

# 导向筛板-导向浮阀塔板流体力学及传质性能

李群生<sup>1</sup>, 张满霞<sup>1</sup>, 汤效飞<sup>1</sup>, 李 仑<sup>1</sup>, 文 放<sup>1</sup>, 王宝华<sup>2\*</sup>

(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:**设计了一种高分离效率、高操作弹性的新型导向筛板-导向浮阀塔板(FGS-VT)。并在直径为600 mm的有机玻璃塔内,以空气-水-氧气为物系,测定了3种结构不同的FGS-VT的流体力学性能和传质性能,包括干板压降、湿板压降、漏液量、雾沫夹带率和塔板效率等。通过与筛孔、导向孔大小和排布方式相当的导向筛板在相同条件下的实验数据对比得出结论,带有14个浮阀的导向筛板-导向浮阀(FGS-VT-14-8)具有更低的干板压降和湿板压降,更大的操作弹性(更低的漏液和雾沫夹带)和更高的塔板效率。

**关键词:**导向筛板-导向浮阀塔板;流体力学性能;塔板效率

中图分类号:TQ053.5

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2013)03-0084-04

## Hydrodynamic and mass transfer performance of flow-guided sieve-valve tray

LI Qun-sheng<sup>1</sup>, ZHANG Man-xia<sup>1</sup>, TANG Xia-fei<sup>1</sup>, LI Lun<sup>1</sup>, WEN Fang<sup>1</sup>, WANG Bao-hua<sup>2\*</sup>

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

2. Chinese Medicine College, Beijing University of Chinese Medicine, Beijing 100029, China)

**Abstract:** A new flow guided sieve-valve tray (FGS-VT) with high efficiency and operating flexibility is designed. The hydrodynamics and mass transfer performance of three types of FGS-VTs, including dry-plate pressure drop, wet-plate pressure drop, weeping, entrainment and efficiency, are tested in an air-water-oxygen system within a 600 mm diameter plexiglass column. Compared with the flow-guided sieve with similar size and arrangement of sieve holes and flow-guided holes, the FGST with 14 valves (FGS-VT-14-8) has the advantages as follows: lower dry-plate pressure drop and wet-plate pressure drop, greater operating flexibility and higher plate efficiency.

**Key words:** flow-guided sieve-valve tray; hydrodynamic performance; plate efficiency

随着石油化工行业的快速发展,以及经济危机的不断出现,合理地利用现有能量、消除已有设备的瓶颈、最大限度地利用设备的生产能力、降低系统的能量消耗是当今企业提高竞争力和经济效益最为有效的方法。塔板作为精馏塔最重要的内件之一,广泛地应用于化工、炼油、食品、轻工、环境等分离行业中。塔板性能的好坏直接关系到分离系统的生产能力、操作弹性、能量消耗量、产品纯度、环境友好性<sup>[1-3]</sup>。因此开发高性能的塔板对于提高精馏单元操作的经济效益至关重要。

处理高黏度易自聚物系一直是精馏过程的一大难题<sup>[4]</sup>,大量的实验数据以及实践经验已经证明,由北京化工大学李群生教授等开发的高效导向筛板<sup>[5-12]</sup>,在处理高黏度、易自聚物系具有独特的优势。本文充分利用了高效导向筛板效率高、处理高黏度易自聚物系能力强等特点,在此基础上开发了一种新型的导向筛板-导向浮阀复合型塔板(FGS-VT),并采用空气-水-氧气物系,通过冷模实验测定了该塔板的流体力学性能及传质性能,并将其实验

结果与同等条件下测得的导向筛板的性能结果相比较,从而证明了新设计的FGS-VT塔板优越的性能。

## 1 实验部分

### 1.1 实验塔板的结构和特点

导向筛板-导向浮阀塔板(FGS-VT)的结构简图见图1。该塔板的结构特点如下:

(1) FGS-VT主要由筛孔、导向孔以及浮阀组成,并且每个浮阀上面设有7个筛孔和一个导向孔。

(2) 在浮阀开启之前,FGS-VT与高效导向筛板(FGST)有着相似的结构。这样FGS-VT能适应不同的气-液负荷,即在低气速下,浮阀处于关闭状态,FGS-VT就如同FGST;随着气速的不断提高,FGS-VT上的浮阀逐渐开启,不断增加气体通道以适应新的操作条件。

(3) 根据分离物系的性能和操作弹性的要求,塔板上可以设置不同数量、形状和排列方式的浮阀和导向孔。

收稿日期:2012-10-12;修回日期:2013-01-08

作者简介:李群生(1963-),男,博士,教授,博士生导师,从事塔器技术的研究;王宝华(1965-),女,副教授,从事中药新剂型与新设备研究,通讯联系人,010-64449695, zhangmanxia\_1018@163.com。

(4)塔板的液相进口处设置带有一定斜度的鼓泡促进器,目的是减小甚至消除液层从入口到溢流堰之间的液面梯度,确保塔板上气体和液体之间均匀地接触进行传质与传热。

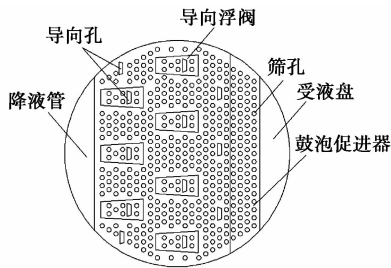


图1 导向筛板-导向浮阀塔板结构简图

本实验对3种结构不同的FGS-VT以及1种FGST进行实验,各塔板的尺寸参数见表1。

表1 实验塔板结构参数

塔板	开孔率/%	浮阀个数	筛孔直径/mm
FGS-VT-8-8 <sup>①</sup>	21.52	8	8
FGS-VT-14-7 <sup>②</sup>	22.24	14	7
FGS-VT-14-8 <sup>③</sup>	25.05	14	8
FGST <sup>④</sup>	20.03	0	8

## 1.2 实验装置与流程

常温常压下,在内径为600 mm,板间距为350 mm的有机玻璃塔内测定了各塔板的性能。采用空气-水体系测定了流体力学性能,包括干板压降

(上接第83页)

且富含C<sub>3</sub>~C<sub>5</sub>的原料气,含较多乙烯、丙烯的裂解气分离中使用,应用面受限。

## 3 结语

利用不同工艺对低体积分数含氢气体提浓提高了氢气的利用率,有效缓解石化行业氢资源的供求矛盾。不同提浓工艺适应的原料气性质、提浓成本和提浓氢气体积分数、氢气回收率等技术经济指标不同。结合低体积分数氢气性质、氢阱要求选择合适提浓工艺是降低氢气费用的关键。膜分离+PSA耦合工艺的操作稳定性、氢气体积分数、回收率等方面均优于单一提浓装置,氢气完全成本显著降低,开拓了低体积分数氢源利用的新途径,已成为高效的氢气分离方法。

## 参考文献

[1] 沈光林,陈勇,吴鸣.国内炼厂气中氢气的回收工艺选择[J].

$\Delta P_d$ 、湿板压降  $\Delta P_w$ 、雾沫夹带  $e$  和漏液  $w$ ;采用空气-水-氧气体系测定了各塔板的传质性能即塔板的效率  $E_{ML}$ 。实验装置及流程详见文献[13-14]。

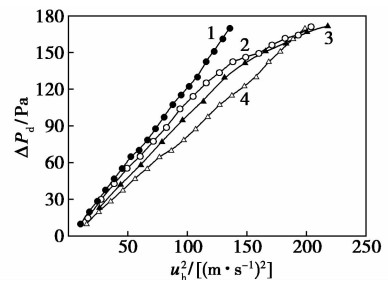
## 2 结果与讨论

### 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没有液体存在时,气体穿过塔板的开孔所造成的阻力损失<sup>[2]</sup>。干板压降的大小与塔板的结构直接相关。

4种实验塔板的干板压降随阀、孔气速平方  $u_h^2$  的变化关系图见图2。



1—FGST;2—FGS-VT-14-8;  
3—FGS-VT-14-7;4—FGS-VT-8-8

图2 4种实验塔板干板压降的比较

从图2可以看出,在一定的  $u_h^2$  下,3类FGS-VT的干板压降均比FGST的低,顺序为:FGST > FGS-VT-14-8 > FGS-VT-14-7 > FGS-VT-8-8。

石油与天然气化工,2003,32(4):193-196.

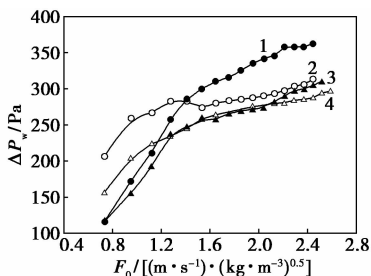
- [2] 邱若磐. 炼油厂氢气资源优化利用研究[D]. 大连:大连理工大学,2003.
- [3] 梁文杰,阙国和,刘晨光,等. 石油化学[M]. 东营:中国石油大学出版社,2009.
- [4] 王海彦,陈文艺. 石油加工工艺学[M]. 北京:中国石化出版社,2009.
- [5] 李增英. 我国炼厂气综合利用技术及其新进展[J]. 石油化工,1999,28(9):632-636.
- [6] 李大东. 加氢处理工艺与工程[M]. 北京:中国石化出版社,2004.
- [7] 陈文杰,顾望田,正浩. 采用膜分离技术回收炼油厂富氢气体中的氢气[J]. 炼油技术与工程,2008,38(9):19-21.
- [8] 王永飞,华贵,李亚军. 炼厂干气的综合利用研究[J]. 现代化工,2008,28(2):69-70.
- [9] 郝树仁,董世达. 烃类转化制氢工艺技术[M]. 北京:石油工业出版社,2009.
- [10] 蒋国梁,徐仁贤,陈华. 膜分离法与深冷法联合用于催化裂化干气的氢烃分离[J]. 石油炼制与化工,1995,26(1):26-29. ■

各塔板的干板压降均随阀、孔气速平方的增大而增大。但是 FGS-VT 类塔板的干板压降曲线分为斜率不同的 2 段,这是因为实验过程中,3 类 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,特别是浮阀个数为 8 的 FGS-VT-8-8,所以曲线的转折点代表塔板上浮阀的开启点。

### 2.1.2 湿板压降

湿板压降指气体通过塔板的开孔及塔板上的液层的压降,是塔板最重要的性能之一。湿板压降高表明使用该塔板所需要的能耗高<sup>[1]</sup>,同时高湿板压降也限制了塔板处理量的提高。

图 3 是液流强度  $Lw = 18.92 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h})$  时,各实验塔板的湿板压降随空塔动能因子的变化关系图。从图 3 中可以看出,在液流强度一定的情况下,4 类塔板的湿板压降均随空塔动能因子的增大而呈增大趋势。浮阀开启之前,各塔板的湿板压降大小顺序大致为: FGS-VT-14-7 > FGS-VT-14-8 > FGS-VT-8-8 > FGST; 浮阀开启但尚未全部开启过程中,湿板压降的顺序为: FGS-VT-8-8 > FGS-VT-14-7 > FGS-VT-14-8 ≈ FGST; 浮阀完全开启后: FGS-VT-8-8 > FGS-VT-14-7 > FGST > FGS-VT-14-8。所以,浮阀开启后,与筛孔和导向孔大小及排布相似 FGST 相比, FGS-VT-14-8 具有更低的湿板压降。



1—FGS-VT-8-8; 2—FGS-VT-14-7;  
3—FGST; 4—FGS-VT-14-8

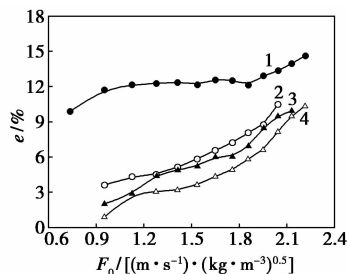
图 3  $Lw = 18.92 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h})$ , 不同塔板湿板压降比较

## 2.2 雾沫夹带

雾沫夹带是塔内气相速度较高,液相速度较低,在有限的塔板间距内,气体将液滴携带至上层塔板的现象。雾沫夹带不仅影响塔板的效率<sup>[15]</sup>,而且限制了塔板操作上限的提高。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

为精馏塔设计的上限<sup>[16]</sup>。

图 4 给出各塔板在液流强度  $Lw = 24.32 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h})$  时,各塔板的雾沫夹带  $e$  随空塔动能因子  $F_0$  的变化关系。从图 4 中可以看出,  $Lw$  一定时, FGST 的雾沫夹带均超出正常的允许范围 (>10%), 而 FGS-VT 类塔板的雾沫夹带均在正常允许的范围之内。在整个  $F_0$  范围内,各塔板的雾沫夹带大小关系为: FGST > FGS-VT-14-8 > FGS-VT-14-7 > FGS-VT-8-8。所以,具有 14 个和 8 个浮阀的 FGS-VT-14-8 和 FGS-VT-8-8 均有着比 FGST 更高的操作上限。



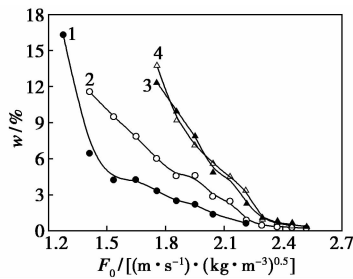
1—FGST; 2—FGS-VT-14-8;  
3—FGS-VT-14-7; 4—FGS-VT-8-8

图 4  $Lw = 24.32 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h})$ , 各塔板雾沫夹带率比较

## 2.3 漏液

当气速较低,液流强度较大时,气体没有足够的动能支撑塔板上的液体,液体将从上一层塔板由塔板上的开孔落至下一层塔板,这种想象称为塔板漏液<sup>[17]</sup>。在漏液操作状态下,液体没有足够的时间与气体进行充分的物质和能量交换,所以大量的漏液将降低塔板的效率。并且,漏液也限制了塔板的操作下限的提高。甚至严重的漏液会增加塔板的压力波动,从而存在引起塔设备振动的危险。工业上规定,把泄漏 10% 作为精馏塔设计的下限<sup>[16]</sup>。

图 5 给出了  $Lw = 16.22 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h})$  时,各实验塔板的漏液率随着空塔动能因子  $F_0$  变化的比较。从图 5 中可以看出,各塔板的漏液率的大小顺序为: FGS-VT-8-8 > FGST > FGS-VT-14-8 > FGS-VT-14-7。即对于筛孔孔径相同的 3 类塔板,带有 14 浮阀的 FGS-VT-14-8 的漏液率远小于导向筛板,而含 8 个浮阀 FGS-VT-8-8 的漏液率略高于导向筛板。所以与 FGST 相比, FGS-VT-14-8 具有更低的操作下限。



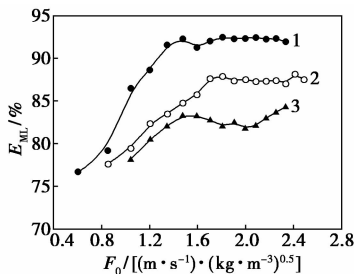
1—FGS-VT-14-7; 2—FGS-VT-14-8;  
3—FGST; 4—FGS-VT-8-8

图5  $Lw = 16.22 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h})$ ,  
各塔板漏液率的比较

## 2.4 塔板效率

塔板的效率直接反映了塔板内气-液进行物质交换的程度,是塔板最重要的性能参数<sup>[18]</sup>。在项目改造过程中,高的传质效率能有效地减小回流比、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,减少固定资产投资,从而大大提高经济效益。

不同塔板在液流强度  $Lw = 16.22 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h})$  时的塔板压降的对比关系见图6。从图6中可以看出,FGS-VT-14-8的塔板效率远比FGST的效率。



1—FGS-VT-14-8; 2—FGS-VT-14-8; 3—FGS-VT-8-8

图6  $Lw = 16.22 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h})$ , 不同塔板塔板  
效率比较

## 3 结论

(1)新设计了一种新型高效率、高操作弹性的导向筛板-导向浮阀复合塔板(FGS-VT),并给出该塔板的结构简图,详细叙述了其结构特点。

(2)通过冷模实验,测定了带有14个和8个浮阀的导向筛板-导向浮阀塔板以及导向筛板的流体力学性能和传质性能。

(3)通过实验证明,与筛孔和导向孔大小和排布相当的导向筛板FGST相比,FGS-VT-14-8具有

更低的干板压降、湿板压降,更大的操作弹性和更高的塔板效率。

## 参考文献

- [1] Nutter D E. The MVG™ tray at FRI [J]. Chem Eng Res Des, 1999, 77(6): 493-497.
- [2] Qian J B, Qi R B, Zhu S L. High-powered adaptive valve tray: A new generation tray offers new advantages [J]. Chem Eng Res Des, 2006, 84(2): 155-158.
- [3] 王汉松. 石油化工设计手册 [M]. 3版. 北京: 化学工业出版社, 2002: 1419-1510.
- [4] Böcker S, Ronge G. Distillation of viscous systems [J]. Chem Eng Technol, 2005, 28(1): 25-28.
- [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(s1): 783-786.
- [6] 李群生, 邹高兴. 高效导向筛板和 BH 型高效填料的特点及其在节能减排中的应用 [J]. 现代化工, 2010, 30(1): 48-50.
- [7] 李群生, 黄强, 何荐轩, 等. 高效导向筛板和 BH 填料塔的研究与应用 [J]. 化工进展, 2009, 28(s1): 327-330.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 李群生, 皮耀, 张泽廷. 高效导向筛板在 26 万 t/a PVC 高/低沸塔精馏中的应用 [J]. 聚氯乙烯, 2006, (4): 35-37.
- [11] 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 J Chem Eng, 2008, 25(6): 1509-1513.
- [12] Zhou Y F, Shi J F, Wang X M, et al. A study of the hydrodynamic behavior of linde-type flow-guided sieve plates [J]. Int Chem Eng, 1980, 20(4): 642-653.
- [13] 李群生, 刘静, 许莉, 等. 新型导向筛板-浮阀复合塔板的流体力学性能研究 [J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2011, 38(3): 1-5.
- [14] 李群生, 许莉, 李通, 等. 新型导向圆盘形浮阀塔板的流体力学性能 [J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2011, 38(6): 16-21.
- [15] Jaćimović B M. Entrainment effect on tray efficiency [J]. Chem Eng Sci, 2000, 55(18): 3941-3949.
- [16] 兰州石油机械研究所. 现代塔器技术 [M]. 北京: 烃加工出版社, 1990: 328-329.
- [17] Wijn E F. On the lower operating range of sieve and valve trays [J]. Chem Eng J, 1998, 70(2): 143-155.
- [18] Luo N, Qian F, Ye Z, et al. Estimation of mass-transfer efficiency for industrial distillation columns [J]. Ind Eng Chem Res, 2012, 51(7): 3023-3031. ■