

文章编号: 1000-8055(2007)04-0588-06

双圆形出口零质量射流组的流场结构 PIV 实验研究

沙 江, 徐惊雷, 林春峰, 李 念, 张堃元
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 对不同出口间距零质量射流组的流场结构进行了 PIV 实验. 采用相位锁定技术测量了周期内不同相位的瞬时流场速度矢量, 显示了两股射流涡对之间相互作用、融合成为一股射流的全过程. 发现射流出口间距越大, 射流组融合完成所需的时间、空间历程越长. 在射流组融合完成后的下游截面上, 速度分布和单射流相似, 具有自模性. 虽然融合未完成前各截面不存在整体自模性, 但两股射流外侧仍满足自模性.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 零质量射流组; PIV; 相位锁定 自模性

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Experimental study of flow field in twin circular synthetic jet arrays using PIV

SH A Jiang, XU Jing lei, LIN Chun feng, Li Nian, ZHANG Kun yuan
(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University
of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A PIV experimental study of flow structures of synthetic jet arrays which had different orifice spacing was carried out. To capture the instantaneous flow velocity vectors, the phase locked technique was designed for the experimental system. The experiment images show the complete forming process of single jet synthesized by the interaction of vortex rings produced by twin synthetic jet respectively. It is found that the spatial distance needed for synthesizing is varied with the spacing of the jet arrays. It is similar to the conventional 2-D jet that the cross velocity profiles at different stations after the synthesizing position are self simulation. The property is also suitable for the lateral sides of jet arrays in the synthesizing distance.

Key words: aerospace propulsion system; synthetic jet arrays; particle image velocimetry (PIV); phase locked; self simulation

平行零质量射流组是近年来出现的一种特殊射流组. 这种射流组是基于零质量射流技术的发展而发展起来的. 零质量射流技术作为一种全新的流动主动控制方法是 20 世纪 90 年代发展起来的, 该技术一经提出就得到国内外学者的广泛关

注. 近年来许多学者就零质量射流在气动控制、流动分离、增强掺混等方面的应用进行了实验研究, 取得了许多令人鼓舞的成果^[1-3]. 本文是在零质量射流的基础上对零质量射流组流场特性的实验研究, 分析了其与常规射流组的异同, 为其在流场主

收稿日期: 2006-04-05; 修订日期: 2006-07-05

作者简介: 沙江 (1983-), 男, 陕西宝鸡人, 南京航空航天大学能源与动力学院硕士生, 主要从事零质量射流研究. Email: taibaisha@

动控制方面的应用奠定了基础. 实验借助于 PIV 系统, 结合相位锁定技术测量了射流组不同相位的瞬时流场, 显示了周期内涡对融合的过程. 分析了射流间距变化时对合成射流流场的性能影响, 通过相应无量纲化, 得到了合成射流组的自模化特性, 并比较了不同间距时拟合系数的差异.

1 实验介绍

图 1 是实验用活塞型激励器示意图. 其中 s 为孔中心距, d 为孔径, h 表示射流出口厚度. 实验时, 保持 h 和 d 值不变, 通过改变 s 值, 使得 s/d 分别等于 2.5, 5, 7.5, 来考察间距对射流组流场的影响. 激励器的活塞由激振器驱动. 驱动信号采用正弦波, 驱动频率 $f = 100\text{ Hz}$, 功率放大器电压 $V = 8\text{ V}$.

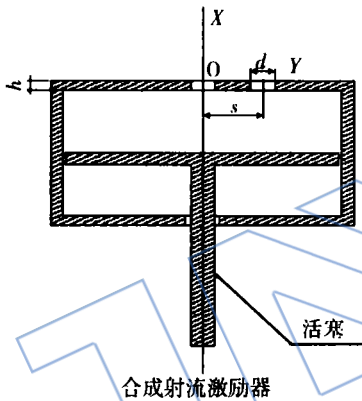


图 1 零质量射流激励器示意图

Fig.1 Schematic of synthetic jet actuator

实验用 PIV 系统由以下四部分组成: 1) 双脉冲激光发生器: 发出激光片光为 CCD 相机拍照提供光源; 2) 数字 CCD 相机: 对激光片光照亮的流场区域进行拍照记录; 3) 同步器: 同步激光脉冲和 CCD 相机拍照时序, 使两者协同工作; 4) 计算机和 Insight 6.0 数据处理与分析软件, 通过对两幅间隔 ΔT (激光脉冲时间间隔) 的粒子图像进行互相关处理, 计算出流场中速度矢量, 得出流场特征参数. 图 2 是实验设备组合关系图. 实验时由信号发生器产生的正弦信号经功率放大器后, 驱动激振器周期性往返运动, 继而驱使活塞在激励器腔体内作周期性振动, 产生零质量射流. 另一方面, 正弦信号通过相位锁定系统进入同步器, 使同步器能按该正弦信号来同步零质量射流的相位和激光脉冲触发时序, 从而实现相位锁定.

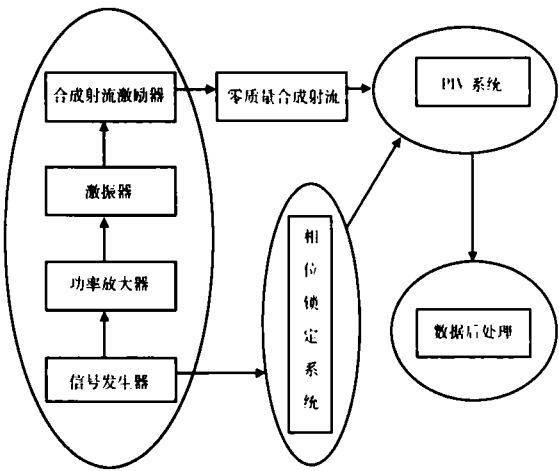


图 2 实验设备结构图

Fig.2 Structure of the experimental devices

2 实验结果和分析

为了研究射流组的流场特性, 本文首先对单出口的零质量射流进行了实验研究, 以获得零质量射流本身特性及流场特征. 为射流组的研究奠定基础和经验.

图 3 和图 4 分别是单孔射流处于“吸”冲程的瞬时和时间平均的流场速度矢量图. 从图中可以得出零质量射流流场的特点: (1) 独特的流场分区

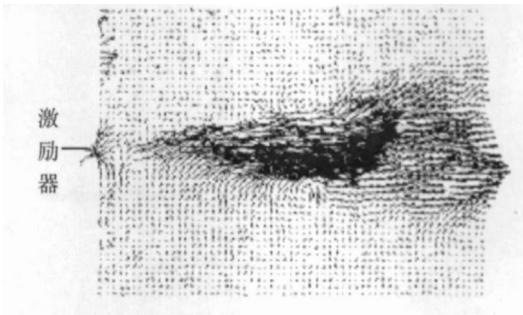


图 3 零质量射流瞬时速度矢量图

Fig.3 Instantaneous velocity vector

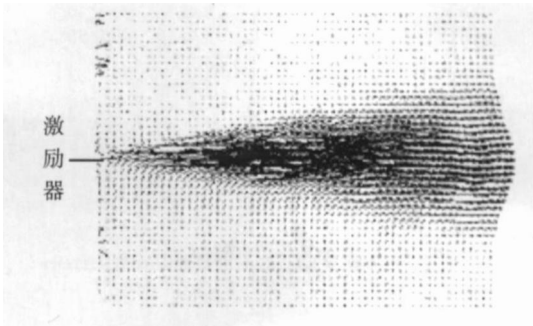


图 4 零质量射流时间平均速度矢量图

Fig.4 Time averaged velocity vector

结构:即在激励器“吸”冲程时,在出口平面下游某一位置处,存在速度为零的区域,称为“鞍点”^[4]。“鞍点”将出口平面下游流场分为两部分,出口至“鞍点”段,环境流体沿激励器表面流入激励器腔体,“鞍点”下游,射流继续向下游发展,不受进入腔体的流体影响,方向性极佳,与常规射流相似;

(2)合成射流在向下游发展过程中,伴随着对环境流体的卷吸、裹入效应,使得射流质量通量增加,射流宽度持续增加,直至与周围流体混为一体,不可分辨,射流剪切层逐渐变厚,射流中心速度逐渐降低。由以上分析可以看出,利用零质量射流进行流场主动控制的主要机理:能量补充:零质量射流通过在“喷冲程”的动量喷射,将动量加入边界层,增强其抵抗分离的能力,从而达到抑制分离的目的^[4];低压卷吸:在激励器“吸冲程”时,激励器出口附近形成的低压区可以有效的实现主流矢量偏转^[5]。

图 5 是单孔射流时间平均流场出口下游不同横截面速度分布。当把图 5 中数据点进行如下处理:纵坐标采用 U/U_m , 其中 U 为某一截面不同位

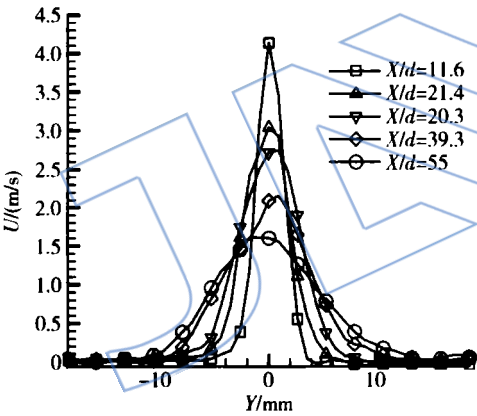


图 5 不同横截面速度分布图

Fig.5 Cross stream velocity profiles

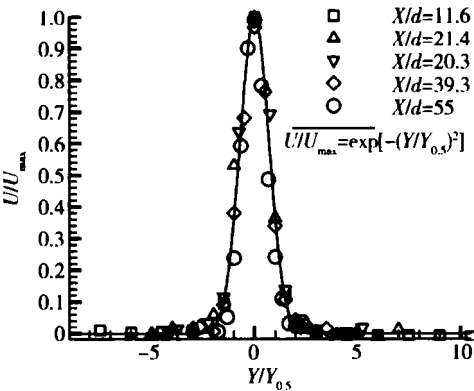


图 6 横截面速度分布的自模性

Fig.6 Self simulation of the cross stream velocity profiles

置处的速度值, U_m 为该截面的轴心速度; 用 $Y/Y_{0.5}$ 为横坐标, Y 为测量点离轴心的距离, $Y_{0.5}$ 为该截面上速度恰好等于轴心速度 U_m 的一半的地方到轴心的距离, 即 $Y(U=0.5U_m)$. 可以看出, 经过处理以后, 5 个截面的速度分布就重叠在同一条曲线上, 如图 6 所示. 说明不同横截面速度分布是相似的, 可以用无因次的速度分布曲线来表示, 该曲线具有高斯分布的形式, 可近似的表示为 $U/U_m = \exp[-(y/y_{0.5})^2]$. 按照与自由沉没射流类似的, 该特性称为零质量射流的相似性或自模性^[6], 自模性证明了流场中各截面的速度分布满足相似性, 并可用相应的公式拟合, 在给出流场中心线速度分布后理论上即可解出流场中各点速度。

通过以上对单出口的零质量射流的分析, 可以得出以下结论: (1) 零质量射流的瞬时流场结构有其特殊的一面, 如流场存在“鞍点”, 因此对其进行相位捕捉是必需的; (2) 零质量射流的时间平均流场结构与常规射流流场结构具有相似性, 即下游不同横截面的速度分布具有自模性。

实验测量了周期内不同相位的流场图像, 显示了涡对融合的全过程, 现以两孔间距 $s=5\text{ mm}$ 的情况为例, 给出周期内瞬时相位及时间平均流场矢量图, 如图 7 所示. (实验时每个周期分成 12 份, 文中限于篇幅只给出流场中部分相位) 图 7 揭示了 $s=5\text{ mm}$ 时, 双圆形出口的零质量射流独自发展、相互融合, 直至形成一股射流的全过程. 在初始时刻, 由于流体在两出口处剪切分离各形成了一对涡, 在 $t/T=0$ 的流场矢量图上清晰可见, 在两股射流中间有一低速区, 它是在出口平面处由两股射流内侧的反向旋转涡对造成的封闭区. 由此可见, 该区域的大小与两股射流间距密切相关. 随着向下游发展, 内侧涡对进行着强烈的动量和质量交换, 互相融合, 大约在 $t/T=0.083$, 射流内侧涡对结构基本不可辨别. 涡对外侧的漩涡由于只和环境流体相互作用, 故相对于内涡来说耗散较弱, 从上图可以看出大概到 $t/T=0.833$ 时才基本消失. 相比较其它两个间距值的实验结果, 发现涡对融合的过程受射流间距影响较大. 随着间距增大, 两射流直到下游较远距离处才相互接触, 中心位置的低速区持续的时间和空间加长, 也就是说两股射流融合完成所需要的时间, 空间历程随间距增大而增大。

图 8~ 图 10 显示了射流组在三种不同间距时出口下游不同横截面位置的速度分布. 它们反

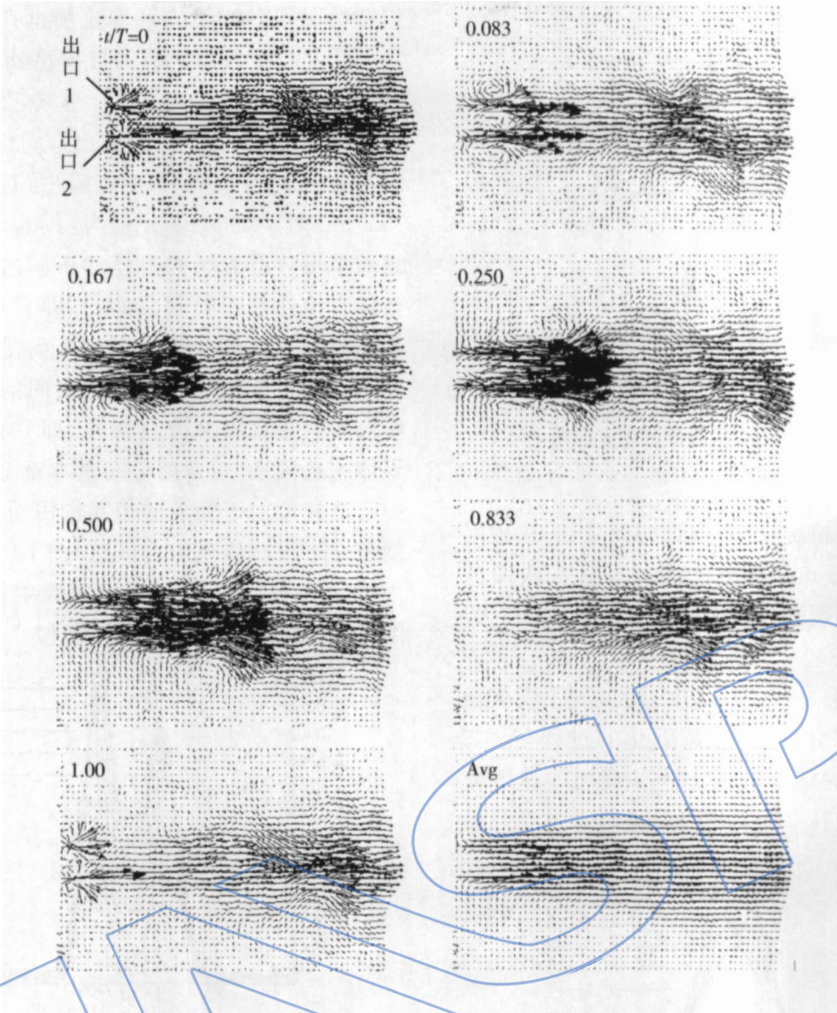


图 7 不同瞬时和时间平均的速度矢量图

Fig. 7 Velocity vectors of different phases and time averaged

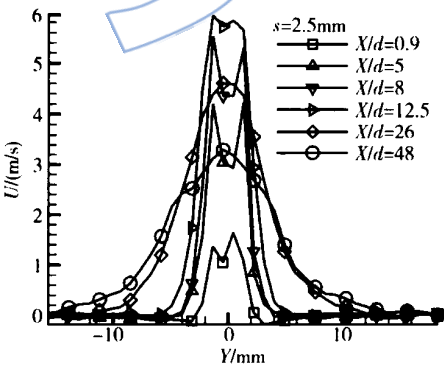


图 8 $s = 2.5 \text{ mm}$, 横向截面速度分布

Fig. 8 $s = 2.5 \text{ mm}$, the cross stream velocity profiles

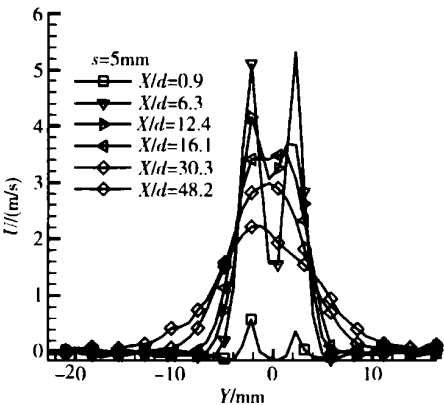


图 9 $s = 5 \text{ mm}$, 横向截面速度分布

Fig. 9 $s = 5 \text{ mm}$, the cross stream velocity profiles

映了相邻两股射流相互作用最后合成单股射流的过程,同时也证实了前面提出的间距对射流合成过程影响的分析.如图 8 中($s = 2.5 \text{ mm}$)在出口下游 $X/d = 0.9$ 处,涡对间的低速区已经不很明

显,而在同样的出口位置 $X/d = 0.9$ 处,图 9($s = 5 \text{ mm}$)显示两股射流间的低速区却相当明显,且该区中速度接近为零, $s = 7.5 \text{ mm}$ 时两射流间低速

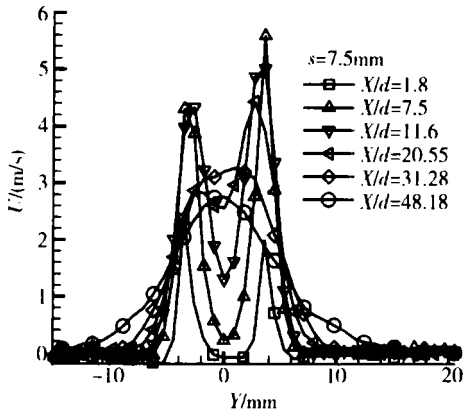


图 10 $s = 7.5\text{ mm}$, 横向截面速度分布
Fig. 10 $s = 7.5\text{ mm}$, the cross stream velocity profiles

区范围较前两种情况更大, 持续时间更长. 三种间距 $s = 2.5, 5, 7.5\text{ mm}$ 对应的涡对融合完成所需距出口的无量纲距离分别大约为 $X/d = 12.5, X/d = 16$, 和 $X/d = 31.3$ 处.

图 11 是间距 $s = 2.5\text{ mm}$ 时, 沿流向不同横截面速度分布和拟合曲线, 无量纲化的过程与图 5 相同. 无量纲化的结果发现上述各截面的速度分布同样基本重叠在一条曲线上. 这说明对双圆形

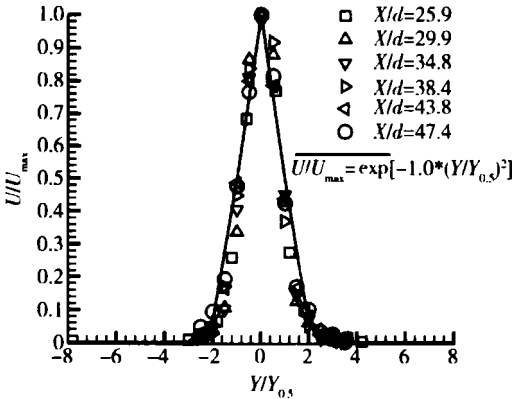
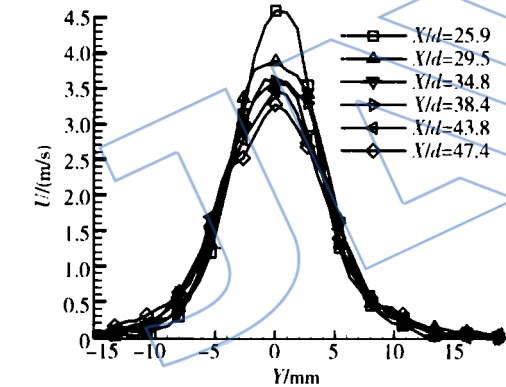


图 11 $s = 2.5\text{ mm}$, 射流融合后不同位置处横向截面速度分布及其自模化图
Fig. 11 $s = 2.5\text{ mm}$, the cross stream velocity distribution after synthesizing process

组合情况下射流组的平均流场也存在自模性, 模化公式与自由淹没射流的自模化公式相同, 即 $U/U_m = \exp[-A(y/y_{0.5})^2]$ ^[6]. 对其它两种间距的数据处理后, 发现对于不同的出口间距, 按上式拟合时系数 A 略有不同. 本次实验中, 对于 $s = 2.5, 5, 7.5\text{ mm}$ 对应的 A 值分别为: $1.0, 0.7$ 和 1.0 . 但是与单出口射流场的自模性不同的是, 射流组的整体自模性是有限制条件的, 即只对融合完成位置下游的不同横截面速度分布满足自模性, 而出口平面至射流融合完成位置之间的各截面, 其速度分布只表现出部分自模性, 即只在两射流外边界体现自模性^[7], 速度分布基本重合在了一起, 而中心区速度由于强烈的相互作用而在相同的无量纲条件下没能体现出自模化. 图 12 以 $s = 7.5\text{ mm}$ 为例证明了上述观点, 说明两股射流的外侧对周围环境流体的卷吸与单射流相似.

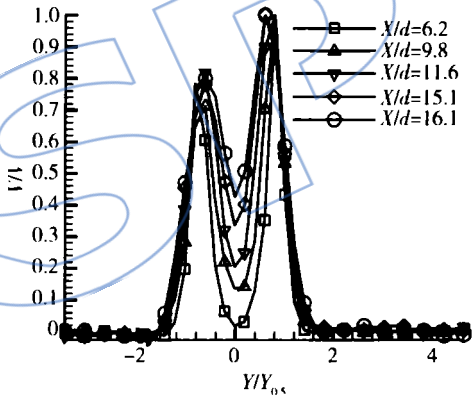


图 12 $s = 7.5\text{ mm}$, 射流融合前不同位置处横向截面速度分布
Fig. 12 $s = 7.5\text{ mm}$, the cross stream velocity distribution in the synthesizing distance

3 结 论

- (1) 对不同间距的圆形出口双射流组进行了 PIV 实验研究, 利用相位锁定技术测量瞬时流场, 得出两股射流融合的全过程.
- (2) 随着两射流间距变大, 两股射流融合为单射流的时间、空间历程加大.
- (3) 射流组融合成单股射流后, 下游不同截面的横向速度分布满足自模性.
- (4) 从射流组出口平面到融合完成所需距离之内, 虽然射流组中心低速区速度分布差异较大, 但各股射流的外边界仍满足自模性.

参考文献:

[1] Michael E D, Glezer A. Airfoil aerodynamic performance

modification using hybrid surface actuators [R]. AIAA 2005-0872.

[2] Amitay M, Pitt D, Kibens V, et al. Control of internal flow separation using synthetic jet actuators[R]. AIAA 2000-0903.

[3] 赵宏, 杨治国, 娄慧娟. 合成射流流动特性试验研究及在燃烧中的应用探讨[J]. 航空动力学报, 2004, 19(4) : 512-519. ZHAO Hong, YANG Zhiguo, LOU Huijuan. Experimental investigation of flow characteristics of synthetic jet and its preliminary application to combustion[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(4) : 512-519.

[4] 罗振兵, 夏智勋. 合成射流技术及其在流动控制中应用的进展[J]. 力学进展, 2005, 35(2) : 221-234. LUO Zhenbing, XIA Zhixun. Advances in synthetic jet technology and applications in flow control[J]. Advances In Mechanics, 2005, 35(2) : 221-234.

[5] 李念, 张堃元, 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 jets[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26 (3) : 248-251.

[6] 梁德旺主编. 流体力学基础[M]. 北京: 航空工业出版社, 1998. LIANG Dewang. The basis of fluid mechanics[M]. Beijing: Aviation Industry Publishing Press, 1998.

[7] 朱彤, 陈崇枢, 邢春礼. 双矩形喷口平行射流的近场结构[J]. 节能技术, 1994, (2) : 1-7. ZHU Tong, CHENG Chongshu, XING Chunli. The near flow field structures of parallel jets of two rectangular orifices[J]. Energy Conservation Technology, 1994, (2) : 1-7.

