

文章编号: 1000-8055(2000) 04-0419-04

# 声激励喷流流动的实验研究

赵 宏, 伍耐明, 郑克扬

(北京航空航天大学 热动力工程研究所, 北京 100083)

摘要: 本文就喷管上游加入“声激励”对喷流流动特性的影响进行了机理性实验研究, 得出在不同声激励参数和喷流工况条件下的喷流参数变化规律及相应的流动显示图象。实验结果表明, 一定的声激励能量可引起喷流核心区长度缩短, 掺混宽度增加, 并对外界空气增大引射掺混。这一机理对于飞行器引射增力器增加推力和降低喷管壁面温度、改善喷流红外辐射强度分布有很好作用。

关键词: 声激励; 射流; 掺混; 流场显示  
中图分类号: V 233. 7 文献标识码: A

## 1 引 言

喷流中拟序结构对外加音频激励的敏感性, 使得利用外加声激励调控喷流剪切层的发展和演化成为可能。利用声激励调控喷流在燃烧室和排气引射系统中均具有实用意义: 在燃烧室中能够强化油气混合, 减小雾珠尺寸, 从而改善燃料雾化, 提高燃烧效率, 减少燃烧装置的尺寸和重量<sup>[1]</sup>; 在排气引射系统中, 能够增强高温高速燃气与周围低速冷空气的掺混, 进而增加发动机引射推力, 降低喷流红外辐射强度<sup>[2]</sup>。另外, 声激励具有声波产生方式简单, 反应速度快, 频率范围宽及易实现自适应控制等优点, 这些都为喷流声激励调控技术的工程应用提供了良好条件。

喷流的声激励调控研究兴起于 60 年代末, 高潮于 80 年代初期, 但从已发表的文献看, 研究重点尚停留在喷流对外加声激励响应机理的探索上, 应用性成果不多。在国外, 大多数研究者都采用热线风速仪、压力传感器等常规手段测量了单、共轴喷流在声激励下流动参数的变化, 采用纹影法显示有无激励条件下喷流流动图象<sup>[3~6]</sup>。测量与流场显示的结果均表明, 利用声激励方法可使强脉动喷流与外界气流的掺混率明显高于常规定常喷流, 但对其如何改善掺混的机理尚不完全清

楚。我们在文献[8]的基础上, 利用二维 LDV 对轴对称喷流流场进行了详细的测量, 并采用频闪观测仪和粒子示踪法进行了流场显示, 从而进一步认清了声激励调制喷流的机理。

## 2 实验设备

本实验系统如图 1 所示, 由供气系统、声激励

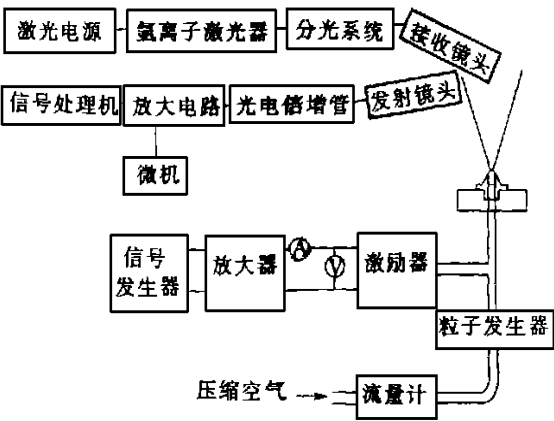


图 1 声激励激光测量(LDV)实验系统示意图

系统、喷管系统、测量系统组成。在供气系统中, 气流由暂冲气源(容积 1000 m<sup>3</sup>)供给, 经整流、加入示踪粒子后, 供实验使用。产生示踪粒子的粒子发生器分为两种类型: 低速、低压的油雾加热型和高

收稿日期: 1999- 10- 20; 修订日期: 1999- 12- 24

基金项目: 航空基金资助项目(96C51033)

作者简介: 赵宏(1970- ), 男, 北京航空航天大学热动力工程研究所, 博士, 博士后。 All rights reserved. http://www.cnki.net

速、高压的气动雾化型,分别用于低、高速实验。声激励系统由信号发生器、功率放大器、激励器组成,用以产生各种频率、功率的激励信号。喷管系统为一系列可更换的轴对称收敛喷管,直径  $\Phi 6 \sim \Phi 20$  mm。测量系统为激光测速系统,由激光光源、发射镜头、接收镜头、光电倍增管、信号处理机等组成。

### 3 实验结果与分析

影响声激励条件下喷流与外界气流掺混的因素很多,既有喷流出口速度、出口边界层形态,也由声激励频率、功率,声激励加入方式等。本文重点研究相同的无声激励喷流工况、不同激励功率下喷流速度分布的变化及相应的流动图象。

#### 3.1 有/无声激励条件下经过同一点的粒子轴向速度概率分布的变化

在自然喷流流场中(图 2),经过同一点的示

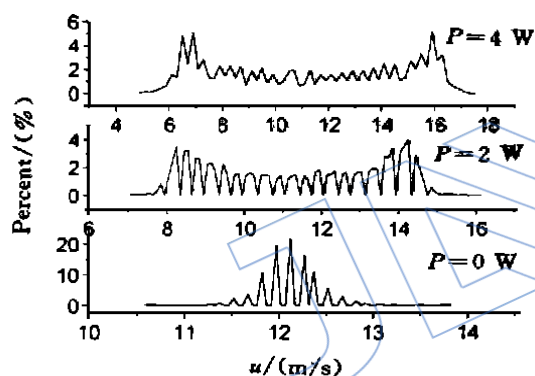


图 2 有/无激励条件下速度概率分布的变化

踪粒子的速度基本是按正态规律分布的,不同点分布趋势的差别只在于正态分布参数不同,但在声激励条件下,喷流中同一点速度的概率分布明显不同于前者,曲线为非正态分布,近似呈“马鞍”型,原正态曲线中心部分被削减,且速度分布范围大大增加。究其原因,是由于声激励的诱导,喷流中周期性的大尺度拟序结构的作用更加突出,流向涡生成及涡的三维畸变更加剧烈,从而使得周向速度分量和径向速度分量增加,造成流向速度降低。

#### 3.2 有/无激励条件下速度的频域分布规律的变化

在自然喷流状态下,各点速度的频域分布曲线是随机的,各个频率对应的谱值都很小,且相差不大(图 3);在加入一定频率“声激励”条件下,由于“声激励”的诱导,喷流剪切层中与该激励频率

对应的不稳定波在  $K-H$  区中的增长率大幅度增加,且随“声激励”功率的增加,增长率呈非线性

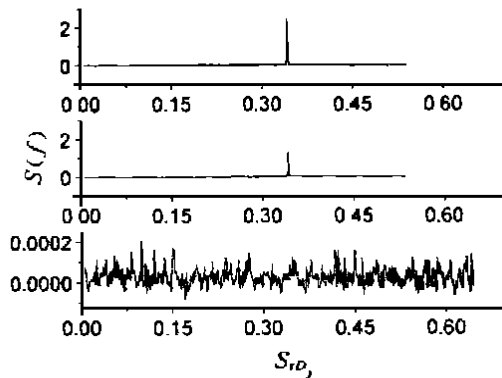


图 3 有/无激励条件下速度频谱的变化

增长,在“声激励”功率为 2W 时,最佳频率对应的频谱值为无声激励时的 1500 倍,声激励功率提高为 4W 时,则增长为 2800 倍,表明该频率对应的能量大幅度增加,与文献[8]的分析结果相一致。

#### 3.3 有/无激励条件下流向速度沿径向分布的变化

在轴向时均速度的径向分布方面,声激励对喷流流场的影响表现为:接近轴线部分的流向时均速度低于无激励时的时均速度,在一定的半径之外,有激励时流向时均速度大于无激励时时均速度,而且曲线宽度也有所加宽,有流向负速度可测量到,说明当地有展向涡的卷起和运动,这与流场显示得到的流动图象相吻合。在流向时均速度的径向分布图中(图 4 左),通过数据分析可以得到有/无激励条件下喷流半宽度的变化,在  $x/D_j = 6.0$  处,在声激励功率为 4 W 时,有激励时较无激励时增加了 12%,相对应的有激励时的体积流量为无激励时的 1.4 倍。

在轴向紊流强度的径向分布方面,声激励的影响表现为:在不同径向距离处,有激励时的紊流强度均远大于对应的无激励时的紊流强度,曲线宽度也有所加宽(图 4 右),在  $x/D_j = 1.5$  处,无激励时紊流强度为 3.7%,激励功率为 2 W 时为 22.9%,增加了约 5 倍,激励功率为 4 W 时 24.2%,增加了近 6 倍。流动的脉动性增强,这对增加主流对外界介质的卷吸、增加掺混量有很大好处;在燃烧室中能够改善油料雾化,降低油珠尺寸,提高燃烧效率<sup>[9]</sup>。

#### 3.4 有/无激励条件下速度沿轴向分布的变化

在外加声激励的“声学整流”作用下,时均流与紊流脉动之间能量转换加剧,总体上,是时均流

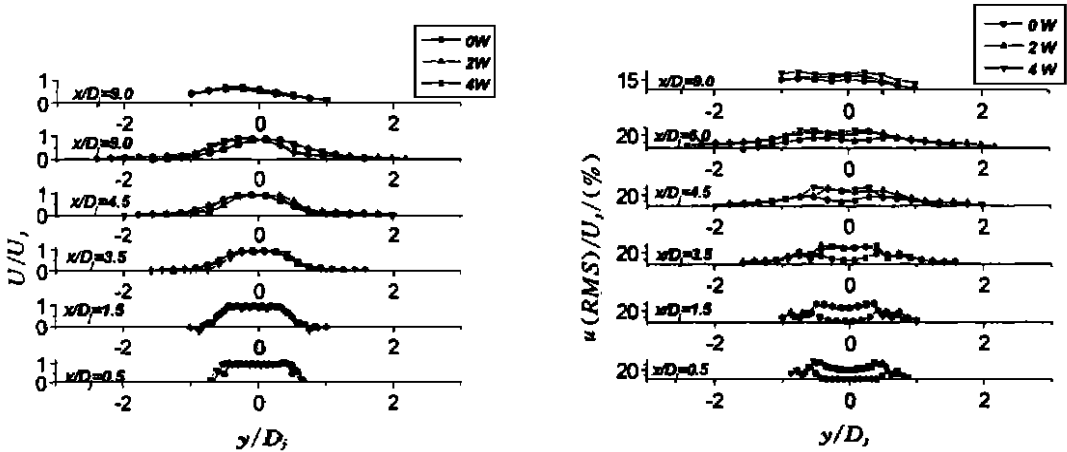


图 4 不同激励功率下流向时均速度(左)、紊流强度(右)的径向变化

能量向紊流脉动转移, 在流向时均速度的轴向上表现为: 与无声激励时相比, 时均速度降低, 且时均速度沿轴向衰减加快, 造成核心区缩短, 在 2 W 时由无激励时的  $4.85D_j$  缩短为  $3.5D_j$ , 缩短了 28% 左右; 脉动速度的分布则正相反, 有声激励情况下, 脉动速度均高于无激励时, 且沿轴向脉动先增加后减少, 在  $x/D_j = 3 \sim 5$  处达到最大, 随着激励功率的增加, 最大值轴向位置在一定范围

显著差异: 在自然频率附近区域(图 6b), 各阶谐波都受到抑制, 形成的轴对称涡环相互距离较远, 不易配对和汇合, 但展向涡的直径较大; 在低于自然频率的区域(图 6a)和高于自然频率的区域(图 6c 和 d), 展向涡的直径都较小, 但相互距离较近, 尤其在高频段, 形成小尺寸涡列向下游推进, 相应

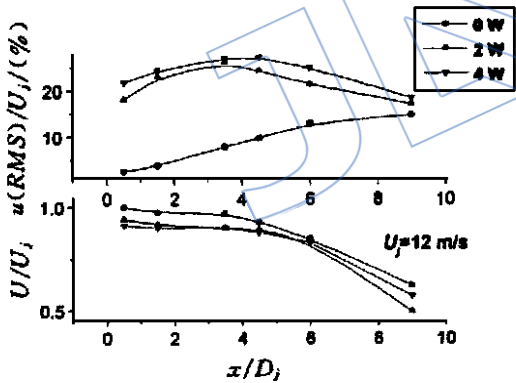


图 5 不同激励功率下流向时均速度(下)、紊流强度(上)的轴向变化

内变化, 如图 5 所示。

3.5 流场显示结果

在流场与激光光源之间加入片光透镜, 便可以在流场中切出一轴向或径向截面, 再用高速相机进行记录, 就可以完成不同工况下喷流流动结构的显示工作。本文重点阐述各种声激励频率、声激励功率下轴向截面的流动图象。

3.5.1 声激励频率对流动结构的影响

喷流对外加声激励的频率响应是逐级锁定的, 对应于不同的声激励频率波段其流动结构有

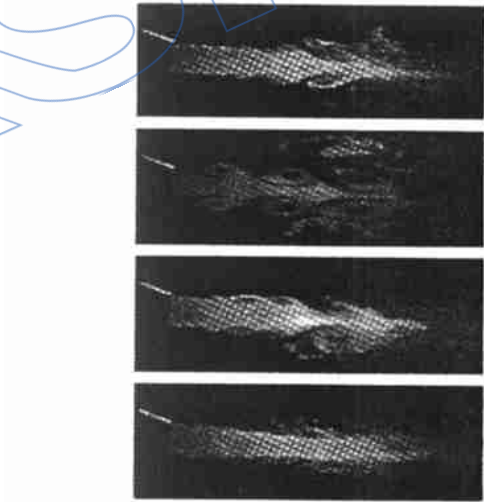


图 6 喷流对不同频率声激励的响应由上向下  
( $St = 190, 340, 590, 890$  Hz)

的核心区域变化也较小。

3.5.2 声激励功率对流动结构的影响

按照文献[7]的观点, 功率的增加只是使展向涡的卷起位置提前, 但实验现象表明, 这是不全面的。流动图象(图 7)表明, 随着激励功率的提高, 不但展向涡卷起的位置提前, 而且涡尺寸也增加, 表现为涡环外径增大, 内径减小, 当激励功率提高到一定值后, 展向涡环相互之间距离也减小。

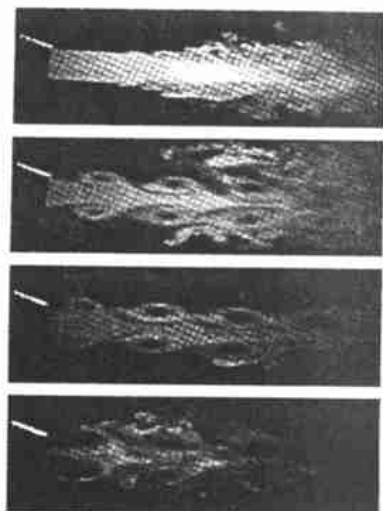


图 7 不同声激励功率下流动结构的变化由上向下  
( $P = 0, 0.5, 1.7, 10 \text{ W}$ )

## 4 结 论

本文对声激振冷喷流进行了比较详细的实验研究, 从中获得大量数据, 可以得出:

(1) 声激振频率, 由于受激的大涡结构频带宽度非常窄, 所以每个系统只有一个或几个较优响应频率, 最佳频率与具体的系统有关。本实验系统为  $St = 0.117$ 。

(2) 每个系统所需激振功率的范围有上下限, 超过上限的激振功率并不能取得更好的激振效果。本实验中, 功率范围为  $2 \sim 90 \text{ W}$ 。

(3) 激振喷流脉动速度的变化沿轴向先是增加后又降低, 大约在  $5 \sim 7$  倍出口直径处出现最高峰值; 沿径向其变化趋势与无激振时类似, 但宽度

明显增加, 表明掺混加强。

(4) 有无激振对比, 喷流掺混增加量随轴向距离的增加而增加, 当激振功率  $25 \text{ W}$ , 出口速度  $28 \text{ m/s}$  时, 在  $x/D_j = 3.0$  截面, 大约增加  $40\%$ 。

(5) 利用“声振激化”技术, 能提高飞行器引射增力器引射推力, 改善喷流引射, 能加强高温燃气射流边界扰动, 降低尾焰最高温度, 该技术对改善飞机红外隐身性能有重要意义。

## 参考文献:

- [1] Ahuja K K, Lepicovsky J. Acoustic and Turbulence Measurements of a Tone Excited Jet With and Without Flight Simulation[R]. AIAA-81-2007
- [2] Vermelen P J, Wai Keng Yu. An Experimental Study of the Mixing by Acoustically Pulsed Axisymmetrical Air-Jet [R]. ASME 85-GT-49
- [3] Vermelen P J, Wai Keng Yu. Measurement of Entrainment by Acoustically Pulsed Axisymmetric Air-Jets [R]. ASME-86-GT-147
- [4] Vermelen P J, Wai Keng Yu. An Experiment Study of the Mixing Behaviour of an Acoustically Pulsed Air-Jet with a Confined Crossflow [R]. AIAA-88-3296
- [5] Juvet P J, Reynolds W C. Entrainment Control in an Acoustically Controlled Shrouded Jet [R]. AIAA-89-0969
- [6] Ahuja K K, Burrin R H, Tam C K W. Tone-Excited Jet: Theory and Experiment [R]. N83-12968
- [7] 童秉纲, 崔尔杰等. 非定常流与涡运动[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993
- [8] 赵宏, 郑克扬, 伍耐明. 利用声激振增强喷流掺混的实验研究[R]. 中国航空科技报告, 1998
- [9] 邹正平. 气流紊流脉动对气动喷嘴雾化的实验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1996

(责任编辑 王震华)

## An Experimental Investigation on Acoustically Excited Jet Flow

ZHAO Hong, WU Nai-ming, ZHENG Ke-yang

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The mechanism of acoustically excited jet flow has been investigated experimentally. The variation rule of jet parameters was derived from various operating conditions of jets excited by different acoustical wave parameters. The flow-visualization images were obtained. The result indicated that the length of jet core section was decreased, the width of mixing section was increased, and the ambient air was entrained strongly by the jet due to the pulsed jet with acoustic waves. These effects are beneficial to the augmentation of ejector thrust and to decreasing of temperature on the nozzle wall, also to the distribution of infrared radiation intensity.

**Key words:** acoustic excitation; jet flow; mixing flow; visualization