

突扩燃烧室在准稳态假设下的 熄火过程对比分析

席文雄, 王振国

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 在准稳态假设条件下, 运用数值模拟方法对火焰的边区驻留与旁侧驻留的两种突扩类型的亚燃冲压发动机燃烧室的熄火过程进行了分析。通过改变燃烧室进气流量和燃油当量比, 对比分析了燃烧室在向熄火的压力下限和贫、富油边界转变过程中的流场特征和火焰形态变化。研究显示, 中心突扩燃烧室在压力和燃油浓度下降过程中, 熄火过程中表现为火焰锋面的中心收缩; 旁侧突扩燃烧室则表现为突扩截面内温度的差异, 以致火焰稳定功能的丧失。

关键词: 火焰驻留; 压力边界; 贫/富油边界; 熄火

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2009) 02-0025-05

Comparison of extinguishing process in dump combustor at the assumption of quasi-steady state

Xi Wenxiong, Wang Zhenguo

(College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The process of flame-out in two kinds of flame-resident ramjet combustor, center-dump and side-dump combustor, were analyzed numerically at the assumption of quasi-steady state. The difference of flow field and the change of flame were discussed when the combustor works closely to the limits of pressure and kerosene concentration. It is found that flame front of center-dump combustor shrinking during the extinguish process. The side-dump combustor has a difference in the temperature of backflow region, which leads to the lose of flameholding.

Key words: flame-resident; limits of pressure; lean/rich fuel limits; blowout

收稿日期: 2008-11-03; 修回日期: 2009-02-10。

作者简介: 席文雄 (1984—), 男, 硕士研究生, 研究领域为冲压发动机燃烧室技术。

0 引言

宽广的稳定工作边界是燃烧室的一项重要性能指标。发动机所有工作点必须落在燃烧室压力和贫、富油气比所规定的范围之内。其中，前者规定了燃烧室所能适应的空域范围，后者规定了燃烧室稳定工作可供调节的范围。燃烧室在边界附近发生的熄火现象是燃烧不稳定研究的重要内容。在航空发动机中，很多工作正围绕这两方面开展。本研究将以冲压发动机突扩燃烧室为研究对象，通过数值模拟方法，在准稳态假设下对两种燃烧室在向熄火的压力下限和贫、富油边界转变过程中的流场特征和火焰形态变化进行了对比分析。

1 研究方法

1.1 前提假设

燃烧室的熄火边界有两方面的含义：其一，保持燃料当量比为最大的温升的情况下，降低压力，直至燃烧室熄火，这是熄火的压力边界；其二，贫、富油熄火边界，即保持燃烧室内压力一定，改变燃料当量比，直至熄火。燃烧室工作状态在向边界点靠近的过程中，可假设成由一系列稳态点组成的准静态平衡过程。通过获取各稳态点的燃烧流场状态，研究燃烧室向边界熄火点发展过程中燃烧室火焰的变化，可为分析边界熄火的动态过程提供辅助信息。燃烧室的熄火边界点是燃烧室的一项重要性能，在实际试验中，往往通过调节相关参数来进行测定。处于边界工作点附近的燃烧室往往表现出不稳定的工作特性，试验中难以获取熄火边界点附近的燃烧工作状态。然而，数值模拟方法却可以在准稳态假设的基础上，通过给定特定的边界条件来获取相关信息。

1.2 数值计算方法

通过求解多组分反应的雷诺平均 N-S 方程来获取流场特征。液相采用颗粒轨道模型跟踪煤油燃料液滴的运动，给定煤油的初始分布、速度和流量；湍流模型采用 $k-\varepsilon$ 二方程模型，壁面采用

标准壁面函数处理；煤油的燃烧化学反应动力学模型采用总包反应的有限速率模型。方程采用有限体积法进行离散，其中对流项采用二阶迎风格式，粘性项采用中心差分格式。壁面采用绝热、无滑移边界。各燃烧组分的比热随温度而变化。

1.3 研究对象

突扩类型的燃烧室方案因其结构简单、紧凑，常为整体式冲压发动机燃烧室设计所采用。一般有中心和旁侧突扩两种结构，在突扩截面处形成的低速回流区是火焰稳定的必要条件。不同的突扩类型决定了火焰驻留位置的差异，中心突扩燃烧室火焰在中心回流区驻留，具有火焰扩散性能好的特点；旁侧突扩燃烧火焰边区燃烧，具有回流区结构稳定、流动损失小的特点。这里选取了中心突扩和旁侧突扩两种简单的燃烧室结构（如图 1 所示）进行了对比分析。为了使结构条件保持一致，两种燃烧室具有相同的面积突扩比。在相同的面积突扩比下，旁侧突扩燃烧室进气喷油段的径向尺寸较中心突扩燃烧室进气喷油段的大，因此在旁侧突扩燃烧室的突扩截面处设置一外凸凹腔使两者保持一致的突扩台阶高度。

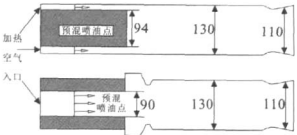


图 1 用于对比分析的中心突扩和旁侧突扩燃烧室模型（单位：mm）

Fig.1 Center-dump and side-dump combustor designed for comparison (unit: mm)

2 结果分析

2.1 压力边界特性

为了研究压力对燃烧流场的影响，对多种流量入口条件下的稳态燃烧流场结构进行了计算。在保持燃料当量比为 1 的情况下，以流量 M (2.92kg)、总温为 744K 的入口条件为基准，通过流量的增减来模拟不同的燃烧压力环境。

图 2 所示为旁侧突扩燃烧室的仿真结果，图中选取了流量变化过程中的几组典型流场结构

($0.67M$ 表示为 0.67 倍基准流量下的仿真算例, 其它类同)。从图中可以看出旁侧突扩燃烧室温度分布形态类似, 表现为边区燃烧的特点。流量变化时, 压力越小, 火焰面不断收缩, 点火延迟时间延长, 火焰锋面靠后, 凹腔内温度逐渐下降。算例结果显示, 当流量为 $0.17M$ 时, 燃烧已经无法建立, 这时已经达到了数值计算条件下的

稳态燃烧的压力下限。从温度分布的扩展性可以看出, 在燃烧室压力的变化过程中, 存在一个合适的压力范围使火焰锋面在燃烧室后部进行汇合。压力再增大时, 由于在保持恰当当量比的条件下, 燃料在同样容积的空间内密度加大, 在燃烧室内的均匀扩散变得困难, 横向火焰面有所收缩。

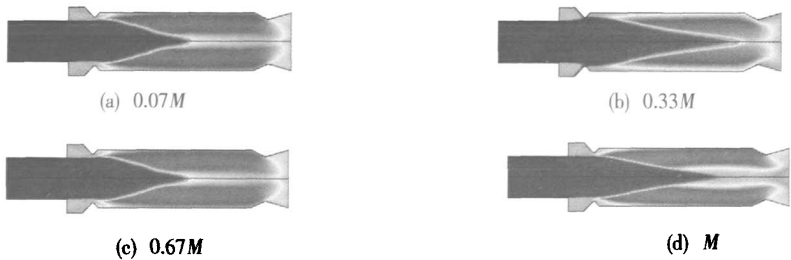


图 2 旁侧突扩燃烧室不同流量下的燃烧温度云图

Fig.2 Contour of temperature in different mass flow in side-dump combustor

图 3 为中心突扩燃烧室在压力变化过程中的典型燃烧温度云图。可以看出, 燃料在中心突扩燃烧室内具有较佳的空间扩散性能, 火焰在燃烧室中心区域驻留。与旁侧突扩燃烧室类似, 也存在一个合适的压力范围, 使火焰锋面饱满地聚集在突扩截面处。压力减少时, 从图中可以看出, 火焰锋面从中心收缩。从中可以推测, 在实际工

作过程中, 紧缩的火焰锋面由于气流动态特性的影响可能发生断裂, 阻止火焰的前后能量的衔接, 此时极易发生燃烧室熄火的风险。从突扩截面区域的温度分布可以看出, 压力的降低也使得该处的温度持续降低, 其火焰稳定的点火源的作用也将不断丧失。压力加大时, 由于燃料分布的不均匀性使得燃烧室内的温度分布均匀性变差。

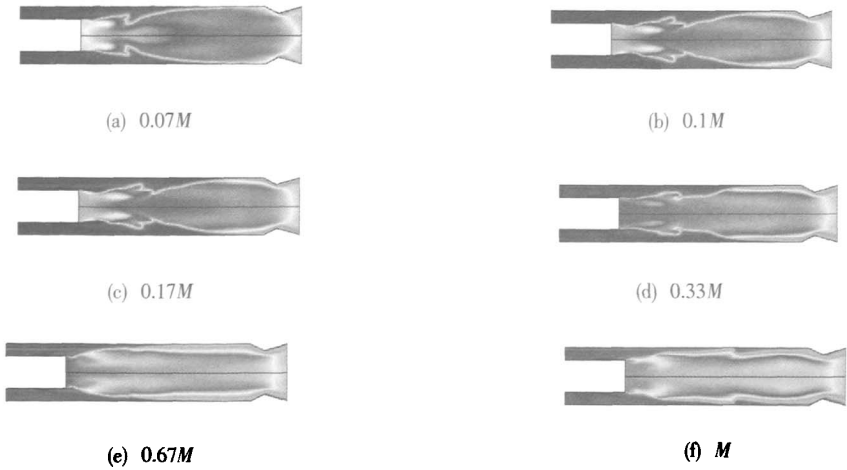


图 3 中心突扩燃烧室不同流量下的燃烧温度云图

Fig.3 Contour of temperature in different massflow in center-dump combustor

图 2 与图 3 进行比较可得，旁侧突扩燃烧室在压力变化过程中，边区部分的温度分布形态较一致，压力对其影响不大。然而，中心突扩燃烧室在压力增大过程中，温度场变化却呈现出不同特点。随着压力增大，突扩截面处的温度不断降低，火焰区域温度分布的不均匀性特点更突出。同时，从压力向可燃压力下限趋近的过程中，旁

侧突扩燃烧室表现为高温火焰的不断后移，中心突扩燃烧室表现为火焰向中心的收缩，直至熄火。

2.2 浓度边界特性

为了研究贫油熄火过程中两种燃烧室所表现出来的特性，进行了不同当量比下的稳态流场计算。

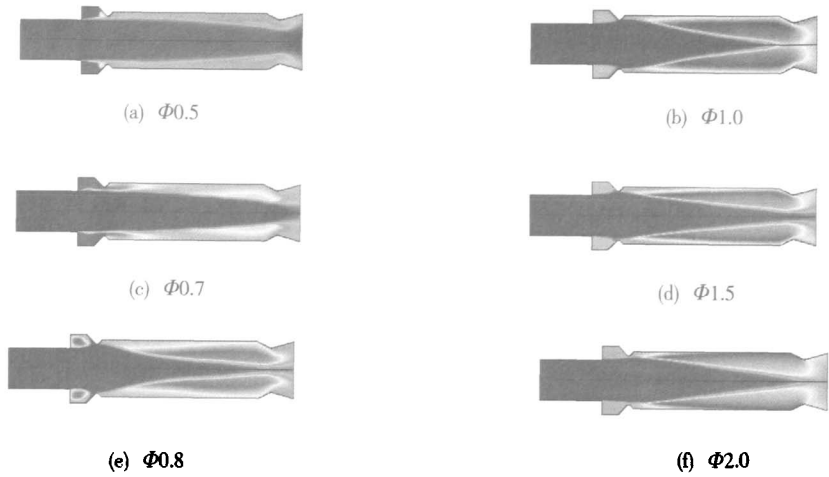


图 4 旁侧燃烧室不同当量比工况下的燃烧流场温度云图
Fig.4 Contour of temperature in different equivalent rate in side-dump combustor

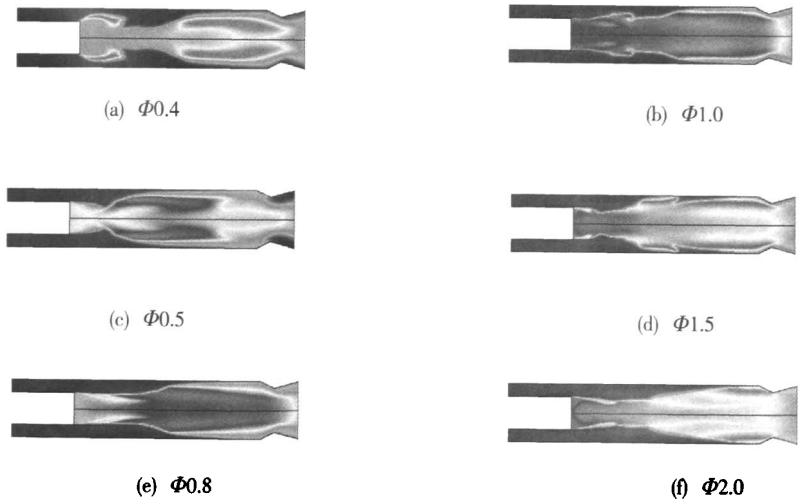


图 5 中心突扩燃烧室不同当量比工况下的燃烧流场温度云图
Fig.5 Contour of temperature in different equivalent rate in center-dump combustor

图 4、5 分别列出了两种燃烧室的温度分布随燃料当量比变化的温度云图 ($\Phi 0.5$ 表示当量比为 0.5 时的算例, 其它类同)。可以看出, 在旁侧突扩燃烧室内, 在一定范围内, 随着当量比的减小, 火焰的高温区域不断向靠近边区的区域收缩, 且壁面温度逐渐降低。当当量比降到一定值时, 凹腔内的火焰温度开始上升, 这是由于随着燃料的减少, 卷吸进入凹腔内的燃料也随之减少, 凹腔内燃烧由富燃的低温燃烧向更有利于燃烧的浓度范围内转变, 凹腔内温度上升, 此时凹腔起着高温点火源的作用。相反, 在当量比持续增大的过程中, 凹腔内的燃料增多, 多余的燃料吸热使凹腔内温度降低, 此时凹腔起着燃料掺混和预燃的作用。

在中心突扩燃烧室中, 可以看出, 随着当量比的减少, 卷吸进入突扩截面的燃料减少, 但此时燃料的减少使得该区域内燃烧的工作模式由适合燃烧的浓度范围向更贫油的方向发展, 大量的空气的掺混使该处的温度降低。同时, 当量比降低时, 在燃烧室温度分布上, 还表现为火焰锋面的不断收缩, 该种情况与压力因素的影响类似。当量比增大时, 中心突扩截面内的温度能够维持在一个较稳定的状态, 然而在燃烧室下游大量的未参与燃烧的燃料吸热使燃烧室内温度降低。且由于分布的不均匀性使得各局部区域之间存在较大的温度梯度, 易出现大量的局部火焰淬熄, 导致燃烧室全局熄火。

3 结论

通过对两种燃烧室在准稳态假设下的燃烧流场计算, 可以得出两种燃烧室在向其压力和燃油浓度边界趋近的过程中表现出不同的特点。

(1) 在压力影响下的特点

旁侧突扩燃烧室的边区火焰分布状态变化较平稳, 静态熄火过程表现为火焰得以稳定的凹腔区内的温度不断降低, 火焰被吹出燃烧室。中心突扩燃烧室温度分布不均匀, 静态熄火表现为火焰面向中心收缩, 使能量的前后传递受阻。

(2) 在燃油浓度影响下的特点

旁侧突扩燃烧室在燃油流量的变化过程中表现为凹腔内不同的浓度分布, 以致凹腔内温度随之变化, 火焰稳定的能力出现差异。中心突扩燃烧室表现为, 浓度扩散的不均匀性使得温度分布不均匀加剧, 易出现大量的局部火焰淬熄导致全局熄火。

参考文献:

- [1] 张均勇, 张宝诚. 航空发动机燃烧室工作稳定性研究[J]. 航空发动机, 2001(1): 33-41.
- [2] Sturges G J, Sloan D G. Flame Stability and Lean Blowout—A Research Program Progress Report in Proceedings of Tenth C ISABE[R]. 1991, 372384.
- [3] 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, (12): 1724-1728.
- [4] 袁怡祥, 林宇震, 刘高恩. 旋流杯燃烧室头部流场与喷雾对贫油熄火的影响[J]. 航空动力学报, 2004, (3): 45-50.
- [5] 刘百麟, 林宇震, 袁怡祥, 等. 高温升燃烧室贫油熄火稳定性研究[J]. 推进技术, 2003, (5): 73-76.
- [6] 张宝诚, 纪友哲, 王平. 航空发动机燃烧室熄火特性的研究[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2004, (3): 3-5.
- [7] 张永芝, 李卓, 李海龙. 超声速进气道流场三维数值模拟[J]. 火箭推进, 2008, 34(3): 27-30.
- [8] 杨事民, 唐豪, 黄玥. 凹腔超声速燃烧室氢气燃烧流场数值模拟[J]. 火箭推进, 2008, 34(1): 12-16.

(编辑: 陈红霞)