

## 基于锌空电池探究能斯特方程影响因素及固态锌空电池的应用

高文琪, 范晓艳, 王飞翔, 傅镛君, 张璟\*, 胡恩来\*, 宫培军\*

浙江师范大学化学与材料科学学院, 浙江 金华 321019

**摘要:** 针对无机化学中能斯特方程的教学难点, 本实验引入紧跟科学前沿的锌空电池为教学模型, 通过改变电极氧化型和还原型浓度来探究能斯特方程影响因素, 加深学生对于电化学过程的理解。同时将柔性电子技术引入实验课堂, 以安全环保的卡拉胶作为固态电解质, 引导学生学习、搭建固态锌空电池, 并对其进行电池电压与弯曲角度的性能测试。此外, 培养学生创造力, 自主设计搭建多形态固态锌空电池, 并对用电器进行供电。本实验紧密结合基础电化学知识, 密切联系科研前端技术, 使学生在加深对能斯特方程理解的同时, 能够认识和制作柔性电子器件, 激发学生对电化学课程的学习兴趣, 且教学成本低、效果好。

**关键词:** 能斯特方程; 锌空电池; 柔性电子; 固态电解质

**中图分类号:** G64; O6

## Exploring Nernst Equation Factors and Applications of Solid Zinc-Air Battery

Wenqi Gao, Xiaoyan Fan, Feixiang Wang, Zhuojun Fu, Jing Zhang\*, Enlai Hu\*, Peijun Gong\*

College of Chemistry and Materials Science, Zhejiang Normal University, Jinhua 321019, Zhejiang Province, China.

**Abstract:** Addressing the challenges in teaching the Nernst equation in inorganic chemistry, this experiment introduces the cutting-edge zinc-air battery as a teaching model. By altering the concentration of oxidizing and reducing materials, students explore the key factors of the Nernst equation, enhancing their understanding of electrochemical processes. Simultaneously, the experiment incorporates flexible electronics technology, using carrageenan as a safe and environmentally friendly solid electrolyte to guide students in learning and constructing solid zinc-air batteries. The batteries are tested for voltage performance at various bending angles to assess their flexibility. Moreover, to foster creativity, students design and build various forms of solid zinc-air batteries to power electronic devices. This experiment is closely aligned with fundamental electrochemical knowledge and state-of-the-art technology, allowing students to deepen their understanding of the Nernst equation while gaining practical experience in creating flexible electronic devices. This approach sparks students' interest in electrochemistry and proves cost-effective with promising results.

**Key Words:** Nernst equation; Zinc-air battery; Flexible electronics; Solid electrolyte

国家能源局印发《“十四五”现代能源体系规划》，实施可再生能源替代行动，推动构建新型电力系统。因此，为促进“新时代新能源高质量发展”新政，电化学基础教学迫在眉睫。而电化学是无机化学教学的重点和难点，无机化学中的电化学部分是对电化学理论知识的简单介绍，该模块以

收稿: 2023-10-10; 录用: 2024-02-02; 网络发表: 2024-03-11

\*通讯作者, Emails: jingzhang@zjnu.edu.cn (张璟); huenlai@zjnu.edu.cn (胡恩来); skygpj@zjnu.cn (宫培军)

基金资助: 国家级大学生创新创业训练计划项目(202310345011); 国家自然科学基金青年项目(22209150); 浙江省课程思政示范课程《无机化学(一、二)》项目(2022-72); 浙江师范大学初阳学院课程建设资助项目(2024-14)

能斯特方程为核心,讨论电极电势的影响因素及相关计算<sup>[1,2]</sup>。目前,针对能斯特方程的实验教学采用铜锌原电池为模型,探究电对、溶液浓度对电极电势的影响。实验内容面临电池模型陈旧、前沿联系不紧密等现状<sup>[2]</sup>。因此,调研现有无机化学实验教材,并查阅国内外电化学前沿相关文献,设计创新型电化学基础实验。旨在实现以学生为主体、培养能力的目标;将学术研究和前沿成果融入教学内容,激发学生专业学习兴趣;利用线上教学平台系统构建课前、课中、课后全过程教学体系,提升教学深度、拓展教学广度,促进知识理解;设计新颖、前沿实验教学内容锻炼学生探索、分析和解决问题的能力,提升课程内容的高阶性和创新性。

锌空电池受到人们的高度关注,发表众多研究论文和综述,广泛应用于铁路、航海灯标、助听器等领域。它具有能量密度高、体积小、质量轻等特点,紧跟科学前沿;同时具备绿色环保安全、稳定性好、成本低等优势,适合本科教学。锌空电池是固液气多相电池体系,可通过改变气液两相探究电极电势的影响因素。柔性穿戴设备也逐渐进入人们的视野,如柔性电子标签、柔性显示屏、柔性智能穿戴设备等<sup>[3-8]</sup>。柔性电子具有灵活性优异、应用前景广阔等特点,将柔性电子技术与锌空电池结合,作为固态锌空电池引入课堂教学,打破学生对电池体系传统认知。

本实验提出采用锌空电池这一前沿模型,探究能斯特方程的影响因素,不仅更新了电池模型,而且有利于学生直观认识电化学过程。此外,采用安全易得且成本低的卡拉胶作为固态电解质,自行组装搭建固态锌空电池,通过电池的趣味应用,在教学中培养学生动手创造的能力。本实验教学过程包括课前预习、课堂实验探究、课后数据分析与讨论3个中心环节。利用锌空电池新知识和固态电解质新技术,学习能斯特方程影响因素及应用所涉及的原电池核心知识,加深学生对电化学基本概念和理论知识的理解掌握,培养学生的实践应用能力和创新思维。

综上所述,本实验提出如下三个解决思路及目的:首先,探究锌空电池电极电势的影响因素,掌握能斯特方程在多相电化学体系中的应用;其次,理解固态电解质在锌空电池中的应用及意义;最后,了解新型柔性锌空电池组装及测试技术。如图1为本新创实验的提出思路。

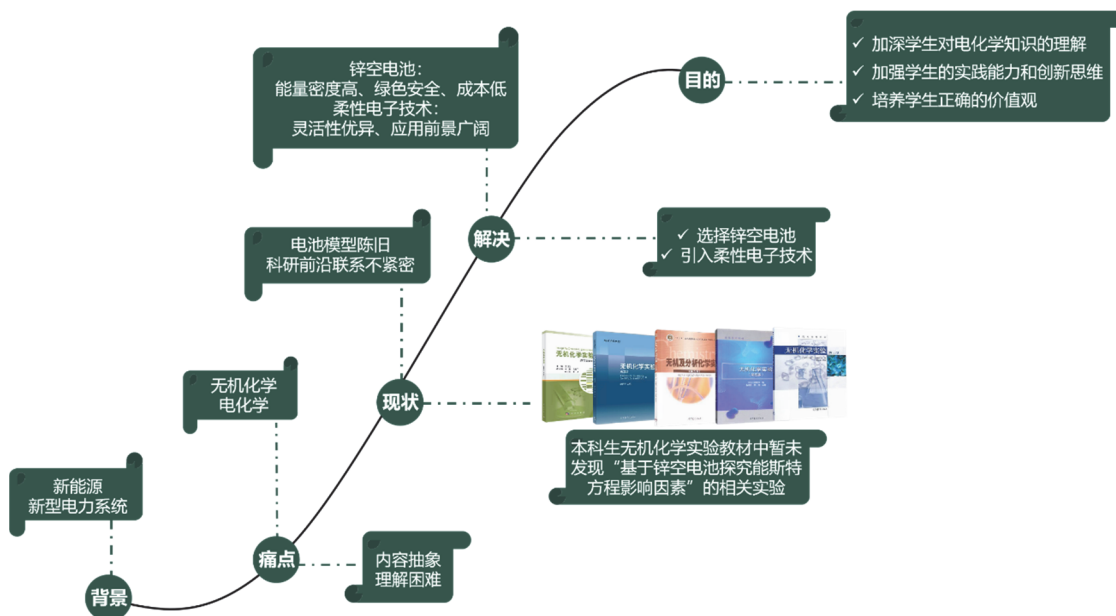


图1 新创实验的思路大纲

## 1 实验部分

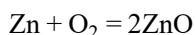
### 1.1 实验原理

#### 1.1.1 锌空电池

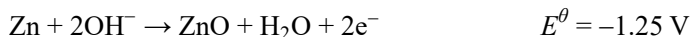
经典的锌空电池是一种半开放体系,一般由锌金属阳极、开放的空气阴极、碱性的水系电解质

和隔膜四个部分组成。

放电时的反应方程式：



负极反应方程式：



$$E = E^\theta + \frac{0.059 \text{ V}}{z} \lg\left(\frac{1}{[\text{c}(\text{OH}^-)]^2}\right)$$

正极反应方程式：



$$E = E^\theta + \frac{0.059 \text{ V}}{z} \lg\left(\frac{p(\text{O}_2)}{[\text{c}(\text{OH}^-)]^4}\right)$$

本实验把锌片作为负极，导电碳纸作为正极，以KOH溶液作为电解质组装锌空电池。通过改变负极还原型浓度(KOH)和正极氧化型浓度(O<sub>2</sub>)来探究能斯特方程的影响因素。

### 1.1.2 卡拉胶

卡拉胶可溶于约80 °C热水中，形成粘性、轻微乳白色的易流动溶液，冷却后即可形成凝胶。卡拉胶中存在的大量羟基等亲水基团(如图2)，可以与电解质中的OH<sup>-</sup>形成氢键，发生传导；此外，K<sup>+</sup>可与卡拉胶上的硫酸基结合，改善卡拉胶的柔韧性。

卡拉胶来源广泛，成本低，无毒无害，安全环保，制作工艺简单，性能稳定，适合本科生实验教学使用。因此，本实验采用卡拉胶制作固态电解质以组装固态锌空电池(如图3)。

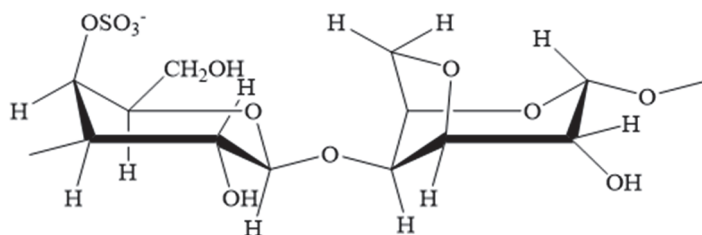


图2 卡拉胶化学结构式

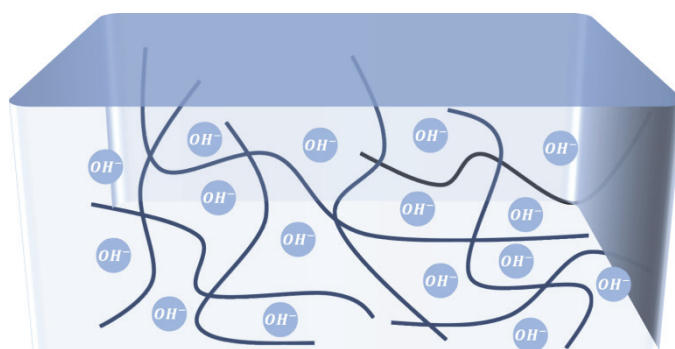


图3 卡拉胶水凝胶固态电解质示意图

### 1.1.3 柔性电子组装原理

常见的柔性电子组装方式有一维的线性结构、二维的平面结构等。

一维线形结构锌空电池一般采用同轴电缆结构，从内到外分别为锌阳极、固态电解质和多孔阴极，如图4(a)所示。二维平面结构锌空电池一般由锌阳极、固态电解质和多孔阴极按“三明治”结构叠加组成，如图4(b)所示。三明治结构是固态锌空电池中应用最早、最广泛的电池设计之一。

本实验主要采用三明治结构组装固态锌空电池。串联时，可用锡箔纸作为外部电路将两个组装好的固态锌空电池的正负极连接起来，以此类推，可串联若干个固态锌空电池。固态锌空电池具有良好的柔韧性，可灵活弯折而不影响电池性能，如图4(c)所示。

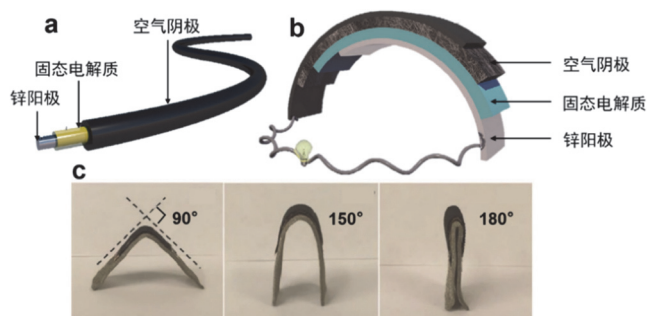


图4 (a) 一维纤维结构<sup>[9]</sup>; (b) 二维三明治结构<sup>[9]</sup>; (c) 弯折角度<sup>[10]</sup>

均改编自wiley出版社

## 1.2 试剂或材料

本实验所用主要试剂及材料如表1所示。

表1 本实验所用试剂与材料

试剂及材料名称	纯度及规格	制造商或提供商	试剂及材料名称	纯度及规格	制造商或提供商
氢氧化钾	分析纯	上海国药集团化学试剂有限公司	锡箔纸	-	台州市万锋日用品有限公司
卡拉胶	分析纯	上海迈瑞尔化学技术有限公司	气体袋	-	湖南可孚医疗科技有限公司
锌片	-	清河县金瓯金属材料有限公司	发光二极管	-	深圳科比微半导体有限公司
锌箔	-	清河县金瓯金属材料有限公司	LED灯带	-	深圳科比微半导体有限公司
碳纸	-	台湾碳能	Type-C充电线	-	深圳市诺亚讯科技有限公司
碳布	-	德国SGL	导线	-	深圳科比微半导体有限公司
泡沫镍	-	德国SGL	电池模具	-	清河县金瓯金属材料有限公司

## 1.3 仪器和表征方法

本实验所用主要仪器如表2所示。

表2 本实验所用主要仪器

仪器名称	型号	制造商或提供商
磁力搅拌器	LC-MSB-HD	上海力辰邦西仪器科技有限公司
分析天平	2011F145-11	赛多利斯科学仪器(北京)有限公司
冰箱	BL-300EX/SM	广州安菲环保科技有限公司
电压表	DLX-UA9233B	杭州德力西集团有限公司

## 1.4 实验步骤/方法

### 1.4.1 液态锌空电池

(1) 电池模具组装。

准备好模具零件，插入螺丝，从下到上依次将隔板—碳纸—隔板放入，盖上盖板拧紧螺丝，最后放入锌片，电池模具组装完成，三视图如图5。

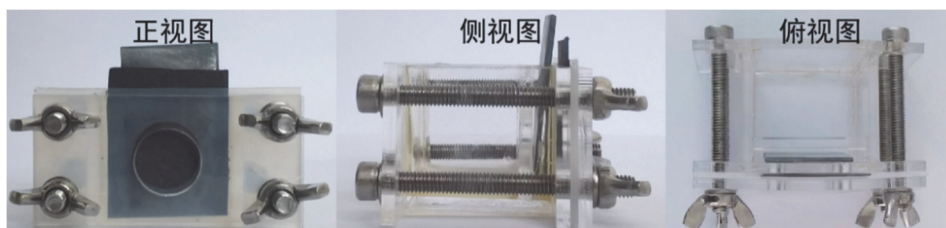


图5 电池模具正视、侧视、俯视图

(2) 负极还原型浓度对电池电极电势的影响。

用容量瓶依次配制浓度为0.05、0.1、0.5、1、2 mol·L<sup>-1</sup>的KOH溶液，向电池模具中加入KOH溶液，向正极处通入空气用电压表测量碳纸和锌片两极间的电池电压，如图6。依次改变KOH浓度，再次测量(每次测量前需对锌片进行打磨)。记录不同KOH浓度下的电池电压。

(3) 正极氧化型浓度对电池电极电势的影响。

在不同KOH浓度下向正极处通入氧气、空气、氮气，用电压表测量碳纸和锌片两极间的电池电压，如图6，记录电池电压，三者进行对比。

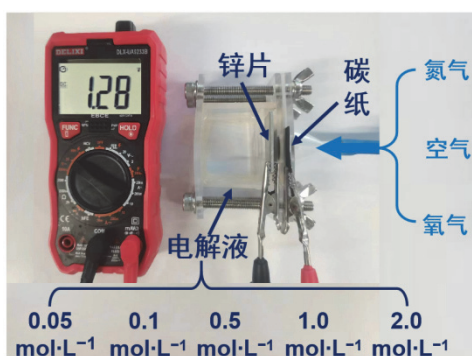


图6 不同变量下的电池电压测试

## 1.4.2 固态锌空电池

(1) 卡拉胶的合成。

卡拉胶A:

配制4% (质量分数)的卡拉胶溶液，用磁力搅拌器搅拌1.5 h后，将卡拉胶均分成若干份(约40 g 卡拉胶溶液为一份)，分别转移至200 mm培养皿中并盖上保鲜膜，在85 °C下加热至溶胶微微冒泡(约5 min)，加热过程可微微摇动培养皿使溶胶厚度均匀，将其置于冰箱中冷藏至溶胶凝固(约2–3 min)，制得果冻态卡拉胶A。

用刮刀将卡拉胶A取出，裁割成2 cm × 2 cm的正方形，将卡拉胶A分别浸泡于0.05、0.1、0.5、1、2 mol·L<sup>-1</sup> KOH溶液约20 min。

卡拉胶B:

称取0.8 g卡拉胶粉末溶于9 mL蒸馏水中后，加入1.0 g KOH固体溶解，用磁力搅拌器搅拌5 min后，85 °C下加热至溶胶微微冒泡(约5 min)，制得豆沙态卡拉胶B。

(2) 固态锌空电池的组装。

把打磨好的锌箔、碳布均裁割成2 cm × 2 cm的正方形，按照三明治结构将锌箔、卡拉胶A、碳布组装成固态锌空电池，如图7。

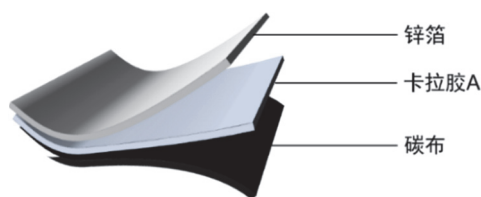


图7 固态锌空电池示意图

用电压表测上述组装好的固态锌空电池电压，并记录数据。

对在 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  KOH溶液浸泡过的卡拉胶A组装的固态锌空电池进行不同角度( $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $150^\circ$ 、 $180^\circ$ )的弯折，再分别用电压表测其电池电压，并记录。

(3) 固态锌空电池的应用。

把打磨好的锌箔、泡沫镍均裁割成 $1\text{ cm}\times 4\text{ cm}$ 的矩形，以锡箔纸作为外部电路导电连接锌箔和泡沫镍，在锌箔上均匀涂敷卡拉胶B后将泡沫镍贴附在上面，以此类推串联若干固态锌空电池，如图8。



图8 一体式固态锌空电池实体图

将发光二极管、LED灯带、Type-C手机充电线的正负极分别与固态锌空电池的正负极连接，观察用电器的工作情况并记录。

## 2 结果与讨论

### 2.1 液态锌空电池

#### 2.1.1 负极还原型浓度对电池电极电势的影响

如图9所示，随着KOH浓度增加，锌空电池电压从 $1.15\text{ V}$ 上升到 $1.31\text{ V}$ ，将电压与 $\lg(\text{OH}^-)$ 进行线性拟合可以发现电压与 $\lg(\text{OH}^-)$ 有良好的线性关系，相关系数 $R^2 = 0.9950$ 。

这表明：电池电压受负极还原型浓度影响，随氢氧根浓度升高而增大，其变化符合能斯特方程。

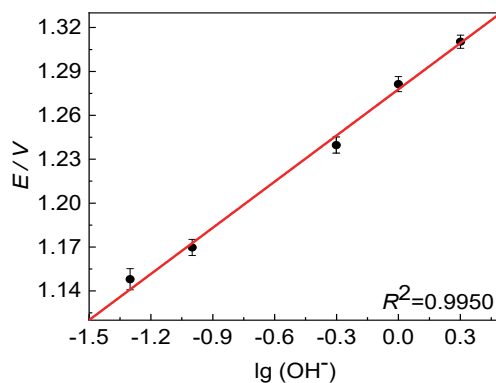


图9 电压-KOH浓度变化图

### 2.1.2 正极还原型浓度对电池电极电势的影响

如图10所示, 以向正极处通入空气(中浓度氧气)为基准, 可以得出向正极处通入氮气(低浓度氧气)后, 电池电压有较大幅度的下降。而向正极处通入氧气(高浓度氧气)后, 电池电压又有所提高。这表明: 电池电压受正极氧化型浓度影响, 随氧气浓度升高而增大, 其变化符合能斯特方程。

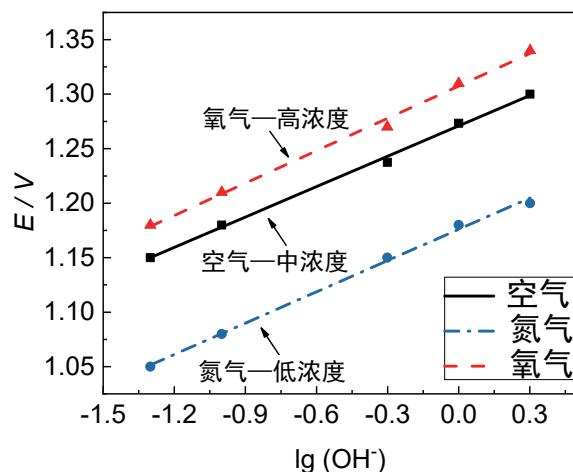


图10 电压- $O_2$ 浓度变化图

## 2.2 固态锌空电池

### 2.2.1 负极还原型浓度对电池电极电势的影响

如图11所示, 随着浸泡固态电解质的KOH浓度的增加, 固态锌空电池电压从0.59 V上升到1.16 V, 将电压与 $\lg(OH^-)$ 进行线性拟合可以发现电压与 $\lg(OH^-)$ 有类似于液态锌空电池中的良好的线性关系, 相关系数 $R^2 = 0.9919$ 。

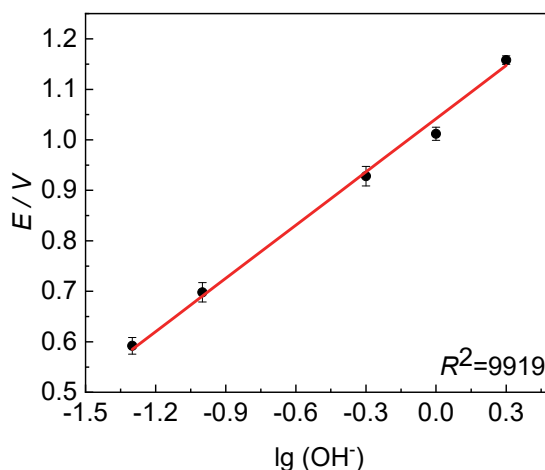


图11 电压-KOH浓度变化图

这表明: 电池电压受负极还原型浓度影响, 随氢氧根浓度升高而增大, 进而说明能斯特方程在固态电池中仍适用。

### 2.2.2 正极还原型浓度对电池电极电势的影响

如图12所示, 对固态锌空电池分别进行不同角度的弯曲试验, 测得其电压均不发生变化。这表明: 固态锌空电池可以进行任意角度弯折而仍保持其电化学性能。

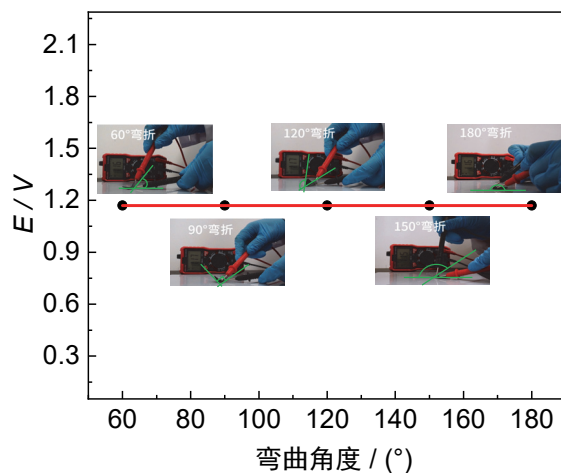


图12 电压-弯曲角度变化图

### 2.2.3 实际应用

固态锌空电池通过一定方式的串联，可以实现给多种用电器供电，如图13，可以使LED彩带、二极管发光外，还能给智能手机充电，可应用于实际生活。同时构建柔性可穿戴电池的基础模型(如图14)，电池穿戴在手臂上能给LED灯带供电，将电池部分剪断仍能LED灯带发光，再将电池完全剪断后LED灯带不发光，最后将剪断的电池进行拼接仍可以正常给LED灯带供电。可见，对电池进行破坏性试验不会造成危险，并且破坏后的电池拼接后仍能正常工作。这表明：固态锌空电池是一款安全环保且易实现可穿戴的储能器件。

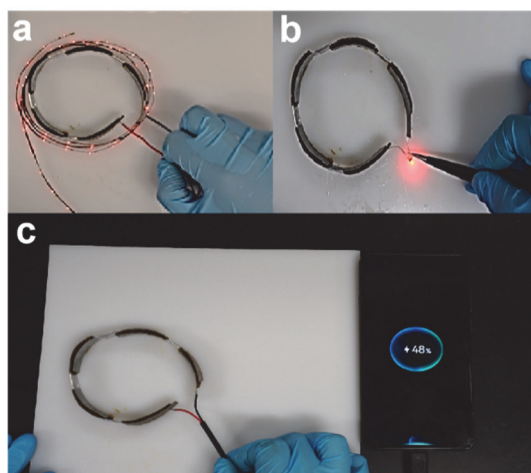


图13 (a) LED彩带；(b) 发光二极管；(c) 智能手机充电

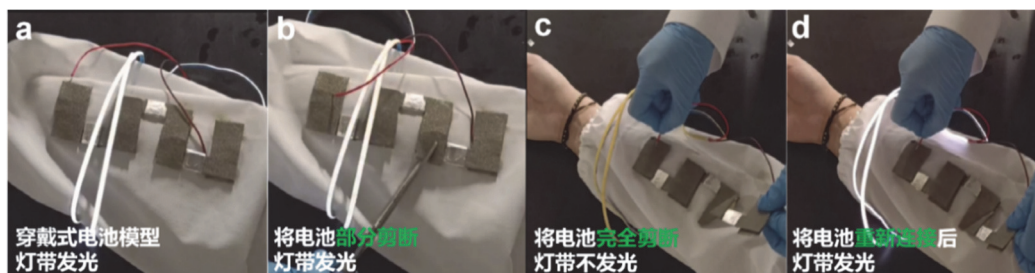


图14 固态锌空电池破坏性实验

### 3 结语

锌空电池目前是新能源领域的研究热点，作为一种新型电池模型，它性能稳定且涉及的电化学内容相当丰富，与基础电化学教学的要求相契合。本实验既通过液态锌空电池对能斯特方程的影响因素进行深入探究和剖析，又开展了固态锌空电池的制备和组装进行知识延伸和技术拓展，非常有利于加深学生对基础电化学课程内容的理解。亦紧密结合科学前沿，有助于培养学生的思维能力；也开拓学生的“锌”视野，激发学生开展科学研究的兴趣。

该实验的时长约为4 h，3-4人一组完成实验，实验具有操作简单、安全、绿色环保、成本低等教学优势，适合作为各大高校化学专业基础电化学实验开展。实验可分为线上线下资源学习与归纳总结，实验方案设计，锌空电池搭建及实验结果讨论分析，相关拓展应用探究。设置实验思考题，引导学生对液态锌空电池性能和固态锌空电池组装等进行思考，提高学生的自主学习和研究能力。整个实验由小组成员合作完成，增强团队协作能力，实验具体内容如图15。学生通过本实验可以基于锌空电池这一固液气电化学体系探究电极电势的影响因素，掌握能斯特方程在多相电化学体系中的应用，以及了解固态锌空电池的组装应用，加强学生勤于思考、善于动手的科学精神，真正做到“知行合一”。同时，实验设计评分表利于各大高校对学生能力进行评估。

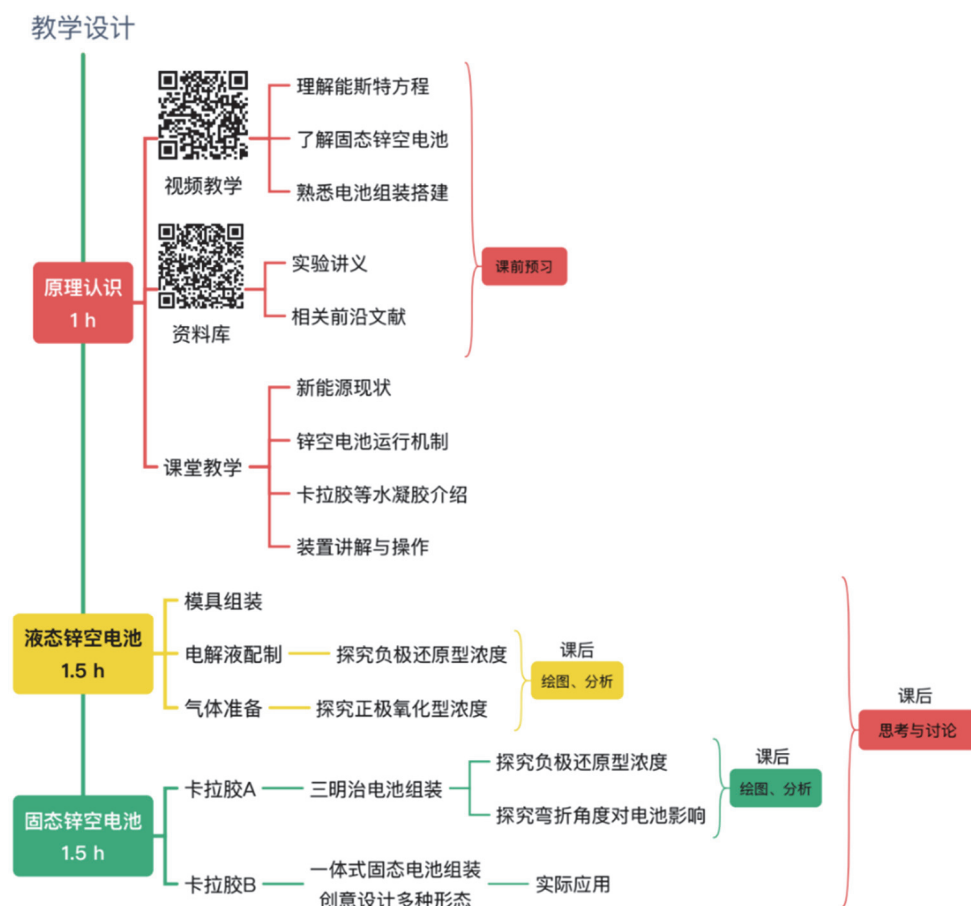


图15 实验具体内容

### 4 创新性/特点/特点声明

- (1) 实验聚焦电化学前沿研究热点，更新教学电池模型，激发学生的科研热情。
- (2) 实验引入柔性技术，自行设计搭建固态锌空电池，引发学生兴趣。
- (3) 紧密联系国家重大战略需求，将新能源技术引入本科实验教学。

参 考 文 献

- [1] 郭慧林, 程永亮, 蒋海英. 大学化学, **2023**, *38* (8), 293.
- [2] 刘洋, 侯磊, 张小娟, 李怀珠, 徐维霞, 高丰琴, 张引莉. 大学化学, **2023**, *38* (9), 60.
- [3] Wei, Y.; Shi, Y.; Chen, Y.; Xiao, C.; Ding, S. *J. Mater. Chem. A* **2021**, *9* (8), 4415.
- [4] Fu, J.; Cano, Z. P.; Park, M. G.; Yu, A.; Fowler, M.; Chen, Z. *Adv. Mater.* **2017**, *29* (7), 1604685.
- [5] Hopkins, B. J.; Chervin, C. N.; Long, J. W.; Rolison, D. R.; Parker, J. F. *ACS Energy Lett.* **2020**, *5* (11), 3405.
- [6] Li, Y.; Lu, J. *ACS Energy Lett.* **2017**, *2* (6), 1370.
- [7] Liu, X.; Fan, X.; Liu, B.; Ding, J.; Deng, Y.; Han, X.; Zhong, C.; Hu, W. *Adv. Mater.* **2021**, *33* (31), 2006461.
- [8] Stock, D.; Dongmo, S.; Janek, J.; Schröder, D. *ACS Energy Lett.* **2019**, *4* (6), 1287.
- [9] Zhang, T.; Wu, N.; Zhao, Y.; Zhang, X.; Wu, J.; Weng, J.; Li, S.; Huo, F.; Huang, W. *Adv. Sci. (Weinh)* **2022**, *9* (6), 2103954.
- [10] Fu, J.; Lee, D. U.; Hassan, F. M.; Yang, L.; Bai, Z.; Park, M. G.; Chen, Z. *Adv. Mater.* **2015**, *27* (37), 5617.