

迷宫流道内固体颗粒运动的 CFD 模拟及 PIV 验证^{*}

喻黎明 吴普特 牛文全 范兴科 张林

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

【摘要】 针对迷宫流道灌水器结构细微复杂的特点,分别采用计算流体力学 CFD 模拟方法和粒子图像测速仪 PIV 观测方法,对固体颗粒在迷宫流道内的运动规律进行了模拟研究与试验观测,并对 2 种方法的研究结果进行了分析,结果表明:CFD 模拟不同直径、不同密度的固体颗粒运动时,其模拟轨迹线与实际运动线非常接近;当颗粒直径较小($65\ \mu\text{m}$)或密度较小(镁粒, $1\ 740\ \text{kg}/\text{m}^3$)时,CFD 模拟的颗粒通过的路程与实际运动路程的偏差很小,而直径或密度较大的颗粒偏差比较大,其原因是直径或密度较大的颗粒实际运动时更加靠近主流区;采用 CFD 模拟颗粒运动速度是可行的,但颗粒实际运动时,保持高速的时间长于 CFD 模拟。

关键词: 滴灌灌水器 颗粒 运动 迷宫流道 计算流体力学 粒子图像测速法

中图分类号: S275.6

文献标识码: A

CFD Numerical Simulation and PIV Verification about the Movement of Solid Particles in Labyrinth Channel

Yu Liming Wu Pute Niu Wenquan Fan Xingke Zhang Lin

(College of Water Resource and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract

Considering the structural intricacy of the drip irrigation emitter with labyrinth channel, this paper utilized the numerical simulation method by CFD and observation method by PIV to simulate and observe the movement regulation of the solid particles in labyrinth channel, and analyzed the results of the two methods. The results show that the movement trajectories of the solid particles with different diameter and density calculated by CFD software accord with the actual movement trajectories observed by PIV machine well. When the diameter is $65\ \mu\text{m}$ or the density is $1\ 740\ \text{kg}/\text{m}^3$, the difference of the path length between the numerical simulation by CFD and observation by PIV is very little, but it is big when the diameter or density is big as the actual movement of solid particles are more closing to the mainstream. It is feasible to simulate the velocity of solid particles by CFD software, but the time of the high speed of particles can keep longer than the simulation one.

Key words Drip irrigation emitter, Particles, Movement, Labyrinth channel, CFD, PIV

引言

灌水器优良的水力性能和抗堵塞性能是滴灌技术成功应用的最关键因素之一。迷宫流道灌水器因利用复杂多变的边界使水流呈紊流状态,具有良好的消能能力而被广泛使用^[1],但也因为复杂多变的

流道以及介于微观和宏观之间的流道尺寸,使得此类灌水器极易堵塞。尽管在滴灌系统中采用过滤器,但仍会有一些微小颗粒进入灌水器流道,这些颗粒在流道内是否会沉淀造成堵塞成为众多学者关注的焦点之一。近年来,魏正英、Wei Qingsong、李云开等^[2-4]采用计算流体力学(computational fluid

收稿日期: 2008-08-05 修回日期: 2008-12-18

^{*} 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA100214)

作者简介: 喻黎明,博士生,主要从事节水灌溉理论与设备研究, E-mail: liming16900@yahoo.cn

通讯作者: 牛文全,副研究员,主要从事节水灌溉理论与设备研究, E-mail: nwq@vip.sina.com

dynamics, 简称 CFD)对不同结构形式流道的流量、水流速度、压力分布等进行数值模拟,在一定程度上了解了单相水流在流道内的运动特性,通过分析水流运动来分析固体颗粒的运动状态;Zhang Jun、王文娥等^[5~6]采用 CFD 模拟流道内颗粒浓度的分布以及颗粒运动轨迹,从理论上分析了颗粒的分布和运动规律。Li Guangyong、穆乃君等^[7~8]对制造产品采用 ISO 标准 ISO/TC23/SC18/WG5N4 短周期堵塞测试程序测试了不同直径颗粒在流道内的通过能力。虽然上述学者通过理论分析推导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 CFD 模拟的规律是否准确以及固体颗粒在流道中的运动轨迹、路程和运动速度尚不清楚。因此,本文通过粒子图像测速法(particle image velocimetry, 简称 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、路程和速度来检验 CFD 模拟相应颗粒在流道内运动规律的准确性,并分析 CFD 模拟颗粒运动时可能存在的问题,以便更好地使用 CFD 软件并提高灌水器流道设计的准确性。

1 材料与方法

1.1 物理模型及网格划分

灌水器流道形状及参数如图 1 所示,流道深度为 1.41 mm。进出口平直流道略微加长,以便于流体的充分发展。

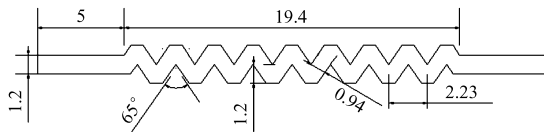


图 1 齿形流道结构及参数

Fig. 1 Form and structural parameters of dental channel

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 0.1 mm 左右,共计约 10×10^4 个单元。

1.2 数学模型

由于流道内的水流可视为不可压缩的流体,常温下定常流动,考虑重力作用,应用连续性方程和 Navier-Stokes 方程^[9],灌水器流量大致在 2.02~5.43 L/h 之间,流体运动平均速度 \bar{v} 在 0.42~1.14 m/s 之间,流道水力半径 R 为 1.128×10^{-3} m,运动粘滞系数 ν 为 10^{-6} m²/s,雷诺数 Re 在 478~1 284 之间。Nishimura 等^[10~11]对类似的相位差为 0°的正弦波纹流道进行了数值模拟和试验研究,结果发现这种正弦型流道的层流、紊流转变发生在雷

诺数 Re 为 200~350 时,远小于常规平直流道的临界雷诺数。李云开等^[12]对 3 种重力滴灌灌水器内部流道流体的研究表明, Re 在 73~930 之间时,流道内流态转换的临界雷诺数比常规尺度流道的值要小, $Re \leq 321$;在对 6 种迷宫式流道灌水器内部流体流动(Re 为 105~930)研究表明,流态转换的临界雷诺数低于 255^[13]。Zhang Jun 等^[14]通过对弧形流道的研究,对比使用层流模型、紊流模型模拟出的流量和试验测试的流量,发现使用紊流模型得到的流量更加接近测试结果。因此,本文的灌水器流道水力计算都采用标准 $k-\epsilon$ 紊流模型,其计算公式见文献^[9]。

参照 ISO 标准灌水器短期抗堵塞试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 Eulerian-Lagrangian 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、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^[15]

$$m_p \frac{du_p}{dt} = m_p g + F_d \quad (1)$$

$$F_d = \frac{3\mu_f c_d Re_p}{\rho_p d_p^2} \frac{c_d Re_p}{4} (u_f - u_p) \quad (2)$$

$$m_p = \frac{\pi \rho_p d_p^3}{6} \quad (3)$$

式中 m_p ——颗粒质量 u_p ——颗粒速度

F_d ——流体对颗粒的曳力

u_f ——流体速度 ρ_p ——颗粒密度

d_p ——颗粒直径 c_d ——曳力系数

Re_p ——颗粒的雷诺数 g ——重力加速度

1.3 边界条件及数值计算方法

在计算齿形流道水力性能时,分 8 个压力水头处理,分别是 1、2、3、4、5、6、7、8 m;在进行 CFD 模拟与 PIV 试验对照时,所有的压力都采用 4 m 水头。出水口为自由出流。采用 Fluent 软件默认的标准壁面函数法对流道壁面进行处理。数值计算采用有限体积法离散控制方程,对流项等各参数的离散都采用二阶迎风格式,速度和压力的耦合采用 SIMPLE 算法求解,收敛精度为 10^{-4} 。

1.4 PIV 流场测试台及观测使用固体颗粒材料

为准确测量迷宫流道内固体颗粒的运动情况,针对使用 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^[16~19],本试验 PIV 流场测试台由连续光源、高速摄像机和

VS-M0910 型放大镜组成,如图 2 所示。此高速摄像机每 1 s 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的运动规律,同时此设备自带的软件 Movias Pro Viewer 1.63 可根据单位时间内粒子运动的距离计算其运动速度。迷宫流道试验件是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,使试验件与实际情况相似。在国际标准中,堵塞试验一般采用的固体颗粒是氧化铝^[20],但实际导致灌水器堵塞的是天然河砂等固体物质,故在本次试验中采用河砂(密度为 2 500 kg/m³)、镁粉(密度为 1 740 kg/m³)和铝粉(密度为 2 870 kg/m³)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 目和 120 目筛网挑选出粒径 125~150 μm 的颗粒,采用 150 目和 180 目的筛网挑选出粒径 90~100 μm 的颗粒,采用 270 目和 220 目的筛网挑选出粒径 58~65 μm 的颗粒。当进行 CFD 数值模拟时,采用颗粒直径的上限,分别为 150、100 和 65 μm。

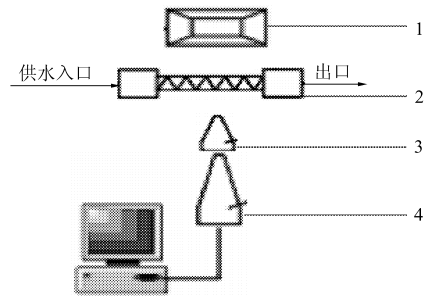


图 2 流场 PIV 测试台结构简图

Fig.2 Schematic diagram of PIV experiment platform

1. 连续光源 2. 迷宫流道 3. 放大镜 4. 高速摄像机

1.5 PIV 观测模型与 CFD 模拟模型水力性能对比

根据图 1 中的几何模型将灌水器流道制作成有机玻璃流道,在不同压力下测量的流量和 CFD 模拟的流量如表 1 所示。其中,CFD 模拟模型所对应的流量系数、流态指数为 1.996 4、0.484 5;PIV 观测模型的相应值为 2.016 1、0.476 1。

CFD 模拟的流量值比 PIV 观测模型实测出的

表 1 CFD 模拟和有机玻璃流道测试的流量

Tab.1 Discharge of testing value of actual model and CFD simulation

模型	压力/m							L/h
	1	2	3	4	5	6	7	
CFD 模拟模型	2.10	2.63	3.33	3.84	4.44	4.74	5.22	5.54
PIV 观测模型	2.02	2.80	3.40	3.89	4.34	4.73	5.10	5.43
偏差/%	3.96	6.07	2.06	1.29	2.30	0.21	2.35	2.03

流量值略大,但对应的流量系数小而流态指数大,两者在流量系数上的差距为 1%,在流态指数上的差距为 2%,差距都非常小,所以两者所使用的模型基本相同,能在此两种模型内比较粒子的运动规律。

2 结果与分析

2.1 CFD 模拟和 PIV 观测的颗粒轨迹线对比分析

图 3 是 CFD 模拟和 PIV 观测不同粒径(65、100 和 150 μm)的砂粒在第 4、5 个流道单元内的运动轨

迹线(图中上为 CFD 模拟,下为 PIV 观测)。当砂粒粒径为 65 μm 时,砂粒基本随主流区的水流运动,CFD 模拟和 PIV 观测的轨迹线非常接近;当粒径为 100 μm 时,CFD 模拟中砂粒在整个流道上有 2 次脱离了主流区进入漩涡,其运动轨迹较紊乱,PIV 观测的第 4、5 流道单元中砂粒运动相对齿尖上下的振幅变大,其运动轨迹比 65 μm 的轨迹紊乱;当粒径为 150 μm 时,CFD 模拟中砂粒 9 次进入了漩涡区,其运动轨迹已相当紊乱,PIV 观测中砂粒经过第 5 个

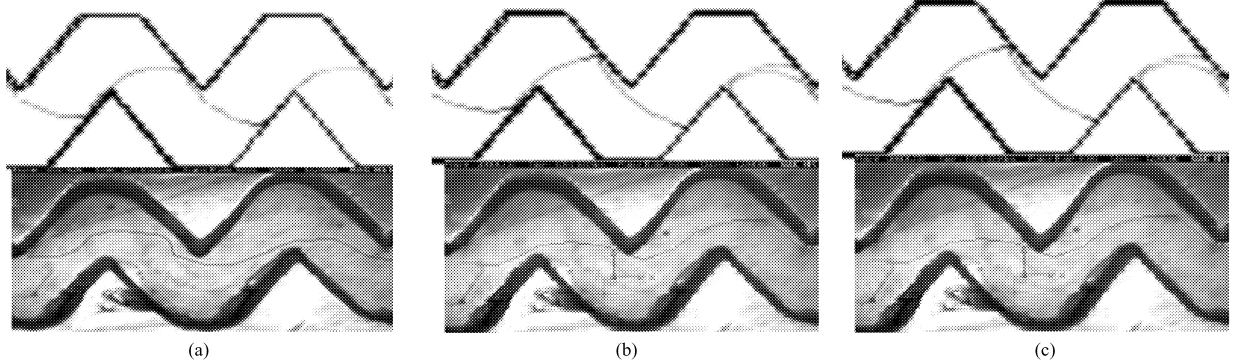


图 3 粒径 65、100 和 150 μm 砂粒的 CFD 模拟和 PIV 观测运动轨迹

Fig.3 Trajectory of CFD simulation and PIV observation about 65, 100 and 150 μm sand particles

(a) 65 μm (b) 100 μm (c) 150 μm

流道单元时,也进入旋涡区。因此,CFD模拟和PIV观测的不同粒径砂粒运动轨迹线具有一定相似性。

图4是CFD模拟和PIV观测粒径为 $100\ \mu\text{m}$ 的镁、砂和铝粒在第4、5个流道单元内的运动轨迹线。从CFD模拟和PIV观测可以看出,镁粒运动的随流性比较好,基本上从水流运动的高速区经过;砂粒的运动轨迹相对镁粒略有些偏离,但还是基本在水

流高速区运动,CFD模拟中,砂粒有2次进入了漩涡区,运动比较紊乱,PIV观测的砂粒运动相对齿尖上下的振幅变大,其运动轨迹比镁粒的轨迹紊乱;铝粒的运动轨迹比较紊乱,CFD模拟中,整个流道上铝粒3次进入漩涡区,而PIV观测到铝粒在第4、5个流道单元都进入了漩涡。因此,CFD模拟和PIV观测中相同直径不同密度颗粒的运动轨迹是比较接近的。

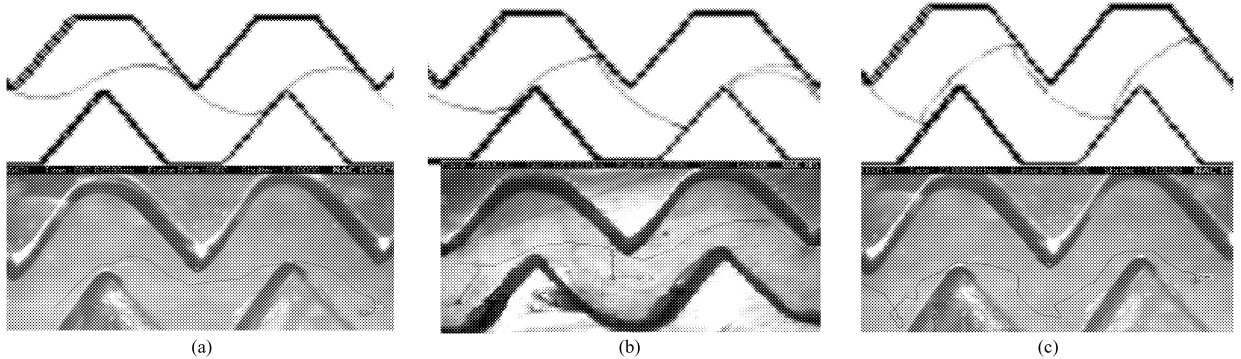


图4 粒径 $100\ \mu\text{m}$ 镁、砂和铝颗粒的CFD模拟和PIV观测运动轨迹

Fig. 4 Trajectory of CFD simulation and PIV observation about $100\ \mu\text{m}$ Mg, sand and Al particles

(a) 镁粒 (b) 砂粒 (c) 铝粒

2.2 CFD模拟和PIV观测的颗粒路程对比分析

表2是CFD模拟和PIV观测不同粒径的砂粒通过相同流道的路程。当砂粒直径较小时,砂粒在流道内经过的路程短,随粒径的增加路程变长,当粒径从 $65\ \mu\text{m}$ 增加到 $150\ \mu\text{m}$ 时,CFD模拟的路程增加了0.82倍,PIV观测的路程增加了0.48倍(整个流道的PIV路程是以第4、5个流道单元的单位路程与单元数相乘,再加上两端增加的平直流道长度;流道长度为 $29.4\ \text{mm}$),这既说明了随颗粒直径的增加,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,也能说明PIV观测的结果比较接近CFD模拟的结果。从表2中可知,PIV观测的不同粒径颗粒的路程都比对应CFD模拟的路程要短,粒径为 $65\ \mu\text{m}$ 时,CFD模拟和PIV观测的偏差非常小,只有2.43%,而粒径大时偏差也大,造成这种现象的原因是直径较大的颗粒在实际运动中并没有CFD模拟时的振幅大,实际运动时更加靠近主流区。

表2 不同直径砂粒在CFD和PIV中的路程

Tab.2 Path length of sand with different diameter in CFD simulation and PIV observation mm

模型	粒径/ μm		
	65	100	150
CFD模拟模型	34.12	47.92	61.96
PIV观测模型	33.31	34.35	49.38
偏差/%	2.43	39.53	25.49

表3是CFD模拟和PIV观测粒径为 $100\ \mu\text{m}$ 的镁、砂和铝粒通过相同流道的路程。当颗粒密度较小时,颗粒在流道内经过的路程短,随密度的增大路程变长,CFD模拟出的铝粒的路程是镁粒的1.52倍,而PIV观测出的铝粒的路程是镁粒的1.39倍,这既说明了随颗粒密度的增加,颗粒运动变得紊乱,从而验证了轨迹线对比分析时颗粒密度变化引起轨迹线变化的规律,也说明PIV观测的结果比较接近CFD模拟的结果。从表中还可以看出,PIV观测到的不同物质的路程都比对应的CFD模拟的路程要短,镁的密度最小,其CFD模拟和PIV观测的偏差非常小,仅1.46%,而密度较大的砂和铝的偏差都比较大。其原因是密度较大的颗粒在实际运动时并没有如CFD模拟的振幅大,实际运动时更加靠近主流区。

表3 粒径 $100\ \mu\text{m}$ 镁、砂和铝颗粒在CFD和PIV中的路程

Tab.3 Path length of $100\ \mu\text{m}$ Mg, sand and Al particles in CFD simulation and PIV observation mm

模型	颗粒		
	镁	砂	铝
CFD模拟模型	34.07	47.920	51.84
PIV观测模型	33.58	34.345	46.54
偏差/%	1.46	39.53	11.39

2.3 CFD模拟和PIV观测的水流和颗粒速度对比分析

图5是CFD模拟的第4个流道单元深度为流

道深一半处的纵剖面水流速度分布图,其速度大小与齿尖成上下左右对称分布,齿尖的左上和右下各有2个旋涡区,最小速度为0.19 m/s和0.24 m/s,略高于壁面处0.17 m/s的速度,最大速度略有不同,左上旋涡最大速度是0.68 m/s,右下旋涡最大速度是0.59 m/s。在齿尖处最高速度为2.48 m/s,靠近齿尖附近形成高速核心区,核心区以1.71 m/s的最小速度连贯起来;从1.71 m/s到旋涡最大速度(0.68 m/s或0.59 m/s)形成主流区,因此在整个流道上流场由高速核心区、主流区和若干个旋涡组成。

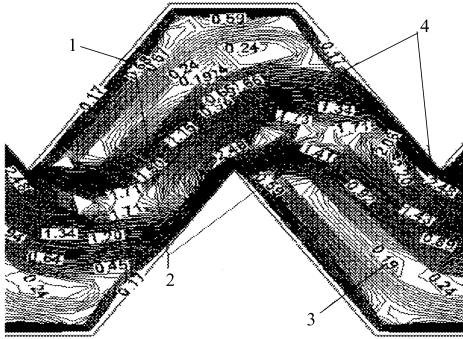


图5 第4个单元的水流速度

Fig.5 Water velocity in the fourth flow unit
1,3. 旋涡低速区 2. 旋涡高速区 4. 齿尖高速区

图6是CFD模拟和PIV观测不同直径的砂粒在相同流道单元上(第4,5个单元)的运动速度曲线图。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运动速度明显变化,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。从CFD模拟速度可以看出,粒径65 μm的砂粒达到最小速度

(1.0 m/s左右)有2次,由图5可知颗粒基本在接近核心高速区的流速范围内运动;粒径100 μm的砂粒达到最小速度(0.5 m/s左右)有3次,由图5可知颗粒基本在主流区运动,有时会到旋涡外围作较高速度运动;粒径150 μm的砂粒达到最小速度(0.2 m/s左右)有2次,由图5可知颗粒既在主流区运动也进入了旋涡,不过从速度线上分析,颗粒很快就离开了旋涡区。从PIV观测的速度可以看出它们具有相似的极值变化,结合轨迹图可知,颗粒直径大时,可观测到颗粒进入了旋涡区,从速度图上亦能反映。在相同的流道单元内,CFD模拟的速度达到最小速度极值共计7次(包含不同粒径的极值),而PIV观测的速度达到最小速度极值同样共计7次(包含不同粒径的极值),但PIV观测的速度能在颗粒运动的较长距离内维持在高速区,而CFD模拟的速度变化快,维持时间短,其原因是实际颗粒运动时更加靠近水流的主流区,因而能获得较长时间的高速,同时也由于PIV观测点的数量少,观测点之间只能通过直线连接,不能完全真实反映各观测点之间的速度,而CFD模拟出轨迹线上任何一个位置的速度,因而速度变化快。

图7是CFD模拟和PIV观测粒径100 μm的镁、砂和铝颗粒在同一流道单元上(第4,5个单元)的运动速度图。从CFD模拟可知,镁、砂和铝颗粒的最小速度都接近0.5 m/s,最高速度也都超过2.0 m/s,铝粒的密度最大,4次接近最小速度,砂粒的密度居中,4次接近最小速度,镁粒的密度最小,3次接近最小速度。由图5可知这些颗粒基本上在

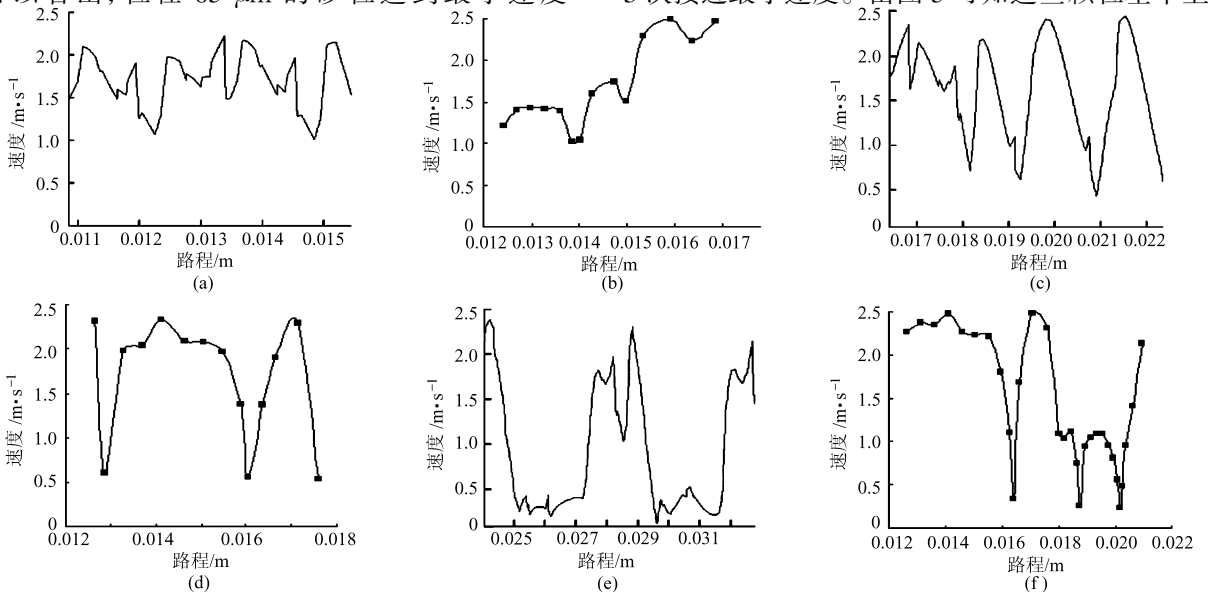


图6 粒径65,100和150 μm砂粒的CFD模拟和PIV观测运动速度曲线

Fig.6 Movement velocity of CFD simulation and PIV observation about 65,100 and 150 μm sand particles

(a) CFD模拟,65 μm (b) PIV观测,65 μm (c) CFD模拟,100 μm (d) PIV观测,100 μm (e) CFD模拟,150 μm (f) PIV观测,150 μm

主流区运动,有时会参与到漩涡外围作较高速度运动;与 PIV 观测的速度具有相似的极值变化,镁、砂和铝粒的速度线图形都很接近,达到极值速度的次数也非常接近(共计 10 次)。但 PIV 观测的速度能

在颗粒运动的较长距离内维持在高速区,而 CFD 模拟的速度变化快,维持时间短,其原因是实际颗粒运动时更加靠近水流的主流区,因而能获得较长时间的高速。

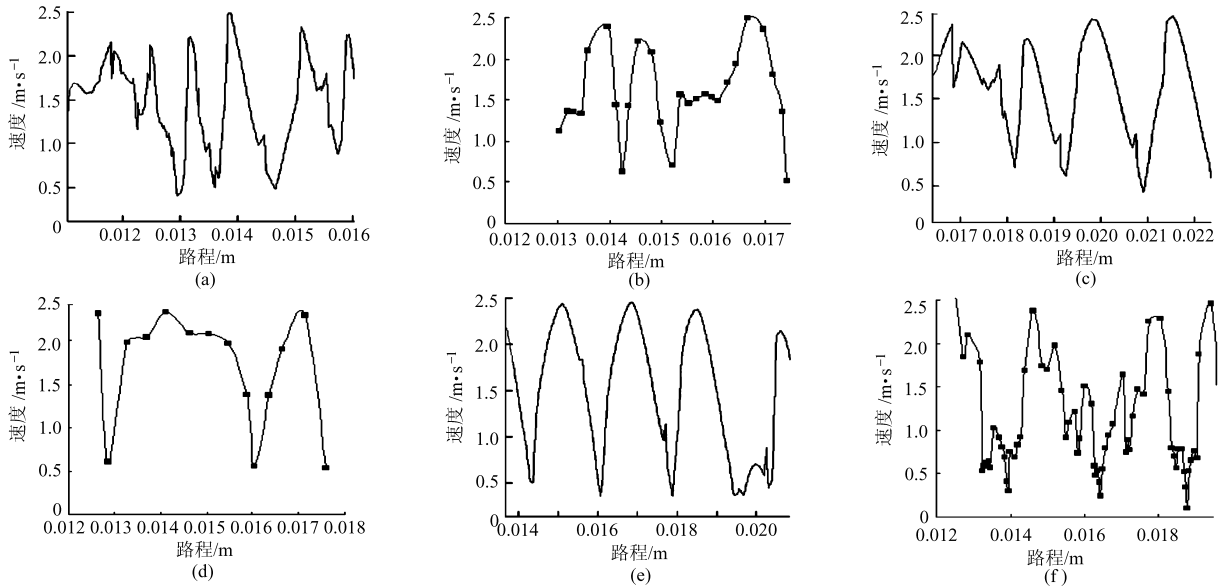


图 7 粒径 $100\ \mu\text{m}$ 镁、砂和铝颗粒的 CFD 模拟和 PIV 观测运动速度曲线

Fig. 7 Movement velocity of CFD simulation and PIV observation about $100\ \mu\text{m}$ Mg, sand and Al particles

(a) CFD 模拟, 镁粒 (b) PIV 观测, 镁粒 (c) CFD 模拟, 砂粒 (d) PIV 观测, 砂粒 (e) CFD 模拟, 铝粒 (f) PIV 观测, 铝粒

3 结论

(1) CFD 模拟和 PIV 观测不同直径和不同密度的颗粒运动轨迹线非常接近,当颗粒直径较小 ($65\ \mu\text{m}$)或密度较小(镁粒, $1\ 740\ \text{kg}/\text{m}^3$)时,颗粒基本在水流的主流流速区运动,颗粒较大或者密度较大时,采用 PIV 能观测到 CFD 模拟时出现的颗粒进入涡旋区,并最终逃离涡旋区的现象,因而采用 CFD 模拟颗粒运动轨迹是可行的。

(2) 分析 CFD 模拟和 PIV 观测不同直径和不同密度的颗粒经过流道的路程可知,当颗粒直径较小 ($65\ \mu\text{m}$)或密度较小(镁粒, $1\ 740\ \text{kg}/\text{m}^3$)时,CFD 模拟和 PIV 观测路程的偏差很小,当直径或密度较大时,偏差比较大,其原因是大直径或高密度的颗粒

实际运动时并没有如 CFD 模拟时的振幅大,实际颗粒运动时更加靠近主流区。

(3) CFD 模拟和 PIV 观测不同直径和不同密度颗粒运动速度的极值非常相似,因而采用 CFD 模拟颗粒运动速度是可行的,但根据 PIV 观测,颗粒运动时更加靠近水流的主流区因而能获得较长时间的高速,同时也由于 PIV 观测点的数量少,观测点之间只能通过直线连接,不能完全真实反映各观测点之间的速度,而 CFD 模拟出任何一个位置的速度,因而速度变化快。

(4) 使用 PIV 只能观测几个流道单元,而 CFD 却能对整个流道进行模拟,采用验证的 CFD 模拟结果去分析整个流道的情况,将有利于灌水器流道内颗粒运动分析和抗堵性分析。

参 考 文 献

- Wei Qingsong, Shi Yusheng, Dong Wenchu. Advanced methods to develop drip emitters with new channel types [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2006, 22(2): 243~249.
- 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 Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(12): 51~55. (in Chinese)
- 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.
- 李云开,杨培岭,任树梅,等.圆柱型迷宫式流道滴灌灌水器平面模型实验研究[J].农业机械学报,2006,37(4):48~51.

- Li Yunkai, Yang Peiling, Ren Shumei. et al. Plane model of labyrinth path drip irrigation column emitter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(4):48~51. (in Chinese)
- 5 Zhang Jun, Zhao Wanhua, Wei Zhengying, 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.
- 6 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 in the emitter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(10):70~73. (in Chinese)
- 7 Li Guangyong, Wang Jangdong, Alam M, et al. Influence of geometrical parameters of labyrinth flow path of drip emitters on hydraulic and anti-clogging performance[J]. ASABE Paper, 2006,49(3):637~643.
- 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.
Mu Naijun, Zhang Xin, Li Guangyong. Experimental study on anti-clogging performance of dental labyrinth flow passage of drip emitters[J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(8):34~39. (in Chinese)
- 9 王福军. 计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- 10 Nishimura T, Bain Y N, Matsumoto Y. 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.
- 11 Nishimura T, Murakami S, Arakawa S, 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):843~845.
- 12 李云开, 杨培岭, 任树梅. 重力滴灌水器水力性能及其流道内流体流动机理[J]. 农业机械学报, 2005,36(10):54~57.
Li Yunkai, Yang Peiling, Ren Shumei. Hydraulic performance and its mechanism of liquid flow in gravity drip irrigation emitter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005,36(10):54~57. (in Chinese)
- 13 李云开, 杨培岭, 任树梅. 滴灌水器迷宫式流道内部流体流动特性分析与试验研究[J]. 水利学报, 2005,36(7):886~890.
Li Yunkai, Yang Peiling, Ren Shumei. Experimental study on flow characteristics in labyrinth path emitters[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005,36(7):886~890. (in Chinese)
- 14 Zhang Jun, Zhao Wanhua, Tang Yiping, et al. Numerical investigation of the clogging mechanism in labyrinth channel of the emitter[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2007, 70(13):1 598~1 612.
- 15 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.
- 16 阮驰, 孙传东, 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.
Ruan Chi, Sun Chuandong, Bai Yonglin, et al. The characteristics of the tracer particles used in water flow field for PIV system[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2006,20(2):72~77. (in Chinese)
- 17 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.
Hu Hua, Liu Shuliang, Wang Tianyou, et al. An investigation into tracer particles for air flow in cylinder of IC engines[J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2002,31(1):5~8. (in Chinese)
- 18 Koutsiaris A G, Mathioulakis D S, Tsangaris S. Microscope PIV for velocity-field measurement of particle suspensions flowing inside glass capillaries[J]. Measurement Science & Technology, 1999,10(11):1 037~1 046.
- 19 Klank H, Goranovic Q, Kutter J P. PIV measurements in a microfluidic 3D-sheathing structure with three-dimensional flow behaviour[J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2002, 12(2):862~869.
- 20 张俊, 魏公际, 赵万华. 水器内圆弧形流道的液固两相流场分析[J]. 中国机械工程, 2007,18(5):589~593.
Zhang Jun, Wei Gongji, Zhao Wanhua. Numerical analysis on liquid-solid two-phase flows in arc-type channel of the emitter[J]. China Mechanical Engineering, 2007,18(5):589~593. (in Chinese)