

从蛋白质到储能材料——可食用的明胶果冻电解质

张欣然^{2,†}, 刘思旗^{2,†}, 陈钺池^{3,†}, 邹庆立^{1,*}, 徐庆红^{1,*}, 黄雅钦²

¹北京化工大学化学学院, 北京 100029

²北京化工大学材料科学与工程学院, 北京 100029

³北京化工大学国际教育学院, 北京 100029

摘要: 明胶是动物结缔组织中的胶原蛋白经过适度水解得到的高分子材料, 其具有溶胶-凝胶可逆性。本实验借助明胶的溶胶-凝胶可逆性以及果汁中富含的金属离子, 制备了明胶果冻电解质材料和系列电解反应的科普简易装置。通过趣味性教学展示和适宜于大众直接参与动手的简易实验, 使大众深入了解水果电池的根本原理以及金属离子在明胶内部被固化溶液环境中的运动转移特性, 进而认识普通电池工作的内在机制。本科普实验不但将凝胶电解质材料在能量储存和转化方面的巨大优势充分展现在大众面前, 促进公众对天然大分子和电解质科学的了解、提高科技创新认知以及激发他们的科学兴趣, 具有极高的社会价值。本科普实验所用材料价廉易得且绿色环保, 实验过程没有安全隐患, 达到用大众熟悉的材料创新性地实现普及科学知识之目的。

关键词: 明胶; 溶胶-凝胶转变; 水系电池; 凝胶电解质; 柔性电池

中图分类号: G64; O6

From Protein to Energy Storage Materials: Edible Gelatin Jelly Electrolyte

Xinran Zhang^{2,†}, Siqi Liu^{2,†}, Yichi Chen^{3,†}, Qingli Zou^{1,*}, Qinghong Xu^{1,*}, Yaqin Huang²

¹ College of Chemistry, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 102299, China.

² College of Material Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 102299, China.

³ School of International Education, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 102299, China.

Abstract: Gelatin, a macromolecular biopolymer derived through controlled hydrolysis of collagen from animal connective tissues, exhibits thermoreversible sol-gel properties. Leveraging this unique characteristic combined with metal ions naturally present in fruit juices, we developed gelatin-based jelly electrolyte materials and constructed a series of accessible electrochemical demonstration devices. Our science communication approach integrates engaging educational demonstrations with hands-on experiments, enabling the public to gain deeper insights into the fundamental principles of fruit-based batteries, the ion transport mechanisms within constrained gelatin matrices, and the operational fundamentals of conventional battery systems. This initiative effectively showcases the superior performance of gel electrolytes in energy storage applications while enhancing public understanding of natural macromolecules and electrochemical science. The experimental design employs low-cost, readily available materials with complete environmental compatibility and operational safety, successfully achieving its goal of innovative science education through familiar everyday substances.

收稿: 2024-08-24; 录用: 2024-10-16; 网络发表: 2025-04-30

[†]共同第一作者, 对本文工作同等贡献

^{*}通讯作者, Emails: xuqh@mail.buct.edu.cn (徐庆红); qlzou@buct.edu.cn (邹庆立)

基金资助: 北京化工大学德智体美劳教育教学改革研究专项基金(2021BHDJGYB22); 北京化工大学实验教学改革研究项目(SYJG2022010, SYJG2022011); 国家自然科学基金项目(52242208)

本科实验荣获第四届全国大学生化学实验竞赛华北区赛科普赛道一等奖

Key Words: Gelatin; Sol-gel transition; Aqueous batteries; Gel electrolyte; Flexible batteries

1 引言

明胶是通过酸法、碱法或酶法适度水解动物结缔组织中的胶原蛋白分子而得到的一种大分子材料^[1,2]。明胶具有溶胶-凝胶的可逆转变特性^[3]，即在加热的条件下(通常40 °C以上)，形成溶胶状态，而温度降至明胶的凝胶点以下时形成凝胶，过程具有可逆性。因此，明胶基水凝胶在食品、医药和储能领域应用广泛，同时也是研究的热点^[4,5]。随着新能源领域的快速发展，人们对高容量、长寿命和高安全的可穿戴电池要求不断提高，新型的凝胶电解质被不断开发出来。但由于该领域涉及到诸多学科的交叉，广大群众对其中涉及的科学知识认识度还较低^[6]。

为了增加公众对凝胶电解质的认识和普及该方面的知识，本课题组借助于明胶所具有的溶胶-凝胶可逆性特点，从公众熟悉的电化学知识及果冻入手，制备了明胶果冻电解质材料，并设计了一系列简单安全、具有观赏性且具有储能及电解反应的简易科普实验装置，探究了不同种类果汁对明胶电解质的溶胶-凝胶可逆转变特性的影响。整个科普实验过程现象明显且具有很强的观赏性，安全环保，适用于在不同年龄段学生以及社会大众中推广。本课题组已经与北京市某小学五年级、初中二年级和北京化工大学一年级本科生就本科普实验进行了互动。同学们对本科普实验表现出浓厚的兴趣，他们自主设计系列模具、教具并亲自完成了整个实验过程。实验后，同学们纷纷表示，通过该科普实验加深了他们对自然科学的认识理解程度，体味到了科学的乐趣。

本科普实验将教、学与探究紧密结合，极大地促进公众对天然大分子和电解质科学的了解、提高科技创新认知以及激发他们的科学兴趣，具有极高的社会价值。

2 实验部分

本科普实验原理简单、材料价廉易得、操作安全，很容易在实验室或实验室外对大中小学生或社会大众进行现场展示。

2.1 明胶果冻电池的工作原理简介

明胶分子是由多个氨基酸分子组成，呈现出纤维状，在溶胶状态下处于无序状态，分子链彼此交错、纠缠^[7]。当温度降低、分子之间相互作用，溶胶通过氢键形成凝胶，形成三维网状结构。当温度升高时，凝胶结构被破坏，分子重新回到溶胶状态。这一过程充分显示了明胶的“溶胶-凝胶可逆性”(如图1所示)^[8]。

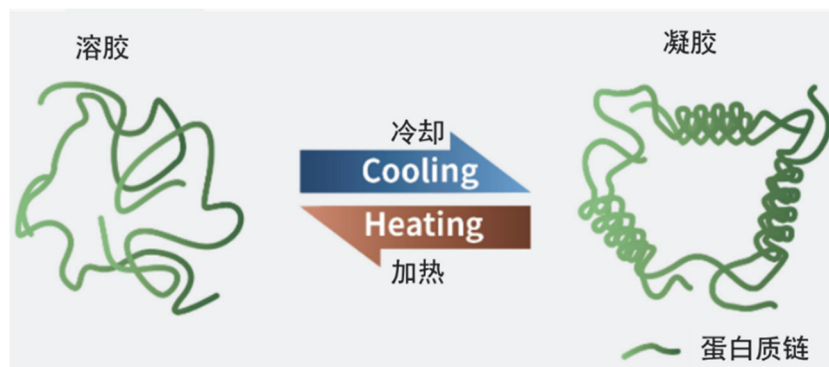
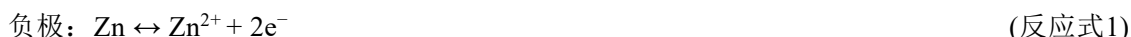


图1 明胶的溶胶-凝胶可逆性原理示意图^[8]

本科普实验利用明胶的“溶胶-凝胶可逆性”，将明胶加入水果果汁中溶解后凝胶，制备了明胶基果冻电解质。果汁中含有大量的水，可供明胶吸水形成具有多孔结构的三维水凝胶网络，这种结构提供了离子传输的通道。同时，果汁中还含有多种金属阳离子和一些有机酸根阴离子，可以作为

凝胶电解质的离子源，离子浓度的提升增加了它们的传输能力，使这种凝胶电解质的离子电导率显著提高。

我们使用了稳定、安全的水系 MnO_2 -Zn二次电池体系，电池主要由二氧化锰正极、金属锌负极和上述凝胶电解质三部分组成。以 Zn^{2+} 嵌入/脱出原理为例，电池体系负极和正极的反应方程式如反应式1和反应式2所示：



在电池放电过程中，电子经外电路从负极流向电池正极；在电池内部，大量离子在凝胶电解质中迁移，维持电池内部的电荷平衡。锌负极提供锌离子，通过凝胶电解质迁移至二氧化锰正极并嵌入形成新相，过程中伴随 MnO_2 的还原反应($\text{Mn(IV)} + \text{e}^- \rightarrow \text{Mn(III)}$)。在电池充电过程中， Zn^{2+} 重新沉积回负极，同时正极发生氧化反应($\text{Mn(III)} - \text{e}^- \rightarrow \text{Mn(IV)}$)恢复成 MnO_2 ，以此实现二次电池反复储能和释能的功能(如图2(a)所示)^[9,10]。以加入一定量的橙汁为例，实验制备的电池容量约为 $250\text{--}300 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ ，电压为 1.4 V ，为可充放的二次电池。在后续涉及点亮 2.5 V 发光二极管相关实验中，实验者将2个或多个凝胶水果电池进行串联使用，点亮该元器件。

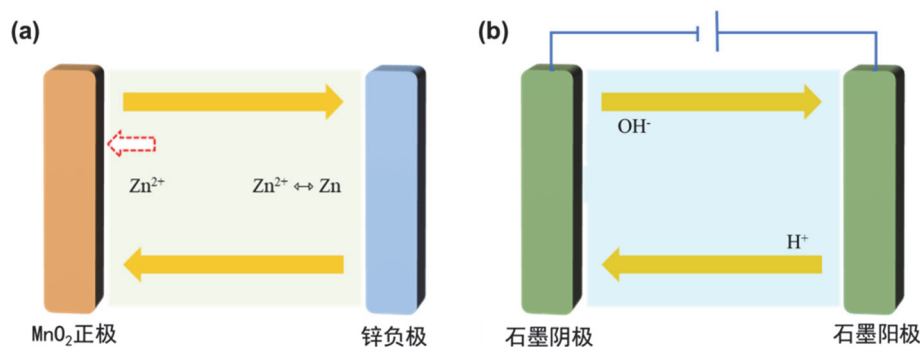


图2 水果电池电化学反应原理

(a) 水果电池电荷储存机制示意图^[9,10]; (b) 电解池离子迁移示意图

为拓展实验的内容，本研究还使用上述凝胶电解质搭建了电解池模型。分别以石墨棒作阴极和阳极、以明胶凝胶作电解质，接通电源后，凝胶电解质中的水分子开始被还原，生成氢气和氧气。电解池体系阴极和阳极的反应方程式如下：



在电解过程中，电极附近会出现显著的pH变化。在阴极附近，由于生成了氢氧根离子，阴极附近pH值上升。在阳极附近，由于生成了质子，pH值下降。电解过程中的离子还会在电场作用下移动，阴极处生成的氢氧根离子向阳极移动，阳极处生成的氢离子向阴极移动(如图2(b)所示)。离子移动减少了电解质中的pH变化，使远离电极的pH趋向于中性。

2.2 试剂或材料

本实验中所涉及的化学试剂均购自北京化学试剂厂，试剂和材料规格如表1所示。

2.3 仪器和表征方法

用辰华660C工作站(上海辰华仪器公司产品，控制电位： $\pm 10 \text{ V}$ ，电流： $\pm 250 \text{ mA}$ ，电位分辨率： 0.1 mV)对凝胶电解质进行交流阻抗测试和时间电流曲线测试；用UNI-T数字万用表(广州柏莱科技有限公司产品)对电池电压和电流进行测试。

用S4700扫描电子显微镜(日本日立公司产品)观察明胶基凝胶电解质的微形貌。

表1 实验材料和试剂

原料及试剂名称	规格	生产单位
柠檬汁	-	自制
橙汁	-	自制
草莓汁	-	自制
菠萝汁	-	自制
黑枸杞浸渍液	-	自制
明胶	猪皮明胶	罗塞洛(温州)明胶有限公司
二氧化锰(MnO ₂)	AR, ≥ 85.0%	上海阿拉丁科技股份有限公司
铝箔	AR, ≥ 99.0%	合肥科晶材料技术公司
钛箔	AR, ≥ 99.0%	合肥科晶材料技术公司
去离子水	分析纯	-
发光二极管	2.5 v/20 mA	连云港美华电子科技有限公司
3D打印耗材	UV树脂	深圳市创想三维科技股份有限公司

2.4 实验步骤

2.4.1 明胶/果汁水凝胶的制备

(1) 果汁的提取

以橙汁制备为例。取一定量橙子，挤入烧杯中静置，用纱布(或其他过滤方式)分离，得到果汁液(如图3步骤a、b所示)。用上述方法制备草莓汁、柠檬汁、菠萝汁。

(2) 溶胶电解质的制备

称取6 g明胶，加入54 g果汁中，在40 °C以上水浴加热条件下溶解，得到明胶质量分数10 wt%的溶胶电解质(如图3步骤(c)、(d)、(e)、(f))。

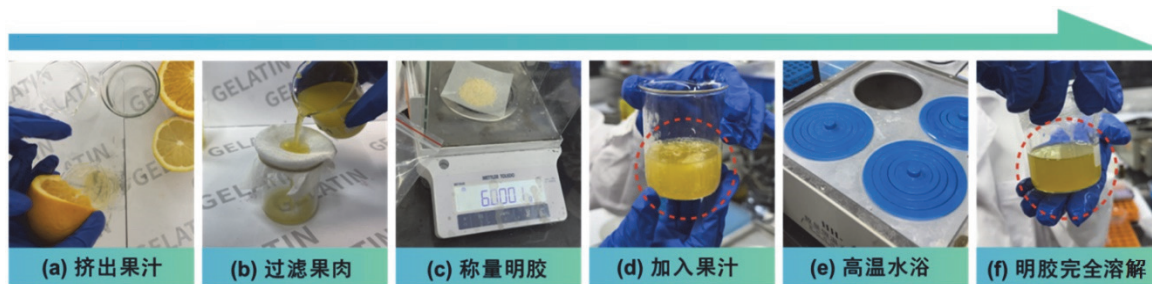


图3 用橙汁制备的明胶基凝胶电解质溶液及其制备过程图

(3) 凝胶电解质的溶胶-凝胶可逆性测试

将10 mL上述溶胶电解质倒入20 mL样品瓶中，在低温环境中静置5 min取出，用倒置瓶法观察电解质是否胶凝。结果显示，用草莓汁、橙汁、柠檬汁制备的明胶溶胶能在较低温度下形成凝胶，但菠萝汁配制的明胶溶胶在低温下不会胶凝(如图4)，故后续实验不再使用菠萝汁。这是因为菠萝汁中的酸或蛋白酶会影响明胶分子结构^[11]。最后将用草莓汁、橙汁、柠檬汁制备的凝胶电解质再次水浴加热，观察到凝胶重新转变为溶胶的过程，验证了明胶水凝胶的溶胶-凝胶可逆特性。

(4) 明胶基凝胶电解质的形貌及元素分布

从图5可以发现，所制的明胶基凝胶电解质孔径约10 μm。孔道中存在的一定量水分子使凝胶具有柔性。当明胶中加入果汁(橙汁、草莓汁或柠檬汁)后，果汁所提供的金属离子(如锌离子、锰离子

等)在 MnO_2 -Zn电池放电过程中具有重要的作用,为电池提供可以自由移动的锌离子,同时锰离子又能够保证正极材料的稳定性,帮助锌离子在具有三维结构的 MnO_2 电极中嵌入和脱出。

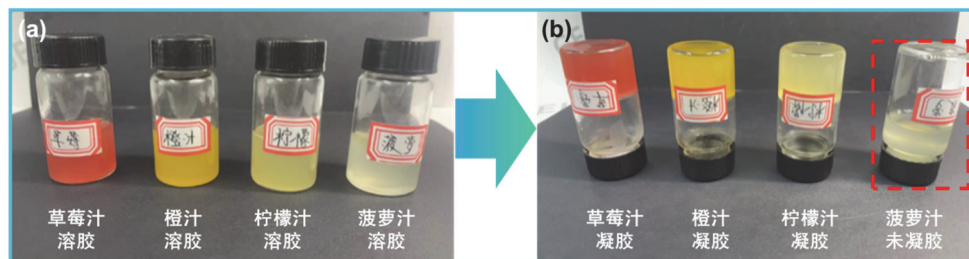


图4 倒置瓶法观察不同水果果汁凝胶状态

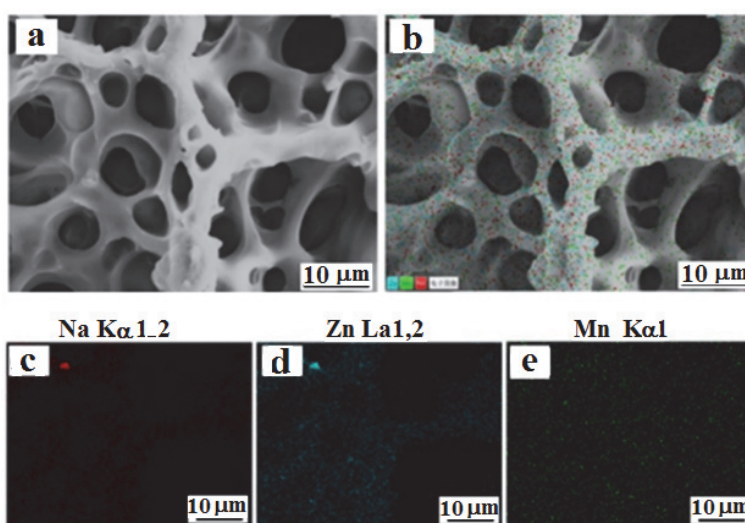


图5 明胶基凝胶电解质的微观形貌和元素分布:以橙汁制备的凝胶电解质扫描电子显微镜照片(a)及相应元素分布图(b)

(c: 钠元素, d: 锌元素, e: 锰元素。b、c、d、e中标识不同元素的颜色前后一致)。电子版为彩图,下同

2.4.2 科普及器件的设计

(1) 电解质成型模具设计制备

为制备不同厚度果冻电池,我们设计并制备了圆柱状电解质成型模具。模具由底面为圆形的柱体和底座组成,如图6(a)所示。将柱体安装在底座上,通过控制向模具中倒入的电解质溶胶的量,就可以制备不同厚度的凝胶电解质。

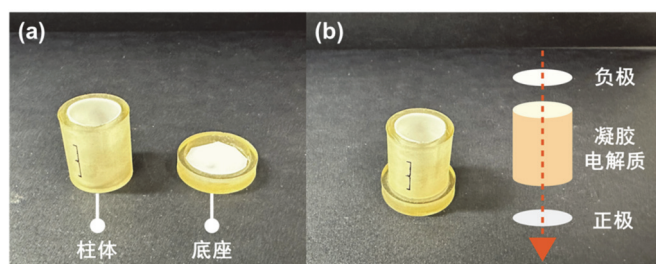


图6 所设计适用于电解质原位成型模具实物图

(a) 电解质成型模具零件; (b) 电解质成型模具的组装

(2) 电池仓模具的设计

我们设计了能调整正负极间距、适用于不同电解质厚度的圆柱形电池的电池仓模具。电池仓模具由3D打印的电池仓主体、接线柱和螺母组成，如图7(a)所示。通过组装这些零件可以得到完整的电池仓模具，如图7(b)所示。只需调节接线柱和螺母的位置，就可以调整正负极的间距，使具有不同电解质厚度的电池与电路良好接触。

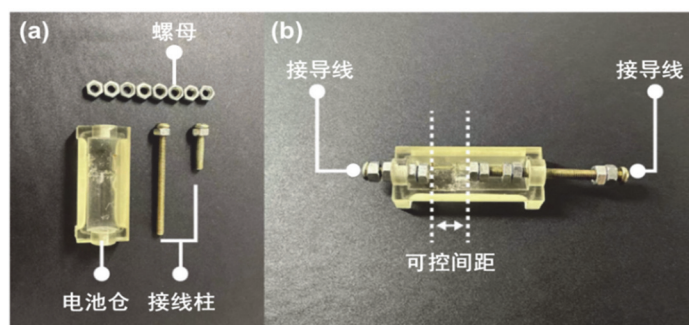


图7 所设计适用于小型圆片状电池的电池仓模具实物图

(a) 电池仓模具零件; (b) 电池仓模具的组装

(3) 双态电池展示用教具的设计和制备

为展示电解质状态对不稳定工况下电路的影响，我们设计制备了实验教具。教具由三部分组成，分别是可旋转的电池盒、能够支撑电池的支架及能够根据电流大小而改变亮度的模拟电器(猫头灯)，如图8所示。

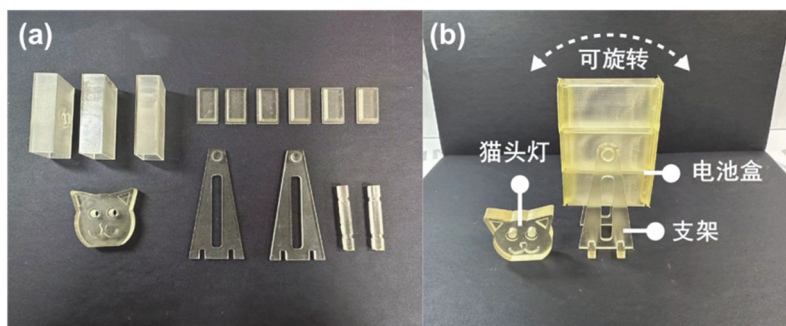


图8 所设计制备的双态电池展示用教具的实物图

(a) 双态电池展示用教具零件; (b) 双态电池展示用教具的组装

2.4.3 果冻电池组装及性能探究

(1) 不同电解质厚度的圆柱状果冻电池制备及性能测试

如图9所示，将制备好的 MnO_2 正极和商用锌箔裁成直径为12 mm圆片。以橙汁为例，将三部分模具组合成圆筒，用盖子封住。将正极片放入筒底，灌入凝胶电解质后将负极片放在顶端。将模具放入冰箱冷藏5 min后取出脱模，得到柔性电池。通过控制模具中加入的电解质质量，可得到不同厚度圆柱状凝胶电解质(5 mm、10 mm和15 mm)。

由于橙汁中含有无机盐，所制备的锌锰二次电池电压在1.4 V左右(其他果汁制备的二次电池接近该电压值)，基于 Zn^{2+} 嵌入/脱出机制，电极反应如式1和式2(详见2.1部分)^[12]。

用电化学工作站进行交流阻抗测试，如图10所示。在电解质内部盐的种类和浓度一定、电解质固含量一定情况下，随着电解质厚度的增大，电池内部阻抗不断升高。

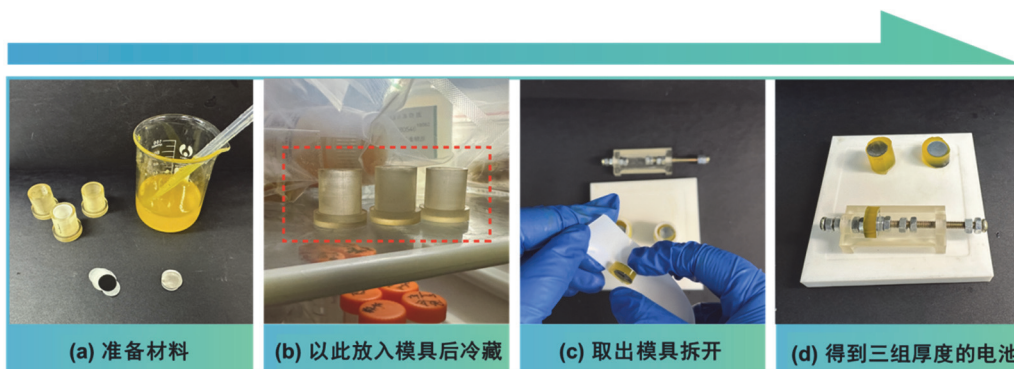


图9 圆柱状电池制备过程示意图

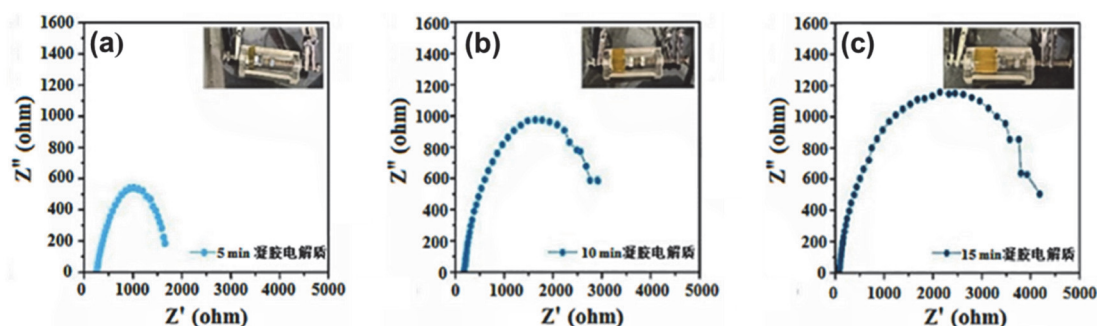


图10 不同厚度凝胶电解质对电池内部阻抗的影响

(a) 用5 mm明胶基凝胶电解质组装的 MnO_2 -Zn电池交流阻抗图谱；(b) 用10 mm明胶基凝胶电解质组装的 MnO_2 -Zn电池交流阻抗图谱；(c) 用15 mm明胶基凝胶电解质组装的 MnO_2 -Zn电池交流阻抗图谱

(2) 果冻电池中化学反应过程及离子定向扩散

为了更好地观察电化学反应过程中凝胶电解质中的pH变化，我们将明胶溶解于黑枸杞浸渍液中，制备“多彩凝胶电解质”。这是因为黑枸杞中富含可以充当酸碱指示剂的花青素，花青素在酸性环境中会吸收氢离子，形成烯醇形的酸式盐，通常呈现出红色或者紫色；在碱性环境下则失去一个质子，形成负电荷，并与阳离子结合形成蓝色或黄绿色的醌式盐(图11)^[13]。

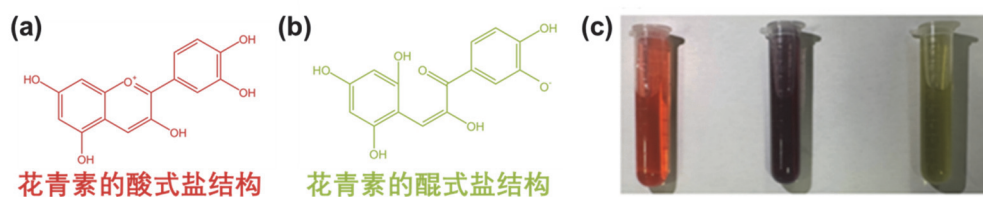


图11 花青素显色的原理

(a) 花青素的酸式盐结构，呈现出红色；(b) 花青素的醌式盐结构，呈现出黄绿色；(c) 不同pH值条件下花青素呈现不同的颜色^[13]

将“多彩凝胶电解质”置于烧杯中，将两根石墨棒插入电解质中作阴极和阳极。通电后，电极反应式如3和式4(详见2.1部分)。电解过程中的析氢、析氧现象可以通过电极附近产生的气泡观察到。由于析氢和析氧过程改变了电解质的局部环境pH值，电极附近的电解质显示出不同颜色。电池反应产生的氢离子和氢氧根离子在凝胶电解质中发生扩散，证明了凝胶电解质具有良好的传导离子功能(图12)。

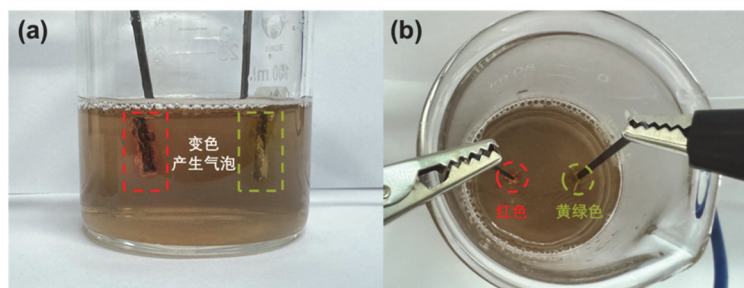


图12 多彩凝胶电解质

(a) 电解过程中电极附近变色和析氢和析氧现象；(b) 阳极呈现红色，阴极呈现黄绿色

(3) 双态电池组装及性能测试

如图13所示。以橙汁为例，将 MnO_2 正极和商用锌箔裁成 $40\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 长方形片。将负极放在长方体管电池壳一端，并用盖子压入，极耳外露。将果汁溶胶从另一端注入，填充至电池壳1/2容积处，用同样的方法封住正极。共组装3个电池，并进行串联。

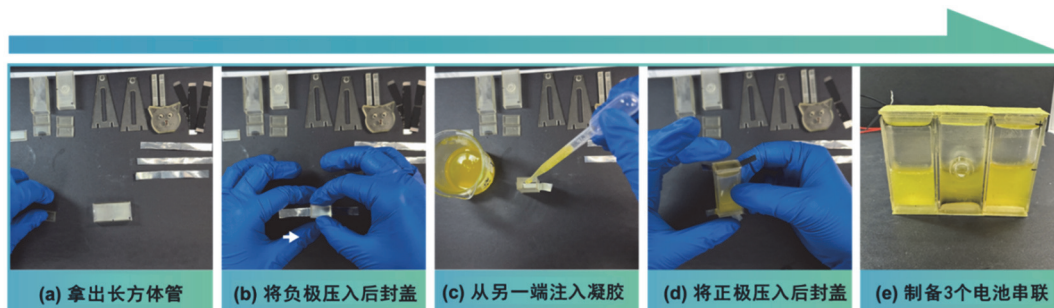


图13 双态电池的组装过程示意图

将另外一组注有橙汁溶胶的电池模具置于低温环境中，使其呈凝胶态，取出后通过旋转来控制电池内部的通断情况；将所制的双态电池连接至电化学工作站，测试其不同状态(凝胶态和溶胶态)下的时间与电流关系曲线。

如图14所示。通过分析不同状态电解质电池的时间与电流曲线发现，电池工作状态与电解质的状态相关^[6]。凝胶态电解质组装电池不受旋转工况的影响，持续稳定地向外界提供 $120\text{ }\mu\text{A}$ 电流。对于溶胶态电解质组装电池，当电池平行于水平面时，电解质浸润正极和负极，电池向外提供约 $230\text{ }\mu\text{A}$ 的电流；当电池垂直于水平面时，电解质很难浸润正极和负极，电池内部只有壁上形成的微弱液流能提供离子的传递，电池向外提供约 $20\text{ }\mu\text{A}$ 的电流。

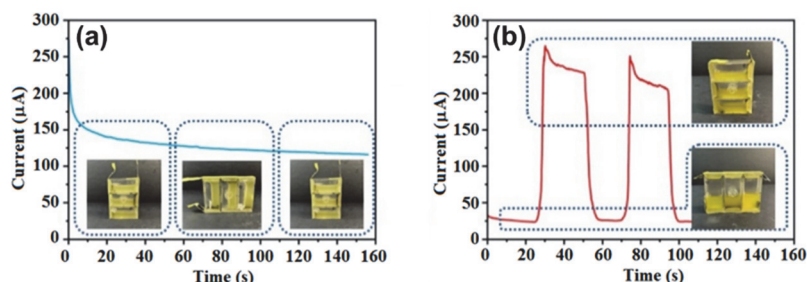


图14 双态电池不同状态条件下的时间电流曲线

(a) 凝胶态下 $\text{MnO}_2\text{-Zn}$ 电池的时间电流曲线；(b) 溶胶态下 $\text{MnO}_2\text{-Zn}$ 电池的时间电流曲线

3 科普展示和互动方案

2.4小节中的实验步骤需要用到如电化学工作站、3D打印机、恒温水浴锅等较为昂贵的仪器，且使用了较为复杂的表征手法，导致可供科普的地点受限。在本节我们将展示更加“日常化”“生活化”的科普展示和互动方案，使本科普实验可以走出实验室，面向更多受众。

3.1 互动实验方案

3.1.1 果汁电解质的溶胶-凝胶实验

为了让科普实验可以走进大众的生活，以2.4.1小节设计的实验为基础，增加了采用硅胶果冻模具作为科普实验的道具，该模具不但廉价易得，还可以产出造型更加精美的凝胶电解质果冻，使实验更具趣味性。按2.4.1小节的方法制备溶胶电解质后，将其倒入果冻模具，放入冰箱冷藏，取出用玻璃棒按压果冻即可检查其凝胶情况，如图15所示。

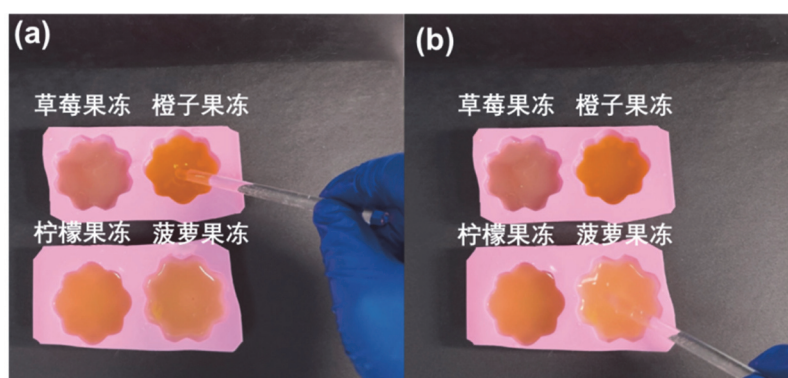


图15 用玻璃棒测试果冻凝胶情况

(a) 橙子果冻富有弹性；(b) 菠萝汁溶解的明胶未形成凝胶

3.1.2 从果冻到果冻电池

取出两个果冻，准备好一个贴有导电铜片的承载物和两对极片，将果冻和极片按照图16(a)的示意图摆放，两个电池串联。将发光二极管正负极分别接触果冻电池的正负极，二极管发出明亮的光。

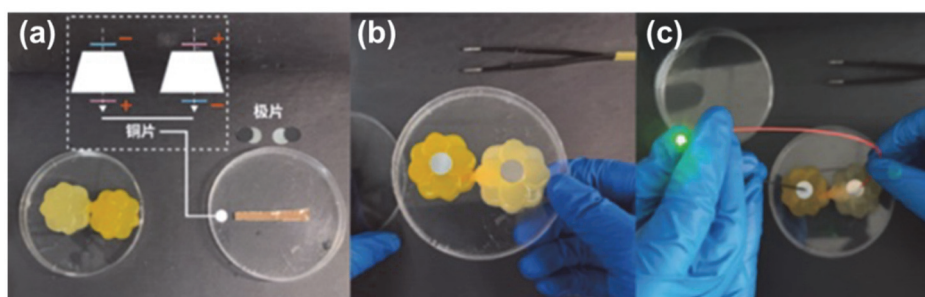


图16 点亮果冻电池

(a) 材料和组装示意图；(b) 电池串联组装体；(c) 点亮发光二极管

继续探究果冻厚度对电池内部阻抗的影响。由于2.4.3小节交流阻抗测试比较复杂，我们采用发光二极管的亮度来反映电池内部阻抗的大小。用果冻模具制备两组果冻，通过控制倒入模具中电解质溶胶的量来控制果冻的厚度，其中一组果冻厚度是另一组的约2倍，按图17的方法组装成电池，在黑暗中进行试验。由图17(b)和17(c)看出，接入厚果冻电池的发光二极管亮度不如薄果冻电池，即薄果冻电池电路中的电流强度更大，证明厚度对电池内阻有显著影响。

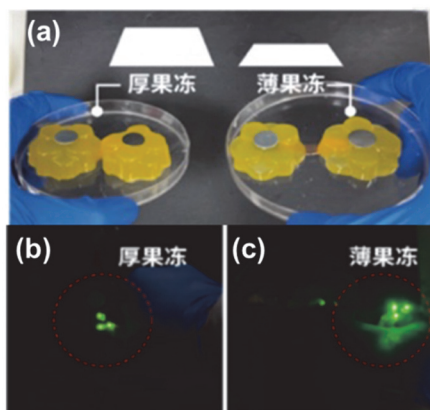


图17 不同厚度果冻电池点亮发光二极管

(a) 不同果冻电解质组装电池形貌；(b) 厚果冻点亮亮度；(c) 薄果冻点亮亮度

3.1.3 可以弯折的果冻电池手环

为了进一步提升科普互动实验的趣味性，我们设计了可以弯折的果冻电池手环。如图18(a)所示，准备好 50×20 mm带有 10×10 mm极耳的正负极片3组，以及 50×20 mm单层卫生纸3张。先将正极粘在纸胶带上，再将卫生纸覆盖在正极上。随后将橙汁溶胶均匀滴加在卫生纸上，盖上负极，用纸胶带将串联部位粘住使其相接。整个电池送入冰箱冷藏10 min后取出。接上发光二极管成功点亮(图18e)。随后用透明胶带对电池进行封装，然后连接发光二极管。通过各种弯曲扭拧动作测试，发光二极管可保持明亮，如图19所示。利用草莓汁和柠檬汁做实验，亦能够得到上述结果。

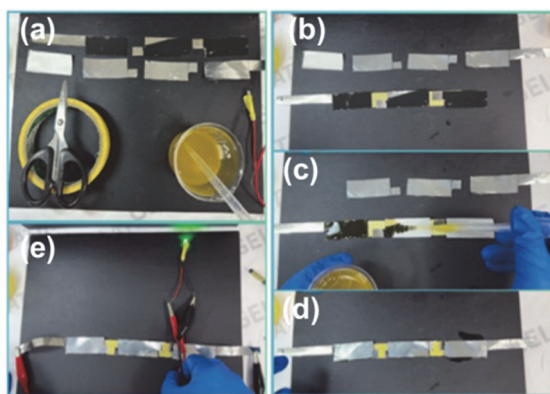


图18 制作果冻电池手环示意图

(a) 准备材料；(b-d) 组装步骤；(e) 成功点亮发光二极管

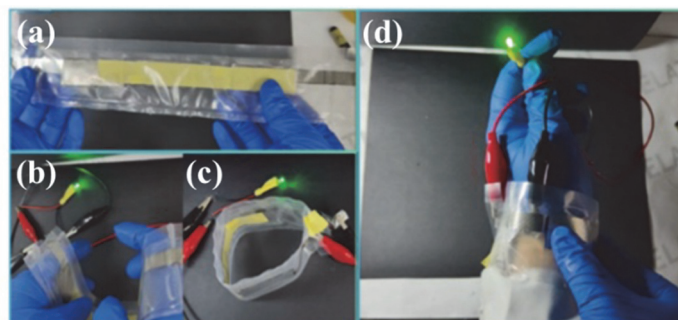


图19 电池封装和测试示意图

(a) 封装电池；(b)和(c) 弯曲电池；(d) 电池手环点亮灯泡

3.1.4 神奇的变色凝胶

将黑枸杞浸入水中得到花青素溶液，用花青素溶液溶解明胶，然后加入占溶液质量分数1%的 Na_2SO_4 增加体系的导电性，待 Na_2SO_4 全部溶解后将溶胶加入硅胶果冻模具，待胶凝后取出，制得可以变色的凝胶电解质。购买市面上常见的2B铅笔铅芯作石墨电极，插入果冻凝胶中。接通电源后即可观察实验现象(图20)。绚丽的颜色变化可以激发受众的好奇心，促使其了解现象背后的实验道理。

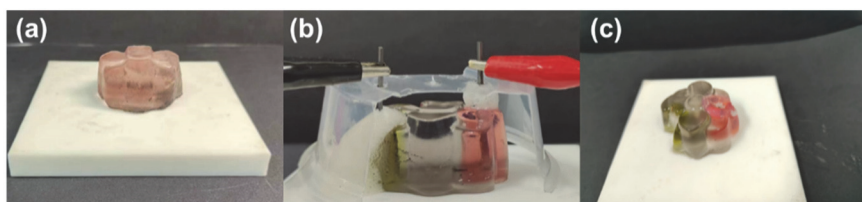


图20 电解变色凝胶

(a) 电解前凝胶形貌；(b) 电解过程中产生的颜色改变与气泡；(c) 电解后凝胶形貌

3.2 展示实验方案

我们不仅设计了可以动手的互动实验，还设计了展示实验。按照图13方法制备3个电池串联的电池仓，将电池仓安装在支架上使其可以旋转，并将正负极和柠檬猫头灯相连，观察猫眼的亮度。图21(a)和(b)为凝胶态电池，随电池旋转，猫眼亮度不变。图21(c)和(d)为溶胶态电池。图21(c)中，正负极之间几乎没有电解液时，猫眼暗淡；当电解液浸润正负极(图21(d))，猫眼发出明亮的光，且比凝胶态更亮。该实验可以促使受众去思考凝胶电解质对不稳定工况的适应能力，揭示了这种前沿电解质优势。

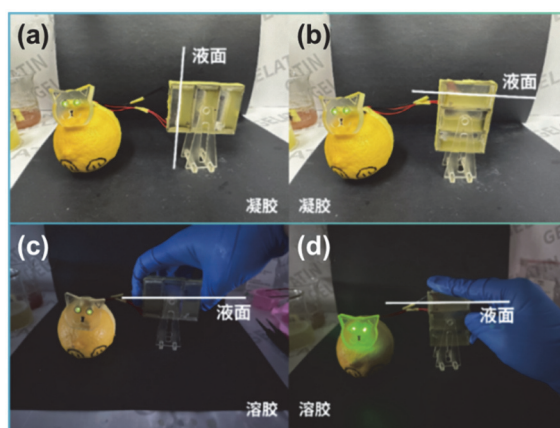


图21 双态电池使猫眼发光

(a)和(b)为电池在凝胶时旋转；(c)和(d)为电池在溶胶时旋转

4 结语

本项目基于明胶溶胶凝胶可逆性，通过探究水果种类、电解质厚度等因素对明胶基水果电池的基本性质影响，创新性地设计成适用于多年龄段受众的科普实验。实验具有安全、原料绿色、现象明显、方便动手和易于理解等特征，将相关的科学知识用通俗的语言和熟悉的材料展示给大家，向广大受众传递了材料科学、生物化学、能源储存等学科知识，具有学科交叉性。其不但具有观赏性的展示实验，还可以让大众开展趣味动手实践。由于所有试剂廉价无毒、反应条件温和、设备简单、操作简便，本科普实验可在很多场所实现，不局限于实验室。

本科普实验适合对不同年龄段学生及社会大众。对有一定化学基础初中生和高中生，鼓励他们走进实验室进行实验，助力青少年爱化学和学化学；对于大学生，本科普实验涵盖离子扩散、氧化还原反应、溶胶和凝胶态明胶性质等知识点，内容丰富，能激发学生学习兴趣，增加其对相关知识理解；对于普通群众，本实验能改变公众对化学传统观念，提升大家的科学素养，引领大众正确认识化学，感受其魅力。我们与小学生、中学生和大学低年级学生进行了互动。同学们亲手制备电解质凝胶，并组装电池。大家一致认为，实验内容趣味性强，又蕴含丰富的科学知识，对深入理解自然科学帮助很大。

5 特点/特色/创新声明

- (1) 设计并组装明胶基水果电池。
- (2) 实现柔性水果凝胶电池设计制备。
- (3) 实验环节紧凑、流程安全、趣味性强和易于推广。

参 考 文 献

- [1] 尹朝阳, 石文琪, 李卫东, 朱明坤, 董晶晶, 孙纪录. 食品研究与开发, **2023**, *44* (7), 193.
- [2] Deng, G.; Huang, K.; Jiang, X.; Wang, K.; Song, Z.; Su, Y.; Li, C.; Zhang, S.; Wang, S.; Huang, Y. *Collagen Leather* **2023**, *5* (1), 26.
- [3] Kobayashi, K. U.; Oikawa, N.; Kurita, R. *Sci. Rep.* **2015**, *5* (1), 18667.
- [4] 李良, 吴瑀婕, 杨静, 马晶晶, 杨彪, 邹焯, 王道营, 徐为民. 肉类研究, **2022**, *36* (4), 57.
- [5] 赵瑞良, 滕佳茵, 唐上城, 陆定贵. 微创医学, **2024**, *19* (2), 181.
- [6] Railanmaa, A.; Lehtimäki, S.; Lupo, D. *Appl. Phys. A* **2017**, *123*, 1.
- [7] 关林波, 但卫华, 曾睿, 米贞健, 林海, 但年华, 陈驰, 曲健健, 叶易春. 材料导报, **2006**, No. S2, 380.
- [8] Schreiber, R.; Gareis, H. *Gelatine Handbook: Theory and Industrial Practice*; Wiley-VCH: Weinheim, Germany, 2007.
- [9] Fan, Z.; Wang, J.; Wu, Y.; Yan, X.; Dai, D.; Wu, X. *J. Energy Chem.* **2024**, *97*, 237
- [10] 符显珠, 李俊, 林敬东, 廖代伟. 电源技术, **2005**, *29* (11), 762.
- [11] 朱绍荣, 杨歌, 杨东, 李立炳, 莫荣嘉, 李晓林, 张永福. 昆明学院学报, **2022**, *44* (3), 70.
- [12] 张璐, 王文凤, 张洪明, 韩树民, 王利民. 化学学报, **2021**, *79* (2), 158.
- [13] 李敏. 不同花青素提取物的组成、稳定性及抗氧化性比较研究[硕士学位论文]. 南京: 南京财经大学, 2013.