Advances in Education 教育进展, 2026, 16(11), 1453-1459
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ae
https://doi.org/10.12677/ae.2026.16112522

Hans汉斯

素养进阶视角下结晶模型建构的教学设计与实施

张　勇，张　琅

重庆市第六十六中学校，重庆

收稿日期：2026年10月11日；录用日期：2026年11月12日；发布日期：2026年11月19日

摘　要

高中化学实验模块中结晶相关实验操作类型繁杂，蒸发结晶、冷却结晶、重结晶等操作极易造成学生认知混淆。基于此，文章以结晶实验为载体，结合教材典型例题与高考选考真题，通过剖析单一溶液、混合溶液体系下晶体析出的原理，梳理不同情境下结晶实验操作流程，建构系统化的结晶化学模型。借助模型认知的思维方式帮助学生厘清各类结晶方法的适用条件，引导学生理解现象背后的微观本质，能够依据物质溶解度特性、热稳定性等信息自主选择结晶方案，落实证据推理与模型认知的化学学科核心素养，提升学生分析、解决化学实际问题的综合能力。

关键词

蒸发结晶，冷却结晶，重结晶，模型认证，化学核心素养

Instructional Design and Implementation of Crystallization Model Construction from the Perspective of Literacy Progression

Yong Zhang, Lang Zhang

Chongqing No.66 Middle School, Chongqing

Received: October 11, 2026; accepted: November 12, 2026; published: November 19, 2026

Abstract

There are various experimental operations related to crystallization in the senior high school chemistry

文章引用: 张勇, 张琅. 素养进阶视角下结晶模型建构的教学设计与实施[J]. 教育进展, 2026, 16(11): 1453-1459.
DOI: 10.12677/ae.2026.16112522

experiment module, and students are easily confused by operations such as evaporative crystallization, cooling crystallization, and recrystallization. Taking crystallization experiments as the carrier, combined with typical textbook examples and actual college-entrance-examination optional test questions, this paper analyzes the principles of crystal precipitation in single-solution and mixed-solution systems, sorts out the experimental procedures of crystallization under different situations, and constructs a systematic chemical model of crystallization. With the thinking mode of model cognition, it helps students clarify the applicable conditions of various crystallization methods, guides them to understand the micro-essence behind phenomena, and enables them to independently select crystallization schemes according to properties such as solubility characteristics and thermal stability of substances. It implements the chemistry discipline core competencies of evidence-based reasoning and model cognition, and improves students' comprehensive ability to analyze and solve practical chemical problems.

Keywords

Evaporative Crystallization, Cooling Crystallization, Recrystallization, Model Certification, Chemistry Core Literacy

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. 研究背景

粗盐提纯是初中化学的重点实验，学生在初中阶段已经接触蒸发结晶的基本操作，能够掌握玻璃棒搅拌、余热蒸干等基础实验要点，对晶体从溶液中析出具备初步感性认知。步入高中阶段之后，化学知识广度与深度显著提升，教材拓展引入冷却结晶、重结晶等实验内容，物质体系也由简单的单一溶质溶液延伸至多种溶质共存的混合溶液情境。

在实际教学过程中笔者发现，不少学生仅依靠机械记忆实验步骤，没有理解结晶操作背后的原理。面对陌生物质、复杂混合体系时，学生无法结合溶解度曲线、物质热稳定性、是否含有结晶水等信息判断应当选用哪一种结晶方式。部分学生混淆“蒸发浓缩冷却结晶”与“蒸发结晶趁热过滤”的适用场景，遇到重结晶综合题型更是无从下手。

《普通高中化学课程标准(2017 版 2020 修订)》明确将“证据推理与模型认知”列为化学五大核心素养之一[1] [2]，要求学生可以通过分析、推理等方法认识研究对象的本质特征，能够建构模型，并运用模型解释化学现象。结晶是物质以晶体形态从过饱和溶液、熔体或气体中析出的过程。针对结晶这一高频考点，教师不应当让学生死记硬背操作话术，而要立足溶解度变化规律与物质性质，建构可迁移的结晶思维模型，将零散的实验知识点整合为结构化的知识体系，推动学生思维由碎片化记忆向逻辑化推理进阶，以此落实学科核心素养的培养目标。

2. 单一溶液的结晶模型

单一溶质溶液结晶是结晶知识的基础，判断结晶方式主要依据两个核心要素：第一是物质溶解度随温度的变化趋势；第二是物质本身的化学性质，重点考察热稳定性，是否受热易分解、是否带有结晶水[3]。不同物质性质对应不同实验操作，下面结合典型物质案例展开分析。

(一) 从 NaCl 溶液中得到 NaCl 晶体

KNO_3 和 NaCl 的溶解度曲线如图 1 所示。

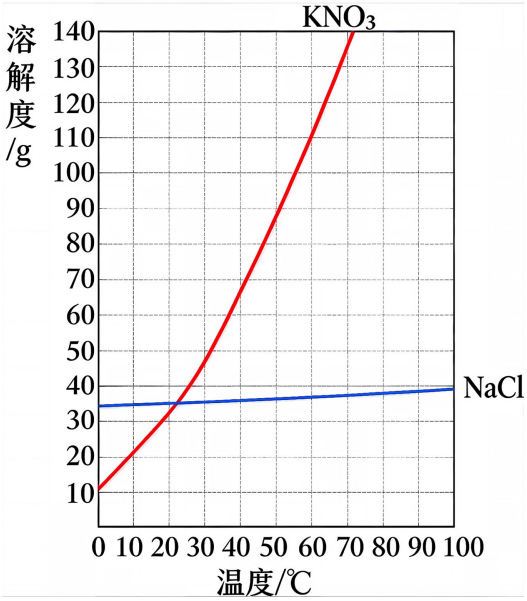


Figure 1. Solubility curves of KNO_3 and NaCl
图 1. KNO_3 和 NaCl 的溶解度曲线

实验操作：蒸发过程中不断用玻璃棒搅拌溶液，防止局部过热造成液体飞溅；当蒸发皿中出现大量晶体析出时，停止加热，利用蒸发皿的余热将剩余少量溶剂蒸干。

关键点：氯化钠的溶解度受温度影响很小，降温条件下溶解度几乎不会下降，几乎无法析出大量晶体，因此不适合使用冷却结晶。同时，NaCl 化学性质稳定，受热不易分解，耐高温，因此选择蒸发结晶。

(二) 从 Li_2SO_4 溶液中得到 Li_2SO_4 晶体

实验操作：蒸发结晶、趁热过滤。

关键点：硫酸锂是较为特殊的物质，它的溶解度随温度升高反而降低。如果蒸发完成之后体系降温，溶解度增大，已经析出的晶体会重新溶解回到溶液中，得不到目标产物。因此，析出晶体之后必须保持高温状态立刻过滤，即趁热过滤，避免降温造成晶体回溶。

(三) 从 $CuSO_4$ 溶液中得到 $CuSO_4·5H_2O$ 晶体

实验操作：蒸发浓缩、冷却结晶、过滤。

关键点：五水硫酸铜属于结晶水合物。如果直接加热蒸发蒸干溶剂，蒸发皿内温度过高，破坏晶体结构，造成结晶水失去，最终得到无水硫酸铜白色粉末，而无法获得蓝矾晶体。绝大多数带结晶水的盐类，均不能直接高温蒸干，统一采用蒸发浓缩，先将溶液变成热饱和溶液，之后降温冷却，析出带有结晶水的晶体。

(四) 从 NH_4NO_3 溶液中得到 NH_4NO_3 晶体

实验操作：蒸发浓缩、冷却结晶、过滤。

关键点：硝酸铵溶解度随温度升高急剧增大，同时铵盐普遍热稳定性差，高温条件下容易发生受热分解。倘若直接蒸发结晶加热蒸干，硝酸铵会受热分解变质。因此，受热易分解的盐类，即便溶解度变化特征各不相同，也优先选择冷却结晶，规避高温带来的物质分解问题。

综合上述案例，对单一溶液结晶模型归纳总结，可以划分三类情况：

1) 溶解度随温度升高明显增大，并且热稳定性良好的物质，常规可采用蒸发结晶；

2) 溶解度随温度升高而减小的物质，采用蒸发结晶，趁热过滤，防止降温晶体复溶；

3) 受热容易发生分解、或者带有结晶水的物质，选用蒸发浓缩、冷却结晶、过滤的操作模型。

3. 混合溶液的结晶模型

在化工生产和高考习题中，更常遇到多种溶质共存的混合溶液体系，其中既有目标产物，又含有可溶性杂质。此时，不仅要考虑目标物质的性质，还要兼顾杂质的溶解度变化规律，通过结晶实现物质分离提纯。混合溶液结晶主要分为除杂提纯、复分解反应制备新物质、有机物重结晶几类场景。

(一) KNO_3 溶液中含有少量 NaCl，获得纯净 KNO_3 晶体

硝酸钾溶解度随温度升高急剧增大，氯化钠溶解度随温度变化幅度很小。实验操作：蒸发浓缩、冷却结晶、过滤、洗涤、干燥。洗涤环节需要结合产物溶解度选择洗涤剂，溶解度大的晶体可以选用冷水、无水乙醇等，减少洗涤过程中晶体溶解损耗。降温冷却之后大量硝酸钾晶体析出，少量氯化钠依旧溶解在冷滤液中，实现固液分离除去杂质。

关键点：杂质 NaCl 含量少，冷却时达不到饱和，不会析出，利用二者溶解度受温度影响差异完成提纯。

(二) NaCl 溶液中含有少量 KNO_3，获得纯净 NaCl 晶体

实验操作：蒸发结晶、趁热过滤、洗涤、干燥。洗涤氯化钠晶体时，为降低晶体溶解损失，优先选用饱和氯化钠溶液作为洗涤剂。蒸发溶剂，氯化钠不断达到饱和析出；硝酸钾杂质量少，热溶液当中溶解度很大，仍然留在热滤液中，趁热过滤分离晶体。

关键点：氯化钠溶解度受温度几乎无变化，不能依靠降温析出；高温下蒸发溶剂让 NaCl 结晶，趁热过滤将硝酸钾保留在滤液除去。

(三) 当 KNO_3 与 NaCl 物质的量之比为 1:1 时，提纯 KNO_3 晶体

当两种溶质含量都比较高，单一一次结晶无法得到纯净产物，就需要组合前面两种模型。

实验操作：较高温度条件下蒸发溶剂，趁热过滤除去大部分 NaCl 晶体；接着将滤液冷却结晶，过滤得到硝酸钾晶体。该操作本质就是重结晶，两次结晶，两次过滤。

关键点：体系中 NaCl 含量较高，冷却时也会达到饱和析出，干扰产物纯度。因此，要先高温蒸发除去大部分氯化钠，再冷却析出硝酸钾，实现两种模型的组合应用。由此可以看出，重结晶并不是某一种独立操作，而是多次结晶分离的组合手段。

(四) 利用 KCl 和 $Ca(ClO_3)_2$ 制备 $KClO_3$，获得杂质少的氯酸钾

Table 1. Solubilities of $KClO_3$ and $CaCl_2$
表 1. $KClO_3$ 和 $CaCl_2$ 的溶解度

物质	温度/℃					
	0	20	40	60	80	100
$KClO_3$	3.3	7.4	14	24.5	38.5	57
$CaCl_2$	59.5	74.5	128	136.8	147.0	159

参考表 1，氯酸钾低温溶解度极低，氯化钙溶解度全程处于极高水平。虽然二者溶解度都随温度上升而增大，但低温条件溶解度悬殊。

实验操作：蒸发浓缩、冷却结晶、过滤、洗涤、干燥。

关键点：冷却之后氯酸钾溶解度急剧下降大量析出，氯化钙依旧溶解在滤液，依靠低温溶解度的巨

大差异完成产物分离，该情景和硝酸钾除氯化钠的原理存在区别，不是依靠两者受温度变化幅度差异，而是依靠低温溶解度绝对值的差距。

(五) 浙江省 2021 年 1 月选考节选

在溶液中加入 KCl，发生 $Na_2Cr_2O_7+2KCl=K_2Cr_2O_7+2NaCl$ 反应，重结晶前，为了得到杂质较少的 $K_2Cr_2O_7$ 粗产品，从下列选项中选出合理的操作(操作不能重复使用)并排序(有关物质的溶解度曲线如图 2 所示)：

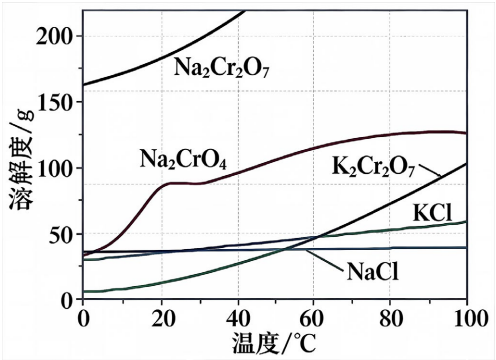


Figure 2. Solubility curves of relevant substances
图 2. 有关物质溶解度曲线

从下列选项中选出合理的操作(操作不能重复使用)并排序：

溶解 KCl→(　　)→(　　)→(　　)→(　　)→重结晶。

a. 50℃蒸发溶剂；b. 100℃蒸发溶剂；c. 抽滤；d. 冷却至室温；e. 蒸发至溶液出现晶膜，停止加热；f. 蒸发至溶液中出现大量晶体，停止加热。

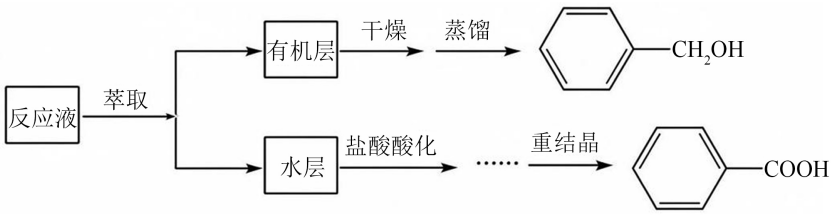
答案：a e d c。

关键点：$K_2Cr_2O_7$ 和 NaCl 按物质的量之比 1:2 考虑。在 100℃时蒸发浓缩，NaCl 先达饱和，50℃时二者溶解度几乎相等，蒸发溶剂后 $K_2Cr_2O_7$ 先达饱和($K_2Cr_2O_7$ 的质量大于 NaCl)，且降温时 $K_2Cr_2O_7$ 的溶解度变化显著而大量析出，NaCl 的溶解度变化不大仍未饱和。该题目体现温度控制、蒸发终点(晶膜而非大量晶体)在工业结晶中的重要意义。

(六) 苯甲酸的重结晶实验(有机物结晶)

苯甲醇与苯甲酸是重要的化工原料，可通过苯甲醛在氢氧化钠水溶液中的歧化反应制得[4]，反应式为：$2C_6H_5CHO + NaOH \rightarrow C_6H_5CH_2OH + C_6H_5COONa$。

某研究小组在实验室制备苯甲醇与苯甲酸，反应结束后对反应液按下列步骤处理：



重结晶过程：溶解→活性炭脱色→趁热过滤→冷却结晶→抽滤→洗涤→干燥。

已知：苯甲醇易溶于乙醚、乙醇，在水中溶解度较小。

请根据以上信息，回答下列问题：

苯甲酸在 A、B、C 三种溶剂中的溶解度(S)随温度变化的曲线如图 3 所示：

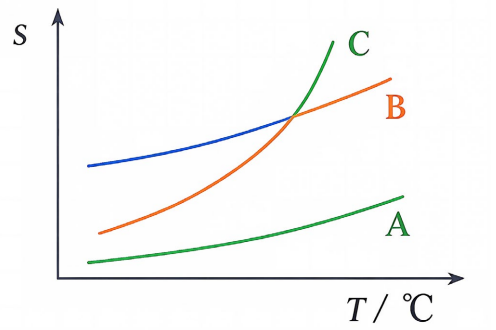


Figure 3. Solubility curves of benzoic acid in different solvents
图 3. 苯甲酸在不同溶剂中溶解度曲线

重结晶时，合适的溶剂是_____，其理由是_____。重结晶过程中，趁热过滤的作用是_____。

答案：C。随温度升高溶解度增加较快；除去不溶性杂质，防止苯甲酸冷却后结晶析出。

关键点：苯甲酸钠先溶于合适的溶剂，对此溶剂的选择有两点要求：一是杂质在此溶剂中的溶解度很大或很小；二是苯甲酸在此溶剂中的溶解度随温度变化比较大，故 C 溶剂最合适。苯甲酸加热溶解后，用活性炭脱色，然后趁热过滤除去不溶性杂质，苯甲酸留在滤液中，杂质留在滤纸上。同时保持高温，防止苯甲酸提前降温结晶析出，随滤渣被过滤除去造成产物损失。

综上，混合溶液结晶可以归纳三类模型：

1) 目标产物溶解度随温度升高显著增大，杂质高温易溶，选用蒸发浓缩冷却结晶－过滤模型；

2) 目标产物溶解度受温度影响小，杂质低温溶解度小，选用蒸发结晶、趁热过滤模型；

3) 两种溶质含量均较高，一次结晶纯度不足，则使用重结晶模型，多次结晶分离提纯。

4. 教学总结与教学启示

化学模型属于科学模型的重要类别，是人们对化学研究对象经过分析推理之后形成的概括性表达，也是化学学科重要的科学思维方法[5]。建构结晶模型，不是简单记住几个标准化操作语句，而是提炼问题的分析路径：对于结晶类问题，首先分析体系是单一溶质还是混合溶质；再分析物质的热稳定性，以及是否含结晶水；结合溶解度曲线，判断溶解度随温度变化的特征，最后匹配对应的结晶操作。当然对于高中学生来说，该模型主要适用于溶解度差异显著的体系，对于形成固溶体或共晶体的复杂情况则难以处理。

从学生思维发展角度来看，教学要遵循循序渐进的路径[6]。先夯实单一溶液结晶基础模型，理解每一步操作的目的，明白“为什么这么做”，而不是只记住“要怎么做”。之后进阶学习混合溶液当中除杂、制备的结晶模型，认识到不同基础模型可以组合使用，理解重结晶的本质是多次结晶。最终学生能够将蒸发结晶、冷却结晶、重结晶三类模型内化，面对陌生情境、陌生物质，自主推理设计结晶提纯方案。

在高中化学课堂中，教师要善用模型建构开展教学。结晶只是其中一个缩影，元素化合物、化学反应原理模块同样可以开展模型建构教学。借助模型认知，将繁杂零散的实验现象、方程式、操作步骤转化为逻辑链条，训练学生证据推理能力。学生依托物质性质证据推导实验方案，透过宏观结晶现象认识微观离子溶解－析出平衡，宏观现象与微观本质相互结合，真正落实化学学科核心素养，提升学生解决真实化学问题的综合能力。

基金项目

重庆市渝中区教育科学规划重点课题“基于化学学科核心素养的探究性实验教学案例研究”(课题号：2021-ZD-20)的研究成果。

参考文献

[1] 中华人民共和国教育部. 普通高中化学课程标准(2017 年版 2020 年修订) [S]. 北京: 人民教育出版社, 2020.

[2] 陈寅, 宋蕊. 基于发展学生学科核心素养的化学单元教学设计——以“晶体的结构与性质”为例[J]. 化学教学, 2020(1): 31-36.

[3] 邱长群. 模型认知的高层次表现——以“从溶液中析出晶体”为例[J]. 中学化学教学参考, 2022(5): 20-22.

[4] 薛礼然, 江玉媛, 孙玉宏. 利用针式过滤器改进苯甲酸重结晶实验[J]. 实验教学与仪器, 2024, 41(6): 66-67.

[5] 王星乔, 滕瑛巧, 李晶, 等. 指向“证据推理与模型认知”的物质结构教学——以人教版选择性必修 2 “配合物”为例[J]. 化学教学, 2022(9): 57-63.

[6] 李胜源, 黄泰荣, 高兴远. 核心素养导向下高二学生“晶体”心智模型的测评研究[J]. 化学教育(中英文), 2025, 46(15): 67-73.