

文章编号: 1000-8055(2008)04-0642-05

多股自耦合射流相干流动和换热特性数值研究

谭晓茗, 张靖周

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 采用数值模拟的方法对多股自耦合射流在相干条件下的流动和换热特性进行了研究. 研究结果表明: 三股自耦合射流都在出口附近耦合成一股射流向下游运动, 两侧的射流受到中间一股射流的卷吸融合在一起, 融合后仍然是一股沿中心线对称的自耦合射流. 在短轴中心截面自耦合射流型面较宽, 射流喷出后在下流的扩展角度大, 而长轴中心截面射流的型面较窄, 扩展角度较小. 在冲击靶板上, 整个冲击区域呈现出中心温度最低的近似圆形的对称性分布, 对流换热系数曲线呈现出中心对称的波峰分布形状, 表明自耦合射流驻点区换热最强. 对流换热系数沿靶板不同方向的分布趋势基本保持一致.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 多股自耦合射流; 流动特性; 换热特性; 数值模拟
中图分类号: O354; V231.11 **文献标识码:** A

Numerical study on the flow and heat transfer characteristics of coupled synthetic jets

TAN Xiao-ming, ZHANG Jing-zhou

(College of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: Numerical study on the flow and heat transfer characteristics of coupled synthetic jets was carried out. The results show that: Near the slot exit, three synthetic jets couple to one jet and move downstream. Two synthetic jets on both sides are limited and rolled by the middle synthetic jet until they merge together into one centrosymmetric synthetic jet. The synthetic jet spreads rapidly along the minor axis direction of the orifice with bigger spread-angle; while along the major axis direction, the synthetic jet contracts firstly and then spreads slowly. At the target surface impinged by the synthetic jet, the temperature field is symmetric with the lowest filed in center. The heat transfer coefficients also take on the same trends with centrosymmetric waves, which means that the best cooled area is the stagnation. The distribution of heat transfer coefficients along different directions of the target surface is basically uniform.

Key words: aerospace propulsion system; coupled synthetic jets, flow characteristics, heat transfer characteristics; numerical simulation

近年来,一种新型的流动控制技术-自耦合射流激发器(Synthetic jet actuator)的出现和应用成为国内外研究的热点之一^[1].其典型的工作原

理如图 1 所示,在一个带有喷口的封闭腔体内,底面的周期性振动使得腔内气体不停进出喷口,在喷口处产生一系列非定常涡环,这一系列涡环对

收稿日期: 2007-04-17; 修订日期: 2007-07-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50276028)

作者简介: 谭晓茗(1976-),女,江苏徐州人,讲师,博士,主要从事强化传热研究.

外流的作用相当于一股射流,能够对附面层和主流产生重要的影响,甚至可以改变主流的方向,因此被认为是一种全新的流动控制概念.这种人工射流不需要额外的流体供给设备,易于操作,因此其应用范围非常广泛,目前在流动分离及气动力控制、射流矢量控制、增强掺混及加强换热控制、抑制噪声、微流体控制、飞行控制、粒子的散布控制等方面取得了成功的应用^[2-6].与此同时,由于自耦合射流流动具有脉动性,比相同雷诺数下常规连续射流具有更强的夹带能力,所以在强化换热方面也具有潜在的应用前景^[7].

总结目前对自耦合射流开展的研究发现,大多数研究是针对单股自耦合射流开展的,国内的清华大学^[8]、国防科技大学^[9]、南京航空航天大学^[10-11]等科研机构在这方面也做了大量的工作.迄今为止,对于多股自耦合射流的研究工作开展得较少,尤其是对其流动和换热特性的研究还比较缺乏.因此,本文试图通过数值模拟的方法对多股自耦合射流在相干条件下的流动和换热特性进行初步探讨.

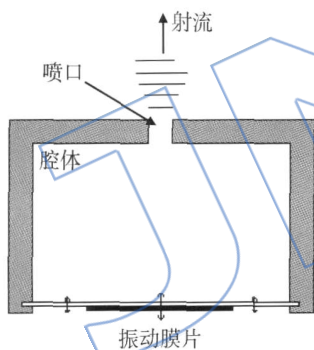


图1 自耦合射流原理简图

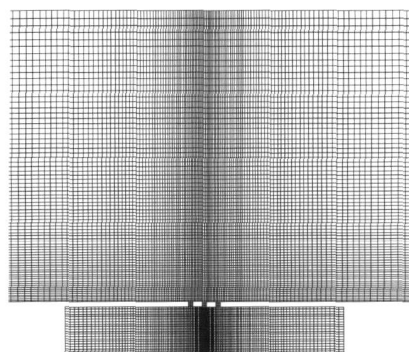
Fig.1 Schematic of synthetic jet actuator

1 计算域和网格划分

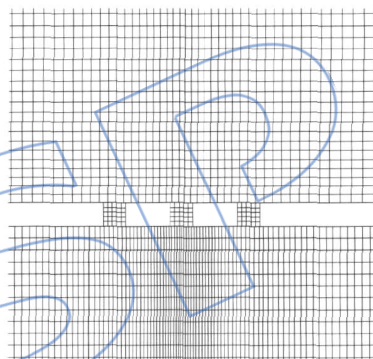
本文的数值模拟区域包括激发器和外部流域.多股自耦合射流共用一个激发器腔体,激发器顶面等间距开三个矩形狭缝喷口,这种设计可以保证三股射流的同步激发,相位一致.激发器的几何尺寸为:腔体直径 $D = 30 \text{ mm}$,腔体高度 $H = 5 \text{ mm}$;喷口宽度 $b = 0.5 \text{ mm}$,高度 $h = 0.5 \text{ mm}$,长度 $l = 10 \text{ mm}$;狭缝喷口间距 $S = 5b$.外部流域:宽 50 mm ,长 50 mm ,冲击距定义为 30 mm ,靶板热流密度为 $1\,000 \text{ W/m}^2$,流体温度设为 298 K .

文中计算模型采用三维模型,根据区域结构的对称性,同时为了节省计算资源,模型仅为几何结构的一半.利用 GAMBIT 软件对计算域进行

网格划分,对称面上的网格如图2所示.在局部区域采用了网格加密处理以提高计算精度和准确性.



对称面网格



局部放大图

图2 计算域网格

Fig.2 Grids configuration of the geometrical model

2 数值计算方法

2.1 数学模型

由于自耦合射流的速度较低,其流动过程由连续性方程

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

和不可压缩的非稳态 N-S 方程所控制

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

其中“ $\bar{\cdot}$ ”表示雷诺平均.

考虑到自耦合射流在形成过程中产生的湍流涡对,本文采用了二维不可压缩非稳态 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,它比标准的 $k-\varepsilon$ 湍流模型能更好地处理涡流,提高精度^[12].

由于 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型是高雷诺数 $k-\varepsilon$ 湍流模型的一种改进形式,所以在近壁区仍然采用壁面函数法来进行处理.

2.2 边界条件

在已有的数值研究中,喷口处的边界条件是

按照正弦速度条件设置的^[13]

$$\overline{u_n}(\xi = 0, \eta, t) = U_0 \sin(\omega t) \tag{3}$$

其中 ξ 表示射流的流向, η 表示射流展向.

这种模拟只是近似地假定喷口处的速度变化规律遵循正弦曲线变化, 没有充分地考虑腔体内部和外部流场的相互影响, 也不能够反映出自耦合射流激发器是利用腔体底面的振动的工作原理. 本文将腔体底面定义为移动壁面, 其运动规律定义为式 (4), 即假定整个腔体底面的运动规律具有周期性正弦曲线特征, 振幅和频率为基本特征量.

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

式中 A 是膜片振幅, f 为振动频率. 当时间 $t = 0$ 时, 膜片的位移为零; 当 $t = \pm 0.25 T$ 时 (T 为周期), 膜片的变形最大.

在 FLUENT 中, 采用用户自定义函数 (UDF) 将运动规律式 (4) 嵌入底面边界, 每个时间步腔体内部的网格点位置都要发生变化, 网格根据式 (4) 进行重新划分.

3 计算结果与分析

3.1 流动特性

本文中设定狭缝长轴方向为 x 方向, 短轴方向对应 y 方向, 射流冲击方向为 z 方向. 图 3 是三狭缝喷口自耦合射流在一个周期内发展的流场矢量图, 图中显示的是 $y-z$ 狭缝短轴中心截面和 $x-z$ 狭缝长轴中心截面上的流场矢量. 如图所示, 不管是在喷口长轴方向还是短轴方向, 三股自耦合射流都在出口附近耦合成一股更强大的射流向下游运动, 流场都经历了周期性的发展.

在 $y-z$ 平面, 合成射流的发展和单个射流的发展规律相似, 在 $t = 1/4 T$ 时, 腔体底面膜片向上运动, 气体从腔体内部喷出, 在喷口附近形成一个反向涡对; 在 $t = 1/2 T$ 时, 这一涡对已经在自耦合射流自身的牵引作用下移动到了相对较远的位置, 逐步与周围的气体掺混, 不断进行动量交换, 喷口出口的涡对消失; 在 $t = 3/4 T$ 时, 自耦合射流继续向下游发展并最终耗散于下游的流场中, 同时腔体底面膜片向下运动, 将喷口外部附近的流体抽吸进激发器腔体; 到 $t = 1 T$ 时, 一个周期结束的同时伴随着又一个新周期的开始, 气体从腔体喷出, 生成新的涡对, 这时可以同时看到新旧涡对. 正因为激发器底面膜片不停地做着周期性振动, 出口处不断有反向涡对生成, 并向下游发展, 补充到自耦合射流中去, 维持了自耦合射流的

延续性.

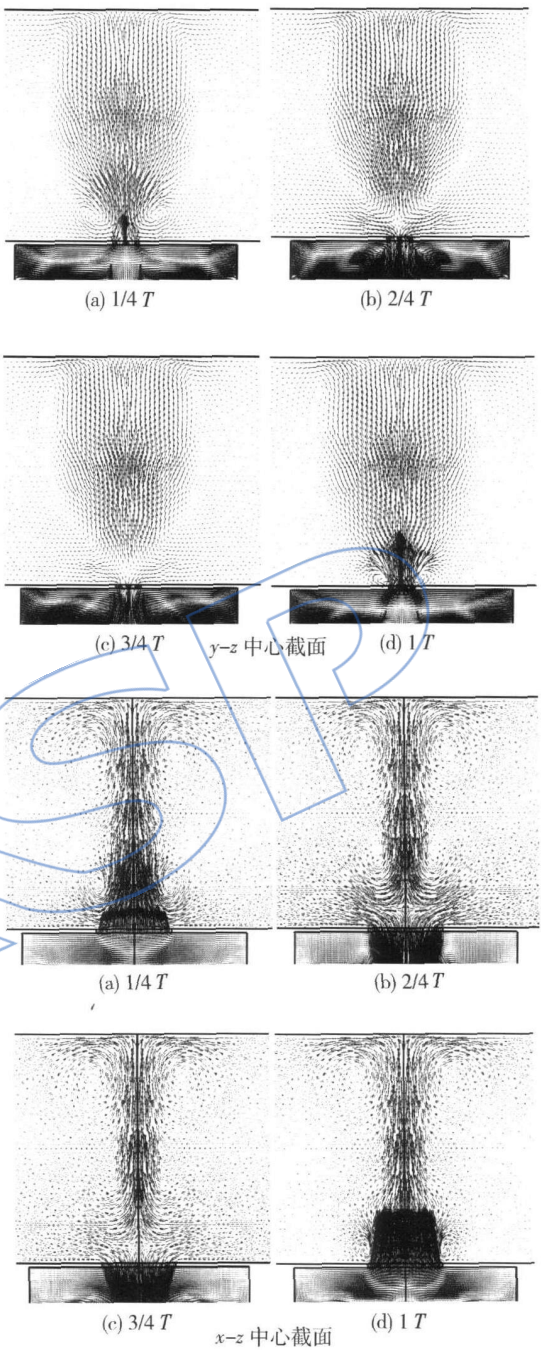


图 3 对称面流场矢量图

Fig. 3 Plots of velocity vectors on centrisymmetrical sections

在 $x-z$ 平面, 这一流场剖面 and 单股自耦合射流的剖面基本相同 (如图 4 所示), 三股自耦合射流融合后仍然是沿中心线对称的自耦合射流, 这一点和从 $y-z$ 平面看到的现象吻合, 即两侧的射流受到中间一股射流的卷吸, 射流由两侧向中间融合, 融合后成为一股中心对称的射流向下游发展, 这说明中间一股射流的卷吸能力较强. 比较后发现, 在 $y-z$ 平面自耦合射流型面较宽, 射流喷出

后在下游的扩展角度较大,而从 $x-z$ 平面上看,射流的型面较窄,扩展角度较小。

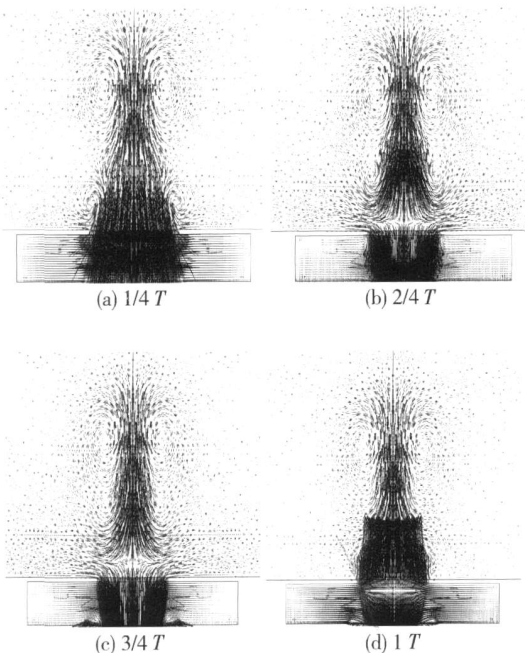


图 4 单股自耦合射流 $x-z$ 中心截面速度矢量图
Fig. 4 Plots of velocity vectors of synthetic jet on $x-z$ centrisymmetrical section

3.2 换热特性

图 5 所示为多股自耦合射流冲击下的恒热流靶板在一个周期内的温度场变化图. 图中温度变化采用等值线表示. 根据图示,从整体上看,冲击驻点区域温度最低,整个冲击区域呈现出中心温度最低的近似圆形的对称性分布,这进一步说明

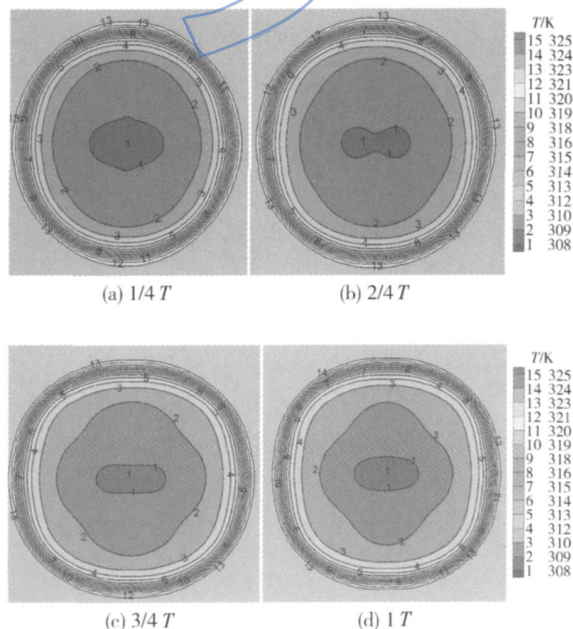


图 5 靶板温度场云图(局部放大)

Fig. 5 Plots of temperature contour of heated plate

三股自耦合射流相干后的发展近似于是中心对称的圆形三维射流. 在中心区,自耦合射流的扩展作用范围在短轴方向要略大于长轴方向,从而引起靶面中央的温度椭圆形分布长轴出现在喷口短轴方向,进一步反映出自耦合射流在长短轴方向上的速度分布特征对换热特性的影响。

图 6 是根据靶板表面温度分布得到的平均对流换热系数沿不同方向的分布曲线. 图中曲线呈现出中心对称的波峰分布形状,表明自耦合射流驻点区换热效果最好. 可以看出,对流换热系数沿不同方向的分布规律基本保持一致,和图 5 中温度场呈现近似圆形分布的趋势相对应。

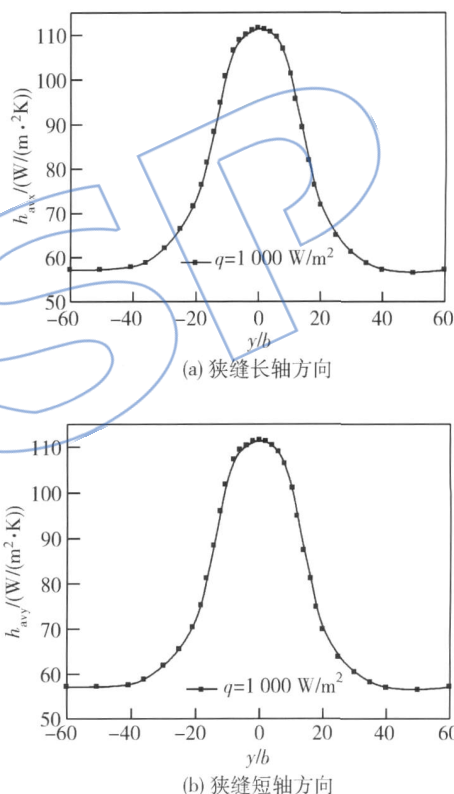


图 6 靶板换热系数在不同方向分布图
Fig. 6 Heat transfer coefficient profiles along different directions

4 结 论

本文采用数值模拟的方法对多股自耦合射流在相干条件下的流动和换热特性进行了研究,取得了以下研究结论:

- (1) 三股自耦合射流都在出口附近耦合成一股更强大的射流向下游运动,流场都经历了周期性的发展。
- (2) 两侧射流受到中间一股射流制约和卷吸,在向下游发展过程中融合到一起,融合后仍然

是沿中心线对称的自耦合射流. 在短轴中心截面自耦合射流型面较宽,射流喷出后在下游的扩展角度大,而长轴中心截面射流的型面较窄,扩展角度较小.

(3) 在冲击靶板上,整个冲击区域呈现出中心温度最低的近似圆形的对称性分布,对流换热系数曲线呈现出中心对称的波峰分布形状,表明自耦合射流驻点区换热最强. 对流换热系数沿靶板不同方向的分布趋势基本保持一致.

参考文献:

- [1] Smith B L, Glezer A. The formation and evolution of synthetic jets[J]. *Physics of Fluids*, 1998, 10(9): 2281-2297.
- [2] Smith B L, Glezer A. Vectoring and small-scale motions effected in free shear flows using synthetic jet actuators[R]. AIAA Paper 97-0213, 1997.
- [3] Goldstein D B. Two-dimensional synthetic jet simulation[R]. AIAA Paper, 2000, 2000-0406.
- [4] Catlynne E, Rumigny N, Amitay M. Virtual aero-shaping of a clark-Y airfoil using synthetic jet actuators[R]. AIAA Paper2001-0732, 2001.
- [5] Mallinson S G. The operation and application of synthetic jet actuators[R]. AIAA Paper 2000-2402, 2000.
- [6] Honohan A M, Trautman M, Glezer A. Modification of the aerodynamic characteristics of bluff bodies using fluidic actuators[R]. AIAA Paper 97-2004, 1997.
- [7] Mahalingam R, Rumigny N, Glezer A. Thermal management using synthetic jet ejectors[J]. *Transactions on Components and Packaging Technologis*, 2004, 27(3): 439-444.
- [8] 罗小兵,李志信,过增元. 一种流体驱动器-合成喷驱动器[J]. *仪器仪表学报*, 2000, 21(5): 504-507.
LUO Xiaobing, LI Zhixin, GUO Zengyuan. A kind of fluid actuator-synthetic jet actuator[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2000, 21(5): 504-507.
- [9] 罗振兵,朱伯鹏,夏智勋. 合成射流激励器射流矢量的影响[J]. *推进技术*, 2004, 25(5): 405-410.
LUO Zhenbing, ZHU Bopeng, XIA Zhixun. Jet vectoring using synthetic jet actuators[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(5): 405-410.
- [10] 谭晓茗,张靖周. 自耦合射流流动特性和相关参数影响规律的数值研究[J]. *航空动力学报*, 2005, 20(5): 836-840.
TAN Xiaoming, ZHANG Jingzhou. Numerical investigation of influence factors and flow characteristics for a synthetic jet[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2005, 20(5): 836-840.
- [11] 李念,张元堃,徐惊雷. 自耦合射流对平行主射流的矢量偏转实验研究[J]. *推进技术*, 2005, 26(3): 248-251.
LI Nian, ZHANG Kunyuan, XU Jinglei. Experimental investigation for primary flow vectoring using parallel synthetic jet[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2005, 26(3): 248-251.
- [12] Yakhot V, Orszag S A. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique[J]. *Phys Fluids A*, 1992, 4(7): 1510-1520.
- [13] 罗小兵,李志信,过增元. 不可压缩合成喷流场的数值模拟[J]. *工程热物理学报*, 2001, 22(1): 56-58.
LUO Xiaobing, LI Zhixin, GUO Zengyuan. Numerical simulations on flow field of incompressible synthetic jet[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2001, 22(S1): 56-58.