

## 物理化学实验课程的逆向性教学实践初探 ——以化学反应动力学为例

谭德新, 梁莉敏, 吕宝苾, 关惠文, 陈海程, 王艳丽\*

岭南师范学院化学化工学院, 广东 湛江 524048

**摘要:** 为促进物理化学及实验教学的模式改革与创新, 以化学反应动力学为研究主线, 借助逆向性(UbD)教学模式, 通过预设学习目的、确定评价体系和设计教学环节, 实现高效教学。逆向性教学实践的课程设计, 不仅能提高学生自主学习积极性, 提升思政、探究以及创新能力, 帮助学生构建知识体系, 还能让学生知识和技能迁移、原理和态度迁移, 为高校人才培养提供新途径。

**关键词:** 物理化学; 实验教学; UbD模式; 化学反应动力学; 人才培养

**中图分类号:** G64; O6

## Exploring Reverse Teaching Practices in Physical Chemistry Experiment Courses: A Case Study on Chemical Reaction Kinetics

Dexin Tan, Limin Liang, Baoyi Lv, Huiwen Guan, Haicheng Chen, Yanli Wang\*

School of Chemistry and Chemical Engineering, Lingnan Normal University, Zhanjiang 524048, Guangdong Province, China.

**Abstract:** To advance the reform and innovation of physical chemistry and experimental teaching methods, this study explores the application of reverse teaching practices, focusing on chemical reaction kinetics. Utilizing the Understanding by Design (UbD) framework, the course design incorporates pre-setting learning objectives, establishing an evaluation system, and creating structured teaching segments to achieve efficient instruction. This reverse teaching practice not only enhances students' self-directed learning and abilities in political thought, inquiry, and innovation but also aids in the construction of their knowledge systems. Additionally, it facilitates the transfer of knowledge, skills, principles, and attitudes, offering a novel approach to talent cultivation in higher education.

**Key Words:** Physical chemistry; Experiment teaching; Understanding by design; Chemical reaction kinetics; Talent cultivation

UbD (Understanding by Design)教学模式是指“以终为始, 意义为主, 追求理解”的教学设计, 也称为“逆向性设计”。UbD教学是在20世纪末由Grant Wiggins和Jay Mactighe提出的教学设计理论, 也是美国教学改革中涌现出的高效课程设计框架, 被美国各阶段教育所广泛使用<sup>[1]</sup>。在中国知网以“UbD”为主题进行检索, 可发现2015年以前年发表文章仅为个位数, 2016年至2021年间文献数量不足百篇, 2022年后UbD相关文献报道明显增多, 主要在基础教学领域。

而目前高校实验教学仍存在大量问题。如实验技术参差不齐, 教学效果不稳定; 课程评价体系模式化、单一化, 难以全面了解学生学习达成度, 尤其是物理化学实验的逻辑性较强, 传统的教

学模式学生难以理解；学生对实验课程的学习积极性不高等问题。鉴于此，我们设想将UbD教学模式与物理化学实验有机结合，为教师提供新的教学方式与挑战，对推进思政教育也具有积极意义，表现在：(1) 深化大概念个性理解。通过反应动力学讲解，理解参数物理意义并比较实验方案，实现理论与实践的关联、认知与情感的协调统一。(2) 构建系统知识体系，促进知识与技能迁移。对概念、方法和原理对比分析、归纳总结，对各学科已学知识加深理解和应用，构建知识体系，培养物理化学学科思维，进一步实现知识与技能迁移。(3) 深化辩证唯物主义认识。不断学习认识动力学对经济社会发展 and 科学技术的重要性，培养科学精神与和社会责任感，体现科学发展意识<sup>[2]</sup>。

## 1 UbD模式下化学反应动力学课程的实施

实验教学在人才培养上占据重要地位。基于UbD模式对物理化学实验课程进行改进，以“化学反应动力学实验”为导向，帮助学生理解化学反应动力学，完成知识体系构建，达成单元课程思政<sup>[3]</sup>。本实验课程针对化学专业大三学生开设，设置于物理化学综合实验课，课程以小班进行教学，小组形式展开，每组3–4人，共计4课时，课程教学划分为三个阶段：预设学习阶段、确定评价体系阶段和设计教学阶段。具体课时安排如表1所示。

表1 课时安排

实验课	主要内容	时长/节
第一次课	讲解动力学方程推导过程及运用，演示动力学参数求解方法	2
第二次课	讲解差示扫描量热仪的工作原理以及使用方法，带领学生完成单体动力学热分析测试操作	1
第三次课	引导学生利用典型的动力学参数求解模型对反应参数求解；学生分享学习结果、撰写学习报告并进行汇报	1

### 1.1 预设学习目的阶段

设计引导性问题、创设问题情境，使学生的学习目标动态生成，这是UbD教学模式设置的关键环节。此方法为学生深入掌握课堂知识、理清学习思路，初步建立相关知识体系提供切实可行的方法。教师在“学习通”教学平台上发布基础的课前预习测试，例如【问题1】–【问题4】(表2)。

表2 预习问题、知识体系构建及思政教学元素

序号	问题	知识体系构建	思政元素
1	列举生活中有关化学反应动力学的例子，了解其实际应用价值及意义	建立生活与学科知识的联系	理论联系实际。初阶知识构建，探索绿色生活和可持续发展理念
2	化学反应动力学公式推导及参数求解方法归纳与总结	创设化学反应动力学公式推导流程	探索精神。挑战困难、创新尝试，寻找有效解决问题方法，培养坚忍不拔的精神
3	化学反应活化能的求解，化学软件Origin数据分析	构筑差热分析求解过程及计算方法	求真精神。锻炼理性思维，掌握科学原理和实际运用，增强动手能力
4	化学反应动力学参数对比分析	构建反应活化能求解方法知识体系	科学精神。培养批判性思维和达成目标的持续动力，促进人格发展，体现学生对知识体系的构建

针对开放性【问题1】，教师在课前发布“化学反应动力学生活实例”话题讨论，预热课堂气氛，让学生了解其重要性及相关度。教师可以结合自己的科研方向补充讲述自身在化学反应动力学领域的工作，拉近师生间的关系，同时加深同学们对国家科学研究的自豪感<sup>[4]</sup>。针对【问题2】–【问题4】，引导学生利用万方、中国知网和维普数据库查阅资料，了解化学反应动力学推导过程及参数求解、差示扫描量热仪的工作原理及操作。教师结合学生在“学习通”平台上提交的答案进行分析整

合, 确保教学更加贴合学生实际需求, 真正体现“学生为主体, 教师为主导”的教学理念。这样的设计不仅有助于推进学生对化学反应动力学在其他领域学习中的迁移和应用, 满足教学对能力的发展要求, 还能为学生认识与改造世界提供世界观和方法论。借此, 教师根据学生的预习情况融入思政元素, 这样就能在教学过程中更好地把握教学目标, 体现出以终为始的教学理念, 进而确定合适的评价体系。

## 1.2 确定评价体系阶段

确定合适评价体系是目标确定和教学实施的过渡阶段, 以学生对动力学的了解程度及重要性的认识程度作为指标来进行下一步教学计划<sup>[5]</sup>。通过“学习通”让学生互相评价课前预习题, 可以激发学生的学习动力, 提高学习效率。同时, 采用“自评”与“他评”的方式进行评价, 也能培养学生的自我反思能力和团队合作精神。在“自评”环节中, 学生在错题下方备注做题遇到的困难以及所需帮助, 引导学生自主思考, 发现学习目标, 激发学生自主构建知识体系。“他评”环节设置评语环节中, 使学生思考自身与同学的思维差别, 完善问题答案并重新提交, 该环节有助于学生对问题的多元思考, 勤于反思与深化理解, 符合UbD的教学理念。此外, 在评价过程中, 学生还可以对自己的学习情况进行查缺补漏, 不断完善自己的学习方法和策略。这不仅能够加强学生的自主学习能力, 还能培养学生的动态、多元和深层的学习过程。教师还可以通过“学习通”中的数据分析功能, 了解学生的学习时长、学习频率和学习效果, 从而对学生的学习情况进行全面的评价。这种评价方式不仅能够达到知识传授的目的, 还能关注学习过程, 真正做到“以学生为中心”的教学理念。最后, 教师可以对学生的评价结果进行归纳和点评, 帮助学生归纳总结课程内容, 提高学习效果。这样的评价方式能够为教师提供可靠的教学依据, 从而设计出更加适合学生的教学环节。

## 1.3 设计学习体验与教学阶段

在这一阶段, 小组成员首先研讨实验, 明确求解动力学参数过程, 采用差示扫描量热仪定量测量物质反应特性, 借助阿伦尼乌斯方程, 利用多种动力学方法求解参数并给出其意义。学生能够进一步理解动力学作用, 构建知识体系, 达成教学目标。

### (1) 环节1——化学反应动力学方程推导。

化学反应动力学方程的推导是本单元内容的重点和难点, 故将方程推导放于教学内容前半部分有助于后续知识引入<sup>[6]</sup>。结合UbD教学模式引导学生发散思维思考: 如何将转化速率 $da/dt$ 与动力学方程联系进而求解参数有助于学生的理解。鉴于学生通过前期预习和讨论有了一定的知识基础, 教师可以开展这一环节的学习。依据高等数学知识, 教师通过方程式(1)和(2), 整理得式(3)。

$$\frac{d\alpha}{dt} = kf(\alpha) \quad (1)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) f(\alpha) \quad (2)$$

$$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = \ln A + \ln f(\alpha) - \frac{E_a}{RT} \quad (3)$$

其中 $k$ 为反应速率常数;  $T$ 为开尔文温度, K;  $E_a$ 为活化能,  $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ;  $R$ 为气体摩尔常数,  $8.314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$ ;  $A$ 为指前因子,  $\text{s}^{-1}$ ;  $\alpha$ 为转换程度;  $t$ 为时间, s;  $f(\alpha)$ 为反应机理函数。以 $\ln(da/dt)$ 对 $1/T$ 作图, 由图中直线斜率 $-E_a/R$ 可求得活化能。学生将这种方法与教材上的参数求解方法进行对比, 不难发现此方式摒弃以往教材老旧、单一的求解过程, 在求解化学反应动力学参数上进行创新, 无需测定速率常数, 而是直接通过单体的转化率求解, 同样能求出动力学参数, 使得参数的求解创新化、多元化。学生在推导公式的过程中, 进一步深化高数积分、微分的应用, 此过程使学生活用学习思维和提升求真精神。

### (2) 环节2——化学反应动力学实验探究。

学生在学习物理化学动力学章节和材料分析现代测试技术基础上, 教师实操并讲解仪器测试过

程。同时还要注意强化实验室安全教育,体现集体责任意识。通过仪器获得数据,借助化学信息学中 Origin 软件学习绘制曲线,此过程可增强学生实际运用与理论知识相结合,进一步认识到科学技术的重要性。如图 1 所示,其中横坐标代表温度( $^{\circ}\text{C}$ ),纵坐标代表热流量( $\text{mW}\cdot\text{mg}^{-1}$ ),曲线表示一种单体在不同升温速率下发生反应放出不同的热量。学生在教师的引导下分析曲线特征温度,可获得不同升温速率下起始温度  $T_i$ 、峰顶温度  $T_p$  和终止温度  $T_f$ ,对应数据如表 3 所示。

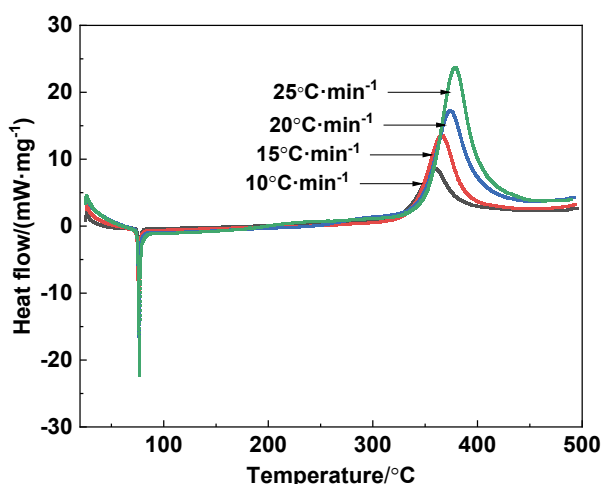


图1 不同升温速率下物质差示扫描量热图

表3 物质反应特征温度

$\beta/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1})$	$T_i/^{\circ}\text{C}$	$T_p/^{\circ}\text{C}$	$T_f/^{\circ}\text{C}$	$t/\text{min}$
10	313.39	357.21	401.47	8.81
15	324.23	365.45	419.77	6.37
20	332.19	373.90	438.81	5.33
25	335.45	378.37	456.37	4.84

$\beta$ 为升温速率;  $t$ 为固化时间

具体计算过程如下,以  $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  升温速率为例,教师引导学生运用 Origin 软件对数据进行积分得到图 2a。首先假设  $H_t$  为某时刻单体反应的热焓值(阴影面积);  $H_0$  为单体完全反应的热焓值。根据转化率  $\alpha$  定义式可知,转化率表示为某时刻的反应热和完全反应热焓值两者的比值( $\alpha = H_t/H_0$ ),根据表 3 的  $T_i$  和  $T_f$  温度区间进行积分,从而得出相应的转化率曲线如图 2b,在这里可以引入热焓理论来解释这种现象。将图 2b 对表 3 中的固化时间微分得到图 2c,即转化速率与温度关系曲线。由图 2c 易见,在同一升温速率下转化速率随温度的增加呈现先增后减的趋势,此教学过程体现 Origin 软件与教学融合,提升学生科研素养。为了让学生掌握知识间的逻辑关系,接下来讲解不同方法对参数的求解。

关于定量求解参数,目前较为常用的求解方法是 Ozawa 法、Kissinger 法以及 Flynn-Wall-Ozawa 法。除此之外,还有 Friedman-Reich-Levi、Starink、Dollimore、Kissinger 迭代法等<sup>[7]</sup>。

Dollimore 法:

$$\lg\left(\beta \frac{d\alpha}{dt}\right) = m \lg T + \lg[Cf(\alpha)]$$

FRL 法:

$$\ln\left(\beta \frac{d\alpha}{dt}\right) = -\frac{E_a}{RT} + \ln[Af(\alpha)]$$

利用式(3)及图2c, 有效地检验学生对公式的推导及Origin数据分析的掌握程度。采用Kissinger法和Flynn-Wall-Ozawa法进行教学便于学生理解。

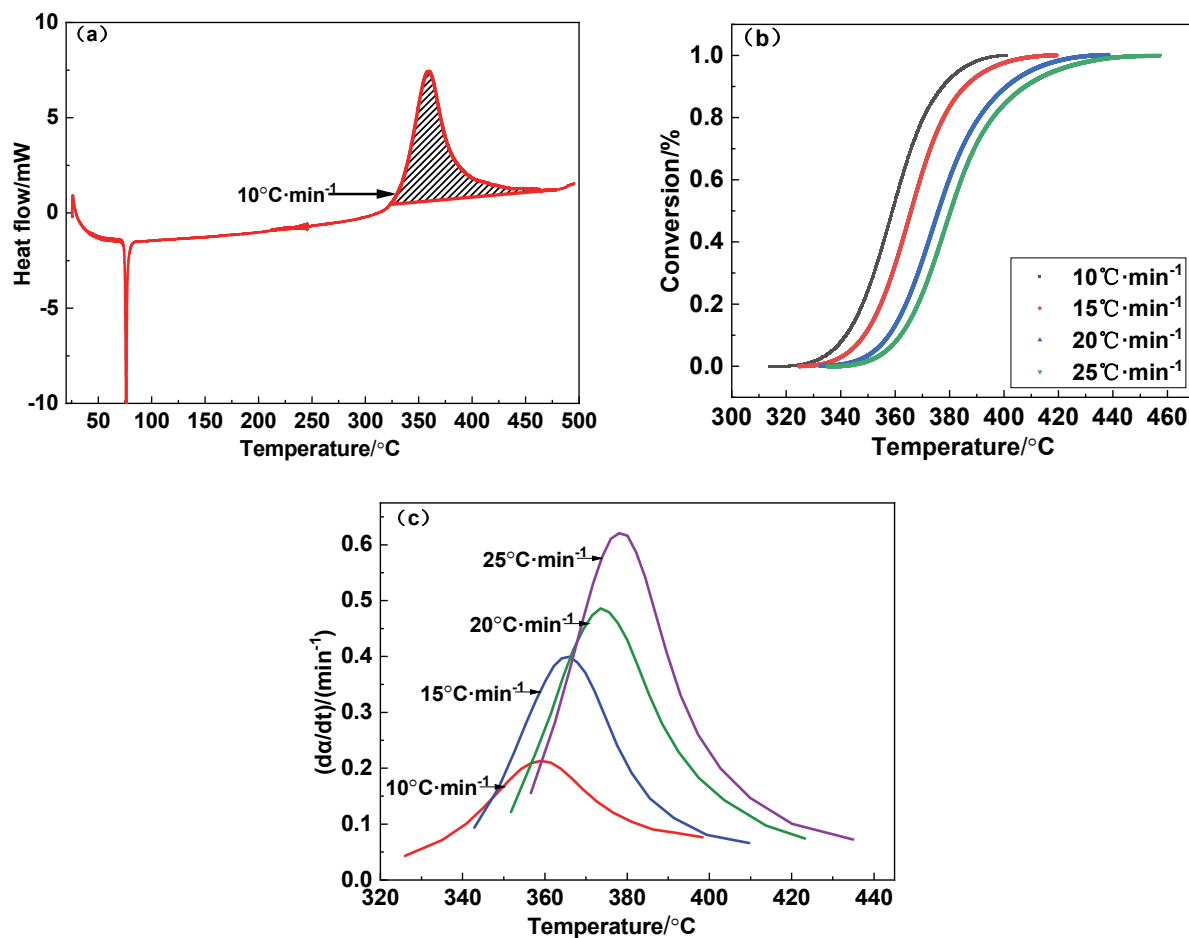


图2 (a) DSC曲线; (b)  $\alpha$ - $T$ 关系曲线; (c)  $d\alpha/dt$ - $T$ 关系曲线

### ① Kissinger法

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_p^2}\right) = -\frac{E_a}{RT_p} + \ln\frac{AR}{E_a} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (4)$$

其中 $T_p$ 由表3中的数据获得, 以 $\ln(\beta/T_p^2)$ 对 $1000/T_p$ 作图得图3a, 由线性拟合可知相关系数为 $R^2 = 0.9906$ , 斜率为 $-E_a/R = -16.01$ , 通过斜率可以求得的 $E_a = 133.11 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ , 通过截距可以求出 $A = 4.42 \times 10^7$ 。学生经小组讨论发现Kissinger法无需用到机理函数, 对于参数求解具有普适性, 利于形成高价值、高效率课堂。

### ② Flynn-Wall-Ozawa法

$$\ln\beta = -1.052\left(\frac{E_a}{RT}\right) + \ln\left(\frac{AE_a}{R}\right) - \ln G(\alpha) - 5.331 \quad (5)$$

其中 $G(\alpha) = \int_0^\alpha d\alpha/f(\alpha)$ , 在不同升温速率下, 结合图2b以 $\ln\beta$ 对 $1000/T$ 作图得图3b, 由斜率 $-1.052E_a/R$ 可以求得活化能 $E_a$ 在 $98.31$ – $134.27 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ , 其平均值为 $124.63 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ , 与Kissinger法计算值相接近, 具体数值见表4。

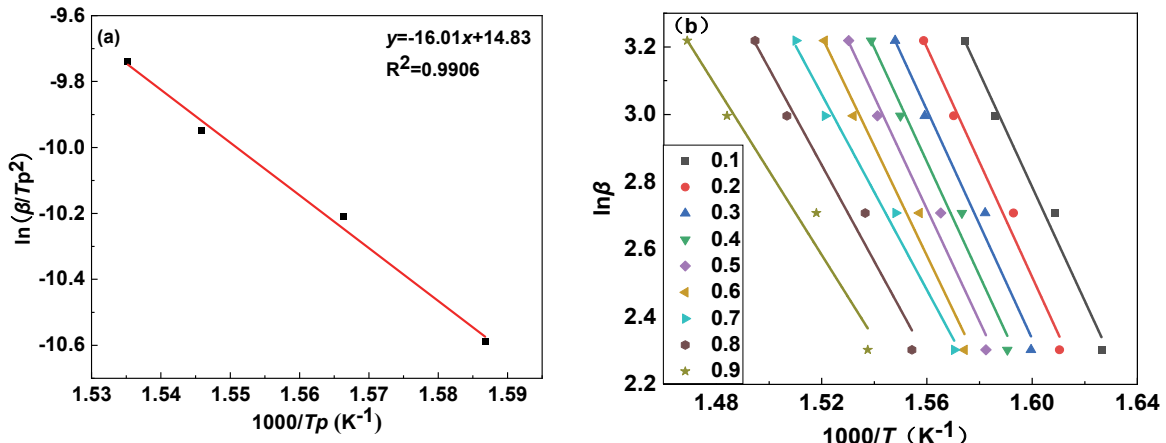

 图3 (a) Kissinger法的 $\ln\beta/T_p^2-1/T_p$ 图; (b) Flynn-Wall-Ozawa法的 $\ln\beta-1/T$ 图

表4 Flynn-Wall-Ozawa法活化能

$\alpha$	$E_a/(kJ\cdot mol^{-1})$	$R^2$	$\alpha$	$E_a/(kJ\cdot mol^{-1})$	$R^2$
0.1	133.48	0.9784	0.6	128.42	0.9672
0.2	134.27	0.9773	0.7	114.59	0.9803
0.3	133.96	0.9760	0.8	112.86	0.9548
0.4	133.32	0.9740	0.9	98.31	0.9515
0.5	132.45	0.9713	Average	124.63	0.9701

为检验学生对于参数求解的掌握程度,关注解法多元化,教师引导学生外推求解活化能。图4为某学生利用其他方法计算活化能实验报告数据。经学生讨论,实验所得FRL法、Starink法、Dollimore法和Kissinger-迭代法计算的活化能分别为:123.98、133.20、125.75和127.39  $kJ\cdot mol^{-1}$ ,用Kissinger法和FWO法计算的活化能分别为133.11和124.63  $kJ\cdot mol^{-1}$ ,标准差约为3.79,与文献相比较为接近。就Kissinger法和FWO法而言,Kissinger法求活化能针对的是峰值温度,FWO法受反应进程和温度的影响,且存在实验误差,故稍有区别;其次,实验证明活化能会随着反应进程变化,实际上复杂非均相反应的活化能由各基元相对贡献度决定,故相比之下带有反应程度函数的动力学方程(如FWO法)显得更为适用。另外,指前因子因其由反应本身决定,与活性位数量有关,即碰撞概率,与反应温度和浓度无关。单体的指前因子越小,活性越低,反应越不易进行。指前因子大多涉及反应机理

实验题目: 化学反应动力学测量综合实验      年 5 月 8 日

$\alpha$	FRL $E_a(kJ\cdot mol^{-1})$	Starink $E_a(kJ\cdot mol^{-1})$	Dollimore $E_a(kJ\cdot mol^{-1})$	Kissinger 迭代 $E_a(kJ\cdot mol^{-1})$
0.1	149.20	127.63	150.72	120.87
0.2	151.99	137.36	153.36	129.90
0.3	148.94	141.01	150.27	133.40
0.4	146.04	142.52	147.37	134.92
0.5	139.97	142.82	141.32	135.34
0.6	130.36	135.09	131.77	134.26
0.7	115.31	137.12	116.76	130.64
0.8	99.12	127.38	90.61	122.19
0.9	44.91	107.89	49.55	105.02
Average	123.98	133.20	125.75	127.39

图4 学生FRL、Starink、Dollimore、Kissinger迭代法活化能数据

函数，本实验课程不要求掌握，故不再赘述。反应级数对反应也有重要影响，反应级数越低，其对反应的敏感程度就越小。

在此过程中引导学生将所学知识汇总建立框架，由定性到定量、从抽象到具体，对大概念进行知识体系的构建，活用知识创造性解决问题，促进该知识体系在其他领域的学习迁移，不仅体现UbD最终的教学目标，还体现学科思政的人才培养策略。

## 2 教学讨论及教学成效

面向采用UbD教学模式的大学物理化学实验课程，对岭南师范学院化学化工学院本科三年级学生进行了实验教学与问卷调查，整理并设置列表(表5)。通过问卷以及实验报告来检验教学效率，根据问卷调查结果对学生学习情况进行分析。

表5 课堂学习情况问卷调查统计表

维度	问题	赞成或比较赞成	一般	比较不赞成或不赞成
学习感受	反应动力学参数求解存在挑战性	94.3%	5.3%	0.4%
	提升对物理化学课程的兴趣度	89.0%	7.9%	3.1%
	有助于培养批判思维和解决实际问题的能力	93.4%	5.6%	1.0%
学习效果	课前预习激发了科学精神、探索精神、求真精神	97.8%	2.2%	0.0%
	课程学习加深对仪器原理和理论知识的理解	89.1%	9.5%	1.4%
	课后作业和评估方式有助于提升学习效果	93.5%	5.3%	1.2%
	课程内容系统化帮助理解反应动力学参数意义及求解过程	98.2%	1.1%	0.7%
	课程内容对知识体系构建和技能应用有帮助	96.3%	3.1%	0.6%
教学策略	课堂上使用多样化的教学策略	87.3%	7.3%	5.4%
	提高了课堂参与度，极大提高学习能动性	95.2%	3.3%	1.5%
	推动知识应用于各领域，促进知识迁移	92.3%	6.1%	1.6%
	确保个性化学习机会及团队合作意识	94.2%	5.1%	0.7%

结果显示：“赞成或比较赞成”选项平均比例高达93.38%，其中“课前预习激发了科学精神、探索精神、求真精神”和“课程内容系统化帮助理解反应动力学参数意义及求解过程”两个问题的赞成比例分别高达97.8%、98.2%，说明该课程对学生达成预期学习效果成效优异；其次，在学习感受维度里，“赞成或比较赞成”选项平均比例达92.23%，表明学生对该课程的满意度较高，激发了学生自主构建知识体系和知识迁移的动力。总体来看，“赞成或比较赞成”选项在每个问题都呈现出断崖式高百分比，充分展现出UbD教学模式在物理化学实验课程中的高效性与可行性。

依托UbD教学模式将化学反应动力学实验引入物理化学实验教程显示：整体教学效果优良，学生对课堂知识和实验过程掌握程度高，体现预期学习目标和思政目标，成效显著。主要表现为：第一、二课时学生查阅资料、了解背景既做到课前预习和课上讨论，也通过教师设置问题、言传身教了解化学反应动力学研究现状，也进一步深化了学生对科学精神体会。尤其是“做”与“教、学”的融合在热分析仪器的使用和动力学公式推导中具有突出效果，落实了信息技术和高数知识的综合运用，进一步完善知识体系构建，达成有效迁移(图5)。例如，基于物理化学数学模型探究变化规律和联系，学生能说出该公式对所有的基元反应和部分复杂反应的适用性，且知道以活化能与温度无关为假设前提才能使用阿伦尼乌斯公式的前提条件。将实验与理论相结合分析实验，激发了学生学习的主动性；小组合作探究体现团队合作精神；掌握必要信息技术获取及处理实验数据。具体体现在学生以小组为单位计算活化能，并利用Origin科研软件对实验结果绘图寻找线性关系，体现科研魅力，充分表现出课堂思政。此完整且有逻辑性的知识体系构建便于在其他领域的迁移。

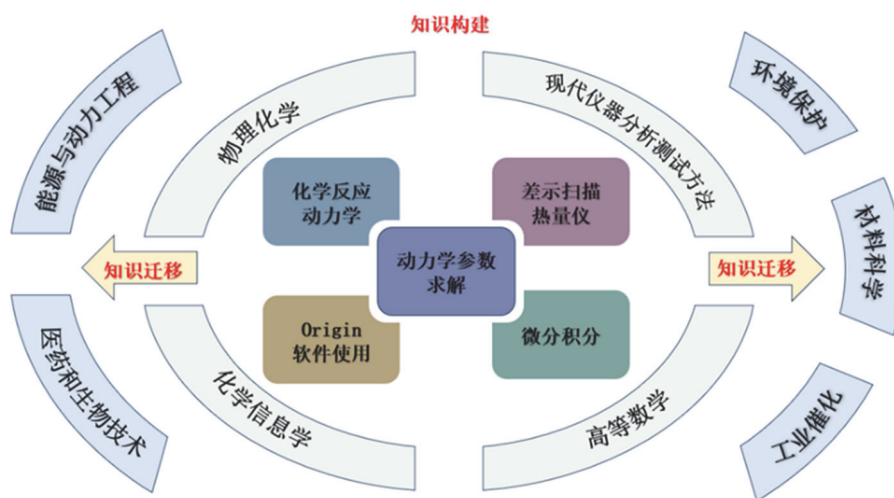


图5 知识体系构建及迁移示意图

化学反应动力学在很多领域都有相关研究，例如环境保护、材料科学、工业催化、能源与动力工程和医药生物技术等领域。知识体系的迁移在此实现落地，也说明了构建知识体系达到学习迁移对学生学习有事半功倍的效果，加强了学生学科知识的综合运用和过硬的综合实践技能，与时俱进，使学生与国际研究前沿接轨，为科学研究培养人才奠定坚实基础。此外，关注目标达成，鼓励学生积极参与科研立项和科技作品竞赛<sup>[8]</sup>。2020–2023年以学生名义发表化学动力学核心论文4篇，孵化学术科研竞赛项目10余项。学生在提出问题、分析问题和解决问题上，利用已学知识为切入点，探究知识间的逻辑性，步步内化达到学习迁移，充分领悟物理化学实验的内在逻辑，获得思政素养不断提升的教学效果。

### 3 结语

逆向性教学模式进一步系统性深化实验课程教授内容，提高学生综合性分析能力、创新性设计能力和实际性操作能力，做到了启发学生树立正确的自我发展观，落实课堂思政，积极将“学习”融入生活，彰显教育魅力，促进课程改革迭代升级。将“知识体系构建及知识迁移”设为教学目标，让学生在发现问题、分析问题和解决问题中构建知识体系，身临其境，动手解决，在建构过程中培养其科学素养、提高思辨能力、深化思政教育，从而达到知识迁移目标，以实现更高效、更有意义的教学。

### 参 考 文 献

- [1] Walters, F. S.; Newman, M. *TESOL Quart.* **2008**, *42* (1), 162.
- [2] 徐文勇, 周勇. *化学教学*, **2023**, *8*, 28.
- [3] 袁汝明, 吴平平, 张来英, 徐晓明, 傅钢. *大学化学*, **2024**, *39* (4), 125.
- [4] 谢锦桂, 管华, 温祖标, 邓志红, 钟声亮. *大学化学*, **2023**, *38* (2), 83.
- [5] 雷雪峰, 马军现. *大学化学*, **2022**, *37* (12), 2111026.
- [6] 张树永, 范楼珍, 淳远, 刘永梅, 田福平, 白云山, 宋淑娥. *大学化学*, **2022**, *37* (6), 2108061.
- [7] 胡荣祖, 高胜利, 史启祯, 赵凤起, 张同来, 张建军. *热分析动力学*. 第2版. 北京: 科学出版社, **2008**.
- [8] 田福平, 张艳娟, 贺民, 贾翠英, 陈静, 孟长功. *大学化学*, **2018**, *33* (2), 29.