



绿色化学导向的超滤膜分离实验的改进与实施

庞秀言^{1,2}, 张 宁^{1,2}, 李 妍^{1,2}, 尚诗林¹, 卢佳慧¹, 白文青¹, 王献玲^{1,2*}

(1. 河北大学 化学与材料科学学院, 保定 071002; 2. 河北大学 化学国家级实验教学示范中心, 保定 071002)

摘要: 基于绿色化学理念, 从实验原料选取、显色剂筛选、实验规模、试剂用量、废液处理等多个角度对传统超滤膜分离能力测定实验进行了改进。通过使用绿色原料与试剂、实验规模微量化、废液回收等一系列有效举措, 显著提高了实验的经济性, 实现了全过程的绿色化。改进后超滤膜分离能力测定实验的实施不仅有利于提升学生的专业素质, 增强环保意识, 树立绿色化学的理念, 也可以作为一例绿色化学的思政典型案例教学案例。

关键词: 绿色化学; 超滤膜实验; 思政案例; 实验教学

中图分类号: G642.0

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20240294

Improvement and Implementation of Ultrafiltration Membrane Separation Experiment Based on Green Chemistry

PANG Xiuyan^{1,2}, ZHANG Ning^{1,2}, LI Yan^{1,2}, SHANG Shilin¹, LU Jiahui¹,
BAI Wenqing¹, WANG Xianling^{1,2*}

(1. College of Chemistry and Materials Science, Hebei University, Baoding, 071002, China;

2. National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education, Hebei University, Baoding 071002, China)

Abstract: Based on the concept of green chemistry, the traditional experiment for determining ultrafiltration membrane separation capability was improved from multiple aspects, including the selection of raw materials and chromogenic agents, the experimental scale, the dosage of reagents, and the waste liquid treatment. Through a series of effective measures, such as the use of green raw materials and reagents, microscaling of the experiment, and waste liquid recovery, the economic efficiency of the experiment was significantly enhanced, achieving a fully green process. The implementation of the improved ultrafiltration membrane separation experiment not only helps enhance students' professional skills and raise environmental awareness while fostering the concept of green chemistry, but also serves as a typical case for ideological and political education in green chemistry.

Key words: green chemistry; experiment of ultrafiltration membrane experiment; ideological and political cases; experimental teaching

绿色化学是一种环境友好化学, 主要从原料的安全性、工艺过程节能性、反应原子的经济性和产物环境友好性等方面进行评价^[1]。而在实验教学中营造绿色、清洁、无污染的环境, 就是践行绿色化学的理念。

膜是介于两相流动相之间的具有多孔结构的凝固态物质。利用其多孔结构, 可以完成具有不同分子量(分子截面积)的液体混合物的分离和

提纯^[2-3]。由于该分离过程以膜两侧的压力差为推动力, 不需要添加化学助剂, 因而属于绿色分离技术^[4-5]。鉴于膜分离技术在生产、科研中的广泛应用, 以超滤膜为代表的膜分离实验已经成为化学、化工、医药、环境等专业学生的必修实验项目^[6-7]。

然而现行超滤膜分离能力测定实验未能有效遵循绿色化学的原则^[8], 多以昂贵且适用条件较苛

收稿日期: 2024-05-31

基金项目: 河北省教改项目(2025GJJG042); 河北大学大学生创新创业训练计划项目(DC2024159); 河北省研究生教改项目(YJG2024008)。

作者简介: 庞秀言, 博士, 教授, 主要从事化学工程与工艺类理论与实验课程的教学与研究工作。E-mail: pxy833@163.com

*通信作者: 王献玲, 硕士, 实验师, 主要从事化学工程类实验课程的服务与管理工作。E-mail: 1581808046@qq.com

刻的牛血清白蛋白^[9]、安全性有争议的聚乙烯醇^[10]等水溶液为模拟废液,使用不安全的显色剂(如硝酸铋),存在试剂及样品用量过大(50 mL)导致的浪费现象,且均未提及废液处理。本文将从绿色且廉价的聚乙二醇(PEG)模拟废液的选取、安全的碘-硼酸显色体系、50 mL 降至 10 mL 的微量实验规模与试剂用量、实验操作、废液处理等方面对传统实验进行改进。

1 超滤膜分离能力测定实验现状分析

1.1 选用原料缺陷

用超滤膜可以实现分子量在 500 以上的溶质大分子与溶剂小分子的分离。现行实验中,牛血清白蛋白和聚乙烯醇为常用分离对象。然而牛血清白蛋白存在价格高、存储与使用条件苛刻等缺点^[10-11]。聚乙烯醇仅溶于热水,在有机溶剂中的溶解度也较低,这给模拟原料液的制备增加了一定难度^[12]。此外,聚乙烯醇对眼睛有刺激作用,吸入该物质会对身体产生一定危害。2017年10月27日,世界卫生组织国际癌症研究机构公布的致癌物清单中包含聚乙烯醇。PEG 具有价格便宜、有多种不同分子量规格、水溶性与脂溶性良好、无毒、无刺激性等特点。因此,相比于牛血清白蛋白和聚乙烯醇,PEG 水溶液更适合作为实验分离的模拟废水^[13-14]。

1.2 显色剂缺陷

分光光度计是实验室最常用的分析仪器。由于 PEG 的水溶液是无色的,以 PEG 的模拟废水为分离对象的超滤膜分离能力测定实验,需要加入显色剂才能对 PEG 进行定量分析。文献[9,15-16]中,碘化钾-次硝酸铋-醋酸/醋酸钠多为选用显色体系。其显色原理为:过量碘离子(I^-)与铋(Bi^{3+})结合形成 BiI_4^- 配合物;在酸性环境下,PEG 中氧原子的孤对电子与水中的(H^+)结合使 PEG 发生质子化; BiI_4^- 再与质子化的 PEG 离子结合形成 $PEG(H^+)-BiI_4^-$ 配合物。该配合物在 510 nm 附近有最大吸收。尽管碘化钾-次硝酸铋-醋酸/醋酸钠显色体系可以实现溶液中 PEG 的定量测定,然而,这种显色方法存在使用试剂种类多(次硝酸铋、乙酸、醋酸钠、碘化钾)、用量大的缺陷。此外,铋有微弱的放射性,血中铋浓度升高可引起脑病,浓度超过 0.1 mg/L 可诱发神经毒性,吸收后引起高铁血

红蛋白血症,严重慢性中毒时可出现严重肾炎。因此,对于 PEG 的显色,碘化钾-次硝酸铋-醋酸/醋酸钠显色体系不是绿色、安全的显色剂。

1.3 原料与试剂用量大

超滤膜的分离能力一般用截留率(Ru)表示,计算 Ru 需要测定原料液和每一个操作条件下得到的滤出液中所含溶质的浓度。现行方法中,以 50 mL 原料液和滤出液的取样量进行定量测定。高的测试取样量既导致原料液的减少与浪费,还可能导致实验中原料液的初始浓度 C_0 不断随时间变化,破坏实验条件的平行性,最终影响 Ru 实验结果的准确性, Ru 的计算方法为:

$$Ru = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_0 为原料液中溶质的浓度,单位 mg/L; C_1 为滤出液中溶质的浓度,单位 mg/L。

1.4 实验操作影响结果准确性

超滤膜分离过程中原料液流经用膜材料制备的分离器。在压力推动下,小分子透过超滤膜壁上的孔,在膜的另一侧汇集后形成滤出液,并从分离器的一侧出口流出。被截留下的大分子形成浓缩液,从分离器另一个出口流出。现行实验中,分离得到的浓缩液直接返回原料液储槽,但是未将得到的滤出液同步返回原料液储槽。这种实验操作导致储槽内原料液浓度 C_0 随超滤分离时间的增加而增大,不能保证整个实验过程操作条件的平行性,因而降低了 Ru 实验结果的准确性,也不利于培养学生科学严谨的态度。

1.5 显色后废液未得到处理或利用

超滤膜分离能力测定实验实施过程,对于测试液与剩余显色废液,一般只要求学生收集于指定废液桶,这样既不能保证整个教学环节遵循绿色化学原则的完整性,也导致学生错误地认为废液处理与其无关,不属于其要完成的实验内容。因此,超滤膜实验废液处理环节的缺失,既不利于学生绿色、环保意识的培养,更与膜分离绿色技术的初衷相背离。

2 超滤膜分离能力测定实验改革方案

遵循绿色化学原则,针对超滤膜分离实验中模拟原料选取、显色方法、实验规模、试剂用量、实验操作、废液处理中存在的问题进行逐一改进。

2.1 原料与显色方法改进

鉴于廉价易得、无毒的 PEG 具有良好的稳定性、生物相容性与水溶性, 根据超滤膜分离设备的截留相对分子质量, 选择一定分子量 PEG 的水溶液作为模拟实验原料。以分子量为 6000 的 PEG 的为例, 进一步从显色剂的环保性、用量等方面, 对 PEG-碘化钾-次硝酸铋-醋酸/醋酸钠显色体系与 PEG-碘-硼酸显色体系进行了对比^[17], 结果如表 1 所示。从表中结果可以看

出, 相对于 PEG 的碘化钾-次硝酸铋-醋酸/醋酸钠显色法, 碘-硼酸显色法具有显色剂安全、试剂种类少、显色时间短、测试灵敏度高、显色后废液可回收等优点, 满足绿色化学理念, 也可以作为“绿色化学”课程思政案例。PEG 与碘-硼酸的显色机理为: PEG 可与碘形成分子型配合物, 该配合物在 520 nm 附近具有最大吸收。硼酸的存在可以增加 PEG 的稳定性, 提高显色灵敏度。

表 1 碘化钾-次硝酸铋-醋酸/醋酸钠、碘-硼酸显色法对比*

方法	试剂	显色方法及样品用量	显色时间/min	废液危害性
传统	次硝酸铋、乙酸、碘化钾、醋酸钠	样品 50 mL、次硝酸铋 0.8 g、碘化钾 20 g、pH 为 4.8 醋酸/醋酸钠缓冲溶液 50 mL	14~20	废液含铋离子, 有危害
改进	碘、硼酸	样品 50 mL、0.05 mol/L 碘液 2 mL、0.50 mol/L 硼酸溶液 15 mL	8~14	可回收利用

*传统: PEG-碘化钾-次硝酸铋-醋酸/醋酸钠显色体系; 改进: PEG-碘-硼酸显色体系

2.2 实验规模的微量化

现行实验中原料液、滤出液、显色剂的用量如表 1 所示, 配制的有色测试液体积为 100 mL。对于容积为 3 mL、光程 1 cm 的普通比色皿, 测试液加上 3 次润洗, 溶液的总消耗量可以控制在 10 mL 之内。因此, 按照表 1 中样品与试剂的常规用量进行测试液配制, 既造成原料与试剂的浪费, 又增加了废液的处理任务。为此, 对实验规模进行了微量化尝试。以 PEG 的碘-硼酸显色体系为例, 按照表 2 中规格进行样品与试剂的量取, 样品、试剂消耗的体积仅为常量方法的 10%, 显色后测试液总体积降低至 10 mL, 即微量化处理后每次测定产生的废液体积缩减为原来的 10%。分光光度定量测量中, 采用容积为 3 mL、光程 1 cm 的普通比色皿取样, 可以满足实验用量。本实验中的实验规模的微量化可作为关注环保、可持续发展、节约、减排的思政案例与思政元素切入点。

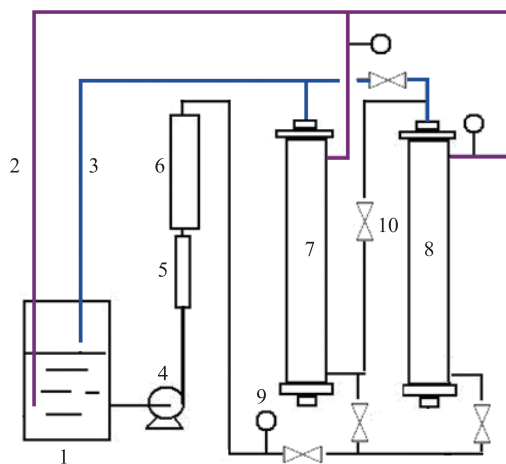
表 2 样品与试剂的用量对比

样品与试剂	传统用量/mL	改进后用量/mL
取样量	50.0	5.0
碘液	2.0	0.2
硼酸溶液	15.0	1.5
测试液	100.0	10.0

2.3 实验操作改进

通过 2.2 节中实验的微量化, 可以减小因取样

对原料液的消耗及其对原料液浓度 C_0 的影响, 确保 Ru 计算结果的准确度。影响 Ru 准确度的另一个关键的因素是实验中得到的滤出液与浓缩液的去向。为了保证实验运行过程中储槽内的 PEG 浓度 C_0 基本维持恒定, 进而保证不同操作条件下 C_0 的平行性, 应将各原料液流量、操作压强下分离得到的浓缩液和滤出液同步返回原料液储槽, 装置原理示意图如图 1 所示。换言之, 在实验运行过程中, 除去必需的取样用于测定外, 滤出液软管应插入原料液储槽。同时, 要求滤出液取样用烧杯、吸量管专用, 其洗涤废液也需返回原料液储槽。



1-原料液储槽; 2-浓缩液管路; 3-滤出液软管; 4-原料泵; 5-流量计; 6-精滤器; 7、8-超滤膜分离器; 9-压力表; 10-阀门

图 1 超滤膜分离实验装置示意图

2.4 实验废液的处理

本研究中用碘-硼酸显色法测定样品中 PEG 含量, 其产生的废液中含有碘、硼酸、PEG。文献资料表明, 质量分率为 3% 的硼酸溶液是一种外用杀菌剂、消毒剂、防腐剂^[18], 具有消肿、利湿、抗炎作用。另外, 早期用的碘伏消毒剂是碘与 PEG 的复合物^[19], 对细菌和真菌有良好的灭活作用, 并且对皮肤无刺激、无致敏作用。

本研究中, 按照表 2 中的显色方法以及试剂用量, 可以推算出实验废液内硼酸的总浓度为 0.001 mol/L, 折合为硼酸的质量分数约为 4.6%; 碘的总浓度为 0.075 mol/L, 折合为质量浓度约为 0.254 g/L。鉴于质量分率 3.0% 硼酸、质量分率 0.5% 和 1.0% 碘伏的药用价值, 可以向收集的实验废液中加入适量去离子水, 获得 3.0% 质量分率的硼酸溶液; 或者加入适量碘液, 获得 1.0% 质量分率(等同于质量浓度 10.000 g/L)或 0.5% 质量分率(等同于质量浓度 5.000 g/L)的传统碘伏, 实验废液得以回收。

3 超滤膜分离能力测定实施方案

改进后的超滤膜分离能力测定实验, 按照以下 3 部分实施, 需 4~5 课时。

3.1 工作曲线的制作

采用碘-硼酸显色法, 建立 PEG 定量测定工作曲线。

1) 配制 0.050 mol/L 碘液、0.500 mol/L 硼酸溶液和 0.100 g/LPEG 储备液。

2) 分别移取 0.100 g/L 的 PEG 标准溶液 0.20、0.40、0.60、0.80、1.00 mL, 转移至 10.00 mL 容量瓶中; 各加入 0.500 mol/L 硼酸 1.50 mL、0.050 mol/L 碘液 0.20 mL; 用去离子水稀释至刻度, 摇匀; 放置 8 min, 搅拌 2 min(控制在 8~14 min)后, 在 520 nm 下测定显色液的吸光度; 以溶液的吸光度为纵坐标, PEG 的质量浓度为横坐标, 绘制工作曲线。

3.2 实验操作

1) 打开仪器总电源。

2) 在管路中总阀门关闭状态下启动原料泵。

3) 根据实验内容需要, 依次打开管路总阀及超滤膜分离器的前、后的相应阀门。

4) 在一定原料流量(操作压强)下使设备稳定运转, 超滤液和浓缩液均流回原料液槽。

15~20 min 后, 用吸量管从原料液储槽准确量取 5.00 mL 原料液, 按照 3.1 节中方法显色后测定吸光度, 利用所建立的工作曲线确定原料液组成 C_0 。

5) 调节并控制一系列原料流量(操作压强), 超滤液和浓缩液均流回原料液槽。15~20 min 后, 从滤出液连接软管接取适量滤出液, 用吸量管准确量取 5.00 mL, 按照 3.1 节中方法显色后测定吸光度, 并确定滤出液组成 C_1 。参照式(1)计算此实验条件下的 Ru 值。润洗吸量管所用滤出液、剩余的滤出液均需及时返回原料液储槽。

6) 实验完毕, 先依次关闭各阀门, 最后关闭原料泵。

7) 关闭仪器电源。

3.3 废液处理

将收集的测试废液混合, 根据废液体积及硼酸的实际浓度(硼酸的质量分率为 4.6%), 确定去离子水用量, 通过稀释配制质量分率为 3.0% 的硼酸溶液; 或者根据废液体积以及碘的实际浓度(0.254 g/L), 确定碘的用量, 配制碘伏溶液。

4 超滤膜分离能力测定实验结果示例

4.1 工作曲线绘制

采用碘-硼酸显色法, 分别配制浓度为 0、2、4、6、8、10 mg/L 的分子量为 6000 PEG 的显色标准溶液各 10 mL, 在 520 nm 下测定显色液的吸光度; 将取得数据利用 Origin 软件作图, 得到如图 2 所示的 PEG 定量测定工作曲线($y=0.062x+0.008$)。

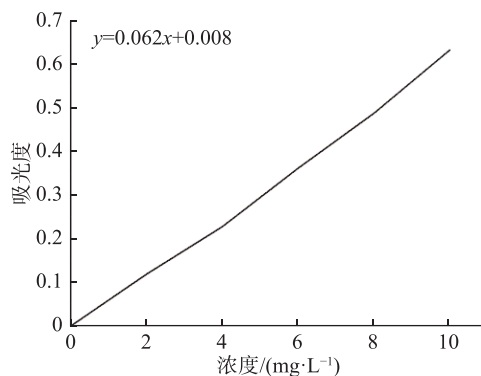


图 2 碘-硼酸显色法中 PEG 的工作曲线图

4.2 不同原料液流量与操作压强下超滤膜分离效果

在 0.040~0 MPa 范围内, 将截留分子量为 6000

的超滤膜两侧的压强差分别控制为 0.04、0.03、0.02、0.01 MPa, 按照 3.1 节中显色方法, 分别测

定原料液、滤出液的吸光度; 根据式(1)计算 Ru 值, 结果如表 3 所示。

表 3 超滤膜分离实验结果

操作压强 p /MPa	原料液吸光度	原料液浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	滤出液吸光度	滤出液浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Ru /(%)
0.04	0.552	7.62	0.089	1.31	82.8
0.03	0.552	7.62	0.076	1.10	85.6
0.02	0.552	7.62	0.078	1.13	85.2
0.01	0.552	7.62	0.070	1.00	86.9

4.3 压强对超滤膜分离能力影响分析

从表 3 中结果可以看出, 随着超滤膜两侧压强增大(推动力增加), 滤出液中所含大分子 PEG 基本表现为增加趋势, 分离效果变差。此结果符合压强对分离能力影响规律。值得注意的是, 0.02 MPa 的分离效果稍低于 0.03 MPa, 这可能是由于操作压强、浓差极化作用和超滤膜的吸附作用多重影响因素叠加引起的^[20]。0.02 MPa 下的结果可能为浓差极化作用和超滤膜的吸附作用占优势; 而在 0.03、0.04 MPa 下, 可能为膜两侧的压强差对分离作用的影响占优势。

4.4 质量分率 3.0% 的硼酸溶液与质量分率 0.5% 的碘伏配制

实验中收集测试废液 236 mL, 其中, 硼酸的质量分率为 4.6%, 碘含量为 0.25 g/L, 测定 PEG 浓度为 3.83 mg/L。取 180 mL 废液, 加入 96 mL 去离子水, 稀释配制得到 276 mL 的质量分率 3.0% 的硼酸溶液。取 56 mL 废液, 加入浓度为 0.05 mol/L (12.70 g/L) 的 I_2 溶液 202 mL, 配制得到质量分率 1.0% 的(等同于质量浓度 10.00 g/L)碘伏溶液 258 mL, 如图 3 所示。



图 3 实验中产生的废液的回收利用

5 超滤膜分离能力测定实验改进后的优点

改进后的超滤膜分离能力测定实验, 具有操作安全、节约原料与试剂、实验结果准确的特

点。同时, 从实验原料准备、显色剂筛选、实验规模与试剂用量、废液处理等方面, 全部遵循绿色化学的原则, 践行了安全、绿色、环保、节约、减排的理念。学生在后续其他实验项目的实施中自觉地养成了节约与回收实验废液的习惯, 将绿色、生态文明理念内化为自觉行动, 如精馏实验中为了减少取样量, 选择采用阿贝折光仪而不是分光光度计进行产品的定性与定量分析。同时将实验中分离得到的产品回收, 经混合并调配成所要求的浓度后, 作为原料液重复利用。

6 结束语

绿色化学已经成为新一轮基础教育化学课程与教学改革的一个重要理念。本文以“超滤膜分离能力测定”实验项目为例, 对传统实验进行了改进。实践证明, 改进后的超滤膜分离能力测定实验中对绿色原料与试剂的使用、实验规模的微量化、废物回收利用等一系列举措, 有利于学生增强环保意识, 树立绿色化学的理念。该实验项目的实施, 既可以提升学生的专业素养, 又可以作为绿色化学课程思政教学典型案例, 在其他实验项目的实施中起到辐射带动作用。

参考文献

- [1] 孙琦, 李猛, 王刚, 等. 创新绿色理念融入有机化学综合设计实验的实施路径[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(11): 177-180.
- [2] 赵辉. 气体分离膜技术及其在石油化工领域的应用[J]. 石油化工, 2023, 52(3): 412-417.
- [3] 骆文佳, 李飞, 张析, 等. MXene@PEI/IL 复合膜的构建及气体分离性能研究[J]. 膜科学与技术, 2024, 44(1): 37-44.
- [4] 凌翠翠, 郭天超, 魏云昕, 等. 碳纳米管基复合膜的气体分离性能实验设计[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(1): 18-21.
- [5] 严硕, 于海斌, 陈赞. 膜法脱除天然气中二氧化碳的工

- 艺技术发展现状[J]. 无机盐工业, 2022, 54(5): 38-46.
- [6] 郭翠梨, 张金利, 胡瑞杰. 化工基础实验[M]. 3版. 北京: 化学工业出版社, 2024.
- [7] 周爱东. 化工专业基础实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2018.
- [8] 张金利, 郭翠梨, 胡瑞杰, 等. 化工原理实验[M]. 2版. 天津: 天津大学出版社, 2016.
- [9] 张志刚, 卢文敏, 崔明明, 等. 分光光度法测定不同分子量聚乙二醇浓度[J]. 膜科学与技术, 2015, 35(1): 20-22.
- [10] 陈威, 王召根, 汪勇. 耐压型聚砜两亲嵌段共聚物超滤膜的制备与表征[J]. 膜科学与技术, 2018, 38(6): 27-33.
- [11] 文欣, 何灿, 海玉琰, 等. PEG对PES/SPSF复合超滤膜分离和抗污染性能的影响[J]. 水处理技术, 2022, 48(5): 104-107.
- [12] 刘超, 董岸杰, 张建华. 改性聚乙烯醇膜的研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(6): 3258-3269.
- [13] 许浩, 顾凯锋, 李韵浩, 等. 低截留分子量聚醚砜超滤膜[J]. 化工学报, 2019, 70(5): 1999-2006.
- [14] 庞秀言, 闰明涛. 化工基础实验[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.
- [15] 师慧娟, 刘耀, 樊小伟, 等. 次碳酸铋分光光度法测定酸铜镀液中聚乙二醇[J]. 冶金分析, 2021, 41(2): 66-71.
- [16] 赵朔, 王亚品, 韩明星. 改进的Dragendorff试剂法定量检测聚乙二醇[J]. 信息记录材料, 2018, 19(11): 36-39.
- [17] 胡亨恩, 肖通虎, 邱慧莹, 等. 温度对分光光度法测定超滤膜性能的影响[J]. 宁波大学学报(理工版), 2017, 30(4): 110-115.
- [18] 李植红, 雷喜荣, 钟彩梅. 不同温度3%硼酸湿敷治疗面部脂溢性皮炎的效果观察[J]. 护理实践与研究, 2019, 16(3): 140-141.
- [19] 姚文莉, 沈德林, 姚楚水, 等. 消毒剂聚乙二醇-碘的研究[J]. 中国消毒学杂志, 1990, 7(3): 136-139.
- [20] 王文娟, 赵昊瀚, 潘艳秋. 动态膜分离油水乳化液操作条件优化和影响因素分析[J]. 高校化学工程学报, 2015, 29(5): 1045-1052.

编辑 王燕

(上接第79页)

- [14] TEPPER O M, RUDY H L, LEFKOWITZ A, et al. Mixed reality with HoloLens: Where virtual reality meets augmented reality in the operating room[J]. Plastic & Reconstructive Surgery, 2017, 140(5): 1066-1070.
- [15] LEE K T, CHEE P S, LIM E H, et al. Data glove with integrated polyethylene-carbon composite-based strain sensor for virtual reality applications[J]. Chemical Engineering & Technology, 2023, 46(12): 2480-2486.
- [16] WANG Z Q, WANG D X, ZHANG Y, et al. A three-fingered force feedback glove using fiber-reinforced soft bending actuators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(9): 7681-7690.
- [17] 刘洋阳. 高校图书馆数字人文空间建设研究: 以耶鲁大学为例[J]. 江苏科技信息, 2021, 38(24): 14-16.
- [18] 李勇, 林志, 刘晶, 等. 生物学野外综合实习多元化教学体系的构建[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(8): 211-213.
- [19] 季元吉. VR全景摄影技术在既有建筑勘察中的应用研究[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(3): 31-34.
- [20] 李勇, 罗招青. 地质灾害应急排查VR全景展示系统的设计与实现[J]. 现代信息技术, 2022, 6(10): 32-34.
- [21] 张海平, 汤国安, 熊礼阳, 等. 面向地貌学本源的DEM增值理论框架与构建方法[J]. 地理学报, 2022, 77(3): 518-533.
- [22] 张子健, 李朋, 程振龙, 等. 基于DEM数据的相对高程计算方法研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(2): 52-54.
- [23] 黄小兵, 万铁庄. 多源数据的点云融合算法在智慧城市三维建模中的应用[J]. 北京测绘, 2021, 35(12): 1582-1586.
- [24] 彭剑飞, 施慧, 余爽, 等. 虚拟现实在心肺复苏实践教学中的应用的范围综述[J]. 军事护理, 2022, 39(11): 69-72.

编辑 王燕