

滴灌系统叠片过滤器离散型流道结构 水力性能试验及内部流场模拟

徐鑫^{1,2,3}, 张金珠^{1,2,3}, 王振华^{1,2,3}, 王钦^{1,2,3}

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000; 2. 现代节水灌溉兵团重点实验室, 新疆 石河子 832000; 3. 兵团工业技术研究院, 新疆 石河子 832000)

摘要: 为获得叠片流道内部水流流动特性, 解决叠片过滤器水头损失较大的弊端, 通过室内试验对比了传统叠片过滤器和具有离散型流道结构的叠片过滤器在不同流量下的水头损失, 并采用 Fluent19.0 对清水条件下 2 种不同流道结构叠片过滤器内部流场分布规律进行数值模拟。结果表明: 流道内部流量模拟值与试验设定值最大相对误差为 4.8%; 随着流量的增大, 传统叠片过滤器产生的水头损失更为明显, 与传统叠片过滤器相比, 离散型流道叠片过滤器产生的水头损失在最大流量下降幅为 20.8%; 对不同流道进行内部流场分析, 得出同一流量下离散型流道的平均过流断面面积大于直线型流道, 过流断面面积越大, 则流速越小, 水头损失也越小, 离散型流道内部局部水头损失占主导地位, 凸台的离散排列降低了沿程水头损失。研究结果可为叠片流道的设计和结构优化提供参考。

关键词: 滴灌; 叠片过滤器; 离散型流道结构; 水力性能; 流场模拟; 水头损失

中图分类号: S277.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)04-0235-06

Hydraulic performance experiment and internal flow field simulation of the novel disc filter with a discrete flow channel in drip irrigation system

XU Xin^{1,2,3}, ZHANG Jinzhu^{1,2,3}, WANG Zhenhua^{1,2,3}, WANG Qin^{1,2,3}

(1. College of Water and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 2. Key Laboratory of Modern Water Saving Irrigation of the Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi 832000, China)
3. Industrial Technology Institute of the Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi 832000, China)

Abstract: In order to understand the flow characteristics and solve the problem of large water-head loss of the disc filter, we compared the water-head loss of the conventional disc filter and the novel disc filter with a discrete flow channel under different flow conditions through laboratory experiments, and simulated the internal flow distribution of the two filters in clear water using Fluent19.0. The results show that the maximum relative error between the simulation value and the set value of the laboratory experiment was 4.8%. The water loss generated by the conventional disc filter increased more obviously with the increase of the flow. Compared with the conventional disc filter, the water loss generated by the novel disc filter decreased by 20.8% under the maximum flow rate. According to the analysis of internal flow field for various flow channels, it is found that the average flowing section area of the discrete channel is greater than that of the straight channel under the same flow rate. The larger the flowing section area become, the smaller the flow rate is and the lower the water-head loss become. The local water-head loss is the dominant factor in the discrete flow channel, and the discrete arrangement of convexes reduces the frictional water-head loss. Our research can provide some reference for the structural design of disc flow channels.

Key words: drip irrigation; disc filter; discrete flow channel structure; hydraulic performance; flow field simulation; water-head loss

收稿日期: 2021-06-17; 修回日期: 2021-07-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51869027); 兵团重点领域创新团队项目(2019CB004)

作者简介: 徐鑫(1996-), 女, 甘肃金塔人, 硕士研究生, 研究方向为高效节水灌溉技术。

通讯作者: 张金珠(1980-), 女, 新疆石河子人, 博士, 副教授, 主要从事干旱区节水灌溉理论与技术研究。

1 研究背景

随着水资源日益短缺,发展微灌技术已成为农业生产的前提^[1-2]。滴灌具有节水增效的特点,是最常用的微灌技术之一^[3]。灌水器作为滴灌系统的一部分,由于其流道结构尺寸较小,在过滤器过滤杂质时,需保证灌水器不被堵塞^[4-5]。叠片过滤器是常见的微灌过滤器之一,其由多个大小相同的叠片叠加在一起形成过滤滤芯,相邻叠片表面沟槽交错形成复杂的立体式过滤通道,对水流进行过滤^[6]。传统叠片流道结构多为直线型,过滤时水头损失增长率较大^[7-8]。

目前,国内外学者从叠片过滤器的类型、材料、组合方式出发,对其水力性能和过滤性能进行了大量研究^[9-11]。Zitterell等^[12]使用量纲分析法预测过滤器的水头损失,发现水头损失预测值与实测值的相关性达99.5%,进而建立了预测水头损失的数学模型。Puig-Bargués等^[13]通过建立回归方程,对叠片过滤器水力性能进行预测,并将预测数据与试验数据进行拟合。王君等^[14]研发了一种水动活塞式单体叠片过滤器,通过水力性能试验,得出单体叠片过滤器适用于低压管道系统的结论。秦天云等^[15]将同等大小的网式过滤器与叠片过滤器进行水力性能对比,发现相同流量时叠片过滤器水头损失小于网式过滤器。李浩等^[16]用CFD(computational fluid dynamics)软件对叠片过滤器全流场进行模拟,得出过滤器水平管路与斜筒的夹角为 30° 左右时,水力性能最佳。杨培岭等^[17]以分形理论为基础,设计了分形流道叠片且叠片上带有缓冲槽,通过物理试验得出水头损失较传统叠片过滤器减小12%~20%,过滤性能提高11%~54%。崔瑞等^[8]将一级直线型流道优化为两级进行水力性能试验,二级流道目数为一级流道目数的2倍,发现二级过滤流道水头损失小于一级流道。

以上的研究多为对叠片过滤器外部结构及叠片流道的改进和对水头损失的预测,其研究结果对提高叠片过滤器水力性能有一定作用。叠片流道是影响叠片过滤器工作性能的重要因素,但目前对其内部流场的研究较为少见。因此,本文自主设计了一种离散型流道叠片,以物理试验与数值模拟相结合的方式,将离散型流道叠片过滤器与传统直线型流道叠片过滤器水头损失进行试验对比研究,并借助CFD软件对两种叠片流道内部水流特性进行数值模拟,分析流道内水流的速度场,解释物理试验所得结果,论证离散型流道叠片在叠片过滤器应用上

的可行性,旨在为流道结构的优化设计及提高叠片过滤器水力性能提供理论指导。

2 叠片流道设计与试验方法

2.1 叠片过滤器离散型流道设计

试验采用离散型流道新型叠片,将其装入叠片过滤器内,形成叠片滤芯,过滤叠片及叠片滤芯设计如图1所示。新型叠片的特点是:改变了传统叠片的直线型沟槽流道,由大小相同的凸台排列形成离散型流道,凸台间距沿径向逐渐减小,形成梯级过滤(图1(b))。过滤时,大颗粒杂质被外侧相邻凸台拦截,小颗粒杂质被内侧相邻凸台拦截,被拦截杂质与叠片凸台共同作用,产生类似于石英砂过滤的效果,同时又有利于反冲洗。

过滤叠片为圆环状,正反两面均分布流道(图1(a)),传统叠片为三角形凹槽流道,流道三角形底边长为0.33 mm,高0.23 mm,相邻三角形间距离为0.20 mm,流道走向与叠片半径方向的夹角为 12° 。本试验中将传统叠片做为对照,除流道结构不一致外,尺寸与传统叠片均保持一致。离散型流道中,凸台由三角形倒圆角拉伸而成,凸台由边长为1 mm的等边三角形倒圆角拉伸而成。

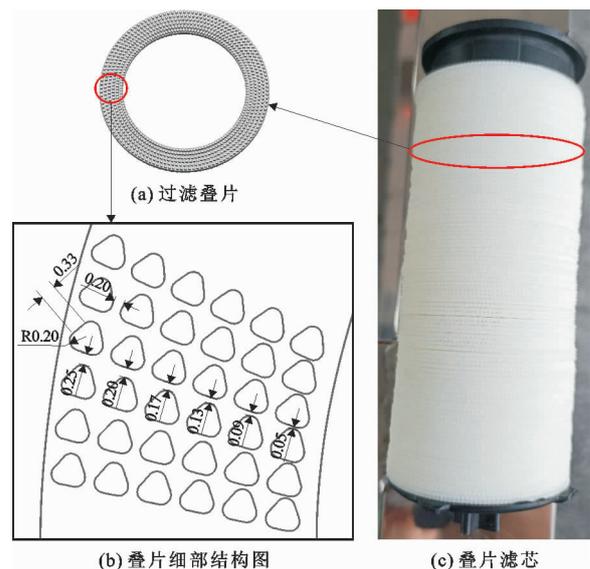
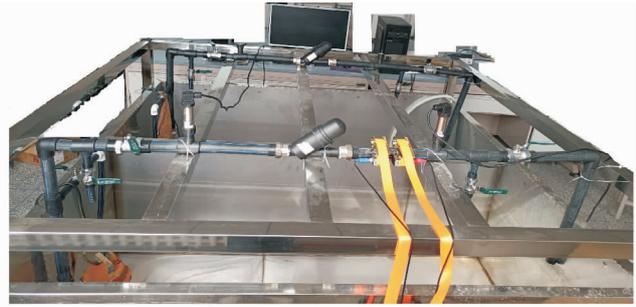
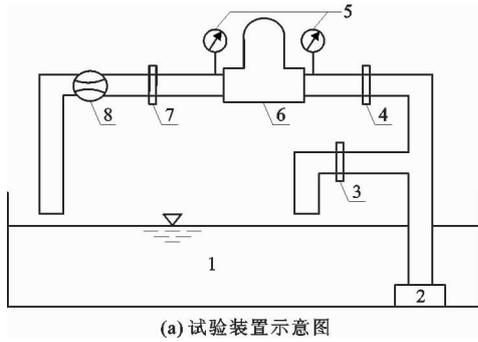


图1 离散型流道过滤叠片及叠片滤芯设计(单位:mm)

2.2 试验装置与方法

试验装置由蓄水池(长1.6 m,宽1.6 m,高0.6 m)、水泵、叠片过滤器(25.4 mm传统叠片过滤器外壳,滤芯替换为离散型流道结构叠片)、高精度压力表(精密等级为0.25级)和流量计组成,管道进、出口尺寸为32 mm,如图2所示。



注:1.蓄水池 2.潜水泵 3.流量调节阀 4.球阀 5.高精度压力表 6.叠片过滤器 7.球阀 8.流量计

图2 试验装置系统

试验过程中,水流由潜水泵从蓄水池吸水,流经管道、过滤器回到蓄水池,实现循环过滤。本次试验不掺杂泥沙颗粒,使水流保持纯净状态,通过流量调节阀3、球阀4控制叠片过滤器流量。开启潜水泵后,观测流量计读数,使过滤器流量达到设定值,稳定运行5 min后,观测叠片过滤器进出口压力表读数,分析叠片过滤器水头损失随流量的变化情况。试验中控制最大流量为2.7 m³/h,最小流量为0.5 m³/h,以0.25 m³/h为梯度进行试验,共计10组试验。

3 叠片流道 CFD 数值模型

3.1 模型建立及网格划分

本文将两叠片压紧后,对通过的水流进行数值模拟。经模拟计算,叠片的截取量对结果无影响,为减小计算量,更加直观清晰地分析叠片内部流场,截取叠片的1/13进行模拟,根据公式(1)、(2)可实现两层叠片间过流量与叠片过滤器过流量的转换。

$$q = Q \cdot \rho \tag{1}$$

$$Q = \frac{13 \cdot n \cdot q \cdot 3600}{\rho} \tag{2}$$

式中: q 为质量流量,kg/s; Q 为体积流量,m³/h; ρ 为水的密度,kg/m³; n 为过滤器内部叠片数量。

采取NX10.0进行仿真建模,利用ICEM CFD19.0划分网格,同时对网格结构进行优化。网格生成以后,导入Fluent19.0进行计算。为减小网格数量和质量对流场模拟结果准确性的影响,本文对 $Q = 1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 工况下的离散型过滤流道进行网格无关性验证,检测指标为出水口流量。图3为网格数量与出水口流量变化量的关系,由图3可以看出,网格数量在 $500 \times 10^4 \sim 870 \times 10^4$ 时,流量变化趋近于0,不同网格大小下流量模拟相对差值小于5%,说明网格数量对计算结果影响较小,综合考虑计算时间和计算结果,确定网格大小为0.04 mm,网

格数为5 098 411。

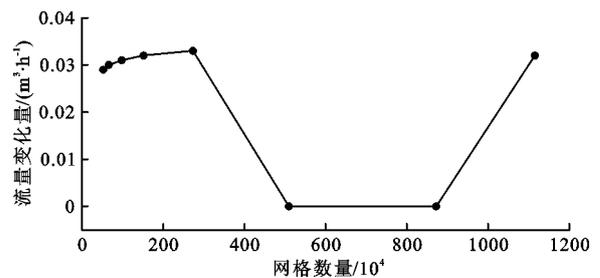


图3 网格数量与出水口流量变化量的关系($Q = 1.5 \text{ m}^3/\text{h}$)

3.2 边界条件

对叠片流道进口、出口、壁面设置边界条件。叠片流道内部伴随着回流,故采用标准的 $k - \epsilon$ 模型^[18]。设置流道进水口条件为压力入口、出口为压力出口,设定值与试验实测值一致。对离散型流道在 $Q = 1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时进行内部流场计算,此时设定进口压强为12 kPa,出口压强为7 kPa。同理,设置流量为0.5、1.0、2.0、2.5 m³/h时对应的压强值,输出质量流量并将其转换为过滤器内部流量与试验设定流量进行对比。其余部分以标准壁面边界条件设置^[19]。

3.3 模型验证

根据模拟结果绘制离散型流道水头损失 Δh 与流量 Q 的关系曲线并与实测数据对比,其结果见图4。由图4可知,试验值与模拟值最大相对误差为4.8%,验证了模型及参数设定的合理性。

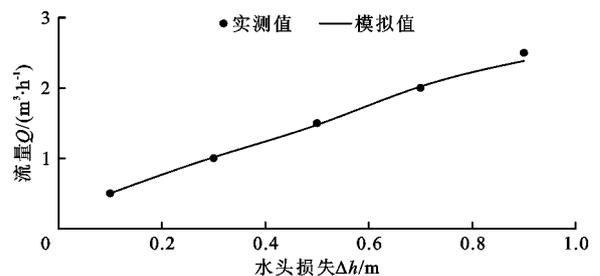


图4 离散型流道水头损失 Δh 与流量 Q 的关系
模拟结果与试验结果对比

4 结果与分析

4.1 清水条件下水头损失对比

图5为两种流道结构叠片过滤器流量与水头损失关系曲线。由图5可看出,两种叠片过滤器流量与水头损失呈正相关,离散型流道叠片水头损失整体优于直线型流道叠片,离散型流道叠片最大水头损失为0.99 m,直线型流道叠片最大水头损失为1.25 m。离散型流道叠片过滤器与直线型流道叠片过滤器相比,最大流量下水头损失降幅为20.8%。

水头损失差值即直线型流道叠片过滤器水损减去离散型流道叠片过滤器水损,由图6流量与水头损失差值关系曲线可看出,水头损失差值随流量的增大而增大,两者呈正相关,离散型流道叠片的水头

损失要明显小于直线型流道叠片。

形成上述差异的原因是离散型流道和直线型流道结构的不同。两种叠片的径向流道长度一致,水流在直线型流道中运动时,由于流道结构呈直线型,水流始终与壁面接触摩擦,耗能较多,故水头损失较大;在离散型流道中,凸台呈分离式排列,当水流进入叠片时,平均过流面积较大,与凸台的接触次数减少,此时消耗的能量减小,故离散型流道叠片过滤器水头损失小于直线型流道叠片过滤器。两种流道结构水头损失存在差异也与内部流场有关,下面将具体对两种流道结构的速度场和压强场进行分析。

4.2 流速场分析

图7为 $Q = 1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时两种流道结构的速度分布云图及流线细部图。

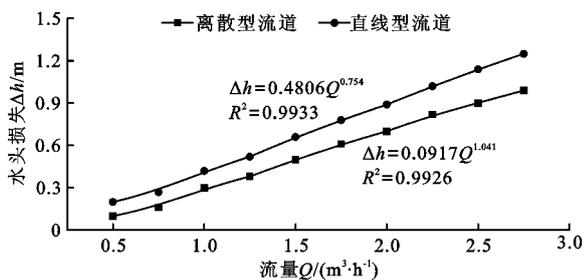


图5 两种叠片过滤器流量与水头损失关系曲线

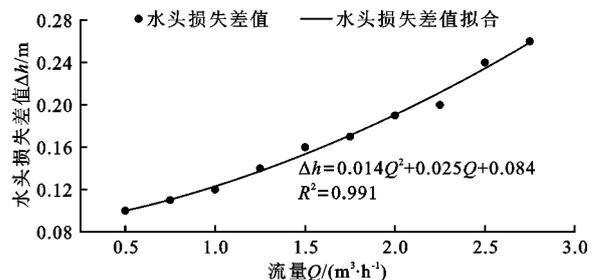


图6 两种叠片流量与水头损失差值关系曲线

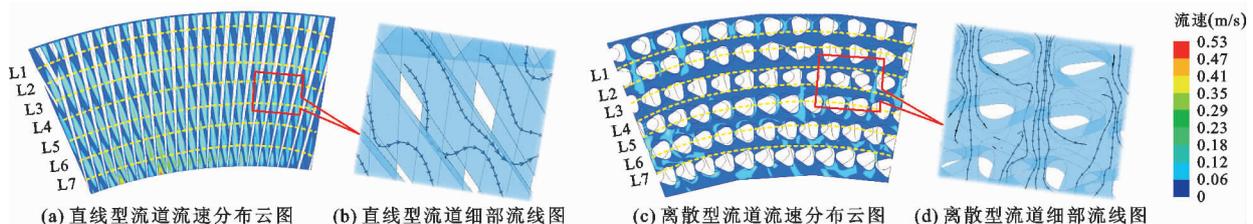


图7 两种流道结构流速分布云图及细部流线图($Q = 1.5 \text{ m}^3/\text{h}$)

分析图7可知,直线型流道中水流在沿径向运动时速度发生明显的变化(图7(a)),最大速度为0.53 m/s,最小速度为0,水流在流道中运动时呈上下翻滚的状态(图7(b)),水流能量消耗较大,此时产生较大的水头损失。离散型流道中水流在在L1周向凸台间隙处流速较大(图7(c)),在入水口附近,水流由径向运动转变为周向运动时,流速大小发生变化,由0.12~0.18 m/s减小至0~0.06 m/s,周向相邻凸台间,流速差异较小;靠近出水口处,流速变化趋势相反,周向流速大,径向流速小,这是因为出水口附近的凸台间距减小,则过水断面面积减小,故流速变大,此处产生的局部水头损失较大。离散型流道内,水流绕凸台流动,没有上下翻滚的状态,由此产生的沿程水头损失较小。沿图7(a)、7(c)虚线提取水流通过时

沿程位置的流速值,共提取7组周向曲线上的水流流速,并取每组流速的平均值计算该处有效过流断面面积 A (流量与平均流速的比值),将周向上不同位置分别命名为L1~L7,绘制出两种流道结构不同周向位置(L1~L7)的有效过流断面面积 A ,如图8所示。

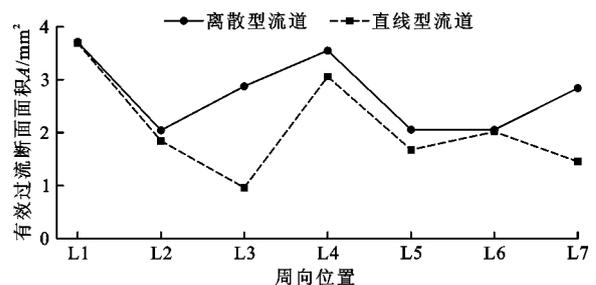


图8 两种流道结构不同周向位置的有效过流断面面积($Q = 1.5 \text{ m}^3/\text{h}$)

分析图8可知:(1)离散型流道的有效过流断面面积大于直线型流道,过流面积越大,水流运动时所受的阻力越小,则产生的水头损失越小,两种流道均在L1处的有效过流断面面积最大;(2)直线型流道在L3、L5、L7处的有效过流断面面积相对较小,这3处水流呈翻滚状态,水流流速较大,因此产生的水头损失较大;(3)流速与水头损失呈正相关,这与张守军^[20]、苟欢欢等^[21]的研究结果一致;(4)离散型流道在L2、L5、L6处的有效过流断面面积较小,

这是因为L2、L5、L6处位于凸台叠加处,凸台的存在使得有效过流断面面积减小。因此,对于叠片过滤器的叠片流道而言,流道中有效过流断面面积越大,水流越容易通过,水头损失越小。

4.3 压强场分析

由试验数据可得到叠片过滤器整体水头损失分布规律,再通过CFD数值模拟得出叠片流道内部压强分布规律。图9为 $Q = 1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时两种流道结构的压强分布云图及湍动能分布云图。

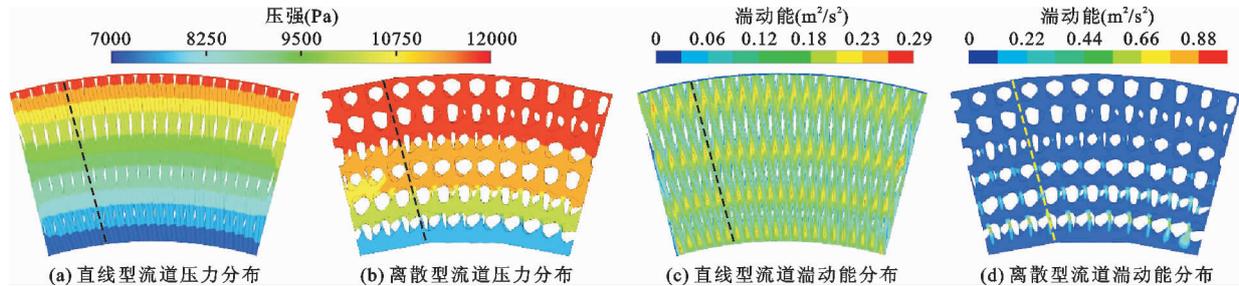


图9 两种流道结构压力分布云图及湍动能分布云图($Q = 1.5 \text{ m}^3/\text{h}$)

由图9(a)、9(b)可以看出,压力变化均表现为从进水口到出水口呈圆周逐渐减小趋势,压力变化相对平稳。离散型流道靠近低压区时,压强变化较为显著,这是因为径向上流道逐渐变窄,靠近出水口处凸台间距离较小,凸台叠加后压强变化明显。由图9(c)、9(d)可以看出,直线型流道中湍动能变化较为明显,最大湍动能为 $0.23 \sim 0.29 \text{ m}^2/\text{s}^2$,此时消耗的能量最多;离散型流道中出水口附近湍动能最大,为 $0.44 \sim 0.99 \text{ m}^2/\text{s}^2$,其余部位湍动能保持较低的水平,消耗能量较少。

沿图9(a)、9(b)中的虚线提取水流通过时沿程的压强,沿图9(c)、9(d)中的虚线提取水流通过时沿程的湍动能,绘制水流方向总水头及湍动能变化曲线,结果见图10。

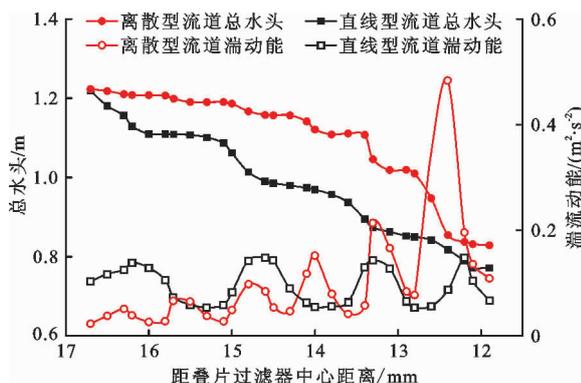


图10 两种流道结构沿水流方向总水头及湍动能变化曲线($Q = 1.5 \text{ m}^3/\text{h}$)

由图10可见,两种结构均表现为由进水口到出水口总水头逐渐减小,且离散型流道总水头始终大于直线型流道总水头;直线型流道中总水头曲线发生4次波动,且波动较为均匀,湍动能变化也较为均匀;同一位置,水头越小,湍动能越大,则水头损失越大;水流在直线型流道中运动时,与两侧壁面接触摩擦,消耗的能量较多,沿程水头损失占主导地位;离散型流道中,从进水口到出水口,水头曲线的波动程度逐渐增加,出水口处水头曲线的波动最大,说明此时产生的局部水头损失最大;虽然离散型流道内局部水头损失较大,但凸台离散排列降低了沿程水头损失,因此,离散型流道的总水头损失整体优于直线型流道。

5 结论

本文以叠片过滤器中的叠片流道为研究对象,对直线型和离散型流道结构的叠片过滤器进行试验测试,并对该两种流道结构进行了数值模拟,同时分析了叠片过滤器水头损失大小和流道内部流场规律,主要结论如下:

(1)两种流道结构叠片过滤器水头损失与流量呈正相关。水头损失差值最大为 0.26 m ,相同流量时,离散型流道叠片过滤器水头损失小于直线型流道叠片过滤器。离散型流道叠片过滤器产生的水损与传统叠片过滤器产生的水损相比,最大流量时降幅为 20.8% 。

(2)通过分析速度场可得,离散型流道的平均过流断面面积大于直线型流道,过流面积与流速成反比,故离散型流道叠片过滤器水头损失小。

(3)通过分析压强场可得,在直线型流道中,水流与两侧壁面接触摩擦产生水头损失,其沿程水头损失占主导地位;在离散型流道中,凸台间距沿流向逐渐减小,局部水头损失占主导地位,但凸台分离式排列,降低了沿程水头损失。因此,离散型流道水头损失整体优于直线型流道。

参考文献:

- [1] SOKOL J, AMROSE S, NANGIA V, et al. Energy reduction and uniformity of low-pressure online drip irrigation emitters in field tests[J]. *Water*, 2019, 11(6): 1195.
- [2] 李久生,栗岩峰,王军,等.微灌在中国:历史、现状和未来[J].*水利学报*,2016,47(3):372-381.
- [3] 徐耀,苏艳平,杨培岭,等.膜片对压力补偿灌水器水力性能影响及内部流固耦合模拟[J].*排灌机械工程学报*,2020,38(7):743-750.
- [4] 靳彬彬,王新坤,黄松,等.射流三通产生的高频压力脉冲对迷宫流道灌水器堵塞的影响[J].*农业工程学报*,2020,36(22):165-171.
- [5] GARCÍA NIETO P J, GARCÍA - GONZALO E, PUIG - BARGUÉS J, et al. A new predictive model for the outlet turbidity in micro-irrigation sand filters fed with effluents using Gaussian process regression[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 170: 105292.
- [6] 李楠,翟国亮,张文正,等.微灌用叠片过滤器的过滤性能试验研究[J].*灌溉排水学报*,2016,35(11):52-56.
- [7] 魏冬.叠片式过滤器进出水管差压高原因分析及对策[J].*科技创新导报*,2020,17(17):55-56.
- [8] 崔瑞,崔春亮,盛祥明,等.两种不同流道结构的叠片水头损失研究[J].*水资源与水工程学报*,2019,30(2):257-260.
- [9] PUJLI T, PUIG - BARGUÉS J, ARBAT G, et al. Effect of wand-type underdrains on the hydraulic performance of pressurised sand media filters[J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 192: 176 - 187.
- [10] 刘小飞,岳春芳,王健,等.喀拉喀什河悬移质沙量和过滤设备选型研究[J].*泥沙研究*,2018,43(3):57-61.
- [11] 储诚葵,朱梅,顾佳林,等.叠片多组合情境下滴灌过滤器水力性能试验研究[J].*灌溉排水学报*,2020,39(S2):76-81.
- [12] ZITTERELL D B, FRIZZONE J A, NETO O R. Dimensional analysis approach to estimate local head losses in microirrigation connectors[J]. *Irrigation Science*, 2014, 32(3): 169 - 179.
- [13] PUIG - BARGUÉS J, BARRAGÁN J, RAMÍREZ DE CARTAGENA F. Development of equations for calculating the head loss in effluent filtration in microirrigation systems using dimensional analysis[J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 92(3): 383 - 390.
- [14] 王君,崔春亮,崔瑞.自主研发的水动活塞式单体叠片过滤器水力性能研究[J].*黑龙江水利科技*,2016,44(9):4-6.
- [15] 秦天云,王文娥,胡笑涛.滴灌系统网式和叠片式过滤器水力性能试验研究[J].*灌溉排水学报*,2017,36(1):57-62.
- [16] 李浩,李红,黄修桥,等.微灌用叠片过滤器全流场数值模拟与优化分析[J].*灌溉排水学报*,2016,35(6):1-5+47.
- [17] 杨培岭,鲁萍,任树梅,等.基于分形理论的叠片过滤器性能试验研究[J].*农业机械学报*,2019,50(2):218-226.
- [18] 喻黎明,徐洲,杨具瑞,等.基于CFD-DEM耦合的网式过滤器水沙运动数值模拟[J].*农业机械学报*,2018,49(3):303-308.
- [19] 张春晋,孙西欢,李永业,等.螺旋流起旋器内部流场水力特性数值模拟与验证[J].*农业工程学报*,2018,34(1):53-62.
- [20] 张守军.不同流速对UPVC输水管道沿程损失影响的试验研究[J].*水利与建筑工程学报*,2019,17(6):231-235.
- [21] 苟欢欢,张胜江,陶洪飞,等.石塑混合与单一介质过滤器清水水力特性试验[J].*中国农村水利水电*,2020(8):126-130+133.