

聚合硫酸铁的制备及性能测定实验融合课程思政的探索与实践

翟林峰, 王华林, 刘玉, 秦广龙*

合肥工业大学化学与化工学院, 合肥 230009

摘要: 无机化学实验是化学素质教育和创新教育的良好载体, 在教学过程中融合思政元素并精心设计教学环节, 不仅可以增强学生的实验技能、提高研究报告撰写能力及巩固无机化学理论知识, 而且有助于培养学生的家国情怀、科学精神、创新思维和环保意识。本文以聚合硫酸铁的制备及性能测定实验为例, 探讨了在无机化学实验教学中引入思政元素并结合无机化学理论知识, 预期达到实验技能培养和思政教育的有机融合, 从而实现知识传授、能力培养和价值引领同向同行的教育目标。

关键词: 无机化学; 实验教学; 课程思政; 聚合硫酸铁; 制备及性能

中图分类号: G64; O61

Exploration and Practice on Integrating Ideological and Political Education into the Experiment of the Preparation and Performance Measurement of Polyferric Sulfate

Linfeng Zhai, Hualin Wang, Yu Liu, Guanglong Qin *

School of Chemistry and Chemical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China.

Abstract: Inorganic chemistry laboratory courses serve as an effective platform for fostering chemical literacy and promoting innovative education. The integration of ideological and political education into the curriculum, coupled with carefully designed teaching activities, not only enhances students' experimental skills, research report writing abilities, and solidifies their theoretical knowledge of inorganic chemistry, but also cultivates their sense of national identity, scientific spirit, creative thinking, and environmental consciousness. This study uses the preparation and performance determination of polyferric sulfate as a case to explore how integrating ideological and political education with inorganic chemistry experiments can achieve a harmonious blend of skill development and ideological guidance. This approach aims to fulfill the educational goals of knowledge transmission, skill cultivation, and value orientation.

Key Words: Inorganic chemistry; Laboratory teaching; Ideological and political education; Polyferric sulfate; Preparation and performance

无机化学实验是化学学科的一个重要实践环节, 其内容不仅与无机化学课程紧密配合, 同时也保持了其作为一门基础化学实验课程的相对独立性和完整性。无机化学实验的主要任务是通过实验教学, 加深学生对无机化学基础理论和无机化合物性质的理解, 熟悉无机化合物的一般分离和制备方法, 掌握无机化学的基本实验方法和操作技能, 培养学生的科学认识和科研能力。

收稿: 2024-10-23; 录用: 2024-11-14; 网络发表: 2025-02-24

*通讯作者, Email: linfengzhai@hfut.edu.cn

基金资助: 合肥工业大学无机化学课程思政示范课程项目(KCSZ2022002)

无机化学实验是化学、化工等相关专业本科生踏入大学校门后开设的首门基础实验课程，该课程与高中化学实验课程相衔接，也是学生学习其他化学实验的重要基础，在实验教学中具有重要的承上启下作用。因此，在该课程的教学融入思政元素教育具有必要性和重要性。在此背景下，合肥工业大学化学与化工学院经过调研和论证，在无机化学实验中开设了聚合硫酸铁(Polyferric sulfate, PFS)的制备与性能测定^[1]等与科学研究前沿相结合的系列综合实验，推动实验教学实现“两性一度”(图1)。

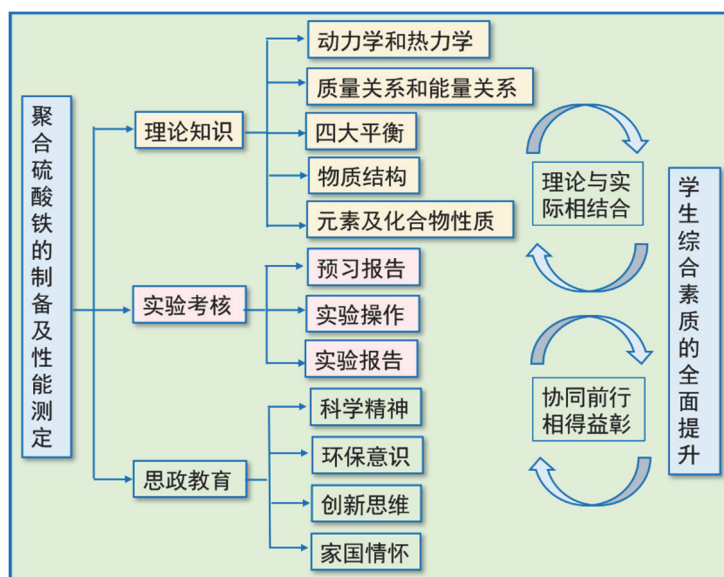


图1 PFS制备及性能测定实验教学设计框架图

PFS是由硫酸亚铁经氧化、水解、聚合而得到的一种无机高分子混凝剂，具有水解速度快，絮凝体密度大，使用pH范围宽，除油、脱色、除重金属离子效果好，无毒无害且成本低廉等优点，在工业废水、生活污水及日常饮用水的净化处理方面具有广泛的应用^[2,3]。目前开发的PFS产品主要有液态和固态两种形式，液态PFS为红褐色粘稠状透明溶液，固态PFS为黄色无定型粉末。本文基于PFS的制备与性能测定实验，尝试将思政元素融入实验教学，使学生在了解学科前沿的基础上，树立正确的世界观、人生观和价值观，增强使命担当，充分认识科学研究在强国建设中的重要性，同时也理解科学研究在曲折中前进的基本属性。

1 实验目的

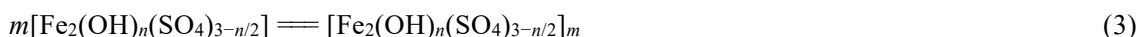
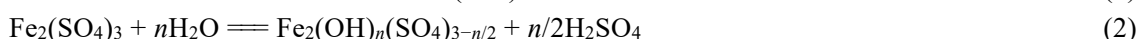
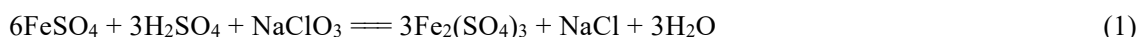
了解PFS的研究进展和应用现状，掌握PFS合成与性能测试原理，掌握无机化合物制备与性能测试的基本实验方法和操作技能，掌握电子天平、水浴恒温振荡器、电动搅拌器、酸度计、光电式浊度仪、Zeta电位仪等实验仪器的正确使用方法，加深学生对无机化学基础理论和无机化合物性质的理解，培养学生的科学认识和科研能力。

2 实验原理

PFS也称碱式硫酸铁或羟基硫酸铁，其化学式可表示为 $[\text{Fe}_2(\text{OH})_n(\text{SO}_4)_{3-n/2}]_m$ 。液态PFS本身含有大量的聚合阳离子，如 $[\text{Fe}_3(\text{OH})_4]^{5+}$ 、 $[\text{Fe}_6(\text{OH})_{12}]^{6+}$ 、 $[\text{Fe}_4\text{O}(\text{OH})_4]^{6+}$ 等。其在水溶液中存在着 $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ 、 $[\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O})_3]^{3+}$ 、 $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_2]^{3+}$ 等配合阳离子，它们通过羟基(-OH)架桥形成多核配离子，再聚合形成无机高分子化合物，相对分子量可达十万以上。由于上述配离子的存在，PFS可对水体中的胶体微粒形成强烈的吸附，并通过粘附、架桥、交联等作用促使其凝聚。同时，其表面阳离子还

可以中和胶体微粒表面的电荷,降低胶体的Zeta电势,从而使胶团脱稳并聚集。由此可见,混凝过程包含了压缩双电层、吸附电中和、吸附架桥和网捕卷扫四种机理,这些机理共同作用,使得水中的胶体颗粒得以脱稳和聚集,从而达到净化水质的目的^[4]。

PFS的制备可采用多种方法,如以亚硝酸钠为催化剂,空气、MnO₂、过硫酸钠等为氧化剂的催化氧化法,也可以H₂O₂、NaClO₃、MnO₂、Cl₂等为氧化剂直接氧化^[5,6]。本实验采用NaClO₃直接氧化法,先将FeSO₄氧化为Fe₂(SO₄)₃(反应1),当溶液中硫酸根的量控制恰当时,Fe₂(SO₄)₃可继续与溶液中的水反应生成碱式硫酸铁(反应2),碱式硫酸铁再聚合即可得到PFS(反应3),相关反应方程式如下:



3 实验过程

3.1 试剂

氯酸钠(NaClO₃)、七水合硫酸亚铁(FeSO₄·7H₂O)、浓硫酸(H₂SO₄)均购自国药集团化学试剂有限公司,分析纯。

3.2 实验仪器

电子天平(上海舜宇恒平科学仪器有限公司,FA124)、水浴恒温振荡器(常州申光仪器有限公司,SHZ-88)、电动搅拌器(常州国华仪器制造有限公司, JJ-A)、酸度计(上海仪电科学仪器股份有限公司,PHS-3C)、光电式浊度仪(上海昕瑞仪器仪表有限公司, WGZ-1A)、Zeta电位仪(英国Malvern, Zetasizer Nano)、比重计、酒精温度计、锥形瓶(250 mL)、量筒(100 mL)、容量瓶(100 mL)。

3.3 PFS的制备

在250 mL锥形瓶中加入20.0 mL质量浓度为10%的H₂SO₄溶液,将锥形瓶置于水浴恒温振荡器内预热至45 °C。分别称取FeSO₄·7H₂O(31.6 g)和NaClO₃(2.0 g),并将其各分成10份。先将2份FeSO₄·7H₂O和2份NaClO₃加入到预热的H₂SO₄溶液中,振摇10 min后,继续加入1份FeSO₄·7H₂O和1份NaClO₃,以后每隔5 min加一次。为使FeSO₄充分氧化,加完所有试剂后再补加0.2 g NaClO₃,继续振摇10–15 min,冷却后倒入量筒中并加水至体积为40.0 mL,即得到密度约为1.45 g·mL⁻¹、Fe质量分数约为11.0%的液体PFS。

3.4 PFS主要性能指标的测定

(1) 密度

将制得的液态PFS倒入清洁、干燥的量筒内,再将其置于恒温水浴中,待温度恒定在20 °C后将比重计缓慢放入PFS溶液中,稳定后读出比重,即为PFS在该温度下的相对密度。

(2) pH值

称取1.0 g液态PFS,用一定量纯水稀释后转移到100 mL容量瓶中,再用蒸馏水定容至刻度线,摇匀后用酸度计测定其pH值。(为了准确评估PFS在废水中的行为和效果,需要先将其稀释后再进行pH值的测定,以满足实际应用指标。测试完的样品需保留作为后续水处理用药剂。)

(3) 混凝性能

以合肥工业大学翡翠湖校区的天然湖水为水样,以浊度的去除效率为指标对PFS的混凝性能进行评价。分别取100 mL水样加入到5个250 mL的锥形瓶中,再取上述稀释100倍的PFS溶液0、1、2、3和5 mL并依次加入到水样中。开动电动搅拌机,先快速搅拌3 min,再慢速搅拌3 min后静置30 min,用移液管吸取15 mL上层清液并用光电式浊度仪测定溶液浊度,最后将PFS加入量与水样浊度的变化绘制成曲线图。

(4) Zeta电势测定

在Zeta电位仪上测量混凝后水样的Zeta电势,并与实验室用二次蒸馏水进行比较。首先用注射器

取1 mL水样,将弯曲式毛细管样品池倒置并用注射器与其一端连接,将样品缓慢注入样品池,当样品开始从样品池另一端口冒出,并确保在样品池的透明毛细区域无气泡产生后,移去注射器并插入塞子。吸干毛细管样品池表面的液体后插入Zeta电位仪的样品槽中进行检测。

3.5 实验注意事项

- (1) 经称量后的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 NaClO_3 在投料前不能混合,以防止发生氧化还原反应而失效;
- (2) 在投加物料时需先关停摇床的震荡,以防止所加物料粘附在反应器壁甚至不能进入反应器内而造成物料损失;
- (3) 用于测试混凝性能的PFS溶液需现配现用,如果因放置时间过长而出现浑浊,需重新配制使用;
- (4) 电动搅拌器在开动搅拌前需检查并确保其转速为零,以避免通电后转速过快而造成人员或反应器损伤。

4 实验教学

4.1 思政环节

PFS是由日本学者Mikami等于1972年研制成功并取得专利^[7]。该技术以硫酸亚铁和硫酸为原料,亚硝酸钠为催化剂,经17 h空气氧化得到棕色PFS溶液。针对该工艺反应时间过长的问題,我国许多研究机构对上述专利进行了改进,并形成了增加气液接触面积、反应压力等多项专利。美、日及欧洲等国家也申请了一些技术改进的专利,但其技术水平并未超越我国。此外,我国许多学者针对其合成机理开展了广泛的研究,如汤鸿霄院士率先研究了无机高分子絮凝理论,针对 Fe^{3+} 的水解聚合过程提出了形态进展综合模式,将该过程发生的化学反应分为水解、聚合、沉淀三类,为后续研究提供了理论基础,极大推动了PFS在我国的发展^[8,9]。目前,中国已经成为全球混凝剂第一大生产基地和消费国。实验预习报告中给学生布置文献比较阅读任务,同学们通过比较有关氮氧化物催化法的中外专利技术,发现以氮氧化物为催化剂生产PFS的工艺很多,但技术水平和生产效率差别非常大。在该方面我国的生产技术遥遥领先,因此体会到通过科研工作者们不断创新,提升了我国混凝剂技术的国际竞争力,从而增强了民族自豪感、荣誉感和民族自信。

开展项目式学习,预习环节请学生对PFS的制备方法进行比较,思考实验室为什么不采用工业上最常用的氮氧化物催化法,而是氯酸盐氧化法。引导学生站在实践的角度分析技术路线的可行性,并且设计实验方案,培养学生的工程师思维。在实验环节,给学生预设产品指标,要求产品必须达到预设指标方可视为合格,以此培养学生严谨的实验态度和细致的操作习惯,体现科学精神中的求实和精确性。引导学生结合实验亲身体会,分析原料投加量、反应温度、反应时间等的波动对产品质量的影响规律,将理论与实际相结合,验证阿伦尼乌斯方程等动力学原理的正确性,鼓励学生开拓进取,培养探索精神。在污水混凝性能测试实验中,学生观察发现PFS对于混凝低浊污水存在用量高、絮体矾花小等问题,针对该问题在讨论实验结果时引导学生从混凝机理出发考虑混凝剂的改性或者复配方案,实验后查阅相关文献并且体现在实验报告中。从中筛选可行性强的方案鼓励学生申请创新实验项目,并提供实验指导和实验条件,持续提升创新意识。

4.2 教学设计

本校自2020年以来,在无机化学实验内容中新增设PFS的制备及性能测试综合性实验,课堂学时数为6学时,其中PFS的合成安排2学时,密度和pH值的测试安排1学时,混凝性能测试安排2学时,Zeta电势测定安排1学时,建议教学过程如表1所示。

为了能够在规定时间内顺利完成实验规定的项目,课前预习至关重要。首先通过阅读实验教材和教科书中的相关内容,明确实验目的并了解实验内容;再通过相关文献查阅和视频观看等掌握实验原理、步骤、操作过程和注意事项;认真思考实验前应准备的问题,并撰写预习报告。

表1 课程进程安排表

课程安排	完成内容	时间安排
课前	文献查阅, 预习实验内容	开课前一周
课中	PFS的制备	2学时
	PFS的密度和pH值测定	1学时
	PFS混凝性能测试	2学时
	Zeta电势测定	1学时
课后	整理实验数据, 提交实验报告	课程结束后一周

课中对实验的背景、原理、步骤及注意事项进行讲授, 使学生自信地进行实验操作, 提高实验效率, 同时更好地熟悉和掌握无机化学知识。为进一步理解PFS的合成原理及其物化性质, 探究合成过程中反应温度、加料时间和硫酸浓度三个因素对PFS性能的影响, 将一个自然班(学生数为30人)分为三个大组; 每个大组又分为5个小组, 在固定其他因素条件下各小组承担其中一个变量参数; 每小组2位同学合作完成实验。其中, 反应温度设为: 35、40、45、50和55 °C; 反应加料时间间隔为1、3、5、7和9 min; 硫酸的浓度为6%、8%、10%、12%和14%。实验过程中组员之间合理分工、团结协作, 以增强学生的合作意识和团队精神。

课后总结是巩固实验知识、提升实验技能的重要环节。本实验制备的目的是得到高盐基度和高分子量的PFS, 充分发挥PFS对水体中胶体的粘附、架桥和交联等作用, 促进其对水体的净化效果。各小组同学在完成规定内容的实验报告后, 各大组之间对实验结果进行统计汇总, 并在课后组织讨论小组, 分别对反应温度、反应时间和硫酸浓度与产品性能的关系进行讨论。不仅提升了学生的实验兴趣, 还可引导学生对如何提高产品性能提出可行的实验方案, 以进一步提高学生的科学研究和创新思维能力。

4.3 教学实践

4.3.1 混凝性能分析

学生自制的PFS均为红褐色粘稠状透明溶液, 密度为1.35–1.45 g·mL⁻¹, 稀释100倍后的溶液pH值为2.23–2.47, 测试结果均符合市场PFS商品的相关指标。将合成的PFS应用于天然湖水浊度的去除, 考察不同PFS用量对净化效果的影响。各组混凝实验结果显示, 随着PFS用量的增加, 水样的浊度呈现先降低后升高的趋势。以硫酸浓度为10%, 反应温度为45 °C, 投料间隔5 min时合成的PFS为例, 考察不同混凝剂用量对污水净化效果的影响, 结果如表2所示。

表2 PFS用量对天然湖水除浊效果的影响

PFS用量/mL	浊度/NTU	Zeta电势/mV	电导率/(mS·cm ⁻¹)
0	65.5	-9.18	0.842
1	44.5	-4.36	0.658
2	13.1	0.67	0.404
3	23.3	1.21	0.394
5	34.7	2.12	0.385

由表2可知, 污水中的胶体主要带负电荷, 其周围较高的负电荷量使其静电排斥能大于范德华引力能和布朗运动能, 因此胶体处于稳定状态。混凝剂中的正电荷可快速中和胶体表面负电荷, 使胶体絮凝沉降, 污水浊度减小。但当混凝剂过量时, 胶体表面由于聚集过量的正电荷而难于絮凝, 浊度又开始增加。Zeta电势仪的电导率数据可以反映出溶液中离子的浓度变化随着混凝剂用量的增加, 电导率不断下降, 表明水体中存在的部分阴离子与PFS中的阳离子发生电中和并被吸附而导致电导

率下降。由此可见，PFS在去除水体中胶体悬浮物的同时还可以去除污水中的部分杂质离子。

4.3.2 PFS合成工艺优化

对比各组同学的混凝结果并对合成工艺条件与污水混凝效果之间的关系进行讨论，优化出适宜的PFS制备条件。图2a结果表明，在35–55 °C范围内，反应温度对PFS混凝性能的影响不显著，但仍可以看出随着反应温度的升高，PFS的絮凝性能呈现出一个先增加后减小的趋势。因此，反应温度为45 °C是制备PFS的适宜温度。

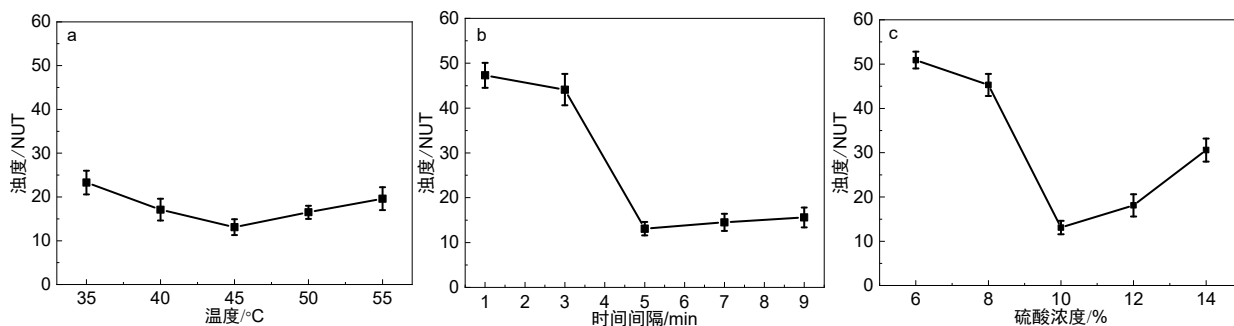


图2 PFS合成工艺(a-c)对天然湖水除浊效果的影响

a 温度; b 时间间隔; c 硫酸浓度

由图2b可以看出，当反应加料时间间隔低于5 min时，受动力学限制， Fe^{3+} 的水解不够充分， $\text{Fe}_2(\text{OH})_n(\text{SO}_4)_{3-n/2}$ 单体生成较少，聚合反应未完全进行，因此产品的分子量和盐基度较小，混凝效果差。当反应加料时间间隔延长为5 min后， Fe^{3+} 的水解充分并聚合形成了大量的聚合物，产品盐基度明显提高。继续延长加料时间间隔，水解和聚合反应均已足够充分，因此盐基度和分子量变化不大，混凝性能不再有明显的提高。

硫酸浓度对PFS混凝性能的影响相对比较显著(如图2c)，当硫酸浓度低于10%时，PFS的混凝效果随着硫酸浓度的增大而增强。尽管低浓度的硫酸溶液有利于提高PFS的盐基度，但不利于分子量的提高并且产品中容易形成黄色的碱式硫酸铁沉淀，使样品的稳定性下降；而当硫酸浓度大于10%时， Fe^{3+} 的水解受到抑制，不利于形成高分子量和高盐基度的PFS，其混凝性能也随之下降。因此，在本实验条件下，PFS较适宜的制备条件是温度为45 °C，加料时间间隔为5 min，硫酸的浓度为10%。

4.3.3 课后延伸

PFS的制备及性能测定实验不仅加深了学生对铁化合物的认识，而且实验内容还涉及了无机化学课程知识中的四大平衡、反应热力学和动力学、物质结构和元素及其化合物性质等相关理论知识，因此该实验是一项集无机化学理论知识和应用的综合性实验。此外，在PFS的合成过程中，除反应时间、温度和硫酸浓度外，氧化剂、搅拌速度等都会影响PFS的性能，课堂教学中鼓励学生结合无机化学所学的理论知识，再结合查阅的文献，对本实验内容提出改进建议，培养学生对科学研究的兴趣，提高学生科学研究的创新思维能力。

根据实验现象提出问题，如合成PFS实验中加入硫酸的作用是什么？为什么PFS能将悬浮物除去？PFS可能对水体中哪些离子具有净化效果？课后以小组为单位，在校图书馆相关数据库中查阅国内外关于PFS的制备和应用的相关文献，尤其关注近十年来国内关于PFS的研究现状并对其技术优势进行分析和评价。各班分为三组，分别从PFS制备的原料来源、合成技术改进和在废水处理中的应用开展调研，并将结果制作成PPT在线上或线下开展学术交流活动，不仅可以加深对实验现象的理解，拓展学生的学术研究思维，同时可以增强学生对国家进步的自豪感和民族认同感。

4.4 无机化学实验教学效果

通过对预习报告、实验操作、实验报告以及线上或线下讨论(包括调研或者实验方案设计报告等)

对学生的素质和能力进行考核, 并按照产出导向的理念, 采用多样化考核手段, 对课程思政教育目标的达成情况进行考核(见表3)^[10]。结果显示, 将思政元素融入课堂教学后, 教学内容更加丰富且增加了趣味性和吸引力, 拓宽了学生的知识视野, 在巩固了无机化学理论知识的前提下, 学生主动申报化学创新项目和参加化学实验竞赛的热情得到提升, 社会责任感和科研意识也得到了显著增强。

许多学生在课程结束后表示受益匪浅, 认为这种教学方式有助于他们树立正确的人生观、价值观和世界观。这一结果同样也激励教师在今后的教学过程中, 继续深化课程思政改革实践, 不断探索更加有效的教学方法和手段, 为实现立德树人的根本任务贡献力量。同时, 我们也注意到一些需要改进的地方。例如, 在线上教学过程中, 部分学生的参与意识和问题讨论效率有待提高。为了解决这个问题, 我们将采取更多的互动措施, 如增加课堂讨论、分组交流等环节, 激发学生的学习兴趣 and 积极性。此外, 我们还可以利用网络平台等现代技术手段, 为学生提供更多的学习资源和机会, 促进他们的自主学习和全面发展。

表3 课程思政教学目标达成度的考核设计

课程思政教学目标	考核形式	考核标准
家国情怀: 培养学生的爱国主义精神和民族自豪感	课前小组报告	了解我国PFS制备、改性与应用的研究进展, 并能指出其现有技术在国际上所处的水平
科学精神: 培养学生掌握科学知识与科学方法的能力, 树立科学道德与诚信意识	实验过程/ 课后实验报告	能通过分工合作顺利完成实验且实验操作规范; 客观、详实地记录实验现象和数据并能对实验结果进行合理的分析和讨论
创新思维: 培养学生勇于探索创新和坚韧不拔的人格, 培养创新能力和全球视野	课前/实验过程/ 课后小组报告	能够发现问题、分析问题和解决问题, 或能提出新观点和新的解决方案
环保意识: 深刻认识水质净化对社会可持续发展的重要性, 增强环保的社会责任感	课后小组报告	能从环保的角度创新设计PFS的制备和改性方案, 或者能提出PFS在其他污水净化中的应用前景

5 结语

无机化学实验是高等院校化学化工类专业必修的第一门基础化学实验课程, 在无机化学实验课程中融入思政元素, 对于提升学生的专业素养和思想品德起着非常重要的作用。在实验教学中, 通过引入思政元素, 如介绍化学家的生平事迹、强调生态环保、展示我国化工领域突出成就等, 可以激发学生的家国情怀、科学精神、创新思维和环保意识。同时, 将思政教育贯穿于实验教学的全过程, 注重课前、课中、课后的无缝对接, 通过线上线下混合式教学、专题教学、案例教学等多种方法, 潜移默化地将思政元素融入实验教学, 从而达到立德树人的目的。

参 考 文 献

- [1] 翟林峰, 王华林, 刘娜. 无机化学实验. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2021: 66-68.
- [2] Jia, D.; Li, M.; Liu, G.; Wu, P.; Yang, J.; Li, Y.; Zhong, S.; Wu, W. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* **2017**, *512*, 111.
- [3] Li, S.; Kang, Y. *Sep. Purif. Technol.* **2021**, *276*, 119373.
- [4] Zhou, Y.; Wu, L.; Li, Y.; Bai, J. *Chem. Eng. J. Advances* **2022**, *9*, 100202.
- [5] Zhai, J.; Jiang, C.; Wu, J. *Adv. Mater. Res.* **2014**, *955-959*, 2915.
- [6] Zouboulis, A. I.; Moussas, P. A.; Vasilakou, F. *J. Hazard. Mater.* **2008**, *155* (3), 459.
- [7] 秦怀婷, 曾小林, 刘程琳. *工业水处理*, **2023**, *43* (7), 53.
- [8] Tang, H.; Stumm, W. *Water Res.* **1987**, *21* (1), 123.
- [9] Tang H.; Stumm W. *Water Res.* **1987**, *21* (1), 115.
- [10] 张树永, 朱亚先, 张文清, 王玉枝, 陆靖. *大学化学*, **2024**, *39* (2), 1.