

面向超临界流体的物理化学(热力学)教学案例设计与实践

黄海燕*, 朱 娣, 马 跃, 岳长涛, 高成地

中国石油大学(北京)理学院, 北京

收稿日期: 2026年8月2日; 录用日期: 2026年9月14日; 发布日期: 2026年9月22日

摘 要

物理化学中热力学部分是化学、化工及相关专业的核心基础知识, 但其理论抽象、公式繁多, 学生常感到枯燥难懂, 难以建立理论与实际应用的联系。为解决这一问题, 本文以“超临界流体”这一前沿且应用广泛的领域作为教学案例, 进行了精心的设计与教学实践。案例将热力学基本概念(如相图、临界点、偏摩尔量、逸度、化学势等)融入超临界CO₂萃取技术的具体情境中, 通过“问题驱动-理论探究-应用实践-前沿拓展”的教学模式, 旨在激发学生学习兴趣, 深化对热力学原理的理解, 并培养其解决复杂工程问题的能力和创新思维。教学实践表明, 该案例能有效提升教学效果, 实现知识、能力与素质的有机融合。

关键词

物理化学, 热力学, 教学改革, 超临界流体, 案例教学

Teaching Case Design and Practice of Physical Chemistry Thermodynamics in the Field of Supercritical Fluids

Haiyan Huang*, Di Zhu, Yue Ma, Changtao Yue, Chengdi Gao

College of Science, China University of Petroleum, Beijing

Received: August 2, 2026; accepted: September 14, 2026; published: September 22, 2026

Abstract

The thermodynamics in Physical chemistry is a core fundamental knowledge for chemistry, chemical

*通讯作者。

文章引用: 黄海燕, 朱娣, 马跃, 岳长涛, 高成地. 面向超临界流体的物理化学(热力学)教学案例设计与实践[J]. 创新教育研究, 2026, 14(9): 593-598. DOI: 10.12677/ces.2026.149723

engineering, and related majors. However, its theoretical abstractness and numerous formulas often make students find it's difficult to understand, struggling to establish the connection between theory and practical application. To address this issue, this paper takes "supercritical fluid"—a cutting-edge and widely applied field—as a teaching case, presenting its careful design and teaching practice. The case integrates fundamental thermodynamic concepts (such as phase diagrams, critical point, partial molar quantities, fugacity, chemical potential, etc.) into the specific context of supercritical CO₂ extraction technology. Adopting a “problem-driven → theoretical inquiry → application Practice → frontier expansion” teaching model, it aims to stimulate students' interest in learning, deepen their understanding of thermodynamic principles, and cultivate their ability to solve complex engineering problems and innovative thinking. Teaching practice shows that this case can effectively enhance teaching outcomes, achieving the organic integration of knowledge, ability, and quality.

Keywords

Physical Chemistry, Thermodynamics, Teaching Reform, Supercritical Fluid, Case-Based Teaching

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

物理化学是化学、化工、材料、环境等众多专业的核心基础课程，其中热力学部分是揭示物质变化过程中能量转换与方向限度的基石，更是理解化学反应、相平衡、溶液性质等后续知识的关键，其重要性不言而喻。然而，传统物理化学热力学教学模式往往侧重于公式推导和理想模型计算，导致学生陷入“知其然不知其所以然”的困境，普遍存在“重理论轻应用”的倾向，学生面对抽象的概念(如化学势、偏摩尔量、相律等)和繁多的公式推导，往往感到枯燥难懂，难以建立理论知识与实际工程问题的联系。如何激发学生的学习兴趣，并培养其运用热力学原理解决实际问题的能力，已成为物理化学教学改革亟待解决的问题[1]-[5]。案例教学和项目式学习在物理化学与工程热力学领域的应用已有诸多尝试。例如在“热力学第二定律”教学中引入制冷循环设计案例，提升了学生应用熵判据的能力[2]；以二醋酸纤维素生产中丙酮的回收为例，将物理化学课程涉及的吸附、相平衡等热力学理论融入实际工程案例中的课堂教学，显著提高了本科生理理论联系实际及解决问题的能力[4]。本文将围绕超临界流体这一兼具理论深度与工业前沿性的主题设计系统性教学案例。

超临界流体(Supercritical Fluid, SCF)是温度与压力均高于其临界点的流体，具有类似气体的扩散性和类似液体的溶解能力，已在萃取、材料制备、反应工程等领域得到广泛应用。超临界流体现象本身就蕴含着丰富的热力学原理，是连接基础理论与高新技术产业的绝佳桥梁。将超临界流体引入物理化学热力学教学，不仅贴合学科前沿，也为抽象概念提供了直观、生动的应用情境。本文以超临界 CO₂ (scCO₂)萃取技术为主线，精心设计了一套面向本科生的教学案例，并通过“问题驱动 - 理论探究 - 应用实践 - 前沿拓展”的教学模式进行实践，旨在提升教学效果，促进知识、能力与素质的有机融合[6]-[10]。

2. 教学案例设计思路

2.1. 设计理念

教学案例的设计包含四步“问题驱动 - 理论联系实际 - 能力导向 - 前沿拓展”。首先从实际生

活或真实工程问题出发,激发学生好奇心和探究欲。例如:“为什么超临界 CO_2 可以用于从咖啡豆中脱除咖啡因?”“如何选择操作条件使萃取效率最高?”“超临界流体在石油加工中有什么应用?”。在好奇心的驱使下,将热力学核心概念(相图、临界点、状态方程、逸度、化学势、偏摩尔量等)嵌入具体情境,使抽象概念“落地”。同时引入简单编程或虚拟仿真工具,让学生动手计算溶解度、绘制相图。不仅传授知识,更注重计算能力、模型构建能力和创新思维的培养。进一步引导学生了解超临界流体领域的最新研究进展,如绿色萃取、超临界水氧化、超临界染色等,激发科研兴趣。

通过教学案例的设计使学生深刻理解临界参数、相图分析、流体逸度、溶解度与温度压力的关系等核心热力学概念。培养学生从实际工程问题中提炼热力学模型、进行分析计算和解决实际问题的能力。激发学生对科学前沿的兴趣,树立绿色化学和可持续发展的理念(scCO_2 被视为绿色溶剂)。

2.2. 设计思路

案例设计围绕超临界 CO_2 萃取浓缩咖啡因的经典工艺展开。通过一段视频或新闻报道展示超临界 CO_2 萃取的工业过程,抛出核心问题。再分步骤讲授相关热力学概念,并以手算或数学软件进行简单计算。利用开源软件(如 Refprop、Aspen Plus 或其他教育版工具)模拟 CO_2 的相图、计算不同条件下气溶解能力。最后介绍超临界流体技术在环保、制药、新材料制备等领域的前沿应用,布置开放性思考题。

3. 教学案例设计内容

本案例以“超临界 CO_2 萃取咖啡因”为主线,分四个阶段展开。本案例可以安排 3 学时左右,其中问题驱动 0.5 学时,播放超临界 CO_2 脱咖啡因工业视频,抛出“如何用热力学解释其原理?”;理论探究 1.5 学时,引出并理解相图、临界点、化学势、偏摩尔量等概念;应用实践和前沿拓展约 1 学时,用以链接科研与绿色化学。

3.1. 问题驱动——从“一杯脱咖啡因咖啡”引入

展示脱咖啡因咖啡的产品,通过视频介绍咖啡因及其脱除方法。由于咖啡因是一种生物碱,传统有机溶剂(如二氯甲烷)萃取咖啡因存在溶剂残留和环境污染问题。超临界 CO_2 萃取技术利用 CO_2 在临界点($T_c = 31.1^\circ\text{C}$, $p_c = 7.38\text{ MPa}$)附近对咖啡因的溶解度随压力和温度剧烈变化的特性,实现高效、绿色的分离。介绍超临界 CO_2 萃取技术作为解决方案,播放工业应用短片,直观展示其过程,引发学生好奇。提出相关问题:如何在不使用有毒有机溶剂(如二氯甲烷)的情况下,高效、绿色地去除咖啡豆中的咖啡因?为何超临界 CO_2 兼具气体高渗透性和液体高溶解能力?如何通过调节温度和压力控制萃取效率?

3.2. 理论探究——知识点映射以揭秘超临界流体的热力学本质

相图与临界点概念的引入,展示 CO_2 的 P-T 相图,标出三相点、临界点、气-液-固共存区。讲解临界点处气液界面消失的物理意义,引导学生理解超临界流体的特殊状态。学生在已学相律基础上,计算 CO_2 的组分数($C = 1$)、相数($P = 2$ 或 3),验证相律公式 $F = C - P + 2$ 。同时补充讲解临界指数(如密度涨落、临界乳光)的基本概念,并将其与超临界萃取中“溶解度突变”相关联。

通过对比气体、液体和超临界流体的密度、粘度、扩散系数等物理性质,如表 1 所示,引导学生理解其“杂交”特性背后的热力学原因(分子间作用力与热运动能的博弈)。

利用偏摩尔量、化学势、逸度等知识点对超临界 CO_2 萃取体系进行分析,讨论为什么超临界液体有如此神奇的溶解性。从超临界 CO_2 与咖啡因构成的二元体系出发,引入偏摩尔体积的概念——在临界点附近,当咖啡因分子(溶质)被溶解在 scCO_2 (溶剂)中时,咖啡因分子周围会聚集大量的 CO_2 分子,形成密集的“溶剂化簇(Solvation Cluster)”。这种聚集效应导致局部的 CO_2 密度远高于远距离的体相密度,

Table 1. Comparison of properties between supercritical fluid, liquid, and gas
表 1. 超临界流体和液体、气体的性质比较

性质	气体	超临界流体	液体
密度/(g·mL ⁻¹)	$(0.6\sim2) \times 10^{-4}$	0.2~0.5	0.6~1.6
粘度/(mPa·s)	$(1\sim3) \times 10^{-2}$	$(1\sim3) \times 10^{-2}$	0.2~3
扩散系数/(cm ² ·s ⁻¹)	0.1~0.4	$(0.7\sim0.9) \times 10^{-3}$	$(0.2\sim2) \times 10^{-5}$

使得加入少量咖啡因后，体系的总体积反而缩小。因此，在临界点附近，咖啡因的偏摩尔体积呈现出巨大的负值(可达 $-10^3 \text{ cm}^3/\text{mol}^{-1}$ 至 $-10^4 \text{ cm}^3/\text{mol}^{-1}$)。Gibbs-Duhem 方程给了混合效应的强制约束，这意味着，这种溶剂体积的塌缩转化为溶质(咖啡因)化学势的急剧下降，化学势下降作为驱动力，导致溶解度急剧增加。最终呈现的结果就是超临界萃取中经典的“压力越高，溶解度指数级增长”的现象。

3.3. 应用实践——深化理解与工艺优化

利用专门的虚拟仿真实验平台，构建一个简化的 scCO_2 萃取流程。观察 CO_2 在临界点附近的 p - V - T 关系变化。模拟不同温度、压力下对咖啡因溶解度的影响，并绘制等温溶解度曲线。尝试寻找一组最优的 T 、 P 操作条件，使萃取效率最高。将抽象理论转化为可视化的数据和曲线，培养学生的工程模拟和优化能力。同时横向延伸，了解相关的超临界 CO_2 萃取技术，例如超临界 CO_2 萃取在天然产物(如啤酒花、辣椒红色素)提取中的应用案例。将 scCO_2 萃取的通用逻辑应用到不同目标产物，让学生理解“同一技术，不同对象，不同策略”。

3.4. 前沿拓展——链接科研与绿色化学

超临界流体因其独特的物理和化学性质，在萃取和分离、化学反应、颗粒制备、染色等方面有着突出的表现。同时超临界流体绿色、环保、无污染、可回收利用，尤其是超临界水和超临界二氧化碳，价廉易得，使得超临界流体技术被广泛应用于能源、化工、材料、环保等领域。通过课堂学习和引导，布置开放性问题的，鼓励学生查阅文献并对超临界流体在其他领域的应用进行讨论。特别要求能源专业学生结合所学专业特点，了解在新能源领域，如太阳能、风能、生物质能、海洋能和地热能等方面，超临界技术的广阔应用前景。

结合中国石油大学(北京)重质油全国重点实验室开发的基于超临界溶剂萃取的重质油评价方法，讨论超临界技术在石油加工中的应用[11]。为了深入研究重质油(原油中沸点较高的馏分或蒸馏残渣)的性质和化学组成，该方法使用超临界低碳烷烃作为萃取溶剂，在保持一定塔底和塔顶温度条件下，通过逐步提高操作压力，将渣油按溶解度的不同分离为 10 多个组分，这些组分具有不同的性质和化学组成，其收率可以反映渣油的加工性能。

在分离评价方法基础上，将超临界萃取技术用于工业分离过程，开发出用于油浆、渣油加工的梯级分离技术。SELEX-ASP 工艺是基于该原理的重质油加工技术，渣油中的沥青质是影响其加工性能的关键组分，通过超临界溶剂萃取可以实现沥青质的选择性脱除。以戊烷为溶剂，在合适的温度和压力条件下，重质油中的易萃取组分被分离出来后送到催化裂化装置生产轻质燃料油；一部分较重组分从渣油中萃取出来后送入加氢精制装置，经加氢改质后再进入催化裂化装置。重质油中的沥青质富集在萃余组分中，通过喷雾造粒，得到固体沥青粉末。该工艺适用于不同重质油的分级加工，具有非常好的应用前景。

4. 教学实践与教学反思

在能源化工专业、化学工程专业的本科生物理化学课程中实施了超临界流体相关的教学案例。

学生在案例引入阶段表现出浓厚兴趣,积极参与,小组讨论热烈。80%学生普遍认为超临界流体的教学案例能有效帮助理解热力学的理论知识,评价包括“让热力学不再冰冷”、“第一次感觉到化学势真的有用”、“对从事绿色化工研究产生了兴趣”。通过案例教学成功地将“知识传递”转变为“能力建构”,实现了学以致用。从教学效果也发现学生在涉及相平衡、真实气体等知识的考题上,平均得分率和解题思路的灵活性均有明显提升。本案例教学模式不仅激发了学生的学习兴趣,而且显著提升了其热力学概念理解水平和应用迁移能力。由此,教学实践成功地将传统的“知识单向传递”转向了“问题驱动-能力建构”的学习模式。

在教学案例的实施过程中,仍有许多需要改进和提高之处。例如面对案例内容信息量大,课时紧张,学生偶有畏难情绪的状况,需要优化学习内容和时间安排,将案例拆解为“课前预习”(包括阅读短篇文献、观看短视频)+“课堂讨论”+“课后延伸作业”,同时录制微课讲解关键公式推导,供学生按需回看。

为进一步深度培养能力培养,除了教师给定物质(CO_2 +咖啡因)的萃取体系,让学生有自主选择与开放性探索空间。可以考虑引入“大作业”形式——每位学生自选一种天然产物(如青蒿素、薄荷醇、虾青素),利用所学热力学原理设计一套 scCO_2 萃取方案,涉及操作温度与压力区间、合适的状态方程、预估萃取收率、风险分析与成本估算等,以真正培养分析问题、解决问题的能力。

超临界流体教学案例将“冷”热力学转化为“热”工程实践,生动诠释了“学以致用”的教育理念。以后我们还将融入机器学习预测相平衡等前沿手段,同时建立案例资源库,供其他高校参考共享,以推动本科物理化学课程从“知识传授”向“能力建构”的深层转型[12][13]。

5. 结语

本文设计的“面向超临界流体的物理化学热力学教学案例”,以学科前沿为锚点,以工程问题为牵引,将化学势、相平衡等抽象概念嵌入真实工业场景(如天然产物萃取、咖啡因脱除),使学生在分析解决问题的过程中,主动调用并内化了热力学核心知识。将超临界流体这一前沿领域作为物理化学热力学的教学案例,是一次有效的教学改革尝试。该案例将抽象的热力学理论与生动的工业应用紧密结合,通过问题驱动和探究式学习,有效激发了学生的学习内驱力,深化了对核心概念的理解,培养了其工程素养和创新意识。这一“理论-实践-前沿”三位一体的教学模式,对于攻克物理化学教学难点、培养新时代创新型人才具有积极的推广价值。

该案例的成功实施印证了“以案例为载体、以能力为导向”的教学改革思路的有效性,不仅突破了物理化学“公式枯燥、理论抽象”的认知壁垒,更实现了从“知识传递”到“能力建构”的范式转型。本案例为物理化学热力学教学改革提供了可复制、可推广的实践范例。未来将持续迭代内容、拓展跨学科融合(如与化学工程、材料科学、环境工程的交叉),使物理化学课程真正成为连接基础理论与现代工程实践的桥梁,为培养具备热力学思维、工程素养与创新精神的高素质人才奠定坚实基础。

基金项目

中国石油大学(北京)“1158”工程教学改革项目,《物理化学》数智课程建设;中国石油大学(北京)教改项目,《物理化学实验 I》混合式教学模式改革——基于线上 MOOC 与线下深度融合的探索与实践;中国石油大学(北京)“1158”工程项目,石油超分子结构组成的高效分解反应研究(SKLHOP2025225810)。

参考文献

- [1] 杨冬,张婷.基于“学以致用”的物理化学课程教学设计——胶体稳定与聚沉研究[J].化工时刊,2026,40(3):108-112.

-
- [2] 吕伟欣, 李雷. 制冷原理多场景案例融入“物理化学”课程教学的实践与探索[J]. 科技风, 2026(9): 118-120.
 - [3] 李莉. 科研案例在“物理化学”教学中的融合与实施[J]. 广州化工, 2025, 53(22): 186-189.
 - [4] 陈学青, 刘秀伍, 张继军. 物理化学中热力学理论在丙酮回收中的应用[J]. 广东化工, 2024, 51(11): 233-236.
 - [5] 黄海燕, 朱娣, 马跃, 岳长涛, 高成地. 物理化学知识图谱的构建及其在自主学习中的应用[J]. 创新教育研究, 2025, 13(8): 666-671.
 - [6] 周晓荣, 方华, 王又容, 陈浩, 费会, 徐玉玲. 基于培养科研思维的大学物理化学教学的探索[J]. 广州化工, 2023, 51(5): 227-228+231.
 - [7] 尚小红. “物理化学”课程教学中激发学生学习兴趣的一些体会[J]. 化工时刊, 2023, 37(1): 63-65.
 - [8] 荣春光, 陈立钢, 张秀成, 向兴德, 周志强. 物理化学基础知识在化工热力学教学中的应用[J]. 大学化学, 2023, 38(5): 254-260.
 - [9] 郑勇, 王鑫, 王凯, 田大勇, 牛永生. 化工专业物理化学课程线上线下混合式教学的研究[J]. 化工管理, 2022(22): 54-56.
 - [10] 付凤艳. 《物理化学》课程热力学教学研究[J]. 山东化工, 2020, 49(24): 180+182.
 - [11] 黄海燕, 马跃. 物理化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2024: 5-22.
 - [12] 潘婷, 沈宇, 刘绪, 李祥春, 赖文勇. 基于兴趣激发与价值引领的物理化学课程重构[J]. 大学化学, 2026, 41(7): 8-16.
 - [13] 阮北, 陈迎笑, 杨莹莹, 李平, 武克忠. 项目式学习在物理化学课程教学中的运用——以“ClO₂ 氧化除铁”项目设计为例[J]. 大学化学, 2026, 41(4): 80-89.