

## 《能源化学工程专业综合实验》课程教学大纲

英文课程名	Special Experiments of energy resources		总学时	48	学 分	1.5	
课程编码	G401031		理论教学学时	48	适用专业	能源化工	
课程类别 (请注明选修或必修)	通识课程		实践教学学时	实验学时	48	先修课程	化学基础实验、专业基础实验等
	大类基础课程			上机学时	无		
	专业基础及专业课程	必修		其它	无	开课学院(部)	化学工程学院

### 一、课程简介

此课程是针对能源化工专业的本科专业必修课，是能源化工专业实践教学的重要环节，以化学反应工程、化工热力学、分离工程等理论课为基础。本课程通过实验使学生加深对所学知识的感性认识，是一门综合性强、内容广泛和工程实用性强的实验课程，是在完成化学基础实验、专业基础实验、无机化学、分析化学、有机化学、物理化学等专业基础课程之后所进行的一门专业综合实验课程。

### 二、教学目标

#### 2.1 课程教学目标

目的是培养能源化工专业学生的科学实践能力，掌握能源与环境技术相关的科学实验方法和相关实验设备的熟练操作，巩固专业知识的重要环节。在实验的过程中，在观察能力、分析能力、操作能力、思维能力、创造能力、写作能力和组织能力得到全面的锻炼。

**课程目标 1:** 课堂教学主要结合先修课程，讲解实验基本原理和主要操作步骤，使同学们更好地理解 and 巩固专业知识的基本方

法。

**课程目标 2:** 增加课外资料的查询，以培养同学们文献检索的能力和自主学习的意识、自主学习的能力和抓住要点的能力。

### 三、课程教学内容及学时分配

#### 1. 理论教学安排

序号	章节或知识模块	教学内容	学时分配	能力培养教学要求	素质培养教学要求	学生任务		
						作业要求	自学要求	讨论
1	风力发电机组叶片的优化	1.了解型风力发电机的主要构造和基本工作原理。 2.了解风速对叶片模型风力发电机功率的影响。 3.了解叶片得不同参数对叶片模型风力发电机功率的影响。	2	掌握相关信息 熟悉实验操作 巩固专业知识	提高观察能力、分析能力、操作能力、思维能力、创造能力、写作能力和组织能力	整理实验数据，撰写实验报告，总结相关知识	查阅相关文献，预习实验，撰写预习报告	组内讨论 实验中遇到的问题
2	潮汐能发电模型	1.了解型潮汐发电机的主要构造和基本工作原理。 2.了解潮汐参数对叶片模型风力发电机功率的影响。	2	掌握相关信息 熟悉实验操作 巩固专业知识	提高观察能力、分析能力、操作能力、思维能力、创造能力、写作能力和组织能力	整理实验数据，撰写实验报告，总结相关知识	查阅相关文献，预习实验，撰写预习报告	组内讨论 实验中遇到的问题
3	沉淀法制备氧化铝催化剂	1.掌握催化剂的制备方法及原理。 2.掌握催化剂成型的方法。	4	掌握相关信息 熟悉实验操作 巩固专业知识	提高观察能力、分析能力、操作能力、思维能力、创造能力、写作能力和组织能力	整理实验数据，撰写实验报告，总结相关知识	查阅相关文献，预习实验，撰写预习报告	组内讨论 实验中遇到的问题
4	质子膜燃料电池性能评价	1.熟悉和掌握燃料电池电极催化剂活性的评价方法。 2.掌握燃料电池评价装置的设备结构、操作原理和使用方法。 3.了解电流密度、反应时间等反应条件对电池电压的影响。	4	掌握相关信息 熟悉实验操作 巩固专业知识	提高观察能力、分析能力、操作能力、思维能力、创造能力、写作能力和组织能力	整理实验数据，撰写实验报告，总结相关知识	查阅相关文献，预习实验，撰写预习报告	组内讨论 实验中遇到的问题

5	甲醛的光催化降解	1.掌握气相光催化系统的设备结构、操作原理和使用方法。 2.熟悉和掌握二氧化钛光催化降解甲醛的活性评价方法。	4	掌握相关信息 熟悉实验操作 巩固专业知识	提高观察能力、 分析能力、操作 能力、思维能力、 创造能力、写作 能力和组织能力	整理实验数 据,撰写实验 报告,总结相 关知识	查阅相关 文献,预习 实验,撰写 预习报告	组内讨论 实验中遇 到的问题
6	NH <sub>3</sub> -SCR 催化剂性能 评价	1.了解 NH <sub>3</sub> -SCR 选择性催化还原实验的反应过程和反应机理、特点。 2.学习气固相管式催化反应器的构造、原理和使用方法。 3.学习对实验体系物料衡算,计算 NO 转化率。	4	掌握相关信息 熟悉实验操作 巩固专业知识	提高观察能力、 分析能力、操作 能力、思维能力、 创造能力、写作 能力和组织能力	整理实验数 据,撰写实验 报告,总结相 关知识	查阅相关 文献,预习 实验,撰写 预习报告	组内讨论 实验中遇 到的问题
7	费托催化剂 性能评价	1.了解费托合成催化剂的制备。 2.了解催化剂活性评价装置的结构。 3.掌握固定床反应器中的催化剂装填方法和活性评价方法。 4.掌握费托合成反应产物的收集和分离方法。 5.掌握反应产物的分析方法掌握固体催化剂评价装置的设备结构、操作原理和使用方法。	4	掌握相关信息 熟悉实验操作 巩固专业知识	提高观察能力、 分析能力、操作 能力、思维能力、 创造能力、写作 能力和组织能力	整理实验数 据,撰写实验 报告,总结相 关知识	查阅相关 文献,预习 实验,撰写 预习报告	组内讨论 实验中遇 到的问题
8	太阳能电池 性能测试	1.了解太阳能电池的基本构造、及其评价标准。 2.掌握太阳能电池评价装置的设备结构、操作原理和使用方法。	4	掌握相关信息 熟悉实验操作 巩固专业知识	提高观察能力、 分析能力、操作 能力、思维能力、 创造能力、写作 能力和组织能力	整理实验数 据,撰写实验 报告,总结相 关知识	查阅相关 文献,预习 实验,撰写 预习报告	组内讨论 实验中遇 到的问题
9	甲烷的催化 燃烧	1.熟悉甲烷催化燃烧的设备结构、操作原理和使用方法。 2.掌握气固相反应装置的催化剂活性评价方法。	4	掌握相关信息 熟悉实验操作 巩固专业知识	提高观察能力、 分析能力、操作 能力、思维能力、 创造能力、写作 能力和组织能力	整理实验数 据,撰写实验 报告,总结相 关知识	查阅相关 文献,预习 实验,撰写 预习报告	组内讨论 实验中遇 到的问题

#### 四、考核方式及成绩评定方式 (请明确教学过程考核、期末考核方式,平时成绩、期末考核成绩占总成绩比例)

1.实验报告:按照《本科实验报告》(能源专业实验)内容、格式的要求书写。

本实验课考核以平时成绩+报告成绩形式,考勤、实验态度和操作、预习报告、实验报告占成绩比例为10%、25%、25%、40%。

## 五、教材、课程网址及参考书目

教材:《能源专业综合实验》(化工学院自印)

- 参考书:【1】邵志刚,衣宝廉,韩明.可逆式再生氢氧燃料电池初步研究.电化学.1998,4(4):444-448
- 【2】齐文刚,邹丽霞.光催化降解甲醛废气的研究.应用化工.2005,34(9):565-567
- 【3】宋丽云,何洪等.多孔  $V_2O_5/Ti_xSi_{1-x}Ce_{0.025}O_{2.05}$  催化剂的合成及其  $NH_3$ -SCR 性能.合成化学.2014,22(3):317-321
- 【4】中国石油集团经济技术研究院,《2013年国内外油气行业发展报告》
- 【5】金鑫,朱梅琴,陈咏梅.沉淀法制备的水合氧化铝在不同温度下的晶相变化.中国材料科技与设备.2013,9(2):28-30
- 【6】张希良.风能开发利用[M].北京:化学工业出版社,2005.
- 【7】元新华,谷永庆,王红娟.甲烷催化燃烧催化剂研究进展.天然气工业.2007,27(2):125-127

执笔者:朱秋莲

课程教学团队成员:张泽凯、朱秋莲

审核者:卢晗锋

---

## 实验 7 费托反应催化剂性能评价

自上世纪五十年代开始，通过石油加工生产的液态燃料成为社会运行的主要能源，然而石油贮量有限，不能保证液态燃料的长期供给，这个问题在我国显得更为突出。2013 年我国石油净进口量约为 2.82 亿吨，对外依存度高达 58.1%<sup>[1]</sup>，超过 50% 的“国际警戒线”，迫切需要发展新的液态燃料生产路线，以消除国家能源安全面临的巨大威胁。目前，世界上正在研究、开发多种可以替代石油来生产液态燃料的技术，其中的费托合成工艺，因其原料来源广泛、产品清洁的特点，成为首选的生产替代燃料的技术手段。

### （一）实验目的

1. 了解费托合成催化剂的制备。
2. 了解催化剂活性评价装置的结构。
3. 掌握固定床反应器中的催化剂装填方法和活性评价方法。
4. 掌握费托合成反应产物的收集、分离和分析方法。

### （二）实验原理

费托合成工艺是指将煤、天然气、生物质等含碳资源先转化为合成气（CO 和 H<sub>2</sub> 的混合物），再将合成气在催化剂上聚合为气、液和固态烃的过程<sup>[2,3]</sup>，其中合成气转变为烃的反应被称为费托合成反应（Fischer-Tropsch synthesis），它在 1925 年就被工业化了。式（I）是对费托合成反应的概括表示，还存在如式（II）所示的水汽变换副反应（Water-gas shift reaction）。反应产物是由不同碳链长度的烷烃和烯烃构成的混合物，产物组成与碳链增长几率（ $\alpha$ ）间的关系通常可用式（III）来表达。



$$\ln X_i = \ln (1-\alpha) + (i-1)\ln \alpha \quad (\text{III})$$

从费托合成催化剂的发展历史来看，只有铁系和钴系催化剂实现了工业化应用；从费托合成反应器的发展历史来看，流化床、固定床和浆态床都获得了工业应用。图 1 是常用的费托反应器结构示意图及其生产能力，在实验室研究阶段，采用固定床反应器可以对催化剂进行快速筛选。

### LTFT, 200-250°C

- \* 3-phase system: gas-liquid-solid
- \*  $\alpha = 0.85 - 0.95$
- \* products: wax, diesel, naphta
- \* Catalysts: supported cobalt or precipitated iron



Slurry bubble column  
24000 b/d



Multitubular fixed bed  
6000 b/d

### HTFT, 320-350°C

- \* 2-phase system: gas-solid
- \*  $\alpha = 0.70 - 0.75$
- \* products: petrol, chemicals
- \* Catalysts: fused iron, K-promoted



Circulating fluid bed  
7000 b/d



Fixed fluid bed  
20000 b/d

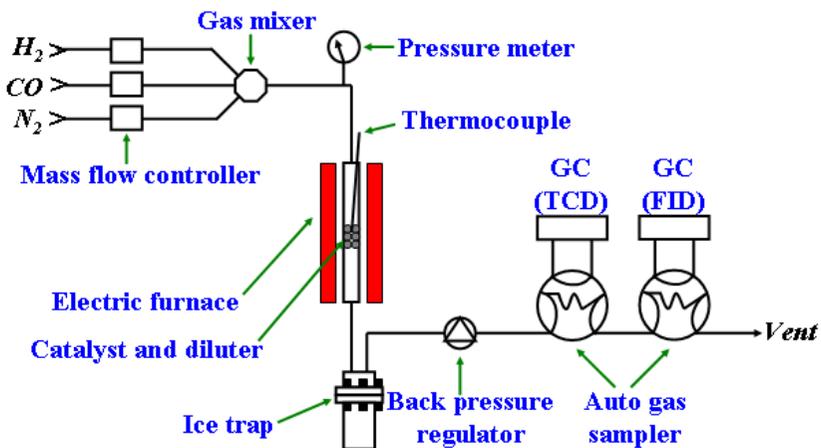
催化剂的研发是 F-T 合成产业化的关键技术之一。研究广泛且具有实际应用价值的主要是 Fe、Co 基催化剂。

本实验通过气相色谱分析产物中的碳氢化合物浓度，计算产物的分布、收率和选择性。

### (三) 实验药品、仪器及流程图

仪器：微型固定床反应器、气相色谱。

药品：硝酸锌、硝酸铁、碳酸铵、 $\text{SiO}_2$ 、空气、 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{N}_2$ 。



实验用反应装置框图

### (四) 实验步骤

1. 制备催化剂

A. 沉淀单元操作。分别配制硝酸锌和碳酸铵水溶液，分别采用正加法（将沉淀剂滴加到母盐溶液中）和反加法（将母盐溶液滴加到沉淀剂中）生成沉淀，采用抽滤方法分离沉淀，再用去离子水洗涤、然后抽滤，重复两次；将沉淀放进烘箱干燥。

B. 等体积浸渍单元操作。采用  $\text{SiO}_2$  作载体，配制硝酸铁水溶液，浸渍 2 h 后，放入烘箱干燥，再放入马弗炉焙烧。

## 2. 催化剂活性评价

A. 装填催化剂。催化剂的评价在固定床装置上进行，先准备好催化剂，然后用量筒量取催化剂 1ml，在电子天平上称重并记录，然后与石英砂以 2:1 体积比稀释。从装置上拆下反应管，在反应管中部装填催化剂的区域地步放入少量石英棉，将稀释好的催化剂缓慢、全部加入到反应器中，并轻微震动，然后记录催化剂高度，确定催化剂在反应器内的装填高度。

B. 安装反应器。将合成气、 $\text{H}_2$  钢瓶与流量计连接好，并装好各配件，连好尾气出口。反应管放入加热炉，连接原料气的进口，夹上磨口夹。尾气与气相色谱相连，反应后气体通过气相色谱仪进行分析。

C. 还原。采用气敏探测器检查气密性后，升温还原。

D. 反应。升压后，采用气敏探测器检查气密性后，升温反应。

E. 尾气分析。启动气相色谱，调用分析程序，运行 20 min 至基线平衡，对反应尾气中的永久气体进行在线分析。

F. 数据处理。

## 3. 停止反应

A. 关闭加热电源后，关闭气体钢瓶，再通过背压阀泄压。

B. 关闭气相色谱电源的加热电源后，待温度降至常温后，再依次关闭电源和载气。

## 4. 清理反应管

A. 关闭反应管上游的各进气阀后，将反应管从反应装置上拆卸下来。

B. 打开反应管两端的变径螺帽，收集其中的反应后催化剂，然后清洗反应管，再放入烘箱干燥备用。

## （五）实验数据记录与处理

保留时间					CO 转化	$\text{CH}_4$ 选	$\text{CO}_2$ 选
------	--	--	--	--	-------	-----------------	-----------------

反应时间 (h)	N <sub>2</sub> 峰 面积	CO 峰 面积	CH <sub>4</sub> 峰 面积	CO <sub>2</sub> 峰 面积	率(%)	择 性(%)	择 性( )

### (六) 思考题

1. 用于衡量催化剂反应性能的指标有哪些？
2. 沉淀操作有正加法、反加法和并流法，它们对所生成的沉淀粒度各有什么影响？
3. 利用气相色谱分析未知混合气体时，如何保证获得相应数量的色谱峰？如何对各个峰进行归属？

### 参考文献

1. 中国石油集团经济技术研究院，《2013 年国内外油气行业发展报告》.
2. A. C. Vosloo, Fuel Process. Technol. 71(2001)149.
3. B. H. Davis, Catal. Today 84(2003)83.
4. F.G. Botes, J.W. Niemantsverdriet, J. van de Loosdrecht, Catal. Today 215 (2013) 112.