

气液分离双压有机朗肯循环系统的热力学分析及优化

梁志辉¹, 罗向龙¹, 陈颖², 莫松平²

(1. 广东工业大学 材料与能源学院, 广东 广州 510006; 2. 广东省功能软凝聚态物质重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要: 综合非共沸工质和汽液分离技术的优势, 提出一种非共沸工质的 DSORC(有机朗肯循环) 汽液分离双压流程系统, 并建立非共沸工质 DSORC 的参数优化模型, 优化变量为蒸发温度、混合工质浓度和汽液分离干度, 目标函数为热力学第二定律效率最大; 采用遗传算法求解建立的参数优化模型; 通过案例分析得到了最优运行参数并与其它形式 ORC 进行了比较。结果表明: 非共沸工质 DSORC 的第二定律效率比非共沸工质基本 ORC(BORC) 提高 14.1% ~ 17.2%, 相比纯工质 DSORC 第二定律效率提高 5.3% ~ 8.7%; DSORC 的第二定律热效率随热源的入口温度提高成线性增长。

关键词: 有机朗肯循环; 气液分离; 非共沸混合工质; 热力学; 遗传算法; 优化

中图分类号: TK11 文献标识码: A

符号说明

- C ——质量分数比;
- C_p ——水的定压比热/ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
- e ——比焓/ $J \cdot kg^{-1}$
- E ——焓流量/ w
- h ——比焓/ $J \cdot kg^{-1}$
- I ——不可逆损失/ w
- m ——质量流量/ $kg \cdot s^{-1}$
- P ——压力/ Pa
- s ——比熵/ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
- T ——温度/ K
- W ——功/ w
- x ——干度
- y ——第一组分质量分数
- η ——效率
- 下标
- 0——环境状态
- 1——热效率
- 2——第二定律效率
- 4——蒸发器入口状态
- cond——冷凝器
- conv——转换
- evap, evap1, evap2——蒸发器、低高压段蒸发器
- ext——外部

- h——热源
- in——入口
- isen——等熵过程
- l——冷源
- N——分段数
- net——净
- out——出口
- p——换热器夹点
- pump——泵
- tran——传递
- turb, turb1, turb2——膨胀机、低、高压段膨胀机
- w——工质

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.04.005

引言

ORC(有机朗肯循环)发电系统被认为最有潜力的利用低温热源的技术之一。它利用低品位的可再生能源和回收工业余热, 缓解能源短缺和环境污染。

当前 ORC 发电系统的研究主要集中在工质的优选、系统、部件参数的优化和循环流程的优化方面。在工质选择方面, 文献[1]考虑了 35 种工质的稳定性、环境影响、安全性和经济性, 详细分析了潜热、密度、比热和过热度的影响; 文献[2]从理论上研究了工质的导热系数、粘度等性质与 ORC 系统的经济性、热力性能的关系; 在系统运行参数优化方面, 文献[3]采用遗传算法对基本 ORC、带回热的 ORC 和双级带回热的 ORC 进行了参数优化, 以热效率和焓效率为目标, 得到多种工质的最佳运行条件; 文献[4]则对纯工质和非共沸工质 ORC 的焓效率和发电成本进行优化, 结果表明正戊烷焓效率最高; 在循环流程优化方面, 文献[5]对基本 ORC 和双压 ORC 作了比较, 由于双压 ORC 与热源更加匹

收稿日期: 2015-06-25; 修订日期: 2015-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51476037); 广州市珠江科技新星项目(2013J2200096); 广州科技计划(13ZK0204)

作者简介: 梁志辉(1988-), 男, 广东梅州人, 广东工业大学硕士研究生。

配,减少了传热过程的焓损失,最终焓效率、净输出功率均高于基本 ORC;文献[6]比较了 R125 工质的跨临界 ORC 和亚临界 ORC 的净输出功率。

非共沸混合工质的相变温度滑移特性与冷热源的温度变化更匹配,可以提高系统输出功率和效率。文献[7]针对使用非共沸工质高温热源 ORC 系统进行了热效率的分析;文献[8]对低温太阳能 ORC 系统进行了实验研究,结果显示非共沸混合工质输出功率、热效率比纯工质高;文献[9]对使用非共沸工质的 ORC 系统的第二定律效率及各个部件的焓损失进行了分析,结果显示相比于纯工质,非共沸工质第二定律效率提高 7.1% ~ 14.2%。

在冷凝过程中进行气液分离,使已冷凝液体不再流经剩余流程,可以减小其在换热器中的压降,文献[10]对带有气液分离功能的冷凝器进行了实验研究表明其压降比常规冷凝器小 42.8% ~ 68.4%;而文献[11]对带气液分离器的非共沸工质制冷系统研究表明换热过程的焓效率得到了较大提高。

本研究提出了非共沸混合工质分液双压 DS-ORC(双压有机朗肯循环)流程,建立 DSORC 的热力学参数模型,并采用遗传算法求解,案例分析中对多种工质组合的蒸发温度、工质浓度比和气液分离干度进行优化,并与 BORC(基本 ORC)、纯工质 DS-ORC 进行了对比,验证 DSORC 的优越性。

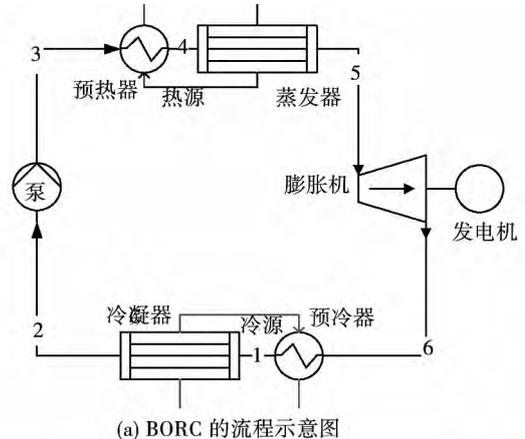
1 非共沸工质气液分离双压 ORC 系统

图 1 给出了基本 ORC 流程图(由冷凝器、蒸发器、泵和膨胀机组成)及相应 $T-s$ 图。工质在冷凝器出口呈饱和液态,进入工质泵加压,然后在蒸发器中吸收热源的热量变成饱和蒸汽,高压的饱和蒸汽进入膨胀机做功并带动发电机发电,做功后的乏汽进入冷凝器与冷源换热,完成一个循环。

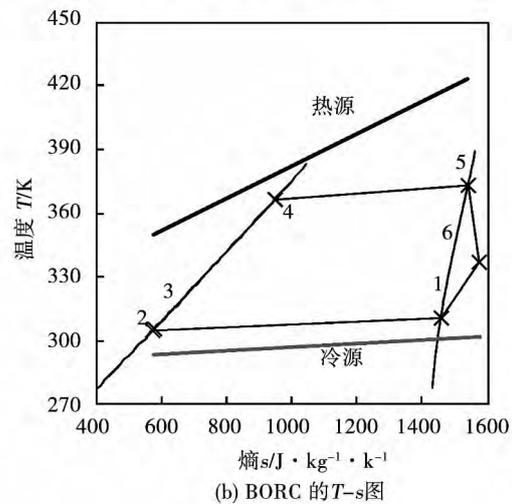
图 2 给出了非共沸混合工质 DSORC 流程图和 $T-s$ 图。由图 2(a) 可以看出,DSORC 在蒸发器 1 出口增加一个气液分离器(蒸发器 1 出口干度小于 1),其中液体进入泵 2 再次加压,然后在蒸发器 2 中蒸发,经过膨胀机 2 膨胀做功,而蒸发器 1 出口的气体则直接进入膨胀机蒸发器 1 做功。从膨胀机 1 和膨胀机 2 排出的工质混合后进入预冷器和冷凝器冷却。热源与工质逆流,先在高压蒸发器中换热之后

进入低压蒸发器换热。

本研究分别建立非共沸混合工质 DSORC、纯工质 DSORC 和非共沸工质 BORC 的热力学参数优化计算模型,并对 3 种形式的 ORC 进行对比。



(a) BORC 的流程示意图



(b) BORC 的 $T-s$ 图

图 1 BORC 的流程图和 $T-s$ 图

Fig. 1 Schematic diagram and $T-s$ diagram of BORC

2 ORC 参数优化模型

2.1 蒸发器

假定所有的循环都是亚临界的,忽略压降和换热器对环境的散热。对于热源侧换热器,为了得到夹点温差位置,将蒸发器分为 N 段,每段的换热量相同。实际计算过程中,当 N 大于 20 时,分段数的变化对输出功率的影响就很小了。

对于图 1(a) 中的蒸发器,由能量平衡得式(1)、式(2)和式(3)为蒸发器进出口条件,蒸发器夹点温差为所有分段中热源与工质的最小温差,如

式(4)所示。

$$m_h \cdot C_p \cdot (T_{h,n}^{evap} - T_{h,n-1}^{evap}) = m_w \cdot (h_{w,n}^{evap} - h_{w,n-1}^{evap}) \quad (1)$$

$$T_{h,1}^{evap} = T_{h,out}^{evap}, T_{h,N}^{evap} = T_{h,in}^{evap} \quad (2)$$

$$h_{w,1}^{evap} = h_{w,in}^{evap}, h_{w,N}^{evap} = h_{w,out}^{evap} \quad (3)$$

$$T_p = \min(T_{h,n}^{evap} - T_{w,n}^{evap}) \quad (4)$$

对于图 2(a) 中的蒸发器 1,其蒸发器模型跟上述相似,但工质出口不是露点状态,是干度 x 状态,所以式(3)改为

$$h_{w,1}^{evap} = h_{w,in}^{evap}, h_{w,N}^{evap} = h_{w,x}^{evap} \quad (5)$$

对于图 2(a) 中的蒸发器 2,需将式(1)修改为下式,其余不变。

$$m_h \cdot C_p \cdot (T_{h,n}^{evap} - T_{h,(n-1)}^{evap}) = m_w \cdot (1-x) \cdot (h_{w,n}^{evap} - h_{w,n-1}^{evap}) \quad (6)$$

2.2 冷凝器

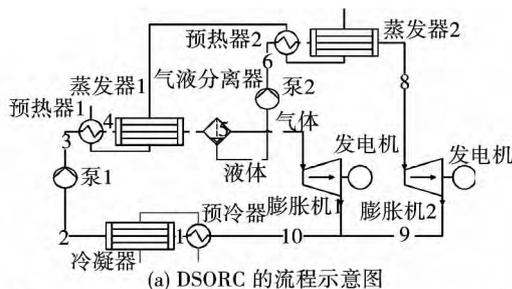
对于冷凝器,其模型与式(1) - 式(4)相似

$$m_l \cdot C_p \cdot (T_{l,n}^{cond} - T_{l,(n-1)}^{cond}) = m_w \cdot (h_{w,n}^{cond} - h_{w,n-1}^{cond}) \quad (7)$$

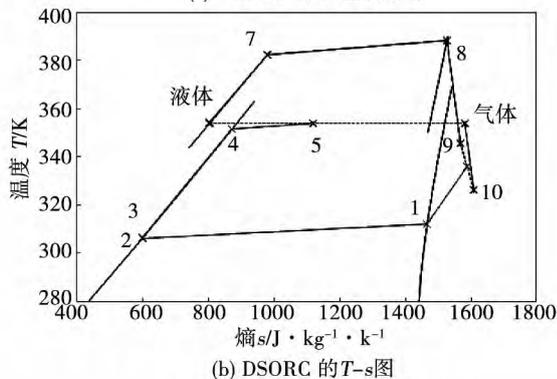
$$T_{l,1}^{cond} = T_{l,in}^{cond}, T_{l,N}^{cond} = T_{l,out}^{cond} \quad (8)$$

$$h_{w,1}^{cond} = h_{w,in}^{cond}, h_{w,N}^{cond} = h_{w,out}^{cond} \quad (9)$$

$$T_p = \min(T_{w,n}^{cond} - T_{l,n}^{cond}) \quad (10)$$



(a) DSORC 的流程示意图



(b) DSORC 的 $T-s$ 图

图 2 非共沸工质 DSORC 的流程图和 $T-s$ 图

Fig. 2 Schematic diagram and $T-s$ diagram of DSORC using zeotropic mixtures as working fluids

2.3 工质泵

对于图 1(a) 的工质泵和图 2(a) 中低压段的工质泵 1,其消耗功为

$$W_{pump} = m_w \cdot \frac{h_{pump,out}^{isen} - h_{pump,in}}{\eta_{pump}} \quad (11)$$

对于图 2(a) 中的工质泵 2,其流量与泵 1 处不同,改为:

$$W_{pump} = m_w \cdot (1-x) \cdot \frac{h_{pump,out}^{isen} - h_{pump,in}}{\eta_{pump}} \quad (12)$$

2.4 膨胀机

对于图 1(a) 中的膨胀机,其做功为:

$$W_{turb} = m_w \cdot \eta_{turb} \cdot (h_{turb,in} - h_{turb,out}^{isen}) \quad (13)$$

对于图 2(a) 中的膨胀机 1 和膨胀机 2 应分别改为:

$$W_{turb} = m_w \cdot (1-x) \cdot \eta_{turb} \cdot (h_{turb,in} - h_{turb,out}^{isen}) \quad (14)$$

$$W_{turb} = m_w \cdot x \cdot \eta_{turb} \cdot (h_{turb,in} - h_{turb,out}^{isen}) \quad (15)$$

2.5 效率

热效率是净输出功与循环吸热量之比,表征热量与功的转换效率。

$$\eta_1 = \frac{W_{net}}{m_h \cdot C_p \cdot (T_{h,in} - T_{h,out})} \quad (16)$$

第二定律效率定义为净输出功与热源入口焓之比

$$\eta_2 = \frac{W_{net}}{E_{h,in}} \quad (17)$$

焓定义为:

$$e = h - h_0 - T_0 \cdot (s - s_0) \quad (18)$$

以环境温度为基准点,则热源入口状态焓即为最大可用功。

$$E_{h,in} = m_h \cdot (h_{h,in} - h_0 - T_0 \cdot (s_{h,in} - s_0)) \quad (19)$$

由上式可看出热源入口温度一定, $E_{h,in}$ 不变,则 η_2 最大即净输出功最大。

为了详细地分析 η_2 的影响因素,将 η_2 进一步地分解为外部效率、传递效率和转换效率之积。式(21)为外部效率是热源释放焓与热源的最大可利用功之比,式(23)为传递效率是换热过程热源释放焓与工质吸收焓之比,式(24)表示换热器的焓效率,而转换效率是循环的净输出功与工质吸收焓之比,工质吸收的焓一部分用于做功,一部分在其它

部件中损失了。

$$\eta_2 = \eta_{ext} \cdot \eta_{tran} \cdot \eta_{conv} \quad (20)$$

$$\eta_{ext} = \frac{E_{h, in} - E_{h, out}}{E_{h, in}} \quad (21)$$

$$E_{tran} = m_w \cdot e_{w, out} - m_w \cdot e_{w, in} \quad (22)$$

$$\eta_{tran} = \frac{E_{tran}}{E_{h, in} - E_{h, out}} \quad (23)$$

$$\eta_{conv} = \frac{W_{net}}{E_{tran}} \quad (24)$$

2.6 优化的目标函数及优化变量

以第二定律效率最大作为 ORC 系统的优化目标, 当第二定律效率最大时, 净输出功也最大(式(17)) 因此目标函数选为净输出功最大。假定冷凝器出口为饱和液态、蒸发器 2 出口为饱和气态, 在已知冷、热源入口温度及流量和夹点温差 T_p 的条件下, 非共沸工质 DSORC 的变量取蒸发器 1 入口温度 T_4 (即 $T-s$ 图中点 4)、混合工质中第一组分的质量分数 y 和蒸发器 1 出口干度 x , 则目标函数如式(25) 所示。

$$\max W_{net} = F(T_4, y, x) \quad (25)$$

同样, 对非共沸工质 BORC 优化变量为 T_4, y , 对纯工质 DSORC 以 T_4, x 为变量。

$$\max W_{net} = F(T_4, y) \quad (26)$$

$$\max W_{net} = F(T_4, x) \quad (27)$$

3 求解算法

遗传算法具有全局搜索能力, 对非线性模型有很好的求解效果, 同时通用性很强, 对不同问题可采用同一个程序。这里采用单种群二进制编码的遗传算法。根据变量取值的上下限和精度将优化变量编码成二进制串, 以二进制串代表变量的值, T_4 的精度为 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$, y 和 x 的精度为 0.01 。种群大小为 25。交叉方式为双点交叉, 概率 0.8, 变异是改变某个二进制位的值, 变异概率为 0.01。适应度采用基于排序的非线性适应度映射, 较大的目标函数值分配到的适应度较高。基于适应度的大小, 通过轮盘赌的方式选择下一代。采用精英保留机制, 将上一代中的 2 个最优个体取代下一代中的最差 2 个个体。终止代数数为 100 代。

4 实例分析

4.1 备选工质及外部条件

考虑效率、环境特性, 最终选用的工质为(文献[9]): WF1(R245fa/异戊烷)、WF2(异戊烷/己烷)、WF3(异戊烷/异己烷)、WF4(异戊烷/环己烷)、WF5(异丁烷/异戊烷)、WF6(戊烷/己烷)、WF7(R245fa/戊烷) 和 WF8(R245fa/R365mfc)。外部条件如表 1 所示。所有的物性参数使用 NIST 数据库计算(文献[12])。

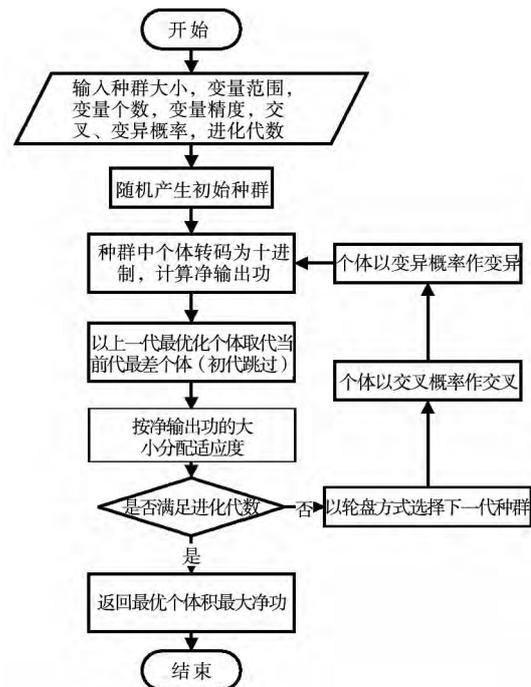


图 3 遗传算法示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Genetic algorithm

表 1 ORC、热源和冷源参数

Tab. 1 ORC, heat source and heat sink parameters

热源/水	
热源入口温度 $T_{h, in} / ^\circ\text{C}$	150
热源压力 P_h / kPa	50
热源质量流量 $m_h / \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	20
冷源水	
冷源入口温度 $T_{l, in} / ^\circ\text{C}$	20
冷源质量流量 $m_l / \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	150
蒸发器夹点温差 T_p / K	10
冷凝器夹点温差 T_p / K	10
泵等熵效率 $\eta_{pump} / \%$	60
膨胀机等熵效率 $\eta_{turb} / \%$	75
环境温度 $T_0 / ^\circ\text{C}$	25

4.2 优化结果

4.2.1 效率对比

应用遗传算法对非共沸工质 DSORC 和 BORC 进行优化,最优结果比较如表 2 所示,其中 DSORC 的 η_2 是在最优 T_4, γ, x 下取得的最大值, BORC 的 η_2 是在最优 T_4, γ 下取得的最大值, η_1 为 η_2 最大时对应的热效率。相同的非共沸混合工质, DSORC 的 η_1 都比 BORC 的 η_1 稍高, 最大提高 1.7%, 而 DSORC 比 BORC 的 η_2 提高 14.1% ~ 17.2%。说明增加气液分离采用双压循环后, 系统的净输出功有较大提高。另外, 由图 4 可知, 不同工质组合对效率的影响不大, 不同非共沸混合工质间 η_1 相差 5% 以内, η_2 相差 4% 以内。

表 2 非共沸工质的 DSORC(最优 T_4, γ, x 下) 和 BORC(最优 T_4, γ 下)的效率比较

Tab. 2 Efficiency comparison of zeotropic mixtures in DSORC(at optimal T_4, γ, x) and BORC(at optimal T_4, γ)

工质组合	ORC 形式	η_1 /%	η_2 /%	η_{ext} /%	η_{tran} /%	η_{conv} /%
WF1	BORC	9.70	34.4	81.0	71.6	59.4
	DSORC	9.75	39.3	87.5	87.1	51.6
WF2	BORC	9.52	34.2	81.6	69.9	59.9
	DSORC	9.68	39.9	88.5	75.8	59.5
WF3	BORC	9.45	34.5	82.5	69.5	60.2
	DSORC	9.81	40.2	88.3	77.5	58.8
WF4	BORC	9.58	33.8	80.7	70.0	59.9
	DSORC	9.75	39.6	87.9	75.6	59.7
WF5	BORC	9.41	35.0	83.4	71.4	58.8
	DSORC	9.45	40.1	89.9	82.4	54.2
WF6	BORC	9.54	34.4	81.9	69.3	60.7
	DSORC	10.05	40.3	87.1	77.1	59.9
WF7	BORC	9.88	35.1	81.1	71.3	60.7
	DSORC	9.90	40.1	87.7	87.7	52.1
WF8	BORC	9.72	34.7	81.3	71.1	60.0
	DSORC	9.79	39.7	87.8	78.1	58.0

为分析 DSORC 相比 BORC 的 η_2 提高的原因, 将热源吸热到输出功分为 3 个过程, 热源释放焓, 换热过程工质得到的焓和焓转化为功, 并分别用外部效率 η_{ext} 、传递效率 η_{tran} 和转换效率 η_{conv} 表示, 如表 2 所示。DSORC 比 BORC 的 η_{ext} 提高 6.4% ~

8.9%, 这主要是 DSORC 的工质流量 m_w 更大, 使得热源出口温度 $T_{h, out}$ 更低, 热源释放出更多的焓, 所以外部效率提高。而传递效率 η_{tran} 提高 8.5% ~ 23%, 说明采用双压流程后平均传热温差小, 减少了换热焓损, 即系统得到更多的焓。但是, 转换效率 η_{conv} 降低了 0.7% ~ 14%, 这是因为 DSORC 中工质经过分液后分为两股, 一股流向高压段, 这股流体压差大于 BORC 的压差, η_{conv} 也高; 另一股流向低压段, 其压差小于 BORC 的压差, η_{conv} 也低于 BORC 的 η_{conv} , 结果是 DSORC 低于 BORC 的平均 η_{conv} 。所以可认为 DSORC 相比 BORC 的 η_2 提高主要是因为外部效率和传递效率的提高。

另一方面, DSORC 使用混合工质或纯工质对效率的影响比较如图 4 所示, 其中所有工质的 η_2 均是最优值, η_1 为 η_2 对应的热效率。结果显示热效率基本相同, 而非共沸工质比纯工质的 η_2 提高 5.3% ~ 8.7% (这里纯工质指非共沸工质中 η_2 较高的组分)。同样是 DSORC, 非共沸工质相比纯工质的优势是其温度滑移特性与冷、热源的变化更为匹配, 即平均传热温差较小, 换热焓损失较小, 即效率 η_{tran} 更大, 使得输出功增加。

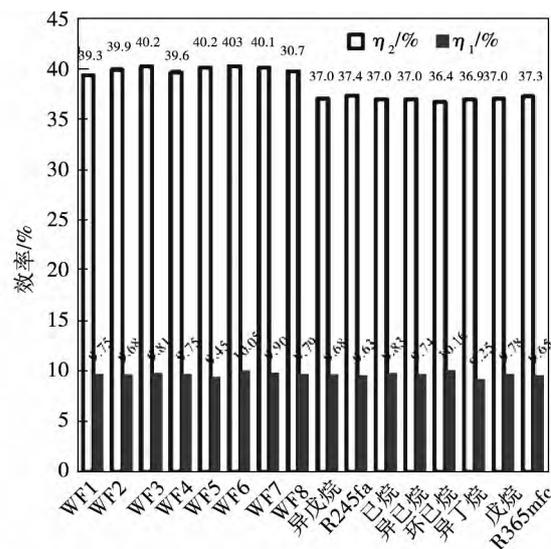


图 4 DSORC 中非共沸工质的(最优 T_4, γ, x 下) 和纯工质(最优 T_4, x 下)的 η_2 和对应的 η_1

Fig. 4 η_2 and η_1 of zeotropic mixtures (at optimal T_4, γ, x) and pure fluids(at optimal T_4, x) in DSORC

由于非共沸工质 DSORC、BORC 和纯工质 DS-ORC 主要差别是在热源换热侧, 所以以 R245fa/异戊烷非共沸工质为对象, 比较热源侧的 $T-H$ 图, 具体如图 5 所示。从图中可直观地看出 R245fa/异戊烷的 DSORC 的热源出口温度最低, 其次为纯工质 R245fa 的 DSORC, 最小为 R245fa/异戊烷 BORC, 但后两者相差较小。另一方面, R245fa/异戊烷 BORC 与热源的换热平均温差最大, R245fa/异戊烷和纯工质 R245fa 的 DSORC 与热源的温差较为接近, 这也说明了非共沸工质 DSORC 相比 BORC 的 η_2 提高相对较大(14.1% ~ 17.2%), 而相比纯工质 DS-ORC 提升较小(5.3% ~ 8.7%)。

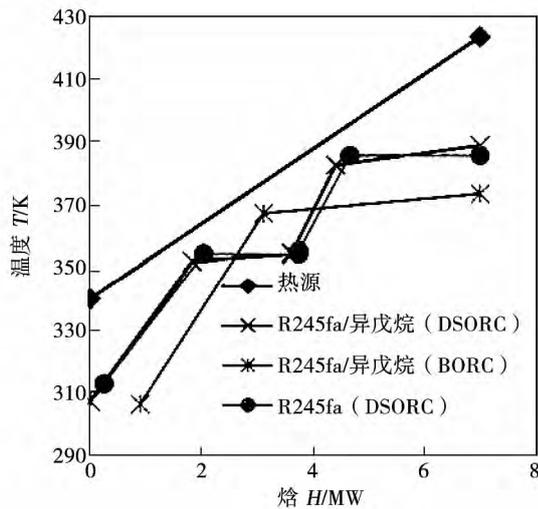


图 5 R245fa/异戊烷的 DSORC(最优 T_4, γ, x 下)、BORC(最优 T_4, γ 下)和 R245fa 的 DSORC(最优 T_4, x 下)的热源侧 $T-H$ 图

Fig. 5 $T-H$ diagram of R245fa/isopentane in DSORC (at optimal T_4, γ, x) and BORC(at optimal T_4, γ), and of R245fa in DSORC(at optimal T_4, x)

4.2.2 分液干度的优化

非共沸工质 DSORC 的净输出功率受蒸发器 1 出口干度的影响。在最优 T_4, γ 下, 不同混合工质净输出功率随干度的变化如图 6 所示。不同混合工质的净输出功率随干度的变化规律很相似, 净输出功率随干度先升高然后下降, 在干度 0.4 左右取得最大值。混合工质的净输出功率的最大和最小值之间相差 15% ~ 25%。其中 WF6 在干度 0.40 时净输出功率最大。

4.2.3 热源入口温度的影响

对于非共沸工质 DSORC 图 7 显示了 η_2 随着热源入口温度变化的规律, 其中 η_2 均是在最优 T_4, γ, x 下取得。从图中可以看出, 随着热源入口温度的升高, η_2 几乎与热源进口温度成线性变化。WF6 在热源入口温度 150 °C 时的 η_2 最高, 为 40.25%。WF5 在热源入口温度为 120 °C 时 η_2 最低, 为 35.47%。不同混合工质之间相差 3% 以内。

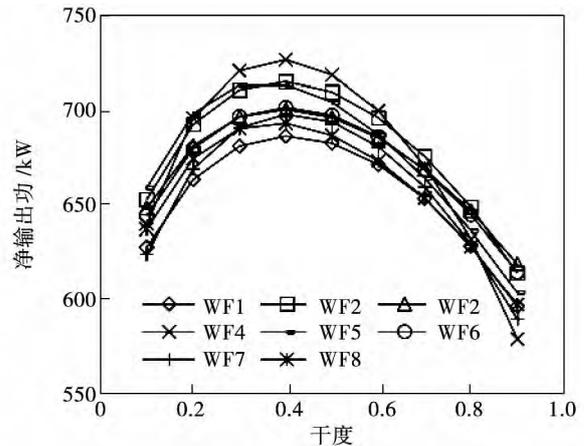


图 6 非共沸工质的 DSORC(最优 T_4, γ 下) W_{net} 随干度 x 的变化

Fig. 6 W_{net} in function of quality x of zeotropic mixtures in DSORC(at optimal T_4, γ)

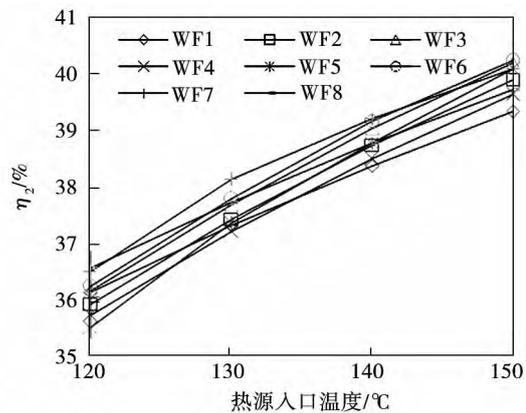


图 7 非共沸工质的 DSORC(最优 T_4, γ, x 下) η_2 随热源入口温度 $T_{h,in}$ 的变化

Fig. 7 η_2 of zeotropic mixtures in DSORC (at optimal T_4, γ, x) in function of $T_{h,in}$

5 结 论

本研究提出了一种带气液分离的双压非共沸工质 ORC, 对该形式的 ORC 建立模型, 并采用遗传算法求解。通过案例分析比较了第二定律效率最大为目标下分液的双压非共沸工质 ORC、分液双压纯工质 ORC 和非共沸工质基本 ORC 的效率大小, 得出以下几个结论:

(1) 非共沸工质 DSORC 的 η_2 比 BORC 的提高 14.1% ~ 17.2%, 增加了分液和高压侧后, 净输出功率提高。通过分析 η_{ext} 、 η_{tran} 、 η_{conv} 发现主要原因是外部效率 η_{ext} 和热源侧换热 η_{tran} 提高。带分液的双压非共沸工质 ORC 的 η_2 相比带分液的双压纯工质 ORC 提高 5.3% ~ 8.7%, 这主要是冷源和热源侧换热的焓损失减少, 提高了输出功率。非共沸工质 DSORC、BORC 和纯工质 DSORC 之间的热效率差别很小。热源侧的 $T-H$ 图显示了换热过程的温度匹配。非共沸工质 DSORC 与热源的温度匹配最好。

(2) 非共沸混合工质 DSORC 随蒸发器 1 出口干度的升高, 其净输出功率先升高, 然后下降, 最大与最小输出功率之间相差 15% ~ 25%, 另外所有混合工质在干度 0.4 左右时, 净输出功率最大。

(3) 非共沸混合工质 DSORC 在热源入口温度升高时, η_2 也随之大致成线性升高。不同混合工质间 η_2 相差 3% 以内。

参考文献:

[1] Chen H, Goswami D Y, Stefanakos E K. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(9): 3059 - 3067.

[2] Stijepovic M Z, Linke P, Papadopoulos A I, et al. On the role of working fluid properties in organic Rankine cycle performance [J].

Applied Thermal Engineering 2012, 36: 406 - 413.

- [3] Xi H, Li M, Xu C, et al. Parametric optimization of regenerative organic rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery using genetic algorithm [J]. *Energy* 2013, 58(9): 473 - 482.
- [4] Kheiri A, Feidt M, Pelloux-Prayer S. Thermodynamic and economic optimizations of a waste heat to power plant driven by a subcritical ORC (Organic Rankine Cycle) using pure or zeotropic working fluid [J]. *Energy* 2014, 78: 622 - 638.
- [5] Guzović Z, Rašković P, Blatarić Z. The comparison of a basic and a dual-pressure ORC (Organic Rankine Cycle): Geothermal Power Plant Velika Ciglena case study [J]. *Energy* 2014, 76: 175 - 186.
- [6] Baik Y, Kim M, Chang K, et al. A comparative study of power optimization in low-temperature geothermal heat source driven R125 transcritical cycle and HFC organic Rankine cycles [J]. *Renewable Energy* 2013, 54(6): 78 - 84.
- [7] Dong B, Xu G, Cai Y, et al. Analysis of zeotropic mixtures used in high-temperature organic rankine cycle [J]. *Energy Conversion and Management* 2014, 84: 253 - 260.
- [8] Wang J L, Zhao L, Wang X D. A comparative study of pure and zeotropic mixtures in low-temperature solar Rankine cycle [J]. *Applied Energy* 2010, 87(11): 3366 - 3373.
- [9] Lecompte S, Ameel B, Ziviani D, et al. Exergy analysis of zeotropic mixtures as working fluids in organic rankine cycles [J]. *Energy Conversion and Management* 2014.
- [10] Chen Y, Hua N, Deng L S. Performances of a split-type air conditioner employing a condenser with liquid - vapor separation baffles [J]. *international journal of refrigeration* 2012, 35(2): 278 - 289.
- [11] Yan G, Cui C, Yu J. Energy and exergy analysis of zeotropic mixture R290/R600a vapor-compression refrigeration cycle with separation condensation [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2015, 53: 155 - 162.
- [12] Lemmon E W, Huber M L, McLinden M O. NIST thermodynamic and transport properties of refrigerants and refrigerant mixtures (REFPROP) version 8.0 [J]. 2007.

(姜雪梅 编辑)

Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(4) . -17 ~23

For the erosion wear problem in the elbow caused by gas-solid flow, a wear prevention method was put forward by adding ribs. A corresponding elbow geometry model was constructed by evenly adding 8 ribs of 2 mm height, and numerically simulated by using DPM model to test the wear condition and compare with the common elbow. The CFD simulation results show that the average and the maximum wear rates of the rib elbow are approximately half of those in the common elbow, indicating the anti-wear effectiveness of rib elbow. Numerical simulations of elbow with different rib heights were also conducted under the same condition. The comparison of wear rate under different rib heights shows the best anti-wear rib height is 2 mm. Finally, the experiment models of common elbow and rib elbow with rib height of 2 mm as numerically simulated were manufactured and the wear experiment was carried out. The experimental results confirm that the average wear rates of the two type ribs under study are similar to simulated, implying that the high fidelity and reliability of the numerical simulation for the rib optimization. **Key words:** erosion wear, common elbow, rib elbow, wear rate

气液分离双压有机朗肯循环热力学分析及优化 = **Thermodynamic Analysis and Optimization in Double-pressure Organic Rankine Cycle with a Gas-liquid Separator** [刊, 汉] LIANG Zhi-hui, LUO Xiang-long (School of Material and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong, China, Post Code: 510006), CHEN Ying, MO Song-ping (Soft Matter Center, Guangdong Province Key Laboratory on Functional Soft Matter, Guangzhou, Guangdong, China, Post Code: 510006) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(4) . -24 ~30

Double-pressure organic Rankine cycle with a gas-liquid separator (DSORC) is proposed. Parametric optimization of DSORC used binary zeotropic mixtures, basic organic Rankine cycle (BORC) used zeotropic mixtures and DSORC used pure fluids is conducted. The second law efficiency maximization is used as objective function. The optimization variables are mixing ratios of zeotropic mixtures, evaporating temperature and vapor quality in separator. And the optimization model is solved using genetic algorithm. The working fluids under study are: R245fa, isopen-

tane ,hexane ,cyclohexane ,isohexane ,pentane ,isobutane ,R365mfc and their binary mixture. The results show that DSORC used zeotropic mixtures has an increase of 14.1 ~ 17.2% in second law efficiency compared to BORG used zeotropic mixtures ,and an increase of 5.3 ~ 8.7% compared to DSORC with pure fluids. The efficiency differences among 8 zeotropic mixtures are less than 3% . The second law efficiency increases linearly with the inlet temperature of heat source. **Key words:** organic Rankine cycle ,gas-liquid separator ,binary mixture ,thermodynamics ,genetic algorithm ,optimization

应用正交试验法进行惯性粒子分离器结构优化 = **Application of Orthogonal Test Method in the Structure Optimization of Inertial Particle Separator** [刊 ,汉] SUN Liang-liang ,WANG Tong (Gas Turbine Research Institute ,Shanghai Jiaotong University ,Shanghai ,China ,Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 ,31(4) . -31 ~ 37

An inertial particle separator was experimentally tested and numerically simulated based on orthogonal experiment theory ,and the effect of inertial particle separator structure parameters on particle separator separation efficiency and pressure drop loss was studied. An optimized structure was then obtained by the orthogonal design. Results show that compared to the separator designed based on empirical data ,the separator optimized using the orthogonal experiment theory in this paper has higher separation efficiency. **Key words:** orthogonal test ,inertial particle separator , separation efficiency ,numerical simulation

襟翼翼缝相对宽度对翼型动态气动性能的影响 = **Effect of the Relative Width of Wing Flap Slit on the Aerodynamic Performance of Airfoil** [刊 ,汉] LI Run-jie ,ZU Hong-ya ,LI Chun ,YE Zhou (School of Energy and Power Engineering ,University of Shanghai for Sci. & Tech. ,Shanghai ,China ,Post code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 ,31(4) . -38 ~ 44

Based on symmetrical airfoil NACA0018 ,the airfoil flow field and lift-drag characteristics ,resulted from the dynamic swing of flap ,were studied for different flap slit widths of the wing trailing edge by using Fluent software numerical