

《化学反应工程》教学大纲

课程类别：学科基础教育课程

课程名称：化学反应工程

开课单位：化学工程与技术学院

课程编号： Z02040101

课程性质：必修课

总学时：48

学分：3

适用专业：化学工程与工艺

先修课程：高等数学、概率论与数理统计、物理化学、化工原理、化工热力学

大纲编写（修订）时间：2019年7月

一、课程性质与教学目标

1. 课程性质与任务（需说明课程对人才培养方面的贡献）

化学反应工程是化学工程与工艺专业本科生必修的一门学科基础教育课程。本课程是以工业规模的化学反应过程为研究对象，研究过程速率及其变化规律，宏观动力学因素对化学反应过程的影响，以实现工业反应过程开发、设计、放大和操作的优化。通过该课程的学习，学生应牢固地掌握化学反应工程中最基本的原理和计算方法，运用科学思维方法，增强提出问题、分析问题和解决问题的能力。课程教学将突出阐述反应工程理论思维方法，重点讨论影响反应结果的工程因素（如返混、混合、热稳定性和参数灵敏性等），并以开发实例进行分析，培养学生应用反应工程方法论解决实际问题的能力。

2. 课程目标

通过本课程的理论教学，使学生具备下列能力：

课程目标 1：能够应用数学、物理、物化和化工原理知识表达反应工程问题，建立反应器和传递过程的数学模型，并正确求解。（支撑毕业要求 1-4）

课程目标 2：能够运用反应工程的工程思维方法，判断反应器变量对评价指标的影响，提出优化的解决方案。（支撑毕业要求 2-2）

课程目标 3：能设计与化学反应工程相关的热模或冷模实验，分析实验结果，验证或拟合模型参数，获取有效结论。（支撑毕业要求指标点 4-1）

二、课程内容、学时分配及对毕业要求指标点的支撑

章节	内 容	讲 课	实 验	小 计	支撑课程目标	支撑的毕业要求指标点
第 1 章	<p>1 绪论</p> <p>1.1 化学反应工程的任务；主要内容：介绍化学反应工程的发展史、研究内容。</p> <p>1.2 化学反应工程内容的分类与编排；主要内容：反应器的类型和操作系统、课程体系。</p> <p>1.3 化学反应工程的基本方法；主要内容：反应器的放大方法。</p> <p>重点：化学反应工程的任务和范畴，化学反应工程的研究方法。</p> <p>难点：无</p>	2		2	1	1-4
第 2 章	<p>2 均相反应动力学基础</p> <p>2.1 概述；主要内容：化学反应速率、转化率的定义，反应速率方程，反应级数、活化能的意义，阿仑尼乌斯方程。</p> <p>2.2 等温恒容过程；主要内容：单一反应动力学方程的建立（微分法、积分法、最小方差解析法），复合反应的收率、得率以及选择性，复合反应反应动力学方程的表达法及动力学分析方法。</p> <p>2.3 等温变容过程；主要内容：膨胀因子、膨胀率的定义，变容过程浓度、分压与转化率的关系及动力学方程。</p> <p>重点：化学反应速率、转化率、复合反应的收率、得率及选择性的定义，单一不可逆、可逆反应的动力学方程的拟合和计算，复杂反应系统反应组分的速率、选择性和收率的定义和计算。</p> <p>难点：变容过程浓度、分压与转化率的关系及动力学方程的转换。</p>	6		6	1, 2	1-4, 2-2
第 3 章	<p>3 均相反应过程</p> <p>3.1 简单理想反应器；主要内容：空速、空时的定义，间歇反应器、平推流反应器、全混流反应器的特征、设计方程及计算。</p> <p>3.2 组合反应器；主要内容：多釜串联、循环反应器的设计方程及计算。</p> <p>3.3 反应器类型和操作方式的评选；主要内容：单一反应、复合反应过程反应器的优选，平行反应的加料方式、原料浓度和操作温度的优选。</p> <p>3.4 非等温过程；主要内容：理想反应器的热量衡算方程。</p> <p>3.5 全混流反应器的热稳定性；主要内容：全混流反应器的热稳定性以及判据。</p> <p>3.6 釜式反应器的搅拌；主要内容：搅拌的作用和方式，搅拌器的类型，搅拌功率的计算。</p> <p>重点：各理想反应器的特征、等温条件下的设计方程及反应器计算，理想流动反应器中复合反应的选择性计算，反应器类型选择及操作方式和操作条件的确定。</p> <p>难点：全混流反应器的热稳定性。</p>	8		8	1, 2	1-4, 2-3

章节	内 容	讲 课	实 验	小 计	支撑课程 目标	支撑的毕业要 求指标点
第 4 章	<p>4 非理想流动</p> <p>4.1 反应器中的返混与停留时间分布；主要内容：返混、停留时间分布的定义，停留时间分布的实验测定，理想反应器停留时间分布函数以及数字特征。</p> <p>4.2 流动模型；主要内容：离析流、多釜串联、扩散流模型。</p> <p>4.3 流体的混合态对化学反应的影响；主要内容：混合态及其对反应结果的影响。</p> <p>重点：返混、停留时间分布的定义，停留时间分布函数、停留时间分布密度函数和停留时间分布函数的数学特征，停留时间分布实验测定方法，离析流以及多釜串联模型计算给定反应的转化率。</p> <p>难点：轴向扩散模型的应用。</p>	6	4	10	2, 3	2-2, 4-1
第 5 章	<p>5 气固相催化反应动力学基础</p> <p>5.1 催化剂；主要内容：催化剂的制法、组成和性能。</p> <p>5.2 催化剂的物理特性；主要内容：物理吸附和化学吸附，催化剂的物理结构。</p> <p>5.3 气固相催化反应动力学；主要内容：化学吸附与气固相催化反应本征动力学模型，建立动力学模型的实验方法及装置。</p> <p>5.4 催化剂的内扩散；主要内容：催化剂中气体扩散的形式，催化剂颗粒内组分的有效扩散系数，内扩散效率因子。</p> <p>5.5 外扩散效率因子；主要内容：催化剂宏观动力学方程。</p> <p>重点：多相催化反应过程步聚及控制步骤，双组分系统有效扩散系数的计算，宏观反应速率的定义，内扩散效率因子的计算方法。</p> <p>难点：气-固相催化反应控制阶段的判别，催化剂内反应组合浓度的分布。</p>	8	4	12	1, 2, 3	1-4, 2-2, 4-1
第 6 章	<p>6 固定床反应器</p> <p>6.1 固定床反应器；主要内容：固定床反应器的特点、类型。</p> <p>6.2 固定床中的传递过程；主要内容：固定床流体力学，固定床的物理特性，固定床的压力降计算多釜串联、循环反应器的设计方程及计算。</p> <p>6.3 拟均相一维模型；主要内容：固定床反应器的计算，绝热温升，多段换热式催化反应器。</p> <p>重点：固定床反应器的特点，固定床反应器的压降计算，用一维拟均相模型计算绝热反应器催化剂用量。</p> <p>难点：多段绝热反应器的优化条件，固定床内的传质和传热。</p>	4		4	2	2-2

章节	内 容	讲 课	实 验	小 计	支撑课程 目标	支撑的毕业要 求指标点
第 7 章	7 流化床反应器 7.1 概述；主要内容：流态化，流化床的优缺点、工业应用。 7.2 流化床的工艺计算；主要内容：流化床床层压降、流化速度、流化床操作速度的计算，流化床反应器的设计计算。 7.3 流化床中的传热和传质；主要内容：床层与器壁的给热，床层与换热器壁的给热，颗粒与气体间的传质。 重点：流化过程，流化床床层压降、流化速度、流化床操作速度的计算，流化床反应器的设计计算。 难点：流化床的数学模型。	3		3	1, 2	1-4, 2-2
第 8 章	8 气-液反应及反应器 8.1 概述；主要内容：气-液反应历程，气液反应过程的基础方程。 8.2 气液反应动力学；主要内容：气-液反应动力学特征以及化学增强因子 β 和膜内转换系数 γ 。 8.3 气液反应器；主要内容：气液反应器类型，填料塔式反应器计算。 重点：气-液反应过程及步骤，化学增强因子 β 和膜内转换系数 γ 的定义和物理意义，气-液反应器的特点和类型。 难点：气液反应过程的基础方程及其数学求解，填料塔式反应器工艺计算。	3		3	1, 2	1-4, 2-2
实验一	釜式搅拌反应器停留时间分布测定实验		4	4	1, 2, 3	4-1
实验二	程序升温技术研究催化剂表面性质		4	4	1, 2, 3	4-1
合计		40	8	48		

三、本课程开设的实验项目

编号	实验项目名称	学时	类型	要求	支撑课程目标	支撑的毕业要求指标点
1	釜式搅拌反应器停留时间分布测定实验	4	综合性	必做	1, 2, 3	4-1
2	程序升温技术研究催化剂表面性质	4	设计性	必做	1, 2, 3	4-1

注：1.类型指验证性、综合性、设计性等。

2.要求指必做、选做。

实验一、釜式搅拌反应器停留时间分布测定实验

实验目的：学习停留时间分布测定的基本原理和实验方法；掌握停留时间分布的统计特征值的计算方法；学会用理想反应器的串联模型来描述实验系统的流动特性。

实验原理：停留时间分布的测定方法有脉冲输入法、阶跃输入法等。常用的脉冲输入法，当系统达到稳定后，在系统的入口处瞬间注入一定量 Q 的示踪剂物料，同时开始在出口流体中检测示踪剂物料的浓度变化。由停留时间分布函数的物理意义，可得：

$$E(t) = \frac{VC(t)}{\int_0^{\infty} VC(t)dt} = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t)dt}$$

实验仪器：釜式搅拌反应器停留时间分布装置。

试剂：自来水、饱和氯化钾溶液。

实验安排：教师介绍釜式搅拌反应器停留时间分布实验装置的构造和操作方法。学生以 6 人一组，要求学生自行讨论，设计不同操作条件下的试验，按实验说明书的步骤自行完成实验。

实验报告要求：采用表格的形式列出实验条件和对应的实验数据，采用列表法计算出停留时间分布函数，并计算出相应的数学特征值，判断不同操作条件下反应器的流动特点，写出实验的体会与疑问。

实验二、程序升温技术研究催化剂表面性质

实验目的：了解氧化还原方法研究固体表面性质的基本方法和原理；掌握程序升温和微型催化色谱技术的一般操作和装置原理。学会分析固体负载催化剂的负载量、活性组分与载体之间的相互作用。

实验原理：程序升温还原技术的基本原理就是将氧化型的催化剂放在含氢气的气流中，按一定速率升高温度。催化剂中氧化物组分，依其还原能力的不同，在不同的温度下被还原。记录还原过程中变化着的信号，就可以得到催化剂表面状态的信息。

实验仪器：全数字化学吸附仪（自制）、U 型石英反应管、不锈钢脱水管、分析天平。

试剂： $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnOx}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、分析纯氧化铜、10% H_2/N_2 、99.99% N_2 、变色硅胶。

实验安排：教师介绍全数字化学吸附仪的构造、使用方法；学生以 6 人一组，对事先准备好的催化剂样品进行试验。

实验报告要求：采用表格的形式，记录程序升温还原的实验条件、催化剂种类以及装填量；常用 origin 软件对实验数据进行处理，结合化工热力学、化学反应工程的知识，分析总结实验数据，得出结论；写出实验的体会与疑问。

四、达成课程目标的途径和措施

1. 采用多媒体与板书教学相结合的方式。在多媒体课件中，既有化学反应工程的基本概念、理论和研究方法等内容，也包含各类典型的工业化学反应器的实景图片、原理示意图、工业实践的过程缩影等，以提高学生对反应器结构、特点、操作的感性认识。对重要知识点采用板书的方式，强调它们的重要性和课程的逻辑性。

2. 根据化学反应工程课程各部分内容的特点，采用讲授型教学为主，配合问题探究、启发式、案例分析式等教学手段，注重培养学生分析问题和解决问题的能力。另外，在教学过程中，注意结合化学工程的最新研究成果，向学生介绍化学工程的前沿知识。充分贯彻了以学生为中心、成果导向、持续改进及参与式教学的理念。

3. 本课程有 8 个学时的实验，增强学生动手能力，培养学生分析思考能力，具体实验内容见“三、本课程开设的实验项目”。

五、考核方式

1. 课程考核方式包括随堂测验、课后作业情况、实验情况和期末考试等。

2. 定量评价

本课程包含 3 个分课程目标，有 4 个考核方式，各考核方式对课程目标达成评价的权重占比分配如下：

表 5.1 各考核方式对课程目标达成评价的权重占比分配

课程目标	分课程目标权重 (本列总和为 1) $\sum P_i=1$	各考核方式评价比例分配 (每行总和为 1) $\sum W_{ik}=1$				各考核方式在课程目标达成中的占比 (所有行列总和为 1) $\sum \sum S_{ik}=1$ $S_{ik}=P_i \times W_{ik}$			
		随堂 测试	作业	实验	期末 考试	测试	作业	实验	期末 考试
1	0.40	0.1	0.2	0.1	0.6	0.04	0.08	0.04	0.24
2	0.40	0.1	0.25	0.15	0.5	0.04	0.10	0.06	0.20
3	0.20	0	0.20	0.40	0.4	0	0.04	0.08	0.08
各考核环节对课程目标达成的贡献率						0.08	0.22	0.18	0.52

注：上表中，期末考试对课程目标达成的贡献率为 0.52，其他考核方式课程目标达成的贡献率为 0.48。

那么第 i 个分课程目标的评价基于各环节 k 的贡献加权求和，就是该分课程目标的达成度 A_i ，即

$$A_i = \sum G_{ik} \times W_{ik} \quad 5-1$$

而多个分课程目标再根据比例加权求和，就得到本门课程的课程目标达成度 A 。

$$A = \sum A_i \times P_i$$

5-2

其中： k 表示不同的考核环节， i 表示不同的分课程目标；

$S_{ik} = P_i \times W_{ik}$ 是第 k 种评价方式通过第 i 个课程目标反映在总的课程目标评分占比；

W_{ik} 表示第 k 种评价方式对第 i 个课程目标百分占比；

P_i 表示第 i 个课程目标在课程总评价中的占比；

G_{ik} 表示第 k 种考核方式支撑第 i 个课程目标的达成度。

表 5.2 第 k 个考核环节对分课程目标的达成度 G_{ik}

环节内容 \ 课程目标	课程目标 1	课程目标 2	课程目标 i
分课程目标权重 (P)	P_1	P_2		P_i
考核内容覆盖率要求 (%)	$S_{1k} \times 100 / \sum S_{ik}$	$S_{2k} \times 100 / \sum S_{ik}$		$S_{3k} \times 100 / \sum S_{ik}$
考核题目
各题目分数总和 ($\sum B$)	$\sum B_1$	$\sum B_2$		$\sum B_i$
考核内容覆盖率实际占比 (%)	$\sum B_1 \times 100 / \sum \sum B_i$	$\sum B_2 \times 100 / \sum \sum B_i$		$\sum B_i \times 100 / \sum \sum B_i$
各题目得分平均值总和 ($\sum A$)	$\sum A_1$	$\sum A_2$		$\sum A_i$
考核环节支撑分课程目标的达成度 (G_{ik})	$G_{1k} = \sum A_1 / \sum B_1$	$G_{2k} = \sum A_2 / \sum B_2$		$G_{ik} = \sum A_i / \sum B_i$

3. 定性评价

定性评价指利用学生的调查问卷进行课程目标达成情况评价，按照各课程目标分项设计合适的问卷，调查学生掌握知识及获得能力等课程目标达成情况。其中成绩均采用百分制统计，五级分制转换为百分制时，优对应 95 分，良对应 85 分，中对应 75 分，及格对应 65 分，不及格对应 55 分。

综合定性与定量评价结果，取最小量为最终评价结果。

六、评价标准

1. 随堂测试评价标准

基本要求	评价标准				权重
	90-100 分	75-89 分	60-74 分	0-59 分	
掌握建立化学反应动力模型以及反应器流动过程模型的基本原理和方法，掌握模型的求解方法。 (支撑课程目标 1、毕业要求指标点 1-4)	基本概念正确、论述逻辑清楚；层次分明、语言规范。	基本概念正确、论基本清楚；语言较规范。	基本概念基本正确、论述基本清楚；语言较规范。	基本概念不清楚甚至错误、原理论述不清楚。	0.4
能根据化学反应特点和反应器‘三传’特征，对反应器设计、选型、操作等相关的工程问题，提出优化的解	能够应用相关知识，分析解决实际化学反应工程问题，论述逻辑	能够应用相关知识分析解决实际化学反应工程问题，论述清楚，	基本能够应用相关知识分析解决实际化学反应实际工程问题，论述基	基本概念不清楚甚至错误、论述不清楚。	0.6

决方案。 (支撑课程目标 2、支撑毕业要求指标点 2-2)	清楚, 语言规范。	语言较规范。	本清楚, 语言较规范。		
----------------------------------	-----------	--------	-------------	--	--

2. 作业评价标准

基本要求	评价标准				权重
	90-100 分	75-89 分	60-74 分	0-59 分	
能够结合化学反应工程的实际问题, 建立化学反应动力学模型和反应器流动过程模型, 并对模型求解。 (支撑课程目标 1、支撑毕业要求指标点 1-4)	按时交作业; 基本概念清晰, 解决化学反应工程问题的过程、结果正确。	按时交作业; 基本概念正确, 解决化学反应工程问题的过程、结果基本正确。	按时交作业; 基本概念基本正确, 解决化学反应工程问题的过程不完整、结果基本正确。	不能按时交作业, 有抄袭现象; 或者基本概念不清楚, 解决化学反应工程问题的过程不完整、结果错误	0.4
能够根据化学反应特点和反应器‘三传’特征, 对反应器设计、选型、操作等相关的工程问题, 提出优化的解决方案。 (支撑课程目标 2、支撑毕业要求指标点 2-2)	按时交作业; 能够应用相关知识分析解决实际工程问题, 论述逻辑清楚, 语言规范。	按时交作业; 能够应用相关知识分析解决实际工程问题, 论述清楚, 语言较规范。	按时交作业; 基本能够应用相关知识分析解决实际工程问题, 论述基本清楚, 语言较规范。	不能按时交作业, 有抄袭现象; 或者基本概念不清楚、论述不清楚。	0.4
能运用化学反应工程相关的热模或冷模的实验数据, 采用合理的反应动力学和反应器设计模型, 证或拟合模型参数, 获取有效结论。 (支撑课程目标 3、支撑毕业要求指标点 4-1)	能够对化学反应工程的有关实验数据, 合理分析实验结果, 拟合模型参数, 获得有效结论。	能够对化学反应工程的有关实验数据, 合理分析实验结果, 拟合模型参数, 获得合理结论。	对化学反应工程的有关实验数据, 能分析实验结果形成结论, 但合理性存在问题。	对化学反应工程的有关实验数据, 未拟合模型参数, 实验结果缺乏分析。	0.2

3. 实验教学评价标准

基本要求	评价标准				权重
	90-100 分	75-89 分	60-74 分	0-59 分	
掌握停留时间分布测定的基本原理和方法; 设计实验方案; 能用理想反应器的串联模型来分析实验系统的流动特性, 得出模型参数和相应的结论。 (支撑课程目标 3、毕业要求指标点 4-1)	按照要求完成预习, 按照实验安全操作规程和指导书进行实验, 设计的实验方案正确; 实验步骤与结果正确; 实验仪器设备完好。	能够预习, 按照实验安全操作规程和指导书进行实验, 设计的实验方案正确; 实验步骤与结果基本正确; 实验仪器设备完好。	预习按照实验安全操作规程进行实验, 设计的实验方案基本正确; 实验步骤与结果基本正确; 实验仪器设备完好。	没有按照实验安全操作规程和实验指导书进行实验; 设计实验方案不清晰; 实验步骤与结果不正确。	0.5
掌握氧化还原方法研究固体表面性质的基本方法和原理; 掌握程序升温 and 微型催化色谱技术的操作步骤; 能设计实验方案, 并对实验结果分析, 撰写实验报告。 (支撑课程目标 3、毕业要求指标点 4-1)	按时交实验报告, 实验数据与分析详实、正确; 图表清晰, 语言规范, 符合实验报告要求。	按时交实验报告, 实验数据与分析正确; 图表清晰, 语言规范, 符合实验报告要求。	按时交实验报告, 实验数据与分析基本正确; 图表较清晰, 语言较规范, 基本符合实验报告要求。	没有按时交实验报告; 或者实验数据与分析不正确; 或者实验报告不符合要求。	0.5

4. 期末考试评价标准

基本要求	评价标准				权重
	90-100分	75-89分	60-74分	0-59分	
能够应用数学、物理、物化和化工原理知识表达反应工程问题，建立反应器和传递过程的数学模型，并正确求解。 (支撑课程目标1、毕业要求指标点1-4)	能够准确运用所学知识表达化学反应工程问题，系统的掌握各类反应过程和传递过程模型的构建方法，并正确求解。	能合理运用所学知识表达化学反应工程问题，掌握各类反应过程和传递过程模型的构建方法，求解方法基本正确。	能够运用所学知识表达化学反应工程问题，基本掌握各类反应过程和传递过程模型的构建和求解方法，但不准确。	表达化学反应工程问题基本概念错误，部分了解反应过程和传递过程模型的构建和求解方法，不会合理运用。	0.4
能够运用反应工程的工程思维方法，判断反应器变量对评价指标的影响，提出优化的解决方案。 (支撑课程目标2、毕业要求指标点2-2)	能灵活运用化学反应工程的思维方法，准确识别反应过程的关键参数，分析判断反应器操作变量对评价指标的影响，提出优化的解决方案。	能运用化学反应工程的思维方法，能识别反应过程的关键参数，分析判断反应器操作变量对评价指标的影响，提出合理的解决方案。	具有化学反应工程的思维方法，能识别反应过程的关键参数，分析判断反应器操作变量对评价指标的影响，但不准确，提出的解决方案存在缺陷。	未很好掌握化学反应工程的思维方法，对反应过程的分析含糊不清，能说明反应器变量对评价指标的影响，但概念错误，不能提出解决方案。	0.4
能设计与化学反应工程相关的热模或冷模实验，分析实验结果，验证或拟合模型参数，获取有效结论。 (支撑课程目标3、毕业要求指标点4-1)	能够对化学反应工程的有关实验数据，合理分析实验结果，拟合模型参数，获得有效结论。	能够对化学反应工程的有关实验数据，合理分析实验结果，拟合模型参数，获得合理结论。	对化学反应工程的有关实验数据，能分析实验结果形成结论，但合理性存在问题。	对化学反应工程的有关实验数据，未拟合模型参数，实验结果缺乏分析。	0.2

七、参考书目及学习资料（主编，书名及版次，出版社，出版时间）

1. 朱炳辰等. 化学反应工程（第三版）. 北京：化学工业出版社. 2001年.
2. 李绍芬编. 反应工程（第二版）. 北京：化学工业出版社. 2000年.
3. 郭 锴等. 化学反应工程. 北京：化学工业出版社. 2000年.
4. 廖晖等. 化学反应工程习题精解. 北京：化学工业出版社. 2003年.
5. 丁百全等. 化学反应工程例题与习题. 北京：化学工业出版社. 2001年.
6. Levenspiel O. Chemical Reaction Engineering. 北京：化学工业出版社，2002年.

制定人：柳来栓、宋健

审定人：

批准人：

2019年7月18日