

薄膜蒸发器传热蒸发性能的实验研究

贺小华*

(南京工业大学)

李佳

(南京林业大学)

李庆生 尹侠

(南京工业大学)

摘要 在自行研制的 0.4m^2 薄膜蒸发器实验测试装置基础上,对介质水及烧碱溶液进行了蒸发实验,得到了在不同工艺操作参数下薄膜蒸发器内各料液总传热系数 K 和蒸发强度 EI 的变化曲线。实验结果表明,转子转速及进料量对设备总传热系数 K 及蒸发强度 EI 影响显著,各料液均存在最佳进料量。粘度增加,总传热系数 K 相应减少,蒸发强度 EI 相应增加,实验与数值模拟结果变化规律一致。研究结果表明,从蒸发强度而言,薄膜蒸发器更适合于高粘度料液的蒸发浓缩。

关键词 薄膜蒸发器 传热系数 蒸发强度 粘性料液

中图分类号 TQ051.6⁺2

文献标识码 A

文章编号 0254-6094(2006)02-0067-05

薄膜蒸发器由于其刮板的机械刮擦成膜作用,使处理的物料在蒸发表面停留时间短而受热效果好,特别适用于蒸发浓缩高粘性、热敏性或易结晶物料,已经广泛应用于化工、医疗、食品及轻工等行业^[1-3]。国内外对薄膜蒸发器的传热系数和蒸发效率进行了大量的实验室研究^[4-6],但由于蒸发传热及刮板刮擦成膜的复杂性,用于蒸发设计计算的液膜侧传热系数主要是液膜受热的数据。对蒸发器的蒸发实验多以水为介质,有关粘性料液的传热数据则报道较少。笔者通过数值模拟分析表明,薄膜蒸发器内粘性料液和纯物质水的速度分布存在差异,粘性料液薄膜内尚没有形成明显的传递边界层^[7]。对高粘度料液而言,基于碱液蒸发浓缩开发的机械搅拌式薄膜蒸发器结构从动量和热量传递角度而言,尚有进一步优化设计的余地。

本文在自行研制的 $F=0.4\text{m}^2$ 薄膜蒸发器实验测试装置的基础上,通过改变薄膜蒸发器的操作参数对纯物质水及烧碱溶液进行传热蒸发实验,进一步探讨各工艺操作参数及料液粘性对传热蒸发性能的影响,与数值模拟结果进行比较,从而为薄膜蒸发器设备从结构和操作工艺上进行优化奠定基础。

1 实验流程设计

自行研制的 0.4m^2 薄膜蒸发器实验装置的工艺流程如图1所示。该系统由加料釜、真空机组、蒸发装置、电加热炉、二次蒸汽冷凝器及监测装置几个部分组成。开启真空和加热系统后,导热油由电加热炉加热,导热油进入加料釜加热物料,经过预热的物料由加料釜经由转子流量计进入蒸发器,物料经浓缩后由蒸发器底部排出,进入接受罐;二次蒸汽由上部出口被抽出,进入冷凝器,经缓冲罐进一步捕集可凝性蒸汽后,少量残余气体进入真空泵。

2 介质水的加热蒸发实验与分析

2.1 实验方案

以水为实验介质,考察在不同系统真空度、导热油温度、进料量、进料温度和转子转速等5个参量下总传热系数 K 和蒸发强度 EI 的变化规律,为进一步研究薄膜蒸发器传热机理奠定基础。

各参量按以下选取:

导热油温度 90、120、150℃

系统真空度 70.7、85.6、91.7kPa

进料温度 25、45、65℃

进料量 17.5、42、70L/h

转子转速 214、259、306r/min

* 贺小华,女,1965年8月生,副教授。江苏省南京市,210009。

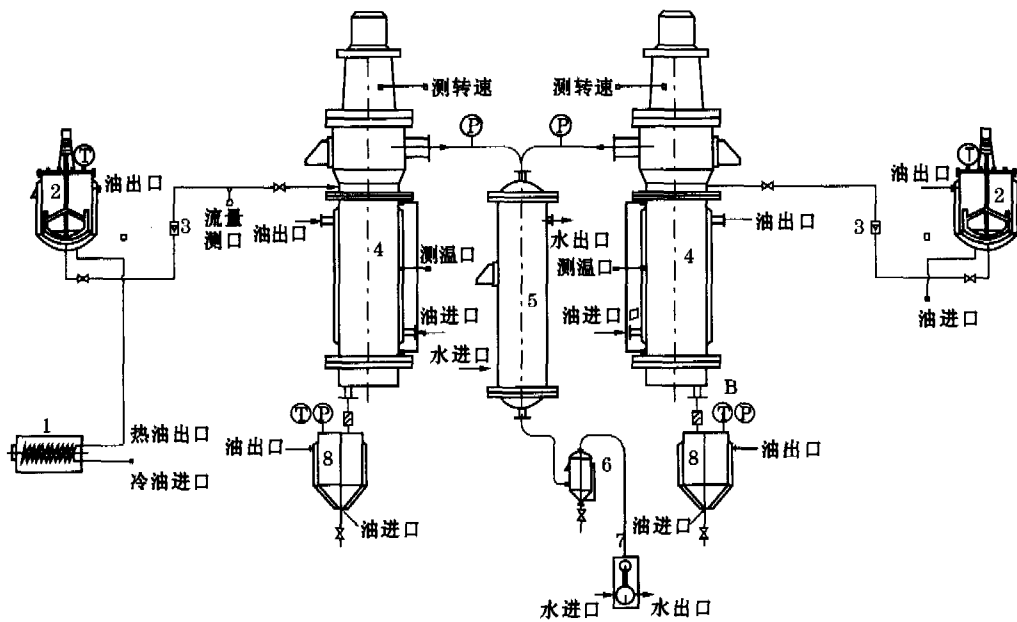


图 1 0.4m² 薄膜蒸发器装置的实验流程简图

- 1——电加热炉； 2——加热釜； 3——转子流量计； 4——蒸发器；
5——冷凝器； 6——缓冲罐； 7——真空泵； 8——接受罐

2.2 实验结果与分析

2.2.1 导热油温度的影响

图 2、3 分别给出了转子转速为 306r/min、进料温度为 40~45℃、真空度 91.7kPa 时,不同导热油温度下总传热系数 K 和蒸发强度 EI 与进料量的变化规律。由图 2、3 可以看出,在本文实验参数范围内,总传热系数 K 和蒸发强度 EI 均随导热油温度的升高而增大。这是由于导热油温度升高,虽温差 ΔT 增大,总传热量 Q 也增大,但 Q 增大的影响超过了 ΔT 增大的影响,因而总的效果是导热油温度升高时 K 增大。

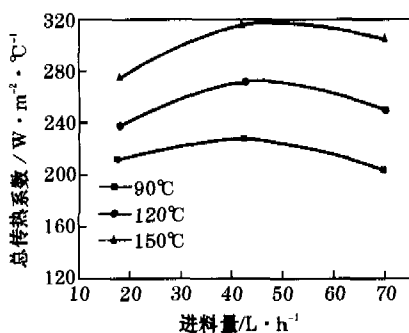


图 2 导热油温度对总传热系数 K 的影响

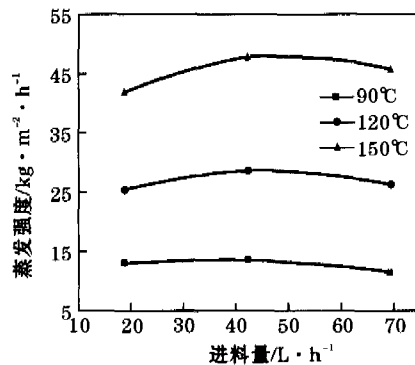


图 3 导热油温度对蒸发强度 EI 的影响

2.2.2 系统真空度的影响

图 4、5 分别给出了转子转速为 306r/min、进料温度为 40~45℃、导热油温度 120℃ 左右时,不同真空度下总传热系数 K 和蒸发强度 EI 与进料量的变化规律。由图 4、5 可以看出,总的来说, K 和 EI 均随真空度的升高而增大。与导热油温度升高时类似,真空度升高,温差 ΔT 增大,总传热量 Q 也增大, Q 增大的影响超过了 ΔT 增大的影响,故总的效果是真空度升高时 K 增大。

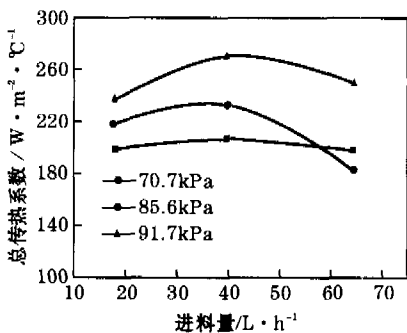


图 4 真空度对总传热系数 K 的影响

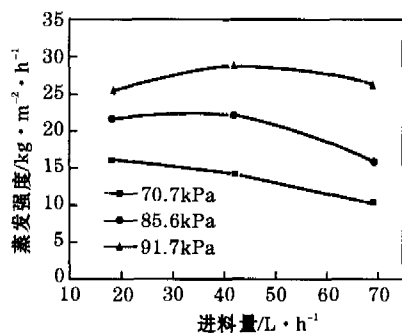


图 5 真空度对蒸发强度 EI 的影响

2.2.3 转子转速的影响

图 6、7 分别给出了进料温度为 22℃、导热油温度 120℃ 左右、真空度 70.7kPa 时,不同转子转速下总传热系数 K 和蒸发强度 EI 与进料量的变化规律。由图 6、7 可以看出,总传热系数 K 和蒸发强度 EI 均随转子转速的提高而增加,高转速能有效地促进圈形波与薄膜之间物质热量的交换,加强湍流程度,提高薄膜蒸发器传热和传质性能。进一步分析发现,在转速增大的整个范围内,K 增大的幅度不同:低转速时,增大转速,K 和 EI 随转速的增大而增大的幅度较明显;而当转速较高时,增大转速,K 和 EI 增大的趋势较小,这与文献[6]中的变化趋势一致。由图 6、7 可知,当进料量为 70L/h 时,转速 259r/min 与 306r/min 时的对应的 K 值以及 EI 值各自接近相等,由于本实验条件

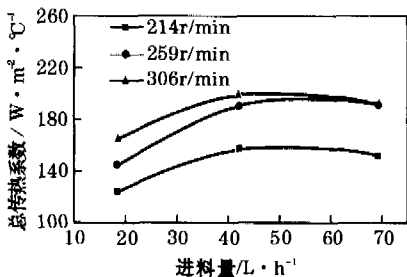


图 6 转子转速对总传热系数 K 的影响

的限制,变频调速电机转速最高只能调至 306r/min,可以预计,随着转速的进一步增大,K 将出现文献[8]所示的下降趋势。在实际生产中,应合理设置转速使之既能提高传热性能,又能减少因高转速带来的高动力消耗。

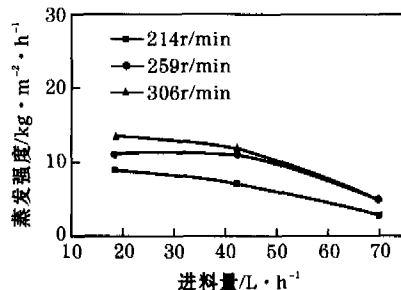


图 7 转子转速对蒸发强度 EI 的影响

2.2.4 进料温度的影响

图 8、9 分别给出了转子转速 306r/min、导热油温度 120℃ 左右,真空度 70.7kPa 时,不同进料温度下总传热系数 K 和蒸发强度 EI 与进料量的变化规律。物料在接近沸点进料能最佳利用传热面积。由图 8、9 可以看出,随着进料温度的升高,薄膜蒸发器内总传热系数 K 和蒸发强度 EI 都明显增大。

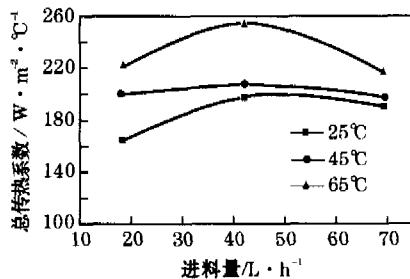


图 8 进料温度对总传热系数 K 的影响

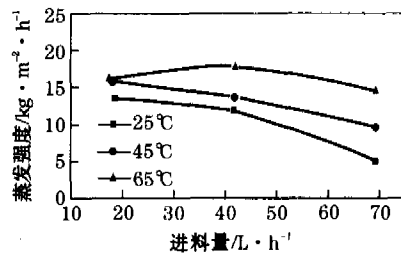


图 9 进料温度对蒸发强度 EI 的影响

2.2.5 进料量的影响

图 2 ~ 9 给出了各工艺参数下薄膜蒸发器总传热系数 K 和蒸发强度 EI 与进料量的变化规律。

总体来说,总传热系数 K 与进料量呈抛物线关系,各组实验均存在最佳进料量 42L/h ,与文献[7]模拟计算分析结果变化趋势一致。文献[7]指出,进料量小时,圈形波尺寸小,圈形波内流体与液膜混合程度较小,随着进料量增加,薄膜中的流体得到更多更新,故 K 值随之增大。而当进料量大到一定值以后,圈形波内流体轴向速度远远大于薄膜内流体速度,因此两者的混合程度又相对减小;且此时壁面提供的热量不能将全部料液加热到一定真空度对应的蒸发温度,故 K 值出现下降趋势。对于蒸发强度 EI ,随进料量的增加有缓慢降低的趋势,这是因为当物料达到一定的流量后,薄膜厚度变大,蒸发表面所获得的热量不足以将物料加热到沸点温度,导致蒸发的物料变少,蒸发强度变低。

3 烧碱的加热蒸发实验与分析

3.1 实验方案

在水的蒸发实验基础上,选定烧碱溶液浓度、进料量、转速为考察因子,其他的实验条件为:真空度 70.7kPa ,导热油温为 120°C ,进料温度为 30°C 。

各参量按以下选取:

溶液质量浓度 10% ($\mu = 1.9 \times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)

30% ($\mu = 8.5 \times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)

进料量 17.5 、 42 、 70L/h

转子转速 214 、 259 、 306r/min

3.2 实验结果与分析

3.2.1 转子转速的影响

图 10、11 给出了不同转速下 10% NaOH 溶液薄膜蒸发器内总传热系数 K 、蒸发强度 EI 与进料量的关系(30% NaOH 溶液时的同样),与介质水的总传热系数 K 、蒸发强度 EI 与转速的关系图 6、7 比较可知,二者的变化规律完全一致。 K 、 EI 均随转速增加而增加。在转速增大的整个范围内, K 增大的幅度不同:低转速时,增大转速, K 随转速的增大而增大的幅度较明显,而当转速较高时,增大转速, K 增大的趋势较小。

3.2.2 进料量的影响

由前述可知,各浓度 NaOH 溶液薄膜蒸发器内总传热系数 K 及蒸发强度 EI 与进料量变化规律与介质水的一致, K 与进料量呈抛物线关系,存在最佳进料量。

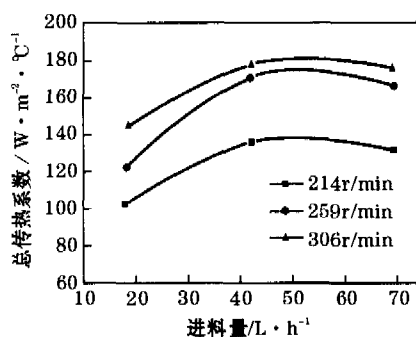


图 10 转速对总传热系数 K 的影响

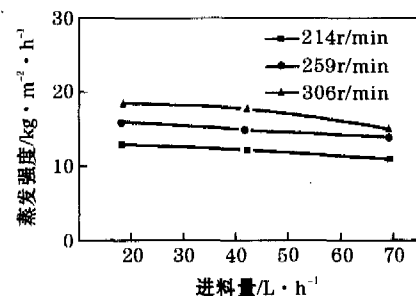


图 11 转速对蒸发强度 EI 的影响

3.2.3 粘度的影响

为了进一步分析粘度对薄膜蒸发器内总传热系数与蒸发强度的关系,图 12、13 分别给出了转速 214r/min 、真空度 70.7kPa 、导热油温为 120°C 、进料温度为 30°C 时,介质水、 10% NaOH 溶液、 30% NaOH 溶液总传热系数 K 及蒸发强度 EI 与进料量的关系。由图 12 可知,各料液的总传热系数与进料量变化规律一致,存在最佳进料量。随着粘度的增加,总传热系数 K 相应减少,这一结论与文献[7]数值模拟结果一致。由图 13 可知,各料液蒸发强度与进料量变化规律基本一致,随着粘度的增加,蒸发强度相应增加。文献[7]粘性料液模拟计算结果表明,粘性料液较之于水达到沸点时沿轴向流动的距离较短,也即蒸发段长

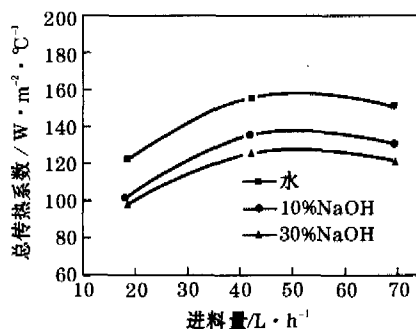


图 12 料液粘度对总传热系数 K 的影响

度较长,蒸发效率较高。由此可知,数值模拟与实验分析在一定程度上得到了互相验证。数值模拟及实验分析均表明,从蒸发强度而言,薄膜蒸发器更适合于高粘度料液的蒸发浓缩。

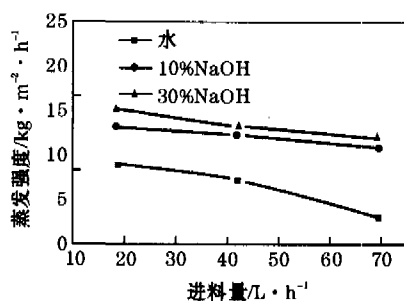


图 13 料液粘度对蒸发强度 EI 的影响

4 结论

4.1 通过对介质水及烧碱溶液的薄膜蒸发实验结果分析可知,薄膜蒸发器内总传热系数 K 及蒸发强度 EI 均随转速增加而增加。在转速增大的整个范围内, K 增大的幅度不同。

4.2 薄膜蒸发器内总传热系数 K 与进料量呈抛物线关系,存在最佳进料量 42L/h。蒸发强度 EI 则随进料量的增加有缓慢降低的趋势。

4.3 随着粘度的增加,薄膜蒸发器内总传热系数 K 相应减少,而蒸发强度相应增加。实验分析及数值模拟均表明,从蒸发强度而言,薄膜蒸发器更适合于高粘度料液的蒸发浓缩。

参 考 文 献

- 1 Cvengros J, Badin V, Pollak S. Residence Time Distribution in a Wiped Liquid Film. *Chem Eng J Biochem Eng J*, 1995, 59(3):259~263
- 2 Chawankul N, Chuaprasert S, Douglas P L et al. Optimization of an Agitated Thin Film Evaporator for Concentrating Orange Juice Using AspenPlus. *Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing*, 2003, 11(3-4):309~322
- 3 陈合,杨辉.刮板薄膜蒸发器的特性及其应用研究.西北轻工业学院学报,1998,16(2):60~64
- 4 Miyashita H. Heat Transfer Correlation in High Prandtl Number Fluid in Votator Type Scraped Surface Heat Exchanger. *J Chem Eng Japan*, 1997, 30(3):545~549
- 5 Abichandani H, Sarma S C. Evaporation in a Horizontal Thin Film Scraped Surface Heat Exchanger. *Journal of Food Process Engineering*, 1991, 14(3):173~187
- 6 皮丕辉,杨卓如,马四朋等.内冷式刮膜蒸发器粘性流体的传热与蒸发探讨. *化学工业与工程*, 2003, 20(3):150~155
- 7 贺小华.薄膜蒸发器蒸发过程数值模拟及其 CAD 系统开发:[博士论文].南京:南京工业大学,2005
- 8 Sangrame G, Bhagavathi D, Thakare H et al. Performance Evaluation of a Thin Film Scraped Surface Evaporator for Concentration of Tomato Pulp. *Journal of Food Process Engineering*, 2000, 43(4):205~211

(收稿日期:2005-06-16,修回日期:2006-03-21)

An Experimental Study on the Properties of Heat Transfer and Evaporation of Thin-Film Evaporators

HE Xiaohua¹, LI Jia², LI Qingsheng¹, YIN Xia¹

(¹Nanjing University of Technology, Nanjing, 210009, Jiangsu, China;

²Nanjing Forestry University, Nanjing, 210037, Jiangsu, China)

Abstract An evaporative experiment was made of the medium water and caustic soda solution based on the self-developed experimental measuring apparatus of 0.4m² thin-film evaporators, the variation curves of the overall heat transfer coefficient K and evaporation intensity EI of all feed liquids in the thin-film evaporators under various operating parameters were obtained. The experimental result shows that the rotor velocity and feed rate affected the overall heat transfer coefficient K and evaporation intensity EI of the evaporators greatly, there was an optimum feed rate for each feed liquid. The overall heat transfer coefficient K was proportionally reduced and evaporation intensity EI was proportionally increased when viscosity rose, the variation laws of the experiment result and numerical simulation result were the same. The research result shows that the thin-film evaporators were more suitable to the evaporation and concentration of high viscous liquids for evaporation intensity.

Keywords Thin-Film Evaporator, Heat Transfer Coefficient, Evaporation Intensity, Viscous Liquid