

板波纹填料用于低界面张力萃取体系的操作特性研究

王 巍¹, 周国梁², 艾利君², 王 强^{2,3}, 刘天坤³, 蔡卫滨^{3*}

(1. 航天工程装备(苏州)有限公司, 江苏 苏州 215104;

2. 中核四〇四有限公司, 甘肃 嘉峪关 735100;

3. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘要:在内径为 100 mm 的玻璃萃取塔中,以具有较低界面张力的 30%煤油(TBP)-醋酸-水为萃取体系,系统研究了板波纹规整填料的流体力学性能和传质性能。结果表明,随两相流量增加,存留分数皆增加;随流速比减小,液泛通量增大;理论级当量高度随连续相流速变化不大,但随分散相流速增加而降低。板波纹填料具有较高的液泛通量和传质效率,在实验范围内,液泛通量高达 $98 \sim 153 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,理论级当量高度在 0.68~1.05 m 之间,对低界面张力萃取体系具有较好的效果。

关键词:板波纹填料;界面张力;萃取;流体力学;传质

中图分类号:TQ051.8+3

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)S-0242-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2020.S.053

Operational characteristics of corrugated sheet packing column for extraction system with low interfacial tension

WANG Wei¹, ZHOU Guo-liang², AI Li-jun², WANG Qiang², LIU Tian-kun³, CAI Wei-bin^{3*}

(1. Aerospace Engineering Equipment (Suzhou) Co., Ltd., Suzhou 215104, China;

2. The 404 Company Limited, China National Nuclear Corporation, Jiayuguan 735100, China;

3. School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The hydrodynamic and mass transfer properties of corrugated sheet packings are systematically studied in a glass extraction tower with an inner diameter of 100 mm by using 30% TBP (kerosene)-HAC-water, which has a low interface tension, as the extractive system. Experiment results indicate that the dispersed-phase holdup increases with the flow rates of both continuous phase and dispersed phase. As flow rate ratio drops, flooding flux increase. The flow rate of continuous phase has little impact on height equivalent to theoretical stage (H_e) while that of the dispersed phase has a positive influence on it. The corrugated structured packings column holds higher flooding flux and good mass transfer efficiency. Within the experiment scope, the flooding flux is as high as $98 \sim 153 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, and height equivalent to theoretical stage is in the array of 0.68~1.05 m, showing a good effect on low interfacial tension extraction system.

Key words: corrugated sheet packing; interface tension; extraction; hydrodynamics; mass transfer

萃取广泛应用于石油、化工、冶金、核工业、生物和医药等行业^[1-5]。工业上,由于填料萃取塔具有结构简单、安装方便、运行能耗低等优点,得到了大量应用^[6-10]。萃取塔填料有散堆填料和规整填料两种,散堆填料的传质效率较高,但运行通量低;规整填料与之相反,传质性能相对差,但运行通量大。随着现代化工业的发展,化工厂生产规模不断扩大,对大通量高效塔填料的需求不断增加。国内外对规整填料萃取塔都进行了较多的研究,如将 MellaPak、

GemPak 等精馏塔规整填料用于液液萃取,但传质性能还有待提升^[11-12]; Montz 是一种专门针对液液两相流动特点而设计的规整填料,萃取性能较好,但结构复杂、制造难度大、成本高。天津大学开发了一种新型规整网孔填料,传质效率高于鲍尔环,但运行通量有限^[13-14]。近年有研究者开发了导向格栅规整填料(DFG)和舌形板波纹规整填料(SBW)两种萃取塔专用填料^[15-17],通量比传统规整填料有明显提升,同时具有较好的萃取效率。

收稿日期:2020-03-17;修回日期:2020-06-01

基金项目:江苏省科技支撑计划(BE2014093);中央高校基本科研业务费(2016QH01)

作者简介:王巍(1987-),男,学士,工程师,研究方向为核能装备,289658571@qq.com;蔡卫滨(1976-),男,博士,副教授,研究方向为化工分离工程,通讯联系人,caiweibin2000@126.com。

萃取塔内的非理想流动现象较严重,两相流过填料时,常用一定高度的板波纹填料对其进行再分布。相比于SBW规整填料,板波纹填料由于少了舌片,传质效率可能低于前者,但由于没有舌片的阻拦,两相流动阻力略有减小,有利于形成更大的通量。为进行比较,本文采用与SBW规整填料相同的波高、波距、倾角等结构设计了板波纹填料,并对其在较低界面张力体系中的水力学性能和传质性能进行了测试。

1 实验部分

1.1 材料与试剂

1.1.1 填料及实验设备

图1为板波纹填料的实物图,结构参数见表1。

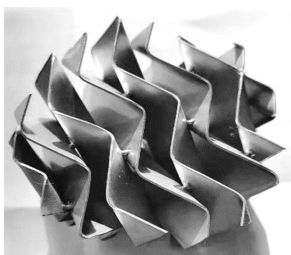
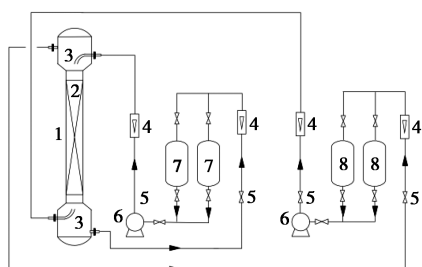


图1 板波纹填料实物图

表1 板波纹填料的结构参数

板厚/ mm	堆积密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	波高/ mm	波距/ mm	波纹倾角/ ($^\circ$)	空隙率/ %	比表面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{m}^{-3}$)
1.0	643	13	26	55	92.2	155.0

图2为实验流程图。两相分别经泵和流量计进入萃取塔,在塔内逆向流动并发生接触传质,完成接触后分别在塔顶和塔底经澄清后流入相应储罐。萃取塔采用透明玻璃塔,其中萃取段内径0.1 m、有效高度1.0 m,塔顶、塔底扩大澄清段直径为0.25 m。



1—萃取塔;2—填料;3—分布器;4—流量计;5—阀门;
6—泵;7、8—储罐

图2 实验设备流程图

1.1.2 仪器及试剂

醋酸、氢氧化钠、酚酞、磷酸三丁酯、航空煤油(TBP)。

BP210S电子天平,德国Sartorius公司;酸式滴定管、碱式滴定管等。

1.2 实验方法

填料萃取塔的性能与萃取两相的物性密切相关,尤其是界面张力。本文选择界面张力较低的30% TBP-醋酸-水体系,其物性见表2。实验以水相为连续相,以30% TBP为分散相,测试板波纹填料萃取塔的水力学性能和传质性能。水力学性能包括分散相存留分数(φ)和液泛通量。分散相存留分数采用体积置换法^[18]测量。传质性能采用理论级当量高度表征,通过氢氧化钠标准溶液滴定连续相和分散相进出口醋酸的浓度,用柱塞流模型求取。

表2 实验体系物性数据(15 $^\circ\text{C}$)

ρ_c / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	ρ_d / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	μ_c / ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	μ_d / ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	σ / ($\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$)
997	837	1.14	2.07	10.8

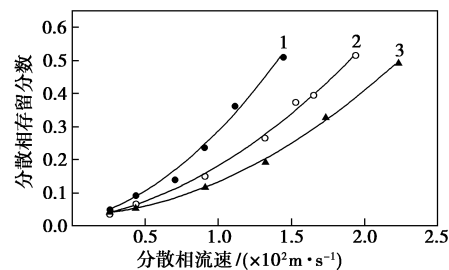
注: ρ 为密度; μ 为黏度; σ 为表面张力;下标c和d分别代表连续相和分散相。

2 结果与讨论

2.1 分散相存留分数

分散相存留分数是塔内单位体积内分散相所占的体积分数,通常存留分数越大,单位体积内的传质面积越大,传质效果越好^[19]。影响存留分数的主要因素有体系物性、塔内件以及两相流量等。

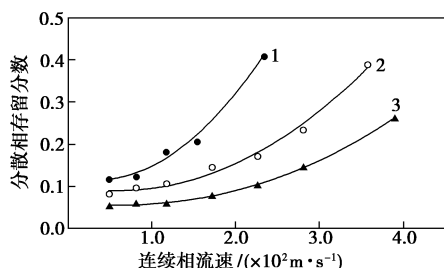
图3为分散相流速 u_d 对存留分数的影响。可以看出,当分散相流速较低的时候,存留分数较小且比较接近;随分散相流速的增加,存留分数都较快增加,不同连续相流速下存留分数的差距增大。



1— $u_c=0.0152\text{ m/s}$;2— $u_c=0.0081\text{ m/s}$;3— $u_c=0.0049\text{ m/s}$

图3 存留分数随分散相流速的变化

存留分数随连续相流速 u_c 的变化见图 4。当分散相流速较低时,存留分数随连续相流速增加变化较小;当分散相流速增加到 0.009 1 m/s 时,连续相流速对存留分数的影响大大增强,随连续相流速增加,存留分数快速增加。



1— $u_d=0.0091$ m/s; 2— $u_d=0.0059$ m/s; 3— $u_d=0.0034$ m/s

图 4 存留分数随连续相流速的变化

2.2 流体力学性能

萃取塔中两相的滑动速度 u_s (m/s) 与填料空隙率 ε 、存留分数 φ 及连续相流速 u_c 、分散相流速 u_d 的关系可用 Pratt 等提出的双层模型来描述,如式(1)所示:

$$u_s = u_d/\varphi\varepsilon + u_c/[(1-\varphi)\varepsilon] \quad (1)$$

汪家鼎等^[20]考虑固体颗粒受阻沉降以及塔内液滴的实际流动状况,提出 u_s 和特性速度 u_0 (m/s, 塔内两相流速趋向于零时分散相单液滴的运动速度)之间的关系如式(2)所示:

$$u_s = u_0(1-\varphi)^n \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可得式(3):

$$u_d + \varphi u_c/(1-\varphi) = u_0 \varphi \varepsilon (1-\varphi)^n \quad (3)$$

可以看出, $\varphi \varepsilon (1-\varphi)^n$ 和 $u_d + \varphi u_c/(1-\varphi)$ 为线性关系,其斜率为特性速度 u_0 。将两相不同流速下的实验数据代入式(3),通过优化计算得到误差最小的指数 n 并作图,即可得到 u_0 。

对于本实验体系,当指数 n 为 0.4 的时候直线具有较好的相关系数,对应的流动特性关联图如图 5 所示。

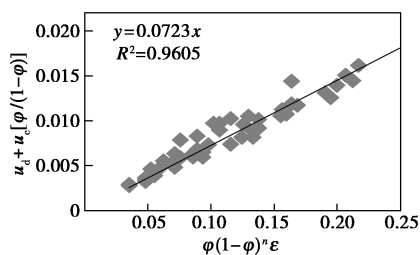


图 5 流动特性关联图

由图 5 可见, u_0 为 0.072 3 m/s。特性速度关联

计算式为式(4):

$$u_0 = C(4g\sigma\Delta\rho/\rho_c^2)^{1/4} \quad (4)$$

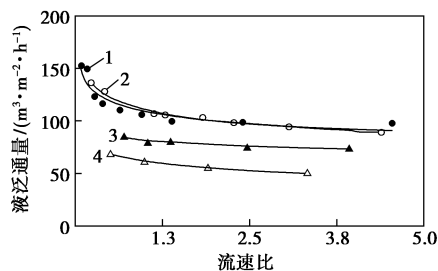
式中, C 为跟填料结构有关的常数; g 为重力加速度, m/s²。

将各物性参数和特性速度 u_0 代入式(4),可得 $C=0.80$ 。由此,板波纹填料萃取塔的流体力学模型为式(5):

$$u_d/\varphi\varepsilon + u_c/(1-\varphi)\varepsilon = 0.80(4g\sigma\Delta\rho/\rho_c^2)^{1/4}(1-\varphi)^{0.5} \quad (5)$$

2.3 液泛通量

萃取塔中,流速比为分散相与连续相空塔流速之比。图 6 为液泛通量随流速比的变化,可以看出,随流速比减小,液泛通量增加。当流速比为 4.55 时,板波纹填料液泛通量为 98 m³/(m²·h);随分散相流速降低,当流速比减小到 0.09 时,板波纹填料液泛通量迅速增加到 153 m³/(m²·h)。图 6 同时给出了 SBW 填料、蜂窝格栅规整填料(FG)以及 Filip 填料的液泛通量^[9,15]。板波纹填料的液泛通量与 SBW 填料相近。在流速比较大或较小的时候,板波纹填料比 SBW 填料的液泛通量略大;在流速比为 1 左右的时候,板波纹填料比 SBW 填料的液泛通量稍小。与 FG 填料以及 Filip 填料相比,板波纹填料的通量明显增大。



1—板波纹填料; 2—SBW 填料; 3—FG 填料; 4—Filip 填料

图 6 液泛通量与两相流速比的关系

2.4 传质性能

当萃取塔内溶质浓度较低、萃取过程水相流量 L (m³/h) 与油相流量 V (m³/h) 变化不大时,根据柱塞流模型,填料的传质性能可用基于水相(连续相)的传质单元数 NTU_w 和传质单元高度 HTU_w 表示。由于传质单元数使用不方便,工程上常用理论级当量高度的方法进行估算。此时萃取柱高度 H (m) 可用式(6)表示:

$$H = N_T H_e \quad (6)$$

式中: N_T 为萃取过程所需要的理论级数; H_e 为理论级当量高度, m。

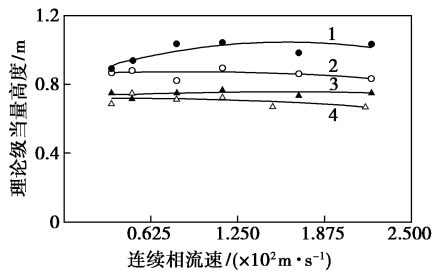
理论级数 N_T 和传质单元数 NTU_w 之间的关系为式(7):

$$N_T = NTU_w(1 - L/\alpha V)/\ln(\alpha V/L) \quad (7)$$

式中, α 为溶质在两相中的平衡系数, 可用式(8)表示:

$$y = \alpha x^* \quad (8)$$

图7是连续相流速对理论级当量高度 H_e 的影响。随连续相流速的增加, 理论级当量高度变化不大, 表明连续相流速对传质性能影响不大。这是由于当连续相流速增加的时候, 一方面分散相停留分数增加, 传质面积增大, 且两相湍动程度增大, 有利于传质; 但另一方面, 连续相在塔内停留时间减少, 与分散相接触时间缩短。总的来说, 这两个因素的影响相当, 因此理论级当量高度变化不大。



1— $u_d = 0.0034 \text{ m/s}$; 2— $u_d = 0.0051 \text{ m/s}$;
3— $u_d = 0.0070 \text{ m/s}$; 4— $u_d = 0.0087 \text{ m/s}$

图7 理论级当量高度随连续相流速的变化

当连续相流速不变时, 随分散相流速的增加, 虽然连续相停留时间减少, 但两相传质面积增大且湍动程度加大, 这些都更有利于传质, 因此理论级当量高度降低。

板波纹填料的理论级当量高度在 $0.68 \sim 1.05 \text{ m}$ 之间。对于相同的体系, SBW 填料的理论级当量高度最低约 0.6 m , FG 填料的最低理论级当量高度约 $1.0 \text{ m}^{[9]}$, 板波纹填料的传质性能比 SBW 稍差, 但优于 FG 填料。综合来看, 板波纹填料具有较大的液泛通量和良好的传质性能, 是一种优良的萃取塔填料。

3 结论

采用界面张力较低的 30% TBP-醋酸-水体系, 研究了板波纹规整填料的流体力学性能和传质性能, 得出如下结论:

(1) 板波纹规整填料具有较高的通量, 其液泛通量在 $98 \sim 153 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 之间。

(2) 在流动特性关联式中的指数项 n 取 0.4 的

时候, 得到的液泛通量理论计算式具有较高的精度。

(3) 板波纹规整填料的理论级当量高度在 $0.68 \sim 1.05 \text{ m}$ 之间, 具有较好的传质性能。

参考文献

- [1] 吴格格, 高仕谦, 张占恩. 二元小分子醇/盐双水相体系萃取三唑类杀菌剂[J]. 现代化工, 2020, 40(2): 231-235.
- [2] 涂盛辉, 张超, 张志文. 功能化离子液体的合成与萃取性能研究[J]. 现代化工, 2019, 39(4): 103-107.
- [3] 勾明雷, 牛青山. 用 TBP 从 POX 工艺酸沉浓缩液中萃取分离 Mo、Re 的研究[J]. 现代化工, 2019, 39(3): 152-155.
- [4] 袁晓乐, 张广山, 李硕, 等. 络合萃取法处理高浓度含铜废水[J]. 现代化工, 2019, 39(1): 85-88, 90.
- [5] 胡发亨, 毛学锋, 赵渊. 煤衍生油溶剂萃取提酚技术试验研究[J]. 现代化工, 2018, 38(8): 81-84.
- [6] 费维扬. 萃取塔设备研究和应用的若干新进展[J]. 化工学报, 2013, 64(1): 44-51.
- [7] 朱慎林, 王刚, 朴香兰, 等. 驼峰筛板萃取塔的性能研究及应用[J]. 石油炼制与化工, 2001, 32(12): 38-42.
- [8] Anubis P, Hinda E, Carlos M. Fluid dynamics study of a liquid-liquid extraction process in a column packed with SMVP[J]. Separation Science and Technology, 2005, 40: 1513-1535.
- [9] 朱慎林. FG 型蜂窝状格栅填料的开发和应用[J]. 炼油设计, 1994, 24(3): 36-40.
- [10] 朱璇雯, 刘成, 张敏华. 填料萃取塔的研究现状及进展[J]. 化工进展, 2013, 32(1): 22-26.
- [11] 尹国玉, 张泽廷, 戴猷元, 等. 板波填料萃取塔的实验研究: (I) 流体力学特性[J]. 化工学报, 1991, 42(3): 289-295.
- [12] 费维扬, 任钟旗. 萃取塔设备强化的研究和应用[J]. 化工进展, 2004, 23(1): 12-16.
- [13] 张敏卿, 苗磊, 李景云. 新型规整网孔填料萃取性能实验研究[J]. 化学工程, 2016, 44(1): 19-22.
- [14] 苗磊. 新型规整网孔填料在吸收和萃取中的性能研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
- [15] 蔡卫滨, 钱建兵, 王玉军, 等. 舌形板波纹规整填料萃取塔的操作性能[J]. 高校化学工程学报, 2017, 31(2): 308-315.
- [16] 蔡卫滨, 陈猛, 钱建兵, 等. 导向格栅规整填料的水力学特性和传质性能研究[J]. 矿业科学学报, 2017, 2(4): 402-408.
- [17] 范召运, 蔡卫滨, 杨蕴辉, 等. 导向格栅规整填料萃取塔的操作性能[J]. 化工学报, 2015, 66(5): 1792-1797.
- [18] 朱慎林, 陈德宏, 费维扬. 蜂窝 (FG) 型规整填料萃取塔的性能研究[J]. 化学工程, 1993, 21(1): 15-21.
- [19] Seibelt A F, Fair J R. Hydrodynamics and mass transfer in spray and packed liquid-liquid extraction column [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1988, 27(3): 470-481.
- [20] 汪家鼎, 沈忠耀, 汪承藩. 液-液萃取脉冲筛板塔中两相流动特性的初步研究[J]. 化工学报, 1965, 16(4): 215-220. ■