

狭缝射流撞击圆柱表面的湍流特性实验研究¹⁾

刘明侯^{*,2)} T. L. Chan[†]

^{*}(中国科学技术大学热科学与能源工程系, 合肥 230027) [†](香港理工大学机械工程系, 香港)

摘要 实验研究了狭缝射流撞击圆柱表面后壁面射流区的平均流动和湍流特性. 考察了雷诺数 Re (6 000~20 000), 喷口到受撞表面距离 Y/W (5~13), 喷口宽度 W (6.25 mm, 9.38 mm), 受撞表面曲率 (半圆柱体直径 $D = 150$ mm) 对流动和湍流结构的影响. 通过分析 X 热线在壁面射流区的测量结果发现, 在近壁区域, 表面曲率、 Re_w , Y/W 和 S/W 等参数对 $\sqrt{u^2}/U_m$ 的影响比对 $\sqrt{v^2}/U_m$ 强, 并且切应力 \overline{uv}/U_m^2 对表面曲率变化最敏感. 当喷口与受撞击表面之间的距离 Y/W 在一定范围内增加时, 沿圆柱表面流动的流向和横向的湍流强度增强. 用平板射流和圆柱体表面壁面射流的数据进行比较, 从而得到表面曲率对壁面射流特性的影响. 结果表明, 曲率对壁面射流的影响较强, 并随着 S/W 的增大而增强. 随着雷诺数的增大, 壁面曲率的影响也有强化的趋势.

关键词 狭缝射流, 曲率影响, 湍流特性, 壁面射流, 半圆柱表面

中图分类号: O357.5 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2005)02-0135-06

引 言

撞击射流具有高效的传热、传质特性, 因而在加热、冷却、烘干和表面处理等工业过程中得到了广泛应用, 同时也吸引了较多研究者的关注. Downs 等^[1], Jambunathan 等^[2], Viskanta 等^[3] 对撞击射流的研究做了较全面的总结. 从上述综述文章中发现, 绝大多数的研究侧重换热性质的研究, 而对流动特性的研究严重缺乏. 要了解射流撞击过程中的传热现象就必须对该过程的流动有比较清晰和全面的认识, 这对解释传热传质过程的一些现象很有帮助. Mansoo 等^[4] 研究射流撞击冷却凹面的流动与换热时发现, 凹面上换热系数分布跟平均流动场之间有密切的关系. Gibson 等^[5] 也研究了平均流动特性对狭缝射流撞击换热的影响. 然而, 针对射流撞击过程的湍流流动特性研究报道很少, 撞击壁面射流区的湍流特性及其随表面曲率的影响报道也较缺乏.

壁面撞击射流指的是射流撞击到平板、凹面或凸面上. 壁面撞击射流分为射流区和壁面区, 壁面区保持有附面层特性, 射流区保持有射流特性, 两区域在速度最大地方相互作用. 壁面曲率对壁面射流的流动与换热影响已经有较多报道, 但大多数研究针对的是喷口流动与壁面相切的情况^[6~9], 而不

是撞击射流. 因此, 对于壁面撞击射流的壁面射流流动特性, 壁面曲率, 狭缝喷口到被撞击壁面距离, 狭缝出口雷诺数等参数对壁面射流流动特性和换热影响研究还比较缺乏. 本文的研究对解释该流动的换热特性, 对湍流模型数据的完善有一定意义.

1 实验设置

实验用空气狭缝射流系统见图 1. 系统包括空气气源, 坐标移动架, 半圆柱体等辅助设备. 为了保证来流质量, 压缩空气经过了过滤系统, 干燥系统, 精密控制气阀后进入稳压箱, 稳压箱中的空气经过了蜂窝器和收缩段后形成了流场稳定、均匀的狭缝射流. 喷口收缩设计见文献 [10]. 研究中采用了两种狭缝射流喷嘴, 它们的狭缝宽度分别为 6.25 mm 和 9.38 mm, 两狭缝的长度为 125 mm, 基本保证了狭缝射流的二维特性.

作者用半圆柱来作为受撞击的曲面, 圆柱体的直径为 150 mm. 圆柱体被固定在坐标架上, 可以调节喷口出口与圆柱体表面之间的距离. 研究中, 喷口出口截面与圆柱表面之间距离为 $Y/W = 5, 7, 9, 11$ 和 13 (其中, Y 是喷口出口截面与圆柱表面之间距离, W 是喷口狭缝宽度). 在圆柱体表面, 作者研

2003-12-02 收到第 1 稿, 2004-07-12 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金资助项目 (50206021, 10372099).

2) E-mail: mhliu@ustc.edu.cn

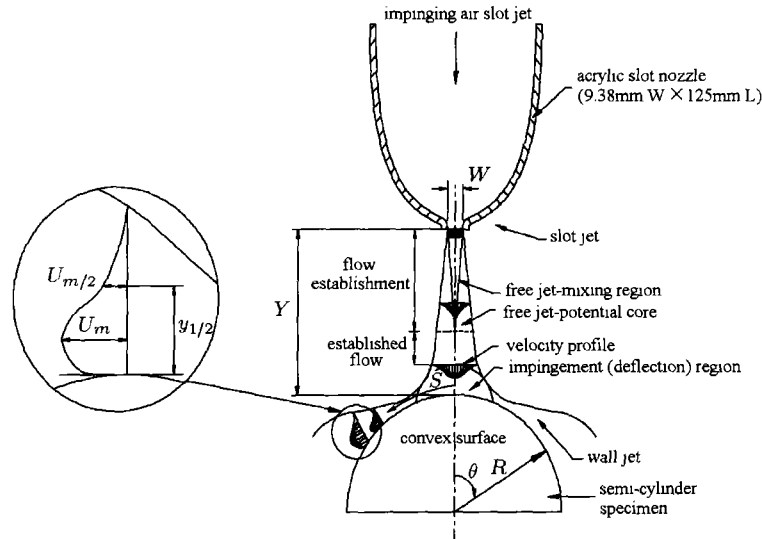


图 1 射流冲击圆柱表面实验系统图

Fig.1 Experimental air slot nozzle jet system

究了 S/W 为 2.62, 3.93, 5.23 和 6.98 时流动参数在径向的分布, 其中, S 是驻点到受测点在柱体表面上的距离, 上述位置分别对应 $\theta = 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 和 53.3° , θ 是测量点到驻点的角向位置, 如果换成弧度, $S = \theta R$, R 是圆柱半径 (见图 1)。

用特制的 X 热线测量二维平均速度及其脉动。

热丝为 $5\mu\text{m}$ 直径的 Wollaston (Pt-10%Rh), 用酸液腐蚀出 1mm 长度作为敏感元件, 连接到 CTA 电桥, 测量时热丝过热率取 0.8。信号经过 16 通道 (12 位) 数据采集板, 放大器进入计算机。采样频率为 3.5kHz。采样时间为 15s。X 热线的速度和角度标定采用文献 [11] 的方法, 文献 [12] 曾经对该方法的测量数据进行了评估。

2 壁面撞击射流的湍流特性

Martin^[13] 研究发现, 自由狭缝射流有大约 $4W$ 长度的射流核心区。如果根据 $U = 0.95U_e$ (U 是射流中心线上平均速度, U_e 是喷口出口速度) 来确定核心区的长度, 本实验中采用的喷口核心区长度约为 $Y/W = 4 \sim 6$ 。如果喷口与受撞击表面的距离很近, 壁面射流会经历从层流到湍流的过渡过程, 从而导致壁面射流流动结构的变化。为了避免该情况发生, 研究中采用的最近撞击距离为 $Y/W = 5$ 。

图 2 中给出了平均速度, 雷诺正应力和切应力在 4 个不同位置 (S/W 为 2.62, 3.93, 5.23 和 6.98) 在壁面射流中的分布。根据狭缝出口宽度 $W = 9.39\text{mm}$ 确定的雷诺数为 12000, 喷口到壁面距离为 $Y/W =$

9。用当地 (径向) 横穿壁面射流里最大流向速度 U_m 和壁面射流半宽 $y_{1/2}$ (流向速度为 $U_m/2$ 的径向位置) 作为速度和长度尺度来无量纲化。在所研究的壁面射流区域内, 每个 S/W 位置的平均速度分布相互吻合都很好 (图 2(a)), 这是由于平均流动的自相似性的结果^[14]。

随着在圆柱上周向位置距离 S/W 的增加, 无量纲后的流向和径向湍流强度增强 (图 2(b), 图 2(c)), 这主要是由于壁面射流中射流区与壁面区在速度最大区域的相互作用。无量纲后的流向雷诺正应力 $\overline{u^2}/U_m^2$ 只有一个峰值 (图 2(b)), 并不像 Neuendorf^[14] 发现的那样, 有两个峰值存在。两个射流不一样可能是导致 $\sqrt{u^2}/U_m$ 分布没有两个峰值的原因。另外特制的 X 热线的空间分辨率不够也可能是另外的因素。流向速度分量的脉动 $\sqrt{u^2}/U_m$ (图 2(b)) 随着 S/W 的增加而增加。特别是在靠近壁面的 $y/y_{1/2} < 1.2$ 区域, 增加尤其明显。正如我们前面提到, 这是由于射流的壁面流动与射流流动之间的相互作用造成的。 $\sqrt{u^2}/U_m$ 最大值的径向位置随着 S/W 的增大而减少, 即当远离射流驻点时, $\sqrt{u^2}/U_m$ 最大值的径向位置远离壁面。在目前的研究中, 在 $\theta = 20^\circ$ 位置, $y_m/y_{1/2} = 0.92$ (其中, y_m 是 $\sqrt{u^2}/U_m$ 最大值所对应的径向位置); 而在 $\theta = 53.3^\circ$ 位置, $y_m/y_{1/2}$ 为 0.56。

从图 2(c) 中也可以发现, 径向脉动 $\sqrt{v^2}/U_m$ 达到最大值的 $y/y_{1/2}$ 位置在 $S/W = 3.93 \sim 6.98$ 范围内渐渐增大。但是, 在 $S/W = 2.62$ 地方, 由于十分

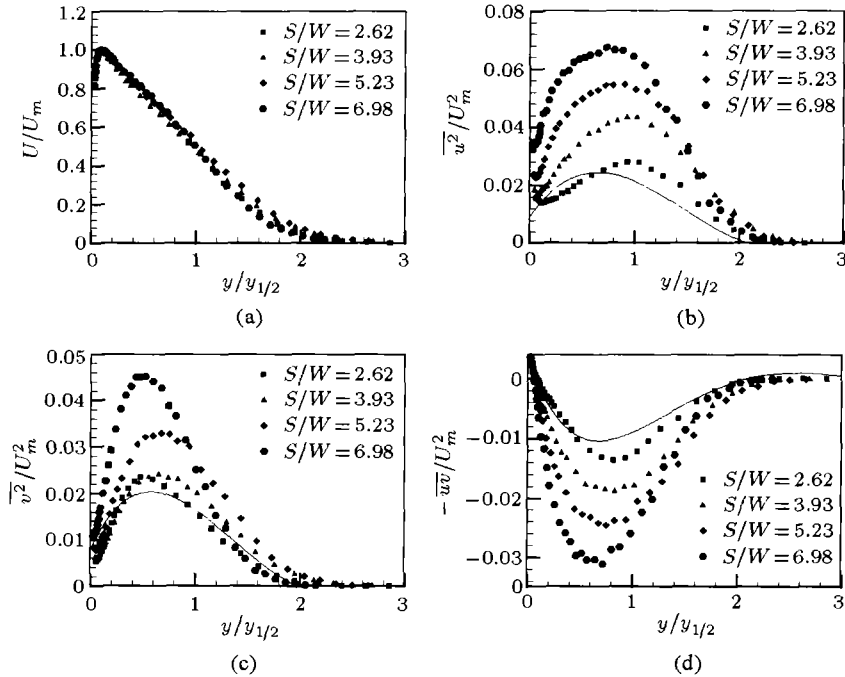


图 2 无量纲的平均速度，雷诺正、切应力在撞击壁面射流中的分布。— 表示平板射流结果
 ($Re_w = 12000, W = 9.38 \text{ mm}, Y/W = 9, D = 150 \text{ mm}$)

Fig.2 Normalized mean velocity, Reynolds normal and shear stress distribution across wall jet.

— plane ($Re_w = 12000, W = 9.38 \text{ mm}, Y/W = 9, D = 150 \text{ mm}$)

靠近壁面射流的转向区域， $\sqrt{v^2}/U_m$ 达到其峰值的径向位置略微靠近壁面处。在角向位置 $20^\circ \leq \theta \leq 53.3^\circ$ 内，150 mm 圆柱体表面射流的 $\sqrt{v^2}/U_m$ 的最大值增大了约 2 倍 (图 2(c))。比较图 2(b) 和 2(c) 不难发现，在靠近壁面区域，流向雷诺正应力由于受到壁面影响，增加比较多。但是，横向雷诺正应力的增加并没有流向正应力的增加那么明显，特别是在靠近驻点的地方。在 $S/W = 2.62$ 和 3.93 两位置，速率对 $\sqrt{v^2}/U_m$ 的影响明显比对 $\sqrt{u^2}/U_m$ 的影响小 (图 2(c))。通过比较两个方向湍流脉动在壁面射流里的分布，发现在靠近壁面的地方 $\sqrt{u^2}/U_m$ 明显由于壁面作用而增强。在靠近驻点附近， $\sqrt{v^2}/U_m$ 的增强并不那么十分明显。在 $S/W = 2.62$ 和 3.93 两位置， $\sqrt{v^2}/U_m$ 的变化远远比相同两位置的 $\sqrt{u^2}/U_m$ 变化小 (图 2(c))。由于壁面对流体的作用，在靠近驻点的地方流体流向雷诺正应力和切应力受壁面曲率的影响明显比径向雷诺应力大。

从图 2(d) 可以发现，雷诺切应力 \overline{uv}/U_m^2 达到最大值的 $y/y_{1/2}$ 位置随着 S/W 的增加而减少。对于大的 θ ，即位置远离驻点时， \overline{uv}/U_m^2 的最大值变大。在 S/W 变化的 2.62 和 6.98 之间， $\sqrt{u^2}/U_m$ 增加到 1.64 倍， $\sqrt{v^2}/U_m$ 也增加到 1.37 倍，而 \overline{uv}/U_m^2 增加

到 3.01 倍。但是在相同的区域内， U_m 减少到 1.45 倍。两个方向雷诺正应力最大值的比 $(\sqrt{u^2}/\sqrt{v^2})_{\max}$ 从 $S/W=2.62$ 位置的 1.04 增加到 $S/W = 6.98$ 位置的 1.21 倍。 $\overline{uv}/\sqrt{u^2}\sqrt{v^2}$ 的最大值 (图 3) 超过了 0.52，较平板壁面射流 ($\overline{uv}/\sqrt{u^2}\sqrt{v^2} = 0.49$) 略高。研究中发现， $\overline{uv}/\sqrt{u^2}\sqrt{v^2}$ 达到最大值的 $y/y_{1/2}$ 位置并不是明显随着 S/W 的变化而变化。

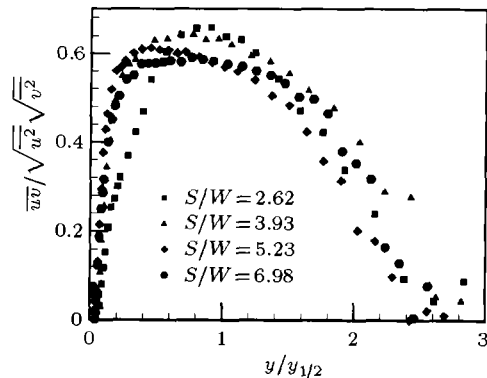


图 3 雷诺切应力在不同 S/W 中的分布 ($Re_w = 20000, W = 9.38 \text{ mm}, Y/W = 9, D = 150 \text{ mm}$)

Fig.3 \overline{uv} correction distribution at S/W ($Re_w = 20000, W = 9.38 \text{ mm}, Y/W = 9, D = 150 \text{ mm}$)

这里需要特别指出的是,对于湍流壁面射流,雷诺应力为零的径向位置不一定是速度值最大的位置,这一点与管内流动或自由射流不同.这一点,在作者的研究中得到了证明.

2.1 曲率对壁面射流的影响

通常研究曲率对壁面射流的影响需要通过比较射流流过平板和流过不同曲率表面(如凸面或凹面)时流动特性得到.对于150 mm直径的圆柱表面,最大角向位置为 $\theta = 53.3^\circ$,因此,可以假定流体在圆柱表面的流动在流向上的压力梯度可以忽略^[14].从而,射流撞击平板与圆柱表面的流动特性的区别都来自曲率的影响,而跟压力梯度无关.通过比较平板射流和曲面射流的差别可以得到壁面曲率对壁面射流的影响.本研究中采用X热线,其空间分辨率不足以研究壁面射流的很靠近壁面区域的流动.研究壁面射流时采用 $y_{1/2}$ 和 U_m 作为壁面射流区域的长度与速度尺度.

图2中给出了流向曲率对平均速度、流向正应力在 $S/W = 2.62$ 到6.98之间的影响结果.基于喷口出口宽度的雷诺数为12000,圆柱体表面到喷口出口的长度为 $Y/W = 9$.对于所采用的两个喷口,在 $Y/W = 6$ 后,射流的核心区都已经结束,即射流为完全发展的射流.在不同的 S/W 位置(从

2.62~6.98),无量纲后的平均速度在壁面射流内的分布比较一致.在 $S/W=2.62$ (图2(b)),流向湍流雷诺正应力比平板射流里($S/W=4.1$)位置的还大.在基本相同的 S/W 位置($S/W=2.62$),由于壁面曲率的影响,圆柱表面的壁面射流区域里的流向雷诺正应力的最大值是平板射流里的1.29倍.虽然该位置比较靠近驻点,但是曲率的影响依然十分明显.其原因,正如Patel等^[9]所说的那样,曲率对湍流一般都产生影响,但对雷诺应力的影响尤为突出.随着射流在圆柱表面流向位置的退后, S/W 的增大,如在 $S/W = 6.98$,流向雷诺正应力在壁面射流里的最大值为平板射流 $S/W = 4.1$ 位置最大值的1.72倍.

2.2 Y/W 对壁面射流的影响

初始流动的状态将影响撞击后的壁面射流的流动结构及流动特性.通过变化喷嘴与受撞壁面之间的距离 Y/W ,观察其对圆柱表面的壁面射流的影响.图4中给出了 $Re_w=12000$, $S/W=6.98$, $Y/W=5, 7, 9, 11$ 和13时的结果.在所研究的撞击距离 Y/W 内,平均速度受到的影响较小,相互符合较好.而对于流向正应力 $\sqrt{u^2}/U_m$,最大值出现在射流撞击柱体表面距离为 $Y/W=7$ 时. Y/W 的影响从径向雷诺应力(图4(c))和雷诺切应力分布(图4(d))中也可以明显看到.

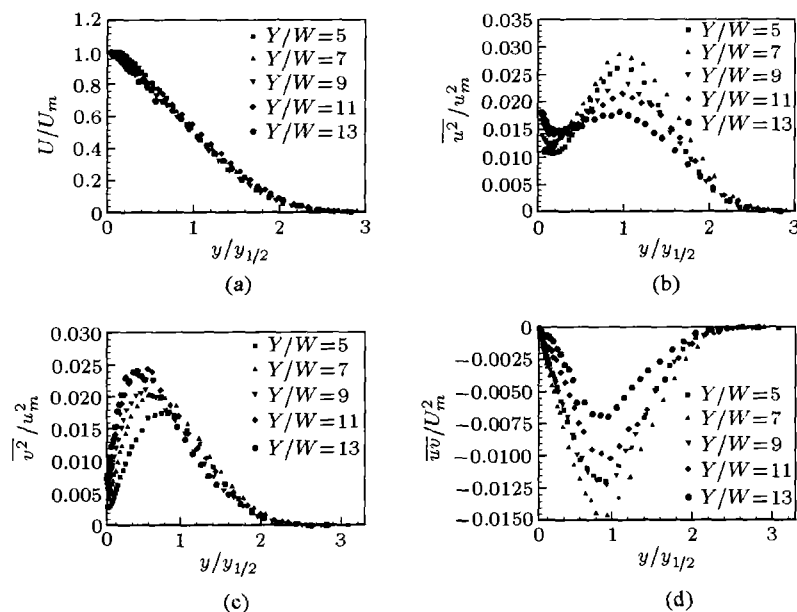


图4 撞击距离 Y/W 对壁面射流的影响($Re_w = 12000$, $W = 9.38$ mm, $S/W = 6.98$, $D = 150$ mm)

Fig.4 Effect of distance between slot jet exit and object surface Y/W on wall jet flow

($Re_w = 12000$, $W = 9.38$ mm, $S/W = 6.98$, $D = 150$ mm)

$S/W=2.62$ (对于 150 mm 的圆柱体, $\theta = 20^\circ$), 该位置靠近射流撞击壁面的驻点, 也很靠近壁面射流的转向区, 因而, 该区域内的径向速度 V 不能看成是可以忽略的小量. 我们知道, 径向速度对 $\overline{u^2}/2$ 的产生起到了重要作用. 在壁面射流的流体转向区域内, 流体与壁面的相互作用很强, 从而流向湍流能量产生 p_u 增强, 导致在靠近壁面区域内的 $\sqrt{u^2}/U_m$ 增加 (图 4(b)).

2.3 雷诺数对壁面射流的影响

雷诺数对壁面射流也有一定的影响. 从 $S/W = 6.98$ 位置的平均速度及其脉动分布可以看出, 无量纲后的平均速度受雷诺数影响很小 (图 5(a)), 但是无量

纲后的流向应力 $\sqrt{u^2}/U_m$ 和径向雷诺应力 $\sqrt{v^2}/U_m$ 随雷诺数的增加而减少, 而流向正应力受雷诺数的影响程度较径向应力要大 (图 5(b), 图 5(c)). 如果保持 $S/W, W, Y/W$ 为常数, 雷诺数 Re_w 的增加意味着 U_e 的增加. 假定距离驻点某位置 S/W 的壁面射流的厚度不受雷诺数的影响, 则壁面射流中的最大速度将增大. 从而, U_m 增大后, 壁面射流中的最大平均速度梯度 $\partial U/\partial y$ 也随之增大, 这导致了 $\sqrt{u^2}/U_m$ 随雷诺数的变化而变化较大的原因. 这里有一个很有意思的现象, 雷诺数对湍流切应力的影响出现在壁面射流的外侧空间, 随着雷诺数的增加, 由于平均速度梯度的增大, 导致了雷诺切应力的值增大.

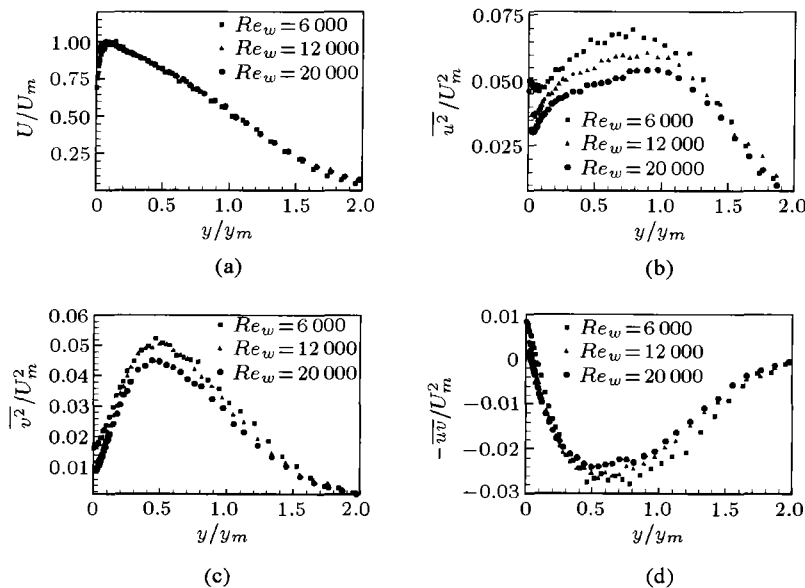


图 5 雷诺数对壁面 (柱直径 100 mm) 射流的影响 ($W = 9.38$ mm, $Y/W = 5$, $S/W = 6.98$)
Fig.5 Reynolds dependence of turbulence characteristics across wall jet of 100 mm cylinder
($W = 9.38$ mm, $Y/W = 5$, $S/W = 6.98$)

3 结 论

本文实验研究了射流撞击圆柱表面的湍流特性, 得到了喷嘴宽度、圆柱表面曲率、雷诺数、喷嘴与圆柱表面距离等参数对壁面射流的影响的参数. 研究结果表明:

(1) 当喷嘴与受撞击表面之间的距离 Y/W 在一定范围内增加的时候, 沿圆柱表面流动的流向和横向的湍流强度增强. 该结果对于了解和解释驻点处努塞数的增大有较大帮助.

(2) 用平板射流和圆柱体表面壁面射流的数据进行比较, 从而得到表面曲率对壁面射流特性的影

响. 结果表明, 曲率对壁面射流的影响较强, 并随着 S/W 的增大而增强. 随着雷诺数的增大, 壁面曲率的影响也有强化的趋势.

(3) 与 $\sqrt{v^2}/U_m$ 相比较, 靠近壁面区域的 $\sqrt{u^2}/U_m$ 受到壁面曲率、雷诺数 Re_w 、撞击距离 Y/W 以及柱体表面角向位置 S/W 等参数的影响更明显. 实验的结果显示, 雷诺切应力对壁面曲率最敏感.

参 考 文 献

- 1 Downs SJ, James EH. Jet impingement heat transfer — a literature survey. ASME Paper No. 87-HT-35, 1987. 1014

- 2 Jambunathan K, Lai E, Moss MA, et al. A review of heat transfer data for single circular jet impingement. *Int J Heat and Fluid Flow*, 1992, 13: 106~115
- 3 Viskanta R. Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1993, 6: 111~134
- 4 Choi Mansoo, Yoo Han Seoung, Yang Geunyoung, et al. Measurements of impinging jet flow and heat transfer on a semi-circular concave surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 3: 1811~1822
- 5 Gibson MM, Verriopoulos CA, Vlachos NS. Turbulent boundary layer on a mildly curved convex surface, part 1: mean flow and turbulence measurements. *Experiments in Fluids*, 1984, 2: 17~24
- 6 Bradshaw P. Effects of streamline curvature on turbulent flow. AGARDograph, 1973, 169172
- 7 Launder BE, Rodi W. The turbulent wall jet. *Prog Aerospace Sci*, 1981, 19: 81~128
- 8 Patel VC, Sotiropoulos F. Longitudinal curvature effects in turbulent boundary layers. *Progress in Aerospace Sciences*, 1997, 33, Issues 1-2: 1~70
- 9 Piquet J, Patel VC. Transverse curvature effects in turbulent boundary layer. *Progress in Aerospace Sciences*, 1999, 35, Issue 7: 661~672
- 10 Button BL, Leech JR. The selection of a contraction design method. ME Report 395, Lanchester Polytechnic, UK, 1972
- 11 Browne LWB, Antonia RA, Chua LP. Calibration of X-probes for turbulent flow measurements. *Experiments in Fluids*, 1989, 7: 201~208
- 12 Zhou Y, So RMC, Liu MH, et al. Complex turbulent wakes generated by two and three side-by-side cylinders. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2000, 21: 125~133
- 13 Martin H. Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces. *Advances in Heat Transfer*, 1977, 13: 60~67
- 14 Neumendorf R, Wygnanski I. On a turbulent wall jet flowing over a circular cylinder. *J Fluid Mech*, 1999, 381: 1~25

EXPERIMENTAL STUDY ON TURBULENCE CHARACTERISTICS OF A SLOT JET IMPINGEMENT ON SEMI-CIRCULAR SURFACES¹⁾

Liu Minghou^{*,2)} T. L. Chan[†]

^{*}(Department of Thermal Science and Energy Engineering, USTC, Hefei, 230027, China)

[†](Department of Mechanical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong)

Abstract Detailed mean flow and turbulence measurements of a turbulent air slot jet impinging semi-circular convex surface were experimentally investigated. The effect of Reynolds number (6000~2000), impingement distance Y/W (5~13), slot jet width W (9.38 mm) and impingement wall surface curvature (semi-cylinder diameter $D = 150$ mm) on impingement wall jet flow and its turbulent structure are presented. The results of X-wire data show that, compared with transverse Reynolds normal stress, $\overline{v^2}/U_m^2$, the streamwise Reynolds normal stress, $\overline{u^2}/U_m^2$ is strongly affected by the examined dimensionless parameters of D/W , Y/W and S/W in the near wall region. It is also evidenced that the Reynolds shear stress, $-\overline{uv}/U_m^2$ is much more sensitive to surface curvature, D/W . The streamwise and transverse turbulence intensity on the semi-cylinder surface increases with Y/W within range that we checked. To study curvature effects on turbulence characteristics, the experimental data of jet impingement on plate wall and semi-cylinder were compared with each other. The results show that effect of wall curvature on turbulence is distinct, and enhances with increase of S/W , Reynolds number based on jet exit width.

Key words slot jet impingement, curvature effects, turbulence characteristics, wall jet, semi-cylinder surface

Received 2 December 2003, revised 12 July 2004.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (50206021,10372099).

2) E-mail: mhlui@ustc.edu.cn