

•教学研究与管理•

doi: 10.3866/PKU.DXHX201802004

www.dxhx.pku.edu.cn

在基础化学实验教学中如何培养学生“想”的意识——以“经典合成实验”教学为例

任艳平*, 吕银云, 董志强

厦门大学化学化工学院, 化学国家级实验教学示范中心, 福建 厦门 361005

摘要: 本文主要介绍了以经典合成实验“二水二草酸合铜(II)酸钾的合成”和“三草酸合铁(III)酸钾的合成”为例, 与学生一起探讨合成条件对产物的“质”和“量”的影响的过程, 并用一张图清晰地展示并引导学生深刻分析了三草酸合铁(III)酸钾的合成过程中, 学生因缺乏反思、判断的能力而坠入迷途或误入歧途而导致的实验结果不同的原因, 以此展现了基础化学实验教学中如何培养学生“想”的意识和“批判性”思维。

关键词: 实验教学; 合成实验; 想; 批判性思维

中图分类号: G64; O6

How to Cultivate Students' Consciousness of Thinking in Basic Chemical Laboratory Teaching: Taking Synthetic Experiment as an Example

REN Yanping*, LÜ Yinyun, DONG Zhiqiang

National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (Xiamen University), College of Chemistry and Chemical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian Province, P. R. China.

Abstract: Taking classical synthetic experiments, the syntheses of potassium dioxalatocuprate(II) dihydrate and potassium trioxalatoferrate(III), as examples, this article discusses the effects of synthetic conditions on the "quality" and "quantity" of the product. Moreover, a flowchart clearly shows the cases when the students fall into a wrong path due to the lack of rethinking and judgement during the synthesis of potassium trioxalatoferrate. The article also discusses on how to inspire students to analyze when they were misguided. Therefore, this article reveals on how to educate students to think and criticize in the teaching process.

Key Words: Chemical laboratory teaching; Classical synthetic experiment; Thinking; Criticizing

化学实验教学在本科化学教育和化学人才培养中起着基础性的关键作用, 实验教学过程对学生的创新思想、创新意识的形成至关重要。

多年来, 化学实验教学也一直在与时俱进地变革, 但围绕培养学生“想”、会“做”、会“表达”的核心理念一直未变, 即实验教学的目的是以具体实验项目为载体, 根据学生的认知规律, 由浅至深, 由低到高, 多层次、全方位地培养学生“想”、会“做”、会“表达”的能力^[1]。

像化学合成这样难于跨越过程的实验, 其实实验过程是培养学生“想”(创新)的意识和“批判性”

收稿: 2018-02-04; 录用: 2018-03-23; 网络发表: 2018-04-10

*通讯作者, Email: yypren@xmu.edu.cn

基金资助: 2016 年度教育部“基础学科拔尖学生培养试验计划”研究课题; 2017 年福建省本科高校教育教学改革研究项目(FBJG20170295); 2017 年度厦门大学教学改革研究项目(JG20170204); 国家基础科学人才培养基金项目(J1310024)

思维的“最佳场所”。

1 “合成实验”教学过程中如何引导学生去“想”

在基础化学实验中开设了一定比例的有关复盐、配合物等合成实验项目，不同类型的合成实验其合成条件、分离方法不都一样，学生按照实验教材自主进行实验。实验教材如同一本详尽的“食谱”，有详细的合成步骤及合成条件，但不是每个人看着“食谱”操作都能得到“美味佳肴”，往往会因个别“火候”掌握不好而导致结果不尽人意。在实验过程中学生往往只是“照方抓药”，对实验条件，如为什么要反应物各自溶解再混合，为什么要加热、搅拌、冷却……等操作的目的是不理解，所以“火候”掌握不好，最后得到的结果是：有的学生产品外观差，有的学生产率低，也有不少学生的产品外观差、产率也低。实验结束后大部分学生对自己的实验结果不满意，因此在实验课后讨论环节，趁学生对“合成实验”已经有了感性认识，我们对学生在实验中出现的点评和总结。然后，再与学生一起一步步通过设问式、探讨式方法对有关合成实验中的内容、合成过程、合成条件进行仔细研究和深刻反思，纵横比较和深入探讨，并伴随着具体的实验演示操作，以启发和引导学生去“想”。如二水二草酸合铜(II)酸钾的合成步骤^[2]：

- (1) 称 4.1 g $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 于 50 mL 烧杯中，加 8 mL H_2O 加热溶解后，将溶液加热至 90 °C；
- (2) 称 12.3 g $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 固体于 250 mL 锥形瓶中，加 35 mL H_2O 加热溶解后，也将溶液加热至 90 °C；
- (3) 在磁力搅拌下，将热的 CuSO_4 溶液慢慢加至热的 $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 溶液中，然后，让溶液冷却至室温后，再放入冰水中冷至 10 °C，减压抽滤，晶体先用适量冰冷的 H_2O 洗两次，再用适量乙醇洗两次，将产物于 40 °C 烘箱中干燥 1 h。

上述仅 150 字描述的合成过程中需要思考的问题很多，如：(1) 反应原料 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 固体为什么要分别溶解？为什么要分别加热到 90 °C 才混合？(2) 为什么要在强烈搅拌下将热的 CuSO_4 溶液慢慢加至热的 $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 溶液中？(3) 混合溶液为什么要先冷却至室温，再放入冰水中冷却？(4) 产物为什么要用冰冷的水洗？如何得到冰冷的水？过滤时，再用乙醇洗涤产物的目的是什么？

学生根据自己的亲身感受，从溶解度、晶体大小、结晶完全等方面纷纷表达了他们对上述问题的认识和理解，最后由指导教师进行“画龙点睛”式的总结。其实，上述这些问题的答案可以概括为两个字，即“质”(纯度、外观——颜色和晶态)和“量”(产率)，这也是任何化学合成的目标，在保证“质”的前提下，尽可能提高产率。当然，也要告诉学生，对于“质”和“量”有时是“鱼和熊掌不可兼得”，往往需要在二者之间找一个平衡点，有时为了“质”而舍弃“量”，有时为了“量”而降低对“质”的要求，针对不同的合成对象，需要具体问题，具体分析。

总结完毕后，指导教师再进一步带领学生回顾和分析实验过程中哪些条件和操作是提高“质”(热加、慢加、快搅、先冷至室温等)，哪些手段是提高“量”(冰水冷却、冰冷的母液洗涤反应容器、冰水洗晶体等)，学生自然心领神会。

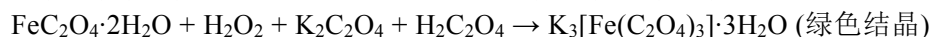
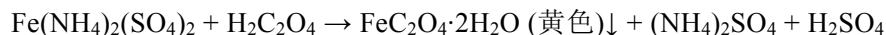
实验教学过程中只有采用这种“手把手”的问题式、启发式、讨论式教学，学生才会“开窍”，不仅知其然，更知其所以然，学生在以后的化学合成实验中操作起来得心应手，“合成实验”的教学效果越来越好，学生对化学合成实验的兴趣也油然而生。

2 “合成实验”教学过程中如何培养学生的“批判性”思维

在创新能力培养中，“批判性”思想是教育很重要的目标之一，这方面是很多中国学生在基础教育中所缺乏的训练^[3]。在现代社会，批判性思维被普遍确立为教育特别是高等教育的目标之一，像化学合成这样难于跨越过程的实验，也是培养学生“批判性”思维的典型案例。本文以三草酸合铁(III)酸钾的合成实验为例来阐述在化学合成实验教学过程中如何培养学生的“批判性”思维。

2.1 三草酸合铁(III)酸钾的合成过程、条件与结果讨论

对学生来说, 每个实验过程都有很多问题需要探究, 即使是经典实验, 学生也会遇到意想不到的问题。如“三草酸合铁(III)酸钾的合成”实验^[4], 其合成反应方程式如下:



其合成过程如图1中黑色箭头所示“合成坦途”。通过实验, 仔细分析其过程仍然存在很多疑问:

第(1)步, 溶解 $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$ 固体时, 为什么要加 5 滴 $3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{H}_2\text{SO}_4$?

第(2)步, 生成 $\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \downarrow$ 后为什么要加热? 第(3)步为什么要倾去清液?

第(5)步, 为什么要在 40°C 慢慢滴入 H_2O_2 ? 为什么还要再在 40°C 保温一段时间?

第(6)步, 在加 8 mL 饱和 $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 溶液前, 为什么要加热至沸?

在合成实验课后讨论过程中, 引导学生对上述问题进行了正、反两方面的分析和讨论, 使其因理启悟。同样, 上述这些问题的答案也可以概括为两个字, 即“质”(纯度、外观——颜色和晶态)和“量”(产率)。如第(1)步, 溶解 $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$ 固体时, 加少量 H_2SO_4 是为了使溶液显酸性以防 Fe^{2+} 离子被氧化并水解^[5]。如果不加 H_2SO_4 , 溶液中的 Fe^{2+} 就会慢慢被氧化并水解形成 $\text{Fe}(\text{OH})\text{SO}_4$ 或 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶态物(易吸附离子, 且不易沉降), 且 $\text{Fe}(\text{OH})\text{SO}_4$ 或 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶态物能溶于第(2)步所加入的饱和 $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 溶液形成 $[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]^{3-}$, 在第(3)步倾析分离时会随清液一起倾倒掉, 致使 $\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \downarrow$ 量减少, 影响最终产物的产率; 在第(2)步, 加热陈化以使小颗粒的 $\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 晶体聚成大颗粒而快速沉降^[6], 有利于倾析分离, 以达到提高最终产物的“质”(纯度、外观——颜色和晶态)和“量”(产率)的目的。

本实验最终产物三草酸合铁(III)酸钾的“质”体现在其晶态。通过展示学生得到的漂亮晶体实物, 让学生切身体会到什么是“好”, 并形成对“好”的合成产物的判断标准。趁着学生想得到漂亮晶体的急切心情, 顺势给学生介绍在常温下影响晶体(单晶)成长的因素, 即晶体的成长首先取决于物质本身性质, 同时与体系的浓度、溶剂以及温度、湿度和容器种类、材质及形状等都有不同程度的关系, 有时表面看似还真与“人”有关, 所以, 学生自嘲晶体成长还与“人品”有关, 但实质还是有些人, 对某些微妙的条件和关键“火候”没有理解认识到位和掌握好。顺便也将学生得到的漂亮晶体(图2a)与自然界极端条件下(地下适宜的高温、高压、长时间慢慢晶化)形成的天然单晶质宝石(图2b)^[7]进行比较。我们在室温下培养的晶体($\text{K}_3[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)看起来也很漂亮, 但其溶于 H_2O , 也容易失 H_2O 风化, 见光会分解, 不能作为戒指或项链等饰品。而天然单晶质宝石具有晶莹剔透、不溶于水、硬度高、强度大、不风化等特点, 其用途也就不言而喻。但我们在实验中学到的有关晶体培养的知识、思想和方法启发我们模拟自然界条件合成人工晶体, 如人造金刚石等, 不过, 这早已是人们探索自然、认识自然的结果。借机要给学生指出的是, 在现代化学合成中, 不论是无机合成还是有机合成, 人们最想得到的物质形态就是单晶, 通过 X 射线衍射测定其单晶结构。这是深入认识该产物本质特性最主要、最直接的手段, 对其性能及其结构决定性质的进一步研究和认识具有重要意义。所以, 在配位化学、材料化学等研究领域, 培养单晶、测定其晶体结构已经是很普遍的研究手段。

通过展示和比较学生得到的晶体, 以及与天然单晶质宝石的对比^[7], 更激发了学生的实验兴趣, 不少学生再次或多次重复该实验, 以达到深刻理解和灵活应用该实验所包涵的有关晶体培养的思想和方法。每遇到合成实验, 总有学生会问“这个实验的产物能否培养成单晶?”还记得曾收到 2013 级“拔尖计划”班一个学生的电子邮件“…最近看到篇很有意思的关于‘结晶’的文章(<http://www.guokr.com/article/439657/>), 想起原来合成三草酸合铁(III)酸钾时您说的天气对结晶的影响, 分享给您。”说明平时的教育对学生有着潜移默化的影响。

要得到“好”的、“多”的单晶(晶体)的过程中贯穿了很多的思想、方法和实验技巧。如何“快速”成长出又“好”又“多”的单晶(晶体)是我们合成实验教学过程中值得探讨的问题。对于本实验, 在最终产物析出的一步, 给母液中加过量乙醇或浓缩母液显然不利于“好”的晶体的形成。

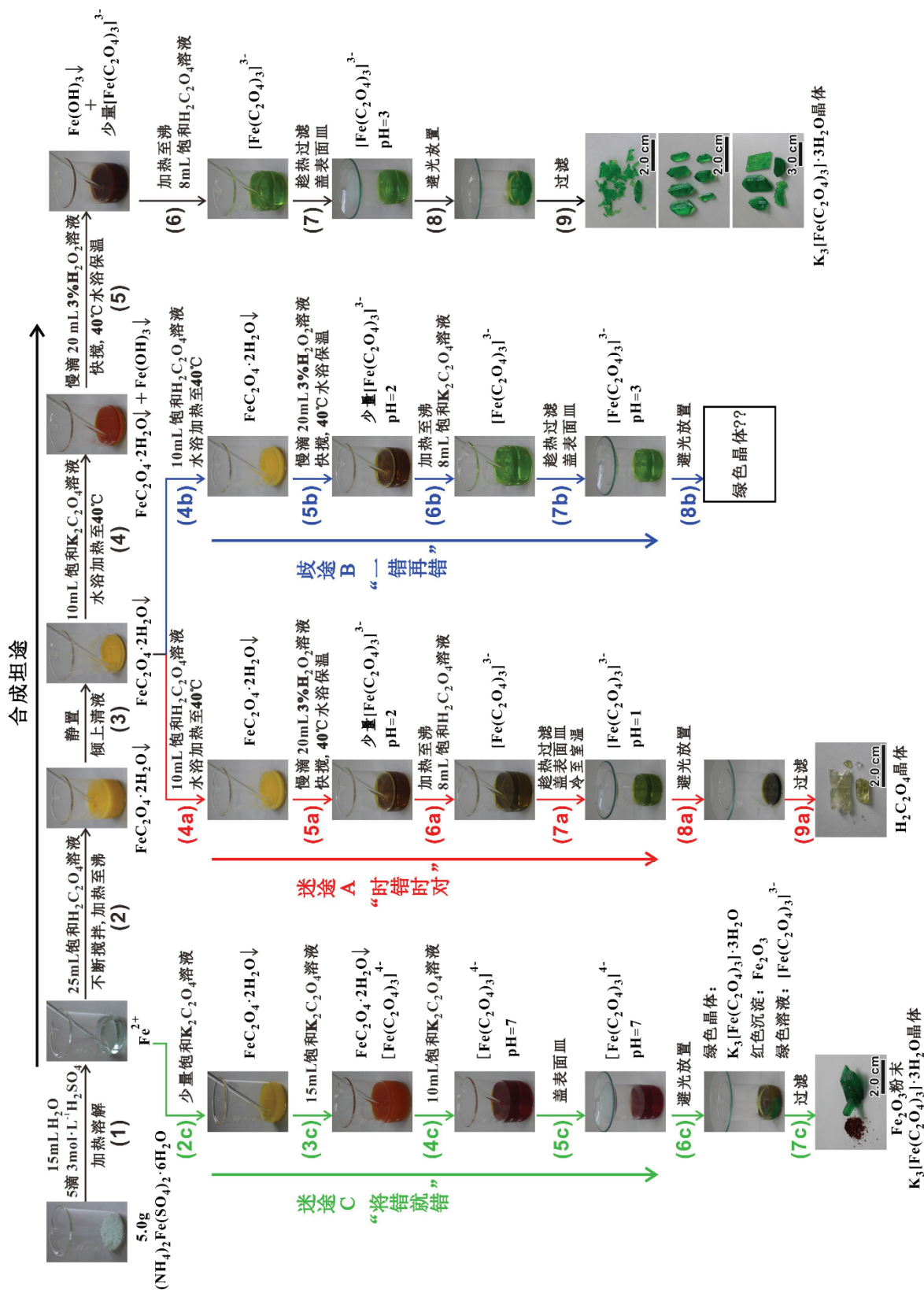


图 1 三草酸合铁(III)酸钾的合成流程图

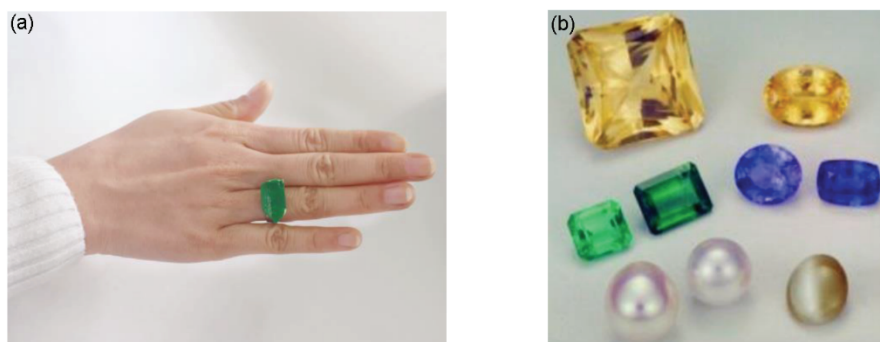


图2 学生合成的 $K_3[Fe(C_2O_4)_3] \cdot 3H_2O$ 晶体展示(a); 天然单晶宝石(b)^[7]

虽然三草酸合铁(III)酸钾的合成步骤看似简单,但是在多年的实验教学实践中,发现总有学生在上述合成实验过程中,因缺乏“批判性”思维而“坠入”迷途或“误入”歧途。

2.2 加试剂“时错时对”而“坠入”红色迷途 A

在合成三草酸合铁(III)酸钾的实验过程中,有学生加试剂“时错时对”,而“坠入”红色迷途(图1,红色箭头所示迷途A)。如在步骤(3)合成得到黄色 $FeC_2O_4 \cdot 2H_2O \downarrow$ 后,有学生将饱和 $K_2C_2O_4$ 溶液错加为饱和 $H_2C_2O_4$ 溶液(二者外观一样)(步骤4a)而浑然不知,因为结果也得到绿色溶液。但这绿色溶液无论如何也得不到绿色晶体,而是白色晶体,白色晶体是什么物质?绿色溶液又是什么物质?绿色溶液为什么得不到绿色晶体而是白色晶体?顺着“红色迷途”分析,不难知道白色晶体就是 $H_2C_2O_4$,而溶液呈现绿色(稍偏黄绿色)是由于 $[Fe(C_2O_4)_3]^{3-}$ 配离子的存在,但“红色迷途”体系中并没有 K^+ ,当然不能得到 $K_3[Fe(C_2O_4)_3] \cdot 3H_2O$ 绿色晶体,而 $H_3[Fe(C_2O_4)_3]$ 可能像 H_2SO_4 一样在室温下不能结晶。这就如同假种子,只长苗,不结果,农民辛苦一年却没有收成,这其中的辛酸……?!

“红色迷途”似乎非常隐蔽,只有看到白色晶体时,才知道其中的问题,其实不然。如果稍加分析就可以知道第4步加错了试剂。从图1可以看出,在黄色 $FeC_2O_4 \cdot 2H_2O \downarrow$ 中加少量饱和 $K_2C_2O_4$ 溶液(碱性)而有 $Fe(OH)_3$ 红色沉淀形成(步骤4);而若在黄色 $FeC_2O_4 \cdot 2H_2O \downarrow$ 中加少量饱和 $H_2C_2O_4$ 溶液仍得到黄色 $FeC_2O_4 \cdot 2H_2O \downarrow$ (步骤4a),由此可以判断加错了试剂。当然,学生也可以根据自己所得最终产物颜色(偏黄绿色)与其他同学的最终产物颜色(翠绿色)的差别,反思自己的实验过程,如测试最终溶液的pH(正常体系 $pH = 3$,迷途A体系 $pH = 1$)就会发现问题所在,此时补加适量饱和 $K_2C_2O_4$ 溶液得到翠绿色溶液即可,避光放置同样可以得到绿色晶体。

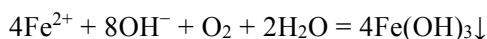
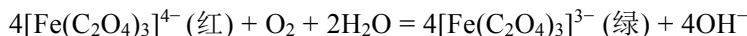
2.3 加试剂“一错再错”而“误入”蓝色歧途 B

在实际实验过程中,还有学生在加入试剂时“一错再错”而“误入”蓝色歧途(图1,蓝色箭头所示歧途B)。如在第4步中本应加入10 mL 饱和 $K_2C_2O_4$ 溶液(步骤4),学生却误加为10 mL 饱和 $H_2C_2O_4$ 溶液(步骤4b),此为“一错”,在第6步中本应在反应体系中加入8 mL 饱和 $H_2C_2O_4$ 溶液(步骤6),学生又错加为饱和 $K_2C_2O_4$ 溶液(步骤6b),此为“再错”。尽管一错再错,但是却歪打正着幸运地得到与“合成坦途”一样的绿色溶液,这绿色溶液是什么物质?能否得到 $K_3[Fe(C_2O_4)_3] \cdot 3H_2O$ 绿色晶体?通过将上述“蓝色歧途B”的过程与“合成坦途”的合成过程进行比较,这绿色溶液就是含 $[Fe(C_2O_4)_3]^{3-}$ 的溶液,并且体系中含有 K^+ ,当然能得到 $K_3[Fe(C_2O_4)_3] \cdot 3H_2O$ 绿色晶体。

2.4 加试剂“将错就错”而“步入”绿色迷途 C

除了上述两种加错试剂的情况,居然还有学生在实验一开始时就将饱和 $H_2C_2O_4$ 溶液错加为饱和 $K_2C_2O_4$ 溶液(图1,步骤2c)而“步入”绿色迷途(图1,绿色箭头所示迷途C),结果得到红色溶液,那红色溶液又是什么物质?这样的实验现象倒引发了很多学生的兴趣与思考,尤其是得到这红色溶液的学生说,既然不能得到“绿宝石($K_3[Fe(C_2O_4)_3] \cdot 3H_2O$ 晶体)”,是否会“因祸得福”而得到更

有价值的“红宝石”？因此，细心呵护这“红色溶液”（盖上表面皿，放在柜子里避光放置）。三周后，没有发现红色晶体生成，但发现溶液颜色不像初始那样红了，再过了三周，发现溶液颜色变绿了，杯底居然有绿色晶体和红色的像铁锈一样的沉淀形成（步骤 6c）。还有学生专门“沿”“绿色迷途”的过程精心重复了实验，结果还一样。难道“红宝石”梦碎得就像铁锈粉末样儿了？！学生当然不“甘心”，自然会探讨和分析没有得到红色晶体的原因，也就知道了杯中的红色沉淀其实就是铁锈，而不是 $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]$ 粉末。这也激励了学生进一步去思考和实验验证。仔细分析可知：常温下，盛红色溶液的烧杯仅盖着表面皿（步骤 5c），不能隔绝空气，所以，溶液中红色的 $[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]^{4-}$ 被空气中 O_2 慢慢氧化为绿色 $[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]^{3-}$ ，同时 $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 溶液碱性较强，溶液中的 Fe^{2+} 也被氧化并形成沉淀，即：



那么，是否能够通过改变合成方法得到 $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]$ 红色晶体呢？我们和学生曾一起努力试过很多方法，比如隔绝空气或在体系中加入乙醇，都没有得到红色晶体。然而，通过实验发现，在步骤 (5c) 得到的红色溶液中加入适量乙醇有细小的橙黄色沉淀生成，倾析掉上清液后，往沉淀中加入适量水，沉淀溶解得到红色透明溶液，由此证明此橙黄色沉淀就是 $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]$ ；将含有此沉淀的溶液在空气中放置一段时间，也能得到绿色晶体，说明 $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]$ 固体不稳定，容易被空气中的 O_2 氧化成 $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]$ 。

当然，仔细分析上述实验过程，如果发现得到红色溶液的问题所在，便可以通过加入适量 H_2O_2 氧化后再加入适量饱和 $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 溶液而得到翠绿色溶液，再进一步避光放置，也能得到绿色晶体。

通过上述分析可以看出，与“合成坦途”相比，不管是“红色迷途”“蓝色歧途”，还是“绿色迷途”，只要能够分析问题所在，并想出解决问题的方法，最终都能通过补救而得到翠绿色溶液，如同“水流千里归大海”一样。当然，不同的歧途不仅浪费试剂和时间，而对于不同的合成实验，“误入”歧途还可能导致其彻底的失败。

在合成实验教学过程中也时常发现有学生在得到与教材上描述的现象不同或与自己预想的结果不一样时，就很快将溶液或沉淀倒掉，而错过了进一步分析、判断和补救的机会，有时候也可能错过了新发现，创新和发现往往是意外的收获，回过头来看，误入“歧途”的收获也是不小的。

3 结语

经典实验就是教学生学思想、学方法，学生如果能将这思想和方法发扬光大，对低年级学生来说，这就是创新。而思想是通过“问题”来展现的，经常问“是什么”和“为什么”这类问题是批判性思维的体现，也是创新的一种动力。原创的科学是未知的，你前行的每一步都可能蕴含着创新，如果没有观察、分析、思考和辨别的能力，你永远不知道你的创新之处。

在基础实验教学过程中，引导学生思考，重在思维能力、发现与提出问题的能力以及批判性思维能力的训练与培养，这也是细水长流的过程，对学生具有潜移默化的作用，学生自然“耳熟能详”。如笔者曾经收到一封邮件：“任老师，我每次在预习‘有机化学实验’有关内容时，‘合成的两大目标‘一是质，二是量’这句话就在我耳畔回荡……所以，我的有机实验都做得很好。你对合成实验的巧妙总结，会使我受益终身。”

总之，在实验教学过程中，指导教师应时刻与学生在一起，结合具体实验实例，身体力行、“手把手”地教学生如何去“想”，如何去“做”，才能使學生真正学到“想”的技能，而不是朝学生空喊要思考、要探索……。

参 考 文 献

- [1] 任艳平, 董志强, 阮婵姿. 大学化学, **2015**, 30 (2), 22.
- [2] Preparatory Problems 43rd International Chemistry Olympiad 2011. Ankara, Turkey (第 43 届国际奥林匹克化学竞赛实验预备题, 土耳其安卡拉, 2011 年), Problem 33.
- [3] 孙华. 中国大学教育, **2015**, No. 12, 15.
- [4] 蔡维平. 基础化学实验(一). 北京: 科学出版社, 2004: 274-276.
- [5] 范志鹏. 大学基础化学实验教学指导书. 北京: 化学工业出版社, 2006: 57.
- [6] 沈建中, 马林, 赵滨, 卫景德. 普通化学实验. 上海: 复旦大学出版社, 2007: 69-70.
- [7] [2018.01.16] <https://wenku.baidu.com/view/f4c6a1694693daef5ff73d03.html>.