

电化学系列基础实验设计

张涛¹, 宗蒙¹, 凌博恺¹, 饶衡², 闫毅^{1,*}, 陈凯杰^{1,*}

¹西北工业大学化学与化工学院, 西安 710072

²吉林大学化学学院, 无机合成与制备化学国家重点实验室, 长春 130012

摘要: 电化学相关的储能、电催化二氧化碳转化、电解水产氢等是助力我国早日实现双碳目标的重要技术, 另一方面电化学也是高中化学、大学化学、无机化学和物理化学等学科的核心知识点之一。因此为了加深学生对电化学知识的理解和运用, 我们设计了电化学系列综合实验。该系列综合实验包括原电池的组装、铁钉表面电镀铜、锌的析氢腐蚀、铁钉的阴极保护, 涉及原电池、电镀池、电化学腐蚀等重要知识点, 并且通过电压表读数、颜色变化、气泡生成等明显的现象表征反应的发生。该系列综合实验现象明显、重现性高、操作简便, 实验设计环环相扣, 不仅能够加深学生对于知识的理解, 提升学生的动手能力, 还能够引起学生对化学学科的兴趣, 激起学生探索化学世界的好奇心。该系列综合实验可作为高中化学教学的展示实验, 也可作为理工科非化学专业一年级、二年级本科生的实验教学内容。

关键词: 电化学; 基础实验; 原电池; 电镀池; 电化学腐蚀

中图分类号: G64; O6

Design of a Series of Fundamental Electrochemical Experiments

Tao Zhang¹, Meng Zong¹, Bokai Ling¹, Heng Rao², Yi Yan^{1,*}, Kaijie Chen^{1,*}

¹ School of Chemistry and Chemical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China.

² State Key Laboratory of Inorganic Synthesis and Preparative Chemistry, College of Chemistry, Jilin University, Changchun 130012, China.

Abstract: Electrochemical technologies, such as energy storage, electrochemical CO₂ conversion, and hydrogen production through water electrolysis, are crucial for helping our country achieve its dual carbon goals. Additionally, electrochemistry is a core concept in high school and university-level chemistry, including inorganic and physical chemistry. To enhance students' understanding and application of electrochemical knowledge, we have designed a comprehensive series of electrochemical experiments. These experiments include the assembly of a galvanic cell, copper electroplating on an iron nail, hydrogen evolution corrosion of zinc, and the cathodic protection of an iron nail. They cover key electrochemical principles such as galvanic cells, electrolytic cells, and electrochemical corrosion. Observable phenomena like voltmeter readings, color changes, and bubble formation are used to indicate the reactions. The experiments are designed to be clear, reproducible, and easy to perform, thereby deepening students' comprehension, enhancing their practical skills, and sparking their interest in chemistry. This series of experiments can serve as demonstration experiments in high school chemistry classes and as part of the laboratory curriculum for first- and second-year undergraduate students in non-chemistry science and engineering majors.

收稿: 2024-03-03; 录用: 2024-04-02; 网络发表: 2024-09-12

*通讯作者, Emails: yanyi@nwpu.edu.cn (闫毅); ckjiscon@nwpu.edu.cn (陈凯杰)

基金资助: 中国博士后科学基金资助(2022M712585); 无机合成与制备化学国家重点实验室(吉林大学)开放课题基金(2024-28); 西北工业大学教育教学改革研究项目(2024JGWZ07, 2024244053, 2023JGZ20); 西北工业大学课程建设项目(PX-27232415); 教育部产学合作协同育人项目(2023JGZ20); 研究生教育研究基金项目(2023YMs018); 研究生教育综合改革发展创新项目(KCJG202408); 研究生培养质量提升项目(24GZ210101)

Key Words: Electrochemistry; Fundamental experiments; Galvanic cell; Electrolytic cell; Electrochemical corrosion

电化学知识和原理涉及生产生活的方方面面,小到可充电手机、新能源汽车,大到电解铝工业,其核心是电能与化学能相互转化。我国提出“2030年碳达峰,2060年碳中和”的双碳目标,一方面调整我国能源结构从化石能源向可再生能源转变,另一方面要求二氧化碳的减排和催化转化,对于二者而言电化学技术扮演着重要的作用,如通过新型电化学储能技术解决可再生能源发电间歇性、随机性和波动性问题^[1],通过二氧化碳电催化转化解决碳排放问题^[2],通过电解水制氢解决化石能源依赖问题^[3]。此外,电催化合成由于其反应动力学快、产物选择性高、综合合成效率高等优点成为目前研究的热点^[4,5]。因此,掌握电化学相关知识,理解电化学过程的内在原理是十分重要的。电化学不仅是高中化学必修的重要知识点^[6],还是大学化学、无机化学和物理化学相关知识体系的重要组成部分^[7]。然而相关知识涉及电池的正负极反应、能斯特方程、电极电势、电解池的阴极阳极反应、法拉第电解定律等,知识容量大、概念抽象、内容艰涩难懂,学生仅通过课堂教学很难实现相关知识的深层次理解,而实验教学作为课堂教学的补充,一方面能够将书本知识具象化,加深学生的理解;另一方面还能够培养学生的动手能力,引起学生对化学学科的兴趣,激起学生探索化学世界的好奇心,是帮助学生将知识体系融会贯通的重要手段。因此巧妙地设计电化学实验,在兼顾现象明显、重现性高、操作简便的同时,还能够使学生熟练掌握电化学相关知识、理解电化学过程,是十分重要的^[8,9]。

电化学基础实验的设计,一方面要保证足够的知识容量,尽可能多地涵盖课本中的知识体系;另一方面要避免过于繁杂,尤其要避免涉及特种试剂、大型仪器设备的使用。此前的电化学实验设计有的专业性较强^[10,11],涉及大型仪器设备的使用;有的针对性强,知识容量较小^[12,13],它们更适合化学相关专业本科生的实验教学。然而在面向高中生和理工科非化学专业本科生时,我们需要设计知识容量大、操作简便的实验,让该实验能够广泛地被中学生和本科生学习、操作和理解,真正意义上使实验教学能够帮助同学理解所学知识,进一步激发学生对化学学科的兴趣^[14-18]。

因此我们设计了该电化学系列基础实验,其中包括四个单元:原电池的组装、给铁钉表面电镀铜、锌的析氢腐蚀、铁钉的阴极保护,其中知识点涉及:原电池、电极电势、电镀池、电化学腐蚀等。该实验涵盖了电化学教学过程中大部分的重点内容,知识容量大;实验中所用到的试剂、器材、设备都是教学过程中常见的,开展实验的壁垒低,广泛性好;实验现象明显,笔者在多班次的实验教学过程中发现很多学生在铁钉电镀铜实验和铁钉阴极保护实验后拍照留念,可见铁钉表面光亮的铜镀层和电极两端一红一蓝的颜色变化引起了学生的兴趣,实验具有一定趣味性,能够激发学生的兴趣和求知欲。

1 原电池的组装

1.1 实验目的

- (1) 了解原电池的构成及组装。
- (2) 掌握电极电势的概念及电池电动势的测量方法。

1.2 实验原理与实验设计

将物质中的化学能通过氧化还原反应的手段转化为电能的装置叫原电池。原电池一般由正极、负极、电解质溶液和盐桥构成。原电池放电时,在外电路中,电子从负极流出对外做功并进入正极,此时负极发生氧化反应、正极发生还原反应;在内电路中,盐桥中的阴离子向负极移动、阳离子向正极移动,维持两个电极的溶液的电中性。

原电池的组装:在此我们组装的电池是Daniell电池(图1a)。它是由英国化学家J. F. Daniell在1836年首次发明构造的,其结构如图1b所示:浸入ZnSO₄溶液的锌板作为负极,浸入CuSO₄溶液的铜板作

为正极，负极和正极之间通过盐桥连接，其中盐桥是装有饱和氯化钾溶液的琼脂，离子可以在其中自由移动。

原电池电动势的测量：用电压表的正负接线柱分别连接原电池的正极板和负极板，通过电压表指针的读数来近似表示原电池电动势。

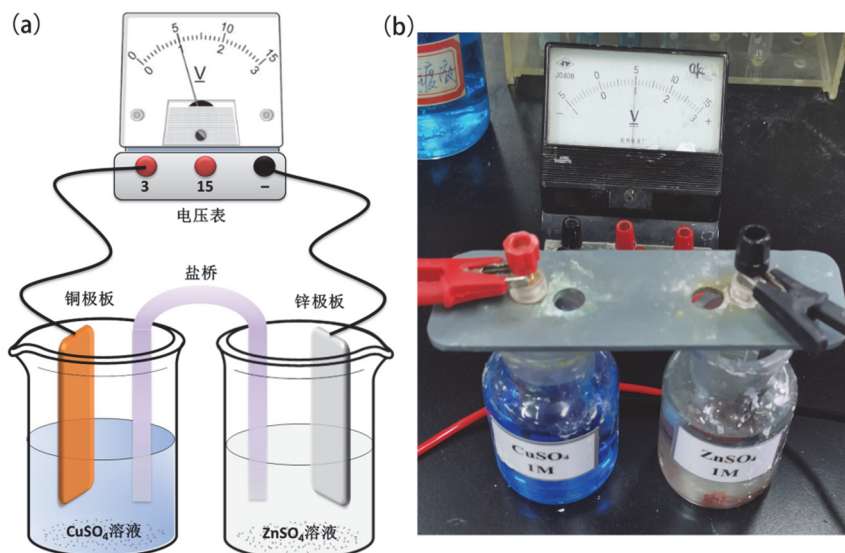


图1 (a) 原电池组装示意图；(b) 实际装置图

1.3 实验步骤

(1) 分别配制 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 ZnSO_4 溶液和 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 CuSO_4 溶液，并分别量取200 mL的上述溶液装入两个250 mL的烧杯中；

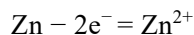
(2) 分别用砂纸打磨锌板和铜板，并将锌板部分浸入装有 ZnSO_4 溶液的广口瓶中，将铜板部分浸入装有 CuSO_4 溶液的广口瓶中；

(3) 将盐桥的两端分别浸入上述 ZnSO_4 溶液和 CuSO_4 溶液中；

(4) 用导线分别连接原电池的锌极板和铜极板，连接锌极板的导线一端与量程0–3 V的电压表的负接线柱相连，连接铜极板的导线另一端与电压表正接线柱相连，此时观察电压表指针位置，并记录读数；将盐桥取出，观察指针位置变化。

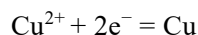
1.4 实验现象与结果讨论

如图1所示，当原电池正负极分别与电压表正负接线柱相连后，发现电压表指针偏转，并且读数在1.0 V处。此现象表明原电池组装成功，并且电池与外电路形成闭合回路。此时锌板与 ZnSO_4 溶液组成的电池负极发生氧化反应，标准电极电势为 -0.762 V ，电极反应式如下：



$$E^\ominus(\text{Zn}^{2+}/\text{Zn}) = -0.762 \text{ V}$$

铜板与 CuSO_4 溶液组成的正极发生还原反应，标准电极电势为 0.340 V ，电极反应式如下：



$$E^\ominus(\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}) = 0.340 \text{ V}$$

此时原电池的标准电动势为：

$$E_{\text{ME}}^\ominus = E^\ominus(\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}) - E^\ominus(\text{Zn}^{2+}/\text{Zn}) = 1.102 \text{ V}$$

在实验中我们发现，电压表的读数小于原电池的标准电动势，这是由于：(1) 测量过程中外电路中有电流通过，电极已经发生极化；(2) 电流通过内外电路，电路中的接触电阻、离子电阻等产生电

压降。

将盐桥取出后，发现电压表指针归零。这是由于盐桥起到内电路导通离子的作用，取出盐桥使电路开路，原电池失效。

2 铁钉表面镀铜

2.1 实验目的

- (1) 了解电镀的作用。
- (2) 了解电镀池的构造和原理。
- (3) 掌握电镀池中阴阳极反应。

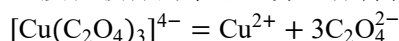
2.2 实验原理与实验设计

电镀是利用电化学原理，在金属镀件表面沉积另一种金属薄层的工艺。电镀的主要作用是通过表面金属镀层增加内部金属镀件的抗腐蚀能力、表面硬度或表面光泽度。电镀池一般有四个部分组成：外部直流电源、电镀液、阳极和阴极。阳极一般由与金属镀层成分相同的金属单质构成，电镀时与直流电源正极相连，发生氧化反应，阳极作为牺牲电极不断消耗；阴极由金属镀件构成，电镀时与直流电源负极相连，发生还原反应，金属离子在阴极表面被还原成单质，沉积在镀件表面形成镀膜。电镀液是镀层金属离子的盐溶液，根据不同的工艺要求可添加一些助剂，电镀在电镀液中进行，电镀过程中电镀液的组分保持相对稳定。

给铁钉表面镀铜^[19]：电解槽的构成如图2a、2b所示：在此我们用实验1中组装的原电池作为外部直流电源，铜棒为阳极，铁钉为阴极，用草酸、氨水和CuSO₄配制电镀液。其中电镀液使用草酸和氨水的目的是Cu²⁺与其可以生成草酸铜氨配合物(NH₄)₄[Cu(C₂O₄)₃]，反应方程式如下：



电镀时消耗的自由铜离子是从[Cu(C₂O₄)₃]⁴⁻中解离出来的，配合物的解离平衡能够使体系中自由铜离子浓度在较低的水平，并且保持稳定，解离方程式如下：



将直流电源正极与铜棒连接，负极与铁钉连接，在电路电极都连接正确后，最后将阴极和阳极放入电镀液中，保证带电入槽。电镀过程持续15 min后，将铁钉取出，观察铁钉表面的颜色变化。

作为对比，我们将同样的铁钉浸入1 mol·L⁻¹的CuSO₄溶液中反应15 min，观察铁钉表面的颜色变化。

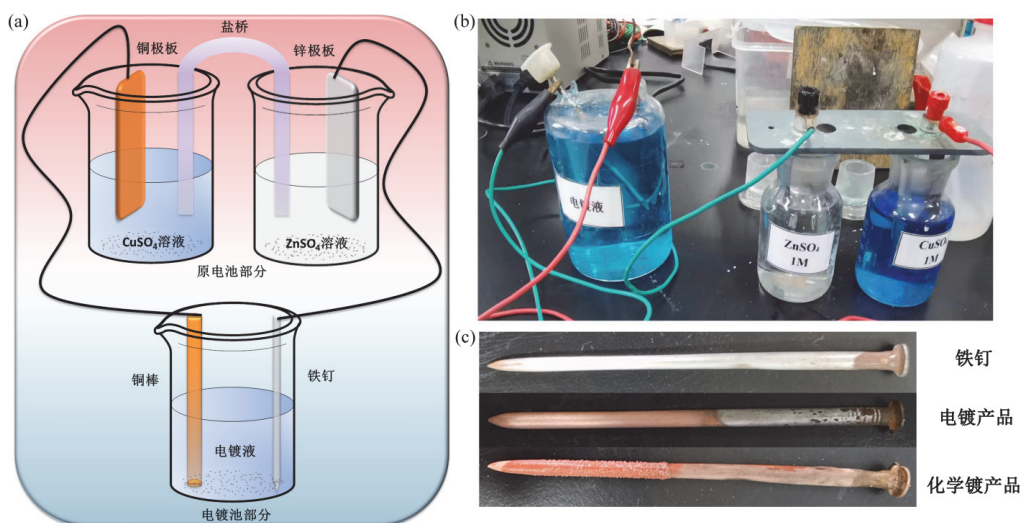


图2 (a) 铁钉镀铜装置示意图；(b) 实际装置图；(c) 铁钉电镀铜和化学镀铜前后对比

2.3 实验步骤

(1) 配制电镀液：将15.9 g无水CuSO₄，80.0 g无水草酸，70 mL氨水在水中溶解形成蓝色均一溶液后，定容至1 L备用；

(2) 量取200 mL电镀液至烧杯中；

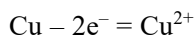
(3) 用砂纸打磨铜棒和铁钉表面，然后再将铁钉浸入1 mol·L⁻¹的HCl溶液持续1–2 min，除去表面氧化层；

(4) 将直流电源正极与铜棒连接，负极与铁钉连接，在电路电极都连接正确后，最后将阴极和阳极放入电镀液中，保证带电入槽，电镀反应持续15 min后，观察铁钉表面颜色变化；

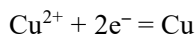
(5) 同时，试管中取5–8 mL 1 mol·L⁻¹的CuSO₄溶液，将同样的铁钉放入试管中反应15 min，取出后观察铁钉表面颜色变化。

2.4 实验现象与结果讨论

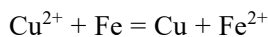
如图2所示，经过15 min电镀后将铁钉取出，可观察到铁钉浸入电解液的部分表面出现光亮的橙红色镀层，用蒸馏水冲洗并用卫生纸轻轻擦拭镀层不脱落。该现象表明铁钉表面经过电镀形成了致密平整的铜镀层，且镀层与铁钉结合较为牢固，电镀时阳极的铜棒发生氧化反应，电极反应如下：



阴极的铁钉表面发生还原反应，电极反应如下：



将试管中的铁钉取出，可观察到浸入CuSO₄溶液中的铁钉表面产生暗红色的絮状物，该絮状物用蒸馏水冲洗后，能够轻易被卫生纸擦拭掉，漏出白色的铁钉本体。该现象表明在溶液中铁钉与CuSO₄溶液发生了置换反应，反应离子方程式如下：



与电镀的铜镀层相比，化学置换表面生成的铜单质较为疏松，并且与铁钉表面结合不牢固(图2c)。

3 锌的析氢腐蚀

3.1 实验目的

- (1) 了解金属析氢腐蚀的原理。
- (2) 了解化学腐蚀和电化学腐蚀的原理和区别。

3.2 实验原理与实验设计

在中学化学中，根据金属活动性顺序表，氢前金属单质能够与稀盐酸发生置换反应，生成氢气和对应的金属离子。在实际生产生活中，活泼金属部件在酸性介质中发生反应，生成氢气和对应金属离子的腐蚀过程叫做析氢腐蚀。而析氢腐蚀又分为化学腐蚀和电化学腐蚀，其中化学腐蚀为一般的氧化还原反应，氢离子与金属通过表面接触反应生成氢气和金属离子，氢气生成和金属腐蚀发生在相同的地方；而电化学腐蚀则比较复杂，一般金属由于杂质等原因，在酸性环境中形成了微型原电池，此时活泼金属作为负极被腐蚀生成金属离子，不活泼的组分如碳等作为正极，氢离子在正极发生还原生成氢气，与化学腐蚀相比，电化学腐蚀氢气产生和金属离子腐蚀不在相同的位置，且反应速度比化学腐蚀快。因此在实际生产生活中，活泼金属部件需要进行特殊保护如镀层、涂层、阴极保护等办法进行防腐。

锌的化学腐蚀：将锌粒置于稀盐酸溶液中，观察气泡产生的位置和速率。

锌的电化学腐蚀：将锌粒置于稀盐酸中，并用铜棒接触锌粒，观察产生气泡的位置和速率。

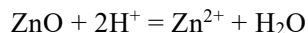
3.3 实验步骤

(1) 在试管中量取1–2 mL的0.1 mol·L⁻¹的稀盐酸，将锌粒置于其中，观察现象；反应1–2 min后，观察气泡产生的位置和速率；

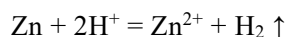
(2) 在上述试管中插入铜棒并与锌粒接触，反应1 min左右，观察气泡产生的位置和速率。

3.4 实验现象与结果讨论

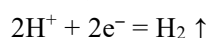
将锌粒置于稀盐酸中后，起初没有气泡产生，这是由于锌粒表面存在氧化膜，氧化锌与稀盐酸先发生反应，反应方程式如下：



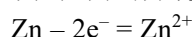
当反应1-2 min后，锌粒表面产生气泡，这是由于金属锌与溶液中氢离子发生了置换反应，反应方程式如下：



如图3所示，将铜棒伸入溶液并与锌粒接触，待反应稳定后，可观察到锌粒产生气泡的同时，铜棒上也产生气泡，并且气泡生成的速率比单纯化学腐蚀要快。此时电化学腐蚀与化学腐蚀同时发生，锌粒上产生气泡的原因是化学腐蚀的发生，铜棒上产生气泡的原因是电化学腐蚀的发生，电化学腐蚀发生时，铜棒作为正极，氢离子在此发生还原反应，反应方程式如下：



与此同时锌粒作为负极，发生腐蚀生成锌离子，反应方程式如下：



需要指出的是，一般情况下，化学腐蚀和电化学腐蚀是同时发生的，为了保证金属部件寿命，需要进行防腐，手段包括镀层、涂层、阴极保护等，而金属的腐蚀与防护也是目前生产生活中重要的技术。



图3 锌的析氢电化学腐蚀实验现象

4 铁钉的阴极保护

4.1 实验目的

- (1) 了解阴极保护的原理和作用。
- (2) 了解阴极吸氧过程的原理和条件。
- (3) 了解牺牲阳极的原理。

4.2 实验原理与实验设计

阴极保护法作为常用的防护手段，广泛应用于金属的腐蚀防护。其原理是将被保护的金属部件与直流电源的负极相连作为阴极，降低金属部件的电极电势，使其低于氢或氧的还原电势，而将活泼金属与直流电源正极相连作为牺牲阳极。当处在酸性介质中时，氢离子在阴极发生还原反应产生氢气，即析氢过程；当处在中性或弱碱性环境中时，空气中的氧气在阴极发生还原反应生成氢氧根，与此同时，牺牲阳极自身发生氧化反应生成相应金属离子，整个过程牺牲阳极不断消耗，阴极被保护免遭腐蚀。一般情况下，采取大阴极小阳极的方式，使金属的阴极防护更加经济有效。

铁钉的阴极保护：将小铁钉与实验1中原电池的正负极相连，并与中性电解液接触，待反应一段

时间后，利用酚酞和铁氰化钾溶液作为指示剂，观察电极周围颜色的变化，推断电极上发生的化学反应(图4a)。

4.3 实验步骤

- (1) 配制 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Na_2SO_4 溶液和质量分数为0.1%的铁氰化钾溶液备用；
- (2) 在表面皿上滴加 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Na_2SO_4 溶液1 mL，0.1%的铁氰化钾溶液3滴，混合均匀作为腐蚀液；
- (3) 取 $2\text{ cm}\times 2\text{ cm}$ 的滤纸，用上述配制好的腐蚀液充分浸润滤纸片；
- (4) 取两根小铁钉，分别与实验1中的原电池正负极相连，并将两根铁钉分别与滤纸接触，接触点相距 $0.5\text{--}1\text{ cm}$ 左右，反应1 min后观察滤纸与铁钉接触位置的颜色变化；
- (5) 反应2 min左右，向电极周围滤纸片上滴加1滴酚酞溶液，观察电极周围颜色变化。

4.4 实验现象与结果讨论

如图4b所示，反应1 min后，滤纸片上与原电池正极相连的铁钉周围产生深蓝色圆斑，这是由于阳极发生损耗，铁单质失去电子形成铁离子，而铁离子进一步与铁氰酸根反应生成 $\text{Fe}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]_2$ 蓝色沉淀导致的，并且随着时间的推移，蓝色越来越深，圆斑面积越来越大，反应方程式如下：

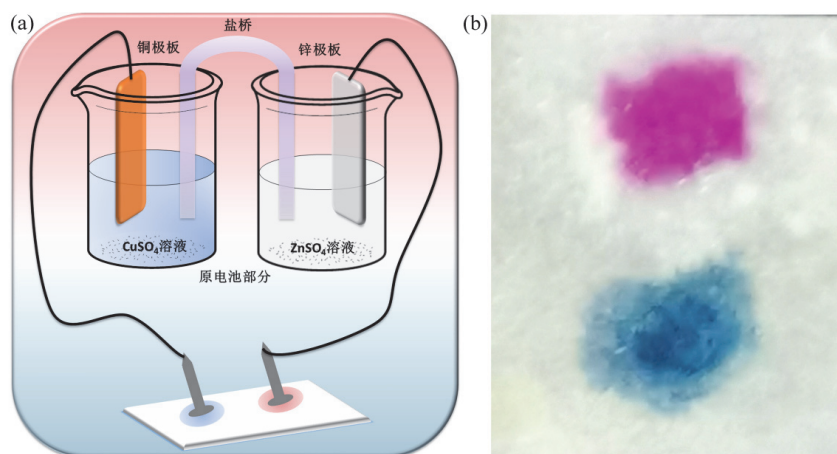
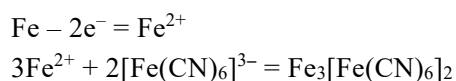
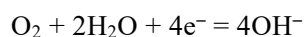


图4 (a) 铁钉阴极保护装置示意图；(b) 反应后滤纸颜色变化

反应2 min后，向电极周围滴加1滴酚酞溶液，发现阴极铁钉周围出现红色圆斑，并且随着时间推移，红色越来越深，圆斑面积越来越大，并且阴极周围无蓝色圆斑生成。这是由于阴极铁钉被保护没有发生腐蚀，而阴极附近发生吸氧反应生成 OH^- ，使阴极附近溶液pH升高，碱性环境下酚酞变色导致的，反应方程式如下：



需要指出的是，酚酞试剂一般需要在反应2 min后滴加，显色较为明显，如果在配制腐蚀液的时候滴加酚酞，有可能使酚酞在电化学环境中失活，无法观测到红色圆斑的出现。此外，阴极周围pH是逐渐升高的，如果滴加酚酞过早，有可能由于pH未达到酚酞变色的范围而只观察到蓝色圆斑，此时需要继续反应待红色圆斑出现为止。

5 思考题

- (1) 原电池实验中，为什么要打磨锌板和铜板？

(2) 原电池实验中, 盐桥的作用是什么? 在电动势测量过程中将盐桥取出, 电压表度数会发生什么变化? 为什么?

(3) 原电池实验中, 电压表测得的数值是否是电池电动势的值? 测量值比电动势真实值偏大还是偏小? 为什么?

(4) 在铁钉镀铜实验中, 电镀与化学镀得到的镀层的区别是什么? 为什么?

(5) 在锌粒与稀盐酸反应中, 铜棒接触锌粒后为何表面会产生气泡? 气泡产生速率与之前相比是增加还是降低? 为什么?

(6) 在铁钉的阴极保护实验中, 阴阳极发生的反应各是什么? 腐蚀液的pH随反应进行是如何变化的?

6 结语

化学是一门实验科学, 大部分理论是在严谨的科学实验的基础上提出和修正的, 因此实验教学在化学知识学习过程中具有举足轻重的作用。在高中化学教育和非化学专业本科生大学化学、普通化学教育过程中, 实验教学不仅要作为课本知识的延伸, 能够帮助学生更好地理解书本知识, 提升学生的动手能力, 还需要引起学生对化学学科的兴趣, 激起学生探索化学世界的好奇心, 培养学生格物致知的化学思维, 吸引更多学生投身化学事业。该系列实验可以作为高中化学教学的展示实验, 也可作为理工科非化学专业一年级、二年级本科生的实验教学内容。笔者在多班次的本科实验教学过程中发现, 学生对于镀铜的铁钉和铁钉阴极保护实验中的颜色变化非常感兴趣, 这也表明了该系列实验不仅起到了巩固课堂知识的作用, 还引起了学生的兴趣, 促进了学生对化学实验的热情。希望通过更多更完善的实验设计, 吸引一批感兴趣、动手灵、思维强的学生投身化学学科。

参 考 文 献

- [1] 周凡宇, 曾晋珏, 王学斌. 动力工程学报, **2024**, *44* (3), 396.
- [2] 鲁佩芳, 阮少军. 中国资源综合利用, **2024**, *42* (1), 100.
- [3] 张博轩, 崔金星, 李智芳, 杨长龙. 化学通报(印刷版), **2023**, *86* (7), 784.
- [4] 高淳, 刘欣, 王明慧, 刘淑贤, 朱婷婷, 张怡康, 郝二军, 杨启亮. 有机化学, **2024**, *44* (3), 673.
- [5] 李原婷, 杨韵涵, 王俊刚, 唐意红, 张素霞, 韩生. 大学化学, **2024**, *39* (1), 229.
- [6] 人民教育出版社课程教材研究所, 化学课程教材研究开发中心. 普通高中教科书 化学 选择性必修1 化学反应原理. 北京: 人民教育出版社, 2020: 95-121.
- [7] 大连理工大学无机化学教研室. 无机化学. 第5版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [8] 朱永明, 胡会利, 于元春, 李旭东, 高鹏. 大学化学, **2024**, *39* (8), 44.
- [9] 张雪倩, 李妙妙, 侯之国, 张天文, 马小航. 广州化工, **2023**, *51* (3), 248.
- [10] 杨甫林, 李家欣, 冯立纲. 大学化学, **2023**, *38* (9), 242.
- [11] 程鹏玮, 罗镇, 车钰灿, 刘欲文, 柯福生, 程功臻. 大学化学, **2022**, *37* (11), 2207146.
- [12] 黄华良, 卜福荣, 苏建宇. 化学教育, **2019**, *40* (10), 53.
- [13] 袁振东, 乔腾, 葛丽丽, 胡晶茹. 化学教育(中英文), **2018**, *39* (11), 28.
- [14] 颜红侠, 张运生, 何嫣赞, 王艳丽, 闫毅. 化学教育(中英文), **2023**, *44* (4), 41.
- [15] 颜静, 耿旺昌, 姚东东, 闫毅. 大学化学, **2020**, *35* (7), 104.
- [16] 颜静, 姚东东, 史涛涛, 耿旺昌, 张宝亮, 闫毅. 化学教育(中英文), **2019**, *40* (10), 34.
- [17] 宗蒙, 黄英, 秦建彬, 孙然. 山东化工, **2023**, *52* (6), 78.
- [18] 王艳艳, 高玲香, 张伟强, 顾泉, 简亚军, 高子伟. 大学化学, **2022**, *37* (12), 2112020.
- [19] 郝仕油, 赵国良. 大学化学, **2017**, *32* (11), 65.