

迷宫流道灌水器抗堵塞设计与 PIV 试验*

喻黎明^{1,2} 梅其勇^{1,2}

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 长沙 410004; 2. 长沙理工大学水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 长沙 410004)

摘要: 为提高迷宫流道灌水器的抗堵塞性能,通过数值模拟的方法对梯形流道内含沙量分布以及水沙流速进行了分析,并采用 PIV 测试优化前后流道内颗粒运动轨迹和速度来进行验证。结果表明:梯形迷宫流道灌水器流道内高含沙量区域主要在迎水面且流速较低的位置,在优化流道时可适当增加迎水面的修改,结合流道整体和加工需求可适当、甚至不修改流道背面尺寸;以某一含沙量分布线作为流道边界,通过多次数值模拟获得较低含沙量的流道后,进行标准化再选取流道较宽的流道。该方法基本消除了沙粒大量集中的现象,获得抗堵塞性能较好的流道模型。经水沙速度分析和 PIV 测试验证了该方法不仅保持了灌水器优化前的水力性能,而且抗堵塞能力得到了提高。

关键词: 灌水器 梯形迷宫流道 抗堵塞 结构设计 PIV

中图分类号: S275.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)09-0155-06

引言

灌水器是滴灌系统的核心部件之一。其主要作用是通过细长复杂多变的流道将有压水转化为均匀、稳定的水滴对作物进行灌溉。灌水器迷宫流道因为较优的水力性能和消能效果而被经常使用。迷宫流道的尺寸微小,流道宽一般是 0.5~1.2 mm,尽管采用过滤系统,但仍有悬浮固体颗粒进入流道造成灌水器的堵塞^[1-3]。正由于微小的尺寸和复杂的结构导致常规方法难以探测固体颗粒在其内部的运动规律,因此许多学者通过常规试验测试和数值模拟的方法对迷宫流道的抗堵塞性能进行研究^[4-10]。同时,还有很多研究者借助 PIV 等设备观测迷宫流道的抗堵塞性能^[11-14]。上述学者借助各种专业设备和软件研究了造成灌水器堵塞的机理,也提出一些有效的抗堵塞优化设计方法,但从改变迷宫流道结构形式,降低流道内固体颗粒的运行时间,提高固体颗粒的通过率方面考虑较少。因此,本文研究采用修改流道结构的方法来提高灌水器的抗堵塞能力,并通过 PIV 测试颗粒运动规律来验证,为灌水器流道抗堵塞优化设计提供参考。

1 材料与方法

1.1 几何模型及网格划分

选用灌水器流道形式如图 1 所示,基于模型加工的原因选取的流道深度 D 为 1.41 mm,流道单元

数 N 为 8,流道上底宽 L 为 0.20 mm,转角 α 为 70° ,流道宽 W 为 0.80 mm,偏差量 J 为 0.10 mm,齿高 H 为 0.90 mm。略微加长进出口平直流道以便于流体的充分发展。建立物理模型的基础上进行网格划分,采用混合多面体网格划分法,进行局部加密,网格单元长度是 0.1 mm 左右,共计约为 2×10^5 个单元。

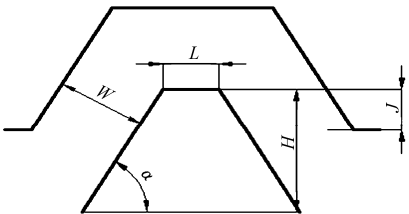


图 1 灌水器流道结构形式

Fig.1 Forms of channel of emitter

1.2 数学模型

本文采用计算流体动力学 (Computational fluid dynamics, CFD) 数值模拟方法。由于不可压缩流体,常温下是定常流动,考虑重力作用,应用连续性方程和 Navier - Stokes 方程等^[15],灌水器流量为 1.0~5.0 L/h,流体的运动平均速度 $\bar{v}$ 为 0.4~1.5 m/s,流道水力半径 R 为 1.128×10^{-3} m,运动粘滞系数 ν 为 10^{-6} m²/s,雷诺数 Re 为 478~1 284。本文灌水器流道水力计算都采用标准 $k-\epsilon$ 紊流模型,计算公式参照文献^[15]。参照 ISO 标准灌水器短期抗堵塞的试验方案中规定的颗粒浓度标准,对

于固体颗粒在流道中的运动属于稀相流,可采用 Eulerian - Lagrangian 两相流模型中的随机轨道模型来进行模拟,当计算两相流时,颗粒直径为 $100\text{ }\mu\text{m}$,密度为 $2\,500\text{ kg/m}^3$,入口体积分数为 0.01 。

1.3 边界条件及数值计算方法

出水口是自由出流,采用 Fluent 软件默认的标准壁面函数法对流道壁面处理。数值计算采用有限体积方法及离散控制方程,对流项等各参数的离散均采用二阶迎风格式,速度与压力的耦合采用 SIMPLE 算法求解,收敛精度是 10^{-4} 。

1.4 透明流道制作

试验用的透明迷宫流道测试件是采用博业激光应用技术有限公司生产的 HSLC1206 型高速激光切割机切割而成,整个测试件由 3 部分组成,前后 2 块采用 0.8 mm 有机玻璃平行板,透光性好,中间为 1.41 mm 的迷宫流道轮廓结构有机玻璃板,且通过 10 个 M4 的螺栓固定,其他流道尺寸与 1.1 节中几何模型尺寸完全相同。进行 PIV 试验时,采用 4 m 及以下压力水头防止泄漏。

1.5 PIV 测试台及固体颗粒

为准确测量迷宫流道内固体颗粒的运动情况,针对使用 PIV 测量流场时采用脉冲激光器作为光源、使用 CCD 抓取图像时存在的不足^[16-20],本试验 PIV 流场测试由连续光源、高速摄像机和 VS - M0910 型放大镜等组成,如图 2 所示。高速摄像机每 1 s 最多能拍下 $200\,000$ 帧画面,同时此设备附带软件 Movias Pro Viewer 1.63,可根据单位时间内粒子运动距离计算出其运动速度。同时,该软件能将连续拍摄的画面分解成一幅幅图片,将该图片作为底图在 AUTOCAD2004 中描绘出所拍摄的流道,利用 AUTOCAD2004 中测量工具测量出图片中流道的各个参数,再与物理模型本身的尺寸进行对照,从而确定放大镜的放大倍数。本试验采用密度接近沙石的镁粉(密度为 $1\,740\text{ kg/m}^3$),镁粉在水中运动时有较明显的金属光泽,可防止透明有机玻璃上划痕造成的误差。为使粒子随水流运动,同时 PIV 能看到,采用 150 目与 180 目的筛网挑选出粒径 $90\sim100\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒,某时间段内连续采集 10 个粒子分析其综合的运动规律。

2 结果与分析

2.1 流道结构优化

图 3 是优化前梯形流道深 $1/2$ 位置上的含沙量(泥沙体积分数)分布图,含沙量较高的位置都分布在流道的迎水面上,能体现出来的较大含沙量为 0.57 ,流道内的较小含沙量为 0.04 ,如果按照较小

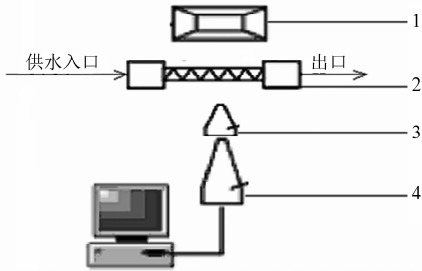


图 2 流场 PIV 测试台结构简图

Fig. 2 PIV experiment platform

1. 连续光源 2. 迷宫流道 3. 放大镜 4. 高速摄像机

含沙量等值线来修正流道,则出现超出范围的现象,如右侧 0.04 含沙量等值线就已经达到了梯形流道的上底宽的位置,使得流道结构标准化无法进行,而且得到的流道宽度非常狭小,不利于找到合适的流道宽度,而取 0.09 含沙量的等值线则相对较好,如按照这个含沙量等值线修改流道,能获得较宽的流道宽,同时能达到较好的效果。

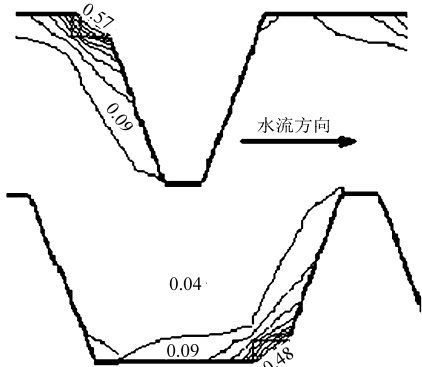


图 3 流道含沙量分布图

Fig. 3 Sand content of channel

按照含沙量为 0.09 等值线修改流道,并进行数值模拟,得修改 1,如图 4a 所示。修改后较大含沙量为 0.09 ,较小含沙量为 0.02 ,再按照 0.02 等值线修改流道得修改 2,如图 4b 所示。经过 2 次优化后,较大含沙量为 0.05 ,对比原型 0.57 的含沙量,优化后的结果明显,但修改后的尺寸不规律,就此开模加工比较困难,不利于规模化生产。

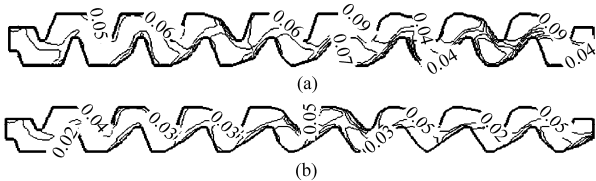


图 4 修改 1 和修改 2 含沙量分布图

Fig. 4 Schematic map of sand content in channel of modification 1 and 2

(a) 修改 1 (b) 修改 2

2.2 流道结构标准化

对第 2 次修改的流道进行规整,形成一个比较

标准的流道形状以利于机械加工,同时还需要保持较低的含沙量,其规整尺寸见图 5 所示,调整后的流道尺寸发生变化,调整后水平宽度 0.57 mm,垂直高度 0.36 mm,流道宽为 0.74 mm,比原来的流道 0.80 mm 要小。对此标准流道进行两相流模拟,得到流道的较大含沙量为 0.09,要高于修改 2 的较大含沙量 0.05。这是由于上述修改的尺寸用数学平均值,是按统一的尺寸修改,与修改 1 和修改 2 有较大的变化,尺寸变化后其含沙量上升,因此需要对其修改的尺寸重新修订。

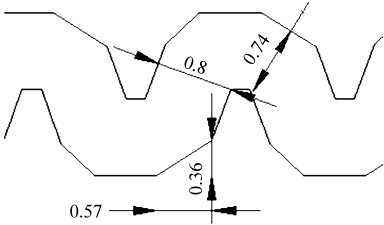


图 5 定型流道尺寸
Fig. 5 Dimension of channel

表 1 各流道流量、流量系数和流态指数

模型	压力/m							
	1	2	3	4	5	6	8	10
优化前流量/(L·h ⁻¹)	1.06	1.48	1.79	2.06	2.29	2.50	2.88	3.22
优化后流量/(L·h ⁻¹)	1.10	1.56	1.88	2.17	2.41	2.64	3.03	3.38
PIV 测试件流量/(L·h ⁻¹)	1.06	1.57	1.85	2.10				

2.3 优化前后水沙速度分布

图 6 所示是分别提取优化前后流道第 4、第 5 单元水沙流速分布图,优化后的水流比优化前的水流速度有所提高,优化前较高的水流速度为 3.51 m/s,优化后较高水流速度为 3.70 m/s,较低速度也从优化前的 0.23 m/s 提高到 0.25 m/s,对应

从图 3、4 可知,含沙量较高的部分主要在迎水面,因此增加迎水面的修改,而不修改背水面的尺寸,因此需要对 0.57 mm 水平宽度,0.36 mm 垂直高度进行调整,分别调整的倍数为 0.6、0.8、1.2、1.4,对应的名称为定型 1、定型 2、定型 3、定型 4。经计算,流道内的较高含沙量分别是 0.08、0.06、0.06、0.06,比较小,而且流量系数和流态指数接近。

流道不堵塞条件是颗粒直径为流道最窄尺寸的 1/10 ~ 1/7^[6]。流道最窄位置尺寸越小,要求的过滤器标准越高,从流道本身来看,流道越窄大颗粒容易造成堵塞,因此可选择流道宽为 0.83 mm 的定型 1 作为最终修改后流道,即最终优化流道。优化前后流道及 PIV 测试件水力性能如表 1。根据表 1 所示,CFD 优化前、优化后及 PIV 实测的流量数据基本接近,流量系数分别为 1.06、1.11、1.08,流态指数分别为 0.48、0.49、0.49,从而验证了数值模拟的准确性。

4 m 水头的工作压力下,滴头的流量从 2.06 L/h 增加到 2.17 L/h,水流流速的增加有利于提高沙粒的运动速度,优化前沙粒运动较高速度为 2.38 m/s,优化后运动较高速度为 2.50 m/s,较低速度也从 0.16 m/s 提高到 0.17 m/s,沙粒运动速度提高有利于沙粒通过迷宫流道,减少在流道内停留时间,从而

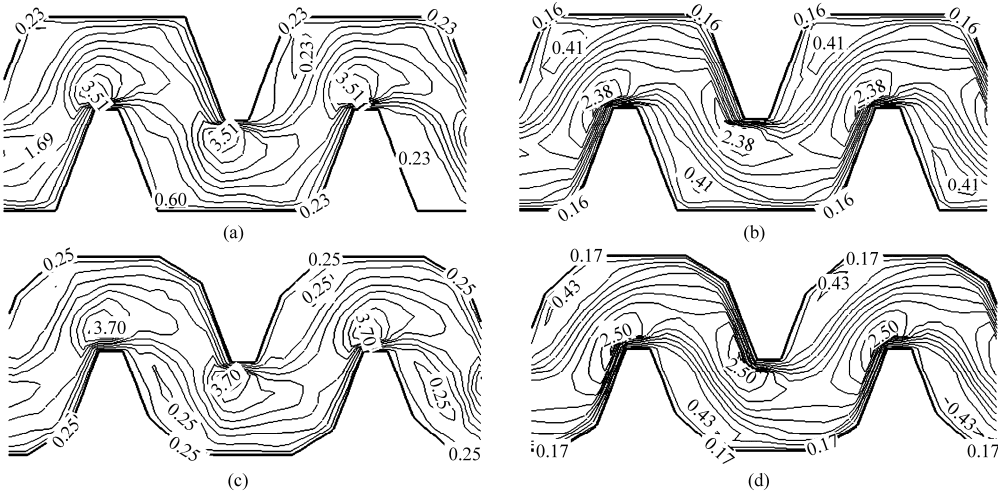


图 6 流道优化前后水沙速度分布图(单位:m/s)

Fig. 6 Distribution of water and sand velocity in the fourth and fifth unit before and after optimization (units: m/s)
(a) 优化前水流速度 (b) 优化前沙粒速度 (c) 优化后水流速度 (d) 优化后沙粒速度

减少了被堵塞的机率。

2.4 优化前后 PIV 试验验证

由于单个粒子运动不具备明确的规律性,本试

验对修改流道前、后的样品连续采集了 10 个粒子的运动轨迹、速度等数据,将此 10 个粒子的运动数据制作成表 2、表 3。

表 2 流道修改前连续 10 个镁粒子运动特性

Tab.2 Motion characteristics of the 10 consecutive magnesium particles in channel changed before

参数	粒子序号										平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
第 4 单元进入旋涡次数	0	2	2	3	4	0	1	6	5	2	2.5
第 5 单元进入旋涡次数	1	1	1	4	3	0	2	3	4	1	2
平均速度/(m·s ⁻¹)	0.66	0.45	0.53	0.39	0.28	0.88	0.56	0.12	0.15	0.55	0.46
最低速度/(m·s ⁻¹)	0.15	0.03	0.24	0.13	0.12	0.36	0.24	0.02	0.08	0.20	0.16
第 4、第 5 单元运动路程/mm	9.42	11.05	11.55	15.44	15.58	9.05	10.36	18.74	16.65	12.47	13.03

表 3 流道修改后连续 10 个镁粒子运动特性

Tab.3 Motion characteristics of the 10 consecutive magnesium particles in channel changed after

参数	粒子序号										平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
第 4 单元进入旋涡次数	2	0	2	1	0	2	2	3	2	0	1.4
第 5 单元进入旋涡次数	3	0	2	2	3	0	2	2	1	1	1.6
平均速度/(m·s ⁻¹)	0.89	1.21	0.66	1.21	1.31	1.12	0.99	0.95	1.02	1.25	1.06
最低速度/(m·s ⁻¹)	0.34	0.51	0.38	0.57	0.48	0.47	0.39	0.26	0.42	0.57	0.44
第 4、第 5 单元运动路程/mm	7.82	4.54	5.91	6.42	5.57	5.89	4.75	8.86	5.23	3.84	5.88

对比表 2、表 3 可知,流道修改后,颗粒进入流道第 4、第 5 单元作旋涡运动的平均次数由 4.5 次下降到 3 次,流道修改后,颗粒运行的平均速度增加明显,修改前为 0.46 m/s,修改后为 1.06 m/s。尤其是最低速度,修改前为 0.16 m/s,而修改后为 0.44 m/s,最低速度提高近 3 倍,在流道第 4、第 5 单元的平均运行路程也从 13.03 mm 下降到 5.88 mm。该 5 项数据表明,流道修改后有效降低了颗粒在流道中的运行长度,减少了停留时间,减少了流道空间

内颗粒的密度,从而降低了被堵塞的机率。取其中第 2 个粒子在第 4、第 5 个流道单元的运动轨迹线和速度制作成图 7。如图 7a、7b 所示,镁粒在修改前流道内运动进入了 3 次涡旋区,并作了旋转运动,其运动轨迹比较混乱,而在修改后流道内并没有进入涡旋区,也没有旋转运动。从图 7c、7d 可知,镁粒在修改前的流道内运动速度比较低,其平均速度只有 0.45 m/s,最高速度为 0.94 m/s,最低速度为 0.03 m/s,接近于停止运动,而在修改后的

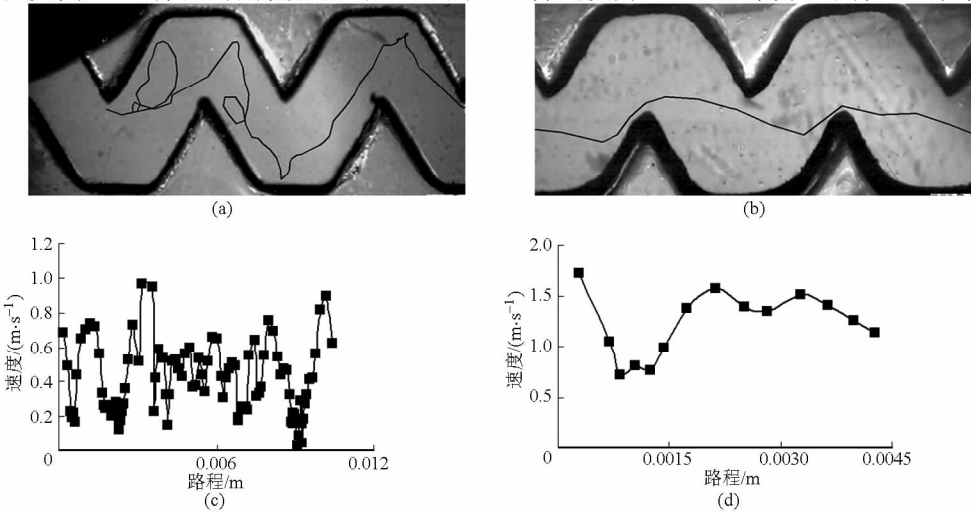


图 7 流道优化前后镁粒运动速度和轨迹线对比

Fig.7 Comparison the velocity and trajectories of Mg in before and after optimization

- (a) 优化流道前镁粒在第 4、第 5 单元的轨迹线
- (b) 优化流道后镁粒在第 4、第 5 单元的轨迹线
- (c) 优化流道前镁粒在第 4、第 5 单元的速度线
- (d) 优化流道后镁粒在第 4、第 5 单元的速度线

流道内, 镁粒平均流速 1.21 m/s , 最高速度为 1.73 m/s , 最低流速也达到 0.71 m/s 。就其运动路程来看, 修改前的路程是 11.0 mm , 而修改后路程只有 4.5 mm , 颗粒在相同流道单元内运动的路程变短, 总体速度变高, 颗粒更加容易通过流道。

3 结论

(1) 迷宫流道灌水器流道内的含沙量分布不均, 高含沙量区域主要在迎水面流速较低的位置, 在

流道优化时可适当增加迎水面的修改, 结合流道整体和加工需求可适当甚至不修改流道背水面尺寸。

(2) 流道以某一含沙量分布线作为流道边界, 通过多次的数值模拟获得较低含沙量的流道后再进行标准化优化设计, 能获得较好的流道模型, 优化后的灌水器不仅保持了优化前灌水器的水力性能, 而且基本消除了沙粒大量集中的现象。流道优化前后水沙分布和 PIV 镁粒跟踪进一步验证了优化后的流道具有更优的流场。

参 考 文 献

- Wei Q S, Shi Y S, Dong W H. Advanced methods to develop drip emitters with new channel types [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2006, 22(2): 243–249.
- Taylor H D, Bastos R K X, Person H W, et al. Drip irrigation with waste stabilization pond effluents: solving the problem of emitter fouling [J]. Water Science Technology, 1995, 31(12): 417–424.
- 王文娥, 王福军, 严海军. 迷宫滴头 CFD 分析方法研究 [J]. 农业机械学报, 2006, 37(10): 70–73.
- Wang W E, Wang F J, Yan H J. Study on CFD method for flow simulation in labyrinth in the emitter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(10): 70–73. (in Chinese)
- Nakayama F S, Gilbert R G, Bucks D A. Water treatments in trickle irrigation systems [J]. ASCE Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1978, 104(1): 23–34.
- Taylor H D, Bastos R K X, Person H W, et al. Drip irrigation with waste stabilization pond effluents: solving the problem of emitter fouling [J]. Water Science Technology, 1995, 31(12): 417–424.
- 魏正英, 唐一平, 赵万华, 等. 滴灌灌水器迷宫流道结构与水力性能实验研究 [J]. 农业机械学报, 2005, 36(12): 51–55.
- Wei Z Y, Tang Y P, Zhao W H, et al. Structure and hydraulic performance experimental research on labyrinth channels of drip irrigation emitters [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(12): 51–55. (in Chinese)
- Bucks D A, Nakayama F S, Gilbert R G, et al. Trickle water quality and preventive maintenance [J]. Agricultural Water Management, 1979, 2(2): 149–162.
- Ozekici B, Sneed R E. Analysis of pressure losses in tortuous-path emitters [M] // Paper America Society of Agriculture Engineering, 1991: 12–115.
- Adin A, Sacks M. Drip-logging factors in waster irrigation [J]. ASCE Journal of Irrigation and Drainage, 1991, 117(6): 813–826.
- 喻黎明, 吴普特, 牛文全. 迷宫流道偏差量对灌水器水力性能及抗堵塞性能的影响 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 64–68.
- Yu Liming, Wu Pute, Niu Wenquan. Influence of the offset of labyrinth channels of drip emitters on hydraulic and anti-clogging performance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 64–68. (in Chinese)
- Li Yunkai, Yang Peiling, Xu Tingwu, et al. CFD and digital particle tracking to assess flow characteristics in the labyrinth flow path of a drip irrigation emitter [J]. Irrigation Science, 2008, 26(5): 427–438.
- 魏正英, 唐一平, 温聚英, 等. 灌水器微细流道水沙两相流分析和微 PIV 及抗堵实验研究 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 1–9.
- Wei Zhengying, Tang Yiping, Wen Juying, et al. Two-phase flow analysis and experimental investigation of micro-PIV and anti-clogging for micro-channels of emitter [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 1–9. (in Chinese)
- 金文, 张鸿雁. 灌水器内流道流场 Micro-PIV 试验分析 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 12–17.
- Jin Wen, Zhang Hongyan. Micro-PIV analysis of flow fields in flow channel of emitter [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 12–17. (in Chinese)
- 喻黎明, 吴普特, 牛文全. 迷宫流道内固体颗粒运动的 CFD 模拟及 PIV 验证 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 45–51.
- Yu Liming, Wu Pute, Niu Wenquan. CFD Numerical simulation and PIV verification about the movement of solid particles in labyrinth channel [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 45–51. (in Chinese)
- 王福军. 计算流体动力学分析—CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- 阮驰, 孙传东, 白永林, 等. 水流场 PIV 测试系统示踪粒子特性研究 [J]. 实验流体力学, 2006, 20(2): 72–77.
- Ruan Chi, Sun Chuandong, Bai Yonglin, et al. The characteristics of the tracer particles used in water flow field for PIV system [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2006, 20(2): 72–77. (in Chinese)
- 赵宇. PIV 测试中示踪粒子性能的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2004.
- 胡华, 刘书亮, 王天友, 等. 关于测量内燃机缸内流场用示踪粒子的研究 [J]. 小型内燃机与摩托车, 2002, 31(1): 5–8.
- Hu Hua, Liu Shuliang, Wang Tianyou, et al. An investigation into tracer particles for air flow in cylinder of IC engines [J]. Small Internal Combustion Engine, 2002, 31(1): 5–8. (in Chinese)
- Koutsiaris A G, Mathioulakis D S, Tsangaris S. Microscope PIV for velocity-field measurement of particle suspensions flowing inside glass capillaries [C]. Measurement Science & Technology, 1999, 10(11): 1037–1046.
- Klank H, Goranovic Q, Kutter J P. PIV measurements in a microfluidic 3D-sheathing structure with three-dimensional flow

behaviour[J]. Journal Micromechanics & Microengineering, 2002, 12(2):862–869.

21 魏正英,苑伟静,周兴,等. 我国压力补偿灌水器的研究进展[J]. 农业机械学报,2014,45(1):94–101.

Wei Zhengying, Yuan Weijing, Zhou Xing, et al. Research progress of pressure compensating emitters in micro-irrigation systems in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,54(1):94–101. (in Chinese)

Anti-clogging Design and Experimental Investigation of PIV for Labyrinth-channel Emitters of Drip Irrigation Emitters

Yu Liming^{1,2} Mei Qiyong^{1,2}

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China
2. Key Laboratory of Water-sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: In order to improve the reference of designing of anti-clogging ability of labyrinth channel emitter, the sand content and water and sand velocity distribution in the trapezoidal labyrinth channels were analyzed by CFD, the movement trajectories and velocity of solid particles in modified channel before and after tested by PIV. The phenomenon of a large number of solid particles concentrated on the surface near the upstream face and low velocity position of trapezoidal-channel emitters. When flow path is being modified, it is appropriate to increase the modification of the upstream face. Combined with the whole flow path and processing requirements, the downstream face may need not modified. Regarded the some one sand content distribution line as the borderlines of trapezoidal-channel to design the channel several times, after structural standardization and selecting the wide flow path, the position with high sand content can be canceled, and the better channel model is got. The method tested by CFD and PIV can keep the previous hydraulic performance before modification, and significantly improve the anti-clogging performance.

Key words: Emitter Trapezoidal-channel Anti-clogging Configuration design PIV

(上接第 149 页)

Indoor Automatic Measurement System for Rainfall Infiltration Based on PLC

Lü Huafang Yang Hanbo Cong Zhentao Lei Huimin

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the measuring method of manual rainfall infiltration with the Mariotte bottle, an indoor automatic measurement system for rainfall infiltration with PLC (programmable logical controller) and touch panel was designed. This system could automatically water to the Mariotte bottle, adjust rainfall intensity, display and record experiment data in real time, and also provide the function of data query. The PLC collects the analog signal and transforms it into a digital signal, which is used to control the water input of the Mariotte bottle to regulate water level through switching the two electromagnetic valves. In addition, the PLC controls regulating valve opening to adjust the rainfall intensity. Furthermore, this system can be operated easily, rationally reflect the infiltration process, and give a high precision measurement.

Key words: Rainfall infiltration Automatic determination PLC