

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2021.02.003



开放科学标识码  
(OSID)

## P/T 复合塔板填料构成及构件间距 对塔板性能的影响

王 岚, 苏子阳, 王 鹏, 王龙耀

(江苏省先进催化与绿色制造协同创新中心(常州大学), 江苏 常州 213164; 常州大学 石油化工学院, 江苏 常州 213164)

**摘要:**以空气-水为实验物系,研究了 P/T 复合塔板的填料构成及构件间距对塔板性能的影响。结果表明:在相同实验条件下,由规整填料组成复合填料板的板压降远低于由散堆填料组成的复合填料塔板;且雾沫夹带量  $e_v$  降低了 80% 以上。在由金属丝网填料组成的规整复合填料板中, BX500 型复合填料板与 CY700 型复合填料板相比,由于其自身波纹距离大,气升通道宽,孔隙率大等特点。在高气液比条件下,其压降更小,雾沫夹带量更低。在 BX500 型复合填料板中,合理增加板内构件间距能明显提高塔板的泛点气速并且降低其雾沫夹带量,与构件间距  $h_0=0$  的 BX500 复合塔板相比,当  $h_0$  增加至 5 mm 时,雾沫夹带量的减少了 13%~20%,气相操作上限提升了 8%~15%,体现出较优的塔板性能。

**关键词:**复合塔板;高气液比;压降;持液;雾沫夹带

中图分类号:TQ 053.5

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2021)02-0017-07

## Effects of Packing Composition and Component Spacing of P/T Composite Tray on Tray Performance

WANG Lan, SU Ziyang, WANG Peng, WANG Longyao

(Advanced Catalysis and Green Manufacturing Collaborative Innovation Center, Changzhou University, Changzhou 213164, China; School of Petrochemical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** The effects of packing composition and component spacing on the performance of P/T composite tray were studied with air-water system. The results show that under the same experimental conditions, the pressure drop of the composite packing plate composed of structured packing is much lower than that of the composite packing plate composed of scattered packing. The amount of entrainment

收稿日期:2020-10-02。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(22072007)。

作者简介:王岚(1976—),女,江苏无锡人,博士,副教授。E-mail: wanglan@cczu.edu.cn

引用本文:王岚,苏子阳,王鹏,等. P/T 复合塔板填料构成及构件间距对塔板性能的影响[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2021, 33(2): 17-23.

ment  $e_v$  was reduced by more than 80%. Compared with CY700 composite packing tray, BX500 type composite packing tray has the characteristics of large corrugated distance, wide air lift channel and large porosity. Under the condition of high gas-liquid ratio, the pressure drop is smaller and the entrainment amount is lower. In BX500 composite filler plate, within a reasonable increase of plate spacing can significantly improve the gas velocity at flooding point and reduce the entrainment quantity. Compared with the  $h_0 = 0$ , when  $h_0$  increased to 5 mm, the entrainment quantity of BX500 composite plate decreased 13%—20%, and the upper limit of gas phase operation increased 8%—15%, which shows excellent tray performance.

**Key words:** compound packing tray; high gas-liquid ratio; pressure drop; liquid hold-up; entrainment

随着环保要求的日趋严格,大气量低压废气的处理,逐渐成为企业的普遍需求。塔设备是一种常用的相间传质分离设备,被广泛应用在废气处理过程中。在传统的板式塔和填料塔设备中,合理的高持液量是影响塔性能发挥的关键参数,但高的持液量通常需要以大的喷淋量和压降来维持<sup>[1]</sup>。面向大气量低压废气的处理,在污染物的塔分离与富集过程中,有效解决高气液比条件下的低塔压降,同时有效保持传质构件的持液量,成为一个关键的技术问题。

P/T 型复合塔板是一种将穿流筛板与填料复合起来的高效填料。该类复合板不设降液管,能增加塔内有效截面积;穿流筛板的加入能显著增加塔板的动持液量,延长液体在塔内的停留时间;而填料则能充分利用塔内空间,提高气液接触面积<sup>[2-4]</sup>。与普通塔板相比,P/T 型复合塔板在提高效率的同时,还表现出了更低的板压降和更大的通量<sup>[5]</sup>。从 P/T 型复合塔板的构成入手,通过对压降,持液性能及雾沫夹带的考察,探究了不同塔板类型及构件间距对复合板性能的影响。

## 1 实验部分

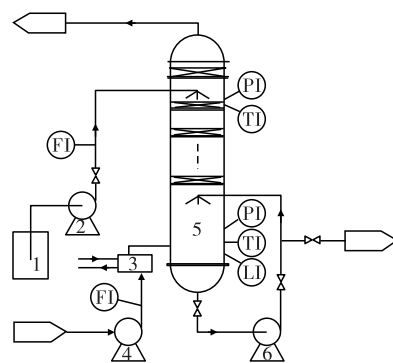
### 1.1 实验装置

实验装置的流程图如图 1 所示,其中塔体的内径为 100 mm,塔高 1 000 mm,塔下部设循环喷淋段。塔内复合塔板的板间距(不含复合塔板自身厚度)为 25 mm。水相由恒流泵从水槽打入塔顶,气体由风机经换热器从塔底鼓入塔内,在循环喷淋段饱和湿度后进入复合塔板段。气液两相在塔内经逐级接触后,气相由塔顶放空,液相落入塔釜中。压力、温度、湿度和液位等由在线仪表读出,流量由相关阀门调控。

塔板主体由填料和穿流筛板复合而成,其中单板填料层厚度为 100 mm,穿流筛板厚度为 2 mm(筛孔孔径 4 mm,开孔率 29%)。填料分别为规整填料(BX500 和 CY700)和散堆填料(弹簧式玻璃填料,壁厚 0.5 mm;陶瓷拉西环填料,壁厚 2 mm),相关参数见表 1。

### 1.2 测量方法

压降由塔设备上的压差计测出,具体操作是在相应的喷淋密度  $L$  和  $F$  因子条件下,每隔 20 min 记录 1 次塔的压降数据,当压降示数不再随时间发生变化时,即得到该条件下的压降值。



说明:1—水槽;2—恒流泵;3—空气加热器;4—鼓风机;  
5—塔体;6—塔釜循环泵。

图 1 实验装置流程图

Fig.1 Schematic of the experiment system

表 1 填料结构参数

Table 1 The structure parameters of different packing

项目	BX500	CY700	弹簧式玻璃填料	陶瓷拉西环填料
峰高/mm	6.5	4.5		
波距/mm	10.2	9		
波纹倾角/(°)	30	45		
孔隙率/%	92	85		
比表面积/(m <sup>2</sup> ·m <sup>-3</sup> )	500	700		
堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	250	350	230	737
直径/mm,高度/mm	100,100	100,100	4,20	6,6

$F$  因子可通过式(1)计算得到

$$F = \frac{V_{\text{air}}}{a_0} \sqrt{\rho} \tag{1}$$

式中: $F$  为气相动能因子, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^{1/2}$ ;  $V_{\text{air}}$  为气体体积流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $a_0$  为塔板孔面积, $\text{m}^2$ ;  $\rho$  为气体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

动持液量  $E_0$  采用体积法测量,在测完湿塔压降后,关闭恒流泵泵和风机,持液从塔内落下至塔釜,至无液滴从塔内落下,测量得到塔釜内新增的液体体积,从而得到动持液量  $E_0$ 。计算式为

$$E_0 = \frac{V_0}{V_p} \times 100\% \tag{2}$$

式中: $E_0$  动持液量,%;  $V_0$  为到塔釜内新增液体体积,L;  $V_p$  为复合塔板体积,L。

雾沫夹带由捕集称重法测得,逸散的雾沫经塔出口被海绵捕集器收集,计算单位捕集时间内海绵的增重量,即得到雾沫夹带量<sup>[6]</sup>。雾沫夹带量采用  $e_v$  表示,计算式为

$$e_v = \frac{m'}{m} \times 100\% \tag{3}$$

式中: $e_v$  为雾沫夹带量,%;  $m'$  为单位时间内气体夹带的液体质量,kg;  $m$  为单位时间内通入的气体质量,kg。

## 2 结果与讨论

### 2.1 复合塔板的填料构成

在筛孔孔径 4 mm、开孔率为 29% 的穿流筛板上设置一定高度的填料,构成复合塔板,整个复合塔板不设降液管。实验比较了复合塔板的填料构成对其单板性能的影响。

#### 2.1.1 复合板填料构成对板压降的影响

当气体穿过塔身时,会产生动力损失即压降。压降是最重要的流体力学参数之一,直接影响了设备的处理效率和负荷<sup>[7]</sup>。实验测定了板间距为 25 mm、筛板上填料层高度均为 100 mm 条件下,不同复合塔板的干板压降随  $F$  因子的变化情况,如图 2 所示。

由图 2 可知,干板压降  $\Delta p_d'$  随着  $F$  因子的增加而增长。在相同的  $F$  因子条件下,两种散堆填料的干板压降大于整装填料,压降最大的是陶瓷拉西环填料,两种规整填料的干板压降相差不大。这是由于相对于规整填料而言,散堆填料杂乱无章的装填方式使复合板内部无法形成固定的孔道。因此,当气体经过复合板时动能损失较大,干板压降较明显。而陶瓷乱堆填料由于堆积密度比较大,气体在经过时,对于气体的能量消耗也更加明显。因此陶瓷拉西环填料的干板压降最大。

图 3 表示的是在设定喷淋密度  $L = 148 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  条件下,不同组合方式的复合塔板湿板压降  $\Delta p_w'$  随  $F$  因子的变化情况。

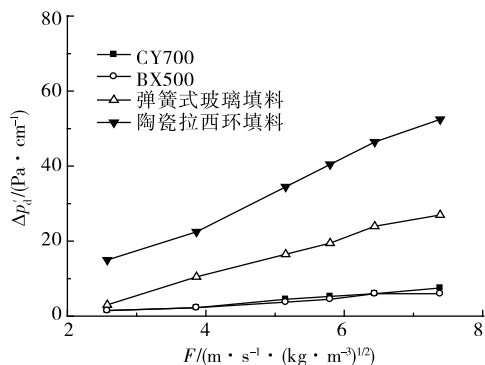


图 2 不同复合塔板  $F$  因子与干板压降  $\Delta p_d'$  的关系  
Fig.2 Relationships of  $F$  and  $\Delta p_d'$  with different composite tray

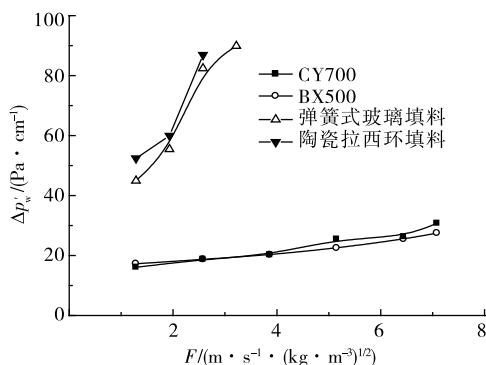


图 3 不同复合塔板  $F$  因子与湿板压降  $\Delta p_w'$  的关系  
Fig.3 Relationships of  $F$  and  $\Delta p_w'$  with different composite tray

由图 3 可知,各类复合塔板的湿板压降相对于干板压降都增加了数倍。其中,散堆填料复合塔板的湿塔压降的增长最大。这是由于在喷淋的作用下,填料逐渐被水浸湿,填料层之间的空隙也被液体填满。气体在经过湿板时,除了克服由经过塔板构件摩擦产生的阻力损失之外,还需克服板上持液层的静压,经过液层摩擦阻力损失。随着  $F$  因子的增高,此两种填料的湿板压降急剧上升。湿板压降增大有利于增大塔板上气液两相的接触时间,但若过大则会增加塔的气相负荷。另外从图 3 可知,随着  $F$  因子的升高,板压降并无出现平缓增长的现象。这说明由散堆填料与穿流筛板复合,其操作弹性小,无法满足大气量吸收操作的需要。

相较而言,金属丝网规整填料复合塔板的湿板压降曲线随着  $F$  因子的升高而平滑上升,这意味着在拥有相同的湿塔压降时,它具有更大的气通量。在  $F > 3.94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^{1/2}$  条件下,BX500 复合塔板湿塔压降最小。原因是其波纹距离较大,使得气体通过的孔道较宽,所以压降较小。

### 2.1.2 复合板填料构成对动持液量的影响

动持液量是指在一定气液操作条件下,以流动的方式滞留在塔板内的液体量,是最重要的塔板水力学参数之一<sup>[8]</sup>。合理的高持液量会增加气液两相接触的机会,提高传质效率。但若动持液量过大,则会易造成高压降和严重的雾沫夹带。图 4 表示的是在板间距为 25 mm、筛板上填料层高度均为 100 mm 的条件下,不同复合塔板的动持液量  $E_0$  随  $F$  因子的变化情况。

图 4 给出的是不同复合塔板动持液量  $E_0$  与  $F$  因子的关系( $L = 148 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )。由图 4 可知,复合塔板的动持液量  $E_0$  随  $F$  因子的升高而升高,其

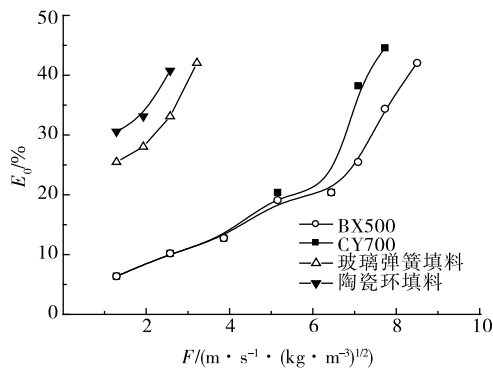


图 4 不同复合塔板动持液量  $E_0$  与  $F$  因子的关系  
Fig.4 Relationships of  $E_0$  and  $F$  with different composite tray

中由散堆填料组成的复合塔在低  $F$  因子条件下拥有较大的持液量,但同时其雾沫夹带现象也出现的最早。当  $F = 3.86 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^{1/2}$  时,由散堆填料组成的复合塔板上的持液出现了飞溅。在相同持液量下,由规整填料组成的复合塔板具有更大气通量。

### 2.1.3 复合板填料构成对雾沫夹带的影响

雾沫夹带是指气液两相在塔板上进行接触,当操作气速增大到一定程度时,受上升气体的作用,部分持液会被分散成小雾滴,而被带到上层塔板的现象。雾沫夹带会降低气液间的传质推动力,影响板效率;工业上规定雾沫夹带率  $e_v \leq 10\%$  为塔操作上限<sup>[9]</sup>。实验测量了不同复合塔板的雾沫夹带量随  $F$  因子的变化情况( $L = 148 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ),结果如图 5 所示。

由图 5 可知,当  $1.3 < F < 3.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^{1/2}$  时,与由散堆填料组成的复合填料板相比,规整填料复合填料板的雾沫夹带量减少了 80% 以上。这是由于散堆填料层的孔隙率小,在相同持液量条件下,板上的持液高度较高。因此当气体经过散堆填料时易引起持液的飞溅,导致出现明显的雾沫夹带,而规整填料丝网的孔隙率较大,板上的持液高度较低。此外丝网对雾沫还具有补集作用,因此在相同  $F$  因子条件下,规整丝网填料雾沫夹带量更少。但随着  $F$  因子的继续增长( $F > 3.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^{1/2}$ ),气液之间湍动愈来愈剧烈,金属丝网对雾沫补集效果逐渐减弱,因此规整填料板的雾沫夹带量  $e_v$  开始出现上升。相对于 CY700 型复合填料板而言, BX500 型复合填料板在相同  $F$  因子条件下,雾沫夹带量更小。

## 2.2 复合塔板的内部构件间距

由穿流筛板和 BX500 规整填料两部分构件紧密耦合而成的复合塔板,规整填料紧贴着筛板在一定程度上遮挡了筛孔,降低了筛板的开孔率。将构件间距打开有利于气液的通过,提高气液通量。此外,当气体穿过复合板时,由于此时板上的静压能大,气泡小,气液传质效率低,将复合填料板内构件间距打开,能让复合板上的填料越过比表面积小的清液层,而更好地作用于气泡比表面积更大的泡沫层,增加传质面积,提高气液传质的效果。

实验考察了不同构件间距对于复合塔板性能的影响,从中筛选出最优条件。实验在玻璃塔中进行,进气温为室温;塔内安装 6 块复合塔板,板间距为 25 mm。

### 2.2.1 构件间距对塔压降影响

当构件间距改变时,气体通过复合塔板时所受的阻力损失会发生改变。实验考查了在不同构件条件下,干塔压降随  $F$  因子的变化关系,如图 6 所示。

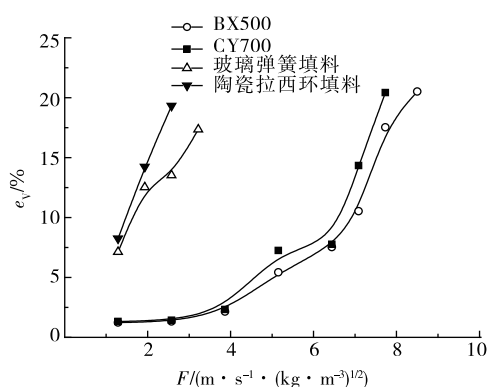


图 5 不同复合塔板雾沫夹带量  $e_v$  与  $F$  因子的关系

Fig.5 Relationships of  $e_v$  and  $F$  with different composite tray

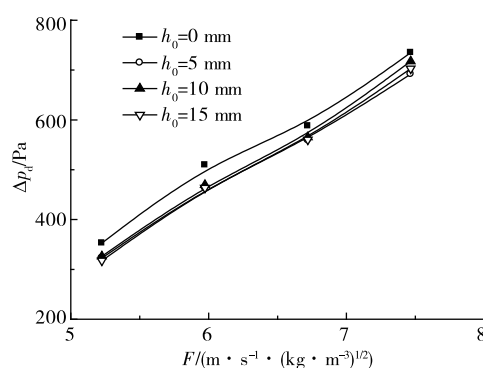


图 6 不同构件间距下干塔压降  $\Delta p_d$  与  $F$  因子的关系

Fig.6 Relationships of  $\Delta p_d$  and  $F$  with different plate spacing

由图 6 可知,在相同操作条件下,干塔压降  $\Delta p_d$  随着  $F$  因子的升高而升高。与构件间距  $h_0 = 0$  时复合塔板干板压降相比较,当  $h_0 > 0$  时,其干板压降小于  $h_0 = 0$  时干板压降。这是由于随着筛板上被堵

住的筛孔得到打开,筛板的开孔率提高,因此其干板压降  $\Delta p_d$  减小。

同时,从图 6 可知,在实验范围内( $5.23 < F < 6.96 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^{1/2}$ ),随着  $F$  因子的升高,不同构件间距复合塔板的干板压降相差不大。随着  $F$  因子继续升高,当  $F > 7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^{1/2}$  时,  $h_0 = 10 \text{ mm}$  和  $h_0 = 15 \text{ mm}$  条件下复合塔板的干塔压降大于  $h_0 = 5 \text{ mm}$  的。这是由于复合塔板中筛板上的筛孔与填料内的孔道不是一一对应的;当气体通过筛板时,气体会因为金属丝网的作用而无法顺利地通过填料。这将使气体在复合塔板内形成涡流,造成压降的升高。这表明  $h_0$  并非越大越好,存在一个使塔板性能最优的值。

在相同的操作条件下,实验考察了不同构件间距的复合塔板的湿塔压降  $\Delta p_w$  随  $F$  因子的变化情况( $L = 143.5 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ),结果如图 7 所示。由图 7 可知,在  $L$  一定、 $F$  因子较低时( $F < 4.47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^{1/2}$ ),  $h_0 > 0$  的复合塔板湿塔压降  $\Delta p_w$  小于  $h_0 = 0$  时。随着  $F$  因子的继续升高,大构件间距( $h_0 = 10, 15 \text{ mm}$ )复合塔板的湿板压降开始向  $h_0 = 0$  时靠近,但总体来说  $\Delta p_w$  仍小于  $h_0 = 0$  时塔压降板。当  $F > 6.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^{1/2}$  时,  $h_0 = 15 \text{ mm}$  的复合塔板压降增长曲线几乎与  $h_0 = 0$  重合。这是因为当  $F$  因子较低时( $F < 4.47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^{1/2}$ ),气相动能较小,气液接触状态较平缓,持液层波动不大。此时筛板上的开孔率是影响湿塔压降的主要因素,当构件间距被拉开后,筛板上的筛孔得到释放,因此其湿塔压降较小。随着  $F$  因子的升高,气液之间的接触开始变得剧烈,与  $h_0 = 5 \text{ mm}$  相比,  $h_0 = 10, 15 \text{ mm}$  的复合塔板压降较大,可认为是由于构件间距过大,气体由于涡流现象能量损失变大所导致的。当  $F$  继续增大( $F > 6.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^{1/2}$ ),气液湍动越来越剧烈,在  $h_0 = 15 \text{ mm}$  条件下,被气体吹起的液体容易重新返回到筛板上,缺少填料的阻滞作用。此时  $\Delta p_w$  快速增长,与  $h_0 = 0$  重合。

综上所述,在实验范围内,适当增大  $h_0$  能减小塔压降,但如果  $h_0$  过大,则易造成涡流。不仅增加塔压降,同时对于传质过程也是不利的;同时可得,  $h_0 = 5 \text{ mm}$  的复合塔板随  $F$  因子的增加表现出了较小的压降。

## 2.2.2 构件间距对雾沫夹带的影响

图 8 表示的是构件间距分别为 0 和 5 mm 条件下,复合塔板雾沫夹带量随  $F$  因子的变化情况( $L = 143.5 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )。由图 8 可知,在  $2.5 < F < 7.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^{1/2}$  范围内,  $h_0 = 5 \text{ mm}$  复合塔板的雾沫夹带量  $e_v$  比  $h_0 = 0$  时减少了 13%~20%。当构件间距被打开后,由于整块复合塔板段高度升高,那么除沫效果也得到了加强。

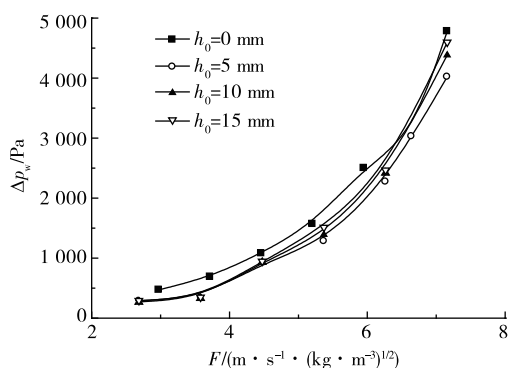


图 7 不同构件间距下湿塔压降  $\Delta p_w$  与  $F$  因子的关系  
Fig.7 Relationships of  $\Delta p_w$  and  $F$  with different plate spacing

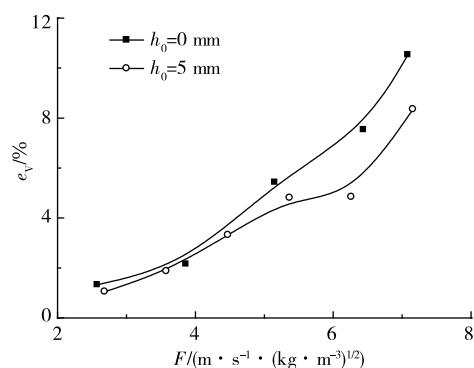


图 8 不同构件间距下复合塔板雾沫夹带量  $e_v$  与  $F$  因子的关系  
Fig.8 Relationships of  $e_v$  and  $F$  with different plate spacing

### 2.2.3 复合塔板操作线

测量了构件间距分别为 0, 5 mm 复合塔板在不同喷淋密度下的载点气速(压降为 600 Pa 的操作气速)和泛点气速(压降为 4 000 Pa 时的操作气速),探究了不同构件间距对复合塔板操作范围的影响,如图 9 所示。由图 9 可知,构件间距  $h_0=5$  mm 的复合塔板与  $h_0=0$  的复合塔板相比,虽然气相操作下限升高了,但气相操作上限提升了 8%~15%,操作弹性更大。

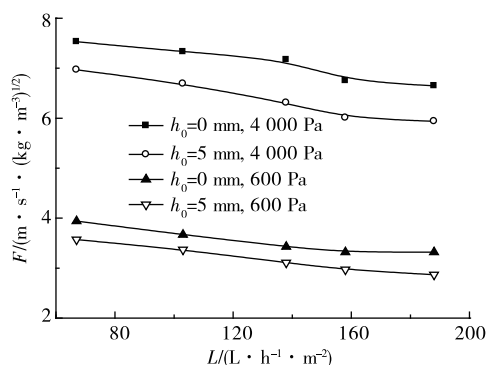


图9 复合塔板操作范围

Fig.9 Operation range of composite tray with different plate spacing

## 3 结论

1)在相同的  $F$  因子条件下,由金属丝网填料组成的复合填料板压降远低于由散堆填料组成的复合塔板;在相同实验条件下,拥有相同动持液量时,由金属丝网填料组成的复合填料板通过的气量更大。此外,由于金属丝网对雾沫具有补集作用,因此与由散堆填料组成的复合塔板相比, $F$  因子相同时,由金属丝网填料组成的复合填料板雾沫夹带量  $e_v$  降低了 80% 以上。

2)与 CY700 型复合填料板相比,BX500 型复合填料板波纹距离大,气升通道宽,孔隙率大。在高气液比条件下,其压降更小,雾沫夹带量更低。

3)对于 BX500 型复合填料板,当构件间距增大时,筛板上被堵住的筛孔得到打开,筛板的开孔率提高,降低复合填料塔压降。但若构件间距过大则易出现涡流现象,在引起塔压降上升的同时,影响传质。构件间距  $h_0=5$  mm 是一个较合适的构件间距,与  $h_0=0$  时的 BX500 型复合板相比,雾沫夹带量减少了 13%~20%,气相操作上限提升了 8%~15%。

## 参考文献:

- [1]王鹏辉. 化工设备流动均布及相关协同效应[D]. 上海: 华东理工大学, 2019: 46-49.
- [2]都昌盛, 王岚, 王龙耀. 高气液比复合填料板的压降与持液性能研究[J]. 高校化学工程学报, 2019, 33(3): 573-578.
- [3]陈柳元, 齐亮, 姚克俭. 复合型塔板填料参数对流体性能影响的研究[J]. 现代化工, 2014, 34(8): 140-144.
- [4]TANG M, ZHANG S F, WANG D W, et al. CFD simulation and experimental study of dry pressure drop and gas flow distribution of the tridimensional rotational flow sieve tray[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2017, 126: 241-254.
- [5]杜冬云, 王军, 方云进, 等. 复合塔板的流体力学特性(I)孔径和开孔率对塔板流体力学特性的影响[J]. 化工学报, 2002, 53(7): 685-689.
- [6]都昌盛. 新型复合塔板的性能研究及其应用[D]. 常州: 常州大学, 2019: 16-17.
- [7]张秋香, 杨晓东. 二种导向浮阀组合塔板的压降研究[J]. 化学工程, 2019, 47(1): 61-64, 69.
- [8]XIE N N, WANG L, WANG Y F, et al. Spray-type packed bed concept for thermal energy storage: liquid hold up and energy storage characteristics[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 160: 114082.
- [9]李群生. 传质分离理论与现代塔器技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016: 95-108.

(责任编辑:谭晓荷)