

毫米级微型燃气轮机系统设计原则与 可实现性循环分析

付雷, 丰镇平

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对多学科领域中毫米级微型燃气轮机系统的设计原则、性能参数选取和整体可实现性条件进行了理论综述、对比研究和量化分析. 结果表明: 由于毫米级微型燃气轮机系统通常采用无回热器结构的布雷顿简单循环体系, 压气机与透平主要受到低 Re 流动的影响和二维几何结构的限制, 因此在设计时需利用不同叶片厚度来分布控制流动分离, 并采用相同叶高且间隙分别是弦长和叶高的 0.2% 和 1%; 间隙泄漏、传热损失、转捩流动、出口损失和尺寸效应等因素对性能的影响不容忽视; 微型燃烧室设计要求确保充分预混并采用小当量流量比稳定燃烧; 装置材料应选用高强度系数的耐高温陶瓷、硅或合金, 轴承采用高稳定性气体轴承. 通过循环分析表明, 微型燃气轮机要达成 10^2 W 级的可实现性循环, 透平进口温度应大于 1 100 K, 压比大于 3, 压气机和透平的效率分别达到 70% 和 75%, 流量控制在 2 g/s 以下, 叶轮的直径转速乘积达到 8 500 mm · r/min, 燃烧室总压损失不超过 5%.

关键词: 毫米级微型燃气轮机; 微型向心透平; 可实现性循环分析

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)05-0042-05

Design Principle and Cycle Analysis of Millimeter-Scale Micro-Turbine

FU Lei, FENG Zhenping

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The design method, selection of performance parameters, and feasibility condition for millimeter-scale micro-turbine systems were discussed and analyzed. The results indicate that because the simple Brayton cycle without a regenerator is adopted in the design of micro-turbines, and the micro-compressors and micro-turbines are affected by flow with low Reynolds number and restricted by two-dimensional geometry, the different blade thickness distribution is used to control separation and the same blade height is applied with the tip clearance of 0.2% chord and 1% blade height. The performance degradation caused by leakage flow, heat loss, transition, exit loss and scaling effect should not be neglected in the design. The adequate mixing of fuel and low equivalence ratio combustion are needed in the micro-combustor design. The high stiffness material is required, and the gas bearings and rotors with high stability are recommended for the system. The cycle analysis shows that the turbine inlet temperature of more than 1 100 K, pressure ratio of over 3, compressor efficiency of 70% and turbine efficiency of 75%, mass flow of below 2 g/s, impeller DN value of 8500, and total pressure loss of less than 5% in the micro-combustor are needed to realize a 100 W-class micro-turbine cycle.

Keywords: millimeter-scale micro-turbine; micro radial turbine; realizable cycle analysis

现代科技界普遍认为,在尽可能大的尺寸单元上产生能量是最经济的,然而毫米级微型燃气轮机的出现改变了这种模式.在经典布雷顿循环的基础上,毫米级微型燃机与大型燃机具有许多不同之处,但是性能是等效的,并且它的功率密度和能量密度均大于传统燃机和现代电池.毫米级微型燃机在移动能源和推进发动机方面有着广泛的应用前景,它的出现为能量系统和推进系统开创了一种新的技术途径.

微型燃机属于热力叶轮机机械范畴.设计时,毫米级微型燃机不是直接将大型燃机小型化,多年来积累的大型燃机的设计理念和经验也不再是完全适用的^[1],所以研究微型燃机系统的设计原则及其面临的挑战很有必要.

本文根据国内外研究进展,对毫米级微型燃机的设计和可实现性循环进行了相关的基础理论综述和研究.由于毫米级微型燃机的设计过程是非线性的,它是一个反复设计、优化和整体权衡的过程,其基础理论的发掘、细化是在微型燃机部件的设计过程中逐步形成的,所以将这些基本内容加以整理作为毫米级微型燃气轮机系统的设计指导具有重要的理论意义和参考价值.本文旨在通过对微型燃气轮机系统设计基础与可实现性循环的分析,为有兴趣的研究者提供一种对微型机械较为全面和系统的认知,从而可以比较准确地开展系统和核心部件的相关研究.当然,毫米级微型燃机还处于初步发展阶段,这些理论有待逐步完善.

1 毫米级微型燃气轮机系统设计原则

毫米级微型燃气轮机系统主要由微型的向心透平、离心压气机、燃烧室、轴承等组成.本文的研究对象是叶轮直径为10~15 mm的微型燃机,透平进口温度小于1 600 K,转速范围为 $10^5 \sim 10^6$ r/min,膨胀比小于4,循环输出功率级别为 10^2 W.

毫米级微型燃机设计涵盖了热力学、流体力学、叶轮机机械气动热力学、材料和结构力学、燃烧学、转子动力学以及尺寸效应等多学科及其交叉学科,国内外对此展开了相关研究^[1-8],本文在此基础上进行了归纳、总结和发展.

1.1 热力学

如果系统部件的设计受限于流体力学、结构、材料和加工等因素,那么整个系统应首先进行热力学设计^[1].从理论上来说,目前的许多稳定热力系统都可以小型化,但考虑到高功率密度、高能量密度、简

单加工工艺以及短时间内验证设计的简易性等因素,微型燃气轮机在设计时应采用布雷顿循环.

尽管带回热器的微型燃机油耗低、循环效率高,但其结构复杂,且布局设计及加工具有一定的难度,因此目前采用的毫米级微型燃机的形式均为简单循环燃气轮机^[1-3].

1.2 流体力学

微型叶轮机机械的 Re 比常规叶轮机机械小若干个数量级,由此便对设计者提出了前所未有的挑战^[5].

压比较大意味着圆周 Ma 必须在高亚音速或超音速范围之内,同时冷端组件的 Re 为 10^4 量级,而热端透平的 Re 仅为 10^3 量级,此时的流体是层流或者是从层流到湍流的转捩^[6],这种低 Re 、高 Ma 的设计既无初始数据和相关经验,也无可利用的分析工具.目前,微机械工艺还不具备加工非平面件的能力,所以控制流体边界层的分离就不能采用常规端壁轮廓线和叶型空间弯扭等方法^[2].另外,在不造成压力损失和流动堵塞下,利用传统技术和方法对用于流动方向直角折转的导向装置或轮廓线进行加工难以实现.

1.3 叶轮机机械气动热力学

较之传统叶轮机机械,微型叶轮机机械的特点是低 Re 流动和二维几何结构^[1].低 Re 带来了不可避免的流动分离,在现有微加工技术的制约下,这种分离影响将更为明显^[2].虽然通过子午流道的收缩或扩张,即利用流体密度发生较大变化可以提高做功能力,但是现有微加工技术只能加工出等叶高的微型叶轮机机械.

为了减少毫米级微型压气机的总压损失,应尽量增大叶片弦长,但这将导致叶展小于弦长.目前解决该问题的方法是,通过调整叶片厚度分布来控制流动分离^[5],但增加叶片尾缘厚度和叶片出口角会产生能量损失,从而降低压缩能力,缩小稳定工作的范围.

低叶展、厚尾缘和低 Re 将使得流动在叶高方向产生波动,导致扩压器进口气流角沿叶高分布出现 $15^\circ \sim 20^\circ$ 的偏差,且由于加工条件受限,微型压气机叶片不能通过弯扭来适应气流角的变化^[4],也不能采用无叶扩压器来提高效率.

毫米级压气机的小尺度间隙虽然可以降低泄漏流带来的损失,但小间隙的存在使得速度梯度增大,从而增加顶部的阻力,造成额外损失.国外先进的微型压气机间隙分别是弦长和叶高的0.2%和1%^[5].

在毫米级尺度下的压气机存在着不同程度的热

传导,这种传热会大幅降低压气机的流量和绝热效率,减小压比,所以不能将其简单地作为绝热来处理.然而,不同的透平进口温度也会导致传热量有所不同,因此毫米级微型压气机必须与微型透平同步设计,即在每一个进口温度下均要求一个优化设计的压气机.

本文作者对毫米级微型向心透平进行了相关研究^[6-8],利用不同的 CFD 商业软件对低 Re 流动情况进行了模拟,预测出层流向湍流转捩的情况^[6],因此设计时必须考虑由此带来的性能损失.

毫米级微型向心透平的间隙与叶高的比值较大,这会严重影响气动性能^[6].在设计中,间隙的大小有其理论值,而其实际值则取决于加工和装配技术,虽然可以采用封闭流道设计,但同时需要考虑叶冠的强度问题.此外,热传导带来的传热损失将直接影响微型透平的效率和功率^[6].

毫米级微型向心透平的出口损失是其损失的主要来源,包括余速损失、出口涡系损失、流道直角折转损失和尾管总压损失.为了降低出口损失,设计时要考虑到膨胀比、反动度的匹配,叶型出口型线和直折转角后的尾管优化等^[6-7].

1.4 结构和材料

微型叶轮机器的结构设计取决于热力学要求,同时受制于材料属性和加工能力.布局结构设计要考虑到转子动力学、离心应力、激振频率,以及热组件承受的蠕变和氧化时的寿命^[1-3],这对高温部件下的透平尤其重要,同时材料强度也是要考虑的重要因素.微型燃机必须以相同的加工方法加工出相同尺寸的试验件进行试验.

高能量密度的毫米级微型燃机所选用的材料应具有高强度系数.陶瓷材料的硬度高、热膨胀系数小、密度低、重量轻、工作温度高,但其韧性低,对裂纹十分敏感.硅材料在经过深度离子反应刻蚀后,标准强度能够达到 4 GPa,但其高温性能受蠕变寿命所限^[5].目前,高强度系数材料是采用在硅基上化学气相沉淀碳化硅层的混合结构材料.表 1 给出了相关材料属性,需要说明的是,透平进口温度不是由循环设计确定,而是由材料可承受的平均温度确定.

表 1 微型向心透平材料的主要属性^[2]

材料	镍基合金	钛合金	陶瓷	硅
离心应力/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	330	420	670	330
热应力/ 10^{-3}	2.7	1.2	1.1	0.9
硬度/ $\text{MPa} \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$	~26	~25	~95	~70
最高耐热温度/ $^{\circ}\text{C}$	~1 000	~300	~1 500	~600

1.5 燃烧学

微型燃烧室的要求是:总压损失低,所有工况下的燃料和空气应顺利地引入、混合,点火要快速,燃烧需稳定.相应的设计要求是:材料强度、隔热结构应维持在低应力状态,燃烧室的尺寸和形状与整个燃机相比较为适宜^[1].这样,微型燃机燃烧室设计将面临着 2 个问题^[5]:①如何解决小尺寸燃烧室的燃料停留时间受限的问题;②当微型化后的表面积与体积比增大时,如何解决燃烧室壁面传热损失与燃烧过程中释放的热量相当的问题.表 2 给出了常规和微型尺寸燃烧室的相关参数.

微型燃烧室的设计基于 3 个原则^[2]:①增大微型燃烧室的体积,以提高燃料的停留时间;②在燃烧室的上游进行燃料的引入与混合;③进行稀薄燃烧,即燃烧当量比为 0.3~0.4.

表 2 常规燃烧室与微型燃烧室设计参数^[1]

燃烧室类型	常规	微型
长度/ m	0.2	0.001
体积/ m^3	0.073	6.6×10^{-8}
截面面积/ m^2	0.36	6×10^{-5}
入口总压/ Pa	38×10^5	4.05×10^5
入口总温/ K	870	500
质量流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	140	1.8×10^{-4}
停留时间/ ms	~7	~0.5
效率	~0.99	~0.90
总压损失	<0.05	<0.05
出口温度/ K	1 800	1 600
功率密度/ $\text{MW} \cdot \text{m}^{-3}$	1 960	3 000
空间加热速率/ $\text{kW} \cdot \text{Pa} \cdot \text{m}^{-3}$	3.85×10^9	3.34×10^{10}

1.6 转子动力学

微型燃机要求采用低摩阻转子来克服流体摩擦力,常见的有气体轴承、磁力轴承、混合气-电轴承等,目前可选择承载能力较强的气体轴承^[1-5].

微型气体轴承工作时所遵循的物理规律有其独特性,主要表现为:轴承圆周速度接近超音速,所以可压缩效应十分明显;与转子相比,轴承的表面积很大,轴颈与直径的比值很小.在现阶段设计中,要求转子转速大于临界频率且高达 2 个数量级,在这样的系统中稳定性便成为主要问题^[2,5].

稳定性是指轴承必须在较大的偏心率下工作.由于装置质量很小,重力载荷接近于 0,因此需要改

变轴承加载方式来保持稳定。设计中解决的方法有 2 种^[2]:①采用侧向加压法;②刻意采用非平衡质量,使转子按质量中心线旋转。

微型轴承的稳定性、加工和装配等因素限定了其所需要的物理空间,且直接影响到微型透平的结构设计,进而影响气动设计及整机性能。因此,在系统设计之初,首先要考虑轴承问题,并将其始终贯穿于部件的气动和结构设计过程中^[6]。

1.7 尺寸效应

功率密度和比功(功率流量比)与特征尺寸成反比,这是尺寸缩小的主要益处。微型燃机的功率密度大约是常规燃机的 100 倍,但实际中并非如此,因为尺寸效应会带来额外的损失。功率密度增加在很大程度上能够补偿或抵消其他损失所导致的循环性能下降,这一优点对微型燃机来说是至关重要的^[1,6]。

能量密度计算所考虑的质量必须包括燃料的质量^[4,6],因为当燃料质量超过了燃机自身质量时,能量密度主要取决于燃料的能量密度,而燃料的能量密度会因循环能量转换效率下降而降低。微型燃机在燃烧碳氢燃料并运行在 20%循环效率时所具有的能量密度为 2 300 W·h/kg。最好的锂电池的能量密度为 200~300 W·h/kg,只相当于微型燃机循环效率为 1%时的能量密度^[2]。

本文对尺寸效应带来的参数变化进行了计算,结果如表 3 所示,其中微型燃机的特征长度取为大型燃机尺寸的 1/100,其余参数依次列出。限于篇幅,详细推导不在此展开。

表 3 尺寸效应影响下的微型燃气轮机主要参数

参数	比例因子函数	比例因子系数
特征长度	X	0.01
面积	X^2	0.000 1
体积	X^3	0.000 001
面积/体积	$1/X$	100
质量	X^3	0.000 001
循环功率	X^2	0.000 1
功率/体积	$1/X$	100
功率/质量	$1/X$	100
雷诺数	X	0.01
平均摩擦系数	$0.3/X^{1/2}$	3
边界层排挤厚度	$0.59/X^{1/2}$	6
平均斯坦顿数	$0.31/X^{1/2}$	3
平均毕渥数	$0.31 X^{1/2}$	0.03

2 毫米级微型燃机可实现性循环分析

毫米级微型燃气轮机循环能否实现与压气机绝热效率、透平绝热效率、压气机压比、透平进口温度、燃烧室压损、轴承机械损失、叶轮的直径转速乘积(简称 DN 值)、材料应力和加工安装技术等因素有关^[9-10]。本文对这些影响因素逐一进行了计算,计算程序为自编写程序,计算模型中嵌入了经验损失模型。需要说明的是,本文为计算编写的热力程序与文献^[9-10]进行了校核,校核结果的误差小于 1%,因此计算结果具有预测性和参考性。

图 1 为以甲烷为燃料,在不同透平的进口温度 T_3 和压气机效率 η_c 下,微型燃机的燃料消耗率 μ 与单位进口面积的输出功 P 的关系曲线。在微型燃机尺寸基本确定以后,可以此估算系统循环输出功。

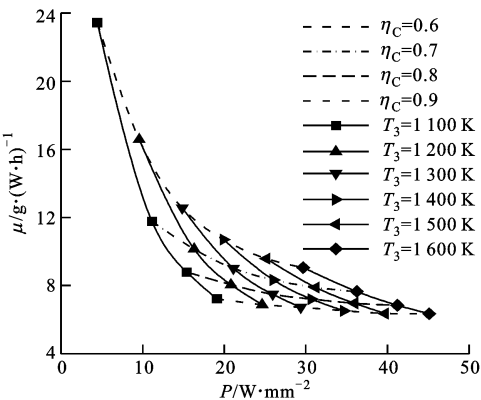


图 1 微型燃机燃料消耗率随单位进口面积的输出功的变化曲线

图 2 为不同进口温度下微型向心透平效率 η_t 和 η_c 随循环输出比功 σ 的变化曲线。从图中可以看出,核心部件的设计效率和参数必须达到某一特定值,即 $\eta_c > 0.75$ 时,才能保证循环有净功率输出。

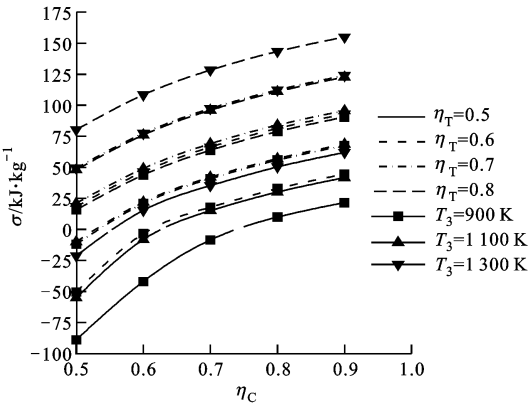


图 2 微型向心透平效率和压气机效率随循环输出比功的变化曲线

图3为不同压比 β 下 η_T 和 η_C 随循环输出比功的变化曲线。从图中可以看出,当 $\eta_C > 0.70$ 时,才能获得循环净功。图4为不同燃烧室总压恢复系数 γ 下 η_T 和 η_C 随循环输出比功的变化曲线。图5为压气机叶轮直径、转速与 β 的关系,图中反映出所需叶轮转速、叶轮直径与能够达到的压比的关系。

综上,本文所提影响因素除轴承稳定性判定、加工和安装技术以外,其余的均给出了直观分析结果。

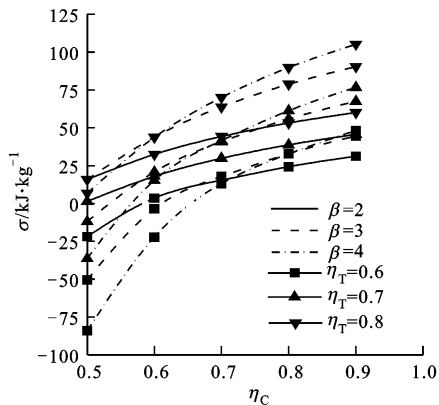


图3 压气机压比与循环输出比功的关系

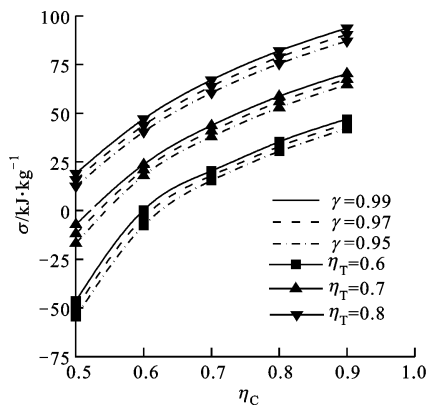


图4 燃烧室总压系数与循环输出比功的关系

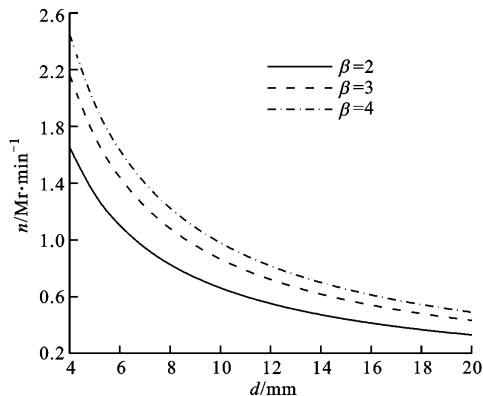


图5 叶轮直径、转速与压比的关系

3 结 论

(1)毫米级微型燃气轮机的设计涵盖了多学科领域,设计时需掌握相关因素之间的制约关系,除气动、强度和结构参数以外,轴承、加工和装配技术也是决定微型燃气轮机能否实现的因素,设计时必须加以权衡。

(2)对于采用无回热器结构的布雷顿简单循环体系的毫米级微型燃气轮机,其压气机、透平设计需利用不同叶片厚度分布来控制流动分离,同时要采用相同叶高且选取合适的间隙;设计中,间隙泄露、传热损失、转换流动、出口损失和尺寸效应等因素对性能的影响不容忽视;微型燃烧室要求确保充分预混并稳定燃烧;装置材料要选用高强度系数的耐高温陶瓷、硅或合金,轴承采用高稳定性气体轴承。

(3)经可实现性循环分析表明,要使微型燃气轮机的循环输出功达到 10^2 W级别, $T_3 > 1\ 100$ K, $\beta > 3$, $\eta_T > 70\%$, $\eta_C > 75\%$,流量控制在2 g/s以下,叶轮DN值大于8 500 mm·r/min,微型燃烧室总压损失小于5%。

参考文献:

- [1] EPSTEIN A H. Millimeter-scale, MEMS gas turbine engines [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(2):205-226.
- [2] EPSTEIN A H, SENTURIA S D, AL-MIDANI O, et al. Micro-heat engines, gas turbines, and rocket engines [C]//Proceedings of the 28th AIAA Fluid Dynamics Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 1997: 1773.
- [3] PEIRS J, REYNAERTS D, VERPLAETESN F, et al. A microturbine for electric power generation[J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2004, 113(1): 86-93.
- [4] EPSTEIN A H, SENTURIA S D. Macro power from micro machinery [J]. Science, 1997, 276 (5316): 1211.
- [5] JACOBSON S A. Aerothermal challenges in the design of a microfabricated gas turbine engine [C]//Proceeding of the 29th AIAA Fluid Dynamics Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 1998:2545.
- [6] FU Lei, SHI Yan, DENG Qinghua, et al. Aerodynamic design and numerical investigation on overall performance of a micro radial turbine with millimeter-scale [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 2010, 132(3):2301-2309.
- [7] 付雷, 石龔, 邓清华, 等. 毫米级微型透平的气动优化

设计研究 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(1): 15-19.

FU Lei, SHI Yan, DENG Qinghua, et al. Aerodynamic design and optimization of a radial inflow millimeter-scale turbine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(1): 15-19.

[8] 付雷, 邓清华, 丰镇平. 微型向心透平级速比与 DN 值的最优选择 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(7): 16-20.

FU Lei, DENG Qinghua, FENG Zhenping. Analysis and optimal selection of stage velocity ratio and DN-value for micro radial turbine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(7): 16-20.

[9] ISOMURA K, MURAYAMA M, TERAMOTO S, et al. Experiment verification of the feasibility of a 100 W class micro-scale gas turbine at an impeller diameter of 10 mm [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2006, 16(9): 254-261.

[10] GROSHENRY C. Preliminary design study of a micro-gas turbine engine [D]. Cambridge, MA, USA: MIT, 1995.

(编辑 苗凌)