

高效旋转精馏床的传质性能

栗秀萍^{1,2}, 刘有智^{1,2}, 张振翀^{1,2}, 涂传璞^{1,2}

(1. 中北大学化工与环境学院, 山西太原 030051;
2. 山西省超重力化工工程技术研究中心, 山西太原 030051)

摘要:以乙醇-水溶液为物系,以不锈钢波纹丝网为填料,在超重力因子为20~120、原料流量0.925~1.851 mol/h、回流比1.5~4.0、原料摩尔分数0.2425、室温进料和常压操作条件下,考察了高效旋转精馏床(HERDB)运行情况与传质性能。结果显示:①高效旋转精馏床运行平稳;②高效旋转精馏床的理论塔板数随超重力因子、原料流量和回流比的增大而增加;③在实验操作条件下,高效旋转精馏床传质单元高度为9.6~65.2 mm。与实验超重力精馏设备相比,高效旋转精馏床的等板高度大于实验室超重力精馏设备,说明存在放大效应。

关键词:高效旋转精馏床;超重力;传质性能

中图分类号: TQ053.5

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2011)02-0077-04

Mass transfer property of high effective rotating distillation bed

LI Xiu-ping^{1,2}, LIU You-zhi^{1,2}, ZHANG Zhen-chong^{1,2}, TU Chuan-pu^{1,2}

(1. School of Chemical Engineering and Environment, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Research Center of Shanxi Province for High Gravity Chemical Engineering and Technology, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Using alcohol/water solution system, with stainless steel wave thread packing, distillation experiment is carried out in high effective rotating distillation bed (HERDB), the running state and mass transfer property of HERDB is studied, under the conditions of ambient temperature and atmospheric pressure, average high gravity factor of 20-120, feedstock flux of 0.925-1.851 mol/h, mole fraction of feedstock of 0.2425, reflux ratio of 1.5-4.0. The results indicate that: ① HERDB runs smoothly, ② the number of transfer units of HERDB increases with the increasing of average high gravity factor, feedstock flux and reflux ratio, ③ the height of mass transfer unit of HERDB is 9.6-65.2 mm. Magnifying effect exists because the height equivalent to a theoretical plate of HERDB is more than that of RPB used in experiment.

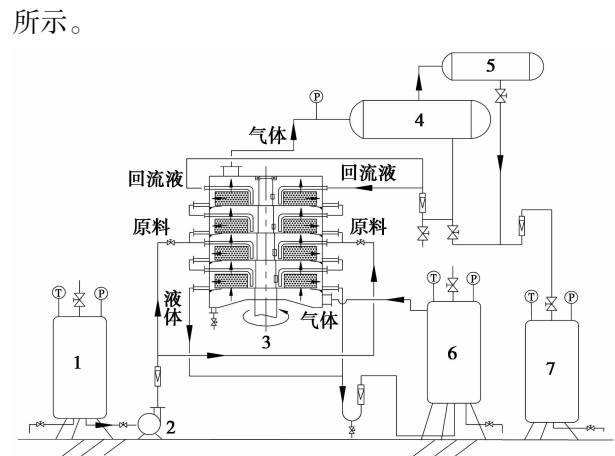
Key words: high effective rotating distillation bed; high gravity; mass transfer property

近年来,出现了利用旋转产生的离心力场来强化传递与反应的技术。它从提高单位容积内的相接面积及设备操作的液泛限等方面极大地强化了传质强度^[1-2]。使得几十米高的塔缩小成高不过2 m的旋转床,这对于传统的传质、传热技术是突破性的进展。旋转床因其具有体积小、操作方便、物料停留时间短和滞留量小的优点而受到精馏科研工作者的青睐,纷纷对其传质传热机理^[3]、操作条件^[4-8]、填料^[9-10]和转子结构^[11]等进行了研究。相比于传统精馏技术,超重力精馏技术体现出绝对的优势^[12]。但是怎么通过改进工艺和优化设备结构使超重力精馏技术的优势得以发挥出来,是我们当前需要解决的问题。高效旋转精馏床是中北大学针对旋转床工业放大中出现的气、液走捷径、动平衡维持、液体淹床和液沫夹带等问题提出的发明专利^[13]。本文中对其传质性能和流体力学性能进行了研究。

1 研究方法

1.1 工艺流程

高效旋转精馏床精馏实验工艺流程如图1



1—原料储槽;2—泵;3—HERDB;4—分凝器;
5—全凝器;6—再沸器;7—产品储罐

图1 HERDB精馏实验工艺流程示意图

原料在泵的作用下,经转子流量计计量后从第3层填料(自上而下)的原料进口进入HERDB,经液体分布器喷洒在填料内侧。在填料中,原料受离心力、填料摩擦力及曳力的作用形成液膜、液丝与

收稿日期:2010-09-20

基金项目:山西省青年科技研究基金(2008021009-1);山西省高校开发项目(20091127)

作者简介:栗秀萍(1972-),女,博士,副教授,从事超重力精馏技术研究,lixuiping@nuc.edu.cn。

液滴,并由填料内侧向外侧甩出,离开填料的液体由受液盘收集后,经降液管进入第 4 层液体分布器和第 4 层填料,液体最后从 HERDB 的液体出口流出,进入再沸器。再沸器中的液体部分引出,部分经加热产生蒸汽,从气体进口进入 HERDB 底部,在压力作用下,从 HERDB 的下端依次通过各层旋转的填料。在填料中,蒸汽与液体错流接触进行传质、传热,气液快速达到平衡,使气相中的易挥发组分的浓度越来越大,液相中易挥发组分的浓度越来越小,达到原料液分离的目的。蒸汽从气体出口流出后,依次进入分凝器与全凝器,为提高设备的分离能力,分凝器中的部分液体作为回流液从回流液进口返回到 HERDB 中,其余作为产品引出。HERDB 内转子的转速(决定超重力场强度的大小)由调频器调节。

1.2 主要设备性能

该研究采用的 HEPDB 为一立式错流型旋转填料床,其具体结构参见文献[13]。HEPDB 的主要部件,转子及填料的性能如表 1 所示。

表 1 HEPDB 主要部件及填料性能

HERDB	气相管/	液相管/	外径/	高/	材料
	mm	mm	mm	mm	
进口	φ56	φ10	350	640	不锈钢
出口	φ56	φ56			
填料	填料丝直	堆积密度/	比表面积/	空隙率	单层轴向
	径/mm	kg·m ⁻³	m ² ·m ⁻³		
	φ0.285	361.72	325.4	0.9539	100

(上接第 76 页)

不适宜直接当沥青使用。用实沸点蒸馏将抽出油中的轻组分蒸馏出来,可作为非烃化合物进一步分离的原料,非烃化合物经组分分析后,通过络合萃取等方法可分离出酚类、吡啶类、喹啉类等重要化工原料;抽出油重组分调合制备重交及建筑等不同牌号的沥青。

3 结语

(1) 用糠醛作溶剂萃取剂对抚顺页岩油进行溶剂萃取,当剂油质量比为 3:1,反应温度为 60℃,停留时间为 30 min 时,抽余油收率为 55.37%,抽出油收率为 43.60%。

(2) 经糠醛萃取后的抽余油可直接当 20# 重柴油销售;还可用络合精制等方法脱氮后进行催化裂化生产各种轻质燃料油,脱除的氮化物可用于非烃化合物的分离;可参照石油蜡油的加工利用工艺对

1.3 实验条件

实验利用 SQ206 气相色谱测量回流液和再沸器乙醇浓度;利用调频电机调节旋转速度;利用液体流量计测定回流流量;利用 U 形差压计测定旋转填料床气相压降。实验条件如表 2 所示。

表 2 操作条件

原料流 量(F)/ mol·h ⁻¹	原料浓度 (c_f)/摩尔 分数	超重力 因子 (β)	回流比 (R)	操作 压力	进料 温度	加热 功率/ kW
0.925 ~ 1.851	0.2425	20 ~ 120	1.5 ~ 4.0	常压	室温	11

2 结果与讨论

精馏设备的传质性能可以用理论塔板数 (NTU) 和等板高度 (HETP) 来表示。理论塔板数的计算应用 Huffman formula 公式^[14] 计算。等板高度为填料轴向厚度与理论塔板数的比。

2.1 超重力因子对高效旋转精馏床传质性能的影响

超重力因子是衡量旋转精馏床内超重力场强度的性能指标^[9],可通过电机的旋转来进行调节。

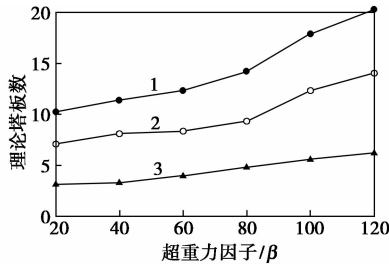
在原料流量为 0.925 mol/h、原料摩尔分数为 0.2425、回流比为 1.5 的操作条件下,高效旋转精馏床的理论塔板数与等板高度随超重力因子的变化关系如图 2 及表 3 所示。

页岩油络合精制油进行加工利用。

(3) 抽出油重组分调合制备重交及建筑等不同牌号的沥青,抽出油轻组分用于非烃化合物的分离;抽余油通过脱氮后得到脱氮油,脱氮油经过催化裂化,得到裂解气、汽油、柴油、重油产品,含氮化合物用于非烃化合物的分离。

参考文献

- [1] 赵桂芳,姚春雷,全辉. 页岩油的加工利用及发展前景[J]. 当代化工,2008,10(5):496-499.
- [2] 肇永辉. 我国油页岩的主要性质及利用[J]. 沈阳化工,2000,29(2):78-80.
- [3] 张胜,杨秋水,李似欣. 络合法分离页岩油中的含氮化合物[J]. 石油大学学报:自然科学版,1996,20(增刊):77-80.
- [4] 张胜,杨秋水,李似欣. 抚顺页岩油的络合与精制[J]. 石油大学学报:自然科学版,1996,20(3):92-95.
- [5] 李小斌. 抚顺页岩油生产轻柴油及调和油的研究[D]. 北京:中国石油大学,2003. ■



1—系统;2—精馏段;3—提馏段

图2 HEPDB 的理论塔板数随超重力因子的变化关系

表3 HEPDB 的等板高度随超重力因子的变化关系

β	$F/\text{mol}\cdot\text{h}^{-1}$	c_f	R	HETP(精馏)/ mm	HETP(提馏)/ mm
20	0.925	0.2425	1.5	28.1	63.7
40	0.925	0.2425	1.5	24.6	60.6
60	0.925	0.2425	1.5	23.9	50.2
80	0.925	0.2425	1.5	21.4	41.3
100	0.925	0.2425	1.5	16.2	35.8
120	0.925	0.2425	1.5	14.2	32.0

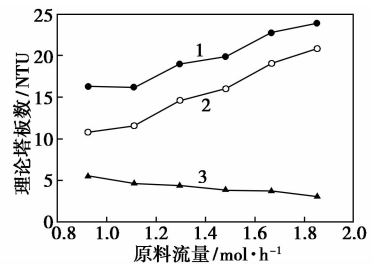
从图2可以看出,高效旋转精馏床的理论塔板数随超重力因子的增大而增大,精馏段的传质效果优于提馏段。原因为室温进料,提馏段中流体之间的热量交换主要用于原料温度升高,超重力因子增大,尽管单位液体在填料中的相间接触面积增大,有利于传热传质进行,液体的气化量相应增加,但增加不明显,致使原料与再沸器中液体浓度相差不大。而精馏段热量交换主要用于相变,随着超重力因子的增大,液体在填料中所受的超重力增大,形成的液滴更小、液膜更薄,单位流体所产生的相界面增大,有利于传热传质进行。

从表3看到,在实验操作条件下,高效旋转精馏床精馏段的等板高度为14.2~28.1 mm,提馏段的等板高度为32.0~63.7 mm,进一步说明精馏段的传质效果优于提馏段。

2.2 原料液流量对高效旋转精馏床传质性能的影响

在原料摩尔分数为0.2425、超重力因子为100、回流比为3的操作条件下,高效旋转精馏床的理论塔板数与等板高度随原料流量的变化关系如图3及表4所示。

从图3可以看出,高效旋转精馏床的理论塔板数随原料流量的增大而增大。精馏段的理论塔板数



1—系统;2—精馏段;3—提馏段

图3 HEPDB 的理论塔板数随原料流量的变化关系

表4 HEPDB 的等板高度随原料流量的变化关系

$F/\text{mol}\cdot\text{h}^{-1}$	c_f	β	R	HETP(精馏)/ mm	HETP(提馏)/ mm
0.925	0.2425	100	3	18.5	36.3
1.111	0.2425	100	3	17.3	43.3
1.296	0.2425	100	3	13.7	45.7
1.481	0.2425	100	3	12.5	51.8
1.666	0.2425	100	3	10.5	53.7
1.851	0.2425	100	3	9.6	65.2

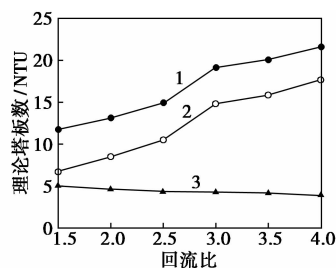
随原料流量的增大而增大,而提馏段的理论塔板数随原料流量的增大稍有减小。原因为整个实验过程中再沸器加热功率不变,且室温进料,当原料流量增大时,再沸器热负荷增大,单位时间内产生的蒸汽量减少,再沸器中液体浓度增大,理论塔板数减少;同理,再沸器上升的蒸汽量减小,与进入提馏段的液体(多为原料液)进行传热传质后,到达精馏段的蒸汽量随原料流量的增大而减小,且气体中轻组分的含量增大,相应冷凝器中轻组分含量增大,精馏段理论塔板数增多。

从表4看到,在实验操作条件下,高效旋转精馏床精馏段的等板高度为9.6~18.5 mm,提馏段的等板高度为36.3~65.2 mm。

2.3 回流比对高效旋转精馏床传质性能的影响

在原料流量为1.111 mol/h、原料摩尔分数为0.2425、超重力因子为60的操作条件下,高效旋转精馏床的理论塔板数与等板高度随回流比的变化关系如图4及表5所示。

从图4看出,高效旋转填料床的理论塔板数随回流比的增大而增加,其中,精馏段的理论塔板数随回流比的增大而增加,而提馏段的理论塔板数随回流比的增大而减小。原因为回流量增大,精馏段填料的润湿面积增大,单位体积填料内气液接触的



1—系统;2—精馏段;3—提馏段

图4 HEPDB的理论塔板数随原料流量的变化关系

表5 HEPDB的等板高度随原料流量的变化关系

R	$F/\text{mol}\cdot\text{h}^{-1}$	c_f	β	HETP(精馏)/ mm	HETP(提馏)/ mm
1.5	1.111	0.2425	60	29.7	39.7
2.0	1.111	0.2425	60	23.5	43.4
2.5	1.111	0.2425	60	19.0	45.7
3.0	1.111	0.2425	60	13.5	46.3
3.5	1.111	0.2425	60	12.6	47.6
4.0	1.111	0.2425	60	11.3	51.2

相界面面积增大,有利于传热传质进行;而提馏段的液体流量远大于精馏段,填料处于完全润湿状态,当回流量增大时,提馏段填料中液膜变厚以及液体流速增大,降低了气液接触的面积与时间,不利于传热传质进行所致。

从表5看到,在实验操作条件下,高效旋转精馏床精馏段的等板高度为11.3~29.7 mm,提馏段的等板高度为39.7~51.2 mm。

3 与实验室超重力精馏设备传质性能的比较

高效旋转精馏床传质性能与实验室超重力精馏设备传质性能比较见表6。

表6 HEPDB传质性能与RPB传质性能

名称	内径/ mm	外径/ mm	填料	$F/mol\cdot h^{-1}$	β	R	HETP/ mm
RPB ^[9]	60	110	波纹丝网 填料	0.296 ~ 1.99	1.0 ~ 7.4	~	~
				0.888	48.88	3.5	23.6
HEPDB	130	330	波纹丝网 填料	0.925 ~ 20.0	1.5 ~ 9.6	~	~
				1.851	120.0	4.0	65.2

由表6所示,在实验操作条件下,尽管填料相

同,均为波纹丝网填料,但等板高度不同,高效旋转精馏床的传质单元高度大于实验室超重力精馏设备,说明存在放大效应。研究结果与文献[11]相同,存在放大效应的原因为高效旋转精馏床的内径、外径均大于实验室超重力精馏设备,相应HERDB的超重力因子远大于RPB,而流体在设备填料内的流动状态、停留时间和相间传质面积均与超重力因子密切相关,导致放大效应的发生。

4 结语

(1) 高效旋转精馏床运行平稳。

(2) 高效旋转精馏床的理论塔板数随超重力因子、原料流量和回流比的增大而增加。

(3) 在原料流量为0.925~1.851 mol/h、超重力因子为20~120、回流比为1.5~4.0的操作条件下,高度旋转精馏床的等板高度为9.6~65.2 mm,大于实验室超重力精馏设备,说明存在放大效应。

参考文献

- [1] Richard B. New mass-transfer find is a matter of gravity[J]. Chem Eng, 1983, 21(2): 23-29.
- [2] 陈建峰. 超重力技术及应用: 新一代反应与分离技术[M]. 1版. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [3] 栗秀萍, 刘有智, 王晓莉. 超重力精馏过程传热传质机理研究[J]. 化学工业与工程技术, 2010, 31(2): 1-5.
- [4] Ramshaw C. Higee distillation-an example of process intensification[J]. Chem Eng, 1983, 90(2): 13-14.
- [5] Trevor K, James R F. Distillation studies in a high-gravity contactor[J]. Ind Eng Chem Res, 1996, 35: 4646-4655.
- [6] Chia C L, Tsung J H, Wen T L. Distillation in a rotating packed bed[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2002, 35(12): 1298-1304.
- [7] Nascimento J V S, Ravagnani T M K, Pereira J A F R. Experimental study of a rotating packed bed distillation column[J]. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2009, 26(1): 219-226.
- [8] 栗秀萍, 刘有智, 杨明. 精馏过程中旋转填料床传质性能与流体力学性能研究[J]. 过程工程学报, 2005, 8(4): 375-378.
- [9] Li Xiuping, Liu Youzhi, Li Zhiqiang, et al. Continuous distillation experiment with rotating packed bed[J]. Chin J Chem Eng, 2008, 16(4): 656-662.
- [10] Li Xiuping, Liu Youzhi. Characteristics of fin baffle packing used in rotating packed bed[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2010, 18(1): 55-60.
- [11] 栗秀萍, 刘有智, 刘连杰. 精馏过程中转子对旋转填料床传质性能的影响[J]. 化工进展, 2005, 24(3): 303-306.
- [12] 刘有智. 超重力化工过程与技术[M]. 1版. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [13] 刘有智, 栗秀萍. 高效旋转精馏床: 中国, 200810054532. 8[P]. 2008-11-19.
- [14] 化学工程手册编委会. 化学工程手册[M]. 1版. 北京: 化学工业出版社, 1989. ■