

低阻力湍流促进器设计与流动特性分析

郝元¹, 刘泽坤², 李伟娇³, 代岩^{1*}

(1. 大连理工大学盘锦产业技术研究院, 辽宁 盘锦 124221;

2. 大连理工大学石油与化学工程学院, 辽宁 盘锦 124221;

3. 中国石油集团东北炼化工程有限公司沈阳分公司, 辽宁 沈阳 110167)

摘要:设计了一种梯形截面的新型螺旋型湍流促进器, 分析了速度、湍动能、湍流耗散率、压力、壁面剪切力等物理量的指标变化以及在流场中的分布状态, 结合数值模拟分析法探索螺旋型湍流促进器强化传质过程的作用机理, 并与传统半圆形截面螺旋型湍流促进器的流体动力学性能和能耗进行了对比。研究表明, 梯形截面螺旋型湍流促进器流场的最大速度为 1.44 m/s, 湍动能平均值为 0.023 K, 壁面剪切力平均值为 9.55 Pa, 轴向压力降与壁面剪切力的比值为 165; 半圆形截面螺旋型湍流促进器流场的最大速度为 1.17 m/s, 湍动能平均值为 0.02 K, 壁面剪切力平均值为 7.35 Pa, 轴向压力降与壁面剪切力的比值为 155; 梯形截面的螺旋型湍流促进器流场的流体动力学性能要优于半圆形截面螺旋型湍流促进器, 且压力降与壁面剪切力相比增加幅度较小, 即相对阻力更小, 在满足强化传质要求的同时消耗更少的能量。

关键词:湍流促进器; 梯形截面; 数值模拟; 压力降; 壁面剪切力

中图分类号: TQ051.7

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2018)10-0222-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2018.10.050

Design and flow characteristics of low resistance turbulence enhancer

Xi Yuan¹, Liu Ze-kun², Li Wei-jiao³, Dai Yan^{1*}

(1. Panjin Industrial Technology Institute, Dalian University of Technology, Panjin 124221, China;

2. School of Petroleum and Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Panjin 124221, China;

3. Shenyang Company, CNPC Northeast Refining & Chemical Engineering Co., Ltd., Shenyang 110167, China)

Abstract: A novel spiral-type turbulence enhancer with a trapezoidal section is designed and prepared. Changes of velocity, turbulent kinetic energy, turbulence dissipation rate, pressure and wall shear force for this enhancer are analyzed, and their distribution states in the flow field are also analyzed. Combining with numerical simulation analysis method, the mechanism for spiral turbulence enhancers to enhance mass transfer process is explored. The hydrodynamic performance and energy consumption of this novel enhancer is compared with that of a spiral turbulence enhancer with a traditional semicircle section. From the simulation results, it can be concluded that in the flow field using a trapezoidal section spiral turbulence enhancer, the maximum velocity can achieve 1.44 m·s⁻¹, the average turbulent kinetic energy 0.023 K, the average wall shear force 9.55 Pa and the ratio of axial pressure drop to wall shear force is 165. In the flow field in the spiral turbulence promoter with a semicircular section, the maximum velocity can reach 1.17 m·s⁻¹, the average turbulent energy reaching 0.02 K, the average wall shear force 7.35 Pa, and the ratio of pressure drop to wall shear force 155. It is verified that the flow field using a trapezoidal cross-section spiral turbulence enhancer has a better hydrodynamic performance than that using semicircle section spiral turbulence enhancer.

Key words: turbulence enhancer; trapezoidal section; numerical simulation; pressure drop; wall shear force

微滤是一种分离效率高、稳定性好的新型过滤技术, 应用于水处理、石油化工、生物科学等各个行业。对于微滤过程来说, 浓差极化以及膜污染是影响膜过滤效率的主要因素, 严重制约了微滤技术的发展。使用湍流促进器是强化微滤膜过程传质的最行之有效的方法, 具有强化效果显著、能量消耗较低且操作简单、可行性好的优点^[1-3]。

Ahmed 等^[4-5]分析了不同形状湍流促进器对管式膜流体动力学特性的影响。赵宗艾等^[6]研究了在管式陶瓷膜内安装螺旋式、缠绕式、变截面式 3 种

结构的湍流促进器对微滤过程的强化效果。陈日志等^[7]设计了 3 种外置式湍流促进器(推进式、螺旋式和圆筒式)进行膜过滤强化实验。沈志洵等^[8]在 19 通道陶瓷微滤膜悬浆液过程中发现螺旋式湍流促进器的综合强化效果要好于缠绕式湍流促进器。一些研究者结合计算流体力学法, 设计出不同结构形状的湍流促进器, 并对其不同性能进行综合分析^[9-11]。Ahsan 等^[12]研究不同数量扰流挡板对管式膜传质的影响, 发现 5 挡板时传质效果最好。

湍流促进器增强流体湍动程度的效果显著, 但

收稿日期: 2018-06-06; 修回日期: 2018-07-20

基金项目: 辽宁省博士启动基金项目(20170520354, 20170520148); 大连理工大学盘锦产业技术研究院专项资金项目(YJYZXZJ2018005); 国家自然科学基金项目(21706023)

作者简介: 郝元(1987-), 男, 博士, 工程师, 研究方向为流体机械装备, xiyan@dlut.edu.cn; 代岩(1983-), 男, 博士, 工程师, 研究方向为化学工程与工艺, 通讯联系人, daiyan@dlut.edu.cn。

随之而来的代价是流动阻力增大,膜组件轴向压力降升高,系统能耗显著增加。本文中设计了一种具有梯形截面的螺旋型湍流促进器,通过 CFD 进行数值模拟,考察了新型螺旋型湍流促进器的强化效果及流动阻力,并将其与文献中常见的半圆形截面螺旋型湍流促进器做比较,研究新型湍流促进器的强化效果以及能耗大小,并分析了新型螺旋型湍流促进器强化传质的流体动力学机制。

1 几何模型建立及参数设定

管式膜物理模型如图 1(a)所示,设定湍流促进器长度为 65 mm,膜管长 85 mm,湍流促进器与膜管出入口之间距离均为 10 mm。边界条件设置为:入口处采用速度入口边界条件,出口处采用压力出口边界条件,进口速度 0.5 m/s,出口压力在 0.04 ~ 0.10 MPa 变化。模拟膜管部分设置为多孔介质,流体可以通过。由于流体在管式膜中流动为湍流,使用湍流模型进行计算,需要设定进出口边界上的湍流参数。对于湍流参数的设定,本文中选择不 Intensity and Hydraulic Diameter(湍流强度 I 和水利直径 DH)的组合模式。假定流体在进口处已经发展完全,故按照完全发展流体流动特征设置湍流强度以及水利直径。采用非结构网格对模型进行网格划分,经过网格无关性分析后,最终确定的网格模型如图 1(b)所示。

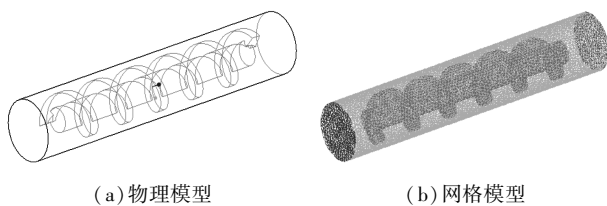


图 1 管式膜物理模型与网格模型

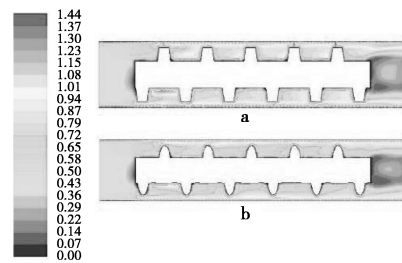
(上接第 221 页)

- [14] 蔺锡钰,吴昊,凌昊,等. Kaibel 分壁精馏塔分离芳烃的稳态和动态模拟[J]. 化工学报, 2015, 66(4): 1353-1362.
- [15] 段圆梦,沈海涛,凌昊. Agrawal 分壁精馏塔分离芳烃的稳态和动态研究[J]. 石油学报: 石油加工, 2017, 33(6): 1072-1081.
- [16] 张英,王志锋,沈海涛,等. 强化 Petlyuk 分壁精馏塔分离四元混合醇的动态控制[J]. 石油学报: 石油加工, 2017, 33(2): 281-290.
- [17] Ruiz C A, Cameron I T, Gani R. A generalized dynamic model for distillation columns-III. Study of startup operations[J]. Analytical Biochemistry, 1988, 12(1): 1-14.
- [18] Myungwan Han, Sunwon Park. Startup of distillation columns using nonlinear wave model based control [J]. IFAC Proceedings

2 模拟结果分析

2.1 膜管内速度云图分析

图 2 为梯形与半圆形截面的螺旋型湍流促进器流场轴向截面速度云图。由图可知,在梯形截面的螺旋型湍流促进器的作用下,膜内产生了高速的流场,原因是梯形截面的螺旋型湍流促进器极大地减小了流道内的有效流通面积。安装梯形截面的螺旋型湍流促进器后,膜面附近没有流动死区或滞留区,促进了流体的流动,增加了流体的湍动程度从而有利于降低浓差极化现象,提高膜的渗透通量,降低膜污染。



a—梯形截面, b—半圆形截面

图 2 梯形与半圆形截面的螺旋型湍流促进器流场轴向截面速度云图

对比 2 种截面的螺旋型湍流促进器的流场速度云图,安装梯形截面螺旋型湍流促进器的流场速度最大值为 1.44 m/s,安装半圆形截面螺旋型湍流促进器的流场速度最大值为 1.17 m/s。即梯形截面螺旋型湍流促进器对流体速度的增强作用要优于半圆形截面螺旋型湍流促进器。

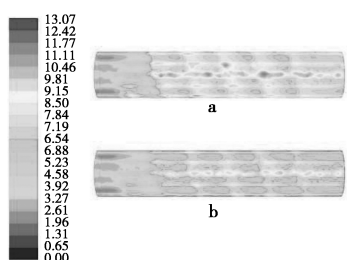
2.2 壁面剪切力分析

从壁面剪切力云图(图 3)中可以看出壁面剪切力呈上下起伏的波动状态,在整个流道范围内,壁面

Volumes, 1997, 30(9): 659-665.

- [19] Werle, Leandro, Marangoni, et al. Application of a new startup procedure using distributed heating along distillation column [J]. Chemical Engineering and Processing, 2009, 48(11/12): 1487-1494.
- [20] Alexandru Woinaroschy, Raluca Isopescu. Divided wall distillation column: Dynamic modeling and control[J]. Computer Aided Chemical Engineering, 2008, 25(8): 313-318.
- [21] Luyben W L. Distillation design and control using Aspen simulation [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2006: 790-803.
- [22] Deanovic I, Matija Evic L J, Halvorsen I J, et al. Designing four-product dividing wall columns for separation of a multicomponent aromatics mixture [J]. Chem Eng Res Des, 2011, 89(8): 1155-1167. ■

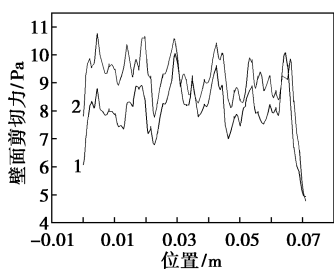
剪切力上下波动,出现多个极大值与极小值。壁面剪切力的极大值与极小值在流道中交替反复出现,在湍流促进器的第一个螺纹位置开始增大,这种现象的出现是因为流体刚进入管内时不受阻碍地自由流动,当流动到湍流促进器部分时受到阻碍,流体发生激烈碰撞,速度也随之发生剧烈变化,从而产生了较大的速度梯度。壁面剪切力可以促使颗粒离开膜表面向主体流体中扩散,从而降低颗粒在膜表面的沉积,增加膜通量。也就是说,增加壁面剪切力能提高膜通量。



a—梯形截面;b—半圆形截面

图 3 安装梯形截面与半圆形截面湍流促进器流场的壁面剪切力云图

安装梯形截面与半圆形截面湍流促进器流场的壁面剪切力曲线如图 4 所示。安装梯形截面的螺旋型湍流促进器流场壁面剪切力最大值为 13.1 Pa,安装半圆形截面的螺旋型湍流促进器流场壁面剪切力最大值为 10.9 Pa。由此可以看出,与安装半圆形截面的湍流促进器的流场相比,安装梯形截面螺旋型湍流促进器流场的壁面剪切力较大,促湍效果更显著,膜通量较大,抑制膜污染的效果更好。



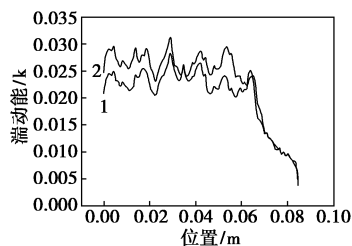
1—半圆形截面;2—梯形截面

图 4 安装梯形截面与半圆形截面湍流促进器流场的壁面剪切力曲线

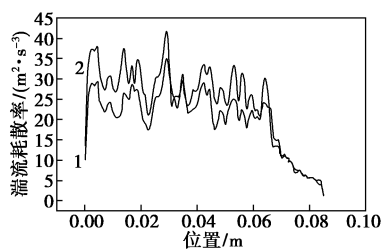
2.3 湍流特性分析

2 种螺旋型湍流促进器流场壁面附近的湍动能分布和湍流耗散率分布如图 5 所示。湍动能因湍流促进器的加入明显增大,即湍动程度增强。不难发现,在湍流促进器螺旋结构附近湍动能较大,在螺纹附近达到局部最大值。这是因为湍流促进器的存在

使流道面积变小,速度增大,流体脉动程度增加并在螺纹附近速度达到极大,从而使湍动能达到极大值。在膜管内安装螺旋型湍流促进器之后,螺旋向流动流体和轴向流动流体之间发生剧烈的碰撞以及混合,流体扰动加大,从而极大地提高了流体的湍动能和湍流耗散率。流体中的质点由于激烈的碰撞从而消耗大量能量,提高了流体的压力损失,使流道中轴向压力降升高,增大了系统能耗。



(a) 湍动能曲线



(b) 湍流耗散率曲线

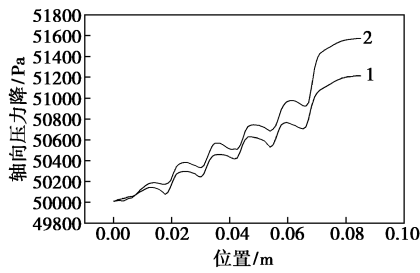
1—半圆形截面;2—梯形截面

图 5 梯形截面与半圆形截面湍流促进器流场的壁面湍动能和湍流耗散率曲线

比较 2 种湍流促进器流场的湍动能分布图可以发现,湍动能分布状况基本一致,都在螺纹附近达到极大值。安装梯形截面的螺旋型湍流促进器流场湍动能最大值为 0.060 2 K,最小值为 4.65×10^{-5} K,安装半圆形截面的螺旋型湍流促进器流场湍动能最大值为 0.052 5 K,最小值为 3.75×10^{-5} K。由此可以看出,安装梯形截面螺旋型湍流促进器流场的湍动能较大,流体湍动程度较高。

2.4 膜管中的压力降特性

图 6 为安装梯形与半圆形截面湍流促进器流场轴向压力降曲线。比较 2 种截面结构湍流促进器的流场膜面轴向压力分布曲线不难发现,轴向压力分布趋势基本相同。安装梯形截面的螺旋型湍流促进器流场膜面轴向压力降为 1 600 Pa,安装半圆形截面的螺旋型湍流促进器流场膜面轴向压力降为 1 400 Pa,安装半圆形截面的湍流促进器的流场膜面轴向压力降要稍大,流体流动阻力更大,能量消耗更多。



1—半圆形截面;2—梯形截面

图 6 安装梯形与半圆形截面湍流促进器
流场轴向压力降曲线

2.5 新型湍流促进器综合性能评价

衡量湍流促进综合性能主要需要考虑 2 方面指标,一为流体湍动程度强化效果,二为强化过程能量消耗大小。

衡量流体湍动程度的主要指标为速度、湍动能、湍流耗散率、壁面剪切力。2 种湍流促进器流场各物理量比较见表 1。从表 1 中可以看出,梯形截面的螺旋型湍流促进器在这些指标上都要优于半圆形截面的湍流促进器。也就是说,梯形截面的螺旋型湍流促进器有更为优越的流体动力学性能,对流体湍动程度的强化作用更强。

表 1 2 种湍流促进器流场各物理量比较

	梯形	半圆形
速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1.44	1.17
湍动能平均值/K	0.023	0.02
湍流耗散率平均值/($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}$)	24.16	20.48
壁面剪切力平均值/Pa	9.55	7.35
轴向压力降/Pa	1576.2	155
压力降/壁面剪切力	1217	165

流场湍动程度提高的代价是流动阻力的增大,能量消耗的增加。膜管的轴向压力降是衡量流体阻力大小的主要因素。流体扰动增加,湍动程度增大一定伴随着流动阻力的提升,这是不可避免的。所以本文中用膜管内压力降与壁面剪切力平均值之比来衡量系统相对能耗的大小。从表 1 中可知,梯形截面螺旋型湍流促进器与半圆形截面相比,压力降与壁面剪切力的比值更小,说明系统相对能耗较低。

3 结论

梯形截面的螺旋型湍流促进器比半圆形截面的螺旋型湍流促进器具有更好的流体动力学性能和较低的能量消耗。在进口速度 0.5 m/s,出口压力

50 kPa 的模拟条件下,安装梯形截面螺旋型湍流促进器的流场与安装半圆形截面螺旋型湍流促进器的流场相比,速度增大 23%,湍动能增大 15%,壁面剪切力增大 30%,相对能耗降低 6.5%,这表明新型湍流促进器对于膜管内流体的强化效果更显著。

对安装梯形截面螺旋型湍流促进器的流场的流体运动状态进行分析可知,流场内的流体流动形式主要分为沿螺旋结构运动的螺旋流以及沿膜面轴向运动的轴向流,2 种流动形式的流体相互碰撞、融合,从而增大流体的扰动,减少颗粒在膜面的沉积,减少浓差极化,减轻膜污染,从而强化传质过程。

参考文献

- [1] Boissier B, Lutin F, Moutounet M, *et al.* Particles deposition during the cross-flow microfiltration of red wines—incidence of the hydrodynamic conditions and of the yeast to fines ratio[J]. *Chemical Engineering & Processing Process Intensification*, 2008, 47(3): 276–286.
- [2] Mourouzidis-Mourouzidis S A, Karabelas A J. Whey protein fouling of large pore-size ceramic microfiltration membranes at small cross-flow velocity[J]. *Journal of Membrane Science*, 2008, 323(1): 17–27.
- [3] Raffin M, Germain E, Judd S J. Influence of backwashing, flux and temperature on microfiltration for wastewater reuse[J]. *Separation & Purification Technology*, 2012, 96(96): 147–153.
- [4] Ahmed S, Seraji M T, Jahedi J, *et al.* CFD simulation of turbulence promoters in a tubular membrane channel[J]. *Desalination*, 2011, 276(1): 191–198.
- [5] Ahmed S, Seraji M T, Jahedi J, *et al.* Application of CFD for simulation of a baffled tubular membrane[J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2012, 90(5): 600–608.
- [6] 赵宗艾,姜涛.附加湍流器强化陶瓷膜微滤过程的研究[J]. *化工机械*, 1997, (6): 315–318.
- [7] 陈日志,张利雄,邢卫红,等.湍流促进器对液固一体式膜反应器中膜过滤性能影响的研究[J]. *现代化工*, 2005, 25(7): 56–58.
- [8] 沈志洵,陈亚中,崔鹏.湍流促进器强化陶瓷膜微滤 CaSO_4 悬浆液的研究[J]. *化学反应工程与工艺*, 2010, 26(1): 92–96.
- [9] 刘元法.湍流促进器强化错流微滤膜过程的研究[D].大连:大连理工大学,2013.
- [10] 解芳,王建敏,刘进荣.微通道湍流促进器强化平板 MBR 的 CFD 数值模拟[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(8): 3841–3846.
- [11] 刘建新,刘志军,王晓娟,等.锯齿形湍流促进膜过滤器处理 SiC 废水性能研究[J]. *现代化工*, 2015, 35(7): 104–107.
- [12] Ahsan M, Hussain A. Computational fluid dynamics (CFD) simulation and comparison for different numbers of baffles to reduce concentration polarization effects in membrane tubes[J]. *Journal of Engineering & Technological Sciences*, 2017, 49(1): 114–131. ■