

自清洗过滤器排污系统的水力计算

郑铁刚^{1,2}, 刘焕芳¹, 刘飞¹, 宗全利¹

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要 结合自清洗过滤器过滤机理, 对过滤器排污系统的水力参数进行分析, 由能量方程得出排污系统中吸沙组件的吸附力计算公式, 并根据动量矩方程指出旋喷管转速及流量之间的关系。结合试验基本参数, 对比泥沙黏结力, 得出实际工程中自清洗过滤器排污装置产生的吸附力远大于泥沙黏结力的结论, 即在理论上满足自清洗要求。

关键词 自清洗过滤器; 微灌; 排污系统; 水力参数

中图分类号: TV131.4

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2010)03-0008-04

Hydraulic calculation of wastewater drainage system of self-cleaning filters//ZHENG Tie-gang^{1,2}, LIU Huan-fang¹, LIU Fei¹, ZONG Quan-li¹ (1. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the filtration mechanism of self-cleaning filters, the hydraulic parameters of wastewater drainage system of the filters were analyzed. A formula for absorption strength of components of the wastewater drainage system was obtained based on the energy equation. The relationship between the rotational speed and the flow quantity was put forward according to the moment equation. The basic test parameters were combined, and the cohesive strength was compared. A conclusion is drawn that the absorption strength of the wastewater drainage system of the self-cleaning filters is much greater than the cohesive strength, in other words, the wastewater drainage system theoretically satisfies the self-cleaning requirements.

Key words: self-cleaning filter; micro irrigation; wastewater drainage system; hydraulic parameter

我国水资源十分短缺, 人均水资源占有量只有 2200 m³, 仅为世界平均水平的 1/4。我国也是农业大国, 而农业是用水大户, 用水量约占全国用水总量的 70%, 在新疆等西北地区占 90% 左右^[1]。随着农业用水总量越来越受到控制, 加速发展农业节水势在必行。根据我国节水灌溉“十一五”发展计划及 2015 年发展规划, 到 2015 年底全国微灌面积将达到 1066.45 万 hm², 占全国总灌溉面积的 19.5%, 绝对面积名列世界第一^[2]。在今后较长一段时期内, 我国微灌面积的比例无疑将会逐年增加, 这就要求与其相关的一些微灌配套设施必须加快研究, 以适应我国微灌事业的快速发展, 微灌用过滤器作为保证整个微灌系统正常运行的核心过滤设备, 无疑将会成为今后研究的热点。从国内过滤设备可靠性不高、密封性差和自动化控制程度低的角度分析并结合国内外研究现状可以看出, 具有自清洗功能的过滤设备是今后主要的研究方向^[3-4]。

自清洗过滤器是一种将液体中颗粒在一定条件下自过滤清除的分离过滤装置, 与传统过滤器相比具有自动化程度高、压力损失小、不必进行人工清除滤渣等特点, 并且多数自清洗过滤器在清洗时可以不间断供水。尽管目前国内市场上已经出现了多种自清洗过滤器, 但自清洗过滤器的很多关键技术和设备还需要进行深入研究。例如在清洗方式上如果仅靠水力冲洗, 而没有其他作用力, 很难将卡在滤网上的杂质去除。笔者曾对微灌用各种网式过滤器进行过调查, 发现使用过的滤网即使经常清洗还是会在不同程度上存在污物粘附在滤网表面的现象, 严重影响过滤器的使用效率, 因此需要对自清洗过滤器的清洗方式进行改进。自吸自动网式过滤器是一种新型过滤器, 其最主要的特点是排污过程中在水力冲洗的基础上增加了排污装置的吸附力, 从而可以大幅度提高清洗效率。

基金项目: 国家自然科学基金(50909062); 石河子大学后补助项目(zrkx2008062)

作者简介: 郑铁刚(1983—), 男, 河北定州人, 博士研究生, 从事水力学及河流动力学研究。E-mail: ztg_1983@163.com

1 自吸自动网式过滤器的结构及工作原理

1.1 结构

根据水力学及过滤水力学设计的自吸自动网式过滤器由过滤器筒体、过滤芯、自动控制装置、排污装置等零部件组成,如图 1 所示。过滤器筒体内设有 1 个用粗过滤芯构成的 1 级过滤室和 1 个用细过滤芯构成的 2 级过滤室,2 级过滤室中装有排污装置,通过自动控制系统保证自吸自动网式过滤器的正常运转。

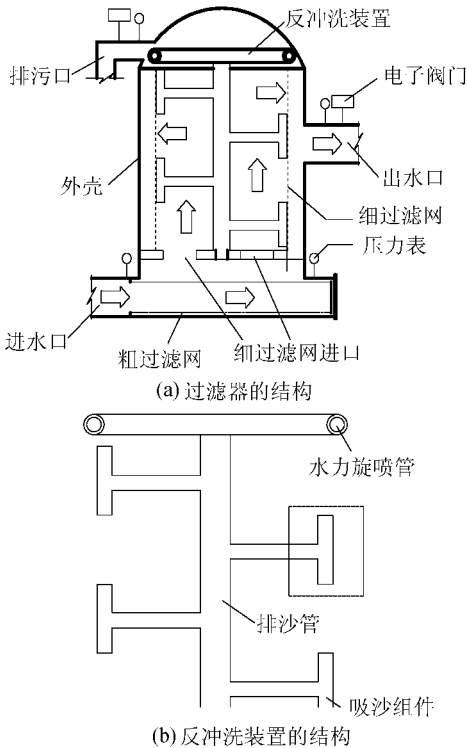


图 1 自吸自动网式过滤器结构示意图

1.2 工作原理

自吸自动网式过滤器的粗过滤阶段实现大颗粒、长絮状杂质等的过滤,其精度不是很高,且排污清洗等手段简单,对整个过滤器生产工艺的影响不是很大,所以这里不对其进行深层次的研究。自吸自动网式过滤器的主要过滤功能体现在细过滤阶段,滤网内嵌在滤网支撑上,滤饼形成于过滤器的内部。过滤器清洗装置以压差作为控制参数,即用细滤网在安全过滤下产生的计算压差作为控制预设值,当压差接近预设值时,输出自清洗信号,从而实现自清洗。

2 自吸自动网式过滤器排污系统水力参数计算分析

自吸自动网式过滤器的排污装置如图 1(b)所示,由吸沙组件和排沙管密封连接组成,沿吸沙管轴

向共分成等长的 4 段,每段均有 1 个吸沙组件控制该段滤网内沙的整体扫描。吸沙组件扫描过后,含沙水体由吸沙组件进入排沙管,在负压作用下水流沿吸沙管上升,当水流到达顶部水力旋喷管处时,水力旋喷管将液能转化为机械动能提供旋转动力,带动排沙管及吸沙组件旋转运动,吸沙组件的旋转运动将对整个滤网内表面进行整体扫描吸附,确保整个网面泥沙的排出。对于排污装置而言,保证冲净率为最终目的,而吸沙组件开口处吸附力的大小是冲净率最主要的影响因素。因此要提高排污装置的工作性能首先要对吸沙组件开口处的吸附力进行研究。

取 4 个吸沙组件中的任意 1 个为研究对象,吸沙组件开口外处为 1—1 断面,吸沙组件开口内处为 2—2 断面,并取 1—1 断面所代表的开口中心为 0—0 基准参考面(图 2),列能量方程有:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w1-2} \quad (1)$$

式中: z_1 为 1—1 断面相对位置高度, m, 取为零; z_2 为 2—2 断面相对位置高度, m, 取为零; p_1 为 1—1 断面处压强, Pa; p_2 为 2—2 断面处压强, Pa; ρ 为水的密度; v_1 为 1—1 断面处的平均水流流速, m/s; v_2 为 2—2 断面处的平均水流流速, m/s; α_1, α_2 为修正系数, 均取 1.0; h_{w1-2} 为 1—1 断面与 2—2 断面之间的水头损失, m, 忽略不计。

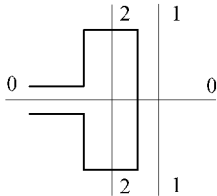


图 2 吸沙组件计算示意图

设排污需水量为 Q_p , 则由液体连续性方程可得研究对象处的流量为 $Q_p/4$ 。由于 1—1 断面处平均水流流速较小, 可以将 v_1 近似取为零, 2—2 断面处的平均水流流速 $v_2 = Q_p/(4A_x)$ 。将以上数据代入式 (1) 可得

$$0 + \frac{p_1}{\rho g} + 0 = 0 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{Q_p^2}{32A_x^2 g} + 0 \quad (2)$$

整理得

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho g} = \frac{Q_p^2}{32A_x^2 g} \quad (3)$$

式中: A_x 为吸沙组件开口断面面积, m^2 。

由于吸附力由吸口处的内外压强差产生, 因此可知产生的吸附力为

$$F = \Delta p A_x = (p_1 - p_2) A_x = \frac{Q_p^2 \rho}{32A_x} \quad (4)$$

由式(4)可以看出,吸沙组件开口处的吸附力大小主要与排污需水量和吸沙组件开口断面面积有关。由排污装置的驱动原理可知,排污需水量与驱动力大小密切相关。

由动量矩方程可知:

$$T=\rho Q_p(v_{2t}r_2-v_{1t}r_1) \tag{5}$$

式中: T 为动量矩; v_{1t} 为进水水流的绝对速度 u_1 在牵连速度 u_q 方向的分量; v_{2t} 为出水水流的绝对速度 u_2 在牵连速度 u_q 方向的分量; r_1 为进水水流旋转半径; r_2 为出水水流旋转半径。

对于水力旋喷管(图3),由于为水力驱动,无外力矩作用,因此 $T=0$,又知水流沿 z 轴方向流入,故在 xOy 平面内 $v_{1t}=0$,忽略转动摩擦力及其他影响因素可知 $\rho Q_p v_{2t} r_2=0$ 。由绝对速度及牵连速度之间的关系可知 $v_{2t}=u_2-u_q=u_2-\omega r_2$,因此

$$\rho Q_p(u_2-\omega r_2)r_2=0 \tag{6}$$

由此可知
$$\omega=\frac{u_2}{r_2}=\frac{Q_p}{2A_p r_2} \tag{7}$$

$$n=\frac{60\omega}{2\pi} \tag{8}$$

式中: A_p 为旋喷管出口面积, m^2 ; ω 为旋喷管角速度, rad/s ; n 为旋转圈数, r/min 。

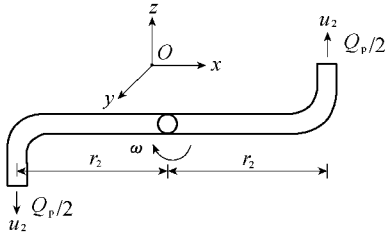


图3 水力旋喷管

由式(7)(8)可得

$$n=\frac{15Q_p}{\pi A_p r_2} \tag{9}$$

对80目自吸自动网式过滤器进行室内试验及原型试验,过滤器基本设计参数如下:①排污需水量为 $50\sim70\text{m}^3/\text{h}$;②旋喷管出口直径为 0.05m ;③吸口尺寸为 $3\text{mm}\times24.5\text{mm}$;④旋喷管旋转半径为 0.35m 。计算得到: $A_p=0.002\text{m}^2$, $Q_p=60\text{m}^3/\text{h}$ 。将以上数据代入式(9)可得 $n=114\text{r/min}$ 。在试验过程中测得的 $n=109\sim111\text{r/min}$,由此可知,在自清洗装置转动过程中摩擦力及其他影响因素对装置的影响较小,符合设计要求。将试验测试得到的 $Q_p=60\text{m}^3/\text{h}$, $A_x=7.35\times10^{-5}\text{m}^2$, $\rho=1\,000\text{kg}/\text{m}^3$ 代入式(4)得 $F=118\text{N}$ 。

自动排污装置能否正常运行的关键是吸沙组件能否将附着在网面上的泥沙颗粒吸出,例如取某一排污过程中含沙水体为研究对象,由于含沙水体在

罐体内水平方向主要受泥沙颗粒之间和泥沙与网面之间的黏结力的影响,因此只要负压产生的吸附力大于黏结力即可实现自清洗。

过滤器自清洗装置排污效果取决于吸附力与黏结力的关系。吸沙组件吸附力的大小可以用式(4)来计算,但与此对应的细颗粒泥沙黏结力的计算尚未达成一致^[5]。唐存本根据杰尔亚金的试验结果,认为细颗粒之间的黏结力 F' 与水深及大气压无关^[6-7],而与粒径 D 成正比,即

$$F'=\eta D \tag{10}$$

式中: η 为比例系数, η 与颗粒表面性质、液体性质及沙粒间接触紧密度有关,在水中紧密接触时, η 为常数。窦国仁也曾讨论过用式(10)来计算细颗粒之间的黏结力(考虑附加压力)。本研究忽略附加压力,用式(10)计算细颗粒之间的黏结力, η 取 $2.56\times10^{-5}\text{N}/\text{cm}^2$ 。

本试验用沙的粒径级配分析如图4所示,取中值粒径为 0.4mm 。由式(10)计算可知泥沙细颗粒之间的黏结力 $F'=1\times10^{-6}\text{N}$ 。

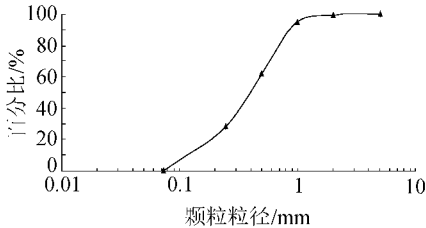


图4 泥沙粒径级配曲线

在一个正常过滤的滤饼层中,孔隙的分布是变化的。对于一般可压缩滤饼来说,滤饼表面处的孔隙率最大,而靠近介质处的孔隙率最小^[8]。因而,清洗滤饼表层所需的吸附力最小,而清洗介质表面所需的吸附力最大。取介质表面泥沙为研究对象,假设泥沙在网面均匀紧密分布,则与吸沙组件开口断面面积相当的面积内的泥沙颗粒总数可以近似计算为

$$m=\frac{A_x}{s}\approx590 \tag{11}$$

式中: s 为单颗泥沙颗粒断面近似面积。

于是吸沙组件开口处的总黏结力 $F'_{\text{总}}\approx F'm=6\times10^{-4}\text{N}$ 。所以理论上吸沙组件的吸附力只要大于 $6\times10^{-4}\text{N}$ 就可以完成自清洗。但是在滤网过滤过程中常常会出现沙粒堵孔现象^[9],这部分作用力的计算尚未找到合适的解决方法。由于沙粒与网孔之间的摩擦力比泥沙黏结力大得多,因此只有吸附力远大于泥沙黏结力的计算值才有可能彻底完成自清洗。由计算可知,泥沙产生的总黏结力为 $F'_{\text{总}}=6\times10^{-4}\text{N}$,吸沙组件产生的吸附力为 $F=118\text{N}$,也就是说自清洗装置产生的吸附力远大于泥沙总黏结力,即在理论上满足自清洗要求。

3 结 论

- a. 水流沿排沙管流至水力旋喷管 ,产生动量矩 T 和角速度 ω ,由能量方程及动量矩方程计算得到自清洗装置旋喷管角速度的计算式为 $\omega = Q_p / (2A_p r_2)$ 旋转圈数的计算式为 $n = 15 Q_p / (\pi A_p r_2)$,吸附力的计算式为 $F = Q_p^2 \rho / (32 A_x)$ 。
- b. 由自清洗装置旋喷管角速度的计算式可知 ,旋喷管角速度与流量及旋喷管出口面积有关。当流量一定时 ,减小旋喷管出口面积 ,旋喷管转速会增大 ,从而扫遍网面的次数增多 ,滤网冲净率也就相应提高。但由动力学可知 ,当出口面积小到某一值 ,即转速达到某一值时 ,排污装置将无法完成吸污过程 ,反而会降低冲净率。因此 ,出口面积应控制在一定范围内来保证冲净率。
- c. 由于存在沙粒堵孔现象 ,因此只有排污装置产生的吸附力远大于泥沙总黏结力时才能彻底完成自清洗。泥沙细颗粒之间的黏结力一般采用经验公式 $F' = \eta D$ 计算。
- d. 将试验基本参数代入吸附力及泥沙黏结力计算式可知 ,试验用过滤器吸沙组件产生的吸附力远大于泥沙总黏结力 ,满足自清洗要求。即自吸自动网式过滤器作为一种新型过滤设备其清洗方式可以大幅度提高清洗效率。

(上接第 7 页)

3 结 语

建立了丹江口控制流域三参数月水量平衡模型 利用此模型对丹江口流域 7 个子流域及全流域的径流过程进行模拟和检验。结果表明 ,此模型具有结构简单、物理概念清楚、模拟精度高、适用性较强等特点 ,可为水库月径流的预测提供技术途径。

参考文献：

[1] 胡庆芳 ,王银堂 ,刘克琳 ,等 .基于改进的两参数月水量平衡模型的月径流模拟[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2007 ,35(6) :638-642.

[2] 熊立华 ,郭生练 .分布式流域水文模型[M]. 北京 :中国水利水电出版社 ,2004 :105-119.

[3] 熊立华 ,郭生练 ,王渺林 ,等 .两参数月水量平衡模型的研制及应用[J]. 水科学进展 ,1996 ,7(增刊) :80-86.

[4] 王纲胜 ,夏军 ,万东晖 ,等 .气候变化及人类活动影响下的潮白河月水量平衡模拟[J]. 自然资源学报 ,2006 ,21(1) :86-91.

[5] ZHANG Lu ,POTTER N ,HICKEL K ,et al. Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko Framework-Model development and testing[J]. Journal of

e. 每个吸沙组件开口的吸附力大小决定了排污运行时间及冲净率。根据这个定量值 ,可以对排污时间及自清洗装置进行优化 ,从而使过滤器过滤及排污达到最优效果 ,对后续工作具有一定的理论指导意义。

参考文献：

[1] 李代鑫 .我国节水灌溉的现状 & 展望[EB/OL].[2006-05-31]. http ://www.cnhydro.com.

[2] 许志方 ,董文楚 .论我国喷微灌发展前景和实施建议[J]. 节水灌溉 ,2004(3) :1-4.

[3] 山伦 ,康绍忠 ,吴普特 .中国节水农业[M]. 北京 :中国农业出版社 ,2004.

[4] ANON. Self cleaning water filter[J]. Process Engineering , 1984 ,2(1) :27-29.

[5] 钱宁 ,万兆惠 .泥沙运动力学[M]. 北京 :科学出版社 ,1991.

[6] DORJAGUIN B V ,VOROPAYEVA T N. Surface forces and the stability of colloids and disperse systems[J]. Colloid Science , 1964 ,19(2) :113-135.

[7] 唐存本 .泥沙起动的规律[J]. 水利学报 ,1963(2) :1-12.

[8] 丁启圣 ,王维一 .新型实用过滤技术[M]. 北京 :冶金工业出版社 ,2000.

[9] 张国祥 ,崔永顺 .砂粒堵孔试验[J]. 节水灌溉 ,1993(1) :53-55.

(收稿日期 2009-09-15 编辑 骆超)

Hydrology ,2008 ,360 :117-131.

[6] 王渺林 ,郭生练 .月水量平衡模型比较分析及其应用[J]. 人民长江 ,2000 ,31(6) :32-33.

[7] 詹道江 ,叶守泽 .工程水文学[M]. 北京 :中国水利水电出版社 ,2002 :72-107.

[8] 芮孝芳 .水文学原理[M]. 北京 :中国水利水电出版社 ,2004 :249-312.

[9] 史海滨 ,何京丽 ,郭克贞 ,等 .参考作物腾发量计算方法及其适用性评价[J]. 灌溉排水 ,1997 ,16(2) :50-54.

[10] 胡庆芳 .参考腾发量的计算和预测方法研究[D]. 北京 :清华大学 ,2005.

[11] 蔡甲冰 ,刘钰 ,雷廷武 ,等 .根据天气预报估算参照腾发量[J]. 农业工程学报 ,2005 ,21(11) :11-15.

[12] 杨汉波 .流域水热耦合平衡方程推导及其应用[D]. 北京 :清华大学 ,2008.

(收稿日期 2009-06-30 编辑 高建群)

