排灌机械工程学报
2012 年 9 月 Sept. 2012 | 第 30 卷 第 5 期 Vol. 30 No. 5
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2012.05.019

自清洗网式过滤器排污流量的计算

骆秀萍[1]，刘焕芳[1]，宗全利[1]，易平[2]
（1. 石河子大学水利建筑工程学院，新疆 石河子 832003；2. 新疆生产建设兵团勘测规划设计研究院，新疆 乌鲁木齐 832000）

摘要：对影响自清洗网式过滤器排污流量大小的因素进行分析，发现过滤器排污流量 Q_p 由流量系数 μ 决定. 为了探讨排污流量系数的变化规律，主要进行了过滤器吸沙组件相对入流面积对排污流量系数影响的试验研究，发现流量系数随着吸沙组件相对入流面积的增大而增大，但当相对入流面积增大到一定程度后，流量系数就不再发生变化，而是趋近于某一恒定值. 建立了排污流量系数关系式，分析排污流量系数关系式发现：当吸沙组件相对入流面积大于 0.15，即当吸沙组件入口长度 l 大于 500 mm 后（吸沙组件入口宽度 b 等于 300 mm，为定值），吸沙组件开口面积对排污流量的影响已不到 0.5%，即过滤器排污系数几乎不随吸沙组件开口面积的增加而改变，该变化规律与试验所作出的分析结果定性一致. 根据排污流量系数关系式，进而建立了自清洗网式过滤器排污流量计算公式，对建立的公式进行均方差 E_{RMS} 检验，得到均方差 E_{RMS} 为 0.001 74，说明该公式具有很高的拟合度.

关键词：微灌；网式过滤器；自清洗；排污系统；流量系数
中图分类号：S277.9　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2012)05-0588-04

Calculating drainage flow rate through self-cleaning screen filters

Luo Xiuping[1], *Liu Huanfang*[1], *Zong Quanli*[1], *Yi Ping*[2]
(1. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China; 2. Survey Planning and Design Institute, Xinjiang Production and Construction Corps, Urumqi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: According to the investigation of the impact factors on the flow rate, it was found that the drainage flow rate through a self-cleaning screen filter Q_p is determined by a flow coefficient. In order to investigate variation features of the flow coefficient, a series of experiments were conducted at various dimensionless inlet cross-section areas of the sand suction component in a self-cleaning screen filter. It was observed that the coefficient increases with opening initially. However, once the opening rises to a certain level, the coefficient no longer changes with the opening and tends to arrive at a constant. The established flow coefficient formula showed that when the dimensionless inlet cross-section area is more than 0.15, i.e. the height of the inlet is bigger than 500 mm (in the experiments, the width of the inlet was kept to be 300 mm), the change in the flow coefficient caused by the dimensionless area is less than 0.5%. This suggests the flow coefficient almost no longer depends on the dimensionless inlet cross-section area. Such a theoretical outcome is consistent with the experimental observations. Finally, an empirical formula was proposed to calculate the drainage flow rates through a self-cleaning screen filter based on the flow coefficient established. Interestingly, the root mean square error (RMSE) is 0.001 74 only, showing the formula has an excellent accuracy.

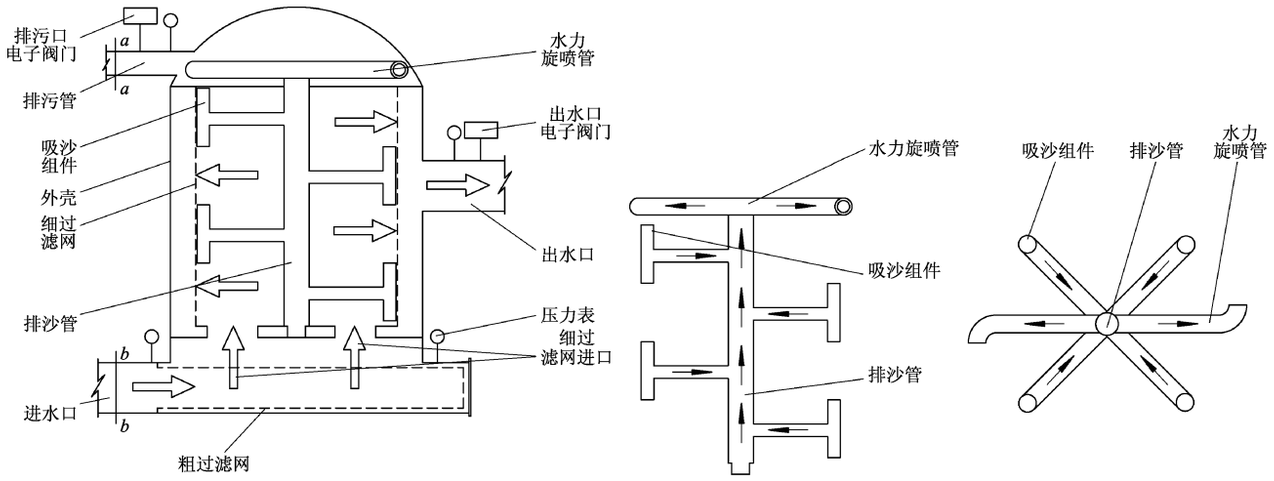
Key words: micro-irrigation; screen filter; self-cleaning; drainage system; flow coefficient

收稿日期：2012-02-27
基金项目：国家自然科学基金资助项目(50909062)；科技型中小企业技术创新基金资助项目(11C26216516530)
作者简介：骆秀萍(1986—)，女，甘肃武威人，硕士研究生(luoxiuping06@163.com)，主要从事工程水力学研究.
刘焕芳(1965—)，男，河南禹县人，教授，博士(通信作者，Lhf0818@shzu.edu.cn)，主要从事工程水力学与节水灌溉方面的研究.

微灌是一种先进的节水灌溉方式,但微灌系统的初始投资较高,灌水器堵塞将直接导致微灌系统不能正常运行. 灌水器的水流通道很窄,以便达到稳定水压和消能的目的,但这也同时增加了灌水器堵塞的危险[1]. 灌水器完全堵塞会使系统瘫痪,部分堵塞也会导致水流分布不均,这会引起减产和产品突变等问题[2-3]. 因此,对灌溉水源进行泥沙处理以及其他净化处理是必不可少的,而节水灌溉用过滤器是降低微灌系统造价与运行能耗的一个重要途径[4],也是保证灌水器不被堵塞的最关键技术设备[5-8]. 作为过滤系统中的终极过滤设施,自清洗过滤器具有自动化程度高、压力损失小[9]、结构简单、安装使用方便、应用范围广等特点,适应了大力发展节水灌溉技术的需求[10]. 目前国内外市场上出现了很多种自动清洗过滤器及生产和研制自清洗过滤器的公司,如以色列(Amiad、Arkal 和 Filtomat 公司)、美国(Orival、Automatic Filters、Schnoeder 和 RPA Process Technologies 公司)等. 国内外许多学者已在实验室和实际工程中对微灌用自清洗过滤器的结构、水力性能等有关问题进行了试验研究和理论探讨,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. 文中将针对自清洗网式过滤器的排污流量问题加以探讨,结合试验结果建立自清洗网式过滤器排污流量计算公式.

1　自清洗网式过滤器结构及工作原理

自清洗网式过滤器主要由过滤器筒体、自动控制装置、过滤芯、排污装置等部分组成,一级过滤室由粗过滤网构成,二级过滤室由细过滤网及排污装置构成. 自清洗网式过滤器结构及过滤流程如图 1 所示.



(a) 自清洗网式过滤器整体结构图　(b) 排污系统结构正视图　(c) 排污系统结构俯视图

图 1　自清洗网式过滤器结构及过滤流程

Fig. 1　Structure and filtering process of self-cleaning screen filter

自清洗网式过滤器的排污装置如图 1b,1c 所示. 排污装置由水力旋喷管和自动吸附装置构成,自动吸附装置由吸沙组件和排沙管密封连接而成. 过滤进行一段时间后,当积聚在细滤网内表面的泥沙使滤网内外表面形成的压差达到预定值时,吸沙组件在过滤器内部水压与外部大气之间形成的压差作用下产生强劲吸力,滤网内表面泥沙在强劲吸力和高速水流的双重作用下进入吸沙组件,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.

2　排污流量计算公式

自清洗网式过滤器排污流量 Q_p 是衡量过滤器排污用水的经济指标. 当过滤器处于排污状态时,对过滤器进水口 $a-a$ 断面和排污口 $b-b$ 断面列能量方程,有

$$z_1+\frac{p_1}{\gamma}+\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}=z_2+\frac{p_2}{\gamma}+\frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}+\sum\xi\frac{v_2^2}{2g}, \tag{1}$$

式中:取地面为高程基准参考面;z_1 为过滤器进口

$a-a$断面相对高程,m;z_2 为过滤器排污出口 $b-b$ 断面相对高程,m;p_1 为进口 $a-a$ 断面处压强,Pa;p_2 为排污出口 $b-b$ 断面处压强,Pa;v_1 为进口 $a-a$ 断面处的平均水流流速,m/s;v_2 为排污出口 $b-b$ 断面处的平均水流流速,m/s;α_1,α_2 为修正系数;g 为重力加速度,m/s^2;$\sum\xi$ 为过滤器总的局部水头损失系数(沿程水头损失忽略不计).

由于过滤器排污口流入大气,故 $p_2=0$(相对压强),取 $\alpha_1=\alpha_2=1$,联立连续性方程为

$$v_1A_1=v_2A_2, \tag{2}$$

式(1)变为

$$z_1+\frac{p_1}{\gamma}-z_2=\left[1+\sum\xi-\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right]\frac{v_2^2}{2g}, \tag{3}$$

则

$$v_2=\frac{\sqrt{2g\left(z_1+\dfrac{p_1}{\gamma}-z_2\right)}}{\sqrt{1+\sum\xi-\left(\dfrac{A_2}{A_1}\right)^2}}, \tag{4}$$

式中:A_1,A_2 分别为过滤器进口及排污出口断面面积,m^2;$\sum\xi$ 包括过滤器进口局部水头损失系数 ξ_1;出口局部水头损失系数 ξ_2;粗细滤网局部水头损失系数 ξ_3;吸沙组件入口局部水头损失系数 ξ_4 以及过滤器内部其他结构水头损失系数 ξ_5. 令

$$\mu=\frac{1}{\sqrt{1+\sum\xi-\left(\dfrac{A_2}{A_1}\right)^2}}, \tag{5}$$

则过滤器排污流量基本公式为

$$Q_P=\mu A_2\sqrt{2g\left(z_1+\frac{p_1}{\gamma}-z_2\right)}. \tag{6}$$

由式(6)可知,自清洗网式过滤器排污系统排污过程与有压短管自由出流类似. 过滤器排污流量与过滤器内外部大气之间形成的压力水头差、进水口和排污口之间的安装高程差以及排污流量系数 μ 有关. 由式(6)可知,一旦过滤器基本参数被确定,则过滤器排污流量计算的正确与否将集中反映到流量系数的取值上,而由式(5)可知,排污流量系数与过滤器局部水头损失系数 $\sum\xi$ 及过滤器进出口面积比有关. 过滤器进出口面积比、过滤器进口局部水头损失系数 ξ_1、出口局部水头损失系数 ξ_2、粗细滤网局部水头损失系数 ξ_3 以及过滤器内部其他结构水头损失系数 ξ_5 在文中研究过程中为定值,故过滤器排污流量系数仅与吸沙组件入口局部水头损失系数 ξ_4 有关.

对吸沙组件入口而言,其为宽 b、高 l 的矩形. 如图1a所示,4个吸沙组件的高度能够控制整个细过滤网的网面,确保在排污过程中所有吸沙组件把整个细过滤网内表面上的泥沙吸净和排出.

取4个吸沙组件中的任意一个为研究对象,吸沙组件入口外为 $c-c$ 断面,入口内为 $d-d$ 断面,并取 $d-d$ 断面所代表的开口中心为基准参考面. 如图2所示.

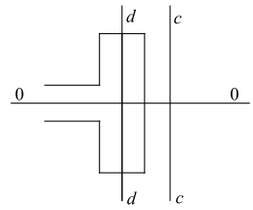


图2 吸沙组件计算示意图

Fig. 2 Calculation schematic of sand suction component

对吸沙组件入口内外列能量方程:

$$z_3+\frac{p_3}{\gamma}+\frac{\alpha_3v_3^2}{2g}=z_4+\frac{p_4}{\gamma}+\frac{\alpha_4v_4^2}{2g}+\xi_4\frac{v_4^2}{2g}, \tag{7}$$

式中:z_3 为 $c-c$ 断面相对高程,m,取为0;z_4 为 $d-d$ 断面相对高程,m,取为0;p_3 为 $c-c$ 断面处压强,Pa;p_4 为 $d-d$ 断面处压强,Pa;v_3 为 $c-c$ 断面处的平均水流流速,m/s;v_4 为 $d-d$ 断面处的平均水流流速,m/s;α_3,α_4 为修正系数,均取1.0.

由于 $c-c$ 断面处平均流速较小,可将 v_3 近似取为0. 由连续性方程可得 $d-d$ 断面处的流速为

$$v_4=\frac{Q_P}{4bl}, \tag{8}$$

将以上数据代入式(7)整理得

$$\frac{p_3}{\gamma}-\frac{p_4}{\gamma}=\frac{1}{2g}\left(\frac{Q_P}{4bl}\right)^2(1+\xi_4). \tag{9}$$

对于排污系统而言,吸沙组件入口处压差水头形成的压力大小是冲净率最主要的影响因素,由式(9)可知,吸沙组件入口处压差水头形成的压力与其入口尺寸密切相关,b,l 越小,压力越大. 同时发现,吸沙组件入口尺寸对局部水头损失系数 ξ_4 也有影响,而过滤器排污流量系数由吸沙组件入口局部水头损失系数 ξ_4 决定,因此,吸沙组件入口条件与过滤器排污流量系数相关. 综上所述,吸沙组件入口条件不仅决定着过滤器的冲净率,还影响过滤器排污流量的大小.

3　排污流量系数的确定

为了探讨自清洗网式过滤器排污流量系数的变化规律，重点进行了吸沙组件相对入流面积对排污流量系数影响的试验研究. 过滤器排污流量系数公式(5)可改写为量纲一化的量，即

$$\mu = f\left(\frac{bl}{A_2}\right). \tag{10}$$

事实上吸沙组件入口宽度和入口长度的变化所引起的均是入流面积的变化. 由于吸沙组件为碳钢材质且入口宽度 b 较小，为 0.003 m，不易改变尺寸，故通过改变其入口长度来改变入流面积，测定吸沙组件不同入流面积下过滤器的排污流量. 在试验过程中，过滤器出口断面面积 A_2 固定不变.

4 个吸沙组件总长 L 为 600 mm，试验过程中通过封住一定长度的吸沙组件来改变其入口长度. 设定水泵水头值为 40 m，过滤器过滤时的进水流量为 220 m^3/h，用流量计分别读取吸沙组件入口长度为 0，120，240，360，480 和 600 mm 共 6 种情况下的排污流量，根据试验数据分析吸沙组件入口面积与排污流量的关系，如图 3 所示.

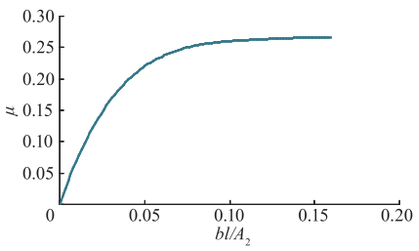


图 3　流量系数与相对入流面积的关系

Fig. 3　Curve of flow coefficient against dimensionless inlet cross-section area

分析图 3 流量系数随吸沙组件入口长度的变化趋势后发现，在各种水流条件下，当流量一定，且其他条件相同，排污流量系数随吸沙组件入口长度的增大而增大，但当吸沙组件入口长度增大到一定程度后，流量系数就不再发生变化，而是趋近于某一恒定值.

根据试验资料，利用自清洗网式过滤器排污流量计算基本公式(6)反算排污流量系数，保持过滤器进水流量为 220 m^3/h 不变，通过图 3 中点绘的过滤器排污流量系数与相对入流面积的关系，建立了如下排污流量系数关系式：

$$\mu = 0.27\left(1 - e^{-35.1\frac{bl}{A_2}}\right). \tag{11}$$

在实际工程中，根据过滤水源实际含沙情况，过滤器吸沙组件入口宽度 b 的选择应大于积累在细过滤网内表面上泥沙的最大粒径，同时又应尽可能的小. 分析式(11)发现，当 $bl/A_2 > 0.15$，即当吸沙组件入口长度 $l > 500$ mm 后，吸沙组件开口面积对流量的影响已不到 0.5%，该分析结果与图 3 由试验所作出的结果从定性上看是完全一致的.

将式(11)代入式(6)，则自清洗网式过滤器排污流量计算公式可变为

$$Q_p = 0.27A_2\left(1 - e^{-35.1\frac{bl}{A_2}}\right)\sqrt{2g\left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} - z_2\right)}, \tag{12}$$

利用统计学中的均方差判断公式(12)的拟合度，均方差计算公式为

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Q_{p,i} - Q_{pe,i})^2}{N}}, \tag{13}$$

式中：$Q_{p,i}$ 为排污流量计算值；$Q_{pe,i}$ 为排污流量试验观测值；N 为观测值的数目.

由于均方差能反映一个数据集的离散程度，那么均方根误差 E_{RMS} 的值越小，则实测值与理论值越接近，经验公式的拟合度越高，适应性越好. 文中根据公式(12)计算的理论值和试验观测值代入公式(13)得到 E_{RMS} 值为 0.001 74. 结合上述讨论，可见建立的自清洗网式过滤器排污流量计算公式具有很高的拟合度.

4　结　论

1)影响自清洗网式过滤器排污流量大小的因素有过滤器内部与外部大气之间形成的压力水头差、进水口和排污口之间的安装高程差、吸沙组件的相对入流面积及局部水头损失系数.

2)进行了过滤器排污系统吸沙组件的开口条件对流量系数影响的试验研究，发现流量系数随着吸沙组件相对入流面积的增大而增大，但当吸沙组件开口长度增大到某程度后，流量系数就不再发生变化，而是趋近于某一恒定值. 根据试验成果，得出排污流量系数计算公式，进而确定了自清洗网式过滤器排污流量计算公式的具体形式.

3)利用统计学原理，对建立的公式进行均方差 E_{RMS} 检验，结果显示拟合出的自清洗网式过滤器排污流量计算公式具有很高的准确性.

(下转第 608 页)