

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2022.03.28

离散型流道结构叠片过滤器性能试验研究

王钦^{1,2,3}, 徐鑫^{1,2,3}, 王振华^{1,2,3}, 张金珠^{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: 在叠片过滤器中, 叠片流道的结构决定着其工作性能。为提高叠片过滤器水力性能和过滤性能, 设计了一种离散型流道新型叠片过滤器, 并与直线型流道传统叠片过滤器进行对比。通过室内模型试验, 研究了两种叠片过滤器水头损失、除沙率、拦沙量、拦截泥沙粒径分布等指标。结果表明: 清水条件下离散型流道新型叠片过滤器最大水头损失为 2.34 m, 传统叠片过滤器为 3.46 m, 前者比后者小 32.3%~50.0%; 含沙水条件下, 两种叠片过滤器拦沙量与流量呈负相关关系, 随着流量的增加, 过滤器拦截泥沙量逐渐减少, 前者平均除沙率为 18.94%, 后者为 15.15%; 离散型流道新型叠片过滤器的有效过滤周期长、水头损失峰值低, 且对细粒径泥沙的拦截效果较好。综上所述, 离散型流道新型叠片过滤器与直线型流道传统叠片过滤器相比, 具有较好的水力性能和过滤性能。

关键词: 滴灌; 叠片过滤器; 离散型流道; 水头损失; 过滤性能

中图分类号: TV93; S275.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)03-0218-07

Experimental study on performance of disc filter with discrete flow channel structure

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

(1. College of Water and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 2. Key Laboratory of Modern Water Saving Irrigation Corps, Shihezi 832000, China; 3. Corps Institute of Industry, Shihezi 832000, China)

Abstract: Disc flow channel structure is an important factor affecting the performance of disc filters. To improve the hydraulic property and working performance of the disc filters, a new type of disc filter with a discrete channel structure was designed and its performance was then compared with that of the conventional linear disc filter. The head loss, sediment interception rate, sediment removal rate, sediment particle size distribution of these two types of filters were monitored via laboratory physical model test. The results showed that under the condition of clear water, the maximum head loss of the novel disc filter and conventional disc filter was 2.34 m and 3.46 m respectively, the former was 32.3%~50.0% lower than the latter. Under the condition of sandy water, the performance of sediment interception of these two types of filters were negatively correlated with the flow rate, i. e., the larger the flow rate, the less the sediment interception of the filters; the average sediment removal rate of the novel filter was 18.94%, whereas that of the conventional filter was 15.15%. Furthermore the novel disc filter performed better at fine-grained sediment interception with a longer effective filtering cycle and lower peak water-head loss. Overall, the hydraulic property and filtration performance of the discrete disc filter are better compared with the conventional linear disc filter.

Key words: drip irrigation; disc filter; discrete flow channel; water-head loss; filtration performance

1 研究背景

近年来, 滴灌技术在我国西北地区实现大面积

推广, 滴灌系统得到广泛应用^[1-4]。过滤器作为滴灌系统的首部装置之一, 具有净化水质, 保证灌水器正常运行的重要作用^[5-8]。过滤器因其对水质净化

收稿日期: 2021-10-14; 修回日期: 2022-03-03

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: 王钦(1996-), 男, 山东莱阳人, 硕士研究生, 研究方向为节水高效灌溉技术。

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。

效果好、耗能少、使用寿命长等优势,成为众多国内外学者的研究重点^[9-11]。研究内容主要包括不同过滤器的分类选型^[12]、传统过滤器结构与过滤流程优化等^[13-14];研究方法包含模拟仿真^[15-17]、建立微型试验系统进行试验研究^[18-21]等。通过学者们的不断研究和探索,过滤器的过滤效果和水力性能得到了大幅提高。

叠片过滤器内部叠片的特殊流道结构及流道的复合可对灌溉水实现三维高精度过滤^[22],同时其易于清洗,多应用于滴灌首部。崔瑞等^[23]将三角形过滤流道优化为两级进行了水力性能试验,靠近进水口侧为一级流道,流道数较少,靠近出水口侧为二级流道,流道数是一级流道的两倍,试验表明流道优化后水力性能明显提升。杨培岭等^[24]基于分形理论改进叠片过滤器,在叠片三角形凹槽流道中间加入缓冲槽,与直线型流道传统叠片过滤器进行了对比试验,得出改进优化后的过滤器水头损失和过滤效果优于传统过滤器的结论。Lee等^[25]以叠片过滤器不同流道结构为研究对象,对过滤器进行了水力性能和过滤性能研究,得出椭圆形凹槽流道叠片过滤器水力性能更好的结论。Chi等^[26]将叠片过滤器滤芯分为3部分,采用计算流体力学的方法模拟了过滤器的运行过程,结果表明其中部出现高压区域,水头损失最大。

以上的研究大多以直线型流道为研究对象,其研究结果对提升叠片过滤器水力性能有一定作用,但针对其他流道形式的研究较少。基于此,本研究自主设计了一种具有离散型流道结构的新型叠片,叠片上分布着大小一致的凸台,凸台相邻排列构成了过滤流道,形成的离散型流道水流流动轨迹形式多样,平均过流面积大。本文以水头损失、拦沙量、除沙率、拦截泥沙粒径等为评价指标,对离散型流道新型叠片过滤器与直线型流道传统叠片过滤器进行综合性能评价,可为叠片过滤器的叠片流道结构设计优化提供参考。

2 材料与方法

2.1 离散型流道叠片过滤器叠片设计

本研究采用的离散型流道叠片结构如图1所示。离散型流道叠片为圆环状,圆环外径 R 为43 mm,内径 r 为29 mm,叠片上下两层均分布流道(图1(b))。叠片上分布着大小一致的凸台,凸台相邻排列构成了过滤流道,所设置凸台俯视图为倒圆角正三角形,正三角形边长为1 mm,圆角半径 r' 为0.20 mm,凸台高

度为0.23 mm(图1(c))。过滤过程中,杂质颗粒随水流进入流道,由于靠近进水口侧周向上凸台间距较大,大粒径杂质颗粒被拦截在叠片外侧,小粒径杂质则随水流进入叠片内部靠近出水口侧,此时由于出水口侧周向上凸台间距较小,可对小粒径杂质起到拦截作用。为了对比,图2展示了直线型流道传统叠片的流道结构及尺寸参数。

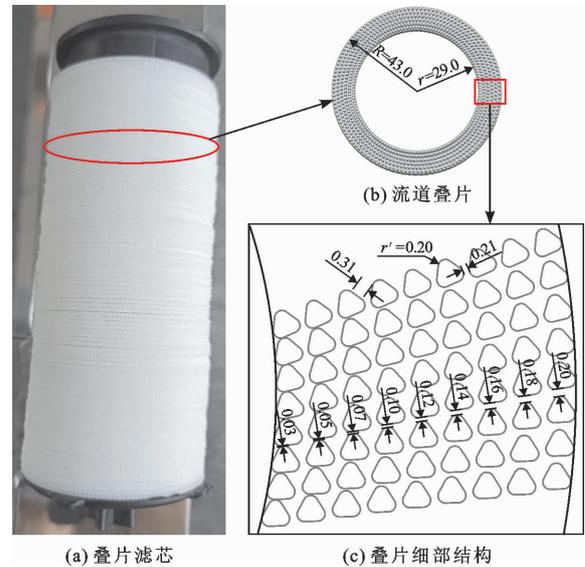


图1 离散型流道叠片结构示意图(单位:mm)

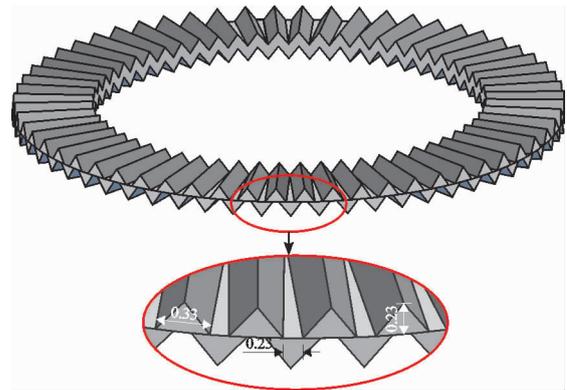


图2 直线型流道叠片结构示意图(单位:mm)

2.2 试验装置

试验平台由水箱(长1.6 m×宽1.6 m×高0.6 m)、水泵(QDX1-10-0.25,上海丰浪机电有限公司生产)、叠片过滤器(离散型流道新型叠片过滤器、直线型流道传统叠片过滤器)、压强传感器(ELE-801, ELECALL)、数据采集仪(34970A-34901A, Agilent)、流量计(TTS-2, LASOAYQ)和变频器(220-004E21, 广东东莞宇鑫科技有限公司生产)组成,水循环管道直径为32 mm,试验装置见图3。两种过滤器均采用同一种外壳,同一外壳进水口、出水口大小一致,水流均充满过滤器。

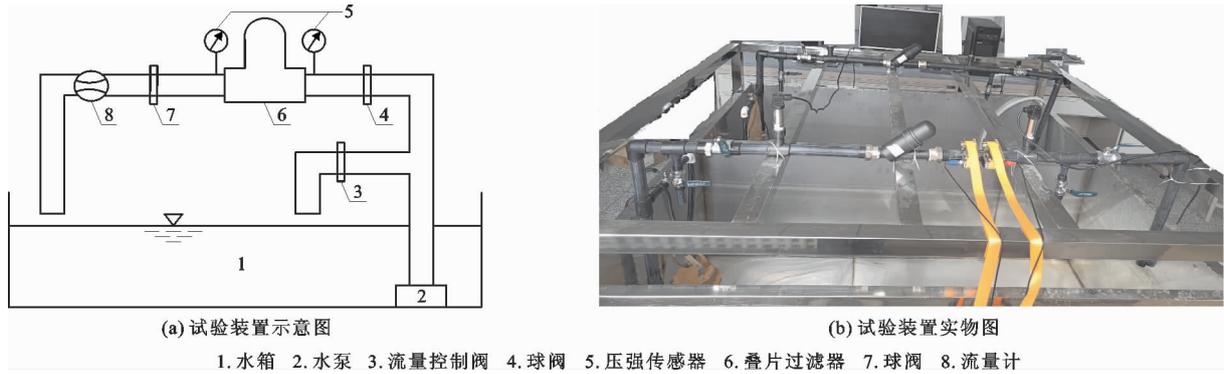


图3 叠片过滤器性能试验装置

2.3 试验设计及过程

试验设置清水和含沙水两种类型水源。清水试验主要测试叠片过滤器的水头损失,含沙水试验主要测试叠片过滤器的水头损失和过滤性能。试验过程中,将水箱中注满自来水,水流由水泵提供动力,从水箱进入管道,依次流经控制阀、压力传感器,经过滤器过滤后,再次流经压力传感器、控制阀、流量计,最后回流至水箱,实现循环过滤,每组试验重复3次。过滤器的额定流量为 $3 \text{ m}^3/\text{h}$,通过与水泵相连的变频器,改变水泵交流电的频率,控制水泵电机转速,达到控制过滤器流量的目的。

清水试验时,缓慢调节变频器上的按钮和流量控制阀,当流量计读数达到试验设定值时,按下计时器,使系统运行5 min后,观测数据采集仪上的读数,通过分析进、出口的压力计算叠片过滤器的水头损失。本试验中,测试流量范围为 $0.50 \sim 2.75 \text{ m}^3/\text{h}$,以 $0.25 \text{ m}^3/\text{h}$ 为变化梯度,共进行10组试验。

日常灌溉工作中,不同水源有着不同的含沙量。本研究考虑微灌易堵塞水流含沙量上限值范围,设置3组进水含沙量水平,即 0.2 、 0.3 、 0.4 g/L 。叠片过滤器装置一般在网式过滤器或砂石过滤器之后,而经一级过滤器过滤后水流中泥沙平均粒径在 0.18 mm 以下,以此为依据设置含沙水中的泥沙颗粒级配及占比,具体见表1。

表1 含沙水试验的泥沙颗粒粒径区间及占比

粒径/ μm	质量百分比/%	累积质量百分比/%
0~40	33.42	33.42
40~53	23.79	57.21
53~75	21.87	79.08
75~106	8.63	87.71
106~160	12.29	100.00

含沙水试验共设计3个流量水平($Q = 0.5$ 、 1.5 、 $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$)和3个含沙率水平(0.2 、 0.3 、 0.4 g/L ,即质量含沙率为 0.02% 、 0.03% 、 0.04%),共9组试验。试验开始前,开启水泵并调节阀门和变频器至设计流量后,向水中加入配置好的泥沙,不断搅拌使水沙混合均匀再开始试验。试验过程中,过滤器进出口压强通过压强传感器将压强数值转变为电信号,由数据采集仪每10 s自动记录一次;每隔1 min在过滤器进、出口同时取样,采集体积为 100 mL 的水样,经沉淀、称重、烘干、再次称重,计算水样中泥沙的重量;观察数据采集仪上的读数,当变化幅度较小时,结束本次试验,对叠片滤芯中所拦截的泥沙进行清洗、烘干、称重。

2.4 评价指标

评价指标主要包括水头损失 H_j 、水头损失回归方程系数 k 、拦沙量、除沙率 S_r 以及被拦截泥沙的粒径组成。

水头损失反映了叠片过滤器的水力性能,其计算公式如下:

$$H_j = \frac{P_{in} - P_{out}}{\gamma} \quad (1)$$

式中: H_j 为叠片过滤器水头损失,m; P_{in} 和 P_{out} 分别为过滤器水流进口和出口压强,Pa; γ 为水的容重, N/m^3 。

回归方程系数 k 可更为清晰地反映出水流经过滤器所产生的能量消耗变化趋势,水头损失 H_j 与流量 Q 的回归方程如公式(2)所示^[24],由公式(2)可计算出回归方程系数 k 。

$$H_j = kQ^2 \quad (2)$$

拦沙量反映过滤器对水中泥沙的去除效果,由清洗叠片下来的泥沙烘干称重获得。除沙率 S_r 更能准确地反映过滤器运行过程中拦截泥沙能力的变化,由下式计算:

$$Sr = \frac{m_{in} - m_{out}}{m_{in}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: m_{in} 和 m_{out} 分别为过滤器进口和出口水流的含沙量,g。

3 试验结果与分析

3.1 清水条件下水头损失对比

图 4 为清水条件下两种叠片过滤器水头损失 (H_j) 随流量 (Q) 的变化曲线。由图 4 可见,叠片过滤器进水流量越大,则水头损失越大。在测试流量范围内,离散型流道新型叠片过滤器的水头损失为 0.10 ~ 2.34 m,直线型流道传统叠片过滤器的水头损失为 0.20 ~ 3.46 m,前者水头损失比后者低 32.3% ~ 50.0%。

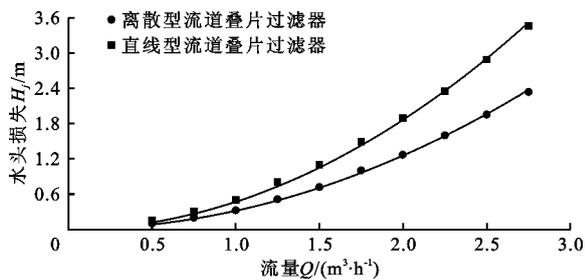


图 4 两种叠片过滤器水头损失 (H_j) - 流量 (Q) 关系曲线

两种叠片过滤器的 $H_j - Q$ 关系回归方程及其系数 k 如表 2 所示。由表 2 可以看出,两种叠片过滤器回归方程的决定系数 R^2 为 0.97 ~ 0.98,离散型流道新型叠片过滤器的 k 值为 0.313 82,而直线型流道传统叠片过滤器的 k 值为 0.465 72,故流经前者的水流能量消耗小于后者。

表 2 清水条件下两种叠片过滤器的 $H_j - Q$ 关系回归方程及其系数

过滤器类型	回归方程	k	R^2
离散型流道叠片过滤器	$H_j = 0.31382Q^2$	0.31382	0.97
直线型流道叠片过滤器	$H_j = 0.46572Q^2$	0.46572	0.98

3.2 含沙水条件下水头损失对比

各组次的试验结果表明,不同流量对由水流含沙量引起的水头损失变化趋势无影响,因此本文以 1.5 m³/h 流量下的试验为例进行分析(该试验流量系根据试验过滤器与实际过滤器大小比例对实际运行流量进行缩尺计算获得)。

图 5 为不同进水含沙率下两种叠片过滤器水头损失随时间变化曲线。图 5 中 0.2、0.3、0.4 分别代表 0.2、0.3、0.4 g/L 3 个进水含沙率水平,L 代表直

线型流道传统叠片过滤器,D 代表离散型流道新型叠片过滤器(下同)。

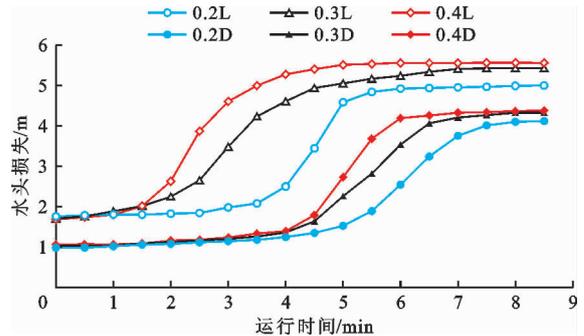


图 5 不同进水含沙率下两种叠片过滤器水头损失随时间变化曲线 ($Q = 1.5 \text{ m}^3/\text{s}$)

由图 5 可以看出,两种叠片过滤器水头损失变化趋势分为 3 个阶段:平稳变化 - 急剧增大 - 平稳变化。在过滤初始阶段,被拦截的泥沙量少,水头损失随时间的变化幅度较小,运行较为平稳;随着过滤器连续运行,杂质颗粒不断被叠片拦截下来,叠片流道内部实际过水面积逐渐减小,水头损失不断增大;在过滤末期,叠片流道被杂质严重堵塞,水头损失达到峰值,故不再变化。

对比两种叠片过滤器可以发现,离散型流道新型叠片过滤器水头损失出现拐点的时间较晚,低水头损失过滤周期较长,且水头损失峰值在 0.2、0.3、0.4 g/L 进水含沙率水平下较直线型流道传统叠片过滤器分别小 7.4%、10.0%、11.3%。分析可知,直线型流道叠片流道中三角形凹槽截面沿水流方向逐渐减小,三角形凹槽流道内局部水头损失呈不均匀变化。在含沙水条件下,沙粒容易在压力突变处被截留,此时压力降低,截留的沙粒增多,滤芯在短时间内被堵塞,造成水头损失突然增大,过滤时间较短。而离散型流道叠片流道中的水流运动轨迹形式多样且压力突变少,泥沙分布均匀,因此水头损失变化平稳,有效过滤周期较长。

3.3 拦沙量与除沙率对比

图 6 为不同进水含沙率下两种叠片过滤器的拦沙量随流量的变化曲线。由图 6 可知,两种叠片过滤器的拦沙量均与流量呈负相关关系。在相同进水含沙率条件下,离散型流道叠片过滤器拦沙量大于直线型流道叠片过滤器,但随着流量的增加,离散型流道叠片过滤器比直线型流道叠片过滤器多拦截的泥沙量逐渐减少,在 0.2、0.3、0.4 g/L 进水含沙率条件,两种叠片过滤器的拦沙量差值在流量为 1.5 m³/h 时,相较于在 0.5 m³/h 时分别减少 50.3%、

39.4%、38.7%；流量为 $2.5\text{ m}^3/\text{h}$ 时的拦沙量差值相较于在 $1.5\text{ m}^3/\text{h}$ 时分别减少55.0%、53.1%、30.0%。分析认为，流量较小时，通过滤芯的水流较为平缓，水流通过流道时与壁面接触时间较长，泥沙颗粒更容易被拦截；流量增大时，流速随之增大，泥沙颗粒所携带的能量较大而不易被拦截，同时高速水流会将附着在滤芯上的部分泥沙颗粒带走，致使拦沙量减小。

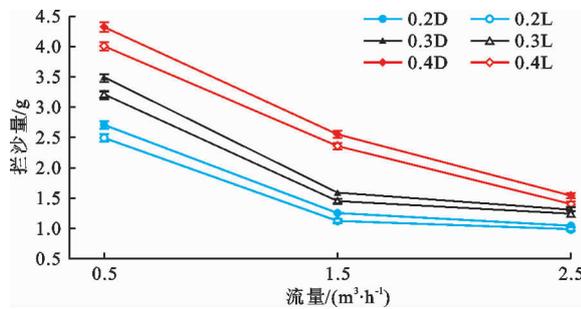


图6 不同进水含沙率下两种叠片过滤器的拦沙量随流量变化曲线

通过对过滤前、后的水样含沙量计算，可得出叠片过滤器的除沙率，除沙率反映了叠片过滤器的过

滤能力。图7为进水流量 $Q = 1.5\text{ m}^3/\text{h}$ 时，不同进水含沙率下两种叠片过滤器的除沙率随时间的变化情况。由图7可见，两种叠片过滤器的除沙率随时间呈先增大后减小的趋势，这与杨培岭等^[24]的研究结果一致。离散型流道叠片过滤器的除沙率明显高于直线型流道叠片过滤器，离散型流道叠片过滤器的平均除沙率为18.94%，直线型流道叠片过滤器的平均除沙率为15.15%。这是由于凸台的分离排列有利于湍流的发展，从而更有利于对泥沙的拦截。

3.4 拦截泥沙粒径对比

图8为进水流量 $Q = 1.5\text{ m}^3/\text{h}$ 时，不同进水含沙率下两种叠片过滤器拦截泥沙的粒径分布。由图8可知，离散型流道叠片过滤器对各粒径范围泥沙的拦截量一般大于直线型流道叠片过滤器，尤其对细粒径泥沙的拦截效果较好。以进水含沙率 0.3 g/L 为例，对于 $0 \sim 40\ \mu\text{m}$ 粒径的泥沙，离散型流道叠片过滤器的拦沙量比直线型流道叠片过滤器大4.59%；对于 $40 \sim 53\ \mu\text{m}$ 粒径的泥沙，前者比后者大10.05%；对于 $53 \sim 160\ \mu\text{m}$ 粒径的泥沙，二者拦沙量差异较小，前者比后者大0.26%~2.06%。

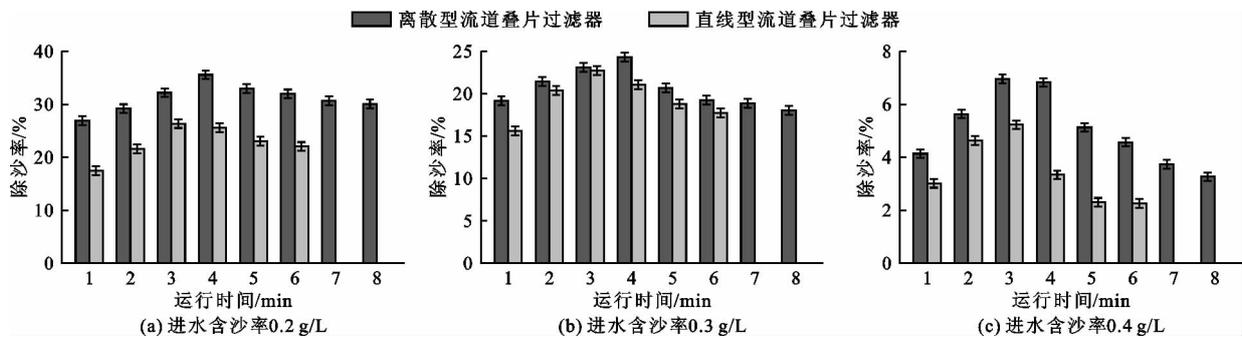


图7 不同进水含沙率下两种叠片过滤器的除沙率随时间的变化情况($Q = 1.5\text{ m}^3/\text{h}$)

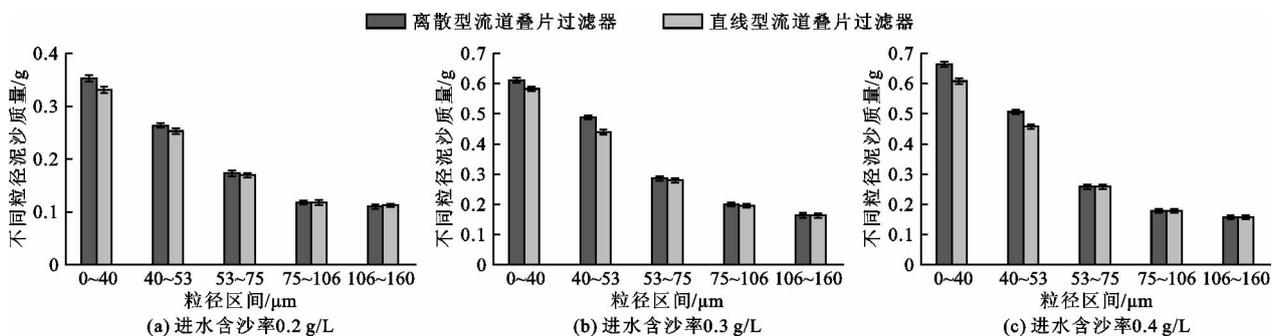


图8 不同进水含沙率下两种叠片过滤器拦截泥沙的粒径分布($Q = 1.5\text{ m}^3/\text{h}$)

4 讨论

水头损失方面，在清水和3种含沙率的含沙水条件下，离散型流道新型叠片过滤器的水头损失均

小于直线型流道传统叠片过滤器。分析认为是由于两种叠片过滤器的外观尺寸相同但流道结构不同，水流进入直线型流道传统叠片过滤器时，与流道边壁产生接触摩擦，耗能较多，水头损失较大，这与杨

培岭等^[27]的研究相一致;而离散型流道新型叠片过滤器的流道呈离散状,水流进入叠片后,与凸台的接触摩擦面积小于直线型流道,所消耗的能量减小,故水头损失较小。

过滤效果方面,离散型流道新型叠片过滤器的拦沙量和除沙率均较高。离散型流道中凸台分离排列,流道内部水流的流动范围广,流体交换面积大,水流流动轨迹形式更多样,使泥沙在凸台之间沉降更均匀,因此提高了拦沙量和除沙率,这与 Gharcheh 等^[28]的观点相一致。

离散型流道对细粒径泥沙拦截效果更好。因为该流道中,凸台间距沿径向逐渐减小,随水流进入流道的大粒径杂质被拦截在叠片外侧,即靠近进水口一侧,小粒径杂质随水流进入叠片内侧,但由于叠片内侧凸台间距小,细颗粒不容易通过,因此被拦截下来。随着过滤器的连续运行,水流不断进入叠片时,小颗粒会被之前拦截的大粒径杂质与外侧凸台共同拦截,形成类似于砂石过滤器产生的三维过滤效果。另外,Xing 等^[29]从流体力学的角度出发,对水流的流动情况进行了数值模拟,得出水流在叠片中流动时存在低速区和主流区,低速区与细颗粒沉降密切相关的结论;Khakimov^[30]认为水流遇到阻碍而绕流时会增加低速区的面积,凸台的分离排列使得低速区的面积更大,泥沙更易被拦截。

5 结 论

本文以离散型流道新型叠片过滤器为研究对象,研究分析了新型叠片过滤器的水头损失、拦沙量、除沙率、拦截泥沙粒径分布等指标,并与直线型流道传统叠片过滤器进行了对比,主要结论如下:

(1)清水条件下,离散型流道新型叠片过滤器的水头损失在测试流量范围内比直线型流道传统叠片过滤器小 32.3% ~ 50.0%;离散型流道新型叠片过滤器的水力特征回归方程系数 k 为 0.314,小于直线型流道传统叠片过滤器的 0.466,故能量消耗较低。

(2)含沙水条件下,两种叠片过滤器水头损失变化趋势均为先平稳变化后急剧增加再平稳变化;离散型流道新型叠片过滤器水头损失出现拐点的时间较晚,有效过滤周期长,且其水头损失峰值在 0.2、0.3、0.4 g/L 进水含沙率水平下相较于直线型流道传统叠片过滤器分别小 7.4%、10.0%、11.3%。

(3)两种叠片过滤器的拦沙量均与流量呈负相关关系,相同含沙量条件下离散型流道新型叠片过

滤器的拦沙量大于直线型流道传统叠片过滤器,但随着流量的增加两种叠片过滤器的拦沙量差值逐渐减少。离散型流道新型叠片过滤器的除沙率明显大于直线型流道传统叠片过滤器,在不同进水含沙率条件下,离散型流道新型叠片过滤器的平均除沙率为 18.94%,直线型流道传统叠片过滤器的平均除沙率为 15.15%。

(4)离散型流道新型叠片过滤器对各粒径范围泥沙的拦截量一般大于直线型流道传统叠片过滤器,尤其对细粒径泥沙的拦截效果较好。在进水含沙率为 0.3 g/L 时,对于 0 ~ 40 μm 和 40 ~ 53 μm 粒径的泥沙,离散型流道新型叠片过滤器的拦沙量分别比直线型流道传统叠片过滤器的拦沙量大 4.59% 和 10.05%。

参考文献:

- [1] GENG Yuhui, CAO Guojun, WANG Lichun. Can drip irrigation under mulch be replaced with shallow-buried drip irrigation in spring maize production systems in semiarid areas of northern China? [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(5): 1926 - 1934.
- [2] LU Junsheng, HU Tiantian, GENG Chenming. Response of yield, yield components and water-nitrogen use efficiency of winter wheat to different drip fertigation regimes in Northwest China [J]. Agricultural Water Management, 2021, 255: 107034.
- [3] GUO Qing, HUANG Guanmin, GUO Yuling. Optimizing irrigation and planting density of spring maize under mulch drip irrigation system in the arid region of Northwest China [J]. Field Crops Research, 2021, 266: 108141.
- [4] ZHAO Di, WANG Zhenhua, ZHANG Jinzhu. Improving yield and quality of processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Miller) using alternate partial root-zone drip irrigation in arid Northwest China [J]. Water, 2019, 11(7): 1503.
- [5] 王照熙,赵雪,张文倩,等.灌溉水磁化处理对水肥一体化滴灌滴头堵塞的影响 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 127 - 135.
- [6] HAN Siqi, LI Yunkai, ZHOU Bo. An in-situ accelerated experimental testing method for drip irrigation emitter clogging with inferior water [J]. Agricultural Water Management, 2019, 212: 136 - 154.
- [7] BOUHALI M E, OUARRICHE H, BOUISFI F. Clogging investigation of pressure compensating button emitters: An experimental study of four types [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27: 44325 - 44332.
- [8] AL - AGELE H A, NACKLEY L, HIGGINS C. Testing novel new drip emitter with variable diameters for a variable

- rate drip irrigation[J]. *Agriculture*, 2021, 11(2): 87.
- [9] DEUS F P D, MESQUITA M, RAMIREZ J C S. Hydraulic characterisation of the backwash process in sand filters used in micro irrigation [J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 192: 188 – 198.
- [10] NIETO P J G, GARCIA – GONZALO E, ARBAT G. Pressure drop modelling in sand filters in micro-irrigation using gradient boosted regression trees [J]. *Biosystems Engineering*, 2018, 171: 41 – 51.
- [11] SOLIMAN A I E, MORAD M M, WASFY K I, et al. Utilization of aquaculture drainage for enhancing onion crop yield under surface and subsurface drip irrigation systems [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 239: 106244.
- [12] MANBARI N, MAROUFPOOR E, AMINPOUR Y. Effect of a combined filtration system and drip irrigation laterals on quality of rainbow trout farm effluent [J]. *Irrigation Science*, 2020, 38: 131 – 145.
- [13] 杨培岭,周洋,任树梅,等. 砂石 – 筛网组合过滤器结构优化与性能试验[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(10): 307 – 316.
- [14] 蔡九茂,翟国亮,吕谋超,等. 微灌砂石过滤器滤帽水力性能试验及内部流场模拟[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(13): 67 – 74 + 316.
- [15] XIAO Ge, LI Bo, TIAN Hua. Numerical study on flow and pressure drop characteristics of a novel type asymmetric wall-flow diesel particulate filter [J]. *Fuel*, 2020, 267: 117148.
- [16] 喻黎明,刘凯硕,韩栋,等. 不同工况下 Y 型网式过滤器流场数值模拟分析[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(2): 346 – 354.
- [17] 谢炎,刘贞姬,李洁,等. 卧式自清洗网式过滤器过滤及排污过程的数值模拟[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2022, 48(1): 117 – 124.
- [18] ZONG Quanli, LIU Zhenji, LIU Huanfang, et al. Backwashing performance of self-cleaning screen filters in drip irrigation systems [J]. *Plos One*, 2019, 14(12): 0226354.
- [19] 徐鑫,张金珠,王振华,等. 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[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(4): 235 – 240.
- [20] 邱元锋,孟戈,罗金耀. 微灌旋流网式一体化水砂分离器试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(5): 77 – 81.
- [21] 阿力甫江·阿不里米提,虎胆·吐马尔白,木拉提·玉赛音,等. 鱼雷网式过滤器排污时间优化试验研究[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(S1): 192 – 199.
- [22] LIU Guangrong, JIANG Hua, LIAO Dongmei, et al. Comparative experiments on the technological performance of disc filters[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 207: 012066.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] LEE S I, CHOI J Y, CHOI W. Effect of groove shape on head loss and filtration performance of disc filters [J]. *Water*, 2021, 13(12): 1683.
- [26] CHI Yanbin, YANG Peiling, MA Zixuan. The study on internal flow characteristics of disc filter under different working condition [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(16): 7715.
- [27] 杨培岭,鲁萍,任树梅,等. 叠片过滤器水力和过滤性能综合评价方法研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(19): 134 – 141.
- [28] GHARCHEH S, DELBARI M, GANJI F. The influence of fertigation on clogging of some emitters in drip irrigation[J]. *Majallah – i ūb va Khāk*, 2016, 29(2): 263 – 273.
- [29] XING Shaobo, WANG Zhenhua, ZHANG Jinzhu. Simulation and verification of hydraulic performance and energy dissipation mechanism of perforated drip irrigation emitters [J]. *Water*, 2021, 13(2): 171.
- [30] KHAKIMOV A G. Flow around a circular cylindrical shell [J]. *Fluid Dynamics*, 2020, 55(2): 154 – 161.