

尾缘吹气式火焰稳定器流场计算

北京航空航天大学 岳连捷* 杨茂林 黄勇 徐行

【摘要】 用修正的 $k-\epsilon$ 模型、SMPLER 方法, 对二元管道中新型火焰稳定器后冷态流场进行了数值模拟, 研究了气流参数及稳定器几何参数变化对回流区结构的影响。为研究、分析新型稳定器燃烧性能, 设计新型稳定器提供了依据。

主题词: 气动稳定 火焰稳定器 流场 计算

分类号: V 235. 113

1 引言

尾缘吹气式火焰稳定器^[1]是一种机械与气动稳定相结合的高效低阻新型稳定器。和常规 V 型稳定器不同, 新型稳定器槽宽小, 且为流线形头部, 不加力状态下流阻损失很小; 加力时尾缘吹气, 扩大回流区。且比通常的气动稳定器耗气量小, 更易于稳定工作。该稳定器的流场存在尾缘吹气射流与主流的相互作用以及射流、主流对回流区的卷吸。其流场特性非常复杂。本文的目的是计算分析新型稳定器的冷态流场, 特别着重描述回流区结构, 研究稳定器几何参数及气流参数特别是吹气的影响。

2 方法简介和边界条件处理

(1) 计算对象如图 1 和图 2。①忽略管道 Z 向侧壁影响, 流场近似成二维; ② Ma 数小于 0.3; ③温度在整个空间为均匀; ④略去重力作用, 流场沿 Y 轴二维对称。取上方区域 $0.7\text{ m} \times 0.15\text{ m}$ 作为计算区域。

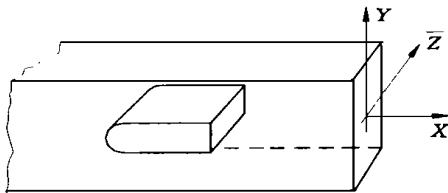


图 1 二元管道结构示意图

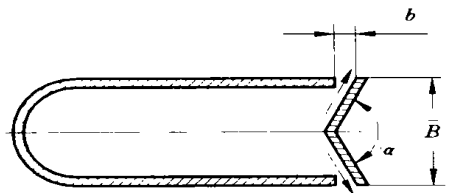


图 2 新型稳定器示意图

(2) 管道雷诺数为 10^6 , 流动状态近似为二维定常不可压湍流流动。粘性流体的运动方程采用直角坐标下的 N-S 方程。湍流模型选用 Bardina 提出的 $k-\epsilon$ 双方程改进模型, 在 ϵ 方程

中加入旋转项,以体现旋转的影响^[2]。

控制方程组可采用如下通用微分方程组的形式表示:

$$\frac{\partial(\rho u \xi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \xi)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\xi} \frac{\partial \xi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_{\xi} \frac{\partial \xi}{\partial y} \right) + S_{\xi}$$

方 程	ξ	Γ_{ξ}	S_{ξ}
连续方程	1	0	0
x 方向动量方程	u	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x} \right)$
y 方向动量方程	v	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y} \right)$
湍流动能方程	k	μ_{eff}/σ_k	$G_k - \rho \epsilon$
湍流耗散方程	ϵ	$\mu_{eff}/\sigma_{\epsilon}$	$\epsilon(c_1 G_k - c_2 \rho \epsilon)/k + c_3 \rho \Omega \epsilon$

$$G_k = \mu_t \{ 2 [(\partial u / \partial x)^2 + (\partial v / \partial y)^2] + (\partial u / \partial y + \partial v / \partial x)^2 \}$$

$$\Omega = [(1/2) \Omega_{ij} \Omega_{ij}]^{1/2}, \quad \Omega_{ij} = (1/2) (\partial u_i / \partial x_j - \partial u_j / \partial x_i), \quad \mu_t = c_{\mu} \rho k / \epsilon$$

其中 $c_1 = 1.44, c_2 = 1.92, c_3 = 0.6, c_{\mu} = 0.09, \sigma_{\epsilon} = 1.22, \sigma_k = 1.0$

(3) 对控制方程组进行无量纲化^[3],并用 S M P L E R 算法求解离散化的方程组^[4,5]。网格为 86×34 的矩形网格,稳定器边界用阶梯形近似处理。

边界条件处理: (1) 给定进口气流和吹气射流的速度、湍流动能 k 、湍流动能耗散率 ϵ 的分布; (2) 固定壁面处采用无滑移条件,近壁处 k 和 ϵ 值由壁面函数法求得; (3) 对称性条件,在计算区域的下边界上 $v = 0$,其他变量在此处的梯度为零; (4) 对于出口轴向速度,以总体质量的连续性为基础,采用相似速度分布近似法处理;其他参数通过对上游条件进行线性插值得到。

3 结果分析

3.1 吹气速度 u_j 对回流区的影响

新型稳定器($\alpha = 180^\circ, b = 3\text{ mm}$)在主流和吹气速度均为 50 m/s 时的流场流矢图见图 3 和 4。稳定器后存在回流区,由于吹气射流加入,大大增加了主流横向动量,主流被明显向上挤压。

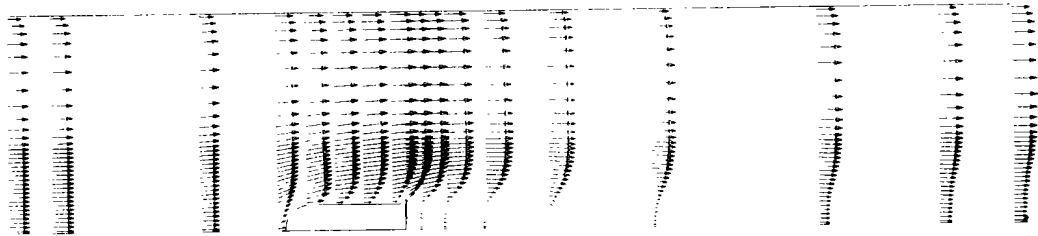


图 3 全场流矢图

新型稳定器($\alpha = 180^\circ, b = 3\text{ mm}$)在主流速度 u_1 为 50 m/s 情况下: (1) 随 u_j 增加,回流区

变大(见图 5(a))。 u_j 增加, 吹气射流的质量和动量都增长, 射流穿透深度增加, 使得回流区宽度 B_r 增加; 吹气射流压迫主流, 使主流的流通面积减小, 主流在稳定器边缘流速加大, 依靠较强的惯性作用, 回流区长度 L_r 变大。同时, 回流率(回流区回流流量与总流量之比)和流阻系数 Ψ 也相应地增加。

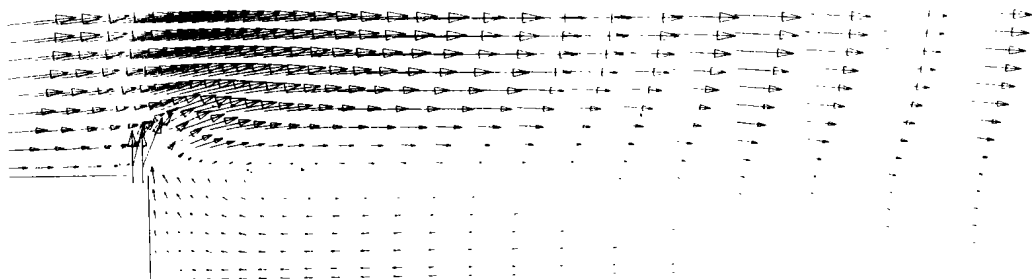


图 4 回流区附近流矢图

(2) 随 u_j 增加, 湍流脉动强度增加, 图 5(b) 为 x (距稳定器尾缘的距离) = $0.5B$ 特征截面上的湍流动能最大值随 u_j 的变化。随 u_j 的增加, 两股流体的掺混更加激烈, 湍流脉动强度加大, 强化了回流区边界上的热质交换, 对燃烧有利。

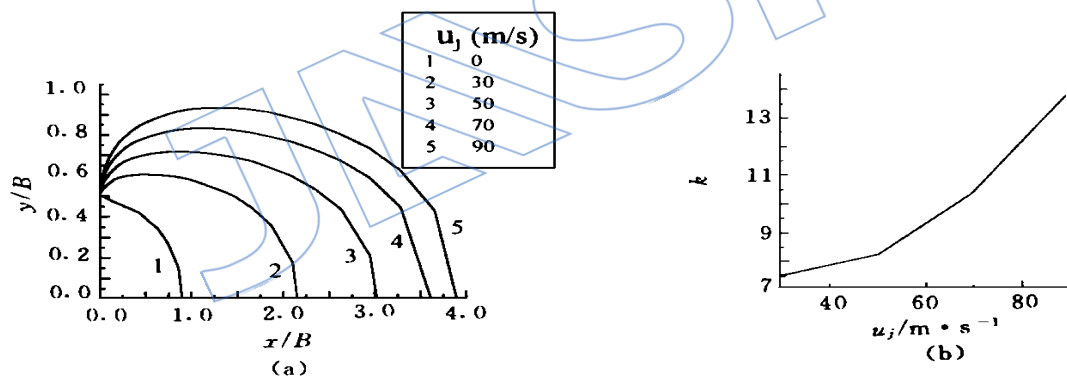


图 5 回流区边界及湍流动能随 u_j 的变化

增大吹气速度, 使回流区变大, 回流量增加, 湍流脉动加强, 有利燃烧; 但同时也引起流阻损失加大, 且回流区边缘速度也增大, 带来不利影响, 设计时需综合考虑。

3.2 主流速度 u_1 对回流区的影响

新型稳定器($\alpha = 180^\circ$, $b = 3\text{ mm}$) 在吹气速度 u_j 为 50 m/s 条件下:

(1) u_1 不太高时, 随 u_1 增加, 回流区变长变窄, 但 u_1 进一步增大, L_r 和 B_r 均变小(见图 6(a))。随 u_1 增加, 吹气射流和主流的动量比减小, 吹气射流的穿透深度下降, 导致 B_r 下降。同时, 稳定器边缘流体惯性增加, 抵抗逆压梯度的能力增强, 使 L_r 有加大的趋势; 但 B_r 减小使气流速度方向趋平, 这相当于常规稳定器几何堵塞比减小的情况, L_r 趋于减小。在 u_1 较小的情况下, 回流区处于刚建立阶段, 随 u_1 增加 L_r 变大的趋势较之变小的趋势明显, 故先变长; 当 u_1 增加到一定程度后, 气流克服逆压梯度的能力增长不大, 使其变短的趋势占优势, 故回流区变短。

(2) 随 u_1 增加, 回流率下降(见图 6(b)), 回流率与回流区宽度变化的趋势一致。

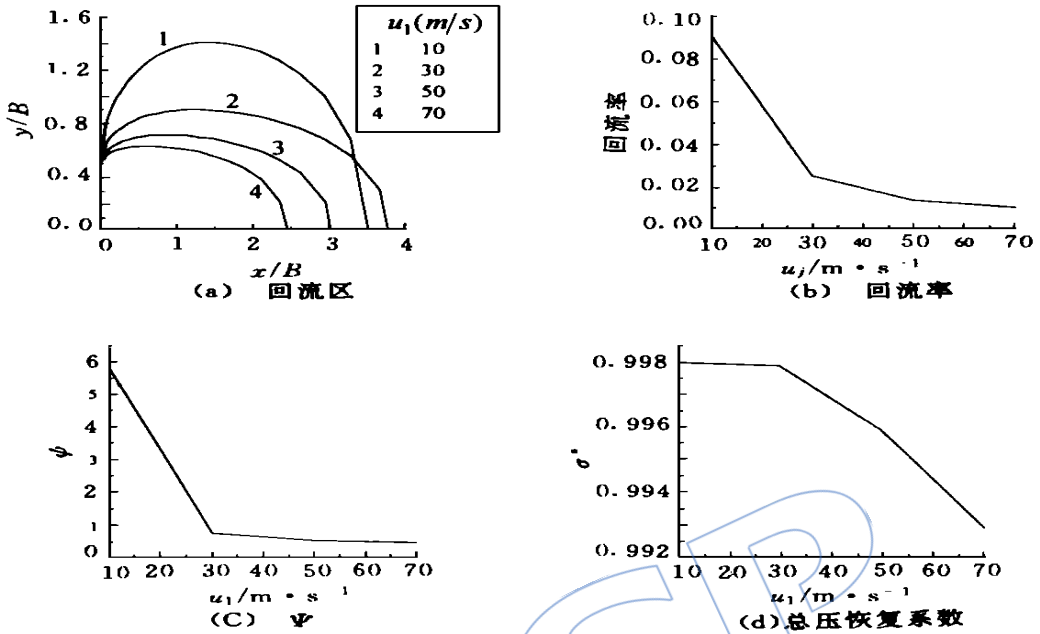


图 6 回流区边界、回流率、 ψ 、总压恢复系数随 u_1 的变化

(3) u_1 增加, ψ 下降, 但总压损失是增加的(见图 6(c) 和图 6(d))。对于常规稳定器来说, ψ 与几何结构相关, 对新型稳定器则还受 u_j 和 u_1 的影响。

3.3 吹气射流与主流速度保持相等时, 回流区随速度的变化

图 7(a) 到图 7(b) 为新型稳定器($\alpha = 180^\circ, b = 3 \text{ mm}$) 保持 $u_j = u_1$ 条件下, 回流区随速度的

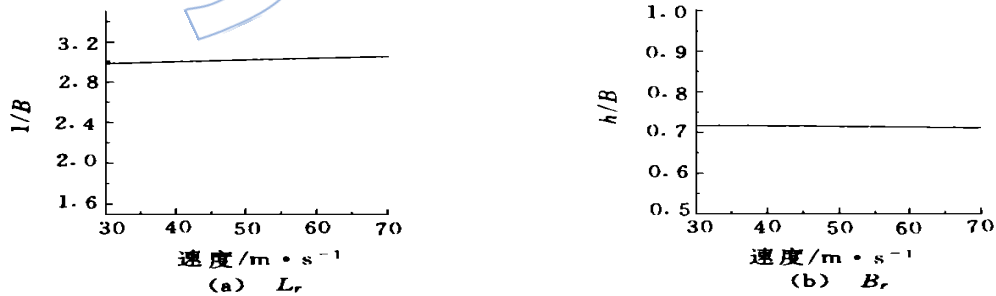


图 7 L_r, B_r 受 u_j 和 u_1 同步变化的影响

变化。保持 $u_j = u_1$, 则射流与主流质量比和动量比都不变。当流速变化时, B_r 和 L_r 基本保持不变, 相应地回流率和流阻系数也变化不大。

3.4 挡板角度 α 的影响

图 8 为新型稳定器($b = 3 \text{ mm}$) 在 $u_j = u_1 = 50 \text{ m/s}$ 条件下回流区大小随 α 角的变化。随 α 变小, 回流区也缩小。这是因为随 α 角的减小, u_j 相同时, 吹气射流的 y 向分速减小, y 向动量减小, 使 B_r 下降, L_r 也相应变小。

3.5 不吹气情况下新型稳定器与 V 型稳定器的对比

图 9 为新型稳定器($\alpha=180^\circ$)不吹气情况下和 V 型稳定器($\alpha=45^\circ$)在相同堵塞比(12%)

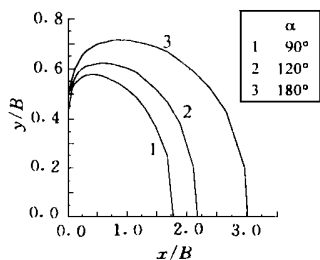


图 8 回流区边界随 α 的变化

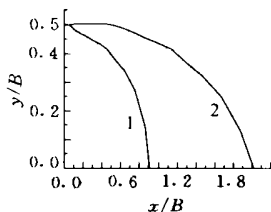


图 9 回流区边界对比
(1 新型稳定器 2 V 型稳定器)

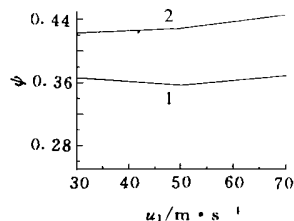


图 10 流阻系数对比

和 $u_1=50\text{ m/s}$ 时其后流场的对比。新型稳定器因为具有流线型结构,沿流向较长,不吹气时其后回流区很小,使其流动损失大大降低。由图 10 可见,新型稳定器 Ψ 较相同堵塞比的 V 型稳定器小 15% 左右。同时由新型稳定器($\alpha=180^\circ, b=3\text{ mm}$), $u_1=50\text{ m/s}$ 时计算结果显示它和堵塞比为 17% 的 V 型稳定器回流区宽度相当,且引气量不足 2%。

4 结 论

(1) 数值计算结果表明新型稳定器回流区由于尾缘吹气作用而显著变宽,使回流区体积、回流率、回流量都大大增加了,体现了新型稳定器的优越性。

(2) 分析了影响该新型稳定器回流区的各主要因素。表明新型稳定器回流区的大小随吹气大小是可调的,不吹气时流阻损失很小,吹气时流阻损失有所增加,在设计时需要综合考虑各因素,优化设计。

(3) 本文用修正的 $k-\epsilon$ 模型, S M P L E R 方法对新型稳定器冷态流场所做的数值模拟的计算结果合理,为进一步研究该稳定器提供了依据与指导。

参 考 文 献

- 1 杨茂林等. 尾缘吹气式火焰稳定器试验研究. 航空动力学报, 1998, 13(2): 185- 188
- 2 Mansour N N, Kin J, Mo in P. Computation of Turbulent Flow s Over a Backward- Facing Step ., N A S A - T M - 85851, 1983
- 3 黄勇, 杨茂林. 二元管道稳定器流场计算. 桂林: 中国航空学会第二届动力年会, CSAA P- 89- 128(C), 1989
- 4 范维澄, 万跃鹏. 流动及燃烧的模型与计算. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1991
- 5 陶文铨. 数值传热学. 西安: 西安交通大学出版社, 1988

(责任编辑 杨再荣)

by the former researcher on rubbing of rotor and stator. The vibration characteristics for some types of rubbing for the dual- shaft engine are analyzed and discussed. The theoretical results are consistent with data measured on a dual- shaft aircraft engine.

Key Words Double spool jet engines Collisions Vibration analysis

STRESS ANALYSIS OF TRAPEZOID TOOTH BELT WITH FEM

Wu Cong, Wang Yong, Ding Weiping, Wang Buyang

(Dept. of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

ABSTRACT The geometric nonlinearity of synchronous trapezoid tooth belt is taken as the point of departure. A nonlinearity finite element solution of the synchronous belt is provided on the basis of elastic linear finite element method to solve two- dimensional stress distribution problem. The level stress distribution for a tooth of the synchronous belt is researched with help of this method. Finally, for an example, a maximum stress point and stress distributions of a synchronous belt tooth have been found out and compared with its elastic linear solution.

Key Words Gears stress Distribution Nonlinearity Finite element analysis

NUMERICAL PREDICTION OF COLD FLOW FIELD BEHIND EBM C FLAMEHOLDER

Yue Lianjie, Yang Maolin, Huang Yong, Xu Hang

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

ABSTRACT A numerical prediction of the cold flow field behind a novel flameholder- Edge Blowing Mixture Curtain (EBM C) in two- Dimension duct was completed by using a modified k- ϵ model and S M P L E R method. The influence of the airflow parameters and the flameholder geometrical parameters on the recirculation zone was also studied. The prediction provides basis for designing the novel flameholder and studying its combustion performance.

Key Words Aerodynamic stabilization Flame holder Flow field Prediction

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON EBM C FLAMEHOLDER

Yang Maolin, Quan Zhong, Bai Xingyan, Zhang Pinjie

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

ABSTRACT A novel flameholder is presented, as named Edge Blowing Mixture Curtain (EBM C) flameholder. It has a streamline form head, small base width, with air and fuel mixture flowing from the slots at its edges into the main flow. It has small cold pressure loss without reheat and variable blowing on reheat so as to enlarge recirculation zone and improve combustion performance. An experimental investigation of this flameholder was carried