

小型涡轮在有机朗肯循环系统中的性能测试与分析

李昀竹 裴 刚 李 晶 季 杰

(中国科学技术大学 热科学和能源工程系 安徽 合肥 230027)

摘 要:介绍了一种应用于有机朗肯循环(Organic Rankine Cycle, ORC)的高转速小型涡轮。以电加热油温机为热源,以循环冷却水为冷源,搭建了 ORC 实验测试平台。在该测试平台上,采用 R123 为循环工质,对小型高转速涡轮进行了实验测试和性能分析。结果显示,在涡轮转速为 24 000 r/min 时,涡轮的绝热内效率达到 0.68。

关 键 词:有机工质;朗肯循环;涡轮;性能测试

中图分类号:TK14 文献标识码:A

引 言

目前,世界能源供应日趋紧张,清洁能源的开发利用将是大势所趋。太阳能、地热、生物质等清洁能源的利用在近些年取得了巨大进步。但这些能源和常规化石能源相比,能流密度低,获得的热源温度通常较低;而将热能转换成电能的水蒸气朗肯循环的高效运行要求热源温度在 370℃ 以上^[1]。这意味着采用传统的手段利用上述新能源,不仅成本高,且效率低。

有机朗肯循环(Organic Rankine Cycle, ORC)是能够有效利用低温热源的手段。ORC 是由 Harry Zvi Tabor 和 Lucien Bronicki 等人于 1961 年提出的^[2]。普通水蒸气朗肯循环中,以水为工质,利用高温高压下的水蒸气推动汽轮机做功;高分子量的有机工质 R113、R123 和水相比,沸点低,且在相对较低的温度下具有更高的蒸发压力。有机朗肯循环中,有机工质替代水,利用有机工质的特性,可有效地利用低品位的热量。

自上世纪 60 年代以来,ORC 能有效利用低品位热能的特性引起了各国学者的广泛关注。H. M. Curran 对 20 世纪 80 年代的 ORC 发电装置进行了系统的统计和总结,指出低温发电系统的热源温度

和工质的选择是 ORC 安全高效运行的重要因素^[3]; O. Badr 等人采用计算机编程模拟了多种有机工质的热物性,取得了良好的效果^[4]; Persson 研究了将螺杆膨胀机应用于 ORC 系统,并指出,这类容积式膨胀机具有膨胀比高,流量低的特点,适合小型 ORC 系统^[5]。近些年来,ORC 在地热发电、工业余热回收、生物质能、太阳能热发电等领域已经进入工程应用阶段,并取得良好的效果^[6-9]。

我国对 ORC 的研究起步较晚,柯玄龄最早在 1985 年等人分析了 ORC 在中低温余热回收中的应用^[10];王恒、黄文春介绍了 ORC 在我国地热发电中的应用情况^[11]。近年来,国内学者对 ORC 的研究逐渐升温。裴刚、李晶等人提出了一种将 ORC 同太阳能集热系统结合的低温热发电系统,通过模拟分析指出了太阳能朗肯循环热发电的关键因素^[12],针对不同地区的气象特点,提出了太阳能 ORC 发电的优化方案^[13],并分析了在 ORC 中加入回热对系统性能的影响^[14];刘杰等人提出将 ORC 用于汽车内燃机的废热回收,扩展了 ORC 的应用领域^[14];王伟等人设计研制了用于 ORC 的单螺杆膨胀机,并对其进行了初步的实验研究^[15];李艳等人针对 ORC 系统特点,将 CFD 软件用于涡轮膨胀机的内部流动模拟,并对膨胀机进行造型优化^[16]。但是就目前而言,国内学者的研究大多停留在模拟计算和系统部件研究。对 ORC 的核心部件的膨胀机,建立相关的试验平台,进行试验研究,测试其性能并获取详实的实验数据,这对 ORC 研究的进一步开展有重要的意义。

1 测试平台和涡轮介绍

该实验平台采用有机工质 R123 为循环工质,以高温热油为热源,冷却水为冷源,以一台小型高转

收稿日期:2010-03-10; 修订日期:2010-09-20

基金项目:国家自然科学基金,钢铁行业低温余热有机朗肯循环发电的基础问题研究项目基金资助(50974150)

作者简介:李昀竹(1982-),男,湖南郴州人,中国科学技术大学博士研究生。

速涡轮为膨胀剂为动力机。该系统为运转试验装置, 主要采取手动调节方式进行控制。图 1 为试验平台图片。系统设计图, 如图 2 所示。



图 1 实验测试平台

Fig. 1 Testing platform

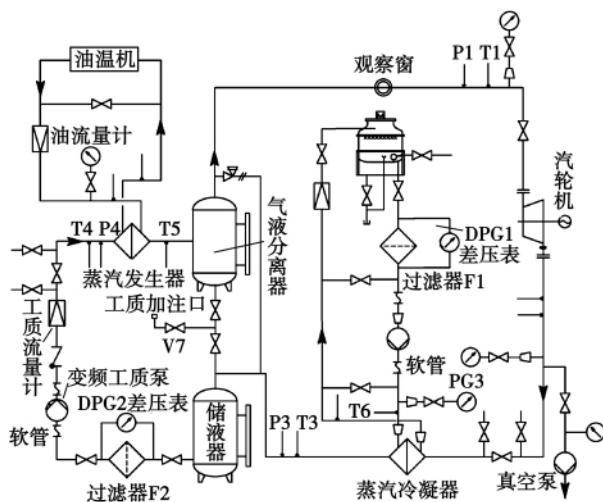


图 2 ORC 系统原理图

Fig. 2 Schematic drawing of an ORC system

油温机把导热油加热作为 ORC 系统的模拟热源; 通过一个板式换热器导热油把工质加热, 使其成为压力、温度相对较高的蒸汽; 气态的工质经过气液分离器, 在小型涡轮膨胀机中膨胀, 工质的内能转换为涡轮的机械能; 涡轮出口乏气在冷凝器中被重新冷凝为液态工质, 并进入储液罐中; 工质泵位于储液罐之后, 将液态的工质加压, 输送到蒸发器中完成循环。该实验装置的系统主要由以下五个部分组成:

1.1 朗肯循环主回路

该回路输送工质 R123, 包括管路、通断阀门、控制阀、冷凝器、蒸发器、流量计、储液器、气液分离器、工质泵、过滤器和接头。该回路上设有抽真空系统。

1.2 高温热源回路

以美孚导热油为介质, 加热蒸发器中的系统工

质 R123, 并使之汽化。该回路包括: 油温机、管路、油泵、过滤器、旁通阀、流量计、手动阀和接头。其中油温机提供一定流量下的设定温度的导热油。

1.3 低温热源回路

这部分功能是以水为介质带走系统工质 R123 在冷凝器中放出的热量。该回路包括: 冷却塔, 管路、阀件、冷却水泵、接头和过滤器等。

1.4 动力转换装置

这部分由涡轮膨胀机、减速器、发电机及其附件组成。涡轮膨胀机轴端通过一个 20:1 的减速器与一个额定转速为 3000 r/min 的车用直流发电机连接。通过一系列的转换, 工质内能转换为发电机输出的电能。发电机额定工况下的输出为 28V 的直流电, 其输出端连接若干与之匹配的直流灯泡, 控制电路通过控制灯泡的数量达到调节输出功率和发电机转速的目的。

1.5 实验数据测量装置

这部分包括设置在上述三个回路部分的热电偶、压力传感器等测量仪表和数据采集仪构成。测量仪表采集的数据传递到数据采集仪中, 从而方便的对实验进行监控和对实验数据进行分析。

采用导热油模拟热源, 通过油温机控制, 可以保持热源的出口温度恒定; 工质泵变频调节, 控制工质循环量, 并维持蒸发压力; 负载调节发电机的转速; 数据采集系统可以测量电压、电流、温度、压力、频率等参数。在该试验台的基础上, 对以 R123 为工质的有机朗肯循环进行初步的实验分析研究。

膨胀机是 ORC 系统中的核心部件, 实验系统中所采用的涡轮膨胀机为径-轴流式涡轮, 专为 ORC 系统设计制造, 运行工质为 R123。该动力涡轮不同于常用的压缩式涡轮冷却器。压缩工质通过喷嘴进入涡轮, 在喷嘴环内膨胀加速, 气体的内能转化为的动能, 温度降低。高速气流吹动涡轮的叶轮, 气体的动能转换为叶轮的机械能, 而且气体在叶轮中继续膨胀, 温度和压力进一步降低。涡轮实物如图 3 所示。涡轮的主要设计参数如表 1 所示。

涡轮轴端通过一台减速比为 20:1 的减速器同一台发电机相连, 带动发电机转动, 从而涡轮的机械功最终转换为电能, 达到能量转换利用的目的。

2 实验数据分析

在初步的实验中, 维持油温机和冷却水的温度稳定(实验中热源和冷源的温度分别为 108℃ 和

31℃) 通过调节工质泵的变频控制系统的蒸发压力,通过调节发电机的负载(灯泡数量)以达到调节涡轮转速的目的。通过采集的数据,可以初步分析涡轮的性能和效率。

表 1 涡轮主要设计参数
Tab.1 Main design parameters of the turbine

参数	
介质	R123
流量/kg·h ⁻¹	500×10 ⁵
进口压力/Pa	7.86×10 ⁵
出口压力/Pa	1.1
进口温度/℃	100
输出功率/kW	≥3.3
涡轮设计效率	≥0.71
转速/r·min ⁻¹	60000



图 3 涡轮膨胀机实物
Fig.3 An actual turbo-expander

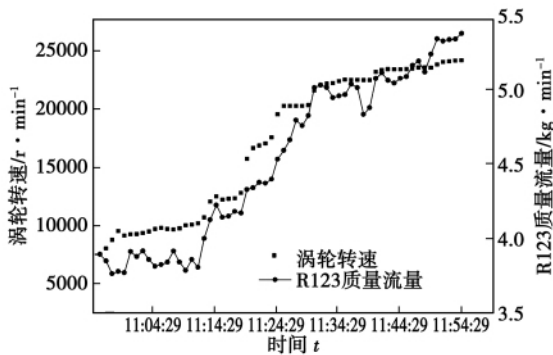


图 4 工质流量和涡轮转速随时间变化曲线
Fig.4 Curves showing a change of the working medium flow rate with time

图 4 是工质流量和涡轮转速随着时间变化的曲线。如图所示,在实验的过程中,随着涡轮转速的增

加,系统的工质流量也增加。当涡轮转速为 10000 r/min 时,工质流量为 3.86 kg/min;当涡轮转速上升到 24000 r/min 时,工质的流量也随之增加到 5.41 kg/min。

涡轮的绝热效率表示为涡轮进出口实际焓降与理论焓降之比^[18]:

$$\eta_t = \frac{\Delta h}{\Delta h_s} = \frac{h_{in} - h_{out}}{h_{s,in} - h_{s,out}}$$

式中: Δh_{in} 是涡轮膨胀机入口处的焓值, Δh_{out} 是涡轮出口焓值, $\Delta h_{s,out}$ 是涡轮经过等熵膨胀达到出口压力下的焓值。

图 5 分别为维持涡轮入口压力为 0.3 和 0.4 MPa,出口压力为 0.1 MPa(冷凝温度为 27℃)时,通过改变负载的大小(即改变灯泡的数量)改变涡轮的转速,得到的涡轮转速-效率曲线。

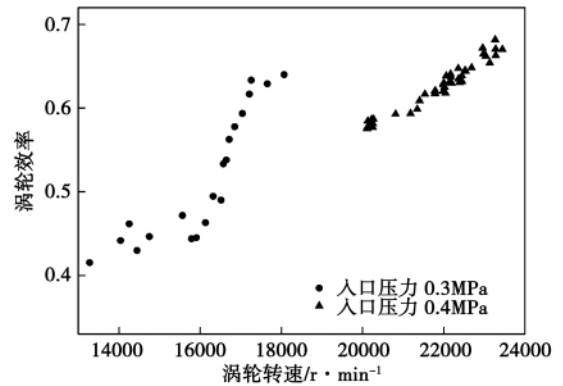


图 5 涡轮的转速-效率图
Fig.5 Turbine speed-efficiency chart

如图所示,涡轮的绝热效率随着转速的增加有着明显的提升;这一趋势无论是入口压力为 0.3 MPa 还是入口压力为 0.4 MPa 都很明显。在入口压力维持在 0.3 MPa 时,涡轮的转速最高能达到 18000 r/min,效率最高达到 0.65;在入口压力维持在 0.4 MPa 时,涡轮的转速最高达到 24000 r/min,效率最高达到 0.68。可以看出,更高的入口压力,可提高涡轮在该入口压力下的高转速;该小型涡轮的性能优良,在相对较低的转速下,也能达到较高的效率。

涡轮的膨胀比 π 定义为涡轮进出口压力的比值,即 $\pi = p_{in}/p_{out}$, p_{in} 和 p_{out} 分别为涡轮进出口压力。

图 6 反映出涡轮进出口压力和转速,对涡轮效率的影响。如图所示,相同的膨胀比,更高的转速下,涡轮的绝热内效率更高。在膨胀比为 4,涡轮转速 20000 r/min 时的绝热效率为 0.6,当涡轮转速提

高到 23000 r/min 时, 绝热内效率提升至约 0.65。

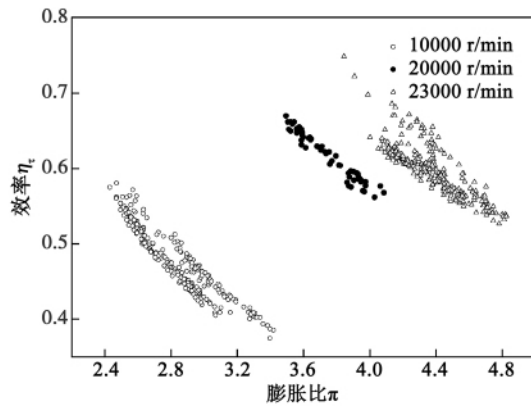


图 6 涡轮的膨胀比/转速-效率图

Fig. 6 Turbine expansion ratio/speed-efficiency chart

同一转速下, 提高涡轮的膨胀比, 涡轮的绝热内效率下降。如图所示, 在涡轮转速 10000 r/min 时, 当膨胀比为 2.4, 涡轮的绝热内效率约为 0.57; 当膨胀比升高到 3.2 时, 涡轮的绝热内效率降低到 0.4。

膨胀比和转速是影响涡轮效率的两个重要因素。在维持保持涡轮膨胀比一定的情况下, 提高涡轮转速对提高涡轮效率是有利的; 而当涡轮转速一定时, 提高涡轮的膨胀比导致涡轮效率的下降。这是因为, 加大涡轮的膨胀比, 意味着涡轮进出口的等熵焓降加大; 而维持涡轮转速不变, 使得涡轮轴端输出功率基本不变, 或增加较少, 因而使得涡轮绝热内效率下降。

3 结 论

利用搭建的平台对用于 ORC 的小型涡轮进行了研究。以实验数据为基础, 初步分析了涡轮流量、转速之间的关系; 并对在不同压力、转速下的涡轮性能以及系统性能进行了测试分析。

测试结果表明: 在维持热源温度 108 °C 和冷源温度 31 °C 的条件下, 随着涡轮转速的增加, 系统工质流量和涡轮绝热内效率都有所提高: 在涡轮转速 24000 r/min 时, 涡轮的质量流量和绝热内效率分别达到 5.4 kg/min 和 0.68。

实验显示, 该涡轮膨胀机在低温热源 ORC 系统中的性能表现优良, 变工况下运行能够维持较高的效率。然而, 在初步的实验中涡轮转速远未达到设计的 60000 r/min; 由于转速是影响涡轮效率的一个重要参数, 该涡轮在更高转速下的性能需要进一步的实验验证。

参考文献:

- [1] Hung T C, Waste heat recovery of organic Rankine cycle using dry fluids [J]. Energy Conversion and Management, 2001, 42(5): 539 - 553.
- [2] Harry Zvi Tabor. Encyclopedia of the Earth [M]. Cleveland Cutler, 2007.
- [3] Curranhm. Use of organic working fluids in Rankine engines [J]. Energy, 1981, 5(4): 218 - 223.
- [4] BADR O. Thermodynamic and thermophysical properties of organic working fluids for Rankine cycle engines [J]. Applied Energy, 1985, 19(1): 1 - 40.
- [5] Persson J G. Performance mapping vs design parameters for screw compressors and other displacement compressor types [C]//VDI Berichte, nr. 859, Düsseldorf, 1990.
- [6] DiPippo R. Second law assessment of binary plants generating power from low-temperature geothermal fluids [J]. Geothermics, 2004, 33(5): 565 - 586.
- [7] Chacartegui R, Sanchez D, Munoz J M, et al. Alternative ORC bottoming cycles for combined cycle power plants [J]. Applied Energy, 2009, 86(10): 2162 - 2170.
- [8] Drescher U, Bruggemann D. Fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass power and heat plants [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(1): 223 - 228.
- [9] Quoilin S, Lemort V. Technological and economical survey of organic rankine cycle systems [C]//Vilamoura, Portugal: European Conference on Economics and Management of Energy in Industry, 2009.
- [10] 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(5): 58 - 69. KE Xuan-ling, LIANG Xiu-ying. Application of an organic working medium rankine cycle in medium-low temperature energy recovery [J]. Steam Turbine Technology, 1985(5): 58 - 69.
- [11] 王恒, 黄文春. 双工质循环机组在地热电厂的运用 [J]. 四川电力技术, 1995, 18(4): 20 - 24. WANG Heng, HUANG Wen-chun. Application of a dual-working-medium cycle unit in geothermal power plants [J]. Sichuan Electric Power Technology, 1995, 18(4): 20 - 24.
- [12] 李晶, 裴刚, 季杰. 太阳能有机朗肯循环低温热发电关键因素分析 [J]. 化工学报, 2009, 60(4): 826 - 832. LI Jing, PEI Gang, JI Jie. Analysis of the key factors in solar energy organic rankine cycle low-temperature thermal power generation [J]. Journal of Chemical Industry, 2009, 60(4): 826 - 832.
- [13] LI Jing, PEI Gang, JI Jie. Optimization of low temperature solar thermal electric generation with Organic Rankine Cycle in different areas [J]. Applied Energy, 2010, 87: 3355 - 3365.
- [14] PEI Gang, LI Jing, JI Jie. Analysis of low temperature solar thermal electric generation using regenerative Organic Rankine Cycle [J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(8-9): 998

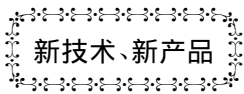
-1004.

[15] 刘 杰,陈江平,祁照岗. 低温有机朗肯循环的热力学分析 [J]. 化工学报 2010 61(S2): 9-14.
LIU Jie ,CHEN Jiang-ping ,QI Zhao-gang. Thermodynamic analysis of a low-temperature Organic Rankine Cycle [J]. Journal of Chemical Industry ,2010 61(S2) : 9 - 14.

[16] 王 伟,吴玉庭,马重芳,等. 单螺杆膨胀机的初步试验研究 [J]. 太阳能 2009(3) : 30-32.
WANG Wei ,WU Yu-ting ,MA Chong-fang ,et al. Primary experimental study of a single screw expander [J]. Solar Energy 2009 (3) : 30 - 32.

[17] 李 艳,连红奎,顾春伟. 有机朗肯循环系统及其透平设计研究 [J]. 工程热物理学报 2010 31(12) : 2014-2018.
LI Yan ,LIANG Hong-kui ,GU Chun-wei. Study of an Organic Rankine Cycle system and Its turbine design [J]. Journal of Engineering Thermophysics 2010 31(12) : 2014 - 2018.

[18] 齐 铭. 制冷附件 [M]. 北京: 航空工业出版社,1992: 28-30.
QI Ming. Refrigeration accessories [M]. Beijing: Aviation Industry Publishing House. 1992: 28 - 30. .



用于铸造工艺的磁流体动力装置

目前,镁浇铸成锭过程都是依靠传统方法,通过料车和小车运输的真空浇注桶将镁运到远距离(从生产车间到浇铸地)。随着科学技术的发展,可以采用磁流体动力泵和磁流体动力混合器来解决有关技术问题。

磁流体动力泵 产品与技术用途: 以各种冶金技术制造用于输送液态镁或类似镁金属的泵。

优点: 取消手工劳动,不接触液态金属,改善浇铸金属的质量,改善铸造车间的生态环境,简化结构和制备,简化管理。潜在市场: 与类似镁,钠,锡的液态金属有关的冶金厂。

项目状态: 已在“АВИСМА”股份公司和索里卡姆斯克制镁厂通过许多试验的磁性流体动力泵实验样品的研制和制备。试验表明,所提供的技术方案表示出上述优点。

磁流体动力混合器 产品与技术用途: 磁流体动力混合器在连铸机结晶槽里混合铝合金和类似铝合金的金属。混合器可用混合圆柱体积的金属和其它过程的金属。

优点: 与其它混合器不同,该混合器在水平面和垂直面单独调节这些过程的强度同时实现混合合金(以此提高铸锭质量)。混合器密封和防湿,保持液态铝短时间落入壳体,具有水冷却线圈。

市场: 混合器可以用在生产铝的所有工厂圆柱锭连铸过程。

项目状态: 已研制和制备工业样品。进行多次试验。现在混合器用在 SYNTALCO 公司(俄罗斯,圣彼得堡),Rossendorfa 研究中心(德国),СИДАУТ 公司(西班牙)。

上述技术主要是寻找投资伙伴。

组织和金融支持: 进一步科研和设计工作。

研究提供装置的世界市场。

为用户组织生产,出售许可证。

(如需要以上技术,可与编辑部联系)

某正车油动机故障诊断与处理 = Diagnosis and Disposal of the Faults of a Forward-drive Oil Servo-motor

[刊 汉] LIU Jiang, ZHAO Shao-hua, WANG Chong(CSIC No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150078), SHI Zhi-gang(Department of Planning and Development, China Shipbuilding Industry Corporation, Beijing, China Post Code: 100097) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(6). - 24 ~ 27

Such fault phenomena as an insufficient power output, an increase of oil consumption and vibration in the oil exhaust pipelines etc. appeared in a forward-going oil servo-motor during a cold-state joint commissioning test on a trial run test rig. On the basis of a preliminary analysis of the faults of the servomotor, a model for the forward-going servomotor was established by utilizing the software AMESim. Furthermore, the working performance in the state of the design operating condition was simulated with the faults being simulated and replayed. It is diagnosed that the oil leakage is the root cause for the faults of the forward-going servomotor. It is calculated that the flow area causing the oil leakage is between 66.5 and 132.7 mm². The authors preliminarily located the fault and according to the simulation results, the defect location was identified with the remedy measures for the defect being given. **Key words:** oil servomotor, fault diagnosis, simulation

小型涡轮在有机朗肯循环系统中的性能测试与分析 = Performance Testing and Analysis of a Small-sized Turbine in an Organic Rankine Cycle System

[刊 汉] LI Yun-zhu, PEI Gang, LI Jing, JI Jie (Department of Thermal Sciences and Energy Source Engineering, China National University of Science and Technology, Hefei, China, Post Code: 230027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(1). - 28 ~ 32

Described was a high speed small-sized turbine applicable for organic Rankine cycles (ORC). With an electrically heated oil heater serving as the heat source and the circulating cooling water as the heat sink, a testing platform was set up for organic Rankine cycles. On the above-mentioned platform, a small-sized high speed turbine was tested and a performance analysis was performed with R123 serving as the circulating working medium. The research results show that when the rotating speed of the turbine is 24000 r/min, the adiabatic inner efficiency of the turbine can hit 0.68. **Key words:** organic working medium, Rankine cycle turbine, performance test

环周进水汽-液两相喷射性能优化 = Optimization of Full-arc Water-admission Steam-liquid Two-phase Jet Flow Performance

[刊 汉] MA Xin-xia, YUAN Yi-chao, LIU Yu-zheng(College of Energy Source and Power Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093), HUANG Ming (Shanghai City Quality Surveillance and Inspection Technology Research Institute, Shanghai, China, Post Code: 200233) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(1). - 33 ~ 37