乙醇燃料微型燃气轮机设计

张 弛 王建臣 覃清钦 杜 鹏

(北京航空航天大学 航空发动机气动热力重点实验室，北京 100191)

摘 要：推广生物质燃料在以微型燃气轮机为核心的分布式能源技术中的应用，设计了一种可燃用乙醇燃料的微型燃气轮机. 通过整机热力循环参数分析，确定了乙醇燃料微型燃气轮机的设计点参数，并结合乙醇燃料特点，对燃烧室的几何尺寸进行了设计，获得了适用于乙醇燃烧的微型燃气轮机燃烧室技术. 初步的整机实验结果表明，该乙醇燃料微型燃气轮机成功实现自行运转，证明了设计方案可行.

关 键 词：分布式能源；微型燃气轮机；生物质燃料；乙醇；燃烧室

中图分类号：TK 47

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)09-1125-05

Design of ethanol micro gas turbine engine

Zhang Chi Wang Jianchen Qin Qingqin Du Peng

(National Key Laboratory on Aero-Engines, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To develop the application of the biomass fuel in micro-turbine-based distributed energy system, micro gas turbine using ethanol as fuel was designed. The design operation parameters of this micro gas turbine were determined by thermodynamic cycle. Based on the parameters and the characteristic of ethanol fuel, the combustor geometry size was designed. Thus the technology of micro gas turbine combustor was achieved for the combustion of ethanol fuel. Experimental results of this engine indicate that the ethanol micro gas turbine engine has successfully realized self-operating, and it demonstrates the designed scheme of the engine is feasible.

Key words: distributed energy; micro gas turbine; biomass fuel; ethanol; combustor

迫于化石燃料储备和环境污染，石油替代能源的开发利用已经成为全球敏感战略技术. 生物质燃料如乙醇和生物柴油等的应用受到大力提倡. 其中，乙醇可以通过多种方式生产，减少对不可再生的化石燃料的依赖，有利于人类的可持续发展.

在车用内燃机中，乙醇作为含氧燃料添加剂，与柴油和汽油组成混合燃料，在很大程度上解决了化石燃料的消耗问题，对提高燃烧性能和降低污染排放也具有作用[1].

作为航空推进动力和地面发电系统，燃气轮机以其高效、大功重比和易维护性等优点得到广泛应用，特别是在航空发动机方面. 事实上，大部分地面发电用燃气轮机也是从航空发动机改型而来. 而航空燃气轮机均是燃用航空煤油这类高品质燃料，随着石油储备的减少和价格的上涨，世界各国抓紧了对航空煤油替代能源的研究和应用，包括生物柴油和乙醇等[2].

微型燃气轮机可作为分布式能源技术的核心装置，实现高效的能源利用[3]. 而作为移动电源，微型燃气轮机发电机组在军事和民用方面也具有相当的优越性[4]. 目前对燃气轮机上的乙醇燃料应用的研究很少，而乙醇燃料在微型燃气轮机上的成功应用将扩大其燃料适应性，无论在能源经济性方面还是在环境污染控制方面都具有重要意义.

本文则是针对微型燃气轮机，提出采用生物质燃料的燃烧室技术 GTEC(Gas Turbine Ethanol Combustor)，从而发展出一套可燃用乙醇燃料的微型燃气轮机，并进行初步测试，验证其可行

收稿日期：2008-09-01

作者简介：张 弛(1979—)，男，四川成都人，博士后，zhangchi@buaa.edu.cn.

性.

1 微型燃气轮机整机性能设计

通过燃气轮机的气动热力循环分析,对乙醇燃料微型燃气轮机的总体参数进行设计,确定整机的性能和设计点参数,进而确定压气机和涡轮部件,并对乙醇燃料燃烧室的几何结构进行设计.

单轴燃气轮机的系统如图1所示,整个装置主要由压气机、燃烧室和涡轮三大核心部件组成.空气在压气机中被压缩,进入燃烧室与燃油掺混燃烧,产生高温燃气,通过涡轮导向叶片的膨胀加速,冲击涡轮产生轴功,以驱动压气机和负载.

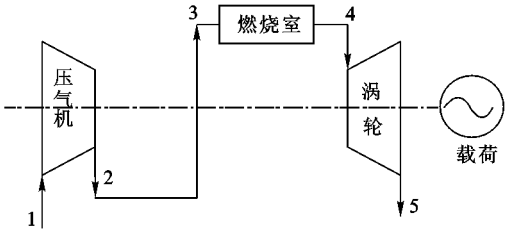


图1 燃气轮机系统简图

燃气轮机属于定压加热的布雷顿(Brayton)循环[5],燃气通过涡轮所作的功,一部分用于驱动压气机,其余部分净功才是对外输出用于驱动负载,是发动机可利用的功.但实际循环中存在不可逆因素,包括流动损失和加热损失等,因此在实际循环中压缩和膨胀过程是多变的,影响到燃气轮机的循环功和热效率.根据热力循环分析,编写燃气轮机整机性能计算程序,用于设计乙醇燃料微型燃气轮机的总体性能参数.但由于缺乏完整的压气机和涡轮部件特性曲线,目前该程序主要是对设计点的热力参数进行估算.

1.1 计算程序验证

GSP(Gas Turbine Simulation Program)是针对燃气轮机性能分析开发的专业软件,能够对采用多种燃料的燃气轮机性能进行模拟[6],但不包括本文所关注的乙醇燃料.它已经用于对多种航空发动机和工业燃气轮机进行建模计算,获得了与实验数据符合良好的模拟结果.可用GSP计算结果与本文自编计算程序作比较,验证设计计算的准确性.

验证所用的某燃气轮机以Jet-A航空煤油为燃料,设计点参数为:空气流量1.433 kg/s,油气比0.015,压气机增压比2.75,压气机效率0.75,涡轮效率0.78.采取回热措施,回热度为0.4.输出轴功145 kW.自编燃气轮机整体性能计算程序和GSP的计算结果分别列在表1中,包括压气机出口温度T_2、压气机功率W_C、燃烧室出口温度T_4、涡轮出口温度T_5、涡轮膨胀比π_T和涡轮功率W_T等参数.两者数据符合得很好,各参数中误差最大仅为0.69%.因此,本文的燃气轮机整体性能计算程序是可信的.

表1 燃气轮机整体性能计算对比

方 法	T_2/K	W_C/kW	T_4/K	T_5/K	π_T	W_T/kW
作者	416.91	186.37	1201.4	1010.7	2.61	331.4
GSP	416.34	185.33	1204.4	1011.6	2.60	333.7
误差/%	0.136	0.560	0.253	0.090	0.580	0.690

1.2 整机设计点性能

本文所设计的微型燃气轮机将以液体乙醇为燃料,它对整机性能的影响主要体现在低热值(26.8 MJ/kg)方面,这也是发动机设计点性能参数所主要考虑的因素.当然,乙醇燃料的粘性、理论空燃比以及化学成分等特性也会与发动机的稳定工作范围和污染排放有关,但这更多的是对燃烧室设计所提出的挑战,将在下一节详细阐述.

由于缺乏压气机和涡轮部件特性的详细数据,在对微型燃气轮机进行整机性能设计时,只能根据常用压气机和涡轮的特性假设其绝热效率分别为0.75和0.78,同时传动轴机械效率为0.98.研究涡轮进口温度和大气环境对乙醇燃料微型燃气轮机设计点的整机性能的影响.

1) 涡轮进口温度影响

乙醇燃料微型燃气轮机进口空气流量0.4 kg/s,在海平面通常状况(101 325 Pa,288.15 K)下,研究涡轮进口温度对整机效率和功率的影响,如图2所示,负载功率5 kW一定.

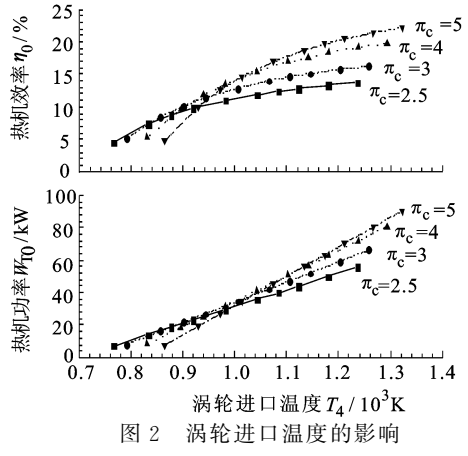


图2 涡轮进口温度的影响

随着涡轮前进口温度的增加,乙醇燃料微型燃气轮机的效率和功率均是增加的,但效率的增加幅度会逐渐变缓.同时,在压气机增压比π_C从2.5增加到5的过程中,整机效率也是大幅增加的,但是在涡轮进口温度较低(低于950 K)时,压气机增压比增大反而会使效率降低.图5中的整

机功率中也有类似的规律.

涡轮进口温度的增加是通过提高整机油气比来实现的.在实际燃气轮机中,由于受材料耐温限制,涡轮进口温度也会受到限制,不可能一味的追求高温,因此整机性能也会受到限制.

2) 大气环境影响

在海平面通常状况下(101 325 Pa,288.15 K),乙醇燃料微型燃气轮机的进口空气流量 0.4 kg/s,但随着大气环境状况的变化,其空气流量以及整机的性能都会受其影响.在进行整体性能估算时,改变大气状况,假设发动机进气道的速度系数保持一定,即换算流量 $m_a T^{0.5}/P$ 保持不变.不考虑大气环境对燃气轮机各部件性能的影响.

在标准大气压 101 325 Pa 下,满足涡轮进口温度 950 K 一定的控制规律,改变环境温度,如图 3 所示.当环境温度从 −30 ℃升高到 35 ℃,整机效率和功率分别下降 25%和 32%,下降幅度相当可观,在四季温差较大的地区需要调整燃机运行状态.以 1976 年 NASA 的标准大气数据为参考,估算 0～1 km 海拔高度范围内的乙醇燃料微型燃气轮机整机性能,如图 4 所示,海拔高度从 0 km 变化到 1 km,该微型燃气轮机的效率从 11.7%升高到 12.2%,而功率从 28.5 kW 减小到 27 kW.

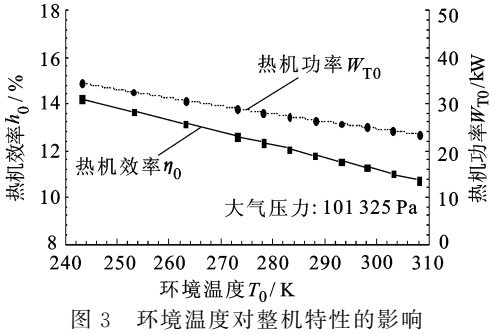


图 3　环境温度对整机特性的影响

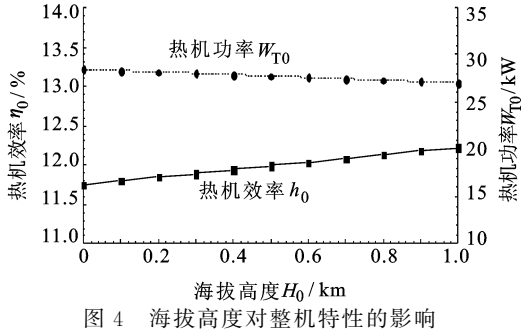


图 4　海拔高度对整机特性的影响

3) 设计点

初步确定乙醇燃料微型燃气轮机的设计点,空气流量 0.4 kg/s,燃油流量 0.009 kg/s,压气机增压比 3,负载功率仅 5 kW,负载有效效率为 2.1%,耗燃率为 6.45 kg/(kW·h).另外,涡轮膨胀比为 2.25,目的是给今后的回热器留有压力损失的余地,现阶段采用尾喷口节流.

2　乙醇燃烧室设计

与燃用航空煤油的燃气轮机相比,采用生物质乙醇燃料的微型燃气轮机最大的不同在于燃烧室部件,这给微燃机的燃烧室技术带来全新特点.

乙醇燃料碳氢比低,可以减少 CO_2 排放.但热值低,影响到燃烧室温度分布和耗油率.粘性小,表面张力小,沸点低,因此雾化蒸发容易,混合均匀,又属于含氧燃料,能降低 NO_x 排放,提高富燃料区燃烧效率,抑制冒烟生成.不过,乙醇汽化潜热大,不利于点火启动,并且燃烧温度低,CO 和 UHC 排放可能增加.还须注意燃烧乙醇时的醛类污染排放[7].

根据微型燃气轮机整机方案,乙醇燃料燃烧室设计点参数:进口总压 303 975 Pa,进口总温 430 K,空气流量 0.4 kg/s,出口总温 950 K,总压损失 4%.设计点燃烧室乙醇与空气的油气比为 0.022 4.为了便于整机拆装与维护,乙醇燃料微型燃气轮机采用单管燃烧室结构,如图 5 所示.

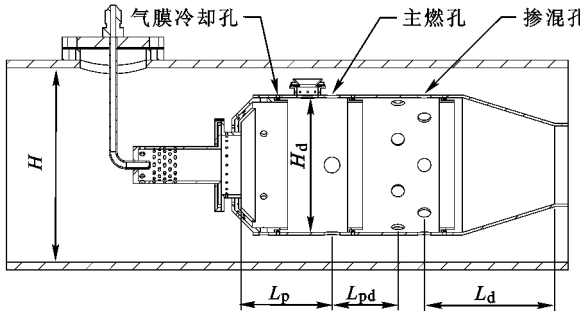


图 5　单管燃烧室示意图

2.1　燃烧室轮廓尺寸

1) 火焰筒头部高度

慢车状态时,燃烧室头部的油气当量比不低于 0.5,由此确定头部气量分配.为了保证乙醇燃料燃烧室火焰筒结构完整性,采取相对成熟的缝槽气膜冷却技术.

在给定的火焰筒头部气量条件下,根据头部气流速度可估算头部高度 H_d,头部气流速度不能太高,否则会影响燃烧稳定性.

2) 机匣直径

燃烧室参考截面[8]的参考速度一般不要超过 30 m/s,假设燃烧室全部气量通过该参考截面,可计算出机匣直径 H.

3) 主燃区长度

从燃烧效率和点火熄火性能考虑，必须保证主燃区气流有足够的驻留时间，但该时间也不能太长，否则有增加 NO_x 排放的趋势. 当驻留时间确定后，可通过主燃区空气流量和头部高度 H_d 计算主燃区长度 L_p[9].

4) 主燃孔

主燃孔气量分配主要根据主燃区气量来确定，主燃孔射流速度依据火焰筒空气压力降来计算，计算主燃孔开孔面积，孔的流量系数 C_d 可初步假设为 0.55[10].

为了保证主燃孔射流深度满足要求，利用以下射流速度中心轨迹公式[8]估算开孔大小：

$$\frac{y_v}{d_j}=1.02J^{0.42}\left(\frac{x}{d_j}\right)^{0.35} \tag{1}$$

式中，射流直径 $d_j=C_d^{0.5}d_h$；J 是射流与横侧气流的动量比；ρ_j 与 u_j 分别为射流的密度和速度；ρ_g 和 u_g 分别为主流燃气的密度和速度.

5) 中间区长度

中间区的作用是使主燃区的高温燃气和主燃孔气流完全掺混充分燃烧，因此可采用与主燃区长度相似的方法，根据中间区气流驻留时间来计算中间区长度 L_{pd}.

6) 掺混孔孔径和掺混区长度

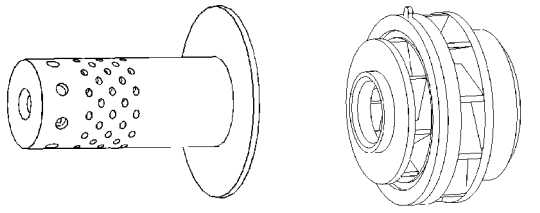
根据燃烧室总气量与前面各孔进气量计算得到掺混孔的空气流量，仍然由射流速度中心轨迹公式(4)计算其孔径和掺混区长度 L_d. 射流在掺混区内的穿透深度至少为 $y_v=0.5H_d$，掺混气才能与上游高温燃气充分掺混，确保燃烧室出口温度分布水平，这是保证涡轮可靠性的重要基础.

2.2 供油方式

液体乙醇沸点较低(78.5 ℃)，低于本文微型燃气轮机设计点的燃烧室进口空气温度，使在燃料进入火焰筒燃烧之前进行预蒸发预混合成为可能，而均匀的燃料与空气混合气能提高燃烧效率并降低污染排放，因此预混管可充分发挥乙醇燃料特点. 图 6a 是预混管示意图，液体乙醇从预混管前方喷入，预混管内采用两级供气：第 1 级空气对液体乙醇进行初步破碎和掺混；第 2 级空气对乙醇进行二次雾化，实现乙醇充分蒸发掺混. 但是预混管内容易回火或自燃，在低功率状态下燃烧稳定性较差. 因此本文在设计阶段还保留了常规旋流器方案，如图 6b 所示，液体乙醇在内旋流器文氏管上形成液膜，液膜在内外反向旋流的剪切作用下破碎雾化，进而蒸发掺混，燃烧稳定[10].

2.3 燃烧室造型

根据以上设计计算，乙醇燃料微型燃气轮机的燃烧室部件的结构尺寸得以确定，而供油方式采用了两套方案：预混管和常规双旋流器，最终需通过实验验证定型. 火焰筒照片如图 7 所示.



a 预混管　　b 双旋流器

图 6 乙醇供油方式示意图

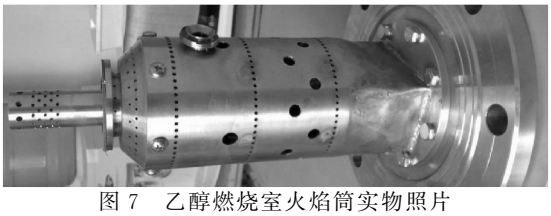


图 7 乙醇燃烧室火焰筒实物照片

乙醇燃烧室作为微型燃气轮机的核心部件，其良好的性能是实现整机正常运转的基础. 为了获取乙醇燃烧室的基本性能参数，开展了部件实验，测试了压力损失和点火熄火等特性. 由于篇幅限制，本文不再详细阐述乙醇燃烧室的部件实验及结果.

3 整机验证

对乙醇燃料微型燃气轮机而言，主要是通过重新设计燃烧室来适应新的燃料要求. 而压气机和涡轮可选取现有部件，并根据功率分配稍作修改即可. 本文根据整机性能要求选用了某型涡轮增压器产品作为压气机和涡轮. 同时配备了相应的润滑系统、燃油系统、点火系统和测试系统，构成了乙醇燃料微型燃气轮机的原理样机，如图 8 所示.

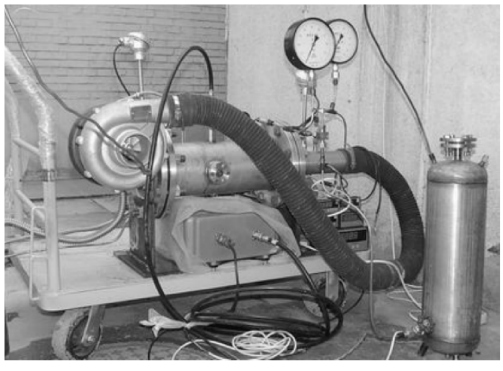


图 8 微型燃气轮机整机试车台实物照片

目前已对乙醇燃料微型燃气轮机开展了初步

的整机实验研究,结果表明:带转到 5 000 r/min 时,可点火起动;转速 40 000 r/min 时,达到慢车状态实现自行运转;最终可达到 80 000 r/min 高速运转.

4 结　论

对燃用液体乙醇的微型燃气轮机进行了整机性能和燃烧室部件设计,初步开展了整机调试工作,取得以下结果:①通过整机热力循环分析,确定了核心机的设计点性能参数;②运用航空燃气轮机燃烧室设计理论,考虑燃料特性,发展了适用于乙醇燃料的微型燃气轮机燃烧室技术;③初步的整机实验验证了乙醇燃料微型燃气轮机的可行性.

本文的研究工作为生物质乙醇燃料在燃气轮机中的应用奠定了基础,针对整机和部件将继续开展更深入的研究.

致谢　本文研究受全国大学生创新性实验计划和北航大学生科研训练计划(SRTP)资助.感谢北京理工大学车辆与交通工程学院鲍捷老师在本项目研究过程中所提供的技术支持.

参考文献(References)

[1] 许沧粟,杜德兴.含水乙醇在内燃机的应用研究[J].内燃机工程,2004,25(4):46－49
Xu Cangsu, Du Dexing. Study of water contended ethanol in IC engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2004, 25(4): 46－49(in Chinese)

[2] 史家荣,冯大强,廖忠权.新型燃油在燃气轮机中的应用试验研究[J].燃气涡轮试验与研究,2004,17(3):10－13
Shi Jiarong, Feng Daqiang, Liao Zhongquan. An experimental investigation of new-type fuel application in gas turbine engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17(3):10－13(in Chinese)

[3] 杜建一,王云,徐建中.分布式能源系统与微型燃气轮机的发展与应用[J].工程热物理学报,2004,25(5):786－788
Du Jianyi, Wang Yun, Xu Jianzhong. Development and application of distributed energy system and mirco-turbine[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(5): 786－788(in Chinese)

[4] 贾武元,袁春,史银建.微型燃气轮发电机组及其在军事领域的应用前景[J].移动电源与车辆,2003(4):43－45
Jia Wuyuan, Yuan Chun, Shi Yinjian. Micro-turbine generator and its applications in military[J]. Movable Power Station & Vehicle, 2003(4): 43－45(in Chinese)

[5] 廉小纯,吴虎.航空燃气轮机原理(下册)[M].北京:国防工业出版社,2001
Lian Xiaocun, Wu Hu. Aero gas turbine theory(V2)[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001(in Chinese)

[6] Visser W P J, Broomhead M J. GSP: a generic object-oriented gas turbine simulation environment[R]. ASME-2000-GT-0002, 2000

[7] 古文英,史权,彭勃,等.乙醇柴油的研究现状[J].西安石油大学学报:自然科学版,2004,19(6):57－62
Gu Wenying, Shi Quan, Peng Bo, et al. Present situation of the researches on ethanol diesel oils[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2004, 19(6): 57－62(in Chinese)

[8] 金如山.航空燃气轮机燃烧室[M].北京:宇航出版社,1988
Jin Rushan. Aero gas turbine combustor[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1988(in Chinese)

[9] Lefebvre A H. Gas turbine combustion[M]. 2nd ed. Phiadelphia: Talor&Francis, 1999

[10] Mellor A M. Design of modern turbine combustors[M]. Orlando: Academic Press, 1991

(责任编辑:张　嵘)