

•专题•

doi: 10.3866/PKU.DXHX202004093

www.dxhx.pku.edu.cn

面向化学专业的催化化学教学的探索与实践

张东风*

北京航空航天大学化学学院, 北京 100191

摘要: 催化化学与多门课程(如无机化学、有机化学、物理化学等)相互渗透, 是一门综合性和应用性很强的课程。针对课程难度大、学生学习积极性不高的问题, 我们提出构建具有学科特色的催化化学知识体系, 设计凸显学生主体的教学模式等手段来激发学生的学习兴趣, 突出培养学生的学科创新思维能力, 体现理论与实践相结合的教学特色。

关键词: 催化化学; 学科特色; 学科思维; 理论结合实践

中图分类号: G64; O6

Exploration and Practice in Catalytic Chemistry Teaching for Chemistry Majors

Dongfeng Zhang *

School of Chemistry, Beihang University, Beijing 100191, P. R. China.

Abstract: Catalytic chemistry is a subject with strong requirements for comprehension and application, which has overlap and interconnection with several subjects such as inorganic chemistry, organic chemistry and physical chemistry. To promote the students' enthusiasm in learning and improve their professionalism, we put forward to construct subject-oriented knowledge system and design student-centered teaching mode. The aim is to stimulate the study enthusiasm among the students and to endow students with creative- and analytical-thinking. The distinct teaching feature is the combination of theory and practice.

Key Words: Catalytic chemistry; Subject-orientation; Subject thinking; Theory and practice

现代人类面临的许多问题, 如能源、自然资源的开发及环境污染等问题的解决都部分地依赖于催化过程。催化与化学、生物、材料及环境等学科的交叉越来越广泛, 无论是在实验室的科学研究过程中, 还是在实际的工业生产过程中, 都会遇到各种催化反应问题。催化化学课程的开设对于实现创新型、复合型高素质专业人才的培养目标具有重要意义, 已成为许多高校化学化工类专业的必修课程^[1]。

催化化学课程以催化作用的基本规律、几类重要催化剂的催化原理及催化剂和催化过程中的常见表征技术和性能评价方法等为主要的教学内容。从课程知识体系角度来讲, 催化化学课程与多门课程的知识点相互渗透, 具有知识点覆盖面广、实践性强, 课程难度大的特点^[1-3]。为了提升教学效果, 教师采取的教改措施主要包括充分利用多媒体教学动画形式^[2]、引入最新科研成果^[3]、优化的考核方式及分组教学^[1]等。这些措施对于激发学生的学习兴趣发挥了一定的作用。然而, 课程知识点

收稿: 2020-04-22; 录用: 2020-05-20; 网络发表: 2020-05-27

*通讯作者, Email: dfzhang@buaa.edu.cn

繁杂的问题还没有从根本上得到解决,因而也无法在有限的学时范围内保证教学效果。案例教学法(case-based learning, CBL)是以教学目标为导向,教师组织学生对相关事例进行搜集、分析、讨论、总结等的一系列教学活动,以达到以理释例或由例获理的教学目的^[4]。该方法的突出优点是情境性强,有助于培养学生分析问题、解决问题的能力及思维方法^[5,6]。根据本校化学专业的培养方案,结合笔者多年的教学经验,笔者在教学过程中进行了探索和实践,主要是在充分了解学生专业知识背景的基础上,对教学内容进行科学整合,简化本专业学生已学知识点,引入既可以反映本学科研究前沿又针对课程基础知识进行综合应用的案例分析,使课程具有鲜明的学科特色,构建以催化规律为主线的知识网络,并在教学过程中突出学生的主体地位,有效地激发了学生的学习兴趣,拓展学生的学科视野,从而实现“将理论知识和应用研究有机结合,利用催化化学所学的知识分析与解决在学习和实际科研工作中所遇到的问题,培养学生学科创新思维”的教学目标。

1 科学构架,整合教学内容

催化化学的授课对象一般是大学三年级的学生。对于化学专业的学生来讲,这个阶段已对本专业的基础课程如无机化学、有机化学、物理化学及分析化学等在内的四大化学进行了系统学习,一部分学生已经有了开展科研项目的经验,也有一部分学生正在确立科研兴趣,打算着手科研实验。针对大三年级学生的知识背景和学业特点,教师对教学内容要进行科学整合,既要在保持课程系统性的基础上化繁为简,避免重复教学;又要建立主线思维,将零散的知识点整合成知识网络,培养学生的学科思维习惯;还要以学生的兴趣为导向对教学内容添故更新,拓展视野,实现利用催化化学所学的知识分析与解决在学习和实际科研工作中所遇到的问题的教学目标。具体涉及的章节及知识点如图1所示。

涉及章节	整合知识点
催化剂和催化作用基本知识	精简: 催化作用的特征(无机化学已学内容) 增新: 催化剂及催化作用相关测试手段
酸、碱催化剂及其催化作用	精简: 酸碱定义(无机化学已学内容)、正碳离子反应规律(有机化学所学内容) 增新: 酸碱催化剂的研究进展及其应用(学生参与)
金属催化剂及其催化作用	增新: 工业催化与实验室研究的联系与区别 金属催化剂在能源领域应用的前沿案例(学生参与)
过渡金属氧(硫)化物催化剂及其催化作用	精简: 晶体场理论(无机化学已学内容) 增新: 半导体催化剂前沿研究案例(学生参与)
络合催化剂及其催化作用	精简: 配位场理论(无机化学已学内容);反应物的活化和络合催化剂的调变(注重与无机化学所学相关内容如配合物的形成及其稳定性进行相互联系)

图1 教学内容整合所涉及的教材章节及知识点

1.1 提纲挈领,精简教学内容

四大化学已系统地讲授了化学热力学、化学动力学、化学键理论及四大化学平衡等方面的基础知识。这些知识既是学习催化化学的基础,也与催化化学的相关教学内容交叉融合。比如,催化作用的几大基本特征的本质建立在化学热力学原理之上,这部分内容在无机化学中已经学习过;固体酸催化剂表面酸性质的测定中所用到的Hammett指示剂的胺滴定法源于分析化学中的酸碱指示剂滴定原理;多相酸碱催化中的正碳离子的形成及反应规律在有机化学教学中有过较为全面的讲授;络

合物催化剂一章中关于反应物的活化及催化性能的调变涉及无机化学中配合物的形成及配位键强弱的影响因素部分的内容；半导体催化剂及络合物催化剂中关于晶体场的影响涉及到的晶体场理论的相关内容在无机化学中进行过深入的学习。因此在设置教学内容的时候，既要融汇知识背景，注重由学生熟悉的内容为切入点，使课程讲授由浅入深，又要对已经学过的知识点提纲挈领，避免重复教学，并注重与催化原理的相关内容进行关联，加深学生对于基础知识应用的融会贯通能力。

1.2 主线思维，构架知识网络

有关催化的教材一般基于催化机理按照催化剂类别(如酸碱催化剂、金属催化剂、半导体催化剂、络合催化剂)划分课程内容。这样可以使学生对催化反应过程中涉及到的几大机理有一个清晰的认识。教师在组织教学的过程中要善于总结共性规律，培养学生的整体学科思维。对于化学专业的学生，已经建立了系统的元素周期观，对于元素的价电子构型也有了较为深刻的认识。教师在教学过程中要按照催化作用过程的基本规律(即催化剂结构特征-催化剂/反应物作用方式-反应物的活化(过渡态中间体)-催化性能-催化剂性能调变)作为主线组织教学，通过建立“结构决定性质”的思维导图将不同的催化剂相互联系起来，构架催化剂和催化作用的整体化知识网络，加深学生对于催化化学课程的深层次理解和辨析能力，培养学生的系统学科思维方式。

1.3 充实案例，强化综合应用

大学三年级的学生刚刚或正要开始接触科研项目，对于科研发展前沿有着浓厚的兴趣。而催化与当前化学专业的科研热点如纳米材料、能源转化与存储及污染治理等领域都密切相关。这一方面使得催化领域时刻会有新鲜的血液注入，但另一方面也使得催化领域的相关内容更新换代速度特别快。因此，教科书中的案例往往由于更新不及时，相对陈旧。2018年11月，教育部高等教育司司长吴岩在第十一届“中国大学教学论坛”上提出“金课”的标准是“两性一度”，即高阶性、创新性、挑战度。“高阶性”的目标是“培养学生解决复杂问题的综合能力 and 高级思维”，这也是催化化学的教学目标之一。教师可结合学生的科研兴趣，在了解相关领域研究前沿的基础上，增加一些新颖的催化剂应用案例。但是在案例的选取方面要下足功夫，不能仅仅反映前沿性，还必须注重催化基础知识的综合应用性。对于笔者所在的北京航空航天大学化学学院来讲，纳米材料及先进能源材料是非常重要的专业方向。因此，笔者在教学过程中注重选取与能源转化相关的纳米催化剂作为实例。比如，在讲到金属催化剂一章时，笔者选取了具有不同暴露晶面的Pd^[7]和Pt₃Ni^[8]纳米催化剂作为代表性事例。通过这两个事例的讲解，使学生对之前所学的催化知识，如催化剂表面不均匀性对催化性能的影响、化学吸附态的确定、催化机理的推测及其催化剂表面微结构的最新测试技术有了一个全方位的、系统的认识。通过前沿案例教学，不仅开拓了学生视野，更重要的是使基础知识点情景化，理清了学生的思路，加深了学生学以致用能力，常常有学生在课后就其科研项目中遇到的问题与老师进行讨论。此外，与自身科研方向的关联性也更有效地激发了学生的学习兴趣。图2以事例1为例，展示了引入的事例1与基础知识点及学生素养培养之间的相互联系框图。

学习的终极目标是应用，催化化学的学习目的不仅在于培养顶尖的科研人才，还在于培养优秀的应用型专业技术复合人才。因此，在教学过程中，不仅要选取科研案例，也要选取合适的工业催化案例。在工业案例的分析中，不仅要注重于基础知识的应用，更要注重引导学生了解工业生产过程与实验室实验的区别与联系，有意识地培养学生的工程思维，使学生学会综合考虑某一技术的可行性，生产过程的安全性和经济性，使培养的学生更符合社会需求。比如，学生早在中学的学习中就已经了解到由氮气和氢气合成氨所用的催化剂是铁单质。在基础的理论学习中这仅仅是一个非常简单的化学反应方程式。而在工业生产过程中，却需要考虑多方面的因素。1) 因为金属铁非常容易氧化，所以在工业生产中并不直接以金属铁作为催化剂原料，而是以磁铁矿(Fe₃O₄)作为原料，通过反应过程中氢气对Fe₃O₄的还原得到金属铁；2) 在高温高压的生产条件下，金属铁微晶非常容易发生融合长大。然而，为了达到好的催化效果和高的原子利用率，对于铁微晶的尺寸有要求。为了防止铁微晶在生产过程中长大，在实际的工业生产过程中需要加入适量的Al₂O₃，与部分Fe生成高熔

点且难还原的 FeAl_2O_4 来隔开Fe微晶,阻止其烧结;同时还需要加入一定量的CaO来降低 Al_2O_3 与磁铁矿的熔融温度;3) Fe的 d 带空穴数(2.2)小于合成氨反应中所需要转移的电子数(3),为了进一步提高催化活性还需要进一步降低Fe的逸出功,这就需要加入一些电子型的助催化剂比如 K_2O ;而为了使 K^+ 分布更均匀,还需要加入一定量的 SiO_2 作为助催化剂。此外,为了满足生产过程的流体力学条件,除了温度、压力之外对于原料的加料速度也有具体的要求。总之,通过多个工业生产实例的讲解,可以使学生对实际工业生产的要求以及基础理论原理与实际工业生产要求的差距有一个较为全面而深刻的认识。

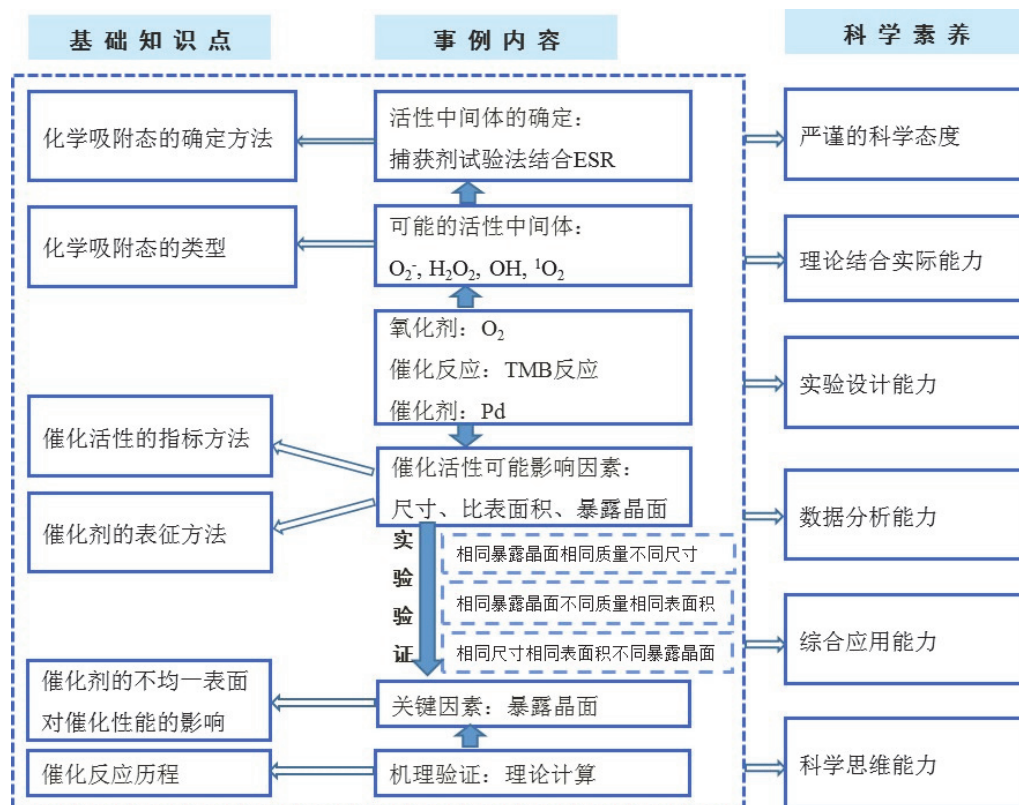


图2 引入的前沿研究事例1与基础知识点及学生素养培养之间的相互联系框图

2 精心设计, 凸显学生主体性

课程教学由“以教师为中心”向“以学生为中心”转变是课程改革的必然趋势,也是实现课程“两性一度”的基本保证。笔者在教学过程中,主要从以下几个方面来凸显学生的主体地位:1) 在课程讲授环节,注重利用启发式教学,引导学生参与到数据分析过程,使教学从学生被动接受知识向主动思考转变,提高学生分析问题、解决问题的能力;2) 在基础知识的教学内容基础上,就某些跟专业密切相关的开放型、创新型课题,如:环境催化、新能源催化等开展教师引导、学生主导的分组式教学,通过组织学生查阅资料、总结讨论、撰写报告、课堂汇报等多个环节,增强学生的自主学习能力,提升学生的融会贯通能力及理论结合实际能力;3) 教学模式上,在传统课堂的基础上合理引入智慧课堂,有效增强师生互动,进一步提高学生的参与度。

2.1 课堂教学引导, 培养科研思维

实验数据分析总结对于培养学生自主实验设计能力、发展科研逻辑思维能力、提高学生的分析问题、解决问题能力有着十分重要的作用。为了实现这方面的目标,笔者积极采用案例教学(CBL)模式,通过引入创新的科研案例,提出问题、反向设计、实验验证,有效引导学生的科研思维。下面

我们以学习催化剂与载体之间的相互作用对于催化性能影响作为一个实例。首先，教师在讲授基础知识的基础上提出一个问题：其他因素会不会对判定载体—催化剂相互作用造成干扰？如何甄别？然后给出在不同温度下制备 TiO_2 负载的不同种类的贵金属催化剂对 CO 和 H_2 的吸附数据表，而后按照图3所示的方式，首先引导学生对数据表进行规律总结。大部分学生能得出以下结论：无论对于何种催化剂，经高温($500\text{ }^\circ\text{C}$)还原制备的催化剂总要比低温($200\text{ }^\circ\text{C}$)还原制备的催化剂对 CO 和 H_2 的吸附能力弱很多。在学生的疑惑过程中进一步提出问题：可能的原因是什么？同学们经过思考，有的认为是由于不同温度制备的催化剂颗粒大小不同，高温制备的催化剂粒径可能大于低温制备的催化剂，因而比表面积较小、吸附量较少；也有的学生说可能是由于不同温度制备的催化剂与载体相互作用强弱不同而造成的。在肯定学生们想法的基础上，接着引导学生回忆如何通过之前学习的实验手段判断原因，从而进一步要求学生设计实验来证明。通过在课程中多次引入诸如CBL之类的教学环节设计，有效培养学生分析问题、解决问题的能力的同时，也使学生形成严谨的科研思维习惯。

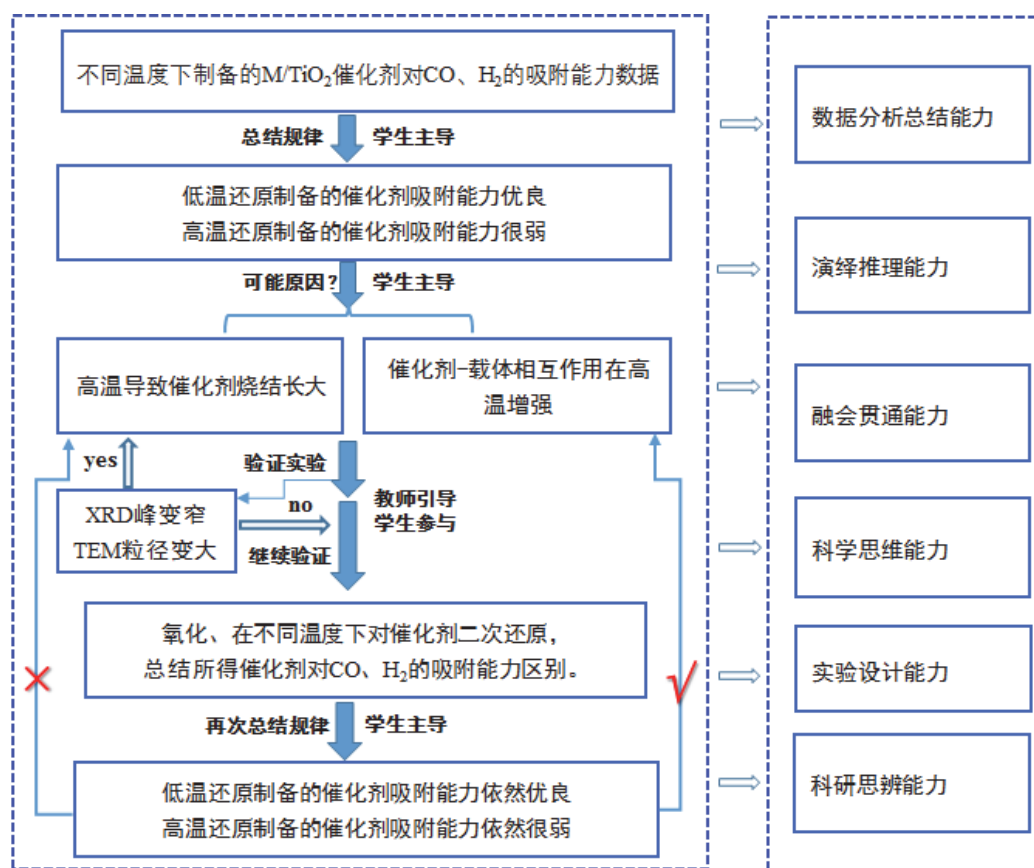


图3 科研应用创新思维导向的、以学生为主体的课堂教学设计示意图

2.2 科研应用导向，强化实践能力

纳米催化剂在能源及环境领域的应用是北京航空航天大学化学学院的重要专业方向，也是目前科研前沿领域的热点之一，学生对该领域的研究具有较为浓厚的兴趣。针对学生的专业背景，笔者除了注重在教学过程中引入相关前沿研究案例之外，还针对环境催化和能源催化展开以学生为主体的专题分组学习。在专题讨论中，由教师确定主题，学生按照自己的兴趣或研究方向自行设定题目，进行专题报告。在布置专题报告的过程中，为了进一步强化以催化规律为主线的学科思维，避免报告流于简单的文献汇报，笔者对专题报告的组成做了具体的要求。要求专题报告必须包括以下几个

部分: 1) 应用背景; 2) 催化主反应; 3) 催化剂组成; 4) 催化机理; 5) 催化剂的结构和组成对催化性能的影响规律; 6) 研究中用到的分析测试方法及所起作用; 7) 结论; 8) 收获及存在的疑问。要达到要求, 学生在撰写报告过程中, 要查阅一定数量的文献, 通过在阅读中思考和总结, 与所学知识进行关联, 增强了学生的融会贯通能力和理论联系实践能力。报告写好后, 按小组进行分组汇报答辩。在答辩环节, 每一小组推荐一名成员和老师共同作为评委, 一方面对各小组的课题展示质量打分, 另一方面对其他小组学生的提问质量进行打分, 以此激励学生在其他小组课题展示过程中的积极思考, 更好地促进全员参与。总的来说, 对应用性的内容通过专题汇报的形式学习, 不仅加强了学生将基础知识应用到实际问题解决过程的理论联系实践能力, 提高了学生的综合应用分析能力和团队协作能力, 还有效地激发了学生的学习兴趣, 开阔了学生的眼界。

2.3 丰富教学模式, 促进有效互动

在课堂讲授中, 我们充分利用多媒体丰富的教学手段, 通过图片、动画等形式对抽象的知识, 如多相催化的基本步骤、分子筛的择型催化机理、催化剂表面的不均一性以及反应物的活化等内容进行直观、形象的演示, 化抽象为具体, 以此来增强课程的趣味性。除此之外, 我们还将智慧课堂引入到教学中。笔者选用的智慧课堂教学平台是由学堂在线与清华大学共同研发的雨课堂。使用雨课堂, 无需安装额外的APP, 对教师来说体现为PowerPoint的一个插件, 对学生来说只需要用微信扫一扫即可加入课堂, 使用起来非常方便。在教学过程中, 教师可以针对重要知识点即时安排练习题, 学生可以通过弹幕的方式对不懂的知识点及时提问, 或者对相关知识点对应PPT标注“不懂”, 这都有助于教师及时了解学生对教学内容的掌握程度及学习难点, 从而有针对性地对相关内容进行重点讲解。

3 结论

针对催化化学的课程特点和化学专业学生的知识基础和学科背景, 提出从课程内容整合、强化学生主体等方面进行教学改革, 建设具有学科特色的催化化学知识体系, 切实有效地激发学生的学习兴趣, 提高学生的综合实践能力, 培养学生的学科思维能力, 开阔学生的视野, 充分发挥催化化学交叉学科的作用, 为培养创新型、复合型高素质专业人才做出切实贡献。

参 考 文 献

- [1] 李平, 陆馨, 段学志, 徐晶, 韩一帆. 化工高等教育, **2019**, 168 (4), 44.
- [2] 高海燕. 化工高等教育, **2011**, No. 4, 81.
- [3] 郭文瑶, 辛志玲, 张萍, 李巧霞. 化工时刊, **2015**, 29 (5), 45.
- [4] 董伟, 王辉. 大学化学, **2003**, 18 (6), 26.
- [5] 张亚萍, 张红平, 霍冀川. 大学化学, **2018**, 33 (11), 82.
- [6] 胡锴, 蔡苹, 程功臻. 大学化学, **2016**, 31 (7), 20.
- [7] Long, R.; Mao, K. K.; Ye, X. D.; Yan, W. S.; Huang, Y. B.; Wang, J. Y.; Fu, Y.; Wang, X. S.; Wu, X. J.; Xie, Y.; *et al.* *J. Am. Chem. Soc.* **2013**, 135, 3200.
- [8] Stamenkovic, V. R.; Fowler, B.; Mun, B. S.; Wang, G. F.; Ross, P. N.; Lucas, C. A.; Marković, N. M. *Science* **2007**, 31, 493.