

基于 CFD – DEM 耦合的迷宫流道水沙运动数值模拟

喻黎明^{1,2} 谭弘^{1,2} 邹小艳^{1,2} 常留红^{1,2} 陈立志³ 范文波⁴

(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;
3. 中南大学机电工程学院, 长沙 410083; 4. 石河子大学水利建筑工程学院, 石河子 832003)

摘要: 基于颗粒动力学理论的欧拉-拉格朗日固液多相湍流模型, 针对灌水器迷宫流道内水沙运动进行了 CFD – DEM 耦合数值模拟研究, 分析了迷宫流道内流体流场、单个沙粒的轨迹线、速度和沙粒群的运动规律、分布特性等。结果表明: 沙粒在流道深度中心面附近分布较多, 靠近边壁较少, 随着流道深度减小, 流道内沙粒的体积浓度成倍上升。流道深度越小, 流道深度(Z 方向上) 水流运动速度越小, 随着沙粒 Z 方向上运动速度增大, 沙粒群穿过中心面次数越多, 撞击边壁的次数越多, 流道深度 0.6 mm 的撞击边壁次数是 1.4 mm 的 7.01 倍, 边壁撞击次数的增加使沙粒高频率改变原有运动方向, 增加了沙粒之间, 沙粒与壁面之间的碰撞, 该运动情况降低了沙粒运动速度, 减少了动能, 不利于沙粒通过迷宫流道, 增加了堵塞几率。该方法可分析大量沙粒个体和群体运动, 以及群体分布情况, 从微观角度了解迷宫流道内沙粒运动, 是迷宫流道结构设计的有效手段之一。

关键词: 滴灌灌水器; 迷宫流道; 流道深度; 耦合; 数值模拟

中图分类号: S275.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)08-0065-07

Numerical Simulation of Water and Sediment Flow in Labyrinth Channel
Based on Coupled CFD – DEM

Yu Liming^{1,2} Tan Hong^{1,2} Zou Xiaoyan^{1,2} Chang Liuhong^{1,2} Chen Lizhi³ Fan Wenbo⁴

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China
2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention,
Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China
3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China
4. College of Water & Architectural Engineering, Shihezi Univesity, Shihezi 832003, China)

Abstract: The depth of flow path of drip irrigation emitter is important geometrical parameter to anti-clogging performance. An Eulerian – Lagrange liquid-solid multiphase turbulence model combined with the kinetic theory of granular flow was used to carry out simulation based on coupled CFD – DEM water-sand two-phase flow in drip irrigation emitter with labyrinth channel. The trajectories and speed of single sediment, speed of sediment group, moving pattern and distribution of sediment group were analyzed. Simulation result indicated that the quantity of sand near the central plane of depth was more than that near the wall. The volume concentration of sediment in channel was increased several times with the decrease of depth. The depth was small; the speed of waterflow in depth direction was descended, but the speed of sediment in depth direction was risen. The average number of hit of each sediment was 14.31 when the depth was 0.6 mm, but the number was 2.04 when the depth was 1.4 mm. The increase of impact frequency to wall changed original movement direction of sediment, augmented the number of times of collision between sands and between sand on the wall, which decreased velocity and

收稿日期: 2016-01-19 修回日期: 2016-02-26
基金项目: 国家自然科学基金项目(51379024)、长沙理工大学研究生科研创新基金项目(CX2015SS05)和石河子大学高层次人才科研启动资金专项(RCZX201434)
作者简介: 喻黎明(1976—),男,副教授,主要从事节水灌溉理论与设备研究,E-mail: liming16900@sina.com

kinetic energy, and it was difficult for sand to go through labyrinth channel, which caused clogging easily. This method was applied to analyze movement and distribution of sand individuality and group, learn the movement regular from micro-view perspective, and it had become an efficient technique in structure design of labyrinth channel.

Key words: drip irrigation emitter; labyrinth channel; flow depth; coupling; numerical simulation

引言

滴灌是干旱地区最有效的节水灌溉方式之一,是缓解水资源紧缺的有效途径。滴头是滴灌系统最关键的部件,滴头的结构及其水力性能的优劣对滴灌系统灌水的均匀性、抗堵塞能力、系统寿命影响很大^[1-2]。迷宫流道滴头是目前使用最为广泛的一种滴头^[3],迷宫流道滴头的特征是出水量小,滴头流道深度一般在 0.6 ~ 1.4 mm 之间可保证均匀出流^[4-5],但由于流道结构复杂,且尺寸微小致使水中泥沙颗粒易在流道内沉积,最终导致堵塞,因而滴头堵塞问题成为众多专家的研究热点。GLAAD 等^[6]指出:滴灌滴头的水力性能由流道的形式、尺寸等因素共同决定,NAKAYAMA 等^[7]、TAYLOR 等^[8]、ROBERT 等^[9]认为滴头的堵塞是流道几何参数、形状参数等多个因素综合作用下产生的结果,且认为滴头的结构参数设计最重要。王文娥等^[10-12]采用 CFD 探究了流道结构参数对滴头内悬浮颗粒分布的影响,结果表明流道深度对抗堵塞能力影响显著。LI 等^[13]采用 CFD 分析了流道结构参数对灌水器流量的影响,结果表明流道深度对流态指数影响最大。李云开等^[14]在总结前人对滴头内部沙粒输移特性测试的基础上,开发了一种基于流道深度的准三维全场测试方法。孙昊苏^[15]对滴头流道单元段流道深度方向截面及一个垂直水流方向截面的流速分布进行了分析,探索了滴头内全流场三维测试。这些研究指出了流道深度对滴头抗堵塞性能有显著影

响,但局限于单相流场及将沙粒当成固相流体的研究,而对影响滴灌滴头堵塞起决定性作用的沙粒个体和群体的运动、分布规律却没有深入研究,且均为二维空间上的运动,忽略了沙粒是在三维上的运动和分布,而沙粒在三维上的运动和分布对滴灌滴头的堵塞有显著影响。

本文应用 CFD-DEM 耦合计算方法分析沙粒在流道深度上的运动和分布规律,揭示流道深度对滴头内沙粒运动与分布的影响,为流道结构优化提供理论依据。

1 数值模拟方法

1.1 物理模型及网格划分

表 1 为本文采用的灌水器几何参数,图 1 为灌水器结构尺寸示意图。按照 CFD 计算过程,在建立物理模型的基础上进行网格划分,由于流道边界变化较大,因此采用混合多面体进行网格划分,并进行局部加密,网格单元长度为 0.10 mm。本文主要研究流道深度变化对沙粒运动的影响,因此只改变流道深度 D ,其他几何参数分别为流道转角 68° 、齿高 1.30 mm、流道宽 1.00 mm、齿间距 2.41 mm、流道总长度 30.28 mm。

表 1 灌水器几何参数
Tab.1 Geometrical parameters of emitter

流道深度/mm	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
网格数量/个	28 662	38 216	47 770	57 324	66 878

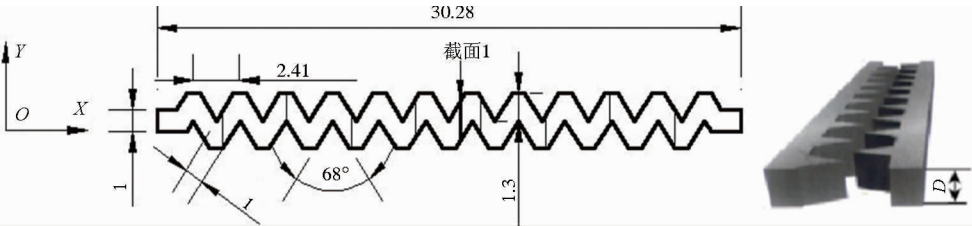


图 1 齿形流道结构及参数

Fig.1 Form and structure parameters of dental channel

1.2 数学模型及模拟方法

流道内水流可视为粘性不可压缩流体,常温下定常流动,考虑重力作用,忽略表面张力影响。目前,滴头的雷诺数 Re 大致在 78 ~ 1 284 之间,NISHIMURA 等^[16-17]发现层、紊流转变发生在雷诺

数 Re 为 200 ~ 350,远小于常规平直流道的临界雷诺数。其他类似的试验结果也被多次发现^[18-19]。

因此,连续相的模拟采用标准 $k-\epsilon$ 紊流模型非稳态计算^[20],其计算公式参照文献[21]。

其中,连续性方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \tag{1}$$

动量方程为

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \tag{2}$$

式中 ρ ——流体密度, kg/m³
 u_i 、 u_j ——流体速度, m/s
 μ ——流体动力粘度, Pa·s

本文中沙粒最大体积分数为 1.0%, 属于稀相流, 采用拉格朗日耦合方法, 具体参数参照文献[22 - 23]设置, 如表 2 所示。沙粒的移动, 沙粒与沙粒之间的碰撞, 沙粒与壁面之间的碰撞以及沙粒运动对周围连续相的作用, 能量、动量交换, 均采用离散方法模拟, 沙粒之间及沙粒与壁面之间的碰撞不会发生显著的塑性形变, 属于硬沙粒接触, 为湿沙粒接触模型, 本文采用“Hertz-mindlin (no slip) built-in”计算方法。计算过程中, 主要考虑曳力 (Viscous drag force) 和重力, 其他附加力如压力梯度力 (Pressure gradient force)、虚假质量力 (Virtual mass force)、升力 (Saffman force) 等与前者相比数量级小, 故不予考虑^[24]。

表 2 模型参数
Tab. 2 Model parameters

相	属性	数值
固相	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 500
	粒径 d_i / mm	0.13
	滚动摩擦因数 μ_r	0.005
	静摩擦因数 μ_s	0.3
	泊松比 ν	0.4
	弹性模量 $E / (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	2×10^7
	恢复系数 c	0.545
液相	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	998.2
	粘度 $\mu / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	0.001
	弹性模量 $E / (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	2×10^8
	泊松比 ν	0.394
入口压力/Pa		50 000
出口压力/Pa		0

沙粒间法向力 F_n 计算式为

$$F_n = \frac{4}{3} E^* (R^*)^{\frac{1}{2}} \alpha^{\frac{3}{2}} \tag{3}$$

其中
$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \tag{4}$$

式中 E^* ——等效弹性模量
 R^* ——等效沙粒半径
 α ——重叠量
 E_1 ——沙粒 1 弹性模量
 ν_1 ——沙粒 1 泊松比

E_2 ——沙粒 2 弹性模量
 ν_2 ——沙粒 2 泊松比

法向阻尼力 F_n^d 计算式为

$$F_n^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^*} v_n^{rel} \tag{5}$$

其中
$$m^* = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \tag{6}$$

式中 m^* ——等效质量 m_1 ——沙粒 1 质量
 m_2 ——沙粒 2 质量
 v_n^{rel} ——法向相对速度
 β ——阻力系数 S_n ——法向刚度

沙粒间切向力 F_t 计算式为

$$F_t = -S_t \delta \tag{7}$$

其中
$$S_t = 8 G^* \sqrt{R^* \alpha} \tag{8}$$

$$G^* = \frac{2 - \nu_1^2}{G_1} + \frac{2 - \nu_2^2}{G_2} \tag{9}$$

式中 δ ——切向重叠量 S_t ——切向刚度
 G_1 ——沙粒 1 的剪切模量
 G_2 ——沙粒 2 的剪切模量
 G^* ——等效剪切模量

沙粒间切向阻尼力 F_t 计算式为

$$F_t = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^*} v_t^{rel} \tag{10}$$

式中 v_t^{rel} ——切向相对速度

计算中的滚动摩擦是很重要的, 它可以通过接触表面上的力矩来说明, 即

$$T_i = -\mu_r F_n R_i \omega_i \tag{11}$$

式中 μ_r ——滚动摩擦因数
 R_i ——质心到接触点间的距离
 ω_i ——接触点处物体的单位角速度矢量

CFD 与 DEM 双向耦合过程如下: CFD 求解连续相, 获得流场信息通过曳力模型转化为作用在沙粒上的流体曳力, DEM 计算沙粒受力情况, 给出沙粒新的位置和速度等信息及对流场的反作用, CFD 更新流场并产生对沙粒新的受力情况, 二者通过一定的模型进行质量、动量和能量的传递, 实现耦合^[25 - 26]。

2 结果与分析

2.1 连续相流场特性分析

本文滴头额定工作压力为 50 000 Pa, 流道深度为 0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 mm 时, 流量分别为 1.721、2.361、3.052、3.731、4.441 L/h, 水流平均流速分别为 0.802、0.821、0.853、0.862、0.883 m/s。对应流道深度的最大流速分别为 2.464、2.413、2.382、2.362、2.341 m/s, 即随着流道深度的增大呈现下降趋势; 对应流道深度的最小流速分别为

0.164、0.162、0.161、0.161、0.160 m/s,即随着流道深度的增大也呈现下降趋势。迷宫流道内水流运动与外界无能量交换,沿程损失和局部损失均由压降提供,沿着水流方向,压力呈线性下降且每个单元下降的压力基本接近,该分析结果与文献[27-28]结果一致。

图2为5种不同流道深度截面1处的Z轴方向压力及Z轴方向速度等值线图,截面1(图1),位于第7个流道单元中,水流运动充分发展。随着流道深度的增大,截面上Y轴压力变化趋势基本相同,

最大压力和最小压力都随着流道深度的增加成下降趋势,Y轴方向上截面压力最小,下截面压力最大,而Z轴方向上压力等值线基本为平行线,压力成均匀分布。Z轴方向上的速度,由于方向相反,存在正负之分,但速度的大小呈中心面两侧对称,中心面速度接近于0,随着深度的增加,最大速度分别为0.018、0.023、0.030、0.036、0.036 m/s,在Z轴上速度明显增加,其等值线逐步向整个截面扩散,而在流道深度最小0.6 mm的截面上,形成更多的涡旋区域,流道深度越大,形成的涡旋越单一。

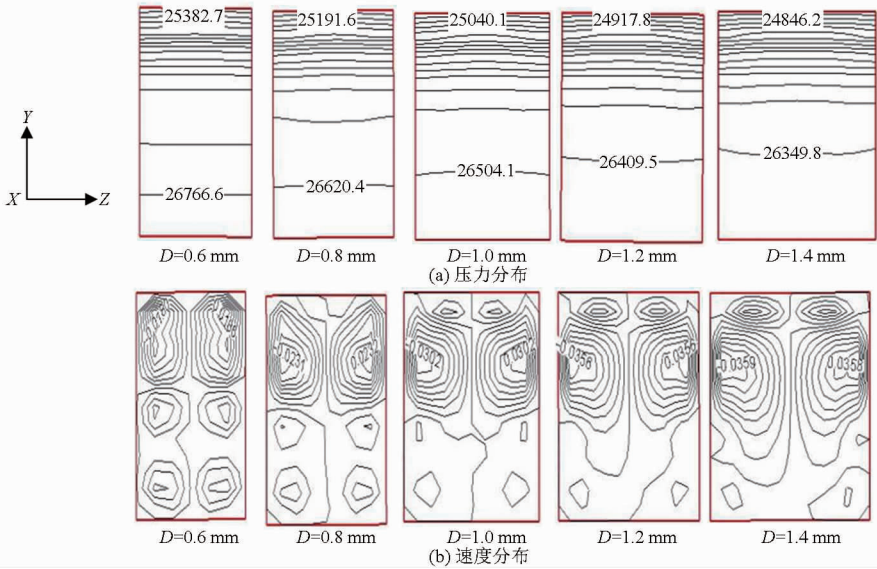


图2 压力、速度分布图
Fig. 2 Distribution of pressure and velocity

2.2 滴头内不同深度位置上沙粒分布

图3为5种不同流道深度滴头1 s内沙粒数量随时间的变化图。入口含沙量(体积分数)为1.0%,沙粒投入速度分别为每0.1 s 416、570、735、902、1 072个。当流道深度为0.6 mm时,运行0.3 s后滴头内沙粒数达到输入与输出微观动态平衡,流道内沙粒数最小,为915个,其他流道深度的沙粒运行0.2 s后即达到微观动态平衡,沙粒总数分别为981、990、965、943个,但平衡后流道内沙粒数量比较接近,差异仅8.0%,而微观平衡后沙粒浓度(体积百分比)为别为3.7%、3.0%、2.4%、1.9%、1.6%,也即流道内浓度都有所增加,流道深度越小,浓度增加越明显,增加了275.0%,而流道深度越大,浓度仅增加了62.0%,也即流道深度的增大降低了沙粒浓度,有利于沙粒通过。

图4为5种不同流道深度不同区域沙粒数分布图,每个区域为0.1 mm,均匀划分,总体具备如下规律:①随着流道深度的增加,区域内沙粒浓度下降明显,0.6 mm流道沙粒浓度最高,最大值达到161个,

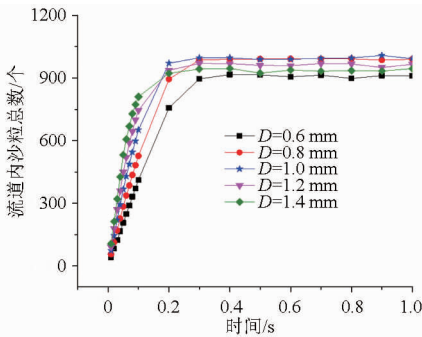


图3 5种不同流道深度滴头1 s内颗粒数变化曲线
Fig. 3 Changes of particle number for emitter in five channel depths within 1 s

1.4 mm流道沙粒浓度最低,最小沙粒数为38个。②同流道内不同区域,沙粒浓度与中心面成近似对称分布,越靠近中心面,沙粒浓度越大,越靠近壁面,沙粒浓度越小。

2.3 滴头内代表性沙粒运动特征

沙粒由入口随机位置释放进入迷宫流道,初始速度为水流平均速度。图5是5种流道深度滴头中代表性沙粒Z方向上运动轨迹,图6为图5中代表

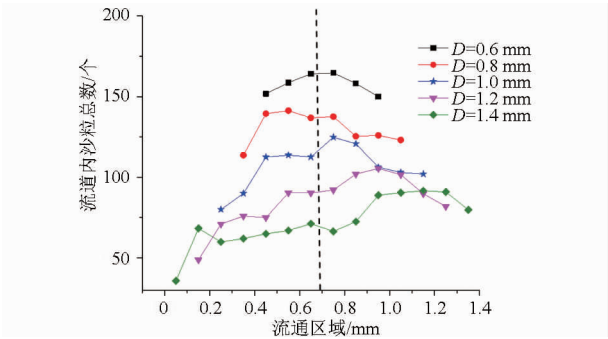


图 4 5 种不同流道深度区域内颗粒数变化曲线
Fig. 4 Change of particle number with position in five channel depths

性沙粒穿过流道时在 Z 方向上的运动速度。从轨迹图中可看出,流道深度较小时,颗粒在 Z 方向上来回运动次数越多,当 $D = 0.6\text{ mm}$ 时,其代表性沙粒穿过流道中心面 24 次, Z 方向上最大运动速度达到 0.58 m/s ,平均运动速度为 0.04 m/s ,撞击边壁达 16 次,运动轨迹最紊乱。随着流道深度的增加,沙粒轨迹在 Z 方向运动越来越成直线,穿越中心面的次数也越来越少,分别为 12、8、6、4 次,其 Z 方向最大速度分别为 0.522 、 0.460 、 0.513 、 0.382 m/s ,撞击边壁次数分别为 8、5、4、0 次,平均速度分别为 0.043 、 0.061 、 0.052 、 0.060 m/s 。

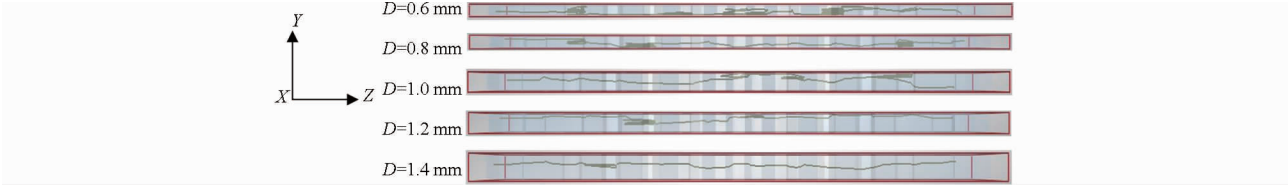


图 5 代表性沙粒运动轨迹图
Fig. 5 Particle trajectories in channel

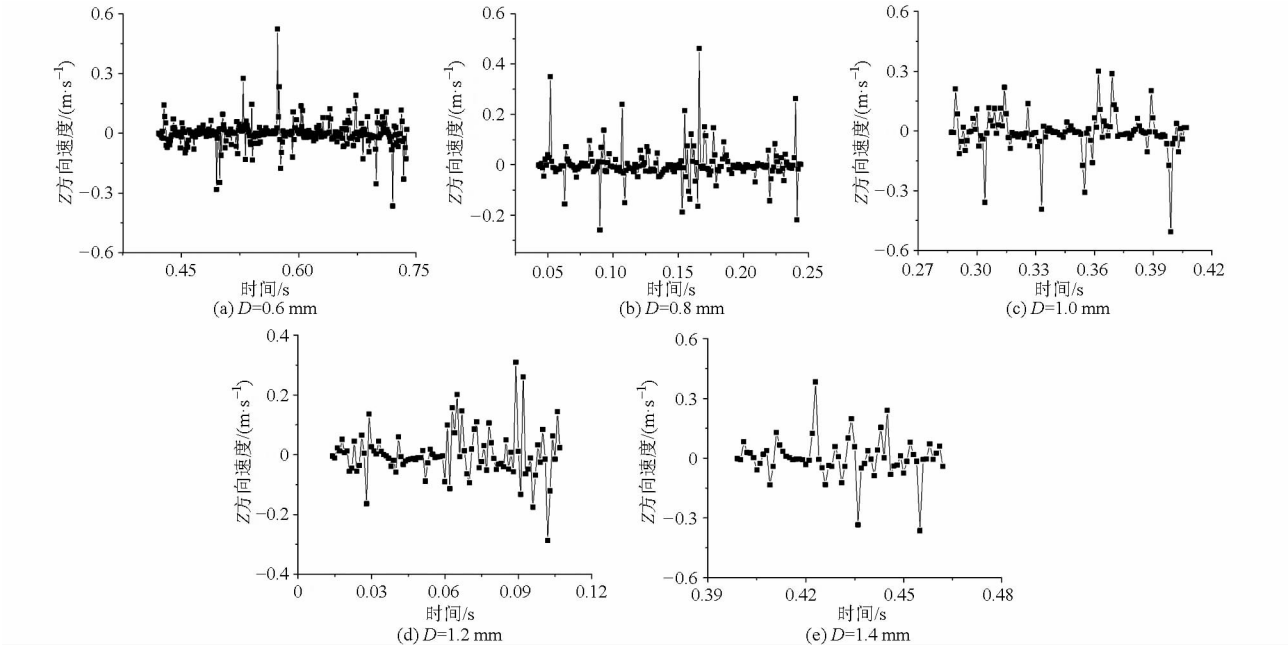


图 6 代表性沙粒运动速度
Fig. 6 Velocity of particles in the channel

因此,流道深度越小,沙粒越容易撞击边壁面,增加了沙粒在流道内 Z 方向上频繁的往返运动,从而增加了在整个流道内的运行时间,增加了流道内的沙粒浓度,降低了沙粒的运行速度,沙粒浓度越大,沙粒与沙粒之间、沙粒与边壁之间易发生碰撞,损失动能导致沙粒容易进入漩涡区,当沙粒无法脱离漩涡区时,就会进行无休止的低速圆周运动,随运行时间加长沙粒数增加,易形成具有粘性的团聚体而造成沉淀堵塞。

2.4 滴头内沙粒群运动特征

表 3 为 1.0 s 内所有通过流道的沙粒群特性,随着深度增加,穿越中心面的沙粒明显减少,当深度为 0.6 mm 时,99.7% 的沙粒都存在穿过中心面的情况,而当深度为 1.4 mm 时,穿过中心面的沙粒减少,但也达到 72.1%,也即还有 27.9% 的沙粒不需要穿过中心面直接通过流道。对比总的运动时长和 Z 方向上的运动时长可知,两时长基本接近,也即沙粒在每个位置上都存在 Z 方向上的

运动,随着流道深度减小,沙粒在 Z 方向上的运动时长增加 2.41 倍,运动路程增加 1.84 倍,运动速度变化不明显,因此,沙粒在流道内运动比较复杂,以往单纯采用二维运动来描述沙粒在流道内的运动与实际情况并不相符。结合图 2 可知,流道深度增加,会增加水流 Z 方向上的运动速度,比

照 0.6 mm 和 1.4 mm 最大速度, Z 方向上增加了 92.5%,但沙粒在 Z 方向上的运动速度仅增加了 25.0%,而在运动时长和运动路程上有较大的增幅。因此, Z 方向上水流流速对沙粒运动作用比较小,主要体现在边壁和沙粒体之间相互碰撞的作用。

表 3 $t=1.0\text{ s}$ 通过流道沙粒群特性

Tab.3 Characteristics of sand group through flow channel when $t=1.0\text{ s}$

通过流道沙粒群特性	流道深度/mm				
	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
通过流道沙粒数	3 240	4 704	6 349	8 044	9 744
与壁面平均撞击次数	14.313	8.164	4.864	3.043	2.041
通过最短时间/s	0.056	0.046	0.047	0.044	0.044
通过率/%	78.9	84.4	89.6	92.7	94.8
通过流道总沙粒平均运动时长/s	0.211	0.173	0.131	0.103	0.091
通过流道总沙粒平均运动路程/mm	120.233	95.712	76.434	63.163	54.912
通过流道总沙粒平均运动速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.570	0.553	0.583	0.613	0.603
穿过流道深中心面沙粒比率/%	99.7	97.3	91.3	81.7	72.2
穿过流道中心面沙粒在 Z 方向平均运动时长/s	0.211	0.173	0.131	0.103	0.091
穿过流道中心面沙粒在 Z 方向平均运动路程/mm	6.372	5.453	4.591	3.930	3.464
穿过流道中心面沙粒在 Z 方向平均运动速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.030	0.032	0.035	0.038	0.038

随着流道深度的增加,流量增加 2.58 倍,通过流道的沙粒数增加 3.01 倍,通过流道沙粒的最短时间缩短 27.0%,沙粒通过率明显增加,从 78.9% 增加到 94.8%。由表 3 可知,随着流道深度的增加,通过的沙粒平均运动时长、运动路程明显下降,运动速度有较大提高,对比通过 0.6 mm 和 1.4 mm 流道的沙粒,平均时长增加了 2.49 倍,平均运动路程增加 2.19 倍,速度降低了 12.3%,其主要原因是沙粒与壁面的撞击次数明显下降,当深度为 0.6 mm 时,每个通过的沙粒平均与壁面撞击次数为 14.31 次,而当深度为 1.4 mm 时,平均撞击次数仅为 2.04 次,撞击次数的减少,减少了沙粒运行方向的改变几率,减少了进入漩涡区的几率,有利于提高沙粒运动速度,提高通过率,利于沙粒通过流道,降低堵塞几率。

由于沙粒数量较大,跟踪大量的沙粒运动数据计算比较困难,因此只跟踪了 1.0 s 时间,但能较准确地分析出流道深度变化对沙粒运动规律的影响,为下一步研究工作打下基础。

本文讨论流道深度范围是 0.6 ~ 1.4 mm,从沙粒通过情况考虑,无疑是流道深度越大,沙粒越容易通过,本结论与文献[29]一致,流道深度与影响滴灌堵塞敏感性成负相关,即当流道深度小于 0.7 mm,极度敏感;当流道深度为 0.7 ~ 1.5 mm,比较敏感;当流道深度大于 1.5 mm,不敏感。而本文最小的流道深度为 0.6 mm,对沙粒通过非常敏感,因此一般不建议采用。流道深度越大越难以堵塞这与文献[4,

30]研究结论一致。本文仅从悬浮沙粒运动规律方面研究,针对的使用范围主要为地下水或黄河灌区等含沙量较多的地方,并不针对再生水使用,由于再生水中存在多种各类的微生物,易形成生物膜,如果结合生物膜和悬浮沙粒的合力作用,可能并不符合本文研究结果,同时再生水的使用过程中,出现较大规模堵塞的情况需要较长的时间,目前国内使用滴灌的周期一般以生长季为主,使用时间不长,因此,该种植方式造成滴灌堵塞的主要原因为悬浮沙粒造成。

3 结论

(1)采用 CFD-DEM 计算沙粒运动能从微观上了解迷宫流道内沙粒运动和分布情况,有助于提高迷宫流道结构设计。

(2)沙粒在流道深度中心面附近分布较多,靠近边壁较少;且随流道深度的增加,流道内沙粒体积浓度下降明显,0.6 mm 流道内相比入口,浓度增加了 275.0%,而 1.4 mm 流道内相比入口仅增加了 62.0%。

(3)流道深度越小,沙粒在 Z 方向上运动速度越大,沙粒群穿过中心面次数越多,撞击边壁的次数就越多。流道深度 0.6 mm 的撞击边壁次数就是 1.4 mm 的 7.01 倍,边壁撞击次数增加,将增加沙粒之间,与壁面之间的碰撞,降低速度,减少动能,易堵塞流道。

参 考 文 献

- 1 CAMP C R. Subsurface drip irrigation: a review[J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(5): 1353-1367.
- 2 NAKAYAMA F S, BUCKS D A. Water quality in drip/trickle irrigation: a review[J]. Irrigation Science, 1991, 12(4): 187-192.
- 3 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): 243-250.
- 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 1): 100-103.
- 6 GLAAD Y K, KLOUS L Z. Hydraulic and mechanical properties of drippers [C] // Proceedings of the 2nd International Drip Irrigation Congress, 1976.
- 7 NAKAYAMA F S, GILBERT R G, BUCKS D A. Water treatments in trickle irrigation system[J]. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1978, 104(1): 23-34.
- 8 TAYLOR H D, BASTOS R K X, PEARSON H W, et al. Drip irrigation with waste stabilisation pond effluent-ts: solving the problem of emitter fouling[J]. Water Science and Technology, 1995, 31(12): 417-424.
- 9 ROBERT G E. Microirrigation[EB/OL]. <http://www.Sidney.ars.usda.gov/personel/pdsf/microirrigation>, 2006.
- 10 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.
- 11 王文娥, 王福军, 牛文全. 滴头流道结构对悬浮颗粒分布影响的数值分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 1-6.
WANG Wen'e, WANG Fujun, NIU Wenquan. Numerical analysis of influence of emitter channel structure on suspended granule distribution[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5): 1-6. (in Chinese)
- 12 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 Wen'e, WANG Fujun, YAN Haijun. 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)
- 13 LI Guangyong, WANG Jiangdong, ALAM M, et al. Influence of geometrical parameters of labyrinth flow path of drip emitters on hydraulic and anti-clogging performance[J]. Transactions of the ASABE, 2006, 49(3): 637-643.
- 14 李云开, 冯吉. 滴灌灌水器内部水动力学特性测试研究进展[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(1): 86-92.
LI Yunkai, FENG Ji. Progress in measurement of hydrodynamic characteristics in drip irrigation emitters[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(1): 86-92. (in Chinese)
- 15 孙昊苏. 滴灌滴头迷宫流道内水流及颗粒物运动特征测试[D]. 北京: 中国农业大学, 2012.
- 16 NISHIMURA T, BIAN Y, MATSUMOTO Y, et al. Fluid flow and mass transfer characteristics in a sinusoidal wavy-walled tube at moderate Reynolds numbers for steady flow[J]. Heat and Mass Transfer, 2003, 39(3): 239-248.
- 17 TATSUO N, SHINICHIRO M, SHINGHO A, et al. Flow observations and mass transfer characteristics in symmetrical wavy-walled channels at moderate Reynolds numbers for steady flow[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1990, 33(5): 835-845.
- 18 LI Y K, YANG P L, REN S M, et al. Experimental study on flow characteristics in labyrinth path emitters[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(7): 886-890.
- 19 ZHANG J, ZHAO W, TANG Y, et al. Numerical investigation of the clogging mechanism in labyrinth channel of the emitter[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2006, 70(13): 1598-1612.
- 20 CHU K W, WANG B, YU A B, et al. CFD-DEM modelling of multiphase flow in dense medium cyclones[J]. Powder Technology, 2009, 193(3): 235-247.
- 21 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.
- 22 TONG Z B, YANG R Y, CHU K W, et al. Numerical study of effect of particle size and polydispersity on the agglomerate dispersion in a cyclonic flow[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 164(3): 432-441.
- 23 CHU K W, WANG B, YU A B, et al. CFD-DEM modelling of multiphase flow in dense medium cyclones[J]. Powder Technology, 2009, 193(3): 235-247.
- 24 唐学林, 余欣, 任松长, 等. 固-液两相流体动力学及其在水力机械中的应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.
- 25 QIU Liuchao, WU Chuanyu. A hybrid DEM/CFD approach for solid-liquid flows[J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(1): 19-25.
- 26 黄思, 杨富翔, 宿向辉. 运用 CFD-DEM 耦合模拟计算离心泵内非稳态固液两相流动[J]. 科技导报, 2014, 32(27): 28-31.
HUANG Si, YANG Fuxiang, SU Xianghui. Unsteady numerical simulation for solid-liquid two-phase flow in centrifugal pump by CFD-DEM coupling[J]. Science and Technology Review, 2014, 32(27): 28-31. (in Chinese)
- 27 WEI Q, SHI Y, DONG W, et al. Study on hydraulic performance of drip emitters by computational fluid dynamics[J]. Agricultural Water Management, 2006, 84(1-2): 130-136.
- 28 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 CSAE, 2005, 21(3): 12-16. (in Chinese)
- 29 穆乃君. 迷宫滴头抗堵塞性能试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
- 30 王建东. 滴头水力性能与抗堵塞性能试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.