文章编号: 1672 - 3317 (2022) 06 - 0072 - 08

微灌用泵前微压过滤器的最佳运行工况研究

陶洪飞^{1,2*},沈萍萍^{1,2},周洋^{1,2},吴梓境^{1,2},李巧^{1,2} (1.新疆农业大学 水利与土木工程学院,乌鲁木齐 830052; 2.新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室,乌鲁木齐 830052)

摘 要:【目的】探究微灌用泵前微压过滤器的最佳运行工况。【方法】以泵前微压过滤器为研究对象,以水头损失、 截沙质量和总过滤效率作为考核指标,开展了进水流量、含沙量、分水器型式、滤网面积等因素的物理模型正交试 验,采用极差和方差分析方法对试验结果进行处理。【结果】影响水头损失大小的因素依次排序为:进水流量、含 沙量、滤网面积、分水器型式;对截沙质量影响大小依次排序为:含沙量、滤网面积、分水器型式、进水流量;对 总过滤效率影响大小依次排序为:滤网面积、含沙量、分水器型式、进水流量。【结论】影响水头损失、截沙质量 及总过滤效率的两个主要因素是含沙量和滤网面积;经综合分析可知最佳运行工况为:进水流量 4 m³/h,含沙量 1.5 g/L,分水器型式 3 型,滤网面积 2 060 cm²。

关键词:过滤器; 微灌系统; 正交设计; 极差分析; 方差分析 中图分类号: S275 文献标志码: A doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2021335 OSID:

陶洪飞, 沈萍萍, 周洋, 等. 微灌用泵前微压过滤器的最佳运行工况研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(6): 72-79. TAO Hongfei, SHEN Pingping, ZHOU Yang, et al. Optimizing Operating Condition of the Filters in Micro-irrigation Pump[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(6): 72-79.

0引言

【研究意义】过滤器是微灌系统中的关键设备, 保障了微灌系统的稳定运行。本文针对一种新型微 灌用泵前过滤器开展最佳运行工况研究,提出影响 过滤性能因素的排序,给出最佳运行工况。研究成 果将为泵前微压过滤器在过滤性能方面的研究提供 理论依据,具有现实意义,同时取得的成果可丰富 完善固液分离和过滤理论。

【研究进展】目前,市场上常用的过滤器包括 砂介质过滤器、网式过滤器及叠片过滤器等^[1-6]。专 家学者对过滤器的水力性能和过滤性能开展了大量 研究。对于过滤器水力性能的研究,主要采用物理 试验结合量纲分析的方法。Elbana 等^[7]在研究微灌砂 石过滤器的水头损失时采用量纲分析法建立了一个 数学模型,该模型具有较高的精度和准确性。刘焕 芳等^[8]对网式过滤器进行水头损失试验,分析了堵塞 对局部水头损失的影响,提出了含沙水条件计算局 部水头损失的经验式。Puig-Bargues 等^[9]采用量纲分 析法建立了微灌用网式过滤器水头损失计算的通用 数学模型,通过该模型计算得到的水头损失和试验 数据较为吻合。Duran-Ros 等^[10]基于 Yurdem 等^[11]的 研究成果,采用量纲分析方法推导和建立了新的水 头损失数学模型,经检验该模型更加贴近于实际。 Wu 等^[12]考虑网式过滤器结构尺寸和影响滤网过滤介 质的因素,结合试验数据和量纲分析方法,建立了 改进的水头损失计算数学模型。Zong 等^[13]利用量纲 分析法,分别建立了清水和浑水条件下自清洗网式 过滤器的水头损失方程,该方程预测水头损失更加 准确。崔瑞等^[14]对 2 种不同流道结构的叠片过滤器 进行研究,结果表明,水头损失与流量呈现出幂函 数关系,水头损失增加值随流量的增加大幅增加。

对于过滤器的过滤性能的研究,学者们往往采 用物理试验、数值模拟及理论分析的方法。张文正 等^[15]对影响砂石过滤器过滤效果的因素进行研究, 结果表明,滤层厚度、原水含沙量对浊度、颗粒质 量浓度影响显著;过滤速度、原水含沙量对水头损 失影响显著。宗全利等^[16]对网式过滤器进行堵塞试 验,结果表明,滤网堵塞经历了介质堵塞和滤饼堵 塞2个过程,含有大量较粗颗粒泥沙等物理因素是造 成滤网堵塞的主要原因。石凯等^[17]对新型翻板网式 过滤器开展了水头损失与流量、含沙量关系的试验 研究,建立了水头损失与流量之间的数学表达模型, 并用试验结果对数学模型进行了拟合验证。周理强

收稿日期: 2021-08-02

基金项目:新疆维吾尔自治区创新环境(人才、基地)建设专项-"天山 青年计划"项目(2019Q075);2019年度新疆维吾尔自治区人民政府公 派出国留学成组配套项目

作者简介: 沈萍萍(1997-),女。硕士研究生,主要从事节水新技术与 新设备以及计算水力学研究。E-mail: 380217684@qq.com

通信作者: 陶洪飞(1987-), 男。副教授, 博士生导师, 主要从事节水 新技术与新设备以及计算水力学研究。E-mail: 304276290@qq.com

等^[18]采用 CFD-DEM (Discrete Element Method, DEM)耦合数值模拟方法对有无导片的Y型网式过 滤器内的流态和水沙运动规律开展了研究,研究表 明安装导流片时泥沙在滤网面上的堆积减少,过滤 器的抗堵塞性能也得到提高。李楠等^[19]对叠片过滤 器过滤性能进行研究,结果表明,水头损失随加砂 量的增加呈现非比例的增加,并且得出过滤精度M 与叠片最小断面内切圆直径D的关系范围。秦天云 等^[20]对网式和叠片过滤器进行研究,结果表明,网 式过滤器水力性能优于叠片过滤器,过滤效果低于 叠片过滤器。

【切入点】目前国内外学者主要研究强压边界 条件下过滤器的水力性能和过滤性能,这种微灌过 滤器存在水头损失大、能耗高及过滤效果不稳定等 问题。为了满足低碳环保的要求^[21],设计了泵前微 压过滤器,目前已获批专利^[22]。将边界条件由强压 改变为微压,则水力性能和过滤性能就会发生变化, 但是目前对泵前微压过滤器的运行工况研究甚少, 因此有必要对泵前微压过滤器进行研究。【拟解决的 关键问题】本文对泵前微压过滤器水力性能和过滤 性能进行研究,分析含沙量、进水流量、分水器型 式、滤网面积对泵前微压过滤器水头损失、截沙质 量和总过滤效率因素的影响排序,确定泵前微压过 滤器运行的最佳工况,为过滤器结构优化提供技术 支撑,深化泵前微压过滤理论研究。

1 材料和方法

1.1 试验装置及工作原理

泵前微压过滤器循环系统由搅拌池、蓄水池、 泵前微压过滤器及连接管道等组成。泵前微压过滤 器由过滤池、分水器及不锈钢滤网等组成,如图 1 所示。蓄水池和过滤池均采用板厚为 7 mm 的透明 亚克力板制作而成,便于观察试验现象。蓄水池内 部尺寸为:长 500 mm、宽 300 mm、高 600 mm;过 滤池可调整为 3 个尺寸,分别对应 3 种面积的滤网, 过滤池宽 300 mm、高 430 mm, 当过滤池长度调整 为 505 mm 时,对应滤网的面积为 1 105 cm²;当长 度调整为 705 mm 时,对应滤网的面积为 1 582 cm²; 当长度调整为 915 mm 时,对应滤网的面积为 2 060 cm²。分水器型式如图 2 所示, 1 型、2 型、3 型分水 器由头部、中间段和尾部 3 个部分构成, 区别在于 其头部和尾部的形状。其中,头部和尾部长度为 60 mm, 中间段长度为 300 mm。1 型分水器头部由拟 合曲线旋转而成,2型分水器头部由椭圆曲线旋转而 成, 其中长轴为 120 mm, 短轴为 40 mm, 3 型分水 器头部形状为圆台,其中上底半径为5 mm,下底半

径为 20 mm。分水器安装方法:将分水器放置在滤 网内,两端用铁箍固定。分水器由一种高强度的光 敏纤维制成,安装于滤网的内部,通过改变滤网内 部的水流分布状态,来提高过滤速度和改善泥沙分 布的均匀性。进水管和回水管的直径为 50 mm,连 接管和出水管的直径为 75 mm。试验流量通过调节 进水阀门和回水阀门的开度来控制,流量通过超声 波流量计来测量。



注 1.蓄水池; 2.进水阀门; 3.分水器; 4.进水口; 5.过滤池; 6.滤网; 7.出水口; 8.出水阀门; 9.排污阀门; 10.集污滤网; 11.搅拌泵; 12.搅拌池; 13.泥浆泵; 14.回水阀门。 图 1 泵前微压过滤器循环系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the micro-pressure filter circulation system before the pump





Fig.2 Three-dimensional diagram of water separators

泵前微压过滤器实际工程的工作原理是指地表 水中的泥沙颗粒先经沉沙池初步沉降,然后由沉沙 池尾部的出水管流入过滤器内部。水流由内而外进 行过滤,过滤后清水由网孔流出。随着过滤的进行, 杂质逐渐累积在滤网内部,当滤网堵塞到一定程度 时,必须进行排污操作,以恢复滤网的过滤能力和 过滤效率,此时,打开排污阀门,在沉沙池自然水 头的作用下实现水力排沙。也可采用人工冲洗的方 式,将不锈钢滤网拆下,进行手动冲洗,冲洗完毕 后,重新安装滤网。

泵前微压过滤器试验系统工作原理:在搅拌池 里加入事先称量好的泥沙,打开搅水泵,将水沙混 合均匀,调节进水阀门开度至设计流量。含沙浑水 由泥浆泵吸入过滤系统,首先在蓄水池进行初步过 滤,然后利用蓄水池尾部的自然水头流入过滤器, 在过滤器内过滤后通过出水管再回到搅拌池内。进 行过滤试验过程中分别更换不同面积的滤网并加入 不同型式的分水器进行试验,以分析不同试验条件 下过滤器的水力性能和过滤性能。每一组浑水试验 结束后,将整个试验装置清洗干净。

1.2 试验设备和材料

泵前微压过滤器采用过滤池和 100 目不锈钢滤 网组合的方式(如图 3 所示),对含沙水流进行过滤 处理,以达到微灌的要求。试验供水装置为一个直 径 0.8 m、长 1.5 m、高 0.33 m 的近似圆柱筒体。试 验用的沙样是根据滴灌系统中沉沙池尾部的泥沙粒 径配置的,但为了缩短试验时间并观察到明显的试 验现象,另添加了占比为 2.13%(粒径为 0.25~0.5 mm)和 0.04%(粒径为 0.5~1 mm)的泥沙,因占 比较少,可认为接近现场的情况。为了保证试验过 程含沙量的稳定,防止泥沙颗粒沉积在圆柱筒体底 部,干扰试验现象,采用漏斗均匀加沙,采用搅拌 泵的方式将泥沙颗粒混合均匀。试验设备主要有: 搅水泵、泥浆泵及手持式超声波流量计等,如表 1 所示,试验沙样的粒径分布如表 2 所示。



图 3 泵前微压过滤器过滤池内部图

Fig.3	Internal	view of	f the	pre-pump	micro-pressure	filter	tanl	K
-------	----------	---------	-------	----------	----------------	--------	------	---

表1试验设备

rable r Experimental setup								
名称	型号/规格	数量	用途					
搅水泵	W6-12.5-0.75	1	将自来水和泥沙搅拌均匀					
泥浆泵	WQD12-20-1.5	1	将试验水源输入试验					
手持式超声波流量计	MSDS-3000H	1	测量试验过程中的流量大小					
电子天平	YP2002N	1	称取样品质量					
电热恒温箱	DHG 系列	1	用于湿沙样和滤纸的烘干					
红外测温仪	DE6830B	1	测量试验过程的水温					
秒表	-	1	记录时间					
数码照相机	佳能 EOS 77D	1	拍取试验现象					
塑料量筒	1 000 mL	25	样品的取样与收集					
滤纸	Φ18 cm 定性滤纸	3	过滤水样中含有的泥沙					

表 2 试验沙样的粒径分布

粒径/mm	< 0.075	0.075~0.1	0.1~0.25	0.25~0.5	0.5~1
颗粒量/%	2.83	1.07	93.93	2.13	0.04

1.3 正交试验设计

在浑水试验过程中,考察因素分别为:进水流 量、含沙量、滤网面积和分水器型式,考察指标为: 过滤器的水头损失、截沙质量、总过滤效率。在进 行泵前微压过滤器浑水试验前,课题组做了预试验, 通过预试验确定试验装置的流量范围为 2~8 m³/h, 故试验流量分别取为 2、4、6、7、8 m³/h。由于新 疆地区灌溉水源多为地表水,具有含沙量高、粒径 小的特点,南疆河流多年平均含沙量基本超过 2.0 kg/m³, 北疆河流平均含沙量为 0.69 kg/m^{3[23]}, 为模 拟实际工程含沙量变化情况并缩短试验时间,本研 究含沙量范围设置为 0.5~2.5 g/L, 故含沙量分别取 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 g/L。分水器通过改变滤网 内部的水流分布状态,来提高过滤速度和改善泥沙 分布的均匀性,分别加入3种不同类型的分水器, 对比分析出水头损失小,过滤效率高的分水器。过 滤池的长度可分别调整为 505、705、915 mm, 对应 的滤网面积分别为1105、1582、2060 cm²。

因此,选取的因素及水平如下:进水流量 A (2、 4、6、7、8 m³/h,记为 A₁—A₅),含沙量 B (0.5、 1.0、1.5、2.0、2.5 g/L,记为 B₁—B₅),分水器型式 C (不加、1型、2型、3型,记为 C₁—C₄),滤网面 积 D (1105、1582、2060 cm²,记为 D₁—D₃)。 1.4 试验步骤

关闭排污阀门,调节进水阀门开度至设计流量,加入称量好的泥沙,打开搅水泵,将水沙混合均匀, 含沙浑水由泥浆泵吸入过滤系统开始过滤,试验过 程中,读取不同试验条件下,不同过滤时间对应的 蓄水池和过滤池内水位;记录相应时间下的进水流 量大小,并同时在出水管尾部提取含沙水样,采用 烘干法测其出水含沙量;试验结束后,将滤网内聚 集的泥沙颗粒和沉积在过滤池底的泥沙进行称质量。 每一组浑水试验结束后,将整个试验装置清洗干净, 按照正交试验设计安排试验。

1.5 试验指标

过滤器的水头损失(h_w)。当水流经过管道、阀 门、滤网等过滤元件时,由于进出口断面形式发生 变化以及过滤元件对水流造成的阻力,产生的能量 损失。当水流含有泥沙等杂质时,此时水流的黏滞 性大于清水,在水流运动过程中,流体之间以及流 体与过滤器接触面之间的阻力会增大,会产生更大 的能量损失。因此,确定影响水头损失的关键因素,

可为降低水头损失以及进一步的结构优化提供参考。

总过滤效率 (η)。过滤器过滤过程过滤效率的均 值。过滤效率为过滤前水流含沙量 (S₁)与过滤后 (出水口)水流含沙量 (S₂)的差值和过滤前水流含 沙量的比值,过滤效率表达式如(1)所示,过滤效 率反映了过滤器对于水中杂质的拦截程度百分比,过 滤效率越高,则滤后水质越好,越能满足灌溉要求。

$$\eta = \frac{S_1 - S_2}{S_1} \times 100\%$$
 (1)

截沙质量(*R*_m)。当过滤器在不同试验条件下工作时,由于进水流量、含沙量、滤网面积、分水器型式的差异,会导致滤网内截留泥沙的质量存在差异。分析不同试验条件对截留泥沙质量的影响,确定影响截留泥沙质量的关键参数,进一步提升装置的泥沙截取能力。

2 结果与分析

2.1 正交试验结果及极差分析

采用正交试验设计,空白列当作一个误差因素, 开展 25 组室内物理模型试验,试验结果如表 3 所示。

在表 3 中, K₁、K₂、K₃、K₄和 K₅分别为各因素 各个水平下水头损失的总和, k₁、k₂、k₃、k₄和 k₅分 别为各因素各个水平下水头损失的均值。当以过滤 器的水头损失为考察指标时,水头损失均值越小则 表明水力性能越好,越有利于过滤的进行。由表 3 水头损失极差分析结果可知,最佳工况为 A₁B₁C₄D₂, 即当进水流量为 2 m³/h,含沙量为 0.5 g/L,分水器 型式为 3 型,滤网面积为 1 582 cm²时的水头损失最 小。水头损失计算式:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho_g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho_g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_w, \qquad (2)$$

式中: hw 为水头损失 (m); Z1 和 Z2 为位置水头

(m); <u>a11²</u> 2g 为速度水头 (m); a1和a2分别为动 量修正系数,取为 1.0。由公式可知,流速越大,水 头损失越大,因此流量取最小试验流量 2 m³/h 时的 水头损失最小。当含沙量逐渐增大时,水流中颗粒 数量会增多,同时水流的运动黏滞系数会增大,进 而引起水头损失的增大。因此,当流量和含沙量取 最小值时,过滤器的水头损失最小。正交试验选出 的最佳工况为 A1B1C1D1,与极差分析最优工况不同。 因此,为了验证该方案是否准确可靠,在进水流量 为 2 m³/h,含沙量为 0.5 g/L,分水器型式为 3 型, 滤网面积为 1 582 cm²时进行试验,试验结果表明水 头损失为 0.049 m,与表 3 中试验结果相近,验证了 该方案为最佳工况。因此,确定的最佳工况为进水 流量 2 m³/h,含沙量为 0.5 g/L,分水器型式为 3 型,

滤网面积为1582 cm²。

当以过滤器的截沙质量作为考察指标时,截沙 质量的均值越大则表明在该试验条件下滤网内部截 留的泥沙颗粒越多,过滤泥沙量更大,更能保证出 水水质更加接近清水。由表 3 截沙质量极差分析结 果可知,最佳工况是 A₄B₅C₄D₃,即当进水流量为 7 m³/h,含沙量为 2.5 g/L,分水器型式为 3 型,滤网 面积为 2 060 cm²时的截沙质量最大。正交试验选出 的最佳工况为 A₃B₅C₄D₂,与极差分析最优工况不同。 因此,为验证该方案是否准确可靠,在进水流量为 7 m³/h,含沙量为 2.5 g/L,分水器型式为 3 型,滤网 面积为 2 060 cm²时进行试验,试验结果表明截沙质 量为 536 g,同表 3 中试验结果相比,验证了该方案 为最佳工况。因此,最佳工况为进水流量 7 m³/h,含

当以过滤器的总过滤效率作为考察指标时,总 过滤效率的均值越大表明在该试验条件下过滤器整 体对于泥沙的去除率更高,出水水质含沙量更小。 由表 3 中总过滤效率极差分析结果可知,最佳工况 是 A₂B₁C₄D₃,即当进水流量为 4 m³/h,含沙量为 0.5 g/L, 分水器型式为 3 型, 滤网面积为 2 060 cm² 时的总过滤效率最高。以总过滤效率为考察指标时, 极差分析确定的最佳工况为 A₂B₁C₄D₃, 而正交试验 优选出的最佳工况为 A₅B₁C₃D₃,与极差分析最优工 况不同。因此,为验证该方案是否准确可靠,在进 水流量为 4 m³/h, 含沙量为 0.5 g/L, 分水器型式为 3型,滤网面积为2060 cm²时进行试验,试验结果 表明总过滤效率为 0.961, 同表 3 中试验结果相比, 验证了该方案为最佳工况。因此,最佳工况为进水 流量 4 m³/h, 含沙量 0.5 g/L, 分水器型式 3 型, 滤 网面积 2 060 cm²。

2.2 方差分析

表 4 为浑水水头损失的方差分析,统计显著性水 平设置为 0.05,当 P<0.05 时表明该因素影响显著。 由表 4 可知,对于过滤器的浑水水头损失来说,进 水流量对浑水水头损失的影响最显著,说明进水流 量是影响过滤器水头损失的最关键因素,其次是含 沙量,然后是滤网面积,最后是分水器型式(影响 不显著)。

截沙质量的方差分析结果如表 5 所示。由表 5 可知,对于过滤器的截沙质量来说,含沙量对浑水 条件下截沙质量的影响最显著,说明含沙量是影响 过滤器截沙质量的最关键因素,其次是滤网面积, 然后是分水器型式,最后是进水流量(影响不显著)。

总过滤效率的方差分析结果如表 6 所示。由表 6 可知,对于过滤器的总过滤效率来说,滤网面积对

灌溉排水学报 http://www.ggpsxb.com

浑水条件下的总过滤效率影响最显著,说明滤网面 含沙量,然后是分水器型式,最后是进水流量(影积是影响过滤器总过滤效率的最关键因素,其次是 响不显著)。

表 3 浑水水头损失、截沙质量和总过滤效率的极差分析结;	;损失、截沙质量和总	,过滤效率的极差分析结果
------------------------------	------------	--------------

Table 3 Range analysis results of muddy water head loss, trapped sediment mass and total filtration efficiency									
试验结果与分析	试验编号	进水流量/ (m ³ h ⁻¹)	含沙量/ (g L ⁻¹)	分水器型式	滤网面积/cm ²	空白列	水头损失/m	截沙质量/g	总过滤效率
	1	7	1.0	2型 Type-2	1 582	3	0.135	212.6	0.908
	2	2	0.5	不加 Not used	1 105	1	0.046	103.0	0.895
	3	7	0.5	不加 Not used	1 582	2	0.118	105.6	0.920
	4	4	0.5	3型 Type-3	1 105	3	0.079	106.8	0.916
	5	8	2.0	1型 Type-1	1 105	2	0.268	400.1	0.844
	6	4	2.5	不加 Not used	1 582	2	0.133	497.4	0.859
	7	8	1.5	3型 Type-3	1 582	1	0.155	323.3	0.895
	8	7	2.0	3 型 Type-3	1 105	5	0.198	420.85	0.860
	9	6	2.0	不加 Not used	2 060	3	0.139	409.6	0.885
	10	8	1.0	不加 Not used	1 582	5	0.152	201.1	0.893
	11	4	2.0	2型 Type-2	1 582	1	0.126	426.3	0.882
	12	7	1.5	不加 Not used	1 105	4	0.183	293.4	0.847
试验结果	13	6	1.0	不加 Not used	1 105	1	0.141	199.2	0.863
	14	4	1.5	不加 Not used	2 060	5	0.099	309.6	0.891
	15	8	2.5	不加 Not used	1 105	3	0.282	475.9	0.830
	16	2	2.5	2型 Type-2	1 105	5	0.096	500.1	0.844
	17	6	2.5	3型 Type-3	1 582	4	0.163	523.0	0.891
	18	2	1.0	3型Type-3	2 060	2	0.068	215.2	0.930
	19	7	2.5	1型Type-1	2.060	1	0.202	521.4	0.885
	20	6	0.5	1型Type1	1 582	5	0.116	106.9	0.941
	21	2	15	1型Type1	1 582	3	0.089	317.5	0.902
	21	- 6	1.5	1 重 Type-1 2 刑 Type-2	1 105	2	0.185	301.5	0.855
	22	8	0.5	2 重 Type-2	2 060	4	0.136	107.2	0.055
	23	2	2.0	2 至 Type-2	1 582	4	0.078	404.7	0.950
	24	4	2.0	1刑 Type 1	1 105	4	0.078	205.3	0.800
	2.5 V	0 277	0.405	1 271	1 105	4	0.110	205.5	0.875
	K ₁	0.577	0.493	0.701	1.394	0.070	-	-	-
	К ₂ К	0.555	0.612	0.791	1.203	0.772	-	-	-
	Λ ₃	0.744	0.711	0.678	0.044	0.724	-	-	-
	K4	0.836	0.809	0.003	-	0.676	-	-	-
	Λ ₅	0.993	0.876	-	-	0.001	-	-	-
极左方例	k_1	0.075	0.099	0.137	0.159	0.134	-	-	-
	k_2	0.111	0.122	0.158	0.127	0.154	-	-	-
	<i>k</i> ₃	0.149	0.142	0.136	0.129	0.145	-	-	-
	k_4	0.167	0.162	0.133	-	0.135	-	-	-
	<i>k</i> ₅	0.199	0.175	-	-	0.132	-	-	-
	K_1	1 540.5	529.5	2 999.5	3 006.2	1 573.2	-	-	-
	K_2	1 545.4	1 033.4	1 551.2	3 118.4	1 519.8	-	-	-
	K_3	1 540.2	1 545.3	1 547.7	1 563.0	1 522.4	-	-	-
	K_4	1 553.9	2 061.6	1 589.2	-	1 533.6	-	-	-
截沙质量的	K_5	1 507.6	2 517.8	-	-	1 538.6	-	-	-
极差分析	k_1	308.1	105.9	300.0	300.6	314.6	-	-	-
	k_2	309.1	206.7	310.2	311.8	304.0	-	-	-
	k_3	308.0	309.1	309.5	312.6	304.5	-	-	-
	k_4	310.8	412.3	317.8	-	306.7	-	-	-
	k_5	301.5	503.6		-	307.7	-	-	-
	K_1	4.435	4.627	8.746	8.647	4.419	-	-	-
	K_2	4.442	4.487	4.465	8.954	4.407	-	-	-
	K_3	4.433	4.389	4.445	4.546	4.440	-	-	-
	K_4	4.420	4.336	4.491	-	4.453	-	-	-
总过滤效率的	K_5	4.417	4.308	-	-	4.428	-	-	-
极差分析	k_1	0.887	0.925	0.875	0.865	0.884	-	-	-
	k_2	0.888	0.897	0.893	0.895	0.881	-	-	-
	k_3	0.887	0.878	0.889	0.909	0.888	-	-	-
	k_4	0.884	0.867	0.898	-	0.891	-	-	-
	k_5	0.883	0.862	-	-	0.886	-	-	-

表 4 浑水水头损失的万差分析	
-----------------	--

Table 4 Analysis of variance of the muddy water head loss

	•			•	
误差来源	平方和	自由度	均方	F值	<i>P</i> 值
进水流量	0.046	4	0.012	25.861	1.519×10 ⁻⁵ ***
含沙量	0.019	4	0.005	10.329	1.007×10 ⁻³ **
分水器型式	0.002	3	0.001	1.567	2.529×10^{-1}
滤网面积	0.006	2	0.003	6.919	1.134×10 ⁻² *
误差	0.005	11	4.490×10 ⁻⁴		
总计	0.078	24			

注	显著性,	***表示 $p < 0.001$, **表示 $p < 0.01$, *表示 $p < 0.05$ 。
		表 5 截沙质量的方差分析

Table 5 Analysis of variance of the trapped sediment mass

误差来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值
进水流量	248.006	4	62.002	1.182	3.714×10 ⁻¹
含沙量	501 171.628	4	125 292.907	2 388.086	$4.434{\times}10^{{}^{-16}{*}{*}{*}}$
分水器型式	1 161.915	3	387.305	7.382	5.547×10^{-3} **
滤网面积	792.438	2	396.219	7.552	$8.625 \times 10^{-3} **$
误差	577.124	11	52.466		
总计	503 951.112	24			

表 6 总过滤效率的7	方差分析
-------------	------

Table 6 Analysis of variance of total filtration efficiency

误差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
进水流量	9.346×10 ⁻⁵	4	2.336×10 ⁻⁵	0.609	6.645×10 ⁻¹
含沙量	0.013	4	0.003	87.810	2.850×10^{-8}
分水器型式	0.002	3	0.001	20.352	8.530×10 ⁻⁵ ***
滤网面积	0.008	2	0.004	105.722	6.576×10 ⁻⁸ ***
误差	4.219×10^{-4}	11	3.835×10^{-5}		
总计	0.024	24			

注 显著性, ***p<0.001, **p<0.01, *p<0.05.

2.3 正交试验结果的综合分析

对于一个多考察指标的正交试验来说,试验方 案的设计以及实施与单一指标正交试验是相同的。 主要区别在于,当试验有多个考察指标时,每做 1 次试验,均需对多个考察指标进行测试并记录。当 对试验结果进行分析时,也需要对试验考察指标进 行一一分析,综合平衡各个指标,最终确定出最优 组合。在本次试验过程中,考察因素为:进水流量、 含沙量、分水器型式和滤网面积,以过滤器的水头 损失、截沙质量和总过滤效率作为考察指标,考察 各因素对考察指标的影响,通过试验确定最佳工况。

对 2.1 节中介绍的极差分析结果进行进一步的分 析,由于各指标单独分析得到的优化条件不一致, 因此需要综合平衡各考察指标间的关系,确定出最 优组合方案。

2.3.1 进水流量对各考察指标影响的综合分析

进水流量对浑水水头损失的影响大小排第一位, 为主要因素,取 A₁时水头损失最小;其对于截沙质 量的影响排第五,为次要因素,取 A₄时最好;其对 总过滤效率的影响排第五,为次要因素,取 A₂最好, 因此 A 应取 A₁。但当 A 取 A₂时的水头损失仅略大 于水头损失最小值,此时的截沙质量仅次于最大截 沙质量,过滤效率达到最大,综合考虑各考察指标,流量A取为A2时性能最佳。

2.3.2 含沙量对各考察指标影响的综合分析

含沙量对于水头损失的影响排第二位,取 B₁ 最 好;其对截沙质量的影响排第一位,取 B₅时最好; 其对总过滤效率的影响排第一位,为主要影响因素, 取 B₁最好;综上,含沙量 B 可取 B₁或 B₅。但是, 当 B 取 B₁时对于此工况的截沙量较小,不利于实际 应用,为了平衡水头损失、截沙质量、总过滤效率 之间的关系,B 选取为 B₃水平,既可保证较低的水 头损失,又可以有较高的截沙质量和总过滤效率。 2.3.3 分水器型式对各考察指标影响的综合分析

分水器型式对水头损失的影响排第四,取 C₄ 最好;其对截沙质量的影响排第二,取 C₄ 最好;其对 总过滤效率的影响排第三位,取 C₄ 最好; 综上,分 水器型式取 C₄最佳。

2.3.4 滤网面积对各考察指标影响的综合分析

滤网面积对水头损失的影响排第三,取 D₂ 最佳; 其对截沙质量的影响排第三,取 D₃ 时最佳;其对总 过滤效率的影响排第二,取 D₃ 最佳;综上,滤网面 积可取 D₂或 D₃。当 D 选取为 D₃时的水头损失略大 于最小水头损失,其截沙质量和总过滤效率均处于 最大值。而当 D 取 D₂时的水头损失最小,且其截沙 质量和总过滤效率与最优水平相差不大,故从减小 水头损失角度考虑,D 可选 D₂,从截沙质量和总过 滤效率方面考虑,D 可选 D₃。

2.3.5 最佳工况的确定

综上可知,最佳工况为进水流量取 A₂,含沙量 B 取 B₃, 分水器型式取 C₄最佳, 滤网面积取 D₂、D₃。 即 A₂B₃C₄D₂和 A₂B₃C₄D₃,流量为 4 m³/h,含沙量为 1.5 g/L, 分水器型式为 3 型, 滤网面积为 1 582 cm² 或者滤网面积为 2 060 cm²。为验证该方案是否可靠, 采用试验方法进行验证。当进水流量为4m³/h,含沙 量为 1.5 g/L, 分水器型式为 3 型, 滤网面积为 1 582 cm²时,试验结果表明,浑水水头损失为: 0.112 m, 截沙质量为: 316.3 g, 总过滤效率为: 0.878。当进 水流量为 4 m³/h, 含沙量为 1.5 g/L, 分水器型式为 3型,滤网面积为2060 cm²时,试验结果表明,浑 水水头损失为: 0.115 m, 截沙质量为: 322.2 g, 总 过滤效率为: 0.906。试验结果对比可知, 水头损失 相差不大,但采用更大面积滤网时将会有更大的截 沙质量和总过滤效率,因此滤网面积选为 2 060 cm²。 试验发现通过单指标和多指标试验结果分析确定的 最佳工况不同,而实际工程中通常兼顾多个考察指 标,因此,采用综合指标来确定最佳工况。最终, 通过对多个考察指标综合分析确定的最佳工况为:

进水流量 4 m³/h, 含沙量 1.5 g/L, 分水器型式 3 型, 滤网面积 2 060 cm²。

3 讨论

本文通过方差分析探究得出进水流量是影响泵 前微压过滤器水头损失的首要影响因素。对于泵后 强压条件下的网式过滤器水头损失的研究,专家学 者们主要通过物理试验和理论分析等方法探究了流 量对网式过滤器的影响,研究结果表明水头损失随 着进水流量的增大而增大[17,24-25],这就说明进水流 量对网式过滤器的水头损失有着重要影响。泵前微 压过滤器是在微压边界条件下运行的,相比于在泵 后强压条件下运行的过滤器水头损失要小得多,仅 有 0.115 m,与目前主推的低压(微压)小流量技术 相匹配,由于其水头损失小,所需要的水泵扬程小 相应的功率也低,因此可节约大量电力。在研究泵 前微压过滤器总过滤效率时滤网面积和含沙量对其 有着重要影响,专家学者们在探究泵后强压条件下 的网式过滤器过滤性能时,发现影响过滤器总过滤 效率的主要因素有流量、含沙量、滤网孔径[16,26-27] 等,这与影响泵前微压过滤器总过滤效率的因素基 本一致。

本研究取得的成果仅适用于流量(2、4、6、7、 8 m³/h)、含沙量(0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 g/L)、 分水器型式(1型、2型、3型)、滤网面积(1 105、 1 582、2 060 cm²),其他工况有待进一步研究。且 本试验仅探讨了流量、含沙量、分水器型式、滤网 面积 4 个参数对泵前微压过滤器水头损失、截沙质 量和总过滤效率的影响,而对沙粒粒径、滤网目数 等参数尚未研究,在今后的研究中将会考虑更多的 影响因素对泵前微压过滤器的水力性能和过滤性能 的影响。在本试验中对泵前微压过滤器只进行了物 理试验,并未对其内部流场进行探索,在今后的研 究中可结合计算机数值模拟等方法,深化有关泵前 微压过滤器的研究。

4 结 论

本文在对泵前微压过滤器进行室内物理模型试 验的基础上,研究了进水流量、含沙量、分水器型 式、滤网面积对水头损失、截沙质量和总过滤效率 的影响,通过方差分析得到,各因素对水头损失的 影响排序为:进水流量、含沙量、滤网面积、分水 器型式;各因素对截沙质量的影响排序为:含沙量、 滤网面积、分水器型式、进水流量;各因素对总过 滤效率的影响排序为:滤网面积、含沙量、分水器 型式、进水流量;通过对多个考察指标综合分析确 定的最佳工况为:进水流量 4 m³/h,含沙量 1.5 g/L, 分水器型式 3 型,滤网面积 2 060 cm²。

参考文献:

- MESQUITA M, DE DEUS F P, TESTEZLAF R, et al. Design and hydrodynamic performance testing of a new pressure sand filter diffuser plate using numerical simulation[J]. Biosystems Engineering, 2019, 183: 58-69.
- [2] CAPRA A, SCICOLONE B. Emitter and filter tests for wastewater reuse by drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2004, 68(2): 135-149.
- [3] LIU Z J, SHI K, XIE Y, et al. Hydraulic performance of self-priming mesh filter for micro-irrigation in northwest China[J]. Agricultural Research, 2021: 1-10.
- [4] DEMIR V, YURDEM H, YAZGI A, et al. Determination of the head losses in metal body disc filters used in drip irrigation systems[J]. Turkish Journal of Agriculture & Forestry, 2009, 33(3): 219-229.
- [5] 刘军. 新疆农业高效节水灌溉技术长效利用研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆 农业大学, 2016.

LIU Jun. Study on long-term utilization of agricultural high-efficienty water-saving irrigation technology in Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2016.

- [6] 刘旋峰, 郭兆峰, 石鑫, 等. 浅析国内几种微灌用水质处理过滤器的使用现状[J]. 新疆农机化, 2017(3): 27-30.
 LIU Xuanfeng, GUO Zhaofeng, SHI Xin, et al. Analysis of utilization of water treatment filters for micro-irrigation in China[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2017(3): 27-30.
- [7] ELBANA M, RAM REZ DE CARTAGENA F, PUIG-BARGUÉS J. New mathematical model for computing head loss across sand media filter for microirrigation systems[J]. Irrigation Science, 2013, 31(3): 343-349.
- [8] 刘焕芳, 王军, 胡九英, 等. 微灌用网式过滤器局部水头损失的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2006(6): 57-60.
 LIU Huanfang, WANG Jun, HU Jiuying, et al. The experimental study on local head loss of screen filter in micro irrigation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(6): 57-60.
- [9] 郑铁刚, 刘焕芳, 宗全利, 等. 微灌用自吸自动网式过滤器水头损失的 试验研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2008, 26(6): 772-775. ZHENG Tiegang, LIU Huanfang, ZONG Quanli, et al. Experimental studies on head loss of self cleaning water screen filter in microirrigation[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2008, 26(6): 772-775.
- [10] DURAN-ROS M, ARBAT G, BARRAGÁN J, et al. Assessment of head loss equations developed with dimensional analysis for micro irrigation filters using effluents[J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(4): 521-526.
- [11] YURDEM H, DEMIR V, DEGIRMENCIOGLU A. Development of a mathematical model to predict head losses from disc filters in drip irrigation systems using dimensional analysis[J]. Biosystems Engineering, 2008, 100(1): 14-23.
- [12] WU W Y, CHEN W, LIU H L, et al. A new model for head lo ss assessment of screen filters developed with dimensional analysis in drip irrigation systems[J]. Irrigation and Drainage, 2014, 63(4): 523-531.
- [13] ZONG Q L, ZHENG T G, LIU H F, et al. Development of head loss equations for self-cleaning screen filters in drip irrigation systems using dimensional analysis[J]. Biosystems Engineering, 2015, 133: 116-127.
- [14] 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.
 CUI Rui, CUI Chunliang, SHENG Xiangming, et al. Research of lamination head loss for two different types of channel structure[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(2): 257-260.

78

- [15] 张文正, 蔡九茂, 吕谋超, 等. 砂石过滤器过滤效果影响因素试验研 究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(7): 77-83.
 ZHANG Wenzheng, CAI Jiumao, LYU Mouchao, et al. Experimental study on influencing factors of filtration effect of sand filter[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(7): 77-83.
- [16] 宗全利,杨洪飞,刘贞姬,等. 网式过滤器滤网堵塞成因分析与压降计算[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 215-222. ZONG Quanli, YANG Hongfei, LIU Zhenji, et al. Clogging reason analysis and pressure drop calculation of screen filter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 215-222.
- [17] 石凯, 刘贞姬, 李曼. 新型翻板网式过滤器水头损失试验研究[J]. 排 灌机械工程学报, 2020, 38(4): 427-432.
 SHI Kai, LIU Zhenji, LI Man. Experimental study on head loss of a new type of rotatable plate screen filter[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(4): 427-432.
- [18] 周理强, 韩栋, 喻黎明, 等. 导流片对 Y 型网式过滤器性能的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 40-46. ZHOU Liqiang, HAN Dong, YU Liming, et al. Effects of guide vanes on performance of Y-screen filter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(12): 40-46.
- [19] 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.

LI Nan, ZHAI Guoliang, ZHANG Wenzheng, et al. Filtration performance of disc filters for microirrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(11): 52-56.

- [20] 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. QIN Tianyun, WANG Wen'e, HU Xiaotao. Hydraulic performance of screen and disc filters for drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(1): 57-62.
- [21] 李云开, 冯吉, 宋鹏, 等. 低碳环保型滴灌技术体系构建与研究现状分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 83-92.

LI Yunkai, FENG Ji, SONG Peng, et al. Developing situation and

system construction of low-carbon environment friendly drip irrigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 83-92.

- [22] 陶洪飞,周洋,李巧,等.泵前微压过滤装置.中国:
 202020260675.0[P]. 2020-11-03.
 TAO Hongfei, ZHOU Yang, LI Qiao, et al. Pre-pump Micro-pressure filtration device. China: 202020260675.0[P]. 2020-11-03.
- [23] 刘焕芳, 宗全利, 金瑾, 等. 西北旱寒区渠系泥沙防控研究: 以新疆为 例[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(6): 1-9. LIU Huanfang, ZONG Quanli, JIN Jin, et al. Sediment control of canal heads and channel in arid and cold area of northwest China—Taking xinjiang as an example[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering. 2021, 19(6): 1-9.
- [24] 骆秀萍. 自清洗网式过滤器运行特性及内部流场数值模拟研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2013.
 LUO Xiuping. Study on operating characteristics and internal flow field numerical simulation of self-cleaning screen filter[D]. Shihezi: Shihezi

numerical simulation of self-cleaning screen filter[D]. Shihezi: Shihezi University, 2013. 宗全利, 刘飞, 刘焕芳, 等. 大田滴灌自清洗网式过滤器水头损失试

验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 86-92. ZONG Quanli, LIU Fei, LIU Huanfang, et al. Experiments on water head loss of self-cleaning screen filter for drip irrigation in field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(16): 86-92.

 [26] 王柏林, 刘焕芳, 刘贞姬, 等. 旋流网式组合型过滤器过滤性能研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(9): 1-4, 9.
 WANG Bolin, LIU Huanfang, LIU Zhenji, et al. Experimental research on the filter performance of swirl-and-screen type combined filter[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(9): 1-4, 9.

[27] 王柏林. 旋流网式组合型过滤器水砂性能分析[D]. 石河子: 石河子大学. 2016.

WANG Bolin. Study on water and sand performance of swirl and screen type combined filter[D]. Shihezi: Shihezi University, 2016.

Optimizing Operating Condition of the Filters in Micro-irrigation Pump

[25]

TAO Hongfei^{1,2*}, SHEN Pingping^{1,2}, ZHOU Yang^{1,2}, WU Zijing^{1,2}, LI Qiao^{1,2}

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, China)

Abstract: [Objective**]** A porous filter is often used in micro-irrigation systems to filter debris and sand particles. Its performance depends on many factors. The purpose of this paper is to present a method to optimize its operating conditions. **[**Method **]** The studies were based on a micro-pressure filter. We took water pressure loss, sand interception rate and filtration efficiency as assessment criteria. In the experiments we measured and calculated the combined impact of inlet flow, sediment content, water-separator type, and filter area on operation of the filter. The results were processed using the analysis of range and variance. **[**Result**]** The factors that affected the head loss of muddy water across the filter were ranked in the descending order of inlet flow > sediment content > filter area > water separator type. The factors that impacted the mass of sand trapped by the filter were ranked in the descending order of sediment content > filter area > water separator type > inlet flow rate. The factors that affected the total filtration efficiency were ranked in the descending order of filter area > sediment content > water separator type > inlet flow rate. **[**Conclusion **]** The two factors that affected water head loss across the filter, sediment filtration and total filtration efficiency most are sediment content and filter area. Comprehensive analysis shows that the optimal operating conditions for the filter are sediment concentration 0.36 kg/m³, inflow rate 4 m³/h, water separator type Type 3, filter area 2 060 cm².

Key words: filter; micro-irrigation; orthogonal design; analysis of variance

责任编辑:赵宇龙