

虚拟现实技术与安全绿色大学化学实验教育

韩冬雪¹, 孙会靓¹, 牛利^{1,2,*}

¹广州大学分析科学技术研究中心, 广东省光电传感材料与器件工程技术研究中心, 广东省高校光电材料与传感器件重点实验室, 广州市传感材料与器件重点实验室, 广州大学化学化工学院, 广州 510006

²中山大学化学工程与技术学院(珠海), 广东 珠海 519082

摘要: 结合大学化学实验教学活动基本现状, 围绕安全、绿色、可视化等学科需求, 探讨虚拟现实技术在化学实验教学及科学实验研究中的一些可能应用和技术特色。有别于虚拟仿真平台, 虚拟现实技术以其更强的融入式、浸润式体验感, 可以更加形象生动地展示实验教育步骤并增强实验训练全过程的现实感。

关键词: 化学实验; 虚拟现实; 现实增强

中图分类号: G64; O6

Virtual Reality Technology for Safe and Green University Chemistry Experimental Education

Dongxue Han¹, Huiliang Sun¹, Li Niu^{1,2,*}

¹ Center for Advanced Analytical Science, Guangzhou Key Laboratory of Sensing Materials & Devices, Guangdong Engineering Technology Research Center for Photoelectric Sensing Materials and Devices, Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Sensor Components in Guangdong Provincial Universities, School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China.

² School of Chemical Engineering and Technology (Zhuhai), Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, Guangzhou Province, China.

Abstract: Combining the fundamental aspects of teaching activities in chemistry and emphasizing safety, environmental friendliness, and visualization, this paper explores potential technical features and applications of virtual reality technology in experimental teaching and scientific research. In contrast to simulations, virtual reality technology, with its interactive and immersive experiences, can vividly depict the procedural aspects of chemical experimental education and training.

Key Words: Chemistry experimental education; Virtual reality; Augmented reality

化学是理论联系实际学科, 化学也是更加注重实验技能的学科。化学学科的特点首先就在于实践, 无论是从课堂到实验室, 还是到工业工程应用, 化学学科更强调联系实际与社会实践, 化学学科依托于社会生产活动产生, 又以探索自然、服务和满足社会需求为目的^[1]。化学学科的性质就决定了化学是一门基础自然科学, 其知识必然来源于不断的探索和实践。实验是化学的灵魂, 是化学的魅力, 更是化学知识产生的唯一源泉。在掌握和传授化学基本技能、提高灵活运用所学知识的能力上, 离不开化学实验; 在探索化学新原理新现象、验证及检验化学新

收稿: 2023-12-19; 录用: 2024-01-08; 网络发表: 2024-02-19

*通讯作者, Email: lniu@gzhu.edu.cn

基金资助: 广州市高等教育教学研究和改革重点项目(2023JGZDXM007)

方法新途径上，更离不开化学实验。

1 化学实验的实践特征

1.1 化学实验对化学试剂有着不可分割的需求

化学实验就是触发物质变化导致性质、组成、结构变化产生新物质的过程，因此化学实验首先必须涉及参与化学反应变化的物质——化学试剂。从生活必不可缺的空气、水，再到日常居家常用的食盐、酒精、醋、小苏打、碘酒、双氧水等；从传统的常见试剂硫酸、盐酸、硝酸、磷酸、氯仿、丙酮、乙醚，再到较为罕见的如氦、镭等；从无毒的氯化钠到剧毒的氰化钠、氯化汞、氢氰酸；从治疗癌症的顺氯氨铂、甲基苯肼、环磷酰胺到致癌的黄曲霉素、苯并芘、氨基联苯、萘胺，昂贵的定量使用、易燃的注意风险、有害的密切防范，诸如此类，林林总总。化学试剂的采购、保存、使用、回收、处理都存在诸多制约条件并带来极大风险，时刻与化学试剂打交道的化学实验成为足以谈虎色变的高危过程。

1.2 化学实验对气氛环境有着严格苛刻的需求

化学实验室提供的不仅仅是科学探究的场所，更多的是进行化学实验的环境条件。化学反应按照预想的设计发生往往伴随着严苛的环境条件限制，如无氧过程需要气氛保护；无水控制中的试剂纯化、除湿、吸湿及气氛保护总是不可避免；真空环境的创造按照真空度要求从机械泵到扩散泵、分子泵逐级提升，操作复杂程度也不断加大；恒温恒湿条件看起来简单，但长期的稳定维护需要较高预算。化学环境氛围的维持是化学实验过程得以顺利实施的重要基本条件，但往往正是一些苛刻实验环境需求使得大多数公众减少甚至丧失了对化学的兴趣和信心。

1.3 化学实验对触发条件有着独一无二的需求

化学反应的发生有自发、可逆，发光、发热、变色、生成沉淀等多个种类，绝大多数化学反应的发生尽管具备热力学可行性，但需要严格的触发条件才能进行。如反应温度的提升需要利用煤气、酒精、电等典型的加热源，尽管属于惯常方法，可其与化学试剂的联合使用往往成为化学实验场所安全的重要隐患；压力条件也是化学反应发生的重要因素，是实验操作过程及安全防范的重要关注点，从简单的机械减压过程到复杂的高/超高真空，从常压到危险的水热反应，从正压保护到负压过程，各式各样形形色色涉及压力控制的反应过程，成为化学实验顺利进行至关重要的要素之一；其他诸如电、磁、声、光等也都可以成为化学反应发生的触发条件，如电氧化还原、电镀、电腐蚀、超声及微波辐照、光化学反应、磁感应等，触发条件有的简单，有的复杂，操作形式多种多样。

1.4 化学实验对操作过程有着不可替代的需求

培养化学实验动手能力是化学学科最直观、最基本的学习方法，通过实操过程非常容易把理论知识直观地转化为感性认识，从而让化学过程变得更加容易理解。化学试剂的使用、反应装备的搭建、气氛的控制、触发手段的实施等实践操作贯穿着整个实验过程。从常规的标准反应容器及设备使用(如称量、定容、抽滤)，到修改定制特定需求(如玻璃器皿吹制加工、装置打孔及质检车削等)；从标准装置模块化搭建(如回流、冷却、蒸馏等)，到复杂非标系统的创新设计(如真空泵、扩散泵、气阀、液阀、光路、检测器、富集分离等)；从常规的化学过程(如滴定、烧结、层析等)，到复杂的光机电联用技术应用(如色谱-质谱、色谱-光谱、电化学-光谱等)，在化学实验的整个操作过程中，需要全程掌控反应时效、试剂危害、触发条件合规可控，甚至是异常突发事件的预防及处理等。安全合理合规的实验操作是化学实验实施的基础和核心，也是实验安全的重要保障。

1.5 化学实验对观察角度有着明确必要的需求

化学实验目的是以实验结果为导向的，不仅仅是实验终点需要明确，实验产物的结构、性质、组成及物质的量也需要准确知悉，以上信息通常可以通过如颜色变化、沉淀反应、电导电位改变等现场原位的光电及化学特性来加以鉴别。化学反应的进行程度也需要实时认识和了解，如可通过观察光谱峰形及谱带位移、电化学电流变化等确定，化学反应的控制条件及环境特征也需要实时跟踪

测量,如流速、温度、时间、压力等。此外,这些观察角度除大型离位表征手段之外,基本都很难给出动态细节、微观层次、机制机理等方面的信息,而这些信息在化学实验教育中尤为重要,是帮助学生清楚、正确、直观了解化学反应发生发展进程的重要依据。

总而言之,化学实验过程广泛涉及到昂贵的试剂、复杂的环境、各色仪器设备、繁杂的操作技术方法及丰富的观察测量信息,实验方法多种多样,涉及仪器设备千差万别,化学实验诱发条件迥然相异,化学反应所需的环境条件种类繁多,实验操作人员观察角度及观察信息的获取方式五花八门。一言以蔽之,化学实验教学难以做到经济、便捷、绿色、安全、环保,附属及维护措施的添加只能在一定程度上起到保障安全及环境无害化作用,而高效、绿色、安全等理念一直是化学实验教学中所追求的最高目标。

2 虚拟现实技术

虚拟现实技术(Virtual Reality, VR)可以追溯到1838年的立体镜技术,1956年创立了第一条VR游戏设备,包括3D视频、音频、震动,甚至是气味效果,但机器巨大;1968–1975年左右诞生的VR游戏设备将计算机图形学等技术引入其中,极大改善了用户的“沉浸式”体验效果;其后的相关VR设备逐渐引入护目镜、手套、控制器等组件用于改善体验效果;直到近10余年来,如Google的立体3D街景、Oculus的宽视野及图像传递功能、索尼公司的ps4vr游戏工作站、Google的Cardboard、三星公司的Gear等,这些VR设备从简单的游戏场景,到医疗、城建及教育等领域,如数字手术刀的临床手术及心理治疗、城市规划、虚拟现实教学、文化遗产保护等,正不断打破传统体验印象,为人们生活提供无限的想象空间。随着社会生产力和科学技术的不断发展进步,各行各业对VR技术的需求也日益旺盛。

所谓虚拟现实,顾名思义,就是虚拟和现实的相互结合。虚拟现实技术集计算机、电子信息、仿真技术等于一身,其基本的实现方式是通过计算机来模拟虚拟环境,从而带给参与者环境沉浸式体验。

2.1 VR技术的典型基本特征

首先就是VR体验的沉浸式特性,可以让用户成为并感受到自己是计算机系统所创造环境中的一部分,通过虚拟世界的触觉、味觉、嗅觉、运动感知等刺激产生思维共鸣,造成心理沉浸,感觉如同进入真实世界;其次,VR技术具有交互性及感知性,使用者可以跟虚拟环境系统产生相互作用,如感觉、触觉、听觉等,甚至位置及状态也会随着用户的介入产生相应动作及改变;再者,VR技术具有自主性和可创建性,不仅虚拟环境中的物体可以依据物理定律发生相应的动作,如移动、翻倒、河流的流动、水花的飞溅、电闪及雷鸣等,同时通过用户与虚拟环境物体的互动,更可以创造客观世界不存在的场景,甚至产生现实世界不可能发生的环境事件。

2.2 VR技术与化学场景构建

从理论上讲,虚拟现实技术(VR)就是一种可以创建和体验虚拟世界的计算机仿真系统,它利用计算机生成一种模拟环境,使用户沉浸到该环境中。也就是说化学反应过程及场景完全可以依据现实需求,利用计算机技术创造出可以完全复制的化学模拟环境,而这样的环境因其虚拟特性本质,在过程安全及危害管控等方面会具有无比优越性。

虚拟现实技术的运用也不是完全脱离化学实际,它创造的模拟环境是利用现实化学实验过程产生的数据,通过计算机技术产生电子信号,将其与各种输出设备结合使其转化为能够让实验人员感受到真实化学过程的手段。当然,这些化学场景可以是现实化学实验中真真切切遇到的试剂、仪器设备、控制条件、反应过程的变化追踪等,也可以是我们平时肉眼所看不到的物质或过程,如电子转移、晶型转化、微观结构及形貌变化等,都可以通过直观的三维模型表现出来。而这些正是VR技术的与众不同之处,既能还原化学实验现实,又能优于现实,更加丰富实验全过程的化学信息,使化学反应原理、过程等的展示更加系统直观。

2.3 VR技术与化学基础理论

基础理论课程在化学教育中起着主导和核心的作用，是化学教学的重要组成部分。历史的演变，如燃素说到原子分子学说；化学规律的总结，如元素周期律；基础理论的丰富，如化学动力学、溶液及电离过程、化学平衡理论、物质结构、氧化还原等都为化学实验实操打下基础。尽管自然科学基础强调逻辑、强调前因后果，但科技进步的日新月异、化学学科的发展也是一日千里，新的知识层出不穷，从其中萃取提炼的基础知识也自然是精妙高深，导致在传授过程中难免枯燥乏味，明显缺乏直观的彰显力。VR技术的引入，通过三维可视化的展示及交互互动体验，使得基础化学概念不再抽象，微观理论不再模糊朦胧，不仅使学生的学习兴趣得到提高，同时也激发了学习者的求知欲^[2]。

在教学团队前期开展的实验课程中(图1)，如光催化材料的构建及能级结构、结构功能关系理论解析，不仅受限于现有表征手段，使得在实验过程中难以形象地阐释微观物理化学过程，同时其光化学性能、光化学反应过程、光化学活性结构等理论授课也更依赖于化学模拟过程的表达形式。通过光催化材料结构调控虚拟实验的可视化界面引导，可以形象解析光催化材料结构模型搭建、构型优化、能级能态分析、反应机理等过程，可以更有效地让学生理解光催化反应内涵本质，并培养他们的理论分析能力。

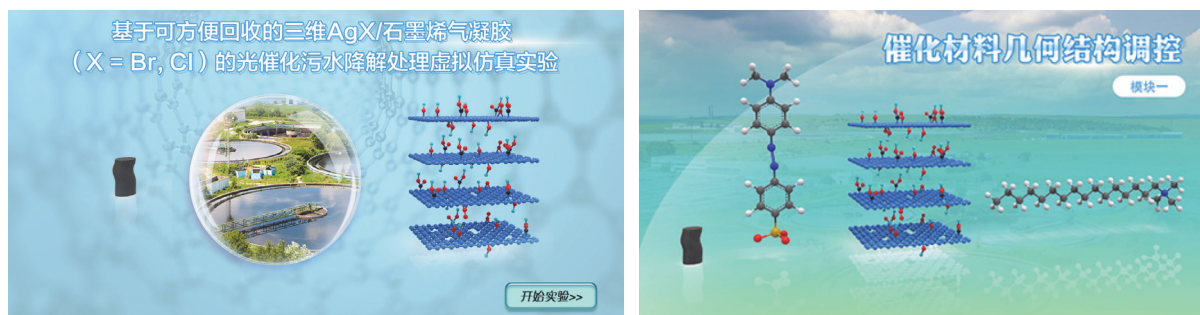


图1 虚拟现实技术用于光催化实验授课理论解析

2.4 VR技术与化学实验实践

实验实践课程在化学教育中是至关重要和不可或缺的。当现实化学实验过程所涉及到的相关元素数字化以后，实验所需要的化学制剂不再有储存、转运、操作使用、废弃物处理等安全隐患；实验实施过程中的环境控制条件，如恒温恒湿、无水无氧、高温高压等，都变得更加容易实现，同时也不再受实施场所、控制系统等限制；实验中所必需的化学反应触发条件如加热、加压、光辐照、电化学等，也会更加容易实施操作；实验中的必要操作步骤，不但可以按照实际场景复现，不会有任何的缺失遗漏，还可以对错误步骤进行即时纠正提醒，严格保证不再会出现任何操作风险；实验中对化学反应过程的追踪及对反应结果的探查，也会通过即时模型显示、动态数据跟踪、微观过程模拟、化学进程的直观可视化、结果的图像化及数字化等方式展现，极大提升了化学实验的实施效率^[3,4]。

在教学团队前期开展的虚拟仿真实验课程中(图2)，真实化学场景的VR元素得到了一定程度的交互式使用，从化学材料的处理、光催化剂的制备及负载、材料性状表征、光催化性能测试评估、数据动态分析及数据处理等实践操作方面均实现了虚拟过程仿真。以光催化污水降解处理为例，实验材料、条件控制、实验测量、结果分析等均可以十分方便地在虚拟环境中得到直观的展现，无论是实验仪器设备、合成装置搭建、反应过程各种外界条件控制均可以通过虚拟界面交互式完成，特别是对误操作、错误数据的处理及分析方法均能够得到交互式的反应和反馈体验。



图2 虚拟现实技术用于光催化实验虚拟操作过程

2.5 VR技术现实体验感提升

目前虚拟仿真技术已经较为成熟，从中学到大学的课程都已经得到了较为广泛的应用，但其与成熟的VR技术相比，还有很大的体验式、交互感差距。现有的虚拟仿真实验课堂还仅停留在声光感受及图像变换式体验，实验者“身临其境”的体感及主动交互能力还十分欠缺，特别是3D环景、触觉感知、振动及味觉、电刺激响应等3D沉浸式及多维反馈式体验还十分受限。随着柔性传感器的不断发展，诸多可穿戴设备已成为虚拟实验室采用的重要交互手段。目前教学团队正在开发的“化学柔性传感器与人体大健康虚拟现实实验”中，基于团队自主研发的如呼吸状态监测、脉搏精细化分析、人体运动姿态检测、步态分析与矫正、复杂手势及关节动作识别、“智能指套”输入、运动汗液电解质监测等化学柔性传感器研究基础，将科研成果切实转化为教学资源(图3)。配套的可穿戴设备应用于虚拟现实实验授课，学生在虚拟世界中系统学习化学传感器原理，实践敏感材料制备、表征、监测数据统计分析并掌握传感机理后，还可以通过虚拟现实中的行进步骤触发可穿戴设备工作，以上互动元素的添加会让实验者感觉身临实验现场，感知热传递、发光、体积膨胀、压力变化等诸多化学相关反应带来的新鲜体验。

随着VR技术平台的越来越规范、越来越开放、越来越廉价，未来的发展方向一定会是消费者或者企业可以设计制作自己的VR设备及软体，如PICO、HTC VIVE等头显及反馈控制装置。特别是将这些头显设备与我们的柔性可穿戴器件相结合，借助VR技术的化学教育技术水平和能力一定会得到巨大的提升。此外VR技术高效、安全、绿色、无害化的本质，也必将成为化学教育中的重要组成部分，为未来虚拟现实实验技术提供极大助力。

2.6 VR技术助力化学知识普及

人们对化学的认知更多地取决于公众化学素养，而公众化学素养不足是一个世界性问题。正如英国皇家化学会2015年的一次民调显示：在受访的民众当中，有25%的人表示对化学“没有任何兴趣”，一半以上的人感觉自己对于化学领域了解太少，约有一半的人表示在谈论有关化学方面的话题时“完全没有信心”，甚至有近两成的人认为“所有的化学物质都危险且有害”，可见普通人对化

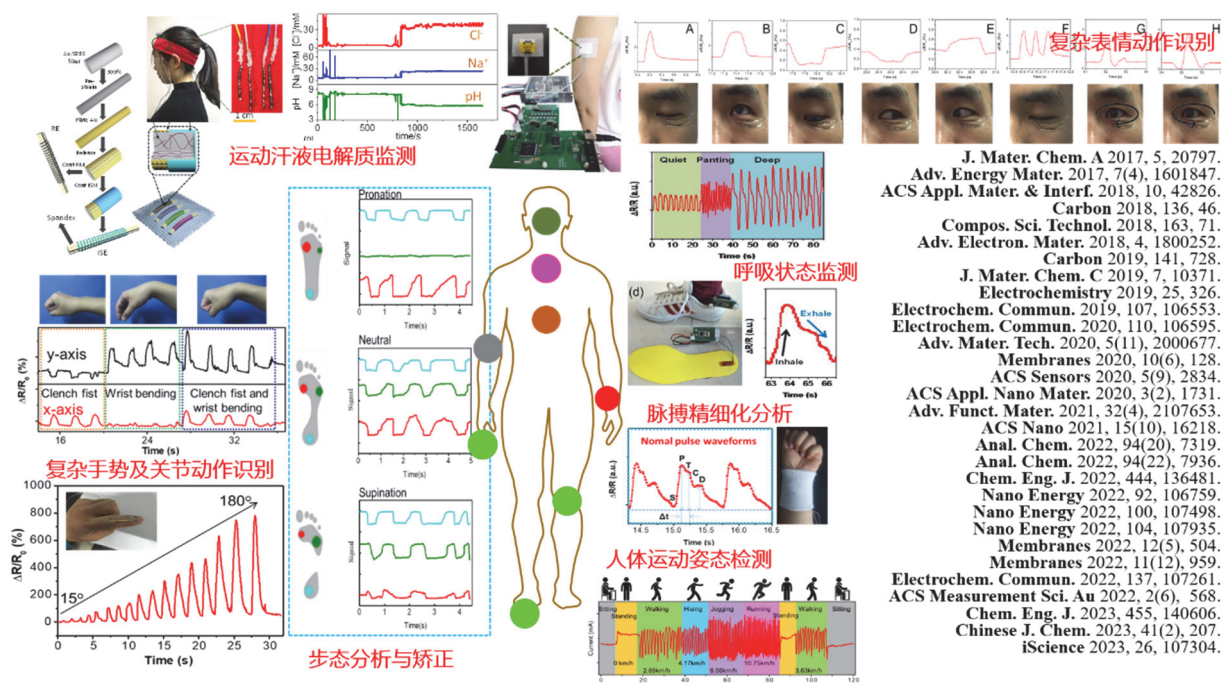


图3 可穿戴器件助力虚拟现实交互式体验

学产生各种没有道理的怀疑和恐惧并非中国独有(中国科协公布了2015年中国公民科学素质调查结果,结果显示我国具备科学素质的公民比例仅为6.20%)。因此化学工作者不仅需要化学知识的传播,化学服务社会能力,甚至传播化学科技科学精神等方面,都需要面向社会及公众普及,毕竟公众的科学素质水平较低,对化学科学、化学工业还缺乏必要的深入了解,民众化学素养的提升需要化学工作者的正确传播和引导。

无疑地,将最新前沿科技引入化学教育中,改善公众对传统化学实验过程危险、有害、复杂、专业的呆板印象,不仅可以提高化学教育的技术水平,同时对公众的科学素养,特别是化学素养的提升也有极大助力。VR技术以其趣味性、直观形象化的特征,一定会在化学知识的传播中起到不可替代的作用。

参 考 文 献

- [1] 韩冬雪, 牛利. 大学化学, **2022**, 37 (1), 2104031.
- [2] 赵蕊, 陈东平, 初庆钊. 大学化学, **2022**, 37 (4), 143.
- [3] 熊琼. 百科论坛电子杂志, **2019**, No. 23, 734.
- [4] 刘瑞淇, 刘赞宇, 王宝金. 中国教育信息化·基础教育, **2019**, No. 3, 94.

- J. Mater. Chem. A **2017**, 5, 20797.
- Adv. Energy Mater. **2017**, 7(4), 1601847.
- ACS Appl. Mater. & Interf. **2018**, 10, 42826.
- Carbon **2018**, 136, 46.
- Compos. Sci. Technol. **2018**, 163, 71.
- Adv. Electron. Mater. **2018**, 4, 1800252.
- Carbon **2019**, 141, 728.
- J. Mater. Chem. C **2019**, 7, 10371.
- Electrochemistry **2019**, 25, 326.
- Electrochem. Commun. **2019**, 107, 106553.
- Electrochem. Commun. **2020**, 110, 106595.
- Adv. Mater. Tech. **2020**, 5(11), 2000677.
- Membranes **2020**, 10(6), 128.
- ACS Sensors **2020**, 5(9), 2834.
- ACS Appl. Nano Mater. **2020**, 3(2), 1731.
- Adv. Funct. Mater. **2021**, 32(4), 2107653.
- ACS Nano **2021**, 15(10), 16218.
- Anal. Chem. **2022**, 94(20), 7319.
- Anal. Chem. **2022**, 94(22), 7936.
- Chem. Eng. J. **2022**, 444, 136481.
- Nano Energy **2022**, 92, 106759.
- Nano Energy **2022**, 100, 107498.
- Nano Energy **2022**, 104, 107935.
- Membranes **2022**, 12(5), 504.
- Membranes **2022**, 11(12), 959.
- Electrochem. Commun. **2022**, 137, 107261.
- ACS Measurement Sci. **2022**, 2(6), 568.
- Chem. Eng. J. **2023**, 455, 140606.
- Chinese J. Chem. **2023**, 41(2), 207.
- iScience **2023**, 26, 107304.