

部分回流下十字旋阀塔板效率的研究

赵培*, 杨康, 张秋香

(华东理工大学化工学院, 上海 200237)

摘要:以环己烷-正庚烷物系,在直径为0.75 m、内置4块塔板、40 m²板式再沸器和30 m²板式冷凝器的精馏塔中考察了开孔率、阀孔动能因子、回流比等因素对十字旋阀塔板默弗里板效率的影响。其中开孔率变量是8.22%、11.0%和13.56%;阀孔动能因子变化范围是(5~13)(m/s)(kg/m³)^{0.5};回流比变量是∞、15、10、8。在开孔率为11.0%,回流比为15的条件下,与F₁型浮阀的板效率做了对比。将实验值与AICHE效率模型、变型的Chen-Chuang效率模型的计算值也进行了对比。结果表明,在相同操作条件下,开孔率越大,塔板效率越低,且波动也越大;在相同开孔率条件下,塔板效率随回流减小而变小;基于Liang等的变型Chen-Chuang模型更加适合十字旋阀塔板的板效率预测,其误差较小,为工业设计提供了参考。

关键词:十字旋阀;板效率;开孔率;阀孔动能因子;回流比

中图分类号:TQ053.5

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2015)09-0168-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2015.09.042

The study of mass transfer performance for the cross-type valve tray at partial reflux

ZHAO Pei*, YANG Kang, ZHANG Qiu-xiang

(College of Chemical Engineering East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: The mass transfer performance of the cross-type valve trays was studied in a plate distillation column with diameter 750 mm and height 4000 mm, using cyclohexane and *n*-heptane as experimental material. At atmospheric pressure and partial reflux conditions, the influence of the kinetic energy factor, reflux ratio and open porosity of valve hole on tray efficiency were tested. The experimental value was compared with AIChE model and Chen-Chuang model. According to dimensional analysis, efficiency model for the cross-type valve tray under the condition of partial reflux were established. The results indicate that, at the same operational conditions, the bigger open porosity, the greater tray efficiency oscillation and the lower efficiency. At the same open porosity, the bigger reflux ratio, the more efficiency of the tray. Based on Liang et al, the Chen-Chuang model is better than the others. Therefore, it can provide important information for the cross-type valve trays for applying to industry.

Key words: cross-type valve trays; tray efficiency; open porosity; the kinetic energy factor; partial reflux

浮阀塔板由于可以自动调节气体流通面积,具有操作弹性大和操作稳定的优点,是目前应用最为广泛的塔板,但浮阀形式多样,传质性能有所差异,使得研究人员很难建立统一通用的浮阀塔板效率模型,而目前塔板效率模型都是以泡罩塔和筛板塔的实验数据进行关联的,应用于浮阀塔有一定的局限性。

十字旋阀塔板是在F₁型浮阀塔板的基础上结合导向浮阀的综合优点而设计改造的,它的特点是:在板面上特制十字形阀孔,并装配十字构型阀片,阀腿三面开有导向孔,与液流方向相反的阀腿不开导向孔,气流从浮阀四周吹出,有较大的通道面积,并且减小了气液对冲,同时,气流上升产生旋流,有效减少了雾沫夹带。冷模实验已指出,在小液流强度下,气液接触充分且鼓泡细腻,泡沫层高度稳定,压降低,流体力学性能较好^[1]。因此,对十字旋阀塔板传质效率的研究和建模尤为重要。

实验室小型精馏塔设备与工业规模的工况大不相同,在放大过程中塔板上的气液流体力学的差异

造成塔板效率不同。要在实验室中建一套中试规模精馏塔,并采用国际公认标准物系测定塔板效率,完成部分回流操作,存在着空间和运转成本无法承受的难题。华东理工大学利用循环、混合、塔釜进料,巧妙设计改造了国内第一座中试规模连续精馏实验装置,专门测定工业塔板的板效率,实验数据可直接为工业应用提供设计帮助。

1 板效率模型

1.1 AIChE塔板效率模型

20世纪50年代,美国化学工程师协会综合了对塔板效率的影响因素,如物性参数、塔板细部结构、操作条件等,提出了AIChE^[2]效率模型,计算依据为:按照双膜理论计算点效率;按照一维涡流扩散模型和液体在塔板上的轴向返混计算塔板效率。

该模型没有考虑气液流态,如气速的分布对液流和塔板返混的影响,且当求液膜控制体系的点效率时,用此模型误差偏大。总体来说,其建模的方法

提供了方向,如塔板上气液相传质单元数的关联式和采用的返混模型等。

1.2 Chen-Chuang 塔板效率模型

以溶质渗透理论为基础,采用了气体和液体的停留时间的计算及增加了对相界面面积的关联计算。此效率模型适用于鼓泡状态下的效率计算,考虑了表面张力并且从相界面着手。相对于 AIChE 而言,其预测浮阀类塔板效率更加符合实际。

Chen-Chuang 模型^[3]计算如下:清液层高度 h_L 采用 Hofhuis 关联式计算:

$$h_L = 0.6h_w^{0.5}p^{0.25}[(\rho_C/\rho_L)^{0.5}(A_H/L_w)]^{0.25} \quad (1)$$

式中, A_H 为整个塔盘的面积, m^2 ; h_w 为堰高, mm ; L_w 为堰长, m 。其中孔间距 p 的计算:

$$A_H/A_A = 0.907(d_0/p)^2 \quad (2)$$

式中, A_H 为孔面积, m^2 ; d_0 为孔径, m 。

气相(或液相)传质系数与停留时间的乘积有如下关系:

$$k_G t_G \propto (D_G t_G)^{0.5} \quad (3)$$

$$k_L t_L \propto (D_C t_C)^{0.5}(M_C G/M_L L) \quad (4)$$

式中, D_G 为气体扩散系数, m^2/s ; M_C 为气相摩尔含量, g/mol ; M_L 为液相摩尔含量, g/mol 。

涡流扩散系数 D_E 计算如下:

$$D_E = 0.00675u_a^{1.44} + 0.000922h_L' - 0.00562 \quad (5)$$

最大气泡直径 d_{max} 的计算根据 Bhavaraju 等推荐的公式计算。两相气相体积分率 ε 采用 Stichlmair 公式计算。那么,单位体积传质面积 a 为:

$$a = 1/[\mu_L^{0.1}(A_H/A_A)]^{0.14} \times (\rho_L F_{SA}^2/\sigma^2)^{1/3} \quad (6)$$

式中, σ 为表面张力, N/m ; μ_L 为液体黏度, $Pa \cdot s$; F_{SA} 为基于塔板有效面积的阀孔动能因子, $(m/s)(kg/m^3)^{0.5}$ 。

综上所述,计算总气相传质单元数公式为:

$$N_{OC} = C_1 [1/\mu_L^{0.1}(A_H/A_A)^{0.14}] (\rho_L F_{SA}^2/\sigma^2)^{1/3} (D_G t_G)^{0.5} / [1 + \lambda(C_1/C_2)(M_L L/M_C G)(G_C \rho_C/D_L \rho_L)] \quad (7)$$

该公式中有 2 个参数 C_1 、 C_2 由实验数据回归得到, $C_1 = 11$, $C_2 = 14$ 。

由于浮阀种类众多,为每种浮阀都建立相对应的效率模型而都进行实验耗费巨大的人力和物力。通过分析发现,对浮阀板效率模型的建立和预测只能对筛板效率模型进行改良^[4],如一些重要流体力学清液层高度和相界面面积的关联。发现考虑到浮阀结构因素,在 Chen-Chuang 模型基础上对清液层高度、涡流扩散系数及相界面面积进行改良,比较适合十字旋阀塔板。

对十字旋阀塔板的计算的改进如下:

$$h_L = h_w + 1.11(Q_L/L_w)^{2/3} \quad (8)$$

式中, Q_L 为液体流量, m^3/s 。

涡流扩散系数 D_E 计算如下:

$$De(Molnar) = 0.25 \times 10^{-6} + 0.165 \times 10^{-3} u_{SA} + 39.94L_p^2 + 0.0973h_w^2 \quad (9)$$

式中: L_p 为液流强度, m ; u_{SA} 为气速(基于鼓泡面积), m/s 。

采用 Liang 等^[5]的相界面面积计算如下:

$$h_f = h_L/(1 - \phi_C) \quad (10)$$

$$\phi_C/(1 - \phi_C) = 12.23^{0.61}(nlh/A_b)^{0.90 \pm 0.18} F_0^{0.61 \pm 0.05} \quad (11)$$

$$a' = a \times h_f \quad (12)$$

$$a' = 6.50^{0.81}(nlh/A_b)^{1.3 \pm 0.19} [h_w + 1.11(L_p)^{2/3}] \times (\rho_L g^2/\rho_C \sigma^3)^{1/5} F_0^{0.57 \pm 0.03} \quad (13)$$

式中, a 为比表面积, m^{-1} ; F_0 为动能因子(基于鼓泡面积), $(m/s)(kg/m^3)^{0.5}$; n 为浮阀个数; l 为浮阀周长, m ; ϕ 为开孔率(基于整块塔板面积)。

(上接第 167 页)

(1) 针对乙醇-异丙醇二元体系,减压操作可增大体系相对挥发度,降低能耗和年总费用。

(2) 双效精馏与常规精馏相比,设备投资费用稍高,并流双效精馏时,能耗节省 45.6%,年综合费用节省 44.3%。

(3) 双效热泵精馏可以在双效精馏的基础上,大幅提高能量利用率,减少年总费用约 59.5%,与常规精馏相比,可节约 77.5%。

因此双效热泵精馏是分离乙醇-异丙醇等近沸体系的一种新型节能分离方法。

参考文献

[1] 曹裕清,李志中,王施芹,等.减压精馏分离乙醇与异丙醇二元混

合物[J].化学工程师,2011,25(7):12-14.

[2] 张鸾,朱宏吉,白鹏.共沸精馏分离乙醇-异丙醇[J].化工进展,2012,31(10):2187-2190.

[3] 王树楹,杨志才,吴锦元,等.塔顶蒸汽直接压缩式热泵精馏的研究[J].化学工程,1984,(1):79-81.

[4] 徐忠,陆恩锡,罗明辉.热泵节能-三种类型热泵的比较[J].化学工程,2008,36(10):75-78.

[5] 武昊宇,项曙光,韩方煜.多效精馏优化设计的研究进展[J].计算机与应用化学,2006,22(7):491-494.

[6] 孙兰义,扎寇.内部热耦合精馏塔构型研究[J].化学工程,2007,34(11):4-7.

[7] Jana A K. Heat integrated distillation operation[J]. Applied Energy, 2010,87(5):1477-1494.

[8] 杨堂,龙永祯,高维平.塔顶蒸直接压缩式热泵节能特性研究[J].吉林化工学院学报,2010,27(2):1-4.

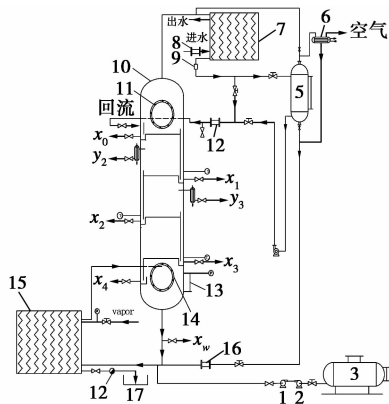
[9] 杨德明,叶梦飞,杜鹏,等.基于 MVR 热泵精馏的乙醇-异丙醇分离工艺[J].化工进展,2014,33(5):1344-1347. ■

2 实验部分

实验在一直径为 750 mm、塔高 4 000 mm、内置 4 块塔板、板间距为 600 mm 的热模塔(塔设备参数见表 1)内进行,将塔顶出料与塔釜循环液混合进入塔釜再沸器,在塔釜以饱和蒸汽连续上升,全塔只有精馏段。进料量变化范围为 143 ~ 229 L/h,环己烷的质量分数约为 0.55。以环己烷-正庚烷为物系,常压、部分回流操作,改变塔釜的加热蒸汽量来改变塔内的气液相负荷。取样,利用气相色谱,选用归一化法定量分析浓度。实验装置流程如图 1 所示。

表 1 塔设备结构参数

塔板结构	板间距/mm	降液管/mm	有效面积/m ²	出口堰高/mm
参数	1030	600	0.3279	50
塔板结构	液流长度/mm	弓高/mm	溢流堰长度/mm	塔板类型
参数	500	130	550	十字旋阀塔板



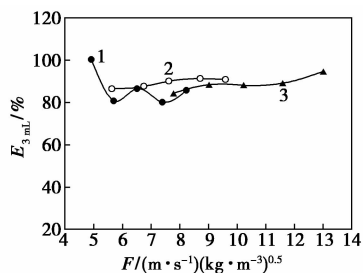
1—出料泵;2—F 进料泵;3—原料槽;4,8,16—涡轮流量计;
5—缓冲罐;6—套管换热器;7,15—板式换热器;9—视镜;
10—塔;11,14—人孔;12—疏水器;13—液位计;17—测水仪器

图 1 实验装置流程图

3 结果及分析

3.1 开孔率对板效率的影响

由图 2 中可以看出,当处于正常的操作范围内,开孔率越小,塔板效率越大;当 F 在 $8 \sim 10$ (m/s) (kg/m^3)^{0.5} 之间时,塔板效率接近;其中 $\phi = 13.56\%$ 的塔板效率波动较大,幅度为 $10\% \sim 20\%$ 。可能因为开孔率越大,漏液点高,从视镜中可以看到浮阀部分开启,随机漏液,风速分布不均匀造成塔板上液体返混较大,导致塔板效率波动比较大。当风速增大



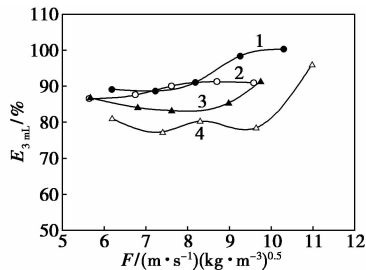
1— $\phi = 13.56\%$; 2— $\phi = 11.0\%$; 3— $\phi = 8.22\%$

图 2 开孔率对塔板效率 $E_{3, \text{ml}}$ 的影响 ($R = 15$)

到一定程度,在 $F = 8 \sim 10$ (m/s) (kg/m^3)^{0.5} 时, $\phi = 11.0\%$ 和 $\phi = 8.22\%$ 的塔板都处于操作风速范围内,漏液量减小,浮阀均匀地开启且自动调节,鼓泡面积较大,传质效率较高,且塔板上气液相接触和传质情况相近,因此,板效率相差不大。随着风速的继续增大, $F > 10$ (m/s) (kg/m^3)^{0.5} 时,浮阀基本处于全开状态,小开孔率的塔板上的气液接触状态为喷射状态,气体变为连续相,液体变为分散相,气液传质面积变为液滴表面,相界面面积增大,传质效果显著增强。

3.2 回流比对塔板效率的影响

从图 3 中可以看出, $\phi = 11.0\%$ 时,板效率随着风速的增大而增大,当 $F > 9$ (m/s) (kg/m^3)^{0.5} 时,板效率变化较大;回流比越大,塔板效率也越大,当回流比 $R > 15$ 时,与全回流的曲线有部分交错;而当 $R < 15$ 时,板效率的波动明显增大。可能是由于回流比的减小导致塔板上气液推动力减小,气液相传质速率降低,从而板效率降低,且当回流比进一步减小到 8 时,操作风速下降到低于漏液点风速,气液接触状态不良,非理想流动因素增多,造成塔板气液浓度分布不均,返混较大,塔板效率波动较大。全回流时,气液相流量达到最大,系统较稳定且气液相接触较充分,气液相传质推动力最大,因此,传质效率较高,波动较小;而回流比较大时类似于全回流,液



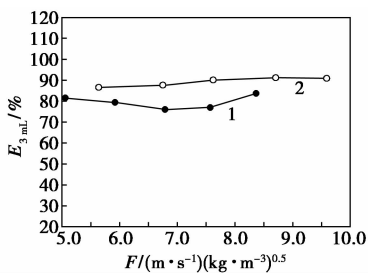
1— $R = \infty$; 2— $R = 15$; 3— $R = 10$; 4— $R = 8$

图 3 回流比对塔板效率 $E_{3, \text{ml}}$ 的影响 ($\phi = 11.0\%$, $h_w = 40$ mm)

气比对板效率的影响甚微,因为通过计算进入塔釜的物料的能量和浓度,得出其对塔釜没有影响,所以 $R=15$ 和 $R=\infty$ 的板效率曲线有相当一部分重合在一起。

3.3 F1 和十字旋阀塔板的比较

通过图 4 可以看出,在开孔率相同的情况下,十字旋阀塔板的板效率高于 F1 约 10%,但随着阀孔动能因子的增大变化不是很明显;相同塔釜供热和开孔率下,十字旋阀可以达到更大的阀孔动能因子,说明其传质阻力比 F1 小,更加有利于传质,从而表现出比 F1 较高的塔板效率,这其中主要是 F1 的塔板结构所致,由于气体经浮阀向四周吹出,造成塔板液体返混大且液层分布不均匀,而十字浮阀的结构对液体有推动作用,液层分布较均匀,增大了其操作弹性,这样减少了在较大气速下的雾沫夹带,并且在稳定操作情况下,其十字结构造成的十字旋流减小了液体的对冲,更加有利于液体的破碎,增加了气液传质面积和湍动,提高了传质效率。



1—F1 型浮阀塔板; 2—十字旋阀塔板

图 4 F1 和十字旋阀塔板效率的比较
($\phi = 11.0\%$, $R = 15$)

3.4 板效率模型值、实验值的比较

本文中以开孔率为 11.0% 和在 $R=\infty$ 的情况下的第三块为例,从表 2 看出, AICHe 模型计算的值随着阀孔动能因子的增大而减小,并且与计算值的误差越来越大,而基于 Molnar 的涡流扩散模型的变型 Chen-Chuang 模型计算值较符合实际,相对于 AICHe 模型,说明其从相界面着手采用溶质渗透理论这一思路,比较适用十字旋阀塔板效率的计算,可是由于它没有考虑到浮阀的几何结构对气液流动造成的影响,在估算相界面积上不是很准确。最后采用 Liang 等的相界面积关联式替代 Chen-Chuang 模型的相界面积关联式的计算较真实地反映了浮阀结构对气速分布的影响不同于筛板结构,所以基于 Liang 等相界面积的变型的 Chen-Chuang 模型计算

值较前 2 种方法更接近实际值,且为浮阀塔板效率的预测提供了一定的参考。

表 2 实验值与 AICHe 模型值、Chen-Chuang 模型值比较

阀孔动能因子 F_s (基于开孔面积)	实验值	AICHe 模型值	基于 Molnar 的 Chen-Chuang 模型值	基于 Liang 等的 Chen-Chuang 模型
6.402	89.130	75.274	78.707	84.782
7.432	88.628	70.094	80.931	85.335
8.322	93.992	66.462	85.658	88.572
9.639	98.288	58.845	87.364	90.023
10.916	99.210	50.346	89.452	92.838

4 结论

通过考察开孔率不同阀孔动能因子和回流比对十字旋阀塔板塔板效率的研究,并将其和 F1 型塔板效率进行比较,综合得出以下结论。

(1) 同一回流比下,开孔率的减小有利于提高塔板效率;开孔率越大,塔板效率波动越大。

(2) 相同开孔率下,随着回流比的减小,塔板传质效率波动增大,塔板效率降低。

(3) 在相同操作条件下,十字旋阀塔板的效率略高于 F1 型塔板,为塔板的设计提供了一定的方案。

(4) 相较于 AICHe 模型和基于 Molnar 的涡流扩散模型的变型 Chen-Chuang 模型,基于 Liang 等的变型 Chen-Chuang 模型更加适合十字旋阀塔板的板效率预测,其误差较小,为工业设计提供了依据。

参考文献

- [1] 宇星,华志明,王建亮,等. 十字旋阀塔板的流体力学性能[J]. 华东理工大学学报:自然科学版,2006,32(5):519-523.
- [2] 兰州石油机械研究所. 现代塔器技术[M]. 2版. 北京:中国石化出版社,2005.
- [3] Guang X Chen, Karl T Chuang. Prediction of point efficiency for sieve trays in distillation[J]. Ind Eng Chem Res, 1993, 32: 701-708.
- [4] Anand N Vennavelli, James R Whiteley, Michael R Resetarits. Predicting valve tray efficiency[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2014, 92(11): 2148-2152.
- [5] Liang Yin-Chun, Zhou Zheng, Shao Min, et al. The impact of valve tray geometry on the interfacial area of mass transfer[J]. AIChE Journal, 2008, 54(6): 1470-1477. ■