

文章编号: 1000-8055(2022)10-2286-09

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220233

旋流器结构对点火性能影响的大涡模拟

刘云峰^{1,2,3}, 黄 勇^{1,2,3}, 王惜伟^{1,2,3}, 王洪妍^{1,2,3}, 王东辉^{1,2,3}

- (1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;
2. 北京航空航天大学 航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191;
3. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘 要: 为研究旋流器结构对航空发动机燃烧室点火性能的影响, 使用大涡模拟方法结合 wall-adapting local eddy-viscosity(WALE)亚格子模型、动态增厚火焰模型, 并设置单个脉冲火花, 模拟了轴径向和双轴向旋流器燃烧室的点火过程。结果表明: 相同结构和工况下, 点火位置的流场因湍流脉动随时间变化, 因而点火时刻会影响点火模拟结果。对于实验中能成功点火的结构和工况, 为避免模拟时使用单脉冲火花影响点火结果, 应选择在速度方向指向回流区, 速度幅值小于平均值的时刻点火。对比轴径向和双轴向旋流器燃烧室的动态流场演变过程, 发现双轴向旋流器燃烧室的火花正对旋转射流, 点火位置瞬时速度指向回流区的概率更低, 火焰更易向下游移动而非进入回流区。因此其点火性能劣于轴径向旋流器燃烧室。

关 键 词: 点火性能; 贫油点火边界; 燃烧室; 大涡模拟; 旋流器; 油气比; 火焰传播

中图分类号: V231.2⁺⁴

文献标志码: A

Large eddy simulation on influence of swirler structure on ignition performance

LIU Yunfeng^{1,2,3}, HUANG Yong^{1,2,3}, WANG Xiwei^{1,2,3},
WANG Hongyan^{1,2,3}, WANG Donghui^{1,2,3}

- (1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics, Beihang University, Beijing 100191, China;
3. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: To investigate the influences of swirler structures on the ignition performance of aero-engine combustors, the large eddy simulation combined with the wall-adapting local eddy-viscosity (WALE) sub-grid model, the dynamic thickened flame model, and a single spark was used to simulate the ignition processes of an axial-radial swirler combustor and a dual-axial swirler combustor. Results indicated that the flow fields at the ignition position changed over time due to the turbulent fluctuation under the same structures and conditions, so the ignition time affected the simulation result. To avoid the use of a single spark in simulations against the ignition results on the condition that the combustor can be ignited successfully in experiments, the spark should be started when the instantaneous velocity pointed to the recirculation zone and the velocity magnitude was smaller than the average value. Comparing the dynamic evolution process of the flow field of the axial-radial swirler combustor with the dual-radial

收稿日期: 2022-04-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(1234AB5678); 国家自然科学基金(12345678); 国家科技重大专项(2017-III-0007-0032)

作者简介: 刘云峰(1996—), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事航空发动机点火熄火研究。

通信作者: 黄勇(1964—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事燃烧室点火熄火机理及预测、喷雾机理与设计。E-mail: yhuang@buaa.edu.cn

引用格式: 刘云峰, 黄勇, 王惜伟, 等. 旋流器结构对点火性能影响的大涡模拟[J]. 航空动力学报, 2022, 37(10): 2286-2294. LIU Yunfeng, HUANG Yong, WANG Xiwei, et al. Large eddy simulation on influence of swirler structure on ignition performance[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(10): 2286-2294.

swirler combustor, it was found that the ignition position of the dual-axial swirler combustor was directly opposite to the swirler jet, and the probability of the velocity pointing towards the recirculation zone was lower. The flame was prone to propagate downstream rather than to the recirculation zone. Therefore, the ignition performance of the double-axial swirler combustor was worse than the axial-radial swirler combustor.

Keywords: ignition performance; lean ignition limit; combustor; large eddy simulation; swirler; fuel air ratio; flame propagation

航空发动机要求在高空环境下一旦发生熄火, 必须能够快速可靠地再点火。高空点火性能一定程度上决定了飞机的飞行包线。但日益严苛的排放标准使发动机设计更加偏向贫油, 高空再点火变得愈加困难。

针对强湍流条件下的点火过程, Mastorakos^[1]、李明磊等^[2]进行了详细的综述。航空发动机单头部燃烧室的点火过程一般可以分为 3 个阶段: ①初始火焰核的形成; ②火焰的传播与增长; ③建立稳定火焰并点燃整个燃烧室。现今航空发动机燃烧室点火以电火花为主。点火器释放能量的持续时间在几十微秒至数百微秒之间^[1]。传递给空气的能量约为点火器贮存电能的 5%~35%^[3]。如果能量释放结束后可以建立足够大的高温区使反应放热大于能量损失, 则成功建立初始火焰核。初始火焰核产生后, 会被气流输运。Karlovitz (Ka) 数代表火焰特征时间与流动特征时间的比值。Esclapez 等认为在两相燃烧中, 如果 Ka 大于 4.5, 则火焰的拉伸率过高, 火焰将无法传播^[4]。Read 等使用高速相机记录火焰传播路径, 发现火焰传播方向是点火成败的关键因素^[5], 火焰必须进入回流区才可能点火成功。

关于旋流器结构对点火性能的影响, 很多学者开展了实验研究。刘桂桂、代威、康尧、罗国良、莫姐等^[6-10]分别探究了旋流器的一级旋流数、二级旋流数、套筒混合段长度、形状以及旋流器级数对高空点火性能的影响。但受限于测试条件, 难以同时测量点火时的火焰传播过程和燃烧室内的流场, 因而无法分析瞬时流场对点火性能的影响。

数值模拟可以很好地解决该问题。Boileau 等首次使用大涡模拟方法计算了真实全环燃烧室的点火过程, 证明了大涡模拟凭借直接求解大尺度湍流运动而特别适合计算点火过程^[11]。夏一帆等^[12-13]的研究同样表明大涡模拟方法对火焰传播过程的计算比雷诺平均方法更加准确。

值得注意的是, 真实燃烧室点火频率通常在 3 Hz 到 15 Hz 之间, 可以持续十数秒以上, 且连续

火花会显著提高点火成功的概率^[14]。但受限于计算资源, 学者们使用模拟方法研究火花能量^[15]、大小^[16]、点火位置^[17]或火焰筒压降^[18]对点火过程的影响时, 通常只使用单脉冲火花计算数十毫秒内的火焰传播过程, 因而无法避免因湍流造成的初始流场差异对火焰传播过程产生影响, 但对该方面问题的研究相对较少。此外使用大涡模拟研究点火过程时, 多集中于燃烧室入口条件和火花的参数, 关于旋流器结构对点火过程影响的分析同样不多。

本文使用大涡模拟的方法计算了轴径向旋流器和双轴向旋流器燃烧室点火时的火焰传播过程。探究了由点火时刻不同导致的初始流场差异对点火过程的影响。与实验比较发现大涡模拟能够复现点火过程中火焰核的产生、分裂、传播及壮大过程, 说明了点火时刻的流场对点火结果的影响。通过对点火位置漩涡分布及瞬时速度的比较, 说明了轴径向旋流器和双轴向旋流器燃烧室点火性能不同的原因。

1 数值方法

1.1 几何模型及网格划分

几何模型为单头部矩形燃烧室, 省去了燃烧室的喷油杆及电嘴。本文采用 FLUENT Meshing 绘制网格。网格采用边界层-多面体-六面体的策略。最小网格为 0.1375 mm, 最大网格为 1.1 mm。轴径向旋流器燃烧室网格总量为 1 031 万, 双轴向旋流器燃烧室网格为 1 038 万, 如图 1 与图 2。计算域的原点设置在旋流器套筒出口中心处, x 轴指向下游, y 轴指向点火器方向。

图 3 为 7 套不同网格数量下使用 Reynolds average Navier-Stokes (RANS) 方法计算得到的点火位置速度大小。当网格数量为 338 万时认为达到网格无关性要求。

对于大涡模拟方法, 使用湍流积分尺度与网格尺寸之比判断网格是否可求解 80% 的湍动能。如式(1)。式中 R 代表湍流积分尺度与网格尺寸

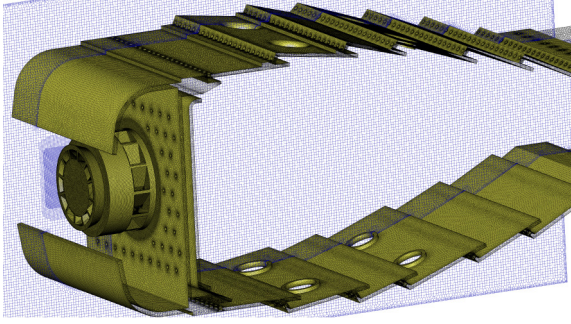


图 1 轴向径向旋流器燃烧室网格

Fig. 1 Mesh of axial-radial swirler combustor

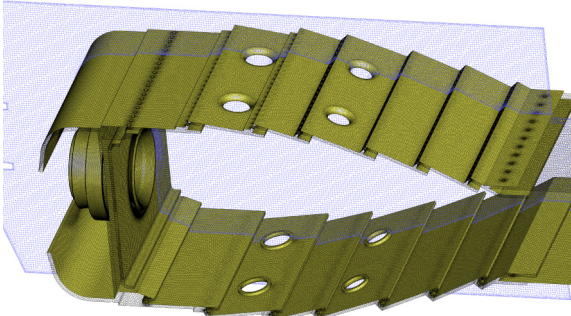


图 2 双轴向旋流器燃烧室网格

Fig. 2 Mesh of dual-axial swirler combustor

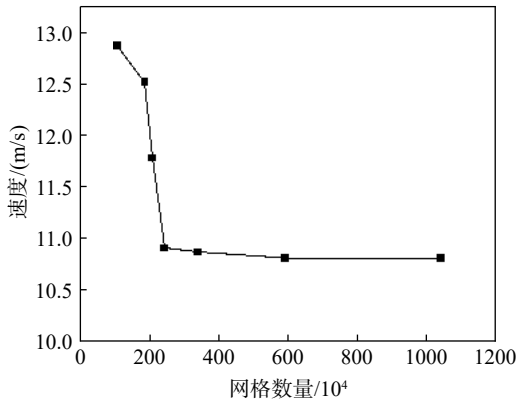


图 3 网格无关性验证

Fig. 3 Grid independence verification

之比; L_0 为湍流积分尺度; L_c 为网格尺寸; k 代表湍动能; ε 代表湍流耗散率, 通过雷诺平均方法计算获取; V_c 代表网格体积。计算域内除壁面附近外 R 均大于 10。

综上所述计算网格满足雷诺平均方法和大涡模拟方法的要求。

$$R = \frac{L_0}{L_c} = \frac{k^{\frac{3}{2}}/\varepsilon}{\sqrt{V_c}} \quad (1)$$

1.2 边界条件及计算方法

燃烧室采用速度入口。平均速度、湍动能和湍流耗散率通过上游实验件的模拟预先获得。平

均速度对应的空气流量为 0.12 kg/s, 温度为 288 K。通过合成涡的方法生成入口的脉动速度。出口为压力出口, 大小为 10^5 Pa。壁面使用绝热无滑移条件, 液滴与壁面的撞击过程使用 FLUENT 中的壁面液膜方法计算。燃油注射位置在文氏管下游, 避免离心喷嘴和文氏管壁面液膜复杂的雾化过程。液滴的索太尔平均直径分布采用文献 [19] 中的方法计算。

湍流采用大涡模拟方法, 亚格子模型为 wall-adapting local eddy-viscosity (WALE) 模型, 其亚网格黏度使用式 (2) 计算。

$$\mu_t = \rho (C_w \Delta_x)^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}} \quad (2)$$

式中

$$S_{ij}^d = \frac{1}{2} (\bar{g}_{ij}^2 + \bar{g}_{ji}^2) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \bar{g}_{kk}^2 \quad (3)$$

其中 μ_t 代表亚网格黏度; ρ 代表密度; 模型常数 $C_w=0.5$; Δ_x 为滤波尺寸; $\bar{S}_{ij}$ 是可解尺度应变率张量分量; $\bar{g}_{ij}$ 是速度梯度张量分量; δ_{ij} 是克罗内克符号。与 Smagorin 模型相比, WALE 模型提高了近壁湍流处的求解精度, 而且在层流剪切流动的情况下亚网格黏度可以恢复为零 [12]。

离散项使用拉格朗日随机轨道模型。燃烧模型采用动态增厚火焰模型 [20]。本文中增厚因子为 8。反应机理使用文献 [21] 中所述机理。在壁面附近采用 Werner 等 [22] 针对大涡模拟提出的壁面函数。使用 Semi-implicit-method for pressure linked equations (SIMPLE) 方法处理速度与压力耦合, 时间采用 bounded second-order implicit 格式, 为降低收敛后流场的振荡, 压力采用 standard 方法, 其余物理量使用 2 阶迎风格式离散。

点火时火花放电的过程采用在空间和时间上呈高斯分布的能量源项 [23], 如式 (4)。通过 FLUENT 用户自定义函数实现。

$$\dot{Q}(x, y, z, t) = \frac{\varepsilon_i}{4\pi^2 \sigma_s^3 \sigma_t} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{r}{\sigma_s} \right)^2} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-t_0}{\sigma_t} \right)^2} \quad (4)$$

式中 $\dot{Q}(x, y, z, t)$ 为 t 时刻在 (x, y, z) 位置上的热源强度; ε_i 代表热源能量, 根据文献 [3] 中所述, 本文取点火器贮能 6 J 的 33%, 即 2 J; σ_t 代表特征时间, 取 32.95 μ s, 此时火花持续时间为 200 μ s, 与高速相机所拍摄的结果一致; σ_s 代表特征尺寸, 取 51 mm, 此时能量释放后 900 K 等温面对应的半径与高速相机拍摄的火花大小相同; r 为距能量释放中心距离; t_0 为点火中间时刻。能量释放中

心位于旋流器出口下游 24 mm, 中心轴线正上方 35 mm 处, 处于燃烧室中心截面上。在能量释放的过程中, 时间步长为 10^{-6} s, 其余求解过程的时间步长为 10^{-5} s。

表 1 为本文模拟的算例信息。本文先对轴径向、双轴向旋流器燃烧室采用雷诺平均方法进行模拟。待计算收敛后生成初始脉动, 后改为大涡模拟的方法, 同时开始喷入燃油。与文献 [24] 相比, 模拟可以重现点火过程中火核的产生、分裂、传播进入回流区、火焰壮大和稳定燃烧的过程, 证明了模拟方法的可靠性。

表 1 算例信息

Table 1 Information of calculation examples

算例	旋流器结构	燃油流量/(g/s)	点火时刻/ms	结果
1	轴径向	2.4	50.0	失败
2	轴径向	2.4	97.5	成功
3	双轴向	2.4	52.5	失败
4	双轴向	4.0	50.0	成功

2 结果和讨论

2.1 轴径向旋流器燃烧室点火

2.1.1 轴径向旋流器燃烧室冷态流场分析

对轴径向旋流器燃烧室燃油流量为 2.4 g/s 的点火过程进行模拟。从燃油喷射开始, 计算 100 ms。分别在第 50 ms 和 97.5 ms 时尝试点火。

图 4 为使用 RANS 方法计算得到的轴径向旋流器燃烧室平均流场, 图中 V 表示流场速度。从旋流器出来的旋转射流紧贴挡溅盘, 流向火焰筒壁面后转向燃烧室下游方向。由于主燃孔关于中心平面对称布置, 所以图中未出现主燃孔射流。

图 5 为使用大涡模拟方法求解 0~100 ms 内点火中心位置的径向速度, 蓝色方块和圆圈分别代表算例 1 和算例 2 的点火时刻。由图可知, 点

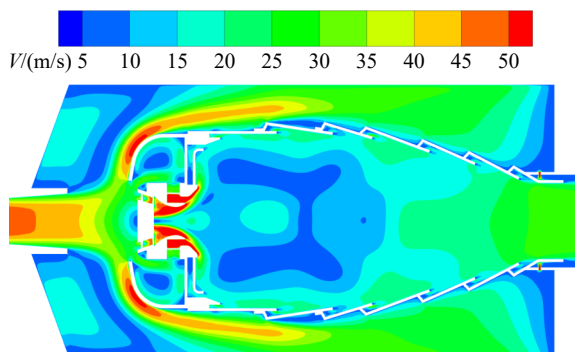


图 4 轴径向旋流器燃烧室平均流场

Fig. 4 Mean flow field of the axial-radial swirler combustor

火位置的径向速度在 30 m/s 和 -10 m/s 之间波动, 期间有 27.5 ms 的时间点火位置的径向速度小于零, 说明点火位置速度指向回流区的概率为 27.5%。

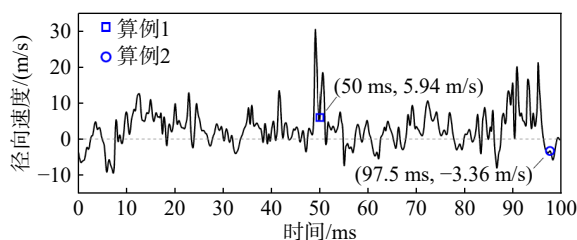


图 5 点火位置径向速度变化

Fig. 5 Variation of the radial velocity at ignition position

图 6 与图 7 分别为 50 ms 和 97.5 ms 时燃烧室中心截面的二维流线和速度大小。图中红圈为点火位置。图 6 与图 7 说明由湍流使点火位置的流场发生变化, 点火器附近存在不同大小的旋涡, 这些旋涡是由旋转射流剪切形成, 尺寸与火花相同量级, 随时间不断运动。当点火时刻为 50 ms 时, 点火位置没有旋涡出现, 速度大小在 10~20 m/s

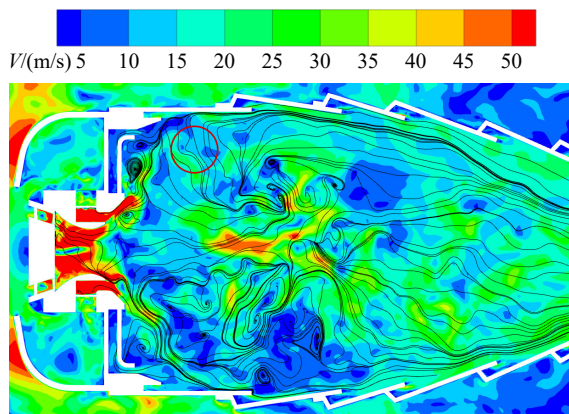


图 6 算例 1 点火时刻速度大小

Fig. 6 Velocity magnitude at the ignition moment of case 1

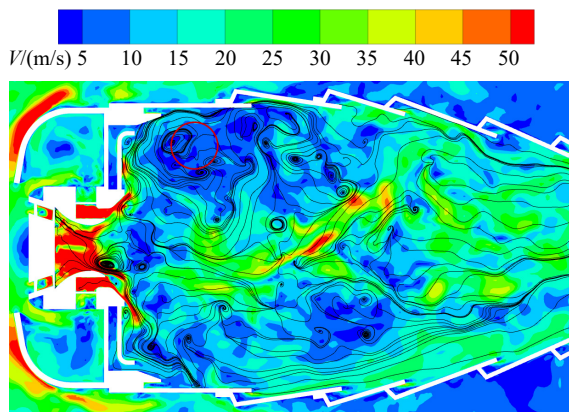


图 7 算例 2 点火时刻速度大小

Fig. 7 Velocity magnitude at the ignition moment of case 2

范围内。当点火时刻为 97.5 ms 时,旋涡经过点火位置时,使点火中心的瞬时径向速度为负,速度大小在 0~10 m/s 范围内,明显低于 50 ms 时刻。

2.1.2 轴径向旋流器燃烧室点火过程

图 8 是算例 1 模拟得到的火焰发展过程,图中黑色实线代表流线,箭头为速度方向, T 为温度。点火器释放能量持续 0.2 ms 后,形成了接近球形的初始火焰核。点火 1 ms 后,火焰向下游移动,被拉伸成椭球形。在 2 ms 后,火焰继续向下游移动且体积迅速缩小。在 3 ms 时气体温度降低,无法维持燃烧,火焰最终熄灭。通过流线可知,从火焰核产生到最终熄灭的整个过程中,火焰所在位置的速度均指向下游,没有旋涡出现,火焰会在气流的输运下向下游传播,因而火焰没有机会进入回流区。火焰被气流输运到下游的同时体积迅速减小,说明反应放热小于热量损失,火焰最终被周围空气冷却而熄灭。

图 9 为轴径向旋流器燃烧室点火成功时,即算例 2 模拟得到的温度及流线变化。算例 2 和算例 1 油气比相同,只是点火时刻不同。经过 0.2 ms 火花放热结束,算例 2 点火位置形成了和算例 1

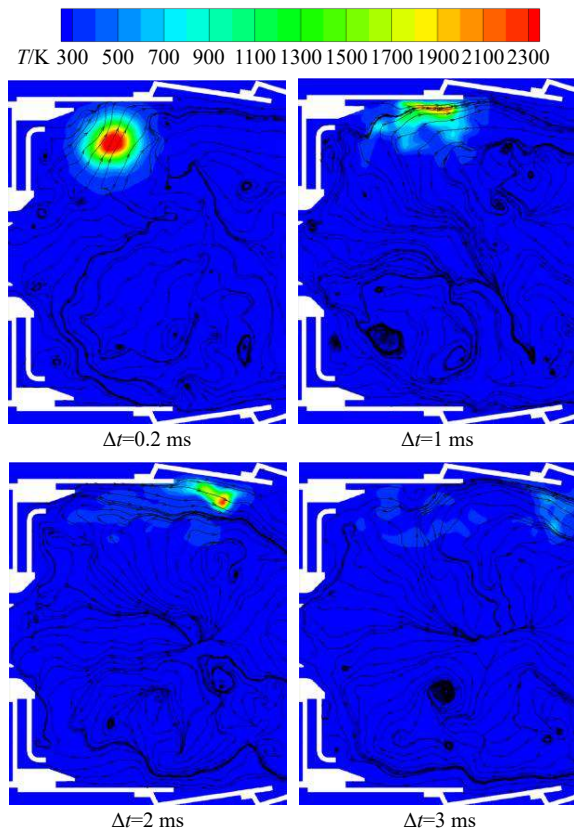


图 8 轴径向旋流器燃烧室 50 ms 时的点火过程

Fig. 8 Ignition process in axial-radial swirler combustor at 50 ms

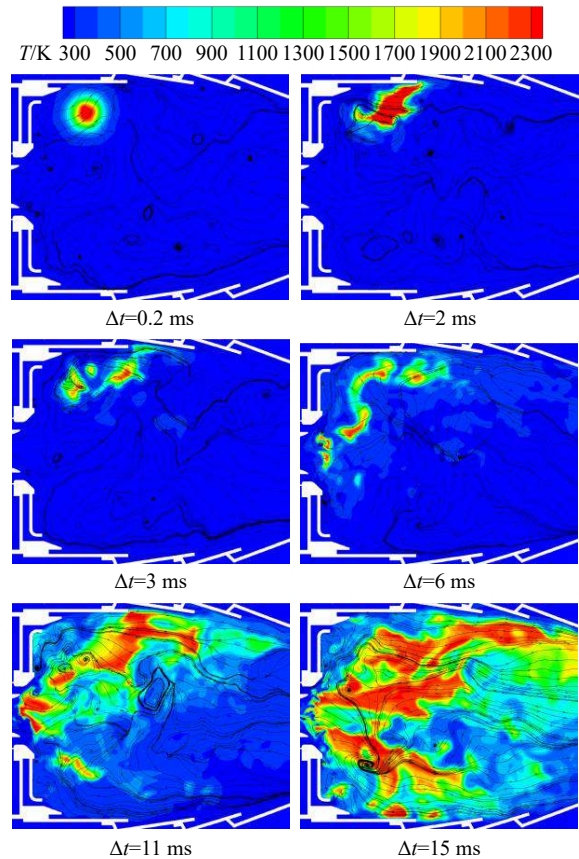


图 9 轴径向旋流器燃烧室在 97.5 ms 时的点火过程

Fig. 9 Ignition process in axial-radial swirler combustor at 97.5 ms

相似的球形火焰核。在点火 2 ms 后,点火位置出现了贯穿整个火焰的旋涡。在旋涡的作用下,火焰出现了分裂现象,如点火后 3 ms 图像所示,这表明点火时流场中的旋涡是火焰分裂的原因。算例 1 中的火焰在 3 ms 时已经熄灭。在点火 3 ms 后,火焰进入了传播阶段。在点火后 6 ms 时,靠近上游的火焰进入回流区,向旋流器附近传播。而另一部分火焰向下游发展,表明瞬时速度决定火焰的传播方向,此时整个火焰呈长条状。在 11 ms 时,火焰壮大,燃烧室上半部分充满高温气体,同时火焰开始向燃烧室下半部分传播。在点火后 15 ms 时,下半部分燃烧室也充满了高温气体。此时整个燃烧室被点燃。结果表明,数值模拟能够复现点火时火焰的分裂、传播及壮大过程。与文献 [24] 中的实验结果一致,证明了数值方法的正确性。

值得指出的是,尽管算例 1 和算例 2 的油气比相同,但由于点火时刻不同导致了最终结果不同,表明单脉冲火花的点火过程具有随机性。和算例 1 相比,算例 2 点火时点火中心速度指向回

流区, 点火位置附近出现了旋涡, 高温火焰并没有立刻被气流输运到下游, 而是在点火位置停留了 3 ms 左右, 在旋涡的作用下分裂成两个火焰。初始火焰核在点火位置停留较长时间有利于燃油蒸发, 促进燃烧反应进行。分裂的两道火焰之一进入回流区, 被输运到旋流器附近, 点燃旋流器附近高浓度的燃油, 火焰逐渐壮大, 最终成功点燃了燃烧室。可见即使边界条件和油气比相同, 点火结果也可能不同。点火初期出现旋涡, 速度指向回流区将有利于点火。

2.2 双轴向旋流器燃烧室点火

2.2.1 双轴向旋流器燃烧室冷态流场的比较

图 10 和图 11 说明了两种旋流器燃烧室的流场的差异。图 10 是使用 RANS 方法计算的双轴向旋流器燃烧室的平均流场。图 11 是 $x=24$ mm 时, 两种结构轴向速度大小随径向位置的变化, 图中虚线代表点火中心位置, 阴影区域代表火花占据的径向位置。图 10 表明, 双轴向旋流器的旋转射流正对点火位置, 与图 4 所示的轴径向旋流器燃烧室有明显区别。从图 11 可以看出, 因为双轴向旋流器燃烧室的点火位置正对旋转射流, 所以其速度偏高。同时旋转射流压缩回流区, 双轴向旋流器燃烧室上游附近的回流区更小。

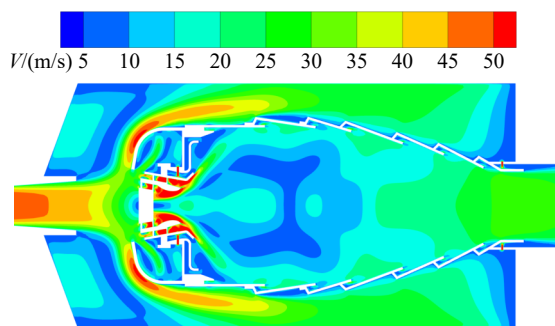


图 10 双轴向旋流器燃烧室平均流场

Fig. 10 Mean flow field of the dual-radial swirler combustor

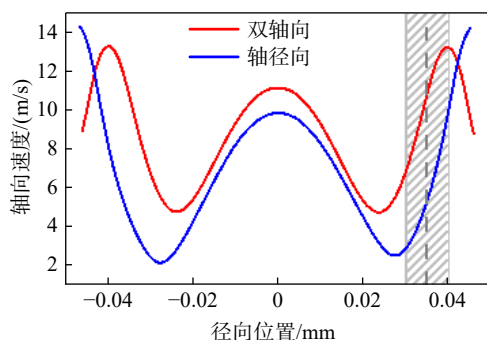


图 11 $x=24$ mm 时径向位置的速度分布

Fig. 11 Radial distribution of axial velocity at $x=24$ mm

图 12 是大涡模拟方法计算两种旋流器燃烧室在 20~100 ms 之间中间平面的旋涡位置, 图中 x 为轴向坐标, y 为径向坐标。黑色圆圈代表点火位置。图 12 表明, 轴径向旋流器燃烧室点火位置有更高概率出现旋涡。双轴向旋流器燃烧室点火位置出现旋涡的概率更低, 旋涡多出现在点火位置下侧更靠近中心轴线附近, 这将导致初始火焰核难以通过旋涡进入回流区。这两种结构旋涡分布差异是由旋转射流不同导致的。

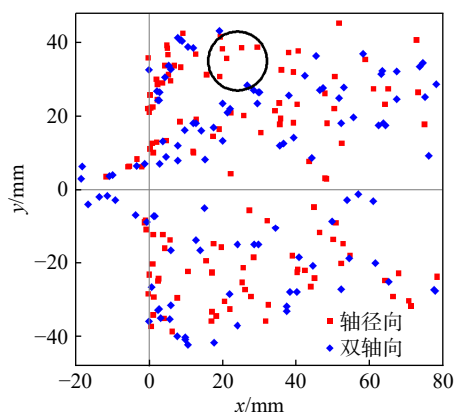


图 12 两种结构中间截面旋涡中心的分布

Fig. 12 Eddy distribution of two structures on the middle section

图 13 是在 0~100 ms 内的双轴向旋流器燃烧室点火中心位置的径向速度变化。期间共有 15.35 ms 径向速度小于 0 m/s。径向速度为负的概率为 15.35%, 小于轴径向旋流器燃烧室的 27.5%, 说明双轴向旋流器点火位置瞬时速度指向回流区的概率更低, 火焰将更难向回流区内传播。

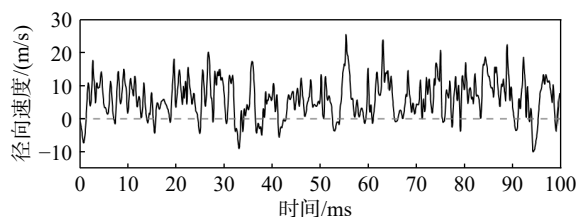


图 13 双轴向旋流器燃烧室点火位置径向速度变化

Fig. 13 Variation of the radial velocity at ignition position of dual-axial swirler combustor

2.2.2 双轴向旋流器燃烧室点火过程

图 14 是算例 3 点火前的中心截面上流线与速度大小。从图中可知, 此时点火位置处于旋转射流上。旋涡出现在旋转射流与中心回流区之间, 且旋涡位置的速度低于周围气流。

图 15 是算例 3 点火失败时的火焰传播过程。

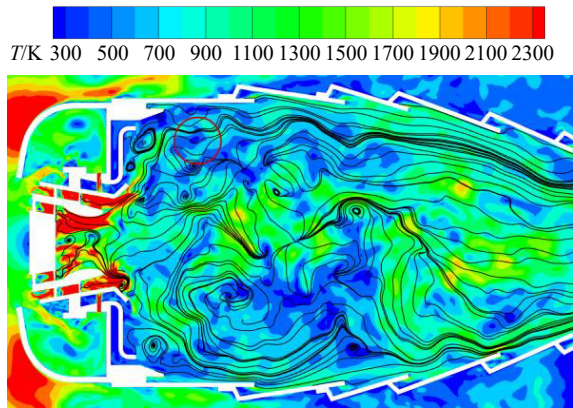


图 14 算例 3 点火前流场

Fig. 14 Flow field of case 3 before ignition

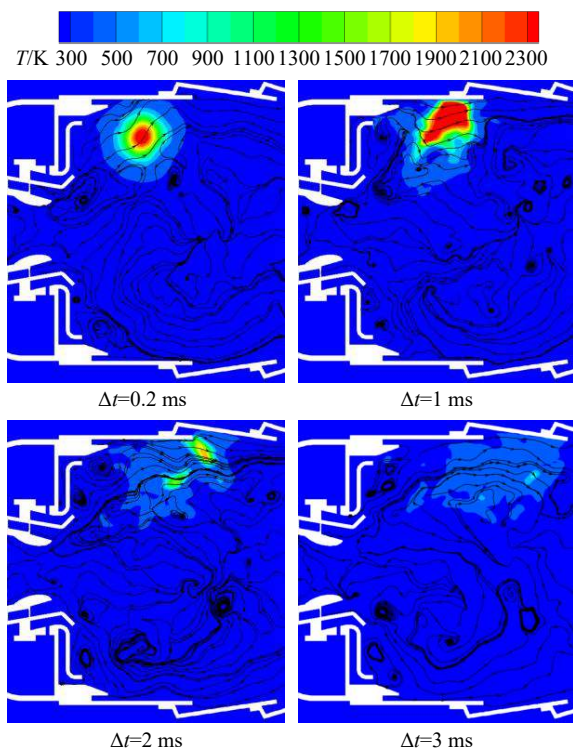


图 15 双轴向旋流器燃烧室燃油流量 2.4 g/s 时点火过程

Fig. 15 Ignition process in dual-radial swirler combustor when fuel mass flow rate is 2.4 g/s

燃油流量为 2.4 g/s。能量释放持续 0.2 ms 后,与算例 1 和算例 2 一样,算例 3 形成了接近球形的初始火焰核。1 ms 时,在流场的作用下火焰向燃烧室壁面和下游移动。左下方旋涡由于距火焰较远,温度在 500 K 以下,不足以燃烧。点火 2 ms 后,在周围冷空气的作用下,高温区体积下降,由于扩散作用,300~500 K 的气体体积增加。在 3 ms 时,中心截面最高温度下降到 900 K 之下,不足以维持燃烧,点火失败。整个点火过程中,由于旋涡距离高温气体较远,火焰无法通过旋涡进入回流区向旋流器传播,最终在冷空气的作用下

熄灭。

燃油流量为 2.4 g/s 时,不同时刻皆无法成功点火,同时点火实验也表明燃油流量为 2.4 g/s 时低于贫油点火边界,因而将数值模拟的燃油流量提高到 4 g/s,即算例 4。

图 16 是轴径向旋流器燃烧室在燃油流量为 4 g/s 时点火成功的温度与流线图。点火持续 0.2 ms 后与算例 1、算例 2 和算例 3 一样形成了球形初始火焰核。在 0.2 ms 到 2.5 ms 的过程中,火焰向下游移动,这和算例 2 成功点火时火焰的运动轨迹有明显差异,却和算例 1 和算例 3 点火失败时火焰运动轨迹相似。其原因在于以上 3 个算例火焰位置的速度皆指向下游。与点火失败时不同的是,由于此时燃油流量为 4 g/s,明显大于前者的 2.4 g/s,燃烧放热增加,火焰没有被周围的冷空气熄灭,反而是逐渐壮大。2.5 ms 到 6.5 ms 内火焰不断增长,但却一直向下游移动,部分高温气体在向下游移动的同时也向中心轴线附近传播。6.5 ms 到 15 ms 间,大面积的高温气体在接近出口时被周围冷空气冷却,流出燃烧室。但 10 ms 时,回流区中心处有一小片高温气体,是火

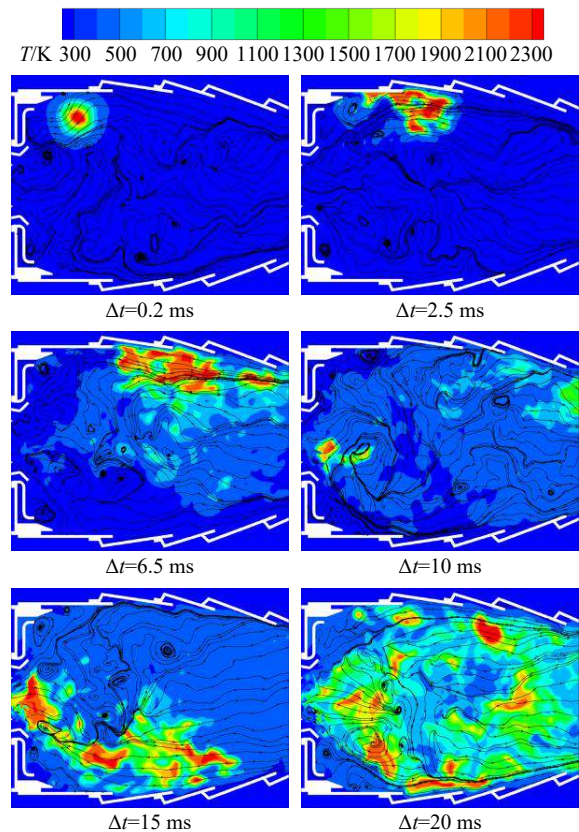


图 16 双轴向旋流器燃烧室燃油流量 4 g/s 时点火过程

Fig. 16 Ignition process in dual-radial swirler combustor when fuel mass flow rate is 4 g/s

焰壮大阶段部分高温气体由中心截面外进入了回流区。从 10 ms 到 15 ms, 这一小片高温区向旋流器移动, 并点燃了旋流器附近高浓度的燃油。从 15 ms 到 20 ms, 火焰逐渐发展, 最终点燃了整个燃烧室。与轴径向旋流器燃烧室成功点火的情况相比, 双轴向旋流器的火花正对旋转射流, 火焰更易向燃烧室下游运动, 难以从点火位置直接向旋流器运动。与双轴向旋流器燃烧室点火失败的过程相比, 因为油气比的增加, 火焰没有快速被周围空气冷却, 反而可以不断增大, 进而增加了火焰在下游通过旋涡进入回流区的可能, 火焰进入回流区后再传向旋流器出口附近, 形成稳定火焰。双轴向旋流器燃烧室因火焰更易向下游移动、传播路径更长、更易被冷空气冷却, 因而需要更多燃油维持化学反应, 所以点火性能较差。

3 结 论

本文使用大涡模拟方法计算两种旋流器结构的点火过程, 得到如下结论。

1) 使用大涡模拟计算时, 相同结构和工况下, 点火位置的流场因湍流脉动随时间变化, 因而点火时刻不同会影响点火结果。对于实验中能成功点火的结构和工况, 为避免模拟时使用单脉冲火花影响点火结果, 应选择在速度方向指向回流区, 速度幅值小于平均值的时刻点火。

2) 轴径向旋流器燃烧室的旋转射流更靠近挡溅盘, 火花位置有更高概率出现旋涡, 瞬时速度更易指向回流区, 火焰可以从点火位置直接向旋流器传播, 因而点火性能更好。而双轴向旋流器燃烧室的火花正对旋转射流, 火焰更易向下游移动, 被周围空气冷却熄灭, 因而点火性能较差。

3) 点火过程中火焰存在分裂、传播、进入回流区和壮大的行为。模拟结果表明点火时流场中的旋涡是火焰分裂的原因。

4) 提高油气比可以增加燃烧放热, 使初始火核体积变大, 持续时间变长, 火焰有更高可能性进入回流区, 传向旋流器并点燃整个燃烧室。

参考文献:

- [1] MASTORAKOS E. Forced ignition of turbulent spray flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(2): 2367-2383.
- [2] 李明磊, 吴宁, 侯凌云, 等. 强湍流下点火及火焰传播机理研究进展[J]. *实验流体力学*, 2015, 29(4): 1-11.
LI Minglei, WU Ning, HOU Lingyun, et al. Research progress on ignition and flame propagation in highly turbulent flows[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2015, 29(4): 1-11. (in Chinese)
- [3] TEETS R E, SELL J A. Calorimetry of ignition sparks[J]. *SAE Transactions Journal of Engines*, 1988, 97(6): 371-383.
- [4] ESCLAPEZ L, COLLIN-BASTIANI F, RIBER E, et al. A statistical model to predict ignition probability[J]. *Combustion and Flame*, 2021, 225(3): 180-195.
- [5] READ R W, ROGERSON J W, HOCHGREB S. Flame imaging of gas-turbine relight[J]. *AIAA Journal*, 2010, 48(9): 1916-1927.
- [6] 刘桂桂, 林宇震, 胡好生, 等. 旋流杯一级旋流数变化对点火性能的影响[J]. *北京航空航天大学学报*, 2015, 41(6): 1117-1121.
LIU Guigui, LIN Yuzhen, HU Haosheng, et al. Effect of swirl cup's primary swirl number on ignition performance[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41(6): 1117-1121. (in Chinese)
- [7] 代威, 林宇震, 张弛. 第2级径向旋流器旋流数对燃烧室点火和贫油熄火性能的影响[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(5): 1092-1098.
DAI Wei, LIN Yuzhen, ZHANG Chi. Effects of swirl number of second stage radial swirler on combustor ignition and lean blow-out performances[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(5): 1092-1098. (in Chinese)
- [8] 康尧, 林宇震, 蒋尧, 等. 旋流杯套筒混合段长度对点火特性的影响[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(9): 2095-2103.
KANG Yao, LIN Yuzhen, JIANG Yao, et al. Effects of sleeve mixing length of swirl cup on the ignition characteristics[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(9): 2095-2103. (in Chinese)
- [9] 罗国良, 宋双文, 胡好生, 等. 旋流杯空气雾化喷嘴套筒出口形状对小型燃烧室点火性能的影响[J]. *航空动力学报*, 2011, 26(8): 1708-1712.
LUO Guoliang, SONG Shuangwen, HU Haosheng, et al. Influences of the swirl cup flares design on the small combustor ignition performances[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2011, 26(8): 1708-1712. (in Chinese)
- [10] 莫姐, 万斌, 王新竹, 等. 三旋流燃烧室点火阶段燃烧性能[J]. *航空动力学报*, 2020, 35(8): 1594-1600.
MO Da, WAN Bin, WANG Xinzhu, et al. Combustion performance of triple swirler combustor in ignition stage[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(8): 1594-1600. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] 夏一帆. 面向航空发动机燃烧室点火问题的数值计算方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
XIA Yifan. A study of numerical methods for the ignition process in aeroengine combustors[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese)
- [13] 夏一帆, 赵冬梅, 葛海文, 等. 环形燃烧室点火过程的实验与数值研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2020, 54(2): 416-424.
XIA Yifan, ZHAO Dongmei, GE Haiwen, et al. Experimental and numerical investigations of ignition process in annular combustor[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2020, 54(2): 416-424. (in Chinese)
- [14] MARCHIONE T, AHMED S F, MASTORAKOS E. Ignition of turbulent swirling n-heptane spray flames using single and multiple sparks[J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(1): 166-180.
- [15] 江洋. 燃烧室点火过程大涡数值模拟方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
JIANG Yang. Research on large eddy simulation of ignition se-

- quence of combustor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [16] JONES W P, TYLISZCZAK A. Large eddy simulation of spark ignition in a gas turbine combustor[J]. *Flow Turbulence and Combustion*, 2010, 85(3/4): 711-734.
- [17] 王凯兴, 刘富强, 范雄杰, 等. 点火位置对中心分级燃烧室点火过程影响的研究[J/OL]. [2022-04-20]. <https://doi.org/10.13675/j.cnki.tjjs.200699>.
- [18] 李承钰. 双级旋流器燃烧室点火及熄火特性研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2019.
- LI Chengyu. Research on performance of flame ignition and flame-out of two-stage cyclone combustor[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019. (in Chinese)
- [19] 高昭, 刘玉英, 顾鹏程. 旋流杯近场液雾SMD的空间分布模型[J]. *航空动力学报*, 2020, 35(9): 1812-1821.
- GAO Zhao, LIU Yuying, GU Pengcheng. Model of spatial SMD distribution of spray at the near-field of swirl cup[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(9): 1812-1821. (in Chinese)
- [20] COLIN O, DUCROS F, VEYNANTE D, et al. A thickened flame model for large eddy simulations of turbulent premixed combustion[J]. *Physics of Fluids*, 2000, 12(7): 1843-1863.
- [21] FRANZELLI B, RIBER E, SANJOS M, et al. A two-step chemical scheme for kerosene-air premixed flames[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(7): 1364-1373.
- [22] WERNER H, WENGLE H. Large-eddy simulation of turbulent flow over and around a cube in a plate channel[C]//*Proceedings of the Turbulent Shear Flows 8*, Berlin: Springer, 1993: 155-168.
- [23] 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.
- [24] YANG Siheng, ZHANG Chi, LIN Yuzhen, et al. Experimental investigation of the ignition process in a separated dual-swirl spray flame[J]. *Combustion and Flame*, 2020, 219(9): 161-177.

(编辑: 陈 越)