

带多圈环形 V 型稳定器的加力燃烧室 两态燃油浓度分布计算*

徐 行 杨茂林

(北京航空航天大学热动力研究所, 北京, 100083)

摘 要: 在流场计算和油珠碰壁处理上进一步发展和完善了轨道扩散模型, 编制了适用于具有多圈环形 V 型稳定器和多种喷油布置的加力燃烧室两态燃油浓度计算的通用程序。用于实际加力燃烧室的浓度场计算, 可以给出加力燃烧室任意截面上液态、气态和总态燃油浓度分布, 各区域内燃油浓度的平均值和周向平均燃油浓度沿径向的分布。

主题词: 加力燃烧室, 火焰稳定器, 燃油雾化, 燃料燃烧

分类号: V235.113

CALCULATION OF FUEL CONCENTRATION DISTRIBUTION IN AFTERBURNER WITH V-SHAPE FLAMEHOLDERS

Xu Hang Yang Maolin

(Inst. of Thermo-Power Engineering, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083)

Abstract: The method of calculation of flow field and treatment of fuel droplets impinging on wall has been improved. A general code used for calculating the fuel concentration in afterburner with V-shape flameholders and different arrangement of fuel ejectors has been developed. When applied to full scale afterburner, it can predict the accurate distribution of liquid, gas and both phase fuel on concentration on any cross section, as well as the average fuel concentration in every area.

Subject terms: Afterburner, Flame holder, Fuel pulverization, Fuel combustion

1 引 言

加力燃烧室中出现的筒体过热和振荡燃烧都与燃油浓度分布有密切的关系。目前加力燃烧室的设计大多采用经验的方法, 按照各区的平均油气比进行喷油布置。本文采用一种半经验半理论的方法, 考虑了形成燃油浓度分布的各环节, 可以迅速准确的提供不同截面两态燃油浓度分布的详细数据, 为新型加力燃烧室设计中喷油和稳定器的布置提供了有力的手段。在流场的简化处理和油珠碰壁处理上也作了一些改进, 能够对多圈稳定器和喷油杆的不同布置, 以及各种喷油方式的通用情况进行计算, 分别对内外函加力燃烧室的两态燃油浓度分布进行了计算。

* 收稿日期: 19961219, 修回日期: 19970304

2 浓度分布计算模型

浓度分布的计算采用轨道扩散模型。假设：(1) 燃油一出喷嘴即雾化成不同尺寸的油珠；(2) 油珠沿其最大概率轨道运动，又绕此轨道扩散；(3) 油珠及其蒸发生成的油气扩散形成的散布符合正态分布；(4) 喷嘴下游截面的两态浓度分布是各尺寸组油珠所形成的两态燃油浓度分布的迭加。计算中的各主要模型如下：

$$(1) \text{ 雾化模型: 设雾化符合 R-R 分布, 即 } Q=1-\exp\left[-0.693\left(\frac{D}{MMD}\right)^3\right] \quad (1)$$

式中 Q 为积累分布, D 为油珠直径, MMD 为质量中间直径。

(2) 油珠的运动轨道: 在忽略重力的情况下, 柱坐标下油珠的运动方程为:

$$\frac{dv_x}{dt} = -\frac{3\rho_a C_D}{4\rho_t D} v_x |\bar{u} - \bar{v}|; \frac{dv_r}{dt} = -\frac{3\rho_a C_D}{4\rho_t D} v_r |\bar{u} - \bar{v}| + \frac{v_\theta^2}{r}; \frac{dv_\theta}{dt} = -\frac{3\rho_a C_D}{4\rho_t D} v_\theta |\bar{u} - \bar{v}| - \frac{v_\theta v_r}{r} \quad (2)$$

式中 u, v, ρ_a, ρ_t 分别为气流和油珠速度及密度, C_D 为阻力系数, D 为油珠直径。

(3) 油雾扩散模型: 假设油雾的扩散服从正态分布。绕轨道的浓度分布为:

$$f = \frac{G_t W}{4\pi D_T \rho_a x} \exp\left(-\frac{W_r^2}{4D_T x}\right) \quad (3)$$

式中 r 为计算节点距名义轨道的距离, D_T 为油珠的当量扩散系数, W 为气流速度, G_t 为燃油通量, x 为油珠移动的距离。

(4) 燃油浓度分布计算: 设有 n 个喷嘴, 每个喷嘴分为 m 组油珠。在计算截面上 P 点处, 液态燃油浓度值为各组油珠在该点值的迭加。在计算气态燃油浓度时, 把每一组油珠在 Δt 时间内所蒸发的油气作为一个点源, 按与油珠相同的方法计算该点源运动到计算截面时在 P 点的气态燃油浓度值, 把所有油气点源在 P 点的燃油浓度值叠加起来就得到 P 点的气态总的燃油浓度值, 把液态和气态燃油浓度值叠加起来便得到总态的燃油浓度值。

(5) 油珠蒸发模型: 油珠的蒸发可分为预热和稳定蒸发两个阶段。在预热段内, 气流向液滴表面的传热一部分用于液滴的蒸发, 另一部分用于液滴的升温。在稳定蒸发阶段, 液滴温度不再升高。预热段内液滴表面的温度计算公式为:

$$\frac{dT_s}{dt} = (1 + 3\sqrt{Re}) \frac{4\pi r_s}{c_{pf}} \frac{\lambda_a}{c_{pa}} \ln(1 + B_Y) \frac{6L}{\pi \rho_t D^3} \left[\frac{B_T}{B_Y} - 1\right] \quad (4)$$

$$\text{油珠直径的变化公式为: } \frac{dD}{dt} = (1 + 0.3\sqrt{Re}) \frac{4\lambda_a \ln(1 + B_Y)}{\rho_t c_{pa} D} \quad (5)$$

式中 B_T, B_Y 为蒸发中传热数和传质数, T_s 为油珠温度。

(6) 油珠的碰壁处理: 由于惯性有一部分油珠将碰到稳定器壁面而被收集, 此时, 把油盘沿稳定器顶线方向分解为若干个线源。当线源的中心点碰到稳定器壁面时, 即认为此线源上的油珠全部被收集。碰壁的油珠在稳定器上将变成油膜。其中一部分油膜被蒸发, 假设油珠在稳定器上已进入稳定蒸发阶段。依据热量平衡关系式可得油膜蒸发量: $G = Ah(T_w - T_t)/L$, h 为油膜与壁面的换热系数, A 为油膜的表面积, 壁温 T_w 由经验给定。油膜温度 T_t 近似取为燃油沸点温度。另一部分油膜将在稳定器的尾缘被绕稳定器的高速气流二次雾化。将油膜在尾缘处划分为有限个点源。取二次雾化的出射角为当地稳定器尾缘切线方向的角度。二次雾化分布仍采用 R-R 分布。其中间直径为: $MMD = B(V_a/75)^{-1.75}$, B 由实验数据给出。

3 流场处理

文献 [1, 2] 根据经验假定回流区的尺寸, 然后采用流管法计算流场, 这种方法计算的稳定器尾缘气流速度分布均匀, 不能反映由于稳定器的存在引起局部加速的流动。为了真实的反映稳定器对流场的影响, 本文对稳定器和回流区以外的流场作了无粘无旋的假设, 直接求解流函数方程得到流场, 并对稳定器壁面进行附面层修正。流函数方程为:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} - \frac{\partial \Psi}{\partial r} = 0 \quad (6)$$

本文编制的程序可根据加力燃烧室外边界和稳定器的几何形状及位置, 以及流场的进口条件, 很快的计算出有多圈环形 V 型稳定器组成的加力燃烧室的流场。

4 计算结果和分析

对某型纯喷气加力燃烧室 (结构见图 1, 有三圈稳定器) 进行了计算, 本文给出了其中一种喷油布置下的计算结果。取进口平均总压为 0.3 MPa, 进口平均总温为 1000 K, 内圈喷油杆 8 个, 每个 5 对侧喷和 1 个单侧喷喷嘴, 中圈喷油杆 12 个, 每个 7 对侧喷喷嘴, 外圈喷油杆

24 个, 每个 1 个单侧喷喷嘴。喷油压力为 2.4 MPa~2.6 MPa。图 2 为稳定器尾缘截面上周向平均油气比沿径向的分布, 图 3 为该截面上燃油总态浓度分布的等值图。在稳定器的尾缘, 由

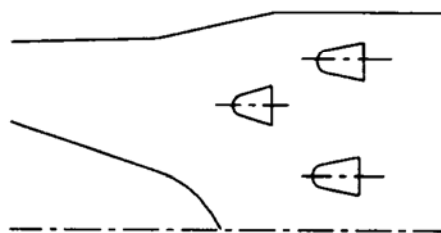


Fig. 1 Sketch of the afterburner

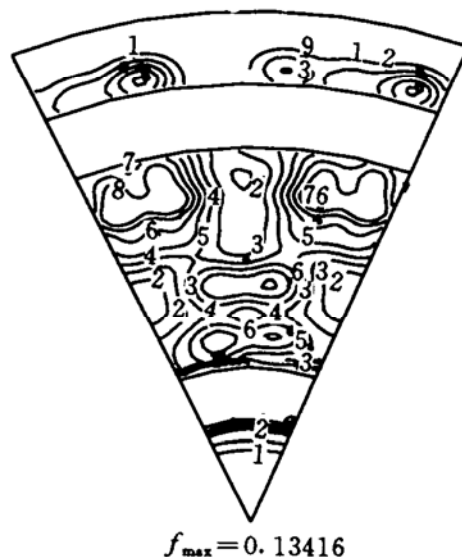
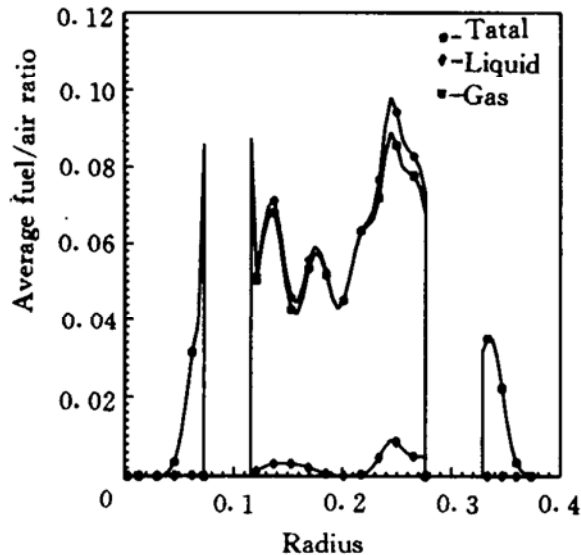


Fig. 2 Distribution of azimuthal averaged fuel/air ratio Fig. 3 Contour of fuel/air ratio on cross section

于加力室的温度很高, 大部分的燃油都蒸发完了。只有在稳定器壁面附近, 由于油珠碰壁和二次雾化, 在外稳定器尾缘内侧, 存在液态燃油, 使油气比的局部峰值为 0.134, 约为化学恰当比的两倍。另外由最大油气比的位置, 可以看出燃油在周向的穿透深度。由图 2 可看出, 由于喷杆的数目较少, 燃油的穿透深度不够, 所以燃油分布在周向不均匀, 尤其是在外稳定器附近。由于内外圈喷油杆的数目不同, 所以在中圈稳定器内外侧的最大浓度值不在相同的周向位置。内外侧的浓度分布不均匀, 有可能导致燃烧的稳定性和效率下降。由周向平均油气

比的径向分布图可以看出, 燃油浓度的径向分布也是不均匀的。其中径向分布的峰值都在稳定器尾缘的两侧, 对火焰的扩展有利。

把外稳定器向外移动了 10mm 后, 燃油浓度分布的计算结果如图 4 和图 5 所示。与第一种布置的结果相比, 在外稳定器外缘, 浓度沿周向的分布比较均匀, 而且在外稳定器的内外两侧周向平均的浓度值相等, 对火焰稳定有利。

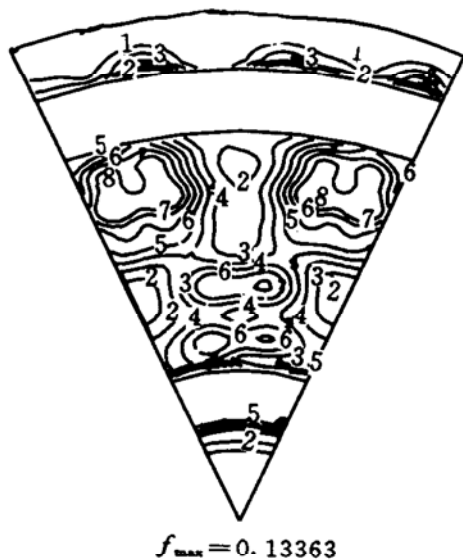
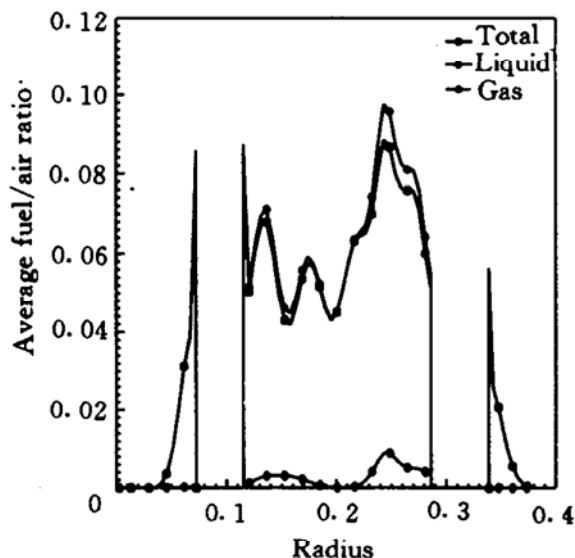


Fig. 4 Distribution of azimuthal averaged fuel/air ratio Fig. 5 Contour of fuel/air ratio on cross section

要提高加力比就必须增加燃烧强度, 如果燃油浓度分布不均匀, 就会出现局部高温区, 导致加力筒体过热。从两种布置下的浓度计算结果可以看出, 如果喷油和稳定器的匹配合适, 便

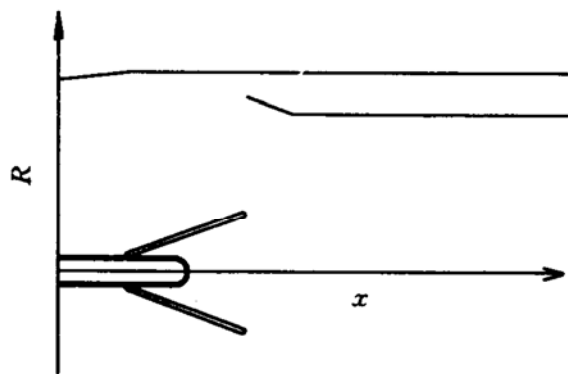


Fig. 6 Sketch of bypass of the afterburner

可得到周向和径向分布都比较均匀的浓度场。这样可以充分的利用整个加力燃烧室的空间, 消除局部高温区, 避免加力筒体过热。

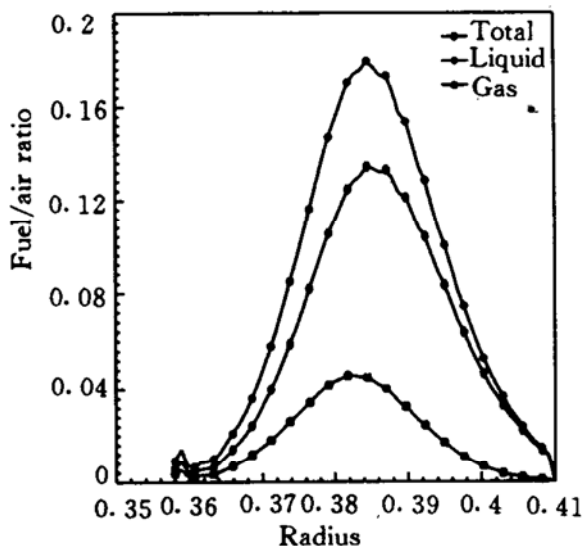


Fig. 7 Distribution of fuel/air ratio along the midway

对另一种加力燃烧室外函(几何结构见

图 6) 的燃油浓度分布进行了计算。图 7 和图 8 分别是稳定器尾缘截面上燃油在某一周向位置上沿径向的分布和等值线图。可以看出, 由于加力燃烧室外函的气流温度较低, 燃油未能充分蒸发, 所以在稳定器的尾缘, 燃油大部分仍是液态, 存在局部富油区, 最大油气比达 0.18, 为化学恰当比的两倍多, 有可能导致振荡燃烧。另外, 燃油的浓度分布偏上, 有一部分燃油

碰到加力室防振屏壁面,可能烧坏防振屏。而稳定器尾缘壁面附近的平均燃油浓度很低,不利于火焰的传播。

5 结 论

本文对轨道扩散法进行了改进,并编制了较通用的加力燃烧室浓度计算程序和结果显示软件。对两种真实加力燃烧室不同喷油和稳定器布置下的燃油浓度分布进行了计算和分析。

应用该方法和计算程序,可获得两态燃油比例,最大油气比,穿透深度,浓度分布均匀性和各区平均油气比等详细数据。为加力室的设计和调节,避免加力筒体过热,避免振荡燃烧,提高燃烧效率提供了有力的辅助手段。

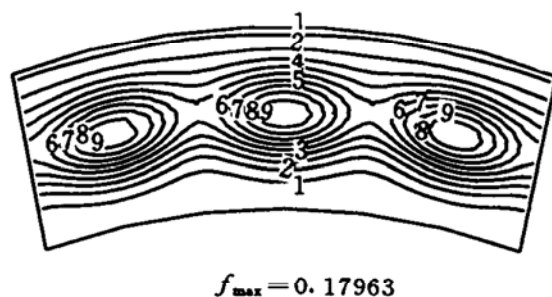


Fig. 8 Contour of fuel/air ratio on cross section

参 考 文 献

- 1 杨茂林. 加力燃烧室浓度场计算方法研究. 中国航空学会第八届燃烧及传热传质学术研讨会, 1992
- 2 覃洪波. 带辐射式稳定器的加力燃烧室燃油浓度分布计算. 中国航空学会第八届燃烧及传热传质学术研讨会, 1992

(上接第 44 页)

- and Technology, 1981, 27
- 8 Kumar M and Kuo K K. Effect of deformation on flame spreading and combustion in propellant cracks. AIAA Journal, 1981(12), AIAA 81-4325
- 9 Smirnov N N, Dimitrienko I D. Convective combustion of porous compressible propellants. Combustion and flame, 1992(89)
- 10 Griffiths S K, Nilon R, H. Similarity analysis of fracture growth and flame spread in deformable solid propellants. Combustion and Flame, 1992(88)
- 11 Laghenry M. T. 魏爱良译. 复合固体推进剂应变对燃速的直接影响. 国外固体火箭技术, 1986(2)