

相平衡的教学设计案例与思考

王女*, 赵勇, 刘兆阅

北京航空航天大学化学学院, 北京 100191

摘要: “相平衡”是物理化学的重要部分, 本文以“纯物质系统相图分析”为例, 介绍了围绕“问题探究式”教学模式开展教学内容、教学目标、教学设计的基本理念与思路, 致力于培养学生发现问题、分析问题、解决问题的能力, 取得了很好的教学效果。

关键词: 物理化学; 相平衡; 相图; 教学设计

中图分类号: G64; O6

Teaching Design and Reflections on Phase Equilibrium

Nü Wang*, Yong Zhao, Zhaoyue Liu

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

Abstract: “Phase equilibrium” is one of the most crucial parts in the physical chemistry curriculum. Considering the subject “single component phase diagram analysis” as an example, this paper presents the teaching content, teaching objectives, teaching ideas, teaching design, and complete teaching activities in detail with respect to the “question inquiry” teaching mode. Results show that students learned to find, analyze, and solve problems and achieved better results.

Key Words: Physical chemistry; Phase equilibrium; Phase diagram; Teaching design

相平衡是物理化学的重要内容, 相关内容在工业分离及提纯领域有重要应用, 但学生理解和掌握有一定的难度。本文以“纯物质系统相图分析”为例, 从问题提出、理论形成、理论应用、前沿拓展几个方面进行教学设计, 取得了较好的教学效果。

1 教学内容及教学目标

1.1 教学内容

根据“高等学校化学类专业物理化学相关教学内容与教学要求建议(2020版)”^[1], 结合我校工科专业物理化学课程的教学特点, 本章的主要教学内容如图1所示, 包括掌握相平衡的普遍规律——相律, 并会利用相律来分析单组分相图、二组分双液体系相图、二组分固液体系相图, 并能够将抽象的相律与实际现象结合起来分析问题, 用相律来指导相图的分析及应用^[2,3]。其中, 纯物质系统相图分析是本章第二节的内容, 是相平衡一章中承上启下、至关重要的一节内容。本部分教学内容旨在让学生在深入理解相律的基础上, 会用相律分析纯物质相图, 掌握纯物质相图的特点。在教学过程

收稿: 2022-12-18; 录用: 2023-02-21; 网络发表: 2023-03-08

*通讯作者, Email: wangn@buaa.edu.cn

基金资助: 2020年北京航空航天大学“北京航空航天大学一流本科课程”(北航教[2020]2号); 北京航空航天大学教改项目; 北京高校本科教学改革创新项目(202210006003)

中,不仅需要学生掌握纯物质相图特征这一新的知识点,而且对学生理解上一节学习的相律在深度和广度上提出了新要求。教师要帮助学生逐步理解相律的重要含义,为学生后续学习相律在二组分相图中的应用奠定基础。

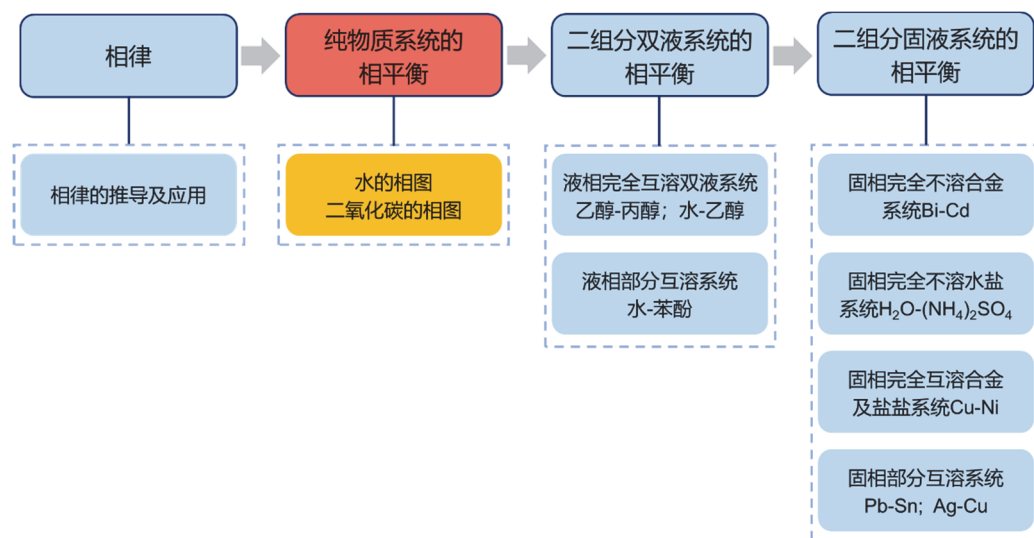


图1 “相平衡”的教学内容

1.2 教学目标

1.2.1 知识传授

- (1) 能够说明纯物质相图的绘制方法。
- (2) 能够说明纯物质相图中点、线、面的含义。
- (3) 能够说明和利用水的相图。

1.2.2 能力培养

- (1) 能够绘制简单的相图。
- (2) 能够利用克拉贝龙方程(Clapeyron方程)说明相关规律。
- (3) 能够在绘制过程中提出问题、分析问题和解决问题。

1.2.3 价值塑造

- (1) 明确物质是第一性的,能够进行分类、归纳并推广应用,解决实际工程及基础科学前沿的问题。
- (2) 能够解决实际问题、建立模型、主动发现规律,体现创新思考。
- (3) 说明中国科学家在本领域所做出的杰出贡献和艰辛历程,说明中国在化学、材料等领域在世界科学舞台中的重要作用。

2 教学设计的基本理念与思路

根据建构主义学习理论^[4,5],学习是引导学生从原有经验出发,生长建构起新的经验。在教学过程中,主要采用“问题探究式”教学理念,按照实验/现象-理论-应用-拓展的思路开展教学活动,具体的教学思路如图2所示:

- (1) 问题的提出:由生活中常见的相平衡问题导入课程。
- (2) 理论的形成:水的相图分析。

在教师的引导和启发下,结合相律,通过实验测定数据描点划线的方法绘制水的相图,通过分

析得出纯物质相图的特点及规律。

(3) 理论的应用：举一反三及知识拓展。

通过详细分析水的相图，引申到二氧化碳、硫、碳的相图，进一步验证相平衡理论的正确性和适用条件，使得理论进一步合理化，并结合科学前沿拓展认识，在解决“老”问题的过程中提出“新”问题，引出后续知识的内容和发展方向。



图2 教学进程图

3 “纯物质系统相图分析”教学案例设计

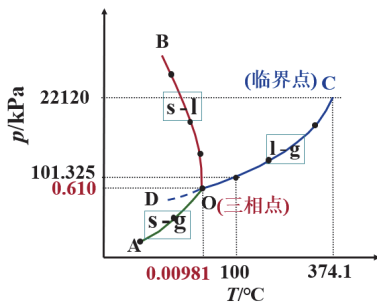
针对本单元的教学难点及重点，结合化学是一门理论和实验并重的学科特点，从问题的提出、纯物质相图理论的形成、纯物质相图的分析及应用、拓展与思考依次展开本节课的教学活动，通过各个教学环节的有机结合，实现从知识传授到能力培养、到价值塑造全方位的人才培养目标。具体的教学环节设计如表1所示。

表1 教学环节设计

教学内容	教学设计意图	教学活动								
1. 问题的提出										
由生活中常见的相平衡问题导入课程： 如：防护镜结雾、雾凇的生成等现象导入本节课的讲授内容—— 物理化学中纯物质的相平衡问题	将相图这一抽象的问题与生活中的现象相结合，引起学生兴趣 ^[6-10]	课前预习环节： 复习热二律中的克拉贝龙方程。发现日常生活中的相平衡现象，并思考现象产生的原因								
2. 理论的形成										
(1) 复习相律并讨论相律在纯物质系统相平衡中的应用：	采用板书对前序知识点相律进行复习，并结合本节纯物质相平衡讨论相律中自由度 <i>F</i> 与相数 <i>P</i> 之间的关系 由相律得出纯物质相图的绘制思路及坐标系的选择	重点内容讨论： 由相律讨论纯物质相图中自由度 <i>F</i> 和相数 <i>P</i> 的关系								
板书： 相律： $F = C - P + 2$ $C = 1 \Rightarrow F = 3 - P$ <table><tr><td><i>P</i></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td><i>F</i></td><td>2</td><td>1</td><td>0</td></tr></table> $F_{\max}$、<i>p</i>、<i>T</i>二维坐标系 ——完整相平衡 <i>p</i>、<i>T</i>——对应 $P_{\max}$			<i>P</i>	1	2	3	<i>F</i>	2	1	0
<i>P</i>	1	2	3							
<i>F</i>	2	1	0							

(待续)

(续表1)

教学内容	教学设计意图	教学活动																																				
(2) 以水为例, 两相平衡实验数据的测定 ① 从水的p-T数据引入: <table><tr><th>$T/^{\circ}\text{C}$</th><th>$p_{\text{冰}}/\text{kPa}$</th><th>$p_{\text{水}}/\text{kPa}$</th><th>$p_{\text{平衡(冰-水)}}/\text{kPa}$</th></tr><tr><td>-15</td><td>0.165</td><td>0.191</td><td>156×10^3</td></tr><tr><td>-5</td><td>0.414</td><td>0.422</td><td>59.8×10^3</td></tr><tr><td>0.00981</td><td>0.610</td><td>0.610</td><td>0.610</td></tr><tr><td>20</td><td>—</td><td>2.338</td><td>—</td></tr><tr><td>80</td><td>—</td><td>47.343</td><td>—</td></tr><tr><td>100</td><td>—</td><td>101.325</td><td>—</td></tr><tr><td>150</td><td>—</td><td>476.020</td><td>—</td></tr><tr><td>374.1</td><td>—</td><td>22120</td><td>—</td></tr></table> 水两相平衡时温度T和压强p的实验数据 ② 三相点的测定: 三相点的测定很有意义, 是我国的化学家黄子卿先生在博期间测得的, 是至今仍被国际温度标准委员会采用的标准温度之一。在讲解过程中穿插化学史中的小故事, 简述我国著名化学家黄子卿先生在三相点测定中的重要贡献, 同时用黄子卿先生在国外学成归国, 为国家的化学教育和科研做出杰出贡献的事例, 鼓励学生学以致用, 报效祖国  物理化学家和化学教育家。1921年毕业于清华学校, 随后赴美留学。1925年在康奈尔大学化学系获理学硕士学位。1925 - 1927年在麻省理工学院化学系从事研究工作。1927年回国, 1929年任清华大学化学系教授。1934 - 1935年再度去麻省理工学院, 进行测定水的三相点的研究, 1935年6月获博士学位。论文中发表的水的三相点温度数据至今仍被国际温度标准委员会采用为标准温度之一。 黄子卿, 1900-1982 (3) 根据纯物质两相平衡时p-T关系的实验数据绘制相图  水的相图	$T/^{\circ}\text{C}$	$p_{\text{冰}}/\text{kPa}$	$p_{\text{水}}/\text{kPa}$	$p_{\text{平衡(冰-水)}}/\text{kPa}$	-15	0.165	0.191	156×10^3	-5	0.414	0.422	59.8×10^3	0.00981	0.610	0.610	0.610	20	—	2.338	—	80	—	47.343	—	100	—	101.325	—	150	—	476.020	—	374.1	—	22120	—	探究式教学方法: 本节课的教学过程中力求从现象到理论, 到问题解决的认知方式, 最终达到学生可以透过现象看本质。在本环节, 通过水两相平衡的实验数据引入, 可以让学生更深刻地领会相图的含义 思政教育科学精神: 通过黄子卿先生测量三相点的历程, 树立学生严谨的科学态度, 并增强学生的民族自豪感和自信心 教学设计: 让学生体会到化学是一门理论和实验并重的科学, 要善于从实验数据中找到规律	结合PPT讲授 结合PPT讲授 利用多媒体设备及动画设计, 先描点, 再画线, 根据两相平衡时的压强p和温度T数值, 逐一画出固气曲线、液气曲线、固液曲线
$T/^{\circ}\text{C}$	$p_{\text{冰}}/\text{kPa}$	$p_{\text{水}}/\text{kPa}$	$p_{\text{平衡(冰-水)}}/\text{kPa}$																																			
-15	0.165	0.191	156×10^3																																			
-5	0.414	0.422	59.8×10^3																																			
0.00981	0.610	0.610	0.610																																			
20	—	2.338	—																																			
80	—	47.343	—																																			
100	—	101.325	—																																			
150	—	476.020	—																																			
374.1	—	22120	—																																			
3. 纯物质相图的分析																																						
(1) 线的分析: $F = 1, P = 2$ 克拉贝龙方程与线: 纯物质两相平衡时, 压强p和温度T的对应关系符合热力学第二定律中讲述的克拉贝龙方程(Clapeyron方程) $\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta_a^\beta S_m}{\Delta_a^\beta V_m} = \frac{\Delta_a^\beta H_m}{T \Delta_a^\beta V_m} \quad \text{---Clapeyron方程}$	教学设计: 通过对于相线斜率的分析, 既可以让学对于纯物质相图有更深入的理解, 还可以更好地掌握热力学第二定律中学过的克拉贝龙方程	与课前预习相呼应: 提问关于克拉贝龙方程的内容																																				

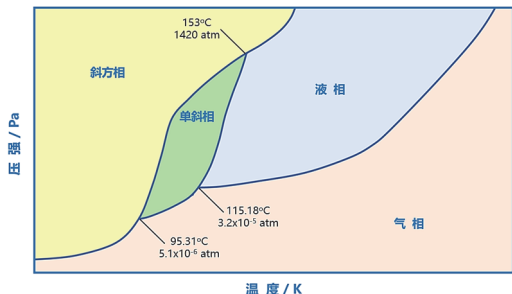
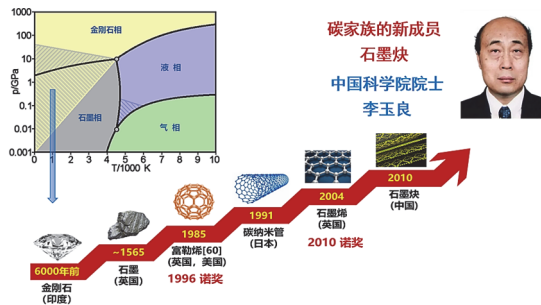
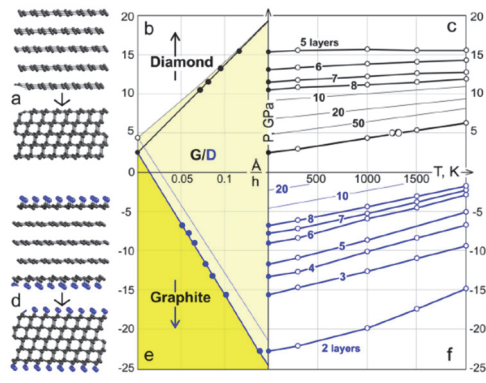
(待续)

(续表1)

教学内容	教学设计意图	教学活动
引申提问：对于通过相图解决实际问题，继续提问：高原煮饭为什么需要用高压锅？引发学生自主思考，高原由于海拔增加引起压强降低，这是气液线的问题，根据气液线的趋势，由于高原压强降低，导致沸点降低，造成做饭不熟的现象，并与相图结合分析问题 作业：按照拉萨平均海拔3600 m，大气压为65 kPa，计算拉萨地区水的沸点		组织学生进行讨论，并在课堂上进行简单的计算、分析 布置课后思考题
(2) 点的分析：$F=0$，$P=3$，三相点自由度为0，温度T和压强p是固定值，不可以变化 三相点与冰点的区别：三相点的分析是本节纯物质相图分析中的难点问题。逐步引导学生注意到三相点和冰点的压强不同，冰点的压强是101.325 KPa，而三相点的压强是0.610 kPa。并对本节的难点问题进行深入的分析 and 解释，让学生了解三相点和冰点的本质区别 三相点：0.61 kPa, 0.0098℃ 冰点：101 kPa, 0℃ 0.0074℃ 压强影响 0.0024℃ 纯度影响	教学重点举一反三： 此问题(气液线：压强的减小导致沸点降低)与上一个问题类似(固液线：压强的增大导致凝固点降低)，可以作为略讲，让学生学会举一反三，会利用所学的知识自主分析问题 难点处理： 用板书的形式将三相点与冰点的温度和压强进行对照，让学生自己观察分析后得出二者的区别，既有利于培养学生发现问题、分析问题的能力，又可以加深学生的印象，达到良好的教学目标	分析讨论：为了引起学生的关注，在“三相点”的讲解过程中，首先设问：“三相点和冰点是不是同一个点？从0.0098℃到0℃是不是近似？”这一看似简单的问题，引起学生注意
(3) 面的分析：$F=2$，$P=1$	教学设计： 此处容易理解，略讲，交待规律即可	通过提问的方式让学生自己总结
(4) 知识点归纳： 总结纯物质相图的规律，点、线、面的特征，点是三相点，$F=0$；线是两相线，$F=1$；面是单相面，$F=2$。纯物质相图的特征可以推广到其他的纯物质相图，因此掌握纯物质相图的特征是把握纯物质相图的关键，也是分析其他纯物质相图的基础	重点总结： 针对本节重点内容，通过板书的设计总结纯物质相图点、线、面中自由度F和相数P之间的关系，加深学生印象，而且便于在课程结尾部分总结纯物质相图的特征及规律	结合板书进行知识点总结
4. 拓展与思考		
(1) 纯物质相图的应用——二氧化碳相图 ① 二氧化碳相图的分析：二氧化碳相图三条线的形状与水的相图类似。水的相图分析为详细讲解部分，二氧化碳相图的分析为略讲部分。重点讲清楚二氧化碳相图与水相图的区别及联系。三条相线的斜率大小和正负是有区别的，具体的解释为克拉贝龙方程(继续深化克拉贝龙方程的应用)	教学设计： 非重点内容略讲，重点把握纯物质相图的特征，培养学生学会举一反三	采用提问形式引导学生自行分析
② 二氧化碳相图的应用：二氧化碳超临界萃取 充分利用所讲理论知识与实际化工生产存在的联系，调动学生学习的积极性，培养学生理论联系实际的能力。通过对二氧化碳超临界点与水的超临界点数值进行对比，发现二氧化碳的超临界点为31℃，7.39 MPa，与水的超临界点对比(374.1℃，22.12 MPa)，比较容易实现。利用超临界点的特点，具有液体的溶解性和气体的流动性，而且二氧化碳还具有廉价、无毒、惰性、易分离等优势，因此被用于超临界萃取，可以用于食品、药品等物质的提取及分离	教学设计(理论联系实际及思政元素)： “二氧化碳超临界萃取”应用的简介，突出节能、无毒、无污染，体现了化学处理过程中的环境友好和食品清洁，并培养学生作为化学工作者绿色环保的基本素养。通过对二氧化碳超临界点萃取咖啡因的简要介绍，既可以让让学生感受到学有所用，基本相图是实际生产的原理。又可以树立化工生产中的环境友好、生态友好的可持续发展理念	结合PPT及超临界萃取案例工艺流程图等进行讲授

(待续)

(续表1)

教学内容	教学设计意图	教学活动
(2) 知识拓展与启发案例——硫的相图 例举硫的相图,从形状上看与水的相图存在明显差异,引导学生找出规律,根据纯物质相图点、线、面的特征,进行分析,从而实现举一反三,真正掌握识图的分析能力  硫的相图	教学方法与知识拓展: 课堂上的有限时间无法对各种纯物质相图进行全面的举例及讲解,故教师在授课内容中重点讲解纯物质相图的规律性内容,让学生了解什么是共性的特点,什么是不同的,引导学生在课下学习及查阅资料的过程中举一反三,掌握分析问题和解决问题的能力。故在本节课针对水的相图作详细分析,在本节课末给出硫的相图和碳的相图,开拓学生的知识面,增加知识的广度,引导学生根据所学的规律,课后自主学习	作为课堂练习题,引导学生自行分析并回答问题
(3) 知识拓展与启发案例——碳的相图:  碳家族的发展历程	知识引申: 例举碳的相图,除了可以利用纯物质相图的规律进行分析,指出碳的相图上还存在着一些未知的阴影区域 思政设计: 简要介绍碳家族的发展历程,包括富勒烯、碳纳米管、石墨烯、石墨炔等,并介绍李玉良院士合成石墨中遇到的困难和挑战,指出我国材料、化学学科在世界领域的重要地位,在潜移默化中培养学生对待科学要一丝不苟,同时也可以树立学生的民族自豪感和自信心,增强对专业领域的兴趣	
 多层石墨烯向金刚石薄膜转变的相图^[11]	前沿拓展: 简要介绍多层石墨烯向金刚石薄膜转变相图的最新研究进展,C相图的进一步延伸,既与本节课知识点密切相关,又可以激发学生对前沿知识和本课程的热情和兴趣,引导学生根据个人兴趣进行课后学习 推荐课后文献阅读: <i>Nano Lett.</i> 2014, <i>14</i>, 676–681.	布置讨论作业:根据教学内容的展开,每章节均有前沿拓展内容。要求学生根据学习兴趣自行选题分组讨论(每组2–3人,每人至少要选择一前沿课题),期末前安排2学时的集中展示,由学生代表展示讨论结果
5. 小结	总结本堂课的学习内容,继续深化纯物质相图的特征并对其进行研究意义略作分析	板书设计: 结合已有板书总结本节课重要知识点

4 “问题探究式”教案设计的应用效果与教学反思

4.1 课堂应用效果

“相平衡”的理论知识是工业分离和提纯技术的基础，同时也是物理化学课程中比较难理解的一部分内容，特别是对于我校材料类的学生，相平衡是其后续课程“物理冶金原理”“材料现代研究方法”的基础，学生普遍反映相平衡理论知识的掌握难度较大，在针对“课程难度和理解程度”的调查问卷中，66.67%的学生认为课程的教学过程难度适中，33.33%的学生认为课程很难。在近期的教学活动中，经过“问题探究式”教案设计及教学实践，课堂上明显能够感知到学生的兴趣和参与度有所提高，学生普遍认为能够较好地理解和掌握“相平衡”一章的基本内容，能够根据相律分析基本相图，并对教师的教学活动安排有很高的评价。调查问卷显示，83.33%的学生认为课程的教学过程难度适中，认为课程较难的同学比例下降至16.67%。图3为案例应用前后对照班“相平衡”一章小测验的正确率对比图，发现改革后每道题的正确率均高于改革前。此外，在经过教案设计后的教学实践中，有91.67%的学生认为前沿知识拓展能够调动课后学习的积极性，从被动灌输转为主动学习；87.5%的学生认为思政环节设计与课程内容紧密结合。因此，应用效果对比充分说明了改革后的教学模式让学生在问题中学习，提升了学生的学习兴趣，从知识传授、能力培养、到学生的价值观塑造，全方位提升了教学效果。

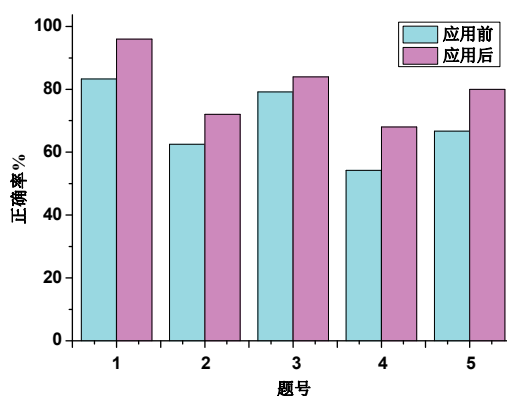


图3 课堂应用效果

4.2 教改前后成绩对比

基于在“相平衡”一章中的教学改革尝试的良好效果，教师逐步在其他章节也开展教案设计改革，图4为改革前后学生的成绩对比。改革前，对照班级的平均分为70.6，优秀率(90–100分)为10.25%，良好率(80–89分)为21.79%，及格率为84.62%；改革后，对照班级的平均分为75.1，优秀率为15.51%，良好率为49.99%，及格率为93.11%。此外，在成绩评定方面，增加了前沿拓展讨论大作业，要求学生根据学习兴趣自行选题分组讨论(每组2–3人，每人至少要选择一前沿课题)，期末前安排2学时的集中展示，由学生代表展示讨论结果，占期末总评成绩的10%。87.5%的学生认为该教学环节很适合，并且可以通过课后调研学到知识。考试成绩显示，经教学改革后，学生成绩的优良率和及格率有显著的提升，这是由于改革后的教案以生活生产中的实际问题或现象为出发点，引导学生将复杂的公式和抽象的理论知识与实际问题的结合起来，能更好地掌握理论知识，并具备利用理论知识分析实际问题的能力，教学目标达成度较高。

4.3 教学反思

根据教育部提出的“两性一度”的金课标准，教师在教学模式上进行了很多探索，从传统的讲授式教学模式到混合型教学模式、研究型教学模式、讨论式教学模式、探究式教学模式等^[3,12]，力争实现课前、课中、课后，线上、线下全方位教学手段的结合，实现更好的教学效果。在本节课的教

学活动中, 由于理论具有很好的应用场景, 采用“问题探究式”教案设计深入浅出, 让学生学习的注意力更加集中, 提高了学习的兴趣。同时, 有些课程内容由于教学时间的关系无法在课堂上深入展开, 为了满足学生高阶性、创新性、挑战度的需求, 在今后的教学活动中, 我们还将根据不同层次的学生, 增加课程内容广度和深度。重点引导学生学习知识点形成和发展过程中的科学方法, 学习基础理论发展过程中的逻辑思维。在课程的各大板块中引入不同深度的案例, 引导学生课后进行分析、比较和讨论, 培养培养学生分析问题、解决问题的能力以及创新思维。

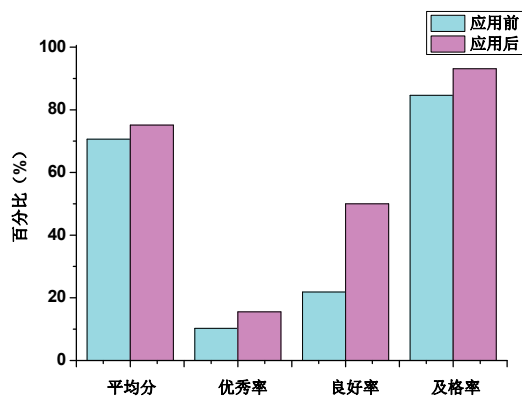


图4 改革前后的成绩对比

5 结语

基于建构主义理论的“问题探究式”教学设计, 目的在于通过精心设计的环环相扣的教学素材和严谨的教学环节, 引导学生从实验开始认识相图的绘制、相图的分析、相图的应用, 理解相律和相图的关系, 总结其特点和规律, 并能够举一反三进行复杂相图的分析。通过教学实践, 在授课过程中, 着重讲授如何将实际问题转化成抽象的理论模型, 既可以激发学生学习的兴趣, 并且可以培养学生发现问题、解决问题、理论联系实际的能力, 取得了很好的教学效果。经过该章节的教学实践活动和取得的良好教学效果表明, “问题探究式”教学思路的设计可以推广到本课程的其他教学板块, 从而形成物理化学课程深入浅出的教学体系。

参 考 文 献

- [1] 张树永, 李金林, 范楼珍, 侯文华, 刁国旺, 郭玉鹏. 大学化学, **2021**, 36 (1), 2009052.
- [2] 天津大学物理化学教研室. 物理化学. 第6版. 北京: 高等教育出版社, 2017: 237-284.
- [3] 那立艳, 张丽影, 支德福, 张树彪. 化学教育, **2021**, 42 (2), 11.
- [4] 彭一鸣, 刘英菊, 刘伟章, 邓远富. 大学化学, **2021**, 36 (7), 2009063.
- [5] 韩莉, 刘萍, 罗漫. 化学教育, **2019**, 41 (4), 26.
- [6] 王广振, 王文亮, 高欣, 张树永. 大学化学, **2019**, 34 (1), 33.
- [7] 王女, 赵勇, 刘兆阅, 田东亮. 大学化学, **2020**, 35 (3), 26.
- [8] 史利国. 站在大学讲台上. 北京: 北京理工大学出版社, 2016.
- [9] 褚继迅, 王萍. 高等数学教学设计. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [10] 孙艳辉, 南俊民, 马国正, 何广平, 左晓希, 李国良, 林晓明. 大学化学, **2021**, 36 (3), 2010015.
- [11] Kvashnin, A. G.; Chernozatonskii, L. A.; Yakobson, B. I.; Sorokin, P. B. *Nano Lett.* **2014**, 14, 676.
- [12] 张树永, 李英, 苑世领, 郝京诚. 大学化学, **2013**, 28 (2), 11.