

# 波瓣主喷管排气引射系统的试验研究

北京航空航天大学 胡 晖 吴寿生 李 黎 魏福清 吴一黄

**【摘要】** 对比试验研究了 4 种不同的圆波瓣主喷管和 2 种二元波瓣主喷管与 3 种混合管的 12 种排气引射系统的组合方案的气动和红外辐射性能。结果表明: 波瓣主喷管能改善引射系统的性能, 同时波瓣主喷管排气引射系统能够有效地抑制排气系统的红外辐射。圆波瓣与圆混合管、二元波瓣与二元混合管的组合要比它们的交叉组合的性能优越。内外波瓣间距相同的二元波瓣主喷管与相应的二元混合管的组合方案具有最好的综合气动性能和红外辐射的抑制性能。

主题词: 波瓣喷管 引射器 红外辐射抑制

分类号: V235.113

## 1 试 验

波瓣强化混合结构作为涡轮风扇发动机的内外涵排气混合器已经用在民用航空发动机的改型上<sup>[1,2]</sup>。在军用战斗机上也被用来作为排气引射系统的主喷管, 降低飞机发动机的红外辐射强度<sup>[3]</sup>。本文对 4 种圆形波瓣主喷管和 2 种二元波瓣主喷管分别同圆形混合管和二元混合管相配合进行了对比试验研究。试验设备及测试系统的详情请见文献[4]。试验研究用的主喷管试验件如图 1 所示, 各波瓣主喷管的出口当量直径为 90 mm, 试验件 a、b、c 是 3 种不同形状

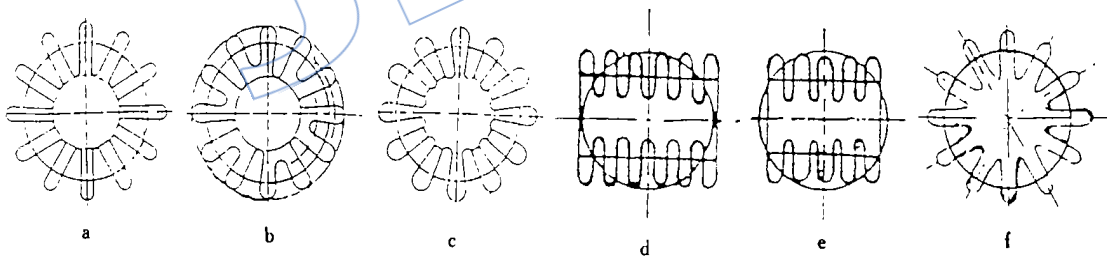


图 1 试验研究的主喷管

的带中心锥的圆波瓣主喷管, 二元波瓣主喷管 d 和 e 的波瓣形状相同, 它们的差别在于内外波瓣的间距, 圆波瓣 a 和 f 的主要差别在于 a 带中心锥而 f 不带锥。混合管试验件有圆形混合管 1、二元混合管 2、二元混合管 3。二元混合管 2 和 3 的宽高比分别与二元波瓣 e 和 d 相对应, 各混合管进口面积与主喷管的出口面积比均为 3:1, 冷试用混合管不带扩压段, 总长均为 276 mm, 热试用混合管带扩压段, 扩压面积比 1.5, 圆形混合管的直筒部分长 83 mm, 二元混合管的直筒部分长 130 mm。

试验研究时, 首先, 对上述几种主喷管和混合管的 12 种组合进行冷试(组合方案及主要气

动性能如表 1 所示)。然后, 根据冷试结果, 选择了其中 5 种有代表性的方案进行了热试, 热试时保持主喷管进口处温度  $T_P$  为  $395 \pm 5^\circ\text{C}$ 。本文主要对各组合方案的最佳间距、引射系数、压力损失系数、混合管出口速度分布和温度分布以及红外辐射方位特性等进行试验对比研究。

表 1 各种波瓣主喷管与混合管组合的主要气动性能表

| 序号 | 组合形式  | 冷 试                                 |               |                              |        |                                             | 热 试           |                     |                      |                              |        |
|----|-------|-------------------------------------|---------------|------------------------------|--------|---------------------------------------------|---------------|---------------------|----------------------|------------------------------|--------|
|    |       | 最佳间距<br>$L_{\text{opt}}(\text{mm})$ | 引射系数<br>$M^*$ | 压力损失<br>系数 $\Delta P_{PT}^*$ | $\psi$ | 静压恢复<br>距离 $L/D$                            | 引射系数<br>$M^*$ | 折合引射<br>系数          |                      | 压力损失<br>系数 $\Delta P_{PT}^*$ | $\psi$ |
| 1  | $a+1$ | 20                                  | 0.86          | 1.236                        | 0.357  | 1.8                                         | —             | —                   | —                    | —                            | —      |
| 2  | $b+1$ | 20                                  | 0.81          | 1.325                        | 0.404  | 1.8                                         | —             | —                   | —                    | —                            | —      |
| 3  | $c+1$ | 0                                   | 0.87          | 1.258                        | 0.360  | 1.8                                         | 1.48          | 0.958 <sup>++</sup> | 0.869 <sup>+++</sup> | 1.492                        | 0.361  |
| 4  | $d+2$ | 0                                   | 0.87          | 1.308                        | 0.374  | 1.8 <sup>[1]+1]</sup><br>1.3 <sup>[2]</sup> | —             | —                   | —                    | —                            | —      |
| 5  | $d+3$ | 0                                   | 0.86          | 1.322                        | 0.382  | 1.3 <sup>[1]</sup><br>0.9 <sup>[2]</sup>    | —             | —                   | —                    | —                            | —      |
| 6  | $d+1$ | 25                                  | 0.88          | 1.275                        | 0.361  | 0.9                                         | 1.49          | 0.965               | 0.875                | 1.515                        | 0.364  |
| 7  | $d+2$ | 20                                  | 0.87          | 1.245                        | 0.356  | 1.8 <sup>[1]</sup><br>0.9 <sup>[1]</sup>    | —             | —                   | —                    | —                            | —      |
| 8  | $d+3$ | 20                                  | 0.87          | 1.226                        | 0.351  | 1.3 <sup>[1]</sup><br>0.9 <sup>[1]</sup>    | 1.48          | 0.958               | 0.869                | 1.480                        | 0.358  |
| 9  | $e+1$ | 25                                  | 0.86          | 1.238                        | 0.358  | 1.8                                         | —             | —                   | —                    | —                            | —      |
| 10 | $e+2$ | 20                                  | 0.87          | 1.251                        | 0.358  | 1.3 <sup>[1]</sup><br>—                     | —             | —                   | —                    | —                            | —      |
| 11 | $e+3$ | 20                                  | 0.84          | 1.231                        | 0.364  | 1.8 <sup>[1]</sup><br>0.9 <sup>[1]</sup>    | 1.46          | 0.945               | 0.857                | 1.487                        | 0.365  |
| 12 | $f+1$ | 20                                  | 0.81          | 1.471                        | 0.449  | 1.8                                         | 1.38          | 0.893               | 0.810                | 1.777                        | 0.460  |

注: [1] 是指二元混合管的顶部 [2] 是指二元混合管的侧边。++ 把热试时的引射系数按温度的 0.50 次方折合到冷试 (283 K) 条件下。+++ 把热试时的引射系数按温度的 0.635 次方折合到冷试 (283 K) 条件下。

2 试验结果和讨论

2.1 主喷管与混合管最佳间距

为了使从主喷管排出的主气流引射尽可能多的次流, 主喷管出口与混合管进口之间存在一个最佳间距。显然, 主喷管出口射流的角度、主喷管与混合管的结构匹配和面积比等因素都会影响最佳间距。如主喷管  $c$ , 由于波瓣出口外径较大, 同混合管进口直径已相差不多, 其最佳间距  $L_{\text{opt}}$  趋近于 0; 对主喷管  $a, b, c, d, e$  和  $f$  等, 出口射流均有一定外扩角 ( $20^\circ$ ), 它们的  $L_{\text{opt}}$  均约 20 mm; 对  $d, e$  两种二元波瓣主喷管, 与圆混合管相配时  $L_{\text{opt}}$  则为 25 mm 左右, 详见表 1。

2.2 引射系数

对于每一种试验方案, 在一定的主流流量和各自最佳的主喷管与混合管间距的条件下试验得出了引射系数。引射系数  $M^*$  的定义为次流的质量流量  $m_a$  与主流的质量流量  $m_P$  之比。从表 1 中可以看出, 各组合方案的引射系数相差不大 (0.81–0.87), 但它们都要比常规单圆主喷管的引射器的引射系数 (约 0.4)<sup>[5]</sup> 大得多, 这与 Presz<sup>[6]</sup> 等人得出的结论是一致的。对于同一种组合方案, 冷试的引射系数大大小于热试时的数值。按  $M^* \propto T_P^{0.5}$  的关系进行温度修正<sup>[7]</sup> 后的热试的引射系数仍然偏大, 当按  $M^* \propto T_P^{0.635}$  进行修正时, 冷、热试验的数据结果吻合得很好, 这可能是由于热试时混合管后装有扩压器的缘故。

2.3 压力损失系数

试验中的压力损失系数<sup>[5]</sup>  $\Delta P_{PT}^*$  是主气流在主喷管前的总压与大气压的差与主气流的动

压头之比, 排气引射系统的压力损失系数的大小直接反映了安装该系统后发动机功率损失的程  
度。从表 1 中可以看到:  $f+1$  的组合方案的压力损失系数最大,  $d+3$  的压力损失系数最小。  
此外, 同一方案, 热试的压力损失系数比冷试的大。为了对各组合方案的引射系数和压力损失  
系数之间进行综合考虑, 评估各组合方案气动性能的优劣, 还引入了能反映排气引射系统的综  
合气动性能的无量纲参数  $\Psi$ , 它的定义表达式为:  $\Psi = \Delta P_{PT}^* / [(1 + M^*)(1 + M^* T^*)]$ 。显然,  $\Psi$   
值越小, 则说明排气引射系统的综合气动性能越好。表 1 中可以看出, 在各方案中,  $d+3$  的组  
合方案的气动综合性能最好,  $f+1$  的气动综合性能最差。

2.4 静压恢复特性

静压恢复特性是指排气引射系统的主、次混合流在混合管内沿着轴向静压分布的变化特  
点。静压恢复越快则表明所需混合管长度越短, 这对排气引射系  
统的结构和重量的优化都十分有利。表中 1 给出了根据各冷试  
特性曲线估计出的各方案的静压达到基本恢复所需的相对混合  
管长度  $L/D$  ( $D$  为主喷管出口的当量直径)。由试验结果可以  
看到, 各波瓣主喷管排气引射系统所需的相对混合管长度为  $L/D$   
 $= 0.7 - 1.8$ , 而常规引射器所需的静压恢复距离  $L/D = 6 -$   
 $8^{[8]}$ 。对采用圆形混合管 1 的情况, 各圆波瓣主喷管  $a, b, c$  和  $f$   
的静压恢复距离基本相同 ( $L/D = 1.8$ ), 而二元波瓣主喷管  $d$   
的恢复距离  $L/D$  在  $0.9 - 1.8$  之间, 采用二元混合管 2 和 3 的情

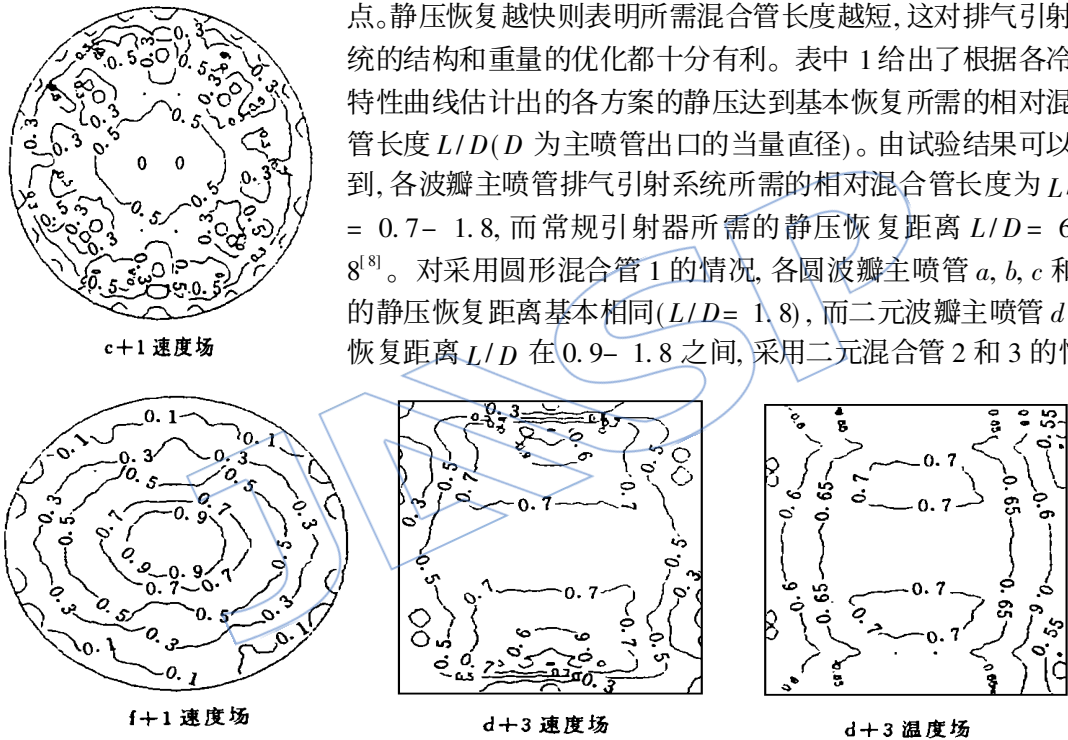


图 2 几个典型的混合管出口流场图

况, 则可改善圆波瓣主喷管方案的静压恢复特性。

2.5 混合管出口处的气流速度和温度分布

混合管的出口气流速度和温度分布情况直接反映主、次气流在混合管内掺混的均匀程度。  
图 2 给出了几个典型的混合管出口截面的速度和温度分布的拓扑图。试验结果表明, 各个方案  
的温度场都比各自的速度场均匀。这表明了在主、次气流掺混过程中, 温度(热)的扩散率大于  
速度(动量)的扩散率; 同时带中心锥的试验方案要比不带中心锥的试验方案的出口流场均匀。

2.6 红外辐射强度

为了对比各波瓣主喷管排气引射系统在抑制红外辐射方面的能力, 在热试时, 用 ZSHF 智  
能化双波段红外辐射计<sup>[9]</sup>在混合管出口后方半径为 10 m 的圆弧上, 与混合管轴线分别成 0,

5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 和 60 的位置上测量所选定的 6 种方案在  $3\sim 5\mu\text{m}$  和  $7\sim 14\mu\text{m}$  两个波段内的红外辐射强度, 试验结果见图 3(□简单圆喷管, 无混合管,  $\triangle C+1$ ,  $* d+1$ ,  $\diamond f+1$ ,  $+ f+3$ ,  $\circ d+3$ )。由于试验条件的限制, 单圆主喷管的外露部分与波瓣排气引射系统的外露部分没有进行相似模拟, 再加上背景的影响, 因此, 所测红外辐射数据仅供定性对比。由图中可以看到, 波瓣形排气引射系统的确能够有效地抑制排气系统的红外辐射, 而在各组合方案中,  $d+3$  的红外抑制性能最好, 而引射系数较大的主喷管  $c$  的红外辐射抑制性能却较差, 这可能是主喷管  $c$  与混合管 1 不匹配, 波瓣峰的外径已基本和混合管进口直径相近, 因此从波瓣流出的热燃气很快就与混合管壁相撞, 造成混合管壁温升高所致(壁温的测量证实了这一点)。

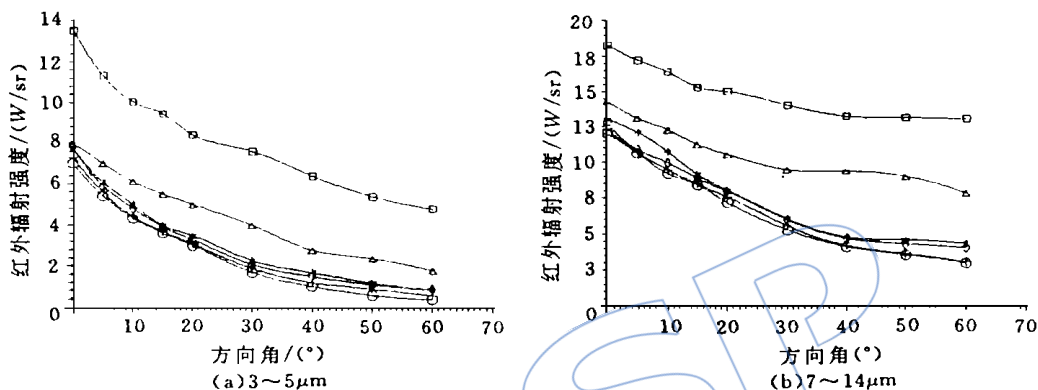


图 3 各种试验方案的红外辐射的方向特性

### 3 结 论

(1) 波瓣主喷管能提高排气引射系统的引射系数, 同时混合基本均匀所需的混合管长度约为波瓣主喷管的当量直径的 0.7~1.8 倍, 能大大改善排气引射系统的性能。(2) 波瓣主喷管排气引射系统能够有效地抑制排气系统产生的红外辐射强度。(3) 圆波瓣主喷管与圆混合管的组合和二元波瓣主喷管与二元混合管的组合方案要比它们各自交叉配合的性能优越。(4) 在所试验的各种组合方案中, 内外边波瓣间距相同的二元波瓣主喷管配上相应的二元混合管( $d+3$ )的气动综合性能和红外辐射的抑制性能最好。

### 参 考 文 献

- 1 Elliott J K, Manning T A, Qiu Y J, Greitzer E M, Tan C S. Computational and Experimental Studies of Flow in Multi-lobed Forced Mixers. AIAA 92-3568, 1992
- 2 Presz Jr W M. Mizer/Ejector Noise Suppressors. AIAA 91-2234, 1991
- 3 吴寿生. 波瓣强化混合结构及其在航空发动机上的应用. CSAA-93-P-118(C), 中国航空学会第三届动力年会, 重庆
- 4 胡晖. 排气引射红外抑制系统的研究: [学位论文]. 北京航空航天大学, 1993
- 5 胡晖, 吴寿生. 低速排气引射系统的一维理论分析. CSAA-93-P-154(P), 中国航空学会第三届动力年会, 重庆
- 6 Presz Jr W M, Gousy R G, Morin B L. Forced Mixer Lobes in Ejector Designs. AIAA 86-1614, 1986
- 7 Presz Jr W M, Greitzer E M. A Useful Similarity Principle for Jet Engine Exhaust System Performance. AIAA 88-3001, 1998
- 8 吴达, 郑克扬. 排气系统气动热力学. 北京航空航天大学出版社, 1988
- 9 魏福清等. ZSHF 智能化双波段红外辐射仪. 北航科技报告, 1990