



科研成果向“两性一度”虚拟仿真实验 转化设计与实践

吴锋景, 刘小娟

(湖南工程学院 材料与化工学院, 湘潭 411104)

摘要: 针对目前化学化工类实验课程内容陈旧、形式单一、对学生吸引力不足的问题, 按照应用型人才培养目标和专业综合实验的教学要求, 将相关最新科研成果按“两性一度”标准, 转化设计为“环保型硅锆复合预处理工艺虚拟仿真实验”, 用于辅助实验教学。实践结果表明, 虚拟仿真实验教学增添了实验教学的活力与动力, 提高了教学效率, 提升了学生的实验技能、创新能力和解决复杂问题的综合能力。

关键词: 虚拟仿真; 科研成果; 两性一度; 创新能力

中图分类号: G642.0

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20240136

Conversion Design and Practical Effect of Scientific Research Achievements into “Profoundness-Innovation-Challenging” Virtual Simulation Experiment Teaching

WU Fengjing, LIU Xiaojuan

(College of Materials and Chemical Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411101, China)

Abstract: In view of the current problems existing in the experimental courses of chemistry and chemical engineering, such as outdated content, single form, and less attractive to students, and in accordance with the goal of cultivating applied talents and the teaching requirements of comprehensive experiments in the major, the latest scientific research achievements are transformed and designed into “Virtual Simulation Experiment of Environmentally Friendly Silicon-Zirconium Composite Pretreatment Process” based on the “profoundness-innovation-challenging” standard, which is applied in assistant experimental teaching. The practical results show that the virtual simulation experimental teaching enhances the vigor and motive power to experimental teaching, promotes teaching efficiency, and increases the students’ experimental skills, innovation ability and comprehensive ability to solve complex problems.

Key words: virtual simulation; scientific research achievements; profoundness-innovation-challenging; innovation ability

实验教学环节在培养化学、化工、材料等专业学生的实践能力、创新能力和综合素质方面发挥着极其重要的作用^[1]。但传统的实验教学内容陈旧、模式固化、过程单一, 不利于学生创新能力和学习兴趣的培养, 也越来越不适应科技飞速发展和社会不断进步给大学生提出更高要求的发展趋势^[2]。虚拟仿真实验因其趣味性、互动性和强大的开发共享能力, 成为实验教学的有益补充, 特别是对于部分化学化工类在实验室开展起来比较

困难的“四高”(高能耗、高消耗、高污染、高危险)实验^[3-7]。教育部先后印发文件鼓励各高校积极开展示范性虚拟仿真实验教学项目建设, 将虚拟仿真实验教学项目列入未来发展计划当中, 并提出将最新科研成果引入到虚拟仿真实验教学项目中, 促进实验教学内容的快速更新^[8-9]。2018年6月教育部全面振兴本科教育计划明确提出加强课程的“两性一度”建设, 即建设创新性、高阶性和挑战度的本科课程^[10]。为加强应用型人才的培

收稿日期: 2024-03-15

基金项目: 湖南省普通高等学校教学改革项目(重点)(HNJG-2022-0245); 湖南省一流课程(虚拟仿真)(2022年); 湖南省高校思想政治教育研究项目(22SZ24)。

作者简介: 吴锋景, 博士, 教授, 主要从事腐蚀电化学、表界面材料、高等教育教学、信息化教学技术方面的研究。

E-mail: wfj2013@aliyun.com

养,提高实验教学的效果,建设一流实验课程,湖南工程学院虚拟仿真实验中心按“两性一度”的标准,将相关科研成果设计转化为“环保型硅锆复合预处理工艺虚拟仿真实验”,辅助实验教学,取得良好的教学效果。该课程2022年被评为“湖南省一流课程(虚拟仿真)”。

1 科研成果

预处理工艺是金属加工工艺的基础,广泛应用于航天航空、家电、汽车、工程机械等领域。但传统金属预处理工艺磷化和铬钝化环境污染严重、能耗高、含有致癌物,急需发展“绿色”金属预处理技术替代。湖南工程学院“表界面新材料”科技创新团队开展面向金属材料预处理的应用研究,成功开发出环保型硅锆复合预处理技术,并取得了一系列原创性、高水平的科研成果,研究结果如下。

1) 采用硅烷(6~15 g/L)和 $\text{H}_2\text{F}_6\text{Zr}$ (20~30 g/L) 为主成膜剂, MgSO_4 (60~120 g/L) 和 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (30~50 g/L) 为成膜助剂,乙醇(30~60 g/L)为硅烷溶剂, $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7$ (1~6 g/L) 为络合剂, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (4~10 g/L) 为 pH 值稳定剂, Na_2SO_4 (3~10 g/L) 为成膜促进剂,复配出性能优良的硅锆复合预处理试剂。

2) 硅锆预处理液的配制工艺与方法如下。

① 称取 10 g 硅烷溶于 50 g 乙醇中。

② 称量 25 g 氟锆酸,配制成 100 g/L 的氟锆酸溶液。

③ 取 600 mL 去离子水,用氟锆酸溶液调节 pH 值至 3.0~5.0,并将其倒入含有硅烷的溶液中,将此溶液在温度 25~35 °C 下搅拌 6~8 h,让其充分水解。

④ 边搅拌边依次加入 $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7$ (2 g)、 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (6 g)、 MgSO_4 (100 g)、 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (30 g) 和其他氟锆酸溶液,搅拌溶液至澄清,得到硅锆酸浓缩液。

⑤ 按照质量分数 5% 配制硅锆预处理液。

3) 碳钢预处理工艺流程为脱脂、水洗、酸洗、水洗、硅锆处理、水洗、水洗、烘干。硅锆复合预处理工艺参数如表 1 所示。

4) 优化工艺条件下预处理膜耐蚀性能优良,4 h 中性盐雾试验腐蚀面积不超过 5%,动电位极化曲线显示预处理膜的腐蚀电流密度仅有 $3.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$,自腐蚀电位也比处理前正移了 0.18 V。附着力测试结果显示涂层附着强度达到 10 MPa 以上,完全符合涂装附着力要求。扫描电镜结果显示预处理膜呈现 100~200 nm 的颗粒状,均匀、致密,比表面积大^[11-17]。

表 1 硅锆复合预处理基本工艺参数

序号	工艺	槽液配方	工艺参数
1	脱脂	氢氧化钠: 5~15 g/L; 碳酸钠: 40~60 g/L; 磷酸三钠: 20~50 g/L; 十二烷基苯磺酸钠: 1~2 g/L; OP-10: 1~2 g/L	温度: 30~60 °C 游离碱点: 10~25 时间: 5~20 min
2	水洗	自来水	温度: 常温 时间: 10 min
3	酸洗	硫酸: 50~200 g/L; 硫脲: 20 g/L OP-10: 5~10 g/L	温度: 常温 时间: 5~20 min
4	水洗	自来水	温度: 常温 时间: 10 min
5	硅锆处理	硅锆浓缩液: 20~100 g/L	温度: 10~40 °C 时间: 0.5~10.0 min pH: 3.0~4.5 铁份值: ≤0.25
6	水洗	自来水	温度: 常温 时间: 10 min
7	水洗	纯水	温度: 常温 时间: 10 min 滴水电导率: ≤50 $\mu\text{s}/\text{cm}$
8	烘干	—	温度: 50~80 °C 时间: 5~20 min

2 仿真实验设计

传统的金属预处理技术环境污染严重，能耗高，已不能满足新时期对专业实验教学的需求，亟需引入适应“新工科”发展需求的新知识、新方法、新技术。教学团队将最新科研成果“环保型硅锆复合预处理技术”引入应用化学专业实验周开设的大型综合专业实验。但实验在前期的开设过程中仍存在以下问题：大量强酸强碱的使

用，存在一定危险性；多批次实验使得原材料消耗大，废水排放多，成本高；实验从槽液配置到工艺优化，再到产品性能检测，内容多、操作步骤复杂、周期长。为此教学团队根据应用化学专业的人才培养目标和专业综合实验的教学要求，与专业虚拟仿真软件公司合作，开发了“环保型硅锆复合预处理工艺虚拟仿真实验”教学项目。项目设计成 5 个子项目，共 16 课时，用于辅助实体实验教学。虚拟仿真实验设计框架如图 1 所示。

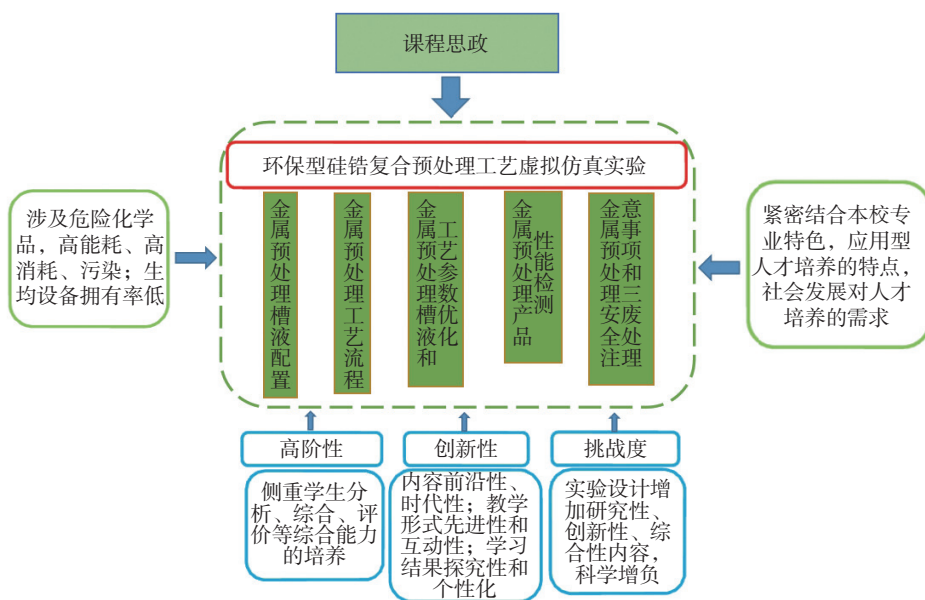


图 1 虚拟仿真实验设计框架图

2.1 虚拟仿真实验教学资源的设计

按照认知、设计、实验、分析、考核的学习

规律将教学资源将分为基础认知、实训提高和综合分析 3 个模块，其层次结构如图 2 所示。



图 2 虚拟仿真实验教学资源层次结构图

基础认知模块要求学生自主线上预习，内容包括实验背景、实验基本原理、预处理膜的主要

功能、仪器设备等。这一模块主要锻炼学生的信息接收能力、知识更新能力(包括记忆、理解和应

用所学知识的能力)和识别问题的能力,并培养学生遇到问题时寻求答案和解决问题的意识。

将虚拟仿真实验操作部分设计为5个实验项目,实训提高模块有实验1、实验2和实验5,综合分析模块有实验3和实验4。为让学生了解预处理液的基本组成,理解各组分在处理过程中的主要作用,掌握预处理液的配置方法,将脱脂液、酸洗液、硅钼液3种槽液的配置设计成实验1“金属预处理槽液配置虚拟仿真实验”,3课时。实验操作界面如图3所示。该项目要求学生在虚拟仿真界面上完成3种槽液的配置,彻底消除了与强酸、强碱等有害物质直接接触的风险,保护了学生的身体健康和安全。



图3 槽液配置虚拟仿真实验操作界面

实验2“金属预处理工艺流程虚拟仿真实验”的主要目的是让学生理解各工艺的主要功能,掌握预处理工艺的设计方法和注意事项,共2课时,设计成可自由选择工艺流程的预处理实验,学生根据预处理效果调整和优化工艺流程。实验5“金属预处理安全注意事项和三废处理虚拟仿真实验”共3课时,主要内容包括预处理工艺过程中的安全注意事项、三废的收集、三废对环境的影响和无害化处理方案。该项目通过在虚拟仿真界面上的理论学习和实验操作,让学生了解预处理过程中的安全隐患和三废来源,掌握安全操作和三废处理技能,增强学生的安全意识和环保意识。

实训提高模块采用主体案例式的学习方法,要求学生按照要求在虚拟仿真界面上操作配置槽液、设计工艺流程、寻找安全隐患、设计三废处理工艺。学生通过仿真操作,将理论知识转化为实际操作能力,提高了学生的动手能力和解决复

杂问题的能力。另外,这个部分内容紧密结合专业背景,有利于培养学生的专业核心技能和专业素养。

槽液配比工艺参数直接影响预处理的效果,是预处理的重点和难点。实验3“金属预处理槽液和工艺参数优化实验”共4课时,设计成可自由选择关键组分和工艺参数下的预处理过程。温度调节操作界面如图4所示。不同的工艺参数对应不同的处理效果,学生需要根据处理效果优化出最佳槽液配比和工艺参数,并理解、掌握各工艺参数对处理效果的影响。实体实验中,实验3需要消耗大量的预处理液,废水排放多、成本高,且实验操作步骤复杂、时间长、效率低。采用虚拟仿真实验优化工艺流程和工艺参数可以显著降低实验成本,提升实验效率。将产品的性能检测分析(包括外观检测、中性盐雾试验、动电位极化曲线和微观形貌测试)设计成实验4“金属预处理产品性能检测分析虚拟仿真实验”,共4课时。学生通过虚拟仿真界面操作“盐雾试验箱”“电化学测试系统”和“扫描电镜”检测膜层性能和微观形貌,避免了实体实验因设备台套数有限,学生实验以观看为主,不能人人上机操作的现象。

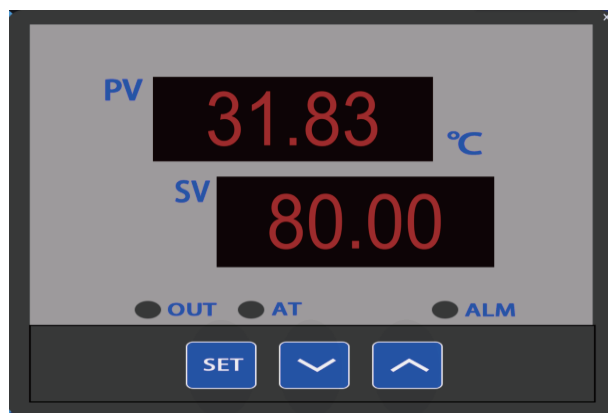


图4 温度调节操作界面

实验3和实验4属于综合分析模块,对学生的综合能力要求较高,要求学生对于预处理槽液配比、工艺参数和产品性能进行综合分析和客观评价,形成自己独立的见解,并提出合理的解决方案。

2.2 “两性一度”实验内容设计

为培养学生的创新能力和解决复杂问题的综合能力,进一步提高教学质量,“环保型硅钼复合预处理工艺虚拟仿真实验”按照“两性一度”

的要求, 深入挖掘实验中具有“创新性”“高阶性”和“挑战度”的实验内容, 融入虚拟仿真实验中。如在虚拟仿真实验中脱脂液按照常规配置既可, 各种试剂的添加顺序对实验结果无影响(与实体实验的实际情况吻合), 但脱脂液各组分的含量对脱脂效果影响较大, 因此虚拟仿真中根据实际实验获得的结论设计了探究性的实验, 即不同

组分含量的脱脂液可以得到不同的处理效果。学生需要在虚拟仿真操作过程中根据各组分在脱脂过程中的作用, 探索各组分的含量, 优化出最佳脱脂液配方。这部分内容根据预处理的前沿研究成果设计而成, 且学生需要经过多次探索才能得到最优结果, 具有一定的创新性。“两性一度”内容设计如表 2 所示。

表 2 虚拟仿真实验“两性一度”内容设计

序号	子项目	设计内容	具体内容	“两性一度”
实验1	金属预处理槽液配置虚拟仿真实验	脱脂液的配置	根据脱脂的效果调整脱脂液各组分的比例, 优化最佳配比	创新性
		酸洗液的配置	硫酸溶液的配制, 根据酸洗时间, 调整硫酸浓度; 硫酸配制方法	创新性
		硅钨液的配置	根据硅钨液的配方位置硅钨液	挑战度
实验2	金属预处理工艺流程虚拟仿真实验	工艺流程的选择	自主选择工艺流程, 自由探索不同工艺对预处理的影响	高阶性
实验3	金属预处理槽液和工艺参数优化实验	硅钨液的配方优化	根据硅钨膜的外观和性能调整硅钨液各组分的比例, 优化出最佳配比	挑战度
		脱脂工艺参数优化	根据脱脂效果, 调整脱脂温度、时间和游离碱点, 优化出最佳工艺参数	创新性
		酸洗工艺参数优化	根据酸洗效果, 调整酸洗时间, 优化出酸洗最佳工艺时间	高阶性
		硅钨工艺参数优化	根据预处理效果, 调整硅钨处理浓度、温度和 pH 值, 优化出最佳工艺参数	高阶性
实验4	金属预处理产品性能检测虚拟仿真实验	盐雾试验	盐雾试验箱的操作	创新性
		电化学测试	三电极系统搭建、电化学测试的操作	高阶性
		扫描电镜测试	扫描电镜的测试原理与操作	高阶性
实验5	金属预处理安全注意事项和三废处理虚拟仿真实验	安全事项查找	查找工艺流程中的安全隐患	创新性
		三废的收集	根据工艺流程收集三废	创新性
		三废的处理工艺流程	预处理三废无害化处理工艺	挑战度

在“硅钨液的配方优化及槽液配置”的实验中, 操作界面上仅给出了硅钨液体各组分的基本范围, 学生需要根据预处理的实验结果来调整具体含量, 优化出最佳配比。如学生选择硅钨含量为 6 g/L, 完成硅钨液配置后, 系统会给出槽液配置分数 60 分, 并提示: “用您的硅钨液产品处理基材, 可以达到基本要求, 但耐蚀性和涂层附着力均有待提高, 建议进一步优化”。这时学生可以系统分析同时影响耐蚀性能和附着力的因素, 调整配比重新配置硅钨液, 直到优化出最佳配比。学生如果选择 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 的含量为 4 g/L 配置硅钨液, 完成配置后, 系统会给出槽液配置分数 70 分, 并提示: “用您的硅钨液产品处理基材,

可以达到基本要求, 但槽液 pH 值稳定性不好, 使用寿命短, 建议进一步优化”。学生可以根据相关课程的理论知识, 分析影响 pH 值稳定性的因素, 调整配方重新配置硅钨液。在实际的硅钨液配置实验过程中, 会出现各种各样的问题, 如药品溶解速度慢、有沉淀产生、大量气泡产生等, 学生需要根据实际情况调整配置方法才能完成实验。因此, 在溶液配置的虚拟仿真实验中, 增加了难点来培养学生解决复杂问题的综合能力 and 高级思维。如果学生没按照如下要求完成水解, 硅钨溶解在 pH 值 3~5 的氟钨酸溶液中, 搅拌下水解 6~8 h, 系统会提示: “您的硅钨产品水解不充分, 请调整配置方法”。“硅钨液的配方优化及

槽液配置”需要学生根据基础理论知识,灵活运用实验方法,系统分析实验结果,才能得到较好的实验结果。这部分内容有一定的难度,需要学生“跳一跳”才能“够得着”,具有一定的挑战性。

硅锆处理过程中,工艺参数对处理结果影响很大,各参数的影响也是一个复杂的过程。硅锆液 pH 值过低,不仅会加速金属的腐蚀,影响硅烷分子的吸附,还会加速锆化膜的溶解;pH 值过

高,金属溶解速度减慢,容易形成氢氧化物导致锆化膜疏松,预处理膜耐蚀性能变差。另外,处理温度和时间对膜层质量也有重要影响。因此“硅锆工艺参数优化”实验考查的不仅是学生对预处理知识的掌握程度,还考查学生灵活运用知识、解决复杂问题的综合能力和高级思维。这部分内容具有一定的高阶性,其工艺参数优化操作界面如图5所示。

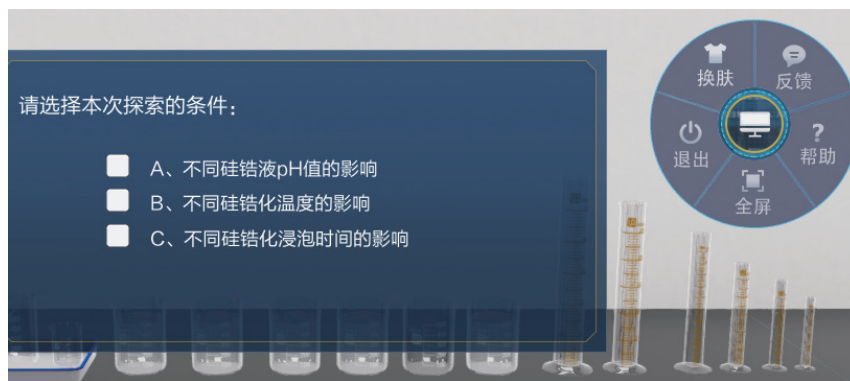


图5 硅锆工艺参数优化操作界面

2.3 虚拟仿真实验模式设计与制作

按照锆复合预处理工艺虚拟仿真实验设计了3种模式:学习模式、练习模式、考核模式。学习模式包括理论知识学习模块和实验视频学习模块。理论知识学习模块的主要内容包括实验目的、实验原理、主要仪器设备的结构、专业故事等,以文字和图片和视频等形式展示。实验视频学习模块通过学生观看视频来学习实验流程、实验现象、实验仪器设备的操作等。练习模式设计为学生在有操作指引的情况下完成实验过程,学生可以在该模式下反复练习和探索,优化出最佳工艺参数。考核模式是学生在没有提示下完成实验,检验学生对实验的熟悉程度。仿真实验室的环境和实验装置按照1:1的比例和颜色设计三维模型和贴图,实验现象按照实际实验现象构建,并借助Unity技术实现实验室场景漫游和人机交互。仿真实验后台加入了根据实体实验获得的数学函数模型,学生可以根据设计的工艺流程,输入的时间、温度、酸度、碱度、配比等参数仿真出不同的实验结果,关键要素仿真度可达90%以上。

2.4 课程思政元素设计

传统的课程思政,教师可以通过眼神、肢体

动作和情感共鸣等细节来把控学生的反应,带动学生的情感,这些在虚拟仿真课程上都难以实现。因此,如何将思政内容更好地在线上呈现出来,如何将专业知识和思政内容有机融合以实现全过程、全方位育人是虚拟仿真教师亟待解决的突出问题^[18-20]。“环保型硅锆复合预处理工艺虚拟仿真实验”课程从国家政策、思想、道德3个维度挖掘课程思政资源,并以文字、视频、仿真操作等形式呈现给学生,以达到育人的效果。如在虚拟仿真的理论知识学习模块设计了安全和环保的理论知识学习,包括国家政策、安全环保注意事项、常规安全环保处置方法等。在项目操作过程中也设计了穿戴防护用品、消防检查、废液回收等操作步骤。通过理论学习和实操训练,宣传国家的安全环保法律法规,培养学生的安全环保意识和建设“两型社会”的责任感。此外,在虚拟仿真软件中还嵌入了行业专家的故事,如在仿真实验的知识长廊里悬挂我国腐蚀领域泰斗肖纪美院士的相片,并给出相关介绍,用行业伟人的故事激励学生,培养学生为祖国努力奋斗的爱国主义精神和刻苦钻研的科学务实精神。部分课程思政设计如表3所示。

表 3 虚拟仿真课程中部分课程思政设计

专业知识点	思政融入内容	呈现形式	育人目标
预处理过程中的安全和环保	① 预处理行业安全、环保国家标准、国家政策、安全注意事项、常规安全环保处置方法等 ② 穿戴防护用品、消防检查、硫酸溶液的配置、预处理三废来源、无害化处理方案等 ③ 违反安全、环保的案例	文字、图片 仿真操作步骤 视频	宣传国家的安全环保法律法规；培养学生的安全环保意识和技能；培养建设“两型社会”的责任感
纳米复合涂层	④ 中科院金属所韩恩厚团队开发了纳米复合涂层应用于2010年“嫦娥三号”。韩恩厚潜心研究10年，只为薄薄一层涂层	文字、图片	鼓励学生刻苦钻研，永攀科学高峰，为科学、为国家努力奋斗
涂层保护和牺牲阳极保护法	⑤ 港珠澳大桥竣工通车的热点新闻：港珠澳大桥全长55公里，设计使用寿命120年，抗16级台风，八级地震，允许三十万吨级油轮通过，被誉为桥梁界的“珠穆朗玛峰”，并被外媒称为“现代世界七大奇迹”之一	视频	宣传国家战略和规划，宣扬社会主义制度的优越性，培养学生民族精神、时代精神以及爱国主义情操

3 实践成效

“环保型硅锆复合预处理工艺虚拟仿真实验”自2019年完成设计与制作，并采用虚实结合(虚拟仿真+实体实验)的方式进行教学实践，取得了良好的教学效果。

3.1 提高了学生的学习兴趣，增添了实验教学的活力和动力

在前期单一的实体实验过程中，由于实验内容多、步骤复杂、耗时长且难度大，学生容易倦怠，参与度不高。据统计，前期的小组实验中只有不到30%的学生顺利地完成了所有实验。通过虚拟仿真实验的学习和锻炼，学生在后续的实体实验中不仅更加熟悉实验流程、操作步骤、注意事项等，还大大增强了完成实验的自信心，并对实验展示出浓厚的兴趣。学生会为了验证虚拟仿真实验中的结论反复实验，为了得到性能最佳的预处理膜不断探索。在考核成绩上也形成了你追我赶的态势，学生参与率达到100%。虚拟仿真实验的引入极大地激发了学生的学习兴趣，增添了实验教学的活力和动力。

3.2 提高了实体实验的成功率和教学效率，降低了材料消耗和能耗

虚拟仿真实验可以通过网络登录学习，突破传统实验对时间和空间的限制，学生可以随时实验、随地实验、反复实验。虚拟环境下的理论知识学习和反复操作演练，使得学生在后续的实体实验中思路更加清晰，目标更加明确，实体实验的成功率提高至90%以上，原材料消耗和能耗降低50%，废水废渣排放降低60%。通过虚拟仿真实验中的安全、环保模块的学习，学生在实体实

验中的安全、环保意识显著提升，操作更加规范。学生在后续的实体实验中没出现过一例安全事故，实验废水、废渣也得到了妥善处理。

3.3 提升了学生的实验技能、创新能力和解决复杂问题的综合能力

经过“环保型硅锆复合预处理工艺虚拟仿真实验”和实体实验的训练，应用化学专业学生的专业素养和创新能力均得到了良好锻炼，在后续的创新训练项目、学科竞赛和毕业论文(设计)中都得到了充分的展示。在良好的科研与竞赛氛围带动下，应用化学各个班级有近70%的学生加入了科研团队或竞赛团队，其中30%以上的学生获得了省级及以上创新创业训练计划项目，或发表了论文、授权了专利，或获得了省级及以上奖励。通过前期的虚拟仿真与实验相结合的专业综合实验和后期的科研创新实验和竞赛训练，学生的实验技能、创新能力和解决问题的综合能力均有了较大的提升。

4 结束语

目前，化学化工类部分传统的实验教学内容老化、形式单一，学生在实验过程中存在“依葫芦画瓢”“照方抓药”和“结果相同”的弊端，实验报告的撰写也是照抄实验讲义，敷衍了事，学生的实验效果不理想。针对该现象，湖南工程学院虚拟仿真实验中心将本专业老师的科研成果设计转化为虚拟仿真实验教学项目，辅助实验教学，取得了良好的教学效果。虚拟仿真实验教学的引入丰富了教学模式，提高了教学质量，提升了学生的实验技能、创新能力和解决复杂问题的综合能力。该虚拟仿真实验教学项目的设计转化

可为科研成果向虚拟仿真实验“金课”转化提供借鉴。

参考文献

- [1] 田东亮,钱建刚,翟锦,等.创新能力培养为导向的大学本科化学实验教学改革[J].实验室研究与探索,2022,41(2):219-223.
- [2] 曾威,杜威,滕波涛,等.以制盐与盐化工为特色的化学工程与工艺专业改造升级[J].化学教育(中英文),2022,43(24):90-94.
- [3] 刘金库,卢怡,张敏,等.科研成果向虚拟仿真实验教学一线转化的模式:以首批国家级虚拟仿真实验教学一流课程建设为例[J].化学教育(中英文),2022,43(10):58-61.
- [4] 彭雪娇,林海禄.基于互联网+的分析仪器虚拟仿真实验室的构建[J].东华理工大学学报,2016,35(4):383-385.
- [5] 苗芳芳,滑静,王燕,等.应用仿真软件进行仪器分析化学实验技术的思考与实践[J].化工设计通讯,2019,45(1):159-160.
- [6] 吴锋景,刘小娟,邓继勇,等.应用型本科高校中化工虚拟仿真实验教学探索[J].广东化工,2016,43(20):204-205.
- [7] 史影,王伟伟,周耐明,等.生物化学综合性虚拟仿真实验建设与教学探索[J].实验室研究与探索,2022,41(4):154-158.
- [8] 教育部高教司.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[EB/OL].(2017-07-13)[2023-02-06].http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7945/s7946/201707/t20170721_309819.html.
- [9] 教育部高教司.教育部关于印发《教育信息化2.0行动计划》的通知[EB/OL].(2018-04-18)[2023-02-06].http://www.moe.gov.cn/srcsite/A16/s3342/201804/t20180425_334188.html.
- [10] 吴岩.建设中国“金课”[J].中国大学教学,2018(12):4-9.
- [11] 吴锋景,刘小娟,肖鑫,等.一种碳钢、镀锌板、铝材同槽表面预处理剂、制备方法及其金属表面预处理方法:CN105803440B[P].2016-07-27.
- [12] 吴锋景,刘小娟,肖鑫.碳钢硅-铝复合预处理工艺研究[J].表面技术,2018,47(2):243-248.
- [13] WU F J, LIU X J, XIAO X. Silane-Zirconium pretreatment for mild steel[J]. Materials Performance, 2018, 57(4): 48-51.
- [14] WU F, HU Z, LIU X, et al. Understanding in compositional phases of carbon steel rust layer with a long-term atmospheric exposure[J]. Materials Letters, 2022 (315): 131968.1-131968.4.
- [15] WU F J, LIU X J, XIAO X. Surface characterisation of electroplated tinplate with different coating mass[J]. Surface Engineering, 2018, 34(6): 462-467.
- [16] 吴锋景,刘小娟,徐佳威,等.螺纹钢防锈液,制备方法及其螺纹钢表面处理方法:CN109943158B[P].2019-06-28.
- [17] 吴锋景,刘小娟,苏长伟,等.减缓耐候钢服役初期锈液流挂的表面处理剂及其制备方法和使用方法:CN113755097A[P].2021-12-07.
- [18] 罗月红,刘国建.疫情之下,机遇之上:线上教学“课程思政”的新思考[J].高教学刊,2021,7(11):42-45.
- [19] 闫兴清,叶俊伟,徐威,等.化工认识实习课程校内实习基地教学改革与实践[J].实验科学与技术,2022,20(3):119-122.
- [20] 张惠莹,刘建,陈冬梅,等.植物生理生化实验课程思政教学设计[J].实验科学与技术,2023,21(4):75-80.

编辑 钟晓