



四川理工学院课程实施大纲

课程名称：反应工程

授课班级：能源化工 2014 级 1-2 班

任课教师： 张 伟

工作部门：化学工程学院

联系方式：15983156553

四川理工学院 制

2017 年 3 月

《反应工程》课程实施大纲

基本信息

课程代码：03351002

课程名称（中文名称或英文名称）：反应工程
（Chemical Reaction Engineering）

学 分：3

总 学 时：45

学 期：2016-2017 第 2 学期

上课时间：周一 9-10 节、周四 3-4 节（1-12 周）

上课地点：N1-210、N1-604

答疑时间和方式：课间、平时，电话或网络答疑（随时）

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：能源化学工程 2014 级 1-2 班

任课教师：张伟

学 院：化学工程学院

邮 箱：77111027@qq.com

联系电话：15983156553

目 录

1 教学理念	1
2 课程介绍	5
2.1 课程性质	5
2.2 课程在学科专业结构中的地位、作用	6
2.3 课程的历史与传统文化	6
2.4 课程前沿及发展趋势	8
2.5 课程与经济社会发展的关系	10
2.6 课程内容可能涉及到的伦理和道德问题	10
2.7 学习本课程的必要性	11
3 教师简介	12
3.1 教师的职称、学历	12
3.2 教育背景	12
3.3 研究兴趣（方向）	12
4 先修课程	12
5 课程目标	12
6 课程内容	14
6.1 课程内容概要	14
6.2 课程教学重点、难点	17
6.3 学时安排	20
7 课程实施	21

7.1 教学单元一	21
7.1.1 教学日期	21
7.1.2 教学目标	21
7.1.3 教学内容（含重点、难点）	21
7.1.4 教学过程	21
7.1.5 教学方法	22
7.1.6 作业安排及课后反思	22
7.1.7 课前准备情况及其他相关特殊要求	22
7.1.8 参考资料	22
7.2 教学单元二	24
7.2.1 教学日期	24
7.2.2 教学目标	24
7.2.3 教学内容（含重点、难点）	24
7.2.4 教学过程	24
7.2.5 教学方法	26
7.2.6 作业安排及课后反思	26
7.2.7 课前准备情况及其他相关特殊要求	27
7.2.8 参考资料	27
7.3 教学单元三	28
7.3.1 教学日期	28
7.3.2 教学目标	28

7.3.3 教学内容（含重点、难点）	28
7.3.4 教学过程	28
7.3.5 教学方法	30
7.3.6 作业安排及课后反思	30
7.3.7 课前准备情况及其他相关特殊要求	30
7.3.8 参考资料	30
7.4 教学单元四	32
7.4.1 教学日期	32
7.4.2 教学目标	32
7.4.3 教学内容（含重点、难点）	32
7.4.4 教学过程	32
7.4.5 教学方法	33
7.4.6 作业安排及课后反思	33
7.4.7 课前准备情况及其他相关特殊要求	33
7.4.8 参考资料	33
7.5 教学单元五	35
7.5.1 教学日期	35
7.5.2 教学目标	35
7.5.3 教学内容（含重点、难点）	35
7.5.4 教学过程	35
7.5.5 教学方法	37

7.5.6 作业安排及课后反思	37
7.5.7 课前准备情况及其他相关特殊要求	37
7.5.8 参考资料	37
7.6 教学单元六	38
7.6.1 教学日期	38
7.6.2 教学目标	38
7.6.3 教学内容（含重点、难点）	38
7.6.4 教学过程	38
7.6.5 教学方法	39
7.6.6 作业安排及课后反思	39
7.6.7 课前准备情况及其他相关特殊要求	40
7.6.8 教材及参考资料	40
7.7 教学单元七	41
7.7.1 教学日期	41
7.7.2 教学目标	41
7.7.3 教学内容（含重点、难点）	41
7.7.4 教学过程	41
7.7.5 教学方法	42
7.7.6 作业安排及课后反思	42
7.7.7 课前准备情况及其他相关特殊要求	42
7.7.8 参考资料	42

7.8 教学单元八	44
7.8.1 教学日期	44
7.8.2 教学目标	44
7.8.3 教学内容（含重点、难点）	44
7.8.4 教学过程	44
7.8.5 教学方法	45
7.8.6 作业安排及课后反思	46
7.8.7 课前准备情况及其他相关特殊要求	46
7.8.8 参考资料	46
7.9 教学单元九	47
7.9.1 教学日期	47
7.9.2 教学目标	47
7.9.3 教学内容（含重点、难点）	47
7.9.4 教学过程	47
7.9.5 教学方法	50
7.9.6 作业安排及课后反思	50
7.9.7 课前准备情况及其他相关特殊要求	50
7.9.8 参考资料	51
7.10 教学单元十	52
7.10.1 教学日期	52
7.10.2 教学目标	52

7.10.3 教学内容（含重点、难点）	52
7.10.4 教学过程	52
7.10.5 教学方法	55
7.10.6 作业安排及课后反思	55
7.10.7 课前准备情况及其他相关特殊要求	55
7.10.8 参考资料	55
7.11 教学单元十一	56
7.11.1 教学日期	56
7.11.2 教学目标	56
7.11.3 教学内容（含重点、难点）	56
7.11.4 教学过程	56
7.11.5 教学方法	58
7.11.6 作业安排及课后反思	58
7.11.7 课前准备情况及其他相关特殊要求	58
7.11.8 教材及参考资料	58
7.12 教学单元十二	59
7.12.1 教学日期	59
7.12.2 教学目标	59
7.12.3 教学内容（含重点、难点）	59
7.12.4 教学过程	59
7.12.5 教学方法	61

7.12.6	作业安排及课后反思	61
7.12.7	课前准备情况及其他相关特殊要求	61
7.12.8	参考资料	61
7.13	教学单元十三	62
7.13.1	教学日期	62
7.13.2	教学目标	62
7.13.3	教学内容（含重点、难点）	62
7.13.4	教学过程	62
7.13.5	教学方法	63
7.13.5	作业安排及课后反思	63
7.13.6	课前准备情况及其他相关特殊要求	64
7.13.7	教材及参考资料	64
7.14	教学单元十四	65
7.14.1	教学日期	65
7.14.2	教学目标	65
7.14.3	教学内容（含重点、难点）	65
7.14.4	教学过程	65
7.14.5	教学方法	67
7.14.6	作业安排及课后反思	67
7.14.7	课前准备情况及其他相关特殊要求	67
7.14.8	参考资料	67

7.15 教学单元十五	68
7.15.1 教学日期	68
7.15.2 教学目标	68
7.15.3 教学内容（含重点、难点）	68
7.15.4 教学过程	68
7.15.5 教学方法	70
7.15.6 作业安排及课后反思	70
7.15.7 课前准备情况及其他相关特殊要求	70
7.15.8 参考资料	70
7.16 教学单元十六	71
7.16.1 教学日期	71
7.16.2 教学目标	71
7.16.3 教学内容（含重点、难点）	71
7.16.4 教学过程	71
7.16.5 教学方法	72
7.16.6 作业安排及课后反思	72
7.16.7 课前准备情况及其他相关特殊要求	73
7.16.8 参考资料	73
7.17 教学单元十七	74
7.17.1 教学日期	74
7.17.2 教学目标	74

7.17.3 教学内容（含重点、难点）	74
7.17.4 教学过程及	74
7.17.5 教学方法	75
7.17.6 作业安排及课后反思	75
7.17.7 课前准备情况及其他相关特殊要求	75
7.17.8 参考资料	75
7.18 教学单元十八	77
7.18.1 教学日期	77
7.18.2 教学目标	77
7.18.3 教学内容（含重点、难点）	77
7.18.4 教学过程	77
7.18.5 教学方法	78
7.18.6 作业安排及课后反思	78
7.18.7 课前准备情况及其他相关特殊要求	79
7.18.8 参考资料	79
7.19 教学单元十九	80
7.19.1 教学日期	80
7.19.2 教学目标	80
7.19.3 教学内容（含重点、难点）	80
7.19.4 教学过程	80
7.19.5 教学方法	81

7.19.6	作业安排及课后反思	81
7.19.7	课前准备情况及其他相关特殊要求	81
7.19.8	参考资料	81
7.20	教学单元二十	82
7.20.1	教学日期	82
7.20.2	教学目标	82
7.20.3	教学内容（含重点、难点）	82
7.20.4	教学过程	82
7.20.5	教学方法	84
7.20.6	作业安排及课后反思	84
7.20.7	课前准备情况及其他相关特殊要求	84
7.20.8	参考资料	85
7.21	教学单元二十一	86
7.21.1	教学日期	86
7.21.2	教学目标	86
7.21.3	教学内容（含重点、难点）	86
7.21.4	教学过程	86
7.21.5	教学方法	88
7.21.6	作业安排及课后反思	88
7.21.7	课前准备情况及其他相关特殊要求	88
7.21.8	参考资料	88

7.22 教学单元二十二	89
7.22.1 教学日期	89
7.22.2 教学目标	89
7.22.3 教学内容（含重点、难点）	89
7.22.4 教学过程	89
7.22.5 教学方法	90
7.22.6 作业安排及课后反思	90
7.22.7 课前准备情况及其他相关特殊要求	90
7.22.8 参考资料	90
7.23 教学单元二十三	92
7.23.1 教学日期	92
7.23.2 教学目标	92
7.23.3 教学内容（含重点、难点）	92
7.23.4 教学过程	92
7.23.5 教学方法	93
7.23.6 作业安排及课后反思	93
7.23.7 课前准备情况及其他相关特殊要求	93
7.23.8 参考资料	93
8. 课程要求	94
8.1 学生自学要求	94
8.1.1 课前预习要求	94

8.1.2 课后复习要求	94
8.1.3 课堂问题解决方法	94
8.2 课外阅读要求	95
8.3 课堂讨论要求	95
8.4 课程实践要求	96
9. 课程考核	97
9.1 出勤（迟到、早退等）、作业、报告等的要求	97
9.2 成绩的构成与评分规则说明	97
9.3 考试形式及说明	98
10. 学术诚信	99
10.1 考试违规与作弊处理	99
10.2 杜撰数据、信息处理等	99
10.3 学术剽窃处理等	100
11. 课堂规范	101
11.1 课堂纪律	101
11.2 课堂礼仪	101
12. 课程资源	102
12.1 教材与参考书	102
12.2 专业学术著作	103
12.3 专业刊物	103
12.4 网络课程资源	103

13. 教学合约	104
13.1 教师作出师德师风承诺	104
13.2 阅读课程实施大纲，理解其内容	104
13.3 同意遵守课程实施大纲中阐述的标准和期望	105
14. 其他说明	106

1 教学理念

高等院校教师必须形成以学生为本的现代教育理念，重视课程设置、教学过程、教学评价等教学环节，把现代教育理念和高校教学观真正地融为一体，在教育实践中逐渐形成系统化、可操作性强的教学观，完成由纯粹的理念体系向具体实践的转型。

《反应工程》是化工专业的一门重要专业技术课，也是“三传一反”的核心课程，该课程涉及物理化学、化工热力学、传递过程及原理等知识领域。内容涉及到生产实际较多，难点较多。该课程既包含化学过程，又包含物理过程，学生普遍有畏难情绪，认为反应工程课程是大学中最难学习的课程之一。按照四川理工学院的教学计划，课时设置为 45 学时。要让学生系统掌握该课程的内容，并运用于实践中，必须在教学手段和方法上进行改革，把反应工程的基本要点和有关基础知识与工业生产实际紧密结合起来，运用工程分析的方法来学习反应工程的重要概念，使学生形成完整的反应工程观点。教学过程中主要采用讲授法、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科研研究工作，以基于研究的学习亦作为教学方法的重要方面，使学生充分掌握反应工程分析的内容和方法手段，提升分析和解决实际工程问题的能力。

本课程教学将坚守以下原则：

(1) 坚定教改，坚持素质教育，以学生的终身发展为目标，坚持“立足过程，促进发展”的评价准则。在我国应试教育机制没有改变的国情背景下，力求找到素质教育与应试教育的切合点。事实证明推行素质教育成功的学校或教师升学率都很高。

(2) 厚爱有创见的学生，树立新型的“人才观”。培养有创造精神有实践能力的一代新人，是时代赋予我们的重任。我们应该全力引导和发展学生的求异思维，鼓励学生的独创，注重培养学生的创造力和想象力。

(3) 做课程改革的实验者，而不是旁观者。课程改革要求在教学过程中更加注重生活、过程、内涵的教学，密切注重学生的差异。改革中我们有很多困惑，很多矛盾，甚至经历多次挫折，但我们要坚定信念：失意不丧志，

得意不忘形。我们要以新的教育理念来武装自己，推动课改朝正确的方向发展。

(4) 回归文本，关注常态课堂，聚焦有效教学，反对形式化。课程改革并非全盘否定传统教学。课堂导入、多媒体使用、延伸拓展、小组讨论等等教学环节的设计都应视教学内容需要来安排，不求热闹，但求实效。

(5) 教育智慧、教学艺术是教师专业化的一种新境界。智慧的教育需要教育的智慧。要努力追求教育智慧，讲求教学艺术。当我们的教育停留在教师带着知识走向学生的时候，教师的知识是最重要的；但当今我们的教育已经发展到教师带着学生走向智慧的时候，教师的智慧无疑更加重要了。广义地说教学艺术是一种达到娴熟、精湛境界，能巧妙地获得创造性教学效果的技艺。

(6) 成功的教师，不是简单地教教材，而是要灵活地用教材教。每一个学生的情况不一样，教师用教材时一定要因人而异，结合自己教育对象的实际，运用自己的智慧，灵活地对教材进行重组、整合，设计出切合实际的教学程序与内容。

实际《反应工程》课程教学过程中，我将坚持以下教学理念和方法进行教学工作，务求学生通过《反应工程》的学习，物以致用，全面提高学生工程分析能力。

(1) 以学生为教学过程根本，加强实际教学工作。

在教学中注重“以学生为本”，重视研究性学习、探究性学习和协作性学习等现代教育理念的应用，以自己的“教”，来引导学生的“学”，对教学内容做精心取舍，以更好地培养学生的能力，努力成为学生的良师益友。在教学方法上，大力提倡“学生参与”，采取分组讨论、案例分析等多样的教学方式，努力调动学生的积极性，培养学习兴趣，激发学习热情，使学生充分地参与到整个学习活动中。本着“教学相长”的理念，对学生提出的问题与质疑，认真对待，耐心解答。

(2) 明确教学内容，加强教学效果。

在教学中，只有了解和掌握反应工程课程的知识结构特点，即课程各部分知识的层次与相互关系，才能抓住教学重点，精选教学内容，有针对性地对教学内容进行革新。在实际的教学中，本人将围绕反应工程学科的两个基

本问题，即反应动力学问题和反应器分析与设计问题，把反应工程的基本观点与基础知识紧密联系起来，从工程分析的角度讨论反应工程中的重要概念。因此，备课时认真钻研教材，了解本学科发展动态，结合教材内容精心取舍，对讲课内容合理安排，做到重点突出，内容详实。重点讲授基本原理、前后内容之间的内在联系和发展关系，突出工程意识，增强学生分析问题、解决问题的能力。同时努力拓宽教学信息，结合本学科的发展史、发展成果、发展方向，把学科研究的最新工业化成果介绍给学生，激发学生的创新意识和工程意识。

反应工程的教学中将紧紧围绕反应动力学和反应器分析与设计两方面展开，这是教学的主干内容。在教学安排上，从应用的角度和反应器设计与分析的需要出发，阐明反应动力学基本原理。在反应器分析与设计中，反应器类型众多，差异大，要从工程科学的角度抓住影响反应的本质要素，即反应时间、反应物料的混合度是决定反应进程的重要因素。物料在反应器中流动，必然存在返混，物料在反应器中停留时间分布的问题。在教学中从理想流动模型 CSTR 和 PRF 理想反应器入手，进行透彻分析，由此出发来进行实际工业反应器设计与分析，构成了整个反应工程课程教学的主线，教学上要为此安排较多的学时。结合精细化工和生物化工的发展，教学中还应对间歇和半间歇反应器的浓度一时间、浓度一轴向距离的变化图进行分析与讨论。对于多相反应系统，重点论述气-固催化反应的宏观动力学及固定床催化反应器。

(3) 多媒体、电子课件等现代化教学手段的应用。

多媒体教学设备的普及，革新了传统的教学手段和方法。本课程结合教材自制一整套电子备课讲稿，制成多媒体 CAI 教学课件，用图像、动画、声音的有效组合，取代传统的单一的黑板板书模式，提高教学效率和效果，便于扩充完善讲课内容，灵活调整讲课素材。该课程全部在多媒体教室上课，利用现代化的教学手段，强化教学素材中的直观效果，尤其是各种反应器的结构形式和操作方式，反应过程的模拟等在多媒体动画中直观地呈现在学习者面前，能促进其理解。

(4) 注重理论联系实际，提高教学质量。

基础知识的掌握对于解决实际工程问题非常重要。在教学中本课程将结合实习教学，将现场典型的工业反应器从结构、原理上进行工程分析，加深对其的理解。如硫磺制酸中的 SO_2 转化反应器是一种典型的多段绝热固定床反应器。实习现场采用孟莫克公司的 HRS 技术，热能利用率比传统工艺高 25%。极大地节约了能源，从理论上分析其工作原理、控制方法：生产中是通过何种手段实现的，怎样操作才能提高 SO_3 转化率，及时将反应产生的热量与系统物料完成热交换，反应一次，换热一次，反应与换热交替进行。讲课中列举大量实例，如甲醇氧化制甲醛的固定床氧化反应器、石油化工中的流化床催化裂化装置反一再系统、精细化工生产中的尾气的吸收利用等。这些实例以理论为指导，通过分析反应器的结构形式、工作原理来理解理论知识，同时丰富了理论，通俗易懂，学生学习有激情，受益很大。

(5) 基础知识与工业应用相结合。

反应工程是一门工程理论性学科，其目标是为工业化生产提供科学指导，因此教学不能脱离工业应用。从全混釜到工业釜式反应器，从平推流到管式炉，基础知识教学中有许多内容学习效果。可以与工业应用相联系。领悟到了所学知识的用武之地，学生会表现出更高的学习热情。

2 课程介绍

2.1 课程性质

《反应工程》是化工类专业的一门专业主干课、核心课程。反应工程涉及物理化学、化工热力学、化工传递过程、优化与控制等，知识领域广泛、内容新颖，对于培养学生的反应工程基础、强化工程分析能力具有十分重要的作用。课程教学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），并结合开发实例进行分析，培养学生应用反应工程方法论解决实际问题的能力。围绕创新教育这一主题，明确培养学生创新思维与创新能力的教学目标，并在教学内容、教学方法上进行改革，改变传统教学模式，将培养创新思维和创新能力的课程教学过程中，探索适宜培养创新人才的“反应工程”教学内容、教学方法。

反应工程课程内容的重点是阐明基本原理，向学生介绍反应工程中的最基本概念、理论和研究方法，所以我们在开设本课程时，精选了化学动力学、间歇反应器、理想流动反应器、返混、反应过程中的热量和质量传递、复杂反应选择性、反应器热稳定性等主要内容，突出影响反应过程结果的工程因素，并按温度效应和浓度效应讨论展开，力求表达清楚，确切阐述，为学生今后开发反应过程与反应器打下扎实的理论基础。

课程难点是掌握反应工程的基本观点和工程思维方法，培养学生分析和解决工程问题的实际能力。在教学中重视基本概念、基本理论和工程分析方法的传授。把握反应的温度效应和浓度效应，体现工程因素和工程措施的对不同反应的具有不同的影响效应，这也是贯穿反应工程基本内容的主线。一方面突出反应工程学科的共性问题，即影响反应结果的工程因素，如返混、预混合、质量传递和热量传递等，另一方面突出反应工程理论思维方法，即工程因素通过影响反应场所温度与浓度而改变反应结果，使学生了解实际反应过程开发的分解与综合、个性与共性之间的关系，从而增强工程分析和解决工程问题的能力。反应工程理论思维方法揭示了反应器型式、操作方式、操作条件等实际上是通过工程因素来实现对反应场所温度和浓度的影响。在教学过程中重视结合相应的思考题、例题教学，并进行必要的习题练习，以期学生将所学内容融会贯通，举一反三，学以致用。

2.2 课程在学科专业结构中的地位、作用

《反应工程》是化学工程的一个分支,以工业反应过程为主要研究对象,以反应技术的开发、反应过程的优化和反应器设计为主要目的一门新兴工程学科。它是在化工热力学、反应动力学、传递过程理论以及化工单元操作的基础上发展起来的。其应用遍及化学、石油化学、生物化学、医药、冶金及轻工等许多工业部门。这一学科是在 1957 年第一届欧洲反应工程讨论会上正式确立的。促成该学科建立的背景是:因化学工业的发展,特别是石油化学工业的发展,生产趋于大型化,对化学反应过程的开发和反应器的可靠设计提出迫切要求;化学反应动力学和化工单元操作的理论和实践有了深厚的基础;数学模型方法和大型电子计算机的应用为反应工程理论研究提供有效的方法和工具。反应工程学科体系已大体形成,理论研究也渐趋完善。在工业应用中,在定性的指导方面已经发挥了很大的作用。但是,与理论研究相比较,反应器内传递过程的实验研究和数据的积累还很薄弱,特别是对于化工生产中经常遇到的多相流动体系研究得还很不够。因此,反应工程的研究需要与多相流体力学和多相传递过程的研究相结合,以便相辅相成。同时,反应工程向生化、冶金等领域扩展时还会出现新的理论问题,需要进一步的研究。

2.3 课程的历史与文化传统

过滤、蒸发、蒸馏、结晶、干燥等单元操作在生产中的应用,已有几千年的历史,据考古发现,至少在 10000 年以前中国人已掌握了用窑穴烧制陶器的技艺,5000 年以前已通过利用日光蒸发海水、结晶制盐;埃及人在 5000 年以前的第三王朝时期开始酿造葡萄酒,并在生产过程中用布袋对葡萄汁进行过滤。但在相当长的时期里,这些操作都是规模很小的手工作业。作为现代工程学科之一的化学工程,则是在 19 世纪下半叶随着大规模制造化学产品的生产过程的发展而出现的,经过 100 多年的发展,化学工程已经成为一门有独特研究对象和完整体系的工程学科。

化学工程的萌芽法国革命时期出现的吕布兰法制碱,标志着化学工业的诞生。到 19 世纪 70 年代,制碱、硫酸、化肥、煤化工等都已有了相当的规模,化学工业在 19 世纪出现了许多杰出的成就。例如:索尔维法制碱中所用的

纯碱碳化塔，高达 20 余米，在其中同时进行化学吸收、结晶、沉降等过程，即使今天看来，也是一项了不起的成就。但当时取得这些成就的人却认为他们自己是化学家，而没有意识到他们已经在履行化学工程师的职责。

化学工程概念的提出英国曼彻斯特地区的制碱业污染检查员 G.E.戴维斯指出：化学工业发展中所面临的许多问题往往是工程问题。各种化工生产工艺，都是由为数不多的基本操作如蒸馏、蒸发、干燥、过滤、吸收和萃取组成的，可以对它们进行综合的研究和分析，化学工程将成为继土木工程、机械工程、电气工程之后的第四门工程学科。但戴维斯的观点当时在英国没有被普遍接受。1880 年他发起成立英国化学工程师协会，未获成功。尽管如此，戴维斯仍继续根据自己的观点搜集资料,进行整理分析。1887~1888 年，他在曼彻斯特工学院作了 12 次演讲，系统阐述了化学工程的任务、作用和研究对象。这些演讲的内容后来陆续发表在曼彻斯特出版的《化工贸易杂志》上，并在此基础上写成了<化学工程手册>，于 1901 年出版。这是世界上第一本阐述各种化工生产过程共性规律的著作，出版后很受欢迎。1904 年在他的助手 N.斯温丁的协助下，又出版该书的第二版。

学科体系的形成如果说单元操作概念的提出是化学工程发展过程中经历的第一个历程的话，那么在第二次世界大战后，化学工程又经历了其发展过程中的第二个历程，这就是“三传一反”（动量传递、热量传递、质量传递和反应工程）概念的提出。

三传一反概念的形成化学工程诞生之初,对工业反应过程的研究吸引着化学工程师的注意。戴维斯在《化学工程手册》中曾对化学工业中的反应作过分类。单元操作的概念，在处理只包含物理变化的化工操作时获得了巨大的成功。有人将反应过程按化学特征分为硝化、磺化、加氢、脱氢等单元过程，试图解决工业反应过程的开发问题。但实践证明单元过程的概念没有抓住反应过程开发中所需解决的工程问题的本质。

1913 年哈伯-博施法（见合成氨工业发展史）投入生产，这一成功极大地促进了催化剂和催化反应的研究。1928 年钒催化剂被成功用于二氧化硫的催化氧化。

1936年发明了用硅铝催化剂进行的粗柴油催化裂化工艺。对这些气固相催化反应过程和燃烧过程的研究，使化学工程师开始认识到，在工业反应过程中质量传递和热量传递对反应结果的影响。

30年代后期，德国的G. 达姆科勒和美国的E. W. 蒂利分别对反应相外传质和传热以及反应相内传质和传热作了系统的分析。这些成果至今仍是反应工程的重要组成部分。

50年代初，随着石油化工的兴起，在对连续反应过程的研究中，提出了一系列重要的概念。如返混、停留时间分布、宏观混合、微观混合、反应器参数敏感性、反应器的稳定性等。在1957年于阿姆斯特丹举行的第一届欧洲反应工程讨论会上，水到渠成地宣布了反应工程这一学科的诞生。

反应工程学科体系已大体形成，理论研究也渐趋完善。在工业应用中，在定性的指导方面已经发挥了很大的作用。但是，与理论研究相比较，反应器内传递过程的实验研究和数据的积累还很薄弱，特别是对于化工生产中经常遇到的多相流动体系研究得还很不够。因此，反应工程的研究需要与多相流体力学和多相传递过程的研究相结合，以便相辅相成。同时，反应工程向生化、冶金等领域扩展时还会出现新的理论问题，需要进一步的研究。

2.4 课程前沿及发展趋势

反应工程所面临的重要挑战是开发一个科学的、可持续发展的技术以满足未来世界能源、环境和材料的需求。实现这个目标需要我们完善对多尺度动力学传递的理解以选择最佳的反应器，从而提高反应器和反应过程效率。

反应器技术涉及到所有可再生资源，不可再生资源以及从中提取的中间介质等原材料经化学反应转化为燃料、通用及专用化学品、建筑和通信材料、衣物纤维、化肥和药品等生活消费品的过程。对于具体化学反应类型以及相关反应器的选择，决定了过程中的能源和物质利用效率以及对环境所造成的影响。

反应工程这门学科的形成即通过引入科学的原理来量化化学反应动力学和热量、动量、质量传递之间的相互作用。多尺度方法论通过定量的评定，例如产率、收率、选择性、能效、以及对环境影响率来比较不同类型的反应器。不同尺度所利用的动力学分析模型是不同的，在分子尺度，使用的是分子动力学和MD模拟法，以及密度泛函理论和过渡态理论；在粒子尺度，使用的是计算流体力学

和直接数值分析；在反应器尺度，使用的是微观混合模型计算流体力学；在大规模生产尺度，运用的是动力学模型。

在反应工程中应用的科学理论常常是很初步的，并没有很大的发展，例如对理想流动模型（活塞流或完全混合）的假设，颗粒尺度下球形催化剂催化效率的定量化等。反应工程一直将科学和经验结合，研究者既没有制造出一种最佳的理想反应器来最大满足化学反应。

为降低新技术在大规模生产中应用的风险，应该加强研究不同尺度下反应本质。例如在分子尺度，量子 and 分子的动力学计算应该与微观动力学概念相结合，这将有助对表面化学和催化过程的微观理解，改进对反应机理和动力学反应速率的描述；在微观至中等尺度，湍流混合与多组分、多相系统中的动力学、质量和热量传递的相互影响应该进一步被认识；在反应器尺度，计算流体力学正在取代理想流动模型。

其中，多相系统模拟相分散和流体流动为计算流体力学提供了依据；基于第一原则的中等尺度领域的量化可以促进反应器内部更优的设计，例如流化床的薄膜结构或规整填料的反应器。这些措施都是为了获得较高的体积反应速率和在较高的质量和能量转化效率下实现生产设备，需要进一步研究。

循环流化床存在巨大的发展潜力和前景，它可以减少反应物和产物对环境的影响，实现绿色化工生产。但是循环流化床的发展还不成熟，液固流动模型及相关参数并不确定，可靠性及稳定性尚不明确。可以借助计算流体力学或开发新的动力学模型进行进一步研究，通过统计、模拟计算、预测、验证等过程得到流体动力学模型及相关参数。计算流体力学可以用来描述真实流动，利用计算流体力学可以纠正由经验法假设的流体流动形式所造成的错误结论，从而优化设计方案。 综上，计算流体力学在优化反应器设计方面起了重要作用，可以帮助我们了解流体的真实流动情况，尤其在多相复杂系统中，可以对相关参数进行假设及验证，增加了反应过程的可控性。设计新型反应器时，应综合考虑其对环境的影响、对能源的利用率、运行可靠性和生产效率等。在设计反应器时不仅要不断深入对分子间相互作用的研究，还应加强对各个尺度下多相复杂系统中的化学反应、质量和热量传递、流体流动模型的探讨，探索更完美的动力学分析模型。

特别强调，在资源短缺，环境条件恶化的情况下，绿色化工生产变得尤为重要，提高能源利用率、降低能耗、减少废弃物的排放、高效利用副产物等是绿色化工的宗旨，这就要求设计新的反应器以实现新的分离、回收、再生工艺，实现高效的传热过程，实现原子的百分百利用。设计可持续发展的反应器、开发高效率的反应技术、科学的深层探讨反应过程本质是化学反应工程的主流方向。

2.5 课程与经济社会发展的关系

化学反应工程是化学工程的一个分支，以工业反应过程为主要研究对象，以反应技术的开发、反应过程的优化和反应器设计为主要目的一门新兴工程学科。它是在化工热力学、反应动力学、传递过程理论以及化工单元操作的基础上发展起来的。其应用遍及化学、石油化学、生物化学、医药、冶金及轻工等许多工业部门。

化学反应工程是一门涉及物理化学、化工传递过程、化工热力学、化学动力学、以及生产工艺、环境保护、经济学等知识领域的课程，是一门综合性很强的工程学科。主要研究工业规模化学反应器中化学反应过程与反应物系质量、热量、动量传递过程即“三传一反”同时进行的物理变化与化学变化的基本规律。在此基础上，探求反应器设计包括装置的型式结构设计、操作条件(参数)的选定及控制、技术经济效果的评价及优化等的基本原理和基本方法。其核心就是对反应装置中的操作过程进行定量的工程学解析。

2.6 课程内容可能涉及到的伦理和道德问题

《反应工程》作为本科主干基础学科，对未来培养国家后备工程人才起到关键性的作用，而在此课程学习基础上，化学工程类科学研究才可能成为现实。

其中科学研究是运用严密的科学方法，从事有目的、有计划、有系统的认识客观世界，探索客观真理的活动过程，是对研究变量或指标的共同的本质的概括。而当代“伦理”概念蕴含着西方文化的理性、科学、公共意志等属性，“道德”概念蕴含着更多的东方文化的情性、人文、个人修养等色彩。我们所讲的科学研究中的伦理与道德，是科学研究者应当秉持的研究规则和行为规范，使伦理道德规范运用到涉及科技活动现实的具体问题的规范问题。科学研究的基本任务是探索、认识未知。理想的科学研究被描述为一个科学家求真、至善、臻美的过程。在这个过程中，科学家揭示着自然界的客观规律，开发应用有利于人类利益的技

术，去追求人类社会的持续、和谐的发展。但是，理想状态只能是一个无限接近到无法到达的状态，科学和现实社会可能会产生各种各样的冲突和矛盾，科学研究中的伦理道德就成为一个为人们关注的焦点。我们讲科学研究中的伦理与道德，并不是指科技成果本身有什么伦理道德，而是指科学研究、技术探索过程中的伦理道德，更是指科学研究应用到政治、经济、文化、军事领域之中产生的伦理道德问题。而《反应工程》正是作为科学研究的基础知识学科，必须考虑“伦理”和相关的“道德”问题。

2.7 学习本课程的必要性

反应工程理论联系实际、应用性较强，是研究化学反应规律和传递过程规律同时起作用的工业反应过程的一门学科，即研究如何在工业规模上实现有经济价值的化学反应。反应工程学课程的核心就在于特定反应在适合的反应器内行为状态数学模型的建立及其工程学解析处理，它注重培养学生的工程方法论、工程能力及技术经济理念，对学生工程能力和素质的培养具有重要的作用。

本课程学习的必要性如下：

- (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

张伟，博士研究生、讲师。

3.2 教育背景

2011.09~2015.06 四川大学 博士研究生

2006.09~2009.07 昆明理工大学 硕士研究生

2000.09~2004.07 大连海事大学 学士

3.3 研究兴趣（方向）

化学工程与工艺流体模拟计算

气-固反应热力学以及动力学研究

化工过程无机盐结晶

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。

表 5-1 课程目标、教学目标与毕业要求对应关系

毕业要求	毕业要求指标点	对应课程目标	教学目标
毕业要求 1: 工程知识	1.4 掌握用于解决化工及相关领域复杂工程问题的专业基础知识。	课程目标 1, 2	目标 1: (1) 掌握均相单一反应动力学; (2) 掌握复合反应动力学特点; (3) 掌握气固催化本征动力学; (4) 了解化学反应工程学科的任务、内容及研究方法; (5) 了解气固催化反应的特点; (6) 了解气固相催化固定床反应器的特点。
毕业要求 2: 问题分析与计算	2.1 能够将数学、自然科学和工程科学的基本原理用于识别、表达单元操作和反应过程, 并通过分析得到有效结论。	课程目标 1, 3	目标 2: (1) 掌握三种理想反应器的设计计算; (2) 掌握针对不同的反应选择合适反应器的方法; (3) 掌握几种解决均相反应过程问题的方法; (4) 理解实际反应器流动特点的建模方法; (5) 掌握不同控制步骤条件下表观反应动力学特点。

6 课程内容

6.1 课程内容概要

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表 6-1 所示。

表 6-1 反应工程课程内容概要

章节	教学内容	教学要求
绪论	1. 化学反应工程的定义； 2. 化学反应工程学科的发展； 3. 化学反应工程的任务； 4. 化学反应工程和其他学科的关系。	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	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。	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。

章节	教学内容	教学要求
第二章 复合反应与反应器选型	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。	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	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）。	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。

章节	教学内容	教学要求
<p>第四章 气固相 催化反 应本征 动力学</p>	<p>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。</p>	<p>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。</p>
<p>第五章 气固相 催化反 应宏观 动力学</p>	<p>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。</p>	<p>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</p>

章节	教学内容	教学要求
第六章 气固相 催化固 定床反 应器	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。	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 课程教学重点、难点

反应工程课程教学重点、难点及学时安排如表 7-2 所示。

表 6-2 反应工程课程教学重点、难点及学时安排

章节	学时安排	教学重点、难点
绪论	2学时	重点： 化学反应工程学科的内容、分类 难点： 化学反应工程学科的研究方法
第一章 均相单 一反应 动力学 和理想 反应器	12学时	重点： 1.化学反应工程基本概念； 2.化学反应动力学方程建立； 3.反应器设计方程。 难点： 1.化学反应式计量方程、转化率等基本概念； 2.等温恒容过程反应动力学方程及动力学方程建立的方法； 3.间歇反应器，平推流反应器，全混流反应器设计方程。

章节	学时安排	教学重点、难点
第二章 复合反应与反应器选型	6学时	<p>重点：</p> <ol style="list-style-type: none"> 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。 <p>难点：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.单一不可逆反应过程与反应器； 2.复合反应（自催化、可逆、平行、连串反应）的反应特征； 3.复合反应（自催化、可逆、平行、连串反应）的反应器选型。
第三章 非理想流动反应器	8学时	<p>重点：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.返混的定义以及返混对反应过程的影响； 2.流体在反应器中的停留时间分布； 3.非理想流动模型（凝聚流模型、多级混合模型、轴向扩散模型）。 <p>难点：</p> <ol style="list-style-type: none"> 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）。

章节	学时安排	教学重点、难点
第四章 气固相 催化反 应本征 动力学	8学时	重点： 1.气固相催化过程及特征，反应速率表达； 2.固体催化剂选择制备； 3.气固相催化反应本征动力学； 4.本征动力学方程实验测定。 难点： 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。
第五章 气固相 催化反 应宏观 动力学	6学时	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。 难点： 1.球形以及其他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	3学时	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。 难点： 1.流体在固定床内的流动特性； 2.固定床内径向传递。

6.3 学时安排

《反应工程》课程一共安排课程 45 学时，一共 23 课次，每个课次安排 2 学时课程任务。具体课程安排参考本大纲 6.2 课程教学重点、难点章节表格以及本大纲 7 课程实施具体教学安排。

7 课程实施

《反应工程》课程教学实施详见如下：

7.1 教学单元一

7.1.1 教学日期

课程安排：2016-2017学年第二学期

课次/学时：1 / 2

7.1.2 教学目标

介绍化学反应工程相关的基本知识：

- (1) 化学反应工程的定义；
- (2) 化学反应工程学科的发展；
- (3) 化学反应工程的任务；
- (4) 化学反应工程和其他学科的关系。

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) 化学反应工程学科的内容、分类；

难点：

- (1) 化学反应工程的研究方法。

7.1.4 教学过程

- (1) (1) 介绍化学工程学科发展史（讲授法）；

①《反应工程》概念提出

- 1956 年
- 荷兰 Amsterdam
- 化学工程方面的国际学术会议
- Krevelen 教授提出《化学反应工程》概念

② 《反应工程》的发展

- 在上世纪的前五十年，化学工程关注的对象是物理过程，如流体流动、传热、吸收、萃取、蒸馏和干燥等

- 没有指导反应器开发的一般性方法

- 石油工业，确切地说是炼油工业的繁荣，促进了化学反应工程的发展

(2) 反应工程的研究对象、目的及内容（**讲授法**）；

(3) 反应工程学的任务及范畴（**图例讲授法**）；

(4) 化学反应过程分类（**讲授法、提问法**）；

(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）（**图例讲授法、案例分析法、提问法**）；

(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（**讲授法、提问法**）。

课堂提问，内容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。

7.1.5 教学方法

本课程主要采取教学方法：讲授法、图例讲授法、提问法

7.1.6 作业安排及课后反思

课后要求学生思考反应工程的研究对象、目的、内容及研究方法。（下次课提问）

7.1.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

具体参考教材 P1-4 绪论部分，以及相关化学反应工程文献进行准备。

7.1.8 参考资料

本讲教学单元教材以及参考资料

教材：

(1) 郭锴、唐小恒、周绪美. 化学反应工程[M]. 北京：化学工业出版社，2012. （绪论部分）P1-3

参考资料:

(2) 金涌, 程易, 颜彬航. 化学反应工程的前世、今生与未来[J]. 化工学报, 2013, 64(1):34-43

7.2 教学单元二

7.2.1 教学日期

课程安排：2016-2017学年第二学期

课次/学时：2 /2

7.2.2 教学目标

均相单一反应动力学和理想反应器基本概念

- (5) 了解化学计量方程、反应程度、转化率等基本概念；
- (6) 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) 化学反应工程基本概念；
- (2) 化学反应动力学方程建立；
- (3) 化学反应器设计方程。

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（讲述法）

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 (对比讲授法)

表 7-3 化学反应式与化学反应计量式对比表格

	化学反应式	化学反应计量式
概念	用于描述反应物经过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, 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 之外的其他公因子。

(3) 反应程度 (讲授法)

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 (摩尔)

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 (讲授法)

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:
$$x_A = \frac{n_{A0} - n_A}{n_{A0}}$$

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（讲授法）

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。

$$r = \frac{1}{V} \frac{d\xi}{dt} \quad (\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1})$$

化学反应速率其它常见的表示方法（对比法）如表8-2所示：

表7-4 化学反应速率其它表示方法

	化学反应速率的其它表示方法
摩尔数	$r_I = \frac{1}{V} \frac{dn_I}{dt}$ ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$) I 为生成物； $-r_I = -\frac{1}{V} \frac{dn_I}{dt}$ ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$) I 为反应物；
转化率	$-r_A = \frac{n_{A0}}{V} \frac{dx_A}{dt}$ ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$) A 为关键组份；
某组份的浓度	$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} - \frac{C_A}{V} \frac{dV}{dt}$ ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$) A 为关键组份， 提问：恒容过程以关键组份 A 的浓度表示的化学反应速率。

课堂提问：

转化率是否为时间的函数？

恒容过程以关键组分 A 的浓度表示的化学反应速率为？

7.2.5 教学方法

本课程主要采取教学方法：讲授法、对比讲授法、提问法、对比法、讲述法

7.2.6 作业安排及课后反思

课后要求学生思考反应工程的化学反应式与化学反应计量方程相关知识点。

课后作业：教材 P35，1、2、3（下次课前提交）

7.2.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

具体参考教材第一章 均相单一反应动力学和理想反应器 1.1 内容，以及相关化学反应工程文献进行准备。

7.2.8 参考资料

本讲教学单元教材以及参考资料

教材：

- (1) 郭锴、唐小恒、周绪美. 化学反应工程[M]. 北京：化学工业出版社, 2012. (第一章第一节部分) 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。

参考资料：

- (1) 陈甘棠. 化学反应工程(第三版)[M]. 化学工业出版社, 2004.(第二章)。
- (2) 毛在砂, 陈家镛. 化学反应工程学基础[M]. 科学出版社, 2004.(第二章)。

7.3 教学单元三

7.3.1 教学日期

课程安排：2016-2017学年第二学期

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（**提问法、讲授法**）

① 反应程度定义式及特点？

② 转化率定义式及特点？

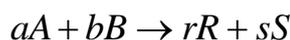
③ 恒容过程以关键组分A 的浓度表示的化学反应速率的表达式？

(2) 化学反应动力学方程（**讲授法、引导法和提问法**）

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）



$$-r_A = k_c c_A^m c_B^n$$

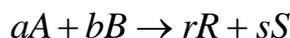
$$(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1})$$

课堂进行提问环节:

- 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 (引导法、讲授法和练习法)

根据化学反应动力学方程的一般表示 (幂函数形式)



$$-r_A = k_c c_A^m c_B^n$$

$$(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1})$$

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:

- ① 温度由 300K 上升 10K ;
- ② 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 (讲授法)

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:

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

要求学生思考 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 (讲授法)

课堂提问:

- 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？
- 4、幂函数形式表达化学反应动力学方程： $-r_A = k_c c_A^m c_B^n \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
 - 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 $m=a$, $n=b$ ？

表7-5 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 ($c_{A0} = c_{B0}$)	$-\frac{dc_A}{dt} = kc_A^2$	$kt = \frac{1}{c_A} - \frac{1}{c_{A0}} = \frac{1}{c_{A0}} \left(\frac{x_A}{1 - x_A} \right)$

引导学生思考：

- 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。

7.3.5 教学方法

本课程主要采取教学方法：引导法、讲授法、提问法和练习法

7.3.6 作业安排及课后反思

课后作业：教材P36，6、13（下次课前提交）

7.3.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

具体参考教材第一章 均相单一反应动力学和理想反应器 1.1.5 和 1.2 内容，以及相关化学反应工程文献进行准备。

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。

参考材料:

- (1) 陈甘棠, 化学反应工程, 化学工业出版社, 北京, 1990; P9
- (2) 朱炳辰主编, 化学反应工程, 化学工业出版社, 北京, 2012; P20
- (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; P29

7.4 教学单元四

7.4.1 教学日期

课程安排：2016-2017学年第二学期

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（**提问法**）

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 $-r_A = k_C c_A^m c_B^n$ ，提问：

反应物浓度和温度对反应速率的影响分别体现在哪个参数上？

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

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

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

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（**讲授法**）

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（讲授法）

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 拟合线性 $-r_A = -\frac{dc_A}{dt} = k_c c_A^n$ 为 $\ln \ln(-\frac{dc_A}{dt}) = \ln k_c + n \ln c_A$ ，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

课堂提问：

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 $-r_A = k_c c_A^m c_B^n$ ，

提问环节：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？

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

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

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

以上那个为一级反应的积分式？并且说明一级反应速率常数 k_c 的单位？

7.4.5 教学方法

本课程主要采取教学方法：讲授法、提问法

7.4.6 作业安排及课后反思

课后作业：教材P36，6、7（下次课前提交）

7.4.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

具体参考教材第一章 均相单一反应动力学和理想反应器 1.2 内容，以及相关化学反应工程文献进行准备。

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。

参考材料：

- (1) 陈甘棠，化学反应工程，化学工业出版社，北京，1990；P9
- (2) 朱炳辰主编，化学反应工程，化学工业出版社，北京，2012；P20
- (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；P29

7.5 教学单元五

7.5.1 教学日期

课程安排：2016-2017学年第二学期

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（**引导法**）

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（**讲授法**）

- 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（**讲授法**）

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 τ ：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 $^{-1}$]：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（讲授法）

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（讲授法和演示法）

授课时按不同方式的分类，并将常见的反应器给出图例。

表7-6 反应器的分类

反应器分类方式	反应器分类类型
按照操作方式分类	1.间歇操作反应器 2.半间歇操作反应器 3.连续操作反应器
按照物料受热情况分类	1.绝热操作反应器 2.等温操作反应器 3.非等温、非绝热操作反应器
按照反应器外形分类	1.管式反应器 2.釜式反应器 3.列管式反应器等
按照流动（返混）状况分类	1.理想流动反应器（BR、PFR、CSTR） 2.非理想流动反应器

课堂提问：

1、为什么用标准空速比较设备生产能力大小，而不是空速？

引导学生思考：

1、回忆积分法和微分法建立动力学方程的步骤；

2、标准状况和物理化学中讲的标准状态的区别。

7.5.5 教学方法

本课程主要采取教学方法：讲授法、引导法、演示法

7.5.6 作业安排及课后反思

课后作业：教材P37，18（下次课前提交）

7.5.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

具体参考教材第一章 均相单一反应动力学和理想反应器1.3内容，以及相关化学反应工程文献进行准备。

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。

参考材料：

(4) 陈甘棠，化学反应工程，化学工业出版社，北京，1990；P31

(5) 朱炳辰主编，化学反应工程，化学工业出版社，北京，2012；P29

(6) 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；P70

7.6 教学单元六

7.6.1 教学日期

课程安排：2016-2017学年第二学期

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（**提问法**）

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（**案例分析法、讲授法和引导法**）

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 (案例分析法、讲授法和引导法)

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:

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

要求学生思考对于恒容反应, 平推流反应器的设计方程:

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

(4) 变容反应过程的一些概念 (讲授法)

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 δ_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 ε_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

本课程主要采取教学方法: 案例分析法、提问法、讲授法和引导法

7.6.6 作业安排及课后反思

课后作业: 教材P37, 20 (下次课前提交)

课后思考问题:

- 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?

引导学生思考：

- 1、对于恒容反应，间歇反应器的设计方程；
- 2、对于恒容反应，平推流反应器的设计方程。

7.6.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

具体参考教材“第一章 均相单一反应动力学和理想反应器”1.4节内容，以及相关化学反应工程文献进行准备。

7.6.8 教材及参考资料

教材：

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。

参考资料：

(1) 万锡仁. 平推流反应器的振荡操作[J]. 南京工业大学学报(自科版), 1991, 13(1):70-76.

7.7 教学单元七

7.7.1 教学日期

课程安排：2016-2017学年第二学期

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) 教材第一章全章小结

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（**提问法**）

- 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（**讲授法**）

推导对于变容反应，平推流反应器平均停留时间。

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

要求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（**案例分析法、讲授法和引导法**）

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：

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

(4) 教材第一章全章小结（归纳法）

7.7.5 教学方法

本课程主要采取教学方法：归纳法、提问法、案例分析法、讲授法和引导法

7.7.6 作业安排及课后反思

课后作业：教材P38，23（下次课前提交）

教材“第一章 均相单一反应动力学和理想反应器”授课结束，完成相应课程回顾，以及课后对全章进行总结。

课后要求学生思考：

- 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？

引导学生思考：

- 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。

7.7.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

具体参考教材第一章 均相单一反应动力学和理想反应器1.4.1内容进行讲授，以及相关化学反应工程文献进行准备。

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。

参考材料：

- (1) 陈甘棠，化学反应工程，化学工业出版社，北京，1990；P32
- (2) 朱炳辰主编，化学反应工程，化学工业出版社，北京，2012；P29
- (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; P82

7.8 教学单元八

7.8.1 教学日期

课程安排：2016-2017学年第二学期

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（讲授法）

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（图例讲授法和引导法）

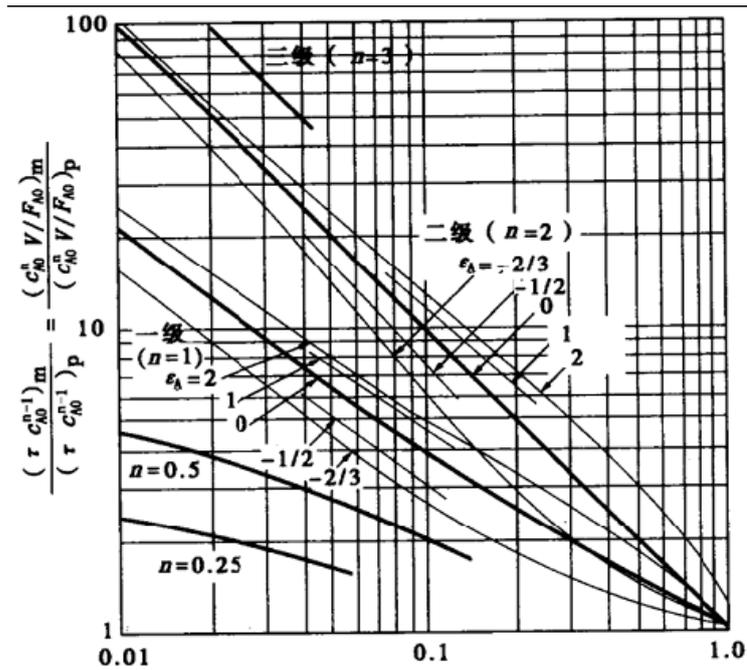


图7-1 n 级反应在简单反应器中性能比较

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 (讲授法)

① PFR 和CSTR 的并联特性;

② PFR 和CSTR 的串联特性。

(4) 根据不同化学反应优化反应器组合 (图例讲授法和引导法)

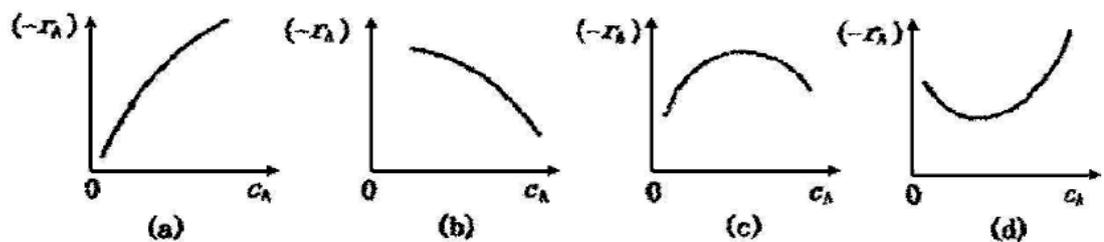


图7-2 反应速率与浓度的几种关系

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

本课程主要采取教学方法: 图例讲授法、引导法和讲授法

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（下次课前提交）

7.8.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

具体参考教材“第二章 复合反应与反应器选型”中2.1节内容进行讲授，以及相关化学反应工程文献进行准备。

引导学生思考：

- 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。

参考材料：

- (1) 陈甘棠，化学反应工程(第三版)，化学工业出版社，北京，1990；P40
- (2) 朱炳辰主编，化学反应工程，化学工业出版社，北京，2012；P29
- (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；P71

7.9 教学单元九

7.9.1 教学日期

课程安排：2016-2017学年第二学期

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（**提问法**）

① 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（**讲授法**）

基本假定：

- 1、反应器内为活塞流；
- 2、管线内不发生化学反应；
- 3、整个体系定常态操作。

定义循环比为 β ：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：

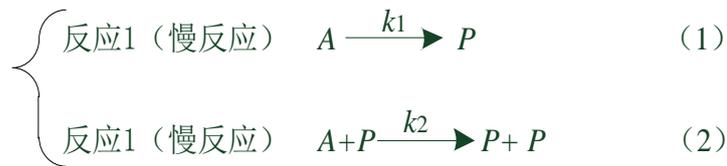
$$V_R = V_0 c_{A0} (1 + \beta) \int_{\frac{\beta}{1+\beta} x_{A2}}^{x_{A2}} \frac{dx_A}{(-r_A)}$$

讨论不同循环比条件下，循环反应器与PFR和CSTR的关系。

①当 $\beta \rightarrow \infty$ ，循环反应器为CSTR；

②当 $\beta = 0$ ，循环反应器为PFR。

(3) 自催化反应特性与反应器选型（图例讲授法和引导法）



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，一旦体系中有了P，反应速率大大加快，直到A的减少使反应速率下降。

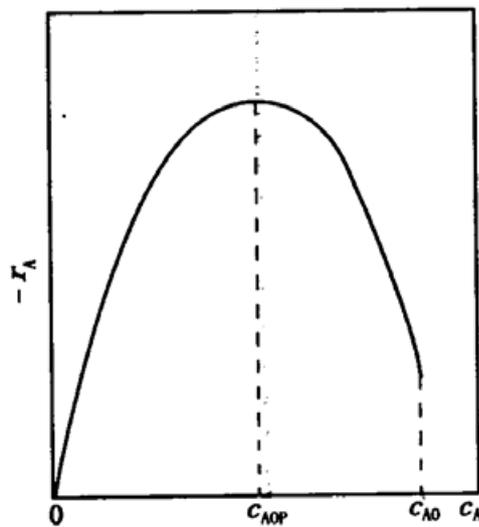
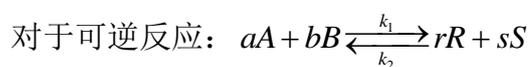


图7-3 自催化反应的反应速率 $-r_A$ 与 c_A 关系

根据自催化反应的特点,要求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 (图例讲授法和引导法)



反应净速率:

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

要求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。

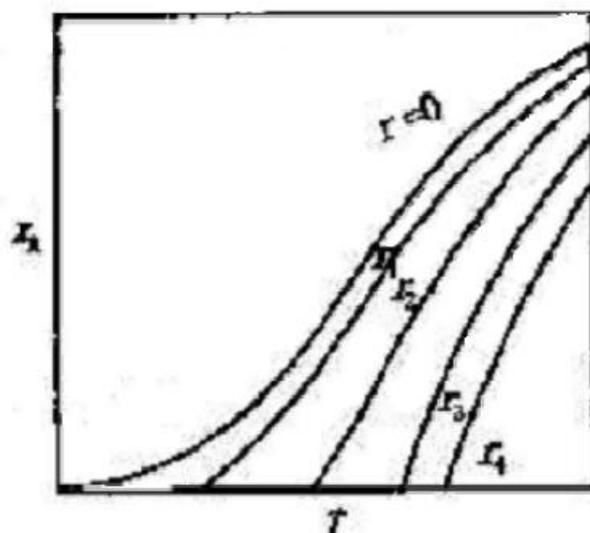
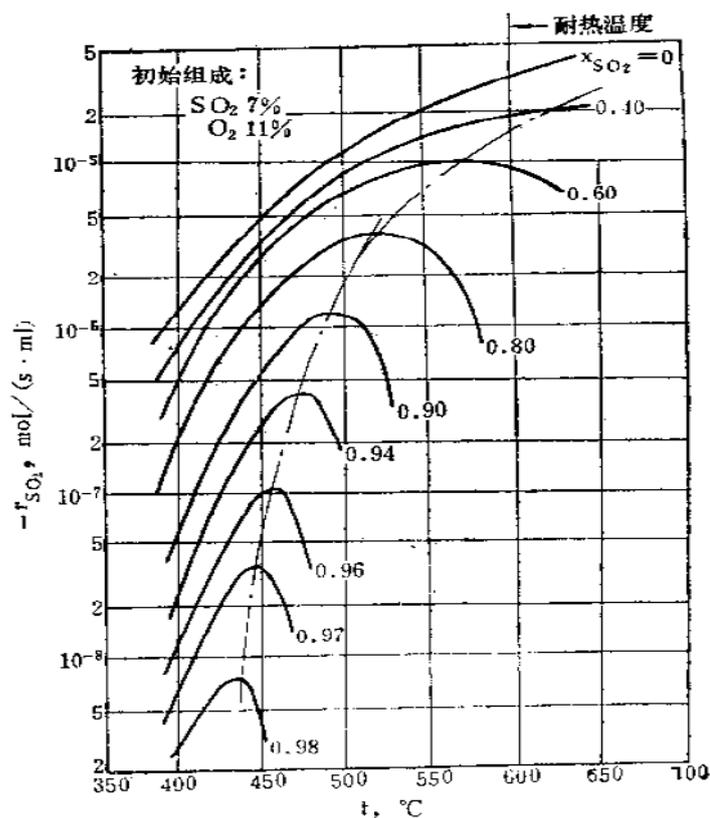


图7-4 可逆吸热反应速率与温度及转化率的关系

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。



课堂提问：

1、 n 级单一不可逆反应在PFR 和CSR 中性能比较？

引导学生思考：

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换率之间的关系，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换率之间的关系，并讨论从浓度和温度角度说明选什么反应器更优。

7.9.5 教学方法

本课程主要采取教学方法：提问法、讲授法和引导法

7.9.6 作业安排及课后反思

课后作业安排：教材P68，5（下次课前提交）

7.9.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

具体参考教材“第二章 复合反应与反应器选型”中2.2-2.3节内容进行讲授，

以及相关化学反应工程文献进行准备。

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。

参考材料：

- (1) 陈甘棠，化学反应工程(第三版)，化学工业出版社，北京，1990；P40
- (2) 朱炳辰主编，化学反应工程，化学工业出版社，北京，2012；P29
- (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；P71

7.10 教学单元十

7.10.1 教学日期

课程安排：2016-2017学年第二学期

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) “第二章 复合反应与反应器选型”全章总结

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（**提问法和归纳法**）

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？

归纳不可逆反应、可逆吸热反应和可逆放热反应的 $x-T$ 图。

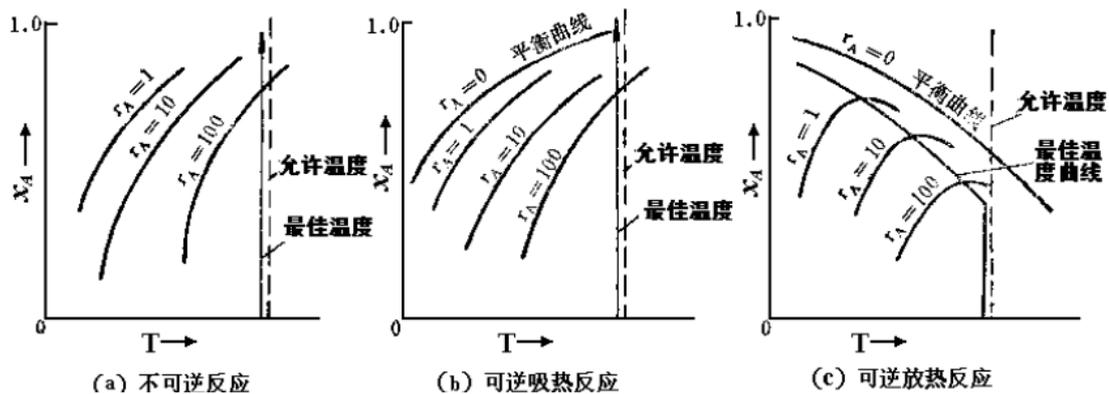
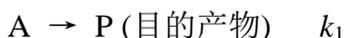


图7-5 不可逆反应、可逆吸热反应和可逆放热反应的x-T图

(2) 平行反应特性与反应器选型 (图例讲授法和引导法)

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：

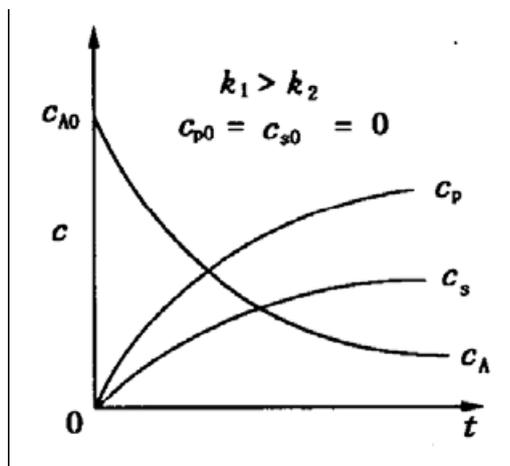


图7-6 组分的浓度随时间变化关系

引出选择性和收率的定义：

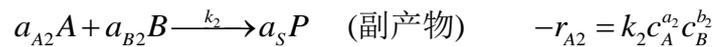
$$\text{平均选择性: } \bar{S}_P = \frac{-(\Delta n_A)_P}{n_{A0} - n_A} = \frac{-\alpha_{A1}(\Delta n)_P}{\alpha_P (n_{A0} - n_A)}$$

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

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

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

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 (图例讲授法和引导法)

对于连串反应: $A \xrightarrow{k_1} P(\text{目标产物}) \xrightarrow{k_2} S$

各组分的浓度随时间变化关系:

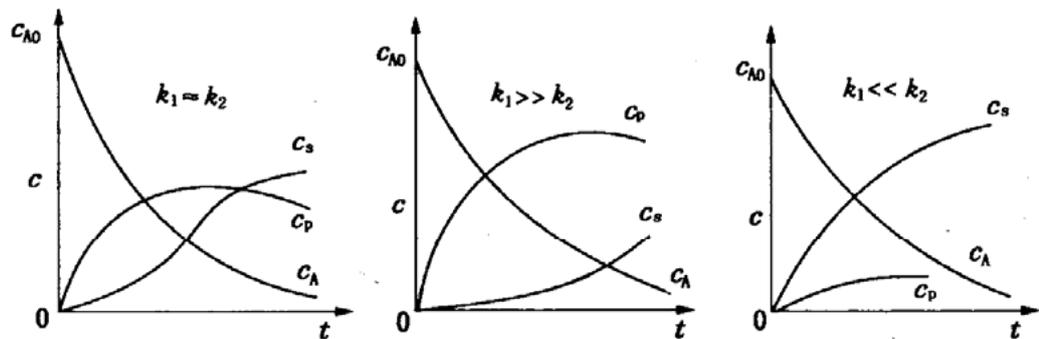


图7-7 连串反应中组分的浓度随时间变化关系

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) “第二章 复合反应与反应器选型” 全章总结 (归纳法)

7.10.5 教学方法

本课程主要采取教学方法：归纳法、提问法、讲授法和引导法

7.10.6 作业安排及课后反思

课后作业：教材P68，6（下次课前提交）

课后要求学生思考总结性问题：

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的转率为？为什么？

引导学生思考：

- 1、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；
- 2、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。

7.10.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

具体参考教材“第二章 复合反应与反应器选型”中2.4-2.5节内容进行讲授，以及相关化学反应工程文献进行准备。

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。

参考资料：

- (1) 陈甘棠，化学反应工程(第三版)，化学工业出版社，北京，1990；P40
- (2) 朱炳辰主编，化学反应工程，化学工业出版社，北京，2012；P102
- (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；P71

7.11 教学单元十一

7.11.1 教学日期

课程安排：2016-2017学年第二学期

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（**引导法**）
- (2) 非理想流动反应器中涉及到的基本概念（**讲述法**）

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（**引导讲授法**）

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 (讲授法)

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。

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

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

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

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

$$\bar{t} = \frac{\int_0^\infty tE(t)dt}{\int_0^\infty E(t)dt} = \int_0^1 t dF(t) = \int_0^{V_R} \frac{dV_R}{V}$$

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 (讲授法)

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: $\bar{\theta} = \int_0^\infty \theta E(\theta)d\theta = \int_0^1 \theta dF(\theta)$

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

(6) 两种停留时间分布规律之间的相互关系 (对比讲授法)

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

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

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

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

7.11.5 教学方法

本课程主要采取教学方法：讲述法、讲授法和引导法

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。(下次课前提问)

课后要求学生思考：

- 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。

7.11.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

具体参考教材“第三章 非理想流动反应器”中3.1-3.2.1节内容进行讲授，以及相关化学反应工程文献进行准备。

7.11.8 教材及参考资料

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

参考资料

- (1) 陈甘棠，化学反应工程(第三版)，化学工业出版社，北京，1990；P70
- (2) 朱炳辰主编，化学反应工程，化学工业出版社，北京，2012；P114
- (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；P118

7.12 教学单元十二

7.12.1 教学日期

课程安排：2016-2017学年第二学期

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（**提问法**）

- 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（**讲授法**）

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（**讲授法**）

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

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 Δt_0 时间间隔内向流量为 V 的流体中加入总量为 m_∞

($m_\infty = \int_0^\infty VC dt$) 的示踪剂，则： $m_t = \int_0^t VC dt$

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

停留时间分布密度函数： $E(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \left(\frac{V}{m_\infty}\right) \cdot C = \frac{V \cdot C}{\int_0^\infty VC dt} = \frac{C}{\int_0^\infty C dt} = \frac{C}{\sum_0^\infty C \Delta t}$

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

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

本课程主要采取教学方法：讲授法和提问法

7.12.6 作业安排及课后反思

课后作业：教材P95，1、2（下次课前提交）

课后要求学生思考：

- 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？

7.12.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

具体参考教材“第三章 非理想流动反应器”中3.2.3以及3.2.4内容进行讲授，以及相关化学反应工程文献进行准备。

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。

参考资料：

- (1) 陈甘棠，化学反应工程(第三版)，化学工业出版社，北京，1990；P88
- (2) 朱炳辰主编，化学反应工程，化学工业出版社，北京，2012；P116

7.13 教学单元十三

7.13.1 教学日期

课程安排：2016-2017学年第二学期

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（**提问法**）

- 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（**引导讲授法**）

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

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

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

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

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

对比PFR 和CSTR 停留时间分布规律

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

(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

本课程主要采取教学方法: 讲授法和提问法

7.13.5 作业安排及课后反思

课后作业: 教材 P96, 7 (下次课前提交)

课后要求学生思考:

- 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?

引导学生思考:

PFR 和CSTR 的特点。

7.13.6 课前准备情况及其他相关特殊要求

具体参考教材“第三章 非理想流动反应器”中3.2.2-3.3.1节内容进行讲授，以及相关化学反应工程文献进行准备。

7.13.7 教材及参考资料

本课程使用教材：“第三章 非理想流动反应器”部分；P77-82。

- (1) 陈甘棠，化学反应工程(第三版)，化学工业出版社，北京，1990；P40
- (2) 朱炳辰主编，化学反应工程，化学工业出版社，北京，2012；P29
- (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；P71

7.14 教学单元十四

7.14.1 教学日期

课程安排：2016-2017学年第二学期

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) “第三章 非理想流动反应器”全章总结。

重点：

- (1) 多级混合槽模型。

难点：

- (2) 轴向扩散模型。

7.14.4 教学过程

- (1) 复习上节课知识点（**提问法**）

- 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（**讲授法**）

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（讲授法）

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（归纳法和对比法）

表 7-7 非理想流体模型

模型	基础模型	模型参数	参数求解	出口转化率
凝聚流	BP	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	$\sigma_{\theta}^2 = \frac{1}{N}$	$x_{AN} = 1 - \frac{1}{(1 + k\frac{\tau}{N})^N}$
轴向扩散	PFR	Pe	$\sigma_{\theta}^2 = \frac{2}{Pe} + 8(\frac{1}{Pe})^2$	教材P95

(5) “第三章 非理想流动反应器” 全章小结

7.14.5 教学方法

本课程主要采取教学方法：讲授法和提问法

7.14.6 作业安排及课后反思

课后作业：教材P96，5（下次课前提交）

课后要求学生思考问题：

- 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？

引导学生思考：

- 1、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？
- 2、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？

7.14.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

具体参考教材“第三章 非理想流动反应器”中3.3.2-3.3.4节内容进行讲授，以及相关化学反应工程文献进行准备。

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

参考材料：

- (1) 陈甘棠，化学反应工程(第三版)，化学工业出版社，北京，1990；P93
- (2) 朱炳辰主编，化学反应工程，化学工业出版社，北京，2012；P124
- (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；P137

7.15 教学单元十五

7.15.1 教学日期

课程安排：2016-2017学年第二学期

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（**演示法和讲授法**）

动画演示并讲授非均相催化反应过程的七个步骤：

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（引导讲授法）

讲授课程过程中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。

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

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

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

(3) 固体催化剂（演示法和讲授法）

演示实际催化剂的图片。



图7-8 各种实际催化剂

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。

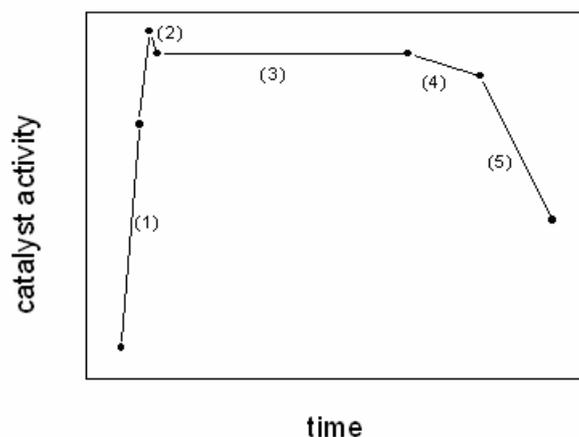


图 7-9 催化剂活性随时间变化曲线

7.15.5 教学方法

本课程主要采取教学方法：演示法、讲授法

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。（下次课前提问）

7.15.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

具体参考教材“第四章 气固催化反应本征动力学”中4.1-4.2.3节内容进行讲授，以及相关化学反应工程文献进行准备。

课前准备问题引导学生思考：

1、学生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

参考材料：

- (1) 陈甘棠，化学反应工程(第三版)，化学工业出版社，北京，1990；P121
- (2) 朱炳辰主编，化学反应工程，化学工业出版社，北京，2012；P37
- (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；P163

7.16 教学单元十六

7.16.1 教学日期

课程安排：2016-2017学年第二学期

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（**提问法**）

- 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（**讲授法**）

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

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

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

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

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 (对比讲授法)

表8-4 物理吸附与化学吸附对比表

	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, 脱附速率表达式为:

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

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

本课程主要采取教学方法: 提问法和讲授法

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。(下次课前提问)

课后要求学生思考:

- 1、非均相催化反应过程的七个步骤？
- 2、固体催化剂的组成？

7.16.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

具体参考教材“第四章 气固催化反应本征动力学”中4.2.3-4.3.1节内容进行讲授，以及相关化学反应工程文献进行准备。

课前引导学生思考：

- 1、影响吸附速率的因素；
- 2、影响脱附速率的因素；
- 3、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。

参考材料：

- (1) 陈甘棠，化学反应工程(第三版)，化学工业出版社，北京，1990；P112
- (2) 朱炳辰主编，化学反应工程，化学工业出版社，北京，2012；P63

7.17 教学单元十七

7.17.1 教学日期

课程安排：2016-2017学年第二学期

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 教学过程及

- (1) 复习上节课知识点（**提问法**）

- 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（**讲授法**）

- 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（**讲授法**）

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（引导讲授法）

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

本课程主要采取教学方法：提问法和讲授法

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。（下次课前提问）

课后要求学生思考：

- 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？

7.17.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

具体参考教材“第四章 气固催化反应本征动力学”中4.3.1节内容进行讲授，以及相关化学反应工程文献进行准备。

课前引导学生思考：

- 1、理想吸附模型假设与实际的偏离。

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。

参考材料:

- (1) 陈甘棠, 化学反应工程(第三版), 化学工业出版社, 北京, 1990; P117
- (2) 朱炳辰主编, 化学反应工程, 化学工业出版社, 北京, 2012; P38

7.18 教学单元十八

7.18.1 教学日期

课程安排：2016-2017学年第二学期

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) “第四章 气固催化反应本征动力学”全章总结。

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（**提问法**）

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（**讲授法**）

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： $A\sigma + B\sigma + \cdots \xrightleftharpoons[k'_s]{k_s} R\sigma + S\sigma + \cdots$

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

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

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 (讲授法)

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 (引导讲授法)

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 (归纳法)

课堂提问:

1、理想吸附模型主要有? 真实吸附模型主要有? 两者区别?

引导学生思考:

1、本征动力学实验的测定如何消除内外扩散的影响。

7.18.5 教学方法

本课程主要采取教学方法: 归纳法、提问法和讲授法

7.18.6 作业安排及课后反思

课后作业：教材P128， 3； P129， 7（下次课前提交）

7.18.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

具体参考教材“第四章 气固催化反应本征动力学”中4.3.2-4.4.5节内容进行讲授，以及相关化学反应工程文献进行准备。

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。

参考材料：

- (1) 陈甘棠，化学反应工程(第三版)，化学工业出版社，北京，1990；P112
- (2) 朱炳辰主编，化学反应工程，化学工业出版社，北京，2012；P37
- (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；P164

7.19 教学单元十九

7.19.1 教学日期

课程安排：2016-2017学年第二学期

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（引导讲授法）

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 (对比讲授法)

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

本课程主要采取教学方法: 讲授法

7.19.6 作业安排及课后反思

课后作业: 教材P157, 2 (下次课前提交)

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

具体参考教材“第五章 气固相催化反应宏观动力学”中5.1节内容进行讲授, 以及相关化学反应工程文献进行准备。

课前引导学生思考:

- 1、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。

参考材料:

- (1) 陈甘棠, 化学反应工程(第三版), 化学工业出版社, 北京, 1990; P117
- (2) 朱炳辰主编, 化学反应工程, 化学工业出版社, 北京, 2012; P43
- (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; P182

7.20 教学单元二十

7.20.1 教学日期

课程安排：2016-2017学年第二学期

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（**提问法**）

- ① 存在内扩散条件下如何研究反应速率？
- ② 效率因子 η 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（**引导讲授法**）

建立球形催化剂的模型，以剥荷花花瓣为实例，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：

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

要求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。

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

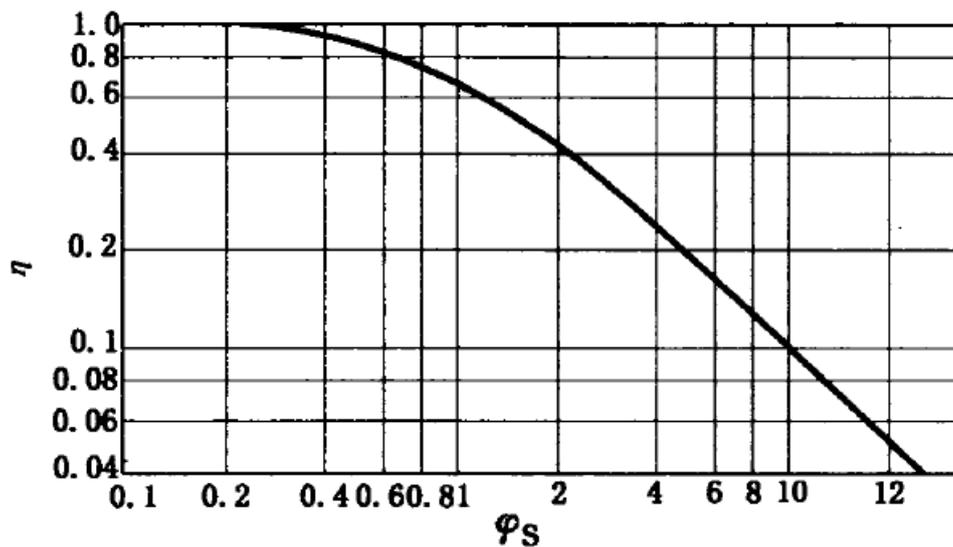


图7-9 效率因子与西勒西勒模数的关系曲线

引导学生思考：

- ① ϕ_s 越小，内扩散阻力越？说明什么过程控制？
- ② ϕ_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（引导讲授法和对比讲授法）

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。

表7-8 对比三种催化剂的西勒模数

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

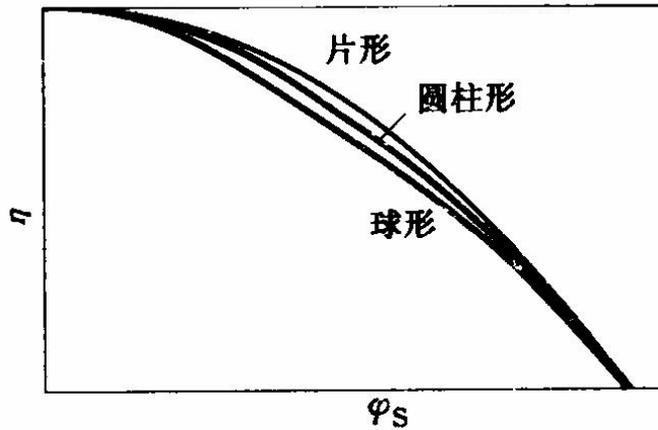


图7-10 η 与 ϕ_s 关系图

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

本课程主要采取教学方法：讲授法和提问法

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。

（下次课前提问）

7.20.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

具体参考教材“第五章 气固相催化反应宏观动力学”中5.2节内容进行讲授，以及相关化学反应工程文献进行准备。

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。

参考材料：

- (1) 陈甘棠, 化学反应工程(第三版), 化学工业出版社, 北京, 1990; P150
- (2) 朱炳辰主编, 化学反应工程, 化学工业出版社, 北京, 2012; P43

7.21 教学单元二十一

7.21.1 教学日期

课程安排：2016-2017学年第二学期

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（**提问法**）
 - 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（**讲授法**）

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：
$$(-R_A) = \frac{S_s}{V_s \sqrt{n}} \sqrt{k_0 D_e} c_{AS}^{\frac{n+1}{2}} \exp\left(\frac{-E}{2RT}\right)$$

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 (讲授法)

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。

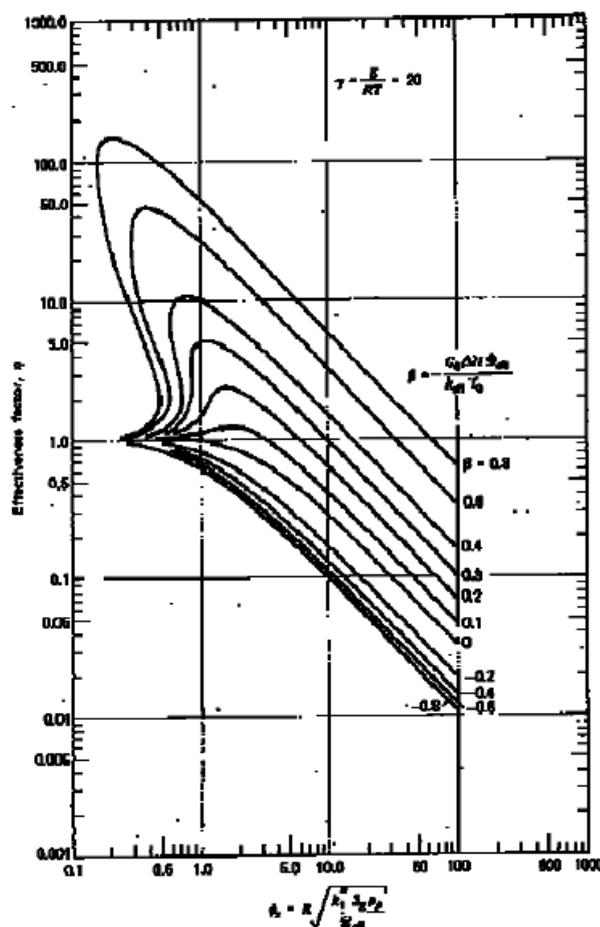


图7-11 非等温条件下球形催化剂 η - ϕ_s 关系

引出对于非等温气固催化反应，效率因子 η 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 (归纳法)

课程之后提问：

- 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？

同时引导学生思考：

- 1、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；
- 2、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。

7.21.5 教学方法

本课程主要采取教学方法：讲授法、归纳法和提问法

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 η 大于1 的原因？吸热反应过程效率因子 η 的取值范围？（下次课前提问）

7.21.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

具体参考教材“第五章 气固相催化反应宏观动力学”中5.3节内容进行讲授，以及相关化学反应工程文献进行准备。

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。

参考材料：

- (1) 陈甘棠，化学反应工程(第三版)，化学工业出版社，北京，1990；P121
- (2) 朱炳辰主编，化学反应工程，化学工业出版社，北京，2012；P35
- (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；P164

7.22 教学单元二十二

7.22.1 教学日期

课程安排：2016-2017学年第二学期

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（引导讲授法）

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 (引导讲授法)

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。

课堂提问：

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。

引导学生思考：

1、回忆并讨论《化工原理》“过滤单元操作”中颗粒床层的性质；

2、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；

3、讨论低雷诺数下和高雷诺数下，如何简化欧根方程；

4、固定床径向传热过程；

5、固定床径向传质的推动力。

7.22.5 教学方法

本课程主要采取教学方法：讲授法

7.22.6 作业安排及课后反思

课后作业：教材 P183, 1 (下次课前提交)

7.22.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

具体参考教材“第六章 气固相催化反应固定床反应器”中6.1节内容进行讲授，以及相关化学反应工程文献进行准备。

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。

参考材料：

(1) 陈甘棠，化学反应工程(第三版)，化学工业出版社，北京，1990；P156

(2) 朱炳辰主编，化学反应工程，化学工业出版社，北京，2012；P138

- (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; P227

7.23 教学单元二十三

7.23.1 教学日期

课程安排：2016-2017学年第二学期

课次/学时：23 /2

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（**提问法**）

- 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？

(1) 固定床反应器的特点（**讲授法**）

(2) 固定床内径向传递（**案例讲授法**）

- 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。

授课过程中课堂提问：

- 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？

7.23.5 教学方法

本课程主要采取教学方法：讲授法和提问法

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。（下次课前提问）

7.23.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

具体参考教材“第六章 气固相催化反应固定床反应器”中6.2.1节内容进行讲授，以及相关化学反应工程文献进行准备。

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。

参考材料：

- (1) 陈甘棠，化学反应工程(第三版)，化学工业出版社，北京，1990；P156
- (2) 朱炳辰主编，化学反应工程，化学工业出版社，北京，2012；P138
- (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；P227

8. 课程要求

根据《反应工程》课程学习要求，以及课程对学生课前课后以及课程学习中具体要求授课教师将更具自己多年来的学习经验总结与同学们交流分享如何学好这门专业核心课，希望能给同学们的学习提供一些启发。

8.1 学生自学要求

8.1.1 课前预习要求

在《反应工程》课程教学过程中，教师可能会忽视课前预习这一环节，从而导致课堂气氛沉闷、学生被动接受、课堂活动难以开展的情况，这严重脱离了以学生为中心的教学理念，笔者认为，要提高课堂效率，让学生真正参与到教学活动中，必须要紧抓预习。本课程教学过程中通过布置灵活多样的预习任务，明确预习的方向，指导学生如何预习，并且建立一套监督检查的策略，让学生养成课前预习的良好习惯，培养学生自主学习的终身学习能力。

课程学生课前预习可以是自己能快速有效的跟上老师的教学思路，事先完成对教科书及其他相关资料的阅读，才能更好的理解老师所讲所做，才能在课堂中提出问题并有效解决问题。

8.1.2 课后复习要求

当代大学生学习自制力不强，课后学习能力不高，学习效果不够理想是各个高校存在的普遍现象，尤其是主干课课程学习课堂，课后学习环节很重要，如果课后不及时复习课上所学内容就很难在学新知识的时候顺利衔接，从而不能获得理想的课堂学习效果，因此，在完善课堂教学效果的同时，如何提高大学生课后学习的能力和效果是每位高校教师应该探讨和力争解决的问题。

遗忘在学习之后立即开始，而且遗忘的进程并不是均匀的。最初遗忘速度很快，以后逐渐缓慢。可见若不及时巩固，在学习后1小时遗忘率可高达55.8%，因此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。

《反应工程》课程在每节课程之后，授课教师将布置学生本次课程相关课后练习题目以及思考问题（具体内容参阅每个教学单元作业安排及课后反思内容部分）。

8.1.3 课堂问题解决方法

遇到问题时，鼓励学生课后多问几个为什么，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。

8.2 课外阅读要求

大学教育给了学生更大的学习空间。其中，进行广泛的课外阅读成了学生的必修课。课外阅读不仅可以使学生开阔视野，增长知识，培养良好的自学能力和阅读能力，还可以进一步巩固学生在课内学到的各种知识，对于提高学生的认读水平和建立主干课知识体系。

苏联著名教育家苏霍姆林斯基说得好：“如果学生的智力生活仅局限于教科书，如果他做完了功课就觉得任务已经完成，那么他是不可能有什么特别爱好的科学的。”我们必须力争“使每一个学生在书籍的世界里有自己的生活”。

学生的知识体系是通过课内外的自主学习而逐渐建立起来的。广泛的课外阅读是学生搜集和汲取知识的一条重要途径。学生从课堂上掌握的知识不是很具体和容易理解，是意识性的知识，需要再消化才会吸收。学生可将自己从课内学到的知识融会到他从课外书籍中所获取的知识渠道中去，相得益彰，形成“立体”的牢固的知识体系。

《反应工程》课程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。

《反应工程》课程具体课外要求如下：

- (1) 督促学生进行与《反应工程》课程相关其他国内外书籍、资料的阅读；
- (2) 进行与《反应工程》课程相关阅读指导，注重学习的时效性；
- (3) 进行与《反应工程》课程相关阅读中指导学生注重方式灵活，注重学生和书籍、文献资料差异；

8.3 课堂讨论要求

课堂讨论这一环节做好了，有利于高质高效的课堂讨论，授课教师在课堂讨论期间做到以下几点：

- (1) 课堂讨论的问题应是有一定难度、共性的问题，课堂讨论前要提前 3~5

分钟分工，让学生充分准备自己要讨论的题目，以保证课堂讨论的充分、高效。

(2) 强调讨论不能停留在表面(只对答案)，要透过“问题”看“本质”，即要理清题目的解题思路、应注意的问题、解题方法及规律、前后知识联系、收获感悟等。

(3) 对重、难点问题要重点展示和讨论，要通过质疑答辩使问题得到彻底解决。

《反应工程》课程课堂讨论关键在于提高教学质量的关键在于落实，达标巩固环节是以落实为主要目的环节，抓实是关键。

(1) 给学生留一定时间对学习提纲进行整理、补充，并由小组长负责检查落实，进行交叉巩固。

(2) 回扣目标，回顾小结。

(3) 进行达标测试或进行相应练习，进一步落实。

(4) 要求学生在学习不到位的内容课后进行及时巩固或布置作业。

8.4 课程实践要求

《反应工程》课程进行中课堂实践中要求学生做到以下几点：

(1) 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，

(2) 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。

(3) 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

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（包括课后补假的同学），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2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，下课铃响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。

9.2 成绩的构成与评分规则说明

根据2016年化学工程与工艺专业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、课后作业、课程报告组成。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；课堂发言主要采用同学主动发言或随机抽点的方式，教师根据题目的难易程度以及回答情况给出等级分数。每一次课后作业根据同学完成情况给出等级分数，该次作业未交者按等级“E”计，补交作业按等级“D”计。课程报告根据同学的完成情况给出等级分数。等级分数与百分制分数换算亦详见下表。

表9-1 等级分数与百分制分数换算

序号	分数	等级
1	98	A+
2	95	A
3	90	A-
4	88	B+
5	85	B
6	80	B-
7	70	C
8	60	D

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

通常情况下，《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

学术诚信最基本的原则是你必须保证你所提交的作业是你自己所做。如果你在完成课时，请教了其他同学、老师，你必须在你的作业中注明。学习小组是非常有益的教育途径。鼓励同学们在完成作业、准备考试时相互之间进行讨论，只要在作业最后注明参考文献、合作者信息（其目的是要感谢他对你的工作所做的贡献），在完成作业时同学之间的相互合作是允许的。未有参考文献说明，逐字照抄其他人的答案或部分答案都是学术欺诈，其他同学对你的答案有贡献但你却未注明就是作弊。课后完成后进行的考试过程中，不得采用不诚实、欺诈或未经认可的任何手段力图通过考试或获取好成绩。学术诚信问题零容忍，学术欺诈或考试作弊行为一经证实，该课程成绩将被判不及格，情节严重者将上报学校。请同学们高度重视学术诚信问题，严格要求自己，遵守四川理工学院相关的管理规范要求。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。

10.1 考试违规与作弊处理

考试作弊、协助他人作弊、杜撰数据信息、抄袭（包括抄袭他人作业、抄袭教辅资料答案）、学术剽窃，这些行为皆视为违反学术诚信，其中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的行为；抄袭是指窃取他人的作品当作自己的，包括完全照抄他人作品和在一定程度上改变其形式或内容的行为。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。

请上课同学高度重视，对自己负责，严格要求自己，遵守四川理工学院相关的管理规范要求。对于学生在《反应工程》课程考试中存在的考试违规和作弊行为，具体将参考学校规定执行处理。

10.2 杜撰数据、信息处理等

学术诚信问题零容忍，学生抄袭或其他欺诈行为一经证实，该课程成绩将被判不及格，情节严重者将上报学校。请同学们高度重视学术诚信问题，对自己负责，严格要求自己，遵守四川理工学院相关的管理规范要求。

10.3 学术剽窃处理等

对于学生在《反应工程》课程学习中存在的学术剽窃行为，具体参考学校规定执行处理。

11. 课堂规范

11.1 课堂纪律

学生在《反应工程》课程进行中应遵守以下规范：

1. 学生必须按时上课，不得无故旷课、迟到或早退。
2. 学生应爱护教室内的一切公物，不得搬走桌椅、不准取走电器设备，损坏公物照价赔偿。
3. 学生上课应有秩序地进入教室，不得抢占座位。应保持教学楼的肃静。
4. 课堂内学生应认真听讲，遵守课堂纪律。下课后应主动安排同学擦黑板。

11.2 课堂礼仪

1. 学生不得穿背心、内裤、拖鞋进教室，不准在教室内抽烟。
2. 学生应自觉保持教室整洁，不得随意吐痰、乱丢果皮、纸屑，严禁在桌椅上刻画。
3. 上课开始，学生班长或课代表应呼起立。

12. 课程资源

12.1 教材与参考书

本课程使用教材：郭锴，唐小恒，周绪美编 冯元鼎主审 . 化学反应工程（第二版）. 北京：化学工业出版社.2013.

本教材主要特色体现如下：

本课程使用教材（化学反应工程（第二版）郭锴，唐小恒，周绪美编）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。

本书为第二版本教材，与第一版教材对比其主要特色体现在：

- (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；
- (4) 基本概念力求清晰、突出基础、淡化专业，着重讲解解决问题的思想方法；
- (5) 突出课程的重点和难点，删除一些与教学大纲联系不十分密切的和重复的内容；
- (6) 由于教学手段的进步，多媒体课件的引入，使得教学进度有所提高。在课时不变的情况下可以介绍更多的内容。为此，增加了流化床反应器一章；
- (7) 增加习题与答案，便于学生学习；
- (8) 提供全书教学用多媒体课件素材。

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;

12.2 专业学术著作

- (1) Smith, J. M., Chemical Engineering Kinetics, 3rd Edition, McGraw-Hill. 1981.
- (2) 时钧, 化学工程手册. 化学工业出版社: 北京, 1996.
- (3) 袁一, 化学工程师手册. 机械工业出版社: 北京, 2000,

12.3 专业刊物

- (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) 浙江大学主办, 高校化学工程学报;
- (3) 中国科学院过程工程研究所主办, 过程工程学报;
- (4) 中国化工信息中心主办, 现代化工;
- (5) 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;
- (6) 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。

12.4 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

为了进一步明确授课教师对师德师风建设应负的责任,努力提高授课教师师德师风建设的整体水平,特向全社会作出公开承诺,全校教职工应在以下八方面履行职责,承担教育责任。

1、实行师德师风建设目标管理责任制,授课教师都应严格执行学校关于加强师德师风建设的各项规定,身正为范,以德立身。

2、切实提高依法执教的法制意识,全校教职工都要自觉学法、知法、守法,用《教师法》、《教育法》、等有关政策法规规范自己的教学工作。

3、坚持开展以德立身,教学为本,情感育人的师德自律教育,铸师魂,修师德,练师能,内强素质,外树形象。

4、模范遵守社会公德。为人师表,衣着整洁得体,语言规范健康,举止文明礼貌,以自身的良好形象教育引导学生,

5、尊重、爱护和信任学生,爱心育人,尊重学生人格,对学生不讽刺,不挖苦,不辱骂,杜绝体罚和变相体罚行为。

6、注重提高教育教学效果。爱生敬业,勤奋工作,备好每一篇教案,上好每一堂课,批好每一次作业,与学生谈好每一次话,以自己辛勤的劳动换取每一位学生的成功。

7、严格执行有关教育法规。不搞有偿家教,不向家长索要或暗示馈赠钱物,不参与黄、赌、毒及一切封建迷信活动,教师不得请学生代批作业、试卷,代写学生成绩册和评语等。

8、自觉抓好自查自纠,围绕师德师风建设问题,定期进行自我对照,自我检查,自我整改,主动听取接受学生家长、学校行风监督员等各方面的批评与建议,自觉置于社会的监督之下。

以上八条,特向学校和上课学生作出公开承诺,如有违法违纪,授课教师将接受学校处罚,同时敬请学生、学校、行风监督员积极配合、支持,共同落实以上承诺。

13.2 阅读课程实施大纲,理解其内容

本课程实施大纲主要是面向学生，以学习为中心，确保课程的每一个方面都能为学生的学习提供最为有效的支持。

上课同学应该认真阅读本课程实施大纲，明确本大纲具体的教学以及规范内容，同时遵守课程实施大纲当中所确定的责任与义务。

13.3 同意遵守课程实施大纲中阐述的标准和期望

- 1 我已阅读课程实施大纲并理解其内容；
- 2 我同意遵守课程实施大纲中阐述的标准和期望；
- 3 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、课堂范等。

签名：

日期：

（备注：课程合作协议请签名并返还给授课教师。）

14. 其他说明

如果上课同学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。