

基于问题导向的物理化学实验项目设计与改进 ——以液体表面张力测定为例

张永民*, 郭爽, 朱明月, 刘梦辉, 李思依

江南大学化学与材料工程学院, 江苏 无锡 214122

摘要: 以日常生活现象(洗衣时的白色絮凝物)为切入点, 通过问题导向, 引导学生自主设计实验。将表面张力的测量融入探究生活现象背后化学原理的过程中, 综合运用多种技术手段, 建立“发现问题-探索实践-回归课本”的探索型实验模式, 从而巩固学生对胶体与界面化学知识点的理解。改进后的实验内容更丰富, 挑战度更高, 综合性更强, 趣味性更浓, 有利于培养学生分析和解决问题的能力, 能更好地培养学生的探究性思维。此外, 本实验安全性较高, 易于操作, 对设备无特殊要求, 非常适合本科教学实验。

关键词: 物理化学实验; 胶体与界面化学; 氯化钙; 表面活性剂; 表面张力

中图分类号: G64; O6

Design and Improvement of Physicochemical Experiments Based on Problem-Oriented Learning: a Case Study of Liquid Surface Tension Measurement

Yongmin Zhang*, Shuang Guo, Mingyue Zhu, Menghui Liu, Sinong Li

School of Chemical & Materials Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu Province, China.

Abstract: The purpose of this project is to guide students in independently designing experiments based on problem-oriented approach, taking a commonplace phenomenon (white flocs formed during laundry) as the starting point. The measurement of surface tension is integrated into the process of exploring the underlying chemical principles of daily life phenomena, and an exploratory experimental model that follows a “problem identification-practical exploration-textbook consolidation” framework is established by combining a diverse array of techniques, thereby reinforcing the students' understanding of colloid and interface chemistry. The revised experiment offers richer content, greater challenges, enhanced comprehensiveness, and increased engagement, effectively fostering students' abilities to analyze and solve problems and nurturing their inquisitive thinking. Furthermore, this experiment ensures a high degree of safety, ease of operation, and requires no specialized equipment, making it highly suitable for undergraduate instructional labs.

Key Words: Physical chemistry experiment; Colloid and interfacial chemistry; Calcium chloride; Surfactant; Surface tension

表面张力测定是一个经典的物理化学本科教学实验。经调研, 在全国多数高校均有开展, 各版本物理化学实验教材中均包含该实验^[1-6]。实验内容主要分为三类:

收稿: 2023-07-10; 录用: 2023-09-05; 网络发表: 2023-10-12

*通讯作者, Email: zhangym@jiangnan.edu.cn

基金资助: 国家自然科学基金(22072058, 21503094); 国家级一流本科课程“物理化学”项目; 江南大学教改项目(JG2021131)

(1) 通过测量表面活性剂溶液的表面张力, 进而获得表面活性剂的临界胶束浓度(critical micelle concentration, CMC)^[7-9], 以及胶束化过程的热力学参数;

(2) 测量水、有机溶剂(乙醇), 以及二者混合体系的表面张力;

(3) 通过测量溶液表面张力, 研究溶质分子在气液界面的吸附。

细究内容, 可发现现有实验均以对经典物理化学知识的验证为主, 过度强调表面张力的测量, 割裂了表面张力与生活中胶体界面现象的关联, 忽视了实验技能的综合训练, 已无法全面满足高等教育的“两性一度”要求, 不利于创新型人才的培养^[10-12]。

针对这一问题, 我们在原有物理化学实验“表面张力测定”的基础上, 以问题为导向, 对实验内容进行了优化和改进, 引导学生自主设计实验探索日常生活现象背后的化学知识。改进后的实验实现了多个知识点的综合运用, 在保持实验的可操作性基础上, 增加了创新性、趣味性、探索性和综合性, 有利于巩固知识, 激发兴趣, 培养创新意识。

1 教学目标

(1) 通过自主设计实验明确无机盐对表面活性剂溶解性的影响规律; 掌握表面张力的测量原理和技术。

(2) 巩固紫外-可见分光光谱、傅里叶红外光谱分析等基本操作;

(3) 引导学生通过归纳比较, 构建知识体系, 培养学生剖析问题、解决问题的能力, 以及创新意识和科学素养。

2 教学实施案例

2.1 课程导入

课前, 通过学习通、企业微信等网络教学渠道向学生发布问题: 在日常生活中, 我们经常会观察到, 用洗衣皂洗涤衣物时, 清水逐渐变浑浊, 甚至会出现白色絮状物。那么, 这种现象背后隐藏的化学原理是什么呢?

通过预设问题1-6, 引导学生积极思考分析问题、查阅文献开展组内讨论、提出解决方案。通过与学生的实时互动, 引导学生在改进优化实验方案的同时, 自主学习相关实验的基本原理(表面张力), 夯实已有知识体系(红外光谱分析等)。

问题1: 洗衣皂中的主要成分是什么?

问题2: 什么是表面活性剂? 它具有哪些特征? 大环两亲分子是否具有表面活性剂的特征?

问题3: 表面活性剂降低表/界面张力的能力受哪些因素影响?

问题4: 影响表面活性剂水溶液清澈度的因素有哪些? 是否与无机盐有关?

问题5: 表面活性剂水溶液的浓度变化会对发泡/乳化能力产生怎样的影响?

问题6: 自来水中通常含有哪些离子? 水的硬度主要由哪些离子决定?

在问题的驱动下, 学生通过查阅文献, 基本可以归纳出以下结果:

(1) 洗衣皂的主要成分是脂肪酸钠皂, 是一种典型的阴离子表面活性剂。最早可追溯至古罗马时代, 人们将草木灰与动物油脂充分混合, 得到一种黏滑的黄绿色半固体或液体(钾皂)。

(2) 表面活性剂是一类与我们的生活息息相关的精细化学品, 其分子结构由亲水头基和疏水尾链构成。独特的亲水-亲油两亲结构, 使表面活性剂可以在气/液或液/液界面表面发生定向吸附, 有效降低体系的表/界面张力, 从而稳定泡沫或乳液^[8]。从分子结构上看, 大环两亲分子具备表面活性剂的特征。

(3) 表面活性剂降低表/界张力的能力不仅与其分子结构密切相关, 而且也会受到其他因素影响,

比如：浓度、无机盐、温度等。低浓度时，表面活性剂无法完全占据表/界面，表面张力较大；高浓度时，表面活性剂在表/界面上的吸附达到最大，表面张力降低至最小。无机盐也会对表面活性剂的性能产生重要影响。在离子型表面活性剂水溶液中加入无机盐，反离子浓度的增加压缩双电层，降低了表面活性离子型亲水头基之间的静电排斥力，导致吸附层中的表面活性分子排列得更紧密，促进了胶束的形成，降低CMC，从而提高表面活性剂降低表面张力的能力。但是，当无机盐过量时，则可能诱发表面活性剂发生聚沉，失去表面活性。其中，羧酸盐型表面活性剂对硬水的敏感性最为显著^[13]。非离子表面活性剂由于其分子的电中性，受无机盐的影响较小。

(4) 影响表面活性剂水溶液清澈度的因素主要是其溶解度，而溶解度与温度密切相关。离子表面活性剂通常在其Krafft温度以上可形成透明水溶液，非离子表面活性剂则需在浊点以下才能形成透明水溶液。此外，表面活性剂的溶解度也会受无机盐影响，特别是羧酸盐表面活性剂。

(5) 当表面活性剂的浓度大于其CMC时，通常表现出较高的发泡/乳化能力。

(6) 自来水中通常含有 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 等离子，其中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子含量决定了水的硬度。

对于学生提交的问题答案，教师应及时评价和指导，帮助学生构建正确完整的知识体系，培养创新思维。另一方面在点评各小组的答案时，可切入化学史、民族文化等，拓展学生的视野，让学生感受化学的魅力，培养探索精神和创新精神。比如：鲁迅先生的作品中曾经提到，乌镇的人们用皂角清洗物品，那么皂角为什么可以用于清洗？是否含有表面活性剂成分？对于不能较为准确回答问题的小组，教师可通过“旁敲侧击”的提问方式进行引导。比如：如果表面活性剂不溶解会不会影响溶液的透明度？

2.2 实验方案的提出

通过学生的自主学习、教师的点评，多数同学已经对要解决的问题有了一个较为清晰的认识。接下来就是如何拟定实验方案进行验证。教师可设定一些问题，引导学生根据提供的试剂与仪器制定可行的实验方案。

2.2.1 试剂与仪器

烷基糖苷(50%水溶液，上海发凯)，月桂酸钠(SDC，98%，国药)，硬脂酸钠(98%，国药)，脂肪醇聚氧乙烯醚硫酸酯钠盐(70%水溶液，中轻日化)，十六烷基三甲基溴化铵(99%，国药)， CaCl_2 (99%，国药)， MgCl_2 (99%，国药)， NaCl (99%，国药)，离子水。

紫外-可见分光光度计(TU-1900，北京普析)，自动界面张力仪(JYW-200D，承德科承试验机有限公司)，滴体积表面张力仪^[14]，最大泡压法表面张力装置^[10]，红外光谱仪，核磁共振波谱仪，浊度仪，酒精灯，铂丝，磁力搅拌器，容量瓶，玻璃漏斗，铁架台，烧杯等。

2.2.2 问题引导

设定的提示问题及目标引导见表1。

表1 预设问题与目标导向

设定问题	目标引导
问题7：如何模拟水的硬度对洗衣皂溶解度的影响？	在脂肪酸钠水溶液中加入 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子进行模拟
问题8：如何表征溶液的透明度？	透光率分析、浊度测量
问题9：当脂肪酸钠水溶液变混后，表面活性剂浓度是否改变？如何证明？	可通过表面张力测试定量分析、发泡/乳化的对比定性判断
问题10：如何鉴定白色絮状物？	红外光谱、核磁共振波谱、焰色反应等

2.2.3 方案细化

通过预设问题的引导，各小组通过组内讨论基本都可以形成如图1所示实验思路。在此过程

中, 学生通过对问题的剖析、归纳总结, 逐渐形成了“刨根问题、追本溯源”的科学精神。表2是某小组以“SDC + CaCl₂”为模拟体系制定的实验方案。教师可通过设置问题帮助学生细化实验, 确保实验的顺利开展。



图1 问题导向式实验思路图

表2 以“SDC + CaCl₂”为模拟体系的实验环节及教师提问

目标	实验环节	设置的问题	学生反馈
问题8	溶液准备	(1) SDC溶液的浓度应在CMC以下、以上还是附近?	(1) SDC溶液的浓度应略高于CMC, 因为表面活性剂溶液的性能在CMC前后会发生较为显著的变化, 有利于实验现象的观察
		(2) 以什么方式加入CaCl ₂ ?	(2) 以高浓度CaCl ₂ 溶液的形式加入, 便于操作, 也不会引起体积较大变化
	样品配制	(3) SDC和CaCl ₂ 溶液的混合顺序是否重要?	(3) 重要。应将CaCl ₂ 溶液加入SDC溶液。反之, 现象不易观察
		(4) 样品的制备是否需要准确定量?	(4) 从定性的角度是不需要准确定量
	样品观察	(5) 制备的样品是否需要恒温?	(5) 恒温
		透光率测量	(6) 参比样如何选择?
	(7) 测量波长范围如何选择?		(7) 可见光范围, 且样品在此范围内不应有吸收
	(8) 有沉淀的样品如何测量?		(8) 测量前摇匀
	(9) 测量过程是否需要严格恒温?		(9) 恒温
问题9	表面张力测量		(10) 表面张力仪如何校准?
		(11) 测量过程是否需要严格恒温?	(11) 严格恒温
		(12) 有沉淀的样品如何测量? 是否所有样品均需进行相同的预处理?	(12) 所用样品在测量前应过滤, 除去沉淀
问题10	红外光谱分析	(13) 红外光谱的测量方法有哪些?	(13) KBr压片法、涂膜法
		(14) 如何通过红外光谱分析快速定性絮凝物的官能团?	(14) 对比SDC和絮凝物的红外光谱确定官能团
		(15) 是否可通过红外光谱分析判定絮凝物的阳离子? 若不能, 应该采取什么方法鉴定?	(15) 较难。可考虑焰色反应或原子吸收光谱等

2.3 实验过程

基于上述细化后的实验方案, 学生即可自主开展实验。实验流程如下, 结果仅供教师教学参考。

(1) 样品观察

在50 mL SDC溶液(5.6 g·L⁻¹)中加入不同体积的CaCl₂溶液(111.0 g·L⁻¹)。发现随着CaCl₂加入量由0增大至0.8 mL, SDC溶液的浑浊现象越发明显, 甚至产生大量白色沉淀(图2)。

(2) 透光率变化

随着CaCl₂的加入样品的透光率快速下降。仅仅加入0.2 mL CaCl₂, SDC样品的透光率就由96%降低至5%, 说明SDS在CaCl₂存在下是高度不稳定的。

(3) 表面张力

对样品滤液的表面张力分析(图3),可以发现,随着CaCl₂加入体积的增大,SDC溶液的表面张力在加入0.8 mL CaCl₂后由21.53 mN·m⁻¹激增至56.64 mN·m⁻¹,可推断样品中表面活性剂含量已大幅减少。若SDC浓度选择不合适则可能导致这一现象提前或延后出现。

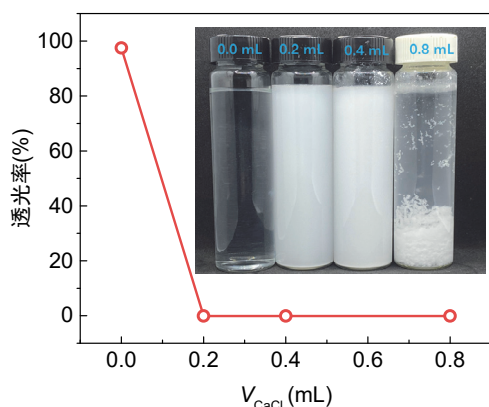


图2 CaCl₂加入体积对SDC水溶液外观及透光率的影响

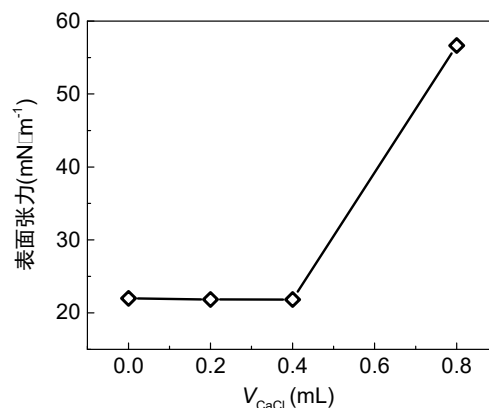


图3 CaCl₂加入体积对SDC水溶液表面张力的影响

(4) 红外光谱定性分析

为了定性判断絮凝物,对滤渣与SDC的红外光谱图进行了对比(图4)。可以看出,滤饼与纯SDC的特征峰基本一致。判断滤饼的主要成分应是SDC与钙离子结合生成的沉淀。

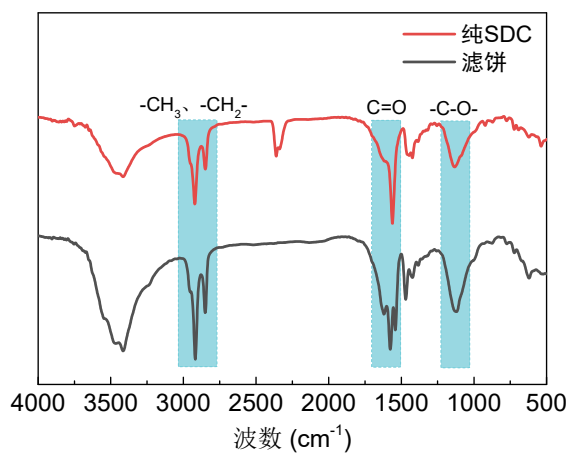


图4 纯SDC以及滤饼的红外光谱图

2.4 实验时间安排

经验证一个实验流程大约需要7.5-8 h, 实验学时安排参见表3。

3 教学实施效果

通过问题导向式的教学设计,实现了多个知识板块的有机串联,有助于学生知识体系的构建与融会贯通(丰富内容,增强综合性)。在教学过程中,教师不再单向、直接地讲授实验原理、内容等,而是通过设置问题引导学生自主查阅资料,了解相关基础知识(提高挑战度)。通过师生互动、小组讨论等方式分析问题(提升趣味性),鼓励学生自主提出解决问题的方案,锻炼他们分析、解决问题的能力。

表3 实验学时安排

实验环节	时长/h
实验要点讲解	0.5
样品配制及观察	1.0
测量透过率	0.5
过滤样品, 收集滤液和滤饼	2.0
表面张力测定	2.0
结构表征/红外光谱	1.0
结合实验结果, 讨论实验心得	0.5-1.0

力和探究性思维(培养创新意识)。这就要求教师根据授课内容及自身的相关科研凝练出有意义、启发性的问题, 将问题升华为课题, 引导学生从科学的角度去思考和分析问题。在这一过程中, 教师对相关问题的理解深度得到大幅度提升, 科研成果持续融入教学, 保证了授课内容的与时俱进。江南大学物理化学教研组全体教师共同编写的《物理化学实验》教材荣获中国石油和化工教育教学优秀教材二等奖, 入选江苏省重点教材, 中国轻工业“十三五”规划教材。物理化学成功获批国家级一流本科课程。

目前, 该改进实验已在我院应用化学专业短学期集中实践环节综合实验课程中连续开设2轮, 共6个教学班。通过教学尝试, 从提出问题、查阅资料、分析讨论、拟定方案、解决问题的不同维度, 改变了实验教学的模式, 拓展了实验内容的宽度和深度, 使实验课堂变得更具探索性和挑战性。学生对知识的理解更立体、更直观, 对由现象到本质的探索过程有了一定的体验。这种问题导向式的实验体验得到了大部分同学的肯定与认可, 通过问卷调查, 96.5%的同学认为“问题导向式的实验过程使他们对知识的理解更深刻, 对分析问题、解决问题的能力有较大的帮助”; 93.2%的同学认为“预设问题较大地提升了他们的探索兴趣, 有点像游戏闯关, 比较有成就感”; 86.1%的同学认为“通过对问题的分析, 自主设计实验进行解答对知识的巩固很有帮助, 对创新能力培养十分有利”。基于物理化学实验的问题导向式改进, 组织学生参加全国大学生实验创新设计大赛, 已获得全国一等奖1次(物理化学实验“乙酸乙酯皂化反应速率常数的测定”的优化与改进)、二等奖1次(黄豆蛋白胶体的制备和聚沉)^[15], 另有华东区赛一等奖4次(无表面活性剂微乳液的构筑及应用; 表面活性剂的神奇魔法: 家庭守护者)^[8,16]。

4 结语

通过对物理化学实验“液体表面张力测定”的创新设计, 将肥皂洗衣产生白色絮凝物这一常见的化学现象与本科实验教学相结合, 激发学生的探究兴趣, 引导同学刨根究底的实验精神; 通过探究无机盐对表面活性剂溶液的影响, 深化学生对胶体与界面化学知识的认识和理解; 通过引入透过率、结构表征等实验环节, 强化学生的实验操作技能和对知识的综合运用能力, 锻炼综合素质。这种由浅入深式的实验设计有利于提升学生的研究兴趣, 激发学生对日常生活现象的观察和思考, 有利于培养学生的创新思维和科研能力。

参 考 文 献

- [1] 徐瑞云. 物理化学实验. 上海: 上海交通大学出版社, 2009: 178-181.
- [2] 魏杰, 柳闰生, 白同春. 物理化学实验. 南京: 南京大学出版社, 2018: 132-135.
- [3] 宿辉, 白青子. 物理化学实验. 北京: 北京大学出版社, 2011: 64-69.

- [4] 唐林, 刘红天, 温会玲. 物理化学实验. 北京: 化学工业出版社, 2016: 78–82.
- [5] 罗鸣, 石士考, 张雪英. 物理化学实验. 北京: 化学工业出版社, 2012: 150–155.
- [6] 严峰. 物理化学实验(修订版). 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版, 2014: 75–85.
- [7] 张晓光. 化学教育, **2021**, *42* (18), 134.
- [8] 张永民, 卢子怡, 郑佳瑶, 向育铭, 樊晔. 化学教育, **2022**, *43* (21), 127.
- [9] 顾文秀, 高海燕. 物理化学实验. 北京: 化学工业出版社, 2019: 94–98.
- [10] 李文坡, 商波. 化学教育, **2016**, *37* (4), 32.
- [11] 刘永梅, 张晋芬, 孙立森, 戴维林, 李晔飞. 大学化学, **2018**, *33* (10), 18.
- [12] 张小艳, 白艳松, 丁永兰, 徐英. 实验室科学, **2017**, *20* (4), 140.
- [13] 宋昭峥, 王军, 蒋庆哲, 南北杰, 柯明. 表面活性剂科学与应用. 北京: 中国石化出版社, 2015: 28.
- [14] 刘雪锋. 表面活性剂、胶体与界面化学实验. 北京: 化学工业出版社, 2017: 2–6.
- [15] 高海燕, 董玉明, 杜佳琼, 宁峥雯, 陈雯清. 大学化学, **2023**, *38* (1), 180.
- [16] 张永民, 樊晔, 刘雪锋, 胡学一, 方云. 大学化学, **2022**, *37* (6), 2107111.