

## 偶极诱导液体门控可视化物质检测 ——化学“101计划”表界面性质应用实验新设计

樊漪<sup>1,3,†</sup>, 蒋焯琪<sup>2,†</sup>, 李智鹏<sup>2</sup>, 周璇<sup>1</sup>, 林景安<sup>3</sup>, 张来英<sup>1</sup>, 侯旭<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>厦门大学化学化工学院, 化学国家级实验教学示范中心(厦门大学), 固体表面物理化学国家重点实验室, 福建 厦门 361005

<sup>2</sup>厦门大学人工智能研究院, 福建 厦门 361005

<sup>3</sup>门创科技(厦门)有限责任公司, 福建 厦门 361005

**摘要:** 本实验基于表面活性剂的界面行为以及液体门控系统的门控液体性质-系统气体跨膜压强阈值对应关系, 应用液体门控教学测试分析仪(压力阈值仪)实现液体门控可视化物质检测。结合本科生化学“101计划”化学测量学实验——偶极诱导液体门控可视化物质检测, 培养学生理论联系实验、学以致用思维, 锻炼创新实践能力。

**关键词:** 化学“101计划”; 液体门控技术; 可视化物质检测; 表面活性剂; 课程设计

**中图分类号:** G64; O6

## Dipole-Induced Liquid Gating for Visual Substance Detection: A Novel Experimental Design for Application of Interface and Surface Properties in the Chemistry “101 Plan”

Yi Fan<sup>1,3,†</sup>, Zhuoqi Jiang<sup>2,†</sup>, Zhipeng Li<sup>2</sup>, Xuan Zhou<sup>1</sup>, Jingan Lin<sup>3</sup>, Laiying Zhang<sup>1</sup>, Xu Hou<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Physical Chemistry of Solid Surfaces, National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (Xiamen University), College of Chemistry and Chemical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian Province, China.

<sup>2</sup> Institute of Artificial Intelligence, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian Province, China.

<sup>3</sup> Gating Inspired Future Technology Co., Ltd., Xiamen 361005, Fujian Province, China.

**Abstract:** This study presents a novel training experiment rooted in the behavior of surfactants at interfaces and the relationship between the properties of gating liquids and the transmembrane pressure threshold of gases in a liquid gating system. By employing a liquid gating teaching analyzer (pressure threshold analyzer), we facilitate visual substance detection through a liquid gating mechanism. This experiment, part of the undergraduate “Chemical Metrology Experiments” course within the Chemistry “101 Plan”, exemplifies the concept of dipole-induced liquid gating for visual substance detection. The primary objective is to cultivate students’ ability to integrate theoretical knowledge with practical application, encourage the utilization of learned concepts, and enhance their innovative practical skills.

收稿: 2024-10-21; 录用: 2024-12-18; 网络发表: 2025-03-11

<sup>†</sup>共同第一作者, 对本文工作同等贡献

<sup>\*</sup>通讯作者, Email: houxx@xmu.edu.cn

基金资助: 教育部化学“101计划”——化学测量学实验课程建设项目; 教育部第三批虚拟教研室建设试点——“101计划”化学测量学实验课程虚拟教研室; 国家自然科学基金(52025132, U24A20205, T2241022, 52303350); 福建省自然科学基金(2022J02059); 高等学校学科创新引智计划(B17027, B16029); 中国博士后科学基金(2023M732931); 新基石科学基金会设立的科学探索奖

**Key Words:** Chemistry “101 Plan”; Liquid gating technology; Visual substance detection; Surfactant; Curriculum design

化学“101计划”明确要求实验课突出“创新”<sup>[1]</sup>,旨在通过一系列创新性的实验教学,培养学生的科学素养并深化其科学研究思维<sup>[2-4]</sup>。“偶极诱导液体门控可视化物质检测”实验是与科研前沿“液体门控技术”及其应用紧密结合的综合性实验,帮助学生掌握液体门控系统的理论知识,同时提升学生操作液体门控教学测试分析仪(压力阈值仪)的实践能力,并能应用于物质检测领域。本综合实验贯彻了高质量实验课程设计的理念,将基础的表面活性剂溶液界面知识的教学与新型液体门控界面表征原理有机结合。实验设计基于液体门控系统中门控液体的表面张力与气体跨膜压强阈值之间的正相关性,利用表面活性剂溶液界面行为调控的微观机制与宏观表面张力变化之间的关联,结合液体门控系统的物质传输机制,构建了一种通过标记物的移动来进行可视化检测的应用型实验方案。本实验有机融合了理论知识的教学以及学生动手实践能力和科学创新思维的培养,切实达成了创新实验教学的目标,以期给全国实验教学创新提供参考。

## 1 实验目的

- (1) 能够说明表面活性剂溶液的界面吸附性质,并阐述其界面行为调控机制。
- (2) 掌握并运用液体门控机制检测表面活性剂溶液中金属阳离子的方法。
- (3) 阐述液体门控可视化物质检测的操作流程及其基本工作原理。

## 2 实验原理

### 2.1 表面活性剂溶液的界面行为调控机制

表面活性剂分子具有亲水的头基(极性基团)和疏水的长链烷基尾部(亲油性或憎水性基团),广泛应用于化工、农业、石油以及日常用品等领域<sup>[5,6]</sup>。进入水溶液后,由于其双重结构特性,分子优先分布在两相界面上;随着浓度的增加,界面逐渐被占据,随后在溶液中形成团簇结构(图1(a))。在此过程中,少量的表面活性剂分子即可显著降低溶液界面的表面张力,但当浓度达到临界胶束浓度(即表面活性剂分子占满界面时的浓度,CMC),这种变化将趋于稳定(详见图1(b))。

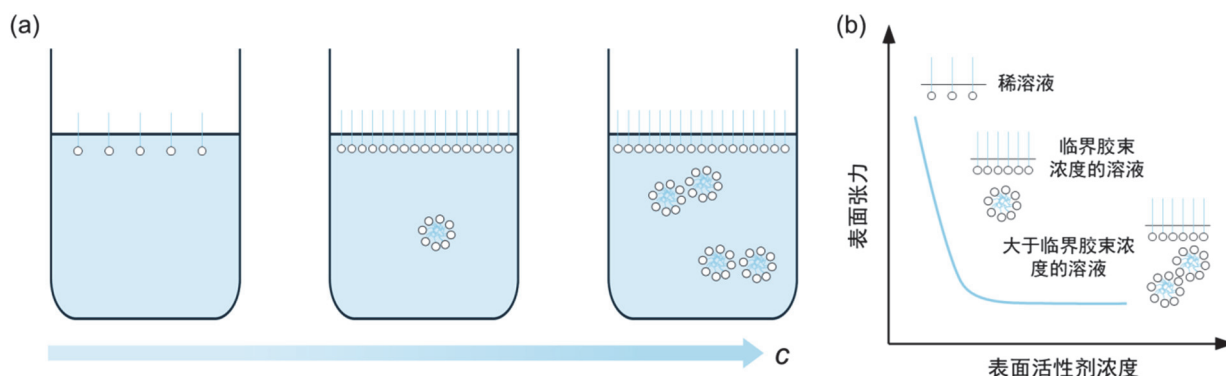


图1 (a) 溶液中表面活性剂分子随浓度的排布行为; (b) 溶液表面张力与表面活性剂浓度的关系

研究表明,当溶液中含有无机物、有机物或其他能与表面活性剂分子发生分子作用的添加物时,表面活性剂分子在界面的排布形式将发生变化,其显著特性表现为溶液表面张力的改变。理论模拟显示,无机物与表面活性剂分子的偶极诱导相互作用影响了表面活性剂分子的电子排布,进而改变了其亲疏水性,导致溶液界面性质发生变化<sup>[7]</sup>。

## 2.2 液体门控可视化物质检测

在液体门控系统中，门控液体的界面行为是影响系统物质跨膜压力数值的重要因素之一<sup>[8,9]</sup>。由于门控液体与输运流体间的表界面张力作用，输运流体在跨膜过程中需要克服不同的压强阈值。理论上，当输运流体为气体时，需要克服门控液体在固体多孔膜孔隙内受到的毛细力，这一过程受拉普拉斯压力的影响。根据杨-拉普拉斯方程，气体的跨膜压强阈值 $p_{\text{Crit}}$ 为：

$$p_{\text{Crit}} = 4\gamma_{\text{l-g}}/d \quad (1)$$

式中， $\gamma_{\text{l-g}}$ 为门控液体的表面张力， $d$ 为多孔固体膜的平均有效孔径。对于单一含有表面活性剂溶液作为门控液体的液体门控系统，表面张力 $\gamma_{\text{l-g}}$ 与表面活性剂浓度 $c$  (当 $c < \text{CMC}$ )遵循Emiempirical szyszkowski方程：

$$\gamma_{\text{l-g}} = \gamma_0[1 - B\ln(1 + c/A)] \quad (2)$$

因此，系统中气体的跨膜压强阈值 $p_{\text{Crit}}$ 与表面活性剂浓度 $c$  (当 $c < \text{CMC}$ )则有如下关系：

$$p_{\text{Crit}} = 4k\gamma_0d_e^{-1}[1 - B\ln(1 + c/A)] \quad (3)$$

式中， $\gamma_0$ 为水的表面张力， $\gamma_0 = 72 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$  (25 °C)， $A$ 为与溶液中的化合物相关的常数， $B$ 为与表面活性剂种类相关的常数， $k$ 为与表面活性剂种类相关的常数。

由式(3)可知，在液体门控系统中，表面活性剂主导的门控液体界面张力与气体跨膜压强阈值呈正相关关系。基于此，我国科学家提出了一种基于检测物质诱导表面活性剂分子偶极力改变，进而引起门控液体表面张力改变的液体门控物质检测的新方法，实现对物质成分和浓度的分析<sup>[7,10]</sup>。

在含十二烷基苯磺酸钠(SDBS)分子的液体门控系统中，对于大多数金属阳离子，系统的气体跨膜压强阈值会随着添加的金属阳离子浓度的增加呈现线性下降的趋势。高价金属阳离子对气体跨膜压强阈值的扰动因子(与压强阈值变化呈正相关)显著高于一价金属阳离子，其中以 $\text{Ca}^{2+}$ 的压强阈值降低效果最为明显(图2(a))。相比之下，对于有机溶剂类添加物，如乙醇，系统的气体跨膜压强阈值则随着其浓度的增加呈现先增后降的非线性变化趋势(图2(b))。

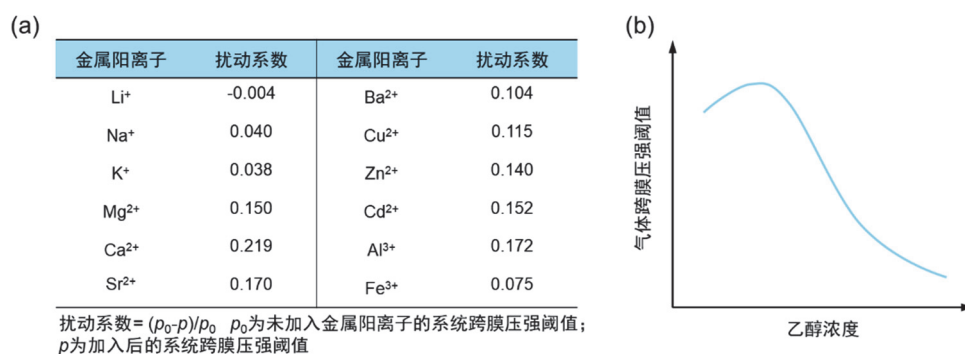


图2 金属阳离子(a)和乙醇(b)引起的液体门控系统气体跨膜压强阈值变化<sup>[6]</sup>

以含有SDBS分子的液体门控系统为例，二价金属阳离子 $\text{Ca}^{2+}$ 的检测效果最为显著。这种物质检测方法可以通过可视化方式实现，其具体原理如图3所示：当检测物 $\text{Ca}^{2+}$ 加入到系统后，会导致液体门控系统一侧的气体释放，从而推动系统另一侧的标记液滴移动。这一过程以可视化手段直观地展示了被检测物质的种类和浓度信息。

## 3 实验仪器与试剂

液体门控压力阈值仪1台(配备液体门控表面张力测量模块和液体门控可视化检测模块各1套，门创科技(厦门)有限责任公司)，移液器1个(10–100  $\mu\text{L}$ )，表面皿若干，亲水尼龙膜(1  $\mu\text{m}$ ，5  $\mu\text{m}$ )。

SDBS (90%，阿拉丁)；NaCl(分析纯，国药集团化学试剂有限公司)； $\text{CaCl}_2$ (分析纯，国药集团

化学试剂有限公司); 去离子水。

SDBS溶液(浓度:  $0.5 \times 10^{-3}$ ,  $1 \times 10^{-3}$ ,  $2 \times 10^{-3}$ ,  $3 \times 10^{-3}$ ,  $4 \times 10^{-3}$ ,  $5 \times 10^{-3}$ 和 $7 \times 10^{-3}$  mol·L<sup>-1</sup>), SDBS-NaCl溶液( $4 \times 10^{-3}$  mol·L<sup>-1</sup>的SDBS溶液混合 $0.5 \times 10^{-3}$  mol·L<sup>-1</sup>的NaCl溶液), SDBS-CaCl<sub>2</sub>溶液( $4 \times 10^{-3}$  mol·L<sup>-1</sup>的SDBS溶液混合 $0.5 \times 10^{-3}$  mol·L<sup>-1</sup>的CaCl<sub>2</sub>溶液)。

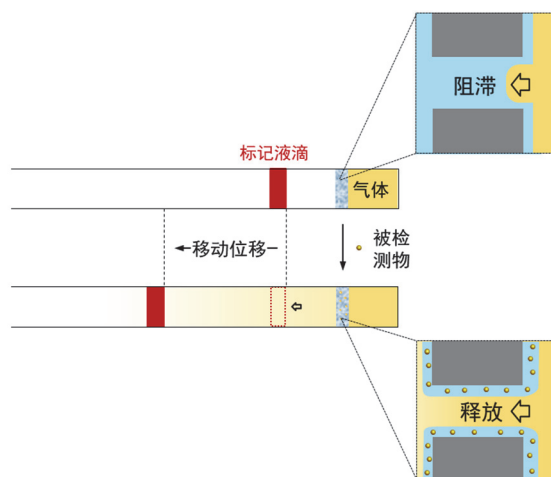


图3 液体门控可视化物质检测原理图

## 4 实验步骤

### 4.1 液体门控技术测定SDBS表面活性剂的CMC值

构筑含表面活性剂分子的液体门控系统: 用移液器移取目标SDBS溶液(浓度:  $0.5 \times 10^{-3}$ ,  $1 \times 10^{-3}$ ,  $2 \times 10^{-3}$ ,  $3 \times 10^{-3}$ ,  $4 \times 10^{-3}$ ,  $5 \times 10^{-3}$ 和 $7 \times 10^{-3}$  mol·L<sup>-1</sup>)滴加于孔径为 $5 \mu\text{m}$ 的尼龙膜表面, 使尼龙膜完全被门控液体浸润, 静置后取出, 完成不同SDBS浓度下表面活性剂溶液-尼龙膜液体门控系统的搭建。系统的跨膜压强阈值测量: 将上述液体门控系统置于仪器膜夹具中, 选择量程为0–100 kPa的压力传感器。传输流体为空气, 流速设定为 $4 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。记录测试得到的相应系统的气体跨膜压强阈值数据及结果。

### 4.2 金属阳离子对含SDBS分子的液体门控系统的气体跨膜压强阈值影响

依次用移液器取SDBS-NaCl溶液和SDBS-CaCl<sub>2</sub>溶液, 分别滴加于两片孔径为 $5 \mu\text{m}$ 的尼龙膜表面, 使尼龙膜完全被门控液体浸润, 静置后取出。将上述液体门控系统置于仪器膜夹具中, 选择量程为0–100 kPa的压力传感器。传输流体为空气, 流速设定为 $4 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。记录测试得到的相应系统的气体跨膜压强阈值数据及结果。

### 4.3 金属阳离子的液体门控可视化物质检测

连接设备的可视化检测模块。首先将浸润 $4 \times 10^{-3}$  mol·L<sup>-1</sup> SDBS溶液的尼龙膜( $1 \mu\text{m}$ )放置于仪器的膜夹具中, 设置如实验4.1节所示的实验参数开始实验, 记录得到的跨膜压强阈值 $p_{\text{crit}}$ 。接着, 释放系统内气体, 归零注射单元, 重复推注气体至系统实时压强值到达 $(p_{\text{crit}} - 10)$  kPa后, 点击“暂停系统加压(即压强保持)”按钮, 使系统保持在该压强值。进而打开分析物注射通道, 将SDBS-NaCl溶液由分析物进口推入, 之后关闭通道, 观察液体门控系统另一侧标记物的移动状况, 记录测试得到的标记物移动的位移信息。同样的, 重复上述操作, 将SDBS-CaCl<sub>2</sub>溶液由分析物进口加入。

## 5 结果与讨论

### 5.1 表面活性剂CMC值的测试结果

采用如图4(a)所示的自搭建液体门控表面张力测量模块对门控液体的表面张力进行测量。实验

结果(图4(b))表明,含有SDBS门控液体表面张力随着SDBS浓度的升高而逐渐下降。将上述溶液依次作为门控液体进行测试时,系统的气体跨膜压强阈值数据如图5所示。实验结果显示,在相同的测试流量下,压强-时间上升曲线的斜率完全重合,但气体的跨膜临界压强阈值随着SDBS浓度的增加逐步降低。与表面张力的降低趋势相比,液体门控系统测试得到的表面活性剂分子的CMC拐点更高,更倾向于反映了动态界面状态下溶液的CMC数据。

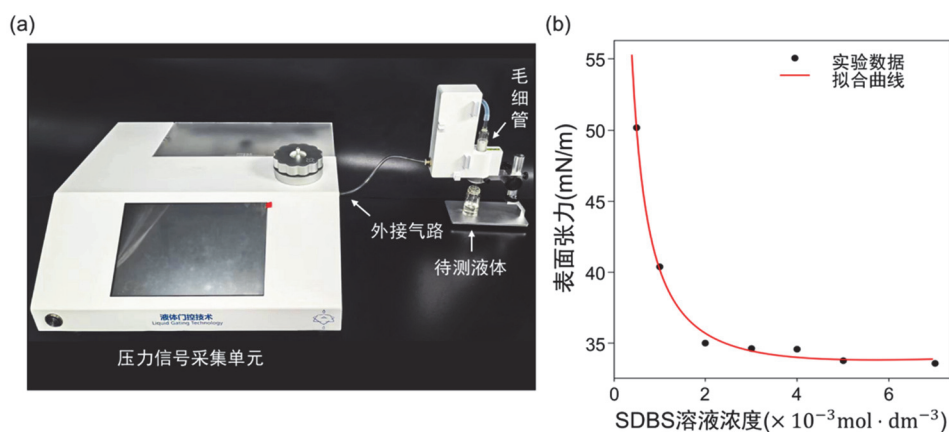


图4 (a) 自搭建液体门控表面张力模块; (b) 门控液体的表面张力随SDBS浓度的变化

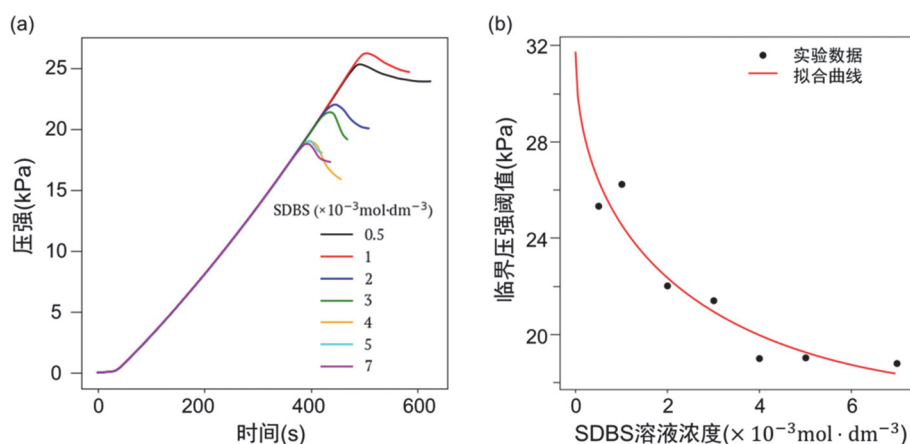


图5 不同浓度SDBS溶液门控液体系统的内部压强变化(a)和跨膜压强阈值(b)

## 5.2 不同金属阳离子作用下的系统气体跨膜压强阈值的测试结果

不同金属阳离子 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Ca}^{2+}$ 作用下的系统气体跨膜压强阈值数据见表1。高价金属阳离子 $\text{Ca}^{2+}$ 的气体跨膜压强阈值变化值(3.46 kPa)明显高于一价离子 $\text{Na}^+$  (1.56 kPa),表明 $\text{Ca}^{2+}$ 对气体跨膜压强阈值的降低效果显著大于 $\text{Na}^+$ 。

表1 金属阳离子作用下的系统气体跨膜压强阈值测试结果

添加的金属阳离子类型	跨膜压强阈值/(kPa)
仅表面活性剂溶液	20.57
$\text{Na}^+$	19.01
$\text{Ca}^{2+}$	17.11

### 5.3 被检测物含金属阳离子的液体门控可视化检测结果

利用如图6(a)所示的自搭建液体门控可视化检测模块对金属阳离子 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Ca}^{2+}$ 分析物进行原位可视化检测。可视化标记物的移动位移结果(图6(b))直观地反映出,在加入金属阳离子 $\text{Na}^+$ 的液体门控系统中,标记物移动位移为21 mm;而在 $\text{Ca}^{2+}$ 的液体门控系统中,标记物移动位移为24 mm。这与实验结果5.2小节相符,表明 $\text{Ca}^{2+}$ 对气体跨膜压强阈值的降低效果显著优于 $\text{Na}^+$ 。

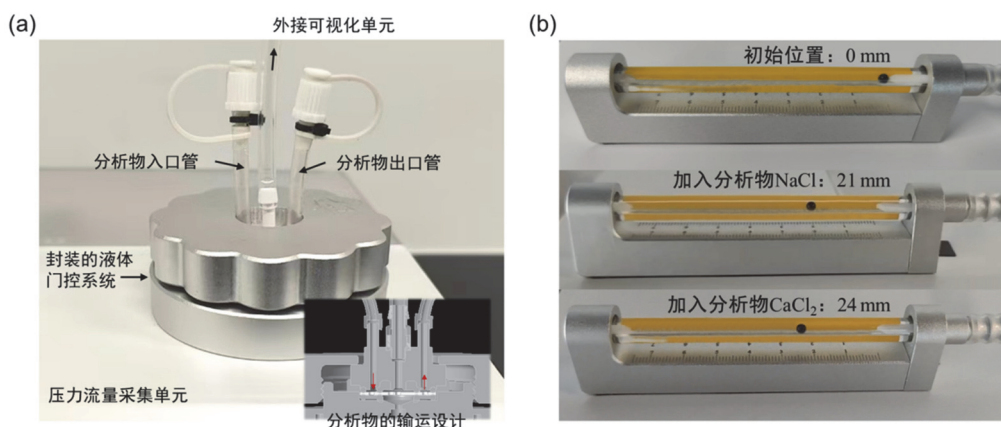


图6 (a) 原位液体门控可视化检测装置; (b) 可视化单元检测结果

## 6 思考题

- (1) 在纯水门控液体中增加I类和II类溶质分子,系统的气体跨膜临界压强阈值将有何种变化?简述加入SDBS表面活性剂分子引起的系统气体跨膜压强阈值变化原理。
- (2) 简述液体门控可视化物质检测特点,并讨论它与其他类型物质检测方法的不同之处。
- (3) 液体门控技术在物质检测中的应用有何优势?如何进一步优化该技术?

## 7 注意事项与教学建议

本实验是厦门大学化学化工学院“化学测量学综合实验”中“液体/固体表界面性质测量”的并行实验之一。实验设计注重学生综合能力的培养,强调实验方案的设计和演示效果。在具体操作过程中,由于本实验属于前沿技术的实际应用实验,涉及压强测试,因此在跨膜压强测试过程中需特别关注整个装置的气密性,尤其是在膜材料的封装步骤中。在注射单元推注过程中,应注意注射器的位置和夹持状态,确保其始终保持在流体推注和稳定推注的状态。

本实验建议采用线上与线下相结合的教学模式,使用启发式互动教学方法引导学生独立探究和解决液体门控检测的实际应用问题。线上部分(建议时长> 2学时):在实验前进行,学生可通过自主观看液体门控原理讲解和技术介绍视频,学习实验相关原理,熟悉操作流程,并完成实验预习报告的撰写。线下部分(时长约6学时):包括课前提问、实验设计讲解、仪器设备介绍及使用指导、实验示教、学生自行实验、实验结果检查与总结等环节。实验组织形式可采用集中讲解与分组实验操作相结合的方式。实验操作建议以2-3人为一组,设置3-5个小组。

为了全面衡量学生在实验课程中的表现,建议从仪器搭建、实验操作和实验报告三个关键环节进行考核。每个环节围绕具体的教学目标设置明确的考核标准,从而形成科学、全面的评价体系(见表2)。以下为完善后的考核设计:

本课程的实验内容以前沿科技的“液体门控技术”为基础,具有显著的创新性,并融合了多学科交叉的特点。因此,建议教师根据学生的专业背景和学习需求,对课程内容进行灵活调整。例如,对于仪器研发相关专业的学生,教学中可以深入探讨仪器的内部设计及其关键技术,从而进一步提升学生在仪器研发与设计方面的专业技能。

表2 教学目标达成度的考核设计

考核环节	教学目标	考核标准
仪器搭建	培养规范严谨的实验习惯与分工协作的团队精神	仪器搭建及调试过程符合实验规范; 团队成员之间分工明确、协作高效; 具备耐心与责任感, 确保仪器调试完成后正常运行
实验操作	培养实事求是的科学态度与熟练的实验操作技能	严格遵循实验规范, 操作过程清晰有序; 数据记录及时、准确; 展现熟练的实验技能, 能够独立完成实验步骤并解决基础问题
实验报告	培养规范严谨的实验习惯与独立思考的能力	报告结构完整, 逻辑清晰; 分析深入, 能够结合实验结果进行全面阐述; 体现出学生对实验原理和结果的深刻理解以及独立思考能力

## 8 结语

本实验巧妙地结合了表面活性剂溶液的界面行为调控机制与液体门控的开关行为原理, 创新设计了一种针对表界面性质测量的应用型液体门控可视化物质检测实验。具体实验内容包括: 学生利用液体门控机制定量分析表面活性剂的临界胶束浓度; 定性分析金属阳离子对含SDBS分子的液体门控系统的气体跨膜压强阈值影响; 通过利用可视化检测模块, 检测金属阳离子分析物。

本实验是一项理论知识、动手实践和科学思维训练相结合的综合实验, 不仅巩固了学生在界面理论方面的知识, 还培养了他们将前沿科技技术融入实际应用的能力。同时, 通过液体门控压力阈值仪及其拓展模块的搭建, 学生可以在新仪器操作的实践课程中提升动手能力, 从而打造综合性与智能化的教学体验。

## 参 考 文 献

- [1] 陈洪燕, 韦卓勋, 苏成勇, 高松. 大学化学, **2024**, *39* (10), 1.
- [2] 俞寿云, 章文伟, 邓顺柳, 李维红, 任艳平, 李一峻, 淳远, 李厚金, 马荔, 赵发琼, 等. 大学化学, **2024**, *39* (10), 52.
- [3] 吴伟泰, 张来英, 淳远, 乔亮, 任斌. 大学化学, **2024**, *39* (10), 64.
- [4] 张来英, 吴伟泰, 王翊如, 邓顺柳, 陈招斌, 陈嘉嘉, 任斌. 大学化学, **2024**, *39* (10), 107.
- [5] 傅献彩, 沈文霞, 姚天扬, 侯文华. 物理化学(下册). 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [6] 朱志昂, 阮文娟, 郭东升. 物理化学(上册). 北京: 科学出版社, 2023.
- [7] Fan, Y.; Sheng, Z.; Chen, J.; Pan, H.; Chen, B.; Wu, F.; Wang, S.; Chen, X.; Hou, X. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2019**, *58*, 3967.
- [8] Hou, X.; Hu, Y.; Grinthal, A.; Khan, M.; Aizenberg, J. *Nature* **2015**, *519*, 70.
- [9] 周璇, 樊漪, 蒋焯琪, 李智鹏, 袁国文, 张来英, 侯旭. 大学化学, **2024**, *39* (10), 113.
- [10] Wang, H.; Fan, Y.; Hou, Y.; Chen, B.; Lei, J.; Yu, S.; Chen, X.; Hou, X. *Nat. Commun.* **2022**, *13*, 1906.