

燃烧室电火花点火模型

肖 为, 江立军, 陈 盛
(中国航空发动机集团有限公司 湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 为了准确掌握影响航空发动机燃烧室点火边界的关键因素,并建立燃烧室点火边界预测模型,对单头部燃烧室的点火过程及点火边界进行了试验与理论研究。获取了燃烧室点火过程的火核生成与传播特性曲线,形成了拓宽燃烧室点火边界的优化方法,基于点火恢复时间建立了燃烧室点火边界预测模型,并对预测模型的精度进行验证。结果表明:提高喷嘴雾化性能是提升点火性能的最有效途径,点火模型预测结果与试验结果相符度较好,模型的最大误差小于 20%,满足燃烧室工程设计需要。

关 键 词: 点火模型; 点火延迟; 电火花点火; 燃烧室; 点火边界

中图分类号: V231.2 **文献标志码:** A

Spark ignition model for combustor

XIAO Wei, JIANG Lijun, CHEN Sheng

(Hunan Aviation Powerplant Research Institute,
Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: With an aim to develop an ignition model and obtain the key factors influencing the ignition limits in aero-engine combustor, testing and theoretical investigations were conducted based on the ignition process inside a single dome gas turbine combustor. The characteristic curve of ignition process was obtained, and a method to optimize the ignition performance was also proposed. An ignition model to predict the ignition limits was developed based on the concept of recovery time, and the accuracy of the prediction model was validated. It is found that the significant improvement in ignition performance can be obtained by decreasing the atomization performance of nozzle. A very satisfactory agreement is demonstrated between the predictions based on the prediction model and the actual measured values. The maximum error of the prediction model is less than 20%, which is qualified to meet the requirements of the combustor design.

Key words: ignition model; ignition delay; spark ignition; combustor; ignition limit

航空发动机燃烧室的高空再点火和高寒点火是发动机设计中最重要的问题之一。点火可以分为两大类,分别是强迫点火和自燃。强迫点火是指通过电火花或者等离子射流来引燃点火器附近的油气混合物,这种点火方式是目前航空发动机中主要的点火方式。对基于电火花点火方式的燃

烧室点火边界进行评估和预测,是燃烧室设计过程中的一个重要环节。然而,燃烧室点火过程极为复杂,涉及到小尺度的火焰与湍流耦合,其物理过程还未被完全掌握和认识^[1]。点火过程中的小尺度问题也对建立理论和经验模型带来了非常大的挑战。

为了能够评估和预测燃烧室的点火边界,研究人员从 20 世纪 70 年代开始就做了大量的试验和理论研究^[2-4]。Ballal 和 Lefebvre^[5-7]提出了一种点火模型,并得到了点火边界与雾化粒径、当量比和燃油物性参数之间的函数关系式。这个点火模型假设电火花释放能量之后形成一个可以持续稳定燃烧的火核,并且这个火核的半径必须大于淬熄半径才能保证点火成功^[8]。基于相似的假设,Peters 和 Mellor^[9-11]提出了一个特征时间模型并且应用于钝体火焰和全环燃烧室。

然而,Naegeli 等^[12]在对 GE 公司 T63 发动机进行点火试验时发现,电火花引燃混合气之后形成的火核会逐渐消失,并在消失一段时间后再次恢复直至火焰充满主燃区。这个现象被 Naegeli 定义为点火延迟现象,这种燃烧室内的点火延迟是由于火核的热耗散引起的局部熄火,因此不同于自燃的点火延迟^[13]。Ahmed 及 Read 等人^[14-15]同样观察到了这一燃烧室点火延迟现象。这一试验观察与 Lefebvre 和 Mellor 点火模型中的假设存在明显的不一致,因为上述点火模型中都假设形成具有一定尺寸的可持续燃烧火核是点火成功的唯一准则。

为了对点火边界进行预测,许多实验室还开展了基于大涡模拟 (LES) 的点火数值仿真研究^[16-19]。这些点火数值仿真应用范围目前在不断拓宽,覆盖从实验室尺寸的模型燃烧室到真实尺寸的全环燃烧室。然而,LES 的计算成本过高,目前依然不适合工程应用。近年来,一种简化的点火数值仿真方法被提出^[20-21],这种方法基于冷态两相 CFD 数值仿真结果和低维度模型计算点火概率,可以对点火性能进行快速评估和预测^[22-25]。然而,上述数值仿真方法只能对点火边界进行定性的评估,还无法实现定量的预测。

综合来看,低维度的理论模型依然是目前最有效的燃烧室点火边界预测工具。然而,现有的点火模型还需要改进,以满足燃烧室点火边界的高精度评估和预测。本文采用不同能量的点火装置、不同雾化粒径的燃油喷嘴对燃烧室地面和高空点火过程进行研究,建立了点火边界预测模型,并基于大量点火试验数据对该模型进行了验证。

1 试验方法

1.1 试验装置

燃烧室试验装置如图 1 所示。该装置包含扩压器、单头部燃烧室以及测试段。该燃烧室被设

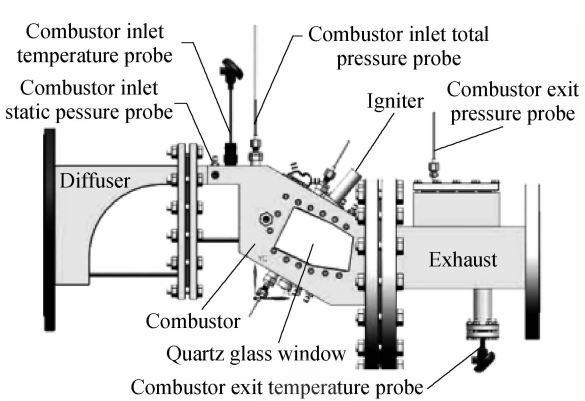


图 1 燃烧室试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of combustor test rig

计成带有一个倾斜角,这么设计的目的是为了与离心压气机的出口气流进行匹配。此外,单头部燃烧室的侧面安装一面 87 mm×141 mm 的石英玻璃,可以用于光学相机拍摄燃烧室内点火过程。

燃烧室采用双油路离心喷嘴供油,燃料采用 RP-3 航空煤油。在点火试验中,采用了 2 个不同流量系数的燃油喷嘴用于研究雾化对点火性能的影响。这 2 个离心喷嘴流量系数分别为 0.31 和 0.65,流量系数 C_d 的表达式如下:

$$C_d = \frac{\dot{m}_f}{A_n \sqrt{2\rho_f \Delta p}} \quad (1)$$

式中 $\dot{m}_f$ 为燃油流量, A_n 为喷嘴喷口面积, ρ_f 为燃油密度, Δp 为喷嘴压降。

点火电嘴被安装在燃烧室的外机匣上,电嘴端面与火焰筒外环壁面平齐,电嘴中心线与燃烧室中心截面夹角为 5°。为了研究不同电火花能量(E)对点火边界的影响,点火试验中采用了 2 个不同点火能量的点火装置进行试验。这 2 个点火装置的储能分别是 6 J 和 12 J,点火频率均为 1.2 Hz,电火花能量转化效率均为 25%。因此,这两个点火装置产生的电火花能量分别为 1.5 J 和 3.0 J。点火边界的试验测试方案如表 1 所示。

表 1 点火试验方案

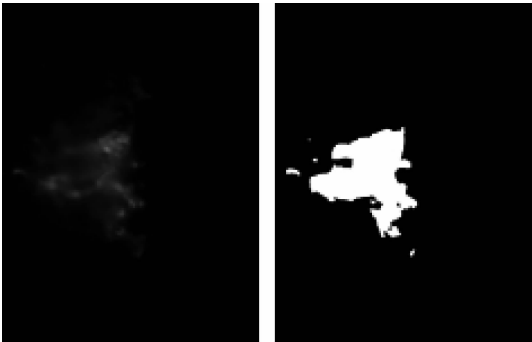
Table 1 Test setups for ignition

试验方案	C_d	E/J
1	0.31	1.5
2	0.31	3.0
3	0.65	1.5

1.2 测试方法

为了获取点火过程的瞬态图像,采用了一台

高速摄影仪(Photron FASTCAM SA4)对点火过程进行拍摄。试验中,高速摄影仪的拍摄帧率为 10 000 帧/s,快门速度为 0.000 02 s,曝光量为 0.000 196 lx·s。采用阈值法对火焰图像进行后处理并提取火焰轮廓和面积,火焰轮廓提取过程如图 2 所示。



(a) 原始灰度图 (b) 火焰轮廓

图 2 火焰轮廓提取过程

Fig. 2 Process of extracting flame outline

在点火边界测试中,首先打开燃油喷嘴的控制阀门,将燃油流量调节至设定流量,然后再启动点火装置形成电火花,电火花的持续时间为 10 s。如果 10 s 之内燃烧室没有形成稳定火焰,则点火失败,反之则点火成功。通过不断调整燃油流量,确定燃烧室的点火边界。当点火边界确定之后,对点火边界下的工况进行重复性试验,每组点火边界测试试验重复 3 次,重复性试验的不确定度在 3% 以内则认为该工况下的油气比为点火边界。

1.3 测试工况

点火试验测试包含地面点火和高空点火,具体的点火工况如表 2 所示。为验证本研究中的点火模型,点火试验工况分为 2 类:一类是地面点火工况;一类是高空点火工况。其中,地面点火工况均为常温常压,高空点火工况覆盖海拔 3 000 m 至 8 000 m 的温度和压力变化范围。表 2 中点火边界测试的工况数总计 68 组(未详细列入表 2),可以充分为点火模型验证提供支撑。

表 2 点火试验测试工况
Table 2 Test conditions of ignition

工况	燃烧室进口 压力 p_3 /kPa	燃烧室进口 温度 T_3 /K
地面点火	101	288
高空点火	35~80	241~288

为了便于分析工况参数对燃烧室点火边界的影响,本研究采用了 2 个参数来表征燃烧室工况,分别是燃烧室停留时间和燃烧室参考速度。停留时间 τ_{res} 的表达式为

$$\tau_{\text{res}} = \frac{\rho_a V_c}{\dot{m}_a} \tag{2}$$

式中 ρ_a 为空气密度, V_c 为火焰筒体积, $\dot{m}_a$ 为燃烧室空气流量。燃烧室参考速度的表达式为

$$U_r = \frac{\dot{m}_a}{\rho_a A_r} \tag{3}$$

式中 A_r 为火焰筒最大横截面积。

2 试验结果与分析

2.1 试验观测

电火花点火的火核衍化过程如图 3 所示。一个完整的燃烧室成功点火过程可以分为以下几个阶段。首先,当喷雾喷入燃烧室时,电极放电产生的能量加热了电嘴附近的油气混合物,从而触发电火花(图 3(a))。随后,电嘴附近形成一个热气核。火焰从热气核中心开始向外传播,并逐渐形成一个初始火核,如图 3(b)所示。初始火核的尺寸先增大,随后在小于 2 ms 的时间内分解为较小的子火核(图 3(c))。一部分子火核向前移动到燃烧室的头部,而其余子火核向点火装置的下游移动。同时,在图 3(d)中,这些子火核的光强逐渐下降并几乎消失,这就是延迟点火现象。虽然火焰在点火延迟期间熄灭,从这些火核释放的热量被运输给回流区内的新鲜混气。当这些新鲜混气在几毫秒内被点燃,湍流火焰开始在回流区内传播并稳定在燃烧室中(图 3(e)、图 3(f))。从图 3 的图像中提取灰度值和火焰区域,采用灰度值来表征火焰发光强度,图中 R_{fu} 为油气比。

图 4 中绘制了火焰发光强度及火焰面积随时间(t)的变化趋势。从图 4 可以看出,在相邻 2 个电火花释放的间隔时间内,发光强度和火焰尺寸呈现相似的趋势。由电火花产生的高强度信号,在不到 1 ms 时间内减少到一个很低的水平。在形成初始火核之后,火核的发光强度和大小在开始时略有增加,但在火核分裂开始后又下降到较低的水平。在点火延迟期间,火焰的光信号非常微弱,高速摄像机几乎无法检测到火焰信号。点火延迟持续约 5 ms 后,火核的发光强度和火焰尺寸开始增大并逐渐恢复,直到火焰充满主燃区。在本研究中,定义点火恢复时间为火焰发光强度低于 1×10^6 的持续时间(见图 4 虚线)。

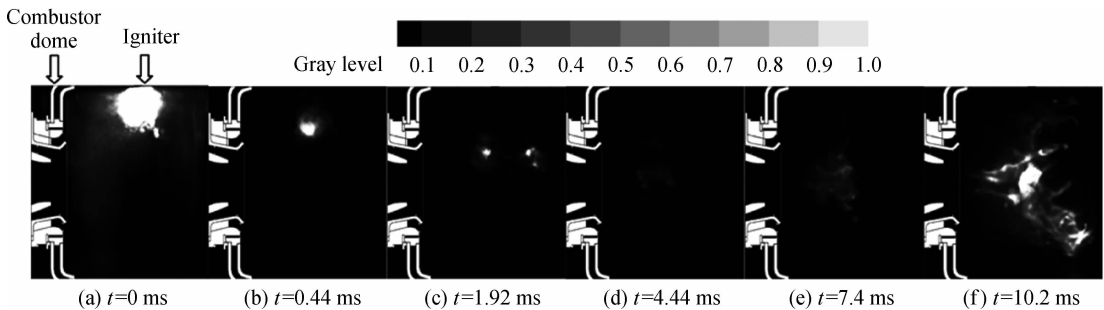


图 3 点火成功的瞬态图像 ($p_3=101\text{ kPa}, R_{fa}=0.0267, E=1.5\text{ J}$)

Fig. 3 Successful ignition sequence ($p_3=101\text{ kPa}, R_{fa}=0.0267, E=1.5\text{ J}$)

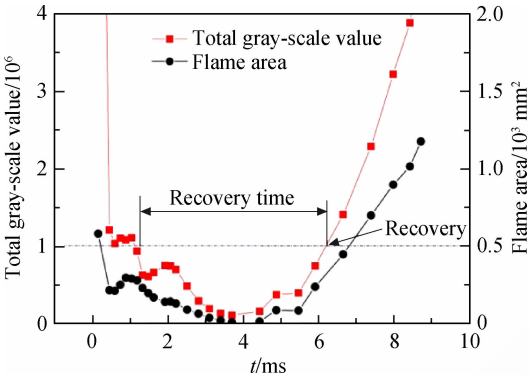


图 4 点火成功的火焰发光强度与面积随时间变化趋势 ($p_3=101\text{ kPa}, R_{fa}=0.0267, E=1.5\text{ J}$)

Fig. 4 Evolution of luminous intensity and flame area over time in the process of successful ignition ($p_3=101\text{ kPa}, R_{fa}=0.0267, E=1.5\text{ J}$)

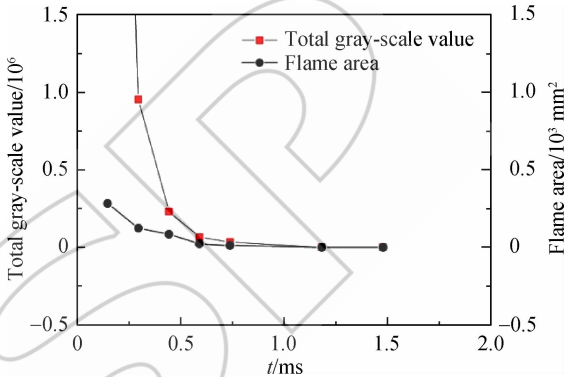


图 5 点火失败的火焰发光强度与面积随时间变化趋势 ($p_3=101\text{ kPa}, R_{fa}=0.0192, E=1.5\text{ J}$)

Fig. 5 Evolution of luminous intensity and flame area over time in the process of unsuccessful ignition ($p_3=101\text{ kPa}, R_{fa}=0.0192, E=1.5\text{ J}$)

点火失败的火核发展过程如图 5 所示。从图中可以观察到,点火失败的整个过程通常发生在不到 1 ms 的时间内,并且可以观察到点火失败过程中的发光强度和火焰尺寸均急剧减小。然而,在火焰恢复到一定的发光强度之前,点火失败和点火成功的火焰发光强度及火焰尺寸变化趋势几乎是一致的。此外,图 5 中没有显示出初始火核形成之后在尺寸和发光强度方面有轻微增加,但在成功点火可以观测到这些轻微增加(见图 4)。还需要注意的是,在点火失败的过程中,并没有观测到火焰恢复的过程。

图 3~图 5 的结果说明了点火过程中火焰发展的几个重要特征。首先,持续存在的火核对于成功的点火不是必不可少的,因为无论是点火成功还是失败,这些火核在最早的时候都有可能在 1 ms 内熄灭。其次,油气比对促进火焰的恢复有显著影响,因为从火焰释放的热量依赖于油气比。最后,燃烧室中最有利于稳定火焰的位置可能是在燃烧室头部套筒出口附近,那里有较低的速度和足够的燃料浓度进行火焰传播。因此,为了点

火成功,关键是在点火延迟期间,能够传递足够的热量给套筒出口附近的新鲜混气,进而形成稳定的火焰。

2.2 点火恢复时间

图 6 显示了不同当量比(ϕ_{pri})下点火恢复时间的概率分布。在本研究中,由于点火恢复时间的随机性非常明显,每次点火恢复时间测试均重复 30 次,以获得点火恢复时间及其概率分布。在给定工况下,点火恢复时间的变化幅度与其平均值相比较较大。因此,点火恢复可能是一个随机事件,文献[15]也说明了类似的现象。当点火恢复时间的重复性测试次数不够多,点火恢复时间和工况之间呈现的相关性有可能是偶然的。然而,从图 6 中也可以看出,当量比对点火恢复时间的平均值有明显的影响(见图 6 的曲线峰值),点火恢复时间的平均值和方差均随当量比的增大而减小。这一趋势在当量比较大的工况下更为明显,尤其是当主燃区当量比超过化学恰当比时,点火恢复时间缩短至 0 ms。

当量比对点火的影响也可能是由恢复时间的

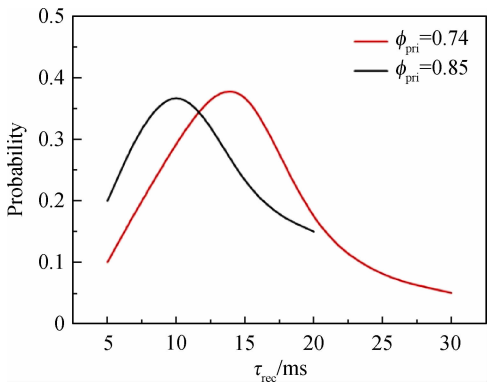


图 6 当量比对点火恢复时间的影响
($p_3=101\text{ kPa}$, $T_3=288\text{ K}$, $E=1.5\text{ J}$)

Fig. 6 Effect of equivalence ratio on the recovery time
($p_3=101\text{ kPa}$, $T_3=288\text{ K}$, $E=1.5\text{ J}$)

变化引起的。以往的点火可视化研究表明,在点火延迟过程中,初始火核可能破裂和熄灭,并形成一些热气核。如果这些热气核的热量被输运至套筒出口附近并引燃新鲜混气,火焰就可以在燃烧室中得以恢复和开始传播。因此,恢复时间相当于热气核膨胀扩张并移动到有回流区并接近于套筒出口位置^[26]的时间。因此,点火恢复时间可能与火焰速度无关,只由气流速度和燃烧室的特征长度决定。事实上,文献[15]的研究表明,火核的移动速度与气流速度非常接近,火核的输运基本由对流主导,和火焰传播关系不大。

点火恢复时间的平均值随工况的变化如图 7 所示。由图 7 可知,点火恢复时间随着停留时间的增加而增加,随着当量比的增加而减少。当当量比超过 1 时,恢复时间逐渐缩短至 0 ms。本研究中,使用燃烧室停留时间而不是主燃区停留时

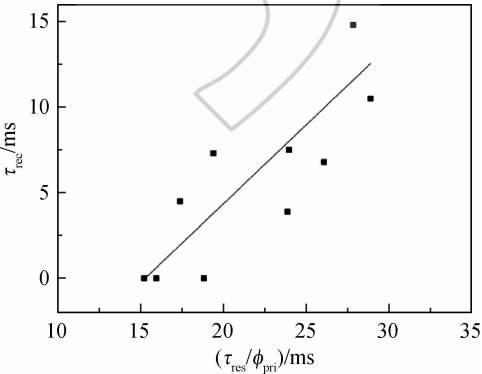


图 7 点火恢复时间与停留时间和当量比的关系
($p_3=101\text{ kPa}$, $T_3=288\text{ K}$, $E=1.5\text{ J}$)

Fig. 7 Correlation of recovery time with the residence time and equivalence ratio
($p_3=101\text{ kPa}$, $T_3=288\text{ K}$, $E=1.5\text{ J}$)

间来关联点火恢复时间,主要是因为燃烧室停留时间易于计算,而主燃区停留时间没有统一的计算标准。这些结果也表明火核和热气核在燃烧室中的输运主要是由对流主导。因此,尺寸较小、停留时间较短的燃烧室在点火延迟期间更容易恢复火焰强度并成功点火。

2.3 平均雾化粒径

雾化质量对点火性能有着重要影响,因为燃料蒸发速率是由液滴大小决定的。本文采用了两种不同流量系数和雾化粒径的燃油喷嘴,进而获得雾化粒径对点火边界的影响规律。图 8 显示了流量系数对离心喷嘴索太尔平均粒径(SMD,记为 D_{32})的影响。从图 8 可以看出,随着流量系数的降低,平均雾化粒径降低,雾化质量得到了明显改善。这是因为当流量系数降低时,需要更高的喷射压力来输送和雾化燃料。

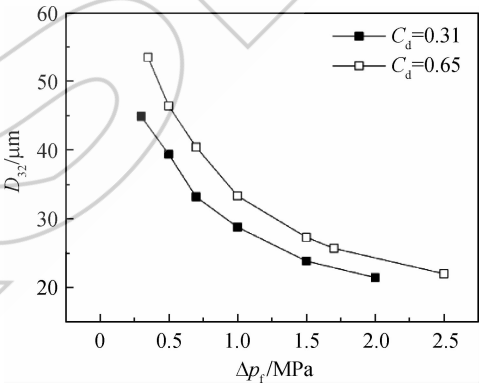


图 8 流量系数对索太尔平均粒径的影响
Fig. 8 Effect of discharge coefficient on Sauter mean diameter

平均粒径对点火边界的影响非常明显,如图 9 所示,其中 $R_{fa,min}$ 表示最小点火油气比,即点火边界。可以看到,当平均粒径下降约 15% 时,最小点火油气比下降了约 20%。因此,减小平均粒径可以显著提高点火性能。另一方面,也暗示了在点火建模工作中必须谨慎地采用与雾化有关的假设。Bykov 等^[27]发现,使用基于 SMD 的均匀喷雾来描述真实的油气混合物,会严重高估点火时间。

从图 9 还可以看到,最小点火油气比随着燃烧室参考速度的增加而降低,Naegeli 等^[12]在试验中也得到了类似的试验结果。这主要是由于燃烧室参考速度的增大可以改善雾化性能。图 8~图 9 可以帮助设计人员确定任意给定的空气流量下停留时间和平均粒径的最佳组合。

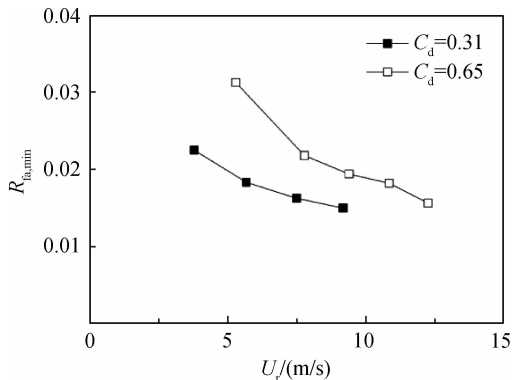


图 9 流量系数对点火边界的影响

($p_3=101\text{ kPa}$, $T_3=288\text{ K}$, $E=1.5\text{ J}$)

Fig. 9 Effect of discharge coefficient on the ignition boundary ($p_3=101\text{ kPa}$, $T_3=288\text{ K}$, $E=1.5\text{ J}$)

2.4 电火花能量

电火花能量对最小点火油气比的影响如图 10 所示。从图中可以看到,当电火花能量从 1.5 J 增大至 3.0 J 时,最小点火油气比几乎保持不变。这说明在本研究的工况范围内,最小点火油气比对电火花能量的变化并不敏感。然而, Danis 等^[28]的试验结果表明,只有当电火花能量增加超过 10 倍时,才能对最小点火油气比产生明显的影响。

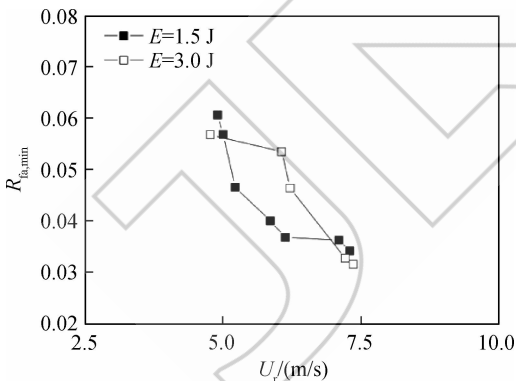


图 10 电火花能量对最小点火油气比的影响

($p_3=48\text{ kPa}$, $T_3=248\text{ K}$, $C_d=0.31$)

Fig. 10 Effect of spark energy on minimum fuel air ratio ($p_3=48\text{ kPa}$, $T_3=248\text{ K}$, $C_d=0.31$)

在目前的研究中,燃烧释放的热量远远大于从点火器释放的火花能量。因此,与燃油燃烧所产生的温升相比,电火花所产生的燃气温升相对较小。因此,将火花能量从 1.5 J 增加到 3.0 J,对最小点火油气比的影响可以忽略不计。这些结果表明,在开展点火性能优化的过程中,应该首先优化雾化性能,其次才应该考虑优化电火花能量。

3 点火模型

在之前的研究中,Ballal 等^[29]和 Mellor^[30]提出了一个基于特征时间的燃烧室点火模型。在该模型中,成功点火的判据是蒸发和燃烧所需的时间必须小于或等于周围的冷气熄灭初始火核所需的时间,即

$$\tau_{ev} + \tau_c \leq \tau_q \quad (4)$$

式中 τ_{ev} 是蒸发时间, τ_q 是淬熄时间, τ_c 是燃烧时间。该判据有一个前提假设,即燃烧室点火成功的前提是电火花引燃油气混合物并形成一个持续燃烧的火核。但试验表明,无论点火成功与否,在点火延迟期间,初始火核都将会熄灭。因此,这一假设在大多数点火工况下都难以成立,必须加以改进。

图 11 为燃烧室点火过程的物理模型。点火过程中,初始火焰可能会熄灭,但高温气核的热扩散过程不会立即终止。只要燃烧室套筒出口附近的新鲜混气能被热气核传递的热量引燃,就能实现火焰的传播和稳定。因此,本文在点火判据中引入点火恢复时间(τ_{rec})来表征点火延迟期间初始火核熄灭和随后恢复的物理过程。点火延迟期间,由于化学反应较弱,燃烧时间可以忽略不计。因此,点火判据可以表示为火焰恢复所需的时间必须小于或等于火焰淬熄时间,即

$$\tau_{rec} \leq \tau_q \quad (5)$$

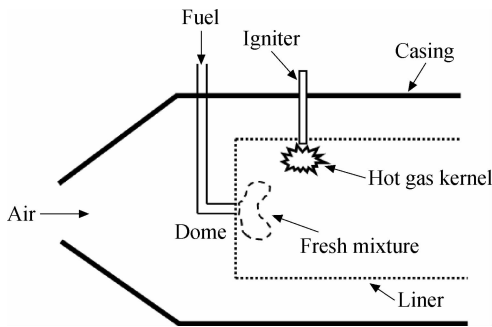


图 11 燃烧室点火过程物理模型

Fig. 11 Physical model of ignition process in combustor

使用式(5)需要知道淬熄时间和点火恢复时间。通过求解一维传热方程,可以得到火核的淬熄时间:

$$\tau_q = \frac{d_k^2}{D Nu} \quad (6)$$

式中 d_k 为火核直径, D 为热扩散系数, Nu 为努塞尔数。火核被认为是一个球体,火核直径为该球体在最小点火能量下被加热到绝热火焰温度所

需的最小直径^[31]。可以表示为

$$d_k = \left(\frac{\rho_f D \tau_{ev}}{\rho_a \phi_{pri}} \right)^{0.5} \quad (7)$$

因此,式(6)可以表示为

$$\tau_q = \frac{\tau_{ev}}{\phi_{pri} Nu} \cdot \frac{\rho_f}{\rho_a} \quad (8)$$

点火恢复时间可以表示为当量比和停留时间的函数,因此有

$$\frac{\tau_{rec}}{\tau_{res}} \propto \left(\frac{1}{\phi_{pri}} \right)^x \quad (9)$$

当点火恢复时间与淬熄时间相等,就可以得到最小点火油气比,因此将式(8)和式(9)代入式(5),最小点火油气比可表示为

$$R_{fa,min} \propto f_{pri} \left(\frac{\tau_{ev}}{\tau_{res}} \right)^x \left(\frac{\rho_f}{\rho_a Nu} \right) \quad (10)$$

其中 f_{pri} 为主燃区的气量分配比,蒸发时间可以通过以下公式计算:

$$\tau_{ev} = \frac{D_0^2}{\lambda_{eff}} \quad (11)$$

式中 D_0 为喷雾的平均直径, λ_{eff} 为蒸发系数。对本研究获得的试验数据进行分析,得出 $x=0.2$ 。因此,式(11)可以表示为

$$R_{fa,min} = C \frac{f_{pri} \tau_{ev}^{0.2}}{\tau_{res}^{0.2}} \cdot \frac{\rho_f}{\rho_a Nu} \quad (12)$$

式中 C 是经验常数,其值取决于燃烧室的几何结构和燃烧组织。式(12)中 $\frac{f_{pri} \tau_{ev}^{0.2}}{\tau_{res}^{0.2}}$ 是喷嘴和燃烧室设计的函数,包括给定条件下的雾化和气动参数;

$\frac{\rho_f}{\rho_a Nu}$ 包含了燃料和空气相关特性参数。

图 12~图 14 显示了式(12)的计算结果与试验结果的对比,其中 $C=0.0023$; $R_{fa,min,m}$ 为最小点火油气比的试验值, $R_{fa,min,p}$ 为最小点火油气比的计算结果。这些预测结果表明,式(12)能够预测工况、雾化粒径及燃烧室结构变化对燃烧室点火边界的影响。

基于特征时间方法,采用蒸发时间和停留时间可以成功关联点火边界数据。在初步设计阶段,利用式(12)可绘制航空发动机起动的点火边界曲线。最大点火高度也可以由式(12)预测,因为在点火过程中,为了防止涡轮叶片的烧蚀,燃烧室的最大油气比必须小于 0.068(即当量比小于 1)。因此,最小点火油气比等于 0.068 的点火高度,即为最大点火高度。然而,本研究没有开展燃烧室几何形状对点火边界的影响,如燃烧室高度

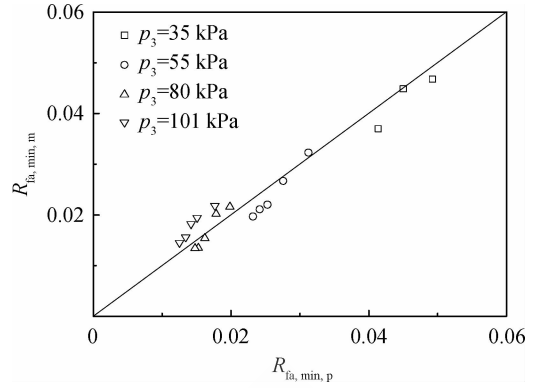


图 12 最小点火油气比预测值与试验值对比
($p_3=35\sim101$ kPa, $T_3=288$ K, $E=1.5$ J, $C_d=0.31$)
Fig. 12 Comparison of measured and predicted values of minimum fuel air ratio ($p_3=35\sim101$ kPa, $T_3=288$ K, $E=1.5$ J, $C_d=0.31$)

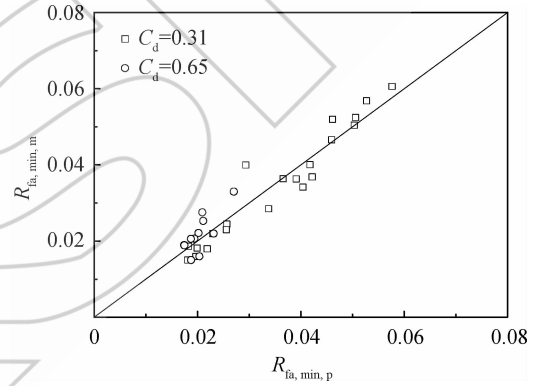


图 13 最小点火油气比预测值与试验值对比
($p_3=48\sim101$ kPa, $T_3=248\sim310$ K, $E=1.5$ J)
Fig. 13 Comparison of measured and predicted values of minimum fuel air ratio ($p_3=48\sim101$ kPa, $T_3=248\sim310$ K, $E=1.5$ J)

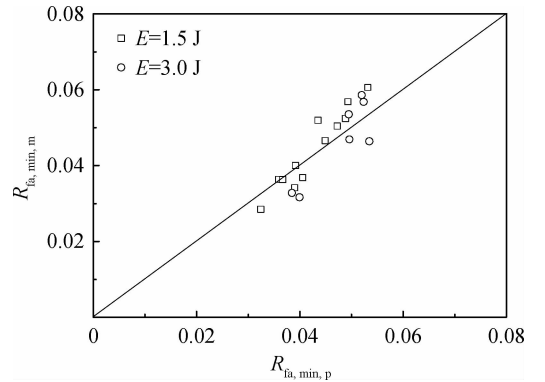


图 14 最小点火油气比预测值与试验值对比
($p_3=52\sim101$ kPa, $T_3=241\sim310$ K, $C_d=0.31$)
Fig. 14 Comparison of measured and predicted values of minimum fuel air ratio ($p_3=52\sim101$ kPa, $T_3=241\sim310$ K, $C_d=0.31$)

和旋流器半径。因此,对于不同拓扑结构的燃烧室,需要对常数 C 进行提前标定进而预测点火边界。在未标定常数 C 的情况下,式(12)依然可以用于对多个燃烧室方案的点火性能进行优化筛选。

4 结 论

本研究开展了燃烧室点火过程中的关键影响因素研究,并建立了点火边界半经验预测模型,可以得出如下结论:

1) 点火恢复时间随当量比的增大而减小,随停留时间的增大而增大。试验结果表明点火过程中的火焰恢复主要受对流和热扩散所影响,而不取决于火焰传播。

2) 降低雾化粒径和增加燃烧室参考速度都可以降低最小点火油气比,电火花能量对燃烧室点火性能的影响较小,雾化粒径和电火花释放位置可能是影响点火性能的关键因素。

3) 本研究建立了一种改进的半经验模型,可在燃烧室方案论证和方案设计阶段预测用于预测燃烧室点火边界。通过试验验证表明最小点火油气比的试验值与式(12)的预测值符合性较好。通过提供燃烧室的气动参数和喷雾数据,式(12)不仅可以用来预估燃烧室的点火边界,还可以用来优化为满足高空再点火所需要的燃烧室停留时间和雾化性能。

参考文献:

- [1] BOILEAU M, STAFFELBACH G, CUENOT B, et al. LES of an ignition sequence in a gas turbine engine[J]. *Combustion and Flame*, 2008, 154(1/2): 2-22.
- [2] CHOI S, LEE D, PARK J. Ignition and combustion characteristics of the gas turbine slinger combustor[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2008, 22(3): 538-544.
- [3] LEVY Y, SHERBAUM V, NADVANY V, et al. Modified vaporizer for improved ignition in small jet engine[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22(4): 828-834.
- [4] GOLDWASSER S R, SAAD M A. Role of pressure in spontaneous ignition[J]. *AIAA Journal*, 1969, 7(8): 1574-1581.
- [5] BALLAL D R, LEFEBVRE A H. Ignition and flame quenching in flowing gaseous mixtures[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1977, 357(1689): 163-181.
- [6] BALLAL R D. Further studies on the ignition and flame quenching of quiescent dust clouds[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 1983, 385(1788): 1-19.
- [7] LEFEBVRE A H. Fuel effects on gas turbine combustion: ignition, stability, and combustion efficiency[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1985, 107(1): 24-37.
- [8] BALLAL D R, LEFEBVRE A H. The influence of spark discharge characteristics on minimum ignition energy in flowing gases[J]. *Combustion and Flame*, 1975, 24: 99-108.
- [9] PETERS J E, MELLOR A M. A spark ignition model for liquid fuel sprays applied to gas turbine engines[J]. *Journal of Energy*, 1982, 6(4): 272-274.
- [10] PETERS J E, MELLOR A M. Liquid fuel spray ignition predictions for JP-10[J]. *Journal of Energy*, 1983, 7(1): 95-96.
- [11] PETERS J E, MELLOR A M. Characteristic time ignition model extended to an annular gas turbine combustor[J]. *Journal of Energy*, 1982, 6(6): 439-441.
- [12] NAEGELI D W, DODGE L G. Ignition study in a gas turbine combustor[J]. *Combustion Science and Technology*, 1991, 80(4/5/6): 165-184.
- [13] AGGARWAL, SURESH K. Single droplet ignition: theoretical analyses and experimental findings[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2014, 45(24): 79-107.
- [14] AHMED S F, BALACHANDRAN R, MARCHIONE T, et al. Spark ignition of turbulent nonpremixed bluff-body flames[J]. *Combustion and Flame*, 2007, 151(1/2): 366-385.
- [15] READ R W, ROGERSON J W, HOCHGREB S. Flame imaging of gas-turbine relight[J]. *AIAA Journal*, 2010, 48(9): 1916-1927.
- [16] LACAZE G, RICHARDSON E, POINSOT T. Large eddy simulation of spark ignition in a turbulent methane jet[J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(10): 1993-2009.
- [17] JONES W P, PRASAD V N. LES-PDF simulation of a spark ignited turbulent methane jet[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(1): 1355-1363.
- [18] TRIANTAFYLIDIS A, MASTORAKOS E, EGELS R L G M. Large eddy simulations of forced ignition of a non-premixed bluff-body methane flame with conditional moment closure[J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(12): 2328-2345.
- [19] SUBRAMANIAN V, DOMINGO P, VERVISCH L. Large eddy simulation of forced ignition of an annular bluff-body burner[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(3): 579-601.
- [20] 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.
- [21] MOIN P, APTE S V. Large-eddy simulation of realistic gas turbine combustors[J]. *AIAA Journal*, 2006, 44(4): 698-708.
- [22] EYSSARTIER A, CUENOT B, GICQUEL L Y M, et al.

Using LES to predict ignition sequences and ignition probability of turbulent two-phase flames[J]. Combustion and Flame, 2013, 160(7): 1191-1207.

[23] ESCLAPEZ L, RIBER E, CUENOT B. Ignition probability of a partially premixed burner using LES[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(3): 3133-3141.

[24] KONG Linghan, REN Zhuyin, HOU Lingyun. Modeling turbulent transport effects on kernel formation and flame propagation in an ignition process[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(4): 895-905.

[25] NEOPHYTOU A, RICHARDSON E S, MASTORAKOS E. Spark ignition of turbulent recirculating non-premixed gas and spray flames; a model for predicting ignition probability[J]. Combustion and Flame, 2012, 159(4): 1503-1522.

[26] STÖHR M, BOXX I, CARTER C, et al. Dynamics of lean blowout of a swirl-stabilized flame in a gas turbine model combustor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2): 2953-2960.

[27] BYKOV V, GOLDFARB I, GOL'DSHTEIN V, et al. Auto-ignition of a polydisperse fuel spray[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 2257-2264.

[28] DANIS A M, NAMER I, CERNANSKY N P. Droplet size and equivalence ratio effects on spark ignition of monodisperse N-heptane and methanol sprays[J]. Combustion and Flame, 1988, 74(3): 285-294.

[29] BALLAL D R, LEFEBVRE A H. A general model of spark ignition for gaseous and liquid fuel-air mixtures[J]. Symposium (International) on Combustion, 1981, 18(1): 1737-1746.

[30] MELLOR A M. Semi-empirical correlations for gas turbine emissions, ignition, and flame stabilization[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1980, 6(4): 347-358.

[31] BALLAL D R, LEFEBVRE A H. Ignition and flame quenching of quiescent fuel mists[J]. Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical and Physical Sciences, 1978, 364(1717): 277-294.

(编辑:李岩梅、陈 越)