

•科普•

doi: 10.3866/PKU.DXHX202209083

www.dxxh.pku.edu.cn

璀璨星云——乙醇凝胶的焰色与变色

魏莱, 倪梅, 刘妍岑*

中国消防救援学院基础部, 北京 102202

摘要: 以超分子凝胶的制备为基础, 结合焰色反应、酸碱指示剂变色和水解平衡移动等原理设计了一个综合性科普实验。实验采用乙酸钙水溶液和乙醇混合的方法制备凝胶, 制备过程中加入金属盐(或硼酸)及酸碱指示剂, 并调节酸碱性。制得的凝胶在燃烧时, 金属盐(或硼酸)使火焰呈现出多彩的焰色, 且受热导致凝胶中乙酸盐的水解平衡移动, 使凝胶中的酸碱指示剂变色。整体实验效果绚丽多彩, 如同璀璨的星云在宇宙中闪耀。本实验涉及知识点丰富, 操作安全简便, 现象明显, 充分展现化学之美, 满足不同人群的科普需求。

关键词: 超分子凝胶; 焰色反应; 酸碱指示剂; 化学科普

中图分类号: G64; O6

Bright Nebula: Flame and Color Change of Ethanol Gels

Lai Wei, Mei Ni, Yancen Liu *

Department of Basic Courses, China Fire and Rescue Institute, Beijing 102202, China.

Abstract: The experiment is a comprehensive popular science experiment designed on the basis of supramolecular gels preparation, combining the two common principles of flame test and color change of indicator. In the preparation of gel, calcium acetate solution and ethanol were mixed first, metal salt (or boric acid) and acid-base indicator were added. When the gel was ignited, the gel showed colored flame because of the metal salt (or boric acid). The heat leads to hydrolytic equilibrium shift of acetate in the gel, leading to the color change of acid-base indicator in the gel. The exhibition effect of experiment is gorgeous and colorful, just like the bright nebula shining in the universe. The experiment is safe and easy to operate, involving rich knowledge, possessing obvious phenomenon, and showing adequately the beauty of chemistry, which can well meet the learning needs of different groups of people.

Key Words: Supramolecular gel; Flame test; Acid-base indicator; Science popularization of chemistry

展示物态变化是科普实验的常见内容, 但传统的固液气三相变化已很难激发受众的兴趣, 而由液态变为半固态的成凝现象则较为新颖^[1]。凝胶不仅在日常生活中应用广泛, 如发胶、果冻等, 且基于凝胶的功能材料已逐渐成为科学研究的前沿。凝胶是固-液或固-气所形成的一种分散系统, 其中分散相粒子相互连接成网状结构, 分散介质填充于其间^[2]。超分子凝胶的分散相则是由小分子自组装而形成, 因而具有很好的刺激响应性, 在分子识别、安全防伪、药物控释等领域展现出良好的应用前景^[3]。生活中常用的固体酒精也是一种超分子凝胶, 可以由乙酸钙溶液和乙醇混合制得, 制备简单、趣味性强, 适合用于科普实验。

另一方面, 展示多种颜色及其变化是化学科普实验中的常见手段, 对受众有较强的吸引力, 尤

收稿: 2022-09-29; 录用: 2022-12-23; 网络发表: 2023-02-23

*通讯作者, Email: liuyc_cfri@163.com

基金资助: 中国消防救援学院基础部教学改革项目

以焰色反应和酸碱指示剂变色最为经典。焰色反应颜色绚丽多彩,节日里五彩缤纷的烟花就是这一现象的应用,原子发射光谱的诞生也受到了焰色反应的启发。但现行教材上的焰色反应实验操作复杂、存在一定的危险性,尚有很大的改进空间^[4-6]。酸碱指示剂遇酸碱变色的实验操作简单、现象明显,且生活中常见的蔬果也可制作酸碱指示剂^[7],在科普过程中亦可借此对平衡移动这一重要化学原理进行讲解。综上,焰色反应和酸碱指示剂变色都是优秀的科普素材,兼具趣味性与科学性,但由于很多人对二者已有一定了解,且实验持续时间短、现象单一,难以长时间吸引受众。

为了实现更好的科普效果,本文将以上原理整合在一个综合性科普实验中。首先,将乙醇倒入饱和乙酸钙水溶液中制得凝胶,此凝胶燃烧的火焰呈浅蓝色(乙醇火焰颜色)和砖红色(钙的焰色)。在凝胶制备过程中加入金属盐或硼酸,制得的凝胶燃烧时即可呈现相应的焰色。同时,在凝胶制备过程中加入某些酸碱指示剂,制得的凝胶在燃烧时颜色会发生变化,这是由于燃烧导致乙酸钙水解平衡的移动^[8],引起酸碱指示剂变色。为了丰富凝胶的变色效果,还可以加入乙酸或氨水调节酸碱性。凝胶燃烧时的焰色与凝胶的变色可以自由组合。本实验兼具趣味性与知识性,操作安全简便,科普效果好。

1 实验原理

1.1 成凝原理

虽然乙酸钙水溶液和乙醇混合成凝的现象已被广泛报道^[8-10],但其成凝原理尚无公认解释。根据超分子凝胶成凝的一般原理,推测电荷相互作用和氢键是形成凝胶的主要驱动力。乙酸钙在水中电离为钙离子和乙酸根离子,当乙酸钙水溶液与乙醇混合,由于溶剂极性的降低,导致乙酸根离子和钙离子之间的电荷相互作用、乙酸根离子之间的氢键作用增强。且钙离子为二价离子,有利于和乙酸根离子组装成三维网状结构,将乙醇和水固定在其中,形成凝胶^[11,12]。

1.2 焰色反应

焰色反应是指部分IA、IIA族金属及其化合物使火焰呈现出特征的颜色现象。这是由于其原子价层的s轨道和p轨道之间的能量差与某些可见光的波长相匹配,高温火焰可使这些物质原子化并将其价层电子从s轨道激发到p轨道上,当电子返回s轨道时会发射特征的电磁辐射,使火焰呈现出相应的颜色。例如,当NaCl在火焰中汽化时,离子转化为气态原子并被激发,激发态钠原子恢复到基态时发出波长为589 nm(黄色)的光^[13]。基于同样原理,非金属硼在高温下发出波长为492、518和546 nm的光,火焰呈绿色^[14]。

1.3 凝胶变色原理

酸碱指示剂一般是弱的有机酸或有机碱,其酸式和共轭碱式具有明显不同的颜色。溶液pH改变引起酸碱指示剂的解离平衡移动,造成其酸式和共轭碱式的比例变化,因而溶液颜色发生变化^[15]。

乙酸钙水溶液中存在乙酸-乙酸根的平衡,方程式为: $\text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_3\text{O}^+$ 。凝胶燃烧时乙酸和水不断挥发,即上述方程式中的反应物减少,引起平衡逆向移动,氢离子浓度减小,使得酸碱指示剂的碱式比例增加,凝胶表现出颜色变化。为了丰富凝胶的颜色,亦可在制备过程中加入少量乙酸或氨水调节酸碱性。例如加入溴百里酚蓝指示剂的凝胶在不加入乙酸时呈绿色,加入乙酸后呈黄色。

2 实验步骤

2.1 试剂

一水合乙酸钙、氯化锂、氯化钠、氯化铯、酚酞、苯酚红、甲基红、溴百里酚蓝、溴甲酚紫、乙醇(95%)、氨水、乙酸均为分析纯,硼酸纯度为99%,实验用水由TTL-6型超纯水器制备。

2.2 溶液的配制

配制以下溶液或悬浊液:

溶液A: 饱和乙酸钙水溶液。

溶液B: 浓度为 $0.030\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的氯化锂乙醇溶液。

溶液C: 饱和氯化钠水溶液。

溶液D: 向饱和乙酸钙水溶液中加入氯化铯固体, 使氯化铯浓度为 $0.17\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。

悬浊液E: 向 50.0 mL 95%乙醇中加入 1.50 g 硼酸固体, 搅拌使其均匀分散, 得到硼酸乙醇悬浊液。

悬浊液F: 向 6.0 mL 溶液A中加入 0.20 g 硼酸固体, 搅拌使其均匀分散, 得到硼酸乙酸钙悬浊液。

溶液G: 将市售氨水稀释十倍, 得到质量分数约为2.5%的稀氨水。

苯酚红指示剂: 向95%乙醇中加入苯酚红固体至饱和。

甲基红指示剂: 向95%乙醇中加入甲基红固体至饱和。

溴甲酚紫指示剂: 向95%乙醇中加入溴甲酚紫固体至饱和。

酚酞指示剂: 向95%乙醇中加入酚酞固体至饱和。

溴百里酚蓝指示剂: 向95%乙醇中加溴百里酚蓝固体至饱和。

2.3 凝胶的制备与燃烧

在方形硅胶软模具(图1a)中加入乙酸钙溶液, 再迅速倒入乙醇溶液, 静置 10 s 后即可取出凝胶。将制得的凝胶置于自制的铝制燃烧底座(图1b)上, 在防火的实验台或石棉网上点燃, 观察现象。为表征凝胶结构, 将凝胶置于真空干燥箱内干燥 24 h , 制得干凝胶粉末。与市售乙酸钙粉末相比, 干凝胶的红外光谱没有变化, 但其X射线粉末衍射在 $2\theta = 7.7^\circ$ 处出现新峰。由表征结果推测, 乙酸钙在凝胶形成的过程中未发生化学反应, 但干凝胶的微观结构与市售乙酸钙有所不同。

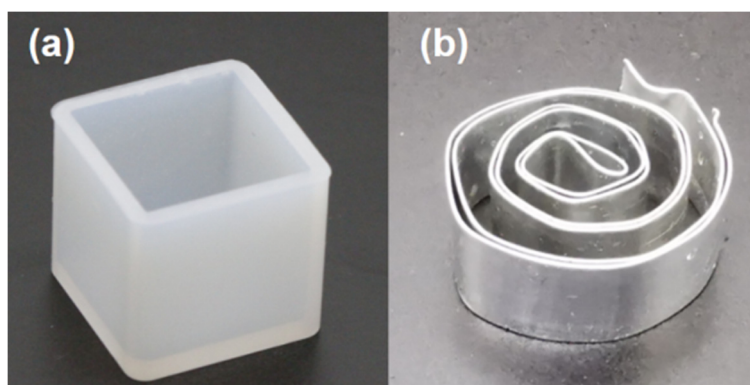


图1 (a) 方形硅胶模具; (b) 自制铝制底座

为了使受众更好地理解实验的原理和设计思路, 在科普活动时将17个凝胶分为三组展示。I组的5个凝胶中分别加入金属盐(或硼酸), 用于展示焰色; II组的7个凝胶中分别加入酸碱指示剂, 用于展示燃烧过程中的颜色变化, 可以加入乙酸或氨水来丰富凝胶的颜色; III组的5个凝胶同时加入金属盐和酸碱指示剂。制备上述17个凝胶使用的溶液及其用量见表1, 其中I组和II组凝胶燃烧时的现象分别如图2和图3所示, III组凝胶燃烧时同时呈现相应的焰色和凝胶变色。科普活动中还可以邀请受众自由选择焰色和凝胶颜色, 组合制作新的凝胶。

3 结果与讨论

3.1 焰色

本实验选择的金属盐(硼酸)及其焰色如图2所示, 这些焰色基本覆盖整个可见光谱, 整体燃烧时色彩丰富, 适合科普展示。

表1 制备凝胶使用的溶液及用量

组别	序号	所含金属盐 (或硼酸) ^a	酸碱指示剂 ^b /mL	乙醇溶液/mL	乙酸钙溶液/mL	焰色	成凝时 颜色	燃烧时 变色
I	a	—	—	95%乙醇10.0	溶液A 2.0	砖红	白色	—
	b	氯化锂	—	溶液B 10.0	溶液A 2.0	紫红	白色	—
	c	氯化钠	—	95%乙醇10.0	溶液A 2.0 + 溶液C 0.5	黄色	白色	—
	d	硼酸	—	悬浊液E 10.0	悬浊液F 2.0	绿色	白色	—
	e	氯化铯	—	95%乙醇10.0	溶液D 2.0	浅紫	白色	—
II	a	—	酚酞指示剂1.0	95%乙醇10.0	溶液A 3.0	砖红	白色	变红
	b	—	苯酚红指示剂1.0	95%乙醇10.0 + 乙酸0.5	溶液A 3.0	砖红	黄色	变粉红
	c	—	苯酚红指示剂1.0	95%乙醇10.0 + 溶液G 0.5	溶液A 3.0	砖红	红色	先变黄， 再变粉红
	d	—	甲基红指示剂1.0	95%乙醇10.0 + 乙酸0.5	溶液A 3.0	砖红	橙红色	变黄
	e	—	溴百里酚蓝指示剂1.0	95%乙醇10.0 + 乙酸0.5	溶液A 3.0	砖红	黄色	变蓝
	f	—	溴百里酚蓝指示剂1.0	95%乙醇10.0 + 溶液G 0.5	溶液A 3.0	砖红	深蓝色	先变黄， 再变蓝
	g	—	溴甲酚紫指示剂1.0	95%乙醇10.0 + 乙酸0.5	溶液A 3.0	砖红	黄色	变蓝
III	a	—	苯酚红指示剂1.0	95%乙醇10.0 + 溶液G 0.5	溶液A 2.0	砖红	红色	先变黄， 再变粉红
	b	氯化锂	溴百里酚蓝指示剂1.0	溶液B 10.0 + 溶液G 0.5	溶液A 2.0	紫红	深蓝色	先变浅绿， 再变蓝
	c	氯化钠	酚酞指示剂1.0	95%乙醇10.0	溶液A 2.0 + 溶液C 0.5	黄色	白色	变红
	d	硼酸	苯酚红指示剂1.0	悬浊液E 10.0 + 乙酸0.5	悬浊液F 2.0	绿色	黄色	变橙
	e	氯化铯	溴百里酚蓝指示剂1.0	95%乙醇10.0 + 乙酸0.5	溶液D 2.0	浅紫	黄色	变蓝

^a每个凝胶中均含有乙酸钙，表格中不重复描述；^b酸碱指示剂加入乙醇溶液中

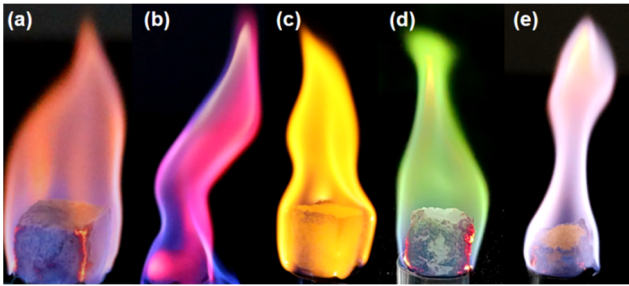


图2 含不同金属盐(硼酸)的凝胶燃烧时的火焰颜色

(a) 乙酸钙；(b) 氯化锂；(c) 氯化钠；(d) 硼酸；(e) 氯化铯

电子版为彩图，下文同

在实验中,发现含不同金属盐(硼酸)的凝胶点燃后出现焰色的时间不同,红色与黄色火焰即锂、钙、钠的焰色最先出现,随后是硼酸的绿色火焰,最后是铯的浅紫色焰色。对此作以下猜想:凝胶燃烧时火焰提供的能量相同,而各种金属盐中金属离子原子化和金属原子被激发所需的能量不同,导致不同凝胶中金属盐焰色的出现时间不同。如在本实验中,红色波长最长,所需能量最小,则最先出现。加之人眼对不同波长的光具有不同的灵敏度,焰色较浅的金属在焰色刚出现时肉眼难以观察,待焰色稳定后方可观察到。

3.2 凝胶燃烧时变色

实验中含不同酸碱指示剂的凝胶燃烧时变色现象如图3所示。由于乙醇的解离常数($K_a(\text{CH}_3\text{COOH}) = 1.26 \times 10^{-16}$)比水的解离常数($K_w = 10^{-14}$)小约两个数量级,加之乙酸钙不溶于乙醇,因此当乙酸钙溶液与乙醇混合成凝时,可以认为乙醇不参与乙酸根离子的水解平衡,只起到稀释作用。因此,制得的凝胶与乙酸钙水溶液同为弱碱性,这与凝胶中加入的酸碱指示剂呈现的颜色相符。根据前文(1.3小节)对于凝胶变色原理的分析可知,凝胶的颜色在燃烧过程中向酸碱指示剂碱式的颜色变化,与实验现象吻合。

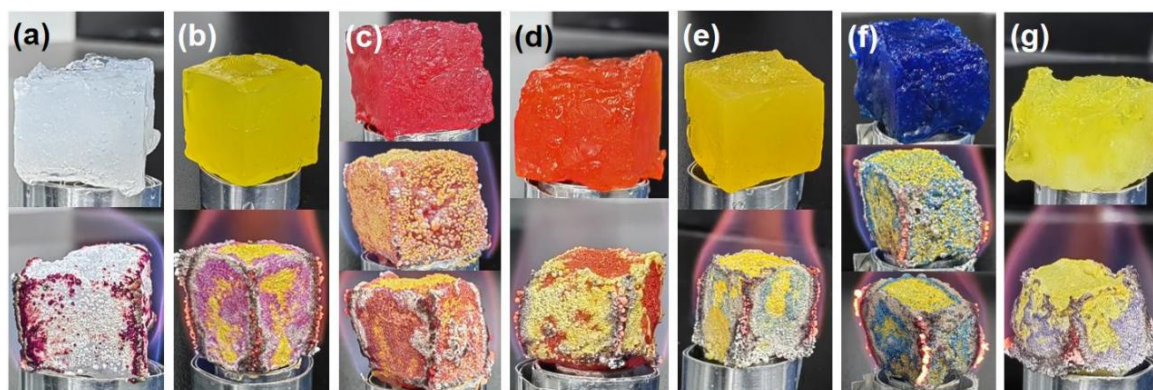


图3 含不同酸碱指示剂的凝胶的变色

(a) 酚酞; (b) 苯酚红+乙酸; (c) 苯酚红+氨水; (d) 甲基红+乙酸;
(e) 溴百里酚蓝+乙酸; (f) 溴百里酚蓝+氨水; (g) 溴甲酚紫+乙酸

但凝胶顶面颜色在燃烧中可能出现不变或者向酸碱指示剂酸式的颜色变化的现象,推测这是由于凝胶顶面被火焰包围,空气不流动,导致乙酸挥发较慢。若将火焰吹开,则凝胶顶面迅速出现酸碱指示剂碱式的颜色,与推测相符。为进一步验证,可以将凝胶倾斜放置,使凝胶立方体的顶角向上。这样,燃烧时乙酸从凝胶各表面挥发的速率相近,实验表明,倾斜放置凝胶的各表面变色现象相近,与竖直放置相比变色效果更明显。但倾斜放置凝胶在操作上有一定难度,需要自制底座,且燃烧时容易翻倒,安全性较差。科普人员可以根据实际情况选择凝胶放置的方式。

为了丰富凝胶的颜色变化,在部分凝胶制备时向乙醇中加入乙酸或氨水调节凝胶体系的酸碱性。加入乙酸的凝胶呈现出酸碱指示剂的酸式色,在燃烧过程中逐渐变为碱式色,如图3(b)、(d)、(e)、(g)所示。而加入氨水的凝胶在燃烧时出现先变为酸式色,再变为碱式色的现象,如图3(c)、(f)所示。推测该现象是氨气受热挥发造成,且氨气挥发的速度大于乙酸钙水解平衡移动的速度,导致凝胶表面酸性增强。

在凝胶中同时加入金属盐和酸碱指示剂时,燃烧时火焰的颜色不受酸碱指示剂的影响,而酸碱指示剂的变色是否受金属盐的影响则取决于金属盐的性质。实验证明,氯化钠和氯化铯的加入一般不影响燃烧时凝胶的变色,例如表1中IIa和IIIc凝胶、IIe和IIIe凝胶燃烧时变色现象均相同。而氯化锂因其水溶液有弱碱性^[16],对酸碱指示剂的变色有一定影响。例如含溴百里酚蓝和氨水的IIIf凝胶在点

燃初期氨水挥发时呈现溴百里酚蓝的酸式色黄色,继续燃烧则凝胶变回碱式色蓝色;而相同条件下点燃含氯化锂的IIb凝胶,整个燃烧过程中未观察到酸式色黄色,而是经浅绿色变回碱式色蓝色。同理,IIb凝胶燃烧时由苯酚红的酸式色黄色变为碱式色红色;IIId凝胶在组成上只比IIb凝胶多加入了硼酸,其燃烧时未观察到苯酚红的碱式色红色,而呈现出橙色。

4 科普展示和互动方案

4.1 科普地点、受众与形式

地点:实验室通风橱处或室外通风较好的场所,在防火实验台或石棉网上点燃凝胶。

受众:所有人群,尤其是中小學生。

形式:实验演示、受众操作、提问讲解、互动探究等。

4.2 展示内容

4.2.1 实验演示

- ① 由科普人员演示并邀请受众共同完成表1中各凝胶的制作及燃烧。
- ② 邀请受众自由选择焰色和凝胶颜色,组合制作新的凝胶,如图4所示。



图4 受众自行组合的凝胶及其燃烧效果

4.2.2 讲解、提问与受众操作

科普人员从乙醇凝胶、焰色反应、凝胶变色三个方面讲解实验原理、提问并带领受众操作。

- ① 讲解一:科普人员介绍凝胶成凝原理和超分子凝胶。

问题一:(针对化学基础较薄弱的受众)乙醇与乙酸钙溶液混合制得的乙醇凝胶,在现实生活中有什么应用?此外,凝胶在生活中还有什么应用?

参考答案:乙醇凝胶即为固体酒精,这种燃料使用方便、安全,燃烧时污染较少,广泛应用于餐饮业、旅游业和野外作业等。凝胶在生活中有广泛应用,如发胶、果冻、芦荟胶、凝胶枕头、免洗手消毒用酒精凝胶^[17]等。

问题二:(针对有一定化学基础的受众)为什么凝胶在燃烧过程中表面会出现白色固体?

参考答案:随着燃烧的进行,凝胶中水含量逐渐减少,有白色的乙酸钙固体析出。

问题三:(针对有一定化学基础的受众)超分子凝胶的优势和应用有哪些?

参考答案:超分子凝胶的制备基于非共价相互作用,具有刺激响应性,可调控。基于超分子凝胶的功能材料在分子识别、光电功能材料、药物控释等领域有着广阔的应用前景。

- ② 讲解二:科普人员介绍焰色反应的原理。

问题一:(针对化学基础较薄弱的受众)焰色反应及其原理可以在哪些方面应用?

参考答案:制作多彩的烟花、地质勘探时用于鉴定样品中的金属元素、原子发射光谱等。

问题二：(针对有一定化学基础的受众)为什么所有凝胶燃烧时的火焰都有蓝色和红色？

参考答案：乙醇在燃烧时有蓝色的火焰；乙酸钙中的钙元素在燃烧时呈现红色的焰色。

③ 讲解三：科普人员介绍酸碱指示剂及凝胶燃烧变色的原因。

问题一：(针对化学基础较薄弱的受众)酸碱指示剂变色在生产生活中有什么应用？

参考答案：检测雨水是否为酸雨；检测化妆品、饮用水的pH是否符合标准；制作pH试纸等。

受众操作：(针对化学基础较薄弱的受众)生活中常见的水果、蔬菜中也含有酸碱指示剂，请三位受众制作黑枸杞、紫薯与紫甘蓝三种蔬果酸碱指示剂，观察其遇酸碱时的颜色变化以及将其加入凝胶中呈现的颜色。

实验步骤：将水果蔬菜切块后用研钵充分研磨，放入95%乙醇中浸泡约20 min，用纱布过滤。取10.0 mL滤液于烧杯中，分别加入乙酸和氨水，观察现象。取2.0 mL饱和乙酸钙溶液于模具中，将加入1.0 mL蔬果指示剂的10.0 mL乙醇溶液快速倒入模具，静置10 s后取出，观察颜色并点燃。图5展示了含蔬果指示剂的凝胶。

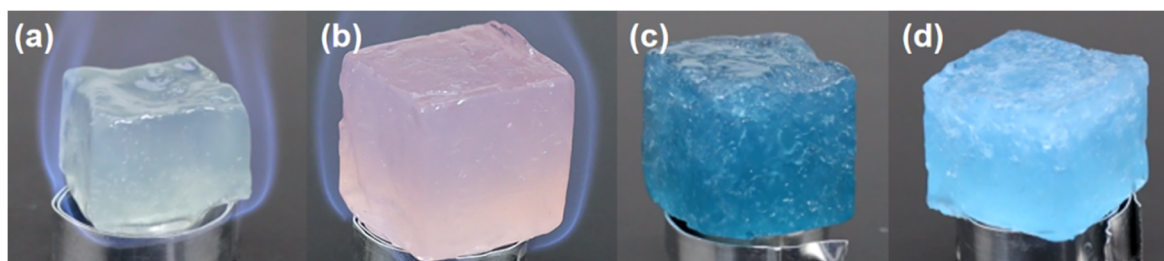


图5 含蔬果指示剂的凝胶

(a) 紫薯；(b) 紫薯+乙酸；(c) 黑枸杞；(d) 紫甘蓝

问题二：(针对有一定化学基础的受众)凝胶燃烧时发生变色是利用了乙酸根离子水解平衡移动的原理，除此之外，盐类水解还有什么应用？

参考答案：第一，化学泡沫灭火剂，利用可溶性铝盐和碳酸氢钠发生双水解反应产生氢氧化铝胶体和二氧化碳气体；第二，净水剂，如明矾水解生成胶体吸附水中的杂质。

4.2.3 引导受众探究

问题：(针对有一定化学基础的受众)乙酸钙溶液的用量过多或过少会有什么后果？金属盐的用量过多或过少会有什么后果？

参考答案：乙酸钙溶液的用量过少，有大量液体未成凝；乙酸钙溶液的用量过多会使凝胶在燃烧过程中析出大量乙酸钙固体，遮挡凝胶的变色。金属盐的用量过多，有大量液体未成凝；金属盐的用量过少，焰色不明显，不易于观察。

受众操作：(针对有一定化学基础的受众)邀请三至五位受众参与问题的探究，运用控制变量法设计实验并完成。

5 结语

本文介绍了一个综合性科普实验，使用乙酸钙溶液和乙醇混合制备凝胶，制备过程中加入金属盐(或硼酸)和酸碱指示剂，凝胶燃烧时可以同时呈现焰色和变色。实验所需材料廉价易得，操作安全简便，绚烂的火焰与多彩的凝胶交相辉映，具备良好的观赏性。同时，本文还设计了完整的科普展示与互动方案，不仅展示了现象，也介绍了经典的化学知识，并融入了科研方法，让受众深刻体会到科学的魅力与智慧。

致谢:中国消防救援学院的张健教授、高向静老师、赵国兴同学和赵广源同学参与了本文的讨论和部分实验,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 韩书, 杨淑涵, 卢裕杨, 李芳, 李有桂. 大学化学, **2022**, 37 (9), 2206099.
- [2] 傅献彩, 沈文霞, 姚天扬, 侯文华. 物理化学(下册). 第5版. 北京: 高等教育出版社, 2005: 450.
- [3] 尹艳镇, 焦淑菲, 史忠丰, 甘雄. 重庆三峡学院学报, **2013**, 29 (145), 100.
- [4] 窦金雨. 化学教与学, **2019**, No. 9, 78.
- [5] 陶慧玲. 化学教学, **2018**, No. 3, 64.
- [6] 陈婉贞, 蔡文联. 闽南师范大学学报(自然科学版), **2018**, No. 2, 109.
- [7] 龙清姣. 凯里学院学报, **2010**, 28 (3), 141.
- [8] 吴凤兮, 阙荣辉, 孙逸棋, 李嵌, 熊言林. 化学教育, **2017**, 38 (13), 70.
- [9] 李明立, 曹广雪. 教学仪器与实验, **2013**, 29 (12), 29.
- [10] 刘瑶, 李德前. 化学教与学, **2021**, 545 (9), 91.
- [11] 王秀凤, 张莉, 刘鸣华. 物理化学学报, **2016**, 32 (1), 227.
- [12] Henstock, H. *Trans. Faraday Soc.* **1933**, 29, 1101.
- [13] 宋天佑, 徐家宁, 程功臻, 王莉. 无机化学(下册). 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2019: 659.
- [14] Maeck, W. J.; Kussy, M. E.; Ginther, B. E.; Wheeler, G. V.; Rein, J. E. *Anal. Chem.* **1963**, 35 (1), 62.
- [15] 武汉大学主编. 分析化学(上册). 第6版. 北京: 高等教育出版社, 2016: 140.
- [16] 冯光熙, 黄祥玉, 申泮文, 张靛华, 刘翊纶, 任德厚. 无机化学丛书(第一卷). 北京: 科学出版社, 1984: 312.
- [17] 李秋平, 朱琳, 胡敏杰, 罗利娟, 吴昊. 大学化学, **2021**, 36 (6), 2008007.