

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.036

基于 CFD - DEM 耦合的网式过滤器水沙运动数值模拟

喻黎明¹ 徐洲¹ 杨具瑞¹ 范文波² 李娜¹ 龙俊³

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500; 2. 石河子大学水利建筑工程学院, 石河子 832003;

3. 长沙理工大学水利工程学院, 长沙 410114)

摘要: 过滤器内部的水沙运动复杂且多变, 初始状态下沙粒分布的不均导致滤芯产生局部堵塞, 改变了水流流态并进一步影响后续沙粒运动和分布。本文以 CFD - DEM (Computational fluid dynamics, CFD; Discrete element method, DEM) 耦合模拟 Y 型网式过滤器内部流场变化与沙粒运动及分布, 直观地反映了滤芯对水流的流动阻力特性与对沙粒运动分布影响。结果表明, 过滤器内部存在明显的回流区、旋涡区及滞流区, 导致各过滤面流速不均, 出口一侧流速大, 进口一侧流速小, 两者相差 39%; 随着时间的变化, 过滤器内流场变化明显, 沙粒堆积依次出现在出口侧下端面、出口侧上端面、进口侧下端面、进口侧上端面上, 最终布满整个滤芯; 在滤芯的 4 个过滤面中, 出口侧上端面流速大而沙粒堆积最少, 进口侧上端面流速小而沙粒堆积最多, 由此可见出口侧上端面具有更好的过滤性能, 可适当提高该处过水面积, 以提高过滤器过滤效率。

关键词: Y 型网式过滤器; 水沙运动; CFD - DEM 耦合; 数值分析

中图分类号: S275.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)03-0303-06

Numerical Simulation of Water and Sediment Movement in Screen Filter Based on Coupled CFD - DEM

YU Liming¹ XU Zhou¹ YANG Jurui¹ FAN Wenbo² LI Na¹ LONG Jun³

(1. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China

2. College of Water and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China

3. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Water and sediment movement in filter is complex and changeable. In the beginning, local blockage on filter element caused by non-uniform distribution of sediment affects flow distribution which will change tracks of follow-up sediment. Using CFD - DEM (computational fluid dynamics, CFD; discrete element method, DEM) method to simulate flow field and sediment distribution in Y-type screen filter, the resistance characteristics of filter and its influence on the movement and distribution of sediment were directly reflected. Results showed that the obvious backflow, vortex and viscous flow in the whole flow field led the uneven flow rate which was higher in outlet area and lower in inlet area, with a difference of 39%. Filter element was responsible for 90% of the total pressure loss. Flow condition was changed significantly with time, while sediment deposition appeared in the order of outlet under area, outlet upper area, inlet under area, inlet upper area and finally blocked the whole filter element. Among the four face areas in the filter element, sediment deposition was the least in outlet upper area which was at high flow rate while most in inlet upper area which was at low flow rate. So appropriately raising the flow section of outlet upper area with a better performance can improve the filtration efficiency.

Key words: Y-type screen filter; water and sediment flow; CFD - DEM coupling; numerical simulation

0 引言

Y 型网式过滤器作为市面上的一款常见的过滤

器, 具有结构简单、使用便利、造价低等优点, 广泛应用于农业灌溉、化工生产、污水处理等领域, 主要用来过滤流体中的杂质颗粒, 是整个系统中的核心设

收稿日期: 2017-08-31 修回日期: 2017-09-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379024, 51769009)和石河子大学高层次人才科研启动资金专项(RCXZ201434)

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

备之一,也是相关领域科研人员以及工程技术人员关注的热点。因此,专家学者进行了多方研究,在数值分析方面,宗全利等^[1]利用动网格技术分析了网式过滤器自冲洗系统设计的不足;阿力甫江·阿不里米提等^[2]模拟了鱼雷式网式过滤器的内部流场,发现整个滤网堵塞并不均匀;王忠义等^[3]通过以平面计算模型计算滤芯系数并转换为多孔介质边界条件的方法模拟网式过滤器的内部流场。在试验测试方面,文献[4-5]提出了确定过滤器设计的相关参数、过滤器的大小和水力性能的计算方法;文献[6-7]以污水试验结合量纲分析的方法得到了过滤器水头损失计算公式。

但上述方法都不能以精确且直观的角度分析沙粒运动。随着计算机技术的发展,CFD-DEM耦合技术被广泛用于模拟各类水沙运动,相比CFD采用的两相流模型,CFD-DEM采用离散元法和Hertz法计算沙粒运动状态,以牛顿运动定理分析离散相沙粒的个体运动与群体运动,考虑了沙粒运动时产生的碰撞与堵塞^[8-9],能模拟滤芯的筛分作用与压降变化的过程。因此,本文以CFD-DEM耦合模拟Y型网式过滤器内部沙粒的运动和分布,结合流场分析滤芯各个面域的过滤性能,以期为过滤器的原理研究及优化结构设计提供方法与思路。

1 数值模拟方法

1.1 模型的建立与边界条件

图1为Y型网式过滤器的几何结构示意图,主要构件为壳体与滤芯。其中滤芯是骨架与滤层复合而成,滤层由金属编织网制作,粒度为 $180\ \mu\text{m}$,起到过滤沙粒的作用,骨架由钢板冲孔制作,起到支撑滤层的作用。考虑到滤芯的结构,同时为了减少网格数量,采用如图2所示的无厚度壁面结构代替滤芯模型。为了保证计算精度,采用结构化网格,在滤网处加密网格以保证计算精度,并进行了网格无关性检验,整个计算域一共有 4.4×10^5 个节点。

过滤器内部存在回流与收束现象,因此采用标准 $k-\varepsilon$ 模型^[10]。进口设置为速度入口条件,水相与沙相均取相同的入口速度 $1\ \text{m/s}$,湍流强度 I 为5%,入口直径为 $16\ \text{mm}$,形状为圆形,所以入口水力半径 D 取为 $8\ \text{mm}$,出口采用压力出口条件,压力为标准大气压,回流湍流强度取默认值,壁面采用标准壁面函数。

1.2 数学模型与分析方法的选择

Y型过滤器内水流可视为粘性不可压缩的流体,考虑沙粒堵塞的影响与滤芯壁面粗糙度的作用,

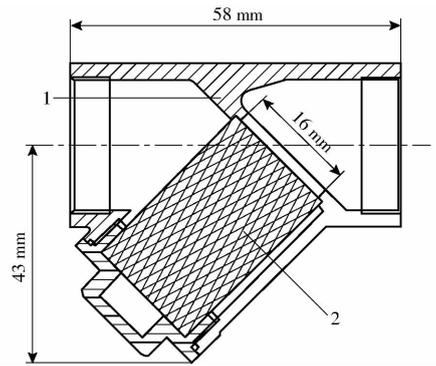


图1 Y型网式过滤器结构示意图

Fig. 1 Structural schematic of Y-type screen filter

1. 壳体 2. 滤芯

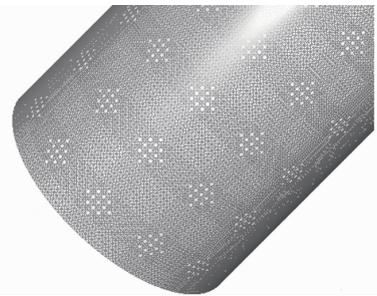


图2 网格化滤芯模型

Fig. 2 Grid model of filter

忽略表面张力影响。

两相流下的水相连续性方程和动量方程^[11]为

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

$$\frac{\partial \varepsilon \rho v}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \varepsilon \mu v = -\nabla \rho + \nabla \mu \varepsilon \nabla v + \rho \varepsilon g - F_e \quad (2)$$

式中 ρ ——水相密度, kg/m^3

ε ——体积分数项

t ——时间, s

v ——水相流速, m/s

g ——重力加速度, m/s^2

μ ——粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$

F_e ——动量汇, N/m^3 , 作用在网格单元内流体阻力的总和

在计算沙粒相时 EDEM 提供了 2 种模型用以计算流场对沙粒的影响,本文选用了欧拉-拉格朗日模型,该模型不考虑沙粒体积分数的影响,直接计算沙粒的受力并反馈给流场,适用于反映过滤器内部变化规律。所采用的模型参数参照文献[12],沙粒的平衡方程^[13-14]表示为

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = F_{p-f} + G_p + \sum F_{p-p} \quad (3)$$

$$I_p \frac{dw_p}{dt} = \sum T_{p-p} \quad (4)$$

式中 m_p ——沙粒质量, kg

v_p ——沙粒速度, m/s

I_p ——惯性矩, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
 w_p ——沙粒角速度, rad/s
 G_p ——沙粒重力, N
 F_{p-f} 、 F_{p-p} 、 T_{p-p} ——沙粒受到来自流体与其余沙粒的力和力矩, 详细公式参照文献[14]

1.3 阻力损失特性曲线

为验证数值模拟的可靠性,对过滤器进行清水条件下不同流量的数值模拟,流量为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 m^3/h 时过滤器的压差分别为 5 366、21 093、46 961、82 746、129 201 Pa。一般情况下,水头损失与过滤流量之间关系式^[15]为

$$\Delta h = kQ^x \quad (5)$$

式中 Δh ——进出口之间的总压力损失, Pa

Q ——总流量, m^3/h

k 、 x ——与过滤器结构有关的相关系数

通过结合模拟数据与式(5)求出过滤器流量与水头损失的关系式: $\Delta h = 21\,092Q^{1.9754}$, 决定系数为 $R^2 = 0.99$; 对比王新坤等^[16]关于 Y 型过滤器流量与压力损失的实验结果, 可以发现两者都具有相同的变化趋势。本文重点在于对过滤器内部流场与沙粒运动规律的探究, 上述结果说明该模型符合过滤器压降变化规律, 因而模拟结果将具有的一定参考价值。

2 结果与分析

2.1 过滤器内流场分析

2.1.1 流速分析

图 3、4 分别为流速 1 m/s、清水状态下过滤器中截面的速度矢量图与流线图。水流从入口均匀的流入过滤器, 沿程流速降低, 当水流冲击到出口面滤芯时, 受过滤器结构形式与滤芯流动阻力的影响, 一部分水流经网孔流出, 另一部分水流平行壁面前进, 产生回流, 并与新进入内腔的水流在入口弯道相遇产生了旋涡, 旋涡中最小流速为零。由于滤芯在网孔处的突缩与突扩, 水流通过网孔时流速会迅速升高, 网孔中最高流速达到 3.0 m/s。在两侧滤芯上取观察点统计壁面流速, 靠近出口侧滤芯与靠近入口侧滤芯平均流速分别为 0.75 m/s 与 0.46 m/s, 速度差为 0.29 m/s。由于堵塞很大程度上受到流速的影响, 流速越大, 过流量越多, 拦截的沙粒便越多, 因此在初始阶段出口侧滤网面更易产生局部堵塞的现象。

2.1.2 压力分析

过滤器水头损失是指水流通过过滤器入口与出口产生的水头压降, 其中包含了管道的沿程压力损失、滤芯的压力损失以及由于堵塞产生的额外压力

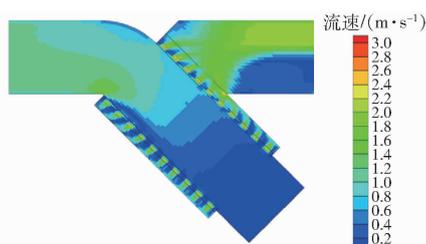


图 3 中截面流速矢量图

Fig. 3 Velocity vector distribution

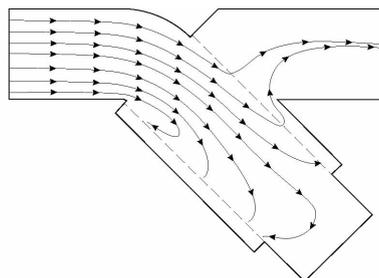


图 4 流线图

Fig. 4 Streamline diagram

损失^[17], 它是用以衡量过滤器性能的一个重要指标。图 5 为中截面静压分布图, 从入口到出口, 压力沿 Y 轴逐渐减小, 沿程取 4 个点用以反映压力梯度的变化, A、B、C、D 点压力分别为 10 755、10 953、1 258、3 Pa, 可以发现内腔压力沿程略有上升但变化较小, 内外腔静压梯度较大, 这说明无厚度壁面能很好地反映滤芯对水流产生的流动阻力特性。滤芯处产生的压力损失 Δp_{BC} 为 9 695 Pa, 占总体压降的 90%, 压力梯度力对沉积在滤芯上的沙粒有明显的作用。

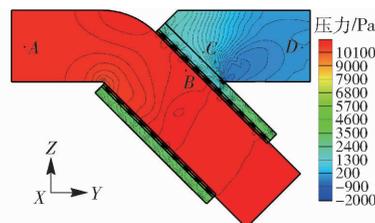


图 5 中截面静压分布图

Fig. 5 Static pressure distribution

2.2 过滤器内沙粒运动分析

2.2.1 沙粒初始沉积轨迹线

考虑到过滤器属于对称结构, 选取图 6 所示的切片区域中的代表沙粒 ($d = 200 \mu\text{m}$) 用以分析沙粒初始沉积轨迹。图 7 为选取的代表沙粒群的运动轨迹线 (从 $t = 0$ 到 $t = 1 \text{ s}$), 可以发现沙粒的运动主要分为两类情况, 一部分沙粒随水流直接流向出口并沉积在滤网面上形成了滤饼介质, 而其中又有小部分沙粒随水流又继续向前滑移进入端盖滞流区; 另一部分沙粒在回流的作用下, 沙粒直接沉积在入口面并不断沿壁面向入口方向滑移, 最终分布在各个网孔附近, 这一过程和水流的流线图十分相似。

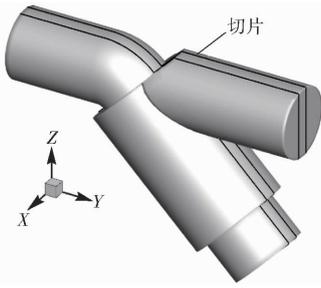


图6 切片示意图

Fig.6 Slice location

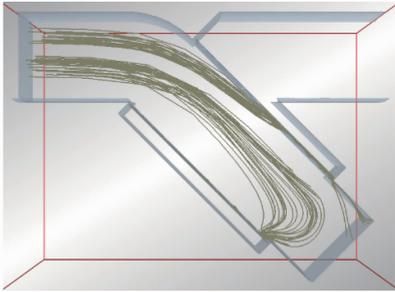


图7 代表沙粒运动轨迹线图

Fig.7 Numerically obtained sediment particle trajectories

2.2.2 流态变化与沙粒分布关系分析

为了便于描述过滤器内部流场与沙粒分布,如图8所示将内腔流场根据流速大小方向分成主流区(流速大并沿壁面向前)、旋涡区(流速低但存在明显的旋涡)、滞流区(不参与回流的低速区)、回流区(流速大并流向入口方向),并根据滤芯高度与到出口的距离将滤网分为a1、a2(统称为出口面)、b1、b2(统称为入口面)4个面域。

图9为入口流速 $v = 1 \text{ m/s}$ 各个时刻下过滤器

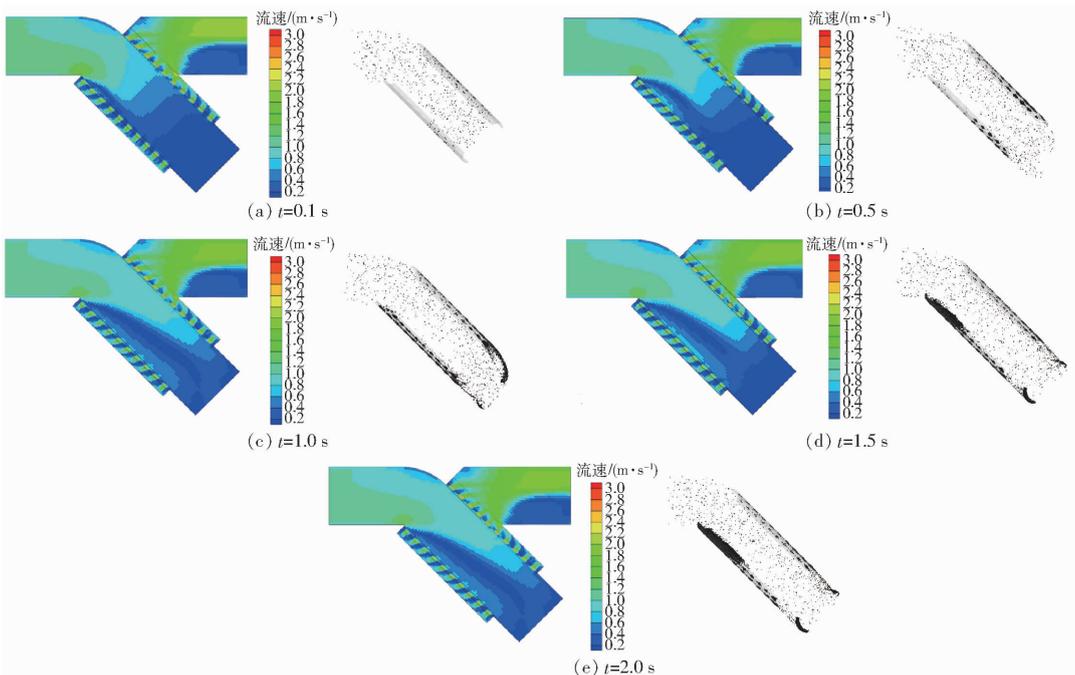


图9 流速与沙粒分布

Fig.9 Velocity vector and sand distribution in different stages

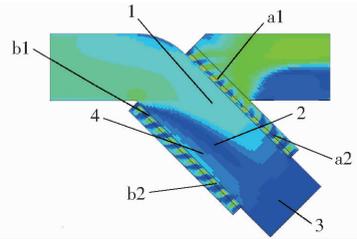


图8 内部流场与滤网结构

Fig.8 Marks of flow distribution and filter structure

1. 主流区 2. 旋涡区 3. 滞流区 4. 回流区

内部的流速与切片沙粒分布图, $t = 0 \text{ s}$ 时,滤芯尚未产生堵塞下的初始流态,回流范围很小,大部分区域处于低速滞流状态;当 $t = 0.1 \text{ s}$ 时,便有少量沙粒堆积在 a1 与 a2 面上,见图 9a;当 $t = 0.5 \text{ s}$ 时,随着回流范围的扩大,各个区域的分界线变得明显,内腔整体流速提高,此时沙粒堆积在 a2 与 b2 区域,其余位置较少,见图 9b;而在图 9c 中滞流区范围缩小,更多的区域参与回流之中,整体流速进一步提高,在 b1 上也出现了明显的沙粒沉积现象;图 9d 中回流占据整个过滤器内腔,滞留区几乎消失,两侧流速呈均匀分布,沙粒布满滤芯并大量沉积在 b2 上;相比之下由于图 9e 中流态与沙粒分布再无明显变化,故不再考虑后续过程。

通过对比不同时刻的流态图可以发现,随着过滤的进行,受回流影响的区域越来越大,内腔的平均流速越来越高,入口面与出口面之间的流速差逐渐减小;观察沙粒分布图,则可以发现沙粒以 a2、a1、b2、b1 的顺序布满了整个滤芯切片上的网孔。分析这一过程的沙粒与流态的对应变化,可以发现回流

范围与沙粒分布是两个相互影响的因素,沙粒堵塞滤芯提高了滤芯的阻力系数,降低了过水面积,促使更多的流域参与到回流的运动之中,而随着回流范围的扩大,更多的沙粒被带到堵塞程度低的滤网上并提高了该处的阻力系数,进一步扩大了回流范围,直到所有的网孔被堵塞。

2.2.3 沙粒受力分析

可以发现在 $t = 1.0$ s 时刻出现了通过回流沿出口面流向入口面的密相沙粒流,这是由于沙粒属于颗粒相,而颗粒的堆积是一种亚稳态^[18-19],流场的变化与后续沙粒的作用力不会使沙粒堆马上产生变化失去稳态,而是当流速达到某一数值,沙粒堆便会产生坍塌并产生密相沙粒流。

而对比不同时刻各处的沙粒分布可以发现,在流速低的 b1 旋涡区上沙粒堆积现象出现的最晚但堆积量最多,而流速高的 a1 上沙粒始终很少。以图 10 中沙粒的受力情况分析原因,附在滤芯上的沙粒主要受水流的曳力 F_x 与 F_y 、压力梯度力 F_p 与自身重力 G 的影响^[20]。a1 处在主流区,流速始终处于较高水平,致使该处的沙粒始终受到较大的曳力影响,堵塞发生后,水流逐渐朝沿平行壁面的方向流动,在曳力和重力的作用下,使附着的沙粒脱离滤芯,而压力梯度力又只作用于紧附在网孔上的沙粒,仅凭沙粒与壁面、沙粒与沙粒之间的摩擦力无法使沙粒维持平衡,所以只有沙粒 2 能够附在滤芯上,沙粒 1、3、4、5 会随流态改变而最终脱离该处滤芯。相比之下,b1 上的整体流速远小于主流区,其中旋涡区的部分地方流速能达到 0 m/s,这使得该处的沙粒受水流曳力的影响很小,在重力的作用便能大量沉积在滤网面,并通过沙粒之间的摩擦力形成较大的堆积。因此结合 2.2.2 小节的结论,可以认为在 Y 型过滤器内部,沙粒沉积的顺序与数量直接受流态影响,其中流速大的主流区域先出现沉积并沿流程扩散,而流速小的地方却是堵塞最严重的,这与文献^[21-22]的沿壁面切向的旋流能减少滤芯上沙粒的原理是一致的。

由此可见,Y 型网式过滤器并不是遵循流速越大的区域堵塞越严重的规律,由于过滤器内水流的旋涡运动,各过滤面流速不均,a1 面的沙粒数量始

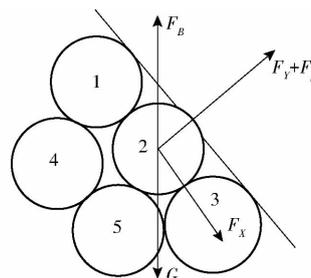


图 10 沙粒受力分析

Fig. 10 Stress analysis of particle

终处于较少的状态,这使得该处形成的滤饼厚度低于其他区域,所以在优化设计结构时可以适当提高 a1 处过水面积来提高过滤器整体的过滤效率。

3 结论

(1) 流场分析表明,在 CFD 中采用无厚度壁面模型能模拟出滤芯的流动阻力特性,其中 Y 型过滤器内部存在明显的回流与旋涡现象,滤芯入口面与出口面流速相差 0.29 m/s,这种差异使得滤芯上的沙粒分布不均并易产生局部堵塞。滤芯压力损失占总压降的 90% ,压力梯度力对附在滤芯上的沙粒起到明显的作用。

(2) 直径大于滤芯粒度的沙粒能被滤芯拦截,说明在 DEM 中无厚度壁面模型能模拟滤芯的筛分效应,整个堵塞过程中回流范围不断扩大,沙粒堆依次出现在出口侧下端、出口侧上端面、进口侧下端、进口侧上端面上,回流变化和沙粒运动之间的相互影响使沙粒最终布满滤芯。从沙粒堆积情况来看,出口侧上端面上最少而进口侧上端面上沙粒最多,表明来自水流的曳力是影响沙粒分布的主要因素。

(3) 过滤器内水流的涡旋运动导致各过滤面流速不均,然而流速大的面域在后期堵塞并非是最严重的,其中出口侧上端面具有流速大而沙粒堆积最少的特点,拥有更好的过滤性能,因此,可以通过提高出口侧上端面骨架上冲孔的密度来适当增加该处的过水面积,从而提高过滤器的整体过滤效率,这也说明采用好的滤芯设计能使过滤器内部呈现流量大的区域堵塞小,流量小的区域堵塞大,从而提高过滤器的使用寿命和整体效能。

参 考 文 献

- 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 on whole flow field for drip self-cleaning screen filter[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(16): 57-65. (in Chinese)
- 阿力甫江·阿不里米提, 虎胆·吐马尔白, 马合木江·艾合买提, 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 of screen filter with

- torpedo in micro-irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3):107-112. (in Chinese)
- 3 王忠义,任翱宇,王纪达,等.管道过滤器流场数值模拟与实验[J].华中科技大学学报:自然科学版,2015,16(1):75-79.
WANG Zhongyi,REN Aoyu,WANG Jida,et al. Numerical simulation and experimental of the pipe filter flow field [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology:Nature Science Edition, 2015,16(1):75-79. (in Chinese)
- 4 董文楚.微灌用滤网过滤器设计原理与方法[J].节水灌溉,1989,1(3):7-14.
- 5 徐茂云.微灌系统过滤器性能的试验研究[J].水利学报,1995(11):84-89.
- 6 PUIG-BARGUÉS J, BARRAGÁN J, de CARTAGENA F R, et al. 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 DURANROS 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 胡国明.颗粒系统的离散元素法分析仿真:离散元素法的工业应用与 EDEM 软件简介[M].武汉:武汉理工大学出版社, 2010.
- 9 钱宁.泥沙运动力学[M].北京:科学出版社,1983.
- 10 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,2016,28(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, 28(10):83-87. (in Chinese)
- 11 王福军.计算流体力学分析-CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
- 12 喻黎明,邹小艳,谭弘,等.基于 CFD-DEM 耦合的水力旋流器水沙运动三维数值模拟[J/OL].农业机械学报,2016, 47(1):126-132. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160117&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.017.
YU Liming,ZOU Xiaoyan,TAN Hong,et al. 3D numerical simulation of water and sediment flow in hydrocyclone based on coupled CFD-DEM [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):126-132. (in Chinese)
- 13 QIU C L, WU C Y. A hybrid DEM/CFD approach for solid-liquid flows [J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(1):19-25.
- 14 CHU K W, WANG B, YU A B, et al. CFD-DEM modelling of multiphase flow in dense medium cyclones [J]. Powder Technology, 2009, 193(3):235-247.
- 15 刘飞,刘焕芳,宗全利,等.自清洗网式过滤器水头损失和排污时间研究[J/OL].农业机械学报,2013,44(5):127-134. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130523&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.023.
LIU Fei,LIU Huanfang,ZONG Quanli,et al. Experiment on head loss and discharge time of self-cleaning screen filter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5):127-134. (in Chinese)
- 16 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)
- 17 徐茂云.微灌用筛网式过滤器水力性能的试验研究[J].水利学报,1992(3):54-56,64.
- 18 陆坤权,刘寄星.颗粒物质(上)[J].物理,2004,33(9):629-635.
LU Kunquan,LIU Jixing. Static and dynamic properties of granular matter(I) [J]. Physics, 2004, 33(9):629-635. (in Chinese)
- 19 陆坤权,刘寄星.颗粒物质(下)[J].物理,2004,33(10):713-721.
LU Kunquan,LIU Jixing. Static and dynamic properties of granular matter(II) [J]. Physics, 2004, 33(10):713-721. (in Chinese)
- 20 唐学林.固-液两相流体动力学及其在水力机械中的应用[M].郑州:黄河水利出版社,2006.
- 21 刘焕芳,王军,胡九英,等.旋流网式过滤器水力性能的试验研究[C]//中国科协2005年学术年会——人水和谐暨新疆水资源可持续利用论坛,2005.
- 22 SOUZA F J, VIEIRA L G M, DAMASCENO J J R, et al. Analysis of the influence of the filtering medium on the behaviour of the filtering hydrocyclone [J]. Powder Technology, 2000, 107(3):259-267.