

工业技术

模拟移动床吸附分离对甲乙苯工艺

叶磊¹,汪成¹,黄英杰¹,刘纪昌^{1,2*},沈本贤^{1,2},孙辉^{1,2}

(1.华东理工大学化学工程联合国家重点实验室,上海200237;

2.绿色能源化工国际联合研究中心,上海200237)

摘要:为了实现C₉芳烃中对甲乙苯资源的高效利用,以X型分子筛为吸附剂,以混合甲乙苯为原料,采用液相模拟移动床吸附工艺分离对甲乙苯(p-MEB)与邻甲乙苯(o-MEB)、间甲乙苯(m-MEB)。在操作温度为75℃、操作压力为0.25 MPa的条件下,在液相模拟移动床吸附分离装置上考察了操作条件对p-MEB吸附分离过程的影响规律,获得优化的p-MEB吸附分离工艺条件为:模拟移动床区域分布采用6-3-4-3模式,切换时间900 s,分配比1.1,循环比3.5,脱附剂比9.3。对于p-MEB质量分数为20.78%的C₉芳烃,优化分离工艺条件下得到的p-MEB质量分数为94.52%,回收率达到90.86%。

关键词:对甲乙苯;吸附;模拟移动床;分子筛

中图分类号:TQ241.1

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)05-0199-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2020.05.043

Adsorption separation of mixed methyl ethyl benzenes by simulated moving bed

YE Lei¹, WANG Cheng¹, HUANG Ying-jie¹, LIU Ji-chang^{1,2*}, SHEN Ben-xian^{1,2}, SUN Hui^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology,

Shanghai 200237, China; 2.International Joint Research Center of Green Energy Chemical Engineering,

East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract:In order to realize the efficient utilization of p-methyl ethyl benzene (p-MEB) resources in C₉ aromatics, the separation process of p-MEB, o-methyl ethyl benzene (o-MEB) and m-methyl ethyl benzene (m-MEB) is studied by using liquid phase simulated moving bed adsorption separation technology with X-type molecular sieves as adsorbent and mixed methyl ethyl benzene as raw material. Under the conditions of operating temperature at 75℃ and operating pressure at 0.25 MPa, the influence rules of operating conditions on the adsorption separation process of p-MEB are investigated in a liquid-phase simulated moving bed adsorption separation device. At the same time, the SMB module of Aspen Chromatography is used to simulate and verify the rules under the experimental conditions. The optimum conditions for p-MEB adsorption separation process are as follows: the simulated moving bed adopts 6-3-4-3 mode in regional distribution, switching time is 900 s, distribution ratio is 1.11, circulation ratio is 3.5 and desorption agent ratio is 9.3. As for C₉ aromatics containing 20.78% of p-MEB, the purity of p-MEB product obtained from the optimal separation process conditions can reach 94.52% and the recovery rate can achieve 90.86%.

Key words:p-methyl ethyl benzene; adsorption; simulated moving bed; molecular sieves

甲乙苯有邻甲乙苯(o-methyl-ethylbenzene, o-MEB)、间甲乙苯(m-methyl-ethylbenzene, m-MEB)和对甲乙苯(p-methyl-ethylbenzene, p-MEB)3种同分异构体。其中p-MEB是重要的化工原料,用途广泛。p-MEB发生脱氢反应可以得到对甲基苯乙烯,聚合后还可生成聚甲基苯乙烯。聚甲基苯乙烯因明显优于聚苯乙烯的弹性、透明性、耐热性、阻燃性和熔融流动性等特点^[1]被广泛应用于生产工程塑料、聚酯纤维和阻燃型特种树脂。重整C₉芳烃中甲乙苯的质量分数占到25%~30%^[2],但大部分用作燃料,造成资源的大量浪费。如果运用分离技术

能实现对甲乙苯的分离提纯,不仅能够提高资源利用率,而且能有利于p-MEB的进一步加工利用。

模拟移动床(simulated moving bed, SMB)吸附分离技术不仅具有固定床处理量大、操作简单的优点,也兼备移动床连续操作的特点^[3-5],相比于传统吸附分离技术更加经济优越^[6-8],在生物医药、石油化工和精细化工的分离领域均有广泛应用^[9-10],国内也有专家学者以分子筛为吸附剂,使用模拟移动床进行石脑油的优化利用^[11-12]。甲乙苯在结构上与二甲苯相似,可借鉴二甲苯的吸附分离技术以分离提纯p-MEB。目前美国UOP公司的Parex工艺

收稿日期:2019-07-03;修回日期:2020-03-02

基金项目:石油化工联合基金重点项目(U1862204)

作者简介:叶磊(1994-),男,硕士生;刘纪昌(1981-),男,博士,教授,研究方向为分子筛及MOFs等多孔材料的合成与吸附分离,通讯联系人, liujc@ecust.edu.cn。

是世界上吸附分离二甲苯的主流工艺^[13-14]。Parex 工艺以八面沸石型分子筛为吸附剂,对二乙苯或甲苯为脱附剂,模拟移动床为分离设备,通过旋转阀周期性转动控制各股物料的进出口位置,从而实现连续分离。但采用模拟移动床吸附分离混合甲乙苯体系的研究尚未见文献报道。

本文中采用液相模拟移动床吸附分离技术分离混合甲乙苯中的对甲乙苯。通过离子交换制得高性能的分子筛吸附剂,开展液相模拟移动床吸附分离实验,获得 p-MEB 分离的优化工艺条件。

1 实验

1.1 原料

原料为中石化某炼厂以混合甲乙苯为主要成分的 C₉ 芳烃,组成如表 1 所示。

表 1 混合甲乙苯原料的组成(质量分数) %

间甲乙苯	对甲乙苯	邻甲乙苯	正丙苯	三甲苯
35.17	20.78	15.26	8.46	20.33

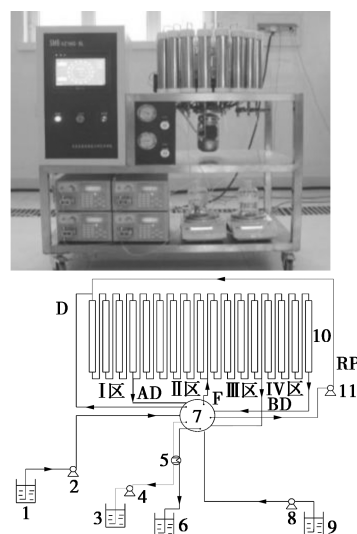
吸附剂是来自中国石化催化剂有限公司、粒径为 0.425 mm 的球形 X 型分子筛。利用离子交换法^[15]对该分子筛进行改性,提高吸附剂对 p-MEB 的吸附容量。改性条件为:采用浓度为 0.5 mol/L 的 K⁺,在 80℃ 下交换 4 h。改性分子筛的具体参数如表 2 所示。脱附剂为质量分数 99.62% 的甲苯。

表 2 改性 X 型分子筛物理性质

性质	颗粒	n(SiO ₂): n(Al ₂ O ₃)	压碎	堆积密度/ (g·cm ⁻³)	对甲乙苯饱和 吸附容量/ (mg·g ⁻¹)
	直径/ mm		强度/ N		
数据	0.425	2.31	53	0.73	40.69

1.2 模拟移动床液相吸附分离装置

吸附分离操作在华东理工大学模拟移动床吸附分离装置上进行,装置照片和流程如图 1 所示。装置主要由 16 根吸附柱(Φ33 mm×300 mm)和 1 个旋转阀组成。原料和吸附剂入口、脱附产物和吸附产物出口由旋转阀调节。16 根吸附柱分为脱附区(I 区)、第一精馏区(II 区)、吸附区(III 区)和第二精馏区(IV 区)^[16-18]。装置的分离柱和管道温度采用 PID 控制,旋转阀由三相异步电机控制。装置模拟流动相和固定相的相对逆向流动是通过旋转阀周期性转动改变物料进出口位置实现的,最终实现组分间的连续分离。



1—原料储罐;2—原料泵;3—脱附油储罐;4—脱附油出料泵;
5—冷凝器;6—吸余油储罐;7—旋转阀;8—脱附剂进料泵;
9—脱附剂储罐;10—吸附柱;11—循环泵;D—脱附剂;
E—脱附产物;F—原料;R—吸余产物;RP—循环液;
AD—脱附产物压力阀;BD—吸余产物压力阀;I 区—脱附区;
II 区—第一精馏区;III 区—吸附区;IV 区—第二精馏区

图 1 模拟移动床吸附分离装置照片和工艺流程

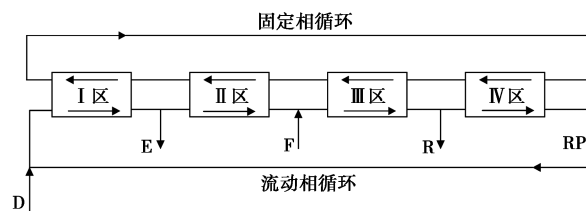
1.3 实验流程

原料从 III 区入口进入,经过 III 区的吸附分离,强吸附组分 A 随固定相逐渐进入脱附区,弱吸附组分 B 在内部液相流动的带动下往吸余产物出口方向移动。脱附剂从 I 区入口进入,将强吸附组分 A 不断解吸,得到高纯度的组分 A,最后脱附剂和组分 A 一起从 I 区出口流出。

2 液相模拟移动床吸附分离对甲乙苯工艺研究

2.1 区域分布对液相模拟移动床吸附分离效果的影响

模拟移动床共有 4 个区域,2 个进料口和 2 个出料口,结构示意图如图 2 所示。模拟移动床的区



D—脱附剂;E—脱附产物;F—原料;R—吸余产物;
RP—循环液;I 区—脱附区;II 区—第一精馏区;
III 区—吸附区;IV 区—第二精馏区

图 2 模拟移动床结构示意图

域分布指吸附分离柱数目的分配,包括脱附区(I区)、第一精馏区(II区)、吸附区(III区)和第二精馏区(IV区)。本实验中模拟移动床共有16根吸附分离柱,每根吸附柱填充180g粒径40~100目改性X型分子筛。

实验过程中对分离效果影响最大的是每股进料、出料和产品的比例。其中,循环比=循环液流量/原料流量,脱附剂比=脱附剂甲苯流量/原料流量,分配比=脱附产物流量/吸余产物流量。在循环比3.5、脱附剂比7.0、分配比0.9、操作温度75℃、压力0.25 MPa、切换时间800s的条件下,考察2种区域分布模式下模拟移动床吸附分离p-MEB效果的影响,实验结果如表3所示。

表3 2种区域分布模式脱附产物和吸余产物中对甲乙苯质量分数/%

区域分布	脱附产物	吸余产物
5-4-6-1	85.27	6.53
6-3-4-3	89.03	2.46

由表3可看出,区域分布为6-3-4-3模式相比于区域分布为5-4-6-1模式,脱附产物中p-MEB的含量更高,达到89.03%,吸余产物中p-MEB的含量更低,为2.46%,即p-MEB的分离效果更好。在区域分布6-3-4-3模式下,脱附区和第二精馏区的分离柱均较多。

模拟移动床吸附分离过程当以甲苯为脱附剂时,脱附是其控制步骤。脱附区柱数增加使得被吸附的p-MEB脱附更完全,模拟移动床吸附-脱附为连续工艺,吸附剂再次吸附的吸附容量随着脱附过程的深入而增大。第二精馏区柱数增加,缓冲能力随之增强,进入脱附区弱吸附组分的量减少,使分离效果变好。

2.2 切换时间对液相模拟移动床吸附分离效果的影响

模拟移动床区域分布采用6-3-4-3模式,在操作温度75℃、压力0.25 MPa、循环比3.5、脱附剂比7.0、分配比0.9的条件下,考察了切换时间对模拟移动床吸附分离p-MEB分离效果的影响。切换时间在700~900s范围内,脱附产物和吸余产物中p-MEB的含量如图3所示。

由图3可看出,脱附产物中的p-MEB含量随着切换时间的增加而不断增加,吸余产物中的p-MEB含量逐渐减少,分离效果增强。切换时间从700s

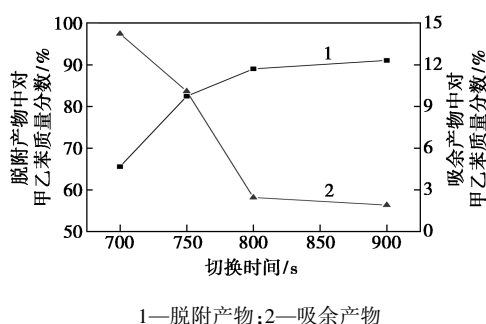


图3 不同切换时间下脱附产物和吸余产物中对甲乙苯质量分数

增至900s时,脱附产物p-MEB质量分数从65.60%增至91.06%,吸余产物中p-MEB质量分数从14.23%降至1.92%。

切换时间影响模拟移动床各区内部液相流速及旋转阀的旋转速度,进而影响强弱吸附组分的吸附分离。模拟移动床各区的内部液相流速和切换时间有直接的关系,可用式(1)表示:

$$L_i^* = L_i - (V \times \varepsilon) / t_s \quad (1)$$

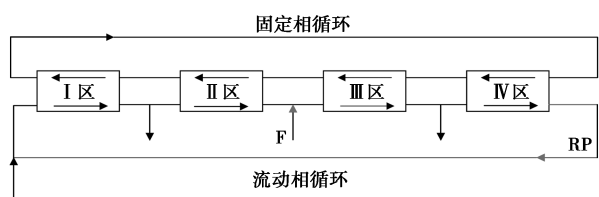
式中, L_i^* 为各区的内部液相流速; L_i 为各区的液相流速; V 为分离单柱体积; ε 为孔隙率; t_s 为切换时间。

由式(1)可知,随着切换时间的增加,模拟移动床各区的内部液相流速随之增大。第一精馏区和吸附区内部液相流速增加,不仅有利于p-MEB置换弱吸附组分,也有利于弱吸附组分及时采出,避免影响到脱附区p-MEB的含量。脱附区内部液相流速增加,被吸附的p-MEB能够解吸更完全,有利于吸附剂在下一周期的吸附。综合各种因素考虑,模拟移动床分吸附分离p-MEB适宜的切换时间为900s。

2.3 循环比对液相模拟移动床吸附分离效果的影响

在模拟移动床的吸附分离工艺中,虽然进料与出料都未流经第二精馏区,但可通过循环泵从吸附区和第二精馏区之间抽出一定量液体进入第二精馏区以维持内部的液相循环及隔开吸附区和脱附区。循环比为循环量与原料流量之比(即循环比=RP/F),通过改变模拟移动床的各区内部液相流速,进而影响到分离效果。图4为模拟移动床工艺流程原料和循环液进料位置示意图。

模拟移动床区域分布采用6-3-4-3模式,在操作温度75℃、压力0.25 MPa、切换时间900s、脱附剂比7.0、分配比1.1条件下,考察了不同循环比对



F—原料; RP—循环液; I区—脱附区; II区—第一精馏区;
III区—吸附区; IV区—第二精馏区

图 4 模拟移动床工艺流程原料和循环液进料位置示意图

模拟移动床吸附分离 p-MEB 效果的影响。循环比在 1.5~4.5 范围内,脱附产物和吸余产物中 p-MEB 质量分数如图 5 所示。

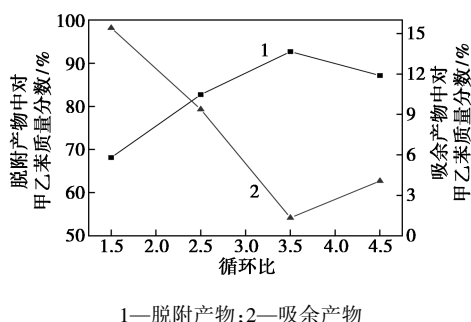


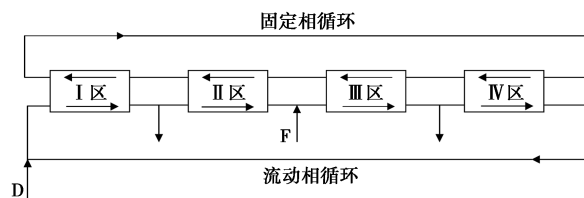
图 5 不同循环比下脱附产物和吸余产物中对甲苯质量分数

由图 5 可知,在循环比为 1.5~3.5 的范围内,脱附产物中的 p-MEB 质量分数随着循环比的增加而增加,吸余产物中的 p-MEB 质量分数降低,分离效果增强。当循环比为 3.5 时,脱附产物中的 p-MEB 质量分数达到 92.70%,吸余产物中的 p-MEB 质量分数降低至 1.33%。但脱附产物中 p-MEB 质量分数当循环比进一步增加至 4.5 时明显下降,吸余产物中的 p-MEB 质量分数明显上升,分离效果下降。

模拟移动床各区内部液相流速随着循环比增加而增加。在第一精馏区中,内部液相流量增加有利于 p-MEB 对弱吸附组分的置换,促进脱附产物中 p-MEB 质量分数不断提高,分离效果不断改善;但当循环比增加到一定值后,吸附区中 p-MEB 被明显稀释,传质推动力降低,部分 p-MEB 在吸附区来不及被吸附,而从吸余出口流出,导致吸余产物中 p-MEB 质量分数上升。同时循环比增加也降低了第二精馏区隔开吸附区和脱附区的能力,致使部分弱吸附组分随循环液与新鲜脱附剂一起进入脱附区,导致脱附产品被污染,脱附产物中 p-MEB 质量分数随之降低。因此,模拟移动床吸附分离 p-MEB 适宜的循环比为 3.5。

2.4 脱附剂比对液相模拟移动床吸附分离效果的影响

脱附剂比为脱附剂与原料的流量之比(即脱附剂比 = D/F),图 6 为模拟移动床工艺流程中脱附剂和原料进料位置示意图。



D—脱附剂; F—原料; I区—脱附区; II区—第一精馏区;
III区—吸附区; IV区—第二精馏区

图 6 模拟移动床工艺流程脱附剂和原料进料位置示意图

模拟移动床区域分布采用 6-3-4-3 模式,在操作温度 75℃、压力 0.25 MPa、切换时间 900 s、循环比 3.5、分配比 1.1 的条件下,考察了不同脱附剂比对模拟移动床吸附分离 p-MEB 分离效果的影响。脱附剂比在 4.0~9.3 范围内,脱附产物和吸余产物中 p-MEB 质量分数如图 7 所示。

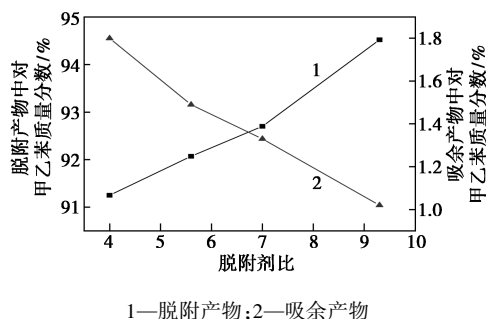


图 7 不同脱附剂比下脱附产物和吸余产物中对甲苯质量分数

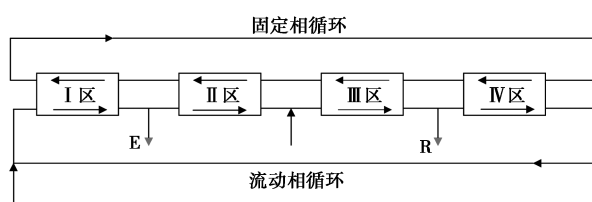
由图 7 可知,在考察的脱附剂比范围内,脱附产物中 p-MEB 质量分数均达 91% 以上,吸余产物中 p-MEB 质量分数均降至 2% 以下,实现了较好分离。随着脱附剂比增加,分离效果变好。当脱附剂比为 9.3 时,脱附产物中 p-MEB 质量分数增至 94.52%,吸余产物中 p-MEB 质量分数降至 1.02%,p-MEB 回收率达到 90.86%。

对于吸余产物,脱附剂比增加,吸附区的原料处理负荷下降,原料中的 p-MEB 能被吸附得更彻底,使吸余产物中 p-MEB 质量分数下降。对于脱附产物,脱附剂比减少,吸附剂处理负荷增加,第一精馏区需要被 p-MEB 置换的弱吸附组分的量增多,在

相同的切换时间内有更多的弱吸附组分进入脱附区污染脱附产物,致使脱附产物中 p-MEB 质量分数下降。此外,脱附区脱附 p-MEB 的效果随着脱附剂的增加而增强使得脱附后的吸附剂再次吸附时吸附容量提高。因此脱附剂比选为 9.3 较为适宜。

2.5 分配比对液相模拟移动床吸附分离效果的影响

p-MEB 的分离效果与脱附产物和吸余产物的采出量分配即分配比(分配比 = E/R) 紧密联系。图 8 为模拟移动床吸附分离工艺流程中脱附产物和吸余产物出料位置示意图。

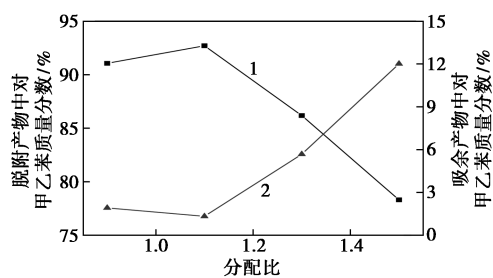


E—脱附产物;R—吸余产物;I 区—脱附区;

II 区—第一精馏区;III 区—吸附区;IV 区—第二精馏区

图 8 模拟移动床脱附产物和吸余产物出料位置

模拟移动床区域分布采用 6-3-4-3 模式,在操作温度 75℃、压力 0.25 MPa、切换时间 900 s、循环比 3.5、脱附剂比 7.0 的条件下,考察了不同分配比对模拟移动床吸附分离 p-MEB 效果的影响。分配比在 0.9~1.5 范围内,脱附产物和吸余产物中 p-MEB 质量分数如图 9 所示。



1—脱附产物;2—吸余产物

图 9 不同分配比下脱附产物和吸余产物中对甲乙苯质量分数

由图 9 可看出,脱附产物中 p-MEB 质量分数随着分配比的增大呈现先增大后减小的变化趋势。当分配比为 1.5 时,由于部分本应在吸余产物出口采出的低 p-MEB 质量分数的物料被过多地从脱附产物出口采出,导致脱附产物中 p-MEB 质量分数低于 80%。当分配比减小至 1.1 时,脱附产物中的 p-MEB 质量分数增加到 92.70%,吸附产物中的 p-

MEB 质量分数下降至 1.33%,分离效果增强。随着分配比的进一步减少,脱附产物中 p-MEB 质量分数下降至 91.06%,吸余产物中的 p-MEB 质量分数增加至 1.92%,分离效果变差。

在相同的切换时间内,能否及时将弱吸附组分从吸余出口流出取决于吸附区的内部液相流速。分配比的减少,不仅导致吸余出料量增大,吸附区的内部液相流速增加,弱吸附组分能及时从吸余出口流出,同时也导致第一精馏区内液相流速增大,有更多的弱吸附组分被置换,分离效果变好。但如果分配比过小,吸余产物出料量过大,在液相循环的带动下部分 p-MEB 从吸余出口流出,导致吸附产物中的 p-MEB 质量分数增加。综合考虑,模拟移动床吸附分离 p-MEB 适宜的分配比为 1.1。

3 结论

以 X 型分子筛为吸附剂,采用液相模拟移动床吸附工艺可以分离混合甲乙苯中的 p-MEB 与 o-MEB、m-MEB。操作温度为 75℃、操作压力为 0.25 MPa 的条件下,在液相模拟移动床吸附分离装置上考察了操作条件对 p-MEB 吸附分离过程的影响规律,p-MEB 的分离效果随着切换时间和脱附剂比的增加而增强,又随着分配比和循环比的增大而先增强后减弱。

优化的 p-MEB 吸附分离工艺条件为:模拟移动床区域分布采用 6-3-4-3 模式,切换时间 900 s,分配比 1.1,循环比 3.5,脱附剂比 9.3。对于 p-MEB 质量分数为 20.78% 的 C₉ 芳烃,优化分离工艺条件下得到的 p-MEB 质量分数为 94.52%,回收率达到 90.86%。

参考文献

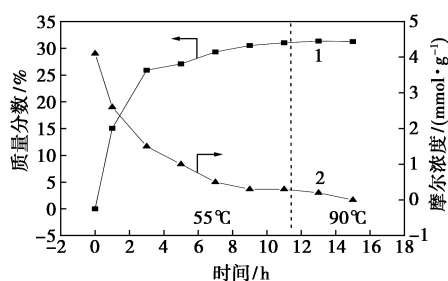
- [1] 林军,顾正桂.重整 C₉ 芳烃中甲乙苯的分离及利用[J].化工时刊,2001,52(1):25-26.
- [2] 米多.连续重整 C₉ 重芳烃的综合利用技术[J].石油化技术,2010,26(6):46-50.
- [3] 王德华,王辉国.模拟移动床技术进展[J].化工进展,2004,23(6):609-614.
- [4] 王晟,马正飞,姚虎卿.烷烃中少量芳烃的固定床和模拟移动床吸附[J].南京工业大学学报,2003,25(2):18-22.
- [5] 陈宏刚.模拟移动床技术原理设计和过程应用[J].国外科技新书评介,2016,11(2):13-14.
- [6] Nguyenvanduc L, Juweon L, Thaihoang L, et al. Solvent-gradient SMB to separate o-xylene and p-xylene [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2011, 28: 1110-1119.

(下转第 207 页)

的反应器中反应液中残留铁离子浓度为 13.8 mg/L, 表面处理后的反应器中反应液中的铁离子测不出, 这也印证了 2.2 中的结果。

2.4 工艺优化后 ϵ -己内酯中试收率

中试反应第一步和第二步反应催化剂为固体酸, 反应条件均为 55℃、-55 kPa, 后期为了保证安全, 必须分解掉残留过氧化物, 温度升高到 90℃, 结果如图 8 所示。反应进行到 9~11 h 时, ϵ -己内酯收率达到 30% 左右, 收率不会有明显上升, 但是少量过氧化物浓度也保持稳定, 升温到 90℃ 后, 过氧化物浓度迅速下降至完全消失, 同时 ϵ -己内酯收率没有明显上升, 说明此时主要是少量过氧化物的自分解。



1— ϵ -己内酯收率; 2—总过氧化物摩尔浓度

图 8 处理后反应器对 ϵ -己内酯收率的影响

3 结论

通过对反应体系中不同催化剂、不同浓度铁离子和不同表面处理工艺的对照研究, 有以下发现。

(1) 硫酸对于第二步反应收率较差。相对硫酸, 固体酸在最终收率上相当, 但是更容易分离, 有利于 ϵ -己内酯的制备。

(2) 通过研究铁离子对反应的影响, 印证了热冲压反应器表面锈蚀造成了过氧化物的不断分解,

无法进行 ϵ -己内酯合成, 表面处理后的反应器则完全消除了铁离子的影响。

(3) 在中试过程中, 反应收率基本符合预期, 在后段 90℃ 反应中, 过氧化物发生了自分解反应, 不能提高 ϵ -己内酯的收率, 但是保证了精馏系统的安全。

综上所述, 过氧化氢间接氧化环己酮制备己内酯中试中, 使用固体酸催化剂, 通过反应器表面处理等手段可以达到反应预期, 为 ϵ -己内酯的工业化装置提供了基础。中试为了安全, 降低了过氧化物和环己酮的比例, 牺牲了收率。未来应该继续研究安全地提高过氧化物含量, 确保收率, 并在反应后期高效去除剩余过氧化物的工艺。

参考文献

- [1] Pralus M, Lecoq J C, Schirmann J P. Process for the preparation of epsilon-caprolactone; US, 4994583 [P]. 1991-02-19.
- [2] Lecoq J C, Pralus M, Schirmann J P. Process for the preparation of ϵ -caprolactone; US, 4740603 [P]. 1988-04-26.
- [3] 黎树根, 李长存. ϵ -己内酯产业现状及其应用 [J]. 合成纤维工业, 2013, 36(1): 46-49.
- [4] 丁榕, 张光旭, 石楷华, 等. 催化氧化合成过氧乙酸的本征动力学 [J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2019, 53(2): 229-236.
- [5] Zhang G X, Ren X C, Zhang H B, et al. MgO/SnO₂/WO₃ as catalysts for synthesis of ϵ -caprolactone over oxidation of cyclohexanone with peracetic acid [J]. Catalysis Communications, 2015, 58: 59-63.
- [6] 李莹, 邓军, 李胜楠, 等. W/Sn/Mg 复合氧化物催化合成过氧乙酸的工艺研究 [J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2017, 51(1): 56-61.
- [7] 马洪宇, 封禄田, 张晓青, 等. 高浓度过氧乙酸的制备 [J]. 辽宁化工, 2017, (1): 30-30.
- [8] 孙峰, 谢传欣, 张帆, 等. 过氧丙酸的制备及热危害研究 [J]. 现代化工, 2010, 30(S2): 186-189.
- [9] 郑健美, 张艳, 张琳. 不同浓度金属离子对过氧乙酸分解速度的影响 [J]. 化学工程与装备, 2008, (11): 26-30. ■
- [10] Nam H G, Han M G, Sung C Y, et al. Optimization of productivity in a four-zone simulated moving bed process for separation of succinic acid and lactic acid [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 171: 92-103.
- [11] Lee H H, Kim K M, Lee C H. Improved performance of simulated moving bed process using column-modified feed [J]. Aiche Journal, 2011, 57: 2036-2053.
- [12] Miglioni C, Mazzotti M, Zenoni G, et al. Shortcut experimental method for designing chiral SMB separation [J]. Aiche Journal, 2000, 48: 69-77.
- [13] Imamoglu S. Simulated moving bed chromatography (SMB) for application in bioseparation [M]. Springer Berlin Heidelberg: Modern Advances in Chromatography, 2002: 211-231.
- [14] 沈本贤, 刘纪昌, 陈晖, 等. 石脑油的优化利用方法; CN, 1710030 [P]. 2005-12-21.
- [15] 曹君, 沈本贤, 刘纪昌. 石脑油中正构烷烃在 5A 分子筛上的液相吸附动力学特性 [J]. 石油炼制与化工, 2012, 43(3): 42-46.
- [16] 许杰, 朱玉明. 烃类分离技术 [J]. 精细石油化工进展, 2005, 6(1): 33-38.
- [17] 希华. 芳烃增产技术及开发与应用进展 [J]. 石油知识, 2010, 5(3): 25-27.
- [18] 王春蓉. 沸石分子筛的离子交换方法及应用研究 [J]. 矿冶, 2011, 20(2): 52-54.
- [19] 林炳昌. 模拟移动床色谱技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [20] 李凌, 井元伟, 袁德成. 模拟移动床吸附分离技术及应用 [J]. 计算机与应用化学, 2007, 24(4): 440-444.
- [21] 马淑芳, 杨春育, 佟泽民, 等. 模拟移动床吸附分离技术 [J]. 北京石油化工学院学报, 2003, 11(1): 34-38. ■

(上接第 203 页)