

固冲补燃室内流场冷流模拟及显示^{*}

李宇飞, 何国强, 刘佩进, 魏祥庚, 董 昊

(西北工业大学 航天工程学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 为了获得对固冲补燃室内混合的认识, 以气体为介质进行了补燃室内流场的模拟, 通过在气流中播入粒子, 利用激光片光成像获取了补燃室内的混合图像。对获取的不稳定的连续图像进行处理, 获得了可用的稳态混合图像。另外, 对其进行伪彩色处理获得了令人满意的结果, 与测温法获得的数据进行了比较, 结果表明, 处理结果是可靠的, 这种冷流模拟显示的方法可以用于固冲补燃室内的混合研究。

关键词: 固体燃料冲压发动机; 加力燃烧室; 流动分布; 混合; 图像处理

中图分类号: V235.213 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2005) 05-0404-05

Cold flow simulation and visualization of SDR secondary combustor inner flow field

LI Yu-fei HE Guo-qiang LU Pei-jin WEI Xiang-geng DONG Hao

(Coll. of Astronautics, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

Abstract To obtain the knowledge of mixing in secondary combustor of ducted rocket, cold flow simulation of secondary combustor using gas was carried out. In this experiment particles were seeded in "fuel" flow and then mixing images were obtained by illuminating the cross-sectional planes of interest with a laser sheet. Continuous unsteady images were processed in order to gain available steady image. In addition pseudo color was used to get satisfied results. Results obtained from processed image were compared with data obtained from temperature measurement method. It indicates processed results are credible and this method can be used to investigate mixing in secondary combustor.

Key words Solid fueled ram jet; Afterburner; Flow distribution; Mixing; Image processing

1 引 言

在固体火箭冲压发动机中, 设计优良的补燃室可以大大提高固体火箭冲压发动机的二次燃烧效率, 缩短二次燃烧所需要的长度, 从而可以提高导弹的性能或减轻其重量。二次燃烧所需要的长度取决于一次流与二次流充分混合所需要的长度。充分混合所需要的长度越短, 一次流进行完全的二次燃烧所需要的长度也就越短, 补燃室也就可以设计得更加短小。因此进行补燃室内流动与混合的研究对于提高固体火箭冲压发动机性能有着重要的意义。

国内外很多机构都对固体火箭冲压发动机补燃室内混合进行了研究。美国阿拉巴马大学的 Brophy 和 Hawk 对四进气道构型的模型进行了详细的研

究^[1~3]。在以水为介质的冷流实验中, 采用在二次流中加入 0.0254cm 的聚苯乙烯小球, 加激光片光照射成像的方法对混合进行流动显示。另外还在冷试条件下, 用雷曼谱仪对甲烷/空气的混合进行了可视化研究。在荷兰与加拿大的一个合作研究计划下, Mayer 和 Stowe 利用水为介质对互成 90° 的双下侧进气道构型的固体火箭冲压发动机模型开展了冷流实验研究^[4,5]。为了对混合的细微结构进行研究, 利用空化效应在代表燃料的水流中生成了微气泡。法国 ONERA 的 Ristori 等人用加入荧光染色剂的水流模拟燃料, 用激光片光照射成像的方法对补燃室中的混合进行了研究^[6]。另外还用 LDV 在冷空气流实验进行了速度测量。我国航天科工集团公司 31 所王卫东等人采取在水流中加入聚乙烯甲苯丁二烯小球的

* 收稿日期: 2004-11-15 修订日期: 2005-04-18

作者简介: 李宇飞 (1978—), 男, 博士生, 研究领域为航空宇航推进理论与工程。E-mail: skyscar@tm.com

方法,成功开展了整体式冲压发动机侧面分流突扩燃烧室的非稳态流场显示实验,然而此实验中所用的模型为简化的二维对称构型,在三维构型(如双下侧进气道构型)中能否取得如此好的结果还需进一步研究,而且本实验进行的只是流场结构显示,并未涉及混合^[7]。

总的来看,对固冲发动机混合的研究大多采用以水为介质的冷流实验。与真实的进行二次燃烧的固冲发动机内流场相比,以水为介质的冷流实验雷诺数偏低,以空气为介质的冷流实验雷诺数偏高。由于水流实验雷诺数超过一定值之后,雷诺数的改变对实验结果影响不大,水流实验的雷诺数可以满足要求。然而气体的可压缩性对实验结果还有一定的影响,Brophy 和 Hawk 进行的实验表明了这一点^[3]。另外 Mayer 和 Stowe 所作的计算也表明两者有一定的区别^[5],所以,进行气流冷流实验还是有实际意义的。在国外所进行的气流冷流实验中,由于价格的原因,雷曼谱仪不是任何一个研究机构都可以配备的。LDV 每次只能进行单点测量,如果要获得整个流场的结构,就需要进行大量的重复实验,而且这种测量方式对实验模型有严格的要求。

本文基于粒子散射,利用片光技术进行气流冷流实验的流动显示。这项技术只需要使用简单的激光片光系统和 CCD 摄像机,将获得的图像经过计算机处理之后即可获得固冲二次燃烧室整个横截面的流场信息,为固冲发动机的研究提供了很大的便利。

2 实验系统

可视化实验所使用的气路系统(见图 1)包括一次流模拟系统和二次流模拟系统,二次流(通过进气道的空气)模拟系统的气源为 40m^3 的气罐(最高压强为 1MPa);一次流的气源为 0.45m^3 的高压氮气罐(最高压强为 4MPa)。为了进行流动显示,在一次流中加入粒子。具体方法是分流一部分一次流气体进入粒子储存罐,驱动粒子进入一次流。实验中所使用的粒子为 $50\mu\text{m}$ 的滑石粉。本文所用的片光源为 5W 的水冷式氩离子激光器,连续输出波长 514.5nm 的绿光,波长 488nm 的蓝光以及波长 476.5nm 的紫光。氩离子激光器产生的激光通过光纤耦合器进入光纤,到达片光镜头产生 1mm 厚的激光片光。图像采集系统采用 Kodak Megaplug ES310 CCD 摄像头,最高拍摄速度达 85f/s 采集图像为 648×482 的 256 级灰度图。摄像头采集的图像传输到计算机内存保存,现有

计算机配制可以保证连续记录 1456 幅图像。为了充分利用 CCD 摄像头的分辨率,将所要摄取的图像取至最大,在现有镜头的基础上,将 CCD 摄像头与实验器轴线成 40° 角放置。

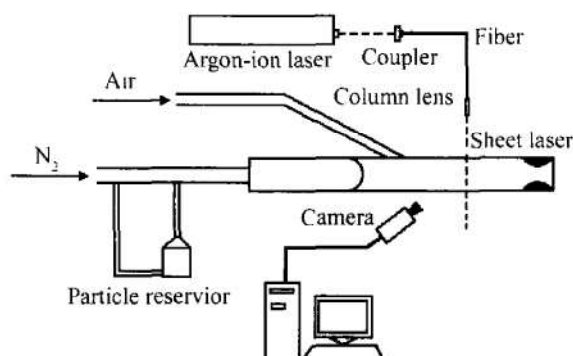


Fig 1 Schematic of particle scatter experiment arrangement

实验模型为有机玻璃制成的双下侧进气道构型(见图 2)。进气道与发动机夹角为 45° ,进气道互成 90° 角。补燃室内径 110mm ,进气道截面为 $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 的矩形。一次流喷管为七孔球头构型的亚临界喷管(见图 3)。头部距离(一次流喷管与进气道中心之间的距离)为 120mm 。

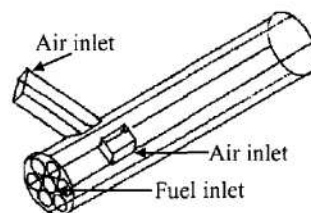


Fig 2 Basic geometry

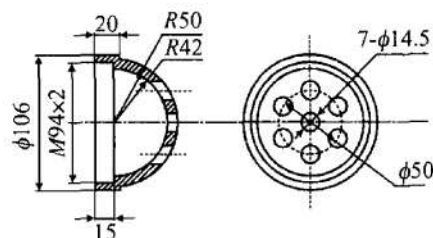


Fig 3 Schematic of fuel injector

3 实验结果分析

在二次空气流量为 0.237kg/s 一次氮气流量为 0.054kg/s 补燃室压强为 0.36MPa 补燃室内雷诺数为 1.46×10^5 ,动量比为 8.776 的工作条件下,进行了 40s 的实验。其间以 85f/s 的速度拍摄了 1456 幅图像,典型的实验图像如图 4。



Fig 4 Experiment image frame 206-210(from left to right)

由图 4可以看出摄取图像为灰度分布图,由参考文献[8]可知散射光强与粒子在片光中的滞留时间以及粒子浓度有关。通常认为 $2\pi r/\lambda > 20$ (λ 为入射光波长)时粒子的散射为无选择性的几何散射,其散射强度与粒子的截面积成正比,本文所选用的粒子尺寸与此吻合。假设片光截面上光强处处相等,可以导出图像上各像素灰度值的函数为

$$P = \sum_{i=1}^N \left| \alpha_i (\pi r_i^2) \left| \frac{h}{v_i \cos \phi_i} \right| \right| \quad (1)$$

式中 P 为图像上各像素的曝光强度(即灰度); N 为曝光时间内成像在 CCD 特定像素上的粒子数; α 为摄像头对粒子散射光的接收系数; r 为粒子半径; h 为片光厚度; v 为粒子运动速率; ϕ 为粒子运动方向与片光面法向的夹角。

在本实验中,可以认为在同一截面上 α , r , v 和 ϕ 近似相等,因此图像上各像素灰度值就正比于曝光时间内成像在 CCD 特定像素上的粒子数 N ,也就是粒子浓度值。由上式可知,通过精确的控制粒子加入量,可以获得流场混合的定量数据。

从连续图像中可以看出不同时间同一截面上的流动图像的差别很大,这可能是由于存在较强的大尺度不规则脉动引起的。这说明尽管气体冷流实验只比水流实验雷诺数高一个数量级,然而湍流脉动效应却要强烈得多。这样的实验结果与研究带来了巨大的困难,因为任何一幅图像都无法代表全体来说明问题。

4 实验数据处理

由于实验获得的图像呈现出强烈的湍流脉动特性,借鉴湍流理论中时均的做法,对获取的图像序列进行加和平均,获得时均过的稳定图像,进行这项操作需要解决如下两个问题。

首先,因为散射光强度与播入的粒子量相关,要获得时均稳态图像,加和平均需要从播入粒子量达到稳定的时刻开始。由于本实验中粒子播入量还无法精确控制,本文由测试图像获取粒子播入量开始稳定的时间点。图 5 给出了三个像素点 (360, 340)、

(360, 240) 和 (360, 140) 的灰度值随帧数变化的情况,曲线呈现出强烈的湍流脉动特征。从图中可以看出 200 帧图像之后,播入的粒子量达到稳定。

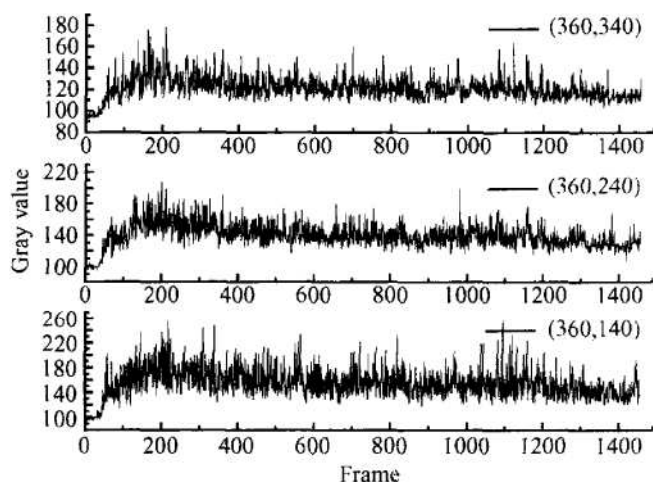


Fig 5 Gray value of one pixel

另一个问题是加和平均的图像数达到多少,才能收敛形成稳态图像。图 6 给出了从第 200 帧 400 和 600 帧开始,像素点 (360, 240) 的灰度值随加和平均图像数的增加而变化的情况。从图中可以看出 50 帧图像加和平均后就可以得到稳态解,本文所作的加和平均图像数达到了 200。

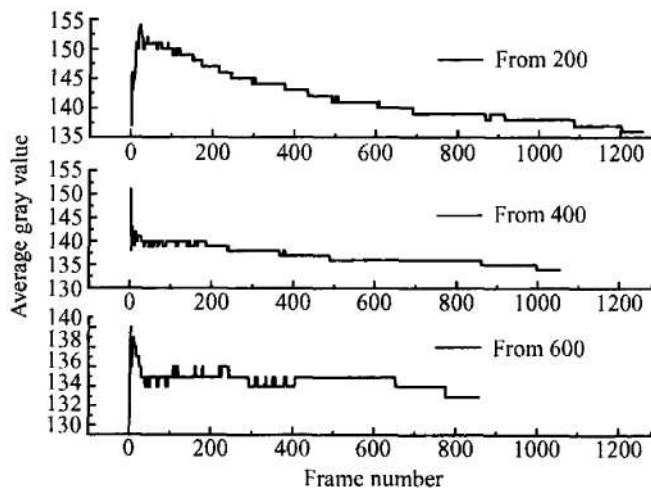


Fig 6 Averaged gray value of one pixel

本文对 200~400 帧图像进行加和平均获得图 7

(a), 从图中可以看出背景光的干扰较强。选定没有加入粒子时获得的一幅图像作为背景图, 对图 7(a) 进行去背景处理得到图 7(b)。从图 7(b) 可以看出背景基本全部消去, 然而画面较暗, 难以看出灰度分布。由于人眼对颜色比较敏感, 对图 7(b) 进行了伪彩色处理, 得到图 8 结果令人满意。

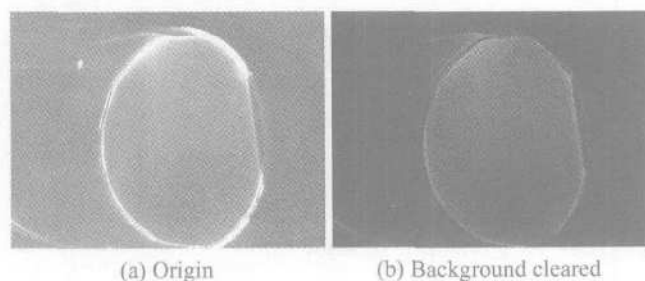


Fig 7 Averaged image of frame 200~ 400

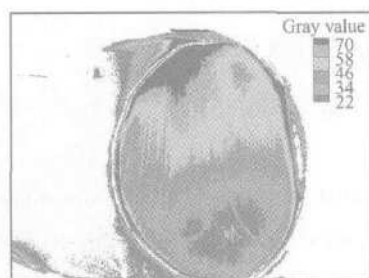


Fig 8 Pseudo color visualization

从图 8 可以看出, 在补燃室上部燃料浓度较高, 下部有一个贫燃料空洞。补燃室两侧燃料浓度适中, 并且形成两个向上翻卷的涡。图像中还可以看到在圆形补燃室截面上部还有一个亮度较高的区域, 那是补燃室上部高强度的散射光照射在补燃室内壁面, 从壁面反射至镜头内形成的。另外在补燃室截面边缘部分亮度也较高, 其原因是粒子粘附在壁面使得壁面散射光强度增加。从图中还可以看到补燃室截面上有放射状条纹分布, 产生的原因是模型所用的有机玻璃管的制造工艺使得补燃室管壁形成沿轴向的条纹, 从而引起入射激光强度变化。这 3 个问题都是加入粒子之后出现的, 因此去背景操作没有将其消除。

5 数据处理结果校验

为了验证图像处理结果的正确性, 用测温法对一次流/二次流之间的混合进行了研究(图 9)。具体方法就是用一个总压 4MPa 总温 1448K 的固体燃料燃气发生器产生的热气流代替冷流实验中加入粒子的氮气流, 实验器构型以及测量位置完全相同。为了保

证燃气发生器正常工作, 同时满足非壅塞式固冲发动机的实验要求, 本文使燃气发生器产生的超声速的燃气流通过一道正激波转变为亚声速气流后通过一次喷管。本实验中一/二次流的动量比与成像法实验中的基本一致, 补燃室压强为 0.37MPa 补燃室内雷诺数为 8.71×10^5 。本实验中雷诺数虽然较大, 然而两实验雷诺数处于同一量级。根据文献[5]的论述, 雷诺数在 10^5 量级时, 雷诺数的影响可以忽略, 因此两个实验结果具有可对比性。温度采用 K 型热电偶测温耙来采集, 由于热电偶具有一定的响应滞后, 可以保证测量结果的稳定。

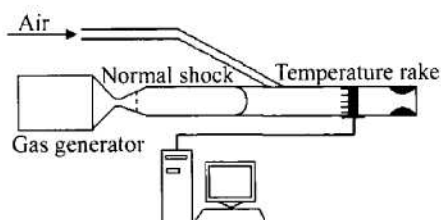


Fig 9 Schematic of temperature measurement arrangement

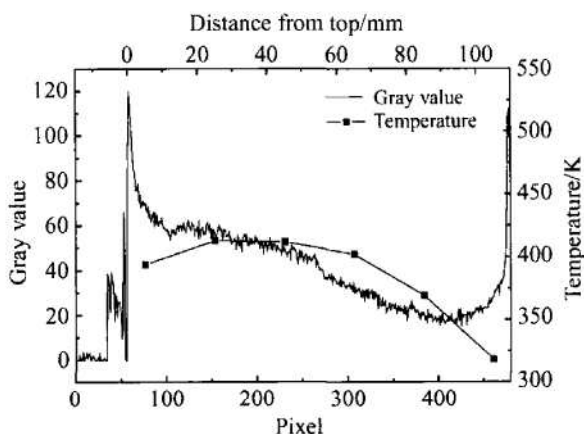


Fig 10 Comparison of the results from two different methods

将图 7 测试截面中线的数据取出, 与测温法获得的结果进行比较(见图 10)。很明显可看出两种方法获得的曲线都可分为高浓度区和低浓度区两段, 高浓度度区的梯度较小, 低浓度度区的梯度较大。这说明上文所进行的数据处理是成功的。所不同的是靠近壁面的边缘部分, 成像法获得的结果在边缘处浓度会有突跃式的增加, 这可能是粒子粘附在壁面使得壁面处散射光强度增大导致的; 测温法获得的结果在边缘处显示浓度会有一定的下降, 这可能是冷的发动机壁面使气流产生热损失, 造成壁面处气流温度降低引起的。本文所用方法在边缘处的取值还需要进一步研究。

(下转第 412 页)

参考文献:

- [1] Viskanta R. Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1980, 6: 111~134
- [2] Hollworth B R, Berry R D. Heat transfer from arrays of impinging jets with large jet-to-jet spacing [J]. *ASME Journal of Heat Transfer and Mass Transfer*, 1978, 24: 407~419
- [3] Goldstein R J, Seol W S. Heat transfer to a row of impinging circular air jets including the effect of entrainment [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1991, 34: 2133~2147
- [4] Bouchez J P, Goldstein R J. Impingement cooling from a

circular jet in a cross flow [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1975, 18: 719~730

- [5] Sang Woo Lee, Sang Won Park, Joon Sik Lee. Flow characteristics inside circular injection holes normally oriented to a crossflow: (I) Flow visualizations and flow data in the symmetry plane [J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 2001, 123: 266~273
- [6] Florschuetz L W, Isoda Y. Flow distributions and discharge coefficient effects for jet array impingement with initial crossflow [J]. *ASME Journal of Engineering for Power*, 1983, 105: 296~304

(编辑: 郭振伶)

(上接第 407 页)

6 结 论

(1)通过加入粒子进行以气体为介质的固冲发动机内流场冷流模拟及显示是可行的,然而常规的图像采集方法只能获得不稳定的实验图像,为了获得有用的实验结果需要进行图像处理。

(2)应用本文的图像处理方法,对连续拍摄的不稳定图像进行处理,可以获得稳定的,效果良好的反映内流场混合情况的图像,处理图像表明固冲内流场是十分复杂的。

(3)将从经过处理的图像中获得的结果与使用测温法获得的结果相比较,发现两者具有高度的一致性,这说明图像处理结果是可靠的。

(4)利用测温法也可以进行固冲内流场的测量,然而由于空间限制只能获得很少的几个点的流场数据。

参考文献:

- [1] Brophy C, Hawk C. Mixing and combustion studies of four-inlet side dump combustors [R]. AIAA 96-2765
- [2] Brophy C, Hawk C. A flow visualization facility for ducted

rocket engine mixing studies [R]. AIAA 95-2934

- [3] Brophy C, Hawk C. An investigation of four-inlet ducted rocket engine flameholding characteristics [R]. AIAA 97-2846
- [4] Mayer A E H J, Stowe R A. Experimental study into mixing in a solid fuel ducted rocket combustion chamber [R]. AIAA 2000-3346
- [5] Stowe R A, De Champlain A, Mayer A E H J, et al. Modeling and flow visualization of mixing in a ducted rocket combustor [R]. AIAA 98-3768
- [6] Ristori A, Heid G, Cochet A, et al. Experimental and numerical study of turbulent flow inside a research SDR combustor [R]. AIAA 99-2814
- [7] 王卫东,刘兴洲.侧面突扩燃烧室冷态流场可视化研究 [J]. 推进技术, 1994, 15(4). (WANG Weidong, LIU Xingzhou. Flow visualization and 3-D numerical study on cold flow field in a side dump combustor [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1994, 15(4).)
- [8] 范洁川.近代流动显示技术 [M]. 北京:国防工业出版社, 2002

(编辑: 梅 瑛)