

高频脉冲条件下灌水器水沙两相流数值模拟

王新坤<sup>1</sup> 靳彬彬<sup>1</sup> 樊二东<sup>1</sup> 张经坤<sup>2</sup> 王琪雯<sup>3</sup> 丁师伟<sup>4</sup>

(1. 江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心, 镇江 212013; 2. 内蒙古绰勒水利水电有限责任公司, 呼和浩特 010090; 3. 内蒙古自治区呼和浩特市水务局, 呼和浩特 010016; 4. 山东泰山抽水蓄能电站有限责任公司, 泰安 271000)

**摘要:** 为提高灌水器的抗堵塞性能,在与射流三通产生波形相同参数(周期、振幅)的高频脉冲波(正弦波、三角波、梯形波、矩形波)的条件下,以迷宫流道灌水器为研究对象,应用CFD两相流含沙量数值分析,采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型及多相流Eulerian模型,模拟高频脉冲条件下流量与压力水头关系、含沙量的瞬时分布,分析高频脉冲条件对颗粒物沉积区含沙量变化的影响。结果表明,高频脉冲波对灌水器平均流量和抗堵塞性能影响较大,高频脉冲波的波动性和连续性对提高灌水器抗堵塞能力起主要作用;抗堵塞能力由大到小的高频脉冲波形顺序为正弦波、三角波、梯形波、矩形波;入流含沙量增加会导致旋涡区泥沙的沉积,高频脉冲波可以增强旋涡区的冲刷以提高抗堵塞性能;灌水器内各处含沙量均随颗粒粒径的增大而升高,不同粒径下含沙量分布和变化略有不同。射流三通产生的脉冲波有利于提高灌水器的抗堵塞能力。

**关键词:** 灌水器; 射流三通; 高频脉冲波; 含沙量; 颗粒粒径; 抗堵塞

**中图分类号:** S275.6      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2020)02-0277-07      **OSID:** 

Numerical Simulation of Water – Sediment Two-phase Flow  
in Emitter under High Frequency Pulse

WANG Xinkun<sup>1</sup> JIN Binbin<sup>1</sup> FAN Erdong<sup>1</sup> ZHANG Jingkun<sup>2</sup> WANG Qiwen<sup>3</sup> DING Shiwei<sup>4</sup>

(1. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China  
2. Inner Mongolia Chuole Water Conservancy and Hydropower Co., Ltd., Huhhot 010090, China  
3. Water Affairs Bureau of Huhhot City, Inner Mongolia Autonomous Region, Huhhot 010016, China  
4. Shandong Taishan Pumped Storage Power Station Co., Ltd., Taian 271000, China)

**Abstract:** Emitter clogging is one of the obstacles that limits the application and popularization of drip irrigation technology. The computational fluid dynamic (CFD) method was regarded as the most effective method to research the water and sand movement in the labyrinth path of the drip irrigation emitter. Based on the high-frequency pulse with the same parameters (period and amplitude), and the jet tee was used as the boundary condition, and CFD software was used to simulate two-phase flow sand concentration in labyrinth channel irrigator in order to improve emitter anti-clogging performance. The  $k-\varepsilon$  turbulence model and Eulerian multiphase flow model were used to simulate the relationship between flow rate and pressure, the instantaneous distribution of particulate matter concentration under high frequency pulse condition, and the influence of high frequency pulse condition on the variation of particulate matter concentration in sediment area. The results showed that the high frequency pulse wave had a great influence on the average flow rate and anti-clogging performance of the emitter, and the fluctuation and continuity of the high frequency pulse wave played a major role in the anti-clogging ability of the emitter; the order of the high frequency pulse wave of anti-clogging ability in descending order was sinusoidal wave, triangular wave, trapezoidal wave and rectangular wave; increasing inflow concentration would lead to sediment deposition in the vortices, and high frequency pulse wave can increase the erosion of the vortices to improve the blockage resistance. The concentration of each part of the emitter was increased with the increase of particle size, and the concentration distribution and variation were slightly different under different particle sizes. The research result can provide theoretical reference for the

application and popularization of the drip irrigation system with high frequency pulsed flow.

**Key words:** emitter; jet tee; high frequency pulse; particulate concentration; particle size; anti-clogging

0 引言

在滴灌系统中,滴灌灌水器是最重要的部件之一,被称为滴灌系统的“心脏”。灌水器内流道结构复杂、尺寸微小,即使在水质良好的滴灌系统中,仍有微小的固体颗粒物进入灌水器造成灌水器堵塞<sup>[1-4]</sup>,因而灌水器堵塞问题成为众多专家的研究热点<sup>[5-18]</sup>。但这些研究都集中在恒定水压对灌水器抗堵塞的影响,对脉冲水压主要研究了周期为36、48、60 s的低频水压,鲜有对高频脉冲条件下流道内颗粒物分布规律进行数值模拟。脉冲滴灌具有水流紊动强烈、抗堵塞强、灌水器均匀度高的优点,是提高滴灌带抗堵塞能力及灌水器均匀性的有效途径<sup>[19-20]</sup>。

本文将连接毛管与支管的射流三通作为高频脉冲发生器,压力水流进入射流喷嘴形成射流,在反控制通道内产生负压,切换射流附壁方向,驱使水流在两条毛管或支管内间歇性流动,实现持续强烈的高频脉冲流,在滴灌灌水器内形成强烈的紊动与冲击水流,有益于冲刷灌水器流道、降低流态指数、增加抗堵塞能力与滴水均匀性<sup>[21-25]</sup>。通过压力传感器测出射流三通脉冲波的参数(振幅、周期),以射流三通产生的高频脉冲波参数作为基础,通过 Fluent 模拟4种典型脉冲波(正弦波、三角波、梯形波、矩形波)对迷宫流道灌水器内流场分布和悬浮颗粒物随水流运动的规律,探讨高频脉冲水压对灌水器内颗粒物分布的影响。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验在江苏大学节水灌溉技术研究中心微灌实验室进行,实验室喷灌大厅温度为24~29℃,相对湿度为50%~60%,试验装置包括供水系统和测试系统,如图1所示。试验主要通过压力传感器(零点偏差:0.5%,稳定性:0.25级)测量连接滴灌带的射流三通产生的脉冲波,分别测试5、6、8、10、12 m恒压下水流对射流三通产生的高频脉冲波形,通过观测发现脉冲频率和振幅如表1所示,以产生相似的波形来对灌水器抗堵塞性能进行研究,应用 CFD 模拟其对灌水器水力性能和抗堵塞性能的影响。

射流三通结构如图2所示。图中 $W$ 为喷嘴宽度, $S$ 为位差, $L$ 为劈距, $\theta$ 为侧壁夹角。

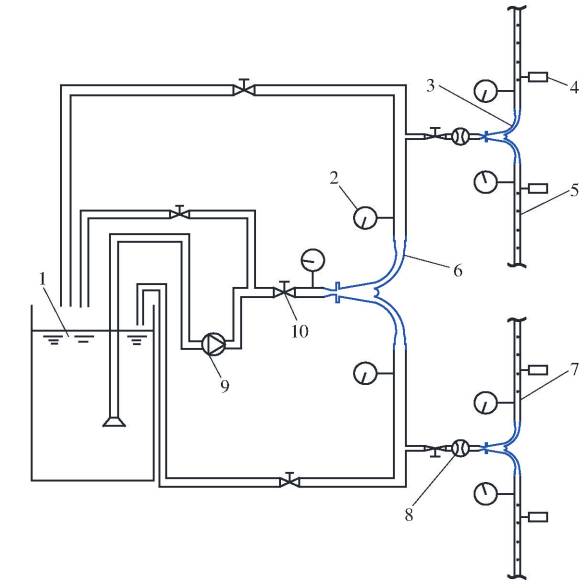


图1 滴灌试验系统示意图

Fig.1 Schematic of drip irrigation experimental system  
1.水箱 2.压力表 3.毛管射流三通 4.压力传感器 5、7.毛管 6.支管射流三通 8.流量计 9.水泵 10.闸门

表1 射流三通进口压力与振幅及频率

| 参数                          | 三通进口压力/kPa |       |       |       |        |
|-----------------------------|------------|-------|-------|-------|--------|
|                             | 50         | 60    | 80    | 100   | 120    |
| 滴灌带进口压力/kPa                 | 17~49      | 25~59 | 38~74 | 49~96 | 58~116 |
| 脉冲振幅/kPa                    | 32         | 34    | 36    | 47    | 58     |
| 振动频率/(次·min <sup>-1</sup> ) | 220        | 222   | 224   | 235   | 240    |

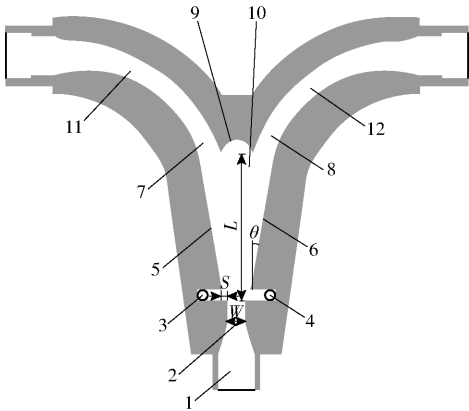


图2 射流脉冲三通结构二维图

Fig.2 Two-dimensional diagram of structure design of jet tee  
1.进水段 2.喷嘴 3.左控制道 4.右控制道 5.左侧壁面 6.右侧壁面 7.左输出道 8.右输出道 9.分流劈 10.射流内空间 11.左出口流道 12.右出口流道

1.2 数学模型

采用紊流 RNG  $k-\varepsilon$  模型进行连续相流场的模

拟,其控制方程见文献[26],采用 Fluent 软件的分离隐式稳态求解器求解各控制方程,速度和压力的耦合采用 SIMPLE 算法处理,各参数的离散均采用二阶精度的迎风格式。灌水器在实际应用中,过滤后沙粒在水中的体积分数远远小于 10%,固体颗粒在流道的运动属于稀相流,选取 Eulerian 多相流模型模拟滴头内颗粒物的浓度分布。Eulerian 模型是多相流模型中比较严格、复杂的模型,将多相流视为互相渗透的连续介质进行模拟,分别求解每一组的动量方程,通过动量方程交换项和连续相相互作用在分散相上的拽力来模拟相间的相互作用,尽可能真实地模拟实际灌溉水中堵塞物质的颗粒质量浓度分布情况。

1.3 几何模型和边界条件设定

选择齿型结构的迷宫流道灌水器为主要研究对象,利用 UG 建立灌水器内流道水体模型,取灌水器流道转角  $\beta$  为  $75^\circ$ ,齿高  $h$  为 1.0 mm,流道宽  $w$  为 1.0 mm,流道深度  $d$  为 0.8 mm,齿尖距  $b$  为 2.07 mm,共计 9 个流道单元,如图 3 所示。

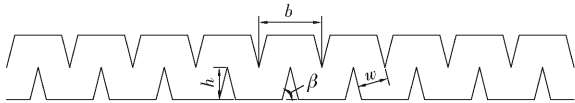


图 3 灌水器结构示意图  
Fig. 3 Drawing of irrigator structure

计算模型为整个灌水器,由于六面体网格单元排列整齐,易于收敛,因此在计算区内采用六面体网格单元进行 CFD 分析。对于控制方程的离散方法主要包括有限差分法、有限元法和有限体积法等,本文采用目前计算流体力学中采用的有限体积法。利用 ANSYS 划分网格,网格单元长度为 0.05 mm,共约 60 万个单元。根据滴灌系统的实际运行情况,压力为计算进口压力,出口压力为 0,其他壁面条件为默认值,考虑重力作用,颗粒设为沙粒,密度  $2\,500\text{ kg/m}^3$ 。入流的颗粒与水流流速相同,计算前流道内颗粒物流为首次使用。根据目前滴灌系统过滤设备为 100 ~ 150 目、孔径为 0.105 0 ~ 0.152 mm,取颗粒直径为 0.02、0.04、0.06、0.08 mm 共 4 个水平,含沙量为 0.001、0.004、0.007、0.01 g/mL 共 4 个水平,收敛精度为  $10^{-4}$ 。

2 数值模拟结果与分析

2.1 脉冲条件下滴头内流场分布与水力性能

在入口压力水头为 1、2、3、4、5、6、8、10、11、12 m 情况下,模拟灌水器实际流量,并把模拟结果进行回归,获得模型的流量系数与流态指数。拟合公式为

$$q = 0.944\,5H^{0.4859} \quad (R^2 = 0.998, P < 0.05)$$

式中  $q$ ——流量  $H$ ——压力水头

流量作为灌水器重要的水力要素,可以直观地反映整个滴灌系统的供水能力。图 4 验证了压力水头控制范围之内,供水压力水头对灌水器流量影响显著,表明压力水头是流量的主要驱动力。由灌水器压力流量公式可知,流道内流量与工作水压呈幂函数关系。随着工作压力水头增大,流道内流量的增加涨幅逐渐减小,而高频脉冲水压下流道内工作压力在  $H_{\min}$  至  $H_{\max}$  之间不断变化。基础水压相同时,完整的波动周期内高频脉冲水压下流道内平均流量小于恒定水压下流道内平均流量,高频脉冲水压与恒定水压下平均流量之间相对偏差均在 0 ~ 5% 之间,偏差较小。这说明相比于恒定水压,高频脉冲水压下流道内流量未出现明显下降,高频脉冲水压对滴灌系统的供水能力影响较小。

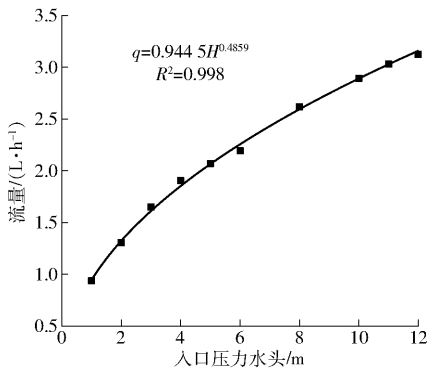


图 4 灌水器流量与压力水头的拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of flow and pressure of irrigator

图 5 为基础水压 5.6 m 时两个周期灌水器内的流量与压力分布,流量变化波形趋势与压力变化波形趋势相同,这种波动的脉冲水压增强了灌水器内部悬浮颗粒物的冲刷,降低了灌水器堵塞的概率。

图 6 为正弦波分别在  $T/4$ 、 $3T/2$ 、 $2T$  ( $T$  为周期) 时的速度分布图,从图中可看出相应的 A、B、C 3 点的速度变化,A 点为迎水区,B 点为齿尖,C 点为背水区,在周期为  $2T$  时灌水器前几个单元格内迎水区速度接近为零。 $T/4$  时瞬时压力水头为 5.6 m,最大速度为 4.07 m/s, $3T/2$  时瞬时压力水头为 7.4 m,最大速度为 4.74 m/s, $2T$  时瞬时压力水头为 3.8 m,最大速度为 3.20 m/s,脉冲波对灌水器内流场会出现连续波动效应,实现水流对固体悬浮物的扰动和冲击。在进口、缓水区及中间拐弯较平顺的部位,速度在流道断面上分布较均匀,在齿尖速度梯度非常大,速度随时间呈现周期性变化,流体的高速区集中在中部,流体在靠近流道内侧拐角处速度较高;在流道外侧尖角后部顶角区域速度相对较低,存在较大的旋涡区,旋涡区水流速度较低,局部速度为零,随着时间的变化,流道内工作压力水头不断增大,导致灌

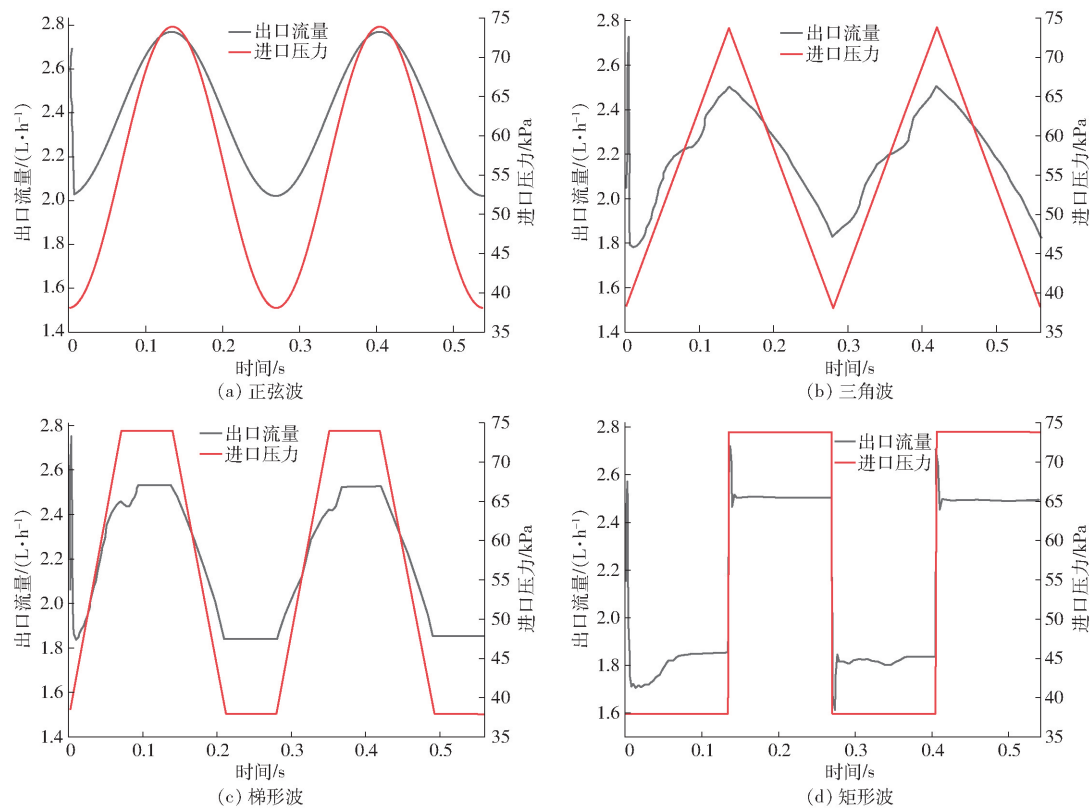


图5 不同波形入口压力下两个周期灌水器的流量与压力拟合曲线

Fig.5 Fitting curves of flow rate and pressure of two period emitters under different wave inlet pressures

水器齿尖后部顶尖旋涡区受到冲击,使得旋涡区速度为零区减少,由此可以看出,随着时间的变化,流道内工作水压不断变化,流道内水流紊动剧烈,形成水流波动效应时水流对旋涡区和速度为零区的间歇性冲击,对颗粒物产生强烈冲击,使得颗粒物能随水流不断运动,不易在旋涡区和速度为零区发生沉积现象,极大地增大了水流对颗粒物的运输能力,从而有效增强灌水器的抗堵塞能力。

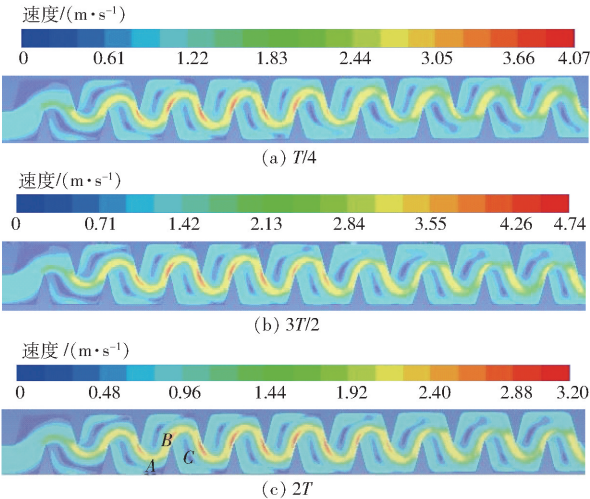


图6 正弦波形进口压力下两个周期灌水器内速度分布图

Fig.6 Velocity distribution maps in two period emitters with sinusoidal inlet pressure

2.2 不同脉冲波形对最大含沙量的影响

可以根据流量、流态指数的需要来确定工作压力水头,一般为5~12 m,本研究取射流三通进口压力水头8 m、工作压力水头3.8~7.4 m为研究对象,灌水器入口水流含沙量为0.01 g/mL、密度为2 500 kg/m<sup>3</sup>,固体颗粒直径为80 μm,采用不同的波形对灌水器进行模拟,其最大含沙量和不同位置的含沙量如图7(图中含沙量单位为g/mL,下同)所示,从图中可以看出,最大含沙量一般在流道的前几个单元,含沙量由大到小依次为正弦波、三角波、梯形波、矩形波,原因可能是正弦波连续性强于其他3种波,动态水压模式下灌水器流道内水流流速始终保持大幅度地连续上下波动,水流紊动加剧,并产生强烈的水流波动效应,对灌水器内泥沙沉积区不断发生冲击,使得水流在波动效应作用下能迅速带走泥沙,并最终通过整个流道;三角波形水压下流道内工作水压的瞬时波动幅度低于正弦波动态水压,其水流紊动强度及产生的水流波动也较小,水流对泥沙的冲击频率次数也较少,导致在灌水器流道内沉积的含沙量比正弦波工作水压下大;梯形波及矩形波动态水压模式下流道内水流流速波动量较大,但在波动期间较长时间流道内水流流速稳定在一定值,使得水流波动效应较弱,且水流对泥沙的冲击作用相对正弦波和三角波较弱,使得泥沙在流道内停

留时间较长,增大灌水器内颗粒物沉积的可能,也证明速度下降会降低沙粒的动能,会促使沙粒沉淀,无法通过。

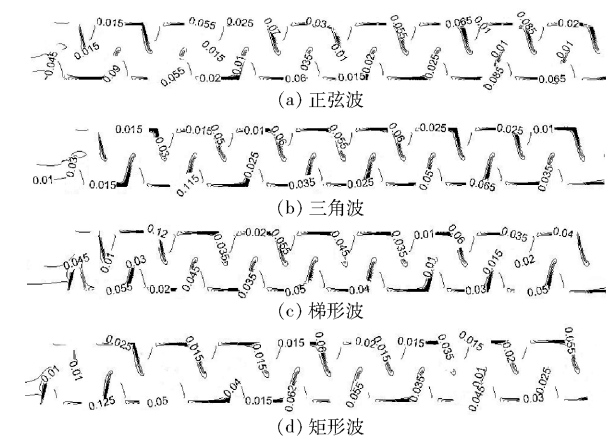


图7 不同脉冲波下灌水器内的含沙量瞬时分布图

Fig. 7 Instantaneous distribution maps of particle mass concentration in emitters under different pulse waves

### 2.3 颗粒粒径对流动内含沙量分布的影响

由图7对比分析得到正弦波对灌水器抗堵塞能力较强,所以模拟工作压力水头为3.8~7.4 m的正弦波动水压、入口水流含沙量为0.01 g/mL、密度为2 500 kg/m<sup>3</sup>、固体颗粒直径为20、50、80、110 μm,模拟时间为2*T*。脉冲波形一定时,则水流流速恒定,其挟沙能力有限,颗粒数量增加,将对其速度产生影响,同时,颗粒之间的碰撞也会增加,使得水流更加紊乱。如图8所示,不同颗粒粒径下灌水器流道内不同位置处含沙量变化略有不同。当固体颗粒直径较小(20 μm)时,其含沙量接近入流含沙量,当颗粒粒径大于50 μm时,其含沙量迅速增加,齿尖含沙量接近入流含沙量,齿尖流道单元背水区的含沙量均低于入流含沙量,且随颗粒粒径的增大含沙量逐步降低;迎水区的含沙量高于入流含沙量,且随粒径的增大含沙量逐步升高,且变化幅度大于背水区;流道内含沙量的分布规律与颗粒粒径有关;由于悬浮颗粒的密度大于液态水,水流挟沙颗粒能力受流速限制,在惯性力的作用下,灌水器内不同部位含沙量不同于入流含沙量,含沙量分布图与速度分布图相对应,含沙量升高的部位速度低,水流平缓或者存在旋涡,速度高的区域含沙量接近入口含沙量或低于入口含沙量,说明流道内含沙量分布与速度密切相关。

根据泥沙动力学原理,液固两相流运动中固体颗粒运动与流体旋涡存在明确的相关结构,吴文权等<sup>[27]</sup>指出,对于小Stokes数(0.15~0.59)与中等Stokes数(1.33~2.36)的泥沙颗粒很容易被流体旋涡所带起,并被卷入流体旋涡结构内,被卷入流体旋涡结构内的泥沙颗粒在运动过程中始终分布于旋涡

区,即在旋涡区聚集。对于进入涡旋区和低速区内的颗粒,由于其所处区域水流速度极低,颗粒进入后很难被冲出,时间长后就会因相互间的靠拢、碰撞而形成混凝,致使微小颗粒合并长大、沉降而堵塞流道,因而,通过脉冲水压的波动性能减少沙粒的沉积量,提高灌水器的抗堵塞性能。

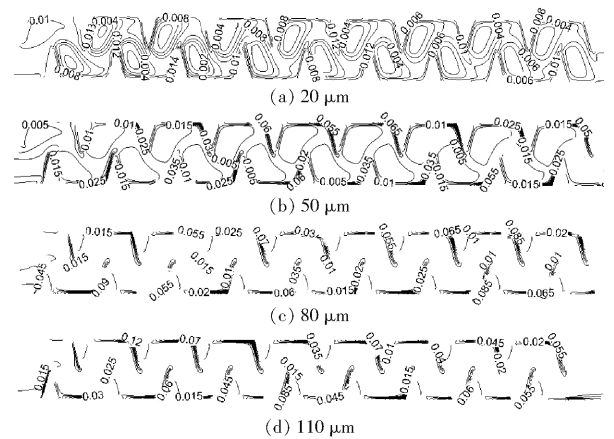


图8 不同颗粒粒径的含沙量瞬时分布图

Fig. 8 Instantaneous distribution maps of particle mass concentration with different particle sizes

### 2.4 灌水器内含沙量变化

为分析颗粒物在迷宫流道内的分布,设置进口含沙量分别0.001、0.004、0.007、0.01 g/mL,颗粒粒径为80 μm,取迷宫流道内特定位置处(*A*点)的含沙量进行比较。*A*点发生沉积,而对应灌水器流道流场分布如图6所示,类似位置正是流道内涡旋区及低速区,进一步证明脉冲水压与此位置颗粒物沉积量的关系。不同波形条件下,对*A*点进行两个周期(0.54 s)的含沙量监测,由图9可知,在恒压水压为5.6 m,*A*点含沙量在初期稍下降之后急剧增大,涨幅大于进口含沙量,*A*点达到最大值之后开始有减小的趋势,在后期又开始缓慢增加,说明恒压下*A*点含沙量随着时间的增加在缓慢增加,随着进口含沙量的增加,*A*点含沙量累积量也在逐渐增加,说明进口含沙量必然影响其灌水器内含沙量分布。含沙量增加,挟沙水流容重增加,将对其速度产生影响,同时颗粒物之间的碰撞也会增加,将会对其波动水流产生影响;同时颗粒物之间的碰撞也会增加,使其水流更加紊乱,造成*A*处含沙量的累积量增加。在脉冲波条件下,*A*点含沙量变化曲线如图9所示,*A*点含沙量在初期稍下降之后急剧增大,但是涨幅均小于恒压条件下含沙量,利用积分公式将该曲线对时间进行积分,再除以积分时间,得到灌水器在脉冲条件下两个周期内的平均含沙量均小于恒压条件下含沙量,说明利用灌水器内流场的连续波动效应,实现水流对固体悬浮物的扰动和冲刷,从而增强低压

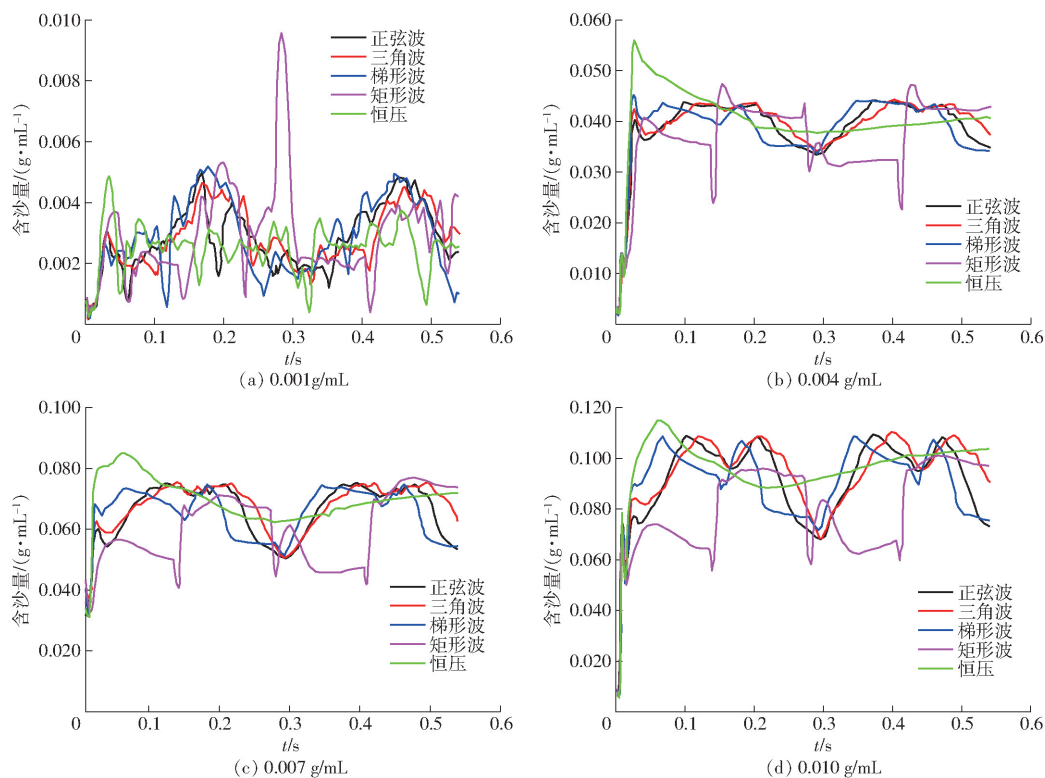


图9 不同脉冲条件下含沙量的变化曲线

Fig.9 Changing curves of particle mass concentration under different pulse conditions

运行时灌水器的抗堵塞能力是有效的,表明射流三通波形对灌水器抗堵塞是有效的。后期含沙量相对于恒压变化量比较大,并且矩形波条件下含沙量变化幅度大,而其他3种波变化趋势相对矩形波较小,原因是矩形波水压突变快导致A点含沙量变化趋势与进口水压相似,整体呈现凸凹形。可见,脉冲波对灌水器的抗堵塞作用是有效的。

### 3 结论

(1) 4种高频脉冲水压下压力与流量存在一定的规律,流量的变化趋势与压力变化相同,压力的变化导致灌水器流道内水流具有一定的波动和脉冲效果。

(2) 同含沙量、同粒径、不同高频脉冲波条件下,正弦波模式下灌水器流道内颗粒物沉积量最少,

说明正弦波模式下能够产生强烈的水流波动效应,对灌水器内泥沙沉积区不断发生冲击,对颗粒物的输送能力最强,导致颗粒物在流道内停留时间较短,在水流波动效应作用下能迅速带走泥沙。

(3) 正弦波条件下不同颗粒直径对灌水器颗粒物沉积略有不同,粒径为20 μm时,流道内含沙量与入流含沙量相近,粒径大于50 μm时,随着颗粒物直径的增大,灌水器内颗粒物累积量也在逐渐增大。

(4) 不同高频脉冲条件下对A点进行两个周期的监测,波形运行一个周期时,含沙量变化幅度较大,正弦波、三角波、梯形波条件下灌水器含沙量均呈周期性变化,而矩形波下含沙量虽然有周期性波动变化,但含沙量整体呈现凸凹形,突变次数最少,这说明矩形波模式下流道内波动性和水流紊动性较弱。

### 参考文献

- [1] WEI Q, SHI Y, DONG W, et al. Advanced methods to develop drip emitters with new channel types[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2006, 22(2): 243–249.
- [2] TAYLOR H D, BASTORS R K X, PERSON H W, et al. Drip irrigation with waste stabilisation pond effluents: solving the problem of emitter fouling[J]. Water Science & Technology, 1995, 31(12): 417–424.
- [3] 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 Wene, WANG Fujun, YAN Haijun. Study on CFD method for flow simulation in labyrinth emitter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(10): 70–73. (in Chinese)
- [4] 李云开, 杨培岭, 任树梅, 等. 分形流道设计及几何参数对滴头水力性能的影响[J]. 机械工程学报, 2007, 43(7): 109–114.  
LI Yunkai, YANG Peiling, REN Shumei, et al. Effects of fractal flow path designing and its parameters on emitter hydraulic performance[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(7): 109–114. (in Chinese)
- [5] 王文娥, 王福军. 片状迷宫滴头中悬浮颗粒浓度分布规律数值分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 1–6.  
WANG Wene, WANG Fujun. Numerical analysis of the distribution rule for suspended granule concentration in labyrinth integra

- [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3): 1-6. (in Chinese)
- [6] 魏正英,唐一平,温聚英,等. 灌水器微细流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)
- [7] 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 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)
- [8] 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, 73.
- 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, 73. (in Chinese)
- [9] 喻黎明,梅其勇. 迷宫流道灌水器抗堵塞设计与 PIV 试验[J/OL]. 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 drip irrigation emitters[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 155-160. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140926&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140926&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.026. (in Chinese)
- [10] 喻黎明,徐霞,杨启良,等. 滴灌灌水器迷宫流道结构对泥沙运动的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 255-261.
- YU Liming, XU Xia, YANG Qiliang, et al. Influence of geometrical parameters of labyrinth passage of drip irrigation emitter on sand movement[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 255-261. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170234&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170234&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.034. (in Chinese)
- [11] 吴泽广,张子卓,张珂萌,等. 泥沙粒径与含沙量对迷宫流道滴头堵塞的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 99-108.
- WU Zeguang, ZHANG Zizhuo, ZHANG Kemeng, et al. Influence of particle size and concentration of sediment on clogging of labyrinth channels emitters[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(7): 99-108. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] ASSOULINE S, MOLLER M, COHEN S, et al. Soil-plant system response to pulsed drip irrigation and salinity: bell pepper case study[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(5): 1556-1568.
- [14] ELMALOGLOU S, DIAMANTOPOULOS E. Wetting front advance patterns and water losses by deep percolation under the root zone as influenced by pulsed drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2007, 90(1): 160-163.
- [15] 王聪,芦刚,刘洁,等. 波动水压滴灌系统设计与实验分析[J]. 中国农村水利水电, 2012(6): 69-72, 77.
- WANG Cong, LU Gang, LIU Jie, et al. Design of dynamic pressure drip irrigation system and experimental analysis[J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(6): 69-72, 77. (in Chinese)
- [16] 曹伟,刘洁,朱月亭,等. 振动水压下滴灌灌水器水力性能研究[J]. 节水灌溉, 2015(9): 1-6.
- [17] 郑超,吴普特,张林,等. 不同动态水压模式下迷宫流道内颗粒物运动特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 294-301.
- ZHENG Chao, WU Pute, ZHANG Lin, et al. Particles movement characteristics in labyrinth channel under different dynamic water pressure modes[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 294-301. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170337&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170337&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.037. (in Chinese)
- [18] 郑超,吴普特,张林,等. 动态水压下迷宫流道水流运动特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 167-172.
- ZHENG Chao, WU Pute, ZHANG Lin, et al. Flow characteristics in labyrinth channel under dynamic water pressure[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 167-172. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150924&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150924&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.024. (in Chinese)
- [19] 高胜国,张祖新,齐学斌,等. 新型抗堵塞地下灌溉系统技术方案[J]. 节水灌溉, 2001(4): 21-22.
- [20] GEORGIEV D. New low pressure system for pulse drip irrigation[J]. International Water & Irrigation Review, 1997, 17(1): 19.
- [21] 王新坤. 一种射流三通: CN103203293A [P]. 2013-07-17.
- [22] 许鹏,王新坤,高世凯,等. 射流振荡三通与滴灌毛管脉冲初步试验研究[J]. 节水灌溉, 2014(3): 1-4, 8.
- XU Peng, WANG Xinkun, GAO Shikai, et al. Preliminary test of jet oscillation tee and pulse flow in drip irrigation lateral pipe[J]. Water Saving Irrigation, 2014(3): 1-4, 8. (in Chinese)
- [23] 杨玉超. 射流脉冲三通振荡特性影响因素研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- YANG Yuchao. Study on influence factors of oscillation performance of jet-pulse tee[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)
- [24] 杨玉超,王新坤,朱燕翔,等. 基于射流脉冲三通的滴灌带试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(9): 111-114.
- YANG Yuchao, WANG Xinkun, ZHU Yanxiang, et al. An experimental study of the jet pulse tee based on drip irrigation pipes[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(9): 111-114. (in Chinese)
- [25] 王新坤,肖思强,樊二东,等. 滴灌毛管射流脉冲三通及水力特性试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 116-121.
- WANG Xinkun, XIAO Siqiang, FAN Erdong, et al. Hydraulic performance experiment of lateral pipe jet-pulse tee[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(12): 116-121. (in Chinese)
- [26] WARSZ Z U A, TIARN W N. Numerical grid generation through second order differential-geometric models [J]. Numerical Mathematics & Applications, 1986, 85: 199-203.
- [27] 吴文权,黄远东. 液固两相流中流体旋涡对固体粒子运动影响的数值研究[J]. 工程热物理学报, 1999, 20(3): 365-369.
- WU Wenquan, HUANG Yuandong. Numerical simulation for the influence of fluid vortex on particle motion in liquid-particle two-phase flow[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1999, 20(3): 365-369. (in Chinese)