

# 表面电弧放电等离子体激励调控稳焰器的 流动与燃烧\*

林振华, 陈钱

中山大学航空航天学院, 广东 深圳 518107

**摘要:** 针对表面电弧放电等离子体激励对稳焰器的调控问题, 对表面电弧放电唯象模型的适用性进行了验证, 并分析了不同激励位置和激励强度对稳焰器流场结构、燃料雾化、点火延迟以及火焰稳定性的影响。研究结果显示, 不同激励位置对流场结构产生显著影响, 尤其在激励能量有效集中时, 形成强烈的激励区域, 导致回流区膨胀, 进而促进燃料雾化, 减缓点火延迟及提高平均火焰温度。同时, 随着激励强度的增加, 回流区长度、混合效率和燃烧效率呈线性增加。

**关键词:** 蒸发式稳焰器; 流动; 燃烧; 表面电弧; 等离子体激励

**中图分类号:** V434 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2024)05-0115-10

## Flow and combustion control by surface arc discharge plasma actuation for flameholder

LIN Zhenhua, CHEN Qian

School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China

**Abstract:** According to the control mechanism of surface arc discharge plasma actuation on the flow and combustion of flameholder, the applicability of the phenomenological model of surface arc discharge is verified. And, the effects of different actuation positions and actuation intensities on the flow field structure, fuel atomization, ignition delay and flame stability in the flameholder are systematically analyzed. The results show that different actuation positions have a significant impact on the flow field structure, especially when the actuation energy is effectively concentrated and a strong actuation region is formed, which leads to the expansion of the recirculation zone, which in turn promotes fuel atomization, slows down the ignition delay and increases the average flame temperature. At the same time, with the increase of actuation intensity, the length of the recirculation zone, the mixing efficiency and the combustion efficiency increased linearly.

**Key words:** flameholder; flow; combustion; surface arc charge; plasma actuation

高速推进器燃烧室中的点火面临来流驻留时迟高等问题, 需要额外的技术手段对燃烧进行调控。等离子体激励调控燃烧是一种可行的方式。间与燃料燃烧时间不匹配、点火边界窄、点火延

\* 收稿日期: 2024-04-06

录用日期: 2024-05-07

网络首发日期: 2024-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(91741102); 广东省基础与应用基础研究基金(2024A1515010712)

作者简介: 林振华(1996年生), 男; 研究方向: 发动机燃烧; E-mail: linzh68@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 陈钱(1983年生), 男; 研究方向: 空气动力学与燃烧学;

E-mail: chenq289@mail.sysu.edu.cn



ZR20240103

当使用等离子体辅助燃烧时,有能量效应、化学效应及输运效应三种效应作用的强耦合(Starikovskaia, 2014; Starikovskaia et al., 2021),可用来提高可燃极限(Feng et al., 2020)、改善煤油雾化效果(Huang et al., 2021, 2022)、增强燃烧稳定(Feng et al., 2018; Reuter et al., 2022)等。

以能量效应控制流场的激励形式主要有表面电弧放电(Yan et al., 2018)、纳秒脉冲介质阻挡放电(Leonov et al., 2016)、直流辉光放电等(Anderson et al., 2011)。表面电弧放电的主要机理被证明为以热效应为主导(Leonov et al., 2016)。表面电弧放电等离子体流动控制模型包括唯象模型和局部热平衡模型等。唯象模型将激励对流动的影响等效为局部热源。施加热源的形式是在激励区域施加 3 000 K 的恒温,或以体积热密度的形式在 N-S 方程中添加能量源项。施加激励的区域形状为楔形和矩形(Leonov et al., 2008a, 2008b; Sun et al., 2010)。Wang et al.(2009)研究了超声速气流中电弧放电等离子体对斜激波的控制。Watanabe et al.(2019)通过实验评估了等离子体辅助流动控制对 Mach-2 超声速流动中压缩斜坡附近流动结构的影响。

迄今为止,鲜有在亚燃冲压发动机中应用表面电弧放电等离子体激励的实例。本文将表面电弧放电应用于亚燃冲压燃烧室稳焰器,以探究激励强度及激励位置对于稳焰器流动与燃烧环节调控优化的一般性结论。

## 1 数值模拟方法

### 1.1 数学模型

连续相燃烧的控制方程包括质量守恒、动量守恒、能量守恒、组分守恒和本构关系。在笛卡尔坐标系下,连续性方程、动量方程和能量方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0, \\ \frac{\partial(\rho \mu_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} + F_{\text{Coriolis}} + F_{\text{Centrifugal}}, \\ \frac{D(\rho h)}{Dt} - \frac{Dp}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \sum_{k=1}^N \frac{\partial}{\partial x_i} h_k J_k + \frac{\partial(u_i \tau_{ij})}{\partial x_j} + \dot{Q}, \end{cases}$$

式中第  $k$  个物质的扩散通量  $J_k = -\rho D_{m,k} \frac{\partial Y_k}{\partial x_i}$  -

$\frac{D_{T,k}}{T} \frac{\partial T}{\partial x_i}$ ,混合物的焓  $h = \sum_{k=1}^N h_k J_k$ ,  $h_k$  为第  $k$  个物质的

焓。方程可以使用状态方程及组分守恒方程来闭合。组分方程为

$$\frac{\partial(\rho Y_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i Y_k)}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} J_k + \dot{\omega}_k.$$

### 1.2 模型验证

以展向中心为分界进行半模计算,计算域流向长度  $x = 170$  mm,法向高度  $y = 75$  mm,展向宽度  $z = 20$  mm。压缩斜坡位于 105.6 mm 处,高度为 3 mm,与平面的夹角为  $7^\circ$ 。电极被视为矩形,电极中心位于压缩斜坡前 30 mm 处,流向长度为 2 mm,高度 0.4 mm,展向宽度 11 mm。

湍流模型使用 standard  $k-\varepsilon$  模型及标准壁面函数。进口马赫数为 2.5,静压 0.3 bar (1 bar =  $1.01 \times 10^5$  Pa),静温 130 K,入口湍流强度 4%,黏度比为 5。选择 50 万、100 万、200 万、400 万四种网格数进行气相流场模拟以验证网格无关性。可以发现,在  $x = 75$  mm 处,50 万、100 万网格数的结果与 200 万、400 万网格数的结果存在显著差异。虽然 200 万和 400 万网格数的结果相差不大,但 200 万网格数时的  $y^+$  值更符合标准壁面模型的要求范围。因此,采用 200 万网格数进行仿真模拟。

将底壁面中心线处的结果与 Yan et al.(2018)的结果进行对比(图 1)。在图 1 中,以无激励状态下的壁面压力为基线,曲线表示有激励情况下的压差,散点表示多次试验的结果。通过对比发现,本次仿真结果与对比对象均保持了良好的一致性。因此,将表面电弧等离子体激励视为热源的唯象仿真是适当的。

### 1.3 计算模型及边界条件

模型(图 2)参数为:蒸发管直径为 12 mm,槽宽为 44 mm,V 形槽夹角为  $30^\circ$ 。蒸发管的引气管

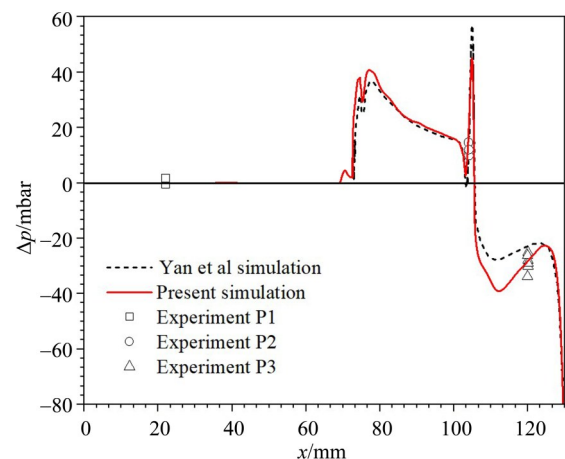


图 1 有无等离子体激励时的压力差

Fig.1 Pressure difference of plasma-on and plasma-off

直径为 3 mm, 长度为 20 mm, 蒸发管出口的直径为 2.25 mm, 而辅助进气口的直径为 0.6 mm, 整体壁度为 1.2 mm。煤油的喷注点位于距离引气管进口 15 mm 处, 上下同时进行喷注, 燃料液滴在引气管入口气流的作用下破碎为小液滴, 并在稳定器后方的回流区内产生稳定的燃料-空气混合气。仿真计算的边界条件设置为: 燃烧室入口静压 70 kPa, 静温 357 K, 马赫数 0.2, 喷注燃料温度 298 K, 当量比 0.4 (Huang et al., 2021, 2022)。

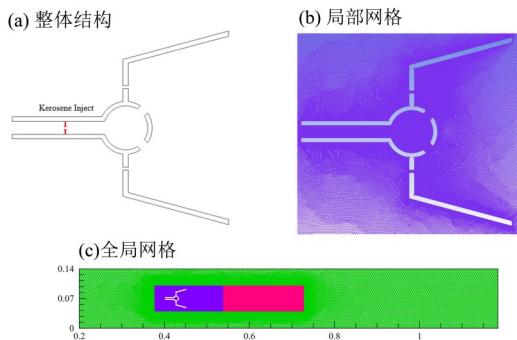


图2 火焰稳定器  
Fig.2 Flame holder

## 2 结果与讨论

### 2.1 表面电弧等离子体激励的布置

表面电弧等离子体激励的布置, 如图 3 所示。P1、P2 激励电极分别距离襟翼尖端 14 mm 和 17 mm, P3 激励电极距离蒸发管中心 46 mm。P1 处当地流速较快, 因此激励作用的长度较长; P2 位于两侧较小回流区的边缘, 当地速度较小, 因此其激励长度较小; P3 位于回流区的中心位置, 当地速度极小, 因此电弧通道主要在两电极之间。激励强度分别采用 710 W 和 2 000 W 电源。本文的计算工况如表 1 所示。

### 2.2 表面电弧等离子体激励调控流动

以 2 500 步 (0.025 s) 作为一个通流周期, 计算 4 个通流周期 (0.1 s) 后, 采集 0.1~0.2 s 的平均结果。图 4 为 Case 0~Case 3 的平均结果。Case 2 和 Case 3 回流区的长度相较于 Case 0 和 Case 1 增加了 20.26%。这是因为 P2 和 P3 位置的激励更有效地将能量保留在回流区内, 而 P1 位置的激励布置使得更多能量随流动耗散到主流中, 仅有小部分能量进入两侧小回流区内并被锁住。

从图 5 也可以看出, 受高温的影响, 回流区内气体膨胀、压力降低、逆压梯度降低, 最终导致回流区面积增大。回流区面积的增大一方面增加

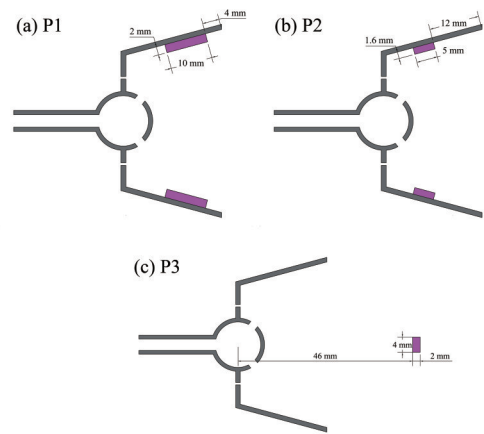


图3 表面电弧放电位置示意图

Fig.3 Schematic diagram of position of surface arc discharge

表1 本文的计算工况

Table 1 The operating conditions calculated in this paper

编号	激励位置	激励强度/W
Case 0	None	None
Case 1	P1	2 000
Case 2	P2	2 000
Case 3	P3	2 000
Case 4	P2	710

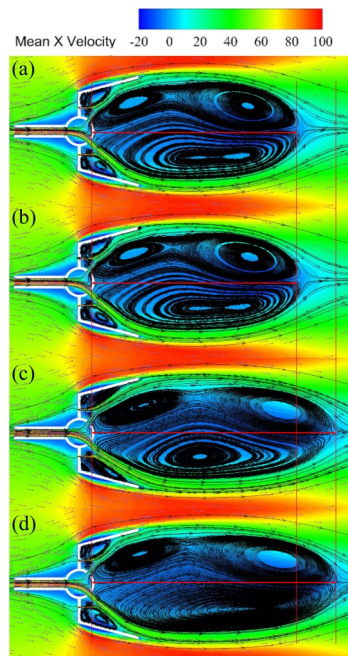


图4 平均流向速度及流线图

Fig. 4 Average flow velocity contour and streamline plot

了燃料的驻留时间, 另一方面也导致了由主流区卷入回流区的氧气量增加。虽然激励的功率完全相同 (2 000 W), 但 Case 1 的能量密度为 Case 2 的

40%，最终使得 Case 1 的核心区域温度为 480 K，而 Case 2 的核心区域温度为 3 000 K 以上，Case 3 的为 870 K。

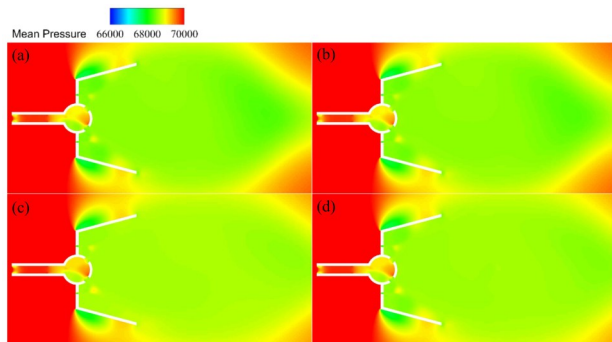


图 5 平均压力云图(Pa)

Fig. 5 Average pressure contour (Pa)

图 6 为 0.2 s 时的瞬态温度场。在 P2 和 P3 位置施加激励时，温度分布差异明显。首先，在 P2 的设置中，其能量更多地锁在两侧小回流区中，部分能量随着流动进入中心的回流区并随着涡脱落至燃烧室下游。小回流区由两侧辅助进口气流及蒸发管出口气流形成，结构稳定，不会随着流动而分离，可以形成稳定的适合蒸发的高温区域。而在 P3 位置的布置下，能量主要集中在主回流区中。这种温度上的差异性源于 P2 位置的回流区相对较小，能锁住绝大部分的能量，能量密度更高。而 P3 回流区面积较大，与主流低温区域接触面积较大，能量密度较小。这种高温区域内部环境有利于优化燃料的蒸发和混合效率，进而提升燃烧过程中的化学反应效率。同时，P2 位置布置时产生的高温已达到点火温度，这可以有效地增大点火面积。对比两种激励位置，P3 对涡脱落频率产生的影响较小，在 P2 位置时脱落涡的温度较高。

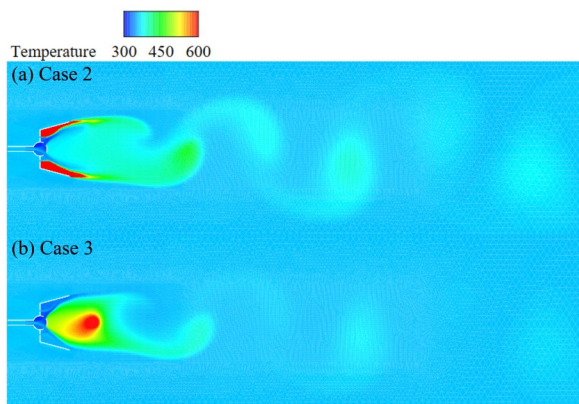


图 6  $t = 0.2$  s 的温度云图(K)

Fig. 6 Instantaneous temperature contour at  $t = 0.2$  s (K)

表面电弧激励产生的局部高温区不仅对流动有一定的影响，同时可以增强燃料的雾化效果以及提升燃料的粒径均匀度。本文进行了四个周期的煤油喷注计算 (0.2~0.3 s) 及四个周期的喷注采集 (0.3~0.4 s)。在激励的作用下，燃烧室及稳定器范围内的煤油质量分数均得到了改善。相较于没有激励辅助的工况 (Case 0)，Case 1 的出口平均气态煤油质量分数提升了 19.64%，Case 2 出口平均煤油质量分数提升了 798.25%，而 Case 3 提升了 247.19%。由图 7 所示，在 Case 2 中，液态煤油自蒸发管流出后，在激励的作用下蒸发为煤油蒸气并卷吸进入回流区内掺混，而在 Case 3 中气态煤油的蒸发主要发生在回流区中。

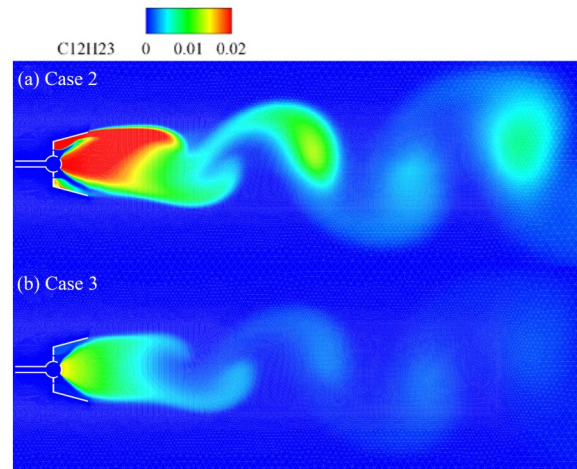


图 7  $t = 0.2$  s 的煤油质量分数

Fig. 7 Instantaneous fuel mass fraction at  $t = 0.2$  s

为了探究激励强度对于流场的影响，在 P2 分别布置了 710 W 及 2 000 W 的激励，从图 8 可以看出，Case 4 的回流区长度相较未施加激励时增加了 7.21%，2 000 W 时的则增加了 20.26%。不同激励强度下的温度分布形态相似，能量被锁在两侧回流区中形成持续稳定的高温区域。

随着激励强度的增加，燃烧室内气态煤油的组分质量分数有所增加。在出口位置，Case 4 的出口平均煤油质量分数相较于未施加激励的情况提升了 213.2%，而 Case 2 提升了 798.25%。回流区长度、出口平均煤油质量分数与激励强度的增加呈正相关。

沿流向方向的掺混效率，如图 9 所示。混合效率表示已雾化(或未燃烧)燃料的质量通量与总燃料质量通量之比，本文采用 Gerlinger et al.(2008) 的混合效率计算式。由图 9 可知，混合效率在流向方向为单调不减的曲线，在出口时达到最大值。

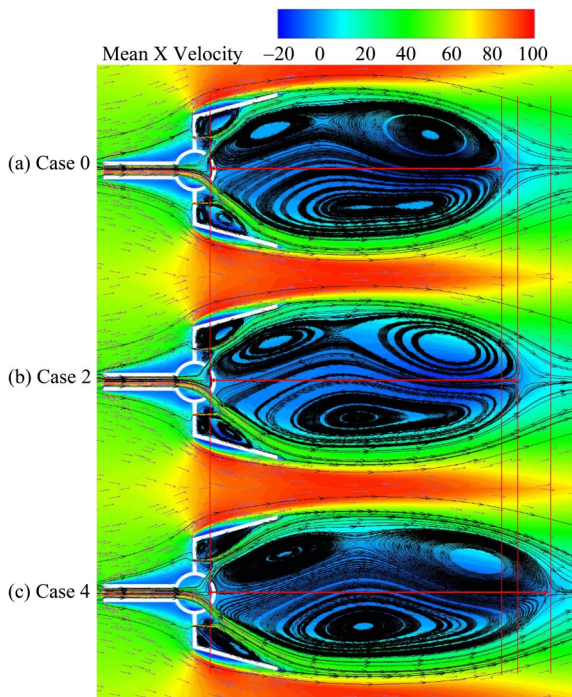


图 8 平均流向速度及流线图

Fig. 8 Average flow velocity contour and streamline plot

在 Case 1 中, 出口时混合效率为 0.92%, 与无激励作用时的 0.73% 相近。在 Case 2 中, 出口时混合效率达到 8.65%, 其全程混合效率及混合效率的增长率最高。在 Case 3 中, 出口时混合效率为 2.9%, 但临近出口时其混合效率的增长率逐渐减小。Case 4 的出口混合效率为 2.5%, 与 Case 2 相比, 出口煤油质量分数及混合效率随激励强度的增长整体呈线性增长。在本文中, 影响混合效率的主要因素是温度。如前文所示, 与 Case 0 相比, Case 1 的温度提升效果较小, 因此其激励效果较差。对比 P2 与 P3 位置的激励布置方式, P2 位置的煤油颗粒从蒸发管流出后更早与高温区接触并迅速雾化, 因此在 0.41~0.48 m 的范围内, 其混合效率迅速提升。

在累积体积分布图(图 10)中, Case 2 大于 150 nm 的粒子数量明显减少、且数量最少, 其在优化粒径方面效果显著, 较小的平均粒径有助于增大蒸发面积, 进而提高蒸发效率。

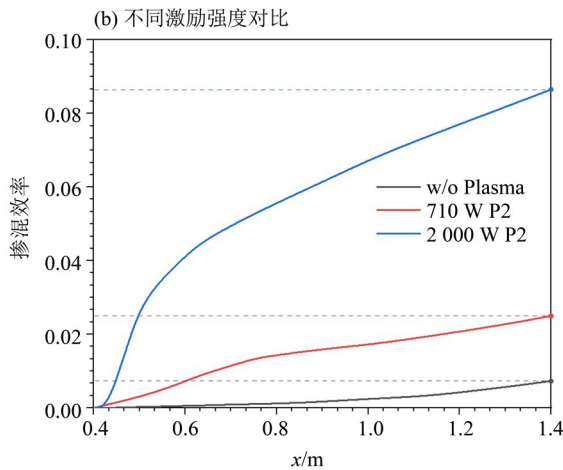
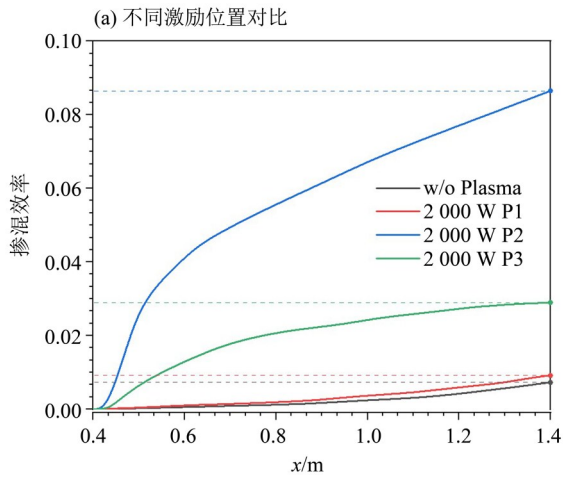


图 9 掺混效率

Fig. 9 Mixing efficiencies

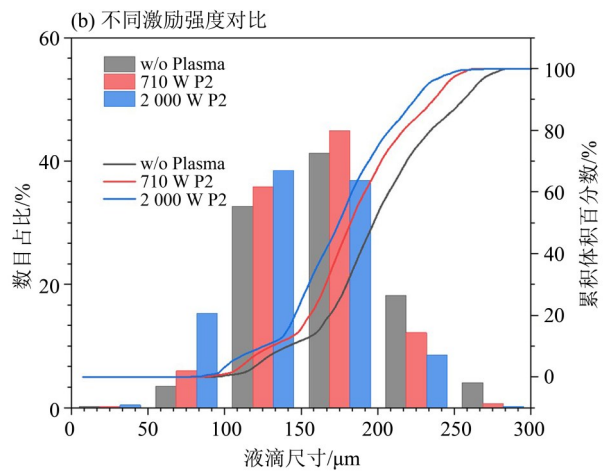
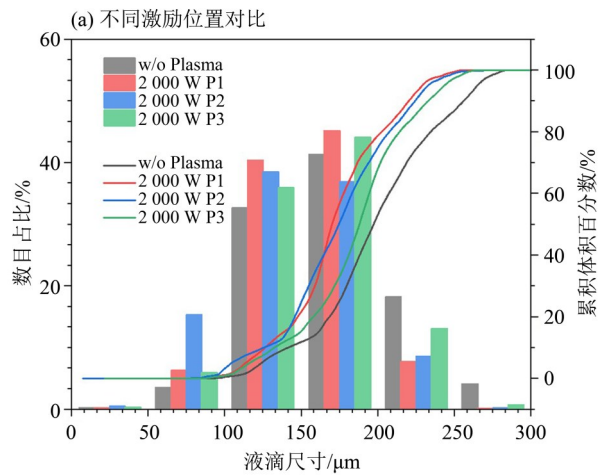


图 10 液滴尺寸和累积体积分布

Fig. 10 The drop size and cumulative volume distribution

与无激励情况下的平均粒径相比, Case 1 平均粒径减少了 15.58%, Case 2 减少了 18.85%, Case 3 减少了 12.69%, Case 4 减少了 12.98%。综上所述, 激励效果与其能量密度及在该位置下气相的流动状态密切相关。对比 Case 1~Case 3 的激励布置方式, 将激励集中布置在改善稳定器和燃烧室范围的效果更为显著。而在比较 P2 与 P3 的激励布置方式时, 作用在较小回流区的效果更能保持能量, 从而提高整体的蒸发效果。

### 2.3 表面电弧等离子体激励调控燃烧

在 Case 0, Case 1, Case 3, Case 4 采用电火花点火的方式, 电火花能量 12 J, 共点火 0.02 s。Case 2 采用表面电弧激励点火的方式, 激励功率 2 000 W。温度和反应热源的瞬时演化特性如图 11~12 所示, 最终时刻为火焰稳定状态所处时刻, 该时刻后监测的壁面压力、燃烧室出口平均温度等各项参数的变化幅度在 1% 以内。

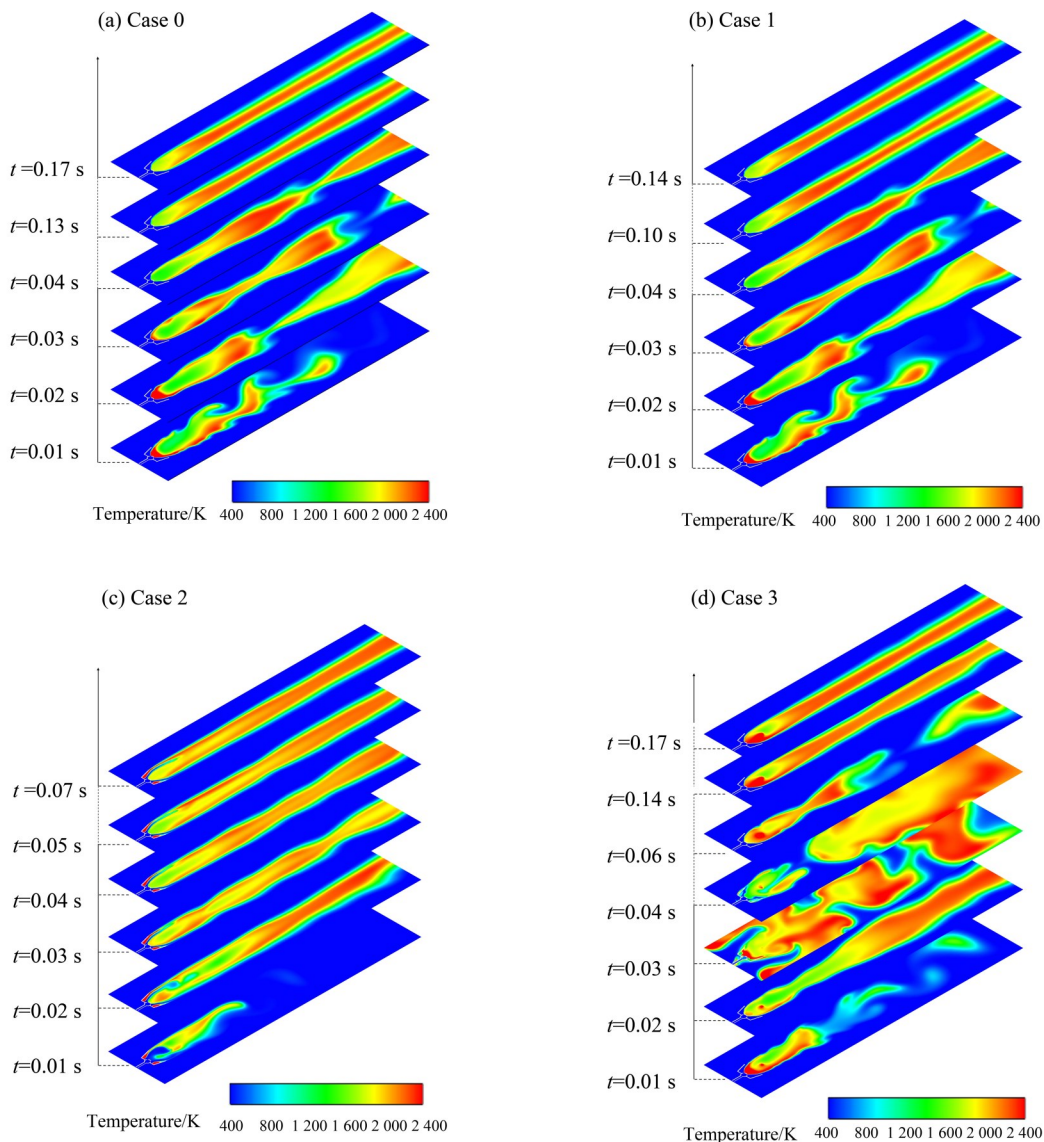


图 11 燃烧室中温度场的演变云图

Fig. 11 Contour of the temperature field in the combustor

在无激励作用及 P1 位置的情况下, 燃烧表现出来极为相似的瞬时演化特性。起初由 SI 点火在回流区头部产生局部的高温区,  $t = 0.01$  s 时在气流的带动下将能量注入主回流区中, 并随着涡的

脱落将能量逐渐带入下游。在  $t = 0.02$  s 时形成交错的火焰锋面(图 12)。由于火焰稳定的一个重要因素是火焰特征时间与流动特征时间的比值趋近于相等, 因此剪切层附近有符合此特征的流动速

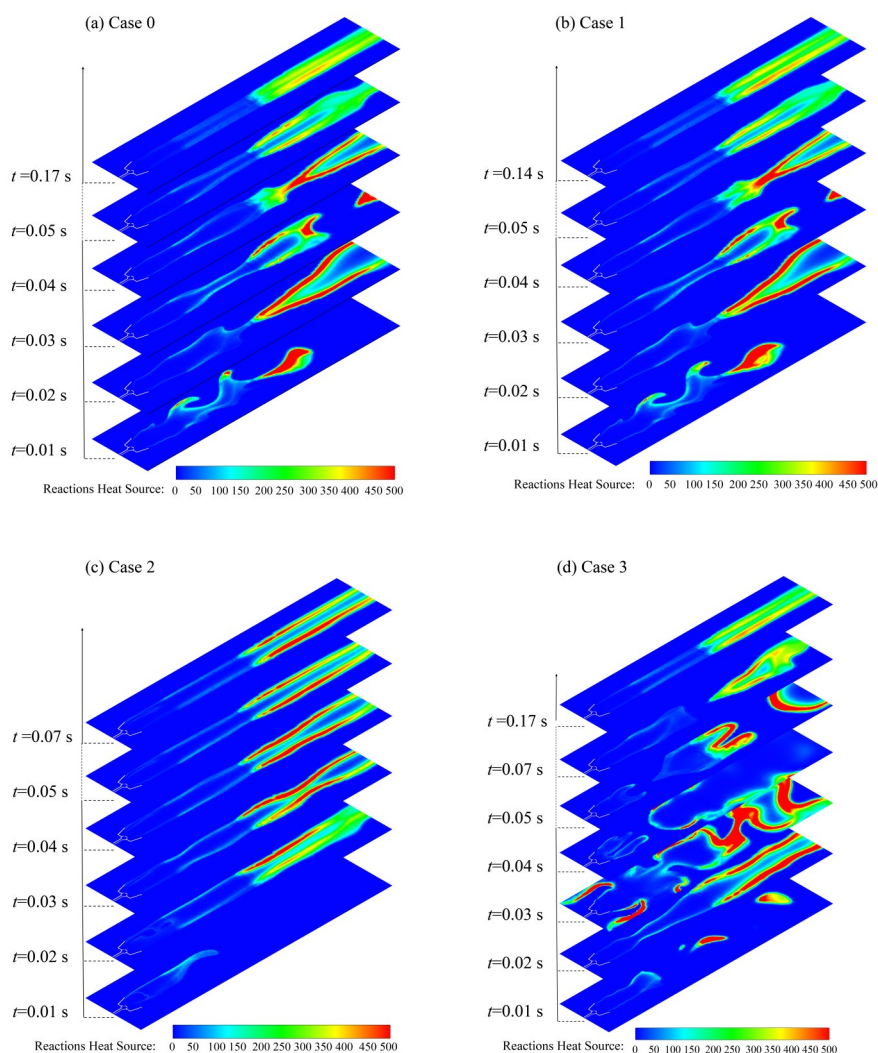


图12 燃烧器中反应放热的演变云图

Fig. 12 Contour of the heat release of the reaction in the combustor

度。由于在0.02 s后关闭SI点火, 上游不再产生更多的能量沉积, 点火的激发能量全部来源于主回流区中沉积的能量。能量随流动逐渐汇入下游, 在这个过程中核心反应区域不断地生成与断裂。当能量沉积到合适的位置时(主回流区尾部), 良好的混气与点火源相遇, 在两侧剪切层形成火焰核心(图11,  $t = 0.05$  s), 最终形成稳定的反应区域。无激励作用的工况下, 在0.17 s达到稳定, P1在0.14 s达到稳定且反应更为剧烈, 出口温度有较小提升(图15); 无激励作用时, 出口平均温度为990.85 K; Case 1的出口平均温度为1008.51 K, 提升了1.78%。

在Case 2中, 未施加额外的电火花点火, 点火所需的能量完全由激励提供。在该工况下, V型槽两侧的高温区迅速点燃燃料, 并在合适的速度路

径下游传播, 在 $t = 0.02$  s时形成核心反应区域, 并在0.07 s时达到稳定燃烧。该工况下激励表现出良好效果, 一方面在点火前油气比最高, 由于整体为贫燃工况, 更高的油气比更易于点火; 另一方面, 两侧激励布置使点火点位于火焰路径中, 更快地将能量传递至后侧核心点火区域。在所有工况中, Case 2的出口平均温度最高, 达到1093.41 K, 相较于Case 0提升了10.35%, 且其火焰厚度也是最大的。

在Case 3中出现了回火现象(图11), 该工况燃烧室内温度最高, 面积较大。点火热源主要来自SI及表面电弧放电。在0.01 s时, 化学反应主要在回流区内部, SI点火高压区域使回流区已燃气体迅速推向下流, 导致下游比上游更快组织起燃烧( $t = 0.02$  s)。受内向外压力梯度影响, 火焰迅速膨胀破碎。同时, 燃烧高压将上游未燃混气回推

并点燃,上下游同时燃烧,中间形成可燃混气的真空地带,上下游的燃烧分离,并随着流动与喷注,在激励附近重新生成适当量比的混气,再重复 Case 0 的不断断裂与重构最终达到稳定燃烧。该工况在 0.17 s 达到稳定状态,出口平均温度为 1 041.8 K。该工况的主要问题是该激励强度下虽然无法点燃,但可能已接近临界点火温度,施加额外点火源后释热率过高,导致不利于燃烧的压力脉动。

在不同激励强度的对比计算中, Case 2 采用表

面电弧点火, Case 4 由于电弧产生的能量不足以点燃火焰,因此设置 SI 点火, SI 点火的工况与前文一致。

由图 13~14 可知,在  $t = 0.01$  s 时, Case 4 与 Case 0 相似,高温区分布在两侧靠近主流的剪切层中,但是在激励的作用下形成了闭合的火焰前锋,该火焰前锋未随着流动而分离,并在  $t = 0.02$  s 时形成良好的反应锋面,最终在  $t = 0.07$  s 时 Case 2 与 Case 4 达到稳定状态。Case 2 的出口平均温度为 1 072.4 K,相较于 Case 0 提升了 8.23%

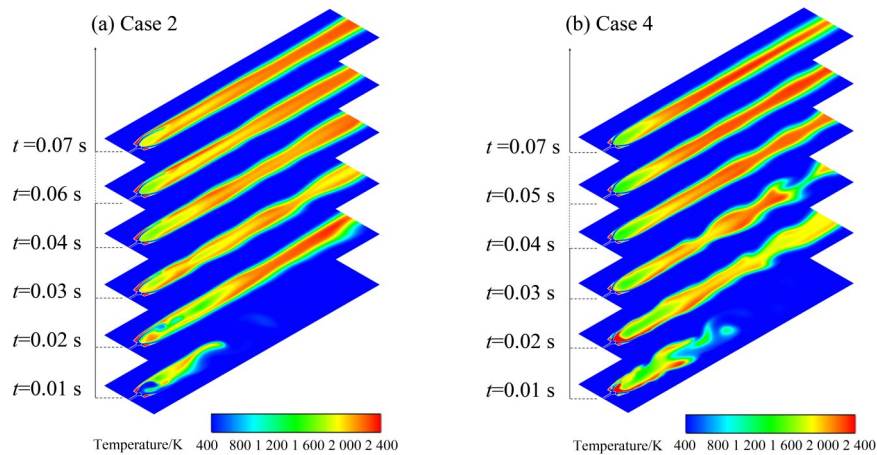


图 13 燃烧室中温度场的演变云图

Fig. 13 Contour of the temperature field in the combustor

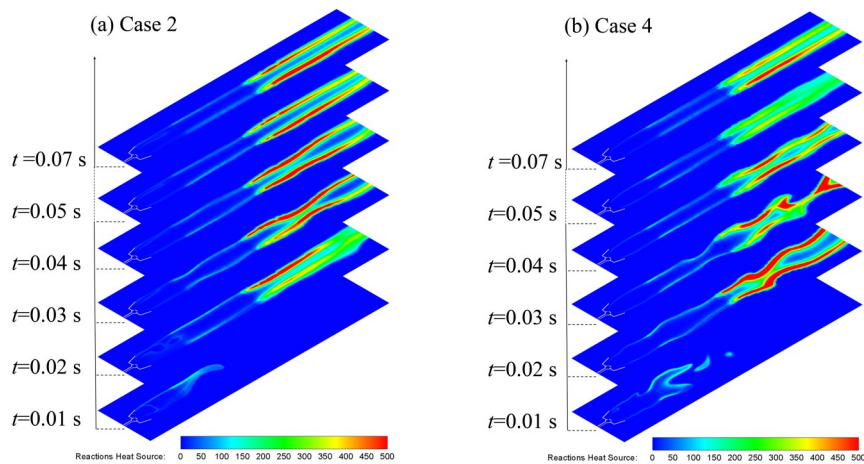


图 14 燃烧器中反应放热的演变云图

Fig. 14 Contour of the heat release of the reaction in the combustor

燃烧效率作为衡量燃料在燃烧室内释放能量完全程度的重要性能指标。根据特定截面上的燃烧效率的定义(Gang, 2014),对各工况的稳定燃烧状态,沿流向方向计算了多处的燃烧效率。由图 16 可知, Case 0 在出口处的燃烧效率为 29.7%,相

较于 Case 0, Case 1 在出口时燃烧效率提升了 2.9%, Case 2 在出口时燃烧效率提升了 7.3%,其全程的燃烧效率最高。Case 3 在出口时燃烧效率提升了 4.7%, Case 4 在出口时燃烧效率提升了 3.4%。所有的激励在燃烧稳定时的燃烧效率均表现出了

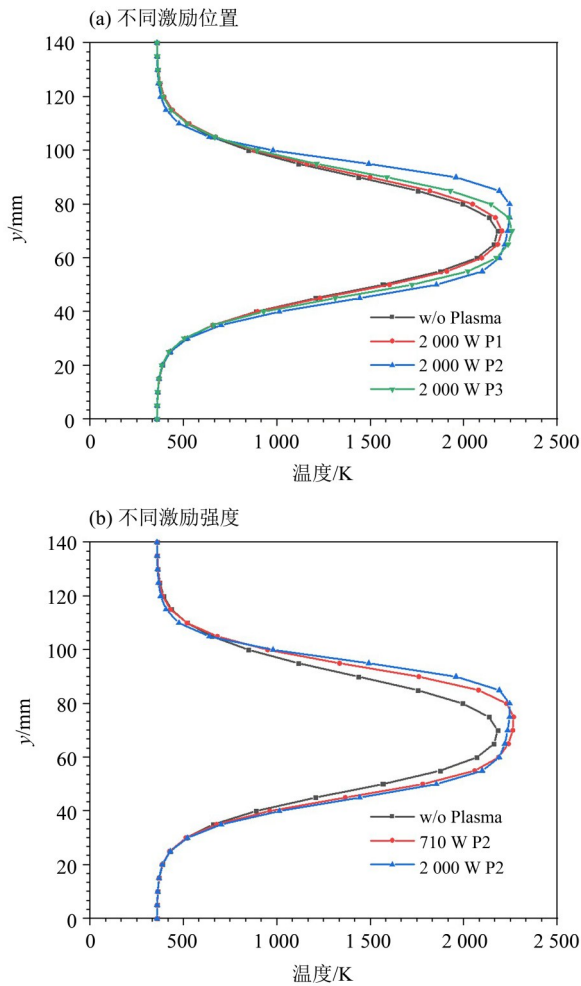


图 15 燃烧室出口处的纵向温度

Fig. 15 Longitudinal temperature at the outlet of the combustor

正向的激励效果。Case 2 与 Case 4 的燃烧效率增长率较为相似, 其对流场的作用效果表现出一致性。在所有的计算中, Case 4 的出口燃烧效率、出口平均温度、火焰厚度均高于 Case 1 及 Case 3, 因此激励位置的选择相较于激励强度对于燃烧的影响更为重要。

### 3 结 论

本文探讨表面电弧放电等离子体激励强度和激励位置对稳焰器流动与燃烧效果的影响。主要结论如下:

- 1) 激励位置相较于激励强度对燃烧效果的影响显得更加显著和关键。
- 2) 激励位置的选择对流动、温度、雾化效果

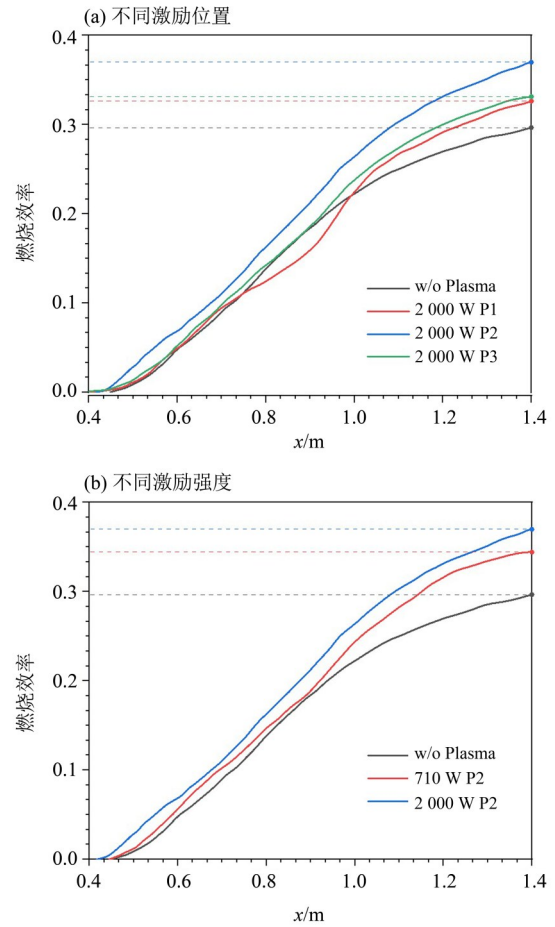


图 16 不同工况下燃烧效率

Fig. 16 Combustion efficiency under different conditions

以及掺混效果等方面产生影响, 其中温度的变化显得尤为显著。合理选择激励位置不仅影响着燃烧反应路径, 还对整体燃烧效果产生关键影响。尽管观察到所有激励对掺混效果和燃烧效果均有所增强, 但需要强调的是, 不适当的激励位置可能导致点火时产生回火等不良现象。在激励位置的选择过程中, 必须全面考虑激励快速释放热能可能导致的热窒息现象, 以确保燃烧过程的安全和稳定。

3) 激励强度的影响主要表现在回流区长度、雾化效果以及燃烧效果(包括燃烧效率和点火延迟)上, 呈现出明显的线性关系。这表明在一定范围内, 通过调节激励强度可以有效地优化燃烧过程, 提高燃烧效率。

## 参考文献:

- ANDERSON K, KNIGHT D, 2011. Interaction of heated filaments with a blunt cylinder in supersonic flow [J]. *Shock Waves*, 21 (2): 149–161.
- FENG R, LI J, WU Y, et al, 2018. Experimental investigation on gliding arc discharge plasma ignition and flame stabilization in scramjet combustor [J]. *Aerosp Sci Technol*, 79: 145–153.
- FENG R, LI J, WU Y, et al, 2020. Ignition and blow-off process assisted by the rotating gliding arc plasma in a swirl combustor[J]. *Aerosp Sci Technol*, 99: 105752.
- GANG L, 2014. Numerical investigation on the supersonic combustion of liquid kerosene in a dual-staged strut based scramjet combustor [C]// 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference.
- GERLINGER P, STOLL P, KINDLER M, et al, 2008. Numerical investigation of mixing and combustion enhancement in supersonic combustors by strut induced streamwise vorticity [J]. *Aerosp Sci Technol*, 12 (2) : 159–168.
- HUANG S, WU Y, ZHANG K, et al, 2021. Experimental investigation of spray characteristics of gliding arc plasma airblast fuel injector[J]. *Fuel*, 293:120382.
- HUANG S, WU Y, ZHANG K, et al, 2022. Experimental investigation on spray and ignition characteristics of plasma actuated Bluff body flameholder [J]. *Fuel*, 309: 122215.
- LEONOV S B, YARANTSEV D A, 2008a. Control of separation phenomena in a high-speed flow by means of the surface electric discharge [J]. *Fluid Dyn*, 43 (6) : 945–953.
- LEONOV S B, DMITRY A Y, 2008b. Near-surface electrical discharge in supersonic airflow: Properties and flow control[J]. *J Propul Power*, 24(6):1168–1181.
- LEONOV S B, ADAMOVICH I V, SOLOVIEV V R, 2016. Dynamics of near-surface electric discharges and mechanisms of their interaction with the airflow [J]. *Plasma Sources Sci T*, 25(6):063001.
- REUTER C B, OMBRELLO T M, 2022. Numerical simulations of ozone addition to strained flames [J]. *Combust Sci Technol*, 194(15): 3225–3245.
- STARIKOVSKAIA S M, 2014. Plasma-assisted ignition and combustion; Nanosecond discharges and development of kinetic mechanisms [J]. *J Phys D Appl Phys*, 47 (35) : 353001.
- STARIKOVSKAIA S, LACOSTE D A, COLONNA G, 2021. Non-equilibrium plasma for ignition and combustion enhancement[J]. *Eur Phys J D*, 75(8) : 231.
- SUN Q, CHENG B, YU Y, et al, 2010. A study of variation patterns of shock wave control by different plasma aerodynamic actuators [J]. *Plasma Sci Technol*, 12(6):708–714.
- WANG J, LI Y, XING F, 2009. Investigation on oblique shock wave control by arc discharge plasma in supersonic airflow[J]. *J Appl Phys*, 106(7) : 073307.
- WATANABE Y, HOUPPT A, LEONOV S B, 2019. Plasma-assisted control of supersonic flow over a compression ramp[J]. *Aerospace*, 6(3):35.
- YAN H, LIU F, XU J, et al, 2018. Study of oblique shock wave control by surface arc discharge plasma [J]. *AIAA J*, 56 (2): 532–541.

(责任编辑 王海蓉)