

滴灌灌水器内颗粒物运动特性的数字粒子图像测速

冯吉¹, 孙昊苏^{1,2}, 李云开^{1*}

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 多元水环保技术产业(中国)有限公司, 北京 102100)

摘要: 明确灌水器内部水流和颗粒物运动特性是解决灌水器堵塞问题的关键。但由于灌水器结构复杂、流道狭小、外观不透明性, 测试其内部临界尺度流体流动情况难度很大。目前还鲜见有灌水器内部水沙两相流动全场测试的研究报道。因此, 该文提出了一种灌水器简化模型和一种流道透明模型加工方法, 并应用改进的数字粒子图像测速(DPIV, digital particle image velocimetry)测试系统可视化了灌水器内部流动特征和颗粒的运动特性, 结果表明: 灌水器内部流动为紊流状态, 灌水器工作压力升高并未改变灌水器内部流动形态、涡的分布位置、流线密集程度以及颗粒物跟随性; 相同工作压力条件下, 颗粒物最大速度随着颗粒粒径的增大而减小, 但不同粒径颗粒物流线及涡量分布趋势较为一致; 在中心区和近壁区颗粒物跟随性均随粒径的增加而减小。研究可为灌水器内部固-液两相流动分析及抗堵塞设计提供理论依据。

关键词: 灌溉, 测试, 设备, 颗粒物, DPIV, 运动特性

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.13.013

中图分类号: S-3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-13-0090-08

冯吉, 孙昊苏, 李云开. 滴灌灌水器内颗粒物运动特性的数字粒子图像测速[J]. 农业工程学报, 2013, 29(13): 90-97.

Feng Ji, Sun Haosu, Li Yunkai. Visualizing particles movement characteristics in drip irrigation emitters with digital particle image velocimetry[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(13): 90-97. (in Chinese with English abstract)

0 引言

解决灌水器堵塞最根本的是要使得灌水器本身具有高抗堵塞的能力。颗粒物是灌水器堵塞物质的主要成分, 占总量的 99% 以上, 可以通过选择合适的灌水器流道结构参数、优化流道边界, 保证流道内具有良好的流动状态, 提升流道内水流对颗粒物的输移能力, 进而达到控制颗粒物在近壁面附着的目的^[1-2]。实现灌水器内部流动可视化已成为其中的核心和关键。但由于结构复杂、流道狭小、外观不透明性, 以及灌水器流道尺寸的特殊性使得流道内流动属于介于微尺度(1.0~1.0 mm)和宏观尺度(>1 mm)之间的介观尺度流体流动问题, 颗粒物运动测试难度很大^[3]。目前已有国内外很多专家学者对灌水器内部水流和颗粒物运动的探索性研究

报道: 李云开^[4]等利用改进的 DPIV (digital particle image velocimetry) 系统观测原尺寸平面滴头模型流道内的速度分布情况, 最早实现了灌水器二维无扰测试; 王建东^[1]等测试了齿形迷宫流道放大模型内的压力分布, 证实原型与模型内部水流压力分布就有较好的相似性; 牛文全^[5]等借助 PIV 等方法并采用镁粉为示踪粒子, 研究了迷宫流道平面模型转角对灌水器水力性能和抗堵塞性能的影响; 魏正英^[6-7]等借助 LDV (laser dopper velocimeter) 测量了灌水器放大模型内流体速度分布情况, 并对灌水器原型进行水力性能试验, 建立了流道流量-压力-结构之间的关系, 为迷宫型灌水器结构设计提供了理论基础; 喻黎明等^[8]利用 PIV 技术, 采用镁粒为示踪粒子, 观测了固体颗粒在流道中的轨迹线、路程以及单点速度; 葛令行等^[9]利用 PTV (particle tracking velocimetry) 技术观测了复杂迷宫流道内沙粒与壁面碰撞过程, 分析了单个沙粒在不同压力点下矩形流道的碰撞反弹系数; 曹蒙^[10]等借助 PIV 平台实现灌水器流道内部颗粒-避免粘附过程的可视化, 发现壁面粗糙元改变了流道内沙粒浓度分布; Wei 等^[11]借助 PIV 设备和染色技术, 实现了颗粒物在灌水器内部流动过程中流线轨迹描绘以及主流区速度的测试。但是, 但现有研究还处于起步阶段, 已有研究在模型方面多采用放大模型^[1,12-13]、平面

收稿日期: 2013-02-26 修订日期: 2013-06-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50609029); 教育部新世纪人才支持计划(NETC-10-0780)

作者简介: 冯吉(1992-), 女, 内蒙古自治区赤峰人, 主要从事滴灌灌水器设计及堵塞机理与控制方面研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。

*通信作者: 李云开(1975-), 男, 湖南芷江人, 副教授, 博士, 博士生导师, 主要从事滴灌灌水器设计及堵塞机理与控制方面研究。北京市海淀区清华东路 17 号中国农业大学东区 57 信箱, 100083。

Email: yunkai@cau.edu.cn; 会员号: E041200313S

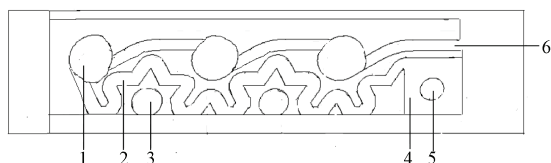
模型^[5,14-15]等，但是灌水器原型的透明模型的透明度有限，忽略原型流道内粘滞力对水流运动的影响，放大模型和平面模型制造精准度较低等，难以反映灌水器内部真实流动情况；测试技术方面多采用 PIV^[16-17]、PTV^[9]、LDV^[6]等，仅仅实现了颗粒物的运动轨迹或单点速度测试，难以实现对流场的全场、瞬态测量。因此，目前还鲜见有灌水器内部水沙两相流动全场测试的研究报道。

综上，本文提出了一种灌水器简化模型及透明模型加工方法，并利用改进的 DPIV 测试系统，测试了内部流动特征和颗粒的运动特性，以了解灌水器堵塞机理和解决灌水器内部堵塞问题提供理论基础。

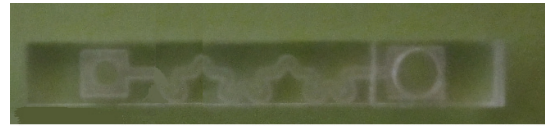
1 试验材料与方法

1.1 试验设计及灌水器结构简化

本文选取一种引黄滴灌片式灌水器^[18]（图 1），其最大工作压力为 110 kPa，公称流量（额定工作条件下的最大流量）为 1.1 L/h，流道宽度、深度和长度分别为 0.52、0.42 和 13.00 mm。由于本文的研究重点是灌水器流道内部水流和颗粒物的运动特性，所以采用只保留灌水器内部消能流道部分的简化模型为研究对象，如图 2。灌水器流道是由结构一致的多个结构单元组成，各个结构单元内部流动具有相似性，因而选取其中一个结构单元进行分析，就能反映灌水器整体的流动规律^[19]。但是，任意结构单元不能体现灌水器实现最终滴落出流的功能，只能选取灌水器流道末端结构单元，通过水力性能测试，以滴落情况考量单元段消能效果的优劣，以满足各工况的测试要求。为此，本文只需对流道末端结构单元内部流动进行测试就可反映片式灌水器内部流体流动特征。目前采用低压或者微压高频滴灌已经成为目前滴灌发展的主导趋势，所以本试验考虑滴灌灌水器工作压力为 20kPa 和 50kPa 两种工作压力，由于本试验所选取研究对象为两个相似单元的串联，所以试验工作压力设计为 10 和 25 kPa。利用改进的 DPIV 测试系统对灌水器内部流动进行测试，本文各种测试结果均为 20 μs 以内流场内流动的平均值。



a. 一种引黄滴灌用片式灌水器消能结构示意图
a. Energy dissipation structure of flat drip irrigation emitters with water in the Yellow River



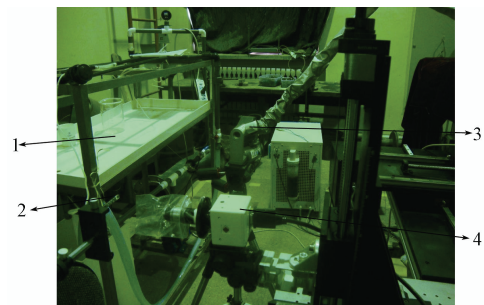
b. 灌水器简化透明模型
b. Transparent simplified model of emitter
1. 泥沙预沉池 2. 消能流道 3. 沉孔 4. 凹槽 5. 出水孔 6. 入水口
1. Pre-sedimentation tank 2. Energy dissipation flow path 3. Sink hole 4. Notch 5. Water outlet 6. Water inlet

图 1 一种引黄滴灌用片式灌水器消能结构示意图及其简化透明模型
Fig.1 Energy dissipation structure of flat drip irrigation emitters with water in the Yellow River and its simplified transparent model

经预试验对比后发现，灌水器样品相互间误差较小。因考虑模型加工精细，造价较高，同时进行模型测试难度较大且时间较长，故本试验加工灌水器模型 2 个，测试 1 个，备用 1 个。

1.2 DPIV 测试系统布置及其改进方法

本文使用 DPIV 系统对灌水器流速分布特征进行测试。该测试系统的基本组成部分主要包括图像采集设备，激光光源系统和系统分析软件。图像采集设备主要包括 CCD 相机、同步控制器和计算机，系统分析软件包括图像采集、显示、速度计算和后期显示等，激光光源系统包括激光器和光导臂。试验台布置如图 2。



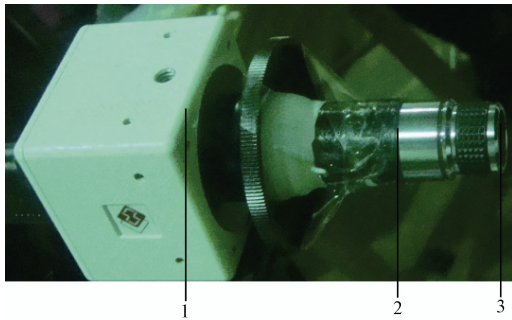
1. 供水平台 2. 滴头模型 3. 脉冲激光 4. 数字相机
1. Water provided platform 2. Emitter model 3. Pulsed laser 4. Digital camera
图 2 DPIV 测试系统装置布置图

Fig.2 Device layout of DPIV test system

本试验图像拍摄选用了 Nikon Flow Sense 2M CCD 相机（200 万像素，150 ns 跨帧），并对其进行了改装。将相机镜头换接成 Nikon D50 近摄镜头，镜头前连接国产 M42 螺口近摄皮腔，近摄比可达 1:1 以上，皮腔和镜头之间连接一个 Nikon 原厂卡口近摄接圈 K2，使得相机和镜头成为一个精确可调节的整体。充分发挥常规 PIV 与 Micro-PIV 的优点，实现拍摄区域与数字图像分辨率的和谐统一（拍摄区域达 4 mm×4 mm）。CCD 机改装后如图 3。本试验采用大恒光电加工的 570 nm 截止的 D50 圆形滤光片进行滤波处理，以防止噪音污染。激光光源系统采用 Dantec 公司生产的 Solo XTG 激光器。单台激

光器各项主要技术参数如下：工作频率：15 Hz、波长 532 nm、激光能量 200 mJ。系统分析软件是由 Dantec 公司提供的 Dynamic Studio 图像采集系统。

DPIV 测试系统图像采集频率为 15 Hz，曝光时间为 100 μs。在应用 DPIV 测速系统进行图像采集时，采用互相关算法，从独立的存在的两幅图像通过一定的判别方法的得到流场中各点的流速矢量。所得文件采用由美国 Tecplot 公司推出的 Tecplot 10 软件进行可视化处理，并且进行进一步的数据处理。



1. CCD 机身 2. 连接件 3. 显微镜物镜
1. The body of CCD camera 2. Connections 3. Microscope objective

图 3 CCD 相机改装图

Fig.3 CCD camera modification

1.3 示踪粒子选用

本试验中选用的荧光粒子的化学成分为聚苯乙烯^[20]，密度约为 1 050 kg/m³。采用平均粒径为 0.10 和 0.05 mm 的两种粒子代表固体悬浮颗粒，采用平均粒径为 0.01 mm 的粒子代表水相。相示踪粒子的平均粒径为 0.01 mm。该荧光颗粒密度与水接近，在流道边界的扰动作用下能够完全离底悬浮。该粒子具有很好的散射效果，利用绿色激光激发，激发荧光波段在 590~610 nm 之间。通过滤光片滤色，可以获取质量较高的图像。固体颗粒流动特征采集试验中粒子体积分数均为 4%，而水流运动特征采集试验中粒子体积分数为 1%^[3]。

1.4 模型加工方法

本文采用数控机床雕刻技术加工灌水器透明模型。灌水器透明模型制作主要包括：底面加工、盖板加工、进水口加工、净面抛光和组装粘合五道工序。底面板材选取厚度为 3.0 mm 的亚克力透明板。在板材一侧采用直径为 0.1 mm 的柱刀雕刻流道结构，而后换用刀口直径 1.5 mm 的柱刀雕刻出水口部分，底面出水口为边长 5.0 mm 的正方形结构；盖板板材选择厚度为 1.0 mm 的亚克力透明板；采用直径为 1.0 mm 的柱刀加工直径为 4.0 mm 的圆形进水口。进水口板材选择厚度为 1.5 mm 的亚克力透明板，用直径为 1.0 mm 的柱刀加工；刚加工完毕的三个部件，需要用布将其表面擦拭干净。仔细观察各部件的尺寸、形状是否合格，检查无误后需要将拍摄要求较高

的部位进行重点抛光处理。本文为避免采用抛光机损坏模型，选用手动抛光，用棉球或尼龙布蘸满专用抛光膏后，紧压抛光面缓慢的沿长度方向往复擦拭。工抛光完毕后，观察三个部件的透明度，如不符合 PIV 测试要求的透明程度时则需再次抛光。最后将三个部件用清水洗净，擦干待用；将擦拭干净的底面、盖板和进水口放置整齐，使用化胶胶水粘合。最终模型如图 1。本试验模型制作精度为 0.001 mm。

2 试验结果与分析

2.1 灌水器内部不同粒径颗粒物运动速度矢量分布

图 4 和图 5 显示了在 10、25 kPa 工作压力下，灌水器透明模型流道内 10、50 和 100 μm 三种粒径颗粒物在末端结构单元内运动速度矢量分布，图中

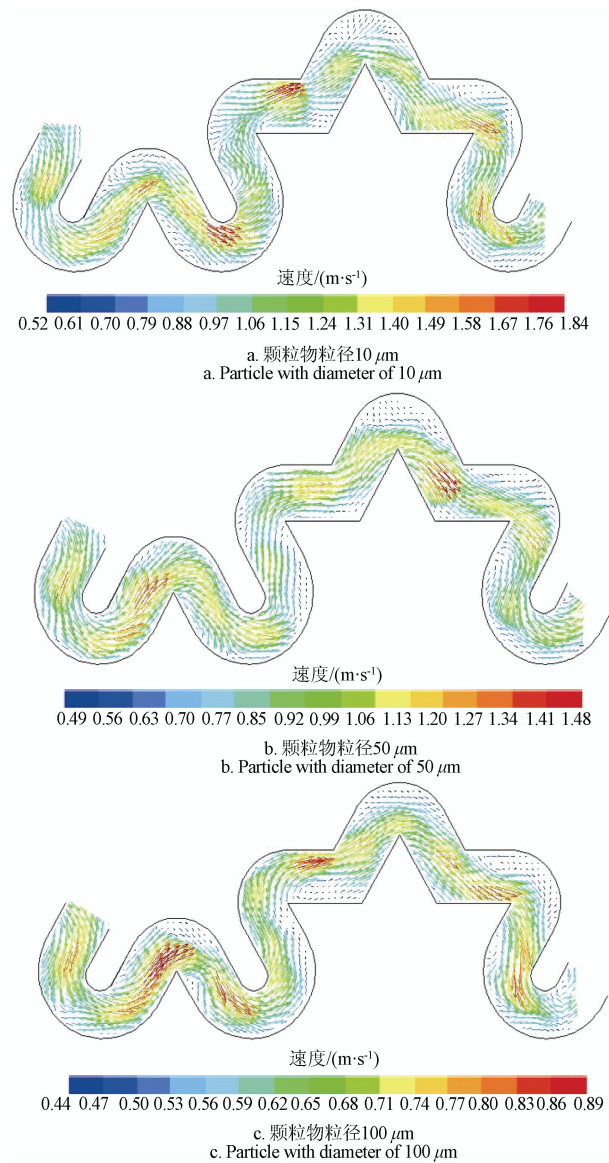


图 4 10 kPa 工作压力下灌水器末端结构单元内不同粒径颗粒速度分布图

Fig.4 Velocity distribution of particles with different diameters in the end structure unit under working pressure of 10 kPa

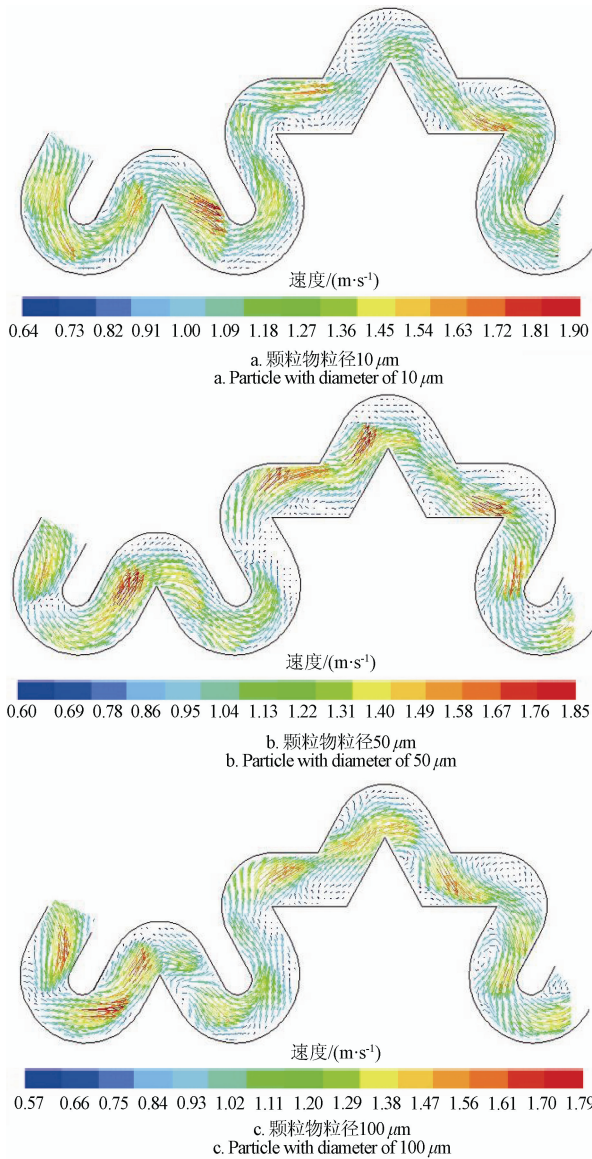


图 5 25 kPa 工作压力下灌水器末端结构单元内不同粒径颗粒速度分布图

Fig.5 Velocity distribution of particles with different diameters in the end structure unit under working pressure of 25 kPa

箭头表示速度方向，颜色代表速度大小，单位为 m/s。从图中可以看出，灌水器透明模型内部流动均呈现紊流特征，按照速度的梯度大小可以分为主流区和非主流区两个运动区域。主流区流速较高，最高速度为 0.9~1.9 m/s 不等，非主流区流速较低，大部分速度不超过 0.5 m/s，部分位置含有漩涡。这主要是因为流体流过齿尖时形成了速度间断面，由于下游速度减慢在齿形背水部位出现回流而产生漩涡。漩涡的产生有利于增加流道的抗堵塞性能，主流区和非主流区水流不断掺混从而实现能量的耗散。较大的速度变化区均出现在主流中心线与流道结构突变位置的交点附近。且两种压力条件下，水相和两种粒径颗粒物主流区和非主流区位置及漩涡分布位置较为一致（如齿尖背水区），说明 50

和 100 μm 两种颗粒物的存在不会显著改变流道内部流动结构与形态。相同压力条件下，灌水器模型最大速度随着颗粒粒径的增大而减小。

2.2 灌水器内部流线及涡量分布

图 6 和图 7 分别显示了 10、25 kPa 压力下灌水器模型末端结构单元内流线和涡量分布。图 6 中不同颜色意义同图 4 和图 5。图 7 中不同颜色代表涡量大小的不同，图中数字单位为 s⁻¹。图 6 和图 7 均通过后处理软件 Tecplot 10 直接处理测试系统所得源文件得到。由图可知，主流区流线密集且漩涡发展较为充分，涡量值较大，有利于灌水器内部颗粒和其它悬浮物质充分扰动并离底悬浮，从而增强灌水器的抗堵塞性能。在边壁结构突变处，流线相对密集，且涡量达到最大值，有利于流道消能能力的提高。在近壁区，流线相对稀疏，涡量值较小，部分位置涡量为 0，颗粒物易在此部位沉积，久之会堵塞灌水器，影响灌水器的使用寿命。流道内涡量大小与工作压力呈线性关系。涡的分布位置和流线密集程度均未因工作压力变化而发生显著改变。

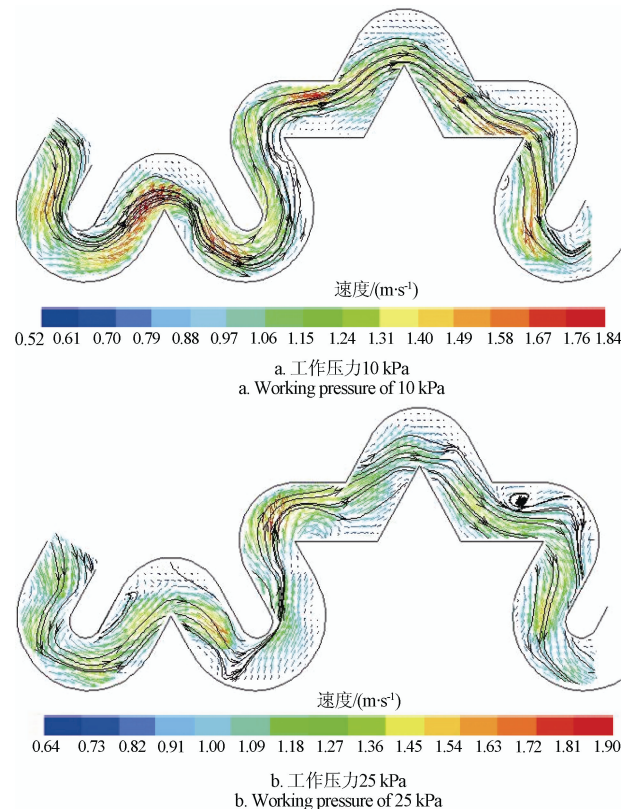


图 6 灌水器末端结构单元内流线分布图

Fig.6 Flow lines distribution in end structure unit of emitter

2.3 灌水器末端结构单元内颗粒物跟随特性研究

图 8 显示了灌水器末端结构单元中心区（距流道内壁面 1/2 流道宽度处）水流及不同粒径颗粒物的速度分布。横坐标 L 代表灌水器内部速度取点位置，纵坐标 v 代表颗粒物运动速度。中心区颗粒物和水质运动速度的总体趋势较为一致，部分位置尤其是结构突

变处和结构突变位置后方，颗粒速度表现出随着粒径的增大而减小的现象。这一方面是由于颗粒物的重力与颗粒的体积成正比，随着粒径增加，由于惯性作用的阻碍，使得大颗粒速度降低较快，颗粒物的跟随性随着粒径的增大而减弱。另一方面，由于突变位置使得压力条件快速改变，而突变位置后方，压力迅速降

低，转化给大颗粒的能量迅速减少，使得大颗粒速度减小幅度大于小颗粒。随着压力的增大，颗粒的紊流程度不断增加，颗粒物和水相速度分布的总趋势保持稳定，但随时间和流动不断变化，在某时段可能发生固相速度大于水相速度的情况。小范围的压力变化不能显著改变颗粒在中心区的跟随特性。

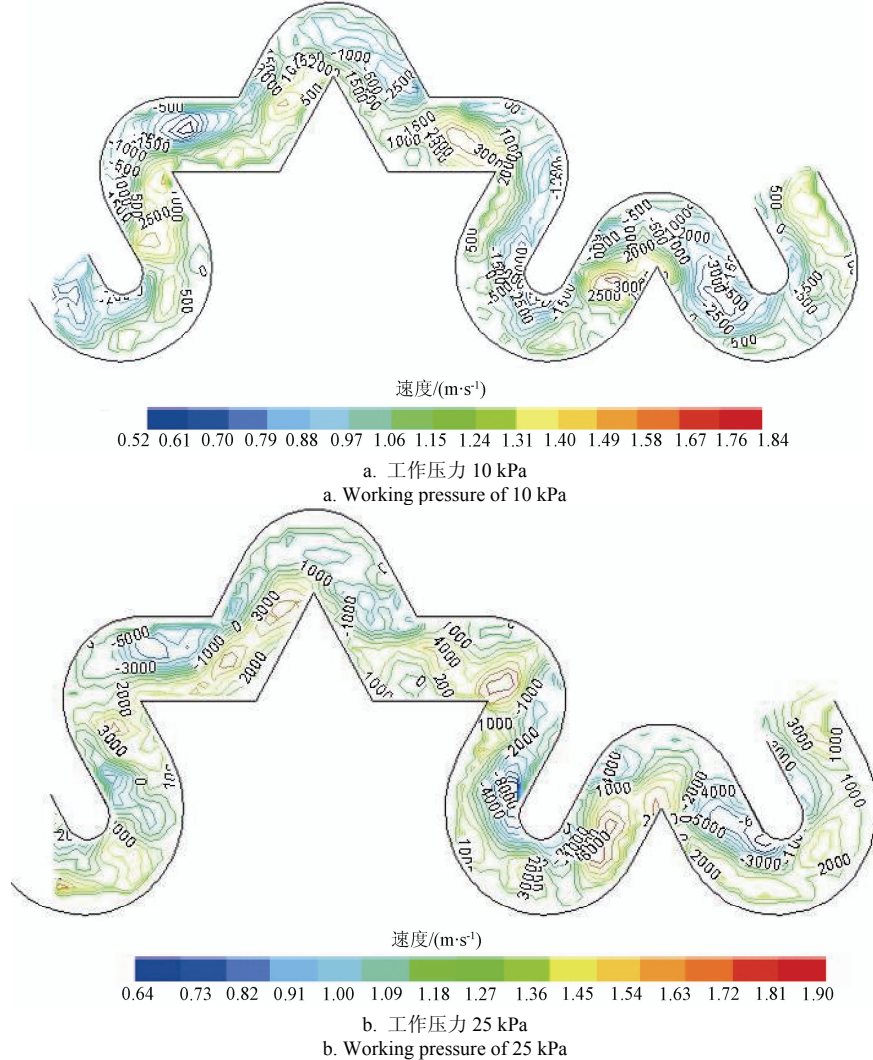


图 7 灌水器末端结构单元内涡量分布图

Fig.7 Vorticity distribution in the end structure unit of emitter

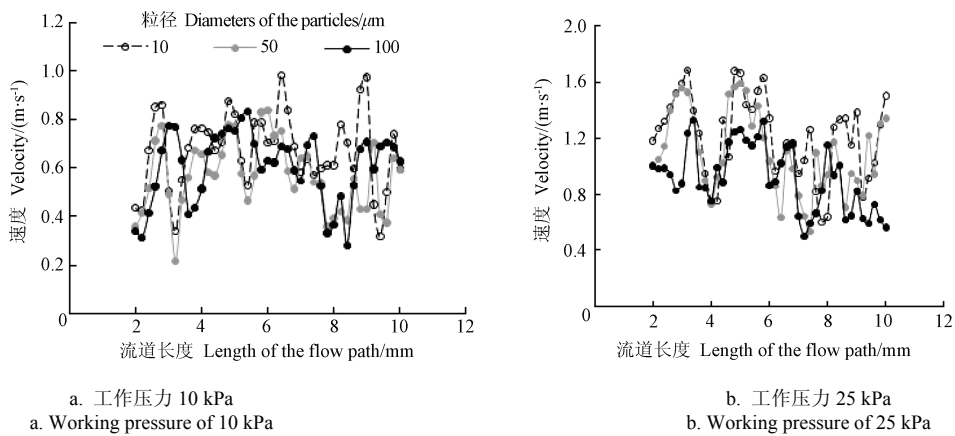


图 8 灌水器末端结构单元中心区水流及颗粒物速度分布图

Fig.8 Velocity distribution of water flow and particle in the end structure unit in the central region

图 9 显示了末端结构单元近壁区(距流道内壁面 1/10 流道宽度处)水流和颗粒物的速度分布。横坐标 L 代表灌水器内部速度取点位置,纵坐标 v 代表颗粒物运动速度。近壁区颗粒流动流速相对较小,两相速度在结构突变区的壁面处速度骤增,并表现出随颗粒粒径的增大而减小的规律。颗粒物跟随性差异未随压力的变化而发生较大的改变。

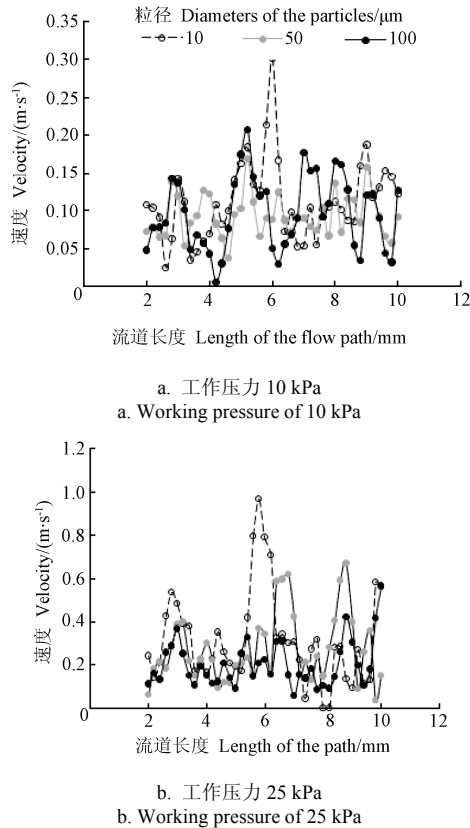


图 9 灌水器末端结构单元近壁区水流及颗粒速度分布图
Fig.9 Velocity distribution of water flow and particle in the end structure unit in the near-wall region

3 结 论

1) 本文所提出的采用改进的 DPIV 测试系统,测试灌水器简化透明模型内部流动特征和颗粒的运动特性的方法是可行的,能较好地测试灌水器流道内水流和颗粒物运动特性,成功解决了因灌水器流道狭小、外观具有不透明性、尺度介观等流动测试技术问题,具有一定的实用性。

2) 在 10、25 kPa 两种工作压力条件下,灌水器流道内部流动均可分为主流区和非主流区两个区域。灌水器内的流动状态、漩涡分布位置与流线密集程度并未因压力变化而发生较大改变;流道内涡量大小与工作压力呈线性关系;小范围的压力变化不能显著改变颗粒在中心区和近壁区的跟随特性。

3) 相同压力工况下,灌水器内部最大速度随着颗粒粒径的增大而减小;不同粒径颗粒物流线及涡量分布趋势较为一致;在中心区和近壁区,颗粒物跟随性均随粒径的增加而减小。

[参 考 文 献]

- [1] 王建东,李光永,邱象玉,等.流道结构形式对滴头水力性能影响的试验研究[J].农业工程学报,2005,21(增刊):100-103.
Wang Jiandong, Li Guangyong, Qiu Yuxiang, et al. Effects of flow passage forms on hydraulic performance of emitters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(supp): 100-103. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王福军,王文娥.滴头流道 CFD 分析的研究进展与问题[J].农业工程学报,2006,22(7):188-192.
Wang Fujun, Wang Wen'e. Research progress in analysis of flow passage in irrigation emitters using computational fluid dynamics techniques[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(7): 188-192. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李云开.灌水器分形流道设计及其流动特性的试验研究与数值模拟[D].北京:中国农业大学,2005.
Li Yunkai. Design of Fractal Flow Path for Emitters and Experiment Study and Simulation Modeling on Its Fluid Mechanism[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [4] 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.
- [5] 牛文全,喻黎明,吴普特,等.迷宫流道转角对灌水器抗堵塞性能的影响[J].农业机械学报,2009,40(9):51-55.
Niu Wenquan, Yu Liming, Wu Pute, et al. Influence of angle of labyrinth channels on anti-clogging performance of emitter[J]. Transactions of the CSME, 2009, 40(9): 51-55. (in Chinese with English abstract)
- [6] 魏正英,赵万华,唐一平,等.滴灌灌水器迷宫流道主航道抗堵设计方法研究[J].农业工程学报,2005,21(6):1-7.
Wei Zhengying, Zhao Wanhua, Tang Yiping, et al. Anti-clogging design method for the labyrinth channels of drip irrigation emitters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(6): 1-7. (in Chinese with English abstract)

- [7] 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 Zhengying, Tang Yiping, Zhao Wanhua, et al. Structure and hydraulic performance experimental research on labyrinth channels of drip irrigation emitters[J]. Transactions of the CSME, 2005, 36(12): 51—55. (in Chinese with English abstract)
- [8] 喻黎明, 吴普特, 牛文全, 等. 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, et al. CFD simulation and PIV validation of the solid particles movement in the labyrinth path[J]. Transactions of the CSME, 2009, 40(5): 45—51. (in Chinese with English abstract)
- [9] 葛令行, 魏正英, 唐一平, 等. 迷宫流道内沙粒壁面碰撞模拟与 PTV 实验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9): 46—50.
Ge Lingxing, Wei Zhengying, Tang Yiping, et al. Simulation and experimental analysis on sand-wall collisions in labyrinth channel emitter [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 40(9): 46—50. (in Chinese with English abstract)
- [10] 曹蒙, 魏正英, 葛令行, 等. 滴头壁面形貌对微颗粒物与壁面黏附特性的影响[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(9): 120—124.
Cao Meng, Wei Zhengying, Ge Lingxing, et al. The impact of drippers wall morphology characteristics on the micro-particles and the wall viscous[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(9): 120—124. (in Chinese with English abstract)
- [11] Wei Zhengying, Cao Meng, Liu Xia, et al. Flow behaviour analysis and experimental investigation for emitter micro-channels[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(4): 729—737.
- [12] 李永欣, 李光永, 邱象玉, 等. 迷宫滴头水力特性的计算流体动力学模拟[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 12—16.
Li Yongxin, Li Guangyong, Qiu Xiangyu, et al. Modeling of hydraulic characteristics through labyrinth emitter in drip irrigation using computational fluid dynamics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(3): 12—16. (in Chinese with English abstract)
- [13] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(6): 1—9. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李云开, 杨培岭, 任树梅, 等. 圆柱型迷宫式流道滴头平面模型试验研究[J]. 农业机械学报, 2006, 37(4): 48—51.
Li Yunkai, Yang Peiling, Ren Shunmei, et al. The study on the plane model of the labyrinth path in cylindrical emitter[J]. Transactions of the CSME, 2006, 37(4): 48—51. (in Chinese with English abstract)
- [15] 李治勤, 马静. 迷宫灌水器水流流态试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 82—86.
Li Zhiqin, Ma Jing. Experiment on flow pattern in labyrinth emitter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(1): 82—86. (in Chinese with English abstract)
- [16] Adrian R J. Particle-image techniques for experimental fluid functions—vorticity equations for incompressible two-dimensional flows[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1994, 1(19): 513—525.
- [17] Adrian R J. Multi—point optical measurement of simultaneous vectors in unsteady flow—a review[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1986, 1(7): 127—130.
- [18] 李云开, 吴丹, 杨培岭, 等. 一种引黄滴灌用片式灌水器[P]. 中国专利: 201110273140.2.
Li Yunkai, Wu Dan, Yang Peiling, et al. A flat drip irrigation emitters with water in the Yellow River[P]. Chinese patent: 201110273140.2. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李云开, 刘世荣, 杨培岭, 等. 滴头锯齿型迷宫流道消能特性的流体动力学分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 59—62.
Li Yunkai, Liu Shirong, Yang Peiling, et al. The fluid dynamics analysis on the energy dissipation characteristics in the labyrinth path[J]. Transactions of the CSME, 2007, 38(12): 59—62. (in Chinese with English abstract)
- Liu Haisheng, Li Yunkai, Liu Yaoze, et al. Flow characteristics in energy dissipation units of labyrinth path in the drip irrigation emitters with DPIV technology[J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, 21(6): 137—145.

Visualizing particles movement characteristics in drip irrigation emitters with digital particle image velocimetry

Feng Ji¹, Sun Haosu^{1,2}, Li Yunkai^{1*}

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Multiple water environmental technology industry (China) co., LTD, Beijing 102100, China)

Abstract: Understanding the movement characteristics of particles is very important for solving the clogging problem in drip irrigation emitters. The key to solve this problem is to make sure that the emitter itself has a high resistance to clogging. Particles are the main component of clogging substance in emitter, accounting for 99% or more. Through selecting the appropriate emitter flow path structure parameters and optimizing the flow boundary, a good flow condition in the path could be ensured, in addition, the transport capacity of particles in the flow path gets improved. Furthermore, the intention of controlling near-wall attachment of particles can be achieved. However, it is very difficult to test the flow in the critical scale flow path due to its complicated structure, narrow flow path, and non-transparent appearance. There were a few reports on the whole field measuring about water-sand two-phase flow in emitters. Therefore, this paper researched flow characteristics in a simplified model of emitter, which only reserved the flow path for energy dissipation. We tested the flow characteristics in the terminal unit structure. At the same time, a processing method for transparent model was proposed in this paper, and we improved the Digital Particle Image Velocimetry (DPIV), by changing the lens of the CCD camera into the close-up lens of Nikon D50. We visualized the movement characteristics of particles in emitters with improved DPIV test system. The results showed that it was feasible to test the motion characteristic of particles in simplified transparent model with the improved DPIV test system. It was turbulent in emitter. And the flow state, vortex distribution, the intensity of flow lines, as well as following performance of particles did not change as the increasing working pressure in emitters. There was a linear relationship between size of flow path and working pressure. The small change of pressure did not significantly change the following characteristic of particles in the central region and the near-wall region. Under the same working pressure, the particles maximum velocity decreased with the increasing particle size, but the distribution trends of the flow lines and the vorticity of particles with different sizes were consistent. The particles following characteristics decreased with the increasing size, in both the central region and the near-wall region. The research could provide the theoretical basis for the analysis on the solid-liquid two-phase flow and the anti-clogging design in emitters.

Key words: irrigation, measurement, equipments, particle, digital particle image velocimetry, movement characteristics

(责任编辑: 曾懿婷)