

文章编号: 1000-8055(2009)09-1930-07

微型燃气轮机乙醇燃烧室点火与熄火试验

张 弛, 王建臣, 覃清钦, 杜 鹏, 姚 翔, 林宇震, 许全宏
(北京航空航天大学, 能源与动力工程学院
航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 对应用于微型燃气轮机上的可再生生物质燃料乙醇燃烧室开展了试验研究, 包括 4 种不同的供油方式, 获得了常温常压进口条件下乙醇燃烧室的点火与熄火特性. 研究表明: 常温常压下采用旋流器的乙醇燃烧室的贫油点火和贫油熄火当量比的值均随空气流量的增加而减小, 其点火与熄火性能优于预蒸发预混管燃烧室.

关 键 词: 分布式能源; 微型燃气轮机; 生物质燃料; 乙醇; 燃烧室; 点火; 熄火

中图分类号: TK474+.9 文献标识码: A

Experimental research on ignition and lean blowout for micro gas turbine ethanol combustor

ZHANG Chi, WANG Jian chen, QIN Qing qin, DU Peng, YAO Xiang,
LIN Yu zhen, XU Quan hong
(National Key Laboratory on Aero-Engine, School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautic, Beijing 100191, China)

Abstract: An experimental investigation was conducted on the combustor of micro gas turbine burning ethanol as a renewable biomass fuel, including 4 kinds of fuel supply modes. The ignition and lean blowout performance characteristics of this combustor under atmospheric pressure and temperature inlet condition were obtained. The research results indicate that, at atmospheric pressure and temperature, the equivalence ratios of lean ignition and lean blow out for the ethanol combustor with swirl cup decrease with the increasing airflow rate, and the swirl cup combustor has better ignition and lean blow out performance than the premixed prevaporized combustor.

Key words: distributed energy; micro gas turbine; biomass fuel; ethanol; combustor; ignition; lean blow out

生物质乙醇燃料是可再生能源, 可通过多种方式生产, 特别是随着非粮食乙醇生产技术和工艺的发展, 可以大大提高其产量并降低成本, 并且不会产生太多的附加循环消耗. 因此乙醇燃料的推广应用, 是减少对不可再生的化石燃料依赖的重要手段之一.

乙醇作为含氧燃料添加剂, 与柴油或汽油混合形成混合燃料, 既减少了化石燃料的消耗量, 又能提高燃烧性能和降低污染排放, 在车用内燃机中已得到较广泛的应用^[1-2]. 微型燃气轮机作为分

收稿日期: 2008-09-09; 修订日期: 2009-02-03
基金项目: 北航大学生科研训练计划(SRTP); 全国大学生创新性实验计划项目
作者简介: 张弛(1979-), 男, 四川成都人, 博士后, 主要从事航空发动机燃烧系统及新能源应用研究

布式能源技术的核心装置,在军事和民用方面都具有相当的优越性,可实现高效能源利用,目前已成为国内外的研究热点^[3]。但除了天然气与合成气等气相燃料外,应用于微型燃气轮机的主要燃料仍然是航空煤油和柴油等高品质燃料,全球石油储备减少和能源价格上涨使该类燃料的应用和发展蒙上了阴影,世界各国正抓紧对替代燃料的研究和应用,包括生物柴油和乙醇等^[4]。

将乙醇燃料应用于微型燃气轮机,关键技术还是在于其重要的能源转换部件——燃烧室。燃料性质的变化所导致的整机稳定工作范围和污染排放等问题,均与燃烧室有关。目前关于燃气轮机燃烧室中乙醇燃料应用的研究很少,而这是乙醇燃料能否在微型燃气轮机中成功应用的重要前提,开展相应的基础和应用研究是必要的。

本文所涉及的微型燃气轮机用途暂时考虑民用的备用紧急电源,采用生物质燃料,更重要的是为未来生物质燃料的推广作一定的技术积累。为此提出了采用生物质燃料乙醇的燃烧室方案(gas turbine ethanol combustor,简称 GTEC),并对此开展相应的试验研究,获得了该燃烧室的相关性能特征。

1 乙醇燃料特性

乙醇燃料的碳氢比为 1:3,具有可以减少 CO₂ 排放的可能,但缺点是乙醇热值低(26.8 MJ/kg),这就直接影响到燃烧室温度分布和耗油率。乙醇黏性小,表面张力小,沸点低,因此其雾化蒸发较容易,又属于含氧燃料,可以降低 NO_x 排放,提高富燃料区的燃烧效率,抑制冒烟生成。不过,乙醇汽化潜热大,点火时混合气温度低,这一点不利于点火启动,并且燃烧温度低,CO 排放可能增加。另外还须注意燃烧乙醇时的醛类污染排放^[5]。

作者通过完全搅拌反应器(PSR)对乙醇(C₂H₅OH)、航空煤油 JP10 和甲醇(CH₃OH)的绝热燃烧化学反应进行模拟,模拟环境为进口空气压力 300 kPa,温度 424 K,采用美国加利福尼亚大学圣迭戈分校所公布的化学反应机理和热物性参数^[6,7]。图 1 是在完全搅拌反应器中乙醇、JP10 和甲醇三种燃料绝热燃烧,所产生的绝热温度和 NO_x 排放的比较。航空煤油 JP10 的绝热燃烧温度最高,NO_x 排放也最多。乙醇与甲醇的绝热温度较相近,但乙醇的 NO_x 排放更高。醇类燃料的绝热火焰温度比航空煤油低了 100 K,NO_x 排放不足后者的一半。同时,无论对于哪种燃料,在当

量比从 0.5 增加到 1.4 的过程中,绝热温度和 NO_x 排放均是先升高后下降的趋势,当量比在 1.0~1.1 之间时绝热燃烧温度达到最高,而 NO_x 排放在当量比为 1.0 时最高。事实上,在整个 NO_x 形成过程中,特别是高温燃烧情况下,热力 NO 的生成占据重要地位。目前形成热力 NO 的主要化学反应机理公认的是 Zeldovich 机理^[8],它是强吸热过程,高温会大大增强其反应速率,因此对应着绝热燃烧温度的升高,NO_x 排放明显增加。与航空煤油相比,乙醇燃料更具降低 NO_x 污染排放的潜力。

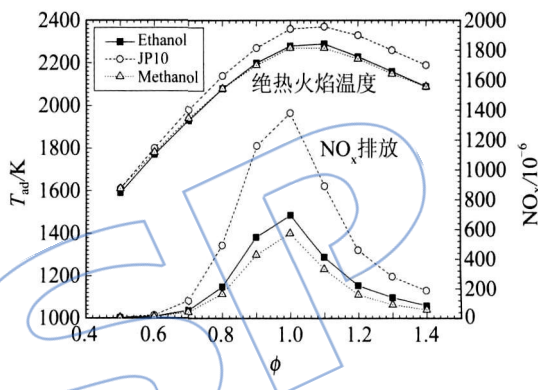


图1 不同燃料燃烧特性比较

Fig. 1 Comparison of the combustion characteristics for different fuel

2 乙醇燃烧室

2.1 总体方案

本文研究所针对的微型燃气轮机在标准大气状态下的设计点空气流量 0.4 kg/s,压气机增压比 3,涡轮前温度 950 K,无回热,负载功率 5 kW。由于该微型燃气轮机是民用,出于拆卸安装、维护及成本考虑,其乙醇燃烧室采用单管形式,结构简单,同时便于试验调试。如图 2 所示。对于乙醇燃烧室而言,气量分配是非常重要的参数,它是确保燃烧室整体性能的基础,也是在燃烧室设计中首先要解决的问题^[9]。表 1 列出了燃烧室主要部件的气量分配,剩余气量均以壁面冷却的方式进入火焰筒。

2.2 供油方式

针对乙醇燃烧室,本文的燃料与空气供给掺混方案包括旋流器和预蒸发预混管两种:旋流器技术在当今航空发动机和燃气轮机中应用很广泛,较为成熟,具有宽广稳定工作范围;预蒸发预混管技术则充分发挥乙醇的低沸点和易挥发性,

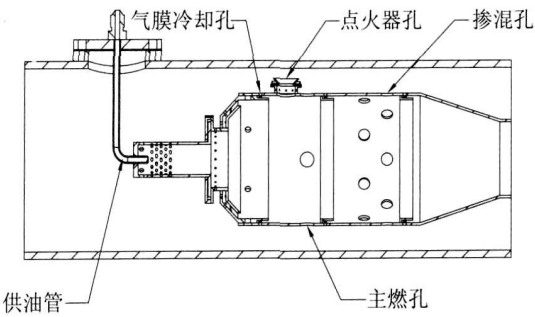


图 2 单管燃烧室示意图

Fig. 2 Schematic of the tubular combustor

表 1 燃烧室气量分配

Table 1 Airflow distribution of ethanol combustor

部 件		气量分配/ %
主燃区	预混管或旋流器	8 4
	主燃孔	12 9
掺混区	掺混孔	35 9

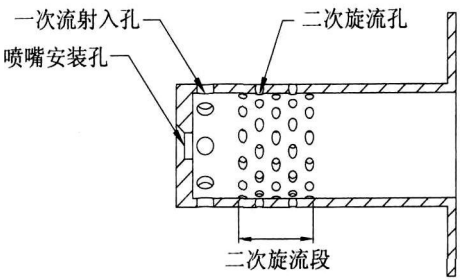
预计在设计点工况下具有很好的性能潜力, 是对富油预蒸发预混(RPP) 技术应用于乙醇燃烧室的探讨.

2.2.1 预蒸发预混管

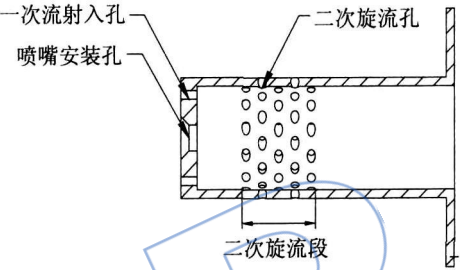
贫油预蒸发预混合燃烧技术(lean premixed prevaporized (LPP) combustor) 在低污染燃烧方面获得了较多的关注^[10], 但该贫油燃烧技术也有缺点, 需要解决回火和自燃问题, 同时还存在燃烧不稳定现象^[11]. 而在本文燃烧室中乙醇燃料全部由该预蒸发预混管供给, 因此属于富油预蒸发预混合(RPP) 的范畴, 目的在于充分发挥乙醇的低沸点和易挥发特性, 使液体乙醇以气态进入燃烧室参加燃烧. 但是这对燃烧室进口气动热力有一定要求, 如果进口空气气量太少或温度太低, 反而会导致燃料雾化蒸发不充分, 这从后面的试验结果可以看出.

如图 3 所示, 预蒸发预混管的进气采用分级方式. 第一级空气主要是对液体乙醇进行初步破碎, 目前有两套方案: 方案 1 沿径向射入, 直接冲击液体燃料, 具有较好的初步雾化效果, 但流场复杂, 损失较大; 方案 2 则沿轴向进气, 流场较均匀. 第二级空气为切向旋流, 可增强对乙醇的雾化和掺混作用, 使预蒸发预混管内的乙醇蒸气和空气掺混均匀, 同时其出口带有旋流特征, 易于火焰稳定. 一次流与二次旋流的空气分配比例为 4: 6, 预蒸发预混管出口旋流数设计为 1. 0. 同时管内气流的驻留时间仅 2ms, 并对气流的速度和速度

梯度进行控制, 防止自燃与回火^[12]. 预蒸发预混管的乙醇喷嘴采用直射式, 结构简单.



(a) 方案1



(b) 方案2

图 3 预蒸发预混管示意图

Fig. 3 Schematic of the premixed prevaporized tube

2.2.2 旋流器

乙醇燃烧室旋流器采用反向双旋流器结构, 如图 4 所示, 乙醇喷嘴采用离心喷嘴或直射式喷嘴. 事实上, 由于乙醇的黏度比航空煤油和柴油都低, 对于同样的雾化喷嘴, 乙醇的雾化效果会更好. 喷嘴在内旋流器的文氏管上形成液膜, 文氏管出口处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. 内外旋流器的空气分配比例为 4: 6, 设计旋流数均为 0. 8, 在燃烧室主燃区可形成稳定的低速回流区, 同时内文氏管出口存在局部富燃区, 因此可保证稳定燃烧和良好的点火与熄火性能.

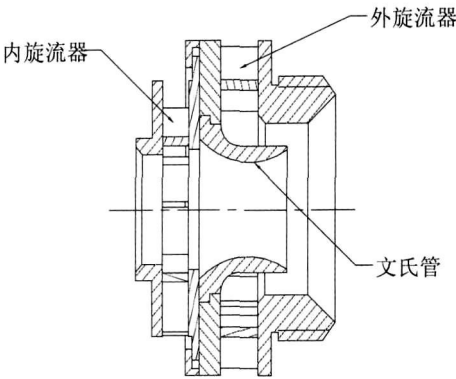


图 4 旋流器示意图

Fig. 4 Schematic of the swirl cup

2 2 3 供油方式方案

按照 3 种乙醇喷嘴(直射式喷嘴 PN 1、PN2 和离心喷嘴 DF15)和 3 种燃油雾化装置(预蒸发预混管 PP1、PP2 和旋流器 5B)的不同组合,乙醇燃烧室的供油方式包括 4 种方案,见表 2 所示. 本文对这 4 种方案开展了试验研究,并对其燃烧室性能进行对比分析.

表 2 乙醇燃烧室供油方式方案
Table 2 Fuel supply manners of ethanol combustor

方案代号	喷嘴	旋流装置
E1	直射式喷嘴 PN 1	预蒸发预混管 PP1 (径向一次流)
E2	直射式喷嘴 PN 1	预蒸发预混管 PP2 (轴向一次流)
E3	直射式喷嘴 PN 2	旋流器 5B
E4	离心喷嘴 DF15	旋流器 5B

3 试验系统及方法

作为微型燃气轮机的核心部件,乙醇燃烧室的基本性能是实现整机正常运转的基础. 而燃烧室的基本性能参数包括: 压力损失, 点火特性, 熄

火特性, 燃烧效率, 污染排放, 火焰筒壁温分布以及出口温度分布等^[13]. 本文主要对乙醇燃烧室开展前三项试验研究, 即压力损失、点火特性和贫油熄火特性.

如图 5 所示, 空气由风机提供, 依靠进气阀调节流量, 空气流过进口段后进入乙醇燃烧室内. 在进口段内测量气流的总静压差和温度, 并由此计算空气流量, 在进行燃烧室试验前用浮子流量计对其进行了标定, 其误差小于 7. 5%. 燃烧室出口气流由排气段排出, 并且排气段的面积比燃烧室出口大得多, 因此可以用排气段静压来计算燃烧室的压力损失.

乙醇燃料的供应依靠油路上的两个节流阀调节, 根据喷嘴前压力 p_f 计算乙醇流量, 3 种乙醇喷嘴也经过流量标定, 其流量数 K_f 值如表 3 所示, 试验时流量按式 (1) 计算即可.

$$\dot{m}_f = K_f \sqrt{\Delta p_f}$$

(1)

表 3 喷嘴流量数
Table 3 Flow number of the nozzles

喷嘴	流量数 $K_f / (\text{kg/s} \cdot \text{MPa}^{0.5})$
直射式喷嘴 PN 1	0.01207
直射式喷嘴 PN2	0.01076
离心喷嘴 DF 15	0.01547

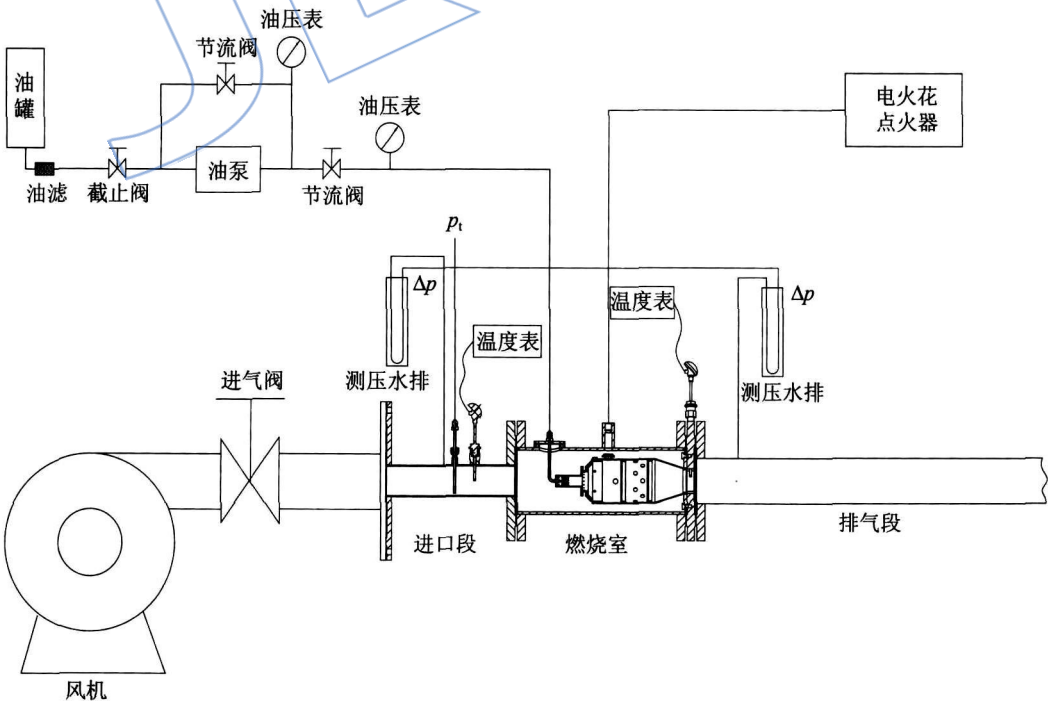


图 5 乙醇燃烧室试验系统图

Fig. 5 Schematic of the ethanol combustor experimental setup

点火试验时将供油压力调节到一定值,则乙醇流量一定,开启电火花点火器,保持 1~ 3 s,观察点火成功与否.改变工况,重复试验,从而获得乙醇燃烧室的点火特性.贫油熄火试验时,则是在成功点火后,逐渐调小乙醇流量,直至熄火,由此获得贫油熄火时乙醇燃烧室的当量比.所有试验均在常温常压下进行,燃烧室压力降范围 0.5%~ 6%.根据以上试验系统和测试方法,可估算乙醇燃烧室的点火与贫油熄火当量比试验数据误差为 10.8%.

4 试验结果及分析

4.1 压力损失特性

燃烧室压力损失特性与流量平方函数关系

$$\frac{\Delta p_{3-4}}{p_{3t}} = K_c \left(\frac{\dot{m}_a}{p_{3t}} \right)^2 T_{3t} \quad (2)$$

将乙醇燃烧室的流量平方函数和压力损失分别作为横纵坐标,绘制试验数据点,如图 6 所示,从而确定 4 种方案的乙醇燃烧室(见表 2)各自的流量数 K_c . K_c 值越小,说明通过一定空气流量的燃烧室压力损失越小.尽管燃烧室的流量数是在常温常压下的试验结果,但由于公式(2)已经考虑了燃烧室压力和温度的影响,因此是可以外推到其他工况的.

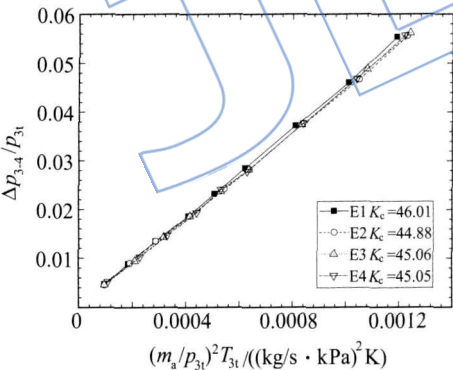


图 6 乙醇燃烧室压力损失特性

Fig. 6 Pressure loss of the ethanol combustors

4.2 点火特性

在一定的燃烧室空气流量下,能点着火的最小当量比即为乙醇燃烧室的贫油点火当量比.以通过燃烧室的空气流量为横坐标,乙醇与空气的当量比为纵坐标,将不同空气流量下的贫油点火当量比绘制成曲线,从而得到乙醇燃烧室的点火特性线,如图 7 所示.

贫油点火当量比对于燃烧室的启动点火非常

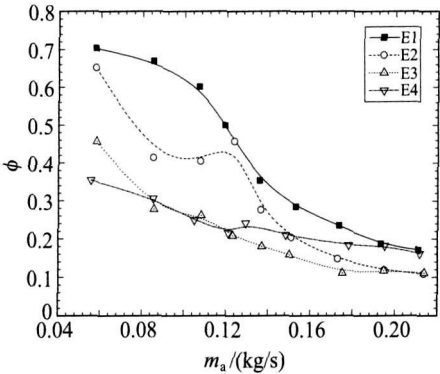


图 7 乙醇燃烧室点火特性

Fig. 7 Ignition characteristics of the ethanol combustors

重要,当燃烧室进口空气流量一定的情况下,只有在供油量足够大,即燃烧室当量比大于贫油点火当量比时,才能保证燃烧室成功点火,乃至微型燃气轮机整机的成功启动.但启动时燃烧室的供油量也有一定的上限,否则会面临燃烧室烧蚀的危险.

从以上试验结果来看,4 种乙醇燃烧室方案的贫油点火当量比均是随空气流量的增加而减小的趋势,并且在空气流量为 0.05~ 0.22 kg/s 范围内贫油点火当量比不低于 0.11. 预蒸发预混管的燃烧室方案点火性能较差,特别是在燃烧室空气流量较小时,这是因为点火试验在常温下进行(实际上整机点火时空气温度仍然较低),没有达到乙醇沸点温度,并不能发挥预蒸发管的优势,而预蒸发预混管属于空气雾化装置,管内气流速度过低,会导致燃料雾化变差.但 E2 方案较 E1 方案有更好的点火特性,说明轴向一次流更适合于乙醇的雾化蒸发.相对而言,旋流器方案的点火特性则更好,无论乙醇喷嘴是直射式(E3)还是离心式(E4),据分析,因为内旋流器的文氏管喉道面积较小,该处在宽的工作范围内能保持较大气流速度,具有良好的空气雾化喷嘴特性,使乙醇燃料雾化蒸发更好,更利于燃料与空气的掺混扩散.

4.3 贫油熄火特性

为了保证燃气轮机在较宽的工作范围内稳定工作,燃烧室的稳定工作范围至关重要,特别是在减少供油量以调低整机载荷时,燃烧室要保证不至熄火.

在一定的燃烧室空气流量下,通过减小当量比使燃烧室熄火,刚刚熄火时的燃烧室当量比就是乙醇燃烧室的贫油熄火当量比.图 8 是乙醇燃烧室的贫油熄火特性曲线图,横坐标为燃烧室空

气流量, 纵坐标为乙醇与空气当量比.

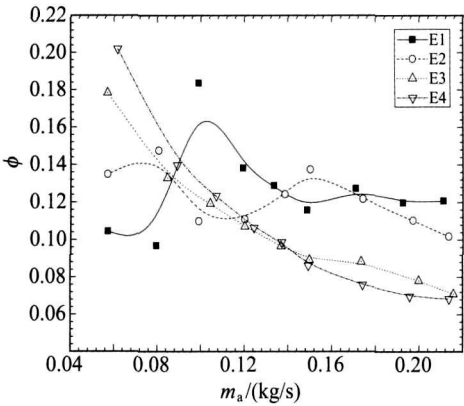


图 8 燃烧室贫油熄火特性

Fig. 8 Lean blow out characteristics of the ethanol combustors

可以看出, 预蒸发预混管方案 E1 和 E2 的乙醇燃烧室贫油熄火当量比均在 0.1 以上, 并且随着燃烧室空气流量增加, 其贫油熄火当量比的变化不存在明显的趋势. 而旋流器方案 E3 和 E4 的贫油熄火当量比明显随着空气流量的增加而减小, 在 0.05~0.22 kg/s 的空气流量范围内, 贫油熄火当量比最低达 0.07, 比预蒸发预混管方案表现出更好的贫油熄火性能.

预蒸发预混管使乙醇和空气在燃烧前掺混得更均匀, 这一点有利于提高燃烧效率, 但是对于燃烧室的贫油熄火性能却是不利的. 因为贫油时预混管出口是均匀的混合气, 其当量比在燃料的可燃极限外, 容易出现熄火或燃烧不稳定的现象^[11]. 实际上, 由于主燃区存在稳定的低速区, 无论燃烧室空气流量是多是少, 决定预蒸发预混管贫油熄火的主要因素是可燃区当量比, 这个可燃当量比的值相对来说是固定的, 因此预蒸发预混管乙醇燃烧室贫油熄火当量比随空气流量变化不大, 这在空气流量较大时表现得很明显, 最终贫油熄火当量比的值稳定在 0.12 左右, 如图 8 所示. 而在空气流量较小时, 由于预蒸发预混管内还没有建立起均匀稳定的气动流场, 燃烧室的贫油熄火性能表现出不稳定性, 随空气流量变化的规律有起伏. 特别是方案 E1 的一次流采用径向垂直进气, 这对管内流动扰动很大, 不稳定的管内流动会影响预蒸发预混合效果, 最终的结果是贫油熄火性能不佳, 所以方案 E1 在空气流量 0.1 kg/s 时的贫油熄火当量比可能达到 0.18. 可见, 本文的预蒸发预混管方案表现出很不稳定的气动特性, 其流场结构还需要优化.

在空气流量很小时, 旋流器方案 E3 和 E4 的雾化效果很差, 贫油熄火性能不佳. 但随着空气流量的增加, 旋流器对液体燃料的雾化效果逐渐增强, 这对贫油熄火性能是有利的, 所以旋流器方案燃烧室贫油熄火当量比随着空气流量的增加而减小. 而且与预蒸发预混管相比, 由于旋流器方案的燃料和空气掺混得“不够均匀”, 在总体贫油的情况下存在局部富油区域, 从而维持了燃烧室内稳定燃烧, 因此最终旋流器方案具有更好的贫油熄火性能. 旋流器的流动特性也与预蒸发预混管不同, 其内部始终可以保持比较均匀稳定的旋流结构, 所以在试验的空气流量范围内贫油熄火性能没有明显的波动起伏.

4.4 点火与熄火特性比较

对于 4 种方案的乙醇燃料燃烧室, 其贫油点火当量比均比贫油熄火当量比高. 点火时, 燃烧室内处于“冷态”, 要将点火器端面的热火球的能量传递到低速区, 引燃低速区的油气掺混物, 最终成为稳定点火源维持整个燃烧室的稳定燃烧. 而熄火时, 燃烧室内已经处于“热态”, 减少燃料, 使低速区燃烧产生的能量不足以点燃新鲜油气混合物, 从而熄火. 可见, 点火过程比熄火更加恶劣, 点火时的当量比也会比熄火高.

预蒸发预混管方案在空气流量较小时, 由于管内空气流动还不稳定, 也不均匀, 同时本文试验是在常温下进行, 这对管内的蒸发掺混行为极其不利, 其贫油点火性能较差, 此时点火当量比达到贫油熄火当量比的 4 倍. 但随着空气流量增加, 点火与熄火特性之间的差距明显减小, 这与管内的空气流动逐渐稳定均匀有很大关系, 预蒸发预混管出口均匀的油气掺混物能明显降低点火难度.

在整个试验空气流量范围内, 旋流器方案的贫油点火当量比始终是贫油熄火当量比的 2 倍左右. 由于旋流器内的流场很稳定, 空气流量增加能增强雾化效果, 这对点火与熄火特性来说都更加有利, 而且改善的幅度相近, 因此维持了不变的点火与熄火当量比例.

从目前点火与贫油熄火试验结果来看, 采用旋流器的乙醇燃烧室总体上优于预蒸发预混管的, 这与各自的设计理念有关. 预蒸发预混管是为了在发动机设计点时使燃料蒸发更完全掺混更均匀, 从而获得更高的燃烧效率和更低的污染排放, 在非设计点工作时则有可能不太适应. 而旋流器的油气分布不太均匀, 有较宽的稳定工作范围. 因此, 对工况机动性要求较高的航空发动机趋向于

旋流器结构,而工况较单一的地面燃气轮机则相反.对于微型燃气轮机乙醇燃烧室,除了考察基本的点火与熄火特性外,还要关注燃烧效率和污染排放性能,这将是今后的研究重点.当然,本文目前所采用的预蒸发预混管结构方案还有不完善之处,具有优化改进的潜力.

5 结 论

本文确定了微型燃气轮机乙醇燃烧室的总体结构,对供油方式采用了预蒸发预混管和旋流器方案,通过常温常压燃烧室部件试验,得到以下主要结论:

- 1) 采用旋流器的乙醇燃烧室,常温常压点火与熄火特性总体上优于预蒸发预混管燃烧室;
- 2) 旋流器乙醇燃烧室贫油点火和贫油熄火当量比的值均随空气流量的增加明显减小;
- 3) 预蒸发预混管乙醇燃烧室贫油点火当量比随空气流量增加而减小,但贫油熄火当量比随空气流量变化较小;
- 4) 采用轴向一次流的预蒸发预混管的点火与熄火性能比径向一次流的好.

目前对燃用生物质燃料的微型燃气轮机燃烧室技术所开展的研究工作,在未来将推动微型燃气轮机以及可再生能源的发展和应用.

参考文献:

- [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] 张学敏,葛蕴珊,韩秀坤,等.车用乙醇汽油的应用研究[C]//代用燃料汽车国际学术会议.长春:中国汽车工程学会代用燃料汽车分会,2004:134-136.
ZHANG Xuemin, GE Yunshan, HAN Xiukun, et al. Application investigation of ethanol+gasoline on vehicle [C]// International Conference of Alternative Fuels Vehicle. Changchun: Alternative Fuels Vehicle Branch of Society of Automotive Engineers of China, 2004: 134-136 (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 micro turbine[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(5): 786-788 (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] Mongia H C, AFRoub M, Danis A, et al. Swirl cup modeling Part I[C]//37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Salt Lake City: AIAA 2001-3576, 2001.
- [7] Saxena P. Numerical and experimental studies of ethanol flames and autoignition theory for higher alkanes[D]. San Diego: University of California, 2007.
- [8] Hewson J C, Bollig M. Reduced mechanisms for NO_x emissions from hydrocarbon diffusion flames[J]. Symposium (International) on Combustion, 1996, 26(2): 2171-2179.
- [9] 金如山.航空燃气轮机燃烧室[M].北京:宇航出版社,1988.
- [10] 林宇震,彭云晖,刘高恩.分级/预混合预蒸发贫油燃烧低污染方案 NO_x 排放初步研究[J].航空动力学报,2003,18(4):492-497.
LIN Yuzhen, PENG Yunhui, LIU Gaoen. A preliminary study of NO_x emission of staging/premixed and prevaporized lean combustion low emission combustor scheme[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(4): 492-497 (in Chinese)
- [11] Liewwen T, Torres H, Johnson C, et al. A mechanism of combustion instability in lean premixed gas turbine combustors[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2001, 123: 182-189.
- [12] 林宇震,许全宏,刘高恩.燃气轮机燃烧室[M].北京:国防工业出版社,2008.
- [13] Lefebvre A H. Gas turbine combustion[M]. 2nd ed. Philadelphia: Taylor and Francis, 1999.