

# 激励射流在超声速流场中的混合特性研究<sup>1)</sup>

顾声龙 陈立红<sup>2)</sup> 顾洪斌 李 飞 卫 喆 张新宇

(中国科学院高超声速科技中心, 北京 100190)

(中国科学院力学研究所高温气体动力重点实验室, 北京 100190)

**摘要** 将 Hartmann-Sprenger(H-S) 管集成到传统射流装置中形成激励射流, 研究其在超声速流场中的混合特性. 设计了 3 种频率的 CO<sub>2</sub> 激励射流, 将其横向注入  $Ma = 2.5$  的均匀超声速来流当中. 采用平面激光散射技术对其进行瞬态可视化成像, 利用组分采样进行时均分析. 结果表明: H-S 激励射流可以有效提高射流穿透深度, 形成较大尺度结构, 从而获得较好的混合效果.

**关键词** 激励射流, 超声速混合, 穿透深度, 大尺度结构

**中图分类号:** O354.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0459-1879(2010)05-0957-05

## 引 言

超燃冲压发动机要求空气和燃料在有限的空间和时间内形成高效混合燃烧, 燃料与空气的混合过程及程度决定着超燃发动机的性能. 其主要难点是: 在高超声速来流中, 燃料需有较大的穿透深度, 使之与来流形成高效混合, 为组织高效燃烧提供基础.

燃料的注入方式主要有横向射流及平行射流. 横向射流可以产生较大的穿透深度但不可避免地伴随着较大的总压损失; 而平行射流与横向射流正好相反, 有较小的总压损失, 但穿透深度非常小.

鉴于两种方式的缺点, 国内外做了许多研究, 发展出更多增强混合的方法, 比如激励射流. 激励射流一方面作为扰动源来刺激边界层内的脉动量, 使其变成不稳定的扰动; 另一方面可以用于放大射流剪切层的特性. Randolph 等<sup>[1]</sup> 研究了超声速来流下, 横向激励射流的效果. 结果表明在相同的射流压力下, 1 Hz 的激励射流比定常射流的穿透深度增大了 12%. Gutmark 等<sup>[2]</sup> 对于高频激励射流的研究表明, 按一定频率激励的射流对于穿透深度有着积极的影响.

Hartmann-Sprenger(H-S) 管是一种结构简单的装置, 如图 1 所示. 其由欠膨胀射流喷管与共轴的共振管组成, 有几个重要参数: 喷管压力比  $R$ 、喷管出口直径  $D_j$ 、共振管直径  $D_t$ 、共振管长  $L$  和管

间距  $X$ . H-S 管有两种工作模式, 吞吐模式和尖叫模式, 其中在吞吐模式下可以产生高频大幅度的气流振荡<sup>[3]</sup>.

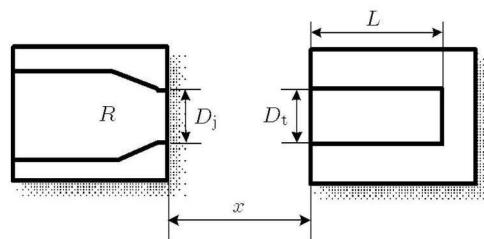


图 1 Hartmann-Sprenger 管示意图

Fig.1 Hartmann-Sprenger tube

采用 H-S 管作为高频发生器, 将其集成到传统的射流装置中, 这样产生按一定频率脉动的射流气体. 主要研究在不同频率激励下, 横向射流在  $Ma = 2.5$  的来流下的混合情况.

## 1 实验装置

图 2 是激励射流装置的示意图, 中间部分就是 H-S 管. 激励射流装置由一定压力、一定温度的气源供气. 其出口直径  $D_e$  为 5 mm, 出口外是按一定频率脉动的欠膨胀射流气体.

H-S 管在实验中处于吞吐模式, 除共振管长  $L$  外, 其他参数值固定. 通过改变共振管  $L$  可以获得

2009-12-09 收到第 1 稿, 2010-07-01 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金资助项目 (90305022, 10525212, 10621202).

2) E-mail: lhchen@imech.ac.cn

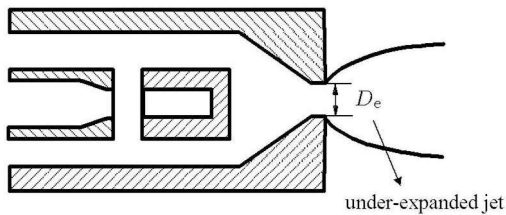


图 2 激励射流装置示意图

Fig.2 Excited jet device

所需要的频率. 本文主要考察了 1 kHz, 1.4 kHz, 5.2 kHz 激励的情况, 并与无激励时的情况进行了比较.

图 3 是超声速直联实验台, 实验所需高温高压气体由烧氢补氧加热器提供, 经喷管加速到  $Ma = 2.5$ , 进入隔离段、第一、第二实验段以及尾喷管.

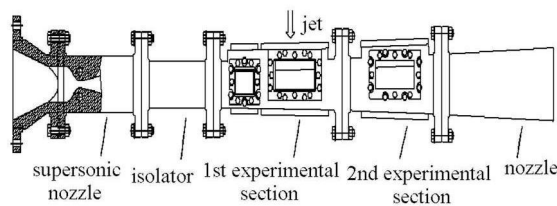


图 3 超声速直联实验台

Fig.3 Direct-connected supersonic test facility

本文直联台气流参数为:  $Ma = 2.5$ , 总温约为 970 K, 总压约为 1.26 MPa. 实验中的射流位置如图 3 所示, 用  $CO_2$  作为射流气体, 射流总压为 0.65 MPa. 在射流孔下游 70 mm 处设有采样探针 (如图 4 所示). 本文在  $CO_2$  射流中加入纳米粒子, 利用 YAG 固体脉冲激光器 (每个脉冲约为 10 ns), 采用平面激光散射技术对  $CO_2$  在超声速来流中的穿透深度以及射流剪切层进行可视化测量.

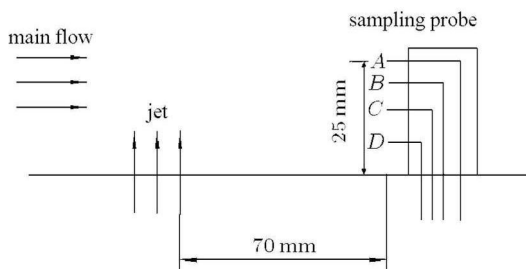


图 4 采样位置示意图

Fig.4 Location of sampling

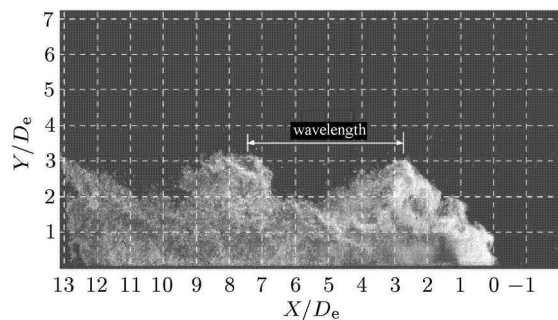
## 2 实验结果

### 2.1 瞬态散射结果

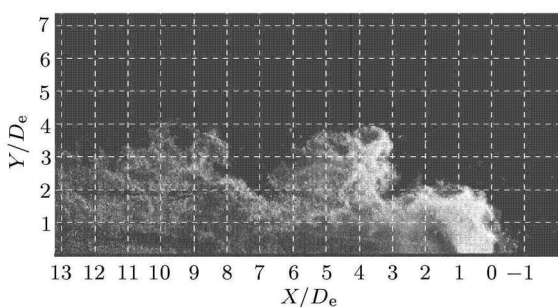
图 5 中虚线方格的边长都是射流出口直径  $D_e$ ,

即用射流出口直径来无量纲化空间坐标. 在不同激励频率下, 所给出的结果是两个随机时刻的结果.

图 5 给出了无激励射流, 也就是传统横向射流的工况下的散射图像. 从两个不同时刻 (随机时刻, 下同) 的图像上可以看到,  $CO_2$  射流的最大穿透深度主要位于  $3D_e \sim 4D_e$  之间. 在射流剪切层处, 存在大尺度结构, 且无激励下的大尺度结构的波长大概在  $5D_e \sim 6D_e$  之间. 大尺度结构伴随着低穿透区与高穿透区的交替, 而由于 Kelvin-Helmholtz(K-H) 不稳定性的原因, 射流剪切层内有小尺度涡结构存在. 小尺度涡在大尺度结构的输运下, 使  $CO_2$  射流扩展到高速空气中, 因此这些大尺度结构直接影响着  $CO_2$  与空气的混合过程及程度.



(a)

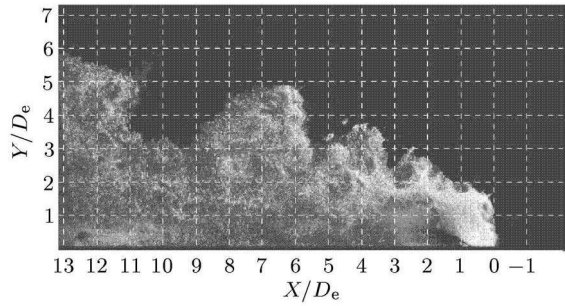


(b)

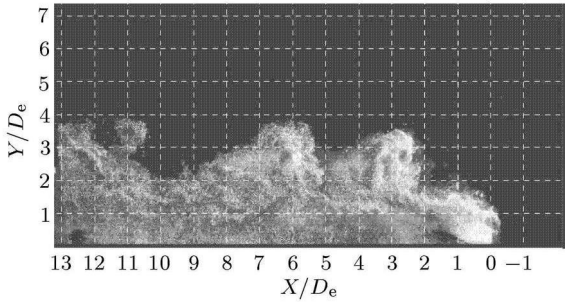
图 5 无激励射流的两个不同时刻散射图

Fig.5 Scattering images of unexcited jet at two random moments

图 6 是 1 kHz 激励下, 两个不同时刻的散射图像.  $CO_2$  射流的最大穿透深度明显增加到  $4D_e \sim 6D_e$ , 而且大尺度结构的波长有所减小, 在视场范围内大尺度结构的数量比无激励的情况要多, 相应的高穿透区的深度也要比无激励情况的大. 而大尺度结构波长的减少, 振幅的增加, 会使燃料与空气的接触面积增加, 这样燃料和空气的混合就更充分. Lee 等<sup>[4-5]</sup>指出超声速燃烧主要发生在射流剪切层



(a)



(b)

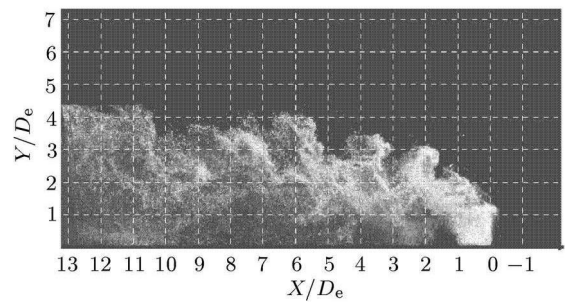
图 6 1 kHz 激励射流的两个不同时刻散射图

Fig.6 Sattering images of 1 kHz-excited jet at two random moments

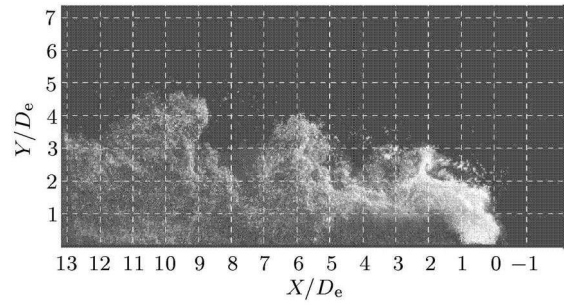
内，增加燃料和空气的接触面积可以提高潜在火焰面的数量或者更大的可燃区域，这会有利于燃烧效率的提高。

图 7 是 1.4 kHz 激励下，两个不同时刻的散射图像。图中表明 1.4 kHz 激励的结果与 1 kHz 激励的结果相似，但还是有所差别：一方面最大穿透深度有所减少，大约在  $4D_e \sim 5D_e$ ，但相对于无激励的情况最大穿透深度还是有所增加；另一方面大尺度结构的波长比 1 kHz 激励下的更小。

图 8 是 5.2 kHz 激励下，两个不同时刻的散射图像。在此激励频率下的混合效果与前两种激励的效果差不多。最大穿透深度大约在  $4D_e \sim 5.5D_e$ ，大尺度结构的波长也比前两种工况下的小。



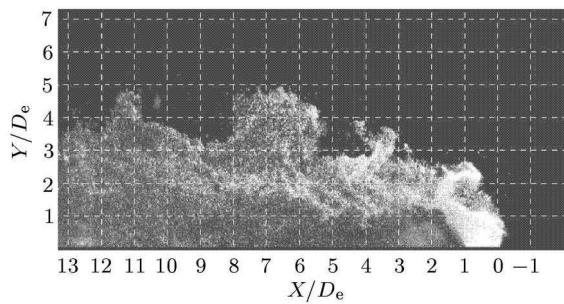
(a)



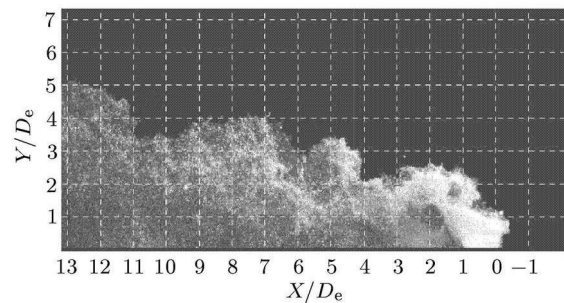
(b)

图 7 1.4 kHz 激励射流的两个不同时刻散射图

Fig.7 Sattering images of 1.4 kHz-excited jet at two random moments



(a)



(b)

图 8 5.2 kHz 激励射流的两个不同时刻散射图

Fig.8 Sattering images of 5.2 kHz-excited jet at two random moments

通过对瞬态散射图像的分析，可以得到如下结论：(1) 有激励的情况下的混合效果要比无激励情况下的好得多，比如穿透深度大，大尺度结构多。(2) 在 1 kHz 激励下，有较大的穿透深度，而在 5.2 kHz 激励下，大尺度结构波长较小。(3) 激励射流影响着射流剪切层的流动。

### 2.2 CO<sub>2</sub> 混合指标分布

从散射图像上得到的是瞬态的流动信息，那么 CO<sub>2</sub> 浓度的分布则是时均结果。为了比较混合效

果, 定义如下混合指标

$$\eta = \frac{C_{\text{measured}}}{C_{\text{ideal}}}$$

式中

$$C_{\text{ideal}} = \frac{\dot{W}_{\text{CO}_2}}{\dot{W}_{\text{CO}_2} + \dot{W}_{\text{exp.gas}}}$$

其中  $C$  表示浓度,  $\dot{W}$  表示摩尔流量. 利用本实验室自主研发的超声速气体采样分析系统测量得到实际浓度. 该系统包括采样探针、贮气罐、真空泵和气相色谱仪. 理想浓度是射流的摩尔流量与实验气体的摩尔流量与射流的摩尔流量的总和的比值.  $\text{CO}_2$  射流流量相对于主流流量非常小, 这使理想浓度非常小, 同时采样探针属于点测量且位于流道中心面, 测量的实际浓度比较大, 这样混合指标  $\eta$  是大于 1 的值 ( $\eta = 1$  时, 混合效果最好), 而且指标越小, 说明射流在主流中扩散的程度 (或范围) 越大, 所以本文只用这种混合效率进行对比, 越接近 1 表示混合得越好.

图 9 是射流下游 70 mm 处,  $\text{CO}_2$  的横向混合指标分布, 即图 4 中点  $B, C, D$  的混合指标分布. 从图中可以看到 1 kHz 激励情况下,  $\text{CO}_2$  的混合指标最小且均在 10 左右. 这说明  $\text{CO}_2$  射流在这种情况下能最大程度地扩散到主流中去, 而且混合得比较均匀, 这与从散射图像得到结果是相一致的. 1.4 kHz 与 1 kHz 频率激励的情况相似, 混合得也比较均匀, 混合指标在 13 附近. 相对于其他有激励射流的情况, 5.2 kHz 激励和无激励下的混合效果就要差一些, 混合指标随着离壁面距离的增加, 混合指标变化比较大, 这说明在这 3 种工况下,  $\text{CO}_2$  射流在主流中混合的均匀性不太好.

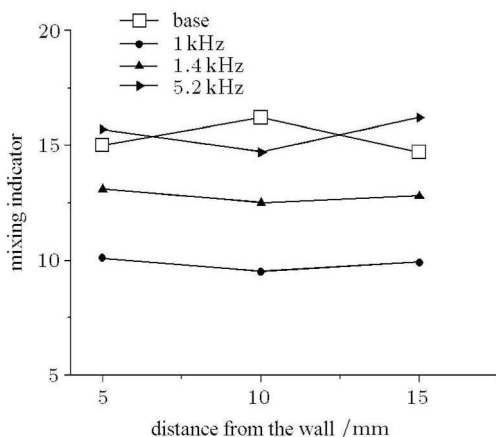


图 9  $\text{CO}_2$  混合指标

Fig.9 Mixing indicator of  $\text{CO}_2$  in the supersonic shear layer

值得注意的是离壁面一定距离外,  $\text{CO}_2$  的浓度是逐渐减少的, 所以在这个范围内一固定点处的  $\text{CO}_2$  浓度可以间接反映穿透深度的大小.

图 10 给出了各种工况下图 4 中所示点  $A$  处的  $\text{CO}_2$  浓度对比. 可以看到  $\text{CO}_2$  浓度在有激励情况下是无激励情况下的 1.5~2 倍, 这间接说明相对于无激励情况, 有激励情况下的  $\text{CO}_2$  可以更深入地扩散到主流中, 有更大的穿透深度. 而在有激励射流工况中, 以 1 kHz 频率激励下的  $\text{CO}_2$  浓度最大, 这说明在此频率激励下, 有最大的穿透深度.

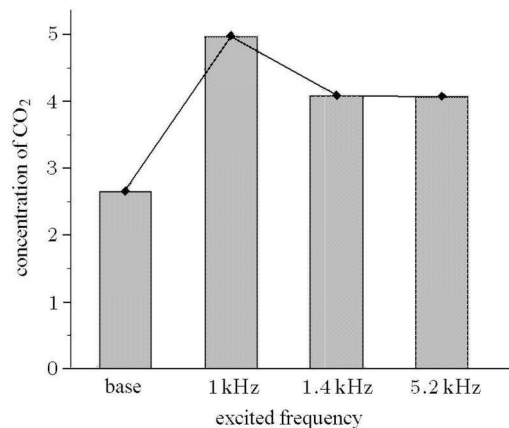


图 10 离壁面 25 mm 处  $\text{CO}_2$  浓度

Fig.10 Concentration of  $\text{CO}_2$  at 25 mm away from the wall

对  $\text{CO}_2$  浓度的分析表明, 相对于无激励射流, 有激励射流有更好混合效果以及更大的穿透深度, 这体现在有激励射流下的混合指标小并且各点的变化幅度非常小, 以及图 10 中点  $A$  的  $\text{CO}_2$  浓度都高于无激励情况. 在各种激励射流中, 以 1 kHz 激励射流效果最好.

### 3 结 论

通过对激励射流的瞬态散射图和  $\text{CO}_2$  浓度分布的分析, 可以得知: 相对于无激励射流, 有激励射流可以产生较多的大尺度结构以及更大的穿透浓度, 这有利于增加燃料与空气的接触面积, 引起更好的混合; 而且在射流剪切层内的混合指标比较均匀, 这说明在有激励情况下, 射流与主流混合得比较均匀, 这也有利于燃烧效率的增加. 在各种工况下, 以 1 kHz 激励情况的混合最好.

### 参 考 文 献

- 1 Randolph H, Chew L, Johari H. Pulsed jets in cross flow. *J Propul Power*, 1994, 10: 746-748

- 2 Murugappan S, Gutmark E. Control of penetration and mixing of an excited supersonic jet into a supersonic cross stream. *Physics of Fluids*, 2005, 17(10): 106101-106113
- 3 顾声龙, 陈立红, 张新宇. H-S 管激励振荡的数值模拟及实验研究. *实验流体力学*, 2009, 23(4): 1-6 (Gu Shenglong, Chen Lihong, Zhang Xinyu. Numerical simulation and experimental investigation of excited oscillation in a H-S tube. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2009, 23(4): 1-6 (in Chinese))
- 4 Lee MP, McMillin BK, Palmer JL, et al. Two-dimensional imaging of combustion phenomena in a shock tube using planar laser-induced fluorescence. AIAA Paper, 91-0460, 1991
- 5 Lee MP, McMillin BK, Palmer JL, et al. Planar fluorescence imaging of a transverse jet in a supersonic cross flow. *Journal of Propulsion and Power*, 1992, 8(4): 729-735

(责任编辑: 周冬冬)

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EXCITED JET IN SUPERSONIC MIXING<sup>1)</sup>

Gu Shenglong Chen Lihong<sup>2)</sup> Gu Hongbin Li Fei Wei Zhe Zhang Xinyu

(*Hypersonic Research Center, CAS, Beijing 100190, China*)

(*Key Lab of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China*)

**Abstract** Hartmann-Sprenger(H-S) tube could generate oscillated flow with high frequency and high amplitude under JRG mode. This article made an excited jet by putting H-S tube into the traditional jet device to investigate its effects on the supersonic mixing. The CO<sub>2</sub> jets excited under three different frequencies were injected into the Mach 2.5 supersonic flow. Planar laser scattering was used to visualize the instantaneous flow while sampling the concentration of CO<sub>2</sub> was used to obtain the time-averaged results. The results showed that the excited jet improved the depth of jet penetration, and made much more large-scale structures, so that it got better mixing in the supersonic flow, especially in the 1 kHz-excited case.

**Key words** excited jet, supersonic mixing, depth of penetration, the large-scale structure

Received 9 December 2009, revised 1 July 2010.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (90305022, 10525212, 10621202).

2) E-mail: lhchen@imech.ac.cn