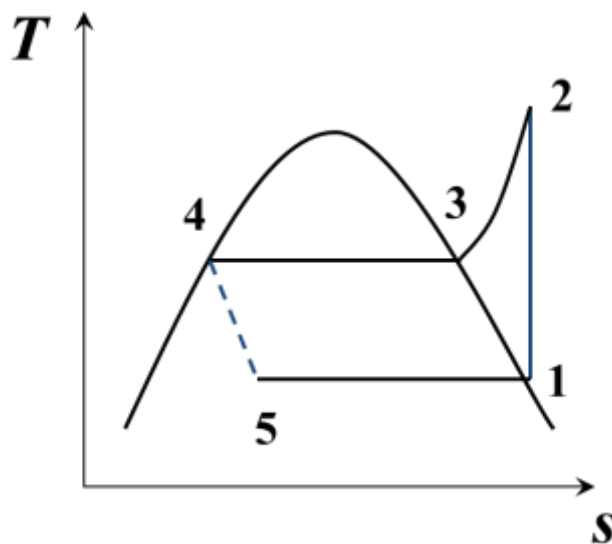
$$T_{1'} = T_0 = 293.15 \text{ K}$$

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

比较两种情况下的压比可知，该理想循环采取回热后，只要 q_c 、 T_c 、 T_0 不变，则净功和制冷系数亦相同，但压比减小，对使用叶轮式机械很有利

课堂练习

某蒸气压缩制冷循环，用氟利昂134a作制冷剂，压缩机入口为干饱和蒸气， $p_1=0.2\text{ MPa}$ ，经压缩机定熵压缩到 $p_2=2\text{ MPa}$ ，冷凝器出口为饱和液，再经绝热节流至 p_1 ，进入冷库蒸发吸热到饱和蒸气完成循环。试求该循环的制冷系数。



蒸气压缩制冷循环举例

解：根据 $p_1=0.2 \text{ MPa}$

$$h_1=h''(p_1), \quad s_1=s''(p_1)$$

$$h_1=391.93 \text{ kJ/kg},$$

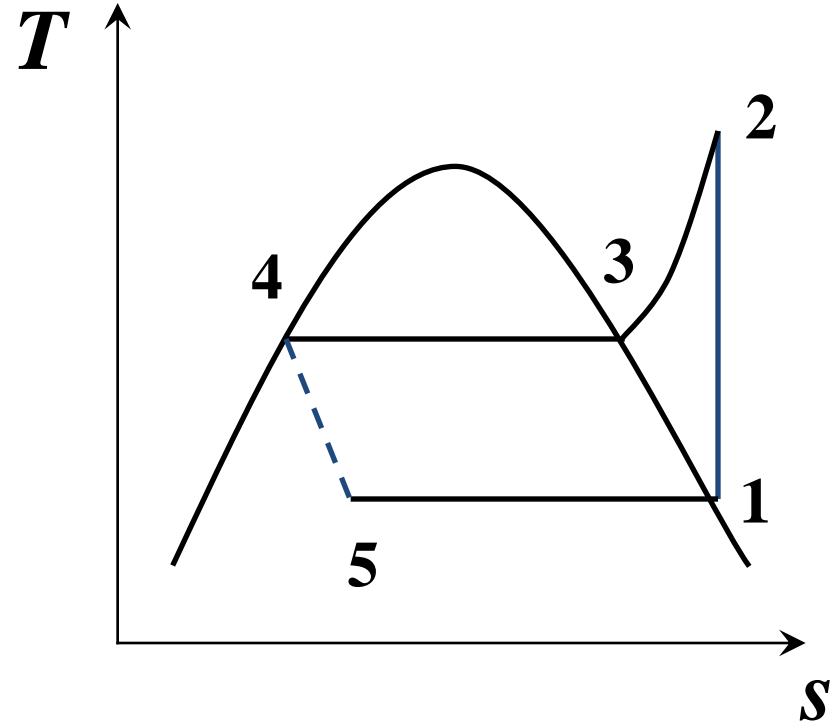
$$s_1=1.731 \text{ kJ/kgK}$$

根据 $p_2=2 \text{ MPa}$

$$s_2=s_1$$

查过热表 $h_2=439.74 \text{ kJ/kg}$

查饱和表 $h_4=299.8 \text{ kJ/kg}$



$$\varepsilon = \frac{q_2}{w} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = 1.93$$