

不同工况下 Y 型网式过滤器流场数值模拟分析

喻黎明¹ 刘凯硕¹ 韩 栋² 仵 峰¹ 李 娜¹ 崔宁博³

(1. 昆明理工大学农业与食品学院, 昆明 650500; 2. 农业农村部工程建设服务中心, 北京 100081;
3. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065)

摘要: 为探究网式过滤器水力性能, 充分了解网式过滤器内部最初流场、滤芯网面流量分布情况, 应用计算流体力学方法对网式过滤器 3 种入口流速 (0.5、1.5、2.5 m/s) 以及 3 种滤网目数 (60、80、100 目) 对过滤器流场进行数值模拟。通过试验对模拟结果的可靠性进行验证, 结果表明: 过滤器的水头损失集中在出口侧滤芯上, 该部分水头损失占总损失的 87%; 水流在腔体内可分为出口侧加速区、出口侧减速区、堵头回流区和漩涡区 4 部分; 滤网面流量分布严重不均, 高流量区域主要分布在出口侧, 入口流速由 0.5 m/s 增至 2.5 m/s 过程中, 网面最大与最小流量均相差 3.3 倍, 滤网目数为 60、80、100 目时, 网面最大与最小流量相差 3.3、3.1、2.3 倍, 且滤网目数增至 100 目时, 最大与最小流量位置向两侧偏移; 堵头处死水区压力大、流速低, 泥沙易于沉淀, 建议扩大堵头容积以承接更多的泥沙; 可以考虑增大腔体体积、改变腔体角度、在入口处设置导流片, 从而改善流场分布; 建议在滤网上增加环状片体, 改善网面流量分布, 从而提高过滤器的使用寿命以及过滤效率。

关键词: 网式过滤器; 数值模拟; 流场; 滤网目数; 入口流速

中图分类号: S275.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298 (2022) 02-0346-09

OSID:



Numerical Simulation Analysis of Flow Field of Y-screen Filter under Different Working Conditions

YU Liming¹ LIU Kaishuo¹ HAN Dong² WU Feng¹ LI Na¹ CUI Ningbo³

(1. Faculty of Agriculture and Food, 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. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to explore the hydraulic performance of the screen filter, the initial flow field inside the screen filter and the flow distribution on the mesh surface of the filter element were fully understood. Computational fluid dynamics method was used at three entrance velocities (0.5 m/s, 1.5 m/s and 2.5 m/s) and three kinds of mesh numbers (60 meshes, 80 meshes and 100 meshes) for numerical simulation, and the screen filter head loss was analyzed. The head loss of the filter was concentrated on the outlet core, which accounted for 87% of the total loss, and increased with the improvement of mesh number of filter screen. Stream flowed to the lateral acceleration area inside the cavity can be divided into export, export side deceleration zone, plug circumfluence area and vortex area four parts. The maximum velocity in the cavity was located at the end of the accelerating zone on the outlet side, and the difference between the maximum velocity and the inlet velocity was 2.4 times. The mesh number of filter screen did not affect the distribution of internal velocity field. The flow distribution on the screen surface was seriously uneven. The high-flow area was mainly distributed on the outlet side, and the area of the high-flow area was positively correlated with the inlet velocity and filtration accuracy. It was suggested to block the area with the highest and lowest flow on the net surface, so that the flow distribution on the net surface can become even, and thus improve the filtration efficiency. When the inlet velocity was increased from 0.5 m/s to 2.5 m/s, the difference between the maximum and minimum flow was 3.3 times. When the mesh number of filter screen was increased from 60 meshes to 100 meshes, the

收稿日期: 2021-01-07 修回日期: 2021-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51769009) 和中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2019CDPZH-10)

作者简介: 喻黎明 (1976—), 男, 教授, 主要从事水动力学和水力机械、节水灌溉理论与设备研究, E-mail: liming16900@sina.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

difference between the maximum and minimum flow rate was 3.3, 3.1 and 2.3 times, the maximum flow rate was shifted outward, and the minimum flow rate was shifted inward. The pressure field in the cavity was step-down with the vortex area as the center. The distribution law of pressure field did not change with inlet velocity and mesh number, but the pressure field was positively correlated with the two variables. In order to reduce the impact force of water flow on the filter screen, annular plates can be added on the surface of the filter screen to form a stagnant water area so as to reduce the impact of water flow on the outlet side of the filter screen. The dead water area in the plug had high pressure, low flow rate, and sediment was easy to precipitate. It was suggested to expand and optimize the plug volume to undertake more sediment. The research result can further reveal the changing rule of the flow field inside the screen filter, and explore the mesh flow distribution of the filter, so as to provide a reference for the structure optimization of the filter.

Key words: screen filter; numerical simulation; flow field; mesh number of filter screen; inlet velocity

0 引言

随着我国农业水资源的短缺以及对微灌技术认知度的提高,微灌技术得到了快速的推广与发展^[1]。网式过滤器作为维持微灌系统运转的核心设备被广泛应用,其具有结构简单、价格较低、使用方便等优点,但滤网堵塞问题较为严重^[2-5],网式过滤器在过滤悬浮物时,会在网面形成网孔堵塞和悬浮物堆积堵塞,首先会造成网孔堵塞,然后在高流量区域网孔堵塞后会产生悬浮物堆积堵塞,过滤器过滤效率和水力性能受到直接影响。因此,将堵塞作为过滤器的核心问题,改善过滤器的滤网堵塞情况,提高过滤器的水力性能将是微灌系统发展的重点。

目前国内外学者对过滤器的研究主要集中在两方面:水力性能和实际应用。文献[6-8]利用量纲分析总结了不同类型过滤器的水头损失公式和主要影响因素;文献[9-11]在无堵塞和堵塞条件下进行了水力性能试验,得出泥沙粒径和滤网的关系,水头损失和流量以及堵塞程度之间的变化规律;宗全利等^[12]在浑水试验中总结了滤网的堵塞规律,并找到了影响滤网堵塞的主要因素;周理强等^[13]在网式过滤器内部增加导流片,从而提高过滤器的抗堵性能。为了提高过滤器的过滤效率及寿命,需要从内部流场情况以及水流特性两方面对过滤器的水力性能进行优化,但微灌系统运行时,过滤器处于封闭状态,不能通过物理试验进行研究分析,因此将 Fluent 软件应用到过滤器中,对其进行流场的数值模拟,研究其内部流态以及流场情况^[14]。骆秀萍^[15]、陶洪飞等^[16-18]对不同流量、尺寸、角度下的鱼雷网式过滤器进行流场分析,总结其变化规律,为过滤器提供结构优化依据;文献[19-22]对网式过滤器进行全流场数值模拟分析,为进一步的过滤器浑水研究提供理论基础。

上述研究表明,可以通过数值模拟的方法对过滤器进行内部流场以及水流特性分析,但现有研究

并未从微观角度对滤网网面进行分析,因此本文选用 1:1 模型对 Y 型网式过滤器进行全流场数值模拟,探究滤网网面流量分布情况,分析滤网目数以及入口流速对网面流量分布的影响,为研究过滤器内部泥沙运动提供参照和过滤器滤网结构优化提供理论依据;同时分析滤网目数以及入口流速对内部流场的影响,为过滤器结构优化提供设计方案和理论依据。

1 数值模拟计算方法与试验验证

1.1 计算方法

Y 型网式过滤器内部水流可以视为黏性不可压缩的流体,定常流动,考虑重力对水流的影响,忽略表面张力的影响。

水相的连续性方程和动量方程^[23]分别为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mu \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \mu \nabla v + \rho \mathbf{g} - F_p \tag{2}$$

式中 ρ ——水相密度, kg/m³ t ——时间, s
 v ——水相速度, m/s p ——静压, Pa
 μ ——粘滞系数, Pa·s
 g ——重力加速度, m/s²
 F_p ——作用于流体的阻力总和, N/m³

数值模拟采用标准 $k-\varepsilon$ 模型^[24-25],该模型是半经验公式,主要是基于湍流动能和扩散率。模型中的湍流耗散率 ε 定义为

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial v'_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial v'_i}{\partial x_k} \right) \tag{3}$$

式中 v'_i ——流速分量, m/s x_k ——流向分量, m
湍流粘度 μ_t 定义为

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{4}$$

式中 C_μ ——湍流模型经验常数
 k ——湍流动能, J

标准 $k-\varepsilon$ 模型的湍流动能 k 方程和耗散率 ε 方程^[26] 定义为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M$$

(5)

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

(6)

其中

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v_i}{\partial x_j}$$

(7)

式中 G_b ——浮力引起的湍动能, m^2/s^2
 Y_M ——脉动膨胀引起的湍动能, m^2/s^2
 v_i, v_j ——流速分量, m/s
 x_i, x_j ——流向分量, m
 G_k ——剪切作用引起的湍动能, m^2/s^2
 $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ ——耗散率经验常数, 采用
Fluent 中的默认值 $C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_{3\varepsilon} = 0.09$
 $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ ——湍动能和湍动能耗散率对应的
Prandtl 系数, 采用默认值 $\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$

1.2 网格划分与边界条件

Y 型网式过滤器结构参数为入口直径 20 mm、出口直径 20 mm、滤芯直径 26 mm、滤芯高度 40 mm、冲孔直径 2 mm, 过滤器由外壳和滤芯部分组成。图 1a 为过滤器的壳体模型示意图, 图 1b 为过滤器的滤芯模型示意图和实物图, 滤芯为复合结构, 滤芯由滤网和冲孔钢板组成, 滤网由金属丝编制而成, 起到过滤作用, 冲孔钢板起到支撑滤网的作用, 本文采用 3 种不同目数的滤网, 具体参数见表 1。

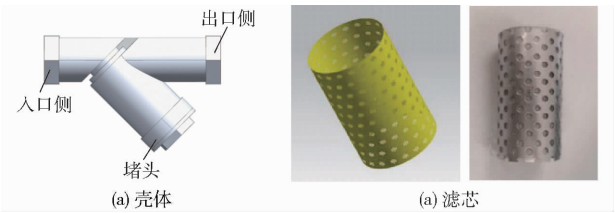


图 1 网式过滤器结构图

Fig. 1 Structural diagram of screen filter

表 1 不同目数滤网参数

Tab. 1 Different mesh filter parameters

目数/目	孔径/mm	丝径/mm
60	0.25	0.12
80	0.19	0.10
100	0.15	0.08

为保证数值模拟的精度以及尽量减少计算时间, 采用六面体结构化网格分别对壳体和滤芯进行

网格划分, 为保证滤芯计算的准确性, 对滤芯进行局部加密并进行网格无关性检验。滤网目数为 60 目的过滤器整个计算域网格数为 554 779 个, 节点为 4.3×10^5 个; 滤网目数为 80 目的过滤器整个计算域网格数为 712 289 个, 节点为 5.5×10^5 个; 滤网目数为 100 目的过滤器整个计算域网格数为 921 779 个, 节点为 6.5×10^5 个, 图 2 为过滤器网格模型。

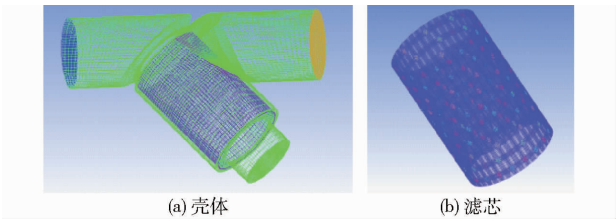


图 2 网式过滤器网格模型

Fig. 2 Mesh models of screen filter

过滤器壁面采用标准壁面函数, 入口设置为速度入口, 湍流强度为 5%, 水力直径与入口内径相同。出口设置为压力出口, 压力为标准大气压, 回流湍流强度为 5%, 采用默认湍流黏度比。压力-速度耦合采用 SIMPLE 方法, 差分格式采用二阶迎风格式, 压力松弛因子设置为 0.2, 其他松弛因子设置为默认值, 标准残差为 1×10^{-3} 。

1.3 试验设计与验证

为验证过滤器在数值模拟计算的准确性, 通过试验得到不同滤网目数以及不同流量下进出口压力差, 并与数值模拟得到的流量-压降曲线进行对比, 过滤器的流量-压降曲线遵循水头损失经验公式^[27]

$$\Delta h = k Q^x$$

(8)

式中 Δh ——过滤器的水头损失(出入口压降), m
 Q ——过滤器总流量, m^3/h
 k ——水头损失系数, 与过滤器的形状、滤网的有效面积有关
 x ——水头损失指数, 反映过滤器水头损失对流量变化的敏感程度

物理试验装置如图 3 所示, 由蓄水池、潜水泵、搅拌机、Y 型网式过滤器、压力表、电子流量计、蝶阀、球阀、不锈钢管以及各种管道联接组成。过滤器

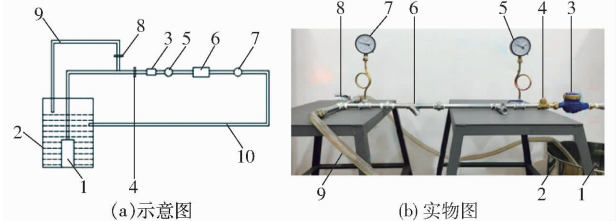


图 3 网式过滤器试验装置

Fig. 3 Schematic of experimental device for screen filter

1. 潜水泵 2. 蓄水池 3. 流量计 4. 止回阀 5. 出水口压力表
6. Y 型网式过滤器 7. 入水口压力表 8. 阀门 9、10. 水管

为市面上常见的不锈钢 Y 型网式过滤器,通过更换滤芯来改变滤网目数。

过滤器额定流量为 $3.5 \sim 4.0 \text{ m}^3/\text{h}$,折合成平均流速为 $2.43 \sim 2.78 \text{ m/s}$ 。试验在清水状态下进行,首先使潜水泵在最大负荷状态下运转,记录对应的流速,然后以 0.25 m/s 为梯度,通过调节阀门使得流速逐渐减小。在此过程中读取对应流速下的过滤器进出口压力,更换不同目数的滤芯后,重复操作。

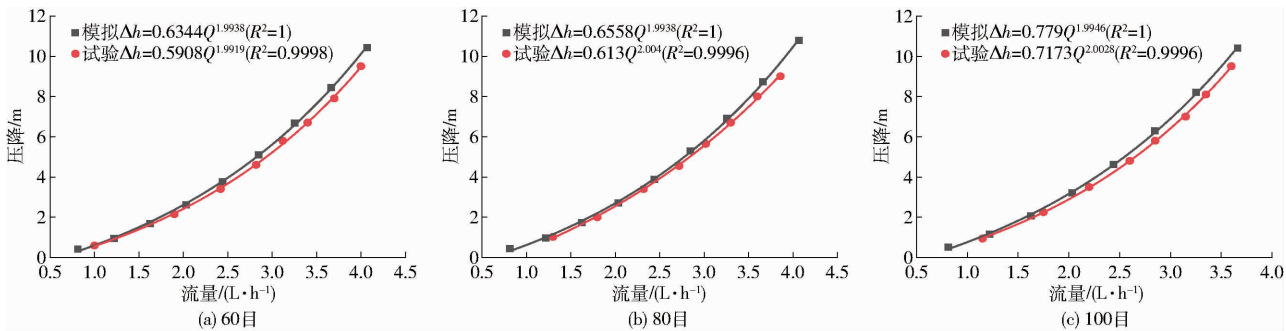


图 4 过滤器数值模拟压降与实测压降对比曲线

Fig.4 Simulated pressure drop of filter compared with measured pressure drop

0.04%,因此采用 CFD 对网式过滤器进行数值模拟分析可行^[28]。

由图 4 中拟合公式可知,水头损失系数 k 决定同一流量下的水头损失。与 60 目相比,数值模拟中 80、100 目的水头损失系数的增长率分别为 3.4%、18.7%;水头损失系数的增长率分别为 3.7%、17%。即在入口流量相同的情况下目数越大水头损失越大。

2.2 内部流

2.2.1 流速分布

图 5 为网式过滤器中心轴剖面的流速分布图。如图 5 所示,水流在腔体内运动可分为 4 个区域:1 表示出口侧加速区,该区域水流受射流和重力作用后流速增加。2 表示出口侧减速区,该区域水流与出口侧滤网碰撞后的流速减小。3 表示堵头回流区,水流与堵头碰撞后产生回流,在入口侧流速先增加后减小。4 表示漩涡区,该区域水流较小,流速趋近于 0 m/s。

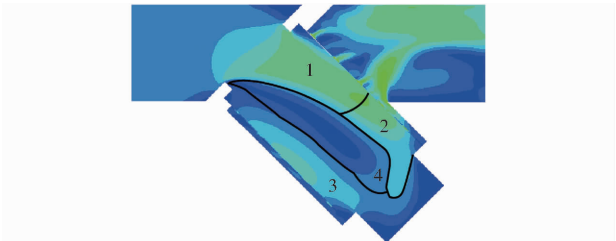


图 5 流速分布图

Fig.5 Velocity profile

2 结果与分析

2.1 试验与数值模拟结果对比分析

用式(8)拟合 60、80、100 目过滤器的流量-压降曲线,并与数值模拟结果进行对比,结果如图 4 所示。3 种滤网目数下试验与数值模拟的水头损失系数 k 分别相差 7.38%、6.98%、8.6%,均小于 10%。水头损失指数 x 分别相差 0.2%、0.7%、0.8%,决定系数 R^2 分别相差 0.02%、0.04%、

流场主要呈现以下几种现象:出、入口流速分布不均匀是由于水流存在射流效应以及重力作用;漩涡区是由于水流在堵头处产生的回流以及循环流所致;在过滤器堵头部分还存在着低流速区域,而这部分低流速区域称为死水区,这是因为水流与堵头发生碰撞时部分水流碰撞在了堵头两侧,无法流向入口侧滤网。

2.2.2 不同入口流速下流速分布

图 6 为 60 目过滤器在 3 种入口流速的流速分布图。由图可知,入口流速分别为 0.5、1.5、2.5 m/s 时,腔体内最大流速靠近出口侧滤网中心处(阶段 1 末尾位置),流速分别为 1.2、3.6、6 m/s,最大流速区域面积分别为 9.9、11.4、13 mm²,即最大流速是入口流速的 2.4 倍,最大流速区域面积分别增大 15%、31%,其区域位置没有发生改变。入口侧滤网处(阶段 3 末尾位置)最大流速分别为 0.8、2.5、3.5 m/s,由于水流在堵头中产生的回流并不规律,所以入口侧滤网的最大流速只会随着入口流速的增大而增大,并没有相应规律。堵头处的死水区流速趋于 0 m/s,随着入口流速的增大而略微增大,其位置不会发生改变。

2.2.3 不同滤网目数下的流速分布

图 7 为入口流速为 1.5 m/s 的 3 种滤网目数的平均流速分布图,由图可知,滤网目数为 60、80、100 目时,腔体内最大流速为 3.6 m/s,该区域面积分别为 11.40、11.96、11.20 mm²;以流速 1.5 m/s 为等值线,将腔体和堵头处流速区域分为两部分,

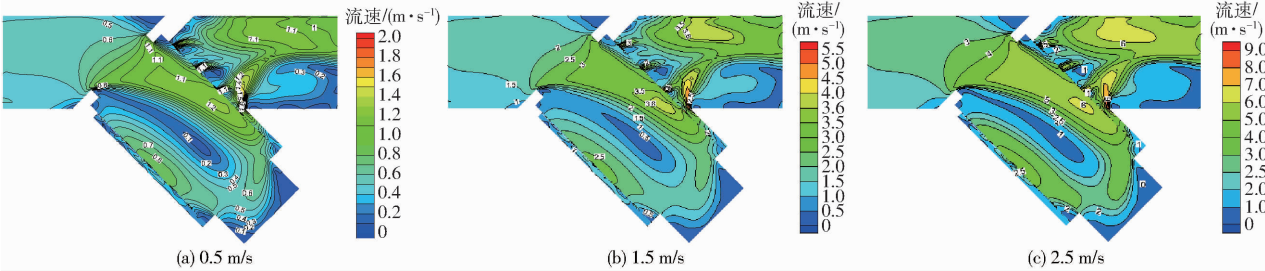


图6 不同入口流速的流速分布图

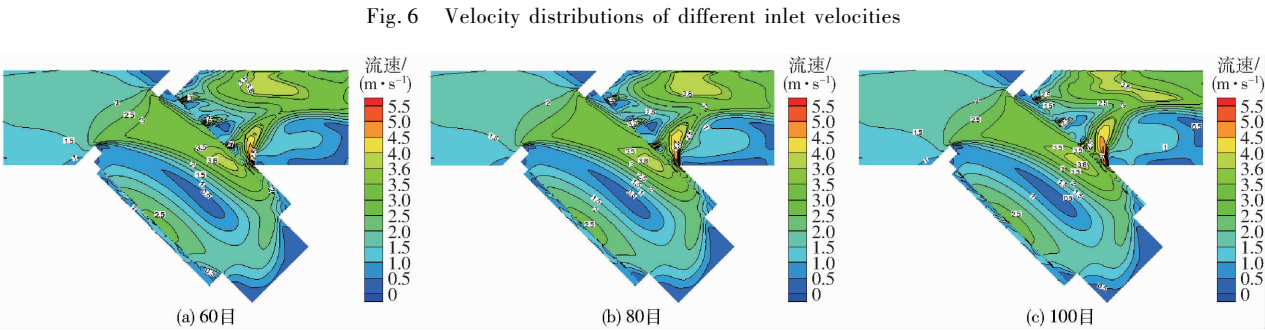


图7 不同目数的流速分布图

Fig. 7 Velocity distribution maps with different mesh numbers

腔体内流速大于 1.5 m/s 的流速区域所占面积分别为 63.83%、64.50%、64.90%，堵头内流速大于 1.5 m/s 区域所占面积分别为 31.86%、32.00%、30.38%。即随着目数的提高，腔体内大于入口流速的区域面积会有所增大；但最大流速、最大流速区域面积、堵头处大于入口流速区域面积基本不发生改变。这说明滤网目数并不影响内部速度场的分布。

2.3 内部压力

2.3.1 压力分布

图 8、9 为网式过滤器正剖面的压力分布图。由图可知，过滤器腔体内压力以漩涡区为中心向外阶梯式递增。出口处的压力分布不均匀是由于出口边界条件设置的影响以及水流的射流效应所致。出口侧滤网下端以及入口侧滤网内、外压差较小且分布较为均匀，这是因为水流通过滤网被壁面阻挡，产生的水头损失较小。在堵头处压力较大，这是由于堵头处存在水流的死水区，水流在死水区流速变化较

小所导致。

2.3.2 不同入口流速下压力分布

图 8 为 60 目的网式过滤器在 3 种不同入口流速的压力分布图。如图所示，3 种入口流速的压力变化规律基本相同，但入口流速影响着整体压力，当入口流速分别为 0.5、1.5、2.5 m/s 时，过滤器的压降分别为 4.2、37.6、104.2 kPa，出口侧上端滤网的内外两侧压降分别为 3.6、33、91 kPa，其中出口侧上端的滤网压降占总压降的百分比分别为 85%、87%、87%，即压降主要集中在出口侧上端滤网且占总压降的 87% 左右。在过滤器腔体内漩涡区的压力最小，分别为 3.3、31.0、85.5 kPa，分别占总压降的 78%、82%、82%。这说明压力在腔体内虽然呈阶梯状分布，但变化在 80% 左右，且不会因为流速而发生变化。

2.3.3 不同滤网目数下压力分布

图 9 为入口流速为 1.5 m/s 的网式过滤器在 3 种不同目数下的压力分布图。如图所示，当滤网

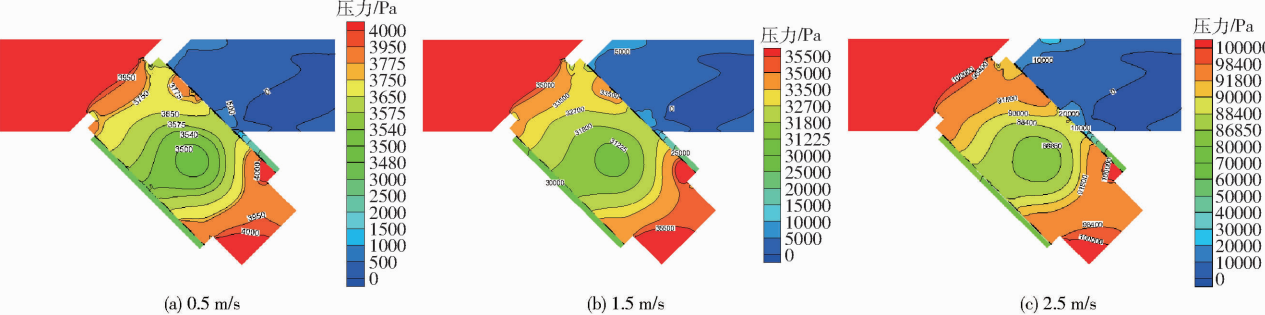


图8 不同入口流速的压力分布图

Fig. 8 Pressure distributions of different inlet velocities

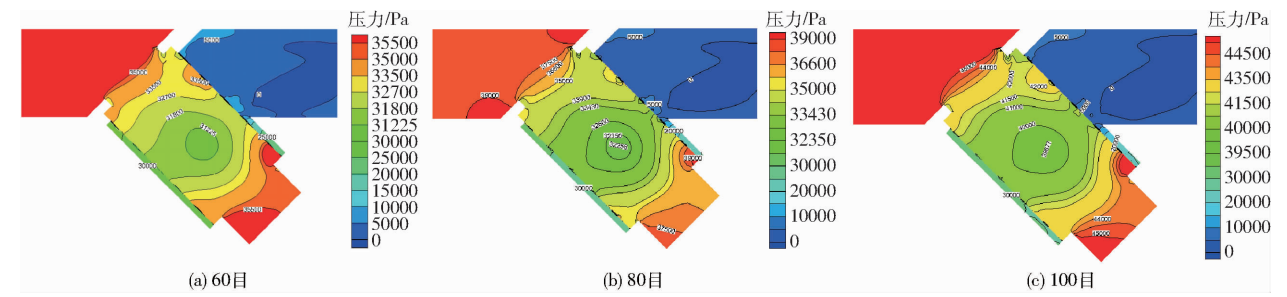


图 9 不同目数的压力分布图

Fig. 9 Pressure distribution maps with different mesh numbers

目数分别为 60、80、100 目时腔体内压力最小值分别为 31.0、32.3、39.7 kPa；压力最大值分别为 36.5、39、46 kPa，腔体内压力最大值和最小值都呈现出递增的规律。3 种目数下压力最大值的位置在出口侧滤网边角处，压力最小值位于腔体中心处，且两者位置都不会随着滤网目数的改变而变化。

2.4 网面流量分布

滤网在过滤器内为圆柱形，定义 $X = 0\text{ m}$ 为出口侧滤网中心轴顶端，以 $X = 0\text{ m}$ 为轴将滤网展开，从

$X = -5\text{ m}$ 到 $X = 5\text{ m}$ 为出口侧滤网，其余部分为入口侧滤网。从图 10 可以看出，网面流量分布并不均匀，高流量区域主要集中在出口侧滤网。水流进入腔体后，与出口侧滤网进行碰撞，由于受到入口水流射流以及循环流的影响，网面流量最大的位置并不是在出口侧滤网上端中心 ($X = 0\text{ m}, Y = 5\text{ m}$)，而是出现在两侧 ($X = \pm 1.5\text{ m}, Y = 4\text{ m}$)；在堵头处产生回流后，水流朝着入口侧滤网流动，由于水流在向上流动的过程中流速不断减小，从而在入口侧滤网上端 ($X = \pm 9\text{ m}, Y = 1\text{ m}$) 出现流量最低点。

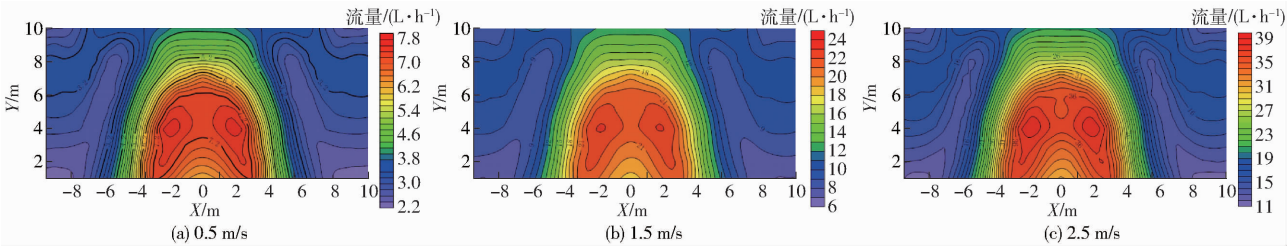


图 10 不同入口流速的网面流量分布

Fig. 10 Flow rates distribution on screen with different inlet velocities

2.4.1 不同入口流速网面流量分布

图 10 为 60 目的网式过滤器在 3 种不同入口流速的网面流量分布。由图可知，3 种流速的网面流量分布都以 $X = 0\text{ m}$ 为对称轴，从网面流量最大位置处向外阶梯递减。结合表 2 可知，入口流速从 0.5 m/s 增大到 1.5 m/s 时，网面上最大流量以及最小流量增大了 300%，最大与最小流量的流量差值在 3.3 倍左右；当入口流速增至 2.5 m/s 时，网面最大流量和最小流量增大 500%，且流量差值在 3.3 倍左右。在 $X = 0\text{ m}, Y = 5\text{ m}$ 的位置，理论上流量应大于 36 L/h，但实际流量却小于 36 L/h，这是由于流

速增大，在腔体内的循环流对从入口进入的水流产生冲击所导致。

以网面流量的中值为界限，将大于中值的流量区域定义为高流量分布区域。入口流速为 0.5、1.5、2.5 m/s 的高流量分布区域分别为大于 5、15、25 L/h；区域面积分别为 1 046、1 066、1 070 mm^2 ，高流量区域面积的增大意味着高流速水流的冲击面变大，即当水流中存在泥沙时，入口流速越大滤网所接触的高流量区域越大，滤网堵塞也越快。

2.4.2 不同滤网目数网面流量分布

图 11 为入口流速为 2.5 m/s 的网式过滤器在 3 种不同滤网目数下的网面流量分布。结合表 3 可知，从 60 目提升至 80 目，滤网过水面积降低 11.66%，网面最大流量降低了 8.8%，网面最小流量增大了 3.4%，最大与最小流量相差 3.1 倍，其位置坐标不变。从 60 目提升至 100 目，即滤网过水面积降低 30%，网面最大流量降低了 23.35%，网面最小流量增大了 10.75%，最大与最小流量相差 2.3 倍，且两者位置均向两侧偏移，纵坐标不变，横坐标

表 2 60 目过滤器网面流量				
Tab. 2 Flow distribution of 60 meshes filter				
入口流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大流量/ ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)	最大流量/ 位置坐标 (X, Y)/(m, m)	最小流量/ ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)	最小流量/ 位置坐标 (X, Y)/(m, m)
0.5	7.60	$\pm 1.5, 4$	2.25	$\pm 9, 1$
1.5	23.00	$\pm 1.5, 4$	6.90	$\pm 9, 1$
2.5	38.48	$\pm 1.5, 4$	11.53	$\pm 9, 1$

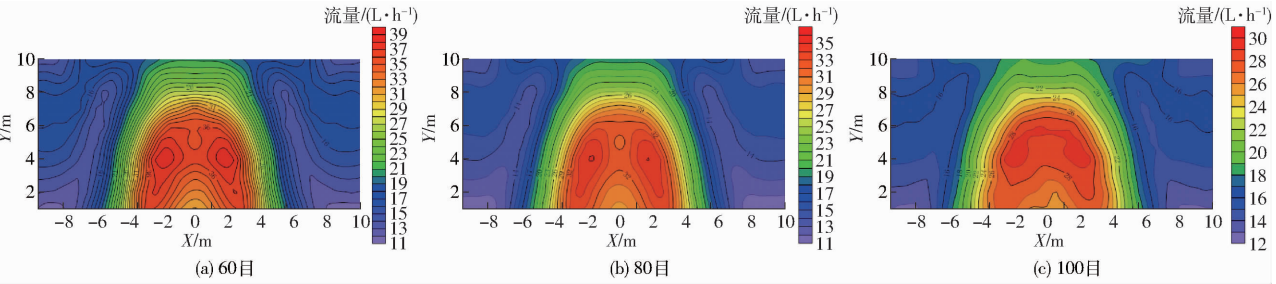


图 11 不同目数的网面流量分布

Fig. 11 Flow rates on screen with different mesh numbers

表 3 入口流速为 2.5 m/s 时过滤器的网面流量

Tab.3 Screen flow rate of filter with inlet velocity of 2.5 m/s

滤网 目数/目	最大流量/ (L·h ⁻¹)	最大流量 位置坐标 (X,Y)/(m,m)	最小流量/ (L·h ⁻¹)	最小流量 位置坐标 (X,Y)/(m,m)
60	38.48	±1.5,4	11.53	±9,1
80	35.07	±1.5,4	11.13	±9,1
100	29.50	±2.5,4	12.77	-8,1

从 1.5 m 变成 2.5 m 以及从 9 m 变成 8 m。

由图 11 可知,入口流速为 2.5 m/s、滤网目数为 60 目时,在 $X=0\text{ m}$, $Y=5\text{ m}$ 的位置,网面流量在该位置降低,图中等值线呈现出向下凹陷的情况,网面流量为 35 L/h;在 80 目时,在此位置流量变化更加明显,等值线呈圆形分布,网面流量为 31 L/h;滤网目数为 100 目时,网面流量分布变得不对称,在出口侧滤网尤为明显,在 X 为 1~4 m 的位置,网面流量大于其对称位置,且在 X 为 -4~4 m, Y 为 4 m 的位置,流量区域连成一片,该区域流量大于 29 L/h。即在入口流速为 2.5 m/s 时,网面流量分布随着目数的提高在出口侧中心开始发生变化,变化区域逐渐明显。

60、80、100 目所对应的高流量分布区域分别为大于 25、23、21 L/h;其面积分别为 1 070、1 081、1 155 mm²。同一流速下,高流量分布区域面积随着滤网目数的提高而增大,即在浑水状态下高流量分布区域面积越大越容易堵塞。

综上所述,提高入口流速,可以提高过滤效率;增大过滤器腔体体积,使得滤网过流面积增大,从而改善网面流量的分布,提高过滤器的过滤效率。

3 讨论

3.1 滤网模型与水头损失系数

本文将滤网模型适当简化,忽略了实际模型中重叠的网孔与金属丝,并将所有网孔视为标准尺寸;且在制作实际模型中因工艺问题会使得模型存在尺寸或形状变形的问题,因此导致水头损失系数 k 相差 8%。王新坤等^[29]采用多孔介质模型模拟过滤

器内部流场,简化了滤网网格模型,这能够有效地解决模型与实际之间存在的偏差,但将滤网视为均匀介质只能从宏观的角度分析过滤器内部流场,本文采用实际模型从更加微观的角度分析了滤网的流量分布,能够更加直观地反映滤网网孔的流态变化规律。可以考虑采用三维扫描数据对滤网建立模型^[30],该方法可以在微观研究的基础上减少数值模拟的误差。

3.2 流场的影响

分析流场可以发现,腔体内最高流速存在于出口侧滤网处,高流速区域分布较为集中,在滤网两侧水流较少,流速较小,滤网利用率较低,而滤网目数并不影响流场,因此可以考虑改变腔体角度^[16],改善过滤器流场分布;增大腔体体积,在入口处设置导流片,将水流分压、分流,减少出口侧滤网冲击力,增加其他区域滤网利用率,从而提高过滤器的过滤效率及使用寿命。

在分析速度场时发现,在堵头处存在死水区,死水区的流速低,但不会随着入口流速和滤网目数的改变而改变;死水区的压力会随着过滤器的整体流速和压力增大而增大;两者区域位置、面积不会发生改变。喻黎明等^[31]研究表明在浑水试验中会有大量的泥沙淤积在堵头处的死水区。文献[32]研究表明,过滤器中存在死水区可以避免水流被直接冲击而产生颗粒嵌入的情况,更便于反冲洗。因此可以考虑增大堵头处的死水区容积,以增大体积为主,使得更多颗粒沉积在死水区,并在该位置设置反冲洗结构。

3.3 网面流量分布

在分析网面流量分布时,当滤网目数为 100 目时,整个网面流量分布变得不规则,出口侧滤网上端最为明显。随着目数的提高,网面高流量区域面积增大,导致水流与滤网发生碰撞后出口侧滤网面受到水流的冲击力更大且并不规则,这使得滤网更容易出现变形、损坏^[33]。

在浑水状态下,流速越大越容易堵塞,目数越大越容易堵塞,这是由于主流区高流量区域面积变大

所导致,过滤器网面高流量分布区域容易导致泥沙大量累计,产生局部滤网堵塞以及架桥现象,导致水头损失上升,从而影响过滤器整体的过滤效率,严重的甚至会导致滤网破损。周理强等^[13]通过安装导流片改善网面流量分布,从而提高了过滤器的抗堵性能,但导流片会对过滤效率存在影响。因此,可以考虑在滤网上增加环状片体^[32],减少水流对主流区高流量区域的冲击,增加水流接触滤网面积,改善网面流量分布的同时还能够形成部分死水区,从而提高过滤器的使用寿命以及过滤效率。

4 结论

- (1) 过滤器的水头损失主要集中在滤芯部分,尤其是滤芯出口侧,该部分占整个过滤器总压降的 87%。
- (2) 水流在腔体内运动分为 4 个区域:出口侧加速区、出口侧减速区、堵头回流区和漩涡区。腔体内最大流速位于出口侧加速区末端,最大流速与入

口流速相差 2.4 倍;滤网目数不影响速度场的分布。高流速区域分布较为集中,滤网利用率较低,建议增大腔体体积,改变腔体角度,入口处增设导流片,改善流场分布,提高滤网利用率。

(3) 腔体内压力场以漩涡区为中心呈阶梯递减分布,压力场分布规律不受入口流速以及滤网目数的影响,压力与两个变量呈正相关。堵头中的死水区流速低、压力大,泥沙易于沉淀,建议扩大堵头容积以承接更多的泥沙。

(4) 网面流量分布不均匀,高流量区域主要分布在出口侧,该区域面积与入口流速和滤网目数呈正相关;当入口流速从 0.5 m/s 增至 2.5 m/s 的过程中,最大与最小流量均相差 3.3 倍;滤网目数为 60、80、100 目时,最大与最小流量相差 3.3、3.1、2.3 倍,且滤网目数增至 100 目时,最大流量位置向外侧偏移,最小流量位置向内侧偏移,高流量区域面积增大,滤网受到冲击力更大。建议优化滤网结构,增加环状片体,改善网面流量分布,减少水流冲击,提高使用寿命,提高过滤效率。

参 考 文 献

[1] 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. Development prospect of water-saving irrigation equipment and technology in China[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(7):738-742. (in Chinese)

[2] SANG Junqiang, ZHANG Xihui, LI Lingzhi, et al. Improvement of organics removal by bio-ceramic filtration of raw water with addition of phosphorus[J]. Water Research, 2003, 37(19):4711-4718.

[3] SIRIWARDENE N R, DELETIC A, FLETCHER T D. Clogging of stormwater gravel infiltration systems and filters: insights from a laboratory study[J]. Water Research, 2007, 41(7):1433-1440.

[4] JUANICO M, AZOV Y, TELTSCH B, et al. Effect of effluent addition to a freshwater reservoir on the filter clogging capacity of irrigation water[J]. Water Research, 1995, 29(7):1695-1702.

[5] CAPRA A, SCICOLINE B. Assessing dripper clogging and filtering performance using municipal waste water[J]. Irrigation and Drainage, 2005, 54(Supp. 1):71-79.

[6] PUIG-BARGUÉS J, BARRAGÁN J, RAMÍREZDE C F. Development of equations for calculating the head loss in effluent filtration in micro-irrigation systems using dimensional analysis[J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(3):383-390.

[7] 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.

[8] ZONG Quanli, ZHENG Tiegang, LIU Huanfang, 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.

[9] 刘晓初,谈世松,何铨鹏.Y型筛网式过滤器水头损失研究[J].中国农村水利水电,2015(11):24-26,31.
LIU Xiaochu, TAN Shisong, HE Quanpeng. Research on the head loss of Y screen filter[J]. China Rural Water Conservancy and Hydropower, 2015(11):24-26,31. (in Chinese)

[10] 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 Hancheng. 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)

[11] 阿力甫江·阿不里米提,虎胆·吐马尔白,木拉提·玉赛音,等.浑水条件下鱼雷网式过滤器的试验研究[J].灌溉排水学报,2018,37(9):79-83.
ALIFUJIANG Abulimiti, HUDAN Tumaerbai, MULATI Yusaiyin, et al. Experimental study on torpedo net filter under muddy water[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 37(9):79-83. (in Chinese)

[12] 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)

[13] 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. Effect of diversion plate on performance of Y-mesh filter[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(12):40-46. (in Chinese)

- [14] 施卫东,施亚,高雄发,等.基于 DEM-CFD 的旋流泵大颗粒内流特性模拟与试验[J].农业机械学报,2020,51(10):176-185.
SHI Weidong, SHI Ya, GAO Xiongf, et al. Simulation and experiment on flow characteristics of large particles in vortex pump based on DEM-CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10):176-185. (in Chinese)
- [15] 骆秀萍.进水流速对自清洗网式过滤器排污系统内部流场影响数值分析[J].水利水电技术,2019,50(5):150-154.
LUO Xiuping. Numerical analysis of influence of inlet velocity on flow field in self-cleaning mesh filter sewage system[J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 2019, 50(5):150-154. (in Chinese)
- [16] 陶洪飞,滕晓静,马英杰,等.出水管角度对网式过滤器内部流场影响研究[J].节水灌溉,2017(8):21-25,29.
TAO Hongfei, TENG Xiaojing, MA Yingjie, et al. Study on the influence of outlet pipe angle on internal flow field of mesh filter[J]. Water Saving Irrigation, 2017(8):21-25,29. (in Chinese)
- [17] 陶洪飞,滕晓静,赵经华,等.不同流量下全自动网式过滤器内部流场的数值模拟[J].水电能源科学,2016,34(12):180-185.
TAO Hongfei, TENG Xiaojing, ZHAO Jinghua, et al. Numerical simulation of internal flow field of fully automatic mesh filter under different flow rates[J]. Journal of Hydropower Energy Science, 2016, 34(12):180-185. (in Chinese)
- [18] 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. Effect of the aperture of the filter on the flow field inside the filter[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(12):68-74. (in Chinese)
- [19] 宗全利,郑铁刚,刘焕芳,等.滴灌自清洗网式过滤器全流场数值模拟与分析[J].农业工程学报,2013,29(16):57-65.
ZONG Quanli, ZHENG Tiegang, LIU Huanfang, et al. Numerical simulation and analysis of full flow field of drip irrigation self-cleaning mesh filter[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(16):57-65. (in Chinese)
- [20] 陶洪飞,滕晓静,马英杰,等.直冲洗网式过滤器的流场模拟及结构优化[J].水电能源科学,2017,35(8):98-102.
TAO Hongfei, TENG Xiaojing, MA Yingjie, et al. Flow field simulation and structure optimization of a direct-washing mesh filter[J]. Journal of Hydropower Energy Science, 2017, 35(8):98-102. (in Chinese)
- [21] 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 Yusaixin, et al. Numerical simulation of full flow field of micro-irrigation torpedo mesh filter[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3):107-112. (in Chinese)
- [22] 滕晓静,陶洪飞,朱玲玲,等.全自动鱼雷网式过滤器内部清水流场特性的数值分析[J].南水北调与水利科技,2017,15(2):176-184,197.
TENG Xiaojing, TAO Hongfei, ZHU Lingling, et al. Numerical analysis of the characteristics of the clear water field inside the fully automatic torpedo net filter[J]. South-to-North Water Diversion and Hydraulic Science and Technology, 2017, 15(2):176-184,197. (in Chinese)
- [23] 黄思.流体机械数值仿真研究及应用[M].广州:华南理工大学出版社,2015.
- [24] 李浩,韩启彪,黄修桥,等.基于多孔介质模型下微灌网式过滤器 CFD 湍流模型选择及流场分析[J].灌溉排水学报,2016,35(4):14-19.
LI Hao, HAN Qibiao, HUANG Xiupiao, et al. CFD turbulent flow model selection and flow field analysis for micro-irrigation network filter based on porous media model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(4):14-19. (in Chinese)
- [25] 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. Selection of calculation model for mesh filter and analysis of internal flow field[J]. Water Saving Irrigation, 2016(10):83-87. (in Chinese)
- [26] 王福军.计算流体动力学分析 CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [27] 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 study on head loss of self-priming automatic mesh filter for micro-irrigation[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science Edition), 2008, 26(6):772-775. (in Chinese)
- [28] 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. Local blockage of CFD-DEM coupled simulation net filter[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18):130-137. (in Chinese)
- [29] 王新坤,高世凯,夏立平,等.微灌网式过滤器数值模拟与结构优化[J].排灌机械工程学,2013,31(8):719-723.
WANG Xinkun, GAO Shikai, XIA Liping, et al. Numerical simulation and structural optimization of grid filters for micro-irrigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Mechanical Engineering, 2013, 31(8):719-723. (in Chinese)
- [30] 万莉君,孙凤宇.基于三维扫描数据的产品数字建模[J].数字技术与应用,2020,38(7):64-67.
WAN Lijun, SUN Fengyu. Digital modeling of products based on 3D scanning data[J]. Digital Technology and Application, 2020, 38(7):64-67. (in Chinese)
- [31] 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. CFD-DEM coupled numerical simulation of water-sand movement in mesh filter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(3):303-308. (in Chinese)
- [32] SANDERSON S L, ROBERTS E, LINEBURG J, et al. Fish mouths as engineering structures for vortical cross-step filtration[J]. Nature Communications, 2016, 7(1):11092.
- [33] 张震.滤网孔径对网式过滤器内部流场的影响[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(4):162-163,165.