

# 基于粒子图像测速仪的微小流道内 固体颗粒运动规律的实验研究

喻黎明<sup>1</sup>, 夏筱龙<sup>1</sup>, 蒋昌波<sup>1</sup>, 陈绍文<sup>2</sup>, 黄良材<sup>2</sup>, 赵利平<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 广东金东海集团有限公司, 广东 汕头 515041)

**摘 要:** 为了解迷宫流道内固体颗粒的运动规律, 提高灌水器的抗堵塞能力, 采用粒子图像测速仪 (particle image velocimetry, PIV) 对不同直径和不同密度的固体颗粒在迷宫流道内的运动规律进行了实验观测。结果表明, 根据颗粒的运动轨迹线可知齿形流道内水流在各齿尖做类似于正弦波的运动, 靠近齿尖处形成主流区, 靠近齿底处形成漩涡区; 直径小 (65  $\mu\text{m}$ ) 或密度低 (1 740  $\text{kg}/\text{m}^3$ ) 的颗粒跟随性比较好, 颗粒直径或密度越大, 运动越紊乱, 出现的最小极值速度越低, 越容易进入漩涡区并最终可能导致堵塞; 与固体颗粒直径相比, 颗粒密度对运动轨迹、路程和速度的影响较小。

**关键词:** 迷宫流道; 轨迹线; 路程; 速度; 粒子图像测速仪 (PIV)

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2012)06-0168-04

中图分类号: S275.6

## Experimental Study on Solid Particle Movement in Micro-channel Using Particle Image Velocimetry

YU Li-ming<sup>1</sup>, XIA Xiao-long<sup>1</sup>, JIANG Chang-bo<sup>1</sup>, CHEN Shao-wen<sup>2</sup>, HUANG Liang-cai<sup>2</sup>, ZHAO Li-ping<sup>1</sup>

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. Guangdong Findonghai Holdings Co., Ltd., Shantou, Guangdong 515041, China)

**Abstract:** To understand the movement of solid particles in micro-channel and improve the anti-clogging ability of emitters, we observed the movement of solid particles of different diameters and the different densities in labyrinth channel using particle image velocimetry (PIV). The trajectories of solid particles showed that water in zigzagging channel flew in sine wave, and formed mainstreams near the tips of the spikes and turbulence at the bottoms. Particles of small diameter (65  $\mu\text{m}$ ) or low density (1 740  $\text{kg}/\text{m}^3$ ) exhibited apparent following behaviors. With the increase of the diameter or density, water flew more turbulently, particles moves slower and became more easily to be trapped and caused clogging. Comparing to the diameter, the density of the particles affected less their movement trajectories, path lengths and velocities.

**Keywords:** labyrinth channel; trajectory; path length; velocity; particle image velocimetry (PIV)

在灌水器各流道中, 迷宫流道由于其复杂多变的边界使水流成紊流状态, 且具有良好的消能能力而被公认为最好的流道形式, 但迷宫流道结构非常复杂, 而且尺寸微小 (一般在 0.5~1.2 mm 之间), 尽管使用滴灌系统时会采用各种过滤器, 但仍会有一些悬浮固体颗粒进入流道, 这些颗粒包含泥沙、黏土粒、各种有机物甚至微生物等<sup>[1-2]</sup>, 水流能否将这些颗粒带出流道决定了灌水器的抗堵塞性能, 而如何提高灌水器的抗堵塞能力一直是国内外业界学者和生产厂家所关注的问题。许多学者对这个问题提出了各种各样

的解决方法, 魏正英、魏青松等<sup>[3-4]</sup>通过增加流场的动效应、减少低流速区域等方式以有利于颗粒通过流道; 李云开等<sup>[5]</sup>提出减少低速区防止颗粒的沉淀; 张俊、王文娥等<sup>[6-7]</sup>采用 CFD 数值模拟方法将流道内单个固体颗粒的运动轨迹和多个颗粒的浓度分布情况可视化, 从理论上分析了颗粒分布和运动规律; 穆乃君等<sup>[8]</sup>通过制造产品, 采用“ISO 标准 ISO/TC23/SC18/WG5N4 短周期堵塞测试程序”测试不同颗粒直径在流道内的通过能力, 着眼于流道的最小尺寸并对过滤系统提出要求。多数学者通过理论分析推导

收稿日期: 2010-11-20

修回日期: 2011-11-29

资助项目: 2011 年湖南省教育厅项目“迷宫流道灌水器结构参数抗堵性能影响的研究”(11C0047); 广东金东海集团有限公司资助项目“海底淤泥吹填泥浆的快速排水技术研究”

作者简介: 喻黎明 (1976—), 男 (汉族), 湖南省长沙市人, 讲师, 主要从事节水灌溉理论与设备研究。E-mail: liming16900@yahoo.cn.

和推测颗粒运动的轨迹及速度,或者通过试验测试固体颗粒在迷宫流道中最终通过的结果,但固体颗粒到底是如何通过迷宫流道、在流道内的运动状态如何,仅使用理论分析不一定十分准确。

因此,本研究通过 PIV 观测不同直径和不同密度的固体颗粒在流道中的轨迹线、路程和速度,并分析其对流道抗堵性的影响,以提高灌水器流道抗堵塞性能的设计能力。

## 1 材料与方 法

### 1.1 搭建 PIV 流场测试台

为准确测量迷宫流道内固体颗粒的运动情况,针对国内外使用 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<sup>[9]</sup>,在搭建本试验 PIV 流场测试台(图 1)时使用连续光源、高速摄像机 HOTSHUT512 和 VS-M0910 放大镜等,此高速摄像机每秒最多能拍下 200 000 帧画面,能清晰地看到粒子在微小的迷宫流道内运动的规律,特别是对于金属颗粒,在光源的照射下会生成与周围环境颜色不同的金属光泽,使得流道中的颗粒运动轨迹更加清楚,有利于颗粒的追踪。同时,此设备附带的软件 Movias Pro Viewer 1.63 能描绘出颗粒的运动轨迹,而且能根据单位时间内粒子运动的距离计算出其运动速度。

### 1.2 观测使用固体颗粒材料

在一般堵塞试验中采用的固体颗粒是氧化铝<sup>[10]</sup>,但考虑到实际导致灌水器堵塞的是天然河砂,故在本次试验中还是采用河砂,其密度为 2 500 kg/m<sup>3</sup>,的同时还采用了镁粉(1 740 kg/m<sup>3</sup>)、铝粉(2 870 kg/m<sup>3</sup>)进行试验,为了能使粒子随水流运动,同时在 PIV 中也能看到,所以分别采用 100~120 目

筛网挑选出的粒径范围为 150~125 μm 的颗粒,采用 150~180 目的筛网挑选出的粒径范围为 100~90 μm 的颗粒,采用 220~270 目的筛网挑选出的粒径范围为 65~58 μm 的颗粒。

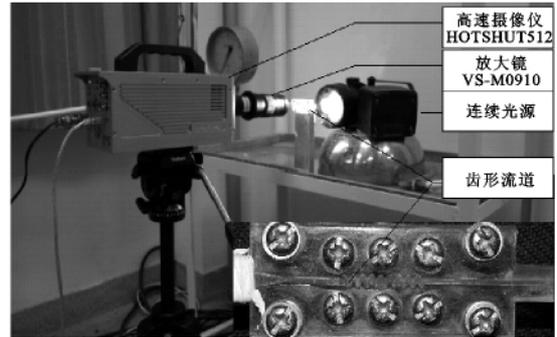


图 1 流场 PIV 测试台

### 1.3 迷宫流道试验件制造及其水力性能

所选用的灌水器流道形状及参数如图 2 所示,流道深度为 1.41 mm,并略微加长了进出口平直流道的长度以便于流体的充分发展。

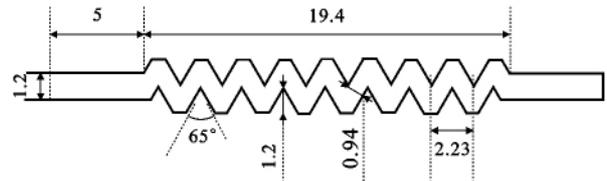


图 2 齿形流道结构及参数

迷宫流道试验件是根据图 2 的几何参数在有机玻璃上数控雕刻出的,并在其上覆盖透光性好的有机玻璃板将流道密封,使试验件和实际情况相似。表 1 为试验件在不同压力下测量的流量、流量系数和流态指数。

表 1 有机玻璃流道测试的水力性能

模 型	压力/m								流量系数	流态指数
	1	2	3	4	5	6	7	8		
PIV 观测模型	2.02	2.80	3.40	3.89	4.34	4.73	5.10	5.43	2.016 1	0.476 1
平均流速	0.42	0.59	0.71	0.82	0.91	0.99	1.07	1.14	—	—
雷诺数 $R_e$	478	662	804	920	1 026	1 118	1 206	1 284	—	—

## 2 结果与分析

### 2.1 流场及受力分析

迷宫流道内水流在各齿尖之间做类似正弦波的运动,靠近齿尖处形成主流区,速度比较高。

参照 ISO 标准灌水器短期抗堵塞实验方案中规

定的颗粒浓度标准,对于固体颗粒在流道的运动属于稀相流,可以采用欧拉—拉格朗日两相流模型中的随机轨道模型来进行模拟。

在计算颗粒运动方程时,颗粒主要受力是重力、曳力,还有附加的压强梯度力、Magnus 力、Saffman 力、附加质量力等,但这些与前者相比数量级较小故

不考虑。单个颗粒的运动方程直接由牛顿第二定律得出。

## 2.2 不同粒径砂粒的运动规律

采用 PIV 对不同粒径 (65, 100 和 150  $\mu\text{m}$ ) 的砂粒在迷宫流道内的运动轨迹线进行观测。当砂粒粒径为 65  $\mu\text{m}$  时, 砂粒基本上随主流区的水流运动; 当粒径为 100  $\mu\text{m}$  时, 砂粒运动相对齿尖上下的振幅变大, 其运动轨迹比 65  $\mu\text{m}$  的轨迹紊乱; 当粒径为 150  $\mu\text{m}$  时, 砂粒经过第 5 个流道单元时进入旋涡区。这说明随着颗粒直径的增加, 颗粒运动越紊乱, 这主要是砂粒在流场中受到的曳力与颗粒投影面积成正比, 而惯性力与颗粒体积成正比, 当颗粒直径小时, 曳力会远远超过惯性力, 因而跟随性较好。当颗粒直径大时, 起主要作用的是惯性力。因此, 直径较大的颗粒更容易在惯性力的作用下甩离主流区而进入旋涡区, 它们在旋涡低速区碰撞, 与其它物质粘接成更大的颗粒, 当灌溉系统停止运行时, 它们最终沉淀下来造成灌水器的堵塞。从表 2 可知, 当砂粒直径为 65  $\mu\text{m}$  时, 砂粒在流道内经过的路程短, 随粒径的增大路程变长, 当粒径从 65  $\mu\text{m}$  增大到 150  $\mu\text{m}$  时, 路程增加了 1.48 倍, 这说明随着颗粒直径的增大, 颗粒运动变得紊乱, 从而验证了轨迹线对比分析时颗粒直径变化引起轨迹线变化的规律。

表 2 不同直径砂粒的路程

砂粒/ $\mu\text{m}$	65	100	150
PIV 观测/ $\mu\text{m}$	33.31	34.35	49.38

注: 整个流道的 PIV 路径是以第 4, 5 流道单元的单位路径与单元数相乘, 再加上两端增加的平直流道长度; 流道长度为 29.4  $\mu\text{m}$ 。下同。

图 3 为 3 种不同直径的粒子在整个迷宫流道中运动的速度图 (第 4, 5 个单元)。砂粒在主流区和旋涡中运动, 因水流的速度变化较大而导致随流的砂粒速度也明显变化, 当砂粒撞击到壁面时, 速度可能变得很小, 当砂粒穿过高速区时, 砂粒又能获得较高的速度。当砂粒直径为 65  $\mu\text{m}$  时, 砂粒最小的速度约为 1.0  $\text{m/s}$ , 最高速度接近 2.5  $\text{m/s}$ , 因而此时颗粒在流道内具有较高的速度, 即使进入了旋涡区也更加容易逃离旋涡。当直径为 100  $\mu\text{m}$  时, 砂粒最小的速度接近 0.5  $\text{m/s}$ , 最高速度超过了 2.0  $\text{m/s}$ , 其速度变化具有一定的起伏规律。当直径为 150  $\mu\text{m}$  时, 砂粒最小的速度接近 0.2  $\text{m/s}$  左右, 最高速度接近甚至超过 2.5  $\text{m/s}$ , 其速度变化没有规律, 比较紊乱, 其较低速度的区域就是颗粒进入旋涡运动的部分, 因为有可能与壁面发生了碰撞或摩擦, 所以颗粒在经过旋涡时会出现速度极低的现象。

从极值速度来看, 粒子直径越大, 出现的极值越低, 在惯性力的作用下, 大直径的颗粒更加难逃离旋涡, 最终因沉淀而造成堵塞。

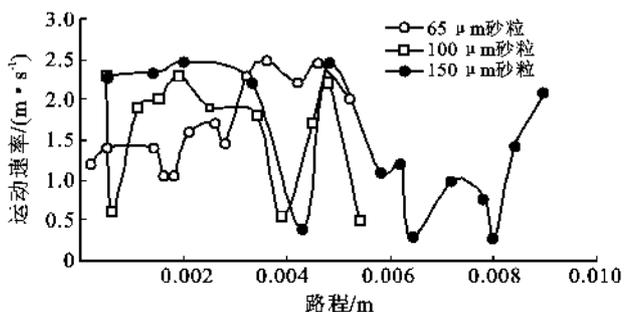


图 3 3 种粒径 (65, 100 和 150  $\mu\text{m}$ ) 砂粒的运动速率

## 2.3 相同粒径的镁、砂和铝的运动规律

图 4 为镁和铝在迷宫流道上的速度图 (第 4, 5 个单元)。镁粒运动的随流性比较好, 基本上是在水流运动的高速区经过, 而铝粒的运动比较紊乱。对比此 2 种颗粒, 密度的不同导致其运动规律不同, 密度越大, 运动越紊乱。这主要是因为颗粒的曳力和重力大致正比于颗粒直径的平方和立方而与颗粒的密度成一次方的关系。在此 2 种材料中, 铝的密度大且是镁的 1.65 倍, 其变化范围要小于变化 3 倍的直径, 所以密度的变化对颗粒在流场中的受力情况的影响不会很大。

从表 3 可知, 当颗粒密度小时, 颗粒在流道内经过的路程短, 随密度的增大路程变长, 铝通过的路程是镁的 1.39 倍, 这说明随颗粒密度的增加, 颗粒运动变得紊乱。

表 3 100  $\mu\text{m}$  的镁、砂和铝的路程

颗粒/ $\mu\text{m}$	镁	砂	铝
PIV 观测/ $\mu\text{m}$	33.58	34.345	46.54

由图 4 可知, 随着颗粒密度的增加, 其最小速度越小。镁粒子在流道中运动的最小速度接近 0.5  $\text{m/s}$ , 砂的最小速度也非常接近 0.5  $\text{m/s}$ , 铝的最小速度接近 0.2  $\text{m/s}$ , 在图 4 还可以观测到铝在第 4, 5 流道单元内两次进入旋涡可知, 密度越大越容易进入旋涡, 当颗粒进入旋涡时, 在惯性力作用下, 密度较大的颗粒更难从旋涡中逃离, 并最终导致灌水器的堵塞。比较图 4 中不同直径变化时粒子最小运动速度从 1.0  $\text{m/s}$  变化到 0.2  $\text{m/s}$  可知, 密度变化引起的颗粒运动速度变化的程度要明显小于直径变化的影响。

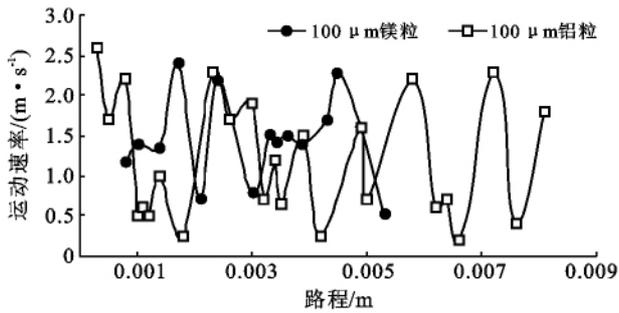


图 4 粒径为 100 μm 镁、铝的运动速率

### 3 结论

(1) 齿形流道内水流在各齿尖之间做类似正弦波的运动,靠近齿尖附近形成主流区,最高速度能达到 2.76 m/s,在齿尖的左上和右下各有两个旋涡区,形成低速区,其速度最低能达到 0.51 和 0.42 m/s。

(2) 直径小的颗粒跟随性比较好,随着密度的增大其运动越紊乱;颗粒粒径越大,出现的最小极值速度越低,越容易进入漩涡区并最终沉淀导致堵塞。

(3) 密度小的颗粒跟随性比较好,随着密度的增大其运动越紊乱;颗粒密度越大,出现的最小极值速度越低,越容易进入漩涡区并最终沉淀导致堵塞,与颗粒直径相比,颗粒密度对运动轨迹和速度的影响要小些。

[ 参 考 文 献 ]

[1] Wei Qingsong, Shi Yusheng, Dong Wenchu. Advanced

methods to develop drip emitters with new channel types [J]. American Society of Agricultural and Biological Engineer, 2006,22(2):243-249.

[2] Robert G E. Microirrigation [EB/OL]. (2006-02-03) [2006-06-26]. <http://www.Sidney.ars.usda.gov/personel/pdsf/microirrigation>.

[3] 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.

[4] Wei Qingsong, Shi Yusheng, Dong Wenchu. Study on hydraulic performance of drip emitters by computational fluid dynamics [J]. Agricultural Water Management, 2006,84(1/2):130-136.

[5] 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.

[6] Zhang Jun, Zhao Wanhua, Wei Zhongying, et al. Numerical and experimental study on hydraulic performance of emitter with arc labyrinth channels [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007,56(2):120-129.

[7] 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.

[8] 穆乃君,张昕,李光永.内镶式齿形迷宫滴头抗堵塞实验研究 [J].农业工程学报,2007,23(8):34-39.

[9] 阮驰,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.

[10] 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.

## 《水土保持通报》2012 年审稿人名单

(按姓氏笔画排序)

上官周平	王 健	王文龙	王占礼	王玉宽	王百群	王进鑫
王国梁	王继军	邓建才	冯雪明	白岗栓	刘 龙	刘咏梅
刘学军	安韶山	朱安宁	朱远达	许月卿	许有鹏	何家理
吴林荣	吴钦孝	宋乃平	张 翼	张光辉	张岁歧	张信宝
张勋昌	张晓萍	张爱军	张风宝	李 锐	李智广	李壁成
杜 峰	杜 盛	杨明义	杨勤科	陈云明	陈奇伯	陈晓清
庞奖励	林昌虎	范兴科	侯庆春	姜 英	蒋新正	赵世伟
赵景波	徐学选	郭忠升	高国雄	崔晓临	康顺祥	梁东丽
梁银丽	温仲明	焦 峰	焦菊英	程积民	董治宝	韩蕊莲
鲁春霞	蔡强国	樊 军	樊恒辉	穆兴民		