

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.020

滴灌用自清洗网式过滤器排污压差计算方法^{*}

宗全利^{1,2} 刘飞² 刘焕芳¹ 郑铁刚³

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 石河子 832000; 2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072;
3. 河海大学水利水电学院, 南京 210098)

【摘要】 对滴灌用自清洗网式过滤器排污压差进行了计算, 分别得出了80目和120目过滤器总压差值, 并与实测值进行了对比, 结果表明两者基本一致; 详细分析了流量、含沙情况和过滤时间等约束条件对排污压差的影响规律, 结合试验获得了清水和浑水水头损失变化曲线, 在保证水头损失不发生急剧上升前提下, 给出了两种目数过滤器最佳排污压差值。

关键词: 滴灌 自清洗 网式过滤器 排污压差

中图分类号: TV131.4; S277.9⁺5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)11-0107-06

Calculating and Experiment on Drainage Pressure Difference of Self-cleaning Screen Filter for Drip Irrigation

Zong Quanli^{1,2} Liu Fei² Liu Huanfang¹ Zheng Tiegang³

(1. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China
2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China
3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract

The drainage pressure difference of self-cleaning screen filter was calculated, and the total value of pressure difference for 80 mesh and 120 mesh was also calculated respectively at first. Contrasting with measured value, the result indicated that the calculated value and measured value were substantial identical. Then, the law of pressure difference was analyzed particularly, which influenced by restriction condition as flow, sand and time, etc. Finally, the variation curve of clean and muddy head loss acquired by the experiments, under the condition that the head loss could not ascend sharply, the best drainage pressure difference for two kinds of mesh was put forward, which could provide reference for the pressure difference calculation of screen filter.

Key words Drip irrigation, Self-cleaning, Screen filter, Drainage pressure difference

引言

近年来,随着滴灌系统引用地表水作为灌溉水源的不断加大,滴灌用过滤器的应用也越来越广泛,其中滴灌用自清洗网式过滤器发展和应用非常迅速^[1-6]。滴灌用自清洗过滤器滤网内部清洗复杂,目前大多数都是以时间为控制参数进行自动清洗,

即人为设定每隔多长时间清洗一次,不管过滤器是否有必要清洗。但要实现自清洗自动控制,仅依照时间次序方法可能达不到彻底清洗目的,而且容易导致重复浪费,而以压差作为控制参数就能合理地解决这个问题,即用滤网过滤产生的压差作为控制预设参数,当压差达到预设值时,输出自清洗信号,实现自动清洗。所以,排污压差是全自动自清洗过

收稿日期: 2011-11-02 修回日期: 2012-01-13

^{*} 国家自然科学基金资助项目(50909062)和科技型中小企业创新基金资助项目(11C26216516530)

作者简介: 宗全利,副教授,武汉大学博士生,主要从事水力学及河流动力学研究, E-mail: quanli1871@126.com

滤器设计的一个关键点。本文在室内试验基础上,对滴灌用自清洗网式过滤器清洗压差进行计算,并结合试验研究结果,最终确定自清洗压差的最佳值,为网式过滤器排污压差的确定提供参考。

1 滴灌用自清洗网式过滤器结构及排污原理

对一种在新疆大田滴灌技术中得到广泛应用的新型自清洗网式过滤器进行研究,其结构如图1所示,其整个工作状态分过滤和自清洗两个过程,具体工作原理如下^[7-9]:

过滤过程:含沙浑水由进水口进入,首先通过粗过滤网,然后经细滤网进口进入过滤室,由里向外通过细滤网,由侧面出水口流出,具体过程见图1。
自清洗过程:当泥沙积聚在细滤网内表面便会在滤网内外表面形成压差,压差达到预定值时,由控制器打开电动排污阀门,同时关闭出水口阀门。这样过滤器内部水压与外部大气之间形成的压差会使侧面开孔的吸头产生强劲吸力;进入吸头的泥沙,通过与吸头连接的排沙管经驱动杆管由排污口排出。水流由驱动杆管流出时会带动整个吸头转动,从而将该范围内滤网内表面的泥沙吸进并排出。当滤网内外压差低于设定值时,自动清洗完成,控制器关闭排污阀,同时完全打开出水阀,自动吸附系统停止旋转,转入正常过滤状态。

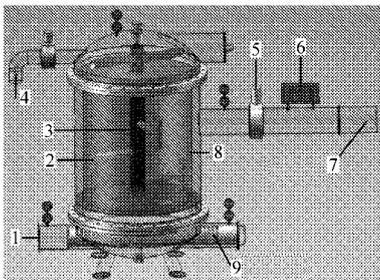


图1 滴灌用自清洗网式过滤器结构示意图

Fig.1 Structural diagram of self-cleaning screen filter for drip irrigation

1. 进水口
2. 吸头
3. 中心轴
4. 排污口
5. 电磁阀
6. 控制箱
7. 出水口
8. 细滤网
9. 粗滤网

2 试验

试验装置如图2所示,由蓄水池及搅拌池、水泵、过滤器、控制箱、变频器、电磁阀、压力表等设备构成。试验采用两种滤网规格:80目和120目,试验过滤器额定流量 $Q_e = 150 \text{ m}^3/\text{h}$,最大流量 $Q_{\max} = 220 \text{ m}^3/\text{h}$;试验分清水试验和浑水试验,分别对80目和120目过滤器进行了试验研究,主要测取清水条件下过滤器局部水头损失随流量变化关系以及不同进水含沙量(泥沙质量浓度)对应水头损失随

时间关系等。浑水试验沙样采用细河沙,80目和120目对应粒径级配如图3所示,中值粒径分别为:80目, $d_{50} = 0.16 \text{ mm}$;120目, $d_{50} = 0.29 \text{ mm}$ 。

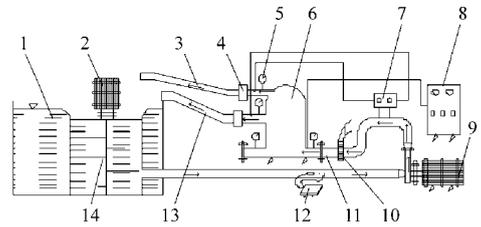


图2 自清洗网式过滤器试验装置示意图

Fig.2 Tester diagram of self-cleaning screen filter

1. 蓄水池
2. 电动机
3. 排污管
4. TST电动控制阀
5. 压力表
6. 过滤器
7. 自动控制柜
8. 变频器
9. 离心泵
10. 蝶阀
11. 进水口
12. 流量计
13. 出水管
14. 搅拌池

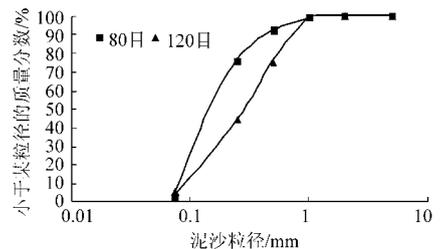


图3 泥沙粒径级配图

Fig.3 Grain-size distribution of sand

3 网式过滤器排污压差理论计算

3.1 过滤基本理论

流体通过均匀的、不可压缩固体床层的流动规律是研究过滤过程基础,最早的试验研究是由达西(Darcy)进行的,1856年提出的著名经验公式^[10]为

$$\frac{V}{At} = u = \frac{K\Delta p}{L} \quad (1)$$

式中 V ——时间 t 内通过床层的流体体积, m^3

A ——床层的截面积, m^2

u ——流体通过床层的平均线速度, m/s

Δp ——流体通过床层的压强差, Pa

L ——床层厚度, m

K ——与床层及流体物性有关的常数

考虑流体粘度在滞留运动中有突出影响,将达西公式修正为

$$u = \frac{K'\Delta p}{\mu L} \quad (2)$$

式中 K' ——渗透系数 μ ——流体粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$

柯兹尼和卡门对此也进行了研究,得出的柯兹尼-卡门方程为

$$K' = \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2 K_1 S_1^2} \quad (3)$$

式中 ε ——过滤介质的孔隙度,定义为流体可以通过的体积部分

S_1 ——过滤介质的比表面积, 定义为过滤介质单位体积内的表面积

K_1 ——柯兹尼常数

与式(2)联立, 可得

$$K' = \frac{\mu u L}{\Delta p} = \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2 K_1 S_1^2} \quad (4)$$

3.2 网式过滤器排污压差理论分析

自清洗网式过滤器过滤阻力包括过滤介质阻力和滤饼阻力, 其中过滤介质为滤网, 在滤饼未建立过滤初期, 滤网产生的流阻起主要作用, 而过滤一段时间后, 滤网表面泥沙颗粒形成滤饼, 滤饼对液流产生的流阻开始起主要作用。即

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 \quad (5)$$

式中 Δp_1 ——滤网产生阻力

Δp_2 ——滤饼产生阻力

3.2.1 滤网产生流阻压降计算

3.2.1.1 层流时滤网产生流阻压降计算

式(1)是在假定多孔介质层中的流动状态是层流前提下建立的, 这样的假定对大多数过滤来说是正确的, 文棋等^[11]就假定液体在微孔中的流动为层流状态, 对过滤介质压降进行了计算。

若液体在微孔中的流动为层流状态, 则满足式(4), 可得

$$\Delta p_{11} = \frac{\mu u L K_1 S_1^2 (1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} = \mu u L K_p \quad (6)$$

其中 $K_p = K_1 S_1^2 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3}$

式中 Δp_{11} ——层流时流阻压降, Pa

K_p ——综合系数

3.2.1.2 紊流时滤网产生流阻压降计算

若液体在微孔中的流动为紊流状态, 则不能用式(6)计算。Heertjes 对此进行了研究, 结果表明: 一旦微孔中的流动为紊流, 那么流速和压力之间的比值就被 $\Delta p_{12}^{0.55}$ 所取代了^[12], 所以紊流状态时可以采用 Heertjes 研究结果, 式(6)变为

$$\Delta p_{12}^{1.55} = \frac{\mu u L K_1 S_1^2 (1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} = \mu u L K_p \quad (7)$$

式中 Δp_{12} ——紊流时流阻压降, kPa

3.2.1.3 层流和紊流的判别

Heertjes 以介质微孔直径为基础, 给出了雷诺数 Re 的定义^[12]

$$Re = \rho u d_p / \mu \quad (8)$$

式中 ρ ——流体密度, kg/m^3

d_p ——金属丝滤网的孔径, m

并以此为判定层流和紊流的标准: 当 $Re < 3$ 时为层流, $Re > 7$ 时为紊流, $3 < Re < 7$ 时为过渡状态。

3.2.1.4 滤网产生流阻压降计算

本文研究的网式过滤器滤网直径 0.69 m, 高度 0.80 m, 过滤介质为金属丝网, 结构如图 4 所示。根据国产市售不锈钢网规格参数可得^[7]: 80 目丝径 $d = 103 \mu\text{m}$, 孔径 $d_p = 216 \mu\text{m}$, 净面积系数 $f = 0.48$; 120 目丝径 $d = 71 \mu\text{m}$, 孔径 $d_p = 140 \mu\text{m}$, 净面积系数 $f = 0.43$; 过滤介质厚度都取 0.2 mm。

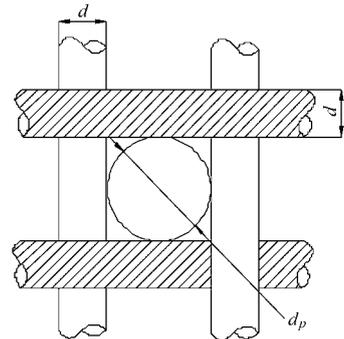


图 4 滤网结构

Fig. 4 Structure of net

将滤网金属丝看作直径为 d 的光滑圆柱 (图 4), 介质的比表面积 S_1 可以定义为单位体积内的表面积, 即

$$S_1 = \frac{\pi d \times 1}{\frac{1}{4} \pi d^2 \times 1} = \frac{4}{d} \quad (9)$$

孔隙度 ε 可以定义为流体可以通过的体积部分 (又称为部分空度或空度), 计算公式为

$$\varepsilon = \frac{\frac{1}{4} \pi d_p^2 L}{(d_p + d)(d_p + d)L} = \frac{\pi d_p^2}{4(d_p + d)^2} \quad (10)$$

本文中滤网 ε 经计算可得: 80 目 $\varepsilon = 0.36$, 120 目 $\varepsilon = 0.35$ 。

很多研究者对不同物料的试验结果: 当 $\varepsilon = 0.3 \sim 0.5$ 时, $K_1 = 5.0$ ^[13], 因此计算中取 $K_1 = 5$ 。

取网式过滤器最大流量 $Q_{\max} = 220 \text{ m}^3/\text{h}$ 计算, 则试验用过滤器滤网的实际过水表面积, 即滤网净面积为: 80 目, $A' = 0.832 \text{ m}^2$; 120 目, $A' = 0.745 \text{ m}^2$ 。通过滤网网孔的平均流速为: 80 目, $u = Q_{\max}/A' = 0.074 \text{ m/s}$; 120 目, $u = Q_{\max}/A' = 0.082 \text{ m/s}$ 。取 $\mu = 1.005 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 则滤网网孔水流的雷诺数为: 80 目, $Re = \rho u d_p / \mu = 15.8$; 120 目, $Re = \rho u d_p / \mu = 11.4$ 。

可以看出: 无论是 80 目还是 120 目, 滤网网孔水流的 Re 均大于 7, 所以网孔水流为紊流, 应该用式(7)计算滤网产生流阻压降, 将上述数值分别代入式(7)可得过滤器滤网产生的压降: 80 目, $\Delta p_1 = \Delta p_{12} = 0.983 \text{ kPa}$; 120 目, $\Delta p_1 = \Delta p_{12} = 1.900 \text{ kPa}$ 。

3.2.2 滤饼产生流阻压降计算

过滤一定时间后由滤网截留的泥沙颗粒形成一层滤饼,滤饼对液流产生的流阻开始起主要作用。随着过滤时间增加,滤饼厚度逐渐增大,且介质两端压差逐渐增大,从而引起滤饼孔隙度减小,因此过滤过程为可压缩滤饼过滤,于是不易确定滤饼在过滤过程中产生的具体压降。滤饼产生的流阻压降计算,可参照文献[14]。由于滤饼过滤与介质过滤原理相同,因此通过量纲分析可引进参数 β ,使

$$\Delta p_2 = \beta^3 \Delta p_1 \quad (11)$$

由前人分析计算及最大压力损失允许值可知 β 一般取值为 $2.5 \sim 4.0$ [14]。

3.2.3 过滤器总压降计算

由式(5)可知,过滤器总压降计算公式为

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 = (1 + \beta^3) \Delta p_1 \quad (12)$$

由上式计算可得网式过滤器总压降:80目为 $16.34 \sim 63.88$ kPa,120目为 $31.56 \sim 123.41$ kPa。根据网式过滤器水头损失试验结果,得到80目和120目过滤器的压降变化值为 $45.08 \sim 127.40$ kPa($4.6 \sim 13.0$ m),可见试验结果与计算结果基本符合。

4 排污压差约束条件

在过滤过程中,来水流量和含沙情况对过滤器水头损失影响较大,这两个因素决定了滤网堵塞程度的大小和快慢。同时过滤过程还要保持一定时间间隔,确保灌溉系统正常运行,不能出现频繁排污,所以排污压差约束条件主要有:流量、来水含沙情况和过滤时间。

4.1 流量

流量对过滤器水头损失影响是显而易见的,流量越大水头损失越大。实际工程中过滤器都是在额定流量下运行的,此时对应水头损失值应该作为排污压差的最小约束条件 Δh_{\min} 。若确定的排污压差小于 Δh_{\min} ,则过滤器就会一直反冲洗,不会正常过滤。

过滤器流量与水头损失关系一般通过试验获得,并且为了方便都在清水条件下进行试验,本文试验获得的清水条件下不同目数过滤器水头损失与流量关系曲线如图5所示,试验过滤器额定流量为 $Q_e = 150 \text{ m}^3/\text{h}$,从图中确定出额定流量对应水头损失:80目, $\Delta h_{\min} = 2.3 \text{ m}$;120目, $\Delta h_{\min} = 3.1 \text{ m}$ 。

4.2 含沙情况

含沙情况主要包括含沙量和粒径大小,当含沙量较大时,泥沙颗粒会迅速堵塞滤网,导致滤网内外压差迅速上升。若泥沙粒径较小,多数小于滤网网

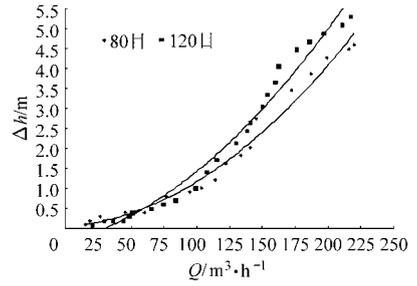


图5 清水条件下过滤器水头损失曲线

Fig. 5 Head loss curves of filter for cleaning water

孔直径,即使含沙量很大也不会短时间内堵塞滤网;相反若泥沙粒径较大,多数大于滤网网孔直径,即使含沙量很小也会在短时间内迅速堵塞滤网。这时就需要根据来沙情况和过滤时间确定一个排污压差,使滤网在没有被大量堵塞,即过滤器水头损失没有急剧变化时,及时进行反冲洗。图6为80目滤网,最大流量 $Q_{\max} = 220 \text{ m}^3/\text{h}$ 下,水头差为 $5 \sim 10 \text{ m}$ 对应过滤时间 t 与含沙量 S_g 之间关系曲线。从图中可以看出,同一压差下,过滤时间随含沙量增大而减小,并且减小的趋势非常明显,说明含沙量对压差影响是显著的;从图中还可以看出,压差为 5 m 曲线与其他压差曲线相比,在相同含沙量变化情况下,过滤时间明显较小,这主要因为在 $Q_{\max} = 220 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,从图5可以看出80目过滤器对应初始水头损失为 4.6 m ,与 5 m 压差差别较小,因此在设定 5 m 压差进行试验时,过滤很短时间就会达到设定压差,从而造成图6中该曲线过滤时间很短,与其他曲线差别较大结果。

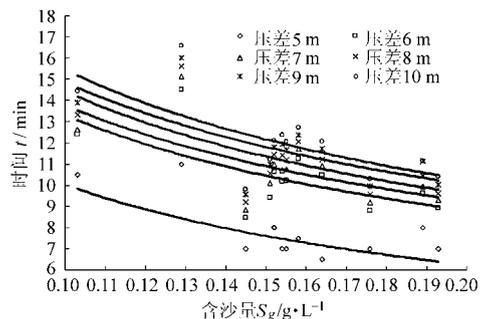


图6 不同压差下过滤时间与含沙量关系曲线

Fig. 6 Relation curves between time and sediment content under different pressures

4.3 过滤时间

过滤时间是衡量排污压差确定是否合理的主要参数。在含沙情况不变条件下,若压差设置较小,过滤时间会较短,出现频繁反冲洗,影响正常灌溉;若压差设置较大,虽然过滤时间会变长,但会导致滤网内表面的泥沙增厚、增多,部分泥沙颗粒在罐体内部较大压力作用下会挤过滤网进入下游滴灌带堵塞滴灌水器,同时过滤网将承受较大压力差而严重影响使

使用寿命,所以此时应有一个滤网内外压差的上限值,该值即为排污压差上限 Δh_{\max} 。

图 7 和图 8 为试验得到的 80 目和 120 目对应不同含沙量水头损失与过滤时间变化曲线,其中

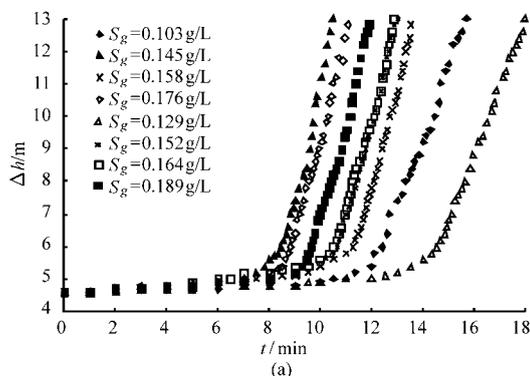


图 7 不同含沙量浑水水头损失变化曲线 ($Q = 220 \text{ m}^3/\text{h}$)

Fig. 7 Trend curves of head loss for muddy water under different sediment contents ($Q = 220 \text{ m}^3/\text{h}$)

(a) 80 目 (b) 120 目

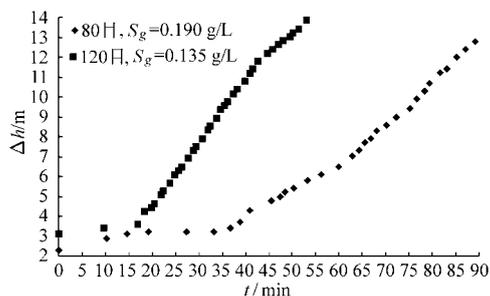
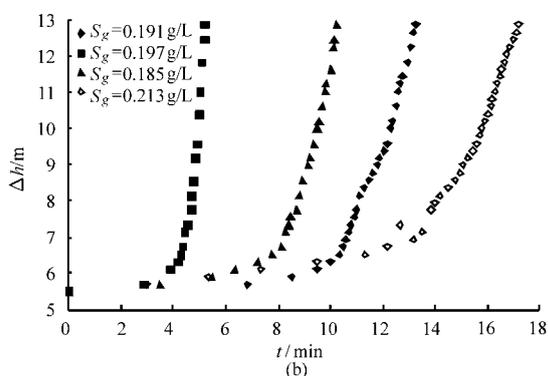


图 8 不同含沙量浑水水头损失变化曲线 ($Q = 150 \text{ m}^3/\text{h}$)

Fig. 8 Trend curves of head loss for muddy water under different sediment contents ($Q = 150 \text{ m}^3/\text{h}$)

但从图 7 中还可以看出,不同含沙量之间对应过滤时间并没有表现出一定的规律性,例如:80 目滤网在达到相同水头损失时,最小含沙量 $S_g = 0.103 \text{ g/L}$ 对应过滤时间应该最长,最大含沙量 $S_g = 0.189 \text{ g/L}$ 对应过滤时间应该最短,实际结果却有所差异: $S_g = 0.129 \text{ g/L}$ 处理运行时间最长, $S_g = 0.145 \text{ g/L}$ 处理运行时间最短。究其原因主要有两方面,一是与试验顺序有关,试验是按照含沙量由小到大顺序进行的,在每进行完一组试验后,粒径小于网孔直径的泥沙总是会留在水中而不会被排除,在增大含沙量进行下一组试验时,所配浑水粒径级配实际已经与上一组有所不同,即细颗粒泥沙含量会变大;进行的试验组次越多,试验浑水的级配就会变得越细,当累积到一定程度后,就会出现含沙量较大对应的过滤时间却较长的情况;二是由于试验中所有这些含沙量组次并不是在同一水样中进行的,即做完几组含沙量试验之后,重新清理蓄水池又进行了几组试验,所以也会导致级配与其他不同。综上,由于各组含沙量之间的泥沙粒径级配有所差异,从而导致了各含沙量之间随时间变化规律不统一。若

图 7 为 $Q = 220 \text{ m}^3/\text{h}$,图 8 为 $Q = 150 \text{ m}^3/\text{h}$ 。从两图中均可以看出,随着过滤时间增加,水头损失不断增大,到一定程度后(6~7 m),水头损失会出现急剧变化现象,说明此时滤网被迅速堵塞,需要进行反冲洗。

每进行完一组含沙量试验就将蓄水池清理干净再进行下一组试验,就会保证每一组试验的颗粒级配完全相同,则不同含沙量之间对应过滤时间就会表现出较好规律性。但由于本文主要目的是观测不同含沙量随过滤时间的变化趋势,而不是比较不同含沙量之间的时间变化趋势,所以该试验造成的误差对文中内容并没有影响,试验结果也完全可以用于排污压差的确定。

5 最佳排污压差

过滤器排污压差确定受过滤流量、来水含沙情况和过滤时间等多重因素影响,其数值应至少大于额定流量下清水水头损失值 Δh_{\min} ,小于排污压差上限值 Δh_{\max} ;实际设置中需要在保证水头损失曲线不发生急剧上升前提下,确定反冲洗压差值,即最佳排污压差 Δh_{opt} 。从图 7 可以看出:不同含沙量对应曲线出现急剧变化转折点略有不同,但两种目数基本都在 6~7 m 范围内,据此可以初步确定两种目数过滤器的最佳排污压差 Δh_{opt} 为 6~7 m。

在实际大田灌溉中,过滤器首部进水口处均配有沉沙池,经过沉沙池沉淀后,最后进入到过滤器内部的泥沙颗粒粒径很小,大多数会穿过滤网网孔。通过在洪水期对新疆生产建设兵团农八师 143 团、133 团和 144 团实际调研,并对实际含沙水样进行测定发现:进入过滤器的泥沙粒径均小于 0.18 mm,所以实际大田灌溉过程中,过滤器运行时水头损失增加比较缓慢。考虑到上述过滤器实际运行条件,最后确定 80 目过滤器的最佳排污压差为 6 m,120 目最佳排污压差为 7 m。实际运行观测结果表明:在额定流量 $Q_c = 150 \text{ m}^3/\text{h}$,在设定的这两种最佳

排污压差下,过滤器实际运行中过滤周期一般为几小时或十几小时,没有出现频繁清洗现象,说明设置的两种目数的最佳排污压差是合理的。

6 讨论

实际应用中,当来水含沙量或泥沙粒径很大时,过滤器按照上述方法设定的最佳排污压差运行时,还可能会出现过滤时间较短,频繁反冲洗现象,这主要是因为来水含沙情况远超过了过滤器本身的过滤能力,所以此时应对过滤器进口来沙情况进行控制。实际过滤器运行中,地表含沙水进入过滤器之前,需要先经过沉沙池进行预处理,进入过滤器泥沙含量和颗粒都不会太大,所以实际工程一般不会出现上

述情况;但若确实来沙量很大,沉沙池处理效果不佳,这时就需要采取其他措施,而不能人为加大排污压差,降低过滤效果。

7 结束语

对网式过滤器排污压差进行了理论计算,并与实测值进行了比较,结果表明:计算值与实测值基本相符;详细分析了排污压差约束条件:流量、含沙情况和过滤时间对排污压差的影响,并在试验基础上,在保证水头损失曲线不发生急剧上升前提下,给出了两种目数过滤器的最佳排污压差,80目过滤器最佳排污压差为6m,120目最佳排污压差为7m。

参 考 文 献

- 冯俊杰,翟国亮,邓忠,等. 微灌过滤器用水压驱动反冲洗阀启闭机构的力学计算[J]. 农业机械学报,2007,38(12): 212~214.
- 赵斌娟,袁寿其,加藤征三,等. 壁流式蜂窝陶瓷微粒过滤器压力损失公式的建立[J]. 农业机械学报,2004,35(6): 44~47.
Zhao Binjuan, Yuan Shouqi, Kato Seizo, et al. Establishment of the pressure drop equation for honeycomb wall-flow diesel particulate filters [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(6): 44~47. (in Chinese)
- Capra A, Scicolone B. Emitter and filter tests for wastewater reuse by drip irrigation [J]. Agricultural Water Management, 2004, 68(2): 135~149.
- Siriwardene N R, Deletic A, Fletcher T D. Clogging of storm water gravel infiltration systems and filters: insights from a laboratory study [J]. Water Research, 2007, 41(7): 1433~1440.
- 李光永,张琼. 反冲洗网式过滤器:中国,02125390.0[P]. 2004-02-04.
- 赵霞. 自吸反冲洗网式过滤器:中国,03276924.1[P]. 2004-09-01.
- 宗全利,刘焕芳,郑铁刚,等. 微灌用网式新型自清洗过滤器设计与试验研究[J]. 灌溉排水学报,2010,29(1):78~82.
Zong Quanli, Liu Huanfang, Zheng Tiegang, et al. The design and experimental study on new net self cleaning filter for micro-irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(1): 78~82. (in Chinese)
- 刘焕芳,郑铁刚,刘飞,等. 自吸网式过滤器过滤时间与自清洗时间变化规律分析[J]. 农业机械学报,2010,41(7):80~83.
Liu Huanfang, Zheng Tiegang, Liu Fei, et al. Analysis of filtering time and sewage time for automatic suction screen filter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 80~83. (in Chinese)
- 郑铁刚,刘焕芳,刘飞,等. 自清洗过滤器排污系统的水力计算[J]. 水利水电科技进展,2010,30(3):8~11.
Zheng Tiegang, Liu Huanfang, Liu Fei, et al. Hydraulic calculation of wastewater drainage system of self-cleaning filter [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(3): 8~11. (in Chinese)
- Avner Adin1, Giora Alon. Mechanisms and process parameters of filter screens[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1986, 20(4): 293~304.
- 文棋. 全自动自清洗过滤器过滤机理分析及控制系统研究[D]. 杭州:浙江大学,2004.
- 丁启圣,王唯一. 新型实用过滤技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2011:47~71.
- 唐立夫,王维一,张怀清. 过滤器[M]. 北京:机械工业出版社,1984.
- 王爱伟. 吸污式自清洗过滤器的开发与理论研究[D]. 北京:北京化工大学,2008.
- 刘焕芳,刘飞,谷趁趁,等. 自清洗网式过滤器水力性能试验[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(2):85~90.
Liu Huanfang, Liu Fei, Gu Chenchen, et al. Experiment on hydraulic performance of self-cleaning screen filter[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(2): 85~90. (in Chinese)