

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.024

动态水压下迷宫流道水流运动特性研究*

郑超¹ 吴普特^{1,2} 张林^{1,2} 朱德兰² 陈昕^{1,2} 陈俊英²

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 采用粒子跟踪测速 (PTV) 技术, 通过观测动态水压及恒定水压下迷宫流道内示踪粒子的运动规律, 分析动态水压下迷宫流道内水流的运动特性, 揭示动态水压滴灌抗堵机理。结果表明: 相对于恒定水压, 动态水压下流道内流量未出现明显下降, 动态水压对滴灌系统的供水能力影响较小; 动态水压下流道主流区水流流速始终保持大幅度上下波动, 水流紊动更加强烈, 大量粒子可以快速经主流区通过流道, 粒子在流道内停留时间大大缩短; 滞止区水流流速仍较低, 但紊动强烈, 进入滞止区的粒子随水流不断运动, 不易发生沉积, 部分粒子在水流紊动作用下能够迅速重返主流区, 并最终通过流道, 粒子在流道内沉积的概率明显降低。采用动态水压可以有效提高流道抗堵能力。

关键词: 动态水压 迷宫流道 水流运动特性 粒子跟踪测速

中图分类号: S275.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)09-0167-06

Flow Characteristics in Labyrinth Channel under Dynamic Water Pressure

Zheng Chao¹ Wu Pute^{1,2} Zhang Lin^{1,2} Zhu Delan² Chen Xin^{1,2} Chen Junying²

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The movements of tracer particles in labyrinth channel under dynamic and constant water pressure were observed based on partical track velocimetry (PTV) technique. Water flow characteristics in labyrinth channel were analyzed and the anti-clogging mechanism of drip irrigation system under dynamic water pressure was discussed. The results show that when comparing with constant water pressure, flow rate in the channel under dynamic water pressure did not decrease significantly. Therefore, the effect of dynamic water pressure on water delivery capacity of drip irrigation system was not obvious. While the flow velocity in channel's main flow path fluctuated dramatically under dynamic water pressure supply system, and the turbulence was more intensely. Most particles could pass the main flow path quickly and the residence time of tracer particles reduced significantly. The flow velocity in the flow stagnation zone was relatively low while the turbulence remained strong. So the particles can hardly deposit in the flow stagnation zone due to the remarkably fluctuation. Meanwhile, some particles in the flow stagnation zone returned to the main flow path and finally flew out of the channel, which lead to the significant decreasing possibility of particle deposition in the channel. Therefore, dynamic water pressure could improve the anti-clogging performance of drip emitter effectively.

Key words: Dynamic water pressure Labyrinth channel Flow characteristics Partical track velocimetry

收稿日期: 2015-06-23 修回日期: 2015-07-15

* 中国科学院西部之光人才培养计划资助项目、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B02)和高等学校学科创新引智计划(111计划)资助项目(B12007)

作者简介: 郑超, 博士生, 主要从事节水灌溉理论, E-mail: zhengchao_xinong@163.com

通讯作者: 吴普特, 研究员, 博士生导师, 主要从事水资源高效利用研究, E-mail: gizwpt@vip.sina.com

引言

迷宫流道因其优良的消能效果被广泛应用于微灌系统灌水器设计中,其尺寸一般在1 mm左右,由于流道尺寸较小,边界复杂,极易被水流中携带的微小颗粒堵塞,进而直接影响整个微灌系统灌溉质量^[1-3]。国内外在灌水器物理堵塞问题研究方面已取得丰硕成果^[4-15],为提高灌水器抗堵能力起到了巨大作用,推动了微灌技术的大面积推广和应用。例如魏正英等^[4]应用计算流体力学数值模拟与激光多普勒测速仪(LDV)试验测量相结合的方法,揭示了迷宫流道内部流动场的情况,分析了迷宫流道堵塞机理,提出了迷宫流道主航道抗堵优化设计方法,并对流道进行优化设计,优化后的流道消除了流动滞止区,抗堵性能得以提高。牛文全等^[5]通过数值模拟方法研究了含沙量在齿型迷宫流道灌水器流道内的分布规律,提出了以较小的含沙量等值线为流道边界对流道进行优化,优化后的流道不仅保持了原型流道的优良水力性能,而且抗堵塞能力也得到提高。王新坤等^[6]分析了三角绕流滴灌灌水器流道的水力性能,揭示了内部湍流流动机理,并通过流道结构优化得到了一种水力性能及抗堵性能俱优的三角绕流灌水器。葛令行等^[7]分析了迷宫流道中沙粒运动轨迹及沉积规律,指出碰撞反弹系数对沙粒沉积规律具有很大影响,各单元压力场变化对沙粒运动轨迹影响甚微。冯吉等^[8]采用改进的数字粒子图像测速(DPIV)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,分析得出灌水器工作压力对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影响甚微,中心区和近壁区颗粒物跟随性均随粒径的增加而减小。但截止目前为止,灌水器物理堵塞问题仍然没有完全解决。近年来,有学者尝试通过改变微灌系统供压方式来缓解灌水器物理堵塞问题。芦刚^[16]指出动态水压滴灌能明显地降低灌水器的堵塞程度。王聪^[17]通过动态水压下灌水器水力性能及堵塞试验,分析了4种水压模式及不同波动参数对灌水器流量、均匀度和堵塞率的影响规律,得出随着动态水压的波幅增大,4种水压模式产生的波动效应逐渐减弱,波幅为2~3 m时波动效应效果最好。这些研究为解决滴灌堵塞问题提供了一条新的途径,但是现有研究主要集中于灌水器宏观水力特性方面,对灌水器流道流场的微观分析涉及较少,动态水压滴灌抗堵机理尚不清楚。

为此,本文通过在水源中添加一定浓度的示踪粒子,并采用高速摄像机分别对动态水压及恒定水

压下的灌水器流道内示踪粒子运动情况进行连续拍摄,以获得示踪粒子的运动轨迹和速度等信息,进而分析动态水压下迷宫流道内的水流运动特性,揭示动态水压滴灌抗堵机理。

1 材料与方 法

1.1 试验装置

试验在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院灌溉水力学试验厅进行,试验装置由水箱、搅拌机(电动机转速为900 r/min)、ISW40-200型离心泵、筛网过滤器(筛网孔径为0.125 mm)、变频器、压力表、压力传感器(西安新敏CYB型,量程40 m,精度0.1%)、数据采集器和PTV可视化试验平台等组成,如图1所示。

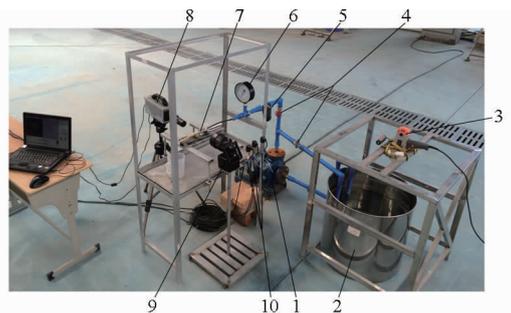


图1 迷宫流道水流运动特性试验装置

Fig.1 Schematic of test system for flow characteristics of labyrinth channel

1. 离心泵 2. 水箱 3. 搅拌机 4. 阀门 5. 过滤器 6. 压力表
7. 试验样件 8. 高速摄像仪 9. 连续光源 10. 压力传感器

PTV可视化试验平台主要由不锈钢支架、连续光源、高速摄像仪及VS-M0910型放大镜组成,其中高速摄像仪每秒可采集0~200 000帧图像,能清晰地捕捉到粒子在微细流道内的运动情况,利用后处理软件Movias Pro Viewer 1.63可获得粒子运动轨迹及瞬时速度等运动特征参数。图2为PTV流道观测区域图,观测区域主要位于第7及第8流道单元,观测区域长为5.6 mm。为了便于分析流道内水流运动特性,把流道划分为主流区和滞止区^[4],从观测区域中选取流道中心线与流道上齿下部之间的A区为速度主流区特征观测区域,A区位于第7

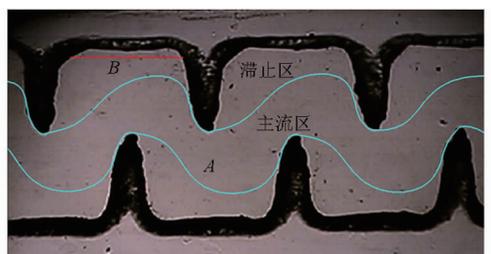


图2 PTV观测区域图

Fig.2 Schematic of PTV observation zone

水道单元末端上齿下部 0.15 mm 处, A 区直径均为 0.1 mm。考虑到本文选取的示踪粒子密度接近于水, 铅垂方向重力的影响较小, 可以忽略, 因此可以仅选取第 7 水道单元内 B 区为速度滞止区特征观测区域, B 区位于第 7 水道单元上部近水道顶部 0 ~ 0.1 mm 处。

变频器主要由可编程逻辑控制器 PLC 和变频器组成, 将压力模式程序输入 PLC 控制变频器, 以控制加压水泵电动机的转速, 进而实现不同的动态水压模式(如: 三角函数波形、三角波形、矩形波形和台阶波形等), 通过参数设置, 可以设定水压极大值、中间值、极小值及波动周期。由于迷宫水道出流量较小, 设计试验装置时加入了回流系统, 可以把水泵大部分出流量回流到水箱, 以保证水泵安全运行; 同时, 回流管道上的阀门也可以辅助变频器调节水道进口压力。

为了观测灌水器迷宫水道内的水流运动, 以杨凌秦川节水生产的贴片式滴灌带中的迷宫水道灌水器为原型, 利用数控激光加工机床雕刻技术(雕刻精度为 0.01 mm)将迷宫水道按 1:1 的比例雕刻在透明的有机玻璃板上, 制成试验样件, 如图 3 所示。试验样件由 2 块 3 mm 厚度的有机玻璃板夹着 1 块雕刻有迷宫水道的 1 mm 厚度的有机玻璃板构成, 并用螺栓对 3 块有机玻璃板进行固定。在水道进口前 4 mm 处刻有测压孔, 并通过直径 2 mm 的不锈钢管及透明软管连接压力传感器。水道进出口平直水道加长, 以便流体充分发展。水道共有 13 个单元, 总长为 22.1 mm, 宽度为 1 mm, 其他水道结构参数详见图 4。为了尽可能真实地反映迷宫水道水流运动, 采用水流跟随性较好、密度接近水的 Nylon 粒子(粒径为 4 μm , 密度为 1.04 g/cm^3)作为示踪粒子。



图 3 有机玻璃试验样件

Fig. 3 Schematic of labyrinth channel specimen

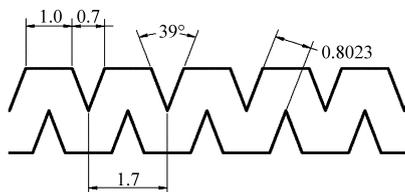


图 4 迷宫水道结构及参数

Fig. 4 Structural parameters of labyrinth channel

1.2 试验方法

试验时, 在水箱中按 0.01 g/L 质量浓度加入 Nylon 粒子(以下简称粒子), 开启搅拌器进行搅拌, 使得粒子均匀分布于水箱的水体中; 开启变频器并设置变频器运行参数, 然后开启水泵。调节完毕后, 待压力稳定, 通过连接在水道进口处的压力传感器测量水道进口压力并由计算机记录压力传感器瞬时采集(1 次/s)的数据, 用称量法(测量 2 次, 每次测量时间为 20 min, 取平均值)测量并记录水道末端出流量。开启连续光源及高速摄像机, 调整及设定高速摄像机的焦距、数字式位移、快门速度及每秒采集帧数等参数, 最后开始采集并保存高速摄像机拍摄的图像。采集图像时, 设定每秒采集 6 000 帧图像, 快门速度、数字移动及触发模式等参数采用系统默认值。参照《农业灌溉设备 滴头和滴灌管技术规范 and 试验方法》, 对恒定水压下水道压力流量关系进行测定, 得到水道的压力流量计算公式为 $q = 1.188H^{0.538}$, 其中 q 为水道流量(L/h)、 H 为水道进口工作水压(m)。试验选定恒定水压及三角函数波形动态水压(详见图 5)2 种模式, 选定恒定水压和三角函数波形动态水压下水道进口基础水压(水道进口平均工作水压)均为 4、6、8、10、12 m , 三角函数波形动态水压模式(以下简称动态水压)的波动周期 T 和振幅分别设为 10 s 和 3 m 。试验采用全试验处理, 共 10 个处理。

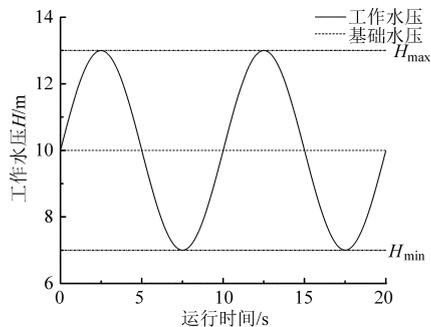


图 5 三角函数波形动态水压模式示意图

Fig. 5 Schematic diagram of trigonometric dynamic water pressure mode

2 结果与分析

2.1 动态水压及恒定水压下水道内流量

流量作为灌水器重要的水力要素, 其大小可以直观地反映整个滴灌系统的供水能力。表 1 给出了恒定水压及动态水压下水道实测平均流量。由表 1 可知, 在不同基础水压下, 动态水压下水道内流量均小于恒定水压下水道内流量。由灌水器压力流量关系 $q = 1.188H^{0.538}$ 可知, 水道内流量与水道内工

作水压呈非线性关系,随着工作压力增大,流道内流量的增加幅度逐渐减小,而动态水压下流道内工作压力在 H_{\min} 至 H_{\max} 之间不断变化,在基础水压相同时,完整的波动周期内动态水压下流道内平均流量必定小于恒定水压下流道内平均流量。但由表1还可以看出,在不同基础水压下,动态水压下与恒定水压下平均流量之间相对偏差均在 $0 \sim 5\%$ 之间,偏差较小。因此,说明相比于恒定水压,动态水压下流道内流量未出现明显下降,动态水压对滴灌系统的供水能力影响较小。

表1 动态水压及恒定水压下迷宫流道实测平均流量

Tab.1 Average flow rate of labyrinth channel under dynamic and constant water pressure

基础水压/m	流量/(L·h ⁻¹)		偏差/%
	恒定水压	动态水压	
4	2.51	2.41	3.83
6	3.13	3.06	2.30
8	3.64	3.58	1.65
10	4.09	4.01	2.05
12	4.51	4.32	4.13

2.2 动态水压及恒定水压下水流运动特性分析

2.2.1 粒子轨迹线

流道主流区的水流速度较大,处在主流区的粒子能够随水流快速通过流道单元;滞止区存在较大的涡旋且速度极低,粒子运动到滞止区易随水流进行绕圈运动甚至在滞止区沉积下来;在粒子运动速度一致时,粒子在流道内运动圈数(指粒子随着紊动水流完成绕圈运动的次数)越多,说明粒子在流道内停留时间越长,那么粒子在流道内沉积的概率越大。因此可以采用粒子在流道内运动圈数来反映粒子沉积概率。

采用后处理软件 Movias Pro Viewer 1.63 对基础水压为 4 m 时动态水压及恒定水压下采集的粒子运动动态图像进行处理,分别从图像中随机选取 100 个进入滞止区的粒子,描绘出每个粒子的运动轨迹线,并对粒子运动圈数按 1、2、3、4、5(5 及 5 以上)等 5 个水平进行统计。动态水压及恒定水压下粒子运动圈数统计结果如图 6 所示,动态水压下粒子运动圈数主要是以 1 圈的居多,占粒子总量的 36%,随着粒子运动圈数的增加,粒子百分数有逐渐减小的趋势;恒定水压下粒子运动圈数主要是以 2 和 3 圈居多,占粒子总量的 62%,随着粒子运动圈数的增加,粒子百分数先增大后减小。由此可以看出,相比于恒定水压,动态水压下粒子运动圈数明显减少,说明采用动态水压可能会缩短粒子在流道内停留时间,降低粒子在流道内的沉积概率。

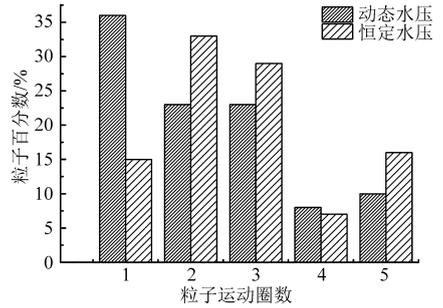


图6 恒定水压及动态水压下流道内粒子运动圈数比例

Fig.6 Histogram of particles circle number under dynamic and constant water pressure

图7给出了动态水压及恒定水压下粒子通过PTV观测区域的平均时间。由图7可知,不同运动圈数时,动态水压下粒子平均通过时间均小于恒定水压下粒子平均通过时间,其相对偏差在 $10\% \sim 35\%$ 之间。如当运动圈数为 1 时,动态水压下粒子通过时间比恒定水压下缩短了 0.0017 s,相对偏差为 27.9%;当运动圈数为 5 时,动态水压下粒子通过时间比恒定水压下缩短了 0.008 s,相对偏差为 34.2%。因此,进一步说明相比于恒定水压,动态水压下粒子在流道内停留时间缩短,降低粒子在流道内的沉积概率。

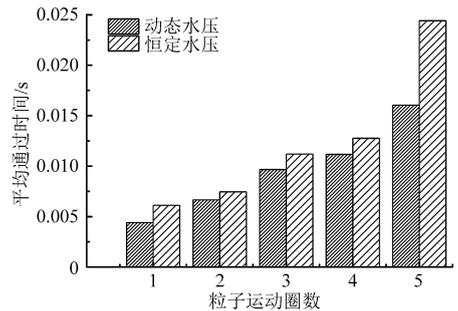


图7 不同运动圈数下粒子平均通过时间

Fig.7 Histogram of particles average transit time in different particles circle numbers

2.2.2 粒子运动速度

(1) 主流区粒子运动速度

图8给出了动态水压及恒定水压下基础水压为 4 m 时 $T/2$ 时段(从 H_{\min} 变化至 H_{\max})内主流区 A 处水流运动速度变化曲线。如图 8 所示,恒定水压下,随着时间的变化,A 处的水流流速稳定在 0.38 m/s 左右,变化较小。在动态水压下 $T/2$ 时段内,随着时间的变化,A 处水流流速不断增大,从 0.21 m/s 增至 0.52 m/s,增幅较大。由此可以看出,相比于恒定水压,动态水压下主流区水流流速始终保持大幅度上下波动,水流紊动更加强烈,从而使得大量粒子可以快速经主流区通过流道,降低了粒子进入滞止区的概率;同时不断冲击滞止区水流,加剧了滞止区内水流紊动,使得进入滞止区内的粒子不易在滞止区内

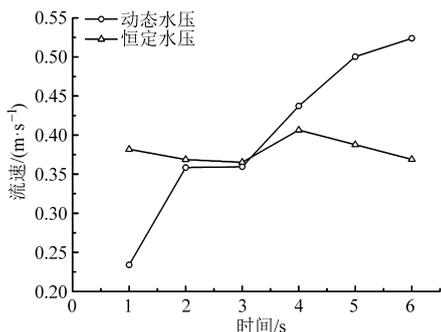


图8 主流区水流流速变化曲线

Fig. 8 Variation curves of flow velocity in main flow path

产生沉积。

(2) 滞止区粒子运动速度

图9给出了动态水压及恒定水压下基础压力为4 m时 $T/2$ 时段(从 H_{min} 变化至 H_{max})内滞止区B处水流流速变化曲线。如图9所示,恒定水压下,随着时间的变化,B处水流流速在0.076 m/s左右发生较小波动,说明恒定水压下滞止区为稳定的低速区,粒子进入滞止区后极易沉积并被吸附在流道壁面。动态水压下 $T/2$ 时段内,随着时间的变化,B处的水流流速不断增大,从0.028 m/s增大至0.15 m/s,增

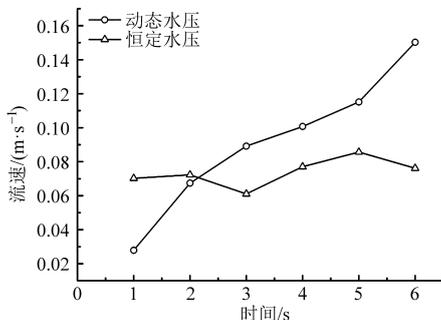
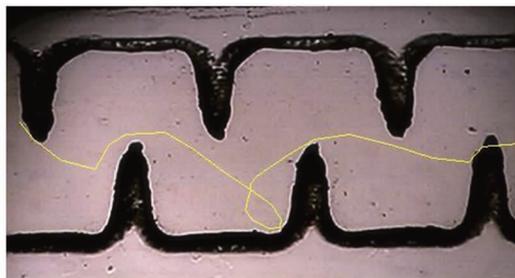
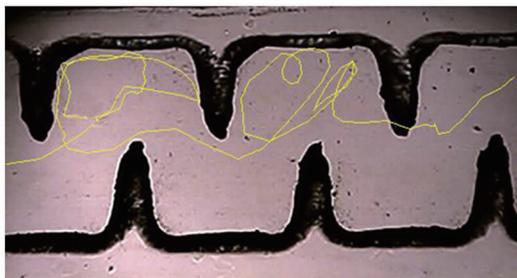


图9 滞止区水流流速变化曲线

Fig. 9 Variation curves of flow velocity in flow stagnation zone



(a)



(b)

图10 动态水压及恒定水压下PTV观测粒子运动轨迹

Fig. 10 Trajectories of PTV observation about particles under dynamic and constant water pressure

(a) 动态水压 (b) 恒定水压

3 结论

(1) 相对于恒定水压,动态水压下流道内流量未出现明显下降,动态水压对滴灌系统的供水能力影响较小。

(2) 动态水压下粒子运动圈数明显少于恒定水压下粒子运动圈数,相同运动圈数时动态水压下粒子平均通过时间均小于恒定水压下粒子平均通过时间。相对于恒定水压,动态水压下粒子在流道内停留时间大大缩短,粒子在流道内的沉积概率明显降低。

(3) 相对于恒定水压,动态水压下流道主流区水流流速始终保持较大幅度上下波动,水流紊动

幅明显。图10给出了恒定水压及动态水压下PTV观测的粒子运动轨迹。恒定水压下粒子随流道滞止区内漩涡不断做绕圈运动,粒子在滞止区运动时间较长;动态水压下进入滞止区的粒子能够迅速随水流返回主流区,粒子在滞止区运动时间较短。说明动态水压下滞止区虽然水流流速仍较低,但水流紊动强烈,粒子进入滞止区后随水流不断运动,降低了粒子沉积的可能,部分粒子在水流紊动作用下能够迅速重返主流区,并最终通过流道。因此,采用动态水压可以有效提高流道抗堵能力。

更加强烈,大量粒子可以快速经主流区通过流道,滞止区水流流速仍较低,但紊动强烈,进入滞止区的粒子随水流不断运动,不易发生沉积,部分粒子在水流紊动作用下能够迅速重返主流区,并最终通过流道,因此采用动态水压可以有效提高流道抗堵能力。

(4) 动态水压滴灌为缓解灌水器堵塞问题提供了一条新途径,本文主要侧重于动态水压下迷宫水道灌水器抗堵机理的研究,未研究不同动态水压模式和波动参数对灌水器抗堵性能的影响,在今后的研究中应加以考虑,并由此筛选出最适宜的动态水压模式和波动参数组合,以促使动态水压滴灌运用于工程实践中。

参 考 文 献

- 1 赵万华. 滴灌系统关键技术研究[J]. 中国农业科技导报, 2007, 9(1): 21-25.
Zhao Wanhua. The key technology of drip irrigation system[J]. Review of China Agricultural Science and Technology, 2007, 9(1): 21-25. (in Chinese)
- 2 Nakayama F S, Bucks D A. Emitter clogging effects on trickle irrigation uniformity[J]. Transactions of the ASAE, 1981, 24(1): 77-80.
- 3 Sietan Chieng, Ghaemi Ali A. Uniformity in a micro-irrigation with partially clogged emitters[C]//2003 ASABE Annual Meeting, ASABE Paper 032097, 2003.
- 4 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 CSAE, 2005, 21(6): 1-7. (in Chinese)
- 5 牛文全, 吴普特, 喻黎明. 基于含沙量等值线的迷宫流道结构抗堵塞设计与模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 14-20.
Niu Wenquan, Wu Pute, Yu Liming. Anti-clogging experimental investigation and optimized design of micro-channels of emitter based on isoline of sand content[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(5): 14-20. (in Chinese)
- 6 王新坤, 李俊红, 单彬, 等. 三角绕流滴灌灌水器结构设计和优化[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): 43-46.
Wang Xinkun, Li Junhong, Shan Bin, et al. Structural design and optimization of triangle circulation drip irrigation emitters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 43-46. (in Chinese)
- 7 葛令行, 魏正英, 曹蒙, 等. 微小迷宫流道中的沙粒沉积规律[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 20-24.
Ge Lingxing, Wei Zhengying, Cao Meng, et al. Deposition law of sand in labyrinth-channel of emitter[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 20-24. (in Chinese)
- 8 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 CSAE, 2013, 29(13): 90-97. (in Chinese)
- 9 Li Y, Yang P, Xu T, 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.
- 10 Li Y, Zhou B, Liu Y, et al. Preliminary surface topographical characteristics of biofilms attached on drip irrigation emitters using reclaimed water[J]. Irrigation Science, 2013, 31(4): 557-574.
- 11 张俊, 洪军, 赵万华, 等. 基于正交试验的迷宫流道灌水器参数化设计研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(1): 31-35.
Zhang Jun, Hong Jun, Zhao Wanhua, et al. Parameterized design of labyrinth-channel emitters based on orthogonal experiments [J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2006, 40(1): 31-35. (in Chinese)
- 12 Zhang Jun, Zhao Wanhua, Tang Yipping. Structural optimization of labyrinth-channel emitters based on hydraulic and anti-clogging performance[J]. Irrigation Science, 2010, 52(4): 1129-1138.
- 13 芦刚, 史玉升, 魏青松, 等. 基于两相流模拟的高抗堵滴灌灌水器开发方法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(7): 118-121.
Lu Gang, Shi Yusheng, Wei Qingsong, et al. A development method for high anti-clogged drip emitters based on two-phase flow simulations[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2007, 35(7): 118-121. (in Chinese)
- 14 王亚林, 朱德兰, 张林, 等. 滴灌毛管泥沙分布与灌水器堵塞试验研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 177-182.
Wang Yalin, Zhu Delan, Zhang Lin, et al. Experiment on sediment distribution in lateral pipes and clogging of emitter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 177-182. (in Chinese)
- 15 喻黎明, 梅其勇. 迷宫流道灌水器抗堵塞设计与 PIV 试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 155-160.
Yu Liming, Mei Qiyong. Anti-clogging design and experimental investigation of PIV for labyrinth-channel emitters of dDrip irrigation emitters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 155-160. (in Chinese)
- 16 芦刚. 工作水压对滴灌灌水器水力性能影响规律的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
Lu Gang. Research on influence laws of the operating water pressure on hydraulic properties of drip emitters[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- 17 王聪. 波动水压对灌水器水力性能影响的实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
Wang Cong. Research on experiment of the effect of dynamic pressure on the hydraulic properties of drip emitters[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)