新型导向立体板填复合塔板的研究与工业应用

赵洪康¹, 王宝华², 金君素¹, 任钟旗¹, 李群生^{1*}

1. 北京化工大学化工资源有效利用国家重点实验室, 北京 100029

2. 北京中医药大学中药学院, 北京 100102

*通讯作者, E-mail: 15210875489@163.com

收稿日期: 2017-12-25; 接受日期: 2018-03-15; 网络版发表日期: 2018-05-15

中国石化股份有限公司资助项目(编号: X501021)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2013CB733603)资助项目

摘要 为了实现大通量、高效率的目的, 本文根据复合塔板的设计思想, 开发设计了新型导向立体板填复合塔板(Novel FVPT). 在一个直径为500 mm的有机玻璃塔内, 使用空气-水(富氧水)物系对该塔板进行冷模实验. 实验内容包括清液层高度、干板压降、湿板压降、雾沫夹带、漏液以及传质效率, 研究其流体力学性能和传质效率随着气液相负荷的变化规律. 本文还根据压降产生原理, 结合影响塔板压降的因素, 推导出了新型导向立体板填复合塔板干板压降的理论模型. 此外, 将新型导向立体板填复合塔板在化工生产中进行实践应用, 扩大了工业产量, 提高了分离效率, 为企业和社会带来了经济效益和环境效益.

关键词 复合塔板, 压降模型, 流体力学, 传质性能

1 引言

板式塔设备是应用最广的传质与分离设备之一, 广泛应用于化工、炼油、制药、化肥、环保等行业的物质分离, 其性能的优劣直接影响到产品的质量和收率, 进而影响到企业的经济效益^[1]. 随着生产要求的不断提高和环保形势日趋严峻, 开发大通量、高效率的新型塔板变得更加紧迫^[2].

近年来, 塔板技术快速发展, 国内外相继推出了一系列结构新颖、性能优良的新型塔板, 在这些新型塔板中, 有些依然是在原有塔板的基础上, 针对原有塔板的不足进行局部的改进, 如导向孔、液面落差、漏液及雾沫夹带等问题; 有些是针对特殊物系设计的, 如具有消泡功能的塔板和防堵抗堵型塔板等; 有些是

与原有塔板结构差异显著, 气液接触方式也发生了极大的变化, 如立体传质塔板和复合塔板、多孔泡沫塔板等, 其中应用比较广泛的有河北工业大学研究开发的立体传质塔板(CTST塔板)、天津大学开发的并流喷射填料塔板(JCPT塔板)^[1].

塔内件包括填料和塔板两种类型, 其作为塔设备的核心部分, 是改进设备结构、提高设备效率的关键. 填料和塔板有着各自的优点. 例如, 填料具有比表面积大、传质效率高等特点; 而塔板结构简单、易于放大、造价较低, 对于常压和加压物系, 特别是大塔径、多侧线板式塔有较大的优势^[3]. 本文中, 北京化工大学化工资源有效利用国家重点实验室根据复合塔板的特点设计思想, 将填料(规整填料)和立体塔板进行复合, 综合两者的优点, 开发设计了新型导向立体板

引用格式: Zhao H, Wang B, Jin J, Ren Z, Li Q. Application and performance analysis of the novel flow-guided vertical packing tray. *Sci Sin Chim*, 2018, 48: 666–675, doi: 10.1360/N032017-00216

填复合塔板^[4].

该塔板是在深入理论研究和长期工业实践的基础上开发设计的大通量、高效率、喷射型塔板. 其结构主体是开设3个矩形孔的塔盘, 在矩形开孔上方设置帽罩. 为了增大传质效率, 规整填料作为局部结构, 安装在帽罩上方. 另外, 挡板的引入有效地降低了雾沫夹带. 如图1所示为新型导向立体板填复合塔板的实物图和结构示意图.

本文开发设计的新型导向立体传质塔板, 实验表明该塔板具有优异的性能, 为板式塔的发展注入了极大的活力, 有着广泛的应用前景^[5,6].

新型导向立体传质塔板的气液接触、传热、传质元件为矩形立体喷射帽罩, 喷射帽罩由板孔、帽罩侧壁(设置一定数量筛孔)、板波纹规整填料、挡板组成, 其中帽罩的下端与塔板间有一定的底隙, 为液体进入帽罩的通道, 帽罩上方的规整填料能够优化气液接触, 提高传质效率, 规整填料上部装有面积大于规整填料的挡板, 防止液体被高速气体夹带至上层塔板形成雾沫夹带^[7].

新型导向立体传质塔板为气液并流喷射型塔板, 气体自矩形板孔进入喷射帽罩中, 液体自帽罩底隙进入喷射罩内, 气液两相的接触经历了如下过程: (1) 气体自矩形板孔进入帽罩, 液体自帽罩底隙进入帽罩, 气液两相在罩体底隙区域垂直相遇; (2) 在气体的剪切力作用下, 液体被提升、拉膜, 并在一定高度下液膜失稳破碎, 此过程有利于传质的进行, 同时也产生能量损失; (3) 一部分气液混合物通过帽罩侧壁上的筛孔喷

射出罩体; (4) 大部分气液混合物经过激烈碰撞、混合进入规整填料, 规整填料能够有效地促进液体表面更新, 使气液保持较高速率的传质过程, 另一方面在规整填料内部形成通道, 防止气液撞击后回流形成漏液和造成较大的能量损失; (5) 从筛孔区和规整填料区两部分喷出罩体的气液混合物以及邻罩喷出的气液混合物在罩间激烈对喷、碰撞, 两者发生撞击, 促进液滴表面更新, 有利于传质过程; (6) 经挡板分离后, 气体绕过挡板继续上升至上一层塔板, 液体回落到塔板液层流向下游. 新型导向立体传质塔板的特殊结构和喷射操作工况使其打破了传统塔板以板上液层为主要传质区域的平面型模式, 把传质区域拓展到塔板至罩顶的立体空间范围, 将塔板的空间利用率提高了60%~80%.

本文对新型导向立体传质塔板进行了流体力学实验, 测定其压降、漏液、雾沫夹带、清液层高度等. 利用富氧水-空气测定了其塔板效率.

2 实验设备

常温常压下, 在内径为500 mm, 板间距为450 mm的有机玻璃塔内测定塔板的流体力学和传质性能. 采用空气-水体系测定的流体力学性能, 包括干板压降 ΔP_D 、湿板压降 ΔP_W 、雾沫夹带量、漏液及塔板上的清液层高度 h_{cl} ; 采用空气-水-氧气体系测定了实验塔板的传质性能即塔板的效率 E_{ML} . 详细的实验流程如图2所示.

实验过程中, 空气通过风机由塔釜送进入实验塔.

图1 新型导向立体板填复合塔板实物图和结构示意图. (a) 塔板的俯视图; (b) 帽罩侧视图; (c) 帽罩前视图; (d) 帽罩俯视图 (网络版彩图)

Figure 1 The structure of NFVP tray. (a) Top view of tray; (b) side view of cap; (c) front view of cap; (d) top view of cap (color online).

图2 实验装置流程图(1. 塔体; 2. 雾沫捕集板; 3. 风机; 4. 孔板流量计; 5、6. 体积测定; 7. U型压差计; 8. 转子流量计; 9. 离心泵; 10. 水槽; 11. 小型填料塔; 12. 氧气压力缓冲罐; 13. 氧气罐; 14. 氧气压力调节阀; 15、16. 实验塔板; 17. 气体分布器; 18. 漏液收集板; 19、20、21. 取样口; 22. 带有刻度的连通管)

Figure 2 Diagram of experiment setup (1. column; 2. entrainment collector; 3. air blower; 4. orifice flowmeter; 5, 6. volumetric measurement; 7. u-type differential pressure meter; 8. rotameter; 9. centrifugal pump; 10. water tank; 11. small packed tower; 12. oxygen pressure buffer tank; 13. oxygen tanks; 14. oxygen pressure valve; 15, 16. experimental trays; 17. gas distributors; 18. weeping collector; 19, 20, 21. sampling points; 22. tube with scale).

液体水通过转子流量计进入塔顶. 空气和水在塔板上并流接触, 进行传质. 在此过程中, 采用空气-水体系测定塔板的流体力学性能, 采用空气-富氧水物系测定其传质效率. 由测量容器测量单位时间内漏液的体积, 测量单位时间内雾沫夹带体积量, U型压差计测量塔板的干板压降和湿板压降. 取样口19~21分别取样测定塔顶、塔中和塔釜水中的含氧量^[8]. 采用带刻度的连通管测定塔板上的清液层高度. 实验测试范围为: $5.71 \sim 28.57 \text{ m}^3 (\text{m h})^{-1}$ ^[9].

实验主要测量新型导向立体传质塔板流体力学性能和传质性能, 流体力学性能主要包括雾沫夹带、漏液、干板压降、湿板压降、清液层高度. 传质性能的测量主要通过测量塔顶、塔中和塔釜含氧量进行计算.

3 结果与讨论

3.1 干板压降

塔板上下之间的压强差称之为塔板压降, 干板压降是在塔板上没有任何液体存在, 只有气体通过板孔、板上构件时产生的阻力. 塔板压降不仅影响塔设备的操作性能, 而且直接决定塔设备的生产能力和传

质效率. 所以在进行塔板设计时需要综合考虑, 在保证塔板效率较高的条件下, 尽量减小塔板压降及降低能耗和改善塔的操作性能^[10].

周亚夫等^[11]在筛板压降模型的基础上, 引入修正系数 k 来校核导向孔对压降的影响, 从而获得导向筛板的干板压降模型:

$$p_d = 0.051k \left(\frac{u_0}{c_0} \right)^2 (1 - \varphi^2) g \rho_g, \quad (1)$$

其中 $k = (1 + 0.145 \varphi'_{fg})^{-2}$, 假设塔板上全为导向孔, 则 $\varphi = \varphi_{fg}$, $\varphi'_{fg} = 1$, 此时 $k = 0.763$,

$$p_{d,fg} = 0.039 \left(\frac{u_0}{c_0} \right)^2 (1 - \varphi_{fg}^2) g \rho_g. \quad (2)$$

本文设计的新型导向立体板填复合塔板, 塔板厚度为 $t = 3 \text{ mm}$, 则根据 $d_0/t = 2$ 在 Hughmark-O'Connell 的有关图表中可查得 $C_0 = 0.76$ ^[12].

国内赖文衡^[4]根据流体力学规律提出了 New VST 塔板的帽罩结构的干板压降一般式:

$$p_d = \varepsilon \rho_g \frac{u_0^2}{2}. \quad (3)$$

金属板波纹规整填料设置在帽罩上方, 作为新型

导向板填复合塔板帽罩的一部分, 假设罩内部的气速和规整填料中的气体的速度相等, 假设帽罩的干板压降是帽罩升气筒和规整填料的阻力加和, 从而简化新型导向板填复合塔板帽罩的干板压降模型.

另外, 将规整填料看作带有阻力的通道, 则规整板波纹填料的干塔压降可用气体通过该通道的压头损失来表示^[12,13]:

$$\frac{p_d}{z} = \lambda \frac{L_e}{d_e} \frac{u_0 \sqrt{\rho_g}}{2}, \quad (4)$$

其中, z 为规整填料的高度, L_e 为每米填料的当量长度, d_e 为当量直径, λ 为气相摩擦因数. 因为 L_e 与 d_e 值取决于填料的结构尺寸, 当规整填料的结构和尺寸确定时, 式(4)可简化为

$$\frac{p_d}{z} = \alpha (u_0 \sqrt{\rho_g})^\beta. \quad (5)$$

根据上文的假设并采用加和模型, 新型导向立体板填复合塔板的立体帽罩的干板压降为

$$\Delta p_{d, \text{cap}} = \varepsilon \rho_g \frac{u_0^2}{2} + h_p \alpha (u_0 \sqrt{\rho_g})^\beta. \quad (6)$$

Novel FVPT塔板是一种复合型塔板, 干板压降则是由气体穿过板上导向孔和立体帽罩结构引起的压头损失复合而成, 其中在立体帽罩结构内部的规整填料也会对其产生影响. 气相通过各种结构的压降互相影响, 不能直接加和, 而是应该考虑到两者在整个塔板的干板压降中所占的权重因子, 因此提出了以下新型导向板填复合塔板的干板压降模型:

$$\Delta p_{d, \text{FVPT}} = \frac{\varphi_{fg}}{\varphi_{fg} + \varphi_c} \Delta p_{d, fg} + \frac{\varphi_c}{\varphi_{fg} + \varphi_c} \Delta p_{d, \text{cap}}. \quad (7)$$

将式(2)与(6)带入式(7), 即可得到FVPT塔板的干板压降模型:

$$p_{d, \text{FVPT}} = 0.039 g \rho_g \frac{\varphi_{fg} (1 - \varphi_{fg}^2)}{\varphi_{fg} + \varphi_c} \left(\frac{u_0}{c_0} \right)^2 + \frac{\varphi_c}{\varphi_{fg} + \varphi_c} \left[\varepsilon \rho_g \frac{u_0^2}{2} + h_p \alpha (u_0 \sqrt{\rho_g})^\beta \right], \quad (8)$$

其中, 规整填料Mellapak 250Y时, 阻力系数 $\varepsilon = 2.26$.

如图3所示, 干板压降实验值与计算值十分吻合, 表明该干板压降模型可以准确地预测塔板的干板压降.

图3 干板压降与空塔气速的关系

Figure 3 The relation between the dry pressure drop and U_s .

3.2 湿板压降

湿板压降测定实验选取液相流量为: $L=2, L=4, L=6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, 即液流强度为 $L_w=5.71, L_w=11.43, L_w=17.14 \text{ m}^3 (\text{m h})^{-1}$. 在测量过程中, 采用U型压差计测定实验板上下的压力差, 即为湿板压降, 即

$$\Delta p_w = (p_b - p_t) / 2, \quad (9)$$

其中 P_b 代表塔釜下方的压力值, P_t 代表塔顶上方空间的压力值.

影响湿板压降的因素主要有两个, 一方面是气速的改变对压降的影响; 另一方面是液体的流动, 表现为板上清液层高度对压降的影响^[14]. 由图4可知, 湿板压降 ΔP_w 随气相负荷和液流强度的增加而增大. 当板上液流强度一定时, 湿板压降随着气速的增大而增大, 原因在于气速增大时, 通过板孔和帽罩的阻力增大, 同时气液两相的湍流混合程度也增大, 导致气液两相接触产生的压降增加; 在不同液流强度下, 湿板压降的变化趋势基本一致; 由图4分析可知, 当液流强度增加时, 液层厚度增大, 气体所受阻力也增大, 从而湿板压降增大, 另一方面, 液流强度增加时进入帽罩内的液体量增加, 必然消耗更多气体的能量来提升液体, 所以导致 ΔP_w 也增大.

3.3 雾沫夹带量

雾沫夹带量的测量跟湿板压降是同步进行的, 即每调节至一个液体流量和一个气体流量, 待到其稳定, 测量出相对应条件下的湿板压降值, 同时测量在一定时间内的雾沫夹带量. 雾沫夹带率的计算基于穿过液层的气相流量的大小^[15]. 实验塔的顶部设置雾沫捕集

图4 湿板压降与气液相负荷的关系(网络版彩图)

Figure 4 The relation between the wet pressure drop and the gas-liquid loading (color online).

板, 聚集了气体夹带的液滴, 在捕集板的一侧设有液相出口并连接一个胶管, 夹带的液体通过胶管引流至一测量器具内, 测量在一定时间内的夹带量, 从而计算出该操作条件下的夹带率。

雾沫夹带是反映塔板气相负荷上限的重要参数, 而雾沫夹带主要取决于气速大小和液流强度的影响。如图5所示, 在一定液流强度下, 雾沫夹带量随气速的增大而增大。随着气速的增大, 塔板上的喷射状态越来越剧烈, 气速增大, 一方面气体具有的动能增大, 使更多的液滴获得了足够的向上初速度而到达上一层塔板, 从而形成雾沫夹带; 另一方面气速增大, 它所能夹带到上一层塔板的液滴的直径就增大, 同时剧烈的喷射产生更多的小液滴更容易形成雾沫夹带, 故而雾沫夹带量增大。当气速一定时, 如图5所示, 雾沫夹带量随着板上液流强度的增加而增大, 其原因是液体复合增大, 塔板上液体量增加, 更多液体被气体裹挟到上层塔板, 形成更多的雾沫夹带量。

3.4 漏液

在操作过程中, 当气相负荷较小而液相负荷较大时, 塔板上上升的气体所具有的动能不足以支撑塔板上的液体, 液体将从上一层塔板的开孔落至下一层塔板, 这种现象称为塔板漏液^[16]。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, 所以大量漏液将降低塔板的效率。并且, 漏液也限制了塔板操作下限的提高。甚至过分的漏液可导致塔板压力不稳定, 进而导致塔设备振动而产生危险。工业设计过程中一般规定每千克液相允许的泄漏量为0.1 kg, 即10%作为精馏塔设计的下限^[17]。

图5 雾沫夹带与气液相负荷的关系(网络版彩图)

Figure 5 The relation between the entrainment and the gas-liquid loading (color online).

漏液量的测量与雾沫夹带量的测量同步进行, 测量方法类似于雾沫夹带。精馏塔的塔底设有漏液收集板, 液体漏至收集板上, 收集板的一侧设置有液相出口。该出口与一胶管相连, 漏下的液体经胶管流至塔外的测量容器内, 通过量取一定时间内的漏液量来确定塔板漏液率。塔板漏液率是基于流过塔板的液体流量来计算的。

漏液量是反映塔板气相负荷下限的重要参数, 而气速太小和板上液层分布不均所引起的气流分布不均则是造成漏液的主要原因。由图6可知, 在液流强度一定的条件下, 漏液量随气相负荷的减小而增大。这是由于当气速减小时, 通过板孔的气体压强也减小, 当在某些点处, 气体压强减小到难以与板孔处液体的静压相平衡时, 液体就会从板孔流向下一层塔板, 因此气速越小, 漏液量就会越大; 另外, 气相负荷一定时, 也像负荷增大也是造成漏液的原因之一, 如图6所示, 气速一定时, 随着液流强度的增大, 漏液增加, 分析其原因是气体负荷一定时, 气体托举液体能力一定, 当液量增加, 造成更多液体从塔板上的开孔降落形成更多漏液。

3.5 清液层高度

清液层高度主要用以描述塔板上实际的持液量, 对塔板的流体力学性能传质效率都是十分重要的参数, 另一方面, 液相进入罩内的主要推动力为清液层与帽罩内的压强差, 所以清液层高度和液面梯度分布对帽罩提升量等参数有较大影响, 是新型导向板填复合塔板流体力学性能研究的重点^[18]。板上液层高度的测量采用的是连通管法, 这种方法因操作简单而得以普遍应用。通过液位连通管一端连接板上液层, 一端连

图 6 漏液率与气液相负荷的关系(网络版彩图)

Figure 6 The relation between the weeping with the gas-liquid loading (color online).

接玻璃液位计, 通过读取液位计上的读数可以直接得出板上液层高度^[19].

清液层高度受液流强度 L_w 和气流的影响较大. 如图7所示, 在堰高为50 mm, 液流强度 $L_w=11.43$ 和 $17.14 \text{ m}^3 (\text{m h})^{-1}$ 时, 板上的平均清液层高度随气相负荷的增大而减小, 且变化趋势一致, 原因在于气速的增加, 加大了板上泡沫层的气含率, 从而泡沫层所含的液体减少; 液流强度 $L_w=11.43 \text{ m}^3 (\text{m h})^{-1}$ 时, 清液层高度保持不变; 从图7还可以得知, 气相负荷一定时, 随着液流强度的增大, 清液层高度增大, 液流强度的增大有利于增加板上持液量, 使液层厚度增大, 静压强增大, 这也验证了上文中湿板压降随着液流强度增大而增大的现象.

3.6 塔板效率

实验中是用氧解析法来测定塔板的传质效率. 富氧水自上而下, 与从塔釜上升的空气逆流接触, 空气将氧气从富氧水中不断地解析出来^[11]. 含氧量的测定跟流体力学性能的测定等都是同步进行的^[20].

采用以液相为基础的默弗里板效率:

$$E_{ML} = \frac{X_i - X_o}{X_i - X_o^*} \times 100\%, \quad (10)$$

其中 X_i 为塔板入口处水中溶氧值; X_o 为塔中取样处水中溶氧值; X_o^* 为塔中取样温度下的平衡溶氧值.

如图8所示, 在较宽的实验操作条件下该塔板都可以保持较高且稳定的塔板效率. 另外, 空塔气速可以达到 3.5 m s^{-1} , 说明该塔板操作上限较高、储量能力大.

图 7 清液层高度与气液相负荷的关系(网络版彩图)

Figure 7 The relation between the clear liquid height with the gas-liquid loading (color online).

图 8 塔板效率与气液相负荷的关系(网络版彩图)

Figure 8 The relation between the tray efficiency with the gas-liquid loading (color online).

3.7 Novel FVPT塔板与传统塔板的对比

新型导向立体板填复合塔板与筛板以及Glitsch V1 valve塔板进行对比分析, 如图9所示, 结果表明在湿板压降和雾沫夹带方面, Novel FVPT塔板和筛板具有相似的趋势, Novel FVPT塔板的湿板压降和雾沫夹带都低于筛板, 且都比Glitsch V1 valve塔板表现优异. 但是, 在漏液方面, Glitsch V1 valve塔板具有浮阀塔板的优势, 在整个操作范围内, 其漏液都很少. 综上所述, Novel FVPT塔板在较大的操作范围内具有较大的传质效率, 并且保持稳定. 尤其在高气相负荷下, 具有较高的传质效率, 表明新型导向立体板填复合塔板具有较大的气相处理能力.

4 工业应用

新型导向板填复合塔板具有大通量、高效率的特

图9 Novel FVPT塔板与传统塔板的对比分析(网络版彩图)
Figure 9 The comparison of novel FVPT and the traditional trays (color online).

点,因此在工业应用中,对于负荷大的情况具有更大的优势。

4.1 聚氯乙烯的生产过程

新型导向板填复合塔板用于聚氯乙烯的生产过程。在原工艺上进行了塔板改造,提高了聚氯乙烯合成和分离过程的技术指标。仅2016年,共计节省水蒸气19600 t,节省循环水53.05万吨,减少电石消耗626.2 t,减少高沸物排放537.7 t。近3年新增利润7711.4万元。

新型导向板填复合塔板的应用,使得产品的产量和质量都得到极大的提升,新增利润丰厚,解决了工厂的难题,减少了污染物的排放,使当地环境得到很大的改善。

4.2 三氯氢硅的生产过程

新型导向立体板填复合塔板用于三氯氢硅生产的技术改造中,提高了三氯氢硅合成和分离过程的技术指标,通量大幅提高,产量扩大,分离效率大幅度提高。

仅2015年,共计合成的三氯氢硅含量由传统的80%~83%提高到了85%~87%,副产物四氯化硅含量由12%~14%降低到了8%~10%,三氯氢硅提高了5%~8%,硅粉单耗降低,减少四氯化硅产物600 t。通过高效合理的分离方法,节省水蒸气10.53万吨,节省冷却水157.95万吨,减少四氯化硅排放2700 t,生产的工业级三氯氢硅纯度达到了99.99%,其中硼磷等杂质含量少于0.02 mg/L,回流比降到2左右,对比美国Current公司、德国西门子公司,其采用西门子法生产三氯氢硅纯度为99.9%,硼磷等杂质含量约为50 ppb,回流比为3。不仅降低了成本,还节省了大量能耗。近三年来共带来新增销售额5239.8万元,新增利润17426.3万元。

4.3 醋酸乙烯和聚乙烯醇的生产过程

新型导向立体板填复合塔板应用于醋酸乙烯和聚乙烯醇生产过程中,提高了醋酸乙烯生产过程的技术指标,产品中醋酸乙烯含量达到99.995%,其中醋酸乙酯含量达到0.02 mg/L以下,对比由中国台湾长春公司

生产的醋酸乙烯含量为99.99%, 醋酸乙酯含量约为0.05 mg/L, 产品的质量得到很大的提升, 处于国际领先水平, 扩大了市场需求, 具有很大的国际市场竞争优势, 同时对比中国台湾长春公司技术, 其回流比为3, 而本技术使回流比降到2左右, 对于节能效果意义重大, 不仅获得巨大的经济效益, 更是推动行业科技进步的一项重举. 仅2016年, 共计节省水蒸气78200 t, 节省循环水234.74万吨, 减少甲醇消耗4618.2 t, 减少醋酸乙烯排放2653.56 t, 减少醋酸排放1326.78 t. 近三年来共带来新增销售额20700.3万元, 新增利润17426.3万元, 经济效益显著.

5 结论

本文对设计开发的新型导向立体板填复合塔板进行了流体力学和传质的研究, 并将其性能Glitsch V1 valve塔板对比分析. 另外, 列举了新型导向立体板填复合塔板的工业应用实例. 结论如下.

(1) 根据干板压降的产生机理, 按照加和形式, 提出了新型导向立体板填复合塔板的干板压降模型, 该模型计算值和实验测定值相关系数 $R^2=0.995$.

$$p_{d,FVPT}=0.039g\rho_g\frac{\varphi_{fg}(1-\varphi_{fg}^2)}{\varphi_{fg}+\varphi_c}\left(\frac{u_0}{c_0}\right)^2+\frac{\varphi_c}{\varphi_{fg}+\varphi_c}\left[\varepsilon\rho_g\frac{u_0^2}{2}+h_p\alpha\left(u_0\sqrt{\rho_g}\right)^\beta\right]$$

(2) 新型导向立体板填复合塔板的湿板压降低于筛板变化, 但两者的趋势一致. 在高气相负荷条件下, 新型导向立体板填复合塔板的湿板压降远低于Glitsch V1 valve塔板.

(3) 新型导向立体传质塔板的雾沫夹带在整个操作范围内都低于筛板和Glitsch V1 valve塔板, 规整填料上方的挡板有效地减少了新型导向立体板填复合塔板的雾沫夹带.

(4) 新型导向立体板填复合塔板的传质效率在较

大的操作范围内保持较大数值, 且稳定性优于后者两种塔板类型, 工业应用也显示了该塔板的优异性能.

新型导向立体板填复合塔板应该进一步研究其结构对性能的影响, 从而优化结构参数, 提高塔板性能. 对于工业应用, 尤其对气相负荷较大的分离情况, 积极推动该塔板的应用实践.

符号说明

φ	塔板开孔率
ρ_g	气相密度
φ_{fg}	导向孔开孔率
C_0	孔流系数
d_e	当量直径 (m)
E_{ML}	塔板效率 (%)
g	重力加速度 ($m\ s^{-2}$)
h_l	清液层高度 (m)
h_p	帽罩内填料层高度 (m)
k	修正系数
L	液流强度 ($m^3\ (h\ m)^{-1}$)
L_e	每米填料的当年长度 (m)
Δp_d	干板压降 (Pa)
Δp_w	湿板压降 (Pa)
t	塔板厚度 (m)
u_0	孔气速 ($m\ s^{-1}$)
X_i	塔板入口处水中溶氧值 ($mg\ L^{-1}$)
X_o	塔板出口处水中溶氧值 ($mg\ L^{-1}$)
X_o^*	取样温度下水中平衡溶氧值 ($mg\ L^{-1}$)
Z	填料高度 (m)
β	液层阻力系数
ε	阻力系数
λ	气相摩擦因数

参考文献

- Li SY, Wang WJ. *Technol Dev Chem Eng*, 2011, 40: 30–34 (in Chinese) [李苏雅, 王文建. 化工技术与开发, 2011, 40: 30–34]
- Li QS, Wang BH. *Modern Chem Ind*, 2001, 21: 38–41 (in Chinese) [李群生, 王宝华. 现代化工, 2001, 21: 38–41]
- Li QS, Yang JM. *Petrol Chem*, 2005, 16: 4–7 (in Chinese) [李群生, 杨金苗. 炼油与化工, 2005, 16: 4–7]
- Lai WH. *Chem Eng (China)*, 1983, 5: 40–47 (in Chinese) [赖文衡. 化学工程, 1983, 5: 40–47]

- 5 Zhagn MX. *Fine Special Chem*, 2009, 17: 3–5 (in Chinese) [张满霞. 精细与专用化学品, 2009, 17: 3–5]
- 6 Li QS, Zhao YL, Zhang MX, Guo ZC, Wang BH. *Chem Ind Eng Prog*, 2011, 78: 3–6 (in Chinese) [李群生, 赵彦乐, 张满霞, 郭增昌, 王宝华. 化工进展, 2011, 78: 3–6]
- 7 Li QS, Huang Q, He JX, Yang M, Song CY. *Chem Ind Eng Prog*, 2009, 28: 27–30 (in Chinese) [李群生, 黄强, 何荐轩, 杨明, 宋春颖. 化工进展, 2009, 28: 27–30]
- 8 Wang H, Niu X, Li C, Li B, Yu W. *Chem Eng Proc*, 2017, 112: 38–46
- 9 Li QS, Wu HL, Zhang XL, An ZM, Zhou J. *Polyvinyl Chloride*, 2006, 3: 3–5 (in Chinese) [李群生, 吴海龙, 张新力, 安志明, 周军. 聚氯乙烯, 2006, 3: 3–5]
- 10 Li QS, Liu J, Xu L, Guo L, Wang BH. *J Beijing Univ Chem Technol*, 2011, 38: 1–5 (in Chinese) [李群生, 刘静, 许莉, 郭蕾, 王宝华. 北京化工大学学报, 2011, 38: 1–5]
- 11 Zhou YF, Shi JF, Wang XM, Ye H. *CIESC J*, 1979, 1: 57–68 (in Chinese) [周亚夫, 史季芬, 汪星明, 叶恒. 化工学报, 1979, 1: 57–68]
- 12 Hanley B, Dunbobbin B, Bennett D. *Ind Eng Chem Res*, 1994, 33: 1208–1221
- 13 Wang T, Yu D, Hu XD, Cui Q, He X, Li QS. *J Beijing Univer Chem Technol*, 2015, 42: 28–33 (in Chinese) [王韬, 于丹, 胡晓丹, 崔侨, 何馨, 李群生. 北京化工大学学报, 2015, 42: 28–33]
- 14 Song CY, Li YC, Song JW, Li QS. *Oil-Gasfield Surf Eng*, 2004, 31: 30–33 (in Chinese) [宋春颖, 李艳臣, 宋景伟, 李群生. 油气田地面工程, 2004, 31: 30–33]
- 15 Chen HY, Li CL, Liu JD. *Chem Ind Eng Prog*, 2002, 21: 47–50 (in Chinese) [陈华艳, 李春利, 刘继东. 化工进展, 2002, 21: 47–50]
- 16 Liu JD, Li CL, Li BC, Lv JH. *Modern Chem Ind*, 2002, 10: 9–12 (in Chinese) [刘继东, 李春利, 李柏春, 吕建华. 现代化工, 2002, 10: 9–12]
- 17 Liu QD, Wang ZY, Li CL, Wang ZH. *Chem Ind Eng Prog*, 2003, 22: 49–52 (in Chinese) [刘启东, 王志英, 李春利, 王朝辉. 化工进展, 2003, 22: 49–52]
- 18 Li QS, Zhang M, Cheng C. *J Beijing Univ Chem Technol*, 2016, 43: 22–28 [李群生, 张苗, 程闯. 北京化工大学学报(自然科学版), 2016, 43: 22–28]
- 19 Liu CJ, Yu GZ, Yuan XG. Computational Fluid-dynamics on Distillation Tray and Experimental Verification. Doctor Dissertation. Tianjin: Tianjin University, 1998 [刘春江, 余国琮, 袁希钢. 蒸馏塔板上计算流体力学及其实验验证的研究. 博士学位论文. 天津: 天津大学, 1998]
- 20 Li CL, Sui H, Zang ZY. *J Hebei Univ Technol*, 2003, 32: 2–6 (in Chinese) [李春利, 隋红, 王志英. 河北工业大学学报, 2003, 32: 2–6]

Application and performance analysis of the novel flow-guided vertical packing tray

Hongkang Zhao¹, Baohua Wang², Junsu Jin¹, Zhongqi Ren¹, Qunsheng Li^{1*}

¹ State Key Laboratory of Chemical Resource Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China

² College of Chinese Pharmacy, Beijing University of Chinese Medicine and Pharmacy, Beijing 100102, China

*Corresponding author (email: 15210875489@163.com)

Abstract: In order to achieve higher throughput and better tray efficiency, this paper proposed a new type of flow-guided vertical packing tray, referred to as Novel FVPT, according to the design idea of composition. The novel tray was subjected to a cold mode experiment using an air-water (oxygen-enriched water) system in a 500 mm diameter Plexiglas column. The experiment included the clear liquid height, the dry pressure drop, the total pressure drop, entrainment, weeping and mass transfer efficiency. The correlation of the performance of the novel tray with the two-phase loading was investigated in this work. Based on the mechanism of the pressure drop, the fundamental model of dry pressure drop of the novel tray was proposed. In addition, the industrial application of the novel tray was illustrated. The results showed that the novel tray with high throughput and better tray efficiency brought great economic and environmental benefits.

Keywords: composition tray, model of pressure drop, hydrodynamics, tray efficiency

doi: [10.1360/N032017-00216](https://doi.org/10.1360/N032017-00216)