



廣東工業大學

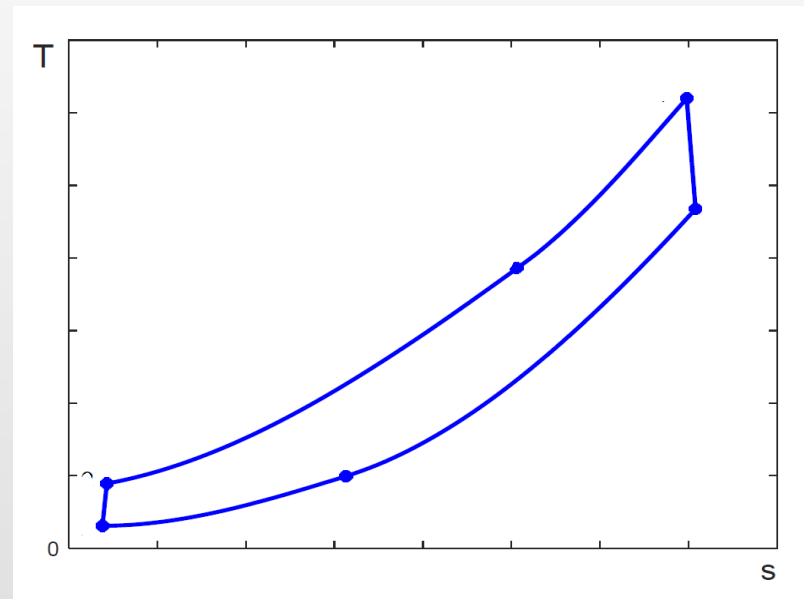
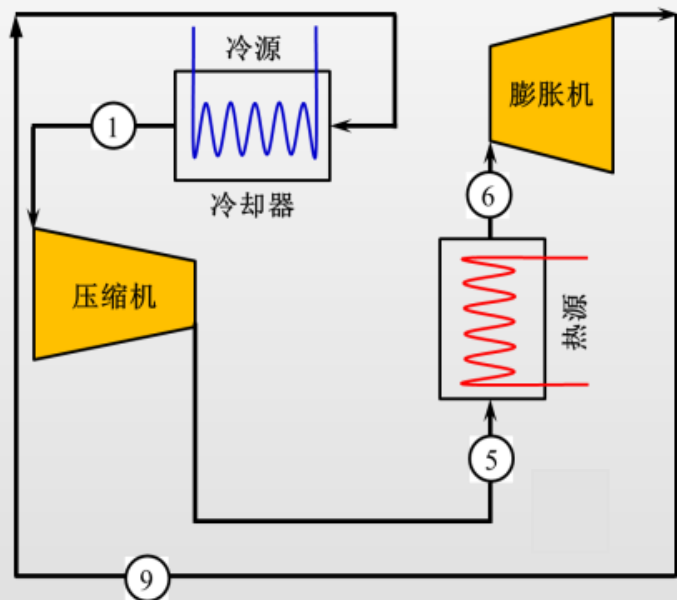
GUANG DONG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

# 高等工程热力学作业——CO<sub>2</sub>发电循环系统焓分析

小组成员：杨汶圣、伍治国、陈展珠、黄彦杰、麦志钊、颜奕波、杨锴

日期：2022年11月21日





SCO<sub>2</sub>发电T-s图

参数 (单位)	值
热源: 饱和水蒸气 $T_H$ (°C)	300
工质流量 $q_m$ (kg/s)	100
换热器最小换热温差 $\Delta T_{min}$ (K)	10
膨胀机等熵效率 $\eta_2$ (-)	0.9
压缩机等熵效率 $\eta_1$ (-)	0.85
最高 $P_{max}$ /最低压力 $P_{min}$ (MPa)	15/7.4
最低温度 $T_{min}$ (°C)	32
冷源进/出口温度 (°C)	22/32
环境温度 $T_0$ (°C)	20

## 要求

- 查阅或计算各点参数值
- 各子系统焓损失及焓损失系数
- 系统焓效率
- 分析改善环节





根据已知条件查阅和计算出各点的温度、压力、焓值和熵值

## 1-2 等熵压缩

$$P_1 = P_{\min} = 7.4 \text{ MPa}, T_1 = T_{\min} = 32 + 273.15 \text{ K} = 305.15 \text{ K}$$

在REFPROP中根据 $P_1$ 、 $T_1$ 查出

$$h_1 = 378.6 \text{ kJ/kg}, s_1 = 1.5857 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

## 2-3 等压吸热

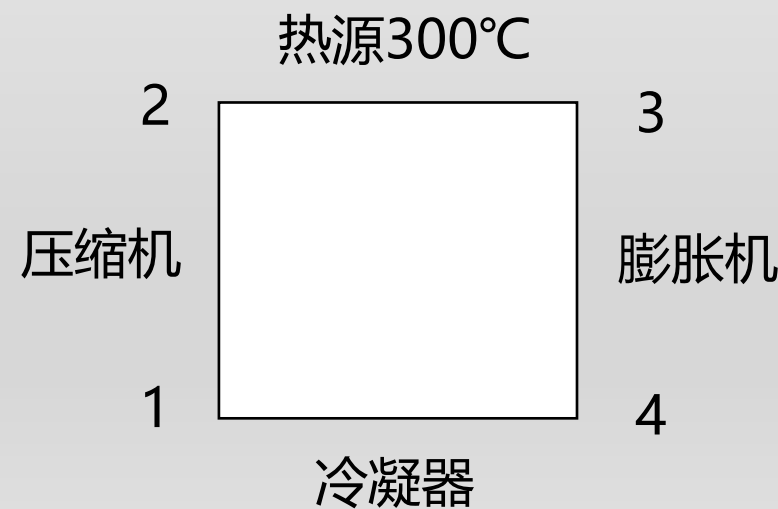
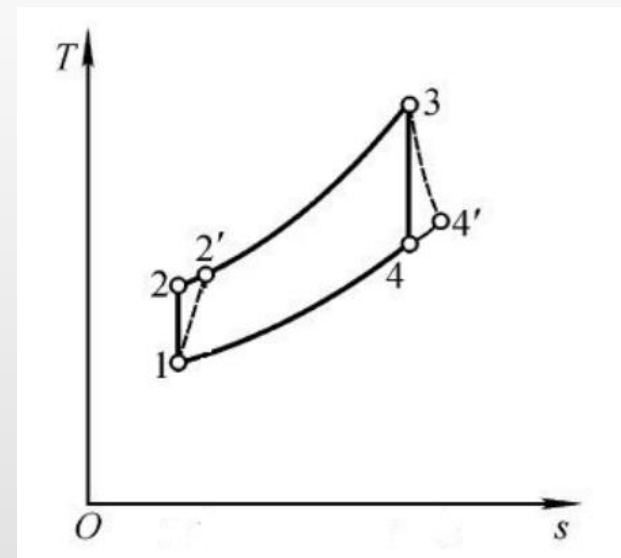
$$P_2 = P_{\max} = 15 \text{ MPa}, s_2 = s_1 = 1.5857 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

由 $P_2$ 、 $s_2$  查出 $T_2 = 348.24 \text{ K}$ ,  $h_2 = 397.91 \text{ kJ/kg}$

## 3-4 等熵膨胀

$$P_3 = P_2 = 15 \text{ MPa}, T_3 = T_{\text{热源}} - 10 = 563.15 \text{ K}$$

由 $T_3$ 、 $P_3$  查出 $h_3 = 725.47 \text{ kJ/kg}$ ,  $s_3 = 2.3443 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$





## 4-1 等压放热

$$P_4 = P_1 = 7.4 \text{ MPa}, s_4 = s_3 = 2.3443 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

由 $P_4$ 、 $s_4$ 查出 $T_4 = 488.31 \text{ K}$ ， $h_4 = 658.88 \text{ kJ}/\text{kg}$

考虑到实际过程并不是可逆过程，压缩机等熵效率 $\eta_1 = 0.85$ ，和膨胀机等熵效率 $\eta_2 = 0.9$

$$P_{2'} = P_{\text{max}} = 15 \text{ MPa}$$

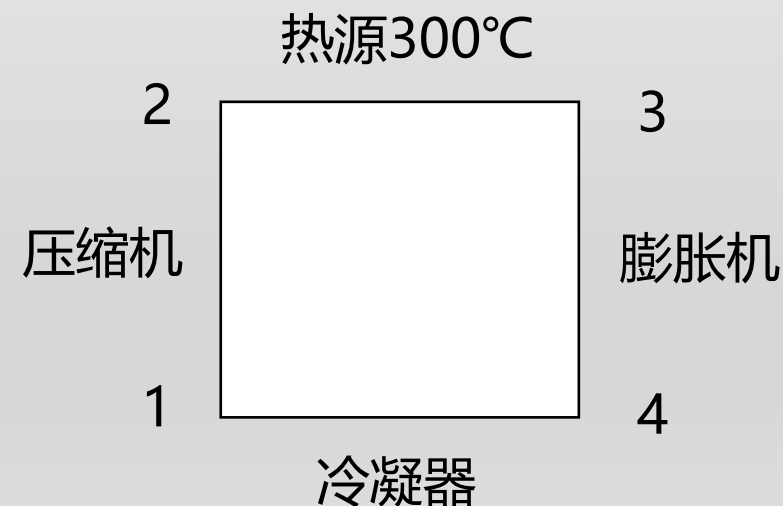
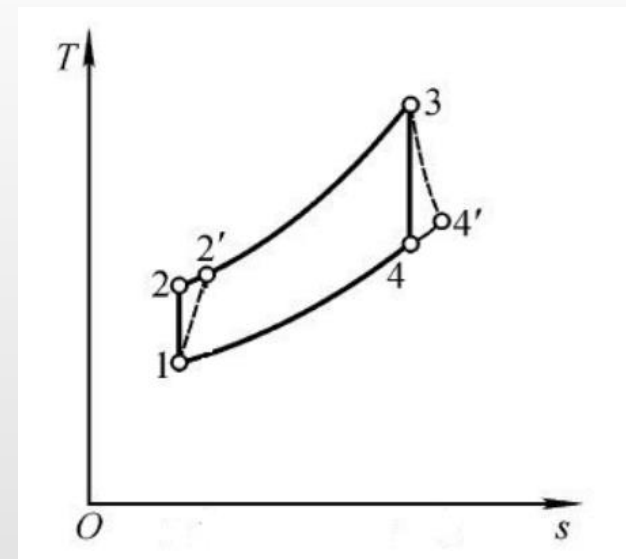
$$h_2 - h_1 = (h_2 - h_1) / \eta_1, \text{ 得 } h_2 = 401.32 \text{ kJ}/\text{kg}$$

由 $P_{2'}$ 、 $h_2$ 查出 $T_{2'} = 349.33 \text{ K}$ ， $s_{2'} = 1.5955 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

$$P_{4'} = P_{\text{min}} = 7.4 \text{ MPa}$$

$$h_3 - h_{4'} = (h_3 - h_4) \cdot \eta_2, \text{ 得 } h_{4'} = 665.54 \text{ kJ}/\text{kg}$$

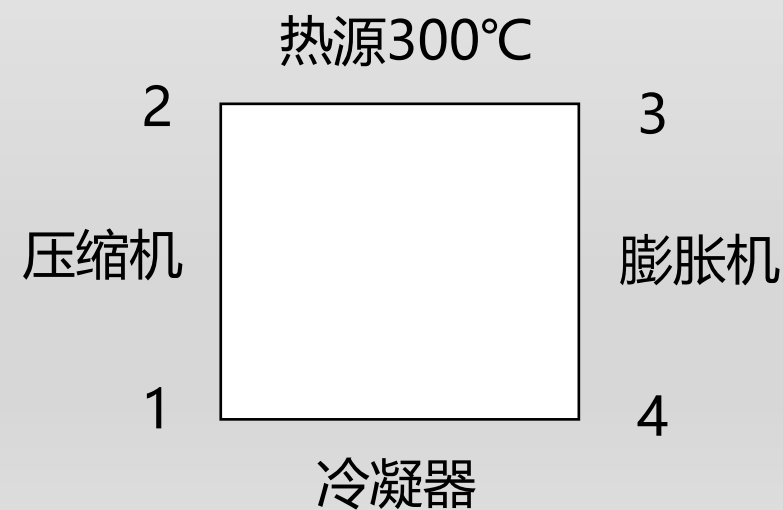
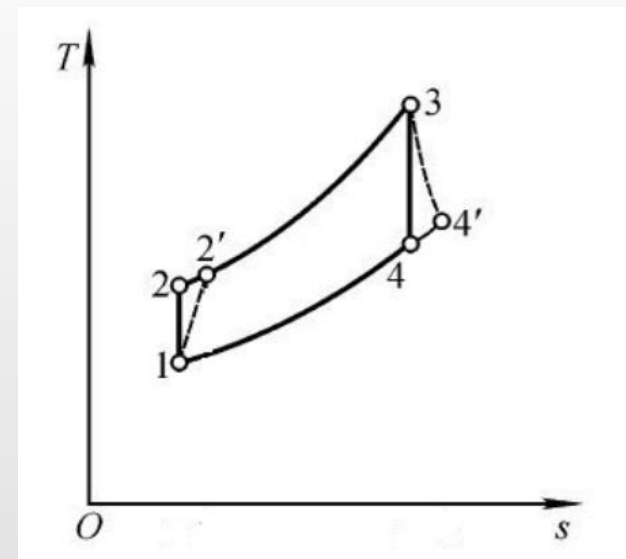
由 $P_{4'}$ 、 $h_{4'}$ 查出 $T_{4'} = 494.25 \text{ K}$ ， $s_{4'} = 2.3578 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$





各点参数汇总如下表:

状态点	温度 (K)	压力 (Mpa)	焓值 (kJ/kg)	熵值 (kJ/(kg·K))
1	305.15	7.4	378.60	1.5857
2	348.24	15	397.91	1.5857
2'	349.33	15	401.32	1.5955
3	563.15	15	725.47	2.3443
4	488.31	7.4	658.88	2.3443
4'	494.25	7.4	665.54	2.3578



## ① 压缩机

压缩机耗功  $w_c = q_m \cdot (h_2' - h_1) = 2272.3 \text{ kW}$

焓损  $I_1 = q_m \cdot T_0 \cdot (s_2' - s_1) = 286.5 \text{ kW}$

收益焓  $E_{x, gain1} = E_2' - E_1 = q_m \cdot [(h_2' - h_1) - T_0(s_2' - s_1)] = 1985.8 \text{ kW}$

焓效率  $\eta_{ex,1} = E_{x, gain1} / w_c = 0.8739$

焓损系数  $e_1 = I_1 / E_{com} = 286.5 / 18108 = 0.0158$

## ② 换热器 (热源300°C)

$Q_1 = q_m \cdot (h_3 - h_2') = 32415 \text{ kW}$

耗费焓  $E_{x, Q_1, T_H} = (1 - T_0 / T_H) \cdot Q_1 = 15836 \text{ kW}$

收益焓  $E_{x, gain2} = E_3 - E_2' = q_m \cdot [(h_3 - h_2') - T_0(s_3 - s_2')] = 10464 \text{ kW}$

焓损  $I_2 = E_{x, Q_1, T_H} - E_{x, 2} = 11093 - 7565.8 \text{ kW} = 5371.3 \text{ kW}$

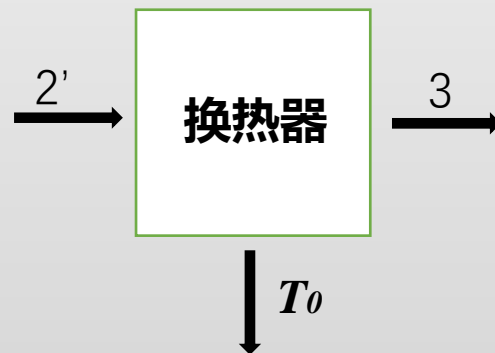
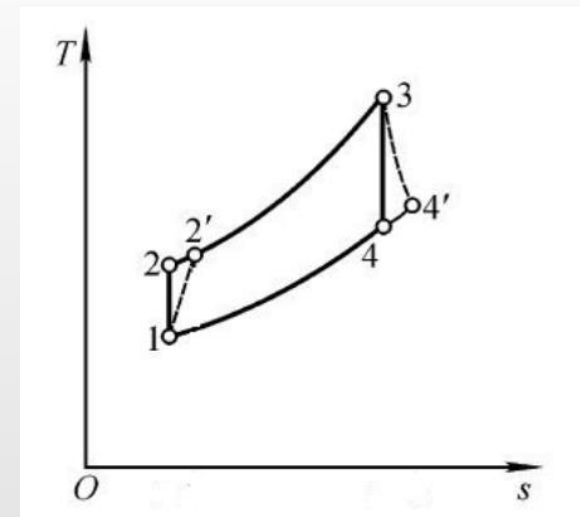
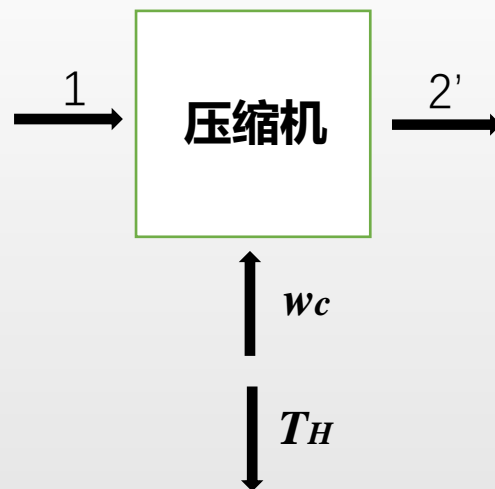
或:  $T_{2',-3,ave} = (T_2' + T_3) / 2 = 456.24 \text{ K}$

收益焓  $E_{x, gain2} = (1 - T_0 / T_{2',-3,ave}) \cdot Q_1 = 11587.24 \text{ kW}$

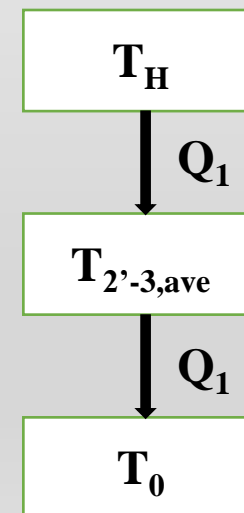
焓损  $I_2 = q_m \cdot T_0 \cdot \Delta s_{g1} = T_0 \cdot Q_1 \cdot (1 / T_{2',-3,ave} - 1 / T_H) = 4248.4 \text{ kW}$

焓效率  $\eta_{ex,2} = E_{x, gain2} / E_{x, Q_1, T_H} = 10464 / 15836 \text{ kW} = 0.6608$

焓损系数  $e_2 = I_2 / E_{com} = 5371.3 / 18108 = 0.2966$



比热容不随温度变化时，可用平均温差计算，但在S-CO2循环中比热容变化比较大，两个工质的流量差别比较大



### ③ 膨胀机

膨胀机做功  $w_e = q_m \cdot (h_3 - h_{4'}) = 5992.8 \text{ kW}$

焓损  $I_3 = q_m \cdot T_0 \cdot (s_4 - s_3) = 397.3 \text{ kW}$

耗费焓  $E_{x, \text{pay}3} = E_3 - E_{4'} = q_m \cdot [(h_3 - h_{4'}) - T_0(s_3 - s_{4'})] = 6390.1 \text{ kW}$

焓效率  $\eta_{\text{ex},3} = w_e / E_{x, \text{pay}3} = 5992.8 / 6390.1 = 0.9378$

焓损系数  $e_3 = I_3 / E_{\text{com}} = 397.3 / 18108 = 0.0219$

### ④ 冷却器

冷源平均温度  $T_{\text{冷, ave}} = (273.15 + 22 + 273.15 + 32) / 2 \text{ K} = 300.15 \text{ K}$

$Q_2 = q_m \cdot (h_4 - h_1) = 28694 \text{ kW}$

耗费焓  $E_{x, \text{pay}4} = E_{4'} - E_1 = q_m \cdot [(h_{4'} - h_1) - T_0(s_{4'} - s_1)] = 6059.9 \text{ kW}$

收益焓  $E_{x, \text{gain}4} = (1 - T_0 / T_{\text{冷, ave}}) \cdot Q_2 = 669.2 \text{ kW}$

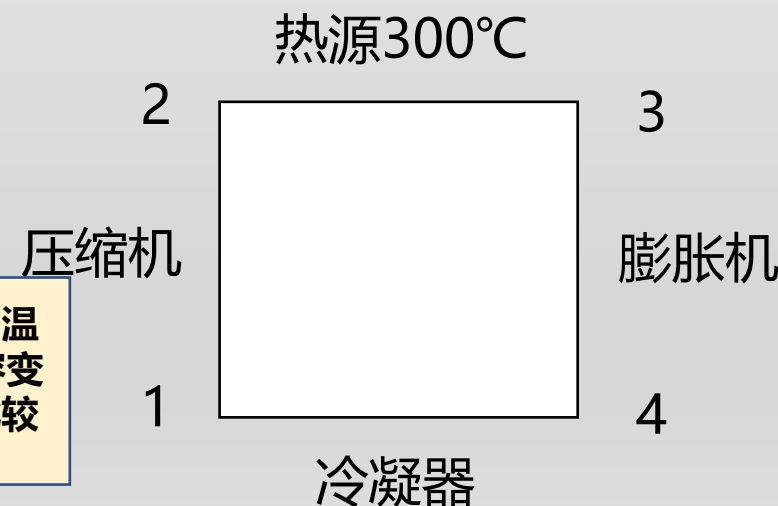
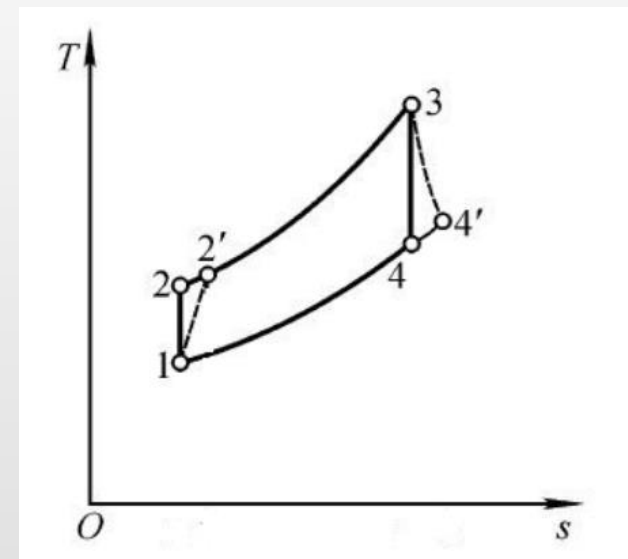
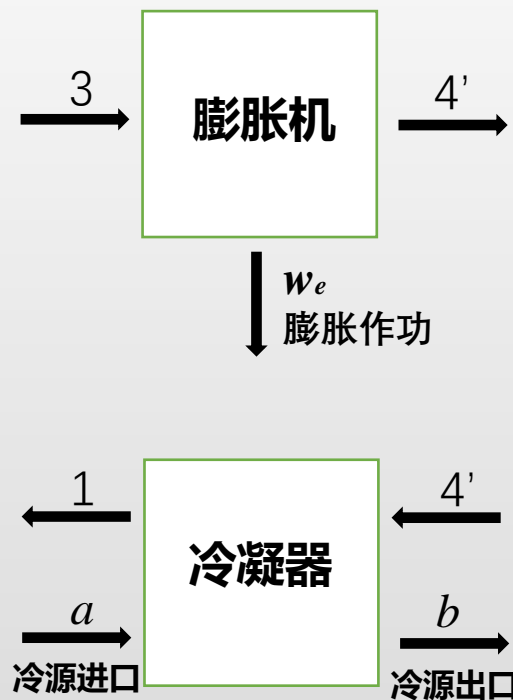
焓损  $I_4 = E_{x, \text{pay}4} - E_{x, \text{gain}4} = 5390.7 \text{ kW}$

或: 耗费焓  $E_{x, Q_2, T_{4'-1, \text{ave}}} = (1 - T_0 / T_{4'-1, \text{ave}}) \cdot Q_2 = 7649.1 \text{ kW}$

焓损  $I_4 = q_m \cdot T_0 \cdot \Delta s_{g2} = T_0 \cdot Q_2 \cdot (1/T_{\text{冷, ave}} - 1/T_{4'-1, \text{ave}}) = 6979.9 \text{ kW}$

收益焓  $E_{x, \text{gain}4} = E_{x, Q_2, T_{4'-1, \text{ave}}} - I_4 = 669.2 \text{ kW}$

焓效率  $\eta_{\text{ex},4} = E_{x, \text{gain}4} / E_{x, \text{pay}4} = 669.2 / 6059.9 = 0.1104$  焓损系数  $e_4 = I_4 / E_{\text{com}} = 5390.7 / 18108 = 0.2977$



比热容不随温度变化时, 可用平均温差计算, 但在S-CO<sub>2</sub>循环中比热容变化比较大, 两个工质的流量差别比较大



	压缩机	膨胀机
耗功/做功(kW)	2272.3	5992.8
收益焓/支付焓 (kW)	1985.8	6390.1
焓损 (kW)	286.5	397.3
焓效率	0.8739	0.9378
焓损系数	0.0158	0.0219

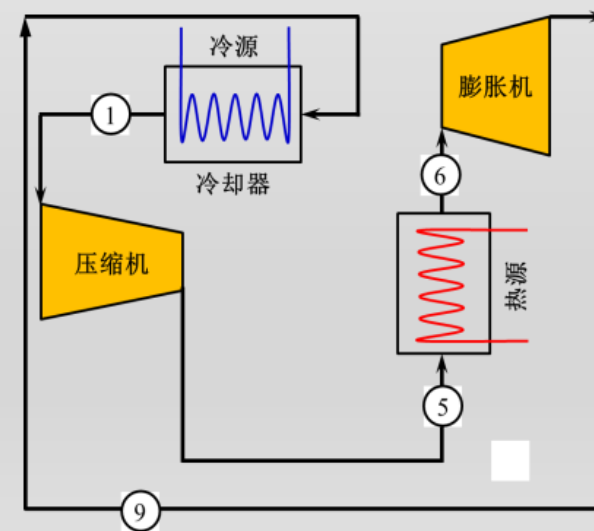
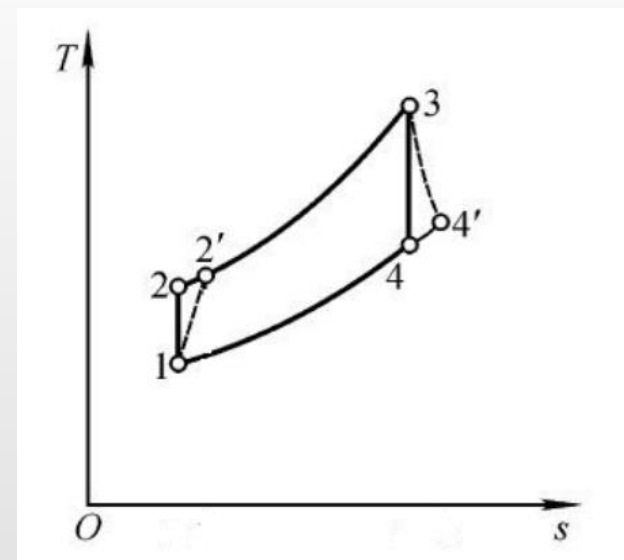
	换热器	冷却器
换热量(kW)	32415	28694
收益焓 (kW)	10464	669.2
支付焓 (kW)	15836	6059.9
焓损 (kW)	5371.3	5390.7
焓效率	0.6608	0.1104
焓损系数	0.2966	0.2977

总供给焓  $E_{com} = W_1 + E_{x,Q_1,T_H} = 18108 \text{ kW}$

总焓损  $I_{all} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 11446 \text{ kW}$

总焓损系数  $e_{loss} = e_1 + e_2 + e_3 + e_4 = I_{all}/E_{com} = 0.6321$

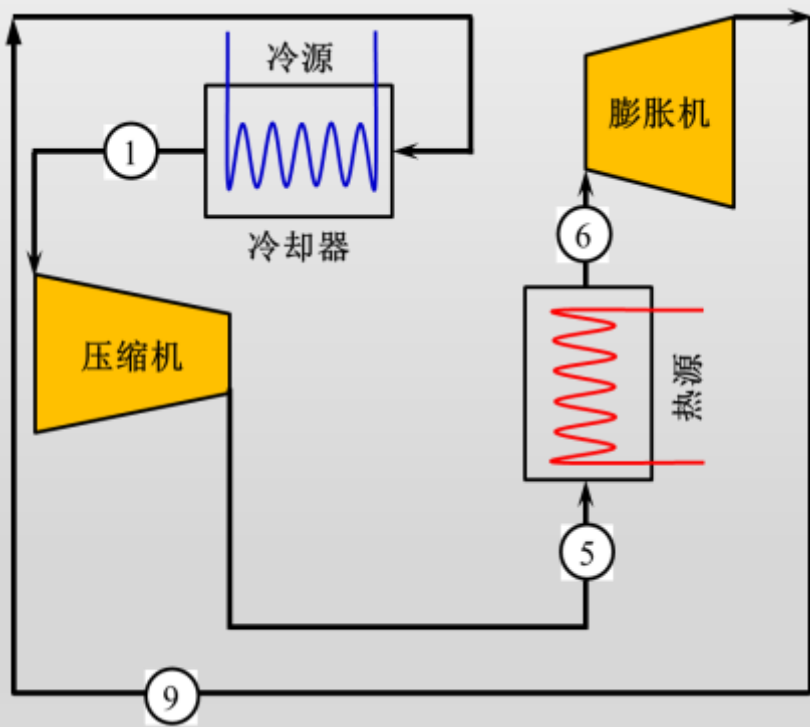
总焓效率  $\eta_{ex,all} = (E_{com} - I_{all}) / E_{com} = 1 - e_{loss} = 0.3679$







在循环过程中，**冷凝器**的焓损失最大，其次是**换热器**，因此可在换热环节和冷凝环节进行改善



➤ **冷凝换热环节改善:**

- ① 增加**回热器**，对冷凝器换热之后产生的热量进行再次利用；
- ② 利用**热电联产**（蒸汽-燃气联合循环），对膨胀机出口工质的余热进行再利用；
- ③ **减小冷源流量**，这样可使在换热量相同的情况下冷源换热温差增大，出口处冷源获得的单位热量更多。

➤ **热源换热环节改善:**

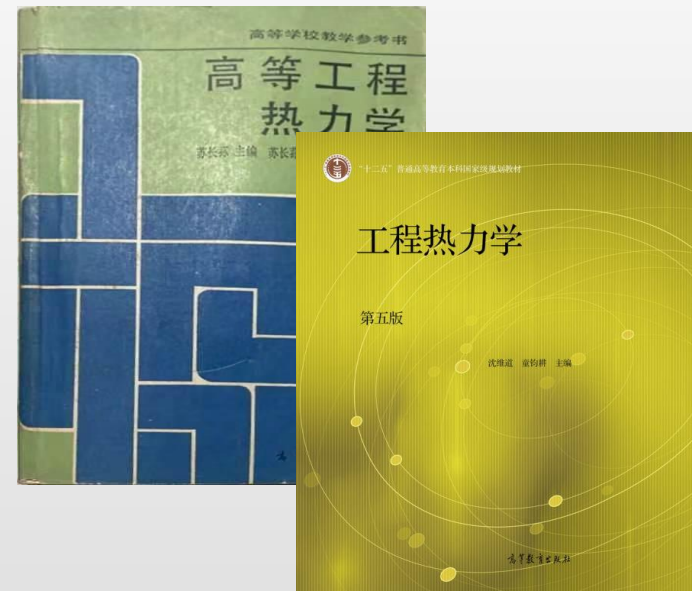
环境温度一定的情况下，**降低热源温度以减小换热温差。**





参考资料：工程热力学 沈维道等  
高等工程热力学 苏长荪

使用工具：REFPROP、MATLAB



小组分工（全体讨论）：

- 1、查阅参数，计算数据：杨锴、黄彦杰、麦志钊
- 2、PPT制作：杨汶圣、伍治国、陈展珠
- 3、讲解：颜奕波





廣東工業大學

GUANG DONG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

# 谢谢大家!

小组成员：杨汶圣、伍治国、陈展珠、黄彦杰、麦志钊、颜奕波、杨锴

展示日期：2022年11月21日

