

滴头壁面形貌对微颗粒与壁面黏附特性的影响

曹蒙, 魏正英, 葛令行, 唐一平, 卢秉恒

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了研究在含沙滴灌条件下, 灌水器迷宫流道内壁面形貌对灌水器内流动特性以及流道内颗粒-壁面黏附的影响, 以详细分析灌水器的堵塞机理, 对不同形貌的矩形流道进行了水力性能测试实验, 并利用粒子图像测速(PIV)平台对灌水器流道内颗粒-壁面黏附进行可视化实验, 结合计算流体动力学的方法对其流场进行了数值仿真计算. 研究表明: 壁面粗糙元(高度为流道水力直径的10%)使得流道的阻力系数显著增大, 即在同一工作压力下灌水器的出口流量变小; 粗糙元改变了流道内沙粒浓度的分布, 且粗糙元附近的沙粒速度较低, 粒子与壁面碰撞后更容易黏附壁面, 使得灌水器流道更容易堵塞.

关键词: 灌水器; 迷宫流道; 粗糙元; 黏附

中图分类号: S275.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)09-0120-05

Influence of Emitter's Channel Wall Topography on Particle-Wall Adhesion

CAO Meng, WEI Zhengying, GE Lingxing, TANG Yiping, LU Bingheng

(State Key Laboratory of Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming at the influence of labyrinth channel wall topography on the flow behavior and adhesion between particles and channel wall under the condition of silt-content irrigation, the emitter channels of different wall topography are chosen, and the hydraulic performance tests and the visual experiments on particle-wall adhesion are conducted via particle image velocimetry (PIV). The computational fluid dynamics is utilized to numerically simulate the flow field. The results show that the higher the wall roughness(the value is 10% of the hydraulic diameter), the greater the resistance coefficient will be. That is, under the same pressure, the smaller the outlet flow rate, the more easily the particle-wall adhesion occurs. Wall roughness affects particle concentration distribution, and the particle velocity near the roughness elements is low, resulting in emitter clogging.

Keywords: emitter; labyrinth channel; roughness element; adhesion

灌水器作为滴灌系统的终端设备, 其堵塞问题是影响整个滴灌系统的最重要的问题. 灌水器迷宫流道特征尺寸一般为 0.2~1.2 mm, 由于流道尺寸较小, 粗糙度与特征尺寸的比值变大, 粗糙度对灌水器性能的影响也越来越重要, 特别是在灌溉水含泥沙滴灌情况下, 影响着灌水器的堵塞性能. Mala 等^[1]测量了内径为 50~254 μm 的微细圆管的水流动特性, 结果表明对内径大于 150 μm 的微细圆管,

实验值与理论值大致相符, 而对内径相对较小的微细圆管, 其压降的实验值比理论值高, 这些都归结于粗糙度的影响. Kandlikar 等^[2]在横截面为 100 μm ×100 μm 的矩形蛇形通道表面设置人为粗糙元, 以改变粗糙元的尺寸参数(高度、形状等)及粗糙元之间的节距, 并通过数值模拟分析了粗糙元各参数及 Re 对摩擦因数的影响. 分析结果表明, 粗糙元的下游出现回流区, 摩擦因数随粗糙元的高度增

加而增大,且呈非线性关系.大多数学者都分别从灌水器流道中各种涡旋与流道的堵塞情况^[3]、颗粒运动轨迹^[4]、颗粒在流道中的浓度分布^[5]、出口流量变化^[6]等角度去研究堵塞机理,而未考虑颗粒与壁面之间的黏附.美国 Shearer^[7]研究发现,通过过滤器和过滤网可以清除直径大于 75 μm 的细小颗粒,但粒径小于 75 μm 的泥沙细颗粒还是会进入灌水器微细流道中.微小颗粒进入流道,一部分颗粒会与壁面碰撞,有的颗粒甚至会黏附于流道壁面.李艳强等^[8]对国内外有关微颗粒在表面黏附的力学模型研究成果进行了分析,Heinl 等^[9]利用拉格朗日方法对水平管道中气力输运中颗粒-壁面的黏附进行了模拟研究,并考虑了壁面粗糙度的影响.分析结果表明,颗粒-壁面黏附主要取决于流体速度与颗粒质量流量.

目前,对管道内颗粒-壁面黏附的研究还局限于采用数值仿真的方法,采用实验方法来可视化观测灌水器内颗粒黏附于壁面的过程也未见有报道.由于流道壁面状况的不同,沙粒与壁面的碰撞、沙粒在壁面的沉积以及沙粒与壁面的黏附会有很大的差异,因此本文选择矩形迷宫流道为研究对象,对具有不同壁面形貌的流道压差进行测量,进而得到相应条件下的流道阻力损失系数.同时,采用粒子图像测速技术(PIV)对迷宫流道内颗粒与壁面的黏附进行观测,分析了粗糙元对颗粒黏附的影响.

1 壁面黏附可视化实验装置

1.1 粒子图像测速 PIV 可视化平台

由于黏性泥沙在迷宫流道中所受的力很复杂,同时,微颗粒的黏附机理及黏附模型还不全面,力学模型在某种程度上很抽象,需要通过数值模拟及可视化的直观动态模拟来更好地体现. PIV 是一种集数学、光学、电子学、摄像技术和计算机技术于一体的全场测速技术,为了对颗粒与壁面的黏附过程进行可视化观察,采用灌水器迷宫流道流动特性 PIV 可视化实验台进行实验,实验台如图 1 所示.

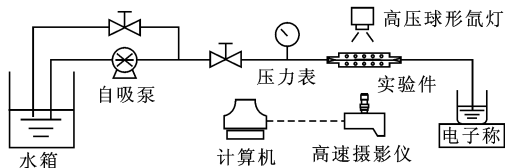
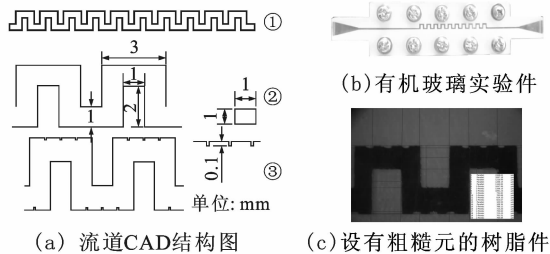


图1 PIV可视化实验台示意图

1.2 矩形迷宫流道试件制作

为研究灌水器内部流场特性的真实情况,实验

中用到的实验件与实际使用的滴灌带产品尺寸比例为 1 : 1. 图 2a 为流道的结构图,为了研究表面形貌对灌水器迷宫流道的影响,在流道的壁面上设计了 100 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 的粗糙元. 实验件采用“三明治”结构,由上中下 3 块打有螺栓孔的板组成,中间部分由 2 块板交错形成流道,3 块板由螺栓紧固密封. 为了减小进出口的压力损失,流道的进出口采用渐缩、渐扩的结构形式,上、下覆板采用透光性能良好的有机玻璃材料加工而成,并按加工形式分为快速成型设备加工的树脂实验件,以及由数控机床加工的有机玻璃实验件. 图 2b、2c 的中间部分是通过光固化快速成型方法加工的,为了保证实验件的尺寸精度,采用 VH-8000 光学显微系统对加工好的实验件的特征尺寸进行测量,经检验,实验件的制造误差均小于 5%,因此满足实验要求. 实验试件的壁面粗糙度采用 Taylor 白光干涉仪进行测量,测得光固化成型加工的树脂实验件的壁面粗糙度为 4.4 μm ,数控机床加工的有机玻璃实验件的壁面粗糙度为 24 μm .



①:流道;②:单元放大图;③:粗糙元单元放大图

图2 矩形迷宫流道试件

2 颗粒-壁面黏附特性分析

2.1 不同壁面形貌对流道水力性能的影响

为了研究壁面形貌对矩形迷宫流道流体阻力损失的影响,定义阻力损失系数 $f = 2\Delta p D(\rho l)^{-1} V^{-2}$, 其中 Δp 为流道的进出口压差, D 为流道的水力直径, ρ 为水的密度, l 为流道的长度,实验用矩形迷宫流道的实际长度为 131.3 mm, V 为流体横截面上的平均速度.

选用 FLUENT 软件进行分析,取滴头正常工作时的进口压力 p 为 100 kPa,出口压力为 0,考虑重力的影响,泥沙直径取 0.01 mm,密度为 2 500 kg/m^3 ,取泥沙的体积分数为 0.02. 采用矩形流道为研究对象,通过改变 FLUENT 软件的壁面条件,设定界面的粗糙度高度值 h 分别为 0、0.05、0.1 mm. 为了比较 h 对模拟结果的影响,同时模拟了粗糙元

矩形流道,并将 h 设为 0. 对于矩形流道模型,由于本身结构简单,因此采用 Cooper 网格单元进行划分. 对设有粗糙元的矩形流道,采取网格局部加密,数值模拟采用 $k-\epsilon$ RNG 湍流模型,近壁面区采用标准壁面函数,设进出口压力为边界条件,压力速度耦合选用 SIMPLE 算法,采用二阶离散格式进行离散,收敛准则为前后 2 次迭代值的相对误差小于 10^{-4} . 图 3 表明,改变软件界面的粗糙度高度对灌水器压力-流量影响不大,当 h 为 0.05 和 0.1 mm 时,流道的压力流量曲线几乎重合,比 h 为 0 mm 时的流量稍微偏低,但设有粗糙元的流道其流量明显比通过改变模拟界面粗糙度高度值的出口流量小,表明通过软件界面粗糙度高度值的改变不再适合强弯曲微细迷宫流道的压力-流量预测. 由于壁面粗糙元引起迷宫流道的阻力损失增大,因此导致流道的流量减少. 对图 3 的数据进行处理,得到 f 与相应 Re 的关系. 结果表明,在同一 Re 下、人为粗糙元的高度为 0.1 mm 时,其阻力损失系数比其他 3 种情况下的阻力损失系数大很多,当粗糙元高度为迷宫流道水力直径的 10% 时,阻力损失影响显著.

对压力-流量进行实验,分析壁面形貌对压力-流量关系的影响,并分别取光固化树脂件、粗糙元的光固化树脂件、有机玻璃实验件进行了实验. 取实验件的前端压力为 10~160 kPa,依次每隔 10 kPa 进行一次记录,共得到 16 个特征点. 为减小实验误差,每次记录出口流量 Q 的时间 $t=3$ min,实验件出口压力为 0,但不考虑进出口的压力损失,实验结果如图 4 所示. 在相同压力条件下,有机玻璃件与粗糙元的光固化树脂件的流量差别不大,而光固化树脂件的流量则较大,表明在压力相同的情况下,壁面微结构高度越高,流道相应的流量越小. 图 3、图 4 表明,实验值与模拟值表现出的趋势是一致的.

2.2 不同壁面形貌对流道颗粒浓度分布的影响

为了对含沙浓度高的灌溉水在流道中的浓度分布进行分析,对矩形流道进行了水沙两相流模拟,矩形流道中截面泥沙的体积分数分布云图如图 5 所示. 图 5a~图 5c 通过改变 FLUENT 软件的壁面条

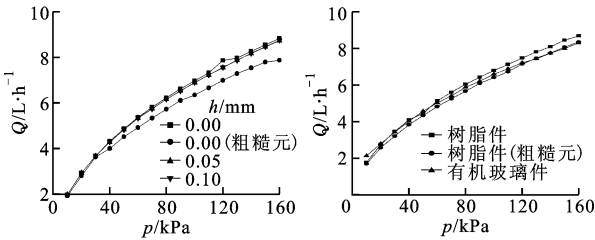


图 3 压力-流量关系的模拟曲线 图 4 压力-流量关系的实验曲线

件设定 h 分别为 0、0.05、0.1 mm, 图 5d 为设计粗糙元的流道, h 设为 0, 表明改变模拟界面的粗糙度高度几乎不影响泥沙的浓度分布. 图 5a~图 5c 中的最大沙粒体积分数位于迎水面, 约为 0.024, 如图 6a 所示, 单元区内的沙粒体积分数由高到低, 即 $A > B > C > D > E$, 但 A、B、C、D 区的沙粒体积分数差别不是很大, E 区最低, 约为 0.014.

图 5d 表明, 壁面设计粗糙元的矩形流道中的最高沙粒体积分数明显高于图 5a~图 5c 所示流道的沙粒体积分数, 并且由图 6b 流道第 1 单元区的沙粒体积分数局部放大图可以看出, 最大沙粒体积分数位于第 2 个粗糙元附近, 如图中 A 区约为 0.027, B 区的沙粒体积分数约为 0.023, C 区最低, 约为 0.014. 显然, 粗糙元改变了流道内沙粒的分布, 其原因是粗糙度的增加使得壁面附近的流场更加复杂, 沙粒运动更加紊乱, 从而影响了最终的浓度分布. 同时, 粗糙元附近的沙粒速度较低, 当沙粒与壁面碰撞的时候初速度比较低, 碰撞后动能易于全部损失, 使得沙粒更容易黏附于壁面.

2.3 颗粒-壁面黏附可视化实验分析

本文尝试对单个泥沙颗粒与壁面的黏附进行研究, 但是颗粒黏附的几率很低, 其中部分颗粒与壁面接触后, 继续沿着壁面运动, 有的则受流体的影响, 再次进入主流区. 初步实验显示, 单个沙粒黏附于壁面的几率约为千分之一, 但当沙粒浓度较高时, 流道内的沙粒黏附现象较为明显. 基于 PIV 测试平台, 对流道内沙粒-壁面黏附特性进行了可视化研究, 在不同时刻对流道壁面上的黏附泥沙的分布情况进行

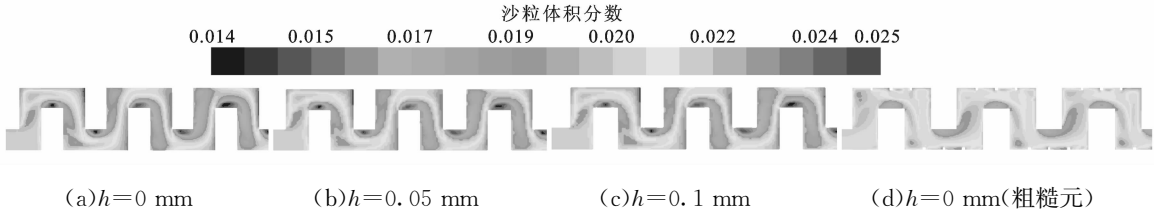
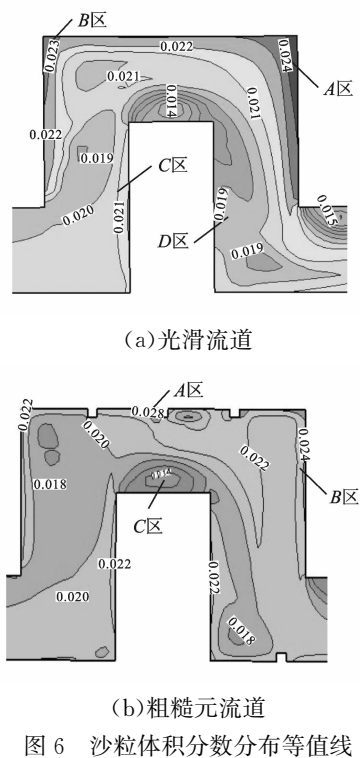


图 5 流道中截面的沙粒体积分数的分布云图



了观测。

实验所使用的颗粒是经 220 目筛网过滤后的泥沙,粒径小于 70 μm ,选取一个单元流道作为观察对象,对不同时刻下的壁面黏附情况进行记录.实验开始时,流道壁面无任何黏附,但随着实验的进行,流道侧壁出现颗粒的黏附,由于实验进行过程中无法对流道上、下壁面进行观察,因此当实验结束后,拆开实验件可见壁面也发生了不同程度的黏附。

由于黏性泥沙黏附的时间较长,由实验发现镁粉黏附所需的时间较短且黏附过程更鲜明,因此为了减少黏附实验所需的时间,部分实验采用镁粉颗粒进行.图 7 表明,镁粉颗粒在流道侧壁的黏附起始位置位于流道的迎水面,与黏性泥沙的情形一致,通过对比多相流 Eulerian 模型的模拟结果,发现实验所得结果与模拟结果中显示的迎水面颗粒浓度高具有一致性.颗粒在流道壁面的黏附是一个时间积累的过程,当实验进行 2 h 后,流道侧壁几乎全部黏附上了颗粒.图 8a 表明,粗糙元矩形流道在粗糙元附近的颗粒体积分数较高,可知是粗糙元影响了侧壁的颗粒黏附.同时,取 $t=30\text{ min}$ 时的粗糙元流道壁面黏附情况,与 Eulerian 模型的模拟结果(见图 8b)进行比较,发现在模拟结果中,沙粒体积分数分布较低的区域为图中的深色区域,与实验中 $t=30\text{ min}$ 时的未黏附区域的吻合度达到 90%,从某种程度上

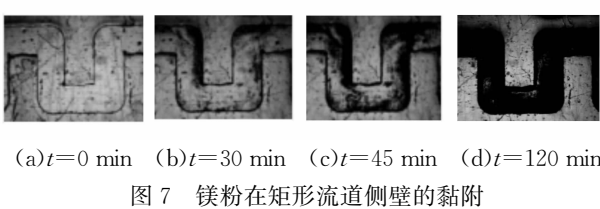


图 7 镁粉在矩形流道侧壁的黏附

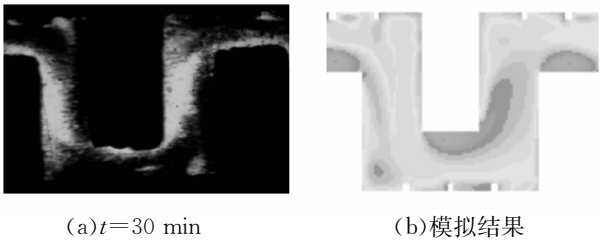


图 8 流道壁面的沙粒分布情况

说明了颗粒浓度越大的区域越容易黏附颗粒。

为了量化黏附面积随时间的变化关系,采用图像处理技术对所得图像进行处理,首先对图片进行灰度处理,黏附区域为黑色,未黏附区域为白色.对镁粉颗粒在有机玻璃件、光固化树脂件、粗糙元光固化树脂件中的实验图片进行灰度处理,拟合的实验曲线如图 9 所示.可见,黏附系数 ϵ 与 t 呈非线性关系,且只有在 t 达到 20~30 min 时,才能明显地观察到颗粒-壁面的黏附现象.对于光固化树脂件,在实验开始 20 min 时,设有人为粗糙元和未设有粗糙元的流道壁面黏附系数分别为 0.3 和 0.2,但实验 30 min 后,后者的黏附系数较前者偏大.在实验 60 min 后,有机玻璃实验件和设有人为粗糙元的流道壁面黏附系数分别高达 1.0 和 0.8.设有人为粗糙元的流道在黏附起始阶段较其他流道的黏附系数大,但设有人为粗糙元的流道达到全部黏附所需的时间最长,约为 300 min,这可能与粗糙元影响了流道内的流场分布有关。

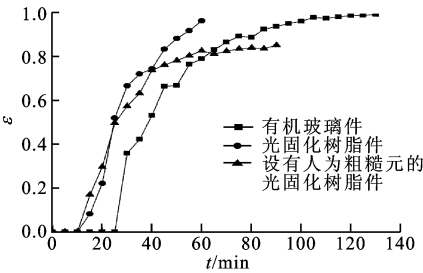


图 9 黏附系数随时间的变化关系

3 结果与讨论

本文以灌水器矩形迷宫流道为研究对象,对流

道内壁面形貌对灌水器流动特性的影响进行了测试实验,同时应用 PIV 可视化平台对颗粒-壁面的黏附进行了实验观测,观测结果如下。

(1)在同一工作压力下,滴灌带产品壁面粗糙度越大,流道的阻力系数越大,其出口流量越小。

(2)对矩形迷宫流道内的颗粒浓度分布进行了两相流数值模拟,结果表明,壁面粗糙元改变了颗粒在流道内的浓度分布。

(3)对矩形迷宫流道内颗粒-壁面的黏附进行了可视化实验,通过分析黏附发生的起始区域、黏附面积随实验时间的变化关系,研究了壁面形貌对颗粒黏附、流场对沙粒-壁面黏附的影响等。结果表明,颗粒-壁面的黏附是一个积累的过程,当壁面粗糙元高度为流道水力直径的 10% 时,迷宫流道内颗粒浓度的分布发生改变,颗粒运动更加紊乱,更容易黏附于壁面。因此,在制造滴灌带产品时,应对其壁面质量进行控制,以提高灌水器的抗堵性能。

参考文献:

- [1] MALA G M, LI Dongqing. Flow characteristics of water in microtubes [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1999, 20(2): 142-148.
- [2] RAWOOL A S, MITRA S K, KANDLIKAR S G. Numerical simulation of flow through microchannels with designed roughness [J]. Microfluid Nanofluid, 2006, 2(3): 215-221.
- [3] 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 [J]. Transactions of the CSAE,

2005, 21(6): 1-7.

- [4] 张俊, 魏公际, 赵万华, 等. 灌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, et al. Numerical analysis on liquid-solid two-phase flows in arc-type channel of the emitter [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(5): 589-593.
- [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 Wen'e, WANG Fujun. Numerical analysis of the distribution rule for suspended granule concentration in labyrinth integrated emitter [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3): 1-6.
- [6] 李治勤, 陈刚, 杨晓池. 浑水引起迷宫灌水器物理堵塞因素实验研究 [J]. 西安理工大学学报, 2006, 22(4): 395-398.
- LI Zhiqin, CHEN Gang, YANG Xiaochi. Experimental study of physical clogging factor of labyrinth emitter caused by muddy water [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2006, 22(4): 395-398.
- [7] SHEARER M N. Minimum screening and automatic flushing [J]. Drip/Trickle Irrigation, 1977, 2(2): 14-16.
- [8] 李艳强, 吴超, 阳富强. 微颗粒在表面粘附的力学模型 [J]. 环境科学与技术, 2008, 31(1): 8-11.
- LI Yanqiang, WU Chao, YANG Fuqiang. Mechanical model of micro-particle on surface adhesion [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(1): 8-11.
- [9] HEINL E, BOHNET M. Calculation of particle-wall adhesion in horizontal gas-solids flow using CFD [J]. Powder Technology, 2005, 159: 95-104.

(编辑 管咏梅)

[本刊相关文献链接]

基于正交试验的迷宫流道灌水器参数化设计研究. 西安交通大学学报, 2006, 40(1): 31-35.

粗糙元特征对风洞中大气表面层模拟的影响. 西安交通大学学报, 2009, 43(3): 87-91.

竖直矩形窄通道空气自然对流换热特性的实验研究. 西安交通大学学报, 2009, 43(3): 10-13.

纳米流道内液体特性的分子动力学研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(1): 9-12.

离心叶轮的速度系数对级性能的影响. 西安交通大学学报, 2008, 42(7): 807-810.