

LDA 测量方截面 U 型旋转通道速度分布^{*}

吉洪湖¹, LAUNDER² B E, JACKSON² D C

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016;

2. Mechanical Engineering Dept., UMIST, Manchester, UK)

摘 要: 为了深入了解旋转涡轮叶片内冷通道中的流动特性, 用激光多普勒测速仪 (LDA) 测量了旋转 U 型通道中的平均速度分布。通道的横截面积为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, 弯管的平均半径与水利直径的比值为 0.65, 旋转轴与弯管的曲率轴平行。在 $Re = 10^5$ 时分别测量了转动数 $Ro = 0, 0.2$ 和 -0.2 三种旋转状态下的速度分布。在这三种情况下弯管内侧 $\theta = 90^\circ$ 至下游一定范围内都有流动的分出现。由于不同的旋转状态二次流的方向和强弱不同, 导致了分离区大小和通道中速度分布的不同。

关键词: 湍流; 旋转流体; 流速测量; 激光多普勒速度计

中图分类号: V231

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2001) 03-0261-04

Velocity measurement of rotating square U-bend duct with LDA

Ji Hong-hu¹, LAUNDER² B E, JACKSON² D C

(1. Coll. of Energy and Power, Nanjing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Mechanical Engineering Dept., UMIST, Manchester, UK)

Abstract: Detailed mean velocity distribution of a rotating U-bend duct was measured with LDA. The U-bend duct has a cross section of $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, and the ratio of the mean radius of the bend to the hydraulic diameter of the duct is 0.65, the axis of rotation is parallel to the bend axis. Three cases were investigated: a stationary U-bend duct flow, a case with the U-bend duct rotating positively at a rotation number $Ro = 0.2$, and a case with negative rotation at $Ro = -0.2$. Flow separation occurs in all three measured cases at the inner wall from half way of the bend to certain downstream region. The size of separation region and the velocity distributions of these three cases are significantly different because the direction and the intensity of the secondary flow are different for different rotation condition.

Key words: Turbulent flow; Rotating fluid; Flow velocity measurement; Laser Doppler velocimeter

1 引 言

现代燃气涡轮发动机的性能在很大的程度上取决于高温部件的有效冷却。特别对于涡轮叶片, 由于它所处的环境温度超过了其金属材料所能承受的极限温度, 高效的冷却就成了保证其正常工作的必不可少的条件。要设计出适用于旋转叶片的高效低阻冷却结构, 就必须深入地了解旋转通道中的流体流动。文献[1]用理论分析的方法研究了正交旋转圆管中的流动。结果表明由哥氏力引起的二次流流型为一对对转的双涡结构, 它导致了非对称的速度分布和温度

分布, 速度和温度较高的流体向旋转管的压力边偏移。文献[2, 3]用实验的方法研究了正交旋转矩形通道中的流动问题, 文献[4~7]用计算的方法研究了类似的问题, 也发现了旋转圆管中出现的基本特性。

文献[8]用流场显示的方法研究了旋转方截面 U 型通道中的流体流动, 所研究通道的旋转轴与 U 型弯道的曲率中心轴平行, 实验表明哥氏力的效应是明显的。文献[6, 9]也用数值计算的方法研究了这一类问题。计算结果表明在旋转 U 型通道中的流动具有旋转圆管和矩形通道中的基本特性, 旋转与弯管曲率的结合对流场的结构有显著的影响。但是目前尚缺

^{*} 收稿日期: 2000-11-09, 中国航空学会动力专业分会燃烧与传热传质专业学术交流会推荐; 修订日期: 2001-02-22。

作者简介: 吉洪湖 (1957—), 男, 博士, 研究领域为传热学、流体力学。

乏评价这些计算精度的实验数据。为了更深入地理解文献[8]所研究的旋转 U 型通道的流动特性, 提供评价 CFD 计算精度的实验数据, 本文用 LDA(激光多谱勒测速仪)测量了与文献[8]相同的旋转通道中的流场。

2 实验台与 U 型通道

所用与文献[8]相同的实验台和 U 型通道, 文献[8]已对其进行了详细的描述, 这里仅给出一些主要的几何参数以方便下文的讨论。U 型通道的横截面为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 弯管的平均半径 R 。与水利直径的比值为 0.65。旋转轴与弯管的曲率轴平行, 该两轴之间的距离为 $4.45 D$, 如图 1 所示。在直通道部分所用的坐标系为直角左手坐标系, 其原点在通道的外侧壁面, 中心对称面(虚线所示)及弯管的进(出)口截面的交点上。坐标 x 由外侧壁面指向内侧壁面, y 轴指向上方, z 轴沿着主流的方向。在弯管区采用的是圆柱坐标系, θ 角由弯管的进口开始度量, x 轴和 y 轴与直通道部分相同。为了让激光束进入所研究的流体, U 型通道是由 10 mm 厚的透明有机玻璃制成。LDA 探头静止地固定在 U 型通道的上方, 探头的轴线与旋转轴线平行。

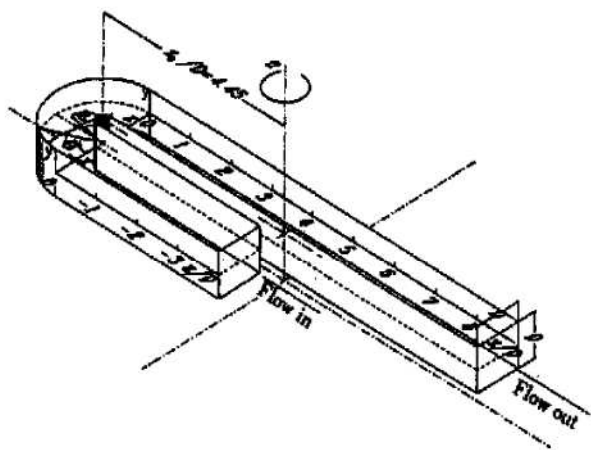


Fig. 1 Schematic of the rotating U-bend duct and the coordinate system used in measurement

3 测量结果与讨论

本文用 LDA 在旋转 U 型通道的水平对称平面 ($y/(0.5D) = 0$) (以下称“对称平面”) 和靠近上壁的一个平面 ($y/(0.5D) = 0.75$) (以下称“近上壁平面”) 内测量了流场的分布。在雷诺数 ($Re = U_m D / \nu$) 为 10^5 时研究了三种旋转状态: 即静止状态, 转动数 Ro

$= \Omega D / U_m$ 为 0.2 的正转状态以及 $Ro = -0.2$ 的负转状态。正转状态定义为通道的压力面与通道的外侧面一致。对于本文的 U 型通道, 从通道上面观察时顺时针旋转即为正转状态。本文在两个测量平面内不同流向位置处横跨通道测量了 U_z / U_m 和 U_x / U_m 的分布, 其中 U_m 是通道的平均速度。

在进行旋转通道流场测量之前, 首先对静止状态下 $Re = 10^5$ 时弯管上游 $z = 3D$ 处横截面上的流场进行了测量, 测量了该截面上水平和垂直对称线上的速度分布。结果表明在这个截面上流动处于正在发展状态, 平均速度的分布基本上是对称的, 二次流和紊流强度都很弱。因此, 在下游各截面上出现的二次流和紊流的变化将可完全归结于通道的旋转和曲率效应。

3.1 静止通道的速度分布

静止通道的速度分布如图 2 所示, 其中图 2(a) 是对称平面内的测量结果, 图 2(b) 是近上壁平面内的分布(以下各种旋转状态的速度矢量图均按此格式绘制)。在弯管的上游直段部分, 速度分布基本对称的正在发展的流体流向弯管的进口截面。

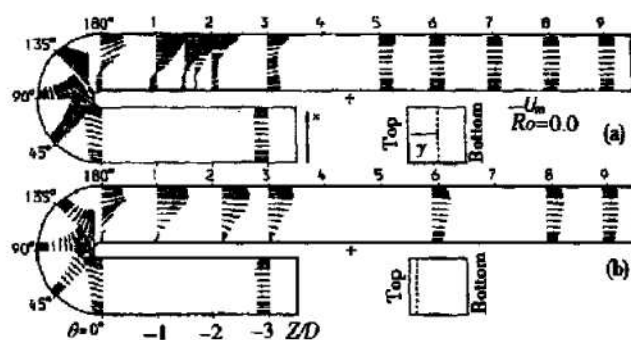


Fig. 2 Mean velocity vector plots of the U-bend duct flow at $Re = 1 \times 10^5$ and $Ro = 0$
(a) On symmetry plane (b) On top Plane

在弯管的进口处, 流体沿着内侧壁面加速而沿着外侧壁面减速。在内侧壁面 $\theta = 90^\circ$ 位置处, 对称平面内的流体开始分离而近上壁平面的流体仍然是附着壁面的。这是由于由曲率引起的二次流在近上壁平面中把流体由外侧壁向内侧壁传输(而在对称平面中二次流具有相反的方向)这使得分离推迟。在弯管的后半段中, 在靠近外侧壁的区域流体开始加速, 这是由于在该区域中沿流向的正压力梯度的减小引起的。在 180° 位置处, 对称平面内的分离区发展到了通道宽度的 35%, 而在近上壁平面中回流运动较弱并且限定在一个狭窄的区域之中。

在弯管的下游,实验表明虽然在对称平面中的回流比近上壁平面中要强,但对称平面中的流体再附着发生得较早。在对称平面中再附着点为 $z/D = 1.7$ 而在近上壁平面为 2.2。对称平面中流体再附着发生以后流场速度的恢复也比近上壁平面中要快。在 $z/D = 6$ 处,对称平面的速度已恢复为对称分布,而在近上壁平面中流体速度仍是近外侧壁较快,直到 $z/D = 8.9$ 时流体速度仍没有恢复为完全的对称分布。

3.2 正转通道的速度分布

正转($Ro = 0.2$)对通道中平均速度发展的影响如图3所示。在这种情况下,在弯管区域中哥氏力与由弯管曲率引起的离心力方向相同。这种状况似乎没有明显地影响弯管上游以及弯管前半段中平均速度的发展。虽然在这种情况下,离心力对流动的影响受到了哥氏力效应的加强,但二次流的速度与静止状态的水平基本相同。在弯管的后半段高速区域向内侧壁偏移($\theta = 135^\circ$ 和 180°)并且与静止情况相比具有较高的速度。

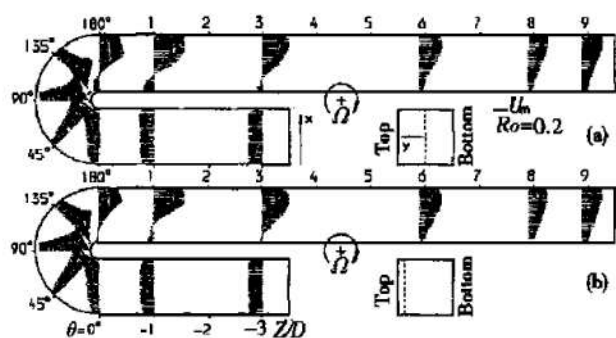


Fig. 3 Mean velocity vector plots of the U-bend

duct flow at $Re = 1 \times 10^5$ and $Ro = 0.2$

(a) On symmetry plane

(b) On top plane

在弯管的下游,由于哥氏力引起的二次流在对称平面中的流向与高动量的流体向内侧壁方向的迁移相反,使得分离区的长度加长为静止通道的两倍,这也造成了沿外侧壁的流体加速较强。与静止状态相反,此时沿近上壁平面内的分离流体的再附着早于对称平面内的再附着。再往下游,测量数据表明速度分布开始趋于旋转直通道的充分发展流动状态,即高动量的流体聚集在旋转通道的压力边一侧,也就是通道的外侧。

3.3 负转通道的速度分布

图4给出了U型通道在负转状态($Ro = 0.2$)下的平均速度矢量场。在这种情况下哥氏力引起的二次流运动在对称平面内把高动量的流体向通道的内

侧壁传输。它使得在 $z/D = -3$ 到弯管进口这个区域中,沿着外侧壁流动的流体速度明显地比静止状态和正转状态的速度要低。

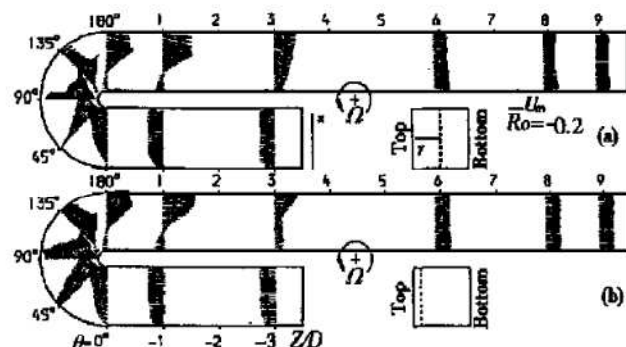


Fig. 4 Mean velocity vector plots of the

U-bend duct flow at $Re = 1 \times 10^5$ and $Ro = 0.2$

(a) On symmetry plane

(b) On top plane

在弯管内的对称平面上,可以观察到在进口处近外侧壁的流速几乎为零。实际上由图5给出的详细矢量图可以看出,在这个区域中刚进入弯管的流体流动即发生了分离,在 $\theta \approx 0^\circ \sim 45^\circ$ 之间靠近外侧壁的一个小区域中出现了一个旋涡,在 $\theta = 20^\circ$ 处分离包达到了其最大尺寸,即通道宽度的15%。由于流动的分离,弯管进口外侧壁的低动量区扩展到了整个弯管的前半段。在近上壁平面,由于哥氏力引起的二次流是从内侧壁向外侧壁流动,它把高动量的流体带到了外侧壁区域,使得近外侧壁的流体迅速从减速运动中开始恢复。在弯管的后半段,在所测量的两个平面内流体沿外侧壁区域都开始加速。在该区域内的二次流在对称平面内是朝着内侧壁面的,这显著地区别于静止和正转状态。在这内侧壁区域,在对称平面内 $\theta = 90^\circ$ 时流动发生分离,在近上壁平面的稍后位置处也出现了分离。虽然正如流场显示实验所表明的^[8]那样在弯管的近上壁平面内的二次流是由哥氏力决定的。但沿着对称平面,哥氏力的效应仅在外侧壁区起决定作用($U_x > 0$),而在内侧壁区,曲率效应起更重要的作用($U_x < 0$)。哥氏力效应与方向相反的曲率效应的总和导致了二次流流型不同于简单对涡结构的更复杂的涡结构。

在弯管的下游区域,通道的负转导致了很强的二次流运动,在对称平面中它指向内侧壁,在近上壁平面内其方向相反。在对称平面内向内侧壁流动的流体使得在弯管出口下游的分离流在 $z = 2D$ 处再附着壁面。与静止状态相反的是在近上壁平面内向外侧壁流动的二次流几乎与对称平面中向内流动的二次

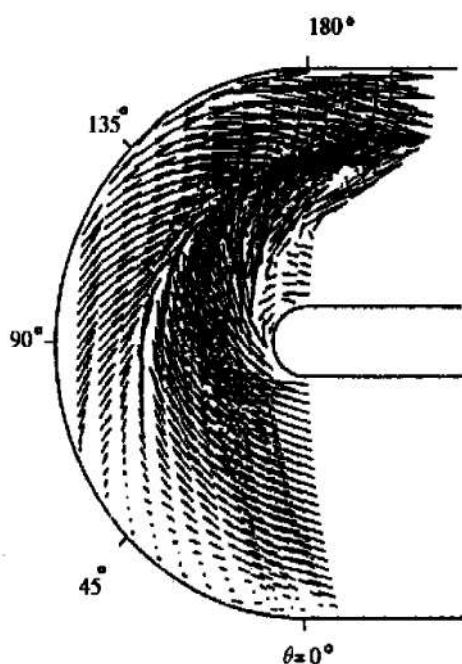


Fig. 5 Mean velocity vector plots of the U-bend duct flow on symmetry plane of the bend region at $Re = 1 \times 10^5$ and $Ro = -0.2$

流一样强。在分离流体再附着壁面($z = 3D$)的近下游区,向内运动的流体导致在内侧壁与上壁的角区聚集着低动量的流体。在 $z = 6D$ 处,流体速度分布趋于旋转直通道的充分发展状态,此时,高动量的流体向通道的内侧壁偏移。

4 结 论

(1) 静止的 U 型通道中的流体的速度分布由弯管进出口之间流动方向的压力梯度所决定,同时也受由弯管曲率引起的二次流的强烈影响。在内侧壁 $\theta = 90^\circ$ 处发生分离, $z = 1.7D$ 时流体再附着壁面。

(2) $Ro = 0.2$ 的正转几乎使分离区的长度加长了一倍,同时也加长了沿外侧壁流体加速效应的影响范围,在弯管出口至 $z = 3D$ 的范围内流体加速的影响依然存在。

(3) $Ro = -0.2$ 的负转引起了流动在弯管的对称平面的进口区域发生分离。在弯管的下游,沿外侧壁的高动量的流体向内侧壁流动,这使得流动分离区限定在 $2D$ 之内。

参考文献:

- [1] Ito H, Nanbu K. Flow in rotating straight pipes of circular cross section[J]. ASME J. Basic Eng., 1991, 113: 383~ 394.
- [2] Wagner R E, Velkoff H R. Measurements of secondary flows in a rotating duct[J]. Trans. ASME J. Eng. power, 1972, 94: 261 ~ 270.
- [3] Morris W D, Ghavamir-Nasr G. Heat transfer measurements in rectangular channels with orthogonal mode rotation[J]. ASME J. Turbomachinery, 1991, 113: 339~ 345.
- [4] Speziale C G. Numerical study of viscous flow in rotating rectangular ducts[J]. J. Fluid Mech., 1982, 122: 251~ 271.
- [5] Iacovides H, Launder B E. Parametric and numerical study of fully-developed flow and heat transfer in rotating rectangular ducts[J]. Journal of Turbomachinery, 1991, 113: 331~ 338.
- [6] Bo T, Launder B E. Turbulent flow and heat transfer in idealized blade cooling passages[C]. AGARD Conference Proceedings 527. Heat Transfer and Cooling in Gas Turbines, Turkey, 1992: 12. 1~ 12. 16.
- [7] Prakash C, Zerkle R. Prediction of turbulent flow and heat transfer in a radially rotating square duct[J]. Trans. of ASME J. of Turbomachinery, 114: 835~ 846.
- [8] Ji honghu. Visualization of flow through a rotating U-bend duct[J]. Trans. of Nanjin Univ. of Aeronautics and Astronautics, 2000, 17(1): 84~ 89.
- [9] Moore J G, Moore J. Effects of secondary flow on heat flow on heat transfer in rotating passages[R]. AGARD-CP-469, Secondary Flows in Turbomachines, paper 25, 1990.

(编辑: 王居信)