

科研与开发

直接接触式与气隙式膜蒸馏的比较研究

丁忠伟¹ 刘伟¹ 张恭孝² 马润宇¹

(1. 北京化工大学化学工程学院, 北京 100029; 2. 泰山医学院工程学院, 泰安 271000)

摘要:采用模拟计算和实验的方法对直接接触式膜蒸馏(DCMD)和气隙式膜蒸馏(AGMD)过程进行了比较研究。模拟计算及实验结果表明, AGMD 中的气隙构成了过程的主要阻力, 使得跨膜温差远小于膜两侧流体主体温差, 这是两种膜蒸馏方式行为差别的主要原因所在。与 AGMD 相比, DCMD 不仅膜通量水平高, 而且膜通量对操作条件反应灵敏, 易于实施过程的强化。而 DCMD 的热效率与 AGMD 相比差距并不太大。

关键词:直接接触式膜蒸馏; 气隙式膜蒸馏; 膜通量

中图分类号: TQ028.8

文献标识码: A

Comparative study on direct contact and air gap membrane distillation

DING Zhong-wei¹, LIU Wei¹, ZHANG Gong-xiao², MA Run-yu¹

(1. College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. Engineering Institute, Taishan Medical College, Tai'an 271000, China)

Abstract: The difference between direct contact membrane distillation (DCMD) and air gap membrane distillation (AGMD) is compared, both by the prediction of the mathematical models of these two processes and by membrane distillation experiments. Results indicate that the limit step in AGMD process is the transport in air gap, and this makes the temperature difference between two sides of the membrane much lower than that of two fluids on the two side of the membrane. Compared with AGMD, DCMD process exhibits higher level of water flux, and its water flux is much more sensitive to operating conditions, and this makes it easier to optimize the process. And DCMD can acquire an acceptable thermal efficiency, although its value is some lower than that of AGMD.

Key words: direct contact membrane distillation; air gap membrane distillation; the flux of membrane

膜蒸馏(MD)是以混合液中的挥发性组分在多孔疏水膜两侧的蒸汽压差为跨膜推动力的膜分离过程。作为一种新型的膜分离技术,膜蒸馏具有分离效率高、操作条件温和、对膜的机械强度要求低等优点^[1],可用于海水和苦咸水的淡化、超纯水的制备、水溶液的浓缩等诸多方面^[2]。诞生于 20 世纪 60 年代的膜蒸馏技术在近 10 年来由于制膜水平的提高而获得了较快发展,相继开发出了 4 种膜蒸馏方式,其中直接接触式(DCMD)、气隙式(AGMD)膜蒸馏易于实现,就目前的发展趋势来看最有可能首先用于大规模工业生产。笔者采用数学模拟和实验测定两种手段对直接接触式和气隙式膜蒸馏过程进行比较

研究。

1 数学模型

1.1 DCMD 过程的数学模型

DCMD 是热、质传递同时进行的复杂过程,当传递过程达到稳态时,流体在膜两侧表面温度 $t_{fm}(t_{pm})$ 可以表示为^[3]:

$$t_{fm} = \frac{h_m \cdot (t_p + t_f \cdot h_f/h_p) + h_f \cdot t_f - N \cdot \Delta H}{h_m + h_f(1 + h_m/h_f)} \quad (1)$$

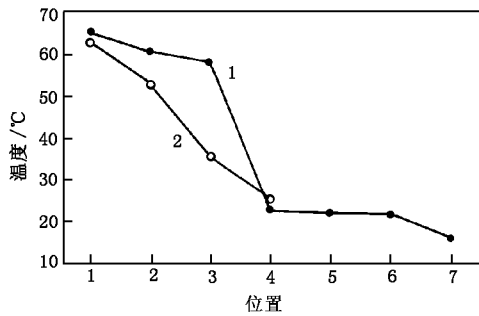
$$t_{pm} = \frac{h_m \cdot (t_f + t_p \cdot h_p/h_f) + h_p \cdot t_p - N \cdot \Delta H}{h_m + h_p(1 + h_m/h_p)} \quad (2)$$

采用 TPKPT 模型^[4]计算式(1)和(2)中的膜通量 N , 具体形式如式(3)。

收稿日期: 2001-12-21

基金项目: 中澳机构合作项目(ACILP)

作者简介: 丁忠伟,男,1968年生,博士,主要从事膜分离技术研究;马润宇,男,1945年生,博士,教授,博导,通讯联系人,主要从事膜分离和生物化工技术方面的研究。



1—AGMD;2—DCMD

位置 1 为热流体主体,2 为热侧膜表面,3 为冷侧膜表面,4 为冷凝液膜表面,5 为冷凝板内侧,6 为冷凝板外侧,7 为冷却水主体

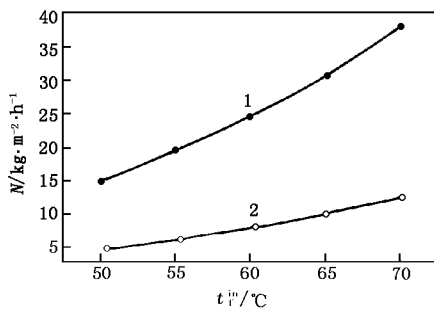
DCMD: $F_f (= F_p) = 3 \text{ L/min}$, $t_f = 62.6^\circ\text{C}$, $t_p = 25.5^\circ\text{C}$,

AGMD: $F_f = 3 \text{ L/min}$, $F_c = 3.48 \text{ L/min}$, $t_f = 65^\circ\text{C}$, $t_c = 16^\circ\text{C}$

图 3 组件内的温度分布

3.2 料液温度对膜通量的影响

图 4 同时给出了 DCMD 和 AGMD 的组件通量受料液温度的影响情况。可以看出,相同操作条件下 AGMD 的组件通量与 DCMD 相比相差甚远,另外,AGMD 中组件通量对热流体入口温度变化的敏感性远不如 DCMD,这一点在图 4 中表现为与 DCMD 对应的曲线斜率明显大于与 AGMD 对应的曲线斜率。考虑到 AGMD 与 DCMD 过程的差别主要就在于前者有气隙的存在,构成 AGMD 传递过程的主要阻力,造成两者在膜通量上的明显差异。



1— $n=0$;2— $n=2$

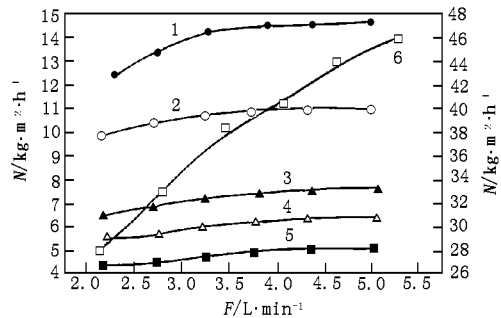
$F_f = F_p = 3 \text{ L/min}$, $t_c^m = 18^\circ\text{C}$

图 4 料液温度对 DCMD 和 AGMD 膜通量的影响

3.3 料液流量对膜通量的影响

图 5 给出了流体流量对两种膜蒸馏方式的膜通量影响关系对比,图中的不同曲线对应着不同的气隙厚度, $n=0$ 对应的是 DCMD。可以看出,虽然 AG-

MD 的膜通量随着流量的增加有所升高,但与 DCMD 相比,相同流量下 AGMD 的通量水平与 DCMD 相差甚远,而且流量对 AGMD 膜通量的影响程度也很小,气隙越厚越是如此。上述现象产生的原因还是在于气隙层的传递阻力是 AGMD 过程的控制步骤,以致于通过提高流体流量来削弱温度极化并不能有效提高膜通量。而在 DCMD 中,没有气隙的存在,膜两侧热边界层内的传热过程可能成为控制步骤,因此膜通量对流体流量的变化非常敏感。



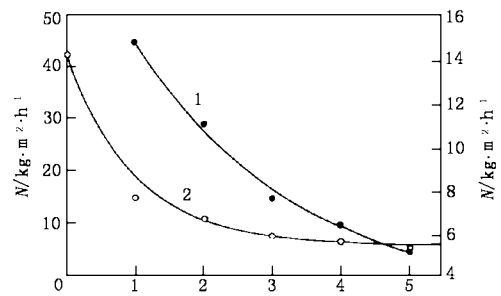
1— $n=1$;2— $n=2$;3— $n=3$;4— $n=4$;

5— $n=5$,以上纵坐标在右;6— $n=6$,纵坐标在左

$t_f^m = 65^\circ\text{C}$, $t_p^m = 20^\circ\text{C}$

图 5 流体流量对 AGMD 和 DCMD 膜通量的影响

3.4 气隙厚度对膜通量的影响



1— $n=1 \sim 5$,纵坐标在左;2— $n=0 \sim 5$,纵坐标在右

$F_f = 3 \text{ L/min}$, $F_c = 3.48 \text{ L/min}$, $t_f^m = 65^\circ\text{C}$, $t_c^m = 15^\circ\text{C}$

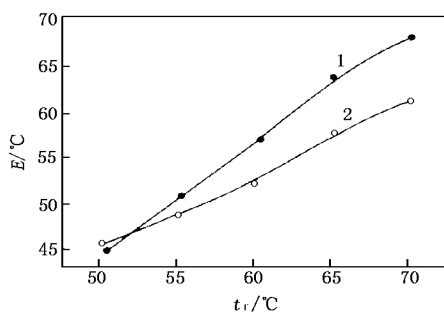
图 6 气隙厚度对膜通量的影响

图 6 给出了气隙厚度对膜通量的影响关系。图中左侧曲线包含了 $n=0$ 的情况,它是 DCMD 的实验结果;右侧曲线则完全是 AGMD 的实验结果。从左侧曲线可以看出,膜蒸馏方式对膜通量起着最重要的影响作用,相对而言,气隙厚度的变化对膜通量的影响是很小的。在 AGMD 中,随气隙厚度的增加

膜通量是下降的,随气隙厚度的变大,下降速度有所减缓。为提高AGMD膜通量,减小气隙厚度是有效手段之一。

3.5 过程热效率

由膜热侧提供的热量并没有全部分用于使挥发性组分气化,部分热量以热传导的方式通过膜并达到膜另一侧的冷流体中。膜蒸馏过程的热效率就是指用于使挥发性组分发生汽化的热量占热侧流体提供热量的分数。前者可以通过实验测定的跨膜通量计算出,后者可以由热流体通过膜组件前后的焓变得到。图7给出了由实验得到的DCMD和AGMD的热效率随热流体入口温度的变化关系。可以看出,MD过程的热效率是随着操作温度的升高而升高的,这一结果看上去与跨膜热传导速率随热流体温度的升高而升高的事实相矛盾,但是如果考虑到膜通量随热流体温度的升高呈指数规律上升,也就不难理解图中所示的规律了。由图7还可以看出,DCMD的过程热效率低于AGMD,这是因为AGMD组件中气隙的存在使跨膜热传导速率大大低于DCMD过程;尽管如此,DCMD的热效率与AGMD相差并不大,这是由于DCMD膜通量远大于AGMD,这极大地提升用于挥发性组分气化的热量占过程总热耗的比例。



1—DCMD;2—AGMD, $n=2$
操作条件与图3相同

图7 DCMD与AGMD的过程热效率比较

3.6 能量回收

膜蒸馏过程是膜热侧流体将热量传递给膜冷侧流体的过程。为了提高过程的热效率,可将来自于热侧、通过跨膜传热到达冷侧的热量加以回收,实现这一目标的方法是将流出膜组件的渗透液(或冷却液)和料液在一热交换设备中进行传热过程,热流的方向是从渗透液到料液。对DCMD而言,能量回收

必须在另外的热交换设备中进行;而AGMD过程具有能量自回收的功能,膜蒸馏过程和热回收过程可以同时膜组件中进行^[4]。AGMD的能量自回收功能使得它在缩小装置规模、节省设备投资方面比DCMD具有一定的优势。

4 结论

(1)AGMD和DCMD过程模型求解结果表明,气隙的存在构成了AGMD的主要传递阻力,它会成为两种膜蒸馏方式存在差别的主要原因,两种膜蒸馏方式的实验结果证实了上述推断。

(2)实验和理论分析结果表明,DCMD具有通量水平高,且对温度、流量等操作条件极为敏感等特点,易于实施过程强化;AGMD不仅通量水平低,且对操作条件极不敏感,减小气隙厚度成为强化该过程的惟一有效手段。

(3)尽管DCMD的跨膜热传导速率大,DCMD的过程热效率低于AGMD,但两者在这方面的差别并不明显。

符号说明

C —膜蒸馏系数, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$	下角标
E —过程热效率, %	c —冷却水
h —传热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	D —分子扩散
M —水的分子质量, $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$	f —热侧流体主体
n —气隙中支承网数	f_m —热侧膜表面
N —膜通量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	g —空气
p —水的蒸气压, Pa	K —Knudsen 扩散
R —通用气体常数, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	\ln —对数平均
t —摄氏温度, °C	m —膜
T —开氏温度, K	p —冷侧流体主体
Y —空气摩尔分数, %	p_m —冷侧膜表面
λ —导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	P —Poiseuille 流动
η —水蒸气黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$	S —冷凝板
ΔH —水的汽化潜热, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	
δ —材质厚度, m	
b —气隙厚度, m	

参考文献

- [1] Lawson K W, Lloyd D R. Membrane distillation[J]. Membr Sci, 1997, 124:1~25
- [2] Lawson K W, Lloyd D R. Membrane distillation II. Direct contact MD [J]. Membr Sci, 1996, 120:123~133
- [3] 丁忠伟, 马润宇, Fane A G. 描述膜蒸馏跨膜传质过程的新模型——TPKPT[J]. 高校化学工程学报. 2001, 15(2):312~317
- [4] 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, 2000