

2-1 能量系统的焓分析模型

(1) 基本模型

(2) 灰箱模型

(3) 关联系统模型

焓分析基本模型介绍

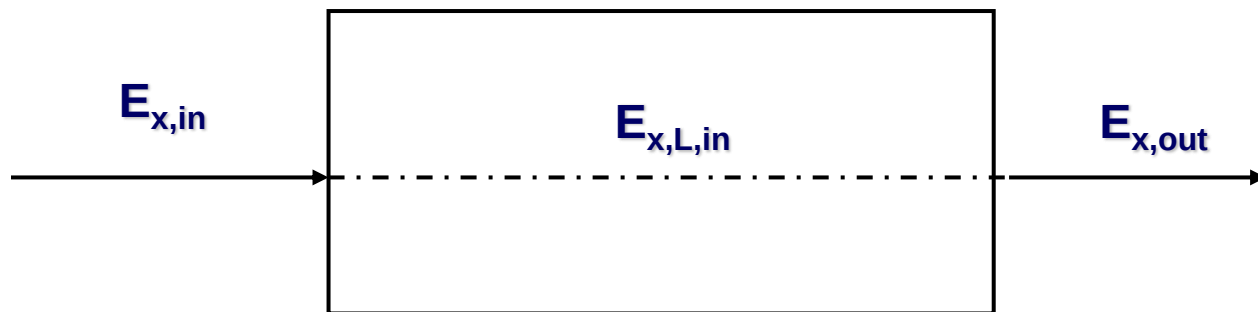
□ 子系统焓分析的目的：

- 合理评价用能水平
- 判别薄弱环节
- 提出改进意见
- 优化

□ 子系统焓分析模型：黑箱模型、白箱模型

黑箱模型

- 是借助于输入输出子系统的能流信息来研究子系统内部用能过程宏观特性的一种方法。只能作粗略分析。

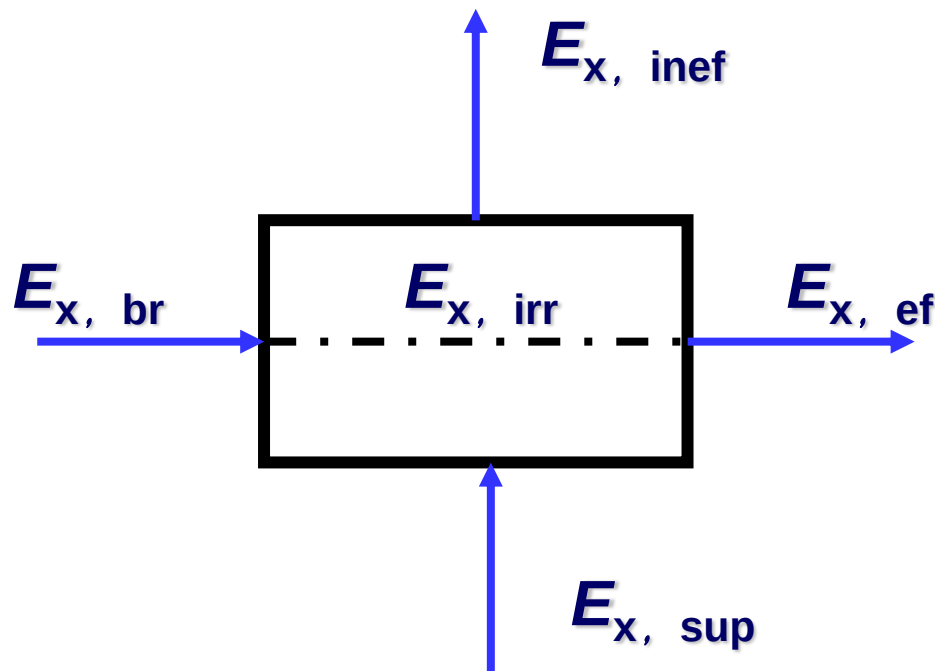


- 对子系统总焓损=输入焓流之和-输出焓流之和

黑箱模型

□ 黑箱模型相关术语：

- 供给炯；
- 带入炯；
- 有效炯；
- 无效炯；
- 耗散炯。



□ 通用炯平衡方程：

供给炯+带入炯=有效炯+无效炯+耗散炯

黑箱模型

□ 当带入焓很小可以忽略时：

焓效率=有效焓/供给焓

焓损失系数=（无效焓+耗散焓）/供给焓

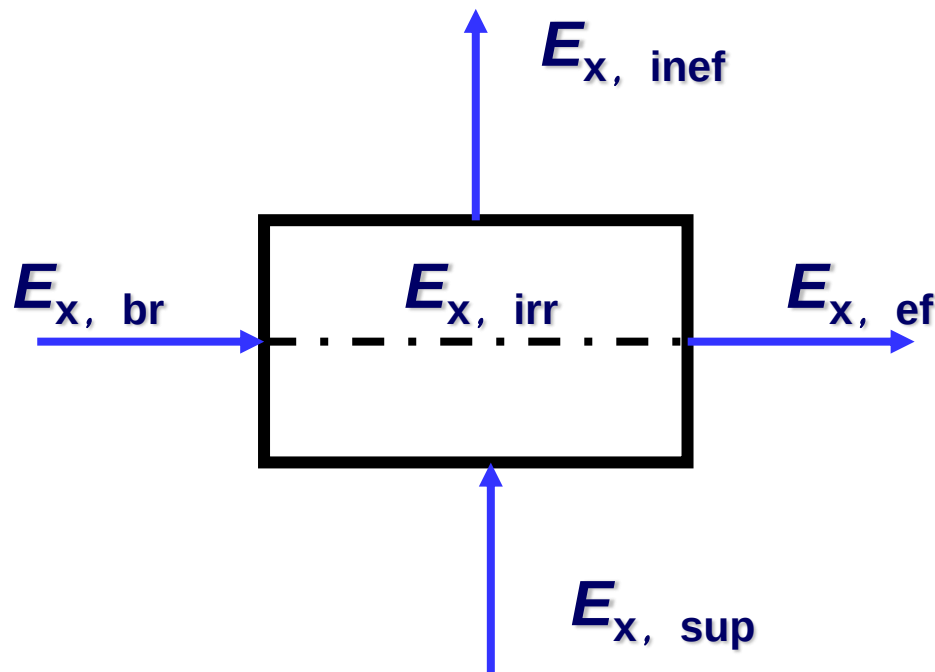
白箱模型

- 为了克服黑箱模型的缺陷而提出，把分析对象看作是由“透明”的边界所包围的系统，从而可以对系统的各个用能过程逐个进行分析解剖，计算各过程的耗散熵。
- 不仅可以计算出子系统的熵效率和热力学完善程度，还能计算出体系内各过程的熵损系数，揭示“薄弱环节”，是一种精细的分析。

白箱模型

□ 白箱模型烟流组成：

- 供给烟；
- 带入烟；
- 有效烟；
- 外部烟损；
- 内部烟耗。



□ 白箱模型烟平衡方程：

供给烟+带入烟=有效烟+无效烟+耗散烟

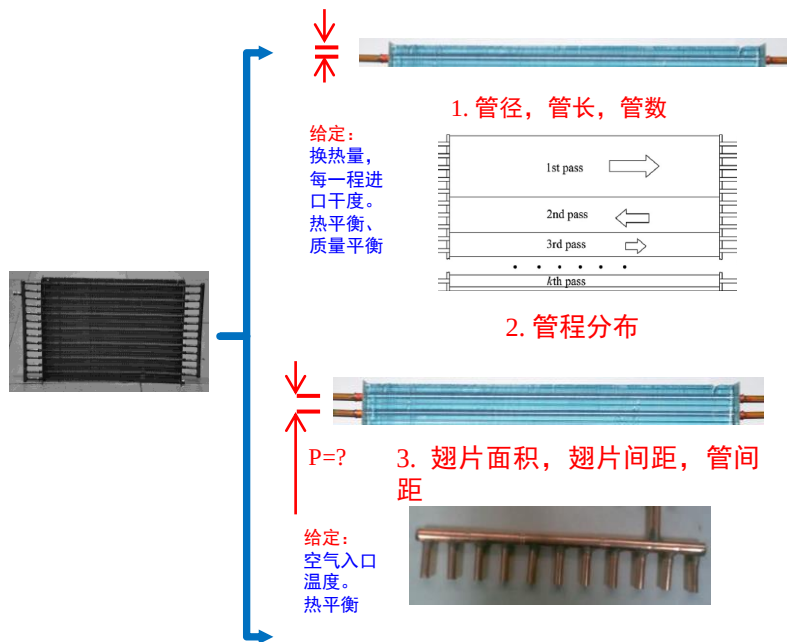
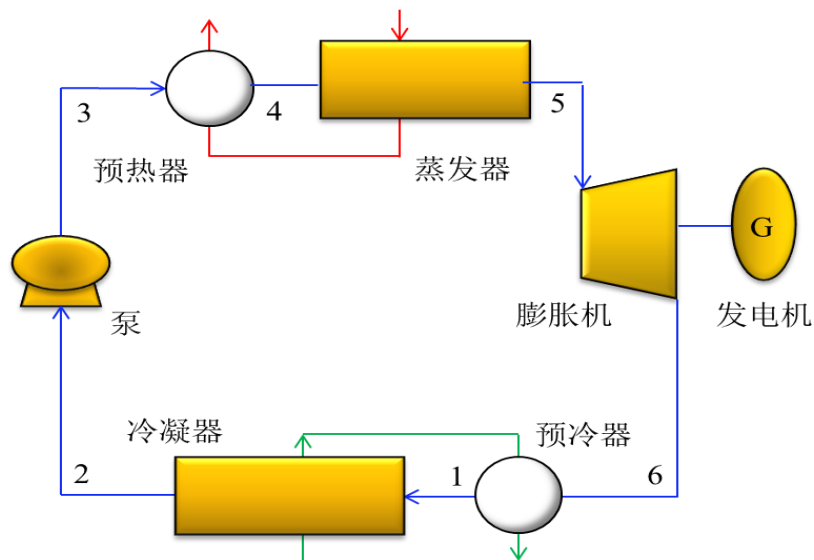
白箱模型

$$\text{子系统焓效率} = 1 - \frac{\text{内部焓耗之和} + \text{外部焓损之和}}{\text{供给焓之和}}$$

$$\text{子系统内某个不可逆焓损失系数} = \frac{\text{该过程内部焓耗}}{\text{供给焓之和}}$$

$$\text{子系统外某个不可逆焓损失系数} = \frac{\text{该过程外部焓耗}}{\text{供给焓之和}}$$

黑白箱模型



- 热力学分析-黑箱
- 经济性分析-黑箱

$$Q = \Delta H + W_t$$

$$\eta = W_{\text{net}} / Q_{\text{in}}$$

$$Q_{HE} = UA \Delta T_m$$

$$C = f(A, W_{\text{max}})$$

- 热力学分析-黑箱+白箱
- 经济性分析-黑箱+白箱

$$Nu_{r,l} = 0.44 \cdot \left(\frac{6\beta}{\pi} \right)^{0.38} \cdot Re_{r,l}^{0.5} \cdot Pr_{r,l}^{0.33} \cdot \left(\frac{\eta}{\eta_w} \right)^{0.14}$$

$$\Delta p_{\text{tot}} = \Delta p_{f, \text{tp}} + \Delta p_p + \Delta p_g + \Delta p_m$$

$$EPC = C_{\text{annual}} / (W_{\text{net}} H_{\text{year}})$$

$$C_{\text{annual}} = CRF \cdot \text{Cost}_{2015} + C_{\text{op}}$$

$$CRF = ii(1 + ii)^y / [(1 + ii)^y - 1]$$

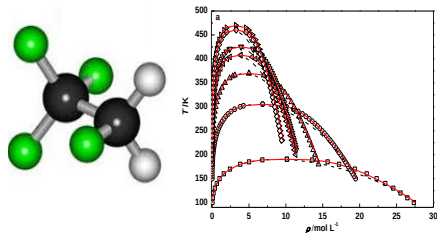
$$C_{BM,j} = C_{P,j} F_{BM,j}$$

$$\log_{10} C_{P,j} = K_{1,j} + K_{2,j} \log_{10} A_j + K_{3,j} (\log_{10} A_j)^2$$

□ 单元子系统焔分析很有必要，但是却不完善：

- 孤立分析，切断联系
- 虽找到措施，但未必可行
- 子系统效率提高，总系统效率未必提高

总能系统分层次示例

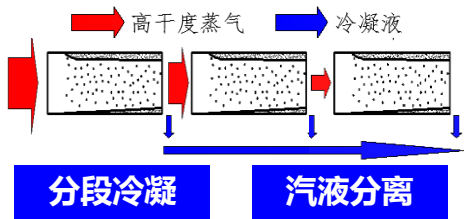


物性

工质



工质是循环的血液

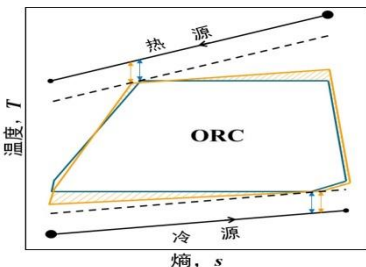


过程

设备



换热设备
焓损失占
70-90%
；成本占
40-90%

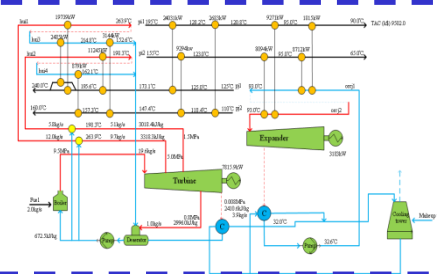


循环

装备



最具推广
潜力的中
低温热能
发电技术
之一



耦合

系统



综合能源
系统

□ 总能系统分析的目的和作用

- 整体用能评价
- 找出用能薄弱的设备
- 分析系统耗能结构， 烟损分布， 烟流去向

□ 总能系统炯分析的内容

- 建立系统炯分析模型
- 建立炯平衡方程
- 计算技术指标
- 解释各项指标，提出分析结论
- 提出改造方案
- 炯经济分析

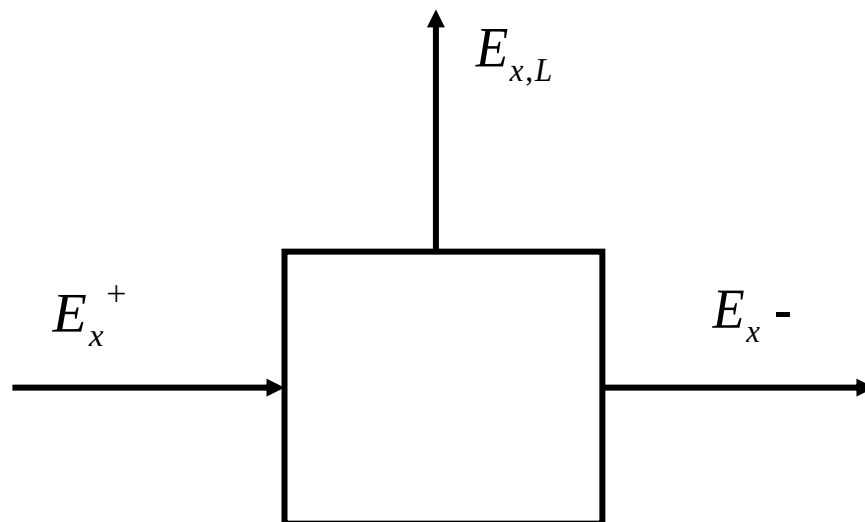
灰箱模型

- 总能量系统：将所有设备看作是黑箱模型，模型之间通过焓流线连接起来组成黑箱网络模型。
- 灰箱模型分类：黑箱串联网络模型、黑箱并联网络模型。

灰箱模型

□ 由三个量组成的网络模型：

- 供给焓
- 有效焓
- 总焓损



灰箱模型

- 黑箱串联网络模型
- 黑箱并联网络模型
- 灰箱复杂模型

能量关联系统模型简介

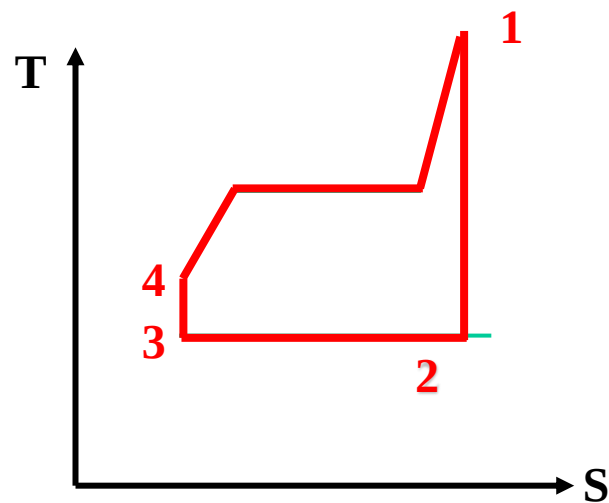
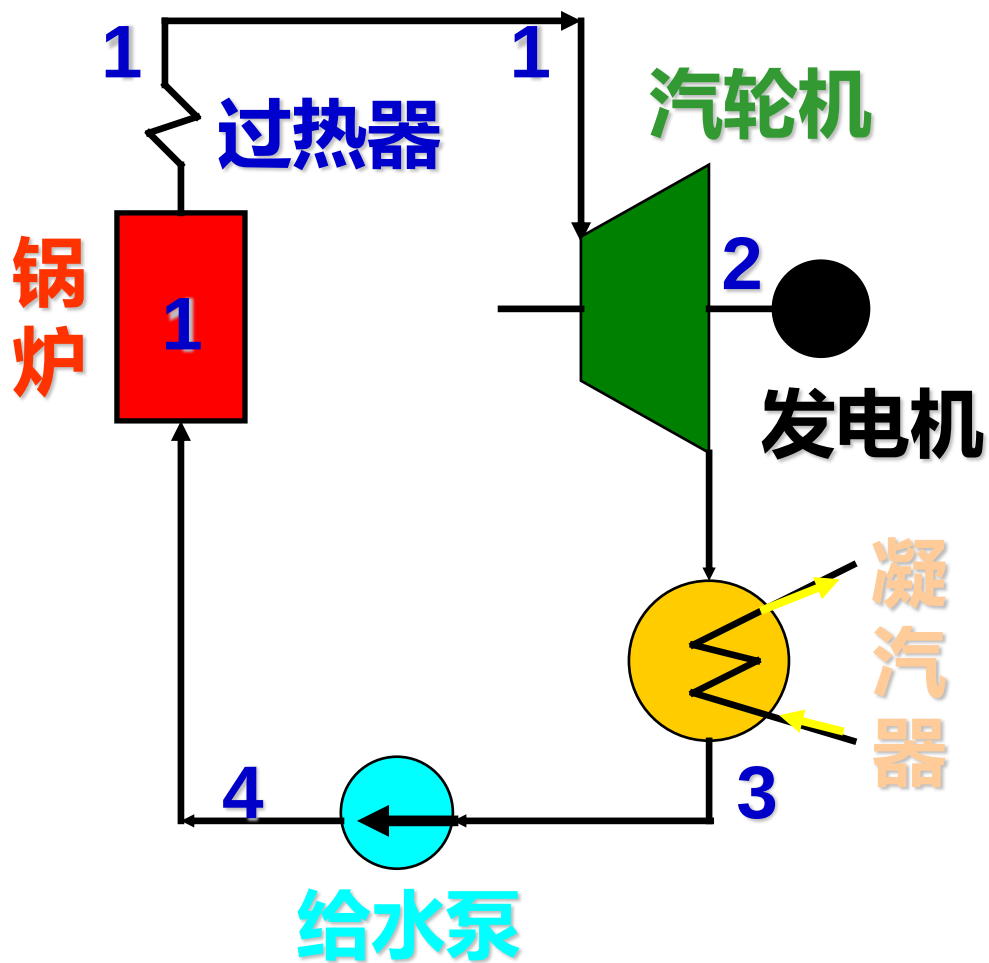


□通用能量关联模型

2-2 能量系统的焓分析实际应用

- **目的：**系统整体用能状况进行全面分析评价，找出薄弱环节，为全面优化提供准备资料。
- **流程：**设备焓分析----->整个系统焓分析：黑+白+灰箱模型。

实例1：蒸汽动力装置的焓分析



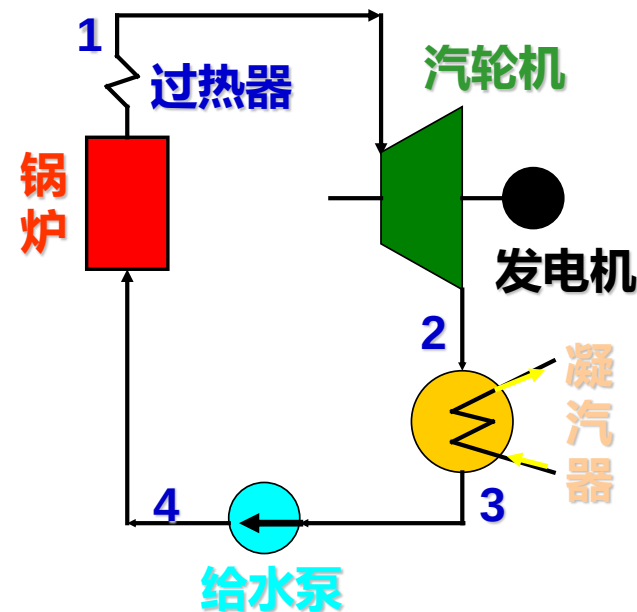
实例1：蒸汽动力装置的焓分析

□ 锅炉设备的焓损失：

$$E_{x, L, B} = E_{x, f} - (E_{x, 1} - E_{x, 4})$$

□ 汽轮机设备的焓损失：

$$E_{x, L, T} = (E_{x, 1} - E_{x, 2}) - W_{sh}$$



实例1：蒸汽动力装置的焓分析

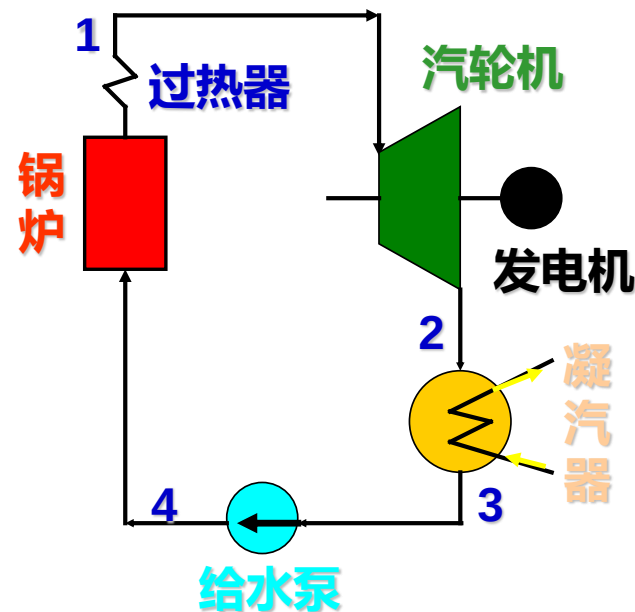
□ 冷凝器的焓损失：

- 如循环冷却水未被利用：

$$E_{x, L, CON} = E_{x, 2} - E_{x, 3}$$

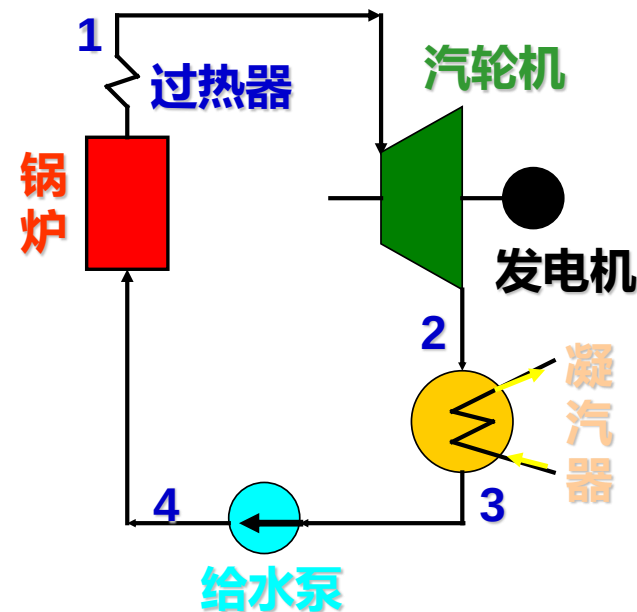
- 如循环冷却水被利用：

$$E_{x, L, CON} = (E_{x, 2} - E_{x, 3}) - (E_{x, w2} - E_{x, w1})$$



实例1：蒸汽动力装置的焓分析

□ 给水泵的焓损失：



$$E_{x, L, P} = E_{x, e} - (E_{x, 4} - E_{x, 3})$$

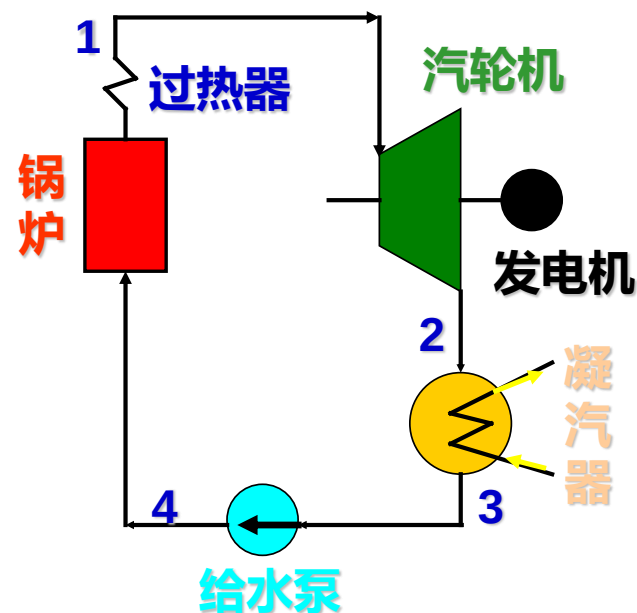
实例1：蒸汽动力装置的焓分析

□ 整个系统焓平衡方程：

$$E_{x,f} + E_{x,e} = W_{sh} + E_{x,L,B} + E_{x,L,T} + E_{x,L,CON} + E_{x,L,P}$$

□ 整个系统焓效率：

$$\eta_{ex} = \frac{W_{sh}}{E_{x,f} + E_{x,e}} = 1 - \frac{E_{x,L,B} + E_{x,L,T} + E_{x,L,CON} + E_{x,L,P}}{E_{x,f} + E_{x,e}}$$



实例1：蒸汽动力装置的焓分析

□ 如以工质考虑：

$$E_{x,Q} = \int_4^1 \delta Q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) = H_1 - H_4 - T_0(S_1 - S_4)$$

□ 循环总供给焓：

$$E_{x,\text{sup}} = W_p + E_{x,Q} = V_3(p_4 - p_3) + H_1 - H_4 - T_0(S_1 - S_4)$$

□ 净收益焓：

$$W_{sh} = H_1 - H_2$$

实例1：蒸汽动力装置的焓分析

□ 朗肯循环焓效率：

$$\eta_{sh} = H_1 - H_2$$

□ 循环总供给焓：

$$E_{x,\text{sup}} = W_p + E_{x,Q} = V_3(p_4 - p_3) + H_1 - H_4 - T_0(S_1 - S_4)$$

□ 净收益焓：

$$W_{sh} = H_1 - H_2$$

实例1：蒸汽动力装置的焓分析

□ 各单元焓损率：

$$e_{x,L,i} = \frac{E_{x,L,i}}{\sum E_{x,L,i}}$$

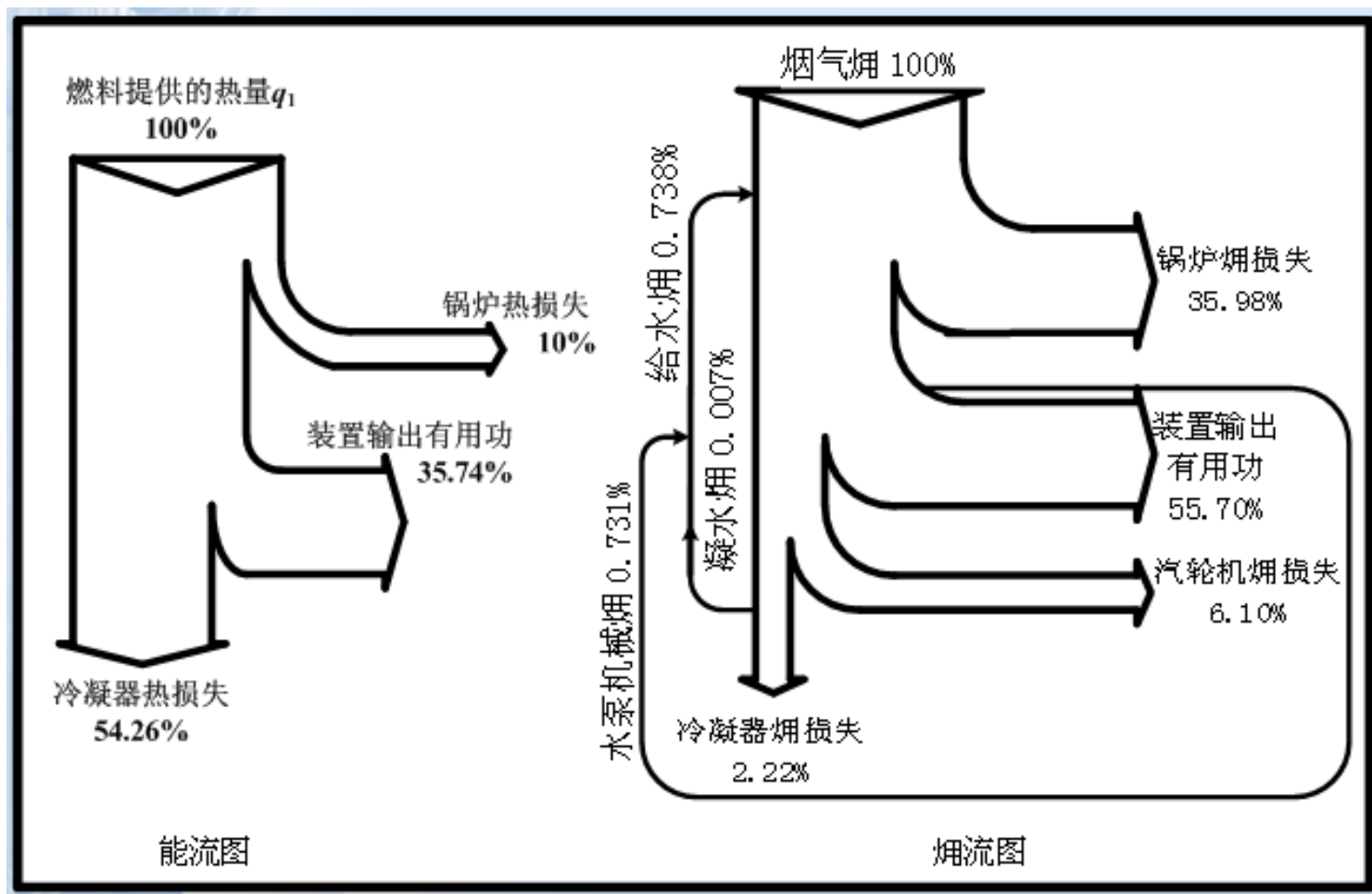
□ 各单元焓损系数：

$$\zeta = \frac{E_{x,L,i}}{E_{x,f} + E_{x,e}}$$

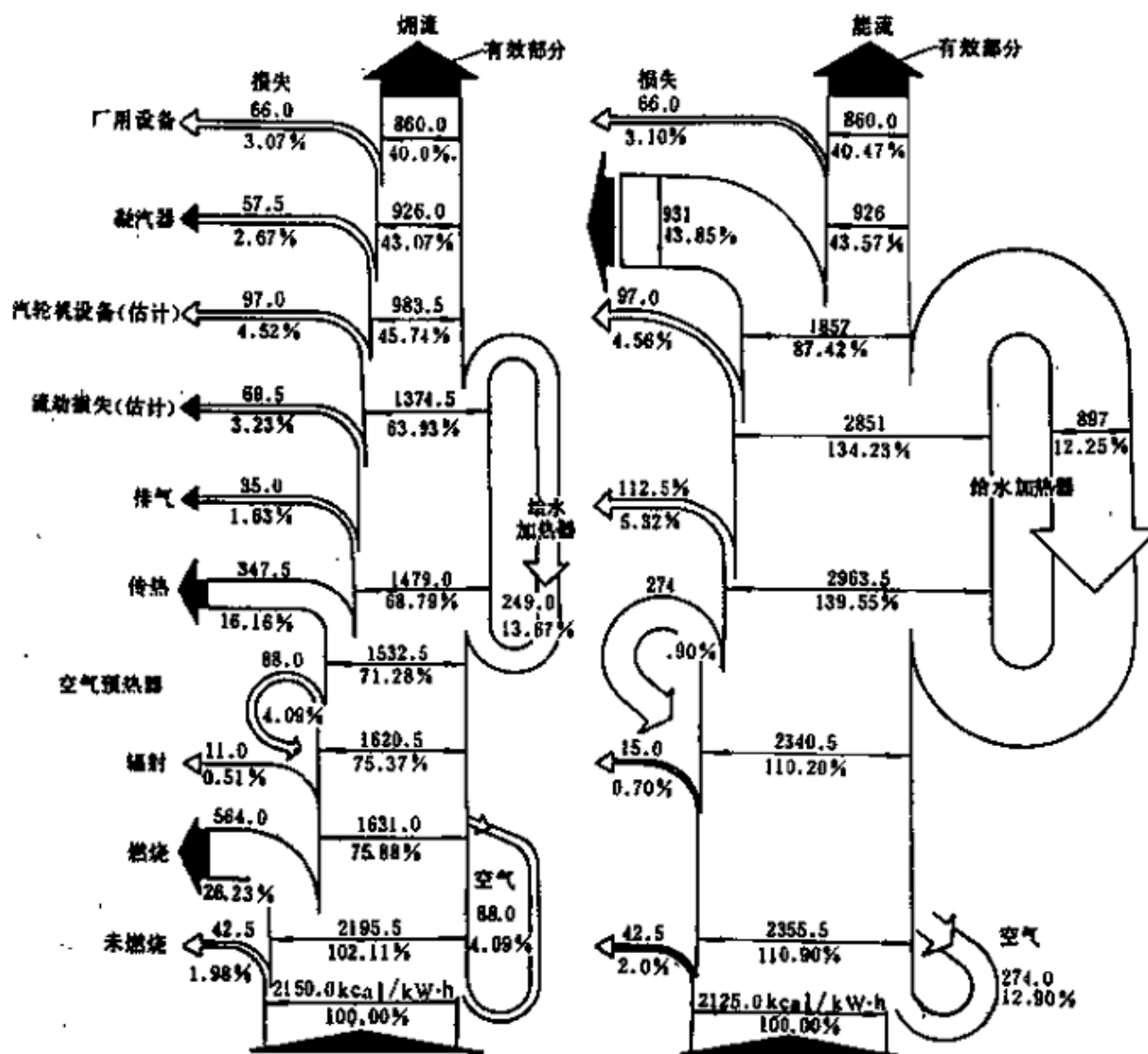
□ 焓效率：

$$\eta_{ex} = 1 - \zeta_B - \zeta_T - \zeta_{CON} - \zeta_P$$

实例1：蒸汽动力装置的焓分析



实例1：蒸汽动力装置的焓分析



实例2：负压热水锅炉的烟分析

□ 负压热水锅炉特点：

负压防爆炸；

排烟温度降低；

换热系数大，节约面积。

□ 热效率：

$$\eta_f = \frac{m(h_2 - h_1)}{m_f \cdot Q_{de}^v} \times 100\%$$

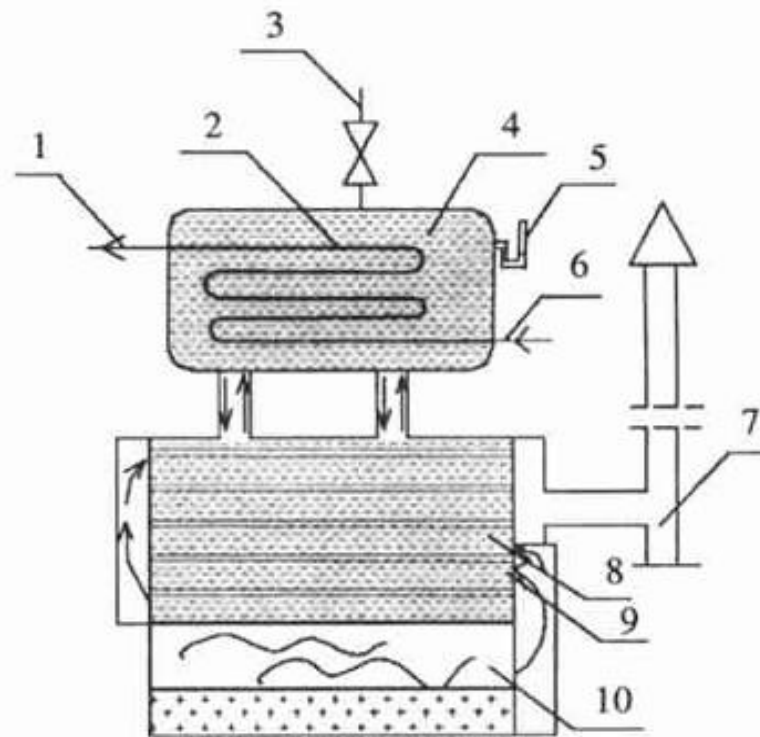


图1 负压热水锅炉示意图

Fig.1 Sketch of sub - atmospheric hot - water boiler

- 1. 供水管 2. 汽水换热管 3. 排气阀
- 4. 中间介质(蒸汽) 5. 压力指示管 6. 回水管
- 7. 烟囱 8. 中间介质(锅水) 9. 烟管
- 10. 炉胆(燃烧室)

实例2：负压热水锅炉的焓分析

□ 焓效率：

$$\begin{aligned}\eta_{ex} &= EX_w / EX_P \\ &= (EX_P - EX_l) / EX_P \\ &= 1 - EX_l / EX_P\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}EX_l &= m_f \cdot ex_f + m_a \cdot ex_a + m_1 \cdot ex_1 \\ &\quad - (m_2 \cdot ex_2 + m_g \cdot ex_g + m_q \cdot ex_q)\end{aligned}$$

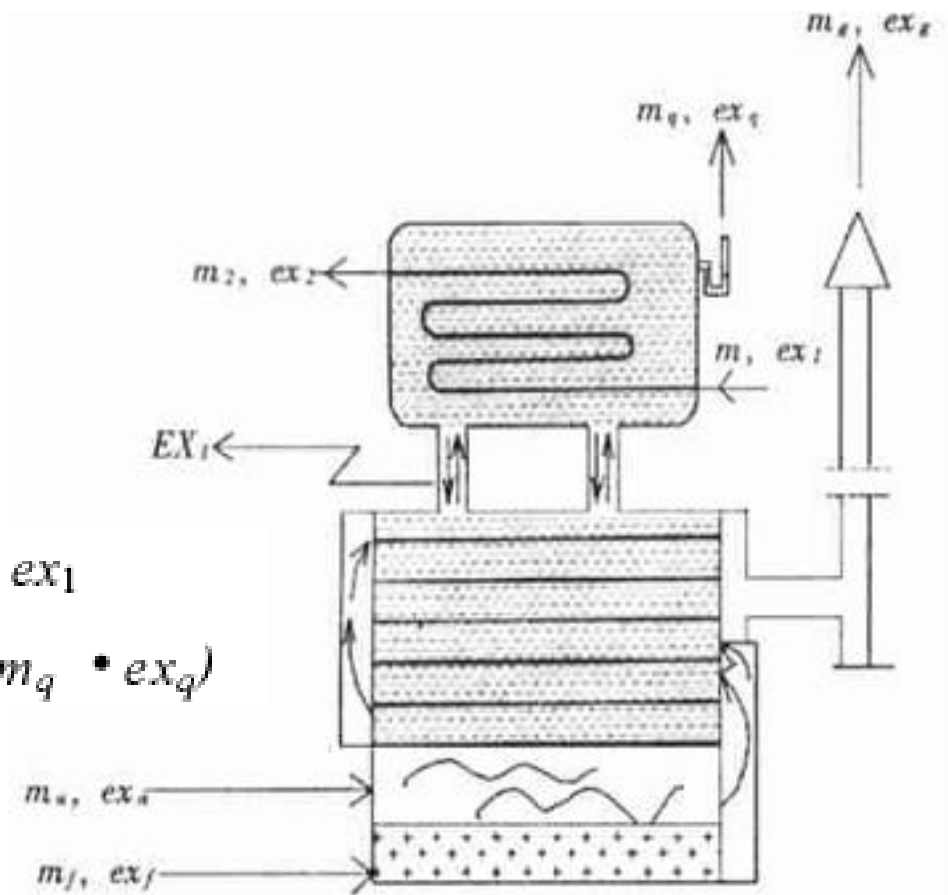


图2 负压热水锅炉焓平衡示意图

实例2：负压热水锅炉的焓分析

$$EX_1 = m_f \cdot ex_f + m_a \cdot ex_a + m_1 \cdot ex_1 \\ - (m_2 \cdot ex_2 + m_g \cdot ex_g + m_q \cdot ex_q)$$

$$m_1 = m_2 = m \quad m_q = 0 \quad ex_a = 0$$

$$m_f \cdot ex_f = m \cdot (ex_2 - ex_1) + m_g \cdot ex_g + EX_1$$

$$\eta_{ex} = m \cdot (ex_2 - ex_1) / (m_f \cdot ex_f)$$

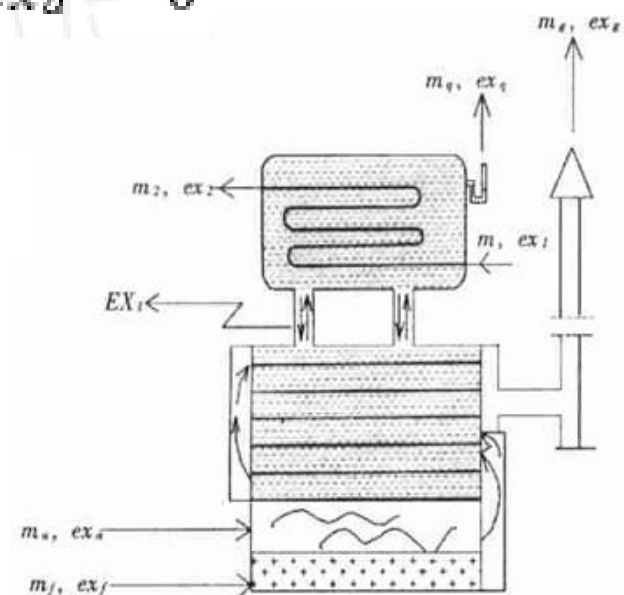


图2 负压热水锅炉焓平衡示意图

实例2：负压热水锅炉的焓分析

$$\eta_{ex} = m \cdot (ex_2 - ex_1) / (m_f \cdot ex_f)$$

$$ex_2 - ex_1 = (h_2 - h_1) - T_0(s_2 - s_1)$$

$$ex_2 - ex_1 = C_P \cdot (T_2 - T_1) - T_0 \cdot C_P \ln(T_2 / T_1)$$

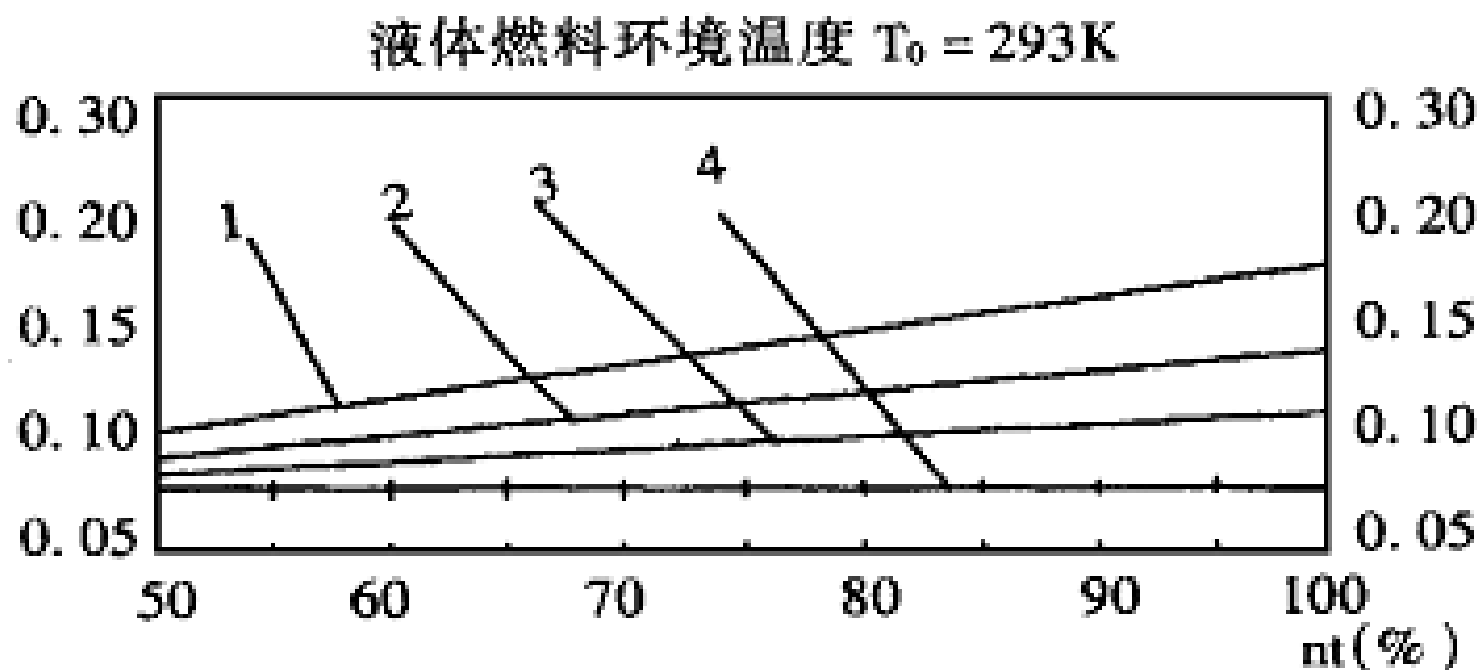
$$= C_P [(T_2 - T_1) - T_0 \cdot \ln(T_2 / T_1)]$$

$$\eta_t = \frac{m(h_2 - h_1)}{m_f \cdot Q_{dw}^y} \times 100 \% \quad \begin{aligned} m_f &= m \cdot (h_2 - h_1) / (\eta_t \cdot Q_{dw}^y) \\ &= m \cdot C_P(T_2 - T_1) / (\eta_t \cdot Q_{dw}^y) \end{aligned}$$

$$\eta_{ex} = \eta_t (Q_{dw}^y / ex_f) [1 - T_0 \ln(T_2 / T_1) / (T_2 - T_1)]$$

实例2：负压热水锅炉的焓分析

□ 焓效率与热效率的关系：



① $T_1 = 328\text{K}$ $T_2 = 358\text{K}$; ② $T_1 = 328\text{K}$ $T_2 = 348\text{K}$;

③ $T_1 = 328\text{K}$ $T_2 = 338\text{K}$; ④ $T_1 = 293\text{K}$ $T_2 = 338\text{K}$;

实例2：负压热水锅炉的焓分析

□ 计算结果：

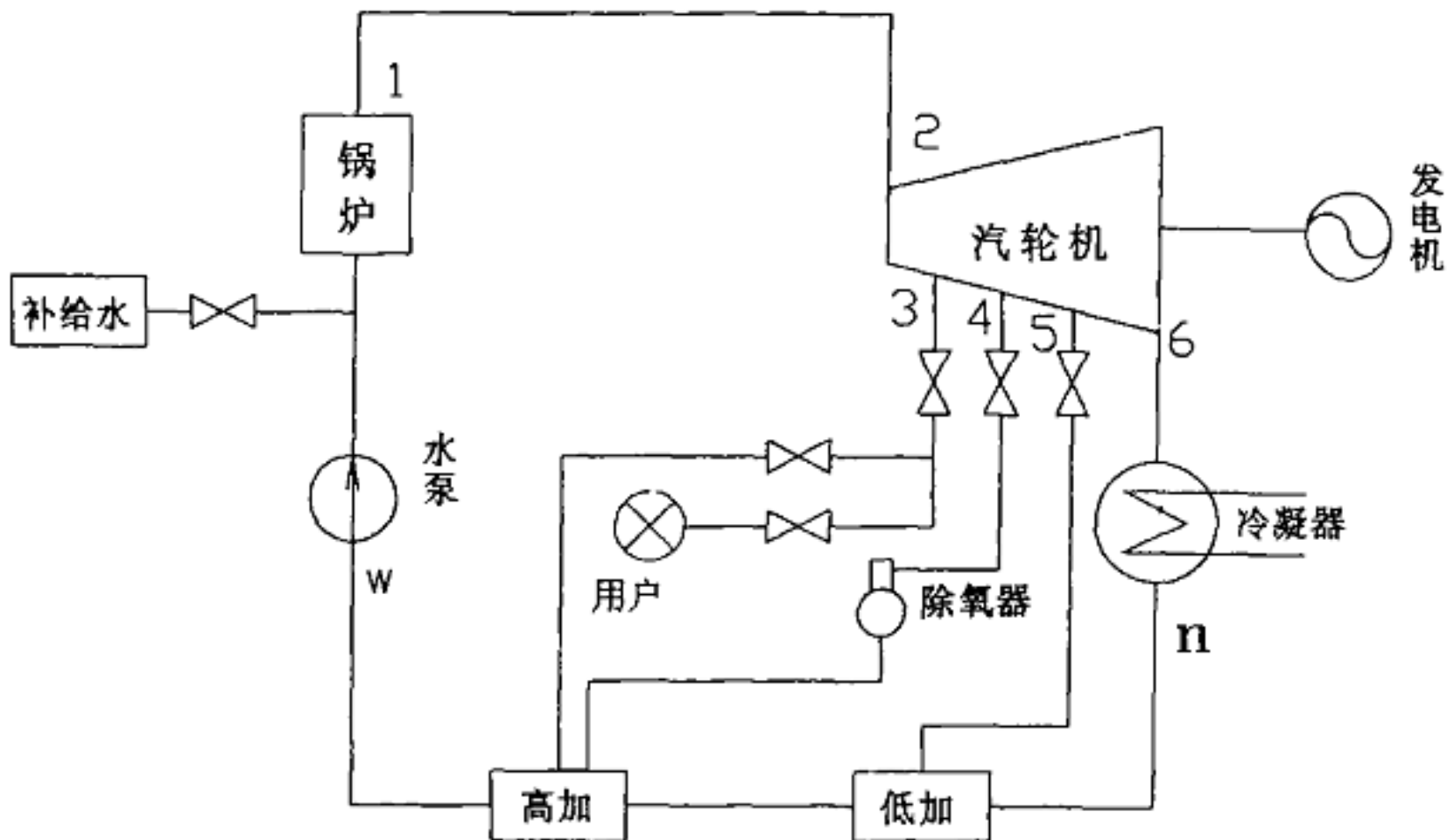
名 称	符 号	单 位	计 算 公 式 或 依 据	数 值
热效率	η_t	%	该炉热力计算书	92
出口水温	T_2	K	该炉热力计算书	338
进口水温	T_1	K	该炉热力计算书	328
设计使用燃料			0 号轻柴油	
燃料低位发热值	Q_{dw}^y	KJ/ Kg	设计用代表性燃料	42915
燃料应用基水份	W^y	%	查表	0
燃料应用基氢份	H^y	%	查表	13.49
燃料高位发热值	Q_{gw}^y	KJ/ Kg	$Q_{dw}^y + r(H^y/100 + W^y/100)$	43253
汽化潜热	r	KJ/ Kg	取定	2512
燃料焓	ex_f	KJ/ Kg	$0.975 Q_{gw}^y$	47172
环境温度	T_0	K	取定	293
焓效率	η_{ex}	%	$\eta_t (Q_{dw}^y / ex_f) [1 - T_0 \ln(T_2/T_1) / (T_2 - T_1)]$	11.2

实例2：负压热水锅炉的焓分析

□ 结果分析：

从上表可以看出，负压热水锅炉的焓效率仅为12%，而大型电站锅炉的焓效率约为40%，较大的工业锅炉约为30%，造成焓效率偏低的主要原因是中间介质（锅水、负压蒸汽）温度较低、温差传热、燃烧及中间换热。因此，从能的数量和质量两方面结合起来，也就是用焓分析，负压热水锅炉并不是一个完善的热力设备。

实例3：烟分析在小型热电厂中应用



实例3：烟分析在小型热电厂中应用

表 1 1号机和1号炉主要技术参数

序号	名称	符号	单位	数值
1	锅炉额定蒸发量	D_g	T/h	75
2	锅炉出口蒸汽压力	P_g	Mpa	5.10
3	锅炉额定蒸汽温度	T_g	℃	485
4	锅炉补给水温度	t_{bg}	℃	150
5	锅炉热效率	η_b	%	90.59
6	燃料低位发热量	Q_{dw}^l	kJ/kg	15520.5
7	燃料消耗量	B	kg/h	13104
8	炉膛温度	T_{li}	℃	1350
9	主蒸汽流量	D_{zj}	T/h	100
10	主蒸汽温度	T_{zj}	℃	470
11	主蒸汽压力	P_{zj}	Mpa	4.90
12	一级抽汽流量	D_3	T/h	57.9
13	一级抽汽温度	T_3	℃	300
14	一级抽汽压力	P_3	Mpa	0.981
15	二级抽汽流量	D_4	T/h	7.4
16	二级抽汽温度	T_4	℃	200
17	二级抽汽压力	P_4	Mpa	0.147
18	三级抽汽流量	D_5	T/h	1.9
19	三级抽汽温度	T_5	℃	70
20	三级抽汽压力	P_5	Mpa	0.0358
21	汽机排汽温度	T_6	℃	60
22	凝水温度	T_n	℃	30
23	汽机机械效率	η_j	%	98
24	电机机械效率	η_d	%	96.2

实例3：烟分析在小型热电厂中应用

表2 热电联产蒸汽各工况点焓、熵、烟

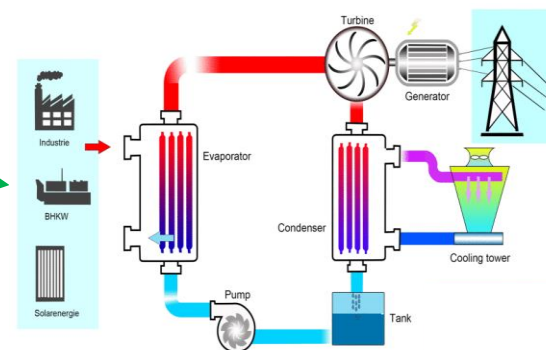
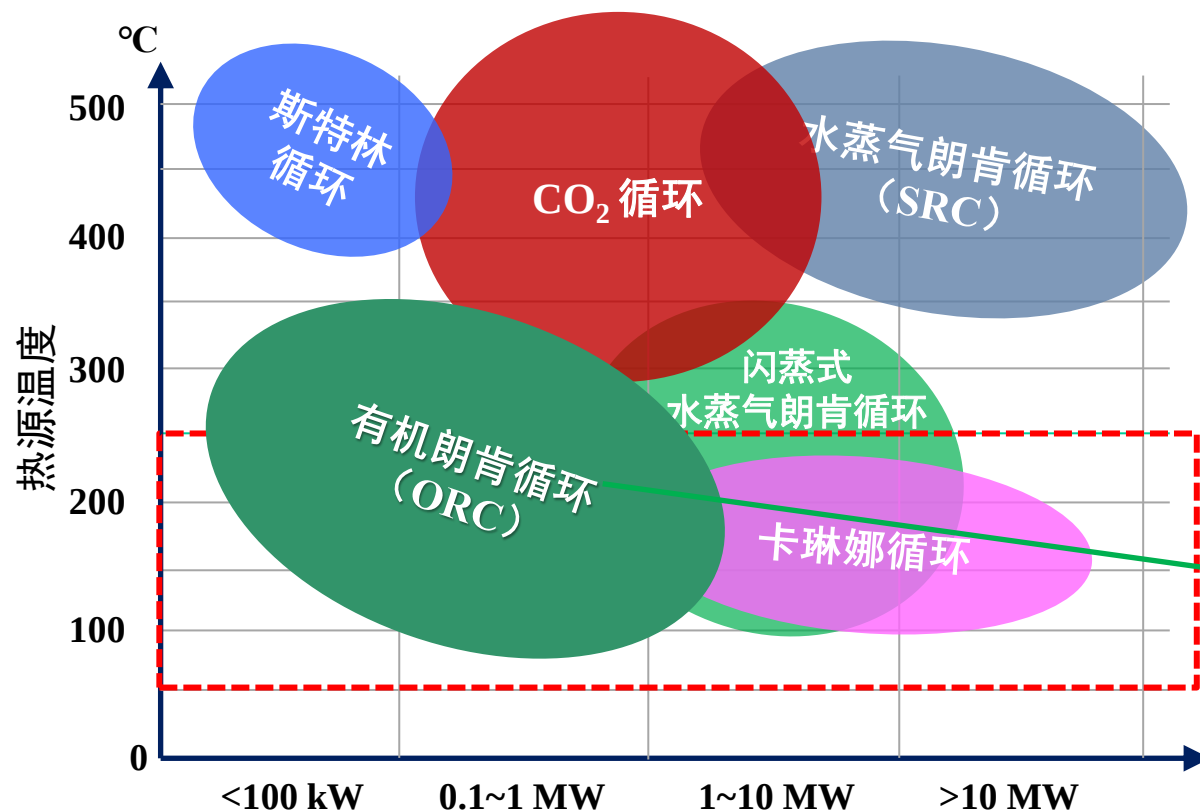
数 项 据 目	工 况	锅 炉 出口 1	汽 机 进口 2	汽 机 一抽 3	汽 机 二抽 4	汽 机 三抽 5	汽 机 排汽 6	给 水 w	凝水 n	环境 0
压力 P (Mpa)		5.10	4.85	0.981	0.147	0.0358				
温度 T (°C)		485	470	300	200	70	60	150	30	25
焓 h (kJ/kg)		3397.63	3365.72	3051.15	2872.86	2549.9	2609.5	644.8	135.66	105.126
熵 s (kJ/kg)		6.9215	6.9019	7.1367	7.7434	8.5224	7.9106	1.8874	0.4565	0.3683
烟 E (kJ/kg)		1339.65	1313.58	893.04	569.95	14.85	256.77	89.46	4.2504	
备 注				包 括 两 部 分 汽 一 部 分 热 · 部 分 入 高 加	汽 机 抽 汽 进 入 除 氧 器	汽 机 抽 汽 进 入 低 加		锅 炉 给 水 为 该 温 度 下 的 饱 和 水		取 环 境 温 度 t=25 ℃、 压 力 为 一 个 大 气 压 烟 值

实例3：烟分析在小型热电厂中应用

表3 热电联产系统各部分火用损失效率对比

收入 火用			支出 火用			火用损系数%	火用效率%
项目	符号	计算值	项 目	符 号	火用值 (kJ/kg)		
每公斤 蒸汽燃料	E_f	2481.07	锅炉	E_{fb}	1174.16	47.32	50.39
			管道损失	E_g	26.07	1.05	91.33
			汽机不可逆火用损失	E_{it}	150.02	6.05	77.27
			汽机发电机机电火用损	E_{le}	29.19	1.18	94.28
			热网火用损	ΔE_q	5.52	0.22	98.76
			回热系统火用损	E_{lhr}	81.82	3.29	
			冷凝器火用损	E_{la}	92.43	3.73	
			供热火用值	E_q	446.52	17.99	
			供电火用值	E_e	660.08	26.6	

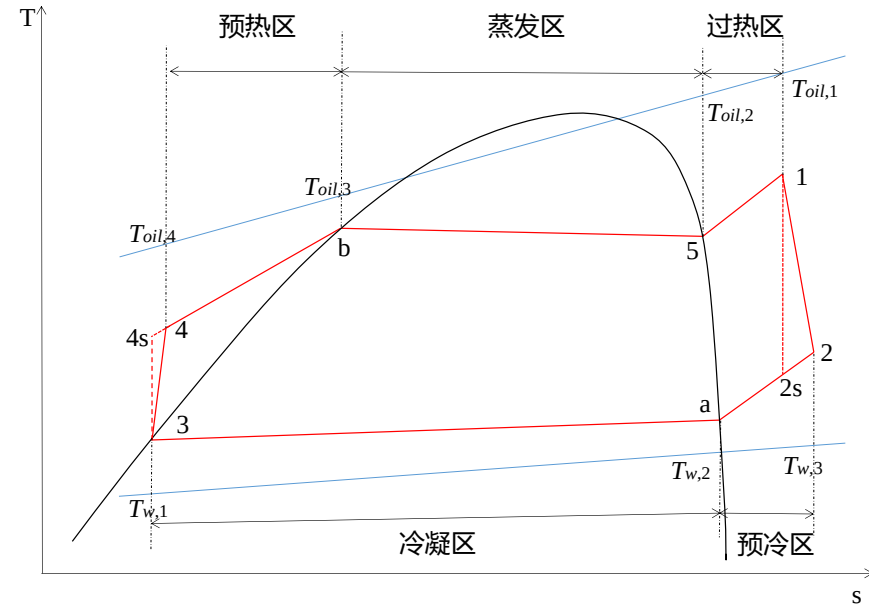
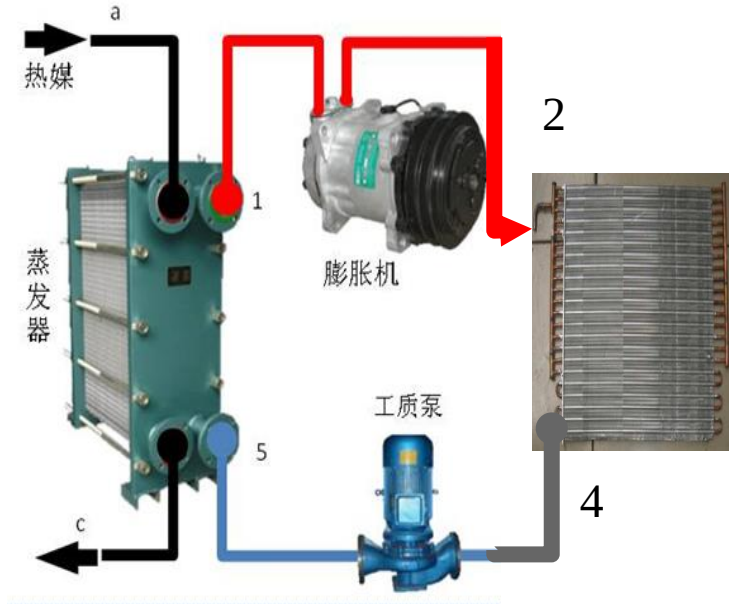
练习1：炯分析在有机朗肯循环系统中应用



有机朗肯循环 ORC 实物及流程图

□ 有机朗肯循环 (ORC) 具有热源温度适用范围广、系统简单、运行稳定、维护方便、寿命周期长等优点！是极具推广前景的低品位热能发电技术之一！

练习1：焓分析在有机朗肯循环系统中应用



- 热源：100度水蒸气
- 工质种类：R134a
- 工质流量：1kg/s
- 蒸发温度：85°C
- 过热度：5°C
- 过冷度：0°C
- 冷凝温度：35°C

步骤

- 热力学平衡计算
- 物性：查表或Refprop

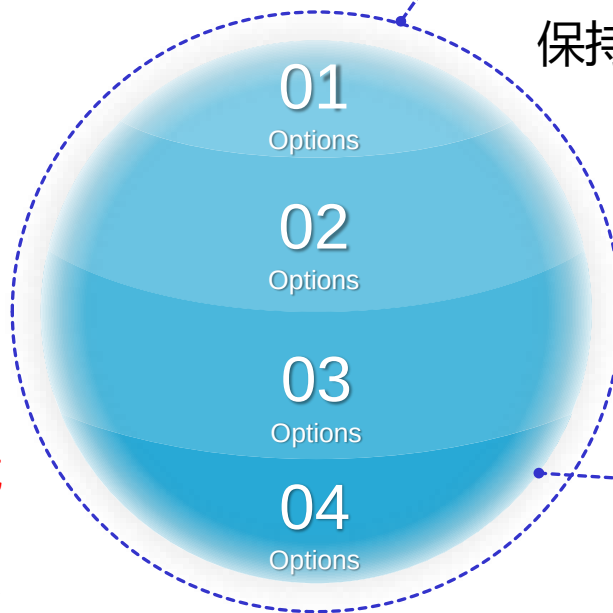
练习2：烟分析在CO₂发电循环系统中应用

传统发电技术出现技术瓶颈，寻求和开发**新型动力循环**系统替代现有技术，成为技术研究的热点。

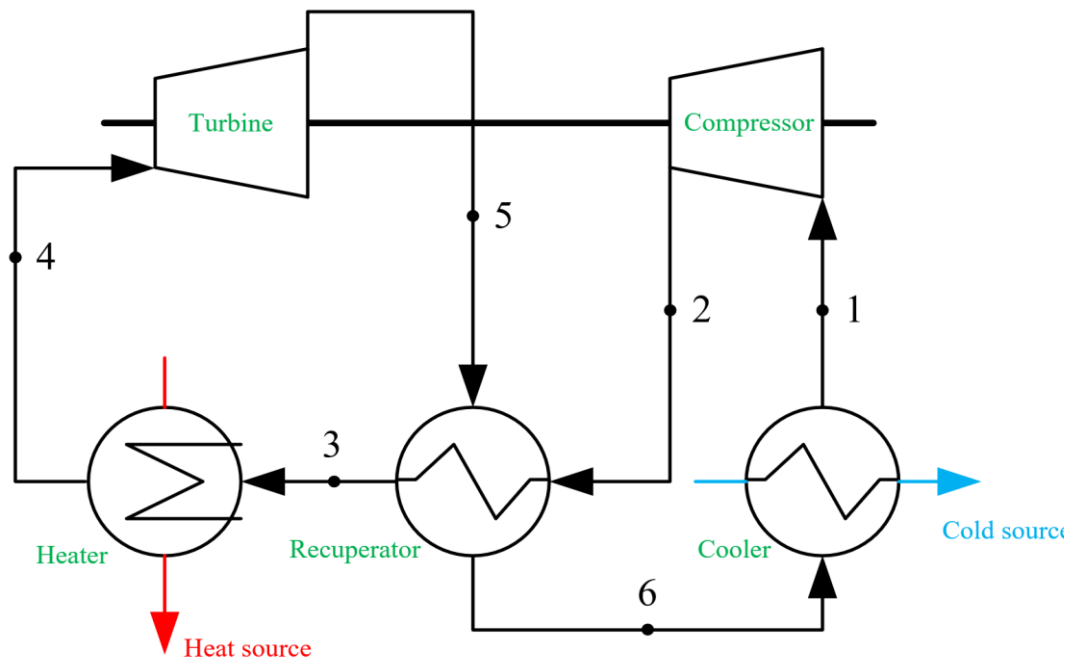
由于SCO₂布雷顿循环**效率高**、**系统结构紧凑**、**节水**和**环境友好**等优势，SCO₂燃煤发电成为突破传统发电效率瓶颈的有效方法之一。

基于中国的能源结构，煤炭占中国能源消耗的75%，煤炭发电占**60%**以上，并且煤炭发电将会长期保持绝对优势。

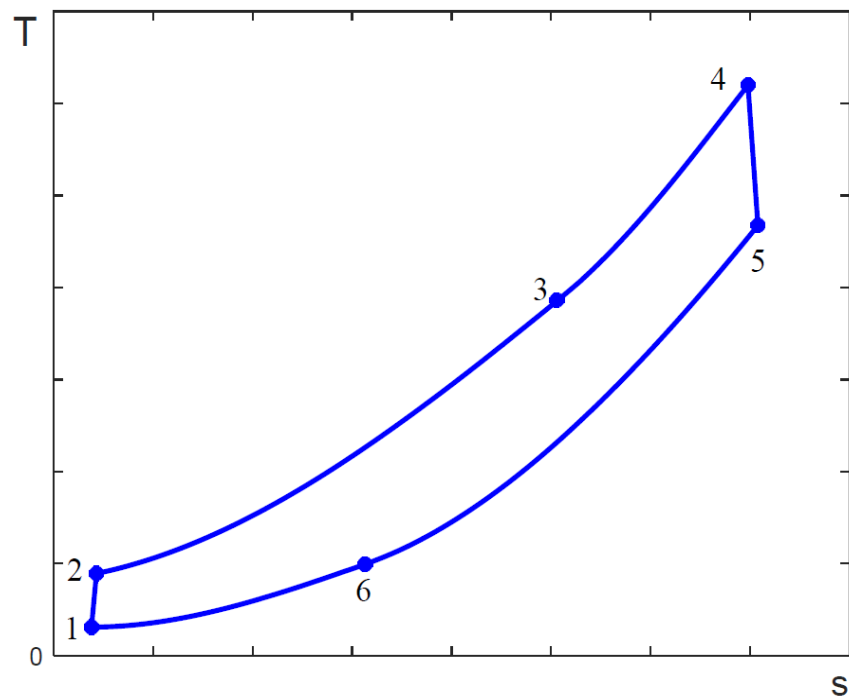
SCO₂具有化学性质稳定、安全性可靠、**价格低廉**、临界状态低、**流动性好**、**比体积小**、**可压缩性小**、**传热效率高**等优点。



练习2：烟分析在CO₂发电循环系统中应用



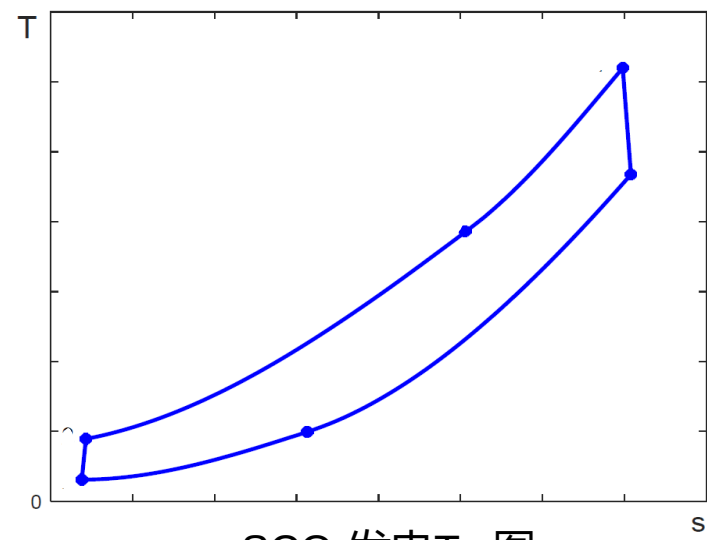
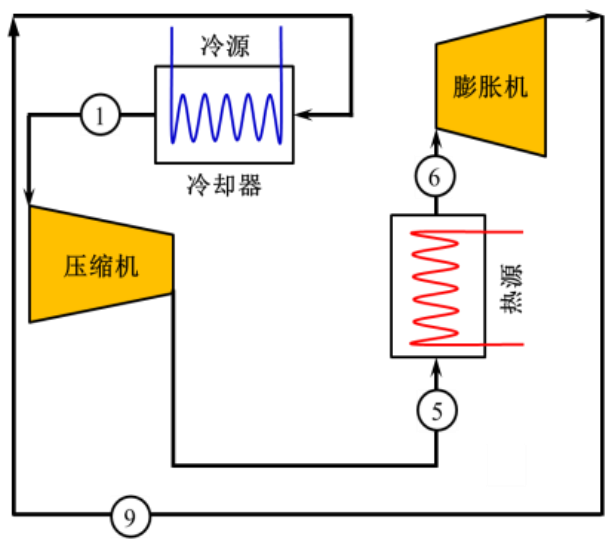
SCO₂发电流程图



SCO₂发电T-s图

- 1-2: 压缩机增压;
- 2-3, 5-6: 回热器回热;
- 3-4: 热源加热;
- 4-5: 透平做功;
- 6-1: 冷源冷却。

练习2： 烟分析在CO₂发电循环系统中应用



SCO₂发电T-s图

参数 (单位)	值
热源：饱和蒸汽(°C)	300
工质流量(kg/s)	100
换热器最小换热温差 ΔT_{min} (K)	10
膨胀机等熵效率 (-)	0.9
压缩机等熵效率 (-)	0.85

The end!