

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.010

小位差比率射流元件内部流场 PIV 试验*

王超 李红 吴燕兰 邹晨海 徐德怀

(江苏大学流体工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 采用 PIV 测试技术对小位差比率射流元件内部附壁射流流动进行了测量,得到了射流元件附壁流动速度场分布以及附壁点位置的准确数据,从而为数值模拟研究提供参照和判断。分别研究了流量、位差比率、补气孔距离、盖板尺寸对射流元件附壁流场的影响,并与数值模拟结果进行了对比。结果表明:一定范围内,流量和工作压力对附壁点位置基本无影响;小位差比率下附壁点距离比随位差比率增大而增大,得到了小位差比率下附壁点距离比与位差比率之间的关系式;附壁点距离随补气孔开孔位置变化先减小后增大;位差比率和盖板尺寸对射流元件附壁效果影响较大。

关键词: 射流元件 小位差比率 附壁流场 PIV 试验

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)09-0051-05

PIV Investigate of Inner Flow of Fluidic Component with Small Offset Ratio

Wang Chao Li Hong Wu Yanlan Zou Chenhai Xu Dehuai

(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The inner flow of fluidic component with small offset ratio was measured by using particle image velocimetry (PIV). The velocity distribution of fluidic component and position of attachment point were obtained to provide reference for the numerical simulation in the future. The effects of flow rate, offset ratio, distance of air entrance hole, and cover size on the inner flow of fluidic component were analyzed and compared with numerical results. The results showed that in a certain range, the flow rate and working pressure had no effect on the distance of attachment point. The attachment point ratio increased with the increasing offset ratio. The relation equation of attachment point ratio and offset ratio was found. The distance of attachment point became shorter firstly then longer with the increasing distance of air entrance hole. The offset ratio and cover size were sensitive to offset jet flow.

Key words: Fluidic component Small offset ratio Offset flow field PIV investigation

引言

粒子图像测速(Particle image velocimetry, PIV)具有单点测量技术的精度和分辨率,又能获得平面流动显示的整体结构和瞬态图像,在各种复杂流场的研究中得到了广泛的应用^[1]。

对于附壁射流流场的研究多针对位差比率大于2的单相流流场,并得出了附壁点位置与位差比率、位差比率与壁面静压分布等的经验公

式^[2-6]。由于全射流喷头射流元件工作的特殊性——位差比率小于1,流动介质为气液两相流,此前的研究结论并不适用^[7]。目前位差比率小于1的附壁式射流元件内部流动规律的相关研究主要采取数值模拟。袁寿其等采用商业软件对全射流喷头内部流场进行了模拟,获得了附壁状态以及直射状态下的速度矢量图和压力分布图,但文献中缺少对流场的详细分析,缺少元件结构尺寸变化对流场的影响等深入分析^[8]。李红对全射流

收稿日期:2012-08-21 修回日期:2012-09-26

*国家自然科学基金资助项目(51049011)、国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA100506)和国家农业科技成果转化基金资助项目(2011GB2C100015)

作者简介: 王超,博士生,主要从事新型节水灌溉技术、射流元件内部流动理论研究,E-mail: wangc1985@126.com

通讯作者: 李红,研究员,博士生导师,主要从事新型节水灌溉技术研究,E-mail: hli@ujs.edu.cn

喷头射流元件内静态稳定附壁流动进行了模拟,得到了壁面压力分布及附壁点长度以及气液相界面形状,并通过测量附壁射流元件壁面压力分布,对数值模拟结果进行了验证^[9-11]。数值计算以及理论计算的结果仅以壁面压力验证,不够全面,最终需要内部流动试验数据验证。为研究全射流喷头射流元件内部流动情况,对内部流动进行精细研究,应用先进的研究手段成为必然。本文采用 PIV 设备对位差比率小于 1 的附壁式射流元件内部流动进行测试。

1 试验装置

1.1 试验台与 PIV 系统

射流元件内部流动测试试验台主要包括离心泵、超声波流量计、闭式循环回路、压力表,如图 1 所示。考虑到回路中水泵可能造成管路振动从而引起样机的抖动,对管路进行了特别加固。

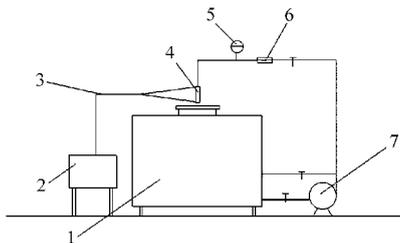


图 1 PIV 试验台示意图

Fig. 1 PIV test rig

1. 水箱 2. 激光器 3. 光臂 4. 观测样机 5. 压力表 6. 流量计 7. 水泵

试验所用设备为 TSI 公司的商用 PIV 系统,主要包括 NAG200 - NWL 型脉冲激光器、610035 型同步器、630059POWERVIEW4MP 型跨帧 CCD 相机、图像采集及数据分析系统(采用 Insight 3G 软件)、内置 Tecplot 软件、610015 型光臂以及光源透镜组等。

1.2 试验样机

试验以小位差比率射流元件内部附壁射流为研究对象。设计模型时,以现有全射流喷头结构尺寸为基础,考虑位差比率、补气孔距离、盖板间隙等因素。在模型设计中,将样机长度适当延长,便于观察。样机使用有机玻璃制作。为保证样机的密封性,样机主要部件全部采用开模工艺加工而成。试验样机结构及主要尺寸如图 2 所示。元件喷嘴出口宽度 $b = 10 \text{ mm}$,补气孔直径 $\phi = 3 \text{ mm}$,作用区长度 $L = 60 \text{ mm}$,作用区和盖板宽度 $S = 10 \text{ mm}$,改变位差 D (位差比率为 D/b)、补气孔距离 h 和出口盖板宽度 b_1 、 b_2 ,设计出不同结构的射流元件透明观测样机。具体编号及参数见表 1、2。

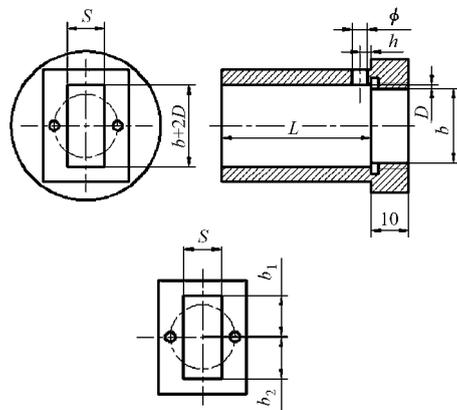


图 2 射流元件样机结构图

Fig. 2 Fluid component drawings

表 1 试验样机编号及尺寸参数

Tab. 1 Parameters of experimental prototype

编号	D/b	h/mm	编号	D/b	h/mm
D1	0.6	3	D6	0.3	3
D2	0.4	3	h1	0.3	4
D3	0.15	3	h2	0.3	5
D4	0.5	3	h3	0.3	7
D5	0.2	3			

表 2 出口盖板编号及尺寸

Tab. 2 Cover sizes and numbers mm

编号	b_1	b_2	编号	b_1	b_2
G1	7	7	G4	5	5
G2	8	8	G5	9	9
G3	6	6			

PIV 测量区域为射流元件作用区,为便于试验拍摄,在样机流道一面贴以黑色胶带,如图 3 所示。

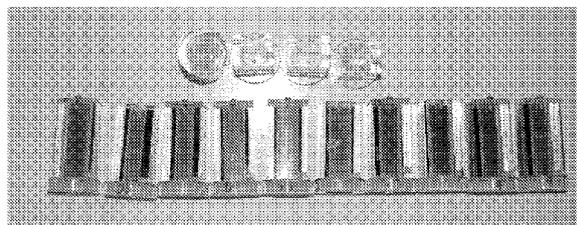


图 3 射流元件透明观测样机

Fig. 3 Transparent observation prototype of fluid component

2 试验方案

对不同位差比率、不同补气孔距离和不同盖板尺寸的透明观测样机在不同流量下的流场进行拍摄,研究不同参数对附壁射流流场重要参数——附壁点位置的影响。

(1) 流量

选择样机 D5、D6,配合盖板 G1,改变流量,研究流量对附壁点位置的影响。本次试验测量 5 个工况,为流量 2、3、3.5、4、4.5 m^3/h 。

(2) 位差比率

流量设置为 $3 \text{ m}^3/\text{h}$, 选择样机 D1 ~ D6, 均配合盖板 G1, 研究位差比率对附壁点位置的影响。

(3) 补气孔距离

选择样机 h1 ~ h3, 配合盖板 G1, 设置流量为 $3 \text{ m}^3/\text{h}$, 研究补气孔距离对附壁点位置的影响。

(4) 出口盖板尺寸

选择样机 D6, 配合盖板 G1 ~ G5, 设置流量为 $3 \text{ m}^3/\text{h}$, 研究出口盖板尺寸对附壁点位置的影响。

在 Insight 3G 中设置相关试验参数, 采用粒子图像序列采集方式, 在流场稳定附壁时, 对测量区域采集 50 组流场互相关照片。试验参数设置为: 脉冲间隔 $400 \mu\text{s}$, 脉冲延时 $50 \mu\text{s}$, 查问区域为 $24 \text{ 像素} \times 24 \text{ 像素}$ 。

3 试验结果与分析

图 4 为拍摄到的观测区流道照片。运用互相关技术, 对试验所得到的图像进行后处理, 并采用修正技术对粒子图像进行修正, 并将得到的速度矢量文件导入 Tecplot 软件中进行平均处理。

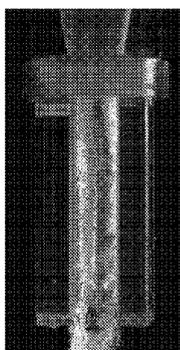


图 4 观测区流道照片
Fig. 4 Picture of offset flow

图 5 给出了样机 D6 配合盖板 G1 在 5 个工况下流道内的绝对速度分布和流线图。从图 5 中可以看出, 主流流速最大的区域位于流道中上游, 随着流量增大, 流道内的最大流动速度不断增大, 而主流在向下游发展时速度衰减加快, 主流向附壁侧弯曲也更明显。这是因为流量越大, 流道中的附壁作用越明显, 主流在附壁时产生的速度损失也越大。图 5 中同时绘出了流场流线图, 从流线图能够更直观地观察到主流的弯曲和附壁。通过绘制流线, 在流道上游右侧能发现回流区, 并有明显的漩涡区。

附壁点的判断: 附壁点是靠近壁面处速度为零的点, 该点附近上游和下游流体流动方向相反。准确判断附壁点位置, 是试验的难点之一。实际操作时, 附壁点位置随紊流流场的扰动, 位置不固定, 有小的偏移存在, 图 6 为流场局部放大图, 从放大图中可以清楚地看到流线在某一点发生方向变化, 依照附壁点定义, 此处即附壁点所在区域。

为了获得更加精确的数据, 通过后处理软件 Tecplot 的数据处理功能, 抓取流道附壁侧距壁面 0.02 mm 处直线上的速度, 其速度分布如图 7 所示,

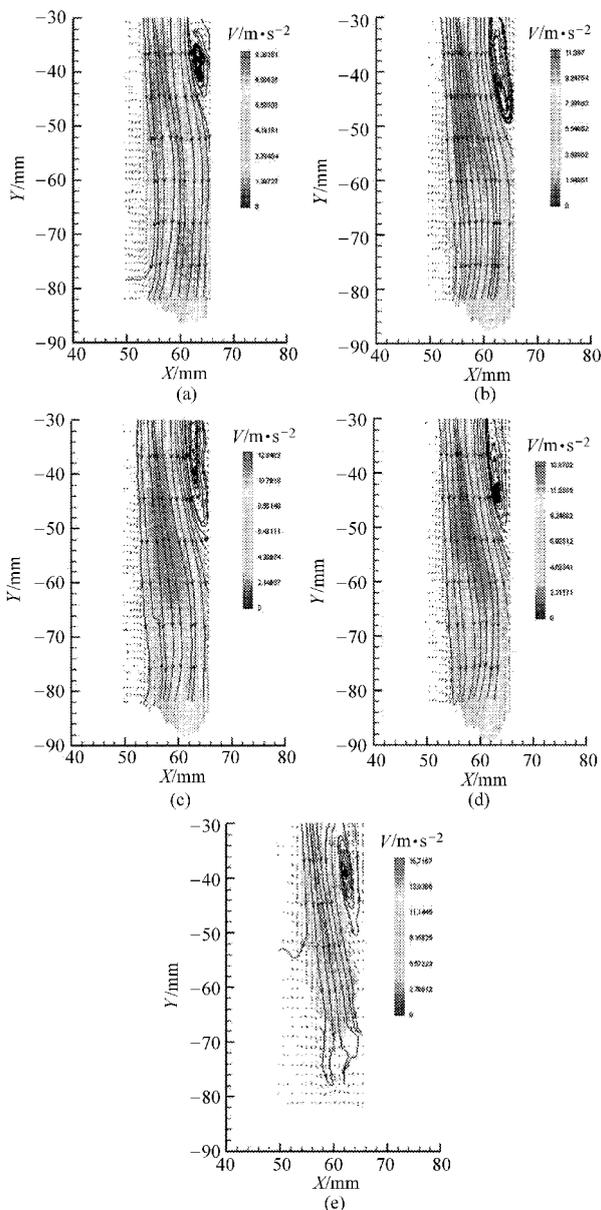


图 5 D6G1 不同流量下绝对速度及流线图
Fig. 5 Velocity vector and streamline of D6G1 with different flow rates

(a) $q = 2 \text{ m}^3/\text{h}$ (b) $q = 3 \text{ m}^3/\text{h}$ (c) $q = 3.5 \text{ m}^3/\text{h}$
(d) $q = 4 \text{ m}^3/\text{h}$ (e) $q = 4.5 \text{ m}^3/\text{h}$

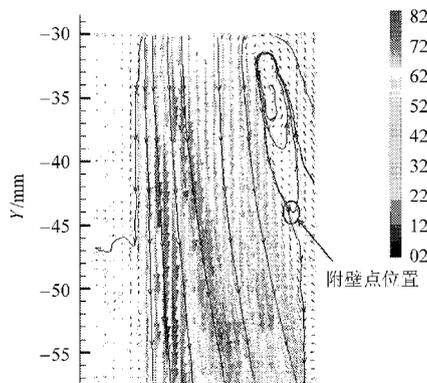


图 6 附壁点局部放大图
Fig. 6 Attachment point

本文以该直线上的速度分布曲线与速度为0点直线相交的交点为附壁点的准确位置,记为 x_r 。

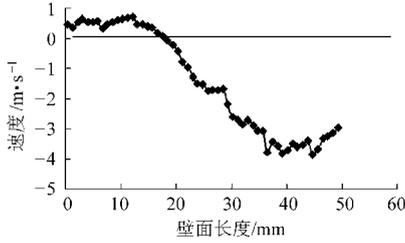


图7 附壁侧速度分布

Fig. 7 Velocity distributions on attachment point

按照以上的方法对试验结果进行处理,得到各因素对附壁点位置的影响。将试验结果与文献[12]中数值模拟结果进行对比,如图8~11所示。

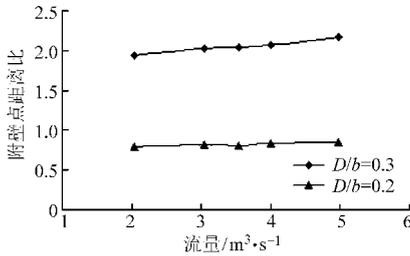


图8 流量对附壁点位置的影响

Fig. 8 Effect of flow rate on position of attachment point

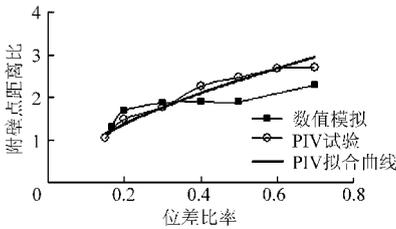


图9 位差比率对附壁点位置的影响

Fig. 9 Effect of offset ratio on position of attachment point

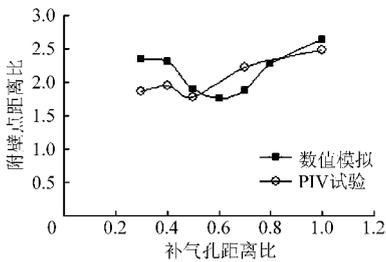


图10 补气孔距离比对附壁点位置的影响

Fig. 10 Effect of air entrance hole distance on position of attachment point

(1) 流量

如图8所示,在一定流量范围内,附壁点距离比 x_r/b 随着流量的增大变化非常小。文献[12]中给出的为附壁点距离与射流元件工作压力之间的变化关系,认为在可工作范围内,工作压力对射流元件附壁点距离没有影响。

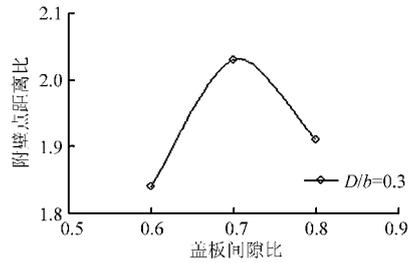


图11 盖板尺寸对附壁点位置的影响

Fig. 11 Effect of cover size on position of attachment point

(2) 位差比率

试验取不同位差比率的5支样机进行测量,编号D4样机($D/b=0.5$)在 $q=3\text{ m}^3/\text{s}$ 时无法实现附壁,增大流量时该样机的附壁性能仍不佳。

如图9所示,相同流量下,位差比率对附壁点距离影响较大。数值模拟与PIV试验结果均表明,小位差比率下,附壁点距离比 x_r/b 随位差比率 D/b 增大而增大。通过对PIV试验结果曲线进行拟合,得到附壁点距离比 x_r/b 与位差比率 D/b 之间的关系式为: $x_r/b=3.653(D/b)^{0.6078}$ 。

(3) 补气孔距离

附壁点距离比 x_r/b 随补气孔距离比 h/b 的增大先减小后增大,数值模拟与PIV试验结果变化趋势基本一致,如图10所示。

全射流喷头中由于射流元件尺寸较小,在尺寸不变的前提下,要使射流在元件作用区流道中充分附壁,就必须掌握附壁点的位置。为实现这一目的,不同位差比率的射流元件补气孔开孔的最佳位置应当有所不同。

(4) 盖板尺寸

通过试验发现,对于本文中所设计的射流元件,盖板尺寸直接影响到射流元件能否附壁以及附壁效果的好坏。盖板G4、G5与样机D6配合,在任何流量下均无法实现附壁。盖板G1与D6配合,所处理得到的附壁流场最为稳定。

通过将PIV试验数据与数值模拟结果进行对比发现,文献中的数值模拟结果与试验结果在变化趋势上基本一致,但在具体数值上的误差仍然偏大。究其原因,本研究针对的射流元件内部为气液两相流,文献[12]在数值模拟两相流模型中使用的是mixture模型,认为元件内部气液两相均匀混合,但通过试验观察发现,射流元件实际工作中,空气和水两相在初始状态时有明显的分界面,经过卷吸作用,主射流边界为气液两相混合,主射流中心仍为水流,所以实际流动状态并非单纯的两相均匀混合状态。如何选择合适的两相流模型,使数值模拟能够更接近实际流动状态,将是对本射流元件内部流动进行

更进一步深入研究所要解决的关键问题。

4 结论

(1) 通过试验手段首次得到了射流元件精确的附壁流场数据,得到了射流元件稳定附壁流场的速度分布,并找出了附壁点位置的判断方法。

(2) 得到了不同因素下附壁点位置的变化,并与数值模拟结果进行了对比。一定范围内,流量与工作压力对附壁点位置的影响很小;小位差比率下,

附壁点距离比随位差比率增大而增大,得到了小位差比率下附壁点距离比与位差比率之间的关系式;附壁点距离随补气孔开孔位置变化先减小后增大;位差比率和盖板尺寸对射流元件能否附壁以及附壁效果的好坏影响较大。

(3) 由于射流元件本身的特殊性以及试验条件限制,仅对有限样机进行了 PIV 试验,不足以指导射流元件的设计,但其所获得的数据足以验证数值模拟的正确性。

参 考 文 献

- 1 Adrian R. Twenty years of particle image velocimetry[J]. *Experiments in Fluids*, 2005,39(2):159~169.
- 2 Bourque C, Newman B G. Reattachment of a two-dimensional incompressible jet to an adjacent flat plate[M] // Brown F T. *Advances in fluidics*. New York: ASME, 1960: 201~232.
- 3 Pelfray R, Liburdy A. Mean flow characteristics of a turbulent offset jet[J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 1986, 108(1): 82~88.
- 4 Alain T, Danisl M. Stability analysis of the mechanism of jet attachment to walls[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45(14):2769~2775.
- 5 Nan Gao, Dan Ewing. Experimental investigation of planar offset attaching jets with small offset distances[J]. *Experiments in Fluids*, 2007, 42(6):941~954.
- 6 Yoon S H. Effect of surface roughness on a turbulent wall-attaching offset jet[J]. *Experiments in Fluids*, 1995, 19(1): 38~42.
- 7 朱兴业,袁寿其,李红,等. 全射流喷头产业化开发中的问题及其改进[J]. *排灌机械*,2006,24(6):24~27.
Zhu Xingye, Yuan Shouqi, Li Hong, et al. Problems and improvements in batching process of complete fluidic sprinkler[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2006, 24(6):24~27. (in Chinese)
- 8 袁寿其,朱兴业,李红,等. 全射流喷头内部流场计算流体力学数值模拟[J]. *农业机械学报*,2005,36(10):46~49.
Yuan Shouqi, Zhu Xingye, Li Hong, et al. Numerical simulation of inner flow for complete fluidic sprinkler using computational fluid dynamics[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005,36(10):46~49. (in Chinese)
- 9 李红. 隙控式全射流喷头理论及试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2007.
- 10 Li Hong, Yuan Shouqi, Xiang Qingjiang, et al. Theoretical and experimental study on water offset flow in fluidic component of fluidic sprinklers[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2011,137(4): 234~243.
- 11 Wang Chao, Li Hong, Chen Chao, et al. The study of the dynamic switching of fluidic component on the fluidic sprinkler[C]. *Proceedings of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference*. Hamamatsu, 2011.
- 12 王超. 全射流喷头射流元件水力特性研究[D]. 镇江:江苏大学,2010.
- 13 欧鸣雄,施卫东,田飞,等. 立式循环泵进水流道的内部流场研究[J]. *农业机械学报*,2013,44(3):55~58,63.
Ou Mingxiong, Shi Weidong, Tian Fei, et al. Flow field analysis of inlet sump in vertical circulation pump[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013,44(3):55~58,63. (in Chinese)