

剪切同轴式喷嘴中心管壁厚对火焰的影响*

洪 流¹, Oswald M², 仲伟聪³

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072 2. 德国宇航中心航天推进研究所, Hardhausen D-74239;
3. 陕西动力机械设计研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 为了研究剪切同轴式喷嘴中心管壁厚度对火焰的影响, 针对 LOX/CH₄ 火焰, 采用数值方法计算了三种不同喷嘴中心管壁厚的长方体形燃烧室内的燃烧过程, 计算表明, 对于较大的管壁厚度, 在紧贴管壁下游的区域将形成较大的回流区, 有利于火焰稳定在喷嘴出口处, 还给出了采用相同几何结构燃烧室的 LOX/CH₄ 燃烧试验结果, 试验也得出了同样的趋势, 随着中心管壁厚度的增加, 火焰中心明显前移。

关键词: 同轴式喷嘴; 火焰稳定性; 液氧; 甲烷; 台阶扩散效应

中图分类号: V231.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2008) 03-0282-04

Numerical and experimental investigation on edge diffusion effect of shear coaxial injector

HONG Liu¹, Oswald M², ZHONG Weicong³

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China
2. Space Propulsion Inst., German Aerospace Center, Hardhausen D-74239, Germany
3. Shaanxi Power Machinery Inst., Xi'an 710100, China)

Abstract To study the edge diffusion effect of shear coaxial injector on the LOX/Methane flame, numerical simulation and experimental investigation on the flame attachment were performed at different LOX post wall thickness. Numerical simulation results show that greater wall thickness causes larger recirculation zone at the downstream of the LOX post, which is beneficial for flame attachment. Experimental results show the same tendency.

Key words Shear coaxial injector; Flame stability; Liquid oxygen; Methane; Edge diffusion effect

1 引 言

对于低温火箭发动机, 非预混火焰的稳定性是一个非常重要的问题。对于同轴式喷嘴, 比较理想的是火焰稳定在喷嘴出口处, 如果火焰前锋与喷嘴出口之间存在一段分离距离, 则有可能产生火焰不稳定, 甚至被吹灭。

Guoco F 等人^[1]在液氧/氢与液氧/甲烷对比燃烧试验中发现, 在相近的 We 数和动力比 J 下, 液氧/氢火焰总是稳定在喷嘴出口附近, 而大多数液氧/甲烷火焰与喷嘴出口之间总存在一段距离 (分离距离)。洪流等人^[2]研究了这种火焰在外界扰动作用下的现象, 发现在横向扰动作用下, 液氧射流将产生

与激励相近波形的脉动, 与一阶横向振型耦合时, 火焰非常不稳定, 火焰将产生强烈的横向和轴向位置脉动。作为课题工作的延续, 本文重点研究同轴式喷嘴中心管壁厚对火焰稳定性的影响。

中心管壁厚是火焰稳定过程中很重要的一个参数, 在它下游的回流区促进了氧化剂与燃料的掺混, 从而加热附近的低动量流, 保证火焰前锋稳定在速度相对较低的区域。Juniper M 等人^[3]采用数值计算方法研究了中心管高度对火焰的影响, 采用了简单的化学反应式和层流模型, 结果表明, 当无量纲参数 $\phi = H / \sqrt{\tau_c D} > 1$ 时, 式中 H 为中心管壁厚度, 见图 1, τ_c 为化学反应时间, $D = 2.41 \times 10^{-9} T^{1.76} \text{ m}^2/\text{s}$ 是成份扩散率, 火焰前锋挤入中心管厚度形成的台阶下游的

* 收稿日期: 2007-06-01; 修订日期: 2007-09-12

作者简介: 洪流 (1963—), 男, 博士生, 研究领域为液体推进技术。E-mail: HongLiu2020@Yahoo.com.cn

低速区, $\phi < 1$ 时, 火焰位于台阶后的低速区之外, 完全曝露在高速主流中, 这时火焰对 Damköler 数 D_a 非常敏感, $D_a = D^{1/2} U^{-1} \tau_c^{1/2}$, 式中 U 为气体喷注速度。

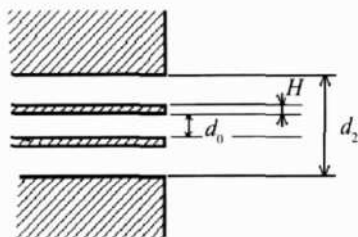


Fig. 1 Geometric definition of shear coaxial injector

本文采用 FLUENT 软件中的非预混燃烧模型和 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 针对不同的中心管壁厚进行了燃烧场的计算, 同时对采用相同结构的喷嘴和燃烧室进行了热试, 从趋势上对两种结果进行了对比。

2 喷嘴中心管壁厚台阶扩散效应数值计算

2.1 物理模型和计算方法

FLUENT 软件中的非预混燃烧模型 PDF 方法是一种基于预测成份分布概率, 然后根据成份分布用热力学气动算法给出当地温度的算法, 因而不需要求解能量方程。用非预混燃烧模型进行燃烧数值模拟时, 控制方程可以用一个通用方程来描述。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\varphi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\varphi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w\varphi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial z}\right) + S_\varphi \quad (1)$$

方程中 φ , Γ_φ 和 S_φ 在各方程中的含义如表 1 所示, 表中的 G_k 和 μ_e 定义如下

$$G_k = \mu_e \left[2 \left| \frac{\partial u}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|^2 + \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|^2 + \left| \frac{\partial v}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial v}{\partial y} \right|^2 + \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right|^2 \right]$$

$$\mu_e = \mu + \mu_t \quad \mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon$$

以上方程中的导数用一阶上风差分格式进行离散化, 采用 Simple 方法求解。

2.2 计算网格划分与边界条件

本文采用的燃烧室是一个横截面为 $60 \times 60 \text{ mm}^2$, 长度为 140 mm 的长方体形燃烧室, 采用一个剪切同轴式喷嘴。根据燃烧室结构的对称性, 从燃烧室中心线开始取 $1/4$ 进行计算。采用非结构性网格, 其中同轴式喷嘴采用四面体网格, 燃烧室及喷管采用五面体网格, 详见图 2。

计算采用了三种中心管壁厚 H 分别为 0.4 mm , 0.6 mm 和 0.8 mm 。为了便于比较喷嘴中心管壁厚的影响, 对于三种壁厚值, 中心管内径和同轴式喷嘴

Table 1 Definition of parameters in equation (1)

Equation	φ	Γ_φ	S_φ
Continuity	1	0	0
x-momentum	u	μ_e	$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_e \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_e \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_e \frac{\partial w}{\partial x} \right]$
y-momentum	v	μ_e	$-\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_e \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_e \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_e \frac{\partial w}{\partial y} \right]$
z-momentum	w	μ_e	$-\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_e \frac{\partial u}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_e \frac{\partial v}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_e \frac{\partial w}{\partial z} \right]$
Turbulent	k	$\frac{\mu_e}{\sigma_k}$	$G_k - \rho \varepsilon$
Turbulent diffusivity	ε	$\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon}$	$-\frac{\varepsilon}{k} (C_1 G_k - C_2 \rho \varepsilon)$
Mixture fraction	f	$\frac{\mu_e}{\sigma_f}$	0
Mixture fraction variance	g	$\frac{\mu_e}{\sigma_g}$	$C_{g1} \mu_e \left[\left \frac{\partial f}{\partial x} \right ^2 + \left \frac{\partial f}{\partial y} \right ^2 + \left \frac{\partial f}{\partial z} \right ^2 \right] + C_{g2} \rho \varepsilon \frac{\varepsilon}{k}$
Energy	H	$\frac{\mu_e}{\sigma_h}$	Q_R
Species	Y_s	$\frac{\mu_e}{\sigma_Y}$	W_s



Fig. 2 Simplified computational domain

的外喷嘴流通面积保持不变,三种工况的喷嘴入口压力和推进剂流量都相同,因此三种计算工况的推进剂喷注动量比相等, $J = 0.229$ 。

液氧入口采用流量边界条件: $m_{\text{LOX}} = 0.0075 \text{ kg/s}$ 入口压力 $p_{\text{LOX}} = 0.8 \text{ MPa}$ $T_{\text{LOX}} = 90 \text{ K}$ 。

燃料入口采用流量边界条件: $m_{\text{CH}_4} = 0.002$ 入口压力 $p_{\text{CH}_4} = 0.8 \text{ MPa}$ $T_{\text{CH}_4} = 300 \text{ K}$ 。

出口采用压力边界条件: $p_e = 0.103 \text{ MPa}$ $T_e = 300 \text{ K}$ 。

2.3 计算结果与讨论

图 3给出了三种中心管壁对应的静温分布。从图中可以清楚看出,当同轴式喷嘴中心管壁厚 H 为 0.4 mm 时,高温区明显靠近喷管一侧,而 $H = 0.6 \text{ mm}$ 和 0.8 mm 时,高温区明显靠近上游,因此可以看出同轴式喷嘴中心管壁的增大有助于火焰中心向上游移动。

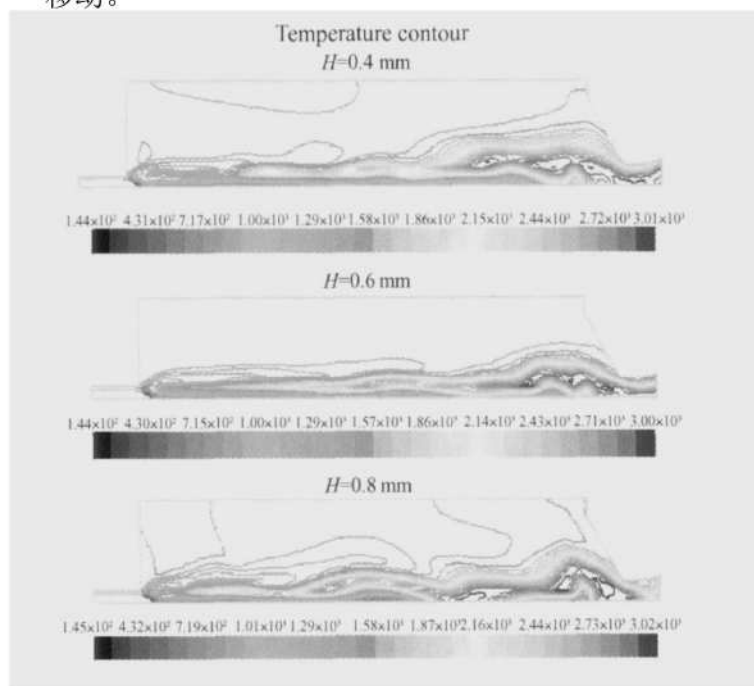


Fig. 3 Comparison of temperature distribution at different thickness of LOX post

OH 基是燃烧过程的中间产物,从 OH 分布情况可以看出火焰形状。为了便于比较,对三种计算工况分别取 0.01 作为 OH 基浓度的下限。图 4给出了三种不同壁厚条件下 OH 基质量分数分布的计算结果。从中可以清楚看出同轴式喷嘴中心管壁厚的增大使

火焰前移,有助于火焰附着在喷嘴出口附近。当 $H = 0.8 \text{ mm}$ 时,火焰基本附着在喷嘴出口。

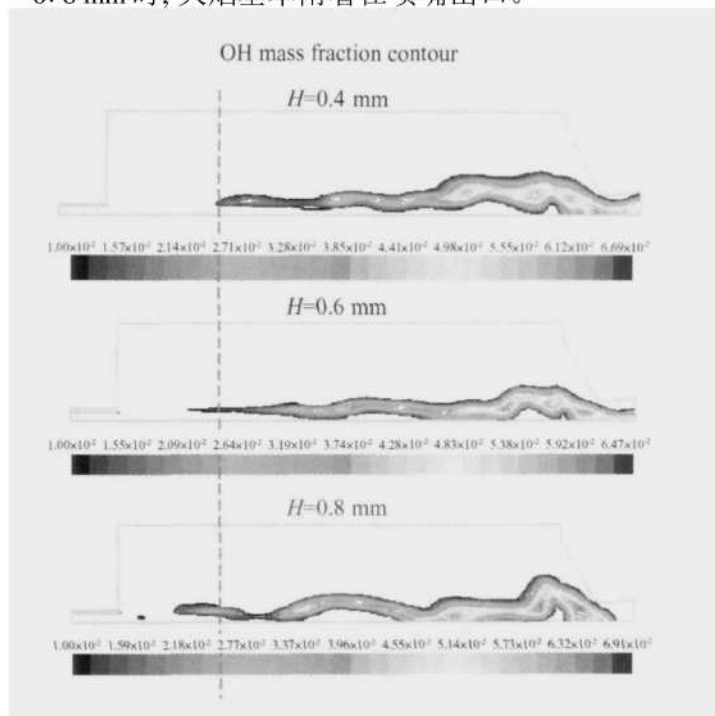


Fig. 4 Flames at different thickness of LOX post

对于内径为 1.2 mm 的中心管,当壁厚为 0.4 mm 时,火焰离开喷注器面有较大的分离距离,在试验工况下没有发现附着火焰^[1,2,4]。

从计算结果,可以清楚看出中心管壁厚对火焰稳定性的显著,其影响趋势与文献[3]的分析是一致的,即在中心管壁的形成的台阶下游形成了回流区,壁厚的增加使回流区增大,有利于推进剂的掺混和火焰的稳定。从计算结果中,没有看出中心管壁对性能,如特征速度的显著影响。

当然,在结构设计上,中心管壁厚过大可能会带来结构的问题和燃烧方面其它的问题,如喷嘴烧蚀问题等,需要综合考虑中心管壁厚的影响。

3 中心管壁端头扩散效应燃烧试验

3.1 试验方法

试验是在德国宇航中心(DLR) Lampoldshausen 中心的低压燃烧试验系统上进行的,关于试验系统的详细描述见文献[1,2,4]。试验用燃烧室与第2节描述的相同。燃烧室喷注器只有一个同轴式喷嘴,液氧以液态从喷嘴的中心柱中喷出,甲烷从环绕液氧柱的同心环状缝隙中喷注。液氧喷嘴内径为 $\Phi 1.2 \text{ mm}$,由于 $\Phi 1.2 \text{ mm}$ 不锈钢管材的限制,液氧喷嘴的管壁厚度只有 0.4 mm 和 0.6 mm 两种。燃料环的外径为 4.9 mm , 5.2 mm , 5.7 mm 和 6.9 mm 四种。选用

了四种不同喉部直径的喷管: $\Phi 12$ $\Phi 13.81$ $\Phi 16$ 和 $\Phi 17$ 。这几种几何参数的搭配可以在系统允许的工况范围内实现动量比在 0.1~0.7 变化, We 数在 2000~10000 变化。

3.2 试验结果与分析

如果根据 OH 根辐射图像灰度定义火焰中心为

$$X_c = \frac{\sum_{i,j} x_i I(i,j)}{I_t}$$

式中 $I(i,j)$ 是 OH 基图像中某点的灰度值, I_t 是总灰度值。将每次试验的火焰中心位置计算出来, 分别表示成 We 数和动力比 J 的函数关系 (图 5 和图 6), 则从中也可以清楚看出, 液氧柱壁厚的增加使火焰中心明显前移, 也就是说, 燃烧区明显往上游移动。这从一个方面说明, 液氧柱壁厚的增加对于火焰稳定在喷嘴出口附近是有益的。

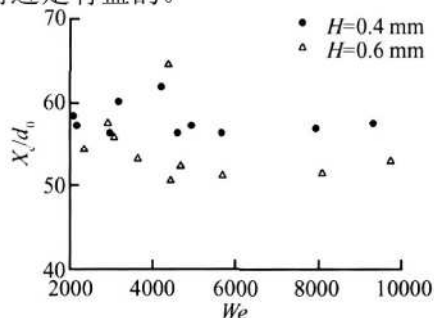


Fig. 5 Dependence of flame center on We

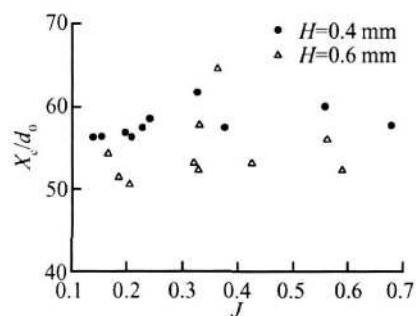


Fig. 6 Dependence of flame center on momentum ratio J

尽管试验没能给出喷嘴中心管壁厚对火焰前锋位置影响的直接证据, 但从火焰中心的分析可以清楚看出中心管壁厚增大有利于火焰的附着。

在图 5 和图 6 给出的 $H = 0.6$ mm 的试验中, 有

个别试验的火焰中心位置与 $H = 0.4$ mm 时相当, 或更大, 这说明影响火焰附着性的因素很多, 中心管壁厚只是其中之一。

4 结 论

本文通过数值计算和试验的方法, 在一定的参数范围内验证了剪切同轴式喷嘴同心管壁厚对火焰稳定性的影响, 可以给出以下趋势性的结论:

(1) 数值计算证明, 紧贴中心管下游的回流区是火焰能否稳定在喷嘴出口附近的主要因素之一。从本文的算例来看, 较大的中心管壁厚有利于火焰附着在喷嘴出口处;

(2) 试验给出较大的中心管壁厚对于性能的提高有一定的影响, 但在数值计算时没有发现这一现象;

(3) 对火焰附着性的影响因素是很复杂的, 除中心管壁厚外, 可能还有燃烧室压力^[2]、动力比、速度比及推进剂的特性参数等, 需要进行综合的分析。

参考文献:

- [1] Cuoco F, Yang B, Oswald M. Experimental investigation of LOX/ H_2 and LOX/ CH_4 sprays and flames[C]. 24th International Symposium on Space Technology and Science, Miyazaki, Japan, IITS 2004-a-04.
- [2] 洪流, Fusetti A, DeRosa M, et al 液氧/甲烷火焰和燃烧不稳定性试验研究[J]. 推进技术, 2007, 28(2). (HONG L, Fusetti A, De Rosa M, et al Experimental investigation on combustion instability of liquid oxygen and methane flame[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2007, 28(2).)
- [3] Juniper M, Candel S. Edge diffusion flame stabilization behind a step over a liquid reactant[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2003, 19(3).
- [4] Fusetti A, DeRosa M, Oswald M, et al Influence of LOX injector wall thickness on atomization and combustion of LOX/ CH_4 sprays[C]. 10th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Kyoto, Japan, ICLASS 06-227.

(编辑: 朱立影)