



CSTAM 2010-0059

## H-S 管激励射流超声速燃烧实验研究

顾洪斌，顾声龙，李智，李飞，陈立红，张新宇

中国科学院力学研究所高温气体动力学重点实验室

第三屆高超声速科技学术会议

2010年10月26-28日 江苏·无锡

# H-S 管激励射流超声速燃烧实验研究

顾洪斌 顾声龙 李智 李飞 陈立红 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燃烧特性。本文设计了三种频率的激励射流, 将其横向注入马赫数 1.8 和 2.5 的超声速来流当中。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, 从而获得较好的燃烧效果。

**关键词:** 激励射流 超声速燃烧 穿透深度 大尺度结构

## 引言

超燃冲压发动机中, 燃料的扩散过程成为制约燃烧过程的重要因素, 因此氢、乙烯等燃料在超声速条件下的燃烧模式, 是以非预混燃烧模式为主的复杂湍流燃烧, 因此燃料混合成为制约条件。

而燃料的注入方式对混合的影响最大, 具体体现在燃料空间扩散上, 超声速流场中的射流因为主流动量高, 因此通常使用的直射式射流方式因为动量比提高受当量比限制无法自由设定射流动量, 而只能形成一定的穿透深度。

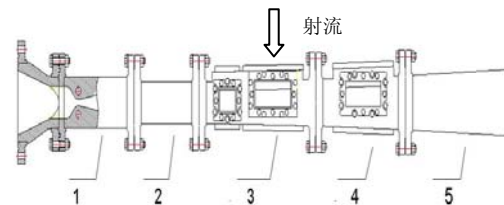
鉴于直射式射流的缺点, 国内外又做了许多研究, 发展出更多的增强混合的方法, 比如激励射流。激励射流一方面作为扰动源来刺激边界层内的脉动量, 使其变成不稳定的扰动, 另一方面可以用于放大射流剪切层的特性。Randolph<sup>[1]</sup>研究了超声速来流下, 横向激励射流的效果。其结果表明在相同的射流压力下, 1Hz 的激励射流比定常射流的穿透深度增大了 12%。Gutmark<sup>[2]</sup>对于高频激励射流的研究表明按一定频率激励的射流对于穿透深度有着积极的影响。

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  $D_r$ 、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。

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 1.8 与 2.5 的来流下的混合与燃烧情况。

## 1 实验设备



1-喷管 2-隔离段 3-第一实验段

4-第二实验段 5-尾喷管

图 1 超声速直联实验台

图 1 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 1.8 和 2.5, 总温 960K~1650K, 总压 0.6~1.26 MPa  $\pm$ 2%。实验中的射流位置如图 1 中所示, 用  $CO_2$  作为射流气体, 射流总压为 0.65MPa。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 10ns), 采用平面

激光散射技术对  $\text{CO}_2$  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。对燃烧状态的壁面压力进行测量。

## 2 激励射流装置

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，本次研究中流场显示散射使用的是  $\text{CO}_2$ ，燃烧实验采用的是乙烯。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。

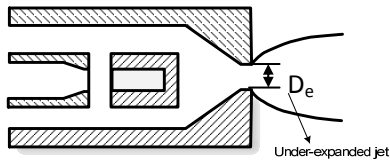


图 2 激励射流装置示意图

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。通过改变共振管长  $L$  可以获得所需要的 H-S 管频率。本文采用的经过考察了 1.4kHz、2kHz、2.9kHz、5.2kHz 激励的情况，并与无激励时的情况进行了比较。而采用乙烯后它的激励频率为 1.08, 2.9, 5.7kHz。

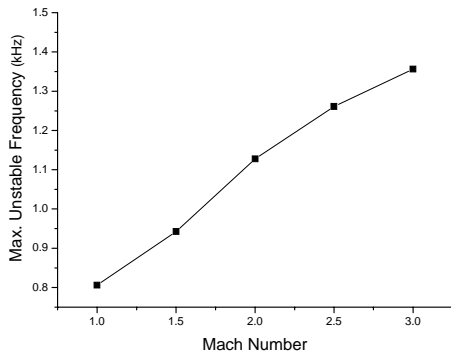


图 3 二维边界层共振频率与马赫数的关系

## 3 实验结果分析

### 3.1 瞬态散射结果分析

图 4 是不同激励下，两个不同时刻的散射图像。可以看到在激励情况下  $\text{CO}_2$  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要大。

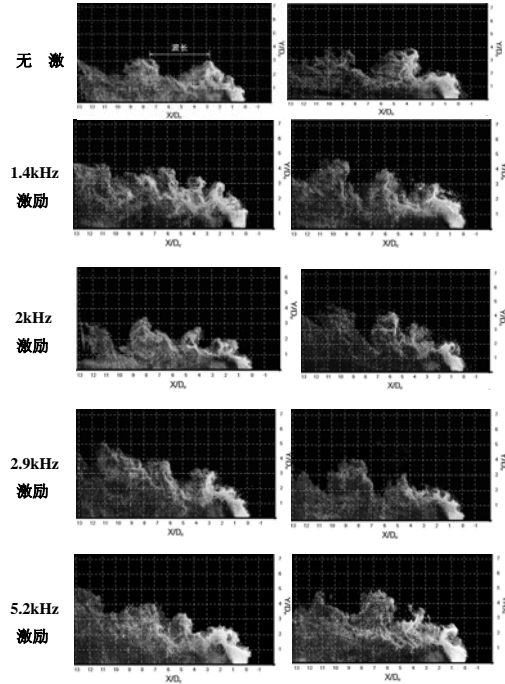


图 4 不同频率激励射流下：两个不同时刻的横向散射图像

在有激励下，两个不同时刻的散射图像。图中表明：不同激励的结果基本相似，但还是有所差别，一方面最大穿透深度有所变化，另一方面是大尺度结构呈现规律没有明显规律，需要更深一步的研究激励频率与大尺度结构以及与来流的关系。

### 3.2 燃烧实验结果分析

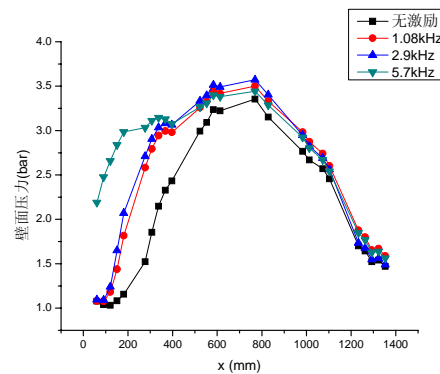


图 5 1.5 度燃烧室扩张角下，进口马赫数 1.8，不同激励的燃烧试验

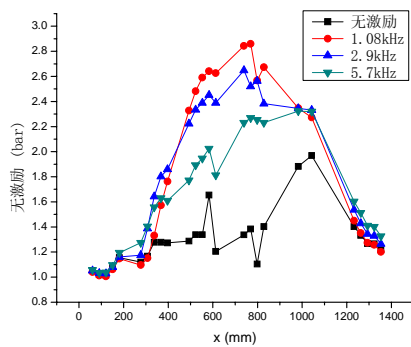


图 6 3 度燃烧室扩张角下，进口马赫数 1.8，不同激励的燃烧试验

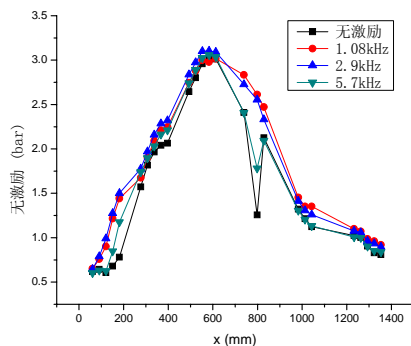


图 7 3 度燃烧室扩张角下，进口马赫数 2.5，不同激励的燃烧试验

图 5 是 1.5 度燃烧室扩张角下，进口马赫数 1.8，不同激励的燃烧试验的燃烧时壁面静压，横坐标是壁面坐标，纵坐标壁面静压，图中的压力是燃烧稳定后的绝对压力值，采用的扩散硅压力传感器。可以看到激励频率改变，而其他实验条件未变下，壁面压力的幅值变化较大，其中无激励情况压力值最低，而随着激励频率提高压力幅值逐渐提高，而在 1.08 和 2.9kHz 情况下压力峰值基本与无激励和 5.7kHz 一致，但是在 5.7kHz 情况下压力上升曲线的高斜率区提前到了燃烧室进口。而压力上升曲线的高斜率区在当前状态实际对应的正激波串的位置，从图 5 中压力状态分析，燃烧室在经过正激波串后已经调整为亚声速，那么也就是说在 5.7kHz 下的燃烧更为剧烈同时也可以看到激励对亚声速下燃烧有较大影响。特别是当扩张角度较小，少量释热就会引起较强的连锁反应。

图 6 在扩张角提高一倍后，压力分布呈现更为复杂的分布，1.08kHz 情况下压力最高，其次是 2.9kHz，然后是 5.7kHz，而无激励就更低了。去除由于实验的不稳定因素导致的结果的发散，这样的规律还是反应出本质的问题，当然目前的结果还需要进一步的验证，但是它反映是燃烧火焰的稳定性问题，在射流结构与凹腔结构的组合使用上，一直存在的敏感性问题与燃烧稳定性问题。可以从混合的侧面对这一问题有了更深入的认识，火焰稳定对燃料混合是有具体要求的，并非混合均匀就好，而是在一定区域内形成稳定的火焰才能整体提高燃烧效率。

图 7 是 3 度燃烧室扩张角下，进口马赫数 2.5，不同激励的燃烧试验结果。在提高进口马赫数和总温后，激励的作用在压力分布上的差别不如进口马赫数 1.8 的情况，但是考虑到进口静压 2.5 要低于 1.8 的变化，以及压力峰值的微小变化体现在温度上还是有很大的差别，温度差别估算在 5% 以上，同样也体现在燃烧效率上。

## 4 结论

通过对激励射流的瞬态散射图和燃烧实验的分析，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。其中基频激励下，有较大的穿透深度，而高频  $\alpha$  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。同时对燃烧产生重要影响，特别是亚声速下，对燃烧的促进作用非常明显。3) 超燃状态下的促进机理更为复杂，但也可以看出激励射流依然存在潜在应用前景。

## 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

# EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE H-S TUBE EXCITED JET IN SUPERSONIC COMBUSTION

Hongbin Gu Shenglong Gu Zi Li Fei Li Lihong Chen 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 jet excited under three different frequencies was injected into the Mach1.8 and 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 combustion with less total pressure loss.

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