

文章编号: 1000-8055(2009)12-2678-05

自耦合射流激励同向气流掺混的数值研究

聂萌萌, 张靖周, 谭晓茗

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 针对同向两股气流掺混的某一特定物理模型, 对自耦合射流作用下的气流掺混过程进行了数值模拟研究以揭示激励参数对于同向两股气流掺混的影响. 与未施加自耦合射流激励的掺混过程相比, 自耦合射流周期性的吹/吸诱导流场内产生复杂的大尺度涡系结构, 使得同向两股气流形成对流型混合, 有效缩减了主流核心区长度; 随着自耦合激励器驱动频率和驱动振幅的增大, 自耦合射流出口附近的涡强度增强, 同向两股气流掺混效果得到有效改善.

关 键 词: 自耦合射流; 掺混过程; 激励参数; 数值模拟

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Numerical investigation on two parallel flows mixing excited by synthetic jets

NIE Meng-meng, ZHANG Jing-zhou, TAN Xiao-ming

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Numerical investigations on two parallel flows mixing process excited by the synthetic jets were performed to understand the effects of synthetic jet excitation parameters on the mixing process. As compared to the mixing flow field without synthetic jet excitation, the synthetic jets induce a complicated vortex structure in the mixing flow field through periodical blow-entrain action. These vortexes generate convective mixing between two parallel flows, making it helpful to shorten the length of primary flow core. As the synthetic jet excitation frequency or excitation amplitude increases, the vortex intensity and the mixing effectiveness are obviously enhanced.

Key words: synthetic jet; mixing process; excitation parameters; numerical simulation

两股气流之间的强化混合在工程实际中具有广泛的应用. 譬如, 热动力装置往往要求助燃风和燃料能够在燃烧室内充分掺混, 以提高燃烧效率、改善燃烧室出口气流的温度分布^[1]; 在发动机排气喷管红外辐射抑制中, 往往要求热喷流与冷流之间形成充分掺混以有效降低热喷流核心区的峰值温度^[2]. 目前强化气流之间的掺混主要采取机械式和流体动力激励方式^[3-5], 对一些主动的流动控制技术的基础研究仍在不断进展之中.

自耦合射流 (synthetic jet) 技术是一种全新

的流动控制技术, 其基本原理是利用激励器腔体底面薄膜振动驱动腔外的流体不断地从喷口吸入和吹出, 在喷口处形成一系列向外扩展的非定常涡环, 最终形成持续的湍流射流. 由于自耦合射流无需附加额外的流体输入, 可以通过改变激励器底面膜片的驱动频率或振幅等激励参数来改变射流特性, 因此自耦合射流技术被认为具有流场调节、强化传热、增强混合等潜在的应用前景^[6]. 近年来, 国内外研究人员开展了自耦合射流强化气流混合问题的数值计算和实验研究^[7-12], 对其激

收稿日期: 2008-11-11; 修订日期: 2009-03-29

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金 (20070287040)

作者简介: 聂萌萌 (1983 -), 女, 湖南湘潭人, 硕士生, 主要从事传热传质研究.

励机理和效果形成了一定的认识. 本文针对一个典型的同向冷、热两股气流掺混物理模型, 对自耦合射流激励下的气流掺混过程进行数值模拟, 以进一步揭示自耦合射流激励参数对掺混的影响.

1 计算方法

1.1 物理模型

本文根据文献[12]的燃烧室实验模型简化出同向冷、热两股气流掺混物理模型, 如图 1 所示, 由自耦合射流喷口、激励器腔体和混合段三部分组成. 混合段主流和二次流设定为平行进气, 长度 $L = 450 \text{ mm}$, 高度 $H = 75 \text{ mm}$; 主流入口高度为 15 mm , 在混合段进气端采用非对称布置, 其上下边距离混合段顶侧和底侧壁面的距离分别为 10 mm 和 50 mm . 自耦合射流激励器布置在混合段壁面的两侧, 腔体宽度 20 mm 、高度 5 mm ; 自耦合射流喷口宽度 b 为 2 mm 、厚度 0.5 mm , 喷口中心线距混合段进口的轴向距离设定为 30 mm . 两侧的自耦合射流激励器膜片振动同向, 无相位差.

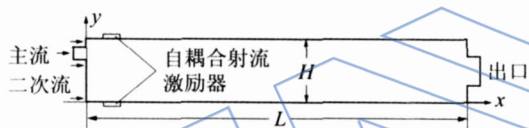


图 1 物理模型简图
Fig.1 Schematic physical model

1.2 控制方程和边界条件

假定混合段内部和自耦合射流腔体内的流动为不可压缩流动, 采用二维非稳定 RNG (renormalization group) $k-\varepsilon$ 湍流模型, 近壁区采用壁面函数法, 其控制方程包括

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} = 0 \quad (1)$$

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

$$\rho c_p \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \rho c_p \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla \bar{T} = (\lambda + \lambda_t) \nabla^2 \bar{T} \quad (3)$$

式中“ $\bar{\quad}$ ”表示时均值.

本文将自耦合射流激励器腔体和混合段内部的流场耦合计算. 运用动网格技术模拟自耦合射流激励器腔体底面膜片的周期性运动, 把振动膜片看成具有正弦曲线运动特性的运动壁面. 质点的运动规律为^[8]

$$y_{\text{wall}} = A \sin(2\pi f t) \quad (4)$$

式中 A 是腔体底面膜片的振幅, f 是振动频率.

1.3 边界条件和计算方法

混合段进出流边界条件: 入口为速度入口, 其中主流速度设为 5 m/s , 温度 1013 K ; 二次流速度设为 2.75 m/s , 温度 313 K . 出口为质量流量出口.

除自耦合射流激励器膜片采用周期性运动边界条件之外, 激励器和混合段壁面均为无滑移边界条件, 同时采用绝热边界条件.

计算方法采用 Fluent 中的离散非稳态隐式求解器, 各参数的离散均采用二阶迎风格式, 以各项计算结果的残差均小于 10^{-6} 来判断解是否收敛. 自耦合射流激励器腔体底面的质点位置随着时间步长按照式 (4) 进行变化, 采用动网格技术调整每个时间步的自耦合射流腔体内的计算网格.

2 结果与分析

2.1 自耦合射流对两股流掺混强化的作用

图 2 为自耦合射流激励器膜片振幅 $A = 2 \text{ mm}$ 、激励频率 $f = 450 \text{ Hz}$ 时, 在一个周期内混合段进口附近的流场局部速度分布矢量图.

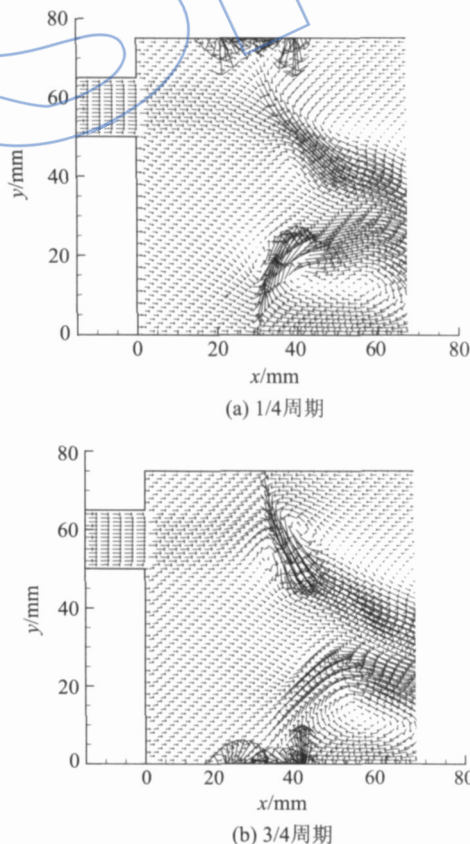


图 2 $A = 2 \text{ mm}$, $f = 450 \text{ Hz}$ 时一个周期内局部速度矢量图

Fig.2 Local velocity vector distribution in one cycle
($A = 2 \text{ mm}$, $f = 450 \text{ Hz}$)

在 $1/4$ 周期时刻, 自耦合射流激励器膜片同

步运动到最大行程,混合段上方激励器腔体内的气体受到膜片压缩而向燃烧室内喷出,在出口处形成涡对,下方激励器则从混合段内吸入气体;而在 3/4 周期时刻,混合段下方激励器腔体内的气体受到膜片压缩而向燃烧室内喷出,上方激励器则从混合段内吸入气体.

在自耦合射流激励器狭缝出口处,随着腔体底面的振动,腔体内流体受激从喷口喷出,在出口处形成涡对,随后在自引力的作用下继续向下游运动,在运动的过程中受到自身和周围流体之间的剪切力作用,涡对将经历卷绕掺混、破碎和融合的过程.由于膜片振动频率很高,喷口处周期性形成的涡对不断地向下游发展,从而维持了射流的连续性.在自耦合射流的作用下,混合段内出现复杂的涡系结构,诱导主流流动方向发生明显偏转并与二次流形成对流型混合,从而增强了主流和二次流之间的掺混.

为了更清晰地揭示出自耦合射流对于混合段内主流和二次流之间掺混的强化作用,对有/无自耦合射流激励下的温度分布进行对比分析.

图 3 为无自耦合射流激励下的温度分布,主流和二次流之间的掺混依赖剪切作用,温度分布呈现显著的剪切掺混特征,高温主流核心区较长,温度为 500 K 的等值线轴向长度接近 200 mm,约 13 倍主流入口高度,排气出口温度分层现象比较明显,即存在较大的温度梯度.

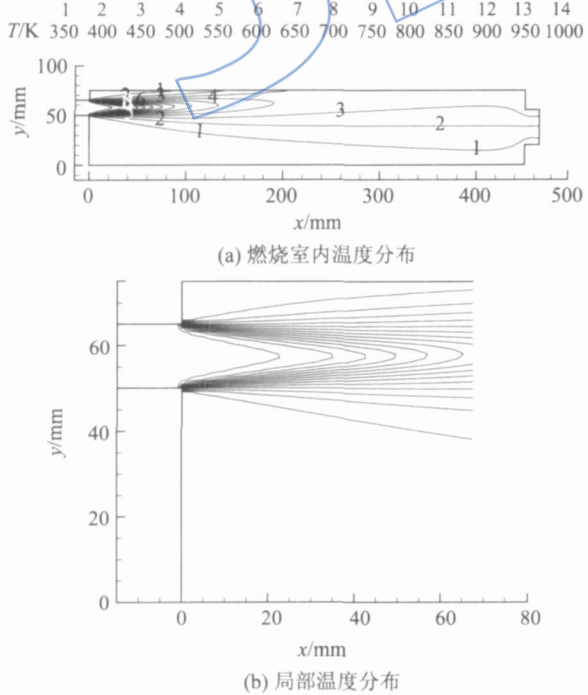


图 3 无自耦合射流激励的温度分布
Fig. 3 Temperature distribution without synthetic jet

图 4 为在自耦合射流激励下的温度分布.相对于无自耦合射流激励下的温度分布,自耦合射流激励下的温度分布存在两个显著的特征:其一,主流核心区在出口下游受到向混合段穿透的自耦合射流作用而发生明显的偏转;其二,由于主流喷口设置的非对称性,主流流动受上侧自耦合射流激励器抽吸/喷吹的影响更显著,主流核心区尾缘也出现局部偏转.由于自耦合射流引起混合段内出现复杂的涡系结构,使得主流和二次流之间的掺混得到强化,高温主流核心区显著缩短,排气出口温度均匀.

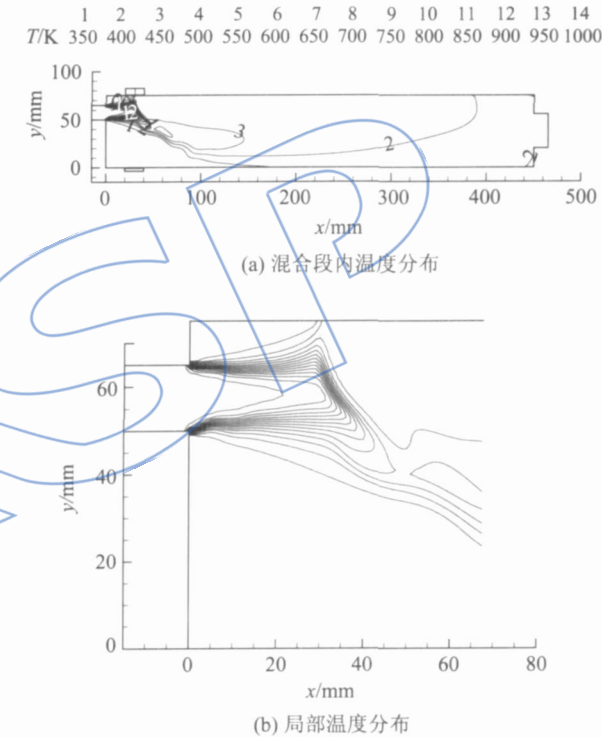


图 4 自耦合射流激励下的温度分布
($A = 2 \text{ mm}$, $f = 450 \text{ Hz}$)
Fig. 4 Temperature distribution with synthetic jet
($A = 2 \text{ mm}$, $f = 450 \text{ Hz}$)

2.2 自耦合射流激励频率的影响

图 5 为自耦合射流激励器膜片振幅 $A = 2 \text{ mm}$ 、激励频率 $f = 800 \text{ Hz}$ 时,在一个周期内不同激励频率下混合段进口附近的局部速度分布矢量图.与图 2 激励频率 $f = 450 \text{ Hz}$ 时相比,可以明显看出,随着自耦合射流激励频率提高,自耦合射流强度增大,使得自耦合射流的穿透能力增强,在混合段内诱导的涡系结构强度得到提高,更有利于两股气流之间的强化混合.

图 6 为自耦合射流激励器膜片振幅 $A = 2 \text{ mm}$ 、不同激励频率下,在混合段沿轴向横截面

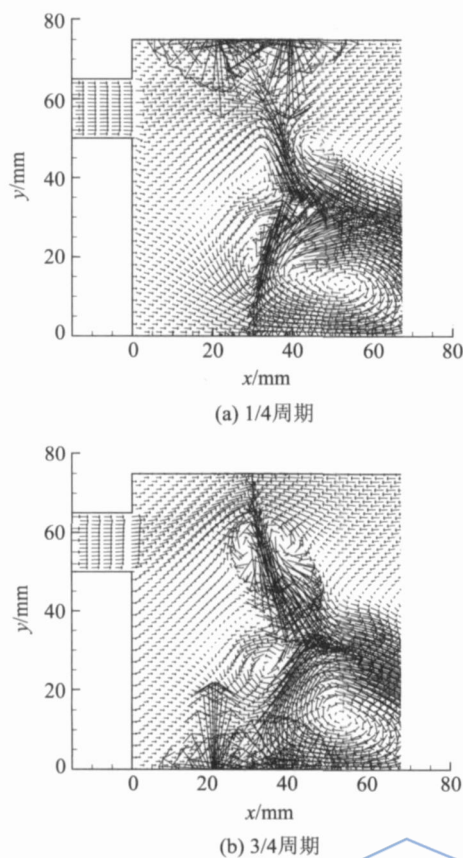


图 5 $A = 2\text{ mm}$, $f = 800\text{ Hz}$ 时一个周期内局部速度矢量图
Fig. 5 Local velocity vector distribution in one cycle
($A = 2\text{ mm}$, $f = 800\text{ Hz}$)

上的温度分布曲线. 未加自耦合射流激励器时, 主流和二次流依赖剪切掺混, 在轴向 100 mm 和 200 mm 截面上高温主流核心区明显. 在轴向 100 mm 处, 混合段的径向 $y/b = 25 \sim 35$ 区间内出现温度最大值在 600 K 以上, 温度分布极不均匀, 呈现典型的剪切型混合特征; 加入自耦合射流激励后, 流场温度最大值转移到混合段的径向 $y/b = 10$ 附近, 而且温度峰值下降到 500 K 以下, 这与主流的偏转和气流间对流型混合的特征是一致的. 随着自耦合射流激励频率的增加, 混合流峰值温度有一定程度的降低且温度分布更趋均匀, 表明自耦合射流激励器的激励频率可明显影响气流之间的掺混效果, 随着自耦合射流激励频率增加, 主流和二次流掺混均匀程度也越明显. 随着主流和二次流掺混距离的增加, 在轴向 200 mm 处, 混合流峰值温度有所降低, 当自耦合射流激励频率为 600 Hz 时, 温度分布已十分均匀.

2.3 自耦合射流激励振幅的影响

图 7 为自耦合射流激励频率 $f = 800\text{ Hz}$ 时, 在不同膜片振幅下, 混合段内的温度等值线分布图. 当膜片振幅为 0.6 mm 时, 自耦合射流强度明

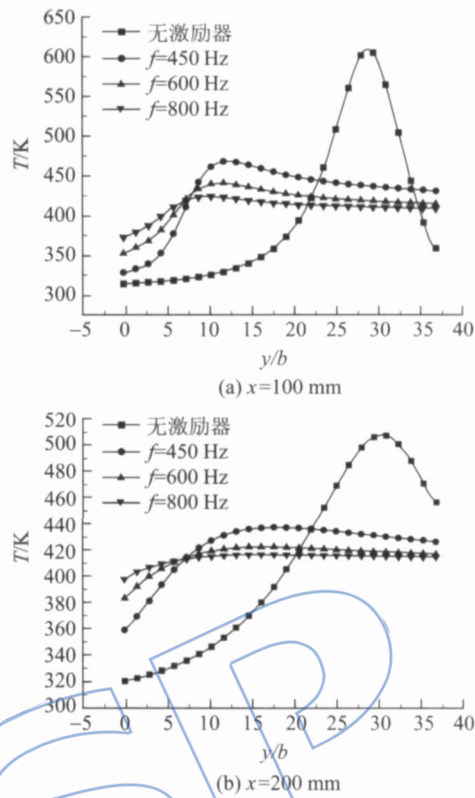


图 6 轴向横截面上温度分布 ($A = 2\text{ mm}$)
Fig. 6 Temperature distribution at streamwise section
($A = 2\text{ mm}$)

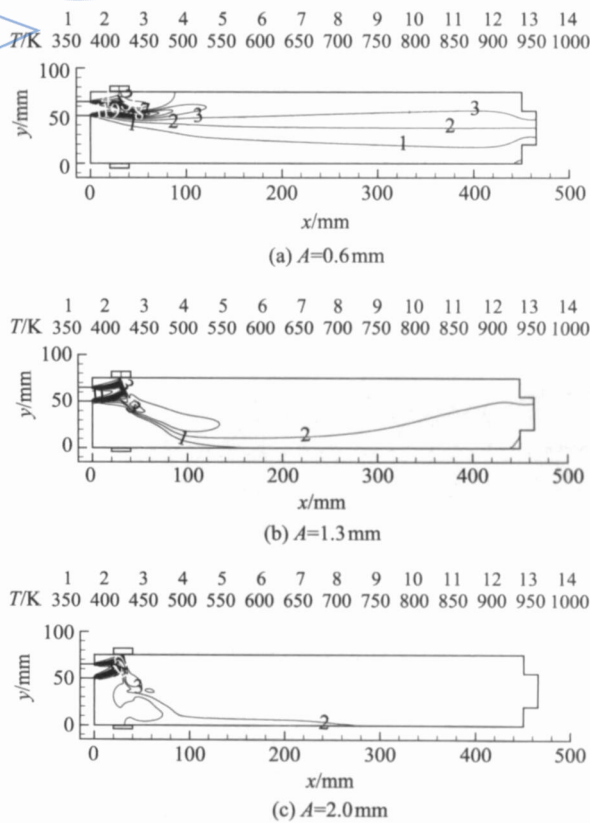


图 7 温度等值线分布 ($f = 800\text{ Hz}$)
Fig. 7 Temperature contour distribution ($f = 800\text{ Hz}$)

显弱于振幅为 2 mm 的情形,对于主流和二次流之间的掺混所产生的影响较弱,作用区域较小。

图 8 为自耦合射流激励频率 $f = 800$ Hz、不同膜片振幅下,在混合段轴向横截面上的温度分布曲线。可以看出,当膜片振幅为 0.6 mm 时,混合流的温度分布与未施加自耦合射流激励时的情况区别并不显著,随着激励器振幅越大,自耦合射流对于主流和二次流的掺混作用才能显现。

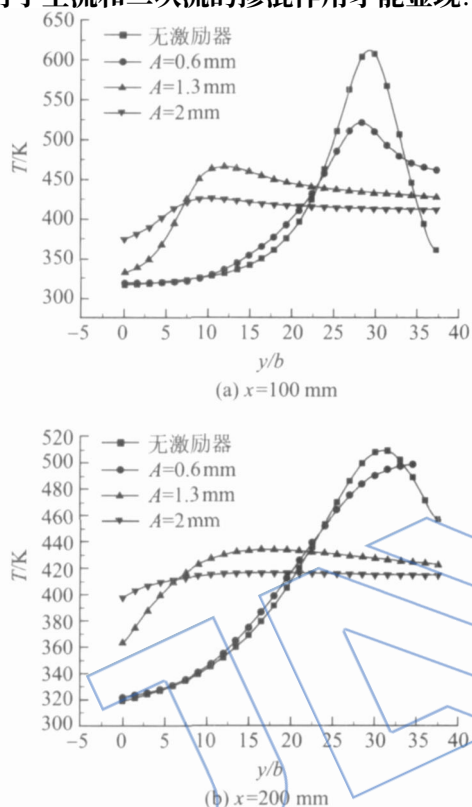


图 8 轴向截面上温度分布 ($f = 800$ Hz)

Fig. 8 Temperature distribution at streamwise section ($f = 800$ Hz)

3 结 论

1) 激励器喷口周期性的吹/吸可产生持续的自耦合射流,在自耦合射流的作用下,混合段内出现复杂的涡系结构,形成主流和二次流之间的对流型混合,有效缩减了主流核心区长度。

2) 自耦合射流激励下的流场存在两个显著的特征。其一,主流核心区在出口下游受到向混合段穿透的自耦合射流作用而发生明显的偏转;其二,受上侧的自耦合射流激励器的抽吸、喷吹影响,主流核心区尾缘也出现局部偏转。

3) 自耦合射流激励频率和振幅对于主流和二次流掺混具有重要的影响。加大自耦合射流激励频率和振幅,可有效增强两股气流之间的掺混均匀程度。

参考文献:

- [1] 岑可法,程军,池涌,等. 高效低污染燃烧及气化技术的最新研究进展[J]. 中国动力工程, 2005, 25(2): 153-159.
CEN Kefa, CHENG Jun, CHI Yong, et al. Recent progress in research on efficient low polluting combustion and gasification technology[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2005, 25(2): 153-159. (in Chinese)
- [2] 张靖周,单勇,李立国. 直升机排气管系统用波瓣喷管引射混合式红外抑制器研究[J]. 航空学报, 2007, 28(1): 32-36.
ZHANG Jingzhou, SHAN Yong, LI Ligu. Investigation on lobed nozzle mixer-ejector infrared suppressor for helicopter exhaust system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica, 2007, 28(1): 32-36. (in Chinese)
- [3] Eckerle W A, Sheibani H, Awad J. Experimental measurement of vortex development downstream of a lobed forced mixer [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1992, 114(1): 63-71.
- [4] Smith L L, Majumaki A J, Lam I T, et al. Mixing enhancement in a lobed injector[J]. Physics of Fluids, 1997, 9(3): 667-678.
- [5] Mitchell M G, Smith O L, Karagozian A R. Effects of passive fuel-air mixing control on burner emissions via lobed fuel injectors[R]. AIAA Paper 99-2400, 1999.
- [6] Smith B L, Glezer A. The formation and evolution of synthetic jets[J]. Physics of Fluids, 1998, 10(9): 2281-2297.
- [7] Ritchie B D, Mujumdar D R, Seitzman J M. Mixing in coaxial jets using synthetic jet actuators[R]. AIAA Paper 2000-0404, 2004.
- [8] ZHANG Jingzhou, TAN Xiaoming. Experimental study on flow and heat transfer characteristics of synthetic jet driven by piezoelectric actuator[J]. Science in China, Ser. E, 2007, 50(2): 221-229.
- [9] 罗振兵,夏智勋,胡建新,等. 合成射流激励器增强同向燃气-氧气掺混数值模拟及机理研究[J]. 固体火箭技术, 2004, 27(4): 267-271.
LUO Zhenbing, XIA Zhixun, HU Jianxin, et al. Numerical simulation and mechanism investigation on equi-directional fuel-air/oxygen mixing enhanced by synthetic jet actuator[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2004, 27(4): 267-271. (in Chinese)
- [10] 罗振兵,夏智勋,胡建新,等. 应用合成射流技术增强燃气-氧气掺混[J]. 推进技术, 2004, 25(3): 199-205.
LUO Zhenbing, XIA Zhixun, HU Jianxin, et al. Numerical simulation of synthetic jet flow field and parameter analysis of actuator[J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(3): 199-205. (in Chinese)
- [11] 赵宏,杨治国,姜惠娟. 压电陶瓷激励影响燃气燃烧器性能的实验研究[J]. 热能动力工程, 2005, 20(1): 22-25.
ZHAO Hong, YANG Zhiguo, LOU Huijuan. Experimental study of the impact of piezoelectric ceramics excitation on the performance of a gas combustor[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2005, 20(1): 22-25. (in Chinese)
- [12] Chen Y, Liang S, Aung K, et al. Enhanced mixing in a simulated combustor using synthetic jet actuators[R]. AIAA Paper 99-0449, 1999.