

应用合成射流技术增强燃气/氧气掺混*

罗振兵, 夏智勋, 王志吉, 胡建新, 赵建民

(国防科学技术大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 为增强燃气/氧气的掺混, 基于旋涡系统的非线性控制理论, 在合成射流激励器的简化模型基础上, 对激励器处于不同工作情形下增强燃气/氧气的掺混流场进行了数值模拟和分析比较, 结果表明: 合适的激励器工作组可以显著增强燃气/氧气的掺混程度及换热, 合成射流的控制效果与激励器的布局、强度和相位等密切相关。

关键词: 合成射流技术*; 控制射流; 激励器; 射流装置; 混合; 数值仿真

中图分类号: V235.213 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2003) 02-0166-03

Enhancing fuel/oxygen mixing using synthetic jet actuators

LUO Zhen-bing, XIA Zhi-xun, WANG Zhi-ji, HU Jian-xin, ZHAO Jian-min

(Inst. of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Based on non-linear control theory of the vortex system, the operation principle, characteristics and potential applications of the synthetic jet technology were introduced briefly. To enhance the fuel/oxygen mixing, simplify the model of synthetic jet actuator, the flow-field of mixing enhancement using synthetic jet actuators at different cases was simulated. It is shown that an appropriate synthetic jet actuators workgroup can significantly enhance fuel/oxygen mixing.

Key words: Synthetic jet technology*; Control jet; Exciter; Fluidic device; Mixing; Numerical simulation

1 引 言

下一代冲压发动机要求燃气/空气能在较短时间内充分掺混, 以提高燃烧效率。应用合成射流技术, 通过改变激励器电信号的频率、振幅和相位即可根据燃气流量、飞行速度及空气流量的变化进行调节控制, 达到有效增强掺混的目的。国外对这一全新技术正进行机理、实验和应用的研究^[1-5]。

20世纪90年代初研究发现, 将大量微尺度的扰动控制流直接耦合进宏观大尺度流动中, 小尺度的扰动流即可引起大的宏观效应^[6]。合成射流激励器是一种小型或微型流体控制器件, 在流动壁面内设置的开缝(或孔)密封腔内利用压电材料的振动, 在缝隙处产生连续不断向外扩展的一系列非定常涡对(或涡环), 它对主流的作用类似于一股射流, 在旋涡对向下游迁移的过程中会产生一低压区, 从而达到对主动流动的控制。本文在对合成射流影响因素研究^[7]的基

础上, 对合成射流增强燃气/氧气的掺混流场进行数值模拟。

2 合成射流增强掺混及换热的数值分析

2.1 合成射流激励器数学模型

合成射流激励器产生的流场(见图1)的入流速度方向是交替变化的, 正是这个特点, 才在激励器出口产生旋涡对并向下游迁移形成合成微射流。Rizzetta等人采用DNS方法对激励器腔体内流场及出口流场的数值模拟^[8]显示, 腔体内的流动在几个计算循环之后变得具有周期性。因此, 针对激励器腔体内流场及合成射流形成的特点, 在只模拟激励器外场流动的情况下, 在出口缝平面采用周期速度分布函数作为连续变化的边界条件是合适的。考虑到激励器出口窄缝有一定深度以及流体的粘性, 认为在出口处 x 方向上的速度分布函数为 $g(x)$, 满足式(2)。同时, 认为入流速度与驱动压电陶瓷的外加信号同步。采

* 收稿日期: 2002-06-04; 修订日期: 2002-09-10。基金项目: 国家自然科学基金项目(50176055)。

作者简介: 罗振兵(1979—), 男, 硕士生, 研究领域为合成射流应用技术及冲压发动机技术。

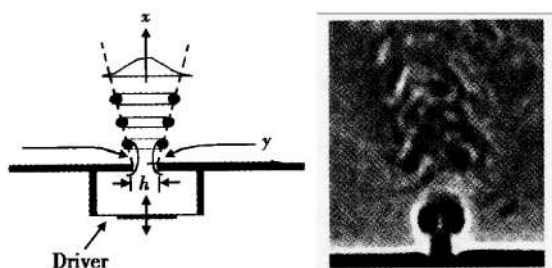


Fig.1 Schematic of synthetic jet actuator and schlieren of synthetic jet flowfield

用正弦电压信号驱动,激励器出口速度分布函数为

$$u_n(y=b, x, t) = u_m g(x) \sin 2\pi f t \quad (1)$$

$$g(x) = \cos(\pi x/h), -h/2 \leq x \leq h/2 \quad (2)$$

式中 u_m 为激励器出口最大速度, x, y 分别代表展向和流向, f 为驱动频率, $g(x)$ 为 x 方向上速度分布函数, b 为各激励器在 y 方向的位置。

2.2 合成射流增强掺混及换热的物理模型

在 Wang H 等人实验模型基础^[9]上增加激励器 1,4,得到合成射流激励器增强掺混的物理模型如图 2 所示,两个氧气进气口、一个燃气进气口,在氧气/燃气进气垂直方向分别布置激励器 1,2,3,4。

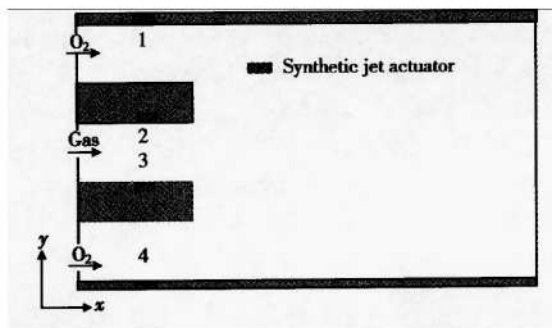


Fig.2 Model and computation domain of mixing enhancement by synthetic jet actuators

2.3 控制方程及边界条件处理

计算模拟的氧气/燃气入口速度都很低(小于 20m/s),取激励器出口射流最大速度为 20m/s,在流速不高的情况下,可假定模拟的流场为不可压,只进行二维处理和考虑流动的粘性和非定常特征。

不可压控制方程的质量、动量守恒方程由连续方程和 N-S 方程的雷诺时均形式分别给出:

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \rho \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} = -\nabla \bar{p} + (\mu_1 + \mu_t) \nabla^2 \bar{u} \quad (4)$$

其中, μ_1, μ_t 分别为层流、湍流粘性系数。

流场的计算区域如图 2 所示。固体壁面边界,采用粘性壁面条件,即满足无滑移条件;燃气/氧气入口提亚声速速度入口条件;激励器出口提速度入口条件, Φ_0 为初相角:

$$\bar{u}_n(y=b, x, t) = u_m g(x) \sin(2\pi f t + \Phi_0) \quad (5a)$$

同时,由 N-S 方程组中动量方程,由于到粘性比速度时谐扰动对 $\partial \bar{p} / \partial x$ 的影响小得多,只考虑速度的时谐扰动性,在激励器出口处有:

$$\partial \bar{p} / \partial x = -\rho \partial \bar{u}_n / \partial t \quad (5b)$$

3 计算结果及分析

3.1 基本算例

计算中,激励器出口宽度 $h = 0.5\text{mm}$, $u_m = 20\text{m/s}$, $f = 1000\text{Hz}$ 。氧气和燃气入口速度分别为 $u_o = 5\text{m/s}$, $u_f = 10\text{m/s}$,入口静温分别为 $T_o = 300\text{K}$, $T_f = 1000\text{K}$,宽度均为 $d = 1.5\text{mm}$ 。将激励器分为两组,激励器 1,4 组成组 I,初相角 $\Phi_o = \Phi_I$,激励器 2,3 组成组 II,初相角 $\Phi_o = \Phi_{II}$ 。根据两组激励器是否工作及相位差对表 1 中 6 种情形分别进行计算模拟。

Table 1 Computational case for mixing enhancement using synthetic jet actuators

Example	Actuator group I	Actuator group II	$\Phi_I - \Phi_{II}$
Case1	off	off	0
Case2	off	on	0
Case3	on	off	0
Case4	on	on	0
Case5	on	on	90
Case6	on	on	180

3.2 计算结果及分析

图 3 是时刻 $t = 0.01\text{s}$ (即第 10 个周期)激励器组不同工作情况下计算得到的 CO 和氧气在流场中的掺混情况(CO 的组分分布)。结果显示,在有合成射流激励器控制的情形下,燃气/氧气的混合程度得到大大的提高,激励器除了起到流动方向控制,使燃气/氧气两股平行射流发生偏转从而交叉增强掺混的作用外,在激励器工作周期的后半周期(即吸过程),组 I 激励器将燃气吸拉到氧气流动侧,从而增强混合(如 Case3),组 II 激励器将氧气吸拉到燃气流动中心从而加强掺混(如 Case2)。两组激励器同时工作增强燃气/氧气的掺混效果更佳(Case4,5,6),掺混效果与两组激励器工作的相位差有关,当相位差为 180° (Case6),掺混效果最佳。这是因为组 I(或组 II)激励器工作在吸过程时,组 II(或组 I)激励器工作在吹

过程,一吸一吹,使燃气流(或氧气流)偏转达到最大,两股流动在垂直方向(y 方向)的来回摆动加剧,使得燃气/氧气两股射流的掺混显著增强。图 4 是 $t = 0.01\text{s}$ 时刻,在下游 $x/h = 24$ 处,各算例计算得到的 CO 质量分数,反映的结果和以上分析相同,即应用合成射流激励器增强混合的效果与激励器的工作情况(布局、强度、相位等)密切相关。

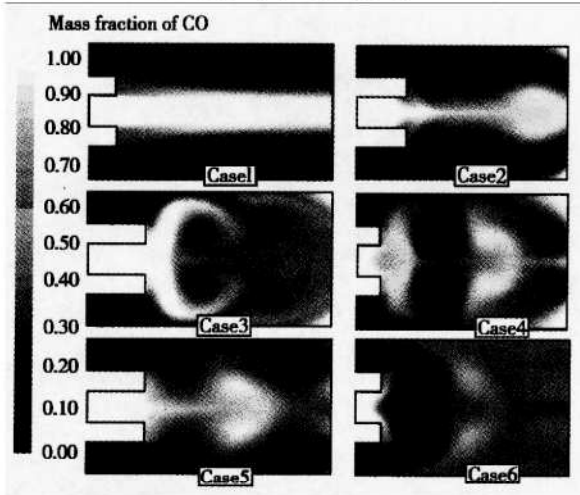


Fig.3 Species profiles of fuel (CO) at different cases

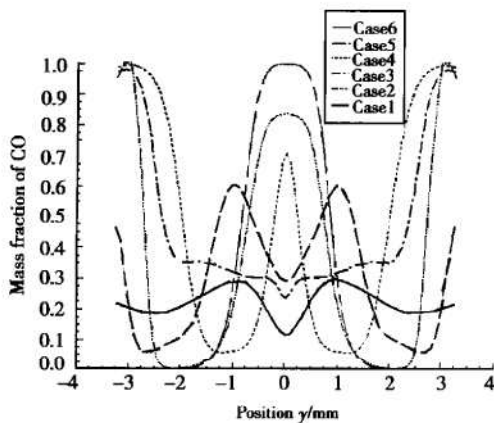


Fig.4 Mass fraction of CO for different cases at $x/h = 24$

大量微尺度的合成射流扰动旋涡元与主流相互作用可以增强主流的湍流度和涡量,从而增强主流的混合,因此该技术在超声速来流条件下可有效增强超燃冲压发动机内的燃烧掺混,提高燃烧效率。

图 5 是合成射流激励器未工作 (Case1) 和工作 (Case6) 情形下,计算流场的静温分布比较。在激励器工作下,中心温度显著降低,由 1000K 很快下降到 500K 以下。

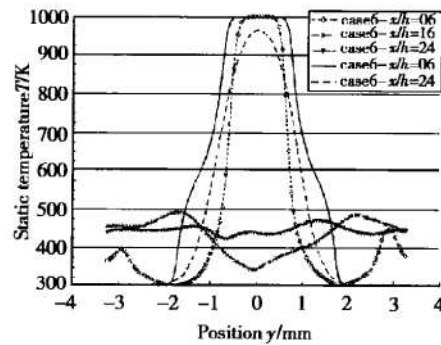


Fig.5 Static temperature for case1 and case6 at $x/h = 6, 16, 24$

4 结论

数值模拟结果表明:应用合成射流控制技术,可以大大提高燃气/氧气的掺混程度以及加强换热,合成射流的控制效果与激励器的工作情况(激励器的布局、强度、相位等)密切相关。随着研究的进一步深入,合成射流技术将有望用于增强超燃冲压发动机内的燃烧掺混、飞行器表面和内部元器件的换热控制等。

参考文献:

- [1] Kral L D. Active flow control technology[R]. ASME Paper No. FEDSM2001-18196.
- [2] Guo D. Vectoring control of a primary jet with synthetic jets [R]. AIAA 2001-0738.
- [3] Chen F J. Development of synthetic jet actuators for active flow control at NASA langley[R]. AIAA 2000-2405.
- [4] Kral L D. Numerical simulation of synthetic jet actuators[R]. AIAA 97-1824.
- [5] Smith B L. The formation and evolution of synthetic jets[J]. Phys. Fluids., 1998,10(9).
- [6] McMichael J M. Progress and prospects for active flow control using microfabricated electromechanical systems (MEMS)[R]. AIAA 96-0306.
- [7] 罗振兵,夏智勋. 合成射流影响因素研究[J]. 国防科技大学学报. 2002,24(3).
- [8] Rizzetta D P. Numerical investigation of synthetic jet flow-fields [R]. AIAA 98-2910.
- [9] Wang H. Fuel-air mixing enhancement by synthetic microjets [J]. AIAA J., 2001,39(12).

(编辑:王居信)