

强旋-V形钝体火焰稳定器燃烧机理仿真研究

Simulation Research on the Combustion Mechanism of a Swirler-V Bluff Body Flame Stabilizer

■ 孙浩峰 吴云柯 / 中国航发研究院

新型强旋-V形钝体组合火焰稳定器可用于解决加力燃烧状态下存在的燃烧不稳定、火焰猝熄、火焰截面温度不均及油耗偏高等问题。以数值仿真为手段，从瞬态涡量、尾迹流时均速度型、燃烧温度场及瞬态火焰扩散机制的角度出发，系统分析其稳燃机理与性能，为试验验证提供参考、为工程应用提供支撑。

钝体火焰稳定器是军用燃气涡轮发动机加力燃烧室的核心部件，它的设计水平决定了发动机的高速性能。本文针对加力燃烧状态下存在的燃烧不稳定、火焰猝熄、火焰截面温度不均及油耗偏高等问题，利用燃烧数值仿真方法，研究了一种新型强旋-V形钝体组合火焰稳定器的燃烧机理。该结构的创新点在于通过流向涡结构与钝体绕流形成的旋涡结构相互作用，强化燃料掺混和火焰扩散，最终达到高效稳燃的目的。

研究对象与研究方法

强旋流形成的回流区旋涡结构是流向与展向旋涡运动的叠加，因此其油气掺混效果往往要优于钝体稳燃结构。图1所示为本研究提出的强旋-V形钝体组合火焰稳定器结构方案。

V形钝体选取折角 35° 、槽宽37.5mm的标准二维V形钝体。旋流器藏于V形钝体槽内，通过外部高压气源切向进气使其能够在出口处形成流向涡。将高压气源引入的强旋流定义为旋流器进气流量与主流流量的比值。

数值仿真研究通过在商用软件

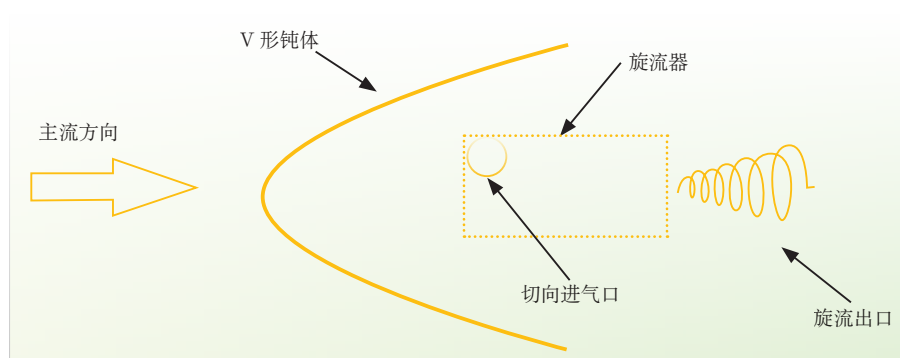


图1 强旋-V形钝体组合火焰稳定器结构

CFX 18.2中求解雷诺平均的纳维-斯托克斯(N-S)方程完成，并利用SSG格式的雷诺应力湍流模型模拟湍流，燃烧反应流动通过求解火焰速度模型(BVM)得到。相比过去基于分子反应速率的模型，BVM利用湍流火焰速度封闭源项的方式有突出优势：在给定条件下，湍流燃烧速度的变化范围是一阶的，分子反应速率在碳氢燃烧过程中的量级随计算域发生的变化是高阶的；随着现代流动与燃烧试验技术的发展，湍流燃烧速度可以通过试验直接且精确测得，因此对于所需模拟的燃烧问题，只要湍流燃烧速度有可参考试验数据，模拟的准确性就能得

到保证。对于本文研究的问题，可认为是火焰传播速度已知、点火条件未知的一类“黑箱”问题，因此希望由模型带入的不确定量越少越好。而BVM相对分子反应速率类模型，燃烧相关量完全由确定的湍流火焰传播速度决定，因此更便于本文燃烧相关问题的研究。

空间离散网格采用ANSYS ICEM 17.2网格生成器绘制，为结构化网格与非结构化网格混合网格，网格总体质量控制在0.5以上。对于雷诺应力模型(RSM)，还须对网格无关解进行验证，经网格无关解验证后的网格总规模控制在300万左右。

稳燃机理与性能

瞬态涡量分析

考虑到流动结构的相似性，定性的稳燃机理分析以冷热态典型来流工况为例展开，其中雷诺数 $Re=50000$ 、 $T_{in}=700K$ 、当量比 $\phi=1$ 、吹风比 $M=1$ 。

如图2(a)所示的冷态涡量全场效果，旋涡结构以速度云图着色。可见受流向涡影响，V形钝体绕流尾迹结构发生了细小变化：拟涡街结构被流向涡管连通；原本在无两端剪切作用条件下，应保持平行、直柱状的脱落涡，受上游流向涡影响在空间上发生了扭曲；流场的展向两端出现了一些小尺度的脱落涡结构，这些沿槽宽方向外侧扩散的小涡，和连通涡街的流向涡管一样，对于火焰的均匀扩散都是有帮助的。

热态条件下的瞬态涡量场的整体较为简单，涡结构表面以温度云图着色，便于区分流场中已燃和未燃区域。在涡量场中，首先确认到了远尾迹中成对脱落的流向涡结构，虽然它是成对脱落，但其整个涡管受流向涡及其形成的近尾迹区展平面法向大尺度旋涡影响，发生了一定程度的弯曲；其次由强旋流生成的展平面法向涡对流场也有一定的过滤作用，尾迹下游仅有一对大尺度旋涡，其余都是小尺度流向涡，这对于燃烧稳定是有益的。进一步观察图2(a)和(b)，两图都反映了流向涡及其诱发的展平面法向涡对展向涡的作用。图中展向脱落涡的“涡脚”结构，即是由流向涡诱发的。

尾迹流时均速度型分析

数值模拟中发现，火焰只能在吹风比 $M=1$ 附近点燃，其原因须通过尾迹速度分析得到。强旋-V形钝

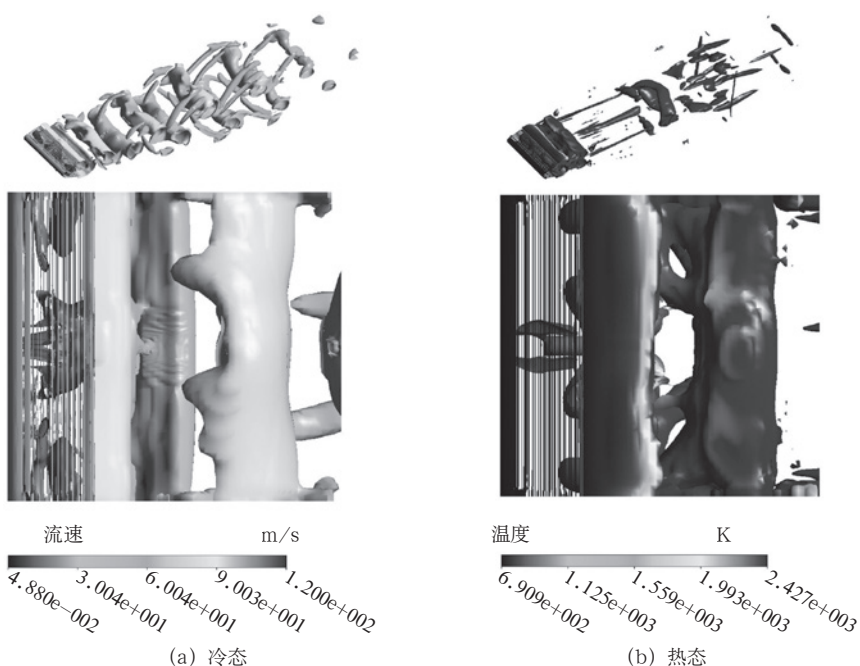


图2 尾迹瞬态涡量场

体组合稳燃方案安排旋流器喷射一股轴向强旋流。如图3(a)所示，在吹风比较大时，从旋流器中喷射出的强旋流出口经膨胀后的速度甚至超过了主流来流，在这一速度下，显然是难以燃着火焰的。而当 M 接近于1时，旋流器出口的速度达到了和回流速度接近的量级。此时，旋流器射流与钝体绕流回流量互相抵消，可以构成低速点火条件。

反之，当 M 较小时，由于旋流

器设置为低压高速出口模式，钝体回流可能流入旋流器中，此时无法形成轴向旋流；而 M 较大时，则形成大吹风比高速火焰吹熄模式。故而火焰只能在 $M=1$ 附近工况下点燃。

更进一步，图3(b)给出了绝对速度型的强旋-V形钝体稳燃速度型，由于展平面法向涡的存在，强旋-V形钝体组合稳燃速度型出现了双折结构。这一速度型也将有利于提升下游流动加速能力，对加力燃

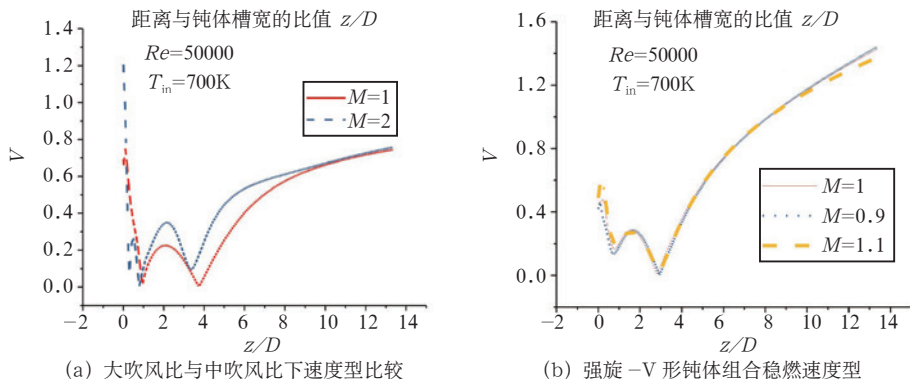


图3 尾迹流时均速度(为方便对比,数据经过无量纲处理)

烧室而言，是有利的。

燃烧温度场分析

如图4所示，利用流向涡结构强化火焰扩散与掺混后，钝体火焰稳定器展向火焰扩散不均的问题得到改善。

瞬态火焰扩散机制分析

图5给出了强旋-V形钝体稳燃火焰扩散机制的定性描述。图中火

焰采用等温面描绘，并给出局部温度分布云图。如图5(a)所示，在初始阶段，强旋-V形钝体稳燃火焰是在其展平面法向涡构成的低速流动区域内燃着的，并以此为火焰核心，向上下游扩散。图5(b)则给出了火焰扩散方式的示意图，向下游火焰主要仍然由钝体绕流的展向

旋涡完成扩散。因此，强旋-V形钝体稳燃火焰实际上是两种稳燃方式的组合，即利用展平面大尺度涡构造低速旋涡中心区域稳定燃烧，再利用常规钝体的展向涡扩散燃烧。

燃烧效率

从表1可见，通入强旋流后，在未改变其他流动条件的情况下， $M=1$ 的强旋-V形钝体组合燃烧效率与传统V形钝体($M=0$)相比有了较大幅度的提升。但其他吹风比条件下燃烧效率相比其他钝体稳燃方案都有大幅降低，这也暴露了强旋-V形钝体组合稳燃方案对流场条件较敏感的缺点。

结束语

本文以数值模拟为手段，开展强旋-V形钝体组合火焰稳定器稳燃机理研究，研究结果表明：流向涡结构是强旋-V形钝体组合火焰稳定器稳定燃烧的决定性因素；燃烧过程中，强旋-V形钝体组合下游存在双折、低速速度型结构，该速度型结构有利于高速来流条件下点火和稳定燃烧；强旋流的存在有利于火焰快速扩散，可改善火焰稳定器下游火焰温度场分布不均问题；强旋-V形钝体的稳燃机理为利用展平面大尺度涡构造低速旋涡中心区域稳定燃烧，再利用常规钝体的展向涡扩散燃烧；强旋-V形钝体组合稳燃方案对吹风比较为敏感，在 $M=1$ 时，可得到较高燃烧效率。考虑到数值模拟研究工作的局限性，后续还将在本文研究结论基础上，开展进一步的燃烧试验研究工作。 航空动力

(孙浩峰，中国航发研究院，工程师，主要从事航空发动机气动热力研究)



(a) 展平面火焰

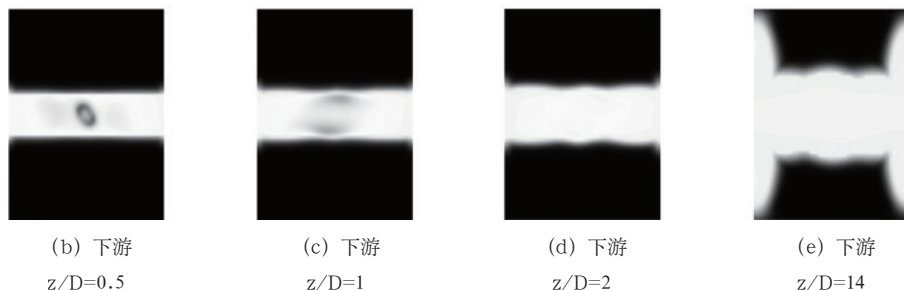


图4 强旋-V形钝体时均火焰外形

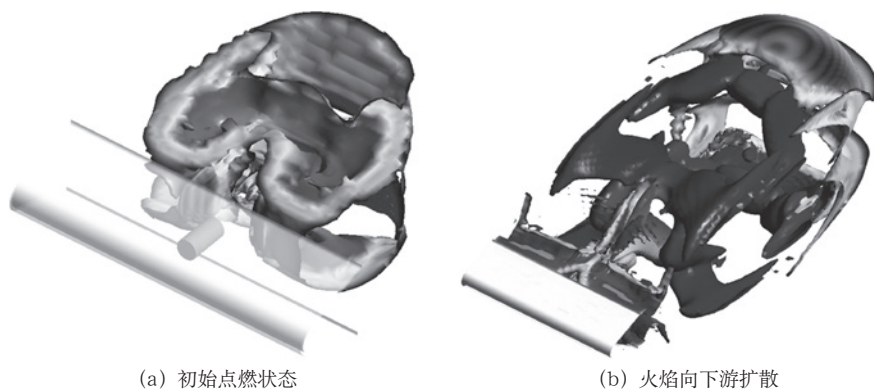


图5 强旋-V形钝体稳燃火焰扩散机制

表1 强旋钝体组合稳燃方案燃烧效率

吹风比 (M)	0	0.8	0.9	1	1.1	1.2
燃烧效率	72.1%	69.1%	72.5%	86.8%	65.6%	60.3%