

无油涡旋膨胀机性能特性及试验研究

彭斌,孙健

(兰州理工大学 机电工程学院,甘肃 兰州 730050)

摘要:对应用于有机朗肯循环系统中的涡旋膨胀机,搭建了以空气为工质的性能试验测试平台。测量了试验样机在不同进气压力下的转速、转矩、出气压力和容积流量;对不同负载下发电机的电压、电流和发电量进行了测量;对实际和理论情况下的容积流量、输入功率和输出功率进行了比较。

关键词:有机朗肯循环系统;涡旋膨胀机;性能试验

中图分类号:TH45 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2020)03-0202-03

Performance and Experimental Study of Oil-free Scroll Expander

PENG Bin, SUN Jian

(school of Mechanical & Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: For the scroll expander used in the organic Rankine cycle system, a performance test platform with air as working medium is built. The rotational speed, torque, outlet pressure and volume flow rate of the test prototype under different inlet pressures and the voltage, current and generating capacity of the generator under different loads are measured and the volume flow rate and the input, output power under the actual and theoretical conditions are compared.

Keywords: organic Rankine cycle system; scroll expander; performance test

0 引言

为了有效地解决能源的低效利用,尤其是不可再生能源的再次利用问题,有机朗肯循环系统(organic Rankine cycle system, ORC)由于其高效的余热回收能力,已被越来越多的研究者所重视。在工业生产中,大量的不可再生能源以中低品位(100℃~250℃)的形式排放到外界,造成了环境污染和大量的能源损失,而有机朗肯循环系统(ORC)能够有效地回收中低品位的热源,因而整个ORC系统的运行效率就决定了其能源回收利用率的大小^[1]。涡旋膨胀机在工作原理上属于容积型膨胀机,相较于其他类型的膨胀机而言,具有转速低、效率高、运行平稳和噪声低等优点^[2-3],因此被众多的研究者所青睐,越来越多的人开始对其进行了深入的理论和试验研究,并得到了实际应用。目前由于加工条件和材料的限制,涡旋膨胀机的设计输出功率均<10kW^[4-5]。

YANAGISAWA等通过对由涡旋压缩机改造而来的涡旋膨胀机使用空气作为工质进行了试验研究,得出其最大等熵效率为75%^[6];吴竺等采用工质R123对涡旋膨胀机变负载工况的传热模型进行了试验研究^[7];潘登等人对涡旋膨胀机在不同工况下的热力学性能进行了试验研究^[8];徐进等人给出了输出功率和输出转矩随气动功率的变化曲线^[9];KIM等人利用低温热源回收系统对涡旋膨胀机的传热模型进行了验证^[10];吴竺等人以油气比为

变化量给出了转速、空气质量流量和输出功率随油气比的变化关系^[11];WANG J D等验证了涡旋式膨胀机的效率与进气压力、体积流量、膨胀机转速之间均有关系^[12];顾伟等以R600为工质进行了试验研究,当涡旋膨胀机的输出轴功为740W时,其转速为4589r/min^[13-14]。

目前研究所用的涡旋膨胀机的输出功率大都<1kW,并且在有机朗肯循环系统中由于诸多条件的限制,无法实现工况条件的大范围调节,无法独立地研究温度和压力分别对整个系统的影响^[15]。本文搭建了以空气为工质的涡旋膨胀机试验平台,试验所用的涡旋膨胀机的最大设计功率为1.5kW通过试验得到了其进出口的压力和温度、转速和流量,发电机的电压、电流和发电量。通过试验研究验证了所建立的热力学模型,为涡旋膨胀机的理论设计和优化奠定了一定的基础。

1 试验研究平台

图1为涡旋膨胀机的试验原理简图。本试验平台由高压气源、涡旋膨胀机、玻璃转子流量计、三相异步发电机、截止阀、压力表、动态转矩传感器、钳式测功计、手持式红外线测温仪、负载、联轴器和管路连接件等组成。试验中由涡旋压缩机产生的高压高温气体经过储气罐和连接管路进入涡旋膨胀机后,高压气体通过连接管路进入涡旋膨胀机,动涡盘在气体的推动下进行转动,涡旋膨胀机与三相异步发电机采用联轴器相连接,降低了两者的传动损

基金项目:国家自然科学基金项目(51275226,51675254);甘肃省陇原青年创新团队资助项目(甘组电明字(2015)34);甘肃省高等学校协同创新团队项目(甘教技函(2017)30)

第一作者简介:彭斌(1976—),男,新疆伊宁人,教授,博士,研究方向为涡旋机械及低温余热发电。

失,提高了整个试验系统的工作效率。本试验中压力的调节是由手动球阀来控制的,由于手动球阀难以精确调节,因此在试验中会产生一定的测量误差。在试验中,涡旋膨胀机的转速、出口压力和容积流量均受到进气压力的影响,因此在试验中应严格、精确地调节进气压力。

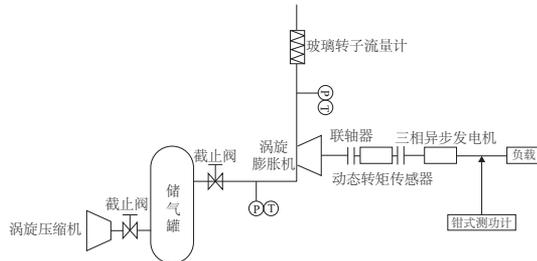


图1 试验原理图

试验所用的涡旋膨胀机为某公司生产的空气压缩量为 $0.4\text{ m}^3/\text{h}$ 的涡旋压缩机经过改装而成的,基本参数如表1所示。

表1 涡旋膨胀机基本参数

参数	值
基圆半径 r_b/mm	3.675
节距 P/mm	29
壁厚 t/mm	4.4
齿高 h/mm	29
涡旋圈数 N	4.24
径向间隙 δ_r/mm	0.02
轴向间隙 δ_a/mm	0.01
终端展开角 φ_d/rad	26.6

2 试验数据的处理

在试验中可以直接测得的数据有:膨胀机的进出口压力、温度和容积流量,膨胀机的转矩、输入功率和转速,三相异步发电机的电压、电流和发电量。

膨胀机的输出功率可以用来描述涡旋膨胀机的输出特性,其计算公式如下:

$$P_{\text{shaft}} = Tn/9.55 \quad (1)$$

其中: P_{shaft} 为涡旋膨胀机的输出功率,W; T 为膨胀机的转矩, $\text{N}\cdot\text{m}$; n 为膨胀机的转速, r/min 。 T 、 n 均可通过动态转矩传感器测得。

理论容积流量可以用来衡量涡旋膨胀机的进气量与转速之间的关系,其计算公式如下:

$$V_{\text{th}} = 60\pi Phn(P-2t)(3-\theta^*/\pi) \quad (2)$$

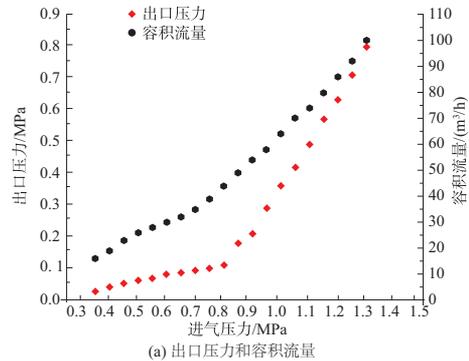
其中 θ^* 为膨胀起始角。

3 试验数据的结果与讨论

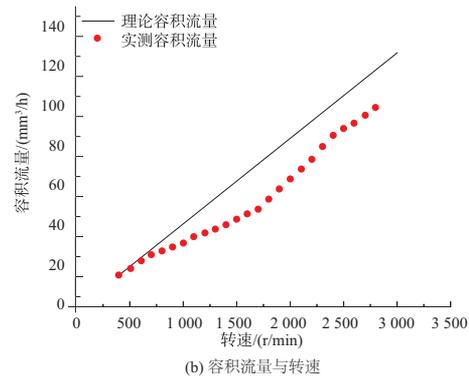
3.1 容积流量和出口压力

图2所示为出口压力和容积流量随进气压力的变化。如图2(a)所示,出口压力和容积流量随着进气压力的增加而增加,在进气压力较低时出口压力和容积流量变化较为缓慢,在进气压力较高时出口压力和容积流量变化较快。图2(b)所示为理论容积流量和实测容积流量随转速的变

化关系。由于存在着进气、排气压力损失和泄漏,实测容积流量要低于理论容积流量;在高转速时由于气流的阻塞作用,实测容积流量与理论容积流量之间的差值将变大。



(a) 出口压力和容积流量



(b) 容积流量与转速

图2 不同进气压力下出口压力和容积流量的变化

3.2 电压和电流的变化

图3所示为发电机的电压和电流随进气压力的变化。电压和电流随着进气压力的增大先缓慢增加,后随着进气压力的增大而逐渐增大。

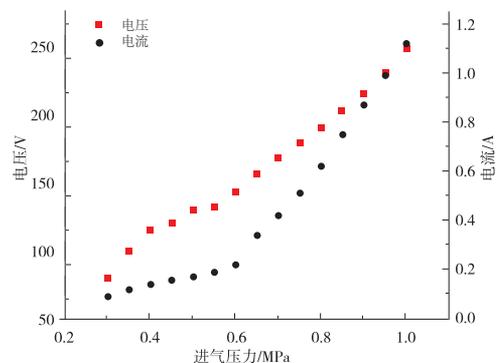


图3 不同进气压力下电压和电流变化

3.3 输出功率

图4所示为输出功率与进气压力和主轴转角之间的变化关系。如图4(a)所示,随着进气压力的增大输出功率也随之增大,实测值与理论值在低压时差值较大,随着压力的增大,两者之间的差值逐渐减小,差值最大值为 50 W ,这也验证了所建立数学模型的准确性;图4(b)所示为在模拟条件:进气压力 $P_{\text{in}} = 0.89\text{ MPa}$ 、转速 $n = 2500$

r/min,出口压力 $P_{d1}=0.15\text{ MPa}$ 下,输出功率随主轴转角的变化趋势。随着主轴转角的不断增大,膨胀机的输出功率先减小后增大,其最大值为 1100 W 、最小值为 800 W 。

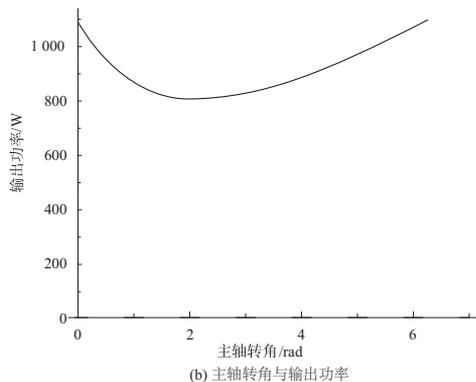
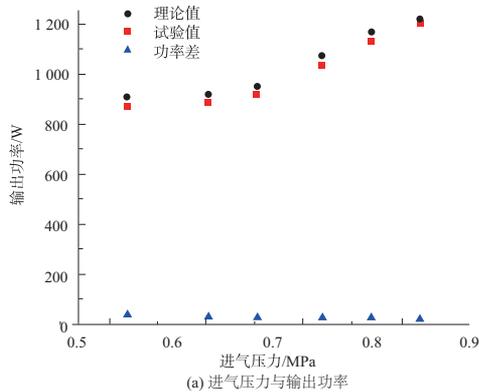


图4 不同进气压力下输出功率的变化

3.4 容积效率和等熵效率的拟合

在试验研究中发现涡旋膨胀机的容积效率 η_v 和等熵效率 η_s 都受到进气压力 P_{in} 、膨胀机转速 n 和膨胀比 ε 的影响。借助于 MATLAB 拟合出的多项式来求解容积效率和等熵效率。

容积效率的多项式由式(3)求得:

$$\eta_v = -80.52373 + 6.09308\alpha + 10.15034\beta - 0.22062\gamma + 0.17893\alpha^2 - 0.29674\beta^2 + 0.02729\gamma^2 - 0.52974\alpha \cdot \beta + 0.15236\alpha \cdot \gamma - 0.11033\beta \cdot \gamma \quad (3)$$

等熵效率的多项式由式(4)求得:

$$\eta_s = 40.74198 + 6.221\alpha - 7.67136\beta + 0.88519\gamma - 0.31322\alpha^2 + 0.32905\beta^2 - 0.72528\gamma^2 - 0.34181\alpha \cdot \beta + 0.47222\alpha \cdot \gamma - 0.02158\beta \cdot \gamma \quad (4)$$

式中: $\alpha = \ln(n)$; $\beta = \ln(P_{in})$; $\gamma = \ln(\varepsilon)$ 。

由式(3)和式(4)中可以看出容积效率 η_v 和等熵效率 η_s 均受转速 n 、进气压力 P_{in} 和膨胀比 ε 的影响。相较于容积效率而言,膨胀比对等熵效率影响更大。由于在实际的工作过程中,涡旋膨胀机是在一个稳定的转速条件下运行的,而本试验的转速是由进气压力所控制的,因此膨胀比对涡旋膨胀机起着至关重要的作用。

4 结语

1) 从以上的试验结果可以看出:随着进气压力的逐

渐增大,涡旋膨胀机的出口压力和容积流量也随之而增大;由于进出口压力的损失和泄漏等因素的影响,实测容积流量和理想容积流量之间存在着较大的差值,因此减小涡旋膨胀机的内泄漏对增大容积流量有着重要的影响。

2) 发电机的电压和电流从侧面反映了涡旋膨胀机输出功率的变化关系。在较低转速时发电机的电压和电流变化较为缓慢,当进气压力增大到一定值时,电压和电流的变化较为明显。

3) 分别对涡旋膨胀机在不同进气压力和主轴转角下的输出功率进行了分析,主要是为了分析影响输出功率的主要因素。由于膨胀机的内部损失和连接部件的机械损失,实测输出功率要小于理论输出功率。因此在满足试验样机设计要求和保证试验安全的前提下,应尽可能地提高涡旋膨胀机的进气压力,以便获得更高的输出功率,进而提高整个有机朗肯循环系统的发电效率。

参考文献:

- [1] 于立军,朱亚东,吴元旦. 中低温余热发电技术[M]. 上海:上海交通大学出版社,2015:1-2.
- [2] 顾伟. 低品位热能有机物朗肯动力循环机理研究和试验验证[D]. 上海:上海交通大学,2010.
- [3] 宋盼盼. 应用于有机朗肯循环的涡旋膨胀机非稳态流动特性研究[D]. 北京:北京理工大学,2015.
- [4] QIU G, LIU H, RIFFAT S. Expanders for micro-CHP systems with organic Rankine cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2011,31(16):3301-3307.
- [5] WANG T,ZHANG Y,PENG Z, et al. A review of researches on thermal exhaust heat recovery with Rankine cycle [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011,15(6):2862-2871.
- [6] YANAGISAWA T,SHIMIZU T,FUKUTA M, et al. Study on fundamental performance of scroll expander[J]. Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu B Hen/transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Part B, 1988,54:2798-2803.
- [7] 吴竺,朱彤,高乃平,等. 有机朗肯循环涡旋膨胀机性能测试与仿真分析[J]. 制冷技术, 2017, 37(1):8-12.
- [8] 潘登,高乃平,谢飞博,等. 有机朗肯循环涡旋膨胀机性能试验研究[J]. 流体机械, 2014(5):10-14.
- [9] 徐进,李金寿,郭宝圣,等. 余热回收型涡旋膨胀机性能试验[J]. 流体机械, 2014(7):1-4.
- [10] KIM H J, AHN J M, RHA P C. Scroll expander for power generation from a low-grade steam source[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A Journal of Power & Energy, 2007, 221(5):705-711.
- [11] 吴竺,朱彤,高乃平,等. 以空气为工质的含油涡旋膨胀机性能的试验研究[J]. 流体机械, 2018,46(6):5-9.
- [12] WANG J D, TANG X Q, WEI J Y, et al. Study on efficiency of scroll expander[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017(6):76-81.
- [13] 顾伟,孙绍芹,翁一武. 采用涡旋膨胀机的低品位热能有机物朗肯循环发电系统试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011,31(17):20-25.
- [14] 彭斌,李要红,赵生显,等. 基于圆渐开线涡旋膨胀机几何模型的研究[J]. 流体机械,2017,45(10):18-24.
- [15] DECLAYE S, QUOILIN S, GUILLAUME L, et al. Experimental study on an open-drive scroll expander integrated into an ORC (organic Rankine cycle) system with R245fa as working fluid [J]. Energy, 2013(55):173-183.

收稿日期:2019-03-07