

“精馏过程强化”专题报道导读

精馏作为应用最为广泛的工业分离技术,对化工生产过程的经济和资源效率具有举足轻重的影响。目前,我国精馏技术发展很快,结合计算机等高新技术,发展了一系列精馏硬件、软件新技术,在精馏新设计方法和控制手段的应用、大型精馏设备技术、精馏操作新方法、新型高效填料和塔内件、精馏系统热集成及耦合等诸多技术领域实现了新的突破。在本刊承办的“2008 全国精馏技术交流与展示大会”上,众多专家对精馏过程的强化进行了交流和研讨,现从中精选 5 篇大会报告安排在本期同时刊出:化工分离过程强化的特点及发展方向;我国大型塔器技术进展与技术创新;萃取精馏技术在资源综合利用过程中的应用;隔壁塔技术进展;立体连续传质塔板及其在精馏中的应用,供业内人士参考。

专论与评述

化工分离过程强化的特点及发展方向

费维扬,罗淑娟,赵兴雷

(清华大学化学工程联合国家重点实验室,北京 100084)

摘要:介绍了化工分离过程的重要性、复杂性、多样性及面临的机遇和挑战。分析了分离过程强化的新特点,对化工分离过程强化在过程工业可持续发展中的意义和作用进行了讨论。

关键词:分离过程;过程强化;新分离技术;新特点

中图分类号:TQ028

文献标识码:C

文章编号:0253-4320(2008)09-0001-04

Recent advances in separation process intensification and its development

FEI Wei-yang, LUO Shu-juan, ZHAO Xing-lei

(State Key Laboratory of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The importance, diversity, complexity of chemical separation process and the challenge it faces are introduced in this paper. The new characteristics of the separation process intensification are analyzed. Its significance and impact on the sustainable development of process industry are also discussed.

Key words: separation process; process intensification; new separation technology; new characteristic

1 概述

1.1 化工分离过程的重要性

化工分离过程是化学工程的一个重要分支,从原料的精制、中间产物的分离、产品的提纯和废水、废气的处理都有赖于化工分离技术^[1-2](见图 1)。绝大多数反应过程的原料和反应所得到的产物都是混合物,需要利用体系中各组分物性的差别或分离剂使混合物各组分得到分离提纯。化工分离过程的应用遍及能源、资源、环保、生物、新材料等领域,无论是石油炼制、塑料化纤、湿法冶金、同位素分离,还是生物制品精制、纳米材料制备、烟道气脱硫和化肥生产等都离不开化工分离过程。它往往是获得合格

产品、充分利用资源和控制环境污染的关键步骤。

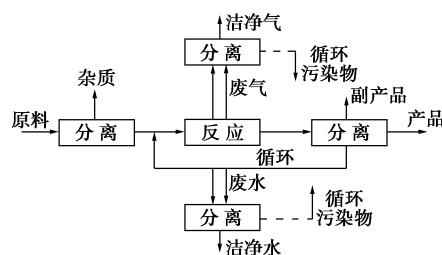


图 1 化工分离过程

分离过程是耗能过程,设备数量众多,规模巨大。在 1 000 万 t 常、减压和 100 万 t 乙烯等特大型石化装置中,塔径 10 m 以上的分离塔比比皆是。随着新产品的不断出现,对分离过程提出了越来越高

收稿日期:2008-07-07

作者简介:费维扬(1939-),男,教授,博士生导师,中国科学院院士,主要从事化工分离科学与技术,特别是溶剂萃取的研究工作,fwy-dce@tsinghua.edu.cn。

的要求。例如医用的 O^{18} 稳定同位素分离需要约 2 000 个理论级。化工分离过程通常占过程工业设备费和操作费的 40% ~ 70%^[3], 对过程的技术经济指标和产品的成本具有重要的影响。随着节能减排要求的提高和水资源紧缺问题的日益突出, 化工分离技术显得尤为重要。

1.2 化工分离过程的多样性

由于化工分离技术的应用领域十分广泛, 原料、产品和对分离操作的要求多种多样, 这就决定了分离技术的多样性。按化工分离过程机理划分, 可大致分成 5 类: ①生成新相以进行分离(如蒸馏、结晶); ②加入新相进行分离(如萃取、吸收); ③用隔离物进行分离(如膜分离); ④用固体试剂进行分离(如吸附、离子交换); ⑤用外力场或梯度进行分离(如离心萃取分离、电泳)等。它们的特点和设计方法有所不同, 但都有各自的特点和特定的应用场合。Keller 于 1987 年总结了一些常用分离方法的技术成熟度和应用成熟度的关系^[4]。20 余年来, 化工分离技术有了很大的发展, 但 Keller 指出的趋势仍可供参考, 精馏、吸收、萃取和结晶等仍是当前使用最多的分离技术^[5-7], 膜分离等新分离技术也得到长足的发展^[8]。

1.3 化工分离过程的复杂性

化工分离技术十分复杂。即使对于精馏、萃取这些比较成熟的技术, 多组分体系大型设备的设计仍是一项困难的工作。大型塔器设计、放大的主要困难在于塔内两相流动和传质过程的非理想性。例如, 大型规整填料塔中既存在着纵向混合和径向混合等宏观尺度的流动, 也存在界面附近微尺度的涡流、界面和传递过程。沿用了百余年的平衡级模型虽然简单、直观, 但用于多组分离过程的缺点已显而易见。非平衡级模型被称为是“可能开创板式分离设备设计和模拟新纪元”^[9-10], 但缺乏传质系数实验数据和模型参数过多使得这种先进模型的工程应用存在困难。许多商用软件功能强大, 已在工程设计中得到广泛运用, 但是多相、多组分传质过程的数学模型尚不完善, 对于一些新的或特殊分离过程往往需要自行开发相关的子程序, 工程经验和中试实验往往是不可缺少的。设计时如何选择高效低耗的分离技术以实现节能减排的目标也是人们十分关注的问题。

2 化工过程强化的历史沿革

化工过程强化是国内外化工界长期奋斗的目标, 人们力图灵活应用化学工程的原理和方法, 通过

技术创新, 用更小、更便宜、更高效的设备和工艺来代替庞大、昂贵的和耗能大的设备和工艺, 或用较少的(或单个)设备来代替多个设备。广义上说, 化工过程强化包括新装置和新工艺方法的发展, 即: 设备的强化, 包括新型反应器、新型热交换器、高效填料、新型塔板等; 工艺过程的强化, 如反应和分离的耦合(反应精馏、膜反应、反应萃取等)、组合分离过程(膜吸收、膜精馏、膜萃取、吸收精馏等)、外场作用(离心场、超声、太阳能等)以及其他新技术(超临界流体、动态反应操作系统等)的应用等。

相对于传统的化工过程和设备, 这些新装置和新工艺能大幅度提高生产效率、显著减小设备尺寸、降低能耗和减少废料的生成, 并最终达到提高生产效率、降低生产成本、提高安全性和减少环境污染的目的, 具有重大的经济效益和社会效益。

我国在化工过程强化方面也进行过很多研究工作。例如 20 世纪 60 年代石油工业的崛起大大推动了催化剂、反应工程和精馏过程的强化; 核燃料后处理和湿法冶金的发展推动了溶剂萃取和离子交换过程的强化等。但我国单位产值能源消耗量比世界先进水平高得多, 我国自主开发的新过程数量较少, 工业化周期较长, 在国际市场上竞争能力较差。在过程强化研究和应用方面与国外先进水平相比仍有较大差距。

近年来, 化工过程强化受到人们更大的关注。1995 年起, 每 3 年举行一次化工过程强化的国际会议的影响力日益扩大。美国 AIChE 和 UEF 也联合各国化工协会分别召开多次化工过程强化的专题研讨会。2002 年还在英国成立了过程强化网(Process Intensification Network, PIN), 每 2~3 个月开一次研讨会, 目的是努力推动过程强化的研究和应用。化工过程强化已成为全球化工界关心的热点之一, 分离过程的强化也受到了极大的重视。

3 化工分离过程强化的若干新特点

3.1 面临新的挑战, 提出更高要求^[11-13]

近年来, 能源、资源、环保和生物等领域对化工分离过程提出了更高的要求。例如全球气候变暖已成为国际热点问题, 政府间气候变化专门委员会(IPCC)在 2007 年初发表的第 4 次气候变化评估报告中指出, 气候变暖已经是“毫无争议”的事实, 人类活动“很可能”是导致气候变暖的主要原因。减少 CO_2 排放, 降低大气中 CO_2 浓度已成为当务之急。但是, 温室气体 CO_2 捕集的难度很大。例如, 燃煤电

厂是最大的工业 CO₂ 排放源,从燃煤电厂烟道气中捕集和分离 CO₂ 的难度在于:CO₂ 浓度和压力很低,导致设备尺寸特别大;烟道气中所含的 NO_x、SO_x 和 O₂ 等气体会造成溶剂损失和设备腐蚀;溶剂再生的能耗非常高等。因此,利用现有技术捕集和分离燃煤电厂烟道气中 CO₂ 的成本高达 40~50 美元/t,从燃煤电厂烟道气中捕集和封存 CO₂ 会使发电成本增加约 50%。这对任何国家都是难以承受的沉重负担。从水泥厂和钢铁厂废气中捕集和分离 CO₂ 的成本也很高。因此,温室气体 CO₂ 的捕集和分离给分离科学与技术带来严峻的挑战。

面临新的挑战,人们对化工分离过程的强化提出了更高目标。越来越多的研究人员认为,化工过程强化的目标不应只停留在使已有设备挤出百分之几的效率,而应致力于使过程工业的效率取得大幅度的提高。化工过程强化不能满足于渐进式的变革,而应致力于在设备的体积、能耗、原材料消耗、产业化的周期和环保等方面使过程和工厂的效率取得重大的突破。大量实例表明,化工分离过程强化对过程工业的节能减排发挥了重要作用。

3.2 信息技术对化工过程强化发挥越来越大的作用

信息技术对化工分离过程的强化也起着极其重要的作用。分子模拟大大提高了预测热力学平衡和传递性质的水平。分子设计加速了高效分离剂的开发。化工模拟软件的商品化和 CAD 和 AI 在化工中的应用大大推动了分离过程和设备的优化设计和优化控制。非平衡级模型改进了传统的“平衡级—级效率”模式,直接用传质、传热速率方程表征两相间的传递过程,避免引入级效率、等板高度等难以确定的量,适用于多元物系的分离过程。功能齐全的 CFD(计算流体力学)软件可以对分离设备内的流场进行精确的计算和描述,加深了人们对相际传递过程机理的认识并对设备强化和放大提供了重要信息。先进测试技术如 LDV(激光多普勒测速仪)和 PIV(激光成像测速仪)等的应用使研究从宏观、平均向微观、瞬时发展,为化工多层次、多尺度的研究提供了条件,为化工过程的强化提供了新的有力的工具。此外基于互联网的过程模拟系统也正在迅速发展,具有深远的意义。

3.3 新分离技术和耦合分离技术迅速发展

近年来,新分离技术得到了长足的发展,例如膜分离在海水淡化等方面得到成功的应用,制备色谱在制药和生物制品分离方面显示特出的优点,超临

界流体萃取具有特效性和无污染的优势,利用表面活性剂的分离技术如反微团等也已成功地用于生产等。诸如催化精馏、膜精馏、吸附精馏、反应萃取、络合吸附、发酵萃取、化学吸收和电泳萃取等耦合分离技术综合了 2 种分离技术的优点,具有独到之处。

一个突出的例子是 Eastman 公司开发的高度集成的乙酸甲酯生产过程。该公司采用乙酸甲酯复合塔,把精馏、萃取精馏和反应精馏等过程耦合在一个塔中,大大简化了流程,减少了设备数目,降低了成本^[14]。

很多耦合过程已成功地用于我国的工业生产。例如催化精馏在甲基叔丁基醚(MTBE)等工艺中的成功应用大大简化了流程、提高了收率和降低单耗。国内一些工厂在对原有 MTBE 装置进行技术改造时采用了催化精馏新技术,并对后续的精馏和萃取设备进行了改造,可使装置的处理能力从 2 万 t/a 提高到 6 万 t/a,大大节约了投资。过程强化创造了显著的经济效益。

3.4 从实现可持续发展的高度来推动化工过程强化

传统的过程工业大多由原生矿物资源(如铁、铜、铝矿石等)和化石资源(如煤、石油、天然气等)的开采、加工、产品消费到废物处理的单向运动模式构成,在对人类社会做出了重大贡献的同时,也造成大量资源、能源的消耗和严重的“三废”污染,成为人类社会可持续发展的巨大障碍。过程强化致力于高效、节能和无污染的生产过程,是解决“发展—污染”的矛盾和实现可持续发展的有效手段。

传统的过程工业往往需要许多庞大的原料、中间产品和成品储罐。这不仅要增加投资,而且容易发生事故。以印度 Bhopal 所发生的中间产品甲基异氰酸盐(MIC)泄漏事故为例,泄漏的 41 t 甲基异氰酸盐造成约 4 000 人死亡的惨剧。通常装置越小,安全性越高。Handershot 指出^[15],利用先进的连续反应器,可以使产生的中间产品立即转化为最终产品。对于同样规模的装置,工艺过程中甲基异氰酸盐的总量可以从 41 t 减少到 10 kg,这样可以大大提高装置的安全性。

3.5 在国外引进技术的消化、吸收和再创新中发挥重要作用

改革开放以来,我国从国外引进一批大型石化成套技术和装置,如合成氨、乙烯、重整、芳烃抽提和己内酰胺等,对加速我国化工产业现代化的步伐发挥了重要作用,但是重复引进现象比较严重。在

消化吸收国外引进技术方面的投入太少,存在引进—落后—再引进—再落后的严重问题,制约了可持续发展战略的实施。随着技术进步和时间的推移,很多引进装置的技术经济指标与国外先进水平相比已有很大差距,急待采用先进技术提升其工艺和设备水平。过程强化是引进技术的消化、吸收和再创新的重要手段,近年来已得到重视。乙烯、环丁砜芳烃抽提、液化气脱硫和己内酰胺等引进装置中分离设备的消化、吸收和再创新技术已取得了重大的经济效益和社会效益^[16-17]。

4 讨论

(1) 尽管化工过程强化具有重要的意义,近年来也取得了长足的进步,但在发展过程中也遇到了不少困难。当前国内外关注的一些主要问题是:

在全球范围内,过程工业的发展往往依赖于兼并、重组和转产高附加值的产品。这基本上是一种基于贸易而不是基于研究、创新的发展策略。

许多化工公司的研究和开发工作主要集中在开发新产品。它们对开发新型设备和过程等化学工程问题关心不够。一些设备制造商和工程公司通常只选用已工业应用的、成熟的设备或技术,而不愿冒险进行原创性的开发。

一些大学和研究所受经费和编制的限制,往往只能选择一些小型的、低风险的研究项目。这虽能多发论文,但难以为过程强化发展做出大的贡献。

(2) 鉴于我国过程工业处于高速发展的阶段,许多产品的物耗、能耗都高于国际先进水平。因此加强过程强化的研究和应用显得特别重要。由于化学工程具有多学科交叉的特点,只有化学、化工、机械和信息技术等各学科的协同努力,只有加强基础研究,致力创新,开发具有自主知识产权的新过程、新

设备和新软件,才能不断推进化工过程强化的发展,顺利实现节能减排的目标,保证我国过程工业的可持续发展。

参考文献

- [1] Seader J D, Henley E J. Separation Process Principle[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1998.
- [2] Humphrey J L, Keller G E. Separation Process Technology[M]. New York: McGraw-Hill, 1997.
- [3] Vision 2020: Separations Roadmap[M]. New York: AIChE, Center for Waste Reduction Technologies, 2000.
- [4] Keller G E. Separations: New Directions for an Old Field[M]. New York: American Institute of Chemical Engineers, 1987.
- [5] 余国琮, 袁希刚. 我国蒸馏技术的现状与发展[J]. 现代化工, 1996(10): 7-13.
- [6] 汪家鼎, 费维扬. 溶剂萃取的最新进展[J]. 化学进展, 1995, 7(3): 219-224.
- [7] 王静康. 工业结晶前沿技术[J]. 现代化工, 1996(10): 19-22.
- [8] 徐南平, 高从■, 时钧. 我国膜领域的重大需求与关键技术[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(S1): 327-331.
- [9] Seader J D. The rate-based approach for modeling staged separations[J]. Chem Eng Progress, 1989, 85(10): 41-49.
- [10] Wesselingh J A. Non-equilibrium modeling of distillation[J]. Chem Eng Res Des, 1997, 75(A6): 529-538.
- [11] Stankiewicz A, Moulijn J A. Process intensification[J]. Ind Eng Res Des, 2002, 41(8): 1920-1924.
- [12] Tsouris C, Porcelli J V. Process intensification-has its time finally come[J]. Chem Eng Prog, 2003, 99(10): 50-55.
- [13] 费维扬. 过程强化和耦合: 展望 21 世纪的化学工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 578.
- [14] Siirola J J. An industrial perspective on process synthesis[J]. AIChE Symp Ser, 1995, 91: 222-233.
- [15] Hendershot D C. Process minimization: Making plants safer[J]. Chem Eng Prog, 2000, 96(1): 35-40.
- [16] 费维扬, 宋新月. 过程强化及其在消化、吸收引进技术中的应用[J]. 化学工程, 2004(增刊): 1-5.
- [17] 王运东, 费维扬, 刘小秦, 等. 新型转盘萃取塔研究开发与工业应用[J]. 化学工程, 2008, 36(4): 1-4. ■

生物炼制技术交流和产业化研讨大会

——第三届全国化工应用技术开发热点研讨会

时间: 2008 年 11 月 11—14 日

主办单位: 中国化工信息中心、厦门大学化学化工学院、中国科学院过程工程研究所、中国科学院广州能源研究所生物质能中心、中国林业科学研究院林产化学工业研究所、教育部生物炼制工程研究中心、中国农业科学院生物质能研究中心、中国科学院海洋研究所、中国科学院青岛生物能源与过程研究所(筹)

我国拥有大量的生物质资源有待进一步开发利用,如农业生物质资源、林业生物质资源、海洋物质资源、垃圾和有机废水等,其开发应用不仅开辟了新型工业模式——生物炼制,同时对维护社会可持续发展和建设和谐生态环境具有重要意义,并且可产生巨大的经济效益。《现代化工》

地点: 厦门云顶山庄大酒店

为本次大会承办单位。本次大会为产、学、研相结合的大会,欢迎国内外有关专家、科研人员及企业人士参会。

会议期间将开展论文征集活动,征集的论文将以《现代化工》(中文核心期刊)增刊的形式正式出版,部分优秀论文将安排在《现代化工》正刊刊出,欢迎投稿。详情参见《现代化工》网站: <http://www.xdhg.com.cn>。

联系方式: 北京安外小关街 53 号 中国化工信息中心《现代化工》编辑部(100029)

联系人: 童志勇

电话: 010-64444095, 64444090

信箱: tongzy@cheminfo.gov.cn