



# 四川理工学院课程实施大纲

课程名称：化学反应工程

---

授课班级：2014 级选课班

---

任课教师：张峰榛

---

工作部门：化学工程学院

---

联系方式：校内短号（62140）

---

四川理工学院 制

2017 年 1 月

# 《反应工程》课程实施大纲

## 基本信息

课程代码：16351002

课程名称：反应工程

Chemical Reaction Engineering

学 分：3

总 学 时：45

学 期：第6学期

上课时间：周2第9、10节，周4第9、10节

上课地点：N1-315

答疑时间和方式：课前、课间答疑；电话答疑；

邮件答疑；考前集中答疑。

答疑地点：授课教室或第二实验楼215（化学工程教研室）

授课班级：2014级化学工程与工艺专业、应用化学等选课班

任课教师：张峰榛

学 院：化学工程学院

邮 箱：20293976@qq.com

联系电话：校内短号（62140）

# 目 录

<b>1. 教学理念</b> .....	<b>1</b>
<b>2. 课程描述</b> .....	<b>3</b>
2.1 课程的性质 .....	3
2.2 课程在学科专业结构中的地位、作用 .....	3
2.3 课程的前沿及发展趋势 .....	3
2.4 课程的前沿及发展趋势 .....	4
2.5 课程与经济社会发展的关系 .....	4
2.6 课程内容可能涉及到的伦理与道德问题 .....	5
2.7 学习本课程的必要性 .....	5
<b>3. 教师简介</b> .....	<b>6</b>
3.1 教师的职称、学历 .....	6
3.2 教育背景 .....	6
3.3 研究方向（兴趣） .....	6
<b>4. 先修课程</b> .....	<b>7</b>
<b>5. 课程目标</b> .....	<b>8</b>
<b>6. 课程内容</b> .....	<b>9</b>
6.1 课程的内容概要 .....	9
6.2 教学重点、难点 .....	12
6.3 学时安排 .....	14
<b>7. 课程教学实施</b> .....	<b>16</b>
7.1 教学单元一 .....	16

7.1.1 教学日期 .....	16
7.1.2 教学目标 .....	16
7.1.3 教学内容（含重点、难点） .....	16
7.1.4 教学过程 .....	16
7.1.5 教学方法 .....	17
7.1.6 作业安排及课后反思 .....	17
7.1.7 课前准备情况及其他相关特殊要求 .....	17
7.1.8 参考资料 .....	17
7.2 教学单元二 .....	17
7.2.1 教学日期 .....	17
7.2.2 教学目标 .....	17
7.2.3 教学内容（含重点、难点） .....	17
7.2.4 教学过程 .....	18
7.2.5 教学方法 .....	20
7.2.6 作业安排及课后反思 .....	20
7.2.7 课前准备情况及其他相关特殊要求 .....	20
7.2.8 参考资料 .....	20
7.3 教学单元三 .....	20
7.3.1 教学日期 .....	20
7.3.2 教学目标 .....	20
7.3.3 教学内容（含重点、难点） .....	20
7.3.4 教学过程 .....	21



7.3.5 教学方法 .....	22
7.3.6 作业安排及课后反思 .....	22
7.3.7 课前准备情况及其他相关特殊要求 .....	22
7.3.8 参考资料 .....	23
7.4 教学单元四 .....	23
7.4.1 教学日期 .....	23
7.4.2 教学目标 .....	23
7.4.3 教学内容（含重点、难点） .....	23
7.4.4 教学过程 .....	23
7.4.5 教学方法 .....	24
7.4.6 作业安排及课后反思 .....	24
7.4.7 课前准备情况及其他相关特殊要求 .....	24
7.4.8 参考资料 .....	25
7.5 教学单元五 .....	25
7.5.1 教学日期 .....	25
7.5.2 教学目标 .....	25
7.5.3 教学内容（含重点、难点） .....	25
7.5.4 教学过程 .....	26
7.5.5 教学方法 .....	27
7.5.6 作业安排及课后反思 .....	27
7.5.7 课前准备情况及其他相关特殊要求 .....	27
7.5.8 参考资料 .....	27

7.6 教学单元六 .....	27
7.6.1 教学日期 .....	27
7.6.2 教学目标 .....	27
7.6.3 教学内容（含重点、难点） .....	28
7.6.4 教学过程 .....	28
7.6.5 教学方法 .....	29
7.6.6 作业安排及课后反思 .....	29
7.6.7 课前准备情况及其他相关特殊要求 .....	29
7.6.8 参考资料 .....	30
7.7 教学单元七 .....	30
7.7.1 教学日期 .....	30
7.7.2 教学目标 .....	30
7.7.3 教学内容（含重点、难点） .....	30
7.7.4 教学过程 .....	30
7.7.5 教学方法 .....	31
7.7.6 作业安排及课后反思 .....	31
7.7.7 课前准备情况及其他相关特殊要求 .....	31
7.7.8 参考资料 .....	31
7.8 教学单元八 .....	31
7.8.1 教学日期 .....	31
7.8.2 教学目标 .....	32
7.8.3 教学内容（含重点、难点） .....	32

7.8.4 教学过程 .....	32
7.8.5 教学方法 .....	33
7.8.6 作业安排及课后反思 .....	33
7.8.7 课前准备情况及其他相关特殊要求 .....	34
7.8.8 参考资料 .....	34
7.9 教学单元九 .....	34
7.9.1 教学日期 .....	34
7.9.2 教学目标 .....	34
7.9.3 教学内容（含重点、难点） .....	34
7.9.4 教学过程 .....	35
7.9.5 教学方法 .....	37
7.9.6 作业安排及课后反思 .....	37
7.9.7 课前准备情况及其他相关特殊要求 .....	37
7.9.8 参考资料 .....	38
7.10 教学单元十 .....	38
7.10.1 教学日期 .....	38
7.10.2 教学目标 .....	38
7.10.3 教学内容（含重点、难点） .....	38
7.10.4 教学过程 .....	38
7.10.5 教学方法 .....	40
7.10.6 作业安排及课后反思 .....	40
7.10.7 课前准备情况及其他相关特殊要求 .....	41

7.10.8 参考资料 .....	41
7.11 教学单元十一 .....	41
7.11.1 教学日期 .....	41
7.11.2 教学目标 .....	41
7.11.3 教学内容（含重点、难点） .....	41
7.11.4 教学过程 .....	42
7.11.5 教学方法 .....	43
7.11.6 作业安排及课后反思 .....	43
7.11.7 课前准备情况及其他相关特殊要求 .....	43
7.11.8 参考资料 .....	44
7.12 教学单元十二 .....	44
7.12.1 教学日期 .....	44
7.12.2 教学目标 .....	44
7.12.3 教学内容（含重点、难点） .....	44
7.12.4 教学过程 .....	44
7.12.5 教学方法 .....	46
7.12.6 作业安排及课后反思 .....	46
7.12.7 课前准备情况及其他相关特殊要求 .....	46
7.12.8 参考资料 .....	46
7.13 教学单元十三 .....	46
7.13.1 教学日期 .....	46
7.13.2 教学目标 .....	47

7.13.3 教学内容（含重点、难点） .....	47
7.13.4 教学过程 .....	47
7.13.5 教学方法 .....	48
7.13.6 作业安排及课后反思 .....	48
7.13.7 课前准备情况及其他相关特殊要求 .....	48
7.13.8 参考资料 .....	48
7.14 教学单元十四 .....	49
7.14.1 教学日期 .....	49
7.14.2 教学目标 .....	49
7.14.3 教学内容（含重点、难点） .....	49
7.14.4 教学过程 .....	49
7.14.5 教学方法 .....	51
7.14.6 作业安排及课后反思 .....	51
7.14.7 课前准备情况及其他相关特殊要求 .....	51
7.14.8 参考资料 .....	51
7.15 教学单元十五 .....	51
7.15.1 教学日期 .....	51
7.15.2 教学目标 .....	51
7.15.3 教学内容（含重点、难点） .....	51
7.15.4 教学过程 .....	52
7.15.5 教学方法 .....	54
7.15.6 作业安排及课后反思 .....	54

7.15.7 课前准备情况及其他相关特殊要求 .....	54
7.15.8 参考资料 .....	54
7.16 教学单元十六 .....	54
7.16.1 教学日期 .....	54
7.16.2 教学目标 .....	54
7.16.3 教学内容（含重点、难点） .....	55
7.16.4 教学过程 .....	55
7.16.5 教学方法 .....	56
7.16.6 作业安排及课后反思 .....	56
7.16.7 课前准备情况及其他相关特殊要求 .....	56
7.16.8 参考资料 .....	57
7.17 教学单元十七 .....	57
7.17.1 教学日期 .....	57
7.17.2 教学目标 .....	57
7.17.3 教学内容（含重点、难点） .....	57
7.17.4 教学过程 .....	57
7.17.5 教学方法 .....	58
7.17.6 作业安排及课后反思 .....	58
7.17.7 课前准备情况及其他相关特殊要求 .....	58
7.17.8 参考资料 .....	59
7.18 教学单元十八 .....	59
7.18.1 教学日期 .....	59

7.18.2 教学目标 .....	59
7.18.3 教学内容（含重点、难点） .....	59
7.18.4 教学过程 .....	59
7.18.5 教学方法 .....	60
7.18.6 作业安排及课后反思 .....	61
7.18.7 课前准备情况及其他相关特殊要求 .....	61
7.18.8 参考资料 .....	61
7.19 教学单元十九 .....	61
7.19.1 教学日期 .....	61
7.19.2 教学目标 .....	61
7.19.3 教学内容（含重点、难点） .....	61
7.19.4 教学过程 .....	62
7.19.5 教学方法 .....	62
7.19.6 作业安排及课后反思 .....	62
7.19.7 课前准备情况及其他相关特殊要求 .....	62
7.19.8 参考资料 .....	63
7.20 教学单元二十 .....	63
7.20.1 教学日期 .....	63
7.20.2 教学目标 .....	63
7.20.3 教学内容（含重点、难点） .....	63
7.20.4 教学过程 .....	63
7.20.5 教学方法 .....	65

7.20.6 作业安排及课后反思 .....	65
7.20.7 课前准备情况及其他相关特殊要求 .....	65
7.20.8 参考资料 .....	65
7.21 教学单元二十一 .....	66
7.21.1 教学日期 .....	66
7.21.2 教学目标 .....	66
7.21.3 教学内容（含重点、难点） .....	66
7.21.4 教学过程 .....	66
7.21.5 教学方法 .....	67
7.21.6 作业安排及课后反思 .....	68
7.21.7 课前准备情况及其他相关特殊要求 .....	68
7.21.8 参考资料 .....	68
7.22 教学单元二十二 .....	68
7.22.1 教学日期 .....	68
7.22.2 教学目标 .....	68
7.22.3 教学内容（含重点、难点） .....	68
7.22.4 教学过程 .....	69
7.22.5 教学方法 .....	69
7.22.6 作业安排及课后反思 .....	69
7.22.7 课前准备情况及其他相关特殊要求 .....	69
7.22.8 参考资料 .....	70
7.23 教学单元二十三 .....	70



7.23.1 教学日期 .....	70
7.23.2 教学目标 .....	70
7.23.3 教学内容（含重点、难点） .....	70
7.23.4 教学过程 .....	70
7.23.5 教学方法 .....	71
7.23.6 作业安排及课后反思 .....	71
7.23.7 课前准备情况及其他相关特殊要求 .....	71
7.23.8 参考资料 .....	71
<b>8. 学生课程学习要求.....</b>	<b>72</b>
8.1 学生自学要求 .....	72
8.2 课外阅读要求 .....	72
8.3 课堂讨论要求 .....	72
8.4 课程实践要求 .....	72
<b>9. 课程考核方式及评分规程.....</b>	<b>73</b>
9.1 出勤（迟到、早退等）、作业、报告等的要求.....	73
9.2 成绩的构成与评分规则说明 .....	73
9.3 考试形式及说明（含补考） .....	74
<b>10. 学术诚信规定.....</b>	<b>75</b>
10.1 考试违规与作弊处理 .....	75
10.2 杜撰数据、信息处理等 .....	75
10.3 学术剽窃处理等 .....	75
<b>11. 课堂规范.....</b>	<b>76</b>

11.1 课堂纪律 .....	76
11.2 课堂礼仪 .....	76
<b>12. 课程资源.....</b>	<b>77</b>
12.1 教材与参考书 .....	77
12.2 专业学术著作 .....	78
12.3 专业刊物 .....	78
12.4 网络课程资源 .....	78
<b>13. 教学合约.....</b>	<b>79</b>
13.1 教师作出师德师风承诺 .....	79
13.2 阅读课程实施大纲，理解其内容 .....	79
13.3 同意遵守课程实施大纲中阐述的标准和期望 .....	79
<b>14. 其他说明.....</b>	<b>80</b>

## 1. 教学理念

大学教育围绕一个“育人目标”核心，着眼于人的全面发展需要，重点培养学生的自学能力、实践能力和创新能力。即以学生为“中心”，教师为“主体”的教与学的关系。在具体的教学中，以“课”为教学活动单位，将学生能力锻炼作为核心，遵循理论联系实际、学以致用和因材施教的原则，使学生在循序渐进的教学过程中短时、优效地获得系统的科学知识。

学好一门专业课，尤其是核心专业课，必须理清思路，对整个学习过程进行合理的规划。除了掌握基本知识和基本理论以外，更重要的还需要把相关的重要研究成果融入课程体系中，并结合典型案例，形成科学的、系统的内容架构。在学时允许的条件下，通过介绍与本课程相关的最新研究成果以及研究成果的应用实例，进一步拓展视野，充实学习内容，深化课程认识，为今后学习与工作打下扎实的基础。

反应工程既是一门理论课程同时也是一门方法类课程，该课程所涉及的工程数学知识较多，且要求有较强的逻辑思维能力。针对我校培养应用型工程技术人才的培养目标，并考虑到我校学生数学基础较薄弱的特点，反应工程的教学过程中，我将贯彻“拿来主义”，即重知识和理论的应用，轻理论和公式的推导。这样不至于让学生因为课本上一大堆繁琐的数学公式而不知前因后果，产生课程学习的畏难情绪。课程实施主要采用**讲授法、引导法、提问法、对比法、归纳法、演示法、练习法以及案例分析法**等多种教学方法，同时结合教师自身的研究，以基于研究的学习亦作为教学方法的重要方面，充分调动学生的学习热情，使学生通过积极的思维、操作、演练，主动地获取知识，确保学生学有所得。在上课形式上，运用多媒体教学手段，方便对新近前沿研究领域、成果的介绍，以实现良好的教学效果。

整个教学实施过程中，我将秉承以下的教学风格：

(1) **公平对待每一位学生**。在教学过程中，我将对学生持民主与尊重的态度，对不同出身、性别、智力、相貌、年龄、个性以及关系密切程度不同的学生尽量做到一视同仁，同等对待，对每一位学生都关心、爱护、无偏袒、不以个人的私利和好恶作标准；

(2) **以一种有趣的教学方式传递知识**。在教学过程中，我尽量寻求有趣的方式向学生传递知识，例如：教学讲授环节，尽量多举与实际生活息息相关的例子，用最浅显易懂、幽默的语言表达课程中比较复杂抽象的概念。其目的是让学生积极参与整个教学环

节，通过参与和体验，高效的学习该课程；

(3) **积极引导学生的主动学习。**在教学过程中，我将通过案例分析、知识点对比、归纳等多种讲授方式引导学生积极主动的学习，使学生深刻体会所学知识对实际工程、未来科研道路或职场工作的价值。

## 2. 课程描述

### 2.1 课程的性质

《化学反应工程》是化学工程与工艺专业重要的专业必修课程之一，是研究化学反应器或包含化学反应的化工单元设备的学科，同时也是现代化学工程学科的重要学术基础。

### 2.2 课程在学科专业结构中的地位、作用

化学反应工程是结合反应装置，应用物理学、化学、工程学和经济学的基本原理与定律，采用现代科学计算方法与手段，综合研究、分析反应器中传递现象和化学反应耦合过程的基本规律，使化学反应能较优地实现工业化或精细化的一门技术基础学科。具体讲，反应工程主要从工程或现场应用角度研究大规模或微型化系统的反应设备结构中反应动力学与反应器内部（含催化剂）动量、质量、能量传递现象之间的相互作用关系，分析反应装置的特性，获得反应器体积设计、结构优化和动态操作控制的原理和方法。

### 2.3 课程的前沿及发展趋势

在上世纪 30 年代以前，化学工程主要建立在单元操作（如流体输送、蒸发、传热等）上，研究工程技术对化学反应有何影响则涉及较少。尔后，一些涉及反应工程的思想概念开始萌芽。1937 年，德国 Damkohler 首先研究了扩散、流动与传递对化学反应收率的影响，是化学反应工程的先导，而我国科学家袁谓康先生正是在 Damkohler 先驱基础上，凝炼出化学工程的时间多尺度思想。上世纪 50 年代，由于化学工程的发展，化工厂的大型化，综合化，自动化与最优化，提出了许多新的概念，例如“返混”现象，反应器的稳定性等等，特别是电子计算机的迅速发展与应用，使大型非线性方程组的数值求解成为可能，促进了传递现象与化学反应的结合，水到渠成，于 1957 年在第一届欧洲化学反应工程讨论会上正式确立了化学反应工程学。

上世纪 50 年代末到 60 年代初出版了一系列反应工程的著作，如 S.M.华拉斯的《化工动力学》、O.列文斯比尔的《化学反应工程》等，使学科体系大体形成。此后，一方面继续进行理论研究，积累数据，并应用于实践；另一方面，把应用范围扩展至较复杂的

领域，形成了一系列新的分支。例如：应用于石油炼制工业和石油化工中，处理含有成百上千个组分的复杂反应体系，发展了一种新的处理方法，即集总方法（见反应动力学）；应用于高分子化工中的聚合反应过程，出现了聚合反应工程；应用于电化学过程，出现了电化学反应工程；应用于生物化学工业中的生化反应体系，出现了生化反应工程；应用于冶金工业的高温快速反应过程，出现了冶金化学反应工程等。

化学反应工程迄今已有 50 多年历史，极大推动了化学工程与邻近学科，如原子能技术、煤炭加工、能源动力、石油化工、冶金工程、制药工艺、生物技术，以及新兴学科，如新材料、新能源、信息技术、环境科学、生命科学等的发展。“三传一反”的基本学术思想，正在前所未有的时间层次，空间广度和深度上演绎出精彩辉煌的篇章。

## 2.4 课程的前沿及发展趋势

化学反应工程发展至今，实验技术和理论发展日渐完善，将继续在化学工程中占据核心的地位。从学科的发展角度，与化学和物理更加紧密结合，进行超越分子层面合成的探索，探索新化学、新物理现象的耦合将一直是反应工程发展的动力，这主要体现在新催化剂的开发导致的化学转化新途径，在分子设计、构建、自组装和等离子体和离子液体等特殊流体环境下的化学、物理新现象，实现过程强化手段作用下传递与反应的协同等。同时，实验技术，尤其是计算科学的发展，将带给反应工程更广阔的发展，如复杂多相化学反应流动的真实模拟，催化剂设计的计算化学和高通量筛选，材料设计的自下而上的分子模拟等。而最终，科学放大依然是反应工程的终极任务，将实验室研究与工业化应用建立可靠的科学放大准则和方法论。

## 2.5 课程与经济社会发展的关系

随着社会分工和生产社会化的不断发展，国民经济的结构也在不断变化。国民经济是各个部门相互关联的总和。在国民经济中，农业是国民经济的基础，工业是国民经济的主导。化学工业在国家工业中占据着不可蔑视的地位。

化学工业（包括化工、轻工、食品、生物等工程学科）属于实业工业，它能够直接创造出非凡的经济价值，直接提高国家 GDP 水平。从各国的经济增长速度和工业发展状况的比照表中可以了解到，国家的经济增长速度有相当一部分得益于化学工业的直接推动，现在中国的 GDP 已经超过了美国，从工业能源的消耗情况可以看到，中国的化

学能源消耗已经超过美国，当然化学能源消耗大并不代表着一个国家的经济一定强盛，但它多多少少可以从一个侧面反映出国家当前的经济发展状况，是处于高速发展，还是处于低迷状态。

发展化学工业，对于改进工业生产工艺、发展农业生产、合成新材料、巩固国防建设、发展高精尖技术、提高国家的综合实力都有很大作用，它是国民经济中的一个重要组成部分。

## 2.6 课程内容可能涉及到的伦理与道德问题

化工伦理规范的构建应该考虑生产和社会实践两方面。从生产方面看，首先应降低化学原料的威胁；其次应确保生产过程的规范和安全；再次应治理和修复化工对环境的危害。从社会实践方面看：应明确不同角色的不同权利义务。如：化学工程师应保证化工科学合理的论证和设计，全力参与、全程跟踪化学工程活动，同时对化学工程的每个生产环节进行监督，从而降低化工风险；工程决策者应根据针对工程中可能存在的问题和风险进行分析，制定不同的备选方案，选择合适方案，实现工程最优化；政府部门应该在道德约束和伦理规范尚不完善的情况下，对工程中的每个参与者进行监督，明确他们的权利义务，监督和管理工程的实施；公众是拥有监督化工的运行和实施，捍卫自身健康和生存环境安全，对其工程的负面影响提出正当的伦理诉求。

## 2.7 学习本课程的必要性

- (1) 进一步加深对化学工程学科的认识；
- (2) 有利于系统的把握化学工程学科的研究内容及研究方法；
- (3) 有利于理解反应工程在化学工业反应过程开发中的重要作用。

### 3. 教师简介

#### 3.1 教师的职称、学历

任课教师：张峰榛；职称：讲师；最终学历：工学博士研究生

#### 3.2 教育背景

1999-2003 年 西南师范大学（现西南大学） 心理学系 心理学专业 理学学士；

2005-2008 年 四川大学化学工程学院 化学工程专业 工学硕士；

2008-2012 年 四川大学化学工程学院 化学工程专业 工学博士；

2015-2016 年 清华大学化学工程系 国内访问学者。

#### 3.3 研究方向（兴趣）

化工传质与分离；

化工多相流技术（含多相化学反应过程）；

化工计算流体力学（CFD）。



#### 4. 先修课程

高等数学、物理化学、化工原理、化工热力学

## 5. 课程目标

① 培养学生将物理化学、化工原理、化工热力学等学科知识用于化学反应工程学科的综合能力；

② 通过本课程的学习，使学生了解化学反应工程学科前沿，理解该学科理论体系，掌握本学科的研究方法；

③ 通过本课程的学习，使学生初步具有实现反应过程最优化的能力以及分析、改进、开发设计反应器的能力。

## 6. 课程内容

### 6.1 课程的内容概要

反应工程课程授课内容包括绪论、第一章均相单一反应动力学和理想反应器、第二章复合反应与反应器选型、第三章非理想流动反应器、第四章气固相催化反应本征动力学、第五章气固相催化反应宏观动力学以及第六章气固相催化固定床反应器，共七部分内容。各部分教学内容及教学要求如下。

#### 绪论

##### 教学内容：

1. 化学反应工程学科在化学工业中的地位；
2. 化学反应工程的研究内容及研究方法。

##### 教学要求：

1. 了解化学反应工程学科的任务和范畴；
2. 了解化学反应工程学科的内容、分类以及研究方法。

#### 第一章 均相单一反应动力学和理想反应器

##### 教学内容：

1. 化学计量方程；
2. 反应程度；
3. 转换率；
4. 化学反应速率；
5. 反应动力学方程；
6. 等温恒容过程反应动力学方程及动力学方程建立的方法；
7. 等温变容过程的膨胀因子和膨胀率；
8. 变容系统组分浓度、摩尔分数、分压和反应速率与转化率的关系；
9. 间歇反应器及其特点；
10. 平推流反应器及其特点；
11. 全混流反应器及其特点。

##### 教学要求：

1. 了解化学计量方程、反应程度、转化率、活化能、阿伦尼乌斯方程等基本概念以及建立动力学方程的三种基本方法；

2. 理解基元反应与质量作用定律，不同级数的不可逆反应中反应时间、转化率与初始浓度之间的关系；

3. 掌握化学反应速率的表达、反应动力学方程、反应级数、基本反应类型、等温变容过程的膨胀因子、膨胀率及所表达的反应速率方程；

4. 掌握三种理想反应器的设计方程，以及根据给定任务计算反应器体积。

## 第二章 复合反应与反应器选型

### 教学内容：

1. 瞬时选择性、平均选择性以及收率的概念；
2. 复合反应（可逆、自催化、平行、连串反应）的特征；
3. 反应速率表达式及动力学特征；
4. 理想流动反应器的串并联操作；
5. 循环反应器特征；
6. 单一不可逆反应的反应器优化组合；
7. 复合反应（可逆、自催化、平行、连串反应）的反应器优化选型。

### 教学要求：

1. 了解循环反应器的特征以及典型复合反应在不同反应器中体积及选择性的比较；
2. 理解可逆反应、自催化反应、平行反应、连串反应动力学方程特征；
3. 理解平推流反应器和全混流反应器的并联和串联；
4. 掌握收率、选择性概念，平行反应和连串反应中温度、浓度、活化能对选择性的影响；
5. 掌握复合反应的反应动力学方程的表达方法及动力学分析方法。

## 第三章 非理想流动反应器

### 教学内容：

1. 返混的概念及返混对反应过程的影响；
2. 停留时间分布的概率函数及特征值；
3. 停留时间分布规律的实验测定（阶跃法和脉冲法）；
4. 以对比时间为变量的停留时间分布；

5. 平推流及全混流反应器的停留时间分布规律；
6. 非理想流动模型（凝集流模型、多级混合槽模型、轴向扩散模型）。

#### **教学要求：**

1. 了解返混对反应过程的影响、宏观流体、微观流体的概念；
2. 理解停留时间分布的概率函数及特征值，以对比时间为变量的停留时间分布；
3. 理解凝集流模型、多级混合槽模型、轴向扩散模型的假设及建模思想；
4. 掌握停留时间分布的实验测定及两种理想反应器的停留时间分布规律；
5. 掌握几种解决均相反应过程问题的方法，即平推流模型、全混流模型、凝集流模型、多级混合槽模型、轴向扩散模型。

### **第四章 气固相催化反应本征动力学**

#### **教学内容：**

1. 催化反应过程及特征；
2. 非均相催化反应速率表达；
3. 非均相催化反应过程；
4. 固体催化剂组成、结构；
5. 化学吸附与物理吸附；
6. 化学吸附速率的表达；
7. 兰格缪尔吸附模型；
8. 焦姆金吸附模型；
9. 弗鲁德里希吸附模型；
10. 表面化学反应；
11. 反应本征动力学；
12. 涉及双曲型本征动力学方程；
13. 幂函数型本征动力学方程及实验测定。

#### **教学要求：**

1. 了解固体催化剂组成、结构以及催化反应过程的特征；
2. 了解物理吸附、幂函数型本征动力学方程及本征动力学方程的实验测定；
3. 理解非均相催化反应速率的几种表达式、焦姆金吸附模型、弗鲁德里希吸附模型；
4. 掌握非均相反应的七大步骤、兰格缪尔模型及双曲本征动力学方程的推理。

## 第五章 气固相催化反应宏观动力学

### 教学内容:

1. 宏观反应速率的定义式;
2. 催化剂内气体扩散;
3. 以颗粒为基准的有效扩散;
4. 球形、无限长圆柱形、圆形薄片以及任意形状催化剂等温条件下的宏观动力学方程;
5. 非等温条件下的宏观动力学方程。

### 教学要求:

1. 了解催化剂内各种扩散以及非等温条件下的宏观动力学方程;
2. 理解扩散判断准则、宏观反应动力学方程的催化剂从特殊形状到任意形状、反应从一级到任意级的假设、推理和求解;
3. 掌握宏观反应速率及有效扩散, 以及等温条件下宏观反应动力学方程。

## 第六章 气固相催化固定床反应器

### 教学内容:

1. 流体在固定床内的流动特性;
2. 固定床内径向传递;
3. 固定床催化反应器的特点及类型。

### 教学要求:

1. 了解流体在固定床内径向传热传质特征;
2. 了解固定床反应器的各种类型及特点。

## 6.2 教学重点、难点

各教学章节的重点、难点如下:

### 绪论

#### 教学重点:

1. 化学反应工程的研究内容和方法。

#### 教学难点:

2. 化学反应工程的研究方法。

## 第一章 均相单一反应动力学和理想反应器

### 教学重点:

1. 化学反应动力学方程的建立;
2. 理想反应器的设计方程。

### 教学难点:

1. 等温恒容过程反应动力学方程及动力学方程建立的方法;
2. 变容系统组分浓度、摩尔分数、分压和反应速率与转化率的关系;
3. 间歇反应器、平推流反应器、全混流反应器设计方程。

## 第二章 复合反应与反应器选型

### 教学重点:

1. 复合反应动力学方程表达法;
2. 复合反应动力学特征分析;
3. 复合反应与反应器选型。

### 教学难点:

1. 复合反应(可逆、自催化、平行、连串反应)的特征及反应速率表达;
2. 循环反应器特征;
3. 复合反应(可逆、自催化、平行、连串反应)的反应器优化选型。

## 第三章 非理想流动反应器

### 教学重点:

1. 停留时间分布的概率函数及特征值;
2. 停留时间分布规律的实验测定;
3. 解决均相反应过程问题的方法,即平推流模型、全混流模型、凝集流模型、多级混合槽模型、轴向扩散模型。

### 教学难点:

1. 返混与混合的区别以及返混对反应过程的影响;
2. 停留时间分布规律的实验测定;
3. 非理想流动模型(凝集流模型、多级混合槽模型、轴向扩散模型)。

## 第四章 气固相催化反应本征动力学

### 教学重点:

1. 非均相催化反应速率的表达;
2. 非均相催化反应过程;
3. 兰格缪尔吸附模型;
4. 双曲型本征动力学方程。

**教学难点:**

1. 双曲型本征动力学方程;
2. 本征动力学方程的实验测定。

## 第五章 气固相催化反应宏观动力学

**教学重点:**

1. 以颗粒为基准的有效扩散;
2. 西勒模数的物理意义;
3. 任意形状催化剂上等温条件下宏观反应动力学方程。

**教学难点:**

1. 球形、无限长圆柱形、圆形薄片以及任意形状催化剂等温条件下的宏观动力学方程;
2. 非等温条件下的宏观动力学方程。

## 第六章 气固相催化固定床反应器

**教学重点:**

1. 流体在固定床内的流动特性;
2. 固定床催化反应器的特点及类型。

**教学难点:**

1. 流体在固定床内的流动特性;
2. 流体在固定床内径向传递特征。

### 6.3 学时安排

各教学章节的学时安排如下:

绪论: 2 学时

第一章 均相单一反应动力学和理想反应器: 12 学时

第二章 复合反应与反应器选型: 6 学时



第三章 非理想流动反应器：8 学时

第四章 气固相催化反应本征动力学：8 学时

第五章 气固相催化反应宏观动力学：6 学时

第六章 气固相催化固定床反应器：3 学时

## 7. 课程教学实施

《化学反应工程》课程教学实施如下：

### 7.1 教学单元一

#### 7.1.1 教学日期

课次/学时：1/2

#### 7.1.2 教学目标

- (1) 了解反应工程研究对象和目的；
- (2) 了解反应工程的研究内容；
- (3) 了解反应工程的研究方法；
- (4) 了解反应工程在工业开发过程中的作用。

#### 7.1.3 教学内容（含重点、难点）

知识点：

- (1) 反应工程研究对象和目的；
- (2) 反应工程的研究内容；
- (3) 反应工程的研究方法；
- (4) 反应工程在工业开发过程中的作用。

重点：

- (1) 反应工程的研究内容、方法。

难点：

- (1) 化学反应工程的研究方法。

#### 7.1.4 教学过程

- (1) 介绍化学工程学科发展史；
- (2) 反应工程的研究对象、目的及内容；
- (3) 反应工程学的任务及范畴；
- (4) 化学反应过程分类；

(5) 典型的化学反应器，主要举例介绍绝热固定床反应器，如：邻二甲苯氧化制苯酐多管式固定床反应器，如：流化床反应器，如：石化企业重油催化裂化流化床反应器)；

(6) 反应工程的研究方法及在工业开发过程中的作用，重点介绍数学模型法研究反应工程的步骤，并提问大型冷模实验研究中可能涉及的传递过程。

### 7.1.5 教学方法

本节主要采用讲授法、图例讲授法、案例分析法、提问法。

### 7.1.6 作业安排及课后反思

课后思考反应工程的研究对象、目的、内容及研究方法。

### 7.1.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

课前准备主要是关于反应工程与流体流动及传热传质过程的基础知识，有助于学生很好的衔接《物理化学》和《化工原理》的知识点。

### 7.1.8 参考资料

本课程使用教材：“绪论”部分；P1-3。

## 7.2 教学单元二

### 7.2.1 教学日期

课次/学时：2/2

### 7.2.2 教学目标

- (1) 了解化学计量方程、反应程度、转化率等基本概念；
- (2) 掌握化学反应速率的表达。

### 7.2.3 教学内容（含重点、难点）

知识点：

- (1) 化学反应式与化学反应计量方程；
- (2) 反应程度（反应进度）；
- (3) 转换率；

(4) 化学反应速率。

重点：

(1) 反应程度与转化率的性质；

(2) 化学反应速率的表达。

难点：

(1) 化学反应速率的表达。

### 7.2.4 教学过程

(1) 化学反应动力学及反应器中涉及到的基本概念

化学组分：任意具有确定性质的化合物或元素。

反应物质：反应器内（或化学反应过程）物料的总和。

反应物：参加反应的物质（反应物、产物）。

伴随物：存在于系统，但本身不发生化学变化的物质。溶剂、稀释剂、惰性物质、催化剂、杂质等。

反应器、反应容积、反应设备：指在其中实施化学反应的设备。

反应体积：指反应器中反应物质所占据的体积。

反应场所（有效反应体积）：反应器中确实发生化学反应的那部分反应体积。

**有效反应体积 ≤ 反应体积 ≤ 反应器体积**

(2) 化学反应式与化学反应计量式

	化学反应式	化学反应计量式
概念	用于描述反应物经化学反应生成产物的定量关系式。	用于定量描述化学反应过程中反应物和产物变化量之间的相互关系。
描述	$aA + bB + \dots \rightarrow rR + sS + \dots$	$\sum a_i I = 0$
特点	1.表示 A 与 B 等可以发生生成 R、S 等的反应，也表示反应进行的方向——不可颠倒次序； 2.左侧为反应物，右侧为产物。	1.只反映组份间量的关系； 2.乘以非零常数，计量关系不变； 3.不得含有除 1 之外的其它公因子。

(3) 反应程度

反应程度定义:  $\xi = \frac{\Delta n_I}{a_I} = \frac{n_I - n_{I0}}{a_I} \geq 0$  单位: mol。

**反应程度的性质:**

- ① 时间的函数, 随反应的进行而不同;
- ② 积累量, 恒大于 0;
- ③ 广度量, 因次 [mol];
- ④ 与反应式的写法有关。

(4) 转化率

定义关键组分: 体系中按化学计量方程计算能够完全反应掉的某一反应物组分。

关键组分 A 的转换率:  $x_A = \frac{n_{A0} - n_A}{n_{A0}}$

**注意:** 对于恒容过程:  $x_A = \frac{c_{A0} - c_A}{c_{A0}}$

转化率的特点:

- ① 随起始态的不同选择而不同;
- ② 与计量系数无关 (与反应式的写法无关);
- ③ 广度量, 无因次;
- ④ 最大值为 1(100%), 取值范围为 0~1。

**提问:** 转化率是否为时间的函数?

(5) 化学反应速率

均相单一化学反应的反应速率定义: 单位反应体积内反应程度随时间的变化率。

$$r = \frac{1}{V} \frac{d\xi}{dt} \quad (\text{mol} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$$

表 化学反应速率其它常见的表示方法

	化学反应速率的其它表示方法
摩尔数	$r_I = \frac{1}{V} \frac{dn_I}{dt} \quad (\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}) \quad \text{I 为生成物};$ $-r_I = -\frac{1}{V} \frac{dn_I}{dt} \quad (\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}) \quad \text{I 为反应物}$
转化率	$-r_A = \frac{n_{A0}}{V} \frac{dx_A}{dt} \quad (\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}) \quad \text{A 为关键组分}$

某组分的浓度	$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} - \frac{C_A}{V} \frac{dV}{dt} \quad (\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}) \quad A \text{ 为关键组分}$ <p>提问：恒容过程以关键组分 A 的浓度表示的化学反应速率为？</p>
--------	---

### 7.2.5 教学方法

本节主要采用讲授法、对比讲授法、对比法。

### 7.2.6 作业安排及课后反思

课后作业：教材 P35，1、2、3。

### 7.2.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

课前准备：

- (1) 转化率是否为时间的函数？
- (2) 恒容过程以关键组分 A 的浓度表示的化学反应速率为？

### 7.2.8 参考资料

本课程使用教材：“第一章 均相单一反应动力学和理想反应器”部分；P4-7。

## 7.3 教学单元三

### 7.3.1 教学日期

课次/学时：3/2

### 7.3.2 教学目标

- (1) 了解活化能、阿伦尼乌斯关系；
- (2) 理解基元反应与质量作用定律；
- (3) 掌握化学反应动力学方程以及常见的简单级数不可逆反应动力学积分式。

### 7.3.3 教学内容（含重点、难点）

知识点：

- (1) 化学反应动力学方程；

- (2) 阿伦尼乌斯关系;
- (3) 以分压表示的反应动力学方程;
- (4) 常见的简单级数不可逆反应动力学积分式。

重点:

- (1) 阿伦尼乌斯关系;
- (2) 常见的简单级数不可逆反应动力学积分式。

难点:

- (1) 以分压表示的反应动力学方程。

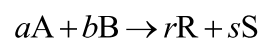
### 7.3.4 教学过程

- (1) 复习上节课知识点
  - ① 反应程度定义式及特点?
  - ② 转化率定义式及特点?
  - ③ 恒容过程以关键组分 A 的浓度表示的化学反应速率的表达式?
- (2) 化学反应动力学方程

**反应动力学方程:** 描述反应速率和影响反应速率的因素之间关系的关系式。

**引导学生思考影响均相化学反应速率的因素。**(反应物系组成、温度、压力)

讲授化学反应动力学方程的一般表示(幂函数形式)



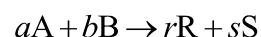
$$-r_A = k_c c_A^m c_B^n \quad \text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$$

**提问:**

- ①  $m$  是否一定等于  $a$ ,  $n$  是否一定等于  $b$ ?
- ② 什么条件下,  $m$  一定等于  $a$ ,  $n$  一定等于  $b$ ?
- ③ 什么是基元反应? 基元反应满足什么定律使得  $m=a$ ,  $n=b$ ?

- (3) 阿伦尼乌斯关系

根据化学反应动力学方程的一般表示(幂函数形式)



$$-r_A = k_c c_A^m c_B^n \quad \text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$$

**引导学生回忆物理化学讲的化学反应动力学中  $k_c$  用什么关系式表达?**(阿伦尼乌斯

关系)

$$\text{阿伦尼乌斯关系: } k_c = k_{c0} \exp\left(\frac{-E}{RT}\right)$$

通过练习实例: 现有两个反应的活化能分别为 100kJ/mol 和 150kJ/mol, 试计算:

(a) 温度由 300K 上升 10K;

(b) 温度由 400K 上升 10K 时速率常数  $k_c$  的增大倍数。

引导学生思考化学反应速率对温度的敏感程度。

(4) 以分压表示的反应动力学方程

推导对于气相反应  $aA + bB \rightarrow rR + sS$ , 以分压表示动力学速率方程与以浓度表示动力学速率方程的关系:

$$-r_A = k_c c_A^m c_B^n = k_c \left(\frac{p_A}{RT}\right)^m \left(\frac{p_B}{RT}\right)^n = \frac{k_c}{(RT)^{m+n}} p_A^m p_B^n$$

引导学生思考  $k_c$  与  $k_p$  的关系。

(5) 常见的简单级数不可逆反应动力学积分式

	速率方程	速率方程计量式
零级反应	$-\frac{dc_A}{dt} = k$	$kt = c_{A0} - c_A = c_{A0}(1 - x_A)$
一级反应	$-\frac{dc_A}{dt} = kc_A$	$kt = \ln \frac{c_{A0}}{c_A} = \ln \frac{1}{1 - x_A}$
二级反应 ( $c_{A0} = c_{B0}$ )	$-\frac{dc_A}{dt} = kc_A^2$	$kt = \frac{1}{c_A} - \frac{1}{c_{A0}} = \frac{1}{c_{A0}} \left( \frac{x_A}{1 - x_A} \right)$

### 7.3.5 教学方法

本节主要采用提问法、讲授法、引导法、练习法。

### 7.3.6 作业安排及课后反思

课后作业: 教材 P36, 6、13。

### 7.3.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

课前准备:



- (1) 影响均相化学反应速率的因素；
- (2) 回忆物理化学讲的化学反应动力学中  $k_c$  用什么关系式表达；
- (3) 化学反应速率对温度的敏感程度；
- (4)  $k_c$  与  $k_p$  的关系。

### 7.3.8 参考资料

本课程使用教材：“第一章 均相单一反应动力学和理想反应器”部分；P 7-9。

## 7.4 教学单元四

### 7.4.1 教学日期

课次/学时：4/2

### 7.4.2 教学目标

- (1) 了解建立动力学方程的方法；
- (2) 掌握反应动力学方程。

### 7.4.3 教学内容（含重点、难点）

知识点：

- (1) 积分法建立动力学方程；
- (2) 微分法建立动力学方程；

重点：

- (1) 积分法建立动力学方程。

难点：

- (1) 微分法建立动力学方程。

### 7.4.4 教学过程

- (1) 复习上节课知识点

① 影响反应速率的主要因素？

② 对于化学反应  $aA + bB \rightarrow rR + sS$ ，反应速率表达式为  $-r_A = k_c c_A^m c_B^n$ ，试问：

反应物浓度和温度对反应速率的影响分别体现在什么参数上？

$$(A) \quad kt = \frac{1}{c_{A0}} \frac{x_A}{1-x_A}$$

$$\textcircled{3} \quad (B) \quad kt = c_{A0} - c_A = c_{A0}x_A$$

$$(C) \quad kt = \ln \frac{c_{A0}}{c_A} = \ln \frac{1}{1-x_A}$$

以上那个为一级反应的积分式？并说明一级反应速率常数  $k_c$  的单位？

(2) 积分法建立动力学方程

讲授教材 P10 例 1-1，介绍积分法并说明积分法的步骤。

① 假定动力学方程形式，得到关系  $kt=f(c_i)$

② 由测定  $t$  时刻浓度值得： $t \sim f(c_i)$

③ 做图， $t \sim f(c_i)$  过圆点时且呈线性关系，假定成立，否则重新假定动力学形式

④ 利用变温实验数据求活化能  $E$  和指前因子  $k_0$

(3) 微分法建立动力学方程

以教材 P10 例 1-1 为例，介绍微分法并说明微分法的步骤。

① 由测得的  $c_i \sim t_i$  曲线上图解微分求得  $-\frac{dc_A}{dt} \sim t_i$  关系数据

② 拟线性化  $-r_A = -\frac{dc_A}{dt} = k_c c_A^n$  为  $\ln \left( -\frac{dc_A}{dt} \right) = \ln k_c + n \ln c_A$ ，求得  $k_c$  和  $n$

③ 利用变温实验数据求活化能  $E$  和指前因子  $k_0$

#### 7.4.5 教学方法

本节主要采用提问法、讲授法。

#### 7.4.6 作业安排及课后反思

课后作业：教材 P36，6、7。

#### 7.4.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

课前准备：

(1) 影响反应速率的主要因素？

(2) 对于化学反应  $aA + bB \rightarrow rR + sS$ ，反应速率表达式为  $-r_A = k_c c_A^m c_B^n$ ，试问：反应

物浓度和温度对反应速率的影响分别体现在什么参数上？

$$(A) \quad kt = \frac{1}{c_{A0}} \frac{x_A}{1-x_A}$$

$$(3) \quad (B) \quad kt = c_{A0} - c_A = c_{A0} x_A$$

$$(C) \quad kt = \ln \frac{c_{A0}}{c_A} = \ln \frac{1}{1-x_A}$$

以上那个为一级反应的积分式？并说明一级反应速率常数  $k_c$  的单位？

#### 7.4.8 参考资料

本课程使用教材：“第一章 均相单一反应动力学和理想反应器”部分；P 9-12。

### 7.5 教学单元五

#### 7.5.1 教学日期

课次/学时：5/2

#### 7.5.2 教学目标

- (1) 理解反应持续时间、停留时间、平均停留时间、空间时间、空速、标准空速；
- (2) 理解反应器内物料流动类型对反应过程的影响。

#### 7.5.3 教学内容（含重点、难点）

知识点：

- (1) 反应器开发任务；
- (2) 所涉及的时间概念（反应持续时间、停留时间、平均停留时间、空间时间、空速、标准空速）；
- (3) 反应器内物料流动类型对反应过程的影响及反应器的分类。

重点：

- (1) 反应器内物料流动类型对反应过程的影响；
- (2) 所涉及的时间概念（反应持续时间、停留时间、平均停留时间、空间时间、空速、标准空速）。

难点：

- (1) 反应器内物料流动类型对反应过程的影响；
- (2) 停留时间、平均停留时间、空间时间、空速的概念理解。

#### 7.5.4 教学过程

##### (1) 复习上节课知识点

引导学生回忆积分法和微分法建立动力学方程的步骤。

##### (2) 反应器开发任务

- ① 反应器选型——基于反应动力学特性进行；
- ② 操作方式与操作条件的确立——结合动力学与反应器两个方面进行；
- ③ 反应器几何尺寸设计——基于生产任务进行。

##### (3) 所涉及的时间概念

**反应持续时间  $t_r$** : 在间歇反应器中反应达到一定转化率所需时间(不包括辅助时间)。

**停留时间(接触时间) $t$** : 连续流动反应器中流体微元从反应器入口到反应器出口所经历的时间。

**平均停留时间**: 连续流动反应器中各流体微元从反应器入口到反应器出口所经历时间的平均值。

**空间时间  $\tau$** : 反应器有效容积  $V_R$  与流体入口条件下的体积流率  $V_0$  之比,  $\tau = V_R/V_0$ 。

**空间速度(空速)  $S_v$ [时间<sup>-1</sup>]**: 单位时间内投入到反应器中的物料体积(指入口条件下)与反应器有效容积或催化剂体积之比。  $S_v = V_0/V_R$

标准空速定义为  $V_{NO}/V_R$ , 其中  $V_{NO}$  为流体在标准状况下的体积流率。

引导学生思考标准状况和物理化学中讲的标准状态的区别。

**提问**: 为什么用标准空速比较设备生产能力大小, 而不是空速?

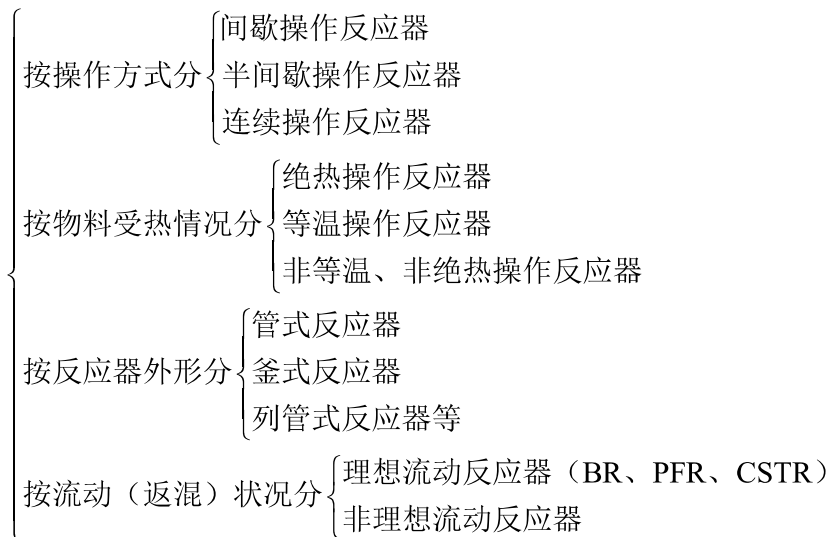
##### (4) 反应器内物料流动类型对反应过程的影响

**简单混合**: 相同组成的物料进行混合; 不影响反应速率的大小(实质: 停留时间相同物料的混合)。

**返混**: 不同组成物料之间的混合, 影响反应速率的大小(实质: 不同停留时间物料的混合)。

##### (5) 反应器的分类

讲授按不同方式的分类, 并将常见的反应器给出图例。



### 7.5.5 教学方法

本节主要采用引导法、讲授法、演绎法、提问法。

### 7.5.6 作业安排及课后反思

课后作业：教材 P37，18。

### 7.5.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

课前准备：

- (1) 为什么用标准空速比较设备生产能力大小，而不是空速？
- (2) 积分法和微分法建立动力学方程的步骤。
- (3) 标准状况和物理化学中讲的标准状态的区别。

### 7.5.8 参考资料

本课程使用教材：“第一章 均相单一反应动力学和理想反应器”部分；P 13-16。

## 7.6 教学单元六

### 7.6.1 教学日期

课次/学时：6/2

### 7.6.2 教学目标

- (1) 掌握间歇反应器的设计方程；

- (2) 掌握平推流反应器的设计方程；
- (3) 掌握膨胀因子和膨胀率。

### 7.6.3 教学内容（含重点、难点）

知识点：

- (1) 间歇反应器（BR）特点及设计方程；
- (2) 平推流反应器（PFR）特点及设计方程；
- (3) 等温变容反应过程的一些概念（膨胀因子和膨胀率）

重点：

- (1) 间歇反应器特点及设计方程；
- (2) 平推流反应器特点及设计方程。

难点：

- (1) 间歇反应器设计方程；
- (2) 平推流反应器设计方程。

### 7.6.4 教学过程

(1) 复习上节课知识点

- ① 返混与混合的区别？
- ② 空速越大说明设备生产能力越强这种说法是否正确？

(2) 间歇反应器特点及设计方程

以生活中常见的泡菜坛为案例，引出间歇反应器，并说明间歇反应器的特点。

通过物料衡算推导间歇反应器的设计方程：

$$t_r = n_{A0} \int_0^{x_A} \frac{dx_A}{(-r_A)V_R}$$

引导学生思考对于恒容反应，间歇反应器的设计方程：

$$t_r = C_{A0} \int_0^{x_A} \frac{dx_A}{(-r_A)} = - \int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{dC_A}{(-r_A)}$$

(3) 平推流反应器（PFR）特点及设计方程

以合成氨反应中的管式反应器为案例，引出平推流反应器，并说明平推流反应器的特点。

通过物料衡算推导平推流反应器的设计方程：

$$\tau = \frac{V_R}{V_0} = c_{A0} \int_{x_{A0}}^{x_{Af}} \frac{dx_A}{(-r_A)}$$

引导学生思考对于恒容反应，平推流反应器的设计方程：

$$\tau = \frac{V_R}{V_0} = - \int_{c_{A0}}^{c_{Af}} \frac{dc_A}{(-r_A)} = \int_{c_{Af}}^{c_{A0}} \frac{dc_A}{(-r_A)}$$

(4) 变容反应过程的一些概念

**变容反应：**对于有些气相反应，反应前后摩尔数不同，在系统压力不变的情况下，反应会引起系统物流体积发生变化的反应。由于物流体积的改变必然带来反应物浓度的变化，从而引起反应速率的变化。

对于变容反应： $a_A A + a_B B = a_P P + a_S S$

**膨胀因子  $\delta_A$  定义：**  $\delta_A = \sum_i \frac{a_i}{-a_A} = \frac{a_P + a_S - a_A - a_B}{-a_A}$

**膨胀率  $\varepsilon_A$  定义：**  $\varepsilon_A = \frac{V_{x_A=1} - V_{x_A=0}}{V_{x_A=0}}$

**膨胀率与膨胀因子的关系：**  $\varepsilon_A = y_{A0} \delta_A$

### 7.6.5 教学方法

本节主要采用提问法、讲授法、引导法、案例分析法。

### 7.6.6 作业安排及课后反思

课后作业：教材 P37，20。

### 7.6.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

课前准备：

- (1) 返混与混合的区别？
- (2) 空速越大说明设备生产能力越强这种说法是否正确？
- (3) 对于恒容反应，间歇反应器的设计方程。
- (4) 对于恒容反应，平推流反应器的设计方程。

### 7.6.8 参考资料

本课程使用教材：“第一章 均相单一反应动力学和理想反应器”部分；P 17-25。

## 7.7 教学单元七

### 7.7.1 教学日期

课次/学时：7/2

### 7.7.2 教学目标

(1) 掌握全混流反应器设计方程。

### 7.7.3 教学内容（含重点、难点）

知识点：

- (1) 平推流反应器平均停留时间；
- (2) 全混流反应器（CSTR）特点及设计方程；
- (3) 本章小结

重点：

- (1) 全混流反应器（CSTR）特点及设计方程；

难点：

- (1) 平推流反应器平均停留时间与空间时间的关系；
- (2) 全混流反应器设计方程。

### 7.7.4 教学过程

(1) 复习上节课知识点

① 恒容条件下间歇反应器与平推流反应器的设计方程表达式？

② 膨胀因子与膨胀率的关系式？

(2) 平推流反应器平均停留时间

推导对于变容反应，平推流反应器平均停留时间。

$$\bar{t} = \int_{x_{A0}}^{x_{Af}} \frac{F_{A0} dx_A}{(-r_A)V} = c_{A0} \int_{x_{A0}}^{x_{Af}} \frac{dx_A}{(-r_A)(1 + \varepsilon_A x_A)}$$

引导学生思考对于恒容反应，平推流反应器平均停留时间与空间时间的关系。



### (3) 全混流反应器 (CSTR) 特点及设计方程

以生活中常见的带搅拌桨的釜式反应器为案例，引出全混流反应器，并说明全混流反应器的特点。

通过物料衡算推导间歇反应器的设计方程：

$$\tau = \frac{V_R}{V_0} = c_{A0} \frac{x_{Af} - x_{A1}}{(-r_A)_f}$$

引导学生思考对于恒容反应，全混流反应器的设计方程：

$$\tau = \frac{V_R}{V_0} = \frac{c_{A1} - c_{Af}}{(-r_A)_f}$$

### (4) 本章小结

#### 7.7.5 教学方法

本节主要采用提问法、讲授法、引导法、案例分析法、归纳法。

#### 7.7.6 作业安排及课后反思

课后作业：教材 P38，23。

#### 7.7.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

课前准备：

- (1) 恒容条件下间歇反应器与平推流反应器的设计方程表达式？
- (2) 膨胀因子与膨胀率的关系式？
- (1) 对于恒容反应，平推流反应器平均停留时间与空间时间的关系。
- (2) 对于恒容反应，全混流反应器的设计方程。

#### 7.7.8 参考资料

本课程使用教材：“第一章 均相单一反应动力学和理想反应器”部分；P 26-35。

## 7.8 教学单元八

### 7.8.1 教学日期

课次/学时：8/2

### 7.8.2 教学目标

- (1) 了解单一不可逆反应过程平推流与全混流反应器比较；
- (2) 理解平推流反应器和全混流反应器的并联和串联。

### 7.8.3 教学内容（含重点、难点）

知识点：

- (1) 单一不可逆反应过程平推流与全混流反应器比较；
- (2) 理想流动反应器的组合；
- (3) 根据不同化学反应优化反应器组合。

重点：

- (1) 理想流动反应器的组合；
- (2) 根据不同化学反应优化反应器组合。

难点：

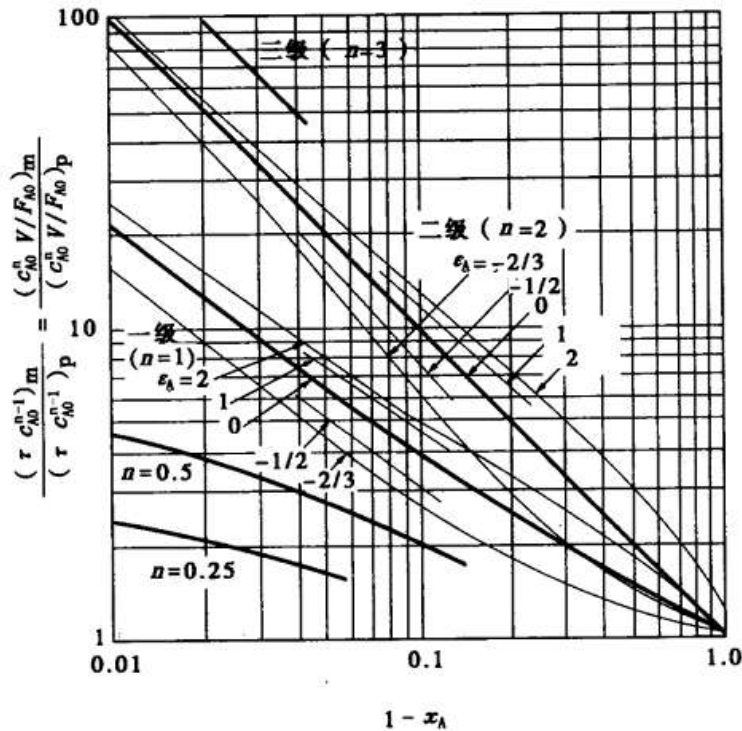
- (1) 根据不同化学反应优化反应器组合。

### 7.8.4 教学过程

- (1) 复合反应

**复合反应：**反应系统中同时发生两个或两个以上化学反应时，称该反应系统为复合反应过程。

- (2) 单一不可逆反应过程平推流与全混流反应器比较



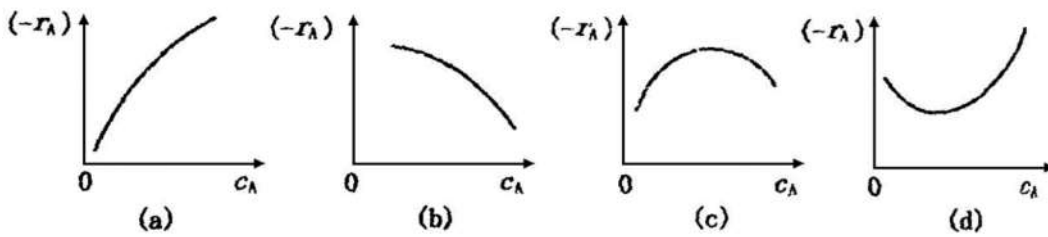
引导学生思考对于单一不可逆(n级)反应过程 PFR 和 CSTR 性能。

(3) 理想流动反应器的组合

PFR 和 CSTR 的并联特性

PFR 和 CSTR 的串联特性

(4) 根据不同化学反应优化反应器组合



引导学生思考对于上述不同类型的反应选择 PFR 和 CSTR 或组合 PFR 和 CSTR, 可使设备费用最小。。

7.8.5 教学方法

本节主要采用讲授法、图例讲授法、引导法。

7.8.6 作业安排及课后反思

课后思考：比较对于单一不可逆(n级)反应，PFR、CSTR 以及多个 CSTR 串联的

空时大小？为什么？

课后作业：教材 P68，8、9。

### 7.8.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

课前准备：

- (1) 对于单一不可逆(n 级)反应过程 PFR 和 CSTR 性能；
- (2) 对于不同类型的反应选择 PFR 和 CSTR 或组合 PFR 和 CSTR，可使设备费用最小。

### 7.8.8 参考资料

本课程使用教材：“第二章 复合反应与反应器选型”部分；P 39-47。

## 7.9 教学单元九

### 7.9.1 教学日期

课次/学时：9/2

### 7.9.2 教学目标

- (1) 了解循环反应器的特征；
- (2) 理解自催化反应和可逆反应特性。

### 7.9.3 教学内容（含重点、难点）

知识点：

- (1) 循环反应器及其特点；
- (2) 自催化反应特性与反应器选型；
- (3) 可逆反应特性与反应器选型。

重点：

- (1) 循环反应器的特点；
- (2) 自催化反应特性；
- (3) 可逆反应的反应器选型。

难点：

- (1) 自催化反应的反应器选型；
- (2) 可逆放热反应的反应器选型。

#### 7.9.4 教学过程

(1) 复习上节课知识点

n 级单一不可逆反应在 PFR 和 CSR 中性能比较？

(2) 循环反应器及其特点

基本假定：

- (a) 反应器内为活塞流；
- (b) 管线内不发生化学反应；
- (c) 整个体系定常态操作。

定义循环比为  $\beta$ ：循环量与产品量之比。

引导学生回忆《化工原理》精馏单元操作中回流比的概念，对比记忆循环反应器循环比的定义。

根据物料衡算推导循环反应器中关键组分进口浓度与出口浓度的关系：

$$x_{A1} = \frac{\beta}{1+\beta} x_{A2}$$

循环反应器设计方程：

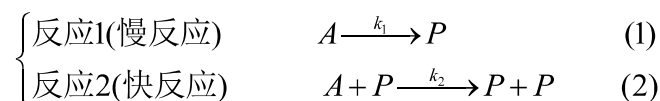
$$V_R = V_0 c_{A0} (1+\beta) \int_{\frac{\beta}{1+\beta} x_{A2}}^{x_{A2}} \frac{dx_A}{(-r_A)}$$

讨论不同循环比条件下，循环反应器与 PFR 和 CSTR 的关系。

当  $\beta \rightarrow \infty$ ，循环反应器为 CSTR；

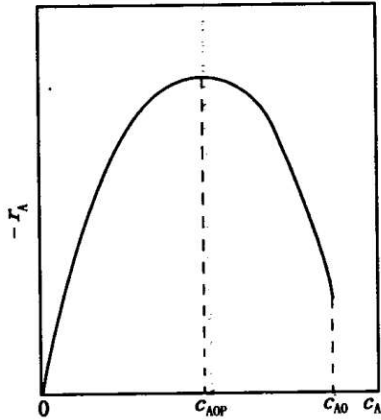
当  $\beta=0$ ，循环反应器为 PFR。

(3) 自催化反应特性与反应器选型



自催化反应过程实质：反应产物对反应起到催化作用，产物可以加快反应进行。

自催化反应的特点：反应起始时，只有 A，没有 P，第二个反应无法进行，一旦体系有了 P，反应速率大大加快，直到 A 的减少使反应速率下降。



根据自催化反应的特点，引导学生思考在低转化率和高转化率条件下反应器组合问题。

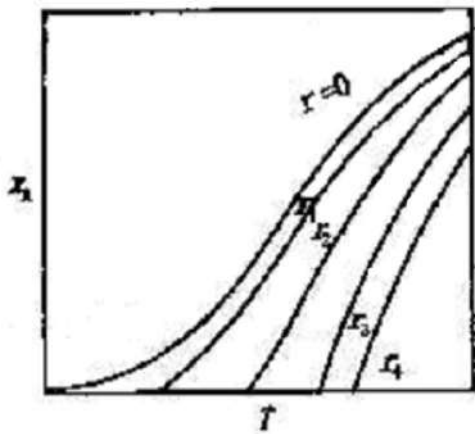
#### (4) 可逆反应特性与反应器选型

对于可逆反应： $aA + bB \rightleftharpoons rR + sS$

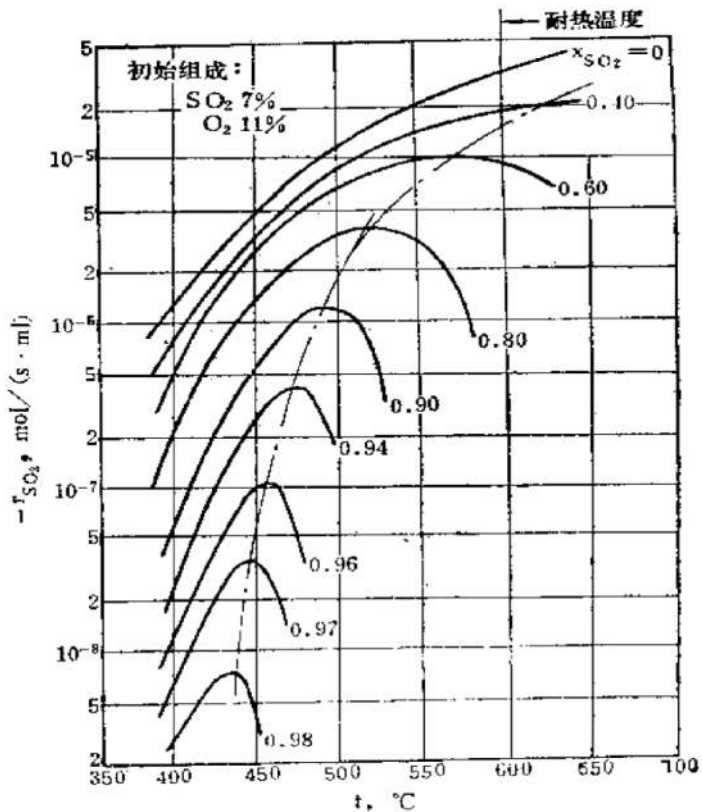
反应净速率：

$$\begin{aligned} r &= r_{\text{正}} - r_{\text{逆}} = r_1 - r_2 = k_1 f(x_A) - k_2 g(x_A) \\ &= k_{10} e^{-E_1/RT} f(x_A) - k_{20} e^{-E_2/RT} g(x_A) \end{aligned}$$

引导学生思考对于可逆吸热反应条件下反应速率与温度及转化率之间的关系，并讨论从浓度和温度角度说明选什么反应器更优。



引导学生思考对于可逆放热反应条件下反应速率与温度及转化率之间的关系，引出可逆放热反应中存在最佳温度，同时讨论从浓度和温度角度说明选什么反应器更优。



### 7.9.5 教学方法

本节主要采用提问法、讲授法、图例讲授法、引导法。

### 7.9.6 作业安排及课后反思

课后作业：教材 P68，5。

### 7.9.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

课前准备：

- (1) 回忆《化工原理》精馏单元操作中回流比的概念，对比记忆循环反应器循环比的定义；
- (2) 在低转化率和高转化率条件下反应器组合问题；
- (3) 对于可逆吸热反应条件下反应速率与温度及转化率之间的关系，并讨论从浓度和温度角度说明选什么反应器更优；
- (4) 对于可逆放热反应条件下反应速率与温度及转化率之间的关系，并讨论从浓度和温度角度说明选什么反应器更优。

### 7.9.8 参考资料

本课程使用教材：“第二章 复合反应与反应器选型”部分；P 47-56。

## 7.10 教学单元十

### 7.10.1 教学日期

课次/学时：10/2

### 7.10.2 教学目标

- (1) 理解平行反应、连串反应动力学方程特征；
- (2) 掌握收率、选择性概念，平行反应和连串反应中温度、浓度、活化能对选择性的影响。

### 7.10.3 教学内容（含重点、难点）

知识点：

- (1) 平行反应特性与反应器选型；
- (2) 连串反应特性与反应器选型；
- (3) 本章小结。

重点：

- (1) 平行反应特性与反应器选型；
- (2) 连串反应特性与反应器选型。

难点：

- (1) 平行反应的反应器选型；
- (2) 连串反应的反应器选型。

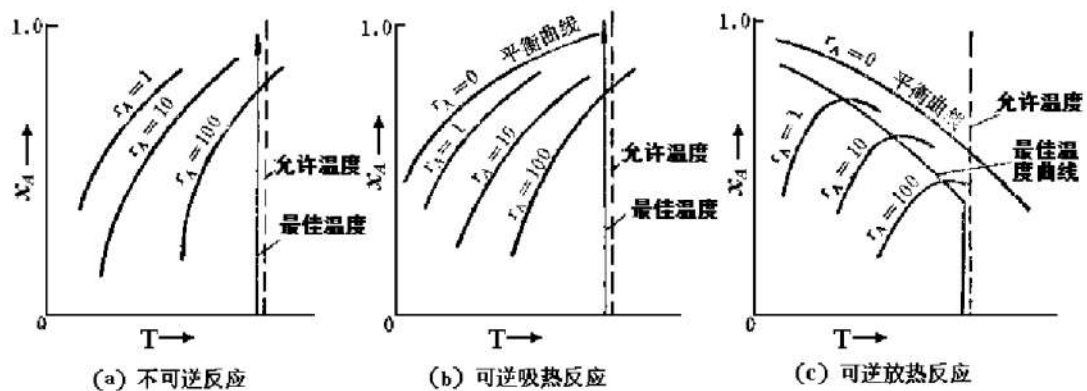
### 7.10.4 教学过程

- (1) 复习上节课知识点

对于自催化反应，若选用平推流反应器且进料中只有反应物 A，反应器出口 A 的转化率为？为什么？

归纳不可逆反应、可逆吸热反应和可逆放热反应的  $x-T$  图。

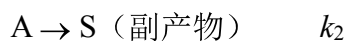
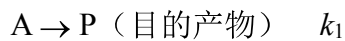




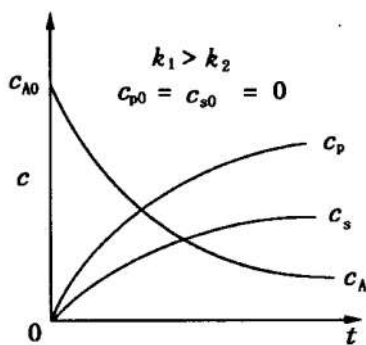
## (2) 平行反应特性与反应器选型

平行反应：反应物同时进行两个或两个以上的反应。

对于等温、恒容基元反应：



各组分的浓度随时间变化关系：



引出选择性和收率的定义：

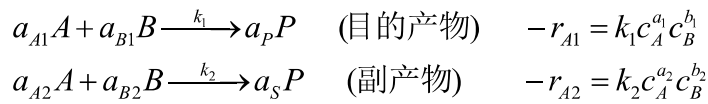
$$\text{平均选择性: } \bar{S}_p = \frac{-(\Delta n_A)_P}{n_{A0} - n_A} = \frac{-\alpha_{A1}(\Delta n)_P}{\alpha_P(n_{A0} - n_A)}$$

$$\text{瞬时选择性: } S_p = \frac{(-r_{A1})}{(-r_{A1}) + (-r_{A2})} = \frac{a_{A1}r_1}{a_{A1}r_1 + a_{A2}r_2}$$

$$\text{收率: } y = \frac{-\alpha_{A1}(\Delta n)_P}{n_{A0}}$$

$$\text{收率与平均选择性的关系: } y = x_A \times \bar{S}_p$$

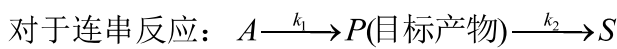
对于平行反应：



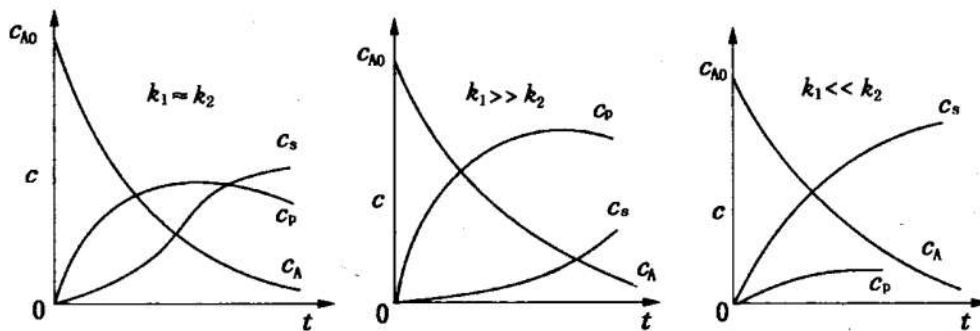
$$\text{瞬时选择性 } S_p = \frac{1}{1 + \frac{k_{20}}{k_{10}} e^{\frac{E_1 - E_2}{RT}} c_A^{a_2 - a_1} c_B^{b_2 - b_1}}$$

从平行反应瞬时选择性公式，引导学生讨论浓度、温度对瞬时选择性的影响以及反应器的选型。

### (3) 连串反应特性与反应器选型



各组分的浓度随时间变化关系：



引导学生思考不同条件下目标产物浓度随时间的变化关系。

$$\text{瞬时选择性： } S_p = 1 - \frac{k_{20}}{k_{10}} \cdot \exp\left(\frac{E_1 - E_2}{RT}\right) \cdot \frac{c_P}{c_A}$$

从一级连串反应瞬时选择性公式，引导学生讨论浓度、温度对瞬时选择性的影响以及反应器的选型。

### (4) 本章小结

#### 7.10.5 教学方法

本节主要采用讲授法、图例讲授法、提问法、归纳法。

#### 7.10.6 作业安排及课后反思

课后作业：教材 P68，6。

### 7.10.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

课前准备:

- (1) 对于自催化反应, 若选用平推流反应器且进料中只有反应物 A, 反应器出口 A 的转化率为? 为什么?
- (2) 对于平行反应, 浓度、温度对瞬时选择性的影响以及反应器的选型;
- (3) 对于连串反应, 浓度、温度对瞬时选择性的影响以及反应器的选型。

### 7.10.8 参考资料

本课程使用教材: “第二章 复合反应与反应器选型” 部分; P 56-66。

## 7.11 教学单元十一

### 7.11.1 教学日期

课次/学时: 11/2

### 7.11.2 教学目标

- (1) 了解返混对反应过程的影响;
- (2) 理解停留时间分布的概率函数及特征值, 以对比时间为变量的停留时间分布。

### 7.11.3 教学内容 (含重点、难点)

知识点:

- (1) 理想反应器与实际反应器;
- (2) 返混对反应过程的影响以及理想反应器的返混程度;
- (3) 流体停留时间分布的定量描述。

重点:

- (1) 返混对反应过程的影响以及理想反应器的返混程度;
- (2) 流体停留时间分布的定量描述。

难点:

- (1) 流体停留时间分布的定量描述。

#### 7.11.4 教学过程

(1) 引导学生思考理想反应器与实际反应器的区别与联系

(2) 非理想流动反应器中涉及到的基本概念

**年龄：**物料（质点）从进入反应器开始，目前已经在反应器内逗留的时间。

**停留时间：**物料(质点)从进入反应器开始，到离开反应器为止，在反应器中总共逗留的时间。

(3) 返混对反应过程的影响以及理想反应器的返混程度

引导学生回忆混合、返混及其区别，返混对反应过程的影响。

引导学生回忆理想反应器的返混情况

① BR：完全不返混；

② PFR：完全不返混；

③ CSTR：完全返混。

(4) 流体停留时间分布的定量描述

① 停留时间分布函数

物理意义：在定态和不发生化学反应时，流过反应器的物料中，停留时间小于  $t$  的物料占总流出物的分率。

$$F(t) = \frac{N_t}{N_\infty} \quad F(t) \propto [0,1]$$

② 停留时间分布密度函数

物理意义：在定态和不发生化学反应时，流过反应器的物料中，停留时间介于  $t$  和  $t+dt$  之间的物料占总流出物的分率

$$E(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad E(t) \propto [0,\infty]$$

停留时间分布与停留时间分布密度函数的关系： $F(t) = \int_0^t E(t)dt$

③ 平均停留时间

$$\bar{t} = \frac{\int_0^\infty tE(t)dt}{\int_0^\infty E(t)dt} = \int_0^\infty tE(t)dt = \int_0^\infty t dF(t) = \int_0^{V_R} \frac{dV_R}{V}$$

④ 离散度

物理意义：表示随机变量与平均值之间的偏离程度。

$$\sigma_t^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t-\bar{t})^2 E(t) dt}{\int_0^{\infty} E(t) dt} = \int_0^{\infty} (t-\bar{t})^2 E(t) dt = \int_0^{\infty} t^2 E(t) dt - \bar{t}^2$$

(5) 以对比时间作自变量的停留时间分布的定量描述

定义对比时间： $\theta = \frac{t}{\tau}$

以对比时间为自变量表示的停留时间分布规律：

① 停留时间分布函数： $F(\theta) = \frac{N_\theta}{N_\infty}$

② 停留时间分布密度函数： $E(\theta) = \frac{dF(\theta)}{d\theta}$

③ 平均停留时间： $\bar{\theta} = \int_0^{\infty} \theta E(\theta) d\theta = \int_0^1 \theta dF(\theta)$

④ 散度： $\sigma_\theta^2 = \int_0^{\infty} (\theta - \bar{\theta})^2 E(\theta) d\theta = \int_0^1 (\theta - \bar{\theta})^2 dF(\theta)$

(6) 两种停留时间分布规律之间的相互关系

$$F(t) = F(\theta)$$

$$E(t) = \frac{1}{\tau} E(\theta)$$

$$\bar{t} = \tau \bar{\theta}$$

$$\sigma_t^2 = \tau^2 \sigma_\theta^2$$

### 7.11.5 教学方法

本节主要采用讲授法、引导法、对比讲授法。

### 7.11.6 作业安排及课后反思

课后思考：混合、返混及其区别，返混对反应过程的影响。

### 7.11.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

课前准备：

- (1) 理想反应器与实际反应器的区别与联系；
- (2) 回忆混合、返混及其区别，返混对反应过程的影响；

(3) 回忆理想反应器的返混情况。

### 7.11.8 参考资料

本课程使用教材：“第三章 非理想流动反应器”部分；P70-72；P77-78。

## 7.12 教学单元十二

### 7.12.1 教学日期

课次/学时：12/2

### 7.12.2 教学目标

- (1) 掌握阶跃法实验测定停留时间分布；
- (2) 掌握脉冲法实验测定停留时间分布。

### 7.12.3 教学内容（含重点、难点）

知识点：

- (1) 阶跃法实验测定停留时间分布规律；
- (2) 脉冲法实验测定停留时间分布规律。

重点：

- (1) 阶跃法实验测定停留时间分布规律；
- (2) 脉冲法实验测定停留时间分布规律。

难点：

- (1) 阶跃法实验测定停留时间分布规律；
- (2) 脉冲法实验测定停留时间分布规律。

### 7.12.4 教学过程

(1) 复习上节课知识点

① 停留时间分布函数  $F(t)$  与停留时间密度函数  $E(t)$ ？

② 平均停留时间与散度？

③ 对比时间为自变量表示的停留时间分布规律及两种停留时间分布规律之间的相互关系？

## (2) 停留时间的实验测定

停留时间实验测定目的：判定反应器内流体的流动状态。

方法：示踪应答技术（激励—响应）即：输入示踪物为激励；输出示踪物为响应

## (3) 阶跃法

在  $t=0$  时刻加入一定浓度的示踪剂并保持下去。

激励：阶跃函数  $C = \begin{cases} 0 & (\text{or } C_0^-); \text{ at } t < 0 \\ C_0 & (\text{or } C_0^+); \text{ at } t > 0 \end{cases}$

响应：  $F(t) = \frac{C - C_0^-}{C_0^+ - C_0^-}$

如果阶跃输入前物料中不含示踪物时，则：

概率密度函数：  $E(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{\Delta F(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta(C/C_0)}{\Delta t} = \frac{\Delta C}{C_0 \Delta t}$

平均停留时间：  $\bar{t} = \int_0^\infty tE(t)dt = \sum tE(t)\Delta t = \sum t\Delta F(t) = \sum \frac{t\Delta C}{C_0}$

方差：  $\sigma_t^2 = \int_0^\infty (t - \bar{t})^2 E(t)dt = \int_0^\infty t^2 E(t)dt - \bar{t}^2 = \sum \frac{t^2 \Delta C}{C_0} - \bar{t}^2$

使用教材 P73，例 3-1 讲授阶跃法的应用。

## (4) 脉冲法

激励：脉冲函数  $C = \begin{cases} 0; & \text{at } t < 0 \\ C_0; & \text{at } 0 < t < \Delta t_0 \\ 0; & \text{at } t > \Delta t_0 \end{cases}$

示踪物衡算：在  $\Delta t_0$  时间间隔内向流量为  $V$  的流体中加入总量为  $m_\infty$  ( $m_\infty = \int_0^\infty VCdt$ )

的示踪物，则：  $m_t = \int_0^t VCdt$

停留时间分布函数：  $F(t) = \frac{m_t}{m_\infty} = \frac{\int_0^t VCdt}{\int_0^\infty VCdt} = \frac{\int_0^t Cdt}{\int_0^\infty Cdt} = \frac{\sum_0^t C}{\sum_0^\infty C}$

停留时间分布密度函数：

$$E(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \left( \frac{V}{m_\infty} \right) \cdot C = \frac{V}{\int_0^\infty VC dt} \cdot C = \frac{C}{\int_0^\infty C dt} = \frac{C}{\sum_0^\infty C \Delta t}$$

$$\text{平均停留时间: } \bar{t} = \frac{\sum_0^\infty tC}{\sum_0^\infty C}$$

$$\text{方差: } \sigma_t^2 = \frac{\sum_0^\infty t^2 C}{\sum_0^\infty C} - (\bar{t})^2$$

使用教材 P75, 例 3-2 讲授脉冲法的应用。

### 7.12.5 教学方法

本节主要采用提问法、讲授法。

### 7.12.6 作业安排及课后反思

课后作业：教材 P95, 1、2。

### 7.12.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

课前准备：

- (1) 停留时间分布函数  $F(t)$  与停留时间密度函数  $E(t)$ ?
- (2) 平均停留时间与散度?
- (3) 对比时间为自变量表示的停留时间分布规律及两种停留时间分布规律之间的相互关系?

### 7.12.8 参考资料

本课程使用教材：“第三章 非理想流动反应器”部分；P72-77。

## 7.13 教学单元十三

### 7.13.1 教学日期

课次/学时：13/2



### 7.13.2 教学目标

- (1) 理解凝集流模型的假设及建模思想;
- (2) 掌握两种理想反应器的停留时间分布规律;
- (3) 掌握凝集流模型的应用。

### 7.13.3 教学内容 (含重点、难点)

知识点:

- (1) 两种理想反应器的停留时间分布规律;
- (2) 非理想流动模型 (凝集流模型)。

重点:

- (1) 两种理想反应器的停留时间分布规律;
- (2) 非理想流动模型 (凝集流模型)。

难点:

- (1) 非理想流动模型 (凝集流模型)。

### 7.13.4 教学过程

- (1) 复习上节课知识点
  - ① 阶跃法直接测到的是什么函数?
  - ② 脉冲法直接测到的是什么函数?
- (2) 理想反应器的停留时间分布规律

引导学生思考 PFR 和 CSTR 的特点, 引出 PFR 和 CSTR 的停留时间分布规律。

$$\textcircled{1} \text{ PFR: } F(\theta) = \begin{cases} 0 & \theta < 1 \\ 1 & \theta \geq 1 \end{cases} \quad E(\theta) = \begin{cases} 0 & \theta \neq 1 \\ \infty & \theta = 1 \end{cases}$$

$$\text{PFR 的特征值: } \begin{cases} \bar{\theta} = 1 & \bar{t} = \tau \\ \sigma_{\theta}^2 = 0 \end{cases}$$

$$\textcircled{2} \text{ CSTR: } F(\theta) = \frac{c}{c_0} = 1 - e^{-\theta} \quad E(\theta) = e^{-\theta}$$

$$\text{CSTR 的特征值: } \begin{cases} \bar{\theta} = 1 & \bar{t} = \tau \\ \sigma_{\theta}^2 = 1 \end{cases}$$

对比 *PFR* 和 *CSTR* 停留时间分布规律

PFR  $\sigma_{\theta}^2 = 0$     CSTR  $\sigma_{\theta}^2 = 1$     其它反应器  $0 < \sigma_{\theta}^2 < 1$

### (3) 非理想流动模型（讲授法）

非理想流动模型是用来描述介于两种理想状况之间的流型，并通过对流型的描述，预计在非理想流动状态下的反应结果；

目的：将流型与化学反应联系起来，预计反应体积、处理量、转化率等之间的关系。

### (4) 凝集流模型（讲授法）

基础物理模型：BR

基本假定：

- ① 流体以流体团的方式流过反应器，且彼此之间不发生混合；
- ② 每个流体团相当于一个小间歇反应器；
- ③ 由于返混的作用，每个流体团在反应器内的停留时间不同，达到的转化率因而不同，在反应器出口处的宏观转化率，就是各不同停留时间的流体团达到的转化率的平均值。

以使用教材 P81，例 3-3 讲授凝集流模型及其应用。

## 7.13.5 教学方法

本节主要采用提问法、讲授法、引导法。

## 7.13.6 作业安排及课后反思

课后作业：教材 P96，7。

## 7.13.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

课前准备：

- (1) 阶跃法直接测到的是什么函数？
- (2) 脉冲法直接测到的是什么函数？
- (3) PFR 和 CSTR 的特点。

## 7.13.8 参考资料

本课程使用教材：“第三章 非理想流动反应器”部分；P77-82。

## 7.14 教学单元十四

### 7.14.1 教学日期

课次/学时：14/2

### 7.14.2 教学目标

- (1) 理解多级混合槽模型、轴向扩散模型的假设及建模思想；
- (2) 掌握多级混合槽模型的应用。

### 7.14.3 教学内容（含重点、难点）

知识点：

- (1) 非理想流动模型（多级混合槽模型）；
- (2) 非理想流动模型（轴向扩散模型）；
- (3) 本章小结。

重点：

- (1) 多级混合槽模型。

难点：

- (1) 轴向扩散模型。

### 7.14.4 教学过程

(1) 复习上节课知识点

①  $PFR$  和  $CSTR$  停留时间分布规律？

② 凝集流模型的模型参数是什么？

(2) 多级混合槽模型

基础物理模型： $CSTR$

基本假定：

① 反应器是由若干大小相等的全混流反应器串联而成；

② 各全混流反应器之间不存在返混，输送管道内不发生化学反应；

③ 定常态操作。

通过物料衡算得多釜串联停留时间分布函数和停留时间分布密度函数：

$$F(\theta) = 1 - \exp(-N\theta)$$

$$E(\theta) = \frac{N^N}{(N-1)!} \theta^{(N-1)} \exp(-N\theta)$$

引导学生获得对比停留时间的方差，并引出多级混合槽流模型参数。

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{1}{N}$$

引导学生思考当  $N=1$  时，是什么反应器？ $N=\infty$  时，是什么反应器？

以使用教材 P85，例 3-4 讲授多级混合槽流模型及其应用。

对于一级不可逆反应，利用多级混合槽模型估算出口转化率：

$$x_{AN} = 1 - \frac{1}{(1 + k\tau_i)^N}$$

### (3) 轴向扩散模型

基础物理模型：PFR

基本假定：

- ① 主体流动为平推流，但叠加一涡流扩散；
- ② 涡流扩散遵循费克扩散定律且在整个反应器内扩散系数为常数；
- ③ 定常态操作。

讲授物料衡算思路，并引出模型参数  $Pe$ 。

$$Pe = \frac{uL}{E}$$

$Pe$  物理意义：流动量与扩散量的比值， $Pe$  数值越大，表明返混程度越小。

引导学生思考：

当  $E \rightarrow \infty \Rightarrow Pe \rightarrow 0$  CSTR ; 当  $E \rightarrow 0 \Rightarrow Pe \rightarrow \infty$  PFR

### (4) 总结非理想流动模型

模型	基础模型	模型参数	参数求解	出口转化率
凝集流	BR	停留时间分布	$E(t)$	$x_{Af} = \int_0^{\infty} x_A(t)E(t)dt$
多级混合槽	CSTR	$N$	$\sigma_{\theta}^2 = \frac{1}{N}$	$x_{AN} = 1 - \frac{1}{\left(1 + k \frac{\tau}{N}\right)^N}$

轴向扩散	PFR	$Pe$	$\sigma_{\theta}^2 = \frac{2}{Pe} + 8\left(\frac{1}{Pe}\right)^2$	教材 P95
------	-----	------	---	--------

(5) 本章小结

### 7.14.5 教学方法

本节主要采用提问法、讲授法、引导法、归纳法、对比法。

### 7.14.6 作业安排及课后反思

课后作业：教材 P96，5。

### 7.14.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

课前准备：

- (1)  $PFR$  和  $CSTR$  停留时间分布规律？
- (2) 凝集流模型的模型参数是什么？
- (3) 多级混合槽模型中，当  $N=1$  时，是什么反应器？ $N=\infty$  时，是什么反应器？
- (4) 轴向扩散模型中，当  $Pe=0$  时，是什么反应器？ $Pe=\infty$  时，是什么反应器？

### 7.14.8 参考资料

本课程使用教材：“第三章 非理想流动反应器”部分；P82-95。

## 7.15 教学单元十五

### 7.15.1 教学日期

课次/学时：15/2

### 7.15.2 教学目标

- (1) 了解非均相催化反应；
- (2) 了解固体催化剂组成；
- (3) 掌握非均相催化反应的七大步骤。

### 7.15.3 教学内容（含重点、难点）

知识点：

- (1) 非均相催化反应过程；
- (2) 非均相催化反应速率表达；
- (3) 固体催化剂。

重点：

- (1) 非均相催化反应过程；
- (2) 非均相催化反应速率表达。

难点：

- (1) 非均相催化反应过程。

#### 7.15.4 教学过程

- (1) 非均相催化反应过程

动画演示并讲授非均相催化反应过程的七个步骤：

- ① 外扩散：反应组分由物流主体→催化剂外表面；
- ② 内扩散：反应组分由催化剂外表面→催化剂内表面；
- ③ 吸附：反应组分在催化剂活性中心上吸附；
- ④ 表面化学反应：在催化剂表面进行化学反应；
- ⑤ 脱附：反应产物在催化剂表面解吸；
- ⑥ 内扩散：反应产物由催化剂内表面→催化剂外表面；
- ⑦ 外扩散：反应产物由催化剂外表面→物流主体。

①和⑦为外扩散过程；

②和⑥为内扩散过程；

③、④和⑤为化学动力学过程。

引出本章主要讨论③、④和⑤，即化学动力学过程。

- (2) 催化反应过程的特征

引导学生回忆均相单一反应速率表达，引出非均相催化反应速率表达。

$$\text{以催化剂体积为基准： } r = \frac{1}{V_s} \frac{d\xi}{dt} \text{ 或 } -r_A = -\frac{1}{V_s} \frac{dn_A}{dt}$$

$$\text{以催化剂质量为基准： } r = \frac{1}{m_s} \frac{d\xi}{dt} \text{ 或 } -r_A = -\frac{1}{m_s} \frac{dn_A}{dt}$$

以催化剂内表面积为基准： $r = \frac{1}{S_v} \frac{d\xi}{dt}$  或  $-r_A = -\frac{1}{S_v} \frac{dn_A}{dt}$

### (3) 固体催化剂

演示实际催化剂的图片。



固体催化剂由**活性组分**、**助剂**和**载体**三部分组成。

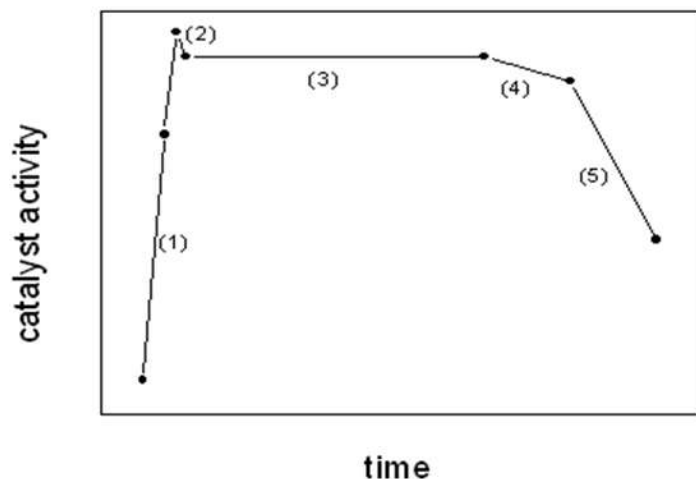
**催化剂制备流程及方法：**

**催化剂制备流程：**原料预处理→原粉制备→煅烧→成型→预活化→销售；

**制备方法：**浸渍法、共沉淀法、熔融法、机械混合法。

图例讲授催化剂使用（包括五个阶段）

- ① 起活期；
- ② 第一活性过渡期；
- ③ 相对活性稳定期；
- ④ 第二活性过渡期；
- ⑤ 活性衰减或失活期。



### 7.15.5 教学方法

本节主要采用讲授法、演绎法、引导法。

### 7.15.6 作业安排及课后反思

课后思考：非均相催化反应过程。

### 7.15.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

课前准备：回忆均相单一反应速率表达。

### 7.15.8 参考资料

本课程使用教材：“第四章 气固催化反应本征动力学”部分；P 97-104。

## 7.16 教学单元十六

### 7.16.1 教学日期

课次/学时：16/2

### 7.16.2 教学目标

- (1) 了解固体催化剂结构；
- (2) 了解物理吸附与化学吸附；
- (3) 理解化学吸附的一般表达式。



### 7.16.3 教学内容（含重点、难点）

知识点：

- (1) 固体催化剂的主要结构特征参数；
- (2) 物理吸附与化学吸附；
- (3) 化学吸附的一般表达式。

重点：

- (1) 固体催化剂的主要结构特征参数；
- (2) 化学吸附的一般表达式。

难点：

- (1) 化学吸附的一般表达式。

### 7.16.4 教学过程

- (1) 复习上节课知识点
  - ① 非均相催化反应过程的七个步骤？
  - ② 固体催化剂的组成？
- (2) 固体催化剂的主要结构特征参数

① 比表面积：
$$S_g = \frac{S}{m_s} \quad \text{m}^2/\text{g}$$

② 孔体积（孔容）：
$$V_g = \frac{V_{\text{孔}}}{m_s} \quad \text{cm}^3/\text{g}$$

③ 固体密度：
$$\rho_s = \frac{m_p}{V_t} \quad \text{g/cm}^3$$

④ 颗粒孔隙率：
$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad \text{g/cm}^3$$

⑤ 颗粒孔隙率：
$$\varepsilon_p = \frac{V_g \rho_s}{1 + V_g \rho_s} = V_g \rho_p$$

以使用教材 P106，例 4-1 为例，讲授孔容及空隙率的测量方法。

- (3) 物理吸附与化学吸附

	物理吸附	化学吸附
--	------	------

选择性	弱	强
吸附温度	通常低于沸点温度	可高于沸点温度
吸附热	接近被吸附物的冷凝热 2~20 kJ/mol	接近化学反应热 21~418 kJ/mol

(4) 化学吸附的一般表达式

引导学生思考影响吸附速率的因素，并引出对于  $A + \sigma \rightarrow A\sigma$  吸附过程，吸附速率表达式为：

$$r_a = k_{a0} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) p_A \theta_V$$

引导学生思考影响脱附速率的因素，并引出对于  $A\sigma \rightarrow A + \sigma$  脱附过程，吸附速率表达式为：

$$r_d = k_{d0} \exp\left(-\frac{E_d}{RT}\right) \theta_A$$

引导学生思考当吸附与脱附动态平衡时，应满足？（净吸附速率等于 0）引出吸附平衡常数：

$$K_A = \frac{k_{a0}}{k_{d0}} \exp\left(\frac{E_d - E_a}{RT}\right) = \frac{\theta_A}{p_A \theta_V}$$

### 7.16.5 教学方法

本节主要采用讲授法、提问法、对比法。

### 7.16.6 作业安排及课后反思

课后思考：催化剂孔容及空隙率的测量方法以及化学吸附的一般表达式。

### 7.16.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

课前准备：

- (1) 非均相催化反应过程的七个步骤？
- (2) 固体催化剂的组成？
- (3) 影响吸附速率的因素。
- (4) 影响脱附速率的因素。

(5) 当吸附与脱附动态平衡时，净吸附速率值。

### 7.16.8 参考资料

本课程使用教材：“第四章 气固催化反应本征动力学”部分；P 104-109。

## 7.17 教学单元十七

### 7.17.1 教学日期

课次/学时：17/2

### 7.17.2 教学目标

- (1) 理解焦姆金吸附模型、弗鲁德里希吸附模型；
- (2) 掌握兰格缪尔模型。

### 7.17.3 教学内容（含重点、难点）

知识点：

- (1) 理想吸附模型（兰格缪尔模型）；
- (2) 真实吸附模型（焦姆金模型、弗鲁德里希模型）；

重点：

- (1) 兰格缪尔吸附等温模型。

难点：

- (1) 理想吸附模型与真实吸附模型的区别。

### 7.17.4 教学过程

(1) 复习上节课知识点

- ① 孔容及空隙率的测量方法？
- ② 吸附速率表达式和脱附速率表达式？

(2) 吸附模型

- ① 理想吸附模型（均匀表面吸附模型）主要有：兰格缪尔模型；
- ② 真实吸附模型（非均匀表面吸附模型）主要有：焦姆金模型、弗鲁德里希模型。

两类模型区别：吸附热  $q$  的不同表达。

### (3) 兰格缪尔吸附等温模型理想吸附模型

模型假设

- ① 吸附剂表面均一。即整个催化剂表面具有均匀的吸附能力；
- ② 吸附和脱附活化能与表面吸附的程度无关 ( $E_a$  和  $E_d$  恒定)；
- ③ 单分子层吸附 (每个活性中心仅能吸附一个气体分子)；
- ④ 被吸附分子间没有相互作用。

推导不同条件下，组分吸附率的关系式，并引出吸附等温式：

$$\theta_i = \frac{K_i p_i^*}{1 + \sum K_i p_i^*}$$

### (4) 真实吸附模型

引导学生思考理想吸附模型假设与实际的偏离，引出真实吸附模型。

理想吸附模型与真实吸附模型的最主要区别在于  $E_a$  和  $E_d$  与表面覆盖度间相互关系处理上。

理想吸附模型： $E_a$  和  $E_d$  与表面覆盖度无关；

真实吸附模型： $E_a$  和  $E_d$  与表面覆盖度有关。

**焦姆金吸附模型：**认为  $E_a$  和  $E_d$  与表面覆盖度成线性关系；

$$E_a = E_{a0} + \alpha\theta_A, \quad E_d = E_{d0} - \beta\theta_A$$

**弗朗得里希吸附模型：**认为  $E_a$  和  $E_d$  与表面覆盖度成对数关系。

$$E_a = E_{a0} + \mu \ln \theta_A, \quad E_d = E_{d0} - \gamma \ln \theta_A。$$

## 7.17.5 教学方法

本节主要采用提问法、讲授法、引导法。

## 7.17.6 作业安排及课后反思

课后思考：理想吸附模型与真实吸附模型的区别和兰格缪尔吸附等温式。

## 7.17.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

课前准备：

- (1) 孔容及空隙率的测量方法？
- (2) 吸附速率表达式和脱附速率表达式？

(3) 理想吸附模型假设与实际的偏离的实质。

### 7.17.8 参考资料

本课程使用教材：“第四章 气固催化反应本征动力学”部分；P 109-113。

## 7.18 教学单元十八

### 7.18.1 教学日期

课次/学时：18/2

### 7.18.2 教学目标

- (1) 了解本征动力学方程的实验测定；
- (2) 掌握双曲本征动力学方程。

### 7.18.3 教学内容（含重点、难点）

知识点：

- (1) 表面化学反应；
- (2) 反应本征动力学；
- (3) 本征动力学实验的测定；
- (4) 本章小结。

重点：

- (1) 双曲线本征动力学方程。

难点：

- (1) 本征动力学实验的测定。

### 7.18.4 教学过程

(1) 复习上节课知识点

① 理想吸附模型主要有？真实吸附模型主要有？两者区别？

(2) 表面化学反应

目的：研究催化剂活性中心上化学反应速率问题。

对于基元表面化学反应： $A\sigma + B\sigma + \cdots \xrightleftharpoons[k_s]{k_s} R\sigma + S\sigma + \cdots$

$$\text{正向速率: } r_s = k_{s0} \exp\left(-\frac{E_s}{RT}\right) \theta_A \theta_B \cdots$$

$$\text{逆向速率: } r'_s = k'_{s0} \exp\left(-\frac{E'_s}{RT}\right) \theta_R \theta_S \cdots$$

$$\text{表面速率: } r = r_s - r'_s = k_s \theta_A \theta_B \cdots - k'_s \theta_R \theta_S$$

$$\text{平衡时: } K_s = \frac{k_s}{k'_s} = \frac{\theta_R \theta_S \cdots}{\theta_A \theta_B \cdots}$$

### (3) 反应本征动力学

化学动力学过程包括：吸附、脱附和表面化学反应，三者串联进行。

本征动力学方程确立原则：在三个化学动力学步骤中，**速度最慢的为过程控制步骤**，其进行速率即为整个化学动力学过程的速率。

引导学生思考对吸附和脱附过程认识和假定上的不同，得到的速率方程不同；对表面化学反应基元步骤及其控制步骤处理上的不同，得到的化学反应速率表达式不同；因此得到的本征动力学方程在表达形式上存在较大的差异。

讲授双曲型本征动力学方程

Hougen-Watson 模型的基本假定：

① 在吸附、表面化学反应和脱附三个过程中必有一个速率最慢的控制步骤，它代表了整个过程的本征反应速率；

② 除控制步骤外的其它步骤均处于平衡状态；

③ 吸附和脱附都可以用 Langmuir 吸附模型描述。

推导不同控制步骤下（吸附控制、表面化学反应控制、脱附控制），反应本征动力学方程。

### (4) 本征动力学实验的测定

引导学生思考本征动力学实验的测定如何消除内外扩散的影响，并引出等温积分反应器、等温微分反应器以及循环式无梯度反应器。

### (5) 本章小结

## 7.18.5 教学方法

本节主要采用提问法、讲授法、引导法、归纳法。

### 7.18.6 作业安排及课后反思

课后作业：教材 P128, 3; P129, 7。

### 7.18.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

课前准备：

- (1) 理想吸附模型主要有？真实吸附模型主要有？两者区别？
- (2) 本征动力学实验的测定如何消除内外扩散的影响？

### 7.18.8 参考资料

本课程使用教材：“第四章 气固催化反应本征动力学”部分；P 113-127。

## 7.19 教学单元十九

### 7.19.1 教学日期

课次/学时：19/2

### 7.19.2 教学目标

- (1) 了解催化剂内气体各种扩散；
- (2) 理解扩散判断准则；
- (3) 掌握宏观反应速率及有效扩散。

### 7.19.3 教学内容（含重点、难点）

知识点：

- (1) 宏观反应速率与效率因子的概念；
- (2) 催化剂颗粒内气体扩散（分子扩散、努森扩散、综合扩散、以颗粒为基准的有效扩散）。

重点：

- (1) 宏观反应速率与效率因子，有效扩散；
- (2) 分子扩散、努森扩散。

难点：

- (1) 以颗粒为基准的有效扩散。

#### 7.19.4 教学过程

##### (1) 宏观反应速率与效率因子的概念

引导学生回忆气固相催化反应的七大步骤。

催化剂颗粒内的浓度分布一般是颗粒外表面处的反应物浓度高于颗粒中心处，因而，对于等温反应，外表面处的反应速率要高于中心处的值。

$$\text{定义宏观反应速率: } -R_A = \frac{\int_0^{V_s} (-r_A) dV_s}{\int_0^{V_s} dV_s};$$

$$\text{定义效率因子: } \eta = \frac{\text{宏观速率}}{\text{外表面本征速率}} = \frac{-R_A}{-r_{As}} = \frac{\int_0^{V_s} (-r_A) dV_s}{(-r_{As})V_s} = \frac{\int_0^{S_i} k_s f(c_A) dS}{k_s f(c_{As}) S_i}$$

$$\text{A 物质的反应速率: } (r_A)_g = k_g \cdot S_e (c_{Ag} - c_{As}) = k_s \cdot S_i f(c_{As}) \cdot \eta$$

##### (2) 催化剂颗粒内气体扩散

当孔径 $\gg$ 分子平均自由行程时为：**分子扩散**

当孔径 $<$ 分子平均自由行程时为：**努森扩散**

当孔径与分子直径相当时为：**综合扩散**

**有效扩散**：在前面孔扩散的基础上进行两点修正，即：

- ① 以孔的真实长度代替直孔长度；
- ② 计算基准变成催化剂外表面积。

#### 7.19.5 教学方法

本节主要采用讲授法、引导法、对比法。

#### 7.19.6 作业安排及课后反思

课后作业：教材 P157，2

课后思考：分子扩散和努森扩散的适用条件。

#### 7.19.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

课前准备：

回忆气固相催化反应的七大步骤。



### 7.19.8 参考资料

本课程使用教材：“第五章 气固相催化反应宏观动力学”部分；P130-134。

## 7.20 教学单元二十

### 7.20.1 教学日期

课次/学时：20/2

### 7.20.2 教学目标

(1) 理解宏观反应动力学方程的催化剂从特殊形状到任意形状、反应从一级到任意级的假设、推理和求解；

(2) 掌握等温条件下宏观反应动力学方程。

### 7.20.3 教学内容（含重点、难点）

知识点：

(1) 球形颗粒催化剂等温反应的宏观动力学方程；

(2) 其他形状催化剂等温反应的宏观动力学方程。

重点：

(1) 西勒模数及西勒模数的物理意义；

(2) 任意形状催化剂等温宏观动力学方程。

难点：

(1) 任意形状催化剂等温宏观动力学方程。

### 7.20.4 教学过程

(1) 复习上节课知识点

① 存在内扩散条件下如何研究反应速率？

② 效率因子  $\eta$  定义？

③ 分子扩散和努森扩散的适用条件？

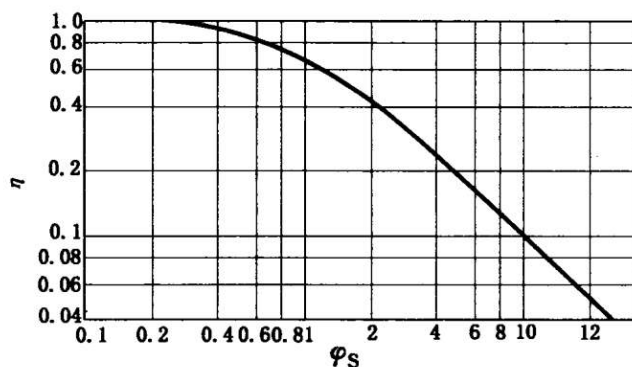
(2) 气固相球形催化等温反应的宏观动力学方程

建立球形催化剂的模型，以剥莲花白为实例，引导学生取体积微元，根据物料衡算推导球形催化剂等温反应的宏观动力学方程，求解得到西勒模数：

$$\phi_s = \frac{R}{3} \sqrt{\frac{k}{D_e} f'(c_{AS})}$$

引导学生思考西勒模数的物理意义：反应化学反应过程受内扩散影响的大小。

$$\text{效率因子与西勒西勒模数的关系：} \eta = \frac{-R_A}{-r_{AS}} = \frac{1}{\phi_s} \left( \frac{1}{\tanh(3\phi_s)} - \frac{1}{3\phi_s} \right)$$



引导学生思考：

①  $\phi_s$  越小，内扩散阻力越？说明什么过程控制？

②  $\phi_s$  越大，内扩散阻力越？说明什么过程控制？

引出等温条件下宏观反应动力学方程： $-R_A = \eta(-r_{AS})$

(3) 其他形状催化剂等温反应的宏观动力学方程

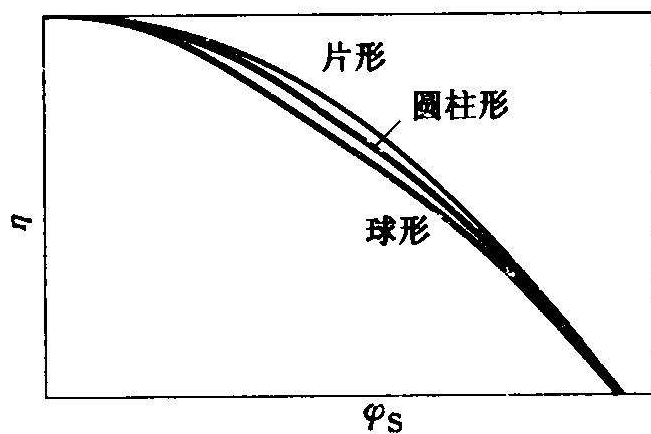
① 无限长圆柱：以卷筒卫生纸为实例，引导学生取体积微元，再由物料衡算推导无限长圆柱催化剂等温反应的宏观动力学方程；

② 圆形薄片：以抽取式餐巾纸为实例，引导学生取体积微元，再由物料衡算推导圆形薄片催化剂等温反应的宏观动力学方程。

对比三种催化剂的西勒模数，并引出任意形状催化剂西勒模数表达式。

催化剂形状	西勒模数表达式
球形	$\phi_s = \frac{R}{3} \sqrt{\frac{k}{D_e} f'(c_{AS})}$
无限长圆柱	$\phi_s = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{k}{D_e} f'(c_{AS})}$
圆形薄片	$\phi_s = \frac{L}{2} \sqrt{\frac{k}{D_e} f'(c_{AS})}$

任意形状	$\phi_s = \frac{V_s}{S_s} \sqrt{\frac{k}{D_e} f'(c_{AS})}$
------	--



$\eta$  与  $\phi_s$  关系图

引导学生思考从上图说明什么问题：

同一反应级数条件下任意形状催化剂可以用球形结果近似代替。

### 7.20.5 教学方法

本节主要采用提问法、讲授法、引导法、对比法。

### 7.20.6 作业安排及课后反思

课后思考：西勒模数的物理意义；如何引出任意形状催化剂西勒模数表达式。

### 7.20.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

课前准备：

- (1) 存在内扩散条件下如何研究反应速率？
- (2) 效率因子  $\eta$  定义？
- (3) 分子扩散和努森扩散的适用条件？
- (4) 西勒模数的物理意义？
- (5)  $\phi_s$  的大小如何反映内扩散阻力以及控制步骤？
- (6) 同一反应级数条件下任意形状催化剂  $\eta$  与  $\phi_s$  关系说明什么？

### 7.20.8 参考资料

本课程使用教材；“第五章 气固相催化反应宏观动力学”部分；P134-142。

## 7.21 教学单元二十一

### 7.21.1 教学日期

课次/学时：21/2

### 7.21.2 教学目标

- (1) 了解非等温条件下的宏观动力学；
- (2) 理解内扩散严重时表观反应级数与表观活化能。

### 7.21.3 教学内容（含重点、难点）

知识点：

- (1) 表观反应级数与表观活化能；
- (2) 非等温过程的宏观动力学。

重点：

- (1) 内扩散严重时表观反应级数与表观活化能；
- (2) 非等温过程的效率因子与西勒模数的关系。

难点：

- (1) 非等温过程的宏观动力学。

### 7.21.4 教学过程

- (1) 复习上节课知识点
  - ① 西勒模数的物理意义？
  - ② 任意形状催化剂西勒模数表达式？
- (2) 表观反应级数与表观活化能

当内扩散阻力很大时：
$$\eta = \frac{1}{\phi_S} = \frac{1}{\frac{V_S}{S_S} \sqrt{\frac{nk c_{AS}^{n-1}}{D_e}}}$$

- ① 对一级反应：反应级数不变；
- ② 对二级反应：为 1.5 级；
- ③ 对 0.5 级反应：为 0.75 级。

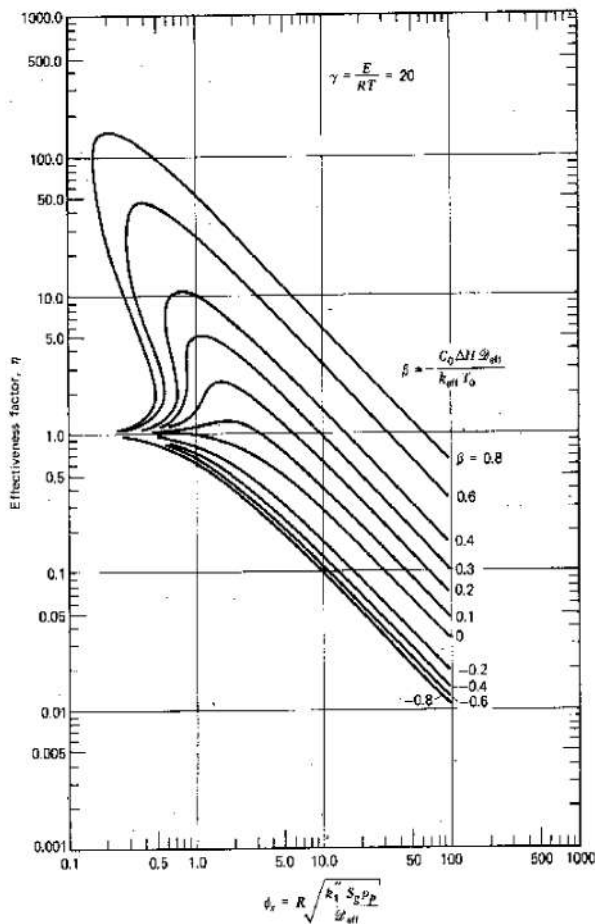
**引出结论：**在内扩散影响严重的情况下，表观反应级数都向一级靠拢。

当内扩散阻力很大时：
$$(-R_A) = \frac{S_S}{V_S \sqrt{n}} \sqrt{k_0 D_e c_{AS}^2} \exp\left(\frac{-E}{2RT}\right)$$

引导学生思考在内扩散影响严重的情况下，表观活化能与实际活化能的关系。

### (3) 非等温过程的宏观动力学

引导学生思考放热反应过程是否催化剂表面反应速率一定大于催化剂内部反应速率，并引出非等温气固催化反应过程效率因子与西勒模数的关系。



引出对于非等温气固催化反应，效率因子 $\eta$ 不再是一定小于1的数，随着西勒模数的增大，可能大于1。

### (4) 本章小结

#### 7.21.5 教学方法

本节主要采用提问法、讲授法、引导法、归纳法。

### 7.21.6 作业安排及课后反思

课后思考：放热反应过程效率因子 $\eta$ 大于1的原因？吸热反应过程效率因子 $\eta$ 的取值范围？

### 7.21.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

课前准备：

- (1) 西勒模数的物理意义？
- (2) 任意形状催化剂西勒模数表达式？
- (3) 在内扩散影响严重的情况下，表观活化能与实际活化能的关系。
- (4) 放热反应过程是否催化剂表面反应速率一定大于催化剂内部反应速率。

### 7.21.8 参考资料

本课程使用教材：“第五章 气固相催化反应宏观动力学”部分；P143-147。

## 7.22 教学单元二十二

### 7.22.1 教学日期

课次/学时：22/2

### 7.22.2 教学目标

- (1) 了解流体在固定床内的流动特性；
- (2) 了解固定床内径向传递。

### 7.22.3 教学内容（含重点、难点）

知识点：

- (1) 流体在固定床内的流动特性；
- (2) 固定床内径向传递。

重点：

- (1) 欧根方程。

难点：

- (1) 固定床内径向传递。

#### 7.22.4 教学过程

(1) 流体在固定床内的流动特性

引导学生回忆并讨论《化工原理》“过滤单元操作”中颗粒床层的性质。

**提问概念：**床层空隙率、颗粒密度、堆密度、等体积当量直径、等表面积当量直径、等比表面积当量直径。

引导学生回忆并讨论《化工原理》“过滤单元操作”中平行孔模型以及描述流体通过颗粒床层的压降公式。

低颗粒床层雷诺数条件下 ( $Re_b < 2$ ) 采用康采尼方程：
$$\frac{\Delta p_b}{L} = K \frac{a^2(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \mu u ;$$

$0.17 < Re_b < 330$  条件下采用欧根方程：
$$\frac{\Delta p_b}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 d_{ea}^2} \mu u + 1.75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 d_{ea}} \rho u^2$$

引导学生讨论低雷诺数下和高雷诺数下，如何简化欧根方程？

(2) 固定床内径向传递

① 固定床内径向传热

引导学生分析固定床径向传热过程分为两部分：**床层内传热**和**设备壁面与流体边界层之间的传热**。

② 固定床内径向传质

引导学生分析固定床径向传质的推动力：**径向上的浓度梯度**。

#### 7.22.5 教学方法

本节主要采用讲授法、引导法。

#### 7.22.6 作业安排及课后反思

课后作业：教材 P183，1。

#### 7.22.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

课前准备：

(1) 颗粒床层的床层空隙率、颗粒密度、堆密度、等体积当量直径、等表面积当量直径、等比表面积当量直径概念。

(2) 回忆并讨论《化工原理》“过滤单元操作”中颗粒床层的性质。

(3) 回忆并讨论《化工原理》“过滤单元操作”中平行孔模型以及描述流体通过颗粒床层的压降公式。

(4) 讨论低雷诺数下和高雷诺数下，如何简化欧根方程。

(5) 固定床径向传热过程。

(6) 固定床径向传质的推动力。

#### 7.22.8 参考资料

本课程使用教材：“第六章 气固相催化反应固定床反应器”部分；P 159-164。

### 7.23 教学单元二十三

#### 7.23.1 教学日期

课次/学时：23/1

#### 7.23.2 教学目标

(1) 了解固定床反应器的特点；

(2) 了解固定床反应器的各种类型。

#### 7.23.3 教学内容（含重点、难点）

知识点：

(1) 固定床反应器的特点；

(2) 固定床反应器的各种类型。

重点：

(1) 固定床反应器的特点。

难点：

(1) 固定床反应器的特点。

#### 7.23.4 教学过程

(1) 复习上节课知识点

① 低雷诺数下和高雷诺数下，如何简化欧根方程？

② 固定床径向传质的推动力是什么？



- (2) 固定床反应器的特点
- (3) 固定床内径向传递
- ① 绝热固定床反应器；
- ② 多段绝热式反应器；
- ③ 列管式反应器；
- ④ 自热式固定床反应器。

#### 7.23.5 教学方法

本节主要采用提问法、讲授法、案例分析法。

#### 7.23.6 作业安排及课后反思

课后思考：固定床反应器的特点。

#### 7.23.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

课前准备：

- (1) 低雷诺数下和高雷诺数下，如何简化欧根方程？
- (2) 固定床径向传质的推动力是什么？

#### 7.23.8 参考资料

本课程使用教材：“第六章 气固相催化反应固定床反应器”部分；P 164-166。

## 8. 学生课程学习要求

我将根据自己多年来的学习经验总结与同学们交流分享如何学好《反应工程》这门专业核心课，希望能给同学们的学习提供一些启发。

### 8.1 学生自学要求

由于课时有限，教学过程中未涉及的部分，如教材后续章节流化床反应器等需要学生自学。

### 8.2 课外阅读要求

课后根据自己的兴趣适当的阅读与本课程相关的书籍、论著以及资料等。这不仅能激发学习兴趣，还可以拓展知识面。

### 8.3 课堂讨论要求

上课时做好笔记，以备后续复习查阅们注意重点记下教科书中未出现而老师却一再强调的内容及知识点，积极参与课堂提问及课堂讨论，这是对所学知识加深理解的重要途径。

### 8.4 课程实践要求

课后及时复习是很有必要的，这不仅可以巩固所学知识，还可以加深对所学知识的理解以及很好的锻炼自己对知识的概括和总结能力。

课后复习遇到问题时，多问几个为什么，尽量依靠自己的能力解决这些问题。在解决问题的过程中会学到包括查阅文献资料、利用各种软件在内的各种知识。同时也可在保持自己意见的情况下与同学进行讨论。学会使用集体的力量解决问题，当然，也可以及时与老师讨论解决问题。

认真对待课堂及课后作业，每次作业都是对所学知识的检验，不仅检验了运用知识的能力，更在很大程度上强化记忆，让自己能对所学知识有系统的认识。

## 9. 课程考核方式及评分规程

### 9.1 出勤（迟到、早退等）、作业、报告等的要求

**出勤：**本课程的学习中，选课同学应该主动遵守四川理工学院学生管理条例中关于出勤的相关政策规定。本课程将采用倒扣分的形式，即对无故缺席的同学（包括课后补课的同学），每缺席 1 次平时成绩扣 5 分，直至扣完。此外，本课程允许每一位同学无理由请假 5 次，但需在授课前提交请假条。

**迟到与早退：**上课铃后进入教室的同学算迟到，下课铃前擅自离开教室的同学算早退。5 次无故迟到 10 分钟及 10 分钟以内的同学算缺席 1 次，1 次无故迟到 10 分钟及 10 分钟以上的同学算缺席 1 次；1 次无故早退的同学算缺席 1 次。

**作业、报告：**根据教学要求，须按时保质保量完成作业或报告。

### 9.2 成绩的构成与评分规则说明

根据化学反应工程课程教学大纲要求，总评成绩 = 30~40% 平时成绩 + 70~60% 卷面成绩。

平时成绩主要由出勤、课堂发言和课后作业组成。出勤不加分，仅扣分，具体扣分细节详见 9.1 节出勤考核方式；课堂发言主要采用随机摇号程序随机抽点同学的方式，教师根据提问题目的难易程度以及抽点同学回答情况给出等级分数，等级分数与百分制分数换算详见表 1；每一次课后作业根据同学完成情况给出等级分数，未交者该次作业按等级“E”计，补交作业按等级“D”计。等级分数与百分制分数换算亦详见表 1。

表 1 等级分数与百分制分数换算

等级分数	百分制分数
A <sup>+</sup>	98
A	95
A <sup>-</sup>	90
B <sup>+</sup>	88
B	85
B <sup>-</sup>	80

等级分数	百分制分数
C <sup>+</sup>	78
C	75
C <sup>-</sup>	70
D	60
D 以下	0

在出勤不扣分的情况下，最终平时成绩为每一次课堂发言和课后作业换算成百分制分数的算术平均分。若存在出勤扣分，平时成绩为先按出勤不扣分的情况计算的算数平均分，然后再依出勤扣分标准计算最终平时成绩。

卷面成绩为期末考试试卷百分制成绩。

### 9.3 考试形式及说明（含补考）

通常情况下，化学反应工程课程考试为闭卷考试，具体考试要求按四川理工学院教务处规定执行。如果该课程总评成绩不及格（即该课程总评成绩<60分），将有且仅有一次补考机会，如果补考仍不及格，则需要重修本课程。

## **10. 学术诚信规定**

### **10.1 考试违规与作弊处理**

考试违规、考试作弊、协助他人作弊视为违反学术诚信。考试作弊、协助他人作弊是指任何利用或企图利用不诚实、欺诈或未经认可的手段以力图获得学分或协助他人获得学分的行为。考试作弊行为一经证实，严格按四川理工学院相关规定处理。

### **10.2 杜撰数据、信息处理等**

杜撰数据、信息亦视为违反学术诚信。杜撰数据、信息是指任何利用或企图利用不诚实或未经认可的手段抄袭、伪造数据、信息以力图获利的行为。杜撰数据、信息行为一经证实，按四川理工学院相关规定处理。

### **10.3 学术剽窃处理等**

学术诚信问题零容忍。学术剽窃是指把他人的观点表达成自己的，而不注明引用来源的行为。学术剽窃一经证实，按四川理工学院相关规定处理。

## 11. 课堂规范

### 11.1 课堂纪律

- (1) 不迟到、缺席，有事、有病事先请假；
- (2) 课堂上发言应先示意；
- (3) 上课期间不得随意进出教室。

### 11.2 课堂礼仪

- (1) 师生间应相互理解相互尊重；
- (2) 进入课堂，不得穿拖鞋、背心；
- (3) 教室内不得吸烟；
- (4) 不在教室吃东西；
- (5) 爱护公物，不得随意在课桌椅、墙壁上乱写乱画；
- (6) 离开教室时随手带走自己的垃圾。

## 12. 课程资源

### 12.1 教材与参考书

#### 本课程使用教材:

郭锴等编,《化学反应工程》(第二版),化学工业出版社,北京,2012。

#### 教材特点:

郭锴等主编的《化学反应工程》(第二版)是根据面向 21 世纪化学工程与工艺专业的教学计划要求编写,其目的是为了适应教学改革中“厚基础、宽专业”以及课时数减少的需求。教材内容包括了绪论和九章,涵盖了均相单一、复合反应、气固相催化反应等化学反应本征动力学,气固相催化反应宏观动力学,理想反应器、非理想流动反应器的数学描述,反应器的设计以及反应器稳定性分析。

该书特点:(1)教材简明扼要,基本概念通俗易懂,注重基础,淡化专业,着重介绍化学反应工程领域解决问题的思路和方法;(2)突出课程的重点和难点,教材内容难度适中,例题、习题具有具有代表性,有利于对化学反应工程内容的理解和消化;(3)每章后附有本章小结,以突出各章的重点、难点,方便学生复习和自学。至 2000 年化学工业出版社出版发行以来,郭锴等主编的《化学反应工程》已印刷 7 次,印数达 27000 册。该书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,同时也获得 2010 年中国石油和化学工业优秀出版物一等奖。

#### 参考书:

- (1) 朱炳辰主编,《化学反应工程》,化学工业出版社,北京,2012;
- (2) 梁斌等编,《化学反应工程》,科学出版社,北京,2003;
- (3) 袁谓康,朱开宏,《化学反应工程分析》,华东理工大学出版社,上海,1995;
- (4) 陈甘棠,《化学反应工程》,化学工业出版社,北京,1990;
- (5) 李绍芬,《反应工程》,化学工业出版社,北京,1990;
- (6) 王建华,《化学反应工程》,成都科技大学出版社,成都,1988;
- (7) Smith, J. M., *Chemical Engineering Kinetics*, 3rd Edition, McGraw-Hill. 1981.

## 12.2 专业学术著作

- (1) 中国科学技术协会主管、中国化工学会和化学工业出版社共同主办, *化工学报*;
- (2) 中国科学院基础科学局、化学部、文献情报中心和国家自然科学基金委员会化学科学部共同主办, *化工进展*;
- (3) 浙江大学联合化学反应工程研究所和上海石油化工研究院共同主办, *化学反应工程与工艺*。

## 12.3 专业刊物

CNKI、万方各类期刊均可。

## 12.4 网络课程资源

- (1) <http://emuch.net/bbs> 小木虫论坛
- (2) <http://bbs.hcbbs.com> 海川化工论坛



## 13. 教学合约

### 13.1 教师作出师德师风承诺

我承诺不断努力完善自己，遵纪守法，履行教师应有的职责，按照本课程教学大纲的要求认真完成其教学工作。

### 13.2 阅读课程实施大纲，理解其内容

对课程实施大纲内容请认真阅读，不理解之处请与任课教师联系沟通。

### 13.3 同意遵守课程实施大纲中阐述的标准和期望

- (1) 我已经认真阅读了化学反应工程课程实施大纲，并清楚理解其中所陈述的内容；
- (2) 任课教师已预备足够的时间让我咨询课程实施大纲的相关内容；
- (3) 我认同任课教师针对课程实施所提的课程标准；
- (4) 我同意遵守本课程实施大纲中所阐述的课程考核方式、学术诚信规定、课堂规范等规定。

签名：

日期：

## 14. 其他说明

如果同学们有对本课程实施的意见和建议，欢迎大家提出，或对你自己做更多介绍，以便我对你有更多了解。