文章编号:1672-3317(2017)12-0068-07

# 滤网孔径对网式过滤器内部流场的影响

陶洪飞,朱玲玲,马英杰,洪明,付秋萍,赵经华,马亮 (新疆农业大学水利与土木工程学院,乌鲁木齐 830052)

摘 要:为探究典型滤网孔径(0.180、0.150、0.125 mm)对全自动网式过滤器内部流场在过滤时的影响,采用Fluent 软件提供的Realizable k-c模型和多孔阶跃模型模拟其清水流场,讨论和分析不同滤网孔径下的速度场、压强场及 能态场。结果表明,滤网孔径为0.180、0.150、0.125 mm的实测水头损失和数值计算的相对误差分别为4.00%、 3.52%、7.32%,可知选择的数学模型具有较高的可靠度;滤网孔径越小,网式过滤器过滤时的内部流场越紊乱,水头 损失越大,罐体与出水管交界处的滤网需要承受的压强差越大,故实际运行中容易因该处滤网变形甚至破损而需 要更换新的滤网。

关键词:过滤器;滤网孔径;数值模拟;模型;水头损失
中图分类号:TV14 文献标志码:A doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.12.012
陶洪飞,朱玲玲,马英杰,等.滤网孔径对网式过滤器内部流场的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(12):68-74.

# 0 引 言

目前,微灌技术已成为新兴节水灌溉技术的代表,其在提高水资源利用率、改良作物品质、促进农业生产、自动化控制等方面的突出优势已被全世界认同<sup>11</sup>。过滤器是微灌系统中的关键设备之一,很多学者通过物理试验方法研究了其水力性能、泥沙处理能力及参数之间无量纲组合方程等内容。例如:通过田间物理实验,以离心式过滤器为一级过滤,叠片式过滤器作为二级过滤,分析研究了这些过滤器的水力性能及其泥沙处理能力<sup>[2]</sup>;基于对叠片式过滤器和水力旋流过滤器水头损失数学模型的研究,推导出了关于水头损失、过滤器结构参数、粘滞系数等变量之间的无量纲组合方程<sup>[3]</sup>。相对于叠片过滤器而言,网式过滤器具有操作简单、清洗方便及对无机污染物高效去除等优势<sup>[4]</sup>。为此,通过室内物理模型试验,研究了网式过滤器的水头损失和排污时间,理论推导出水头损失经验表达式及120目自清洗网式过滤器的最佳排污时间表达式,得出过滤器最佳排污时间段在20~30 s之间<sup>[54]</sup>。

由于网式过滤器在运行过程中处于封闭状态,无法观察到其内部的水流结构,故有部分学者通过计算 流体力学(CFD)软件模拟该过滤器的内部流场,并提出相应结构优化措施。有学者分别采用3种湍流模型 同多孔介质阶跃模型对网式过滤器的内部流场进行数值模拟,并将计算结果与物理试验结果进行对比,指 出 Realizable *k-ε*模型具有更高的准确性<sup>[7]</sup>;运用动网格技术,对过滤器的自清洗过程进行了数值模拟,得到 了流速、紊动能和压力等流场的分布规律,指出了自清洗系统的不足<sup>[8]</sup>;运用 FLUENT 软件对自清洗网式过 滤器内部流场进行数值模拟,并通过改变排污管和吸污管直径的方法对过滤器进行结构优化<sup>[9]</sup>;采用多孔介 质模型对全自动鱼雷网式过滤器的清水流场进行模拟,对比分析计算结果得到了出水管最佳位置<sup>[10]</sup>。

综上,采用数值模拟方法对网式过滤器的内部水流结构和流场特性进行研究不失为一种有效方法,但 尚未有学者针对滤网孔径对网式过滤器内部流场的影响这一问题展开研究。在实际生产运行中,滤网孔径 的大小是根据灌水器出水孔等效直径来选取的,一般要求不大于1/7~1/10的等效直径,兹拟采用Fluent软件 提供的Realizable *k-e*模型同多孔阶跃模型模拟全自动网式过滤器在不同典型滤网孔径下的清水流场,初步 探究滤网孔径对全自动网式过滤器内部流场的影响。

收稿日期:2016-08-18

基金项目:国家级大学生创新训练计划项目(201510758009);库尔勒市重点科技项目;新疆农业大学校前期资助课题(XJAU201401);复合应用型 农林人才培养模式改革试点(农业水利工程)项目;新疆农业大学教研教改项目;新疆水利水电工程重点学科基金项目(xjslgc zdxk20101202)

作者简介:陶洪飞(1987-),男,四川南充人。硕士生导师,博士,主要从事节水新技术与新设备以及计算水力学研究。E-mail:304276290@qq.com

# 1 全自动网式过滤器的介绍

本次数值模拟选用的全自动网式过 滤器由新疆鑫水现代水利工程有限公司 生产,具有结构简单、安装方便、自动化 程度高、劳动强度低等特点。

全自动网式过滤器主要由罐体、进 出水管、滤网、控制器等部分组成。其关 键参数详见图1。全自动网式过滤器的 工作原理为:灌溉水从进水管流入罐体, 所有粒径大于网孔孔径的污物都会滞留



在滤网上,而过滤水则穿过滤网,进而流向出水管;随着滤网上污物的累积,过滤器的水头损失逐渐增大。 当水头损失达到预设压差值时,控制器自动开启排污阀进行排污,当达到预设的排污时间时,排污阀自动关闭,冲洗结束,过滤仍在进行。

# 2 全自动网式过滤器的CFD模拟

# 2.1 数学模型

采用Fluent软件中的多孔阶跃(porous jump)模型<sup>[11]</sup>模拟滤网,相关参数表达式为:

$$C_{1} = \frac{150(1-\varepsilon)^{2}}{D^{2}\varepsilon^{3}},$$
 (1)

$$q = \frac{1}{C_1} , \qquad (2)$$

$$C_2 = \frac{3.5(1-\varepsilon)}{D\varepsilon^3} , \qquad (3)$$

式中: $C_1$ 为阻力系数(m<sup>2</sup>); $C_2$ 为惯性损失系数(m<sup>1</sup>);D为滤网孔孔径(mm);q为渗透率(m<sup>2</sup>); $\varepsilon$ 为孔隙比(%), 也叫"筛分面积百分比"。

选用 Fluent 6.3 提供的 Realizable k- $\epsilon$ 湍流模型,与多孔阶跃模型耦合求解。该湍流模型的湍动能k和 耗散率 $\epsilon$ 的方程见文献[12-14]。数值模拟采用的3种滤网关键参数如表1所示。

工况	<i>D</i> /mm	滤网厚度/m	滤网丝径/mm	<i>E</i> /%	$q/m^2$	$C_{\rm l}/({\rm m}^{-2})$	$C_2/({ m m}^{-1})$
1	0.180	0.001	0.112	38	3.083 3×10 <sup>-11</sup>	3.24×10 <sup>10</sup>	219 703.2
2	0.150	0.001	0.112	28	1.200 8×10 <sup>-11</sup>	8.33×10 <sup>10</sup>	435 020.5
3	0.125	0.001	0.112		4.411×10 <sup>-12</sup>	2.27×10 <sup>11</sup>	918 367.3

### 2.2 选取典型断面

图2为全自动网式过滤器的三维图像。为较好地分析 该网式过滤器中的流场分布情况,分别选取不同工况计算 结果中的X=0.51m及Z=0m典型断面,分析不同滤网孔径 下网式过滤器的清水流场分布情况。并定义远离出水口一 侧的滤网为上滤网,靠近出水口一侧的滤网为下滤网。

# 2.3 网格划分及计算方法

为保证计算精度并减少数值计算的工作量,对过滤器 计算网格进行优化。首先,在Gambit 2.3 中对网式过滤器 进行建模;然后,对其网格进行分块划分。由于进、出水口 结构简单,采用六面体结构性网格,其余部分均采用四面 体非结构网格,网格总数共计123 252 个。



图2 三维图像

网式过滤器的数值计算采用非定常的压力基隐式算法,计算区域和控制方程的离散均采用有限体积法。采用Fluent 6.3 提供的SIMPLE算法计算压力与速度的耦合方程,差分格式采用精度较高的二阶迎风格

式。残差标准为1.0×10<sup>-3</sup>,迭代时间步长为1.0×10<sup>-4</sup>s。

### 2.4 定义边界条件

1)过滤器进水管中运动的水流,可近似视为均匀流,取进流方向与X轴正向一致,故设置进水口的边界 条件为速度进口:*U=u*,*V=*0,*W=*0。根据控制变量法,同时根据实际生产运行情况,将不同滤网孔径网式过滤 器的进流量统一设置为352.1 m<sup>3</sup>/h,则根据过水断面平均流速定义可得,*u=*3.11 m/s。

2)根据过滤器实际生产运行情况,出水口压强一般为200 kPa左右。因此,数值模拟时,根据控制变量法,将不同工况下网式过滤器出水口的边界条件统一设置成压强出口,压强大小为200 kPa。

3)根据控制变量法,将不同工况下网式过滤器的罐体、管道内壁及排污管均按固壁定律进行处理,采用 无滑移边界条件,即*U=V=W=*0。

# 3 物理试验

#### 3.1 水头损失表达公式

如图1所示,取全自动网式过滤器的进水口和出水口分别为1-1和2-2断面,并将进水口的管轴中心线 所在平面3-3断面选定为基准面。1-1断面和2-2断面的能量方程为:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w_{1-2}} , \qquad (4)$$

式中: $Z_1$ 、 $Z_2$ 分别为1-1、2-2断面处的位置水头(m);  $\frac{P_1}{\rho g}$ 、 $\frac{P_2}{\rho g}$ 分别为1-1、2-2断面处的压强水头(m);  $\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}$ 、

 $\frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}$ 分别为1-1、2-2断面处的流速水头(m);  $\alpha$ 为动能修正系数,其值取决于过水断面的流速分布,对于渐变流,  $\alpha$ =1.05~1.10:  $h_{w12}$ 为1-1断面至2-2断面的水头损失(m)。

令 $\Delta Z=Z_1-Z_2$ ,  $\Delta P=P_1-P_2$ ,  $\alpha_1=\alpha_2=1$ , 又由于 $D_1=D_2$ ,则上述能量方程可转化为:

$$h_{w1-2} = \Delta Z + \frac{\Delta P}{\rho g}$$
(5)

#### 3.2 材料与方法

为验证数值计算结果的准确性和可靠性,在新疆农业大学农业水利工程实验室对全自动网式过滤器进行了水力性能试验。物理试验装置按实际模型1:1制造,试验系统由水泵[型号200-315(I)B]、管道、网式过滤器、阀门、精密压力表(YB150,精度等级为0.25级)和电磁流量计(AM200/300,精度等级为0.5级)等构成。分别对滤网孔径0.180、0.150、0.125 mm的网式过滤器进行物理试验,试验水源为清水。试验开始后,通过变频柜和闸阀将进水流量调节至352.1 m<sup>3</sup>/h,由于清水试验时过滤器不会产生堵塞,所以系统流量及水头损失比较稳定,监测15 min后,记录过滤器的进水口和出水口的压力表数值,通过式(5)计算不同滤网孔径下的水头损失。

# 4 数值模拟结果与物理试验结果对比

表2是全自动网式过滤器不同滤网孔径下过滤清水时的计算水头损失同物理试验实测水头损失的对比结果。其中,水头损失是根据水头损失公式及数值模拟结果计算得到的。从表2可以看出,滤网孔径对水头损失的影响是不可忽略的,滤网孔径越小,水头损失越大;滤网孔径为0.180、0.150、0.125 mm的实测水头损失和数值计算的相对误差分别为4.00%、3.52%、7.32%,表明数值模拟具有较高的准确性和可靠性。

|--|

工况	滤网孔径/mm	实测水头损失/m	1-1 断面压强/kPa	2-2 断面压强/kPa	1-1断面位置水头/m	2-2断面位置水头/m	计算水头损失/m	相对误差/%
1	0.180	3.00	226.08	200.02	0	-0.51	3.12	4.00
2	0.150	4.54	238.71	200.02	0	-0.51	4.38	3.52
3	0.125	8.06	269.66	200.02	0	-0.51	7.47	7.32

# 5 3种滤网孔径下网式过滤器的内部流场

### 5.1 速度场分析

图3、图4分别表示3种工况下网式过滤器过滤清水时Z=0m、X=0.51m断面处的速度分布情况。通过

对图3、图4的对比分析可知,①全自动网式过滤器在不同滤网孔径下过滤时,其内部速度场的分布规律相似。水流先是均匀地从进水管流入,当水流开始进入罐体(X=0.2 m处)时,根据恒定总流连续性方程,过水断面面积增大,水流流速减小;当罐体内的水流到达出水口(X=0.41 m处)上方时,一部分水流在罐体内沿着X轴正方向流向排污管,另一部分水流则在罐体内沿着Y轴负方向流向出水管;水流在罐体内沿X轴正方向继续流动,过水断面面积没有改变,但水流流速却沿X轴正方向阶梯式地逐渐减小,最终减小到0.5 m/s左右,这是因为排污口处于关闭状态,过滤器尾部沿X轴正方向运动的液体质点与沿X轴负方向运动的液体质点相互碰撞、摩擦和混掺,从而消耗大量的能量,水流流速逐渐减小。②由于出水管垂直于过滤器罐体,受出水口边界条件及重力影响,水流沿着X轴正方向的分速度会逐渐减小,而沿Y轴负方向的分速度则会逐渐增大,所以在罐体与出水管交界处会出现一段"Y"形的高流速紊流区域,且滤网孔径越小,紊流区域越明显。相反地,网式过滤器的上部,即上滤网附近的水流流速则较小。③根据液体运动的连续性方程,滤网孔径越小,水流通过滤网孔的流速越大。由文献[15]中的局部水头损失计算公式知,在其他工况条件都相同的情况下,水流流速越大,其产生的局部水头损失越大。所以滤网孔径越小,水头损失越大。



### 5.2 压强场分析

图5、图6分别表示3种滤网孔径下网式过滤器过滤时 Z=0 m、X=0.51 m断面处的压强云图。对比图5、 图6可知,①全自动网式过滤器在不同滤网孔径下过滤时,其内部压强场的分布规律相似,只是压强值的大 小及波动范围相差较大。②在其他边界条件都相同的情况下,网式过滤器的滤网孔径越小,其内部水流压强 场的分布越不均匀。滤网孔径为0.180、0.150、0.125 mm的内部最大压强差分别为32、50、80 kPa。③网式过 滤器罐体尾部的水流压强相对于进水管和出水管中的水流压强大,且分布较为均匀。这是因为排污管处的 阀门处于关闭状态,此处对水流有阻挡作用,所以过滤器罐体尾部承受较大压强。④网式过滤器出水管中的 水流压强相对于进水管和排污管中的水流压强小,且其上部产生漩涡处的水流压强达到整个过滤器内水流 压强的最小值。⑤网式过滤器滤网附近的水流压强差较大,且滤网孔径越小,滤网所要承受的压强差越大。 当滤网孔径为0.180、0.150和0.125 mm时,滤网所要承受的最大压强差分别为15、30和65 kPa。这说明网式 过滤器的滤网孔径越小,过滤时对滤网的承压要求越高。较大的压强差虽然有助于提高过滤器的过滤效率, 但是也容易将较大粒径的污染物挤出滤网,跟随过滤水进入管道系统,从而堵塞灌水器。⑥滤网孔径越小, 网式过滤器尾部处滤网的内外压强差越大。当滤网孔径为0.180、0.150、0.125 mm时,滤网尾部的最大压强差 分别为0、15、45 kPa。大压差区域的滤网网孔被堵塞后,水头损失陡增,达到控制器阈值时,便开始冲洗。频 繁冲洗会降低网式过滤器的过滤效率及使用寿命,建议针对此问题进行相关结构优化。



### 5.3 能态场分析

图7、图8分别表示3种工况下网式过滤器过滤时Z=0m、X=0.51m断面处的湍动能云图。通过对图7、 图8的对比分析可知,①全自动网式过滤器仅过滤不冲洗时,其罐体内的能态场总体较稳定。但是出水管与 罐体交界处存在高湍动能紊乱区,且滤网孔径越小,紊乱越明显,造成的水头损失也越大。②全自动网式过 滤器在不同滤网孔径下过滤时,内部能态场的分布规律相似,只是滤网孔径越小,全自动网式过滤器内部的 湍动能值越大且波动范围越广,造成的水头损失也就越大,与物理试验结果相一致;滤网孔径0.180、0.150、 0.125 mm的内部湍动能值的波动范围值分别为0.5~5.5、0.5~6.5、0.5~7.0 J/kg。③罐体与出水管交界处的滤 网附近湍动能值较大且分布不均匀,所以在实际生产运行中该处滤网容易产生变形甚至损坏,一方面降低 滤网使用寿命,增大使用和维修成本;另一方面减弱全自动网式过滤器的工作能力,影响正常使用。此处有 待进一步结构优化。



# 6 结论

1)Fluent 6.3提供的Realizable k-c模型同多孔介质阶跃模型能很好地模拟网式过滤器的内部流场。

2)得到了全自动网式过滤器在3种典型滤网孔径下过滤时的内部流场。分析研究后发现:在其他条件都相同时,滤网孔径越小,全自动网式过滤器过滤时的内部流场越紊乱,造成的水头损失越大。实际生产运行中,滤网孔径的大小需根据微灌系统中灌水器出水孔的等效直径来选取。

3)全自动网式过滤器过滤时,罐体与出水管交界处会出现"Y"字型的紊乱区。此处流场很不稳定,不仅 会增大过滤器过滤时的水头损失,还会降低滤网使用寿命,影响正常使用。可考虑改变出水管与罐体的角 度进行结构优化。

4)全自动网式过滤器过滤时,其滤网尾部所要承受的内外压强差较小,且滤网孔径越大越明显,所以可 考虑将滤网尾部适当缩短或者改变滤网整体形状,从而提高过滤器工作效率并节约经济成本。

### 参考文献:

- [1] 孙伟. 中国农业节水技术推广关键影响因素研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2012.
- [2] 叶成恒,范兴科,姜珊. 离心叠片与离心筛网过滤系统性能比较试验[J]. 中国农村水利水电,2010(2):73-78.
- [3] YURDEM H, DEMIR V, DEGIRMENCIOGLU A. Development of a mathematical model to predict head losses from disc filters in drip irrigation systems using dimensional analysis[J]. Biosystems Engineering, 2008, 100(1): 14-23.
- [4] TAJRISHY M A, HILLS D J, TCHOBANOGLOUS G. Pretreatment of secondary effluent for drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 1994, 120(4): 716-731.
- [5] 刘焕芳,郑铁钢,刘飞,等. 自吸式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.
- [6] 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]. 农业机械学报,2013,44(5):127-134.
- [7] 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(10):83-87.
- [8] 宗全利,郑钢铁,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.
- [9] 王栋蕾,宗全利,刘建军. 微灌用自清洗网式过滤器自清洗结构流场分析与优化研究[J]. 节水灌溉,2011(12):5-8,12.
- [10] 阿力甫江•阿不里米提,陶洪飞,马英杰,等.不同出水口位置下全自动鱼雷网式过滤器内部流场的数值模拟[J].灌溉排水学报,2015.34(12):47-51.
- [11] 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.
- [12] 白兆亮,李琳. 有压管道中孔板相对间距对局部阻力系数的影响及其机理研究[J]. 水电能源科学,2015,33(1):177-182.
- [13] 于勇. FLUENT入门与进阶教程[M]. 北京:北京理工大学出版社,2010.
- [14] 江帆,黄鹏. FLUENT 高级应用与实例分析[M]. 北京:清华大学出版社,2010.
- [15] 邱秀云,赵涛,牧振伟.水力学[M].乌鲁木齐:新疆电子出版社,2008.

# The Effect of Screen Aperture on Internal Flow Field in Automatic Screen Filter

TAO Hongfei, ZHU Lingling, MA Yingjie, HONG Ming, FU Qiuping, ZHAO Jinghua, MA Liang (College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** The flow field of water under different screen apertures in an automatic screen filter was simulated using the k- $\varepsilon$  and porous jump models in the Fluent software. Three screen apertures, 0.180, 0.150 and 0.125 mm, were studied. The velocity field, pressure field and energy field under different filter apertures were discussed and analyzed. The results showed that the relative error of the measured and calculated head loss was 4.00, 3.52 and 7.32%, respectively, and the mathematical model was reliable. The smaller the screen aperture was, the more disordered the internal flow field in the automatic screen filter was and the head loss in the automatic screen filter was hence higher. In addition, the screen needed to be replaced in actual operation due to deformation or even damage. **Key words:** filter; screen aperture; numerical simulation; model; head loss

责任编辑:刘春成