

文章编号: 1000-8055(2004)04-0512-08

合成射流流动特性实验研究及 在燃烧中的应用探讨

赵 宏, 杨治国, 娄慧娟

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘要: 应用热线风速仪对合成射流激励器出口流场进行了较详细测量。实验结果表明, 激励器流场可划分为 2 个不同的区域。在距离激励器出口 10~15 倍出口缝宽之前, 流动具有强烈的非定常性; 在此位置下游, 流动特性与常规射流相似。在流向中心线上, 随着向下游距离的增加, 时均速度呈先增后降的趋势, 湍流度则单调递减。当激励电压有效值 40 V、激励频率 980 Hz 时, 时均速度在 15 倍缝宽处达到最大, 约 14.2 m/s, 激励器出口附近湍流度近 80%。在展向上, 时均速度、湍流度均剧烈改变, 梯度变化明显高于常规喷流。适当参数的合成射流激励可以改善扩散燃烧器出口温度分布, 降低 NO_x 生成量。

关键词: 航空、航天推进系统; 合成射流; 流场测量; 主动流动控制; 激励器

中图分类号: V 231.1

文献标识码: A

Experimental Investigation of Flow Characteristics of Synthetic Jet and It's Preliminary Application to Combustion

ZHAO hong, YANG Zhi-guo, LOU Hui-juan

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100083, China)

Abstract: The velocity distributions of synthetic jet were measured with Hot-wire anemometer. Experimental result shows that two distinct regions exist in the flow-field created by the actuator. Close to the slot-exit, the mean centerline velocity accelerates downstream to a maximum at distance of approximately 10~15 slot-width, when signal frequency is 980 Hz and amplitude is 40 V. At streamwise distance larger than approximately 10~15 slot-width, the flow pattern changes as conventional jet. Velocity profile across the synthetic jet appears like the profile in conventional jet, but velocity gradient is much large. At the exit of combustor, excitation using synthetic jet can improve the distribution of temperature and decrease contents of NO_x . Synthetic jet is effective for active flow control purpose.

Key words: aerospace propulsion system; synthetic jet; flow field measurement;
active flow control; actuator

合成射流又称零质量射流, 其基本原理是, 在 带有小孔(或缝)的空腔内, 依靠内部膜片的周期

收稿日期: 2003-09-09; 修订日期: 2005-05-24

作者简介: 赵宏(1970-), 男, 辽宁北镇人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院, 博士, 博士后, 主要从事主动流动控制技术和测控技术研究

性往复振动, 促使空腔内外的流体周期性地进出小孔, 使得一个周期内通过小孔的流体净流量正负相抵为零, 但给予外界流体的射流动量是非零的(图 1)。合成射流激励器是一种重要的主动流动控制激励器, 对于附面层减阻、流动转捩控制、增强流动混合、实现喷流推力矢量等方面都有重要的用途。

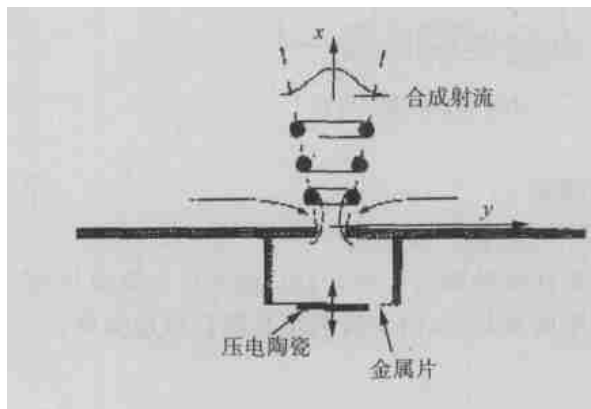


图 1 合成射流示意图

Fig 1 Schematic of synthetic jet

合成射流虽然出现时间不长, 但发展非常快, 国内外众多研究机构都在进行相关的研究, 典型的如美国 NASA Langley 中心利用 THUNDER 材料技术设计加工了合成射流、悬臂梁式、瞬时响应涡 3 种合成射流激励器, 合成射流最大速度达到近 100 m/s , 并在 NACA 0015 机翼模型上进行了流动分离抑制与减阻工作; 空军学院采用热线风速仪对单膜片合成射流进行了接触式测量^[1]; Texas A & M University 发展了基于微电机的紧致型高功率合成射流激励器, 用于 NACA 0015 流动分离控制^[2~5]; 波音公司在 AV 8B 飞机减阻增升上进行了采用合成射流激励器的缩尺寸风洞整机实验, 取得了有效载荷增加 20% 的理想效果; Georgia 技术学院利用合成射流激励器进行了改善燃烧室出口温度分布的实验, 很大程度上消除了局部高温点; 国内, 国防科技大学在矢量推力与超音掺混^[6], 南京航空航天大学 and 清华大学在机理研究方面都做了一定的工作。但目前国内的研究主要在理论分析、数值模拟方面, 对实验与应用方面的涉及不够。为此, 在中国石油化工股份有限公司的资助下, 在国外单膜片激励器测量的基础上, 我们对双膜片合成射流激励器流场进行了测量与分析, 更好地了解了流动参数与外加激励信号的关系, 并在单级燃烧器上进行了助燃风激励实验, 考察了合成射流激励对 NO_x 含量的影响,

为后续研究打下良好基础。

1 实验装置与过程

1.1 双膜片合成射流激励器

实验中所用合成射流激励器如图 2 所示, 按 Langley 激励器最优尺寸数据设计加工, 外框为边长 57 mm 的正方形, 流体空腔为圆柱形, 空腔长度为 4 mm , 进排气口为长 37 mm 宽 0.5 mm 的矩形狭缝, 并可更换为不同尺寸的实验部件。振荡膜片由 PZT-5 型压电陶瓷片与 $\Phi 53$ 紫铜片粘结而成, 粘结剂为环氧树脂。

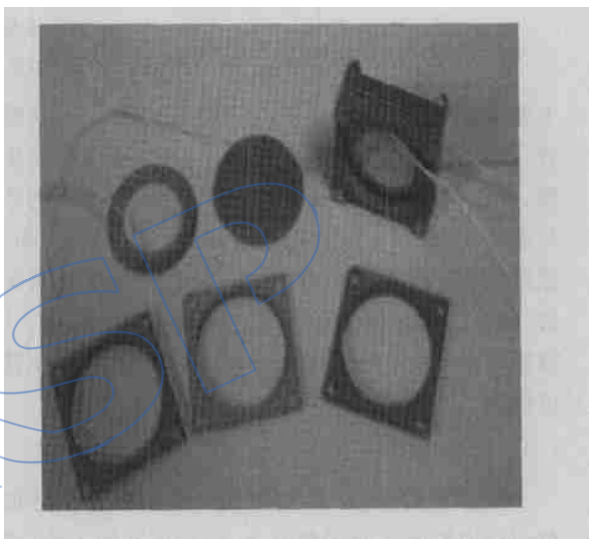


图 2 合成射流激励器

Fig 2 Actuators of synthetic jet

1.2 实验装置

合成射流激励器性能研究实验装置如图 3(a)所示。整个装置由实验件(合成射流激励器)、激励信号发生器、数据采集 3 部分组成。激励发生器包括信号源(XD 2A)、功率放大器(SA-750A), 能够输出合适波形和功率的信号。数据采集部分包括位移机构、热线风速仪(BD-2)、采集板(PCL-818HG)、计算机及连接导线。位移机构用于调节热线风速仪探针位置, 热线风速仪用于测量并输出流速电压信号, 采集板和计算机将电压信号转换为速度值并进行处理。

助燃风激励燃烧实验在声激励燃烧实验台上进行(图 3(b)), 系统由天然气供给系统、助燃风供给系统、燃烧器、合成射流激励系统和测量系统构成。天然气流量由流量调节阀调节, 由流量计计量; 助燃风流量计量调节系统组成与天然气供给系统相同, 但流量范围不同。燃烧器为缩尺寸单级

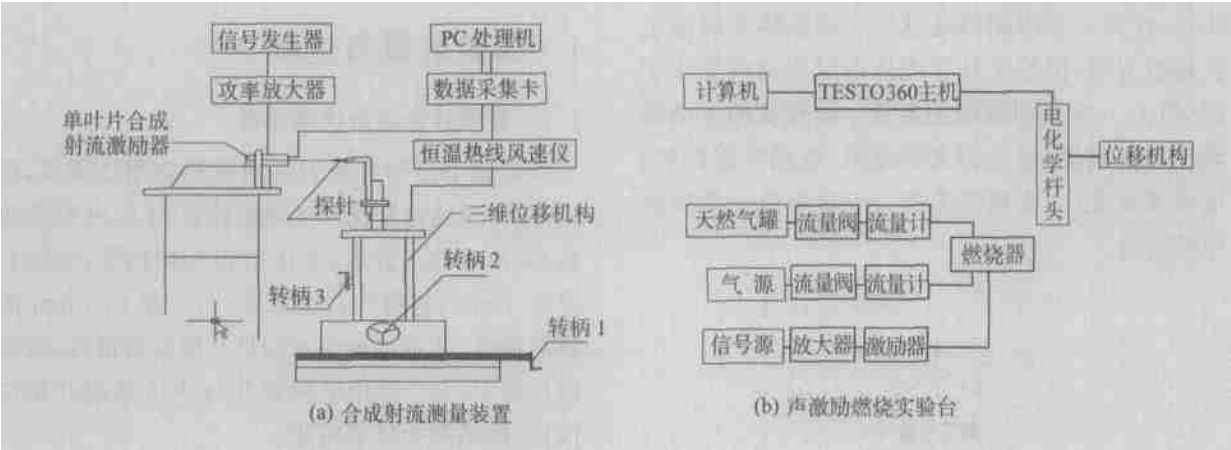


图 3 实验装置构成示意图
Fig 3 Schematic of experimental apparatus

工业扩散燃烧器, 侧向进气, 外径为 59 mm, 喷嘴直径 1 mm。合成射流激励系统由激励信号发生器、合成射流激励器构成, 与单体合成射流不同的是应用了环型 4 个合成射流激励器, 同相位工作, 该激励器安装在燃烧器助燃风管路上。测量系统由 TESTO360 烟气分析仪、三坐标位移机构、计算机构成, 烟气分析仪的电化学杆头安装在位移机构上。

1.3 实验过程

性能实验中, 信号发生器产生的激励信号加载到合成射流激励器膜片上, 激励器开始工作。测量系统分别测量激励信号、时均速度、脉动速度三路信号。激励信号频率范围为 0~ 1100 Hz, 激励电压有效值 0~ 50 V, 激励器双膜片信号彼此相位差 180°。在每次改变频率与电压之后, 移动热线风速仪探针空间坐标位置, 测量对应的信号值, 并进行处理, 获得整个流场速度分布。

在燃烧实验中, 初步进行了单孔喷嘴实验。燃烧器点火由高能点火器进行, 天然气流量保持 0.4 m³/h 不变, 助燃风余气系数 α 变化范围分别为 0.9, 1.1, 1.2。由烟气分析仪测量出口各种烟气成分和温度分布, 实验中主要考察燃烧器出口 NO_x 含量和温度的变化。

2 实验结果与分析

2.1 合成射流时均速度与频率的关系

一般来说, 当激励信号频率与激励器膜片共振频率一致时, 合成射流出口速度最大。但事实上, 由于振荡膜片与框架、信号线、空腔内空气紧密连接, 是一个复杂的动力学系统, 难以精确计算

整体最佳激励输入频率, 因而, 通常在计算膜片共振频率的基础上, 由实验测定其最佳激励频率。

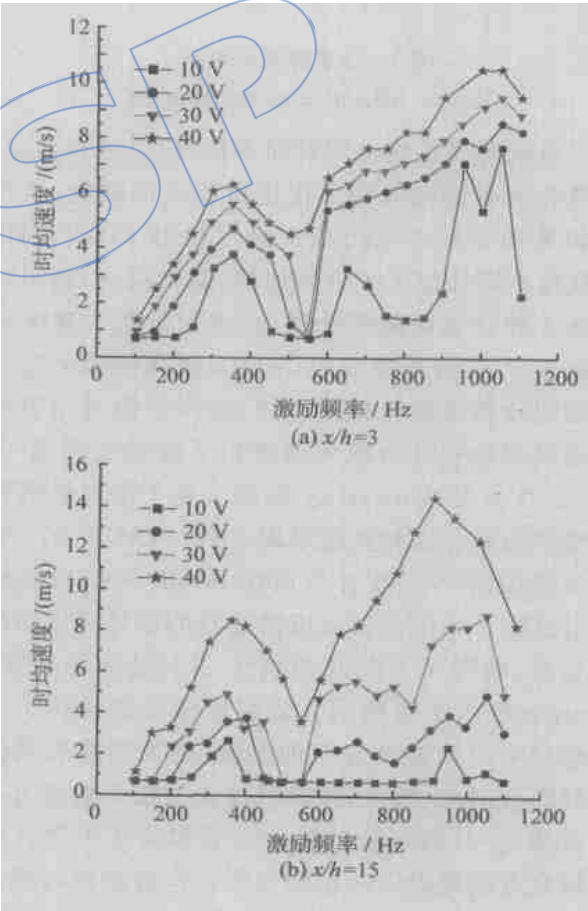


图 4 时均速度随频率的变化关系
Fig 4 Relation of mean velocity with excited frequency

本激励器振荡膜片为圆形, 其共振频率可按下式计算^[2]:

$$2\pi f_{1,2} = K_{1,2} \sqrt{\frac{4Et^3}{3(1-\nu^2)mD^4}}$$

其中: $K_{1,2}$ 为系数, 取值为 10.2 和 21.3; E 为膜片的杨氏模量; t 为膜片厚度; ν 为泊松比; m 为单位面积下膜片质量; D 为膜片直径。

实验中, 膜片材质为 PZT-5 型压电陶瓷和紫铜的黏结体, 厚度 0.2 mm, 有效直径 50 mm, 计算所得共振频率分别为 500 Hz 和 1044 Hz。

实验中, 取流向距离 $x/h = 3$ 和 15 (h 为出口宽度) 处进行考察时均速度随频率的变化, 结果如图 4(a) 和 (b) 所示。从中可以看出, 不同电压下、不同位置处, 速度随频率的趋势大体相同, 呈非对称马鞍状, 分别在 375 Hz 和 980 Hz 处有峰值出现, 表明该频率对应的速度较大, 即相应的激励器总体阻抗较小, 且 980 Hz 处的速度值 (14.2 m/s,

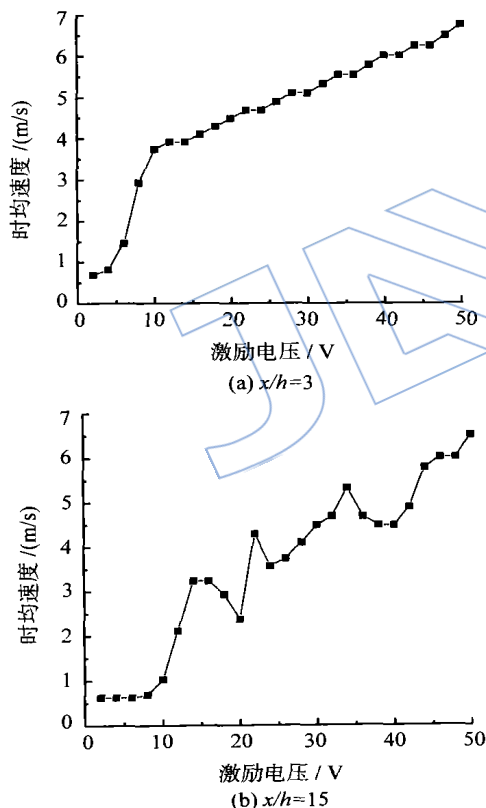


图5 频率为 375 Hz 下, 时均速度随电压的变化关系

Fig 5 Mean velocity change with excited voltage for excited frequency of 375 Hertz

$x/h = 15$) 要大于 375 Hz 处速度值 (8.4 m/s, $x/h = 15$)。实验所得低频特征频率与计算结果相差较多, 较高特征频率与计算结果基本相符, 说明在低

频情况下, 腔内气体的惯性对激励器特性有一定的影响。

2.2 时均速度与电压的关系

在频率一定的情况下, 加载在压电陶瓷膜片上的电压幅值直接决定膜片振动幅度大小, 从而决定合成射流速度的大小, 但由于激励器本身是一个复杂的非线性系统, 因而随着电压的增加, 速度幅值不是简单的线性增加, 这可由不同截面、不同频率下, 时均速度与电压的实验曲线 (图 5) 可以看出, 在电压 10~15 V 以下, 速度随电压以斜率 0.4 单调增加, 在电压大于 15 V 时, 增长的斜率减少为 0.1 左右, 增长速率趋缓。在激励器出口较远处, 由于流动本身的传播与膜片驱动影响的衰减, 在一定电压值以上, 速度才对信号电压的变化有所反应, 并在急速增长的同时有波动现象出现。

2.3 中心线上, 时均速度、湍流强度沿流向的变化

合成射流的流向速度分布, 直接决定了合成射流对外界流体的影响。在流向上, 当激励电压较低时 (< 10 V), 时均速度的最大值出现在激励器出口附近 ($x/h < 5$); 当激励电压较高 (> 25 V), 时均速度的最大值并不出现在激励器出口处, 而是出现在出口下游 10~15 倍特征尺寸处 (图 6)。这是因为在高激励电压下, 合成射流在剪切层内形成了主涡环和次涡环, 对于中间流体来讲, 主次涡环起到了虚拟边界的作用, 且主次涡环形成收扩形状的中央通路, 最小截面在激励器出口下游 10~15 h 处, 因而该位置的时均速度值最大。

湍流强度则随着流向距离的增加不断衰减, 在出口下游 15~20 倍特征尺寸处, 开始接近常数 (图 7)。这表明, 在 $x/h = 10 \sim 15$ 之前, 流动是具有明显的非定常特征的, 在该距离之后, 流动具有定常、充分发展湍流特征。

2.4 时均速度、湍流度沿展向 (与激励器出口长边垂直方向, 以 y 表征) 的变化

合成射流的时均速度、湍流度径向分布都与自然射流速度径向分布相似, 时均速度类似于正态分布曲线, 而湍流度则呈中间凹两边高的形状。应指出, 由于激励器出口宽度较小 (0.5 mm), 因而剪切层较薄, 厚度低于探针宽度 (1 mm), 空间测量误差较大 (图 8)。

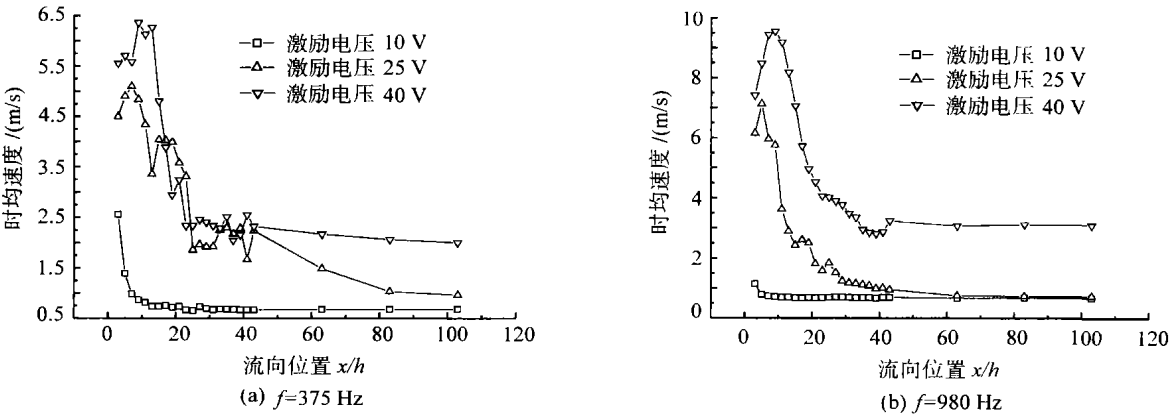


图 6 中心线上, 时均速度沿流向的变化规律

Fig 6 Mean velocity as function of the axial distance from exit

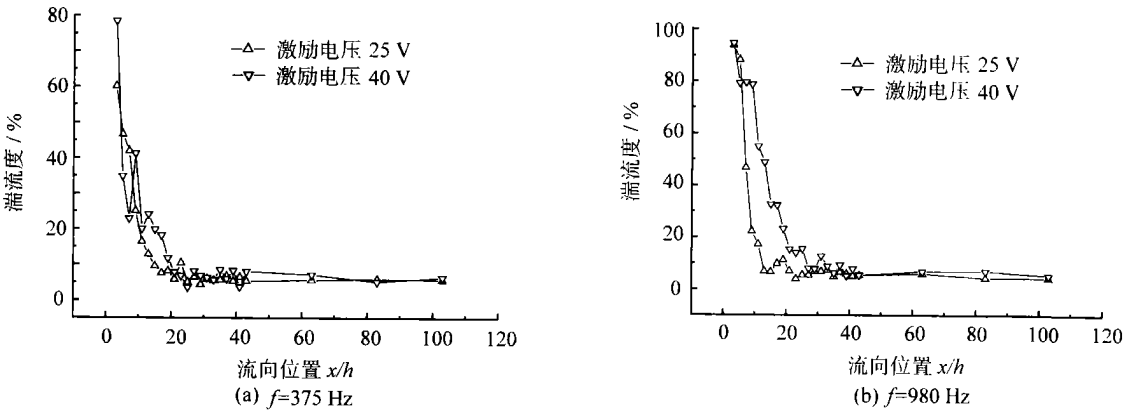


图 7 中心线上, 湍流度沿流向的变化规律

Fig 7 Turbulent intensity as function of the axial distance from exit

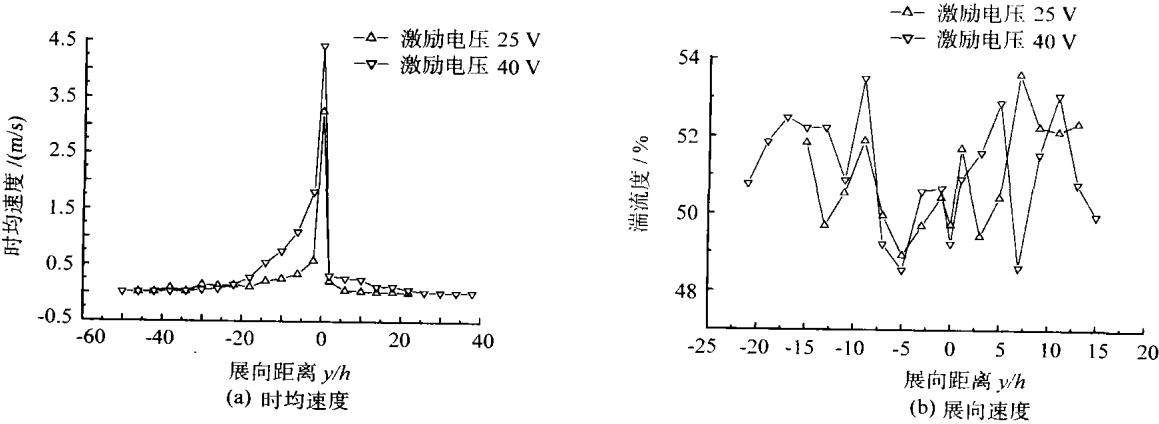


图 8 $x/h = 5$ 截面处, 时均速度、湍流度展向分布 ($f = 375$ Hz)

Fig 8 Span-distribution of mean velocity and turbulent intensity at $x/h = 5$ 0 for excited frequency of 375 Hertz

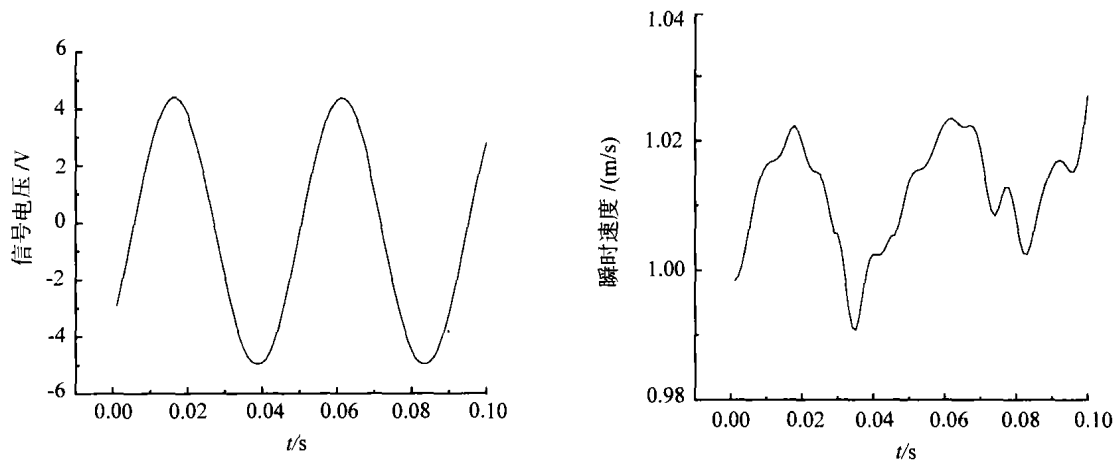


图 9 $x/h = 3$ 处激励信号与速度随时间变化的对比 (激励电压 10 V, $f = 15$ Hz)
Fig 9 Comparison of excited signal wave to temporal velocity profile at $x/h = 3$
for excited voltage of 10 V and frequency of 15 Hertz

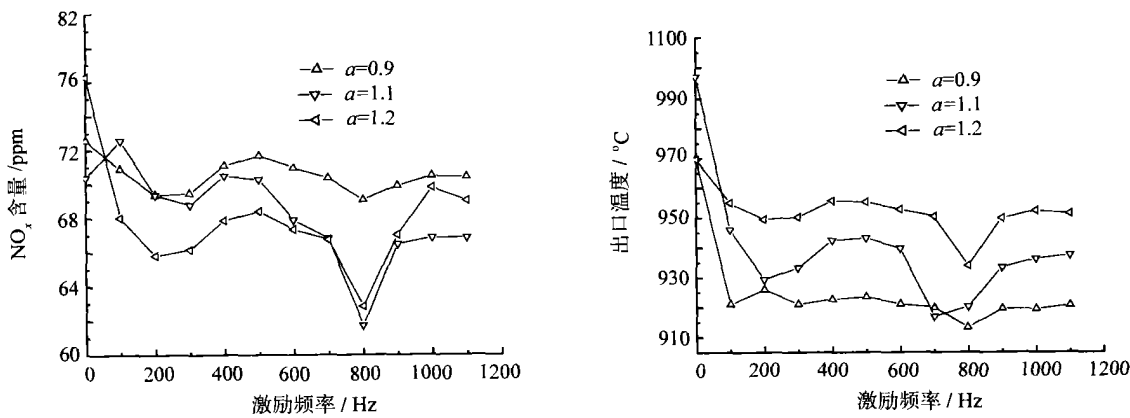


图 10 激励频率对燃烧室出口 NO_x 含量的影响 (激励电压 30 V 余气系数 $a = 0.9, 1.1, 1.2$)
Fig 10 Concentration change of NO_x with excited frequency for excited voltage of 30 V
and residual air coefficient of 0.9, 1.1, 1.2 respectively

2.5 单点速度随时间的变化与激励
信号比较分析

合成射流是激励器膜片周期振荡下的一个流体行为, 随着距离出口下游位置的不同和流体内部的发展演化, 瞬时速度的周期性表现就有所不同(图 9)。在出口下游, 瞬时速度的变化是在一定的平均值基础上进行的, 即一个完整周期内, 正负速度平均值不为零, 从而对外界流体的输出动量是不为零的, 这与相关文献结果一致^[1]。

2.6 激励频率对燃烧器出口 NO_x 含量、
温度的影响

激励频率决定了外加给助燃风管路内附面层的动量扰动的频率, 即可以直接与附面层中的 T-

S 波相耦合的外加涡波的频率, 因此, 激励频率表征合成射流与助燃风主流之间的耦合程度及耦合之后的流动的影响程度。图 10 为燃烧器出口截面平均 NO_x 含量随激励频率的变化, 从中可以看出, 与激励器本身的频率特性相似(图 4), 在接近最佳激励频率的位置(图中约 300 和 800 Hz), 对耦合后的流动, 燃料与空气、燃烧产物与空气的混合影响最明显, 对应的温度、 NO_x 含量影响也最大(对应的 NO_x 含量较无激励时分别降低了 13%, 17%), 因此, 选择适当的激励频率是取得降低 NO_x 效果的前提。

2.7 激励电压对燃烧器出口 NO_x 含量、
温度的影响

激励电压决定合成射流速度的高低, 也就决

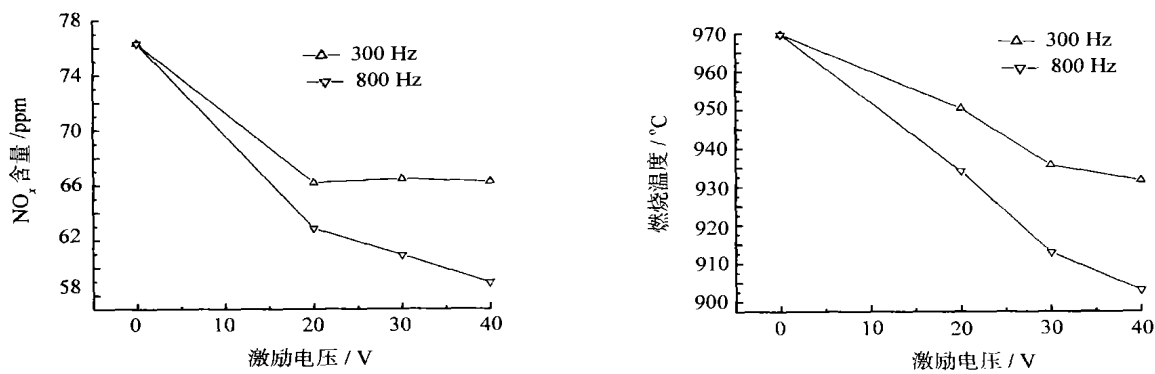


图 11 激励电压对燃烧器出口NO_x 含量、温度的影响 (余气系数 $a=1.1$)

Fig 11 Concentration change of NO_x and temperature at exit cross-area with excited voltage for residual-air coefficient of 1.1 and excited frequency of 300 and 800 Hertz respectively

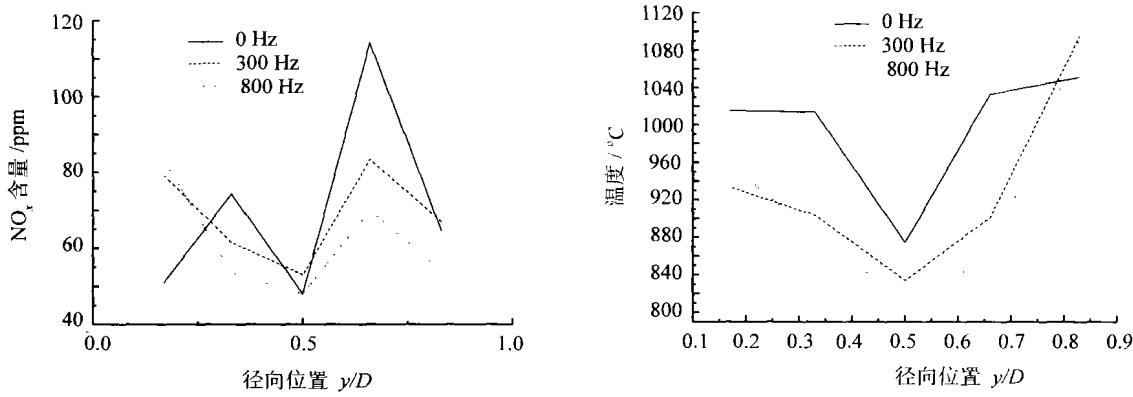


图 12 合成射流激励对燃烧器出口NO_x 含量、温度径向分布的影响
(余气系数 $a=1.1$, 激励电压 30 V)

Fig 12 Radial distribution of Concentration change of NO_x and temperature at exit for residual-air coefficient of 1.1 and excited voltage of 30 V

定了合成射流对主流的影响能力, 从而影响空气与燃料的混合、烟气与烟气、烟气与剩余空气之间的掺混以及相关的NO_x 生成。在一定激励频率下, 随着激励电压的增加, 合成射流影响力增加, 造成相应的出口温度降低, NO_x 生成量降低。另外, 在不同频率下, 增减激励电压对NO_x 含量的影响效果不同, 而且, 当频率为 300 Hz 时, 激励电压高于 20 V 后, 影响效果随着激励电压的增加存在饱和现象(图 11)。

2.8 合成射流激励对燃烧器出口NO_x 含量
径向分布的影响

由于助燃风的侧向进风, 燃烧器出口的温度、NO_x 含量径向分布是不均匀的, 存在一定程度的温度、组分含量梯度。合成射流激励加入之后, 改

善了中心附近富油区、壁面附近贫油区油气的混合, 径向分布趋于均匀, 降低了相应的梯度, 减少了局部高温区的存在, 从而不但降低了局部NO_x 含量(图 12), 而且也降低了出口总体的NO_x 含量(图 10, 11), 相应的温度分布也验证了这一点。

3 结 论

通过上述的实验结果与分析, 我们可以得到下列结论:

- (1) 合成射流速度大小与激励器结构、激励信号频率、激励信号电压有直接关系, 存在一个或几个最佳激励频率, 速度随电压在不同电压范围内呈分段式线性关系。
- (2) 在流向中心线上, 随着向下游距离的增加, 时均速度呈先增后降的趋势, 湍流度则单调递

减。当激励电压有效值 40 V、激励频率 980 Hz 时, 时均速度在 15 倍缝宽处达到最大, 约 14.2 m/s, 激励器出口附近湍流度近 80%。

(3) 合成射流速度径向分布趋势与常规射流无异, 但剪切层厚度较窄。

(4) 随着流向距离的不同, 单点瞬时速度随时间的变化越发不规则, 一个完整周期内平均值也不为零, 表明有“净”动量扰动给予外界流体。

(5) 适当参数的合成射流激励的加入, 可以促进助燃风与燃料、烟气与空气之间的掺混, 减少 NO_x 生成, 降低环境污染, 本实验条件下降低幅度最大为 17%。

参考文献

[1] Yair Guy, Thomas E M d. aughlin, Julie A Morrow. Velocity

Measurements in a Synthetic Jet[R]. A IAA 2001- 0118
[2] Greenblat D, W ygnanski I Dynamic Stall Control by Oscillatory Forcing[R]. A IAA Paper 98- 0676, 1998
[3] Guy Y, Morrow J A, M d. aughlin T E. Parametric Investigation of the Effects of Active Flow Control on the Normal Force of a Delta Wing[R]. A IAA Paper 2000- 0549, 2000
[4] Guy Y, Morrow J A, M d. aughlin T E. Velocity Measurements on a Delta Wing with Periodic Blowing and Suction [R]. A IAA Paper 2000- 0550, 2000
[5] W ygnanski I, Seifert A. The Control of Separation by Periodic Oscillations[R]. A IAA Paper 94- 2608, 1994
[6] 罗振兵, 夏智勋, 方丁西, 等. 合成射流影响因素[J]. 国防科技大学学报, 2002, 24(3): 32- 35