

文章编号:1674-8190(2019)06-861-06

# 发动机环形燃烧室点火过程可视化实验研究

王慧, 钟亮, 王高峰

(浙江大学 航空航天学院, 杭州 310027)

**摘要:** 有效捕捉环形燃烧室中火焰传播规律, 明晰其点火联焰机理是航空发动机领域的研究重点, 因此在浙江大学 TurboCombo 实验平台上, 借助高速相机记录燃烧室整个点火过程, 开展可视化实验研究。主要介绍三种构型(直喷环形燃烧室、斜喷环形燃烧室、带涡轮导叶的直喷环形燃烧室)下的点火过程相关机理研究; 分析火焰传播过程特征, 斜流喷嘴引入周向速度分量后所作用周向联焰的过程, 涡轮导叶对周向点火过程和周向点火时间的影响。结果表明: 增加涡轮导叶可以缩短周向点火时间; 高速可视化测量可追踪环形燃烧室中整个点火过程, 有助于 APU 等航空发动机高空点火性能的分析。

**关键词:** 环形燃烧室; 点火过程; 可视化实验; 旋流喷嘴

中图分类号: V231.1; TK16

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.06.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Visual Experiment Study of the Ignition Process in the Annular Combustion of Aero-engines

Wang Hui, Zhong Liang, Wang Gaofeng

(School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The effectively capture of the flame propagation rule in the annular combustor and the clarification of its ignition mechanism of joint flame are the research emphasis in aero-engine field. Therefore, the visual experiment research is conducted for the whole ignition process of the combustor on the TurboCombo experiment platform made by Zhejiang University with the help of a high-speed camera. The research on ignition mechanism of three configurations(direct-injection annular combustor, swirling-injection annular combustor, and direct-injection annular combustor with turbine guide blades) is introduced, and the characteristics of the process of flame propagation, the process of flame combination under the influence of circumferential velocity's component because of the swirling injectors, the effect on circumferential ignition process ignition time due to the turbine guide blades are analyzed. The results show that the addition of turbine vane can shorten the surround ignition time; the high-speed visual measurement can track the whole ignition process in the annular combustion, which is helpful for the analysis of the high altitude ignition performance of APU(Auxiliary Power Unit) and other aero-engines.

**Key words:** annular combustor; ignition process; imaging experiment; swirling injector

收稿日期:2019-11-06; 修回日期:2019-12-01

通信作者:王高峰, gfwang@zju.edu.cn

引用格式:王慧, 钟亮, 王高峰. 发动机环形燃烧室点火过程可视化实验研究[J]. 航空工程进展, 2019, 10(6): 861-866.

Wang Hui, Zhong Liang, Wang Gaofeng. Visual experiment study of the ignition process in the annular combustion of aero-engines[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(6): 861-866. (in Chinese)

## 0 引言

辅助动力装置 APU 是一个小型的燃气涡轮发动机<sup>[1]</sup>,具有体积小、重量轻的特点,可改善发动机气动性能、降低使用费用,能独立输出压缩空气或者供电,同时也是保证发动机空中停车后再启动的主要装备,直接影响飞行安全。

近年来,辅助动力装置 APU 的点火问题受到了越来越多的关注,因为其直接影响发动机工作的可靠性和安全性,同时,APU 在高压、高空、低温等恶劣条件下的正常启动与再点火能力也一直是航空发动机领域的研究重点<sup>[2-3]</sup>。另外,随着对污染物排放要求的不断提高,贫油预混预蒸发等技术手段的逐渐应用,使得其燃烧室点火过程面临更严苛的挑战。根据燃烧室点火和火焰周向传播规律,点火过程分为三个阶段<sup>[4]</sup>:①初始火核形成;②火核扩张发展形成单个稳定的旋流火焰;③火焰面周向传播,点燃全部喷嘴。周向点火联焰受到点火模式、点火能量、当量比、流速、喷嘴间距、油气分布、压力和温度等诸多因素影响,其物理机制和控制规律十分复杂。因此,深入研究环形燃烧室中的复杂点火过程具有重要指导意义。

使用全尺度工业级燃烧室进行点火实验研究,会面临测量困难和代价高昂问题。因此,发展实验室尺度的燃烧室模型,在尽可能保留真实燃烧系统流场特性的同时,增加光学诊断窗口,成为研究环形燃烧室点火机理的有效手段<sup>[3]</sup>。目前,国内外也已经发展了一些较为成熟的环形燃烧室模型,例如,法国 EM2C 实验室的研究人员基于 MICCA 装置<sup>[5-7]</sup>,在环形燃烧室中进行点火研究,实验中观测到拱形火焰结构,火焰沿着燃烧室两侧传播方式为周向向前;剑桥大学的 E. Machover 等<sup>[8-9]</sup>研究了预混和非预混条件下的火焰传播过程,发现了火焰在喷嘴之间“锯齿状”的传播方式,而且平均速度越大锯齿状传播模式中向下游传播就越明显。国内王高峰等<sup>[10-11]</sup>基于浙江大学的 TurboCombo 环形燃烧室与涡轮耦合模型,对比分析了先通燃气后点火(FFSL)和先点火后通燃气(SFFL)两种模式的不同形态特征,发现了喷嘴旋流方向的排列会破坏周向点火过程的对称性,使得沿顺时针和逆时针方向火焰面传播速度差别较大。

本文着重研究不同构型燃烧室下火焰传播过程的形态特征,通过搭建环形燃烧室实验平台,使用高速相机记录周向火焰传播过程,探究直流喷嘴燃烧室、斜流喷嘴燃烧室以及引入导叶后的燃烧室火焰传播的差异。

## 1 实验装置及方法

### 1.1 实验装置

TurboCombo 实验平台如图 1 所示,主要由环形燃烧室及涡轮两部分组成,其中环形燃烧室壁面由透明石英玻璃壁面构成,满足了可视化实验需求。



图 1 实验平台

Fig. 1 Experimental platform

实验中丙烷与空气经混气管路充分预混后送入配气室,之后再经旋流喷嘴进入燃烧室腔体,在环形基座上等间距地布置了 16 个旋流喷嘴,采用 6 个径向斜孔形成旋流,旋流数  $S=0.82$ 。常规竖直喷嘴,敞口环形燃烧室即在 TurboCombo 实验平台中仅保留环形燃烧室部分,同时将内壁支承金属圆筒也改为透明石英玻璃壁;倾斜喷嘴,敞口环形燃烧室即在此基础上改变喷嘴入射角度,使喷嘴轴向与燃烧室轴向成  $45^\circ$ ;带涡轮导叶环形燃烧室,就是 TurboCombo 涡轮部分保留涡轮导叶,研究下游涡轮导叶对点火过程的影响。

### 1.2 实验方法

整个点火过程由高速相机记录,帧率为 1 000 Hz(相机位置如图 2 所示)。针对带涡轮导叶环形燃烧室,由于内壁支承金属圆筒的遮挡,需要 2 台高速相机才能记录完整的点火过程,此外为了更好

地记录火焰传播形态,在相机镜头前加装了带通为 400~680 nm 的可见光滤镜。

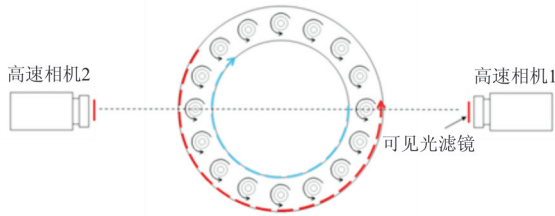


图 2 实验装置及测量设备布置示意图

Fig. 2 Layout of the experimental configuration and diagnostic equipment

实验中空气与丙烷流量分别采用七星 D07-60B 和 D07-9E 质量流量计控制,可燃混气在以设定的配比进入燃烧室腔体后由贴近环形基座的点火针点燃,点火针的频率为 100 Hz,平均点火能量约为 100 mJ。实验中的具体操作方式如下:首先将空气按照预设值通入燃烧室,启动点火针,之后打开丙烷流量计阀控,在流量计响应时间之后,可燃混气被点燃,点火过程开始。本文中所有实验均在常温常压下进行,并且针对每个工况都进行了至少 3 次的重复实验,确保实验结果可靠。此外由于燃烧室壁面温度对点火过程存在较大影响<sup>[12]</sup>,每次实验前都将燃烧室壁面预热至 500 K。

## 2 实验结果

本文所有点火过程序列图片均为高速相机拍摄的灰度图经渲染之后的结果。

### 2.1 直喷环形燃烧室的点火过程

直喷环形燃烧室的点火过程如图 3 所示,白色对应于火焰最大发光强度,而灰色对应于火焰最小发光强度,可以看出:整个点火过程可以分为 3 个阶段:(1)可燃混气遇到足够能量的火花,产生初始火核;(2)初始火核不断扩张发展,并在点火针临近的喷嘴处形成单个稳定的旋流火焰;(3)单个旋流火焰分为两支,沿着两个方向逐次点燃全部喷嘴,最终达到稳定工作状态,实验中将初始火核生成时刻定义为周向点火起点,将两侧火焰面融合时刻定义为终点。在  $t=80$  ms 时,两侧火焰面的融合,但融合位置并非在点火针的正对处,而是在燃烧室左

半侧,即两侧火焰面的传播存在着不对称性,右侧火焰面处于领先位置。

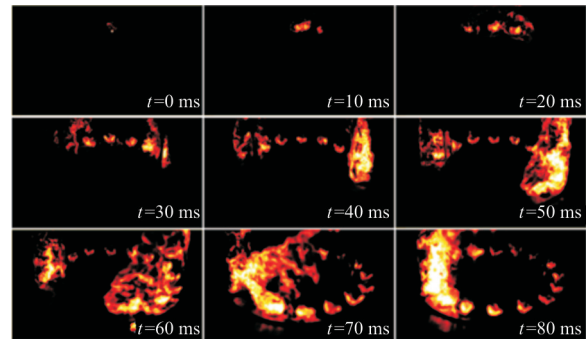


图 3 直喷环形燃烧室的点火过程

Fig. 3 Ignition process of the annular combustor with upright inject

### 2.2 斜喷型环形燃烧室的点火过程

斜喷型环形燃烧室的点火过程如图 4 所示,可以看出:此时火焰的传播模式与直喷环形燃烧室点火过程不同,由原先的沿两侧双向传播转变为仅沿单侧传播。这是因为改变喷嘴入射方向后,环形燃烧室内形成了一个俯视逆时针的周向速度分量,在这个周向速度分量的作用下,左侧火焰面的传播得到了加强,而右侧火焰面的传播被完全抑制,形成了单向火焰传播模式。这说明,此时火焰的传播行为主要是由燃烧室内的流场结构所决定的。

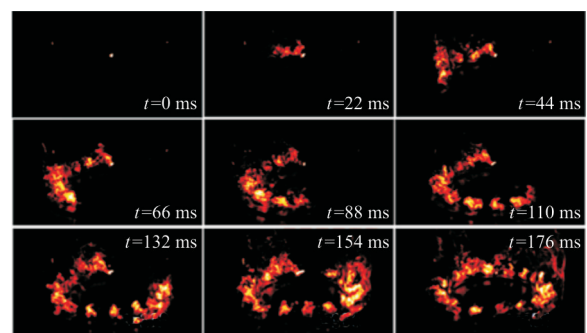


图 4 斜喷型环形燃烧室的点火过程

Fig. 4 Ignition process of the annular combustor with oblique inject

### 2.3 带涡轮导叶环形燃烧室的点火过程

带涡轮导叶环形燃烧室的点火过程如图 5 所示,可以看出:此时火焰传播形态与直喷环形燃烧室中相似,均沿双向传播。但由于出口涡轮导叶的

存在,火焰面上沿在冲刷涡轮导叶时传播方向发生了偏折。

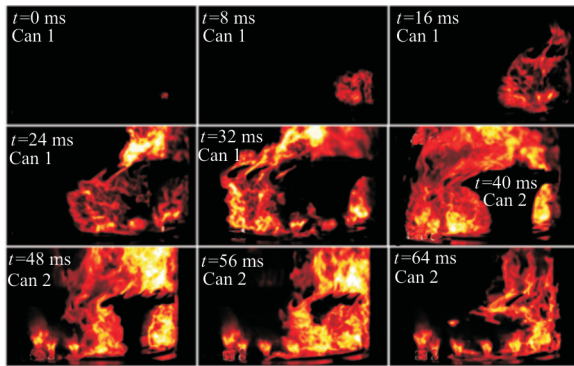


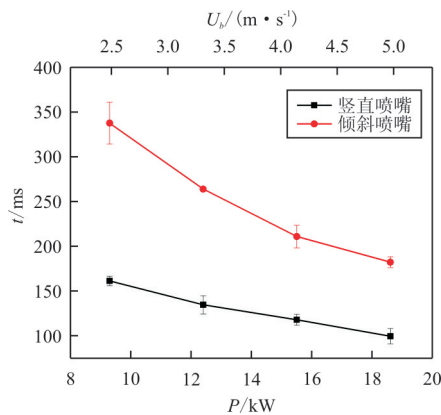
图 5 带涡轮导叶环形燃烧室的点火过程

Fig. 5 Ignition process of the annular combustor with turbine vane

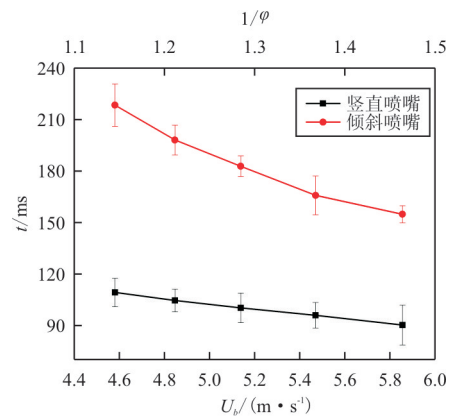
### 3 周向点火时间的结果分析

周向点火时间  $t$  可以反映火焰在环形燃烧室中传播的历程,  $t$  是指从初始火核生成到火焰面融合或点燃所有喷嘴间经历的时间。本文研究了当量比一定或热功率一定时,周向点火时间随工况变化的实验结果,并以此来分析倾斜喷嘴结构和燃烧室出口涡轮导叶对周向点火时间的具体影响。

直喷环形燃烧室和斜喷型环形燃烧室的周向点火时间变化规律对比图如图 6 所示,可以看出:由于改变喷嘴入射角度带来的流场结构变化会造成两者周向点火时间的显著差异,在斜喷型环形燃烧室中,火焰仅沿单侧传播,所以周向点火时间明显延长。



(a) 当量比一定 ( $\phi = 0.80$ )



(b) 热功率一定 ( $P = 18.6$  kW)

图 6 喷嘴角度对周向点火时间的影响

Fig. 6 Influence of nozzle angle on circumferential ignition time

从图 6(a)可以看出:当量比一定时,两者周向点火时间均随主流速度  $U_b$  增大而缩短,这是由于流速增大,湍流脉动加剧,湍流火焰传播速度  $S_T$  加快。但两者对于流速增大的响应有所不同,斜喷型环形燃烧室的周向点火时间随流速增大的缩短更为显著,这是因为随着主流速度增大,周向速度分量的作用也愈发明显,它能更好地加速火焰传播,缩短周向点火时间。

从图 6(b)可以看出:热功率一定时,周向点火时间随主流速度增大或当量比减小而缩短。一方面,主流速度的增大会加快湍流火焰传播;另一方面,随着当量比的减小,在贫燃范围内,燃后气体温度  $T_b$  以及层流火焰传播速度  $S_L$  均会下降,两者都会使火焰传播减慢。因此根据实验结果可以推测,相较于燃后气体温度及层流火焰传播速度,流动对火焰传播速度有重要影响,特别是对于斜喷型环形燃烧室,当主流速度足够大时,燃烧室内的周向速度分量就决定了火焰的周向传播速度。

燃烧室出口带有涡轮导叶和不带涡轮导叶的周向点火时间变化规律对比图如图 7 所示,可以看出:两者随各参数的变化规律相同,但在燃烧室出口涡轮导叶的影响下,整体周向点火时间缩短了约 15%,这是因为在出口涡轮导叶的影响下,点火过程中的非定常流场结构发生了改变。

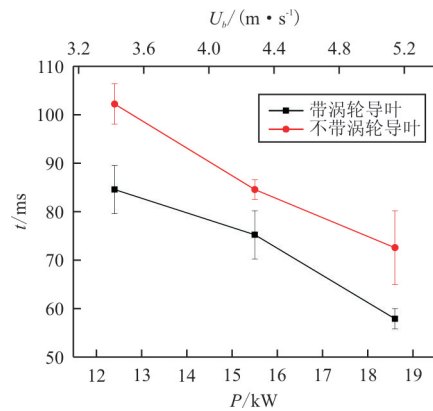
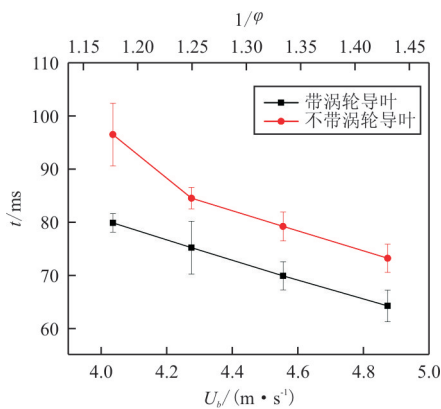
(a) 当量比一定 ( $\phi = 0.80$ )(b) 热功率一定 ( $P = 15.5$  kW)

图 7 涡轮导叶对周向点火时间的影响  
Fig. 7 Influence of turbine vane on circumferential ignition time

## 4 结 论

(1) 在直喷垂直喷嘴的敞口环形燃烧室内, 初始火核发展为旋流火焰后向两侧传播, 之后两侧火焰持续点燃所有喷嘴直至融合。

(2) 在倾斜喷嘴的敞口环形燃烧室内, 火焰转变为仅沿单向传播, 这是由于改变喷嘴入射角度而引入的周向速度分量造成的。

(3) 在带涡轮导叶环形燃烧室内, 火焰传播形态与常规垂直喷嘴燃烧室相似, 仍沿双向传播, 但火焰面上沿在涡轮导叶作用下发生偏折。

(4) 改变喷嘴角度后, 由于火焰仅沿单侧传播, 周向点火时间明显延长并且更易受流动影响; 而在涡轮导叶的影响下, 虽然火焰传播形态相似,

但周向点火时间有所缩短, 这是由于点火过程中的非正常流场结构变化造成的。

(5) 在大光学窗口的透明环形燃烧室模型下, 利用高速可视化方法开展周向点火机理研究的方法是有效性的。

## 参考文献

- [1] 李东杰. 辅助动力装置的应用现状和发展趋势[J]. 航空科学技术, 2012(6): 7-9.  
Li Dongjie. Application status and development trend of auxiliary power unit[J]. Aeronautical Science & Technology, 2012(6): 7-9. (in Chinese)
- [2] 陈利强, 颜应文, 徐榕, 等. 辅助动力装置全环形燃烧室燃烧性能试验研究[J]. 热动力工程, 2013(1): 7-12.  
Chen Liqiang, Yan Yingwen, Xu Rong, et al. Experimental study of the combustion performance of a wholly annular combustor of an auxiliary power plant[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2013(1): 7-12. (in Chinese)
- [3] 王高峰, 夏一帆, 叶沉然, 等. 环形燃烧室周向点火机理基础研究进展[J]. 实验流体力学, 2019, 33(1): 14-28.  
Wang Gaofeng, Xia Yifan, Ye Chenran, et al. Progress on light-round ignition dynamics in annular combustor [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2019, 33(1): 14-28. (in Chinese)
- [4] 令狐昌鸿, 王高峰, 钟亮, 等. 环形旋流燃烧室模型点火过程的实验[J]. 航空动力学报, 2018, 33(7): 1767-1778.  
Linghu Changhong, Wang Gaofeng, Zhong Liang, et al. Experiment on ignition process in annular swirling combustor model[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(7): 1767-1778. (in Chinese)
- [5] Bourgouin J F, Durox D, Schuller T, et al. Ignition dynamics of an annular combustor equipped with multiple swirling injectors[J]. Combustion and Flame, 2013, 160(8): 1398-1413.
- [6] Philip M, Boileau M, Vicquelin R, et al. Large eddy simulations of the ignition sequence of an annular multiple-injector combustor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(3): 3159-3166.
- [7] Prieur K, Durox D, Beaunier J, et al. Ignition dynamics in an annular combustor for liquid spray and premixed gaseous injection [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(3): 3717-3724.
- [8] Machover E, Mastorakos E. Spark ignition of annular non-premixed combustors[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, 73: 64-70.
- [9] Machover E, Mastorakos E. Experimental investigation on spark ignition of annular premixed combustors[J]. Combustion and Flame, 2017, 178: 148-157.

- [10] Ye C, Wang G, Fang Y, et al. Ignition dynamics in an annular combustor with gyratory flow motion[C]// Proceedings of 2018 ASME Turbo Expo. Oslo, Norway: AIAA, 2018: 11-15.
- [11] 叶沉然, 王高峰, 马承彪, 等. 斜喷环流环形燃烧室点火实验研究[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(11): 205-214.  
Ye Chenran, Wang Gaofeng, Ma Chengbiao, et al. Experimental investigations of ignition process in an annular combustor with circumferential flow via oblique injection[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(11): 205-214. (in Chinese)
- [12] Philip M, Boileau M, Vicquelin R, et al. Simulation of the ignition process in an annular multiple-injector combustor

and comparison with experiments[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2014, 137(3): 1-10.

#### 作者简介:

王 慧(1991—),男,博士研究生。主要研究方向:环形燃烧室点火机理实验。

钟 亮(1993—),男,博士研究生。主要研究方向:环形燃烧室的流场诊断以及传热测量。

王高峰(1979—),男,博士,副教授,博导。主要研究方向:燃烧室和涡轮耦合作用。

(编辑:丛艳娟)

#### (上接第 845 页)

- tions for establishing civil aircraft design assurance system [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2015, 6(4): 479-484. (in Chinese)
- [6] 贾少澎, 朱宁文, 谈心刚, 等. 设计保证体系建设和审查的若干专题研究之二:设计保证体系建设研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2015(3): 1-8.  
Jia Shaopeng, Zhu Ningwen, Tan Xingang, et al. Design assurance system developing and audit: research on design assurance system construction[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2015(3): 1-8. (in Chinese)
- [7] 中国民用航空局. 民用航空产品和零部件合格审定规定: CCAR-21-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2017.  
CAAC. The regulation for the certification of civil aircraft products and parts: CCAR-21-R4 [S]. Beijing: CAAC, 2017. (in Chinese)
- [8] 中国民用航空局. 航空器型号合格审定程序: AP-21-AA-2011-03-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.  
CAAC. The procedure for civil aircraft type certification: AP-21-AA-2011-03-R4[S]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chi-

nese)

- [9] 钱仲焱, 贾洪, 郝莲. 民用运输类飞机的设计组织要求[J]. 机械设计, 2012(9): 6-9.  
Qian Zhongyan, Jia Hong, Hao Lian. Design organization requirements for civil transport category airplane[J]. Journal of Machine Design, 2012(9): 6-9. (in Chinese)
- [10] 黄雄. 关于民用飞机设计机构适航管理的若干思考[EB/OL]. (2015-06-14)[2018-12-05]. <http://www.docin.com/p-1184961274.html>.  
Huang Xiong. Airworthiness management in civil aircraft design institute[EB/OL]. (2015-06-14)[2018-12-05]. <http://www.docin.com/p-1184961274.html>. (in Chinese)

#### 作者简介:

秦怀磊(1985—),男,学士,工程师。主要研究方向:适航管理与技术。

(编辑:丛艳娟)