

Y型网式过滤器多目标优化正交试验

喻黎明¹ 曹东亮¹ 李久霖¹ 李娜¹ 韩栋² 邵社刚³

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500; 2. 农业农村部工程建设服务中心, 北京 100081;
3. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 为了提高Y型网式过滤器水力性能和抗堵塞性能,以出口与筒体间夹角、入口缩小比、导流片高度和导流片圆心角为试验因素,采用CFD-DEM耦合和物理试验相结合的方法对过滤器内部的过滤过程进行探究。通过系列数值模拟正交试验结果的极差分析探索各因素对水头损失、中速过流量区域面积占比、颗粒分布相对标准偏差及拦截率4个指标影响的敏感度,结果表明:中、高速过流量区域均集中在出口侧,当出口与筒体间夹角越小时,出口截面积与其呈正相关,且对应中速过流区域面积越大,水力性能越好。颗粒集中通过区域与中速过流量区域相对应,入口缩小比的增大使颗粒分布越均匀,抗堵塞性能越好。结构优化参数组合为:出口与筒体间夹角35°、入口缩小比22/26、导流片高度10 mm、导流片圆心角90°,其中夹角对综合指标影响最为显著,是结构设计的关键参数。与改进前相比,水头损失减小了36.6%,相对标准偏差减小了43.26%,拦截率提高了3.93个百分点,中速过流量区域面积占比增加了15.77个百分点,表明了优化方案的有效性。研究结果可为网式过滤器的优化设计提供参考。

关键词: 网式过滤器; CFD-DEM耦合; 数值模拟; 正交试验; 结构优化

中图分类号: S275.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)09-0322-12



Multi-objection Optimization Orthogonal Test of Y-type Screen Filter

YU Liming¹ CAO Dongliang¹ LI Jiulin¹ LI Na¹ HAN Dong² SHAO Shegang³

(1. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China
2. Center of Engineering and Construction Service, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China
3. Research Institute of Highway Science, Ministry of Transportation, Beijing 100088, China)

Abstract: In order to improve the hydraulic performance and anti-clogging performance of Y-type screen filter, taking the angle between outlet and cylinder, the inlet reduction ratio, the height of guide vane and the center angle of guide vane as experimental factors, the filtration process inside the filter was studied by the method of CFD-DEM coupling and physical test. Through the range analysis of a series of numerical simulation orthogonal test results, the sensitivity of various factors to water head loss, area proportion of medium speed flow area, relative standard deviation of particle distribution and interception rate was explored. The results showed that the medium and high speed flow areas were concentrated on the exit side, and the exit cross-sectional area was positively correlated with it when the angle between the outlet and the cylinder was small, and the larger the corresponding medium-speed flow area was, the better the hydraulic performance was. The concentration of particles through the region corresponds to the medium-speed flow area, and the increase of the inlet reduction ratio made the more uniform particle distribution, the better the anti-clogging performance can be. The combination of structural optimization parameters was as follows: the angle between outlet and cylinder was 35°, the inlet reduction ratio was 22/26, the height of guide vane was 10 mm, and the center angle of guide vane was 90°. Among them, the included angle had the most significant influence on the comprehensive index, which was the key parameter of structural design. Compared with that before improvement, the head loss was reduced by 36.6%, the relative standard deviation was reduced by 43.26%, the interception rate was increased by

收稿日期: 2021-09-16 修回日期: 2021-10-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51769009, 52269011)

作者简介: 喻黎明(1976—),男,教授,博士,主要从事节水灌溉理论与设备研究, E-mail: liming16900@163.com

通信作者: 李娜(1978—),女,实验师,主要从事节水灌溉理论与设备研究, E-mail: kjelina@163.com

3.93 percentage points, and the area proportion of medium-speed flow area was increased by 15.77 percentage points, which showed the effectiveness of the optimization scheme. The research results can provide some reference for the optimal design of screen filter.

Key words: screen filter; CFD – DEM coupling; numerical simulation; orthogonal test; structure optimization

0 引言

当前我国农业快速发展的过程中,微灌技术的应用在农业发展中起到重要的作用^[1-2]。网式过滤器作为微灌系统中的核心设备,有效减少杂质进入,提高灌水质量,进而减缓微灌系统堵塞。网式过滤器^[3-4]具有结构简单、便于制造与安装、过滤效果好和价格低廉等优点,在国内外微灌系统中被广泛使用。

为了提高网式过滤器的综合性能,国内外学者进行了大量研究,并取得了一定成果。目前,对网式过滤器的优化研究主要集中在过滤机理和结构上。在过滤机理优化方面,李曼等^[5-6]研究了不同过流量和含沙量对水头损失的影响,并得到了浑水水头损失计算公式;朱德兰等^[7]进行 Y 型网式过滤器堵塞试验,得到局部水头损失与肥液浓度、滤网清洁度的关系式;喻黎明等^[8]通过 CFD – DEM 耦合模拟了不同流量下 Y 型网式过滤器内部不同粒径沙粒的运动与分布,分析了过滤器内部流态对沙粒运动分布的影响;宗全利等^[9]进行堵塞试验,建立了滤网内外压降与滤网孔径、滤网厚度等的定量关系式。在结构优化方面,李盛宝等^[10-11]将 3 种不同目数的滤网集成在同一壳体,提高了过滤效果;陶洪飞等^[12]探究了不同出水管角度对网式过滤器内部流场的影响;王新坤等^[13]通过优化过滤器滤筒形状、出入水口夹角和位置等结构改善过滤器内部流场分布,提高了速度分布的均匀性;WU 等^[14]提出在过滤器结构设计中应选择合适的进出口直径和滤网直径以改良过滤器的水力性能;王柏林等^[15]将旋流过滤器和网式过滤器串联连接进行试验,分析其在不同含砂率条件下的过滤性能变化规律;周理强等^[16]通过内置导流片改变了过滤器内部流态和沙粒运动分布规律,提高了过流能力与抗堵塞能力。

目前结构优化研究可分为将不同的过滤器或者部件进行组合和改变单个结构参数而固定其他结构参数,而涉及同时改变两个或者多个参数的研究较少。因此,本文对网式过滤器同时配置 4 个结构参数进行正交试验,以分析多个结构参数同时改变对多目标的影响,从而系统地筛选出最佳结构参数组合,并分析结构优化对过滤器过滤性能的影响机制,为过滤器优化设计提供理论依据。

1 正交试验设计与方法

1.1 网式过滤器结构

本文研究模型为农田灌溉常用 Y 型网式过滤器,过滤器主要由进水口、筒体、滤芯、堵头以及出水口组成(图 1),其中滤芯由冲孔钢板和不锈钢滤网复合而成,滤网包覆在冲孔钢板内侧。冲孔钢板可使滤网避免因流量大而产生移位,不锈钢滤网则起到过滤泥沙杂质的作用。

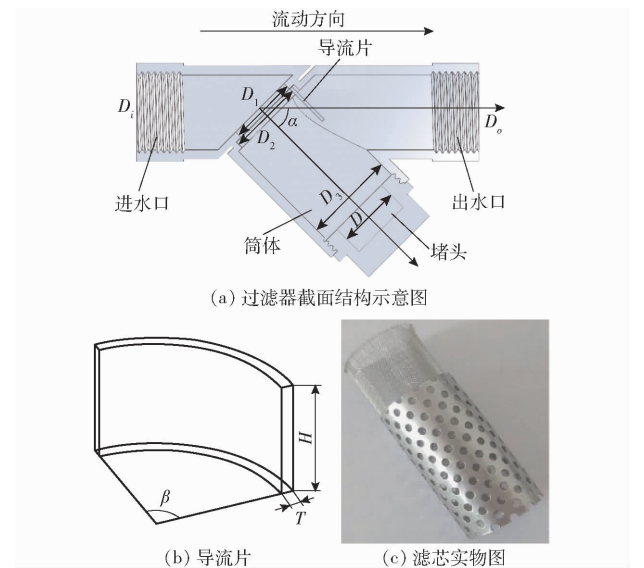


图 1 Y 型网式过滤器内部结构图

Fig. 1 Schematics of Y-type screen filter structure

1.2 试验因素和试验方案

如图 1 所示,网式过滤器结构参数主要有滤网目数 $N = 60$ 、入口直径 $D_i = 24$ mm、出口直径 $D_o = 24$ mm、出口与筒体间夹角(以下简称夹角) $\alpha = 45^\circ$ 、入口处最小内径 $D_1 = 20$ mm、滤网内径 $D_2 = 26$ mm、筒体内径 $D_3 = 29.5$ mm、导流片圆心角 $\beta = 60^\circ$ 、导流片高度 $H = 15$ mm、导流片厚度 $T = 2$ mm、堵头高度 $h = 10$ mm、堵头直径 $D = 20$ mm。结合周理强等^[16]和喻黎明等^[17]提出的过滤器结构优化方案建议,正交试验最终选择夹角 α 、入口缩小比 $R(D_1$ 与 D_2 的比值)、导流片圆心角 β 以及导流片高度 H 共 4 种因素作为研究对象。每种因素选取 3 个水平,因素水平如表 1 所示。通过 CFD – DEM 耦合计算,探讨不同因素对过滤器整体性能影响的规律,从而找到因素影响的显著性大小顺序和最优参数组合。

表 1 正交试验因素水平

Tab.1 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素			
	夹角/ (°)	入口缩小 比	导流片圆 心角/(°)	导流片高 度/mm
1	45	18/26	30	10
2	55	20/26	60	15
3	35	22/26	90	20

1.3 综合评分法

进行多指标正交试验时,需要采用综合评分法进行分析^[18-20]。根据各个指标的重要程度,对每个试验的每个指标按一定的评分标准评出分数,再将同一个试验中各指标的分数求和即为该试验的总分数。将这个总分数作为这个试验的总指标,然后根据这个总指标(分数),利用单指标试验结果的直观分析法作进一步的分析,确定较好的试验方案。

对每个试验的各个指标按照指标隶属度计算标准评出分数,指标隶属度计算方法如下:

若试验指标越高越好,则

$$\eta' = \frac{\eta_i - \eta_{\min}}{\eta_{\max} - \eta_{\min}} \tag{1}$$

式中 η' ——中速过流量区域面积占比隶属度
 η_i ——第*i*个试验中速过流量区域面积占比
 $\eta_{\max}$ ——正交试验中最大中速过流量区域面积占比
 $\eta_{\min}$ ——正交试验中最小中速过流量区域面积占比

$$I'_r = \frac{I_{ri} - I_{r\min}}{I_{r\max} - I_{r\min}} \tag{2}$$

式中 I'_r ——拦截率隶属度
 I_{ri} ——第*i*个试验拦截率
 $I_{r\max}$ ——正交试验中最大拦截率
 $I_{r\min}$ ——正交试验中最小拦截率

若试验指标越低越好,则

$$H'_L = \frac{H_{L\max} - H_{Li}}{H_{L\max} - H_{L\min}} \tag{3}$$

式中 H'_L ——水头损失隶属度
 H_{Li} ——第*i*个试验水头损失,m
 $H_{L\max}$ ——正交试验中最大水头损失,m
 $H_{L\min}$ ——正交试验中最小水头损失,m

$$S'_r = \frac{S_{r\max} - S_{ri}}{S_{r\max} - S_{r\min}} \tag{4}$$

式中 S'_r ——颗粒分布相对标准偏差隶属度
 S_{ri} ——第*i*个试验颗粒分布相对标准偏差
 $S_{r\max}$ ——正交试验中最大颗粒分布相对标准偏差

$S_{r\min}$ ——正交试验中最小颗粒分布相对标准偏差

1.4 网格划分与边界条件

根据表 1 要求,采用 SolidWorks 绘制过滤器三维模型。利用软件 ICEM (The integrated computer engineering and manufacturing code)对模型进行网格划分,主要为了将空间连续的流体区域分割成足够小的计算域,然后在每个计算区域上应用流体控制方程,求解所有区域的流体计算方程,最终获得整个计算区域上的物理量分布。网式过滤器的计算域形状较为规则,因此采用六面体结构化网格,同时将出入口的相贯线区域网格加密,网格质量采用 Determinant 3×3×3 标准度量并且都在 0.5 以上。网格数量越多,理论上计算精度越高,但是会增加计算量,因此需要对网格进行无关性验证^[21-22]。将网格模型 edge 上的节点数依次扩大 1.0 倍(方案 1)、1.2 倍(方案 2)、1.4 倍(方案 3)、1.6 倍(方案 4),对各网格模型进行水力性能测试,选取验证工况流量 $Q=3.2\text{ m}^3/\text{h}$,以水头损失为评价指标,与 Q 工况对应的水头损失 H_0 为 6 m。

根据数值计算得到的水头损失和对应的试验水头损失,定义相对误差 r 为

$$r = \frac{H_L - H_0}{H_0} \times 100\% \tag{5}$$

式中 H_L ——计算水头损失,m

当 r 小于 1%,该网格被认为满足计算要求, r 越小,说明网格对计算结果的影响越小。由表 2 可以看出,方案 1 和方案 2 的网格可满足计算要求,方案 3 和方案 4 中存在不满足计算要求的试验。综上所述,采用方案 1 进行正交试验。

表 2 正交试验组网格数

Tab.2 Grid number of original model and orthogonal test

试验 序号	网格数	$r/\%$			
		方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
1	329 112	0.34	0.32	0.11	0.45
2	329 588	0.22	0.22	2.53	1.04
3	329 746	0.35	0.29	0.91	0.55
4	334 260	0.68	0.47	0.82	0.39
5	333 846	0.54	0.68	0.41	0.61
6	340 776	0.62	0.43	0.32	0.21
7	335 404	0.89	0.51	1.12	0.37
8	334 462	0.42	0.19	0.33	0.22
9	334 814	0.53	0.38	0.51	0.49
原型	327 648	0.57	0.23	0.88	1.24

液相属于低速不可压缩流动,因此选用压力基求解器。过滤器内部存在回流与射流现象,故采用标准 $k-\varepsilon$ 模型^[23]对网式过滤器三维流场进

行求解,近壁区采用标准壁面函数。流体介质为液态水,固体介质为 abs 塑料。进口边界条件采用速度入口,流体与离散相均采用相同的速度(0.5 m/s),流速方向与入口边界垂直,湍流强度 I 为 5%,入口水力直径为 24 mm,出口采用压力出口,回流强度选取默认值。应用 SIMPLE 算法来耦合压力和速度之间的关系,收敛残差为 10^{-3} ,时间步长为 1×10^{-4} s。

本文水沙两相流的计算中颗粒相体积分数小于 10%,所以选用拉格朗日模型。颗粒设置为球形颗粒,采用 3 种粒径颗粒,半径分别为 100、150、200 μm 。颗粒与壳体的物性参数、接触参数设置如表 3、4 所示。

表 3 物性参数
Tab.3 Physical parameters

材料	泊松比	剪切模量/MPa	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
壳体	0.394	220	1 050
颗粒	0.400	22	2 500

表 4 接触参数
Tab.4 Contact parameters

碰撞形式	恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
颗粒-颗粒	0.545	0.3	0.005
颗粒-壳体	0.500	0.5	0.010

1.5 数值模拟验证

在清水条件下,通过试验测量的手段求解网式过滤器过流量与水头损失之间的关系式并与数值模拟的拟合结果进行对比,以验证数值模拟结论的准确性。清水为实验室自来水,试验装置如图 2 所示。

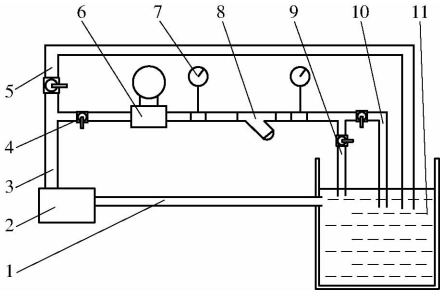


图 2 清水试验装置示意图

Fig.2 Schematic of clear water test device

1.进水管 2.自吸泵 3.出水管 4.球阀 5.分压管 6.智能电磁流量计 7.压力表 8.Y 型网式过滤器 9.取水口 10.回流管 11.蓄水桶

物理试验过程中,通过调节进口处阀门使网式过滤器前端压力表分别在 0.01、0.02、0.03、0.04、0.05、0.06、0.07、0.08、0.09、0.10 MPa 下稳定运行,此时网式过滤器两端的压力表读数之差换算后即为网式过滤器的水头损失。记录 10 组不同水头损失

下过滤器的过流量,经拟合得到过滤器的流量-压差曲线。数值模拟过程中,入口流速依次选定为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 m/s,从而得到不同入口流量,入口与出口的压力差都可以通过 Fluent 在 REPORT 模块中计算得出。

网式过滤器的流量-压降^[24]关系式为

$$\Delta h = kQ^x \tag{6}$$

式中 Δh ——进出口之间的水头损失,m

k ——水头损失系数

x ——流态指数

根据式(6)对所获得的数据点拟合得到如图 3 所示的流量-压降曲线。

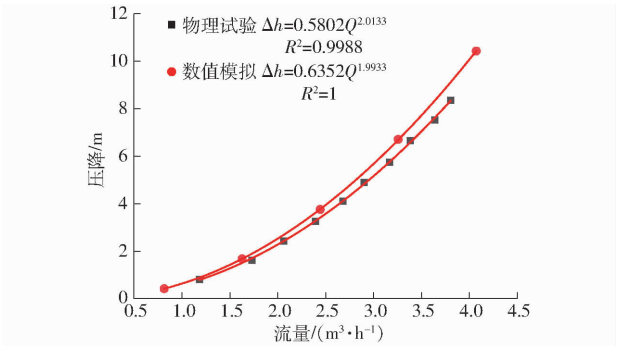


图 3 清水状态下的流量-压降曲线

Fig.3 Flow - pressure drop curves under clear water condition

对比物理试验和数值模拟拟合公式,两者的水头损失系数与流态指数差异分别为 8.65%、1.03%。物理试验与数值模拟拟合公式的决定系数分别为 0.998 8 和 1,表明式(6)对流量与压降关系的解释度很高,通过 t 检验法对结果进行验证,得到两组数据的压力差异不显著,证明了数值模拟结果是可靠的。对比不同流量下,仿真计算值与实际测量值的相对误差分别为 8.32%、14.75%、9.01%、9.98%、9.36%、7.61%、9.11%、7.65%、9.36%、8.18%,即多数误差在 10% 以内,满足定量预测要求,也证明了仿真计算结果的准确性,因此可以采用数值模拟的方法对过滤器性能进行分析和结构参数优化。

2 结果与分析

2.1 正交试验水力性能分析

2.1.1 水头损失

水力性能作为衡量过滤器性能的重要指标,即在相同的入口速度条件下,进出口之间水头损失之差越小,说明过滤器的水力性能越好。根据正交试验方案,以同样的数值计算方法依次计算在流速 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 m/s 下水头损失,然后对流量与压降数据点进行曲线拟合,9 组试验均遵循流量-

压降曲线变化规律。图 4 曲线可以清晰地分为 3 个层次,试验 4、5、6(夹角均为 55°)水头损失系数普遍较大,试验 7、8、9(夹角均为 35°)水头损失系数较小,指数总体波动不大,所以对于水头损失而言,夹角的影响最为明显。

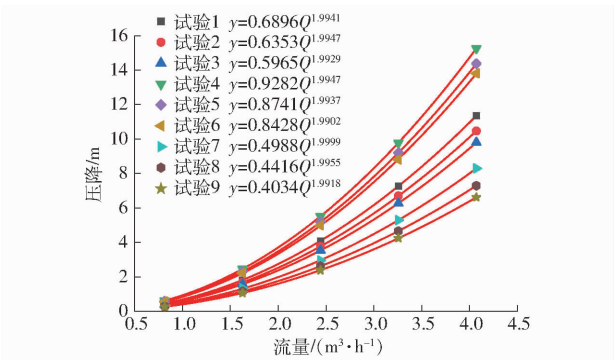


图 4 正交试验清水状态下的流量-压降曲线

Fig. 4 Flow - pressure drop curves of orthogonal test under clear water condition

以流速 0.5 m/s 为例,对水头损失 H_L 进行单指标直观分析,极差分析如表 5 所示,各因素对水头损失影响的显著性由大到小依次为夹角、入口缩小比、导流片高度、导流片圆心角。 K_i (i 分别取 1、2、3) 代表每个因素中与 i 水平相关的试验结果之和, k_i 代表每个因素中与 i 水平的试验结果之和的平均值。夹角为主导因素,导流片圆心角及高度敏感度较小,该结果与图 4 相吻合。夹角为 55°时,水头损失均值为 0.585 m;夹角为 35°时,水头损失均值较 55°减小了 49.1%,随着夹角的增大,水头损失也在增大,这与弋鹏飞等^[25]得出的弯折角越大,局部水头损失也越大的结论一致。

表 5 水头损失极差分析					
Tab. 5 Range analysis of head loss					
试验序号	$\alpha/(^{\circ})$	R	$\beta/(^{\circ})$	H/mm	H_L/m
1	45	18/26	30	10	0.458
2	45	20/26	60	15	0.422
3	45	22/26	90	20	0.396
4	55	18/26	60	20	0.615
5	55	20/26	90	10	0.580
6	55	22/26	30	15	0.560
7	35	18/26	90	15	0.331
8	35	20/26	30	20	0.294
9	35	22/26	60	10	0.268
K_1	1.276	1.404	1.312	1.306	
K_2	1.755	1.296	1.305	1.313	
K_3	0.893	1.224	1.307	1.305	
k_1	0.425	0.468	0.437	0.435	
k_2	0.585	0.432	0.435	0.438	
k_3	0.298	0.408	0.436	0.435	
极差 R	0.862	0.180	0.007	0.008	

2.1.2 网面过流量

网面过流量也是反映过滤器性能的重要指标,对于网式过滤器而言,仅保证水头损失小不足以说明过滤器结构设计的合理性,网面整体的使用效率也需要考虑。

考虑本次试验采用的滤芯为滤网和钢板复合而成,钢板冲孔之外的区域过流量为零。首先根据冲孔数将滤网面划分为 200 个区域,并设置对应的检测面,通过 CFD 计算流速 0.5 m/s 下过滤器的内部流场,将每个区域过流量数据导至 Excel,最后统计每个滤网面的总过流量,作为衡量滤网面过流能力的指标。由于过流量区域分布在圆柱型滤网上,为方便观察使用 Surfer 软件将网面过流量以柱面展开云图的形式表达。

如图 5a 所示,滤芯相邻圆周上的冲孔交错,相隔圆周上的冲孔处于同一列,所以图 5a 中的点 A 对应图 1c 中滤芯第一圆周上任意冲孔的圆心,图 5a 中的点 B 即为与点 A 同处一列最末一圆周上对应冲孔的圆心。云图以滤网出口侧面点 A 作为坐标原点, X 轴坐标值表示为沿圆周点到点 A 的弧长,沿滤网从点 A 指向点 B 为 Y 轴正方向。将不同区域的网面总过流量与对应的位置坐标进行整合,得到图 5b 的过流量分布云图。以试验 1 云图为例,距 Y 轴 20 mm 的区域称为出口侧,其余区域称为入口侧; Y 轴 0 ~ 10 mm 区域称为上端, 10 ~ 30 mm 称为中端, 30 ~ 40 mm 称为下端。

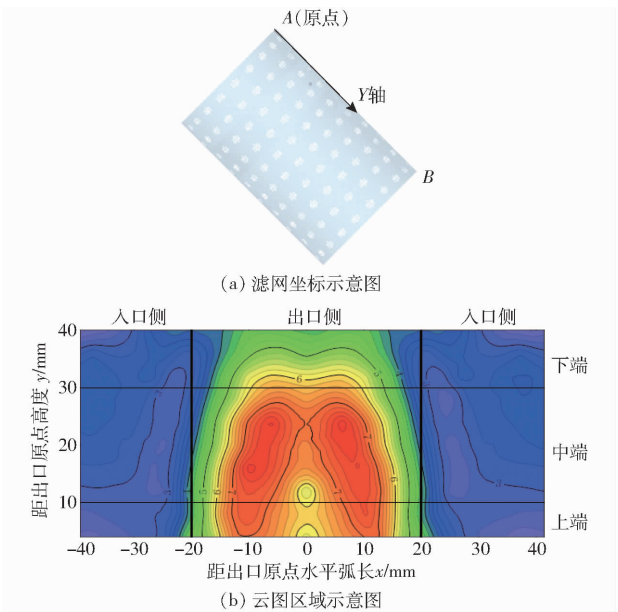


图 5 云图坐标和区域示意图

Fig. 5 Schematics of cloud map coordinates and region

将云图按照过流量划分为低速、中速、高速 3 种过流区域类型,分别对应流量 2 ~ 4 L/h、4 ~ 6 L/h、6 ~ 9 L/h。根据云图(图 6)可以发现,所有试验的

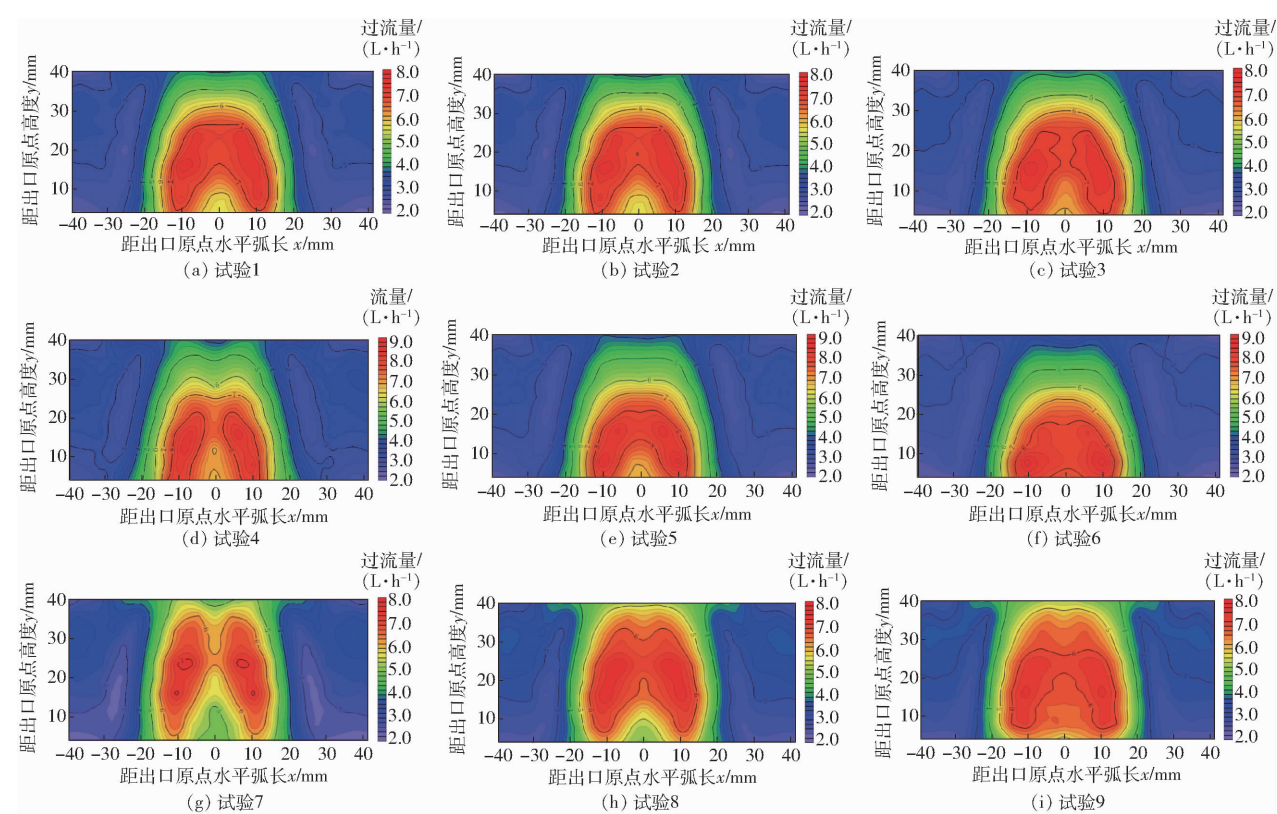


图6 正交试验网面过流量分布云图

Fig.6 Cloud maps of network flow distribution in orthogonal test

中高速过流量区域都集中在出口侧圆柱面上,而入口侧过流量在 2~4 L/h 范围内。试验 1~6 出口侧的下端区域存在低速过流量,出口侧过流量分布梯度较大,而试验 7、8、9 出口侧中高速过流量区域面积更广且分布更为均匀。

正交试验最大最小过流量统计如图 7 所示,各试验中最大过流量波动幅度最大为 2.45 L/h;最小过流量几乎处于同一水平,最大值与最小值只相差 0.51 L/h。各试验最大最小过流量间倍数分别为 3.43、3.34、3.51、3.54、3.89、4.17、2.68、2.88、3.01。整体而言,试验 7、8、9 间倍数较小,试验 4、5、6 倍数偏大,前者倍数的均值较后者减小 26.1%,表明试验 7、8、9 的过流量梯度过渡更为平缓即过流

量分布更加均匀。

不同速度的过流量区域面积占比统计如图 8 所示,试验 6 低速过流量区域面积最大,为 1 983.35 mm²,占滤网面面积的 59.9%。试验 7、8、9 的中速过流量区域面积占比高于其他试验 10 个百分点左右,而低、高过流量区域面积都小于其他试验。对于网面过流量而言,结构优化的目的就是减小局部低、高过流量区域的面积,提高中速过流量区域面积,缓和过流量之间的梯度。总体而言,试验 7、8、9 的过流量分布更加均匀,其高速过流量区域面积占比较低,使滤网承载过小的水流压力,不易使滤网发生变形而影响最终过滤的效果;低速过流量区域面积在试验组中保持低水平,能使滤网得到充分利用和保证过

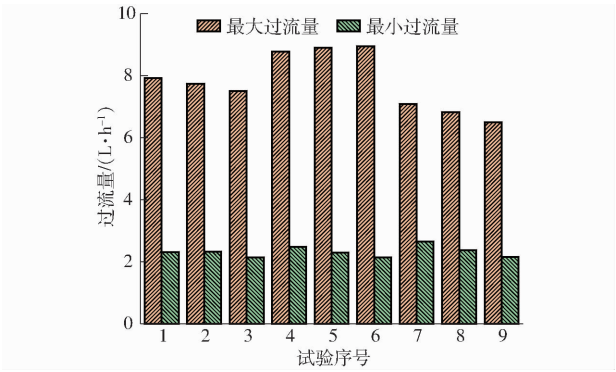


图7 正交试验滤网最大、最小过流量

Fig.7 Maximum and minimum overflow of filter screen in orthogonal test

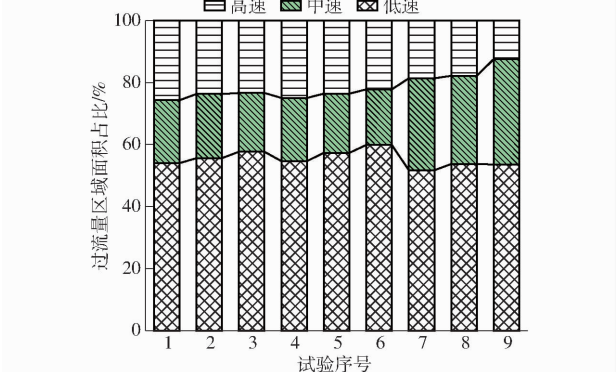


图8 正交试验3种过流速度过流量区域面积占比

Fig.8 Area proportion of three kinds of overcurrent velocity in orthogonal test

滤效率。

将图 8 中速过流量区域面积占比 η 作为评价指标,分别计算得到正交试验组的中速过流量区域面积占比,用极差分析法进行分析,从而得到各因素对指标 η 的影响程度。由表 6 可知,对中速过流量区域面积占比而言,影响因素的主次顺序为夹角、导流片圆心角、导流片高度和入口缩小比。其中,夹角的极差远大于其他因素,所以夹角对中速过流量区域

表 6 中速过流量区域面积占比极差分析

Tab.6 Range analysis of area proportion of medium speed flow area

试验序号	$\alpha/(^{\circ})$	R	$\beta/(^{\circ})$	H/mm	$\eta/\%$
1	45	18/26	30	10	20.30
2	45	20/26	60	15	20.68
3	45	22/26	90	20	18.97
4	55	18/26	60	20	20.40
5	55	20/26	90	10	19.09
6	55	22/26	30	15	17.94
7	35	18/26	90	15	29.66
8	35	20/26	30	20	28.47
9	35	22/26	60	10	34.01
K_1	59.95	70.36	66.71	73.40	
K_2	57.43	68.24	75.09	68.28	
K_3	92.14	70.92	67.72	67.84	
k_1	19.98	23.45	22.24	24.47	
k_2	19.14	22.75	25.03	22.76	
k_3	30.71	23.64	22.57	22.61	
极差 R	16.73	0.89	2.79	1.86	

面积占比作用最大,当夹角由 55° 减小至 35° 时,中速过流量区域面积占比提高了 57.63%。

2.2 正交试验抗堵塞性能

2.2.1 颗粒通过点均匀度

在过滤的初始阶段,部分小颗粒能够通过滤网孔而不会被拦截。随着过程的进行,颗粒在滤网上逐步堆积,从而形成滤饼层。分布均匀的颗粒会形成均匀的滤饼,起到辅助过滤的效果,同时也能避免由于局部堵塞而产生的一系列问题,因此需要通过分析小颗粒的运动轨迹来研究滤饼的分布。为了研究颗粒通过点分布的均匀性,采取类似网面过流量云图的区域划分方法,统计落在不同区域上的通过点,并采用相对标准偏差作为衡量坐标分布均匀性的指标,相对标准偏差 S_r 计算公式为

$$S_r = \frac{1}{(M-1)\bar{z}} \sum_{i=1}^M (z_i - \bar{z})^2 \tag{7}$$

式中 M ——区域数
 z_i ——区域 i 内颗粒数
 $\bar{z}$ ——区域平均颗粒数

在 CFD-DEM 计算结果的基础上通过 Matlab 统计颗粒轨迹线,计算小颗粒通过滤网面所对应的坐标(通过点坐标),并使用 Matlab 计算其 S_r , S_r 越小表明通过点分布越均匀。

图 9 为 Matlab 绘制的颗粒通过点分布图,可以发现正交试验通过点主要集中在出口侧上端以及出口侧和入口侧交汇的柱面区域。对比网面过流量

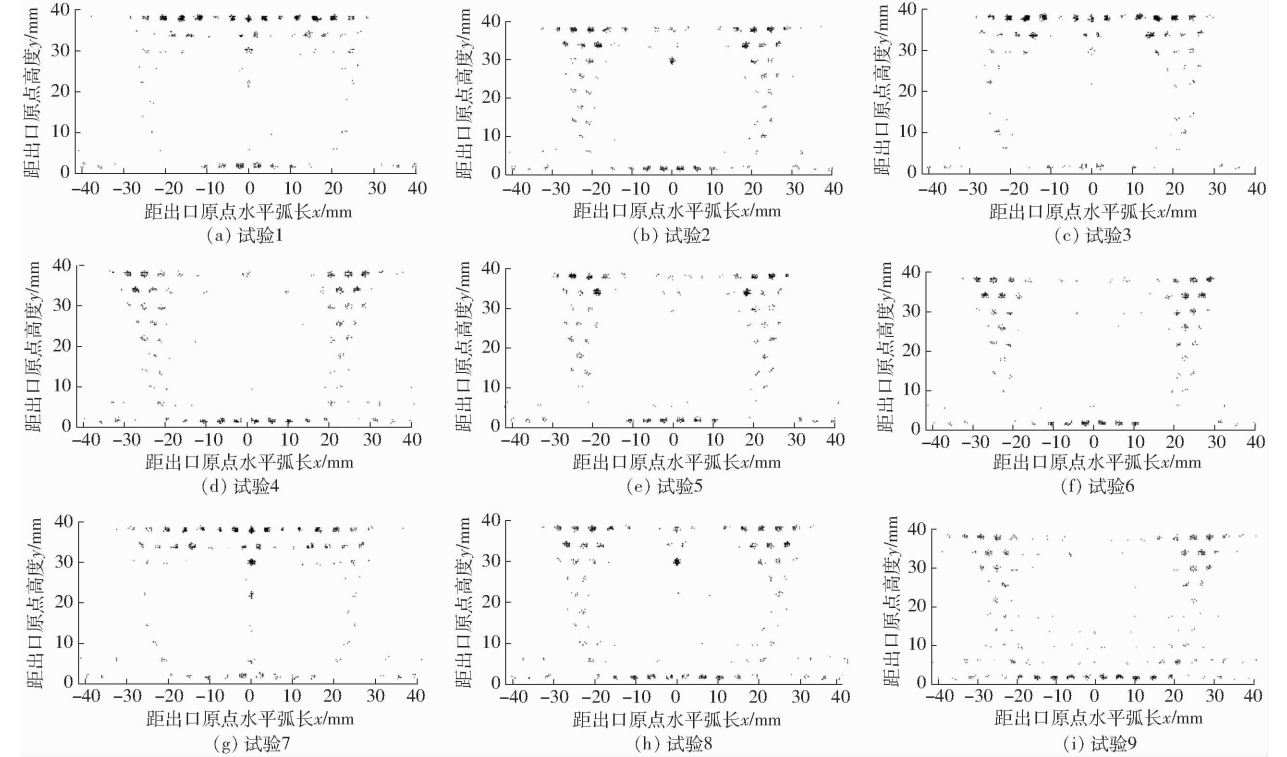


图 9 正交试验颗粒通过点分布图

Fig.9 Distributions of particles passing through points in orthogonal test

图,可以发现颗粒通过率低区域与高、低速过流量区域相对应,颗粒集中通过区域与中速过流量区域相对应。究其原因,高速过流量区域颗粒很容易堆积,形成滤饼从而对小颗粒进行拦截;高流速导致频繁碰撞,颗粒通过率下降;低速过流量区域水流流速过小以至于颗粒的跟随性低,颗粒的无规则运动明显。

由表 7 可知,影响颗粒通过点分布相对标准偏差 S_r 主导因素为入口缩小比,影响因素的敏感度由大到小为入口缩小比、夹角、导流片圆心角、导流片高度。在 9 组试验中 R 取 22/26 时, S_r 分别为 45.67、58.20、41.61,其均值较 R 为 18/26、20/26 分别减小 45.4%、12.1%,这也表明入口缩小比越大,颗粒分布均匀度越佳。

表 7 颗粒通过点分布相对标准偏差极差分析

Tab.7 Range analysis of relative standard deviation of particle passing point distribution

试验序号	$\alpha/(^{\circ})$	R	$\beta/(^{\circ})$	H/mm	S_r
1	45	18/26	30	10	86.11
2	45	20/26	60	15	56.95
3	45	22/26	90	20	45.67
4	55	18/26	60	20	105.64
5	55	20/26	90	10	62.49
6	55	22/26	30	15	58.20
7	35	18/26	90	15	74.59
8	35	20/26	30	20	46.08
9	35	22/26	60	10	41.61
K_1	188.73	266.34	190.39	190.21	
K_2	226.33	165.52	204.2	189.74	
K_3	162.28	145.48	182.75	197.39	
k_1	62.91	88.78	63.46	63.40	
k_2	75.44	55.17	68.07	63.25	
k_3	54.09	48.49	60.92	65.80	
极差 R	21.35	40.29	7.15	2.55	

2.2.2 颗粒拦截率

颗粒进入过滤器的结果分为通过和拦截两种情况,本次试验投入 3 种颗粒各 2 000 个,粒径分别为 200、300、400 μm ,滤网的筛分使粒径为 300 μm 和 400 μm 的颗粒被拦截,被拦截的颗粒分布在滤网的各个区域并构成滤饼的主体结构。滤饼层有助于捕获粒径小于过滤精度的颗粒,从而提高拦截率。通过 Matlab 计算出未通过滤网的 200 μm 颗粒数,然后将拦截数量除以总颗粒数得出拦截率 I_r ,并对正交试验的拦截率进行极差分析,结果如表 8 所示。

试验 3 拦截 200 μm 颗粒数最多达到 493 个,效果最差的为试验 4 拦截 172 个。各因素对拦截率影响由大到小依次为入口缩小比、导流片圆心角、导流片高度、夹角。各因素影响水平相近,入口缩小比为

表 8 拦截率极差分析

Tab.8 Range analysis of interception rate

试验序号	$\alpha/(^{\circ})$	R	$\beta/(^{\circ})$	H/mm	$I_r/\%$
1	45	18/26	30	10	71.77
2	45	20/26	60	15	71.33
3	45	22/26	90	20	74.88
4	55	18/26	60	20	69.53
5	55	20/26	90	10	74.00
6	55	22/26	30	15	74.23
7	35	18/26	90	15	72.98
8	35	20/26	30	20	72.10
9	35	22/26	60	10	74.28
K_1	217.98	214.28	218.10	220.05	
K_2	217.76	217.43	215.14	218.54	
K_3	219.36	223.39	221.86	216.51	
k_1	72.66	71.43	72.70	73.35	
k_2	72.59	72.48	71.71	72.85	
k_3	73.12	74.46	73.95	72.17	
极差 R	1.60	9.11	6.72	3.54	

主导因素,夹角敏感度较小。当入口缩小比取 22/26 时,3 组拦截率的均值为 74.46%,较 R 为 18/26 提高近 3 个百分点。

2.3 参数优化与试验验证

2.3.1 参数优化

本文试验指标选取 4 个,属于多指标正交试验,因此采用综合评分法对结果进行分析。视各指标的重要性相同,所以各指标的权重都为 0.25。4 个指标的隶属度由式(1)~(4)计算得出,将各指标隶属度之和作为整个试验的总指标。利用单指标试验的直观分析,得出影响因素对总指标敏感度从大到小依次为夹角、入口缩小比、导流片高度、导流片圆心角。根据极差分析(表 9)得到最优因素组合为:夹角 35°、入口缩小比 22/26、导流片高度 10 mm、导流片圆心角 90°。

2.3.2 优化方案试验验证与分析

根据正交试验分析得出的最优设计参数组合重新构建几何模型,通过数值模拟对优化方案模型进行性能试验,将得到的结果与原模型试验值进行对比分析。

当入口流速为 0.5 m/s 时,优化方案水头损失为 0.268 m,与原模型相比降低了 36.6%。从两者网面过流量图(图 10)来看,原型过滤器的最大过流量为 7.74 L/h,最小过流量为 2.32 L/h;优化模型最大过流量为 6.49 L/h,最小过流量为 2.26 L/h。最大最小过流量间倍数由 3.34 下降为 2.87,表明不同区域之间过流量变化更为平滑,不存在陡增与突降现象。低速过流量区域面积占比由 55.7%降低到 53.7%,虽然面积占比只减小 2 个百分点,但是

表 9 综合评分法对试验结果的极差分析

Tab.9 Range analysis of test results by comprehensive scoring method

试验序号	$\alpha/(^{\circ})$	R	$\beta/(^{\circ})$	H/mm	H_L/m	$\eta/\%$	S_r	$I_r/\%$	H'_L	η'	S'_r	I'_r	综合分
1	45	18/26	30	10	0.458	20.30	86.11	71.77	0.45	0.15	0.31	0.42	1.33
2	45	20/26	60	15	0.422	20.68	56.95	71.33	0.56	0.17	0.76	0.34	1.83
3	45	22/26	90	20	0.396	18.97	45.67	74.88	0.63	0.06	0.94	1.00	2.63
4	55	18/26	60	20	0.615	20.40	105.64	69.53	0.00	0.13	0.00	0.00	0.13
5	55	20/26	90	10	0.580	19.09	62.49	74.00	0.10	0.07	0.67	0.84	1.68
6	55	22/26	30	15	0.560	17.94	58.20	74.23	0.16	0.00	0.74	0.88	1.78
7	35	18/26	90	15	0.331	29.66	74.59	72.98	0.82	0.73	0.48	0.64	2.67
8	35	20/26	30	20	0.294	28.47	46.08	72.10	0.93	0.66	0.93	0.48	3.00
9	35	22/26	60	10	0.268	34.01	41.61	74.28	1.00	1.00	1.00	0.89	3.89
K_1	5.79	4.13	6.11	6.90									
K_2	3.59	6.51	5.85	6.28									
K_3	9.56	8.30	6.98	5.76									
极差 R	5.97	4.17	1.13	1.14									

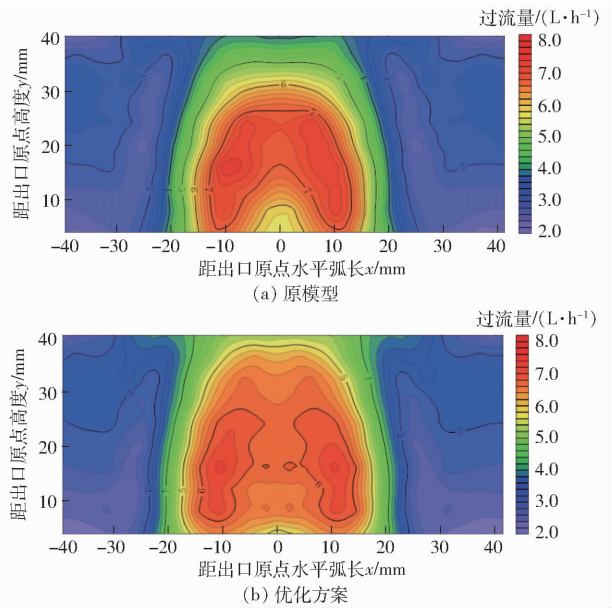


图 10 原模型和优化方案网面过流量对比

Fig.10 Comparison of network flow between original model and optimization scheme

图 10a 低速区域大部分位于 2 ~ 3 L/h 范围内,而图 10b 低速区域过流量接近中速过流量,前者平均过流量远小于后者。图 10a 中速过流量区域面积占比 20.68%,图 10b 中速过流量区域面积占比 36.45%。同改进前相比,中速过流量区域面积占比增加 15.77 个百分点。

由图 11 可知,图 11a 通过点颗粒主要集中在出口侧上端以及出口侧与入口侧的交汇处,而图 11b 颗粒分布范围广,滤网大部分区域都被充分利用。改进前 S_r 为 57.56,颗粒拦截率为 71.42%;优化改进后 S_r 为 32.66,拦截率为 75.35%,同改进前相比,相对标准偏差减小 43.26%,拦截率提高 3.93 个百分点,表明了优化方案的有效性,也说明优化参数的准确性和可行性。

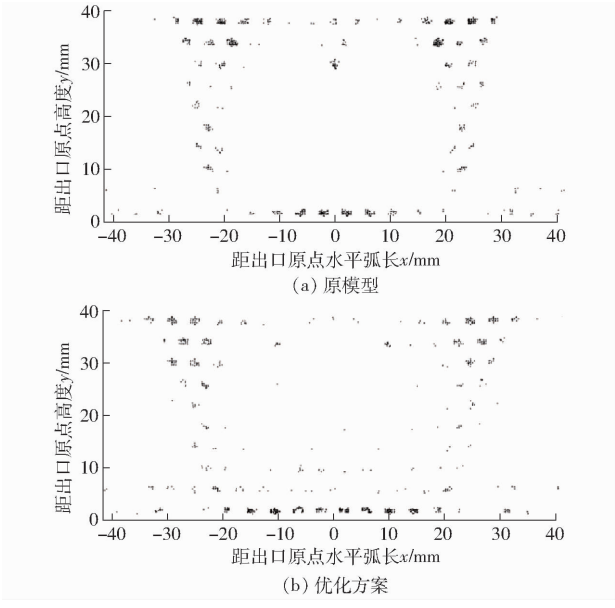


图 11 原模型和优化方案颗粒通过点分布对比

Fig.11 Comparison of particle distribution between original model and optimization scheme

3 讨论

通过结果分析发现影响水力性能最显著的指标为夹角,影响抗堵塞性能最显著的是入口缩小比,而对总指标而言,因素敏感度最大的为夹角,入口缩小比次之,并且夹角和入口缩小比的极差都远大于导流片圆心角和高度。极差较大的因素,表明了因素的水平对试验结果影响较大,所以夹角和入口缩小比为主要因素。在 Y 型网式过滤器优化的过程中,首先考虑夹角,因为夹角的确定对水头损失和网面过流量影响最大,同时水力性能与颗粒运动存在密切联系。对比图 6 与图 9 可以发现,颗粒集中区域都在最大最小过流量位置附近,改变最大最小过流量位置或者降低最大过流量与提高最小过流量对抗

堵塞性能也有很大提升,进而体现结构优化对过滤器过滤性能的影响。

夹角的确定其实也意味着筒体与出口管道接触面积(即出口截面积)的确定,夹角越小,出口截面积越大。对于水头损失和中速过流量区域面积占比两个指标而言,夹角为主要影响因素且夹角与两指标呈正相关性,即随着夹角的减小,出口截面积逐步增大,更多的水流通过滤网之后直接进入出口管道,避免因与筒体的碰撞而导致水头损失的增大,同时降低与壁面撞击的回流对即将通过冲孔以及滤网内部的水流产生冲击的可能性。碰撞以及冲击发生的机率减小也提高了各个区域过流速度,中速过流量区域面积占比也将随之变大,所以夹角变小可以有效增大出水面面积,这与张凯等^[26]将过滤器出口段改变为前大后小的圆弧形,改善过滤器过滤性能的原理类似。

过滤器网面最大过流量与最小过流量所对应位置如表 10 所示,由于过滤器为对称结构,所以过流量基本遵循关于 Y 轴对称。降低最大过流量与提高最小过流量,能够保障滤网的正常工作,提高滤网上各个区域的平均流速和颗粒的网面分布度。根据表 10 中的坐标可以看出,有 7 组试验的

最大过流量位置处于(±10.34 mm,16 mm),局部过高的过流量易使滤网发生变形,宗全利等^[9]发现过流量大的区域更容易分布泥沙从而产生局部堵塞,导致水头损失上升过快,进一步降低系统的整体过滤性能。为降低确定位置的局部过高过流量,建议:①考虑改变导流片形状,将高过流量区域的网孔遮挡住,避免第一波水流冲击此位置网孔。水流通过狭窄的入口形成高速射流,经导流片对流速进行削弱从而达到降低过流量的效果。②减小高过流量区域冲孔半径的同时,增加冲孔的密度,达到过流面积保持不变而降低过流量的目的。最低过流量集中发生在(±37.23 mm,4 mm),网面过流量图(图 10)显示低过流量区域都处于滤网的入口侧,采取以下两个措施来提高入口侧滤网的利用率:①考虑在靠近入口侧再设置一块或者多块导流片,对水流流态进行调整,使得部分水流向着出口侧前进,并在出口侧的导流片作用下进行流动,另一部分直接在新置导流片作用下通过入口侧的滤网。②因为入口侧过流量较小,所以可以增大入口侧滤网的冲孔半径,这不仅增加了入口侧总过滤面积,也不会出现因过流量过大而产生滤网变形甚至破损的现象。

表 10 最大、最小过流量对应位置坐标

Tab.10 Corresponding location coordinates of maximum and minimum overflows					
试验 序号	最大过流量位置坐标/ (mm,mm)	最小过流量位置坐标/ (mm,mm)	试验 序号	最大过流量位置坐标/ (mm,mm)	最小过流量位置坐标/ (mm,mm)
原型	(±10.34,16)	(±37.23,4)	6	(±10.34,8)	(±37.23,4)
1	(±6.21,24)	(±39.30,40)	7	(±10.34,16)	(±37.23,4)
2	(±10.34,16)	(±37.23,4)	8	(±10.34,16)	(±37.23,4)
3	(±10.34,16)	(±37.23,4)	9	(±10.34,16)	(±33.10,4)
4	(±6.21,16)	(±24.82,10)	优化	(±10.34,16)	(±37.23,4)
5	(±10.34,8)	(±37.23,4)			

本文正交试验虽然很好地平衡了试验次数,能够找到影响各指标的主导因素以及最佳参数组合,但未考虑各因素间交互作用对试验指标的影响,建议可以采用通径分析^[27]作进一步分析。因为通径分析不但能够量化因素对指标产生影响的敏感度,还能分析因素的间接作用是拮抗作用还是协同作用,而在本试验中极差分析只能得到夹角对水头损失影响最为显著,入口缩小比次之,导流片圆心角及高度敏感度较小,不能探究当出口与滤网间夹角为主导因素时,另外 3 种因素对水头损失的间接作用是拮抗还是协同。通径分析可以根据误差对结果的通径系数的绝对值来判别是否存在对结果影响较大的因素未被考虑进去,使得结构优化方案更加严谨。

4 结论

- (1)从水力性能来看,出口与筒体间夹角为主导因素。正交试验中、高速过流量区域均集中在出口侧,而入口侧过流量停留在 2~4 L/h 范围内。当夹角越小时,出口截面积与其呈正相关,中速过流量区域面积随之变大,使得过滤器内流场分布更为均匀。
- (2)对抗堵塞性能而言,入口缩小比的影响最为显著。根据网面过流量与通过点分布云图,发现颗粒通过率低区域与高、低速过流量区域相对应,颗粒集中通过区域与中速过流量区域相对应。入口缩小比越大,颗粒分布均匀度越佳,拦截率也呈现正向增长。
- (3)本文试验属于多目标正交试验,采用综合

评分法确定了最优参数组合:出口与筒体间夹角 35°、入口缩小比 22/26、导流片高度 10 mm、导流片圆心角 90°。其中夹角对综合指标影响最为显著,因此夹角是网式过滤器性能优化设计的一个关键参数。优化后,水头损失与相对标准偏差分别减小了 36.6%、43.26%,拦截率与中速过流量区域面积占比分别提高 3.93、15.77 个百分点,表明了优化方案的可行性和实际应用价值。

参 考 文 献

[1] 田玉萍. 农业节水灌溉设备的主要类型与普及情况分析[J]. 农机使用与维修,2021(4):123-124.

[2] 李仰斌,刘俊萍. 中国节水灌溉装备与技术发展展望[J]. 排灌机械工程学报,2020,38(7):738-742.
LI Yangbin, LIU Junping. Prospects for development of water-saving irrigation equipment and technology in China[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2020,38(7):738-742. (in Chinese)

[3] 冯吉,焦有权,杨林林,等. 滴灌系统过滤器及其性能测试研究进展[J]. 中国农机化学报,2020,41(6):74-82.
FENG Ji, JIAO Youquan, YANG Linlin, et al. Research progress on performance test of drip irrigation system[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(6):74-82. (in Chinese)

[4] 杜思琦,韩启彪,李盛宝,等. 滴灌用过滤装置的研究现状及发展趋势[J]. 节水灌溉,2020(3):57-61.
DU Siqi, HAN Qibiao, LI Shengbao, et al. Research status and development trend of filters in drip irrigation system[J]. Water Saving Irrigation, 2020(3):57-61. (in Chinese)

[5] 李曼,刘贞姬,宗全利,等. 滴管网式过滤器水头损失试验及分析[J]. 人民黄河,2021,43(2):152-156,161.
LI Man, LIU Zhenji, ZONG Quanli, et al. Energy loss test and analysis of horizontal screen filter[J]. Yellow River, 2021, 43(2):152-156,161. (in Chinese)

[6] 李曼,刘贞姬,石凯,等. 滴灌用网式过滤器排污效果试验研究[J]. 灌溉排水学报,2019,38(10):55-62.
LI Man, LIU Zhenji, SHI Kai, et al. Experimental study on sewage discharge effect of net filter for drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019,38(10):55-62. (in Chinese)

[7] 朱德兰,王蓉,阮汉铖. Y型网式过滤器堵塞过程对有机肥浓度的响应研究[J]. 农业机械学报,2020,51(7):332-337.
ZHU Delan, WANG Rong, RUAN Hanyu. Response of process of Y-net filter clogging to organic fertilizer concentration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(7):332-337. (in Chinese)

[8] 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.
YU Liming, XU Zhou, YANG Jurui, et al. Numerical simulation of water and sediment movement in screen filter based on coupled CFD-DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3):303-308. (in Chinese)

[9] 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. (in Chinese)

[10] 李盛宝,韩启彪,杜思琦,等. 微灌多级复合网式过滤器的设计和试验[J]. 节水灌溉,2020(8):82-84,97.
LI Shengbao, HAN Qibiao, DU Siqi, et al. The design and test of multi-stage composite screen filter for micro-irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2020(8):82-84,97. (in Chinese)

[11] 李盛宝,袁志华,杜思琦,等. 多级复合网式过滤器水力性能试验研究[J]. 灌溉排水学报,2021,40(3):110-115.
LI Shengbao, YUAN Zhihua, DU Siqi, et al. Experimental study on the hydraulic performance of a multi-stage composite mesh filter[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021,40(3):110-115. (in Chinese)

[12] 陶洪飞,朱玲玲,马英杰,等. 滤网孔径对网式过滤器内部流场的影响[J]. 灌溉排水学报,2017,36(12):68-74.
TAO Hongfei, ZHU Lingling, MA Yingjie, et al. The effect of screen aperture on internal flow field in automatic screen filter[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017,36(12):68-74. (in Chinese)

[13] 王新坤,高世凯,夏立平,等. 微灌用网式过滤器数值模拟与结构优化[J]. 排灌机械工程学报,2013,31(8):719-723.
WANG Xinkun, GAO Shikai, XIA Liping, et al. Numerical simulation and structural optimization of screen filter in micro-irrigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(8):719-723. (in Chinese)

[14] WU C H, SHARMA M M. A DEM-based approach for evaluating the pore throat size distribution of a filter medium[J]. Powder Technology, 2017, 322:159-167.

[15] 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. (in Chinese)

[16] 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 CSAE, 2020, 36(12):40-46. (in Chinese)

[17] 喻黎明,徐洲,杨具瑞,等. CFD-DEM耦合模拟网式过滤器局部堵塞[J]. 农业工程学报,2018,34(18):130-137.
YU Liming, XU Zhou, YANG Jurui, et al. Numerical simulation of local clogging in screen filter based on coupled DEM-CFD[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18):130-137. (in Chinese)

[18] 王新坤,姚吉成,徐胜荣,等. 喷管仰角和长度对负压反馈射流喷头水力性能的影响[J]. 农业工程学报,2020,36(13):75-82.

WANG Xinkun, YAO Jicheng, XU Shengrong, et al. Effect of nozzle elevation and length on hydraulic performance of negative pressure feedback jet sprinkler[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(13):75–82. (in Chinese)

[19] 段家现. 正交试验和综合评分法的注塑工艺多目标优化[J]. 塑料工业, 2018,46(7):66–69,91.
DUAN Jiaxian. Multi-objective optimization of injection molding process based on orthogonal experimental and comprehensive scoring method[J]. China Plastics Industry, 2018,46(7):66–69,91. (in Chinese)

[20] 冯果, 李玮, 何新, 等. 正交试验结合综合评分法优化苗药了哥王的提取工艺[J]. 中国药房, 2017,28(16):2216–2219.
FENG Guo, LI Wei, HE Xin, et al. Extraction technology optimization of miao medicine *Wikstroemia indica* by orthogonal test and comprehensive scoring meth[J]. China Pharmacy,2017,28(16):2216–2219. (in Chinese)

[21] CELIK I B, GHIA U, ROACHE P J, et al. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications[J]. Journal of Fluids Engineering, 2008, 130(7): 078001.

[22] RETHORE P E, LAAN P, TROLDORG N, et al. Verification and validation of an actuator disc model[J]. Wind Energy, 2014, 17(6): 919–937.

[23] 陶洪飞, 朱玲玲, 马英杰, 等. 网式过滤器的计算模型选择及内部流场分析[J]. 节水灌溉, 2016(10): 83–87.
TAO Hongfei, ZHU Lingling, MA Yingjie, et al. Calculation model selection and internal flow field analysis of screen filter [J]. Water Saving Irrigation, 2016(10): 83–87. (in Chinese)

[24] 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 Hydropowe, 2006(6): 57–60. (in Chinese)

[25] 弋鹏飞, 马爽文, 张建鹏, 等. 节水承插式折角弯管水流流动特性研究[J]. 节水灌溉, 2021(4): 35–40.
YI Pengfei, MA Shiwen, ZHANG Jianpeng, et al. Study on flow characteristics of water-saving socket type bend pipe[J]. Water Saving Irrigation, 2021(4): 35–40. (in Chinese)

[26] 张凯, 喻黎明, 刘凯硕, 等. 网式过滤器拦截率计算及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 123–130.
ZHANG Kai, YU Liming, LIU Kaishuo, et al. Calculation of interception rate of mesh filter and analysis of its influencing factors[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(5): 123–130. (in Chinese)

[27] 吴丹妮, 裴向军. 基于正交试验设计和通径分析的反倾坡变形敏感性研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35(10): 141–144.
WU Danni, PEI Xiangjun. Study on sensitivity of deformation of anti-dip layered rock slope based on orthogonal experimental design and path analysis[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(10): 141–144. (in Chinese)

(上接第 313 页)

[17] HOU H,PENG S,XU J, et al. Seasonal variations of CH₄ and N₂O emissions in response to water management of paddy fields located in Southeast China[J]. Chemosphere, 2012, 89(7):884–892.

[18] 陈书涛,黄耀,郑循华,等. 轮作制度对农田氧化亚氮排放的影响及驱动因子[J]. 中国农业科学,2005,38(10):2053–2060.
CHEN Shutao, HUANG Yao, ZHENG Xunhua, et al. Nitrous oxide emission from cropland and its driving factors under different crop rotations[J]. Scientia Agricultura Sinica,2005,38(10):2053–2060. (in Chinese)

[19] 李晶,王明星,王跃思,等. 农田生态系统温室气体排放研究进展[J]. 大气科学,2003(4):740–749.
LI Jing, WANG Mingxing, WANG Yuesi, et al. Advance of researches on greenhouse gases emission from Chinese agricultural ecosystem[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2003(4):740–749. (in Chinese)

[20] 周玲红,魏甲彬,成小琳,等. 南方冬季种养结合模式对双季稻田 CH₄ 和 CO₂排放的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2018,34(5):433–440.
ZHOU Linghong, WEI Jiabin, CHENG Xiaolin, et al. Effects of winter green manure crops with and without chicken grazing on CH₄ and CO₂ emissions in a double-crop rice paddy field in South China[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018,34(5):433–440. (in Chinese)

[21] DAI J L, DUAN L S, DONG H Z. Improved nutrient uptake enhances cotton growth and salinity tolerance in saline media[J]. Journal of Plant Nutrition,2014,37(8): 1269–1286.

[22] 杜臻杰,齐学斌,李平,等. 猪场废水灌溉对土壤氮素时空变化与氮平衡的影响[J]. 农业机械学报,2017,48(8): 262–269.
DU Zhenjie, QI Xuebin, LI Ping, et al. Effect of piggery wastewater irrigation on temporal-spatial variation and balance of nitrogen[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(8): 262–269. (in Chinese)

[23] 周爽,王广帅,高阳,等. 滴灌对农田 N₂O 排放影响的研究进展[J]. 中国农村水利水电,2020(1):8–12.
ZHOU Shuang, WANG Guangshuai, GAO Yang, et al. The effects of drip irrigation on soil N₂O emissions from farmland: a review[J]. China Rural Water and Hydropower,2020(1):8–12. (in Chinese)

[24] 吴家梅,纪雄辉,彭华,等. 不同有机肥对稻田温室气体排放及产量的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(4): 162–169.
WU Jiamei, JI Xionghui, PENG Hua, et al. Effects of different organic fertilizers on greenhouse gas emissions and yield in paddy soils[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(4): 162–169. (in Chinese)