

基于深度学习的物理化学课程DOK教学实践初探 ——以弯曲液面附加压力和蒸气压教学为例

郭畅^{1,*}, 杨海朋², 方晖¹, 赵英国¹, 李雅婷¹

¹ 安庆师范大学化学化工学院, 安徽 安庆 246011

² 深圳大学材料学院, 广东 深圳 518060

摘要: 为促进学生深度学习, 提升物理化学课程教学质量, 以表面化学中“弯曲表面的附加压力和蒸气压”的教学为例, 从学生实际出发, 应用DOK (Depth of Knowledge, 知识深度)理论划分教学内容等级, 设计不同课堂活动和小组任务, 从力和能量两个角度深化逻辑主线, 体现学科融合, 培养高阶思维。对于教学难点Kelvin方程, 以表现性任务体现生活和生产中的实际应用, 激发兴趣。以小组讨论话题层层递进, 从力对于化学势的影响出发, 将Kelvin方程从单组分系统推广到多组分溶液和多组分化学反应系统, 体现热力学的多元应用, 意义建构。通过课前SPOC (Small Private Online Course, 小规模在线课程)任务清单, 课上雨课堂翻转讨论, 课后公众号展示拓展, 开展混合式教学。经过教学实践, 结合问卷调查和学生产出, 发现基于深度学习的DOK教学, 不仅能帮助学生发展各项高阶能力, 而且学习主动性和实践创新能力都得到有效提高。

关键词: 深度学习; 知识深度理论; 物理化学; 表现性任务; 教学实践

中图分类号: G64; O6

A Preliminary Exploration of DOK Teaching Practice in Physical Chemistry Course Based on Deep Learning: A Case Study on the Additional Pressure and Vapor Pressure of Curved Liquid Surfaces

Chang Guo^{1,*}, Haipeng Yang², Hui Fang¹, Yingguo Zhao¹, Yating Li¹

¹ School of Chemistry and Chemical Engineering, Anqing Normal University, Anqing 246011, Anhui Province, China.

² College of Materials Science and Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, China.

Abstract: This study aims to enhance deep learning and improve the quality of physical chemistry education by applying the DOK (Depth of Knowledge) theory to categorize teaching content. Using the teaching of “additional pressure and vapor pressure of curved liquid surfaces” in surface chemistry as a case, we design diverse classroom activities and group tasks that promote higher-order thinking. To address the challenging Kelvin equation, we incorporate performance tasks that connect theoretical concepts to real-life applications, sparking student interest. Through a progressive, discussion-based approach in group work, students explore the impact of surface tension on chemical potential and extend the Kelvin equation from single-component systems to multi-component solutions and reactions, illustrating thermodynamic concepts and fostering meaningful understanding. A blended teaching approach was adopted, combining pre-class SPOC (Small Private Online Course) tasks, flipped classroom discussions via Rain Classroom, and post-class expansion through public accounts. Teaching practice, supported by surveys and student outputs, demonstrates that DOK-based deep learning not only enhances higher-order cognitive skills but also significantly improves students' learning initiative and practical innovation abilities.

收稿: 2024-08-11; 录用: 2024-10-17; 网络发表: 2025-01-15

*通讯作者, Email: aqguochang@163.com

基金资助: 安徽省线上线下混合式一流课程(2023xsxx173); 安徽省课程思政示范课(2022kcsz170); 广东省本科高校教学质量与教学改革工程立项项目(286)高分子材料与工程专业核心课程群虚拟教研室; 深圳大学教学改革研究项目(000002010901)

Key Words: Deep learning; DOK; Physical chemistry; Performance task; Teaching practice

深度学习概念源自人工智能领域,指通过模仿人脑对信息的处理方式,从大量复杂数据中自动提取模型,分析特征,预测趋势,自我迭代。引申到教育学领域,深度学习成为一种可以帮助学生深度理解知识,实现意义建构的学习方式和学习观念^[1]。面临飞速发展的数智化时代,如何帮助学生发展元认知能力,自我评估,动态反馈,最终达到知识的整合内化、主动建构、批判反思、迁移拓展,孵育终身学习能力,进行社会主义核心价值观引领下的深度学习,是亟需解决的核心问题。

最早用于学业成就评价的知识深度(Depth of Knowledge, DOK)理论,现已延伸拓展到课堂教学领域,成为推动学生深度学习和培养高阶思维的教学设计工具^[2]。DOK将学生认知水平划分为回忆重现(Recall and Reproduction),技能概念(Skill and Concept)、策略推理(Strategic Thinking and Reasoning)和拓展思考(Extended thinking)四个递进等级,从教学内容和学生特点出发,依托不同活动和任务,动态全程监测,促进学生深度学习。

物理化学课程是大学化学及相关专业的核心课程,通过对物理性质的观测,提炼化学运动普遍规律,具有学科融合的天然属性。

为践行我校“举师范旗、走应用路、创特色牌”发展思路,主动对接社会发展需求,坚持“为党育人、为国育才”,有效支撑国家级一流化学专业建设,团队依托省线上线混合式一流课程、省课程思政示范课和省教学示范课的建设^[3],从学生需求出发,以意义建构为目标,划分知识深度等级,设计与实际情境相关的表现性任务作为评估手段,以促进学生动态自评互评,全面提升深度学习能力与水平。

1 基于深度学习的Laplace公式和Kelvin方程教学实践

《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)》^[4]指出,通过物理化学课程的学习,要“能够深化对辩证唯物主义的认识,形成系统的化学学科思维,能够采用科学的世界观和方法论观察、分析和解决问题并做出预测,并藉由分析和解决生产生活中的现象和问题,体现社会责任感、创新意识和科学发展意识”。课程中的表面化学部分为跨学科领域,在新材料开发、能源转换、环境保护、生物医药等多个学科中都有重要的应用价值。其中,Laplace公式和Kelvin方程是表面化学的重要工具,在理解和预测涉及弯曲界面的物理化学现象中发挥着关键作用。随着科学研究的深入,相应方程的应用范围和准确性也在不断扩展和修正^[5,6]。

1.1 教学内容分析

授课内容为“弯曲表面上的附加压力和蒸气压”,设计在两个课时完成。在前期学习中,已经从力和能量两个角度,分析和解读了“表面张力”概念。对于弯曲表面,从力的角度理解附加压力,可拓展Laplace公式的推导方法。附加压力导致弯曲界面相的化学势改变,相变过程出现介稳态。从定性分析到定量表述,对分析曲率半径影响相变参量的Kelvin方程进行讨论,并设计与生活生产相关的表现性任务,促使学生深入辨析和具体应用。同时关注学科融合,介绍学科进展,教学内容框架如图1所示。



图1 教学内容

1.2 学情分析

课程授课对象为化学专业本科三年级学生，学生的热力学基础知识较扎实，具备较好的逻辑思维能力。同时近一学年的混合式教学锻炼了学生发散思维和迁移能力，课堂气氛热烈，大多数学生在教师引导下能够积极完成线上学习，参与分组讨论和汇报展示。

本节内容深化了力和能量两个角度的分析应用，其中Kelvin公式是本节教学重点和教学难点。为此，将Kelvin公式推导作为学生预习汇报任务，在任务评价中引导回顾相平衡判据，锁定化学势核心概念。从表面张力导致的合力——附加压力出发，利用微元法处理化学势变量，推导Kelvin方程。从定性判断和定量计算两个角度，展开小组讨论，引导学生拓展化学势微元法在不同表面系统中的应用，并最终推广到任意系统的多相平衡。

1.3 教学目标设计

按照学生在本节学习过程中所需的深度理解和应用能力，划分教学内容DOK等级，设计相应活动和任务，见表1。

表1 教学内容DOK分级

课时	DOK等级	认知水平	关键能力	内容主题
第一节课	DOK1 回忆重现	回顾界面现象本质，从力和能量两个角度理解表面张力	记忆、理解、应用 (逻辑思维、元认知、学科思维)	弯曲表面附加压力——Laplace方程
	DOK2 技能概念	分析弯曲表面附加压力产生原因和方向	理解、应用、分析 (逻辑思维、运算推理、整合反思)	
	DOK3 策略推理	从能量角度推导Laplace公式 从力角度推导Laplace公式 正确使用Laplace公式计算和分析	分析、评价、创造 (学科融合、决策制定、模式识别、反思批判)	
	DOK4 拓展思考	极小曲面 空化与最大螺旋桨	评价、创造 (逻辑思维、系统思维、意义建构、迁移创新)	
	DOK1 回忆重现	回顾曲率半径和附加压力关系，从热力学角度推导Kelvin方程	记忆、理解、应用 (逻辑思维、学科思维、运算推理)	弯曲表面的蒸气压——Kelvin公式
		回顾化学势判据，总结化学势影响因素		
DOK2 技能概念	由化学势推导曲率半径对单组分蒸气压的影响 评价Kelvin方程意义	理解、应用、分析 (逻辑思维、运算推理、整合反思)		
第二节课	DOK3 策略推理	Kelvin方程的定性分析和定量计算 通过附加压力影响，探求曲率半径对多组分多相系统平衡的影响	分析、评价、创造 (运算推理、学科融合、决策制定、模式识别、反思批判)	
	DOK4 拓展思考	探究化学势微元法在不同系统中的应用	评价、创造 (逻辑思维、系统思维、意义建构、迁移创新)	

同时，介绍空化效应和泡沫的研究(螺旋桨空蚀、超声医学、强力清洗、最小曲面、建筑美学)，培养学生深刻认识基础理论知识对实际应用的科学价值和重要贡献，进一步引领学生树立学科融合，学习强国的正确价值观；通过引入江雷院士在超浸润表面方面的研究、中国科学家王奉超对于Kelvin方程在纳米尺度的修正，帮助学生拓展视野，了解表面科学的研究进展，培养学生批判性思维以及探索未知、追求真理、永攀科学高峰的责任感和使命感。

1.4 任务设计

为了支撑DOK3、DOK4的教学内容，有效促进学生深度学习，设计了预习任务(Flip Task, FT)、表现性任务(Performance Task, PT)和小组讨论话题(Group Topic, GT)，制作任务清单，课前线上发送，课上小组PK，优秀小组汇报。课后拓展心得，及时在课程公众平台展示发布。

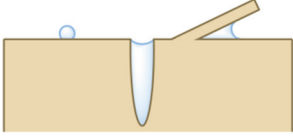
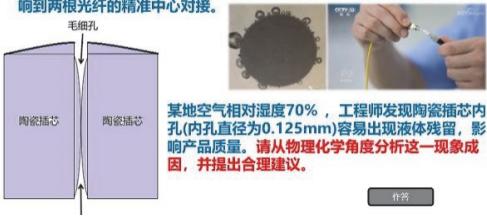
1.4.1 预习任务

本节内容涉及两个重要的表面化学公式——弯曲液面的附加压力和蒸气压计算公式。为促进学生自主学习，布置了相应的预习任务，要求自行推导Laplace方程和Kelvin公式(分别用FT1和FT2表示)，并提交图片作业。教师择优选取两个小组代表，课上进行翻转教学。学生积极性很高，特别是Laplace方程推导，很多小组都没有按照教材的能量角度推导，而是从力的角度出发进行了证明。

1.4.2 表现性任务

结合生活和生产实际，依托特定情境，设定实际角色，设计了两个表现性任务(分别以PT1和PT2表示，见表2)，要求学生应用所学知识和技能完成具体任务，以此评估和延展学生的学习深度。

表2 “Kelvin方程应用”表现性任务具体内容及优秀回答

任务编号	PT1——生活中的应用	PT2——生产中的应用
表现性任务具体内容	<p>主观题 5分</p> <p>表现性任务1</p> <p>如果你是一名金牌家政，为同等条件下衣物如何快速晾干而苦恼，请从物理化学角度提出几点建议？</p> <p>Tips: 为什么泼在地上的水很快就干了，而洗完的衣服却不容易晾干？</p> 	<p>主观题 10分</p> <p>表现性任务2</p> <p>陶瓷插芯是光纤通信产业链中不可或缺的零部件。插芯的好坏直接影响到两根光纤的精准中心对接。</p>  <p>某地空气相对湿度70%，工程师发现陶瓷插芯内孔(内孔直径为0.125mm)容易出现液体残留，影响产品质量。请从物理化学角度分析这一现象成因，并提出合理建议。</p>
小组优秀作答	<p>观察特点→凸凹</p> <p>↓</p> <p>利用 Kelvin公式 $R \ln \frac{p_r^*}{p_l^*} = \frac{2\gamma M}{R^2 \rho}$ $R' > 0 \rightarrow p_r^* > p_l^*$ 蒸气压大于平面, 易</p> <p>$R' < 0 \rightarrow p_r^* < p_l^*$ 蒸气压小于平面, 不易</p> <p>改进(增大 R') $\rightarrow p_r^* = p_l^* e^{\frac{2\gamma M}{R^2 \rho R'}}$</p> <p>↓</p> <ul style="list-style-type: none"> γ, ρ (烘干剂) M, ρ (改变液体性质(干洗剂)) R' (改变浸润程度→衣服的材质(晾干)) 	<p>由水的三相图可知，一定温度下，气体的压力对饱和蒸气压时，才会凝结为液体的。</p> <p>相对湿度 $U = 70\%$ 白天 30°C $p = 4.25 \times 10^3 \text{ Pa}$</p> <p>晚上 20°C $p = 2.33 \times 10^3 \text{ Pa}$ $\gamma = 72.75 \times 10^{-3} \text{ N m}^{-1}$</p> <p>已知: R' 相对湿度 $U = \frac{p_r}{p_l}$ ①弯曲液面内压力 $p_r < p_l$</p> <p>计算: $p_r = U p_l = 70\% \times 4.25 \times 10^3 \text{ Pa} = 2975 \text{ Pa}$</p> <p>$\ln \frac{p_r}{p_l} = \frac{2\gamma M}{R^2 \rho R'} = \frac{-2 \times 72.75 \times 10^{-3} \times 18 \times 10^{-3}}{8.314 \times 297 \times 0.125 \times 10^{-3} \times 1000} = -8.32 \times 10^{-4}$</p> <p>$p_r = p_l e^{\frac{2\gamma M}{R^2 \rho R'}} = 0.99 p_l = 0.99 \times 2.33 \times 10^3 \text{ Pa} = 2306.7 \text{ Pa} < p_{\text{sat}}$</p> <p>∴在夜间, 水蒸气会在细孔中凝结。</p> <p>措施: $\frac{2\gamma M}{R^2 \rho R'} = \frac{2\gamma M}{R^2 \rho R'}$</p> <ol style="list-style-type: none"> 改变 R'，表面改性，使液滴在细孔表面上不能润湿，使 $R' > R$。 改变 p_l，改变湿度，使 $p_r > p_{\text{sat}}$ 时，水蒸气不凝结。 $2306.7 \text{ Pa} \geq U p_l \Rightarrow 527.28 \geq U$ 改变 T，增大 $T \Rightarrow$ 饱和蒸气压增大，这样液滴蒸气压就会小于饱和蒸气压，蒸汽不易凝结。
拓展教学	如何改变表面浸润程度？如何道法自然？——介绍江雷院士的开创性工作	毛细凝聚在纳米器件生产中的影响如何？亚纳米尺度下 Kelvin方程还能适用吗？——介绍中国科学家王奉超的 Nature 论文

PT1是定性分析，立足生活场景，教师略作引导，大家就发现Kelvin方程可联系日常体验，都激发了极大兴趣，小组讨论也热度飙升。讨论结果中关于表面改性的思路，又可进一步拓展，介绍江雷院士在超浸润表面方面的原创性研究，培养学科志趣。

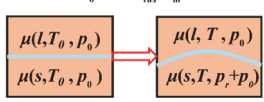
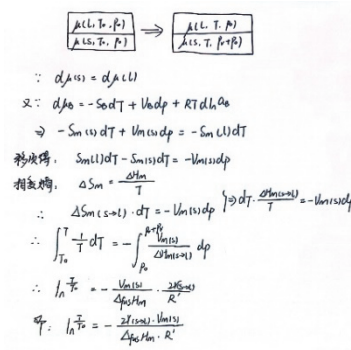
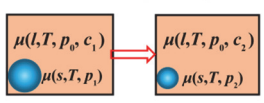
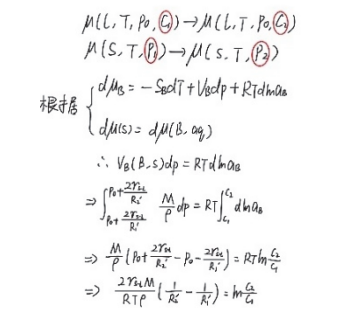
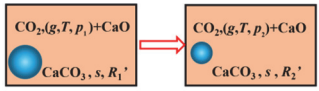
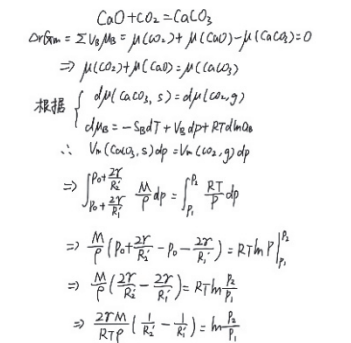
PT2需要定量计算,依托生产实际,其背景是我国作为全球产销规模最大的5G光纤产业集聚地,光纤陶瓷插芯产销量蝉联全球第一^[7]。由于插芯内径较小,容易出现毛细凝聚现象。PT2信息中没有给定具体参数,各小组需要分析判断所需数据种类,自行查询。在小组展示讨论结果之后,提示大家进一步思考毛细凝聚在纳米器件生产中的影响。并介绍中国科学家王奉超的*Nature*论文,修正后的Kelvin方程能应用于亚纳米尺度^[5],说明了物理化学基础理论知识的强大生命力。

通过对表现性任务PT1和PT2的现象成因分析、解决方案设计和教师点评拓展,充分体现了课程内容的高阶性、创新性和挑战度,有效训练学生对于Kelvin方程的高阶应用能力。

1.4.3 小组讨论话题

基于DOK3“Kelvin方程的定性分析和定量计算”中的主体思路——附加压力改变弯曲表面的化学势,定性分析凸面、凹面系统中的参量变化趋势,再通过经由FT2归纳的化学势微元法进行定量计算。而在DOK4“探究化学势微元法在不同系统中的应用”中,分别针对单组分多相系统、多组分多相系统及化学反应系统设置了相关话题,用GT1、GT2和GT3表示(见表3)。如果线下课时不够,也可安排作为课后作业进行评价。

表3 小组讨论话题具体内容及优秀解答

话题编号	小组讨论话题具体内容	小组优秀解答	讨论提示
GT1	<p>主观题 5分</p> <p>分组讨论</p> <p>物理化学</p> <p>试证明半径为R的球形小颗粒固体的熔点T满足如下关系:</p> $\ln \frac{T}{T_0} = -\frac{2\gamma_{sm} V_m(s)}{\Delta_{fm} H_m R'}$ <p>Tips:</p>  <p>作答</p>		温度对化学势的影响
GT2	<p>主观题 5分</p> <p>分组讨论</p> <p>物理化学</p> <p>试证明固体粒子的溶解度c和粒子半径R之间满足如下关系:</p> $\ln \frac{c_2}{c_1} = \frac{2\gamma_{s-l} M}{RT\rho} \left(\frac{1}{R_2'} - \frac{1}{R_1'} \right)$ <p>Tips:</p>  <p>作答</p>		活度对化学势的影响
GT3	<p>主观题 5分</p> <p>分组讨论</p> <p>物理化学</p> <p>试证明细粒碳酸钙分解压力p和粒子半径R之间满足如下关系:</p> $\ln \frac{p_2}{p_1} = \frac{2\gamma M}{RT\rho} \left(\frac{1}{R_2'} - \frac{1}{R_1'} \right)$ <p>Tips:</p>  <p>作答</p>		化学势的化学平衡条件

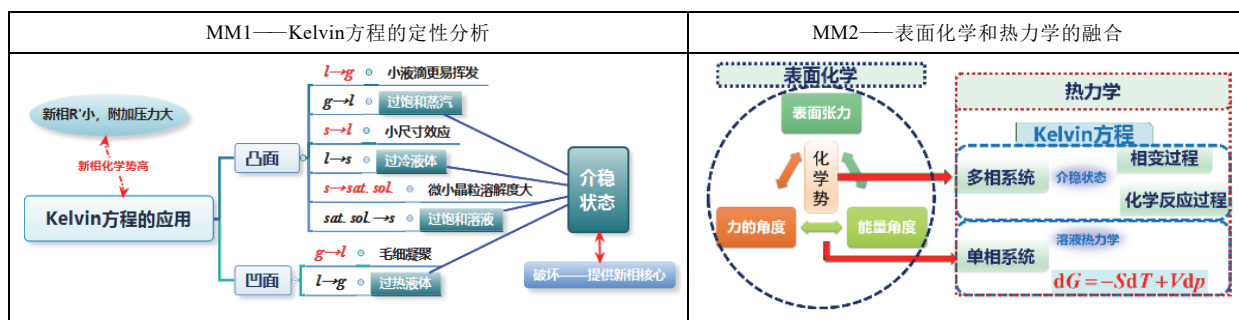
GT1考察含表面相的单组分系统平衡温度的变化,微元法等式中需要体现温度变量。GT2考察含表面相的多组分系统溶解平衡中浓度的变化,微元法等式中需要考虑组分B的活度变量。最后,对于含表面相的多组分化学反应系统,GT3考察表面张力对化学平衡条件的影响。

这三个小组讨论话题,体现了化学势微元法在不同表面系统、不同平衡下的应用。通过变式练习和讨论,阐述Kelvin方程的热力学本质,在对上学期热力学知识的回顾和应用中,整合内化学科知识框架。同时,课后拓展思考,鼓励学生对化学势微元法在单组分单相系统和多组分溶液系统中的应用进行意义建构,迁移应用。

1.4.4 思维导图设计

图谱类板书在混合式教学中必不可少,甚至有画龙点睛之用。为了帮助学生快速梳理内容的逻辑顺序,融会贯通,设计使用了相应的思维导图(Mind Mapping, MM),分别用MM1和MM2表示(见表4)。

表4 板书导图设计



在DOK3“Kelvin方程的定性分析和定量计算”中,对于不同表面相系统,如果生成相的化学势过高,就会形成介稳状态。师生在对不同曲面不同相变方向的定性讨论中,通过G1的板书归纳,厘清思路,推演结论,深化学科思维。

表面化学是从力和能量两个不同角度进行的研究,其中附加压力对于化学势的影响就是Kelvin方程的热力学本质,课终总结时,通过G2的板书,高效构建热力学和表面化学主体内容,以核心概念化学势为关键点,促进同化顺化,质疑反思,在学科融合中迁移应用。

1.5 教学流程

依托课前线上学习、课上翻转讨论和课后展示拓展,融合表现性任务和小组话题,强化多角度、多维度对弯曲表面的研究,将教学内容转化为目标线、活动线和任务线,及时评价反馈,促进深度学习。在第一课堂的课上教学中,按照DOK教学目标,设计不同类型的多元活动,以学生为主体,在教师引导下完成对应任务,达成教学设计意图。两个主题的教学流程分别见图2和图3。

2 教学讨论和成效

团队依托自建虚拟教研室,校级交流学习,探讨物理化学教学改革方向和手段,在践行“1421”理工类专业课程建设模式^[3]基础上,实施了基于深度学习的物理化学课程DOK教学实践。

前述以“弯曲表面上的附加压力和蒸气压”为主题的教学设计获得第三届全国高校教师教学创新大赛基础课程正高组二等奖,得到专家同行的高度肯定。

为了验证物理化学DOK教学下学生的深度学习效果,我们分别在开课前和一学年的教学实践之后,采用包含“深度学习动机、深度学习投入、深度学习策略和深度学习结果”四个维度的深度学习评价量表^[8],对安庆师范大学化学化工学院化学专业本科三年级同学进行了问卷调查。

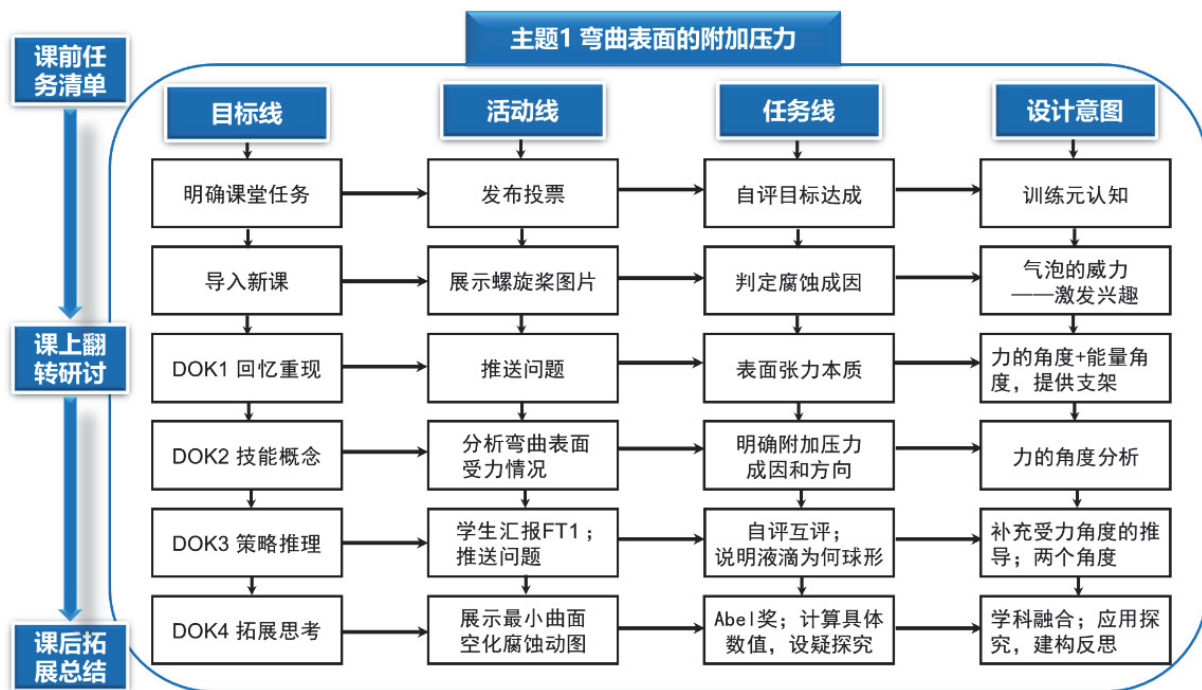


图2 弯曲表面附加压力的教学流程

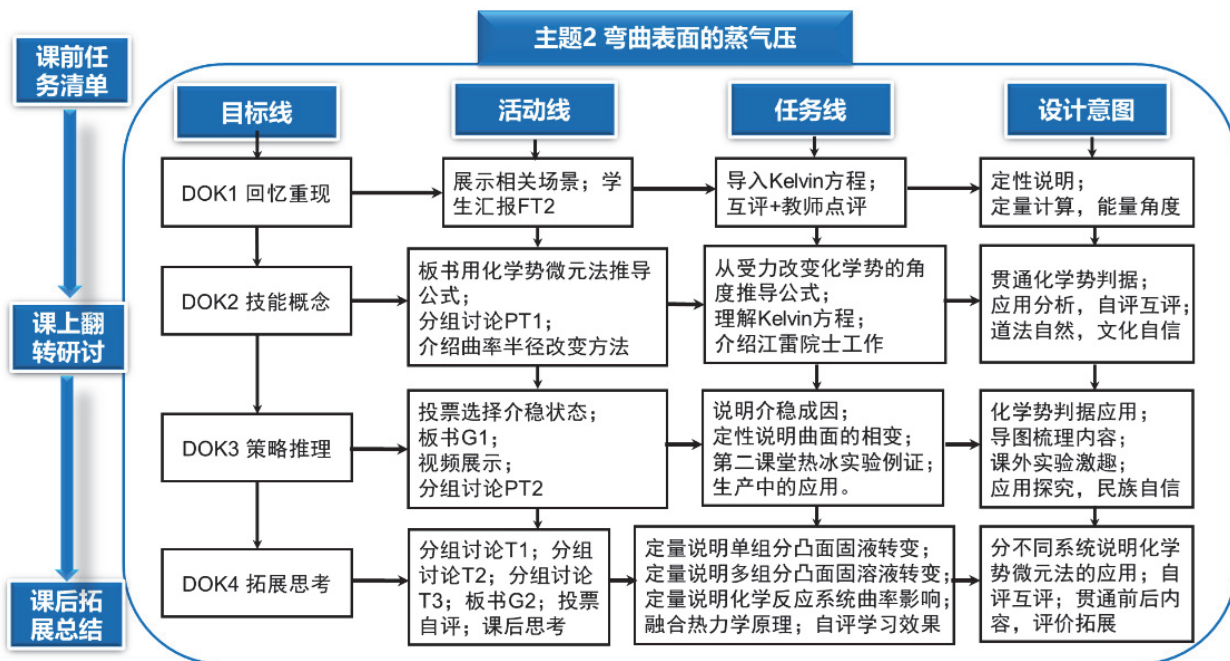


图3 Kelvin方程的教学流程

按照Likert量表分别将对应选项“极大提高、较大提高、有点提高和没有提高”，赋分为4、3、2、1分，计算各选项平均得分。对比开课前和结课后(见图4)，发现实施DOK教学实践之后，四个维度平均分都明显增长。其中，深度学习策略维度得分增长最为明显。该维度共包含15个不同子项，涵盖回忆分析、描述推理、判断反思、整合拓展、关联应用等多方面的学习策略，对比可见，相应选项中“很经常”的占比增长迅速。说明学生能理解和选择适合自己的学习策略，主动学习。

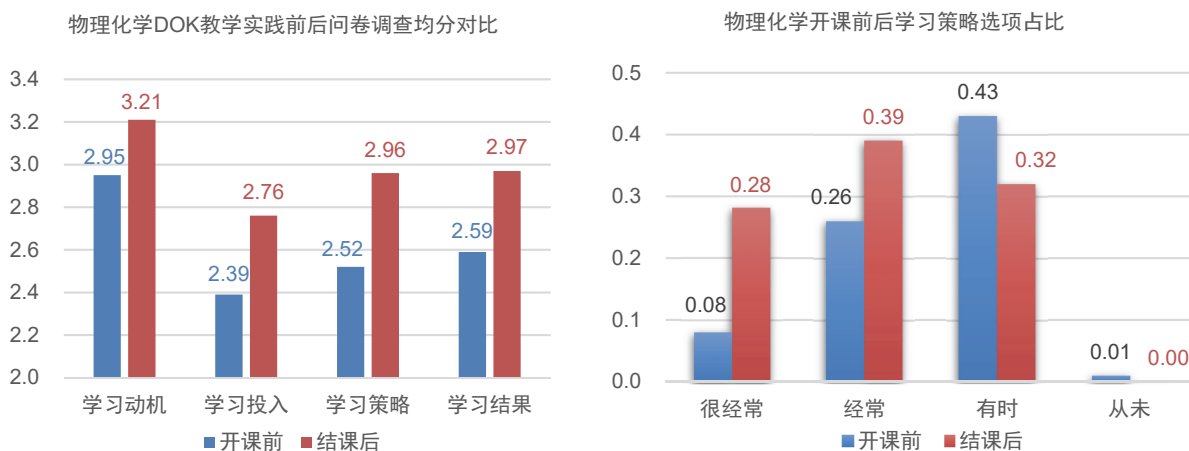


图4 基于深度学习的物理化学DOK教学实践前后问卷对比

在深度学习结果维度中,开课前后四级选项所占比例见图5,虽然“较大提高”和“有点提高”的比例有所减小,但是“极大提高”占比增长极为明显。深度学习结果的维度一共包含10个能力评价指标,可以看出,在“c.自主学习能力和“d.信息获取、筛选与提取的能力”这两个子项,学生自评的“极大提高”占比最大。对于“b.广泛涉猎各个知识领域”“a.深厚的专业知识和技能”“e.复杂问题解决能力”“g.口头和书面表达能力”“i.自信心”“j.浓厚的学习兴趣”这6个子项,“极大提高”和“较大提高”占比之和较大。在“f.批判性思考能力”和“h.与他人合作的能力”这两个子项指标上,相对表现不突出,后期在教学中应重点关注这两方面的相关训练。总体看来,物理化学DOK教学实践,能有效提升学生元认知能力和学习兴趣,提高深度学习的效率和成效,对于学生高阶能力的发展确实很有帮助。

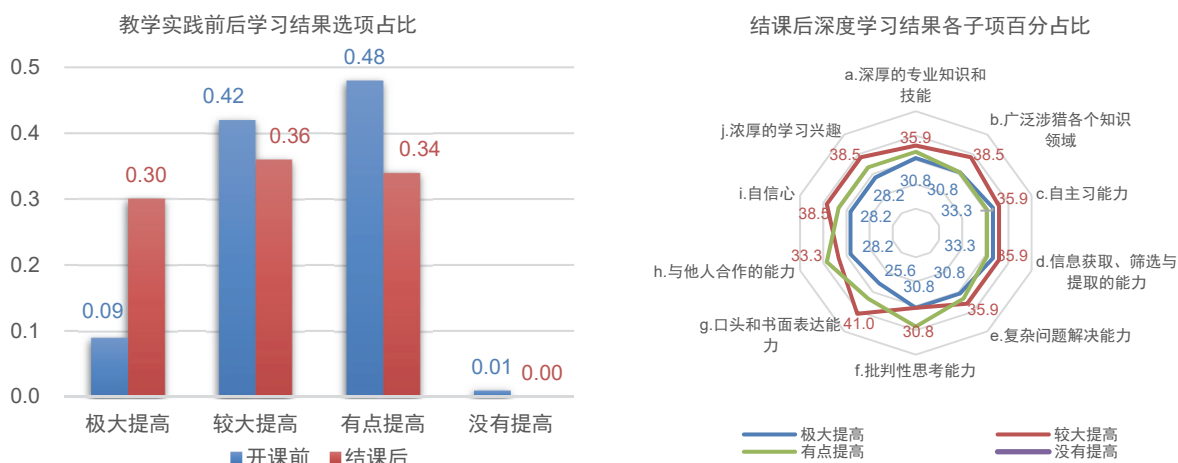


图5 教学实践后的深度学习能力促进情况

学生依托第二和第三课堂,积极主动开展课外和科研实践,在教学团队指导下先后斩获数十项国家级、省市级创新创业赛事大奖,创新实践能力显著增强。同时,学生还在第四课堂——课程公众平台“畅谈物化”上踊跃投稿,积极分享科研实践、课后总结和学习心得^[9-11],学习氛围浓厚。21级化学专业李金桥同学,从开课前B站5千粉丝,增长为结课时近4万粉丝的大UP主。团队课程建设

成果获得一定认可, 2023年12月获批安徽省线上线下混合式一流课程, 2023年10月加入师范院校物理化学课程虚拟教研室, 2024年7月加入“101计划”物理化学课程虚拟教研室。依托两大国家级平台, 积极向高水平大学学习, 扩大交流范围和研讨深度, 有力支撑了本课程的持续建设和教学改革的持续深入。

3 结语

基于知识深度的DOK教学模式有效融合目标线、活动线和任务线, 强调从问题解决与应用、思维迁移与创造层面设计对应的活动和任务, 强调学生通过深层次的思考和理解来掌握知识。鼓励学生进行批判性思维、创造性思考和自主学习, 以实现知识的深入理解、主动建构和迁移应用, 真正促进深度学习。在教学实践中, 着眼于学科思维和学科融合两个角度, 同时注重学科之思——探索精神、社会责任、批判反思、科学伦理, 与科学之美——价值引领、情知互促、文化自信、实践创造等元素的融合, 如雨润酥, 如春在花, 彰显教育魅力。

参 考 文 献

- [1] 陈明选, 周亮. 华东师范大学学报: 教育科学版, **2023**, *41* (8), 53.
- [2] 叶冬连, 胡国庆, 叶鹏飞. 现代教育技术, **2019**, *29* (12), 35.
- [3] 郭畅, 方晖, 白国梁, 赵英国, 黄荣谊, 吴腊霞. 大学化学, **2022**, *37* (10), 2203085.
- [4] 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.
- [5] Yang, Q.; Sun, P. Z.; Fumagalli, L.; Stebunov, Y. V.; Haigh, S. J.; Zhou, Z. W.; Grigorieva, I. V.; Wang, F. C.; Geim, A. K., *Nature* **2020**, *588*, 250.
- [6] Kaptay, G. *Adv. Colloid Interface Sci.* **2018**, *256*, 163.
- [7] 焦点访谈: 隐形冠军 一路追“光” 领“纤”世界. [2024-09-14]. https://m.gmw.cn/2022-09/01/content_1303119300.htm
- [8] 李玉斌, 苏丹蕊, 李秋雨, 任永功. 电化教育研究, **2018**, *39* (12), 94.
- [9] 畅谈物化. 学姐说——物化助创新. [2024-09-19]. https://mp.weixin.qq.com/s/MsrH3m_PZt_Qj1e8gd1Xog
- [10] 畅谈物化. 同学谈——微元法推导Kelvin方程及应用. [2024-09-19]. <https://mp.weixin.qq.com/s/tqBC8dC0i-GOv79Cfe3cfcg>
- [11] 畅谈物化. 学姐说——物理化学学习感悟. [2024-09-19]. <https://mp.weixin.qq.com/s/zlbqis9uGzZyNkgEYGj-jQ>