

垃圾焚烧烟气处理虚仿综合实验的应用

——以大气污染控制工程课程教学为例^①

张 艳, 柳 丹, 王懿祥, 骆林平

浙江农林大学 环境与资源学院/浙江省农林环境与资源重点实验教学示范中心, 杭州 311300

摘要:随着垃圾焚烧烟气处理虚仿综合实验开发完成,如何充分、合理利用该虚仿综合实验是后建设时期急需解决的问题。垃圾焚烧烟气处理虚仿综合实验涵盖了烟气从产生到排放过程中的 8 个主要处理工艺,实现了场景、工艺设备、仪器操作、数据采集等全方位、全过程仿真。以炉内 SNCR 法脱硝反应温度的控制等为例,详细讲述了虚仿实验在教学疑难点讲解方面和烟气处理工艺设计方面的应用。重点强调了虚仿实验与大气污染控制工程课程理论教学、实践教学等教学活动的深度融合。虚仿实验在课程教学中的充分应用调动了学生积极性,提高了教学质量,推动了教学改革。

关键词:虚拟仿真实验;烟气处理;大气污染控制工程;课程教学

中图分类号: G642.0

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2020)05-0186-07

2017 年教育部发布了开展示范性虚拟仿真实验教学项目建设的通知,详细提出了提高学生实践能力和创新精神,必须以现代信息技术为依托,推进信息技术与高等教育实验教学的深度融合。2018 年 4 月教育部印发的《教育信息化 2.0 行动计划》再次强调了坚持信息技术与教育教学深度融合的核心理念,建立健全教育信息化可持续发展机制。信息技术是现阶段教学质量提升的助推器,在推动教育改革和人才培养方面不断深化和拓展。

大气污染控制工程是环境工程专业的主干学位课程^[1]。因其理论性强,知识面广,难度大,对学生的实践、创新能力要求高,且污染控制实验涉及高危、极端环境和不可逆操作,实验成本过高,传统实验室不具备开设此类实验的条件^[2]。加之,工厂实习也受到时间、学生人身安全、工厂生产任务等因素制约。传统的实践教学已不能更好地辅助理论教学,不能满足提高学生实践能力的要求^[3]。为了解决这个问题,我校开发建设了垃圾焚烧烟气处理虚仿综合实验。该虚仿综合实验模拟了废气处理的全部过程,从烟气的产生,到降温,再到各种辅料的添加,综合了重金属和 PAH 吸附、脱硝、脱硫、除尘等大气污染处理的主要环节。着重强调了不同工艺的特征和各处理工序之间的联系和影响,更加真实,更加系统。但如何应用好烟气处理虚仿综合实验,怎样才能充分发挥其在大气污染控制工程课程教学中的作用与优势,是虚仿实验后建设时期需要解决的新问题。

1 垃圾焚烧烟气处理虚仿综合实验概况

垃圾焚烧烟气处理虚仿综合实验使用 JAVA 语言在 Eclipse 平台上进行开发,选用 MySQL 作为数据

^① 收稿日期: 2019-09-13

基金项目: 浙江省高等教育“十三五”教学改革研究项目(jg20190246)。

作者简介: 张 艳(1984—),女,硕士,高级实验师,主要从事实验室教学与管理、固体废弃物资源化利用研究。

库管理系统,以经典模型、真实数据作为支撑.仿真的范围包括工厂场景、各种工艺、设备外形及其内部结构、DCS 模拟操作(后台数据绑定)、仪器设备操作、数据采集等.烟气处理的操作流程通过 flash、2D 和 3D 等仿真技术真实再现.为环境工程及其相关专业的学生提供一个三维立体的、高度完整的、高度仿真的、高交互操作的、可全程参与的、可提供学生使用情况反馈和教师指导及评分的烟气综合处理软件.使学生通过学习、操作、使用,加深理论知识的理解,提高实践操作水平,培养工程设计能力.

该虚仿综合实验以垃圾焚烧后产生的烟气为处理对象,主要包括垃圾焚烧炉工艺、消石灰制备及注入系统、活性炭喷射系统、碱液吸收脱硫塔、半干式脱硫塔、脉冲袋式除尘器、静电除尘器和旋风除尘器 8 个工艺(图 1).各工艺仿真软件均基于 DPSP 过程仿真软件运行平台进行开发.针对垃圾焚烧时产生烟气中所含的 NO_x 、重金属、二噁英、酸性气体(SO_2 和 HCl)、粉尘等污染物进行处理.其中,涉及炉内选择性非催化还原法(SNCR)脱硝、活性炭吸附、湿式脱硫、半干式脱酸、袋式滤尘、静电除尘和旋风除尘等大气污染控制工程的主要处理工艺.

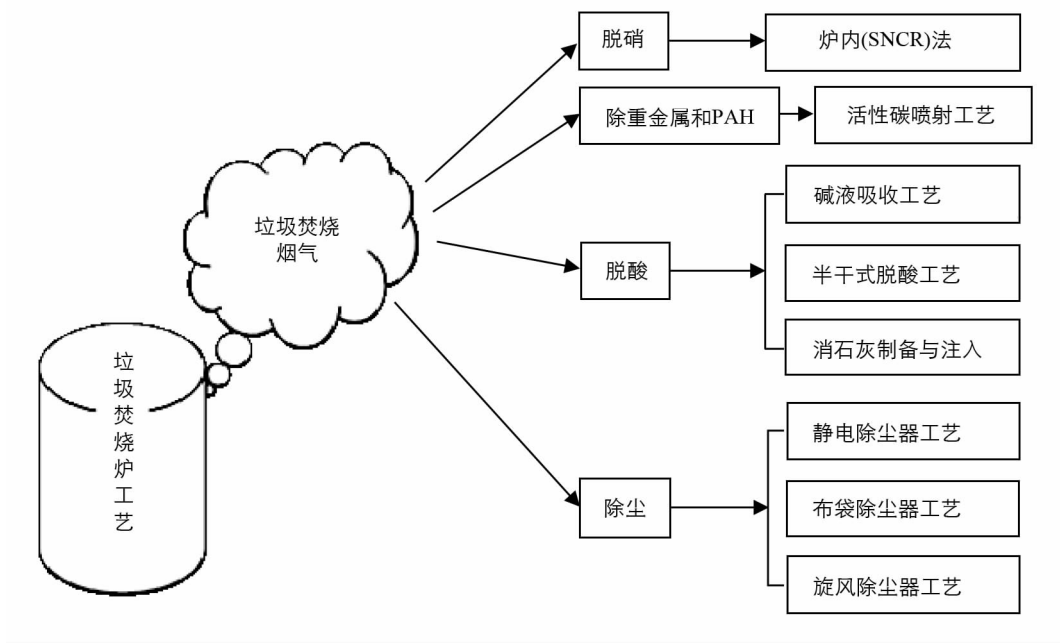


图 1 垃圾焚烧烟气处理虚仿综合实验各组成模块

2 在教学重难点讲解和操作方面的应用

为了将教学中抽象、晦涩的理论形象化、具体化,该虚仿综合实验采用 3D 技术,通过实时阴影、凹凸贴图、光照贴图和碰撞检测、射线检测、流体、刚体模拟等方法制作模型、贴图、动画.每个工艺配有全面的现场图和 DCS 界面的二维、三维图,实现主要的设备、管线、管件、仪表和自控系统、报警系统的全部仿真和所有操作的全过程仿真.既能将抽象理论具体展现,又能用来实验、实习.方便了教师答疑解惑,熟练了学生的操作技术,显著提升学生学习质量.

2.1 事故处理凸显知识重点

垃圾焚烧后,烟气中的 NO_x 主要以 NO 、 NO_2 形式存在. NO 能诱发一系列大气污染化学反应形成光化学烟雾. NO_2 能快速损坏肺细胞,严重危害人体健康. 炉内选择性非催化还原法(SNCR)脱硝工艺能有效降低烟气中 NO_x 的排放量,现为火电厂广泛使用. 该工艺不需要昂贵的催化剂,也不需要专用反应釜,尿素作为还原剂直接注入炉膛即可,但对反应温度的要求十分严苛^[4-5]. 当反应温度达到 $930\sim 1\,090\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,以下反应(1)占主导地位, NO 被还原成 N_2 .



当反应温度超过 1 100 ℃，催化剂将被氧化成 NO，反而会增加 NO_x 量；当反应温度低于最佳反应区间，残留催化剂量将会增加。因此反应温度的控制对脱硝效果至关重要。

因反应需要高温环境，难以在实验室真实再现。工厂实习也因烟气排放质量的要求，不能让学生验证、操作、练习^[6]。

本虚仿综合实验在垃圾焚烧炉工艺中，按照电厂实际情况设置尿素储罐(V101)、尿素流量调节阀(VA110)、尿素进料流量表(FI104)等装置(图 2)和尿素添加、调节等操作。为了加深学生对反应温度影响脱硝效果这部分内容的理解，除了正常工况外，还特地设置“炉膛温度异常 1”“炉膛温度异常 2”和“尾气 NO_x 含量超标”等事故处理操作。使学生理解在不同温度条件下所发生的化学反应，深刻地认识到温度控制对 NO_x 排放量的重要作用，反复练习还可以提高学生的操作技能。

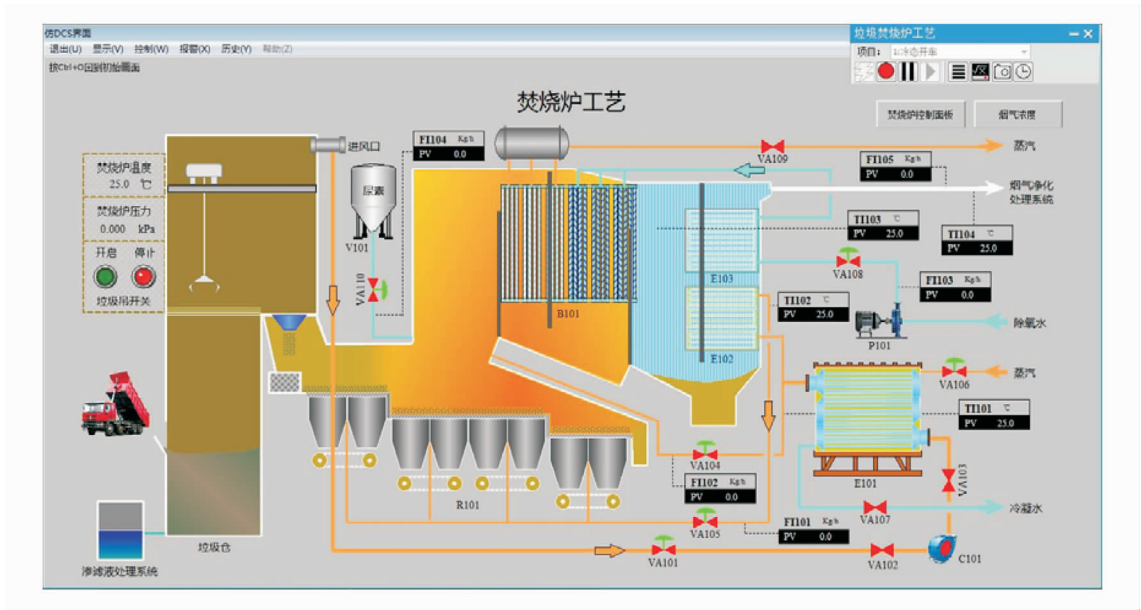


图 2 焚烧炉工艺仿 DCS 界面图

2.2 3D 动画展示抽象原理

总悬浮颗粒物(TSP)、可吸入颗粒物(PM₁₀)、细颗粒物(PM_{2.5})、可入肺颗粒物(PM₁)等专业词汇很多人都耳熟能详。颗粒物对人体和环境的危害已经是众所周知。不同类型除尘器的性能和除尘效果大相径庭。要想选择合适的除尘器，最大限度地提高除尘效果，对于除尘器的工作原理、使用范围和使用条件都要有清晰的认识和深入的理解。旋风除尘器的内涡旋、外涡旋、上涡旋理论；电除尘器工作的 3 个基本过程、电场荷电和扩散荷电两种机理、异常荷电现象；袋式除尘器的工作原理、影响除尘效率的机制和脉冲式清灰^[7]。这些理论深奥、难懂，仅靠讲解、板书、图片和实验室简易的模拟装置，教学效果很难尽如人意。

虚仿综合实验采用 Maya, 3D Max 等工具，通过骨骼动画、关键帧制作 3D 动画，然后使用 Microsoft DirectX 实现 3D 渲染。完成旋风除尘器(进气管、筒体、锥体和排气管)、电除尘器(电晕电极、集尘极、高压供电设备、气流分布板)和布袋除尘器(滤袋、振打机构)以及辅助设备(法兰、烟道、阀门、灰斗等)的仿真，使学生对这些装置及其内部结构一目了然^[8]。再通过 VR, AR 和动作捕捉技术，实现电除尘器中高压直流电晕、延续的电晕电场或纯静电场、振打清灰、反电晕、电晕闭塞和袋式除尘器中截留、惯性碰撞、扩散、电沉积等现象的仿真，可以逼真地演示出颗粒物在除尘器中运动、变化轨迹(如图 3a、b)。亲眼观测到的现象比语言描述更加令人信服。该实验还设置了“除尘器预喷涂”等工况，可以形象地展示粉尘初层的作用。

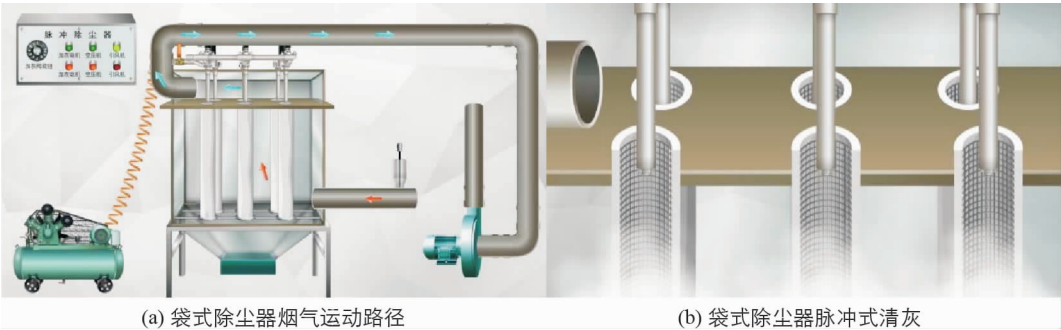


图 3 袋式除尘器工作状态

2.3 虚拟操作开展工艺设计

该虚仿综合实验采用 CS, BS 架构相结合的架构方式. 用户通过访问综合实验平台, 查看列表、调用软件和收集数据、信息, 可以调整焚烧炉参数, 使垃圾焚烧状况不同, 再根据产生烟气中各种污染物含量和设备特性, 设计工艺流程, 启动 3D 仿真项目, 进行烟气处理操作, 然后分析、评价处理效果. 进一步加深学生对理论知识的理解, 对工艺、设备的认识, 培养学生的工程设计能力.

以对比碱液吸收工艺和半干式脱硫工艺的脱酸效果为例, 分别设计以下两组处理工艺, 实验结束后对比处理效果, 评价工艺设计的优劣.

垃圾焚烧烟气碱液吸收脱酸工艺流程(图 4): 垃圾进厂称质量后卸进垃圾仓, 搅拌均质化后, 送入垃圾料斗, 推送至炉排上进行燃烧. 烟气产生后, 向焚烧炉内喷入尿素溶液, 脱除 NO_x . 随后烟气经过降温塔, 将温度降至 150°C 左右, 先将消石灰用喷射风机喷入降温塔和除尘器之间的管道中, 初步降低烟气的酸性. 再将活性炭喷入该部分管道吸附烟气中的二噁英和重金属等有害物质. 与消石灰和活性炭反应后的烟气带着飞灰和各种粉尘进入袋式除尘器. 在袋式除尘器内, 焚烧产生的烟尘、消石灰反应物和生成物、吸附了重金属和二噁英的活性炭等各种颗粒物均附着于滤袋表面, 形成粉尘初层开始过滤; 同时消石灰和活性炭在滤袋表面进一步反应、吸附^[9]. 经预除尘后的烟气从碱液吸收塔底部进入向上运行, 与向下喷射的碱液充分接触, 烟气中残留的酸性气体 HCl , SO_2 等进行反应, 生成盐类^[10-11]. 同时, 烟气温度逐渐降低, 经过再热器后排放入大气.

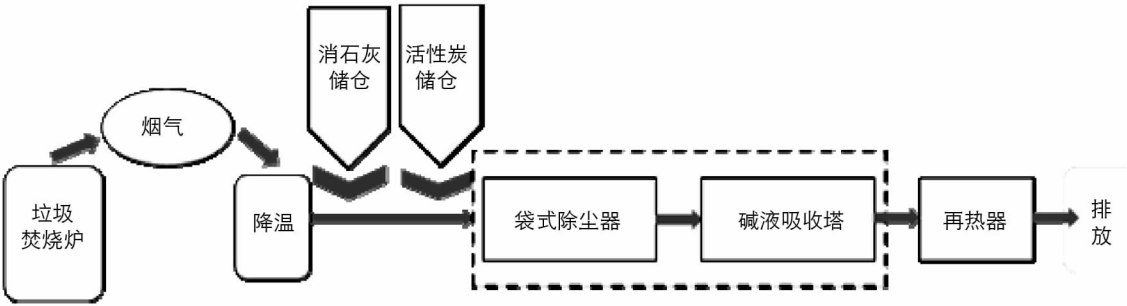


图 4 垃圾焚烧烟气处理采取碱液吸收脱硫

垃圾焚烧烟气半干法脱酸工艺流程(图 5): 为了对比不同脱酸工艺的处理效果, 垃圾焚烧, 烟气产生、降温, 消石灰和活性炭的喷入都与前一处理工艺相同. 从烟气降温喷入消石灰和活性炭后开始, 工艺调整为: 烟气先进入喷雾吸收塔, 经行脱酸处理. 消石灰作为吸收剂经塔顶的雾化器喷射, 形成均匀的雾滴颗粒, 吸收烟气中的酸性物质. 同时, 由于水分的蒸发吸热, 烟气温度降低. 完成脱硫反应后的干粉状产物, 部分在塔内分离、排出, 部分随脱硫后的烟气进入袋式除尘器. 烟气经过除尘、再热后排放.

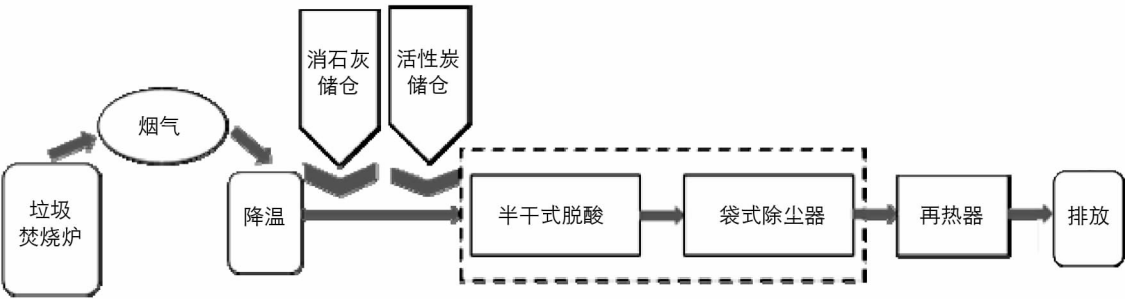


图 5 垃圾焚烧废气处理采用半干式脱硫

按照以上两种方案分别开展虚仿实验。实验结束后，对比除尘率、脱硫率等指标，评价两种方案的优劣，开展讨论，分析原因，使得学生对相关知识的理解、认识更进一步，最终达到能够灵活应用各种设备、工艺解决实际问题的目的。

3 与大气污染控制工程课程教学相融合

垃圾焚烧烟气处理虚仿综合实验的组成是多个维度的。有烟气产生到排放的完整处理过程；有知识点讲解到实际操作的全部教学过程；涵盖了颗粒污染物控制、气态污染物控制等大气污染物控制的核心工艺；还包括教师布置任务模块、学生学习操作模块和考核竞赛模块等多个管理模块。虚仿实验的各个组成部分可以用在大气污染控制工程教学过程的不同环节上，与该课程教学相融合。

3.1 与理论教学相融合

课前，学生可以通过虚仿软件中对主要知识点的讲解部分进行预习，内容精简，重点突出，形式新颖，可提高学生预习的积极性。课堂教学时，向学生展示虚仿实验中设备的外形和内部结构(如图 6a)，清晰明了的画面，可加深学生对设备装置构造的记忆。播放仪器设备的工作动画(如图 6b)，可让学生对课本上大段文字描述的工作过程和原理一目了然^[12]。多样的教学形式还可增强学生自主学习的兴趣。课后还可以反复观看，无形中将课堂教学延伸到教室之外，提升了复习效果。

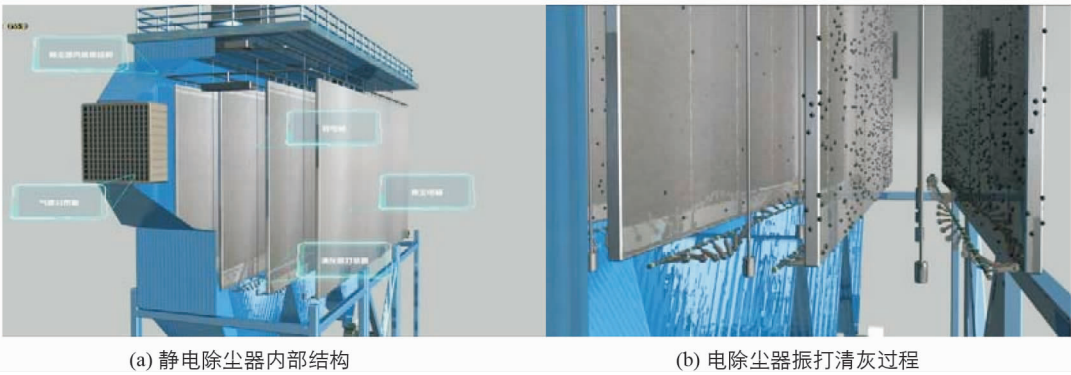


图 6 静电除尘器结构和清灰过程

3.2 与真实实践相融合

虚仿综合实验在辅助真实实验课程方面，完全实现了一对一教学，冲破了仪器台套数的限制，拓展了实验室的面积，延长了实验教学时间，真正实现处处能学、时时可学，弥补了实验课和工厂实习的不足。在真实实验中观察到的实验现象，可以在虚仿实验中寻找原理；在实习、实训中学习的操作技术，也可以在虚仿实验中反复练习^[13-14]。在真实实验和实习结束后，还可以通过虚仿实验进行考核，切实提高教学质量。

3.3 与设计竞赛相融合

使用虚仿实验开展课程设计竞赛，培养学生的创新能力。设计一个废气处理的竞赛题目，给出废气的

污染物类型、含量和特征污染物,以及要执行的排放标准.让学生带着问题,充分发挥积极性,释放潜能,根据自己所学的知识和实习、实训经验,选取适合的处理设备,设计工艺流程.再回到实验室和虚仿实验中,运行、调试、计算,修改完善处理工艺.教师可根据竞赛成绩的反馈,掌握学生的学习情况,督促学生学习,培养学生的工程设计能力和创新能力^[15-16].

3.4 与课程建设相融合

虚仿综合实验还可以用于精品视频公开课、精品资源共享课、精品在线开放课和 MOOC/SPOC 课等课程的建设上.为翻转课堂顺利进行提供了优质的预习资源.这些精品课程的建设也促进了垃圾焚烧烟气处理虚仿综合实验的建设和完善.

4 结 语

垃圾焚烧烟气处理虚仿综合实验被充分应用于大气污染控制工程课程教学的各环节,不断挖掘其应用潜力,才是真正完成了该虚仿实验的建设与开发.该虚仿综合实验的应用,调动了学生学习的积极性,激发了学生潜力,切实提高了教学质量,改善了教学效果.还有效地推动了环境工程专业的课程建设,对其他虚仿实验的建设也起到了示范和引领作用.但虚仿实验也有其局限性,不能过度依赖.只有强化它与理论教学、真实实践教学等教学活动的融合,善加利用,才能充分发挥它在教学中的作用,最大化实现其价值.

参考文献:

- [1] 段凤魁,郝吉明,王书肖,等.大气污染控制工程实验课程建设探讨[J].实验技术与管理,2015,32(9):6-8.
- [2] 刘 涛,羌 宁,盛 力,等.建设精品实验 提升大气污染控制实验教学水平[J].实验室研究与探索,2014,33(3):142-145,149.
- [3] 张 艳,侯永平,曹玉成.环境工程新型实践教学基地实验工厂的探索与建设[J].东南大学学报(哲学社会科学版),2015,17(S2):158-160.
- [4] 李 军,严圣军,陈 竹,等.符合欧盟 2000 标准的垃圾焚烧烟气处理工艺[J].发电设备,2012,26(6):453-455,460.
- [5] 梁 梅,黎小保,刘海威,等.生活垃圾焚烧烟气处理技术研究进展[J].环境卫生工程,2013,21(5):49-52.
- [6] 张 艳,邓庆德.树立共享理念 构建大型仪器设备先进管理模式[J].中国高校科技,2014(9):24-25.
- [7] 宋海娃,陈 功,岳良建,等.虚拟现实技术在纺织除尘设备中的应用研究[J].机械工程师,2010(2):84-85.
- [8] 刘 涛,李照海,羌 宁,等.大气污染控制工程信息化实验教学模式的构建[J].实验室研究与探索,2017,36(8):234-236.
- [9] 朱庆春.城市生活垃圾焚烧烟气处理工艺研究[J].安徽农学通报,2016,22(21):59-61.
- [10] 黄贤明,童国道.基于虚拟技术国内某 300MW 火发电机组脱硫 DCS 仿真系统的研制[J].工业控制计算机,2012,25(1):49-50,52.
- [11] 王建宏,朱玲,陈家庆,等.大气污染控制工程综合型实验的整合与优化[J].中国现代教育装备,2012(7):69-70,73.
- [12] 高宏岩,王兆芊,王闻阳.基于力控软件的过程控制虚拟实验系统[J].实验室研究与探索,2017,36(3):90-93.
- [13] 郝雯娟,张 祺.教学用风力发电系统虚拟实验台的设计与实现[J].实验技术与管理,2016,33(2):97-99,105.
- [14] 赵红晓,聂国隽,俞永辉.流体力学虚拟实验平台的建设与应用[J].实验室研究与探索,2017,36(8):122-124,147.
- [15] 姜树杰.巧用虚拟实验技术解决教学难点——以“电子线路分析与应用”课程教学为例[J].实验技术与管理,2016,33(4):100-102.
- [16] 潘雪涛,邬华芝,蔡建文,等.创新虚拟实验教学模式培养自主学习能力[J].实验室研究与探索,2014,33(11):72-76.

The Application of Virtual Synthetic Simulation Experiment in Waste Incineration Flue Gas Treatment

——Taking the Course of Air Pollution Control Engineering as an Example

ZHANG Yan, LIU Dan, WANG Yi-xiang, LUO Lin-ping

School of Environmental and Resource Sciences/Key Experimental Teaching Demonstration Center of

Agricultural and Forestry Environment and Resources of Zhejiang Province, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China

Abstract: With the completion of the virtual imitation comprehensive experiment of waste incineration flue gas treatment, how to make full and reasonable use of the virtual imitation experiment is an urgent problem to be solved in the post-construction period. The virtual imitation experiment includes eight main treatment processes from generation to emission of flue gas. It has been realized that all simulation of scene, equipment, instrument operation, data acquisition in the all-around and the whole process. Taking “Control of Reaction Temperature of Denitrification by SNCR Method” as an example, the application of the virtual imitation experiment in explaining doubtful and difficult points and designing flue gas treatment process has been described in detail. The deep integration of the virtual imitation experiment and teaching activities of “Air Pollution Control Engineering” have been emphasized. The application of the virtual imitation experiment in curriculum teaching has aroused students’ enthusiasm, improved teaching quality and promoted teaching reform.

Key words: virtual simulation experiment; flue gas treatment; air pollution control engineering; curriculum teaching

责任编辑 包 颖