

文章编号: 1000-8055(2010)10-2244-05

宽高比对矩形喷管射流湍流强度影响试验

张 勃, 吉洪湖, 曹广州, 黄 伟
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 采用热线风速仪对不同宽高比圆转矩形收敛喷管射流宽、窄对称面上的湍流强度进行了试验研究, 得到其沿径向和轴向的分布特征, 揭示了流体微团正向脉动变化规律. 湍流强度沿径向逐渐减小, 宽高比小于 8 时, 随宽高比增加而提高, 宽高比大于 8 后, 略有减小. 宽、窄对称面上的湍流强度分布规律相同; 在射流中心线上, 湍流强度沿轴向呈现增大趋势, 宽高比小于 8 时, 随着宽高比增大而提高, 大于 8 后, 湍流强度有所降低, 分布规律不变.

关 键 词: 矩形喷管; 射流; 湍流强度; 掺混; 高宽比

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Experimental investigation of jets turbulence intensity characteristics from rectangular nozzles with different aspect ratios

ZHANG Bo, JI Hong-hu, CAO Guang-zhou, HUANG Wei

(College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The distribution of turbulent intensity in the wide and narrow symmetrical planes of the jets from rectangular nozzles was experimentally investigated with hot-wire apparatus. The results show that the turbulent intensity decreases radially, and increases when AR (aspect ratio = W/H , W , nozzle width, H , nozzle height) of nozzle exits is smaller than 8, but decreases slightly when AR is bigger than 8. In the axis line, turbulent intensity increases slowly. The distributions are the same both in wide and narrow symmetrical planes, and the magnitude increases with AR, but decreases as AR is bigger than 8.

Key words: rectangular nozzle; jet; turbulence intensity; mixing; aspect ratio

近年来, 随着红外探测与跟踪技术的发展, 红外探测器与红外制导导弹日益成为飞行器的重要威胁来源, 采用二元喷管可以加强尾喷流与外流的掺混, 有效缩小高温核心区的体积与表面积, 起到红外抑制的目的^[1-2].

二元喷管加强了尾喷流与外界大气的掺混, 缩小了高温区表面积, 开展对其流场的研究有助于研究其红外抑制机理. Der 等^[3]研究了二元喷管中旋流的发展, Krothapalli 和 Tsuchiya 等^[4-5]分别对矩形与轴对称喷管射流流场在低雷诺数条件下进行了试验研究, 得到射流雷诺剪应力沿径

向先增大再减小, 湍流强度沿径向逐渐减小的规律, 同时在下流较远处得到了射流的自相似分布规律. Shih 和 Sforza 等^[6-7]则进一步指出雷诺剪应力与湍流强度大小取决于喷管形状和气流参数. 张勃等^[6]对宽高比为 4 的圆转矩形喷管的试验研究中也得到相同规律.

研究表明, 宽高比的不同对喷管射流流场会产生较大的影响, 本文对宽高比为 1, 4, 8, 12 和 16 的圆转矩形收敛喷管射流进行了试验研究, 并对其下游不同截面上的湍流强度的分布规律进行了初步分析.

收稿日期: 2009 09 01; 修订日期: 2009 12 01

作者简介: 张勃(1976-), 男, 江苏南京人, 副教授, 主要从事强化传热、红外隐身研究.

1 试验设备与试验模型

本文采用的试验台如图 1 所示, 主要包括: 收敛喷管、气流稳定段、风机、变频器、热线风速仪以及相关的数据采集设备. 为了保证进口气流的均匀性, 在喷管进口前布置与喷管进口等径的足够长的平直管段, 使得流体到达喷管进口时的速度分布达到管流充分发展时的速度分布. 试验时

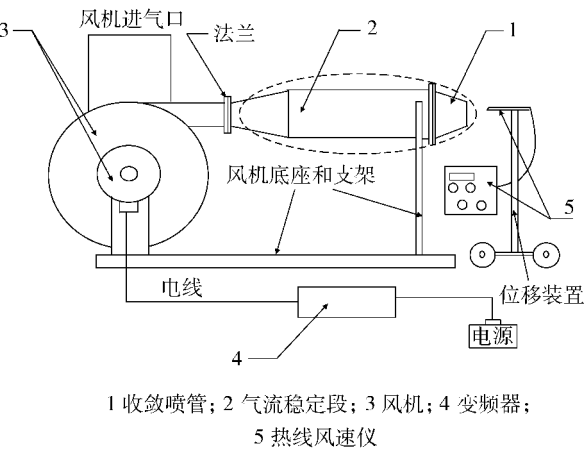


图 1 试验台架示意图
Fig. 1 Sketch of experimental rig

气流出口雷诺数为 2.5×10^5 , 环境压力为 1.01×10^5 Pa, 环境温度 303 K. 图 2 中以宽高比为 4 的喷管 AR4 (aspect ratio(W/H) = 4) 为例, 给出了其宽边、窄边、过渡型面以及连接法兰照片.

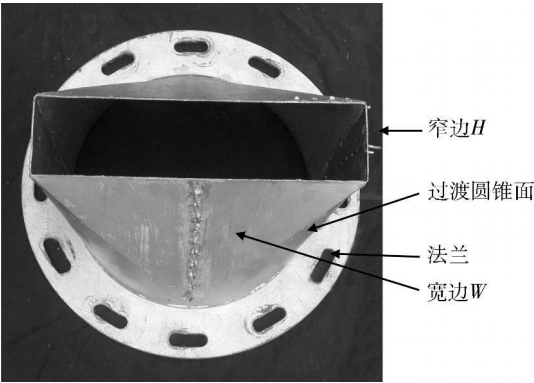


图 2 模型照片
Fig. 2 Photo of AR4

图 3 给出了本文研究的宽高比分别为 1, 4, 8, 12 和 16 的 5 个矩形收敛喷管模型 AR1, AR4, AR8, AR12 和 AR16 与一个轴对称收敛喷管模型 AR0 照片, 其进口面积均为 0.041 m^2 、出口面积均为 0.015 m^2 .

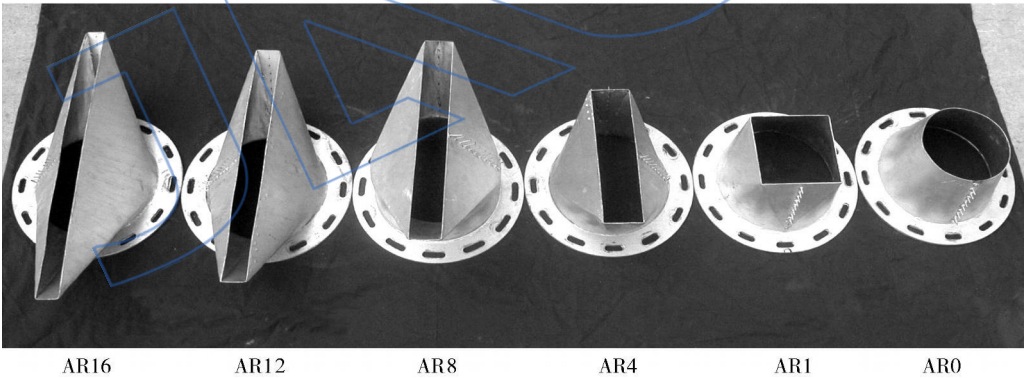


图 3 喷管实物图
Fig. 3 Photo of nozzles

2 试验测量仪器

本试验中采用 TSI 2052 型热线风速仪, 利用 45° 斜丝, 采用单斜丝旋转 180° 的方法测量了不同射流宽窄对称面上的湍流强度^[8-12], 这种方法相比采用叉丝测量, 对流场影响较小, 在流场相对稳定的情况下, 试验精度良好. 本文试验采用的热丝为直径 $3.8 \mu\text{m}$, 长 3 mm 的铂丝, 热丝两端镀有合金, 减少支杆绕流的干扰, 有效提高测量精度, 速度测量误差约为 1% ^[8].

3 测量参数与测量方法

在射流特性参数中, 湍流强度 $\varepsilon = \overline{u^2}/U^2$ 是反映射流的正向速度脉动特征的重要参数, 本文针对喷口宽高比变化对射流微团正向脉动的影响开展研究.

根据 king 公式

$$E^2 = a + b U^{0.5}$$

(1)

对式(1)在 $E = E, U = U$ 时分别利用泰勒公式展开, 取其一阶项得

$$\begin{cases} E^2 = E^2 + 2Ee \\ a + bU^{0.5} = a + bU^{0.5} + 0.5bU^{-0.5}u \end{cases} \quad (2)$$

式中 u 为脉动速度, U 为平均速度, E 为时均电压, e 则为脉动电压。

取零风速下电压值为 E_0 , 对应可以得到

$$\varepsilon = \frac{\overline{u^2}}{U^2} = \left(\frac{4Ee}{E^2 - E_0^2} \right)^2 \quad (3)$$

4 试验结果与分析

圆到矩形过渡段的存在使得流体存在一个从等径的圆截面向不等径的矩形出口的流动过程, 增强了旋流效应。过渡段在宽边与窄边方向, 分别具有扩张与收缩特征, 不同方向上的速度脉动呈现不同的变化规律。喷管宽高比的不同使得喷管宽窄两侧扩张与收缩程度不同, 从而对流动特征产生不同影响。

下文针对不同宽高比条件下, 喷管射流的湍流强度在射流典型截面: 宽、窄对称面上, 喷口下游 $0.1D^*$ ($D^* = 4A/C$, A 和 C 分别为喷管出口面积与湿边周长), $1D^*$, $2D^*$, $4D^*$ 和 $8D^*$ 等不同轴向位置处(参见图 4)的分布规律进行分析研究。

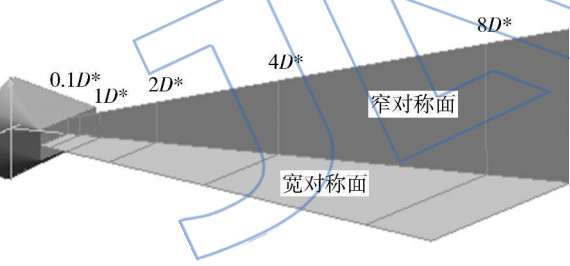


图 4 测量平面示意图
Fig.4 Measuring plane

4.1 不同宽高比条件下, 射流对称面上的湍流强度分布

为了研究宽高比的变化对湍流强度的影响, 本文将相同轴向截面上, 不同喷管宽、窄对称面上的湍流强度分别绘制在两张图上。

图 5(a) 和 (b) 中给出的为喷口下游 $0.1D^*$ 处, 不同喷管宽对称面与窄对称面上湍流强度沿径向的分布, 如图 5(a) 中所示, 宽对称面上, 喷管 AR0 射流沿径向与外流不断掺混, 发生能量交换, 湍流强度基本呈现线性降低, AR1 射流与 AR0 分布相似, 量值接近。当喷管宽高比增大到 4 和 8 时, AR4 和 AR8 的射流湍流强度明显增大, 这是由于宽高比的增大增强了喷管出口涡旋, 角

区涡旋的增强诱发了大量的展向涡和流向涡, 使得湍流强度增大, 同时射流与环境流体的强烈掺混使得其沿径向衰减较快。而当宽高比增大至 12 和 16 时, 在本文研究的雷诺数条件下, 喷口高度的进一步减小使得其对出口截面附近涡系发展的促进作用减弱, 轴线附近的湍流度有所降低, 同时沿径向衰减速度降低, 衰减距离较长。图 5(b) 中所示为窄对称面上的湍流强度分布, 其量值与宽对称面接近, 分布规律依然为沿径向逐渐降低。

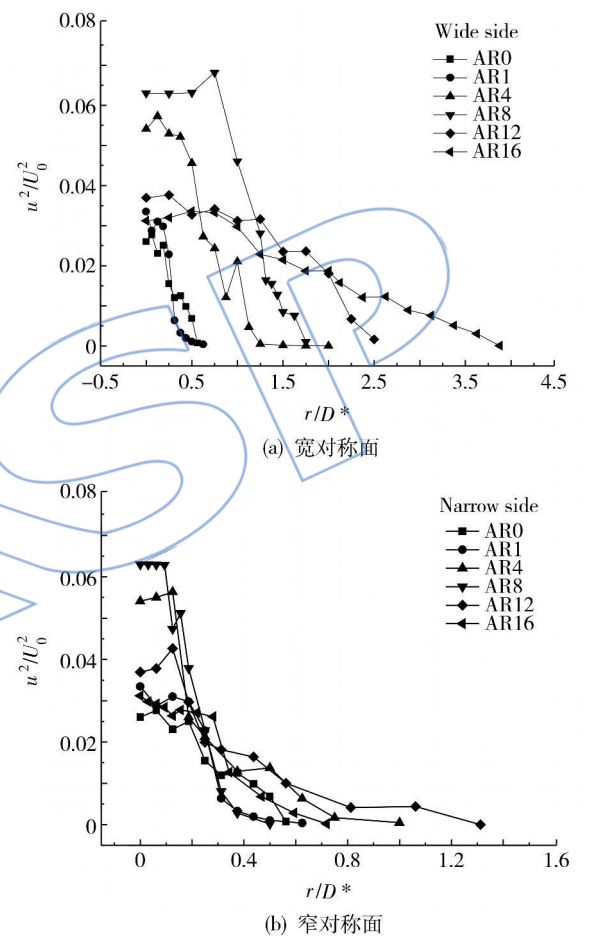


图 5 喷口下游 $0.1D^*$ 截面处射流湍流强度分布
Fig.5 Distribution of turbulence intensity on $X = 0.1D^*$ plane

图 6(a) 和 (b) 分别给出了喷口下游 $4D^*$ 截面处射流宽、窄对称面上湍流强度分布。在宽对称面上(图 6(a)), 不同模型湍流强度沿径向逐渐减小, 并且随着宽高比增大而增大, AR4 和 AR8 湍流强度较大, 径向扩张距离也较大, 当宽高比增大为 12 和 16 时, 湍流强度有所减弱。图 6(b) 中窄对称面上的分布与宽对称面相同, 量值总体上略小。比较看出, 不同宽高比喷管射流之间湍流强度变化剧烈, 宽高比的变化对窄对称面上流动特性

的影响较大. 相比图 5 中所示下游 $0.1D^*$ 截面上结果, $4D^*$ 截面上湍流强度略有增大, 不同喷管, 不同位置处受到对应位置流动特点的影响, 变化幅度区别较大.

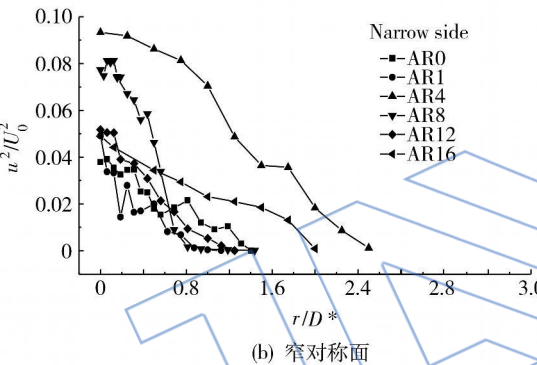
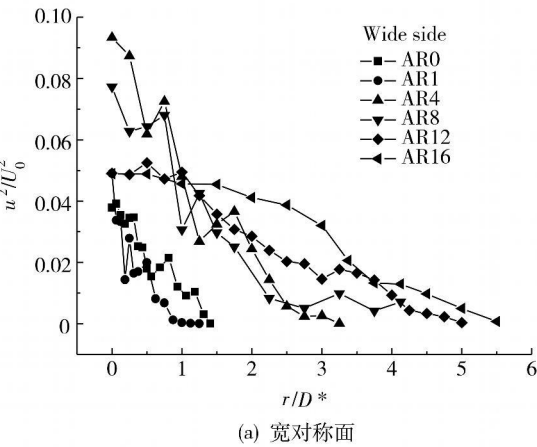


图 6 喷口下游 $4D^*$ 截面处射流湍流强度分布
Fig. 6 Distribution of turbulence intensity on $X = 4D^*$ plane

4.2 不同宽高比条件下, 射流中心轴线上的湍流强度分布

图 7 给出了不同喷管射流中心轴线上湍流强度 $\overline{u^2}/U_0^2$ 的分布. 在 $X/D^* < 4$ 的范围内, 湍流强度逐渐增大, 当 $X/D^* > 4$ 后, 变化减缓, 其分布规律与 Rajaratnam^[13] 所得射流近喷口区相似. 喷管宽高比从 1 增大到 8 时, 喷管射流中心线上的湍流强度逐渐增大, 随轴向距离的增大, 增大速度逐渐减小. 当喷管宽高比增大到 12 和 16 时, 湍流强度相比 AR4 与 AR8 略有减小, 不再随宽高比增大而增大. 根据射流自相关理论分析, 射流在喷口下游较远处会显现出相同的变化规律, 而本文试验采用的为变截面喷管, 且试验在近喷口区进行, 射流流动特征会出现局部的波动, 使得其规律性不明显.

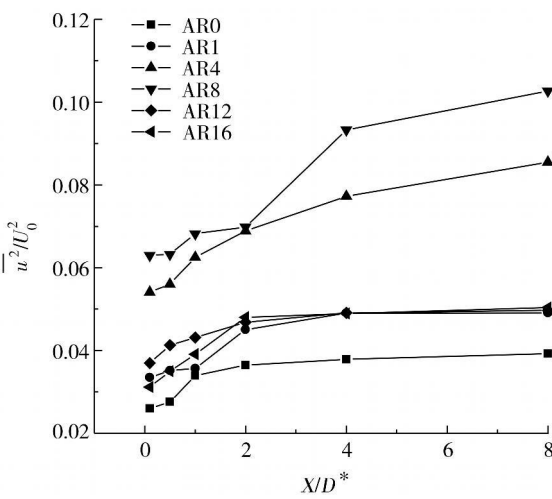


图 7 射流中心轴线上湍流强度分布
Fig. 7 Distribution of turbulence intensity on centerline

5 结 论

本文在雷诺数 $Re = 2.5 \times 10^5$ 条件下, 通过热线风速仪对不同宽高比的圆转矩形收敛喷管的射流湍流强度特性进行了试验研究, 得到以下结论:

- 1) 湍流强度沿径向逐渐减小, 随着宽高比增加, 强度值有所增大, 当宽高比大于 8 以后, 强度值则有所减小.
- 2) 射流中心轴线上, 在近喷口区域, 湍流强度沿轴向缓慢增大, 增大速度沿轴向逐渐减小; 强度值随宽高比增大而提高, 当宽高比大于 8 以后, 强度值有所减小.
- 3) 在宽高比较小时, 射流的湍流强度随着宽高比增大而增大, 当宽高比增大至 12 时, 喷口形状的改变抑制了旋流涡系的发展, 湍流强度略有减小.

参考文献:

[1] 琼斯 J. 黑色魔力的艺术[M]. 北京: 航空工业出版社, 1991.
[2] 张勃, 吉洪湖. 圆转矩形大宽高比收敛喷管过渡型面及喷口形式对射流掺混特性的影响[J]. 航空动力学报, 2007, 22(3): 384-389.
ZHANG Bo, JI Honghu. Influence of high aspect ratio convergent nozzle with different transition cross section and nozzle shape on jets mixing characteristics [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(3): 384-389. (in Chinese)
[3] Der J Jr., CHU Chongwei. Evolusion of swirl in two dimensional nozzle flow [R]. AIAA 82-488, 1982.
[4] Krothapalli A, Baganoff D. On the mixing of a rectangular jet [J]. J. Fluid Mech., 1981, 107: 201-220.
[5] Tsuchiya Y, Horikoshi C. On the spread of rectangular jets

[J]. Experiments in Fluid, 1986, 4(4): 197-204.

[6] Shih T H, Chen J Y, Lumley J L. Second order modeling of boundary-free turbulent shear flows [R]. AIAA 91-1779, 1991.

[7] Sforza P M, Steiger M H, Trentacoste N. Studies on three dimensional viscous jets[J]. AIAA Journal, 1966, 5(4): 800-806.

[8] 张勃, 吉洪湖, 黄伟. 圆转矩形喷管射流掺混特性[J]. 航空动力学报, 2009, 24(11): 2476-2482.

ZHANG Bo, JI Honghu, HUANG Wei. Experimental investigation of mixing characteristics of jet from circle rectangular transition nozzle[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(11): 2476-2482. (in Chinese)

[9] 董志勇. 射流力学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

DONG Zhiyong. Turbulent jets [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)

[10] 田杰, 陈旭, 郝辉, 等. 旋转单斜丝热线测量叶轮机出口流场[J]. 流体机械, 2003, 31(7): 25-28.

TIAN Jie, CHEN Xu, HAO Hui, et al. Measurement of flowfield behind impeller with a rotating slanted hot wire [J]. Fluid Machinery, 2003, 31(7): 25-28. (in Chinese)

[11] Müller U R. On the accuracy of turbulence measurements with inclined hot wires [J]. J. Fluid Mech. , 1982, 119: 155-172.

[12] Russ S, Simon T W. On the rotation, slanted, hot wire technique [J]. Experiments in Fluids, 1991, 12(12): 76-80.

[13] Rajaratnam N. Turbulent jets [M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976.

