微型气浮轴承高速透平膨胀机的研制

陈汝刚，侯予，陈纯正
（西安交通大学能源与动力工程学院，710049，西安）

摘要：为了发展微型气体轴承高速透平，在优化设计的基础上，研制了国内首台轴径为6 mm、叶轮直径为9 mm、设计转速为300 000 r/min的微型气体轴承透平膨胀机.对研制样机进行了全面介绍，阐述了该研制样机的结构设计特点，并对研制样机进行了初步的机械性能和热力性能考核.通过转子起浮试验，系统机械性能、热力性能的连续运转及超速试验考核，结果显示：所研制的样机振动小、运转平稳、效率高，最高转速超过342 000 r/min，满足超速15%的要求；在室温为23 ℃、无回热器的情况下，当进气压力从0升到0.27 MPa的45 min升速时间内，温降就达42 ℃，具有降温速度快，降温效果显著的特点.由于其机械及热力性能均达到预期要求，因此为今后进一步发展我国微型高速气体轴承透平机械奠定了坚实基础.

关键词：透平；膨胀机；气体轴承；静压；微型；高速
中图分类号：TB653 **文献标志码**：A **文章编号**：0253-987X(2010)01-0061-05

study of Miniature High Speed Turboexpander with Gas Lubricated Bearing

CHEN Rugang, HOU Yu, CHEN Chunzheng
(School of Energy and Power Engineering, Xi′an Jiaotong University, Xi′an 710049, China)

Abstract: A new miniature static gas bearing turboexpander with a shaft diameter of 6mm, a wheel diameter of 9mm, and a designed rotation speed of 300 000 r/min was developed on the basis of optimum design. The structure characteristics of the prototype developed were investigated. The preliminary mechanical and thermodynamic performance of the prototype was experimentally examined. The results show that the prototype has obvious features such as small vibration, stable operation and high efficiency, and the prototype can run at more than 342 000 r/min reaching 15% over-speed. Moreover, the temperature drop can be 42 ℃ within 45 minutes when the driving pressure increases from 0 to 0.27 MPa at the room temperature of 23 ℃ for the prototype without recuperators. The experimental verification shows that the mechanical and thermodynamic performance of the prototype can meet the requirement.

Keywords: turbine; turboexpander; gas bearing; hydrostatic; miniature; high speed rotation

近年来，随着工业及科技发展的需要，微小型气体轴承高速透平机械在很多领域已得到了快速发展，如移动式电源分布系统、燃料电池所用的空气燃料处理系统等具有宽广的应用前景，其中以微小型低温制冷机及微小型动力发生装置最为突出.研制相应的稳定可靠的微小型气体轴承高速透平机械也已成为开发研制微小型低温制冷机等微小型装置的关注焦点，人们普遍期待微小型高速透平机械能具有较好的热效率及良好的运转稳定性，以保证所配套的低温装置或动力装置能达到预期的制冷或动力

收稿日期：2009-09-01. 作者简介：陈汝刚(1970－)，男，博士，讲师. 基金项目：民用航天预先研究资助项目(C3220061314)；新世纪优秀人才支持计划 资助项目(NCET-05-0834)；西安交通大学校长科研基金支持计划项目(08140010).

要求. 在发展微小型高速透平机械的过程中,采用气体轴承已显示出了极大优势,国外不仅明显加快了动压气体轴承微小型高速透平机械的研制步伐,并且对微小型静压气体轴承高速透平机械也给予了充分关注,并已陆续有轴径小于 6 mm 、转速 100 000r/min 以上的相应研制样机问世[1-7]. 近年来,国外所研制的样机主要集中在轮径小于 10 mm 的静压气体轴承高速透平,其尺寸小、转速高(300 000 r/min 以上).

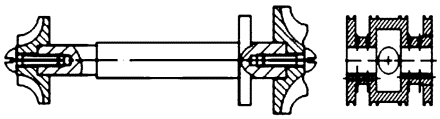
目前,我们正积极研制国内首台轴径为 6 mm、轮径为 9 mm、转速为 300 000 r/min 的手掌型气体轴承透平膨胀机样机,鉴于其研制具有的高难度,研制第 1 阶段采用了小孔供气静压气体轴承以开发试验样机,第 2 阶段则拟采用新型箔片动压气体轴承以实现轴承无需外界气源供气的要求. 本文拟对微小型高速静压气体轴承透平膨胀机的研制做简要阐述,通过试验研究以揭示研制样机的机械和热力性能.

1 研制样机的设计及结构

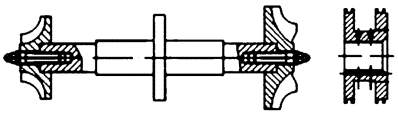
微小型高速透平膨胀机是利用工质流动时速度的变化来转化能量,为了保证结构的简化,而且满足单级比焓降的特点,采用单级径轴流反动式透平的方案,在采用一元设计方法的基础上,通过优化设计对通流部件内气体流动过程进行了分析计算,设计了一台流量为 10 m^3/h 的微小型气体轴承透平膨胀机样机. 其主要参数为:进口压力 $p_0=0.4$ MPa;出口压力 $p_2=0.11$ MPa;进口温度 $T_0=253$ K;等熵效率 $\eta_s=0.45$;工作轮外径 $D_1=9$ mm;主轴直径 $D=6$ mm;设计转速 $n=300\ 000$ r/min. 图 1 所示为研制样机的实物外形图.

在样机设计中,采用径-轴流反动式工作轮,输出轴功率由径向风机叶轮吸收,工作轮与风机轮分置主轴两端. 转子主轴及轴承系统曾设计为单止推盘近风机轮端配置的形式,如图 2a 所示,但经模型样机的初步试验,显示出止推盘在近风机端一侧的止推静压气体轴承,由于供气通道的设计易产生供气泄漏,导致止推轴承供气压力下降,影响透平膨胀机的正常运转,因此通过分析比较,将主轴及轴承设计方案改进为主轴单止推盘中间配置的形式,如图 2b 所示. 本文试验主要针对图 2b 所示的结构型式进行了详细试验研究. 实验转子总长 59 mm,质量为 11.4 g. 试验时转子支撑系统采用不同型式的全静压气体轴承的方案,静压径向轴承采用双排切向小孔供气型,每排 8 孔,供气孔直径为 0.3 mm. 静压止推轴承则因转子承受轴向力较小采用单排小孔供气的平面止推型,8 孔圆周均布,孔径亦为 0.3 mm. 选择切向小孔供气静压径向气体轴承的结构方案,主要是因为其结构简单,制作方便,且由于逆切向供气在轴承间隙 C_r 中产生的切向环流速度(如图 3 中环流角速度 ω_0 所示)与转子正常运转角速度 ω 方向相反,可抑制、推迟自激涡动的发生,显著提高了透平膨胀机的运转稳定性.

图 1 研制的微小型试验样机



(a)止推盘在单端



(b)止推盘在中间

图 2 两种不同设计方案的转子及轴承

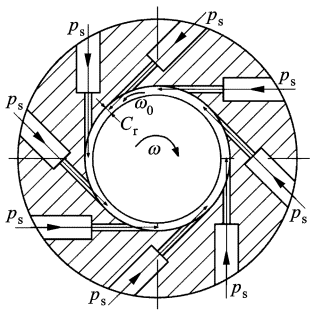


图 3 轴承间隙中切向环流示意图

2 试验台及测试设备

为开展微小手掌型高速气体轴承透平膨胀机的试验研究,搭建了专用试验台,包括建立了新的供气系统及数据动态测试采集系统,该试验台系统流程及测试系统装置分别如图 4 及图 5 所示. 试验所需用的压力空气系由一台螺杆压缩机产生,并通过空

气过滤器、油水分离器、微雾分离器等净化处理后，经由截止阀、流量计（透平驱动气及轴承气）分别提供至透平工作轮及径向与止推气体轴承. 在止推盘处同一平面内分别安装两个互成 90°的电涡流传感器，以测试水平方向和竖直方向的相对径向位移. 转子转速用安装在风机端的转速传感器进行测试，转子每转一圈传感器输出一个方波信号. 测试用传感器配置如表 1 所示.

表 1　系统主要测试传感器配置

传感器名称	传感器类型	测量范围	测量精度/%
转速传感器	电涡流振动	0～400 000 r·min^{-1}	0.1
振幅传感器	电涡流振动	0～0.5 mm	0.005
压力传感器	扩散硅压力	0～0.8 MPa	0.5
流量传感器	质量流量	0～12 m^3·h^{-1}	1.0

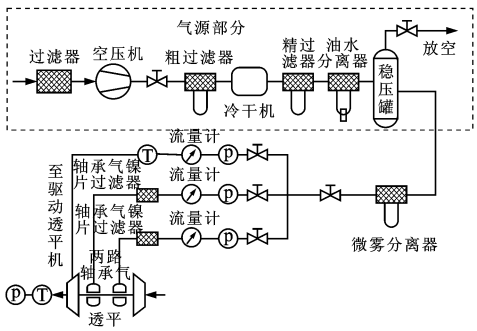


图 4　试验台系统流程示意图

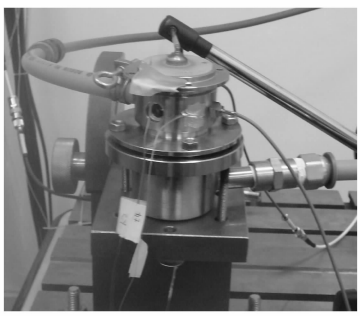


图 5　微小型高速透平测试试验台

3　微小型高速透平的机械及热力性能试验结果

将研制的气体轴承透平膨胀机样机在新建立的微小型气体轴承透平膨胀机试验台上进行了初步常温试验，取得了较好结果. 试验时样机径向、止推静压气体轴承的安装间隙分别为 0.04 和 0.05 mm；微小型转子-轴承组合件装入膨胀机中间机体后，首先进行转子起浮试验，即在不供给膨胀机通流部分驱动工作气的情况下，打开轴承气进气阀仅对轴承提供压力气体，转子即很快起浮. 本试验中实测的转子起浮压力为 0.01 MPa，继续提高轴承供气压力 p_s，转子顺转的转速也随之升高，图 6 表示了在起浮过程中轴承供气压力 p_s 在 0～0.18 MPa 区间时，转子顺转转速及轴承耗气量 Q_b 随轴承供气压力 p_s 的变化.

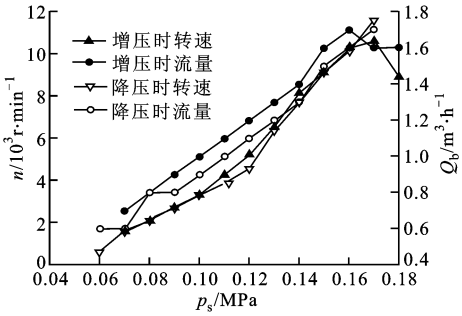
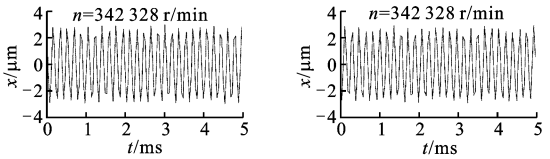


图 6　转速及耗气量 Q_b 随供气压力 p_s 的变化

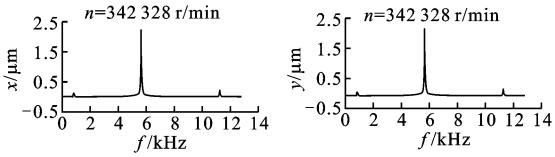
该静压气体轴承起浮试验情况表明，静压气体轴承研制质量良好，转子起浮压力低，轴承气压力提高后，轴承间隙中气体的切向环流速度明显能为转子-轴承系统的正常运转提供有效阻尼，可保证转子正常稳定运转. 依靠轴承气黏性力带动转子旋转能达到较高速度.

在保证所装配的转子组件能正常起浮的情况下，对研制的静压气体轴承透平膨胀机进行了初步的机械性能及热力性能考核. 保持透平工作轮排气压力 p_2 不变，逐步提高透平进气压力 p_1 以提高透平膨胀机转速，观察并记录各不同工况时的透平膨胀机进气压力、温度、流量、转速、轴承气压力及耗气量，以及转子的振动情况，包括各种工况时的转子时域、频域和轴心轨迹图. 图 7 给出在高转速 342 328 r/min 下转子的时域、频域和轴心轨迹图. 试验结果显示振幅中以同步分量为主，次同步分量不显著，而且频率较低，轴心轨迹清晰、振幅小. 图 8 则给出了不同转速下驱动流量、轴承耗气量及转子振幅的变化，其中透平驱动流量及轴承气耗气量是由相应的流量计测定，转子振幅则由转子止推盘外侧的两个相互垂直配置的电涡流传感器实测得出，可以看出，

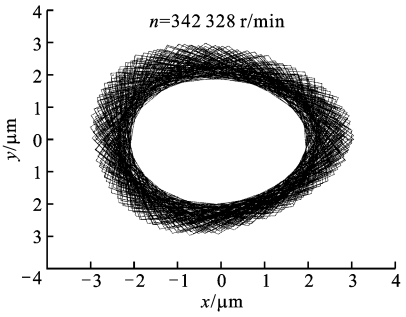
转子运转稳定，最大振幅(峰峰值)为 3.1 μm. 根据运转过程中实测的进排气温度，在室温为 23 ℃、无回热器的情况下，当进气压力从 0 升到 0.27 MPa 仅短暂的 45 min 升速时间内，温降就达 42 ℃，显示出研制样机具有降温速度快，降温效果显著的特点.



(a)x 方向时域 (b)y 方向时域



(c)x 方向频域 (d)y 方向频域



(e)轴心轨迹

图 7 实测的转子时域、频域及轴心轨迹图

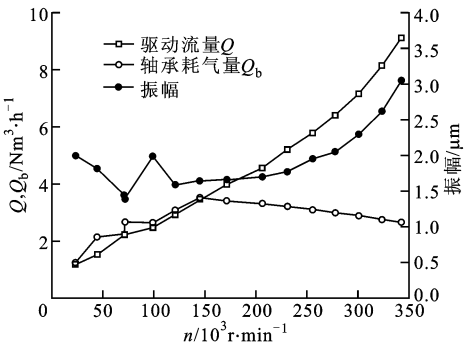


图 8 透平驱动流量、轴承耗气量及振幅随转速的变化

经过多次升速、降速工况的考核后，还对研制样机进行了设计转速下 12 h 连续运转考核以及超设计转速 15%的超速试验考核，结果表明，样机运转平稳正常，符合要求. 根据实测试验数据，计算出各工况下的绝热效率 η 及特性比 U_1/C_0，从而可得出透平膨胀机的 η-U_1/C_0 的特性曲线. 其中：透平膨胀机绝热效率 $\eta=\Delta h/\Delta h_0$，膨胀机实际焓降值 Δh 及膨胀机理想绝热焓降值 Δh_0 根据实测的膨胀机进出口压力、温度由热力图表求出；U_1 为工作轮圆周速度，由 $U_1=\pi Dn/60$ m/s 计算出，D 为透平工作轮直径，m，n 为透平膨胀机转速，10^3 r/min；C_0 为相应于理想绝热焓降的理想速度，可由 $C_0=8.311(\Delta h_0)^{1/2}$(m/s)求出，$h_0$ 单位为J/mol. 根据试验结果计算得出的研制样机特性曲线显示在图9 中.

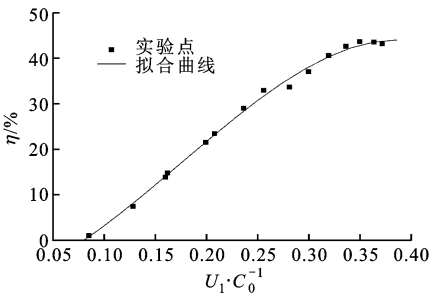


图 9 研制样机的实测 η-U_1/C_0 特性曲线

4 结 论

研制小尺寸、高转速的微小型高速透平机械具有较大难度，目前国际上属于热点研究内容. 本文研制的国内首台轴径为 6 mm、轮径为 9 mm、设计转速为 300 000 r/min 的微型气体轴承透平膨胀机，经过精心设计，转子采用单止推盘在主轴中间、径-轴流反动式工作叶轮与风机轮分置主轴两端的配置形式. 轴承系统则设计为切向小孔供气静压气体轴承的结构方案. 通过转子起浮试验，系统机械性能、热力性能的连续运转考核和测定及超速试验考核，结果显示所研制的样机运转稳定、振动小、效率高，最高转速超过 342 000 r/min，满足超速 15%的要求. 样机在短时间内就可以达到 42 ℃的温降效果，试验结果令人满意. 通过对该样机的研制和试验测试，为我国今后进一步研发微型动压气体轴承透平膨胀机奠定了良好基础.

参考文献：

[1] EVANS J C, NELLIS G F. Design and test of hydrostatic gas Bearings for a hybrid cryogenic refrigerator [C]// ASME International Mechanical Engineering Congress. Washington, USA: ASME, 2003: 67-76.

[2] WAUMANS T, VLEUGELS P, PEIRS J, et al. Rotor dynamic behavior of a micro-turbine rotor on air bearings: modeling techniques and experimental verification [C]// Proceedings of International Conference

on Noise and Vibration Engineering. Lenven, Belgium: Katholieke Universiteit Leuven, 2006: 181-198.

[3] KOUSUKE I, MOTOHIDE M, SUSUMU T, et al. Experimental verification of the feasibility of a 100W class micro-scale gas turbine at an impeller diameter of 10 mm [J]. Journal of Micromechanics and Micro Engineering, 2006, 16(9):254-261.

[4] KOUSUKE I, SHUJI T, SHINICHI T, et al. Development of high-speed micro-gas bearings for three-dimensional micro-turbo machines [J]. Journal of Micromechanics and Micro Engineering, 2005, 15(9): 222-227.

[5] SHUJI T, KOUSUKE I, SHINICHI T, et al. Turbo test rig with hydroinertia air bearings for a palmtop gas turbine [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2004, 14(11):1449-1454.

[6] EPSTEIN A H. Millimeter-scale, micro-electro-mechanical systems gas turbine engines [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(2):205-226.

[7] EHRICH F F, JACOBSON S A. Development of high-speed gas bearings for high-power density micro-devices [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003,125 (1):141-148.

[本刊相关文献链接]

小型低温余热发电系统膨胀机输出特性试验研究. 2009,43(11):100-103.

培尔顿式膨胀机的实验研究. 2009,43(9):95-99.

低温余热回收用涡旋膨胀机性能模拟研究. 2009, 43(7):95-99.

CO_2 滑片膨胀机热力过程的试验研究. 2008, 42(3):313-317.

低温透平制冷机的静压气体润滑轴承研究. 2007, 41(7):792-796.

（编辑　王焕雪）