

# 在《腐蚀与防护综合实验》中开展虚拟仿真实验探究

谢学军, 廖冬梅

武汉大学动力与机械学院能源化学工程系, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年6月13日; 录用日期: 2022年7月11日; 发布日期: 2022年7月18日

---

## 摘要

该文论述了开设《腐蚀与防护综合实验》的必要性, 单纯线下开设《腐蚀与防护综合实验》存在的问题, 在《腐蚀与防护综合实验》中开设虚拟仿真实验的必要性, “除盐水中碳钢的腐蚀与防护虚拟仿真实验”的实验方法、特色、优点。认为“除盐水中碳钢的腐蚀与防护虚拟仿真实验”的开设很有必要, 不但弥补了单纯线下实验的不足, 而且标志武汉大学已设计、建立起体系较完备和先进、内容较完整的金属腐蚀与防护课程群。

## 关键词

腐蚀与防护综合实验, 虚拟仿真实验, 开设背景, 实验方法, 特色与优点

---

## Research on Virtual Simulation Experiment in *Comprehensive Experiment of Corrosion and Protection*

Xuejun Xie, Dongmei Liao

The Energy Chemistry Engineering Department, School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan Hubei

Received: Jun. 13<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jul. 11<sup>th</sup>, 2022; published: Jul. 18<sup>th</sup>, 2022

---

## Abstract

The necessity of setting up *Comprehensive Experiment of Corrosion and Protection*, the problems existing in setting up *Comprehensive Experiment of Corrosion and Protection* only offline, the ne-

cessity and advantages of setting up virtual simulation experiment in *Comprehensive Experiment of Corrosion and Protection*, and the experimental methods and characteristics of “virtual simulation experiment of corrosion and protection of carbon steel in deionized water”, were discussed in the paper. It is considered that the establishment of “virtual simulation experiment of corrosion and protection of carbon steel in deionized water” is very necessary, which not only makes up for the deficiency of simple offline experiment, but also marks that Wuhan University has designed and established a relatively complete, advanced and complete course group of metal corrosion and protection.

## Keywords

Comprehensive Experiment of Corrosion and Protection, Virtual Simulation Experiment, Setting up Background, Experimental Methods, Features and Advantages

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 开设《腐蚀与防护综合实验》及其中开展虚拟仿真实验的必要性

### 1.1. 开设《腐蚀与防护综合实验》的必要性

武汉大学能源化学工程专业的前身是电厂化学, 曾是原武汉水利电力学院的三大王牌专业(高电压与绝缘技术、农田水利工程、电厂化学)之一。专业创办 60 多年来, 一直有一支坚持面向电力系统开展金属腐蚀与防护科研、教学的师资队伍, 取得了丰硕成果, 被誉为培养我国电力系统电厂化学专业人才的摇篮和黄埔军校。《金属腐蚀与防护》及其配套实验课程, 不但一直是能源化学工程专业的核心课程, 而且是专业的特色与优势。

理论密切联系实际、理论指导和应用于实际, 既是工科专业教学的基本要求和一般的教学方法, 也是工科教学的根本目的; 既是工科教师施教的根本指导方针和原则, 也是学生学好工科专业的根本途径和方法; 同时也是激发学生学习兴趣的触发点。

为了将理论密切联系实际、理论指导和应用于实际落到实处, 2006 年起武汉大学能源化学工程专业腐蚀与防护课程组老师开始面向化工与制药类、水质科学与技术专业等开设《腐蚀与防护综合实验》, 2018 年起《腐蚀与防护综合实验》作为通识课《材料防护与资源效益》的实验开设。

### 1.2. 《腐蚀与防护综合实验》单纯线下开设存在的问题, 也就是开展虚拟仿真实验的必要性

《腐蚀与防护综合实验》以前都是在线下开展, 是先(学生)设计、(教师)批阅、(学生)修改和完善综合实验方案; 设计综合实验方案包括设计空白腐蚀实验方案、至少两种防腐蚀方法及其防腐蚀效果的验证实验方案; 然后做空白腐蚀实验、两种或两种以上防腐蚀方法的防腐蚀效果验证实验。

单纯的线下实验存在的问题有(如图 1): 用高压釜进行高温高压实验有风险(温度高于 100℃、压力超过 1 MPa, 容易发生烫伤等安全事故; 在实验室对除盐水除氧需要用高压氮气, 也有一定安全隐患); 高压釜一方面单台较贵, 需台套数较多, 实验设备投入较大, 另一方面高压釜釜盖较重, 既难以搬动, 也容易发生搬不稳而砸伤人等安全事故; 实验周期长、教学计划安排的时间不够(因为要验证每种防腐方法的防腐蚀效果和探索最佳防腐效果及其防腐条件, 因而每种防腐方法的验证实验至少包括空白

腐蚀实验在内的 5 个水平各 3 个平行实验, 每个实验从打磨、清洗、干燥和称量试片, 到挂片, 再到取片、清洗、干燥和称量试片、测量试片尺寸, 至少需要 3 天, 而整个综合实验的教学计划安排时间只 5 天); 实验设备台套数不够, 不得不分组进行, 分组实验的弊端凸显; 除盐水的水质易受空气影响, 实验结果的平行性差; 金属的腐蚀与防护过程不易观察, 学生往往只看到了腐蚀与防护的最终结果, 难以通过实验感知金属腐蚀影响因素的影响程度和防腐蚀方法的防腐效果; 学生操作不规范等。因而实际实验的教学效果不理想。而虚拟仿真实验正好可以解决这些问题[1] [2] [3]。



Figure 1. Problems in offline experiment

图 1. 线下实验存在的问题

为了弥补单纯线下实验的不足和克服其缺陷, 特别是为了克服线下实验周期长和教学效果不理想的缺点, 提出在《腐蚀与防护综合实验》中开展“除盐水中碳钢的腐蚀与防护虚拟仿真实验”。

“除盐水中碳钢的腐蚀与防护虚拟仿真实验”隶属于《腐蚀与防护综合实验》和《材料防护与资源效益》, 一方面模拟发电机组给水系统、凝结水系统和闭式循环冷却水系统等的材质、运行过程中的水质和运行条件, 采用高压釜或水浴锅开展 20 号碳钢在除盐水中的氧腐蚀虚拟仿真实验, 感知和认知氧腐蚀的发生; 另一方面采用给水系统、凝结水系统和闭式循环冷却水系统等在运行过程中提高 pH 值的防腐蚀方法, 模拟给水、凝结水和闭式循环冷却水系统的材质、水质和运行条件, 开展 20 号碳钢在提高 pH 值的除盐水中的防腐蚀虚拟仿真实验; 同时模拟闭式循环冷却水系统的材质、水质和运行条件, 开展 20 号碳钢在加缓蚀剂除盐水中的防腐蚀虚拟仿真实验, 探索闭式循环冷却水系统新的防腐蚀方法, 感知和认知防腐蚀方法及其防腐蚀效果。

## 2. “除盐水中碳钢的腐蚀与防护虚拟仿真实验”方法

(1) 学生通过教师给题、析题和自己审题, 了解实验题目的工程背景、科学内涵, 实验目的、内容与要求。

(2) 学生在“除盐水中碳钢的腐蚀与防护虚拟仿真实验平台”上

(a) 通过“基本操作”模式的实验场景 C1~C11, 学习和除盐水中碳钢的腐蚀与防护相关的、规范的实验基本操作, 掌握仪器的正确使用方法和规范操作。

(b) 通过“在线帮助”学习防腐蚀方法和防腐蚀效果验证实验方案, 初步设计能解决实际腐蚀问题的防腐蚀方法和有较好防腐蚀效果的防腐蚀方案。

(c) 通过“实验练习”模式的实验场景 C12~C34, 进行虚拟仿真实验练习, 学习如何做腐蚀与防护虚拟仿真实验和探究防腐蚀方法及其工艺条件, 巩固提高所学腐蚀与防护基本理论知识(电化学氧腐蚀原理, 氧含量、电导率、pH 值、温度、流速等影响因素)和实验技能, 掌握除盐水中碳钢氧腐蚀的防止方法, 设计除盐水中碳钢的空白腐蚀实验方案、优化除盐水中碳钢的防腐蚀方案和防腐蚀效果验证实验方案。

(d) 通过“实验考核”模式的实验场景 C35~C39, 根据优化设计的防腐蚀方案、空白腐蚀实验方案和防腐蚀效果验证实验方案, 开展除盐水中碳钢的腐蚀与防护虚拟仿真实验, 找到解决除盐水中碳钢腐蚀的较优或最佳防腐蚀方案, 为线下实验或实际腐蚀问题的解决提供指导。

(3) 学生通过在线试题库答题。

(4) 学生按格式完成实验报告。

(5) 教师登陆虚拟仿真平台, 查看学情, 综合评定给分。

这样, 一方面学生自己设计了碳钢在除盐水中腐蚀的实验方案和防止碳钢在除盐水中腐蚀的方法及其防腐蚀效果验证实验方案, 另一方面学生按自己设计的实验方案开展了虚拟仿真实验, 在线上独立完成自主学习、练习、设计、虚拟仿真实验, 克服线下实验弊端的同时充分发挥了线上虚拟仿真实验的优点, 使每个学生都得到锻炼和培养[4]-[9]。

### 3. “除盐水中碳钢的腐蚀与防护虚拟仿真实验”的特色

(1) 首次研发并开设了目前最先进超超临界燃煤机组和应用最广泛商业压水堆核电站的高温高压给水水质和运行参数下的碳钢腐蚀和防腐蚀虚拟仿真实验。

(2) 除盐水中碳钢的腐蚀与防护虚拟仿真实验数据全部来源于工程实际运行参数和线下真实实验数据, 充分体现了虚实结合的原则。

(3) 创新设计开发了本项目的虚拟仿真实验模式和成绩评定方式。实验模式包括基本操作、实验练习和实验考核三个模块, 成绩评定在基本操作、实验练习、在线答题、实验考核和实验报告里穿插进行而且各不相同, 不但通过实验考核、实验报告评分, 还在基本操作、实验练习中考核评分和通过在线答题评分, 全面覆盖实验前预习、实验过程和实验考试 3 个教学环节并全部纳入评分系统, 全面考查了学生的基本实验技能、综合应用能力和实验设计能力。

学生通过基本操作的学习、练习, 可熟悉设备操作方法, 掌握严谨规范的实验操作, 重点考查学生的基本实验技能; 学生通过实验练习, 可巩固和加深对腐蚀与防护实验方法、步骤、流程的认识, 并在了解不同防腐蚀方案的基础上, 展开思考, 为后续实验方案的设计、优化与实施打下基础, 重点考查学生的综合应用能力; 实验考核模式是开放式的实验考核, 学生可以按必做和选做实验要求, 自主选取实验变量, 设计和优化实验方案, 开展虚拟仿真实验, 分析实验结果, 可重点考查学生的实验设计和分析、解决问题的能力。

(4) 特意在移动手机端设计搭载 APP, 在手机和 PC 机上都能进行线上虚拟仿真实验, 不但为疫情期间一些老师和学生(包括较偏远地区学生)的实验课程教学解了燃眉之急, 也为更广泛人群应用提供了新渠道[10] [11] [12]。

#### 4. 《腐蚀与防护综合实验》中开设虚拟仿真实验的优点

(1) 《腐蚀与防护综合实验》实现了线上线下混合式教学, 即老师指导学生先在线上自主完成“除盐水中碳钢的腐蚀与防护虚拟仿真实验”, 然后到实验室按照自己设计、修改、完善的实验方案开展线下实验。

(2) 通过除盐水中碳钢的腐蚀与防护虚拟仿真实验, 可以大大缩短线下实际实验的时间, 如通过虚拟仿真实验了解了不同 pH 值对除盐水中 20 号碳钢的防腐蚀效果及取得最佳防腐蚀效果的 pH 值, 线下就可只验证最佳 pH 值条件下的防腐蚀效果, 至少减少了  $3 \times 3$  (3 个水平各 3 个平行) 次实验; 而且实验效果会更好, 因为实践证明学生感兴趣, 会利用很多课余碎片化时间高质量完成虚拟仿真实验[10] [11]。

(3) 目前, 虚拟仿真实验已在武汉大学的专业课《腐蚀与防护综合实验》和武汉大学通识课《材料防护与资源效益》中进行了教学应用。学生可以利用碎片化时间在手机上开展虚拟仿真实验, 有利于发挥学生的学习积极性、主动性; 通过虚拟仿真实验的体验和打下的基础, 再做线下实验时能够真正融入到实验当中去, 实验教学效果大大提高; 理论知识得到了充分巩固和实际应用, 在本科阶段即掌握了发电热力设备腐蚀与防护核心技术, 为将来从事电力相关领域的科研或生产工作奠定了坚实基础。

(4) “除盐水中碳钢的腐蚀与防护虚拟仿真实验”的开设, 标志着武汉大学已设计、建立起体系较完备和先进、内容较完整的金属腐蚀与防护课程群(如图 2 所示) [13] [14] [15] [16]。

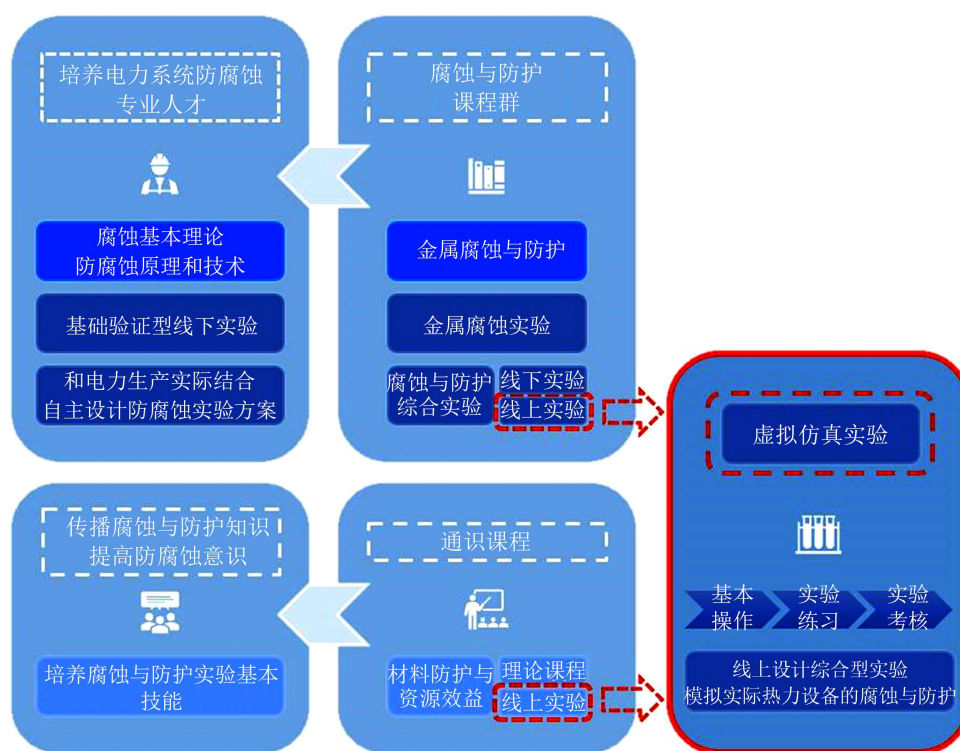


Figure 2. Course group of metal corrosion and protection

图 2. 金属腐蚀与防护课程群

#### 5. 结论

武汉大学能源化学工程专业开设“除盐水中碳钢的腐蚀与防护虚拟仿真实验”, 不但必要、可行, 而且很有特色, 表明武汉大学已设计、建立起体系较完备和先进、内容较完整的金属腐蚀与防护课程群。

## 参考文献

- [1] 谢学军, 等. 电力设备腐蚀与防护[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 7.
- [2] 谢学军, 龚淘洁, 许崇武, 彭珂如. 热力设备的腐蚀与防护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 7.
- [3] 周柏青, 陈志和. 热力发电厂水处理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019: 802.
- [4] Wang, J., Cheng, R., Liu, M. and Liao, P.-C. (2021) Research Trends of Human-Computer Interaction Studies in Construction Hazard Recognition: A Bibliometric Review. *Sensors*, **21**, Article No. 6172. <https://doi.org/10.3390/s21186172>
- [5] Ou Yang, H., Chen, B., Al-Mureish, A., Li, L. and Wu, N. (2021) Associations between Gestational Diabetes and Anxiety or Depression: A Systematic Review. *Journal of Diabetes Research*, **2021**, Article ID: 9959779. <https://doi.org/10.1155/2021/9959779>
- [6] 王卫国, 胡今鸿, 刘宏. 国外高校虚拟仿真实验教学现状与发展[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(5): 214-219.
- [7] 张敬南, 张铨钟. 实验教学中虚拟仿真技术应用的研究[J]. 实验技术与管理, 2013, 30(12): 101-104.
- [8] 罗晓东, 尹立孟, 王青峡, 许文林. 基于虚拟仿真技术的实验教学平台设计[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(4): 104-107.
- [9] 蔺智挺. 基于虚拟仿真实验的模拟集成电路实验教学[J]. 实验技术与管理, 2016, 33(1): 122-126.
- [10] 谢学军, 廖冬梅. 腐蚀与防护综合实验的虚拟仿真[J]. 创新教育研究, 2017, 5(5): 409-412. <https://doi.org/10.12677/CES.2017.55064>
- [11] 谢学军. “腐蚀防护综合实验”的特色与创新研究[J]. 中国电力教育, 2014(6): 124+130.
- [12] Diemer, J., Alpers, G.W., Peperkorn, H.M., Shibani, Y. and Mühlberger, A. (2015) The Impact of Perception and Presence on Emotional Reactions: A Review of Research in Virtual Reality. *Frontiers in Psychology*, **6**, Article No. 26. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00026>
- [13] Makransky, G., Andreasen, N.K., Baceviciute, S. and Mayer, R.E. (2021) Immersive Virtual Reality Increases Liking but Not Learning with a Science Simulation and Generative Learning Strategies Promote Learning in Immersive Virtual Reality. *Journal of Educational Psychology*, **113**, 719-735. <https://doi.org/10.1037/edu0000473>
- [14] Stefanovski, L., Mona Meier, J., Kalsank Pai, R., Triebkorn, P., Lett, T., Martin, L., Büla, K., Hofmann-Apitius, M., Solodkin, A., Randal McIntosh, A. and Ritter, P. (2021) Bridging Scales in Alzheimer's Disease: Biological Framework for Brain Simulation with the Virtual Brain. *Frontiers in Neuroinformatics*, **15**, Article ID: 630172. <https://doi.org/10.3389/fninf.2021.630172>
- [15] Fenekansi Kiwumulo, H., Muwonge, H., Ibingira, C., Baptist Kirabira, J. and Ssekitoleko, R.T. (2021) A Systematic Review of Modeling and Simulation Approaches in Designing Targeted Treatment Technologies for Leukemia Cancer in Low and Middle Income Countries. *Mathematical Biosciences and Engineering*, **18**, 8149-8173. <https://doi.org/10.3934/mbe.2021404>
- [16] 谢学军, 廖冬梅. 《腐蚀与防护综合实验》的雨课堂混合式教学[J]. 创新教育研究, 2017, 5(4): 345-348. <https://doi.org/10.12677/CES.2017.54053>