



绿色发展理念在高等分离工程教学中的践行

汤志刚

(清华大学 化工系,北京 100084)

[摘要]笔者根据多年从事高等分离工程教学的经验,提出在该课程教学中重点通过突出健全传质单元转化效能的综合评价指标、强化二次能源和资源分布式综合利用途径、大力推进化工分离智能化运用等环节,帮助学生从发展理念到实施途径等多视角,逐步树立化工分离的绿色发展观。

[关键词]绿色化工; 分离工程; 教学

The Practice of Green Development Principle in the Course Teaching of Advanced Separation Process

Tang Zhigang

Abstract: Based on years of experience in course teaching of Advanced Separation Process, the author proposes to highlight that by emphasizing the comprehensive evaluation index of the transformation efficiency of the mass transfer unit, strengthening distributed and comprehensive utilization of the secondary energy and resource, and vigorously promoting the intelligence of separation process etc, to help students gradually establish a preliminary view about green development of separation process including conception, methodology and practice.

Key words: Green chemical engineering; Separation process; Teaching

进入新世纪以后,人类社会高速发展面临着资源、能源和环境危机等方面的挑战,化工绿色化、低碳化和洁净化发展越来越成为人们关注的焦点。人们迫切希望从可持续发展的视角出发,提高化工过程的自洽度,即将降低维持人类生活水平及科技进步所需的化学产品与过程所使用与产生的有害物质作为努力的目标,推动化工及其相关行业的新发展^[1-2]。

分离工程是化工绿色、低碳、洁净发展的重要

领域,根据化工绿色发展路线图中给出的 8 个技术领域(即绿色产品设计、原料、反应、催化、溶剂、工艺改进、分离技术和实现技术)逐步凝练并形成了绿色化工产品设计、原料绿色化及新型原料平台、新型反应技术、催化剂制备的绿色化和新型催化技术、溶剂的绿色化及绿色溶剂、新型反应器及过程强化与耦合技术、新型分离技术、绿色化工过程系统集成、计算化学与绿色化学化工结合等 9 个方面的绿色化学和化工发展趋势^[3-5]。

[作者简介] 汤志刚(1970-),男,副教授,博士。

实施分离工程的绿色发展战略不仅需要大力开发绿色分离技术,也迫切需要在教学环节中强化分离工程绿色发展的基本理念,使学生树立绿色发展观,为未来绿色化工分离工程的可持续发展和人才培养奠定坚实的基础^[6-8]。

一、提升转化效能是分离工程绿色发展的基础

化工装备是化工的最小单元,类似于人体的细胞。正是在这些功能各异的化工装备中,“三传一反”的基本功能得以实现,其中的质量传递装备就是分离过程的基本单元。根据绿色化工的发展理念,绿色化工的基础之一是高效。一个高效的化工过程,其基本单元必定是高效的。在教学中,健全传质单元的转化效果综合评价指标有助于帮助学生在考虑空间、时间和能耗等多种因素的情况下,对传质设备进行综合评价,并根据评价指标提出提升传质装备效能的改进思路。

如传质单元的评价指标——转化度,其定义为^[9]:

$$\text{传质装备转化度} = \frac{\text{目标产品产率}}{\text{装备体积} \times \text{传质过程能源消耗}}$$

以微分式柱式液液萃取设备为例,通过降低装备体积提高转化度和两相的液泛速度是提升转化效能的首要选择。其中影响较大的是内件结构和物性参数。如内件的空隙率与比表面积,对于空隙率较大的填料,其特性速度和两相液泛速度都较大,这对降低装备直径有益。但是,空隙率的增加在一定程度上会影响传质单元高度,进而使得装备的高度将有所增加。因此,从降低装备体积的综合效果看,工程中需要选择适当空隙率的填料内件。

对于特定的待处理体系,萃取剂的物性对液泛速度的影响尤为重要。如在萃取效果相近的前提下,选择具有较大两相密度差和界面张力的萃取剂无疑可以提高特性速度。另外,对于选择萃取剂作为分散相的萃取过程,如果实际操作中选择萃取能力较差的溶剂,分散相相对连续相的比例较大,则分散相存留分数将增加,从而导致液泛速率降低。如轻油和中性油均可以作为含酚废水

的萃取剂,但是与中性油相比,轻油作为萃取剂时,两相密度差和界面张力较大,因此采用轻油作为萃取剂可有效降低萃取塔直径,提高转化度。

影响装备体积的另一个关键因素就是设备高度。对于萃取装备而言,降低设备高度的核心是降低传质单元高度,其主要影响因素是传质系数,该系数受到萃取的物性(密度、界面张力、黏度和扩散性)、萃取设备的两相流动(分散度、液滴分布和流比等)、萃取装备的内构件结构(空隙率、比表面积)的影响。如果萃取设备两相密度差大、界面张力适中、黏度小、扩散系数大、液滴直径适中、分散好、填料比表面积大,那么,这些特性均对提高传质系数、降低传质单元高度有益。

大多数液液萃取过程在温度较低的情况下进行,因此除了输送吸收剂需要消耗一定的泵功以外,萃取过程的热量消耗是很小的。同样地,萃取过程的萃取剂一般是循环使用的,萃取富含溶质的萃取剂(通常称为萃取相)一般可通过再生后返回萃取塔使用(常见的再生方法有加热和化学再生)。因此,萃取过程的再生消耗有可能是能源消耗,也有可能是再生药剂的消耗,教学中应注意区别对待。如焦化含酚废水的处理可以采用异丙醚、轻油和中性油等物理萃取剂,也可以采用TOA(三辛胺)等胺类化学萃取剂。前者依靠萃取剂对酚的溶解能力萃取回收酚,后者则依靠胺与酚的络合作用将酚从水中分离。物理萃取剂常采用精馏的方法回收,一般萃取剂的沸点比酚低,实际操作中通常从回收塔顶得到回收的萃取剂进行循环使用,可从塔釜得到酚。化学萃取剂的回收一般采用液碱对负载后的萃取相进行反萃,将酚转化为酚钠盐。这样一方面使萃取剂得到再生,另一方面可通过加入酸(硫酸等)分解酚钠盐来回收酚。

对于采用蒸馏方法回收萃取剂的工艺,参考精馏构成的各种节能措施可以降低回收萃取剂过程中的能耗。值得一提的是,萃取剂的蒸发潜热对回收能耗有着举足轻重的影响,因此选择萃取剂时应当充分考虑其蒸发潜热。在萃取效果接近的情况下,选择蒸发潜热较小的萃取剂是降低萃取回收能

源消耗、提高转化度的有力手段。如轻油和中性油均可以作为酚的萃取剂,但是轻油的蒸发潜热小于中性油,两者萃取效果相近(轻油的分配系数略高于中性油),此时采用轻油作为萃取剂,使得萃取回收能源再生消耗更低,转化度更高。

转化度这个评价指标的教学可以帮助学生从塔内件、萃取剂选择、萃取和反萃工艺等方面认识到提升萃取转化效能对促进萃取装备绿色发展的的重要性。

二、二次能源和资源利用是分离工程绿色发展的核心

绿色化工发展的核心之一是自治度高,即对外依存的能源和资源少。教学中充分展示如何利

用系统内部的二次能源和二次资源,有助于学生加深对提高系统自治度的认识。

为了阐述化工二次能源的综合利用,教学中可以提出“基于流程工业的分布式能源系统”的节能理念,并结合通过冶金焦化建立基于焦炉的分布式能源系统的案例进行讲授,使同学们对能源梯级、多阶、高效使用等建立初步的认识。

以焦化过程为例,围绕其主要的能源供给对象,焦炉、管式炉等释放的余热完全可形成靠近局部用户的独立分布式网化能源系统。我们可充分利用红焦余热、烟道气余热和上升管荒煤气余热的网化效果,供给焦化流程内部,形成焦炉分布式网化能源系统^[10],如图 1 所示。

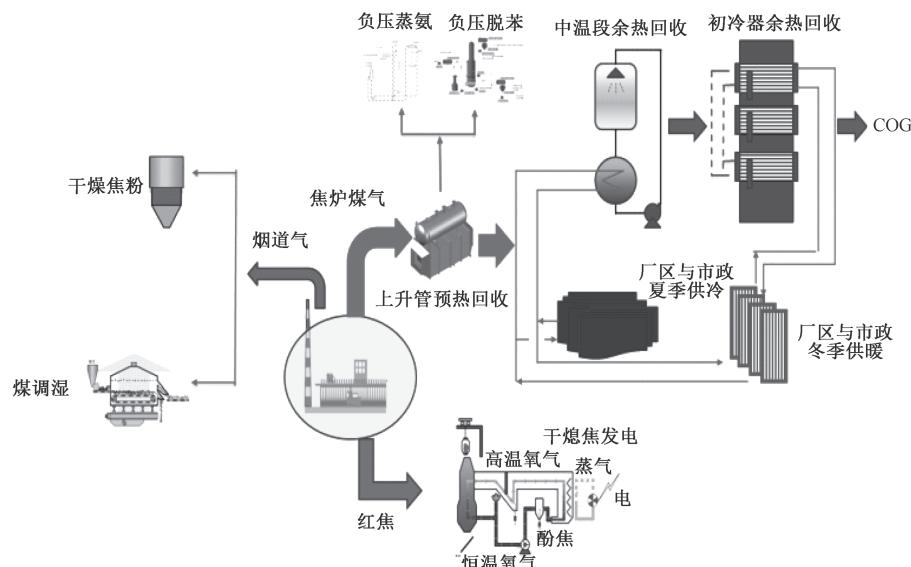


图 1 焦炉分布式能源系统示意图

为了阐述化工二次资源的综合利用,教学中可以提出“基于流程工业的硫元素分布式资源化系统”的资源综合利用理念,并结合煤化工全流程硫元素的转化与资源化案例进行讲授,使同学们对废弃资源的循环和高效利用建立初步的认识。现有焦化系统硫素流存在如下问题:1. 系统存在多处脱硫点,脱硫环节多,成本很高;2. 煤气脱硫产生的硫黄品质低,没有市场;3. 煤气脱硫副反应多,产生大量副产物,市场不易消纳;4. 烟道气脱硫成本高,脱硫产品不易消化等。针对这些问题,教学中可以提出分布式硫素资源化系统^[11],如图 2 所示。

该系统结合高效催化剂和高效脱硫器,大幅提高了焦炉煤气的脱硫效率,将焦炉煤气中的 H_2S 含量降至 $5\sim10\text{mg}/\text{m}^3$,焦炉煤气燃烧加热后的烟道气中 SO_2 降至 $30\text{mg}/\text{m}^3$ 以下,符合国家排放标准,烟道气无需进行脱硫净化处理;同时将焦化化产的焦炉煤气脱硫产品由原来的低品质硫黄、混合盐和硫氰酸铵等市场容量小的产品改为液体或固体 SO_2 产品,有效改善了产品结构,拓展了产品市场空间,使整个系统硫素转化的绿色化、洁净度大幅提升。

三、智能化发展是分离工程绿色发展的高地
智能化是绿色化工发展的必经之路,也是未

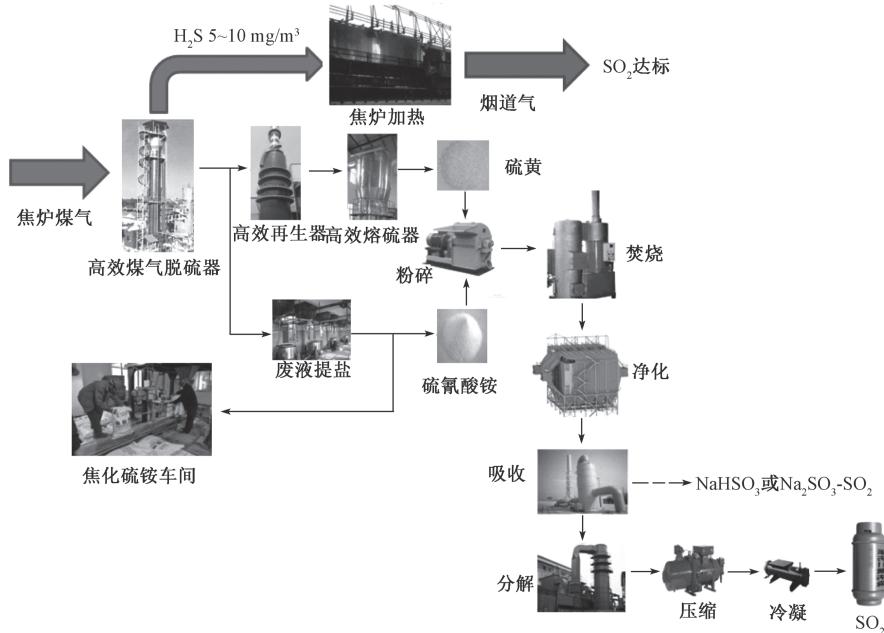


图 2 焦化硫素分布式资源化系统示意图

来发展的高地。教学中需要通过知识点的辨析，引导同学们认识到数学建模和模拟计算在未来化工分离过程中的重要性；同时通过流程模拟计算案例、流场模拟案例和分子设计模拟案例，使同学们逐步体会化工分离智能化的本质和实现途径。

如多组分精馏及其换热网络流程模拟案例的讲解可以帮助同学们认识到流程序列优化和能量综合利用在分离过程节能降耗中的重要作用；塔内件流场分布模拟案例的讲解可以帮助同学们认

识到塔内件结构优化对改善设备效能、提高分离效率的重要作用；吸收剂分子模拟案例的讲解可以帮助同学们认识到通过优化分子结构提升吸收剂性能、降低吸收成本的重要作用。

当然，借助仿真手段提高课堂教学容量，增强教学的生动性和多样性，也是贯彻化工分离绿色发展的重要内容。如教学中通过高等分离工程课件建设，可将课本中较为枯燥的公式变为生动、形象的图像和动画（见图 3），这有助于提升同学们的学习兴趣，大幅改善知识消化和吸收效果^[12]。

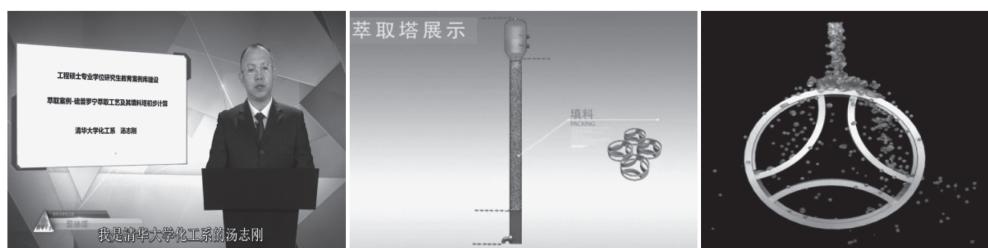


图 3 视频教学课件画面示意图

四、结论

分离工程是化学工程重要的学科方向之一。为了更好地实施绿色发展战略，化工教学必须从发展理念、方法论及实践措施与手段等方面加强绿色化工人才的培养，为我国绿色化学化工的可持续发展打下良好的人才基础。（文字编辑：李丽妍）

参考文献：

- [1] García-Serna J, Pérez-Barrigón L, Cocero M J. New trends for design towards sustainability in chemical engineering: Green engineering [J]. Chemical Engineering Journal, 2007, 133: 7-30.

（下转第 54 页）

参考文献:

- [1] 阎秋娟. 国内慕课(MOOCs)研究进展[J]. 图书馆理论与实践, 2016(1):19-24.
- [2] 王彦沙. 大学化学慕课建设[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [3] 胡新星. 我国“慕课”发展研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [4] 许细薇, 蒋恩臣. 浅析慕课在本科实验课程的应用[J]. 广州化工, 2016(22):181-182,187.
- [5] 温燕梅. 慕课时代的有机化学实验教学改革初探[J]. 广东化工, 2014(18):180,190.
- [6] 王富华, 焦桂珍, 邵慧芳, 等. 在高校化学实验教学中植入慕课优势[J]. 实验室科学, 2016(3):135-137,141.
- [7] 温娜, 吕海霞, 李宝铭. MOOCs 与工科类有机化学实验融合的教学模式探索[J]. 广州化工, 2016(22):178-180.
- [8] 唐倩, 龚成斌. 有机化学实验教学改革研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2013(3):165-167.
- [9] 龙应钊, 王燕, 孙学芹. 完善化学专业实验教学, 培养创新型人才[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(6):220-223.
- [10] 刘洪来, 王燕, 汪建军, 等. 化学实验教学质量体系的建设与实践[J]. 化工高等教育, 2008 (3):46-48.
- [11] 李耀刚, 石国英, 王宏志. 改革实验教学, 培养创新能力[J]. 实验室研究与探索, 2007, 26(11):92-94.
- [12] 刘永红, 文利柏, 胡先文, 等. “互联网+”背景下的公共基础课教学改革的探索——以基础化学实验(I)为例[J]. 大学化学, 2017, 32(12):31-34.
- [13] 李志红. 100 起实验室安全事故统计分析及对策研究[J]. 实验技术与管理, 2014(4):210-213.
- [14] 岳斌, 常国华, 陈明凯. “慕课”背景下的《有机化学》教学改革研究[J]. 教育教学论坛, 2017(6):139-140.
- [15] 朱平平, 冯红艳, 金谷, 等. 大学化学实验安全教育和管理的创新与实践[J]. 大学化学, 2017, 32(12):48-52.

(上接第 13 页)

- [2] Concepcion Jimenez-Gonzalez, Peter Poechlauer, Quirinus B Broxterman, et al. Key Green Engineering Research Areas for Sustainable Manufacturing: A Perspective from Pharmaceutical and Fine Chemicals Manufacturers[J]. Organic Process Research & Development, 2011, 15:900-911.
- [3] 丁波. 化学工程工艺中的绿色化工技术要点[J]. 化工设计通讯, 2018, 44(5):178.
- [4] 陈亮. 化工工程中绿色化工技术的应用[J]. 化工设计通讯, 2018, 44(8):48.
- [5] 吴姣姣, 马燕良, 梁佩. 绿色化学化工问题研究[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(1):144-148.
- [6] 邹晓新, 秦传玉, 邹东雷, 等. 倡导绿色化工教学[J]. 教育教学论坛, 2017(49):211-212.
- [7] 桑杰. 绿色化学理念在化学化工教学改革中的应用[J]. 化工管理, 2018(5):14-15.
- [8] 李二飞. 绿色化学化工发展前景与人才培养[J]. 智富时代, 2017(10):242.
- [9] 汤志刚, 温燕明, 王登富, 等. 负压脱苯工艺及其转化度的评价[J]. 煤化工, 2015, 43(5):14-18.
- [10] Tang Zhigang, Li Hongwei, Wen Yanming. Utilization of a Novel Distributed Energy System based on Process Industry in Coking Production [J]. Journal of Clean Energy Technologies, 2016, 4(3):229-232.
- [11] 汤志刚, 温燕明, 王登富, 等. 一种焦化工业中硫的分布式资源系统及方法: CN201610828355.6 [P]. 2017-01-04.
- [12] 许振良, 汤志刚, 鲁金明, 等. 构建全日制工程硕士研究生在线教学新模式——以“高等分离工程”课程为例[J]. 化工高等教育, 2018(3):18-22.