第29卷第4期 2014年7月

文章编号:1001-2060(2014)04-0380-05

芳烃蒸馏过程低温余热发电系统影响因素分析

杨 平1,卢秀荣2,劳国瑞2,翁一武1

(1. 上海交通大学 动力机械与工程教育部重点实验室,上海200240;2. 中国昆仑工程公司,北京100037)

摘 要:针对以芳烃蒸馏过程余热为热源的有机物工质朗肯 循环(Organic Rankine Cycle,ORC)发电系统,建立了数学模 型,计算并比较了包括 R600a、R601 及 R245fa 在内的几种工 质的工作压力、膨胀比、系统效率等参数,分析并验证了工质 流动阻力和常见几种冷却方式对系统工作参数、系统效率等 的影响。研究表明:在工质蒸发温度为 90 - 130 ℃,冷凝温 度 45 ℃的条件下,流动阻力损失导致系统发电功率和效率 分别降低约 1.5% -9.2%和1.7% -9.3%;循环水冷却系 统耗功占系统发电功率比(即耗功比)最大,达到 7.6% -13.7%,直流水冷却系统耗功比最小,约 3.6% -4.9%;与直 接空气冷却方式相比,湿式空气冷却方式在环境温度高于 30 ℃时可使系统发电效率提高 40.4% -47.7%。

关 键 词: 芳烃蒸馏; 低温余热; 有机物朗肯循环发电系 统; 阻力损失; 冷却方式

中图分类号: TK115 文献标识码: A

引 言

芳烃蒸馏是工业上获取芳烃的重要手段,其工 艺流程主要包括预分馏、抽提蒸馏、溶剂再生和芳烃 精制等过程。以上几个过程中均存在中低温气相产 物,并需要被冷凝以进入下道工序或作为产品产出, 因此该芳烃蒸馏过程存在大量可利用的余热。有机 物朗肯循环是目前最为常见的一种低温热能利用手 段之一,由于其具备系统简单、系统效率高等诸多优 势,人们对其进行了大量的研究,主要集中在有机物 工质选择^[1-2],循环结构优化及热力分析^[3-5],实际 系统性能测试3个方面^[6-7]。

在有机物朗肯循环中,一些内外部因素如环境 温度、流动阻力损失等会对其系统工作参数、效率等 产生影响,因此本研究针对芳烃蒸馏过程低温余热 热源的温度、流量及相变换热特性,选取 R600a, R601、R245fa等工质,研究了流动阻力及不同冷却 方式等因素对工质工作压力、膨胀比及系统效率等 性能参数的影响。

首先,基于 Matlab 软件建立 ORC 的系统模型, 比较了不同工质的工作压力、流量、系统效率等性能 参数;其次,对工质流动阻力及其对系统工作压力、 膨胀比及输出功率等的影响进行了计算和分析。结 果表明,流动阻力使系统发电功率降低1.5% -9.2%,其降幅大小不仅取决于工质的阻力特性,而 是与工质工作压力有着密切的关系,工作压力高的 工质,如 R600a,降幅仅为1.5% -3.0%,而工作压 力较低的工质,如 R601a,降幅达4.1% -7.6%;最 后,分析了不同冷却方式的耗功比及其对系统效率 的影响,并对干式和湿式空气冷却方式的效果进行 了实验验证。

1 ORC 发电系统模型

1.1 ORC 系统简介及工质选择

芳烃蒸馏设备主要包括预分馏塔、抽提蒸馏塔、 溶剂再生塔和芳烃精馏塔等,其中几个塔顶均有中 低温气相物产出,部分塔顶气相物参数如表1所示。 以其中的甲苯精馏塔为例,对回收利用其低温余热 的 ORC 系统进行分析。该系统的流程如图1所示。

表1 芳烃蒸馏过程热源参数

Tab. 1 Parameters of the heat source during the distillation of aromatic hydrocarbons

项目	抽提蒸馏塔	溶剂再生塔	甲苯精馏塔	
介质	非芳烃蒸汽	C8 芳烃	甲苯	
塔顶压力/MPa	0.12 - 0.2	0.05 - 0.07	0.4	
塔顶温度/℃	100 – 108	95 - 135	160 – 178	
塔底温度/℃	157 – 170	170 – 178	130 – 150	

ORC 循环过程中,工质的蒸发吸热量和冷凝放 热量分别为^[7]:

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)基金资助项目(2010CB227301);国家自然科学基金资助项目(51376123) 作者简介:杨 平(1989-),男,上海交通大学硕士研究生.

收稿日期:2013-12-09; 修订日期:2014-02-20

(1)

$$Q_{\sigma} = G \cdot (h_3 - h_2)$$

$$Q_{c} = G \cdot (h_{4} - h_{1}) \tag{2}$$

而系统输出功和工质泵泵功分别为:

$$W_{1} = G \cdot (h_{3} - h_{4s}) \cdot \eta_{1}$$
(3)
$$W_{2} = G \cdot (h_{2s} - h_{1})$$
(4)

$$W_{\rm p} = \frac{\sigma \left(n_{2\rm s} - n_{1}\right)}{\eta_{\rm p}} \tag{4}$$

其中,ŋ,和 ŋ,为膨胀机和泵的等熵效率:

$$\eta_{\rm t} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4\rm s}};$$

$$\eta_{\rm p} = \frac{h_{2\rm s} - h_1}{h_2 - h_1}$$
(5)

式中: h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 一图 1 中对应点工质的焓值 kJ/kg; h_{2s} 、 h_{4s} 一泵等熵压缩和膨胀机等熵膨胀后的理 想焓值 kJ/kg。G一工质的质量流量 kg/s。





在有机物朗肯循环中,工质选择至关重要。合适的工质需具备优良的热力学性能,良好的环保性和安全性以及稳定的化学性质。根据芳烃蒸馏过程低温热源的温度范围及文献[1-2]给出的选择标准,选取 R600a,R600,R245fa,R245ca,R601 和R601a6种工质作为研究对象,对每种工质在 ORC 循环中的性能进行了计算和比较。

1.2 工质流动阻力

有机物工质工作压力较低,即使较小的阻力损 失也会对膨胀机入口压力、膨胀压降产生不容忽视 的影响。针对有机物朗肯循环建立了工质的流动阻 力模型,计算了管道及换热器的阻力损失。管道沿 程和局部阻力损失分别由式(6)、式(7)计算^[8]。

$$\Delta P_{\rm f} = \frac{\lambda}{d_i} \cdot \frac{\rho u^2}{2} \cdot L \tag{6}$$

$$\Delta P_{t} = \sum K \cdot \frac{\rho u^{2}}{2} \tag{7}$$

式中: λ 一摩擦系数; ρ 一流体密度 ,kg/m³; $L \ d_i$ 一直 管长度和内径 ,m; u 一流动速度 ,m/s; K 一阀门、管 件的阻力系数。摩擦、阻力系数均根据文献 [8]进 行选取。

换热器阻力损失主要包括进出口压力损失和内 部摩擦损失,本研究采用管翅式换热器,根据文献 [9],此类换热器的内部摩擦损失占换热器总阻力 损失的绝大部分,可由式(8)计算。

$$\Delta P = \frac{G^2}{2g_c \rho_i} \left[2\left(\frac{\rho_i}{\rho_0} - 1\right) + f \frac{L}{r_h} \rho_i \left(\frac{1}{\rho}\right)_m \right] \quad (8)$$

式(8)适用于单流程换热器,在多流程的情况 下,应加入弯管损失:

$$\Delta P_{\rm b} = K_{\rm b\, \star} \frac{\rho u_{\rm m}^2}{2g_{\rm c}} \tag{9}$$

式中: G一质量流速 ,kg/s; $\rho_i \ \rho_0$ 一换热器进出口工 质密度 ,kg/m³; f一摩擦因数; L一管长 ,m; r_h 一水力 半径 ,m。

此外,由于蒸发器和冷凝器内均发生相变,其摩 擦压降可由代表两相摩擦的系数 φ^2 乘以单相流动 压降计算得到,具体计算过程可参见文献[9]。

1.3 冷却方式

ORC 发电系统常见的冷却方式有直流水冷却、 循环水冷却、干式空气冷却和湿式空气冷却4种方 式^[10]。根据1.1节的数学模型计算冷凝温度变化 对系统工作参数、效率等的影响利用1.2节中的阻 力损失模型计算每种冷却方式冷源流体的阻力损 失,并根据冷却负荷计算冷源流体流量 最终根据式 (10)计算不同冷却系统水泵或风机的耗功^[10]。

$$W_{\rm p} = \frac{\rho g Q H}{1000 \cdot \eta_{\rm p}}$$

$$W_{\rm f} = \frac{H_{\rm f} \cdot Q_{\rm f}}{1000 \cdot \eta_{\rm f}}$$
(10)

式中: $Q \ Q_{f}$ 一水泵流量和风机风量 $\ m^{3}/s; \eta_{P} \ \eta_{f}$ 一水 泵、风机效率 $\ \beta \ \rho$ 一水的密度 $\ kg/m^{3}; H$ 一水泵扬 程 ,可根据文献 [11]提供的经验公式计算 ,m; H_{f} 一 风机风压 ,由换热器管束阻力(ΔH_{1})和风机动压头 (ΔH_{2})组成 ,具体计算方法参见文献 [10], Pa; 在湿 式空冷中 喷水加湿后空气阻力增大 增大倍数根据 文献 [10] 给出的经验值进行选取。

2 结果分析

2.1 工质性能分析

为比较不同工质的性能,针对芳烃蒸馏过程低 温热源温度等特性,对6种工质的循环性能进行了 计算。计算时取环境温度25℃,蒸发器出口过热度 5℃,冷凝过冷度5℃,工质泵和涡轮机等熵效率分 别取0.8和0.85^[3]。表2中列出了在蒸发温度为 110℃时各工质的蒸发和冷凝压力、单位质量工质 的吸热量、系统发电功率和效率。

表2 不同工质的循环性能

Tab. 2 Circulating porformance of various working media

工质	蒸发、冷凝	吸热量	发电功率	系统效
	压力/MPa	$/kW \cdot kg^{-1}$	/kW • kg $^{-1}$	率/%
R600a	2.38.0.60	400.33	39.97	9.98
R600	1.84.0.43	446.21	46.31	10.38
R245fa	1.57.0.29	233.29	24.24	10.39
R245ca	1.16.0.20	251.31	26.57	10.57
R601	0.73.0.14	476.09	50.72	10.65
R601a	0.89.0.18	453.05	47.54	10.49

由表 2 可以看出,R600a 和 R600的蒸发和冷凝 压力最高,而系统效率略低。R245fa 和 R245ca 的 单位质量吸热量和发电功率远小于其它几种工质, 实际使用中需要较大流量,从而可能导致系统成本 增加,效率降低。R601和 R601a 的在单位质量吸热 量、发电功率和系统效率最大,且具有相对较低的蒸 发压力。因此,当使用这两种工质时,系统所需工质 流量更小,工质泵耗功更少,且系统效率更高。

2.2 流动阻力的影响

图 2 是有机物工质朗肯循环中,R600a 和 R601 两种工质的流动阻力损失及其占膨胀过程压降的比 例(以下简称阻力损失占比)随蒸发温度的变化情 况。随着蒸发温度的增加,两种工质的阻力损失均 呈增加趋势。然而,由于膨胀压降也随蒸发温度增 加而增加,因此阻力损失占比反而不断减小,图中两 种工质阻力损失占比分别由4.7%和6.9%降为 4.4%和3.5%。此外,虽然 R600a 的阻力损失是 R601 的数倍,但由于该工质在有着较大的膨胀压 降,其阻力损失占比在某些情况下反而更小,即其工 作参数和效率受压降影响更小。





图 3 给出了 R600a、R245ca 和 R601 3 种工质考 虑阻力损失与不考虑阻力损失相比发电功率的降幅 随蒸发温度的变化。系统发电功率的降幅随蒸发温 度增加而减小,R601a 的降幅在 7.6% - 4.1% 之 间,而 R600a 的降幅则为 3.0% - 1.5%。可见,阻 力损失对于系统的影响不仅取决于工质自身的阻力 特性,还与其工作压力有着密切的关系。膨胀压降 较低的工质受到的影响更大。





2.3 冷却方式对于 ORC 系统的影响

对冷凝温度变化的计算和实验结果表明,在其 它条件不变时,系统的发电功率和效率均随冷凝温 度的升高而线性减小。图4 是 R601 在蒸发温度为 110 ℃时,采用不同冷却方式的系统输出比功随环 境温度的变化情况,环境温度 T₀在0-40 ℃之间波 动,对应的直流冷却水温参见文献[12]。当环境温 度由0℃增加至40℃时,采用循环水冷方式的系统 发电功率比采用直流水冷方式低2.8%-32.6%, 因为循环水冷方式的冷凝温度及冷却水流量均大于 直流水冷方式,导致系统发电比功较小而冷却耗功 占系统输出功的比例更大。空气冷却方面,随着环 境温度的升高,采用湿式空冷方式的优势明显增加。





Fig. 4 Influence of the ambient temperature on the output power of the system by adopting various cooling modes

图 5 是在环境温度 T_0 变化时,不同冷却方式耗 功占系统输出功的比例(耗功比)。可以看出,环境 温度升高导致系统冷却耗功比不断增加,循环水冷 方式的耗功比最大,达到 7.6% – 13.7%,而直流水 冷方式最小,约为 4.1% – 5.5%。在环境温度低于 20 ℃时,干式空冷与湿式空冷方式耗功比相差在 10% 以内,但随着环境温度的升高,后者的优势迅速 显现出来。当 T_0 达到 40 ℃时,干式空冷方式耗功 比高出湿式空冷方式近 40%。可见,湿式空冷对于 环境温度的变化有着更好的适应性,在气温较高时 有着明显的优势。

为验证两种空气冷却方式对系统的影响,在采 用空冷器的小型 ORC 发电装置上进行了实验。首 先,对空冷器采取喷水辅助冷却,并在130 s 时停止 喷水,记录系统各点温度、压力等参数的变化。图 6 是实验中系统发电功率随时间变化的测试结果,测 试时维持其它参数不变。从图中可以看出,喷水停 止后发电功率明显下降,在气温分别为25、30 和 35 ℃时,系统发电功率在喷水停止前后分别下降约 20.2%、33.0%和41.2%。与图4中对应点的理论 计算结果比较发现,二者变化趋势一致,即气温越高 时,干、湿空冷方式的发电功率差距越大,这进一步 说明湿式冷却在气温较高时有着良好的效果。





Fig. 5 Proportion of the power consumed by the system under various cooling modes





3 结 论

(1) 在所选取的6种工质中,R601和R601a在
 工作压力、输出功和系统效率等方面有着最好的表现,在蒸发温度为110 ℃时二者效率分别可达
 10.65%和10.49%。

(2) 流动阻力随工质蒸发温度升高而增加,但 其导致输出功率的降幅却随之减小,以 R600a 为 例 随着蒸发温度由 90 ℃增加至 130 ℃,阻力损失 由 48.7 kPa 增加至 120.9 kPa,而与此相对应的输 出功率降幅则由 3.0%减小至 1.5%。

(3) 工作压力较低的工质的做功能力更易受到 流动阻力的影响,以 R600a 和 R601 为例,二者在蒸 发温度为 110 ℃时的阻力损失分别为 70.0 kPa 和 31.9 kPa,而其输出功降幅则分别为 2.0% 和 6.3%。

(4)不同冷却方式对于系统的影响主要在于冷凝温度和耗功比两个方面,其中直流水冷耗功比最小,仅为4.1%-5.5%,而循环水冷耗功比最高,达到7.6%-13.7%,两种空气冷却耗功比在环境温度低于20℃时约为5.3%-7.5%,且相差较小,而随着环境温度的升高,干式空冷耗功比迅速增大,在环境温度为30℃和40℃时分别达到9.1%和11.5% 校湿式空冷分别高出24.7%和38.6%。

参考文献:

- [1] 顾伟 翁一武,王艳杰,翁史烈.低温热能有机物发电系统热力 分析[J].太阳能学报 2008,29(5):608-612.
 GU Wei,WENG Yi-wu,WANG Yan-jie,et al. Thermodynamic analysis of a low temperature thermal energy organic power generation system[J]. Journal of Solar Energy 2008 29(5):608-612.
- [2] Chen Huijuan ,Goswami D. Y. 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.
- [3] 罗 琦,翁一武,顾 伟. 抽汽回热式有机工质发电系统的热力特性分析[J]. 现代电力 2009 26(6): 39-44.
 LUO Qi, WENG Yi-wu, GU Wei. Analysis of the thermal characteristics of a steam extraction recuperation type organic working medium power generation system [J]. Modern Electric Power 2009 26 (6): 39-44.
- [4] Li W Feng X. Effects of evaporating temperature and internal heat exchanger on organic Rankine cycle [J]. Applied Thermal Engineering 2011 37(17): 4014 – 4023.

- [5] Mago P. J ,Chamra L. M ,et al. An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids [J]. Applied Thermal Engineering 2008 28(8-9): 998-1007.
- [6] Roberto Bracco ,Stefano Clemente ,et al. Experimental tests and modelization of a domestic-scale ORC [J]. Energy ,2013 (58): 107-116.
- [7] 顾 伟. 低品位热能有机物朗肯动力循环机理研究和实验验 证[D]. 上海: 上海交通大学 2009.
 GU Wei. Study of the mechanism governing the low grade thermal energy organic Rankine power cycles and their experimental verification [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University 2009.
- [8] 黄卫星. 工程流体力学[M]. 北京:化学工业出版社 2005: 84-131.
 HUANG Wei-xing. Engineering Fluid Mechanics [M]. Beijing: Chemical Industry Press 2005: 84-131.
- [9] 沙拉(美),赛库利克.换热器设计技术[M].北京:中国机械
 工业出版社 2010: 345 384.
 Ramesh K. Shah ,Sekulic ,D. P. Heat exchanger design technology
 [M]. Beijing: China Machine Press 2010: 345 384.
- [10] 马义伟.空气冷却器[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 1998:36-87.
 MA Yi-wei. Air Coolers[M]. Harbin: Harbin Instituteof Technology Press, 1998:36-87.
- [11] 王新全.通风工程学[M].北京:中国机械工业出版社, 2008: 272-299.

WANG Xin-quan. Ventilation Engineering [M]. Beijing: China Machine Press 2008: 272 – 299.

[12] 谭洪卫,李潇潇,朱金明,等.黄浦江水温变化规律与江水源 热泵节能潜力研究[J].上海节能 2007(6):21-25. TAN Hong-wei, LI Xiao-xiao, ZHU Jin-ming, et al. Study of the variation law governing the temperature of water in Huangpu River and the energy-saving potential of heat pumps using the river water as the water source [J]. Shanghai Energy-saving 2007(6):21 -25.

(丛 敏 编辑)

The authors have conducted a study of the influence of the participation of a supercritical high power unit in the primary frequency modulation of the power grid on the loss in service life of the steam turbine established a finite element model for the fatigue life of the rotor of the turbine under various operating conditions and calculated and analyzed the transient temperature field and elastic and plastic stress field of the rotor when the unit was taking part in the primary frequency modulation of the power grid. It has been found that when the load changes in a range of 10% the maximum stress on the surface of the shaft at the dangerous location is 82.18 MPa the variation value of the stress is 69.18 MPa the maximum stress at the center of the shaft is less than 20 MPa and the variation value of the stress is less than 17 MPa showing that the stress is very low and the thermal stress is also very small. The primary frequency modulation has a small influence on the temperature variation at all stages in HP and MP cylinder and the thermal stress and the influence on the service life of the unit can be neglected thus the unit is capable of safely taking part in the primary frequency modulation of the power grid. **Key Words**: supercritical unit primary frequency modulation temperature field stress field steam turbine life

基于电气体发电的 ORC 系统热力学分析 = Thermodynamic Analysis of an ORC System Based on the Electro-gas Power Generation [刊,汉]SUN Wan-min ,LIU Juan-fang ,CHEN Qing-hua ,ZHU Gui-tong (College of Power Engineering ,Chongqing University ,Chongqing ,China ,Post Code: 400044) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014 29(4). - 374 - 379

Set up was an ORC system based on the electro-gas power generation and with the power generation power output and exergy efficiency serving as the target function ,based on the thermodynamics and electricity theory ,calculated and analyzed were the corresponding targets of seven working media in the subcritical state when compared with the traditional steam turbine-generator power generation mode. It has been found that with an increase in the evaporation temperature ,the power generated by the system will increase. Under the same conditions ,R134a will have a relatively large output power. When the inlet temperature of the heat source is constant ,the smaller the pinch point temperature difference ,the higher the exergy efficiency of the system. At a same pinch point temperature difference ,when the inlet temperature of the heat source is not approximately two times higher than the pinch point temperature difference ,the exergy efficiency will have its maximum value. In the contrary ,the exergy efficiency will monotunely increase with an increase of the evaporation temperature. The foregoing can offer theoretical guide for selection of working media and performance optimization of novel ORC power generation technologies. **Key Words**: electro-gas power generation ,power generation efficiency ,exergy efficiency ,pinch point temperature difference

芳烃蒸馏过程低温余热发电系统影响因素分析 = Analysis of the Factors Influencing a Waste Heat Power Generation System in an Aromatic Hydrocarbon Distillation Process [刊] 汉]YANG Ping ,WENG Yi-wu (Ed-

ucation Ministry Key Laboratory on Power Machinery and Engineering Shanghai Jiaotong University Shanghai ,China ,Post Code: 200240) ,LU Xiu-rong ,LAO Guo-rui (China Kunlun Engineering Company ,Beijing ,China ,Post Code: 100037) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29(4). -380 - 384

For an organic working medium Rankine cycle power generation system with the waste heat from the aromatic hydrocarbon distillation process serving as the heat source established was a mathematical model calculated and compared were such parameters as the working pressure expansion ratio and system efficiency etc. of several working media including R600a ,R601 and R245fa and analyzed and verified was the influence of the flow resistance of the working media and several commonly-seen cooling modes on the working parameters and efficiency of the system. It has been found that when the evaporation temperature of the working medium falls in a range from 90 to 130 $^{\circ}$ C , µnder the condition of the condensing temperature being 45 $^{\circ}$ C ,the flow resistance loss will lead to a decrease in the power generated by the system and its efficiency by about 1.5% to 9.2% and 1.7 to 9.3 % respectively. The power consumption of the circulating water cooling system will account for a maximal proportion of the power generated by the system (i. e. power consumption ratio) , attaining 7.6 % to 13.7 % and the power consumption ratio of the once-through water cooling system will be minimal being about 3.6% to 4.9%. Compared with the direct air cooling mode , the wet type air cooling mode can enhance the power generation efficiency of the system by 40.4% to 47.7% when the ambient temperature is higher than 30 $^{\circ}$. **Key Words**: aromatic hydrocarbon distillation , low temperature waste heat organic Rankine cycle power generation system resistance loss cooling mode

新型活性焦脱硫吸附塔内气流均布特性数值模拟研究 = Study of the Numerical Simulation of the Uniform Distribution Characteristics of a Flue Gas Flow in a New Type Active Coke Desulfurization and Adsorption Tower [刊 汉]LEI Ming LI Yang FAN Qing-wei ,DAN Hui-jie (Xi' an Thermodynamics Academy Co. Ltd. ,Xi' an ,China ,Post Code: 710032) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014 ,29(4). - 385 - 390

By using the fluid simulation software Fluent a numerical simulation study was performed of the distribution characteristics of a gas flow in a new type active coke desulfurization and adsorption tower. It has been found that when the flue gases enter into the adsorption tower the flue gas flow speed will quickly drop under the action of the bed resistance the flue gas flow will uniformly pass through the active coke layer. The bed resistance will greatly influence the flue gas flow distribution. The bigger the resistance the more uniform the flue gas flow in the tower. Moreover the local non-uniform phenomena of the flue gas flow in the tower can be changed by retrofitting the inlet structure or additionally installing a flow disturbing device. **Key Words**: active coke flue gas desulfurization gas flow distribution numerical simulation