

文章编号: 10008055(2007) 082124 206

带隔热屏加力燃烧室热态流场计算

张海涛, 赵坚行
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 在任意曲线坐标系下对带有横向波纹隔热屏、外冷却通道和尾喷口的涡喷加力燃烧室的三维热态流场进行数值模拟. 利用椭圆型微分方程和区域法生成三维贴体网格, k ϵ 模型预估紊流特性, EBU2 Arrhenius 紊流燃烧模型估算化学反应速率, 六通量模型预估辐射通量以考虑其对壁面和气流温度的影响. 在非交错网格系统下应用混合差分格式离散控制方程, SIMPLE 算法求解离散方程, 数值分析两种进口气流参数分布对加力室热态流场和壁温分布的影响. 所得计算值与试验数据基本相符, 表明计算方法合理.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 数值计算, 加力燃烧室, 隔热屏, 贴体网格

中图分类号: V231.2 **文献标识码:** A

Turbulent combustion flow field calculation for afterburner with heat shield

ZHANG Haitao, ZHAO Jianxing
(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of
Aeronautics and Astronautics, 210016 Nanjing, China)

Abstract: In an arbitrary curvilinear coordinate system, numerical simulation was performed for 3D turbulent combustion flow field of the afterburner with the cross-rippled heat shield, outer cold passage and jet nozzle. The body-fitted grids were generated using a system of elliptical partial differential equations. The k ϵ model was employed to describe the turbulent characteristics. EBU2 Arrhenius turbulent combustion model was used to determine the chemical reaction rate, while a six-flux model was applied to predict heat radiation and its influence on the wall and gas temperature. The discretization of governing equations in a non-staggered grid system was obtained by hybrid scheme and was solved with SIMPLE algorithm. The influences of two different inlet gas parameter distributions on afterburner flow characteristics and wall temperature profiles were analyzed numerically. Calculations were in good agreement with the experimental data and show that numerical procedures are fairly reasonable.

Key words: aerospace propulsion system; numerical simulation; afterburner; heat shield; body-fitted grids

加力燃烧室是航空发动机重要部件之一, 在军用发动机上装置加力燃烧室可加大发动机的推力和增强飞机的飞行机动性, 它的工作好坏直接影响发动机的工作与性能. 为满足先进飞机发动机的飞行需要, 对加力室的要求也不断提高, 所需的实验费用非常昂贵, 因此本文采用数值方法模

拟加力燃烧室内气流流动和燃烧情况. 由于加力燃烧室形状复杂, 故采用贴体坐标系^[122]以避免因壁面边界与网格线不一致而带来的计算误差. 数值研究进口气流参数分布对加力室热态流场和壁温分布的影响. 所得计算值与试验数据基本相符表明计算方法合理, 可为加力燃烧室优化设计提供有用的设计依据.

本文的研究对象为带横向波纹隔热屏、外冷却气流和尾喷口的加力燃烧室, 隔热屏把加力室分为内外两通道, 为了防止隔热屏壁温过高, 在的许多斜孔和发散孔. 在加力筒体外还装有外冷其壁面上开有多排大小、形状及分布规律不相同却风罩, 并通入外冷却气流对加力室筒壁进行冷却. 此外, 还装有固定加力筒体的销钉, 销钉座露出在外通道内, 对气流在外通道内流动起了堵塞作用.

1 数值方法

所研究的气流为完全发展的紊流预混可燃混气(煤油+ 空气), 数学模型为 kE 方程紊流模型、EBU2Arrehenius 紊流燃烧模型以及六通量辐射模型^[3].

1.1 控制方程

在三维任意曲线坐标系下进行热态流场计算, 各个变量的守恒方程通用形式为^[4]

$$\begin{aligned} &\frac{5}{5N}(QU5) + \frac{5}{5G}(QV5) + \frac{5}{5F}(QW5) = \\ &\frac{5}{5N} \left[\frac{\#5}{rJ} (q_{11} 5N+ q_{12} 5G+ q_{13} 5F) \right] + \\ &\frac{5}{5G} \left[\frac{\#5}{rJ} (q_{21} 5N+ q_{22} 5G+ q_{23} 5F) \right] + \\ &\frac{5}{5F} \left[\frac{\#5}{rJ} (q_{31} 5N+ q_{32} 5G+ q_{33} 5F) \right] + rJS5 \end{aligned} \tag{1}$$

式中两组坐标系之间的雅可比行列式

$$J = x_N(r_G H - r_F H) - r_N(x_G H - x_F H) + H(x_G F - x_F G)$$

协变度量张量

$$q_j = r^2 A_{1i} A_{1j} + r^2 A_{2i} A_{2j} + A_{3i} A_{3j};$$

U, V, W 逆变速度为

$$\begin{cases} U = rA_{11}u + rA_{21}v + A_{31}w \\ V = rA_{12}u + rA_{22}v + A_{32}w \\ W = rA_{13}u + rA_{23}v + A_{33}w \end{cases} \tag{2}$$

式中 A_j 为 J 的代数余子式; $x_N, x_G, x_F, r_N, r_G, r_F, H, H, H$ 分别为圆柱坐标系(x, r, H)对曲线坐标系(N G F)的导数; 变量 5 分别为速度 u, v 和 w, 紊流动能 k 和紊流动能耗散率 E, 焓 h, 混合分数 f,

燃油质量分数 m_a , 燃油质量分数脉动均方值 g, 辐射通量 R_x, R_r, R_{tj} #s 为各变量的输运系数; S_s 为方程源项.

1.2 隔热屏壁温计算^[5]

在隔热屏内外壁面处都有气流流动, 因此隔热屏壁面与流体之间有对流换热, 另外隔热屏两边气流温度不同, 使隔热屏壁面处有热传导和辐射换热, 因此计算隔热屏壁温时, 除了通过六通量模型考虑高温热辐射外, 还必须耦合考虑导热, 辐射和对流换热对隔热屏壁温的影响. 隔热屏壁面与内外通道流体之间换热关系式为

$$GT_i = \frac{-QC_L^{1/4} k_p^{1/2} C_{pi}}{Rr \left[\frac{1}{k} \ln(Ey_{pi}^+ + P_{is}) \right]} + a_{ri} \quad (i = 1, 2) \tag{3}$$

式中

$$\begin{aligned} y_{pi}^+ &= (QC_L^{1/4} k_p^{1/2} y_{pi}) / L; a_{ri} = \frac{R(T_{ri}^4 - T_{2i}^4)}{T_{ri} - T_{2i}}; \\ q_w &= \frac{T_M - T_c}{1/G_{T1} + 1/G_p/K + 1/G_{T2}}; \\ K &= 111.2 + 101.4^* (T_w - 373) / 700 \end{aligned}$$

其中 T_M 为靠近隔热屏内壁面处气流温度, T_c 为靠近隔热屏外壁面处气流温度, T_w 为隔热屏壁温, a_{ri} 为辐射换热系数, q_w 为换热热流, K 为导热系数.

1.3 加力室筒体外壁冷却计算^[6]

为了防止加力室筒体壁温不至过高, 在加力筒体外装有外冷却风罩, 并通入外冷却气流对筒壁进行冷却, 在加力室内部因温度高, 除了考虑对流换热外还需考虑辐射影响; 而筒体壁温和外风罩气流温度都较低, 可忽略筒体外壁与外风罩之间辐射, 因此加力筒体壁面的热平衡方程可简化为

$$q_{R2} + A(T_c - T_w) = A(T_w - T_a) \tag{4}$$

式中 A_i 和 A_o 分别为筒体壁面内侧和外侧气流的对流换热系数, q_{R2} 为加力室内部向筒壁传递辐射热, T_a 为外冷却气流温度.

2 网格生成与数值求解方法

2.1 网格生成

为了保证网格质量, 满足流场计算的要求, 本文采用椭圆微分方程法对带横向波纹隔热屏的加力室生成三维贴体网格. 在任意曲线坐标系下椭圆网格生成方程的分量形式为^[11]:

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 g^{ij} r_{NN} + \sum_{k=1}^3 g^{kk} P_{kr} = 0 \tag{5}$$

式中 P_k 为来控制源项, 用来调整网格的分布; N 为任意曲线坐标系的坐标, g^j 为逆变度量张量, r 为位置矢量. 考虑到隔热屏几何形状特殊, 本文采用区域法^[5]把加力室分为 8 个区域分别生成网格后再将其组合成整体网格. 在生成网格时一方面为了能合理反映小孔及波纹形状; 另一方面为了减少计算工作量, 总网格数尽可能少. 因此采用不均匀网格分布, 局部网格加密. 从而合理显示加力室气流结构, 减少计算误差.

由于研究对象为带有横向波纹隔热屏的加力燃烧室, 隔热屏波纹周向均布, 故可取一个夹角为 15° 的扇形体进行数值计算, 图 1 为带横向隔热屏加力室网格图, 网格总数为 424 @ 45 @ 34. 图 2 为横向隔热屏加力室入口段隔热屏网格图. 由图可知, 隔热屏带有横向波纹, 在该段上开有多排分布

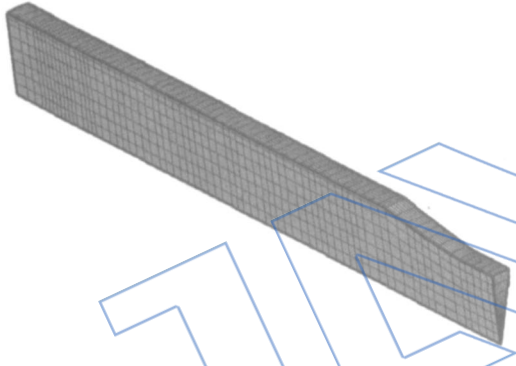


图 1 带横向隔热屏加力室网格图

Fig. 1 Grid of afterburner with the cross heat shield

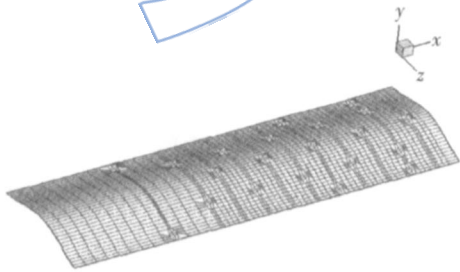


图 2 入口段隔热屏网格图

Fig. 2 Grid of the heat shield in afterburner entrance

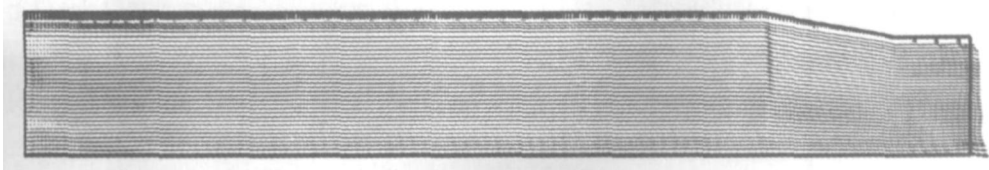


图 3 K=26 截面气流速度矢量图(非均匀分布)

Fig. 3 Gas velocity vector profile at section K= 26 (nonuniform distribution)

规律不相同的许多斜孔, 外通道低温气流通过这些冷却孔进入隔热屏内通道, 对隔热屏进行冷却.

2.2 初始条件与边界条件

进口边界条件: 来流流量分配和进口气流参数是给定的, 主流速度由流量、进口面积和气流密度确定. 出口边界条件: 令各变量法向梯度为零; 利用流量连续对速度和压力进行修正. 壁面边界条件: 在固壁上取气流速度和紊流参数为零, 近壁区采用在任意曲线坐标系下的壁面函数^[7]. 周期性条件: 在周期位置变量值相等:

$$\phi_{n+1} = \phi_1, \phi_n = \phi_2.$$

3 计算结果及分析

本文对进口气流参数非均匀分布与均匀分布两种工况进行三维燃烧流场计算. 部分计算结果如图 3~ 图 14 所示. 其中, 图 3 与图 4 分别为进口参数非均匀分布时开孔纵截面($K=26$)的气流速度矢量图和温度等值线图, 由图 3 可知, 隔热屏开孔对隔热屏附近处速度分布有影响, 但对整体流场影响不太大. 随着轴向长度增加, 由于加力室横截面减小、流量增加及化学反应引起气流密度减小, 使内通道气流速度增加. 由图 4 可知, 在内通道因混气燃烧使气体温度升高, 越靠近加力燃烧室中间轴线, 温度越高, 高温区随着火焰扩张角而扩大, 但由于外形的影响和隔热屏小孔气流的冷却使高温区又向内折; 靠近隔热屏处, 因小孔冷却, 气流温度较低. 外通道内气体没有燃烧仅是传热使气流温度升高, 故其温度要比内通道低. 另外隔热屏上小孔的孔径比较小, 小孔冷却气流的渗透深度较小, 故小孔气膜冷却对加力室中心部分温度场的影响不是很明显.

图 5 为加力室进口参数均布时不开孔纵截面($K=3$)温度等值线图, 与图 4 相比可知, 由于进口气流参数分布不同和无小孔进气的影响, 其温度分布与进口气流参数非均匀分布时有一定的区别, 但其变化规律基本相同.

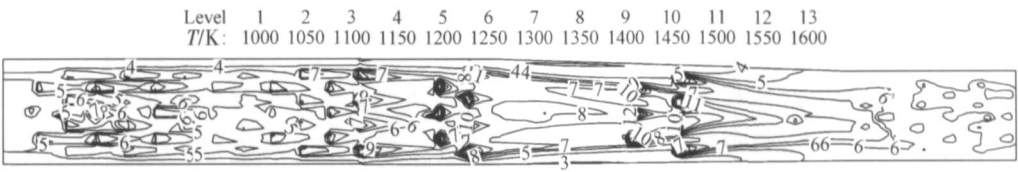


图 8 J = 36 截面隔热屏壁面温度等值线局部放大(非均匀分布)

Fig. 8 Heat shield wall temperature contours magnified of at section J = 36 (nonuniform distribution)

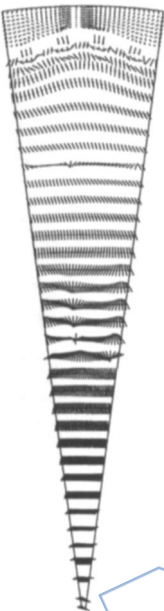


图 9 I = 142 截面速度分布(非均匀分布)

Fig. 9 I = 142 velocity profile(nonuniform distribution)

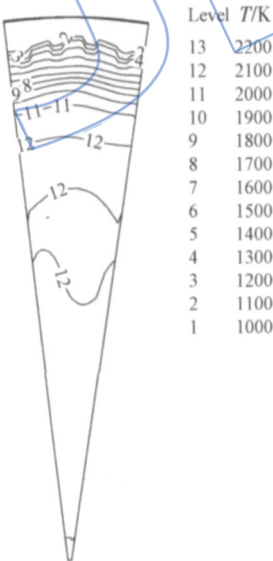


图 10 I = 142 截面温度分布(非均匀分布)

Fig. 10 I = 142 temperature profiles
(nonuniform distribution)

图 11 和 12 分别为出口温度和轴向速度径向分布图, Case1D 与 Case2D 分别表示进口参数非

均匀分布与均布两种工况, 由图可知, 进口气流参数分布对出口气流参数分布有一定的影响, 但对出口速度的影响要比对出口温度大些. 图 13 和图 14 分别表示两种进口分布对隔热屏和加力筒体

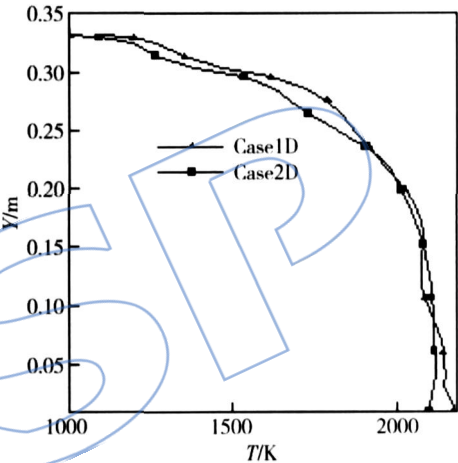


图 11 加力室出口温度径向分布

Fig. 11 Exit temperature radial profiles

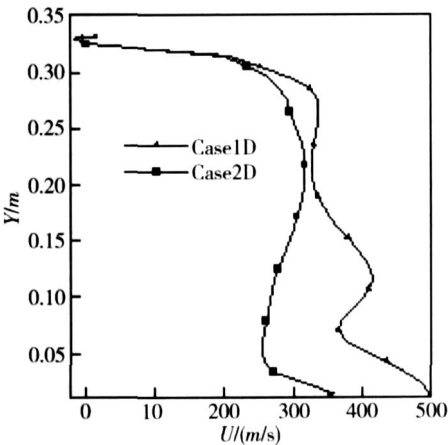


图 12 加力室出口速度径向分布

Fig. 12 Exit velocity radial profiles

壁温轴向分布的影响, 由图可知, 小孔冷却对隔热屏壁温影响较大, 在接近收敛段时, 因火焰扩张贴近屏壁, 在不开孔局部轴向位置上高温燃气靠近屏壁, 使该处壁温要比周围较高些. 筒体壁温随轴向距离增加以及隔热屏壁温增高而升高, 但因外通道冷却气流温度较低, 相应的变化不如隔热屏

壁温大. 另外, 进口气流温度分布不同, 所得的隔热屏和加力筒壁温轴向分布也不相同, 但是 Case1D 与 Case2D 两种工况所得的壁温分布规律基本一致, 与试验数据基本相吻合, 表示本计算方法合理可靠.

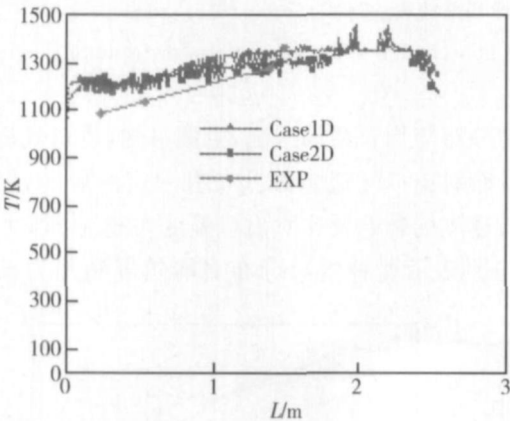


图 13 进口分布对隔热屏壁温轴向分布的影响
Fig. 13 Axial profiles of heat shield wall temperature

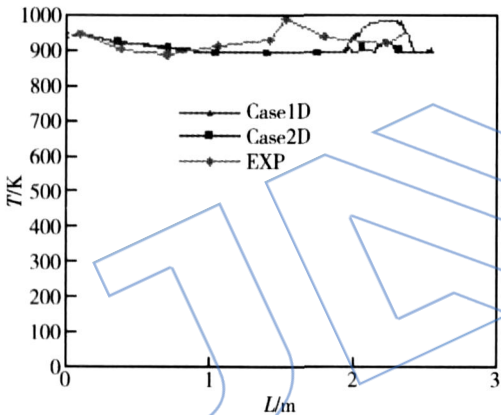


图 14 进口分布对筒壁壁温轴向分布的影响
Fig. 14 Axial profiles of cylinder wall temperature

4 结束语

本文数值分析任意曲线坐标系下带横向隔热屏加力燃烧室三维热态整体流场, 结果表明, 隔热屏的形状和开孔规律以及进口气流参数分布对加力室内部流场有影响因此把加力室作为一个整体进行研究, 可以较全面地反映加力室内气流流动, 有助于加深对加力室内各种复杂现象进一步理解, 为加力室优化设计和研制提供有用的参考依据.

参考文献:

[1] 赵坚行. 燃烧的数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[2] 侯晓春, 季鹤鸣, 赵坚行. 高性能航空燃气轮机燃烧技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

[3] Khalil E E. Modelling of furnaces and combustors[M]. Tunbridge Well, Kent: Abacus Press, 1982.

[4] Zhao J X. Three-dimensional gas turbine combustor performance modeling[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 19(1): 62-70.

[5] 刘洪. 加力燃烧室隔热屏优化设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 1997.

[6] 赵坚行, 刘全忠. 加力室隔热屏流场计算[J]. 工程热物理学报, 1995, 16(4): 492-494.

ZHAO Jianxing, LIU Quanzhong. The prediction of turbulent reacting flow in a afterburner with heat shield[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1995, 16(4): 492-494.

[7] 雷雨冰. 数值模拟环形燃烧室整体流场[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2000. 12.