

混凝土材料虚拟仿真实验的建设与思考

戴民,王晴,潘文浩,赵明宇

(沈阳建筑大学材料科学与工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要:为推动实验教学改革,结合专业特点,培养学生基于不同工程环境设计和制备高性能混凝土的能力,开展“极端环境下混凝土材料制备和性能评价虚拟仿真实验”项目建设。结合项目建设经历,对教学目标进行了分析,阐述了基于实验原理的核心知识点及其设计流程,展示了虚拟仿真实验的功能模块、交互操作考察点和赋分情况,体现了实验设计、教学方法和评价体系方面的创新。

关键词:极端环境;混凝土;材料制备;性能评价;虚拟仿真

中图分类号:G642.0

文献标志码:A

混凝土作为最大宗的人造材料,其耐久性国际工程界关注的重大课题,全世界因为混凝土丧失耐久性造成的经济和社会损失十分巨大。20世纪90年代初期学术界提出了高性能混凝土的概念,它是一种以混凝土耐久性为设计目标的新型混凝土。高性能混凝土技术使混凝土的生产过程和应用过程实现了绿色化,混凝土从传统概念上得以飞跃,符合人类寻求与自然和谐、可持续发展的趋势^[1,2]。建筑物所处环境的多样性,带来了混凝土高性能化的多样性,因此,在混凝土相关的课程中,培养学生基于不同工程环境设计和制备高性能混凝土的能力,成为必不可少的课程目标。

极端环境下混凝土材料制备和性能评价是高性能混凝土教学的重要内容,往往通过理论教学与实验教学相结合的方法强化学生对这部分知识点的理解和运用,尤其是实验环节的设置对于提升学生按指定性能设计和制造材料的能力十分有效。但是,由于学时和实验环境的限制,混凝土高性能化的训练

变得十分有限,更是无法接触到极端环境中劣化混凝土的现场评价方面的实践训练,这种情况的出现是传统教学方式无法避免的缺憾。

虚拟仿真实验教学是我国高等教育信息化建设的重要内容^[3],以信息技术应用为本质特征的虚拟仿真实验教学,为实验教学改革和实验室建设增添了活力和动力^[4],利用新兴信息技术建设虚拟实验教学平台,有助于解决知识学习与实践技能获得之间的鸿沟^[5]。虚拟仿真实验是以数学理论、相似原理、信息技术、系统技术及其应用领域有关的专业技术为基础,以计算机和各种物理效应设备为工具,采用“面向对象”思想创建的能够实时操作的、非实在的实验空间,在此环境中,实验者可以像在真实的环境中一样完成各种预定的实验项目。该实验可以使打破时间和空间的限制,使一些抽象的、难以通过实体实验室设计的实验得以实现,能够解决传统理论教学与学生工程化培养之间的矛盾,拓展实验教学的深度和广度,提高实验

教学实效,实现理论与实践教学的密切结合,该实验是理论与实验教学的有益补充和创新,国内外许多高校结合专业特点,建立了虚拟实验室^[6-9],有效强化了对学生实践技能的培养。沈阳建筑大学无机非金属材料工程专业也把虚拟仿真实验项目的建设列入国家一流本科专业建设点重点建设内容^[10],积极推进教育部产学研协同育人项目“极端环境下混凝土材料制备与评价虚拟仿真实验设计与应用”建设。该虚拟传真实验项目聚焦东北地区典型的严寒及海洋环境中混凝土的耐久性问题,借助虚拟现实技术高度仿真混凝土材料设计、制备和性能评价过程,同时虚拟再现多种极端环境下混凝土劣化过程,可使学生加深对混凝土材料的劣化机理的认识,深入了解混凝土在极端环境中的性能演变规律,熟悉混凝土制备及耐久性评价的实验方法,初步掌握提升混凝土耐久性的技术手段,符合教育部对虚拟仿真实验教学项目建设应坚持问题导向和需求导向的要求^[11]。

一、实验教学目标思考

“极端环境下混凝土材料制备与评价虚拟仿真实验”可用于无机非金属材料工程、土木工程、工程管理、建筑学、城市地下空间工程等相关专业的综合实验教学,同时也可作为混凝土工程与技术、混凝土学、土木工程材料、材料测试与分析、土木工程材料实验等课程的重要教学手段,起到了拓展学生知识结构、启迪学生科学思维和创新意识的作用。对照工程教育专业认证中课程目标对毕业要求的支撑情况,在无机非金属材料工程专业课程体系中,本实验作为“无机专业实验”课程的重要组成部分,可强化对毕业要求4(研究)的支撑,结合“无机专业实验”课程教学目标,“极端环境下混凝土材料制备与评价虚拟仿真实验”设定如下教学目标:

①通过不同服役环境选择混凝土材料可视化虚拟仿真实验教学,使学生掌握不同服役环境下,学会选择混凝土材料,并学会运用所学理论知识指导应用,掌握混凝土原材料

选择、配合比设计以及混凝土制备和测试能力;

②通过对混凝土进行抗冻性实验的虚拟仿真实验教学,使学生了解混凝土试样在长期冻融循环环境下的破坏过程,掌握评价混凝土抗冻性能和分析影响抗冻性能因素的能力;

③通过混凝土抗硫酸盐侵蚀性能可视化虚拟仿真实验教学,使学生掌握混凝土材料抗硫酸盐侵蚀机理,了解硫酸盐侵蚀环境,例如海水环境下混凝土材料设计原理与思路;

④通过混凝土抗氯离子渗透性能虚拟仿真实验教学,使学生了解氯离子在混凝土内传输机理和混凝土材料抗渗性能评价机理,掌握混凝土 RCM 法和电通量法抗氯离子渗透实验操作原理,学会针对氯离子环境或者水工环境下设计混凝土的能力;

⑤通过实验过程操作,使学生会依据无机原料组成、性能及产品技术性能要求,设计无机材料原料组成并进行制备及测试,并能正确进行数据测试采集、分析与评价;

⑥通过性能测试与结果评价,掌握无机材料的测试方法和评价方法,并能分析无机材料性能,依据有关标准规范进行评价,最终完成实验预期目标。

二、实验原理

根据混凝土材料性能可调、耐久性可定向设计等特点,实验设计成针对极端环境下,混凝土材料选择、设计、制备和测试评价等环节的教学内容。针对混凝土服役过程中,受到硫酸盐侵蚀、冻融循环及氯离子渗透等作用,其性能会产生劣化的情况,通过现场检测验证材料设计的有效性。

1. 混凝土材料原材料选择与设计

混凝土材料各项性能与其耐久性密切相关,然而其性能取决于混凝土原材料选择与配合比设计,针对不同耐久性破坏机理的必要条件和关键因素合理选择原材料,并通过混凝土配合比设计技术优化混凝土材料相关性能,使其更加适用于所服役恶劣环境。由

于混凝土材料各项性能指标,尤其是各种耐久性能均需要经过长龄期之后方可测试,这是在授课计划时间内很难完成的,为此,引入虚拟仿真实验,通过灵活的虚拟仿真实验技术解决混凝土材料耐久性评价的时间局限。

2. 混凝土抗冻融循环性能

混凝土抗冻融循环性能是指混凝土在含水状态下能经受多次冻融循环作用而不破坏、强度也不显著降低。混凝土毛细孔中的水分在结冰后膨胀压力作用下破坏孔壁结构,解冻后一部分膨胀残留下来,破坏的孔壁结构也随着融化的水带出混凝土。长期冻融循环后混凝土的力学性能和质量都大幅度降低。所以,可以根据冻融循环后的相对动弹模量和质量损失来确定最大循环次数和耐久性指数。

3. 混凝土抗硫酸盐干湿循环侵蚀性能

硫酸盐环境中的 SO_4^{2-} 进入混凝土内部,与水泥石的某些固相组分发生化学反应而生成一些难溶的盐类矿物,这些难溶的盐类矿物吸收水分子体积膨胀,形成膨胀内应力,当膨胀内应力超过混凝土的抗拉强度时就会导致混凝土的破坏。另外,硬化水泥石中 CH 和 CSH 凝胶等组分溶出或分解,导致混凝土强度和粘结性能损失。硫酸盐环境下混凝土性能测试主要是通过硫酸盐溶液的干湿循环实验进行。

4. 混凝土抗氯离子渗透性能

钢筋混凝土的粘结应力是这两种材料共同工作的基础,当环境中存在氯离子侵蚀性介质时,当其渗透进入混凝土内部后,氯离子会加速结构混凝土中的钢筋锈蚀,从而导致混凝土结构破坏。混凝土氯离子渗透性能测试主要是通过 RCM 法或电通量法实验进行测试。

三、仿真设计的核心要素

1. 核心知识点

通过对实验原理的分析,提炼出仿真实验需要学生熟练掌握的核心知识点如下:

①不同服役环境对混凝土材料性能

要求;

②混凝土原材料选择、配比设计以及混凝土制备;

③混凝土工作性能测试与调节混凝土配比设计方法;

④混凝土冻融循环实验与混凝土抗冻性能评价;

⑤混凝土硫酸盐干湿循环侵蚀实验与 SO_4^{2-} 侵蚀混凝土机理;

⑥混凝土抗氯离子渗透性能与混凝土结构体中氯离子迁移和渗透机理。

2. 核心要素的仿真设计流程

借助虚拟现实技术,进行混凝土的设计和制备,在虚拟环境中进行硫酸盐干湿循环侵蚀、冻融循环、抗氯离子渗透等实验,虚拟再现多种环境下混凝土劣化过程,考虑到对全部核心知识点的涵盖,仿真实验的设计如图 1 所示。

①先进入实验课基础知识部分,引导学生学习混凝土设计、冻融、硫酸盐或氯离子等环境下混凝土结构的劣化或破坏机理等内容;选择好模块后,依次进入学习模式和实验前考核模式,考核结束后,自动给出成绩,未合格必须重做,合格者进入实验。

②实验阶段包括混凝土制备环节、工作性测试环节以及相关耐久性测试环节,依照学生自己实验思路进行自主安排,直至实验全部结束。

③对结果进行后台分析与评价,并直接给出实验结论是否合格,如不合格,会简要提示错误环节内容。

④实验操作与成绩合格后,对学生所选模块内完成情况进行综合评价,并给出评语。

四、实验教学过程与评价

1. 实验教学过程

实验教学过程通过科学性、系统性和实用性等原则进行合理编排,主要由导言、学习模块、考核模块,设计场景选择、原材料选择、配合比设计、实验操作和结论与评价等部分组成(见图 2)。

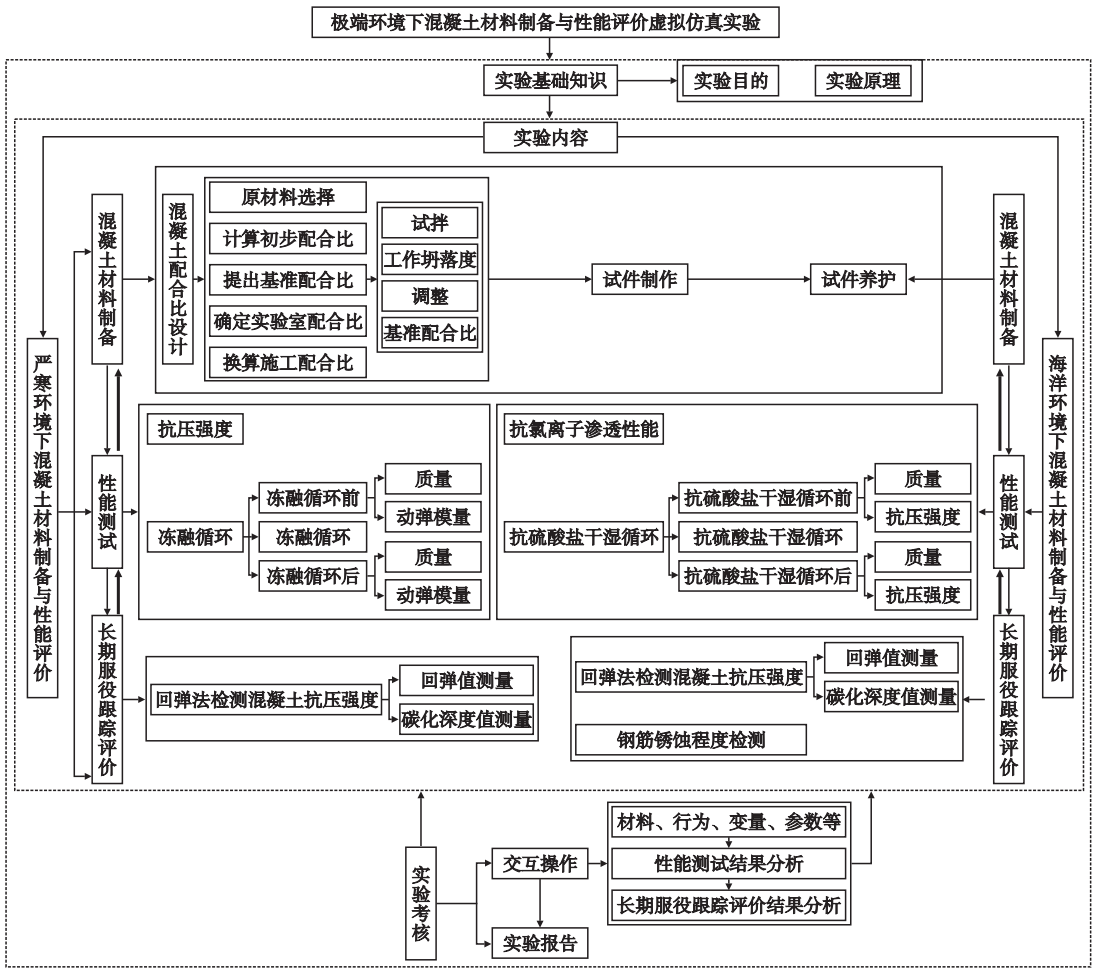


图1 极端环境下混凝土材料制备与性能评价虚拟仿真实验拓扑图

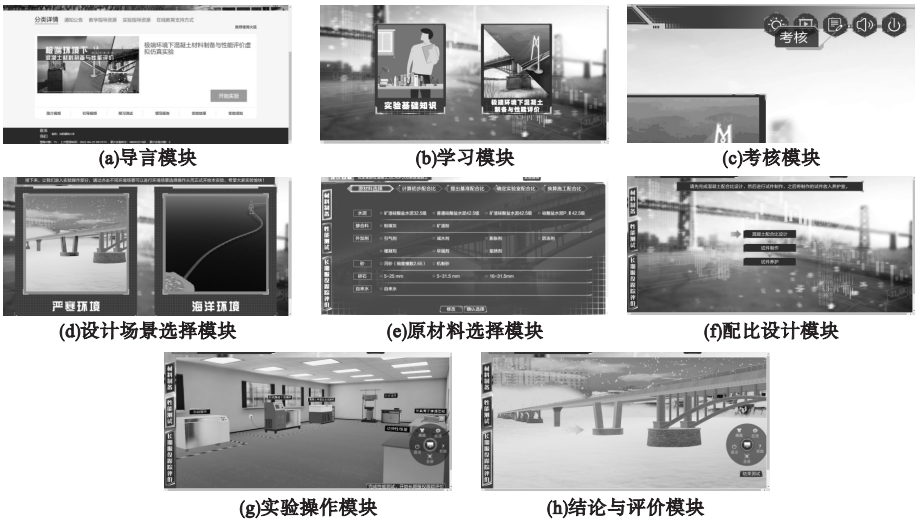


图2 虚拟仿真实验功能模块

其中,导言模块指导学生快速了解实验内容;学习模块和考核模块以代入式学习与检验方式为实验顺利进行提供保障;混凝土材料性能确定、原材料选择以及配比设计可以检验学生的理论专业知识掌握程度;混凝土制备与工作性测试考察学生实际动手能力

和调整配比能力;耐久性测试设备选择与操作检验学生对混凝土耐久性能测试原理的掌握和分析评价能力;完成实验报告作为实验最终考核方法检验学生总结实验的能力。综上所述实验教学过程,能够多维度考察学生掌握实验能力、自主实践能力以及是否达到实验目等。

混凝土耐久性虚拟仿真设计实验具有合理的学生交互操作界面,在仿真学习、测试、虚拟实验室操作环节,学生可以通过人机交互界面实现耐久性实验的理论学习、设计适配、实验操作,交互性步骤如下:

- ①输入用户名及密码;
- ②点击理论学习,进入图文、视频学习界面,完成后进行测试;
- ③测试完成返回主界面,点击开始设计,分配设计题目,学习设计理论注意要点,完成测试;

- ④返回主界面,点击进入实验室;
- ⑤在实验室中,选择原材料,输入各原材料的用量比例;
- ⑥点击混凝土搅拌设备,将选择的原材料放入设备,选择搅拌参数,完成坍落度实验并成型,其间输入插捣次数等参数;
- ⑦选择养护设备,设施养护温度、时间等参数,进行养护;
- ⑧取出试块,分别点击万能试验机、冻融循环机、碳化箱等设备进行相应实验,期间可反复操作;
- ⑨实验优化,整理数据,退出系统。

2. 评 价

以上虚拟仿真实验过程中,人机界面将对学生的操作进行后台的判断,让学生在虚拟实验条件下自由探索,提高自己解决实际问题的能力。在人机交互过程中设置了10个考察点并对考察点赋分,形成对学生的考核(见表1)。

表1 交互操作考察点与赋分情况

序号	目标要求	合理用时/min	目标达成度赋分点	步骤 满分/分
1	登录系统,通过图文、视频学习混凝土耐久性相关实验操作方法	30	观看时间	5
2	回答问题	20	回答题目每错1题扣1分	10
3	回答问题通过后,进入设计题目任务,确认设计目标,通过图文资料,学习相关规范要求	20	观看时间	5
4	回答问题	10	回答题目每错一题扣1分	10
5	进入虚拟实验空间,进行配合比设计,并输入配合比	20	组成、掺量每错1处扣1~5分	20
6	在虚拟实验空间,进行实验样品成型与工作性能测试操作	10	交互操作逻辑每错1处扣2分	15
7	在虚拟实验空间,进行实验样品养护操作	10	交互操作逻辑每错1处扣2分	10
8	在虚拟实验空间,进行实验样品耐久性实验测试操作	30	交互操作逻辑每错1处扣2分	20
9	根据实验结果,进行配合比设计调整,并重复步骤5~8	0~70	1~3次重复实验优化配比的 操作机会	—
10	完成设计实验,提交实验结果	5	根据性能结果评价	5

五、项目建设的创新点

1. 实验设计创新

虚拟仿真实验课程的设计具有突出的自由式、探索式、沉浸式的特点,它将理论分析与实验教学融于一体,为混凝土耐久性设计提供了一个自由化、智能化、交互性的教学与实验环境,能够从理论和实践的双重视角让学生探索混凝土耐久性的设计、分析、实验操作的整个环节。

2. 教学方法创新

构建的混凝土制备与检测虚拟仿真实验

空间,具有的沉浸感、交互性、想象性,为学生构建了三维立体视觉和身临其境感受的实验教学环境;将现代仿真技术应用于实验教学,通过建立完备的仿真模型、技术文件数据库,为学生提供充足的模型储备和技术指导;利用图文教学,将实验教学从课堂教学模式转化为线上教学模式,从多个视角对学生展示实验操作方法,提高了学生学习的质量与效率。

3. 评价体系创新

实验设计中注重对学生能力的过程性评价,将基本理论知识的掌握、问题分析、实验操作、实验结果等内容纳入评价指标体系,根

据各指标在评价体系中的相对重要程度,采用模糊一致判断矩阵法进行权重确定,在实验结束后给出优秀、良好、一般、及格和不及格5个等级,并指出实验过程中的失分环节以加深学生对实验的理解。

六、结 语

“极端环境下混凝土材料制备与性能评价虚拟仿真实验”实现了线上的虚拟仿真模块代替部分现场实验教学,有效解决了混凝土耐久性设计实验周期长、线下实验对设备和场地要求高、现场评价难度大的问题,让每位学生都能在虚拟实验环境下进行自由探索,反复调整,充分体验从材料设计、制作到评价的每个环节,加深对相关理论知识和工程技术的理解和掌握。

参考文献:

- [1] 吴中伟. 高性能混凝土:绿色混凝土[J]. 混凝土与水泥制品,2000(1):3-6.
- [2] 冯乃谦. 高性能混凝土[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1996.
- [3] 王晓敏,高志强,闫晋文. 国内高校材料学科虚拟仿真实验教学的发展探究[J]. 中国大学

教育,2021(3):78-85.

- [4] 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.
- [5] 逯行,朱陶,徐晶晶,等. 高校虚拟仿真实验教学的基本问题与趋势[J]. 现代教育技术,2021,31(12):61-68.
- [6] 卢艳丽,董文强,王永欣,等. 材料类专业虚拟仿真实验教学中心的建设与实践[J]. 实验室研究与探索,2018,37(11):153-157.
- [7] 张伯伟,华均. 经济虚拟仿真实验教学中心的建设[J]. 实验技术与管理,2014,31(11):5-7.
- [8] 李宁,王其州,叶海旺,等. 采矿工程专业虚拟仿真实验教学平台建设[J]. 工业和信息化教育,2022(2):86-90.
- [9] 宋先雨,梁克中,武卫荣,等. 化工虚拟仿真实验教学课程建设与改革[J]. 山东化工,2021,50(24):230-231.
- [10] 陈彦文,符聘,陈苗,等. 一流专业建设过程中实验教学改革研究:以沈阳建筑大学无机非金属材料工程专业为例[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版),2021,23(4):426-432.
- [11] 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]. (2017-09-20)[2022-06-17]. <https://sbc.seu.edu.cn/2018/1129/c5582a247870/page.htm>.

Building and Thinking for Virtual Simulation Experiment of Concrete Materials

DAI Min, WANG Qing, PAN Wenhao, ZHAO Mingyu

(School of Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: In order to promote the reform of experimental teaching and train students' ability of designing and preparing high performance concrete for different engineering environments, the project of "Virtual Simulation for Preparation and Evaluation of Concrete in Extreme Environment" was carried out with major characteristics. In combination with project construction experience, this paper analyzes the teaching goals, expounds the core knowledge based on the experiment principles and its design process, exhibits the function modules of the virtual simulation experiment, the inspection points of interactive operation and scoring rules. The innovations in the design of experiment, teaching method and evaluation system were embodied.

Key words: extreme environment; concrete; material preparation; performance evaluation; virtual simulation

(责任编辑:徐聿聪 英文审校:林 昊)