

纸上得来终觉浅，绝知此事要躬行 ——“树叶电镀”科普实验的实践与反思

程一飞，杨嘉辉，邵伟，张万群，胡万群，李维维，杨凯平*

化学国家级实验教学示范中心(中国科学技术大学)，合肥 230026

摘要：介绍了作为2023年中国科学技术大学科技周化学与材料学院科普点的志愿者，在准备“树叶电镀”科普实验时，如何经历重重失败，克服种种困难，最终顺利完成“树叶电镀”项目的经历，以及在此经历中的感悟与收获。

“树叶电镀”实验是受艺术性的树叶书签之启发，主要利用化学镀与电镀原理，目的在树叶表面均匀镀上一层铜的科普实验。通过该实验，观众可初步了解氧化还原反应及电化学的初步知识，激发小朋友们对于化学的兴趣。

关键词：科普实验；树叶电镀；电化学；氧化还原反应

中图分类号：G64；O6

Learning Goes Beyond the Written Word: Practical Insights from the “Leaf Electroplating” Popular Science Experiment

Yifei Cheng, Jiahui Yang, Wei Shao, Wanqun Zhang, Wanqun Hu, Weiwei Li, Kaiping Yang *

National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (University of Science and Technology of China), Hefei 230026, China.

Abstract: This article introduces how the authors, as volunteers at the Experimental Chemistry Education Center of the University of Science and Technology of China, overcame various failures and successfully completed the “Leaf Electroplating” project for the 2023 Science and Technology Week, as well as the insights and gains gained from this experience. The “Leaf Electroplating” experiment is inspired by the artistic art of leaf bookmarks, mainly using principles of chemical plating and electroplating, with the aim of uniformly plating a layer of copper on the surface of leaves as a popular science experiment. Through this experiment, the audience can gain a preliminary understanding of redox reactions and electrochemistry, stimulating children’s interest in chemistry.

Key Words: Popular science experiment; Leaf plating; Electrochemistry; Redox reaction

中国科学技术大学化学实验教学中心作为安徽省科普教育基地，每年科技活动周接待公众参观人数两万余人。2023年4月22日，第八届“中国航天日”系列活动——中国科大2023年科技活动周拉开帷幕，我们作为本次科技活动周的志愿者，通过查阅文献，设计实验方案，经过多次预实验，反复优化实验条件，最终设计的“树叶电镀”趣味实验在本次科技周当天的活动中展示成功，得到了既美观，又耐保存的镀铜树叶。

通过这项实验，大家可以对身边易得的材料(大小合适，完整的落叶即可)进行加工，得到既可作

收稿：2023-10-10；录用：2023-11-28；网络发表：2024-01-12

*通讯作者，Email: kpyang@ustc.edu.cn

基金资助：中国科学技术大学教学研究项目(2021xjyxm061)；中国科学技术大学教学研究项目(2022xjyxm047)；安徽省质量工程教学研究项目(2022jyxm1822)；安徽省新时代研究生质量工程教学研究项目(2022jyxggj006)

为装饰，又可以作为书签等工具使用的“铜树叶”，这是化学与艺术的创新结合。而通过科普展示与讲解，可以向小朋友们普及相关的化学镀及电镀的简单原理，以及在实验中涉及到的氧化还原反应、电化学等方面的化学知识，初步了解生活中常见的电镀工艺及其重要作用。美丽多彩的实验现象，进一步激发了观众对化学的热情与兴趣(图1)。

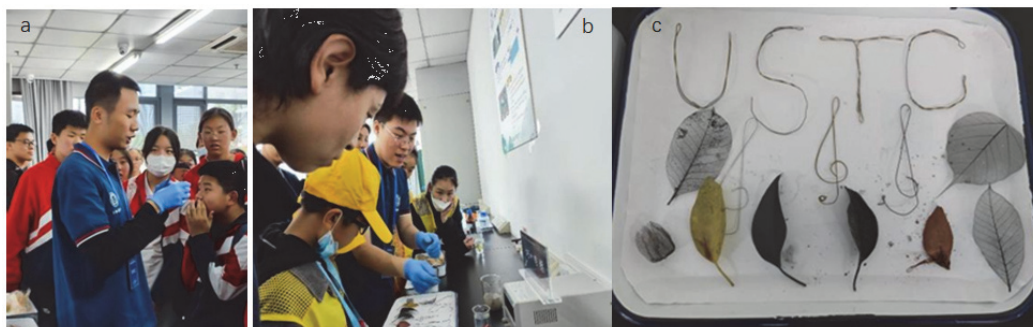


图1 (a)、(b) 作者正向同学们进行树叶电镀科普讲解；(c) 树叶电镀科普实验部分成果展示

1 实验部分

1.1 实验仪器及试剂

1.1.1 仪器

电镀整流器及配套设备(267 mL哈氏槽、导线、测试夹等, 图2): GP-1505D, 昆山高品精密仪器有限公司; 电子天平: YP5001, 上海越平科学仪器有限公司; 磁力搅拌器: JB-1A, 上海雷磁仪器厂(上海精密科学仪器有限公司)。量筒: 100 mL 1只; 烧杯: 500 mL 3只, 250 mL 1只。玻璃片、玻璃棒、胶头滴管、镊子、药匙、硬纸板。

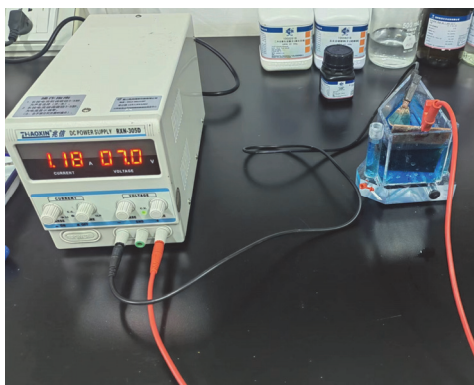


图2 “树叶镀铜”实验电解装置

1.1.2 试剂

蒸馏水。结晶硫酸铜($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$): 分析纯(AR), 结晶氯化亚锡($\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$): AR, 硝酸银(AgNO_3): AR, 稀盐酸: $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨水: 25% (质量分数, 下同), 甲醛溶液: 36%, 无水乙醇, 均购于国药集团化学试剂有限公司。石墨漆喷剂: SM01, 150 mL, 海琳之星。洗洁精: 雕牌洗洁精, 正常规格, 净含量408g, 货号6366595。铜板: 上述电镀整流器配套材料。

1.2 实验原理

人类历史的发展离不开材料的进步, 而如何改善材料的表面性能一直以来都在引发工程师们的思考。镀层的用途就是获得需要的表面性能, 而在各种镀涂方法中, 电镀和化学镀因其经济性, 普

遍适用于各类镀层等优秀特性，广泛应用于生产实践中^[1]。

电镀，是指在含有某种金属离子的电解质溶液中，将被镀工件作为阴极，通过一定波形的低压直流电，使金属离子得到电子，不断在阴极沉积为金属的加工过程^[2]。而化学镀，是指通过溶液中适当的还原剂使金属粒子在金属表面的自催化作用下进行还原的金属沉积过程^[3]。本实验即利用简单的化学镀与电镀原理，采取两者结合的方法，为树叶镀上一层均匀美观的铜。

本次实验的核心原理是电解池原理，即通过外加电源，使铜板上的铜转移到树叶表面。采用浓硫酸铜溶液($200\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)做电解(镀)液，纯铜板做阳极，喷有石墨漆作为基质，且表面附着有金属银的树叶(可视为基体材料)做阴极(图3)，电极反应方程式如下：

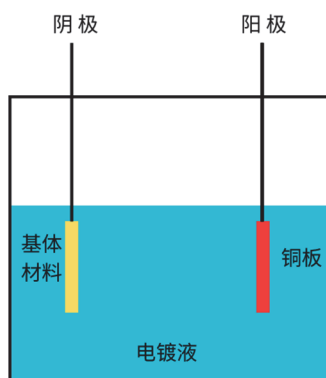
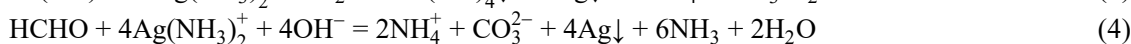
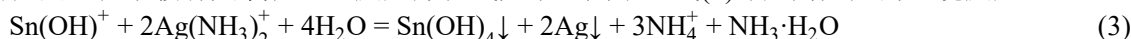


图3 电解铜原理示意图^[4]

此外，为了解决树叶本身不导电的问题，在开始电镀之前，使用石墨漆作为基质材料(可以让银更加均匀地附着)，用氯化亚锡浸泡后，再将树叶置于滴有若干滴甲醛溶液、新制的银氨溶液中，利用银镜反应使其表面附着了一层银，增强其导电性。此时，树叶表面水解生成的 $\text{Sn}(\text{OH})_2$ 胶状物也可以还原 $\text{Ag}(\text{I})$ ，同时吸附还原剂。生成的银颗粒作为类似“晶核”，为后续被甲醛还原而成的银提供附着的表面位点。化学镀有关氧化还原反应方程式如下，其中，式(4)即广为人知的银镜反应：



综上所述，本实验采取先化学镀后电镀的方法，最终在树叶表面均匀地镀上一层紫红色、闪亮美观的铜。

1.3 实验步骤

1.3.1 对树叶的预处理

- 1) 将树叶放入适宜浓度(1 : 100左右)的洗洁精溶液中浸泡20 min，去除表面油污；
- 2) 将树叶取出，用清水漂洗后稍稍晾干，将其放置于硬纸板上，用石墨漆喷剂在树叶正反表面均匀地涂上一层石墨漆，静置晾干。

1.3.2 溶液配制

- 1) 配制浓硫酸铜溶液：称取50.00 g $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ，溶解于250 mL蒸馏水中，在磁力搅拌器上搅拌至完全溶解，再将硫酸铜溶液全部倒入电解槽(267 mL哈氏槽)中；
- 2) 配制稀氯化亚锡溶液：向100 mL蒸馏水中加入2药匙的 $\text{SnCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (此处定性即可)，在磁力搅拌器上搅拌滴加 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 稀盐酸，直至白色浑浊完全溶解；
- 3) 配制5%稀氨水(在通风橱中操作)：向500 mL烧杯中倒入50 mL 25%氨水，加水稀释至溶液体积为250 mL；
- 4) 配制4%硝酸银溶液：用电子天平称取8.33 g硝酸银固体，溶解于200 mL蒸馏水中(用500 mL

烧杯盛取), 用玻璃棒搅拌至完全溶解:

5) 配制银氨溶液(在通风橱中操作): 往4%硝酸银溶液中滴加5%稀氨水, 直到棕色沉淀完全溶解, 溶液澄清。

1.3.3 树叶的化学镀

1) 将喷涂有一层均匀石墨漆基质材料的树叶放置于稀氯化亚锡溶液中浸泡30 s, 用蒸馏水轻轻漂洗两下, 放在洁净的玻璃片上;

2) 向银氨溶液中搅拌滴加20滴甲醛溶液, 滴加完后迅速将树叶放入溶液中, 浸泡约30 min。

1.3.4 树叶电镀

将1.3.3小节得到的表面附着有金属银的树叶(见图4)取出, 用蒸馏水稍稍漂洗, 与恒流电源负极相连(做阴极), 插入电解槽中(铜板做阳极, 浓 CuSO_4 溶液做电镀液), 用1.0–1.5 A的电流电镀。

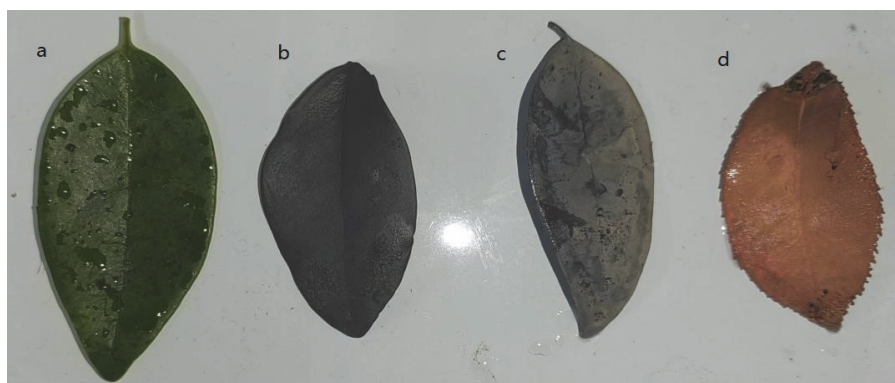


图4 (a) 未经任何处理的树叶; (b) 喷有石墨漆基质材料的树叶; (c) 表面镀银的树叶; (d) 镀铜树叶(最终产品)

电镀4 min左右时, 就可以明显发现树叶部分表面已经镀上金属铜。可以观察到, 铜的附着是从边缘开始, 逐渐向中心延伸, 同时从上到下逐渐延伸(见图5)。电镀半小时后, 树叶全表面镀上一层致密均匀、美观精致的紫红色金属铜, 完成了产品(见图4)的制作。



图5 树叶镀铜过程(1.5 A, 电镀4 min 30 s)

2 实验总结与反思

2.1 预实验回顾与反思

在“科技活动周”正式开始前, 我们进行了大量的预实验。虽然这些预实验的效果都不甚理想, 多次遭遇失败, 但通过不断摸索、尝试与总结, 积累大量的实践经验, 最终筛选出合理的实验方案, 并获得成功。以下便是对各次预实验过程、现象、分析及经验教训的简要概括, 以供参考借鉴。

各组预实验均在树叶于洗洁精溶液和稀氯化亚锡溶液中完成浸泡的基础上进行(参考1.3实验步骤)。

2.1.1 预实验A: 直接电镀

考虑实验成本, 最初尝试在不进行化学镀银的条件下直接电镀。因为树叶本身是绝缘体, 所以在实验中完全没有电流出现, 自然只能得到“零结果”。

2.1.2 预实验B: 电镀前, 树叶表面仅镀银

第一次的实验失败之后, 根据文献^[5]中所述原方案, 决定采取先利用银镜反应进行化学镀, 再进行电镀的方法来完成电镀, 但在具体实践过程中, 发现有如下问题:

- 1) 还原出的银难以均匀附着在树叶表面, 多是以分散的颗粒形式存在;
- 2) 原方案中提到将树叶浸泡在无水乙醇中以去除叶绿素的方法可行性较低, 浸泡数个小时后树叶仍无明显变化;
- 3) 树叶表面电阻极大, 电镀电流很小(给两极板施加20 V的电压, 电流示数仍为0, 说明电流强度小于0.01 A, 电阻大于2 k Ω , 而正常电镀电阻大小应为0.2 Ω 左右, 如图2所示), 使电镀过程极为缓慢(见图6), 同时产生的热量过多, 容易将树叶烧穿。

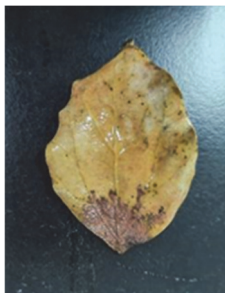


图6 预实验B中电镀一个半小时的不理想结果

造成以上各种问题的原因可能是:

- 1) 树叶表面凹凸不平, 银难以均匀附着全表面, 大都在某些位点上聚集沉降, 电阻过大, 无法起到改变树叶导电性的作用;
- 2) 树叶完整的情况下, 难以用无水乙醇萃取叶绿素, 因而树叶表面的理化环境过于复杂, 形状不够平整。使用丙酮可能会提高萃取效果, 但毒性较大且易挥发, 不适合在科普实验中展示, 因而只能作罢。

2.1.3 预实验C: 电镀前, 树叶表面仅喷涂石墨漆

检讨第二次实验失败原因, 发现主要是由于银难以均匀附着在树叶表面, 导致树叶电阻过大, 电镀过程难以进行。为此, 我们想到了石墨漆这种材料。石墨漆具有导电能力, 且容易附着在树叶表面。使用石墨漆对树叶进行喷涂后, 电镀速率有一定加快, 却依然远远达不到预期。由于在这种实验条件下的石墨漆喷剂的导电性依然弱于一般金属材料(如铜丝、铁丝), 电镀时的电流还是较小。

2.1.4 预实验D: 利用喷涂石墨漆和镀银的方式

虽然预实验C效果不甚理想, 但石墨漆涂层易于均匀覆盖全表面, 同时具有一定导电能力的优良特性让我们不禁联想到, 上个实验失败的主要原因在于银不能均匀附着在树叶光滑的表面, 但如果用石墨漆涂层作为基质材料先覆盖于树叶之上, 是否有利于银的附着? 也就是说, 如果将预实验B与C的两种方法结合起来会怎样? 通过将这样的想法转化为实践, 我们进行的正式实验(即完全按照1.3中步骤进行的实验)终获成功。

2.1.5 电镀时, 多片树叶(不同进度)共同镀铜

为了节省时间与器材, 尝试在一个电解槽中同时电镀两片树叶的实验。结果发现由于已经镀上

部分铜的树叶电阻大幅降低, 尚未镀上铜的树叶电阻远高于已镀铜的树叶, 导致该树叶表面几乎无电流通过, 以致其无法进行电镀。

2.2 实验总结

树叶电镀科普实验的核心为电镀原理, 而关键则是想方设法让本身绝缘的树叶表面导电, 并尽可能减小电阻。为此做了很多尝试, 几乎穷尽了手头上已有材料的各种组合运用, 终于在最后找到了同时使用的创新实验方案。该方案有如下优点:

1) 石墨漆可以为银的附着提供均匀基质, 同时巧妙规避了无水乙醇不能有效去除叶绿素的问题(去除叶绿素的目的在于使镀层金属与树叶基质可以良好结合^[5]), 即石墨漆覆盖表面后, 叶绿素及树叶表面具体理化环境不再对实验产生影响, 在为银提供良好附着位点的同时不影响树叶轮廓, 也能表现出较大叶脉的形状;

2) 银具有极其优良的导电性(25 °C时, 电阻率仅为 $1.65 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ^[6]), 配合覆盖全面的导电石墨漆, 可以大幅降低树叶表面电阻。具体而言, 其中银降低电阻率 ρ , 石墨漆增大负极材料电极导电表面积 S , 由式(5)知, 电阻 R 减小^[7]。

$$R = \frac{\rho l}{S} \quad (5)$$

3) 本实验所用试剂均为中学化学课堂上出现的常见试剂, 但其中部分物质还是具有一定的危险性, 如: 硝酸银属于易制爆化学品, 具有腐蚀性及助燃性; 甲醛溶液有毒性及腐蚀性; 乙醇有易燃性; 氨水有刺激性等^[8]; 废液中含有重金属离子, 不能随意排放, 需要倒入废液缸中等待进一步处理(如加适量铁粉回收重金属后, 母液再经沉淀、过滤、稀释排放)。在实验开始时前, 需要按照标准流程领取所需试剂; 在实验过程中, 需要严格遵守实验操作规范, 全程佩戴好防护手套, 在通风橱中进行涉及上述危险化学品的操作, 并戴好护目镜、防护口罩。

4) 树叶电镀实验采用生活中随处可见的落叶为原材料, 实验现象明显, 易操作, 适合作为科普实验推广, 可以让化学真正走进生活, 激发公众尤其是中小学生对化学的兴趣, 提高科学素养。对于本次参加“科技活动周”的小朋友而言, 我们的实验在他们的心中埋下科学的种子, 相信在后续的学习生活中, 只要加以正确的引导, 便可生根发芽。让更多的孩子在未来选择从事化学研究, 也为更多热爱化学的人才成材创造条件。

3 实验拓展

“科技活动周”结束后, 我们意犹未尽, 另外设计了两项拓展试验, 分别更换镀件与镀层金属, 旨在拓宽上文所述电镀方法的应用范围。

3.1 电镀模型

在该实验中, 将镀件从树叶更换为本身绝缘, 但形状更为复杂的塑料小模型, 实验步骤与1.3所述一致, 同样采用先使用石墨漆喷剂与化学镀银改善表面导电性, 再镀铜的方法。用2.5 A的电流电镀3 h后, 得到产品(见图7)。

可以明显观察到产品表面大部分都已经镀上一层致密的金属铜, 但由于该模型体积较大, 几何形状过于复杂, 电镀时难以将其表面完全均匀覆盖。因此在实际应用中可以将复杂绝缘模型先行拆分, 采取本文方法逐一电镀后, 再将其组装, 完成最终产品的制作。

3.2 树叶电镀(镀镍)

在实际生产中, 由于金属镍的优良特性(如抗腐蚀、高耐磨性等), 电镀镍被广泛应用于材料加工领域。根据溶液中金属活动性顺序, 铜在氢之后, 但镍在氢之前, 因此镍可以代表一系列活动性强于氢(弱于铝)的镀层金属, 作为镀铜实验的补充。基于上述两点原因, 在本实验中, 镀层金属被更换为镍, 使用 $200 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硫酸镍溶液(由分析纯 $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 晶体配制而成, 购于国药集团化学试剂有限公司)为电镀液, 镍板(99.99%, 购于中研金属材料)为阳极, 其余步骤与1.3相同, 进行树叶电镀实验。



图7 电镀产品(左)和模型原件(右)

实验操作时发现, 由于镍的活动性顺序在氢之前, 所以在电镀过程中会在阴极产生大量氢气气泡。电镀10 min后, 在完成化学镀银的树叶表面仍然未见金属的沉积。显然, 如果仅仅以化学镀银处理树叶, 已经满足不了上述需求。因此, 决定采用已经完成的镀铜树叶作为镀件, 进行再次尝试。

用1.5 A的电流电镀30 min后, 可以观察到树叶表面已经镀上一层均匀、色泽较暗的金属镍(图8)。树叶边缘少许绿色物质为析出的硫酸镍晶体, 可用蒸馏水洗去。



图8 镀镍树叶

3.3 拓展试验总结

1) 镀铜时, 1.3所述方法具有普遍适用性, 即对于各种绝缘材料均可采取该处理加工方法。对于结构复杂、体积较大的物品可以先进行拆分, 每一部分逐一镀好铜后再进行组装;

2) 电镀其他金属时, 若金属活动性介于锌(包括锌)与氢之间, 则需要考虑电解水(产生氢气)的影响。由3.2中的实验现象可知, 电镀较活泼金属需要更严苛的镀件表面条件, 包括更平整的几何形状及更优良的导电性(虽然银的电阻率略小于铜, 但在本实验中, 由于得到镀层的方法不同, 电镀铜比化学镀银要致密均匀得多, 导电面积更大, 实际上电镀铜树叶表面的电阻要显著低于仅完成化学镀银树叶的表面电阻)。因此可以采用1.3所述方法给镀件镀好铜后, 以此为基础, 在铜表面镀上需要的较活泼金属(如镍)。

3) 电镀较活泼金属时还应当考虑溶液pH的影响, 应在确保不会产生沉淀的情况下选择合适的缓冲溶液, 以减少氢气的产生, 并提高电流效率。如可以往硫酸镍溶液中加入硼酸做缓冲剂, 将pH调至4.0左右^[2]。

4 结语

2023年中国科学技术大学“科技活动周”当天，我们向小朋友们进行了电镀树叶的实验展示与化学知识科普(图9)。在初步了解电解原理及电镀在我们生活中的广泛应用与意义后，小朋友们都十分好奇，跃跃欲试。于是我们拿出早已准备好的铁丝音符，让小朋友们来亲自动手，体验电镀的过程。很快，大家就将手中的铁丝音符镀上了漂亮的金属铜(仅需十几秒就能完成)，有些具有探究精神的小朋友甚至进一步比较了电镀铜与仅通过置换反应得到的铜之间的区别，发现电镀铜更加致密，在铁丝上附着更加紧密，较不易擦除。



图9 同学们在认真观察实验现象(左)及同学们的心得体会(右)^[9]

在现场展示“树叶镀铜”实验的同时，我们还向小朋友们分享了在做预实验时经历的种种挫折。来自宣城市二中高二(26)班的杨然同学评价：“其中令我印象最深的是树叶电镀实验。有两位志愿者向我们讲述了他们进行这项实验的过程，从失败到不断尝试再到成功。其中一位志愿者说，学习也就像他们做这项实验一样，要从一次次失败中爬起，不断尝试，不断探索。身为天之骄子的他们都有接受失败的勇气，并有坚持到底的决心，我们应该向他们学习，学习他们的谦虚、求知、坚持精神，正是有了这些品质，他们才能让普通的树叶镀上一层银光。”

虽然我们当时才刚刚大一，还没有正式开始科研工作，但是这次科普活动经历的种种失败以及最后的成功让我们对于未来的科研生活有了更多的感悟与准备。化学作为一门实验学科，它需要研究人员不断地去尝试。面对问题、挑战与意外，我们不能畏惧或气馁，而应当积极探索、不断改进实验方案，即使失败，也能积攒具有参考价值与借鉴意义的宝贵实践经验。正如我们的指导教师所言：“化学实验就像做菜，只有不断尝试各种调料组合，才能找到最美味的配方！”

参 考 文 献

- [1] Sudarshan, T. S. 表面改性技术工程师指南. 范玉殿, 等译. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [2] 张胜涛, 等. 电镀工程. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [3] 李宁. 化学镀实用技术. 第2版. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [4] 吴群英, 刘智敏, 张翼飞, 范围东, 陈四兵, 陈东琛. 信息记录材料, 2022, 23 (4), 62.

- [5] 沈玉华, 黄方志, 谢安建, 宋继梅, 李士阔. 大学化学, **2011**, 26 (1), 45.
- [6] 郭树怀, 王衍子, 党莹. 物理学. 上海: 上海科学技术出版社, 2012.
- [7] 胡友秋, 程福臻, 叶邦角, 刘之景. 电磁学与电动力学(上册). 第2版. 北京: 科学出版社, 2014.
- [8] 南京大学国家级化学实验教学示范中心. 高校实验室常用危险化学品安全信息手册(MSDS). 北京: 高等教育出版社, 2020.
- [9] 我校应邀组织学生参加中国科学技术大学科技开放日活动. [2023-09-22]. <https://mp.weixin.qq.com/s/353-X2QnfVozMsSql4Jr2Q>