

## 以“溶度积规则”指导电荷转移共晶沉淀析出 ——材料类专业无机化学教学改革案例

何学侠<sup>1,\*</sup>, 雷志斌<sup>1</sup>, 陈沛<sup>1</sup>, 李琪<sup>1</sup>, 邓炜钰<sup>1</sup>, 胡鹏<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 陕西师范大学材料科学与工程学院, 西安 710119

<sup>2</sup> 西北大学物理学院, 西安 710127

**摘要:** 在大学本科基础课程的教学过程中, 将基础知识与科学研究适当结合, 有助于激发学生的学习积极性, 并能够在学生脑海中埋下一些科学研究的种子, 对学生的学术发展与国家的人才培养战略具有重要意义。在材料专业基础课无机化学“沉淀溶解平衡”章节的教学中, 我们采用了文献阅读、教师引导、学生分组自学讨论、课堂讨论汇报等教学环节, 将“溶度积规则”用于前沿有机半导体材料——“电荷转移共晶”沉淀析出过程的分析, 从而丰富了教学内容, 并扩展了溶度积规则在实际应用中的物质范畴。这样的教学设计不仅拓宽了学生对“溶度积规则”的理解, 也使学生对科学研究有了初步的认识, 同时培养了他们的自学能力、英语文献阅读能力、问题分析能力以及语言表达能力。

**关键词:** 沉淀溶解平衡; 教学改革; 沉淀析出; 教学优化

**中图分类号:** G64; O6

## Precipitation of Charge Transfer Co-Crystals Guided by the “Solubility Product Rule”: A Case on the Teaching Reform of Inorganic Chemistry in Materials Science Majors

Xuexia He<sup>1,\*</sup>, Zhibin Lei<sup>1</sup>, Pei Chen<sup>1</sup>, Qi Li<sup>1</sup>, Weiyu Deng<sup>1</sup>, Peng Hu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Materials Science and Engineering, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China.

<sup>2</sup> School of Physics, Northwestern University, Xi'an 710127, China.

**Abstract:** In undergraduate foundational courses, effectively integrating basic knowledge with cutting-edge scientific research can increase students' learning enthusiasm and ignite a sense of scientific inquiry. This approach is highly valuable for students' academic development and aligns with talent cultivation strategic. When teaching the topic of “Precipitation-Dissolution Equilibrium” in the core Inorganic Chemistry course for materials science majors, we implemented methods such as designated literature, guided instruction, group discussions, and student-led presentations. The “Solubility Product Rule” was applied to analyze the precipitation process of “Charge Transfer Co-crystals,” a novel class of organic semiconductor materials, broadening the scope of teaching content and extending its applications. This approach not only deepens students' understanding of the “Solubility Product Rule” but also introduces them to scientific research practices. Additionally, it strengthens their self-directed learning, English reading, problem-solving, and communication skills.

**Key Words:** Precipitation-dissolution equilibrium; Teaching reform; Precipitation; Teaching optimization

收稿: 2024-10-28; 录用: 2024-11-25; 网络发表: 2024-11-28

\*通讯作者, xxhe@snnu.edu.cn

基金资助: 陕西师范大学校级本科教育教学改革“揭榜挂帅”项目(24JBGS31); 陕西师范大学一流本科课程建设项目(“新能源材料制备与器件组装”)

## 1 引言

2014年8月,教育部高等学校材料类专业教学指导委员会制订了《材料类专业教学质量国家标准》,对高校材料类专业办学的规范性、科学性和质量控制提出了指导性原则<sup>[1]</sup>。国家标准给出的材料类专业培养要求是培养学生应具有坚实的自然科学基础、材料科学与工程专业基础和人文社会科学基础,具有较强的工程意识、工程素质、实践能力、自我获取知识能力、创新素质、创业精神、国际视野、沟通和组织管理能力;能够从事材料科学与工程基础理论研究,新材料、新工艺和新技术研发,生产技术开发和过程控制,材料应用等材料科学与工程领域的科技工作,可承担相关专业领域的教学、科技管理和经营工作。陕西师范大学材料科学与工程学院(以下简称:材料学院)是2011年设立的研究型学院,办学目标不仅要培养在材料学、材料工程、新能源材料与器件、化学及相关交叉学科具有更高层次深造能力,而且在企事业单位、科研机构能够从事科研、开发、教学与管理工作的复合型人才<sup>[2]</sup>。近年来,随着国家提倡发展新质生产力的重要决策,教育部提出了相应匹配“创建新工科”的目标<sup>[3]</sup>,这为材料学院人才培养和科学研究的进步和发展提出了新的挑战和机会。在这样的大环境下,通过优化教学内容和改进教学方法,合理构建适应材料类专业需要的无机化学教学体系及教学内容,是新工科背景下材料类专业国家标准及人才培养目标实现的重要途径。

本文介绍了我院在材料化学专业无机化学课程改革中的一些实践,以有机晶体二萘嵌苯和四氰基喹二甲烷形成有机电荷转移共晶析出过程为例,展现了材料类专业无机化学课程改进中的一些具体做法。

## 2 材料化学专业无机化学课程教学改革必要性

无机化学课程是全国化学类和材料类专业在大一开设的第一门核心基础课,也是与化学关联专业大一所开设的一门重要基础课。目前我院给大一材料化学专业学生在一年级也开设了无机化学课程,在近十年的教学实践过程中,我们秉承教学相长、基础知识与前沿研究相结合,基础理论指导实践应用等教学理念,取得了一些有利于学生学习提高的正向效果。但是,教学过程中也发现存在一些需要改革的问题,主要体现在以下几个方面:(1) 教学内容筛选严谨度不高,导致与化学类专业教学雷同度较高,(2) 教学方法创新力度不够,教与学的有机结合没有很好发挥,导致学生学习主动性不足;(3) 教学内容与学科前沿进展脱节现象严重,学生对于学科前沿进步的了解不足,导致学生对于专业认同度和热爱度不高。为此,如何实现新工科背景下无机化学课程内容、教法、知识体系与学科发展的有机统一,是需要深入思考和实践的重要课题。

在无机化学课程教学改进中,在不影响学生对基本原理理解和掌握基础上,我们遵从理论系统性、知识体系性和学科前沿性的教学原则,强化理论教学严谨有度,重视理论对于实践的指导,以学科前沿进展为学生专业认同度的有力抓手,取得了显著的教学效果。如通过一些材料学科前沿进展与基础知识理论结合实例,加深了学生对基础知识的掌握和理论对于实践的指导。在课堂教学过程中,通过选择2-3个基础知识与学科前沿研究密切相关专题,在教师指导下,学生通过文献研读,充分理解基础知识在学科前沿中的作用。如在氧化还原反应章节中,通过诺贝尔奖获得者Goodenough的生平简介和研究成果,不仅加深了学生对这一章节重要性的认识,而且使学生在学习基础知识过程中提高了专业认同感。

## 3 “溶度积规则”指导下的电荷转移共晶沉淀析出教学内容重构

在处理难溶强电解质的沉淀-溶解平衡过程中,溶度积规则是重要参数,不仅旨在反映难溶性强电解质的溶解性大小及其溶解后生成离子之间的动态平衡关系,而且可以用于判断难溶性强电解质溶液中的沉淀溶解反应进行的方向。在传统溶度积规则教学过程中,主要教学内容包括溶度积常数定义及沉淀生成和溶解判断依据( $Q_c$ 与 $K_{sp}$ 关系问题)<sup>[4]</sup>。而对于类似溶度积规则纯理论知识点,则是通过例题和习题帮助学生巩固和理解。这样的教学过程较为古板,学生学习兴趣不足,且溶度积规则用于指导材料制备的应用作用不强,导致学生学习过程主要是记忆性学习,而理解应用性学习能

力培养不够。为此,在溶度积规则教学过程中,我们以溶度积规则指导下的电荷转移共晶沉淀析出应用案例进行教学设计与实践,旨在教学过程中通过学生的高度参与实现学生的“主观能动性”,提高学生应用型思维和综合凝练能力,培养学生创新能力和知识运用能力。

沉淀溶解平衡理论作为传统无机化学的重要基础理论,主要适用于描述难溶盐类化合物在水溶液中的溶解与沉淀行为。该理论关注离子浓度和溶解度积常数 $K_{sp}$ 之间的关系,用以预测沉淀的形成、溶解度的大小以及溶解平衡的移动方向。它适用于几乎不溶的电解质如 $BaSO_4$ 、 $AgCl$ 等,也可用于分析多种溶液混合时是否形成沉淀或饱和溶液中离子浓度的变化,从而广泛应用于定量分析、选择性沉淀和分离纯化等领域。然而,由于有机物,特别是非电解质在水溶液中不导电,长期以来该理论对其体系的适用性受限。而本节课讨论的文献内容,创新性地将沉淀溶解平衡理论扩展应用至有机共晶的生长与析出领域,为研究有机共晶的溶解行为、过饱和条件下的成核动力学及溶解平衡提供了新的理论框架。这一创新不仅拓宽了沉淀溶解平衡理论的适用范围,还为开发有机物制备新技术、优化工业生产工艺和药物晶型控制提供了重要的理论支持,对有机化学及相关领域亦具有深远的意义。另外,在化学教育中,无机化学和有机化学往往被视为分割的领域,此次扩展为学生提供了一个范例,展示如何将传统理论创新性地应用于新的领域。通过学习这一科研成果,学生不仅能够加深对沉淀溶解平衡理论的理解,还能认识到理论突破与应用创新的重要性。这种跨领域的研究可以进一步激发学生探索科学未知的兴趣,帮助他们在未来应对多学科融合的挑战。

#### 4 课时和学生负担的考虑

将科研应用融入无机化学课堂教学,旨在提升学生的学习兴趣和实践能力。然而,在课程实施过程中,增加学习内容,自然要增加课时,也会加重学生的学业负担。现有的课时数和学习内容的匹配关系是前辈们多年教学经验的结晶。在课程改进时一定要尊重这些经验。要在对教学内容充分掌握和对其特点充分理解基础上,对原有的课时安排做适当调整,以便腾出适当的课时,加入新的内容;对学生的课后习题也要有增有减,不至于给学生增加太多的学业负担。

无机化学课程中,有些教学内容对学生有一些难度,如原子结构、电子排布等量子力学知识的介绍。这些部分不能缩减学时。而对于四大平衡的部分,在介绍了一般的化学平衡原理和酸碱平衡原理后,这种平衡思想在学生的头脑中已基本建立。这样在理解沉淀溶解平衡、氧化还原平衡和配位平衡等方面就没有太大的困难。这些部分可以提纲挈领地讲,也可以自学。这样就可以匀出一些课时加入本篇论文的主题“电荷转移共晶形成过程中的溶度积规则分析”。

对学生习题的安排可以有以下三种办法:

(1) 没有额外的课后作业:对一些专题讨论,教师可以提前简单介绍一下文献的基本知识,研究的基本过程,要求学生理解文献内容即可。

(2) 补充少量作业:学生的作业基本上按照教材的要求完成,补充2-5道与文献相关的题,通过完成习题,加深学生对相关知识点理解。

(3) 以专题为主的习题:有些主题涉及到较多的基础知识,在完成了对文献的研读后,教师以该专题为中心布置课后作业。作业中的问题应该包括对基本概念的理解,对文献中涉及到基础知识的理解。同时教师辅导学生阅读文献,并给一些提示,让学生能够理解论文内容与基础知识的关系。为了减轻学生负担,也要做到问题分解,也就是将研究文献中与基础知识相关的内容分解成数个问题,同时将学生也分成相应组数。除了总体要求外,每个组学生需要对指派的问题认真研学,并在全组同学共同努力下制作PPT文件,并推选一位同学在课堂上讲解本组研学的结果。

### 5 “溶度积规则”指导下的电荷转移共晶沉淀析出教学内容实践

#### 5.1 电荷转移共晶背景介绍及文献学习教学步骤

(1) 背景介绍:“电荷转移共晶的制备和性能研究”是材料化学领域的前沿课题。将含有缺电子基团( $-X$ (卤素),  $-CN$ )的化合物与含有孤对电子基团( $-S$ )、共轭双键(包括芳香环)都是含有偶极的

化合物。将两类化合物混合，两者相互极化、各自偶极矩增加，从而使两者复合为一体，形成电荷转移共晶。电荷转移共晶的单体一般是有机化合物。基于其组成和结构的特点，这类材料可以具备独特的电学和光学性质。两种单体形成共晶的过程可以用“沉淀溶解平衡”描述。

为此，在“沉淀溶解平衡”一章的讲授中，融入了“电荷转移共晶形成过程的溶度积规则分析”的专题文献研读。研究文献指出：二萘嵌苯和四氰基喹二甲烷可以形成1:1, 2:1, 3:1三种不同计量比的共晶。利用溶液降温法制备共晶，发现共晶产物的种类与溶剂有很大的关系。要求学生通过研读文献<sup>[5]</sup>，用“溶度积规则”分析产物类型与溶剂的关系。

(2) 具体步骤：

(a) 指定前沿文献；

(b) 按照学生人数分成几个小组；

(c) 指定每个小组负责讲述文献的一部分内容；

(d) 一周时间准备，教师在该过程中对学生不懂的部分给予帮助。

(3) 学生的结果：学生代表上台讲台讲授自己小组的分析过程和结论。

(4) 教师的评论。

## 5.2 教学目标

(一) 知识目标：掌握溶度积常数定义、沉淀生成和溶解判断依据；掌握溶度积规则及其应用。

(二) 技能目标：通过学习溶度积常数的相关计算法则，养成严谨的学习工作态度；能够用化学的思维思考问题，能够用化学的手段解决问题；能够将所学的沉淀溶解平衡中的相关知识跟科研知识相结合，能够从化学分子层面解释科学研究及实验中遇到的实际问题。

(三) 素养价值目标：基于所学的溶度积知识点及相关科研文献案例，切实让学生感受到专业基础知识解决现实问题的美妙，培养学生的科学、创新精神。

## 5.3 教学流程

整体教学流程规划如图1所示。

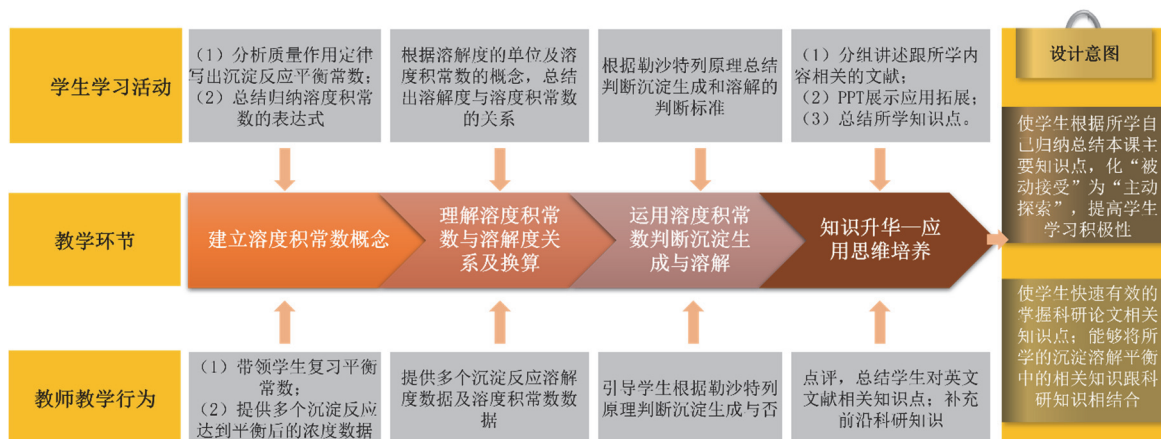


图1 具体教学流程

### 5.3.1 课前准备1：线上文献发送

根据教学目标，上课前一周，通过班级群向学生发送一篇关于二萘嵌苯(Perylene, 简称为P, Perylene的浓度[Perylene]表示为[P])和四氰基喹二甲烷(7,7,8,8-Tetracyanoquinoline and methane, 简称为T, 其浓度表示为[T])形成不同配比的电荷转移共晶的英文论文<sup>[5]</sup>。该文献主要是利用溶度积规则分析不同溶剂中产物不同的原因。教师在线下会先对整体内容进行大概讲解，然后将学生分成三组，以小组的形式共同阅读文献以加深理解。

### 5.3.2 课前准备2: 线上答题+学情分析

线上答题的目的是全面了解学生基础, 有针对性地进行教学设计。教学之前在网络教学平台发布习题(采用学习通平台), 将习题成绩作为平时成绩的一部分。

具体的习题内容为:

(1) 请写出化学平衡常数的一般表达式(以 $aA + bB = cC + dD$ 为例, 该内容无机化学第四章学习过);

(2) 请举例说明哪些物质难溶? 哪些物质可溶?

(3) 你对溶解的理解是什么?

(4) 你了解过溶度积常数吗?

根据学生的作答情况, 教师更加了解学生的学习基础。从学生的线上答题情况反馈判断学生的学情。教师课堂上重点讲述溶度积常数与高中所学溶解度的区别、沉淀生成和溶解判断依据及重点掌握溶度积规则及其在科研上的应用。

### 5.3.3 教学实录

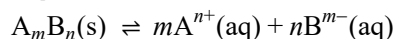
环节1 建立溶度积常数的概念、理解溶度积常数与溶解度关系及换算、运用溶度积常数判断沉淀生成与溶解(引导学生归纳总结)。

在无机化学教学中, 有关沉淀溶解平衡反应的讨论是借助于溶度积规则。因此, 先写出 $\text{AgCl(s)} = \text{Ag}^+ + \text{Cl}^-$ 的方程式, 让学生根据以前学习的平衡常数知识, 写出平衡常数 $K$ 的表达式, 进而得出溶度积的定义。

在掌握溶度积及溶度积与溶解度换算的基础上, 让学生根据勒沙特列原理, 归纳总结出沉淀生成溶解的判断依据<sup>[4]</sup>, 侧重让学生表达想法, 总结知识点。

知识点①: 溶度积定义

难溶强电解质 $A_mB_n(\text{s})$ 溶于水形成饱和溶液时, 在溶液中达到沉淀溶解平衡状态(动态平衡), 各离子浓度保持不变(或一定), 其离子浓度幂的乘积为一个常数, 这个常数称之为溶度积常数, 简称溶度积, 用 $K_{\text{sp}}$ 表示:



$$K_{\text{sp}} = c(A^{n+})^m \cdot c(B^{m-})^n \quad \text{其适用对象为饱和溶液}$$

知识点②: 溶度积与溶解度(单位: g/100 g水)互换

$$\text{对于AB型} \quad K_{\text{sp}} = S^2$$

$$\text{对于AB}_2\text{型} \quad K_{\text{sp}} = S(2S)^2$$

$$\text{对于A}_m\text{B}_n\text{型} \quad K_{\text{sp}} = (mS)^m(nS)^n$$

(需要为学生讲明: 以上换算的条件是难溶物溶解的部分百分百电离, 且难溶物溶解了的阳离子、阴离子的水解反应等副反应可以忽略, 浓度可以替代活度)

知识点③: 沉淀生成和溶解的判据

在难溶电解质溶液中, 离子浓度幂的乘积称为浓度积, 用符号 $Q_c$ 表示。

$Q_c > K_{\text{sp}}$ , 溶液过饱和, 有沉淀析出, 直至溶液饱和, 达到新的平衡;

$Q_c = K_{\text{sp}}$ , 溶液为饱和溶液, 沉淀与溶解处于平衡状态;

$Q_c < K_{\text{sp}}$ , 溶液未饱和, 向沉淀溶解的方向进行, 无沉淀析出, 若加入过量难溶电解质, 难溶电解质溶解直至溶液饱和。

环节2 知识升华——应用思维培养。

学生分组讲授溶度积规则在有机晶体沉淀析出中的应用实例<sup>[5]</sup>, 课前给每个小组定两个问题, 利用“问题驱动型”方法来调动学生阅读文献目标性和积极性。

第一小组学生主要解决问题:

(1) 什么是有机电荷转移共晶?

(2) 本文有机电荷、转移共晶中给体和受体反应生成什么物质？

第一小组学生PPT展示如图2所示。

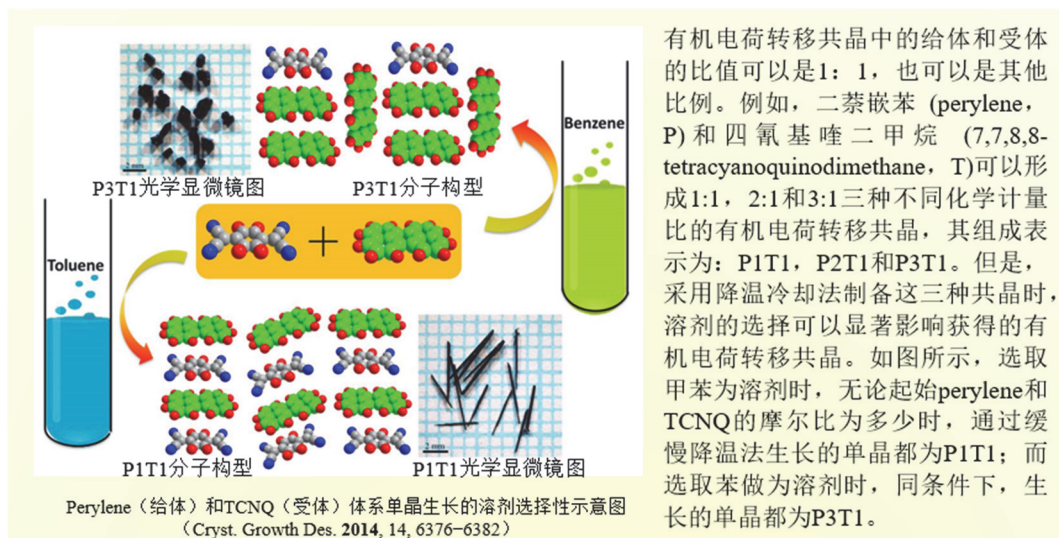


图2 第一小组学生展示的体系单晶沉淀析出的溶剂选择性示意图

什么是有机电荷转移共晶: 有机电荷转移共晶是一种由能够给出 $\pi$ 电子的分子(Donor, 电子给体)和能够接受 $\pi$ 电子的分子(Acceptor, 电子受体)构成的复合物。

教师补充: 有机电荷转移共晶由于展现出很多单极材料所不具备的物理性质, 如有机超导、有机铁磁、有机铁电等, 备受人们的关注<sup>[5,6]</sup>。一般情况下, 有机电荷转移共晶的溶解度小于单体的溶解度, 并且其溶解度在高温下较大、低温下较小, 所以可利用该原理, 采用降温冷却法来生长有机电荷转移共晶<sup>[5]</sup>。

第二小组学生主要解决问题:

(1) 如何用溶度积规则解释不同产物P1T1, P3T3的生成?

(2) P1T1和P3T1产物溶解度和溶度积常数 $K_{sp}$ 的关系?

第二小组学生PPT展示如图3所示。

在电荷转移共晶中, 给体(D)由于给出部分电子, 显示部分正电荷属性, 而受体(A)得到部分电子, 从而显示出部分负电荷属性, 溶度积规则就可以解释这个现象。

对于任意一个二元有机电荷转移共晶 $D_nA_m$ , 存在如下平衡:



那么其溶度积常数( $K_{sp}$ )可以表示为:

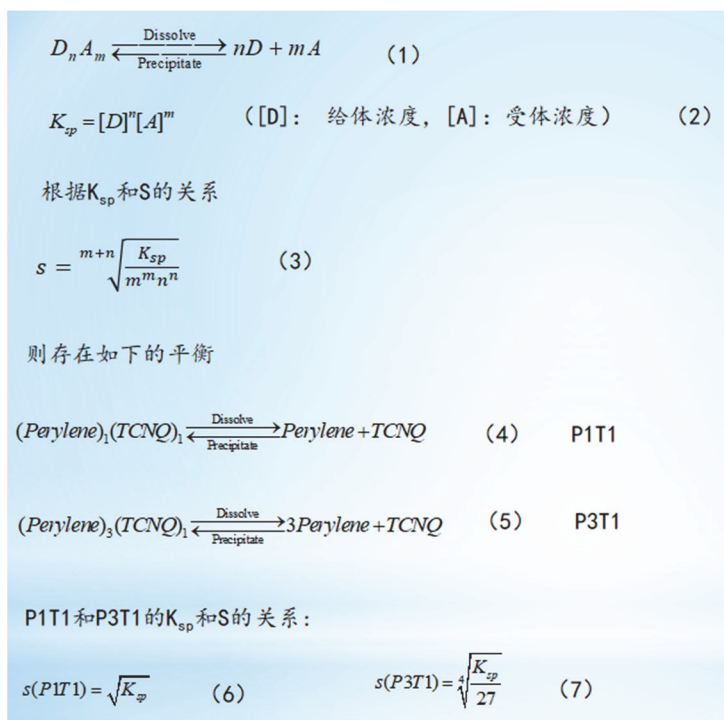
$$K_{sp} = [D]^n [A]^m \quad (2)$$

其中: [D]为溶剂中给体浓度, [A]为溶剂中受体的浓度。根据溶度积常数和溶解度的关系, 可以得出:

$$s = \left( \frac{K_{sp}}{m^m n^n} \right)^{1/(m+n)} \quad (3)$$

对于电荷转移共晶P1T1和P3T1来说, 存在如下平衡:




 图3 第二小组学生展示P1T1和P3T1的溶解度 $s$ 和 $K_{sp}$ 关系推导过程

因此, 根据公式(3), P1T1和P3T1的溶解度和溶度积常数的关系如下所示:

$$S(\text{P1T1}) = (K_{sp})^{1/2} \quad (6)$$

$$S(\text{P3T1}) = \left(\frac{K_{sp}}{27}\right)^{1/4} \quad (7)$$

第二小组学生PPT展示文献中实验得出的具体数据如图4所示。

表2 P1T1和P3T1在不同温度下的溶解度 (mol/L)

|         |      | 40 °C     | 50 °C     | 60 °C     | 70 °C     | 80 °C     |
|---------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| toluene | P1T1 | 0.0006(7) | 0.0008(3) | 0.0008(6) | 0.0009(2) | 0.0010(1) |
|         | P3T1 | 0.0029(6) | 0.0031(7) | 0.0037(4) | 0.0048(3) | 0.0056(7) |
| benzene | P1T1 | 0.0025(4) | 0.0025(8) | 0.0030(2) | 0.0032(9) | 0.0046(4) |
|         | P3T1 | 0.0014(1) | 0.0016(6) | 0.0017(6) | 0.0021(1) | 0.0026(4) |

表3 P1T1不同温度下在甲苯和苯中的溶度积常数 (mol/L)

|         |  | 40 °C                       | 50 °C                       | 60 °C                       | 70 °C                       | 80 °C                       |
|---------|--|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| toluene |  | $1.12 \times 10^{-7}$       | $1.73 \times 10^{-7}$       | $1.87 \times 10^{-7}$       | $2.12 \times 10^{-7}$       | $2.54 \times 10^{-7}$       |
|         |  | $(\pm 0.11 \times 10^{-7})$ | $(\pm 0.11 \times 10^{-7})$ | $(\pm 0.11 \times 10^{-7})$ | $(\pm 0.11 \times 10^{-7})$ | $(\pm 0.11 \times 10^{-7})$ |
| benzene |  | $6.46 \times 10^{-6}$       | $6.68 \times 10^{-6}$       | $9.14 \times 10^{-6}$       | $1.08 \times 10^{-5}$       | $2.16 \times 10^{-5}$       |
|         |  | $(\pm 0.25 \times 10^{-6})$ | $(\pm 0.25 \times 10^{-6})$ | $(\pm 0.25 \times 10^{-6})$ | $(\pm 0.25 \times 10^{-6})$ | $(\pm 0.25 \times 10^{-6})$ |

表4 P3T1不同温度下在甲苯和苯中的溶度积常数 (mol/L)

|         |  | 40 °C                        | 50 °C                        | 60 °C                        | 70 °C                        | 80 °C                        |
|---------|--|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| toluene |  | $2.08 \times 10^{-9}$        | $2.74 \times 10^{-9}$        | $5.31 \times 10^{-9}$        | $1.48 \times 10^{-8}$        | $2.79 \times 10^{-8}$        |
|         |  | $(\pm 0.17 \times 10^{-9})$  | $(\pm 0.17 \times 10^{-9})$  | $(\pm 0.17 \times 10^{-9})$  | $(\pm 0.17 \times 10^{-9})$  | $(\pm 0.17 \times 10^{-9})$  |
| benzene |  | $1.08 \times 10^{-10}$       | $2.07 \times 10^{-10}$       | $2.64 \times 10^{-10}$       | $5.27 \times 10^{-10}$       | $1.32 \times 10^{-9}$        |
|         |  | $(\pm 0.13 \times 10^{-10})$ | $(\pm 0.13 \times 10^{-10})$ | $(\pm 0.13 \times 10^{-10})$ | $(\pm 0.13 \times 10^{-10})$ | $(\pm 0.13 \times 10^{-10})$ |

图4 第二小组学生PPT展示不同单晶的溶度积常数与溶解度

文献中通过溶解-蒸发实验,测得P1T1和P3T1不同温度下的溶解度,如图4中的表2所示。在甲苯中P1T1的溶解度小于P3T1的溶解度,而在苯中,P3T1的溶解度小于P1T1的溶解度。也就是说,P1T1在甲苯中先沉淀出来,而P3T1在苯中先沉淀出来。根据P1T1和P3T1不同温度下的溶解度和公式(6)、公式(7),可以计算出P1T1和P3T1在不同温度下不同溶剂中的溶度积常数(图4中的表3和表4)。

第三小组学生主要解决问题:

如何判断P1T1和P3T1哪种物质先沉淀?

小组三学生PPT展示如图5所示:学生认为需要比较反应商( $Q$ )与溶度积常数( $K_{sp}$ )的大小来判断P1T1和P3T1谁先沉淀。

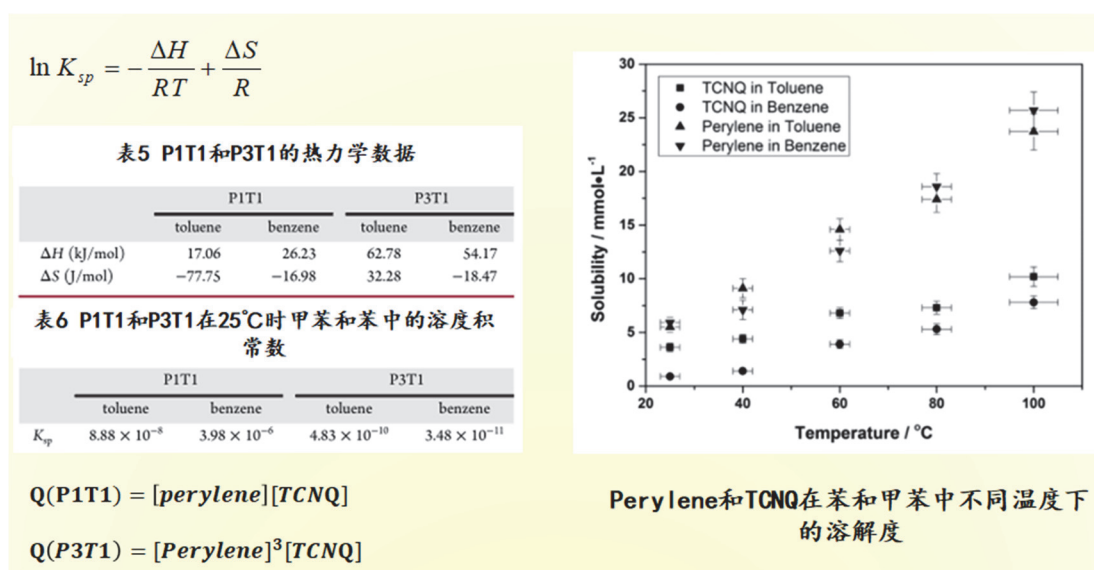


图5 第三小组学生PPT展示内容

由于晶体沉淀析出的温度为25 °C,有以下公式:

$$\ln K_{sp} = -\frac{\Delta H}{RT} + \frac{\Delta S}{R} \quad (8)$$

利用公式及图5中的表5的热力学数据,计算得出图5中的表6中25 °C时甲苯和苯中的溶度积常数,再根据perylene和TCNQ在苯和甲苯中不同温度下的溶解度,用以下公式计算其反应商:

$$Q(P1T1) = [P][T]$$

$$Q(P3T1) = [P]^3[T]$$

第三小组学生讲解:25 °C时,根据perylene和TCNQ在苯中和甲苯中的溶解度(图5 PPT右图所示),与图5中的表6数据比较,P1T1的反应商大于P1T1的溶度积常数( $1.63 \times 10^{-5} > 8.88 \times 10^{-8}$ ),而P3T1的反应商则小于P3T1的溶度积常数,说明在甲苯中P1T1将会生成,而P3T1则会溶解。perylene和TCNQ在25 °C时苯中的反应商大于P3T1溶度积常数( $1.10 \times 10^{-10} > 3.48 \times 10^{-11}$ ),而P1T1的反应商则小于P1T1的溶度积常数,说明在苯中P3T1将会生成,而P1T1则会溶解。因此,利用沉淀-溶解平衡,可以有效地根据溶剂选择性析出所需的有机电荷转移单晶。

环节3 经确认学生的解答正确后教师点评。

三个小组通过今天的学习内容及一篇文献,不仅加深了对基本概念的理解,理清了溶解度和溶度积常数的关系,掌握了利用溶度积与反应商来判断沉淀的生成原则;理解了如何用溶度积常数来判断特定溶液中,究竟哪种有机晶体可以沉淀析出。

在学习溶度积规则时,同学们尤其应该注意两个容易错误的知识点:第一个是常易误解溶度积

常数 $K_{sp}$ 的定义, 将其等同于饱和溶液中的离子浓度乘积, 而忽略了溶度积仅在特定温度下是常数, 与离子浓度的动态变化无关。另一个难点是混淆同离子效应和盐效应的影响, 尤其是在计算多元沉淀体系的溶解度时容易犯错, 应特别注意体系中的离子种类和来源。

利用溶度积规则, 除了所学的指导有机共晶沉淀析出, 还可以用来净化水, 比如有机废水中往往含有难降解的有机污染物, 通过设计有机物的沉淀反应, 利用溶度积规律预测沉淀生成条件, 可以实现对特定污染物的选择性去除。例如, 对于含有苯酚、酞酸酯等常见污染物的工业废水, 通过设计特定反应条件(如调节pH或加入络合剂)使其形成不溶的有机盐类沉淀, 可大幅降低其溶解度, 从而实现污染物的分离与水质净化。将沉淀溶解平衡理论应用到有机物的研究, 不仅能够提高处理效率, 还具有较高的环境友好性和经济效益, 为开发更加高效的净化工艺提供了基础依据。

除了以上应用实例, 溶度积规则的学习还可以干什么? 同学们可以以小组讨论形式把结果上传。

## 6 教学反思与改进

沉淀溶解平衡是无机化学中的重要理论概念, 通常用于描述难溶性无机化合物的析出和溶解过程。然而, 将这一理论应用到有机化合物的生长和析出领域具有重要的意义。通过溶度积规则, 可以精确控制有机晶体的析出条件, 从而实现对晶体生长速率、形态和纯度的调控。这在有机电子材料、药物制备以及功能性材料的开发中尤为关键。因此, 沉淀溶解平衡为有机材料科学提供了强有力的理论支持, 使得研究人员能够在分子水平上优化有机材料的生长过程, 推动有机化合物在高科技领域的应用。所以本节课将书本上的理论应用范围从无机物扩展到有机物范畴, 不仅帮助学生巩固了理论知识, 还激发了他们探究前沿问题的兴趣, 使其逐步具备在复杂应用中分析和解决问题的能力。这种培养方式将课堂知识与科研需求无缝衔接, 为学生未来的创新研究奠定了坚实的基础。本节课整体上是由学生作为主体, 通过小组协作, 在课本知识的基础上, 升华所学内容, 同时也利用文献加深学生对课本知识的理解和把握。该教学设计激发了学生参与课堂互动的积极性与主动性, 也让他们认识到无机化学理论的学习可以去解决科学研究中遇到的问题, “学以致用”, 相比于传统的习题讲解, 能获得非常好的教学效果。本次教学改革将沉淀溶解平衡与科研案例结合, 增强了教学内容的实际应用性, 取得了较好效果。然而, 仍存在以下问题:

(1) 时间限制: 在有限的课堂时间内难以实现所有小组的充分展示, 未来应该考虑分配更多讨论时间。

(2) 个性化指导不足: 在小组讨论环节, 教师难以对每位学生的问题进行详细解答, 可考虑在课后安排答疑时间或线上讨论。

针对以上问题, 未来可进一步完善教学流程, 加强课前自学环节, 并适当缩小讨论范围, 以提高课堂讨论的针对性和效率。

## 7 结语

本文通过教师引导学生归纳总结溶度积规则在不同溶剂中有机单晶沉淀析出产物的选择性案例, 使学生能够牢固地掌握溶度积规则相关知识, 深刻地理解溶度积规则在科研上的应用。另外, 本教学过程通过溶度积规则指导“电荷转移共晶析出”的教学案例, 将沉淀溶解平衡的理论知识与实际科研内容相结合, 构建了以文献研读、分组讨论和案例分析为主的教学模式, 提升了学生的科研意识、批判性思维和知识应用能力。该举措同时也加强了学生阅读专业英语的能力、概括能力、表达能力、PPT的设计能力等, 也消除了本科生对科学研究和论文的神秘感, 为材料化学专业本科生科研思维的培养奠定了一定基础。

**致谢:** 本文在撰写及修改过程中, 多得北京大学化学与分子工程学院荆西平老师和陕西师范大学刘宗怀老师的悉心修改和指导, 在此表示衷心的感谢; 同时也感谢朱玉军老师对本文格式及内容上的认真修改及建议。

参 考 文 献

- [1] 姜训勇. 教育教学论坛, **2019**, No. 38, 61.
- [2] 《陕西师范大学本科专业建设管理办法(修订)》(陕师校发〔2023〕189号). [2025-07-03]. <https://jwc.snnu.edu.cn/info/1060/5368.htm>
- [3] 教育部办公厅关于推荐新工科研究与实践项目的通知(教高厅函〔2017〕33号). [2025-07-03].  
[http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/201707/t20170703\\_308464.html](http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/201707/t20170703_308464.html)
- [4] 宋天佑. 简明无机化学. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [5] Hu, P.; Ma, L.; Tan, K. J.; Jiang, H.; Wei, F. X.; Yu, C. H.; Goetz, K. P.; Jurchescu, O. D.; McNeil, L. E.; Gurzadyan, G. G.; Kloc, C. *Cryst. Growth Des.* **2014**, *14*, 6376.
- [6] Jiang, L.; Dong, H. L.; Hu, W. P. *J. Mater. Chem.* **2010**, *20*, 4994.