

文章编号: 1000-8055(2012)09-1958-09

超燃发动机混合效率评估方法探讨

张弯洲^{1,2}, 乐嘉陵², 田野², 杨顺华², 邓维鑫^{1,2}, 程文明¹

(1. 西南交通大学 机械工程学院, 成都 610031;

2. 中国空气动力研究与发展中心 吸气式高超声速技术研究中心, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 总结和分析了 3 种常用的典型混合效率评估方法, 为了提高对混合程度的评估精度和客观性, 提出了 3 种新的混合程度评估方法和指标: 流场混合效率、可燃混合效率和适燃区域比例。流场混合效率能够客观评估流场结构的混合性能和增混措施的效果; 可燃混合效率和适燃区域比例, 结合了流场中的熄火边界参数, 能够将燃料的分布及混合程度直接与点火燃烧联系, 能够客观评估不同程度的贫油和富油流场的混合程度, 能够合理地预测燃烧可能发生的区域。最后通过二维算例比较了新旧方法的评估结果, 验证了新评估方法的合理性。

关 键 词: 燃料混合; 超燃发动机; 点火燃烧; 混合效率; 超燃发动机设计

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Evaluation methods of the fuel mixing efficiency for Scramjet

ZHANG Wan-zhou^{1,2}, LE Jia-ling², TIAN Ye², YANG Shun-hua²,
DENG Wei-xin^{1,2}, CHENG Wen-ming¹

(1. School of Mechanical Engineering,

Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Airbreathing Hypersonics Research Center,

China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: Three commonly-used evaluation methods for scramjet were summarized and analyzed, to improve the precision and objectivity for mixing evaluation, three new methods were imposed: the flow-field mixing efficiency, the flammable mixing efficiency and the flammable region percentage. The flow-field mixing efficiency can estimate the mixing performance of the flow structure and the effect of the mixing enhancement measurements. The flammable mixing efficiency and the flammable region percentage that took the flow-field blowout limits into consideration can connect with the ignition and combustion directly, objectively estimate the mixing efficiency for different lean and rich regions, and predict the region that combustion may occur. Then the three methods are verified and compared with the existed methods by two-dimension computational cases.

Key words: fuel mixing; scramjet; ignition and combustion; mixing efficiency; design of scramjet

收稿日期: 2012-03-20

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120921.1251.006.html>

基金项目: 自然科学基金青年科学基金(10902109)

作者简介: 张弯洲(1984—), 男, 湖南醴陵人, 博士生, 主要从事超燃发动机研究。

超燃发动机中,燃料的燃烧效率直接影响发动机的性能,而燃烧效率与流场中的温度、速度和燃料的混合程度密切相关。燃料充分混合及合理分布对燃烧效率影响尤为显著。燃料最理想的混合状态^[1]为燃料与空气以化学反应恰当比达到分子水平的混合程度。过于贫油或富油的混合区域不利于点火和燃烧。而关于点火的研究文献中明确指出,高温、低速、混合均匀和富自由基的流场有利于点火。可见燃料的混合程度是影响超燃发动机点火及燃烧的重要因素。

超燃发动机中气流的驻留时间为毫秒量级,燃料的注入和混合必须快速有效^[2]。优化设计注油方式和引入增混装置是解决燃料合理分布和充分混合的有效途径。如设法增加燃料喷射的穿透深度^[3-4],采用异形喷孔^[5],使用斜坡注油器^[6],引入纵向或横向旋涡结构,引入横向声波,采用凹槽结构等,均有大量的研究文献和结论。

在研究改善燃料分布和增强燃料与空气混合的同时,需要有客观而科学的指标,对流场中燃料的分布和混合程度进行评估和界定,并将燃料的分布和混合程度与点火及燃烧联系起来,指导超燃发动机注油方式的设计。同时也需要评估注油方式和增混措施的性能,为注油方式和增混措施的设计提供依据。

本文比较和分析了常用的几种评估混合程度的方法,尤其是文献中普遍使用的 Rogers 于 1971 年提出的混合效率计算方法,发现其有一定的局限性,不能客观地评估燃料分布及燃料混合程度与燃烧之间的联系。因此本文结合流场混合特性和流场中的熄火边界参数,提出 3 个评估混合程度的指标,力求客观地评估燃料在流场中的分布和混合程度,以及其与燃烧之间的联系。并通过模拟壁面注油和模拟支杆注油的二维算例进行检验,证明了这些评估指标的合理性。

1 现有混合程度评估方法

1.1 基于时间平均的混合程度评估方法

Liscinsky 等人^[7]于 1995 年提出混合度的概念和计算方法,其定义适用于某一区域一段时间内的混合程度,其定义为

$$U = \frac{v_{\text{var}}}{c_{\text{avg}}(1 - c_{\text{avg}})} \quad (1)$$

$$c_{\text{var}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{c}_i - c_{\text{avg}})^2$$

式中 $\bar{c}_i$ 表示某微元时间平均质量浓度; c_{avg} 为平

均质量浓度: $c_{\text{avg}} = m_{\text{fuel}} / (m_{\text{fuel}} + m_{\text{air}})$, $U = 0$ 时表示充分均匀混合状态, $U = 1$ 时表示没有任何混合的状态。Fuller 等人^[8]于 1998 年提出用 $1 - U$ 表示混合度,使混合度的判定数值随混合程度的增加而增加,当 $1 - U = 1$ 时,表示充分均匀混合。

1.2 基于质量平均的混合程度评估方法

Kopchenov 和 Lomkov 于 1992 年^[9]提出某截面的混合度定义和计算方法,其定义为

$$D = \frac{\int_A \rho u (c - \bar{c})^2 dA}{\bar{c}^2 \int_A \rho u dA} \quad (2)$$

式中 ρ, u, c 分别代表当地的密度、速度和质量浓度; A 代表面积; $\bar{c}$ 表示计算截面上的加权平均质量浓度; $D = 0$ 表示充分均匀混合, $D = 1$ 表示没有燃料注入。

1.3 与燃烧反应联系的混合效率评估方法

Rogers(1971), Riggins 和 McClinton(1992)提出^[10-11]与化学反应相联系的混合效率概念,该混合效率的定义为(下文简称 Rogers 混合效率)

$$\eta_m = \frac{\dot{m}_{\text{fuel, mixed}}}{\dot{m}_{\text{fuel, total}}} = \frac{\int \alpha_{\text{react}} \rho u dA}{\int \alpha \rho u dA} \quad (3)$$

$$\alpha_{\text{react}} = \begin{cases} \alpha & \alpha \leq \alpha_{\text{stoic}} \\ \alpha_{\text{stoic}} \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha_{\text{stoic}}} & \alpha > \alpha_{\text{stoic}} \end{cases}$$

α 表示燃料的质量分数; α_{react} 表示能够参与反应的燃料质量分数; α_{stoic} 表示化学反应恰当比时的燃料质量分数。

该混合效率为所有能够与氧化剂进行反应的燃料与注入总燃料之比,即

$$\eta_m = \frac{\dot{m}_{\text{fuel, react}}}{\dot{m}_{\text{fuel, total}}} \quad (4)$$

该混合效率是文献中用以评价燃料混合程度应用最多的方法^[12-13]。

以上 3 种混合程度和混合效率的评估各有特点和局限。如式(1)和式(2)的混合度计算公式为流场中局部燃料质量分数与流场平均质量分数进行比较,该类混合度计算方法适用于两种物质以接近 1:1 的比例进行混合的情况。而超燃发动机中注入的燃料相对空气来说较少,如以当量比为 1 注入燃料时,氢气与空气的油气比仅为 0.028,煤油与空气的油气比仅为 0.064,并且式(1)和式(2)的计算方法没有体现燃料混合程度与燃烧之间的关系。式(3)的混合效率计算虽然与反应有联

系,但其与燃烧之间的联系并不客观合理,例如只要流场中没有富油微元区域,该混合效率的计算结果均为 1.0,不能评估贫油的程度;同时对于贫油和富油程度较高的区域,该评估值过于乐观.在后面的算例中会有更详细的比较和分析.

通过上述分析,有必要提出评估燃料分布和混合程度评估的新方法,能够更客观合理地评估燃料在流场中的分布情况和混合程度,并建立其与燃烧之间的联系,为超燃发动机的设计提供更有合理的依据.

2 混合程度评估新指标和方法

2.1 流场混合效率

流场混合性能主要由流场结构,注油装置和增混措施等决定.不同的发动机构型如凹槽构型,突扩台阶构型,扩张燃烧室构型等流场结构有差别;不同的注油方式^[3-6,14-15]如支杆注油、支板注油、斜坡注油等对流场结构也有较大影响.如图 1 所示不同支板形式^[16]的注油器在流场中会产生不同的纵向旋涡.如图 2 所示不同的凹槽形式^[17]在凹槽内回流区的形式和大小不同,凹槽出口剪切层的形成和凹槽尾部的激波形式均不同.如图 3 所示不同角度的斜坡注油器^[18]引起下游不同的纵向旋涡结构.

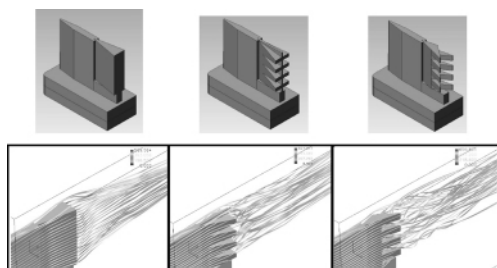


图 1 不同形式的支板注油器下游的流线

Fig. 1 Streamlines under different pylon injectors

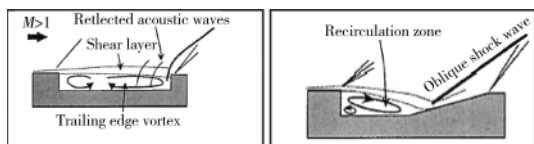


图 2 不同形式凹槽引起的流场结构

Fig. 2 Different cavities induced different flow-fields

因此,定义流场混合效率,用以描述和评估流场的混合性能,与燃料注入量关系不大.假设空气的流量为 $\dot{m}_{a0}$, 燃料的流量为 $\dot{m}_{f0}$. 假设给定足够

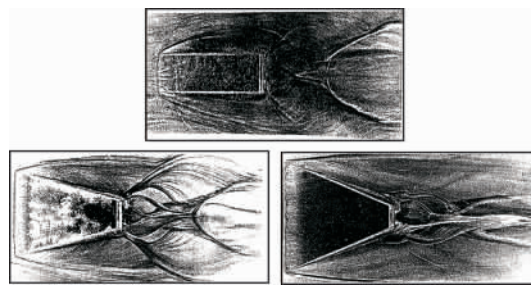


图 3 不同角度的斜坡注油器下游的纵向涡旋结构

Fig. 3 Different longitudinal vortexes after different ramp injectors

的时间使其充分混合,则流场各处的燃料质量分数为

$$\alpha_{f0} = \dot{m}_{f0} / (\dot{m}_{f0} + \dot{m}_{a0}) \quad (5)$$

空气的质量分数为

$$\alpha_{a0} = \dot{m}_{a0} / (\dot{m}_{f0} + \dot{m}_{a0}) \quad (6)$$

此时的混合状态为充分混合,及混合效率定义为 1.0;完全未混合的区域则空气的质量分数为 0 或燃料的质量分数为 0,此时的混合效率定义为 0;介于充分混合与完全未混合的区域,则区分为相对贫油区域和相对富油区域分别进行计算,贫油区域燃料的质量分数为 $\alpha_f = \dot{m}_f / (\dot{m}_f + \dot{m}_a)$;富油区域空气的质量分数为 $\alpha_a = \dot{m}_a / (\dot{m}_f + \dot{m}_a)$. 则流场中,各微元处的流场混合效率为

$$\eta_{ms} = \begin{cases} \frac{\alpha_f}{\alpha_{f0}} & \left(\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \leq \frac{\dot{m}_{f0}}{\dot{m}_{a0}} \right) \text{ 相对贫油段} \\ \frac{\alpha_a}{\alpha_{a0}} & \left(\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} > \frac{\dot{m}_{f0}}{\dot{m}_{a0}} \right) \text{ 相对富油段} \end{cases} \quad (7)$$

计算控制体内的总混合效率为

$$\eta_m = \frac{\int \eta_{ms} dS}{\int dS} \quad (8)$$

η_{ms} 表示各微元处的流场混合效率,根据混合程度其取值范围为: $0 \leq \eta_{ms} \leq 1$; η_m 为总混合效率; dS 表示微元面积或微元体积; α 为质量分数. 利用该式可以计算某截面或某控制体积内的混合效率. 该计算式分贫油区域和富油区域,其曲线的变化趋势如图 4 所示. 该曲线在贫油区和富油区 η_{ms} 的范围均为: $0 \sim 1$. 贫油段 $\dot{m}_f$ 的范围为 $0 \sim \dot{m}_{fst}$, 而富油段 $\dot{m}_a$ 的范围为 $1 \sim 0$; 一般 $\dot{m}_{fst}$ 相对 $\dot{m}_a$ 较小,因此该混合效率在贫油区域相对更为敏感.

2.2 可燃混合效率

在 Rogers 的混合效率计算中,理论上所有能够参与反应的燃料都计算在内. 而实际流场中,维

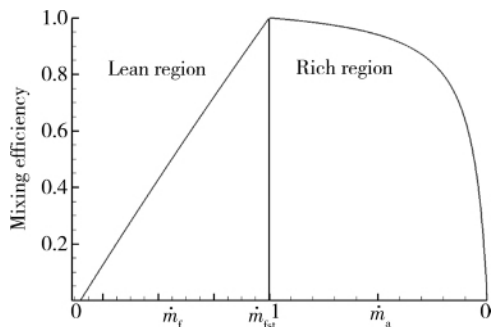


图4 流场混合效率曲线

Fig. 4 Curve of the flow-field mixing efficiency

持燃烧对燃料混合程度和质量分数范围有相对苛刻的要求. 如流场中, 燃料质量分数高于富油熄火边界 (rich blow-out) 或低于贫油熄火边界 (lean blow-out) 时, 燃烧反应几乎不能发生. 因此有必要重新定义混合效率与点火燃烧之间的关系. 燃料与空气以化学反应恰当比达到分子程度混合时, 最有利于点火和稳定燃烧^[1], 定义此时的可燃混合效率为 1.0; 燃料质量分数达到和高于富油熄火边界 (α_{f-rb}) 或低于贫油熄火边界 (α_{f-lb}) 时定义可燃混合效率为 0. 此时的可燃混合效率计算公式为

$$\eta_{fms} = \begin{cases} 1 - \frac{\alpha_{fst} - \alpha_f}{\alpha_{fst} - \alpha_{f-lb}} & (\alpha_f \leq \alpha_{fst}) \\ 1 - \frac{\alpha_f - \alpha_{fst}}{\alpha_{f-rb} - \alpha_{fst}} & (\alpha_f > \alpha_{fst}) \end{cases} \quad (9)$$

$$\eta_{fm} = \frac{\int \eta_{fms} dS}{\int dS} \quad (10)$$

该公式在评估贫油和富油程度较高的区域时, 计算出来的混合效率极低, 表示对点火及燃烧十分不利. 当针对具体的流场参数, 若能通过计算和实验确定贫油和富油熄火边界, 该可燃混合效率的计算会更客观, 更准确.

2.3 适燃区域比例

如上节所述, 要维持稳定的燃烧, 流场中燃料的质量分数和混合状态需要满足一定的条件. 在贫油或富油程度较高的区域即使可能在高温下发生少量的化学反应, 但不一定能够维持稳定的燃烧. 因此, 根据特定的流场, 可以利用当地当量比区分混合程度适合燃烧的区域. 计算适合燃烧的面积 (体积) 与总面积 (体积) 之比, 来定量计算流场中适合燃烧的区域比例. 如假设在某流场中, 通过计算或实验确定, 当地当量比范围为 $f_{\min} \sim f_{\max}$ 时, 比较适合点火和燃烧, 那么适燃区域的比

例则定义为

$$R = \frac{\sum S_{\phi=(f_{\min}-f_{\max})}}{\sum S} \quad (11)$$

适燃区域比例能够定量地计算流场中能够维持稳定燃烧的区域比例.

结合适燃区域比例和可燃混合效率, 可以对流场中燃料的混合程度和分布与燃烧之间的联系进行比较客观的评估和判断.

3 混合程度指标的二维算例验证

3.1 模拟壁面注油的二维算例验证

模拟壁面注油的算例包括隔离段和部分燃烧室, 燃烧室为单凹槽和串联双凹槽两种构型, 模拟壁面垂直注油且注油位置相同 (图 5). 稳焰凹槽深度与隔离段高度的比值约为 0.3, 凹槽的长深比为 7; 声学凹槽深度与稳焰凹槽深度一致, 长深比为 1. 模拟入口马赫数为 2.0 下, 注入不同当量比 (equivalence ratio, 简称 ER; 记为 R_e) 的乙烯燃料, 计算流场中的燃料分布 (见图 6), 并根据计算结果, 计算上述混合效率和可燃区域比例 (表 1), 比较和分析不同混合效率之间的差异.

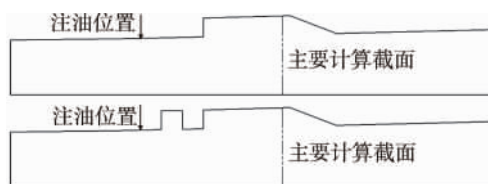


图5 单凹槽和双凹槽燃烧室构型

Fig. 5 Combustor configuration with single and dual cavities

从图 6 和表 1 中得出下列结论:

1) Rogers 混合效率不能客观反映燃料的分布情况. 从质量分数分布 (图 6) 可以看出, 模拟壁面注油的算例中, 随着注油当量比的增加, 燃料的穿透深度略有增加, 但燃料基本分布于下壁面附近和凹槽内, 向主流中心扩散的燃料极少. 可见, 燃料在流场中的分布并不理想. Case1-1 中, Rogers 的混合效率达到 0.73 (表 1), 而流场混合效率和可燃混合效率均在 0.3 左右 (表 1 和图 7). 可见, 综合燃料的分布情况以及凹槽深度与流场高度的比例, Rogers 的混合效率并不能反应燃料的分布情况, 而流场混合效率和可燃混合效率比较接近实际情况.

2) Rogers 混合效率的评估结果相对比较乐

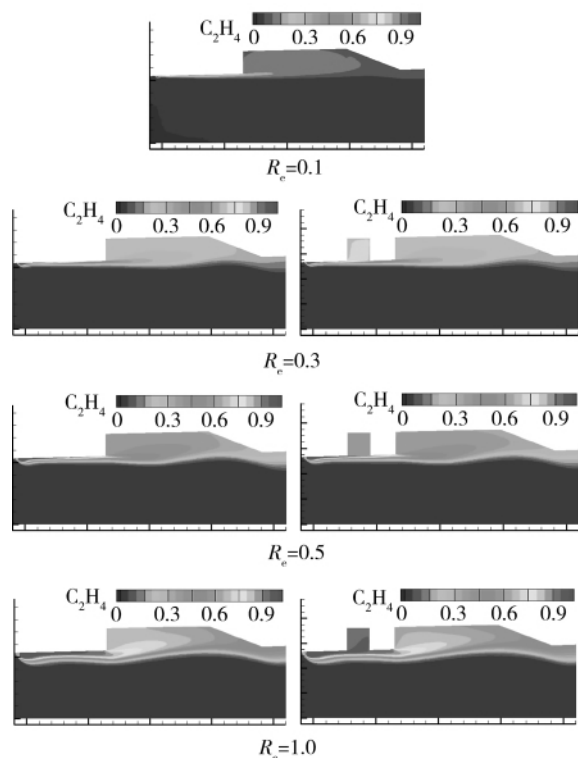


图 6 不同注油当量比下乙烯的质量分数云图

Fig. 6 Ethylene mass fraction under different ERs

观. 结合表 1 和图 8 可以看出, Case1-4 和 Case1-7 在 490 mm 截面上, 凹槽内的局部当量比均在 15 以上, 最高接近 25, 超过了富油熄火边界. 根据实验及计算结果, 此时仅有极少的燃料能发生反应. 而 Rogers 的混合效率计算结果认为有 14% 的燃料仍能参与反应. 而跟富油熄火边界计算的可燃混合效率仅 0.037, 相比之下 Rogers 的混合效率结果比较乐观.

3) 流场混合效率能够反映串联双凹槽构型

表 1 壁面注油算例中不同混合效率及适燃区域比例的计算结果(截面 $x=490$ mm)Table 1 Results of mixing efficiencies and flammable region percentage for wall injection (the section at $x=490$ mm)

Case	Configuration	R_e	Rogers mixing efficiency	Flow-field mixing efficiency	Flammable mixing efficiency	Flammable region percentage $R(0.5 \sim 1.5)$	Flammable region percentage $R(0.5 \sim 2.0)$
Case1-1	Single cavity	0.1	0.7254	0.3372	0.2945	0.0535	0.3137
Case1-2		0.3	0.3663	0.3202	0.2483	0.0339	0.04456
Case1-3		0.5	0.2327	0.2736	0.1657	0.0303	
Case1-4		1.0	0.1404	0.2050	0.037	0.0321	
Case1-5	Dual-cavity	0.3	0.3605	0.3249	0.2498	0.0347	
Case1-6		0.5	0.2370	0.2805	0.1732	0.0330	
Case1-7		1.0	0.1425	0.2101	0.048	0.0339	

注: 计算可燃混合效率时, 根据实验及计算结果, 富油熄火边界取燃料质量分数为 51.2%, 贫油熄火边界取 0.

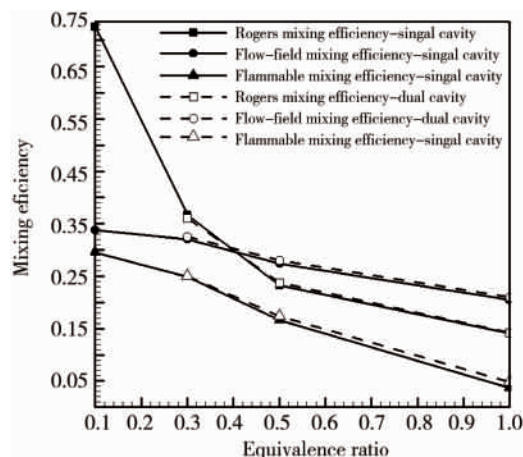


图 7 3 种混合效率的计算结果曲线

Fig. 7 Results of mixing efficiencies

的混合性能略高于单凹槽构型. 随着当量比的增加, 流场混合效率呈下降趋势. 这是因为进入凹槽内部的燃料越多, 凹槽内燃料的质量分数梯度变小, 混合性能变差. 而串联凹槽的混合效率较单凹槽的混合效率略高, 说明上游声学凹槽对混合有一定的增强, 但效果并不明显, 最大的增幅为 2.5% (二维计算中, 声学凹槽的声波振荡作用可能没有充分发挥).

4) 适燃区域比例能够客观反映燃料的分布和混合情况. 适燃范围若定义为当量比 0.5 ~ 1.5, 各算例中均较小, 因为凹槽内富油程度较高, 均超出适燃区域的判定范围, 适燃区域分布于燃料与主流之间过渡的位置 (图 8). 若将适燃范围定义为当量比 0.5 ~ 2.0, 则 Case1-1 凹槽内均为适燃区域, 此时的适燃区域比例为 31.37%, 与燃料分布情况相符.

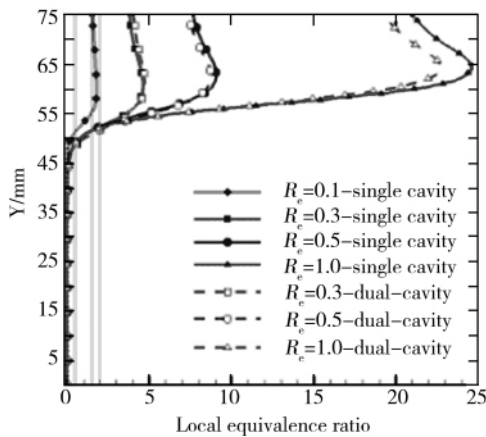


图 8 490 mm 截面上的当地当量比曲线
Fig. 8 Local equivalence ratio at $x=490$ mm

3.2 模拟支杆注油的二维算例验证

模拟支杆注油的发动机构型及来流参数与模拟壁面注油算例一致,注油位置在 x 方向(沿流向)一致,而在高度方向平均分布 3(图 9)、7(图

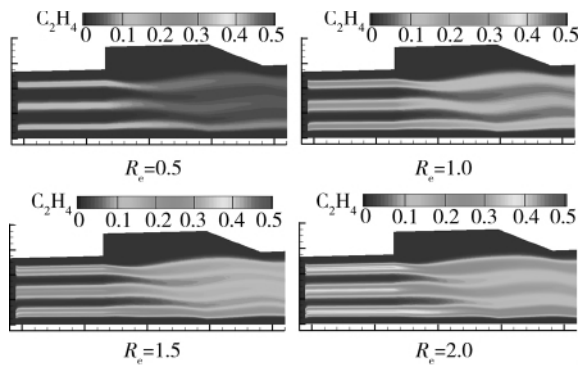


图 9 3 点注油算例不同注油当量比下的燃料分布
Fig. 9 Fuel mass fraction for each R_e with three strut injectors

10)个点.后根据计算结果,在 7 点注油算例的基础上,离上壁面 1mm 处增加了一个注油点,为 8 (图 11 左)点注油算例;离上壁面 1mm 和 3mm 处各增加一个注油点,为 9 点(图 11 右)注油算例.各注油点的注油量平均分配.计算结果见图 9,图 10,图 11 和表 2.

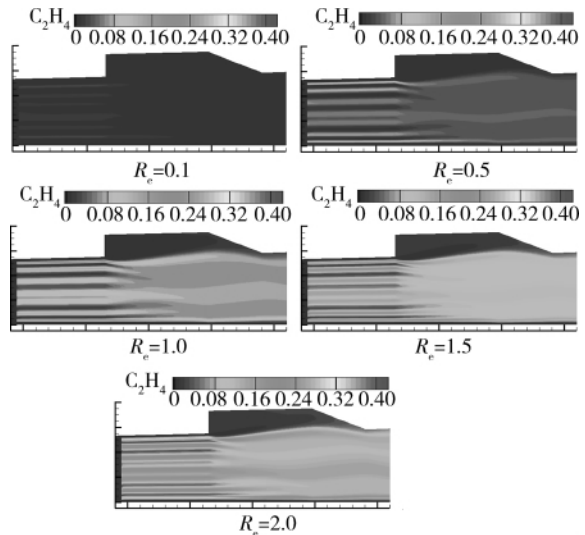


图 10 7 点注油算例不同当量比下的燃料分布
Fig. 10 Fuel mass fraction for each R_e with seven strut injectors

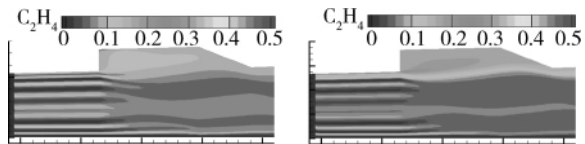


图 11 8 点注油(左)和 9 点注油(右)算例在当量比为 1 时的燃料分布
Fig. 11 Fuel mass fraction for $R_e=1.0$ with eight (left) and nine (right) strut injectors

表 2 支杆注油算例中不同混合效率及适燃区域比例的计算结果(截面 $x=490$ mm)

Table 2 Results of mixing efficiencies and flammable region percentage for strut injection (the section at $x=490$ mm)						
Case	Amount of injectors	R_e	Rogers mixing efficiency	Flow-field mixing efficiency	Flammable mixing efficiency	Flammable region percentage $R(0.5\sim1.5)$
Case2-1	Three	0.5	0.9815	0.6086	0.4381	0.4456
Case2-2		1.0	0.6966	0.6119	0.5929	0.3620
Case2-3		1.5	0.4893	0.6059	0.5782	0.2105
Case2-4		2.0	0.3707	0.5944	0.5324	0.0380
Case2-5	Seven	0.1	1.0	0.7296	0.0857	0
Case2-6		0.5	1.0	0.7812	0.4414	0.5101
Case2-7		1.0	0.9100	0.7857	0.7803	0.7469
Case2-8		1.5	0.6227	0.7898	0.7604	0.2674
Case2-9	Nine	2.0	0.4728	0.7889	0.7346	0.0410
Case2-10		1.0	0.8046	0.8399	0.8074	0.6898
Case2-11		1.0	0.9078	0.9186	0.9070	0.7701

从图 9 和图 10 可以看出, Case2-1 至 Case2-9 算例, 离上壁面最近的注油点所喷出的燃料仅有极少量的通过扩散进入凹槽, 凹槽内贫油程度很高. 后根据该计算结果, 在离上壁面 1 mm 和 3 mm 位置的各增加了一个注油点, 即 9 点注油算例. 从 Case2-10 的计算结果(图 11 右)可以看出, 这 2 个点喷出的燃料大部分进入凹槽, 导致凹槽内的富油程度稍高. 在此基础上, 减少了离上壁面 3 mm 的注油点即 Case2-11, 凹槽内的燃料质量分数分布相对比较合理(图 11 左).

图 12 为相同截面上, 3 点注油(图 12(a))和 7 点注油(图 12(b))的当地当量比变化曲线. 从图中的曲线可以看出, 3 点注油算例由于注油点较少, 燃料相对集中, 流场中有 3 个明显的波峰; 而 7 点注油的算例中, 除靠近下壁面注油点有较明显的波峰外, 其他位置的燃料分布均比较平滑. 比较相同注油当量比算例中, 3 点注油的当地当量比峰值明显高于 7 点注油的峰值. 这说明 7 点注油相对 3 点注油的燃料分布更均匀, 混合更充分. 而图 12(c)比较了注油当量比均为 1.0 的 4 个算例, 从该图中可以看出, 注油点越多, 流场中燃料的分布越均匀. 3 点和 7 点注油中, 凹槽内的燃料分布极少; 9 点注油中, 凹槽内燃料质量浓度较高, 当地当量比最高达到 3 以上; 后根据该计算结果, 减少了离上壁面 3 mm 的注油点即 8 点注油, 凹槽内燃料的分布更加合理.

通过上述图表的结果, 可得出以下结论:

1) Rogers 混合效率不能客观评估不同贫油状态的混合程度. 如 Case2-5 和 Case2-6 中, 该混合效率均为 1.0, 表示这两个状态下燃料的混合效率没有差别. 而从当地当量比曲线可以看出, Case2-6 相对更有利于燃烧的发生和维持. 可见 Rogers 的混合效率对于贫油流场的贫油程度不能客观评估.

2) 流场混合效率能够评估注油方式的混合性能. 从流场混合效率的计算结果来看, Case2-1 至 Case2-4 其流场混合效率均在 0.6 左右, 差别最大为 1.98%; 而 Case2-6 至 Case2-9, 流场混合效率均在 0.785 左右, 差别最大为 0.61%. 从这个结果可以看出, 7 点注油算例燃料分布更均匀, 混合更充分, 因此混合效率均高于 3 点注油. 该计算结果符合流场混合效率主要由流场结构决定, 与注油量关系不大的特性. Case2-5 的流场混合效率低于 0.785, 约为 7%, 其原因为: 当量比 0.1 时燃料质量分数已经很低, 其向凹槽内和向下壁

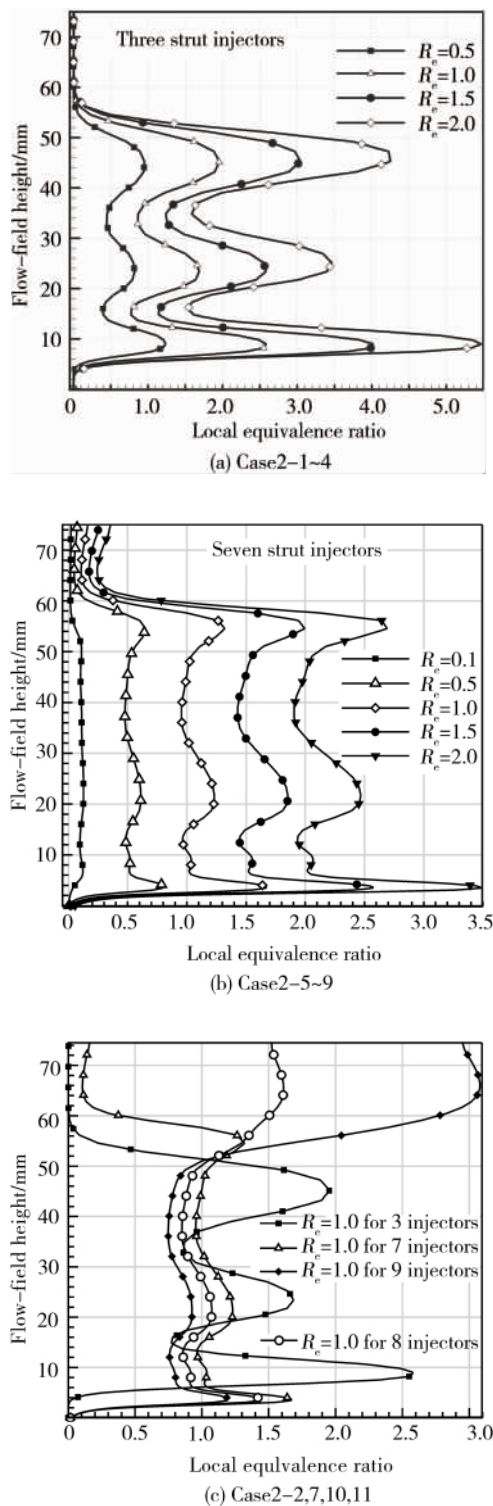


图 12 490 mm 截面上的当地当量比曲线

Fig. 12 Local equivalence ratio at $x=490$ mm

面扩散的速度较慢, 导致流场混合效率偏低, 但仍然明显高于 3 点注油算例的流场混合效率. 从图 12(b)中当地当量比曲线可以看出, Case2-5 凹槽内的当地当量比几乎为 0, 随着当量比的增大, 凹槽内的燃料质量分数随之增加. 而 9 点注油

(Case2-10)会导致凹槽内富有程度稍高,其流场混合效率低于8点注油(Case2-11)。可见,流场混合效率能够客观评估不同注油方式的混合性能。

3) 将可燃混合效率与适燃区域比例综合分析,可以客观的评估燃料的分布和混合程度。但可能出现可燃混合效率较高而适燃区域比例较低的现象。如 Case2-9 中,可燃混合效率为 0.735,而适燃区域比例仅为 4.1%,出现这种现象的原因见图 12(b),流场中大部分区域的当地当量比为 2.0~2.5 之间,超出了当量比为 0.5~1.5 的适燃区域判定范围,而 2.0~2.5 的当地当量比对可燃混合效率的影响不大。出现这样的现象一方面说明适燃区域判定范围可能相对较窄;另一方面说明大部分区域超出适燃区域判定范围不远。

4) 综合考虑可燃混合效率和适燃区域比例,能够对流场中燃料的分布和混合程度进行客观的评估。如 Case2-7, Case2-10 和 Case2-11,这 3 个算例注油当量比为 1,且燃料的分布比较理想; Case2-11 对燃料分布做了进一步优化,相对 Case2-10,降低了凹槽内的富油程度,从计算结果可以看出,可燃混合效率达到 0.9186;判定适燃区域的范围即使是当量比 0.5~1.5 这样苛刻,适燃区域比例也达到了 77%。可见该算例的混合程度和燃料分布最为合理。

5) 比较 Case2-5 中的 Rogers 混合效率和可燃混合效率计算结果,结合图 12(b)可以看出,在贫油程度较高的流场中,可燃混合效率的评估值相对更准确。

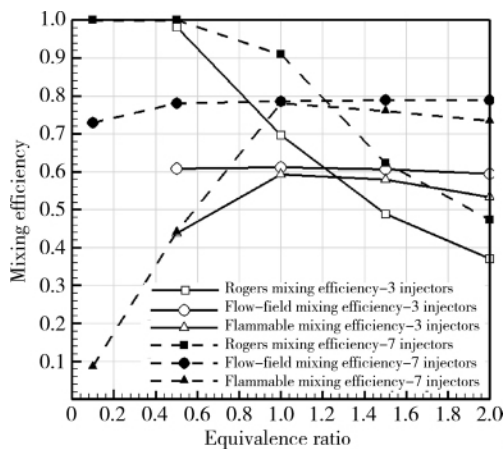


图 13 Case2-1 至 Case 2-9, 3 种混合效率的计算结果

Fig. 13 Three mixing efficiencies for case2-1 to case 2-9

4 结 论

通过上述的算例验证和分析,对几种混合程度评估方法进行简单的比较和总结:

1) Rogers 的混合效率对燃料的分布和混合程度评估不够客观。主要表现有:①不能对燃料的分布进行客观评估;②该混合效率能够评估理论上参与反应的燃料混合程度,不能客观地评估维持燃烧的燃料混合程度;③不能评估不同贫油程度的燃料混合状态。

2) 流场混合效率计算能够相对客观地评价流场结构和注油方式的混合性能,与初始注入的油汽比关系不大。但注入燃料对其有一定的影响,主要因为当燃料在流场中的质量分数梯度的变化,会影响燃料的混合速度。该混合效率适合评估增混措施的效果和流场结构的混合性能。

3) 结合可燃混合效率和适燃区域比例两个评估指标,能够客观的评估燃料的分布和混合程度。在计算这两个指标时,可以根据具体的流场参数,设定适燃区域的判定范围,以及可燃混合效率中的贫油和富油熄火边界,从而更客观和精确地评估流场中燃料的混合程度和分布,并与点火及燃烧相联系。

4) 这 3 种混合效率的评估方法,可以应用于计算和评估已知流场的混合性能和混合程度。如果结合实验和数值模拟的参数如熄火边界等,可以进一步提高混合效率评估方法的准确性和客观性。

参考文献:

- [1] Heiser W H, Pratt D T. Hypersonic airbreathing propulsion[M]. Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., 1994.
- [2] Segal C. The scramjet engine: processes and characteristics [M]. New York: Cambridge University Press, 2009.
- [3] 刘世杰, 潘余, 刘卫东. 超燃冲压发动机支板喷射燃料的燃烧过程试验[J]. 航空动力学报, 2009, 24(1): 55-59. LIU Shijie, PAN Yu, LIU Weidong. Experimental study on the combustion and flow process in a scramjet with strut injector[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(1): 555-559. (in Chinese)
- [4] Lin K C, Kenedy P J, Jackson T A. Structures of aerated-liquid jets in high-speed crossflows[R]. AIAA 2002-3178, 2002.
- [5] Hirano K, Matsuo A, Kouchi T, et al. New injector geometry for penetration enhancement of perpendicular jet into supersonic flow[R]. AIAA 2007-5028, 2007.

- [6] WANG Dian, SONG Wenyan, LI Jianping, et al. Investigation of hydrocarbon-fuel ignition and combustion in scramjet combustor[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2008, 31(5): 449-452.
- [7] Liscinsky D S, True B, Holdeman M A. Crossflow mixing of noncircular jets[R]. AIAA-95-0732, 1995.
- [8] Fuller R P, Wu P K, Nejad A S, et al. Comparison of physical and aerodynamic ramps as fuel injectors in supersonic flow[J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(2): 135-145.
- [9] Kopchenov V I, Lomkov K E. The enhancement of the mixing and combustion processes applied to scramjet engines[R]. AIAA-92-3428, 1992.
- [10] Rogers R C. Mixing of hydrogen injected from multiple injectors normal to a supersonic airstream [R]. NASA TN D-6476, 1971.
- [11] Ringins D W, McClinton R C. A computational investigation of mixing and reaction flows in supersonic combustors [R]. AIAA-92-0626, 1992.
- [12] Parent B, Sislian J P. Turbulent hypervelocity fuel/air mixing by cantilevered ramp injectors[R]. AIAA-2001-1888, 2001.
- [13] Yang V, Li J, Yeol J, et al. Ignition transient in an ethylene fueled scramjet engine with air throttling Part I: non-reacting flow development and mixing[R]. AIAA 2010-409, 2001.
- [14] Rasmussen C C, Driscoll J F, Hsu K Y, et al. Stability limits of cavity-stabilized flames in supersonic flow[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 2825-2833.
- [15] 陈立红, 顾洪斌, 张新宇. 支板凹腔一体化超燃冲压发动机实验研究[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(4): 717-719.
CHEN Lihong, GU Hongbin, ZHANG Xinyu. Experimental study on scramjet with cavity/strut configuration[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(4).
- [16] Doster J C, King P I, Gruber M R, et al. Pylon fuel injector design for a scramjet combustor[R]. AIAA 2007-5404, 2007.
- [17] Ben-Yakar A, Hanson R K. Cavity flame-holder for ignition and flame stabilization in scramjet: an overview[J]. Journal of Propulsion and Power, 2001, 17(4): 869-877.
- [18] Aso S, Yamane Y, Umii K, et al. A study on supersonic mixing flow-field with swept ramp injectors [R]. AIAA 97-0397, 1997.