

中空纤维膜组件结构对其膜蒸馏性能的影响

郝高峰 丁忠伟* 刘丽英 马润宇 杨祖荣
(北京化工大学 化学工程学院, 北京 100029)

摘 要: 对一系列不同封装分率和不同膜面积的中空纤维膜组件进行了直接接触式膜蒸馏对比实验,并考察了操作方式对跨膜通量的影响。结果表明:提高封装分率可以明显降低沟流效应,使壳程流体分布趋于均匀,总体传质、传热效果得到改善,从而使跨膜通量提高,增幅可达 40% 以上;在组件封装分率较低时,热流体走管程更有利于跨膜传质。在进料状况不变的条件下,随着膜面积的增加,组件单位膜面积的跨膜通量明显降低,而总产量则有所增加。

关键词: 膜蒸馏; 中空纤维膜组件; 封装分率; 跨膜通量
中图分类号: TQ028.8

引 言

中空纤维膜组件以其制备技术相对简单、无需支撑体、装填密度大等优点,广泛应用于膜分离的各个领域。通常所采用的中空纤维膜组件多为平直式,即成束的中空纤维膜丝沿组件轴向平行排列,但膜丝在这类组件的壳程是随机分布的,这就导致了壳程流体的分布很不均匀,存在沟流、死区等非理想行为,使实际组件的传质、传热效果与理想组件的预计结果有相当的差距,此类现象被称之为沟流效应^[1-3]。一些研究者指出,对于膜丝随机装填的组件,封装分率对其性能有很大的影响^[4-7]。在理想中空纤维膜组件中,膜丝在壳程是按一定的规则均匀分布的,但实际情形与理想情形相差甚远^[3]。作为膜组件重要结构参数之一的封装分率对膜丝的分布有着重要影响,进而影响流体在组件内分布。本文以用于膜蒸馏过程的中空纤维膜组件为研究对象,通过清水实验,重点考察了封装分率、膜面积及操作方式对其膜蒸馏性能的影响。

1 实验部分

1.1 膜组件制备

实验采用聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维膜,膜

丝内径为 1.0 mm,外径为 1.3 mm,膜平均孔径为 0.16 μm ,孔隙率为 85%。在膜面积一定的条件下,分别通过改变组件的有效长度或内径的方式得到一系列封装分率不同的组件;在组件内径、有效长度一致的条件下,通过改变封装分率得到一系列膜面积不同的组件,具体规格如表 1 所示。其中 1[#]~6[#]组件用于考察封装分率对其性能的影响;而 7[#]~10[#]组件用于考察膜面积对其跨膜通量及组件总产水量的影响,同时为了提高膜丝的分散性和封装分率,在 7[#]~10[#]组件中加入外径为 8 mm 的内芯。

表 1 组件结构参数

Table 1 Geometric parameters of membrane modules

编号	膜面积/ m^2	纤维丝 根数	封装分率/ %	组件内径/ mm	有效长度/ cm
1 [#]	0.035	35	30	14.0	28.0
2 [#]	0.035	46	40	14.0	21.0
3 [#]	0.035	58	50	14.0	17.0
4 [#]	0.035	70	60	14.0	14.0
5 [#]	0.035	46	33	15.5	21.0
6 [#]	0.035	46	54	12.0	21.0
7 [#]	0.016	16	20	14.0	28.0
8 [#]	0.023	23	30	14.0	28.0
9 [#]	0.031	31	40	14.0	28.0
10 [#]	0.040	39	50	14.0	28.0

1.2 实验流程

实验流程如图 1 所示,左侧蠕动泵抽取位于电子天平上的冷侧料液槽中的纯水,将其送入制冷机

收稿日期: 2008-12-12

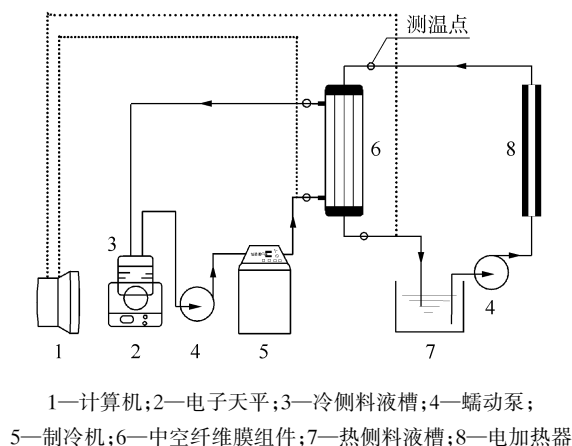
基金项目: 国家“十一五”科技计划支撑项目(2006BAB03A06)

第一作者: 男,1982 年生,硕士生

* 通讯联系人

E-mail: dingzw@mail.buct.edu.cn

中,降至预期温度后进入膜组件;同时右侧蠕动泵抽取热侧料液槽中的纯水,将其送入电加热器中,加热至预期温度后进入膜组件进行膜蒸馏过程。实验采用逆流操作方式,所需测定的温度、跨膜通量、加热电压均由计算机采集数据并记录。



1—计算机;2—电子天平;3—冷侧料液槽;4—蠕动泵;
5—制冷机;6—中空纤维膜组件;7—热侧料液槽;8—电加热器

图1 膜蒸馏实验流程图

Fig.1 Membrane distillation experimental setup

2 结果与讨论

2.1 封装分率对跨膜通量的影响

在相同实验条件下,通过测量比较1[#]~6[#]膜组件的跨膜通量发现,在实验范围内,即组件封装分率在30%~60%之间时,无论是改变冷、热侧入口温度,还是改变进料量,只要在相同实验条件下,组件的跨膜通量均随封装分率的增加而提高,高封装分率组件的膜蒸馏性能要优于低封装分率的组件。4[#]组件与1[#]组件相比,跨膜通量增幅在40%~65%之间,如图2所示。究其原因,主要是由于壳程膜丝非均匀分布造成的,即膜丝在有的区域密集一些,有的区域疏松一些,或者说组件内不同区域的局部封装分率是不同的。局部封装分率高的区域流通截面积小,壳程流量较小,其温度很快接近于管程流体;而局部封装分率低的区域,则壳程流量较大,管程流体温度很快接近于壳程流体。因此组件即使在冷、热流体总流量相同的情况下,局部也存在流量差异,即某些区域冷、热流体流量比过大或过小,导致膜两侧温度差急剧降低,使膜蒸馏过程的传质推动力大大削弱,产生了大量低效、无效面积区。而随着封装分率的提高,壳程流体分布逐渐趋于均匀,沟流效应随之显著降低;同时随封装分率的提高,壳程流体流速有所提高,使温度边界层变薄,削弱了温度极

化现象,故传质、传热效果明显加强,跨膜通量随之增大。

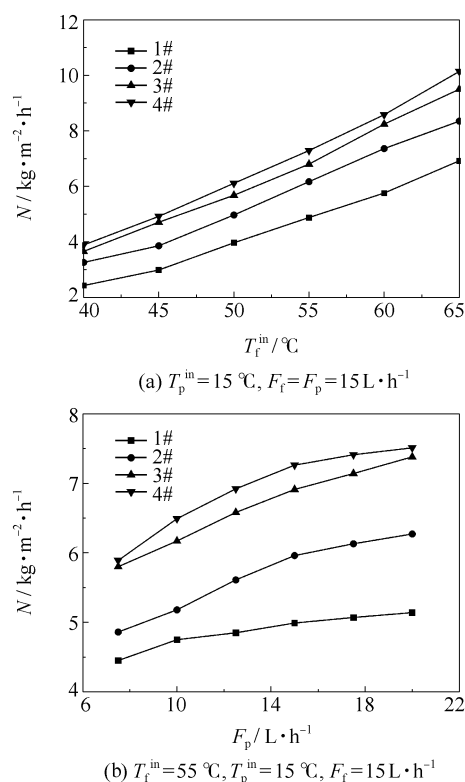


图2 热料液走壳程时封装分率对组件跨膜通量的影响

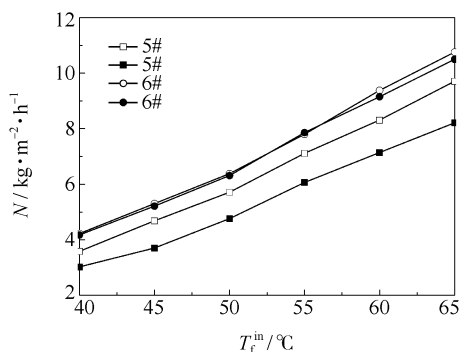
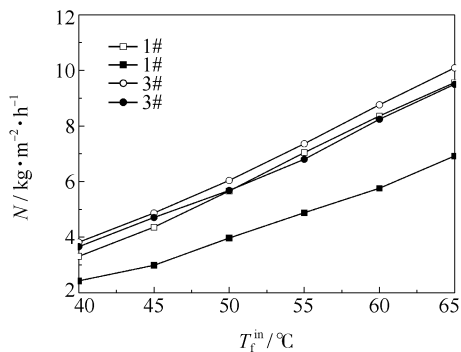
Fig.2 The effect of packing density on module flux when hot feed flows through the shell side

2.2 操作方式对跨膜通量的影响

采用不同的操作方式,即热料液走管程或是走壳程,比较1[#]、3[#]、5[#]、6[#]组件,发现操作方式对组件跨膜通量也有一定的影响,结果如图3所示,可以看在其他条件相同的情况下,热料液走管程要比其走壳程更有利于传质,但随着组件封装分率的提高,二者的差距在减少。这也再次说明了壳程流体的确是非均匀分布的,随着封装分率的提高而有所改善。热料液分布均匀与否对跨膜传质影响更大,由于壳程流体在低封装分率时存在严重的沟流效应,而料液在管程的分布要远比壳程均匀^[8],因此热料液走管程更有利于传质、传热。但当封装分率提高到一定程度时,壳程流体分布已趋于较为均匀,因而由于操作方式的不同所造成的对组件传质、传热的影响也随之变小。

2.3 膜面积对跨膜通量及产量的影响

在相同实验条件下,对膜面积不同的7[#]~10[#]组件进行对比实验。结果如图4所示,组件跨膜通

(a) $T_p^{\text{in}} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $F_f = F_p = 15\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ (b) $T_p^{\text{in}} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $F_f = F_p = 15\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$

实心点: 热料液壳程; 空心点: 热料液走管程

图3 操作方式对组件跨膜通量的影响

Fig.3 The influence of the operating mode on module flux

量随膜面积的增加明显降低,而组件总产量则有所增加。但随着膜面积值的增加,产量上升的幅度在逐渐减小。这主要是由于总的进料量以及进料状况是恒定的,随着膜面积的增加,虽然流体分布趋于均匀,但是平均分配到单位膜面积上的冷、热流量大大降低了,导致膜两侧的温差迅速降低,致使传质、传热的推动力变小了,对应的膜面积不能充分发挥作用,因此组件单位膜面积上的跨膜通量必然降低;另一方面,随着膜面积的增加,组件获得了更大的传质面积,流体分布较低封装分率时也有所改善,整体上趋于均匀,但密集排布的膜丝及膜丝之间的相互吸引会产生一小部分无效的膜面积,即有效膜面积的增加会越来越不明显,故组件的产量的增幅会有所减小。

3 结 论

(1) 提高组件的封装分率可以明显降低沟流效应,改善组件壳程流体分布状况。同时使组件得到更大的传质面积,从而增强其膜蒸馏性能。

(2) 一定范围内提高组件膜面积可以提高组件

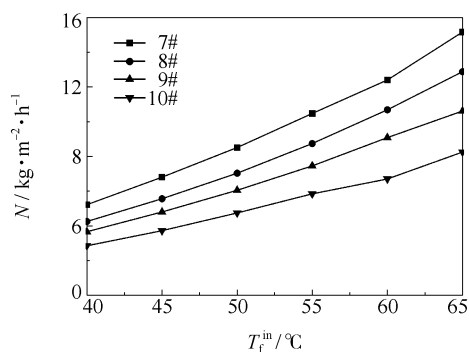
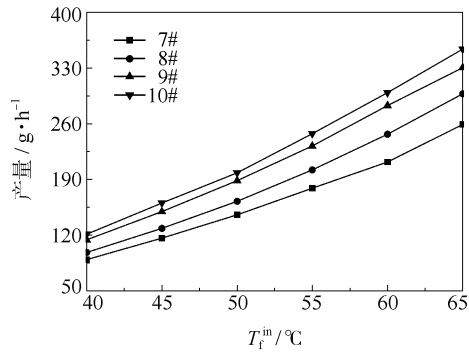
(a) $T_p^{\text{in}} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $F_f = F_p = 15\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ (b) $T_p^{\text{in}} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $F_f = F_p = 15\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$

图4 热料液走管程时膜面积对组件膜蒸馏性能的影响

Fig.4 The effect of the membrane area on module performance when hot feed flows through the tube side

产量,但由此而带来组件跨膜通量的下降也意味着对膜面积使用效率的下降。因此在实际装置中采用膜面积过大的组件来提高产量的做法是既不经济也不有效的;而采用多个组件并联的方式,既可以保证单个组件能发挥其最大效能,同时也可以提高总产量。

符 号 说 明

F_f ——热料液进料量, L/h

F_p ——冷料液进料量, L/h

N ——跨膜通量, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$

T_f^{in} ——热料液入口温度, $^{\circ}\text{C}$

T_p^{in} ——冷料液入口温度, $^{\circ}\text{C}$

参考文献:

- [1] Wu J, Chen V. Shell-side mass transfer performance of randomly packed hollow fiber modules[J]. Journal of Membrane Science, 2000, 172(1/2): 59-74.
- [2] 阎建民, 袁其朋, 马润宇. 用缠绕式摹组件强化传递过程的研究[J]. 膜科学与技术, 2001, 21(4): 13-16.

- Yan J M, Yuan Q P, Ma R Y. Transfer enhancement of membrane process with helical wound modules[J]. Membrane Science and Technology, 2001, 21(4): 13 – 16. (in Chinese)
- [3] 丁忠伟. 膜蒸馏的膜组件性能及动态过程研究[D]. 北京:北京化工大学化学工程学院, 2001.
- Ding Z W. Study on the Module Performance and Dynamic Process of Membrane Distillation [D]. Beijing: College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, 2001. (in Chinese)
- [4] Gawroński R, Wrzesińska B. Kinetics of solvent extraction in hollow-fiber contactors[J]. Journal of Membrane Science, 2000, 168(1/2): 213 – 222.
- [5] Zheng J M, Xu Z K, Li J M, et al. Influence of random arrangement of hollow fiber membranes on shell side mass transfer performance: A novel model prediction[J]. Journal of Membrane Science, 2004, 236(1/2): 145 – 151.
- [6] Ding Z W, Liu L Y, Ma R Y. Study on the effect of flow maldistribution on the performance of the hollow fiber modules used in membrane distillation[J]. Journal of Membrane Science, 2003, 215(1/2): 11 – 23.
- [7] 李利君, 刘丽英, 丁忠伟. 装填分率对中空纤维膜组件壳程传质性能的影响[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2005, 32(3): 1 – 4.
- Li L J, Liu L Y, Ding Z W. The effect of packing density on shell-side mass transfer performance of hollow fiber membrane module[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science, 2005, 32(3): 1 – 4. (in Chinese)
- [8] Wang Y J, Chen F, Wang Y, et al. Effect of random packing on shell-side flow and mass transfer in hollow fiber module described by normal distribution function[J]. Journal of Membrane Science, 2003, 216(1/2): 81 – 93.

The effect of configuration on the performance of a hollow fiber membrane module

HAO GaoFeng DING ZhongWei LIU LiYing MA RunYu YANG ZuRong

(College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Direct contact membrane distillation experiments with a series of hollow fiber membrane modules of different packing density or different membrane area have been conducted, and the effects of the operating mode on the trans-membrane flux were investigated. It was found that the distribution of the flow in the shell side became more uniform with increasing packing density, so that the channeling effect was weakened, the trans-membrane flux was enhanced and the flux enhancement was more than 40%. For lower packing densities, flow of hot feed through the tube side was more beneficial to mass transfer. With increasing membrane area, the productivity of the module increased to some extent whilst the trans-membrane flux became significantly lower.

Key words: membrane distillation; hollow fiber membrane module; packing density; trans-membrane flux