



工质在热机或制冷机中所经历的过程是循环过程。蒸汽动力循环与制冷循环被广泛应用于现代的化工生产中。

本章主要研究实际循环中热、功转换的效果及其影响因素，探求提高能量转换效果的途径。

主要内容包括：蒸汽动力循环的热效率、循环功以及循环中各过程工质状态函数的变化；制冷循环与获得低于环境温度的操作过程的热力学分析；

要求掌握工作原理、工质状态变化、能量转换计算、能量转换效果热力学分析



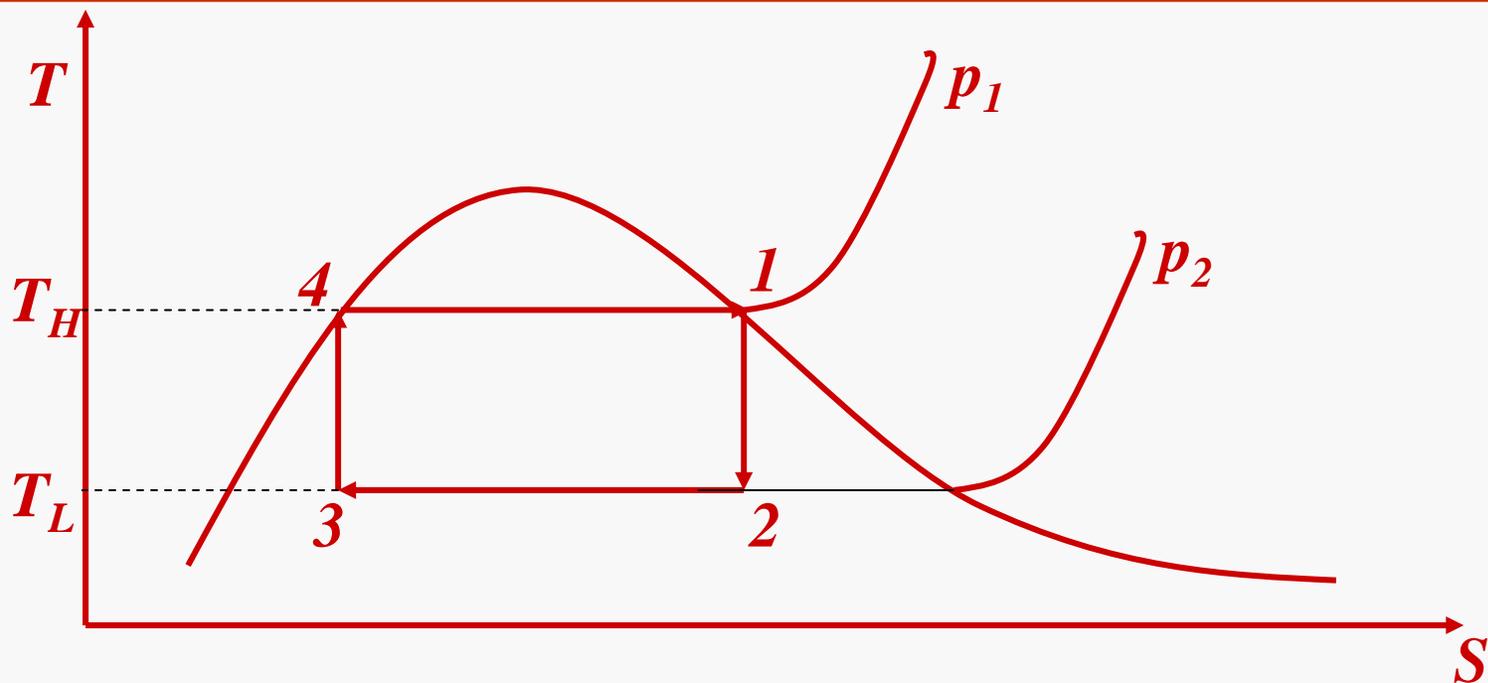


采用水蒸汽为工质，将热能连续不断转换为机械能的热力循环，称为蒸汽动力循环。

6.1.1 正向卡诺循环

正向卡诺循环是由两个可逆等温过程和两个可逆绝热过程组成，是一个由高温向低温传热的自发过程，是产功过程。工质吸热温度大于工质排热温度，是动力循环，是最理想的动力循环，因为它产功最大。

6.1.1 正向卡诺循环



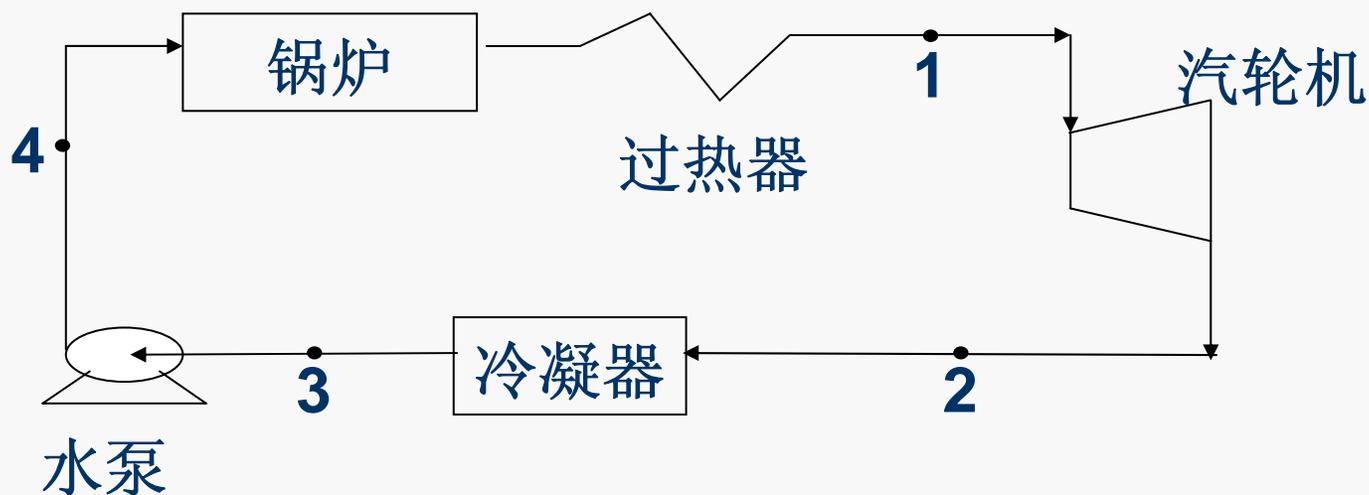
卡诺循环产功最大，但实际不能实现，因为：

- ① 湿蒸汽对汽轮机和水泵有侵蚀作用，汽轮机带水量不能超过10%，水泵不能带入蒸汽进泵；
- ② 绝热可逆过程实际难以实现。

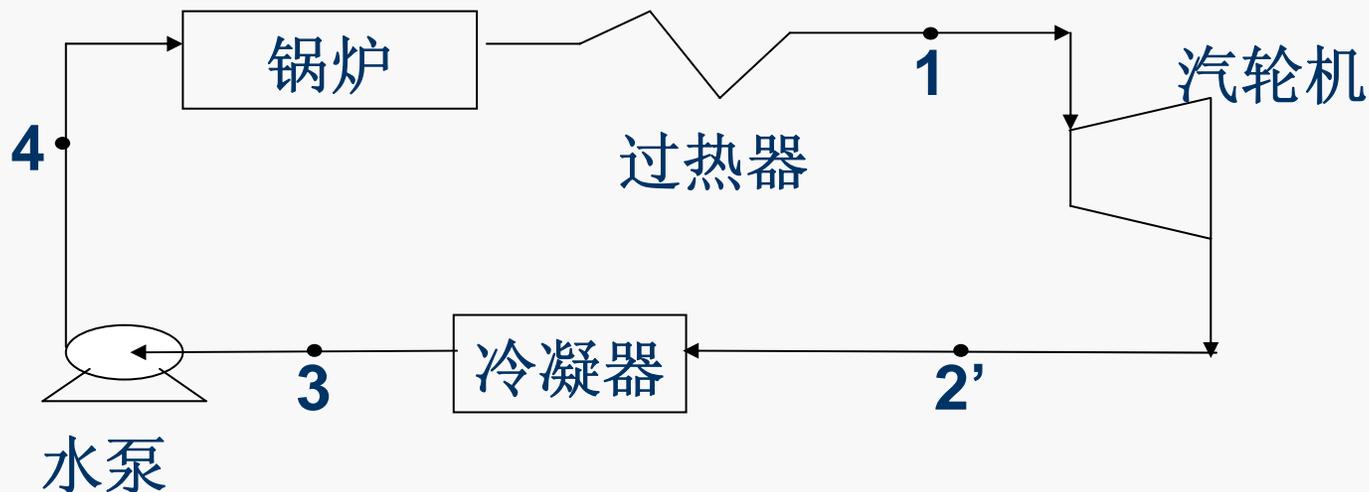
6.1.2 朗肯循环原理



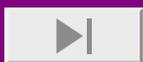
朗肯循环是最简单的蒸汽动力循环，主要设备有：透平机、冷凝器、水泵、锅炉四部分，工作介质一般为水。



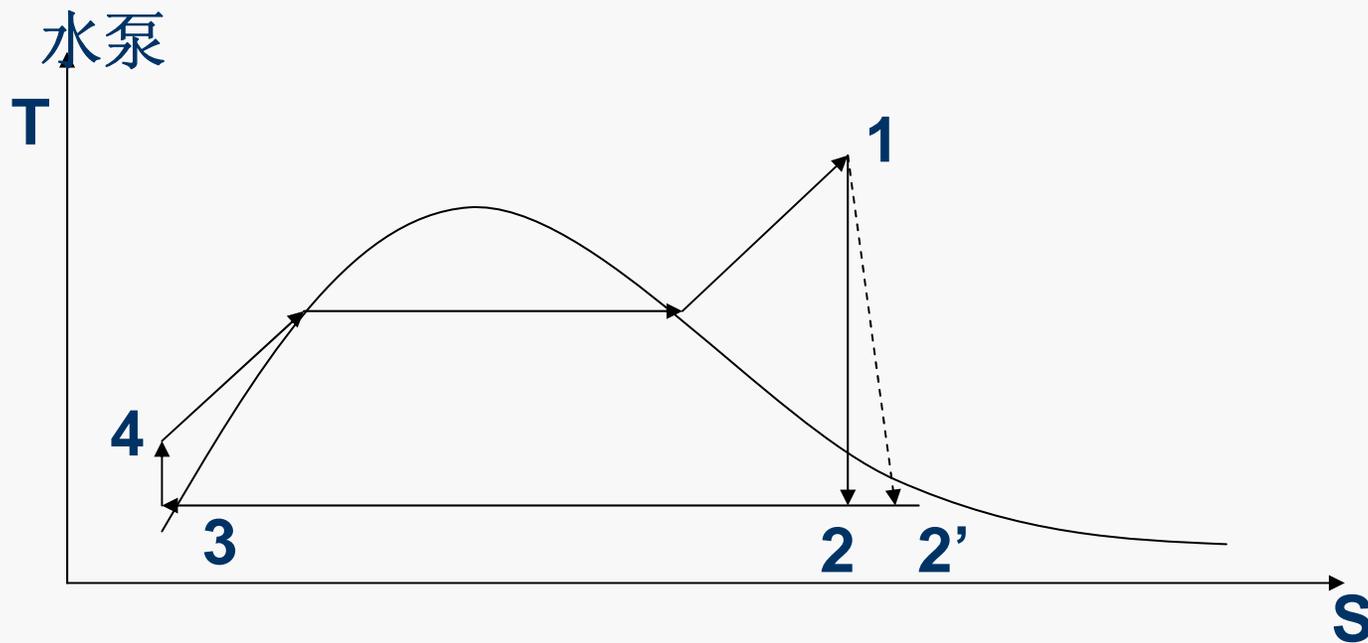
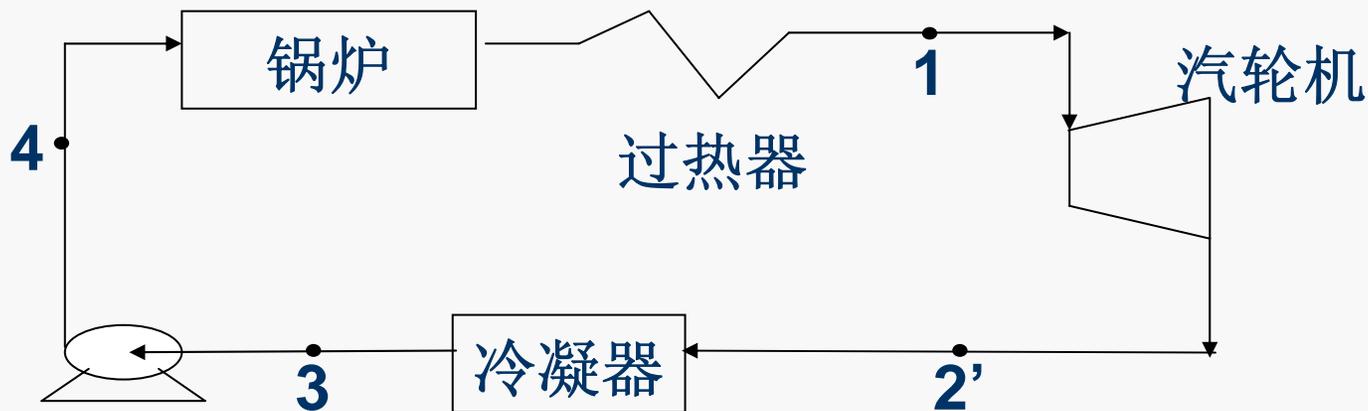
6.1.2 朗肯循环原理



p_1 、 T_1 的高温高压蒸汽进入透平机等熵膨胀到状态 $2'$ ，对外做功， $2'$ 点状态为乏汽，从透平机流出进入冷凝器，乏汽在冷凝器中放出汽化潜热 Q_2 ，而变为该压力下的饱和水，放出的热量 Q_2 由冷却水带走，达到状态 3 ，饱和水经水泵压到 p_1 进入锅炉，锅炉吸收热量 Q_1 ，使工质变化到状态 1 ，完成一个循环。



6.1.2 朗肯循环原理



6.1.2 朗肯循环原理



实际朗肯循环的过程为：

- ①恒压升温过程 $4 \rightarrow 1$ ：锅炉进行，水在锅炉中恒压加热，吸热为 Q_1 。
- ②不可逆绝热膨胀过程 $1 \rightarrow 2'$ ：对应与汽轮机，做功为 W_S 。
- ③恒压冷凝过程 $2' \rightarrow 3$ ：冷凝器中进行，在冷凝器里，冷却水把工质的热量带走，使其由气体转变为液体，放热为 Q_2 。
- ④不可逆绝热压缩过程 $3 \rightarrow 4$ ：水泵进行，耗功为 W_p 。



朗肯循环与卡诺循环的不同表现在：

(1) 工质进汽轮机时状态不同，卡诺循环为湿汽，朗肯循环为干气；

(2) 膨胀过程不同，卡诺循环为等熵过程，朗肯循环为不可逆绝热过程；因为汽轮机在运动过程中有摩擦，因而沿着熵增大的方向进行，这就出现了等熵效率问题。

等熵效率：

$$\eta_s = \frac{\text{实际过程产功}}{\text{等熵过程产功}} = \frac{H_1 - H_{2'}}{H_1 - H_2} \leq 1$$

6.1.2 朗肯循环原理



- (3)工质出冷凝器状态不同，卡诺循环为汽液共存，朗肯循环为饱和水；
- (4)压缩过程不同，卡诺循环为等熵过程，朗肯循环为不可逆绝热过程，若忽略掉工质水的摩擦与散热可简化为可逆过程；
- (5)工质吸热过程不同，卡诺循环为等温过程，朗肯循环为不可逆过程，沿着等压线变化。



(1) 工质在锅炉中的吸热量

$$Q_1 = \Delta H = H_1 - H_4 \quad \text{kJ/kg}$$

(2) 工质在冷凝器中排放的热量

$$Q_2 = \Delta H = H_3 - H_2' \quad \text{kJ/kg}$$

(3) 汽轮机中工质的单位产功量

$$W_S = \Delta H = H_2' - H_1 \quad \text{kJ/kg}$$

$$\therefore \eta_s = \frac{H_1 - H_2'}{H_1 - H_2} = \frac{W_S}{W_{SR}}$$

$$\therefore W_S = \eta_s W_{SR}$$



(4) 水泵中工质的单位耗功量

$$W_P = \Delta H = H_4 - H_3 \text{ kJ/kg}$$

由于液态水的不可压缩性，水泵中工质的耗功量可按下式进行计算：

$$W_P = \int_{P_3}^{P_4} V_{\text{水}} dP = V_{\text{水}} (P_4 - P_3) = V_{\text{水}} \Delta P$$



(5) 热效率

定义：锅炉中所给的热量中转化为净功的量。

$$\eta = \frac{-(W_S + W_P)}{Q_1} = \frac{(H_1 - H_2) + (H_3 - H_4)}{H_1 - H_4}$$

$\because W_p \ll W_s$ ，近似计算取 $W_p = 0$

$$\therefore \eta = \frac{-W_S}{Q_1} = \frac{H_1 - H_2}{H_1 - H_4}$$



(6) 汽耗率

即蒸汽动力装置中，每输出单位净功($1kW \cdot h$)所消耗的蒸汽量，用SSC表示：

$$SSC = \frac{3600}{W_N} = \frac{3600}{W_S + W_p} \quad \text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$$

6.1.3 朗肯循环过程的热力学计算



在循环中，各状态点的确定如下：

状态点 1：根据 p_1 、 t_1 值可查得 H_1 、 S_1 值。

状态点 2：根据 p_2 和等熵效率可得

状态点 3：

状态点 4：

例6-1：某一理想的 Rankine 循环，锅炉的压力为 4MPa，产生 440°C 过热蒸汽，汽轮机出口压力为 0.004MPa，蒸汽流量 60t/h，求：

- (1) 过热蒸汽每小时从锅炉吸收的热量；
- (2) 乏气的湿度以及乏气在冷凝器放出热量；
- (3) 汽轮机作出的理论功率和水泵消耗的理论功率；
- (4) 循环的热效率。

解:

(1) 确定各点的参数

1点 (过热蒸汽), 根据 $p_1=4\text{MPa}$ 、 $t_1=440^\circ\text{C}$, 查过热水蒸气表得: $H_1=3307.1\text{kJ/kg}$ 、 $S_1=6.9041\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;

2点 (湿蒸汽), $p_2=4\text{kPa}$, $S_2=S_1=6.9041\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, 查饱和水蒸气表得:

$$H_g=2554.4\text{kJ/kg} \quad H_l=121.46\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

$$S_g=8.4746\text{kJ/kg} \quad S_l=0.4226\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

$$V_l=1.004\text{cm}^3/\text{g}$$

2点处的干度为x

$$8.4746x + (1-x)0.4226 = 6.9041 \quad x = 0.8050$$

$$H_2 = 2554.4 \times 0.805 + (1-0.805) \times 121.46 = 2080.0$$

3点（饱和液体）

$$p_3 = 4 \text{ kPa} \quad H_3 = H_l = 121.46 \text{ kJ/kg}$$

$$S_3 = S_l = 0.4226 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

4点（未饱和水）

方法1:

$$\begin{aligned} H_4 &= H_3 + W_p = H_3 + V_l(p_4 - p_3) \\ &= 121.46 + 0.001004 \times (4000 - 4) = 125.5 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

4点（未饱和水）

方法2

已知 $p_4=4\text{MPa}$, $S_4=S_3=0.4226\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, 查未饱和水性质表。

	2.5MPa		5MPa		4MPa	
	H	S	H	S	H	S
20 °C	86.30	0.2961	88.65	0.2956	87.71	0.2958
40 °C	169.77	0.5715	171.97	0.5705	171.09	0.5709

$$\frac{0.4226 - 0.2958}{0.5709 - 0.2958} = \frac{H_4 - 87.71}{171.09 - 87.71} \Rightarrow H_4 = 125.5\text{kJ/kg}$$

(2) 计算

过热蒸汽每小时从锅炉吸收的热量

$$\begin{aligned} Q_1 &= m(H_1 - H_4) = 60 \times 10^3 \times (3307.1 - 125.5) \\ &= 190.9 \times 10^6 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

乏气在冷凝器放出的热量

$$\begin{aligned} Q_2 &= m(H_2 - H_3) = 60 \times 10^3 \times (2080.0 - 121.5) \\ &= 117.5 \times 10^6 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

乏气的湿度为： $1 - x = 1 - 0.805 = 0.195$

汽轮机作出的理论功率：

$$P_T = mW_s = m(H_2 - H_1) = \frac{60 \times 10^3}{3600} (2080.0 - 3307.1) \\ = -20452 \text{ kW}$$

水泵消耗的理论功率：

$$N_P = mW_P = m(H_4 - H_3) = \frac{60 \times 10^3}{3600} (125.5 - 121.5) \\ = 67 \text{ kW}$$

热效率：

$$\eta = \frac{-3600(P_T + N_P)}{Q_1} = \frac{-3600(20452 - 67)}{190.9 \times 10^6} = 0.3844$$

例6-2：在某核动力循环装置，锅炉温度为 320°C 的核反应堆吸入热量 Q_1 ，产生压力为 7MPa 、温度为 360°C 的过热蒸汽（点1），过热蒸汽经汽轮机膨胀做功后于 0.008MPa 压力下排出（点2'），乏气在冷凝器中向环境温度 $t_0=20^{\circ}\text{C}$ 进行定压放热变为饱和水（点3），然后经泵返回锅炉（点4）完成循环。已知汽轮机的额定功率为 $5 \times 10^4\text{kW}$ ，汽轮机作不可逆的绝热膨胀，其等熵效率为 0.75 ，水泵作等熵压缩。试求：

- (1) 蒸气的质量流量；
- (2) 乏气的湿度；
- (3) 循环的热效率。

解:

1点 (过热蒸汽), 根据 $P_1=7\text{MPa}$ 、 $t_1=360^\circ\text{C}$, 查过热水蒸气表得: $H_1=3045.5\text{kJ/kg}$ 、 $S_1=6.2801\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;

2点 (湿蒸汽), $P_2=0.008\text{MPa}$, 查饱和水蒸气表得:

$$H_g=2577.0\text{kJ/kg} \quad H_l=173.88\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

$$S_g=8.2287\text{kJ}/\text{kg} \quad S_l=0.5926\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

汽轮机作等熵膨胀 $S_2=S_1=6.2801\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

$$S_2=S_g x_2 + (1-x_2)S_l$$

$$6.2801=8.2287x_2+(1-x_2) \times 0.5926$$

$$x_2=0.7448$$

$$H_2 = H_g x_2 + (1 - x_2) H_l$$

$$= 2577.0 \times 0.7488 + (1 - 0.7488) \times 173.88 = 1963.7$$

汽轮机作等熵膨胀过程1-2所作的理论功 W_R

$$W_R = H_2 - H_1 = 1963.7 - 3045.5 = -1081.8 \text{ kJ/kg}$$

汽轮机作实际膨胀过程1-2'所作的功 W_s

$$W_s = \eta_s W_R = -1081.8 \times 0.75 = -811.4 \text{ kJ/kg}$$

$$W_s = H_2' - H_1$$

$$H_2' = H_1 + W_s = 3045.5 + 811.4 = 2234.1 \text{ kJ/kg}$$



汽轮机作实际膨胀后乏气的干度为 x_2'

$$H_2' = H_g x_2' + (1 - x_2') H_l$$

$$2234.1 = 2577.0 x_2' + (1 - x_2') 173.9 \quad x_2' = 0.8573$$

乏气的湿度为 $1 - 0.8573 = 0.1427$

3点 0.008MPa饱和液体

$$H_3 = 173.88 \text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}) \quad S_3 = 0.5926 \text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

$$4\text{点 } P_4 = 7 \text{MPa}, S_4 = S_3 = 0.5926 \text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

4点 $P_4=7\text{MPa}$, $S_4=S_3=0.5926\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

查未饱和水性质表

	5MPa		7.5MPa		4MPa	
	H	S	H	S	H	S
40 °C	171.97	0.5705	174.18	0.5696	173.74	0.5698
80 °C	338.85	1.0720	340.84	1.0704	340.44	1.0707

$$\frac{0.5926 - 0.5698}{1.0707 - 0.5698} = \frac{H_4 - 173.74}{340.44 - 173.74} \Rightarrow H_4 = 181.33\text{kJ} / \text{kg}$$

水泵所消耗的功

$$W_P = H_4 - H_3 = 181.33 - 173.88 = 7.45 \text{ kJ/kg}$$

热效率

$$\eta = \frac{-W}{Q_1} = \frac{-(-811.4 + 7.45)}{3045.5 - 181.33} = 0.2807$$



1. 提高蒸汽的过热温度

在相同的蒸汽压力下，提高蒸汽的过热温度时，可提高平均吸热温度，增大做功量，提高循环的热效率，并且可以降低汽耗率。同时乏气的干度增加，使透平机的相对内部效率也可提高。但是蒸汽的最高温度受到金属材料性能的限制，不能无限地提高，一般过热蒸汽的最高温度以不超873K为宜。



2. 提高蒸汽的压力

当蒸汽压力提高时，热效率提高、而汽耗率下降。但是随着压力的提高，乏汽的干度下降，即湿含量增加，因而会引起透平机相对内部效率的降低。还会使透平中最后几级的叶片受到磨蚀，缩短寿命。乏汽的干度一般不应低于0.88。另外，蒸汽压力的提高，不能超过水的临界压力，而且设备制造费用也会大幅上升。

6.2 节流膨胀与作外功的绝热膨胀



膨胀过程在实际当中，经常遇到，如：高压流体流经喷嘴、汽轮机、膨胀器及节流阀等设备或装置所经历的过程，都是膨胀过程。下面讨论膨胀过程的热力学现象。着重讨论工业上经常遇到的节流膨胀和绝热膨胀过程及其所产生的温度效应。





将高压流体经一节流阀迅速膨胀到低压的过程称为节流膨胀。

特点：等焓过程

由热力学第一定律： $\Delta H = 0$

流体进行节流膨胀，由于压力变化而引起的温度变化称为节流效应或 *Joule-thomson* 效应。节流时微小压力的变化所引起的温度变化，称为微分节流效应。

数学式为：

$$\mu_J = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H$$



$$\mu_J = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H = \frac{T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P - V}{C_p}$$

对理想气体:

$$\mu_J = 0$$

说明理想气体在节流过程中温度不发生变化



6.2.1 节流膨胀



$$\mu_J = \left[\frac{\partial T}{\partial P} \right]_H$$

对实际气体 μ_J 值可为正值、负值或零。

$\mu_J > 0$ 节流后温度降低，制冷。

$\mu_J = 0$ 节流后温度不变。

$\mu_J < 0$ 节流后温度升高，制热。





节流过程的主要特征是等焓；理想气体节流时温度不变，不能用于制冷或制热；真实气体节流效应取决于气体的状态，在不同的状态下节流，具有不同的微分节流效应值。

转化点，转化曲线

由于真实气体的节流效应值随着状态的不同而发生变化，所以在实际当中，要产生制冷效应，必须选择适当的节流前状态，使其节流效应系数大于0。欲达到这一目的，首先要找到转化点。所谓转化点就是节流效应系数为0时的温度、压力所对应的点



P₁₄₄ 图6-9

转化曲线：将图上各转化点连接起来所组成的曲线就叫转化曲线。

转化曲线左侧，等焓线上，压力减小，温度降低，为制冷区；

转化曲线右侧，等焓线上，压力减小，温度升高，为制热区；

转化曲线上，节流效应系数为零。

6.2.1 节流膨胀



积分节流效应：实际节流时，压力变化为一有限值，由此所引起的温度变化称为积分节流效应。

$$\Delta T_H = \int_{p_1}^{p_2} \mu_J dp$$



①可逆绝热膨胀

对外作功的绝热膨胀，如果可逆进行，则为等熵过程，因而又称为等熵膨胀。

特点：等熵过程，要注意绝热过程是可逆的才能称为等熵过程。

微分等熵温度效应系数：等熵膨胀时，压力的微小变化所引起的温度变化。

$$\mu_s = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_s$$

6.2.2 作外功的绝热膨胀



$$\mu_s = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_s$$

$$\mu_s = \frac{T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p}{C_p}$$

$$\because C_p > 0, \quad T > 0, \quad \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p > 0$$

$$\therefore \mu_s > 0$$

任何气体在任何状态下经绝热膨胀，都可制冷。



6.2.2 作外功的绝热膨胀



在相同条件下，等熵膨胀系数恒大于节流膨胀系数，因此等熵膨胀可获得比节流膨胀更好的制冷效果。

积分等熵温度效应：等熵膨胀时，压力变化为有限值所引起的温度变化，称为积分等熵温度效应。

$$\Delta T_S = \int_{p_1}^{p_2} \mu_S dp$$



②不可逆对外作功的绝热膨胀

实际上对外作轴功的膨胀过程并不是可逆的，因此不是等熵过程，而是向熵增大的方向进行，其终态位置可由等熵效率计算确定。对活塞式膨胀机，温度小于等于 30°C 时，等熵效率近似等于0.65，温度高于 30°C 时，等熵效率近似等于0.7和0.75之间；对透平机，等熵效率在0.8和0.85之间。

不可逆对外作功的绝热膨胀的温度效应介于等熵膨胀效应和节流膨胀效应之间。



①等熵膨胀与气体属性及状态无关，对任何气体任何状态都产生制冷效应。节流膨胀对理想气体不产生温度效应，真实气体视气体状态而定，若真实气体产生制冷效应，那么等熵膨胀的温度效应大于节流膨胀的温度效应。

②设备与操作

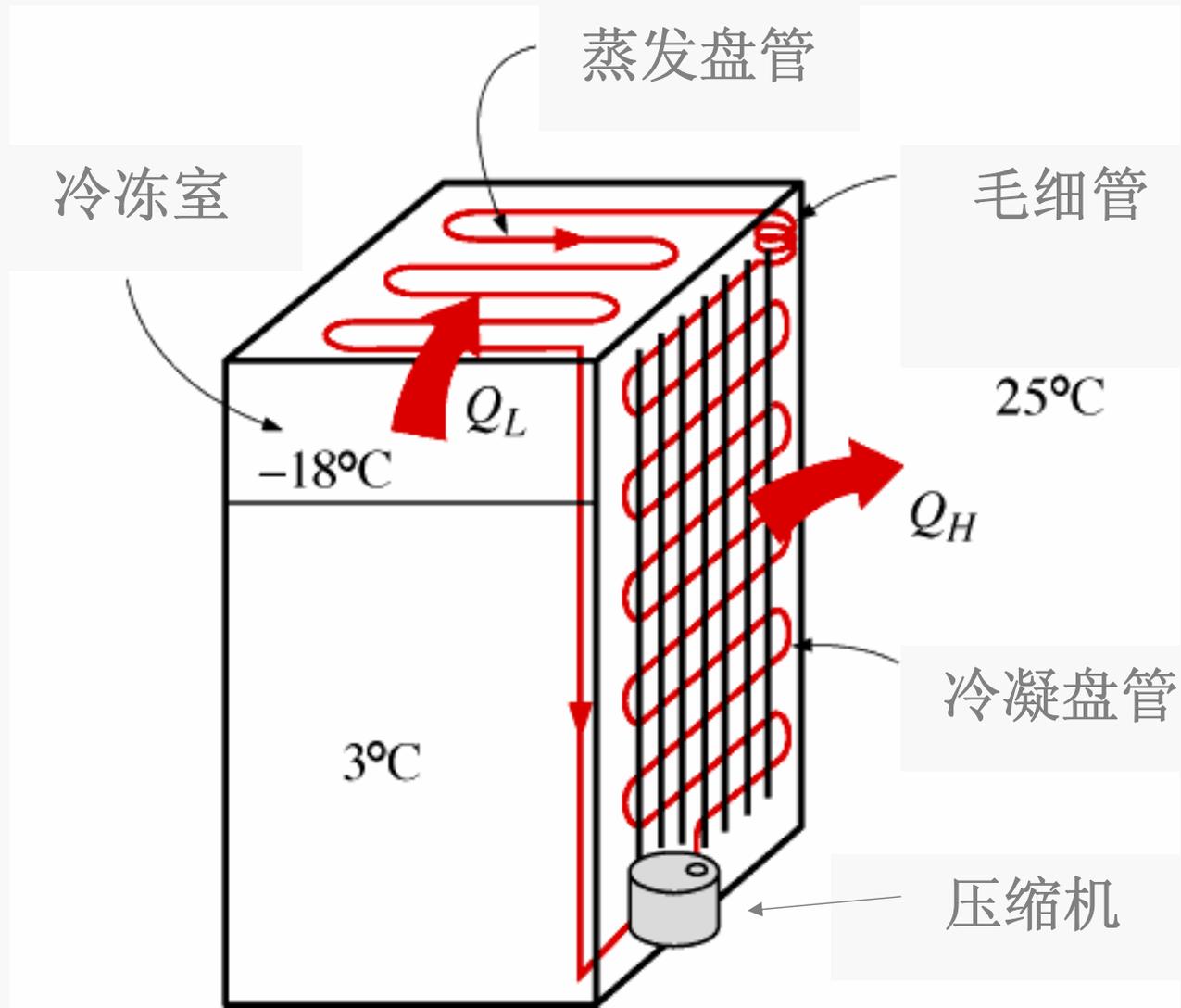
节流膨胀简单，针形阀；

等熵膨胀复杂，需要低温润滑油。

③操作条件与运行情况

一般大中型企业这两种都用，小型企业用节流膨胀。

6.3 制冷循环

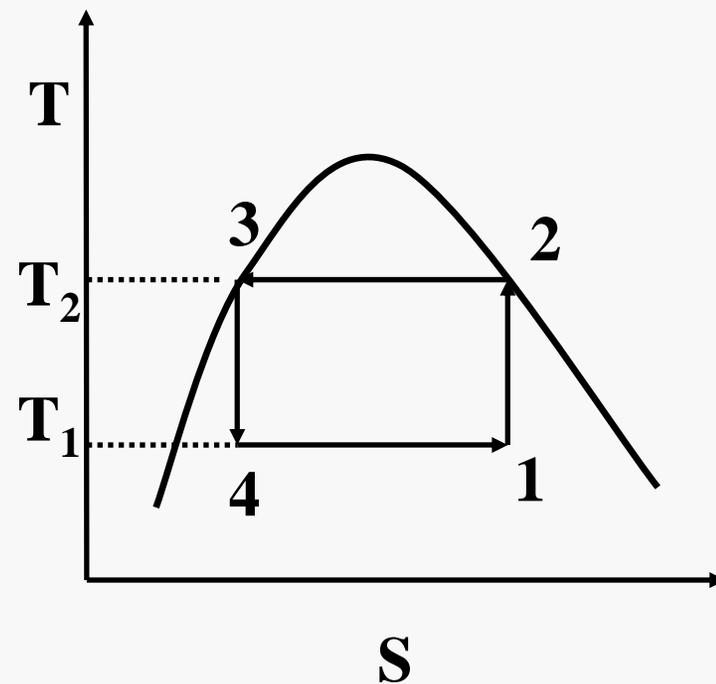
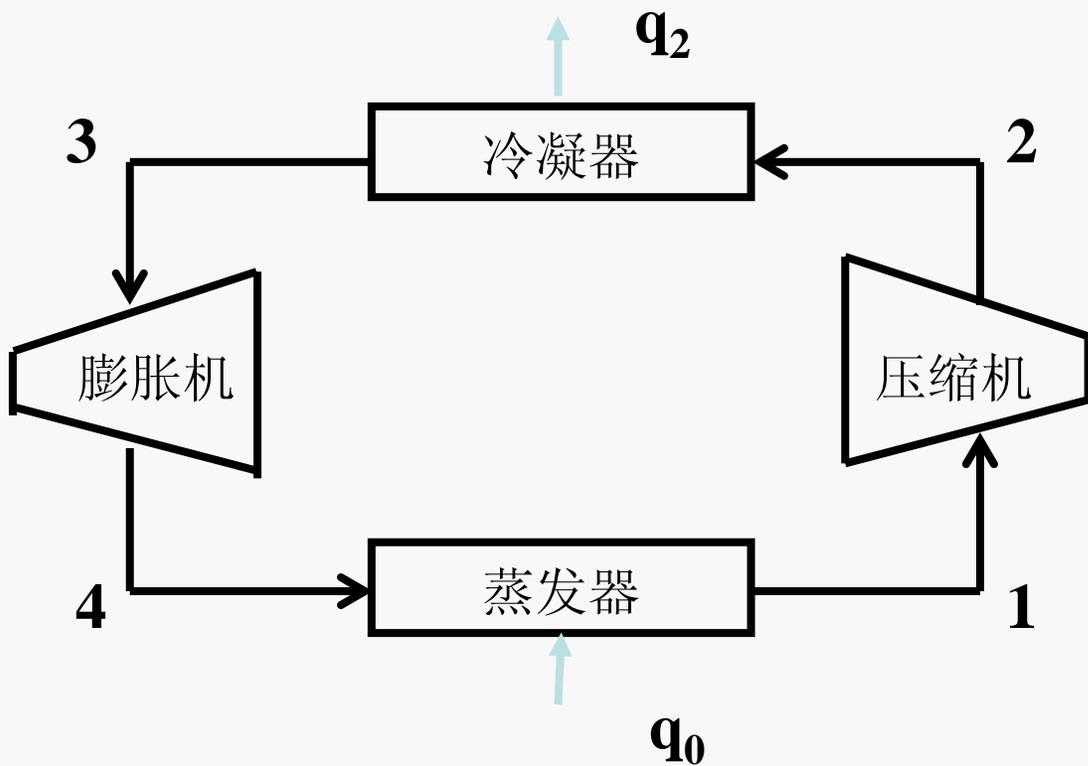




化工生产中常常需要将物系的温度降低到大气环境的温度，例如：合成氨工艺生产分离合成气中氨需 -30°C ，气体分离液化空气需要 -100°C 以下的低温，有机化工生产中，轻烃组分的分离都需要低温。

冷冻温度高于 -100°C 称普通冷冻；低于 -100°C 称为深度冷冻。要将物质冷却到大气环境温度以下，必须从被冷却物系取走能量，通常是以热的形式取出并排入大气或冷却水。因此，冷冻过程实质上是由低温物系向高温物系传热的过程，要用逆卡诺循环来达到制冷的目的。

6.3.1 制冷循环—逆向卡诺循环



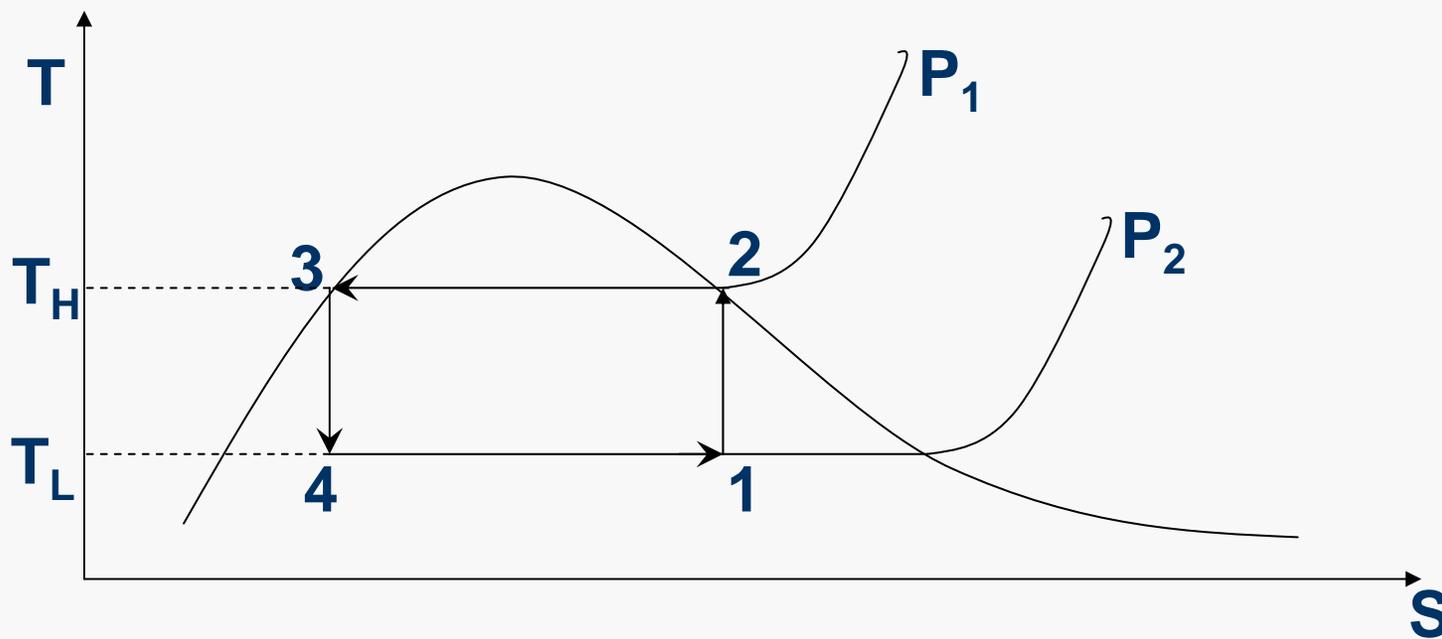
6.3.1 制冷循环—逆向卡诺循环



该循环经历了四各过程：

1→2：压缩过程； 2→3：等温冷凝，放热 Q_H ；

3→4：膨胀过程； 4→1：等温蒸发，吸热 Q_L 。





其热力学情况如下：

由热力学第一定律 $\Delta H=Q+W_S$ ，经过一个循环过程，实际上 $\Delta H=0$ ，所以：

$$Q = -W_S$$

又
$$Q = Q_H + Q_L$$

$$Q_H = T_H(S_3 - S_2) = T_H(S_4 - S_1)$$

$$Q_L = T_L(S_1 - S_4) = -T_L(S_4 - S_1)$$

故
$$W_S = -Q = (T_H - T_L)(S_1 - S_4)$$



用于衡量制冷效果好坏的一个技术指标是制冷系数，所谓制冷系数是指消耗单位功所获得的冷量，其数学表达式为：

$$\varepsilon = \frac{Q_L}{W_S}$$

对于卡诺压缩制冷循环制冷系数为：

$$\varepsilon = \frac{Q_L}{W_S} = \frac{T_L (S_1 - S_4)}{(T_H - T_L)(S_1 - S_4)} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$



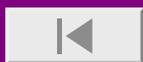
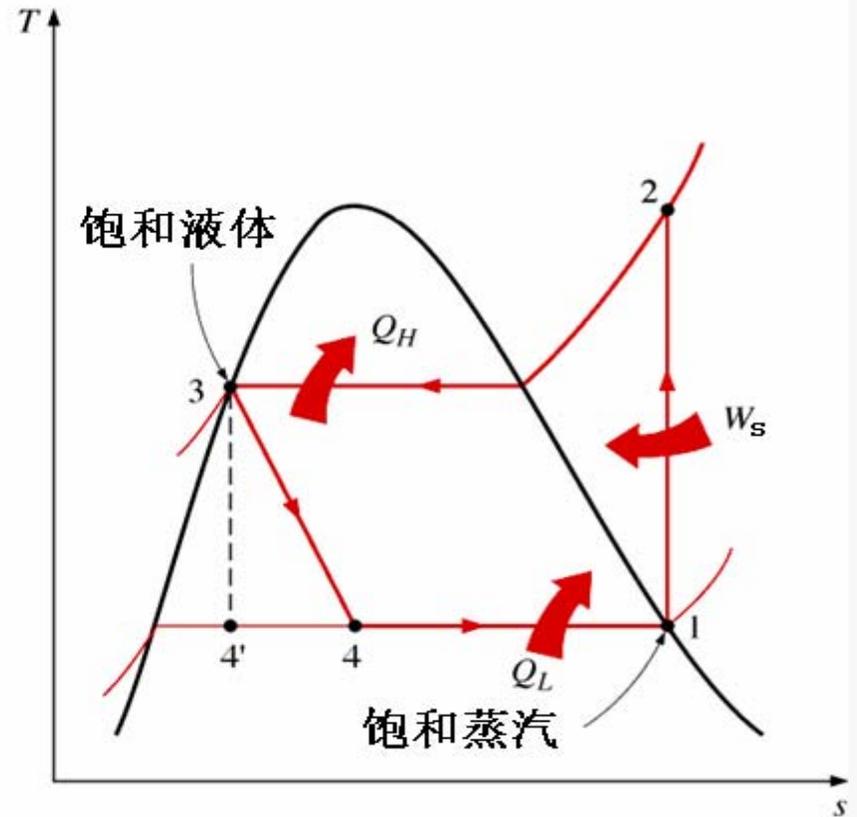
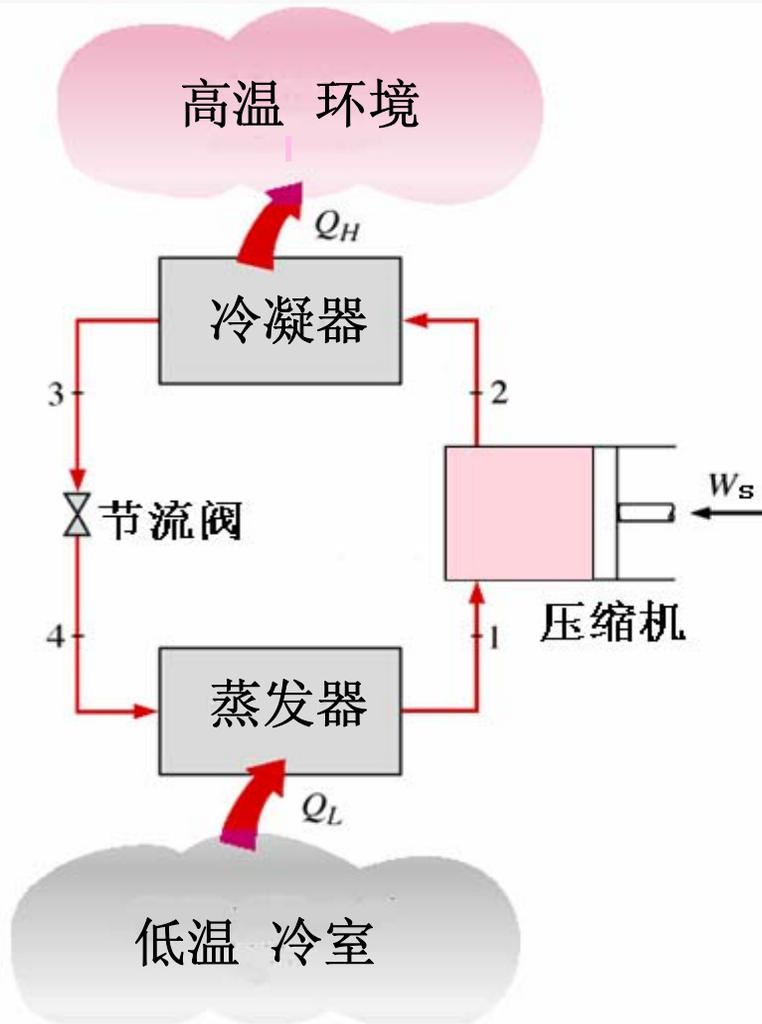
由此可见，制冷系数与冷却温度 T_H 和载冷体温度 T_L 有关：

(1)若制冷温度 T_L 一定，则 T_H 降低，制冷系数变大；电冰箱之所以在冬天制冷效果好，就是由于 T_H 低的缘故。

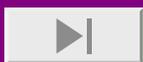
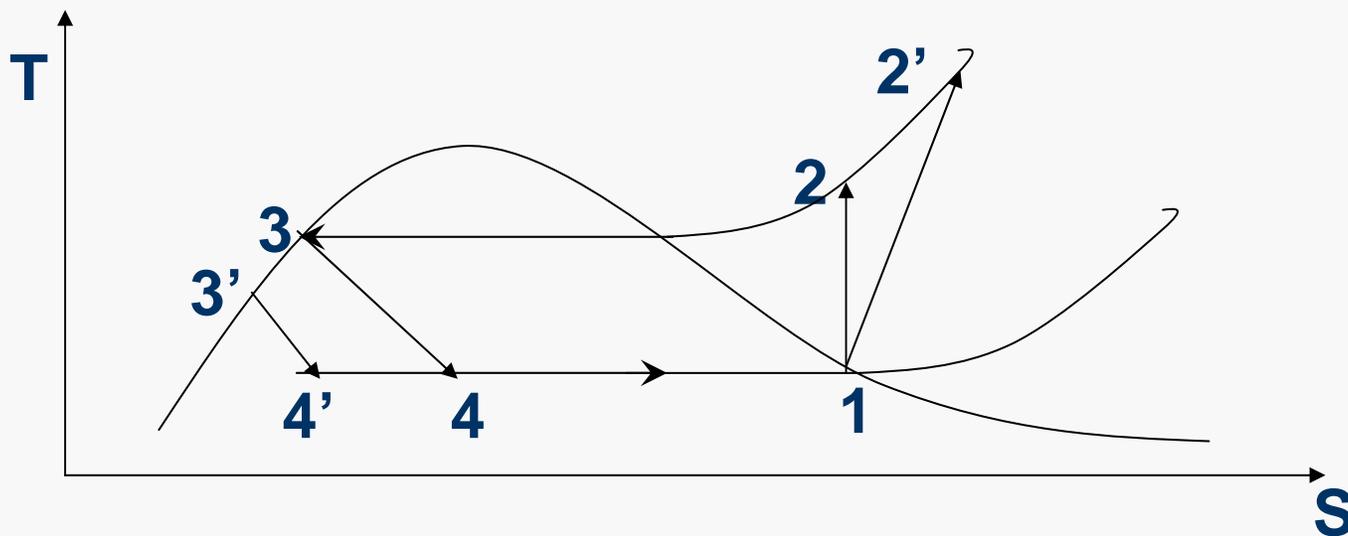
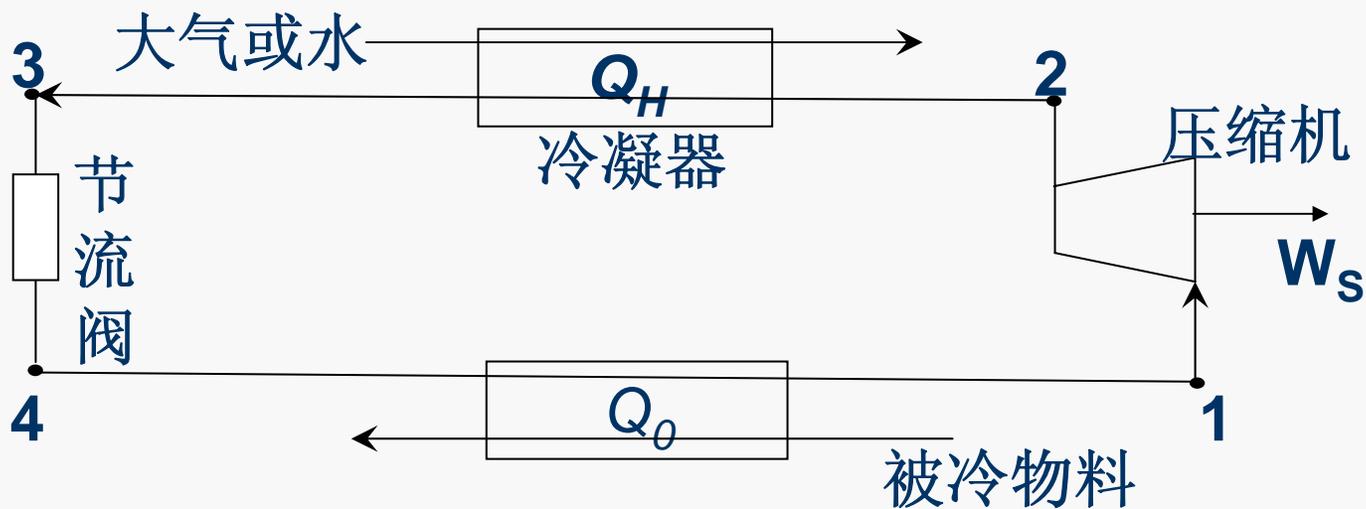
(2)若冷却温度一定，则 T_L 升高，制冷系数变大；因此要以满足工艺条件为依据，如果工艺条件为 -20°C ，一般选取 $T_L = -25^{\circ}\text{C}$ 即可，不能过冷太多。

逆向卡诺循环是制冷循环最理想的情况，因为它耗功最小，但实际过程的耗功量都大于逆向卡诺循环，工业上现在广泛应用的是蒸汽压缩制冷循环。

6.3.2 蒸汽压缩制冷循环



6.3.2 蒸汽压缩制冷循环



6.3.2 蒸汽压缩制冷循环



- 1→2: 对应于压缩机, 如冰机、氨压机、制冷机;
- 2→3: 冷凝器进行, 在冷凝器里, 冷却剂把工质的热量带走, 使其由高压气体变为高压液体;
- 3→4: 在节流阀内进行;
- 4→1: 蒸发器内进行。





实际压缩制冷循环的每一步都是不可逆的，它与卡诺压缩制冷循环的不同表现在五个方面：

- (1) 制冷剂进压缩机时的状态不同：卡诺压缩制冷循环为湿气，实际压缩制冷循环为干气；
- (2) 压缩过程不同：卡诺压缩循环为等熵过程，实际压缩制冷循环若忽略掉热损失，可视为不可逆绝热过程；因为压缩机在运动中总是有摩擦的，因而是沿着熵增大的方向进行，这就出现了等熵效率问题：

$$\eta_s = \frac{\text{等熵过程耗功}}{\text{实际过程耗功}} = \frac{H_2 - H_1}{H_{2'} - H_1} \leq 1$$

6.3.2 蒸汽实际压缩制冷循环



- (3) 冷凝过程不同：卡诺制冷为等温过程，实际制冷为不可逆过程，沿着等压线变化；
- (4) 制冷剂离开冷凝器时状态不同：卡诺制冷为饱和液体，实际制冷为过冷液体；
- (5) 膨胀过程不同：卡诺制冷为等熵过程，实际制冷为等焓过程；



(1)单位冷冻量：1Kg制冷剂在循环过程中所提供的冷量：

$$q_0 = H_1 - H_4 \text{ kJ/kg}$$

(2)冷凝器的单位热负荷

$$q_H = H_3 - H_2 \text{ kJ/kg}$$

(3)单位耗功量

$$W_S = H_2 - H_1 \text{ kJ/kg}$$

(4)制冷系数

$$\varepsilon = \frac{q_0}{W_S} = \frac{H_1 - H_4}{H_2 - H_1}$$



(5)冷机的制冷能力

$$Q_0 = Gq_0 \text{ kJ/h}$$

G为制冷剂循环量。

(6)制冷剂循环量

$$G = Q_0 / q_0 \text{ kg/h}$$

(7)冷凝器的热负荷

$$Q_H = Gq_H \text{ kJ/h}$$



(8) 压缩机的轴功率

$$N_T = GW_S / 3600 \quad \text{kW}$$

$$\because G = Q_0 / q_0$$

$$W_S = q_0 / \varepsilon$$

$$\therefore N_T = \frac{Q_0}{q_0} \cdot \frac{q_0}{\varepsilon \times 3600} = \frac{Q_0}{\varepsilon \times 3600} \quad \text{kW}$$



制冷剂的选择原则：

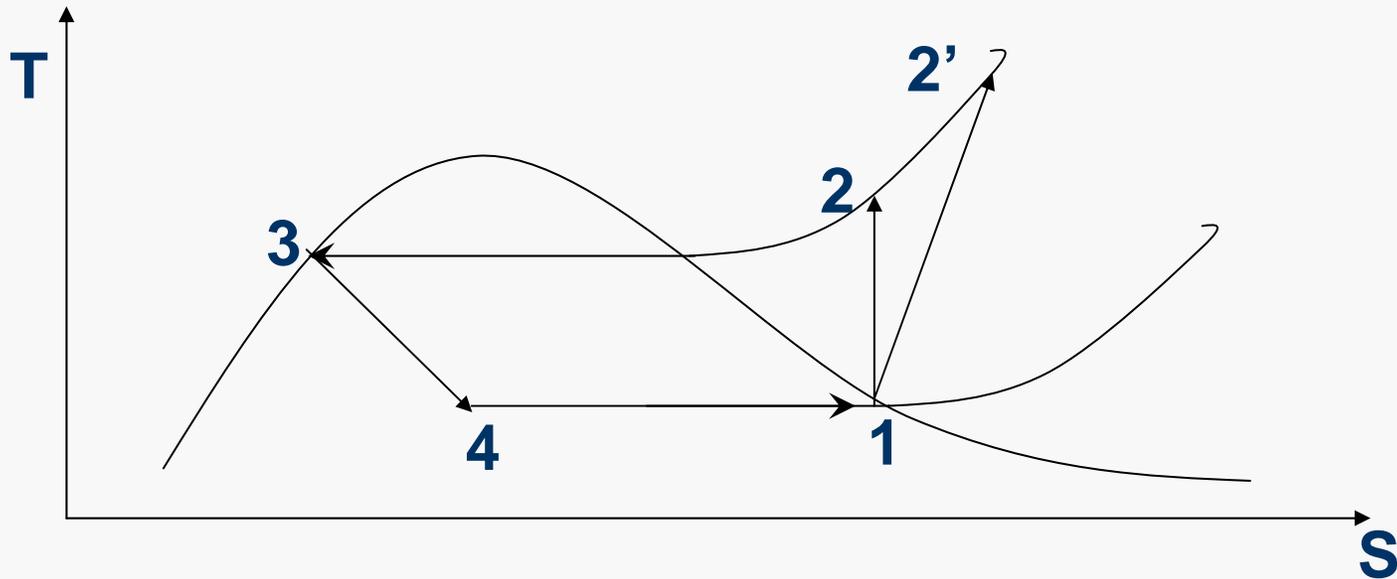
- (1) 潜热要大。
- (2) 有较高的临界温度与较低的凝固温度。
- (3) 化学稳定性、不易燃、不分解、无腐蚀性。
- (4) 常温下冷凝温度应尽量低。
- (5) 大气压力下沸点低。

6.3.4 制冷循环计算举例



例：某空气调节器的制冷能力为 $4.18 \times 10^6 \text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$ ，采用氨蒸汽压缩制冷循环。夏天室内温度维持在 15°C ，冷却水温度为 35°C 。蒸发器与冷凝器的传热温差为 5°C 。已知压缩机的等熵效率为0.8。求：1.逆卡诺循环的制冷系数；2.假定压缩机为等熵过程，工质的循环量、压缩功率、冷凝器放热量和制冷系数；3.压缩为非等熵过程时的上述各参数。

6.3.4 制冷循环计算举例



已知: $H_1=1452\text{kJ/kg}$, $H_2=1573\text{kJ/kg}$
 $H_3=368.2\text{kJ/kg}$, $H_4=368.2\text{kJ/kg}$



解:1. 循环工质氨在冷凝器中的冷凝温度 T_H 为

$$T_H = 35 + 5 = 40^\circ \text{C}$$

氨在蒸发器内蒸发温度 T_L 为

$$T_L = 15 - 5 = 10^\circ \text{C}$$

逆卡诺循环的制冷系数为

$$\varepsilon = \frac{T_L}{T_H - T_L} = \frac{283.15}{313.15 - 283.15} = 9.44$$



2. 氨的循环量

$$G = \frac{Q_0}{q_0} = \frac{Q_0}{H_1 - H_4} = \frac{4.180 \times 10^4}{1452 - 368.2} = 38.57 \text{ kg/h}$$

压缩机功率

$$\begin{aligned} N_T &= GW_s / 3600 = G(H_2 - H_1) / 3600 \\ &= \frac{38.57 \times (2573 - 1452)}{3600} = 1.296 \text{ kW} \end{aligned}$$

冷凝器放热量

$$Q_H = G(H_3 - H_2) = 38.57 \times (368.2 - 1573) = -46469 \text{ kJ/h}$$

制冷系数

$$\varepsilon = \frac{H_1 - H_4}{H_2 - H_1} = \frac{1452 - 368.2}{1573 - 1452} = 8.957$$

6.3.4 制冷循环计算举例



$$3. \text{ 由 } \eta_s = \frac{H_2 - H_1}{H_{2'} - H_1} \Rightarrow 0.8 = \frac{1452 - 1573}{1452 - H_{2'}}$$

$$\therefore H_{2'} = 1603 \text{ kJ / kg}$$

$$G = \frac{Q_0}{q_0} = \frac{Q_0}{H_1 - H_4} = \frac{4.180 \times 10^4}{1452 - 368.2} = 38.57 \text{ kg / h}$$

$$\begin{aligned} N_T &= GW_s / 3600 = G(H_{2'} - H_1) / 3600 \\ &= \frac{38.57 \times (1603 - 1452)}{3600} = 1.618 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$Q_H = G(H_3 - H_{2'}) = 38.57 \times (368.2 - 1603) = -47626 \text{ kJ / h}$$

$$\varepsilon = \frac{H_1 - H_4}{H_{2'} - H_1} = \frac{1452 - 368.2}{1603 - 1452} = 7.177$$



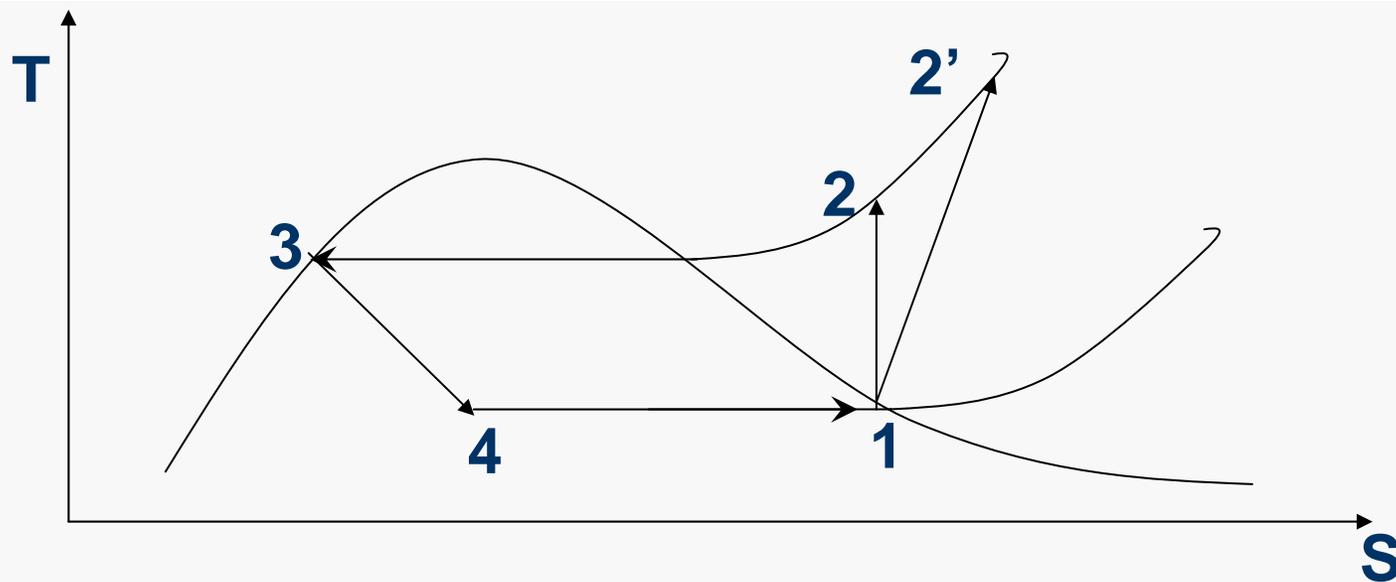
6.3.4 制冷循环计算举例



例：某制冷机采用氨作制冷剂，制冷能力为 6000kJ/h ，蒸发温度为 -15°C ，压缩为可逆绝热，蒸汽的冷凝温度为 30°C ，采用节流膨胀阀，试计算：

- (1) 蒸汽离开压缩机的温度；
- (2) 节流阀后，制冷剂内液体的含量；
- (3) 制冷剂的循环量；
- (4) 压缩机处理的蒸汽量；
- (5) 压缩所需的功率；
- (6) 制冷系数；
- (7) 该循环逆卡诺循环的制冷系数；

6.3.4 制冷循环计算举例



解：(1)此循环在 T - S 图上表示如上。查氨的 T - S 图得：
点1： $t_1 = -15\text{ }^\circ\text{C}$ ， $p_1 = 2.35 \times 10^5 \text{ Pa}$ ， $H_1 = 1661 \text{ kJ/kg}$
 $S_1 = 9.02 \text{ kJ/kgK}$

6.3.4 制冷循环计算举例



点2: $t_2=30\text{ }^\circ\text{C}$, $p_2=11.7\times 10^5\text{ Pa}$

由1→2是等熵压缩, 所以由点1开始, 沿等熵线 $s_1=s_2$ 与的等压线 p_2 之交点为点2, 从图上直接读出蒸汽离开压缩机的温度 $t_2=99\text{ }^\circ\text{C}$, $H_2=1891.17\text{ kJ/kg}$ 。

点3: $t_3=30\text{ }^\circ\text{C}$, 等温等压冷凝, 沿等温线 t_3 与饱和液体线的交点得: $H_3=560.66\text{ kJ/kg}$ 。

点4: 3→4等焓膨胀, $H_4=H_3=560.66\text{ kJ/kg}$ 。

(2)单组分汽液两相混合物的焓中据干度定义得:

$$H_4 = H_l(1 - x) + H_g x$$

6.3.4 制冷循环计算举例



此处： $H_1=351.46 \text{ kJ/kg}$ ； $H_g=H_1=1661 \text{ kJ/kg}$ ；
 $H_4=H_3=560.66 \text{ kJ/kg}$ 。

代入上式解得： $x=16\%$ 。即：节流后，制冷剂中液体含量为84%。

(3)制冷剂循环量：

$$G = \frac{Q_0}{H_1 - H_4} = \frac{60000}{1661 - 560.66} = 54.5 \text{ kg/h}$$

(4)由氨的 T - S 图查得： $v_1=0.506 \text{ m}^3/\text{kg}$

压缩机处理的蒸汽量 $V=v_1G=0.506 \times 54.5=27.58 \text{ m}^3/\text{h}$



(5) 压缩机所需功率:

$$N_T = G \cdot W_s = G \cdot (H_2 - H_1) = 54.5 \times (1891.17 - 1661) = 12544.26 \text{ kJ/h} = 3.48 \text{ KW}$$

(6) 制冷系数

$$\varepsilon = \frac{q_0}{W_s} = \frac{H_1 - H_4}{H_2 - H_1} = \frac{1661 - 560.66}{1891.17 - 1661} = 4.8$$

(7) 逆卡诺循环的制冷系数

$$\varepsilon_c = \frac{T_1}{T_2 - T_1} = \frac{273 - 15}{30 - (-15)} = 5.7$$

6.3.5 热泵



热泵的工作原理与制冷机完全相同，制冷机是制冷，热泵的工作目的是制热。热泵是将低温热不断地输送到高温物体中。它以消耗一部分高质量的能量为代价，通过热力循环，从自然环境介质(水、空气)中或生产排放的余热中吸取热量，并将它输送到所需要的较高温度的物质中去。实质上是一个逆向运转的热机，故成为热泵。



6.3.5 热泵



热泵的经济性能是以消耗单位功量 W_N 所得到的供热量 Q_H 来衡量的，称为制热系数 ξ_H 。

$$\xi_H = Q_H / W_N$$

可逆热泵(逆卡诺循环)的制热系数为

$$\xi_{H, \text{卡}} = \frac{T_H}{T_H - T_L}$$



可逆热泵的制热系数只于两个温源的温度有关，与工质性质无关。制热系数与制冷系数的关系为

$$\xi_H = \frac{|Q_H|}{|W_N|} = \frac{|Q_0| + |W_N|}{|W_N|} = \frac{|Q_0|}{|W_N|} + 1 = \varepsilon + 1$$

即制热系数大于制冷系数，供热量 Q_H 大于压缩机消耗功量 W_S 。



例 某冷暖空调器热泵功率为1kW，环境温度为0℃，要求供热的温度为30℃，制热系数是逆卡诺循环的80%。求此空调的供热量，以及热泵从环境吸收的热量。

解：逆卡诺循环的制热系数为：

$$\xi_{H, \text{卡}} = \frac{T_H}{T_H - T_L} = \frac{303.15}{303.15 - 273.15} = 10.105$$

6.3.5 热泵



$$Q_H = \xi_H \times W_N = 0.8 \times 10.105 \times 1.0 = 8.084 \text{ kW}$$

从环境吸收的热量为

$$Q_0 = |Q_H| - |W_N| = 8.084 - 1.0 = 7.084 \text{ kW}$$

可见，消耗1 kW的功，可以产生8.084kW的热，且7.084kW的热是由低温热源获得的。

例：某蒸汽压缩制冷过程,制冷剂在 $250K$ 吸收热量 Q_L ,在 $300K$ 放出热量 $-Q_H$,压缩和膨胀过程是绝热的,向制冷机输入的净功为 W_N ,判断下列情况是:

A可逆的 B 不可逆的 C 不可能的

$$(1) Q_L = 2000kJ \quad W_N = 400kJ$$

$$(2) Q_L = 1000kJ \quad Q_H = -1500kJ$$

$$(3) W_N = 100kJ \quad Q_H = -700kJ$$

$$\text{解:(1)、} \eta_{\text{可逆}} = \frac{250}{300 - 250} = 5 \quad \eta = \frac{Q_L}{W_N} = \frac{2000}{400} = 5$$

$\because \eta = \eta_{\text{可逆}} \quad \therefore$ 此制冷程是可逆的。

(2)、

$$\eta = \frac{Q_L}{W_N} = \frac{Q_L}{-Q_H - Q_L} = \frac{1000}{1500 - 1000} = 2$$

$\therefore \eta < \eta_{\text{可逆}} \therefore$ 不可逆

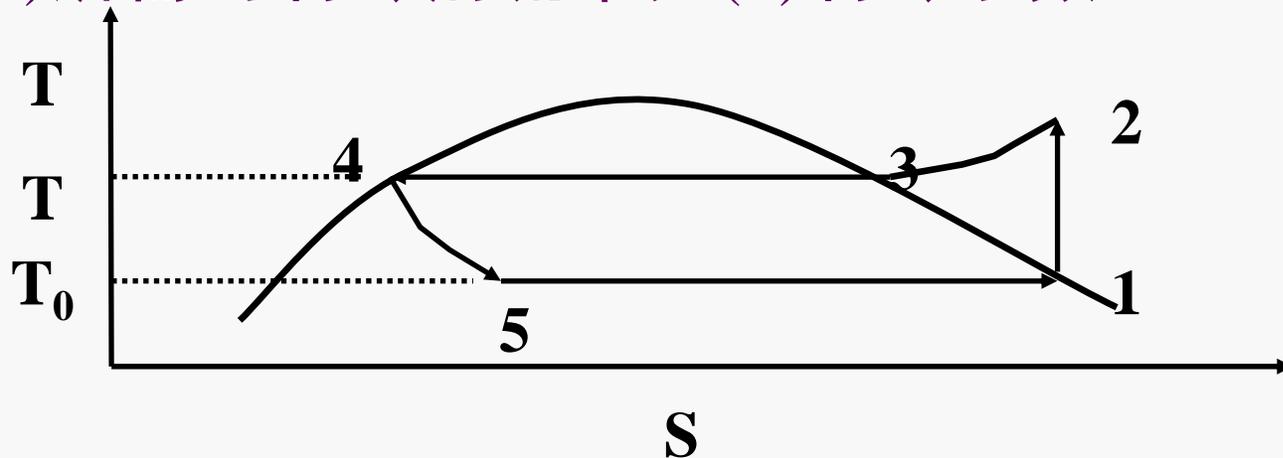
(3)、

$$\eta = \frac{Q_L}{W_N} = \frac{-Q_H - W_s}{W_N} = \frac{700 - 100}{100} = 6$$

$\therefore \eta > \eta_{\text{可逆}} \therefore$ 不可能

例：某压缩制冷装置，用 $R134a$ 作为制冷剂，蒸发器中的温度为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，冷却器中的压力为 1.0MPa ，假定 $R134a$ 进入压缩机时为饱和蒸汽，而离开冷凝器时为饱和液体，压缩过程按绝热可逆计算，每小时制冷量 Q_0 为 $1.67 \times 10^5 \text{ kJ}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

求：(1)所需的制冷剂流率；(2)制冷系数。



解:

1点 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 饱和蒸汽

查表得: $H_1 = 231.9\text{kJ/kg}$; $S_1 = 0.9367\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

SATURATED REFRIGERANT 134A - TEMPERATURE TABLE

T $^{\circ}\text{C}$	P bar	Spec. vol. m^3/kg		Int. Ener. kJ/kg		Enthalpy kJ/kg		Entropy $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	
		Sat. liq.	Sat. vap.	Sat. liq.	Sat. vap.	Sat. liq.	Sat. vap.	Sat. liq.	Sat. vap.
		v_f X 1000	v_g X 100	u_f	u_g	h_f	h_g	s_f X 10	s_g X 10
-40	0.52	0.705	35.692	-0.04	204.3	0	222.7	0	9.553
-37	0.6	0.71	30.901	3.39	206	3.44	224.6	0.146	9.511
-34	0.7	0.714	26.859	6.87	207.7	6.92	226.4	0.292	9.471
-31	0.81	0.719	23.435	10.38	209.3	10.44	228.3	0.438	9.434
-28	0.93	0.723	20.52	13.93	211	14	230.1	0.584	9.399
-25	1.07	0.728	18.031	17.52	212.7	17.6	231.9	0.73	9.367
-22	1.22	0.733	15.895	21.16	214.4	21.25	233.7	0.875	9.336
-19	1.39	0.738	14.056	24.83	216	24.93	235.5	1.021	9.307
-16	1.57	0.743	12.468	28.54	217.7	28.66	237.3	1.166	9.28
-13	1.78	0.748	11.091	32.29	219.3	32.42	239.1	1.311	9.255
-10	2.01	0.753	9.893	36.07	221	36.22	240.9	1.455	9.232
-7	2.26	0.759	8.847	39.89	222.6	40.06	242.6	1.6	9.21
-4	2.53	0.764	7.931	43.75	224.3	43.94	244.3	1.744	9.189
-1	2.83	0.77	7.128	47.64	225.9	47.86	246	1.888	9.169
2	3.15	0.776	6.42	51.57	227.5	51.82	247.7	2.031	9.151
5	3.5	0.782	5.794	55.53	229.1	55.81	249.4	2.175	9.134
8	3.88	0.788	5.241	59.53	230.7	59.84	251	2.318	9.118
11	4.29	0.795	4.749	63.56	232.3	63.9	252.7	2.46	9.103
14	4.73	0.802	4.311	67.62	233.8	68	254.3	2.603	9.089

2点: $P_2 = 1\text{MPa}$, $S_2 = S_1 = 0.9367\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

查表得 $H_2 = 278.7\text{kJ}/\text{kg}$

SUPERHEATED REFRIGERANT 134a

v in m^3/kg , u in kJ/kg , h in kJ/kg , s in $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

T	P= 10 bar				P= 12 bar			
	$v \times 100$	u	h	s	$v \times 100$	u	h	s
50	2.17	256.9	278.7	0.937	1.711	253.4	274	0.911
60	2.301	266.6	289.6	0.97	1.834	263.7	285.7	0.946
70	2.422	276.1	300.3	1.002	1.946	273.6	297	0.98
80	2.537	285.6	311	1.033	2.051	283.4	308	1.011
90	2.648	295	321.5	1.062	2.149	293.1	318.9	1.042
100	2.754	304.5	332.1	1.091	2.243	302.8	329.7	1.071
110	2.857	314	342.6	1.119	2.334	312.5	340.5	1.1
120	2.958	323.6	353.2	1.146	2.422	322.2	351.3	1.128
130	3.057	333.3	363.9	1.173	2.507	332	362.1	1.155
140	3.153	343	374.6	1.199	2.591	341.8	372.9	1.181
150	3.248	352.9	385.4	1.225	2.673	351.8	383.8	1.207
160	3.342	362.8	396.2	1.25	2.754	361.8	394.8	1.233
170	3.435	372.8	407.2	1.275	2.833	371.9	405.9	1.258
180	3.527	383	418.3	1.3	2.912	382.1	417	1.283
190	3.618	393.3	429.5	1.324	2.989	392.4	428.3	1.308

4 点 1MPa饱和液体

查表得 $H_4 = 104.2 \text{ kJ/kg}$

SATURATED REFRIGERANT 134A - PRESSURE TABLE

P bar	T °C	Spec. vol. m ³ /kg		Int. Ener. kJ/kg		Enthalpy kJ/kg		Entropy kJ/(kg°K)	
		Sat. liq.	Sat. vap.	Sat. liq.	Sat. vap.	Sat. liq.	Sat. vap.	Sat. liq.	Sat. vap.
		v_f X 1000	v_g X 100	u_f	u_g	h_f	h_g	s_f X 10	s_g X 10
0.5	-40.61	0.705	36.78	-0.7	204	-0.7	222.4	-0.03	9.562
1	-26.42	0.726	19.165	15.8	211.9	15.9	231.1	0.661	9.382
1.5	-17.17	0.741	13.058	27.1	217	27.2	236.6	1.109	9.291
2	-10.1	0.753	9.93	35.9	220.9	36.1	240.8	1.451	9.232
2.5	-4.3	0.764	8.019	43.4	224.1	43.5	244.2	1.729	9.191
3	0.65	0.773	6.727	49.8	226.8	50	247	1.967	9.159
3.5	5	0.782	5.793	55.5	229.1	55.8	249.4	2.175	9.134
4	8.91	0.79	5.086	60.7	231.2	61.1	251.5	2.361	9.114
4.5	12.45	0.798	4.531	65.5	233	65.9	253.4	2.529	9.096
5	15.71	0.806	4.084	69.9	234.7	70.3	255.2	2.684	9.081
5.5	18.72	0.813	3.715	74.1	236.3	74.5	256.7	2.826	9.068
6	21.54	0.82	3.406	78	237.7	78.5	258.2	2.959	9.057
6.5	24.19	0.826	3.143	81.7	239.1	82.2	259.5	3.084	9.047
7	26.68	0.833	2.916	85.2	240.3	85.7	260.7	3.201	9.037
7.5	29.05	0.839	2.719	88.5	241.5	89.1	261.9	3.312	9.028
8	31.3	0.845	2.545	91.7	242.6	92.4	263	3.417	9.02
8.5	33.44	0.851	2.391	94.8	243.6	95.5	264	3.518	9.013
9	35.5	0.857	2.254	97.7	244.6	98.5	264.9	3.614	9.006
9.5	37.47	0.863	2.13	100.6	245.5	101.4	265.8	3.706	8.999
10	39.36	0.869	2.019	103.3	246.4	104.2	266.6	3.795	8.992
10.5	41.19	0.875	1.918	106	247.3	106.9	267.4	3.88	8.986
11	42.95	0.881	1.825	108.6	248.1	109.5	268.1	3.962	8.98

$$H_1 = 231.9 \text{ kJ/kg} \quad H_2 = 278.7 \text{ kJ/kg}$$

$$H_4 = 104.2 \text{ kJ/kg} \quad H_5 = H_4$$

$$\begin{aligned} q_0 &= H_1 - H_5 = H_1 - H_4 \\ &= 231.9 - 104.2 = 127.7 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$G = \frac{Q_0}{q_0} = \frac{1.67 \times 10^5}{127.7} = 1308 \text{ kg/h}$$

$$W_s = H_2 - H_1 = 278.7 - 231.9 = 46.8 \text{ kJ/kg}$$

$$\varepsilon = \frac{q_0}{W_s} = \frac{127.7}{46.8} = 2.73$$