

某型蒸发式稳定器气动及燃烧特性研究

丁兆波¹, 金 捷²

(1. 北京航天动力研究所, 北京 100076;

2. 北京航空航天大学 航空发动机数值仿真中心, 北京 100191)

摘 要: 为解决亚燃冲压发动机在高速低温来流条件下的可靠点火、火焰稳定和高效燃烧问题, 对某型蒸发式火焰稳定器分别进行了冷态流场和燃烧流场的数值研究, 并与常规 V 型火焰稳定器进行了对比分析。研究结果表明: 在给定范围内, 蒸发式稳定器随来流速度的增大, 总压恢复系数和停留时间明显减小, 回流区长度、回流率和燃烧效率变化不大; 与相同槽宽的常规 V 型火焰稳定器相比, 回流率明显减小, 总压恢复系数、回流区长度和停留时间略有减小。蒸发式稳定器后部形成明显的回流区, 且基本上不受外部主流流动的干扰, 通过单独控制稳定器局部供油, 可以使稳定器在最佳油气比下工作, 有利于在高速来流条件下可靠工作。

关键词: 亚燃冲压发动机; 蒸发式稳定器; V 型稳定器; 气动特性; 燃烧特性

中图分类号: V439-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2013) 03-027-05

Investigation on aerodynamic and combustion characteristics of an evaporating flame-holder

DING Zhao-bo¹, JIN Jie²

(1. Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China;

2. Aero-engine Numerical Simulation Research Center, BUAA, Beijing 100191, China)

Abstract: To realize reliable ignition, flame stabilization and effective combustion of a ramjet engine under the condition of low-temperature and high-velocity incoming flow, numerical analysis of cold-state and combustion flow fields for an evaporating flame-holder was completed, and contrastive analysis with the V-gutter flame-holder was performed. The results show that, in a given scope, with the increase of inlet velocity, the total pressure recovery coefficient and retention time are reduced obviously, and recirculation zone length, recirculation ratio and combustion efficiency change a little. Compared to the V-gutter flame-holder, the recirculation ratio is reduced more significantly, and the total pressure recovery coefficient, recirculation zone length, and retention time are decreased a little bit. Recirculation zone happens in downriver of evaporating flame-holder, and is not interfered by

收稿日期: 2013-01-15; 修回日期: 2013-02-12

基金项目: 国家 863 项目(2006AA705308)

作者简介: 丁兆波 (1980—), 男, 博士研究生, 研究领域为发动机燃烧装置

main-flow. The flame-holder can work at the best fuel-air mass ratio by local fuel supply and adapt to low-temperature high-velocity inlet environment.

Keywords: ramjet engine; evaporating flame-holder; V-gutter flame-holder; aerodynamic characteristic; combustion characteristic

0 引言

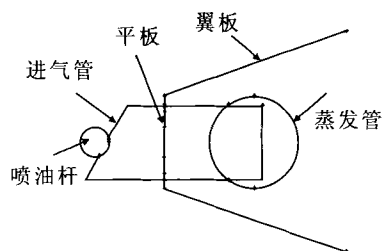
蒸发式火焰稳定器具有燃烧效率高, 贫油熄火范围宽, 点火性能好等优点, 在工作状态多变的加力燃烧室和亚燃冲压燃烧室中得到普遍应用。其中郑殿峰基于斯贝蒸发式稳定器改进设计了多种蒸发式稳定器, 提高了点火性能、火焰稳定性和燃烧效率, 扩大了低压下的贫富油熄火边界。刘鸿、王家骅等对应用在 AL-31F 加力燃烧室的一种 V 型蒸发式火焰稳定器进行了研究, 揭示了该种稳定器冷态下的总压损失特点以及低压稳定性好, 贫富油熄火边界宽的特点。

本文对某型蒸发式火焰稳定器在高速低温来流下的流动特性、两相燃烧及性能进行了数值模拟与分析, 并与常规 V 型火焰稳定器进行了对比分析, 重点关注与气动及燃烧特性有关的关键参数。

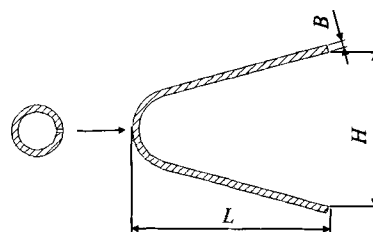
1 数学物理模型

1.1 研究问题

蒸发式稳定器的几何结构如图 1(a)所示。此稳定器置于二元矩形通道内, 选取堵塞比 0.32。V 型稳定器见图 1(b)所示。



(a) 蒸发式稳定器



(b) V 型稳定器

图 1 蒸发式及 V 型稳定器结构示意图

Fig. 1 Schematic of evaporating and V-gutter flame-holders

1.2 数值方法及边界条件

计算采用有限体积方法和迎风格式对气相 $N-S$ 控制方程进行离散。压力和速度的耦合采用 SIMPLE 方法。标准 $k-\epsilon$ 模型提供湍流封闭, 近壁区采用标准壁面函数处理。采用守恒标量的 PDF 模型处理扩散燃烧问题。煤油喷雾采用离散相模型, 在全流场中用拉格朗日方法跟踪液滴的运动和输运。给定来流空气速度进口, 压力出口, 燃料进口采用 DPM 模型, 给定煤油喷嘴的位置、液滴的速度、直径、静温和流量。壁面绝热, 无滑移。

具体模拟工况: 进口气流 $Ma=0.15\sim0.28$; 进口温度 $T=429\sim583\text{ K}$; 油气比 $f=0.003\sim0.02$ 。

2 计算结果与分析

2.1 气动特性

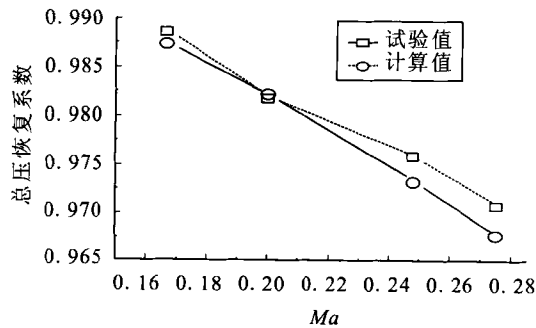
对相同槽宽的蒸发式和 V 型稳定器, Ma 数取 0.15, 0.20, 0.24 和 0.28 等 4 个值进行了冷态流场的数值模拟。

2.1.1 燃烧室气动损失

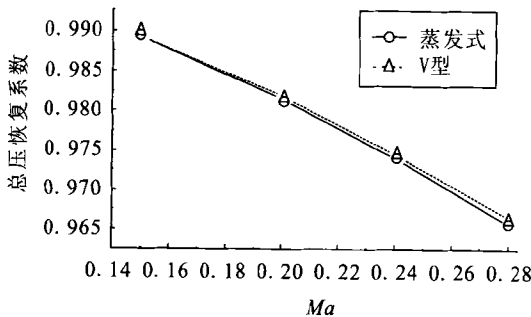
实际燃烧室中, 由于存在摩擦阻力、混合阻

力和加热阻力等, 出口总压必然低于进口总压。习惯上, 定义燃烧室总压恢复系数为出口截面平均总压与进口截面平均总压之比。

由图 2 可见, 随进口气流速度的增大, 蒸发式稳定器的总压恢复系数有明显的下降, 计算值与试验值的变化趋势一致, 误差在可接受范围内; 相比同样槽宽的 V 型稳定器, 总压恢复系数略有减小, 但变化不大。



(a) 与试验值的对比



(b) 与 V 型稳定器的对比

图 2 总压恢复系数随进口 Ma 数变化

Fig. 2 Variation of total pressure recovery coefficient with Mach number at inlet

2.1.2 回流区长度、回流率 φ 和停留时间 τ_{res}

由图 3(a)可见, 随来流速度的增大, 回流区长度略有变化, 但变化不大; 回流区长度相比同样槽宽的 V 型稳定器略小。

回流率 φ 为回流区内逆流流量与来流流量之比。根据均匀搅拌器理论, 回流率越大, 回流区内热燃气质量越多, 这有利于和来流新鲜混气的热交换, 有利于燃烧。由图 3(b)可见, 随来流速度的增大, 回流率基本不变; 相比同样槽宽的

V 型稳定器, 回流率明显减小。

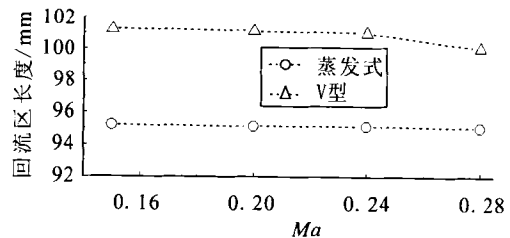
在混合区中燃气的停留时间决定了是否能建立一稳定的火焰或者熄火, 停留时间:

$$\tau_{\text{res}} \approx \frac{(L/2)}{(V_2/2)} = \frac{L}{V_2}$$

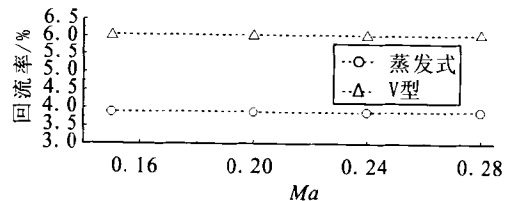
式中: L 为回流区长度; V_2 为混合区边缘处的速度。

根据米海尔松准则, $M_i \sim \frac{\tau_{\text{res}}}{\tau_b}$, 若 $\tau_{\text{res}} < \tau_b$, 即可燃物停留时间小于燃烧时间, 火焰就会被吹离回流区而熄灭。理论上说, M_i 越大越有利于燃烧。 $\tau_{\text{res}} \approx \tau_b$ 相应于临界稳定着火值。

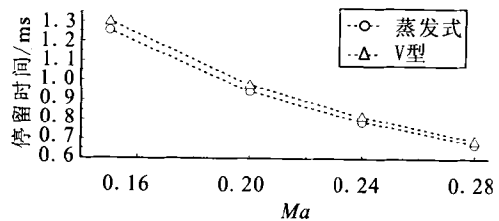
由图 3(c)可见, 随来流速度的增大, 停留时间明显缩短; 相比同样槽宽的 V 型稳定器, 停留时间略有减小, 但变化不大。



(a) 回流区长度



(b) 回流率



(c) 停留时间

图 3 回流区长度/回流率/停留时间随来流速度的变化

Fig. 3 Variation of recirculation zone length, recirculation ratio and retention time with inlet velocity

2.2 燃烧特性

2.2.1 燃烧流场特征

蒸发式稳定器宽广的工作范围和良好的高速低温来流下的点火性能主要得益于其特殊的尾迹气流结构和采用回流区局部供油方案。

图4为蒸发式稳定器正对蒸发管分布孔的流型数值仿真结果。气流分两路进入稳定器,一部分通过进气管进入蒸发管与喷入蒸发管内的燃油混合后从蒸发管上下两侧的分布孔射出,并和另一部分从稳定器头部的进气孔进入的空气形成混合流。蒸发式稳定器后部形成明显的回流区,由一对稳定的涡对组成。蒸发式稳定器的内回流区,受到V型翼板的保护,基本上不受外部主流流动的干扰,并可以单独控制局部供油,因此有利于在高速来流的条件下可靠工作。

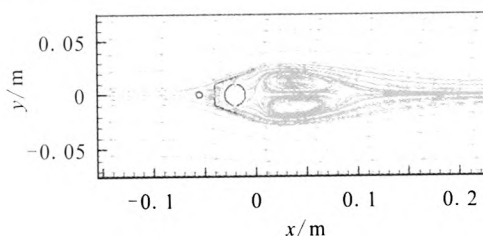


图4 蒸发式稳定器流线图

Fig. 4 Stream line distribution after flame-holder

另一方面,采用蒸发管有利于在尺寸很小的火焰稳定器内组织燃烧。蒸发管有利于燃油较充分地雾化蒸发和掺混,同时单独给稳定器供油,可以使稳定器在最佳油气比下工作。回流区气态燃油浓度较高,对于点火、组织燃烧比较有利,保持回流区始终处于高温区(图5),大大提高稳定器的壁温,使低温来流下的稳定工作能力相应增强。来自主流的冷油滴可以在其表面再次蒸发,给回流区补充可燃蒸汽,进而又强化了稳定器的“蒸锅效应”,使火焰稳定器的工作状态得以恢复,从而有利于低温来流条件下稳定燃烧。

2.2.2 不同来流及油气比下的燃烧性能

由图6(a)可见,随着来流速度的增大,燃烧效率略有变化,但变化不大。油气比 $f=0.02$ 相比 $f=0.003$ 情况下燃烧效率显著提高,在 $Ma=0.28$, $f=0.02$ 时,燃烧效率最大,可达96%。由图6(b)

可见,仅稳定器局部供油,即 $f=0.003$ 时,出口平均温度约600 K。而主燃区和稳定器组合供油,即 $f=0.02$ 时,出口平均温度约1200 K,且沿径向分布更为均匀。

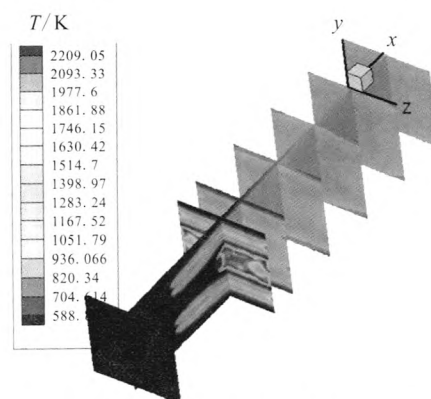
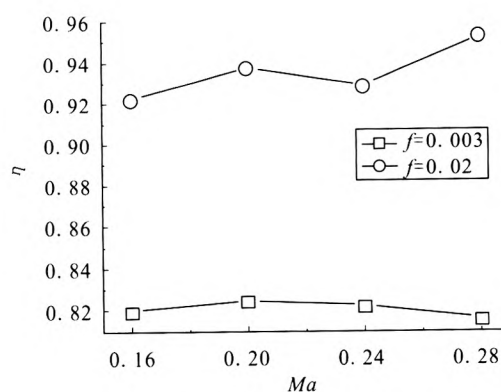
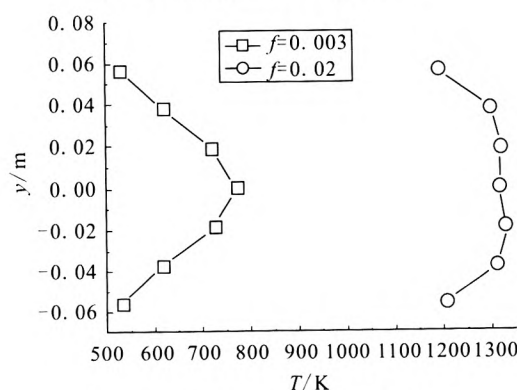


图5 蒸发管稳定器各轴向截面总温分布

Fig. 5 Total temperature distribution of axial section for evaporating flame-holder



(a) 不同来流工况下的燃烧效率



(b) 不同油气比下的出口温度分布

图6 不同来流速度及油气比下的燃烧性能

Fig. 6 Combustion characteristics at different inlet velocity and fuel-air mass ratio

3 结论

通过对某型蒸发式稳定器在本文模拟来流条件下的数值研究, 得出以下结论:

1) 随来流速度的增大, 总压恢复系数明显下降, 停留时间明显缩短, 而回流区长度、回流率和燃烧效率变化不大。

2) 与相同槽宽的常规 V 型火焰稳定器相比, 回流率明显减小, 总压恢复系数、回流区长度和停留时间略有减小。

3) 蒸发式稳定器后部可形成明显的回流区, 且基本上不受外部主流流动的干扰, 有利于在高速来流的条件下可靠工作。

4) 通过单独控制稳定器局部供油, 可以使稳定器在最佳油气比下工作, 有利于燃油较充分地雾化蒸发和掺混, 有利于低温来流下的点火和组织燃烧。

参考文献:

- [1] 郑殿峰, 张会强, 林文漪, 等. 蒸发式稳定器常压和低压燃烧性能试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(12): 1724-1728.
- [2] 郑殿峰, 张会强, 林文漪, 等. 蒸发式稳定器气态燃料掺混特性和蒸发管的流量系数[J]. 燃烧科学与技术, 2004, 10(1): 28-31.
- [3] 刘鸿, 王家骅. 特种 V 型蒸发式火焰稳定器的总压损失试验研究[J]. 江苏石油化工学院学报, 2002, 14(3): 40-42.
- [4] 刘鸿, 王家骅. 特种 V 型蒸发式火焰稳定器的低压性能试验研究[J]. 江苏工业学院学报, 2004, 16(1): 12-14.
- [5] 王方, 许春晓, 王家骅. 稳定器流动、燃烧实验及冷态大涡模拟研究[J]. 航空动力学报, 2006, 21(3): 502-506.
- [6] [美]约翰. 霍普金斯大学应用物理实验所. 冲压发动机技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
- [7] 刘兴洲. 飞航导弹动力装置[M]. 北京: 宇航出版社, 1992.
- [8] LONGWELL J P, FROST E E, WEISS M A. Flame stability in bluff body recirculation[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 1953, 45(8): 1629-1633.
- [9] 许胜. 多孔介质钝体火焰稳定特性实验研究[D]. 中国科学技术大学, 2011.
- [10] 丁兆波, 金捷. 某型蒸发式火焰稳定器燃烧特性及供油匹配数值研究[J]. 火箭推进, 2012, 38(4): 43-48.
- [11] 王家骅. 一个预燃式稳定器的稳焰机理研究[J]. 工程热物理学报, 1981, 2(4): 23-28.
- [12] 王家骅. 蒸发式火焰稳定器的稳定机理研究[J]. 南京航空学院学报, 1980 (1): 69-84.
- [13] KUNDU K M, DBANERJEE D. Theoretical analysis on flame stabilization by a Bluff-body[J]. Combustion Science and Technology, 1977, 17(3/4): 153-162.
- [14] 李宁, 宋文艳, 罗飞腾, 等. 基于先锋氢点火和双凹腔火焰稳定的煤油超声速燃烧特性 [J]. 推进技术, 2012 (2): 205-210.
- [15] 潘亮, 聂嵩, 刘业奎. 环槽式过氧化氢/煤油气液喷注器研究[J]. 火箭推进, 2012 (3): 23-28.
- [16] 江强, 王辽, 郭金鑫, 等. 基于总温测量的超燃冲压发动机燃烧效率研究[J]. 实验流体力学, 2012 (4): 1-5.
- [17] 税琳棋, 高建民, 刘加增, 等. 不同冷却工况下 90°带肋通道中蒸汽的强化换热特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2012 (9): 6-11.

(编辑: 王建喜)