

## 虚拟现实VR技术在有机化学课程教学中的应用探究

刘卉<sup>1</sup>, 张树鹏<sup>1</sup>, 张云添<sup>1</sup>, 董伟<sup>1</sup>, 刘雨季<sup>1</sup>, 邓冰心<sup>2</sup>, 陈东平<sup>2,\*</sup>, 汤永兴<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>南京理工大学化学与化工学院, 南京 210094

<sup>2</sup>北京理工大学, 爆炸科学与安全防护全国重点实验室, 北京 100081

**摘要:** 针对有机化学教学中结构抽象、反应复杂导致学生理解困难的现状, 采用虚拟现实(Virtual Reality, VR)的化学元宇宙技术与有机化学课程相结合的方式, 将有机化合物的分子结构、空间构象、反应机理等, 以学生交互式模式进行学习。不但提高了有机化学课程教学质量, 而且提升了学生的学习兴趣以及动手能力和创新能力, 同时分析了VR技术在有机化学教学应用方面的挑战及创新性, 弥补了VR技术应用于国内高校有机化学课程教学研究的空白, 具有很大潜力和重要意义。

**关键词:** 有机化学; VR技术; 学习兴趣; 动手能力; 交互学习

**中图分类号:** G64; O6

## Research on the Application of Virtual Reality (VR) Technology in the Teaching of Organic Chemistry

Hui Liu<sup>1</sup>, Shupeng Zhang<sup>1</sup>, Yuntian Zhang<sup>1</sup>, Wei Dong<sup>1</sup>, Yuji Liu<sup>1</sup>, Bingxin Deng<sup>2</sup>, Dongping Chen<sup>2,\*</sup>, Yongxing Tang<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China.

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Explosion Science and Safety Protection, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China.

**Abstract:** In response to the difficulties students face in understanding abstract structures and complex reactions in organic chemistry teaching, this study explores the combination of virtual reality (VR) technology, specifically the chemistry metaverse, with organic chemistry courses. This approach allows students to learn about the molecular structure, spatial conformation, and reaction mechanisms of organic compounds through interactive learning. The integration of VR technology not only improves the quality of organic chemistry teaching, but also enhances students' interest in learning, as well as their hands-on and innovative abilities. Additionally, this research analyzes the challenges and innovations in applying VR technology to organic chemistry teaching. By addressing the gap in the use of VR technology in organic chemistry teaching and research in domestic universities, this study demonstrates its significant potential.

**Key Words:** Organic chemistry; VR technology; Learning interest; Hands-on ability; Interactive learning

教育被视为国家发展的重中之重, 结合国家在“互联网+”、大数据、新一代人工智能等领域的重大政策决议, 教育部于2018年印发了《教育部关于加快建设高水平本科教育全面提高人才培养能

收稿: 2023-12-05; 录用: 2024-02-27; 网络发表: 2024-03-04

\*通讯作者, Emails: yongxing@njust.edu.cn (汤永兴); dc516@bit.edu.cn (陈东平)

基金资助: 国家一流本科专业建设点(教高厅函[2022] 14号); 江苏省品牌专业建设点(苏教高函[2022] 10号); 江苏省高等教育教改研究项目(2023JSJG293); 南京理工大学研究生教学改革课题(KT2023A005); 北京理工大学机电学院教育教学改革项目

力的意见》<sup>[1]</sup>和《教育信息化2.0行动计划》<sup>[2]</sup>, 国务院2019年印发的《中国教育现代化2035》<sup>[3]</sup>提出: “充分利用现代信息技术, 丰富并创新课程形式”, 要求加快高校的信息化工程建设, 培养学生的动手实践能力。习近平总书记二十大报告中指出, 要“推进教育数字化, 建设全民终身学习的学习型社会、学习型大国”。教育数字化的实现需要将已有教育教学方式与先进数字技术手段进行融合, 进一步推动教育教学的改革和发展。

目前, 我国众多高校都在推动虚拟现实实验室和虚拟仿真实验教学项目建设。根据教育部办公厅的决定, 自2017年至2020年期间, 在普通本科高等学校开展示范性虚拟仿真实验教学项目的建设[4]。2019年5月, 教育部科技发展中心成立了虚拟现实研究中心, 旨在将虚拟现实技术与目前教学手段进行结合, 进一步将虚拟现实技术应用到教育领域<sup>[5]</sup>。在这样的社会环境下, 虚拟现实技术有了广阔的发展和应用空间。VR技术能够为使用者创造出一个三维立体的虚拟世界, 通过计算机技术和传感技术为使用者呈现出一个能被看到、听到和感知到的场景<sup>[6]</sup>, 在这个虚拟空间中, 使用者能够观察其中的景象并与虚拟世界中的物体或人物进行互动。起初, VR技术主要应用于休闲娱乐和游戏领域, 随着技术不断发展和成熟, 已经逐渐应用到了其他各行各业。如今, VR技术已经作为一种新型的教学手段出现在教育领域中。但是, 如今VR技术多应用于高校的虚拟实验室项目建设中, 而在理论课程学习中的应用还较少, 尚未应用到有机化学课程教学的研究中。

本文旨在将VR技术引入到高校有机化学教学课程中, 通过将学生引入虚拟分子空间中, 把有机化学课程内容变得更生动有趣, 从而提高学生的学习兴趣和、创新思维和自主学习意愿。对于目前传统教学手段存在的问题进行改善, 使教学形式更加多元化, 并实现考核评价过程的实时化, 具有重要的创新性和教学意义。

## 1 VR技术在有机化学课程教学中应用的必要性

有机化学课堂教学的核心是探讨化学结构在反应过程中发生的变化。目前, 高校教师通常采用二维图片或结构模型(图1)来教学。然而, 对于一些复杂立体的三维结构, 这种教学方式并不足够直观。随着多媒体教学工具的引入, 极大程度上提高了教师的教学效率, 也有助于学生理解和掌握化学结构。这说明, 教学工具对于有机化学的课堂有很大影响。尽管如此, 目前大多数多媒体教学手段只能静态展示化学结构模型, 无法实现使用者与化学结构之间的交互, 仍属于被动式教学, 不能满足实际教学需求。VR技术作为一种三维可视化技术, 不仅能够实现立体成像的效果, 还能实现使用者与虚拟空间中物体的交互。国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)于2022年10月公布了该年度化学领域的十大新兴技术, “VR支持的交互式建模技术”就是其中之一<sup>[7]</sup>。该技术通过融合计算化学和VR技术, 建立了化学元宇宙。IUPAC评价该技术: “当计算化学拥抱元宇宙, 化学元宇宙将成为可能”, 并指出以VR为技术底座的化学元宇宙将在化学教育领域中得到更广泛的应用。

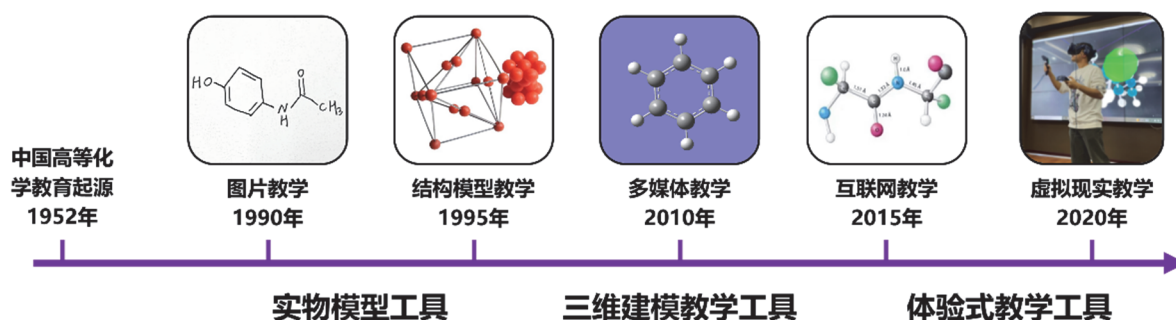


图1 化学结构教育工具的发展历程

作为一种新型的化学领域教育技术,化学元宇宙已在化学类课程中有了初步应用探索。赵蕊等人<sup>[8,9]</sup>通过将VR技术与传统的分子动力学模拟方法相结合,开发出了一种化学元宇宙教学工具Manta。在燃烧化学教学实践中,通过在虚拟空间中探究氢氧燃烧的化学反应发生的过程,来学习温度和碰撞特性在化学反应以及氢气燃烧反应中的作用。在虚拟空间中,学生可通过与分子结构进行交互来了解化学反应发生的过程,并确定其中关键的影响因素。通过分析学生反馈的调查问卷,证实了化学元宇宙技术极大地改善了学生上课的参与度,提升了学生对于相应知识点的理解和认知。我们有理由相信化学元宇宙技术将在我国化学类课程的专业教育中创造新的可能性,拓宽化学类课程的教育手段。

## 2 VR技术在有机化学课程中的应用

南京理工大学有机化学教学团队基于化学元宇宙教学工具Manta,开展了面向本科生有机化学课程的教学实践。采用了有机化学中的部分反应体系进行了虚仿实验案例设计,共计包含10个化学元宇宙交互案例(图2),涉及构象转化、异构化反应和开环/取代/加成反应。在有机化学的学习过程中,学习同种物质不同化学结构的构象转化是一个难点。在构象转化案例中,学生能够使用手柄在虚拟空间中对实验对象进行操作,实现环己烷的船式和椅式构型的转变,丁烷C-C键的旋转,以及胺反转的构象转变。这对于空间想象能力相对较弱的学生来说,是一种直观且有趣的教学方式。

异构化反应是化合物结构发生改变而分子量不变的过程,在实际化学学习过程中,仅靠目前的教学手段,很难直观地了解异构化反应的发生。在这里我们设计了2-甲基丁烷正离子氢负离子转移反应和己二烯、瞬烯的Cope重排反应,让学生作为主导者实际参与到异构化反应的发生过程中。此外,对于新物质生成的化学反应,设计了环丁烯的开环反应、亲核取代反应、臭氧化物的生成反应和双烯加成反应。以上案例分别从不同的角度支持学生自由探索有机化学反应发生的原理。

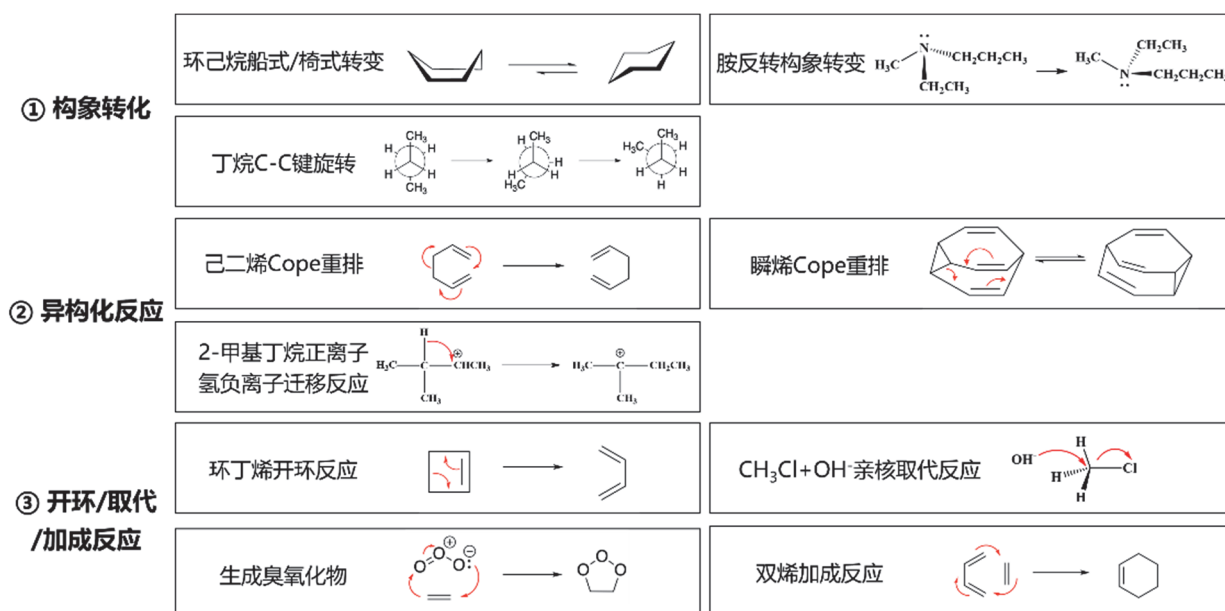


图2 10个虚仿实验案例,包含构象转化、异构化反应、开环/取代/加成反应

### 2.1 分子结构展示与空间构象转化

有机化学每一章均涉及基础有机化合物大类的分子结构。结构决定性质,这是有机化学中的核心要领。要想学好有机化学,每一类化合物基础物质结构的掌握理解显得尤为重要,然而采用黑板或者多媒体授课对于结构的剖析比较单调无力,往往是学生不容易引起重视的环节。同时学生的三

维想象能力不尽相同，导致无法把手写结构合理地转换成真实的三维构象。通过VR技术，学生将以三维立体形式对有机分子结构进行沉浸式观察和探索。他们可以自由旋转、放大和缩小分子，从不同角度观察分子的空间排列和化学键的构成。这种互动性可以帮助学生更好地理解分子结构和化学键的特性，对有机分子结构产生直观印象。以正丁烷为例，它是由四个碳原子组成的链状烷烃，沿两个碳碳键之间的 $\sigma$ 键键轴旋转会出现不同的构象。在本次有机化学教学课堂中(图3)，学生可通过VR手柄在虚拟空间中对丁烷的C2—C3碳碳键进行旋转，通过绕碳碳键旋转 $60^\circ$ 或 $120^\circ$ ，实时观察丁烷不同构象的动态转变过程。相比于课本或讲义上的简单描述，这有利于学生对化学物质构象变化过程的认识。

其他例如烯烃或者环烷烃的顺反异构体，烷烃尤其是环己烷的构象异构体，手性分子的对映异构等，这些对学生来说是一个相对抽象的概念。通过传统的平面图和模型，学生难以全面理解化合物立体结构的存在形式，比如环己烷的船式、椅式构象以及取代环己烷中取代基在a键、e键的互相转变。而利用VR技术，可以将有机分子以三维形式展现，自己动手实现同一物质不同构型之间的转变，甚至可以直接搭建出新的结构，让学生更加直观地理解分子的空间结构和分子间的相互作用。

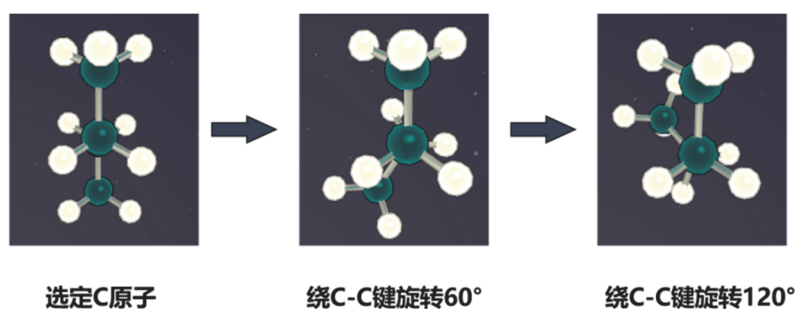


图3 通过VR手柄开展的丁烷C—C键旋转案例

## 2.2 探索反应机理

有机化学反应的机理是学生需要掌握的重要内容之一。有机化学作为一门知识点多、结构抽象、反应机理复杂的化学化工专业的基础课，对于一些空间立体感较弱、或者基础差的同学，很难理解有机化合物的结构以及有机反应机理<sup>[10]</sup>。传统的教学方式依靠图解和文字解释，但对于多数学生来说，难以形象地理解反应物和产物之间的相互作用过程。通过化学元宇宙技术，学生可以三维立体视角观察反应物之间的相对位置、键的断裂和形成过程，模拟反应的整个过程，让学生亲身参与并观察反应物的变化，从而更好地理解反应机理和反应路径，提高课堂的效率。

在教学实践中包含了四个开环/取代/加成反应。以狄尔斯-阿尔德双烯加成反应为例(图4)，学生通过操控乙烯来和丁-1,3-二烯发生双烯加成反应。首先通过VR手柄与乙烯分子交互，然后寻找合适角度促成双烯加成反应发生，然后观察生成的六碳环分子结构中的C—H键翻转过程。部分同学在这一案例中将有效了解到反应位点的重要性，以及反应过程中潜在的结构翻转变。除了直观观察反应过程，在化学元宇宙工具中，学生可结合有机化学课程自由探索有机反应机制。以亲核取代反应( $\text{CH}_3\text{Cl} + \text{OH}^-$ )为例(图5)，在该虚拟案例中内置有4个 $\text{OH}^-$ ，分别分布在 $\text{CH}_3\text{Cl}$ 分子的四周。学生通过自主判断，选择每个不同位置的 $\text{OH}^-$ ，通过VR交互来探索亲核取代反应的发生机制。图5a是一位同学选取面向 $\text{CH}_3\text{Cl}$ 分子甲基一侧的 $\text{OH}^-$ 来促成亲核取代反应。但是由于 $\text{OH}^-$ 的H原子是面向甲基一侧，导致亲核取代反应无法发生。图5b是该同学改变了 $\text{OH}^-$ 和 $\text{CH}_3\text{Cl}$ 分子的相对位置，将 $\text{OH}^-$ 的O原子与 $\text{CH}_3\text{Cl}$ 分子的甲基结合，促成了亲核取代反应的发生。通过以上自由探索，学生充分理解了亲核取代反应机制和其相应的发生过程，有效地补充了有机化学课程上的讲解和演示，取得了极好的教学效果。

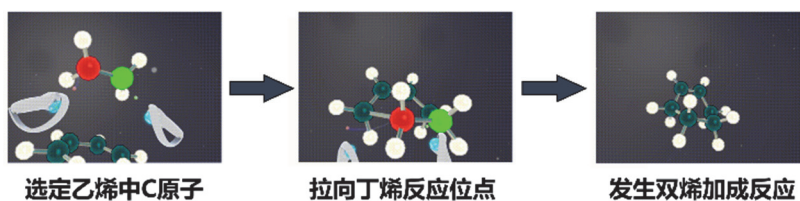
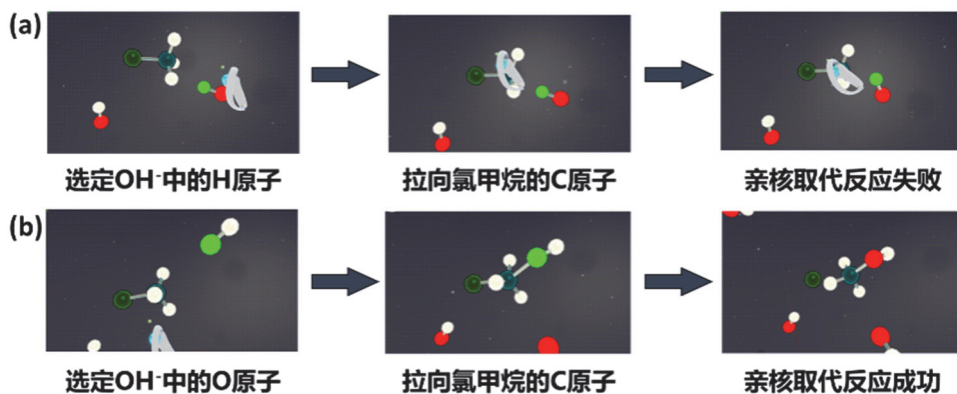


图4 通过VR手柄开展的狄尔斯-阿尔德双烯加成反应案例

图5 探索亲核取代反应( $\text{CH}_3\text{Cl} + \text{OH}^-$ )发生机制

### 2.3 教学评价

本次教学实践结束后,教学团队对本次课堂参与同学发放了一份调查问卷,调查他们对于本次VR教学实践的体验和评价(表1)。本次调查问卷共计43份,包括11个问题,分别是对参与学生的个人能力、对VR技术应用的了解程度、在本次课堂参与中的困难程度以及本次VR实践课对个人学习情况的影响等问题进行调查。每个问题分为1-10程度,1表示不同意,10表示非常同意。从每部分的调查结果来看,参与课堂的学生对自己综合能力的评价在中上水平,大部分同学对VR技术以及VR技术在高校教学中的应用了解较少,在本次教学实践中多数同学都遇到过一定的VR技术使用困难。经过本次VR实践课,80%以上的同学都对VR技术在化学课堂中的应用表示出积极的态度,认为VR实践课提升了自己的学习动力,有利于个人专业知识水平的提高,并且相信虚拟现实技术的发展前景明朗,未来能够在更多的教学方面发挥作用。

表1 VR教学实践学生调查问卷结果统计

序号	问题	平均分
1	对自己的综合能力进行评价	6.9
2	对VR技术的了解程度	5.7
3	对VR技术在高校教学中应用的了解程度	4.7
4	使用VR技术进行课堂学习的过程中有困难	5.5
5	VR实践课对我在专业实践中的学习提供了动力	7.9
6	VR实践课对我专业知识水平的提高有帮助	8.2
7	使用Manta更有利于我理解有机反应机理	8.4
8	VR实践课与专业的相关度	7.9
9	这种新型的教学方式比传统教学方法更有趣	8.7
10	“VR+教育”的未来发展前景	8.2
11	Manta未来会在大学化学教学方面发挥更多的作用	8.0

### 3 VR技术在有机化学课程教学应用中的挑战

尽管VR技术为有机化学教学带来的新模式有着卓越的应用前景,但仍需考虑一些限制因素。比如在打造虚拟课堂的过程中硬件设施的配备问题,以及由于虚拟课堂教学方式与传统教学方式存在的不同而对教师提出的新的要求和挑战。

#### 3.1 软硬件设施不完备

在打造虚拟现实课堂方面,首先要面临软硬件设施建设的问题。从场地和经济因素考虑,目前对于大多数的学校,配备完善的虚拟现实技术设施存在一定的困难。作者团队前期在有机化学课堂教学中做了初步尝试,取得了一定的成效,但仍需要在软硬件设施方面加大投入,增强体验感。在我们设想的智慧教室中,教室的前面用智能白板或高清投影取代现存的普通黑板,并设置一个音响。参与课堂的同学能够人手一套VR学习设备,就像现在课堂上所用的笔记本电脑一样普遍。教师在讲台上拥有一个课堂教师管控系统,并通过VR网络传输器与学生的VR学习终端进行连接,以实现对学生课堂学习内容的安排和把控,实时与学生在虚拟空间中进行沟通交流。受限于虚拟现实技术的应用现状,在目前已经建设的基础课堂中(图6),我们将学生进行分组来体验VR新型教学方式,并通过投影屏幕将头盔中的画面实时展现给课堂参与者,进行课堂内容的交流。相比于传统教学方式,已经实现了课堂内容、教学方式和师生交互的创新。未来随着虚拟现实技术的发展,软硬件设施水平的提升,智慧教室也会尽早实现。



图6 已建设的基础课堂

#### 3.2 对专业教师以及VR技术人员的要求

与传统教学方式不同,VR教学方式注重让学生主导课堂,教师只起到课堂“引导者”的作用<sup>[1]</sup>,在这种方式下,师生之间的身份差异更小,能够构建更活跃自由的课堂环境,促进学生对学习内容的个性化探索。在这种情境下,对教师的教学能力和教学方式也提出了要求和挑战。在进行VR学习资源的系统化开发时,教师要有针对性地开发适合VR化教学的知识点,不仅需要考虑整体课程的构成还要结合教学目标、课程重难点以及学生的学情进行分析。适合VR化教学的知识点应当具备以下特点:即现有学习资源难以有效传达且适合使用VR技术呈现,并且开发的教学内容对于后续课程和整个专业群的学习有益。这样的做法既能充分利用现有资源,实现虚拟现实技术与实际教学方法的结合,降低教学成本,又能避免过度追求虚拟化带来的负面影响。因为并非所有学习资源都适合采用VR技术开发,全面进行VR资源开发不仅会耗费大量资源,而且可能无法达到预期效果。

此外,脚本设计、三维建模和场景构建都是VR课程制作过程需要的环节。这需要不同领域专业人员的参与和合作,比如化学专业人员、建模专业人员和计算机专业人员。对于大多数教育工作者而言,在编程专业知识匮乏的情况下,创作自己的VR教学内容具有一定的挑战。国内的学者们也在积极探索如何将教学内容和虚拟现实技术进行进一步融合。这些因素使得VR课程前期的发展较为困难。

总而言之,对于新技术的使用,教师必须提升教育教学境界,深入挖掘VR教学方法论,树立学科思维,用先进的方法和科学的思维高效地培养人才,这些对于教师都具有一定的挑战性。

## 4 VR技术在有机化学教学上的创新性

### 4.1 创新教学模式

创新教学模式是深化高校教学改革,推动教育高质量发展的系统化措施之一。传统教学模式主要包括讲解-接受、自学-辅导、演示-模仿、引导-讨论等模式,以教师为主、学生被动接受。在现代教育理念引领下,先后出现了启发探究式、项目式、线上线下混合式和多平台远程教学等多种智慧教学模式。我校有机化学教学团队依托国家级一流本科教学课程建设和特色性发展项目,将VR技术融入到有机化学教学案例中,利用虚拟现实设备,结合教学需求,开发相应的互动式教学方法,授课教师和学生不再需要依靠电脑屏幕上的二维图像想象三维结构,VR技术能够在虚拟空间中展现出形象的三维全景画面,提供半沉浸式环境。虚拟现实技术在教育上能提高学生的主动参与意愿;它提供的3D学习内容,可培养学生发展较佳的化学结构空间感知力;VR可将抽象的概念比如化学反应、分子结构等微观信息具体化,从而提升学生对这些内容的理解,提升学生推理能力与思考逻辑能力等。VR教学和常规教学并存互补,构建教学资源虚拟化、教学选择多样化、教学过程交互化、教学管理平台化、教学环境集成化的新型VR教学平台。

### 4.2 提升学生交互式学习体验

传统的有机化学教学往往以课堂讲授和课后习题为主,学生的参与度和兴趣有限。VR技术可以打破传统教学模式,创建交互式的学习环境,让学生能够自主探索和学习,在虚拟空间中进行有机反应的探索和实验。他们可以根据自己的兴趣和需要选择反应类型、反应物和条件,进行模拟实验并观察反应结果。这种自主学习的方式可以激发学生的学习兴趣 and 主动性,培养他们的创新思维和问题解决能力。虚拟教学方式依托人机交互技术,创造了一个沉浸式的虚拟空间,为提高学生在课堂上的积极性和创造性、解决传统教学体系存在的问题、改善实验教学方式、推动专业教学改革提供了新的途径和思路<sup>[12]</sup>。

### 4.3 重构学生学习评价方式

与传统教学方式中教师通过作业和考试来考核学生对课堂内容的掌握程度不同,在学生使用VR教学设备进行课堂学习的过程中,后台会实时收集存储学生操作的细节数据,并进行汇总评估。教师可通过对学生提交作业的各个步骤的可靠性系数进行修订和评价,最终学生的分数由完成度和系数进行综合评价。

通过记录学生是否完成预定的动作,可以判断学生是否正确理解化学反应。通过在程序里内置问卷的方式,让学生在操作完成后能够进一步加深对关键知识点的理解和总结,同时免去了学生的课后作业。最终学生的分数由预定动作的完成情况以及问卷的问答情况进行综合评价。相比传统的批改作业模式,本课程的成绩判定完全由电脑完成,不但大大减少了学生和教师的负担,同时也提高了学生的参与度和积极性。

### 4.4 课程具有开放性

本课程实验所使用的教学平台是分子动力学计算服务器,能够进行通用的化合物结构优化和化学反应计算。除了课程内演示的特定分子和反应外,还可以向学生提供完全自由的探索空间,允许学生自由设计化合物分子,指定反应路径及模拟化工过程,探索教学课程以外的任何化学反应和化工过程,直观观测分子结构微观世界以及相应的动力学特性,有效地加强了课堂内外的互动性和创新性。同时,支持个人计算机间的互联,学生课后仍可以利用个人设备进行进一步学习,不受时间、环境等条件的使用,极大方便了学生的使用和学习,为其掌握化学基础知识以及相应的材料计算模拟方法打下了良好的基础。

## 5 结语

传统教育手段下,学生只能被动地获取知识,这种方式下学生依赖于教师的讲授,这往往让学习变得枯燥无味,学生的学习效果不佳。而VR教学为知识传递注入了新活力,通过视觉、听觉和行

为交互激发学生的兴趣和想象力, 提供一个具有沉浸感、交互性和空间性的学习环境, 学生能够全身心地投入到这个虚拟环境中。此外, VR全景技术能够把复杂的知识点和抽象概念转化为视频或图片形式, 学生通过视觉观察更容易理解知识点, 简化了学习过程, 通过与空间内容的交互, 学生能够实现玩中学习, 享受学习的过程。

随着时代的发展和新兴技术的出现, 传统的教学方式已经不能满足现代的教学需求, VR技术的应用丰富了有机化学课堂的教学资源, 优化了教学形式, 在这种环境下, 学生能够主动探索和学习课程内容, 提高了实践能力, 也促使教师在课堂上不断创新。此研究弥补了国内高校VR技术应用于有机化学课程教学的空白, 具有很大的潜力和重要意义。

### 参 考 文 献

- [1] 教育部. 教育部关于加快建设高水平本科教育全面提高人才培养能力的意见. [2024-02-29].  
[http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/201810/t20181017\\_351887.html](http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/201810/t20181017_351887.html)
- [2] 教育部. 教育部关于印发《教育信息化2.0行动计划》的通知. [2024-02-29].  
[http://www.moe.gov.cn/srcsite/A16/s3342/201804/t20180425\\_334188.html](http://www.moe.gov.cn/srcsite/A16/s3342/201804/t20180425_334188.html)
- [3] 中共中央, 国务院. 中共中央、国务院印发《中国教育现代化2035》. [2024-02-29].  
[https://www.gov.cn/zhengce/2019-02/23/content\\_5367987.htm](https://www.gov.cn/zhengce/2019-02/23/content_5367987.htm)
- [4] 教育部. 教育部办公厅关于2017–2020年开展示范性虚拟仿真实验教学项目建设的通知. [2024-02-29].  
[http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7945/s7946/201707/t20170721\\_309819.html](http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7945/s7946/201707/t20170721_309819.html)
- [5] 程媛, 张博闻, 李鑫. 山西档案, **2021**, No. 2, 135.
- [6] 刘革平, 王星. 中国电化教育, **2020**, No. 11, 87.
- [7] IUPAC ANNOUNCES THE 2022 TOP TEN EMERGING TECHNOLOGIES IN CHEMISTRY. [2024-02-29].  
<https://iupac.org/iupac-2022-top-ten/>.html
- [8] 赵蕊, 陈东平, 初庆钊. 大学化学, **2022**, 37 (4), 2108015.
- [9] Zhao, R.; Chu, Q. Z.; Chen, D. P. *J. Chem. Edu.* **2022**, 99 (4), 1635.
- [10] 杨立国, 王鑫, 牛永生, 付艳华, 周忠源, 张楠. 化工设计通讯, **2023**, 49 (5), 110.
- [11] 姬志敏. 西部地区中学虚拟仿真实验教学效果研究[硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
- [12] 滕鑫, 唐颂超, 杨晓玲, 庄启昕. 大学化学, **2023**, 38 (11), 8.