

波瓣混合器流场试验

张哲衡, 王东明, 张宝华, 胡文成, 于婷婷

(中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 为了获得加力燃烧室波瓣混合器内的三维流场, 采用带热电偶的五孔探针对流场进行了测量。通过试验, 得到了波瓣混合器出口不同截面的速度场和温度场, 以及波瓣混合器沿流向的热混合效率、总压恢复系数变化规律。试验结果表明: 在波瓣混合器尾缘处会产生一对相互逆转的流向涡, 流向涡的产生加强了内、外涵气流的对流混合; 越靠近波瓣混合器尾缘, 内、外涵掺混能力越强, 热混合效率增加速度越快, 总压恢复系数下降也越快。

关 键 词: 波瓣混合器; 热混合效率; 总压恢复系数; 五孔探针; 流场

中图分类号: V231

文献标志码: A

Experiment of flow field in lobed mixer

ZHANG Zhe-heng, WANG Dong-ming, ZHANG Bao-hua,
HU Wen-cheng, YU Ting-ting

(Shenyang Engine Design and Research Institute,
Aviation Industry Corporation of China, Shengyang 110015, China)

Abstract: In order to obtain the three-dimensional flow field of afterburner lobed mixer, a five-hole probe with thermocouple was applied to measure the flow field of the lobed mixer. The velocity and temperature fields in different sections at the lobed mixers outlet were obtained in the experiments, and the change rules of the thermal mixing efficiency and the total pressure recovery coefficient in the flow direction were measured. The experimental results indicate that a pair of inverse direction streamwise vortexes are generated in the trailing edge of lobed mixer, which strengthens the degree of the mixed convection between inner bypass and external bypass. The closer to the trailing edge of the lobed mixer, the greater the mixing degree of the flow between inner bypass and external bypass, the quicker the thermal mixing efficiency increasing, the faster the total pressure recovery coefficient declining.

Key words: lobed mixer; thermal mixing efficiency;
total pressure recovery coefficient; five-hole probe; flow field

为了增加巡航距离和提高加速能力, 需要小涵道比的加力发动机^[1]。发动机在起动加力时, 低压涡轮排出的高温燃气和内涵进入的低温空气经混合器掺混后, 进入加力燃烧室。发动机加力燃烧室中的混合器结构对内、外涵气流的混合以及燃烧组织具有重要的影响^[2], 目前加力燃烧室的进气方式主要有平行进气和波瓣强迫式混合进气两种方式。就平行进气而言, 它具有结构简单、质量

小和气动损失小等优点, 但由于内、外涵为平行进气, 两股气流之间的混合依赖于射流间的剪切作用, 混合均匀性差, 由此带来局部富油、燃烧效率低等问题; 而波瓣强迫式混合进气与平行进气相比, 能够显著提高内、外涵的混合效率, 其原因如下: 一是由于在同样出口面积的情况下, 波瓣混合器的特殊结构, 增加了内、外涵气流的接触面积, 使得内、外涵气流之间的黏性剪切混合增强; 二是

由于流向涡、正交涡等引起的对流混合作用的增强^[3],但是波瓣混合器也会导致流动损失增大、总压恢复系数降低。

波瓣混合器内部气流的流动混合物理过程非常复杂,国外对其结构以及其流动过程开展了大量的研究^[4-5]。国内对波瓣混合器也进行了大量的数值模拟研究,并且近年来也取得了重要进展。在波瓣混合器流场试验方面,目前国内也开展了一些相应的研究,邵万仁等人^[6-7]研究了波瓣混合器出口角度、相对混合长度和波瓣穿透率等结构参数对波瓣形排气引射混合器气动性能的影响;金捷等人^[8]通过二维位移机构,采用五孔探针对波瓣混合器出口单个截面上的流场进行过试验研究。本文通过三维位移机构,采用五孔探针测试方法对波瓣混合器出口多个截面进行了流场测试,不仅试验测得了波瓣混合器出口沿程各个截面周向及径向的速度场和温度场、波瓣混合器径向各截面沿程轴向及径向温度场,而且还计算得到了沿程热混合效率以及总压恢复系数的变化规律,对以后的试验研究以及数值模拟都具有重要意义。

1 试验设备、试验件

本试验在涡扇发动机加力燃烧室模拟试验器上进行。试验器主要由内、外涵进气系统,加温系统,可调喷嘴系统,引射系统,燃油液压系统等组成。设备空气流程如图 1 所示,试验器采用连续气源供气,内、外涵空气流量由各自的电动调节阀调节并采用孔板流量计测量,内涵空气采用单管燃烧室喷油燃烧加温,外涵空气采用电加热器加温,通过引射系统来建立负压,模拟高空环境。

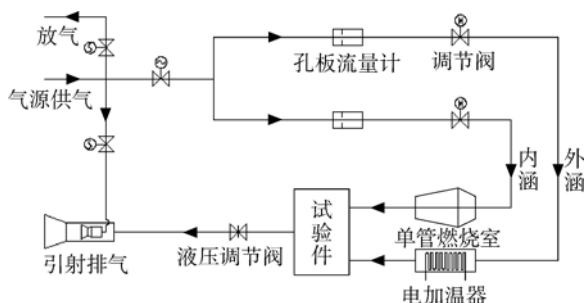


图 1 设备空气流程图

Fig. 1 Sketch of air regulating system

针对某涡扇发动机的波瓣混合器,采用缩比例的试验件,该试验件主要由扩压器、波瓣混合器和锥体组成,其结构简图见图 2。

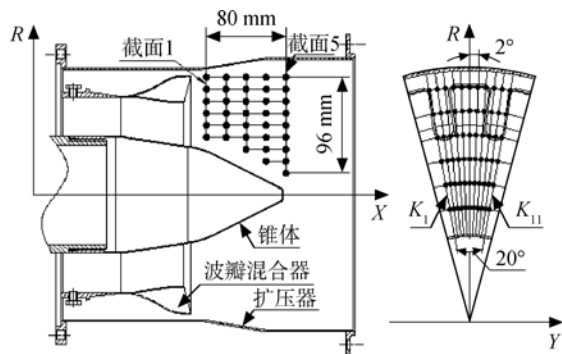


图 2 试验件结构简图

Fig. 2 Structure sketch of experimental article

2 试验工况、测试内容

试验工况如表 1 所示。试验件进口截面的速度场和温度场用总温、总压靶测取;在扩压器通道空间内,用带单点温度感头并经全方位校准的五孔探针测取三维速度场和温度场。测点布局如图 2 所示,沿轴向等距测量 5 个横截面(截面 1~截面 5);径向测量 2 个波谷和 1 个波峰区域,共 11 个截面($K_1 \sim K_{11}$),相邻截面之间的夹角为 2° ;每个截面径向测点等距分布 6~9 点。

表 1 试验工况

Table 1 Test conditions

涵道	入口压力/ kPa	入口温度/ K	入口气流速度/ (m/s)
内涵	101	870	226
外涵	104	360	73

试验过程中所有压力测量都采用的是 DSA 压力扫描阀,精度为 $\pm 0.05\%$;外涵进口温度测量采用的是铜-铜镍热电偶(T 偶),内涵进口温度测量采用的是铂铑 30-铂铑 6 热电偶(B 偶),五孔探针的温度感头采用的是镍铬-镍硅热电偶(K 偶),温度测量精度为 $\pm 1.0\%$;另外五孔探针由一套全自动三维位移机构驱动并实现数据自动采集。

3 五孔探针结构及数据处理方法

3.1 五孔探针结构

本文所使用的五孔探针头部为球形,头部直径为 4 mm;测压孔孔径为 0.6 mm;五孔探针长为 270 mm,高为 600 mm。五孔探针的结构形式、测压孔编号、其偏转角 α 和俯仰角 β 及空间 3 个分量的速度如图 3 所示。

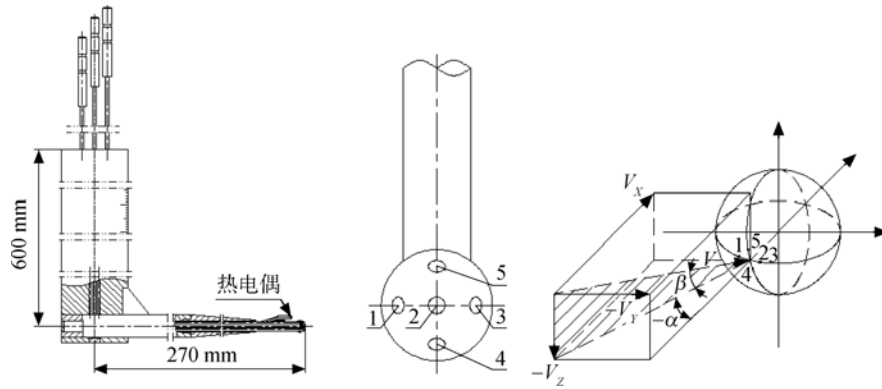


图3 五孔探针结构形式、测压孔编号及角度定义

Fig. 3 Structure, numbers of pressure testing holes and angles explanation of five-hole probe

3.2 五孔探针校准过程

五孔探针在标准压力风洞中进行了全方位校准,校准的马赫数范围为 $0.1 \sim 0.6$,步长 $\Delta Ma = 0.1$;偏转角 α 范围为 $-20^\circ \sim +20^\circ$,步长 $\Delta \alpha = 4^\circ$;俯仰角 β 范围为 $-16^\circ \sim +20^\circ$,步长 $\Delta \beta = 4^\circ$. 五孔探针校准时,在某一 Ma ,固定 α ,改变 β ,采集 5 个测压孔的压力值 $p_1 \sim p_5$ 、总压 p_t 和静压 p_s ,并记录此时的 Ma , α 和 β .

3.3 校准数据处理

五孔探针的校准压力系数定义如下^[9-10]:

反映 α 的无量纲量

$$K_\alpha = \frac{p_3 - p_1}{p_2 - p_m} \quad (1)$$

反映 β 的无量纲量

$$K_\beta = \frac{p_5 - p_1}{p_2 - p_m} \quad (2)$$

反映 Ma 的无量纲量

$$K_{Ma} = \frac{p_2 - p_m}{p_t} \quad (3)$$

反映 p_t 的无量纲量

$$K_t = \frac{p_t - p_2}{p_2 - p_m} \quad (4)$$

反映 p_s 的无量纲量

$$K_s = \frac{p_2 - p_s}{p_2 - p_m} \quad (5)$$

$$p_m = \frac{p_1 + p_3 + p_4 + p_5}{4} \quad (6)$$

式中 p_m 为压力平均值. 从以上反映总压 p_t 和静压 p_s 的无量纲参数可直接计算得到总压和静压

$$p_t = p_2 + K_t \times (p_2 - p_m) \quad (7)$$

$$p_s = p_2 - K_s \times (p_2 - p_m) \quad (8)$$

根据校准时测得不同 Ma , α 和 β 时探头 5 个测压孔中的压力,就可以建立气流的参数 α , β ,

Ma , K_t 和 K_s 与无量纲量 K_α , K_β 和 K_{Ma} 之间的 5 个近似函数

$$Ma = f_1(K_\alpha, K_\beta, K_{Ma}) \quad (9)$$

$$\alpha = f_2(K_\alpha, K_\beta, K_{Ma}) \quad (10)$$

$$\beta = f_3(K_\alpha, K_\beta, K_{Ma}) \quad (11)$$

$$K_t = f_4(K_\alpha, K_\beta, K_{Ma}) \quad (12)$$

$$K_s = f_5(K_\alpha, K_\beta, K_{Ma}) \quad (13)$$

通过风洞中的校准数据,利用高斯最小二乘条件即可求得上述 5 个三元近似函数的多项式系数.

3.4 试验数据处理

试验过程中,将五孔探针测得的 5 个压力值代入式(7)~式(13)中即可得到测点处的 α , β , Ma , p_t , p_s . 通过将五孔探针在风洞中的校准数据 $p_1 \sim p_5$ 代入式(7)~式(13)中,计算得 α 的最大绝对误差为 1.33° , β 的最大绝对误差为 1.52° , Ma 的最大相对误差为 1.1% , p_t 的最大相对误差为 0.42% , p_s 的最大相对误差为 0.25% .

4 试验结果及分析

4.1 速度场和温度场

波瓣混合器出口沿轴向 5 个横截面(截面 1~截面 5)的温度场如图 4 所示(R 表示半径方向, T 为温度). 比较这 5 个截面的温度场可以看出,在最靠近波瓣尾缘出口的截面 1 处,还能清晰地看出波瓣的轮廓结构. 从截面 1 到截面 5,随着波瓣混合器出口距离的增加,外涵最低温度已由 335 K 逐渐升高到 448 K ,而中心最高温度却基本没有变化,其原因是由于波瓣混合器的掺混作用,加强了内、外涵气流的掺混,从而导致了外涵气流温度的升高,而中心靠近锥体的地方,由于此处离波瓣较远,内涵的气流未参与掺混,所以其温度基本没有变化.

图 5 为波瓣混合器出口各纵截面($K_1 \sim K_5$

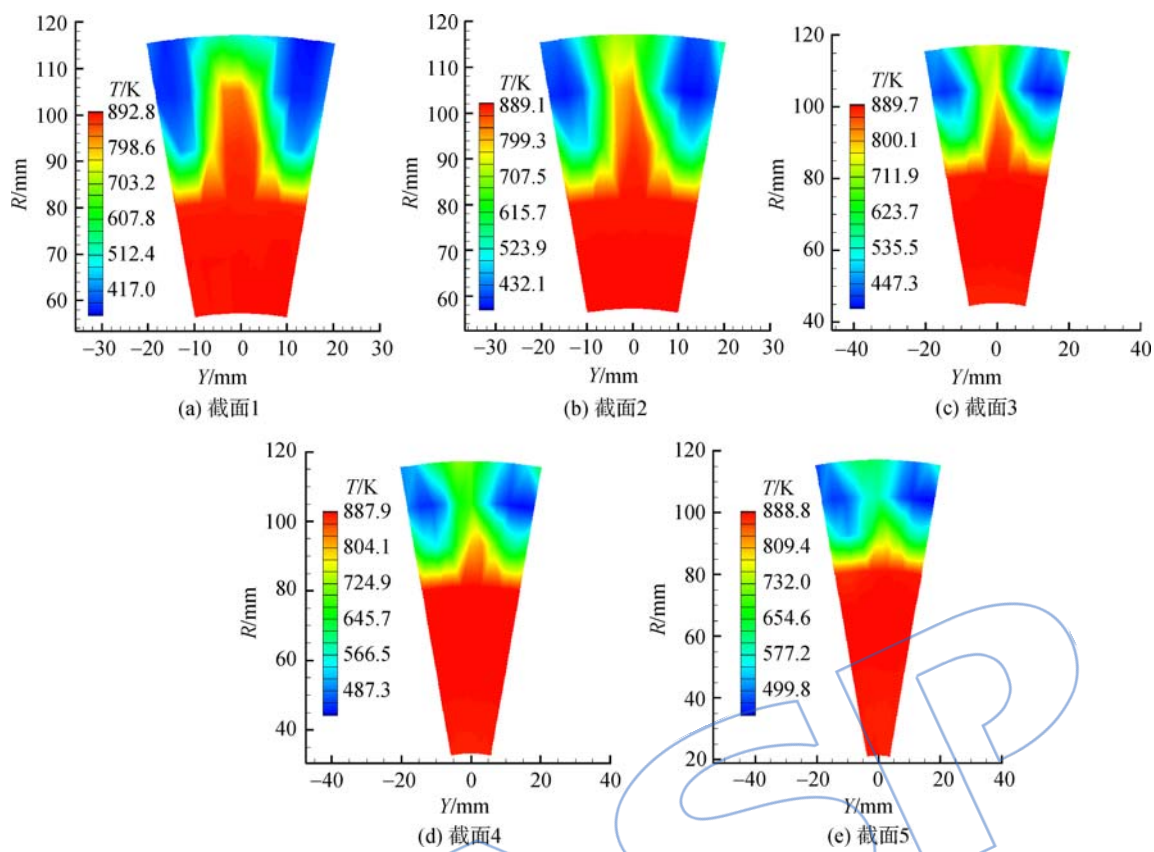


图 4 波瓣混合器出口沿轴向各横截面温度场

Fig. 4 Temperature fields of cross sections in axial direction at lobed mixers outlet

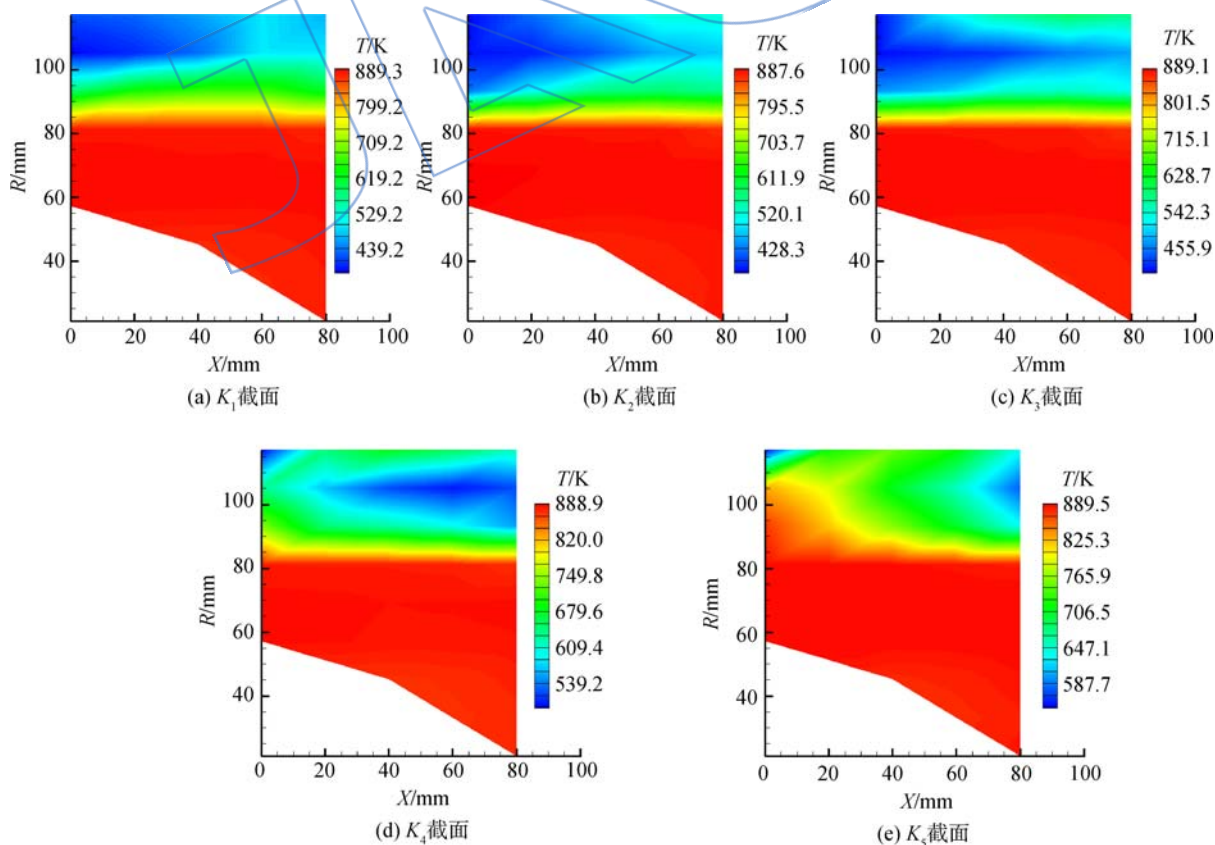


图 5 波瓣混合器出口各纵截面温度场

Fig. 5 Temperature fields of vertical sections at lobed mixers outlet

截面)温度场.波瓣入口外涵空气温度较低、内涵温度较高,所以图5中上半部分温度较低、下半部分温度较高.另外由于 $K_1 \sim K_3$ 截面为波谷区间,低温区间较大,而 K_4 和 K_5 截面为波峰区间,低温区间较小.

图6为波瓣混合器出口沿轴向5个横截面的速度场(V 为速度).比较这5个不同截面的速度图可见,随着波瓣混合器出口距离的增加,速度由88 m/s逐渐降低到了34 m/s.并且从截面1到截面3,最高速度都位于波峰的正下方,此处速度越大,说明波瓣掺混能力越强.而在截面4和截面5处,最高速度由波峰正下方转移到了靠近锥体处,其主要原因是在截面4和截面5处,离波瓣混合器出口距离较远,波瓣的掺混能力较弱,而由于锥体扩压的作用,导致气流向轴心方向运动的能力较强.因此从截面1到截面5,波瓣混合器的掺混能力在逐渐减弱,在靠近波瓣混合器出口的截面1处掺混能力最强,在离波瓣混合器出口最远的截面5处,波瓣的掺混能力最弱.

图7为波瓣混合器出口各纵截面的速度场.比较这5张不同周向位置的速度图,从速度大小来看,随着波瓣混合器出口距离的增加,速度在逐

渐减小;另外由于外涵速度低、内涵速度高,以及扩压器和锥体的扩压减速作用,导致图中中间速度高,而靠近扩压器和锥体壁面的速度低.从波瓣混合器出口气流速度的方向来看,在波瓣混合器出口处,波谷会导致外涵气流方向轴心方向偏转,波峰会导致内涵气流向外壁偏转,而锥体在导致内涵气流扩压减速的同时,也会导致内涵气流向轴心方向偏转.

图8为波瓣混合器出口沿轴向截面2和截面4的速度矢量局部放大图,从图中可以发现波瓣混合器尾部边缘处产生了一对明显的相互逆转的旋涡,此旋涡的方向沿流动方向称为流向涡.产生的流向涡可增加流场各个物理量的梯度,增大内涵气流和外涵气流的接触面积.流向涡的产生还会使内、外涵气流产生大尺度的对流混合.

4.2 沿程温度混合效率

流体质量组分混合效率作为衡量波瓣混合器混合性能的重要指标,在实际情况下因为流体成分测量比较困难,所以应用范围不大^[11-14].本文使用实际工程中广泛采用的热混合效率来评价主、次流混合的均匀程度.Frost^[15]根据一维流动,定义热混合效率 η 如下:

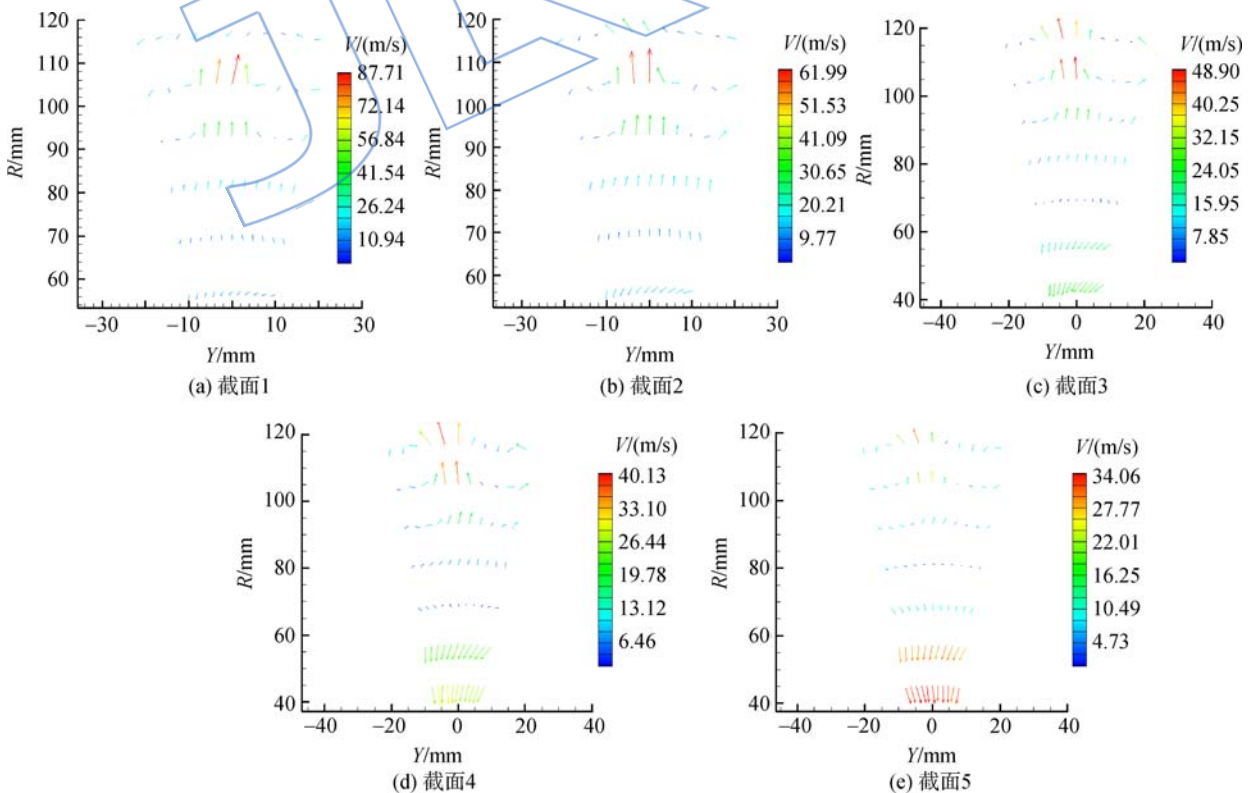


图6 波瓣混合器出口沿轴向各横截面速度场

Fig.6 Velocity fields of cross sections in axial direction at lobed mixers outlet

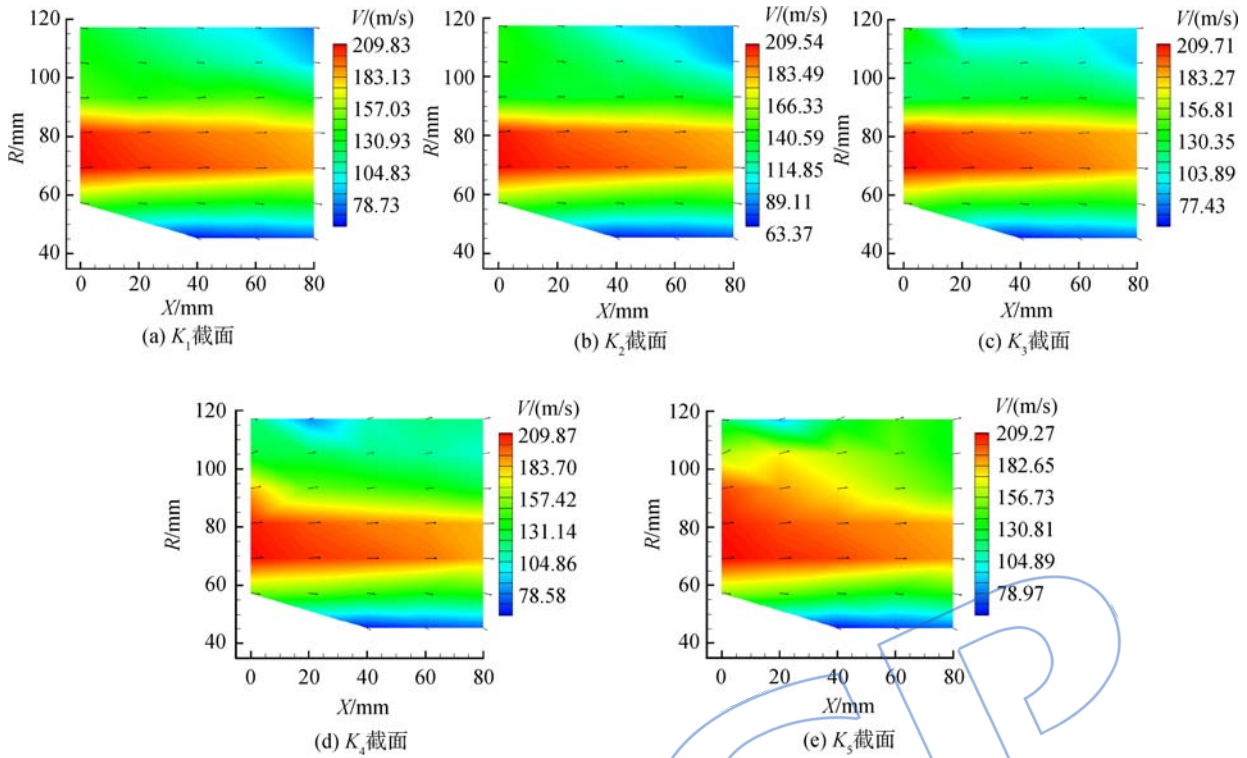


图7 波瓣混合器出口各纵截面速度场

Fig. 7 Velocity fields of vertical sections at lobed mixers outlet

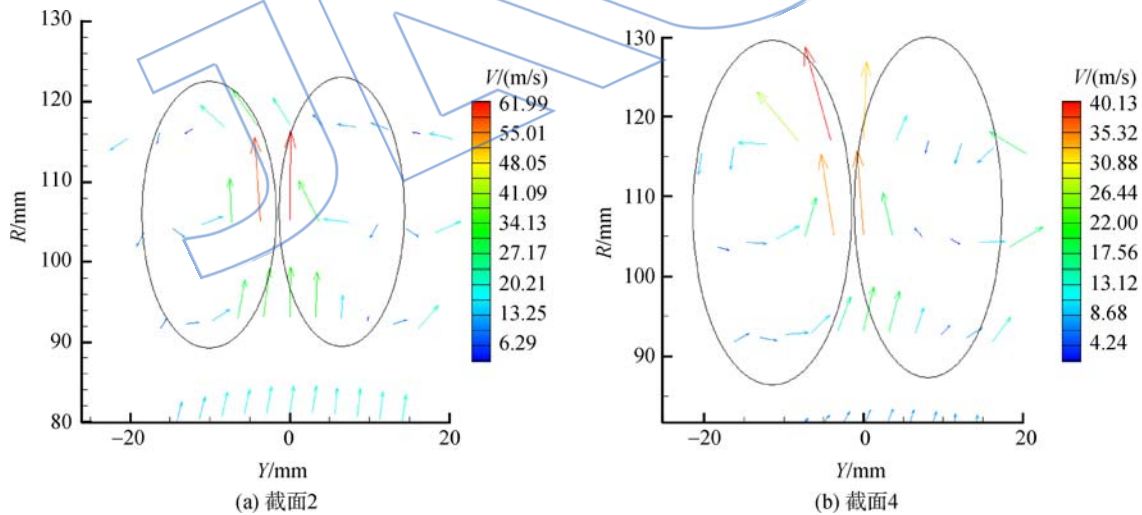


图8 速度矢量局部放大图

Fig. 8 Part enlarging of velocity vector

$$\eta_t = \frac{\int T^{0.5} dm - T_{\text{hot}}^{0.5} \dot{m}_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}^{0.5} \dot{m}_{\text{cold}}}{T_{\text{mix}}^{0.5} (\dot{m}_{\text{hot}} + \dot{m}_{\text{cold}}) - T_{\text{hot}}^{0.5} \dot{m}_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}^{0.5} \dot{m}_{\text{cold}}} \quad (14)$$

式中 T 为测点的温度, dm 为测点单元的质量, T_{hot} 为主流入口温度, T_{cold} 为次流入口温度, $\dot{m}_{\text{hot}}$ 为主流入口流量, $\dot{m}_{\text{cold}}$ 为次流入口流量, T_{mix} 为主、次

流完全混合后的温度, 它的定义为

$$T_{\text{mix}} = \frac{c_{p_{\text{hot}}} T_{\text{hot}} \dot{m}_{\text{hot}} + c_{p_{\text{cold}}} T_{\text{cold}} \dot{m}_{\text{cold}}}{c_{p_{\text{hot}}} \dot{m}_{\text{hot}} + c_{p_{\text{cold}}} \dot{m}_{\text{cold}}} \quad (15)$$

式中 $c_{p_{\text{hot}}}$ 为主流比定压热容, $c_{p_{\text{cold}}}$ 为次流比定压热容。

将上述热混合效率式(14)应用到本文中, 离散后可得到式(16)

$$\eta_t = \frac{\frac{\dot{m}_6 + \dot{m}_{lb} + \dot{m}_{l6}}{\sum_{j=1}^n \rho_{7-j} V_{7-j} A_{7-j}} \cdot \sum_{j=1}^n \sqrt{T_{7-j}} \rho_{7-j} V_{7-j} A_{7-j} - \sqrt{T_{16}} \dot{m}_{l6} - \sqrt{T_6} (\dot{m}_6 + \dot{m}_{lb})}{\sqrt{T_{6m}} (\dot{m}_6 + \dot{m}_{lb} + \dot{m}_{l6}) - \sqrt{T_{16}} \dot{m}_{l6} - \sqrt{T_6} (\dot{m}_6 + \dot{m}_{lb})} \quad (16)$$

式中 T_{7-j} , ρ_{7-j} , V_{7-j} , A_{7-j} 分别表示五孔探针各测点处的温度、密度、速度和面积; T_6 为内涵进口温度; T_{16} 为外涵进口温度; $\dot{m}_6$ 为内涵空气流量; $\dot{m}_{l6}$ 为外涵空气流量; $\dot{m}_{lb}$ 为内涵加热器燃油流量; T_{6m} 为内、外涵空气完全混合后的温度, 它的定义为

$$T_{6m} = \frac{c_{p16} T_{16} \dot{m}_{l6} + c_{p6} T_6 (\dot{m}_6 + \dot{m}_{lb})}{c_{p16} \dot{m}_{l6} + c_{p6} (\dot{m}_6 + \dot{m}_{lb})} \quad (17)$$

但是在使用上述计算式(16)计算每个测量单元的小流量时, 热混合效率的计算会产生很大的波动, 引起很大的误差, 所以需要式(16)进行改进. 为此, 在保持式(16)基本形式的情况下, 引入方差的概念, 经无量纲化整理后^[9], 结果为

$$\eta_r = 1 - \frac{\frac{\dot{m}_6 + \dot{m}_{lb} + \dot{m}_{l6}}{\sum_{j=1}^n \rho_{7-j} V_{7-j} A_{7-j}} \cdot \sum_{j=1}^n (T_{7-j} - T_{6m})^2 \rho_{7-j} V_{7-j} A_{7-j}}{T_6^2 (\dot{m}_6 + \dot{m}_{lb}) + T_{16}^2 \dot{m}_{l6} - T_{6m}^2 (\dot{m}_6 + \dot{m}_{lb} + \dot{m}_{l6})} \quad (18)$$

应用式(18), 根据五孔探针试验数据, 计算的波瓣混合器出口沿程热混合效率如图9所示. 图中纵坐标为热混合效率 η_r , 横坐标 X/D 为波瓣混合器出口距离/扩压器入口直径.

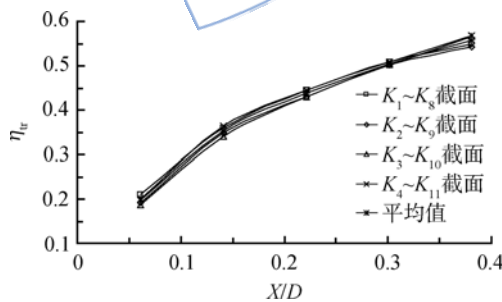


图9 波瓣混合器出口沿程热混合效率

Fig. 9 Thermal mixing efficiency at lobed mixers outlet along flow

波瓣混合器波瓣数为偶数, 而五孔探针测量区间为 20° (2个波谷、1个波峰), 在计算热混合效率时需要计算1个波谷和1个波峰区间, 因此选择了4个不同计算区间来计算热混合效率. 从图9中可用看出, 4个不同测量区间内的热混合效率基本一致, 其变化趋势为随着波瓣混合器出

口距离的增加, 热混合效率逐渐增加, 并且在波瓣混合器出口处, 热混合效率增加速率较快, 在远离波瓣混合器出口处, 热混合效率增加速率较慢.

4.3 总压恢复系数

波瓣混合器总压恢复系数定义为

$$\sigma_{ab} = \frac{p_{t7av}}{p_{t6m}} = \frac{\sum_{j=1}^n \rho_{7-j} V_{7-j} A_{7-j} p_{t7-j}}{\sum_{j=1}^n \rho_{7-j} V_{7-j} A_{7-j}} \times \frac{\dot{m}_{l6} + \dot{m}_6 + \dot{m}_{lb}}{p_{t16} \dot{m}_{l6} + p_{t6} (\dot{m}_6 + \dot{m}_{lb})} \quad (19)$$

式中 p_{t7av} 为试验件出口平均总压, p_{t6m} 为试验件入口平均总压, p_{t16} 为试验件外涵入口总压, p_{t6} 为试验件内涵入口总压, p_{t7-j} 为五孔探针测量总压. 根据式(19)计算得到波瓣尾缘出口总压恢复系数沿流动方向的变化规律如图10所示. 从图中可以看出, 4个不同计算区间内, 总压恢复系数基本一致, 最大相差仅为0.3%; 在波瓣尾缘出口处, 总压恢复系数下降最快, 越远离波瓣尾缘, 总压恢复系数下降速度越慢.

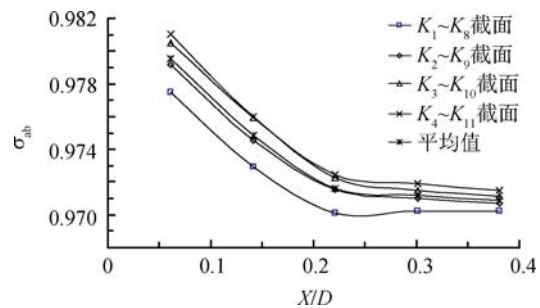


图10 波瓣混合器的总压恢复系数

Fig. 10 Total pressure recovery coefficient of lobed mixers

5 结 论

1) 采用带热电偶的全方位校准五孔探针, 配以三维位移机构, 能够成功测量波瓣混合器出口不同截面以及径向各个截面的温度场、速度场, 同时计算得到了沿程热混合效率和总压恢复系数变化规律, 试验结果对波瓣混合器的数值模拟和进一步的试验研究有着重要的参考意义.

2) 在波瓣混合器尾部边缘处会产生一对明

显的相互逆转的流向涡,流向涡的产生还会加强内、外涵气流的对流混合。

3) 在4个不同计算区间内,试验得到的波瓣混合器热混合效率、总压恢复系数基本一致。

4) 随着波瓣混合器出口距离的增加,热混合效率逐渐升高,总压恢复系数逐渐降低;在波瓣尾缘出口处,内、外涵掺混能力最强,热混合效率增加速度最快,总压恢复系数下降速度也最快;越远离波瓣尾缘出口,内、外涵掺混能力越弱,热混合效率增加速度越慢,总压恢复系数下降也越慢。

参考文献:

- [1] 明贵清,何家德,郭明焕,等.波瓣强迫混合器流动规律初步分析[J].燃气涡轮试验与研究,2000,13(3):27-30.
- [2] 王亚盟,张靖周,高家春,等.加力燃烧室用锯齿冠状混合器混合特性数值研究[J].航空动力学报,2011,26(1):72-77.
WANG Yameng, ZHANG Jingzhou, GAO Jiachun, et al. Numerical study on the mixing characteristics of chevron mixers for the afterburner[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(1): 72-77. (in Chinese)
- [3] 郭楠.菊花形混合器流场计算及设计优化[D].北京:北京航空航天大学,2008.
GUO Nan. Numerical simulation of the flow field and the optimal design of lobed mixers[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)
- [4] Cooper N J, Merati P, Hu H. Numerical simulation of the vortical structures in a lobed jet mixing flow[R]. AIAA-2005-635, 2005.
- [5] Ooba Y, Kodama H, Nakamura Y, et al. Large eddy simulation analysis of a 18-lobe convoluted mixer nozzle[R]. AIAA-2002-0717, 2002.
- [6] 邵万仁,吴寿生.涡扇发动机菊花型排气混合器的初步选型试验研究[J].航空发动机,1999(3):15-24.
- [7] 邵万仁,吴寿生.波瓣形排气引射混合器的试验研究[J].航空动力学报,2000,15(2):155-158.
SHAO Wanren, WU Shousheng. Experimental research on lobed exhaust ejection mixer[J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(2): 155-158. (in Chinese)
- [8] 金捷,何家德,徐镇勇,等.涡扇加力模型混合扩压器三维流场测量[J].燃气涡轮试验与研究,1996(2):45-49.
- [9] 张晓东,姜正礼,赵旺东.五孔探针在涡轮导向器出口流场测量中的应用[J].燃气涡轮试验与研究,2010,23(4):44-48.
ZHANG Xiaodong, JIANG Zhengli, ZHAO Wangdong. Application of 5-hole probe in measurement of turbine nozzle outlet flowfield[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2010, 23(4): 44-48. (in Chinese)
- [10] 岳国强,韩万金,芦文才,等.五孔探针实验数据处理的线性插值法[J].热能动力工程,2004,19(5):526-529.
YUE Guoqiang, HAN Wanjin, LU Wencai, et al. Linear interpolation method for processing the test data of five-hole probes[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2004, 19(5): 526-529. (in Chinese)
- [11] 刘友宏,樊超,谢翌,等.波瓣数对波瓣强迫混合排气系统性能影响[J].航空动力学报,2010,25(8):1683-1689.
LIU Youhong, FAN Chao, XIE Yi, et al. Effect of lobe numbers on the performance of a lobed mixer in the forced mixing exhaust system[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(8): 1683-1689. (in Chinese)
- [12] 谢翌,刘友宏.瓣高宽比对波瓣强迫混合排气系统性能影响[J].航空动力学报,2010,25(12):2787-2794.
XIE Yi, LIU Youhong. Effect of ratio of height to width of lobe on the performance of a lobed mixer in a forced mixing exhaust system[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(12): 2787-2794. (in Chinese)
- [13] 刘友宏,谢翌.菊花形混合器混合效率理论计算[J].航空动力学报,2009,24(4):740-745.
LIU Youhong, XIE Yi. Analytical solution of mixing efficiency of lobed mixer[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(4): 740-745. (in Chinese)
- [14] 刘友宏,郭楠,李江宁,等.后缘切角对波瓣混合器性能影响[J].航空动力学报,2009,24(9):1917-1922.
LIU Youhong, GUO Nan, LI Jiangning, et al. Effect of cut angles at trailing edge on the performance of a lobed mixer[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(9): 1917-1922. (in Chinese)
- [15] Frost T H. Practical bypass mixing systems for fan jet aero-engines[J]. Aeronautical Quarterly, 1966, 17(5): 141-160.