

液体门控机制及基本性质测定 ——化学“101计划”表界面性质测量实验新设计

周璇^{1,†}, 樊漪^{1,3,†}, 蒋焯琪², 李智鹏², 袁国文³, 张来英¹, 侯旭^{1,2,*}

¹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

²厦门大学人工智能研究院, 福建 厦门 361005

³门创科技(厦门)有限责任公司, 福建 厦门 361005

摘要: 介绍一个涵盖界面化学、物理化学与仪器分析等多学科的基础实验。本实验融合前沿科技成果“液体门控技术”, 以自主研发的液体门控教学测试分析仪(压力阈值仪)的设计原理和先进表征技术特性为基础, 结合本科生化学“101计划”中的化学测量学实验——液体门控机制及基本性质测定, 创新教学模式, 丰富化学测量学实验中关于界面科学表征的课程设计。

关键词: 化学“101计划”; 界面科学; 液体门控技术; 教学仪器; 液体门控压力阈值仪; 课程设计
中图分类号: G64; O6

Liquid Gating Mechanism and Basic Properties Characterization: a New Experimental Design for Interface and Surface Properties in the Chemistry “101 Plan”

Xuan Zhou^{1,†}, Yi Fan^{1,3,†}, Zhuoqi Jiang², Zhipeng Li², Guowen Yuan³, Laiying Zhang¹, Xu Hou^{1,2,*}

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

² Institute of Artificial Intelligence, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian Province, China.

³ Gating Inspired Future Technology Co., Ltd., Xiamen 361005, Fujian Province, China.

Abstract: This report introduces a foundational laboratory experiment that integrates interface chemistry, physical chemistry, and instrumental analysis. It utilizes cutting-edge “liquid gating technology” and is based on the principles and advanced characterization features of the self-developed Liquid Gating Teaching Testing Analyzer (Pressure Threshold Analyzer). The experiment of Liquid Gating Mechanism and Basic Properties Characterization is part of the undergraduate course Chemical Metrology Experiments in the Chemistry “101 Plan”. This study presents innovative teaching models and enhances the course design by incorporating advanced techniques for characterizing interface science within physical chemistry experiments.

收稿: 2024-07-26; 录用: 2024-09-11; 网络发表: 2024-09-20

[†]共同第一作者, 对本文工作同等贡献

*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, T2241022, 21975209, 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); 嘉庚创新实验室科技项目(RD2022070601); 新基石科学基金和中国博士后科学基金(2023M732931)

Key Words: Chemistry “101 Plan”; Interface science; Liquid gating technology; Teaching device; Liquid gating pressure threshold analyzer; Curriculum design

随着化学“101计划”的启动，化学领域的本科教育教学改革蓬勃展开^[1,2]，“化学测量学实验”是教育部化学“101计划”中的12门核心课程之一。“液体门控机制及基本性质测定”实验依托我国科学家自主研发的液体门控教学测试分析仪(压力阈值仪)，为“化学测量学实验”课程中的表界面性质测量提供了全新的实验设计思路。本实验将新型界面表征原理融入教学，通过基于液体门控压力阈值仪的表界面性质测量，将理论知识、动手实践与科学思维相融合，不仅提升了学生对界面理论知识的理解，还激发了学生在仪器设备搭建与研发仪器方面的兴趣，增强了学生自研仪器设备的信心。通过该实验，学生将掌握界面表征仪器的结构与搭建方法，学习仪器设备的研发过程，并进一步加深对科学问题的理解与认识。

1 实验目的

- (1) 了解表界面性质，能够阐述毛细作用原理。
- (2) 掌握液体门控机制，能够对液体门控系统中的流体输运行为开展研究。
- (3) 能够说明基本的跨膜压强测量原理，并测量液体门控膜系统的跨膜压强阈值，能够阐述液体门控系统中多孔固体和门控液体的基本性质与液门开关行为的关系。

2 实验原理

2.1 液体门控技术

受自然界生物体结构的启发，2015年，“液体门控机制”首次被提出^[3]，即“液体在限域孔道内受毛细力作用稳定地填充在孔道内部，形成一种闭合状态的液体门控；在一定压力下，液体门控迅速开启，形成孔道内壁有液体内衬的通路；进一步地，这种液体门控状态能够可逆地调控^[4]”。随后，这一概念的理论逐步完善，开发了具有力^[5]、光^[6]、热^[7]、电^[8]、磁^[9]、声^[10]等多外场响应的液体门控系统，并发展成为一种“液体门控技术”。

液体门控系统是由固体多孔材料和液体材料复合的系统，具有对输运流体进行门控开关的行为。液体门控系统的出现将传统固体膜门控系统中的界面科学问题从固/气(或固/液)界面拓展到固/液/气(或固/液/液)界面^[11]。如图1所示，与固体门控系统不同的是，气体输运无需克服阻力，而液体输运需要克服阻力；在液体门控系统中，输运流体需要在一定压力作用下使门控液体表面变形，才能通

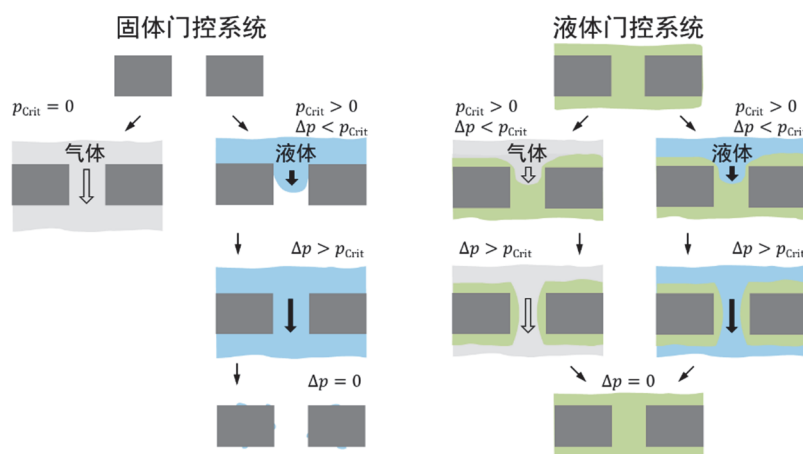


图1 固体门控系统与液体门控系统

过液体门控系统。在这一过程中，输运流体需要克服跨膜运输所需的最小压强，即临界压强(p_{Crit} ，跨膜压强阈值，即单位面积上的跨膜压力阈值)。当膜两侧的压力差 Δp 小于跨膜压强阈值 p_{Crit} 时，输运流体无法通过液体门控膜；而当膜两侧的压力差 Δp 大于跨膜压强阈值 p_{Crit} 时，输运流体才能通过液体门控膜。

液体门控系统内的流体传输行为受到三种基本组件(固体多孔膜、门控液体和传输流体)在微孔限域多相界面上产生不同界面性质的影响。当输运流体为气体时，其临界跨膜压强将与拉普拉斯压强有关。根据杨-拉普拉斯方程^[12]，可得关系式：

$$p_{\text{Crit}} = p_{\text{In}} - p_{\text{Out}} = \gamma(1/R_1 + 1/R_2) \quad (1)$$

其中， p_{In} 为流入膜系统的压强， p_{Out} 为流出膜系统的压强， γ 为液体的表面张力， R_1 与 R_2 为液面的曲率半径。当弯曲液面为球形时， $R_1 = R_2 = R$ ，则可以简化关系式为：

$$p_{\text{Crit}} = \gamma(1/R + 1/R) = 2\gamma/R \quad (2)$$

2.2 液体门控压力阈值仪

液体门控技术密切相关于多相界面之间的相互作用。基于此，我国科学家自主研发了液体门控教学测试分析仪(压力阈值仪)，主要由多相流体输运单元、压力流量采集单元、膜封装单元和数据交互单元四部分构成(如图2)。该设备能够以压力形式输出固/液/液或固/液/气多相界面的相互作用信息，可用于深入表征固体或液体物质的表界面性质以及分析介观限域孔道内的流体行为。液体门控压力阈值仪结合了界面行为的微观机理与宏观力的表现形式，为界面表征提供了新的技术手段，拓宽了界面表征的应用范围。

液体门控压力阈值仪的开发在硬件和软件两方面均具有创新性(图3)。硬件部分包括多相流运输单元、压力流量测试单元、膜封装单元及其总控制系统。软件部分涵盖人机交互界面、主控系统以及

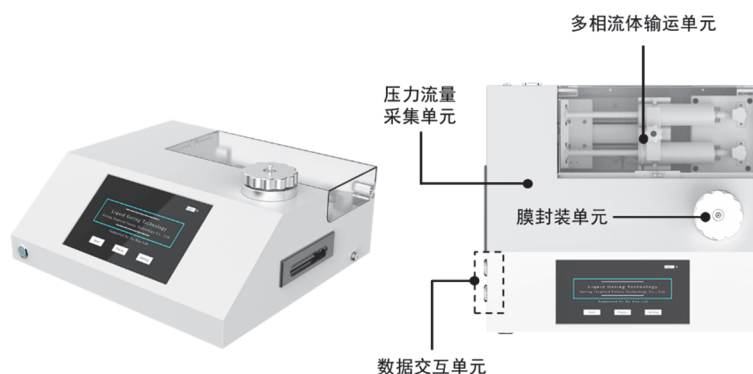


图2 液体门控压力阈值仪

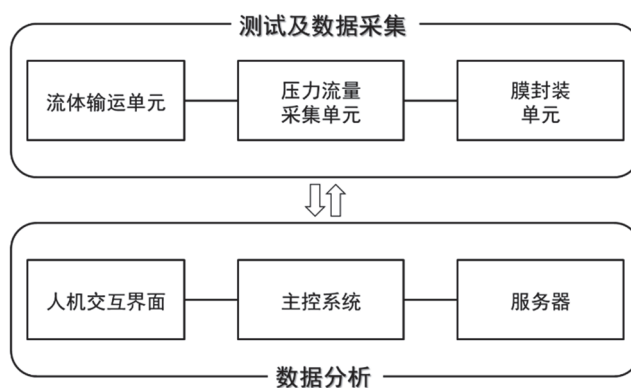


图3 液体门控压力阈值仪架构图

及服务器，能够记录系统内部的压强、流量和温湿度数据随时间的变化，并对应液体门控系统的具体门控开关行为。在测试操作结束后，相关数据可以直接导出，并传送至数据库终端进行智能优化和分析处理。借助人工智能的数据分析，系统具备数据持久化存储、异常值检测、特征数据提取和变量分析等功能。

3 实验仪器与试剂

自搭建的接触角测量仪1套；自研的液体门控压力阈值仪1台(门创科技(厦门)有限责任公司)；移液器(量程：10–100 μL) 1个。去离子水；乙醇水溶液(体积分数：0%，20%，40%，60%，80%和100%) (分析纯，国药集团化学试剂有限公司)；亲水尼龙膜(孔径：1，5和8 μm)；表面皿若干。

4 实验步骤

4.1 多相界面的接触角测量

采用自建设备测量固/液/气三相界面交界处的接触角。首先，组装并调试摄像机、光源、微量注射单元和载物平台，使摄像机、光源和微量注射单元在同一直线上，并将摄像机连接至电脑(图4a)。具体操作时，使用微量注射器吸取待测试的液体，缓慢注射2 μL 液滴，然后调整微量注射器或载物台的高度，使液滴和膜材料缓慢接触，形成液滴接触角。使用电脑端的软件记录图像，并利用分析软件得到接触角的数值(图4b)。

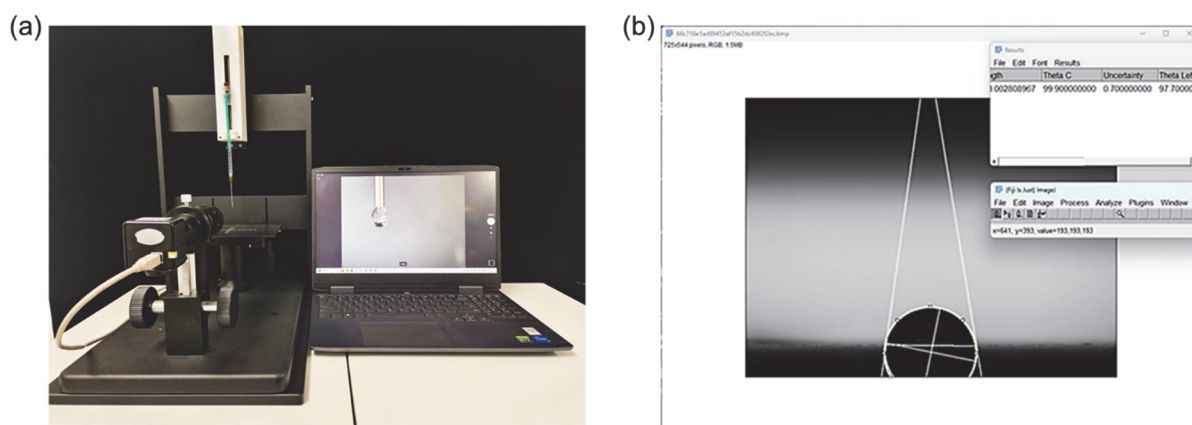


图4 接触角测量仪(a)及接触角分析(b)

4.2 液体门控系统的构筑及跨膜压强阈值测量

(1) 液体门控系统的构筑。用移液器移取目标门控液体滴加于尼龙膜表面，使尼龙膜完全被门控液体浸润，静置后取出。

(2) 跨膜压强阈值的测试。具体操作上，首先将浸润了门控液体的多孔固体膜材料装入仪器的膜夹具内；其次，根据仪器系统设定，依次选择或输入压力传感器型号、材料性质参数(包括门控液体、固体膜材料、膜孔径及参比孔径，如图5a所示)和注射单元参数(包括输运流体、流量和参比流量，如图5b所示)。然后，选择相对应的测试方案组，依次进行实验。最后，根据系统设定，将测试结果上传至数据分析平台，等待分析结果，并在实验记录本上记录相关流体跨膜压强阈值数据和结论。

固体门控系统与液体门控系统的对照实验设定。对照组：未浸润门控液体的尼龙膜(孔径：5 μm)；实验组：选择离子水-尼龙膜液体门控系统。选择量程0–100 kPa的压力传感器；其中传输流体为空气，设定流速为4 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。



图5 液体门控压力阈值仪的“材料性质设置”界面(a)和“注射单元设置”界面(b)

4.3 流速对液体门控系统的跨膜压强阈值的影响

选取孔径为5 μm 的尼龙膜，充分浸润去离子水门控液体，静置后取出，完成去离子水-尼龙膜液体门控系统的搭建。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，流速依次设定为2、4、6、8、10 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

4.4 多孔固体膜材料孔径对液体门控系统的跨膜压强阈值的影响

选取不同孔径的尼龙膜(孔径分别为1、5、8 μm)，依次充分浸润去离子水的门控液体，静置后取出，完成不同孔径下的去离子水-尼龙膜液体门控系统的搭建。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 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

4.5 不同表面张力的门控液体对液体门控系统的跨膜压强阈值的影响

用去离子水配制一系列乙醇水溶液，体积分数分别为0%，20%，40%，60%，80%和100%作为门控液体。通过表面张力测量模块依次测得不同乙醇水溶液的表面张力数值。选取孔径为5 μm 的尼龙膜，将其浸润在上述系列乙醇水溶液中，静置后取出，完成不同表面张力下的乙醇水溶液-尼龙膜液体门控系统的搭建。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 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

4.6 门控液体的量对液体门控系统的门控行为的影响

选取孔径为5 μm 的尼龙膜，用移液器分别移取10、30、50 μL 体积的去离子水于尼龙膜表面，静置3 min后取出，完成含不同量的门控液体的去离子水-尼龙膜液体门控系统的搭建。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 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

5 结果与讨论

5.1 不同膜材料的润湿性探究

以水在材料界面的接触角为例，在疏水膜材料表面(图6a)，水的接触角测量值为150.4°，表明水在该材料上具有较差的润湿性；而在亲水膜材料表面(图6b)，水的接触角测量值为39.4°，表明水在该材料上具有较好的润湿性。通过润湿性测试结果，学生可以初步评估系统内固液材料复合的稳定性。

5.2 流量、孔径和表面张力对液体门控压力阈值的影响

对液体门控系统施加不同流量的气体进行增压，从图7看出，随着流速增加，系统内的增压速率逐渐提高(图7a)，气体跨膜压强阈值也将逐渐增大(图7b)。液体门控系统可以被视为一个智能自驱动的调控门，当流量增大时，系统在平衡状态下的开度将会增加，因此需要更大的压力来打开孔道并释放压力，这表现为更高的气体跨膜压强阈值。

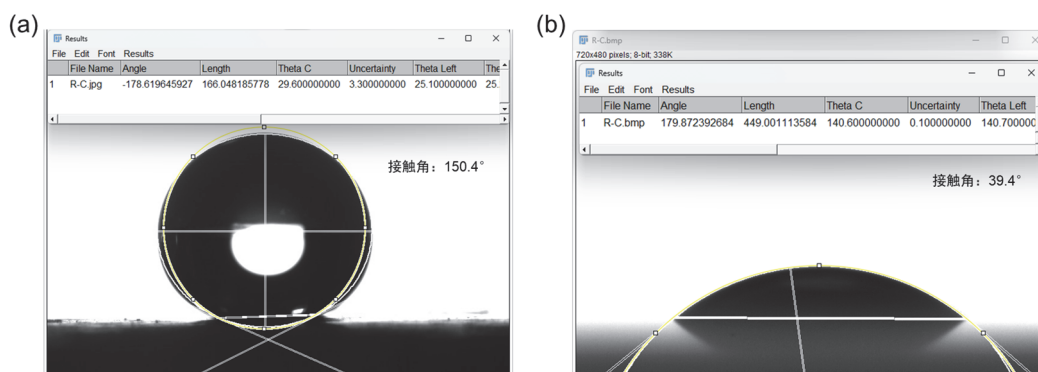


图6 水对不同膜材料的润湿性比较

(a) 疏水材料; (b) 亲水材料

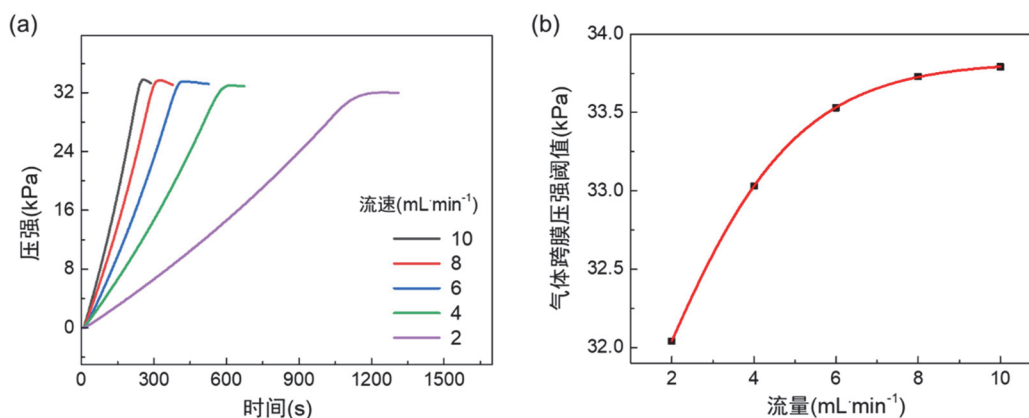


图7 不同流量下系统的内部压强变化(a)和跨膜压强阈值(b)

由式(2)可知, 系统内物质的跨膜压强阈值受多孔固体材料孔径和门控液体表面张力的影响。图8结果验证这一点: 孔径越小, 气体跨膜压强阈值将越大(图8a); 而乙醇水溶液的表面张力越低(即乙醇的体积分数越大), 气体跨膜压强阈值则越小(图8b)。

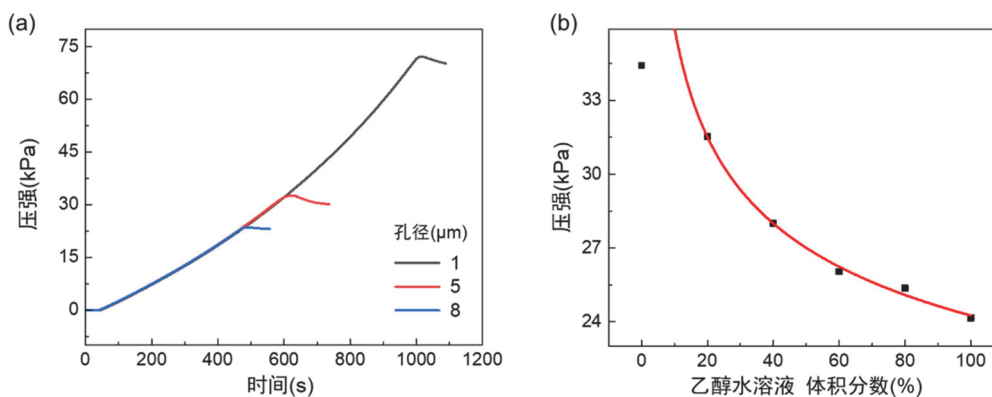


图8 孔径(a)和表面张力(b)对液体门控系统的跨膜压强阈值的影响

5.3 门控液体的浸润量对系统的门控行为影响

在不同门控液体量下, 多孔固体膜材料的浸润程度将会不同(图9a)。因此, 当多孔固体材料未被

完全浸润时，测得的气体跨膜压强阈值将始终为零，而当完全被浸润后，气体的跨膜压强阈值可以被测得，且随着门控液体量的增加而逐渐增大(图9b)。

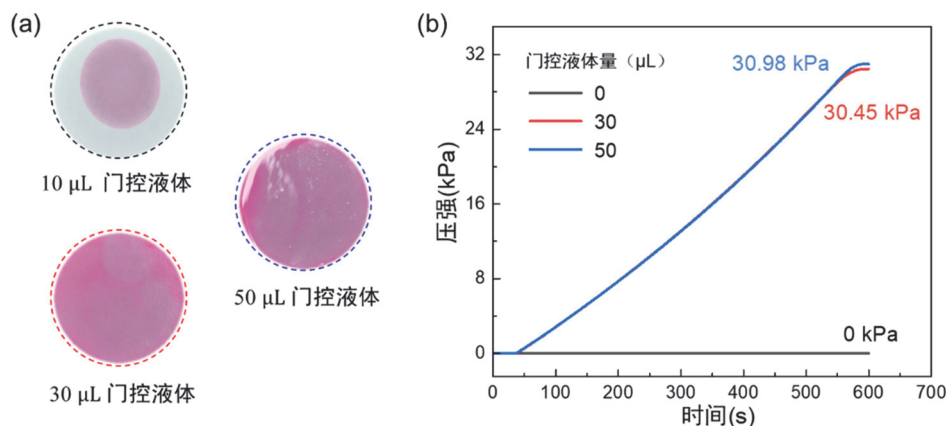


图9 不同门控液体量下膜材料的浸润程度(a)和系统的内部压强变化(b)

6 思考题

- (1) 液体门控系统有哪些特点，简述它与多孔固体系统有何不同？
- (2) 若选择不同材质的多孔膜，系统的跨膜压强阈值是否有变化？结合液体门控机制讨论门控液体的表面张力如何影响跨膜压强阈值(液体门开关行为)的变化。
- (3) 与输运气体的液体门控系统相比，若输运流体为液体，系统的跨膜压强阈值将如何变化？与输运气体体系有何不同，为什么？

7 教学反馈与教学建议

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/固体表面性质测量”的并行实验之一。实验以液体门控技术为载体，旨在激发学生的学习兴趣，增强学生对前沿科学技术学习的主观能动性。在实验教学过程中，重点介绍液体门控技术的原理及液体门控压力阈值仪的先进设计策略。通过从经典毛细作用理论入手，逐步引出液体门控系统界面科学问题，进而基于物质输运原理，引导学生学习一台表界面表征仪器的设计过程，并利用该设备完成相关表界面性质参数的表征。这一过程有助于学生构建完整的科学思维体系。

本实验具体分为集中理论学习和分组实验操作两部分，建议安排6学时，其中理论2学时，实验操作4学时。实验操作以2-3人为一组，建议设置3-5组。除了本文所列举的实验内容外，鉴于液体门控技术的多学科交叉性，教师也可根据学生的专业背景和学习需求灵活调整课程内容。对于化学及相关领域专业的学生，课程需要注重表界面化学、流体力学及液体门控技术的理论基础和应用前景，尤其是在材料科学、生物医学和环境工程等领域的应用潜力。而对于化学测量学专业的学生，课程则深入探讨仪器构建的关键技术，包括传感技术、信号处理、电路与机械设计原理，确保学生全面理解设备的开发流程。

8 结语

液体门控机制及其技术开发作为界面科学的重要表征方法之一，落实了化学“101计划”中本科生教育教学改革的创新要求。本实验结合液体门控技术的原理与液体门控压力阈值仪的搭建策略，设计了一系列关于液体门控系统基本性质的测定实验。实验首先从多相界面的接触角测量开始，随后以水基溶液-亲水尼龙膜材料复合的液体门控系统为具体实验对象，探讨系统中流速、多孔固体膜

材料孔径、门控液体表面张力及其用量对系统门控行为的影响。

本实验融合了物理化学界面理论与界面性质表征技术，既注重界面化学基础理论的学习，也强调利用自研的液体门控压力阈值仪进行界面性质测试的实验教学。这种教学模式将前沿科技融入教学改革，强调教育实施过程中学科发展的灵活性和前瞻性，不仅极大丰富了学生的学习内容，还提供了一个理论与实践并重的学习平台，使学生能够洞察未来科学发展趋势，提升综合素质，增强创新意识和解决实际问题的能力。

参 考 文 献

- [1] 化学“101计划”工作启动会在北大化院顺利召开. [2024-09-13]. <https://www.chem.pku.edu.cn/xyxw/149490.htm>
- [2] 在教育强国建设中充分发挥高等教育龙头作用. [2024-09-13]. http://www.moe.gov.cn/jyb_xwfb/s5148/202306/t20230627_1065948.html
- [3] Hou, X.; Hu, Y.; Grinthal, A.; Khan, M.; Aizenberg, J. *Nature* **2015**, 519, 70.
- [4] Hou, X. *Adv. Mater.* **2016**, 28, 7049.
- [5] Sheng, Z.; Wang, H.; Tang, Y.; Wang, M.; Huang, L.; Min, L.; Meng, H.; Chen, S.; Jiang, L.; Hou, X. *Sci. Adv.* **2018**, 4, eaao6724.
- [6] Han, Y.; Zhang, Y.; Zhang, M.; Chen, B.; Chen, X.; Hou, X. *Fundam. Res.* **2021**, 1, 800.
- [7] Chen, B.; Wang, H.; Xu, J.; Pan, L.; Jing, Y.; Hou, X. *Green Energy Environ.* **2023**, 8 (6), 1501.
- [8] Zhang, Y.; Han, Y.; Ji, X.; Zang, D.; Qiao, L.; Sheng, Z.; Wang, C.; Wang, S.; Wang, M.; Hou, Y.; *et al.* *Nature* **2022**, 610, 74.
- [9] Liu, J.; Xu, X.; Lei, Y.; Zhang, M.; Sheng, Z.; Wang, H.; Cao, M.; Zhang, J.; Hou, X. *Adv. Mater.* **2021**, 34, 2107327.
- [10] Liu, J.; Sheng, Z.; Zhang, M.; Li, J.; Zhang, Y.; Xu, X.; Yu, S.; Cao, M.; Hou, X. *Mater. Horiz.* **2023**, 10, 899.
- [11] 张运茂, 韩雨航, 王苗, 侯旭. *科学*, **2023**, 75, 1.
- [12] 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.