

亚燃冲压发动机燃烧室燃油浓度分布预测

黄日鑫¹, 谭永华²

(1 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100; 2 航天推进技术研究院, 陕西 西安 710100)

摘 要: 基于 Fluent 两相反应流场计算平台, 采用涡耗散概念模型, 对典型亚燃冲压发动机燃烧室的两相反应流场进行三维数值模拟计算。重点研究温度场影响下的燃油气相分布, 计算给出气相燃油在火焰稳定装置前后以及内部的分布, 得到燃油在亚燃冲压发动机燃烧室内分布的一般规律。计算发现, 稳定装置内部及近后方燃油分布较富, 到达火焰峰以后, 燃油浓度急剧下降。计算预测径向蒸发管后壁面与最外环蒸发管内的燃油富集, 而中间环蒸发管燃油分布较贫, 计算结果与燃烧试验结果一致。

关键词: 亚燃冲压发动机; 燃烧室; 燃油浓度; 涡耗散概念模型

中图分类号: TK16

文献标识码: A

文章编号: (2008) 04-0017-05

Numerical prediction of fuel distribution in a ramjet chamber

Huang Rixin¹, Tan Yonghua²

(1 Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;

2 Academy of Aerospace Propulsion Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: A simple numerical analysis was conducted to explore the fuel vapor distribution in a ramjet combustion chamber, especially in the near-field and inside of flame holder. With the help of Fluent software two-phase reacting flow module, the 3D numerical simulation was performed by using eddy dissipation concept model. A general law of fuel distribution in hot flow of the chamber was obtained in the simulation. The simulation results indicate that there is a rich-fuel area inside the holder and near its downstream part. Then, the fuel concentration falls down rapidly over the combustion area. The results also indicate that both back inner walls of the radial evaporating pipe and inside the outer circumferential evaporating pipe are fuel concentrations, but the fuel concentration inside the mid-circumferential-pipe is lean, which is accord with the experiment results very well.

Key words: ramjet; combustion chamber; fuel concentration; eddy dissipation concept model

收稿日期: 2008-05-07; 修回日期: 2008-06-24。

作者简介: 黄日鑫 (1982—), 男, 硕士, 研究领域为冲压发动机燃烧室技术。

1 引言

燃油在燃烧装置中的分布直接影响到稳定燃烧与燃烧效率,在燃烧装置的研究中占有十分重要的地位。由于阻塞部件的存在,亚燃冲压发动机燃烧室燃油的分布情况相对复杂。燃油浓度分布的测量常在冷流场中进行,未考虑燃烧温度场的影响。目前在燃烧条件下进行燃油浓度分布测量还有一定难度。因此,数值方法来模拟计算燃烧室热态工作时的燃油浓度场是比较方便的方法。

早期的浓度场计算一般认为燃油蒸汽的扩散分布满足一定分布,且用当量点源分布来描述,燃油分布最终是各级尺寸液滴的气、液两态燃油分布的迭加。这些为浓度场计算开辟的方法简化近似程度较大,而且没有充分考虑湍流脉动等因素的影响。随着计算两相反应流场的各分支数值模型的发展,浓度场的计算方便易行,精度提高。由于燃烧计算一般都是基于气相容积反应的假设,所以可以直接计算燃烧时流场的气相燃油分布。本文以典型的带阻塞部件的液体亚燃冲压发动机燃烧室为计算对象,在两相反应流场计算的基础上,从燃烧模型的计算原理出发,提出计算气相燃油浓度的方法;对阻塞部件影响下的燃油分布进行研究,得到燃油分布的特征。

2 燃烧室三维模型

燃烧室的模型采用从燃烧室入口到喷管出口的全段模型,结构示意图见图 1。

为充分考察阻塞部件对燃油分布的影响,模型中考虑喷油装置的布置;建立火焰稳定装置的完整结构,包括稳定器上精确布置的进气孔与出气孔。建模时忽略供油管、各类连接杆、管、耳座等构件。忽略喷嘴的实际结构,将喷嘴简化成在喷油装置上空间布置的喷注点。模型中假设壁面无厚度且不考虑壁面传热作用。划分网格时,对阻塞部件附近区域如进气孔、出气孔以及蒸发管等进行非结构网格局部加密。

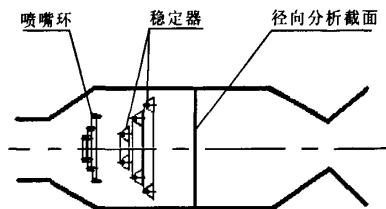


图 1 燃烧室结构示意图

Fig.1 Configuration of combustion chamber

3 数值模型

采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型,对粘性影响比较明显的近壁粘性底层与过渡层区域采用标准壁面函数求解。采用颗粒随机轨道模型处理两相流问题,将空气流作为连续相,燃油液滴作为离散相,两相分别以欧拉-拉格朗日法求解,再进行相间的耦合计算。将雾化的一次破碎过程假设成多组不同滴径液滴的初始分布,该初始分布的相关参数由雾化摄影照片得到,忽略液滴二次破碎与重聚的非稳态过程。

理论上,液滴的蒸发过程贯穿液滴生存期的始终,但计算中假设一个液滴的起始蒸发温度,即液滴温度小于蒸发温度时,液滴仅加热不蒸发。当液滴温度介于蒸发温度与沸点间时,液滴开始满足蒸发规律。若液滴温度大于沸点,则液滴状态受控于沸腾规律。

亚燃冲压发动机燃烧室中的燃烧兼具预混与非预混的特点,两相化学反应模型需考虑化学反应的动力学因素,因此选取涡耗散概念模型进行计算,将燃烧假设为等压的气相容积反应。燃油的化学反应机理使用简化的 7 组分 4 步总包反应机理。假设气体为理想气体,气体的比热、热导率、粘性及扩散系数等参数基于分子动力学理论计算,液滴的比热、动力粘度、饱和蒸汽压及表面张力等参数均参照燃料的试验参数以温度分段多项式形式给出。

燃烧室入口处给定质量流量边界条件,为易于计算收敛,先使用总压入口条件计算初场,然后改为质量流量边界条件进行计算。液滴与固体外壁面的相互作用使用液膜边界条件处理,对于

蒸发管的内壁面则采用捕获条件, 即液滴与壁面碰撞后即刻蒸发。流场方程组采用有限体积法离散, 离散精度为二阶, 基于压力进行速度与压力的耦合求解。

燃油在燃烧室中的分布可以通过当量比的分布来确定。燃料、空气与产物由于化学反应、分子扩散及湍流扩散作用同时存在, 很难由一般的元素追踪方法来确定当量比。由涡耗散概念模型的原理, 在细微结构 (fine structure) 的涡中, 可以由控制体内反应物的净生成率 (不可逆反应中为负值) 以及涡中未反应完全的反应物来计算燃烧时的当量比, 如下面方程所示:

$$\dot{m}_{\text{fuel}} = -\dot{\omega}_{\text{fuel}} V_{\text{cell}} \tau^* + \rho V_{\text{cell}} Y_{\text{fuel}} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{\text{air}} = -\dot{\omega}_{\text{O}_2} V_{\text{cell}} \tau^* + \rho V_{\text{cell}} Y_{\text{O}_2} + \rho V_{\text{cell}} Y_{\text{N}_2} \quad (2)$$

$$\Phi = \frac{m_{\text{fuel}}/m_{\text{air}}}{0.0685} \quad (3)$$

式中, m 为网格控制体内燃料与空气的质量; $\dot{\omega}$ 为体积净生成率; V_{cell} 为网格的体积; τ^* 为细微结构中的特征混合时间 (即化学反应时间); Y 为组分的质量分数; 0.0685 为燃料与空气化学反应的恰当油气比。

4 计算结果及分析

(1) 稳定器前后的燃油分布

计算余气系数为 1.7 的某工况, 得到的当量比沿燃烧室轴向截面的分布如图 2 所示, 燃烧的总温分布见图 3。

图 2 燃烧室轴向截面当量比分布

Fig.2 Contours of equivalent ratio
distribution in axial section

两图是对应的, 即燃油的分布系燃烧影响下的分布。燃油刚离开喷嘴便开始蒸发, 在到达稳定装置以前已初具一定的油气分布。图 2 中, 包络在当量比等于 1 的化学恰当比曲线以内的区域为富油区, 这个富油区主要集中在喷油装置与稳定装置的附近。在受到稳定装置阻塞的流场区域中, 燃油量向下游迅速下降, 在相当大的范围内可以认为燃油已燃烧完全; 而不受稳定装置阻塞的流场区域, 由于高速气流的携带, 燃油量的下降相对滞后一些。对照总温图, 喷油装置附近的燃油蒸发作用使这里的总温要略低于来流空气的总温。燃烧发生在稳定装置后方, 特别是在受阻塞区域的燃油富集区后面, 相对低的流速以及合适的当量比使这里形成总温达 2500K 左右的主火焰。可以认为燃烧发生在一个薄层内, 将燃油蒸汽全部耗尽并转化成燃烧产物, 这使图 2 中对应位置的当量比迅速下降。高温燃烧的区域边界基本上与化学恰当比曲线一致, 燃烧发生在该曲线上游略富油的地方。

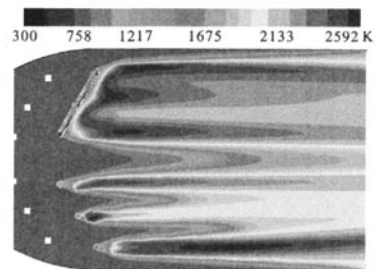


图 3 燃烧室轴向截面总温分布
Fig.3 Contours of total temperature
distribution in axial section

图 4 为燃烧室中某径向截面上的当量比分布, 总温分布如图 5 所示。受燃烧的影响, 该截面上部分区域的燃油已耗尽, 截面上的最大当量比为 0.6。当量比曲线密度较大的地方燃油浓度的变化率较大, 图中显示这些地方一般位于阻塞部件的边缘后面, 这里也恰是高速气流与低速气流的分界处。最外环与次外环高速流道中仍有一定量的燃油分布, 较同截面的其它地方要富油, 相应地总温要低。由此, 高速气流加之富油条件

显然是不利于燃烧的。不难看出燃油在该截面上的分布并不均匀，最外环较富，中间环较贫。

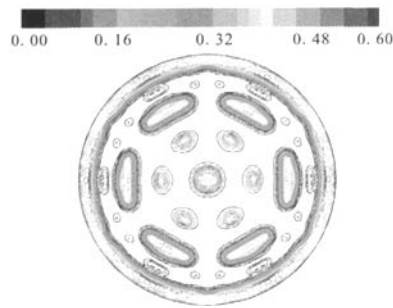


图 4 燃烧室径向截面的当量比分布
Fig.4 Contours of equivalent ratio distribution in radial section

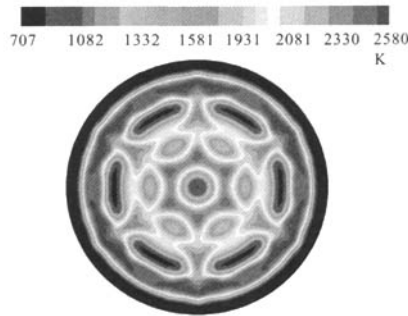


图 5 燃烧室径向截面上的总温分布
Fig.5 Contours of total temperature distribution in radial section

(2) 稳定器蒸发管内的燃油分布

分析发现，稳定装置后面的富油区影响着燃烧高温主火焰的驻定位置，富油区分布的均匀性也势必会影响到稳定装置后的燃烧效率。因此，有必要考察稳定装置内的燃油扩散与分布情况来研究稳定装置后的燃油分布特点。图 6 为内环周向蒸发管内的当量比分布，在进气孔附近气流速度较高处，燃油分布较贫；而在管内气流速度相对低处，燃油分布则最富。实际上，速度的分布显示两个进气孔之间的管段内存在两个回流区，富油区的位置恰在两个回流区的交汇处附近。

进一步考察各环周向蒸发管内最富油区域，

即上面提及的两进气孔之间的管段截面处的燃油分布（图 7），发现最外环蒸发管内的燃油最富，最内环次之，而中间环则最贫。这也解释了图 3 中间环燃烧较差的现象。分析认为，单独供给内环蒸发管的燃油有部分经由径向蒸发管进入最外环，使得最外环的燃油最富；而中间环由于上下两段径向蒸发管的贯通作用，燃油较难驻留在该环蒸发管内，因此燃油分布相对要贫。径向蒸发管内的燃油分布如图 8 所示。蒸发管内与后面均是富油区，特别是靠近出气小孔一侧的壁面处富油程度极大（当量比均超过 20）。而在进气孔处，由于气流的速度较高燃油较贫，这里速度较高的气流影响着燃油分布的均匀性。

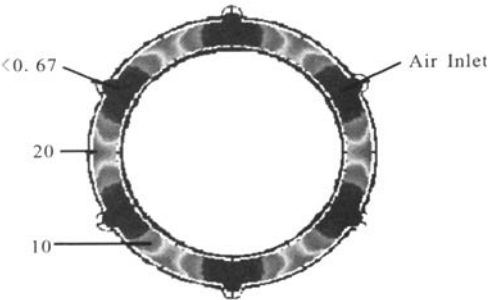


图 6 蒸发管内的当量比分布
Fig.6 Contours of equivalent ratio distribution inside evaporating pipe

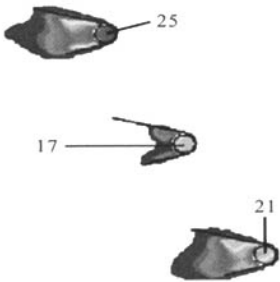


图 7 周向蒸发管内局部燃油分布
Fig.7 Local fuel distribution inside circumferential evaporating pipe

由燃烧试验后部件的积碳情况显示，径向稳定器出气小孔一侧的壁面有明显的积碳发现

象, 说明这里的燃油分布较富; 而中间环周向蒸发管试后仍保持着良好的光泽, 说明这里的燃油分布相对较贫。可见, 数值计算对燃烧室中燃油浓度分布的预测与试验取得了很好的一致; 因此, 建立的物理数学模型与采用的计算方法、边界条件以及所做的假设和简化是合理的, 可以在此基础上进行更加深入的结构分析与流场研究。



图 8 径向蒸发管内局部燃油分布

Fig.8 Local fuel distribution inside radial evaporating pipes

5 结论

通过对燃烧室两相反应流场的三维计算, 得到燃油分布的结论如下:

(1) 稳定装置后的低速受阻塞区域中燃油的浓度大, 火焰温度峰的位置出现在化学恰当比曲线附近; 动力学燃烧过程发生在一个薄层内, 并将大部分燃油耗尽。来自前方喷油装置的燃油蒸汽则在阻塞装置的环间高速流道中形成相对较贫的分布。

(2) 数值计算预测径向蒸发管后向壁面与最外环周向蒸发管内为燃油富集区, 预测结果与燃烧试验结果吻合。

(3) 中间环蒸发管由于径向蒸发管的贯通作用, 燃油在这里很难驻留, 燃油分布情况最差。因此, 中间环蒸发管内的燃油分布影响着稳定装置燃油分布的整体均匀性。

参考文献:

- [1] 杨茂林, 顾建善, 徐行, 等. 加力燃油浓度场计算方法研究[R]. 中国国防科学技术报告, 1993.
- [2] 尹应青, 杨茂林, 徐行, 等. 稳定器后燃油浓度分布及焰锋位置计算[J]. 工程热物理学报, 1997, 18(1): 117-120.
- [3] 黄日鑫, 谭永华. 亚燃燃烧室两相反应流场的燃烧模型[J]. 火箭推进, 2008, (2): 24-30.
- [4] Stanton D W, Rutland C J. Multi-Dimensional Modeling of Thin Liquid Films and Spray-Wall Interactions Resulting from Impinging Sprays[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41: 3037-3054.
- [5] Fluent Inc. FLUENT User's Guide[M]. Fluent Documentation, 2007.
- [6] Kundu K P, Penko P F, Yang Songlin. Reduced Reaction Mechanisms for Numerical Calculations in Combustion of Hydrocarbon Fuels[R]. AIAA98-0803, 1998.
- [7] Wang T S. Thermo-Kinetics Characterization of Kerosene/RP-1 Combustion[R]. AIAA96-2887, 1996.
- [8] 黄玉辉. 液体火箭发动机燃烧稳定性理论数值模拟和实验研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2001.
- [9] Kenneth K Kuo. Principles of Combustion. Second Edition [M]. John Wiley&Sons, New York, 2005.
- [10] Magnussen B F. On the Structure of Turbulence and a Generalized Eddy Dissipation Concept for Chemical Reaction in Turbulent Flow [C]. Nineteenth AIAA Meeting, St. Louis, 1981.

(编辑: 王建喜)