

## 对“硫酸亚铁铵制备”实验的再认识 ——批判性思维教育的最好案例之一

董志强, 吕银云, 任艳平\*

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

**摘要:** 介绍了“硫酸亚铁铵制备”实验中存在的问题, 总结了 30 多年来人们针对该实验存在的问题进行改进所采取的措施, 给出了对该实验再认识的一些探索 and 具体做法及效果。

**关键词:** 硫酸亚铁铵制备; 再认识; 效果

**中图分类号:** G64; O6

## Reunderstanding of the “Preparation of Ammonium Ferrous Sulfate”: One of the Best Examples of Critical Thinking Education Experiment

DONG Zhiqiang, LÜ Yinyun, REN Yanping \*

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:** This paper introduces the problems in the experiment of the preparation of ammonium ferrous sulfate, summarizes the measures which are adopted for the improvement of the problems in the experiment over the past thirty years, and gives the exploration, concrete practice and effect on the experiment.

**Key Words:** Preparation of ammonium ferrous sulfate; Reunderstanding; Effect

“硫酸亚铁铵制备”实验原理简单, 但其制备过程涵盖了加热、倾析过滤、洗涤、溶解、水浴加热、常压过滤、溶液转移、蒸发浓缩、结晶、减压过滤等一系列化学合成的基本操作, 是一个经典的无机化学制备实验, 对培养学生基础理论知识的应用能力和无机合成实验的基本操作规范和技能都有重要的意义。同时, 本实验贴近生活, 实验原料通常选用机械加工废弃物铁屑或废铁皮打包带等, 从环境保护的角度来说, 属于变废为宝、再生利用钢铁资源的环保型实验, 可以让学生切身感受到化学变废为宝的魅力, 有益于激发学生的实验兴趣和探索热情。

在 20 世纪 70 年代末的“无机化学实验”和“普通化学实验”教材<sup>[1,2]</sup>中就含有此实验。到目前为止, 几乎所有的基础化学实验教材(“无机及分析化学实验”“无机化学实验”或“普通化学实验”)也仍然选编了此实验<sup>[3-5]</sup>。该实验所用的实验仪器简单, 一般实验室的实验条件都能满足该实验开设的要求, 所以, 20 世纪 70 年代末以来, 几乎所有有关高校都开设了此实验; 同时, “硫酸亚铁铵制备”实验也一直是很多中学生化学奥林匹克竞赛以及大学生化学实验竞赛赛前培训的典型代表实验。

收稿: 2018-02-26; 录用: 2018-03-27; 网络发表: 2018-04-16

\*通讯作者, Email: ypren@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)

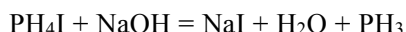
因此, 本文主要针对“硫酸亚铁铵制备”实验中存在的问题进行进一步的探索, 给出了对该实验再认识的一些探索结果和具体做法及效果。

## 1 “硫酸亚铁铵制备”实验中存在的问题

“硫酸亚铁铵制备”实验是非常经典而“流行”的一个实验。然而, 按照大部分有关教材<sup>[1-5]</sup>介绍的方法进行实验时, 都会遇到3个实际问题: (1) 铁粉(或废铁屑)与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应慢; (2) 铁粉(或废铁屑)中含有硫、磷等杂质, 与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应过程中不可避免的有少量  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{PH}_3$  等有毒有害气体生成而污染实验环境; (3)  $\text{Fe}^{2+}$  容易被空气中  $\text{O}_2$  氧化。如由于常温下铁粉(或废铁屑)与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应慢, 铁粉(或废铁屑)中含有硫、磷等杂质和  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应时生成  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{PH}_3$  等有毒气体, 因此, 铁粉(或废铁屑)与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应要在通风橱中水浴加热(控制水浴温度  $50\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$ , 以防高温加速  $\text{Fe}^{2+}$  被空气中的  $\text{O}_2$  氧化)以加快其反应速度, 并避免产生的刺激性气体逸出而危害师生的身体健康。由于水浴加热过程中溶液中水分的不断挥发损失, 为避免  $\text{FeSO}_4$  由于过饱和而析出, 学生还须不断向反应瓶内补  $\text{H}_2\text{O}$ , 所以, 通风橱的门经常处于开启状态(也相当于敞开式), 导致实验室依然弥漫着刺激性的气味; 同时, 不断向反应瓶内补  $\text{H}_2\text{O}$  又会导致反应液温度降低, 使铁粉(或废铁屑)与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应速度变慢, 又需要继续加热, 如此恶性循环, 又会使  $\text{Fe}^{2+}$  长时间暴露在空气中被  $\text{O}_2$  氧化。总的来说, “硫酸亚铁铵制备”实验过程使实验室污染严重, 整个实验效率低, 所得产品品质较差。

为了解决上述三个实际问题, 从1985年至2017年的30多年时间里, 关于“硫酸亚铁铵制备”实验的改进一直都有报道<sup>[6-16]</sup>。如: (1) 利用原电池原理, 加入少量碳粉或铜粉以加速铁粉与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应<sup>[14]</sup>; (2) 将敞开式反应装置改装为封闭式, 并用吸收液( $\text{NaOH}$  溶液、 $\text{KMnO}_4/\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液或  $\text{CuSO}_4$  溶液)对产生的有毒气体  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{PH}_3$  等进行吸收处理, 以达到改善实验室环境的目的<sup>[8,10-14]</sup>。

分析上述改进措施, (1) 利用原电池原理<sup>[14]</sup>, 加入少量碳粉或铜粉以加速铁粉与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应在理论上是可行的, 但实验结果证实实际反应仍然很慢, 没有达到改进的目的; (2) 利用  $\text{NaOH}$  溶液吸收<sup>[10,11,13]</sup>反应体系中所产生的  $\text{PH}_3$  废气的可行性值得怀疑, 从理论上来说, 下列反应告诉人们:  $\text{NaOH}$  溶液不能吸收废气中的  $\text{PH}_3$ <sup>[17]</sup>。



即使用  $\text{KMnO}_4/\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液或  $\text{CuSO}_4$  溶液能够有效吸收废气中的  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{PH}_3$ <sup>[17]</sup>, 但此方法要增加一些仪器装置(基础实验教学中不常见的仪器, 有些还是特殊仪器)和吸收剂, 改进后实验操作也比较繁琐, 且使用吸收剂, 不仅造成试剂的浪费, 还会产生新的吸收废液污染物。总的来说, 改进后的实验可行性比较差, 实验效果不理想, 远没有达到改进的初衷。所以, 到目前为止, 很多实验教材上<sup>[18-20]</sup>有关“硫酸亚铁铵制备”实验还是沿用1985年以前实验教材上未做任何改进的实验方法。

对于“硫酸亚铁铵制备”实验, 这么多人“前赴后继”地进行实验方法改进, 以提高铁粉(或废铁屑)与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应速度以及避免反应过程产生废气污染等效果不好的原因是因为遇到问题, 只想到了“头疼医头、脚疼医脚”的解决方法, 似乎解决了表面问题, 而忽略了深层次的科学性问题。“硫酸亚铁铵制备”实验的核心问题是铁粉(或废铁屑)与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应慢(如果反应快, 在通风橱中反应, 有害气体  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{PH}_3$  的扩散问题就解决了; 如果反应快, 也减少了  $\text{Fe}^{2+}$  被氧化的几率)的问题, 这就需要在理论指导下通过实验来探讨二者反应慢的根本原因。

## 2 对铁粉(或废铁屑)与 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 反应慢的原因进行初探

一个反应的快慢首先取决于反应物的本质, 针对本实验的根本性问题, 即铁粉(或废铁屑)与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应慢的原因, 我们进行了一系列初步探讨。

## 2.1 不同品牌铁粉与 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 反应

为了探究铁粉与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应慢的原因,我们随机选用了几种不同品牌的还原铁粉(国药集团化学试剂有限公司,批号 20141011, 20160201; 西陇科学股份有限公司; 阿拉丁(Aladdin), 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 麦克林(Macklin), 上海麦克林生化科技有限公司),在不同的加热条件下,考查其与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应的情况。

### 2.1.1 70 °C 水浴持续加热反应

在通风橱中,使上述 5 种铁粉(4 g)与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (30 mL 3 mol·L<sup>-1</sup>)在 70 °C 水浴持续加热的条件下反应,国药集团化学试剂有限公司的两个批次的铁粉与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应完全的时间都超过 60 min,而上述其他品牌的还原铁粉与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应完全的时间为 6–23 min。实验结果表明,铁粉与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应的速度与铁粉的来源有关。

具体来说,不同厂家的还原铁粉可能由于生产原料、生产方法的不同导致铁粉的“反应活性”不同,或者在生产及包装过程的某个环节导致铁粉“失活”。因此也提醒人们,开封的瓶装铁粉一定要旋紧瓶盖并置于电子防潮柜或干燥器中保存,以免其表面吸收  $\text{O}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ ,吸收  $\text{O}_2$  后使其纯度降低,而吸  $\text{H}_2\text{O}$  后因团聚而导致其比表面积减小,可能使其反应活性降低。

### 2.1.2 200 °C 电热板快速加热启动反应

在通风橱中,相同的启动反应条件下(200 °C 电热板快速加热 2 min 启动反应,随后关掉电热板,靠电热板余热使反应继续进行),上述 5 种铁粉(4 g)与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (30 mL 3 mol·L<sup>-1</sup>)反应的速度仍取决于铁粉的来源,即国药集团化学试剂有限公司的两个批次的铁粉与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应完全的时间都超过 60 min,而上述其他品牌的还原铁粉与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应完全的时间(8–18 min)与其水浴持续加热反应完全的时间基本一致。在其他条件不变的情况下,我们又进一步将上述国药集团化学试剂有限公司的两个批次的铁粉与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应的启动反应时间由 2 min 延长为 5 min,而其反应完全的时间都不超过 25 min,且反应结果一样。这表明对于反应活性差的铁粉与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应,不仅启动反应温度要适当高,而且此启动温度下的启动反应时间也要适当长,才能使反应完全的时间缩短。

### 2.1.3 室温下反应

对于反应活性大的铁粉,我们也考查了它们(4 g)与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (30 mL 3 mol·L<sup>-1</sup>)在室温下反应的情况,即反应开始比较剧烈(反应物浓度大,反应速率大,放热多,促使反应继续进行),反应 15 min,反应停止(没有气泡产生)(随着反应进行,反应物浓度降低,反应速率减慢,放热减少,反应不能继续下去),但还有铁粉没有反应完全(能被吸磁棒吸引),接着将反应容器放置于 200 °C 电热板上加热 1 min,很快反应完全。实验结果表明,室温下铁粉不能完全反应,这不仅影响最终合成产率,还造成浪费。

比较上述 2.1.1、2.1.2 和 2.1.3 小节的实验结果,不同品牌的铁粉活性不同。活性差的铁粉与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应的快慢(反应完全的时间)取决于启动反应的温度(电热板, 200 °C)以及此温度下启动反应的时间(5 min);而对于反应活性大的铁粉,不同的加热方式都有利于提高反应速率,缩短反应完全的时间。

## 2.2 不同来源的废铁屑与 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 反应

同样采用水浴持续加热反应和电热板加热启动反应两种方式,考查了两种不同来源的废铁屑与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  的反应快慢。

在通风橱中,电热板加热启动反应条件下(200 °C 电热板快速加热启动 5 min),试验了两种不同来源的废铁屑(机械加工废弃铁屑和废铁皮打包带)与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应。实验结果表明,机械加工废弃铁屑、废铁皮打包带屑与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应从开始启动到反应完全的时间都不超过 30 min。

同样在通风橱中,70 °C 水浴持续加热条件下,试验了上述两种不同来源的废铁屑与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应。实验结果表明,机械加工废弃铁屑、废铁皮打包带屑与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应完全的时间分别为 50 和 55 min,说明水浴持续加热的反应效率低。

另外,我们还定性鉴定了对应废铁屑与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  在电热板高温启动反应完全以及水浴持续加热反应完全后溶液中  $\text{Fe}^{3+}$  的含量。实验结果表明,两种启动反应条件下的溶液中  $\text{Fe}^{3+}$  含量相当,说明高温启动废铁屑与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应不会增加  $\text{Fe}^{2+}$  的氧化,且反应结束前,Fe 是过量的,而高温也有利于反应  $\text{Fe}^{3+} + \text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$  的进行。

上述实验结果表明,对于两种不同来源的废铁屑,相对于水浴加热,电热板加热启动反应(200 °C 快速加热启动反应 5 min)的方式使反应效率更高。

### 2.3 小结

通过以上对铁粉、废铁屑与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  在两种不同加热方式下的反应情况进行探讨,可初步得出以下结论:(1) 铁粉与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应的快慢主要取决于其活性大小,而对于反应活性大的铁粉,不同的加热方式都有利于提高反应速率,缩短反应完全的时间;(2) 对于活性差的铁粉或废铁屑与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应,需要 200 °C 电热板快速加热启动反应 5 min,才能使反应完全的时间缩短。

在目前的教学实验中,基本都是采用废铁屑作原料<sup>[18-21]</sup>与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应制备硫酸亚铁铵,采用上述电热板加热启动反应的方式,即在通风橱中,200 °C 电热板快速加热 5 min 使反应充分启动,随后关掉电热板和通风橱的门,靠电热板余热以及反应所放出的热量使反应继续进行。此改进方案的优势在于:(1) 由于不需要持续加热,反应瓶中的水分不会挥发很多,无需再补  $\text{H}_2\text{O}$ ;(2) 学生不需要给反应瓶中补  $\text{H}_2\text{O}$ ,就不需要打开通风橱的门,也就不会有气体逸出通风橱,影响师生健康;(3) 比水浴持续加热的反应时间更短,实验效率高,产品品质有保障,且不需要回流装置、气体吸收装置及吸收剂<sup>[8,10-14,21]</sup>,简化了实验过程,在实际操作中可行度高。

下面就作者多年的教学实践,把对该实验的再认识与理解和具体做法及注意细节与大家分享,希望起到抛砖引玉的作用。

## 3 对“硫酸亚铁铵制备”实验再认识的一些探索和具体做法

以废铁屑为原料,“硫酸亚铁铵制备”实验过程如图 1 所示。

针对图 1 中的一些关键步骤的操作及说明如下。

### 3.1 废铁屑与 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 反应

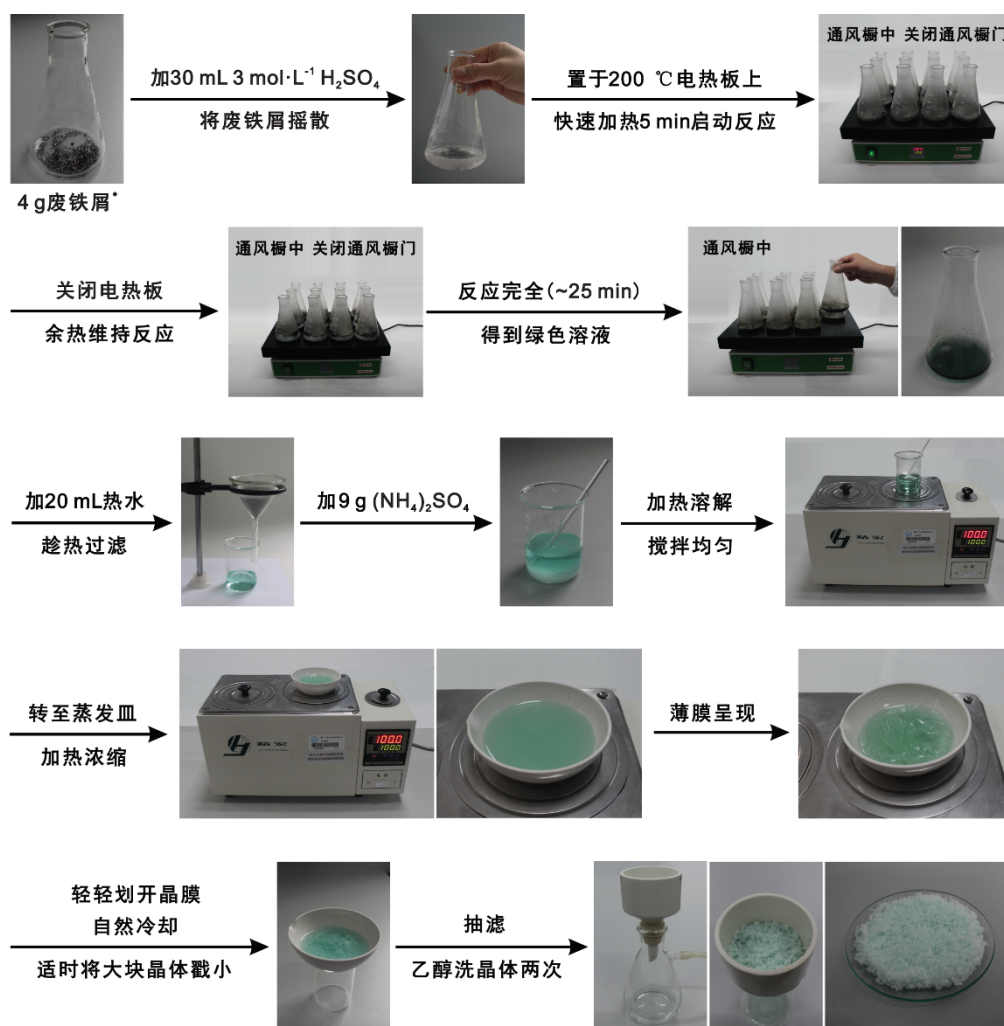
为了防止表面洗干净的废铁屑“失活”,废铁屑与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  接触后要立即高温加热 5 min (先将电热板设置并加热到 200 °C)使反应快速启动(产生大量气泡)。废铁屑与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应是放热反应,启动反应后,电热板的余热足以维持反应进行完全,所以,不需要持续加热,也就避免了持续加热所带来的上述一系列问题;同时,由于不需要持续加热, $\text{Fe}^{2+}$ 被氧化的几率也大大减少,对产品品质也多了一份保障。

另外,从上述 2.1 和 2.2 小节的实验结果也可以看出,在相同的启动反应条件下,商品铁粉与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应的速度大于废铁屑与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应的速度,因此在反应前,将废铁屑机械加工得越细小(提高其比表面积)越有利于反应进行。

趁废铁屑与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  在通风橱中反应期间,指导教师可组织学生进行实验原理的讲解和有关讨论,系统地给学生讲解和示范有关合成实验的基本操作规范和技能(对一年级学生,学习规范操作很重要),如常压过滤滤纸的折叠、撕角(两次)、与漏斗贴紧、过滤时的“三靠”(盛待过滤液的烧杯嘴和玻璃棒相靠,玻璃棒末端和滤纸三层部分相靠,漏斗下端的管口与用来装盛滤液的烧杯内壁相靠),以及常压热过滤的注意事项及细节等,指导学生做好常压热过滤前的一切准备。

### 3.2 $\text{FeSO}_4$ 溶液的过滤

当废铁屑与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应结束后,生成的  $\text{FeSO}_4$  溶液处于饱和边缘,在室温下容易析出  $\text{FeSO}_4$  晶体。因此反应结束后,应立即加入 20 mL 热水,趁热进行常压过滤(也可以采用减压过滤(双层滤纸,防止细小杂质穿透滤纸)),尽可能减少  $\text{Fe}^{2+}$  溶液在空气中的放置时间。



\*: 废铁屑已洗净, 洗涤方法见文献[3]

图 1 “硫酸亚铁铵制备”实验流程图

### 3.3 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 的溶解

在上述过滤得到的  $\text{FeSO}_4$  溶液中加入一定量  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  固体(或饱和溶液), 水浴加热使其溶解, 并充分搅拌使二者混合均匀。

### 3.4 $\text{FeSO}_4 \cdot (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 结晶过程

将上述得到的溶液转移至蒸发皿中(蒸发皿及其边缘要洗干净, 防止以前残留的铁锈混入溶液中), 并将蒸发皿置于水浴锅上(拿掉水浴锅的一个套圈)加热蒸发直至晶膜出现。蒸发过程不要搅拌, 注意不要蒸发过度。冷却时先将晶膜轻轻划开, 冷却过程适时将大块晶体戳小, 以防结成大块晶体, 影响产品外观。

在慢慢蒸发过程中, 不需要搅拌, 并且电子水浴锅蒸发比较安全, 指导教师此时可给学生示范和讲解减压过滤滤纸的挑选、修剪、润湿、贴紧、沉淀转移、固体洗涤等操作及其注意细节, 进一步指导学生做好减压过滤前的一切准备。

将蒸发皿中晶体转移至布氏漏斗后, 蒸发皿中残留的晶体尽可能用刮刀刮入漏斗中, 千万不能加乙醇涮洗。尽管  $\text{FeSO}_4 \cdot (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  不溶于乙醇, 但加乙醇于蒸发皿中, 残留在蒸发皿母液中

的  $\text{FeSO}_4$  和  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  也会析出, 影响产品质量。

按照我们上述对该实验的理解和做法, 该实验依然操作简单、方便, 不需要增加任何试剂和仪器; 整个实验过程安全、环保、快速高效; 98%以上的学生都能轻松完成实验, 所得产品不仅产率高, 质量也好(平均产率达 80%, 目测比色法鉴定产品均为 I 级), 如同仿佛刚下的厚雪一样, 晶体颗粒蓬松、均匀, 望去宛如月亮之色(如图 2 所示)。总的来说, 该实验教学效率高、效果好。



图 2 学生合成  $\text{FeSO}_4 \cdot (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  产品展示

#### 4 结语

通过对“硫酸亚铁铵制备”实验的再认识和实践, 启发学生在实验过程中遇到问题, 要从根源上、有科学依据地想办法解决问题, 解决问题的策略要周全, 并能从正反两个方面有理有据进行论证, 分析其科学性并通过实验验证其可行性。

实验教学过程就是培养学生明辨是、非、曲、直等一系列问题的能力。任何实验, 尤其对于经典实验, 可能由于当时实验条件以及人们认识水平的限制, 需要我们现在要以“批判性”思维对一些实验内容和实验过程进行重新认识和审视。比如“硫酸亚铁铵制备”实验中, 铁粉(或废铁屑)溶解于  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 教材上写的都是要加热, 所以学生一定要加热, 一般加热溶解还很慢, 有学生加热的温度就更高, 温度越高, 水分挥发越多, 又怕  $\text{FeSO}_4$  析出, 所以要补充  $\text{H}_2\text{O}$  (或补加  $\text{H}_2\text{SO}_4$ )<sup>[3]</sup>, 这使得体系温度降低, 已经启动的反应速率减慢, 导致反应时间增加, 而长时间加热, 又容易导致  $\text{Fe}^{2+}$  被氧化……。一系列恶性循环的结果就是反应慢、污染严重、 $\text{Fe}^{2+}$  氧化多、产品品质差。而对该反应是否要持续加热? 加热多长时间? 学生没有任何质疑, 一切都“按部就班”, 这就是学生缺乏“批判性”思维的典型表现。

最后, 需要指出的是, 文献<sup>[6,14]</sup>报道有关“先在铁粉与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应形成的  $\text{FeSO}_4$  溶液中加入  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  固体后, 再过滤; 复盐溶液的抗氧化能力大于  $\text{FeSO}_4$  溶液; 以及在  $\text{FeSO}_4$  和  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  混合溶液中, 沿器壁缓慢加入适量乙醇, 使之覆盖在液面上, 随着乙醇在溶液中不断扩散,  $\text{FeSO}_4 \cdot (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  逐渐结晶析出的做法( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  和  $\text{FeSO}_4$  也都不溶于乙醇, 这种方法得到的产品中肯定含有  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  或  $\text{FeSO}_4$ )”, 其科学依据还有待于我们进一步去思考和探索, 这些问题也是培养学生“批判性”思维的很好案例。

## 参 考 文 献

- [1] 中山大学、辽宁大学等校. 无机化学实验. 北京: 人民教育出版社, 1978: 71–72.
- [2] 浙江大学普通化学教研组. 普通化学实验. 北京: 人民教育出版社, 1981: 25–26.
- [3] 蔡维平. 基础化学实验(I). 北京: 科学出版社, 2004: 253–256.
- [4] 南京大学大学化学实验教学组. 大学化学实验. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2010: 132–133.
- [5] 徐家宁, 门瑞芝, 张寒琦. 基础化学实验(上册)——无机化学和化学分析实验. 北京: 高等教育出版社, 2006: 68–69.
- [6] 陈雪梅, 高歌, 李海洋, 丁荫祥. 龙岩师专学报(教育自然科学版), **1985**, 3 (2), 127.
- [7] 张喜英. 周口师专学报, **1995**, 12 (1), 26.
- [8] 税永红. 化学教育, **1999**, 20 (9), 41.
- [9] 姜述芹, 马荔, 梁竹梅, 杨涛, 陈虹锦. 实验室研究与探索, **2005**, 24 (7), 18.
- [10] 汪丰云, 王小龙. 大学化学, **2006**, 21 (1), 51.
- [11] 陈彦玲, 岳淑美, 林世威, 秦建聂. 长春师范学院学报(自然科学版), **2010**, 29 (4), 62.
- [12] 李晓春. 赤峰学院学报(自然科学版), **2011**, 27 (10), 27.
- [13] 钟国清, 周齐文, 夏安. 实验技术与管理, **2013**, 30 (5), 14.
- [14] 韦正友, 石婷婷, 司友琳, 孙远东. 大学化学, **2014**, 29 (1), 60.
- [15] 刘艳菊, 黄甜甜, 郝露露, 杨怀霞. 生物技术世界, **2016**, No. 1, 251.
- [16] 季然, 胡勇. 广东化工, **2017**, 44 (6), 78.
- [17] 武汉大学, 吉林大学等校. 无机化学(下册). 第3版. 北京: 高等教育出版社, 1994: 676–678.
- [18] 南京大学《无机及分析化学实验》编写组. 无机及分析化学实验. 第5版. 北京: 高等教育出版社, 2015: 78–80.
- [19] 中山大学等校. 无机化学实验. 第3版, 修订版. 北京: 高等教育出版社, 2015: 46–47.
- [20] 赵滨, 马林, 沈建中, 卫景德. 无机化学与化学分析实验. 上海: 复旦大学出版社, 2008: 171–173.
- [21] 兰州大学化学化工学院大学化学实验中心编. 大学化学实验——基础化学实验 I (上册). 第2版. 兰州: 兰州大学出版社, 2011: 256–257.