

导向筛板-新型浮片式浮阀复合塔板的 流体力学和传质性能

汤效飞 张满霞 李群生* 文放 李仑
(北京化工大学 化学工程学院, 北京 100029)

摘要:设计了一种新型塔板,即导向筛板-新型浮片式浮阀复合塔板,并在内径 $\Phi 600$ 的有机玻璃塔内以空气-水为物系,对该复合塔板进行了冷模实验。测定了不同开孔率的复合塔板在固定堰高,改变流速和液流强度情况下的塔板压降、雾沫夹带率、漏液率和清液层高度,并与相同实验条件下的F1型浮阀塔板的流体力学参数进行了对比。此外,本文采用氧解析实验对新型塔板的传质性能进行了研究。实验结果表明,导向筛板-新型浮片式浮阀复合塔板相比F1型浮阀具有通量大、压降低、抗堵性好、传质效率高和浮阀不易卡死、脱落等优点。实验数据表明,该复合塔板的干板压降、湿板压降和雾沫夹带率都随着孔动能因子和液流强度的增大而增大;漏液率随着孔动能因子的增大而减小,随着液流强度的增大而增大;传质效率随着孔动能因子的增大而增大,随着液流强度的增大而减小;清液层高度随着孔动能因子的增大呈现上升、稳定然后下降的趋势,并且随着液流强度的增大而增大。根据实验数据,回归得到了该复合塔板的干板压降($\Delta p_d = aF_0^2 + b$)、湿板压降($\Delta p_T = \xi F_0^m L_w^n$)和雾沫夹带率($e_v = aF_0^m L_w^n$)的关联式。

关键词:新型浮片式浮阀;导向筛板;复合塔板;流体力学;传质性能

中图分类号: TQ053.5

引言

板式塔作为塔器的一种,是化工、炼油生产中的核心设备之一^[1],具有结构简单、易于放大、造价低廉、安装、检修和清洗方便等优点^[2]。其中,以板填复合塔板^[1,3]、筛板-浮阀复合塔板^[4-5]为代表的复合塔板,是近年来板式塔研究的重要方向。

复合塔板所用传统浮阀多数采用阀腿+阀盖的结构,阀腿起连接和限制的作用,但阀腿也是摩擦、卡死的主要原因。本文参考以高操作弹性著称的VV型浮阀^[2]和FSV浮阀^[6],设计了无阀腿的新型浮片式浮阀(FRV),并将其与导向筛板结合,设计了导向筛板-新型浮片式浮阀复合塔板(GS-FRV型塔板)。在冷模实验中对GS-FRV型复合塔板的流体力学和传质性能进行了测定,并对相关实验数据进行了分析。

收稿日期: 2012-11-01

基金项目: 中国石化股份有限公司资助项目(X501021)

第一作者: 男,1985年生,硕士生

* 通讯联系人

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

1 实验部分

1.1 操作条件

本实验在常温常压下,以空气-水为物系,在有机玻璃圆形冷模塔中进行。实验塔内径 $\Phi 600$ mm,塔间距为350 mm,溢流堰长370 mm,溢流堰高30 mm。塔内包括4块塔板:2块实验塔板,1块雾沫捕集板,1块气体分布板。

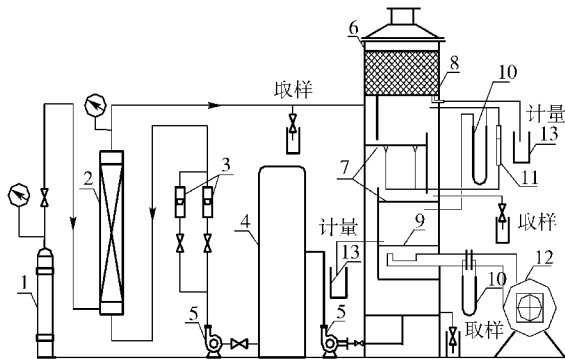
实验的测试范围为:液流强度5.41~21.62 m³/(h·m),空塔动能因子为0.60~2.59 (m/s)·(kg/m³)^{0.5}。

1.2 实验装置及塔板结构

实验装置如图1所示。实验中,水槽中的水经转子流量计计量后,与钢瓶来的氧气在混合器中混合吸收后从雾沫捕集板的降液管打入塔内,与鼓风机鼓入的空气在实验塔板上进行气液接触,通过塔内设置的相关构件进行雾沫夹带量、漏液量、板压降、清液层高度和取样点处溶氧量的测量,从而对塔板的流体力学和传质性能进行研究。

实验塔盘一共有3组,其结构参数如表1所示,其中GS(8)-FRV为筛孔孔径 $\Phi 8$ mm,孔间距15 mm的导向筛板与新型浮片式浮阀复合的塔板;GS(9)-

FRV 为筛孔孔径 $\Phi 9$ mm, 孔间距 15 mm 的导向筛板与新型浮片式浮阀复合的塔板。



1—钢瓶; 2—混合器; 3—转子流量计; 4—水槽; 5—离心泵; 6—板式塔; 7—实验塔板; 8—雾沫补集板; 9—气体分布板; 10—U形压差计; 11—清液层测量管; 12—鼓风机

图1 塔板冷模实验装置

Fig. 1 Experimental apparatus of the cold experiment with the trays

表1 实验塔板相关结构参数

Table 1 Structural parameters of experimental trays

编号	塔板样式	开孔率/%		筛孔孔径/ mm	浮阀类型
		浮阀未开	浮阀全开		
1#	F1	可忽略	14.30	—	F1
2#	GS-FRV	14.25	25.63	8	FRV
3#	GS(9)-FRV	17.93	29.31	9	FRV

实验用 GS-FRV 型塔板和 FRV 阀件结构如图 2 所示。FRV 由中心轴和套在中心轴上的圆片构成, 为了保持浮阀开启的稳定性, 圆片上对称开有四个箭头型固定阀孔。中心轴垂直焊接在固定在塔板上的钢架上。阀片的运动只受中心轴限制, 故阻力小, 开启容易, 不易卡死。实验用 FRV 的阀片尺寸为 $\Phi 80$ mm, 塔板上对应开孔 $\Phi 72$ mm, 浮阀通量大, 不易脱落。

气体通过 FRV 阀件流动的示意图见图 3。当气速较低时, 气体不能顶起浮片, 只从固定阀孔通过。随着气速的增大, 浮片浮起, 气体分别通过塔板上的大孔和浮片上的固定阀孔, 并且通过塔板上大孔的气流在浮片的限制下主要从水平向喷出。当气速增大到一定程度后, 浮片被完全顶开, 贴到固定架上, 浮阀达到全开。气体通过塔板上的大孔后在浮片的限制下向斜上方喷出, 少量气体通过固定阀孔喷出。

2 结果与讨论

2.1 干板压降

本实验在图 1 所示的装置中改变气速测定了

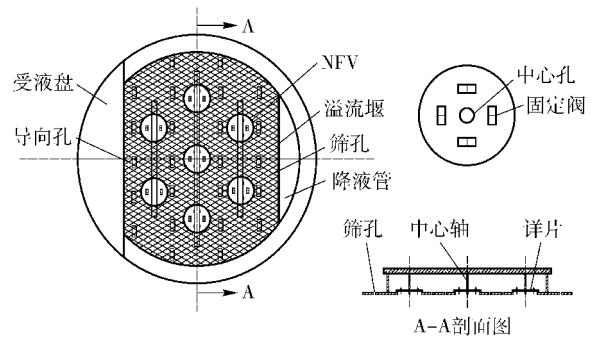


图2 实验用新型浮片式浮阀阀件及复合塔板结构图
Fig. 2 Structure of the new floating roundel valve (FRV) and the tray composed of a FRV and a flow-guided sieve tray (GS-FRV)

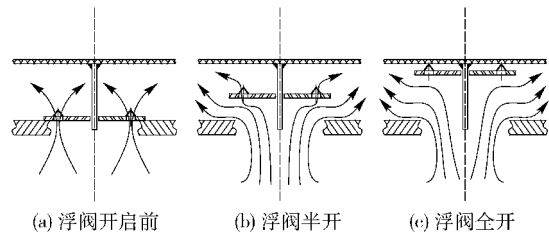


图3 气体通过 FRV 阀件流动的示意图

Fig. 3 Status of the FRV when gas travels through it
2#、3#塔板的干板压降, 并将结果汇总于图 4。

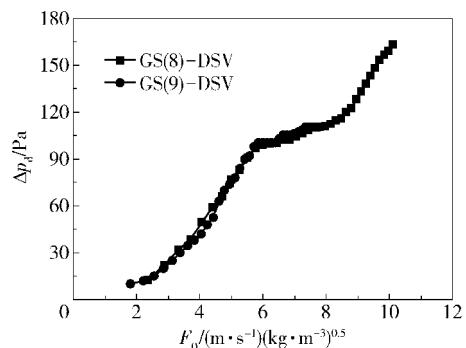


图4 不同开孔率下 GS-FRV 塔板的干板压降随孔动能因子变化的关系图

Fig. 4 Comparison of dry pressure drop between trays with different porosity

干板压降是气体通过塔板上的筛孔和浮阀后的阻力损失之和, 本文采用目前使用较多的 Stichlmair 和 Mersmann 提出的关联式(1)进行关联^[7]

$$\Delta p_d = \xi F_0^2 / 2 = \xi u_0^2 \rho_g / 2 \quad (1)$$

式(1)中 Δp_d 为干板压降, Pa; ξ 为阻力因子; F_0 为孔动能因子, $(\text{m/s}) \cdot (\text{kg/m}^3)^{0.5}$; u_0 筛孔气速, m/s, 本实验中气体通过筛孔和阀孔的气速不同, 但难以在实验中确定各自的速度, 因此为了计算和对比方便, u_0 以入塔总气体流量与塔板筛孔和阀孔的总开孔面

积的比值记; ρ_g 为气体密度, kg/m^3 。

从图 4 可以看出,干板压降随 F_0 的增大而增大,但变化趋势分为 3 段。

在 $0 < F_0 \leq 6$ 时,塔板上浮阀未开启,气体主要通过筛孔和浮片上的固定阀孔,压降主要由气体通过孔的收缩和扩张的局部阻力和摩擦产生,拟合的关联式如式(2)所示,拟合精度 $R^2 = 0.990$ 。

$$\Delta p_d = 2.97F_0^2 - 1.12 \quad (2)$$

在 $6 < F_0 \leq 8.7$ 时,塔板上的 FRV 浮阀开始浮动,气体通过筛孔、固定阀孔和塔板大孔。浮阀的调节作用使得压降在此范围内变化平缓。此阶段阻力来源于气体通过孔的阻力和克服浮片的重力,拟合的关联式如式(3)所示,拟合精度 $R^2 = 0.981$ 。

$$\Delta p_d = 0.52F_0^2 + 78.9 \quad (3)$$

在 $F_0 > 8.7$ 后,塔板上浮阀完全开启,塔板压降来源于气体通过筛孔和阀孔的阻力。此阶段拟合的关联式如式(4)所示,拟合精度 $R^2 = 0.991$ 。

$$\Delta p_d = 1.65F_0^2 - 3.57 \quad (4)$$

图 5 为在 F1 型浮阀塔板与 GS(8)-FRV 型塔板在相同空塔动能因子 (F_T) 下干板压降的对比。从图 5 可以明显看出 GS(8)-FRV 型塔板在相同空塔动能因子下有更低的压降(相同的 F_T 时,低 50% 以上),特别是在高气速下更明显。

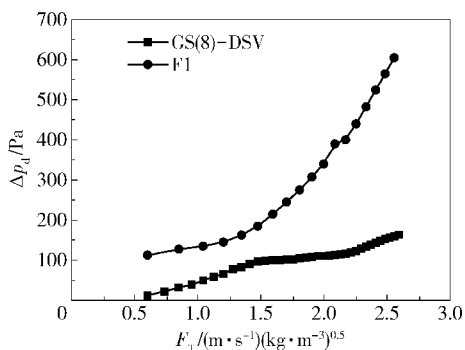


图 5 GS(8)-FRV 塔板与 F1 型浮阀塔板干板压降对比图
Fig. 5 Comparison of dry pressure drop between the F1 floating valve tray and the GS(8)-DSV tray

2.2 湿板压降

本文通过实验测定了不同液流强度 (L_w) 下,GS-FRV 型塔板 (2#、3# 塔板) 的湿板压降随 F_0 的变化关系,并将 GS(8)-FRV 的实验结果汇总于图 6。从图 6 可以看出在 L_w 相同的条件下,湿板压降随着 F_0 的增大而增大;在 F_0 相同的条件下,湿板压降随着 L_w 的增大而增大。而且,在低气速条件下,FRV 浮阀未开启,气体主要通过筛孔和阀片上的固定阀孔,

曲线斜率较大;随着气速的变大,阀片逐渐升起,随着气速调节开度,因此压降曲线变化平缓。实验中,FRV 阀片是逐渐升起的,不像传统浮阀只有开闭两个操作状态,因此湿板压降整体变化较传统浮阀平缓。

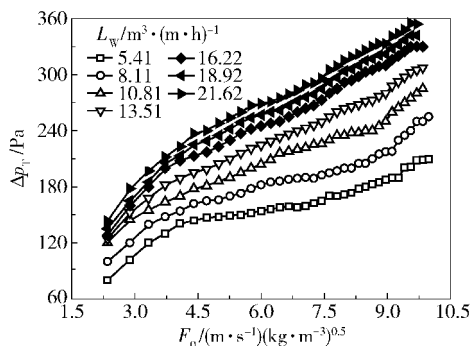


图 6 不同液流强度下 GS(8)-FRV 塔板湿板压降与孔动能因子的关系图

Fig. 6 Comparison of the wet pressure drop for GS(8)-FRV for different flow intensities

湿板压降理论上由气体通过塔板的机械阻力和通过塔板上液层的阻力两部分组成,在本文实验条件下,可用式(5)^[4]进行关联

$$\Delta p_T = \xi F_0^m L_w^n \quad (5)$$

式(5)中 Δp_T 为湿板压降, Pa; F_0 为孔动能因子, $(\text{m}/\text{s})(\text{kg}/\text{m}^3)^{0.5}$; L_w 为液流强度, $\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{h})$; ξ 、 m 、 n 为系数和指数,由实验数据回归得到。

GS(8)-FRV 的 Δp_T 回归结果如式(6)所示

$$\Delta p_T = 29.11F_0^{0.55}L_w^{0.41} \quad (6)$$

式(6)中, F_0 的适用范围为 2.35 ~ 10.12 $(\text{m}/\text{s})(\text{kg}/\text{m}^3)^{0.5}$, L_w 的适用范围是 5.41 ~ 21.62 $\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{h})$, 拟合精度系数 $R^2 = 0.982$ 。

图 7 为在相同液流强度下,1#、2#、3# 塔板的湿板压降对比关系图,从图 7 可以看出:在实验范围内,GS-FRV 型塔板的在相同的 L_w 和 F_0 条件下,压降比 F1 型浮阀塔板小 35% 左右;且 GS(9)-FRV 湿板压降明显低于 GS(8)-FRV 的湿板压降。

2.3 雾沫夹带

雾沫夹带 (e_v), 是反映塔板气相负荷上限的重要参数之一^[8], 其数值为塔板上升气体夹带的液体质量与上升气体质量的比值。本文在溢流堰高一定的条件下,研究了气速、液流强度对 GS-FRV 型塔板的雾沫夹带率的影响。

图 8 为 GS(8)-FRV 型塔板在不同 L_w 下的 e_v 与 F_0 的关系图。从图 8 可以看出:在相同液流强度

下,GS(8)-FRV 型塔板的 e_v 随 F_0 的增大而增大;在相同的 F_0 条件下,GS(8)-FRV 型塔板的 e_v 随液流强度的增大而增大;在 $F_0 \leq 5.5$ 时,浮阀未升起, e_v 随 F_0 变化曲线较陡, $F_0 > 5.5$ 后,浮阀开始升起, e_v 随 F_0 变化曲线稍平缓,这是因为通过筛孔的气流垂直向上吹,夹带的液滴到达上层塔板的可能性大,而通过孔的气流在阀片的限制下平行或斜向上吹出,雾沫到达上层塔板的可能性低。

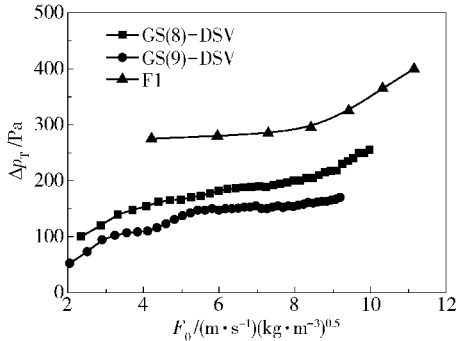


图7 不同塔板在相同液流强度 ($L_w = 8.11 \text{ m}^3 / (\text{m} \cdot \text{h})$) 下湿板压降与孔动能因子关系的比较

Fig. 7 Comparison of wet pressure drop for different trays with the same intensity ($L_w = 8.11 \text{ m}^3 / (\text{m} \cdot \text{h})$)

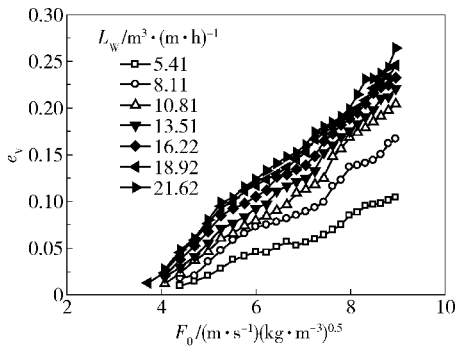


图8 不同液流强度下 GS(8)-FRV 型塔板的雾沫夹带与孔动能因子关系的比较

Fig. 8 Comparison of entrainment for GS(8)-FRV with different flow intensities

理论上, $e_v = f(H_T, \sigma, F_0, L_w)$ [9], 在本文实验条件下, e_v 可简化为只与 F_0 和 L_w 有关。因此,对实验数据进行回归得到关联式(7)和(8),式(7)的适用范围为 $0 < F_0 \leq 5.5$, 拟合精度 $R^2 = 0.976$, 式(8)的适用范围为 $F_0 > 9$, 拟合精度 $R^2 = 0.968$ 。

$$e_v = (5.57 \times 10^{-7}) F_0^{5.48} L_w^{1.03} \quad (7)$$

$$e_v = (3.61 \times 10^{-4}) F_0^{2.10} L_w^{0.67} \quad (8)$$

2.4 漏液率

本文在溢流堰高一定的条件下,研究了 F_0 和

L_w 的变化对 GS-FRV 型塔板的漏液率 (ε) 的影响,并将 GS(8)-FRV 型塔板在不同液流强度下的 ε 与 F_0 的关系汇总于图9。

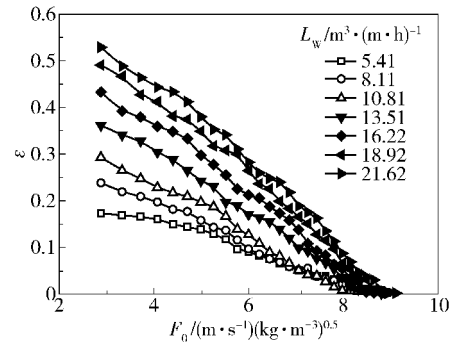


图9 不同液流强度下 GS(8)-FRV 型塔板的漏液率与孔动能因子关系的比较

Fig. 9 Comparison of weeping rates of GS(8)-FRV for different flow intensities

从图9可以看出:在相同 L_w 下,GS-FRV 型塔板的 ε 随 F_0 的增大而减小,且在 $F_0 \geq 5.1$ 后,迅速减小直至消失;在相同的 F_0 条件下,GS-FRV 型塔板的 ε 随液流强度的增大而增大。

2.5 清液层高度

本文利用连通器原理,在塔板上设置多个采样点,并利用膨大段稳定液位,测量了比较准确的清液层高度(见图1)。图10为GS(8)-FRV型塔板改变液流强度和气速得到的 h_{CL} 与 F_0 的关系图。从图10可以看出,在低液流强度下,GS(8)-FRV型塔板的 h_{CL} 随着气速的增大首先增大,稳定,然后减小,直至接近消失;而在高液流强度下,在实验范围内, h_{CL} 随着气速的增大只呈现上升和稳定阶段。这是因为,在低液流强度下,塔板的操作状态随着气速的增大依次出现漏液、鼓泡、喷射3种操作状态, h_{CL} 随之

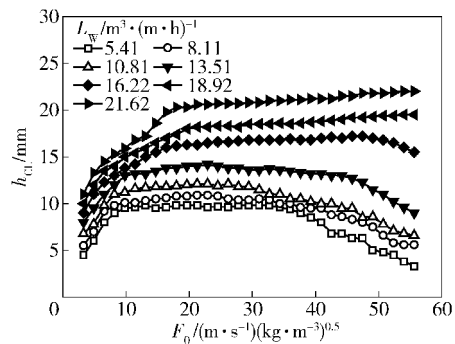


图10 不同液流强度下 GS(8)-FRV 型塔板的清液层高度与孔动能因子关系的比较

Fig. 10 Comparison of clear liquid height for GS(8)-FRV with different flow intensities

变化;而在高液流强度下,在实验范围内未达到喷射状态,因此 h_{CL} 不断升高至稳定,未出现下降阶段。

2.6 传质效率研究

本文通过氧解析实验,对复合塔板的传质性能进行了测定,其中 GS(9)-FRV 的部分测试数据汇总于图 11。从图 11 可以明显看出,新型复合塔板的板效率比较高,在高气速下接近一个理论级;相同 L_W 下,随着 F_0 增大,稳定液层被撕裂,气液接触更充分,效率升高;在相同 F_0 下,随着 L_W 的增大,气体穿过液层的阻力增大,气泡和液层较稳定,气液接触不够充分,效率降低。

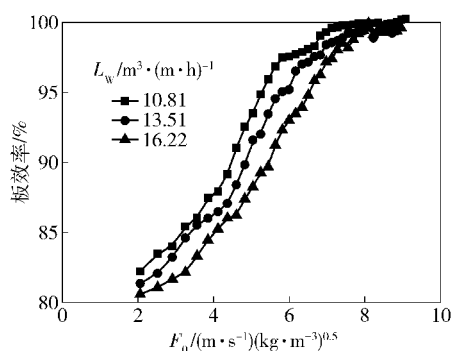


图 11 不同液流强度下 GS(9)-FRV 型塔板的板效率与孔动能因子关系的比较

Fig. 11 Comparison of tray efficiency for GS(9)-FRV with different flow intensities

3 结论

(1) GS-FRV 型复合塔板具有通量大,压降低(相同条件下,湿板压降相比 F1 型浮阀塔板低 100 Pa 左右),板效率高,抗堵性好,浮阀开启容易、不易卡住或脱落等优点。

(2) 得到了 GS(8)-FRV 型复合塔板的干板压降、湿板压降和雾沫夹带率的关联式分别为 $\Delta p_d = aF_0^2 + b$, $\Delta p_T = \xi F_0^m L_W^n$, $e_V = aF_0^m L_W^n$ 。

(3) 相同 L_W 下,随着 F_0 的增大,GS-FRV 型复合塔板的漏液率迅速减少,然后消失;相同 F_0 下,漏液率随着液流强度的增大而增大。相同 L_W 下,GS-FRV 型复合塔板的清液层高度,随着 F_0 的增大,呈现增大,稳定然后减小的趋势;相同 F_0 下,清液层高度随着 L_W 的增大而增大。

符号说明

a, b —系数

e_V —雾沫夹带率

F_0 —孔动能因子, $m/s(kg/m^3)^{0.5}$

F_T —空塔动能因子, $m/s(kg/m^3)^{0.5}$

H_T —板间距, mm

h_{CL} —清液层高度, mm

L_W —液流强度, $m^3/(m \cdot h)$

m, n —指数

Δp_d —干板压降, Pa

Δp_T —湿板压降, Pa

ε —漏液率

ξ —阻力因子

ρ_g —气体密度, kg/m^3

σ —液体表面张力, N/m^2

参考文献:

- [1] 王树楹, 高长宝, 兰仁水. 板式塔研究进展[J]. 化学工程, 2003, 31(3): 20-26.
Wang S Y, Gao C B, Lan R S. Progress in the research of trays[J]. Chemical Engineering, 2003, 31(3): 20-26. (in Chinese)
- [2] 王松汉. 石油化工设计手册: 第3卷[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
Wang S H. Petrochemical design manual: Volume III [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [3] 李伟峰, 李群生, 杨明. 新型导向复合塔板流体力学性能研究[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2010, 37(3): 31-34.
Li W F, Li Q S, Yang M. Hydromechanical properties of flow-guided compound trays[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science, 2010, 37(3): 31-34. (in Chinese)
- [4] 李群生, 许莉, 李通, 等. 新型导向圆盘形浮阀塔板流体力学性能[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2011, 38(6): 16-21.
Li Q S, Xu L, Li T, et al. A new flow-guided round floating valve tray and its hydromechanics[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science, 2011, 38(6): 16-21. (in Chinese)
- [5] 王劲寒. 浮阀筛孔复合塔板设计计算方法探讨(1)[J]. 炼油设计, 1997, 27(4): 20-24.
Wang J H. Design and calculation method for floating valve-sieve integrated trays (1) [J]. Refinery Design, 1997, 27(4): 20-24. (in Chinese)
- [6] 刘巍, 王雷. FSV 浮动筛片塔板的开发研究[J]. 化学工程, 1995, 23(3): 28-36.
Liu W, Wang L. Development and research on FSV tray [J]. Chemical Engineering, 1995, 23(3): 28-36. (in Chinese)

- Chinese)
- [7] 毛明华, 李群生, 王爱军. 高效导向筛板流体力学性能研究[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2004, 31(3): 27-30.
- Mao M H, Li Q S, Wang A J. Hydrodynamic characteristics of high efficient flow-guided sieve tray[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science, 2004, 31(3): 27-30. (in Chinese)
- [8] 陈敏恒, 丛德滋, 方图南, 等. 化工原理: 下册[M]. 3 版. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- Chen M H, Cong D Z, Fang T N, et al. Chemical engineering: Volume 2[M]. 3rd Ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [9] 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.
- Lanzhou Machinery Research Institute. The modern column techniques [M]. 2nd Ed. Beijing: China Petrochemical Press, 2005. (in Chinese)

A study of the hydromechanical and efficiency properties of a new tray composed of a new floating roundel valve and a flow-guided sieve tray

TANG XiaoFei ZHANG ManXia LI QunSheng WEN Fang LI Lun

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

Abstract: A new tray composed of a new floating roundel valve and a flow-guided sieve tray (GS-FRV) has been designed, and cold-flow model experiments for the trays have been conducted in a $\Phi 600$ mm perspex column with an air-water system. GS-FRV trays with different aperture ratios and F1 floating valve trays were studied. The efficiency performance and hydromechanics of GS-FRV trays have been measured for different air velocities and flow intensities and the results contrasted with those for F1 floating valve trays measured under the same conditions. The experimental results show that the GS-FRV trays have higher capacity, lower pressure drop, better anti-clogging behavior and are less prone to seizure compared with F1 floating valves. The GS-FRV trays also show high efficiency performance. Experimental data show that: the plate pressure drop and entrainment rate increase with the increase of the kinetic energy factor (F-factor) and liquid flow intensity; the weeping rate decreases with the increase of the F-factor and increases with the increase of the liquid flow intensity; the efficiency performance increases with the increase of the F-factor and decreases with the increase of the liquid flow intensity; the clear liquid height first increases, then stabilizes and finally decreases with the increase of the F-factor and decreases with the increase of the liquid flow intensity. According to the experimental data, the regression formulae of the dry plate pressure drop ($\Delta p_d = aF_0^2 + b$), the wet plate pressure drop ($\Delta p_T = \xi F_0^m L_w^n$) and the entrainment rate ($e_v = aF_0^m L_w^n$) for the GS-FRV have been derived, and the variation of entrainment rate, weeping rate and clear liquid height as a function of changing F_0 and flow intensity have been obtained.

Key words: new floating roundel valve; flow-guided tray; compound tray; hydromechanics; efficiency performance