

一体化加力燃烧室燃油自燃特性研究

费力¹, 赵兵兵², 王壮壮¹, 何立明³

(1. 空军工程大学航空机务士官学校, 河南信阳, 464099; 2. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038;
3. 西北工业大学动力与能源学院, 西安, 710129)

摘要 为探索一体化加力燃烧室内发生自燃现象的规律, 以一体化支板中的燃油喷射系统为研究对象, 采用高速摄影法拍摄了燃油在高温来流条件下的自燃火焰, 重点分析了一体化加力燃烧室来流温度、来流速度、余气系数、燃油喷嘴类型等因素对于燃油自燃特性的影响规律。结果表明: 提高加力燃烧室来流温度使得燃油更容易发生自燃, 当来流温度超过 1 200 K 时所有工况下燃油都可以发生自燃; 提高加力燃烧室来流速度有利于抑制自燃, 使得燃油自燃延迟距离增大; 贫油情况下燃油颗粒可以从环境中吸收更多的热量, 自燃延迟距离减小; 雾化效果好的锥形雾化喷嘴容易发生自燃, 雾化效果差的直射式喷嘴相对稳定。研究结果为一体化加力燃烧室的供油系统和点火系统的设计提供初步的参考价值。

关键词 航空发动机; 加力燃烧室; 航空燃油; 自燃; 自燃延迟距离

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.05.007

中图分类号 V233.3 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)05-0053-07

An Investigation on Spontaneous Combustion Characteristics of Fuel in Integrated Afterburner

FEI Li¹, ZHAO Bingbing², WANG Zhuangzhuang¹, HE Liming³

(1. Aviation Maintenance NCO School, Air Force Engineering University, Xinyang 464099, Henan, China;
2. Aviation Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
3. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract In order to investigate the law of spontaneous combustion in the integrated afterburner, taking the fuel injection system in the integrated strut as a research object and adopting the spontaneous combustion flame of the fuel under the condition of high temperature inflow recorded by high-speed photography, the effects of input temperature, inlet velocity, residual gas coefficient and fuel nozzle type on the spontaneous combustion properties of the integrated afterburner are investigated. The results show that the increment of afterburner inlet temperature makes spontaneous combustion easy, and spontaneous combustion can occur under all conditions when the inlet temperature exceeds 1200 K. The increment of afterburner flow velocity is advantageous to the suppression of spontaneous combustion, making the spontaneous combustion delay distance of fuel increase. In the case of lean oil, fuel particles can absorb more heat from the environment, and the delay distance of spontaneous combustion is reduced. Conical atomizing nozzles with good atomization effect are prone to spontaneous combustion, while direct atomizing nozzles with poor at-

收稿日期: 2024-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(52276142)

作者简介: 费力(1994-), 男, 安徽肥东人, 讲师, 博士, 研究方向为推进系统理论与工程应用。E-mail: 15991949595@163.com

引用格式: 费力, 赵兵兵, 王壮壮, 等. 一体化加力燃烧室燃油自燃特性研究[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(5): 53-59. FEI Li, ZHAO Bingbing, WANG Zhuangzhuang, et al. An Investigation on Spontaneous Combustion Characteristics of Fuel in Integrated Afterburner[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(5): 53-59.

omization effect are relatively stab. The research results provide a preliminary reference value for the design of oil supply system and ignition system of integrated afterburner.

Key words aeroengine; afterburner; aviation kerosene; spontaneous combustion; spontaneous combustion delay distance

不同于主燃烧室,加力燃烧室进口的温度可以达到 1 000 K 以上,在未来的军用航空发动机设计中,来流温度可能会更高^[1]。正是由于这种特殊的高温来流条件,除了对加力燃烧室中的部件提出,更高的耐高温烧蚀要求外,加力燃烧室中喷嘴喷出燃油后容易发生“自燃”现象。燃油没有经过点火器点火发生自燃,直接影响了加力燃烧室中设计的液雾分布情况,对于液滴的穿透深度、蒸发效率以及浓度分布都会产生不利影响,严重时还会对火焰稳定器产生烧蚀,对加力燃烧室的稳定工作带来很大的危害。因此,对于新型加力燃烧室设计而言,探索燃油自燃规律具有十分重要的意义。

文献[2~3]在一个流动反应器中开展液雾的自燃实验,初步探索了进口温度和预混时间等参数对自燃边界和点火延迟时间(ignition delay time, IDT)的影响规律。随着测试诊断技术的发展,文献[4~5]对不同的燃料进行了自燃实验,重点探索了燃料颗粒与来流两相的相互作用与液雾自燃的关系。文献[6]在此基础上研究了液态燃料蒸发对液雾自燃的影响,发现液滴蒸发性较差时,液滴会出现离散燃烧现象。文献[7]针对柴油建立了蒸发燃烧模型,通过计算发现喷雾在与气流表面由于存在速度差而产生湍流漩涡,促进自燃反应的发生。国内的研究起步较晚,文献[8]对加力燃烧室中热射流点火的燃油自燃规律开展了研究,定性分析了环境条件对燃油自燃的影响规律。文献[9~10]在此基础上开展了更加细致的研究,对自燃火焰的发展以及自燃延迟时间的概率密度进行了分析。

从公开文献来看,国内外对于航空燃油点火的研究较多,而对于航空燃油的自燃问题研究较少。从研究的发展趋势来看:一是目前所开展的实验条件距离真实的加力燃烧室工作条件还有差距,特别是影响液雾自燃的压力和温度因素;二是大多数研究停留在简单的定容弹和流动反应器之中,缺少确切的应用背景,对实际应用支撑不足^[11]。本文针对一体化加力燃烧室燃油自燃问题开展实验研究,重点分析来流条件与燃油分布对于燃油自燃规律的影响,为一体化加力燃烧室的设计提供初步的参考依据。

1 实验设备

加力燃烧室一体化是加力燃烧室未来发展的必

然趋势,本文研究基于一体化加力燃烧室的模型,如图 1 所示,采用 V 型火焰稳定器、凹腔火焰稳定器和支板火焰稳定器相融合的稳焰机理。将喷油杆安装在支板火焰稳定器内部,接通加力时,喷油杆将航空燃油从支板侧边喷出,并与内涵来流燃气掺混形成油气混合气。航空燃油在内涵道高温气流的条件下进行雾化蒸发,在这个过程中,燃油容易发生自燃现象。

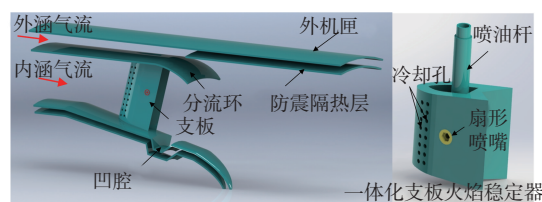


图 1 凹腔支板喷油杆一体化方案

Fig. 1 Integrated solution for concave cavity support plate fuel injection rod

为了开展横向来流条件下航空燃油的自燃特性研究,搭建了燃油自燃特性实验平台,如图 2 所示。它由供气系统、供油系统和控制系统等子系统构成,通过实验段前的燃烧器构造燃油喷雾高温横向的来流条件。喷雾测试段为一个矩形实验段,主要模拟的是一体化加力燃烧室中支板与支板之间的横向来流通道。矩形实验段两侧为石英玻璃视窗,用于相机的拍摄,相机的型号是 FASTCAM Mini WX100 高速相机,拍摄帧频为 250 帧/s,分辨率为 1 280×454。前后各安装 6 根 B 型铂铑热电偶测量环境温度。图 3 为燃油自燃实验段结构示意图。

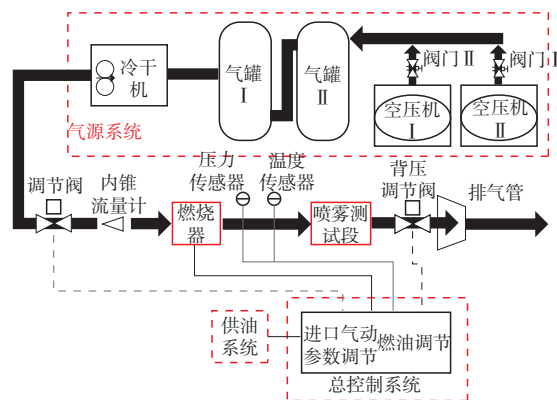


图 2 燃油自燃特性实验平台

Fig. 2 Experimental platform for spontaneous combustion characteristics of fuel

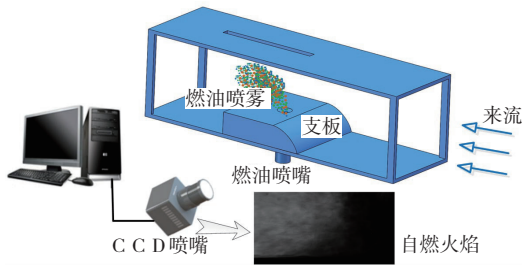


图 3 燃油自燃实验段结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of the experimental system

喷嘴分别使用直射式喷嘴、锥形雾化喷嘴以及扇形喷嘴,其雾化效果如图 4 所示。其中直射式喷嘴是目前加力燃烧室中使用最为广泛的喷嘴^[12-13],它结构简单,雾化效果相对较差,本文选择外径 6 mm,壁厚 1 mm 的不锈钢油管,利用激光打孔技术均匀地在管壁上加工 5 个直径 0.4 mm 的小孔,每个小孔之间的距离为 10 mm。锥形雾化喷嘴在主燃烧室应用较为广泛^[14-15],其雾化效果相对较好,喷嘴出口呈锥形,本文选用丹佛斯实心喷嘴,喷嘴的雾化嘴角为 45°。扇形喷嘴近年来逐渐受到关注,它的出口截面呈一层薄薄的扇形液面,其出口扇形的角度也可以通过改变喷嘴出口的几何结构进行调节^[16-17],其喷雾特点十分有利于加力燃烧室周围的联焰与燃烧,本文选用扇形喷嘴的角度为 60°。

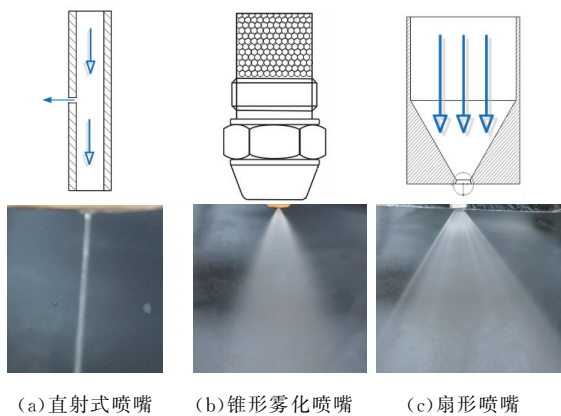


图 4 3 种喷嘴的结构及雾化效果图

Fig. 4 Structure and atomization condition of three nozzles

2 实验工况与方法

2.1 实验工况

实验中的条件参数如表 1 所示,进口压力为大气压力,主要分析在来流温度为 900~1 200 K,余气系数为 1、3、5,来流速度为 900~1 200 m/s 时,航空燃油在横向来流条件下的自燃特性。

表 1 自燃实验状态参数

Tab. 1 Parameters of spontaneous combustion experiment

实验参数	数值
入口温度 T/K	900~1 200
入口压力 P/kPa	101
来流速度 $V/(m/s)$	40~60
余气系数 α	1、3、5

2.2 自燃结果判定

实验过程中,在达到来流条件后,打开加力燃油供油电磁阀使得供油量达到设定值并持续 5 s,使用高速相机以及热电偶记录这 5 s 内的光学信号以及温度信号,通过分析判断燃油是否成功自燃,判断标准如下:

- 1) 开始供油后,高速相机拍摄到明显的火焰信号。
- 2) 开始供油后,下游温度较入口温度有明显提高。

将实验结果分为稳定自燃、间歇性自燃和未发生自燃状态,其中,间歇性自燃状态表示燃油喷射过程中出现短暂自燃现象后熄灭,随后又连续出现这种短暂的、间歇的自燃现象。

3 实验结果与分析

在加力燃烧室正常工作状态下,燃油从喷嘴喷射出来之后向下游扩散,与来流混合形成可燃混合气,经点火器点火成功后开始燃烧。当进口温度不均匀,燃油在局部区域发生自燃现象时,燃油从喷嘴喷出后在没有外界点火器能量输入的情况下就开始燃烧,如图 5 所示,将自燃火焰起始处与喷嘴出口处的水平距离定义为自燃延迟距离。这种不可预见的自发燃烧具有很强的随机性,这与液雾自身的雾化破碎过程以及高温来流的分布息息相关。

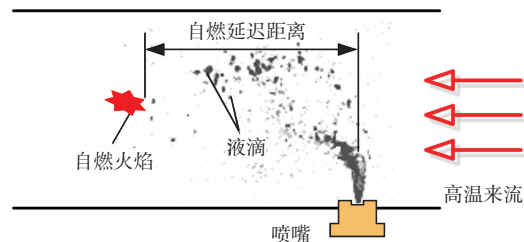


图 5 自燃形成过程

Fig. 5 Process of spontaneous combustion

相比于正常的点火燃烧,自燃最大的特点是随机性,随之带来的就是燃烧的不稳定性和释热的不均匀性,目前还没有成熟的描述自燃随机性的数学模型和描述方法。本文采用了高速相机记录航空燃油在不同工况下的自燃过程,从实验结果来看,不同工况下

的火核产生与发展都存在差异,然而从大量的实验结果可以总结出自燃发展过程中普遍存在的规律:一是自燃的发生不是由某一个火核从某一点开始产生并发生扩散,而是多个火核先后随机出现,同时进行扩散;二是火核产生后的扩散过程是随机的,有的火核出现后会在很短的时间内消失,无法得到扩散,有的火核会在扩散的过程中面积不断增大,有的火核会受到流动状态的影响而分裂成 2 个甚至更多的火核;三是自燃过程并不是一个连续的过程,从原理来看,在高温来流条件下,燃油自发燃烧形成火焰,通过高速相机来看,有的工况下火焰形成后无法自持,很快消失,但是新的火核产生后会形成新的火焰,这是一种间断性的火焰发展过程。

3.1 来流温度对自燃特性的影响

来流温度是影响燃油自燃最直接的影响因素,图 6 为扇形喷嘴在不同来流温度(900~1 200 K)下的自燃实验结果。在开展实验的过程中,每一种工况下的实验均要重复进行 5 次,如果有 4 次及以上发生自燃,认定该工况下可以发生自燃,如果只有 1 次及以下发生自燃,认定该工况下不可以发生自燃,其余情况认为发生间歇性自燃。本文在同一种进口来流温度下,进行了 3 种不同来流速度(40~60 m/s)工况的实验,每一组实验重复 5 次,即在每一种进口来流温度的条件下开展了 15 组实验,从 15 组实验的结果来看,当来流温度为 900 K 时,只有其中 2 组可以出现间歇性自燃现象,其余工况下均未发生自燃。随着来流温度升高至 1 200 K,15 组工况中有 14 组发生自燃,还有一组发生间歇性自燃。显然,来流温度的提高对于燃油自燃是有利的。

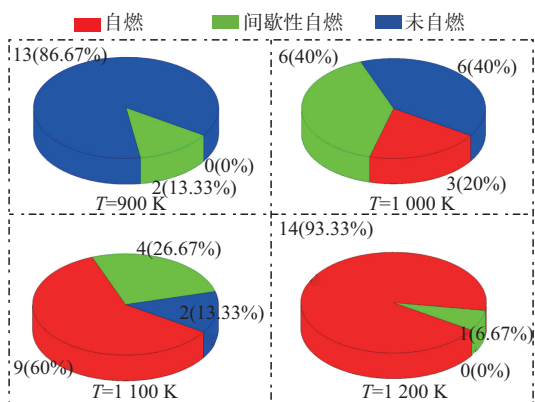


图 6 扇形喷嘴在不同来流温度下自燃实验结果

Fig. 6 Statistics of spontaneous combustion results of fan nozzle at different inlet temperatures

文献[10]发现,燃油的自燃延迟时间主要由燃油雾化时间、蒸发时间以及化学反应时间组成^[18],即:

$$ADT = \tau_a + \tau_e + \tau_c \quad (1)$$

其中,前 2 项属于物理过程,当来流温度升高时,燃油液滴表面的粘性力将会减小,此时液滴在横向来流的剪切力作用下更容易破碎,从而改善雾化效果。与此同时,来流温度的升高使得液滴表面吸收更多的能量,从而加快了燃油液滴蒸发速率。第 3 项为燃烧化学过程,文献[19]总结出温度与燃烧化学反应速率的经验关系式:

$$k(T) = AT^b \exp \frac{-E_a}{RT} \quad (2)$$

式中: A 、 b 、 E_a 均为经验参数; R 为气体常数。当来流温度提高时,燃烧化学反应速率也随之增大。综上所述,来流温度的提高导致燃油更容易发生自燃。

3.2 来流速度对自燃特性的影响

表 2 为燃油在不同来流速度下的自燃实验结果,表中“√、□、×”3 种符号分别代表稳定自燃、间歇性自燃和未发生自燃状态。结果表明来流速度为 40 m/s 时,当来流温度达到 1 000 K 时就可以发生间歇性自燃现象,而来流速度提高至 60 m/s 时,发生自燃现象需要来流温度提升至 1 200 K,说明增大来流速度不利于燃油发生自燃现象。

表 2 不同来流速度下自燃实验结果(扇形喷嘴, $\alpha=1$)

Tab. 2 Experimental results of spontaneous combustion at different inlet velocities (fan nozzle, $\alpha=1$)

来流温度 T/K	来流速度 $V/(m/s)$		
	$V=40$	$V=50$	$V=60$
900	×	×	×
1 000	□	□	×
1 100	√	□	×
1 200	√	√	√

利用 matlab 软件对每组工况下的自燃火焰图片进行数字化处理,选取 1 000 张动态自燃火焰图片进行叠加处理,得到了扇形喷嘴在 $\alpha=1$ 、 $T=1 200$ K 时不同来流速度下燃油自燃火焰的时均图像,如图 7 所示,其中红色虚线表示喷嘴位置,绿色虚线表示自燃火焰起始位置。相比较而言,在来流速度为 40 m/s 时,自燃火焰更加明亮,且自燃延迟距离较短。原因是加力燃烧室的主燃区与主燃烧室不同,它没有明显的主回流区,燃油从喷嘴喷出进入加力燃烧室开始雾化蒸发需要一个过程,在这个过程中,来流速度直接决定了已经具备自燃条件的喷雾液滴在主燃区的停留时间,当来流速度较大时,燃油在雾化和蒸发的过程中被吹向下游,这个过程燃油从环境中吸收大量的热量,环境温度降低,不利于自燃现象发生,即使发生自燃,其自燃延迟距离必然

增大,所能发生自燃的最低来流温度必然升高。

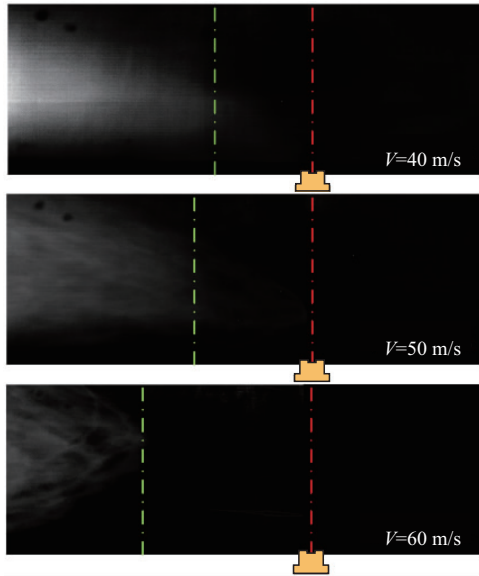


图 7 不同来流速度下燃油自燃火焰的时均图像

Fig. 7 Time average image of fuel spontaneous combustion flame at different inlet velocities

3.3 余气系数对自燃特性的影响

表 3 为扇形喷嘴在不同余气系数下的自燃实验结果,在余气系数为 1 时,只有当来流温度达到 1 200 K 时燃油才会发生自燃,而随着余气系数增大,燃油在来流温度 1 000 K 时就会发生间歇性自燃,结果表明在贫油工况下燃油更加容易发生自燃。

表 3 不同余气系数下自燃实验结果(扇形喷嘴, $V=60\text{ m/s}$)
Tab. 3 Experimental results of spontaneous combustion at different residual gas coefficients (fan nozzle, $V=60\text{ m/s}$)

来流温度 T/K	余气系数		
	$\alpha=1$	$\alpha=3$	$\alpha=5$
900	×	×	×
1 000	×	☑	☑
1 100	×	☑	✓
1 200	✓	✓	✓

图 8 为不同余气系数下燃油自燃火焰的时均图像,从图中可以直观地看出在来流温度为 1 200 K 时,虽然 3 种不同余气系数工况下均发生了自燃,但是在余气系数为 1 时自燃火焰较弱,并且自燃延迟距离较长,而余气系数为 5 时自燃火焰较强,并且自燃延迟距离较短。当余气系数较小时加力燃烧室内处于贫油状态,此时喷嘴喷射燃油流量较小,燃油在高温环境中吸收热量迅速蒸发并发生燃烧反应。而随着提高喷嘴的供油压差,喷嘴喷射燃油流量增大,由文献[20]可知,此时燃油液滴尺寸变大,蒸发所需吸收的热量增加,蒸发速率变慢且导致环境温度降低,不利于燃油发生自燃现象,所以自燃延迟距离变长,火焰强度变弱。

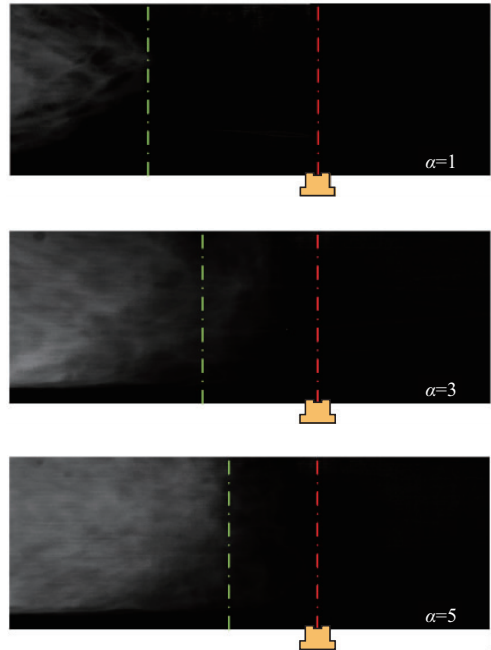


图 8 不同余气系数下燃油自燃火焰的时均图像

Fig. 8 Time average image of fuel spontaneous combustion flame at different residual gas coefficients

3.4 燃油分布对自燃特性的影响

除了环境因素外,燃油空间分布以及液滴尺寸大小也是影响燃油自燃的重要影响因素。表 4 为不同燃油喷嘴类型的自燃实验结果,结果表明锥形雾化喷嘴形成的喷雾场更加容易发生自燃,其次是扇形喷嘴,直射式喷嘴形成的喷雾相对稳定,说明了在相同燃油流量条件下,燃油喷雾的分布形式以及燃油液滴的尺寸大小都会影响自燃现象的发生,燃油液滴粒径越小,喷雾空间分布越广泛,越容易发生自燃现象。

表 4 不同燃油喷嘴自燃实验结果($V=60\text{ m/s}, \alpha=1$)

Tab. 4 Experimental results of spontaneous combustion at different nozzle types ($V=60\text{ m/s}, \alpha=1$)

来流温度 T/K	喷嘴类型		
	扇形喷嘴	锥形雾化喷嘴	直射式喷嘴
900	×	×	×
1 000	×	×	×
1 100	×	✓	×
1 200	✓	✓	☑

图 9 给出了不同喷嘴在 $V=60\text{ m/s}, \alpha=1, T=1\ 200\text{ K}$ 条件时燃油自燃火焰的时均图像,3 种喷嘴发生自燃现象的条件与火焰形态都存在着明显差异。其中锥形雾化喷嘴在横向来流下分布范围最广,燃油颗粒的液滴尺寸最小,实验中当来流温度达到 1 100 K 及以上时,在 $V=60\text{ m/s}, \alpha=1$ 的工况下的多组实验均可以发生自燃。除此之外,锥形雾化喷嘴形成的自燃火焰非常明亮,说明燃油颗粒充分参与燃烧,喷雾粒径越小,导致燃油更容易发生自

燃。而锥形雾化形状使得在燃油喷嘴的上游就已经存在燃油颗粒,因此自燃延迟距离很短。扇形喷嘴形成的喷雾粒径相比于锥形雾化喷嘴要稍大一些,因此自燃发生的环境条件更加严格,自燃延迟距离更长,火焰强度更加微弱。以此类推,直射式喷嘴因为由于自身雾化效果差^[21-22],燃油颗粒在加力燃烧室内分布范围小,在多数工况下难以自燃,燃油喷雾相对稳定。

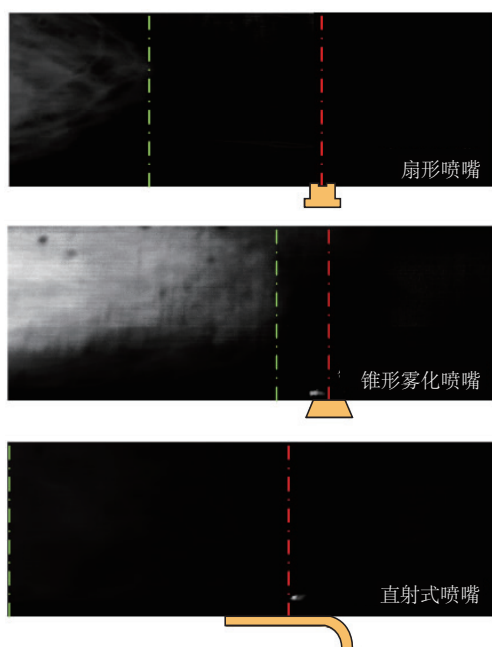


图9 不同喷嘴类型燃油自燃火焰的时均图像

Fig. 9 Time average image of fuel spontaneous combustion flame at different nozzle types

4 结论

本文以一体化支板中的燃油喷射系统作为研究对象,开展了燃油自燃特性的实验研究,采用高速摄影法拍摄了燃油在高温来流条件下的自燃火焰,重点分析了一体化加力燃烧室来流温度、来流速度、余气系数、燃油喷嘴类型等因素对于燃油自燃延迟距离等特性的影响规律,得到如下结论:

1) 燃油在高温来流的条件下会发生自燃现象,实验中当来流温度低于 900 K 时燃油不会自燃,温度超过 1 200 K 后一定自燃,高温会加快燃油雾化蒸发的物理过程和化学反应的化学过程,是决定自燃与否的重要因素。

2) 当横向来流速度较大时,燃油驻留时间短,在雾化蒸发的过程中向下游移动,导致自燃延迟距离变大,不利于自燃。

3) 贫油工况下燃油颗粒可以从环境中充分地吸收热量且有充足的氧气,导致燃油更容易发生自燃,

自燃延迟距离也会变短。

4) 燃油雾化分布情况同样也会直接影响自燃的结果,直射式喷嘴由于喷射出的燃油粒径大并且分布范围窄,不利于燃油从环境中吸收热量并发生反应,而锥形雾化喷嘴由于燃油雾化效果好而且分布范围广,燃油容易发生自燃。

参考文献

- [1] LOVETT J, BROGAN T, PHILIPPONA D, et al. Development Needs for Advanced Afterburner Designs [C]// 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Virginia: AIAA, 2004: 4192.
- [2] MAREK C J, PAPATHAKOS L C. Exhaust Emissions from a Premixing, Pre-vaporizing Flame Tube Using Liquid Jet a Fuel [J]. Aircraft Propulsion and Power, 1976(2): 1-14.
- [3] MAREK C J, BAKER C E. High-Pressure Flame Visualization of Autoignition and Flashback Phenomena with Liquid-Fuel Spray [R]. Washington D C: NASA, 1983.
- [4] HINKELDEY O, SCHIEL R, CANO W M, et al. Laser Based Study of Auto-Ignition of Sprays in a Continuous Flow Reactor [C]// Proceedings of the European Combustion Meeting, Chania: Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne, 2007: 1-6.
- [5] HINKELDEY O, KOCH R, BAUER H J, et al. Laser Based Study of Spray Auto-Ignition in a Generic Mixing Duct [C]// ASME Turbo Expo: Power for Land, sea, and Air, Berlin: the American Society of Mechanical Engineers, 2008: 37-46.
- [6] LACEY J, POURSADEGH F, BREAR M J, et al. Generalizing the Behavior of Flash-Boiling, Plume Interaction and Spray Collapse for Multi-Hole, Direct Injection [J]. Fuel, 2017, 200: 345-356.
- [7] SHINJO J, MEGARITIS A, GANIPPA L, et al. Modeling Temperature Distribution Inside an Emulsion Fuel Droplet under Convective Heating: a Key to Predicting Microexplosion and Puffing [J]. Atomization and Sprays, 2016, 26(6): 551-583.
- [8] 徐兴平, 张孝春, 游庆江, 等. 加力燃烧室热射流点火的燃油自燃规律研究 [J]. 航空发动机, 2014, 40(1): 39-41, 74.
- [9] XU X P, ZHANG X C, YOU Q J, et al. Investigation on Fuel Autoignition Law of Hot-Jet Ignition for Afterburner [J]. Aeroengine, 2014, 40(1): 39-41, 74. (in Chinese)
- [9] ZHAO Y S, ZHANG C, LIN Y Z. Random Behavior of Kerosene Spray Autoignition in Crossflow [C]// ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical

- Conference and Exposition, Seoul;The American Society of Mechanical Engineers,2016;13-17.
- [10] 靳勇,林宇震,张弛,等. 高温高压下航空煤油横向喷射自燃延迟时间特性研究[J]. 燃气涡轮试验与研究,2017,30(5):26-30.
- JIN Y,LIN Y Z,ZHANG C,et al. Spray Autoignition Delay Time of Fuel Injected into Crossflow at High Temperature and High Pressure[J]. Gas Turbine Experiment and Research,2017,30(5):26-30. (in Chinese)
- [11] 高伟,张弛,贺春龙,等. 航空发动机极端条件下液雾自燃特性研究进展[J]. 实验流体力学,2019,33(1):29-40.
- GAO W,ZHANG C,HE C L,et al. Progress on Spray Autoignition Under the Extreme Conditions in Aeroengines[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics,2019,33(1):29-40. (in Chinese)
- [12] HUANG W D,MOON S,WANG Y A,et al. Nozzle Tip Wetting in Gasoline Direct Injection Injector and Its Link with Nozzle Internal Flow[J]. International Journal of Engine Research,2020,21(2):340-351.
- [13] KESKINEN K,KAARIO O,NUUTINEN M,et al. Mixture Formation in a Direct Injection Gas Engine; Numerical Study on Nozzle Type, Injection Pressure and Injection Timing Effects[J]. Energy,2016,94:542-556.
- [14] JEDELSKY J,MALY M,BELKA M,et al. Effect of Fabrication Method and Surface Roughness on Spray Characteristics for Small Pressure-Swirl Atomizers [J]. Journal of Manufacturing Processes,2023,85:166-178.
- [15] SHEN L X,FANG G Y,WANG S Z,et al. Numerical Study of the Secondary Atomization Characteristics and Droplet Distribution of Pressure Swirl Atomizers [J]. Fuel,2022,324:124643.
- [16] WANG J,LIANG Q F,ZENG T W,et al. Drift Potential Characteristics of a Flat Fan Nozzle: a Numerical and Experimental Study[J]. Applied Sciences,2022,12(12):6092.
- [17] LI S G,CHEN C C,WANG Y X,et al. Study on the Atomization Characteristics of Flat Fan Nozzles for Pesticide Application at Low Pressures[J]. Agriculture,2021,11(4):309.
- [18] 刘玉英,谢奕,柳杨,等. 凹腔支板火焰稳定器自燃点火性能初步试验[J]. 航空动力学报,2018,33(6):1298-1304.
- LIU Y Y,XIE Y,YANG L,et al. Preliminary Experiment on Spontaneous Ignition Performances of Cavity-Based Strut Flameholder [J]. Journal of Aerospace Power,2018,33(6):1298-1304. (in Chinese)
- [19] WILLIAMS A,SHCHERBIK D,BIBIK O,et al. Autoignition of a Jet-a Fuel Spray in a High Temperature Vitiated Air Flow[C]// ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition, Montreal;The American Society of Mechanical Engineers,2015:1-10.
- [20] FEI L,ZHAO B B,HE L M,et al. Experimental Study on Spray Characteristics of Fan Nozzle for Integrated Afterburner in Lateral Airflow[J]. Aerospace Science and Technology,2022,130:107937.
- [21] 熊溢威,李锋,高伟伟,等. 直射式喷嘴流动特性的数值和试验研究[J]. 航空发动机,2016,42(6):68-75.
- XIONG Y W,LI F,GAO W W,et al. Numerical and Experimental Study of Flow Characteristic of Direct Sprayed Nozzle[J]. Aeroengine,2016,42(6):68-75. (in Chinese)
- [22] FU Y C,TAO Z,XU G Q,et al. Experimental Study of Flow Distribution for Aviation Kerosene in Parallel Helical Tubes under Supercritical Pressure[J]. Applied Thermal Engineering,2015,90(5):102-109.

(编辑:陈斐)