

锯齿形湍流促进膜过滤器处理 SiC 废水性能研究

刘建新, 刘志军, 王晓娟, 许晓飞*, 刘凤霞, 魏 伟

(大连理工大学流体与粉体工程研究设计所, 辽宁 大连 116024)

摘要:为提高平板膜过滤器的过滤性能,设计了一种新型的锯齿形湍流促进膜过滤器。以含有不同浓度的 SiC 颗粒废水为研究对象,通过错流微滤实验对促进器强化过滤性能进行了研究,分析了促进器作用下膜组件的流动阻力和能量利用率。结果表明,锯齿形促进器可使常规过滤渗透通量提高 3.46 倍,尤其是在低进料流量、低雷诺数下能有效地强化膜通道内的湍动能,提高能量利用率。锯齿形促进器的强化作用与锯齿的疏密有关,当锯齿的疏密程度增加 50% 时,单齿强化过滤效率可提高 3.7 倍。

关键词:膜过滤;膜污染;过滤强化;湍流促进器

中图分类号:X703.1

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2015)07-0104-04

Study on the performance of saw-toothed turbulence promoter in membrane filtration of SiC wastewater

LIU Jian-xin, LIU Zhi-jun, WANG Xiao-juan, XU Xiao-fei*, LIU Feng-xia, WEI Wei

(R&D Institute of Fluid and Powder Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To improve the filtration performance of flat sheet membrane module, one saw-toothed turbulence promoter is proposed. Cross-flow micro-filtration experiments for SiC particle suspension are performed to test the enhancement of this promoter to filtration. Moreover, the flow resistance and energy efficiency of membrane module with saw-toothed promoter are also investigated. The results show that saw-toothed turbulence promoter can increase the permeate flux of normal filtration by 3.46 times. It is easier for the promoter to transform the input energy to enhancement turbulence energy in low feed flow rate than that in high feed flow rate. The enhancement of saw-toothed promoter is related to the dense of saw units. Filtration enhancement ratio per saw unit can increase by 3.7 times with the dense of saw units increase by 50%.

Key words: membrane filtration; membrane foul; filtration enhancement; turbulence promoter

膜过滤作为一种高效、节能、环保的技术,在化工、制药、环保等领域具有广泛的应用^[1]。在膜过滤过程中,由于颗粒或溶质在膜表面不断沉积,从而导致渗透通量逐渐减小,过滤效率降低^[2-3]。因此,对颗粒沉积形成的二次膜以及膜污染的有效控制是提高膜装置过滤性能的重要研究内容。其改进的主要措施包括流动强化、膜材料改进、优化操作参数和采取反冲洗等方式^[4-5],其中采用流动强化被认为是最为行之有效的方 法之一^[6]。Yang 等^[7]指出通过采用外部能量产生二次流(如迪恩涡、泰勒涡、脉动流等)和优化膜组件结构的方式可实现流动强化,其中以添加湍动促进器的优化膜组件结构方式应用最为广泛。湍流促进器在过滤通道内产生的扰流一方面可破坏膜表面的浓度边界层,减少颗粒物或溶质在膜表面的沉积,另一方面可对膜表面沉积

颗粒产生冲刷作用,从而可有效地改善膜的过滤性能。在能量利用率、设备投资及维护成本等方面,湍流促进器均被证明是一种有效提高膜组件过滤性能的结构^[8-9]。

由于膜组件结构的不同,管式膜组件、平板膜及卷曲膜组件中具有不同形式的湍流促进器。管式膜组件中的促进器形式多样,研究者较多,其中以螺旋纽带式、螺纹式、交互碟片式等湍流促进器在强化传质及节能方面较为多见^[10]。在平板膜及卷曲膜组件中,间隔体作为促进器常用于在进料通道内产生涡旋,增强流体的混合和提高膜表面流动剪切率,强化膜组件内的传质^[11]。实验研究表明,间隔体可将无强化的常规过滤的渗透通量提高 3~5 倍^[12],然而,间隔体往往造成膜组件沿程压降的显著升高,造成系统相对能耗增大。同时,由于通常间隔体设置

收稿日期:2015-01-06

基金项目:辽宁省自然科学基金项目(20121024)

作者简介:刘建新(1985-),男,博士生,loafer@mail.dlut.edu.cn;许晓飞(1981-),男,博士,讲师,主要从事多相流流动及数值模拟等研究,通讯联系人,0411-84986285,xiaofei.xu@dlut.edu.cn。

于膜表面上,不仅会减小有效过滤膜面积,在跨膜压力较大时还易造成膜的变形,从而对膜性能产生影响^[13]。因此,针对板式膜装置,需要研究开发更为有效的湍流促进装置。

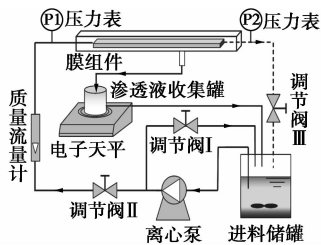
研究者对矩形通道内传热强化性能的研究结果表明,锯齿形湍流促进器对传热的强化作用相当于圆管中的螺纹促进器,能在较小的沿程阻力损耗下,显著提升传热效果^[14-15]。据此,本研究根据传递现象的类比性,开发设计一种应用于平板膜组件中的锯齿形湍流促进器,并对半导体工业生产中常见的 SiC 废水进行处理,进行了错流微滤实验,研究锯齿形湍流促进器作用下膜装置的过滤性能和沿程流动阻力特性。

1 实验设置

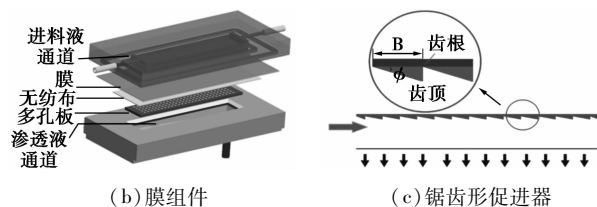
1.1 实验装置及流程

实验流程如图 1(a) 所示。SiC 废水经离心泵送入膜组件,通过控制调节阀开度控制流体在膜组件内的流速和压力。流体流量由质量流量计测量,压力表分别测定流经膜组件两侧的压力 p_1 和 p_2 ,膜组件内跨膜压力为两压力表示数的平均值,即 $TMP = (p_1 + p_2)/2$ 。过滤过程中通过测量单位时间内的滤液质量,从而测得渗透通量随时间的变化。

膜组件由有机玻璃制成,分为上、下 2 部分,如图 1(b) 所示。进料通道位于组件上部,流通截面积为 60 mm^2 ,渗透液经膜组件下部出口管流出。滤膜紧贴于组件上部的下端,有效过滤面积为 $4\,500 \text{ mm}^2$ (长 150 mm ,宽 30 mm),底部采用无纺布衬垫,并以多孔不锈钢板进行支撑。膜组件上、下 2 部分均采用硅橡胶 O 型圈密封,防止进料液从错



(a) 实验流程图



(b) 膜组件

(c) 锯齿形促进器

流通道内渗漏。

锯齿形湍流促进器如图 1(c) 所示,安装于进料通道过滤膜的对侧,起湍流扰动作用的锯齿高度为 2 mm ,齿顶与膜表面距离也为 2 mm 。本文中设计了 2 种促进器,根据锯齿疏密程度的不同,一种为密齿型(dense saw-toothed promoter, DSP),另一种为疏齿型(sparse saw-toothed promoter, SSP),对应锯齿单元长度 B 分别为 $10、15 \text{ mm}$,2 种促进器在过滤通道内的锯齿单元数分别为 $15、10$ 。

1.2 材料和方法

采用的微滤膜为经表面改性的 PTFE 复合亲水膜,泡点测试得到的滤膜平均表面孔径为 $0.22 \mu\text{m}$,死端过滤测得纯膜阻力为 $(1.75 \pm 0.10) \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$ 。

实验中,采用人工配置的 SiC 废水,SiC 颗粒来源于半导体加工业,平均粒径为 $5.99 \mu\text{m}$,粒径小于 $0.26 \mu\text{m}$ 的颗粒累积分布小于 0.5% ,大部分颗粒的粒径大于膜孔径,可在膜表面进行有效截留。实验中,膜装置进口处 SiC 废水的颗粒体积分数为 0.01% ,与典型的半导体加工业的生产废水浓度基本相同;进料流量分别为 $108、216 \text{ kg/h}$ 。在跨膜压力为 60 kPa 时,分别使用常规平板膜组件(NFM)、密齿型促进器膜组件(DSP)和疏齿型促进器膜组件(SSP),对 SiC 废水进行错流过滤实验。

1.3 测试参数

膜污染阻力采用 Darcy 公式进行计算。由于过滤膜的孔径小于进料颗粒的最小粒径,颗粒进入膜孔形成的堵塞阻力可忽略不计,由此,滤饼阻力为:

$$R_c = TMP/\mu_L J - R_m \quad (1)$$

式中, μ_L 为渗透液黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; R_m 为过滤膜阻力, m^{-1} ; J 为渗透体积通量, m^3/s

通过膜组件两侧的压力表可测得过滤方向上沿着膜孔进料通道的沿程流动阻力降 $p = p_1 - p_2$,根据 Darcy-Weisbach 公式,可得膜组件内沿程流动阻力系数为:

$$\lambda = 2\Delta p d/\rho u^2 L \quad (2)$$

式中, L 为通道长度, m ; d 为错流通道当量流通直径, m ,NFM 膜通道 $d = 3.75 \text{ mm}$,DSP 和 SSP 膜通道 $d = 5.45 \text{ mm}$; u 为膜孔的平均过滤速度, m/s 。

将膜装置作为一个系统,其输入系统的能量包括进料液的动能和压力能,输出系统的有效能量为渗透流动的动能,用有效输出与输入能量的比值表征膜装置的能量有效利用率。

根据进料液的流量和压力,输入功率可表示为:

$$P_{E_{in}} = [P_1 + (u^2/2)\rho] \cdot Q_{in} \quad (3)$$

图 1 实验装置及流程图

输出功率可表示为:

$$P_{Eout} = \rho g H_{out} Q_{out} = \rho J^3 A_m / 2 \quad (4)$$

有效功率比为:

$$N_p = P_{Eout} / P_{Ein} \quad (5)$$

2 结果分析

2.1 湍流促进器的强化作用

2.1.1 与常规过滤的对比

图 2 为 DSP 膜组件与 NFM 膜组件渗透通量及滤饼阻力随时间的变化。从图 2 中可以看出,渗透通量在前 10 min 内迅速下降,10 min 后渗透通量缓慢减小,过滤阻力缓慢增大且趋于稳定值,渗透通量减小到初始通量的 10% 所需的时间分别为 5、30 min,在 DSP 作用下初始通量的下降速度明显减小。DSP 膜装置作用下的稳定渗透通量是 NFM 的 3.46 倍。通过对 2 h 过滤的渗透通量进行积分,得到 2 种条件下的单位面积渗透液体积分别为 2.85、8.36 m³/m²,采用 DSP 强化过滤得到的渗透体积是 NFM 的 2.94 倍。这表明锯齿形湍流促进器可有效增大渗透通量,减小过滤阻力,对过滤起到了明显的强化作用。

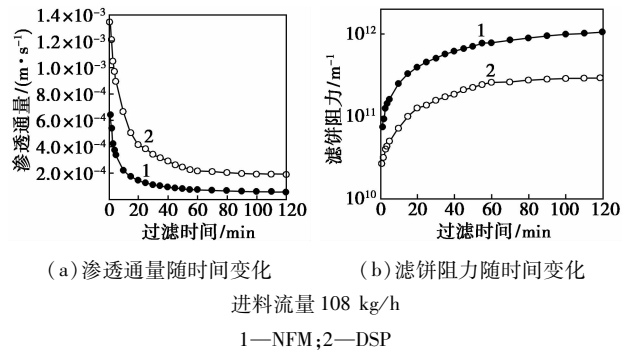
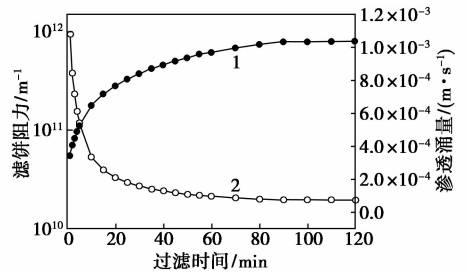


图 2 DSP 作用下过滤与 NFM 过滤对比

2.1.2 锯齿密度的影响

SSP 作用下的过滤通量及阻力变化如图 3 所示,其进料流量为 108 kg/h。从图 3 中可以看出,渗透通量及阻力随时间变化趋势与 NFM 的变化规律基本相同,渗透通量减小至 10% 的初始通量所需的时间为 12 min,下降速度较 DSP 快些,达到稳定的通量是 NFM 的 1.34 倍。在 2 h 的操作时间内,单位面积渗透液体积为常规过滤的 1.41 倍。根据 2 种促进器在膜组件内的齿单元数,计算得到 DSP 的单齿强化率为 16.4%,SSP 的单齿强化率为 3.4%,当齿密度增加 50% 时,单齿强化率提高了 3.7 倍,表明随着齿密度的增大,齿单元内局部湍动强化性能明显提升。



1—滤饼阻力;2—渗透通量

图 3 SSP 作用下渗透通量及阻力随时间变化

2.2 膜组件内流动阻力分析

图 4 为沿程压降随进料流量的变化。从图 4 中可以看出,膜组件的沿程压降随进料流量的增大而升高。在相同流量下,DSP 作用下的沿程压降比 NFM 装置高出 12.8% ~ 21.7%,SSP 作用下的沿程压降比 NFM 装置高出 5.3% ~ 9.2%。由于 NFM 通道的当量直径较大,其内部流道内的 *Re* 数比 DSP 和 SSP 装置均高,说明湍流促进器可在低 *Re* 数条件下将流动通道内的沿程压降转化为湍动动能,从而实现过滤过程的强化。

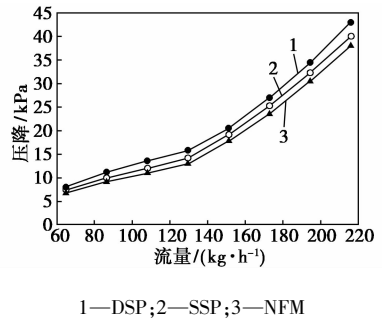


图 4 不同膜组件中沿程压降随进料流量的变化

图 5 为沿程阻力系数随雷诺数的变化。从图 5 中可以看出,阻力系数随 *Re* 数的变化趋势分为 2 个区:在 *Re* < 2 625 范围内,阻力系数随 *Re* 数的增大而急剧减小,在 *Re* ≥ 2 625 时,阻力系数随 *Re* 数缓慢增大。由于过滤通道内的流动阻力主要是湍动流动和黏性流动共同作用的结果,在相同 *Re* 数下,黏

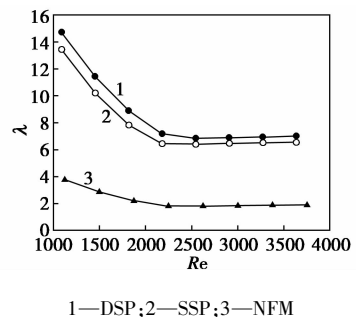


图 5 不同膜组件中沿程阻力系数随 *Re* 变化

性流动阻力基本相同,通道内流动阻力系数越大,湍动动能越强。从图5中还可看出,同样的 Re 数下,DSP和SSP作用下的沿程阻力系数高于NFM装置,表明锯齿形湍流促进器有效地将流动阻力转化为湍动动能,从而实现了对过滤过程的强化。

2.3 膜组件过滤能耗分析

表1中列出了在2种流量下,3种膜组件中达到稳定过滤通量下的渗透功率和有效功率比。可以看出,错流速度越大,输出功率越高。在NFM装置中,流量为216 kg/h与108 kg/h相比,其输出功率要高出10倍以上;而采用强化方式过滤时,DSP和SSP单元对应的比值分别为1.94和4.39倍,表明采用强化过滤可以减小不同错流流量下输出功率的差异。SSP和DSP2种湍流促进器作用下的膜组件,其输出功率比分别为NFM装置的7.8倍和41.7倍。DSP的有效输出功率高于SSP。与其他2种膜组件不同,DSP组件在低流量下的有效输出功率比稍高于高流量下的有效功率比,108 kg/h进料流量下的有效输出能量比是216 kg/h进料流量的1.32倍,表明DSP在低进料流量下能够更有效地将输入能量转化为有效强化湍动动能,提高了能量利用率。

表1 稳定通量下的输出功率和功率比

	$P_{Eout}/10^{12}W$		$N_{Pave}/10^{12}$	
	216 kg/h	108 kg/h	216 kg/h	108 kg/h
NFM	4.00	0.39	0.77	0.19
DSP	31.72	16.36	6.01	7.93
SSP	4.26	0.97	0.81	0.48

3 结论

采用平板膜错流过滤工艺,对不同浓度的SiC颗粒废水进行处理,研究锯齿形湍流促进器过滤参数的强化性能。

在锯齿形湍流促进器作用下,稳定渗透通量是常规过滤装置的1.34~3.46倍,显著提高了SiC颗粒废水的过滤性能。密齿型促进器强化作用高于疏齿促进器,齿密度增加50%时,单齿强化率可提高3.7倍。相同 Re 数条件下,锯齿形湍流促进器能够有效地将流动阻力转化为湍动动能,实现过滤过程

的强化。密齿型促进器在低流量下的能量利用率高,高于高流量下能量利用率,最高能量利用率是常规过滤的41.7倍。

参考文献

- [1] 王华,刘艳玉,彭东明,等.膜分离技术的研究进展及应用展望[J].应用化工,2013,(3):532-534.
- [2] 王建龙,彭永臻,王淑莹.膜污染成因及控制对策研究新进展[J].环境科学与技术,2007,(6):101-102.
- [3] 武文娟,王湛,姚金苗,等.中空纤维微滤膜污染及阻力分析[J].环境污染治理技术与设备,2006,(10):30-35.
- [4] 沈悦啸,王利政,莫颖慧,等.膜污染和膜材料的最新研究进展[J].中国给水排水,2010,(14):16-22.
- [5] 吕晓龙,刘惠玉.多孔膜的污染及其控制方法[J].天津工业大学学报,2004,(1):18-22.
- [6] 李昕,王洪海.改善膜表面流动状态防治膜污染技术的研究进展[J].化工进展,2007,(6):797-803.
- [7] Yang X, Wang R, Fane A G, et al. Membrane module design and dynamic shear-induced techniques to enhance liquid separation by hollow fiber modules: A review[J]. Desalination and Water Treatment, 2013, 51(16/17/18):3604-3627.
- [8] Krstic D A, Hoflinger W, Koris A K, et al. Energy-saving potential of cross-flow ultrafiltration with inserted static mixer: Application to an oil-in-water emulsion[J]. Separation and Purification Technology, 2007, 57(1):134-139.
- [9] Krstic D M, Tekic M N, Caric M D, et al. Kenics static mixer as turbulence promoter in cross-flow microfiltration of skim milk[J]. Separation Science and Technology, 2003, 38(7):1549-1560.
- [10] 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.
- [11] Schwinge J, Wiley D E, Fane A G, et al. Characterization of a zigzag spacer for ultrafiltration[J]. Journal of Membrane Science, 2000, 172(1/2):19-31.
- [12] Schwinge J, Wiley D E, Fane A G. Novel spacer design improves observed flux[J]. Journal of Membrane Science, 2004, 229(1/2):53-61.
- [13] Kim Y C, Elimelech M. Adverse impact of feed channel spacers on the performance of pressure retarded osmosis[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(8):4673-4681.
- [14] Ezato K, Suzuki S, Sato K, et al. Critical heat flux test on saw-toothed fin duct under one-sided heating conditions[J]. Fusion Engineering and Design, 2001, 56/57:291-295.
- [15] Sato K, Chu R C, Kumada M. Heat transfer enhancement using turbulent promoters for drag-reducing surfactant aqueous solution flow[J]. Journal of Enhanced Heat Transfer, 2003, 10(3):301-309. ■