

文章编号: 1000-8055(2002) 01-053-05

速度比对波瓣混合器混合气动性能的影响

路玉霞, 吴寿生, 魏福清, 黄 勇
(北京航空航天大学 动力系, 北京 100083)

摘要: 在常压、双涵进气条件下, 通过对几种波瓣混合器与圆形收敛喷管组合的出口流场测试, 研究不同外、内涵速度比情况下, 波瓣混合器的混合气动性能(压力和温度均匀度、压力损失系数等)变化规律, 为对比起见, 还对环形混合器组合进行了试验。试验表明: 在本试验范围内, 随着速度比的增加, 压力均匀度曲线呈“凸”形, 冷态试验时, 峰值在速度比 1.0 处, 热态试验时, 峰值在 0.68 附近(冷、热态峰值的速度都与温度比的平方根成正比)。压力损失系数曲线呈“凹”形, 冷态试验时, 谷值速度比小于 1.0, 热态试验时, 谷值在速度比更小处, 温度均匀度曲线则随着速度比的增加呈下降趋势, 在速度比 0.2~0.7 之间, 温度均匀度随速度比的变化基本呈线性关系, 而在速度比大于 0.7 以后, 则下降趋势变平缓。

关键词: 波瓣混合器; 气动性能; 速度比; 均匀度; 压力损失系数

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Aerodynamic Performance of Lobed Mixers at Different Velocity Ratios

LU Yu-xia, WU Shou-sheng, WEI Fu-qing, HUANG Yong
(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The exit flow fields of a circular convergent nozzle with three lobed mixers were measured at atmospheric pressure and two-flow conditions, to study the impact of velocity ratio on the mixing performance. An annular mixer was also tested for comparison. The results show that the curves of pressure uniformity with the velocity ratio have "convex" shapes. Their peak values appear at velocity ratio 1 under cold conditions, and at velocity ratio 0.68 under hot conditions. The two velocity ratio values are directly proportional to the square root of temperature ratio under cold and hot conditions. Contrary, the curves of pressure loss coefficient with the velocity ratio have "concave" shapes. The velocity ratio values at the valley points of the curves are dependent on the configuration of the mixers, and are both less than those at the peak points of the pressure uniformity curves under cold and hot conditions. The temperature uniformity decreases with the increase of velocity ratio in the test range. The correlation is linear when the velocity ratios lie 0.2~0.7, and then it changes smoothly as the velocity ratio is greater than 0.7.

Key words: lobed mixer; aerodynamic performance; velocity ratio; uniformity; pressure loss coefficient

1 引言

波瓣混合器能够强化两股流体的混合, 这一

性能早在 60 年代就被人们发现并用于降低涡扇发动机的噪声。后来, 进一步研究发现波瓣混合器能够增加发动机的推力、降低耗油率^[1]和抑制飞

表 1 4 种混合器有关几何参数

代号	名 称	内倾角/(°)	外倾角/(°)	设计面积比	实际面积比
A	直斜式波瓣混合器	20.7	10	1.0	0.94
B	拐平式波瓣混合器	20.7	16.7	1.0	0.97
D	斜切拐平式波瓣混合器	20.7	20.6	1.0	0.82
F	环形混合器	—	—	0.69	0.74

机排气系统的红外辐射^[2], 另外它还可用于降低超音速飞行器起落时的噪声^[3], 用于燃烧器中强化燃油与空气的混合^[4]等。因而进入 80 年代以后, 国际上有很多研究工作者, 通过试验或数值计算研究了波瓣混合器的混合机理, 并取得了重要的成果。研究发现, 两股流体的速度比对波瓣混合器的混合气动性能有明显的影响^[5~11], 但从已有的研究报道看, 都只对 2~3 种速度比情况进行试验和数值计算对比, 为了更全面地了解两股流体速度比对波瓣混合器混合气动性能的影响, 进行了本文报道的研究工作。

2 试验设备及试验安排

试验是在北航热动力工程研究所低速双涵试

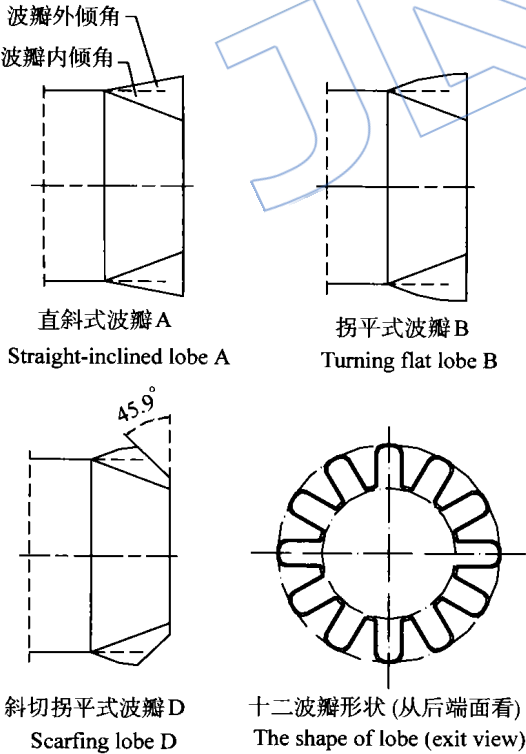


图 1 试验件简图
Fig.1 Sketch of test-pieces

验台上进行的^[12]。主要试验件为: 直斜式 12 波瓣混合器 A, 外壁拐平式 12 波瓣混合器 B, 外侧壁斜切的 12 波瓣混合器 D(图 1), 为比较起见, 本文在相同的试验条件下, 对一个简单环形混合器做了类似的试验, 表 1 为以上 4 种混合器的有关几何参数表。另外, 与混合器组合的圆形收敛喷管出口直径为 $\Phi 76.8\text{ mm}$, 中心锥圆柱段直径为 $\Phi 59.6\text{ mm}$ 、圆锥段长度为 92 mm (图 2)。

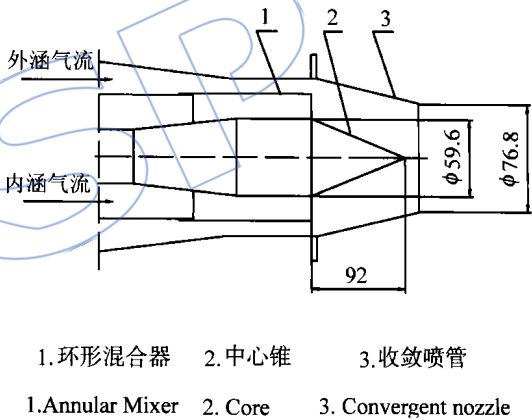


图 2 试验件安装部分简图
Fig.2 Sketch of test-pieces fixing

试验条件: 常压供气, 热试时内、外涵温度比为 2.17。

3 试验结果和分析

试验研究的混合气动性能指标及定义如下:

压力均匀度 e_p : 喷管出口处各测点压头 p_i 偏离平均压头 p 的点数平均值与平均压头的比值与 1 之差。即:
$$e_p = 1 - \frac{\sum |p_i - p|}{n \cdot p}$$
 n 为测点数。

温度均匀度 e_T : 喷管出口处各测点温度 T_i 偏离平均温度 T 的点数平均值与平均温度的比值与 1 之差。即:
$$e_T = 1 - \frac{\sum |T_i - T|}{n \cdot T}$$
 n 为测点数。

压力损失系数 ξ_p : 两股流体混合前质量加权平均总压与混合后平均总压的差值与主流动压头之比。即:

$$\xi_p = \frac{P_p^* \cdot m_p + P_s^* \cdot m_s - P^*}{\rho_p \cdot v_p^2 / 2}$$

其中: P_p^* , m_p , ρ_p 和 v_p 分别为内涵气流的总压、质量流量、密度和速度; P_s^* , m_s 分别为外涵气流的总压、质量流量; P^* 为喷管出口平均总压。

3.1 冷试状态下, 波瓣混合器的混合气动性能

3.1.1 压力均匀度

图 3 是冷试状态下, 4 种混合器分别与圆形收敛喷管组合时, 压力均匀度随速度比的变化曲线。可以看到:

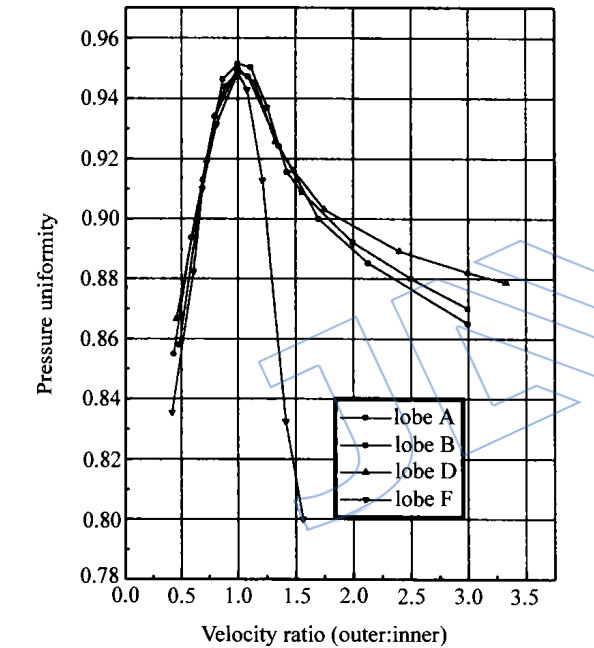


图 3 冷试状态下压力均匀度随速度比的变化
Fig.3 Changes of pressure uniformity with velocity ratios under cold condition

(1) 随着速度比的变化, 4 种混合器的压力均匀度曲线都呈“凸”形, 且在速度比等于 1.0 时, 压力均匀度达到最高值, 这一结果与 Belovich and M. Samimy^[10] 在速度比 3 : 1, 1 : 1 和 1 : 3 三点所得到的结果相同。

(2) 在速度比等于 1.0 附近, 4 种混合器的压力均匀度比较接近, 并与混合器的型式关系不大。在速度比小于 0.7、大于 1.1 时, 环形混合器 F 的压力均匀度迅速下降, 而 3 种波瓣混合器的压力均匀度变化较为平坦, 尤其在速度比大于 1.1 以

后更明显, 这正说明由波瓣结构产生的流向涡与正交涡相互作用的强化混合效果^[7, 10]。

(3) 斜切拐平式波瓣混合器 D 的压力均匀度稍高于其他两种混合器 A 和 B, 这主要是因为波瓣切角以后, 流向涡的强度比正常情况增加 25% ~ 30%^[13]。

3.1.2 压力损失系数

图 4 是冷试状态下, 4 种混合器分别与圆形收敛喷管组合时, 压力损失系数随速度比的变化曲线。可以看到:

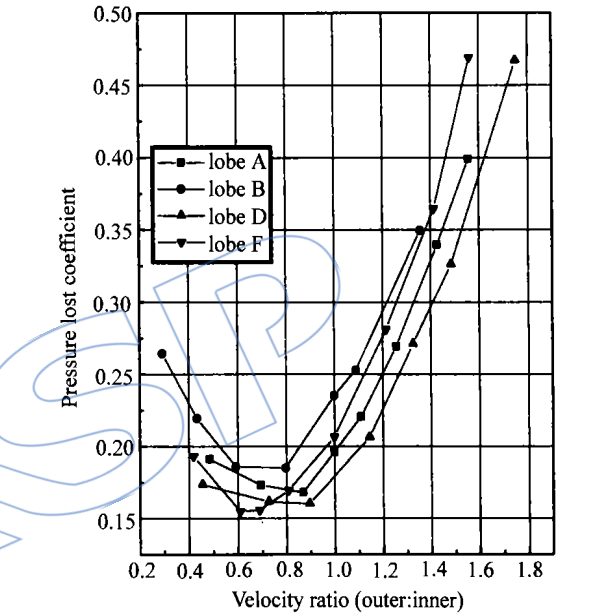


图 4 冷试状态下压力损失系数随速度比的变化
Fig. 4 Changes of pressure lost coefficient with velocity ratios under cold condition

(1) 4 条曲线都呈凹形, 谷值比较靠近, 但在同一速度比, 且速度比都小于 1.0, 即压力场最均匀的时候, 压力损失并不是最小。在压力损失较小情况下, 磨擦损失起主要作用, 由于外涵的摩擦面积比较大, 所以在外涵速度较小时, 其综合压力损失才最小。并且由于不同混合器的内、外磨擦表面积比不同, 从而呈现出各混合器有不同的谷值速度比。

(2) 比较图 4 的 4 条曲线还可以看到, 斜切拐平式波瓣混合器 D 在大多数情况下的压力损失系数最小, 拐平式波瓣混合器 B 的压力损失系数最大。环形混合器 F 的压力损失系数仅在对应该谷值区的速度比附近最小, 显然, 这些特点与混合器结构有关, 即摩擦表面积、流向涡、正交涡的强度等不同造成的。

3.2 热试状态下, 波瓣混合器的混合气动性能

3.2.1 压力均匀度

图 5 是热试状态下, 波瓣混合器 D 和环形混合器 F 分别与圆形收敛喷管组合后, 压力均匀度

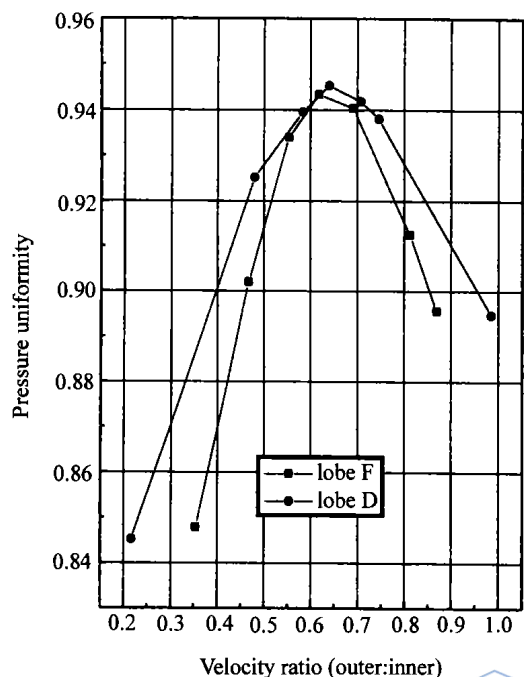


图 5 热试状态下压力均匀度随速度比的变化

Fig. 5 Changes of pressure uniformity with velocity ratios under hot condition

随速度比的变化曲线。曲线的趋势与冷试状态下相似, 所不同的是, 压力均匀度的最高点在速度比 0.6~0.7 之间。由理论分析知, 在常压下, 两股流体的速度比与温度比的平方根成正比, 即:

$$\frac{V_2}{V_1} \propto \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{T_1}{T_2}}} = \frac{1}{2.17} = 0.68$$

这样, 由前面可知, 冷态时, 速度比为 1 时压力均匀度最高, 因此在内、外涵温度比为 2.17 时, 对应压力均匀度最高的速度比应为 0.68, 介于 0.6~0.7 之间。

3.2.2 压力损失系数

图 6 是热试状态下, 波瓣混合器 D 和环形混合器 F 分别与圆形收敛喷管组合时, 压力损失系数随速度比的变化曲线, 曲线的趋势与冷试状态下相似。可以看到, 在所试验范围内波瓣混合器的压力损失系数曲线仍然呈凹形, 压力损失系数最低点在速度比 0.5 左右, 并且在速度比大于 0.5 以后, 波瓣混合器的压力损失系数小于环形混合

器。环形混合器的压力损失系数曲线在所试验范围内尚未出现“凹”形, 但对比图 4 和图 6, 可以肯

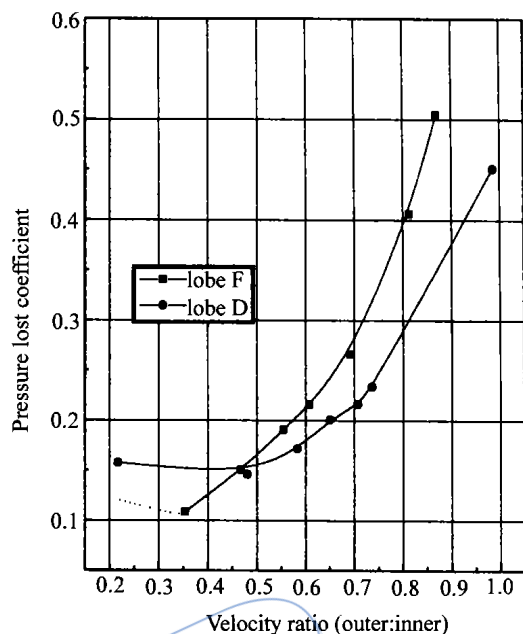


图 6 热试状态下压力损失系数随速度比的变化

Fig. 6 Changes of pressure lost coefficient with velocity ratios under hot condition

定地说, 它也应呈“凹”形曲线, 对应压力损失系数最低点的速度比就在 0.35 附近。

3.2.3 温度均匀度

图 7 是热试状态下, 波瓣混合器 D 和环形混合器 F 分别与圆形收敛喷管组合时, 温度均匀度随速度比的变化曲线。在试验范围内, 随着速度比的增加, 温度均匀度下降。比较两条曲线, 可看到:

(1) 当速度比很小, 例如小于 0.2 时, 波瓣混合器与环形混合器的温度均匀度应当比较接近, 这是由于外涵气流速度太小, 喷射过程类似于内涵的单射流, 对混合起强化作用的主要是 K-H 不稳定性造成的正交涡^[10], 但因波瓣结构的裙边边缘线比环形混合器长, 因而混合均匀度略好。

(2) 速度比在 0.2~0.7 之间, 两个混合器的温度均匀度随速度比的增加, 基本均呈直线下降, 波瓣混合器的下降斜率小于环形混合器, 它的温度均匀度也明显高于环形混合器, 在这一速度比范围(实际涡扇发动机的外、内涵速度比约在 0.5~0.7 之间)内, 由于流向涡与正交涡的相互作用^[7], 使波瓣混合器的温度均匀度明显高于环形混合器。

(3) 当速度比大于 0.7 以后, 从趋势上看, 两个混合器的温度均匀度的下降均趋于平缓, 这与

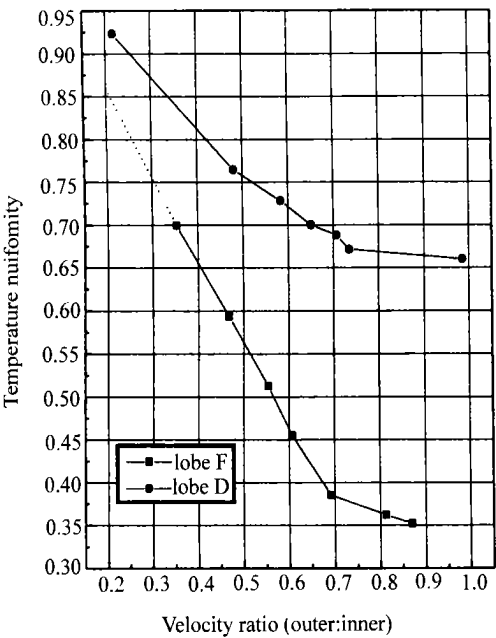


图 7 热试状态下温度均匀度随速度比的变化
Fig. 7 Changes of temperature uniformity with velocity ratios under hot condition

由 K-H 不稳定性造成的正交涡的大大削弱有关。

4 结 论

由上述试验结果, 可得如下几点结论:

- (1) 常压条件下, 环形混合器和波瓣混合器的压力均匀度随速度比的变化呈“凹”形曲线, 各混合器的峰值相当, 并且对应的速度比相同, 即, 冷态试验时, 峰值在速度比 1.0 处, 热态试验时, 峰值在速度比 0.68 附近, 冷、热态峰值的速度比正比于温度比的平方根。偏离峰值后, 在速度比减小一侧, 曲线变化较为陡峭, 速度比增大一侧, 波瓣混合器曲线变化较为平坦。
- (2) 环形混合器和波瓣混合器的压力损失系数随速度比的变化曲线呈“凹”形, 其凹点对应的速度比与混合器的结构有关, 但均小于 1.0。环形混合器 F 最小, 冷态时约 0.6, 热态时在 0.35 左右, 波瓣混合器 D 最大, 冷态时约 0.85, 热态时在 0.5 左右。
- (3) 环形混合器和波瓣混合器的温度均匀度曲线随速度比的增加呈下降趋势。在速度比 0.2 ~ 0.7 范围内(涡扇发动机的实际速度比通常在此范围内), 基本上呈线性变化, 但波瓣混合器的下降斜率小于环形混合器, 它的温度均匀度明显

高于环形混合器。当速度比大于 0.7 以后, 两种混合器的温度均匀度的下降趋于平缓。

(4) 为使混合器的混合气动性能最佳, 正确选择两股流体的速度比十分重要。最佳速度比应选在比压力损失曲线凹点略偏向均匀度改善处。

参考文献:

- [1] 吴寿生, 候志兴. 排气混合器和短舱[A]. 高效节能发动机文集第 6 分册[C]. 北京: 航空工业出版社, 1991.
- [2] 李黎等. 带波瓣主喷管排气射流红外抑制系统的试验研究[R]. 北京: 中国航空科技报告, HJB94- 1248, 1994.
- [3] Tillman T G, Paterson R W, Presz W M. Supersonic Nozzle Mixer Ejector[J]. Journal of Propulsion and Power, 1992, 8 (2): 512- 519.
- [4] Smith L L, Majamak A T, Lam I T, Dalabory O, Karagozian A R, Marble E F, Smith O I. Mixing Enhancement in a Lobed Injector[J]. Physics Fluids, 1997, 9(3): 667- 678.
- [5] Elliott J K, Manning T A, Qin Y J, Greitzer E M, Tan C S, Tillman T G. Computational and Experimental Studies of Flow in Multi-Lobed Forced Mixers[R]. AIAA Paper, 1992: 92- 3866.
- [6] Eckerle W A, Skeibani H, Awad J. Experimental Measurement of the Vortex Development Downstream of a Lobed Forced Mixer[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1992, 114: 63- 71.
- [7] McCormick D C, Bennett J C, Jr. Vortical and Turbulent Structure of a Lobed Mixer Free-Shear Layers[J]. AIAA Journal, 1994, 32(9): 1852- 1859.
- [8] Yu S C M, Yeo J Y, Teh J K L. Velocity Measurements Downstream of a Lobed Forced Mixer with Different Trailing Edge Configurations[R]. AIAA Paper 94- 0018, 1994.
- [9] Sullivan M N O', Krasnodebski J K, Waitz I A, Greitzer E M, Tan C S. Computational Study of Viscous Effects on Lobed Mixer Flow Features and Performance[J]. Journal of Propulsion and Power, 1996, 12(3): 449- 456.
- [10] Belovich, Samimy M. Mixing Processes in a Coaxial Geometry with a Central Lobed Mixer-Nozzle[J]. AIAA Journal May, 1997, 35(5): 838- 841.
- [11] Yu S C M, Xu X G. Confined Coaxial Nozzle Flow with Central Lobed Mixer at Different Velocity Ratios[J]. AIAA Journal, 1998, 36(3): 349- 358.
- [12] 陈方, 吴寿生, 魏福清, 等. 常压、双涵进气条件下小尖片强化混合研究[J]. 航空动力学报, 2002, 17(1): 35- 39.
- [13] Yu S C M, Hou Y, Chan W K. Scarfing and Scaloping Effects on Lobed Forced Mixer at Low - Speed Conditions[J]. Journal of Propulsion and Power, 2000, 16(3): 440- 448.