

V型稳定器表面集油的研究

南京航空学院 刘志刚 王家骅 李概奇

在涡轮风扇的加力燃烧室里,一部分未完全蒸发的油珠因惯性撞落在稳定器表面上形成油膜,对燃烧室的性能产生影响。本文以新的试验方法和计算方法研究了这一现象。

一、试验方法

试验装置如图1所示。在稳定器后缘有一V形挡板,槽内铺有吸油材料。稳定器的安装端面焊有一空心钢管。当燃油撞击到稳定器壁面形成油膜后,由于惯性和气流剪切作用,油膜沿壁面运动,经收集挡板全部流进槽内。当气流温度较高时,稳定器做成夹层,利用冷却水循环冷却壁面,使收集到的燃油不蒸发。

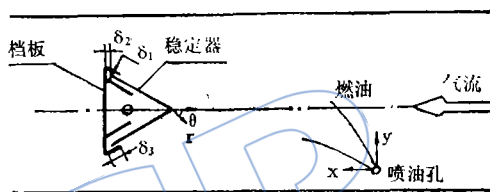


图1 油珠收集示意图

挡板与稳定器的间隙 $\delta_1 = 1.0 \sim 2.5 \text{ mm}$, $\delta_2 = 1.0 \sim 2.5 \text{ mm}$, $\delta_3 = 3.0 \sim 4.0 \text{ mm}$ 。试验观察到,挡板的十分有限间隙对测量精度的影响以及对流场的干扰很小。该法较准确地反映稳定器所收集的燃油,并不受操作因素影响。试验时,用电磁阀控制喷油并计时。用精密天平称出吸油量。

二、试验结果

表1 部分试验结果 ($\phi = [(W_{f1} - W_{f2}) / W_{f1}] \times 100\%$ 表示集油量 W_f 递增或递减率)。

		P (MPa)		V (m/s)		T (K)		α (°)		L (m)	
		0.7	3.5	35	51	305	405	40	60	0.17	0.23
W_{f1}	W_{f2} (g/s)	0.71	0.69	0.4	0.73	0.91	0.5	0.4	0.53	0.91	0.7
ϕ (%)				82.5		45		29		23	

试验发现,最大燃油浓度随油压变化从稳定器的一侧移至另一侧,所收集的燃油随油压提高而先增加后减少。因此,燃油侧喷下,当稳定器与喷嘴径向距离一定,随工况的变化稳定器附近的燃油浓度场是很不稳定的。

从表1可知,气流速度增大时,所收集的燃油明显增加,高达82.5%。表明气流速度不仅影响油珠惯性,使更多的油珠不易绕过稳定器而撞落在壁面上,还限制了油珠的穿透。

试验还发现,气流温度提高后,有一部分小油珠在到达稳定器截面前已蒸发完。其他油珠也因蒸发而减小了惯性,使油珠易绕过稳定器。当气流温度提高 100°C ,集油递减率为

45%。气流温度对集油量影响明显。

在其他条件相同时, 稳定器离喷嘴轴向距离 L 愈远, 集油量愈少。但最大集油量对应的油压不受距离变化的影响。表明油珠因本身的运动和扩散, 距喷嘴下游愈远的地方, 单位面积的燃油密度愈小。

表 1 的试验结果还表明, 堵塞比相同, 稳定器顶角 α 增大, 集油量也增加。说明顶角增大油珠因惯性绕稳定器流动更为困难。因此, 设计稳定器时, 应考虑顶角对集油量的影响。

三、集油率的因次分析

在试验的基础上, 对影响集油率的变量进行因次分析。影响集油率的有油珠初始速度 V_{fo} 、温度 T_{fo} 、密度 ρ_{fo} 、气流速度 u_g 、温度 T_g 、密度 ρ_g 、轴向距离 L 、喷嘴直径 d_o 、顶角 α 等。堵塞比相同时, 顶角的变化表现在稳定器高度 $\text{ctg}(\alpha/2)(w/2)$ 的变化。

将各变量的物理因次代入, 并由相应的试验数据处理 ($V_{fo} = 39 \sim 55 \text{ m/s}$, $u_g = 35 \sim 85 \text{ m/s}$, $d_o = 0.005 \text{ m}$, $L = 0.17 \sim 0.23 \text{ m}$, $\alpha = 40^\circ \sim 60^\circ$, $T_g = 297 \sim 405 \text{ K}$), 得出集油率的经验公式。

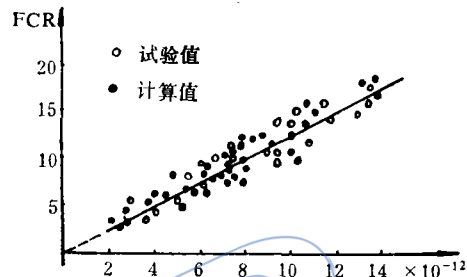


图 2 集油率与经验公式

$$\text{FCR} = 1.37 \times 10^{12} \left(\frac{u_g}{V_{fo}} \right)^{1.82} \left(\frac{d_o}{L} \right)^{0.9} \left[\frac{d_o}{\text{ctg}(\alpha/2)(w/2)} \right]^{0.74} \left(\frac{T_{fo}}{T_g} \right)^{3.32} \left(\frac{\rho_{fo}}{\rho_g} \right)^{-2.59} \quad (1)$$

四、燃油收集的计算方法

$$\text{雾化滴经分布 } dR/dZ = 2.079Z^2 e^{-0.693Z^3} \quad (2)$$

气流温度偏低时, 考虑燃油预热对燃油各参量的影响。由能量守恒方程求预热时间 t_1

$$t_1 = (\rho_f C_{pf} / 6 \text{Nu} K_g) D_f^2 \ln[(T_g - T_{fo}) / (T_g - T_w)] \quad (3)$$

从 (3) 式可知, 油珠愈大, 预热时间愈长。

油珠在湿球温度 T_w 下蒸发, 完全蒸发完的时间 t_2

$$t_2 = D_f^2 / \lambda_{st}, \quad \lambda_{st} = (8K_g / C_{pg} \rho_f) \ln(1 + B) \cdot \text{Nu} \quad (4)$$

油珠的生存时间 t : $t = t_1 + t_2$

假设气流为二元流, 无粘, 不可压。对有稳定器的气流流场按图 1 的柱坐标给出

$$\begin{aligned} u_{gx} &= \partial\phi/\partial x = \alpha r \frac{2\pi}{2\pi - \alpha} \cos(\alpha\theta/(2\pi - \alpha)) \\ u_{gy} &= \partial\phi/\partial y = \alpha r \frac{2\pi}{2\pi - \alpha} \sin(\alpha\theta/(2\pi - \alpha)) \end{aligned} \quad (5)$$

在气流径向, 认为稳定器的影响仅限于 $\delta + \frac{W}{2} + 0.02$ 和 $\delta - \frac{W}{2} - 0.02$ 内。

为了求得油珠在同一截面的各参量, 油珠运动方程变换为

$$\frac{dV_{fx}}{dx} = - \frac{3}{4} \frac{\rho_g C_{Df} V_f \text{Re}}{\rho_f D_f^2} \left(1 - \frac{u_{gx}}{V_{fx}} \right), \quad \frac{dV_{fy}}{dy} = - \frac{3}{4} \frac{\rho_g C_{Df} V_f \text{Re}}{\rho_f D_f^2} (V_{fy} - u_{gy}) \quad (6)$$

考虑到油珠在喷口的雾化特性,认为油珠是偏转 θ° 角($\theta = 6^\circ$)雾化后开始在气流中运动的。

$$V_{fx0} = V_{fo} \sin \theta \quad V_{fy0} = V_{fo} \cos \theta \quad (7)$$

求解方程(6)、(7),可得不同燃油组份在同一截面上各自的名义轨迹以及所经历的运动时间。当燃油名义轨迹处于稳定器的影响范围内时,(6)式中的 u_{gx} 、 u_{gy} 用(5)式的值代入。

稳定器边界的坐标为 $L \leq x \leq x_0 + L$, x_0 为稳定器顶高。

$$y_{p1} = (x - L) \operatorname{tg}(\alpha/2) + \delta \quad y_{p2} = \delta - (x - L) \operatorname{tg}(\alpha/2) \quad (8)$$

撞击在壁面上任一点的燃油密流 g_f 可按轨道扩散法求得

$$g_f = \int_0^{Z_{\max}} \frac{dR}{dZ} \left(\frac{D_f}{D_{fo}} \right)^3 \frac{G_f u_g}{4\pi D_{Tf} S_f} \cdot \exp \left\{ \frac{-u_g (Z_p^2 + (y - y_p)^2)}{4D_{Tf} S_f} \right\} dZ \quad (9)$$

式中 y 为油珠名义轨迹, Z_p 、 y_p 为稳定器壁面坐标。

当油珠名义轨迹与壁面相交时,名义轨道外没有与壁面相撞的这一组份的油珠仍遵守同一规律继续运动。以这一组份油珠的XOY平面的燃油边沿作定性轨迹,认为 $g_f/g_{f\max} = 0.01$ 处是这一组份的油珠边沿。其中 $g_{f\max}$ 是名义轨迹处的燃油密流。于是这一组份油珠的边沿半径 $r_{\max}$

$$r_{\max} = \sqrt{4D_{Tf} \ln 100 / u_g} \cdot S_f^{1/2} \quad (10)$$

依油珠定性轨迹,可求得继续运动的这一组份燃油撞落在稳定器壁面的量。

从图3的计算结果可知,在此工况下,燃油在稳定器上下壁面的集油量是不同的。这与集油试验中集油量的变化规律是一致的。但集油试验无法分辨上下壁面的集油量。在实际燃烧室中,上下壁面的集油不同对燃烧性能会产生很大影响。因此,计算不仅相辅于试验,而且在某些方面优于试验。

图2的计算值是把计算结果代入试验所归纳的经验公式而产生的。可以看出它们的趋势与试验结果是基本一致的。表明计算和试验比较吻合。

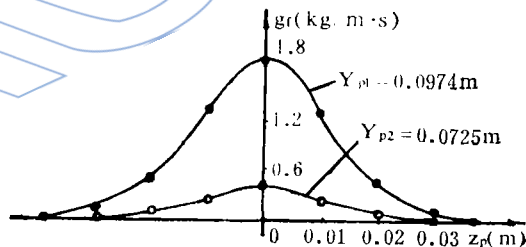


图3 计算算例

五、结 论

1. 本文利用收集挡板,很大程度提高了测量稳定器集油量的精确性和可靠性。
2. 试验和计算表明,燃油侧喷下的稳定器周围的浓度场易受工况变化的影响,气流温度、速度以及燃油喷射速度对稳定器集油量影响很大。增大稳定器顶角、减小稳定器与喷嘴轴向距离,将使集油量增多。
3. 本文提出的以燃油边沿作定性轨迹的方法,可以用于计算稳定器表面的集油。

参 考 文 献

- [1] Ernst, R.C, "Flameholder Combustion Instability", ADA058794, 1978.
- [2] Gu Shanjian, "A Method to Measure the Fuel Distribution and the Captured by V-Gutter Flameholder in High Speed Airstream", 85-GT-42.

(责任编辑 王华芳)

the length of flame front to the diameter of augmentor equals 1.2 ($L/D = 1.2$) when the swirl angle of 45° is selected. The coefficient of pressure loss in the swirl augmentor is not larger than that of a conventional afterburner. There is no obvious effect of pressure on the position of flame front.

MEASUREMENT OF RESIDUAL TIME OF GAS IN RECIRCULATION ZONE BEHIND FLAMEHOLDERS

Jiang Leiyong and Zhang Xunan

(Nanjing Aeronautical Institute)

Abstract

An instrument has been developed which provides sensitive and reliable measurement of the residual time of gas in the recirculation zone behind flameholders with flame. The experiments with this instrument show that the mean residual time is inversely proportional to the upstream velocity.

FUEL CAPTURE ON THE SURFACE OF V-SHAPED FLAMEHOLDER

Liu Zhigang, Wang Jiahua, Li Gaiqi

(Nanjing Aeronautical Institute)

Abstract

A new method for measuring the fuel capture on the surface of flameholder by means of V-shaped capture gutters is proposed. The relationship between fuel capture rate and individual parameters has been analysed. An empirical formula has been established. In the calculation, the concept of considering the edge of fuel droplet groups as reference trajectory has been set up. The fuel capture rate on the surface of V-gutter flameholder has been calculated and the results are in good agreement with the experimental data.

ENHANCEMENT OF HEAT TRANSFER IN TURBINE BLADE COOLING

Zhang Yuming, Gu Weizao, Liu Changchun

(Institute of Engineering Thermophysics)

Abstract

An experimental study on fully-developed turbulent air flow in rectangular passages with two opposite rib-grooved roughened walls has been performed to determine the effects of the rib-grooved pitch-to-height ratios on friction factor and heat transfer coefficients. A general method for predicting average friction factor and average Stanton number in rectangular ducts with two smooth and two opposite rib-grooved walls is developed. Experimental results show that the performance of the heat transfer in the passages with rib-grooved roughened walls is better than that in the passages with rib roughened walls at the same s/h . This work may be useful to internal cooling design of the gas turbine blade.