

## 发现生活的美——给结晶加点“料”

肖琰<sup>1,\*</sup>, 黎书伶<sup>2</sup>, 李一凡<sup>2</sup>, 樊佳宁<sup>2</sup>, 史琳琳<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 沈阳药科大学制药工程学院, 沈阳 110016

<sup>2</sup> 沈阳药科大学药学院, 沈阳 110016

**摘要:** 以探究不同杂质对化学物质结晶的影响为出发点, 从生活中取材, 研究晶体生长过程中的影响因素, 得到不同形貌的晶体, 并在此基础上设计出结晶山水景观实验。本实验从宏观与微观角度研究了不同杂质对晶体生长的影响, 将化学科学与艺术相结合, 可应用于化学科普。本实验操作简单、成本经济、安全性高, 适合不同年龄段的人群参与。本实验有利于激发人们对化学的兴趣, 提高人们对化学研究的积极性, 拉近普通人群与化学科学之间的距离。

**关键词:** 结晶; 杂质; 化学科普

**中图分类号:** G64; O6

## Discovering the Beauty of Life: Adding Some “Ingredients” to Crystals

Yan Xiao<sup>1,\*</sup>, Shuling Li<sup>2</sup>, Yifan Li<sup>2</sup>, Jianing Fan<sup>2</sup>, Linlin Shi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Pharmaceutical Engineering, Shenyang Pharmaceutical University, Shenyang 110016, China.

<sup>2</sup> School of Pharmacy, Shenyang Pharmaceutical University, Shenyang 110016, China.

**Abstract:** In this experiment, the influence of different impurities on chemical crystallization was explored using materials from daily life. Factors affecting crystal growth were studied, resulting in crystals with diverse morphologies. Based on these findings, a crystal landscape experiment was designed, suitable for chemical science popularization. This experiment investigated the effects of various impurities on crystal growth from both macro and micro perspectives, combining chemical science with art. It is easy to operate, cost-effective, and safe, making it accessible for participants of all ages. By stimulating interest in chemistry and promoting enthusiasm for chemical research, this experiment bridges the gap between the general public and chemical science.

**Key Words:** Crystallization; Impurity; Popularization of chemistry

结晶是在化学中应用广泛的一种实验操作。它是材料学的理论基础, 也是地质矿物学等基础学科的母体学科, 同时在药物学、生物学等应用科学中也发挥着重要作用。晶体在自然和生活中无所不在。在中国古代诗词中, 诸如“九里楼台牵翡翠, 两行鸳鹭踏真珠”“忽如一夜春风来, 千树万树梨花开”等, 都蕴含着结晶的化学原理。结晶万千形态, 千变万化, 充满着化学的美感。日常生活中, 结晶也与我们如影随形, 并与我们的生活息息相关。

杂质对结晶的形成的有着重要影响, 作为一种添加剂, 不同的杂质会影响结晶过程与形貌特点。本实验利用生活中常见的化学物质, 通过添加不同的化学物质影响结晶过程, 探究杂质对结晶的影响, 并考虑其实际应用, 发现了一系列具有独特形状的结晶, 制作出美丽的结晶景观模型。

收稿: 2023-12-04; 录用: 2024-02-04; 网络发表: 2024-05-07

\*通讯作者, Email: yxiao619@163.com

基金资助: 2021年辽宁省双一流课程建设项目(10163-1639); 2022年度辽宁省普通高等教育本科教学改革研究项目(10163-528); 2023年沈阳药科大学本科课程思政示范课程(2023-77-12)

## 1 实验原理

### 1.1 结晶的原理

晶体被定义为单位空间格子严格按一定规则有序排列形成的结构, 具有自限性、均一性、异向性、对称性和稳定性。结晶形成的过程分为晶核形成和晶体生长两个阶段。在晶核形成中, 热力学条件起决定性作用, 受溶液过饱和度及内部结构、环境的影响。溶液在未成核前处于稳定状态, 体系中只有一个均匀液相。晶体相变驱动力足够大的时候, 体系出现晶核, 使溶液处于固液共存状态: 部分质点由高能量向低能量状态的转变, 使体系内自由能减小; 同时又因新相界面产生而出现的表面张力能, 使体系内自由能增加; 如果晶型发生转变, 就存在形变能的变化<sup>[1]</sup>。晶体生长受动力学条件控制, 其表现为晶体生长的速率与生长形态的不同<sup>[2]</sup>。晶体生长速率呈现阶梯状, 遵循布拉维法则<sup>[3]</sup>。而晶体生长形态受各晶面相对生长速率、表面能、晶体内部构造、外部环境温度、pH、压强以及杂质种类影响, 由空间格子结点依次发展成行列、面网、平行六面体空间点阵最后发展为单位晶胞。单位晶胞台阶化生长形成肉眼可见晶体。

### 1.2 杂质对结晶的影响

杂质被称为晶习改变剂, 根据杂质对晶体形貌影响的原理, 通过实验加入某种杂质对晶貌的改变情况, 在生产过程中加入特定种类与浓度的杂质充当晶形修饰剂, 应用于改变晶貌, 使结晶具有特定形状与松软程度<sup>[4-7]</sup>。

对溶质结晶产生影响的杂质主要总结为六类, 包括不溶或微溶盐的微晶、多价阳离子、络合物、表面活性剂、水溶性聚合物和生物活性大分子。杂质对溶液状态、晶体成核、晶体生长、团聚过程以及晶体表面台阶生长速率等都有影响, 进而影响晶体晶习、粒径及粒度分布等。杂质影响溶液过饱和度与溶液稳定性, 加入杂质会改变溶液结晶介稳区, 增大溶液过饱和度<sup>[8]</sup>。杂质能够改变成核推动力, 影响成核诱导期, 即目标产物过饱和溶液形成到出现临界晶核的时间间隔。通过物理作用吸附在临界晶核表面, 使成核能量势垒升高或者降低, 或者通过化学反应与溶质形成配合物, 同时改变成核温度, 影响晶体成核。杂质还会影响晶体生长速率与晶体形貌。不同杂质对晶体生长速率影响与作用效果不同。在晶体内部, 当杂质与晶体具有一定程度晶格相似性时, 进入晶体内部成为晶体一部分, 影响结晶。在晶体外部, 杂质随机吸附在晶体表面形成外力, 促进或抑制生长单元在晶面集结<sup>[9]</sup>。其中三种吸附位置对晶体生长速率影响最大——扭折点处、台阶面上、台阶的凸缘处。即使少量(浓度占比<溶液0.05%)杂质存在溶液中也会影响晶体晶习, 导致晶体生长形态发生改变或对称性降低<sup>[10]</sup>。

### 1.3 纸面结晶原理

由于纸的毛细作用, 饱和溶液在纸面上升, 溶质转移到纸面边缘, 形成晶核。纸边缘末端溶液水分先蒸发, 而溶质无法随着水分蒸发而挥发, 留在纸面上, 长成结晶。使用不被水浸润的物品, 将结晶液滴在其表面, 待水分挥发, 生长出结晶。在杂质与结晶溶质相同的条件下, 结晶形状与纸孔隙的大小有关。当纸孔隙大, 毛细作用强, 溶质进入纸的内部, 在结晶纸中产生晶核改变结晶环境, 结出晶体往往蓬松; 当纸孔隙小, 溶液无法浸透纸面沿纸内部植物纤维上升, 覆盖纸的表面, 往往板结在纸表面。晶液在自然条件下形成的晶形与在纸面下的有差距, 毛细作用越强, 差距越明显。

## 2 结果与讨论

### 2.1 结晶实验

利用物质溶解度曲线, 查找20℃下固体溶质的溶解度, 计算出所需量, 称量稍过量固体粉末置于烧杯中, 加入40 mL蒸馏水并搅拌至溶液无块状固体, 将烧杯置于加热套加热。至溶液澄清停止加热, 待溶液稍冷。取12支试管, 以4支为一组, 均分为食盐组、尿素组、磷酸二氢钾组。另取4支试管做混合实验组。

单一晶液组实验：在试管中加入10 mL氯化钠/尿素/KDP饱和溶液充当结晶体溶液，加入杂质(胶水、洗洁精、葡萄糖等) 1 mL (或0.2 g)，混合均匀。具体配制及相应的结晶结果如表1所示，磷酸二氢钾饱和溶液用KDP表示，“/”后为加入的杂质。相应的结晶图如图1所示，结晶格与表1位置相对应。

表1 单一晶液实验组结晶溶质、杂质及实验结果

组别	溶质/无杂质	溶质/杂质1	溶质/杂质2	溶质/杂质3
食盐组	氯化钠	家用食盐	家用食盐/小苏打	家用食盐/糖类物质
结晶状态	正四面体	正四面体、零散颗粒	块状不规则	略小于家用食盐
尿素组	尿素	尿素/胶水	尿素/洗洁精	尿素/氨水
结晶状态	刺状	蓬松的绒球，质地结实	细长晶须，树状	结实针叶状
KDP组 <sup>[9]</sup>	KDP	KDP/胶水	KDP/自来水	KDP/食盐
结晶状态	棱状	中间白色晶核，块状	结晶零散、大小形状不一	颗粒状



图1 不同结晶组的结晶效果图

电子版为彩图，下同

混合实验组实验：A组加入10 mL磷酸二氢钾饱和溶液、2 g食盐粉末、1 mL氨水、0.2 g漂白粉。B组加入10 mL磷酸二氢钾饱和溶液、2 g食盐粉末、1 g碳酸氢钠粉末、0.2 g漂白粉。C组加入10 mL磷酸二氢钾饱和溶液、2 g食盐粉末、1 mL氨水、1 g无水氯化钙固体。D组加入10 mL尿素饱和溶液、2 g食盐粉末、1 mL氨水、0.2 g漂白剂。具体配制及相应的结晶结果如表2所示，“/”后为加入的杂质。相应的结晶图如图2所示，结晶格与表2位置相对应。

表2 混合实验组的结晶溶质、杂质种类及实验结果

物质及结晶状态	组A	组B	组C	组D
溶质/杂质	KDP、食盐/漂白粉、氨水	KDP、食盐/氨水、漂白粉、小苏打	KDP、食盐/氨水、无水氯化钙	尿素、食盐/漂白粉、氨水
结晶状态	在边缘团聚	结实，绒毛状	板结在点滴板	颗粒状，生长旺盛



图2 混合实验组结晶生长情况

## 2.2 结晶的显微观察

用电子显微镜与偏光显微镜观察每组结晶形状与构造。部分晶体显微图如图3和图4所示。

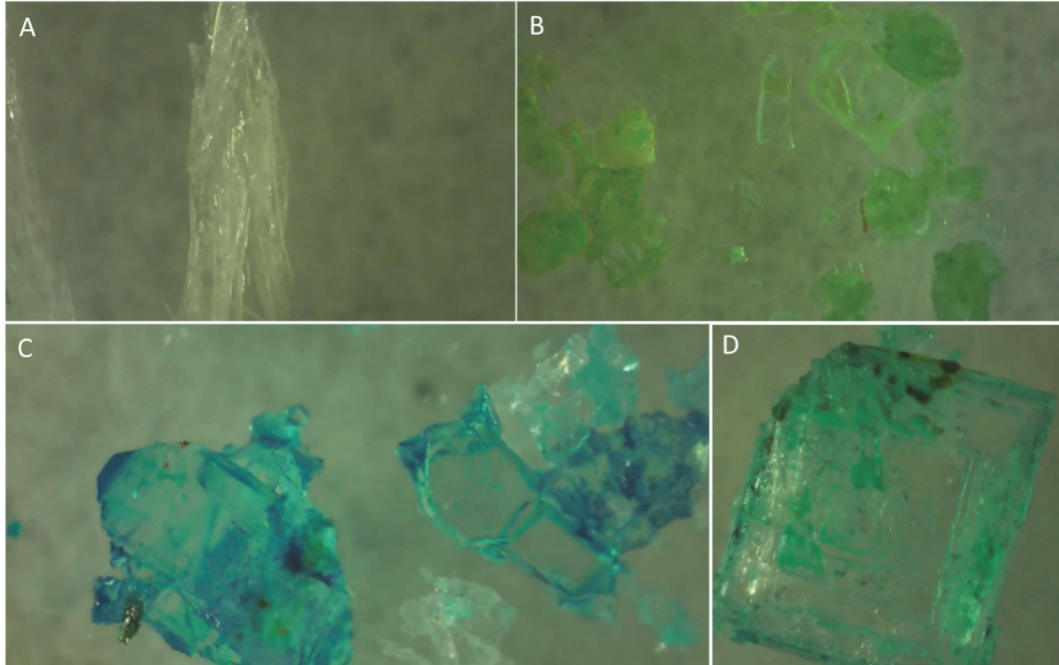


图3 电子显微放大镜下的晶体

(A) 尿素+洗洁精; (B) 食盐; (C) KDP+食盐+氨水+无水氯化钙; (D) KDP+食盐

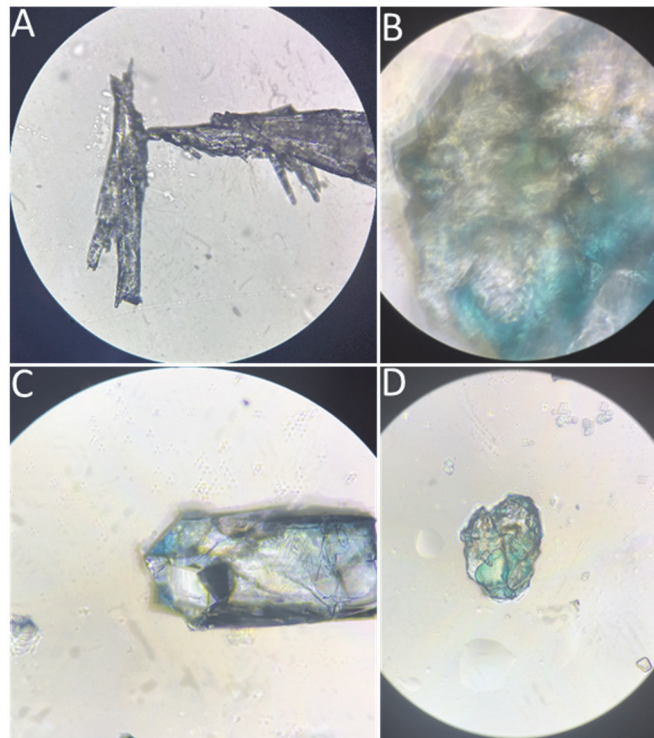


图4 偏光显微镜下的晶体

(A) 尿素+洗洁精; (B) 食盐; (C) KDP+食盐+氨水+无水氯化钙; (D) KDP+食盐

### 2.3 X射线单晶衍射测试

采用专业仪器测量在食盐存在下磷酸二氢钾溶液生成的结晶的基本性质。挑选的晶体尺寸为： $0.266\text{ cm} \times 0.152\text{ cm} \times 0.071\text{ cm}$ 。单晶测试条件：X射线单晶衍射仪(Bruker Smart APEX II, Mo- $K_{\alpha}$ 射线,  $\lambda = 0.71073\text{ \AA}$ )测定单晶结构, 利用SMART和SAINT程序收集衍射数据。相关数据如表5所示。

表5 晶体学数据表

Compound	—
Chemical formula	—
Formula weight	—
Crystal system	tetragonal
Space group	<i>I4/mmm</i>
<i>a</i> /Å	7.4644(6)
<i>b</i> /Å	7.4644(6)
<i>c</i> /Å	6.9847(10)
$\alpha$ (°)	90
$\beta$ (°)	90
$\gamma$ (°)	90
<i>V</i> /Å <sup>3</sup>	389.17(8)
<i>Z</i>	4
$D_{\text{calc}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.486
F (000)	172.0
$\mu/\text{mm}^{-1}$	1.535
Reflections collected	1265
Unique refl. ( $R_{\text{int}}$ )	171(0.0227)

根据表5可得出, 晶体为四方晶系, 空间群*I4/mmm*, 且晶体位于中心对称的空间群, 说明晶体结构可能是中心对称结构。磷酸二氢钾( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )为非线性光学晶体, 非线性系数 $d_{3630.63} \times 10012\text{ m}\cdot\text{V}^{-1}$ , 对 $0.69430\text{ m}$ 激光倍频相位匹配角 $\theta$ 为 $50.451^\circ$ , 属四方晶系。可得出结论, 杂质并未改变晶体整体结构, 但对晶体内部结构有微小改变。

## 3 结晶山水景观实验

按照实验室观察记录的不同材料与晶液的混合产生的结晶形貌, 用电脑设计结晶山水平面模型, 利用尿素饱和溶液加入不同杂质材料还原出晶体制作的“山水”(图5)。

## 4 梯度科普设计

本实验将化学结晶和日常生活相联系, 具有安全性高、艺术性强、操作简便等优点, 具有潜在的科普应用价值。根据不同年龄人群及社会大众的化学知识储备, 本文设计梯度科普, 具体方案如下。

### 4.1 针对少儿群体: 自制不同结晶+原创绘画定格漫画

用小朋友喜闻乐见的科普漫画、科普短视频的方式, 向小朋友科普结晶相关知识。走进家庭与学校, 利用生活中的材料, 指导孩子通过想象力在结晶溶液中加入不同的杂质, 制作不同晶型的结晶。同时可开展结晶作画写字、装饰结晶树等有趣的实验, 帮助孩子打开探索化学世界的大门。

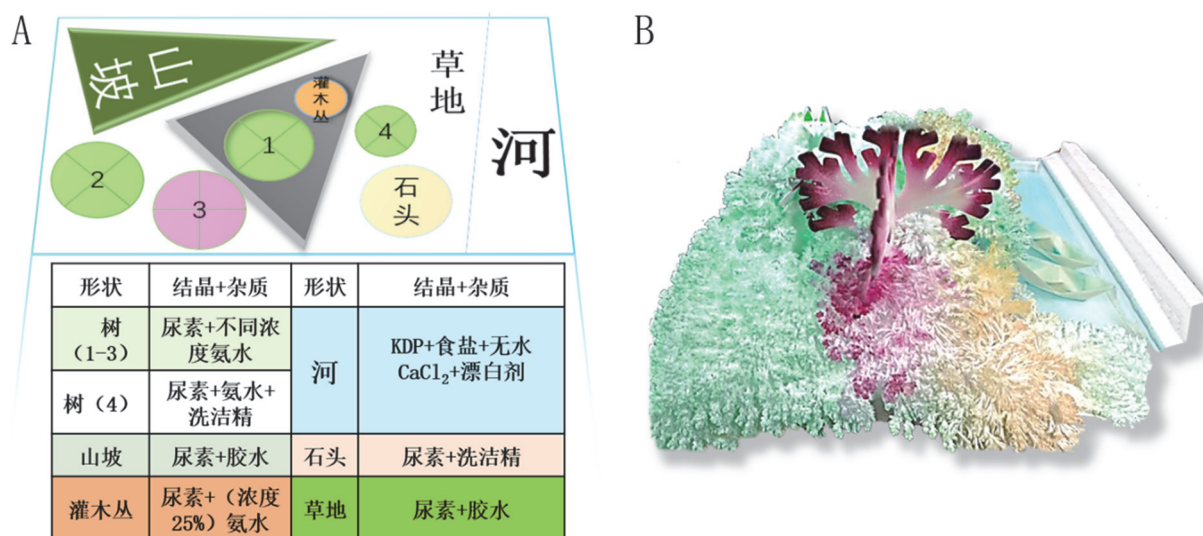


图5 “结晶山水景观”实验的电脑设计平面图(A)及实际全景图(B)

#### 4.2 针对中学生：DIY结晶森林+科普结晶纯度判断

初次接触化学的中学生，可以在家动手做DIY实验，通过不同材料种类和量浓度配比，制作天气瓶、结晶花草、“海洋之心”等结晶成品，探究晶液纯度对晶形与晶体生长的影响，既美观又易制作。引导青少年透过表面看其化学本质，应用化学。让学生熟知生活中的材料含有的化学成分及其性质、常见应用及在结晶中的影响。

#### 4.3 针对本科生：利用实验仪器探究结晶与杂质印象本质+将课本搬进生活

对于拥有一定专业化学知识的本科生，引导其利用显微镜进入微观分子层面，探究杂质对晶体内部结构稳定的影响，实现进一步改良配比与杂质原料。通过思考寻求杂质对结晶影响更多应用方式，从不同角度探究不同杂质的影响机理，优化结晶实验，提高大学生对结晶实验的兴趣及创新能力。

#### 4.4 针对社会群体：科普生活中的结晶现象，拉进科学与生活的距离

通过科普认识生活材料中含有的化学成分，辨别网络中对“晶体”虚假科普，分析网络“结晶石”“纸树开花”等原理及自然界矿石结晶和雾凇霜雪生成不同晶貌的原因。将复杂的化学语言具象为生活中常见事务，增加对化学的亲近感。

## 5 结语

本实验利用杂质对结晶的影响原理，得到加入不同浓度与种类杂质后获得的结晶成品。受此启发，进一步设计结晶景观，尝试将化学科学与艺术美学相结合。最后，笔者希望本实验能够作为科普素材让不同人群了解化学、喜爱化学，对不同群体的科普方法做了一定的预想与实践。

## 参 考 文 献

- [1] 李丹宁. 晶体成核过程分子聚集态研究[博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2021.
- [2] 劳迪斯, R. A. 单晶生长. 刘光照, 译. 北京: 科学出版社, 1979.
- [3] 常新安, 臧和贵, 陈学安, 肖卫强. 人工晶体学报, 2010, 39 (S1), 185.
- [4] 徐大瑛, 耿文娟, 钱德全, 薛瑞. 无机盐工业, 2021, 53 (11), 77.

- [5] 郭敏, 叶秀深, 刘海宁. 无机盐工业, **2008**, *40* (8), 11.
- [6] 齐亚兵, 杨清翠. 应用化工, **2020**, *49* (5), 1175.
- [7] 李淑婷, 李澳, 刘彬彬, 陆明. 化学工业与工程, **2023**, No. 1, 41.
- [8] 翁臻培, 周志朝, 李中和. 结晶学. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.
- [9] 李伟东, 王圣来, 于光伟, 丁建旭, 王端良, 许心光. 硅酸盐学报, **2017**, *45* (7), 955.
- [10] 宫海燕, 李彩虹, 王佩佩, 王红强. 化学与生物工程, **2010**, *27* (3), 9.