

90°圆截面弯管内三维紊流场实验研究

西安交通大学 尚虹** 王尚锦 席光 袁民建

沈阳鼓风机厂研究所 孔庆利

【摘要】用CTA热线风速仪和五孔探针,对一曲率直径比 $R_c/D = 0.87$,直径 $D = 280\text{mm}$ 的90°圆截面弯管内部三维紊流场进行了详细测量和分析。给出了不同雷诺数下弯管内不同截面上时均速度场、紊流动能、总压及静压沿曲率半径方向的分布。

主题词: 湍流流动 流场(流体力学) 管道流动 管件

分类号: O357.5

1 实验装置及测试方法

已有的研究表明^[1~3],弯管内部的流动结构主要受弯管曲率直径比(R_c/D)、雷诺数(Re)以及进口来流条件的影响。 $R_c/D < 1.0$ 的圆截面弯管流动,无论实验还是理论研究都进行得比较少,至今尚未见到关于 $R_c/D \leq 1.0$ 的圆截面弯管内三维紊流场的研究报告,而这类弯管在工业中应用却十分广泛。本文结合某工程实际问题,对曲率直径比 $R_c/D = 0.87$ 的圆截面弯管内部流场进行了详细测量。实验中采用了两套测量系统,一套是单斜丝热线测量系统,主要测量平均速度场和紊流量,另一套为五孔球型空气动力探针,主要测量平均压力场和平均速度场,这样可为理论预示方法提供较全面的实验数据,而且测量结果也可相互校核。

实验弯管布置如图1所示。风源为一空压机,通过调节压缩机转速或流量调节阀可获得弯管不同来流雷诺数的流动。为保证来流均匀性,在弯管0°截面的前6D位置设置了栅板—管束整流器,弯管进口为正在发展的紊流流动。实验分别在上游 $x/D = -2$ 和折转角 $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 不同截面上进行测量。将气流速度分解为3个方向分速度,其中流动方向分速度为主流速度 u_s ($\bar{u}_s = u_s/u_{ref}$)。曲率半径方向分速度 u_R ($\bar{u}_R = u_R/u_{ref}$)和高度方向分速度 u_z ($\bar{u}_z = u_z/u_{ref}$),称为二次流速度。定义静压系数 $\bar{P}_s = (P_s - P_{sref})/(1/2)(\rho u^2)_{ref}$,总压系数 $\bar{P}_t = (P_t - P_{tref})/(1/2)(\rho u^2)_{ref}$ 。紊流特性用紊流动能 K 表征, $K = (1/2)(u_i^2 + u_b^2 + u_n^2)/u_{ref}^2$ 。各下标定义参见图1、2。

本文采用Dantec公司生产的CTA型热线风速仪。图2为单斜丝热线探针测量的空间几何关系示意图,测量方法详见文献[4,5]。在热线测量系统分析和数据处理中,热线特性系数校准误差小于0.1%,线化器的线性标定误差小于0.1%,温度所引起的误差小于2.0%,测点位置误差小于1.5%。为综合考查测量系统的测量精度,将 $x/D = -2$ 截面上测得的主流速度沿管道横截面积分,求得的流量与实验装置中流量孔板测得的流量进行了比较其误差小于1.5%。

五孔球型空气动力探针头部直径5mm,为实验弯管直径的1.8%,除非常靠近壁面的区域

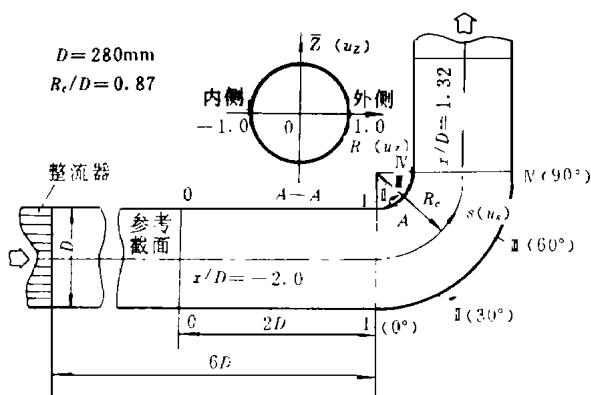


图 1 实验弯管及测量坐标

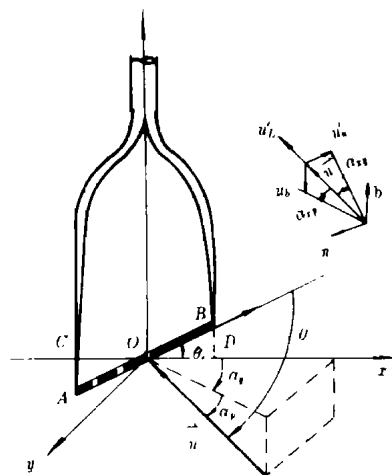
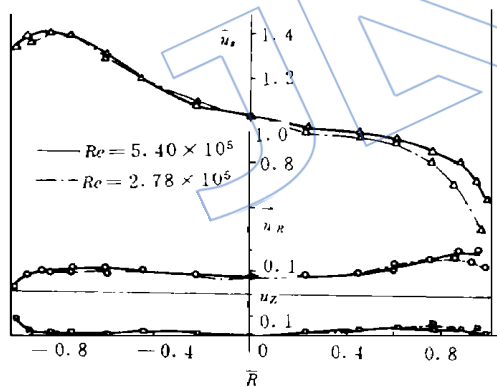
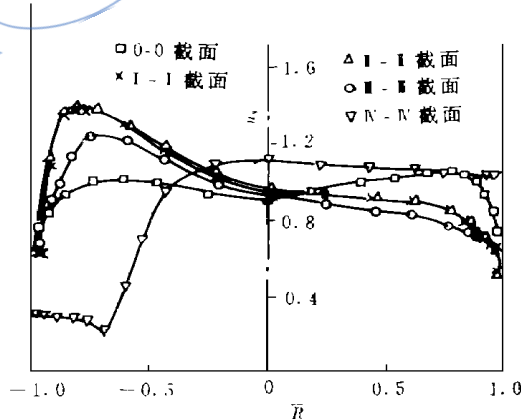


图 2 测量空间几何关系

外, 探针扰动不会引起较大误差。压力显示用蒸馏水 U 管压力计, 读数误差小于 9.80665 Pa 。

2 实验结果及分析

实验的雷诺数范围为 $Re = 2.78 \times 10^5 \sim 5.40 \times 10^5$ 。测量发现, 在此雷诺数范围弯管内流场的整体分布趋势基本相同, 只是量值上稍有差别。图 3 给出 2 个不同雷诺数下弯管主流、二次

图 3 流场的比较 ($\theta = 30^\circ$)图 4 $\bar{u}_s$ 沿曲率半径 $\bar{R}$ 向分布发展

流分布的典型结果。下面讨论雷诺数 $Re = 2.9339 \times 10^5$ (对应 $u_{\text{ref}} = 16.93 \text{ m/s}$) 流场测量结果。

2.1 速度场分布

由图 4 (图 4~8 中, $\square$ 0-0 截面, $\times$ I-I 截面, $\triangle$ II-II 截面, $\circ$ III-III 截面, ∇ IV-IV 截面) 可知, 弯管进口前 ($-2D$) 截面主流速度 $\bar{u}_s$ 基本呈均匀分布, 弯管预效应尚不明显。在 0 截面, 主流速度 $\bar{u}_s$ 已明显畸变, 内侧速度增大, 外侧速度减小, 这种趋势持续到 30 截面。随着流动的发展, 弯道内侧速度开始减小, 外侧速度增大, 在 90 截面内侧约 20% 直径范围内出现一明显低速区, 中心及外侧区域 $\bar{u}_s$ 分布较为平坦。这一低速区的产生主要是由于在 90 截面附近弯管内

侧逆压梯度很大, 导致主流速度急剧减小而产生分离所致。从总体情况看, 随着流动的发展, 主流速度 $\bar{u}_s$ 最大值逐渐向外侧偏移, 但从弯管 0 截面到 90 截面, $\bar{u}_s$ 最大值始终在弯管内侧与中心轴线之间。这与文献[2]对 $R_c/D = 2.8$ 的同类弯管测量结果有较大差别, 该弯管在 $\theta = 75^\circ$ 时主流速度最大值已移至弯管中心轴线以外靠近外侧的区域。这说明不同曲率的弯管在不同来流条件下主流速度分布会有很大差异。由图 5(a) 可以看到, 弯管进口前 ($-2D$) 截面 $\bar{u}_R$ 分量很小, 到弯管 0 截面, 出现了几乎全为负值的径向速度 $\bar{u}_R$, 这是弯管“预效应”在上游产生径向压力梯度所造成的结果。随着流动的发展, 到 $30^\circ/60^\circ/90^\circ$ 截面, $\bar{u}_R$ 逐渐变为正值, 形成常规的二次流分布结构。上述实验结果与文献[6]的数值计算结果完全一致。图 5(b) 为各测量截面二次流 $\bar{u}_z$ 沿 $\bar{R}$ 的分布。图中可见, $\bar{u}_z$ 在各测量截面上都远比 $\bar{u}_R$ 为小, 其数值大小均在平均参考速度的 4% 以内。若弯管沿 z 轴严格几何对称, $\bar{u}_z$ 值理应为零。

3.2 总压及静压分布

由图 6 可以看到, 在弯管进口前 ($-2D$) 截面总压系数基本均匀分布, 此后内外侧壁附近的低能区开始向中心发展, 自 0 截面始外侧低能区范围逐渐比内侧大, 至 30 截面这一现象最为明显。至 60 截面, 内侧低能区范围开始大于外侧, 随着流动的发展, 低能区的损失值及范围进一步增大, 到 90 截面靠内侧壁附近约 20% 直径范围出现一明显低能量区。与图 4 对照可知, 该处是因流动分离所致。

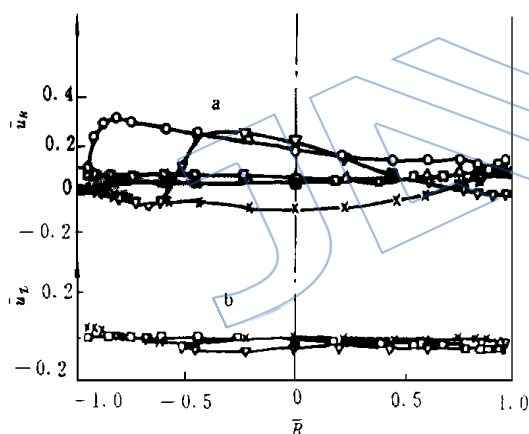


图 5 二次流速度沿 $\bar{R}$ 向分布发展

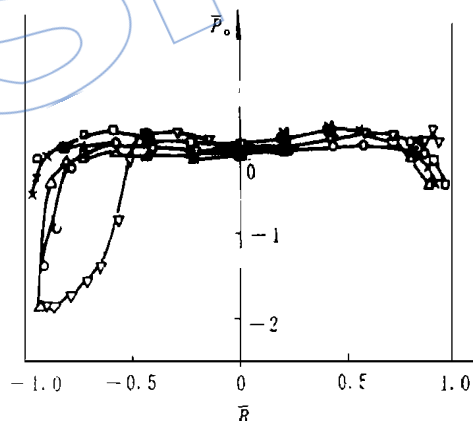


图 6 总压系数沿 $\bar{R}$ 向分布发展

由图 7 可见, 弯管前 ($-2D$) 截面静压系数基本均匀分布。至 0 和 30 截面, 内侧压力逐渐降低, 外侧压力逐渐升高, 基本呈线性分布, 在 30 截面静压沿曲率半径的变化梯度达到最大值。可见从弯管前直管段到弯管 30 截面, 弯管在内侧壁附近为收敛流动, 在外侧壁附近为扩压流动。30 截面以后内侧压力增大, 变为扩压流动; 而外侧变为收敛流动。从图 7 还看到, 60° 到 90 截面间静压下降明显高于上游截面。

3.3 紊流分布

由图 8 可见, 自 0-0 到 III-III 截面, 管道中心区域紊流动能均较小, 且变化不大; 内外壁附近紊流动能相对较大, 且内壁比外壁大。这是由于内侧壁沿壁面法向速度梯度相对较大, 引起紊流动能生成项增加, 使得紊流强度增大; 同时该处主流速度也较大。对于本实验强曲率弯管

而言,上述两个因素导致内侧紊流动能增大的程度,超过了内侧凸壁曲率使紊流动能减小的

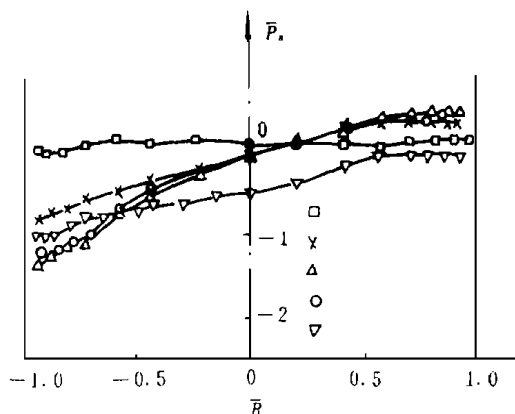


图7 静压系数沿 $\bar{R}$ 向分布发展

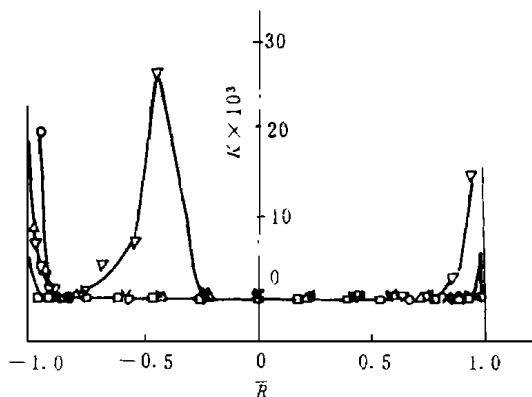


图8 K 沿 $\bar{R}$ 向分布发展

程度,从而出现了内侧壁附近紊流动能较大的分布趋势。尤应注意在 90 IV-IV 截面,内侧约 $\bar{R} = -0.5$ 位置有一很大的紊流动能峰值,对照图 4 可以发现,该处恰好是主流速度沿法向梯度最大的位置,因此可以认为该紊流动能的峰值是由于紊流动能的生成项增大所致。此外 90 截面在外侧附近紊流动能较内侧大,这是由于该截面内侧附近低速区的存在导致了流体主流向外侧偏移,在外侧壁附近形成较大的速度梯度,引起紊流动能生成项增大以及凹壁曲率影响所致。

结论 (1)由压力分布曲线可知,弯管内的能量损失主要发生在弯管内侧壁附近,在 90° 截面区域损失尤为严重。静压分布从 0 到 90 截面始终是外侧高于内侧,内侧上游为收敛流动(约在 0~30 截面之间),下游为扩压流动(30 截面以后);外侧流动则与内侧相反,但其压力梯度量值远比内侧小。(2)紊流动能的测量表明,强曲率弯管内侧壁的紊流动能一般比外侧壁大。速度梯度大的位置,紊流动能也大。

致谢 本文实验研究的准备工作得到姜桐教授、郑黎明硕士的帮助,衷心感谢!

参 考 文 献

- 1 ΠΟ H. Flow in Curved Pipes JSM E, Int. J., 1987, 30(262): 543- 552
- 2 Enayet M M, etc Laser- Doppler Measurements of Laminar and Turbulent Flow in a Pipe Bend, Int. J. Heat & Fluid Flow, 1982; 3(4): 213- 219
- 3 Azzola J, etc Developing Turbulent Flow in a U- Bend of Circular Cross- Section: Measurement and Computation. ASME, J. of Fluids Eng., June, 1986, 108: 214- 221
- 4 Theodor H Okiishi Measurement of the Periodic Variation of Turbomachine Flow Fields Proceedings of the Dynamic Flow Conference, 1978
- 5 Motoo Kurumaru, etc Measurement of 3-D Flow Field Behind an Impeller by Means of Periodic Multi- Sampling with a Slanted Hot Wire Bulletin of JSM E, 1982; 25(209): 1674- 1681
- 6 尚虹. 90 强曲率圆截面弯管内三维紊流场实验与理论研究. [学位论文] 西安交通大学, 1991

(责任编辑 魏星禄)

HOT- WIRE MEASUREMENT OF 3- D FLOW FIELD IN A RECTANGULAR VOLUTE

Huang Shujuan, Hu Zhiwei, Miao Yongniao

(Dept of Power, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

ABSTRACT 3-D turbulent flow fields in a rectangular volute of a small centrifugal compressor were measured with a hot-wire probe at three cross sections along its circumference at three different flow regimes. The space positions were adjusted with a three-dimensional coordinate frame. Time average velocities and Reynolds stress tensors were calculated by means of a hot-wire response equation with third order of precision. The measured results illustrated two recirculation regions near both side walls due to abrupt expansion at the inlet of the rectangular volute. The turbulent kinetic energy and Reynolds stresses in the recirculation regions were reduced as the flow rate increases and as the radius increases. In addition, asymmetry of the rectangular inlet induced the vortices at different cross sections of the volute, and made the trace of the flow as a curved spirochaeta. In consequence, the abrupt expansion and the asymmetry of the inlet must be avoided.

Key words Turbulent flow Flow field Hot-wire probe Measurement

EXPERIMENTAL STUDY OF 3- D TURBULENT FLOW FIELD IN A 90 °BEND PIPE

Shang Hong, Wang Shangjin, Xi Guang, Yuan Minjian

(Dept of Power, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Kong Qingli

(Institute of Shenyang Boiler Plant, Shenyang)

ABSTRACT The 3-D turbulent flow field in a 90 °strongly curved pipe ($D = 280\text{mm}$, $R_c/D = 0.87$) has been experimentally studied under different Reynolds numbers ($Re = 2.78 \times 10^5 \sim 5.40 \times 10^5$) with a single slant hot-wire measurement system and a five-hole dynamic probe. The detailed experimental results are given, including the distributions of 3-D time-averaged velocities, turbulent energy, total pressure and static pressure along the curvature direction at five different cross-section. It is shown that the loss in this strongly-curved pipe mainly occurs near the inner-side wall, and increases rapidly near the 90 °cross-section due to flow separation. Static pressure distribution near the outer-side wall is higher than that near the inner-side wall throughout. The flow near the inner-side wall accelerates from the 90 °to the 30 °cross-section and decelerates after 30 °cross-section. But near the outer-side wall, the tendency becomes adverse, and the pressure gradient here is much smaller than that near the inner-side wall.

Key words Turbulent flow Flow field Pipe flow

EXPERIMENTAL STUDY ON GASDYNAMIC PERFORMANCE OF INTAKE WITH PLENUM BYPASS

Chen Xiao, Li Lulong, Ma Rulong

(2nd Dept, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

ABSTRACT The intake with plenum bypass is a new-type subsonic intake for civil medium-range aircraft. Its geometry is considered. A model of this type has been designed, which scale is 1:2. Experiments of flow visualization, gasdynamic performance and foreign object throwing have been done. The experimental results show that its perfect gasdynamic performance and flow steadiness satisfy the requirements of aeroplane and engine. Compared to the intake with pipe by-pass, this new-type intake has many advantages, especially the improved ability of eliminating