

非化学专业 化学教育

基于 Aspen Plus 耦合生命周期评价的科研案例 在环境工程原理教学中的应用*

黄卫清^{1,2**} 李 瀚¹

(1. 东莞理工学院生态环境与建筑工程学院 广东东莞 523808;

2. 华南理工大学广东省绿色化学产品技术重点实验室 广东广州 510640)

摘要 将化工流程模拟 Aspen Plus 软件与环境影响评估领域常用的生命周期评价 (LCA) 进行集成应用, 围绕环境工程原理教学中有关化工过程质量能量衡算与环境污染防治内容的协同应用与拓展, 构建化工流程模拟-环境风险评估科研案例“苯酐生产流程模拟及环境风险研究”, 并将其作为环境工程原理的综合教学案例。教学实践经验表明, 通过引入工程相关综合教学案例, 不仅使得抽象的理论知识更加生动具体, 而且在深化学生对课程理论知识理解的同时, 提高学生应用专业知识分析和解决化工生产环境污染工程问题的综合能力和素质, 为学生将来步入相关领域工作奠定扎实的基础。

关键词 生命周期评价 Aspen Plus 环境工程原理 环境风险评估 流程模拟

DOI: 10.13884/j.1003-3807hxjy.2021120203

环境工程原理是当前高校环境类专业的核心基础理论课程, 该门课程包含了质量能量衡算、流体流动、质量传递等化工原理理论内容以及沉降过滤、化学吸附吸收、微生物降解等环境污染防控技术原理, 是一门涉及化工和环境学科交叉融合的重要课程^[1]。由于该门课程理论性极强, 涉及内容丰富, 覆盖学科领域范围广, 传统灌输式教学不利于学生充分理解其中的原理和应用途径, 学生难以将理论知识拓展到实际的工程应用中, 不利于培养学生的综合创新和应用能力。目前, 国内已有一些学者尝试使用化工软件或者科研案例融入具体的课程教学中, 以激发学生的学习热情和兴趣。项东^[2]等使用 Aspen Plus 软件应用于化工分析与合成理论教学中, 在提高学生工程应用能力方面取得了良好的效果。郑秋闾^[3]等将 Aspen Plus 软件应用于化工原理课程设计教材附录设计任务书中, 引导学生对比核对手工计算和软件计算的结果, 进而加深学生对知识点的理解。杨金怀^[4]等将科研项目作为教学案例, 并结合 Aspen Plus 软件模拟萃取精馏分离共沸物, 并指出该方式能将复杂的萃取精馏过程转化为简洁明了的知识内容。此外, 还有相关学者尝试采用研究性学习^[5]、赛教融合^[6]等方式提高课程教学质量。目前, 尚未有相关报道采用 Aspen

Plus 软件耦合生命周期评价 (LCA) 进行教研案例分析并将其应用到环境工程原理课程教学中。因此, 本教研团队以提高学生对于环境工程原理理论知识的理解和综合应用能力为教学目标, 以环境工程原理基础篇中的质量能量衡算理论和环境工程原理分离篇中的环境污染防治理论为综合拓展结合点, 尝试引入团队科研项目“苯酐生产流程模拟及环境风险研究”作为桥梁和媒介, 探索基于 Aspen Plus 软件耦合 LCA 的科研案例在环境工程原理教学中的应用, 在深化学生对课程理论知识理解的同时, 提高学生应用专业知识分析和解决化工生产环境污染工程问题的综合能力, 开拓学生视野, 启发和培养学生“化工生产-环境保护”协同和学科交叉思维, 为学生将来步入相关领域工作奠定扎实的基础。

生命周期评价 (LCA) 是一种针对产品/技术的全生命周期过程的环境影响进行评估的方法, 它能够量化实际生产工艺过程中不同类型的环境影响^[7]。Aspen Plus 软件则可以快捷并稳定地模拟获得实际化工过程的物料和能耗的投入产出清单, 并提供针对性的理论指导^[8]。本教学团队基于前期有关 Aspen Plus 软件应用研究^[9]和环境工程原理实践课程教学改革的探讨^[10], 创造性地将 LCA 与

* 国家自然科学基金 (21706029); 广东省一流本科课程“环境工程原理”(粤教高函 [2020] 16号); 广东省高等教育教学改革项目: 基于新工科背景的化工原理课程理论及实验教学改革创新(粤教高函 [2018] 180号); 广东省研究生教育创新计划资助项目 (2021JGXM106); 广东省普通高校重点科研平台和项目 (2022ZDZX1030); 东莞理工学院新工科新文科课程 (202102055)

** 通信联系人, E-mail: huangwq@dgut.edu.cn

Aspen Plus 软件进行耦合并应用到环境工程原理课程教学中,引导学生采用学科交叉思维理解环境工程原理相关理论知识,提高学生课程综合应用能力。

1 环境工程原理总体教学设计与教学理念

环境工程原理是一门具有强交叉性及工程性的环境学科核心专业基础课程。本课程具体教学以新工科促进多学科知识交叉融合教学理念为背景,以培养适应乃至引领未来工程发展需求的高素质复合型工科人才为核心目标。一是立足“立德树人”“新工科复合型人才”与“高阶思维培养”等新教育教学理念,充分挖掘“课程思政”元素,进行课程思政建设,着力培养具有家国情怀的时代新人和“德智体美劳”全面发展的社会主义建设者及接班人。二是注重课程教学内容和教学模式创新,结合最新科技前沿发展,“以学生为本”精心优化选取授课内容,对课程授课与考核进行多样化设计,同时授课过程重视学生主体参与积极性和师生多元交流互动,切实提高学生学习效果。三是注重关联环境工程原理实验、化工原理、化工仪表及自动化、固体废物处理与处置、大气污染控制工程等课程,结合课程团队教师科研成果及相关交叉学科知识,对课程进行交叉拓展,培养具备多学科交叉知识储备和创新思维、宽阔视野和高阶思维能力的高素质工科人才。四是积极带领学生通过高规格的国家级、省部级学科竞赛和跨学科竞赛将相关课程群理

论知识实践化,充分培养学生的综合实践和科研能力。综上,对环境工程原理总体教学设计和相关教育教学理念概括如图 1 所示。

2 科研案例引入及其教学方案设计

环境工程原理基础篇和分离篇的理论教学基本按照独立的单元操作进行讲解,教材缺乏综合工程案例将相关理论内容进行关联。任课教师如果仅针对理论进行灌输式教学,不利于培养学生综合创新和工程应用能力。鉴于本院系学生曾前往东莞市某苯酐生产企业进行参观实习,初步了解了苯酐生产工艺流程以及污染物处理处置方式,采用有关苯酐生产的科研案例进行课程理论知识交叉串联和综合讲解有利于将学生直观感知与课堂教学案例深度融合,激发学生的学习兴趣 and 主观能动性。因此,本教学团队首先引入科研项目“苯酐生产流程模拟及环境风险研究”相关背景信息,进行环境工程原理理论知识的综合工程应用案例教学尝试。该科研案例是以邻二甲苯(OX)为原料生产苯酐技术(简称邻法)的流程模拟,并重点结合生命周期评价(LCA)工具对该技术的环境影响进行分析和讲解。苯酐(PA)是我国农药、医药、染料等领域中重要的基础化工原料^[11],邻法依然是我国苯酐生产的主流方式之一^[12],通过手动构建邻法生产苯酐的 Aspen 流程模拟,有利于提高学生的工程思维和综合实践能力。在背景知识的充分铺垫之

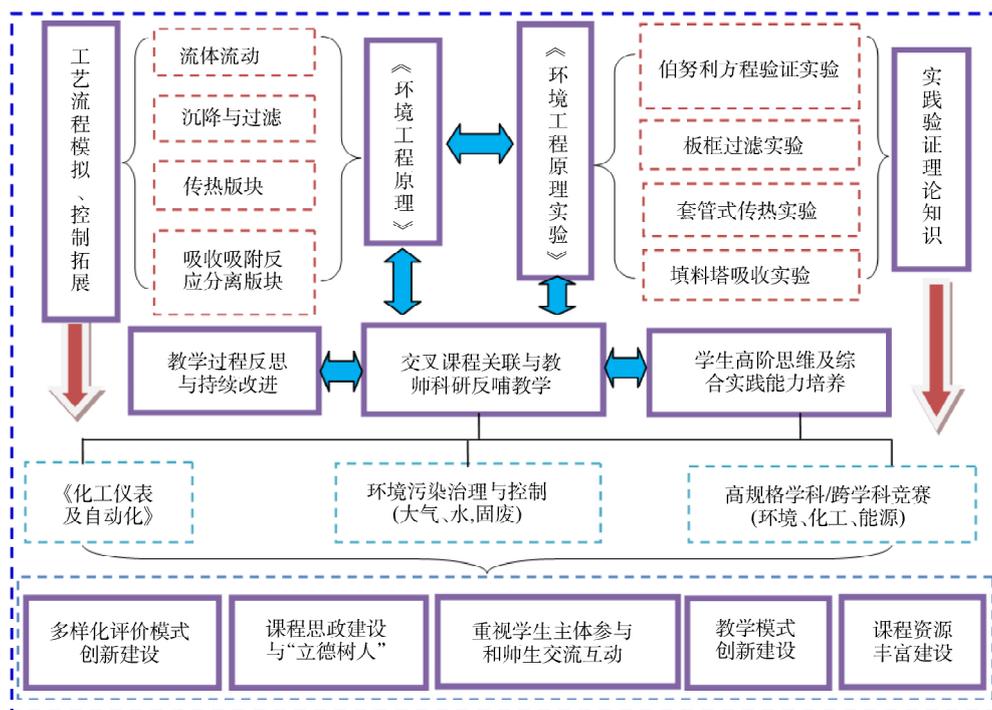


Fig 1 Teaching concepts and teaching design of principles of environmental engineering

图 1 环境工程原理教学设计相关教育教学理念思维导图

后,从邻法生产苯酐流程模拟到环境污染风险和防治进行依次讲解,提高学生多学科知识交叉思维和应用能力。该科研案例教学内容具体教学方案与设计简述如下:

(1) 教学主题:综合科研案例分析——苯酐生产过程流程模拟与环境影响评价。(2) 教学目标:知识目标是让学生学会将环境工程原理关于物料和能量核算的基础知识与污染防控单元操作进行关联,并进行工程应用拓展;素质目标为培养学生的综合创新和工程应用能力。(3) 教学重点与难点:苯酐生产过程流程模拟软件的初步认识和应用示例,苯酐生产过程环境影响的生命周期评价理论和应用示例。(4) 教学方法与手段:以PPT展示为主,结合学生认识实践环境图片和小视频关联工程情境,同时采用启发式设问和实例(软件及计算)演示,最后总结并设定讨论和疑问解答环节从而对教学实施过程进行评价和反思改进。接下来重点介绍具体教学内容及其教学过程实施。

3 具体教学内容及教学过程

3.1 教学内容——邻法生产苯酐流程模拟

鉴于环境专业学生对于化工流程模拟和 Aspen Plus 软件的使用经验较少,展示综合工程应用案例时先提前简要介绍流程模拟的基本理念和该软件的基础知识,并在确保授课效果的前提下尽量简化流程模拟过程,提高学生可接受程度。采用较复杂的综合工程教学案例且涉及多个方法和工具时,要有所有侧重,因此针对环境工程专业学生的特点和相应的教学目标对该部分主要进行简要介绍。

3.1.1 Aspen Plus 流程模拟软件

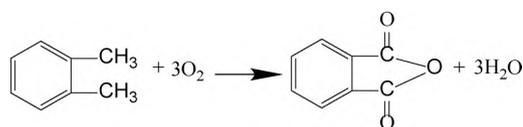
化工流程模拟本质上是根据由单个或多个单元操作组成的化工实际生产或运行数据,进行数学模型描述后,采用适当的模拟软件和计算机程序定量计算和模拟实际的生产过程。Aspen Plus 就是被广为使用的能实现该功能和目的的流程模拟软件,在 20 世纪 80 年代由麻省理工学院开发并被美国的 Aspen Tech 公司商品化,可以实现在不同的生产条件和工艺参数下进行严格的质量和能量平衡计算以及预测生产的结果和各个物流的状态^[8]。模拟过程主要包括流程模拟定义、流程模拟参数设置、输出模拟结果等。在进行模拟过程参数设置的过程中需要对具体的化工生产过程有较充分的理解,提醒学生进行软件流程模拟需要先对生产过程进行了解和分析。简要介绍流程模拟定义包括基本的单位和组分定义、选择合适的单元操作模块,用

物流线连接单元模块;而参数设置主要包括物流流量和组成的输入、模块数据的输入,比如设备的操作温度和压力等,以及物性方法的选择。掌握操作方法方面重点介绍初学者在初步使用软件时应该多应用 Next 导航进行模拟操作提示和查看模拟结果。

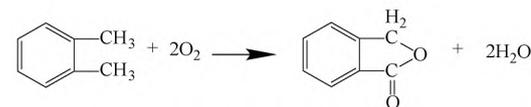
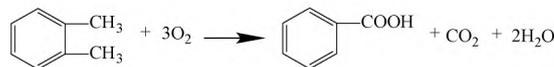
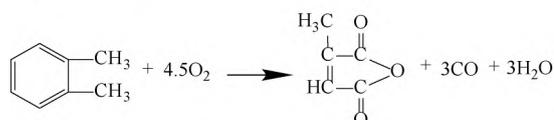
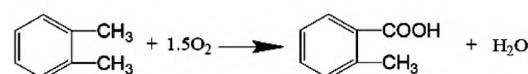
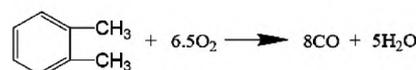
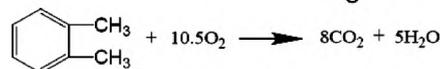
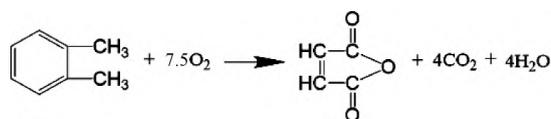
3.1.2 邻法反应原理

邻法生产苯酐是指在催化剂的作用下,加热汽化的邻二甲苯(OX)与空气混合,OX与氧气发生放热反应,主要是羧化的催化氧化反应,最终生成主产物苯酐蒸气和大量水蒸气,同时还会混杂着副反应生成的顺酐、苯甲酸等 VOC 以及 CO、CO₂ 等大气污染物,其主反应以及副反应的反应公式如下。

主反应:



副反应:



3.1.3 邻法技术工段流程模拟及软件参数设置

为方便学生理解,尽量简化软件流程模拟的建模过程和参数设置过程。邻法技术简化为以下 4 个阶段。(1) 原料预处理工段:空气与邻二甲苯分别经升温处理后,一起进入混合器 M101 中均匀混合得到流股 6。(2) 化学反应工段:流股

6 进入反应器 R201 中进行放热反应得到粗产品流股 7。(3) 苯酐提纯工段: 粗产品流股 7 经换热降温后, 进入固液分离器 V201, 分离出的液相流股 11 经升温后与空气混合后, 进行闪蒸分离操作; 随后产品流股 23 分别进入轻组分分离塔 T401 和重组分分离塔 T402, 分离得到纯度较高

的苯酐产品流股 33。(4) 回收废气工段: 固液分离器 V201 分离出的气相流股 10 进入水洗塔 T301 回收反应产生的部分酸性气体。采用软件界面主窗口演示流程图搭建过程, 明确具体的装置模块和物流及其数据输入, 最终所构建的邻法流程模拟模型如图 2 所示。

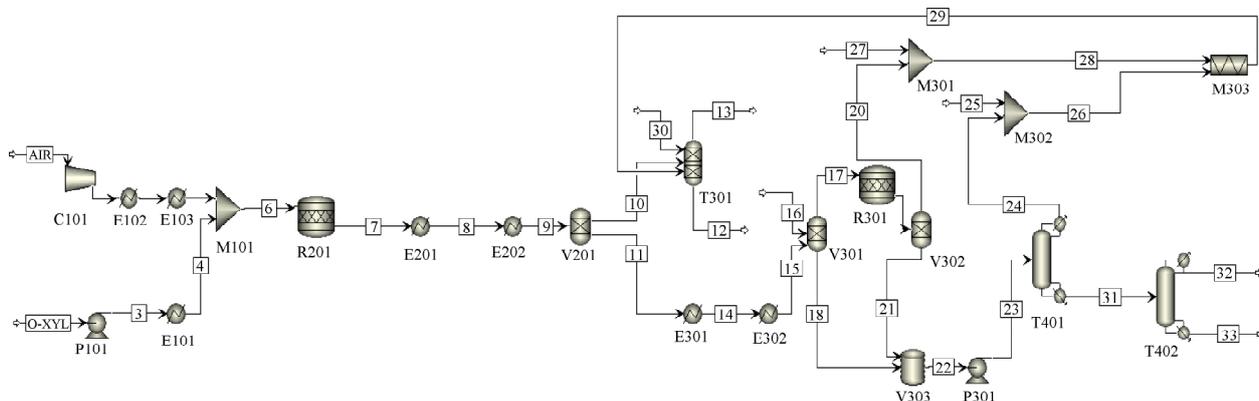


Fig. 2 Process simulation of PA production by *o*-xylene

图 2 邻法流程模拟示意图

参数设置方面, 简要向学生说明流程模拟过程物性方法的选择和设置是决定模拟结果准确性的关键步骤, 且物性方法包含计算热力学性质和传递性质的方法和模型。在模拟邻法的过程中, 根据反应过程的物性特点, 采用 PENG-ROB 状态方程计算常规固体组分和常规气体组分的热力学性质。根据邻法反应中涉及各组分变化, 在 Aspen Plus 软件中输入组分种类及进料组分信息: 组分种类包括邻二甲苯、氧气、苯酐、邻苯二甲酸、顺酐等; 设置进料邻二甲苯温度为 25 °C, 压力 1.0 bar, 流量 3 090.3 kg/h; 设置进料空气温度为 25 °C, 压力 1.0 bar, 流量 47 366.5 kg/h, 其中氧气占其体积分数的 0.21, 流量为 9 947.0 kg/h; 设置进料水温度 25 °C, 压力 1.0 bar, 流量 10 000.0 kg/h。此外, 设置反应温度 370 °C, 压力 3.2 bar, 以及确定必要的产物的转化率。

3.1.4 模拟结果清单

假设每年工厂正常生产时间为 8 000 h, 经过模拟和质量能量衡算, 该技术每年需消耗电力能源共 5.54×10^7 kWh, 消耗 OX 原料共 24 722.4 t, 可获得纯度较高的苯酐产品共 28 829.6 t, 同时直接排放 CO₂ 共 6 149 600 kg, CO 共 315 200 kg, 以及 VOC 共 3 128 000 kg (VOC 包括微量苯酐、顺酐、苯甲酸、甲基马来酸酐、邻甲基苯甲酸等)。

3.2 教学内容拓展——苯酐生产环境风险评价

在帮助学生深化有关环境工程原理的质量能量

衡算理论后, 进一步结合 LCA 帮助学生了解有关环境污染识别和风险评估方法和计算原理。通过 LCA 量化邻法生产苯酐技术全生命周期过程对环境的直接或潜在影响, 主要围绕 LCA 系统边界的确定、LCA 清单分析及分类、清单数据特征化、标准化和加权处理、LCA 结果解释等展开教学。LCA 是环境工程专业学生未来从事环评和清洁生产审核等工作所需要掌握的重要工具, 结合该方法对科研案例进行讲解对学生综合应用多学科交叉知识和关联本专业课程群的创新实践能力具有重要的引导作用。

3.2.1 邻法 LCA 系统边界的确定

首先向学生明确 LCA 系统边界确定的重要性。在进行 LCA 过程中, 系统边界范围会影响评估结果的精确性和可靠性, 不同的系统边界会产生不同的评估结果。为方便学生理解 LCA 的应用, 对本科研案例的系统边界进行了精简, 在教学过程中将邻法的 4 个工段纳入系统边界, 如图 3 所示, 不考虑原材料的开采与运输环节, 同时不考虑产品的销售使用环节, 仅考虑苯酐生产流程中的物料能源消耗和废气污染物排放。

3.2.2 LCA 清单分析及分类

LCA 清单分析及分类即根据系统边界中的能源和原材料的投入以及废气污染物的产生, 确定其对环境可能会造成的影响。选取 1 t 苯酐作为功能单位, 用总耗电量除以苯酐产量即可获得生产 1 t

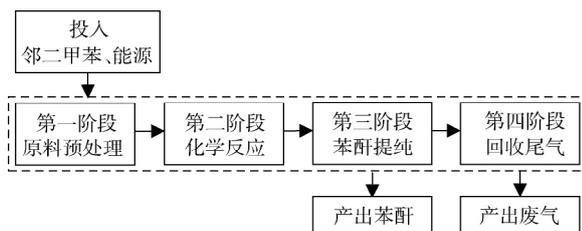
Fig. 3 LCA scope of PA production by *o*-xylene

图3 邻法 LCA 系统边界

苯酚共消耗电能 1 921.64 kWh, 同理可得生产 1 t 苯酚共消耗 OX 原料 857.54 kg, 并直接排放 213.31 kg CO₂、10.93 kg CO 以及 108.5 kg VOC。目前我国电能生产主要以燃煤为主, 根据国家统计局每度电折算 0.122 9 kg 标准煤计算, 生产 1 t 苯酚共消耗标准煤 236.17 kg。每燃烧 1 kg 标准煤可排放 2.5 kg CO₂、0.02 kg SO₂、0.009 kg NO_x 以及 0.001 09 kg CO^[13-14], 因此可计算得生产 1 t 苯酚间接排放 590.42 kg CO₂、4.72 kg SO₂、2.13 kg NO_x 以及 0.26 kg CO。通过引导学生进行物料和能耗的投入产出计算, 最终获得邻法生命周期污染物排放清单如表 1 所示。

根据环境领域的专业背景知识可知, 邻法生产苯酚过程中直接或间接产生的 CO、NO_x 和 VOC 会促进光化学烟雾的形成, CO、SO₂ 和 NO_x 对人体具有毒害效应, CO₂ 是引发全球变暖的温室气体之一, SO₂ 和 NO_x 是酸雨效应的致因因子。因此, 选择光化学烟雾形成 (POCP)、人体毒性潜力 (HTP)、全球变暖 (GWP) 以及酸化效应 (AP)

表 2 邻法生命周期清单特征化结果

Table 2 Characterization of life cycle inventory of PA production by *o*-xylene

环境影响类型	胁迫因子	基准物	环境影响潜值单位	特征化因子	环境影响潜值
光化学烟雾形成 (POCP)	CO	C ₂ H ₄	kgC ₂ H ₄ -eq	0.03	46.76
	NO _x	C ₂ H ₄	kgC ₂ H ₄ -eq	0.7	
	VOC	C ₂ H ₄	kgC ₂ H ₄ -eq	0.416	
人体毒性潜力 (HTP)	SO ₂	1,4-DCB	kg1,4-DCB-eq	0.096	3.14
	NO _x	1,4-DCB	kg1,4-DCB-eq	1.2	
	CO	1,4-DCB	kg1,4-DCB-eq	0.012	
全球变暖 (GWP)	CO ₂	CO ₂	kgCO ₂ -eq	1.00	803.73
酸化效应 (AP)	SO ₂	SO ₂	kgSO ₂ -eq	1	5.79
	NO _x	SO ₂	kgSO ₂ -eq	0.5	

3.2.4 标准化和加权处理

标准化即是将各种环境影响类型的环境影响潜值除以对应的世界环境影响类型基准值, 以提供对比不同环境影响类型大小的依据, 标准化计算公式如 (2) 所示:

等 4 种环境影响类型进行分析论证, 探讨该技术对环境所造成的影响。

表 1 邻法生命周期污染物排放清单

Table 1 Life cycle pollutant emission inventory of PA production by *o*-xylene

污染物	排放量/kg		
	直接排放	间接排放	总排放量
CO ₂	213.31	590.42	803.73
CO	10.93	0.26	11.19
VOC	108.50	—	108.50
SO ₂	—	4.72	4.72
NO _x	—	2.13	2.13

3.2.3 清单数据特征化

清单数据特征化即利用生命周期清单中污染物 (胁迫因子) 的排放数据以及污染物的相关性系数转化为可以反映该技术环境影响特征的数据, 即环境影响潜值, 各种环境影响类型的特征化计算公式如 (1) 所示:

$$EP(j) = \sum EP(j)_i = \sum [(Q_i \times EF(j)_i)] \quad (1)$$

式中, EP(*j*) 表示该技术对环境影响类型 *j* 的贡献度 (环境影响潜值), EP(*j*)_{*i*} 表示胁迫因子 *i* 对环境影响类型 *j* 的贡献度, Q_{*i*} 表示胁迫因子 *i* 的排放量, EF(*j*)_{*i*} 表示胁迫因子对环境影响类型 *j* 的特征化因子。邻法生命周期特征化过程中不同环境影响类型所选用的基准物、特征化因子^[15] 以及环境影响潜值如表 2 所示。

$$NER(j) = \frac{EP(j)}{NR(j)} \quad (2)$$

式中, NER(*j*) 为环境影响类型 *j* 标准化结果, NR(*j*) 为环境影响类型 *j* 的世界基准值。根据参考文献[16]提供的 2000 年世界人均环境影响

潜值, 计算得标准化结果如表 3 所示。

表 3 邻法环境影响潜值标准化结果

Table 3 Environmental impact potential value standardization of PA production by *o*-xylene

环境影响类型	环境影响潜值	基准值	标准化结果
光化学烟雾形成 (POCP)	46.76	34.72	1.347
人体毒性潜力 (HTP)	3.14	197.21	0.0159
全球变暖 (GWP)	803.7	6869	0.117
酸化效应 (AP)	5.79	52.26	0.111

为获得邻法的生命周期综合环境影响指数, 应对环境影响类型进行加权处理。令各环境影响类型权重均为 0.25 以方便学生理解和应用, 将各环境影响类型的标准化结果乘以权重可计算得各环境影响类型的加权值, 对加权值进行累加可获得综合环境影响指数, 各种环境影响类型的加权值和以及其占综合环境影响指数的比重分别如表 4 和图 4 所示。

表 4 邻法环境影响潜值标准化加权处理结果

Table 4 Weighted results of environmental impact potential value standardization of PA production by *o*-xylene

环境影响类型	加权值
光化学烟雾形成 (POCP)	3.37×10^{-1}
人体毒性潜力 (HTP)	3.98×10^{-3}
全球变暖 (GWP)	2.93×10^{-2}
酸化效应 (AP)	2.77×10^{-2}
综合环境影响指数	3.98×10^{-1}

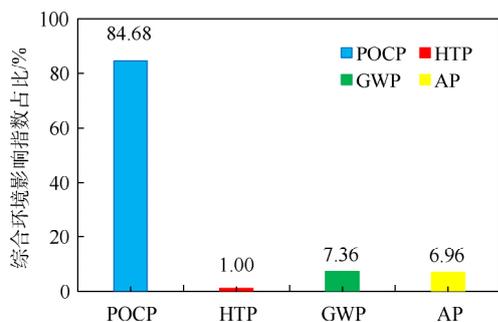


Fig 4 Proportion of integrated environmental impact index in the life cycle of PA production by *o*-xylene

图 4 邻法生命周期综合环境影响指标占比

3.2.5 LCA 结果解释

引导学生完成邻法 LCA 数据分析后, 进一步结合环境工程原理中污染防控的相关知识进行 LCA 结果解释。综上所述可以看到, 光化学烟雾形成 (POCP) 是邻法的主要环境影响类型, 其比重高达 84.68%, 而直接排放的 CO 和 VOC 是该影响类型的关键贡献因子; 其次为温室效应 (GWP), 比重为 7.36%; 酸化效应 (AP) 位列第三, 比重为 6.96%; 人体毒性潜力占比最小, 仅为 1.00%。

因此, 要降低邻法的整体环境影响, 应采取降低 CO 和 VOC 的直接排放, 以降低 POCP 影响程度。此处可以引入环境工程原理中有关化学吸收和微生物反应器的相关内容, 以强化学生对污染物处理的理解。例如, 根据上述 VOC 组分的化学特性, 可通过装载着化学吸收剂的填料塔或者喷淋塔设备对 VOC 进行吸收去除, 或者使 VOC 通过生物滴滤塔使其被微生物作为养料吸收利用降解为 CO₂ 和 H₂O。此外, 考虑到 VOC 和 CO 主要来源于各类副反应, 可以通过研究邻法的化学反应机理, 探索相关措施抑制副反应, 进而降低 VOC 和 CO 的排放, 最终降低综合环境影响。

3.3 教学实施效果总结与反思

本教学实践采用具有学生认识实践工程情境关联的苯酐生产过程科研案例, 提出基于 LCA 耦合 Aspen Plus 软件的环境工程原理教学实践方案, 教学目标是关联环境工程原理基础篇和污染防治单元操作篇, 从而培养学生的综合实践能力。具体教学过程中采用了工程情境关联、动画及具体应用软件和计算方法展示、启发式教学、工程案例导入等多种教学方法和手段融合, 是一次符合新工科多学科交叉融合教学理念的尝试, 极大地激发了学生的学习兴趣和对课程实用性的认同感。在具体教学过程中, 由于采用了一些较新的工程软件和分析方法, 有些学生不能一下子全部掌握, 通过教学反思, 可以在基础篇讲解时先尝试介绍有关联的软件和基础应用案例, 从而在综合科研案例引入和教学实践中可以更好地让学生理解和参与进来。也可以结合课程设计或项目专题作业让学生以团队的方式进行拓展和学习, 并带领学生参加课程相关的高规格学科/跨学科竞赛, 以取得更好的教学目标设定结果。

基于前期环境工程原理和相关交叉关联课程的教学经验积累, 教学团队采用该教学方法和教学理念重点对本校 2017—2019 级的环境工程专业共约 210 名学生进行了教学实践, 并取得了良好的教学效果: 一是学生对综合教学案例所涉及的理论知识板块的难点和要点的理解更加透彻, 期末考核在保持成绩正态分布的前提下实现了由传统卷面成绩不及格率超过 30% 降低并稳定在 7% 左右。二是深化了学生对课程理论知识的理解并提高了学生应用专业知识分析和解决化工生产环境污染工程问题的综合能力。通过近 3 年教学实践指导相关环境工程专业学生参加高规格学科/跨学科竞赛, 获得了全国大学生化工设计大赛、全国大学生化工安全设计大赛等近 10 项国家级重要奖项。三是学生对该课程

教学满意度得到了极大提升,课程教学团队负责人近3年6次综合评教均获“优秀”等级,学生评教平均分高达94.2。

4 结论

环境工程原理是一门化工和环境相结合的重要基础课程,学习环境工程原理的目的是为了让学生了解实际工程中污染物的处理处置原理并加以应用。本教团队采用邻法生产苯酐的科研案例,提出基于LCA耦合Aspen Plus软件的环境工程原理教学实践方案,即通过引导学生应用Aspen Plus软件构建邻法生产苯酐流程模拟模型,并耦合LCA理论评估邻法生产苯酐全生命周期的环境风险,不仅让学生掌握了有关Aspen Plus软件和LCA的基础应用方式,同时让学生进一步了解环境工程原理中重要的质量能量衡算理论知识,培养了学生识别工程项目环境污染风险并结合环境污染防治原理提出防治方案的意识。

目前,鉴于我国工业正在经历重大转型阶段,我国对高素质新工科人才的需求前所未有。为此,本教学团队秉承产教深度融合、学科交叉教学等理念促进新工科人才培养,以环境工程原理课程教学为着力点推动教学实践方案改革,有利于学生开拓视野,锻炼扎实的环境工程专业实践能力。通过相关教学方案改革创新,本团队主讲的环境工程原理2020年获批准广东省一流本科课程,目前已被广东省教育厅推荐参评国家一流课程。未来将进一步探索更多实用的教学实践方案,以培养新时代复合

型、应用型工科人才。

参 考 文 献

- [1] 胡洪营,张旭,黄霞,等. 环境工程原理. 3版. 北京:高等教育出版社,2015
- [2] 项东,靳通,方远婷,等. 化学教育(中英文),2018,39(16):68-71
- [3] 郑秋闾,范晶晶. 化学教育(中英文),2017,38(6):68-71
- [4] 杨金杯,余美琼,陈文韬. 化学教育(中英文),2021,42(4):78-85
- [5] 腾波涛,谢坚坚,冯姗,等. 化学教育,2016,37(22):57-60
- [6] 王久亮,李建军,刘敬禹,等. 化学教育(中英文),2020,41(18):34-38
- [7] Weidema B, Brandão M. Journal of Industrial Ecology, 2020, 24(3):726-730
- [8] 孙兰义. 化工过程模拟实训——Aspen Plus教程. 2版. 北京:化学工业出版社,2017
- [9] Huang W Q, Xiang D. Separation and Purification Technology, 2021, 260:118210
- [10] 黄卫清,邱永福,花开慧,等. 广东化工,2020,47(1):192-193
- [11] 曹静,林萍. 化工进展,2015,34(4):976-979,1028
- [12] 崔小明. 石油化工技术与经济,2016,32(5):19-23
- [13] 姚强,陈超. 洁净煤技术. 北京:化学工业出版社,2005
- [14] 邢爱华,马捷,张英皓,等. 清华大学学报:自然科学版,2010,50(6):917-922
- [15] Guinée J B, Marieke G, Reinout H, et al. Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 2002
- [16] Sleeswijk A W, Van Oers L F C M, Guinée J B, et al. Science of the Total Environment, 2008, 390:227-240

Application of Scientific Research Case in Teaching of Principles of Environmental Engineering Based on Aspen Plus Coupled with LCA

HUANG Wei-Qing^{1,2**} LI Han¹

(1. School of Environment and Civil Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China; 2. Guangdong Provincial Key Lab of Green Chemical Product Technology, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract Based on the cooperative application and expansion of course contents including the chemical process mass and energy balance and environmental pollution prevention, the scientific research of “study on production process simulation and environmental risk of phthalic anhydride” is built and used as the comprehensive teaching case for the course. During the teaching practice, the chemical process simulation software Aspen Plus combined with the environmental risk assessment tool “life cycle assessment” (LCA) is involved and introduced. The teaching practice shows that the introduction of engineering-related teaching case not only makes abstract theoretical knowledge more accessible and concrete, but also deepens students’ understanding of curriculum knowledge. More importantly, students’ comprehensive ability to analyze and solve the environmental pollution problems of chemical production by using the professional knowledge is strengthened, which lays a solid foundation for them to step into related fields in the future.

Keywords life cycle assessment; Aspen Plus; principles of environmental engineering; environmental risk assessment; process simulation