

超临界朗肯循环热力性能研究

张鑫¹ 赵贤聪¹ 苍大强¹ 王景富³

(1. 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2. 中国国际工程咨询公司, 北京 100048;
3. 中国船舶重工集团公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘要: 对 140 °C 以下的低温工业余热进行了回收利用, 从热力学第一定律和第二定律的角度对超临界朗肯循环的系统性能进行了分析。以 R22、R115、R134a、R125 及 CO₂ 5 种工质为研究对象, 对超临界朗肯循环的输出净功率、吸热量、热效率、焓损失和焓效率等参数进行了计算。结果表明: 当透平进口压力较低时 (8-11 MPa), 采用有机工质 R22 综合性能最好; 当透平进口压力较高时 (11-26 MPa), 以超临界 CO₂ 为工质综合性能最好。

关键词: 低温余热; 超临界朗肯循环; 热力性能; 工质

中图分类号: TK11 文献标识码: A
DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2015.02.013

引言

近年来, ORC (有机朗肯循环) 由于其结构简单、循环热效率高、蒸发压力和冷凝压力较低等特点, 已成为低品位余热资源的主要利用方式^[1-3]。目前, 大多数研究都集中在亚临界 ORC 上, 对于超临界朗肯循环研究较少。胡芑等人以 R134a、R22 等 8 种有机工质为研究对象, 对其超临界 ORC 单位净输出功率、循环效率、循环功比、膨胀机入口体积流量等参数进行了理论分析, 结果表明: 以 R152a 和 R134 为工质的超临界 ORC 具有较高的单位净输出功率和循环效率^[4]。姜亮等人建立了带回热器的超临界朗肯循环计算模型, 运用 EES (Engineering Equation Solver) 软件对有、无回热器两种情况下系统的热力参数进行了计算, 结果表明: 在超临界工况下, 以 R152a 为工质的系统增加回热器后最大热效率提高了 0.65%^[5]。汤磊等人利用超临界 ORC 发电系统回收温度低于 150 °C 的低品位热能, 研究表明: 在热源进口温度和最小换热温差的限制下, 存在最佳膨胀机入口温度和膨胀机入口压力, 使得系统循环热效率最高^[6]。

CO₂ 作为自然界存在的一种物质, 早年就被广泛用于制冷行业, 但因为系统笨重且效率很低而被

人工制冷剂所替代^[7]。由于 CFCs 等人工制冷剂替代形势所迫, 以 CO₂ 作为制冷剂重新受到重视。本研究以 40-140 °C 的工业废气所携热能为利用对象, 研究比较了以 CO₂ 及以其它有机物为工质的超临界朗肯循环系统的输出净功率、热效率、焓效率等热力性能参数, 并讨论了蒸发温度、透平进口压力等因素对热力性能参数的影响。

1 超临界朗肯循环系统机理分析

与亚临界朗肯循环相比, 超临界朗肯循环工质与热源的匹配性更好, 系统的不可逆性更小, 循环的基本部件与亚临界循环类似, 系统温熵图如图 1 所示。

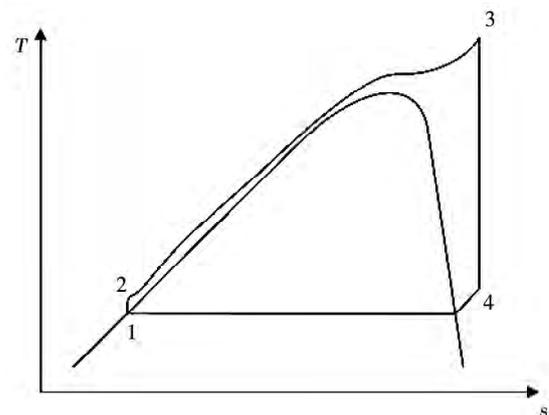


图 1 超临界朗肯循环系统的温熵图
Fig. 1 $T-S$ diagram of a supercritical Rankine cycle system

超临界朗肯循环历经以下 4 个过程:

等压加热 (2-3): 高压不饱和的液态工质 2 进入蒸发器, 与高温热源进行热交换, 被加热为超临界工质 3。

收稿日期: 2014-10-21; 修订日期: 2014-12-10

作者简介: 张鑫 (1968-), 男, 山东邹平人, 北京科技大学博士研究生。

绝热膨胀(3-4): 超临界工质推动透平做功, 带动发电机组发电, 出来后成为低温低压的蒸汽 4。

等压放热(4-1): 低温低压的气态工质进入冷凝器, 与冷却水进行热交换, 历经预冷、等温放热两个阶段冷凝为饱和液态工质 1。

绝热加压(1-2): 饱和液态工质进入工质泵, 升压超过临界压力, 成为高压不饱和液体 2。

工质在 1、2、3、4 的 4 个状态点分别为: 低压饱和液态, 高压不饱和液态, 高温高压超临界状态, 低温低压气态。

2 参数设定及循环工质的选择

2.1 参数设定

超临界朗肯循环系统所利用的热能为工业废气 (CO₂ 含量 13%, H₂O 含量 11%, N₂ 含量 76%), 温度范围为 313.15 - 413.15 K, 压强为 0.1 MPa, 环境温度设为 20 °C (293.15 K)。系统各部件的基本参数设置为: 透平绝热效率 $\eta_T = 0.85$, 机械效率 $\eta_m = 0.9$, 工质泵绝热效率 $\eta_p = 0.8$ 。

蒸发器中, 热源进出口温差设为 15 °C (热源出口温度为 398.15 K); 冷凝器中, 冷却水进出口温度分别设为 293.15 和 298.15 K, 工质冷凝后温度为 302.15 K。

2.2 循环工质的选择

考虑到热源废气的温度设为 140 °C, 为实现工质在超临界区的加热过程, 所选工质的临界温度应小于 413.15 K。因此, 选取 CO₂ 和 R22、R134a、R125、R115 的 4 种有机物作为工质, 研究在不同的透平进口压力和进口温度下, 系统的热力性能, 工质的部分参数如表 1 所示。表中 ODP(臭氧衰减指数), GWP(温室效应指数)。

表 1 工质的基本物性及环保参数

Tab. 1 Basic physical properties of the working medium and environmental protection parameters

工质	分子式	ODP	GWP	临界压力/MPa	临界温度/K
R744	CO ₂	0	1	7.38	304.13
R22	CHClF ₂	0.05	4200	4.99	369.3
R134a	CH ₂ ClF	0	420	4.06	374.21
R125	CHF ₂ CF ₃	0	860	3.62	339.17
R115	CF ₃ CF ₂ Cl	0.6	7400	3.13	353.1

3 系统热力性能分析

3.1 以 CO₂ 为工质

由图 2 可见, 随着透平进口压力的增加, 系统输出净功率呈先升后降的趋势, 存在一个峰值对应着最佳的透平进口压力。而随着透平进口温度的降低, 这个最佳压力逐渐减小, 向 CO₂ 的临界压力靠近, 即透平的每个进口温度都对应着一个最佳的压力值, 且此最佳压力值随着进口温度的升高而增加。

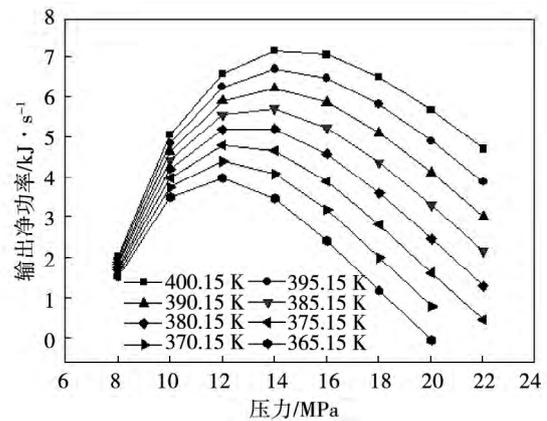


图 2 系统输出净功率随透平进口压力的变化图

Fig. 2 Chart showing changes of the net power output of the system with the pressure at the inlet of the turbine

随着透平进口温度的升高, 系统输出净功率会有一定程度的增加。这个优势在较高的压力下体现更为明显。以透平进口温度 400.15 K 和 365.15 K 为例, 当透平进口压力同为 14 MPa 时, 系统输出净功率分别为 7.21 kJ/s 和 3.56 kJ/s, 前者相对后者提升了 102.53%; 而两个温度下的最佳压力 14 MPa 和 12 MPa 分别对应的输出净功率的峰值为 7.21 kJ/s 和 4.05 kJ/s, 前者相对后者提升了 78.02%。

系统吸热量的变化趋势如图 3 所示。随着透平进口压力的提升, 系统吸热量逐渐降低; 随着透平进口温度的提升, 系统吸热量增加。这是因为: (1) 在同样的透平进口温度下, 随着压力的增加, 蒸发器入口工质的焓值增加, 出口的焓值减少, 进而造成其焓变减少; (2) 在同样的透平进口压力下, 蒸发器入口工质的焓值不变, 但随着透平进口处工质温度的升高, 工质的焓值升高, 从而导致蒸发器工质的焓变增加。

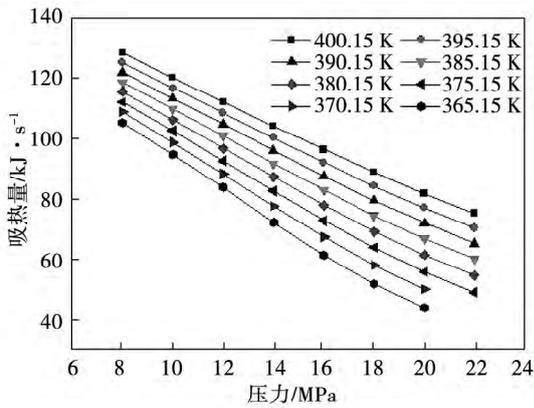


图3 系统吸热量随透平进口压力的变化图
Fig. 3 Chart showing changes of the amount of heat absorbed by the system with the pressure at the inlet of the turbine

图4为系统热效率随透平进口压力的变化图,呈现以下规律:(1)随着透平进口压力的升高,系统热效率呈先升后降的抛物线状,存在一个最佳压力值对应着热效率的峰值;(2)随着透平进口温度的升高,系统热效率增加,且压力越大,效率的提升越明显;(3)不同的透平进口温度存在不同的最佳压力对应着系统最大热效率,且随着温度的升高,最佳压力值越大;(4)要维持循环系统的有效运行,压力值存在一个有效区间,且透平进口温度越低,此有效压力区间越窄。

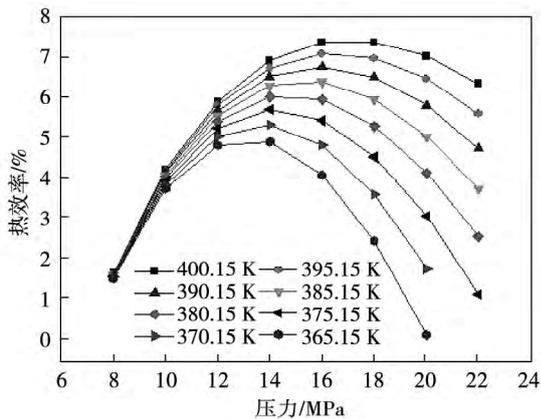


图4 系统热效率随透平进口压力的变化图
Fig. 4 Chart showing changes of the thermal efficiency of the system with the pressure at the inlet of the turbine

总体而言,在热源 140 °C 时,采用 CO₂ 为工质的超临界朗肯循环的热效率较低。在透平进口温度为 400.15 K 时,其最佳压力值 18 MPa 对应的最高热

效率为 7.39%。

系统焓损失随透平进口压力和进口温度的变化如图5所示。随着透平进口压力的升高,系统焓损失呈下降趋势,且变化率渐趋平缓,整体呈双曲线状。而随着透平进口温度的升高,焓损失也增加,且在不同的压力下,增加率相差不大。

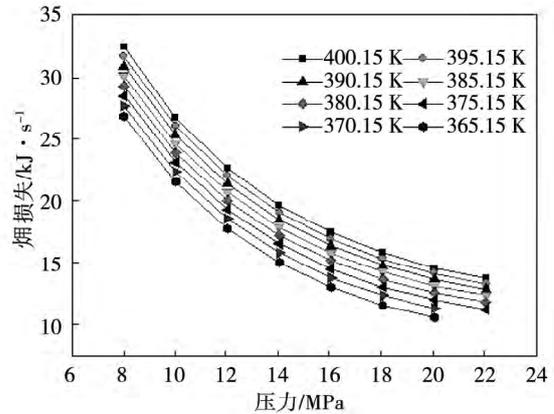


图5 系统焓损失随透平进口压力的变化图
Fig. 5 Chart showing changes of the exergy loss of the system with the pressure at the inlet of the turbine

由图6可见,系统焓效率的变化曲线与图5所呈现的系统焓效率的变化曲线很相似。而透平进口处 400.15 K 的温度下最佳的压力值也在 18 MPa 左右,对应的最大焓效率为 6.24%。

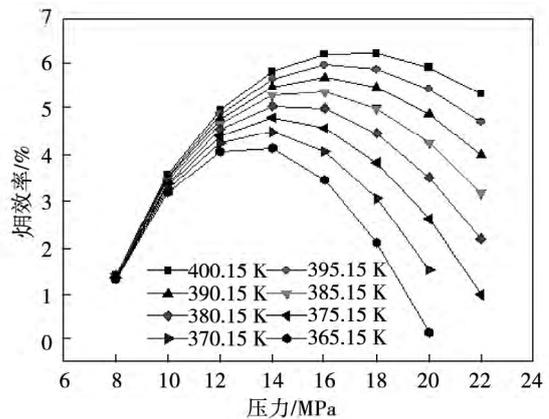


图6 系统焓效率随透平进口压力的变化图
Fig. 6 Chart showing changes of the exergy efficiency loss of the system with the pressure at the inlet of the turbine

3.2 不同工质的超临界朗肯循环性能对比分析

选取透平进口温度为 400.15 K, 在 8 MPa - 26 MPa 的压力区间内, 对比研究了 CO₂ 与 4 种有机工质对超临界循环的热力性能的影响。

由图 7 可见, 在设定的透平进口压力范围内, 在系统输出净功率方面, CO₂ 与 4 种有机工质表现出了截然不同的变化趋势。CO₂ 表现出了先增后减的变化趋势, 在透平进口压力 14 MPa 处达到峰值 7.21 kJ/s。而 4 种有机工质均表现出单调递减的趋势。在 8 - 11 MPa 的压力下, 4 种有机工质的性能为 R22 > R134a > R125 > R115; 在 11 - 26 MPa 的压力下, 4 种有机工质的性能为 R134a > R125 > R22 > R115。且在 11 - 26 MPa 的压力区间内, CO₂ 表现出了明显的优势。鉴于 CO₂ 和 R134a 较好的环境友好性, 采用二者做工质, 无疑实现了热力性能和环境效益的较好统一。

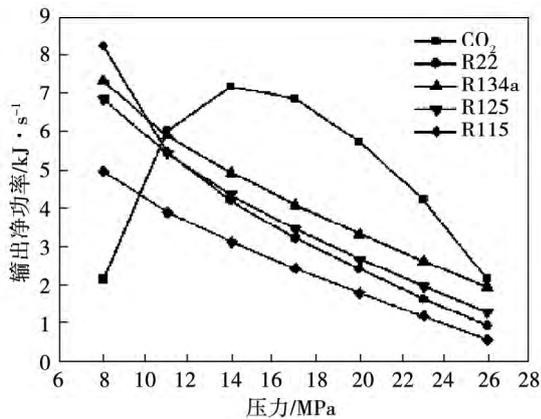


图 7 系统输出净功率随透平进口压力的变化图

Fig. 7 Chart showing changes of the net power output of the system with the pressure at the inlet of the turbine

由图 8 可见, 相对于 4 种有机工质, 采用 CO₂ 为循环工质的超临界循环在系统吸热量方面表现出了较大的优势, 且在较低的透平进口压力下优势更明显。系统吸热量随透平进口压力的升高都成单调递减的趋势, 但 CO₂ 的变化曲线呈一次函数, 而有机工质的变化曲线都是渐趋平缓, 变化率随着压力的增大而减小。

系统热效率随透平进口压力的变化如图 9 所示。采用 CO₂ 为工质的超临界循环的系统热效率表现出了先升后降的趋势, 在 17 MPa 的压力下达到峰值 7.43%。而 4 种有机工质都为单调递减的趋势, 以 R134a 为例, 压力为 8 MPa 时的热效率是 9.54%,

而压力为 26 MPa 时的热效率是 3.43%, 降低了 64.05%。

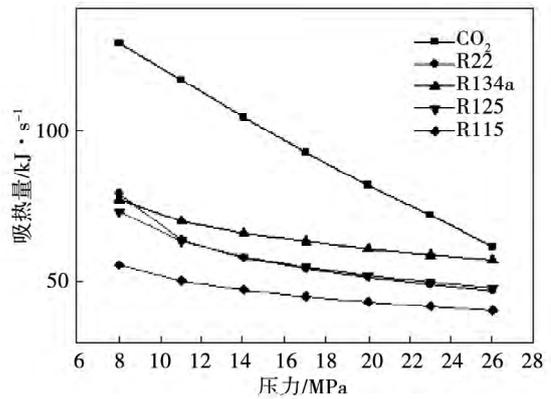


图 8 系统吸热量随透平进口压力的变化图
Fig. 8 Chart showing the amount of heat absorbed by the system with the pressure at the inlet of the turbine

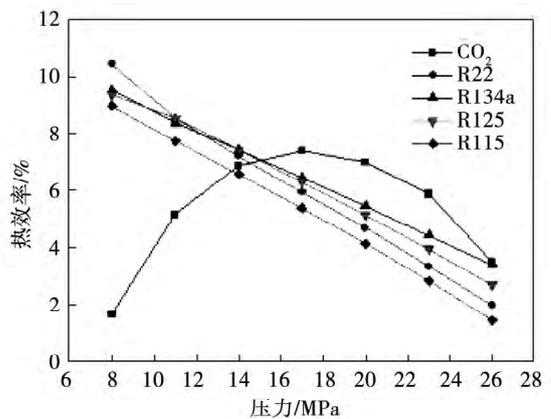


图 9 系统热效率随透平进口压力的变化图
Fig. 9 Chart showing changes of the thermal efficiency of the system with the pressure at the inlet of the turbine

相对于 4 种有机工质, 采用 CO₂ 为工质, 系统在热效率方面的优势只体现在某段透平进口压力值范围内, 约 15 MPa - 26 MPa。而在 8 MPa - 14 MPa 时, 有机工质的系统热效率明显高于 CO₂, 以 8 MPa 的压力为例, R134a 的系统热效率达到 9.54%, 而 CO₂ 只有 1.68%。

在低压段, 4 种有机工质的表现为 R22 > R134a > R125 > R115, 此顺序也正是其临界压力的高低顺序。可见, 在较低的透平进口压力下, 临界压力大的有机工质表现出的系统热效率更好。

由图 10 可见, 随着透平进口压力的增大, CO₂

超临界循环的焓损失呈单调下降趋势,且变化率逐渐减小。4种有机工质的系统焓损失呈先减后增的变化趋势,但变化率极小。整体上,有机工质的系统焓损失大大低于CO₂超临界循环。

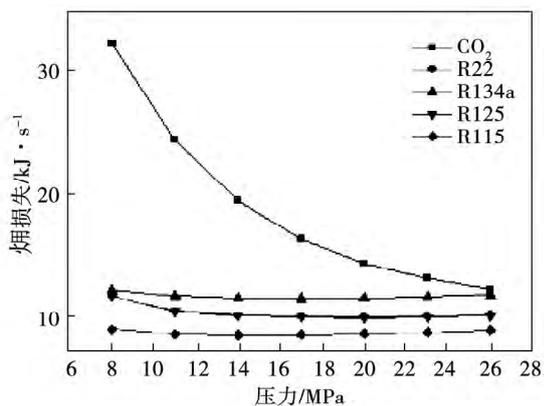


图 10 系统焓损失随透平进口压力的变化图

Fig. 10 Chart showing changes of the exergy loss of the system with the pressure at the inlet of the turbine

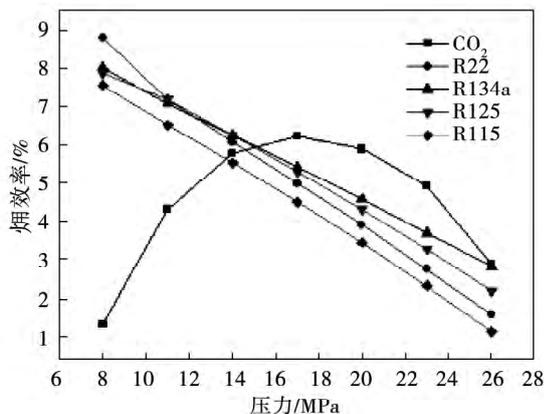


图 11 系统焓效率随透平进口压力的变化图

Fig. 11 Chart showing the exergy efficiency of the system with the pressure at the inlet of the turbine

图 11 为系统焓效率随透平进口压力的变化图。随着压力的增大,CO₂超临界循环的焓损失呈抛物线状,先升后降,在压力为 17 MPa 处达到峰值 6.28%。而 4 种有机工质都呈单调下降的趋势。在 15 MPa 之后,CO₂超临界循环的焓效率高于 4 种有机工质;而在 14 MPa 之前,则明显低于超临界朗肯循环的焓效率。在 8 MPa 的压力下,R22 的系统焓效率达到 8.84%,其它 3 种有机工质也均在 7.6%

之上,而 CO₂则仅为 1.41%。

4 结 论

(1) 以 CO₂为工质的超临界朗肯循环,系统吸热量和焓损失都随着透平进口压力的升高而减小,但系统热效率、焓效率及输出净功率都存在一个峰值对应着不同的最佳压力值,且最佳压力值会随着透平进口温度的升高而增大。而随着透平进口温度的升高,各项系统性能参数值都会增大。

(2) 在 8 MPa - 20 MPa 的压力范围内,采用有机物作为工质的超临界朗肯循环,系统性能参数表现出与超临界 CO₂循环不同的变化规律,热效率、火用效率、系统输出净功率都呈现出单调性变化。

(3) 在较高的压力下 11 MPa - 26 MPa,超临界 CO₂循环表现出性能的全面优势;但在低压端(8 MPa - 11 MPa),有机工质表现更好。

参考文献:

- [1] Y P Dai, J F Wang, J. Gao. Parametric optimization and comparative study of organic Rankine cycle(ORC) for low grade waste heat recovery[J]. Energy Conversion and Management 2009(50) : 576 - 582.
- [2] Lee K, Kuo S, Chien M, Shih Y. Parameters analysis on organic Rankine cycle energy recovery system. Energy Conversion and Management, 1988, 28: 409 - 18.
- [3] 王志奇. 有机朗肯循环低温烟气余热发电系统实验研究及动态特性仿真[D]. 长沙: 中南大学, 2012. WANG Zhi-qi. Experimental study and dynamic characteristics simulation of an organic Rankine cycle low temperature flue gas waste heat power generation system [D]. Changsha, Central South University, 2012.
- [4] 胡 芑, 胡仁东, 陈则韶. 超临界有机朗肯循环工质的选择[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(6) : 1045 - 1048. HU Peng, HU Ren-dong, CHEN Ze-shao. Selection of the working media for supercritical organic Rankine cycles [J]. Journal of Engineering Thermophysics 2014(35) 6: 1045 - 1048.
- [5] 姜 亮, 徐 建, 朱亚东 等. 超临界工况下回热器对低温余热发电系统性能的影响[J]. 热能动力工程, 2013(28) : 1: 45 - 47. JIANG Liang, XU Jian, ZHU Ya-dong et al. Influence of the recuperator on the performance of a low temperature waste heat power generation system under the supercritical operating conditions [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2013(28) 1: 45 - 47.
- [6] 汤 磊, 王羽平, 杨 平等. 低品位热能超临界有机朗肯循环发电特性分析[J]. 动力工程学报, 2014, 34(8) : 646 - 652. TANG Lei, WANG Yu-ping, YANG Ping, et al. Analysis of the power generation characteristics of a low grade thermal energy supercritical organic Rankine cycle [J]. Journal of Power Engineering 2014, 34(8) : 646 - 652.
- [7] 丁国良. CO₂制冷技术新发展[J]. 制冷空调与电力机械, 2002(23) : 1 - 6. DING Guo-liang. New advances in CO₂ refrigeration technology [J]. Refrigeration, Air Conditioning and Electric Power Machinery 2002, 26(23) : 1 - 6.

(丛 敏 编辑)

urement and Control, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(2). -222 -227

On a horizontal single-row copper tube bundle type heat exchange test rig, studied was the influence of the flow speed, steam mass fraction and cooling water flow rate on the condensate water production capacity and heat exchange coefficient of a hybrid gas at normal pressure at 120 °C. It has been found that the flow speed and steam mass fraction of the hybrid gas can notably enhance the condensate water production capacity and heat exchange coefficient. To increase the cooling water flow rate has no conspicuous tendency to increase or decrease the condensate water production capacity and the heat exchange coefficient at the gas side, however, the heat exchange coefficient at the liquid side becomes bigger obviously, thus leading to an increase of the overall heat exchange coefficient. Finally, according to the test and research results, a condensing convection heat transfer experimental correlation formula for humidified gas laterally sweeping across a tube bundle was proposed and the formula under discussion can control relatively well the deviation between the test value and the prediction one within a range of 10%. **Key Words:** humidified gas, tube bundle, condensate water production capacity, heat exchange coefficient

超临界朗肯循环热力性能研究 = **Study of the Thermodynamic Performance of a Supercritical Rankine Cycle** [刊, 汉] ZHANG Xin, ZHAO Xian-cong, LI Meng-qi, BAI Hao, CANG Da-qiang (College of Metallurgical and Ecological Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing, China, Post Code: 100083), ZHANG Xin (China International Engineering Consulting Corporation, Beijing, China, Post Code: 100048), WANG Jing-fu (CSIC No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(2). -228 -232

With a view to recovering and utilizing the low temperature waste heat below 140 °C, from the viewpoint of the first and second law of thermodynamics, the authors conducted an analysis of the performance of a supercritical Rankine cycle system. With five kinds of working medium (R22, R115, R134a, R125 and CO₂) serving as the object of study, the authors also calculated such parameters as the net output power, amount of heat absorbed, thermal efficiency, exergy loss and efficiency etc. The calculation results show that when the pressure at the inlet of the turbine is relatively low (8 - 11 MPa), the comprehensive performance of the system is the best when organic working medium R22 is used. When the pressure at the inlet of the turbine is relatively high (11 - 26 MPa), the comprehensive performance of the system is the best when organic working medium CO₂ in its supercritical state is used. **Key Words:** low temperature waste heat, supercritical Rankine cycle, thermodynamic performance, working medium