



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.02.027

滕晓静,陶洪飞,朱玲玲,等.全自动鱼雷网式过滤器内部清水流场特性数值分析[J].南水北调与水利科技,2017,15(2):176-184,197. TENG Xiaojing, TAO Hongfei, ZHU Lingling, et al. Numerical analysis of characteristics of internal flow field in automatic screen filter with torpedo[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 176-184, 197. (in Chinese)

全自动鱼雷网式过滤器内部清水流场特性数值分析

滕晓静,陶洪飞,朱玲玲,郑文强,胡建强,俞峻豪

(新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要:采用 Fluent 软件中的 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型与多孔介质阶跃面对不同流量下全自动鱼雷网式过滤器的清水流场进行数值模拟。结果表明:数值计算中进、出口间水头损失同物理试验的吻合程度较高,选择的数学模型具有较高的准确性和可靠性。对比不同流量下的计算结果可知,流量不同时过滤器内速度分布规律相同,压强分布规律也相同,但流量越大,水头损失越大,滤网内外侧的速度差、压强差也就越大;过滤器内的速度和压强分布越不均匀,结构有待进一步优化。

关键词:全自动鱼雷网式过滤器;数值模拟;水头损失;流量;流场

中图分类号: TV 14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)02-0176-09

Numerical analysis of characteristics of internal flow field in automatic screen filter with torpedo

TENG Xiaojing, TAO Hongfei, ZHU Lingling, ZHENG Wenqiang, HU Jianqiang, YU Junhao

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: The water flow field in automatic screen filter with torpedo was numerically simulated at different flow rates via the porous jump model and Realizable $k-\epsilon$ model in FLUENT. The results showed that the calculated head loss was highly consistent with the test result. Thus, the mathematical model was highly accurate and reliable. The comparison among the calculation results at different flow rates showed that the velocity and pressure distribution patterns were the same at different flow rates within the filter. The greater the flow, the greater the head loss, and the greater the velocity and pressure difference between the inner and outer sides of the screen. The velocity and pressure distribution were not uniform in the filter. Therefore, the structure of the filter awaits further optimization.

Key words: automatic screen filter with torpedo; numerical simulation; head loss; flow rate; flow field

根据过滤原理,过滤器可分为砂石过滤器、离心过滤器、网式过滤器、叠片过滤器^[1];而组合过滤器

能综合两个过滤器的优点^[2];杨胜敏^[3]就过滤器选型进行了研究,在他给出的过滤器类型及组合方式的

收稿日期:2016-01-31 修回日期:2016-06-04 网络出版时间:2017-09-00

网络出版地址:

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);乌鲁木齐市科学技术局项目(H141028030);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资助(xjslgczdxk20101202)

Funds: National Undergraduate Training Programs for Innovation (201510758009); Korla Key Technology Project; The Early-stage Project of Xinjiang Agricultural University (XJAU201401); Project of Urumqi Technology Bureau (H141028030); Pilot Program for Reform of Training Mode for Versatile and Practical Agroforestry Talents (Agricultural Water Conservancy Project); Xinjiang Agricultural University Teaching and Research Innovation Project; Fund for Key disciplines in Water Resources and Hydropower Engineering in Xinjiang (xjslgczdxk20101202)

作者简介:滕晓静(1994),女,浙江永嘉人,主要从事农业水利工程方面研究。E-mail: tengxiaojing@hotmail.com。

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

选择建议中,网式过滤器都是作为最末级过滤器,因此网式过滤器的性能好对整个微灌系统十分重要。

全自动鱼雷网式过滤器是在传统网式过滤器的基础上提出的一种满足低压排沙要求的新型过滤器,其具有结构紧凑、节能率高、自清洗不断供水以及水沙分离效率高等特点^[4]。但关于鱼雷网式过滤器的研究尚处于起步阶段,尤其是该过滤器中的流场分布规律。当前,很难通过现有的测试手段(如PIV或LDP)来测量速度场,因此选择正确的数学模型对鱼雷网式过滤器中的流场进行数值模拟不失为一种有效的方法。随着计算机的广泛应用以及计算机容量的增大,目前仿真模拟流动具有很高的可靠性和准确度^[5-7]。已有许多学者将数值模拟运用到过滤器的研究中,如姚卓飞^[8]利用 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型对陶瓷过滤器进行模拟,并且涉及到气-固两相流的分离以及流体穿越多孔介质等复杂的过程;李景海等人^[9]采用 Eulerian 模型作为石英砂滤层反冲洗数值模拟模型,对滤层的反冲洗过程进行了瞬态模拟;王忠义等人^[10]合理简化了管道过滤器滤芯,将其平面化并结合多孔介质模型将滤芯的阻力特性转换为边界条件。另外还有许多针对网式过滤器的数值模拟,王新坤^[11]以 AZUD 公司一款进口直径为 50 mm 的普通微灌网式过滤器为研究对象,利用数值模拟得到该过滤器的流场特性,并对过滤器进行结构优化;李浩等人^[12]以 AZUD-M100 网式过滤器为样品,分别采用 3 种不同湍流模型对过滤器流场进行模拟,发现基于多孔介质模型的标准 $k-\epsilon$ 模型或 Realizable $k-\epsilon$ 模型更适合过滤器的数值模拟;宗全利^[13]、于旭永^[14]、骆秀萍^[13]等人针对自

清洗网式过滤器进行了多方面的研究,得到该过滤器内部流场特性的相关资料。

本文将利用 Fluent 软件模拟不同进流量下全自动鱼雷网式过滤器的清水流场,并结合物理实验数据,初步探究进流量对该过滤器内部流场的影响,这将为全自动鱼雷网式过滤器的进一步研究与结构优化提供参考。

1 全自动鱼雷网式过滤器的介绍

全自动鱼雷网式过滤器(下文简称“过滤器”)由罐体、滤网、鱼雷、自动控制器等部分组成,其整体示意图见图 1(a)。该过滤器创新之处是在滤网内加入鱼雷部件,旨在较小的工作压力下也能完成过滤和冲洗工作。鱼雷和滤网的形状见图 1(b)和(c)。过滤器罐体、滤网、鱼雷的长度分别为 1.031 m、0.961 m、1.031 m。罐体、滤网、鱼雷的直径分别为 0.254 m、0.2 m、0.154 m。进口和出口直径均为 0.2 m。

该过滤器为全自动过滤器,进、出水口装有压力传感器,能采集进水口和出水口的压力并反馈给控制器,只需在控制器中预先设置好压差、排污时间,过滤器即可自动完成反冲洗、排污、停止反冲洗等工作。工作原理为:灌溉水由进水管进入滤网中,净水穿过滤网,流向出水口,而污物则会被截留在滤网内。随着污物的积累,水头损失逐渐增加,当过滤器出水口压力与进水口压力达到预定压差值时,控制器便自动开启排污阀,此时一部分水流冲刷滤网上的污物,并携带污物从过滤器尾部的排污管排出;另一部分水流则通过滤网从出水口排出。当排污时间达到预设的时间,控制器自动关闭排污阀,冲洗结束。

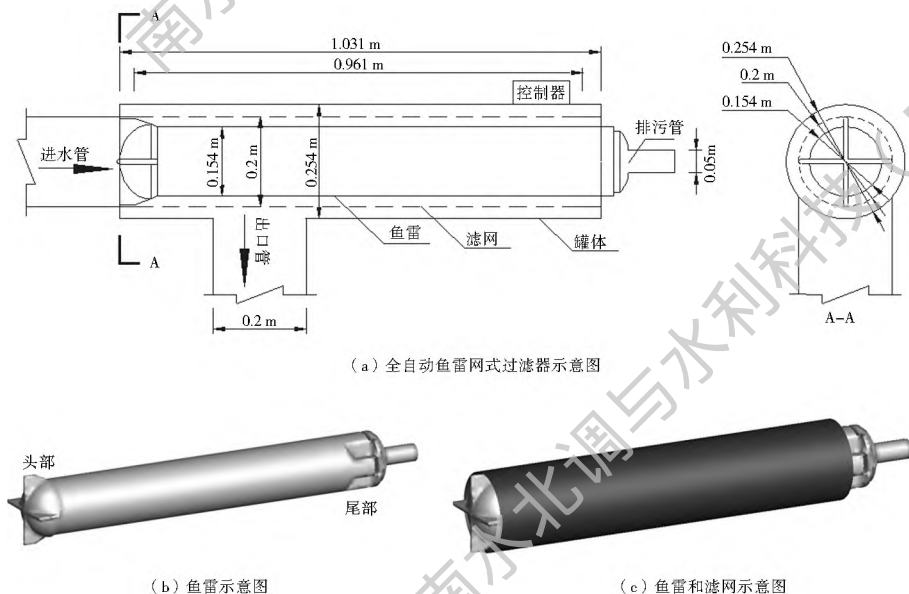


图 1 全自动鱼雷网式过滤器示意图

Fig. 1 Structural diagram of automatic screen filter with torpedo

2 全自动鱼雷网式过滤器内部流场的数值模拟

2.1 数学模型

多孔阶跃面 (porous jump) 是多孔介质模型的一维简化, 可用于模拟已知速度-压降特性的薄膜, 多孔阶跃面比多孔介质模型收敛性更好。多孔介质模型通过在动量方程中增加源项来模拟计算域中多孔性材料对流体的流动阻力。该源项由两部分组成, 即黏性阻力项和惯性损失项。

黏性阻力系数和惯性阻力系数的计算方法有好几种, 本文采用 Ergun 方程计算通过层床的阻力系数。该型方程能较好地结合孔隙形状和黏性的影响, 其具体形式如下:

$$-\frac{\Delta P}{\Delta L} = A \frac{(1-\varepsilon)^2 \mu u}{\varepsilon^3 D^2} + B \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \rho u^2 \quad (1)$$

式中: ρ 和 μ 分别为介质的密度和黏性系数, u 为表观速度; A 、 B 为常系数, 由实验确定。对于常系数 A 、 B , 不同研究者给出了不同值^[16], 在 ANSYS FLUENT 参考手册中, 根据黏性阻力项和惯性损失项, 给出的各方向黏性阻力系数和惯性损失系数计算公式如下:

$$C_1 = \frac{150(1-\varepsilon)^2}{D^2 \varepsilon^3} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{1}{C_1} \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{3.5(1-\varepsilon)^2}{D \varepsilon^3} \quad (4)$$

式中: α 为渗透率 (m^2); C_1 为阻力系数 (m^2); C_2 为惯性损失系数 (m^{-1}); D 为滤网孔直径 (mm); ε 为孔隙比 (%)。物理试验中采用的滤网参数如下: 滤网孔直径 $D = 0.18 \text{ mm}$, 孔隙比 $\varepsilon = 38\%$, 丝径 $d = 0.112 \text{ mm}$, 根据给定的参数值, 可计算得到 $\alpha = 3.0833 \times 10^{11} \text{ m}^2$, $C_1 = 3.24 \times 10^{10} \text{ m}^{-2}$, $C_2 = 219703.2 \text{ m}^{-1}$, 滤网厚度取 0.001 m 。

湍流模型选 Realizable $k-\varepsilon$ 模型, 与多孔介质阶跃面耦合求解, 这种湍流模型的湍动能 k 和耗散率 ε 的方程见文献[17]

2.2 坐标系的建立及典型面的选取

为了分析过滤器流场分布情况, 本文选取了若干典型面进行分析。图 2 是过滤器的三维坐标图, 其中沿过滤器长度方向为 X 轴, 沿高度方向为 Y 轴, 沿宽度方向为 Z 轴, 坐标轴原点坐标 $(0, 0, 0)$ 在进水口中心处。选取的典型面分别是 $Z = 0 \text{ m}$ 、 $X =$

0.2 、 0.41 、 0.51 、 0.61 、 1.2 m 。 $Z = 0 \text{ m}$ 断面是沿滤网轴线上的纵断面, 通过该断面, 可以直观、全面地观察过滤器内部速度和压强的分布规律。 $X = 0.2 \text{ m}$ 、 $X = 1.2 \text{ m}$ 分别是沿滤网轴线上鱼雷头部和尾部的横断面, 这两个断面能反映出鱼雷部件对水流的影响。 $X = 0.41$ 、 0.51 、 0.61 m 三个断面是出水管附近的横断面, 出水管对过滤器的影响可从这三个断面中表现出来, 其中, $X = 0.51 \text{ m}$ 断面是过出水管圆心的横断面, 而 $X = 0.41$ 和 0.61 m 分别是过出水管沿 X 轴方向的最左端和最右端的横断面。

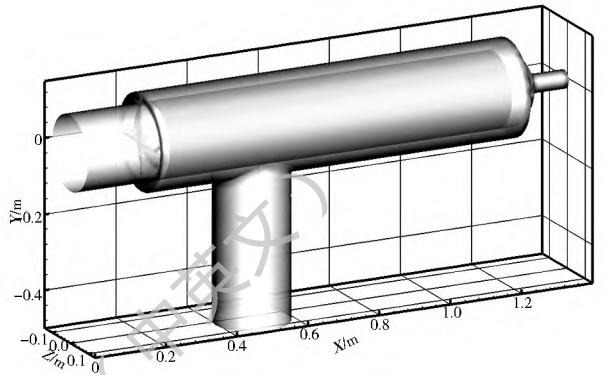


图 2 三维坐标图

Fig. 2 Three-dimensional coordinate

2.3 网格划分及计算方法

模型的建立和网格的划分在 Gambit 2.3 中进行。建模完成后, 将过滤器的网格按块划分: 进口段因为结构简单, 采用六面体结构性网格; 其余部分结构比较复杂, 故采用四面体非结构网格。网格总数量为 12 万余个。数值模拟采用非定常流二阶隐式格式; 差分格式采用精度更高的二阶迎风格式; 并且采用基于压力-速度修正算法 (SIMPLE); 计算区域和基本控制方程的离散采用有限体积法。残差标准为 1.0×10^{-3} , 迭代时间步长为 $1.0 \times 10^{-4} \text{ s}$ 。统一将迭代 2 万步的数据提取出来对比分析。

2.4 边界条件

因为本文仅模拟过滤状态下的流场, 过滤时过滤器尾部的排污口处于关闭状态, 所以排污口可视为固壁。过滤器的罐体、管道内壁及鱼雷也均按固壁定律进行处理。入口属于孔口进水, 可近似视为均匀流, 取来流方向与 X 轴正向一致, 进口边界条件取为: $U = u$, $V = 0$, $W = 0$, 进口断面平均流速 u 由进口流量和进口面积算出。过滤器出水管为压力出口边界条件, 为了能更好的同物理实验对比, 进口流速、出口压强的设置均同物理试验 (具体物理实验见第 3 节), 具体数值见表 1。

表 1 不同工况下的进、出口边界条件
Tab. 1 Boundary conditions of inlet and outlet under different working conditions

工况	进口流量/(m ³ ·h ⁻¹)	进口流速/(m·s ⁻¹)	出口压力/kPa
1	51	0.451	345
2	100.7	0.890	325
3	151.3	1.338	301
4	201.1	1.778	263
5	250.7	2.217	215
6	299.8	2.651	136
7	350.2	3.096	55

3 物理试验结果与数值模拟结果对比

物理试验装置按实际模型 1:1 制造, 试验系统由供水设备、过滤设备及控制设备等构成。供水设

备为蓄水池, 由离心泵向过滤器供水; 控制设备由变频装置和闸阀组成, 共同控制试验系统的流量大小。通过控制设备调节不同进水口流量值(50、100、150、200、250、300 及 350 m³/h)。由于清水试验时过滤器不会产生堵塞, 故系统过流量及水头损失比较稳定, 监测 10 min 后, 记录过滤器的进水口压力表及出水口压力表的数值, 停机结束本次试验。最后整理实验数据, 计算水头损失。

表 2 是全自动鱼雷网式过滤器不同工况下的物理试验结果与数值模拟结果。从表中可以看出:(1) 水头损失与进流量有关, 进流量越大水头损失越大;(2) 物理试验和数值计算结果的最大相对误差和平均相对误差分别为 8.58% 和 5.23%, 表明数值模拟具有较好的吻合性。

表 2 结果对比

Tab. 2 Results comparison

工况	流量/(m ³ ·h ⁻¹)	位置水头/m	实测水头损失/m	计算进口压/kPa	计算出口压强/kPa	计算水头损失/m	相对误差/%
1	51	0.51	0.81	347.75	345	0.78	3.70
2	100.7	0.51	1.21	331.56	325	1.17	3.31
3	151.3	0.51	1.91	313.76	301.01	1.78	6.81
4	201.1	0.51	2.71	283.55	263.01	2.56	5.54
5	250.7	0.51	3.51	244.96	215.02	3.5	0.28
6	299.8	0.51	5.01	176.83	136.03	4.59	8.38
7	350.2	0.51	6.41	108.56	55.04	5.86	8.58

注: 位置水头为进水管过水断面中心与出水管过水断面中心的高差。

4 水流流动路径

图 3(a) 为 Z=0 m 断面的流线图。图中可以观察到: 水流从进水管进入滤网, 遇到鱼雷头部后, 四散开来。鱼雷上部的水流先是向鱼雷尾部流去, 而后又折回向出水管流去。鱼雷下部的水流和鱼雷上部的水流运动状况不同。在鱼雷下部流线大体可分为两种, 一是靠近鱼雷表面的水流越过出水管流向鱼雷尾部, 然后掉头沿着罐体流向出水口; 二是离鱼雷较远的水流直接流向出水管, 流线呈弧形, 并因为结构突变, 造成水流紊乱, 在出水管中产生明显的漩涡。图 3(a) 为 X=0.51 m 断面的流线图。图中, 水流离开鱼雷表面, 沿着罐体流向出水管, 左右两股水流在出水管中间汇合。

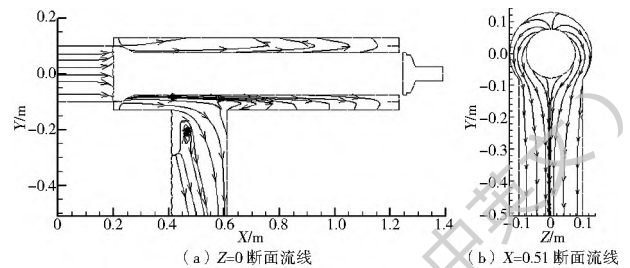


图 3 断面流线

Fig. 3 Sectional flow chart

299.8 m³/h 进流量下的数值计算结果。

5.1 速度场分析

5.1.1 Z=0 m 断面速度场分析

图 4 为 Z=0 m 断面的速度云图。从图 4 可以看出不同工况时该断面的速度流场分布规律比较相似:(1) 过滤器内沿 X 轴流速大小分布不均匀;(2) 水流均匀地从进水管进入滤网, 当水流运动至鱼雷头部(X=0.2 m)时, 受其阻挡, 鱼雷头部中心点处流速很小。(3) 水流沿着鱼雷运动, 因滤网中装有鱼雷, 大大减小了过水断面面积, 由液体连续方程可

5 不同工况流场对比

本文选取较能代表过滤器运行状态的两个物理量进行分析, 它们分别是: 速度和压强。限于篇幅, 只对比分析三种工况: 100.7 m³/h、201.1 m³/h、

知,当流量为定值时,过水断面面积减小,流速将会增大; $X=0.25\text{ m}$ 处过水断面面积最小,所以该处的流速最大。(4)水流继续沿着鱼雷表面前进,此时过水断面面积虽然没有变化,但流速却逐渐减小。受排污口固体边界的影响,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,造成水流流速减小。(5)出水管垂直于滤网,水流受到出口边界条件的影响,沿 X 轴的分速度会逐渐减小,而 Y 方向的分速度逐渐增大,所以在出水管拐弯处出现了一段弧形的高流速区域。在高流速区域左侧,还产生了漩涡。

不同工况下, $Z=0\text{ m}$ 断面速度云图在局部又有所不同,主要体现在以下几个方面:(1)水流在经过鱼雷头部后,流量越大,鱼雷头部对水流的加速效果越明显。如图4(a)所示,当流量为 $100.7\text{ m}^3/\text{h}$ 时,流速从进水管的 1 m/s 左右,增加至 2 m/s 左右;当流量为 $201.1\text{ m}^3/\text{h}$ (图4b)时,流速从进水管的 1.8 m/s 左右,增加至 3.8 m/s 左右;当流量为 $299.8\text{ m}^3/\text{h}$ (图4(c))时,流速从进水管的 2.5 m/s 左右,增加至 5.5 m/s 左右。即当流量为 100.7 、 201.1 、 $299.8\text{ m}^3/\text{h}$ 时,水流经过鱼雷头部后,流速分别增加了约 1 、 2 、 3 m/s 。鱼雷的存在,能明显增加滤网内部水流的流速,这不仅能降低冲洗压力,还能提高过滤器的冲洗效率,流量越大,冲洗时的效果会越明显。(2)当 $X>0.086\text{ m}$ 时,流量越大,鱼雷上表面

的高速水流(为便于比较,文中的“高速水流”是相对于进口水流的流速而言,并不是流速绝对值的大小,下同)所能持续的位移越短。因为流量越大,流速越大,在排污管边界条件(视为固壁)的影响下,沿 X 轴负向的液体与正向流动的液体相互碰撞所消耗能量也越大,从而高速水流所持续的位移也就越短。当流量为 100.7 、 201.1 、 $299.8\text{ m}^3/\text{h}$ 时,高速水流持续的位移分别为 0.54 、 0.48 、 0.4 m 。而鱼雷下表面则相反,流量越大,高速水流所能持续的位移越长,虽然同样受排污管边界条件影响下,过滤器尾部的水流会沿 X 轴负向流动,但大部分水流并没有与沿 X 轴正向流动的水流发生碰撞,而是直接流向出水管,因此能量损失小,所持续的位移也就越长。(3)在出水口拐弯处,流量越大,弧形的高流速区域也越大。(4)从图4可看出,当流量为 $100.7\text{ m}^3/\text{h}$ 时,出水口处的水流流速分布很均匀;当流量为 $201.1\text{ m}^3/\text{h}$,出水口处的水流流速分布比较均匀;当流量为 $299.8\text{ m}^3/\text{h}$ 时,出水口处的水流流速分布不均匀。造成这些差异的原因是 $Y=-0.1\text{ m}$ 处结构突变,水流方向从沿 X 正方向运动迅速转变为沿 Y 轴负方向运动,造成出水口处水流紊乱,出水管固壁会迫使紊乱的水流完全转变为沿 Y 轴负方向运动。而流量越大,沿 X 轴方向的流速就越大,水流紊乱就越厉害。图3(a)中因流量小,紊流在很短的一段距离后消除,而图3(c)中因为流量大,紊流在出水口处仍未消除。

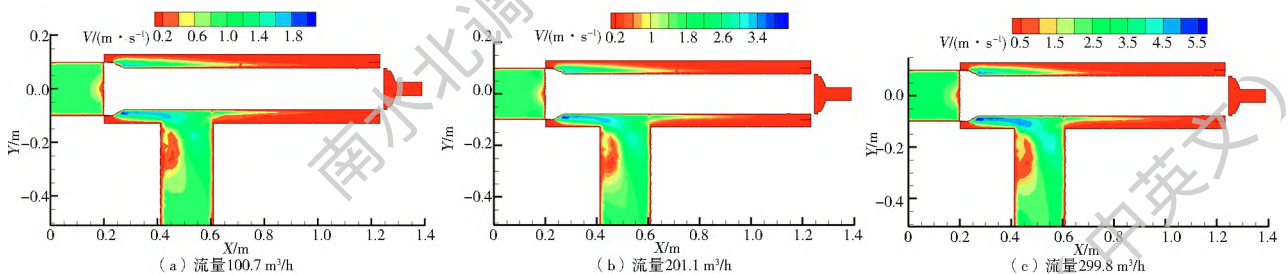


图4 $Z=0\text{ m}$ 断面速度云图

Fig. 4 Velocity contours diagram of the $Z=0\text{ m}$ section

5.1.2 $X=0.2\text{ m}$ 断面速度场分析

图5为 $X=0.2\text{ m}$ 断面的速度场。从图5中可知,不同流量下鱼雷头部的流速均是从中心向外逐渐增加,在到达鱼雷四周边壁处,即靠近罐体的位置,流速又快速减小。这是由于鱼雷头部流线型的形状,具有分流作用,越靠近鱼雷流速越小;同时受到过滤器罐体边界条件的影响,流速又快速减小。

从图5可见进流量越大,该断面最大流速也就越大,如进水流量为 $100.7\text{ m}^3/\text{h}$ 时,水流的最大流速为 1.3 m/s ,而流量为 201.1 、 $299.8\text{ m}^3/\text{h}$ 时水流

的最大流速分别为 2.6 、 3.8 m/s 。

5.1.3 $X=0.41\text{ m}$ 和 $X=0.61\text{ m}$ 断面速度场分析

图6、图7分别为 $X=0.41$ 、 0.61 m 断面的速度云图。从这两个断面来看,流场十分相似,流量的不同对流场的影响十分微小。不管进流量是多少, $X=0.41$ 、 0.61 m 断面中,鱼雷上部的流速均小于鱼雷下部的流速。鱼雷上表面沿 Y 轴正方流速先增大后减小:在鱼雷表面流速较小,离开鱼雷一段距离后,流速开始增大,并保持高流速一直到滤网附近

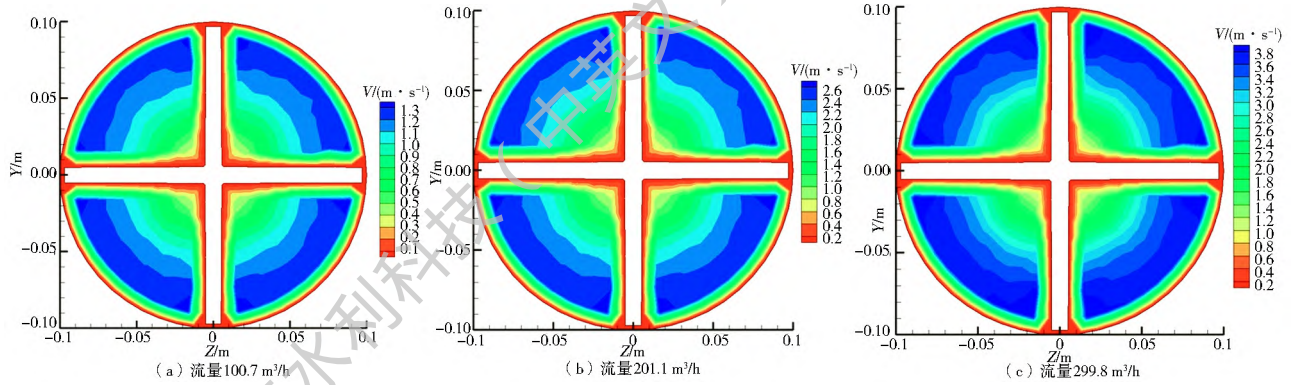


图 5 $X = 0.2 \text{ m}$ 断面速度场
Fig. 5 Velocity field of the $X = 0.2 \text{ m}$ section

($Y = 0.1 \text{ m}$), 液体穿过滤网后能量有所损失, 流速开始减小, 直到顶部罐体附近, 流速降到最小。而在鱼雷下表面沿 Y 轴负方向, 流速也是先增大后减小, 只是流速减小并不是因为穿过滤网, 而是在受下面罐体固体边界影响才减小。对比图 6(a) 和图 7(a) (或图 6(b) 和图 7(b) 或图 6(c) 和图 7(c)), 过水断面面积一样, 但是速度却相差很大, 由恒定总流的

连续方程可知, 通过断面 $X = 0.41 \text{ m}$ 的流量大于通过断面 $X = 0.61 \text{ m}$ 的流量, 因为部分水流通过断面 $X = 0.41 \text{ m}$ 后直接从出口流出。另外从 5.1.1 节的分析中可知, $X = 0.41 \text{ m}$ 断面正处于鱼雷头部对水流加速的区域, 鱼雷下表面高流速区域的范围也很大。因此断面 $X = 0.41 \text{ m}$ 的流速远远大于断面 $X = 0.61 \text{ m}$ 的流速。

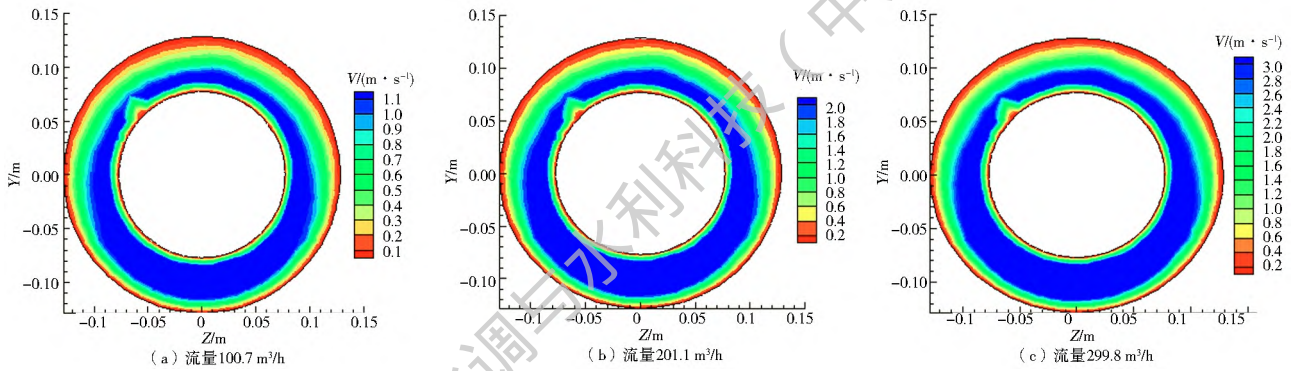


图 6 $X = 0.41 \text{ m}$ 断面速度场
Fig. 6 Velocity field of the $X = 0.41 \text{ m}$ section

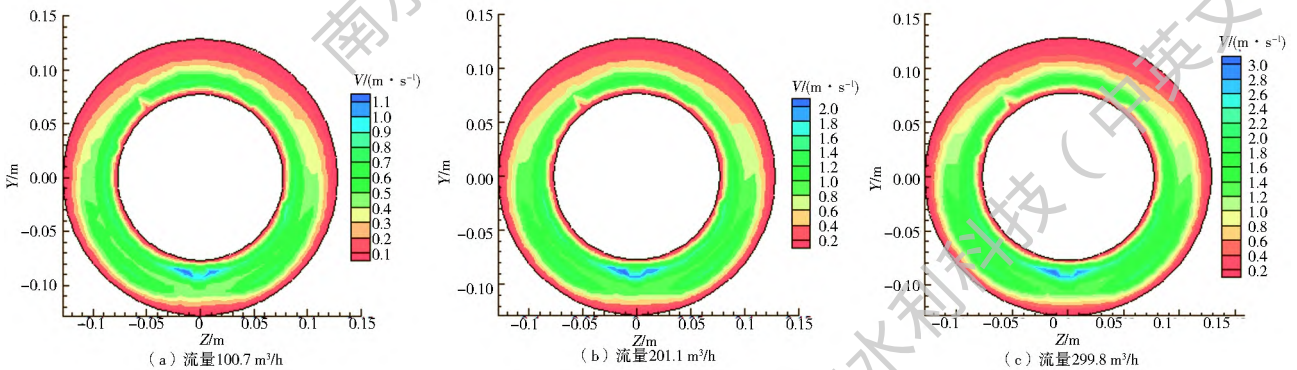


图 7 $X = 0.61 \text{ m}$ 断面速度场
Fig. 7 Velocity field of the $X = 0.61 \text{ m}$ section

5.1.4 $X = 1.2 \text{ m}$ 断面速度场分析

图 8 为 $X = 1.2 \text{ m}$ 断面下的速度云图。从图 8 可知, 不同流量下鱼雷尾部的速度流场相似, 即鱼雷尾部处的水流流速非常小, 流速在 10^{-2} m/s 数量级。滤网周围流速明显小于其他区域的流速, 且固体边

界对流速的影响也变得十分明显。

5.2 压强场分析

5.2.1 $Z = 0 \text{ m}$ 断面压强场分析

图 9 为 $Z = 0 \text{ m}$ 断面的压强云图。从图 9 可以看出不同工况时该断面的压强场分布规律大致相

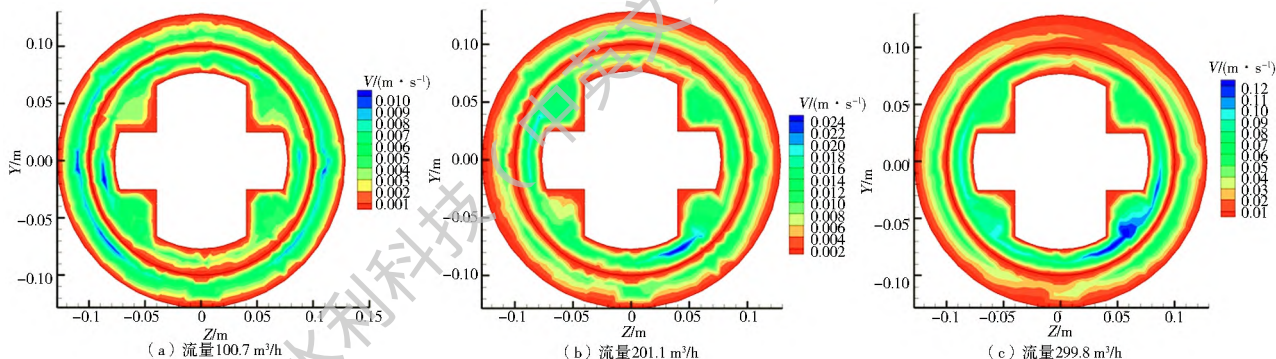


图 8 $X = 1.2 \text{ m}$ 断面速度场

Fig. 8 Velocity field of the $X = 1.2 \text{ m}$ section

同: (1) 过滤器内部的压强大小沿 X 轴分布不均匀; (2) 进水管处压强较大, 鱼雷头部中心部位压强是整个断面上压强最大的; 鱼雷头部对水流有阻挡, 该处承受很大的压强, 且由 5.1.1 节分析可知, 鱼雷头部中心处速度很小, 由能量守恒定律可知速度越小, 则压强越大。 (3) 鱼雷尾部压强相对出口较大, 且较均匀。 (4) 出水管压强较小, 其中产生漩涡的区域压强是整个断面上最小的。

不同工况下, $Z = 0 \text{ m}$ 断面压强云图的不同点主要体现在以下几个方面: (1) 鱼雷头部中心压强明显高于进水口压强, 且流量越大, 压强差也越大。 (2) 该断面上, 滤网的位置为 $Y = 0 \text{ m}$ (上滤网) 和 $Y = -0.1 \text{ m}$ (下滤网), 在 $X = 0.2 \sim 0.6 \text{ m}$ 处, 滤网内外侧有很大的压强差, 尤其是下滤网。当流量为

$100.7 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 压强差约为 $3 \sim 4 \text{ kPa}$; 当流量为 $201.1 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 压强差为约为 $6 \sim 10 \text{ kPa}$; 当流量为 $299.8 \text{ m}^3/\text{h}$, 压强差约为 $15 \sim 20 \text{ kPa}$ 。由此可见, 流量越大, 滤网承受的压强差越大。较大的压强差固然有利于提高过滤和冲洗效率, 但是也容易将大粒径的颗粒物冲出滤网, 进入管道系统, 从而堵塞灌水器, 还可能造成滤网变形, 降低滤网寿命。另外压差沿滤网分布不均匀, 在滤网前半段压强差大, 后半段压强差小, 容易造成污物快速在压差大的区域堆积, 而压差小的区域堆积的污物就少很多。大压差区域网孔被堵塞后, 水头损失陡增, 达到控制器的阈值时, 便开始冲洗, 频繁的冲洗将降低工作效率。由于出水口位置对压强影响很大, 故可通过改变出水口位置来优化过滤器的结构。

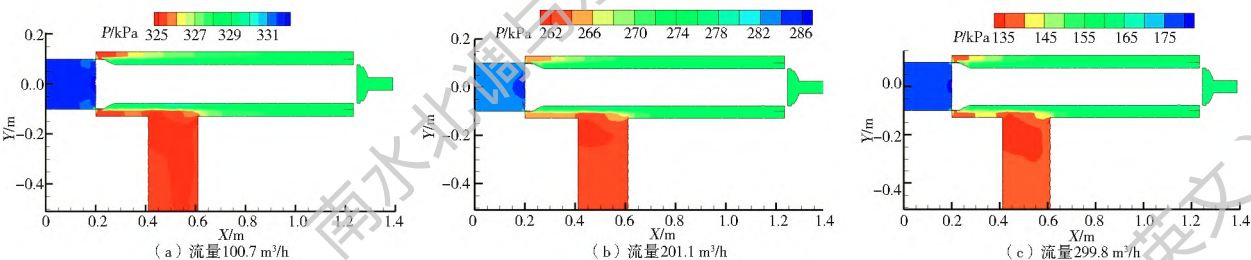


图 9 $Z = 0 \text{ m}$ 断面压强场

Fig. 9 Pressure field of the $Z = 0 \text{ m}$ section

5.2.2 $X = 0.2 \text{ m}$ 断面压强场分析

图 10 为 $X = 0.2 \text{ m}$ 断面鱼雷头部的压强云图。从图 10 可知, 不同流量下压强分布规律是相同的, 即压强都是从中心向外逐渐减小, 但该断面的最大压差则不一样, 当流量为 $100.7 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 最大压差为 4 kPa (如图 10(a) 所示), 而流量为 $201.1 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 最大压差为 14 kPa (如图 10(b) 所示), 流量为 $299.8 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 最大压差为 26 kPa (如图 10(c) 所示), 可知流量越大, 造成鱼雷尾部的压差也就越大。

5.2.3 $X = 0.41 \text{ m}$ 和 $X = 0.61 \text{ m}$ 断面压强场分析

图 11、图 12 分别为 $X = 0.41 \text{ m}$ 和 0.61 m 断面

的压强云图。图 11、图 12 中, 压强分布有几个特点: (1) 滤网内部压强大于滤网外部压强; (2) 断面上半部分压强明显大于下半部分压强; (3) 压强最小的位置在断面的最下面 ($Y = -0.1 \sim -0.128 \text{ m}$ 左右), 该处正好紧挨着出水管, 因此离出水管越近, 压强越小; (4) 通过对比不同流量同一断面上最大压强差发现, 流量越大压强差越大。流量为 $100.7 \text{ m}^3/\text{h}$ 时最大压强差为 4 kPa , 流量为 $201.1 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $299.8 \text{ m}^3/\text{h}$ 时最大压强差分别为 10 kPa 、 22 kPa ; (5) 对比同一流量, $X = 0.41 \text{ m}$ 断面和 $X = 0.61 \text{ m}$ 断面滤网内部压强, 当流量为 $100.7 \text{ m}^3/\text{h}$ 时 (即对比图 11(a)、图 12(a)), 滤网内部压强分布较均匀, 且断面

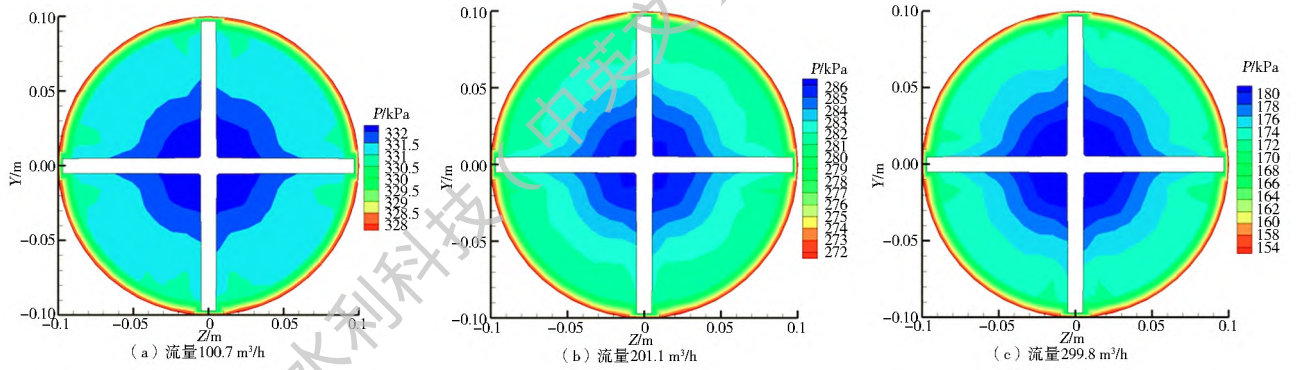


图 10 $X = 0.2\text{ m}$ 断面压强场

Fig. 10 Pressure field of the $X = 0.2\text{ m}$ section

$X = 0.41, 0.61\text{ m}$ 差别不大。当流量为 $201.1\text{ m}^3/\text{h}$ 时(即对比图 11(b)、图 12(b)), 断面 $X = 0.41\text{ m}$ 滤网内部压强分布较均匀, 而断面 $X = 0.61\text{ m}$ 滤网内部压强上小下大, 压强差约为 2 kPa 。当流量为 $299.8\text{ m}^3/\text{h}$ 时(即对比图 11c、图 12(c)), 断面 $X = 0.41\text{ m}$ 滤网内部压强上大下小, 而断面 $X = 0.61\text{ m}$ 滤网内压强上小下大, 压强差均为 2 kPa 。可见, 流量较小时, 滤网内部压强分布均匀; 随着流量增加, 断面 $X = 0.41\text{ m}$ 滤网内部压强仍然保持均匀分布, 断面 $X = 0.61\text{ m}$ 滤网内部压强开始发生变化: 下侧压强逐渐大过上侧压强; 流量进一步增大, 断面 $X =$

0.41 m 滤网内部压强也开始发生变化, 上侧压强逐渐大过下侧压强, 断面 $X = 0.61\text{ m}$ 滤网内部压强则继续保持上小下大的状态。当流量过大时, 滤网内压强有上大下小(如断面 $X = 0.41\text{ m}$) 也有上小下大(如断面 $X = 0.61\text{ m}$) 这对过滤器的稳定运行较为不利。

5.2.4 $X = 1.2\text{ m}$ 断面压强场分析

图 13 为 $X = 1.2\text{ m}$ 断面的压强云图。从图 13 可看出鱼雷尾部处滤网内侧的压强大于滤网外侧的压强, 进流量越大, 对应的滤网内外压强差越大, 但总体压强差很小, 仅为 1 kPa 左右。

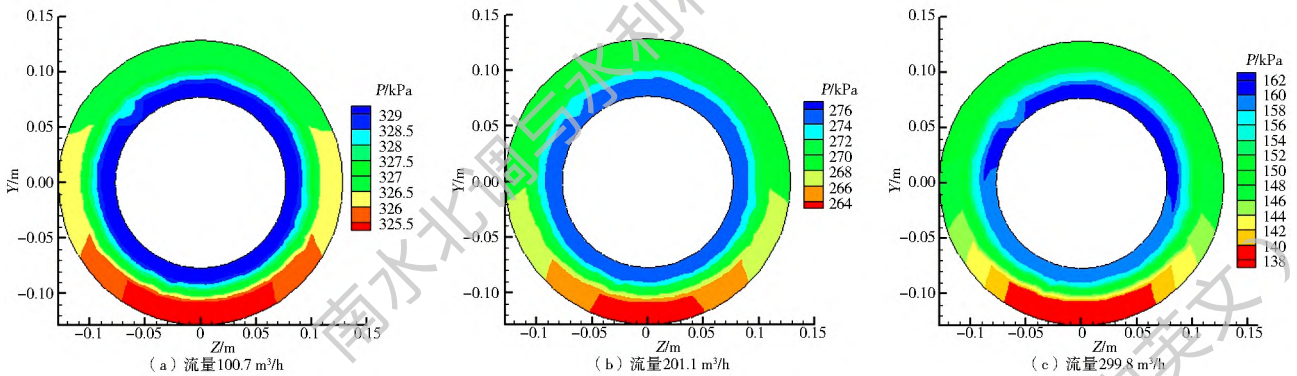


图 11 $X = 0.41\text{ m}$ 断面压强场

Fig. 11 Pressure field of the $X = 0.41\text{ m}$ section

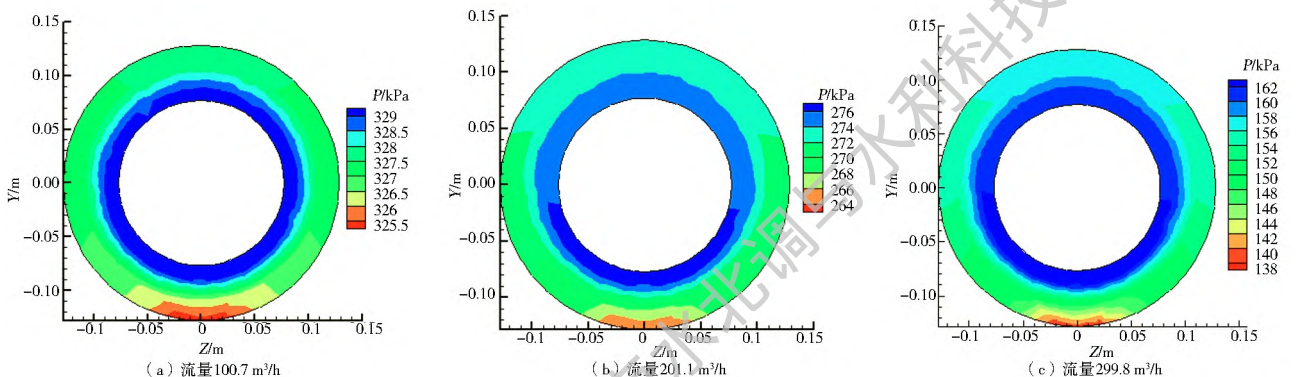
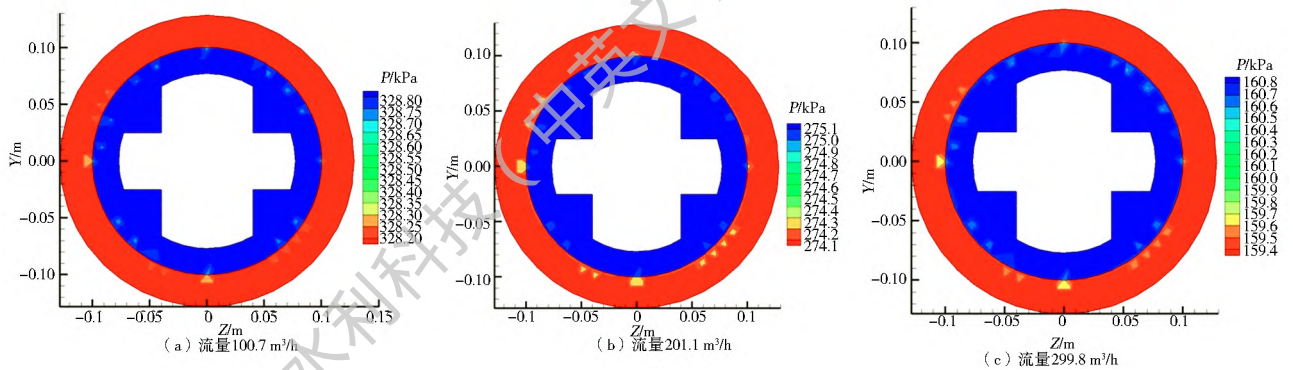


图 12 $X = 0.61\text{ m}$ 断面压强场

Fig. 12 Pressure field of the $X = 0.61\text{ m}$ section

图13 $X = 1.2\text{ m}$ 断面压强场Fig. 13 Pressure field of the $X = 1.2\text{ m}$ section

6 结论

(1) 不同进流量下过滤器的物理实验结果和数值模拟结果吻合程度较高,最大相对误差和平均相对误差分别为 8.58% 和 5.23%,这表明 Realizable $k-\varepsilon$ 模型和多孔介质阶跃模型能很好的模拟过滤器过滤状态的清水流场。

(2) 流量越大,清水的水头损失也就越大。

(3) 不同流量下,速度和压强分布规律大致相同,但流量越大,滤网内、外侧的流速差和压强差也就越大。

参考文献 (References):

- [1] 张娟娟,徐建新,黄修桥,等.国内微灌用叠片过滤器研究现状综述[J].节水灌溉,2015(3):59-61,65.(ZHANG Juanjuan, XU Jianxin, HUANG Xiurqiao, et al. Research status and development trend of disc filter in micro irrigation [J]. Water Saving Irrigation, 2015(3): 59-61, 65. (in Chinese))
- [2] 王柏林,刘焕芳,李强,等.大田微灌用新型组合式过滤器水力性能试验研究[J].中国农村水利水电,2015(8):31-34.(WANG Borlin, LIU Huanfang, LI Qiang, et al. Experimental research on the hydraulic performance of the new composite filter for drip irrigations in fields [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(8): 31-34. (in Chinese))
- [3] 杨胜敏,张海文.设施农业微灌过滤器的选型与应用研究[J].水利水电技术,2013,44(6):97-100.(YANG Shengmin, ZHANG Haiwen. Study on selection and application of filter for micro irrigation in facility agriculture [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(6): 97-100. (in Chinese))
- [4] 阿力甫江·阿不里米提,虎胆·吐马尔白,马合木江·艾合买提,等.直冲洗鱼雷网式过滤器内流场的数值模拟[J].节水灌溉,2014(10):6-10.(Alipujiang·Abulimiti, Hudan·Tumarbai, Mahemujiang·Aihemaiti, et al. Numerical simulation of flow field in torpedo filter [J]. Water Saving Irrigation, 2014(10): 6-10. (in Chinese))
- [5] 张尉林. FLUENT 软件与 IDEM 软件的耦合及其应用研究[D]. 吉林大学, 2013. (ZHANG Weilin. The research of the coupling FLUENT Software with IDEM software and its application [D]. Jilin University, 2013. (in Chinese))
- [6] 马坤,赖焕新.大曲率弯道中拟塑性流体的湍流数值计算研究[J].工程热物理学报,2016,37(5):993-998.(MA Kun, LAI Huanxin. Numerical study of turbulent flows of a pseudoplastic fluid in a strongly curved square duct [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(5): 993-998. (in Chinese))
- [7] 夏密,李映,李凤琴.固液两相流离心泵内颗粒运动规律的数值研究[J].机电工程,2015,32(12):1555-1558,1563.(XIA Mi, LI Yi, LI Fengqin. Numerical simulation of solid phase movement and distribution in the solid liquid two phase flow centrifugal pump [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(12): 1555-1558, 1563. (in Chinese))
- [8] 姚卓飞.高温陶瓷过滤器设计与数值模拟研究[D].华北电力大学,2015.(YAO Zhuofei. Design and Numerical Simulation Study on Dust Removal with Ceramic Filter at High Temperature [D]. North China Electric Power University, 2015. (in Chinese))
- [9] 李景海,翟国亮,黄修桥,等.微灌石英砂过滤器反冲洗数值模拟验证与流场分析[J].农业工程学报,2016,32(9):74-82.(LI Jinghai, ZHAI Guoliang, HUANG Xiurqiao, et al. Numerical simulation and flow field analysis of backwashing of quartz sand filter in micro irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(9): 74-82. (in Chinese))
- [10] 王忠义,任翱宇,王纪达,等.管道过滤器流场数值模拟与实验[J].华中科技大学学报:自然科学版,2015,43(1):75-79.(WANG Zhongyi, REN Aoyu, WANG Jida, et al. Numerical simulation and experimental of the pipe filter flow field [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2015, 43(1): 75-79. (in Chinese))
- [11] 王新坤,高世凯,夏立平,等.微灌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.(WANG Xinjun, GAO Shikai, Xia Liping, et al. Numerical simulation and structural optimization of screen filter in micro irrigation [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(8): 719-723. (in Chinese))
- [12] 李浩,韩启彪,黄修桥,等.基于多孔介质模型下微灌网式过滤器 CFD 湍流模型选择及流场分析[J].灌溉排水学报,2016,35(4):14-19.(LI Hao, HAN Qibiao, HUANG Xiurqiao, et al. Turbulence model selection and flow field analysis of the micro irrigation screen filter based on porous medium using CFD [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(4): 14-19. (in Chinese))

(下转第 197 页)

- [7] 王京元, 阎俊崎, 陈霞, 等. 土壤 pH 值对盆栽大豆幼苗的影响[J]. 江西农业学报, 2012, 24(2): 96-97. (WANG Jing yuan, YAN Jun qi, CHEN Xia, et al. Effect of soil pH value on seedling of potted soybean[J]. Acta Agriculture Jiangxi, 2012, 24(2): 96-97. (in Chinese))
- [8] 李道西, 彭世彰, 丁加丽, 等. TDR 在测量农田土壤水分中的室内标定[J]. 农业工程学报, 2005(增刊): 24-25. (LI Dao xi, PENG Shi-zhang, DING Jia li, et al. Laboratory calibration on measurement of field soil moisture using TDR[J]. Transactions of the CSAE, 2005(supp.): 24-25. (in Chinese))
- [9] 周凌云, 陈志雄, 李卫民. TDR 法测定土壤含水量的标定研究[J]. 土壤学报, 2003(1): 59-64. (ZHOU Ling-yun, CHEN Zhi-xiang, LI Wei-min. Calibration on measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR)[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003(1): 59-64. (in Chinese))
- [10] 吴月茹, 王维真, 晋锐, 等. TDR 测定土壤含水量的标定研究[J]. 冰川冻土, 2009(2): 262-267. (WU Yue ru, WANG Wei zhen, JIN Rui, et al. The Calibration of measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR)[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009(2): 262-267. (in Chinese))
- [11] 王贵艳, 史秀捧, 张建恒, 等. TDR 法、中子法、重量法测定土壤含水量的比较研究[J]. 河北农业大学学报, 2002(3): 23-27. (WANG Gui yan, SHI Xiu peng, ZHANG Jian heng, et al. A study on the comparison of measuring soil water content with TDR, neutron probe and oven dry[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2002(3): 23-27. (in Chinese))
- [12] 王相平, 杨劲松, 余世鹏, 等. 基于蒸发皿水面蒸发量优化冬小麦微咸水灌溉制度[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(4/5): 6-10. (WANG Xiang ping, YANG Jin song, YU Shi peng, et al. Optimizing brackish water irrigation program based on water surface evaporation of a 20cm standard pan[J]. Journal of irrigation and drainage, 2014, 33(4/5): 6-10. (in Chinese))
- [13] 邹君, 杨玉蓉. 农田水分研究的意义、进展及存在的问题[J]. 衡阳师范学院学报: 自然科学, 2002, 23(6): 101-104. (ZOU Jun, YANG Yu rong. A review of study on farmland moistures[J]. Journal of Hengyang Normal University: Natural Science, 2002, 23(6): 101-104. (in Chinese))
- [14] 郑重, 马富裕, 张凤荣, 等. 农田水分监测与决策支持系统的实现[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 155-161. (ZHENG Zhong, MA Fu yu, ZHANG Feng rong, et al. Application of decision support system for monitoring field water[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(7): 155-161. (in Chinese))
- [15] 龚元石, 李春友, 李子忠. 农田土壤水分测定三种方法的比较[J]. 中国农业大学学报, 1997, 2(3): 53-58. (GONG Yuan shi, LI Chun-you, LI Zi zhong. Comparison of three methods for measuring soil moisture in the field[J]. Journal of China Agricultural University, 1997, 2(3): 53-58. (in Chinese))
- [16] 王维真, 小林哲夫. 利用 TDR 对土壤含水量及土壤溶液电导率的同步连续测量[J]. 冰川冻土, 2008(3): 24-25. (WANG Wei zhen, Tetsuo Kobayashi. Continuous measurement of soil water content and soil solution electrical conductivity by using TDR[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008(3): 24-25. (in Chinese))
- [17] 王若水. 内陆干旱区重度盐碱地滴灌土壤水盐调控机制与农业利用方法研究[D]. 中国科学院研究生院, 2012. (WANG Ruoshui. A study on inland arid severe drip saline alkali soil water salt regulation mechanism and agricultural utilization method[D]. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese))
- [18] 张祯, 荀久玉, 孔锦. 土壤电导率的测定中影响因素研究[J]. 科技信息: 学术版, 2007(28): 276-277. (ZHANG Zhen, XUN Jiu-yu, KONG Jin. The influence factors of measurement of soil electrical conductivity in the study[J]. Science and Technology Information: Academic Version, 2007(28): 276-277. (in Chinese))

(上接第 184 页)

- [13] 宗全利, 郑铁刚, 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. (ZONG Quan li, ZHENG Tie gang, LIU Huan fang, et al. Numerical simulation and analysis on whole flow field for drip self-cleaning screen filter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(16): 57-65. (in Chinese))
- [14] 于旭永. 自清洗过滤器内部机构受力特性研究[D]. 石河子大学, 2014. (YU Xu yong. Study on the stress characteristics of the internal structure of self-cleaning screen filter[D]. Shihezi University, 2014. (in Chinese))
- [15] 骆秀萍. 自清洗网式过滤器运行特性及内部流场数值模拟研究[D]. 石河子大学, 2013. (LUO Xiu ping. Study on operating characteristics and internal flow field numerical simulation of self-cleaning screen filter[D]. Shihezi University, 2013. (in Chinese))
- [16] 李振鹏, 孙中宁, 廖永浩. 非达西流区微球床多孔介质阻力特性研究[J]. 应用科技, 2009, 36(04): 61-64. (LI Zhen peng, SUN Zhong ning, LIAO Yong hao. The research on the resistance characteristics of microsphere packed bed porous media in non-Darcy regime[J]. Applied Science and Technology, 2009, 36(04): 61-64. (in Chinese))
- [17] 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. (BAI Zhao liang, LI Lin. Study on impact of relative spacing of orifice plate in pressure pipe on local resistance coefficient and impact mechanism[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(1): 177-182. (in Chinese))