

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.05.002

基于 CFD 仿真模拟及 PIV 粒子示踪相结合法 超滤膜组件优化

朱 亮^{1,2},汪 跃^{1,2},陈 琳^{1,2},李玉坤^{1,2},张友思³,吴新明⁴,黄永福³,殷绪华^{1,2}

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室,江苏 南京 210098; 2. 河海大学环境学院,江苏 南京 210098;
3. 山东膜源水净化科技有限公司,山东 章丘 250200; 4. 江苏省路运水利工程管理处,江苏 宿迁 223800)

摘要: 采用在线监测与水力流体模拟相结合方式,利用数值模拟仿真技术、示踪技术及高速图像采集分析等手段,考察现有超滤膜组件内部的流场分布,并设计出新型超滤膜组件。结果表明,由于超滤膜组件内部流场主要受到布水管布水的影响,布水管上开孔均匀与否将直接影响整个超滤膜组件内部布水的均匀性。与组件 UFA-860C 相比,设计出的条形孔超滤膜组件因其布水管上有规则地均匀开孔且采用多根布水管组合,在运行时组件内部布水更加均匀,且能够充分利用膜丝的有效面积,从而有效减缓膜污染。

关键词: 超滤膜组件;CFD 软件;数值模拟;高速图像;示踪粒子;粒子图像测速试验;流场分布

中图分类号: X703.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2019)05-0402-09

Optimization of the ultrafiltration (UF) components based on combined method of CFD and PIV particle tracing method

ZHU Liang^{1,2}, WANG Yue^{1,2}, CHEN Lin^{1,2}, LI Yukun^{1,2},
ZHANG Yousi³, WU Xinming⁴, HUANG Yongfu³, YIN Xuhua^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development of Shallow Lakes, Hohai University, Nanjing 210098, China;*
2. *College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;*
3. *Shandong Membrane Source Water Purification Technology Co., Ltd., Zhangqiu 250200, China;*
4. *Jiangsu Luoyun Water Project Management Department, Suqian 223800, China)*

Abstract: Based on the combination of online monitoring and hydraulic fluid simulation, the distribution of flowing field inside the existing UF membrane component was investigated by means of numerical simulation, tracer technology and high-speed image acquisition and analysis, and new UF membrane components was designed. The results show that the internal flow field of UF membrane component is mainly affected by the cloth pipe, and the uniformity of opening of the water pipe directly affects the uniformity of water distribution inside the UF membrane component. Compared with the component of UFA-860C, the strip-hole UF membrane component has the ability to make better use of the effective area of UF membrane wire at the operating time, thus effectively reducing the membrane pollution.

Key words: UF membrane components; CFD software; numerical simulation; high-speed image; tracer particles; particle image velocimetry; flow distribution

作者简介: 朱亮(1963—),男,教授,博士,主要从事水污染控制理论与技术研究。E-mail:zhulianghhu@163.com

通信作者: 陈琳,副教授。E-mail: chen_lin@hhu.edu.cn

引用本文: 朱亮,汪跃,陈琳,等. 基于 CFD 仿真模拟及 PIV 粒子示踪相结合法超滤膜组件优化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):402-410.

ZHU Liang, WANG Yue, CHEN Lin, et al. Optimization of the Ultrafiltration (UF) Components Based on combined method of CFD and PIV Particle Tracing Method[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2019,47(5):402-410.

超滤膜分离技术成为一种分离过程的标准,在水处理工程中已经得到广泛的应用^[1-2]。但膜的污染问题已成为膜运行中不可忽视的问题,直接影响到产水的成本以及设备稳定控制等。水源有机污染的加重使得膜污染控制问题更加突出^[3-4]。在超滤膜广泛应用过程中,膜污染问题始终是膜技术中的主要问题。目前关于超滤膜组件的研究主要在组件的抗污染性能方面,对膜污染的控制集中在运行工况^[5-6]、膜的清洗^[7-9]以及进水的预处理上^[10-11],而关于膜组件的配水系统对膜组件的污染研究较少。目前,国内外的许多超滤膜产品膜丝长度为 1.5~2 m,膜丝较长会使管程产水的水力阻力沿着轴向驱动压力发生变化,进而导致膜组件内部承受压力不均、污染不平衡,加速了膜污染进程^[12]。在对超滤膜组件的优化分析中,严丹燕等^[13]运用 Fluent 软件模拟了超滤膜组件的内部流态,分析出组件较优的产水位置,从而优化超滤膜组件结构,其方法为超滤膜组件优化提供了一种新技术。另外,示踪技术是一种高效的流体力学测速方法,但是在对超滤膜组件优化研究中,利用示踪粒子对组件内部流场分析相关的研究基本没有。

目前市场上应用较广泛的中空纤维超滤膜组件是山东膜源水净化科技有限公司 8 寸外压式膜组件 UFA-860C(以下简称组件 A),本文通过对组件 A 内部配水结构分析,分析膜组件在实际运行中存在的问题,对膜组件结构进行优化,增大布水管内部配水的均匀性,从而设计出新型超滤膜组件。利用数值模拟仿真技术、示踪技术及高速图像采集分析手段对设计的组件进行流场分析,从而说明新型超滤膜组件的合理性及实用性。

1 材料与方法

1.1 数值模拟试验

Fluent 软件是计算流体动力学(CFD)计算软件之一,多应用于二维及三维流动分析,且能够在参考系下完成流场的模拟^[14]。所以,Fluent 软件是模拟超滤膜组件流场的一种有效分析工具^[13]。CFD 流体模拟试验主要用到 Gambit、Fluent 和 Tecplot 软件。通过 Gambit 建模,Fluent 计算,Tecplot 软件分析流场,从而得到超滤膜组件内部各个位置以及各个方向上的流场图。

中空纤维超滤膜组件膜丝孔径小导致数值模拟模型过大,无法模拟出中空纤维膜丝的结构,因此将模型简化,将膜丝去除,构建不含膜丝的超滤膜组件模型。模型按照实际尺寸构建,超滤膜网格为:Elements (Tet/Hybrid),Type(TGrid),网格大小为 0.3,入口设为速度入口,出口设为压力出口,并将模型保存为 mesh 文件。将超滤膜组件模型 mesh 文件导入 Fluent 软件,运用 Fluent 中连续性方程及动量传递方程组对组件流场进行求解。依照实际运行情况,设置进水流量为 4 m³/h,确定入口边界条件、出口边界条件,模拟采用二阶上风格式离散方程,SIMPLE 算法求解流场,收敛判断条件为迭代残差小于 10⁻⁶。最后,保存运行结果并导入 Tecplot 软件进行数据分析。

1.2 分析及构建模型

1.2.1 存在问题

如图 1 所示,组件 A 的结构包括承压外壳、两端端盖和超滤膜芯体,超滤膜芯体装配在承压外壳内;超滤膜芯体包括超滤膜丝、中心布水管和排水管;膜壳的长度为 140 cm,外直径为 23 cm;布水管和排水管的长度为 50 cm、直径为 50 mm,且都在管壁上开了 180 个左右直径为 0.65 cm 的圆形孔(开孔无规则)。组件 A 内部充满膜丝(9 600 根),将布水管包围在中间。



图 1 组件 A 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the component A

对组件 A 进行 CFD 仿真模拟,如图 2 所示(其中纵坐标为速度大小,以颜色区分;横坐标是各个方向上的速度大小,x 和 y 轴方向速度为组件横截面速度(相互垂直),z 轴方向速度为沿着水流整体方向速度)。

可以看出组件 A 在 x 轴方向的速度整体较小,平均速度约为 0.015 m/s,x 轴方向上水流速度从第一排布水孔到最后一排布水孔显著增长,而且膜管局部区域(圆圈标记区域)水流速度达到 0.037 m/s,可以看出组件 A 布水孔区域在 x 轴方向上并不均匀;另外,从第一排布水孔到排水管末端 6 个截面的速度大小分别为 0.011 m/s、0.022 m/s、0.056 m/s、0.0097 m/s、0.0094 m/s 以及 0.01 m/s,且布水管的长度为 50 cm,此情况同样说明组件 A 在 x 轴的整体区域上布水并不均匀。因组件 A 水流分布在 x 轴和 y 轴方向上是对称结构,所以在 y 轴方向上的速度与 x 轴方向上基本一致。组件 A 在 z 轴方向的速度整体上达到 0.070 2 m/s,且布水

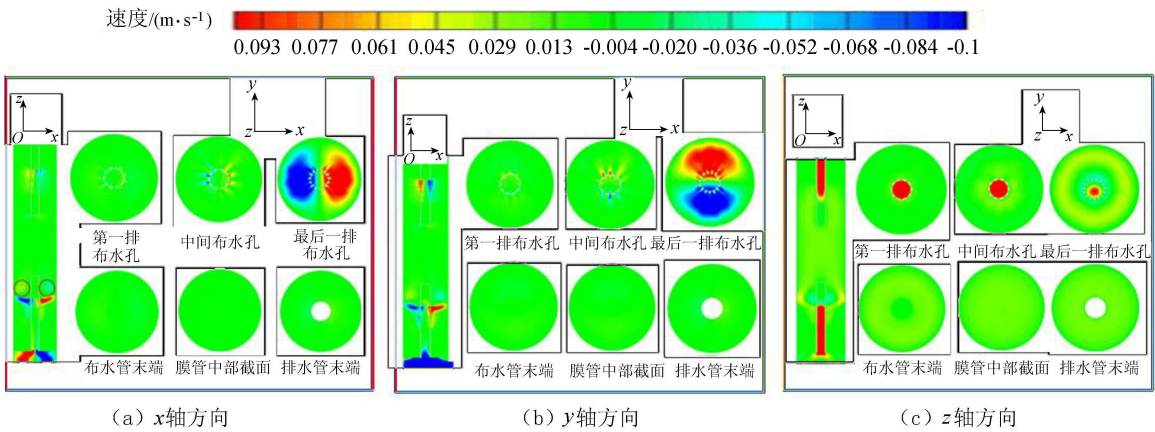


图 2 组件 A 各方向上的水流速度大小

Fig. 2 Speed in each direction of the component A

管上各排孔之间速度增长明显,膜管内部流速相对稳定的区域较小,说明组件 A 布水孔区域在 z 轴方向上并不均匀;另外,从第一排布水孔到排水管末端 6 个截面的速度大小分别为 0.057 m/s、0.079 m/s、0.124 m/s、0.007 1 m/s、0.070 8 m/s 以及 0.069 m/s,说明组建内部布水并不均匀。

原因分析:组件 A 在运行过程中,由于内部只有一根长为 50 cm、直径为 5 cm 的中心布水管,膜管内部有着 9 600 根膜丝,从而导致灌胶在内部的膜丝没有充分产水;组件 A 内部的中心布水管只有 15 cm 的区域开孔,且开孔不均匀,水流速度在膜管内部难以均匀,对不同部位膜丝污染程度不一,加速污染。

1. 2. 2 构建模型

针对组件 A 存在的问题,设计新型超滤膜组件可在布水管上均匀开孔且在布水管堵头位置进行开孔从而分压。另外,为保证内部膜丝充分产水,设计的新型超滤膜组件采用多管布水方式,但为了不影响组件内部膜丝的填充量,多根布水管所占空间与组件 A 的中心布水管大致相当。

设计出 2 套新的超滤膜组件,即条形孔超滤膜组件以及圆形孔超滤膜组件(简称组件 B 和组件 C),如图 3 所示。其中,组件 B 由膜壳、2 个端盖、6 根布水管、1 根排水管和膜丝组成(可填充 9 000 根膜丝)。它的布水管由 1 根直径 32 mm 的中心布水管及 5 根环绕中心布水管的直径 20 mm 的布水管组成,长度均为 20 cm,中心布水管管壁上均匀开条形孔(每排 3 个孔,4 排孔,孔径 15 mm×5 mm),其堵头位置开 9 个圆形孔(孔径 5 mm);5 根直径 20 mm 的布水管同样均匀开孔(每排 3 个孔,4 排孔,孔径 10 mm×5 mm),堵头位置开 5 个圆形孔(孔径 5 mm)。组件 C 大致构造与组件 B 相同,只是布水管长度均为 35 cm,且中心布水管上均匀开圆形孔(每排 10 个孔,10 排孔,孔径 5 mm),5 根直径 20 mm 的布水管同样均匀开圆形孔(每排 3 个孔,10 排孔,孔径 5 mm)。

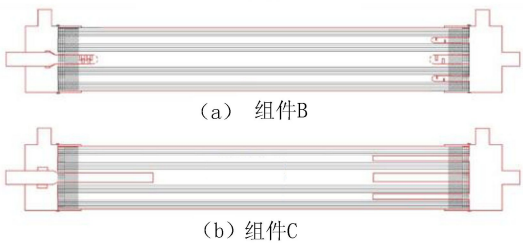


图 3 组件 B 及组件 C 结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the component B and the component C

1. 3 PIV 示踪粒子试验

1. 3. 1 试验平台的搭建

粒子图像测速(PIV)试验需用到激光光源、高速摄像机等,为完成 PIV 示踪试验还需要 1 台高配计算机,同时需要搭建 1 套 PIV 测试平台和 1 套超滤膜组件运行装置,在装置搭建过程中,主要用到铝合金型材、UPVC 管、压力传感器、电磁阀、手动阀、水泵、空压机等。

1. 3. 2 试验方法

PIV 是一种瞬态、多点、无接触式的流体力学测速方法,它能在拍摄的瞬态记录下大量空间点上的速度分布信息^[15]。本试验对组件 B 和 C 进行 PIV 示踪粒子拍摄,通过流场分析,与 CFD 仿真模拟结果比较从而确定组件 B 和 C 的布水均匀性。为确定组件的实用性,委托山东膜源水净化科技有限公司组装 6 种不同膜丝填充量的超滤膜组件(组件 B 和组件 C 的型号与组件 A 相同),对组件 B 和 C 确定 3 种状态下的膜丝填充量进

而进行 PIV 粒子示踪试验:无膜丝填充的组件、填充 3 000 根膜丝的组件以及填充 6 000 根膜丝的组件(当膜丝填充量大于 6 000 根时,激光透过的空间很小,会影响高速摄像机的拍摄效果)。根据组件 A 实际运行工况,组件 B 和 C 进水初始条件与组件 A 相同,控制进水流量为 $4\text{ m}^3/\text{h}$,进水侧压力为 0.1 MPa ,初始跨膜压差为 0.032 MPa 。另外,如图 4 所示,选取 6 个拍摄点(以组件 C 为例),每个拍摄点间距 20 cm 。

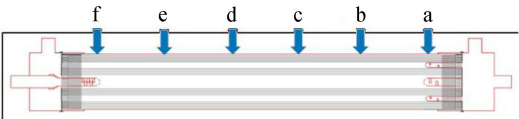


图 4 拍摄位置
Fig. 4 Profile of the shooting position

2 结果与讨论

2.1 CFD 流体模拟试验结果分析

当 Fluent 软件计算结束后,将文件导入 Tecplot 软件进行后处理分析,可以得到各个方向上的流场图,颜色表示速度的大小和方向,可通过 Tecplot 软件计算出各个截面的平均速度。

2.1.1 组件 B

组件 B 经过后处理分析可得到整个组件 B 超滤膜组件 xyz 各轴方向水流的流场图,如图 5 所示:因组件 B 在 x 轴和 y 轴方向结构对称,所以其 x 轴和 y 轴方向水流速度大小基本一致,组件 B 整体区域在 x 轴和 y 轴方向上速度较小(0.013 m/s),而且由于布水管较短,其整体布水均匀区域大于组件 A;另外组件 B 在 x 轴和 y 轴方向布水管上的速度整体较大但其增长趋势较组件 A 相对缓慢,而且从第一排布水孔到排水管路末端 6 个截面的速度大小分别为 0.021 m/s 、 0.036 m/s 、 0.042 m/s 、 0.027 m/s 、 0.018 m/s 以及 0.18 m/s ,此情况下组件 B 在 x 轴和 y 轴上布水均匀的区域较大。组件 B 整体区域在 z 轴方向上速度较小(0.025 m/s),而且由于布水管较短其整体布水均匀区域较组件 A 大;另外组件 B 在 z 轴方向从第一排布水孔到排水管路末端 6 个截面的速度分别为 0.019 m/s 、 0.022 m/s 、 0.027 m/s 、 0.034 m/s 、 0.018 m/s 以及 0.21 m/s ,流速相对均匀,说明组件 B 在 z 轴上布水均匀的区域较大。

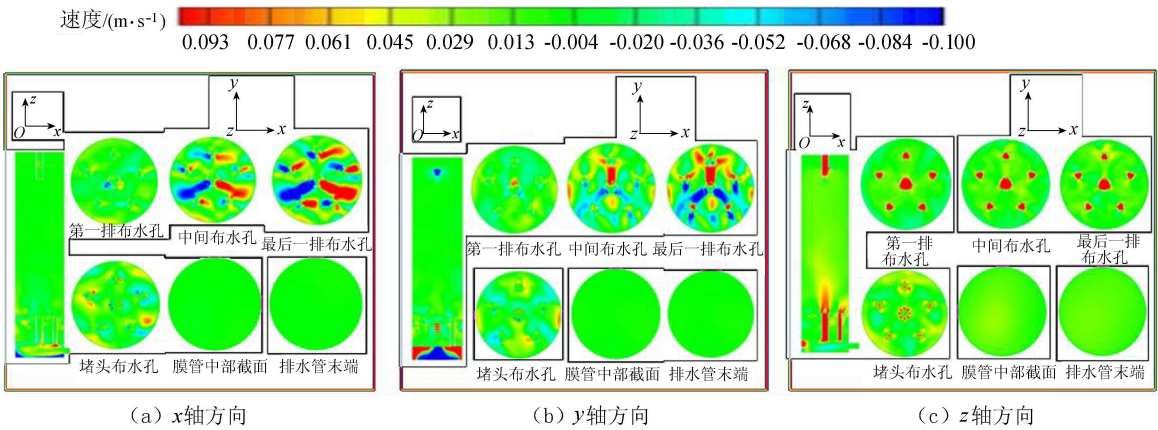


图 5 组件 B 各方向上的水流速度
Fig. 5 Speed in each direction of the component B

2.1.2 组件 C

如图 6 所示:因组件 C 在 x 轴和 y 轴方向结构对称,所以其在 x 轴和 y 轴方向水流速度基本一致;组件 C 整体区域在 x 轴和 y 轴方向上速度较小,平均为 0.028 m/s ,而且其整体布水均匀区域较组件 A 较大。另外,从第一排布水孔到排水管路末端 6 个截面的速度大小分别为 0.031 m/s 、 0.042 m/s 、 0.053 m/s 、 0.027 m/s 、 0.022 以及 0.19 m/s ,此情况组件 C 在 x 轴和 y 轴上布水均匀的区域较大。组件 C 整体区域在 z 轴方向上速度较小(0.043 m/s),由于布水管较短,其整体布水均匀区域较组件 A 大;另外组件 C 在 z 轴方向布水管上速度变化基本不变,而且从第一排布水孔到排水管路末端 6 个截面的速度分别为 0.069 m/s 、 0.076 m/s 、 0.069 m/s 、 0.055 m/s 、 0.039 m/s 以及 0.38 m/s ,说明组件 C 在 z 轴上布水均匀的区域较大。

根据 CFD 仿真模拟研究结果,可知组件 B 和组件 C 布水均匀性优于组件 A,组件 A 中靠近进水端的水流远小于布水管末端,这可能导致组件 A 靠近进水端膜丝不能得到充分使用且容易受到污染。而组件 B 采用短管组合的形式布水,将组件 A 的中心布水形式改为分散式布水,在靠近进水端的位置减少了布水死区且布水管

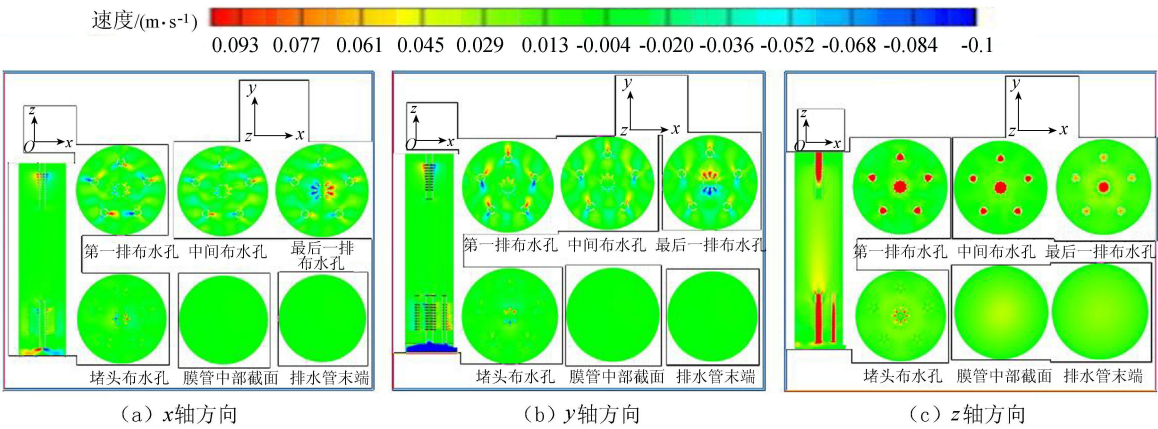


图 6 组件 C 各方向上的水流速度大小

Fig. 6 Speed in each direction of the component C

水流速度相对于组件 A 增长趋势平稳,增加布水的均匀性。组件 C 同样采用多管组合的布水结构,布水管中每排孔水流速度差异不大,整个膜组件中布水死区较小,管壁开圆形孔均匀且有规则,从而布水均匀。

2.2 PIV 示踪粒子试验结果分析

图 7~12 是组件 B 和 C 在填充不同量膜丝状态下流场的灰度值,其上颜色表示速度大小,纵坐标为速度大小,横坐标是拍摄的距离(均为 20 cm),通过计算可得出其在运行时 x 轴和 y 轴方向上的平均速度值。其中,横向是 x 轴方向,纵向是 y 轴方向。另外,组件 B 和 C 在填充 6000 根膜丝时由于膜丝量大,在运行时膜丝的抖动致使只能拍摄到点 a、点 b、点 e 和点 f 区域。

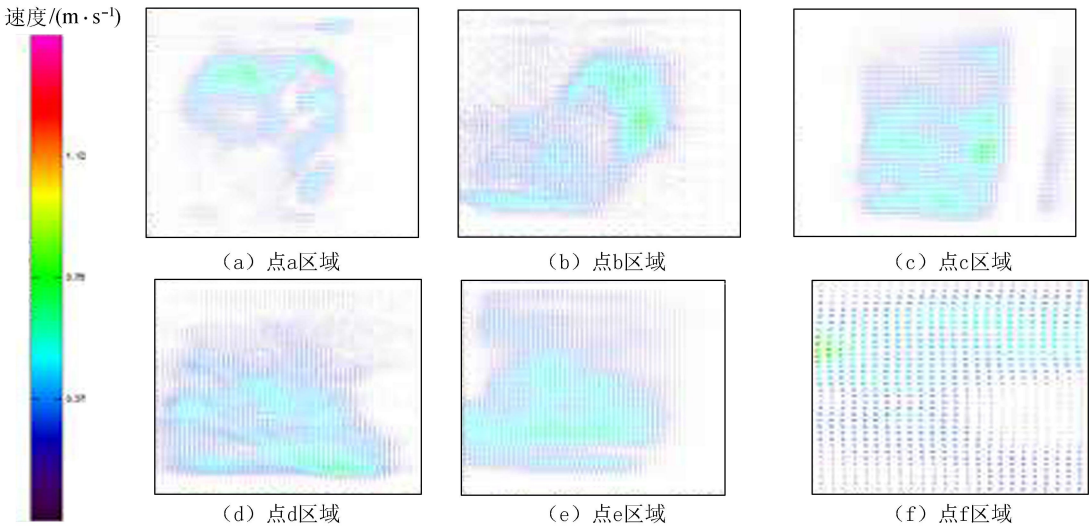


图 7 组件 B 无膜丝填充状态下各区域流场

Fig. 7 Flow field of the component B without film wire

2.2.1 组件 B

如图 7,组件 B 在无膜丝填充状态下运行时,整体水流方向为 x 轴负方向,即水流基本是从布水管一侧沿着浓水出口一侧流动。在 y 轴方向上速度波动的区域基本是在布水孔周围,这是因为布水管开孔位置是沿着 y 轴上下布水的;另外,点 a 至点 f 区域沿着 x 轴负方向的平均水流速度分别为 0.009 7 m/s、0.016 8 m/s、0.018 7 m/s、0.018 6 m/s、0.019 2 m/s 以及 0.008 6 m/s。与 CFD 模拟结果对比可知,组件 B 在 PIV 示踪粒子试验中的水流速度略小于数值模拟中的水流速度,这是因为装置在实际运行中会有损失。组件 B 整体布水均匀的区域较大,且与数值模拟的结果相符。

如图 8,组件 B 在填充 3000 根膜丝状态下运行时,水流方向与空管状态下类似,点 a 至点 f 区域平均水流速度分别为 0.020 9 m/s、0.022 9 m/s、0.020 5 m/s、0.020 5 m/s、0.019 5 m/s 以及 0.014 3 m/s,可以看出在此情况下整个组件内部布水相对均匀,说明少量膜丝填充情况下对组件 B 的布水均匀性没有产生显著影响。

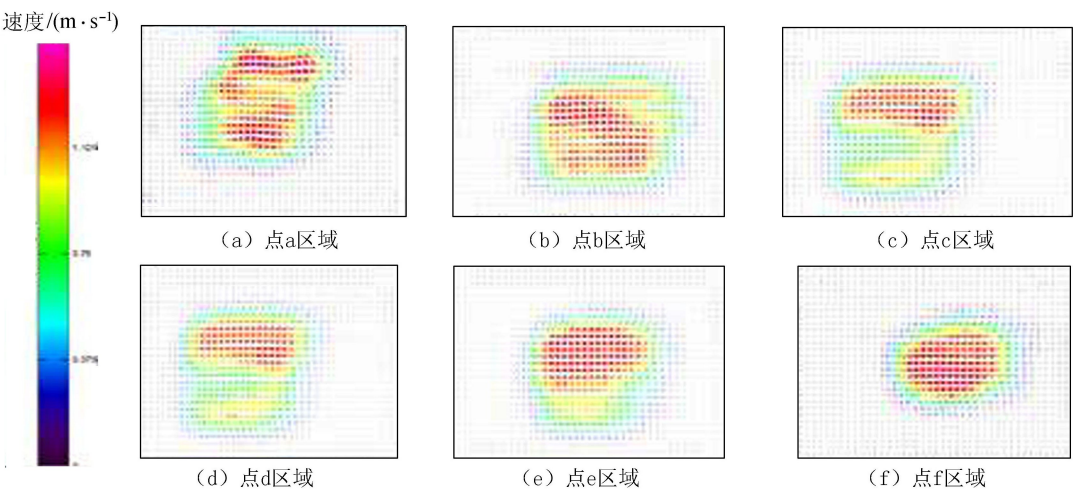


图 8 组件 B 填充 3000 根膜丝各区域流场

Fig. 8 Flow field of the component B with 3000 film wires

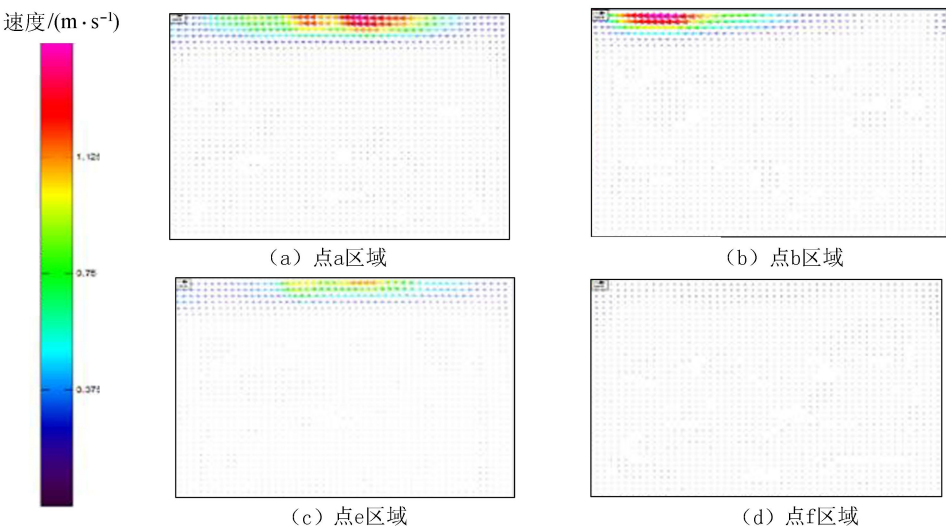


图 9 组件 B 填充 6000 根膜丝状态下各区域流场

Fig. 9 Flow field of the component B with 6000 film wires

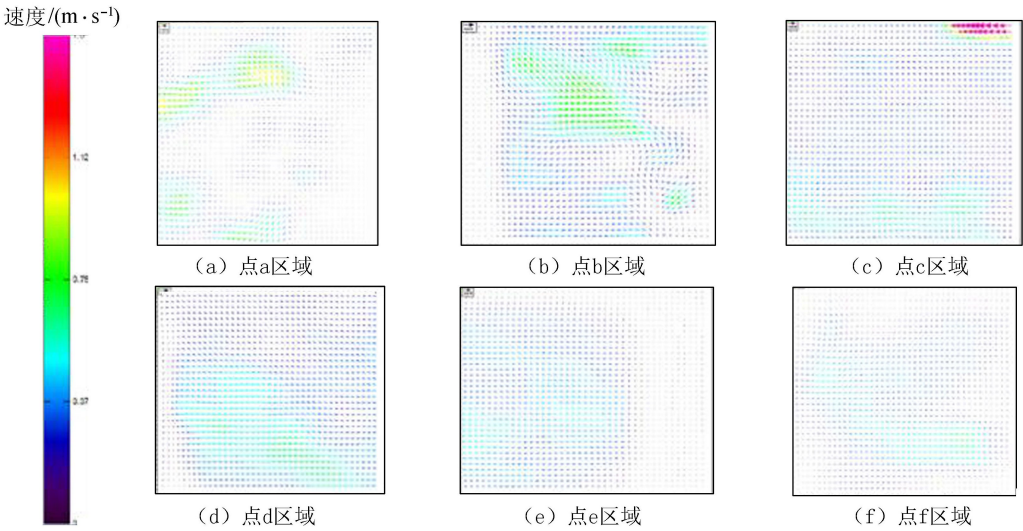


图 10 组件 C 无膜丝填充状态下各区域流场

Fig. 10 Flow field of the component C without film wire

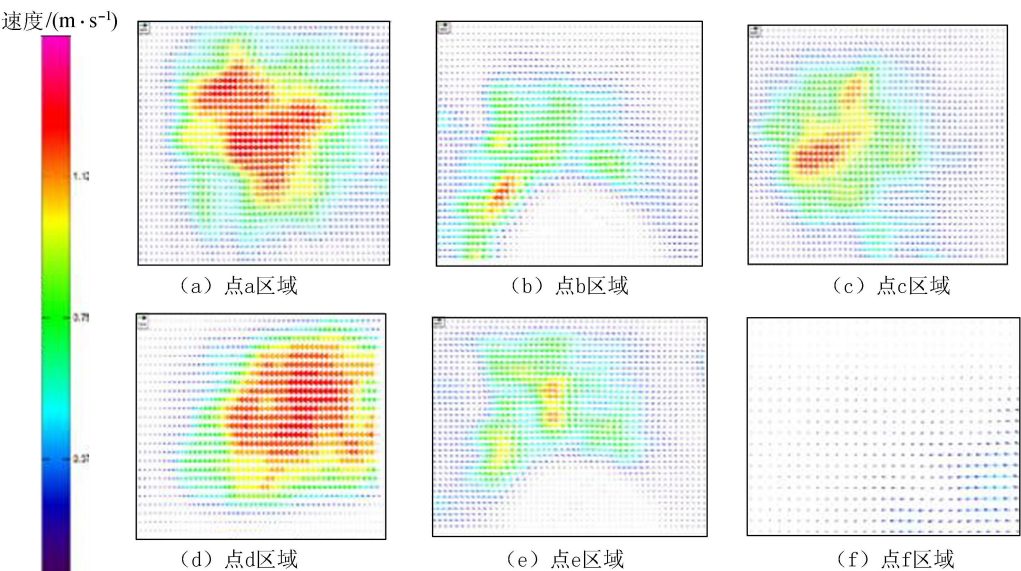


图 11 组件 C 填充 3000 根膜状态下各区域流场

Fig. 11 Flow field of the component C with 3000 film wires

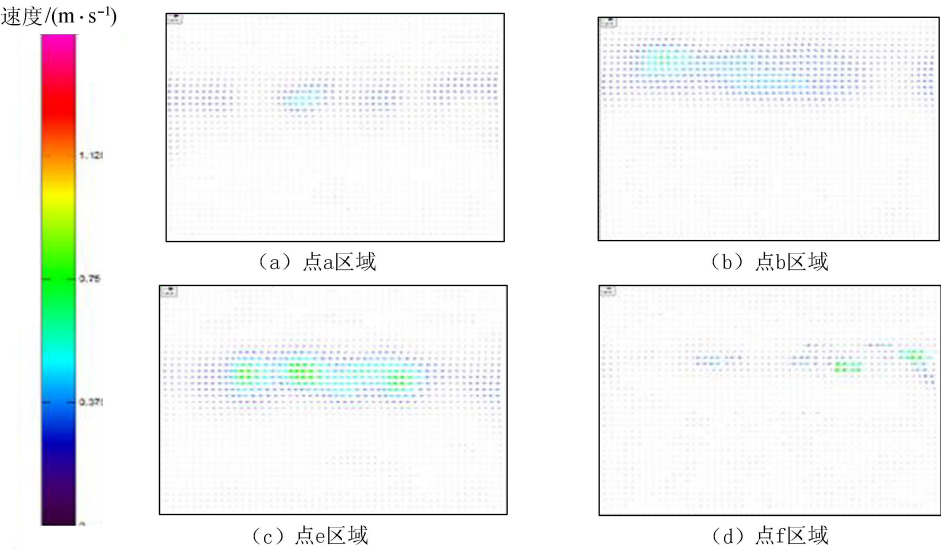


图 12 组件 C 填充 6000 根膜状态下各区域流场

Fig. 12 Flow field of the component C with 6000 film wires

如图 9,组件 B 在填充 6000 根膜丝状态下运行时,点 a、b、e 和 f 区域平均水流速度分别为:0.0067 m/s、0.0039 m/s、0.0039 m/s 以及 0.006 m/s,可以看出在此情况下整个组件内部水流速度较小,这是因为大量膜丝的存在影响了水流的流动。点 b 和点 e 区域水流 x 轴方向上差异不大,且由上述研究可知点 a 至点 e 区域水流速度基本一致,说明在大量膜丝的填充情况下对组件 B 的布水均匀性仍然没有产生明显影响。

2.2.2 组件 C

如图 10,组件 C 在空管状态下运行时与组件 B 无膜丝运行的情况类似,组件 C 整体水流方向同样为 x 轴负方向,在 y 轴方向上速度波动较大的区域基本是在布水孔周围,说明组件 C 布水管上布水较为均匀;另外,点 a 至点 f 区域沿着 x 轴负方向的平均水流速度分别为 0.0283 m/s、0.0328 m/s、0.038 m/s、0.039 m/s、0.0317 m/s 以及 0.028 m/s,同样由于水头损失的原因组件 C 整体的水流速度小于数值模拟的水流速度,但其整体规律类似,而且组件 C 整体布水均匀的区域相较于组件 B 的区域要大,这与数值模拟的结果相一致。

如图 11,组件 C 在填充 3000 根膜丝状态下运行时,水流方向与空管状态下类似,点 a 至点 f 区域平均水流速度分别为:0.049 m/s、0.034 m/s、0.0348 m/s、0.035 m/s、0.0274 m/s 以及 0.006 m/s,可以看出组件 B 在此情况下点 a 和点 f 区域与其他区域差异很大,这可能是因为点 a 和点 f 区域正对着布水孔,填充膜丝后影

响了其布水的速率。尽管如此,整个组件内部布水相对均匀。

如图 12,组件 C 在填充 6000 根膜丝状态下运行时,水流方向与空管状态下相似,另外点 a、b、e 和 f 区域沿着 x 轴负方向的平均水流速度分别为:0.004 m/s、0.0061 m/s、0.0069 m/s 以及 0.0019 m/s,可以看出在此情况下整个组件内部水流速度较小。同样地,点 b 和点 e 区域水流在 x 轴方向上速度一致,说明在大量膜丝填充的情况下对组件 C 的布水均匀性仍然没有产生明显影响。

2.2.3 分析

由于在实际运行中水头损失的原因,在无膜丝填充状态下,组件 B 和组件 C 中的局部区域水流速度比数值模拟中的小,且组件内部沿着管道方向的水流速度变化趋势不明显,整体与数值模拟相符,这表明组件 B 和组件 C 布水均匀。当填充膜丝之后,组件 B 和 C 内因为采用多根布水管组合后,组件内部分散式布水且布水管较短,膜丝有效进水面积增大,布水的均匀性显著提高,因此可以认为组件 B 和组件 C 布水相对均匀,且组件 B 布水均匀性优于组件 C,有投入实际生产的价值。

3 结 论

a. CFD 仿真模拟结果表明组件 A 的中心布水管上每排孔的水流速度差异较大,内部布水均匀区域较小;组件 B 布水孔周围布水较均匀,而且组件内部布水均匀的区域基本占据整个膜组件;组件 C 每排孔水流速度差异不大,但是其布水管开孔区域较大导致整体水流速度波动较大。所以组件布水均匀性优劣排列顺序为:组件 B>组件 C>组件 A。

b. 无膜丝填充时,组件 B 和组件 C 内部流场的 PIV 示踪粒子试验结果与数值模拟的结果整体规律相似,说明在不填充膜丝状态下实际运行时组件 B 相较于组件 C 具有更好的布水均匀性。

c. 在填充少量以及大量膜丝的情况下,组件 B 与 C 内部水流速度相对于空管运行状态下有所不同,但组件内部布水仍然较均匀,说明设计的条形孔超滤膜组件在有无膜丝情况下都是布水均匀的,即组件 B 和 C 优于组件 A,有投入实际生产的价值。

参考文献:

[1] 巨姗姗. 超滤膜发展现状概述及国内外工程应用分析[J]. 净水技术,2015,34(4): 1-5. (JU Shanshan. Development situation and engineering application of ultrafiltration membrane at home and abroad[J]. Water Purification Technology, 2015, 34(4): 1-5. (in Chinese))

[2] 龚玲,钟成华,邓春光. 膜分离技术的现状及发展[J]. 中国科技信息,2005, 2(23): 30. (GONG Ling,ZHONG Chenghua, DENG Chunguang. Status and development of membrane separation technology[J]. China Science and Technology Information, 2005, 2(23): 30. (in Chinese))

[3] TIAN J Y, ERNST M, CUI F, et al. Correlations of relevant membrane foulants with UF membrane fouling in different waters [J]. Water Research, 2013, 47(3): 1218-1228.

[4] 邱运仁,张启修. 超滤过程膜污染控制技术研究进展[J]. 现代化工,2002, 22(2): 18-21. (QIU Yunren,ZHANG Qixiu. Research progress in membrane fouling control in ultrafiltration[J]. Modern Chemical Industry, 2002, 22(2): 18-21. (in Chinese))

[5] 齐鲁,王洪臣,郑祥,等. 超滤膜在饮用水处理中临界通量的影响因素研究[J]. 工业用水与废水,2011, 42(6): 10-14. (QI Lu, WANG Hongchen, ZHENG Xiang, et al. Factors affecting critical flux of ultrafiltration membrane in drinkingwater treatment[J]. Industrial Water & Wstewater, 2011, 42(6): 10-14. (in Chinese))

[6] 李圭白,田家宇,齐鲁. 第三代城市饮用水净化工艺及超滤的零污染通量[J]. 给水排水,2010, 36(8): 11-15. (LI Guibai, TIAN Jiayu, QI Lu. The third generation of urban drinking water treatment process and zero-membrane fouling flux of ultrafiltration[J]. Water Supply and Sewerage, 2010, 36(8): 11-15. (in Chinese))

[7] 雷晓玲. 给水超滤膜系统中曝气对膜通量的影响及其机理研究[J]. 给水排水,2009, 35(11): 129-135. (LEI Xiaoling. Study on mechanisms and impacts of aeration on the membrane flux in drinking water ultrafiltration membrane treatment[J]. Water Supply and Sewerage, 2009, 35(11): 129-135. (in Chinese))

[8] 康华,何文杰,王胜江,等. PVDF 膜污染及清洗试验研究[J]. 给水排水,2008, 34(4): 12-16. (KANG Hua, HE Wenjie, WANG Shengjiang, et al. Experimental study on fouling and cleaning of PVDF membrane[J]. Water Supply and Sewerage, 2008, 34(4): 12-16. (in Chinese))

[9] 肖建平. UF膜组件的有机污染及清洗[J]. 重庆建筑大学学报,2005, 27(4): 74-76. (XIAO Jianping. Organic fouling and cleaning of UF membrane[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2005, 27(4): 74-76. (in Chinese))

[10] 张强,刘燕,魏源源,等. 饮用水消毒预处理工艺研究进展[J]. 化学通报,2010, 73(11): 980-985. (ZHANG Qiang, LIU Yan, WEI Yuanyuan, et al. Research progress on pretreatment technology for drinking water disinfection[J]. Chemical Bulletin (Printed Edition), 2010, 73(11): 980-985. (in Chinese))

[11] 秦洪春,郭金涛,李伟英,等. 预处理工艺控制膜污染的研究进展[J]. 水处理技术,2011, 37(3): 1-4, 10. (QIN Hongchun, GUO Jintao, LI Weiyang, et al. Research progress on pretreatment of the effects on membrane fouling[J]. Water Treatment Technology, 2011, 37(3): 1-4, 10. (in Chinese))

[12] YOON S H, LEE S, YEOM I T. Experimental verification of pressure drop models in hollow fiber membrane[J]. Journal of Membrane Science,2008,310(1):7-12.

[13] 严丹燕,辛永光,黎华恒. 内压式中空超滤膜组件的流场分布分析[J]. 广东化工,2012,39(4): 190-191. (YAN Danyan, XIN Yongguang, LI Huaheng. Analysis for flow field distribution in inside-flow hollow UF membrane module[J]. Guangdong Chemical Industry, 2012,39 (4): 190-191. (in Chinese))

[14] 张凯,王瑞金,王刚. Fluent技术基础与应用实例[M]. 北京:清华大学出版社,2010: 1-4.

[15] 阮驰,孙传东,白永林,等. 水流场PIV测试系统示踪粒子特性研究[J]. 实验流体力学,2006, 20(2): 72-77. (RUAN Chi, SUN Chuandong, BAI Yongling, et al. The characteristics of the tracer particles used in water flow field for PIV system[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2006, 20(2): 72-77. (in Chinese))

(收稿日期:2019-01-18 编辑:高建群)

《河海大学学报(自然科学版)》征订启事

(邮发代号 28-63, CN32-1117/TV, ISSN1000-1980, 双月刊)

《河海大学学报(自然科学版)》是以水资源开发、利用与保护为重点的综合性学术期刊,主要刊登水资源、水文、地质、测量、水利工程、水电工程、水运工程、海洋及海岸工程、水工结构、工程力学、水力学及河流动力学、岩土工程、电力工程、电子技术及自动化工程、工业与民用建筑、环境工程等学科的学术论文。

《河海大学学报(自然科学版)》创办于1957年,是全国中文核心期刊、中国科技核心期刊、CSCD核心期刊,在国内工程技术界和学术界有较大影响。刊载的文章中,绝大部分为国家科技攻关(重点)项目和各种自然科学基金资助项目的研究成果,部分达到了国内领先和国际先进水平,为我国水利、水电、水运工程及其他有关工程建设的规划、设计、施工和管理提供了科学理论、方法和具体建议,发挥了较大的社会效益和经济效益,深受工程界和科技界赞许,并获得华东地区优秀期刊奖、中国高校精品科技期刊奖以及中国期刊方阵“双效期刊”、江苏省优秀期刊、全国水利系统优秀期刊等称号。

《河海大学学报(自然科学版)》每逢单月25日出版,国内外公开发行,每期定价15.00元,全年6期,共90.00元。欢迎广大读者通过全国各地邮政局订阅或直接与编辑部联系。

编辑部地址:江苏省南京市西康路1号 《河海大学学报(自然科学版)》编辑部

电话/传真:025-83786343

E-mail:xb@hhu.edu.cn

http://jour.edu.cn/hhdxbzr/ch/index.aspx