

网式过滤器堵塞滤饼厚度及厚度均匀性研究

龙洋娟¹, 刘贞姬^{1,2}, 刘冬冬¹, 刘铭锦¹

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003; 2. 寒旱区生态水利工程兵团重点实验室, 新疆 石河子 832003)

摘要: 为探究滤饼堵塞机理, 以试验与数值模拟相结合的方法开展了不同工况下卧式网式过滤器堵塞时滤饼厚度以及厚度均匀性变化规律研究。结果表明: 过滤器滤饼厚度由单位时间里滤网面接触颗粒数量、流场作用力、颗粒间相互作用力与颗粒重力共同决定; 试验中过滤器堵塞时滤饼厚度随颗粒质量浓度增大先增大后减小, 模拟中滤饼厚度随颗粒质量浓度增大先增大后趋于稳定; 同一颗粒质量浓度条件下, 试验和模拟中堵塞时滤饼厚度随进口流量增大缓慢下降后趋于稳定; 滤饼厚度的均匀性随颗粒质量浓度增大先增大后趋于稳定, 随流量增大而先增大后减小; 综合考虑各工况下滤饼厚度以及厚度均匀性, 实际灌溉中过滤器运行流量不宜超过 $200 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

关键词: 网式过滤器; 滤饼厚度; 流场作用力; 颗粒作用力; 厚度均匀性

中图分类号: S27.5

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2025)03-0040-08

Study on thickness and thickness uniformity of filter cake during clogging of screen filters//LONG Yangjuan¹, LIU Zhenji^{1,2}, LIU Dongdong¹, LIU Mingjin¹ (1. College of Water Conservancy and Architecture Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 2. Key Laboratory of Cold and Arid Regions Eco-Hydraulic Engineering of Xinjiang Production & Construction Corps, Shihezi 832003, China)

Abstract: In order to explore the clogging mechanism of filter cakes, a combined approach of prototype experiments and CFD-DEM coupled simulation was used to investigate the variation laws of filter cake thickness and thickness uniformity during the clogging of horizontal screen filters under different conditions. The results show that the cake thickness of the filter is determined by the number of particles in contact with the unit screen area, the flow field force, the inter-particle interaction force and the particle gravity. In the experiments, the filter cake thickness first increases and then decreases with the increase of particle mass concentration, while in the simulations, the filter cake thickness first increases and then stabilizes with the increase of particle mass concentration. Under the same particle mass concentration, the filter cake thickness in both experiments and simulations slowly decreases and then stabilizes with the increase of inlet flow rate. As the particle mass concentration increases, the thickness uniformity of the filter cake first increases and then tends to be stable after reaching the saturation concentration. As the inlet flow rate increases, the thickness uniformity first increases, and then significantly decreases after reaching the critical flow rate. Based on the comprehensive analysis of the thickness and thickness uniformity of the filter cake under various conditions, the operating flow rate of the filter in actual irrigation should not exceed $200 \text{ m}^3/\text{h}$.

Key words: screen filter; cake thickness; flow field force; particle force; thickness uniformity

作为水资源匮乏的农业用水大国,我国正持续推广节水灌溉技术,其中过滤器是保证节水灌溉系统不被堵塞的关键技术设备,对节水农业发展有着极其重要的影响^[1-4]。因网式过滤器具有安装使用简单,维护方便,造价成本低及水头损失小等优点,使用最为广泛^[5-6]。但网式过滤器普遍存在堵塞问题,长时间运行后泥沙颗粒、悬浮有机物等在滤网处易堆积堵塞形成滤饼,导致过滤效率降低甚至无法

正常运行,严重影响农田灌溉。因此,对网式过滤器堵塞过程以及堵塞时滤饼的结构进行研究,确定最佳运行工况,以减小过滤器堵塞带来的损害成为目前节水灌溉设备研究的重点内容。

过滤过程中堵塞的本质是形成了滤饼,目前众多学者对滤饼的研究主要集中于滤饼的结构和滤饼的形成;冯泽宇等^[7]通过真空过滤试验考察了颗粒粒度对过滤速度的影响,使用 X 射线计算机断层扫

基金项目: 国家自然科学基金项目(12162030,11662018)

作者简介: 龙洋娟(1999—),女,硕士研究生,主要从事水利机械性能研究。E-mail: 3446164734@qq.com

通信作者: 刘贞姬(1979—),女,教授,博士研究生,主要从事水利机械性能研究。E-mail: shz_lzj@163.com

描技术获取滤饼的微观结构细节,分析颗粒性质对滤饼孔隙结构的影响;陈茹霞等^[8]对不同条件下的细粒煤进行真空过滤脱水后形成的滤饼进行孔隙结构分析,得到滤饼的孔隙率和分形维数,结合过滤速度、滤饼水分和干滤饼密度分析滤饼结构对过滤脱水的影响规律;Iritani 等^[9-11]研究了压滤过程中过滤压力和滤饼结构的关系,结果显示,随着过滤压力的增加,滤饼的平均质量比阻增大,滤饼结构的渗透性能降低;喻黎明等^[12]采用 CFD-DEM 耦合方法研究了入口流速、颗粒粒径等因素对网式过滤器局部堵塞时滤饼颗粒在网面分布情况的影响;杨泽志等^[13]以过滤过程中单个微粒的受力为基础,得出各作用力与滤饼厚度的关系;Mekinley 等^[14]通过开展大量室内砂土渗透试验,总结出在恒定压力条件下的滤饼生长厚度方程。

滤饼的厚度与厚度分布情况对过滤器滤网压强分布以及堵塞程度产生直接影响^[15-17],但少有学者从三维滤饼角度建立滤饼厚度与不同影响因素之间的直观联系。因此,本文以使用最为广泛的网式过滤器为研究对象,对不同进口流量、不同颗粒质量浓度工况进行了堵塞试验及数值模拟试验,分析进口流量、颗粒质量浓度对堵塞时滤饼厚度与滤饼厚度均匀性的影响,探讨颗粒质量浓度和进口流量对滤饼形成的内在影响,为实际灌溉运行选择最佳运行工况及减小过滤器过滤过程中滤饼堵塞带来的损害提供理论依据。

1 试验及数值模拟方法

1.1 研究对象

本文选择在节水灌溉系统中使用最为广泛的卧式网式过滤器(设计流量:120 ~ 240 m³/h,反冲洗压差值:0.2 MPa,生产厂家:新疆石河子金地节水设备有限公司)为研究对象,结构尺寸如图 1 所示。为了便于后期对滤网堵塞情况进行分析,建立过滤器的三维坐标系,坐标轴以过滤器进口与滤网中轴线交汇点为圆心 O,图中 x 轴为圆筒滤网轴线方向, y 轴为竖直径向方向, z 轴为水平径向方向。

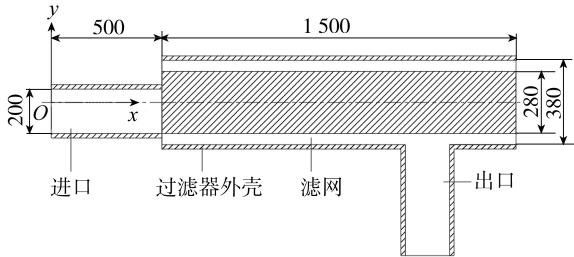


图 1 卧式网式过滤器结构尺寸(单位:mm)

1.2 试验设计

试验中网式过滤器采用楔形滤网,具有不易堵塞、容易冲洗的特点,滤网目数为 80 目。试验装置包括水池、搅拌器、离心泵、变频柜、电磁流量计、数显压力表、网式过滤器、连接管道。堵塞试验中采用的泥沙颗粒由新疆玛纳斯河河沙筛分得到,其颗粒级配与新疆北疆地区实际灌溉用水颗粒级配相符。通过走访新疆生产建设兵团,选取与实际工程中水源泥沙浓度相符的颗粒质量浓度,分别为 0.032、0.064、0.095、0.124 kg/m³。

a. 清水试验方法:根据实际工程灌溉常用流量范围,选定 200、180、170、160、150、140 m³/h 等 6 种进口流量进行清水试验,测定进出口压强,计算得到进出口清水水头损失。

b. 堵塞试验方法:设置 200、180、170、160、150、140 m³/h 等 6 种进口流量,以及 0.032、0.064、0.095、0.124 kg/m³ 这 4 种泥沙颗粒质量浓度进行 24 组试验。随着时间增加,滤网逐步堵塞,当进出口水压差达到预定压差时,认为此时滤网严重堵塞,试验结束。试验结束后,打开过滤器取出滤网,采用体积排水法获得滤饼和滤网的体积,减去干净滤网体积,得到各工况下湿滤饼体积。收集滤网上滤饼泥沙颗粒,对滤饼颗粒进行烘干,测定每组泥沙质量,计算得到滤网堵塞形成滤饼时的平均厚度,此时滤饼厚度的计算面积为滤网有效过滤面积。

1.3 物理模型

根据试验中的网式过滤器构建 1:1 简化物理模型,使用非结构网格划分方式,并在滤网处进行网格加密,网格单元数量为 1 536 004 个,正交网格质量大于 0.2,最大纵横比为 1:4.5,满足网格质量要求。

液相采用 fluent 软件进行数值模拟,过滤器内流动液体属于不可压缩流体,采用标准 k-ε 模型对三维流场进行求解,采用 SIMPLEC 算法进行速度场和压力场的耦合,壁面条件采用标准壁面。进口边界条件采用速度入口,出口边界条件采用压力出口,湍流强度设为 5%,收敛残差设为 1×10⁻³。

颗粒相采用 DEM 软件 EDEM^[18] 进行模拟。考虑到泥沙级配连续且数量大,而计算机算力有限等情况,模拟中去除了小于滤网孔径的颗粒,以及因粒径过大而在过滤中难以附着在滤网上的颗粒,选取颗粒粒径分别为 0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.6、1.8、2.0 mm,各粒径占比与试验中相同。为缩短模拟时长,还原滤网堵塞情况,在考虑实际工程泥沙浓度范围的基础上,模拟中采用的颗粒质量浓度大于试验中浓度,分别为 0.112、0.279、0.309、0.336 kg/m³。所选取的进口流量分别为 220、200、160、140 m³/h。

对 140 m³/h 流量下不同颗粒质量浓度,以及对 0.112 kg/m³ 颗粒质量浓度下不同进口流量共 8 组工况进行了水沙耦合模拟。

实际工程泥沙颗粒因杂质存在,有一定吸附性,模拟过程中采用 EDEM 中的吸附模型进行预模拟,发现颗粒的堆积状态与过滤器实际运行中泥沙运移状态差别过大,即 EDEM 吸附模型不适用于描述过滤器中泥沙颗粒^[19-21]。而不考虑吸附模型时,模拟的颗粒状态更接近实际过滤中泥沙颗粒状态,故本文模拟过程中将不考虑泥沙颗粒间的吸附性。颗粒物性参数及接触参数参考文献[19],设置过滤器壳体的泊松比为 0.394,密度为 1 050 kg/m³,泥沙颗粒的泊松比为 0.400,密度为 2 500 kg/m³。设置颗粒间相互作用的恢复系数为 0.545,静摩擦因数为 0.3,滚动摩擦因数为 0.005。颗粒和壳体相互作用的恢复系数为 0.500,静摩擦因数为 0.5,滚动摩擦因数为 0.010。

1.4 数值模拟验证

通过清水试验,测得不同进口流量 Q 下的水头损失 ΔH ,对试验结果进行拟合得到进口流量-水头损失曲线,如图 2 所示。由图 2 可知,数值模拟的数据与试验数据有较高的吻合度,证明了数值模拟结果的准确性。

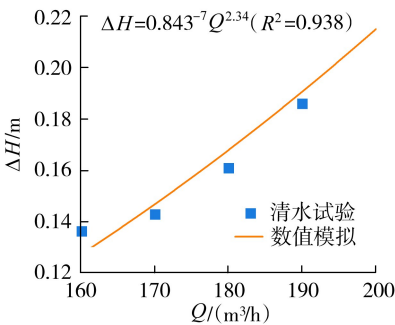


图 2 清水条件下进口流量-水头损失曲线

为了验证流固耦合仿真结果,进行了 0.124 kg/m³ 质量浓度、140 m³/h 流量下的浑水数值模拟和浑水试验。将得到的滤饼均匀地划分为 5 个区域(表 1),比各区域滤饼质量占比,以此验证流固耦合模拟的可靠性。浑水数值模拟和浑水试验中各区域滤饼质量占比如表 1 所示。可见浑水试验与数

表 1 不同区域的滤饼质量占比验证

区域	x 轴范围/m	浑水试验 质量占比/%	数值模拟 质量占比/%	质量占比相 对误差/%
1	(0.5, 0.8]	6.7	7.2	7.0
2	(0.8, 1.1]	9.7	11.2	13.2
3	(1.1, 1.4]	17.8	18.5	4.0
4	(1.4, 1.7]	27.7	30.7	9.7
5	(1.7, 2.0)	38.1	32.4	-17.7

值模拟的滤饼质量占比最小相对误差为 4.0%,最大相对误差为 17.7%。结果表明,本文所采用的数值模拟方法对滤饼颗粒沉积状态的研究是可靠的。

2 结果与分析

2.1 滤饼厚度随浓度变化规律

图 3 为堵塞试验和数值模拟得到的滤饼厚度 T 随颗粒质量浓度 S 的变化曲线。试验中滤饼厚度的计算面积是滤网有效过滤面积,模拟中滤饼厚度的计算面积是滤饼分布面积。由图 3 可知,堵塞试验和数值模拟得到的滤饼厚度随颗粒质量浓度的增大可分为两个不同的阶段。如图 3(a) 所示:同一流量条件下,颗粒质量浓度较低 (0.032 ~ 0.095 kg/m³) 时为第一阶段,堵塞滤饼厚度随颗粒质量浓度增大而增大至某一峰值,该峰值为滤网完全堵塞时形成的最大滤饼厚度,并且最大滤饼厚度随流量增大而减小,其中流量为 140 m³/h 时,最大滤饼厚度最大 (0.708 mm),流量为 200 m³/h 时,最大滤饼厚度最小 (0.596 mm),说明流量与滤饼厚度存在较为明显的相关关系;颗粒质量浓度较高 (0.095 ~ 0.124 kg/m³) 时为第二阶段,堵塞滤饼厚度随颗粒质量浓度增大而减小。如图 3(b) 所示:同一流量条件下,颗粒质量浓度较低 (0.112 ~ 0.279 kg/m³) 时为第一阶段,堵塞滤饼厚度随颗粒质量浓度增大而增大;颗粒质量浓度较高 (0.279 ~ 0.336 kg/m³) 时为第二阶段,堵塞滤饼厚度随颗粒质量浓度增大而缓慢增长,最后趋于稳定。

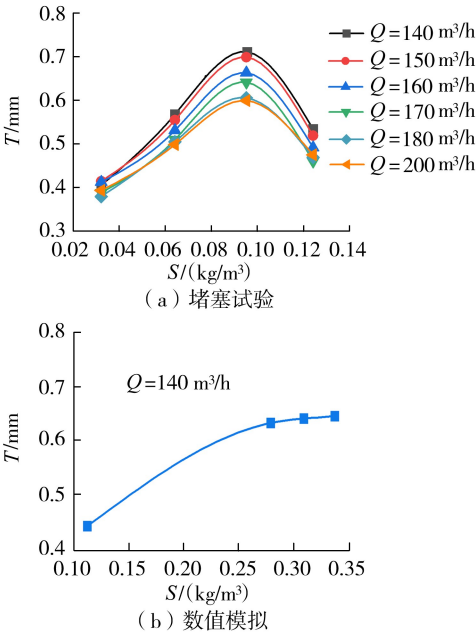


图 3 滤饼厚度随颗粒质量浓度变化曲线

对比图 3(a) 和图 3(b) 可以发现,在第一阶段堵塞试验与数值模拟呈现相同的变化规律,两者在

颗粒质量浓度增大到一定值时,堵塞滤饼厚度变化规律改变,不再随着浓度增大而增大;但在颗粒质量浓度较高的第二阶段,试验和数值模拟的滤饼厚度随颗粒质量浓度变化呈现不一致的变化规律,这需要对滤饼形成原理进行分析并对规律不一致的原因进行解释。

对上述结果进行微观层面分析,发现颗粒质量浓度对最终堵塞状态滤饼厚度的影响主要由单位时间里滤网面接触颗粒数量和颗粒间相互作用力决定。颗粒质量浓度越大,单位时间里滤网面接触颗粒数量越多,颗粒被滤网捕获的可能性越大,越会形成更厚的滤饼层。颗粒间相互作用力包括颗粒间碰撞力以及颗粒靠近时存在的吸附力。如图 4(a) 所示,浓度越大,滤饼层外层颗粒间碰撞越频繁,加上泥沙颗粒间存在一定吸附力,导致外层颗粒更容易在腔体内自由颗粒的作用下脱离滤饼。颗粒数量对滤饼厚度具有正向效益,颗粒间相互作用力对滤饼厚度具有负向效益。颗粒质量浓度增大到一定程度时,颗粒间相互作用力对滤饼厚度的负向效益大于颗粒数量增加带来的正向效益,导致高颗粒质量浓度时滤饼厚度反而出现下降趋势,因模拟时没有考虑到泥沙颗粒间的吸附力,颗粒作用对滤饼厚度的负向效益较试验过程减小,故模拟结果在高颗粒质量浓度时滤饼厚度呈现稳定不变的趋势。

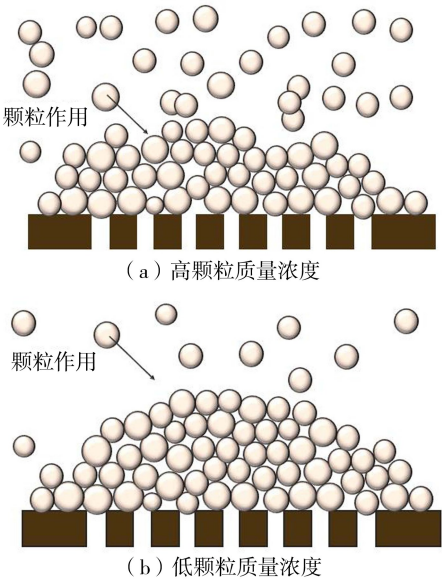


图 4 不同质量浓度颗粒相互作用示意图

2.2 滤饼厚度随进口流量变化规律

图 5 为堵塞试验和数值模拟得到的滤饼厚度随进口流量变化曲线。由图 5 可知,堵塞试验和数值模拟得到的滤饼厚度随流量增大呈现较为一致的规律,同一颗粒质量浓度条件下,滤饼厚度随进口流量增大呈先下降后趋于稳定的变化趋势,在一定程度

上说明了堵塞试验与数值模拟结果的准确性。通过对比图 3 和图 5 可以发现,流量为 $140\text{ m}^3/\text{h}$ 时滤饼厚度差最大 (0.321 mm), 为 $200\text{ m}^3/\text{h}$ 时最小 (0.287 mm)。颗粒质量浓度为 $0.095\text{ kg}/\text{m}^3$ 时滤饼厚度差最大 (0.094 mm), 为 $0.032\text{ kg}/\text{m}^3$ 时最小 (0.047 mm)。由此发现,颗粒质量浓度对滤饼厚度的影响较进口流量对滤饼厚度影响更大,这说明本试验中颗粒间相互作用力较流场作用力对滤网上滤饼颗粒影响更为显著。

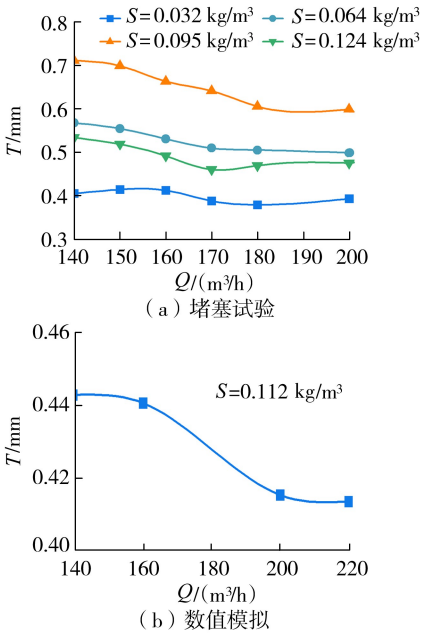


图 5 滤饼厚度随进口流量变化曲线

进口流量对堵塞状态滤饼厚度的影响主要由滤网面接触的颗粒数量与流场对颗粒的作用力决定。流量越大,单位时间内接触颗粒数量越多,流场对颗粒的作用力越大。如图 6 所示,流场对颗粒的作用力可分解为垂直滤网面的力 f_1 与平行于滤网面的错流 f_2 。 f_1 越大,颗粒越容易依托楔形网孔形成稳定滤饼层; f_2 越大越容易导致原本稳定的滤饼层结构失稳,不利于滤饼表层颗粒的稳定性,表面颗粒在 f_2 作用下往更远更高的滤网或内部腔体运移。流量越大,颗粒在 f_2 的作用下,越容易在滤网后端形成局部堆积现象。基于滤饼颗粒受力分析可以解释滤饼厚度随流量的变化规律,随着流量的增大,错流对滤饼层厚度带来的负向效益大于垂直力以及单位时间里滤网面接触颗粒数量增加对滤饼层带来

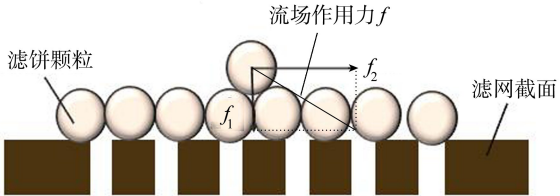


图 6 流场对颗粒作用力示意图

的正向效益,这就导致流量增大但平均滤饼厚度减小。而当三者的作用在某一流量下达到一种动态平衡状态时,滤饼结构趋于稳定,滤饼厚度也不会再发生较大变化。

根据喻黎明等^[22]研究成果:流量越大,颗粒受流场作用力越大,更多的颗粒在过滤器腔体内移动,难以附着在滤网上,这也是同一浓度下,随着流量增大,滤饼层厚度反而呈下降趋势的原因。

2.3 厚度均匀性变化规律

2.3.1 滤饼等级划分

实际运行中,网面上滤饼厚度是不均匀的。根据滤饼压降公式^[16],滤饼厚度越厚,滤饼压降越大,滤饼厚度越不均匀,易导致滤网压降分布不均,进而产生局部极高压强区域,严重降低网式过滤器过滤效率,增加后续冲洗难度^[23-25]。

为了量化堵塞时滤饼厚度分布规律,本文利用Python编程,根据每组试验得到的平均滤饼厚度将滤饼层划分成上、中、下三层,统计各层滤饼面积占比。中层滤饼面积占比越大说明滤饼厚度分布越均匀,上层滤饼面积占比越大说明滤饼局部突起面积越大,局部高压降区域越多。本文引入局部系数 R_s 来描述滤饼局部不均匀性, R_s 越大说明堵塞滤饼局部突起面积越大。 R_s 计算公式为

$$R_s = A_u / A_m \tag{1}$$

式中: A_u 为上层滤饼面积占比; A_m 为中层滤饼面积占比。

将滤网上滤饼的面积划分为 m 个区域,统计各区域平均滤饼厚度,采用厚度均匀性系数 R_{cov} 描述滤饼厚度均匀性, R_{cov} 越大,滤饼厚度均匀性越差,网面压强分布越不均匀。 R_{cov} 计算公式为^[26]

$$R_{cov} = \frac{\sigma_t}{t} = \frac{1}{t} \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (t_j - t)^2} \tag{2}$$

式中: σ_t 为滤饼层厚度总体标准差; t 为滤饼平均厚度; m 为各区域数量; t_j 为各区域滤饼平均厚度。

根据局部系数以及厚度均匀性系数将滤饼划分为4个等级: $0 < R_s \leq 0.3, 0 < R_{cov} \leq 1$,滤饼等级评价为优秀; $0.3 < R_s \leq 0.6, 1 < R_{cov} \leq 1.5$,滤饼等级评价为良好; $0.6 < R_s \leq 0.9, 1.5 < R_{cov} \leq 2$,滤饼等级评价为合格; $R_s > 0.9, R_{cov} > 2$,滤饼等级评价为较差。 R_s 越大,滤饼级别越差,滤饼后续清洗难度越大; R_{cov} 越大,厚度均匀等级越低,滤饼厚度均匀性越差,实际运行中过滤器更容易局部堵塞乃至破坏,故在灌溉时应尽量规避在滤饼等级为较差时的工况下运行,且相较 R_s 应优先考虑 R_{cov} 。

2.3.2 厚度均匀性随颗粒质量浓度变化规律

表2是不同颗粒质量浓度的滤饼厚度均匀系

数,表3是不同质量浓度各分层滤饼面积占比,图7是流量140 m³/h、质量浓度0.309 kg/m³时滤饼纵剖面及横剖面。由表2、表3、图7发现,①颗粒质量浓度由0.112 kg/m³增加到0.279 kg/m³时,厚度均匀性系数由1.721变为1.181,局部系数由1.035减小为0.447,滤饼厚度均匀性以及滤饼局部突起改善明显,滤饼评价等级由合格/较差变为良好;上层厚度滤饼面积减小,中层厚度滤饼面积增加,下层厚度滤饼面积略有增加。这是因为在低颗粒质量浓度(0.112~0.279 kg/m³)时,颗粒质量浓度越大,单位时间滤网面接触颗粒数量增加,最上层颗粒与自由颗粒碰撞作用更为频繁,原本稳定性较差的上层滤

表2 不同颗粒质量浓度下厚度均匀性系数

颗粒质量浓度/(kg/m ³)	平均滤饼厚度/mm	厚度总体标准差	各区域数量	厚度均匀性系数	滤饼评价等级
0.112	0.453	0.779	1024	1.721	合格
0.279	0.634	0.748	1182	1.181	良好
0.309	0.642	0.752	1176	1.171	良好
0.336	0.647	0.782	1208	1.209	良好

表3 不同颗粒质量浓度各分层滤饼面积占比

颗粒质量浓度/(kg/m ³)	厚度层划分	厚度范围/mm	区域占比/%	局部系数	滤饼评价等级
0.112	下层	≤0.35	43	1.035	较差
	中层	>0.35~<0.75	28		
	上层	≥0.75	29		
0.279	下层	≤0.53	45	0.447	良好
	中层	>0.53~<0.93	38		
	上层	≥0.93	17		
0.309	下层	≤0.54	47	0.500	良好
	中层	>0.54~<0.94	34		
	上层	≥0.94	19		
0.336	下层	≤0.55	46	0.588	良好
	中层	>0.55~<0.95	34		
	上层	≥0.95	20		

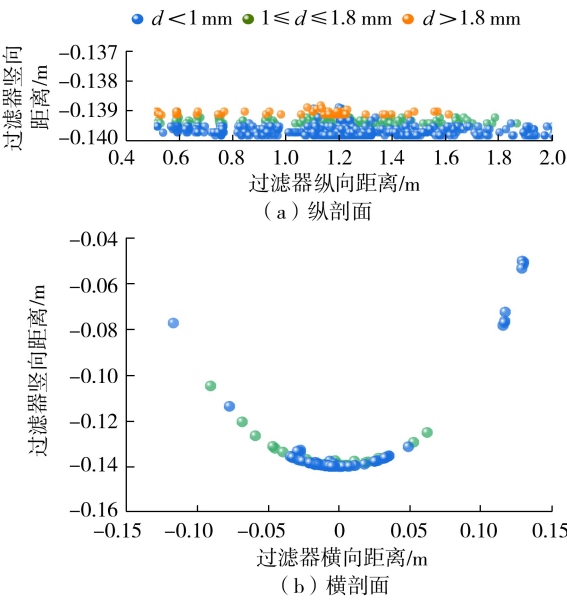


图7 S = 0.309 kg/m³、Q=140 m³/h时滤饼纵、横剖面

饼颗粒失稳脱离滤饼层,导致上层的局部突出减小,滤饼厚度分布更均匀。②颗粒质量浓度由 0.279 kg/m^3 增加到 0.336 kg/m^3 时,滤饼均匀性以及各厚度面积占比都趋于稳定,滤饼评价等级维持在良好等级,总体来看上层厚度滤饼面积占比增大,中层厚度滤饼面积占比减小,下层厚度滤饼面积略有增加,但各层厚度滤饼面积占比变化程度小,不超过3%。可见,在高颗粒质量浓度($0.279\sim 0.336\text{ kg/m}^3$)时,滤网面接触颗粒数量和颗粒间相互作用力对滤饼层厚度的影响会维持在一个动态平衡状态,滤饼层厚度分布也趋于一个较为稳定的状态。

2.3.3 厚度均匀性随颗粒进口流量变化规律

表 4 是不同流量的滤饼厚度均匀系数,表 5 是不同流量各分层滤饼面积占比,图 8 是质量浓度 0.112 kg/m^3 、流量 $220\text{ m}^3/\text{h}$ 时滤饼纵剖面及滤饼最厚位置横剖面。分析表 4 和表 5 发现,滤饼厚度均匀性随流量变化分为两个阶段。①滤饼评价等级提高阶段:流量由 $140\text{ m}^3/\text{h}$ 增大至 $160\text{ m}^3/\text{h}$ 时,厚度均匀性系数由 1.607 减小为 1.597 ,滤饼厚度均匀性增大,局部系数由 0.659 减小为 0.564 ,局部突起减小,上层滤饼面积占比由大变小,中层滤饼面积占比有所增加,下层滤饼面积占比逐渐增大。在较低流量下,因颗粒受重力影响,流场挟沙能力差,滤饼颗粒更多地堆积在滤网前段。随着流量增大, f_1 和 f_2 对滤饼颗粒的联合作用越大,滤饼颗粒由滤网前半段向更远处移动,颗粒在网面上的分布会更分散,导致滤饼整体会更平整,上层局部突出面积减小,中层滤饼面积占比增加,滤饼厚度趋于均匀化。②滤

表 4 不同流量下厚度均匀性系数

进口流量/(m^3/h)	平均滤饼厚度/mm	厚度标准差	各区域数量	厚度均匀性系数	滤饼评价等级
140	0.453	0.727	1024	1.607	合格
160	0.451	0.720	1091	1.597	合格
200	0.425	0.779	1012	1.832	合格
220	0.424	0.883	820	2.084	较差

表 5 不同流量下各分层滤饼面积占比

进口流量/(m^3/h)	厚度层划分	厚度范围/mm	区域占比/%	局部系数	滤饼评价等级
140	下层	≤ 0.35	32	0.659	合格
	中层	$>0.35\sim <0.75$	41		
	上层	≥ 0.75	27		
160	下层	≤ 0.35	36	0.524	良好
	中层	$>0.35\sim <0.75$	42		
	上层	≥ 0.75	22		
200	下层	≤ 0.35	43	0.727	合格
	中层	$>0.35\sim <0.75$	33		
	上层	≥ 0.75	24		
220	下层	≤ 0.35	44	1.000	较差
	中层	$>0.35\sim <0.75$	28		
	上层	≥ 0.75	28		

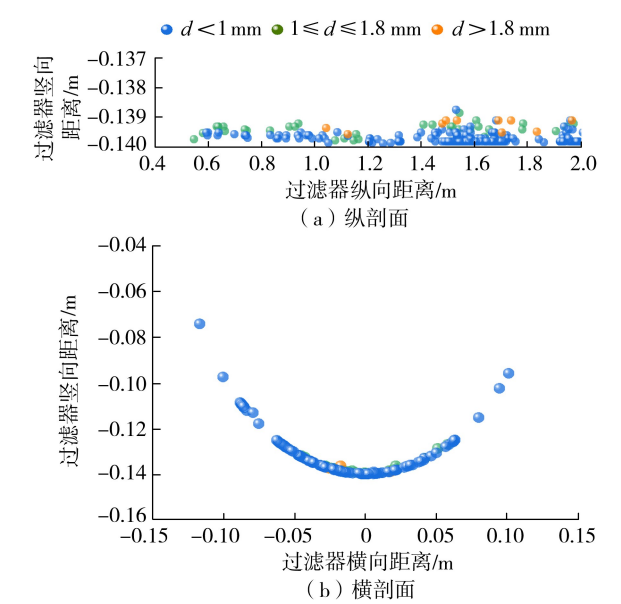


图 8 $S=0.112\text{ kg/m}^3$ 、 $Q=220\text{ m}^3/\text{h}$ 时滤饼纵、横剖面

饼评价等级降低阶段:流量由 $160\text{ m}^3/\text{h}$ 增大到 $220\text{ m}^3/\text{h}$ 时,厚度均匀系数由 1.597 增大到 2.084 ,滤饼厚度均匀性逐渐减小,上层滤饼面积占比由小变大,中层面积占比明显减小,下层滤饼面积占比逐渐增大,这导致局部系数由 0.524 增大到 1.000 ,局部突起增多。结合图 8 可以发现,大流量下水流对泥沙颗粒裹挟力大, f_2 对滤饼颗粒的影响占主导,颗粒在 f_2 的作用下向更远处运移,在滤网后端形成明显堆积,形成局部厚度较大的滤饼层,最厚滤饼层位置随着流量增大由进水口位置向出水口位置靠近,这导致上层滤饼面积占比增大。随着流量增大,一些颗粒会往更高、更远的滤网处运动,进而形成滤饼,而下层滤饼颗粒分布将更为分散。

3 讨论

a. 关于颗粒间吸附性对滤饼的影响,Nishitani等^[27-29]研究了颗粒间吸引力和颗粒质量浓度对滤饼形成机理的影响,发现随着吸引力和颗粒质量浓度的增加,颗粒形成的饼层较松散且表面粗糙,容易被横流冲走,这与本文颗粒间吸附力对滤饼厚度产生负向效益的规律具有一致性。因本文在模拟中颗粒作用力仅考虑了颗粒间碰撞力,没有考虑颗粒间吸附力,这会导致在高浓度时,实际滤网滤饼厚度均匀性规律与模拟结果会有微小差距。

b. 参考 Zhou 等^[30]的研究,本文从实际工程中滤饼厚度的最主要影响因素(颗粒质量浓度和进口流量)出发,基于颗粒受力的微观层面分析了两种影响因素的改变导致堵塞滤饼厚度变化的根本原因。但并没有对各种作用力以及滤网面接触颗粒数量对滤饼的影响进行单独监测和量化,仅考虑三者

协同作用的影响,后续研究可利用 CFD-DEM 模拟在研究颗粒受力上的优势,对堵塞过程中颗粒所受流场作用力和颗粒间相互作用力进行数值表征,以进一步对滤饼颗粒受力进行研究。

c. 对于不同工况下形成的堵塞滤饼层,通常平均厚度越小,厚度均匀性越好。上层滤饼面积占比越小的滤饼在堵塞时滤网两侧压差分布更为均匀,过滤器运行更为稳定,滤饼更容易清洗。在实际灌溉过程中,因颗粒质量浓度由该地水源决定,故通过调控灌溉流量来控制堵塞滤饼厚度状态可行性更高,根据本文研究结果,对于网式过滤器实际灌溉中进口流量不宜超过 $200\text{ m}^3/\text{h}$,否则形成滤饼的等级低,即滤饼厚度大、滤饼厚度分布不均匀,导致局部堵塞严重,不利于过滤器长期稳定运行以及后续清洗工作。

4 结 论

a. 同一流量时,在第一阶段,试验和模拟中过滤器堵塞时滤饼厚度均随颗粒质量浓度增大而增大;在第二阶段,试验中滤饼厚度随颗粒质量浓度增大而减小,模拟中滤饼厚度随颗粒质量浓度增大呈先增大后趋于稳定的趋势。

b. 同一颗粒质量浓度条件下,试验和模拟得到的规律呈现出一致性,堵塞时滤饼厚度随进口流量增大呈缓慢下降后趋于稳定的趋势。

c. 模拟和试验结果表明,流量和颗粒质量浓度对滤饼厚度与滤饼颗粒分布均匀性的影响实质上由单位时间里滤网面接触颗粒数量、颗粒间相互作用力、流场作用力以及颗粒自身重力决定。

d. 实际灌溉中可通过调控进口流量来控制形成更有利于过滤器长期运行和便于清洗的高评价等级滤饼,对于网式过滤器实际灌溉中进口流量不宜超过 $200\text{ m}^3/\text{h}$ 。

参考文献:

[1] ICID. World irrigated area-2018[Z/OL]. [2019-12-01]. <https://www.icid.org/world-irrigated-area.pdf>.
[2] 李久生,栗岩峰,王军,等.微灌在中国:历史、现状和未来[J].水利学报,2016,47(3):372-381. (LI Jiusheng, LI Yanfeng, WANG Jun, et al. Microirrigation in China: history, current situation and prospects [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47 (3): 372-381. (in Chinese))
[3] WANG Jing, KIM S C, PUI D Y H. Carbon nanotube penetration through a screen filter: numerical modeling and comparison with experiments [J]. Aerosol Science and Technology, 2011, 45(3): 443-452.

[4] 李云开,周博,杨培岭.滴灌系统灌水器堵塞机理与控制方法研究进展[J].水利学报,2018,49(1):103-114. (LI Yunkai, ZHOU Bo, YANG Peiling. Research advances in drip irrigation emitter clogging mechanism and controlling methods[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 103-114. (in Chinese))
[5] DURAN-ROS M, PUIG-BARGUÉS 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.
[6] 杨晓军,刘飞,吴玉秀,等.新疆农田节水灌溉系统首部过滤设备选型探讨[J].中国农村水利水电,2014(5): 76-80. (YANG Xiaojun, LIU Fei, WU Yuxiu, et al. A discuss on the first part filtration equipment selection in Xinjiang agricultural water-saving irrigation system [J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(5): 76-80. (in Chinese))
[7] 冯泽宇,董宪姝,樊玉萍,等.基于显微CT技术的滤饼微观孔隙结构研究[J].矿业研究与开发,2021,41(3): 131-135. (FENG Zeyu, DONG Xianshu, FAN Yuping, et al. Study on the micro pore structure of filter cake based on micro-CT technology [J]. Mining Research and Development, 2021, 41(3): 131-135. (in Chinese))
[8] 陈茹霞,樊玉萍,冯泽宇,等.浓度和粒度对细粒煤滤饼结构影响的研究[J].中国矿业,2017,26(2): 133-138. (CHEN Ruxia, FAN Yuping, FENG Zeyu, et al. Study on the structure of fine coal filter cake based on concentration and particle size [J]. China Mining Magazine, 2017, 26 (2): 133-138. (in Chinese))
[9] IRTANI E, KATAGIRI N, NAKAJIMA R, et al. Cake properties of nanocolloid evaluated by variable pressure filtration associated with reduction in cake surface area [J]. AIChE Journal, 2014, 60(11): 3869-3877.
[10] GOLDRICK S, JOSEPH A, MOLLET M, et al. Predicting performance of constant flow depth filtration using constant pressure filtration data [J]. Journal of Membrane Science, 2017, 531: 138-147.
[11] IRTANI E, KATAGIRI N, NAKAJIMA R, et al. Nanocolloid cake properties determined from step-up pressure filtration with single-stage reduction in filtration area [J]. AIChE Journal, 2015, 61(12): 4426-4436.
[12] 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))
[13] 杨泽志,奚旦立,毛艳梅.错流过滤中由颗粒沉积模型对滤饼厚度的分析[J].东华大学学报(自然科学版), 2008, 34(6): 736-739. (YANG Zezhi, XI Danli, MAO

- Yanmei. Cake thickness model by particle dynamic balance analysis in cross-filtration[J]. Journal of Donghua University (Natural Science Edition), 2008, 34(6): 736-739. (in Chinese))
- [14] MCKINLEY J D, BOLTON M D. A geotechnical description of fresh cement grout-filtration and consolidation behaviour [J]. Magazine of Concrete Research, 1999, 51(5): 295-307.
- [15] KLEINBERG R L, FLAUM C, GRIFFIN D D, et al. Deep sea NMR: methane hydrate growth habit in porous media and its relationship to hydraulic permeability, deposit accumulation, and submarine slope stability[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2003, 108 (B10): 2508-2522.
- [16] 宗全利, 杨洪飞, 刘贞姬, 等. 网式过滤器滤网堵塞成因分析与压降计算[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 215-222. (ZONG Quanli, YANG Hongfei, LIU Zhenji, et al. Clogging reason analysis and pressure drop calculation of screen filter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48 (9): 215-222. (in Chinese))
- [17] 杨洪飞, 宗全利, 刘贞姬, 等. 大田滴灌用网式过滤器滤网堵塞成因分析[J]. 节水灌溉, 2017 (2): 94-98. (YANG Hongfei, ZONG Quanli, LIU Zhenji, et al. The analysis of clogging factor for filter screen in field drip irrigation system [J]. Water Saving Irrigation, 2017 (2): 94-98. (in Chinese))
- [18] LI Hongjun, ZHOU Xiao, LI Xu, et al. Research and optimization design of mixing characteristics of high-speed centrifugal mixer based on DEM [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2095(1): 012071.
- [19] KWORK C Y, BOLTON M D. DEM simulations of soil creep due to particle crushing [J]. Géotechnique, 2013, 63 (16): 1365-1376.
- [20] COETZEE C J, ELS D N J. Calibration of discrete element parameters and the modelling of silo discharge and bucket filling [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 65(2): 198-212.
- [21] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modelling of tillage: determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil [J]. Biosystems Engineering, 2014, 121: 105-117.
- [22] 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]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 126-132. (YU Liming, ZOU Xiaoyan, TAN Hong, et al. 3D numerical simulation of water and sediment flow in hydrocyclone based on coupled CFD-DEM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47 (1): 126-132. (in Chinese))
- [23] 吴玉秀, 刘贞姬, 谢炎, 等. 自清洗网式过滤器排污系统数值模拟及结构优化 [J]. 中国农村水利水电, 2023 (1): 128-133. (WU Yuxiu, LIU Zhenji, XIE Yan, et al. Numerical simulation and structural optimization of self-cleaning mesh filter sewage system [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(1): 128-133. (in Chinese))
- [24] 李曼, 刘贞姬, 石凯. 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. Experimental study on sewage discharge effect of drip irrigation net filter [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38 (10): 55-62. (in Chinese))
- [25] 谢炎, 刘贞姬, 李洁, 等. 卧式自清洗网式过滤器过滤及排污过程的数值模拟 [J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2022, 48(1): 117-124. (XIE Yan, LIU Zhenji, LI Jie, et al. Numerical simulation of the filtration and sewage processes of horizontal self-cleaning mesh filter [J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2022, 48(1): 117-124. (in Chinese))
- [26] 汤家港, 葛大丽. 基于数值模拟的电镀 3D 打印厚度均匀性研究 [J]. 表面技术, 2023, 52(3): 318-326. (TONG Jiagang, GE Dali. Thickness uniformity of electroplating 3D printing based on numerical simulation [J]. Surface Technology, 2023, 52(3): 318-326. (in Chinese))
- [27] NISHITANI J, MINO Y, MATSUYAMA H. Numerical simulation of particulate cake formation in cross-flow microfiltration: effects of attractive forces [J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30(8): 1592-1599.
- [28] LORENZEN S, YE Yun, CHEN V, et al. Direct observation of fouling phenomena during cross-flow filtration: influence of particle surface charge [J]. Journal of Membrane Science, 2016, 510: 546-558.
- [29] TARABARA V V, KOYUNCU I, WIESNER M R. Effect of hydrodynamics and solution ionic strength on permeate flux in cross-flow filtration: direct experimental observation of filter cake cross-sections [J]. Journal of Membrane Science, 2004, 241(1): 65-78.
- [30] ZHOU Guangyu, LOW Z X, FENG Shasha, et al. Effect of relative humidity and dust moisture content on filtration performance of bag filter [J]. Separation and Purification Technology, 2023, 308: 122952.

(收稿日期: 2024 - 03 - 01 编辑: 骆超)