

研究简报

从浓度分布评价填料塔性能

唐忠利 刘春江 陈江波 王广全 袁希钢 余国琮
(化学工程联合国家重点实验室(天津大学), 天津 300072)

关键词 蒸馏 填料塔 浓度分布 不均匀流动

中图分类号 TQ 021.4

文献标识码 A

文章编号 0438-1157(2004)05-0810-05

EVALUATION OF PACKED TOWER PERFORMANCE BY ANALYZING
DISTILLATION COMPOSITION PROFILE

TANG Zhongli, LIU Chunjiang, CHEN Jiangbo, WANG Guangquan, YUAN Xigang and YU Guocong(K T Yu)

(State Key Laboratory of Chemical Engineering (Tianjin University), Tianjin 300072, China)

Abstract The performance of sheet metal structured packing Mellapak 350Y in a pilot-scale high-pressure column (0.15 m I. D.) was investigated at 700—1900 kPa. The packing height was 2.0 m. Isobutane and *n*-butane was used as test mixture. The imperfect flow phenomena in column, such as maldistribution, wall flow, end effect and backmixing could be revealed by testing the composition profile along the packing. A concave or convex composition profile curve might be a result of maldistribution, and $f_{\max}$, which was the maximum value of liquid maldistribution friction could be used to judge the sensitivity to maldistribution of a proposed packed bed. Through comparing the separation efficiency at the top section of packing with that at the bottom section would disclose the existence of wall flow and end effect in the column. Moreover, the extent of gas and liquid backmixing in packing could be estimated if the composition profile along the whole column could be obtained.

Keywords distillation, packed tower, composition profiles, imperfect flow

引 言

精馏塔性能的优劣通常可以用在塔顶和塔底取样,然后计算其分离效率的方法来判断,但这种方法只可以判断出精馏设备效率的高低,却几乎无法找出造成设备效率不够理想或低效的原因^[1]。不良初始分布、壁流、沟流和溪流、端效应以及气相或液相返混等现象都可以造成填料塔效率的下降,而这些影响与塔板数或塔高有关,因此通过测量沿塔

高的浓度分布就有可能了解精馏塔内部流体不均匀流动和分布的情况,达到改善精馏塔性能的目的。填料塔内的轴向返混程度一般采用示踪剂的激励——响应实验来确定,但示踪剂的加入及其检测手段有可能对流场造成干扰。此外,返混程度的测量多采用空气-水物系的冷模实验进行,在工业规模装置上很难模拟出真实工况的气液两相流条件(如高压蒸馏),况且冷模实验获得的数据是否能够直接用于真实的蒸馏过程还值得商榷。雷夏等^[2]通

2002-09-09 收到初稿,2003-12-04 收到修改稿。

联系人:刘春江。第一作者:唐忠利,男,34岁,博士。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 20206021, 20136010)。

Received date: 2002-09-09.

Corresponding author: LIU Chunjiang, associate professor.

E-mail: cjliu@tju.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 20206021, 20136010).

过测量沿萃取柱高度浓度分布,并结合扩散模型计算了萃取柱中两相轴向返混系数和“真实”传质系数,从理论上讲这种方法也可用于蒸馏填料塔,但由于在蒸馏实验过程中同时检测气、液两相的浓度存在着一定的困难,因此这种方法在蒸馏填料塔中的应用受到了限制.基于同样的原因,本文以下将通过实例仅就如何通过浓度分布判断填料塔内液体不良分布、壁流以及端效应现象进行讨论.

1 实验装置和数据来源

本文数据来自天津大学高压蒸馏实验^[3],高压塔直径为 0.15 m,测试填料为 Mellapak 350Y,填料高度为 2 m,压力范围为 700~1900 kPa,物系为正丁烷/异丁烷混合物.液体分布器为自制的溢流式分布器,其结构见图 1.分布器是由两个高度为 60 mm 的柱状圆环构成的环形区域,内外环直径分别为 30 mm 和 100 mm,上缘开有角度为 60° 的 V 字形溢流孔,距分布器底 15 mm 处置有挡板,两环间的区域为受液区,回流液直接由进液管注入圆环中,通过溢流方式由分布器顶部的 V 字形溢流孔中流出.

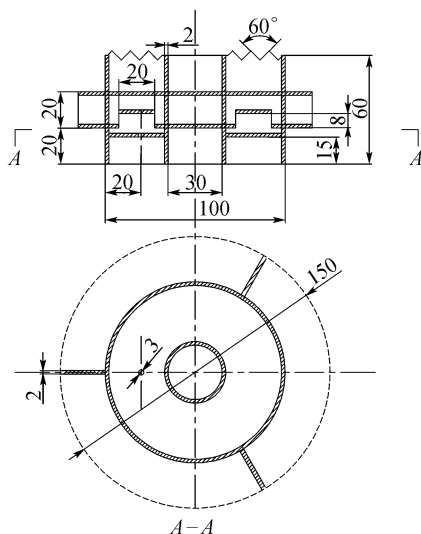


Fig. 1 Reflux liquid distributor

2 液体不良分布

填料塔中液体不良分布根据其尺度可以分为小尺度不良分布和大尺度不良分布两类.小尺度不良分布与填料的特征分布有关,它是由于液体的溪流和沟流造成的不良分布,其尺度范围为单个散堆填料或规整填料通道尺寸.大尺度不良分布是指不良

初始分布或壁区喷淋不足等因素引起的尺度比较大的区域性不良分布.两种不良分布都可以造成塔内各处液气比大小不一,引起局部回流比减小甚至出现“夹紧点”,使分离效率下降.对散堆填料的研究表明,填料处于特征分布时的小尺度不良分布对分离效率的影响并不大,与完全均匀的理想分布相比,分离效率仅仅下降 5%^[4],而大尺度不良分布的影响要大一些.小尺度不良分布可以通过填料的径向混合来抵消其对传质效率的影响,大尺度不良分布可以通过精心的设计、合理的施工来减轻甚至消除其不良影响.以下着重讨论如何判断大尺度不良分布及其对传质的影响.

对全回流过程,对由塔底高度为 H 的单元体中液相轻组分 x 进行质量衡算,并结合 Fenske 方程可得

$$\lg\left(\frac{x}{1-x}\right) = \frac{\lg\alpha}{HETP}H - \lg\left(\frac{1-x_w}{x_w}\right) \quad (1)$$

假设全塔相对挥发度 α 和等板高度 $HETP$ 数值恒定,那么用 $\lg[x/(1-x)]$ 值对填料高度 H 作图,应得到一条直线.但实际上在实验过程中所得到的沿塔高的浓度分布图常常以下凹或上凸的曲线形式出现,这种曲线形式通常是由于各种形式的不良分布造成的.

图 2 和图 3 是在 1900 kPa 下不同气相负荷下的实验数据.从图 2 和图 3 可以看出,在小液量时 $[F=0.66 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^{0.5}]$,浓度分布呈上凸曲线形式,而当液量增大时 $[F=1.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^{0.5}]$,浓度沿填料高度呈直线分布.液量过少时,有可能使液体分布不均,从而形成了曲线形式的浓度分布图,当增大液量,液相分布改善,得到了直线形式的浓度分布图,相应的 $HETP$ 从 0.25 m 减小到 0.17 m,效率提高了 32%.

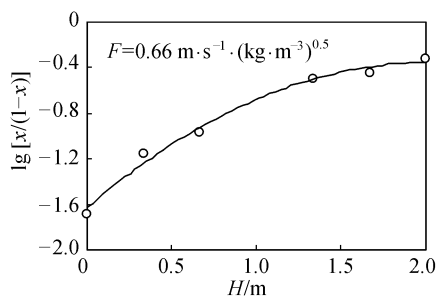


Fig. 2 Composition profiles of Mellapak 350Y at 1900 kPa

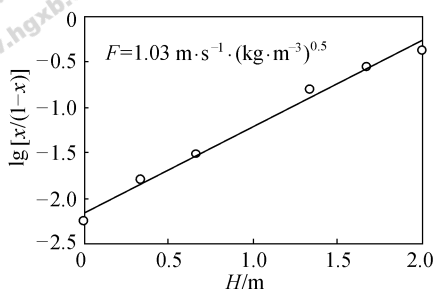


Fig. 3 Composition profiles of Mellapak 350Y at 1900 kPa

Billingham 等^[5]借助于并行塔模型提出了一种计算最大不良分布因子 $f_{\max}$ 的简单方法,并提出了判断填料对不良分布敏感的准则及其对分离效率的影响。

当 $f_{\max} < 0.05$ 时,填料对不良分布非常敏感,有可能达不到分离效率。

当 $0.05 < f_{\max} < 0.1$ 时,填料对不良分布敏感,但有可能达到分离效率。

当 $0.1 < f_{\max} < 0.2$ 时,填料对不良分布不敏感。

当 $f_{\max} > 0.2$ 时,填料对不良分布完全不敏感。

对全回流,其计算公式为

$$f_{\max} = \frac{y_{N+1} - y_N}{2y_{N+1} - 1} + \frac{y_{N+1} - y_N}{y_{N+1} + y_N - 1} - \left(\frac{y_{N+1} - y_N}{2y_{N+1} - 1} \right) \left(\frac{y_{N+1} - y_N}{y_{N+1} + y_N - 1} \right) \quad (2)$$

$$y_{N+1} = [1 + \alpha^{-(N+2)/2}]^{-1} \quad (3)$$

$$y_N = [1 + \alpha^{-N/2}]^{-1} \quad (4)$$

从以上公式可以看出, Billingham 提出的最大不良分布因子 $f_{\max}$ 仅仅是相对挥发度和分离级数的函数。应用式(2)~式(4)计算了图2和图3的 $f_{\max}$ (见表1),发现填料在高液相负荷下 [$F = 1.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^{0.5}$] 比低液相负荷下 [$F = 0.66 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^{0.5}$] 对液相分布更为敏感 ($f_{\max} < 0.05$), 1100 kPa 下的计算结果也得到了相同的规律,即随着液速和分离效率的增大,最大不良分布因子 $f_{\max}$ 数值减小,填料对液相分布的要求也增大。表1中还计算了相同(近) F 因子 [$F = 0.86 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^{0.5}$] 不同压力下 $f_{\max}$ 的变化情况,从表中可以看出,随着压力的增大, $f_{\max}$ 数值减小,也就是说高压下对液相分布的要求更高。

Table 1 $f_{\max}$ values at pressure of 1100~1900 kPa

Pressure /kPa	$F/\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^{0.5}$	Relative volatility	H/m	HETP /m	N	$f_{\max}$
1100	0.28	1.24	2	0.59	3.36	0.176
1100	0.60	1.24	2	0.43	4.63	0.132
1100	0.86	1.24	2	0.35	5.68	0.105
1100	1.26	1.24	2	0.27	7.40	0.072
1300	0.86	1.22	2	0.33	6.05	0.101
1500	0.88	1.20	2	0.22	9.11	0.059
1700	0.86	1.18	2	0.17	11.58	0.041
1900	0.66	1.17	2	0.25	8.04	0.077
1900	1.03	1.17	2	0.17	11.98	0.041

3 壁 流

壁流是填料塔操作中经常遇到的现象,研究表明散堆填料塔中的壁流量可高达总液量的 50%,而规整填料塔中壁流严重时其壁流量可占总液量的 71.15%^[6]。壁流的发生与塔径、液体分布器、填料的几何结构和制造加工精度、物系性质、气、液相负荷以及塔壁的热损失等因素有关,它的存在对分离效率有严重的影响,许多学者对此进行了研究。

可用多种方法判断壁流的发生,最直接的方法是通过冷模实验直接测量壁流量的大小,此外还可以通过比较不同气速下沿塔高的浓度分布来判断是否存在壁流。从表1中数据可看出,在 1100 kPa 下随着 F 因子的增大, HETP 值下降。比较各气相负荷下沿塔高的浓度分布(图4)发现,塔下部低气相负荷的传质效率明显低于高气相负荷的传质效率,而在塔上部,各气相负荷下效率相近,这种结果暗示了在填料塔中有壁流现象存在,而低气相负荷下的高 HETP 值很有可能是由壁流造成的。

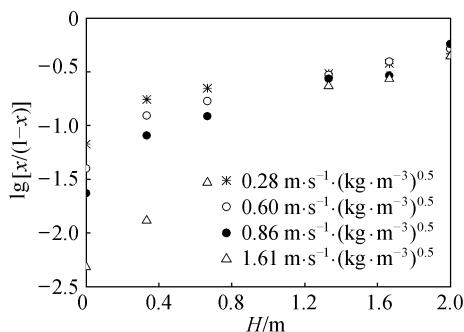


Fig. 4 Composition profiles of Mellapak 350Y at 1100 kPa with different F factor

4 端效应

填料层顶部的液体初始分布和填料层底部气体

初始分布、床层外气液间的接触以及过冷或过热进料都可以引起填料塔的端效应现象。在这三种情况中，液体分布对填料效率的影响最大，而填料层外上部空间或填料层外下部空间气液相互接触发生传质作用，与填料的分离效率相比，这部分传质量非常小，除非在填料层特别低的情况下，一般都忽略不计。而过冷或过热的物料进入填料后，一方面会发生气体的冷凝和液体蒸发，使液体和气体流量之比有所变化，影响到分离效率，另一方面，过冷和过热物料进入填料后，必须消耗一段填料用来进行热交换，直至过冷液体温度达到泡点，过热气体达到露点，因此填料层的效率将下降。此外，在接近泛点操作时，过冷和过热进料还容易引发液泛，使填料塔不能正常操作^[7]。

填料塔的端效应可以通过测取填料塔浓度分布、计算沿塔高的局部分离效率来确定，但是这种方法必须在填料中设置多个取样装置，有可能干扰

甚至改变了流体流动分布。还有一种方法是确定不同高度下的填料效率，这样可有效的避免对塔内流场的干扰，但这种方法不适用于对实际工业装置的评价。图 5 是天津大学高压蒸馏实验 1900 kPa 下高压塔上、中、下三段填料的等板高度数值。从图中可以看出，在所有气相负荷下，填料上段的分离效率最低，在 $F=0.85\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})^{0.5}$ 时，填料上段等板高度比下段等板高度高 3.36 倍，存在着明显的端效应现象。对实验条件及实验数据分析后发现，端效应主要是由于液体不良分布和过冷回流造成的。

5 结 论

在工业规模的装置上对填料塔进行流体力学性能的测量往往不易实现，本文通过对蒸馏塔沿填料高度浓度分布数据分析，得到了填料塔内不良初始分布、壁流、端效应等不均匀流动和分布状况，这种方法对改善工业规模填料蒸馏塔性能具有借鉴意义。

符 号 说 明

- $f_{\max}$ ——填料最大不良分布因子
- F —— F 因子， $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})^{0.5}$
- H ——填料高度， m
- $HETP$ ——等板高度， m
- N ——理论级数
- x ——液相中轻组分摩尔分率
- x_w ——塔釜液相轻组分摩尔分率
- y ——气相中轻组分摩尔分率
- α ——相对挥发度

References

1 Zuiderweg F J. Distillation Composition Profiles-What do They Tell Us? *Chemical Engineering Research and Design*, 1999, **77** (9): A475

2 Lei Xia (雷夏), Fei Weiyang (费维扬), Shen Zhongyao (沈忠耀), Wang Jiading (汪家鼎). A Method for Simultaneous Evaluation of Axial Mixing Coefficients and “true” —HTU in the Extraction Column from Concentration Profiles under Steady State. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 1982, **33** (4): 368

3 Chen J B, Tang Z L, Wang G Q, Liu C J, Yuan X G, K T Yu. Performance of Mellapak 350Y Corrugated Sheet Structured Packing at High Pressure. In: *Proceedings of International Symposium on Natural Resources Processing*. Tianjin: 2003. 433

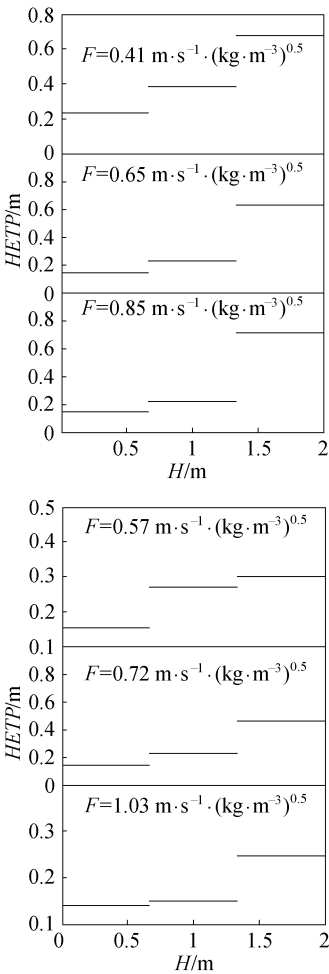


Fig. 5 Top, middle and bottom section efficiencies at 1500 kPa

- 4 Zuiderweg F J, Hoek P J. Effect of Small Scale Liquid Maldistribution (‘natural flow’) on the Separating Efficiency of Random Packings. *EFCE Publication Series* (European Federation of Chemical Engineering), 1987, No. 62: B247
- 5 Billingham J F, Lockett M J. A Simple Method to Assess the Sensitivity of Packed Distillation Columns to Maldistribution. *Trans IChemE*, 2003, **80** (5): A373
- 6 Zhang Zhibing (张志炳), Hagginbotham P, Potter K E, K T

- Yu (余国琮). Experimental Study on the Wall Flow of Column Containing Structured Packing. *Chemical Engineering* (化学工程), 1996, **24** (2): 7
- 7 Shi Jun (时均), Wang Jiading (汪家鼎), K T Yu (余国琮), Chen Minheng (陈敏恒). Handbook of Chemical Engineering (化学工程手册). 2nd ed. Beijing: Chemical Industrial Press, 1996

《化工进展》2004 年第 5 期目次

进展与述评

- 中国精细化工的现状和发展预测 王大全
- 微反应器研究及展望 郑亚锋 赵 阳 辛 峰
- 聚丙烯酸钠高吸水性树脂的改性研究进展 贾振宇 崔英德 黎新明 尹国强
- 超声波作用于天然气水合物形成分解研究进展 孙始财 樊栓狮
- 铈锆固溶体制备方法的研究进展 王帅帅 冯长根
- 聚偏氟乙烯膜的亲水性改性研究进展 唐广军 孙本惠
- 六铝酸盐的结构及其在甲烷制氢中的应用 段华超 刘 源 李增喜 闻学兵
- 从裂解汽油中分离回收苯乙烯技术评述 李 涛
- 负载型单中心催化剂用于烯烃聚合的研究进展 黄汝彬 刘东兵 毛柄权
- 过程工业并行工程研究 魏奇业 华 贲
- 甲基丙烯酸甲酯生产工艺及技术经济比较 杨学萍

研究开发

- 超临界 CO₂ 和植物油脱臭馏出物相平衡研究 金君素 李群生 张泽廷 于恩平
- 732 离子交换树脂从胱氨酸母液提取 L-精氨酸的研究 翁连进 甘林火 王士斌 韩媛媛 刘才富
- 多组分分批精馏中各种设计参数对回流比的影响 张雪梅 张卫江 简春贵 张军保 周莹晖
- 化学法活性炭的吸附性能和孔结构特性 张会平 叶李艺 杨立春
- 直接从水玻璃合成表面修饰的纳米 SiO₂ 微粒 李 玲
- 羧甲基纤维素接枝聚磺甲基丙烯酸酰胺的制备及其吸附性能的研究 李 杰 马凤国 谭惠民
- 有机硅改性丙烯酸聚氨酯杂合分散体的合成研究 胡剑青 涂伟平 夏正斌

应用技术

- 纳米 CuO 的制备、表征及其应用 崔宝臣 马丽景 白守礼 杜俊岐
- 用于热水示踪技术测量蒸馏塔板上液体返混的微机温度测量装置 姬登祥 俞晓梅 李育敏 顾卫国 张建正
- 邻对苯二酚热敏性研究及产品分离工艺优化 李小平 冯惠生 徐世昌 陈文峰
- C₅ 石油树脂改性作为柴油改进剂的研究 陈均志 何国华

专栏 (石化科技与管理)

- 填充柱气相色谱用于双氧水工作液组分测定的分析方法 李学梦 段正康
- 重金属污染的生物修复技术研究 张 慧 李 宁 戴友芝
- 循环冷却水系统蒸发损失的计算与分析 胡跃华 朱泽华
- 聚己内酰胺纤维工业纺丝装置建设的市场分析及经济评价 樊凯非
- 石化企业社区电子商务解决方案 陈 岗 唐马强 尹若明
- 尿素储运地坪腐蚀分析与选材 刘 谦 陆新山