脉冲射流强化喷流混合的数值模拟

李家军 额日其太 王 强

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院，北京 100191)

摘 要：采用高振幅低流量射流射入亚音剪切层以强化喷流混合，对利用脉冲射流强化喷流混合的流场进行了数值模拟. 利用有限体积法和重整化群(RNG)k-ε 湍流模型求解N-S方程. 分别进行了低亚音马赫数及中等亚音马赫数喷流混合的数值模拟. 数值模拟结果显示，无论是对于低亚音速热喷流还是中等亚音速热喷流，脉冲激励引起喷流在与激励源平行的平面迅速扩展，在与之垂直的平面收缩，当脉冲射流激励的斯德鲁哈尔数在0.2时，可以得到较好混合，而且少量的射流流量(占主流流量的1%)可以极大地增加速度及温度的衰减率，随着流量的增加(占主流流量的3%)，喷流混合得到进一步的强.

关 键 词：流动控制；脉冲射流；强化混合

中图分类号：O 357

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)12-1491-04

Jet mixing enhancement by pulsed blowing

Li Jiajun Eriqitai Wang Qiang

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: This work uses a technique for injecting high amplitude and low mass flux pulsed slot jets into subsonic shear layers for the purpose of jet mixing enhancement. The 3-D flow fields of the jets with pulsed jet blowing for mixing enhancement were simulated numerically. The finite volume method, RNG k-ε turbulence model were employed to solve N-S equation. Numerical simulations of low Mach number 0.2 and middle Mach number 0.6 jets exhausting into fluid were conducted. These simulations show that pulsed jet blowing effected on either low Mach number jets or middle Mach number jets causes the jet to expand rapidly in the plane parallel with the actuators and to contract in the plane perpendicular to the actuators, the intensity of motion and associated mixing are higher when the excitation Strouhal number is around 0.2, and small injection flow rates can provide tremendous increases in both velocity and temperature decay rates. With the increase of the pulsed slot jet mass flux, a better mixing can be obtained.

Key words: flow control; pulsed blowing; mixing enhancement

通常，把对喷流的控制分为2类：主动与被动控制. 被动控制比如，在喷管出口设置的各种静止小突片，齿形的喷管尾缘修形，还有其它各种对喷管出口的几何修形的研究.

20世纪90年代以来，重点发展的是喷流的主动流动控制方法. 使用高振幅低流量脉冲射流激励喷管出口平面附近的剪切层，这些带有脉冲频率的横向喷流有效激发了剪切层不稳定模式，极大改变了喷流流动的发展[1-2]. 相关的研究[1-3]表明恰当设计的射入喷管出口附近剪切层的高振幅、低流量的脉冲射流可以明显改变喷流的发展.

由于在许多例子中，被动控制只需要简单的修改设计、改变喷口几何形状，因此具有一定的吸引力. 而且由于它的简单易行使得它的部件易于制造. 然而，主动流动控制有2个主要的优势是被

收稿日期：2008-12-02

作者简介：李家军(1980—)，男，黑龙江桦南人，博士生，Lijiajun@sjp.buaa.edu.cn.

动流动控制技术无法达到的.首先,主动流动控制可以在需要时开启,不用时关闭,减少喷流混合系统带来的损失.其次,主动流动控制可以用于控制复杂的、动态过程.

在先前的工作中,进行了脉冲射流强化圆柱喷管喷流混合的数值研究[4],结果表明脉冲射流的作用下,喷流的速度核心区面积得到极大的衰减.为了考察脉冲射流对热态工作条件下喷流混合的影响,本文进一步对轴对称收敛喷管的热喷流混合进行详细的数值模拟研究.

1 数值模拟方法

在目前的工作中,在数值模拟中使用有限体积法求解非定常可压缩流 N-S 方程,为数值模拟这种性质的流场,采用大时间步隐式积分保证计算效率.

采用重整化群(RNG)k-ε 二方程湍流模型描述喷流.对于喷管流动,首先完成稳态的流动,在稳态解的基础上开始非稳态激励计算.

模拟对象由一个轴对称收敛喷管和分布在喷管出口 2 侧的 2 个 90°圆弧出口的注气室构成(见图 1),注气室提供交替的脉冲射流,冲击喷管出口喷流的剪切层.考察脉冲射流对流场结构、以及核心区长度的影响.

下游出流边界设定为在下游至少 20 倍喷管出口直径处,阻止下游边界对重要区域的影响.在轴线方向采用最小限度的网格拉伸(6%~8%)解决主要的受迫扰动.

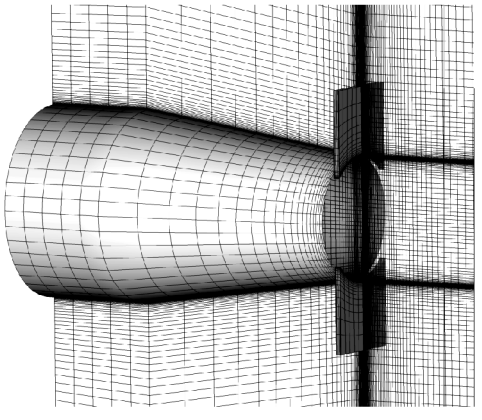


图 1 喷管及注气室示意图和网格分布

在脉冲喷管进口应用边界条件,变化流体的质量流量模拟脉冲射流,流量的变化为

$$\dot{m}(t)=\dot{m}_0+\Delta\dot{m}\sin(\omega t+\varphi) \qquad (1)$$

式中,$\dot{m}_0$ 表示质量流量的平均值;$\Delta\dot{m}$ 表示扰动的振幅;ω 表示角频率;φ 表示相位角.一个周期内脉冲射流的质量流量的变化图如图 2 所示(T 为周期数).

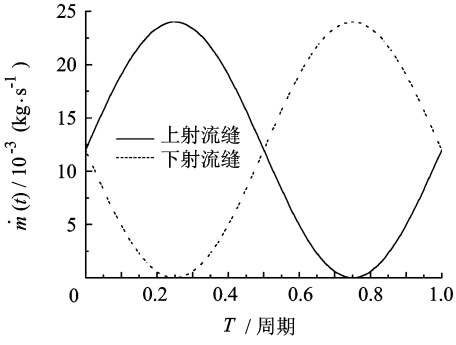


图 2 脉冲射流系统质量流量变化图

2 结果及分析

作为模拟对象的轴对称收敛喷管出口直径 D_{jet} 为 65 mm,u_{jet} 为出口速度.射流缝宽 3 mm,占 90°圆弧.分别进行了低亚音马赫数($Ma=0.2$)喷流混合的模拟验证及中等亚音马赫数($Ma=0.6$)喷流混合数值模拟.

2.1 $Ma=0.2$ 条件下模拟验证及结果分析

主流流量 M_{main} 为 0.24 kg/s,脉冲射流流量 M_{pulsejet} 占 M_{main} 的 1%,每一射流缝峰值流量为 0.0024 kg/s,进口总温为 373 K,远场压力为 101 325 Pa,温度为 300 K,$St=0.2$.其中

$$St=f\times D_{\mathrm{jet}}/u_{\mathrm{jet}} \qquad (2)$$

图 3 为无激励状态喷流马赫数图(z 平面为与激励源垂直平面),显示喷流潜在核心区延伸至 $x=16r_0$(r_0 为喷管出口半径).

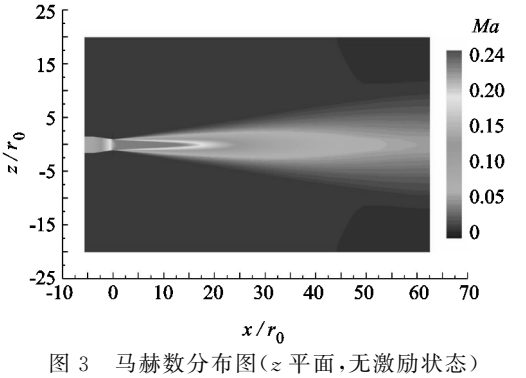


图 3 马赫数分布图(z 平面,无激励状态)

图 4 给出了时间平均的马赫数场结果.尾喷流与环境气流的迅速混合以及喷流核心区的明显缩短显示出脉冲射流对时间平均流场的非稳态影响.在如图所示的与激励源平行的平面,这种影响促使尾喷流迅速扩散传播,如图所示,喷流核心区大致延伸到 $x=7r_0$.

图 5 给出了瞬态的马赫数分布.脉冲射流激

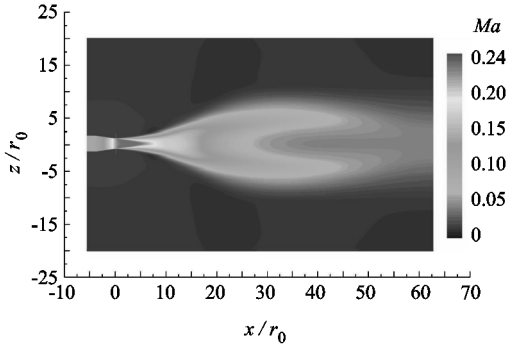
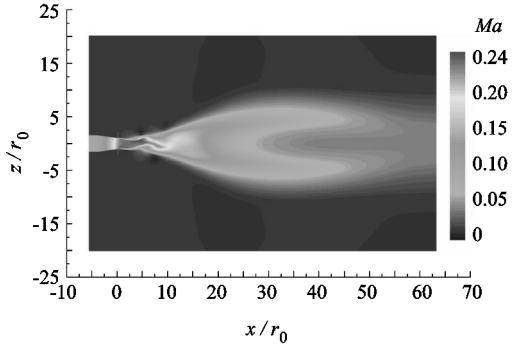
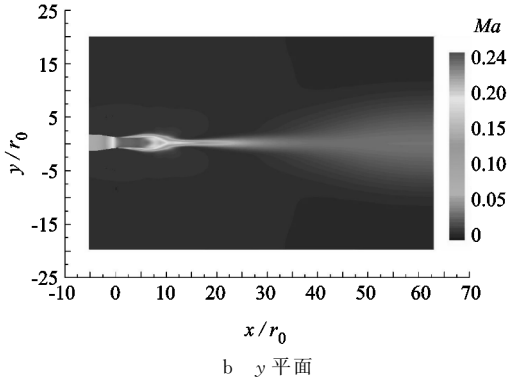


图 4　马赫数时均分布图(z 平面, $St=0.2$)

励对尾喷流的作用明显,与无脉冲激励状态相比,在脉冲激励的作用下,尾喷流在 z 平面上下拍动,迅速与环境气流混合,在 y 平面,在喷管出口平面下游呈现明显的紧缩,并在 $x=13r_0$ 处达到最小值,这个位置对应着尾喷流在 z 平面上下拍动的最活跃区域以及最大的质量输运区域. 以上现象表明,由于脉冲射流激励的作用,尾喷流在拍动的方向上迅速扩散,喷流紧缩一侧为混合过程提供了质量输运. 因此,喷流在 z 平面扩展,在 y 平面收缩. 图 5 显示喷流的核心区明显缩短.



a　z 平面



b　y 平面

图 5　马赫数瞬时分布图($St=0.2$)

图 6、图 7 分别给出了中心线上的时均无量纲马赫数 Ma/Ma_0 以及时均无量纲温度 T^* 的实验结果[1]与数值模拟结果比较. 同样也给出了未受激励时的中心线上无量纲马赫数及时均无量纲温度分布曲线作为比较.

在脉冲激励的作用下,中心线上的时均无量纲马赫数以及时均无量纲温度得到极大衰减. 如前所述,在喷管出口平面下游 6.5 倍直径 d_0 处对应着喷流拍动的最活跃区域以及最大的质量输运区域. 受此影响喷流中心线上此处速度及温度波动极大,加之时间平均结果中样品数量的选取所带来的误差,因此如图 6、图 7 为在喷管出口平面下游 6.5 倍直径附近的对比结果有一定的误差.

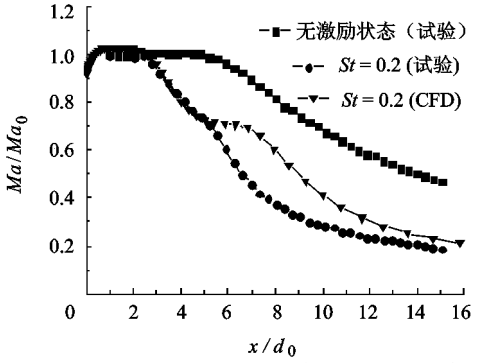


图 6　时间平均的中心线 Ma/Ma_0 分布图

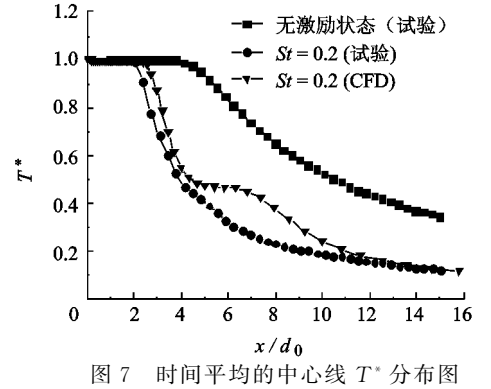


图 7　时间平均的中心线 T^* 分布图

2.2　$Ma=0.6$ 条件下的模拟结果及分析

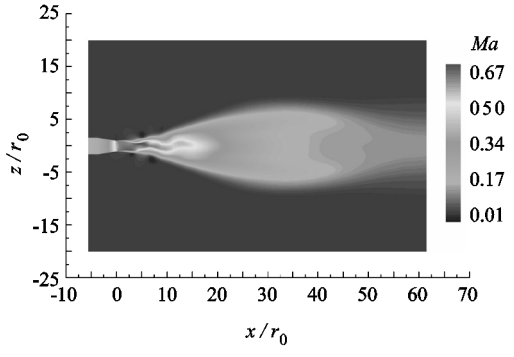
主流流量 0.54 kg/s, 脉冲射流流量占主流流量的 1%,每一射流缝峰值流量为 0.005 4 kg/s,进口总温为 725 K,远场压力为 101 325 Pa,远场温度为 300 K,$St=0.2$.

图 8 给出了瞬态的马赫数分布. 与前面低亚音条件下的模拟结果类似,脉冲射流激励对尾喷流的作用明显,与无脉冲激励状态相比,在脉冲激励的作用下,尾喷流在 z 平面上下拍动,迅速与环境气流混合,在 y 平面,在喷管出口平面下游呈现明显的紧缩,并在 $x=13r_0$ 处达到最小值. 结果显示喷流的马赫数核心区明显缩短.

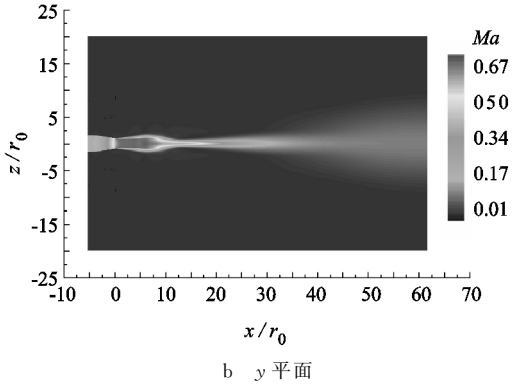
图 9、图 10 分别给出了中心线上的时均无量纲温度随脉冲射流流量及 St 数变化分布图,同样,也给出了未受激励时的中心线上时均无量纲温度分布曲线作为比较.

如图 9 所示,随着射流流量的增加,喷流时均

无量纲温度核心区长度缩短，中心线上的时均无量纲温度衰减程度加剧.



a z平面



b y平面

图8 马赫数瞬时分布图($St=0.2$)

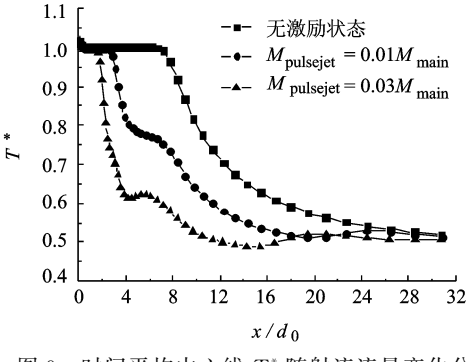


图9 时间平均中心线 T^* 随射流流量变化分布图

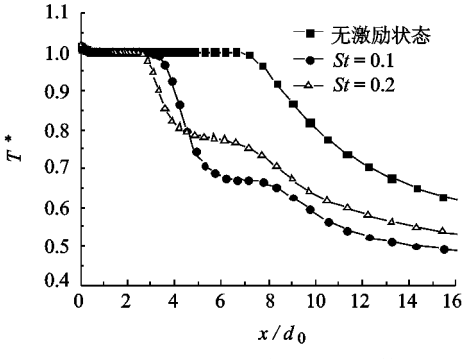


图10 时间平均的中心线 T^* 随 St 数变化分布图

如图10所示，随着 St 数的增加，喷流时均无量纲温度核心区长度缩短，在2～4倍直径范围内，喷流温度得到较大的衰减，4倍直径以后，小的 St 数时均无量纲温度减少幅度相对较大.

3 结 论

综上所述，在 $Ma=0.2$ 的低亚音条件下，当 $St=0.2$ 时，喷流被激发为明显的拍动模式，产生显著的速度、温度衰减，核心区长度减少一半以上. 在 $Ma=0.6$ 的中等亚音条件下，当 $St=0.2$ 时，喷流被激发为明显的拍动模式，产生显著的速度、温度衰减，核心区长度减少一半以上.

由此可知，在 $St=0.2$ 时，无论是低马赫数亚音状态还是中等马赫数亚音状态，脉冲射流都可以促使喷流有效混合，少量的射流流量(占主流流量1%)可以促使温度、速度迅速衰减，缩短喷流温度、速度核心区长度. 另外，大的射流流量可以更加有效的促进喷流混合.

参考文献(References)

[1] Parekh D E, Kibens V, Glezer A, et al. Innovative jet flow control: mixing enhancement experiments [R]. AIAA 96-0308, 1996

[2] Freund J B, Moin P. Jet mixing enhancement by high-amplitude fluidic actuation [J]. AIAA Journal, 2000, 38(10): 1863－1870

[3] Chenault C F, Dorris III J, Smith D, et al. Active core exhaust (ACE) control for reduction of thermal loading [R]. AIAA 2000-2471, 2000

[4] 李家军，额日其太. 脉冲射流强化圆柱喷流混合的三维数值模拟[J]. 北京航空航天大学学报，2007，33(7)：773－776
Li Jiajun, Eriqitai. Mixing enhancement in round jet exhaust using pulsed blowing: 3-D numerical simulalions[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(7): 773－776(in Chinese)

[5] Suzuki H, Kasagi N, Suzuki Y. Active control of an axisymmetric jet with distributed electromagnetic flap actuators [J]. Fluid Dyn, 2004: 36, 498 - 509

[6] Ho C M, Huerre P. Perturbed free shear layers [J]. Ann Rev Fluid Mech, 1984, 16: 365－424

(编 辑：张 嵘)