

小发直流燃烧室扩压器 和火焰筒匹配的数值模拟

航空工业总公司第六〇八研究所 李概奇*
西北工业大学 严传俊

【摘要】 采用数值模拟方法对某小发直流燃烧室扩压器和火焰筒匹配下的流场进行了计算和分析,用双方程 $k-\epsilon$ 模型描述紊流特性,用二步化学反应模型模拟化学反应,用空气流量分配作为火焰筒内外流场联合求解的桥梁,引入边界结点类型说明数组帮助复杂边界条件的处理。计算结果表明燃烧室环腔间形成两个强烈的回流区,内、外环腔流场极不对称,并且具有较强的三维性;前置扩压器倾斜角度是影响燃烧室流场和性能的最重要因素。

主题词: 小型透平发动机 燃烧室 数值模拟 流场
分类号: V235

目前在燃烧室扩压器与火焰筒匹配方面的实验研究主要集中在扩压器和火焰筒外部之间的流动,而已有的燃烧室数值计算则往往只计算火焰筒内部的流动,并且这方面的工作均以大发动机燃烧室为研究对象。本文对一台结构布局比较特殊的小发直流燃烧室火焰筒内外流场同时进行了数值模拟,并对不同扩压器与火焰筒匹配时燃烧室性能进行了数值试验。

1 计算模型和方法

燃烧室为一短环直流燃烧室,带有 12 个气动雾化喷嘴和 12 对双级反向径向涡流器,前置扩压器与燃烧室中心线有 50° 的较大倾斜角,其中安装了许多弯曲叶片,叶片间流道形状使离心压气机出口气流得以整流、转向和轻度扩压,燃烧室内外环腔几何很不对称。

计算时燃烧室进口参数为设计点的进口参数,前置扩压器出口截面平均马赫数 0.0856,相应雷诺数 1.337×10^5 。各变量 φ 的控制方程通式为 $\text{div}(\rho \vec{u} \varphi) - \Gamma \nabla^2 \varphi = S_\varphi$ 其中源项 S_φ 按文献[1]计算。紊流特性用标准 $k-\epsilon$ 模型描述^[2],火焰筒内部化学反应由二步反应方程模拟^[1],化学反应速率用 EBU-Arrhenius 燃烧模型计算^[3],辐射热交换采用六通量辐射模型^[1];喷嘴油雾初始尺寸分布用 R-R 公式描述,实验表明喷嘴质量中间直径 $MMD = 60 \mu\text{m}$,尺寸分布指数 $n = 3$ 。用颗粒群轨道扩散模型计算油雾的运动和蒸发^[1],油珠蒸发产生的质量源、动量源和能量源附加在相应的气相控制方程中,以考虑气相和液相的耦合。

为了将火焰筒内外流场联合求解,先预估燃烧室空气流量分配,然后计算火焰筒各进气孔的平均速度。气流在涡流器叶片通道内的平均速度不难由质量守恒和动量矩守恒算出^[4]。如果以火焰筒壁面作为内外流场的分界面,当几何边界和进气孔处气流参数已知时,可以分别求解

出火焰筒内部和外部流场, 这样壁面上进气孔新的流量 m_H 可根据壁面内外压差 ΔP 、孔面积 A_H 、流量系数 C_D 、密度 ρ 求出, 然后用新的 m_H 作为边界条件重新迭代求解火焰筒内外流场, 直至进气孔流量和内外流场达到收敛。为了处理复杂的几何边界, 引入了边界结点类型说明数组 $M(I, J, K)$ 。以 $x-r$ 平面为例, 固壁边界大体可分成图 1 所示的几种类型, 每种类型边界事先在数据文件中赋值, 程序运行时就能根据 $M(I, J, K)$ 的值在边界处理子程序中用壁面函数法^[1]对边界进行恰当处理。这种方法把复杂的多连域求解转变为相对简单的单连域求解, 程序还具有较好的通用性。

各变量 φ 的方程通式在控制容积内积分, 并对源项线性化处理, 可以得到离散方程:

$$a_p \varphi_p = \sum a_i \varphi_i + S_p \quad (1)$$

式中 φ_p 和 φ_i 分别代表变量 φ 在求解网格点 p 和相邻

网格点的值, a_i 为方程系数, 用混合差分格式计算, 方程(1)用 SIMPLEC^[5] 算法进行求解。

前置扩压器的进口截面气流参数和分布由离心压气机气动计算提供, 考虑到周期对称性, 周向计算了燃烧室环形的 $1/12$, 即 30° 的扇形, 用 CTDMA^[1] 法处理周向边界条件; 网格分布为非均匀的正交错位网格, 网格点数 $80 \times 60 \times 30$ 。

2 燃烧室流场和性能计算结果

图 2(a) 为两相邻喷嘴中间轴向平面上的速度分布, θ 为偏离喷嘴周向角度, 可见燃烧室外环腔和头部环涡形成两个强烈的回流区, 在回流区附近区域有较大的速度梯度、较高的紊流动能, 是总压损失的重要原因; 内环流速远高于外环, 相应内环静压比外环低许多。在图 2(b) 中由于有喷嘴支杆和涡流器, 使回流区受到一定程度的破坏; 同时由于涡流器的强烈旋转, 火焰筒主燃区形成了强烈的回流, 为稳定燃烧提供了良好流态; 燃烧室速度场具有较强的三维性。计算还表明前置扩压器内部速度分布受火焰筒影响较小, 原因是前置扩压器内气流通道扩压程度很小, 有利于气流稳定流动; 另外, 突扩区的突扩比十分大, 也有利于减少前置扩压器对火焰筒安排的敏感性。

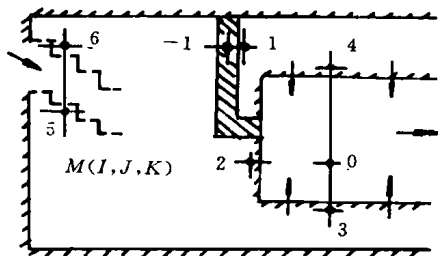


图 1 边界网格结点类型说明示意图

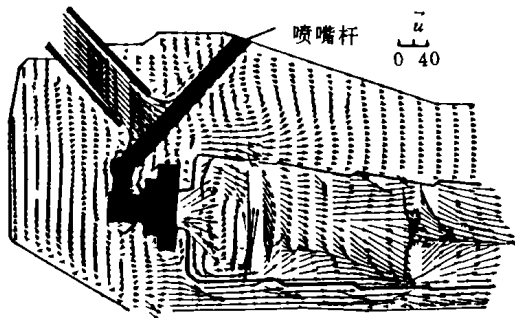
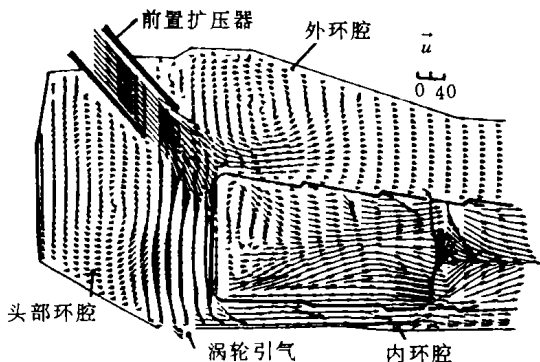


图 2 燃烧室轴向截面速度场(a. $\theta=15^\circ$; b. $\theta=0^\circ$)

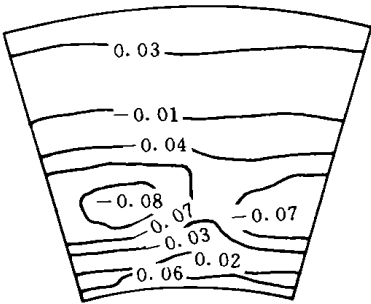


图3 头部环腔涡心横截面静压恢复系数分布

图3为以前置扩压器进口截面作参考时,头部环腔涡心横截面静压恢复系数 $C_p = \Delta P / (1/2) \rho U^2$ 分布,可见涡心附近压强较小,压强沿径向和周向分布都不均匀。

图4表明了冷气和高温燃气的充分掺混,有利于燃烧室出口形成高品质的温度场。。

图5为燃烧室出口某径向位置周向平均温度和出口总平均温度之差与燃烧室温升之比(RPF)沿叶高变化,叶尖温度低于叶根与火焰筒外环冷气进气量较多有关。计算还表明火焰筒外环壁温普遍高于内环,主要原因是外环腔气流速度远低于内环气流速度。

火焰筒外环进气量与内环之比 S 为1.07,外环气量大于内环是由于外环腔静压较高;内外环腔总压损失 λ_i 、 λ_o 分别为0.89%和0.46%;燃烧室环腔总的质量平均总压损失 $\bar{\lambda} = 0.65\%$,总压损失较小主要是由于前置扩压器出口马赫数较低。

3 不同扩压器与火焰筒匹配的数值试验

以原结构为基准,表1中工况(1)–(4)分别表示前置扩压器往外环、内环偏 6° ;出口马赫数增到0.1,火焰筒往后平移1 cm 情况; η 为燃烧效率, σ 为总压恢复系数, PF 为出口温度分布系数, EI_{CO} 和 EI_{UHC} 分别为CO和未燃油UHC 排放指数。

表1 燃烧室流动和性能参数变化

工况	S	λ_i	λ_o	$\bar{\lambda}$	η	σ	PF	EI_{CO}	EI_{UHC}
基准	1.07	0.89	0.46	0.65	0.992	0.960	0.35	3.36	0.62
(1)	1.20	0.92	0.42	0.60	0.990	0.963	0.40	3.20	0.80
(2)	1.01	0.88	0.51	0.68	0.986	0.952	0.45	4.70	1.80
(3)	1.066	1.10	0.58	0.90	0.998	0.950	0.46	5.00	2.20
(4)	1.05	0.86	0.43	0.62	0.979	0.966	0.50	6.20	3.90

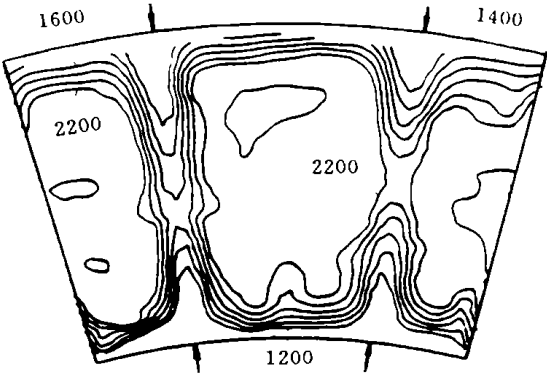


图4 火焰筒中间孔横截面温度分布

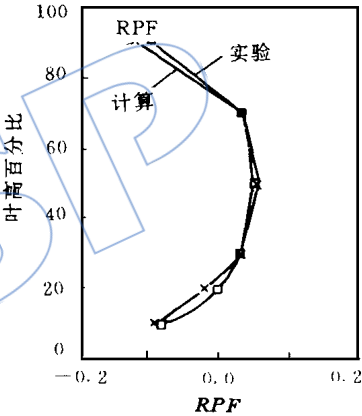


图5 燃烧室出口径向温度分布系数变化

计算表明不同工况时速度场仍与图 2 类似,但由于空气流量分配的改变,导致火焰筒内速度场和油雾场的匹配性变差,燃烧室性能与基准燃烧室相比,都不同程度地恶化。

4 计算与实验结果比较

设计点状态燃烧室出口温度场用旋转热电偶耙测量,CO、未燃油 UHC 用燃气取样分析得出,总压用总压耙测量。

表 2 燃烧室性能计算与实验比较

表 2 比较了燃烧室性能计算值与实验值,可见两者基本吻合;图 5 表明燃烧室出口径向温度分布的计算结果与实验基本相符;燃烧室环腔间质量平均总压损失 λ 计算值为 0.65%,与实验值 0.5% 十分接近;火焰筒外部速度场与冷态下激光测速仪实验结果定性相符。

	η	σ	PF	EI_{CO}	EI_{UHC}
计算	0.992	0.9600	0.35	3.36	0.62
实验	0.990	0.9615	0.30	4.00	0.40

5 结 论

(1) 气流从前置扩压器流出后在燃烧室环腔间形成了两个强烈回流区,内外环腔的流场极不对称,内环流速远高于外环,气流流过内环腔的总压损失高于外环总压损失。(2) 由于喷嘴支杆和涡流器的存在,燃烧室环腔间流场具有较强的三维性;由于前置扩压器扩压程度较小,环腔空间很大,前置扩压器内部流场受火焰筒影响不明显。(3) 前置扩压器倾斜角度是影响燃烧室性能的重要几何参数,燃烧室基准结构布局具有较好的燃烧性能。

参 考 文 献

1 Mongia H C, Reynolds R S. Combustor Design Criteria Validation. USARTL-TR-78, 1979

2 Launder B E, et al. The Numerical Computation of Turbulent Flow. Comp Methods Appl. Mech. Eng., 1974, 3(3)

3 Hautman D J, Dryer F L, Sehug K P. A Multiple-Step Overall Kinetic Mechanism for the Oxidation of Hydrocarbons. Comb Sci Tech, 1981, 25: 219-235

4 Rasfjord T, et al. Air and Spray Patterns Produced by Gas Turbine High-Shear Nozzle/Swirlers Assemblies. AIAA 90-0465

5 Van Doormaal J P, Raithby G D. Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows. Numerical Heat Transfer, 1984

(责任编辑 杨再荣)

performance of the atomizer with lower swirling strength is better than that of the atomizer with higher swirling strength near the atomizer exit, but downstream the both atomizers possess same atomization performance.

Key Words Atomizing Measurements Drop size Fuel- nozzles

NUMERICAL SIMULATION FOR MATCHING DIFFUSER WITH LINER IN A SMALL DIRECT- FLOW COMBUSTOR

Li Gaiqi and Yan Chuanjun

(*Zhuzhou Aviation Power Institute, Zhuzhou 412002*)

ABSTRACT

Numerical simulation was carried out for inside and outside flow- fields of the liner in a small direct- flow combustor with special structural arrangement, numerical tests of combustor performance were performed for matching of different diffusers with the liner. The program employs two- equations (K- ϵ model) to describe turbulent characteristics. The combustion following vaporization was simulated by a two- step chemical reaction combustion model. Arrhenius- EBU model was used to determine the reaction rate, and the air flow mass distribution was taken as a bridge to link the inside and outside flow- fields of the liner. The calculated results indicated that two strong recirculation zones emerged when air flowed into combustor annular cavity from prediffuser, the inside and outside flowfields were very unsymmetrical. The inclination of the prediffuser was an important geometrical parameter for the combustor performance.

Key Words Small turbine engines Combustion chambers Numerical simulation Flow fields

A STUDY ON EFFECTS OF ENVIRONMENTAL FACTORS ON ALUMINUM OXIDE PARTICLE SIZES

Zhang Wei, Cao Taiyue, Wang Ningfei, Zhang Weihu, Zhu Hui

(*5th Dept. National University of Defense Technology, Changsha 410073*)

ABSTRACT

On the basis of diffusional combustion model of metal combustion and heterogeneous nucleation mechanism, the average particle sizes of the product Al_2O_3 in aluminum combustion were calculated. The results show that the temperatures on the combustion surface and on the metal surface increase with enhancing pressure, and the average particle size of the condensed product decreases as pressure increases. The effect of the pressure on the parameters is larger than that of the temperatures.

Key Words Aluminium powder Environmental factors Combustion products

CALCULATION OF 3D CASCADE FLOW WITH N- S EQUATION

Ji Lucheng and Zhou Sheng

(*4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083*)

ABSTRACT

A cell- centered finite volume method was developed to solve Reynolds- averaged Navier- Stokes equation with Jameson's Runge- Kutta scheme. In its