

单喷嘴燃烧流场仿真研究

仲伟聪, 张 锋

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 运用 CFD 技术, 采用涡扩散 (EDC, eddy dissipation concept) 模型对某发动机单喷嘴燃烧的稳态燃烧流场进行了数值模拟, 得到了燃烧室内的压力、速度、温度及燃气组分等参数的分布情况, 并对其混合程度进行了评估。结构改进前后的计算结果对比表明, 适当增加中心喷嘴的壁厚和缩进长度有利于燃烧室火焰的附着和提高燃烧室流场的均匀程度。

关键词: 涡扩散; 单喷嘴; 燃烧; 缩进长度

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2009) 06-0027-04

Numerical simulation of combustion in a single-injector

Zhong Weicong, Zhang Feng

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The combustion flow field in a single-injector is simulated by using the EDC (eddy dissipation concept) model. The distribution contours of static pressure, velocity, temperature and gas components in the combustion chamber are obtained. The simulation results show that increasing the wall thickness and the recess length of central nozzle properly are beneficial to the flame attachment and the uniformity coefficient improvement of the combustor flow field.

Key words: EDC; single-injector; combustion; recess length

0 引言

燃烧问题一直是数值仿真研究的热点之一, 尤其对火箭发动机而言, 燃烧研究一直在不断发

展。燃烧的 CFD 模拟可以在产品生产前和热试前对其燃烧状态预估, 从而减少反复。本研究对单喷嘴燃烧流场进行了数值模拟, 针对计算结果进行了结构改进, 为提高燃烧室混合效率提出有效措施。

收稿日期: 2009-03-31; 修回日期: 2009-04-16。

作者简介: 仲伟聪 (1977—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机气动传热技术。

1 计算模型

1.1 几何模型

喷嘴及燃烧室的几何结构如图 1 所示。考虑到几何模型的特点,对计算域进行了简化,采用二维轴对称模型;考虑到正交性,网格全部采用四边形网格,共划分 34225 个单元,34756 个节点。计算网格见图 2。其中中心喷嘴为氧化剂入口,边区喷嘴为燃料入口。

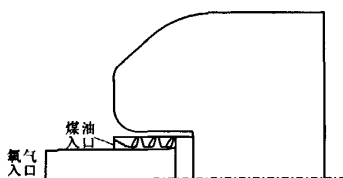


图 1 几何结构

Fig.1 Geometric configuration

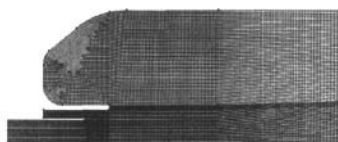


图 2 计算网格图

Fig.2 Calculation grid

1.2 物理模型

煤油和氧气入口均采用流量入口边界条件。出口采用压力出口边界条件。计算采用稳态隐式分离算法进行求解,燃烧模型采用涡扩散模型,湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,近壁采用标准壁面函数处理。压力与速度的耦合采用 SIMPLE 算法。

涡扩散模型是由 Magnussen 和 Hjertager 在 1976 年提出的,假设大部分燃料快速燃烧,整体反应速率由湍流混合控制。在非预混火焰中,湍流缓慢地通过对流混合燃料和氧化剂进入反应区,在反应区它们快速地燃烧。在预混火焰中,湍流对流/混合冷的反应物和热的生成物进入反应区,在反应区迅速地发生反应。在这种情况下,

燃烧称为混合受限的燃烧,未知的化学反应动力学速率可以安全地忽略掉。

反应 r 中物质 i 的产生速率 $R_{i,r}$ 由下面两个表达式中较小的一个给出

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,R}} \right) \quad (1)$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j v''_{j,r} M_{w,j}} \quad (2)$$

式中, $M_{w,i}$ 为 i 物质的分子量; Y_p 为任一产物组分 P 的质量分数; v' 为反应速度; Y_R 为特定反应物的质量分数; A 、 B 为经验常数 ($A=4.0$, $B=0.5$)。

在方程 (1) 和方程 (2) 中,化学反应速率由大涡混合时间尺度 k/ε 控制,如同 Spalding 所述的涡破碎模型一样。只要湍流出现 ($k/\varepsilon > 0$),燃烧即可进行,不需要点火源来启动燃烧。这通常对于非预混火焰是可接受的。

在涡耗散模型中,每个反应都有同样的湍流速率,因而模型只能用于单步(反应物-产物)或是双步(反应物-中间产物,中间产物-产物)整体反应。原因是多步反应机理基于 Arrhenius 速率,每个反应都不一样。

1.3 基本假设

计算中假设流动满足如下条件:

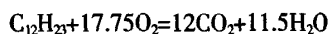
流体是牛顿流体;

流体具有各向同性;

不考虑液体的破碎、雾化过程;

考虑到燃烧室中的高温环境,加上喷注压力远远大于煤油的饱和蒸汽压,认为煤油迅速气化,在计算中简化为浓密气体进行处理;

化学反应采用单步反应进行:



计算过程中各组分的 c_p 等参数按文献中的数据拟合,以分段多项式的形式给出。

2 结果及分析

各流场参数和组分浓度分布云图见图 3、图 4。

从煤油的质量分数分布可以看出,因为煤油

处于氧气外圈, 虽然是离心式喷注, 但经过一段较长的狭缝后又在缩进区与壁面碰撞, 与氧气速度基本平行, 这样煤油和氧气之间的混合并不是很好, 煤油分布在喷嘴外环附近, 扩散角度不大, 直到计算域出口尚未完全反应。

从 CO_2 的质量分数分布看出, CO_2 的浓度分布表征了煤油和氧的反应, 它分布在煤油与氧气交界的狭长区域, 尤其是开始相遇的阶段反应区域很窄, 随着向下游流动, 两股气体相互扩散发生反应才形成了较大的反应区域。从整场的分布可以看出, 温度的分布不均匀。

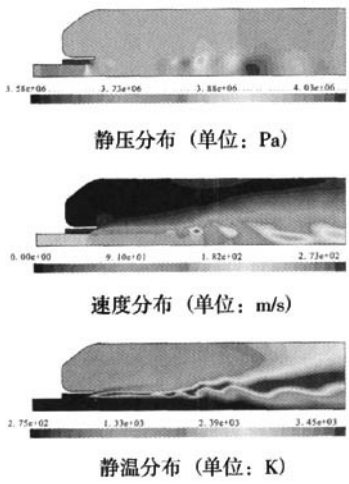


图 3 流场各参数分布

Fig.3 Parameter distribution of the flow field

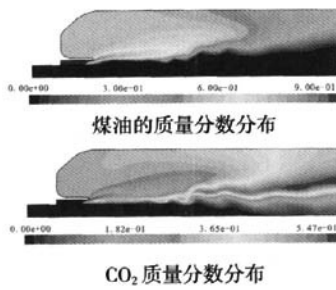


图 4 组分浓度分布

Fig.4 Concentration distribution of the species

从静温分布可以看出, 在内喷嘴和外喷嘴之间存在一个反应回流区, 但由于内喷嘴出口为一

尖角形状, 使得火焰无法附着, 最终可能导致火焰熄灭。

3 结构改进后的结果分析

为使燃烧流场更加均匀, 并且不致熄火, 对喷嘴结构进行了修改。修改方案见图 5。其中结构 a 为增大中心喷嘴的管壁厚, 结构 b 为增加中心喷嘴管壁厚并增加了缩进长度。

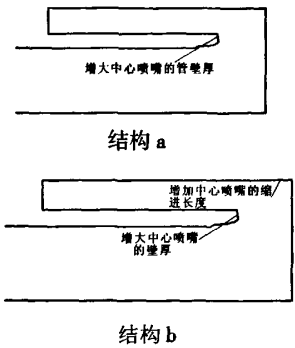


图 5 喷嘴结构对比

Fig.5 Comparison of the two configurations

为了评估结构修改后的流场, 取温度分布和 CO_2 的质量分数分布进行对比, 具体结果见图 6、图 7。

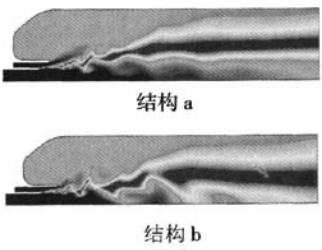


图 6 两种结构温度分布对比

Fig.6 Comparison of temperature profiles for the two configurations

结构修改前高温区域在燃烧室前端是一个狭长的区域, 到后端仍然呈扩张趋势。从图 6 静温分布可以看出, 结构 a 前端高温区发生了明显变化, 在前端形成一波浪状区域, 后端形成一稳定的高温部分。结构 b 前端高温区的波浪范围比结

构 a 更大, 并且从后端的高温区域可以看出, 结构 b 的高温部分更靠近中心线, 说明其混合效果更好。

图 7 给出了两种结构下 CO_2 质量分数的分布对比, 结构 a 不仅提供了可供火焰附着的位置, 而且火焰附着面的增加加大了当地的掺混, CO_2 的质量分数分布区域更大。结构 b 由于增加了缩进长度, 煤油出口部分混合长度更大, 产生了更多的波浪形分布, CO_2 的分布也更靠近轴线附近。

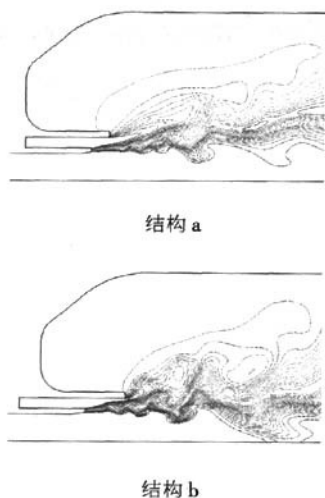


图 7 两种结构 CO_2 质量分数分布对比
Fig.7 Comparison of CO_2 mass fraction
for the two configurations

4 结论

(1) 不合适的喷嘴设计可能导致燃烧室内流场很不均匀, 并可能导致熄火。

(2) 增大中心喷嘴的管壁厚, 不仅可以使火焰有效附着, 而且增大了局部的掺混。

(3) 适当增加缩进长度可以使燃烧室内的燃烧更加充分, 温度分布更加均匀, 更加有利于提高燃烧效率。

参考文献:

- [1] Magnussen B F, Hjertager B H. On Mathematical Models of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion [R]. In 16th Symp. (Int'l.) on Combustion. The Combustion Institute, 1976.
- [2] Magnussen B F. On the Structure of Turbulence and a Generalized Eddy Dissipation Concept for Chemical Reaction in Turbulent Flow[R]. Nineteenth AIAA Meeting, St. Louis, 1981.
- [3] Spalding D B. Mixing and Chemical Reaction in Steady Confined Turbulent Flames[R]. In 13th Symp. (Int'l.) on Combustion. The Combustion Institute, 1970.
- [4] 伊赫桑·巴伦. 纯物质热化学数据手册[M]. 程乃良, 牛四通, 徐桂英, 译. 北京: 科学出版社, 2003.
- [5] 汪洪波, 王振国, 孙明波. 预燃室低频不稳定燃烧仿真研究[J]. 火箭推进, 2007, 33(5): 22-26.
- [6] 孔德英, 雷勇, 任庆丰. 发动机燃烧室离心式喷嘴喷雾角的数值仿真[J]. 计算机仿真, 2007, 24(10): 45-47, 52.
- [7] 张蒙正. 液体火箭发动机燃烧不稳定性试验研究简述[J]. 火箭推进, 2005, 31(6): 12-18.
- [8] 庄逢辰. 液体火箭发动机喷雾燃烧的原理、模型及应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1995.
- [9] 哈杰 D T, 里尔登 F H. 液体推进剂火箭发动机不稳定燃烧 [M]. 朱宁昌, 张宝炯, 译. 北京: 国防工业出版社, 1980.

(编辑: 陈红霞)