

化学安全工程专业反应热安全仿真实验教学改革

——以环己酮氨肟化反应为例

冯泽民, 杨 傲, 牛宜辉*, 米红甫, 王文和

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20日; 录用日期: 2025年6月6日; 发布日期: 2025年6月17日

摘 要

针对化工工艺热风险评估与化工设备安全技术课程中化学反应器热安全传统实验的危险性高、动态过程可视化不足等问题, 本文设计了基于仿真模拟软件的化学反应热安全仿真实验教学方案。以环己酮氨肟化半间歇反应器为研究对象, 构建稳态与动态模型, 模拟冷却水失效和反应物浓度波动工况下的热失控动态响应。借助动态仿真, 可实现对过程参数的动态追踪, 揭示热失控机理与安全操作边界。该教学方案融合了化工热力学、反应工程与过程控制知识, 利用虚拟仿真技术突破传统实验的局限性, 培养学生的工程实践能力与创新思维。实践表明, 实验提高了学生对反应热失控机理的理解, 加强了理论与工程应用的结合, 为化工安全专业实验教学提供了新范式。

关键词

化工安全, 热失控, 反应器, 热安全, 教学设计, 动态模拟

Simulation-Based Experimental Teaching Reformation of Reaction Thermal Safety in Chemical Safety Engineering

—A Case Study of Cyclohexanone Ammoximation

Zemin Feng, Ao Yang, Yihui Niu*, Hongfu Mi, Wenhe Wang

School of Safety Science and Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Mar. 20th, 2025; accepted: Jun. 6th, 2025; published: Jun. 17th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 冯泽民, 杨傲, 牛宜辉, 米红甫, 王文和. 化学安全工程专业反应热安全仿真实验教学改革[J]. 创新教育研究, 2025, 13(6): 208-217. DOI: 10.12677/ces.2025.136430

Abstract

To address the high risks and insufficient dynamic process visualization associated with traditional thermal safety experiments for chemical reactors in the courses on chemical process thermal risk assessment and chemical equipment safety technology, this paper designs a simulation-based teaching plan for chemical reaction thermal safety. Taking a semi-batch reactor for the ammoxidation reaction of cyclohexanone as the example, steady-state and dynamic models were constructed to simulate the dynamic responses of thermal runaway under the of cooling water failure and fluctuations in reactant concentrations. Dynamic simulation was utilized to achieve real-time tracking of process parameters, revealing the mechanisms of thermal runaway and defining safe operating boundaries of the reactors. This teaching plan integrates knowledge from chemical thermodynamics, reaction engineering, and process control, leveraging virtual simulation technology to overcome the limitations of traditional experiments, thereby cultivating students' engineering practice abilities and innovative thinking. Practical application has demonstrated that this experiment enhances students' understanding of the mechanisms behind reaction thermal runaway, strengthens the integration of theory and engineering application, and provides a new paradigm for experimental teaching in chemical safety.

Keywords

Chemical Safety, Thermal Runaway, Reactor, Thermal Safety, Teaching Design, Dynamic Simulation

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

反应热失控是导致化学反应器事故的重要因素之一。统计数据表明, 56%的化学反应事故由反应热失控引起的[1]。间歇和半间歇反应器是精细化工领域主要的反应单元操作设备, 其工艺复杂多变、自动化程度低, 加之操作人员对工艺安全的认识不足, 这些因素容易引发导致泄露、火灾、爆炸等事故[2][3]。因此, 深入、透彻地认识和剖析化学反应的本质特征以及间歇反应器的安全操作, 对保障化工企业的安全生产具有重要意义[4]。

化工设备安全技术课程是化工安全专业的一门必修课。该课程通过结合化工热力学、化学反应工程和安全工程的知识, 认识化工反应设备的结构, 深入分析操作原理, 让学生从操作层面认识化学反应器的安全操作, 理解化学反应热失控原理, 并进行热安全分析和评价[5][6]。然而, 采用传统实验方式研究和教学反应热失控存在如下问题: 1) 反应热失控实验通常涉及强放热反应和易燃易爆化学品, 学生在操作过程中, 由于操作不当等原因, 存在极大的危险性, 易导致安全事故的发生; 2) 反应热失控是动态变化极为复杂的过程, 在故障状态下随着时间累积会产生工艺危险和事故, 但传统实验方式无法让学生直观地观察反应进度和工艺参数变化过程, 难以从理论层面分析反应热失控的基本原理并给出预防措施; 3) 反应热失控与化学反应器的工艺操作和自动控制密切相关, 学生很难通过传统化学实验分析和理解实际工厂操作过程对反应热失控的影响, 即化学反应器的危险与可操作性分析。此外, 化学反应器也是化工设备安全技术这一化工安全专业必修课的重要单元。因此, 针对上述问题, 化工设备安全技术课程应结合当前学科发展前沿, 引入化工过程动态仿真模拟手段, 融合化工安全专业基础知识, 构建新的专业知识体系架构, 探

索新工科背景下的工程教育模式[7]。对学生开展基于仿真软件的仿真培训,能够培养学生的大工程意识,提高学生的工程实践能力[8]。此外,要强化教学内容和教学方法的顶层设计,为学生创造更多接触实际工程问题的机会,培养学生结合仿真模拟开展化工过程反应热失控问题分析与安全评估的能力。本仿真课程以环己酮在 TS-1 催化剂作用下与氨水和过氧化氢发生氨肟化反应生产环己酮肟的半间歇反应器为研究对象,分析半间歇反应器的安全操作原理和反应热失控机理,并进行安全评价。基于 Aspen Plus 和 Aspen Dynamics 流程模拟软件,分别搭建环己酮氨肟化半间歇反应器的稳态和动态模型,通过开展动态仿真,研究反应过程的可操作性和热安全。该实验紧密联系前沿科学理论和化工工程实践应用,旨在提升学生运用专业知识和工具解决工程问题的能力,激发学生的科研兴趣,培养创新能力。

2. 实验设计基础

2.1. 课程教学目标

在传统教学过程中,存在反应器动态特性难以观测、故障场景难以复现等痛点。通过仿真模拟教学,可达成以下三个教学目标:

- 1) 知识目标:掌握半连续反应器的结构特征与热传递原理,从过程模拟出发理解过程的稳态及动态特征。
- 2) 能力目标:具备设备参数设置、稳态模拟优化、动态响应分析以及热风险故障诊断能力。
- 3) 素养目标:建立“本质安全”理念,增强学生的工程伦理意识。

2.2. 概念设计与流程建模

Aspen Plus 是当前工业和学术界常用的大型化工流程建模软件,其功能包括单元操作设计、全流程工艺模拟与优化以及动态模拟。学生通过开展流程模拟,能够理解并掌握化工过程工艺安全特性。该软件内置的反应器模块包括转化率反应器、产率反应器、平衡反应器、吉布斯反应器、半连续搅拌罐反应器、平推流反应器和间歇反应器。其中,后三者基于严格的动力学模型,能够模拟反应过程的时间累积效应。Aspen Dynamics 是 Aspen 套件中专门用于动态仿真的模拟软件,它以 Aspen Plus 软件构建的稳态模型为基础,在设置相应的水力学模型后可转换为动态模型[9]。在开展动态模拟之前,首先要在 Aspen Plus 软件中构建好反应器的稳态模型,并添加反应器的长高物理参数,然后利用 Aspen Plus 的 Pressure Driven 模式将其转化为动态模型,进而开展过程的动态模拟,如图 1 所示。

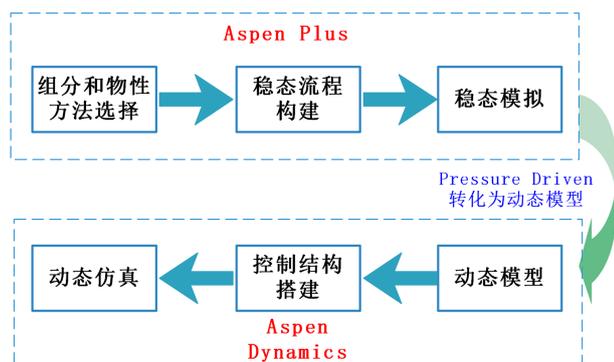


Figure 1. Flowsheet diagram of dynamic simulation using Aspen Dynamics

图 1. Aspen Dynamics 动态模拟流程示意图

基于上述原理,学生首先需在 Aspen Plus 软件中建立环己酮氨肟化过程的稳态模型,进而通过仿真

模拟, 在设置水力学参数后将其转化为 Aspen Dynamics 软件的过程动态模型。图 2 为简化后的环己酮氨肟化工艺流程图。在仿真实验中, 原料的温度和压力分别为 25℃和 300 kPa; 环己酮、过氧化氢水溶液(30 mol%)和氨水(25 mol%)的流量分别为 2.5、8.34 和 10 kmol/h。为使反应物在液相发生反应, 需加入水和叔丁醇作为反应溶剂, 其加入量分别为 3 和 19 kmol/h。反应器中物料的停留时间为 2 h, 反应器产生的热量由夹套中的循环冷却水带走[10]。

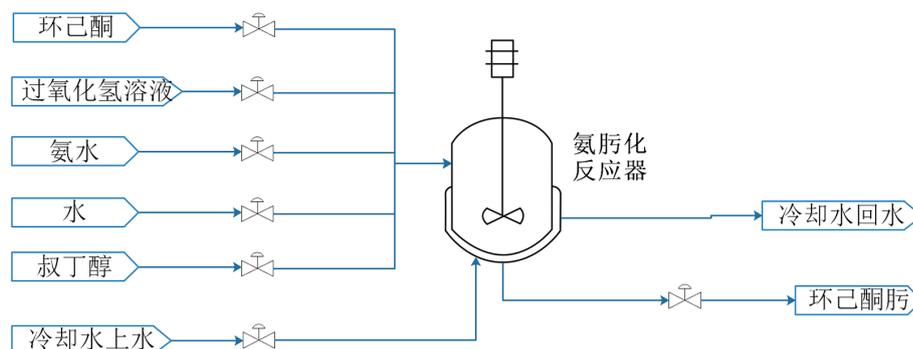


Figure 2. Flowsheet diagram of cyclohexanone ammoxidation process
图 2. 环己酮氨肟化工艺流程示意图

3. 思维立体化实验教学体系设计

3.1. 教学内容构建

教学采用“虚实结合”的创新模式, 设计了 4 学时模块化教学内容, 涵盖设备认知、教学示范、仿真实验、安全评价。

1) 设备认知: 运用实物模型演示、工业反应器讲解视频等丰富多样的教学手段, 使学生全面深入掌握反应器的结构及其关键参数, 并结合化工原理、化学反应工程等课程知识理解反应器传热原理。

2) 教学示范: 授课教师以 Aspen Plus 和 Aspen Dynamics 软件平台为依托, 构建环己酮氨肟化过程的稳态及动态模型, 现场演示建模操作方法与关键参数设置原理, 使学生通过仿真建模理解反应器工作原理。

3) 仿真实验: 学生在教师示范的基础上分组协作, 自行搭建该过程的稳态及动态仿真模型, 通过动态仿真分析原料浓度变化和冷却水失效工况下的动态响应特征。

4) 安全评价: 学生依据仿真模拟结果, 分析过程热安全特征, 辨识过程的危险性, 针对过程存在的危险性, 制定安全控制策略, 完成控制方案设计。在此基础上, 分组答辩互评, 以客观检验教学成果。

3.2. 教学实施创新

3.2.1. 教学资源开发

教学过程中形成仿真平台和案例库资源的开发: 构建基于 Aspen Dynamics 软件的动态仿真体系, 集成实时数据看板, 使学生能直观地了解反应过程的动态变化; 收集国内外典型反应器安全事故案例, 建立反应器危险与可操作性案例体系。

3.2.2. 教学方法改革

在教学过程中采用“问题链驱动”教学模式, 设置递进式问题引导探究性课程教学, 例如: 如何通过设备结构参数优化提升反应器的传热效率? 自动控制和人工操作方式对反应器热失控进程有何影响? 不同故障场景下应采取哪些应急措施? 通过这些问题, 引导学生深入、积极思考, 逐步探索反应热失控的相关知识。

在分组仿真模拟过程中设置“角色扮演”环节，让不同组员分别模拟实际生产过程中的“工艺工程师-安全工程师-操作员”，以实现协同作业，了解实际生产操作模式。通过角色扮演，学生能够更好地体会不同岗位的职责和工作内容，增强团队协作能力和对实际生产过程的理解。

3.2.3. 虚拟仿真实验教学的先进性

为更清晰地突出仿真实验教学的优势，将其与传统实验教学、案例教学、项目式教学等常见教学方法进行比较，具体内容见表1。

Table 1. Comparison of various teaching methods

表 1. 不同教学方法比较

教学方法	优点	缺点	虚拟实验教学的优势体现
传统实验教学	能让学生直接接触实验设备和试剂，获得真实的操作体验。	存在较高的安全风险，实验成本高，具有极高的安全性，学生无需接触实际的危险化学品实验过程中一旦出现失误可能导致严重后果；实验条件难以精确控制，可重复性差；对于反应热失控这类动态变化快、危险性高的实验，难以全过程展示过程细节。	学生无需接触实际的危险化学品和复杂设备，避免了安全事故的发生；实验成本低，可多次重复进行，便于学生反复练习和深入研究；能够通过软件精确模拟各种复杂工况下的反应过程，清晰展示动态变化细节，帮助学生更好地理解反应热失控机理。
案例教学	通过实际案例分析，案例通常是对已发生事件的描述，可加深学生对理论知识的理解，培养学生分析和解决实际问题的能力。	学生缺乏亲身参与和实践操作的机会，对知识的掌握可能停留在表面；案例的选取和分析可能存在主观性，不同案例之间的关联性和系统性不足。	学生能够在虚拟环境中亲自操作和模拟，将理论知识应用于实践，加深对知识的理解和掌握；实验内容和参数可根据教学需求灵活调整，保证了教学内容的系统性和全面性；通过实时反馈和数据分析，能更准确地评估学生的学习效果。
项目式教学	以项目为导向，能有效培养学生的团队协作能力、创新能力和综合应用知识的能力。	项目实施过程较为复杂，需要较长的时间和较多的资源支持；对学生的自主学习能力和教师的指导能力要求较高，若组织不当，可能导致项目进展不顺利。	实验操作相对简单，实验周期可根据教学安排灵活设置；在软件平台的支持下，教师能够更方便地对实验进行指导和监控，确保实验顺利进行；通过丰富的实验场景和参数设置，同样能培养学生的创新能力和综合应用知识的能力。

4. 教学过程设计

4.1. 设备认知模块

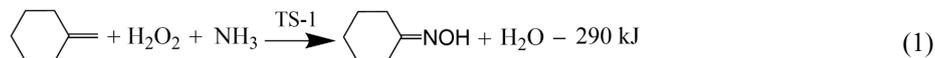
在该模块教学过程中设置了实物模型演示与工业反应器讲解视频环节。通过演示和视频讲解，让学生掌握反应器夹套、搅拌系统等关键部件，理解反应器传热原理，重点掌握反应器换热面积计算与夹套设计方法，理解搅拌转速对反应均匀性的影响以及夹套冷却对反应过程的影响。

4.2. 教学示范模块

授课教师使用 Aspen Plus 完成组分输入、热力学模型选择，并搭建如图 3 所示的过程稳态模型，以此让学生理解过程建模的方法和原理。然后，授课教师依据稳态模拟结果，核算水力学参数，并在 Aspen Plus 演示转化为过程动态模型的方法。该模块重点在于让学生认识和理解过程稳态和动态建模的原理与方法，以及热力学模型的选择对过程仿真结果的影响。

4.2.1. 反应动力学

环己酮氨肟化反应中的物料包含反应物环己酮、氨水和过氧化氢，溶剂为叔丁醇和水，反应器压力为 300 kPa。因此，教学过程中选用非理想性 RK-SOAVE 热力学模型来计算流体的热力学性质^[10]。环己酮氨肟化主反应和双氧水分解副反应可分别用公式(1)和公式(2)表示。



环己酮氨肟化反应与双氧水的分解反应均属于强放热液相反应。TS-1 催化剂的加入量约为 1wt%。应动力学方程可表示为公式(3)~(6)的幂级数形式[10]。

$$r_1 = -\frac{dC_A}{dt} = k_1 C_A^{0.90} C_B^{0.12} C_C^{0.81} \quad (3)$$

$$r_2 = -\frac{dC_B}{dt} = k_2 C_B^{1.43} \quad (4)$$

$$k_1 = 4.53 \times 10^{13} \exp\left(-\frac{5.84 \times 10^4}{RT}\right) \quad (5)$$

$$k_2 = 2.12 \times 10^{13} \exp\left(-\frac{1.12 \times 10^5}{RT}\right) \quad (6)$$

式中： r_1 和 r_2 分别为环己酮氨肟化主反应和双氧水分解反应的反应速率， $\text{kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{min})$ ； C_A 、 C_B 和 C_C 分别为环己酮、双氧水和氨的摩尔浓度， kmol/m^3 ； k_1 和 k_2 为反应速率常数， $\text{kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{min})$ ； R 为气体常数， $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ； T 为反应温度， K 。

4.2.2. 稳态模型

图 3 为基于 Aspen Plus 构建的环己酮氨肟化稳态工艺流程图，其中反应器采用搅拌罐反应器模型。氨水(NH_3)、环己酮($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}$)、过氧化氢溶液(H_2O_2)以及溶剂水(WATER)、叔丁醇(SOLVENT)经混合后进入反应器(REACTOR)中，反应器的停留时间为 2 h，初始反应温度和压力分别设定为 80°C 和 300 kPa。与图 2 所示的工艺流程图不同的是，反应器夹套冷却水用单独的冷却器(COOLER)向反应器提供冷能， 30°C 循环冷却水在 COOLER 中被反应器释放出的热加热至 40°C ，从而带走反应过程中产生的反应热。

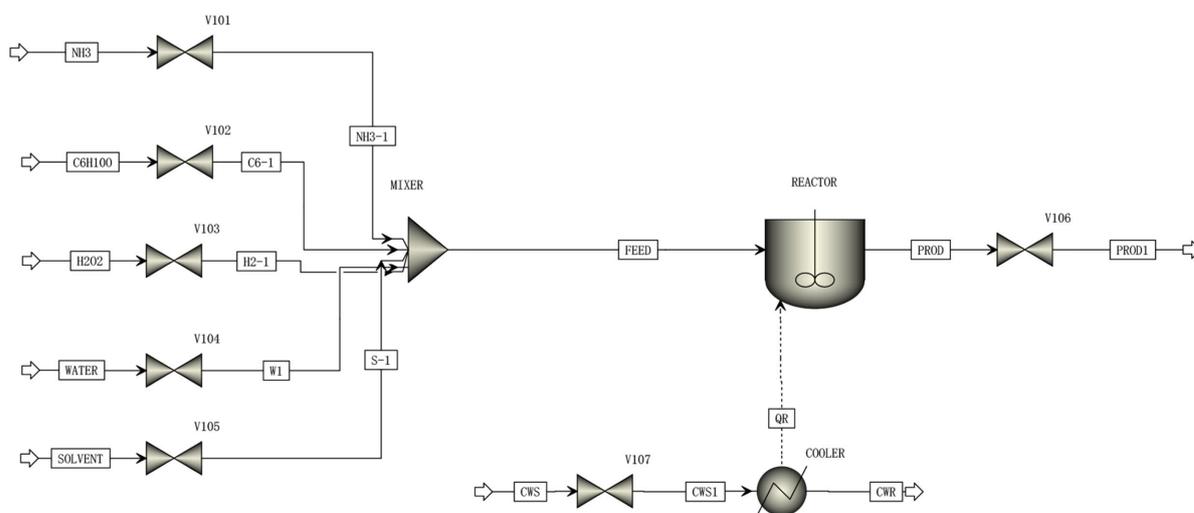


Figure 3. Flowsheet diagram of cyclohexanone ammoxidation process developed in Aspen Plus

图 3. 基于 Aspen Plus 搭建环己酮氨肟化工艺流程图

4.2.3. 动态模型

基于稳态模拟结果，设置反应器停留时间为 2 h 时，反应器体积为 5.2 m^3 、反应器高度为 3 m。图 4

为基于 Aspen Dynamics 搭建的环己酮氨肟化动态模拟工艺流程图。其中, FC1 通过调节控制阀 V101, 使氨水流量维持在设定值, 即氨水/环己酮的摩尔流量比为 4 (R1); FC2 通过调节控制阀 V102, 使环己酮流量维持在设定值 2.5 kmol/h; FC3 通过调节控制阀 V103, 使过氧化氢溶液流量维持在设定值, 即过氧化氢溶液/环己酮的摩尔流量比为 3.336 (R2); FC4 通过调节控制阀 V104, 使水流量维持在设定值, 即水/环己酮的摩尔流量比为 1 (R3); FC5 通过调节控制阀 V105, 使叔丁醇的流量维持在设定值, 即叔丁醇/环己酮的摩尔流量比为 7.6 (R4); LC1 通过调节控制阀 V106, 使反应器液位维持在设定值; TC1 通过调节控制阀 V107, 以调节冷却水的流量, 使反应器温度维持在设定值。实验过程中所有控制器均采用比例积分形式[11], 控制器的操作变量、控制变量和参数见表 2, 控制器参数运用 Tyreus-Luyben 方法得到[12]。

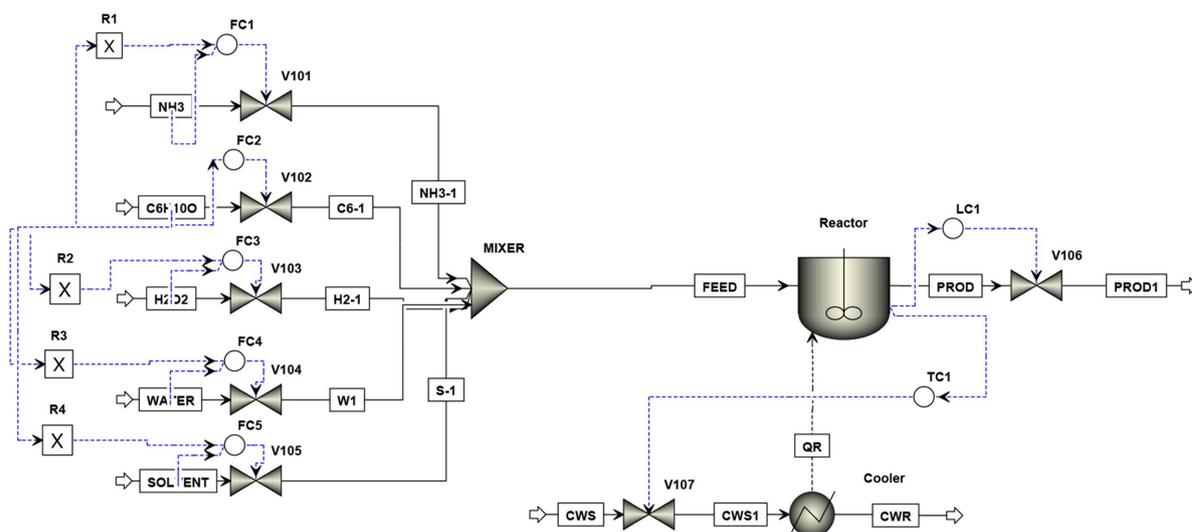


Figure 4. Dynamic simulation flowsheet diagram of cyclohexanone amoximation process developed in Aspen dynamics
图 4. 基于 Aspen Dynamics 搭建环己酮氨肟化动态模拟工艺流程图

Table 2. Tuning parameters of the controllers in dynamic simulation
表 2. 动态模型控制器参数

控制器	控制变量	操作变量	比例常数(%/%)	积分常数(min)	作用形式
FC1	氨水摩尔流量	V101 开度	0.5	0.3	反作用
FC2	环己酮摩尔流量	V102 开度	0.5	0.3	反作用
FC3	过氧化氢摩尔流量	V103 开度	0.5	0.3	反作用
FC4	水摩尔流量	V104 开度	0.5	0.3	反作用
FC5	叔丁醇摩尔流量	V105 开度	0.5	0.3	反作用
LC1	反应器液位	V106 开度	2	9999	正作用
TC1	反应器温度	V107 开度	205	0.528	正作用

4.3. 仿真实践模块

仿真实践模块采用分组式教学模式, 4 位同学为一组。小组需完成稳态及动态模型的构建, 接着依次开展冷却水失效、原料配比失衡、搅拌装置故障(模拟搅拌桨叶损坏、搅拌电机停转等情况)、加热系统异常(设定加热功率突变、加热元件故障等场景)、管道堵塞(设置不同程度的管道堵塞, 如部分堵塞和完全堵塞)、仪表失灵(模拟温度、压力仪表故障导致数据错误或无显示)等异常工况的动态仿真测试, 并实时采集温度、压力、液位等关键工艺参数的动态变化曲线, 从而形成实验结果。本模块旨在培养学生掌握过程控

制的基本原理和 PID 控制器的参数整定方法, 以及理解过程动态响应曲线热安全特性解读。在实践过程中, 要求学生详细记录每个工况下的参数变化情况, 分析不同故障对反应过程的影响程度, 并与理论知识相结合, 探讨相应的解决措施。例如, 当搅拌装置故障时, 观察反应体系内温度分布的不均匀性如何变化, 以及对产物生成速率的影响; 针对管道堵塞工况, 研究压力波动对反应进程和设备安全的影响机制。

4.4. 安全评价模块

在此模块中, 基于上述建立的动态仿真模型, 通过角色扮演的“工程师会诊”形式来演练工业过程化学反应器的安全操作, 有助于学生理解各岗位在实际生产过程中的岗位目标和职责, 从而培养学生的工程思维素养。同时, 针对原料流量波动、冷却水失效、搅拌装置故障、加热系统异常、管道堵塞、仪表失灵等异常工况下, 开展反应器热失控事故的应急演练, 编制应急预案, 使学生将所学的应急管理知识切实应用到实际生产中。采用小组互评模式, 对各组的创新点以及结果的合理性、正确性进行评估打分, 进而形成最终的评价成绩。评价过程中, 制定明确的评分标准, 从应急方案的完整性、可行性、创新性以及团队协作等多个维度进行考量, 确保评价结果的客观性和公正性。例如, 应急方案的完整性包括是否涵盖所有可能的故障场景、应对措施是否全面; 可行性关注措施在实际操作中的可执行性; 创新性体现在是否提出新颖有效的解决方法; 团队协作则考察小组成员之间的沟通、配合情况。

5. 教学效果评价

5.1. 仿真结果实验报告

基于搭建的 Aspen Dynamics 动态仿真模型, 开展过程动态仿真, 得到冷却水和反应物流量匹配失效工况下的动态响应曲线数据。图 5(a)为反应器的冷却水从正常值 531.17 kmol/h 逐步降至 0 时, 反应器温度的动态响应特征; 图 5(b)为环己酮流量从 2.5 kmol/h 逐步升高至 5 kmol/h(即反应器进口环己酮浓度从 1.06 kmol/m³ 升高至 1.72 kmol/m³)时, 反应器温度的动态响应特征。图 6(a)表明, 冷却水流量减少的越多, 反应器温度上升的越快。当冷却水流量为 0 时, 反应器温度在 12 h 时内上升至 138℃。叔丁醇和水在常压下的沸点分别为 83℃和 100℃, 当温度高于常压下的沸点时, 若发生泄漏并降压至常压, 溶剂很容易挥发, 在明火存在的情况下, 极易引发火灾和爆炸事故。图 6(b)表明, 反应物环己酮浓度(C_A)改变时, 反应器温度随时间的动态变化趋势。由图 6(b)可知, 反应物中环己酮的浓度越高, 反应器温度上升的越快。当环己酮的浓度升至 1.72 kmol/m³ 时, 反应器温度升高至 136℃, 在 0.5 h 内即可达到叔丁醇的沸点。此时, 保持反应物之间的摩尔比和冷却水流量恒定, 通过改变环己酮流量控制器 FC2 的设定值来改变环己酮在反应器进口的摩尔浓度。

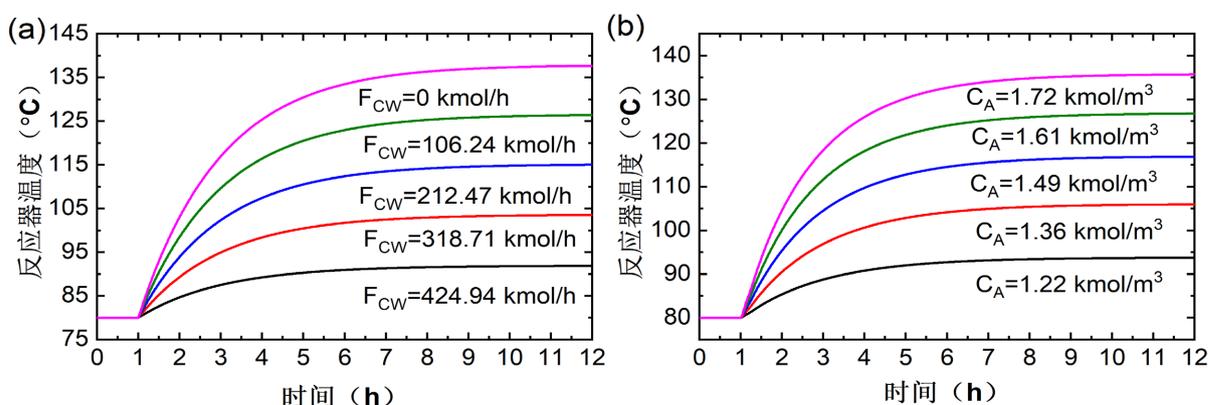


Figure 5. Dynamic response characteristic of reaction temperature in reactor under the reduced cooling water flow (a) and the changes of reactant concentration (b)

图 5. (a) 冷却水流量减小和(b) 反应物浓度变化与反应器反应温度之间的动态响应特征

图 6 为反应物环己酮浓度阶跃改变后, 反应器温度(图 6(a))与冷却水流量(图 6(b))的动态响应特征。当环己酮的流量从 2.5 kmol/h 分别阶跃到 4 和 1 kmol/h 时, 反应器中环己酮对应的终态浓度分别为 1.489 和 0.486 kmol/h。反应器的控制器能够对反应物浓度的变化快速作出响应, 进而实现对冷却水流量的调整, 使反应器温度维持在 80℃左右。因此, 只要确保工艺控制器、工艺设备安全可靠运行且工艺操作规范, 该工艺可以实现安全生产。

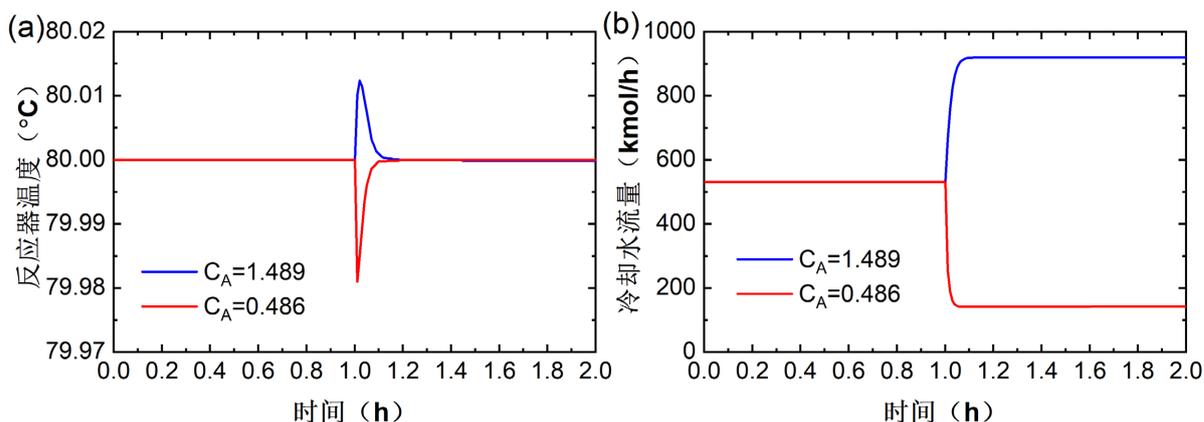


Figure 6. Dynamic response of (a) Reaction temperature and (b) Cooling water flow rate under the variation of reactant concentration

图 6. 反应物浓度变化与(a) 反应温度和(b) 冷却水流量之间的动态响应特征

上述仿真结果可作为评价学生实验报告中实验数据准确性的依据, 进而通过小组讨论互评和教师评价相结合的方式综合评定学生的实验成绩。在评价过程中, 详细对比学生实验报告中的数据与仿真结果, 检查数据的准确性、完整性以及对数据的分析深度。对于数据偏差较大的情况, 引导学生分析原因, 找出问题所在, 以提高学生的实验操作能力和数据分析能力。例如, 如果学生记录的温度变化曲线与仿真结果差异明显, 教师可引导学生检查模型参数设置是否正确、数据采集过程是否存在误差等。

5.2. 教学实施成效量化分析

采用全面量化的评价方式客观衡量教学成果, 具体评价指标及权重见表 3。

Table 3. Quantitative evaluation method of teaching outcomes

表 3. 教学成果定量评价方法

评价维度	具体指标	权重	评价方式
知识掌握	对反应热失控机理的阐述准确性。 关键参数(如反应速率常数、热力学参数等)的理解和运用能力。 稳态及动态模型搭建的准确性和完整性。	40%	教师根据学生的课堂表现和实验报告成绩进行评分。
能力提升	对多种异常工况下动态响应曲线的分析深度和准确性。 应急方案制定的合理性和可行性。	40%	教师对学生的模型文件进行检查, 评估模型的合理性、参数设置的正确性以及针对不同工况的模拟效果; 小组互评, 从模型的创新性、实用性等方面进行评价。
素养养成	工程伦理意识的体现(如在讨论安全问题时对伦理因素的考虑)。 团队协作能力(在小组仿真实践和安全评价环节中的协作情况)。 创新思维(提出的创新性观点或解决方案)。	20%	通过课堂讨论、小组项目中的表现以及实验报告的撰写进行评价。

通过开展反应器热安全动态仿真,学生对化学反应热失控的动态过程有了更直观的理解,实验报告中关于机理理解、事故分析、应急处置措施等方面的创新点数量显著增加。此外,“工程师会诊”的实施提升了学生解决复杂工程问题的能力。

6. 结语

本实验属是化工工艺热风险与评估、化工设备安全技术课程的重要内容,融合了化学反应工程原理、化工原理、工艺操作和过程控制等知识。在本实验实施过程中,通过构建“结构认知-建模示范-仿真实践-安全评价”的闭环教学体系,实现了从设备结构认知到安全操作能力的递进式培养,从工程问题的角度出发,培养学生综合解决复杂工程问题的能力。未来,可进一步探索将人工智能技术引入仿真实验教学,实现对实验过程的智能监测和优化;加强与企业的合作,引入实际生产中的案例和数据,使教学内容更加贴近工程实际,为化工安全专业人才培养提供更有力的支持。例如,利用人工智能算法对学生的实验操作进行实时指导和反馈,提高实验教学的效率和质量;与企业合作开展实习实践活动,让学生在真实的工作环境中应用所学知识,提升实践能力。

基金项目

重庆科技大学本科教育教学改革研究项目(项目号:202354);重庆市高等教育教学改革研究项目(项目号:222161);重庆市教委科学技术研究项目(项目号:KJQN202201545)。

参考文献

- [1] 吴怡, 马大庆, 叶昊天, 等. 精细化工反应热失控判据的研究进展[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(S1): 90-97.
- [2] 江佳佳, 蒋军成, 潘勇. 间歇式放热反应热失控临界参数及热安全性[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2012, 34(3): 36-40.
- [3] Nolan, P.F. and Barton, J.A. (1987) Some Lessons from Thermal-Runaway Incidents. *Journal of Hazardous Materials*, **14**, 233-239. [https://doi.org/10.1016/0304-3894\(87\)87015-2](https://doi.org/10.1016/0304-3894(87)87015-2)
- [4] Westerterp, K.R. and Molga, E.J. (2006) Safety and Runaway Prevention in Batch and Semibatch Reactors—A Review. *Chemical Engineering Research and Design*, **84**, 543-552. <https://doi.org/10.1205/cherd.05221>
- [5] 严宗诚, 陈砺, 吴妙娴, 等. 化工安全复合型人才培养探索与实践——以华南理工大学为例[J]. 化工高等教育, 2022, 39(3): 33-36.
- [6] 豆帅勇, 张金勇, 苏昭桂, 等. OBE 理念下的化工设备安全课程教学探索[J]. 广州化工, 2023, 51(5): 210-212.
- [7] 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.
- [8] 周爱东, 姜勇, 杨红晓. 实施化工安全仿真培训, 培养大工程观意识的工程技术人才[J]. 实验技术与管理, 2011, 28(12): 86-89.
- [9] Feng, Z., Shen, W., Rangaiah, G.P. and Dong, L. (2018) Proportional-Integral Control and Model Predictive Control of Extractive Dividing-Wall Column Based on Temperature Differences. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **57**, 10572-10590. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b02729>
- [10] Zhu, Z., Li, G., Yang, J., Dai, Y., Cui, P., Wang, Y., et al. (2019) Improving the Energy Efficiency and Production Performance of the Cyclohexanone Ammoxidation Process via Thermodynamics, Kinetics, Dynamics, and Economic Analyses. *Energy Conversion and Management*, **192**, 100-113. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.04.037>
- [11] Feng, Z., Shen, W., Rangaiah, G.P. and Dong, L. (2020) Design and Control of Vapor Recompression Assisted Extractive Distillation for Separating N-Hexane and Ethyl Acetate. *Separation and Purification Technology*, **240**, Article ID: 116655. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116655>
- [12] Tyreus, B.D. and Luyben, W.L. (1992) Tuning PI Controllers for Integrator/dead Time Processes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **31**, 2625-2628. <https://doi.org/10.1021/ie00011a029>