

水冲压发动机燃烧稳定性数值研究

韩 超, 夏智勋, 胡建新

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 建立了水冲压发动机燃烧稳定性计算模型, 对一次进水水冲压发动机燃烧室内流场进行数值模拟。研究了燃烧室长度、水燃比、液滴直径等因素对水冲压发动机燃烧稳定性的影响。研究表明, 适当增加燃烧室长度、采用多次进水以减小局部水燃比并选取适当的雾化器, 有利于水冲压发动机的稳定燃烧。

关键词: 水冲压发动机; 燃烧不稳定; 数值模拟

中图分类号: V433.9

文献标识码: A

文章编号: (2008) 06-0027-04

Numerical study on combustion stability for water ramjet

Han Chao, Xia Zhixun, Hu Jianxin

(Inst. of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The flow field of a single injection water ramjet was calculated based on the model which was established in the paper. Effects of chamber length, water-fuel ratio and droplet size on combustion stability were researched. It is shown that increasing chamber length, multiple water injection to decrease local water-fuel ratio and choosing proper atomizer will benefit combustion stability.

Key words: water ramjet; combustion instability; numerical simulation

0 引言

自 20 世纪 30 年代末发现燃烧不稳定现象以

来, 燃烧不稳定问题一直是发动机设计中的难题。“由于在能量损失相对较低的容积内有很高的能量释放密度, 用于推进系统的任何燃烧室中的条件通常趋于激发和维持振荡”。在大力发展

收稿日期: 2008-08-05; 修回日期: 2008-09-15。

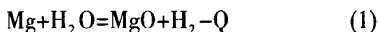
作者简介: 韩超 (1983—), 女, 博士生, 研究领域为水冲压发动机技术。

高性能发动机的今天, 燃烧不稳定问题显得尤为重要。水冲压发动机采用水与高能量金属反应作为发动机动力, 由于不需携带氧化剂, 发动机性能更加优良, 已成为目前水下航行器的首选推进系统。在水冲压发动机技术飞速发展的同时, 开展水冲压发动机燃烧稳定性研究具有非常重要的意义。

水冲压发动机工作过程包括水的雾化、蒸发及两相的掺混、燃烧等物理化学过程, 每一个过程都可能包含了引起燃烧不稳定的因素。由于到目前为止, 关于燃烧不稳定的激励机理还不很清楚, 可以通过对不同工况下发动机流场情况的对比, 研究各可能因素对燃烧稳定性的影响, 希望可以为发动机设计提供参考。

1 计算模型

采用金属镁含量为 50% 的固体药柱作为燃料, 药柱燃烧产生高温富燃燃气, 其中含有大量的镁蒸气, 与水发生如下反应:



反应可放出大量的热, 作为发动机动力。燃气成分通过热力计算程序获得, 主要为 Mg 、 MgCl_2 、 H_2 和 N_2 。

1.1 控制方程

在欧拉坐标系中求解气相 NS 方程, 采用拉格朗日方法跟踪液滴轨迹。采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型描述湍流, 燃烧模型采用有限速率反应模型。为了检验发动机燃烧的动态稳定性, 在流场中激发一定的压力扰动:

$$\begin{aligned} p' &= \alpha \bar{p} \sin(\omega t) & t < t_0 \\ p' &= 0 & t > t_0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中, p' 为扰动压力; \bar{p} 为稳态压力; α 为扰动系数, 取值范围为 0.02~0.2; ω 为扰动频率; t 为扰动时间。

根据水冲压发动机燃烧室的工作特点, 认为引起水冲压发动机燃烧不稳定的因素主要在于液态水的雾化、蒸发及与燃气的掺混反应过程。这与液体火箭发动机工作过程具有很大的相似性。

结合已有研究, 认为该过程引起的燃烧不稳定为高频不稳定 ($\geq 1000\text{Hz}$)。在本文的计算中, 将扰动频率 ω 取为 2000Hz。

1.2 计算网格及边界条件

为了节省计算时间, 减少计算量, 将三维燃烧室简化为二维轴对称结构, 进水孔等效成环形分布, 不考虑燃面后退对燃烧室容积的影响。计算网格如图 1 所示, 进水孔和喷管附近网格加密。



图 1 计算网格

Fig.1 Grid of calculation

燃气和进水孔采用流量入口, 给出液滴分布及粒径、温度、壁面绝热、喷管压力出口。

2 计算结果分析

2.1 燃烧室结构对水冲压发动机燃烧稳定性的影响

通过改变燃烧室长度实现结构的变化。对四种长度的发动机燃烧室进行了模拟计算, 图 2 给出了不同长度下, 燃烧室内某一点压力变化对比。可以看出, 随着长度的增加, 燃烧室消除压力扰动的能力增强, 达到稳定状态的时间缩短 (1、2、3 结构达到稳态所需的时间分别约为 0.08s, 0.06s, 0.04s), 而长度较小的发动机 (结构 4) 则出现了压力振荡现象。这是因为发动机越长, 扰动所遇到的阻尼就越大, 而两相掺混反应也越充分, 可以更快地达到稳定状态。故在发动机设计中, 适当增加燃烧室长度有利于抑制燃烧不稳定。

2.2 水燃比对水冲压发动机燃烧稳定性的影响

此处水燃比是指整个燃烧室的水燃比, 即由一次进水孔进入燃烧室的全部水流量与高温燃气流量之比。图 3 给出了不同水燃比下燃烧室压力

变化情况。在适当范围内 (不会导致发动机熄火), 随着水燃比的增大, 燃烧室中液滴相含量增加, 液滴雾化、蒸发及两相掺混对燃烧过程的影响加剧, 同时燃气得到充分燃烧, 热量释放率增加, 燃烧室中燃烧与流动过程趋向于不稳定。从这点考虑, 水冲压发动机工作中不易选取过大

的水燃比。但根据文献, 水冲压发动机比冲随水燃比变化存在一最优值, 即应适当提高水燃比。因此, 最佳方案是在合适的整体水燃比下, 采用二次进水或多次进水, 以降低局部水燃比, 防止局部水流量太大造成两相掺混困难, 导致不稳定, 又可以保证比较好的比冲性能。

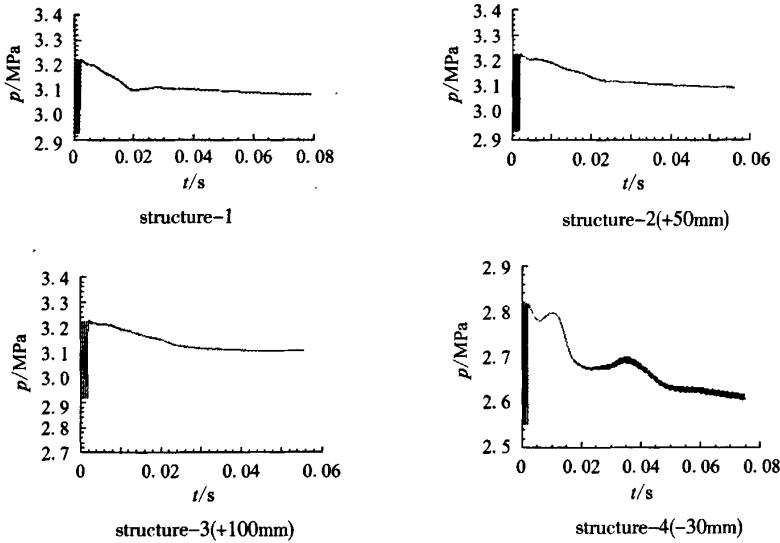


图 2 燃烧室长度对水冲压发动机燃烧稳定性的影响
Fig.2 Effect of chamber length on combustion stability

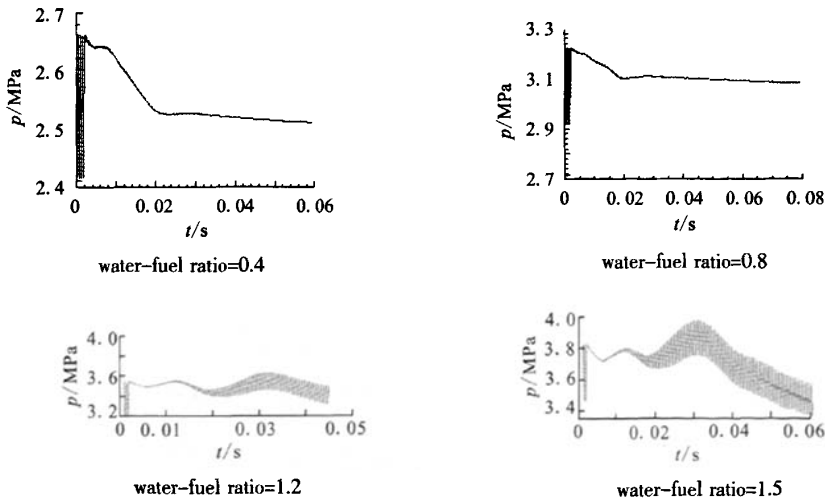


图 3 水燃比对水冲压发动机燃烧稳定性的影响
Fig.3 Effect of water-fuel ratio on combustion stability

2.3 液滴直径对水冲压发动机燃烧稳定性的影响

如图 4 所示,液滴直径对燃烧稳定性的影响并不遵循一定的规律,液滴直径为 $50\mu\text{m}$ 时压力出现振荡,而 $70\mu\text{m}$ 和 $20\mu\text{m}$ 时都处于稳定状态,这一点与相关文献获得的结论相同。液滴直径主要影响其蒸发速率,直径越小蒸发越快,对燃烧过程的影响越低;而直径较大时,因反应不完全被吹走的液滴质量也越大,燃烧室温度降低,由于液滴质量流失形成的对燃烧过程的反馈不足以维持燃烧室中的压力振荡,故也可达到稳定状态。这一结论对于选取适当的雾化器具有指导作用。

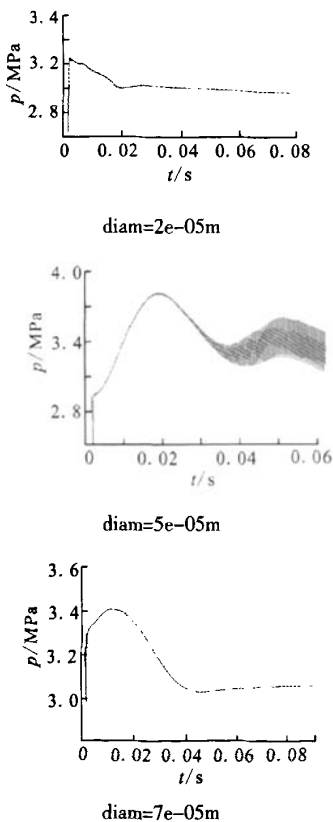


图 4 液滴直径对水冲压发动机燃烧稳定性的影响

Fig.4 Effect of droplet size on combustion stability

3 结论

通过建立水冲压发动机燃烧稳定性计算模型,对不同状况下发动机燃烧室内流场进行了数值模拟,研究了燃烧室长度、水燃比、液滴直径等因素对水冲压发动机燃烧稳定性的影响,获得结论如下:

(1) 适当增加燃烧室长度有利于抑制燃烧不稳定;

(2) 随着水燃比的增大,发动机趋向于不稳定;建议在合适的整体水燃比下,采用多次进水方案,以减小局部水燃比,获得最优发动机比冲;

(3) 液滴初始直径在某些值附近时,易激发不稳定振荡,应结合发动机情况选取适当的雾化器。

以上结论与相关文献中部分结论具有相通之处,由此可见,在开展水冲压发动机燃烧不稳定研究的过程中可以借鉴液体燃料发动机燃烧不稳定的研究方法 & 结论。

参考文献:

- [1] 杨 V, 安德松 W E. 液体火箭发动机燃烧不稳定性[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] 柳长安, 吴宝元, 王玉峰. 冲压发动机转级流场数值仿真研究[J]. 火箭推进, 2007, 33(5): 18-22.
- [3] 庄逢辰, 张中光, 聂万胜, 等. MMH/NTO 火箭发动机燃烧动态稳定性数值评定[J]. 推进技术, 2001(0): 68-69+77.
- [4] 缪万波, 夏智勋, 郭健, 等. 金属/水反应冲压发动机理论性能计算与分析[J]. 推进技术, 2005(6): 85-88.
- [5] Kim Y M, Chen C P, Ziebart J P. Numerical Simulation of Combustion Instability in Liquid-Fueled Engines [R]. AIAA-92-0775.

(编辑: 王建喜)