

基于“教 - 赛 - 科”协同育人的化工工艺热风险及评估教学创新

——Aspen Plus驱动的课程改革与实践

杨 傲, 黎 勇, 王梓霖, 梁馨月, 郑星群*

重庆科技大学安全科学与工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年3月14日; 录用日期: 2025年4月18日; 发布日期: 2025年4月28日

摘 要

项目以化工安全工程专业的必修课程化工工艺热风险及评估课程为例, 引入了Aspen Plus化工流程模拟软件中的反应器模块, 以乙酸乙酯和异丙苯合成过程为教学案例。在两个案例教学中分别采用了全混釜反应器和平推流反应器进行设计, 针对设计过程中使用Aspen Plus软件自带的Model Analysis Tool工具来设计满足生产要求的操作条件, 引入过程路径指数对模拟结果的安全性进行了评估, 从教学结果可以看出, 在融合了流程模拟软件以后的课程, 将繁杂的理论公式以可视化的模型展示出来, 可以充分激发学生的学习兴趣、调动学生的积极性, 从理论知识到工程设计应用进行了全方位的学习, 进一步, 通过竞赛来深化学生的整体学习效果达到“教 - 赛 - 科”协同育人的理念。

关键词

化工安全, 反应器, 本质安全, 过程模拟, 教学设计

Innovation in Chemical Thermal Risk Assessment Teaching Based on “Teaching-Competition-Science” Collaborative Education

—Curriculum Reform and Practice Driven by Aspen Plus

Ao Yang, Yong Li, Zilin Wang, Xinyue Liang, Xingqun Zheng*

College of Safety Science and Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing

*通讯作者。

文章引用: 杨傲, 黎勇, 王梓霖, 梁馨月, 郑星群. 基于“教-赛-科”协同育人的化工工艺热风险及评估教学创新[J]. 创新教育研究, 2025, 13(4): 519-527. DOI: 10.12677/ces.2025.134277

Abstract

This project takes the compulsory course of Chemical Process Thermal Risk and Assessment for Chemical Safety Engineering as an example. The reactor module in the Aspen Plus chemical process simulation software is introduced, and the synthesis process of ethyl acetate and cumene is used as a teaching case. In two case studies, a continuous stirred tank reactor and a plug flow reactor were used for design. In the design process, the Model Analysis Tool built-in Aspen Plus software was used to obtain operating conditions that meet production requirements. The process route index was introduced to evaluate the safety of the simulation results. From the teaching results, it can be seen that in the course after integrating the process simulation software, displaying the complex theoretical formulas in a visual model can fully stimulate students' interest in learning and stimulate their enthusiasm. It provides comprehensive learning from theoretical knowledge to engineering design applications, and the concept of "teaching-competition-science" collaborative education can be achieved by deepening students' overall learning outcomes through competitions.

Keywords

Chemical Safety, Reactor, Intrinsically Safe, Process Simulation, Teaching Design

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

化工工艺热风险及评估是高校化工安全工程专业的一门重要必修专业课程，主要讲授化学工程中的反应器原理、设计及热风险分析、计算与评估等，内容涉及化学反应工程、化工热力学、化工计算、危险化学品管理等诸多课程的基础理论知识与工程应用背景[1]。该课程具有专业背景和数学功底要求高、理论计算复杂抽象等特点。课程内的热风险评估需要反应动力学、反应热力学和微积分相结合实现绝热温升、反应热稳定性计算等。因此，采用传统的教学模式将该课程的理论知识和计算方法传授给学生，会导致大部分学生由于难以理解、学习困难而对化工工艺热风险及评估这门课失去学习兴趣。为了解决上述难题，本项目在传统课程教学中引入了以 Aspen Plus 的数值模拟方法，将枯燥的理论知识和数学推导用可视化模型来替代，激发学生的学习兴趣，增强学生对该课程的理论知识学习[2]-[5]。进一步，通过热风险评估基础知识锻炼学生 Aspen Plus 的应用，在熟练使用软件时鼓励学生参加全国大学生化工安全设计大赛，在作品中寻找创新点实现化工过程的节能降碳和安全防护。强化学生的工程应用能力，培养企业需要的高水平、国际化、高能力的化工安全专业应用型人才。本文以乙酸乙酯和异丙苯合成过程为教学案例，针对不同的反应动力学和反应器类型做了详细的概述，系统地讲述 Aspen Plus 在化工工艺热风险及评估教学中的应用研究。

2. Aspen Plus 反应器模型介绍

如图 1 所示，Aspen Plus 中有 7 种不同类型的反应器模型，可分为四个类型[6]-[8]。第一类：RStoic 和 RYield 是计量和收率反应器，可以根据实验获得的反应物数据进行设置，得到整个反应过程需要的热

量等参数。第二类：REquil 和 RGibbs 分别是平衡和吉布斯反应器，可以通过反应平衡数据、温度和压力等参数获得反应器进出口物流和热量等参数。第三类：RCSTR 和 RPlug 是全混釜反应器和平推流反应器，需要详细的动力学数据才可以进行反应器设计。最后一类是 RBatch，间歇反应器，批量进料进行反应。

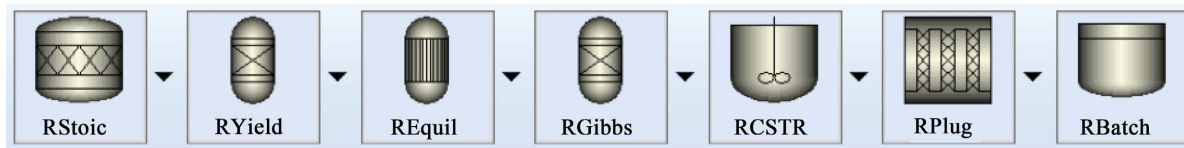


Figure 1. The reactor model in Aspen Plus

图 1. Aspen Plus 中反应器模型

Aspen Plus 中常用的动力学类型为幂律型和双曲线吸附模型，见公式(1)和公式(2)。

$$r = kT^n e^{-E/RT} \prod (C_i)^{\alpha_i} \quad (1)$$

$$r = \frac{\text{kinetic factor} \times \text{driving force expression}}{\text{adsorption expression}}$$

$$\text{kinetic factor} = kT^n e^{-E/RT} \quad (2)$$

$$\text{driving force expression} = K_1 \prod_i C_i^{v_i} - K_2 \prod_j C_j^{v_j}$$

$$\text{adsorption expression} = \left(K_i \prod_j C_j^{v_j} \right)^m$$

式中， r 是反应速率； k 为指前因子； T 为温度，单位 K； E 是活化能； C 是组分浓度； K_1 、 K_2 和 K_i 是平衡常数； m 为吸附项表达式幂指数； n 是温度常数； v 是浓度指数。

在 Aspen Plus 中吸附常数可以通过输入项的数量和系数来进行定义，见公式(3)。

$$\ln K_i = A_i + \frac{B_i}{T} + C_i \ln T + D_i T \quad (3)$$

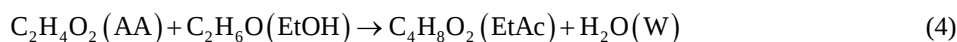
式中， A_i 、 B_i 、 C_i 和 D_i 是用户通过计算提供的常数项。

3. 课程设计基础

在课程教学前，需要学生在化学反应式配平、反应动力学类型、反应器的原理与设计方面有一定的知识储备量，便于后续的课程教学。

3.1. 乙酸乙酯生产工艺

乙酸($C_2H_4O_2$, AA)与乙醇(C_2H_6O , EtOH)可以发生酯化反应生成乙酸乙酯($C_4H_8O_2$, EtAc)和水(H_2O , W)，反应操作压力为 3 bar，初步假设反应在操作温度为 100℃ 下进行，化学反应式见公式(4)，反应速率方程见公式(5) [8] [9]。



$$(-r_{AA}) = k \left(C_{AA} C_{EtOH} - \frac{1}{K_C} C_{EtAc} C_W \right) \quad (5)$$

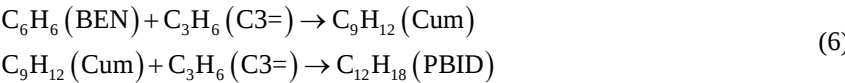
式中， $k = 0.02479 \exp \left(-\frac{3.211 \times 10^7}{RT} \right)$ 。

$$K_{\text{EtAc}}=1.019\times10^{-19}\exp\left(\frac{1.39\times10^8}{RT}\right)$$

C_{AA} 、 C_{EtOH} 、 C_{EtAc} 和 C_{W} 是乙酸、乙醇、乙酸乙酯和水的摩尔浓(kmol/m³); R 是气体常数, 为 8.314 J/(mol·K); T 是温度, 单位 K。

3.2. 异丙苯生产工艺

异丙苯(C₉H₁₂, Cum)可以通过苯(C₆H₆, BEN)与丙烯(C₃=)反应制得, 见公式(6)。同时异丙苯合成过程会与丙烯反应生成副产物对二异丙苯(C₁₂H₁₈, PBID), 见公式(7)。上述两个反应均为不可逆反应, 反应压力为 25 bar, 列管式反应器(342 根 0.0763 m 直径的反应管), 反应侧的热流温度为 360℃, 传热系数为 0.065 kW/m²/K, 催化剂的固体密度为 2000 kg/m³, 床层孔隙率为 0.5 [10]。



$$\begin{aligned} R_1 &= 2.8\times10^7 \times e^{-104174/RT} C_{\text{C3=}} C_{\text{BEN}} \\ R_2 &= 2.32\times10^9 \times e^{-146742/RT} C_{\text{Cum}} C_{\text{C3=}} \end{aligned} \tag{7}$$

式中, R_1 和 R_2 是主反应和副反应的速率; $C_{\text{C3=}}$ 、 C_{BEN} 、 C_{Cum} 是丙烯、苯和异丙苯的摩尔浓度(kmol/m³)。

3.3. 安全性指标

在化工工艺过程安全指标计算时, 可选用工艺流程指数(Process Safety Index, PSI)作为安全性指标, 详细计算见公式(8)和公式(9) [11]-[15]。

$$PSI = \frac{\text{质量热值} \times \text{密度} \times \text{压力} \times \text{可燃性}}{10^8} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} LFL_{\text{mixture}} &= \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{LFL_i}} \\ UFL_{\text{mixture}} &= \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{UFL_i}} \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} LFL_T &= LFL_{25} \times \left[1 - \frac{0.75 \times (T - 25)}{\Delta H_C} \right] \\ UFL_T &= UFL_{25} \times \left[1 + \frac{0.75 \times (T - 25)}{\Delta H_C} \right] \end{aligned}$$

式中, 质量热值、密度和压力的单位分别是 kJ/kg、kg/m³ 和 atm, 其中可燃性为无量纲数值; n 表示工艺过程中的物流数量; LFL_{mixture} 和 UFL_{mixture} 是混合物的爆炸下限和上限, %/%; LFL_i 和 UFL_i 是组分 i 的爆炸下限和上限, %/%; LFL_T 和 UFL_T 是在温度 T 时的爆炸下限和上限, %/%; LFL_{25} 和 UFL_{25} 是在温度 25℃ 下的爆炸下限和上限, %/%; ΔH_C 表示燃烧热, kcal/mol; 各组分的燃烧热和爆炸极限见表 1。

Table 1. The calorific value and standard combustion upper and lower limits of each component
表 1. 各组分的热值和标准燃烧上下限

组分	ΔH_C /(kcal/mol)	LFL_{25} /(%/%)	UFL_{25} /(%/%)
乙酸乙酯/EtAc	-492.261	2.0	11.5

续表

乙醇/EtOH	-294.975	3.1	27.7
乙酸/AA	-194.564	6.0	17.0
异丙苯/C ₉ H ₁₂	-1182.53	0.9	6.5
苯/C ₆ H ₆	-749.021	1.2	8.0
丙烯/C ₃ H ₆	-460.065	2.4	10.3
丙烷/C ₃ H ₈	-487.988	2.1	9.5
对二异丙苯/C ₁₂ H ₁₈	-1616.99	0.9	6.5

表 1 内各组分热值(ΔH_c)是通过 Aspen Plus 软件查询得到, 标准燃烧上下限(LFL_{25} 和 UFL_{25})是通过国际化学品安全卡查询(<http://icsc.brics.ac.cn/>)。

4. 教学过程设计

4.1. 课前预习

学生在进行反应器 Aspen Plus 仿真模拟前, 要求学生查阅 Aspen Plus 的帮助文件, 学习如何将给定的化学反应动力学输入到 Aspen Plus 中。此外, 还需要提前了解一下全混釜反应器和平推流反应器的工作原理、内部结构和操作参数等。

4.2. 乙酸乙酯生产工艺仿真模拟及安全评估

乙酸乙酯合成过程的化学反应式见公式(4), 动力学数据见公式(5), 属于双曲线吸附类型。点击 Aspen Plus User Interface 打开软件, 在 Reactor 界面选择 RCSTR 全混釜反应器(见图 2), 输入操作温度(100℃)、压力(3 bar)、反应器体积(19 m³)、反应相态(液相)、反应动力学等参数, 在设计过程中要求乙酸转化率在 35%以上, 且反应器体积不超过 20 m³。

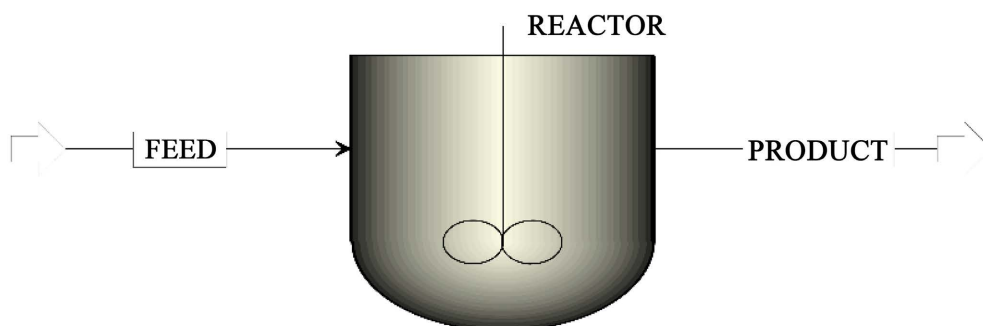


Figure 2. Synthesis of ethyl acetate in continuous stirred tank reactor of Aspen Plus

图 2. Aspen Plus 内全混釜反应器合成乙酸乙酯

原料流量是 4 m³/h, 温度 30℃, 压力 5 bar, 原料中反应组分的质量比为 AA:EtOH:W = 1:2:1.35。在设定完参数以后运行建立的乙酸乙酯生产工艺, 从模拟结果可知, 乙酸的含量由进料的 13.6242 kmol/h 降低到了 8.9147 kmol/h, 即乙酸转化率为 34.57%, 不满足 35%的设计要求。此时, 可以让学生回顾化工工艺热风险及评估课程中关于反应器的原理部分知识, 结合前期学习的化工热力学和反应工程, 对于吸热反应, 增大反应器的体积和操作温度会增大乙酸转化率。为了验证上述所学内容, 通过 Aspen Plus 的 Sensitivity Analysis Tool 工具[16] [17], 设定反应温度范围为 80℃到 100℃, 步长为 1℃; 反应器体积范围为 19 m³到 20 m³, 步长为 0.2 m³, 分析结果如图 3 所示。

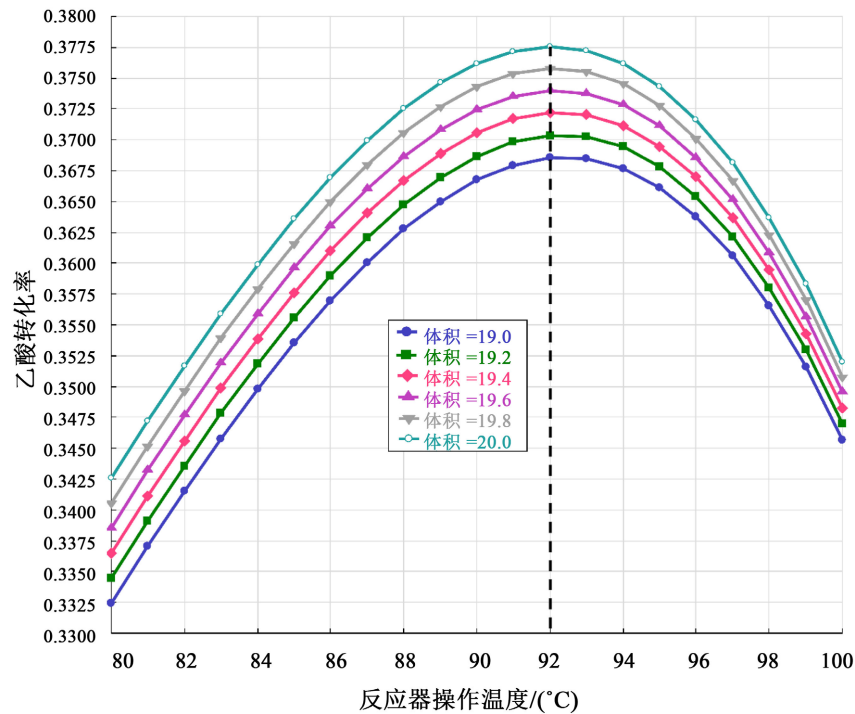


Figure 3. The effect of reactor temperature and volume on acetic acid conversion rate
图 3. 反应器温度和体积对乙酸转化率的影响

从图 3 可以看出, 反应温度在 80℃ 到 92℃ 之间, 随着温度的增加, 乙酸的转化率逐渐增大, 说明在此温度范围内, 正向的反应速率大于逆向反应速率, 整体呈现上升趋势。反应温度在 92℃ 到 100℃ 之间, 随着温度的增加, 乙酸转化率逐渐减小, 说明在此温度范围内, 正向反应速率小于逆向反应速率, 整体呈现下降趋势。反应器体积在 19 m³ 到 20 m³ 之间时, 随着反应器体积的增加, 乙酸转化率也随之增大。最终选择 92℃ 和 20 m³ 作为反应器的操作参数, 通过模拟可知, 乙酸在产品物流含量由 8.9147 kmol/h 降低到了 8.4803 kmol/h, 此时乙酸的转化率达到 37.76%, 满足 35% 的设计要求。

通过 Aspen Plus 和公式(9)可以获取各个物流的质量热值、密度、压力和可燃性数值, 通过公式(8)可以计算出整个工艺的安全性指标 PRI 数值, 从表 2 可以看出乙酸乙酯合成反应的前后流股 PSI 分别为 13.28 和 7.33。

Table 2. The calculation of safety parameters for the production process of ethyl acetate
表 2. 乙酸乙酯生产工艺的安全性参数计算

物流名称	质量热值/kJ/kg	密度/kg/m ³	压力/atm	可燃性/%/%	PSI
FEED	15443.67	889.76	4.93	19.60	13.28
PRODUCT	15460.15	817.77	2.96	13.93	7.33

4.3. 异丙苯生产工艺仿真模拟及安全评估

异丙苯合成过程反应器内温度在 360℃ 以上, 因此, 在进料处添加一个蒸发器来预测物料, 丙烯物料(C3)和苯(BENZENE)在混合器(MIXER)进行混合。其中 C3 物流由 95% 的丙烯和 5% 的丙烷组成, 物流温度和压力分别为 25℃ 和 25 bar。BENZENE 物流只包含了苯, 操作温度和压力是 46℃ 和 25 bar。混合后的物流送至预热器(HEATER)加热到 360℃ 以后, 直接进入平推流反应器内(REACTOR), 工艺流

程图见图 4。

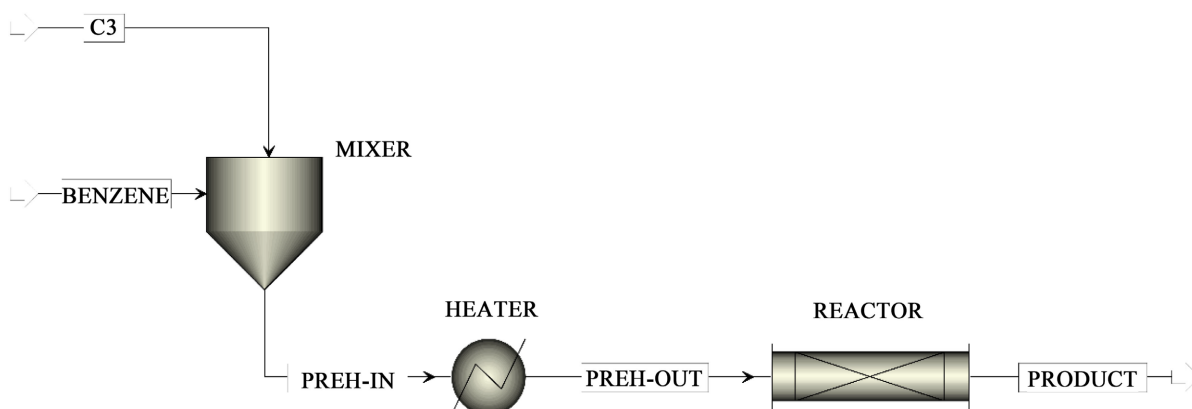


Figure 4. Synthesis of isopropylbenzene using Plug Flow Reactor of Aspen Plus

图 4. Aspen Plus 内平推流反应器合成异丙苯

反应器进行仿真模拟以后,可以得到产品物流(PRODUCT)温度为 380.55℃,组成为 5.5 kmol/h 的丙烷、106.603 kmol/h 的苯、96.290 kmol/h 的异丙苯和 4.108 kmol/h 的对二异丙苯。在整个反应过程中,为了保证丙烯可以完全反应,加入的苯是过量的,从计算结果可以看出,以丙烯计算转化率接近于 100%。表 3 列出了在此条件下反应过程的各个流股 PSI 数值。从表 3 可以看出,C3、BENZENE 和 PREH-IN 这三个流股的安全性较差,PREH-OUT 和 PRODUCT 流股的安全性较好。

Table 3. The calculation of safety parameters for the production process of isopropylbenzene

表 3. 异丙苯生产工艺的安全性参数计算

物流名称	质量热值/kJ/kg	密度/kg/m ³	压力/atm	可燃性/%/%	PSI
BENZENE	40146.64	850.78	24.67	6.61	55.70
C3	45803.22	505.27	24.67	7.87	44.93
PREH-IN	41407.90	758.93	24.67	7.31	56.67
PREH-OUT	41407.90	31.18	24.67	10.05	3.20
PRODUCT	40850.30	45.04	24.67	7.97	3.62

通过表 2 和表 3 的对比,可知在乙酸乙酯生产案例中 FEED 物流的危险性更大,在异丙苯生产案例中 C3、BENZENE 和 PREH-IN 这三个流股的安全性较差。PSI 主要由质量热值、密度、压力和可燃性四个部分组成,从计算结果可知两个案例中安全性较差的物流主要是质量热值和密度引起的。通过上述结果,引导学生根据所学危险与可操作性分析(HAZOP)知识对工艺安全性进行识别和判断,根据洋葱模型理论在工艺 PID 图中建议加入易燃组分泄露检测装置或温度/压力警报装置,当事故发生时及时进行预警并按照应急预案进行抢救减少人民的生命和财产损失。

5. 教学评价

在融入了 Aspen Plus 模拟的化工工艺热风险及评估课程评估中,学生成绩分为三部分:平时作业(30%)、反应器模拟与安全评估报告(20%)、期末考试(50%)。其中,平时成绩和期末考试可以考察学生在课堂学习过程中对于基础理论知识的掌握程度;反应器模拟与安全评估报告可以锻炼学生的操作和工程应用能力。

进一步,针对 Aspen Plus 模拟在化工工艺热风险及评估课程中的实际应用效果进行了调查,以化安 2021-01 班级 28 名同学为调查对象,结果如表 4 所示。

Table 4. Evaluation survey of 28 students in class 2021-01 of Hua-An on the course
表 4. 化安 2021-01 班级 28 名同学对课程的评价调查

	对课程 感兴趣	Aspen Plus 帮助理解课本理论知识	愿意在更多的 课程加入仿真模拟
非常差	0	0	0
差	0	0	0
一般	10.9%	0	0
好	21.7%	34.8%	28.3%
良好	67.4%	65.2%	71.7%

从表 4 和学生反馈的意见可知,在加入了 Aspen Plus 的化工工艺热风险及评估课程,突破了原有的教学局限,引入了生动形象且能够实际操作的仿真模拟软件,学生更加愿意去学习,同时也更加容易掌握所学的知识,将所有知识融会贯通,从而应用到实际工业过程中。通过学习本门课程学生积极主动报名参加全国大学生化工安全设计大赛和全国大学生化工设计竞赛取得全国二等奖和三等奖的成绩。此外,学生积极与老师联系成功申报获批校级大学生创新创业项目,项目以指导教师的省部级项目天然气脱碳为例进行了量子化学计算、热力学分析和过程模拟等内容,项目成果拟撰写为科研论文。通过这种培养模式,学生能够从课堂学习转向积极参与学科竞赛和科研项目,真正实现了“教-赛-科”融合的新工科人才培养模式。

6. 总结

化工工艺热风险及评估是化工安全工程专业的一门专业必修课程,有较强的工程应用背景和理论基础,教学中引入了 Aspen Plus 化工流程模拟软件,将繁琐的化学反应工程计算进行了可视化、简化,让学生更容易、更积极地参与到学习过程中,调动了学生的主观能动性,拓宽了学生的专业知识领域,培养了学生将理论知识与实际工程相结合的意识。此外,通过本课程的学习,引导学生参加全国大学生化工安全设计大赛,在比赛中学生通过软件的运用,锻炼了学生的化工流程模拟操作能力,从理论知识出发去解决实际工程问题,提高工业反应的转化率、降低碳排放、减小过程的危险性,从而为双碳目标和人民生命安全提供保障,且更加符合当前智能制造的就业需求,增加了学生在未来工作中的竞争力。

基金项目

重庆科技大学本科教育教学改革研究项目(项目编号: 202459)。

参考文献

- [1] 陈网桦, 彭金华, 陈利平. 化工工艺的热安全——风险评估与工艺设计[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] 黄卫清, 李瀚. 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[J]. 化学教育, 2023, 44(2): 85-91.
- [3] 朴铁柱, 修石健, 张金月, 权波. Aspen HYSYS 模拟软件在分离工程教学中的应用[J]. 化工高等教育, 2020, 37(1): 147-150.
- [4] 高晓新, 陆凯锐, 陈群, 陈海群, 马江权, 汤吉海. 化工专业三元共沸物分离实验与模拟探究[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(8): 186-189.
- [5] 周志伟, 武文良. 基于确定灵敏板的精馏实验设计[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(4): 71-75.

-
- [6] Al-Malah, K.I.M. (2022) Aspen Plus® Chemical Engineering Applications. Wiley.
- [7] 熊杰明, 李江保, 彭晓希, 杨索和. 化工流程模拟 Aspen Plus 实例教程[M]. 第2版. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [8] 孙兰义. 化工过程模拟实训: Aspen Plus 教程[M]. 第2版. 北京: 化学工业出版社, 2020.
- [9] Tavan, Y., Behbahani, R.M. and Hosseini, S.H. (2013) A Novel Intensified Reactive Distillation Process to Produce Pure Ethyl Acetate in One Column—Part I: Parametric Study. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **73**, 81-86. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2013.05.015>
- [10] Luyben, W.L. (2011) Principles and Case Studies of Simultaneous Design. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118001653>
- [11] Zhu, J., Hao, L. and Wei, H. (2021) Sustainable Concept Design Including Economic, Environment and Inherent Safety Criteria: Process Intensification-Reactive Pressure Swing Distillation. *Journal of Cleaner Production*, **314**, Article ID: 127852. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127852>
- [12] Sun, S., Fu, L., Yang, A. and Shen, W. (2023) An Intensified Energy-Saving Architecture for Side-Stream Extractive Distillation of Four-Azeotrope Mixtures Considering Economic, Environmental and Safety Criteria Simultaneously. *Separation and Purification Technology*, **310**, Article ID: 123132. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123132>
- [13] Yang, A., Ernawati, L., Wang, M., Kong, Z.Y., Sunarso, J., Sun, S., *et al.* (2023) Multi-Objective Optimization of the Intensified Extractive Distillation with Side-Reboiler for the Recovery of Ethyl Acetate and Methanol from Wastewater. *Separation and Purification Technology*, **310**, Article ID: 123131. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123131>
- [14] Yang, A., Wang, W., Sun, S., Shi, T., Ren, J., Bai, M., *et al.* (2022) Sustainable Design and Multi-Objective Optimization of Eco-Efficient Extractive Distillation with Single and Double Entrainer(s) for Separating the Ternary Azeotropic Mixture Tetrahydrofuran/Ethanol/Methanol. *Separation and Purification Technology*, **285**, Article ID: 120413. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120413>
- [15] 杨傲, 王文和, 米红甫, 等. 基于 Aspen Plus 的化工过程安全仿真实训课程设计与探索[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(9): 150-156.
- [16] 包宗宏, 武文良. 化工计算与软件应用[M]. 第2版. 北京: 化学工业出版社, 2018.
- [17] 赵云鹏, 汪广恒, 李士凤, 买尔哈巴·阿不都热合曼. 化工流程模拟——Aspen Plus 从入门到实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2023.