

燃油分布对 V 形稳定器后燃烧的影响

北京航空航天大学 杨茂林* * 黄 勇 顾善建 杨志豪 张迎年

【摘要】 研究了不同喷射方式和喷油布置形成的不同燃油分布对二元 V 形稳定器后燃烧的影响。试验得到火焰前锋形状, 不同分布下的贫熄边界, 稳定器截面和出口截面温度分布, 并计算了燃烧效率。此外还研究了喷油稳定器偏置对燃烧的影响。

主题词: 火焰稳定器 温度分布 燃烧效率 加力燃烧
分类号: V231.2

1 试验装置及测试方法

试验装置见图 1。试段长 900 mm, 截面 300 mm×170 mm 矩形通道, 直射式喷油杆, 喷孔直径 d_0 为 0.5 mm, 在稳定器尾缘上游 295 mm 和 267 mm 处分别顺喷、30 斜喷和 90 侧喷燃油。二元 V 形稳定器, 顶角 β 为 40° , 槽宽 H 74 mm, 堵塞比 25%, 水平安装, 顶线与流向垂直。移位热电偶和总压探针测燃烧后气流温度和总压, 试段侧壁静压孔测静压。喷嘴供油量预先标定。坐标系见图 2。在距稳定器尾缘后方 5 mm 截面测温度分布, 距稳定器尾缘 520 mm 截面

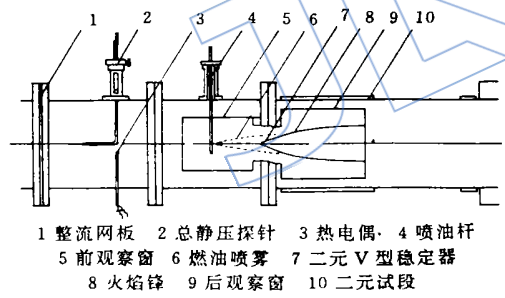


图 1 二元加力试验台试验装置示意图

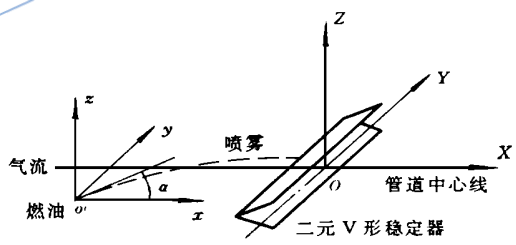


图 2 试验测试坐标

测出口温度分布, 并计算燃烧效率。固定来流温度、速度, 逐渐减少油量直至熄火, 测取熄火瞬间油气参数获得贫熄边界。在每一工况下由观察窗观察火焰状况并照相, 获得火焰扩张角和焰锋形状。试验油气参数范围为进口气流温度 T_a 573– 773K, 速度 V_a 50– 100m/s, 来流速度不均匀度小于 2%。喷嘴供油压力 p_f 为 1.5– 2.5MPa。

2 试验结果分析讨论

2.1 火焰扩张角和焰锋形状

火焰在稳定器尾缘处开始, 向后向外扩展。亮白色焰锋在迎气流面与主气流分界明暗清晰。焰锋后形成白兰色火焰区。逆流区中充满高温燃烧产物呈暗色。着火点在稳定器尾缘内

侧, 火焰由回流区的顺流区穿过回流区与主流间的剪切层伸入主流区, 见图 3, 试验得到的焰锋特点:

(1) 火焰前锋轮廓形状不是直线, 而是一条曲线—各工况下焰锋轮廓线具有大体相近的形状。这和文献[1]一致。火焰扩张角在根部较大, 与稳定器半顶角相近($\beta/2$), 向后逐渐变小, 在距稳定器尾缘下游 $2H$ 处变为 4° 左右的小角, 见图 4。前段变化快, 后段趋平(在距尾缘 $0.5、1、1.5H$ 时焰锋与轴线夹角约 $10、7、5^\circ$)。绕回区主气流速度大小和方向的变化, 对稳定器后焰锋轮廓形状起了主导作用。(2) 来流速度增加, 火焰扩张角变小。见图 4a。速度由 50 m/s 增至 100 m/s 时, 扩张角在 $1H$ 处约减小 $2\text{--}3^\circ\text{C}$ 。火焰扩张角 θ 与当地气流速度

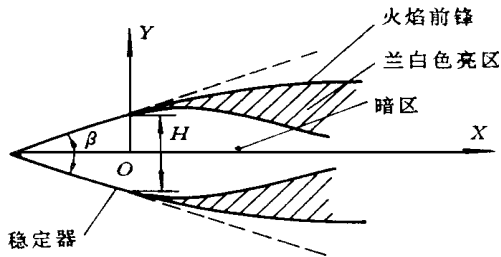


图 3 稳定器后火焰发展示意图

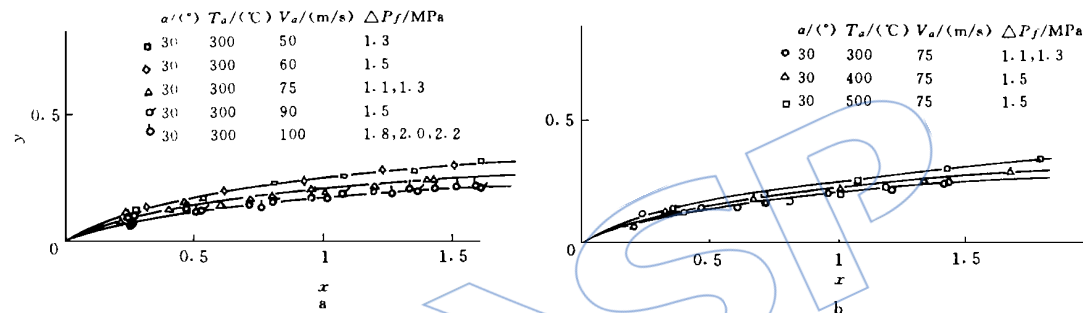


图 4 火焰前锋形状(a 速度影响, b 温度影响)

方向角 α 和焰锋与气流速度夹角 φ 的关系为 $\theta = \alpha + \varphi$ (见图 5)。 α 角由流场决定, φ 角由火焰锋余弦定律应满足 $\sin\varphi = U_T/V_P$ 。 U_T 为当地混气的紊流火焰传播速度, V_P 为当地流速, φ 的量级为 10° 以内。按 Та́на́нТо́в 煤油与空气混气紊流火焰传播速度^[2]: $U_T = 5.3\tilde{u}^{0.67}u^{0.33}$, 即 $U_T \propto \tilde{u}^b$, 且 $b < 1$ 。如气流的紊流强度 ϵ 一定则由 $\epsilon = \tilde{u}/V_a$, 因而 $U_T \propto V_a^b$, 而 $V_P \propto V_a$, 故来流速度 V_a

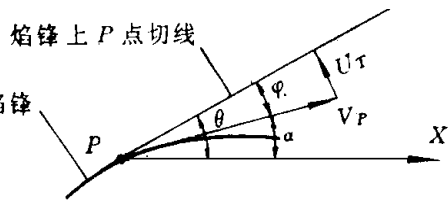


图 5 θ 与 α 及 φ 示意图

增加 φ 应略为减小。加之, 在一定速度范围内, 来流速度 V_a 增加, 稳定器后回流区外侧主流的方向角 α 将减小。因而随着来流速度 V_a 的增加, 火焰扩张角 θ 是减小的。(3) 来流温度增加, 火焰扩张角增加。见图 4b。来流温度由 300°C 增至 500°C , 温度每上升 100°C , 火焰扩张角在 $1H$ 处上升 $1\text{--}2^\circ\text{C}$ 左右。由于 $U_T \propto T_a^{0.25}$ (文献[2]), 随来流温度增加 U_T 增加, 故火焰扩张角增大。同时, T_a 增加速度相同情况下, Ma 数下降, 在一定速度范围内, 几何一定情况下, 稳定器后回流区外侧主流的 α 是增加的, 因此 θ 增大。(4) 油压变化, 火焰扩张角度变化不显著, 见图 4a。(5) 喷油方式对火焰扩张角有影响。侧喷下火焰扩张角稍大。稳定器后火焰的初始扩张角以及焰锋形状决定了火焰复盖的范围。

2.2 贫熄边界

(1) 不同喷射方式对贫熄边界的影响, 见图 6。顺喷较斜喷具有更宽的贫熄范围。这是由于顺喷燃油供应集中, 当总体已很贫时, 局部油气比仍较大而不致熄灭。侧喷情况下由于燃油

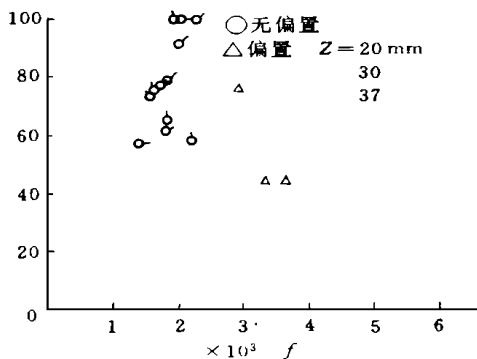


图6 喷油稳定器偏值对贫熄边界的影响

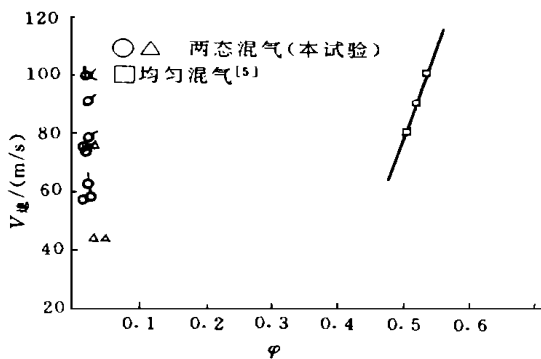


图7 两态混气与均匀混气贫油熄火特征的比较

在空间内有更大的散布范围,雾化、蒸发较好,有利于稳定。但在低速下,由于雾化蒸发差,油分散,反而熄火平均油气比增加。(2) 温度对贫熄边界的影响试验表明,温度低时贫熄边界窄。主要原因是化学反应速率低,火熄传播速度小,反应生成热量少。对于均匀混气: 熄火速度 $V_{\text{熄}} \propto T^n$, n 值为 $1.5 - 2$, $V_{\text{熄}} \propto T_0^{1.2-2}$ (见文献[3])。由此可见来流温度对熄火速度有明显影响。在两态混气情况下,随来流温度增加,液态燃油的蒸发加剧,回流区中油气比增加,有利于火焰稳定和传播。(3) 喷油稳定器偏置对贫熄边界的影响,见图6。当喷油稳定器偏置距离小时,贫熄边界变化尚不明

显,但偏置距离超过 10 mm 以外,则贫熄边界明显

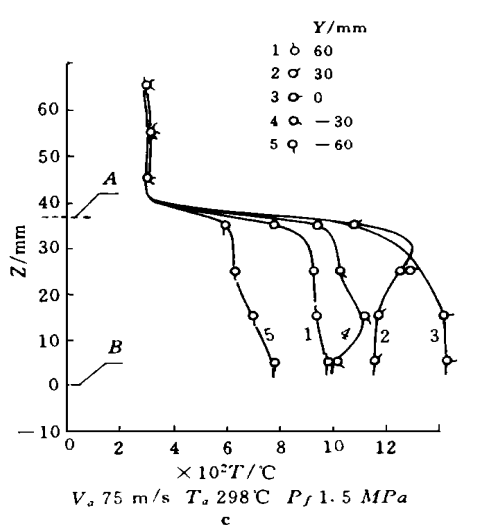
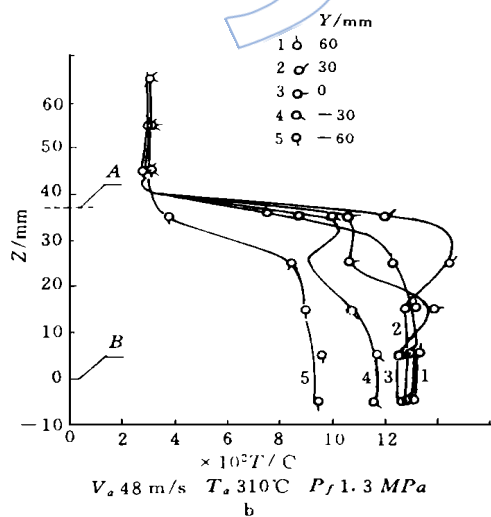


图8 稳定器尾缘截面温度分布

缩小。这是由于相当部分燃油离开稳定器, 进入回流区的燃油减少, 另外回流区两侧不对称, 一侧先熄火, 被冷气流冲淡, 这对另一侧回流区发生不利的影响。(4) 本试验条件下, 两态燃烧贫燃当量比小于均匀混气贫燃当量比, 相差 10 倍左右, 见图 7。两态燃烧贫燃范围较均相混气宽的多。总油气比虽已很贫, 但局部油气仍在可燃范围之内。

2.3 温度分布

(1) 在稳定器尾缘处温度分布成尖峰。表明该处是激烈化学反应区, 是焰锋穿过的地方。造成温度陡升, 见图 8(A 稳定器尾缘, B 稳定器中心位置)。回流区中温度分布平坦, 说明回流区紊流混合充分, 温度分布均匀, 基本中止了反应, 充满高温燃烧产物。稳定器外侧气流温度仍为来流温度, 在接近稳定器尾缘处有一凹坑。这是由于焰锋外侧油雾射流(二次雾化后)集中穿过处, 油雾温度低, 加上蒸发吸热, 造成该处温度低于来流温度。

(2) 不同喷射方式沿稳定器尾缘温度分布不同。侧喷温度变化平缓, 而顺喷变化陡, 斜喷居中, 见图 9。侧喷情况下油雾射流穿透深, 燃油沿稳定器顶线方向(Y 向) 散布宽, 油气比分布均匀, 因而温度变化也较平缓。在稳定器尾缘截面, 若取稳定器后的中心区 Y 向 ± 60 mm, Z 向 ± 30 mm 的区域, 温度分布不均匀度设为 P_r 。取 $P_r = (T_{\max} - T_{\text{mean}}) / T_{\text{mean}}$ 。 P_r 值: 侧喷为 32.6%, 斜喷为 31.9%, 顺喷为 41.4%。斜喷是在低速的结果。可见侧喷温度分布比较均匀。

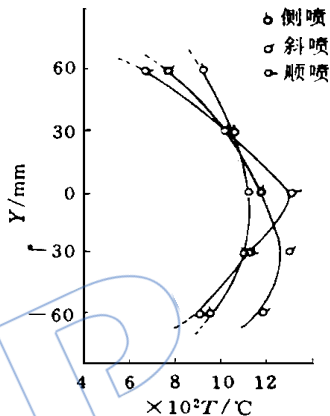


图 9 侧喷、斜喷、顺喷下稳定器尾缘截面处回流区温度分布比较

(3) 侧喷出口平均温度较顺喷为高, 且温度分布均匀。在燃烧室出口截面中心区域, P_r 侧喷为 28%, 顺喷为 37%。侧喷和顺喷在该区上的平均温度分别为 714°C 和 631°C , 最高温度分别为 915°C 和 867°C 。

(4) 喷油偏置时, 燃烧室出口温度分布显著变化: 火焰偏向偏置方, 高温区向该方向偏移, 出口温度分布变得更不均匀。在燃烧室出口截面中心区域, 温度分布不均匀度 P_r , 斜喷, 无偏置时为 37.5%, 在相同工况下, 喷油上偏 20 mm 时, 增至 60%。在该区的温度平均值相应为 814°C 和 678°C 。可见偏置对方温度分布影响是很大的。

2.4 燃烧效率

定义燃烧效率为进出口总焓差除以燃料的化学能。

$$\eta = \frac{\sum \rho_5 V_5 \Delta A_5 C_{p5} T_{05} - \sum \rho_4 V_4 \Delta A_4 C_{p4} T_{04}}{m_{\beta} \cdot H_u}$$

式中: ρ 、 V 、 T_0 、 C_p 、 ΔA 分别为当地气流密度、速度、总温及定压比热和微元面积。 m_{β} 和 H_u 为燃油流量和燃油低热值。下标 4、5 分别表示进口和出口。近似认为出口速度场与温度场仿射相似^[2]: $V/V_{\max} = T/T_{\max}$ 。可证明:

$$\eta \cong \left[G_5 (\Delta A_5 / A_5) \sum (C_{p5} T_{05} - G_4 C_{p4} T_{04}) \right] / (m_{\beta} \cdot H_u)$$

式中: G_5 、 G_4 为出口和进口燃气流量。 A_5 为出口截面积。在进行 η 计算时, 按附面层修正计算 G_4 , 按实测出口截面温度, 插值积分求 $\sum C_{p5} T_{05}$, 得到不同布置、不同工况下的 η 。

侧喷: $\eta = 92.6\%$ ($\alpha 30^\circ$; $V_a 75 \text{ m/s}$, $T_a 305^\circ\text{C}$, $P_f 1.5 \text{ MPa}$)

斜喷: $\eta = 89.7\%$ ($\alpha 30^\circ$; $V_a 48 \text{ m/s}$, $T_a 310^\circ\text{C}$, $P_f 1.3 \text{ MPa}$)

顺喷: $\eta = 82.5\%$ ($\alpha 0^\circ$; $V_a 75 \text{ m/s}$, $T_a 298^\circ\text{C}$, $P_f 1.5 \text{ MPa}$)

斜喷、喷油偏置: $\eta = 67.2\%$ ($\alpha 30^\circ$; $V_a 48 \text{ m/s}$, $T_a 315^\circ\text{C}$, $P_f 1.3 \text{ MPa}$, $Z_0 20 \text{ mm}$)

由以上结果可见: 不同喷射方式下燃烧效率相差很大, 侧喷 η 高, 顺喷低, 而斜喷介于二者之间。侧喷 η 高的原因: 首先, 其雾化比顺喷细, 油珠蒸发快, 与气流混合充分, 有利于燃烧, 而顺喷则雾化较粗^[5]。其次, 侧喷所经历的路径长, 有利于油珠的蒸发与混合, 而顺喷则路径短。再有, 侧喷穿透深度大, 油珠散布宽, 沿稳定器边缘燃油散布均匀, 火焰面宽, 稳定器负担均匀。而顺喷燃油比较集中, 稳定器沿长负担不均匀。由浓度场计算表明: 侧喷穿透深度大, 燃油散布宽, 燃油浓度散布均匀, 顺喷相反, 而斜喷则介于其间, 见图 10(计算值 V_a 为 75 m/s , T_a 为 300°C , ΔP_f 为 1.5 MPa)。

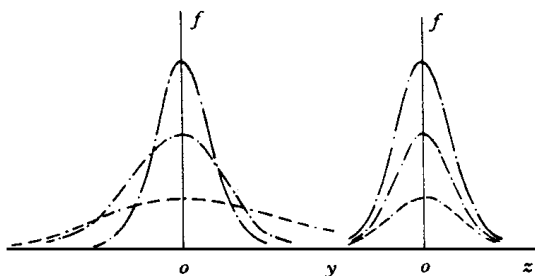


图 10 不同喷油方式稳定器前缘截面燃油温度分布

喷油稳定器偏置其燃烧效率显著下降。其原因一方面由于稳定器两边燃油不平衡。一方偏富, 另一方偏贫; 两支火焰不对称, 一支强, 另一支弱; 一半回流区温度高, 另一半回流区温度低; 稳定器两边负担不平衡, 对燃烧都是不利的。另一方面, 由于偏置, 相当部分燃油远离稳定器边缘, 稳定器对燃油的收集总量下降, 进入回流区的燃油减少; 相当部分燃油到下游才能参加燃烧。随着偏置距离加大, 偏贫一方可能熄火, 成为单边火焰, 浓度场、温度更不对称, 另一边回流区被冷流冲淡, 燃烧更为恶化。再增大偏置距离时, 偏富的一边也逐渐变贫, 稳定器对燃油收集量大为减少, 大部分燃油不能进入燃烧, 燃烧效率更低, 直到灭火。

结论 (1) 燃油沿稳定器分布集中, 有利于贫油熄火边界扩展。(2) 燃油沿稳定器分布均匀, 有利于燃烧效率提高。相同工况下, 侧喷燃烧效率较顺喷为高, 斜喷介于侧喷与顺喷之间。(3) 燃油偏置分布, 对火焰稳定和燃烧效率都大为不利。应避免不对称分布。(4) 火焰前锋轮廓形状为曲线, 稳定器尾缘处火焰扩张角接近稳定器半顶角, 然后逐渐趋平。来流速度增加、温度降低, 火焰扩张角略为变小。总之, 两态混气燃烧与均匀混气不同, 凡影响稳定器尾缘两态燃油浓度分布的因素都将影响燃烧性能。

参 考 文 献

- 1 周力行. 燃烧物理及反应流体力学(下册). 北京: 清华大学出版社, 1980
- 2 付维标, 卫景彬. 燃烧物理学基础. 北京: 机械工业出版社, 1984
- 3 Lefebvre A H. Gasturbine Combustion. Mc Graw Hill, 1983
- 4 . 高亚音速流中不良流线旋转体火焰稳定的研究. 3- И, АДС, ВПИ43, 1958
- 5 杨茂林, 黄勇. 燃油在稳定器尾缘的二次雾化研究. 航空动力学报, 1992; 7(1): 6

(责任编辑 杨再荣)