

文章编号:1000-8055(2011)01-0210-07

气-气喷注器混合场流动显示

金 平, 杜正刚, 杨立军, 蔡国飙
(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 研究气-气喷注器气流流动混合过程, 基于粒子图像测速仪(PIV)实验系统, 采用对两股气流分别示踪的方法, 对三种典型结构的气-气喷注器混合场开展了实验研究. 实验结果验证了这种实验方案的可行性, 结合轴截面和横截面的流场分布测量, 得到了同轴离心式、同轴直流式、互击式气-气喷注器气流混合过程的主要作用因素和混合场的分布特征.

关 键 词: 粒子图像测速; 混合场; 同轴离心式气-气喷注器; 同轴直流式气-气喷注器;
互击式气-气喷注器

中图分类号: V434⁺.13

文献标识码: A

Flow visualization of gas-gas injector mixing flowfield

JIN Ping, DU Zheng-gang, YANG Li-jun, CAI Guo-biao

(School of Astronautics,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Flow visualization technology with particle image velocimetry system was applied in the paper to study the mixing flowfield of gas-gas injector. The method of tracing two different flows separately was adopted and three typical injectors, such as coaxial shear injector, coaxial swirl injector and triple impinging injector, were selected to conduct out a series of tests. The experimental results validate the way to trace the two flows separately credible and show the different mixing mechanisms of three typical injectors with axial and cross-section images, which reveal the major impact factors of mixing process and distribution features of mixing flowfield.

Key words: particle image velocimetry; mixing flowfield; coaxial shear gas-gas injector;
coaxial swirl gas-gas injector; triple impinging gas-gas injector

随着人类空间活动越来越频繁, 一次性使用火箭因其研制周期长、费用高难以满足空间运输的需求, 大力发展安全可靠、费用低廉的可重复使用运载器成为必然. 在众多的可重复使用动力系统方案中, 全流量补燃循环发动机^[1]因其高性能、高可靠性和技术成熟受到关注. 气-气喷注器作为全流量补燃循环发动机的新部件, 是其关键技术之一. 相比常规的液体推进剂燃烧过程, 气-气燃烧没有了液滴雾化和蒸发过程, 使得燃烧过程变

得简单和高效, 从而能有效提高发动机的性能. 因此, 气流混合过程成为影响气-气燃烧的主要因素, 对此开展研究对提高全流量补燃循环发动机性能具有重要意义.

国内外针对气-气喷注器气流混合过程开展的研究甚少. Calhoon 等^[2]在 1967—1973 年间开展了气-气喷注器冷流实验研究, 采用质谱仪对气-气混合场进行了混气质量分布测量, 初步获得了几种常用结构形式气-气喷注器的气流混合场

收稿日期: 2010-06-02; 修订日期: 2010-10-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划

作者简介: 金平(1979—), 女, 湖北麻城人, 博士后, 主要从事全流量补燃循环发动机技术研究.

质量分布特征,但这些研究对气-气混合过程的作用机理并没有形成清楚的认识。

根据过去应用在液体火箭发动机喷雾燃烧的大量实验经验可以知道,针对冷态液体喷雾场采用流动显示技术能很好地理解喷雾混合流动变化过程,对深入理解喷雾机理起到了决定性的作用。因此,为了揭示气-气喷注器混合过程的气流运动和扩散规律,开展气-气喷注器混合场流动显示研究很有必要。过去十几年间,随着计算机技术、光学技术和激光技术的发展,流动显示技术日趋成熟和完善。粒子图像测速技术(particle image velocimetry,简称 PIV)作为非接触、对流场无扰动的全场定量测量显示技术,能有效地测量同一时刻整个流动空间的流场分布,在液体和气体流场结构显示和流动机理研究中得到了广泛的应用^[3]。在本文的研究中,应用了 PIV 系统对气-气喷注器混合场开展研究。

PIV 实验系统的基本原理是通过流场中散布合适的示踪粒子,利用电荷耦合元件(charge-coupled device,简称 CCD)等成像系统获得曝光后的示踪粒子图像,之后对图像进行处理和分析,从而获得流场分布情况。PIV 技术的基本假设是粒子能有效跟踪流场,粒子的运动能直接反映流场情况。如何选择适用于气流场流动的示踪粒子以及如何实现两股气流的混合流动显示成为关键。

目前在 PIV 实验系统上针对气-液、液-固两相混合流动已有具体的应用方法^[4-7],但是对于两股不同气体介质的气-气混合流动显示研究尚不多见。为了实现两股气流的流动显示,通常有两种方法:其一是采用不同颜色的两种固体示踪粒子进行流场显示,由颜色混合的均匀度来显示混合过程的变化,但固体示踪粒子对气体流场的细微结构显示有一定偏差;其二是采用两种不同质量

分数的液体介质示踪粒子进行流场显示,根据示踪粒子质量分数的变化差别来判断气流的混合情况,但这种实验方法对示踪粒子制备系统和图像处理技术提出了很高的要求。

因此为了在现有的实验系统^[8-9]中实现两股气流的流动显示,本文在稳定流场的假设上,以液体油滴为示踪粒子,提出“两股气流分别示踪”的实验方法,即在两个不同的稳定流场时间段内,分别对 PIV 实验系统中两股气流中一股气流加入示踪粒子,进行图像采集,然后结合两种情况下的图像对流动过程进行综合分析。本文将在液体火箭发动机上得到广泛应用的三种典型气-液、液-液喷注器结构,即同轴离心式、同轴直流式和三股互击式,在气-气喷注器上进行了应用,并对这三种气-气混合场用以上的实验方法开展了流动显示研究,为气-气混合流动机理研究提供参考。

1 实验装置和测量方法

1.1 气-气喷注器结构

在实验中均选用压缩空气作为富氢燃气和富氧燃气的模拟介质,由于受到实验系统空气流量的限制,三种气-气喷注器实验件空气流量均为 5 g/s,混合比为 6.4,设计喷注压降为 0.052 MPa。因为流量较小,为了避免因环孔太小(环孔直径 $d \leq 0.2$ mm)加工精度造成较大的误差,采用了中心富氢喷孔、边区富氧喷孔的结构排布形式,其具体结构如图 1 所示。

1.2 粒子发生器

在本文的研究中,采用了自行设计的液体粒子发生器来产生气体流场示踪粒子,如图 2 所示。发生器内部以超声速喷嘴高压气流冲击油料形成雾化的示踪粒子,有足够的压力注入实验流场。经

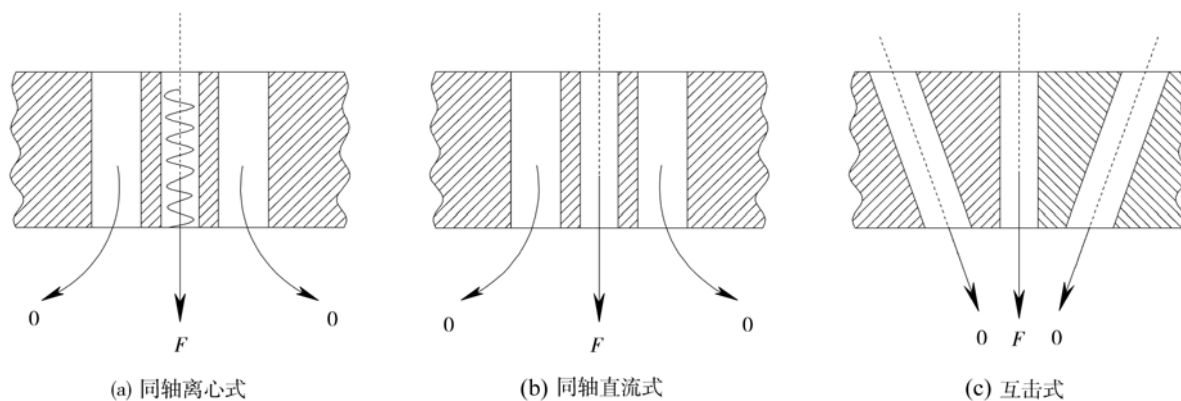


图1 气-气喷注器的结构

Fig. 1 Configuration of gas-gas injectors

过测试该种粒子的形状均为球状,注入流场后分布均匀,对光线有良好的散射性,粒径小(平均粒径约为 $0.6\ \mu\text{m}$),能够满足跟随性的要求,在粒子发生器内同时使用多个超声速喷嘴的情况下,能产生足够流量的粒子,以保证在实验条件下实验段内持续产生满足尺寸要求的粒子数目^[8].

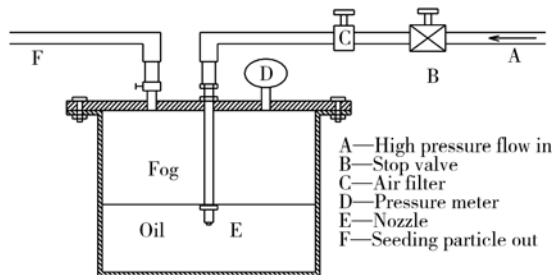


图2 粒子发生器

Fig. 2 Particles generator

1.3 实验系统

实验是在北京航空航天大学流体力学研究所的PIV实验系统进行的,PIV实验系统由光源、图像采集系统、同步控制器,具体参数见文献^[8].

实验系统图如图3所示.由主气路引出一条支路,为粒子发生器提供高压气源.由粒子发生器产生的示踪粒子经另一支路注入需要的示踪的支路.为保证粒子有相同的物理特性,对高压气源经过除油除水处理^[9].

1.4 测量方法

气流混合场轴截面的流场分布结合横截面的流场分布可以有效地反映流场在三维空间的分布情况,因此在本文实验中,对气流混合场轴截面

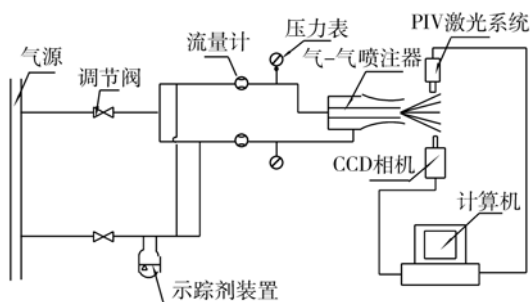


图3 气-气喷注器流动显示实验系统

Fig. 3 Sketch of experiment system

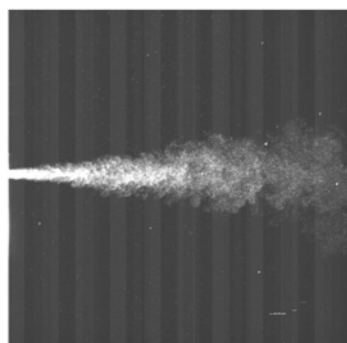
120 mm×120 mm 的范围进行了图像采集,为了观察其三维流场特征,对喷注面下游5 mm 和66 mm处的流场横截面45 mm×45 mm 的范围进行图像采集.为了校准实际测量的流场范围,在实验开始前,将标有刻度的校准尺子置于观测区域获取图像,用于标定CCD的像素与实际测量范围的换算关系,以此可以实现对流场结构的定量测量和标定.

2 实验结果与讨论

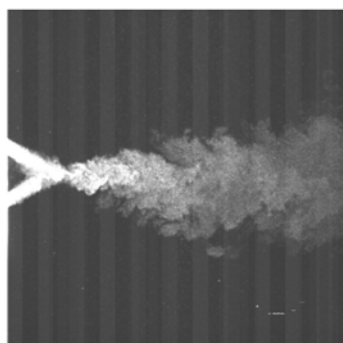
2.1 气-气混合流动显示验证

以互击式气-气喷注器气流流场显示为例,针对单喷和气-气喷注器工作的两种情况,对于氢氧两路分别加示踪粒子的测量结果如图4和图5所示.

从图4可以看出,单喷注器的射流场具有明显的射流特征,随着流动的进行在射流边界上有对涡的形成,出现卷吸现象^[10-12].随着轴向喷射距离的增加,分布区域呈发散状,离子质量分数减小,速度降低.



(a) 1个中心喷孔加粒子



(b) 2个边区60°互击喷孔加粒子

图4 单喷注器混合场流动显示

Fig. 4 Axial section image of single injector

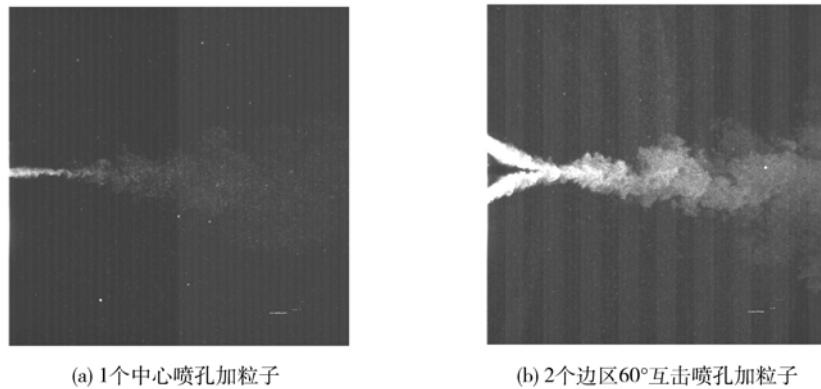


图5 气-气喷注器混合场流动显示

Fig. 5 Axial section image of both injectors

从图5可以看到,当气-气喷注器工作时,流场分布与单喷注器流场有较大区别.对比图4(a)和图5(a),当通入周围气流时,中心气流被迅速打散,气流质量分数急剧减小,流场的大范围扩散在轴向位置上发生得较早.对比图4(b)和图5(b),气-气喷注器工作时可以清晰地看到撞击过程的中心气流的变化过程,有中心气流撞击之后气流分布区域变小.这些现象能清晰地表示单喷注器工作和气-气喷注器工作的差别,同时可以反映两股气流混合过程的变化,因此可结合图5中(a)和(b)两图来进行气-气混合场的流动混合机理分析.

对于互击式喷注器而言,由于气流间强烈的互击作用会带来流动显示的问题.因为气流中加入的示踪粒子直径为微米级的液滴,经过撞击,容易发生聚合现象而形成更大直径的液滴,如图5(b)所示在撞击点之后气流直径先变小再扩散.如果把气流看成是弹性球状分子,那么图中所显

示的示踪粒子撞击过程与真实气流撞击过程是有差别的,有待在下阶段的实验中得到改进.

2.2 气-气混合场轴截面流动显示

三种结构气-气喷注器混合场的轴截面分布测量如图6和图7所示.图6显示的是喷注器中心喷孔加粒子的情况,图7显示的是外围喷孔加粒子的情况.从图中可以看出混合流动仍然保持了明显的射流特征,在混合边界存在卷吸现象.随着轴向喷射距离的增加,粒子分布范围变大,粒子的质量分数减少,说明气流混合越来越均匀.

结合图6和图7可以看到,对于离心式喷注器,在图示的两种情况下从喷注器出口处开始,粒子分布区域没有区别,即表示在喷出气流的同时达到了较好的混合状态,这是由于中心喷嘴的旋流对气流混合起到了很大的作用.对于直流式喷注器,在一定的喷射距离内还保留了中心气流,但由于气流间的卷吸作用在两股气流边界的区分已

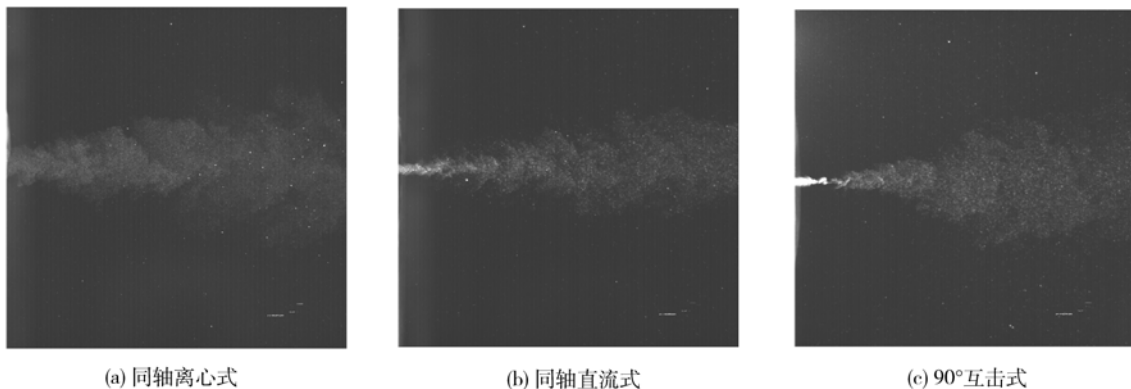


图6 中心加粒子情况下气-气喷注器混合场轴截面显示

Fig. 6 Image of gas-gas injector axial section with particles inside

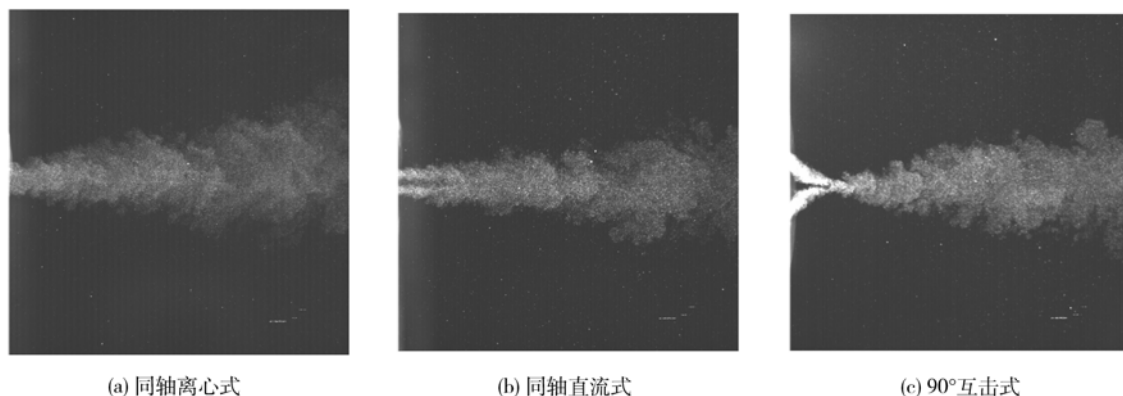


图7 边区加粒子情况下气-气喷注器混合场轴截面显示

Fig. 7 Image of gas-gas injector axial section with particles outside

经不明显,并且整个流动有着典型的单喷孔的射流特征,说明气流掺混发生在两股气流接触面并且与相互的卷吸作用密切相关.对于互击式喷注器,由粒子质量分数分布可以看出,整个流动过程被撞击点分成的三个阶段,第一阶段是各自喷射互不干扰,第二阶段是撞击混合过程,第三阶段是混合扩散过程.在撞击过程中由于气流间存在较大的挤压作用,结合图6(c)和图7(c)可以看到,中心气流截面在撞击面上由大变小表示两股气流急剧混合过程的变化,此过程的气流边界清晰可辨表示了气流间的较强作用力,由此可看出在接触面上的撞击作用是气流混合的主要因素.但是由于撞击作用直接导致了微小油滴示踪粒子的凝聚,可能与实际的气流撞击过程存在一定的差别,但气流流动混合过程的作用机理是相同的.

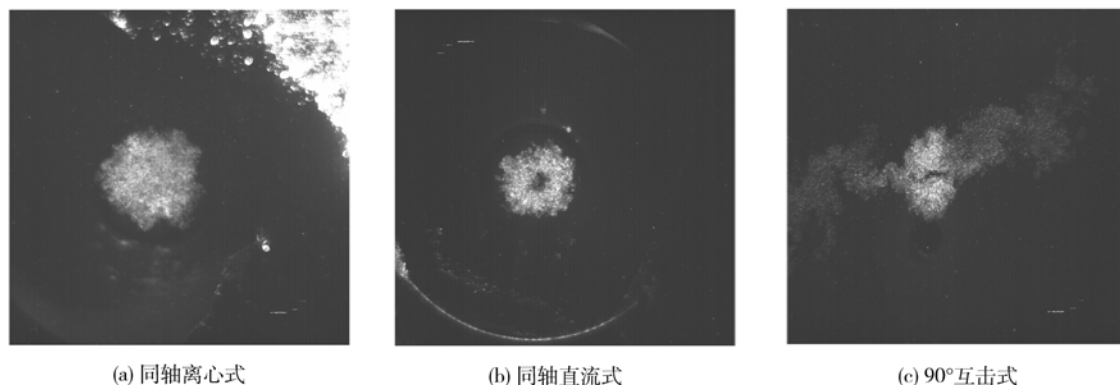
由气流混合场的喷射角可以看到气流的分布范围,离心式喷注器的混合区从喷注面板开始,喷射角较大;直流式喷注器的混合区从混合距离之

后,喷射角较小;互击式喷注器的混合区从撞击点之后开始,喷射角较大.

2.3 气-气混合场横截面流动显示

三种结构气-气喷注器的混合场横截面测量结果如图8和图9所示,分别为距离喷注面板5 mm和66 mm的位置.由截面气流分布可看出,气流分布边界不明显,这种情况亦属于射流特征.

从图8中可以看出,在距离喷注面板较近的位置上,三种不同结构气-气喷注器混合场分布情况明显不同:同轴离心式喷注器横截面气流分布均匀,说明两股气流混合均匀;同轴直流式喷注器气流截面仍保留了中心气流,说明内外两股气流尚未混合均匀;对于互击式喷注器,此测量位置在撞击点之前1.5 mm,由于喷射角度的原因使得中心气流的分布压缩成一条扁平的窄缝,说明气流中心存在较大的挤压作用,同时由于挤压作用使得气流向垂直于撞击面的方向流动.

图8 边区加粒子情况下气-气喷注器混合场 $x=5$ mm 处横截面流场显示Fig. 8 Image of gas-gas injector cross section with particles outside at $x=5$ mm

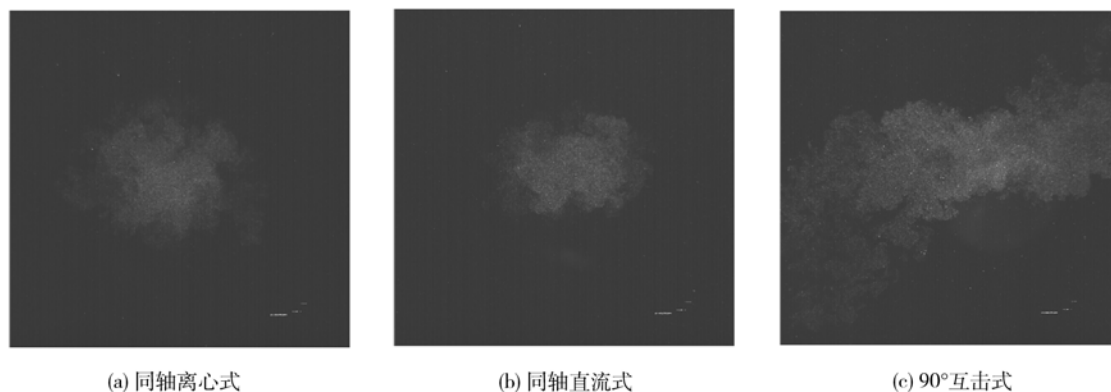


图9 边区加粒子情况下气-气喷注器混合场 $x=66\text{ mm}$ 处横截面流场显示

Fig. 9 Image of gas-gas injector cross section with particles outside at $x=66\text{ mm}$

从流场分布区域来看,两种同轴式结构气流流场保持了对称分布,互击式结构气流流场具有明显的三维流动特征.相比同轴直流式喷注器气流分布,同轴离心式喷注器气流分布范围更大一些,而互击式喷注器气流流场有向垂直于设计撞击面方向流动的趋势,设计撞击面即是三喷孔中心与设计撞击点所在的平面.

从图9中可以看出,在距离喷注面较远的位置上,相比图8,随着轴向距离的增加,三种结构气流流场分布范围增加,同轴直流式和互击式流场不再存在中心气流,气流流场分布进一步均匀,且气流流场示踪粒子质量分数大幅度减小.两种同轴式结构气-气喷注器混合场的分布情况趋于一致,但同轴离心式比同轴直流式气流分布范围仍然要大一些.互击式结构气流流场在垂直于设计撞击面的区域具有较大扩散区,并且三维分布特征更加明显.

3 结 论

1) 基于PIV实验系统以液体油滴为示踪粒子,采用两股气流分别示踪的方法对气-气喷注器混合场开展了气-气混合流动显示实验研究,实验结果验证了该实验方法的可信性和有效性,但对于有气流撞击情况,流场显示存在误差.

2) 通过结合轴截面气流分布图像和横截面气流分布图像,可以得到气流混合场的三维气流分布情况,有助于建立对气流混合过程更全面的理解.

3) 根据PIV实验系统图像测量结果,定性的对比分析了三种结构气-气喷注器气流混合场的分布特点和气流混合过程的主要作用因素:①对

于离心式喷注器,气流混合发生在喷注器出口处,混合气流呈对称分布,区域较大,中心喷嘴旋流作用对气流混合影响最大;②对于直流式喷注器,气流混合发生在两股气流的接触面上,混合气流对称分布,分布区域较小,气流间的卷吸作用控制着气流混合过程;③对于互击式喷注器,气流混合从两股气流的撞击点开始发生,混合气流具有明显的三维分布特征,分布区域靠后,范围较大,撞击作用是影响气流混合的主要因素.

致谢:

对北京航空航天大学流体力学研究所申功炘教授及张永刚博士的热心指导和帮助表示感谢!

参考文献:

- [1] Davis J A, Campbell R L. Advantages of a full-flow staged combustion cycle engine system[R]. AIAA 97-3318, 1997.
- [2] Calhoon D F, Ito J I, Kors D L. Investigation of gaseous propellant combustion and associated injector/chamber design guidelines[R]. NASA CR-121234, 1973.
- [3] 徐玉明,迟卫,莫立新. PIV测试技术及其应用[J]. 舰船科学技术, 2007, 29(3): 101-105.
XU Yuming, CHI Wei, MO Lixin. PIV measurements technique and its application[J]. Ship Science and Technology, 2007, 29(3): 101-105. (in Chinese)
- [4] 熊霏,姚朝晖,郝鹏飞,等. 冲击射流的PIV实验研究[J]. 流体力学实验与测量, 2004, 18(3): 68-72.
XIONG Fei, YAO Chaohui, HAO Pengfei, et al. PIV investigation of impinging jet[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2004, 18(3): 68-72. (in Chinese)
- [5] 马宏伟,蒋浩康. 扩压叶栅端壁区旋涡流动显示研究[J]. 航空动力学报, 1997, 12(3): 258-262.
MA Hongwei, JIANG Haokang. Flow visualization of flow field in endwall region of a compressor cascade[J]. Journal of Aerospace Power, 1997, 12(3): 258-262. (in Chinese)

- [6] 胡华,刘书亮,王天友,等. 关于测量内燃机缸内流场用示踪粒子的研究[J]. 小型内燃机与摩托车, 2002, 31(1): 5-8.
HU Hua, LIU Shuliang, WANG Tianyou, et al. An investigation into tracer particles for air flow in cylinder of IC engine[J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2002, 31(1): 5-8. (in Chinese)
- [7] 王希麟. 流动显示技术在多相流检测中的应用[C]//第五届全国流动显示学术会议论文集. 烟台: 中国力学学会, 2002.
- [8] 代钦,魏润杰,黄湛,等. 超音速喷流 DPIV 瞬时速度场实验测量[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(6): 665-669.
DAI Qin, WEI Runjie, HUANG Zhan, et al. Experimental study of supersonic jet flow using DPIV[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(6): 665-669. (in Chinese)
- [9] 魏润杰,申功炘. DPIV 系统研制及其应用[J]. 流体力学实验与测量, 2003, 17(2): 88-92.
WEI Runjie, SHEN Gongxin. The research of DPIV system and its application[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2003, 17(2): 88-92. (in Chinese)
- [10] 余常昭. 紊动射流[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
YU Changzhao. Turbulence jets[M]. Beijing: Higher Education Press, 1993. (in Chinese)
- [11] 平浚. 射流理论基础及应用[M]. 北京: 宇航出版社, 1995.
PING Jun. Jets elements and applications[M]. Beijing: China Astronautics Publishing House, 1995. (in Chinese)
- [12] 赵承庆,姜毅. 气体射流动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.
ZHAO Chengqing, JIANG Yi. Gas jet dynamics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1998. (in Chinese)