



CSTAM 2009-0034

## 激励射流在超声速流场中的混合的特性研究

顾声龙 陈立红 顾洪斌 李飞 卫喆 张新宇

中国科学院高超声速科技中心

中国科学院力学研究所高温气体动力学重点实验室

第二届高超声速科技学术会议

2009年11月2-4日 安徽·黄山

# 激励射流在超声速流场中的混合的特性研究

顾声龙 陈立红 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：** Hartmann-Sprenger (H-S) 管处于吞吐模式下可以产生高频高幅度的气流振荡。本文将 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。本文设计了三种频率的  $\text{CO}_2$  激励射流，将其横向注入马赫数 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、测量总压进行时均分析。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，同时总压损失也较低。

**关键词：** 激励射流 超声速混合 穿透深度 大尺度结构

## 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，使燃料有较大的穿透深度，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。

鉴于二种方式的缺点，国内外又做了许多研究，发展出更多的增强混合的方法，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<sup>[1]</sup>研究了超声速来流下，横向激励射流的效果。其结果表明在相同的射流压力下，1Hz 的激励射流比定常射流的穿透深度增大了 12%。Gutmark<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 $L$ 以及管间距 $X$ 。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。

图 1 Hartmann-Sprenger 管示意图

本文采用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。本文主要研究在不同频率激励下，横向射流在马赫数为2.5的来流下的混合情况。

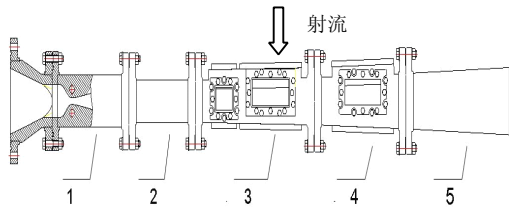
## 1 实验装置

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5mm，出口外是按一定频率脉动的欠膨胀射流气体。



图 2 激励射流装置示意图

H-S管在实验中处于吞吐模式下，除共振管长L外，固定其它参数值。通过改变共振管L可以获得所需要的频率。本文主要考察了900Hz、1.3kHz、5kHz激励的情况，并与无激励时的情况进行了比较。



1-喷管 2-隔离段 3-第一实验段  
4-第二实验段 5-尾喷管  
图 3 超声速直联实验台

图 3 是超声速直联实验台，试验所需高温高压气体由烧氢补氧加热器提供，经喷管加速到马赫数 2.5，进入隔离段、第一、二实验段以及尾喷管。本文中直联台气流参数为：马赫数 2.5，总温 960K~980K，总压 1.26 MPa±6%。实验中的射流位置如图 3 中所示，用 CO<sub>2</sub> 作为射流气体，射流总压为 0.65MPa。在射流孔下游 70mm 处设中总压探针和采样探针（如图 4 所示）。本文在 CO<sub>2</sub> 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 10ns），采用平面激光散射技术对 CO<sub>2</sub> 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。

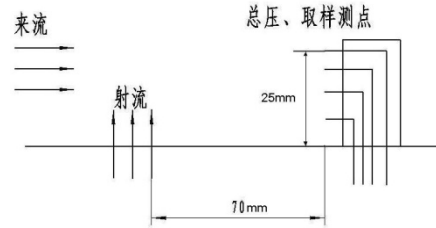


图 4 测总压及采样位置示意图

## 2 实验结果

### 2.1 瞬态散射结果

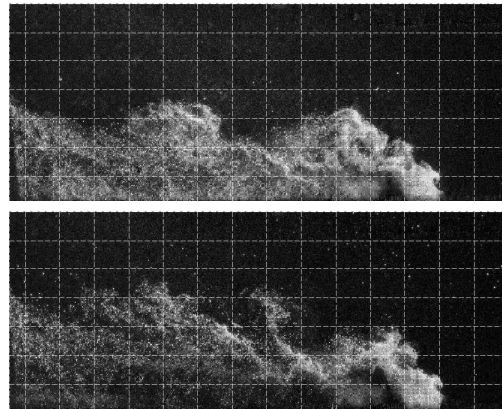


图 5 无激励射流的两不同时刻散射图

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。从两个不同时刻的图像上可以看到，CO<sub>2</sub> 射流的最大穿透深度主要位于 3D<sub>e</sub>~4D<sub>e</sub> 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<sub>e</sub>~6D<sub>e</sub> 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 K-H 不稳定性的原因，射流剪切层内有小尺度涡结构存在，这些小尺度涡在大尺度结构的输运下，使 CO<sub>2</sub> 射流扩展到高速空气中，所以这些大尺度结构直接影响着 CO<sub>2</sub> 与空气的混合过程及程度。

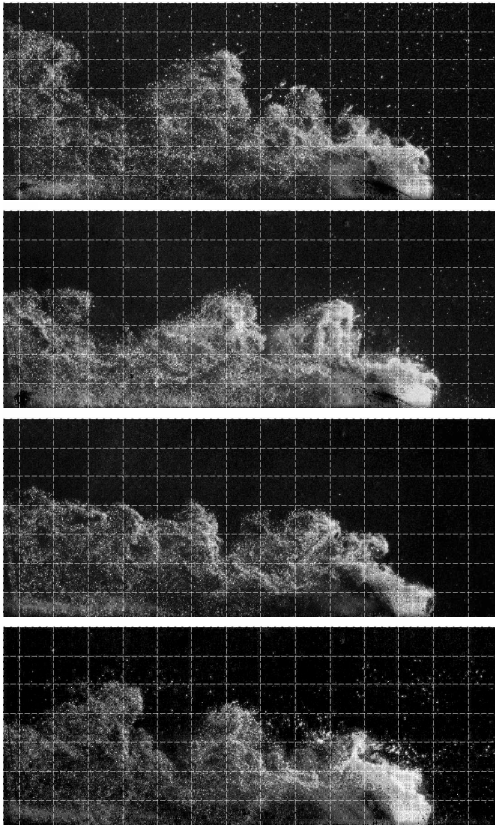


图 7 1.3kHz 激励射流两个不同时刻散射图

图 7 是 1.3kHz 激励下，两个不同时刻的散射图像。图中表明：1.3kHz 激励的结果与 900Hz 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  $4D_e \sim 5D_e$  之间，但相对于无激励的情况最大穿透深度还是有所增加的；另一方面大尺度结构的波长比 900Hz 激励下的更小。

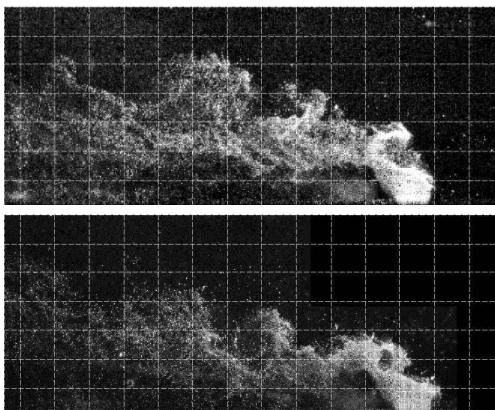


图 8 5kHz 激励射流两个不同时刻散射图

图 8 是 5kHz 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

图 6 900Hz 激励射流的两不同时刻散射图

图 6 是 900Hz 激励下，两个不同时刻的散射图像。CO<sub>2</sub> 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要大。

两种激励的效果差不多。最大穿透深度大概在  $4D_e \sim 5.5D_e$  之间，大尺度结构的波长也比前两种工况下的小。

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 900Hz 激励下，有较大的穿透深度，而在 5kHz 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 总压损失及 CO<sub>2</sub> 浓度分布

从散射图像上得到是瞬态的流动信息，那么总压损失分布与 CO<sub>2</sub> 浓度的分布则是时均结果。

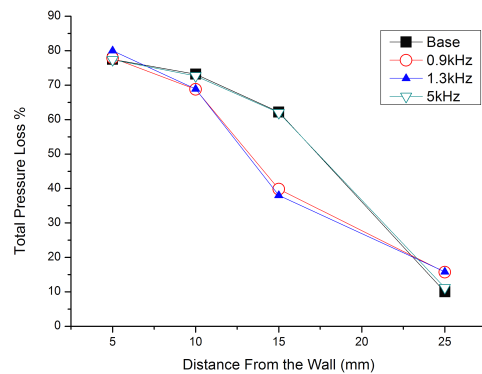


图 9 总压损失分布

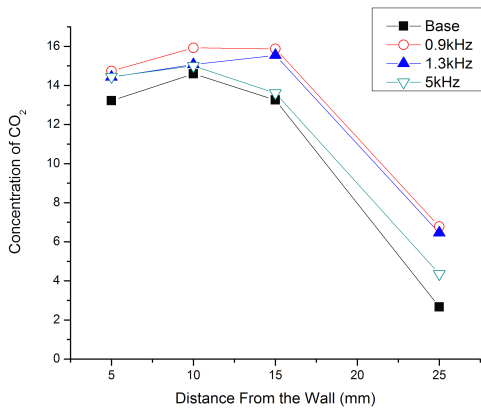


图 10 CO<sub>2</sub> 浓度分布

图 9、10 分别是图 4 所示位置处的总压损失分布和 CO<sub>2</sub> 浓度分布。从浓度分布上来看，有激励射流下的 CO<sub>2</sub> 浓度要比无激励射流下的要大。其中 900Hz 和 1.3kHz 激励下的浓度最大，5kHz 激励比无激励下的浓度稍大一些。结合总压损失图来看，1) 在离壁面 5mm 和 10mm 处，有激励射流和无激励射流的总压损失相差不多，但有激励射流下的 CO<sub>2</sub> 浓度要大。2) 离壁面 15mm 处，有激励射流的总压损失都有比无激励射流下的小，而有激励射流下的 CO<sub>2</sub> 浓度要高，尤其是离壁面 15mm 处，较小的总压损失带来了较高的 CO<sub>2</sub> 浓度。3) 离壁面 25mm 处，有激励射流有较大的总压损失，但 CO<sub>2</sub> 浓度比无激励射流下的要大。

从图 10 还可以看到，无激励情况和 5kHz 激励下，CO<sub>2</sub> 浓度的最大值是离壁面 10mm 处，而 900Hz 激励和 1.3kHz 激励下，则在 15mm 处。这说明有激励射流影响着边界层流动，使射流下游的气体有所抬升，所以有激励射流会有较大的穿透深度。

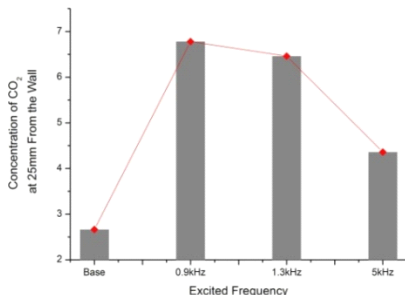


图 11 离壁面 25mm 处 CO<sub>2</sub> 浓度

离壁面 25mm 处的 CO<sub>2</sub> 浓度也给了比较有利的证据，如图 11 所示。从图中可以看到，有激励射流下该点的 CO<sub>2</sub> 浓度要比无激励射流下高很多。因为 CO<sub>2</sub> 浓度沿横向是逐渐变小的，所以本文认为有激励射流下 CO<sub>2</sub> 射流的穿透深度要大得多。

通过对总压损失的分析，可以得到以下结论：1) 有激励射流可以在低总压损失的情况下，得到较好的混合效果。2) 有激励射流的穿透深度要比无激励射流下的要大。3) 低频激励射流影响着边界层的流动，会使射流下游的气体有所抬升。

### 3 结论

通过对激励射流的瞬态散射图和总压损失及 CO<sub>2</sub> 浓度分布的分析，可以得知：1) 有激励射流可以在低总压损失的情况下，得到较好的混合效果比如穿透深度大，大尺度结构多。其中 900Hz 激励下，有较大的穿透深度，而 5kHz 激励下，大尺度结构波长较小。2) 激励射流不仅影响着射流剪切层的流动，还影响着边界层流动。

### 参考文献

- 1 H. Randolph, L. Chew, and H. Johari, "Pulsed jets in cross flow," J. Propul. Power 10, 746 1994
- 2 S. Murugappan and E. Gutmark, "Control of penetration and mixing of an excited supersonic jet into a supersonic cross stream", Physics of Fluids 17, 106101, 2005
- 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 (已录用)

本项目为国家自然科学基金资助 (90305022, 10525212, 10621202)。

## MIXING

Shenglong Gu Lihong Chen Hongbin Gu Fei Li Zhe Wei Xinyu Chang

Hypersonic Research Center CAS, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China

Key Lab of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, CAS, Beijing, 100190

**Abstract:** Hartmann-Sprenger(H-S) tube could make flow oscillated with high frequency and high amplitude under JRG mode. This article made the 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> jet excited under three different frequencies was injected into the Mach 2.5 supersonic flow. The planar laser scattering was used to visualize the instantaneous flow while measuring total pressure and sampling the concentration of CO<sub>2</sub> were 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 got better mixing in the supersonic flow with less total pressure loss.

**Keywords:** Excited Jet, Supersonic Mixing, Depth of penetration, The large-scale structure