

对用于烟气余热回收的 有机朗肯循环(ORC)和 两级串联有机朗肯循环(TSORC)的 热力学和经济性评价

李太禄¹, 孟楠¹, 刘建², 朱家玲³, 孔祥飞¹

- (1. 河北工业大学能源与环境工程学院;
2. 天津城建大学能源与安全工程学院;
3. 中低温热能高效利用重点实验室(天津大学))

摘 要: 烟气余热可采用有机朗肯循环(ORC)和两级串联有机朗肯循环(TSORC)两种方式回收,但需详细比较两种方式的综合性能。本文从热力学和经济学的角度对 ORC 和 TSORC 进行了比较。技术指标包括净输出功率、效率、热导率、比体积比,经济指标包括发电成本(EPC)、投资回收期(PBP)和投资回报率(ROROI)。结果表明,与 ORC 相比,TSORC 可以在低压阶段从热源回收更多的热量,从而减少了热源与工质换热的不可逆损失,提高了净输出功率和效率,但降低了热效率。但从经济角度看,TSORC 的 EPC、PBP 和 ROROI 的等指标较差,因为增加的投资高于安装第二阶段蒸发的收益。但是 200℃~300℃的较高烟气温度有利于提高 TSORC 的技术经济性能。可以预见,随着制造成本的降低,在未来 TSORC 的经济性能将进一步提高。

关键词: ORC; TSORC; 技术经济性; 发电成本

1 引 言

目前,燃气透平(GT, gas turbine)广泛应用于轮船,卡车,发电机组,因为其运行可靠,启动迅速,噪声低。由于 GT 产生的烟气废热会造成热污染,因此 GT 的效率应进一步提高。采用烟气余热回收将有助于提高 GT 系统的整体热效率。

在这个背景下,许多研究人员都关注于 GT 系统发电效益的提高。燃料类型是提高 GT 性能的关键,研究人员对液体燃料,氨燃料,热解生物质油和混合燃料以及在不同应用场景下燃料的选择做出了一系列分析和比较。此外,GT 系统部件的材料合金是另一个影响 GT 系统性能和寿命的重要因素。Subbarao 等人比较了应用于涡轮叶片合金部件的镍,钛,钢及其他合金材料,发现通过晶粒结构选择合适的叶片合金材料可以提高 GT 系统的寿命和发电性能。此外,许多学者提出了透平入口冷却技术,混合太阳能余热和其他新技术来提高 GT 系统性能。GT 系统性能的提高包括参

数优化和余热回收设计。Santos 等人提出了一种闭式再热 GT 联合循环并且分别分析了 GT 循环,蒸汽循环和联合循环。Paepe 等人将废热回收和循环系统结合,发现微型 GT 系统的发电效率得到显著提高。

GT 系统经常和余热回收系统结合起来运行以提高系统性能。研究表明,余热回收的技术路线包括朗肯循环,卡琳娜循环,再热 ORC, ORC(organic Rankine cycle), TSORC(two-stage series organic Rankine cycle)。Girgin 等人研究了朗肯循环系统,并且发现了该系统的许多局限。Larsen 等人发现和卡琳娜循环相比,ORC 循环在提高热效率方面具有巨大的潜能。Braumakis 等人从热力学角度讨论了 ORC 和再热 ORC 的热效率和烟效率。Braumakis 等人通过热力学评价比较和分析了 ORC 和 TSORC, TSORC 系统的发电性能优于 ORC 系统。由于 ORC 节能,环保,在回收低温余热扮演着重要的角色,并且他在发电性能改

善方面具有巨大的潜力。此外,在回收高温余热方面,采用烷烃类工作介质的 ORC 系统具有许多优势。

和 ORC 系统相比,TSORC 系统在发电性能上展示出了巨大的优势,但是 TSORC 系统的经济学性能研究较少。White 等人建议 ORC 发电系统的进一步发展应以平衡热力学性能和经济性成本为指导。Yao 等人按净利润和回收期对 ORC 进行了热力学和经济性分析。此外,Amirmohammad 等人从节省燃料、烟效率和单价三个方面评价了 ORC 的经济性能。此外,有许多学者关注最大化系统组件的效率。Qiu 等人对压缩空气驱动涡旋式膨胀机进行了优化研究,并评估了在 ORC 中使用涡旋式膨胀机的可行性。Nematollahi 等人研究了钎焊金属泡沫板换热器 (BMPHE, brazed metal foam plate heat exchanger) 对 ORC 性能参数的影响,发现采用 BMPHE 提高了 ORC 系统的能量密度。对不同工况下的 ORC 和 TSORC 的技术比较比较充分,但经济评价经常被忽略。因此,需要从热力学和经济性的角度对用于 GT 烟气回收的 ORC 和 TSORC 进行详细的比较。

本论文中,建立了 TSORC 的热力学-经济性模型。热力学指标包括净输出功率(W_{net})、热效率(η_{th})和烟效率(η_{ex}),经济性指标包括发电成本(EPC)、投资回收期(PBP)和投资收益率(ROROI)。本文对 ORC 和 TSORC 在热力学和经济性进行了研究。

2 系统描述

TSORC 烟气回收系统的工作原理图如图 1 所示。GT 发电系统由压缩机、燃烧室和 GT 组成。首先,经过过滤的空气被压缩机压缩,然后进入燃烧室与气体一起燃烧。在燃烧室产生的高温高压气体驱动 GT 做功。最后,GT 排出的烟气流入 TSORC 系统的蒸发器作为热源,使工质汽化。

对于 TSORC 系统,有两台蒸发器,两台泵,一台冷凝器和一台涡轮机。工作流体从冷凝器由泵 1 驱动进入低压蒸发器 2,然后分为两部分:工质 1,工质 2。工质 2 在蒸发器 2 中继续被加热到过热状态,然后流入涡轮机输出机械功。蒸发器 2 饱和状态下的工质 1 经泵 2 增压进入蒸发器 1 被加热至过热状态,然后流入涡轮。涡轮排出的工质

流入冷凝器,由冷却水冷凝,最后在泵 1 的驱动下进入蒸发器 2 完成一个循环。蒸发器 2 是 TSORC 不同于 ORC 的关键部件。对于工质而言,有两个出口,一个入口,工作液体在蒸发器 2 的过热蒸汽通过出口 1 进入涡轮的中级叶片,液态饱和流体通过蒸发器 2 的另一个出口进入蒸发器 1。 T - s 图如图所示。

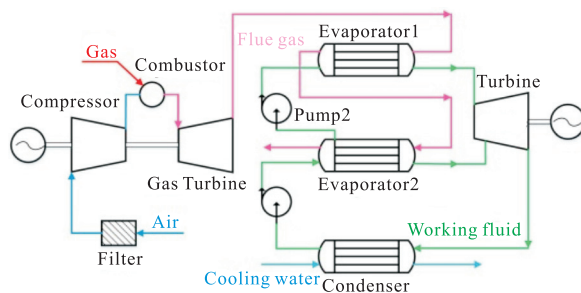


图 1 用于烟气余热回收的 TSORC 系统流程图

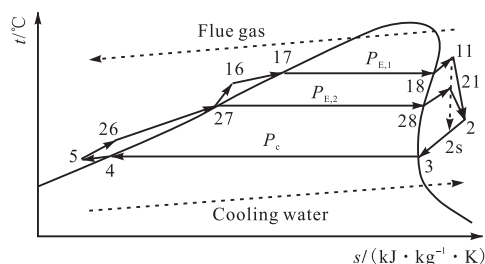


图 2 TSORC 系统的 T - s 图

3 热力学模型

为了便于建立 TSORC 系统的热力学模型,本文根据热力学第一定律和热力学第二定律,做出以下假设:

在泵入口工质处于饱和液体状态。窄点温差分别设置为 20°C 和 5°C , 冷凝器冷凝温度为 30°C ;

在两台蒸发器出口,工质的过热度为 5°C , 冷凝器出口为过冷度为 5°C 的过冷液;

对工质在蒸发器、冷凝器和工质泵中的压降均不予考虑;

忽略汽轮机高低压蒸汽混合的做功能量损失;

忽略了工质的温度损失、摩擦损失以及动能和势能的变化;

烟气入口温度在 $200 \sim 300^{\circ}\text{C}$ 范围内,环境温度为 20°C , 烟气质量流量为 10kg/s 。

烟气与工作流体之间的蒸发过程可分为预热段、蒸发段和过热段三个部分,蒸发过程的 $T-Q$ 图如图 3 所示。蒸发器和冷凝器的换热系数分别为 280 和 $850 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

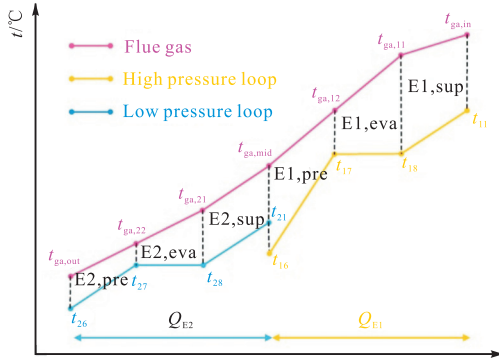


图 3 蒸发过程传热的 $T-Q$ 图

高压蒸发器“E1”的传热方程为

$$Q_{E1,pre} = m_{\text{gas}}(h_{\text{ga},12} - h_{\text{ga},\text{mid}}) = m_{\text{wf},1}(h_{17} - h_{16}) \quad (1)$$

其中, Q_{E1} 表示高压蒸发器的换热量, m_{gas} 和 $m_{\text{wf},1}$ 表示烟气和工质的质量流量, h 表示状态点的比焓。状态点的下标如图 3 所示。

$$Q_{E1,pre} = (KA)_{E1,pre} \frac{(t_{\text{ga},\text{mid}} - t_{16}) - (t_{\text{ga},12} - t_{17})}{\ln[(t_{\text{ga},\text{mid}} - t_{16})/(t_{\text{ga},12} - t_{17})]} \quad (2)$$

式中 “ $(KA)_{E1}$ ” 为高压蒸发器内传热系数与面积的乘积, 表示蒸发器的热导率。

$$Q_{E1,eva} = m_{\text{gas}}(h_{\text{ga},11} - h_{\text{ga},12}) = m_{\text{wf},1}(h_{18} - h_{17}) \quad (3)$$

$$Q_{E1,eva} = (KA)_{E1,eva} \frac{(t_{\text{ga},11} - t_{11}) - (t_{\text{ga},12} - t_{17})}{\ln[(t_{\text{ga},11} - t_{18})/(t_{\text{ga},12} - t_{17})]} \quad (4)$$

$$Q_{E1,sup} = m_{\text{gas}}(h_{\text{ga},\text{in}} - h_{\text{ga},11}) = m_{\text{wf},1}(h_{11} - h_{18}) \quad (5)$$

$$Q_{E1,sup} = (KA)_{E1,sup} \frac{(t_{\text{ga},11} - t_{18}) - (t_{\text{ga},\text{in}} - t_{11})}{\ln[(t_{\text{ga},11} - t_{18})/(t_{\text{ga},\text{in}} - t_{11})]} \quad (6)$$

高压蒸发器的总换热面积和换热量为:

$$A_{E1} = A_{E1,pre} + A_{E1,eva} + A_{E1,sup} \quad (7)$$

$$Q_{E1} = Q_{E1,pre} + Q_{E1,eva} + Q_{E1,sup} \quad (8)$$

高压蒸发器的不可逆损失为:

$$I_{E1} = T_0[m_{\text{wf},1}(s_{11} - s_{16}) - m_{\text{gas}}(s_{\text{ga},\text{in}} - s_{\text{ga},\text{mid}})] \quad (9)$$

其中 I_{E1} 为高压蒸发器的不可逆损失, T_0 为环境温度, s 为状态点的比熵。

低压蒸发器“E2”的传热方程为:

$$Q_{E2,pre} = m_{\text{gas}}(h_{\text{ga},22} - h_{\text{ga},\text{out}}) = m_{\text{wf},2}(h_{27} - h_{26}) \quad (10)$$

其中 “ Q_{E2} ” 表示低压蒸发器的换热量, “ $m_{\text{wf},2}$ ” 表示工质流量 2。

$$Q_{E2,pre} = (KA)_{E2,pre} \frac{(t_{\text{ga},\text{out}} - t_{26}) - (t_{\text{ga},22} - t_{27})}{\ln[(t_{\text{ga},\text{out}} - t_{26})/(t_{\text{ga},22} - t_{27})]} \quad (11)$$

其中 “ $(KA)_{E2}$ ” 为低压蒸发器传热系数与面积的乘积。

$$Q_{E2,eva} = m_{\text{gas}}(h_{\text{ga},21} - h_{\text{ga},22}) = m_{\text{wf},2}(h_{28} - h_{27}) \quad (12)$$

$$Q_{E2,eva} = (KA)_{E2,eva} \frac{(t_{\text{ga},21} - t_{28}) - (t_{\text{ga},22} - t_{27})}{\ln[(t_{\text{ga},21} - t_{28})/(t_{\text{ga},22} - t_{27})]} \quad (13)$$

$$Q_{E2,sup} = m_{\text{gas}}(h_{\text{ga},\text{mid}} - h_{\text{ga},21}) = m_{\text{wf},2}(h_{21} - h_{28}) \quad (14)$$

$$Q_{E2,sup} = (KA)_{E2,sup} \frac{(t_{\text{ga},\text{mid}} - t_{21}) - (t_{\text{ga},21} - t_{28})}{\ln[(t_{\text{ga},\text{mid}} - t_{21})/(t_{\text{ga},21} - t_{28})]} \quad (15)$$

低压蒸发器的总换热面积和换热量为:

$$A_{E2} = A_{E2,pre} + A_{E2,eva} + A_{E2,sup} \quad (16)$$

$$Q_{E2} = Q_{E2,pre} + Q_{E2,eva} + Q_{E2,sup} \quad (17)$$

低压蒸发器的不可逆损失为:

$$I_{E2} = T_0[m_{\text{wf},1}(s_{27} - s_{26}) + m_{\text{wf},2}(s_{21} - s_{27}) - m_{\text{gas}}(s_{\text{ga},\text{mid}} - s_{\text{ga},\text{out}})] \quad (18)$$

其中 “ I_{E2} ” 是低压蒸发器的不可逆损失。

两台蒸发器的总换热面积和换热量为:

$$A_E = A_{E1} + A_{E2} \quad (19)$$

$$Q_E = Q_{E1} + Q_{E2} \quad (20)$$

冷凝器 C 的传热方程为:

$$Q_{C,\text{sup}} = m_{\text{wf}}(h_4 - h_5) = m_{\text{cw}}(h_{\text{cw},1} - h_{\text{cw},\text{in}}) \quad (21)$$

其中 “ Q_C ” 为凝汽器的换热量, “ m_{cw} ” 为冷却水的质量流量, “ h_4 ” 和 “ h_5 ” 为状态点比焓, 如图 2 所示, 下标 “cw, in” 为冷却水入口。

$$Q_{C,\text{sup}} = (KA)_{C,\text{sup}} \frac{(t_4 - t_{\text{cw},1}) - (t_5 - t_{\text{cw},\text{in}})}{\ln[(t_4 - t_{\text{cw},1})/(t_5 - t_{\text{cw},\text{in}})]} \quad (22)$$

式中 “ $(KA)_C$ ” 为传热系数与冷凝器面积的乘积。

$$Q_{C,\text{con}} = m_{\text{wf}}(h_3 - h_4) = m_{\text{cw}}(h_{\text{cw},2} - h_{\text{cw},1}) \quad (23)$$

$$Q_{C,\text{con}} = (KA)_{C,\text{con}} \frac{(t_4 - t_{\text{cw},1}) - (t_5 - t_{\text{cw},\text{in}})}{\ln[(t_4 - t_{\text{cw},1})/(t_5 - t_{\text{cw},\text{in}})]} \quad (24)$$

$$Q_{C,\text{pre}} = m_{\text{wf}}(h_2 - h_3) = m_{\text{cw}}(h_{\text{cw},\text{out}} - h_{\text{cw},2}) \quad (25)$$

其中, 下标 “cw, out” 为冷却水出口。

$$Q_{C,\text{pre}} = (KA)_{C,\text{pre}} \frac{(t_2 - t_{\text{cw},\text{out}}) - (t_3 - t_{\text{cw},2})}{\ln[(t_2 - t_{\text{cw},\text{out}})/(t_3 - t_{\text{cw},2})]} \quad (26)$$

冷凝器的总换热面积和换热量为:

$$A_C = A_{C1} + A_{C2} + A_{C3} \quad (27)$$

$$Q_C = Q_{C1} + Q_{C2} + Q_{C3} \quad (28)$$

冷凝器的不可逆损失为:

$$I_C = T_0[m_{wf}(s_5 - s_2) - m_{cw}(s_{cw,in} - s_{cw,out})] \quad (29)$$

其中“ I_C ”是冷凝器的不可逆损失。

蒸发器和冷凝器的总换热面积为：

$$A = A_E + A_C \quad (30)$$

泵 1 和泵 2 的耗功分别为：

$$W_{P1} = m_{wf,1}(h_{16} - h_{27}) = m_{wf,1}(h_{16s} - h_{27})/\eta_{P1} \quad (31)$$

$$W_{P2} = m_{wf}(h_{26} - h_5) = m_{wf}(h_{26s} - h_5)/\eta_{P2} \quad (32)$$

其中，“ W_{P1} ”和“ W_{P2} ”表示“泵 1”和“泵 2”的耗功，“ η_{P1} ”和“ η_{P1} ”表示“泵 1”和“泵 2”的效率，其值均为 75%。

$$W_P = W_{P1} + W_{P2} \quad (33)$$

泵的不可逆损失为：

$$I_{P1} = T_0 m_{wf,1}(s_{16} - s_{27}) \quad (34)$$

$$I_{P2} = T_0 m_{wf}(s_{26} - s_5) \quad (35)$$

其中“ I_{P1} ”和“ I_{P2} ”为泵 1 和泵 2 的不可逆损失。

$$I_P = I_{P1} + I_{P2} \quad (36)$$

透平输出功率为：

$$W_T = m_{wf,1}(h_{11} - h_{12}) + m_{wf,2}(h_{21} - h_{22}) \quad (37)$$

其中 W_T 为涡轮输出功率。

汽轮机的不可逆损失为：

$$I_T = T_0[m_{wf,1}(s_{12} - s_{11}) + m_{wf,2}(s_{22} - s_{21})] \quad (38)$$

其中“ I_T ”代表涡轮机的不可逆损失。

汽轮机的比体积比为：

$$VFR = \frac{m_{wf,1}v_{12}/v_{11} + m_{wf,2}v_{22}/v_{21}}{m_{wf,1} + m_{wf,2}} \quad (39)$$

式中 VFR 为涡轮的比体积比，这是一个对于透平的估值， v 表示状态点的比体积。

系统的净输出功率为：

$$W_{net} = \eta_T W_T - W_P \quad (40)$$

其中“ W_{net} ”为系统净输出功率，“ η_T ”为汽轮机效率。

系统的总不可逆损失为：

$$I = I_{E1} + I_{E2} + I_C + I_T + I_P \quad (41)$$

热效率为：

$$\eta_{th} = W_{net}/Q_E \quad (42)$$

其中“ η_{th} ”为系统热效率，为热力学评价参数。

焓效率为：

$$\eta_{ex} = W_{net}/(Ex_{ga,in} - Ex_{ga,out}) \quad (43)$$

式中， η_{ex} 为系统的焓效率，为热力学评价参数；“ Ex ”表示状态点的焓值。

$$Ex_{ga,in} = m_{gas}(h_{ga,in} - T_0 s_{ga,in}) \quad (44)$$

$$Ex_{ga,out} = m_{gas}(h_{ga,out} - T_0 s_{ga,out}) \quad (45)$$

4 经济性模型

ORC 系统的经济评价主要包括电力生产成本 (EPC , electricity production cost)、回收期 (PBP , payback period) 和投资收益率 ($ROROI$, rate of return on investment) 三个方面。此外，各部件的成本也是经济研究的一个重要参数，其定义为：

$$Cost_{2001} = C_{bmE1} + C_{bmE2} + C_{bmC} + C_{bmT} + C_{bmP} \quad (46)$$

其中“ C_{bm} ”是部件成本。

$Cost_{2001}$ 是指由 CEPCI (Chemical Engineering Plant cost Index) 引入的 2001 年部件成本。在这里，我们通过公式将其转换为实际成本 $cost_{2018}$ ：

$$Cost_{2018} = Cost_{2018} CEPCI_{2018} / CEPCI_{2001} \quad (47)$$

其中， $CEPCI_{2018} = 648.4$ ， $CEPCI_{2001} = 397$ 。

资本回收因子 (CRF , capital recovery factor) 将一个现值在特定时间内按特定折现率转换成等量的年度支付流。电力生产成本 (EPC) 是指系统产生 1kWh 的净输出功率所付出的成本，它是给出的最重要的经济绩效指标：

$$CRF = i(1+i)^{LT} / [(1+i)^{LT} - 1] \quad (48)$$

$$EPC = [CRF Cost_{2018} + i Cost_{2018}] / (W_{net} t_{op}) \quad (49)$$

其中“ i ”为年利率，假设为 5%；“ LT ”为生命周期时间，假设为 15 年； t_{op} 为运行时间，假设为 7500h。

回收期 (PBP) 是收回投资成本所需的时间长度。某项投资的回收期是决定是否承担该职位或项目的重要因素，因为较长的回收期通常不适合投资。

$$PBP = \ln[(W_{net} C_e) / (W_{net} C_e - i Cost_{2018})] / \ln(1+i) \quad (50)$$

其中“ C_e ”是电价，假设为 \$0.15/kWh。

投资回报率 ($ROROI$) 是一种绩效指标，用于评价一项投资的效率或比较多种不同投资的效率。投资回报除以投资成本计算 $ROROI$ ，结果用百分数或比率表示：

$$ROROI_1 = \sum_{x=1}^{LT} [W_{net} t_{op} C_e (1+r)^x / (1+i)^x] \quad (51)$$

$$ROROI_2 = \sum_{x=1}^{LT} \left[\frac{k Cost_{2018} (1+r)^x}{(1+i)^x} + i Cost_{2018} \right] \quad (52)$$

$$ROROI = ROROI_1 / ROROI_2 \quad (53)$$

其中 r 表示通货膨胀率, 假设为 2%, k 表示所有部件的管理成本, 假设为 1.65%。

此外, 部件的成本价格是通过以下公式和成本的相关参数计算出来的, 如表 1 所示。

$$\lg C_{pE1} = K_1 + K_2 \lg(A_{E1}) + K_3 [\lg(A_{E1})]^2 \quad (54)$$

$$\lg F_{pE1} = C_1 + C_2 \lg(P_{E1}) + C_3 [\lg(P_{E1})]^2 \quad (55)$$

$$F_{bmE1} = B_1 + B_2 F_M F_{pE1} \quad (56)$$

$$C_{bmE1} = C_{pE1} F_{bmE1} \quad (57)$$

$$\lg C_{pE2} = K_1 + K_2 \lg(A_{E2}) + K_3 [\lg(A_{E2})]^2 \quad (58)$$

$$\lg F_{pE2} = C_1 + C_2 \lg(P_{E2}) + C_3 [\lg(P_{E2})]^2 \quad (59)$$

$$F_{bmE2} = B_1 + B_2 F_M F_{pE2} \quad (60)$$

$$C_{bmE2} = C_{pE2} F_{bmE2} \quad (61)$$

$$\lg C_{pC} = K_1 + K_2 \lg(A_C) + K_3 [\lg(A_C)]^2 \quad (62)$$

$$\lg F_{pC} = C_1 + C_2 \lg(P_C) + C_3 [\lg(P_C)]^2 \quad (63)$$

$$F_{bmC} = B_1 + B_2 F_M F_{pC} \quad (64)$$

$$C_{bmC} = C_{pC} F_{bmC} \quad (65)$$

$$\lg C_{pP} = K_1 + K_2 \lg(W_P) + K_3 [\lg(W_P)]^2 \quad (66)$$

$$\lg F_{pP} = C_1 + C_2 \lg(W_P) + C_3 [\lg(W_P)]^2 \quad (67)$$

$$F_{bmP} = B_1 + B_2 F_M F_{pP} \quad (68)$$

$$C_{bmP} = C_{pP} F_{bmP} \quad (69)$$

其中 $K_1, K_2, K_3, C_1, C_2, C_3, B_1, B_2, F_M$ 是蒸发器“E1”和“E2”, 冷凝器“C”和泵“P”的成本价格修正因子, 如表 1 所示。

$$\lg C_{pT} = K_1 + K_2 \lg(W_T) + K_3 [\lg(W_T)]^2 \quad (70)$$

$$C_{bmT} = C_{pT} F_{bmT} \quad (71)$$

其中 K_1, K_2, K_3, F_{bm} 为透平“T”的成本修正因子, 如表 1 所示。

表 1 部件成本修正因子

	K_1	K_2	K_3	C_1	C_2	C_3	B_1	B_2	F_M	F_{bm}
换热器	4.665	0.155	0.154	0	0	0	0.96	1.21	1	/
泵	3.389	0.053	0.153	0	0	0	1.89	1.35	1.5	/
透平	3.514	0.598	0	/	/	/	/	/	/	3.5

5 模型验证

以某基于 R245fa 的 ORC 电厂在相同热源和散热条件下的实际工程数据为例, 验证了本文所建立的数值模型的正确性。数值结果与工程实际吻合较好, 如表 2 所示。实际工厂的额定输出功率为 350kW, 输出功率的绝对差异为 20.6kW, 而热效率的相对差异为 5.89%, 绝对差值为 0.83%。实际工程数据的 VFR、功率输出和循环效率总是低于数值计算的。这种差异主要是由于工质在换热器和管内的压降, 在进行数值计算时假设换热器和管内均不存在压降, 而实际上均存在压降。另一方面, 测量仪器的误差是导致差异的另一个方面。

表 2 所选工质的热物性参数

工质	摩尔质量/ ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)	沸点/ °C	临界温度/ °C	临界压力/ MPa
正辛烷	114.23	99.208	270.85	2.572
环己烷	84.16	80.74	280.49	4.08
庚烷	100.20	98.38	266.98	2.74
辛烷	114.23	125.62	296.17	2.50
壬烷	128.26	150.76	321.40	2.28

6 结果讨论

对于回收为 200 ~ 300°C 的烟气余热, 临界温

度对工质的选择至关重要。本研究选取了临界温度大于 250°C 的六种工质, 六种工质的热物性参数如表 3 所示。

以温度为 280 °C 的烟气为例, 比较了 ORC 和 TSORC 在不同蒸发温度和不同工质下的热力学和经济性能。此外, 还分析了烟气温度为 200 ~ 300 °C 范围内以环己烷为工质的 ORC 和 TSORC 的系统性能。

6.1 净输出功率

图 4(a) 显示了蒸发温度 (t_e) 对净功率输出 $W_{\text{net,ORC}}$ 的影响。随着 t_e 的增加, $W_{\text{net,ORC}}$ 先增加后减小。透平进口温度的升高和工质质量流量的减小, 是 $W_{\text{net,ORC}}$ 表现出该种变化趋势的原因。正辛烷在 $W_{\text{net,ORC}}$ 表现出了良好的性能, 当 $t_e = 150^\circ\text{C}$ 时, 其最高值为 346.8kW。图 4(b) 描述了高压蒸发温度 (t_{e1}) 和低压蒸发温度 (t_{e2}) 对环己烷 $W_{\text{net,TSORC}}$ 的影响。在给定 t_{e2} 条件下, 随着 t_{e1} 的增大, $W_{\text{net,TSORC}}$ 先增大后减小。给定 t_{e1} , $W_{\text{net,TSORC}}$ 随着 t_{e2} 的增加而增加。与 ORC 相似, 随着 t_{e1} 的增加, 高压级工质质量流量减小, 而透平进口处焓值增加。另外, 当蒸发温度为 100°C 和 180°C 时,

$W_{\text{net,TSORC}}$ 达到最高值 408.6 kW。图 4(c) 显示了 ORC 和 TSORC 的 W_{net} 的比值, 随着 t_e 的增加, $W_{\text{net,TSORC}}/W_{\text{net,ORC}}$ 的比值均增大且均大于 1。与 ORC 相比, TSORC 的系统净输出功显著提高, 当 $t_{e1} = 240^\circ\text{C}$ 和 $t_{e2} = 80^\circ\text{C}$ 时, $W_{\text{net,TSORC}}/W_{\text{net,ORC}} = 1.81$ 。

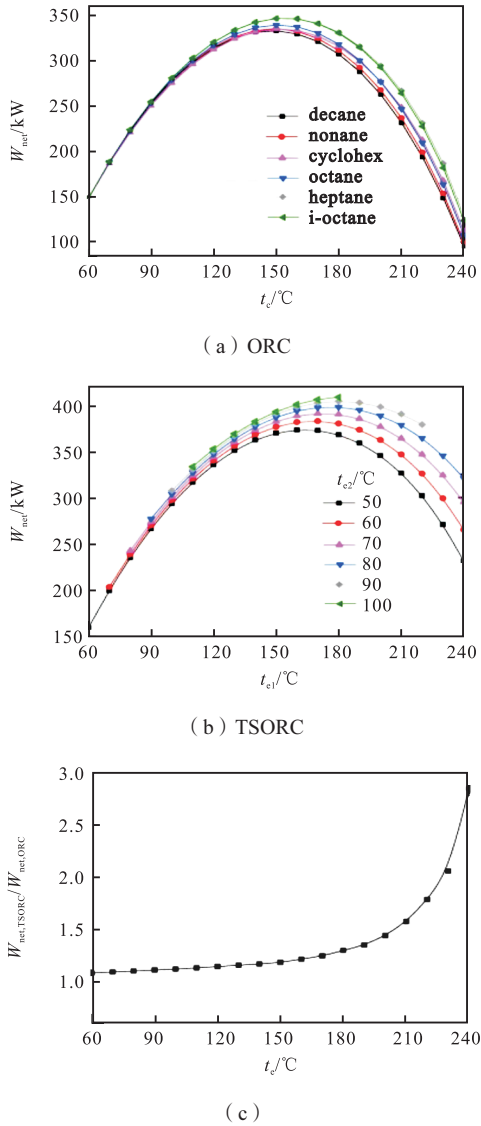


图 4 烟气温度为 280°C 时的系统净输出功

6.2 热效率和焓效率

图 5(a) 显示了 t_e 对 $\eta_{\text{th,ORC}}$ 的影响。随着 t_e 的增加, $\eta_{\text{th,ORC}}$ 先增加后趋于一个固定值。如式 (5) 和 (42) 所示, $\eta_{\text{th,ORC}}$ 与蒸发器的进口焓成正比。热效率最终趋于一个固定值的原因是蒸发器的进口焓开始缓慢增加。当环己烷作工质时, $\eta_{\text{th,ORC}}$ 较

好, 当温度为 240°C 时, $\eta_{\text{th,ORC}} = 20.56\%$ 。图 5(b) 显示了 t_{e1} 和 t_{e2} 对环己烷 $\eta_{\text{th,TSORC}}$ 的影响。在给定 t_{e2} 条件下, $\eta_{\text{th,TSORC}}$ 随 t_{e1} 的增加先增加后减小。在给定 t_{e1} 时, $\eta_{\text{th,TSORC}}$ 随 t_{e2} 的增加而增加。此外, $\eta_{\text{th,TSORC,opt}} = 16.66\%$ 。由图 5(c) 可知, 随着 t_e 的增加 $\eta_{\text{th,TSORC}}/\eta_{\text{th,ORC}}$ 先增加后减小, 且始终小于 1。 $\eta_{\text{th,TSORC}}$ 低于 $\eta_{\text{th,ORC}}$ 。图 6(a) 说明了 t_e 对 $\eta_{\text{ex,ORC}}$ 的影响。随着 t_e 的增加, $\eta_{\text{ex,ORC}}$ 先增加后减少, 与净功率输出和热源输入的焓成比例。环己烷在 $\eta_{\text{ex,ORC}}$ 体现出了良好的性能, 在 $t_e = 180^\circ\text{C}$ 时达到最大值 50.04%。图 6(b) 表明 t_{e1} 和 t_{e2} 对环己烷 $\eta_{\text{ex,TSORC}}$ 的影响。对于给定的 t_{e2} , $\eta_{\text{ex,TSORC}}$ 随着 t_{e1} 的增加先增大后减小。对于给定的 t_{e1} , $\eta_{\text{ex,TSORC}}$ 随

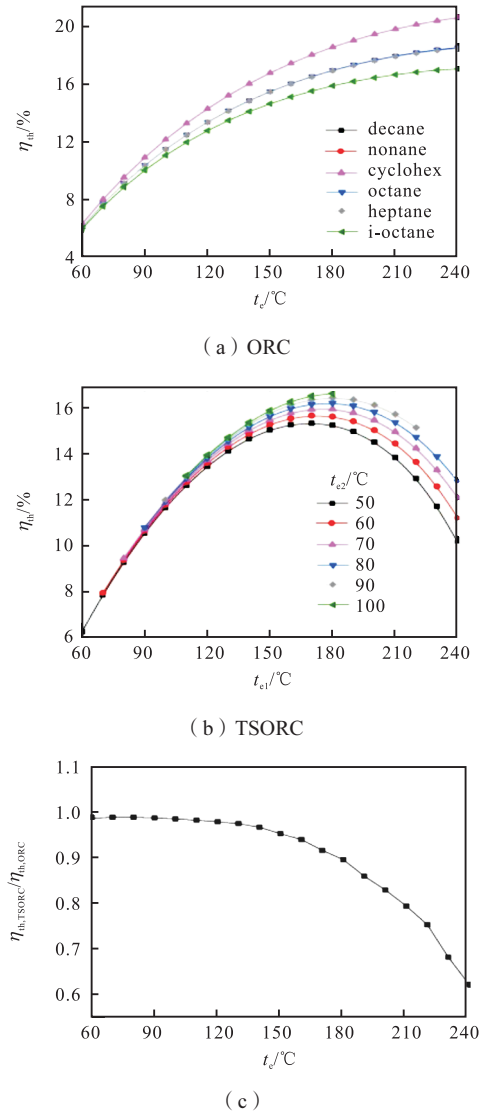


图 5 烟气温度为 280°C 时的热效率

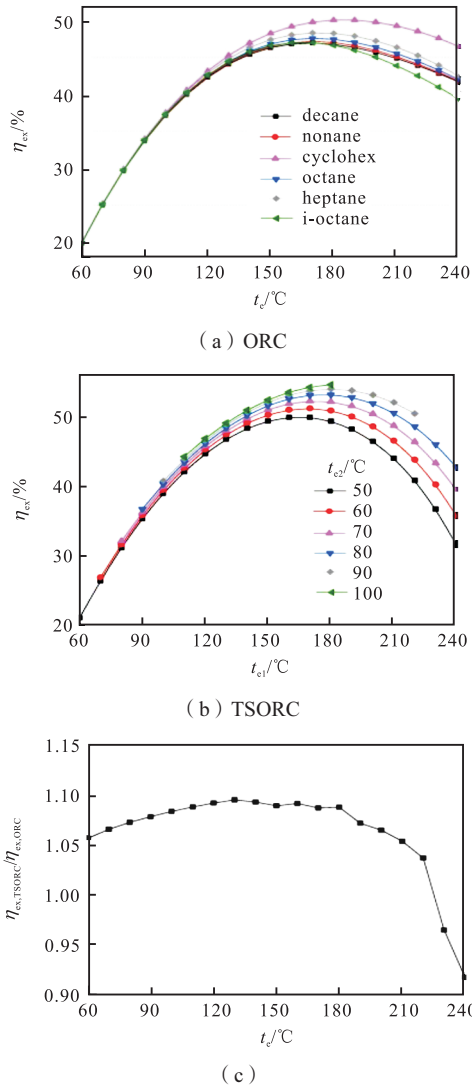


图6 烟气温度为280℃时的焓效率

t_{e2} 的增加而增加。 $\eta_{ex,TSORC}$ 的变化趋势由烟气出口焓的增加和 W_{net} 的增加引起,如式(43)所示。此外,对于 $t_{e1} = 100^\circ\text{C}$ 和 $t_{e2} = 80^\circ\text{C}$, $\eta_{ex,TSORC,opt}$ 达到 54.45%,图 6(c)显示了 ORC 和 TSORC 在 η_{ex} 上的比较,随着 t_e 的增加, $\eta_{ex,TSORC}/\eta_{ex,ORC}$ 先增加后减少。当温度低于 220°C 时,TSORC 的 η_{ex} 高于 ORC,但当温度低于 220°C 时 TSORC 的 η_{ex} 低于 ORC。与 ORC 相比, $\eta_{ex,TSORC}$ 在 $t_{e1} = 160^\circ\text{C}$ 和 $t_{e2} = 110^\circ\text{C}$ 时取有最佳值,为 59.1%。

6.3 不可逆损失

图 7(a)表示 t_e 对 ORC 的不可逆损失的影响。不可逆损失主要由四个部分组成:蒸发器换热的不可逆损失、冷凝器换热的不可逆损失、透平做功的不可逆损失和泵做功的不可逆损失,其中蒸

发器处的不可逆损失所占比例最大。随着蒸发温度的增大,不可逆损失减小,值得一提的是,在 $130^\circ\text{C} < t_e < 190^\circ\text{C}$ 时,不可逆损失的变化趋于平缓。不可逆损失的减小主要是由于工质在蒸发器熵变的减小。图 7(b)显示了当工质为环己烷时, t_{e1} 和 t_{e2} 对 TSORC 的不可逆损失的影响。对于给定的 t_{e2} ,随着 t_{e1} 的增大,不可逆损失先减小后增大,对于给定的 t_{e1} ,不可逆损失与 t_{e2} 成反比。此外,对于给定的 t_{e2} ,还有一个最低点。例如,当 $t_{e2} = 50^\circ\text{C}$, $t_{e1} = 140^\circ\text{C}$ 时,不可逆损失的最低值为 585.07kW。此外,对于 $t_{e1} = 180^\circ\text{C}$ 和 $t_{e2} = 100^\circ\text{C}$,不可逆损失的最低值为 425.5kW。从图 7(c)中可以看出,随着 t_e 的增加, I_{TSORC}/I_{ORC} 先减小后增大。在 $110^\circ\text{C} < t_e < 160^\circ\text{C}$ 时,其 I_{TSORC} 低于 I_{ORC} ,

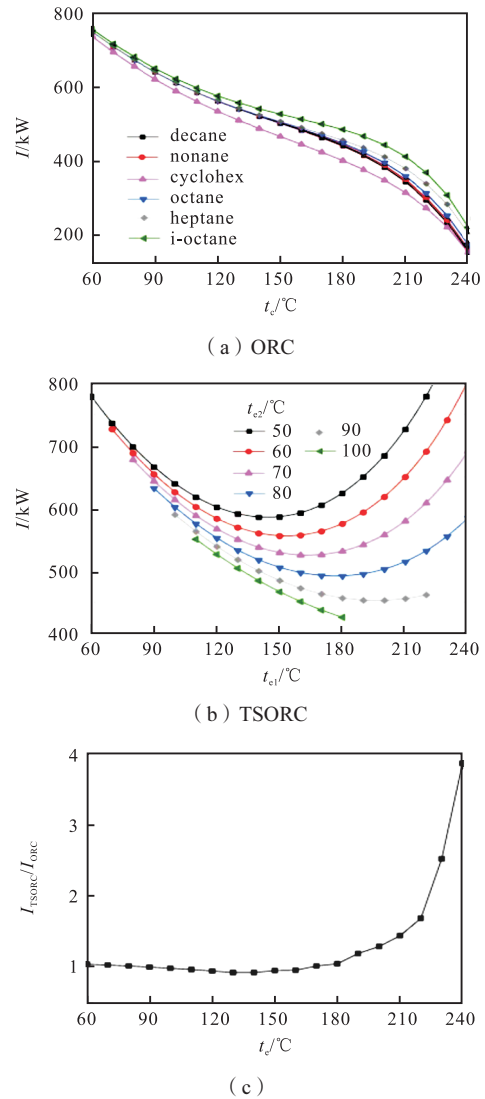


图7 烟气温度为280℃时的不可逆损失

但在 $t_e < 100^\circ\text{C}$ 和 $t_e > 170^\circ\text{C}$ 时, I_{TSORC} 高于 I_{ORC} 。与 ORC 相比, $t_{e1} = 240^\circ\text{C}$ 和 $t_{e2} = 120^\circ\text{C}$ 时, I_{TSORC} 的最低值为 6.0%。

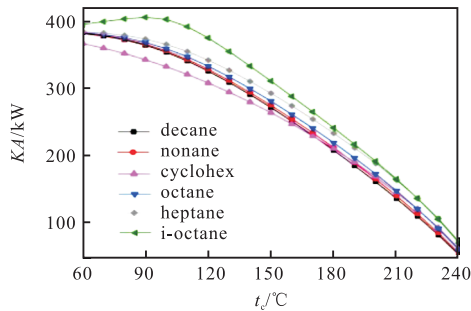
6.4 热导率

图 8(a) 示出了 t_e 对热导 $(KA)_{\text{ORC}}$ 的影响。 KA 是传热系数和传热面积的乘积, 是蒸发器导热性能的评价参数。随着 t_e 的增加, KA 降低。 KA 与传热面积成正比, 随着 t_e 的增加, 传热面积将减小。对于 $t_e < 170^\circ\text{C}$, 环己烷和癸烷的 KA 较低。图 8(b) 描述了当工质为环己烷时, t_{e1} 和 t_{e2} 对 $(KA)_{\text{TSORC}}$ 和 $(KA)_{\text{ORC}}$ 的影响。对于给定的 t_{e2} , KA 随着 t_{e1} 的增加先减小后增大。对于给定的 t_{e1} , KA 与 t_{e2} 成比例。随着 t_{e1} 的增加, 传热温差会减小, 导致传热面积增加。此外, 在 $t_{e1} = 200^\circ\text{C}$ 和 t_{e2}

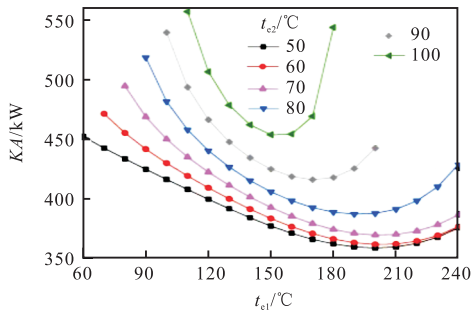
$= 50^\circ\text{C}$ 时, $(KA)_{\text{TSORC}, \min} = 358.48 \text{ kW}/^\circ\text{C}$ 。从图 8(c) 中可以看出, $(KA)_{\text{TSORC}}/(KA)_{\text{ORC}}$ 随着 t_e 的增加而增加, 且总高于 1。换言之, $(KA)_{\text{TSORC}}$ 总比 $(KA)_{\text{ORC}}$ 高。

6.5 比体积比

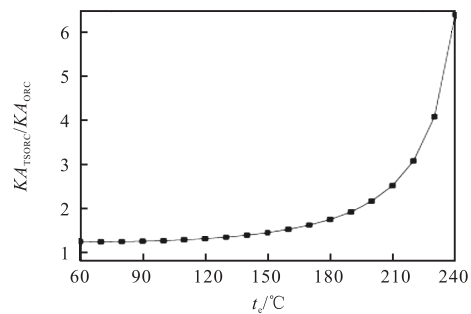
图 9(a) 显示了 t_e 对 ORC 系统透平机进出口处的工质比体积比 VFR_{ORC} 的影响。 VFR 是涡轮机入口和出口之间的比体积比。从图 9(a) 所示, 随着 t_e 的增加, VFR 减小, 这是因为 VFR 与涡轮入口的工质比体积成反比, 而涡轮入口的工质比体积将随着蒸发温度的增加而增加。环己烷和庚烷的 VFR 在 $t_e < 90^\circ\text{C}$ 和 $t_e > 90^\circ\text{C}$ 时达到了较低值。图 9(b) 描述了当工质为环己烷时, t_{e1} 和 t_{e2} 对 TSORC 系统 VFR 的影响。对于给定的 t_{e2} , 随着



(a) ORC

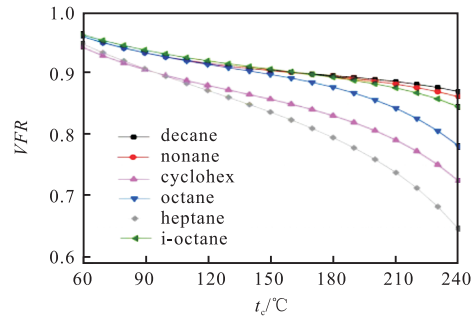


(b) TSORC

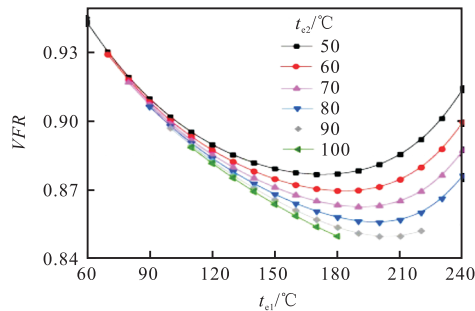


(c)

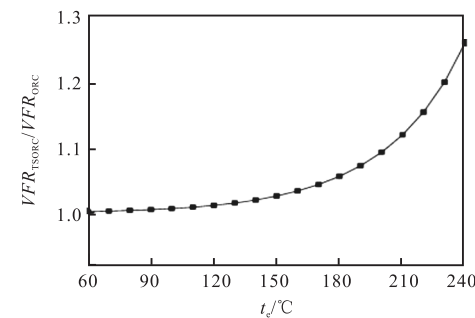
图 8 烟气温度为 280°C 的热导率



(a) ORC



(b) TSORC



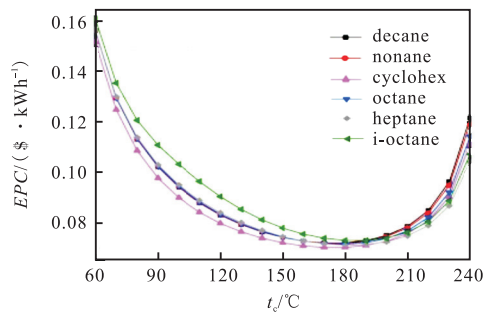
(c)

图 9 烟气温度为 280°C 时的比体积比

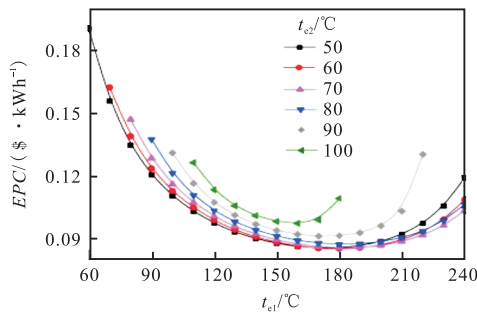
t_{e1} 的增大, VFR 先减小后增大。对于给定的 t_{e1} , VFR 随着 t_{e2} 的增加而减小。从图 9(c) 可以看出, 随着 t_e 的增加, VFR_{TSORC}/VFR_{ORC} 增加, 且均高于 1。换言之, TSORC 的 VFR 总比 ORC 高。与 ORC 相比, 当 t_e 为 60/70℃ 时, TSORC 的 VFR 取到最低值。当 $t_{e1} = 180^\circ\text{C}$ 且 $t_{e2} = 60^\circ\text{C}$ 时, TSORC 的 VFR 取到最低值 0.849。

6.6 发电成本

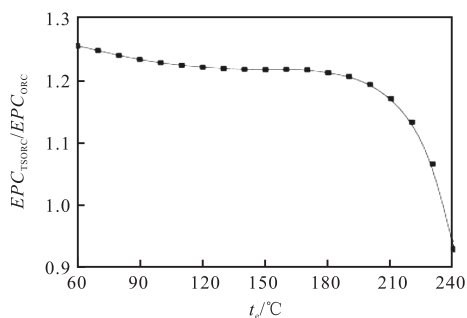
图 10(a) 指出了 t_e 对 ORC 发电成本的影响。随着 t_e 的增加, EPC 先减小后增大。 EPC 的变化取决于总投资成本和净发电功率的相对变化, 正如式 (49) 所示。总投资成本和 EPC 之间存在比例关系, 但 EPC 与净发电成本成反比。此外, 在 $t_e = 170^\circ\text{C}$ 时, 环己烷的 EPC 达到最低值



(a) ORC



(b) TSORC



(c)

图 10 烟气温度为 280℃ 时的发电成本

0.0702\$/kWh。图 10(b) 描述了 t_{e1} 和 t_{e2} 对以环己烷为工质的 TSORC 系统 EPC 的影响。对于给定的 t_{e2} , EPC 随 t_{e1} 先减小后增大。对于给定的 t_{e1} , 随着 t_{e2} 的增加, $t_{e1} < 160^\circ\text{C}$ 时 EPC 随之增加, $t_{e1} > 160^\circ\text{C}$ 时 EPC 先减少后增加, 此时 EPC 的最低值为 0.085\$/kWh。从图 10(c) 中, EPC_{TSORC}/EPC_{ORC} 随着 t_e 的下降而下降。当 $t_e < 240^\circ\text{C}$ 时, EPC_{TSORC} 高于 EPC_{ORC} , 当 $t_e = 240^\circ\text{C}$ 时, EPC_{TSORC} 低于 EPC_{ORC} 。 EPC_{TSORC} 的最低值在 $t_{e1} = 180^\circ\text{C}$, $t_{e2} = 60^\circ\text{C}$ 时达到。值得一提的是, TSORC 的最优 EPC 低于工业用电价格。

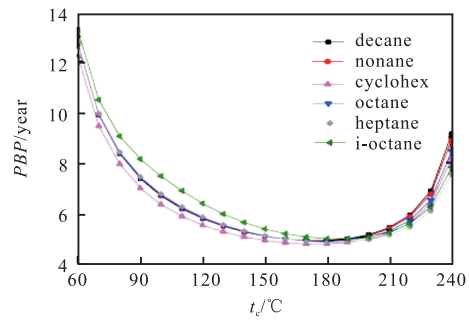
6.7 投资回收期

图 11(a) 显示了 t_e 和工质选择对 ORC 回收期 (PBP) 的影响。随着 t_e 的增加, EPC 先减小后增大。 PBP 与总成本和净输出功率成一定的比例关系, 如公式 (50) 所示。 PBP 的影响因素与 EPC 相同, 因此 PBP 和 EPC 的变化趋势相似, 如图 11(a) 所示。对于 $t_e = 170^\circ\text{C}$, 以环己烷为工质的 ORC 系统的最短投资回收期为 4.77 年的, 比异辛烷低 5.5%。图 11(b) 显示了 t_{e1} 和 t_{e2} 对以环己烷为工质的 TSORC 系统的影响。对于给定的 t_{e2} , PBP 随 t_{e1} 先减小后增大。对于给定的 t_{e1} , 当 $t_{e1} < 160^\circ\text{C}$ 时 PBP 随 t_{e2} 的增加而增加, 当 $t_{e1} > 160^\circ\text{C}$ 时先减小后增大。从图 11(c) 可知, 随着 t_{e2} 的增加, PBP_{TSORC}/PBP_{ORC} 减小。在 $t_e < 240^\circ\text{C}$ 时, PBP_{TSORC} 高于 PBP_{ORC} , 但是在 $t_e = 240^\circ\text{C}$, PBP_{TSORC} 低于 PBP_{ORC} 。 PBP_{TSORC} 在 $t_{e1} = 180^\circ\text{C}$ 且 $t_{e2} = 60^\circ\text{C}$ 时达到最低值。

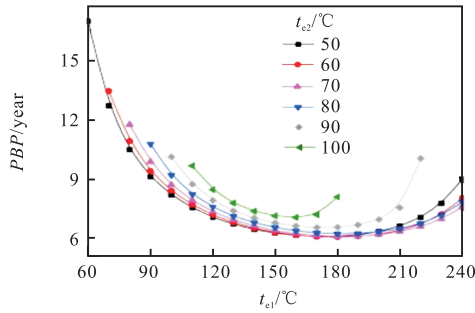
6.8 投资回报率

图 12(a) 表明了 t_e 对 ORC 系统投资回报率 ($ROROI$) 的影响。随着 t_e 的增大, $ROROI$ 先增大后减小。 $ROROI$ 是一个经济性评价参数, 与 EPC 和 PBP 相同。如式 (53) 所示, $ROROI$ 与净输出功率成正比, 因此 $ROROI$ 与 EPC 相反。当 $t_e < 190^\circ\text{C}$ 时, 以环己烷为工质的系统拥有较高的 $ROROI$, 而对于 $t_e > 190^\circ\text{C}$, 以庚烷为工质的系统的 $ROROI$ 较高。此外, 以环己烷为工质的系统的 $ROROI$ 较好, 在 $t_e = 170^\circ\text{C}$ 时达到最大值为 3.013, 比异辛烷高 2.8%。图 12(b) 展示了 t_{e1} 和 t_{e2} 对以环己烷为工质的 TSORC 系统的投资回报率的影响。对于给定的 t_{e2} , $ROROI$ 随 t_{e1} 先增大后减小。对于给定

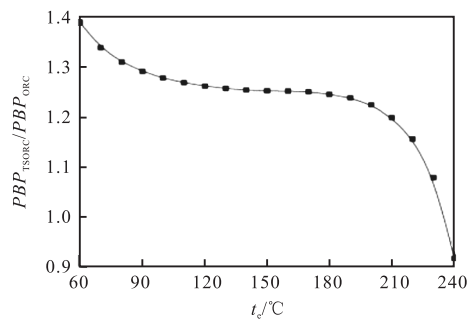
的 t_{e1} , 当 $t_{e1} < 160^\circ\text{C}$ 时, 随着 t_{e2} 的增加, $ROROI$ 减小, 对于 $t_{e1} > 160^\circ\text{C}$, $ROROI$ 先增大后减小, $ROROI$ 的变化是由总投资成本的增加引起的, 与 EPC 相反。如图 12(c) 所示, $ROROI_{\text{TSORC}}/ROROI_{\text{ORC}}$ 随 t_e 的增加而增加。对于 $t_e < 240^\circ\text{C}$, $ROROI_{\text{TSORC}}$ 低于 $ROROI_{\text{ORC}}$, 但对于 $t_e = 240^\circ\text{C}$, $ROROI_{\text{TSORC}}$ 高于 $ROROI_{\text{ORC}}$ 。与 ORC 相比, 对于 $t_{e1} = 240^\circ\text{C}$ 和 $t_{e2} = 70^\circ\text{C}$, TSORC 将 $ROROI$ 提升了 7.4%。



(a) ORC



(b) TSORC

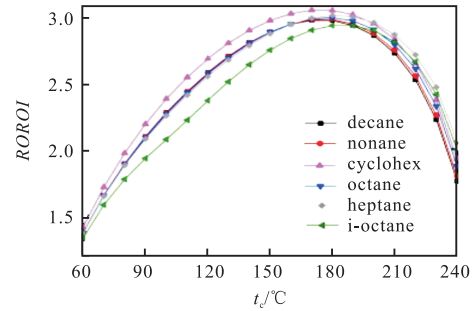


(c)

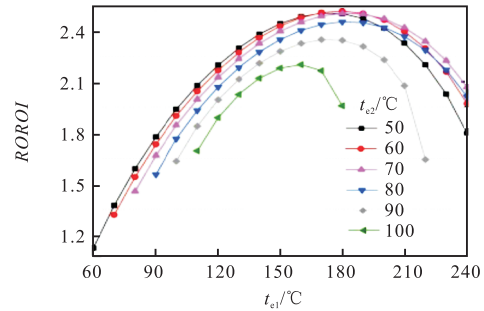
图 11 烟气温度为 280°C 时的投资回收期

最后, 对于烟气温度范围为 $200 \sim 300^\circ\text{C}$, 以环己烷为工质的 ORC 系统和 TSORC 系统的热力学和经济性指标列于表 3~8, 并且找到了各烟气温度下热力学经济参数最佳时所对应的工况, 并

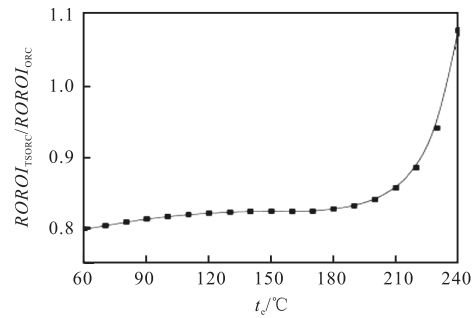
给出了指标的重要性排序。从表 3 可以看出, 烟气温度逐渐上升时, 系统净功逐渐增大, 并且



(a) ORC



(b) TSORC



(c)

图 12 烟气温度为 280°C 时的投资回报率

TSORC 系统的净功比 ORC 系统大。与 $W_{\text{net,max}}$ 相对应的是, TSORC 在 η_{th} 和 η_{ex} 上较好, 而在 EPC 、 PBP 和 $ROROI$ 较差。由表 4 可知, 随着烟气温度的升高, η_{th} 逐渐增大。此外, $\eta_{\text{th,TSORC}}$ 低于 $\eta_{\text{th,ORC}}$ 。与 $W_{\text{net,max}}$ 相对应的是, TSORC 在 η_{th} , η_{ex} , EPC , PBP 和 $ROROI$ 均较好。由表 5 可知, 随着烟气温度的升高, η_{ex} 增大。此外, $\eta_{\text{ex,TSORC}}$ 均高于 $\eta_{\text{ex,ORC}}$ 。TSORC 在 W_{net} 、 EPC 、 PBP 和 $ROROI$ 上表现较好, 在 η_{th} 上较差。由表 6 可知, EPC 随烟气温度的升高而降低, EPC_{TSORC} 比 EPC_{ORC} 更差。将总部件成本与 W_{net} 相结合, 即可得到发电成本。 EPC 的改善主要是由于净输出功的增加。与

$EPC_{\max}$ 相对应, TSORC 在 W_{net} 和 η_{ex} 上较好, 在 η_{th} 、 PBP 和 $ROROI$ 上较差。此外, EPC_{TSORC} 在 0.077-0.133\$/kWh 范围内, 低于工业用电, TSORC 具有很大的应用前景。由表 7 可知, PBP 随烟气温度的升高而降低, PBP_{TSORC} 高于 PBP_{ORC} 。 PBP 的变化趋势和 EPC 相同。与 PBP 最大值相对应, TSORC 在 W_{net} 和 η_{ex} 上较好, 在 η_{th} 、 EPC 和 $ROROI$ 上较差。由表 8 可知, 随着烟气温度的升高, $ROROI$ 逐渐增大。此外, TSORC 的 $ROROI$ 比

ORC 差。与 $ROROI_{\max}$ 相对应, TSORC 在 W_{net} 和 η_{ex} 表现较好, η_{th} 、 EPC 和 PBP 较差。

在上述分析中, 当烟气温度为 200 °C ~ 300 °C 时, 烟气温度越高, 其热力学性能和经济性能越好。与 ORC 相比, TSORC 提高了净输出功率和效率, 但降低了热效率、 EPC 、 PBP 和 $ROROI$ 。

因此, TSORC 的热力学性能较好, 经济性能不如 ORC。

表 3 不同烟气温度下 ORC 和 TSORC 最大净输出功率对应的主要参数

$t_{\text{gain}}/\text{°C}$		$W_{\text{net,max}}/\text{kW}$	$\eta_{\text{th}}/\%$	$\eta_{\text{ex}}/\%$	$EPC/\text{\$/kWh}$	PBP/year	$ROROI/1$	$t_c/\text{°C}$
200	ORC	135.61	12.02	40.83	0.1238	9.33	1.73	105
	TSORC	192.51	13.29	50.51	0.1359	10.52	1.58	90/140
	TSORC/ORC	1.42	1.11	1.24	1.10	1.13	0.91	1.08
220	ORC	176.83	12.94	42.40	0.1057	7.67	2.03	115
	TSORC	240.15	14.37	51.77	0.1280	9.64	1.67	100/140
	TSORC/ORC	1.36	1.11	1.23	1.21	1.27	0.83	1.09
240	ORC	224.16	13.77	43.53	0.0925	6.54	2.32	125
	TSORC	292.17	15.06	52.52	0.1188	8.86	1.80	100/150
	TSORC/ORC	1.30	1.09	1.21	1.28	1.35	0.78	1.07
260	ORC	278.18	14.84	45.41	0.0816	5.65	2.63	140
	TSORC	347.41	15.78	53.30	0.1089	7.96	1.97	100/160
	TSORC/ORC	1.25	1.06	1.17	1.34	1.41	0.75	1.02
280	ORC	339.55	15.45	46.82	0.0743	5.08	2.88	150
	TSORC	408.63	16.66	54.45	0.1093	7.99	1.96	100/180
	TSORC/ORC	1.20	1.08	1.16	1.47	1.57	0.68	1.04
300	ORC	409.0	16.25	48.79	0.0686	4.64	3.12	165
	TSORC	475.54	17.57	55.45	0.1002	7.20	2.14	100/200
	TSORC/ORC	1.16	1.08	1.14	1.46	1.55	0.68	1.05

表 4 不同烟气温度下 ORC 和 TSORC 最大热效率对应的主要参数

$t_{\text{gain}}/\text{°C}$		$\eta_{\text{th,max}}/\%$	W_{net}/kW	$\eta_{\text{ex}}/\%$	$EPC/\text{\$/kWh}$	PBP/year	$ROROI/1$	$t_c/\text{°C}$
200	ORC	16.25	37.19	44.47	0.2331	23.91	0.92	165
	TSORC	13.71	191.23	51.03	0.1403	10.97	1.53	100/130
	TSORC/ORC	0.84	5.14	1.15	0.60	0.46	1.66	0.72
220	ORC	17.26	23.13	43.40	0.3157	55.29	0.68	190
	TSORC	14.37	240.15	51.77	0.1280	9.74	1.67	100/140
	TSORC/ORC	0.83	10.38	1.19	0.41	0.18	2.47	0.66
240	ORC	17.85	27.45	42.47	0.2762	34.68	0.78	210
	TSORC	15.06	292.17	52.52	0.1188	8.86	1.80	100/150
	TSORC/ORC	0.84	10.64	1.24	0.43	0.26	2.33	0.64
260	ORC	18.30	32.80	41.48	0.2413	25.56	0.89	230
	TSORC	15.78	347.41	53.30	0.1089	7.96	1.97	100/160
	TSORC/ORC	0.86	10.59	1.29	0.45	0.31	2.21	0.62
280	ORC	18.62	40.09	40.48	0.2083	19.59	1.03	250
	TSORC	16.66	408.63	54.45	0.1093	7.99	1.96	100/180
	TSORC/ORC	0.90	10.19	1.35	0.52	0.41	1.91	0.63
300	ORC	18.85	51.93	39.55	0.1740	14.79	1.23	270
	TSORC	17.57	472.54	55.45	0.1002	7.20	2.14	100/200
	TSORC/ORC	0.93	9.10	1.40	0.58	0.49	1.74	0.64

表 5 不同烟气温度下 ORC 和 TSORC 最大焓效率对应的主要参数

$t_{\text{gain}}/^{\circ}\text{C}$		$\eta_{\text{ex,max}}/\%$	W_{net}/kW	$\eta_{\text{th}}/\%$	$EPC/\$/\text{kWh}$	PBP/year	$ROROI/1$	$t_c/^{\circ}\text{C}$
200	ORC	44.90	80.84	15.47	0.1480	11.78	1.45	150
	TSORC	51.03	191.23	13.71	0.1403	10.97	1.53	100/130
	TSORC/ORC	1.14	2.37	0.89	0.95	0.93	1.05	0.79
220	ORC	45.20	135.66	15.75	0.1107	8.12	1.93	155
	TSORC	51.77	240.15	14.37	0.1280	9.74	1.67	100/140
	TSORC/ORC	1.15	1.77	0.91	1.16	1.20	0.86	0.81
240	ORC	45.72	195.43	16.01	0.0915	6.456	2.34	160
	TSORC	52.52	292.17	15.06	0.1188	8.86	1.80	100/150
	TSORC/ORC	1.15	1.50	0.94	1.30	1.37	0.77	0.83
260	ORC	46.50	260.33	16.26	0.0797	5.50	2.69	165
	TSORC	53.50	347.41	15.78	0.1089	7.96	1.97	100/160
	TSORC/ORC	1.15	1.33	0.97	1.37	1.45	0.73	0.86
280	ORC	47.58	330.60	16.49	0.0718	4.89	2.98	170
	TSORC	54.45	408.63	16.66	0.1093	7.99	1.96	100/180
	TSORC/ORC	1.14	1.24	1.01	1.52	1.63	0.66	0.92
300	ORC	49.06	403.35	16.93	0.0663	4.47	3.23	180
	TSORC	55.45	472.54	17.57	0.1002	7.20	2.14	100/200
	TSORC/ORC	1.13	1.17	1.04	1.51	1.61	0.66	0.96

表 6 不同烟气温度下 ORC 和 TSORC 最小发电成本对应的主要参数

$t_{\text{gain}}/^{\circ}\text{C}$		$EPC_{\text{min}}/\$/\text{kWh}$	W_{net}/kW	$\eta_{\text{th}}/\%$	$\eta_{\text{ex}}/\%$	PBP/year	$ROROI/1$	$t_c/^{\circ}\text{C}$
200	ORC	0.1216	132.62	12.95	42.64	9.12	1.76	115
	TSORC	0.1333	190.41	12.87	49.51	10.26	1.61	80/130
	TSORC/ORC	1.0965	1.4358	0.9933	1.1610	1.1250	0.9120	0.93
220	ORC	0.1033	171.21	14.15	44.18	7.46	2.07	130
	TSORC	0.1176	235.83	13.64	50.21	8.74	1.82	80/140
	TSORC/ORC	1.1382	1.3774	0.9638	1.1365	1.1720	0.8786	0.88
240	ORC	0.0898	215.56	15.16	45.39	6.32	2.38	145
	TSORC	0.1048	278.28	14.06	49.73	7.60	2.04	70/150
	TSORC/ORC	1.1673	1.2910	0.9276	1.0957	1.2021	0.8567	0.82
260	ORC	0.0796	266.49	16.01	46.46	5.49	2.69	160
	TSORC	0.0943	329.89	14.94	50.58	6.69	2.27	70/170
	TSORC/ORC	1.1848	1.2389	0.9336	1.0886	1.2182	0.8440	0.81
280	ORC	0.0716	318.43	16.92	45.45	4.87	2.99	180
	TSORC	0.0851	380.04	15.66	50.75	5.94	2.51	60/180
	TSORC/ORC	1.1890	1.1935	0.9251	1.0697	1.2189	0.8411	0.77
300	ORC	0.0653	377.93	17.64	48.35	4.39	3.28	200
	TSORC	0.0772	439.12	16.59	51.69	5.31	2.77	50/190
	TSORC/ORC	1.1820	1.1619	0.9405	1.0690	1.2075	0.8460	0.76

表 7 不同烟气温度下 ORC 和 TSORC 最短投资回收期对应的主要参数

$t_{\text{gain}}/^{\circ}\text{C}$		$PBP_{\text{min}}/\text{year}$	W_{net}/kW	$\eta_{\text{th}}/\%$	$\eta_{\text{ex}}/\%$	$EPC/\$/\text{kWh}$	$ROROI/1$	$t_c/^{\circ}\text{C}$
200	ORC	9.12	132.62	12.95	42.64	0.1216	1.76	115
	TSORC	10.26	190.41	12.87	49.51	0.1333	1.61	80/130
	TSORC/ORC	1.12	1.44	0.99	1.16	1.10	0.91	0.93
220	ORC	7.46	171.21	14.15	44.18	0.1033	2.07	130
	TSORC	8.74	235.83	13.64	50.21	0.1176	1.82	80/140
	TSORC/ORC	1.17	1.38	0.96	1.14	1.14	0.88	0.88
240	ORC	6.32	215.56	15.16	45.39	0.0898	2.38	145
	TSORC	7.60	278.28	14.06	49.73	0.1049	2.04	70/150
	TSORC/ORC	1.20	1.29	0.93	1.10	1.17	0.86	0.82

续表 7

$t_{\text{gain}}/^{\circ}\text{C}$		$PBP_{\text{min}}/\text{year}$	W_{net}/kW	$\eta_{\text{th}}/\%$	$\eta_{\text{ex}}/\%$	$EPC/\$/\text{kWh}$	$ROROI/1$	$t_p/^{\circ}\text{C}$
260	ORC	5.49	266.49	16.01	46.46	0.0796	2.69	160
	TSORC	6.69	329.89	14.94	50.58	0.0943	2.27	70/170
	TSORC/ORC	1.22	1.24	0.93	1.09	1.18	0.84	0.81
280	ORC	4.587	318.43	16.92	47.45	0.0716	2.99	180
	TSORC	5.94	380.04	15.66	50.75	0.0851	2.51	60/180
	TSORC/ORC	1.22	1.19	0.93	1.07	1.19	0.84	0.77
300	ORC	4.69	377.93	17.64	48.35	0.0653	3.28	200
	TSORC	5.31	439.12	16.59	51.69	0.0772	2.77	50/190
	TSORC/ORC	1.21	1.16	0.94	1.07	1.18	0.85	0.76

表 8 不同烟气温度下 ORC 和 TSORC 最大投资回报率对应的主要参数

$t_{\text{gain}}/^{\circ}\text{C}$		$ROROI_{\text{max}}/1$	W_{net}/kW	$\eta_{\text{th}}/\%$	$\eta_{\text{ex}}/\%$	$EPC/\$/\text{kWh}$	PBP/year	$t_p/^{\circ}\text{C}$
200	ORC	1.76	132.62	12.95	42.64	0.1216	9.12	115
	TSORC	1.61	190.41	12.87	49.51	0.1333	10.26	80/130
	TSORC/ORC	0.91	1.44	0.99	1.16	1.10	1.12	0.93
220	ORC	2.07	171.21	14.15	44.18	0.1033	7.46	130
	TSORC	1.82	235.83	13.64	50.21	0.1176	8.74	80/140
	TSORC/ORC	0.88	1.38	0.96	1.14	1.14	1.17	0.88
240	ORC	2.38	215.56	15.16	45.39	0.0898	6.32	145
	TSORC	2.04	278.28	14.06	49.73	0.1049	7.60	70/150
	TSORC/ORC	0.86	1.29	0.93	1.10	1.17	1.20	0.82
260	ORC	2.69	266.49	16.01	46.46	0.0796	5.49	160
	TSORC	2.27	329.89	14.94	50.58	0.0943	6.69	70/170
	TSORC/ORC	0.84	1.24	0.93	1.09	1.18	1.22	0.81
280	ORC	2.99	318.43	16.92	47.45	0.0716	4.87	180
	TSORC	2.51	380.04	15.66	50.75	0.0851	5.94	60/180
	TSORC/ORC	0.84	1.19	0.93	1.07	1.19	1.22	0.77
300	ORC	3.28	377.93	17.64	48.35	0.0653	4.39	200
	TSORC	2.77	439.12	16.59	51.69	0.0772	5.31	50/190
	TSORC/ORC	0.85	1.16	0.94	1.07	1.18	1.21	0.76

7 结论

在烟气温度为 200 ~ 300 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下, 本文比较了有机朗肯循环(ORC)和两级串联有机朗肯循环(TSORC)的热力学和经济性能。本研究得出的主要结论如下:

从热力学角度看, 在相同的烟气温度下, TSORC 可以从烟气中回收更多的热量, 以提高净输出功率和效率, 但热效率比 ORC 低。

随着烟气温度的升高, TSORC 的热力学优势趋于减弱, 因为烟气低压段余热回收越来越不值得回收。

ORC 和 TSORC 的总体经济性能与烟气能级成正比, ORC 比 TSORC 更具竞争力。以环己烷为工质的 TSORC 的发电成本在 0.077 ~ 0.133 $\$/\text{kWh}$ 之间, 低于商业电价。随着技术的进步, 机

械制造成本的下降, 未来 TSORC 的竞争力会更强。

符号说明			
Q	换热量/kW	MGT	微燃机
I	不可逆损失	ICE	内燃机
c	比热		
W	输出功/kW	希腊字母	
s	比熵/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	η_{th}	热效率/%
K	传热系数/($\text{W} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)	η_{ex}	炯效率/%
A	换热面积/ m^2		
m	质量流量	下标	
h	焓/($\text{KJ} \cdot \text{Kg}^{-1}$)	gain	烟气进口
ORC	有机朗肯循环	gamid	中段烟气
TSORC	两级串联有机朗肯循环	gaout	烟气出口
PBP	投资回收期	pp	窄点
VFR	比体积比	wf	工质
EPC	发电成本	E	蒸发段
ROROI	投资回报率	C	冷凝段
CCGT	燃气透平联合循环	T	透平做功段
GT	燃气透平	P	泵做功段