

# 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

陈日志, 张利雄, 邢卫红, 徐南平

(南京工业大学化学化工学院江苏省材料化学工程重点实验室, 江苏南京 210009)

**摘要:**以改善液固一体式膜反应器中膜过滤性能为目的, 设计了3种外置式湍流促进器进行膜过滤强化实验, 考察了湍流促进器的构型、旋转速度等因素对膜通量的影响。结果表明, 旋转的湍流促进器可以明显地提高膜通量, 其中推进式湍流促进器的强化效果最明显; 随着湍流促进器旋转速度的增加, 膜通量也相应增加; 采用该湍流促进器可以进行高悬浮液质量浓度的膜过滤强化实验。

**关键词:**一体式膜反应器; 过程强化; 湍流促进器; 膜通量

中图分类号: TQ051.7

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2005)07-0056-03

## Effects of external turbulence promoter on membrane filtration performance of liquid-solid phase submerged membrane reactor

CHEN Ri-zhi, ZHANG Li-xiong, XING Wei-hong, XU Nan-ping

(Key Laboratory of Materials-oriented Chemical Engineering of Jiangsu Province, College of Chemistry and Chemical Technology, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** In order to improve the membrane filtration performance of liquid-solid phase submerged membrane reactor, three kinds of external turbulence promoters were designed for flux enhancement. Effects of the configuration and rotation rate of the turbulence promoters on the membrane flux were investigated, and the experimental results indicated that the membrane flux could be enhanced with the introduction of rotary turbulence promoters. The propeller turbulence promoter was found to be more effective than the others. The membrane flux was increased with the increase of rotation rate of turbulence promoter. The method of flux enhancement with external turbulence promoter was also suitable for high particle concentration filtration.

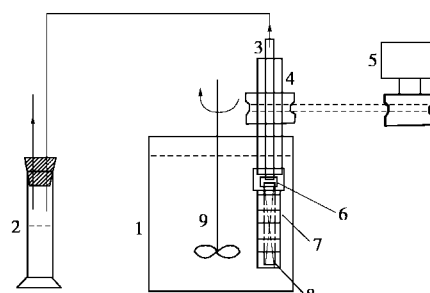
**Key words:** submerged membrane reactor; process intensification; turbulence promoter; membrane flux

液固膜反应器技术将悬浮态反应和催化剂分离2个彼此独立的单元过程合并为一个单元过程, 不仅可以简化工艺流程, 降低设备投资, 更重要的是可以实现催化剂的原位分离, 但关于这方面的研究还比较少<sup>[1]</sup>。根据膜组件位置的不同, 膜反应器可分为分置式和一体式。一体式膜反应器中膜组件与反应器是一个有机整体, 避免了分置式膜反应器的占地面积大、能耗高、浪费料液等缺点<sup>[2-4]</sup>, 更有发展潜力。在液固一体式膜反应器中, 为减少催化剂颗粒在膜表面的沉积, 以延长膜的运行周期, 减少膜的使用面积, 增加反应器的有效空间, 通过过程强化提高膜的通量是很有必要的, 如采用膜旋转、搅拌引起的旋转切向流等技术。笔者设计了外置式湍流促进器进行膜过滤强化实验, 考察了湍流促进器的构型、旋转速度等因素对膜通量的影响, 为液固一体式膜

反应器的应用提供基础数据。

## 1 实验部分

实验装置如图1所示。



1—液槽; 2—量筒; 3—滤液出口管; 4—套筒式转轴; 5—电机; 6—固定螺母; 7—湍流促进器; 8—膜管; 9—搅拌桨

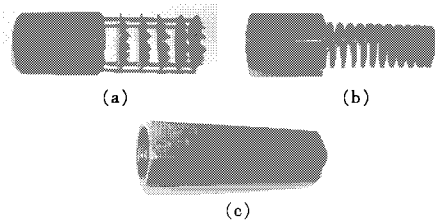
图1 附加湍流促进器的一体式膜反应器示意图

收稿日期: 2005-04-01

基金项目: 国家“973”计划(2003CB615702); 国家自然科学基金重点项目(20436030); 国家科技攻关计划项目(2004BA310A34)

作者简介: 陈日志(1976-), 男, 博士生, 025-83587502, rzhichen@163.com; 徐南平(1961-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事无机膜的制备、表征、应用和膜催化反应研究, 通讯联系人, 025-83587171, npxu@njut.edu.cn.

膜管通过固定螺母连接到滤液出口管,湍流促进器与套筒式转轴相连。实验过程中,湍流促进器可以是静止的,相当于一个静态混合器,也可以在电机的作用下旋转形成一个动态过滤装置;膜管是静止的,且与湍流促进器同轴。实验采用的湍流促进器有3种型式:推进式、螺旋式和圆筒式(见图2)。推进式、螺旋式湍流促进器主要由2个部分组成,如推进式湍流促进器是由推进构件(起到推进流体的作用)和套筒螺母(起连接作用)所组成,螺旋式湍流促进器的组成也与其相似。



a—推进式;b—螺旋式;c—圆筒式

图2 湍流促进器示意图

实验采用负压抽吸进行膜过滤。采用秒表、量筒测定一定滤液体积所用的时间,经计算得到膜通量。待测完膜的纯水通量后,将一定质量的  $Al_2O_3$  粉体快速加到一定体积的去离子水中(同时搅拌),并立刻测定膜通量。在过滤过程中,不定期地向装有悬浮液的容器中去离子水,以保证悬浮液的固含量基本不变。过滤结束后,用清水冲洗膜表面,然后将膜管放在超声场中清洗。测定清洗过的膜的纯水通量,并与新膜的纯水通量相比较,以确定膜的污染情况及清洗效果。过滤条件为(除特别说明外):悬浮液质量浓度  $5\text{ g/L}$ ,悬浮液温度  $20^\circ\text{C}$ ,操作压力  $0.02\text{ MPa}$ ,膜管有效长度为  $5\text{ cm}$ ,外径为  $12\text{ mm}$ 。

为了评估湍流促进器对膜过滤性能的影响,用以下公式表示渗透通量( $FI$ )的改善程度:

$$FI = \frac{J_{TP} - J_{NTP}}{J_{NTP}} \quad (1)$$

式中,  $J_{TP}$  是有湍流促进器时的膜通量,  $J_{NTP}$  是没有湍流促进器时的膜通量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 湍流促进器构型对膜通量的影响

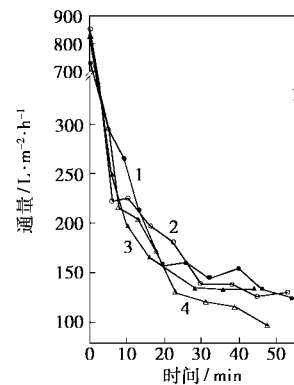
3种湍流促进器的结构参数如表1所示。固定搅拌速度  $800\text{ r/min}$ ,考察了湍流促进器构型对膜通量的影响,实验结果见图3。从图3(a)可以看出,当湍流促进器静止时,也就是湍流促进器作为静态混合器时,3种湍流促进器都没有提高膜通量,对于圆

筒式湍流促进器,膜通量还小于没有湍流促进器时的膜通量。这说明在该实验条件下,当推进式与螺旋式湍流促进器不旋转仅作为静态混合器时,其对膜面附近流体的流场没有显著的影响,从而不能起到强化作用;圆筒式湍流促进器的反作用可能是因为它将膜管全部覆盖,屏蔽了机械搅拌所引起的旋转作用力对膜表面的冲刷作用。从图3(b)可以看出,当湍流促进器以一定的速度环绕膜管旋转时,3种不同构型的湍流促进器都能提高膜通量,其中推进式湍流促进器的强化作用最为明显。螺旋式湍流促进器的  $FI$  值比较低,可能是因为螺旋式湍流促进器使流体在膜管的某些部位形成了滞留区,从而削减了其对膜通量的改善程度;圆筒式湍流促进器的  $FI$  值比较低,这主要是因为圆筒屏蔽了机械搅拌所引起的旋转作用力,使流体只能在圆筒旋转所产生的作用力下对膜表面进行冲刷。

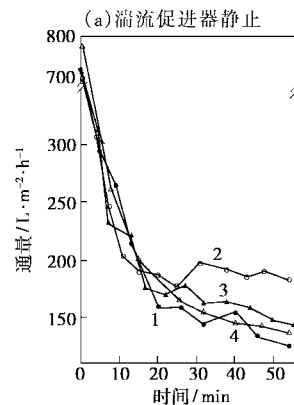
表1 3种湍流促进器的结构参数

湍流促进器	螺间距/ mm	间歇尺寸 <sup>①</sup> / mm	长度/ mm	套筒螺母 长度/mm
推进式	8	2	85	37
螺旋式	5	2	85	37
圆筒式		2	85	

注:①是指湍流促进器与膜表面的距离。



1—空管;2—推进式;3—螺旋式;4—圆筒式



1—空管;2—推进式;3—螺旋式;4—圆筒式

(b)湍流促进器以  $458\text{ r/min}$  旋转

图3 湍流促进器对膜过滤性能的影响

由上面分析可知,旋转的推进式湍流促进器可以显著提高膜通量,其中起强化作用的有 2 个部分:推进构件和套筒螺母。为此,笔者对附带推进式湍流促进器以及仅附带套筒螺母的膜反应器强化膜过滤效果进行了比较。结果表明,上述 2 种条件下对应的  $FI$  值分别为 46.4% 和 40.8% (以大约过滤 60 min 时的通量计算)。因此在推进式湍流促进器强化膜过滤中,起主要作用的是套筒螺母,单纯的推进构件强化效果不是很明显,这主要与推进构件的结构有关。实际上套筒螺母也相当于一个圆筒式湍流促进器,二者差别就是对膜表面的覆盖程度不一样,但对膜通量的改善程度差别却很大,前者的  $FI$  值为 40.8%,后者的  $FI$  值仅为 9.3%。鉴于圆筒式湍流促进器对膜表面的覆盖程度对膜通量的影响很大,在固定圆筒与膜表面之间的距离为 2 mm 的条件下,考察了圆筒对膜表面的覆盖程度对膜通量的影响,实验结果如图 4 所示,其中负值表示圆筒没有覆盖膜表面。可见,当圆筒完全覆盖膜表面时,膜通量最小,当覆盖程度减小时,膜通量有所增加,但是当圆筒不覆盖膜表面的程度较大时,膜通量又减小。当圆筒对膜表面的覆盖程度在 8% 左右时,其对膜过滤的强化效果最好。

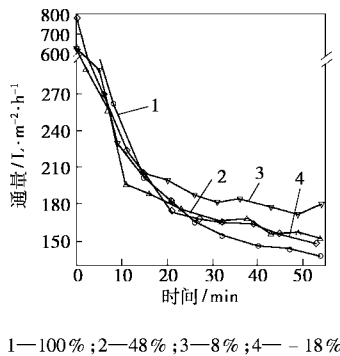


图 4 圆筒对膜表面的覆盖程度对膜通量的影响

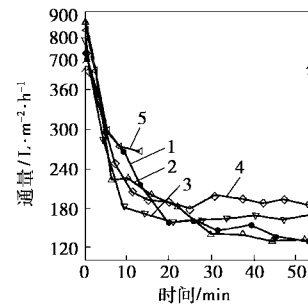
另外,实验还考察了圆筒式湍流促进器与膜表面之间的间隙对强化膜过滤效果的影响,实验中圆筒对膜表面的覆盖程度为 100%。结果显示,当间隙为 2 mm 时,  $FI$  值为 9.3%;间隙为 4 mm 时,  $FI$  值为 5.5%。这说明,当湍流促进器离膜表面比较近时,其旋转产生的作用力对膜表面的冲刷效果明显,强化效果显著。但湍流促进器离膜表面也不宜太近,否则会造成如下结果:①易形成流动死区或滞留区,使膜通量减少;②旋转的湍流促进器会使膜管松动或脱落,使实验失败。

所以,本实验选用推进式湍流促进器用于膜过

滤强化,其中套筒螺母对膜表面的覆盖程度为 8%,与膜表面之间的距离为 2 mm。

### 2.2 湍流促进器旋转速度对膜通量的影响

图 5 显示了湍流促进器旋转速度对膜通量的影响。可以看出,当湍流促进器静止时,不能提高膜的通量,在其余的旋转速度下,膜通量都有所提高,而且随着旋转速度的增加膜通量也相应增加。这说明,较高的湍流促进器旋转速度有利于膜通量的提高。

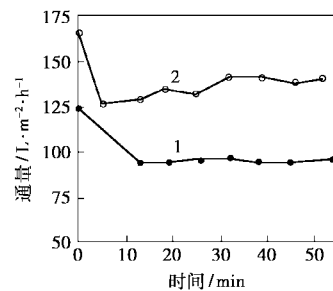


1—空管;2—0 r/min;3—300 r/min;4—458 r/min;5—544 r/min

图 5 湍流促进器旋转速度对膜通量的影响

### 2.3 高悬浮液质量浓度下湍流促进器强化膜过滤的效果

固定搅拌速度 800 r/min,进行了悬浮液质量浓度为 50 g/L 的湍流促进器强化膜过滤实验(湍流促进器旋转,其速度为 458 r/min),结果如图 6 所示。



1—空管;2—附加湍流促进器

图 6 膜通量随时间的变化

由图 6 可以看出,在较高的悬浮液质量浓度下,旋转的湍流促进器同样可以提高膜通量。邢卫红等<sup>[5]</sup>在采用陶瓷微滤膜错流过滤技术回收钛白粉水洗液中二氧化钛粒子的过程中,考察了缠绕式湍流促进器对不同浓度原料液微滤过程的强化效果。结果发现,当原料液质量浓度较低(0.1 g/L)时,湍流促进器可显著提高膜通量;而当原料液质量浓度较高(10 g/L)时,湍流促进器反而使膜通量降低。他们认为这可能是由于原料液质量浓度的升高,导致

(下转第 60 页)

经过改造后即可满足扩产要求。

## 2 模拟计算及改造方案

首先,需要通过流程模拟计算确定原有装置是否可以满足扩产以后的处理能力。甲醇回收工序中甲醇-甲缩醛-水三元体系属于强非理想体系,甲缩醛分别与甲醇、水形成二元共沸体系,甲醇、甲缩醛、水形成三元共沸体系,对于低压单一液相系统,Wilson、NRTL、UNIQUAC 等活度系数模型均适用。笔者经过综合考虑,认为以 Wilson 方程作为平衡常数( $K$ 值)的计算模型较为适宜;气相参数用理想气体方程计算;系统焓值用 Ideal-Gas、Henry's Law 的非对称模型计算。甲醇-甲缩醛-水三元体系中所含二元体系的 Wilson 模型参数如表 1<sup>[2]</sup>。

表 1 Wilson 模型二元交互作用参数

体系	水-甲醇	甲缩醛-水	甲醇-甲缩醛
参数/ $J \cdot mol^{-1}$	225.3 444.1	629.1 2271.7	-65.9 903.8

通过详细模拟计算,确定如下改造方案:①将原装置中甲醇塔和甲缩醛塔位置互换;②选择新型高效填料——DZ 型高效填料、Zupak 型填料和 Chaopak 型填料,并用重新设计的新型塔内件代替原塔内件设备。

DZ 型高效填料同传统填料相比,主要特点在于其表面经过机械处理。填料经表面处理,比表面积增加 30% 左右,空隙率达到 95% 以上,液体在其上更容易形成均匀的液膜,气体经过其表面时湍动更剧烈,加强了传质传热的功能。同时根据流体力

(上接第 58 页)

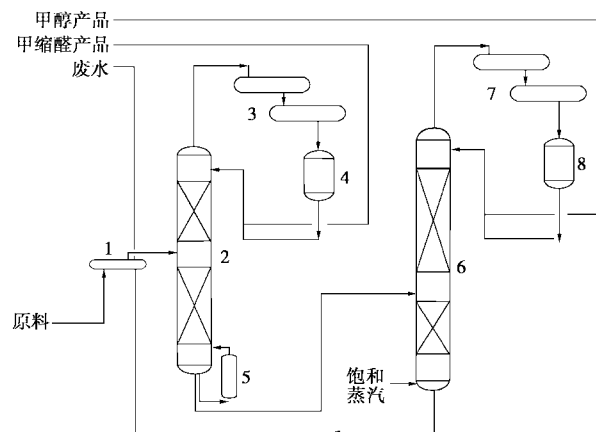
沉积层厚度的增加,在膜管的某些部位形成流动死区和滞留区,从而导致膜通量下降。而在本实验中,当悬浮液质量浓度高达 50 g/L 时,湍流促进器同样可显著增大膜通量。这说明即使在较高的悬浮液质量浓度下,所使用的外置式湍流促进器也不会使膜管的某些部位形成流动死区和滞留区,所以可以进行高悬浮液质量浓度的膜过滤强化实验。

## 3 结论

(1)在 3 种外置式湍流促进器(推进式、螺旋式、圆筒式)强化膜过滤实验中,推进式湍流促进器的强化效果最明显。

学研究结果,将倾斜角度稍加调整,使得流体流动更加顺畅,气、液流过两盘填料接触点时不会发生流道的急剧变化,从而使压降变小,通量变大。液体分布器采用高通量、低压降的槽式液体分布器;液体收集器采用百叶窗式液体收集器;甲缩醛塔塔底再沸器采用热虹吸式再沸器。为解决改造后甲醇塔塔底再沸器加热面积不够的问题,将甲醇塔塔底加热方式改为饱和蒸汽直接加热;为了保证冷凝效果,塔顶冷凝器采用串联的两级冷凝结构。

改造后甲醇回收工序工艺流程如图 1 所示,改造后两塔的结构如图 2 所示。通过上述改造,利用 2 套原有装置即可满足生产需要,每套装置处理能力为 4.5 t/h。有关模拟计算结果见表 2。采用新型 DZ 型高效填料及 Zupak 型填料进行流体力学核算,结果如表 3 所示。



1—原料预热器;2—甲缩醛塔;3,7—冷凝器;4,8—回流罐;  
5—再沸器;6—甲醇塔

图 1 改造后甲醇回收工序工艺流程

(2)随着湍流促进器旋转速度的增加,膜通量也相应增加。

(3)即使在较高的悬浮液质量浓度下,所设计的外置式湍流促进器也不会使膜管的某些部位形成流动死区和滞留区,同样会提高膜通量。

## 参考文献

- [1] Vitulli G, Verrazzani A, Pitzalis E, et al. [J]. Catalysis Letters, 1997, 44 (3-4): 205-210.
- [2] Ueda T, Hata K, Kikuoka Y. [J]. Water Science and Technology, 1996, 34(9): 189-196.
- [3] Ueda T, Hata K. [J]. Water Research, 1999, 33(12): 2888-2892.
- [4] 南京工业大学. 一体式悬浮床无机膜反应器[P]. CN 02138439. 8, 2002-10-15.
- [5] 邢卫红, 童金忠, 徐南平, 等. [J]. 化工进展, 2000, 19(1): 44-49. ■