



廣東工業大學

GUANG DONG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



烟分析在有机朗肯循环中应用

REPORT

汇报人：林焱炜

指导老师：罗向龙

汇报日期：2022年11月21日

小组成员：陈锐荣、关旭辉、黄余泽、梁明钊、林焱炜、吴展涛、张玉婷

目录

CONTENTS

01 ORC循环构建

02 部件焓分析

03 系统焓分析

04 改善环节分析

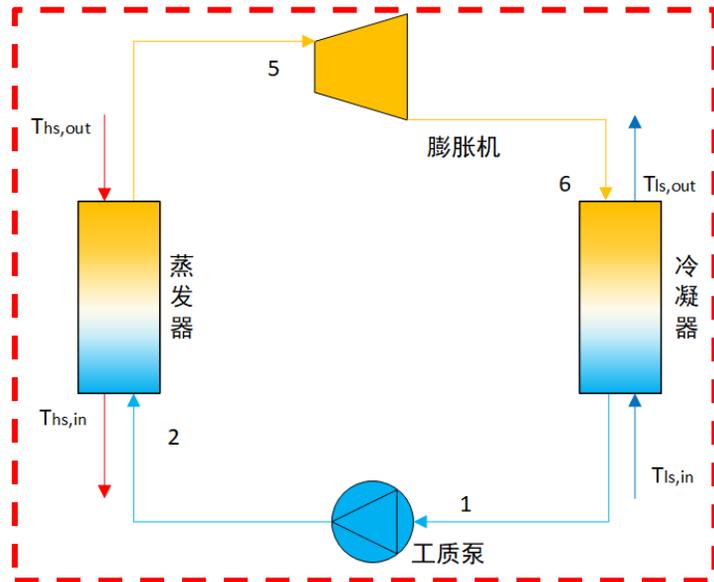




01

ORC循环构建





ORC循环示意图

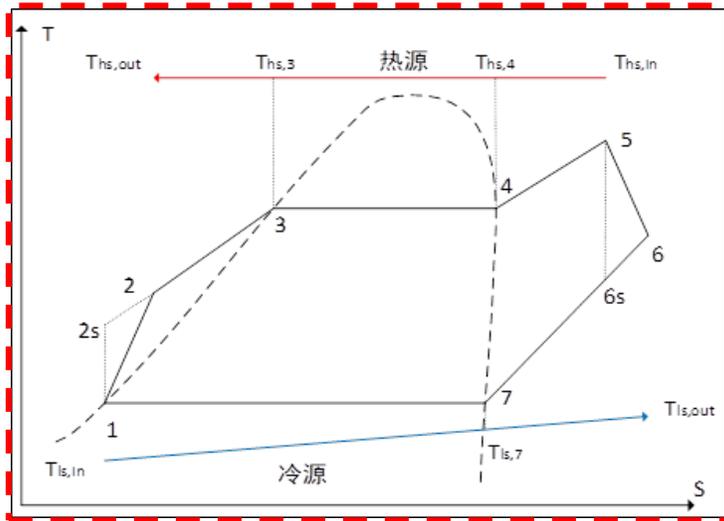
- 朗肯循环（蒸汽动力循环的理想循环）
- 水在**锅炉**中定压吸热后，过热水蒸气进入**汽轮机**中绝热膨胀做功，排出的乏汽进入**冷凝器**内定压冷凝，凝结水在**给水泵**绝热压缩后，进入锅炉完成循环。
- 有机朗肯循环(Organic Rankine Cycle)是以**低沸点有机物**为工质的朗肯循环。
- ORC优点：热源温度适用范围广、结构简单、回收效率高、运行稳定、寿命周期长等优点；
- ORC缺点：工况随温度**波动大**、**焓损高**。

ORC系统边界条件

热源温度(水蒸气)	100	°C	冷却水进口温度	20	°C
工质种类	R134a		冷却水出口温度	25	°C
工质流量	1	kg/s	工质泵等熵效率	75	%
蒸发温度	85	°C	膨胀机等熵效率	75	%
过热度	5	°C	环境温度	20	°C
过冷度	0	°C	环境压力	0.101325	Mpa
冷凝温度	35	°C	冷却水进出口压力	0.101325	Mpa

ORC系统各点参数

	P (MPa)	T (°C)	H (kJ/kg)	S (kJ/(kg·K))
1点	0.88698	35	249.0066	1.167008
2点	2.925829	36.6923	251.3258	1.16888
2s点	2.925829	36.29171	250.746	1.167008
3点	2.925829	85	332.2243	1.410382
4点	2.925829	85	427.7598	1.677129
5点	2.925829	90	438.1619	1.705981
6s点	0.88698	35	415.0911	1.705981
6点	0.88698	38.36221	420.8588	1.724634
7点	0.88698	35	417.1884	1.712787



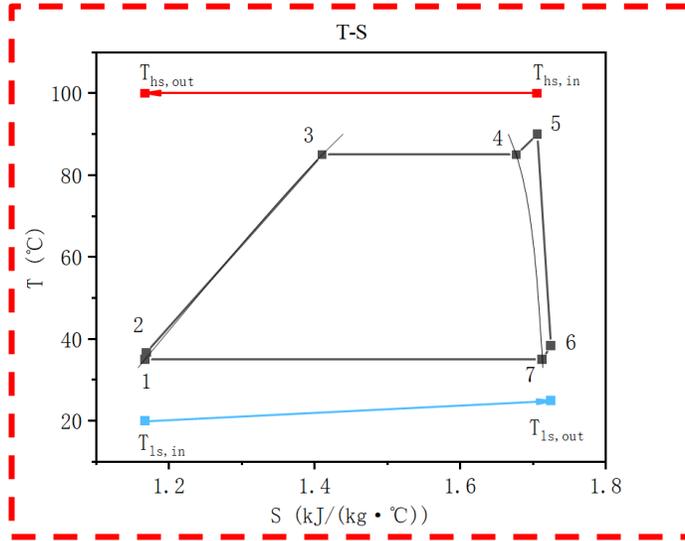
ORC循环T-S示意图

ORC系统冷热源进出口参数

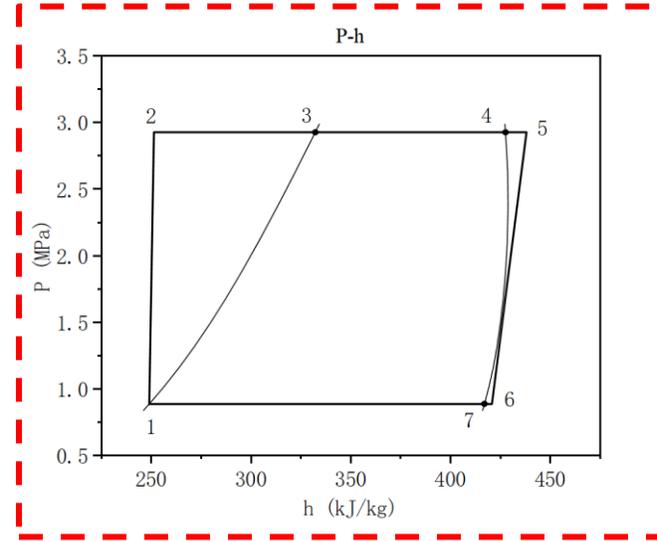
	P (MPa)	T (°C)	H (kJ/kg)
热源进口	0.101418	100	2675.57
热源出口	0.101418	100	419.1662
冷源进口	0.101325	20	84.0073
冷源出口	0.101325	25	104.9201

ORC系统冷热源进出口质量流量

热源质量流量	M_{hs}	0.082803	kg/s
冷源质量流量	M_{ls}	8.217555	kg/s



ORC循环T-S图



ORC循环P-h图

ORC系统计算结果

蒸发器换热量	Q_{eva}	186.8362	kW
冷凝器换热量	Q_{con}	171.8522	kW
工质泵耗功	W_p	2.319152	kW
膨胀机输出功	W_t	17.30311	kW
净输出功	W_{net}	14.98396	kW
循环热效率	η_t	8.02%	
卡诺效率	η_c	22.5%	同冷热源下



02

部件焗分析



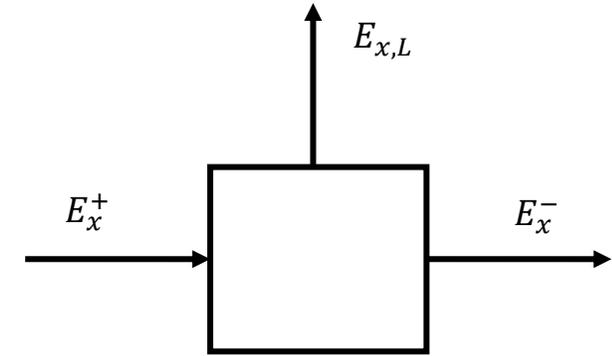
灰箱模型

将黑箱五个量，即供给焓 $E_{x,sup}$ ，带入焓 $E_{x,br}$ ，有效焓 $E_{x,ef}$ ，无效焓 $E_{x,inef}$ ，耗散损 $E_{x,irr}$ 和外部焓损 $E_{x,l,out}$ ，组合为三个量即：

供给焓 E_x^+ ；**有效焓**（输出净收益焓） E_x^- ；**总焓损**（内、外焓损之和） $E_{x,L}$ 。

焓平衡方程： $E_x^+ = E_x^- + E_{x,L}$

焓效率为： $\eta_{ex} = \frac{E_x^-}{E_x^+}$



Exergy balance equations (焓平衡方程)

Cycle component	Exergy balance equations
Pump	$\dot{E}_1 + \dot{W}_p = \dot{E}_2 + \dot{E}_{D,p}$
Evaporator	$\dot{E}_2 + \dot{E}_{hs,in} = \dot{E}_5 + \dot{E}_{hs,out} + \dot{E}_{D,eva}$
Expander	$\dot{E}_5 = \dot{E}_6 + \dot{W}_{exp} + \dot{E}_{D,exp}$
Condenser (利用冷却水)	$\dot{E}_6 + \dot{E}_{ls,in} = \dot{E}_1 + \dot{E}_{ls,out} + \dot{E}_{D,c}$
Condenser (未利用冷却水)	$\dot{E}_6 = \dot{E}_1 + \dot{E}_{D,c}$

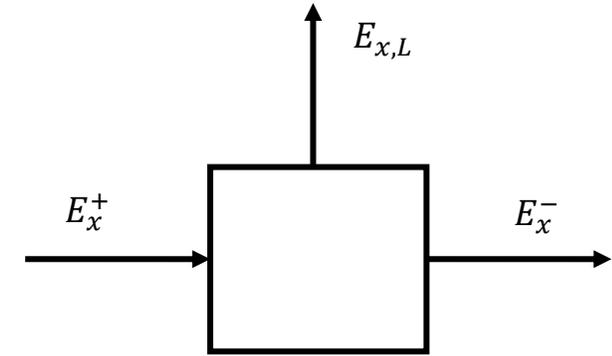
灰箱模型

将黑箱五个量，即供给焓 $E_{x,sup}$ ，带入焓 $E_{x,br}$ ，有效焓 $E_{x,ef}$ ，无效焓 $E_{x,inef}$ ，耗散损 $E_{x,irr}$ 和外部焓损 $E_{x,l,out}$ ，组合为三个量即：

供给焓 E_x^+ ；有效焓（输出净收益焓） E_x^- ；总焓损（内、外焓损之和） $E_{x,L}$ 。

焓平衡方程： $E_x^+ = E_x^- + E_{x,L}$

焓效率为： $\eta_{ex} = \frac{E_x^-}{E_x^+}$



Exergy calculation for ORC component and system (灰箱模型)

Component	Exergy of fuel (供给焓)	Exergy of product (有效焓)	Exergy of destruction (焓损)
Pump	$\dot{E}_{F,p} = W_p$	$\dot{E}_{P,p} = \dot{E}_2 - \dot{E}_1$	$\dot{E}_{D,p} = \dot{E}_{F,p} - \dot{E}_{P,p}$
Evaporator	$\dot{E}_{F,evap} = \dot{E}_{hs,in} - \dot{E}_{hs,out}$	$\dot{E}_{P,evap} = \dot{E}_5 - \dot{E}_2$	$\dot{E}_{D,evap} = \dot{E}_{F,evap} - \dot{E}_{P,evap}$
Expander	$\dot{E}_{F,exp} = \dot{E}_5 - \dot{E}_6$	$\dot{E}_{P,exp} = W_{exp}$	$\dot{E}_{D,exp} = \dot{E}_{F,exp} - \dot{E}_{P,exp}$
Condenser (利用冷却水)	$\dot{E}_{F,cond} = \dot{E}_6 - \dot{E}_1$	$\dot{E}_{P,cond} = \dot{E}_{ls,out} - \dot{E}_{ls,in}$	$\dot{E}_{D,cond} = \dot{E}_{F,cond} - \dot{E}_{P,cond}$
System (利用冷却水)	$\dot{E}_{F,tot} = \dot{E}_{F,p} + \dot{E}_{F,evap}$	$\dot{E}_{P,tot} = W_{exp} + \dot{E}_{ls,out} - \dot{E}_{ls,in}$	$\dot{E}_{D,tot} = \dot{E}_{D,exp} + \dot{E}_{D,cond} + \dot{E}_{D,p} + \dot{E}_{D,evap}$
Condenser (未利用冷却水)	$\dot{E}_{F,cond} = \dot{E}_6$	$\dot{E}_{P,cond} = \dot{E}_1$	$\dot{E}_{D,cond} = \dot{E}_{F,cond} - \dot{E}_{P,cond}$
System (未利用冷却水)	$\dot{E}_{F,tot} = \dot{E}_{F,p} + \dot{E}_{F,evap}$	$\dot{E}_{P,tot} = W_{exp}$	$\dot{E}_{D,tot} = \dot{E}_{D,exp} + \dot{E}_{D,cond} + \dot{E}_{D,p} + \dot{E}_{D,evap}$

“Fuel-Product-Destruction” concept



03

系统烟分析



焓分析的环境条件

	P_0 (MPa)	T_0 (°C)	H_0 (kJ/kg)	S_0 (kJ/(kg·K))
R134a	0.101325	15.000	416.087	1.8718148
水	0.101325	15.000	63.07683	0.224448

Exergy calculation for ORC component and system (灰箱模型)

Component	供给焓	有效焓	焓损	设备焓效率	焓损失系数
Pump	2.319	1.779	0.539	76.74%	0.0120223
Evaporator	42.559	32.071	10.489	75.35%	0.2337153
Expander	22.678	17.303	5.375	76.30%	0.1197636
Condenser (利用冷却水)	11.172	4.355	6.817	38.98%	0.1518976
System (利用冷却水)	44.87865	21.658	23.220	48.26%	0.5173990

系统焓效率 (利用冷却水)

$$\text{总供给焓 } \dot{E}_{x,sup} = \dot{W}_p + \dot{E}_{hs,in} - \dot{E}_{hs,out}$$

$$\text{净收益焓 } \dot{E}_{x,ef} = \dot{W}_{exp} + \dot{E}_{ls,out} - \dot{E}_{ls,in}$$

$$\text{总焓损 } \dot{E}_{x,L} = \dot{E}_{x,sup} - \dot{E}_{x,ef}$$

$$\text{系统焓效率 } \eta_{ex} = \frac{\dot{E}_{x,ef}}{\dot{E}_{x,sup}} = \frac{\dot{W}_{exp} + \dot{E}_{ls,out} - \dot{E}_{ls,in}}{\dot{W}_p + \dot{E}_{hs,in} - \dot{E}_{hs,out}}$$

$$\text{焓损系数 } \xi_i = \frac{\dot{E}_{x,L,i}}{\dot{E}_{x,sup}}$$

焓损系数: 蒸发器 > 冷凝器 > 膨胀机 > 工质泵

焓分析的环境条件

	P_0 (MPa)	T_0 (°C)	H_0 (kJ/kg)	S_0 (kJ/(kg·K))
R134a	0.101325	15.000	416.087	1.8718148
水	0.101325	15.000	63.07683	0.224448

Exergy calculation for ORC component and system (灰箱模型)

Component	供给焓	有效焓	焓损	设备焓效率	焓损失系数
Pump	2.319	1.7796	0.539545	76.74%	0.0120223
Evaporator	42.559	32.071	10.48883	75.35%	0.2337153
Expander	22.678	17.303	5.37483	76.30%	0.1197636
Condenser (未利用冷却水)	47.182	36.010	11.172		0.248945
System (未利用冷却水)	44.879	17.303	27.576	38.56%	0.6144467

系统焓效率 (未利用冷却水)

$$\text{总供给焓 } \dot{E}_{x,sup} = \dot{W}_p + \dot{E}_{hs,in} - \dot{E}_{hs,out}$$

$$\text{净收益焓 } \dot{E}_{x,ef} = \dot{W}_{exp}$$

$$\text{总焓损 } \dot{E}_{x,L} = \dot{E}_{x,sup} - \dot{E}_{x,ef}$$

$$\text{系统焓效率 } \eta_{ex} = \frac{\dot{E}_{x,ef}}{\dot{E}_{x,sup}} = \frac{W_{exp}}{\dot{W}_p + \dot{E}_{hs,in} - \dot{E}_{hs,out}}$$

$$\text{焓损系数 } \xi_i = \frac{\dot{E}_{x,L,i}}{\dot{E}_{x,sup}}$$

焓损系数: 冷凝器 > 蒸发器 > 膨胀机 > 工质泵

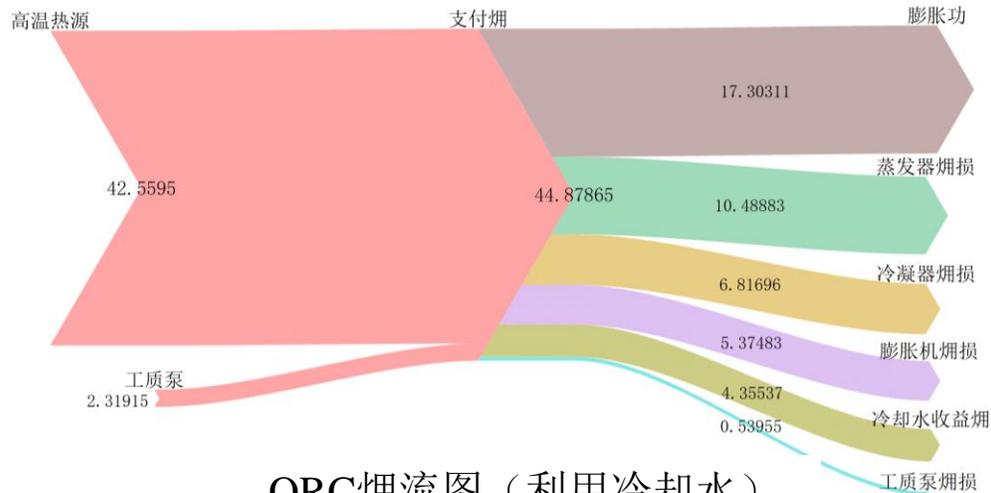


04

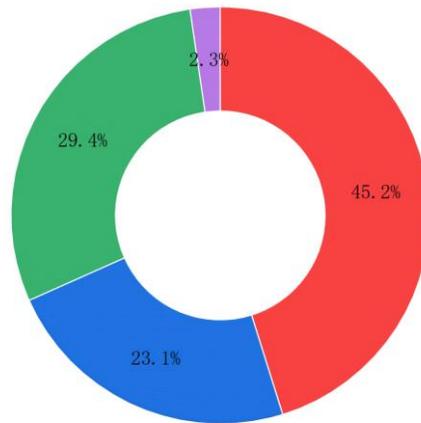
改善环节分析



改善环节分析



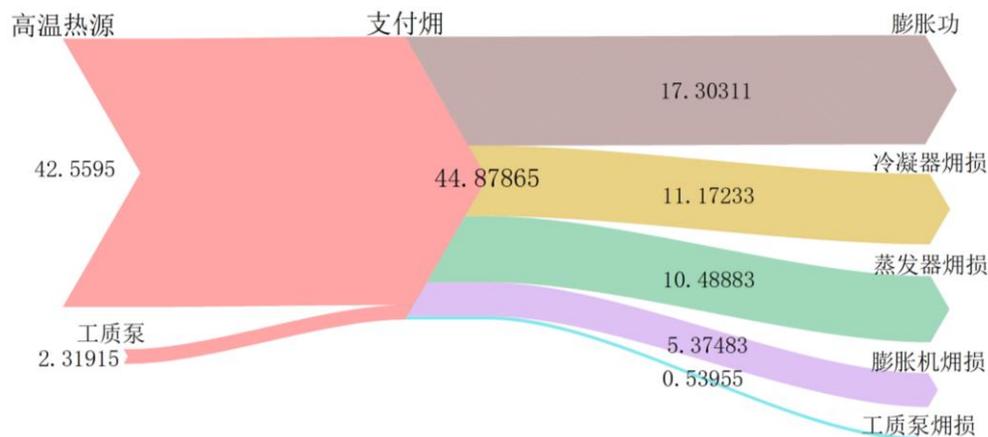
ORC焓流图 (利用冷却水)



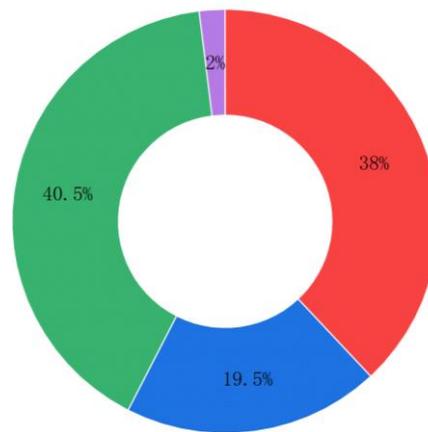
ORC系统焓损占比图
(利用冷却水)

蒸发器
膨胀机
冷凝器
工质泵

改善环节及措施分析 (利用冷却水)
 焓损系数: 蒸发器>冷凝器>膨胀机>工质泵
 焓损率: 蒸发器>冷凝器>膨胀机>工质泵
改善环节: 蒸发器
改善措施: 使用不同压力的饱和蒸汽来加热; 更换传热系数更大、流动阻力更小的换热器。



ORC焓流图 (未利用冷却水)



ORC系统焓损占比图
(未利用冷却水)

蒸发器
膨胀机
冷凝器
工质泵

改善环节及措施分析 (未利用冷却水)
 焓损系数: **冷凝器**>蒸发器>膨胀机>工质泵
 焓损率: 冷凝器>蒸发器>膨胀机>工质泵
改善环节: 冷凝器
改善措施: 更换传热系数更大、流动阻力更小的换热器; 回收利用冷却水。

小组分工

陈锐荣	蒸发器焓分析	林焱炜	数据计算
关旭辉	公式编辑及PPT制作	吴展涛	冷凝器焓分析
黄余泽	焓损分析	张玉婷	工质泵及膨胀机焓分析
梁明钊	绘图及PPT制作		

参考资料

- [1]傅秦生. 能量系统的热力学分析方法[M]. 1. 西安:西安交通大学出版社, 2005.7
- [2]卢沛, 罗向龙, 陈健勇,等. 板式换热器及其热力系统的运行特性和高级焓分析[J]. 化工学报, 2021, 72(S01):8.
- [3]Bejan A, Tsatsaronis G, Moran M. Thermal design and optimization [M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [4] Galindo J, Ruiz S, Dolz V, et al. Advanced exergy analysis for a bottoming organic Rankine cycle coupled to an internal combustion engine [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 126: 217-227.
- [5]Morosuk, T, Tsatsaronis, et al. Advanced exergetic evaluation of refrigeration machines using different working fluids[J]. ENERGY -OXFORD-, 2009.



廣東工業大學

GUANG DONG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

THANKS

汇报人：林焱炜

指导老师：罗向龙

小组成员：陈锐荣、关旭辉、黄余泽、梁明钊、林焱炜、吴展涛、张玉婷

汇报日期：2022年11月21日

REPORT

问题1、ORC系统各参数具体是如何确定的？

问题2、为什么T-S图上热源进出口熵值为什么和蒸发器R134a进出口熵值分别相等？

问题3、蒸发器的焓分析具体是如何分析的？

问题4、冷凝器的焓分析具体是如何分析的？

问题5、工质泵的焓分析具体是如何分析的？

问题6、膨胀机的焓分析具体是如何分析的？

问题7、为什么采用不同的压力的饱和蒸汽来加热比只用一个压力的饱和蒸汽来加热可以明显地减少焓损失？

问题1、ORC系统各参数具体是如何确定的？

ORC构建步骤：

- 1、先确定蒸发温度下的饱和液3点和饱和气4点，冷凝压力下的饱和液1点和饱和气点7点；
- 2、再通过过热度确定膨胀机进口5点；
- 3、然后通过工质泵和膨胀机等熵效率公式确定工质泵出口2点和膨胀机出口6点。

Ps：蒸发过程和冷凝器是定压过程，且在两相区内还是定温过程。

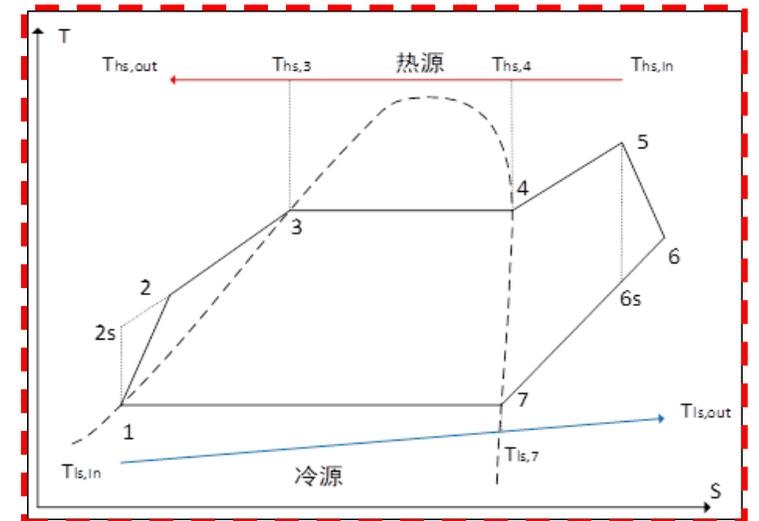
$$\text{工质泵等熵效率: } \eta_P = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}; \quad h_2 = h_1 + \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_P}$$

$$\text{膨胀机等熵效率: } \eta_t = \frac{h_5 - h_6}{h_5 - h_{6s}}; \quad h_6 = h_5 - \frac{h_5 - h_{6s}}{\eta_t}$$

点2的温度=REFPROP(“T”,R134a,“PH”,“SI with C”,点2的压力,点2的焓值)

饱和液相点3的焓值=REFPROP(“H”,R134a,“TQ”,“SI with C”,点3的温度,0)

饱和液相点4的焓值=REFPROP(“H”,R134a,“TQ”,“SI with C”,点4的温度,1)



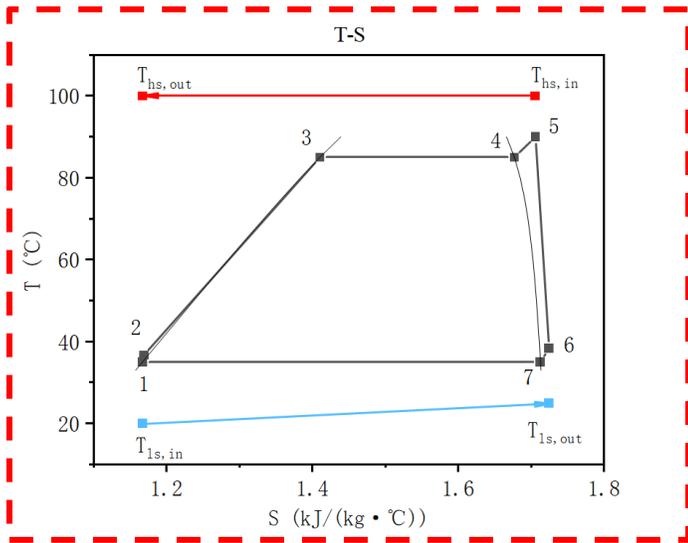
ORC循环T-S示意图

返回

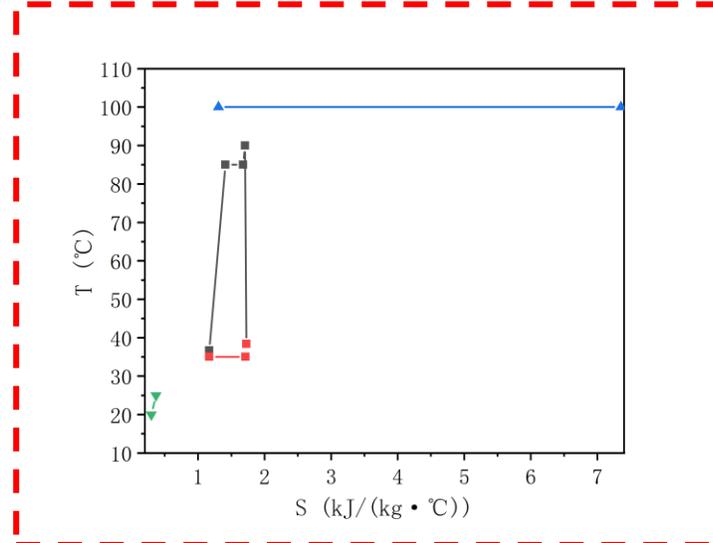
问题2、为什么T-S图上热源进出口熵值为什么和蒸发器R134a进出口的熵值分别相等？

首先，因为冷热源和循环工质是不同的物质，物性不同，相同的换热量下，热源进出口熵值和蒸发器R134a进出口的熵值实际上不相同，但为作图直观取为相同。

其次，如果冷热源进出口熵值取实际熵值，在T-S图上不能很好地表示出是那一段与其换热。



ORC循环T-S图



ORC循环T-S图

热源状态点				
	P	T	H	s
	MPa	°C	kJ/kg	kJ/(kg·K)
蒸发器进口	0.101418	100	2675.57	7.354119
蒸发器出口	0.101417997	100	419.1662	1.3072111

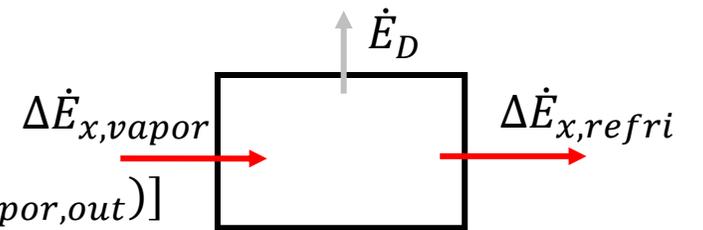
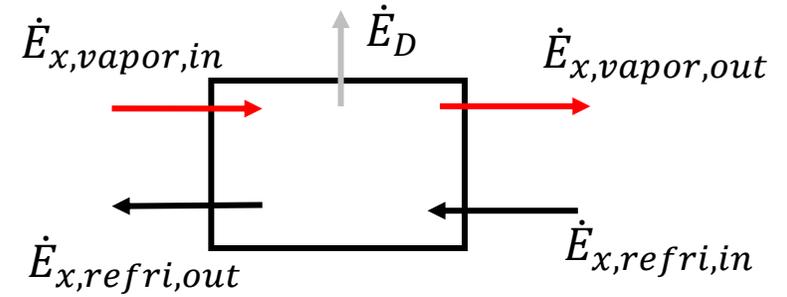
返回

问题3、蒸发器的焓分析具体是如何分析的？

Exergy analysis: Evaporator						
制冷剂侧			水蒸气			换热量
e_in	e_out	ΔE_refri	Δs	Ex,Q	An,Q	Q
kJ/kg	kJ/kg	kW	kJ/kg C	kW	kW	kW
37.78933	69.8600001	32.07067	6.046908	42.559498	144.2767	186.8362

蒸发器				
Ed	Ef	Ep	eta_eva	ξ
kW	kW	kW	设备焓效率	焓损失系数
10.48883	42.5595	32.07067	75.35%	0.23371537

焓分析的环境条件				
	P ₀ (MPa)	T ₀ (°C)	H ₀ (kJ/kg)	S ₀ (kJ/(kg·K))
水	0.101325	15.000	63.07683	0.224448



换热量: $\dot{Q}_{eva} = \dot{m}_{refri}(h_5 - h_2)$

焓平衡方程: $\dot{E}_{x,vapor,in} + \dot{E}_{x,refri,in} = \dot{E}_{x,vapor,out} + \dot{E}_{x,refri,out} + \dot{E}_D$

供给焓: $\Delta\dot{E}_{x,vapor} = \dot{m}_{vapor}[h_{vapor,in} - h_{vapor,out} + (T_0 + 273.15)(S_{vapor,in} - S_{vapor,out})]$

收益焓: $\Delta\dot{E}_{x,refri} = \dot{m}_{refri}(\dot{e}_{x,refri,out} - \dot{e}_{x,refri,in})$

問題4、冷凝器的焓分析具體是如何分析的？

冷凝器焓分析（利用冷卻水）

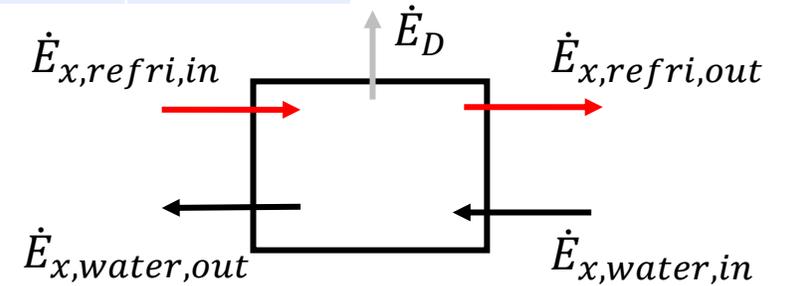
Exergy analysis: Condenser					
制冷劑側			水側		
e_in	e_out	ΔE_refri	e_in	e_out	ΔE_water
kJ/kg	kJ/kg	kW	kJ/kg	kJ/kg	kW
47.182	36.010	11.172	0.179	0.709	4.355

冷凝器				
Ed (kW)	Ef (kW)	Ep (kW)	設備焓效率	焓損失係數
6.817	11.172	4.355	38.98%	0.15189764

焓平衡方程： $\dot{E}_{x,refri,in} + \dot{E}_{x,water,in} = \dot{E}_{x,refri,out} + \dot{E}_{x,water,out} + \dot{E}_D$

供給焓： $\Delta \dot{E}_{x,refri} = \dot{m}_{refri}(\dot{e}_{x,refri,in} - \dot{e}_{x,refri,out})$

收益焓： $\Delta \dot{E}_{x,water} = \dot{m}_{water}(\dot{e}_{x,water,out} - \dot{e}_{x,water,in})$



冷凝器焓分析（未利用冷卻水）

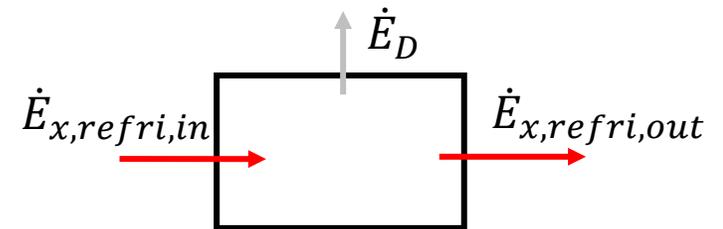
Exergy analysis: Condenser					
制冷劑側			水側		
e_in	e_out	ΔE_refri	e_in	e_out	ΔE_water
kJ/kg	kJ/kg	kW	kJ/kg	kJ/kg	kW
47.182	36.010	11.172	0.179	0.709	4.355

冷凝器				
Ed (kW)	Ef (kW)	Ep (kW)	設備焓效率	焓損失係數
11.172	47.182	36.010	76.32%	0.2489454

焓平衡方程： $\dot{E}_{x,refri,in} - \dot{E}_{x,refri,out} = \dot{E}_D$

供給焓： $\dot{E}_F = \dot{m}_{refri} \dot{e}_{x,refri,in}$

$$\eta = \frac{\dot{E}_{x,refri,out}}{\dot{E}_{x,refri,in}} = x$$



问题5、工质泵的焓分析具体是如何分析的？

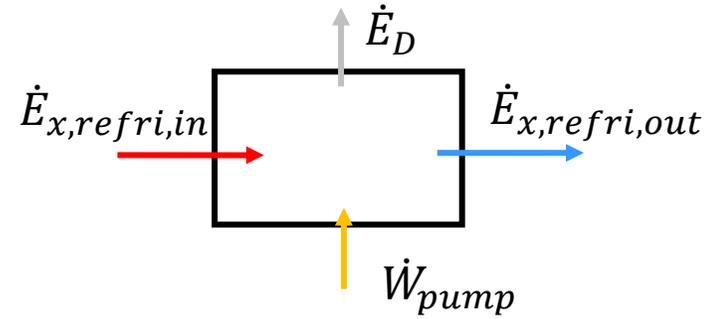
工质泵黑箱模型焓分析：

焓平衡方程： $\dot{E}_{x,refri,in} + \dot{W}_{pump} = \dot{E}_{x,refri,out} + \dot{E}_D$

供给焓： \dot{W}_{pump}

收益焓： $\Delta\dot{E}_{x,refri} = \dot{m}_{refri}(\dot{e}_{x,refri,out} - \dot{e}_{x,refri,in})$

焓效率： $\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_{x,refri,in} - \dot{E}_{x,refri,out}}{\dot{W}_{pump}}$



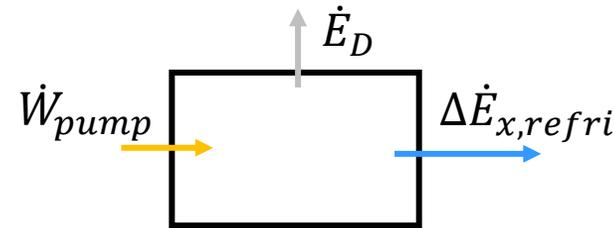
工质泵灰箱模型焓分析：

焓平衡方程： $\dot{W}_{pump} = \Delta\dot{E}_{x,refri} + \dot{E}_D$

供给焓： \dot{W}_{pump}

收益焓： $\Delta\dot{E}_{x,refri}$

焓效率： $\eta_{ex} = \frac{\Delta\dot{E}_{x,refri}}{\dot{W}_{pump}}$



Exergy analysis: Pump			
制冷剂侧			
e_in	e_out	ΔE_{refri}	W_in
kJ/kg	kJ/kg	kW	kW
36.00973	37.7893325	1.779607	2.3191518

工质泵				
Ed (kW)	Ef (kW)	Ep (kW)	设备焓效率	焓损失系数
0.539545	2.319152	1.779607	76.74%	0.01202232

问题6、膨胀机的焓分析具体是如何分析的？

膨胀机黑箱模型焓分析：

焓平衡方程： $\dot{E}_{x,refri,in} = \dot{E}_{x,refri,out} + \dot{W}_{sh} + \dot{E}_D$

供给焓： $\Delta\dot{E}_{x,refri} = \dot{m}_{refri}(\dot{e}_{x,refri,in} - \dot{e}_{x,refri,out})$

收益焓： \dot{W}_{sh}

焓效率： $\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{sh}}{\dot{E}_{x,refri,in} - \dot{E}_{x,refri,out}}$

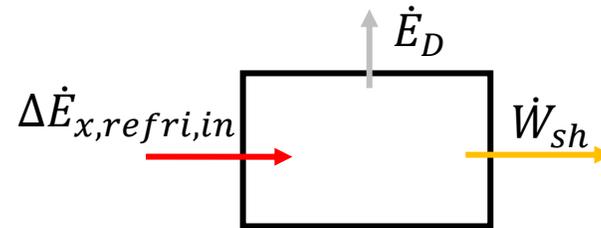
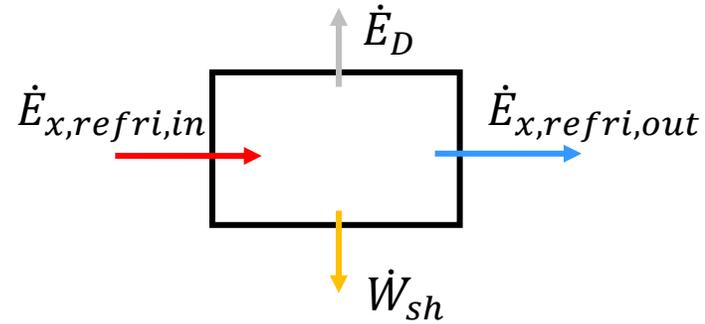
膨胀机灰箱模型焓分析：

焓平衡方程： $\Delta\dot{E}_{x,refri} = \dot{W}_{sh} + \dot{E}_D$

供给焓： $\Delta\dot{E}_{x,refri}$

收益焓： \dot{W}_{sh}

焓效率： $\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{sh}}{\Delta\dot{E}_{x,refri}}$



Exergy analysis: Expander			
制冷剂侧			
e_in	e_out	ΔE_refri	Wout
kJ/kg	kJ/kg	kW	kW
69.86	47.1820594	22.67794	17.3031105

膨胀机				
Ed (kW)	Ef (kW)	Ep (kW)	设备焓效率	焓损失系数
5.37483	22.67794	17.30311	76.30%	0.11976364

问题7、为什么采用不同的压力的饱和蒸汽来加热比只用一个压力的饱和蒸汽来加热可以明显地减少烟损失？（p138）

答：在换热器中，如果不计流体的粘性摩阻，则冷、热流体进行定压过程，流体焓的变化等于热量焓，并且可以在 $\eta_c - Q$ 图上用面积表示出来。

设热流体进、出口状态为1和2，且无黏性摩阻，则 $E_{x,H_2} - E_{x,H_1} = \int_1^2 \delta Q \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) = \int_1^2 \eta_{c,H} \delta Q$ ，以 $\eta_c = 1 - \frac{T_0}{T}$ 为纵坐标，以 Q 为横坐标，由定积分的几何意义， $\int_1^2 \eta_{c,H} \delta Q$ 在 $\eta_c - Q$ 图上可以用面积表示。

同理，冷流体进、出状态3和4， $E_{x,H_4} - E_{x,H_3} = \int_3^4 \delta Q \left(1 - \frac{T_0}{T_L}\right) = \int_3^4 \eta_{c,L} \delta Q$ 。

换热过程的焓平衡方程为 $E_{x,H_1} - E_{x,H_2} = E_{x,H_4} - E_{x,H_3} + E_{x,L}$ 。

降低饱和蒸汽压力，即降低了饱和蒸汽的温度，降低了 η_c ，由图可知可降低烟损。

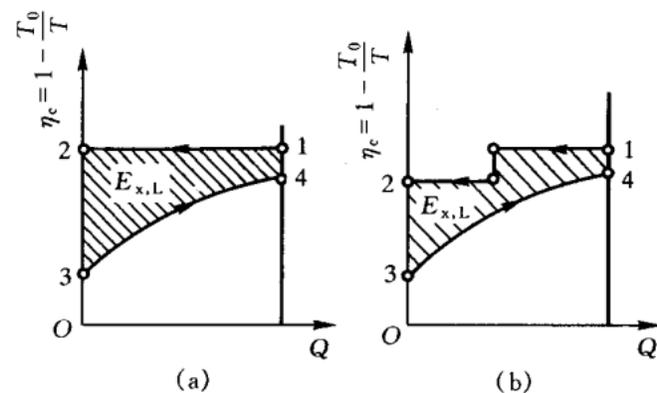


图 8-10 传热过程的改善
(a) 原传热工程；(b) 改善后的传热过程