

## 研究论文

## 陶瓷膜通道相互作用的实验分析及 CFD 优化

彭文博, 漆虹, 李卫星, 邢卫红, 徐南平

(南京工业大学膜科学技术研究所, 材料化学工程国家重点实验室, 江苏南京 210009)

**摘要:** 提出陶瓷膜过滤时, 通道之间存在 3 种效应关系 (壁厚效应、干扰效应、遮挡效应), 并用实验进行了验证。对于多通道陶瓷膜构型的设计, 要考虑 3 种效应。膜孔径小于 200 nm 的陶瓷膜, 可以增大其通道的排布密度, 通过提高装填密度可以提高单位体积的处理量; 膜孔径大于 500 nm 的陶瓷膜, 中间的通道对通量几乎没有贡献, 提高装填密度意义不大。固定膜元件的外径, 选取通道直径  $a_c$  和壁厚  $a_w$ , 并设定两参数的比值为  $\alpha$ , 采用计算流体力学 (CFD) 软件进行模拟计算, 获得了通量与处理量随孔径与  $\alpha$  值的变化关系。

**关键词:** 陶瓷膜; 纯水通量; CFD; 构型

**中图分类号:** TQ 028.8

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0438-1157 (2008) 03-0602-05

## Experimental investigation of effects of ceramic membrane channels on flux and optimization with CFD

PENG Wenbo, QI Hong, LI Weixing, XING Weihong, XU Nanping

(Membrane Science and Technology Research Center, State Key Laboratory of Materials-Oriented Chemical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, Jiangsu, China)

**Abstract:** There are three effects in the ceramic membrane filtration process, wall thickness effect, interfering effect, sheltering effect, and these effects are validated by experiments. When mean pore size of membrane is less than 200 nm, flow by volume is increased by enhancing loading density. When mean pore size of membrane is more than 500 nm, the contribution of middle channel to the total pure water flux (PWF) of ceramic membranes can be neglected, and it is no use to enhance loading density. It is assumed that the diameter of membrane module was unchanged, and defined channel diameter  $a_c$ , thickness of the wall  $a_w$ , and set  $\alpha$  as the ratio of  $a_c$  and  $a_w$ . The relationship between flux, flow, mean pore size and  $\alpha$  was acquired by numerical simulation with CFD software.

**Key words:** ceramic membrane; pure water flux; CFD; configuration

### 引 言

无机陶瓷膜经过多年的发展, 在众多领域获得了广泛的应用, 成为膜领域发展最迅速、最有发展

前景的品种之一。但由于其生产成本低、脆性大、密封难等问题限制了其在更广泛领域的应用<sup>[1-2]</sup>。为了降低成本, 许多研究者通过开发膜元件、组件的设计, 提高装填密度来降低成本。陶瓷膜元件的

2007-08-07 收到初稿, 2007-11-21 收到修改稿。

**联系人:** 邢卫红。第一作者: 彭文博 (1981-), 男, 博士研究生。

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划项目 (2003CB615700); 国家自然科学基金项目 (20436030); 江苏省自然科学基金项目 (BK2006722)。

**Received date:** 2007-08-07.

**Corresponding author:** Prof. XING Weihong. E-mail: xingwh@njut.edu.cn

**Foundation item:** supported by the National Basic Research Program of China (2003CB615700), the National Natural Science Foundation of China (20436030) and the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK2006722).

几何外形包括平板、管式、多通道以及中空纤维等<sup>[3]</sup>。目前商品化的多孔陶瓷膜元件主要集中在多通道（包括蜂窝体）构型，美国 pall 公司生产出六边形 19 通道陶瓷膜，美国 CeraMem 公司生产出直径 142 mm、长 864 mm 的蜂窝体陶瓷膜，膜面积达到了 10.7 m<sup>2</sup>。法国的 Tami 公司生产出根据花瓣形状设计出的陶瓷膜，大大提高了陶瓷膜的面积体积比。国内主要陶瓷膜生产公司如南京九思、江苏久吾等生产的陶瓷膜，其主要构型是 7、19、37、61 通道等。

计算流体力学（computational fluid dynamics, CFD）技术能模拟出实际运行过程中各种所测数据状态。近几年来，将 CFD 技术用于膜分离过程的模拟计算得到快速发展，在陶瓷膜过滤过程主要研究有两部分<sup>[4-12]</sup>，一是对过滤过程的模拟计算，二是对陶瓷膜元件和组件的优化设计，但对利用 CFD 技术对陶瓷膜元件构型的设计报道较少。本文旨在通过实验分析陶瓷膜过滤时通道之间的相互影响关系，并对陶瓷膜的构型进行 CFD 优化，综合考虑单位体积的处理量以及能耗问题，确定膜孔径与几何构型的关系，为陶瓷膜生产提供依据。

## 1 实验部分

采用纯水（电导率 < 4 μs · cm<sup>-1</sup>）为介质测定陶瓷膜的纯水通量。操作条件为：温度 20℃，压力 101.325 kPa，膜面流速为 3 m · s<sup>-1</sup>。以 7 通道（平均孔径 3 μm）为例，采用堵塞通道的方式，改变通道数量、位置，考察了通道与通道之间的相互关系。实验中分别测定了 26 种堵孔方式下的陶瓷膜纯水通量。7 通道陶瓷膜几何尺寸如表 1 所示，纯水通量实验值如表 2 所示。

表 1 7 通道陶瓷膜的几何尺寸

Table 1 Geometry size of 7-channel ceramic membrane

Diameter of channel, a <sub>c</sub> /mm	Wall thickness of channel, a <sub>w</sub> /mm	Diameter of membrane element /mm	Length of membrane element /mm	Area of membrane element /m <sup>2</sup>	Volume of membrane element /m <sup>3</sup>	Ratio of area to volume /m <sup>-1</sup>
6.6	3.05	32	1000	0.145	0.0008	181

## 2 结果与讨论

### 2.1 7 通道之间的相互影响关系

比较表 2 中的构型 1 和构型 2，堵住中心通

表 2 7 通道陶瓷膜（平均孔径 3 μm）堵孔下的纯水通量  
Table 2 Pure water flux (PWF) of 7-channel ceramic membrane with different configurations (3 μm mean pore size)

No.	Configuration	Flow /L · h <sup>-1</sup>	No.	Configuration	Flow /L · h <sup>-1</sup>
1		726	14		475
2		717	15		407
3		685	16		538
4		655	17		411
5		589	18		541
6		612	19		435
7		641	20		316
8		602	21		356
9		585	22		368
10		592	23		383
11		487	24		198
12		538	25		237
13		565	26		0

Note: Symbol of fork (⊗) represents blocked channel.

道，单根膜管的处理量衰减很小，说明中心通道的贡献很小，但是单独打开中心通道（如构型 24），此时中心通道是有较大处理量的，因此说明外围的 6 个通道对中心通道有抑制作用，称其为“遮挡效应”。7 通道是最简单的多通道形式，对于 19、37、61 通道，这种现象会更明显，因此在陶瓷膜元件

的设计上更要考虑到这一点。比较构型 24 和 25 可以得到, 中心通道的处理量要小于周边一个通道的处理量, 这是因为周边一个通道到渗透侧的距离减小, 渗透阻力减小, 因此周边一个通道的处理量会大于中心通道的处理量, 称这种现象为“壁厚效应”。因此在多通道陶瓷膜制备中, 保证产品完整性和机械强度的同时应尽量减薄壁厚。比较构型 21、22 和 23 同样是只打开周围的两通道, 但是处理量存在差异, 这是因为通道排布位置不一样, 造成处理量的差异, 称这种现象为“干扰效应”。从中可以发现, 通道间距越大, 干扰效应越小。比较构型 14、15、16 发现同样打开 3 个通道, 处理量之间差异很大, 构型 16 的处理量最大。比较构型 17、18、19, 构型 18 的处理量最大。从中发现结构越对称, 通道“干扰效应”越低, 处理量越大。

根据以上分析, 可以通过“遮挡效应”、“壁厚

效应”、“干扰效应”来解释 26 种排布方式处理量的差异。当通道直径相同时,  $n$  通道的陶瓷膜过滤效率远远比不上  $n$  根单管并联使用时的过滤效率。这是多通道构型的不足, 这一不足是由于通道之间的 3 种效应的存在所决定的。

## 2.2 通道与通道相互影响的 CFD 计算

根据 Darcy 定律, 采用 CFD 软件中的 Fluent 软件可以定量计算出不同堵塞通道方式下的 7 通道陶瓷膜 (平均孔径  $3\ \mu\text{m}$ ) 元件沿渗透方向上的压力分布、速度分布 (图 1), 进而计算出不同平均孔径陶瓷膜的处理量, 结果见表 3。计算主要根据连续性方程、Darcy 定律, 采用有限体积法可以求得多孔陶瓷膜沿着渗流方向上压力分布的数值解, 从而求得多孔陶瓷膜沿着渗流方向上速度分布的数值解, 从而计算出多孔陶瓷膜的纯水通量。具体计算方法见文献 [13]。

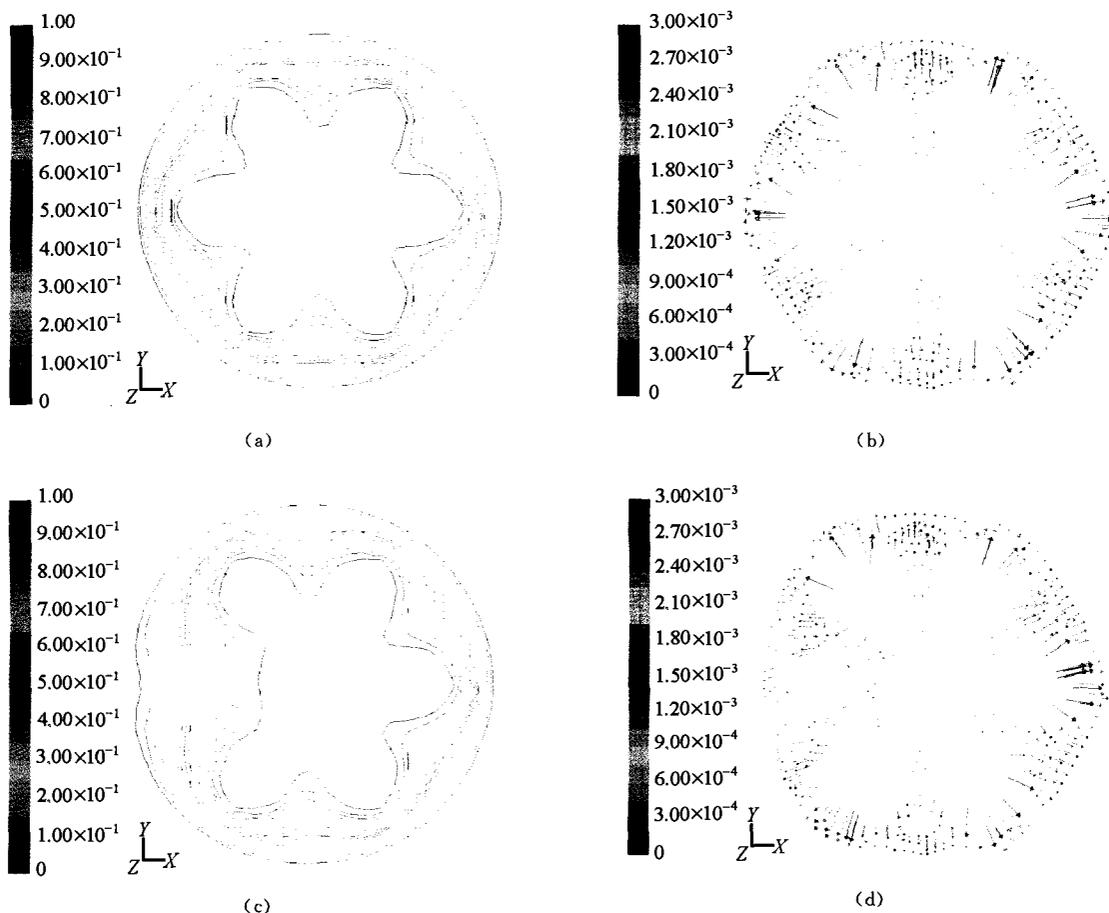


图 1 不同构型陶瓷膜截面上的压力分布和速度分布

Fig. 1 Distribution of pressure and velocity vectors of ceramic membranes with different configuration ( $3\ \mu\text{m}$  mean pore size)

图 1 (a) 表示通道全打开时截面上的压力分布，从中根据等压线的分布可以看出通道与通道之间的相互干扰，还可以看出中间区域压力梯度很小，因此对于以压力为驱动的膜过滤过程，中心通道对整个通量的贡献几乎为 0。图 1 (b) 表示通道全打开时截面上的速度分布，从中可以看出中心通道的渗透速度相对周围 6 个通道的渗透速度要小很多，这与实验结果是一致的。图 1 (c) 表示封闭一个通道时截面上的压力分布，在封闭通道的周围压力梯度很小，这个区域的渗透速度也会很小。图 1 (d) 表示封闭一个通道时截面上的速度分布，从中发现由于边上一个通道的关闭，减小了“遮挡效应”，中心通道在这一侧上有了渗透速度。

表 3 是实验部分中堵孔方式 1 和 3 的纯水通量实验值与计算值的比较，从中可以看出，实验值与计算值吻合较好。利用 CFD 软件进行纯水通量的模拟计算是可靠的。

表 3 两种构型陶瓷膜纯水通量实验值与计算值的比较

Table 3 Comparison of PWF between experimental and simulated data

Configuration of Table 2	Flow of experiment /L · h <sup>-1</sup>	Flow of simulation /L · h <sup>-1</sup>	Error /%
1	726	771	6.20
3	685	705	2.92

Note: Operating pressure is 101.325 kPa.

### 2.3 7 通道构型的设计

综合考虑 3 种效应的存在，利用 CFD 对 7 通道构型进行优化设计。固定膜元件外径为  $\phi 32$  mm，改变通道直径与壁厚的比例关系，来考察通量的变化，为了简化设计，本文固定外径为  $a$ ，认为通道与通道、通道与壁面的距离相等为  $a_w$ ，通道直径为  $a_c$ ，如图 2 所示。设定  $a_c$  与  $a_w$  的比值为  $\alpha$ ， $\alpha$  可以在一定范围内选取，一般通过实验或者经验公式来确定。

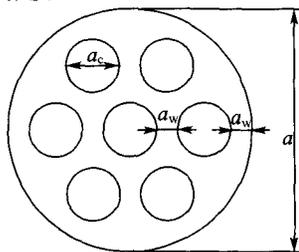


图 2 7 通道陶瓷膜断面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of 7-channel ceramic membrane

本文固定外径  $a$ ，通过改变  $\alpha$  值，采用 Fluent 计算软件考察膜渗透通量和单个膜元件处理量的变化，结果见图 3 和图 4。

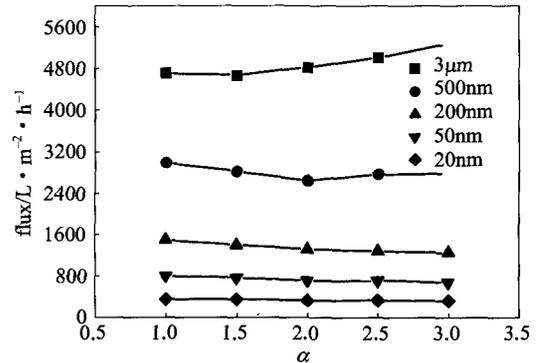


图 3 不同  $\alpha$  值下 7 通道陶瓷膜的渗透通量的计算值  
Fig. 3 Simulated PFW of 7-channel ceramic membrane with different  $\alpha$

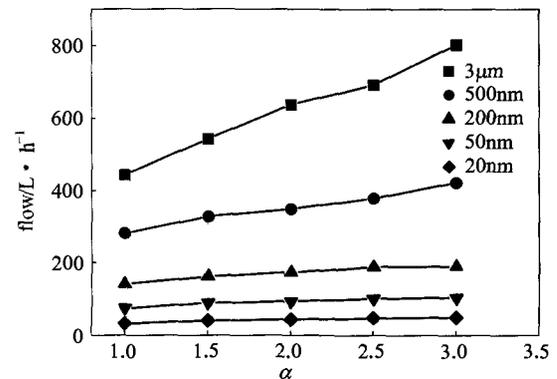


图 4 不同  $\alpha$  值下 7 通道陶瓷膜的处理量的计算值  
Fig. 4 Simulated flow of 7-channel ceramic membrane with different  $\alpha$

图 3 表示不同  $\alpha$  值下，5 种孔径的 7 通道陶瓷膜的渗透通量的计算值。从图 3 中可以看出，随着孔径的增大渗透通量增大，这是由于随孔径的增大渗透阻力减小。对于  $3 \mu\text{m}$  孔径的陶瓷膜，随着  $\alpha$  值的增大，渗透通量先减小后增大。当  $\alpha$  值从 1 增大到 1.5 时，通道直径越来越大，每圈上排布越来越密，通道之间距离越来越短，虽然“壁厚效应”减小了，但是通道与通道的“干扰效应”增大了，所以造成过滤效率降低、通量降低。当  $\alpha$  值从 1.5 增大到 3 时，“壁厚效应”的减小幅度大于“干扰效应”的增大幅度，使得过滤效率提高、通量增大。因此，对于  $3 \mu\text{m}$  孔径的膜， $\alpha$  值越大越好，即膜制备时，通道直径越大壁厚越薄越好，对于  $500 \text{ nm}$  孔径的陶瓷膜，随着  $\alpha$  值的增大，渗透通

量先减小后增大。原因同 3  $\mu\text{m}$  孔径的陶瓷膜一样。当  $\alpha$  值取 2 左右时, 过滤效率最低、通量最小。对于 200、50 nm 孔径的陶瓷膜, 随着  $\alpha$  值的增大, 渗透通量减小, “干扰效应”超过了“壁厚效应”, 使得通量降低。对于 20 nm 孔径的陶瓷膜, 随着  $\alpha$  值的增大, 渗透通量基本不变。这是因为过滤时, 渗透阻力全部集中在膜层上, 通道的位置差异对渗透阻力影响不大, “壁厚效应”、“干扰效应”都减弱, 因此膜的通量随  $\alpha$  值变化而变化很小。

图 4 表示不同  $\alpha$  值下, 5 种孔径的 7 通道陶瓷膜的处理量的计算值。膜的处理量为膜通量与膜面积的乘积。随着膜孔径增大, 处理量增大, 这是由于渗透通量增大;  $\alpha$  值对孔径大于 500 nm 的膜影响很大, 随着孔径的减小,  $\alpha$  值的影响减小。 $\alpha$  值增大, 表示通道直径增大, 膜面积也增大, 故处理量会增大, 但通道直径增大意味着过滤时进料的增多, 因此泵的能耗会增大, 同样提高了成本, 因此综合考虑膜的渗透通量和单位体积处理量, 在设计时, 对于 3  $\mu\text{m}$  孔径的膜,  $\alpha$  值在加工的限制下越大越好。对于 500 nm 孔径膜  $\alpha$  值取 3, 对 200 nm 孔径膜  $\alpha$  值取 2.5, 对于 50、20 nm 孔径的膜  $\alpha$  值取 2 为宜。

### 3 结 论

(1) 根据堵孔实验结果, 提出了陶瓷膜过滤时存在 3 种效应: 壁厚效应、干扰效应、遮挡效应。并根据 CFD 计算, 通过分析压力场、速度场的变化解释了 3 种效应的存在。

(2) 根据 CFD 计算可以确定不同孔径陶瓷膜的最佳几何结构尺寸。对于 3  $\mu\text{m}$  孔径的膜,  $\alpha$  值在加工的限制下越大越好。对于 500 nm 孔径膜  $\alpha$  值取 3, 对 200 nm 孔径膜  $\alpha$  值取 2.5, 对于孔径小于 50 nm 的膜  $\alpha$  值取 2 为宜。

(3) CFD 软件是优化设计多孔陶瓷膜构型的一种有力工具。

### References

- [1] Xu Nanping (徐南平), Xing Weihong (邢卫红), Zhao Yijiang (赵宜江). The Separation Technology and Application of Ceramic Membranes (无机膜分离技术与应用). Beijing: Chemical Industry Press, 2003; 1-2
- [2] Xu Nanping (徐南平), Li Weixing (李卫星), Zhao Yijiang (赵宜江), Xing Weihong (邢卫红), Shi Jun (时钧). Theory and method of application-oriented ceramic membranes design (I): Simulation of relation between membrane permeability and micro-structure. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*(化工学报), 2003, **54** (9): 1284-1289
- [3] An Shuling (安树林). Practical Tutorial of Membrane Science Technology (膜科学技术实用教程). Beijing: Chemical Industry Press, 2005; 43-47
- [4] Ghidossi R, Veyret D, Moulin P. Computational fluid dynamics applied to membranes: state of the art and opportunities. *Chemical Engineering and Processing*, 2006, **45**: 437-454
- [5] Lee Y, Clark M. Modeling of flux decline during crossflow ultrafiltration of colloidal suspensions. *J. Membrane Sci.*, 1998, **149**: 181-202
- [6] Geraldes V M, Semiao V, de Pinho M N. Flow management in nanofiltration spiral wound modules with ladder-type spacers. *J. Membrane Sci.*, 2002, **203**: 87-102
- [7] Koutsou C P, Yiantsios S G, Karabelas A J. Numerical simulation of the flow in a plane-channel containing a periodic array of cylindrical turbulence promoters. *J. Membrane Sci.*, 2004, **231**: 81-90
- [8] Dolecek P. Mathematical modeling of permeate flow in multichannel ceramic membrane. *J. Membrane Sci.*, 1995, **100**: 111-119
- [9] Darcovich K, Dal-cin M M, Balleve S, Wavelet J P. CFD-assisted thin channel membrane characterization module design. *J. Membrane Sci.*, 1997, **124**: 181-193
- [10] Dolecek P, Cakl J. Permeate flow in hexagonal 19-channel inorganic membrane under filtration and backflush operating modes. *J. Membrane Sci.*, 1998, **149**: 171-179
- [11] Koutsou C P, Yiantsios S G, Karabelas A J. Direct numerical simulation of flow in spacer-filled channels: effect of spacer geometrical characteristics. *J. Membrane Sci.*, 2007, **291**: 53-69
- [12] Shakaib M, Hasani S M F, Mahmood M. Study on the effects of spacer geometry in membrane feed channels using three-dimensional computational flow modeling. *J. Membrane Sci.*, 2007, **297**: 74-89
- [13] Peng Wenbo (彭文博), Qi Hong (漆虹), Chen Gangling (陈纲领), Zou Linling (邹琳玲), Xing Weihong (邢卫红), Xu Nanping (徐南平). CFD modeling of permeate process in 19-channel porous ceramic membranes. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*(化工学报), 2007, **58** (8): 2021-2026