

导向筛板-导向浮阀塔板性能的实验研究

李群生¹ 张满霞¹ 汤效飞¹ 李 仑¹ 文 放¹ 郭 凡¹ 王宝华^{2*}

(1. 北京化工大学 化学工程学院, 北京 100029; 2. 北京中医药大学 中药学院, 北京 100029)

摘 要: 采用空气-水-氧气物系, 在内径为 $\Phi 600$ mm, 塔板间距为 350 mm 的冷模精馏塔内, 分别研究了带有 14 个浮阀的 FGS-VT-14 塔板和带有 8 个浮阀的 FGS-VT-8 塔板的流体力学与传质性能。根据实验数据, 回归得到了 FGS-VT-14 塔板的干板压降和湿板压降关联式分别为 $\Delta p_d = \xi u_0^2 \rho_g / 2$ 和 $\Delta p_w = a_1 F_h^m L_w^m$ 。实验结果表明, 与 FGS-VT-8 相比, FGS-VT-14 的干板压降降低 3%、湿板压降降低 16% (浮阀升起后)、漏液降低 90%、雾沫夹带升高 55%、塔板效率增大 12%, 具有更好的综合性能; 与导向筛板相比, FGS-VT-14 塔板的操作性提高了 10%~20%、塔板效率提高了 7%、湿板压降降低了 8% (浮阀升起后)。

关键词: 导向筛板-导向浮阀; 流体力学; 效率; 压降关联式

中图分类号: TQ053.5

引言

作为精馏塔最重要的内件之一, 板式塔广泛应用于分离行业中。随着工业生产对设备性能、产品纯度及能量利用率等要求的不断提高, 开发高效率、大通量、低压降塔板是板式塔研究的必然之路。

筛板以结构简单、造价低廉等优势广泛应用于精馏过程中^[1]。但是操作弹性低、易堵塞等缺点限制了筛板塔在一些领域中的应用。为了克服筛板的缺点, 出现了大量改进型塔板。如多降液管塔板 (MD 塔板)^[2-3]、导向筛板^[4-7]和新型垂直筛板^[8-9]等。这些改进型的塔板在处理通量、塔板效率等方面有所提高。但是作为筛孔型塔板, 低操作弹性的问题仍未得到解决。

本课题组在筛板塔研究的基础上, 设计开发了一种新型高效、高操作弹性的导向筛板-导向浮阀塔板 (FGS-VT)^[10-11]。本文采用空气-水-氧气物系, 通过冷模实验测定两种 FGS-VT 塔板流体力学及传质性能, 并将其与导向筛板 (FGST) 的性能相比。得到了导向筛板-导向浮阀塔板的基础实验数据及流体力学性能关联式。

收稿日期: 2013-01-14

基金项目: 国家“863”计划 (2008AA062401); 中央高校教育基金 (JL1101)

第一作者: 男, 1963 年生, 教授

* 通讯联系人

E-mail: wbaohua1@163.com

1 实验部分

1.1 实验操作条件与实验塔板

常温常压下, 在板间距 350 mm, 溢流堰长 370 mm, 溢流堰高 30 mm, 内径为 $\Phi 600$ mm 的精馏塔内, 采用空气-水-氧测定了各塔板的性能。实验中所用塔板的结构如图 1。

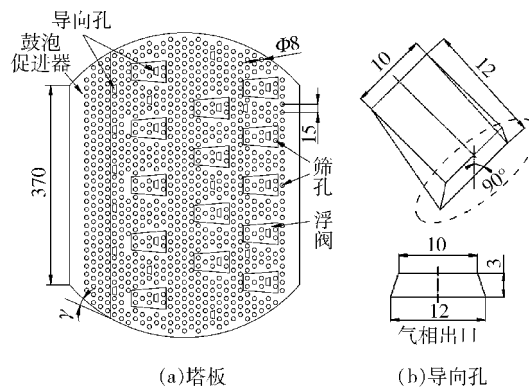


图 1 导向筛板-导向浮阀塔板结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of the flow-guided sieve-valve tray

本实验对两种结构不同的 FGS-VT, 即具有 8 个浮阀的 FGS-VT-8 和具有 14 个浮阀的 FGS-VT-14, 进行实验。除设置的浮阀个数不同外, 两种实验塔板的其他结构参数均相似。各塔板的尺寸参数如表 1 所示。

1.2 实验装置与流程

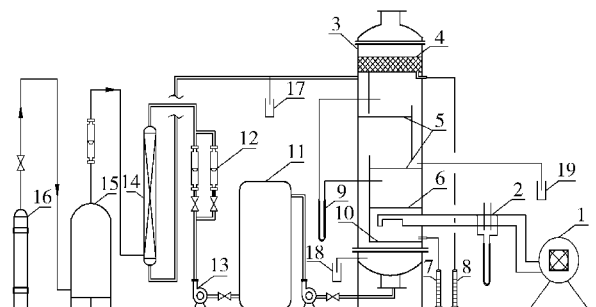
精馏实验流程如图 2, 空气通过风机 1 经计量后从塔釜送入实验精馏塔 3。水通过离心泵 13 计

量后由塔顶进入塔 3。空气和水在塔板上逆流接触,进行传质传热。在此过程中,采用空气-水体系测定塔板的压降、漏液、雾沫夹带等流体力学性能,采用空气-水-氧体系测定其效率。由测量容器 7 测量单位时间内的漏液量,8 测量单位时间内的雾沫夹带量,U 型压差计 9 测量塔板的压降。取样口 17、18、19 分别取样测定塔顶、塔釜和塔中水中的含氧量。

表 1 实验塔板结构参数

Table 1 Structure parameters of the tested trays

塔板	开孔率/%	浮阀个数	筛孔直径/mm
FGS-VT-8	21.52	8	8
FGS-VT-14	25.05	14	8



1—风机;2—孔板流量计;3—精馏塔;4—雾沫捕集板;5—测试塔板;6—气体分布板;7,8—测量容器;9—U 型压差计;10—漏液收集板;11—水槽;12—转子流量计;13—离心泵;14—小型填料塔;15—氧气压力缓冲罐;16—氧气钢瓶;17,18,19—取样

图 2 精馏实验装置流程图

Fig. 2 Schematic view of the experimental set-up for distillation

实验测试范围为:单位长度堰的液体流量即液流强度 $L_w = 5.41 \sim 21.62 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{h})$,空塔动能因子 $0.60 \sim 2.66 (\text{m/s})(\text{kg/m}^3)^{0.5}$ 。

2 结果与讨论

2.1 塔板压降

2.1.1 干板压降

干板压降是塔板上只有气体无液体存在时,气体穿过塔板开孔的阻力损失。干板压降的大小与塔板结构直接相关。其关联式主要有孔板模型和阻力系数模型。本实验采用基于阻力因子的关联式。目前使用最为广泛的干板压降计算关联式为^[12]

$$\Delta p_d = \xi F_h^2 / 2 = \xi u_h^2 \rho_g / 2 \quad (1)$$

式(1)中, Δp_d 为干板压降,Pa; ξ 为阻力系数; F_h 为阀、孔动能因子, $(\text{m/s})(\text{kg/m}^3)^{0.5}$; u_h 为阀、孔气速,

m/s ; ρ_g 为气相密度, kg/m^3 。两种实验塔板干板压降随阀、孔气速平方 u_h^2 的变化关系图见图 3。

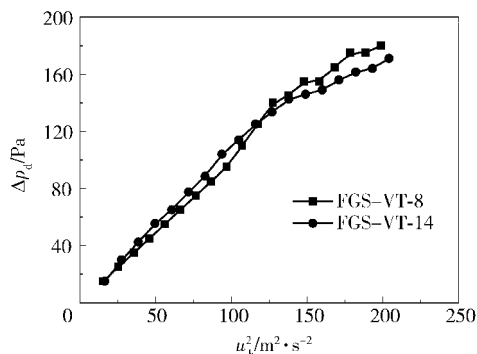


图 3 两种实验塔板干板压降的比较

Fig. 3 Comparison of dry-plate pressure drop between the two tested trays

由图 3 可知,两种塔板的干板压降均随阀孔气速的增大而增加,且其干板压降曲线均分为斜率不同的两段。这是因为实验过程中,两种 FGS-VT 塔板的干板压降均比较小,阀盖上下压力差不足以将浮阀全部托起,所以浮阀没有完全开启。这两阶段中两种塔板的干板压降的大小顺序分别为:第一阶段, $\Delta p_d(\text{FGS-VT-14}) > \Delta p_d(\text{FGS-VT-8})$; 第二阶段, $\Delta p_d(\text{FGS-VT-8}) > \Delta p_d(\text{FGS-VT-14})$ 。

下面以 FGS-VT-14 塔板为例分析曲线各阶段,并给出其关联式。

第一阶段,浮阀处于完全关闭状态。即图 3 中 u_h^2 小于 $124.6 (\text{m/s})^2$ 时,干板压降随阀、孔气速平方的增大而迅速增大。在此阶段,气体的通道包括筛孔、导向孔(包括浮阀上的筛孔和导向孔)和浮阀的初始开缝,与筛孔类塔板类似。采用式(1)对 FGS-VT-14 的第一阶段进行拟合,得关联式为

$$\Delta p_d = 1.105 u_h^2 + 1.322 \quad (2)$$

适用范围为 u_h^2 在 $16.6 \sim 124.6 (\text{m/s})^2$,拟合的精度系数 $R^2 = 0.998$ 。

第二阶段,浮阀逐渐开启但未完全打开,呈上下浮动状态,即图 3 中 u_h^2 大于 $124.6 (\text{m/s})^2$ 时。此阶段,随阀孔气速的增大浮阀开度逐渐增大,塔板的开孔面积相应增大。因此,干板压降随着阀孔气速平方的变化变缓慢。该阶段,气体的压降不仅包括气体通过塔板上的开孔所产生的压降,还包括其克服阀体自重而引起的阻力损失。因此,这一阶段的干板压降^[12]可以表示为

$$\Delta p_d = \xi_1 m_v g / A_v + \xi_2 u_h^2 \rho_g / 2 \quad (3)$$

式(3)中, ξ_1, ξ_2 为阻力系数; m_v 为阀质量, kg; A_v 为安装状态下阀片的投影面积, m^2 。

用式(3)对 FGS-VT-14 塔板浮阀开启阶段的干板压降进行拟合, 得关联式为

$$\Delta p_d = 0.489u_h^2 + 71.654 \quad (4)$$

适用范围为 u_h 在 $124.6 \sim 205.8 (m/s)^2$, 拟合的精度系数 $R^2 = 0.980$ 。

2.1.2 湿板压降

湿板压降指气体穿过塔板开孔及塔板上的液层时的压降, 是塔板最重要的性能之一。湿板压降高表明使用该塔板达到一定分离要求所需要的能耗高, 同时高湿板压降也限制了塔板处理量。

图4是 FGS-VT-14 塔板在不同液流强度下的湿板压降随阀、孔动能因子 F_h 的变化关系图。由图4可见, 湿板压降变化分为3段, 有2个转折点。以液流强度 $L_w = 10.81 m^3/(m \cdot h)$ 为例, 浮阀开启之前, 即 $F_h < 5.74 (m/s)(kg/m^3)^{0.5}$, 湿板压降主要由两部分组成: 气体通过塔板上筛孔、导向孔和浮阀初始开缝所承受的摩擦阻力以及气体穿过塔板上液层的阻力。与其他筛孔类塔板相似, 该阶段湿板压降随阀、孔动能因子的增加迅速增大。在浮阀开启过程中, 湿板压降主要影响因素有气体通过筛孔、导向孔、浮阀开孔的摩擦阻力、克服阀重的阻力和穿过液层的阻力。在该阶段, 塔板上浮阀的开启数量随着阀孔动能因子的增大而增加。实际通过阀、孔的气体速度基本维持不变, 所以穿过浮阀、孔的摩擦阻力基本不变。因此该阶段的湿板压降随着阀、孔动能因子的变化斜率比浮阀开启之前小的多, 曲线趋于平缓。当浮阀完全开启后, 即 $F_h > 9.32 (m/s)(kg/m^3)^{0.5}$, 湿板压降主要为摩擦阻力和气体穿过液层阻力两部分组成。此阶段湿板压降随阀、孔动能因

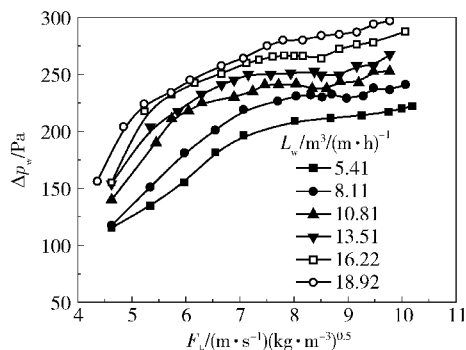


图4 不同液流强度下 FGS-VT-14 湿板压降比较

Fig. 4 Comparison of wet-plate pressure drop for FGS-VT-14 with different liquid weir loading

子的变化趋势与开孔类塔板相似。

目前, 计算湿板压降的关联式主要有加和式、准数关联式和与气速相关联的关系式。其中准数关联式能更清晰体现关键因素对湿板压降的影响。对于空气-水体系, 湿板压降的主要关联式^[12]为

$$\Delta p_w = a F_h^n L_w^m h_w^p \quad (5)$$

式(5)中: Δp_w 为湿板压降, Pa; h_w 为溢流堰高度, m; a, n, m, p 为系数和指数, 由实验数据拟合求得。本实验所用塔板的溢流堰高度均相同, 所以塔板压降主要受气相阀、孔动能因子, 液流强度的影响。因此式(5)可以简化成如下关联式

$$\Delta p_w = a_1 F_h^n L_w^m \quad (6)$$

本文对 FGS-VT-14 塔板浮阀未开启, 浮阀开启但未全部开启和全部开启 3 个阶段分别采用式(6)进行拟合, 拟合的结果如下。

浮阀开启前

$$\Delta p_w = 7.32 F_h^{1.34055} L_w^{0.39287} \quad (7)$$

拟合的精度系数 $R^2 = 0.971$ 。

浮阀开启但未全部开启

$$\Delta p_w = 74.52 F_h^{0.304} L_w^{0.226} \quad (8)$$

拟合的精度系数 $R^2 = 0.996$ 。

浮阀全部开启

$$\Delta p_w = 64.07 F_h^{0.34151} L_w^{0.25387} \quad (9)$$

拟合的精度系数 $R^2 = 0.980$ 。

图5给出了两种实验塔板湿板压降与结构相当的导向筛板 FGST 的湿板压降对比图。由图5可知, 随浮阀不断开启, 三者的湿板压降大小关系为: $\Delta p_w (FGS - VT-8) > \Delta p_w (FGS - VT-14) > \Delta p_w (FGST)$ 。在一定液流强度下, 3 种塔板湿板压降均

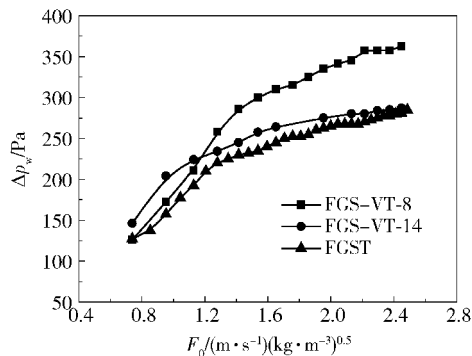


图5 $L_w = 18.92 m^3/(m \cdot h)$ 时几种实验塔板湿板压降比较

Fig. 5 Comparison of wet-plate pressure drop among the tested trays when $L_w = 18.92 m^3/(m \cdot h)$

随 F_0 增大而增大,但是浮阀开启后,FGST 增大幅度较 FGS-VT-14 大。

2.2 雾沫夹带

雾沫夹带是塔内气相速度较大,液相速度较小,在有限的塔板间距内,气体将液滴夹带至上层塔板的现象。雾沫夹带不仅影响塔板的效率^[13],而且限制了塔板操作上限。工业上通常规定每 kg 上升气体所夹带的液体量不超过 0.1 kg (10%) 作为精馏塔的设计上限^[12]。

图 6 给出了 FGS-VT-14 塔板在不同液流强度下,雾沫夹带随着空塔动能因子 F_0 的变化关系图。从图 6 可以看出,在液流强度一定时,雾沫夹带率 e 随空塔动能因子 F_0 的增大而增加;当 F_0 一定时,雾沫夹带随着液流强度的增大而增大。

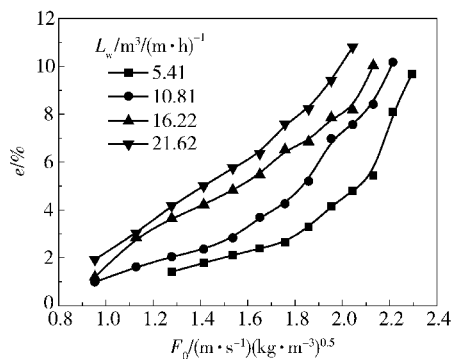


图 6 不同液流强度下 FGS-VT-14 雾沫夹带比较

Fig. 6 Comparison of FGS-VT-14 entrainment with different liquid weir loadings

图 7 为液流强度 $L_w = 24.32 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{h})$ 时,两种塔板雾沫夹带与导向筛板雾沫夹带的对比。由图 7 可知,在该操作条件下 FGST 已无法正常工作,其雾

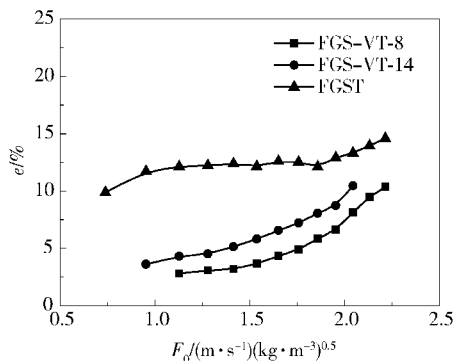


图 7 $L_w = 24.32 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{h})$ 时几种实验塔板雾沫夹带的比较

Fig. 7 Comparison of entrainment among the tested trays when $L_w = 24.32 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{h})$

沫夹带量均大于 10%,FGS-VT-14 和 FGS-VT-8 的雾沫夹带量均在 10% 以内。说明 FGS-VT 类塔板具有更高的操作上限。

2.3 漏液

在漏液状态下,液体没有足够的时间与气体进行充分的物质和能量交换,所以大量漏液将降低塔板效率。通常,工业上将泄漏 10% 作为精馏塔的设计下限^[12]。

图 8 是 FGS-VT-14 塔板漏液率与空塔动能因子 F_0 的关系。由图 8 可知,FGS-VT-14 的漏液率 w 随着 F_0 的增大而减小,随着液流强度 L_w 的增大而增大。

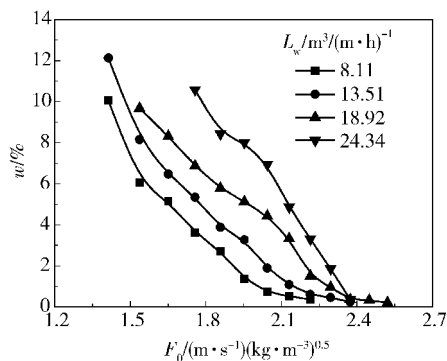


图 8 FGS-VT-14 在不同液流强度下漏液率比较

Fig. 8 Comparison of FGS-VT-14 weeping with different liquid weir loadings

图 9 为 $L_w = 16.22 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{h})$ 时几种实验塔板漏液的比较。由图 9 的对比中可知,在同等操作条件下,3 种塔板相比,带有 14 个浮阀的 FGS-VT-14 具有更低的漏液,即更低的操作下限。综合塔板的漏液及夹带数据,与 FGST 相比,FGS-VT-14 塔板的操作性提高了 10% ~ 20%。

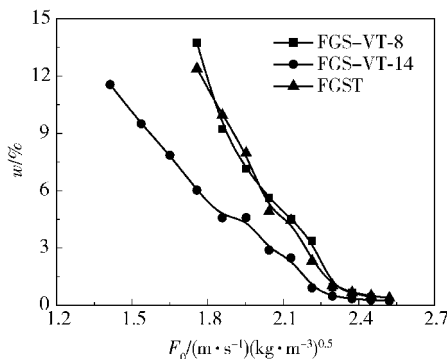


图 9 $L_w = 16.22 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{h})$ 时几种实验塔板漏液的比较

Fig. 9 Comparison of weeping of the tested trays when $L_w = 16.22 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{h})$

2.4 塔板效率

塔板效率直接反映了塔内气-液两相进行物质交换的程度,是塔板最重要的性能参数^[14]。在项目改造过程中,高传质效率能有效的减小回流比、降低能耗、增加产品的纯度;在新建项目中,较高的塔板效率可以降低设备的高度、减少塔板数、减少固定投资,从而大大的提高经济效益。

图10给出了FGS-VT-14在不同的液流强度下塔板效率随着空塔动能因子的变化关系。从图10可以看出,随着液流强度的增大,塔板效率 E_{ML} 减小。随着空塔动能因子的增大,塔板效率呈增大趋势。

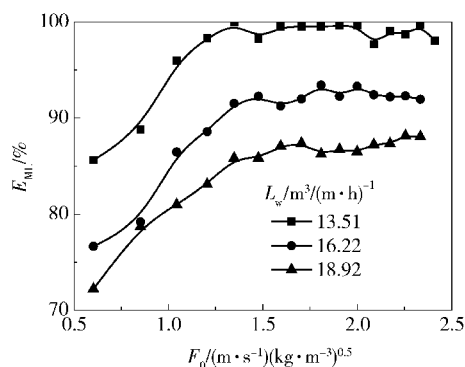


图10 不同液流强度下FGS-VT-14塔板效率比较

Fig. 10 Comparison of FGS-VT-14 efficiency with different liquid weir loadings

图11为 $L_w = 16.22 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h})$ 时几种实验塔板的塔板效率比较。由图11中的对比关系曲线可知,在同等操作条件下,3种塔板的效率大小顺序为: $E_{ML}(\text{FGS-VT-14}) > E_{ML}(\text{FGST}) > E_{ML}(\text{FGS-VT-8})$ 。FGS-VT-14具有更高的效率。

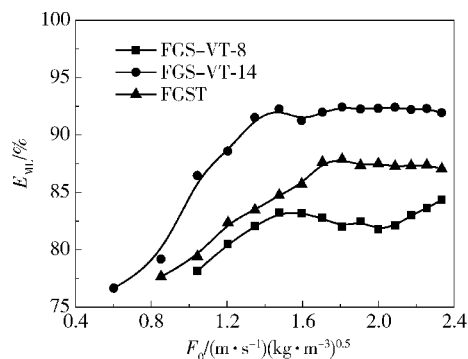


图11 $L_w = 16.22 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h})$ 时几种实验塔板的塔板效率比较

Fig. 11 Comparison of efficiency of the tested trays when $L_w = 16.22 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h})$

3 结论

(1) 随气速的增大,FGS-VT-14和FGS-VT-8的干板及湿板压降不断增大。通过对实验数据的拟合,给出了带有14个浮阀的FGS-VT-14塔板的干板压降 $\Delta p_d = \xi u_h^2 \rho_g / 2$ 和湿板压降关联式 $\Delta p_w = a_1 F_h^n L_w^m$ 。

(2) 一定气速下,随着液流强度的不断增加,导向筛板-导向浮阀塔板的漏液和夹带不断增大,而塔板效率不断减小。一定液流强度下,随着空塔动能因子的不断增大,该塔板的漏液不断减小,而雾沫夹带和塔板效率增大。

(3) 相同操作条件下,与FGS-VT-8相比,FGS-VT-14干板压降降低3%,湿板压降降低16%(浮阀升起后),漏液降低90%,雾沫夹带升高55%,塔板效率增大12%;与导向筛板相比,FGS-VT-14塔板的操作性提高了10%~20%,塔板效率提高了7%,浮阀升起后,湿板压降降低了8%。FGS-VT-14具有更好的综合性能。

符号说明

e —雾沫夹带率, %

E_{ML} —塔板效率, %

F_0 —空塔动能因子, $(\text{m/s})(\text{kg/m}^3)^{0.5}$

F_h —阀、孔动能因子, $(\text{m/s})(\text{kg/m}^3)^{0.5}$

L_w —液流强度, $\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{h})$

u_h —阀、孔气速, m/s

w —漏液率, %

Δp_d —干板压降, Pa

Δp_w —湿板压降, Pa

参考文献:

- [1] Wijn E F. Weir flow and liquid height on sieve and valve trays[J]. Chemical Engineering Journal, 1999, 73(3): 191-204.
- [2] Lee A T, Wu K, Burton L. Multiple downcomer high performance tray assembly: US, 5702647[P]. 1997-12-30.
- [3] 张志群. MD塔板的流动模拟和效率计算[J]. 高校化学工程学报, 1994, 8(3): 250-257.
Zhang Z Q. Simulation and efficiency of multiple downcomer tray[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 1994, 8(3): 250-257. (in Chinese)
- [4] Li Q S, Song C Y, Wu H L, et al. Performance and applications of flow-guided sieve trays for distillation of highly viscous mixtures[J]. Korean Journal of Chemical

- Engineering, 2008, 25(6): 1509–1513.
- [5] 李群生, 赵彦乐, 张满霞, 等. 高效导向筛板塔对 PVAc 脱除 VAc 单体精馏的技术改造[J]. 化工进展, 2011, 30(增刊): 783–786.
- Li Q S, Zhao Y L, Zhang M X, et al. Technology reform of the distillation for PVAc off VAc by high efficient flow-guided sieve tray[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2011, 30(Suppl): 783–786. (in Chinese)
- [6] 李群生, 常秋连, 李钊. 新型高效分离技术原理及其在聚氯乙烯工业中的应用[J]. 聚氯乙烯, 2007(10): 5–13.
- Li Q S, Chang Q L, Li Z. The mechanism of novel separation technology with high-efficiency and its application in PVC industry[J]. Polyvinyl Chloride, 2007(10): 5–13. (in Chinese)
- [7] 李群生, 张满霞. 高效导向筛板塔的特点及其工业应用[J]. 精细与专用化学品, 2009, 17(23): 13–15.
- Li Q S, Zhang M X. Characteristics and applications of flow-guided sieve tray[J]. Fine and Specialty Chemicals, 2009, 17(23): 13–15. (in Chinese)
- [8] Olujic'Ž, Jödecke M, Shilkin A, et al. Equipment improvement trends in distillation[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2009, 48(6): 1089–1104.
- [9] 杜佩衡, 杜剑婷, 王荣良. 垂直筛板塔流体力学与传质研究状况[J]. 化学工程, 2003, 31(4): 22–26.
- Du P H, Du J T, Wang R L. Research status on fluid mechanics and mass transfer of vertical sieve tray tower[J]. Chemical Engineering (China), 2003, 31(4): 22–26. (in Chinese)
- [10] Li Q S, Zhang M X, Tang X F, et al. Flow-guided sieve-valve tray (FGS–VT): a novel tray with improved efficiency and hydrodynamics[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2013[2013-01-04]. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2013.01.004>.
- [11] Li Q S, Zhang M X, Zhi G L, et al. A distillation tray with high efficiency and excellent operating flexibility for viscous mixture separation[J]. Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly, 2013[2013-01-24]. <http://www.ache.org.rs/CICEQ/CI&CEQ.html>.
- [12] 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, 1990.
- Lanzhou Institute of Petroleum Machinery. The modern column techniques[M]. 2nd Ed. Beijing: China Petrochemical Press, 1990. (in Chinese)
- [13] Jacimovic' B M. Entrainment effect on tray efficiency[J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55(18): 3941–3949.
- [14] Luo N, Qian F, Ye Z C, et al. Estimation of mass-transfer efficiency for industrial distillation columns[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(7): 3023–3031.

Experimental studies of the flow-guided sieve-valve trays

LI QunSheng¹ ZHANG ManXia¹ TANG XiaoFei¹ LI Lun¹ WEN Fang¹
GUO Fan¹ WANG BaoHua²

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

2. School of Chinese Materia Medica, Beijing University of Chinese Medicine, Beijing 100029, China)

Abstract: The performance of two types of flow-guided sieve tray with 14 and 8 valves (FGS–VT-14 and FGS–VT-8, respectively) has been studied in an air–water–oxygen system within a 600 mm diameter plexiglass column with a 350 mm tray spacing. The regression models of the dry-plate pressure drop ($\Delta p_d = \xi u_h^2 \rho_g / 2$) and wet-plate pressure drop ($\Delta p_w = a_1 F_h^n L_w^m$) of FGS–VT-14 were obtained from the experimental data. The results indicated that the performance of FGS–VT-14 was better than FGS–VT-8 because its dry-plate pressure drop, wet-plate pressure drop (when the valves start to open) and weeping were reduced by 3%, 16% and 90%, respectively, and the tray efficiency was improved by 12%, although the entrainment increased by 55%. Compared with conventional flow-guided sieve trays, the operating flexibilities of the two FGS–VT units were improved by 10%–20%, and the tray efficiency increased by about 7%. On increasing the gas velocity, the pressure drop decreased by about 8%.

Key words: flow-guided sieve–valve tray; hydrodynamics; tray efficiency; pressure drop regression model

<http://www.journal.buct.edu.cn>