

## 面向新工科建设的催化类课程教学案例设计

袁冰\*, 于凤丽, 解从霞

青岛科技大学化学与分子工程学院, 山东 青岛 266042

**摘要:** 催化类课程是化学化工专业重要的主干课程, 在课程改革过程中, 将课堂知识、科研进展和生产实际整合为教学案例, 作为培养实践创新能力的载体, 是新工科改造的现实需求。本文提出了催化类课程教学案例设计构想及部分设计示例, 旨在提高催化课程教学质量, 为培养理论联系实际、知行合一、学以致用的新工科人才提供支撑。

**关键词:** 新工科; 教学案例; 催化教学

**中图分类号:** G641; O6

## Teaching Cases Design of Catalysis Courses for Emerging Engineering Education

Bing Yuan\*, Fengli Yu, Congxia Xie

College of Chemistry and Molecular Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, Shandong Province, China.

**Abstract:** Catalysis courses are important core courses in the field of chemistry and chemical engineering. In the process of curriculum reform, integrating classroom knowledge, research progress, and practical production into teaching cases has become a practical requirement for cultivating practical innovation abilities, which is also a demand in the transformation of the new engineering disciplines. This article proposes the concept and provides some design examples of teaching cases for catalysis courses, aiming to improve the quality of catalysis course teaching and provide support for cultivating new engineering talents who can connect theory with practice and apply knowledge effectively.

**Key Words:** Emerging engineering education; Teaching Cases; Catalysis Teaching

为应对新一轮科技革命和产业变革所面临的巨大新机遇、新挑战, 从“教育大国”向“教育强国”迈进, 高等教育须超前谋划、主动变革, 为我国产业发展和国际竞争提供智力支持和人才保障<sup>[1]</sup>。2017年起, 教育部先后通过“复旦共识”“天大行动”和“北京指南”启动“新工科”建设, 提出“问产业需求建专业, 问技术发展改内容, 问学校主体推改革, 问学生志趣变方法, 问内外资源创条件, 问国际前沿立标准”六大理念<sup>[2]</sup>。几年来, 在探索支撑新技术、新产业、新经济发展的新工科模式过程中, 不仅建成了一些新兴专业, 还通过产学研协同育人等计划, 重构人才知识体系、创新教学方式与技术、强化实践创新能力, 促进了传统工科专业向新工科专业转化。这些丰富的研究成果为地方应用型院校在新工科背景下的课程改革和建设提供了指导和参考<sup>[3-8]</sup>。

收稿: 2023-09-10; 录用: 2023-11-14; 网络发表: 2023-11-28

\*通讯作者, Email: yuanbing@qust.edu.cn

基金资助: 山东省优质专业学位教学案例库立项(SDYAL2022081); 教育部产学研合作协同育人项目(202102152024); 青岛科技大学第三批“课程思政”教育教学改革试点课程立项(青科大教学[2021] 17 号); 青岛科技大学研究生教育课程思政示范课程(2022KCSZ12)

催化科学与技术化工、石油、冶金、制药及环保等诸多行业中皆具有极为重要的地位，尤其是随着人类对能源、环境和健康等问题的愈发关注，催化作为提高原子经济性的重要途径，以及开发新能源、新材料的有效手段，其作用和地位进一步获得了提升，成为发展现代工业和绿色高新技术，实现“碳达峰”“碳中和”的战略目标不可缺少的科学基础。高等院校催化相关课程一直以来是支撑化学工程、化工工艺、应用化学、材料与化工等工科专业的主干课程之一。然而，一方面催化类课程涉及范围广，涵盖催化剂的成分、结构、性质、制备工艺及原理、材料应用、工程实践和最新动态，同时与有机化学、无机材料化学、高分子化学、生物化学、分析化学、物理化学等多个学科知识内容相互交叉、渗透和融合，课程内容繁杂、部分知识抽象晦涩、系统性差，不易理解和掌握；另一方面，催化是一个应用性很强的学科，近年来其发展突飞猛进，新材料、新理论、新体系、新方法层出不穷，但国内多数教科书和参考书往往落后于行业和科研进展，且缺乏来自企业的实际案例，不利于培养学生发现问题、分析问题、解决问题的能力。因此，“教师讲、学生听、满堂灌”的传统枯燥单一教学方法正面临着严峻的挑战，向培养实践创新能力和科学素养为本的结构多样化战略性转变势在必行。

国内部分高校在催化相关课程授课过程中，采用微课、翻转课堂、混合教学等改革措施，取得了一定效果<sup>[9-12]</sup>。而在新工科建设过程中，各学校也已经充分认识到案例教学<sup>[13]</sup>的必要性，希望能将案例教学法作为桥梁，以学生为主体，把课堂知识、科学研究和实际生产整合为教学案例引进到课程的教学中，有效地联系基础知识和实际应用，从而引导学生独立思考，深度理解如何应用理论解决实践问题<sup>[14,15]</sup>。其中，如何构建案例，决定了案例教学效果的好坏。然而，从目前来看，国内催化相关课程的案例教学尚处于起步阶段，涉及催化课程案例教学的参考资料和文献十分有限，具体教学中如何设计案例并将其较好地融入课堂，文献中更是颇少涉及<sup>[16-20]</sup>。因此，为适应我国新工科建设的客观需求，进一步提高化学化工类工科高等教育教学质量，通过合理的设计和提炼组织建设符合教学要求的案例素材，以及时跟进催化学科日新月异的新知识、新理论和新技术，使学生最大限度地接触催化领域发展的前沿，为相关专业催化类课程的教学改革提供支撑，具有十分重要的意义<sup>[21]</sup>。

笔者在执教“催化化学”“绿色催化”等课程的过程中，结合应用化学等工科专业特点以及催化学科发展，不断查阅资料和收集工业和科研实践中的相关案例，并融合课程思政的思想，构思和设计了一些具有代表性、典型性和原创性，符合课程使用需求的教学案例，旨在为构建完善利用多种终端进行自主学习和技能训练、加强产学研协同育人、培养复合应用型人才的教学案例库打下坚实基础。

## 1 教学案例的组织建设方案

依据“催化化学”“绿色催化”等相关课程教学大纲中对教学内容的要求，进行重点和难点知识的提炼。以启发、服务和培养学生应用能力为原则，预先设计构建相关案例，为课程开展案例教学实践活动提供支撑(案例示例见表1)。在实际授课过程中，充分结合课堂讲授、文献阅读、案例研讨、翻转课堂、课程论文等教学方式和手段，将案例教学融入课堂。例如，在讲授各版块相关知识之前，先通过“超星学习通”等网络教学平台把预设案例介绍给学生，根据学生对不同案例的兴趣分成若干小组，布置其利用课外时间查阅资料并分析讨论案例，每个小组选出代表，分配一定的课堂时间开展翻转课堂，再由教师点评，向相应案例中的催化理论和知识点扣题。全体学生根据前期查阅的资料、讨论和讲解的内容进行进一步复习和理解，撰写课程论文。授课教师利用“学习通”等平台对案例教学的全过程进行过程管理，根据学生资料查阅的完整性、翻转课堂和课程论文的完成质量对学习效果进行考核和评价。

案例教学法有效性的核心是案例，案例的设计和选择除了需具有典型性、时代性、贴近学生兴趣点等特点，还需要保持开放性，随时根据课堂效果和反馈情况进行及时调整。例如，2021年的诺

贝尔化学奖颁发给德国科学家本杰明·李斯特(Benjamin List)和美国科学家戴维·麦克米伦(David MacMillan),“以表彰他们对不对称有机催化的发展所作出的贡献”。评委会在颁奖词中表示:“建造分子是一门艰难的艺术。Benjamin List和David MacMillan因其开发了一种精确的分子构建新工具——有机催化,对制药研究产生了巨大影响,并使化学变得更加环保。”这恰好与催化课程的教学内容契合,十分适合作为载体构建案例,引导学生思考金属有机催化、酶催化、有机小分子催化等具有手性催化能力的催化剂各自的优点和缺点,并深刻理解有机小分子催化体系的意义。又如,美国“绿色化学挑战奖”(Green Chemistry Challenge Award)每年颁发一次,奖给学校或工业界已经或将要通过绿色化学显著提高人类健康和环境的先驱工作,这其中有相当一部分工作与催化作用相关。每年在授课过程中与时俱进地将这部分内容整合成案例素材,引导学生分析其获奖原因和对人类社会将产生的积极意义,与绿色化学的12原则进行对照,十分有利于加强学生对催化课程理论知识的系统掌握,也有利于学生积极加强实践创新能力。

下文针对表1中“合成氨的昨天、今天和明天”“高辛烷值汽油与离子液体之缘”“在多相催化与均相催化之间”,和“从石油化学到生物炼制的催化挑战”等典型案例的设计进行了展示。

表1 催化类课程教学案例的架构设想

序号	课程内容版块	教学案例设计构想
1	绪论及催化发展史	一次性医用口罩的前生今世
2	催化作用基本特征	合成氨的昨天、今天和明天
3	催化剂的选择性和稳定性	催化剂的“雷锋”精神
4	催化反应分类方式	在多相催化与均相催化之间
5	酸碱催化	高辛烷值汽油与离子液体之缘
6	催化剂的研发、制备及使用	从石油化学到生物炼制的催化挑战
7	多组元催化剂的组成与性能	固体催化剂的集体主义精神
8	金属催化	金属高分散的极限——单原子催化
9	杂多酸催化	杂多化合物与离子液体的结晶
10	生物催化	CO <sub>2</sub> 到淀粉——从0到1的原发性突破

## 2 典型案例设计一——合成氨的昨天、今天和明天

众所周知,合成氨工业是20世纪最伟大的化学发明,是被誉为“用空气制造面包”的多相催化“bellwether”反应。1908年德国化学家Fritz Haber完成了 $N_2 + 3H_2 = 2NH_3$ 反应加压下的热力学数据,从热力学原理上肯定了合成氨反应的可行性,并采用钨催化剂建立了一个 $80\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ 的试验装置,将 $N_2$ 与 $H_2$ 在17.5–20 MPa和500–600 °C下直接合成得到6%的氨,获得1918年诺贝尔化学奖; Alwin Mittasch用2500种不同的催化剂进行了6500次试验,在1912年研制成功现代合成氨工业催化剂的雏形——含有钾、铝氧化物作助催化剂的价廉易得的铁催化剂; C. Bosch和Haber一同设计并加工了一套闭路循环合成反应的高压系统,解决了合成过程的高压工程化问题,再次获得诺贝尔奖; 2007年Gerhard Ertl在“固体表面化学过程”研究中作出的贡献为合成氨研究三度获诺贝尔奖; 我国刘化章教授自主研发的新一代 $Fe_{1-x}O$ 基合成氨体系为保障我国粮食和能源安全,以及世界范围内合成氨工业技术的进步做出了杰出贡献<sup>[22]</sup>。

### 2.1 案例目的和教学目标

以课堂讲授和查阅资料的方式引导学生充分理解推动工业催化发展的动力,以及催化科学与技术化学工业中的重要地位。通过该教学案例的实施,完成整合化学热力学、化学动力学、催化作用基本原理、多相催化原理、金属催化等多方面相关知识点的知识目标;结合科技前沿中光催化、

电催化合成氨的进展，实现培养学生主动运用催化基础知识的能力目标；引导学生用历史唯物主义和辩证的方法来评价催化科技双刃剑作用，达到对科学和真理不断追求的素质目标。

## 2.2 案例教学的实施展开方案

(1) 在讲解硝酸的催化生产工艺时，一方面介绍其下游产品对人类社会的巨大影响，另一方面启发学生思考该工艺的关键原料——氨的来源，从而如图1所示导入案例，阐明“固氮”的重要意义；

(2) 引导学生在先行课程知识基础上，根据催化作用基本原理，查取 $N_2$ 、 $H_2$ 和 $NH_3$ 的标准摩尔生成焓、标准摩尔熵和标准吉布斯自由能等参数，估算合成氨非催化反应的活化能垒，并对比熔铁催化时的能垒，理解和说明合成氨实现工业化生产的可能性；

(3) 在学习多相催化反应原理版块的过程中，引导学生查阅相关文献，理解 $N_2$ 和 $H_2$ 在金属催化剂表面的吸附和解离过程，以及反应的速率控制步骤；

(4) 从原料气的输运过程、合成成本、安全性等方面思考传统合成氨工艺的优缺点，分析侯德榜在我国创建永利铔厂的贡献以及工业联产的意义；

(5) 引导学生进一步思考为何在仅以热能驱动的情况下，室温、常压或标准压力下无法人工合成氨，并分析是否能用其他形式的能量驱动该反应在室温、常压进行。查阅电催化、光催化固氮最新前沿文献以验证想法的可行性，并对这些采用新能量形式的固氮技术工业化前景进行评述。

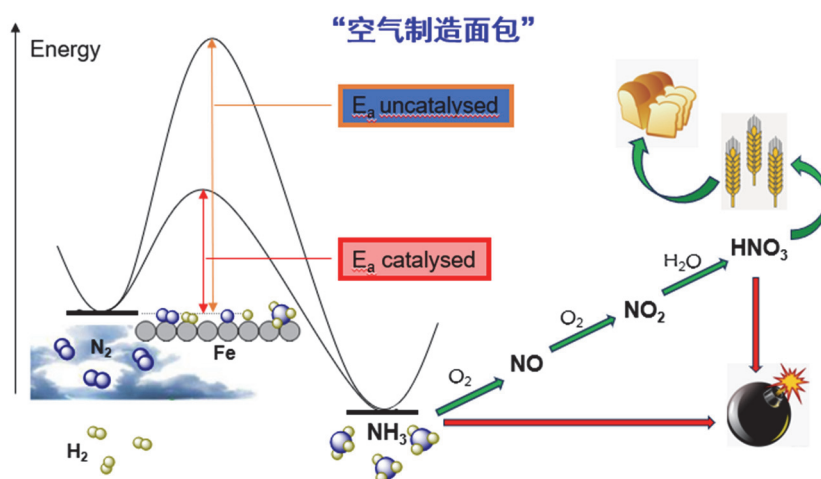


图1 合成氨案例导入示意图

## 3 典型案例设计二——高辛烷值汽油与离子液体之缘

汽油辛烷值是衡量汽油在气缸内抗爆震燃烧能力的一种数字指标，其中，支链烷烃的爆震现象少，常以标准异辛烷值规定为100，正庚烷的辛烷值规定为零。提高汽油辛烷值，可有效提高发动机效率，节约燃料。以C4混合烃以一定的烷烯比在酸催化下发生烷基化反应制备的以C8异构烷烃为主的烷基化油产品(如图2所示)，具有辛烷值高、蒸气压低、芳烃含量低、且几乎不含硫等优势，是最理想的高辛烷值清洁汽油及其调和组分。而该工艺自从20世纪30年代开发成功以来，主要采用浓硫酸、氢氟酸等传统液体酸催化剂，因此带来的强腐蚀性和废酸排放问题，很大程度上限制了烷基化汽油的发展。

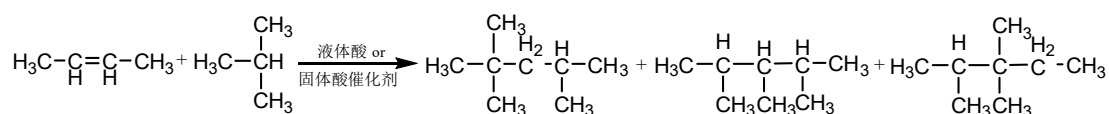


图2 烷基化汽油制备反应

### 3.1 案例目的和教学目标

该案例从世界范围内对清洁能源的现实需求出发，旨在引导学生思索化学化工过程的绿色催化解决方案和可持续发展进程。通过该教学案例的实施，实现对酸碱催化的基础知识目标的掌握；达到能够辩证地认识均相催化和多相催化各自的优势和不足，有针对性地设计和筛选催化剂的能力目标；引导学生充分结合科研进展和全球范围内工业化进程，认识催化科学与技术对世界的改造作用。

### 3.2 案例教学的实施展开方式

(1) 在开展酸碱催化版块教学时，启发学生根据所学化学知识分析异丁烷和C4烯烃的烷基化反应机理，判断可以采用的催化剂类型。介绍工业上烷基化汽油生产最初采用的是何种催化剂、目前主流催化剂和相应的催化工艺。

(2) 复习根据相态均一性对催化反应的分类，引导学生理解工业上各种传统液体酸催化烷基化汽油生产的优势和劣势，学习固体酸催化的特征。布置课下查阅各类固体酸催化剂在烷基化汽油制备反应中的应用研究进展，了解FBA工艺、Alkylene工艺、AlkyClean工艺等固体酸催化过程的初步工业化应用，及其在传统工艺改造过程中所需要面临的问题。

(3) 讲解离子液体的定义、结构及性能特征；启发学生思考什么样结构的离子液体能具有酸催化能力；查阅文献，了解已被用于烷基化汽油生产的离子液体的种类和结构特征。

(4) 搜集资料，比较山东德阳化工离子液体催化C4烷基化、哈石化烷基化、九江石化公司烷基化、中化弘润石油化工和雪佛龙盐湖城炼油厂ISOALKY离子液烷基化技术的试车投产进度、产能规模、技术要点，分析上述技术通过新建炼化装置或改造设备为商品汽油的清洁化和质量升级提供的解决方案。

(5) 对比和评析传统液体酸、各种固体酸和离子液体催化制备烷基化汽油的优缺点，对案例进行总结，撰写学习报告，上传网络学习平台用于案例教学的效果评价。

## 4 典型案例设计三——在多相催化与均相催化之间

催化反应按照系统物相均一性分为均相催化和多相催化，其中均相催化活性高，但催化剂不易回收再利用；多相催化剂易于分离回收和循环使用，但是往往需要较为苛刻的反应条件；酶催化兼具了均相和多相催化的优势，但对反应环境要求甚高，极易失活。开发能够结合均相和非均相催化优点的催化体系，在特定的反应中同时实现较高的催化活性和良好的回收稳定性一直是科研工作者追求的目标(图3)。

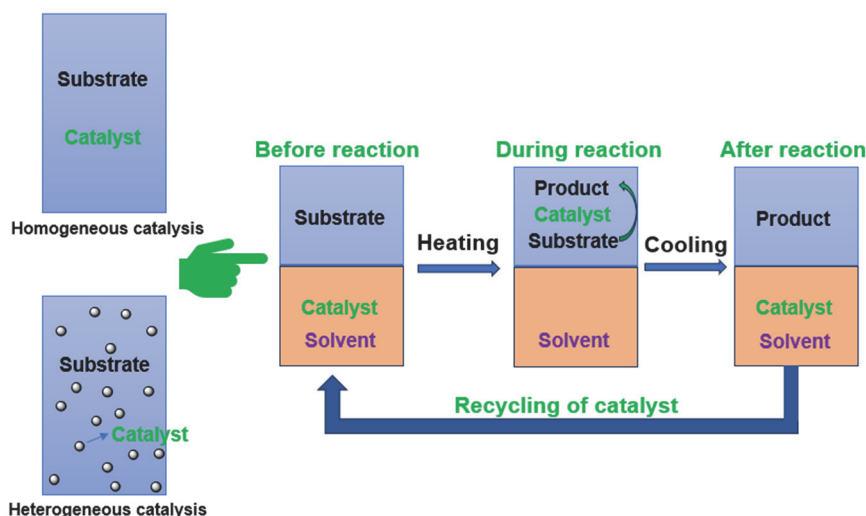


图3 结合均相与多相催化优点的相转移催化体系示意图

#### 4.1 案例目的

该类案例从教师自身的科研实践和相关科研方向出发, 结合教学内容将分散在各章节中的知识元素提取出来, 对学生进行引导启发, 围绕解决科学问题进行知识重构(图4) [23]。

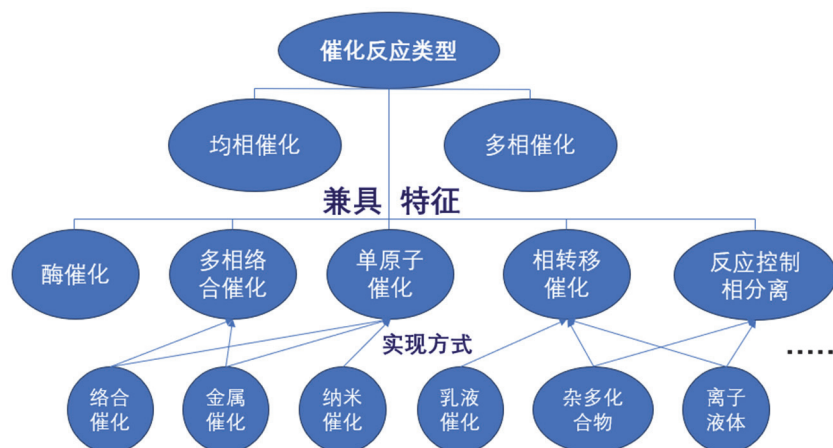


图4 在多相与均相之间的催化体系及相关知识元素导图

#### 4.2 案例教学的实施展开方式

该案例实施采用小组作业的形式:

(1) 引导学生查阅具有反应控制相转移功能的催化剂 $[\pi\text{-C}_5\text{H}_5\text{NC}_{16}\text{H}_{33}]_3[\text{PO}_4(\text{WO}_3)_4]$ , 厘清其在丙烯环氧化反应中是否溶于反应介质, 能否归为均相催化的范畴, 在何种试剂作用下变成可溶活性物质, 再与底物选择性地作用生成目标产物。分辨该过程中是否具备了均相催化的特征, 反应结束后, 该催化剂又是如何实现从介质中析出并回收的[24]。

(2) 引导学生查阅并分析一些催化剂在不同极性介质中的溶解性特征, 使其在反应前溶于其中一种底物, 随着催化反应的进行, 该底物不断耗尽, 而催化剂不溶于生成的产物, 从反应体系中析出, 从而巧妙地构建出自分离催化反应体系[25]。

(3) 引导学生查阅文献, 归纳上述温控相转移催化、反应控制相转移催化、反应控制相分离等催化研究实例所使用催化剂的结构、组成特点, 以及能够引起相转移、相分离的具体条件和限制。

### 5 典型案例设计四——从石油化学到生物炼制的催化挑战

5-羟甲基糠醛简称5-HMF, 是美国能源局发布的重要生物质平台化合物之一, 是连接生物质资源和石油化学的重要桥梁。其分子中含有高活性的呋喃环、羟基和醛基等, 可通过加氢、酯化、卤化、聚合和水解等过程进行进一步的转化, 在作为高分子材料合成单体、大环化合物合成原料以及医药、农药中间体等领域具有重要的潜在应用价值。5-羟甲基糠醛的合成是由果糖等六碳糖或多聚糖出发, 经过酸催化脱水得到。与石油化学工业类似, 传统的无机液体酸催化由于腐蚀设备、难以分离回收和再生等缺点, 亟需进行改进。关于5-羟甲基糠醛的绿色催化制备研究层出不穷, 但多为实验室技术, 尤其在我国鲜见规模化生产。

#### 5.1 案例目的

本案例的引入载体为催化剂的设计、制备和使用教学版块, 涉及生物质转化、糖类脱水反应、催化剂设计、绿色溶剂、绿色催化剂等多角度知识点, 具有较好的综合性和前沿性。目的是使学生认识到在“双碳”目标的背景下, 以生物质平台化合物为原料生产高附加值化学品是催化科学与技术研发的重点方向之一。

## 5.2 设计与实施

案例的情境设定为山东省某企业拟采用淀粉为原料生产5-羟甲基糠醛产品，急需设计催化路线和给出完整制备方案，包括采用的具体催化剂品种、溶剂类型、反应器类型、反应工艺条件及分离后处理方式等。要求学生分组以角色扮演形式，从研发工程师的角度提出解决方案，再与其他小组互评。教师给出思维导图进行引导(图5)，并根据各小组的设计及互评结果对该案例教学的效果进行评价。

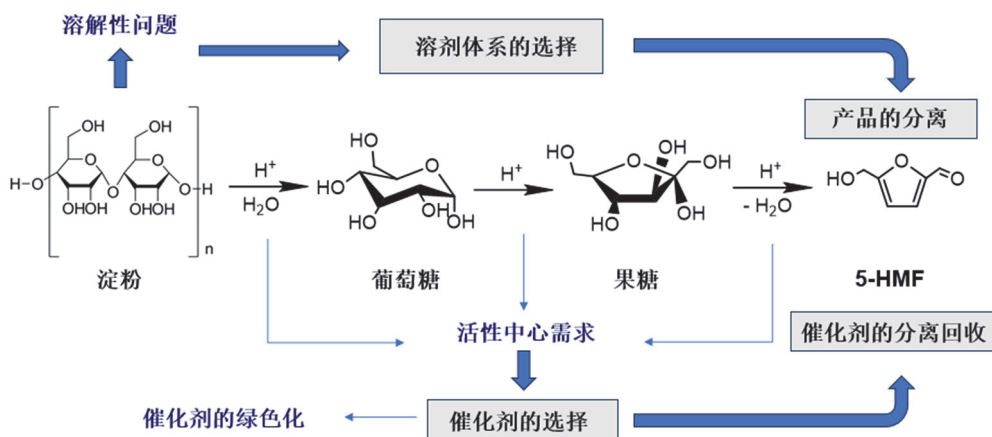


图5 淀粉制备5-HMF教学案例引导图

该案例要求学生查阅*Science*、*Green Chemistry*等国际著名期刊的最新研究成果，加强对低温共熔溶剂、分子筛、杂多酸等相关催化剂的理解，认识该反应在工业上的推广难点，对案例中涉及的问题进行全面思考和讨论，从而充分理解和掌握催化剂的设计、制备和使用版块的教学内容。

## 6 结语

综上，案例教学不同于以教师为主体的举例法，是以学生为主体，理论与实践相结合的互动教学模式，十分有助于将催化课程教学中零散分散的知识点系统化、有序化，重构人才知识体系，强化培养学生实践创新能力，促进传统工科专业向新工科转化。与案例教学的必要性和迫切性相比，目前高等学校相关专业催化类课程的教学案例库建设严重滞后，仍处于起步阶段，亟需在教学实践过程中紧跟科技与工业发展前沿，通过合理的设计和提炼，不断加强教学案例的开发，为相关专业催化类课程的教学改革提供支撑，为促进我国新工科建设添砖加瓦，从而也为立德树人，培养高素质、创新型和应用型人才打下坚实的基础。

## 参 考 文 献

- [1] 赵继, 谢寅波. 中国高教研究, 2019, No. 11, 9.
- [2] 张大良. 新工科建设的六个问题导向. 光明日报, 2017-04-18.
- [3] 顾佩华. 高等工程教育研究, 2020, No. 4, 1.
- [4] 林健. 清华大学教育研究, 2017, 38 (2), 26.
- [5] 任玉琢, 徐利梅, 谢晓梅, 李辉, 黄艳, 黄廷祝. 高等工程教育研究, 2019, No. 3, 29.
- [6] 苏海涛, 胡鸿志, 徐翠峰, 许金, 郭庆. 实验技术与管理, 2019, 36 (9), 222.
- [7] 田景芝, 荆涛, 郑永杰, 王波, 杜晓昕. 实验技术与管理, 2019, 36 (11), 266.

- [8] 王荣德, 王培良, 王智群, 钱懿. 中国高校科技, **2019**, No. 10, 59.
- [9] 朱鋆珊, 赵彩云. 山东化工, **2020**, *49* (20), 231.
- [10] 李文生, 邱发成, 张兴然, 张强, 刘作华. 广东化工, **2021**, *48* (8), 328.
- [11] 蔡喆. 广州化工, **2020**, *48* (4), 121.
- [12] 彭淑静, 张启俭, 周艳军, 郭洁, 齐平. 教育教学论坛, **2017**, No. 52, 171.
- [13] Barnes, L. B.; Christensen, C. R.; Hansen, A. J. *Teaching and the Case Method: Texts, Cases, and Readings*, 3rd ed.; Harvard Business School Press: Boston, MA, USA, 1994.
- [14] 刘红梅. 江苏高教, **2016**, No. 4, 71.
- [15] 康晓红, 程志明, 李智, 刘博, 段武彪. 化学教育, **2016**, *37* (2), 47.
- [16] 邢闯, 吕鹏, 盖希坤. 教育教学论坛, **2016**, No. 22, 128.
- [17] 褚睿智, 孟献梁, 苗真勇, 刘建周. 广州化工, **2016**, *44* (17), 176.
- [18] 高海燕, 蒋平平. 广州化工, **2013**, *41* (1), 192.
- [19] 王艳力, 杨飘萍, 盖世丽, 贺飞, 殷金玲. 化工高等教育, **2021**, *38* (1), 128.
- [20] 吴志杰. 化工高等教育, **2015**, No. 2, 52.
- [21] 郭俊辉, 曹旭华, 王富忠. 高等工程教育研究, **2010**, No. 3, 140.
- [22] 邵先钊, 王伟, 李志洲, 刘军海, 张海冉. 化工管理, **2021**, *16*, 13.
- [23] 史金铭, 薛哲勇, 王晶英, 许志茹, 李晓岩, 滕春波. 中国生物化学与分子生物学报, **2021**, *37* (8), 1124.
- [24] Xi, Z. W.; Zhou, N.; Sun, Y.; Li, K. L. *Science* **2001**, *292* (5519), 1139.
- [25] Leng, Y.; Wang, J.; Zhu, D. R.; Ren, X. Q.; Ge, H. Q.; Shen, L. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2009**, *121* (1), 174.