

界面物理化学中的课程思政元素挖掘与教学实践 ——以“弯曲表面上的附加压力”为实践案例

孙艳辉*, 南俊民, 马国正, 左晓希, 李国良, 林晓明

华南师范大学化学学院, 广州 510006

摘要: 本文从知识体系、应用拓展、科学家贡献三个维度梳理了界面物理化学中蕴含的科学精神、科学伦理和家国情怀等思政元素。并以“弯曲表面上的附加压力”一节为例开展了教学实践, 通过线上线下、课前课中课后、教师和学生等多种混合方式, 在课程教学不同环节融入思政元素。该模式为理工类专业课程融入思政教育提供了参考。

关键词: 界面物理化学; 附加压力; 课程思政; 科学精神; 家国情怀; 混合式教学

中图分类号: G64; O6

Exploration and Teaching Practice of Ideological and Political Elements in Interface Physical Chemistry: Taking “Additional Pressure on Curved Surfaces” as an Teaching Example

Yanhui Sun*, Junmin Nan, Guozheng Ma, Xiaoxi Zuo, Guoliang Li, Xiaoming Lin

School of Chemistry, South China Normal University, Guangzhou 510006, China.

Abstract: This paper explores the ideological and political elements, including scientific spirit, scientific ethics, and patriotic sentiment, present in interface physical chemistry from three dimensions of knowledge system, application expansion, and scientists' contributions. Using the topic of “Additional Pressure on Curved Surface” as a practical example, teaching practices are implemented by integrating ideological and political elements throughout different stages of the course, employing a variety of blended methods such as online and offline activities, pre-class, in-class, and post-class assignments, and involving both teachers and students. This model provides a reference for integrating ideological and political education into science and engineering courses, particularly in the field of physical chemistry.

Key Words: Interface physical chemistry; Additional pressure; Curriculum ideological and political education; Scientific spirit; Patriotic sentiment; Blended learning

目前, 课程思政已经全面纳入本科教学体系, 各类课程要与思政理论课同向同行。《高等学校课程思政建设指导纲要》指出, 理学类专业课程要注重科学思维方法的训练和科学伦理的教育, 培养学生探索未知、追求真理、勇攀科学高峰的责任感和使命感^[1]。物理化学知识体系本身蕴含丰富的哲学思想和思政元素, 非常适合在课程教学中把马克思主义立场观点方法的教育与科学精神的培养结合起来, 提高学生正确认识问题、分析问题和解决问题的能力, 将显性教育和隐性教育相统一, 实现知识传授与思想价值引领相融合, 构建课程育人大格局^[2-4]。

收稿: 2024-02-06; 录用: 2024-04-17; 网络发表: 2024-04-25

*通讯作者, Email: sunyanhui0102@163.com

基金资助: 广东省课程思政改革示范项目(202121015); 国家一流线上线下混合式课程; 广东省质量工程项目(202323213); 华南师范大学质量工程项目(202107144)

本文以界面物理化学为例，深度挖掘提炼专业知识体系中所蕴含的思想价值和精神内涵，从课程知识体系建构、应用拓展、科学家贡献三个维度科学合理地拓展课程的广度、深度和温度。同时，以“弯曲表面的附加压力”一节为例，介绍如何将课程思政元素润物无声地融入教学过程，实现立德树人目标。

1 界面物理化学知识体系中的思政元素

从发展历史看，不同于经典热力学和动力学，界面物理化学属于近代发展起来的一个分支，对其原理和现象的认识是随着近现代物理学的进步和高精尖检测设备的问世而快速发展起来的分支学科。其研究对象链接宏观与微观，内容涉及化学、材料、能源、环境、医药、农业等多学科领域，属于典型的交叉学科。其理论发展和拓展应用中蕴含了丰富的科学精神、科学伦理、家国情怀、文化传承等思政元素^[5,6] (表1)。

表1 界面物理化学相关知识点和可融合的思政元素举例

知识点	思政结合点	体现的思政元素	融入策略
表面自由能	巨大的表面自由能与粉尘爆炸的联系	科学伦理：社会安全	① 线下授课 ② 案例拓展，课后阅读资料；学生调研报告等
弯曲表面的附加压力和毛细现象	① 利用毛笔和宣纸对墨水的附加压力，中国航天员在太空安全书写；② Young-Laplace方程命名的历史；③ 毛细管永动机的批判；④ 生活中的附加压力：医学领域的气塞、材料防护领域的气蚀现象	① 家国情怀、文化自信和自信 ② 科学伦理：尊重原创 ③ 科学思维：质疑与批判思维 ④ 科学伦理	① 导课案例 ② 线下授课 ③ 小组讨论 ④ 线下导课案例或线上拓展阅读资源
弯曲表面液体的饱和蒸气压	① 在人工干预天气中的应用，人工驱雨，人造冰雪，为中国顺利举办两届奥运会保驾护航；② 液体暴沸现象；③ <i>Nature</i> 杂志发表中国学者王奉超对Kelvin方程的适用性的研究进展	① 家国情怀：民族自豪、科技报国 ② 科学伦理：安全生产问题 ③ 民族自豪，勇攀科学高峰的创新精神	① 线下授课导课案例 ② 课后阅读资料 ③ 线下授课
超疏水现象	① 莲花效应：古诗词中超疏水现象；② 大国工程、大国重器中超疏水材料的应用；③ 仿生超疏水材料引领者：江雷院士科学事迹简介	① 文化自信 ② 家国情怀，科技报国 ③ 科学精神：民族自豪、科技报国、创新精神	① 线下导课案例 ② 课后阅读资料或学生调研报告 ③ 线上拓展资源
气固表面吸附理论	从Langmuir的单分子层吸附理论到BET多层吸附理论，以及不断发展的其他吸附理论	科学精神：创新与发展	线下授课
表面活性剂	表面活性剂的滥用带来的环境问题	科学伦理：土壤环境、水体环境的保护	线上拓展资源

接下来，分别从经典理论知识、应用拓展、科学家贡献等角度分析在界面物理化学中可融入的各种思政元素。

1.1 基于经典理论知识，挖掘开拓创新、质疑批判的科学精神

在“弯曲表面特有的表面现象——弯曲表面液体饱和蒸气压”知识点中，可以融入科学家的创新开拓精神。例如，在学习Kelvin方程的推导和基本应用后，介绍我国学者王奉超教授在*Nature*期刊发表的研究成果，将该方程中弯曲表面的曲率半径从150多年前的微米尺度拓展到原子尺度^[7]，其应

用领域从介稳现象发展到了纳米限域效应。该案例让学生感受到经典的理论也是在不断创新与发展的，同时也展示了中国科学家的开拓创新精神，可以培养学生的创新意识和民族自豪感。在“固体表面吸附理论”知识点中，吸附模型在不断修正与发展，这可以让学生体会科学知识的认识是不断发展、不断更新与迭代的。例如从Langmuir的单分子层吸附理论到BET多层吸附理论，以及还在不断发展的其他类型的吸附理论^[8]，科学家在前人研究基础上摒弃不合理的假设和近似模型，不断优化提出更合理的、适用性不同的吸附模型。这些都渗透着科学家不断创新与发展、质疑与批判等科学精神。

1.2 基于应用拓展挖掘科学伦理和家国情怀等元素

界面物理化学的基本原理可以拓展到上至国家战略、下至与人类生活密切相关的衣、食、住、行、医、药、材等多个领域。在相关知识的拓展应用中，可以挖掘许多科学伦理、科学精神和家国情怀等思政元素。

例如，由于表面效应产生的巨大表面能和大表面积导致的快速反应，在生产中往往因处置不当造成粉尘爆炸事故：例如近年来高校实验室频发的铝粉爆炸、镁粉爆炸等，造成巨大的人员伤亡和财产损失；医学治疗中输液操作不当引入小气泡到血管中，导致由于附加压力引起的气体栓塞而产生医疗事故；蒸馏精馏实验操作中由于小气泡的附加压力使得小气泡的蒸气压远小于平面液体的饱和蒸气压，到达沸点却不沸腾，继续升温产生暴沸现象，若处理不当则造成实验事故等；表面活性剂在食品、化工、医药行业的过度应用造成环境污染、影响人体健康以及给社会带来负面效应。这些都涉及到社会责任和科学伦理问题。在教学中，可以通过线下或线上观看案例视频警示学生高度重视，并利用所学知识避免此类事故发生，承担起社会责任。

工业生产、科学前沿都离不开界面化学知识。通过相关界面化学知识的拓展，培养学生的科学精神和科技兴国、产业报国的志向。由液固界面的超疏水表面，拓展到超疏水材料在大国工程项目如港珠澳大桥的水下桥基防腐，潜艇、轮船等减阻防腐的应用；由附加压力产生的毛细现象拓展到青藏铁路修建中技术人员如何避免毛细水对高寒冻土路基的稳定性产生影响^[9]……等等，激励学生学习科学家勇于探索未知、追求真理、勇攀高峰的科学精神和科技兴国的责任感。

1.3 基于科学家贡献挖掘科学精神、家国情怀元素

通过对界面物理化学的发展做出卓越贡献的国内外科学家的事迹介绍，挖掘科学家在科学研究道路上孜孜以求、不断探索、勇攀高峰的科学精神。例如表面化学创始人Langmuir在科学研究上涉猎广泛，成为第一个获得诺贝尔奖的工业化学家，以此激励学生的责任感和使命感。德国马普研究所的科学家Gerhard Ertl因在固体表面化学领域的杰出贡献而获得2007年诺贝尔化学奖，他利用多种现代表面分析技术对哈伯-博施合成氨复杂催化反应的表面化学过程机制进行深入研究，极大地提高了合成氨的反应速率^[10,11]。

中国同样拥有从事界面物理化学研究的科学家：在讲解物理吸附、化学吸附知识点时，介绍张大煜先生自青年时期就力主“工业救国”“科学救国”，他针对国家需求组织水煤气催化合成液体燃料，建立物理吸附、化学吸附等系列研究方法，并提出“表面键”催化理论，推动了表面催化动力学的发展^[12]。讲解BET吸附理论时，介绍中国胶体表面科学的主要奠基人傅鹰先生的科学贡献和爱国事迹：傅鹰首次提出了利用润湿热测定固体粉末比表面的公式和方法，早于BET吸附法8年^[13]。其多次婉拒国外优厚条件，一心报效祖国。他研究了蒙脱土的吸附和润湿、石油钻井泥浆流变性、矿物浮选等国家建设急需的实际问题。在讲解超疏水现象时介绍江雷院士在仿生超疏水材料领域的研究带动了该方向在世界范围的发展。科学前辈们的渊博学识、高尚品德、求实作风和爱国精神，激励和鼓舞学生养成追求真理、勇攀科学高峰的精神和科技兴国、产业报国的使命担当^[14]。

1.4 基于界面物理化学知识的其他思政元素

仿生超疏水材料中著名的“荷花效应”完美地契合了中国的一句古诗“予独爱莲之出淤泥而不染”。为提高学生学习兴趣，教学实践中梳理了多首与界面物理化学相关的古诗词。例如唐朝韦应

物的《咏露珠》：秋荷一滴露，清夜坠玄天。将来玉盘上，不定始知圆。表现的是水有表面张力、弯曲表面有附加压力、球形表面能最低、荷叶具有超疏水结构等界面物理化学的知识，使得露珠呈球状。通过中国古诗词引入界面物理化学教学，以此培养学生对古诗词的热爱，提高文化修养，实现文化传承。

中国航天英雄王亚平两次太空授课都展示了水的表面张力实验，表明在失重环境表面张力不受影响；又例如中国举办双奥会、大型阅兵活动等运用了人工消雨和人造冰雪等人工干预天气技术，都涉及了界面物理化学中的亚稳现象。这些案例都彰显了中国力量，可以激发学生的爱国情怀和学习动力。

2 融合思政元素的线上线下混合教学实践

上述思政元素的挖掘，为开展课程思政教育奠定了良好的基础。在实际教学中可以根据不同的教学内容、不同类型的思政元素，灵活运用不同的融合策略，如表1所示。例如可以将蕴含思政元素的案例作为线下课堂的导课资料；可以将需要拓展的思政案例设置为小论文、调研报告等作为学生的课后作业；可以将科学家的科学探索事迹、典型的思政文献作为线上拓展资源供学生课后阅读。

以“弯曲表面的附加压力”为例，具体介绍融合思政的线上线下混合式教学实践过程。

2.1 课前——线上导学融入思政元素

课前，教师在中国大学MOOC平台发布融合思政元素的导学问题(图1)，学生通过查阅资料、学习线上思政文献等完成相应导学内容。例如：导学问题第7和9题，分别为人工干预天气在我国举办的两届奥运会中的应用；了解古诗词中的表面现象、了解大国工程项目中涉及的表面物理化学知识。学生在查阅资料完成导学问题过程中，既感受到科技奥运的力量，也为中国的强大感到自豪，又能感受到中国传统文化的魅力，同时增强了科技报国的使命担当和责任感。

The screenshot displays a MOOC interface with two learning materials on the left and a student list on the right. The materials include '13 表面物理化学 导学提纲 2023' and '太空书写小知识'. The student list table is as follows:

姓名	学号	开始学习时间
庄	20202421163	2023-05-31 09:25
叶	20202421121	2023-05-31 09:25
林	20202421120	2023-05-31 09:25
蓝	20202421070	2023-05-31 09:25
温	20202421125	2023-05-31 09:25
管	20202421123	2023-05-31 10:16
符	20202421168	2023-05-31 09:25
何	20202421040	2023-06-01 12:30
何	20202421029	2023-05-31 09:25
董	20202421065	2023-06-01 10:32

图1 课前线上发布融合思政元素的导学问题及学生预习情况

2.2 课中——线下教学融合思政元素

线下课堂教学流程如图2所示，给出了每一教学环节可融合的思政元素。



图2 弯曲表面的附加压力融入课程思政元素的融合策略

2.2.1 新课导入

教师点评学生线上预习情况，播放航天英雄刘伯明2021年在CCTV《开学第一课》节目中，用中国的文化瑰宝毛笔和宣纸在太空挥墨书写“理想”二字寄语青少年。以此引出本节主题——弯曲表面的附加压力。以该案例致敬航天英雄，传承中国古典文化、激发学生爱国情怀。

2.2.2 模型构建

根据学生线上预习出现的共性疑难问题，启发学生定性分析附加压力成因，定量推导附加压力计算公式，培养学生的逻辑思维和系统思维能力。引导学生首先从受力平衡角度推导凸面小液滴所受到的附加压力的计算公式，再拓展到凹面小气泡的推导，得出规则球面的附加压力公式(1)：

$$p_s = \frac{2\sigma}{R} \quad (1)$$

进一步拓展到不规则弯曲表面。不规则弯曲表面不能进行受力平衡分析，因此拓展到从能量守恒角度推导一般弯曲表面的Young-Laplace方程^[8]，式(2)：

$$p_s = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2)$$

按照该思路构建模型可以培养学生的科学思维能力。

2.2.3 问题探究

1) 首先结合附加压力产生的毛细压力，解释导课案例给出的问题。

由于毛笔和宣纸的微观结构都具有丰富的毛细孔道，弯曲液面对墨水产生附加压力，因此毛笔可以在太空安全书写而不会出现墨水飞溅现象。以这一案例彰显中国文化自信。

2) 不同教材对该方程使用不同名称的溯源。

部分教材称公式(1)、(2)为Young-Laplace方程^[8]，也有称Laplace-Young方程^[15]；部分教材称Laplace方程^[16]；也有少数称为Gauss-Laplace方程^[17]。文献研究^[17]表明：1805年，Thomas Young (英国物理学家，被誉为“最后一个什么都知道的人、百科全书式学者”)，在他的一篇关于流体粘滞力的论文中，首次用散文诗般的句子描述了液体的毛细现象；一年之后，1806年，Pierre-Simon Laplace (法国数学家和物理学家，天体力学、天体演化学的创立者，被誉为“应用数学的先驱，把上帝赶出宇宙的人”)，在他出版的《天体力学》一书的附录部分，详细给出了毛细压力的原理和公式。因此，

后人将描述附加压力的公式称为Young-Laplace方程或Laplace-Young方程都是合适的，但是如果只称为Laplace方程，对Thomas Young则是不公平的；而Gauss-Laplace方程的表述只见于19世纪德国的文献中，实际上，Gauss只是用变分的方法对公式进行了变换处理，出于对本国科学家的尊重，德国文献将描述毛细现象的方程称为Gauss-Laplace方程。该文献作为拓展资料发布于在线课程平台，以培养学生养成尊重原创、尊重知识产权的学术道德规范。

2.2.4 小组讨论

基于毛细现象，提出两种毛细管永动机的设想：已知半径为 R 的毛细玻璃管，水的凹液面与毛细管壁的夹角(接触角)为 θ ，则水沿管壁上升的高度为 h_0 。一种假设：有一相同半径 R 的玻璃毛细弯管，在 h_1 处弯曲， $h_1 < h_0$ ，则水会因毛细现象自动从弯管流出并带动叶轮转动，形成毛细永动机。第二种假设：有一相同半径 R 的玻璃毛细管，高度 $h_2 < h_0$ ，在高度 h_2 的管口上方装一容器，由于毛细现象，液体将通过毛细管口溢至上方容器并从容器侧壁小孔流出，驱动叶轮转动，形成第二种毛细永动机。引导学生分组讨论两种永动机是否成立。如果不成立，两支毛细管中水分别上升到什么位置？

通过讨论，所有小组都得出一致结论：因为热力学定律已经否定了永动机，因此两种毛细管永动机都不成立。对第一种毛细管中液体上升的位置，所有小组给出的结论都是上升到弯曲处，不可能流过弯处流下来。值得一提的是，有一小组联想到物理中的虹吸现象，产生了生成性问题：虹吸现象和第一类毛细管有何区别？对第二种毛细管，出现了两种答案，一种认为液体上升到毛细管最高的位置，不可能进入容器(正确结论)；第二种观点认为液体经毛细管上升进入容器，考虑重力、压力、流体力学等多种因素，液体不可能源源不断进入容器。讨论中出现了观点碰撞，生成了新问题。此时，教师引导学生从毛细现象的本质思考问题的关键，并肯定学生的质疑与批判思维、创新和发散思维以及知识迁移和独立思考的能力。

2.2.5 前沿拓展

基于前述学习内容，为了将经典理论与前沿创新融合，拓展学生的视野，同时展示我国学者在该领域取得的进展，设置如下四个问题引导学生课后阅读教师发布的文献解决问题：

- 1) 重力场中，Young-Laplace方程适用的曲率半径范围是多少？
- 2) 液相法制备纳米材料过程中，分散在液体中的纳米球具有丰富的液-固界面，纳米球表面内外压力差是否也适用于Young-Laplace方程？
- 3) 芯片制作中，在电场存在下，弯曲表面的Young-Laplace方程如何修正？
- 4) 单分散纳米材料的合成，通常采用超临界干燥技术，这和附加压力有何关系？

通过文献导读^[7,18]，可以找到上述问题答案：

1) 关于方程的适用范围，目前已从微米、纳米拓展到了原子尺度，特别引入中国科学技术大学王奉超教授2020年12月10日在*Nature*上报道的其团队在纳米限域毛细凝聚领域取得的重要研究进展^[7,18]。报道指出，“限域系统”通道内只能容纳一两层水分子，弯曲液面不存在，没有曲率半径，接触角无法准确定义。为了描述该尺寸下的毛细现象，研究者认为石墨烯通道内的毛细凝聚主要是固液界面间的相互作用。据此，对150年前的开尔文方程作了修订(注：毛细凝聚现象的本质为弯曲表面附加压力引起弯曲表面液体饱和蒸气压改变；开尔文方程与附加压力相关)。

2) 在液固界面，附加压力同样存在，这也是液相法合成纳米材料中晶核理论依据^[19]。

3) 对电场下的附加压力，只需要做如式(3)的修正^[20]：

$$p_s = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) - \frac{1}{2} \varepsilon E^2 \quad (3)$$

4) 纳米材料合成中，材料颗粒之间具有丰富的毛细孔，残余溶剂在毛细孔形成凹液面，产生巨大的附加压力，造成纳米材料的团聚或孔结构坍塌。因此，一般干燥过程通常采用低表面张力的溶剂置换水溶剂后进行干燥，以减小颗粒之间的附加压力；若条件允许，可采用超临界干燥技术完全避免附加压力的影响。

2.2.6 总结提升

分别从体系线、受力线、能量线对附加压力的形成、公式、应用进行梳理。然后随堂提问检验,要求学生利用附加压力知识解释学习、生活中的表面现象,如:①酒精灯灯芯为何能源源不断地将酒精吸上来?(学生回答:灯芯具有丰富的毛细纤维,酒精在纤维之间成凹液面,因附加压力对酒精产生毛细压力,因而可以不断上升)。②有些织物为何水洗后缩水?(水在某些织物的毛细纤维间呈凹液面,产生巨大的附加压力,破坏了纤维的弹性,即使晾干也不能恢复原状)。③护士为病人注射前为何要排除针筒中的气体?(如果针筒中一旦存留气体,随着注射液进入人体血液或组织,随着血液流动,到达毛细血管位置,由于毛细管半径越小,附加压力越大,阻碍血液流动,严重者形成气体栓塞,危及生命^[21])。最后布置课后作业:查阅文献,了解附加压力在材料合成干燥工艺中的影响。

2.3 课后作业和拓展阅读

为进一步巩固课程思政效果,课后布置思政作业和拓展阅读文献。在实际教学中,课后的思政作业是在学完胶体与界面化学专题后的一项大作业:“请结合胶体界面化学专题的课程内容,选择一主题,查阅文献,撰写一篇小论文(不少于1000字),自然融入科学思维、科学精神、科学伦理、家国情怀等思政元素中的一种或多种。”

2.4 教学反思

上述教学实践将批判与质疑、创新与开放、逻辑与辩证等科学思维自然地融入教学;通过导案例、前沿拓展文献等将科技兴国、科学精神、家国情怀、文化传承、科学伦理等思政元素如盐化水般融入教学,润物无声地实现立德树人目标。值得注意的是,在实际教学中,可根据具体学时安排,在线下课堂讲授中有选择地融入思政元素案例。同时利用在线课程平台展示一些思政元素相关的案例资源供学生阅读,或布置学生对有关思政案例进行调研并撰写调研报告。总之,教学中应灵活运用线上线下混合、课前课中课后混合、教师教和学生学相混合等多元思政融入策略,切忌喧宾夺主。

3 结语

本文以界面物理化学为例,从知识体系建构、应用拓展、科学家贡献三个维度挖掘了物理化学课程蕴含的思政元素,并以弯曲表面的附加压力一节为例,给出了融入课程思政元素的教学实践案例,力图将价值塑造、知识传授和能力培养融为一体,充分发挥课程育人作用。

致谢: 在论文完成过程中教育部师范院校物理化学课程虚拟教研室各位老师给予了宝贵意见和指导。

参 考 文 献

- [1] 教育部关于印发《高等学校课程思政建设指导纲要》的通知. [2023-10-20]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/202006/t20200603_462437.html?eqid=85c0d9cc000197de000000066443b6eb
- [2] 孙艳辉, 南俊民, 马国正, 何广平, 左晓希, 李国良, 林晓明. 大学化学, 2021, 36 (3), 2010015.
- [3] 赵红梅, 陆自强, 李崧, 李兴玉, 字成庭, 樊兴丽, 秦向东. 大学化学, 2024, 39 (3), 210.
- [4] 刘长霞, 李英, 周自成, 崔维真. 化学教育(中英文), 2023, 44 (4), 31.
- [5] 卢靖, 孔新刚, 赵亚娟, 冯永强, 景阿锋. 教育教学论坛, 2022, 36, 107.
- [6] 刘长霞, 王洪玲, 董翠芳, 李煦, 崔维真, 袁华. 化学教育(中英文), 2023, 44 (20), 36.
- [7] Yang, Q.; Sun, P. Z.; Fumagalli, L.; Stebunov, Y. V.; Haigh, S. J.; Zhou, Z. W.; Grigorieva I. V.; Wang, F. C.; Geim, A. K. *Nature* 2020, 588, 250.
- [8] 傅献彩, 侯文华. 物理化学(下册). 第6版. 北京: 高等教育出版社, 2022: 332-422.
- [9] 高志华, 石坚, 罗丽娟. 铁道建筑, 2010, No. 6, 94.

- [10] 科学史: 探索表面化学 | 2007年诺贝尔化学奖 | 格哈德·埃特尔. [2024-04-23].
<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1661663783153802709&wfr=spider&for=pc>
- [11] 郑仁垚. 大学化学, **2007**, *22* (6), 13.
- [12] 俞稼铺. 化工管理, **2013**, No. 11, 60.
- [13] 阎云. 物理化学学报, **2022**, *38* (12), 2206022.
- [14] 罗显峰, 张锡奇, 江雷. 科学通报, **2022**, *67* (32), 3754.
- [15] Atkins, P.; de Paula, J. *Atkins' Physical Chemistry*, 8th ed.; Oxford University Press: Oxford, UK, 2006.
- [16] 刘俊吉, 周亚平, 李松林, 冯霞 编著. 物理化学(下册). 第6版. 北京: 高等教育出版社, 2017: 468–471.
- [17] Pujado, P. R.; Huh, C.; Scriven, L. E. *J. Colloid Interface Sci.* **1972**, *38* (3), 662.
- [18] 曹国鑫, 刘海龙. Young-Laplace方程在纳米尺度下的有效性//第十四届全国物理力学学术会议缩编文集. 第十四届全国物理力学学术会议, 四川 绵阳, 2016年9月27日. 四川 绵阳, 2009: 60.
- [19] Montero de Hijes, P.; Shi, K.; Noya, E. G.; Santiso, E. E.; Gubbins, K. E.; Sanz, E.; Vega, C. *J. Chem. Phys.* **2020**, *153*, 191102.
- [20] Van Honschoten, J. W.; Brunets, N.; Tas, N. R. *Chem. Soc. Rev.* **2010**, *39*, 1096.
- [21] 赵振国. 应用胶体与界面化学. 北京: 化学工业出版社, 2008: 94–119.