

# 全环回流燃烧室等离子体点火试验研究

张 险, 陈 剑, 袁 汀, 蒋荣伟

(中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

**摘 要:** 以全环回流燃烧室为研究对象, 采用等离子体点火器进行地面点火试验研究, 并与采用常规电火花点火器进行地面点火试验的结果进行了对比。研究表明, 采用等离子体点火器进行燃烧室点火可使燃烧室具有更宽的贫油点火边界, 且能有效减小点火延迟时间; 燃烧室着火后的联焰与点火器的特性无关, 采用纯气动雾化喷嘴的燃烧室, 在进口空气马赫数 0.09 到 0.13 范围内, 增加进气流速有助于燃烧室点火。

**关键词:** 航空发动机; 燃烧室; 等离子体点火器; 电火花点火器; 联焰; 点火边界; 点火延迟时间

中图分类号: V231.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-2620 (2018) 02-0037-04

## Experimental investigation of plasma ignition in an annular reverse-flow combustor

ZHAN Xian, CHEN Jian, YUAN Ting, JIANG Rong-wei

(AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

**Abstract:** Taking an annular reverse-flow combustor as the target, the ground ignition test was conducted by plasma igniter and the comparisons were made between the plasma ignition and the conventional electric spark ignition. According to the results, it is suggested that the use of plasma igniter for combustor ignition can broaden the lean ignition limits of combustor, and be able to effectively reduce the period of ignition delay. The results also indicate that crossfire generated from ignition of combustor has nothing to do with characteristics of igniter and with the adoption of the combustor with pure pneumatic atomizing nozzle, as the inlet Mach number goes up within the range from 0.09 to 0.13, increasing airflow velocity facilitates combustor ignition.

**Key words:** aero-engine; combustor; plasma torch; electric spark torch; crossfire; ignition boundary; ignition delay time

## 1 引言

燃烧室点火性能是航空发动机可靠工作的第一个重要环节,也是需优先考察的燃烧性能,其评估的关键参数是贫油点火油气比<sup>[1]</sup>。燃烧室贫油点火特性是关系到发动机地面点火起动和空中再起动能否成功的重要因素。燃烧室的点火过程极其复杂,现有的燃烧室设计理论和经验,以及在此基础上建立和发展的燃烧室设计方法,还不足以有把握设计出点火性能一次性达标的燃烧室。因此,在燃烧室研制过程中,需进行大量的燃烧室部件点火试验。

目前,燃烧室常见的点火方式主要有电火花点火和等离子体点火两种。电火花点火器因其体积小、结构简单、使用方便,是现在应用最广泛的点火形式。等离子体点火是一种新型的先进点火方式,在航空航天领域以及点火环境恶劣的条件下极具应用前景<sup>[2]</sup>。与电火花点火器相比,等离子体点火器具有放电能量大、耐污垢等优点,特别是点火的同时对燃烧具有强化作用。近年来,随着对燃烧理论研究的深入和相关高新技术的发展,等离子体点火技术越来越受到重视<sup>[3-9]</sup>。国外, Gallimore 等<sup>[10]</sup>进行了

收稿日期: 2017-03-06; 修回日期: 2017-06-23

作者简介: 张 险(1987-),男,湖北荆门人,工程师,硕士,研究方向为航空发动机燃烧室部件性能试验。

等离子体射流点燃可燃混合气研究,结果表明等离子体射流中含有较高浓度的氢原子,化学活性高,同时等离子体射流表现出了良好的穿透性,有助于提升点火能力。Jacobsen等<sup>[11]</sup>进行了超声速条件下的等离子体点火实验,在等离子体点火器输入功率仅为2 kW时就可以产生高达5 000 K的高温活性气体,并在冲压发动机上进行测试研究。Matveev等<sup>[12]</sup>将等离子体点火应用到了飞机发动机上,在12 km以上高空表现出了可靠的点火性能。国内,宋文艳等<sup>[13]</sup>进行了超声速燃烧室等离子体点火实验研究,实现了煤油的可靠点火和稳定燃烧。李飞等<sup>[14]</sup>在直连式超燃实验台上开展了超声速气流中液态煤油燃料等离子体点火实验,研究了煤油在不同喷注位置 and 不同喷射压力下的点火性能。赵兵兵等<sup>[15]</sup>在燃烧室中进行了直流电弧等离子体射流点火特性试验,表明等离子体射流点燃可燃混合气的温升速率快,点火延迟时间短。但目前国内等离子体点火研究大多在简易燃烧器中进行,在航空发动机燃烧室上进行的等离子体点火研究尚不多见。

本文以某型全环回流燃烧室为研究对象,开展了燃烧室等离子体点火试验研究,并与常规电火花点火试验结果进行了对比分析,以期等离子体点火器在航空发动机上的应用提供有益参考。

## 2 试验系统及试验件

### 2.1 试验系统

试验在某燃烧室部件点火性能试验器(图1)上进行。试验器主要由进气系统、排气系统、燃油系统、冷却系统、电气系统、操控系统和测试系统等组成。通过气源站的空压机等提供稳定的压缩干燥空气。燃油系统采用先进的变频定量供油方式,调节快速、稳定、精准,具有自动控制和紧急停油等功能。测试系统主要由计算机、VXI数据采集系统、空气流量喷嘴、燃油质量流量计、温度热电偶、PSI9016

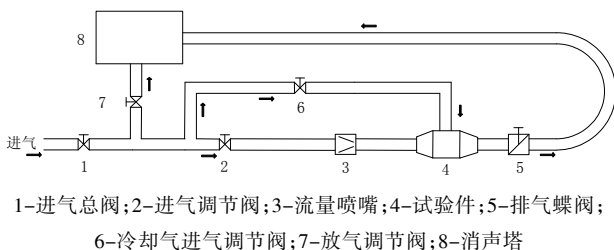


图1 燃烧室试验器示意图

Fig.1 Schematic of the combustor test rig

压力模块等组成。燃烧室出口截面总温采用三支铂铑10-铂热电偶接入VXI数据采集系统进行测量,测量精度为 $\pm 5^\circ\text{C}$ ,每支热电偶有五个测点。出口截面总压采用三支压力耙接入PSI9016压力模块测量,测量精度为 $\pm 0.5\%$ ,每支压力耙有三个测点。三支热电偶和三支压力耙彼此交错间隔 $60^\circ$ 沿周向均布,每支热电偶和压力耙上的各测点沿燃烧室出口环面径向由外到内依次排列,燃烧室出口测点分布见图2。试验中,空气流量采用标准流量喷嘴测量,测量精度为 $\pm 1.0\%$ ;燃油流量采用质量流量计测量,测量精度为 $\pm 0.5\%$ 。所有的温度、压力、空气流量、燃油流量等测量参数,全部通过计算机VXI数据采集系统进行采集和处理。

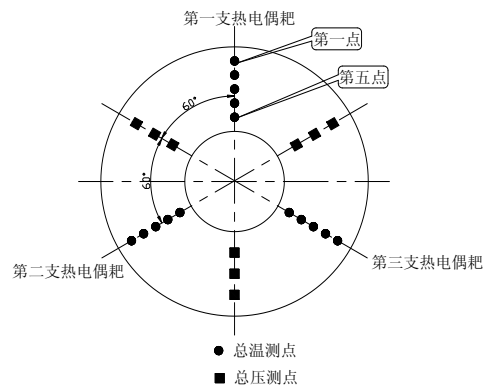


图2 燃烧室出口测点分布

Fig.2 Schematic of the measurement point distribution at the combustor exit

### 2.2 试验件

试验件为某型全环回流环形燃烧室,主要由扩压器、燃烧室机匣、火焰筒组件、单油路纯气动雾化燃油喷嘴、单油路燃油总管以及点火器等组成,具体结构示意见图3。设计了专门的试验件前后转接段,主要由进气段、测量段和排气段三部分组成。其

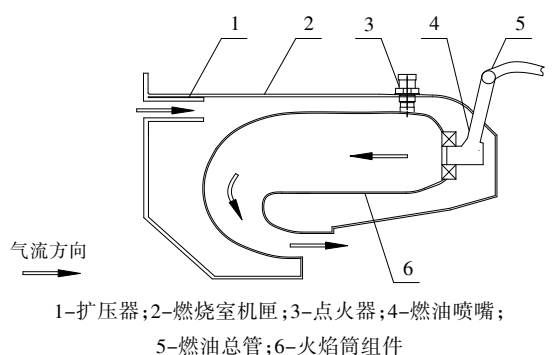


图3 试验件结构示意图

Fig.3 Schematic of the test sample structure

中,排气段装有摄像装置,可动态实时观察燃烧室出口火焰。

试验采用的等离子体点火系统(图4)以空气为工作介质,主要由等离子体点火器、驱动电源、供气系统等组成。等离子体点火器为高频高压脉冲起弧的非转移弧式等离子体射流点火器,阴极与阳极采用75%钨铜合金制作,既可耐高温、腐蚀,又具有良好的导电性。工作介质采用侧向进气方式。当点火气体(空气)通过阴极和阳极间的通道时,在等离子体电源的作用下产生高温等离子体电弧,并以高温射流的方式喷出<sup>[16-17]</sup>。采用的电火花点火系统主要由驱动电源、点火线圈、点火电嘴、点火电缆等组成。通过点火线圈中的升压整流变换成直流脉动电流,对储能的电容充电。当电容充满时,放电电流经过放电管、扼流线圈及点火电缆传送到点火电嘴,形成高能电弧火花<sup>[18]</sup>。

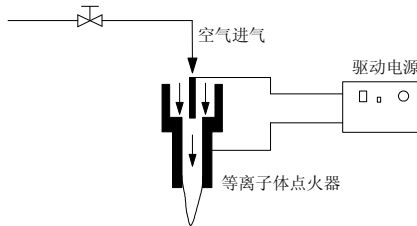


图4 等离子体点火系统示意图

Fig.4 Schematic of the plasma ignition system

分别采用等离子体点火器和电火花点火器进行点火。两种点火器的安装方式、安装位置均相同,点火器均垂直于进气气流方向,且点火器端面深入燃烧室的深度相同。

### 3 试验与结果分析

燃烧室分别装配等离子体点火器和电火花点火器,在常温常压下按表1中状态1~6进口参数进行燃烧室地面点火试验,试验中等离子体点火系统的

供气通过试验器冷却气进气管道新增旁路提供。对表1中的每个点火试验状态,起动点火器点火的同时开始计时和喷嘴供油。记录点火时间、燃烧室出口温度等参数。通过出口三支热电偶的温升并辅以排气段上出口摄像装置拍摄的火焰图像,判断燃烧室的点火情况。每支热电偶的温度通过耙上五个测点的温度取平均值,只要有一支热电偶的温度温升高于80℃,则表明燃烧室着火成功;如果三支热电偶的温度都大于250℃,则表明燃烧室联焰成

表1 燃烧室点火试验参数

Table 1 Parameters of the combustor ignition experiment

状态	进口空气总温/℃	进口空气总压/MPa	进口空气马赫数	油气比
1	常温	常压	0.07	0.034
2				
3				
4				
5				
6				

功。以油气比为0.034时对应的燃油流量为起始供油流量,若燃烧室着火成功,则逐步减少燃油流量直至不着火。若燃烧室不着火,则逐步增加燃油流量直至着火成功。通过上述方式,得到燃烧室能够着火成功的最小油气比,即贫油点火边界。为排除偶然因素,贫油点火边界验证需重复至少两次以上。

表2给出了按状态1~6进口参数进行地面点火试验时燃烧室着火成功的最小油气比。可见,采用等离子体点火,状态1~6只需要较小的油气比就能着火成功;而采用电火花点火时,则需要较大的油气比才能着火成功。图5为采用不同点火系统点火时的性能比较,可看出采用等离子体点火系统点火可获得更宽的贫油点火边界。

表2 燃烧室点火试验结果

Table 2 Results of the combustor ignition experiment

状态	着火成功最小油气比	
	等离子体点火	电火花点火
1	0.023	0.040
2	0.017	0.032
3	0.015	0.027
4	0.014	0.024
5	0.012	0.018
6	0.010	0.016

图6、图7分别示出了状态6采用等离子体点火器和电火花点火器在贫油点火边界着火成功时,燃烧室出口温度与点火时间的关系曲线。图中, $T_{t41av}$ 、 $T_{t42av}$ 、 $T_{t43av}$ 分别表示燃烧室出口截面三支热电偶各自测量的五点温度的平均值, $T_{t4av}$ 表示出口三支热电偶的平均温度,温度平均值均通过除以 $T_{t4av}$ 的最大值 $T_{t4avmax}$ 进行了无量纲处理。可见,采用等离子体点火器点火时,供油5s后燃烧室着火成功;采用电火花点火器点火时,供油11s后才着火

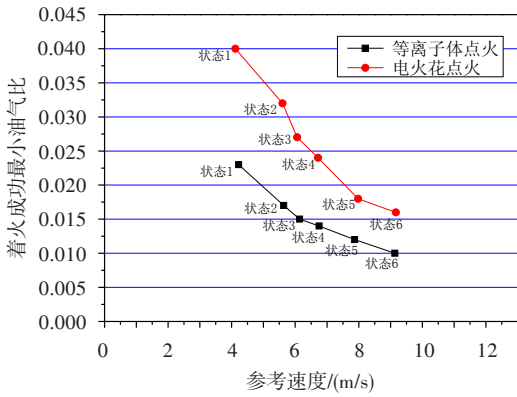


图5 采用不同点火系统点火时的性能比较

Fig.5 Comparison of the ignition performance of different ignition systems

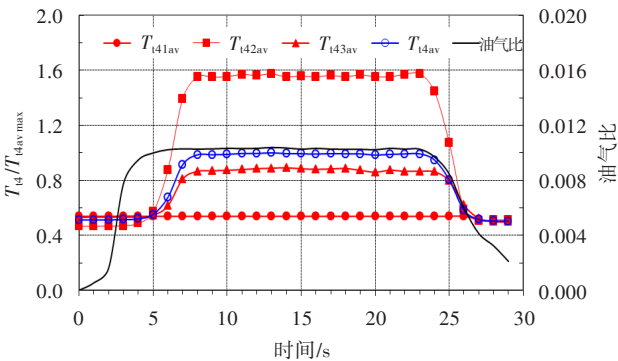


图6 状态6边界等离体着火成功曲线图

Fig.6 The successful plasma ignition curve of state 6 at ignition boundary

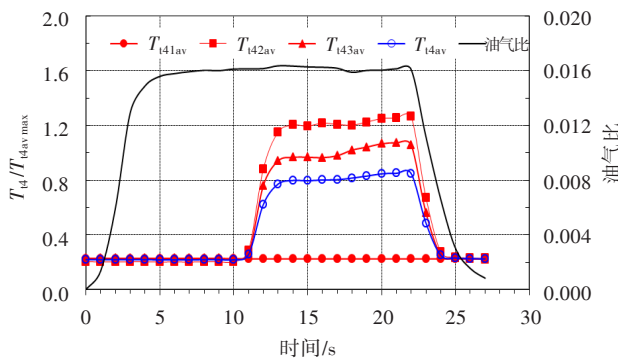


图7 状态6边界电火花着火成功曲线图

Fig.7 The successful electric spark ignition curve of state 6 at ignition boundary

成功。其余状态的点火曲线图也呈类似规律,这就说明采用等离体点火器进行点火的点火延迟时间明显比电火花点火器的小。

出现这种现象是因为等离体点火机理与电火花点火机理不同<sup>[15]</sup>。相比电火花点火,等离体点火有以下几方面优势:首先,等离体点火的点火源

为一股持续的高温热射流,点火能量更高,能更有效地加热未燃混合气,也就能适应更恶劣的点火环境。其次,等离体点火器产生的等离体以高速射流的方式喷射,热射流穿过混合气时的穿透深度更深,与火焰筒内部混合气的接触范围更大,点火源能深入到靠近火焰筒中心区域油气比相对较高的油气混合物,对点火器附近的油气比、气流速度等条件要求下降;另外,高速的热射流还能增强燃烧室内气流的湍流脉动强度,强化燃料与空气的混合,有利于燃料的快速雾化及蒸发。最后,等离体点火的放电过程中产生了大量的活性原子和基团,这些中间产物降低了化学反应的活化能,减小了点火延迟时间,最终加速了燃烧的化学动力学过程。因此,采用等离体点火器更容易实现点火,且着火更加迅速。

从图6和图7的结果还可看出,不管采用何种点火器,燃烧室均只能着火成功,而不能联焰成功,这说明该型燃烧室的联焰效果不好,燃烧室的联焰与采用何种点火器无直接关联。采用不同的点火器只决定了是否能在点火器附近形成稳定的火团,只与燃烧室是否能够着火成功有关。等离体点火器能增大燃烧室着火成功的边界,但不能改变燃烧室的联焰特性。这是因为形成火团只是燃烧室启动的第一步,是燃烧室联焰的前提条件,火焰的传播则受到燃烧室本身气动结构设计的影响。

表3给出了燃烧室采用电火花点火器进行点火时的试验结果。从表中可发现,同一燃油流量,当进口空气马赫数较小时不能着火成功,增加进口空气马赫数则能够使燃烧室着火成功。这是因为状态1到状态6进口空气流量均较小,燃烧室采用的又是纯气动雾化喷嘴,常温常压状态下,在一定程度上当进口空气马赫数增大时,喷嘴头部进气流量和流速

表3 燃烧室电火花点火试验结果

Table 3 Results of the electric spark ignition experiment in the combustor

状态	进口空气 $M_a$	燃油流量/(g/s)			
		12.0	12.7	13.4	14.5
1	0.07	○	○	●	●
2	0.09	○	○	○	●
3	0.10	○	○	●	●
4	0.11	○	○	●	●
5	0.13	●	●	●	●
6	0.15	●	●	●	●

注:“●”表示着火成功;“○”表示着火失败

(下转第46页)