



廣東工業大學

GUANG DONG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

焓分析在有机朗肯循环系统中应用

汇报内容:

1. 各点热力学参数计算和分析
2. 各子系统焓损失分析
3. 各子系统及朗肯循环系统的焓效率
4. 结果分析及改善环节

第四组

组员: 郑子俊、丘榕芳、钟恺为、陈炜华、梁铸、陈培聪、冯森

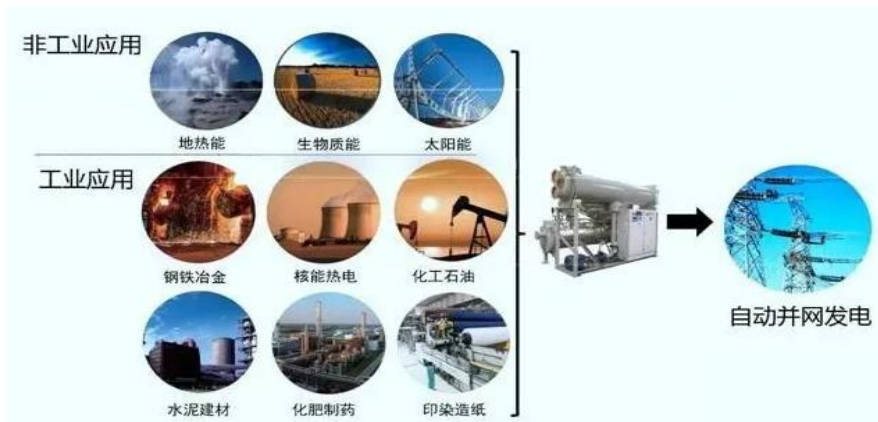


有机朗肯循环简介

在传统朗肯循环中采用**有机工质**(如R113,R134a等)代替水蒸气推动涡轮机做功。

有机工质具有**低沸点**的特性，在低温条件下有机工质被加热即发生蒸发，工质汽化后会获得**较高的蒸汽压力**，推动**膨胀机**做工，从而将**低品位热能**转化为**高品位的机械能和电能**。有机朗肯循环发电技术，是一项将工业生产过程中降低品位余热回收利用转化为高品位电能的**节能减排技术**。

有机朗肯循环的热源



有机朗肯循环作为回收余热废热进而提高总体热效率,实现太阳能、地热能、生物质能等新能源利用的一条有效途径,各国学术界和工业界正积极投入力量进行相关研发工作。

01

工业余热

回收工业余热可减少工业能耗和温室气体的排放。大多数工业过程或电厂排放大量的烟气,温度一般不高于400℃。

02

地热

地热发电利用地热蒸汽或者热水作为热源。所利用的地热水大多在饱和状态附近,温度一般不超过200℃。

03

太阳能

太阳能能量密度低,热源温度不高,采用基于集热技术的有机朗肯循环热电系统,经过集热装置后,温度可以达到300℃。

04

生物质能

生物质能发电采用有机朗肯循环主要是由于在机组规模较小时,有机工质具有更高的涡轮机效率。

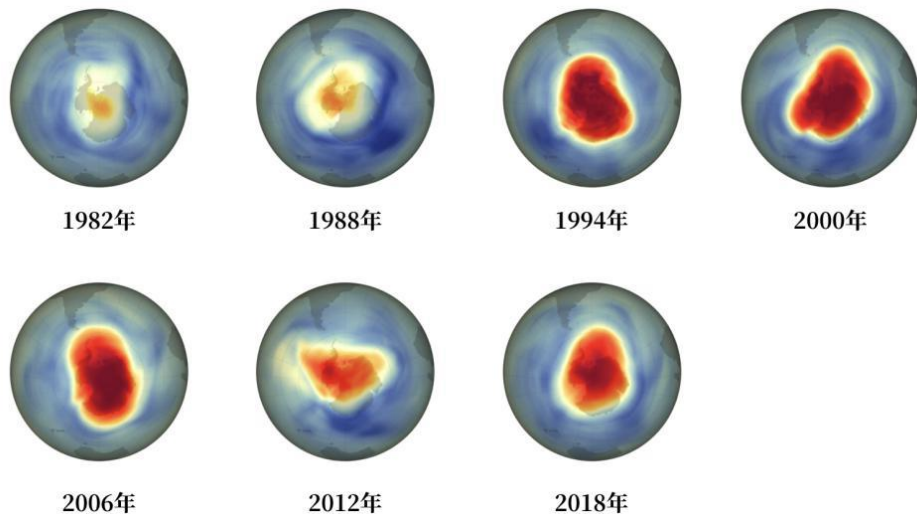


图1 1982年至2018年间，南极上方的臭氧层空洞面积

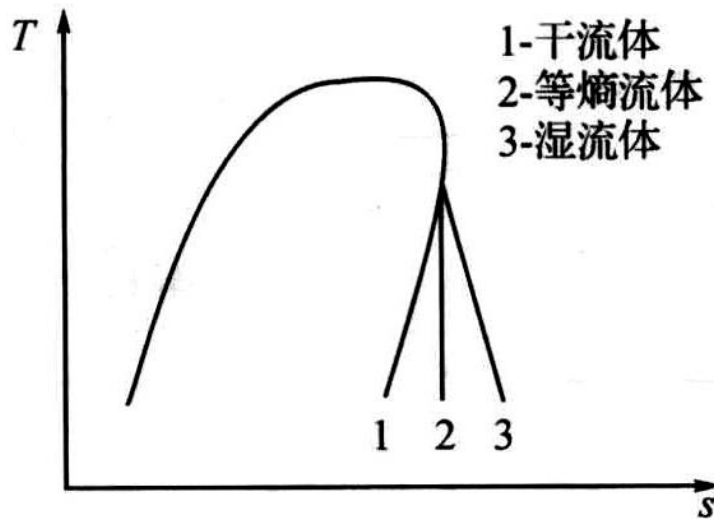


图2 有机朗肯循环工质饱和蒸汽T-S曲线

早在上世纪六十年代就有学者提出利用有机朗肯循环来回收低品位的热能，一开始使用的是氟利昂作为循环工质。由于环境问题日益突出传统CFC工质由于其对于臭氧层的破坏作用而被限制使用。由于我国能源结构的改善，对全球氟利昂减排的贡献约有60%。

根据有机工质的饱和蒸汽曲线 dT/ds 的情况可以将工质分为三种类型：
 $dT/ds > 0$ 为干流体通常具有较大的分子量，如R113、苯等；
 $dT/ds < 0$ 为湿流体分子量一般较小，如水等；
 $dT/ds \rightarrow \pm\infty$ 为等熵流体，如R134a等。

有机朗肯循环过程



广东工业大学
GUANGDONG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

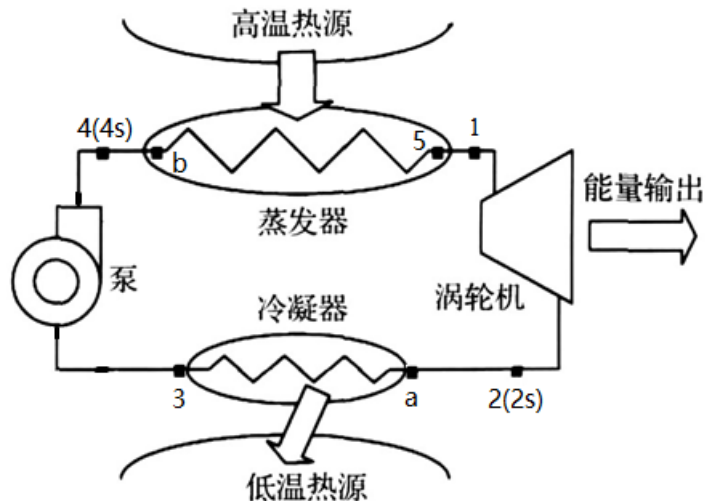


图1 有机朗肯循环示意图

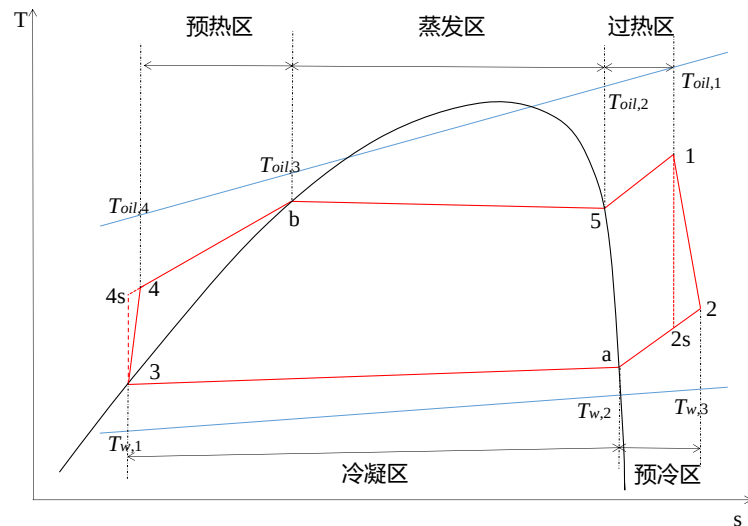


图2 有机朗肯循环热力过程T-S图

热力过程	解释
4-b-5-1	R134a在蒸发器中定压吸热，汽化成饱和蒸汽
1-2s	绝热膨胀过程
2s-a-3	等温等压放热冷凝为饱和液体
3-4s	饱和R134A液体在泵内绝热压缩，再次循环
1-2	实际循环中的膨胀过程
3-4	实际循环中的压缩过程

有机朗肯循环具体应用



广东工业大学
GUANGDONG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

工业余热回收

我国的钢铁、电解铝等产量，以及石油炼制位居世界前列，这些行业每年都要消耗大量的煤炭和电力资源，产生大量的余热，造成能源浪费。采用 ORC 余热发电技术进行低温余热发电，可回收蒸气减压损失能量。

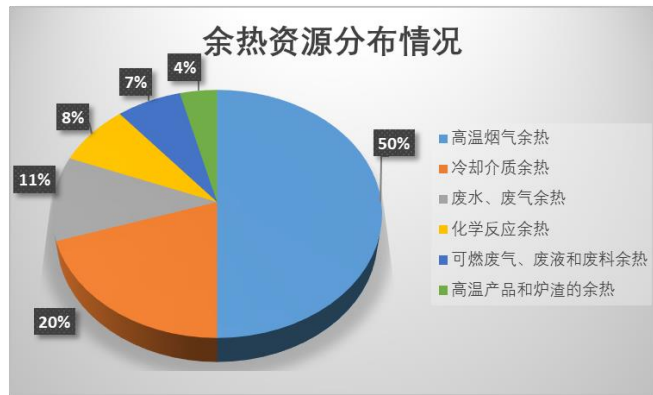


图 余热分布情况

地热资源利用

我国拥有丰富的地热资源，目前开发出来的大部分中低温地热资源主要用来给人们提供生活热水，只有少部分用来发电，可以采用OCR技术进行地热发电；

图 地热发电厂



有机朗肯循环具体应用



广东工业大学
GUANGDONG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

太阳能发电领域

利用**太阳能集热装置**或是**太阳池**，在合理设计相关参数的情况下，可以使高温热源（热水）的温度长时间保持在**70°C以上**，那么在没有太阳辐射的夜晚或是阴天，ORC发电系统都能长时间有效发电，解决太阳能光伏发电受到时间制约的问题；

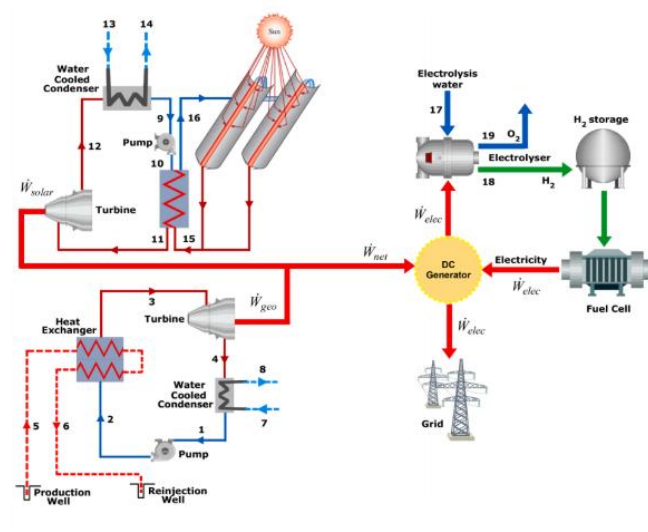
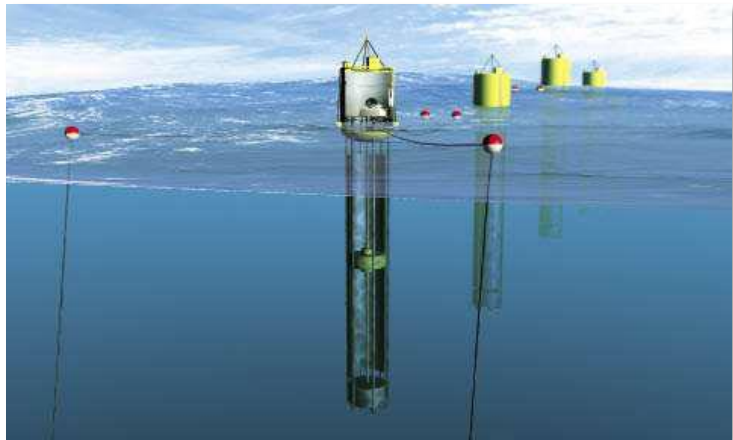


图 太阳能发电示意图

海洋温差发电

海水温差大蕴涵的能量是巨大的，**能量用之不尽**，只要选取适当的**有机工质**，合理设计ORC系统，就可以充分利用蕴涵在海水中的能量，把它变成**高品位的电能**；

图 海洋温差发电模拟图



有机朗肯循环具体应用



广东工业大学
GUANGDONG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

利用硫酸厂余热的ORC系统

美国莫来斯顿联合化学公司设计、安装一座利用工业余热的千瓦朗肯循环发电厂。该热力系统与设计参数见图5。余热流是离开浓酸吸收塔的一部分硫酸，温度为388.75K，通过锅炉与加热器使有机工质被加热与蒸发，通入汽轮机做功，经冷凝由泵打回到加热器，完成一个封闭循环。硫酸的流量取决于满足500千瓦汽轮机所需要的热量。设计时冷却水温取302.65K。

冷却水温随季节而变化，系统的功率也将在460~620kW变化。总的热效率在9.7~13%，所选的有机工质为G133A，在37.7~93.3℃范围内，蒸汽的饱和线部分基本上平行于等熵线，因此膨胀机进口只需要很小的过热，而在膨胀终了时仍会有少量过热，这利于提高效率。

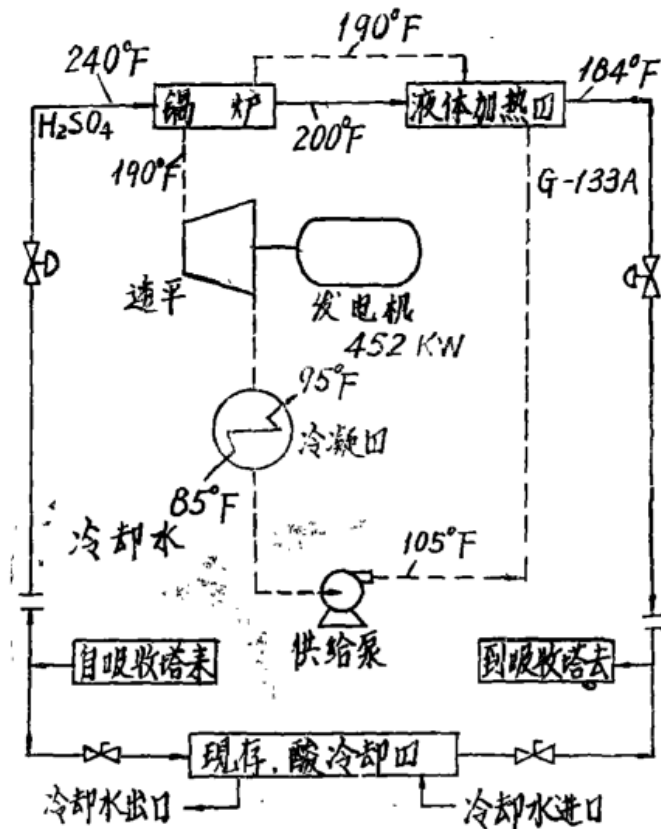


图 化工厂能量回收热力系统图

有机朗肯循环具体应用



广东工业大学
GUANGDONG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

〔炼油、化工厂750~2500千瓦ORC系统〕

美国机械技术公司(MTI)针对炼油、化工厂工艺装置余热源的**平均温度(121~221℃)**和可用以发电的余热规模(**1500~3500kW**)，设计了以**R-113为工质**的ORC系统。

膨胀机的设计，按照简单、可靠、运转期长、辅助系统少及部件通用性大等要求来进行。在结构上采取如图所示的方案。机组的主要参数如下：

透平：**单级径向式透平**。

选用R-113为工质的优点是，**无毒、不燃烧、无腐蚀性、热稳定性好(<149℃)**典型的朗肯循环运行范围是：

蒸发器：**82~127℃，284.1~788.1kPa**；

冷凝器：**27~43℃，47.6~82.7kPa**。

发电机：感应式（4160伏，3相）。

标准功率设计范围：**751~2500千瓦**。当需要**输出2500千瓦以上**的电功率时，可将二个以上的机组并联或串联布置运行。

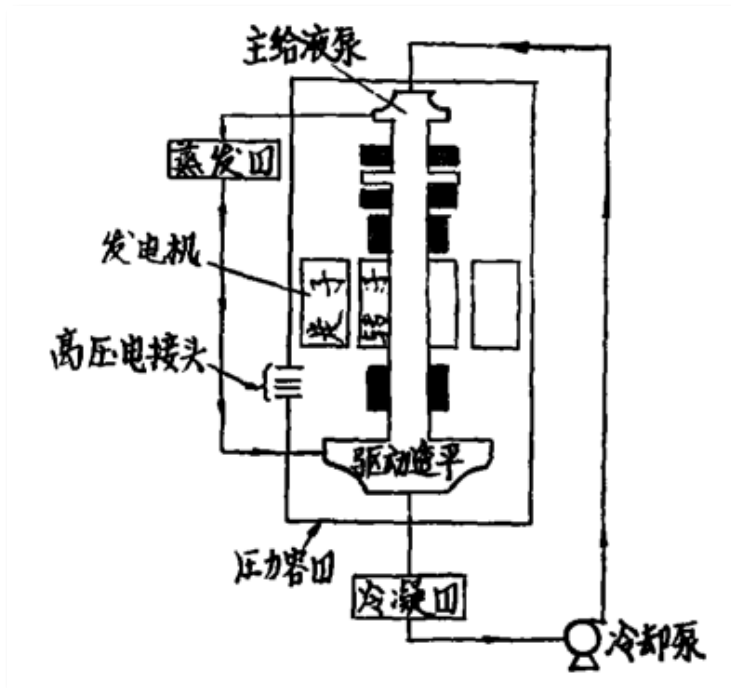


图 化工厂能量回收热力系统图

有机朗肯循环具体应用



广东工业大学
GUANGDONG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

〔用油-氟里昂来进行余热能量回收的ORC系统〕

所谓油-氟里昂ORC系统，就是采用耐热性高的多元醇脂油作中间介质来回收余热，它与R-113相混，直接进行热交换，而后仅R-113蒸发和进入膨胀机做功。在氟里昂中混入耐热油后，耐热分解的能力显著增高，可以回收200~400℃的中温余热。在水泥厂中，出窑的高温水泥块（1300~1400℃）被空气冷却。相反，空气被加热，温度可达250~300℃。在这种排气烟道中可安置油加热器来进行余热能量回收（见图1），从而通过ORC系统来实现发电。日本住友水泥公司已利用水泥生产过程的余热来进行发电，发电量为3000千瓦，发电效率达12.6%，其热力系统及参数见图2。

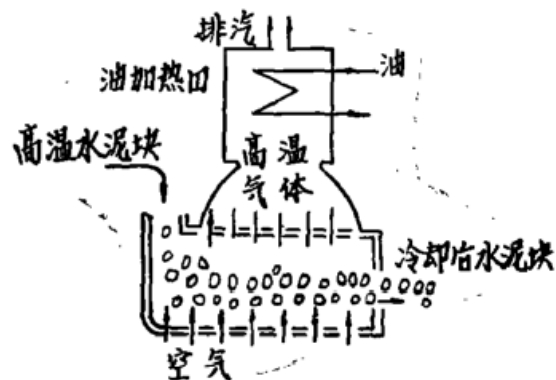


图1 利用油加热器进行余热回收

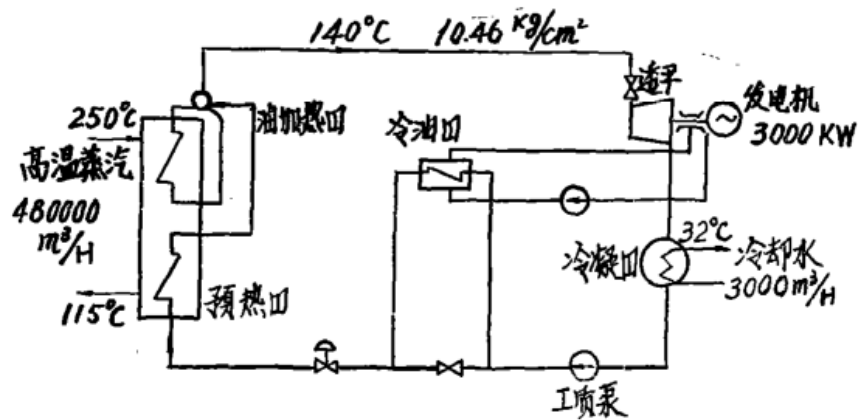
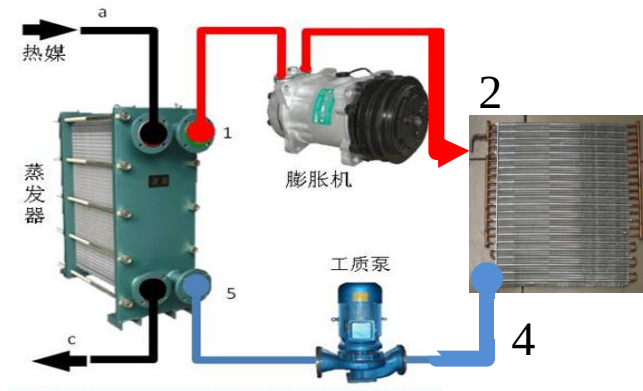


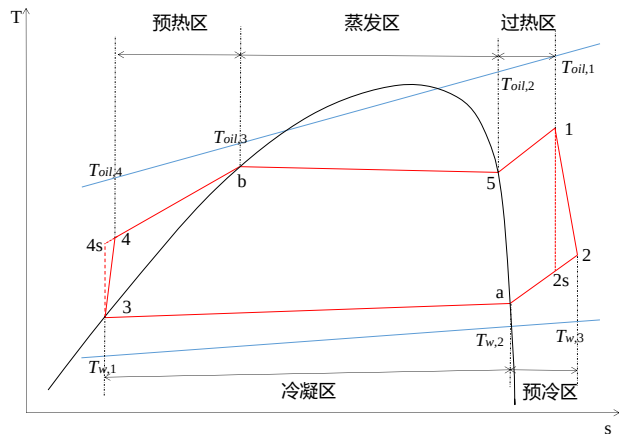
图2 油氟里昂ORC热力系统

1.1 初始条件及计算要求



已知条件:

- 热源: 100°C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
- 冷却水进出口温度: 20/25°C
- 膨胀机和泵等熵效率均为: 75%



工质的朗肯循环

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

1.2各点热力学参数计算和分析



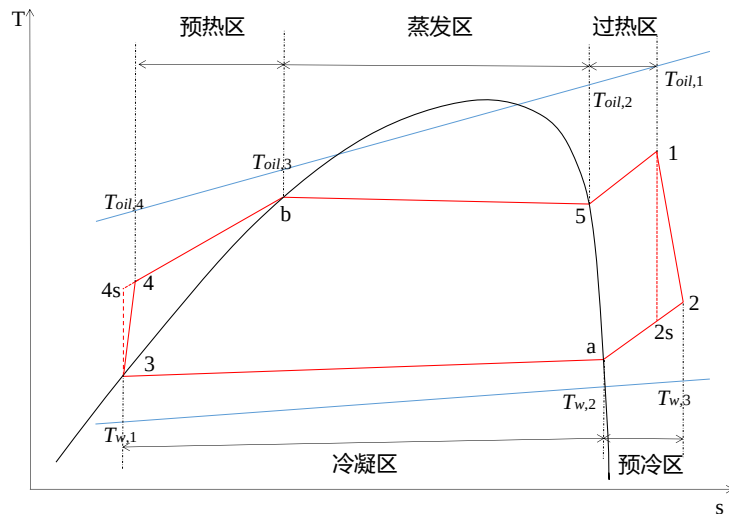
热力过程	解释
4-b-5-1	R134a在蒸发器中定压吸热，汽化成饱和蒸汽
1-2s	绝热膨胀过程
2s-a-3	等温等压放热冷凝为饱和液体
3-4s	饱和R134A液体在泵内绝热压缩，再次循环
1-2	实际循环中的膨胀过程
3-4	实际循环中的压缩过程

基本参数计算方法：

- 1.R134a的饱和气液体点直接通过refprop查得；
- 2.其余点通过各个热力过程，如等压、绝热、等温等过程，确定两个参数点查得；
- 3.泵和膨胀机的等熵效率取0.75。

各点基本参数						
工质状态	对应点	压力Mpa	比容m ³ /kg	温度K	熵kJ/(kg*K)	焓kJ/kg
空气	0	0.1	0.001003	298.15	0.3664	104.87
过热蒸汽	1	2.9258	0.006084	363.15	1.7060	438.15
过热蒸汽*	2s	0.8870	0.022757	308.15	1.7060	415.10
饱和蒸汽点	a(sat)	0.8870	0.023033	308.15	1.7128	417.19
饱和液体点	3(sat)	0.8870	0.000857	308.15	1.1670	249.01
过冷液体*	4s	2.9258	0.000850	309.44	1.1670	250.74
饱和液体点	b(sat)	2.9258	0.001127	358.15	1.4104	332.22
饱和蒸汽点	5(sat)	2.9258	0.005499	358.15	1.6771	427.76
过热蒸汽	2($\eta=0.75$)	0.8870	0.023558	311.51	1.7246	420.86
过冷液体	4($\eta=0.75$)	2.9258	0.000851	309.84	1.1689	251.32
冷却水	进冷却水	0.8870	0.001001	293.15	0.2963	84.75
	出冷却水	0.8870	0.001003	298.15	0.3670	105.66

**红色表示通过这两个参数查表得其他参数



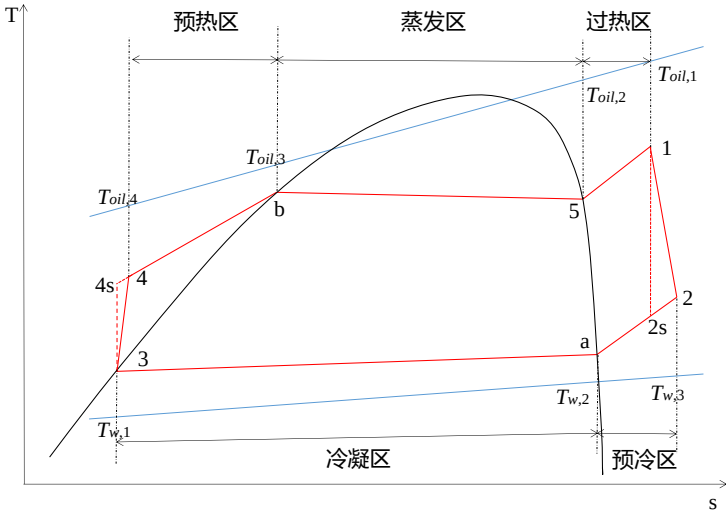
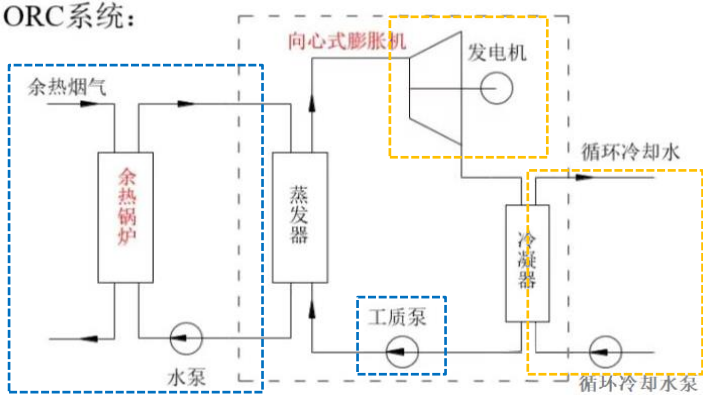
工质朗肯循环T-S图

2.1各子系统焓损失分析

各点焓值计算		
状态点	计算公式	计算结果/kJ
1	$E_{x,i} = h_i - h_0 - T_0 \cdot (s_i - s_0)$	-66.12
2		-88.95
3		-94.56
4		-92.82

输入焓	计算公式	计算结果/kJ
热源	$E_{x,Q} = (h_1 - h_4) \cdot (1 - T_0 / T)$	37.55
供水泵	$W_p = (h_{4s} - h_3) / \eta_p$	2.31
总输入焓	$E_{x,sys} = E_{x,Q} + W_p$	39.86

输出焓	计算公式	计算结果/kJ
冷却水	$E'_{x,Q} = h_{w2} - h_{w1} - T_0 \cdot (s_{w2} - s_{w1})$	-0.17
膨胀机	$W_T = (h_1 - h_2) \cdot \eta_T$	17.29



2. 2各子系统焓损失分析



各系统	计算公式			
	焓损失	焓效率	焓损率	焓损系数
蒸发器	$E_{x,Q} + E_{x,4} - E_{x,1}$	$\frac{E_{x,1} - E_{x,4}}{E_{x,Q}}$	$\frac{\Delta E_{x,eva}}{\Delta E_{x,sys}}$	$\frac{\Delta E_{x,eva}}{E_{x,sys}}$
膨胀机	$E_{x,1} - E_{x,2} - W_T$	$\frac{W_T}{E_{x,1} - E_{x,2}}$	$\frac{\Delta E_{x,exp}}{\Delta E_{x,sys}}$	$\frac{\Delta E_{x,exp}}{E_{x,sys}}$
冷凝器	$E_{x,2} - E_{x,3} - E'_{x,Q}$	/	$\frac{\Delta E_{x,con}}{\Delta E_{x,sys}}$	$\frac{\Delta E_{x,con}}{E_{x,sys}}$
供液泵	$E_{x,3} + W_P - E_{x,4}$	$\frac{E_{x,4} - E_{x,3}}{W_P}$	$\frac{\Delta E_{x,p}}{\Delta E_{x,sys}}$	$\frac{\Delta E_{x,p}}{E_{x,sys}}$
总系统	$\Delta E_{x,eva} + \Delta E_{x,exp} + \Delta E_{x,p} + \Delta E_{x,con}$	$\frac{W_T}{E_{x,sys}}$	1	$1 - \eta_{sys}$

3. 各子系统及朗肯循环系统的焓参数



各子系统	计算结果			
	焓损失(kJ)	焓效率	焓损率	焓损系数
蒸发器	10.854954	0.710935	0.477344	0.272337
膨胀机	5.545590	0.757125	0.243866	0.139132
冷凝器	5.773265	/	0.253878	0.144844
供液泵	0.566485	0.754414	0.024911	0.014212
总系统	22.740294	0.433721	1.000000	0.566279

分析:

由计算可知，在该循环系统中，**蒸发器**的焓损率最高，焓效率最低，蒸发器在系统中起到提供热量的作用，类似于锅炉，而大型电站锅炉的焓效率约为40%，较大的工业锅炉约为30%，相对而言蒸发器的**焓效率不低**，造成焓效率偏低的主要原因是热蒸汽的传热温度较低、温差传热、中间换热。

改善:

- 1.调整热蒸汽的**进口速度**: 当工质进口速度为系统**最小速度**, 热空气进口速度为系统**最大速度**时, 蒸发器**换热效率最高**;
- 2.调整运行的工质: **待选工质临界温度越高, 蒸发器换热效率越好**; 所有待选工质中换热效果: R245fa > 正丁烷 > 异丁烷 > R134a > R143a > R125;
- 3.改进换热器的**换热性能**, 对于管壳式换热器, 可以通过**逐步增加换热管支管的数量来改变换热器流道的数量**; 对于板式换热器, 通过**增加工质在板间空腔中的流程来改变板式换热器流道的数量**。

资料收集：冯森、钟恺为

计算分析：陈炜华、陈培聪

PPT制作：丘榕芳、梁铸

汇报：郑子俊

- [1] 柯玄龄,梁秀英.有机工质朗肯循环(ORC)在中、低温余热能量回收中的应用[J].汽轮机技术,1985(05):58-69.
- [2] Alireza Javanshir, Nenad Sarunac Thermodynamic analysis of a simple Organic Rankine Cycle[J] Energy, 2017.
- [3] Nadim Chakroun. Organic Rankine Cycle Analysis: Finding the Best Way to Utilize Waste Heat[J]. Journal of Purdue Undergraduate Research,2012.
- [4] Vincent Lemort, Sébastien Declaye, Sylvain Quoilin. Organic Rankine Cycles Including Fluid Selection[J]. Handbook of Clean Energy Systems, 10.1002/9781118991978.hces013,2015.
- [5] 刘峻,陈捷,井泓澎,王健,郑敏捷,姜未汀,潘卫国.有机朗肯循环系统复合温差发电技术经济性研究[J].上海节能,2022(09):1184-1188.
- [6] 罗向龙,徐乐,谭立锋,陈颖.R245fa有机朗肯循环余热发电系统火用分析[J].节能技术,2012,30(02):131-135+141.



感谢您的观看

Thank you for your listening!