

# 隔壁塔技术进展

孙兰义, 李 军, 李青松

(中国石油大学化学化工学院, 山东 青岛 266555)

**摘要:**在简要介绍隔壁塔结构特点、节能原理、形式以及适用范围的基础上,着重阐述了隔壁塔的工业应用状况,并分析了国内外反应精馏隔壁塔、萃取精馏隔壁塔及共沸精馏隔壁塔研究的若干最新进展。

**关键词:**隔壁塔;精馏;节能;应用;进展

中图分类号:TQ028.3

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2008)09-0038-04

## Progress in technology of dividing wall column

SUN Lan-yi, LI Jun, LI Qing-song

(School of Chemistry & Chemical Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China)

**Abstract:** On the basis of the structure, principle of energy saving, types and application fields of dividing wall column (DWC) introduced, its application in industries is reviewed especially. And, the new advances in DWCs used in reactive distillation, extractive distillation and azeotropic distillation are analyzed.

**Key words:** dividing wall column; distillation; energy saving; application; progress

精馏是当代化工生产中最成熟、应用最广泛的分离技术之一。但精馏过程的能耗巨大,据估计,化工过程中 40%~70% 的能耗用于分离,而精馏能耗又占其中的 95%。近年来,能源价格的持续上涨使得精馏过程节能技术的研究具有极其重要的意义。

目前,精馏过程节能技术的研究主要可以分为以下 2 类:①精馏自身的改进,如热耦合精馏塔序列、隔壁塔等;②精馏与其他过程的耦合,如反应精馏、精馏-膜分离耦合等。其中,隔壁塔作为节能技术研究的一个热点,正在工业装置上得到迅速应用。它既可以较大幅度提高热力学效率,降低能耗,又减少设备投资<sup>[1-3]</sup>,但国内在此方面尚无工业实施案例。本文主要介绍隔壁塔技术概况、工业应用现状以及相关研究的最新进展。

## 1 隔壁塔技术

### 1.1 隔壁塔的结构特点

对于传统的三元混合物分离,若采用简单塔分离序列,至少需要 2 个精馏塔才能使其得到有效分离。而图 1 所示的隔壁塔,利用隔壁将普通精馏塔从中间分割为 2 部分,隔壁巧妙的使用实现了两塔的功能及三元混合物的分离。在隔壁塔中,进料侧为预分离段,另一端为主塔,混合物 A、B、C 在预分离段经初步分离后为 A、B 和 B、C 两组混合物,A、B

和 B、C 两股物流进入主塔后,塔上部将 A、B 分离,塔下部将 B、C 分离,在塔顶得到产物 A,塔底得到产物 C,中间组分 B 在主塔中部采出。同时,主塔中又引出液相物流和气相物流分别返回进料侧顶部和底部,为预分离段提供液相回流和初始气相。这样,只需 1 座精馏塔就可得到 3 个纯组分,同时还可节省 1 个蒸馏塔及其附属设备,如再沸器、冷凝器、塔顶回流泵及管道,而且占地面积也相应减少。一般来说,与传统的两简单塔分离序列相比,隔壁塔的能耗及设备投资均可降低 30% 左右<sup>[4-5]</sup>。

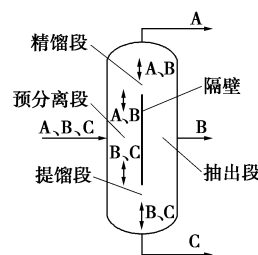


图 1 隔壁塔

### 1.2 隔壁塔的节能原理

隔壁塔在分离原理和计算方法上与热耦合精馏塔相同,在热力学上等同于一个 Petlyuk 塔<sup>[6]</sup>(图 2)。与传统两塔流程相比,隔壁塔节能的主要原因有 2 点<sup>[1,4,7]</sup>:

收稿日期:2008-06-20

基金项目:教育部博士点基金新教师项目资助课题(20070425530)

作者简介:孙兰义(1972-),男,博士,副教授,从事传质和分离工程研究,lanyi\_sun@hotmail.com。

(1)避免了中间组分的返混效应。在常规两塔分离序列中,塔1提馏段内随着轻组分A浓度的降低,中间组分B的浓度逐渐增加(图3),但在靠近塔釜处,由于重组分C浓度增加,中间B组分浓度在达到最大值后逐渐减小,即组分B在该塔中发生返混,这也是该塔分离效率较低的重要原因。与之相反,如图4所示,在隔壁塔中,经预分离段分离后的A、B和B、C两组混合物进入主塔后做进一步分离,其中,中间B组分在塔中浓度达到最大时采出,这就有效避免了两塔流程中的返混现象。

(2)减小进料与进料板上物流组成不同引起的混合问题。在预分离段顶部和底部B组分的组成完全和主塔这2股物料进料板上的组成相匹配,符合最佳进料板的要求。

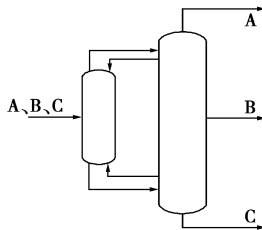


图2 Petlyuk 蒸馏塔

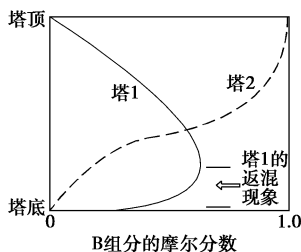


图3 传统的简单塔分离序列中B组分浓度分布

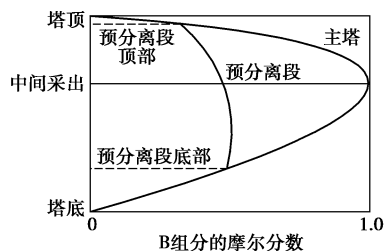


图4 隔壁塔中B组分浓度分布

### 1.3 隔壁的形式

在隔壁塔中,隔壁的设计尤为重要,隔壁长度、放置位置等都会影响分离效果,目前,国外对隔壁的研究已经取得了相当的成就,已从最初将隔壁焊在塔上发展到可移动的隔壁。其中,德国 Montz 公司<sup>[8]</sup>开发的“非固定”隔壁就是隔壁塔技术上的一项

巨大进步,“非固定”隔壁由金属板相互拼接而成,质量轻,不需要与塔壁焊接,对于塔壳的偏心率要求不高,安装方便快捷,特别方便旧塔改造。而且,“非固定”隔壁的灵活性使得非常规构型隔壁塔的工业实施变得比较容易。

另外,在隔壁的设计上,近年来已经有利用1个隔壁或2~3个隔壁的组合进行4种纯组分的分离工业实施案例(如图5)。

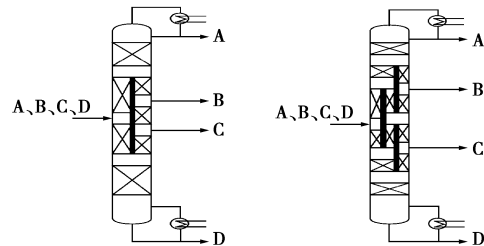


图5 用隔壁塔分离4种纯组分示意图

### 1.4 隔壁塔的适用范围

理论上,对于三组分以上混合物的分离,都可考虑使用隔壁塔。但隔壁塔并非适用所有的精馏分离问题,对分离纯度、进料组成、相对挥发度及塔的操作压力都有一定的要求<sup>[9]</sup>:

(1)产品纯度。由于隔壁塔所采出的中间产品纯度比单个精馏塔侧线出料达到的纯度要大,因此,当希望得到高纯度的中间产品时,可考虑使用隔壁塔。如果对中间产品纯度要求不高,则可以直接使用一般精馏塔侧线采出即可。

(2)进料组成。若中间组分质量分数超过20%、而轻重组分含量又相当的物系,特别是当进料中的中间组分质量分数达到66.7%左右时,是采用隔壁塔比较理想的物系。

(3)相对挥发度。当中间组分为进料中的主要组分,而轻组分和中间组分的相对挥发度与中间组分和重组分的相对挥发度大小相当时,采用隔壁塔时节能优势更为明显。

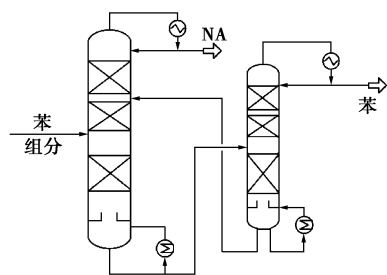
(4)塔的操作压力。由于采用隔壁塔分离三组分混合物是在同一塔设备内完成,故整个分离过程的压力不能改变。

## 2 隔壁塔的工业应用现状

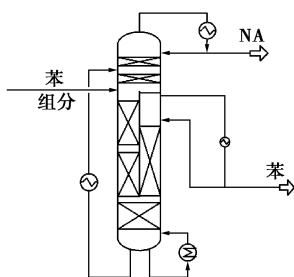
早在1933年,因裂解气分离问题,Eric W Luster就提出了隔壁塔概念,并申请了美国专利<sup>[10]</sup>,但由于其工艺计算及控制的复杂性,直到1985年,第一座用于回收精细化学品的隔壁塔才投入工业运转。目前,大部分运营的隔壁塔为BASF公司拥有,并由

德国 Montz 公司提供塔内件<sup>[11]</sup>, 如南非萨索尔 (Sasol) 公司用于回收合成汽油混合物中 1-己烯的隔壁塔即采用了 BASF 公司的技术, 该塔也是目前世界上最高的一座隔壁塔, 其高达 107 m, 直径 5 m。

近年来, 由于能源价格的持续上涨, 瑞士 Sulzer 公司, 美国 Koch - Glitsch、Kellogg、UOP 公司, 德国 Linde、Uhde 公司, 日本 Sumitomo 公司等企业巨头纷纷开始隔壁塔技术的开发与应用, 隔壁塔工业化塔器也由 2000 年时全世界不足 20 座发展到 2006 年 9 月时的近 100 座, 生产实践表明隔壁塔的应用已经产生极大的经济效益。如埃克森美孚公司位于英国南安普敦的 Fawley 炼油厂, 当采用隔壁塔技术对二甲苯回收塔进行改造后, 其能耗降低 53%, 并且二甲苯的纯度还有所提高, 经济效益非常显著。随后, 埃克森美孚公司对其位于法国的 Port Jerome 炼油厂的二甲苯回收塔也采用隔壁塔技术进行改造, 其在鹿特丹石化厂新建的苯-甲苯-二甲苯分离塔便直接采用隔壁塔技术<sup>[12]</sup>。西班牙 CEPSA 公司 Algeciras 炼油厂有 2 座用以分离烷烃和异构烷烃的精馏塔。为增产异己烷, Koch-Glitsch 公司采用隔壁塔技术对其中的一座塔进行改造并获得成功, 得到了合格的异己烷溶剂, 与传统流程相比, 节能达 40%<sup>[3]</sup>。德国 Uhde 公司采用萃取精馏与隔壁塔相结合的技术, 用于从重整生成油中回收苯, 并于 2004 年 10 月在德国 Gelsenkirchen 地区 ARAL 芳烃股份有限公司的甲苯回收装置上首次实现工业应用<sup>[2]</sup>, 如图 6 所示,



(a) 甲苯回收装置传统工艺流程



(b) 甲苯回收装置隔壁塔工艺流程

图 6 德国 Uhde 公司甲苯回收装置工艺流程

该工艺将萃取精馏塔和汽提塔合并, 精馏、汽提和溶剂回收均在一座隔壁塔中进行, 相比较于传统工艺, 新工艺节省 20% 能耗, 投资费用节省 20% ~ 25%, 并且装置的占地面积也大大减少。

此外, 值得一提的是, 美国 UOP 公司开发了一种有别于传统隔壁塔的隔壳塔<sup>[13]</sup> (split shell column, SSC), 如图 7 所示, SSC 的隔壁与塔的下端或上端相连, 而其连接的位置与塔顶、塔底产品要求及进料组成有关。与传统的两塔序列相比, SSC 的能耗没有减少, 但设备投资大大减少。目前, UOP 公司已将 SSC 应用于 HyCycle 工艺过程, 用于分离反应副产物。

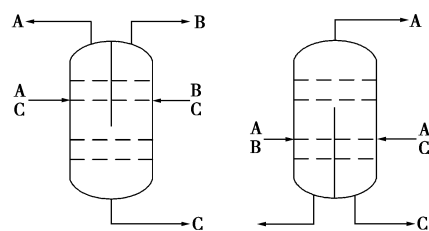


图 7 UOP 公司的隔壳塔

### 3 隔壁塔技术研究的新进展

隔壁塔技术在多元物系分离中的成功运用, 证明了其在降低能耗、减少设备投资方面的巨大潜力。近年来, 研究者们已着眼于将隔壁塔技术应用于特殊精馏体系, 如反应精馏、萃取精馏、共沸精馏等新领域, 以期最大限度降低能耗。

#### 3.1 反应精馏隔壁塔

反应精馏是精馏领域重要的过程耦合方式, 该过程中反应与分离相互促进, 可大幅度提高反应转化率和生产能力。Mueller 等<sup>[14]</sup> 首先提出了将反应精馏应用于隔壁塔的概念, 即结合反应精馏与隔壁塔优势的“反应精馏隔壁塔”技术, 该技术是一种反应与分离同时进行、高度强化的复杂技术, 在进一步提高反应选择性和转化率的同时, 可以大幅度降低能耗、减少设备投资。

Daniel 等<sup>[15]</sup> 针对反应精馏隔壁塔提出了简捷设计的方法, Sander 等<sup>[16]</sup> 以醋酸甲酯体系为例, 研究了反应精馏隔壁塔性能, 并做了相关试验, 其研究结果表明了反应精馏隔壁塔方案的可行性。2007 年, Mueller 等<sup>[17]</sup> 通过对 3 种具有不同集成度的碳酸二乙酯合成过程的研究, 证明了具有高集成度的反应精馏隔壁塔的能耗与操作费用最低。Fabricio 等<sup>[18]</sup> 以乙醇和乙酸反应生成乙酸甲酯为例, 研究了 3 种热耦合反应精馏塔的性能, 研究结果表明在乙酸

甲酯收率要求相同的条件下,反应精馏隔壁塔的能耗最低。同时,简单的PI控制器就可以很好地控制反应精馏隔壁塔分相器有机相中乙酸甲酯的浓度。

在反映精馏隔壁塔过程模拟方面,Mueller等<sup>[19]</sup>提出基于速率模型研究反应精馏隔壁塔的思路,并完成了碳酸二甲酯与乙醇酯交换生成碳酸二乙酯的反应与分离的过程模拟。Gheorghe等<sup>[20]</sup>提出了一套基于商业软件的反应精馏隔壁塔模拟计算方法,并以乙基叔戊基醚(TAEE)合成为例验证了商业模拟软件在反应精馏隔壁塔模拟方面的有效性。笔者所在课题组<sup>[21]</sup>提出了一种单塔催化水解乙酸甲酯的反应精馏隔壁塔工艺,即采用反应精馏隔壁塔(图8)替代常规反应精馏流程中的反应精馏塔及甲醇精馏塔,并应用 ASPEN PLUS 模拟软件,对反应精馏隔壁塔及常规反应精馏流程进行模拟,其研究结果显示反应精馏隔壁塔可以节省再沸器能耗 19.6%。

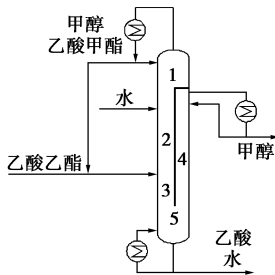


图8 用反应精馏隔壁塔技术水解乙酸甲酯新工艺流程

另外, Anton 等<sup>[22]</sup>还介绍运用已有精馏装置改造成反应精馏隔壁塔的实例,其研究结果表明,与传统的两塔流程相比,反应精馏隔壁塔工艺设备投资减少 35%,能耗降低 15%,而且,反应精馏隔壁塔的操作更加稳定。Hernandez 等将反应精馏隔壁塔用于乙醇与乙酸合成乙酸乙酯的过程,其研究结果表明,利用 2 个温度控制回路便可以控制反应精馏隔壁塔,而且该控制方案已成功应用于实验装置。

### 3.2 萃取精馏隔壁塔

萃取精馏是一种特殊的精馏方法,若将隔壁塔与萃取精馏技术耦合到一起,同样可以达到既降低能耗又减少设备投资的目的。叶青等<sup>[23]</sup>提出了采用隔壁塔替代常规萃取精馏流程的萃取精馏塔及溶剂回收塔的工艺,其研究结果表明,隔壁塔工艺比常规的两塔萃取精馏流程节能 25.2%。此外,国内的研究者们还陆续研究了采用该项技术制无水叔丁醇、分离丙烯-丙烷、分离醋酸水溶液等工艺流程<sup>[24-26]</sup>,发现与常规的分选工艺流程相比,隔壁塔

的能耗均可降低 20% 以上,节能效果显著。

### 3.3 共沸精馏隔壁塔

共沸精馏体系也可采用隔壁塔技术,李军等<sup>[27]</sup>提出一种单塔共沸精馏生产无水乙醇的新工艺流程,即采用隔壁塔替代常规共沸精馏流程中的脱水塔及提浓塔。其应用 ASPEN PLUS 模拟软件对新工艺流程及常规共沸精馏流程进行模拟,结果显示新工艺流程可以节省能耗 28.2%,并能降低设备投资费用。

## 4 结语

近年来,国外正在加快隔壁塔的工业化步伐,并取得了令人瞩目的成果。我国对隔壁塔的研究较少,更缺少实际工业化应用。加快此项技术的开发和工业化应用步伐,并且拥有独立的知识产权,对降低工业生产的能源消耗,减少 CO<sub>2</sub> 的排放,推动我国石油、化工行业的发展具有重要意义。

## 参考文献

- [1] Ennenbach F, Kolbe B, Ranke U. Divided wall columns: A novel distillation concept[J]. Process Technology Quarterly, 2000, 5(3): 97-103.
- [2] Bärbel K, Sascha W. Novel distillation concepts using one-shell columns[J]. Chemical Engineering & Process, 2004, 43(3): 339-346.
- [3] Spencer G, Plana Ruiz F J. Consider dividing wall distillation to separate solvents[J]. Hydrocarbon Processing, 2005, 84(7): 90-94.
- [4] Lestak F, Collins C. Advanced distillation saves energy and capital[J]. Chemical Engineering, 1997, 104(7): 72-76.
- [5] Michael A, Schultz M, Stewart D. Reduce costs with dividing wall columns[J]. Chemical Engineering Progress, 2002, 98(5): 64-71.
- [6] Suphanita B, Bischerth A, Narataruksa P. Energy loss analysis of heat transfer across the wall of the dividing-wall distillation column[J]. Energy, 2007, 32(4): 2121-2134.
- [7] Triantafyllou C, Smith R. The design and optimization of fully thermally coupled distillation columns[J]. Trans IChem E: Part A, 1992, 70(3): 118-132.
- [8] Kaibel B, Jansen H, Zich E, et al. Unfixed dividing wall technology for packed and tray distillation columns[C]//Distillation and Absorption, London: IChemE, 2006: 252-266.
- [9] Michael A S, Douglas G S, James M H, et al. Reduce costs with dividing-wall columns[J]. Chemical Engineering Progress, 2002, 98(5): 64-71.
- [10] Luster E W. Apparatus for Fractionating cracked products: US, 1915681 [P]. 1933-06-27.
- [11] Olujic Z, Kaibel B, Jansen H. Distillation column internals /configurations for process intensification[J]. Chemical Biochemical Engineering Quarterly, 2003, 17(4): 301-309.

(下转第 43 页)

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

线性低密度聚乙烯(LLDPE)粉料,SR646 滚塑级,韩国现代公司,熔融指数为 4.50 g/(10 min),密度 0.932 g/cm<sup>3</sup>,天津悦海化工有限公司; $\beta$ -碳化硅( $\beta$ -SiC),平均粒径 1~2  $\mu$ m,纯度 > 95%,密度 3.1~3.2 g/cm<sup>3</sup>,比表面积 2.5 m<sup>2</sup>/g,徐州宏武纳米材料有限公司;钛酸酯偶联剂(NDZ-105),南京曙光化工集团有限公司;二甲苯,天津博迪化工有限公司;无水乙醇。

### 1.2 $\beta$ -SiC 表面改性处理

将 SiC 粉末放置真空干燥箱内干燥 4 h,称取一定量的 SiC 粉末分散于无水乙醇中,浸泡 0.5 h。机械搅拌下用超声波处理 30 min;称取一定质量的酞酸酯偶联剂 NDZ-105 以 1:3 的质量比溶于异丙醇,并用超声分散 20 min,然后加入 SiC,磁力搅拌 30 min,再用超声分散 40 min,室温下静置 24 h,使得 NDZ-105 充分吸附到 SiC 表面,抽滤分离 4~5 次,再于 80℃ 真空干燥 24 h,再在 100℃ 干燥箱内 3 h,即得 NDZ-105 改性处理后的 SiC 样品。

### 1.3 SiC/LLDPE 导热复合材料的制备

将 LLDPE 粉体和经表面处理过的 SiC 按配方称

量,一起放入高速搅拌机中高速搅拌(采用多次短时搅拌防止局部温度过高,至充分混合均匀),进行粉末共混复合,采用模压成型法制备 SiC/LLDPE 复合材料(170℃、20 MPa),按标准哑铃型裁刀裁成标准力学试样。

### 1.4 性能表征与结构分析

采用日本电子公司生产的 JEM-6700F 型扫描电子显微镜对试样断口形貌进行分析;采用美国 Waters-TA 公司的 Q100 型 DSC 仪进行差示量热扫描;使用德国 Netzsch 公司生产的 TGA-Q50 型热失重仪对复合材料进行热分析;采用瑞士 AB 公司生产的 Hot-Disk 型热常数分析仪对材料的导热系数进行测试;拉伸强度测试按 GB/T 1040-1992 标准执行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 SiC 用量对 SiC/LLDPE 复合材料力学性能的影响

图 1 为 SiC 用量对复合材料相对拉伸强度的影响,并用 Nielsen 方程<sup>[7]</sup>进行理论值计算。随着 SiC 用量的增加,SiC/LLDPE 材料的拉伸强度迅速下降,实验值和理论值呈现的下降趋势是吻合的,相对而言,实验值对应的下降趋势相对平缓。理论值和

(上接第 41 页)

- [12] Bernie S, Berne S, Dave S. Dividing wall column revamp optimises mixed xylenes production. [EB/OL]. <http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/distillation06/CD-proceedings/paper%20updates/Slade.pdf>. 2006/2008.
- [13] Schultz M A, O'Brien D E, Hoehn R K, et al. Innovative flow schemes using dividing wall columns [C]//Marquardt W, Pantelides C. 16th proceedings of european symposium on computer aided process engineering and 9th international symposium on process systems engineering, Germany: Elsevier B V, 2006: 695-700.
- [14] Mueller I, Kloeker M, Kenig E Y. Modeling and optimization for energy saving and pollution reduction [C]//International 7th conference on process integration, Prague: Process Engineering Publisher, 2004: 1325-1326.
- [15] Daniel G, Patil P, Dragomir R, et al. Conceptual design of reactive dividing wall column [C]//Distillation & Absorption 2006, London: IChemE, 2006: 364-372.
- [16] Sander S, Flisch C, Geissler E, et al. Methyl acetate hydrolysis in a reactive divided wall column [C]//Distillation & Absorption 2006, London: IChemE, 2006: 353-363.
- [17] Mueller I, Pech C, Bhatia D, et al. Rate-based analysis of reactive distillation sequences with different degrees of integration [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(8): 7327-7335.
- [18] Fabricio O B, Salvador H, Babatunde O. Analysis of design and control of reactive thermally coupled distillation sequences [J]. Computer Aided Chemical Engineering, 2007, 24: 877-882.
- [19] Mueller I, Kenig E Y. Reactive distillation in a dividing wall column: Rate-based modeling and simulation [J]. Ind Eng Chem Res, 2007, 46(11): 3709-3719.
- [20] Gheorghe B, Alexandra E P, Valentin P. Reactive distillation process analysis in a divided wall column [J]. Computer Aided Chemical Engineering, 2007, 24: 443-448.
- [21] 孙兰义, 杨德连, 李军, 等. 用隔壁式反应精馏塔技术水解乙酸甲酯的模拟研究 [J]. 现代化工, 2008, 28(z1): 78-81.
- [22] Anton A K, Pragl H, van Strien C. Overcoming equilibrium limitations in reactive dividing-wall columns [J]. Computer Aided Chemical Engineering, 2007, 24: 467-472.
- [23] 叶青, 裘兆蓉. 具有能量集成的萃取精馏新工艺及模拟 [J]. 天然气化工, 2007, 32(3): 34-37.
- [24] 夏珊珊, 裘兆蓉, 叶青, 等. 隔壁精馏塔萃取精馏制无水叔丁醇研究 [J]. 化学工程, 2007, 35(11): 70-73.
- [25] 陈红梅, 叶青, 裘兆蓉. 隔壁萃取精馏塔分离丙烯-丙烷的模拟 [J]. 天然气化工, 2007, 32(5): 15-18.
- [26] 叶青, 裘兆蓉, 钟秦. 隔壁萃取精馏塔分离醋酸水溶液的模拟 [J]. 化学工程, 2007, 35(6): 4-7.
- [27] 李军, 孙兰义, 胡有元, 等. 用共沸精馏隔壁塔生产无水乙醇的研究 [J]. 现代化工, 2008, 28(z1): 93-95. ■