

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.035

砂石-筛网组合过滤器结构优化与性能试验

杨培岭 周 洋 任树梅 马子萱

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 为了充分了解灌溉用砂石过滤器和筛网过滤器组成的二级过滤系统的内部流场情况,利用 Pro/Engineer 软件进行三维造型,基于计算流体动力学(Computational fluid dynamics,CFD)技术,应用数值模拟采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型结合多孔介质模型对过滤器内部流场进行分析并提出优化方案,在优化的基础上设计新型一体式过滤器并对其进行性能测试。结果表明:RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟结果与试验结果吻合良好,可用于流场分析和结构优化。组合过滤系统按传统分体式布置时,由于连接管道和筛网过滤器外壳等影响,会产生较大水头损失,且筛网过滤器部分由于结构复杂造成环流与漩涡,导致流场不稳,过滤时流速分布不均。针对传统组合过滤系统流场的不足,提出将滤网融入砂石罐体的一体式优化布置方案,改善了布置的复杂度;通过流场分析发现可减小 38.5% 的水头损失,且由于罐体空间较大对水流扰动较小,所以内部流场稳定;过滤时流速分布更均匀,因此对滤网的利用也更加合理充分,延长了滤网使用寿命。通过两次性能测试对比分析可知,砂石-筛网组合一体式过滤器能有效减小水头损失,并且在含沙水条件下流量减小 20% 时能多运行 20 min 左右,表明一体式过滤器水力性能更优且能提高灌溉效率。

关键词: 过滤器; 多孔介质; 数值模拟; 结构优化

中图分类号: S275.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)10-0307-10

Structural Optimization and Performance Test of Sand – Screen Combination Filter

YANG Peiling ZHOU Yang REN Shumei MA Zixuan

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to get fully understanding of the interior flow field of a two-stage filtration system composed of sand filter and screen filter in irrigation system, the interior flow field was analyzed and offered optimization by building 3D model using Pro/Engineer, based on computational fluid dynamics (CFD) technique, numerical simulation and using RNG $k-\varepsilon$ model combined with porous media model. And the new integrated filter was made and the performance test it was done. As it was shown in the result, simulation results of the RNG $k-\varepsilon$ model were consistent with the experimental results. Therefore, the model can be used for flow field analysis and structural optimization. When the combined filter system was set with sand filtration material and screen mesh separately installed in different shells, it would cause huge water head loss due to the influence of pipes between sand filter and screen filter and shell of screen filter. And too much circulation and whirlpool of water inside the filter due to complexity of structure led to instability of flow field, which finally caused uneven distribution of velocity during filtering. In terms of the shortcoming of traditional combination filter system based on field flow analysis, a new type of integrated layout optimization incorporating the screen into the sand filter was proposed to improve the complexity of the layout. According to the field flow analysis, integrated filter's water head loss was decreased by 38.5%, and interior field flow was more stable because the tank space was larger and the flow disturbance was smaller. And the flow velocity distribution was more uniform during filtering, so the utilization of the screen was more reasonable, and the screen life of the filter was extended. After the comparison of two performance tests, it was known that the new integrated filter can effectively reduce the loss of water head and it can run about 20 min more when the flow rate was

收稿日期: 2018-04-16 修回日期: 2018-08-02

基金项目: 内蒙古黄灌区安全增效滴灌技术集成与技术推广项目

作者简介: 杨培岭(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与新技术研究,E-mail: yangpeiling@126.com

decreased by 20% under the condition of sand water. It was showed that the new integrated filter's hydraulic performance was better and the irrigation efficiency was improved. According to the research raised above, a kind of digital method was proposed to discuss the performance of the filter, which was used to research and design a kind of integrated filter, and finally the advantageous structure of the integrated filter was obtained, including the sand filter and the screen filter.

Key words: filter; porous media; numerical simulation; structural optimization

0 引言

滴灌具有节水效果好,灌水质量高等优点^[1],是目前常用的灌溉技术。灌水器作为滴灌系统中的关键部件,其尺寸微小,易被水中杂质堵塞^[2-3]。过滤器过滤水源,是减少灌水器堵塞的关键设备。砂石过滤器滤层具有三维立体孔隙,因此对丝状、棒状杂质具有良好的拦截作用^[4]。CAPRA 等^[5]和张文正等^[6]研究发现砂石过滤器的过滤和防堵塞效果较好,常作为一级过滤设备。筛网过滤器过滤效果好、结构简单、便于拆卸和清洗^[7],但由于利用简单的机械筛分原理仅能对粒径大于网孔的杂质进行过滤,常作为二级过滤设备。

在实际应用中,常将砂石过滤器和筛网过滤器联合布置在灌溉首部。但二者需要管道连接,势必增大占地面积、增大水头损失,而水头损失等水力性能是国内外学者在过滤器研究方面关注的重点^[8-9]。由此,一些学者开始研究不同类型过滤器的组合形式^[10-11],但这些研究都因缺乏对其内部流场进行分析而缺少理论支撑。

过滤器内部结构复杂,内部流场可视化困难,但随着计算流体力学(CFD)近年来的迅速发展,服务于流体工程领域已成为可能^[12]。CFD 因其节省资源和运算速度快等优点,被广泛应用于过滤系统的数值模拟^[13-17]。本文拟利用数值模拟的方法分析砂石-筛网组合过滤器内部流场,优化布置结构,为两级组合一体式过滤器优化设计提供理论依据。

1 砂石过滤器与筛网过滤器结构及原理

本文主要研究对象是节水灌溉系统首部的两级过滤系统,因此涉及到一级过滤装置——砂石过滤器和二级过滤装置——筛网过滤器,两者的具体工作原理如下^[18-19]:

砂石过滤器是一种介质过滤器,主要过滤对象是质地较软的杂质。其过滤元件是由石英砂或花岗岩等堆叠而成的介质组,沙砾的堆叠令其中形成了三维的过滤通道,具有较强的过滤能力。

筛网过滤器是利用机械筛分的原理进行杂质过滤,其主要的过滤元件为过滤器壳体内的滤网,该滤网主要是由不锈钢丝或者尼龙丝线编织而成,用于

过滤尺寸大于所用滤网网孔的杂质。这种过滤器在过滤杂质时对丝线状质地柔软的杂质过滤效果较差,对质地较硬的球状杂质具有较好的过滤效果。

2 传统分体组合过滤系统试验及参数采集

2.1 试验装置

为了验证模拟的合理性以及采集模拟所需参数,同时也为了与结构优化后的新型过滤器进行水力性能对比,故设置物理试验。试验在中国农业大学通州试验站进行。试验装置主要由蓄水池、搅拌机、潜水泵、砂石过滤器、筛网过滤器、压力表、电磁流量计以及阀门和连接管道组成,如图 1 所示。试验中所用的砂石过滤器和筛网过滤器分别选自北京某公司和西班牙某公司的筛网过滤器,其参数如表 1 所示。

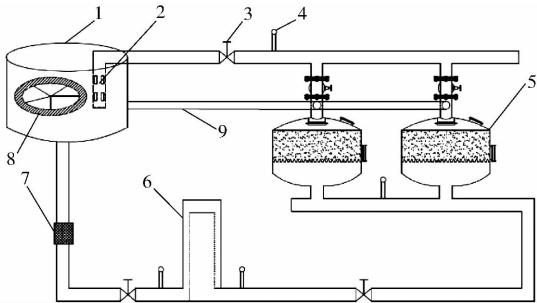


图 1 试验布置图

Fig. 1 Test layout

1. 蓄水池 2. 潜水泵 3. 阀门 4. 压力表 5. 砂石过滤器
6. 筛网过滤器 7. 电磁流量计 8. 搅拌机 9. 排污管

表 1 砂石过滤器和筛网过滤器参数

Tab.1 Parameters of sand filter and screen filter

类型	型号	进出口管 直径/mm	额定过流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	精度/目
砂石过滤器	ATP-S228	110	60	100~140
筛网过滤器	AZUD	63	30	120

2.2 试验方法

清水条件下,各过滤器不会发生堵塞情况,即不会有水头损失和流量随时间的变化特性,故着重关注水头损失与流量之间的水力性能关系。由于筛网过滤器额定流量是 30 m³/h,通过调节阀门设定系统的过流量从 0.2 倍的额定流量起以 6 m³/h 为梯度逐步升至 1.2 倍的额定流量,即进行 6、12、18、24、30、36 m³/h 6 个流量梯度下的试验。在每次调节流

量稳定后读取各压力表对应的数值,由此计算出各流量下的水头损失。其中,根据砂石过滤器两端压力表的值可得到砂石过滤器的流量-水头损失曲线。

将泥沙分级过筛,根据选定的“粒径级配曲线”配制适量的沙土,将泥沙加入水源中,配置为质量分数为 0.2% 的含沙水源。含沙水条件下,由于各过滤器会因为泥沙的存在而发生堵塞,且堵塞情况随时间发生变化,故着重关注水头损失与流量随时间的变化特性。调节阀门开度至 30 m³/h 开始试验,保持系统运行,隔一定时间记录各过滤器两端压力表数值。以系统流量减少 20% 或水头损失达到 7 m 作为该次试验结束的标志。

2.3 试验结果

2.3.1 清水条件

清水条件下,水头损失随流量的变化如图 2 所示。由图 2 可以看出,水头损失随流量的增大而增大,但砂石过滤器和筛网过滤器二者加起来的水头损失并不是系统整体的总水头损失,这是由于砂石过滤器和筛网过滤器之间由管道连接,管道会造成沿程水头损失和局部水头损失。

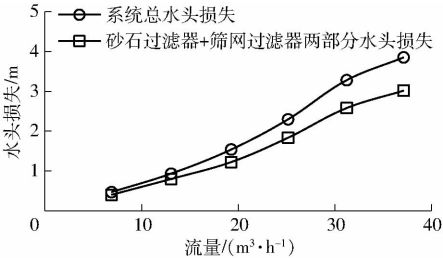


图 2 清水条件下水头损失随流量的变化
Fig.2 Change of head loss with flow under clean water condition

2.3.2 含沙水条件

图 3 为传统砂石-筛网二级过滤系统的总水头损失以及系统流量随时间的变化曲线。总水头损失主要分为 2 个阶段,在前期(0 ~ 30 min)水头损失平稳上升,且上升幅度不大,在后期(30 ~ 40 min)水头损失曲线斜率激增,损失大幅提升,这是由于筛网过滤器堵塞时,大量泥沙迅速堆积在网孔处造成水头

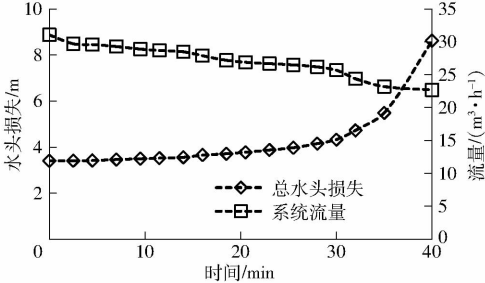


图 3 含沙水条件下总水头损失和流量随时间的变化曲线
Fig.3 Changing curves of total head loss and flow over time under sandy water condition

损失陡增。系统流量随时间的变化主要分为 3 个阶段,在运行前期(0 ~ 15 min)的初始有所降低后趋于稳定平缓下降,在中期(15 ~ 30 min)的初始有所降低后趋于稳定平缓下降且下降幅度略高于前期,在运行后期(30 ~ 40 min)流量有明显降低且流量变化快,最终在 40 min 时流量的下降达到了初始流量的 20%,结束试验。

3 砂石-筛网组合过滤器数值模拟

3.1 建立模型与网格划分

为了与试验结果进行对照,选出合适的湍流模型,采取还原试验布置,在 Pro/Engineer 中进行 1:1 三维造型,计算模型如图 4 所示。

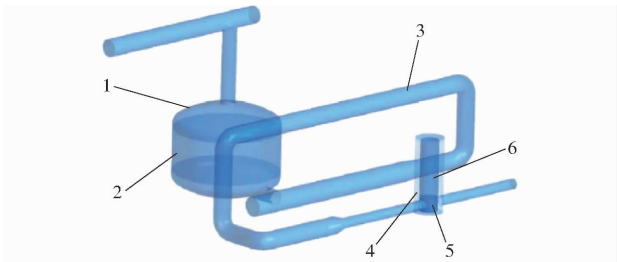


图 4 砂石-筛网组合分体式过滤器计算模型
Fig.4 Physical model for calculation of sand - screen combination filter

1. 砂石过滤器 2. 砂石滤料层 3. 连接管道 4. 筛网过滤器
5. 滤网卡槽 6. 滤网

由于该模型较复杂,且包含多孔介质和多孔阶跃区域,因此将模型在 ANSYS ICEM 软件中进行分块划分网格。其中砂石滤料层结构简单,采用结构化网格,其余部分采用四面体非结构网格,网格总数为 703 980 个。

3.2 多孔介质模型

多孔介质模型是基于体积流量率来计算表观速度,根据经验公式定义流动阻力,因而能较好地模拟多孔区内部的压力损失。从本质上来说,多孔介质模型就是在动量方程中增加了一个代表动量消耗的源项,以模拟计算域中多孔性材料对流体的阻力作用。该源项包含两部分,即方程右端第一项为 Darcy 粘性阻力项;第二项为惯性损失项。方程表达式为

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 \frac{1}{2} C_{ij} \rho |v| v_j \right) \quad (1)$$

式中 S_i ——第 i 个(x 、 y 或者 z 方向)动量方程中的源项

D 、 C ——粘性阻力和惯性阻力系数定义的对角矩阵,其导致多孔介质单元上的压力降

ρ ——水的密度 μ ——动力粘度系数
 v ——速度 v_j —— j 方向速度

这个负的源项又被称为“汇”,代表在单元上产生一个流体速度平方的压力降。

分别在系数矩阵 $\boldsymbol{D}$ 与 $\boldsymbol{C}$ 中代入对角项 $1/\alpha$ 和 C_2 ,则得到简化的多孔模型

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + \frac{1}{2} C_2 \rho |v| v_i \right)$$

(2)

式中 α ——渗透率
 C_2 ——惯性阻力系数
 v_i —— i 方向速度

Fluent 也提供了用速度的幂函数来模拟阻力的模型,即指数律模型

$$S_i = - C_0 |v|^{C_1} = - C_0 |v|^{C_1-1} v_i$$

(3)

式中 C_0 ——指数模型系数
 C_1 ——粘滞阻力系数

当采用指数律模型时,压力降为各向同性的。在 Fluid 面板的指数律模型下,依次输入 C_0 和 C_1 即可。

3.2.1 多孔介质

ARBAT 等^[20]用数值模拟方法预测砂石过滤器各组件的水头损失,其中砂石滤层造成的水头损失占总损失的 84.6%,进出水管造成的水头损失占 4.4%,另外的 11% 是由多孔板和滤帽造成的。由于本文在模型建立中省略了砂石滤料层下部的多孔板和滤帽,考虑到多孔板和滤帽在实际中是为了盛放石英砂并仍然能拦截杂质和保证水流通过,其功能和性质与砂石滤层相似,故将其功能简化到砂石多孔介质域中体现,因此本文在模拟中将砂石过滤器整体的水头损失由砂石滤层体现。根据物理试验测得的砂石过滤器的水头损失随流量的变化得到水头损失与流速的关系曲线,如图 5 所示,并可以由指数律模型推得粘滞阻力系数 C_1 和惯性阻力系数 C_2 。

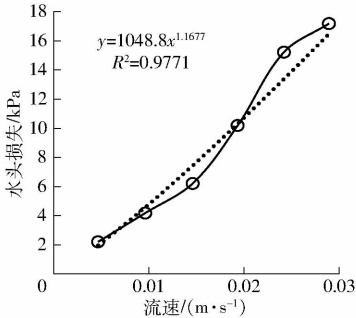


图 5 水头损失与过滤速度的拟合关系
Fig. 5 Fitting of water head loss and filtration rate

结合式(3)和拟合曲线公式,可计算得到多孔介质的阻力系数为 $C_0 = 1.048\ 8 \times 10^6$, $C_1 = 1.167\ 7\ \text{m}^{-2}$ 。

3.2.2 多孔阶跃

借鉴其他学者的研究^[21-22],在 Fluent 中采用简化的多孔介质模型——多孔阶跃模型来模拟滤网,

相关参数的计算公式为

$$\alpha = \frac{D_p^2 \varepsilon_1^3}{150 (1 - \varepsilon_1)^2}$$

(4)

$$C'_1 = \frac{1}{\alpha}$$

(5)

$$C'_2 = \frac{3.5 (1 - \varepsilon_1)}{D_p \varepsilon_1^3}$$

(6)

式中 D_p ——网孔直径,mm
 ε_1 ——孔隙比,%
 C'_1 ——筛网计算中粘滞阻力系数
 C'_2 ——筛网计算中惯性阻力系数

根据所使用的滤网参数, $D_p = 0.125\ \text{mm}$, $\varepsilon_1 = 38\%$,可计算得到 $\alpha = 3.913 \times 10^{-11}\ \text{m}^2$, $C'_1 = 2.56 \times 10^{10}\ \text{m}^{-2}$, $C'_2 = 316\ 373\ \text{m}^{-1}$ 。计算中考虑滤网的厚度,设定滤网厚度为 $0.1\ \text{mm}$ 。

3.3 湍流模型、计算方法与边界条件

数值模拟采用 RNG $k - \varepsilon$ 湍流模型

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k v_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + \rho \varepsilon$$

(7)

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon v_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

(8)

其中 $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$ $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$

式中 k ——湍动能 ε ——耗散率
 G_k ——平均速度梯度引起的湍动能
 $\alpha_k, \alpha_\varepsilon$ ——湍动能和耗散率的有效普朗特数的倒数
 μ_t ——湍流粘性系数
 $C_\mu, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ ——常数项

采用 Fluent 提供的 SIMPLE 算法来计算压力与速度的耦合方程,差分格式采用精度更高的二阶迎风格式,残差标准为 1×10^{-3} 。采用非定常计算,迭代时间步长为 $0.000\ 2\ \text{s}$ 。

在进口处设置速度进口边界条件,例如性能测试试验中,在 $30\ \text{m}^3/\text{h}$ 时进水管进口速度为 $0.882\ \text{m/s}$;出口设置为压力出口边界条件,例如性能测试试验中,在 $30\ \text{m}^3/\text{h}$ 时测得出口压力为 $16.5\ \text{kPa}$;其余设置为壁面边界条件,无滑移的标准壁面。

3.4 结果与分析

3.4.1 数值模拟与试验对比分析

通过物理试验得到砂石-筛网组合过滤器进出口压降随流量变化的关系曲线,并与数值模拟结果进行对比,如表 2 所示。

由表 2 可以看出,试验与模拟间的相对误差最

表 2 模拟与试验结果对比

Tab.2 Comparison of simulation and test results

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	模拟结果				试验结果				水头损失 相对误差/%
	进口压力/kPa	出口压力/kPa	位置水头/m	水头损失/m	进口压力/kPa	出口压力/kPa	位置水头/m	水头损失/m	
6	3.63	10.36	1.12	0.447	3.88	10.39	1.12	0.469	4.69
12	8.46	10.60	1.12	0.906	8.75	10.61	1.12	0.934	3.00
18	17.20	13.63	1.12	1.477	17.80	13.59	1.12	1.541	4.15
24	25.83	15.25	1.12	2.178	27.01	15.22	1.12	2.299	5.26
30	36.12	16.52	1.12	3.080	38.11	16.48	1.12	3.283	6.18
36	44.05	17.73	1.12	3.752	45.04	17.70	1.12	3.854	2.65

大为 6.18%，最小仅为 2.65%，误差均在允许范围之内，因此数值模拟计算结果与试验基本吻合，说明数值模拟计算具有准确度和可靠度，可以体现过滤器内部水流运动状态，进一步说明本文所选择的湍流模型和参数是合理的，且适用于本文所建立的物理模型的模拟过程，该模型和参数组合也将用于接下来的模拟设置。本文以 30 m³/h 流量下的模拟结果为例进行内部流场分析。

3.4.2 压强场

图 6 为砂石-筛网组合分体式过滤器压降图。由图 6a 可以看出，由过滤系统进口到出口的整个流域中，压力值是逐渐减小的，即水头损失逐渐增大，加上位置水头（1.12 m）模型整体水头损失为 3.08 m，

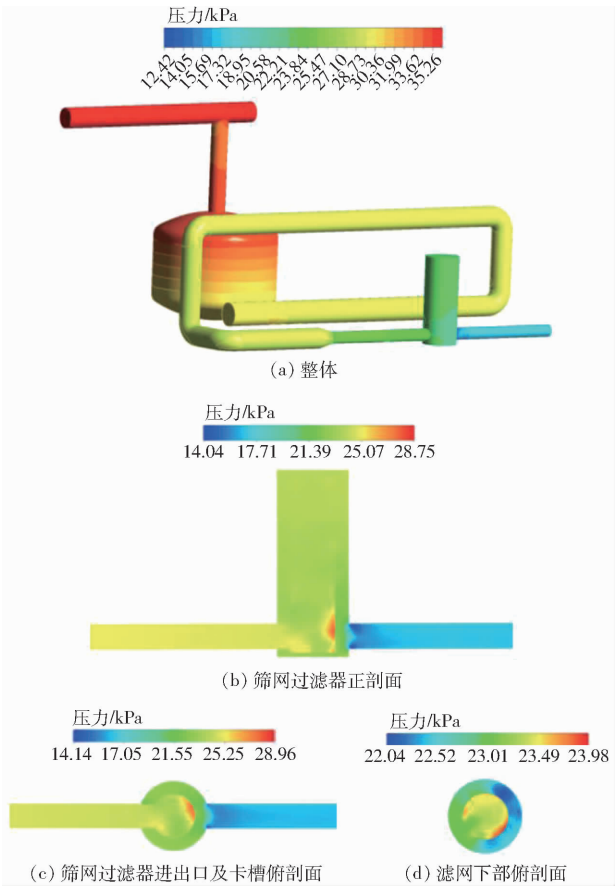


图 6 砂石-筛网组合分体式过滤器压降

Fig. 6 Pressure drop diagrams of sand - screen split-type combination filter

主要由砂石过滤器、连接管道和筛网过滤器 3 部分组成，其中连接管道水头损失达 0.5 m 左右，约占总体的 16.2%。如图 6b~6d 所示，筛网过滤器部分，起过滤作用的滤网处压降并不大，而造成能量损耗的主要原因是筛网过滤器的进口和出口处：进口处由管道至过滤器内部，过流截面突然增大，且有卡槽阻力，造成了突然的水头损失；出口处水流汇集，由于过流截面的突然减小且有 90°的拐角，产生了压力最低点。整个筛网过滤器部分造成约 1 m 的水头损失，占总体的 32.5%。

3.4.3 流线

图 7 为筛网过滤器不同截面流线图。从图 7a 可以看出，水流进入筛网过滤器直接撞击卡槽，随后水流运动方向发生改变，需向上运动经过滤网过滤，所以在卡槽内造成堵塞，形成环流；从图 7b 可以看出，水流向上运动，受重力作用和滤网的阻挡，在滤网内形成漩涡，造成内部流场不稳；从图 7c 可以看出，当水流穿过滤网后，由于受到滤网阻挡，速度减小，并在过滤器外壳的影响下，形成几处绕滤网的环流，最终汇于出口方向，从出水管流出。并且由于过滤器与出水管连接处截面骤缩，且形成 90°拐角导致水流方向突然变化，因此环流在此处明显增强导致出水口堵塞。综上所述，筛网过滤器内流场不稳定，有多处环流和漩涡，水流流动受到较大扰动。

3.4.4 流速

图 8 为筛网过滤器内水流流速矢量图和流速观测线及其沿竖直方向 Y 轴的变化曲线。将筛网过滤器滤网视为左右两部分，创建 6 条平行于滤网轴向（Y 轴）的直线，使其分别位于左滤网外侧、左滤网、左滤网内侧和右滤网外侧、右滤网、右滤网内侧，如图 8b 所示。筛网过滤器内的流速矢量图和选取的流速观测线变化曲线分别如图 8a、8c 所示，水流从进水管进入呈辐射状，一部分直接撞击卡槽，一部分斜向上经右侧滤网过滤流出，因此在滤网下半部分（-0.55 ~ -0.35 m）右侧滤网及右侧滤网内部速度明显高于其他各处速度，最大达到 2.9 m/s；由

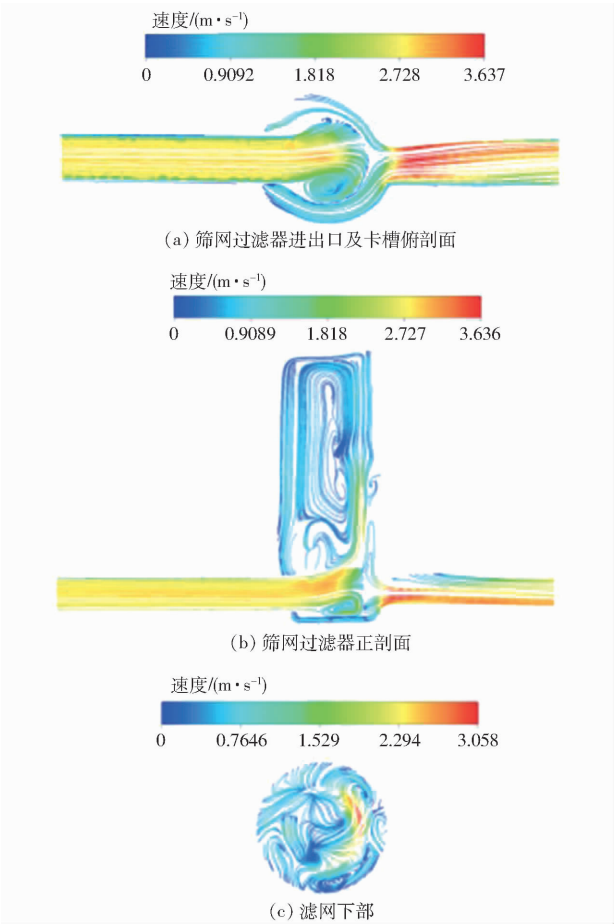


图 7 分体式过滤器筛网部分不同截面流线
Fig. 7 Streamline diagrams of different sections of screen in split-type combination filter

于受到重力作用影响,速度急剧减小,在右侧滤网上半部分($-0.35 \sim -0.19$ m)流速不断减小,右滤网和右滤网内侧速度变化趋势大体相似。由前文流线分析可知,水流在滤网内部形成旋涡,从右侧向左侧分布,左滤网和左滤网内侧在整个滤网的有效长度($-0.55 \sim -0.19$ m)上的速度整体较小,最高为 1 m/s,且二者有相似的递减变化趋势。对比左、右滤网,二者在滤网下部速度差距明显,但在滤网上部左、右滤网以及左、右滤网内侧速度大体相同。在左、右滤网外侧,由于受到滤网和外壳阻挡以及滤网和外壳间的环流作用影响,流速进行重分配,流速较低,二者流速无明显差别,且随高度变化不大。综上所述,筛网内部流速受到多重作用影响而在整个过滤过程中分布不均,导致滤网不同部位相同时间内过流量不同,所以可认为对滤网的利用右部多于左部,下部多于上部,降低了对滤网的利用率。

4 结构优化及数值模拟

4.1 优化结构设计

由以上讨论可知,砂石-筛网组合过滤器在分体式结构下,连接管道造成部分水头损失且增加系统

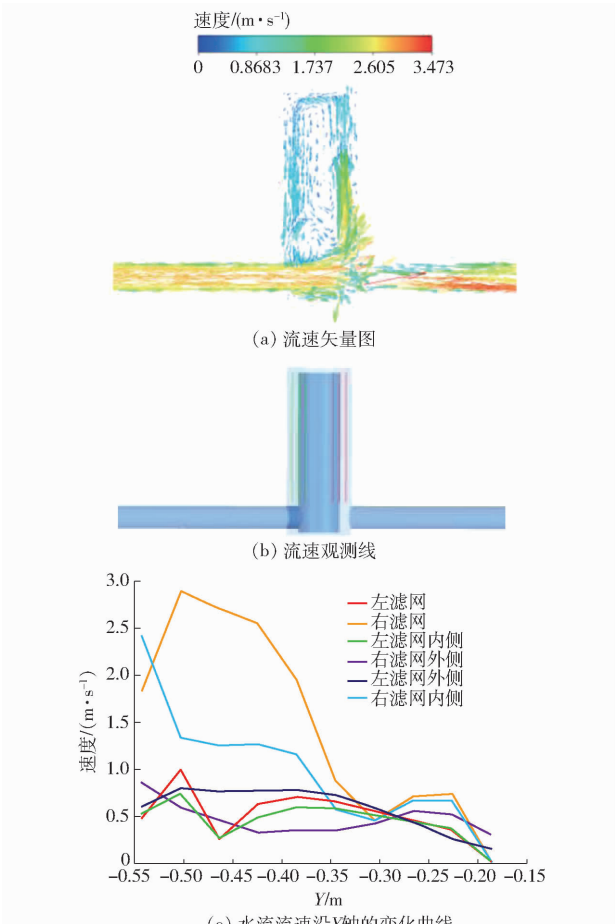


图 8 分体式筛网过滤器内流速
Fig. 8 Flow velocity at screen in split-type combination filter

布置的复杂性,而筛网过滤器内部流场不稳,流速分布不均且进出口水头损失较大,因此展开对组合过滤器的结构优化。优化的主要思路是将砂石过滤器和筛网过滤器布置在同一罐体内,由此省去了中间连接管道,将滤网直接固定在卡槽上,用砂石罐体外壳包裹,其空间更大,减小了外壳对水流的扰动,无突然扩张与收缩的截面,保证流动稳定,设计如图 9 所示。

由于要与传统组合过滤系统进行对比,为了减小罐体尺寸的影响,故尽量接近传统组合过滤系统中的尺寸参数,并参考相关规范,最终确定一体式过滤器罐体直径为 700 mm,砂石滤料层厚度 260 mm,滤网高度 235 mm,直径 120 mm。

4.2 建立优化模型与网格划分

根据上述尺寸构建模型,如图 10 所示。将模型在 ANSYS ICEM 软件中进行分块划分网格,其中砂石滤料层结构简单,采用结构化网格,其余部分采用四面体非结构网格,网格总数为 $415\ 205$ 个。采用与上述分体式过滤系统相同的模型和设置得到结果。

4.3 结果与分析

4.3.1 优化后压强场

图 11 为砂石-筛网组合一体式过滤器压降图。

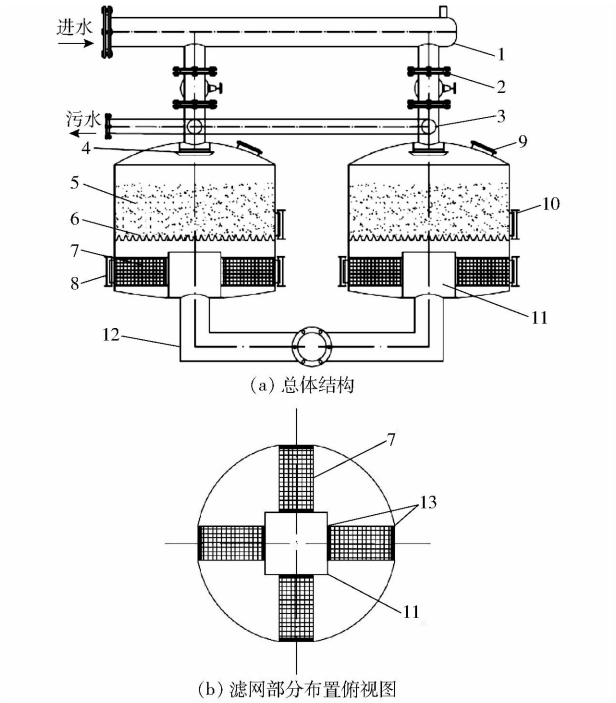


图 9 一体式过滤器结构设计图

Fig. 9 Structure design diagrams of one-piece combination filter

1. 进水管 2. 阀门 3. 排污管 4. 布水器 5. 砂石滤料 6. 滤帽多孔板 7. 滤网 8. 滤网密封口 9. 进砂口 10. 掏砂口 11. 集水箱 12. 出水管 13. 卡槽

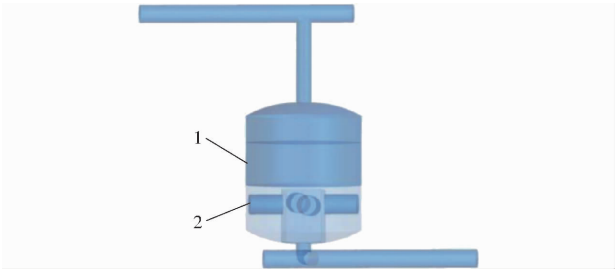


图 10 砂石-筛网组合一体式过滤器计算模型

Fig. 10 Physical model for calculation of sand - screen one-piece combination filter

从图 11a 可以看出,加上位置水头(1.18 m),整体水头损失仅为 1.895 m,相比分体式模拟水头损失 3.08 m 减少了 38.5%,从图中可以看出,上部砂石滤层和下部滤网之间几乎无压降,这说明简化连接管道对水头损失的减小非常可观。由图 11b、11c 看出,滤网卡槽处无高速水流的直接撞击,故在此处无明显的能量损耗;水流从上部砂石流入下部滤网,整个过流截面无明显变化,且流动方向单一,因此可认为下部滤网部分结构简单,仅有滤网多孔阶跃产生少量压降,而无因结构复杂产生的水头损失,从而减少了筛网过滤器部分的水头损失。综上所述,一体式的布置在压降方面做到了优化。

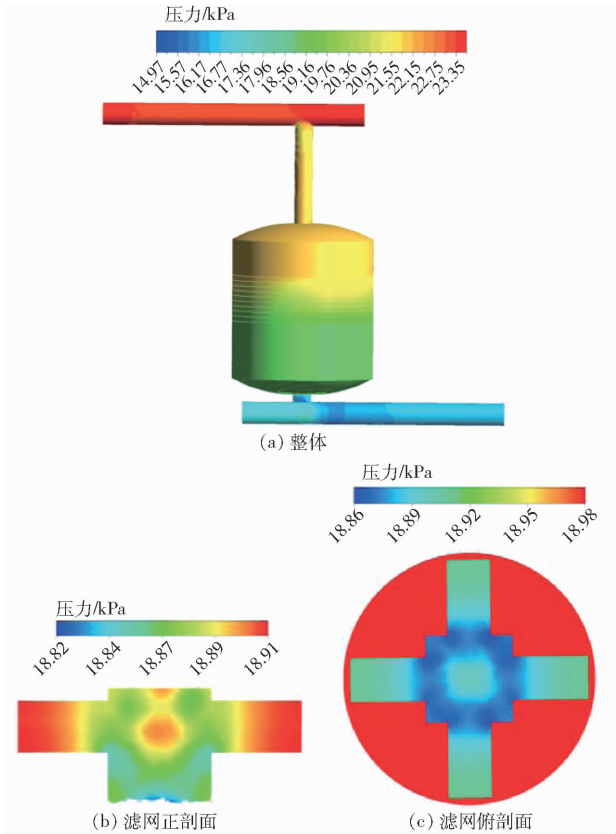


图 11 砂石-筛网组合一体式过滤器压降

Fig. 11 Pressure drop diagrams of sand - screen one-piece combination filter

4.3.2 优化后流线

图 12 为一体式布置筛网部分流线图。从图 12a 可以看出,虽然 4 个滤网周围也有罐体包裹,但由于空间较大,对水流的影响和扰动没有分体式布置筛网壳体那么强烈,因此并未出现明显环流和漩涡。从图 12b 可以看出,当水流从上部砂石到达滤网时,水流直接从滤网外部穿过滤网到内部进行过滤过程,无需有水流方向的突变,也无向上攀爬的过程,使得重力作用不会对水流影响较大产生旋涡导致流场不稳;无需对水流进入滤网专门设置进口,从而无

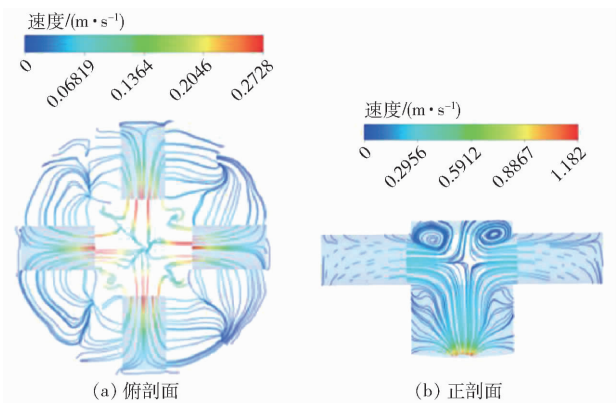


图 12 一体式过滤器筛网部分不同截面流线

Fig. 12 Streamline diagrams of different sections of screen in one-piece combination filter

截面的骤缩,水流从上部砂石到下部滤网整个过流面几乎无变化,这也是一体式过滤器滤网部分水头损失较小的原因之一。连接 4 个滤网的集水箱顶部由于空间较小出现漩涡,但下部水流出口处无明显的水流方向突变,因此无环流出现,出口顺畅无堵塞现象。综上所述,一体式布置内部流场稳定,在结构方面做到了优化。

4.3.3 优化后流速

图 13 为一体式布置中 4 个滤网的流速分布、选取的流速观测线和其中 X 和 Y 负方向的 2 个滤网沿各自轴线的流速变化曲线。从图 13a 可以看出,4 个滤网流速分布几乎相同,说明滤网布置结构合理。将筛网过滤器滤网分为上下两部分看待,分别在 X 和 Y 的负方向创建 6 条平行于滤网轴向的直线,使其分别位于上滤网外侧、上滤网、上滤网内侧和下滤网外侧、下滤网、下滤网内侧,如图 13b 所示。从

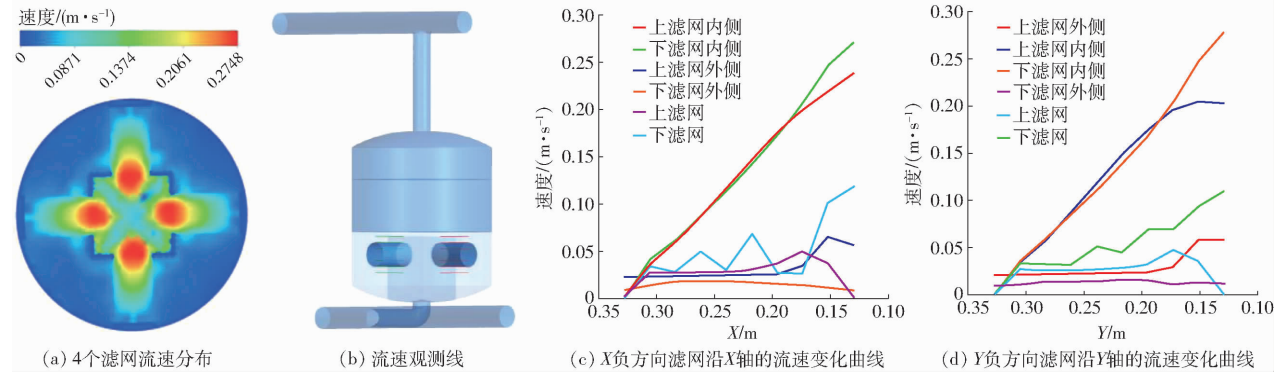


图 13 一体式滤网流速

Fig. 13 Flow velocity at screen in one-piece combination filter

5 一体式过滤器性能试验

5.1 试验概况和方法

根据 4.1 节中结构尺寸设计参数进行实物制作 (图 14), 并对其进行性能测试。制作和测试在上海维节水灌溉股份有限公司进行。试验布置如图 15 所示, 与 2.1 节试验布置和所用设备相似, 只是将传统分体砂石-筛网组合过滤系统换成一体式



图 14 一体式过滤器实物图

Fig. 14 Picture of one-piece combination filter

图 13c、13d 可以看出, 2 个滤网沿轴线的流速变化曲线相似, 选取 X 轴的变化曲线进行具体说明分析: 在一体式过滤器滤网处, 过滤是从外侧向内侧进行, 从外侧速度来看, 上、下两侧的流速都未随轴向坐标的变化而有明显变化, 流速沿轴向分布均匀, 因此可认为对滤网的利用充分均匀, 并不像传统分体式过滤系统对滤网的利用右侧多于左侧, 下部多于上部。上滤网和下滤网的流速整体均分别高于上滤网外侧和下滤网外侧流速, 这是由于过滤的进行, 当水流穿过滤网时过流面积减小, 流速加快, 与实际情况相符。从滤网内侧来看, 在整个滤网的有效长度上 (0.13 ~ 0.33 m), 流速随轴向坐标的变化而变化, 越接近集水箱流速越大, 这是由于水流进入滤网后流向改变, 过流面从罐体横截面变成滤网截面, 过流面积减小, 因此流速增大, 有利于迅速将水流向出口, 引导排出。

砂石-筛网组合过滤器。

清水条件下, 进行 6、12、18、24、30、36 m³/h 6 个流量梯度下的试验。在每次调节流量稳定后读取各压力表对应的数值, 由此计算出各流量下的水头损失。

选择与 2.2 节中相同的泥沙配比, 将泥沙加入水源中, 配置为质量分数为 0.2% 的含沙水源。调节阀开度至 30 m³/h 开始试验, 保持系统运行, 隔

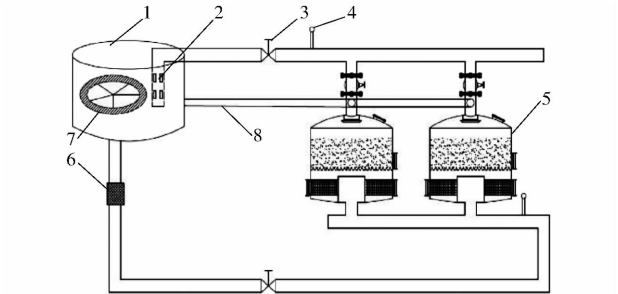


图 15 一体式过滤器性能测试试验布置图

Fig. 15 Performance test layout of one-piece combination filter

1. 水箱 2. 水泵 3. 阀门 4. 压力表 5. 一体式过滤器 6. 电磁流量计 7. 搅拌器 8. 排污管

一定时间记录各过滤器两端压力表数值。以系统流量减少 20% 或水头损失达到 7 m 作为该次试验结束的标志。

5.2 结果分析

为了显示一体式过滤器的水力性能与传统分体式过滤系统的不同,在本节主要进行二者水力性能结果的对比分析。

图 16 是清水条件下两种过滤系统水头损失随流量的变化,通过直观对比可知,一体式过滤器水头损失明显小于传统分体式过滤器,从省略砂石过滤器和筛网过滤器之间的连接管道而言,水头损失理论上应该从系列 1 下降到系列 2,但从试验结果来看,水头损失从系列 1 下降到系列 3,这说明一体式过滤器不仅减掉连接管道带来的水头损失,节省占地面积和减轻安装与维护带来的繁琐,也确实做到了结构的优化,减轻了滤网外壳对其水流的扰动,减少了截面的扩张与骤缩,保持了内部流场的稳定,与模拟结果相吻合。

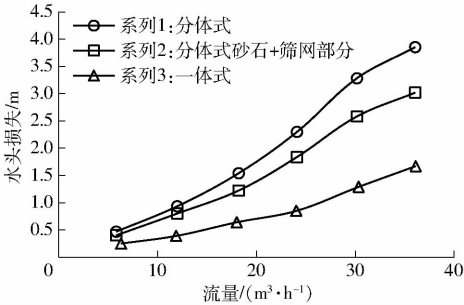


图 16 清水条件下分体式与一体式水头损失随流量的变化
Fig. 16 Changes of head loss with flow under clean water condition

含沙水条件下,从水头损失来看(图 17),在 30 min 之前,分体式过滤系统和一体式过滤器均处于平缓上升阶段,在 33 ~ 40 min 阶段,即分体式过滤系统的过滤后期,水头损失急剧增大,这是由于滤网被堵塞的概率和速率迅速增大导致,而一体式过滤器由于在近乎相同直径和厚度的砂石滤料后布置 4 个滤网,增多了滤网个数,可有效增大过滤面积,且通过数值模拟分析可知对滤网的利用充分,因此即使后期大量砂砾需要滤网过滤也能满足过滤要求,不会出现堵塞面积所占比例增大导致流速迅速增大使得水头损失激增的现象,因此水头损失仍以与之前相似的上升幅度增大。无水头损失的激增,故不会引起过滤器内部压强的突然增大,有利于各部件长期稳定运行使用。

从流量的变化来看,一体式过滤器的流量变化比分体式流量变化平稳,与水头损失相似,在过滤后期,分体式过滤系统流量有一个跳跃式减小,这是堵

塞的突然增强导致。而两种过滤系统流量都减少 20% 时,一体式过滤器比分体式过滤器能多运行 20 min 左右,这能减少反冲洗的次数与频率,提高灌溉效率,节约资源。

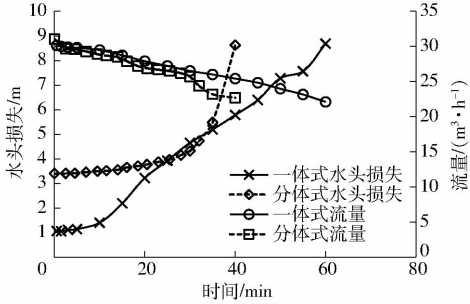


图 17 含沙水条件下分体式与一体式水头损失和流量随时间的变化
Fig. 17 Changes of total head loss and flow over time under sandy water condition

6 结论

(1) 利用 CFD 技术结合多孔介质模型对组合过滤器进行数值模拟,结果与物理试验结果吻合度较高,可分析其内部流场,为结构优化奠定基础。

(2) 组合过滤器分体式布置,中间连接管道会产生水头损失,筛网过滤器的滤网需要壳体进行包裹,势必会形成截面的突然扩张和收缩,也会产生较大水头损失,同时内部和出口由于水流方向的突变等原因会产生多处环流和漩涡,造成流场的不稳定;且通过流速讨论认为滤网并未得到充分利用,降低了过滤效率,尤其在对含沙水进行过滤时,随着含沙水流不断通过筛网滤芯,筛网滤芯上的网孔被堵塞的概率和速率迅速增大,筛网滤芯右侧柱面较早达到堵塞,在过流面积骤然减小时,筛网滤芯的左侧柱面也会在短时间内堵塞,造成筛网滤芯堵塞快,需经常进行反冲洗;且这样的流动方式对筛网滤芯有明显的损害,受力的不均匀使得筛网滤芯的使用寿命有限。

(3) 通过对分体式内部流场的分析,明确了优化方向。通过对优化后一体式布置的结构进行模拟,将滤网布置在更大直径的罐体内,省去连接管道,并使滤网安装在更宽的罐体内,减少了 38.5% 的水头损失,且滤网受到壳体的影响更小,出口处水流顺畅,因此减少了环流和漩涡,使得流场稳定;通过对流速讨论发现,流速分布更加均匀合理,对滤网各部利用充分,提升了过滤效率,延长了滤网使用寿命。

(4) 通过传统分体式砂石-筛网组合过滤系统和一体式砂石-筛网组合过滤器的性能测试试验对

比分析可知,清水条件下一体式组合过滤器不仅省去连接管道的水头损失且由于结构优化能有效减小其他部位水头损失,与模拟吻合;含沙水条件下一体式过滤器比传统分体式过滤系统在流量减少20%

时能多运行20 min左右,减少反冲洗次数和频率,提高灌溉效率,并且在过滤后期无水头损失的陡增,故不会引起内部压力突然增大,有利于各部件稳定运行。

参 考 文 献

- 1 叶志勇,郭克贞,赵淑银,等.河套灌区节水农业发展现状及其近期重点[J].中国农村水利水电,2010(6):81-84.
YE Zhiyong, GUO Kezhen, ZHAO Shuyin, et al. The current development and focal points in short-term water-saving agricultural in Hetao irrigation district[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(6):81-84. (in Chinese)
- 2 张杰武,冯吉,徐飞鹏,等.引黄滴灌砂石过滤器滤料过滤性能[J].排灌机械工程学报,2016,34(4):357-361.
ZHANG Jiewu, FENG Ji, XU Feipeng, et al. Sand filter performance on drip irrigation with the Yellow River[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(4):357-361. (in Chinese)
- 3 李云开,王伟楠,孙昊苏.再生水滴灌毛管内颗粒-管壁碰撞特性研究[J/OL].农业机械学报,2015,46(9):159-166. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150923&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.023.
- 4 LI Yunkai, WANG Weinan, SUN Haosu. Particle-wall collision characteristics influenced by biofilms in drip irrigation laterals with reclaimed water[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9):159-166. (in Chinese)
- 4 邓忠,翟国亮,宗洁,等.微灌系统堵塞机理分析与微灌过滤器研究进展[J].节水灌溉,2014(8):71-74.
DENG Zhong, ZHAI Guoliang, ZONG Jie, et al. Clogging mechanism analysis of micro-irrigation system and the advance of research on micro-irrigation filter[J]. Water Saving Irrigation, 2014(8):71-74. (in Chinese)
- 5 CAPRA A, SCICOLINE B. Emitter and filter tests for wastewater reuse by drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2004, 68(2):135-149.
- 6 张文正,翟国亮,吕谋超,等.微灌条件下三种过滤器过滤效果试验研究[J].灌溉排水学报,2017,36(4):88-93.
ZHANG Wenzheng, ZHAI Guoliang, LÜ Mouchao, et al. Experimental research on filtering effect of three types of filter under micro-irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(4):88-93. (in Chinese)
- 7 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/OL].农业机械学报,2017,48(9):215-222. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170927&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.027.
- 8 ZONG Quanli, YANG Hongfei, LIU Zhenji, et al. Clogging reason analysis and pressure drop calculation of screen filter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9):215-222. (in Chinese)
- 8 DURANROS M, ARBAT G, BARRAGAN 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.
- 9 DURAN-ROS M, PUIG-BARGUES J, ARBAT G, et al. Performance and backwashing efficiency of disc and screen filters in microirrigation systems[J]. Biosystems Engineering, 2009, 103(1):35-42.
- 10 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.
QIU Yuanfeng, MENG Ge, LUO Jinyao. Experiment of screen hydrocyclone separator for micro-irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(5):77-81. (in Chinese)
- 11 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.
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. (in Chinese)
- 12 郑力铭. ANSYS Fluent 15.0 流体计算从入门到精通[M].北京:电子工业出版社,2015:21-22.
- 13 SHAKAIB M, HASANI S M F, MAHMOOD M. Study on the effects of spacer geometry in membrane feed channels using three-dimensional computational flow modeling[J]. Journal of Membrane Science, 2007, 297(1-2):74-89.
- 14 LI Y L, TUNG K L. CFD simulation of fluid flow through spacer-filled membrane module: selecting suitable cell types for periodic boundary conditions[J]. Desalination, 2008, 233(1):351-358.
- 15 ZHANG Z, YANG P, REN S, et al. Numerical simulation and optimization of micro-irrigation flow regulators based on FSI[J]. Irrigation & Drainage, 2013, 62(5):624-639.
- 16 ZALQAMEN B, ABDUL Q, ABUDUL S, et al. Numerical simulation of mixing of effluent through porous media: the effects of local inertia on the flow[J]. Mehran University Research Journal of Engineering and Technology, 2018, 37(2):405-416.
- 17 GOU L, BAI D, ZHOU W, et al. Evaluation of numerical simulation accuracy for two-ways mixed flow drip irrigation emitter based on CFD[J]. International Journal of Heat & Technology, 2017, 35(2):384-392.
- 18 王军,刘焕芳,成玉彪,等.国内微灌用过滤器的研究与发展现状综述[J].节水灌溉,2003(5):34-35.
WANG Jun, LIU Huanfang, CHENG Yubiao, et al. Summarize of domestic current research and development situation of filter for micro-irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2003(5):34-35. (in Chinese)
- 19 董文楚.微灌用网过滤器与砂过滤器综述[J].节水灌溉,1992(1):26-30.
DONG Wenchu. Overview of filter and sand filter for micro-irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 1992(1):26-30. (in Chinese)
- 20 ARBAT G, PUJOL T, PUIG-BARHUÉS J, et al. Using computational fluid dynamics to predict head losses in the auxiliary elements of a micro-irrigation sand filter[J]. Transactions of the ASABE, 2011, 54(4):1367-1376.
- 21 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)
- 22 阿力甫江·阿不里米提,虎胆·吐马尔白,木拉提·玉赛音,等.微灌鱼雷网式过滤器全流场数值模拟[J].农业工程学报,2017,33(3):107-112.
ALIFUJIANG Abulimiti, HUDAN Tumaerbai, MULATI Yusaiyin, et al. Numerical simulation on flow field screen filter with torpedo in micro-irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3):107-112. (in Chinese)