“双一流”建设背景下物理化学课程教学改革与实践

纪敏*, 王新葵, 孙延波, 王旭珍, 王新平

大连理工大学化工学院化学系, 辽宁 大连 116023

摘要: 在“双一流”建设的背景下, 物理化学教学秉承“以学生为中心, 以目标为导向”的教学理念, 通过问题引导的启发式教学模式, 从科学发展的历史角度出发, 阐述相关概念、定律, 并将学科前沿和应用案例引入课堂, 培养学生的创新意识和科学思维方法。通过翻转课堂和分组讨论的方式, 培养学生的自学能力和团队协作精神。

关键词: 双一流; 物理化学; 课程改革

中图分类号: G64; O6

Teaching Reform and Practice of Physical Chemistry under the Background of “Double First-Class” Construction

Min Ji*, Xinkui Wang, Yanbo Sun, Xuzhen Wang, Xinping Wang

Department of Chemistry, School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, Liaoning Province, China.

Abstract: Under the background of “double first-class” construction, we embrace the teaching philosophy of “student-centered and goal-oriented” in the physical chemistry teaching process. Through the heuristic teaching model guided by questions, the concepts and laws are elaborated based on the history of scientific development. The frontiers of the discipline and application cases are introduced into teaching, aiming at cultivating students’ innovative consciousness and scientific thinking. Through flipped classroom and group discussion, students’ self-educated ability and team spirit are developed.

Key Words: Double first-class; Physical chemistry; Curriculum reform

为推动高等教育内涵式发展, 提升高等教育整体水平, 2015 年 10 月国务院印发《统筹推进世界一流大学和一流学科建设总体方案》, 明确了“双一流”建设的总体要求、建设思路和建设任务。

“双一流”建设是党中央、国务院做出的重大战略决策, 为我国高等教育综合改革指明了方向^[1]。2018 年 6 月教育部长陈宝生在新时代全国高等学校本科教育工作会议上的讲话中强调: “一流本科是建设高等教育强国的根基。只有培养出一流人才的高校, 才能够成为世界一流大学, 在‘双一流’建设中要加强一流本科教育。”课程是本科教育的基石, 建设一流本科, 需要建设好每一门课程。化学作为大连理工大学的“双一流”学科, 在培养富有创新精神的精英人才方面发挥着重要作用。物理化学作为化学、化工类人才培养的核心课程, 已经进入一个全新的发展阶段, 内涵更加丰富, 涉及多个层面: 从宏观深入到微观、从定性走向定量、从描述过渡到推理、从静态推进到动态、从平衡态拓宽到非平衡态、从体相外延到表相等。因此, 在教学内容和教学方法上必须与时俱进, 深入开展课程创新设计与教学方法改革。

收稿: 2020-07-12; 录用: 2020-08-09; 网络发表: 2020-08-17

*通讯作者, Email: jimin@dlut.edu.cn

基金资助: 大连理工大学教学改革基金重点项目(ZD2019004)

1 学情分析

2020 年,大连理工大学的应用化学专业入选国家级一流本科专业建设点。本专业人才培养的目标是:培养适应现代社会发展,满足国家建设需要,具有高尚道德品质、宽厚扎实的基础功底、突出的科研潜质、开阔的国际视野、富有创新精神与合作意识的高级化学类精英人才。“物理化学”是用物理学的原理和实验方法来研究化学变化普遍规律的学科,被誉为“化学中的哲学”,在人才培养方案中处于核心地位。物理化学是我校应用化学的专业基础课,共 112 学时,开课学期为大二学年下学期和大三学年上学期。学生前期已修过高等数学、大学物理、无机化学、分析化学、有机化学(上)等预备知识,后续为有机化学(下)、化工原理、催化原理、表面化学等课程的学习奠定理论基础。学生已经具有一定的知识储备和思考、解决问题的能力。但是不足之处在于:理论与实际联系不足、创新意识不强、自学能力不足。针对物理化学的课程特点和学生情况,我们进行了物理化学课程改革,在教学策略和教学逻辑上从学生的需求出发,对学生知识吸收和巩固的过程进行揣摩,使得课堂教学更好地适应学生的需要和个性化发展要求^[2]。

2 物理化学课程改革措施

鉴于 1981 年美国教育家 Spady 等人提出 OBE (Outcome-Based Education) 教学理念,我们提出“以学生为中心,以目标为导向”的教学理念。以学生为中心,就是以学生发展为中心,以学生学习、学习效果为中心,实现价值塑造、能力培养、知识传授三位一体的人才培养模式。针对学生存在的问题,以学生为中心,教师作为学生学习的引导者,通过“课前导学-问题引导-讨论指导-思维疏导-课后辅导”的教学流程进行课堂教学。具体来讲,课前在慕课堂平台布置学习任务,学生充分利用我校在中国大学 MOOC 平台建设的优质资源,进行自主学习,并进行自测和填写不明白问题问卷,让教师课前了解学情,哪些需要重点讲解的,哪些可以一掠而过的,教师在上课前做到心中有数,从而可以实现精准教学;重点难点的讲解,采用问题引导的方式,启发式教学,步步深入,引起学生的好奇心,激发学习兴趣;在讲解概念和定律的时候,通过讲解其发展历史、学科现状及其前沿,培养学生科学思维方法,使学生了解其发展趋势和需要解决的关键科学问题,培养学生的创新意识;指导学生分析讨论典型案例,培养学生融会贯通、解决问题的能力;组织学生分组研讨具有前沿性的科研文献^[3],培养学生崇尚科学、创新意识及其团结协作精神;课后绘制具有发散性的思维导图,疏导思维,使学生的零散知识系统化,进行巩固提升;通过撰写文献研读报告,培养学生科学语言论述问题的能力。通过深入浅出的讲解,在基础-提高-应用-创新四个层次上,将物理化学的理论知识与生产实践、科研前沿相融合,突出课程的“应用性”和“科学性”。以物理化学表面现象一章中的润湿作用为例,教学设计如图 1 所示。

图 1 润湿作用课程设计

这一课程改革思路是基于美国教育心理学家杰罗姆·布鲁纳的发现教学理论^[4]和中国化学教育家傅鹰提出的教学方法。根据布鲁纳的教学理论：(1) 知识学习要掌握学科的基本结构，而基本结构也就是该学科的基本概念、基本原理以及它们之间的关联；(2) 激发学生的内在动机，如好奇心、上进心、朋友之间的相互作用；(3) 在教学过程中，学生是一个积极的探究者。学习的主要目的不是要记住教师和教科书上所讲的内容，而是要学生参与该学科知识体系建立的过程。中国著名的教育家傅鹰认为：“一种科学的历史是那门科学最宝贵的一部分。科学只给我们知识，而历史却给我们智慧。”这促使我们讲授科学知识，阐述科学概念，都是从人类认识自然的过程，从科学发展的历史角度，循序渐进、深入浅出地进行讲解。

2.1 问题引导的启发式教学

启发式教学是教师根据学生学习的基本规律，引导学生积极、主动地掌握知识的教学方法。具体表现在，课堂上更多采用问号和省略号，而不是句号和叹号。例如，在学习了化学热力学和化学动力学内容以后，通过教师问题引导，逐步深入，和学生一起开启“多相催化中的领头羊(Bell-wether)反应——合成氨反应的探究之旅，具体设计如表 1 所示。

通过启发式的教学方法，学生清晰地明白为什么现在工业上合成氨的条件是：压强： 2×10^7 – 5×10^7 Pa；温度：700 K 左右，使用铁触媒作为催化剂；适时将氨液化分离， N_2 、 H_2 循环使用，适当提高氮氢比(实际应用 $n(N_2):n(H_2) = 1:2.8$)，这是因为氮的活化吸附是该反应的速度控制步骤，

表 1 关于合成氨反应的启发式教学设计

层次	教师行为	学生行为
注重衔接	研究事件：1774 年化学家普里斯特里证实了氨是氮和氢的二元化合物；1795 年希尔德布兰德就试图在常压下合成氨，结果以失败而告终；1850–1900 年，人们对化学平衡原理取得了重大的突破；1909 年哈伯高温高压下成功合成氨 点拨提问：因合成氨获得诺贝尔化学奖的科学家有几位？	回顾：利用原有的知识体系分析思考 互动回答：1913 年 Haber 催化剂的发现；1931 年 Bosch 催化过程的工业化；2007 年 Ertl 催化机理的认识
强化基础	提问：已知 $N_2(g) + 3H_2(g) = 2NH_3(g)$ ，在 298 K 下， $\Delta_f H_m^\ominus = -92.2 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ， $\Delta_f S_m^\ominus = -198.2 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ，则在 298 K、0.1 MPa 反应条件下，若氢气和氮气的摩尔比为 3:1，氨的摩尔分数为 0.2，反应能否正向自发进行？	互动回答：利用范特霍夫定温方程 $\Delta_r G_m = \Delta_r G_m^\ominus + RT \ln J_p < 0,$ 所以反应可以正向自发进行
求知探索	提问：科研结果表明：合成氨的速率方程 $r = k \cdot c(N_2) \cdot c^{1.5}(H_2) \cdot c^{-1}(NH_3)$ 没有催化剂 $E_a = 335 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ，有 Fe 触媒催化剂 $E_a = 167 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ；那么可以通过哪些措施能提高反应速率和平衡转化率呢？ 提问：经过大家分析讨论得到上面的一些结果，那为什么合成氨很难？	互动回答：学生经过热烈讨论后提出方案，如表 2 所示 互动回答：低温有利于平衡，高温才能断 $N \equiv N$ ，有利于工业产率。教师引导思考：反应能垒与反应物种 NH_x ($x = 0, 1, 2$) 的吸附能之间存在着限制关系
引入前沿	研读文献：构筑“过渡金属——氢化锂(TM-LiH)”双活性中心催化体系，显著提高了传统金属催化剂在温和条件下的合成氨性能。双活性中心的构筑使 N_2 和 H_2 的活化及中间产物的吸附发生在不同的活性中心上，从而打破了反应能垒与吸附能之间的限制关系 ^[5]	了解前沿，开拓视野：撰写研读报告，提出催化剂进一步的改进思路

表 2 提高平衡转化率和反应速率的措施

提高平衡转化率		提高化学反应速率	
反应特点	措施	反应特点	措施
放热	降低温度	活化能高	使用 Fe 催化剂 700 K 时 $k(\text{cat})/k(\text{无}) = 3.4 \times 10^{12}$
分子数减少	增大压强	低温时速率低	升高温度
700 K, 20 MPa, $n(\text{N}_2) : n(\text{H}_2) = 1 : 3$ (摩尔比), $K^\ominus = 9.29 \times 10^{-5}$ (数据由老 师提供)	N_2 、 H_2 循环利用	原料气浓度增加, 能提高 反应速率	增大反应物浓度, 增大压强
浓度比是否影响转化率?	$n(\text{N}_2) : n(\text{H}_2) = 1 : 3$ (摩尔比) 平衡转化率最大	氨气浓度增加, 能降低反 应速率	及时分离移出 NH_3

适当提高氮含量, 有利于提高反应速率。对于以上分析, 对合成氨反应的前沿方向也有了一个清晰的了解, 即低温高效合成氨催化剂的设计和开发, 比如构建双活性中心催化剂, 使 N_2 和 H_2 的活化及中间产物的吸附发生在不同的活性中心上, 从而打破了反应能垒与吸附能之间的限制关系^[5]。通过这一典型案例分析, 学生清晰地了解到任何一个反应的工业化过程都需要从热力学和动力学两方面去综合考虑, 更能够从中感知前人在探索和改造自然的过程中所经历的认识与思考、偶然与必然, 从而给学生以思维能力与科学方法层面的启迪。

2.2 挖掘知识体系形成的历史过程

物理化学课程中涉及到大量的概念、公式和定律, 这些概念、公式、定律是怎样提出、修正和推导出来的? 任何一个简单的概念背后都有引人入胜的典故! 我们要深挖概念背后的故事及其科学思维, 才能引起学生的好奇心, 培养学生发散思维能力; 带领学生跳出教材的局限, 重温知识体系形成的历史过程; 引导学生实现知识的突破, 贯穿繁杂知识的逻辑脉络^[6]。

比如, 我们在讲解润湿概念的时候, 对润湿的历史娓娓道来^[7]。润湿的概念和物质润湿性质的研究可追溯到200多年前, 湿润科学研究的先驱者Thomas Young于1805年提出了液体接触角的概念来定义表面润湿性。超亲水表面(接近 0° 的水接触角)和超疏水表面(接触角 $> 150^\circ$)的研究起源于20世纪初。Ollivier在1907年报道了第一个超疏水表面, 他们描述了由烟灰、番茄红素粉末和三氧化二砷组成的表面上近 180° 的接触角。Langmuir在1920年发现吸收有机化合物的单层可以完全改变固体表面的摩擦和润湿性能, 这一发现开辟了人们可以广泛使用化学改性来控制物质表面润湿性能的先河。表面科学的理论框架在20世纪30年代和40年代开始发展起来。1936年, Wenzel研究了固体表面的宏观粗糙度与接触角之间的关系, 并解释了粗糙度如何提高疏水性。1944年, Casses和Baxter的研究将这一理论扩展到可以在水和固体之间捕获空气的多孔表面和粗糙表面, 该理论被称为复合润湿模型。2000年, 我国物理化学家江雷院士提出二元协同纳米界面结构理论, 创制了新的学科前沿方向——仿生超浸润材料。因此, 在物理化学课程教学过程中, 指导学生研读江雷院士在2004年发表在*Nature*上的一篇文章“Water repellent of water striders”^[8], 从中体会江雷院士向自然学习的科学创新精神, 有所发现—有所发明—有所创造的创新思路, 培养学生发现问题、提出问题, 并能科学地表述问题的能力, 用科学的语言对文献进行总结, 总结文章的创新点、不足及其改进思路, 培养学生的科学思维。最后引入超疏水材料在潜艇涂层及超疏油材料在油水分离中的应用, 让学生对这一概念得以更深刻的认识。每一章学习完毕后让学生绘制思维导图, 让学生对这一章的知识点进行梳理, 使知识系统化。

在讲解热力学第二定律时, 通过串联讲解几位科学家的伟大贡献, 带领学生重现热力学第二定律及其数学表达式是如何一步一步确定的。法国青年工程师卡诺身处蒸汽机迅速发展的时代, 提高

热机效率是当时人们开展的热点研究课题。卡诺独辟蹊径，从理论的高度对热机的工作原理进行研究。1824 年他发表了名著《谈谈火的动力和能发动这种动力的机器》，运用了理想模型的研究方法，以他富于创造性的想象力，精心构思了理想化的热机——卡诺热机，提出了作为热力学重要理论基础基础的卡诺循环和卡诺定理，从理论上解决了提高热机效率的根本途径。卡诺的这种研究问题的方法，对学生创新思维的培养具有重要的参考价值，实际上卡诺的理论已经深含了热力学第二定律的基本思想，但由于受到热质说的束缚，使他当时未能完全探究到问题的底蕴。随着后来热力学第一定律的提出，热力学第二定律便呼之欲出了。1834 年(卡诺去世两年后)，他的著作《谈谈火的动力和能发动这种动力的机器》才有了第一个认真的读者——法国物理学家克拉佩龙。他发表了题为“论热的动力”的论文，用 $p-V$ 曲线翻译了卡诺循环，但未引起学术界的注意。1948 年，英国物理学家开尔文根据克拉佩龙介绍的卡诺理论，发表了“建立在卡诺热动力理论基础上的绝对温标”一文。德国物理学家克劳修斯通过克拉佩龙和开尔文的论文，于 1850 年从热量传递的方向性角度提出了热力学第二定律的表述，并首先提出了熵的概念，得出了热力学第二定律的数学表达式。1851 年开尔文从热功转换的角度提出了热力学第二定律的另一种说法。1877 年，奥地利物理学家玻尔兹曼发现了宏观的熵与体系的热力学概率的关系。至此，科学界开始普遍接受热力学第二定律。热力学第二定律的逐渐形成过程，背后所蕴藏的科学思维方法及科学家们的科学精神值得每一个学生去仔细揣摩。如今这个定律又有了新的内涵，在信息、宇宙、生命领域中有了新的解读，激发了学生的学习兴趣。热力学第二定律发展史妙趣横生的介绍，知识点的串联，不仅仅给学生带来心理上的冲击，更重要的是帮助学生建立对知识更宏观的认识。

马克思曾经说过，人类认知是螺旋式上升的。大学，是传授深奥知识的场所。回归常识，探索知识迁移的有效途径是我们在课堂教学中时时要牢记在心的，教师的教学也需要有科学的思维方式，注重学生创新能力的培养，有意识地培养学生的自学能力，凸显知识的高阶性、前沿性，学生在未来才会有无限的潜力。

2.3 线上线下混合教学模式

一流课程建设需要一流的课程资源。大连理工大学物理化学课程建设一直具有很好的传承并积淀了深厚的底蕴。课程于 2008 年被评为国家精品课程，2013 年被评为国家精品在线开放课程。2015 年，我们从教学内容的前沿性、高阶性、与相关学科的融合性、教学思想的先进性、教学形式的创新性与可塑性等方面全方位进行设计和视频录制，在中国大学 MOOC 平台上线。2017 年被评为首批国家精品在线开放课程。目前已经开课 8 轮，选课人数超过 6 万人。为了培养学生的自学能力、团结协作精神及科学思维，我们将教学内容进行了重新规划：将重点、难点进行提炼，将一些难度较低和应用性较强的内容安排学生利用课外时间通过中国大学 MOOC 平台自学；利用节约的课时进行详解重点难点和翻转课堂、分组讨论等利于培养学生创新能力的教学方式。比如化学反应的标准摩尔焓变、标准摩尔熵变的计算、稀溶液的依数性、影响反应平衡的因素、催化剂对反应的影响、几种简单的复合反应等部分内容，由于相关的核心知识点已经在课堂讲授完成，学生已经具备了相关的知识储备，自学的难度并不大。为了保证自学效果，我们设计了多层次的问题对学生进行引导和督促。比如，自学“几种简单的复合反应”这一部分内容，首先在课前安排自学任务时，给学生布置一系列问题，如“不同级数的平行反应、对行反应、连串反应的动力学方程如何建立？实际生产过程中如何控制产物的选择性？如何获取连串反应中间物的最佳反应时间？”等，这些问题起到了提纲挈领的作用，可以帮助学生掌握核心知识点。此外，学生带着问题去学习，可以促进学生思考，帮助学生更深入地理解相关的内容。针对平行反应、对行(对峙)反应、连串反应三类复合反应，学生分为三组，每组只讲一类反应，全组成员团结协作制作 PPT，课堂上进行打擂台比赛。每组选一个代表进行 PPT 讲解，然后其他两组同学对其进行提问，这个组的任何一个同学都可以进行回答。最后教师针对学生的表现进行点评，同学投票选出表现最佳组、表现最佳辩手。这种方式极大地调动了学生的学习兴趣，并可以有效锻炼学生的文献调研能力、自学能力、科学表达能力和实际解决

问题的能力等。而教师的点评又可以加深学生对知识点的认知,达到了较好的教学效果。为了鼓励学生参与讨论和互动,我们物理化学的课程考核平时分占 30%,除了作业、测试题目外,对于 PPT 讲述认真和积极参与讨论的学生,给予自主学习平时成绩满分奖励(自主学习部分比例设定为 15%–20%;应用化学专业共 30 名学生)。主讲过 PPT 的学生普遍反映收获很大,体会到什么是“台上一分钟,台下十年功”,也体会到老师上课的不易,师生产生了很多共鸣。

3 结语

在“双一流”应用化学专业建设的背景下,深入开展物理化学课程创新设计与教学方法改革。教学过程中,以学生为中心、以目标为导向,从基础理论应用到高阶性研讨,借助启发式问题引导,从人类认识自然的过程、科学发展的历史角度,深入浅出地进行知识点讲解,不断激发学生的兴奋点,引导学生参与到课堂讨论、分析、评判等教学过程中,提升高阶思维能力,培养创新意识,从而获得良好的教学效果。正如康德的名言:“重要是给予思维,而不是给予思想。”这种教学设计具有普适性,能更好地激发学生探求未知的兴趣和积极性,培养学生的团结协作意识及其创新思维能力,具有推广价值。

参 考 文 献

- [1] 国务院. 关于印发统筹推进世界一流大学和一流学科建设总体方案的通知(国发(2015)64 号). [2015-10-24]. http://www.moe.gov.cn/jyb_xxgk/moe_1777/moe_1778/201511/t20151105_217823.html
- [2] 马昱春. 计算机教育, **2016**, No. 3, 7.
- [3] 张树永, 李英, 苑世领, 郝京诚. 大学化学, **2018**, 28 (2), 11.
- [4] 布鲁纳. 教育过程. 邵瑞珍, 译. 北京: 文化教育出版社, 1980.
- [5] Wang, P. K.; Chang, F.; Gao, W. B.; Guo, J. P.; Wu, G. T.; He, T.; Chen, P. *Nat. Chem.* **2017**, 9 (1), 64.
- [6] 马昱春, 鲍丽薇. 计算机教育, **2016**, No. 11, 76.
- [7] Liu, M. J.; Wang, S. T.; Jiang, L. *Nat. Rev. Mater.* **2017**, 2 (7), 1.
- [8] Gao, X. F.; Jiang, L. *Nature* **2004**, 432 (7013), 36.