

轴对称湍射流冲击平板的实验研究

姚世勇¹, 郭勇¹, 姜楠^{1,2,3}

(1. 天津大学机械工程学院力学系, 天津 300072;

2. 天津市现代工程力学重点实验室, 天津 300072;

3. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京, 100190)

摘要: 文章报告了轴对称湍射流垂直冲击平板的实验研究。空气射流从内径为 D 的圆形铜管中流出, 喷嘴出口与冲击平板的距离为 $9D$, 基于喷嘴出口中心线速度与喷嘴直径的雷诺数为 10338。利用热线风速仪对自由射流区和壁面射流区进行双丝热线测量, 并且阐述了平均速度, 湍流度和高阶矩物理量的不同特征。

关键词: 湍流; 轴对称冲击射流; 热线风速仪; 自由射流; 壁射流;

0 引言

湍流冲击射流由于其冲击表面时具有很高的局部传热传质率, 因此被广泛地用于表面加热、飞机机翼除冰、叶轮机械中迎流叶片的冷却、电子元件的冷却、纸张干燥和材料的热处理等工程应用和工业工程中; V/STOL (垂直或短距离起落) 军用飞机在起飞和低空盘旋时, 升力射流与地面之间强烈的空气动力作用, 也涉及到冲击射流的问题; 作为一种独特的流动的形式, 冲击射流也常被用来评价湍流模型对复杂流动的预测能力。

许多研究人员, 例如早期的 Tani 和 Komatsu^[1], Cola^[2], Wolfshtein^[3], Donaldson 和 Snedeker^[4], Bradbury^[5], Beltaos 和 Rajaratnam^[6-7], Gutmark 等^[8] 都对冲击射流进行了研究, 并且这些研究结果表明, 冲击射流可分成三个明显的流动区域, 即自由射流区、冲击区和壁面射流区。后来, 热线技术的发展使得更加详细地研究冲击射流成为可能。回顾最近关于冲击射流的实验工作, 有 Cooper 等人^[9], Kim^[10], Knowles 和 Myszko^[11], 以及 Guerra 等人^[12], 并且这些实验都是利用热线风速仪来进行测量。近些年随

着激光诊断技术的出现, 像激光多普勒测速技术 (LDV), 粒子图像测速技术 (PIV) 和粒子追踪技术 (PTV) 这些非接触式的光学测量技术开始广泛地被应用在冲击湍射流的研究上^[14-20]。

由于冲击射流在滞止区, 尤其是在冲击表面附近是高度紊乱的, 并且伴随着不稳定的倒流和分离, 热线风速仪或许不适合在这些区域内进行测量。但是由于其高灵敏度和高响应频率, 热线风速仪仍然是湍流测量的理想有效的工具, 可以获得湍流场的全部信息。

尽管冲击射流已经被广泛地研究, 但是人们对其认识仍然有一定的不足和缺陷。这篇文章利用热线风速仪对轴对称湍射流垂直冲击平板进行了实验研究, 利用双丝热线探针对自由射流区和壁面射流区进行测量。当前实验工作的目的是增强对冲击湍射流特征的进一步的认识, 并且为湍流数学模型的发展和有效性提供全面有效的数据。

1 实验装置和过程

当前的实验工作是在一个 $3 \times 3 \times 2 \text{ m}^3$ 的空间中进行的, 并且在实验过程中始终保持空间密闭, 从而排除外部因素的干扰。空气通过一个压缩机供给到一根

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11272233), 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(NO.2012CB720101), 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室(2011)对外开放课题, 天津大学自主创新基金联合资助。

作者简介: 姚世勇 (1986), 男, 河北省邯郸市, 博士研究生, 研究方向: 实验流体力学 E-mail: shiyong-yao@163.com

长 6000 mm，内径为 7 mm 的圆形聚氨酯气管。在聚氨酯气管与铜管的连接处放置一些纱布和蜂窝器，从而使产生气流更为均匀，并且控制气流的紊乱度。铜管长为 $50D$ ，内径 D 为 9 mm，外径为 12.5 mm。空气射流由喷嘴出口喷射出的中心速度 U_c 为 17 m/s，对应的基于喷嘴内径的雷诺数为 10338。喷射出的湍流冲击到一个 $100 \times 60 \text{ cm}^2$ 的平滑方形的玻璃板上。在整个实验过程中，雷诺数保持不变，并且只考虑喷嘴与平板距离 $H/D = 9$ 的情况。

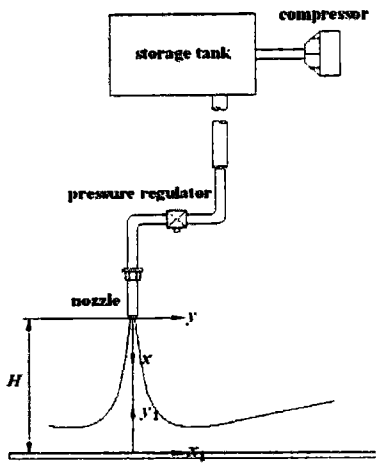


图 1 实验装置示意图

Fig.1 schematic of experimental set-up

利用 TSI-1240 双丝探针和 TSI-1243 边界层探针分别对自由射流区和壁面射流区进行测量。热线风速仪的输出电压通过电桥电路被传送到一个 12-bit，把电桥电压信号转化为速度的数模转换器中。样本大小设置为 4096 Kpt/ch，采样频率为 100,000 Hz，对应的采样时间为 41.943 s。低通滤波器设置为“无”，以便获得完整的湍流场信息。

热线探针在 TSI Model 1127 校准器上标定，涵盖的速度范围为 0~20 m/s。通过四阶多项式拟合标定的数据，标定曲线表示为：

$$U = C_0 + C_1 E + C_2 E^2 + C_3 E^3 + C_4 E^4$$

其中， U 表示为速度， E 表示为电桥电压。双丝探针同样标定了偏航角。

2 实验数据处理和结果分析

2.1 平均场

图 2 (a) 和 (b) 分别为自由射流区的平均法向速度和平均径向速度的无量纲径向剖面图。对于探针与喷嘴的间距为 $x/D = 0.5, 1$ 和 2 时，中心平均法向速度都处于核心区且速度基本恒定，等于射流出口速度。然后，当探针与喷嘴的间距超出核心区时，中心平均法向速度逐渐减小，说明射流已经成为充分发展的湍流。从图 2 (a) 中可以看出，所有的剖面曲线都相交于同一点，并且这一点的位置在径向距离 $y/D \approx 0.5$ 处。然而在图 2 (b) 中这个位置对应着除了 $x/D = 4$ 和 6 时，平均径向速度的最小值。

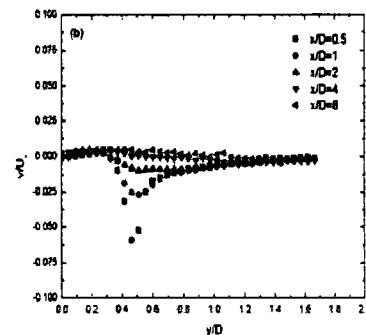
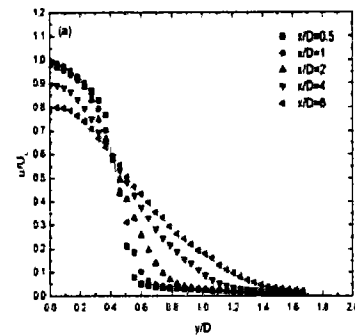


图 2 自由射流区平均法向速度和径向速度的无量纲径向剖面图

Fig.4 Non-dimensional profiles of mean normal and radial velocity components in the free-jet

图 3 (a) 和 (b) 分别表示壁面射流区的平均径向速度和平均法向速度的无量纲剖面图。可以发现，对于每一条剖面曲线，随着探针与平板表面距离的增大，平均径向速度分量都是先增大到其最大值，然后

再减小。同样可以发现，随着探针与喷嘴轴线间距的增大，平均径向速度剖面愈加趋于光滑平坦。值得注意的是，在图 3 (b) 中，对于探针与喷嘴轴线间距在 $x_1/D = 2$ 到 4 时，平均法向速度分量在 $y_1/D < 1.0$ 的区域内为负值，然而，在 $x_1/D = 6, 8$ 和 10 位置处为正值。尽管如此，自 $y_1/D = 1.2$ 起，所有剖面曲线都互相重合，其值接近 0.0025。由此可以推断出，平均径向速度在壁面射流区的近壁处是逐渐减小的，而平均法向速度是先增大后减小。

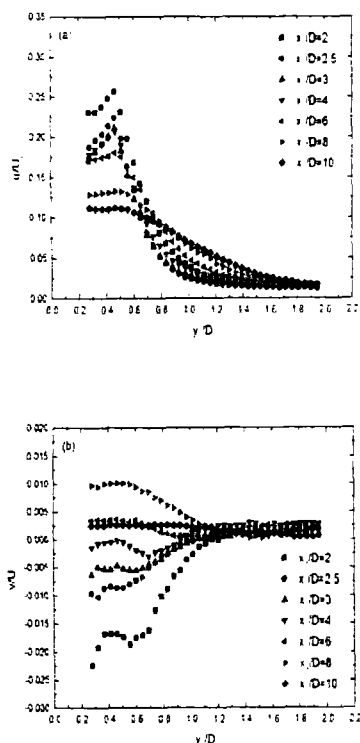


图 3 壁面射流区平均径向速度和法向速度的无量纲剖面图

Fig. 3 Non-dimensional profiles of mean radial and normal velocity components in the wall-jet

2.2 湍流度

图 4 (a) 和 (b) 分别表示自由射流区的法向速度和径向速度的方均根速度剖面图。对于探针与喷嘴的间距在 $x/D = 0.5, 1$ 和 2 处， u_{rms} 和 v_{rms} 都随着径向移动距离的增加而先增大到最大值，然后再减小。对于在 $x/D = 4$ 和 6 处，剖面曲线反而是先减小，继而增大然后再减小。同样值得注意的是，每一条剖面的最

大值对应的位置在 $y/D \approx 0.5$ 处，并且这些最大值在图 4 (a) 中是逐渐增大的且增大的趋势逐渐变缓，但是 4 (b) 中的峰值是先增大后减小。

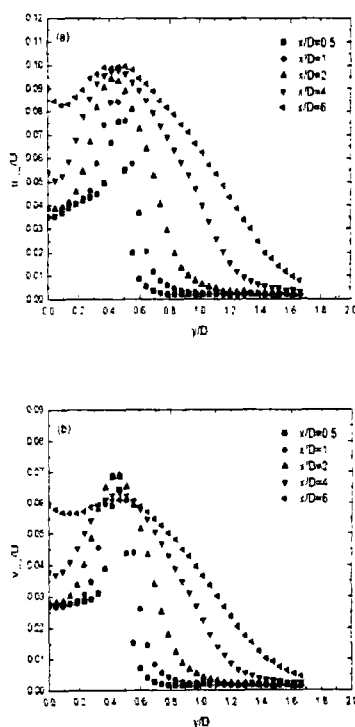


图 4 自由射流区法向速度和径向速度的方均根无量纲剖面图

Fig. 4 Non-dimensional profiles of r.m.s of normal and radial velocity components in the free-jet

图 5 (a) 和 (b) 分别表示壁面射流区的径向速度和法向速度的方均根速度剖面图。随着探针距喷嘴轴线间距的增大，径向速度和法向速度的方均根剖面曲线愈加光滑和平坦。对于每一条径向速度方均根的剖面曲线来说，其都是先增大再减小，并且随着法向移动距离的增大，这种趋势愈来愈不明显。然而，值得注意的是，对于探针与喷嘴轴线的间距在 $x_1/D = 2$ 到 4 处，近壁区内的法向速度基本保持不变，然后法向速度呈现明显的下降。由此可以推断出，与壁面平行的壁射流愈加远离喷嘴轴线，其紊乱性越小。

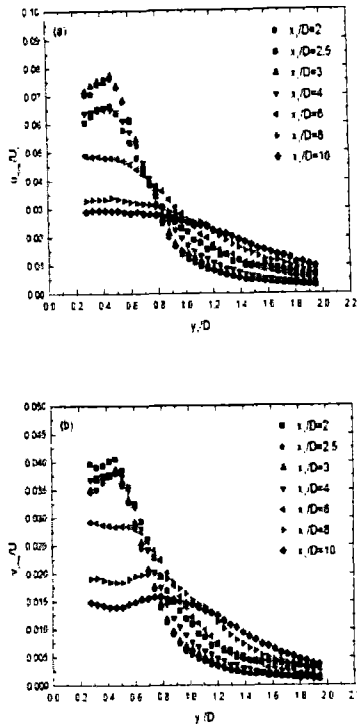


图5 壁面射流区径向速度和法向速度的方根无量纲剖面图

Fig.5 Non-dimensional profiles of r.m.s of radial and normal and radial velocity components in the wall-jet

2.3 高阶矩

图6和图7分别表示自由射流区偏斜因子和平坦因子的剖面图。从图中可以看出，随着探针与喷嘴间距的增大，偏斜因子的剖面曲线愈加规则和光滑。每一条偏斜因子的剖面曲线都存在一个正的最大值，并且最大值向远离喷嘴轴向的方向移动。同样地，在每一条平坦因子剖面曲线上也存在一个最大值，这些最大值随着探针与喷嘴间距的增大而逐渐增大，并且远离喷嘴轴线。由此不仅证实了在自由射流区射流扩散的现象，而且还推断出随着远离喷嘴出口，射流边界层上的卷吸效应更加强烈。

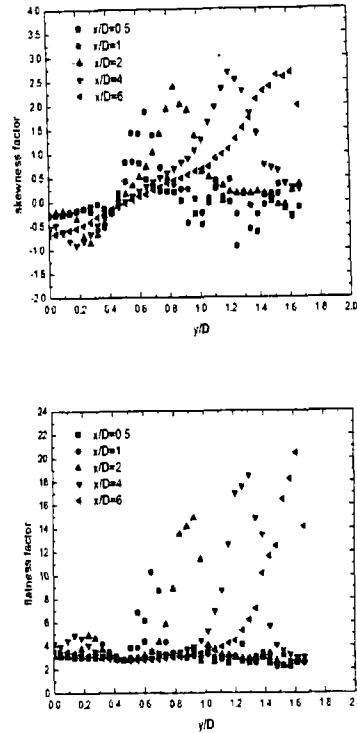


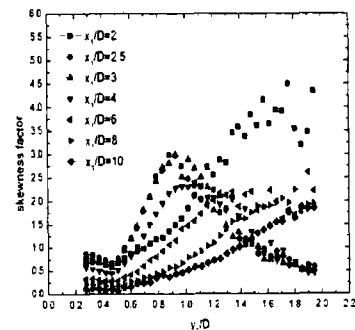
图6 自由射流区偏斜因子剖面图

图7 自由射流区平坦因子剖面图

Fig.6 Profiles of skewness factor in the free-jet

Fig.7 Profiles of flatness factor in the free-jet

图8和图9分别表示壁面射流区偏斜因子和平坦因子的剖面图。从图中可以发现，在 $x_1/D = 2$ 处的偏斜因子和平坦因子的剖面曲线与其他位置的剖面曲线相比更加紊乱和不规则。随着探针与喷嘴轴线间距的增大，偏斜因子和平坦因子的剖面曲线图变得越来越光滑和平坦。这意味着在 $x_1/D = 2$ 处，射流扰动和混合作用比在其他位置处要强烈。



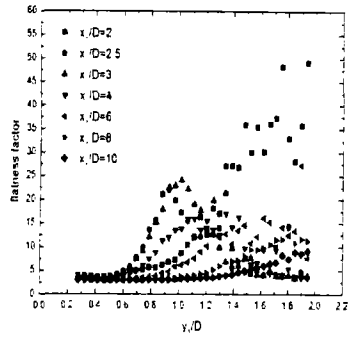


图 8 自由射流区偏斜因子无量纲剖面

图 9 自由射流区平坦因子无量纲剖面

Fig.8 Profiles of skewness factor in the wall-jet

Fig.9 Profiles of flatness factor in the wall-jet

3 讨论与结论

自由射流区:

1. 当喷嘴与探针的间距在 $x/D = 0.5, 1$ 和 2 处时, 中心平均法向速度都处于核心区, 并且速度基本恒定, 等于射流出口中心线速度。然后, 当喷嘴与探针的间距超出核心区时, 中心速度逐渐减小。
2. 对于喷嘴与探针间距在 $x/D = 0.5, 1$ 和 2 处时, u_{rms} 和 v_{rms} 都随着径向移动距离的增大而先增大到最大值, 然后再减小。对于在 $x/D = 4$ 和 6 处, u_{rms} 和 v_{rms} 先减小, 继而增大然后再减小。
3. 随着探针与喷嘴间距的增大, 偏斜因子和平坦因子的剖面曲线愈加规则和光滑。每一条偏斜因子的剖面曲线和平坦因子剖面的曲线都存在一个最大值, 并且最大值向远离喷嘴轴向的方向移动。这不仅证实了在自由射流区射流的扩散现象, 而且推断出随着远离喷嘴出口, 射流边界层上的卷吸效应更加强烈。

壁面射流区:

1. 对于每一条剖面, 随着探针与平板表面距离的增加, 平均径向速度分量都是先增大到其最大值, 然后再减小。同样发现, 随着探针距喷嘴轴线间距的增大, 平均径向速度剖面越来越光滑平坦。

2. 对于每一条径向速度方均根的剖面, 其都是先增大, 然后再减小。随着法向移动距离的增大, 这种趋势愈来愈不明显。对于探针与喷嘴轴线间距在 $x_1/D = 2$ 到 4 处时, 近壁处的法向速度基本保持不变。然后, 法向速度呈现明显的下降。由此可以推断出, 与壁面平行的壁射流愈加远离喷嘴轴线, 其紊乱性越小。

3. 在 $x_1/D = 2$ 处的偏斜因子剖面和平坦因子剖面与其他位置的剖面相比更加紊乱和不规则。随着探针距喷嘴轴线间距的增大, 偏斜因子和平坦因子的剖面曲线变得越来越光滑和平坦。

Nomenclature

C_0, C_1, C_2, C_3, C_4	constant in polynomial equation of calibration curve
D	diameter of jet nozzle
E	probe bridge voltage
H	distance between nozzle and impinging plate
U	velocity across probe
U_c	centerline velocity of the jet at nozzle exit
u	normal mean velocity
u_{rms}	root mean square of normal velocity
v	radial mean velocity
v_{rms}	root mean square of radial velocity
x	distance between nozzle exit and probe
x_j, y	distance between nozzle axis and probe
y_l	distance between impinging plate and probe

参考文献:

- [1] Tani I., Komatsu Y., Impingement of a round jet on a flat surface. Proc. 11th Int. Congress on Applied Mechanics, Munich, 1964: 672-676.
- [2] Cola R., Energy dissipation of a high velocity vertical jet entering a basin, Proc. 11th International Association for Hydraulic Research Congress, Leningrad, USSR, 1965, 1: 1-13.
- [3] Wolfshtein M., Some solutions of the plane turbulent impinging jet. J. Basic Engineering, ASME, 1970, 92: 915-922.
- [4] Donaldson C.D., Snedeker R.S., A study of free jet impingement. Part 1. Mean properties of free impinging jets, J. Fluid Mech. 1971, 45:

- 281–319.
- [5] Bradbury L.J.S., The impact of an axisymmetric jet onto a normal ground. *Aeroautical Quarterly*, 1972, 23: 141–147.
- [6] Beltaos S., Rajaratnam N., Plane turbulent impinging jets. *J. Hydraulic Research*, 1973, 11: 29–59.
- [7] Beltaos S., Rajaratnam N., Impinging circular turbulent jets. *J. Hydraulics Div.*, 1974, 100: 1177–1192.
- [8] Gutmark E., Wolfshtein M., Wygnanski I., The plane turbulent impinging jet. *J. Fluid Mech.*, 1978, 88: 737–756.
- [9] Cooper D., Jackson D.C., Launder B.E., Liao G.X., Impinging jet studies for turbulence model assessment – I. Flow-field experiments, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 1993, 36: 2675–2684.
- [10] Kim K.S., An experimental study on the flow and heat transfer characteristics of an impinging jet. *KSME Journal*, 1993, 7: 258–271.
- [11] Knowles K. and Myszkowski M., Turbulence measurements in radial wall-jets. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1998, 17: 71–78.
- [12] Guerra D.R.S., Su J., A.P. Silva Freire. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48: 2829–2840.
- [13] Craft T.J., Graham L.J.W., Launder B.E., Impinging jet studies for turbulence model assessment – II. An examination of the performance of four turbulence models. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1993, 36: 2685–2697.
- [14] Barata J.M.M., Durão D.F.G., Heitor M.V., McGuirk J.J., On the analysis of an impinging jet on ground effects. *Exp. Fluids*, 1993, 15: 117–129.
- [15] Maurel S., Sollic C., A turbulent plane jet impinging nearby and far from a flat plate. *Exp. Fluids*, 2001, 31: 687–696.
- [16] Fairweather M., Hargrave G.K., Experimental investigation of an axisymmetric impinging turbulent jet. 1. Velocity field, *Exp. Fluids* 2002, 33: 464–471.
- [17] Tummers M.J., Jacobse J., Voorbrood S.G.J., Turbulent flow in the near field of a round impinging jet. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 54: 4939–4948.
- [18] Loureiro J.B.R., Silva Freire A.P., Wall shear stress measurements and parametric analysis of impinging wall jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55: 6400–6409.
- [19] Hassan M. El, Assoum H.H., Sobolik V. et al., Experimental investigation of the wall shear stress and the vortex dynamics in a circular impinging jet. *Exp. Fluids*, 2012, 52: 1475–1489.
- [20] Nishino K., Samada M., Kasuya K., Torii K., Turbulence statistics in the stagnation region of an axisymmetric impinging jet flow. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 1996, 17: 193–201.

Experimental investigation of an axisymmetric turbulent jet impinging on a flat surface

Yao Shiyong¹, Guo yong¹, Jiang nan^{1,2,3}

(1. Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Modern Engineering Mechanics, Tianjin 300072, China;

3. The State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: This paper reports an experimental study of an axisymmetric turbulent jet impinging normally onto a flat surface. The single air jet was issued from a round pipe with inner diameter D , and the distance between the nozzle exit and the flat impingement plate was $9D$. The Reynolds number based on the nozzle centerline velocity and the nozzle diameter was 10338. Measurements were performed in the free and wall-jets using cross-wire hot-wire anemometer. Mean velocity and turbulence intensity results being presented as well as higher-order moments of the velocity fluctuations.

Key words: turbulent flow, axisymmetric impinging jet, hot-wire anemometer, free-jet, wall-jet