

90°方形弯管内部流场 PIV 试验

马皓晨¹,代翠²,董亮²,吴贤芳²

(1. 江苏大学机械工程学院,江苏 镇江 212013; 2. 江苏大学流体机械工程技术研究中心,江苏 镇江 212013)

摘要:为了揭示不同进口流速情况下90°方形弯管内部流动特征,在构建90°方形弯管专用PIV试验台的基础之上,对弯管内不同断面以及不同半径上的流速分布情况进行了PIV测试试验。试验结果表明:采用PIV技术能较好地获得弯管内部流动情况;流体未进入弯曲段时,各断面流速分布变化不大;而进入弯曲段后,由于受到弯管壁的约束形成旋转流动,弯管内侧流速增大,外侧流速降低;当转过60°位置后,弯管内侧流速降低,外侧流速增加;到达90°位置后,各断面的流速基本趋于一致。不同半径处的流速分布不相同,弯管内侧流速较大,外侧较小,在50°、60°处流速达到最大值;弯管不同的进口流速对于速度峰值的位置有一定的影响,而对于弯管内其他的流动情况影响较小。

关键词:90°方形弯管;粒子图像测试;流场分析;双叶片泵

中图分类号:TV131.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)05-0031-04

PIV experiment of inner flow field in 90° bending ducts with square section//MA Haochen¹, DAI Cui², DONG Liang², WU Xianfang² (1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to reveal the internal flow characteristics of a 90° bending duct with square section at different inlet velocities, PIV measurements of velocity distribution were carried out for bending ducts at different sections and radii. The experimental results suggest that the flow behavior within a bending duct can be measured by PIV. Velocity profiles vary little before the fluid entering the bending section. Rotating flow forms due to the restraint of the bending wall when the fluid enters the bending section, resulting in a velocity increase at the inner wall of the bending duct and a velocity decrease at the outer wall of the bending duct. On the contrary, the velocity decreases at the inner wall of the bending duct and increases at the outer wall of the bending duct when the fluid passes through 60°. Flow velocity tends to be uniform when the fluid passes through 90°. Velocity profile was different with different radius and the velocity near the inner wall is higher than that near the outer wall. Maximum velocity occurs at 50° and 60°, and its location is found to be dependent on the inlet velocities and independent on other flow characteristics in the bending duct.

Key words: 90° bending duct with square section; particle image velocimetry; flow analysis; double-blade centrifugal pump

在石油、化工、水利等领域中,常用弯管来实现流体的输运以及热量和质量的传递。弯管内流体的流动受到诸多因素的影响,尤其是在来流速度变化时,弯管内的流场呈现出十分复杂的流动特性,如在管壁附近形成分离区,管道横截面上产生二次流动,这些现象不仅造成流体总压和能量损失而导致热量、质量交换效率降低,而且还会产生较大的流动噪声,所有这些流动现象都会造成管内流体能量的损失,因而对水力机械过流部件的效率有着重要影响,故弯管内的流体流动一直受到研究者的关注^[1-6]。

Kliafas 等^[7]应用非接触激光测量方法对90°方形弯管内流场进行了研究,测量了90°方形管道从

竖直到水平段内的流动情况。徐俊等^[8]利用激光多普勒测速仪(LDV)测量了180°矩形弯管的流场,获得了流场的时均流速、湍流强度等数据,给出了180°矩形弯管时均切向流速、时均轴向流速和湍流强度沿周向和轴向的分布曲线。杜彩虹等^[9]利用智能型五孔球探针测量了180°矩形弯管的流场,同时利用FLUENT流体计算软件,采用Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型对弯管的流场进行了数值模拟,并重点考察了切向速度和压力的变化。赵懿等^[10]采用二维激光多普勒测速仪和五孔探针测得4片90°弯管Z形组合在不同弯管间距下水流特征断面上的三维流场、压力分布以及紊动特性的沿程变化等,并探讨

基金项目:国家自然科学基金(51179075);江苏省工业科技支撑计划(BE2012131);江苏省研究生创新计划(CXZZ12_0680);江苏大学高层次人才启动基金(12JDG082)

作者简介:马皓晨(1975—),女,江苏海安人,讲师,硕士,主要从事泵内流测试研究。E-mail:mahaochen@gmail.com

了双弯管局部阻力相邻影响的机理。谢龙等^[11]利用激光粒子图像测速技术 (particle image velocimetry, PIV) 对阀体后 90°圆截面弯管的内部流场进行了测量, 分别在不同阀体开度和流速工况下测得了弯管内大量高分辨率瞬态速度场数据, 并对其进行统计分析, 研究了时均速度场、流线图谱及涡量场等相关流场特征。

关于 90°方形弯管在不同流速情况下弯管内的流动, 无论是理论研究还是试验研究都较少见, 至今鲜有关于 90°方形弯管内三维紊流场的研究报道, 而这类弯管在工农业中的应用却十分广泛, 为此, 本文结合某工程实际问题, 对前端配置双叶片泵的 90°方形弯管内部流场进行分析。

1 试验装置和测量方法

1.1 试验台构造

图 1 为 90°方形弯管试验装置示意图。测试设备主要有变频控制柜、三相异步电机、电磁流量计等。试验时, 通过变频控制柜对电机进行无级调速, 流量由电磁流量计测得。

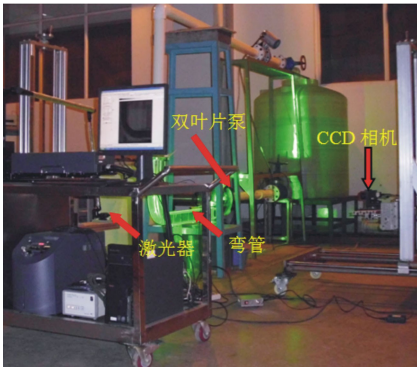


图 1 90°方形弯管试验装置

试验用弯管结构如图 2 所示。为了便于 PIV 测量, 弯管采用有机玻璃铸造, 有机玻璃质地均匀, 无气泡、杂质, 各个表面抛光处理, 粗糙度达到 3.2 级。90°方形弯管的具体参数见表 1。

表 1 90°方形弯管参数

符号	含义	符号	含义
d	水动力学直径(0.08 m)	v_c	时均平均流速
r	径向长度	x_H	沿直线的轴向距离
r_i	弯道内侧回转半径(0.144 m)	z	展向坐标
r_o	弯道外侧回转半径(0.224 m)	$z_{1/2}$	弯管宽度的一半(0.04 m)
r^*	无量纲的径向位置, $r^* = (r - r_o) / (r_i - r_o)$	z^*	标准化展向坐标, $z^* = z / z_{1/2}$
u	平均流速	θ	轴向坐标
v_{in}	进口流速(1 m/s、2 m/s)		

1.2 PIV 测试系统

试验采用美国 TSI 公司产的商用 PIV 系统, 主要包括: YAG200-NWL 型脉冲激光器(单脉冲能量

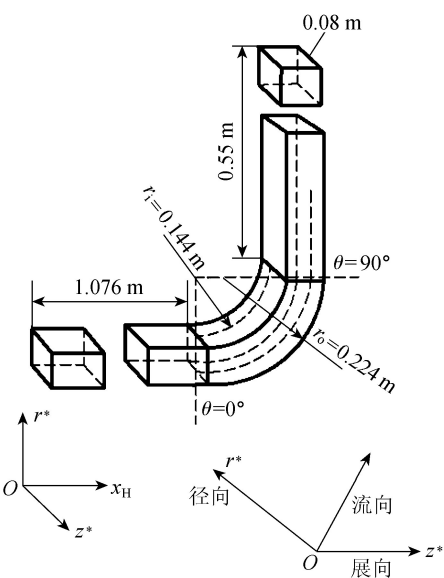


图 2 90°方形弯管结构示意图

为 200 mJ)、630059 POWERVIEW 型 4MP 跨帧 CCD 相机(分辨率为 2048 像素×2048 像素)、Insight 3G 图像采集及分析系统(其查询区最小可达 4 像素×4 像素)、610035 型同步器、用于将同步触发信号传送给同步器的同步触发控制器主机和光纤传输转换器、610015 型光臂、片光源透镜组等。

1.3 测试方案

PIV 测量截面为沿主流方向, 测量区域为弯管段。试验共测量 1 m/s 和 2 m/s 两个不同的进口流速(通过出口阀门来调节流量从而改变弯管进口流速), 且在每个流速下, 测量 6 个断面, 分别为距弯管中间断面 10 mm、20 mm 以及 30 mm 的断面(两侧对称), 为便于标记, 以弯管进口方向最左边平面为基准($z = 0$ cm), 则 6 个断面分别记为 $z = 10$ mm、20 mm、30 mm、50 mm、60 mm、70 mm。

1.4 测试步骤

通过变频器将模型泵转速调到 1 000 r/min, 并通过出口阀门改变流量, 测量流场, 依次重复直至完成所有方案的测量。具体试验步骤如下:

- a. 连好线后打开计算机、同步器、激光器等。
- b. 启动模型泵, 调节泵转速为 1 000 r/min。
- c. 调节激光的光腰, 使其在测量区域中心附近, 并使片光面与测量断面重合。
- d. 添加示踪粒子, 控制粒子浓度。
- e. 调节相机焦距, 使拍摄的图片清晰, 粒子微微曝光。
- f. 调节出口阀门, 使模型泵输出流量为 23 m³/h (对应弯管进口平均流速为 1 m/s)。
- g. 在 Insight 3G 中设置试验参数, 拍摄零时刻的 100 组流场图像并保存。
- h. 调节出口阀门, 使模型泵输出流量为 46 m³/h

(对应弯管进口平均流速为 2 m/s),重复步骤 g。

i. 试验结束,对拍摄的图片进行处理。

2 试验结果与分析

2.1 径向流速分布

图 3 给出了进口平均流速为 1 m/s 时, $z=30$ mm 断面各个位置上的时均流速分布曲线,可以看出,对于同一断面而言,当流体未进入弯曲段,即在 $x_H=1056$ mm 和 $\theta=0^\circ$ 时,弯管内流速分布变化不大;而在流体进入弯曲段后,流速分布开始逐渐发生变化,弯管内侧流速逐渐增大,最大值在径向中心线上 $r^*=0.9$ 附近,数值约为 1.2 m/s,外侧流速逐渐减小,这种变化趋势延续到 $\theta=60^\circ$ 处达到最大值,此时,弯管内侧流速开始减小,外侧切向流速逐渐增大,流速的峰值由内壁向中心 $r^*=0.5$ 处移动,随着 θ 继续增大,流速的峰值继续向外壁移动,而近外壁的流速继续升高, $\theta=90^\circ$ 处不同断面的流速变化较小,基本趋于一致。对于不同断面,流速分布情况略有区别,说明弯管各个断面内流速分布情况并不一致,存在一定的波动,从而导致不同断面流速分布出现差异。

图 4 为进口平均流速为 2 m/s 时, $z=20$ mm 和 $z=60$ mm 断面上的时均流速分布情况,可以看出,当流体未进入弯曲段,即在 $x_H=1056$ mm 和 $\theta=0^\circ$ 时,流速分布变化不大,且相互对称断面 ($z=20$ mm 与

$z=60$ mm 关于弯管中间断面对称) 的流动情况基本相同;流体进入弯曲段后,对称断面流速分布出现了一些差异,这是因为流体进入弯管之后就为旋转流动,使得从 $\theta=0^\circ$ 到 $\theta=90^\circ$ 之间不同断面的流速方向发生变化,流体进入弯管内会出现二次流动,影响了不同断面上流速的分布。

2.2 不同半径流速分布

图 5 为进口平均流速为 1 m/s 时,不同半径上(指相同截面不同 r 时的流速变化情况)的时均流速分布曲线,可以看出,由于流体运动受到弯管曲率和离心力的影响,导致径向压力分布不均匀,形成径向压力梯度,导致切向流速在径向上分布不均匀。此外,由于弯管壁面存在黏性层和摩擦阻力的影响,使壁面附近的切向流速急剧减小,而主流方向流速增加。弯管外侧所受压力较大,且具有较大的离心力,故切向速度较大,主流方向流速相对较小,而在 $\theta=50^\circ$ 、 60° 处的流速的变化趋势达到最大值,即弯管内侧流速最大,外侧最小,之后主流流体由于离心力作用向弯管外侧靠近,内侧与外侧流速也开始相应发生变化。

2.3 不同断面流场分布

弯管内不同断面的流动特征如图 6 和图 7 所示,可见,无论在何种进口流速情况下,弯管出口的直线段靠近弯管内侧处存在低速区,这是由于在弯曲区域离心力的作用下,使器壁附近的切向流速急

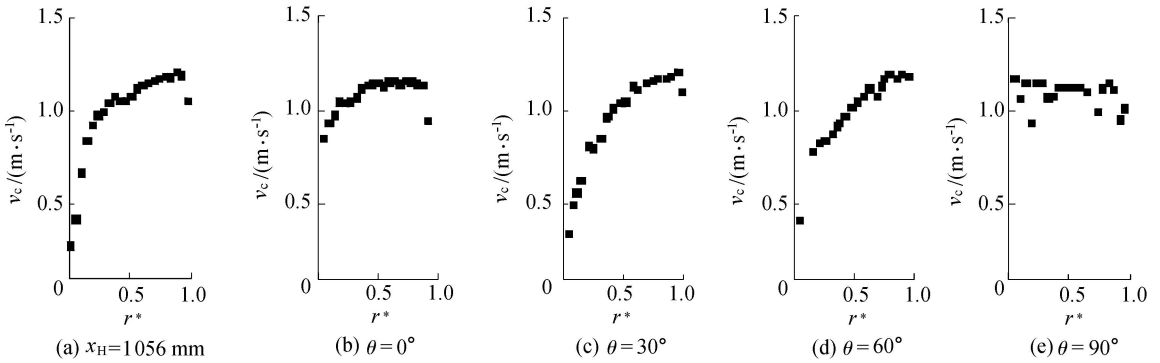


图 3 $z=30$ mm 断面沿主流方向的时均流速分布

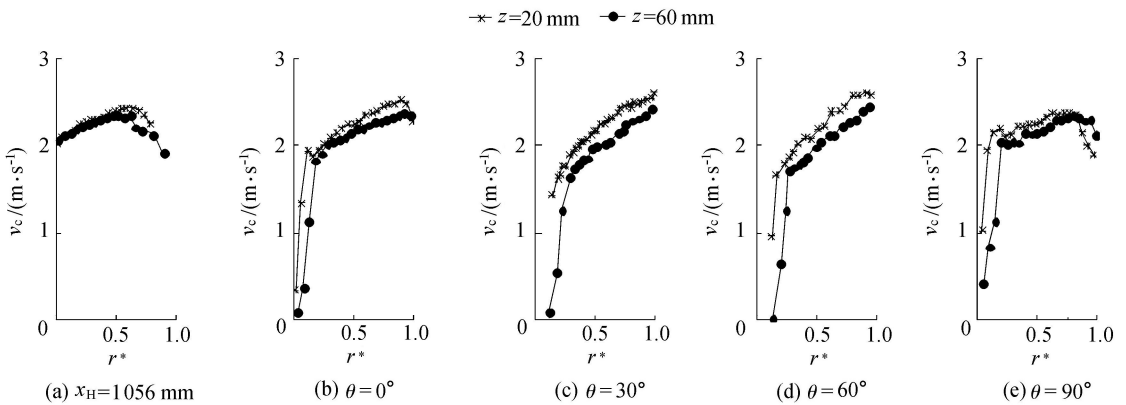


图 4 $z=20$ mm 和 $z=60$ mm 断面沿主流方向的时均流速分布

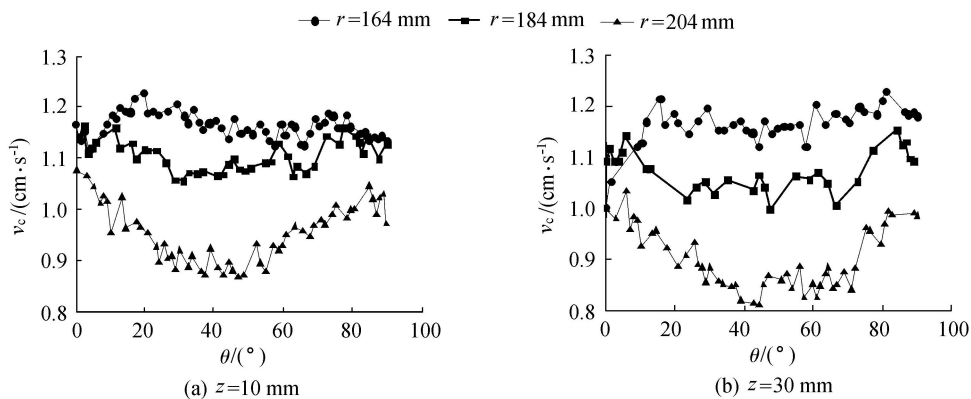


图5 不同半径时均流速分布

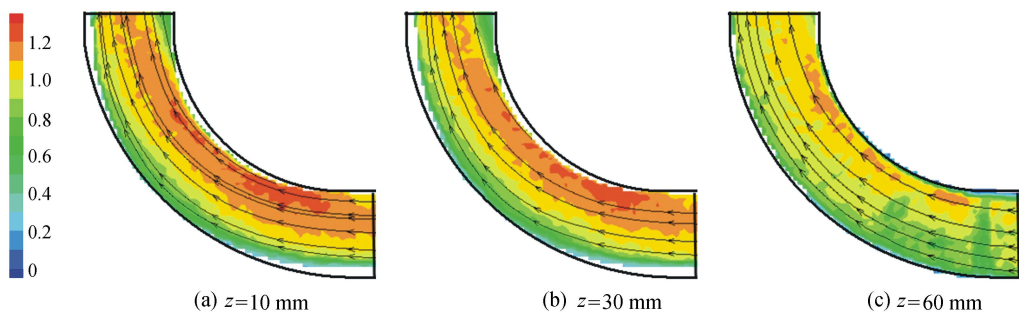


图6 进口平均流速 1 m/s 时弯管内不同断面流动特征(单位: m/s)

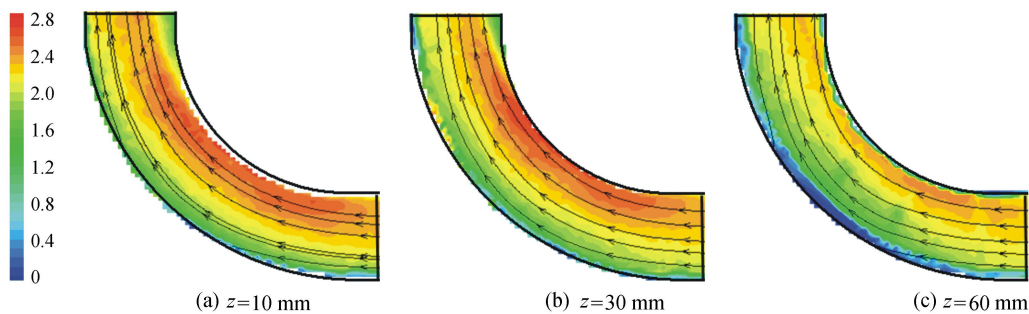


图7 进口平均流速 2 m/s 时弯管内不同断面流动特征(单位: m/s)

剧减小,且弯管内侧表面附近的切向流速分布也发生较大的变化。此外,整个拍摄区域的弯管外侧近壁处附近区域内存在低速区,且不同断面的高速区面积有较大差异。

3 结 论

a. 流体进入弯曲段后,弯管内侧流速逐渐增大,最大值在径向中心线上 $r^* = 0.9$ 附近,数值约为 1.2 m/s,外侧流速逐渐减小,这种变化趋势延续到 $\theta = 60^\circ$ 处达到最大值;此后弯管内侧流速开始减小,外侧切向流速逐渐增大,流速的峰值由内壁向中心 $r^* = 0.5$ 处移动,随着 θ 继续增大,流速的峰值继续向外壁移动,而近外壁的流速继续升高,到 $\theta = 90^\circ$ 处不同断面的流速变化较小,基本趋于一致。

b. 弯管内侧流速最大,外侧最小,且在 $\theta = 50^\circ$ 、 60° 处流速的变化趋势达到最大值。

c. 弯管不同的进口流速对于流速峰值的位置有

一定的影响,而对于弯管内其他的流动情况影响较小。

参考文献:

- [1] LACOVIDES H, LAUNDER B E. Turbulent boundary-layer development around a square-sectioned u-bend; measurements and computation [J]. Journal of Fluids Engineering, 1990, 112: 409-415.
- [2] BAGHERNEZHAD N, ABOUALI O, AHMADI G. Simulation of aerosol deposition in 90° square cross section bends using LES [C]//Proceedings of the ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting. New York: ASME, 2009: 1-11.
- [3] 湛含辉,朱辉,陈津端. 90° 弯管内二次流(迪恩涡)的数值模拟[J]. 锅炉技术, 2010, 41(4): 1-5. (ZHAN Hanhui, ZHU Hui, CHEN Jinduan. Numerical simulation of secondary flow (Dean Vortices) in 90° curved tube [J]. Boiler Technology, 2010, 41(4): 1-5. (in Chinese))

(下转第 56 页)

The research on a new separator device for water-sediment
[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2007, 30
(1):68-70. (in Chinese))

- (收稿日期:2012-11-26 编辑:熊水斌)

[4] 李杜,杨策,陈山.带90°弯管的离心压气机进口畸变数值研究[J].航空动力学报,2010,25(11):2556-2563. (LI Du, YANG Ce, CHEN Shan. Numerical simulation on inlet distortion of centrifugal compressor with 90 degree bent pipe[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(11): 2556-2563. (in Chinese))

[5] 桂绍波,曹树良.基于SMAC方法的90°弯管内部流场数值模拟[J].江苏大学学报:自然科学版,2008,29(6):507-511. (GUI Shaobo, CAO Shuliang. Numerical simulation of interior flow field in 90° curved duct based on SMAC method [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2008, 29(6): 507-511. (in Chinese))

[6] 樊洪明,何钟怡,王小华.弯曲管道内流动的大涡模拟[J].水动力学研究与进展:A辑,2001,16(1):79-83. (FAN Hongming, HE Zhongyi, WANG Xiaohua. Large eddy simulation of a curved duct flow[J]. Chinese Journal of Hydraulics, 2001, 16(1): 79-83. (in Chinese))

[7] KLIAFAS Y, HOLT T M. LDV measurements of a turbulent air-solid two-phase flow in a 90 degree bend [J]. Experiments in Fluids, 1987, 5(2): 73-85.

[8] 徐俊,杜彩虹,王甜.180°矩形弯管流场的LDV测量[J].实验流体力学,2010,24(1):36-41. (XU Jun, DU Caihong, WANG Tian. Experimental measurement of flow

[9] 杜彩虹,宋健斐,魏耀东,等. 180°矩形弯管流场的实验测量和数值模拟[J]. 化工学报, 2007, 58(12): 3033-3035. (DU Caihong, SONG Jianfei, WEI Yaodong, et al. Experimental measurement and numerical simulation of flow field in a 180° curved duct with rectangular cross-section [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering 2007, 58(12): 3033-3035. (in Chinese))

[10] 赵懿,贺益英. 直角 Z 形组合双弯管流动特性的研究[J]. 水利学报, 2006, 37(7): 778-783. (ZHAO Yi, HE Yiyang. Hydraulic characteristics of Z-type pipe combination with two similar rectangular bend [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(7): 778-783. (in Chinese))

[11] 谢龙,靳思宇,于建国. 阀体后 90°圆形弯管内部流场 PIV 分析[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(9): 1395-1399. (XIE Long, JIN Siyu, YU Jianguo. PIV analysis of inner flow field in 90° bending duct of circular-section with fore-end valve [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(9): 1395-1399. (in Chinese))

• 56 • 水利水电科技进步, 2013, 33(5) Tel: 025-83786335 E-mail: jz@hhu.edu.cn http://kbb.hhu.edu.cn