



导流网角度对反渗透膜元件内部定常流动的影响

高炜帆, 王 清, 林培锋

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘要: 采用 $k-e$ 湍流模型和多孔介质模型, 对不同导流网角度的反渗透膜元件内部流动过程进行定常数值模拟, 以研究导流网角度对反渗透膜元件内部产水率的影响。首先为了确定进口边界条件, 对导流网角度为 90° 的原型导流网膜元件做了不同压力下的产水量实验; 其次通过数值模拟对比分析了原型、 45° 、 60° 和 120° 等不同角度导流网对反渗透膜元件内部压力、速度、湍动能和拟涡能云图的影响, 并对导流网角度对反渗透膜元件内部流动特性的影响进行了分析。结果表明: 在进口压力为 0.9 MPa 时, 反渗透膜元件内部的产水量基本趋于稳定, 且产水量比较高。导流网角度的改变对反渗透膜元件内部流动状态有明显的改善, 其中, 120° 的导流网膜元件可以承受更大的压力, 更好地减少膜内湍流耗散, 单位时间涡量小, 膜内部产水率最高, 对工程应用实践有一定的参考意义。

关键词: 导流网角度; 反渗透膜元件; 多孔介质模型; 数值模拟; 产水率

中图分类号: TB302

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2022) 01-0044-07

The influence of division net angle on the steady flow inside the reverse osmosis membrane element

GAO Weifan, WANG Qing, LIN Peifeng

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The internal flow of the reverse osmosis membrane elements with different diversion net angles are simulated with steady flow to study the influence of the diversion net angle on the water production rate of the reverse osmosis membrane element by using the $k-e$ turbulence model and the porous media model. First of all, to determine the inlet boundary conditions, water production experiments under different pressures are carried out on the prototype diversion membrane element with a diversion net angle of 90° . Secondly, the effect of the prototype and the diversion nets with different angles, including 45° , 60° and 120° , on the internal pressure, velocity, turbulent energy and enstrophy cloud diagrams of reverse osmosis membrane element are compared and analyzed by means of numerical simulation, and the influence of diversion net angle on the internal flow characteristics of reverse osmosis membrane element is analyzed. The results show that when the inlet pressure is 0.9 MPa , the water production inside reverse osmosis membrane element is basically stable, and the water production rate is relatively high. The change of division net angle significantly improves the internal flow state of the reverse osmosis membrane element. Among them, a diversion membrane element at 120° can bear greater pressure and better reduce turbulent dissipation in the membrane, the vorticity per unit time is small, and the water

收稿日期: 2021-03-29 网络出版日期: 2021-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51676173); 浙江省重点研发计划项目(2020C03081)

作者简介: 高炜帆(1997-), 男, 河南邓州人, 硕士研究生, 主要从事动力工程及工程热物理方面的研究。

通信作者: 林培锋, E-mail: linpf@zstu.edu.cn

production rate inside the membrane is the highest, which is of a reference significance for engineering application practice.

Key words: diversion net angle; reverse osmosis membrane element; porous media model; numerical simulation; water production rate

0 引言

作为一种新型污水处理技术,膜分离技术在市政污水、工业污水、医学用水等行业都发挥着非常重要的作用。过滤膜是膜分离技术的重要组成部分,其中,反渗透膜作为过滤膜中的典型代表,具有过滤精度高、对水质适应性强、占地空间少、操作简单、低价环保等特点,已成为污水处理工艺流程中的重要装置^[1]。

反渗透膜内部的流动特性对其产水率有较大影响,因此很多学者对影响反渗透膜内部流动特性的因素进行了研究。李燕等^[2]在均苯三甲酰氯和间苯二胺界面聚合反应过程中加入聚乙二醇来制备改性聚酰胺反渗透复合膜,与改性前相比,反渗透膜的盐截留率和通量恢复率均有所提高。刘美玲等^[3]利用氯化处理和聚阳离子电解质壳聚糖静电吸附沉积的方法,研究了氯化过程和壳聚糖浓度对膜性能的影响,发现在 pH=9、氯化时间为 30 min、次氯酸钠质量浓度为 1000 mg/L 的情况下,反渗透膜的产水量和截留率有所提升。Mutharasi 等^[4]将纳米粒子作为亲水膜的有效纳米填充剂,发现在修饰膜中插入羟基粒子时,亲水膜的顶部表面结构会发生变化,使得膜通量有一定程度的提升。刘伟良等^[5]采用纳米发泡的方法,在液相中加入乙醇胺来考察其对聚酰胺反渗透复合膜结构和性能的影响,发现加入适量的乙醇胺,膜通量会有一定程度的提升。Jaramillo 等^[6]通过原子转移自由基聚合(ATRP)的方法,利用双离子聚合物刷修改了复合反渗透膜表面,提升了膜的亲水性。王双等^[7]运用 CFD 软件对反渗透膜进水流道内的速度场进行了数值模拟,研究了纤维丝形态及位置对流动内传质效果的影响,发现纤维丝断面为椭圆形,在纤维丝交点处有凸出滑半球的隔网形态为最优结构。郭竹洁等^[8]通过建立新型膜清洗装置,对卷式反渗透膜进行了清洗方面的研究,分析了气液两相流清洗过程中清洗液流量、气体流速、气液比、清洗时间对膜截留率和通量恢复率的影响,发现清洗液在 0.12 L/min 时,可获得较好的膜通量恢复率。吴降麟^[9]研究了流道宽度对膜产水量的影响规律,获得了最佳流道宽度,发现流道宽度

的增加可以有效提升膜的产水量。林伟琛等^[10]运用计算流体力学与响应曲面耦合的方法,研究了进水流道几何参数和进口流量对反渗透膜内水力学性能的影响,发现增加流道进口开度和提高进口流速可以更好地提升反渗透膜内的水力学性能。方健等^[11]通过 CFD 方法建立了卷式 RO 膜组件隔网流道的 3D 纯水渗透模型,对隔网丝构型进行了改进,分析了隔网丝结构对流动内传质效率和渗透通量的影响,发现随着隔网丝长度减小,流动死区面积明显减少,流道内渗透通量会有所提升。孔德正等^[12]建立了基于 N-S 方程的卷式膜隔网通道数值模型,对四种异型隔网的膜面剪应力和通道压降等膜性能进行了探究,对比这四种不同结构的异型隔网后发现,混合型隔网通道性能最优。刘辉等^[13]运用 CFD 软件分析了倾角、长径比、滤层厚度和孔隙率对过滤器处理效果的影响,发现当过滤器倾角为 60°、长径比为 2.0、孔隙率为 0.7、滤层厚度为 70.0 mm 时,过滤器具有最佳的产水效率。李小虎等^[14]以熔体静电纺丝纤维膜为原型,运用 CFD 软件对纤维过滤器内部流场进行了数值模拟,从速度分布、过滤压降及颗粒分布等方面探究了纤维过滤器出口对过滤效率的影响,对侧出口模型和下出口模型进行比较后发现,下出口模型具有较少的死水区,更利于提升膜的产水效率。综合来看,学者们对反渗透膜内部流动特性进行了大量研究,但尚未广泛涉及导流网角度对反渗透膜元件内部影响方面的内容,因此有必要对此进行研究。

本文利用 Fluent 软件,对不同角度导流网的反渗透膜内部流场进行了定常数值模拟,获得了不同工况条件下的速度、压力、湍动能和拟涡能云图,并对比分析各个云图变化,研究了不同角度导流网对反渗透膜内部流场特性的影响,为更有效地提升反渗透膜通量提供了一定的依据。

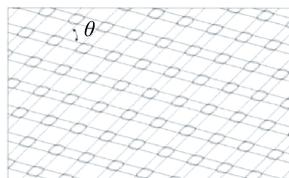
1 几何模型

本文研究对象为不同角度的导流网膜元件,导流网的夹角 θ 分别为 45°、60°、90° 和 120°,计算区域由导流网层、反渗透膜层、净水流道层 3 部分组成。中间层为导流网层,即进水流道层,

其长度为10.0 mm,横截面尺寸为6.0 mm×0.8 mm;上下第一层为反渗透膜层,横截面尺寸为6.0 mm×0.5 mm;上下第二层为净水流道



(a) 导流网膜元件整体结构



(b) 导流网截面

a.导流网层;b.反渗透膜层;c.净水流道层

图1 导流网膜元件整体结构和导流网截面示意图

2 控制方程

2.1 湍流模型

在湍流模型中,标准的 k - ϵ 模型为双方程模型,是在单方程模型的基础上,引入的一个关于湍流动能耗散率的方程。标准 k - ϵ 湍流模型的方程为:

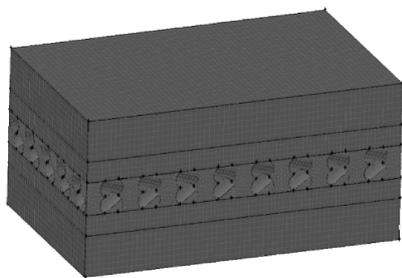
$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \delta - Y_M \quad (1)$$

$$\rho \frac{d\delta}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \delta}{\partial x_i} \right] + C_{1\delta} \frac{\delta}{k} (G_k + C_{3\delta} G_b) - C_{2\delta} \rho \frac{\delta^2}{k} \quad (2)$$

其中: ρ 为流体密度, μ 为动力黏度, μ_t 为湍流黏性系数, G_k 为平均速度梯度形成的湍动能生成项, G_b 为存在浮力影响形成的湍动能生成项, δ 为湍动能耗散率, k 为湍动能, Y_M 为可压速湍流脉动膨胀对总耗散率的影响, $C_{1\delta}$ 、 $C_{2\delta}$ 、 $C_{3\delta}$ 为模型参数。

2.2 多孔介质方程

多孔介质的参数方程是半经验公式的 Ergun 方程,该方程应用的雷诺数范围很广,适用于多种填充物。多孔介质的参数方程为:



(a) 整体网格

层,即出水流道层,横截面尺寸为6.0 mm×1.0 mm。导流网膜元件整体结构和导流网截面示意图如图1所示。

$$\frac{|\Delta p|}{L} = \frac{150\mu}{D_p^2} \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} v_\infty + \frac{1.75\rho}{D_p} \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} \quad (3)$$

其中: D_p 为粒子的平均直径, L 为床的深度, ϵ 为空隙比率, v_∞ 为空隙与填充床的体积比。从多孔介质的参数方程可以得到关于黏性阻力项 C_1 和惯性阻力项 C_2 的方程,该方程可以表示为:

$$C_1 = \frac{150}{D_p^2} \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} \quad (4)$$

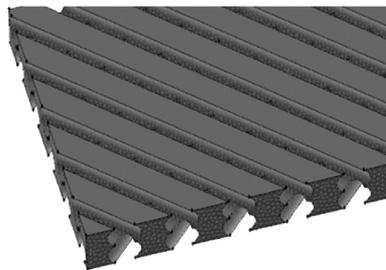
$$C_2 = \frac{3.5}{D_p} \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \quad (5)$$

通过式(4)和式(5),计算得到黏性阻力系数为 2×10^{10} ,惯性阻力系数为 80000。

3 网格划分及数值解法

3.1 网格划分和边界条件

本文采用 Fluent 前期处理软件 GAMBIT 对导流网膜元件进行划分,模型的结构相对比较复杂,在网格划分时,采用了结构化和非结构化网格相结合的混合网格。整体网格和局部网格示意图如图2所示。为使计算结果获得较高精度,对流动情况比较复杂的导流网层和多孔介质层网格进行了加密处理。整体网格数目控制在 233000 左右。



(b) 局部网格

图2 整体网格和局部网格示意图

该导流网膜元件的工作介质为纯水,其电导率为 $1 \mu\text{s}/\text{cm}$,本文近似看作不可压缩流体。计算区

域进口边界条件设置为 0.9 MPa 的压力进口;计算域出口边界条件设置为流量出口;壁面均设置为无

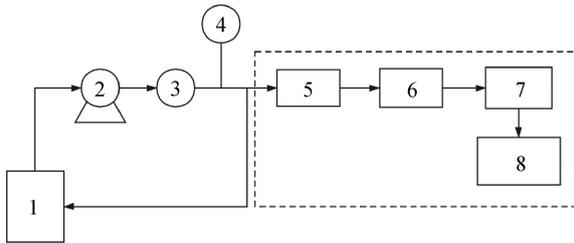
滑移壁面。

3.2 数值解法

在求解方程时,方程的对流项采用二阶迎风离散格式,方程的其他项离散格式则采用中心差分格式,采用 SIMPLE 算法对速度和压力进行分离迭代求解。若各个变量的相对残差值小于 10^{-5} ,则认为结果收敛。

4 实验研究

本文针对 90° 导流网的反渗透膜元件进行了不同压力下的产水量实验,实验设备组成示意图如图 3 所示。主要实验设备包括进出口管路、测试池、BW-400 膜片、 90° 导流网、循环水泵、压力计、浓水流量计、量筒等仪器。实验的具体步骤为:首先进行测试液的配置,配置比例为 2:1000 的盐水溶液作为测试液,将配置好的测试液倒入量筒中,并将进出口管放入量筒中;接着进行膜片预压操作,裁剪适当尺寸的待测膜片,放于测试池上,用盖板将其固定,接着打开进出水阀门,开启循环水泵,设置压力分别为 0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 MPa 来测定不同压力下的产水量。为了尽可能减少实验过程中的误差,重复上述实验步骤进行多组实验,取其平均值作为最终实验结果。



1. 盐水箱;2. 循环水泵;3. 浓水流量计;4. 压力表;
5. 导流网;6. 膜片;7. 导流网;8. 产水箱

图 3 实验设备组成示意图

不同运行压力下的产水量变化曲线如图 4 所示,从图 4 中可以看出:在 5 种不同进口压力下,实验值与数值模拟结果较为接近;随着运行压力不断增加,产水量稳步提升,当压力增加至 0.9 MPa 时,产水量趋于稳定,且达到最佳值,之后基本保持恒定。

5 数值模拟结果及分析

本文通过对比 90° 导流网反渗透膜元件的实验和模拟结果,验证了其模拟结果的准确性,为了得到反渗透膜内更高的产水效率,对导流网角度进行了改变,分别以 45° 、 60° 、 90° 和 120° 的导流网模型为研

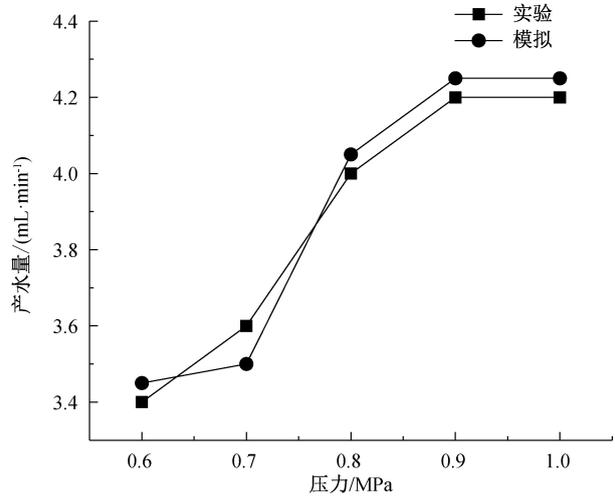


图 4 不同运行压力下的产水量变化曲线

究对象,分析其对反渗透膜内压力、速度、湍动能和拟涡能云图的影响。

5.1 压力云图分析

$Z=0$ 截面不同角度导流网膜元件压力云图如图 5 所示,从图 5 中可以看出:不同角度导流网对反渗透膜区域内压力分布的影响基本一致,都呈逐渐递减的线性分布。这是由于反渗透膜区域渗透竞争比较激烈,产生了较大的渗透阻力,造成膜区域压力会有一定程度的降低。

5.2 速度云图分析

$Z=0$ 截面不同角度导流网膜元件速度云图如图 6 所示,从图 6 中椭圆标记区域可以看出:不同角度导流网对反渗透膜区域速度的影响大小不一。 45° 、 60° 和 90° 的导流网主要对膜左侧区域速度有比较明显的影响;与前三种角度的导流网相比, 120° 的导流网对膜区域速度影响范围更大,整个膜区域速度都受到了一定程度的影响。

5.3 湍动能云图分析

$Z=0$ 截面不同角度导流网膜元件湍动能云图如图 7 所示,从图 7 中椭圆标记区域可以看出:不同角度导流网对反渗透膜区域湍动能的影响存在较大差异。 45° 、 60° 和 90° 的导流网对膜区域湍动能影响程度比较小,影响范围主要作用于左侧区域,而对右侧区域影响甚微;与前三种角度的导流网相比较, 120° 的导流网对膜区域湍动能的影响范围更广,整个膜区域基本都受到了不同程度的影响,在膜区域上下两侧的湍动能近似呈对称分布,沿着膜区域渗透流动方向呈线性递减趋势,这是由于膜区域存在较大的渗透竞争,使得湍动能会有一定程度的降低。

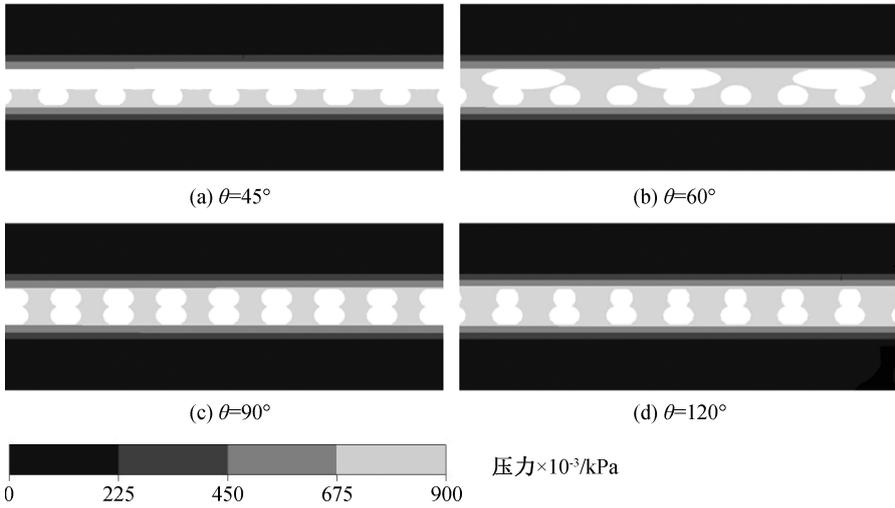


图5 Z=0 截面不同角度导流网膜元件压力云图

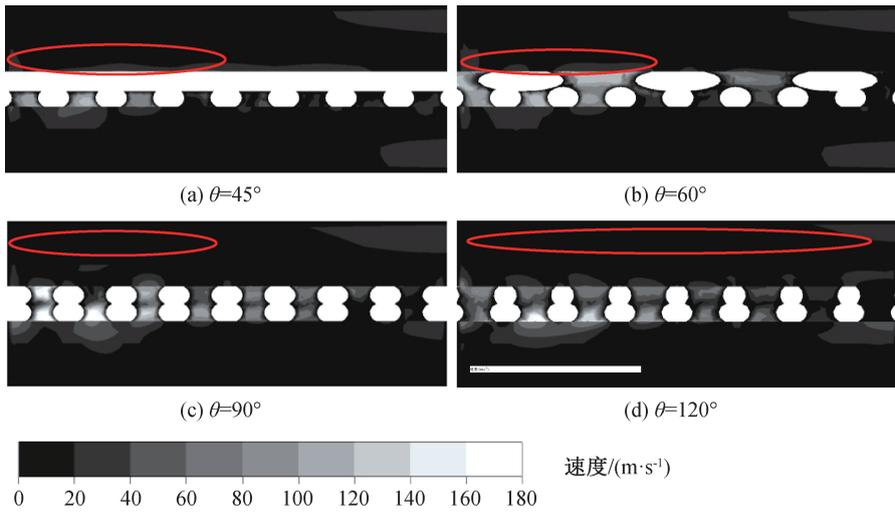


图6 Z=0 截面不同角度导流网膜元件速度云图

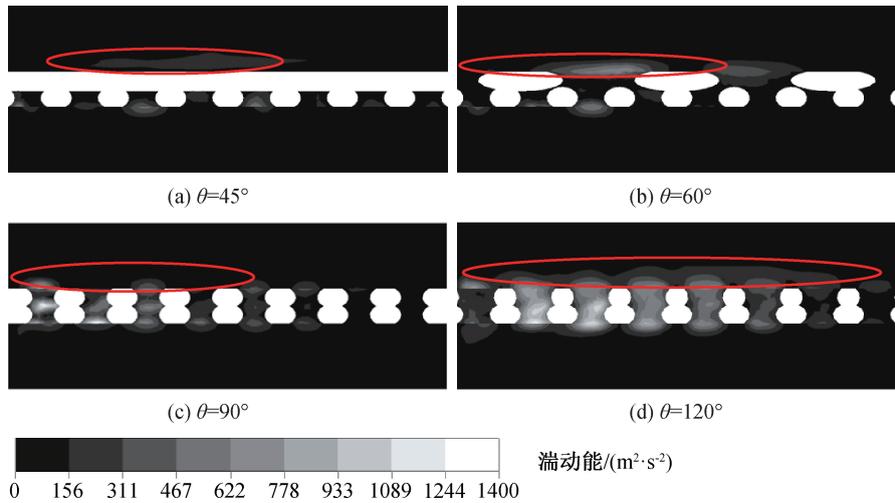


图7 Z=0 截面不同角度导流网膜元件湍动能云图

5.4 拟涡能分析

拟涡能为湍流场中存在的各种可连续地运动、伸缩和变形的拟序涡,用来判断流场的涡旋强度,涡旋强度越高,流动中产生的阻力越大;涡旋强度越

低,流动中产生的阻力越小。拟涡能的定义为:

$$\Omega(t) = \frac{1}{2} \int \rho \omega^2 dv \quad (6)$$

其中: Ω 为某一时刻 t 的流体所产生的总拟涡能, ω

为流体产生的涡量, v 为导流网膜元件的总体积。

$Z=0$ 截面不同角度导流网膜元件拟涡能云图如图 8 所示, 从图 8 中椭圆标记区域可以看出: 45° 和 60° 的导流网对反渗透膜内的拟涡能几乎没有影响; 90° 的导流网对膜区域拟涡能影响比较明显, 对

左侧和靠近中间区域都有一定程度的影响; 与 90° 的导流网相比, 120° 的导流网对膜区域拟涡能的影响甚微, 膜区域的涡量变化程度更小, 涡旋程度更低, 大大地降低了膜区域的能量损失, 更有利于膜区域渗透效率的提升。

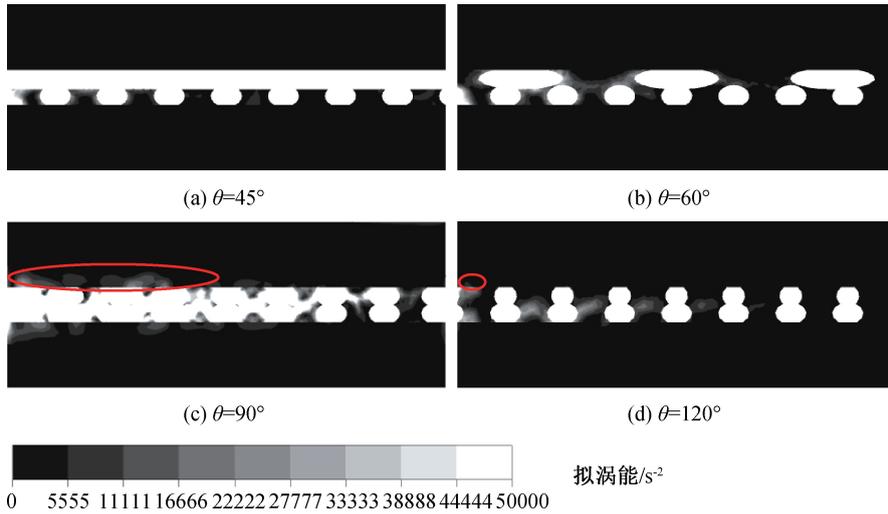


图 8 $Z=0$ 截面不同角度导流网膜元件拟涡能云图

5.5 产水率分析

不同角度导流网产水率的柱状图如图 9 所示, 从图 9 中可以看出: 45° 导流网膜元件的产水率为 47.63%, 60° 导流网膜元件的产水率为 49.56%, 90° 导流网膜元件的产水率为 50.01%, 120° 导流网膜元件的产水率为 50.50%。

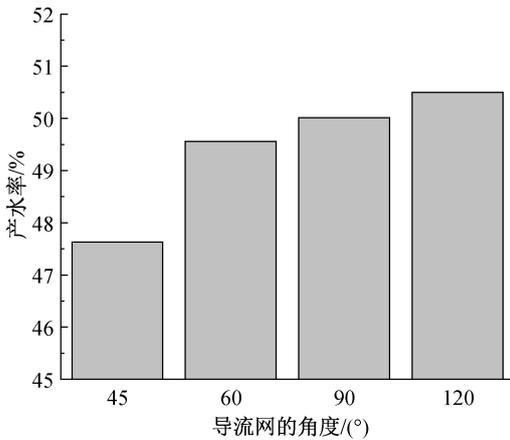


图 9 不同角度导流网的产水率柱状图

6 结论

本文通过在不同角度工况条件下对导流网膜元件进行数值模拟, 研究了不同角度的导流网对反渗透膜内产水效率的影响, 主要得出如下结论:

- 运用多孔介质模型使得反渗透膜区域具备了一定的渗透效果, 还原了膜区域内部流场。
- 导流网角度对反渗透膜元件内部流动特性

有很大的影响。随着导流网角度不断增大, 膜内压差会有一定程度地降低, 速度和湍动能的波动趋势更平缓, 在很大程度上降低了湍流耗散, 更有助于维持膜内的湍流稳定。

c) 在工程应用中, 推荐使用 120° 的导流网膜元件。与其他角度的导流网相比, 120° 的导流网对膜内维持更稳定的压差和湍动能有重要作用, 这使得其可以承受较大压力和降低一定程度的湍流耗散; 120° 的导流网对膜元件内部的拟涡能影响也更小, 这使得单位时间的涡量小, 涡旋程度和能量损失小, 有助于产水效率的提升。

本文采用数值模拟方法, 分析了在相同进出口边界条件下, 4 种特殊角度的导流网对反渗透膜元件内部流动状态的影响, 得到了较高的膜内产水效率, 但是仍缺少更多随机角度的探究, 有待后续研究完善。

参考文献:

- 权洁, 陈浩, 孟庆睿. 基于 Fluent 的纤维过滤器内部流场数值模拟[J]. 液压与气动, 2019(12): 46-50.
- 李燕, 徐荣, 郭猛, 等. PA/PEG 交联共聚反渗透膜的制备及耐污染性能[J/OL]. 化工进展. (2021-03-29)[2021-05-31]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2020-2558>.
- 刘美玲, 刘军, 王琴, 等. 聚电解质静电沉积改性制备高性能反渗透膜[J]. 化工学报, 2018, 69(2): 830-839.

- [4] Mutharasi Y, Zhang Y, Weber M, et al. Novel reverse osmosis membranes incorporated with Co-Al layered double hydroxide (LDH) with enhanced performance for brackish water desalination [J]. *Desalination*, 2021, 498: 114740.
- [5] 刘伟良, 马晓华. 单乙醇胺和二氧化碳对聚酰胺反渗透复合膜的影响[J]. *膜科学与技术*, 2020, 40(6):1-6.
- [6] Jaramillo H, Boo C, Hashmi S M, et al. Zwitterionic coating on thin-film composite membranes to delay gypsum scaling in reverse osmosis [J]. *Journal of Membrane Science*, 2021, 618: 118568.
- [7] 王双, 蔡相宇. 计算流体力学在反渗透膜进水流道设计中的应用[J]. *天津工业大学学报*, 2020, 39(6):15-20.
- [8] 郭竹洁, 王枢, 孟涛, 等. 卷式反渗透膜的气液两相流清洗特性[J]. *膜科学与技术*, 2011, 31(6):73-77.
- [9] 吴降麟. 宽流道反渗透膜抗污染性能分析[D]. 天津: 天津工业大学, 2019: 45-50.
- [10] 林炜琛, 邵瑞朋, 王乔, 等. 基于 CFD 和 RSM 的全效膜元件进水流道优化研究[J]. *膜科学与技术*, 2020, 40(6):88-95.
- [11] 方健, 张峰, 仲兆祥, 等. CFD 用于反渗透膜组件隔网构型的优化研究[J]. *膜科学与技术*, 2018, 38(1):74-80.
- [12] 孔德正, 田凤国, 朱田, 等. 基于 CFD 的异形隔网性能分析[J]. *广东化工*, 2020, 47(6):8-11.
- [13] 刘辉, 龙俨丽, 刘萍, 等. 基于 CFD 的排污管道过滤器数值模拟及结构优化[J]. *广州化工*, 2021, 49(1): 97-99, 103.
- [14] 李小虎, 张有忱, 李好义, 等. 多孔介质模型的纤维过滤器优化模拟[J]. *膜科学与技术*, 2015, 35(1):23-27.

(责任编辑:康 锋)