教学设计

指尖探秘—建筑结构抗火虚拟仿真实验

课程名称：土木工程防灾与减灾

授课教师：陈伟

教学团队：陈伟、叶继红、张营营、郭震、姜健等

教学单位：中国矿业大学

力学与土木工程学院

一、课程背景

“土木工程防灾与减灾”是土木工程本科专业的主干课程。该课程的教学目标是要求学生掌握工程结构的防灾减灾理论和常用设计方法，了解防灾减灾学科的研究动向，培养学生创新意识以及解决工程问题的能力[1]。在各类灾害中，建筑火灾发生最为频繁，并极具毁灭性。据《中国消防年鉴》统计，在 2013 年至 2017 年，我国共发生火灾事故 181 万起，死亡 9502 人，直接财产损失超过 220 亿人民币。因此，建筑火灾已成为威胁公众安全、危害人民生命财产安全的重要灾害[2]，建筑结构抗火设计也成为“土木工程防灾与减灾”的重点授课内容。

与此同时，当今社会，新颖的建筑结构体系不断涌现，常常超出了我国现行抗火设计规范的适用范围[3]。此时，通常需要通过开展建筑结构抗火试验，从而对建筑抗火设计方案进行论证。因此，在“土木工程防灾与减灾”课程体系中，开展建筑结构抗火实验教学，不仅有利于加强学生对于结构抗火基本原理的理解，而且已成为建筑结构抗火设计与研究的一项重要手段。然而，当前国内仅有少数高校拥有建筑结构抗火实验实体平台，并且大型建筑结构抗火实验普遍存在潜在安全风险，且耗时长、费用高，学生很难有机会现场观摩，从而缺乏直观认识。同时，由于抗火实验的特殊性，实验过程中很难捕捉并获得重要实验现象的视频资料。因此，传统的教学手段是通过少量实验照片进行展示，这显然不利于学生对于结构抗火设计理论的正确理解，以及创新性能力与综合素质的提高，明显制约了我国工程防灾减灾专业技术人员的培养。

虚拟技术与网络技术为上述问题提供了理想的解决方案，已成为提升我国土木工程专业教育质量，助推高等教育教学变轨超车的重要手段[4-8]。鉴于此，课程团队先后建设了实验实验平台、虚拟仿真平台、虚拟教具以及 MOOC 等现代教学资源，构建高度仿真的建筑结构抗火实验教学平台。依托该平台，突破传统实验教学模式，实现了微实验虚拟教学和实体实验教学的相互补充，并将其服务于《土木工程防灾与减灾》专业课程实践教学。

二、教学团队简介

主讲教师：陈伟，男，博士，副教授，山东莱阳人，中国建筑学会抗震防灾分会、结构抗火专业委员会委员，主要从事结构抗火研究。近年来，负责建设完成了中国矿业大学工程结构火安全试验室、《土木工程防灾与减灾》大学 MOOC、中国矿业大学结构抗火虚拟仿真实验，参编完成《土木工程防灾》规划教材等。

部分团队成员：

叶继红，女，博士，教授，中国矿业大学力学与土木工程学院院长兼人力资源部部长，结构工程、防灾减灾工程学科带头人。国家杰出青年基金获得者，教育部新世纪优秀人才，江苏省特聘教授，中国矿业大学越崎学者，主要从事大跨空间结构、轻钢结构防灾减灾研究。

姜健，男，博士，教授，黑龙江齐齐哈尔人。2012 年获英国爱丁堡大学结构工程博士学位，2015 年至 2019 年任美国国家标准与技术研究院客座研究员。主要从事钢结构及钢-混凝土组合结构的抗火理论与设计方法研究、结构抗连续性倒塌研究。

三、微课教学目标

1. 了解并熟悉微课实验对象—轻钢龙骨承重复合墙体的基本构造；
2. 了解并熟悉建筑构件耐火试验的主要设备、实验制度与流程；
3. 了解并熟悉钢结构承重墙耐火实验的典型现象。

四、教学设计

➢ **教学理念：**以“趣”为核心，在创新思维层面，注重激发学生的学习兴趣，做到“知其然”；在学习能力提升层面，使学生能够体会到追寻“真想”的乐趣，享受“知其用”；在塑造科学素养层面，培养学生的学术志趣，达到“知探索”。

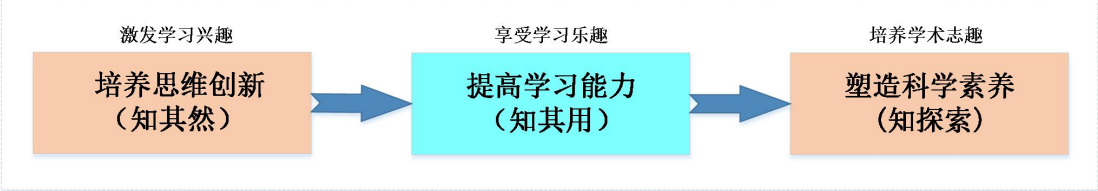


图 1 教学理念

➢ **教学活动设计**

1. 问题导入：通过新颖的建筑结构体系展示，使学生清楚本节课程的重要性。（**本环节 30 秒**）

2. 介绍学习目标：使学生一开始即知道本节课程的重点，强化印象。（**本环节 30 秒**）

3. 知识点介绍：通过虚拟教具的操作展示，加深学生对本节课的主要实验对象（**1 分 30 秒**）、实验设备（**1 分 20 秒**）和实验制度（**1 分 10 秒**）的了解（知其然）。（**本环节 4 分钟**）

4. 虚拟仿真实验案例实践：指导学生亲自动手完成实验模型的制作与安装全过程，并且操作大型抗火实验设备完成耐火实验，通过逼真的实验现象展现，使学生们能够加深理解，并享受学习乐趣（知其用）；（**本环节 4 分钟**）

5. 课后任务：布置课后任务，学生课后如玩游戏般完成建筑构件耐火虚拟仿真实验，在不知不觉中，已探索了后续课程的理论教学知识点（知探索）。（**本环节 30 秒**）

五、教学方法创新

依托建筑结构抗火实验教学平台，提高虚拟仿真实验的利用率，改进传统实验教学“高消耗、实验周期长、实验参数单一、实验参与度低”等不足，实现“多参数、多次重复以及全过程参与实验”。基于“基础-综合-创新应用”的递进关系，在满足教学大纲任务的前提下，将原来的“验证型实验”拓展为“综合设计型实验”和“创新型实验”，做到“基础模块全员化、综合模块菜单化、创新模块自主化”，加强土木工程专业人才创新能力和综合素质的培养，提升学生的行业竞争能力，具体而言：

（1）充实完善教学培养方案，推进实验实践教学改革。明确提出虚实结合的实验教学大纲。分别设置了常规实验项目、自主试验、试验技术研究等不同类型的实验项目，结合现有实体实验室的科研项目试验，提出基于虚实结合的多阶段、多层次实验的教学方案，强化不同类型课程及其综合实践环节的知识体系串联。

（2）强调学习自主性，“预习，学习，练习，考核”四位于一体，鼓励学生全方位、全过程参与并探索实验。学生通过上述连贯而系统的建筑结构抗火教学资源，可实现自主性学习，即通过“土木工程防灾与减灾 MOOC”进行理论知识点学习；通过“建筑结构抗火微试验”和“虚拟教具”进行虚拟实验实践学习，结合参观中国矿业大学工程结构火安全实验室加深理解；进而通过“建筑结构抗火虚拟仿真平台”，亲自动手完成实验任务。此外，充分体现“能实不虚、虚实结合”的教学理念，将学生原来只能参与部分环节的实验教学内容扩展到全方位与全过程，进一步强化学生实体实验的学习效果。学生可将探究科学原理的思想反映到实验设计和过程中，将原来的“验证型实验”演变为“综合设计型实验”和“创新型实验”。

（3）以趣为核，探索虚实结合的施教方案，实现实验实践教学与理论教学的高度融合。通过虚拟教具以及虚拟仿真平台，使学生学习过程具备良好的交互性，实现趣味性与严谨性相结合，游戏与学习相结合，学生有自由发挥的空间。例如：通过沉浸性的火灾实验现象使学生了解到混凝土结构如何通过改变截面尺寸以及保护层厚度等方式提高耐火性能，钢结构构件如何通过改变防火构造提高耐火性能，从而加深对结构抗火基本原理的正确理解等。

（4）融入工程技术和科学研究最新成果，以通俗易懂方式进行教学实现。开展“科研试验进课堂，趣味游戏进教学”等教学改革尝试，完善工程实践、科学研究实验教学方法及手段。围绕教学团队承担的科研项目以及所取得的科研成果[9-10]，利用配套课程改革、教学手段和教学方式创新过程，进一步依托科研优势进行教学软件资源开发，进一步丰富虚拟资源。

（5）线上与线下教学双轨并行，电脑网页版和手机版双终端共同支持，鼓励学生自由开展课后实践活动。考虑到课堂教学的时间有限，结合学生的日常学

习和生活习惯，通过手机客户端可以实时开展课后创新实践活动，能够自主使用虚拟仿真实验完成命题式作业，随时随地可以学习专业知识，并进行实时模拟考核，反复操作，做到及时查漏补缺，更有针对性地提高学生知识吸收效果和创新能力。

（6）践行“课程思政”育人理念，突出增强学生的社会责任感与担当意识。将安全教育融入学习的全过程，强化学生的安全与防护意识。通过高仿真度的虚拟呈现，让学生身临其境地去理解工程火安全，以及火灾对社会、对人民造成的巨大伤害，从而促使学生自觉建立起对社会的一份责任感与担当意识。

六、钢结构承重墙耐火虚拟仿真实验指导

采用虚实结合的实验方法，通过课堂理论学习，掌握基本实验理论和知识点；通过线上虚拟实验设备学习，并结合参观本校工程结构火安全重点实验室加深理解；通过本虚拟仿真实验在网页端的“学习模式”和“练习模式”，进行虚拟仿真实验线上学习与练习，结合手机端的 APP 程序进行线下学习与练习；通过命题式考核以及知识点考核，完成该课程的实验教学考核。

结构抗火实验部分展现了结构构件在火灾环境下的作用效应。根据真实情况下的建筑结构抗火试验流程，对虚拟仿真实验内容进行模块化设计。整体实验内容分为 5 个模块：实验认知与人员准备、实验模型的制作与安装、实验设备准备与控制、抗火实验开启与停止、实验结果分析与总结。

（1）实验认知与人员准备

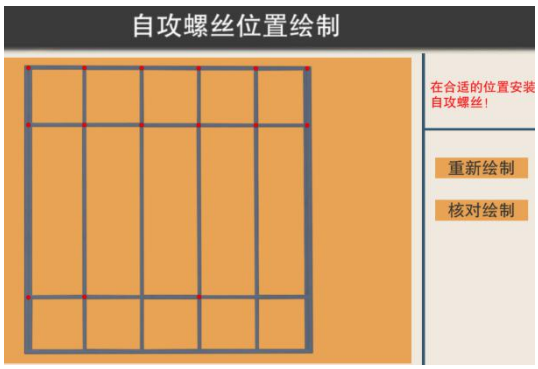
“实验认知与人员准备”模块中，点击“实验整体介绍”，通过知识点学习，对建筑结构抗火实验建立整体性认识。操作实验人员进入“更衣室”，换装实验工装，并学习实验室的安全与管理规定，强化学习者的实验室安全与防护意识。实验人员进入实验大厅后，通过漫游功能（图 2），可以在虚拟实验大厅行走，并通过点击大厅中虚拟设备的形式，了解抗火实验设备的相关功能。

图 2 虚拟实验大厅漫游功能

（2）实验模型制作与安装

“实验模型制作与安装”模块中，学习者根据所掌握的结构抗火设计基本原理，选定实验模型的基础参数，并且亲自动手完成实验模型的制作与安装全过程，从而加深对前期所学习的土木工程专业课程的认识。本模块中，学生利用鼠标对屏幕显示界面的实验材料进行拖拽或点击动作，进行实验模型的制作；通过控制屏幕显示界面的操作手柄，完成行车吊装作业以及抗火试验炉的行走等。实验模型的主要制作与安装过程均通过虚拟实操的形式实现，这在已有的土木工程虚拟仿真实验中并不多见。以钢结构承重墙虚拟实验模型为例，本模块的虚拟操作步达到 17 步，涉及钢龙骨骨架拼装（图 3a）、自攻螺钉布置与安装（图 3（b）、图 3（c））、行车吊装作业（图 3（d））、螺栓位置确定（图 3（e））与连接（图 3（f））、墙板安装（图 3（g）、（i））、填充层安装（图 3（h））、热电偶安装（图 3（j））等。虚拟实验过程中，正确完成了虚拟操作步骤，方可进行下一步实验操作。此外，考虑到本模块的虚拟操作步数较多，在屏幕上方界面设置“提示”功能，便于学生对操作步进行学习与掌握。

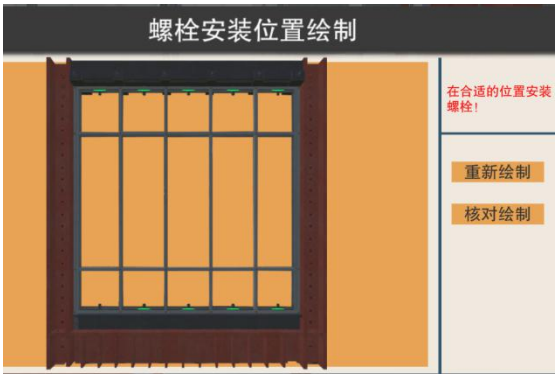
（a）钢龙骨拼装



（b）自攻螺钉位置绘制

（c）自攻螺钉安装

（d）钢龙骨骨架吊装

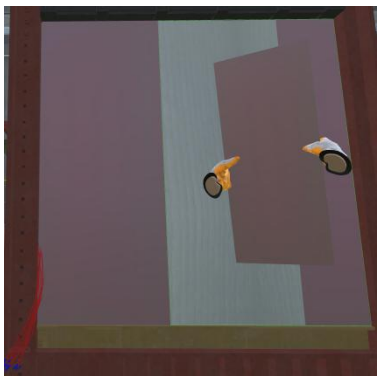


（e）螺栓安装位置绘制

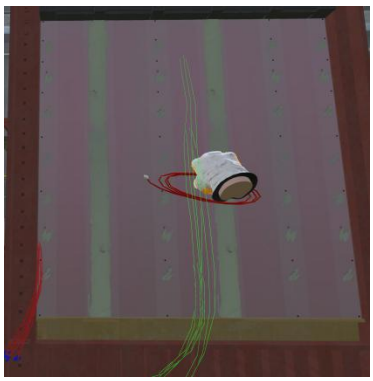
（f）螺栓安装

（g）背火侧基层墙板安装

（h）背火侧填充层安装



（i）背火侧面层墙板安装



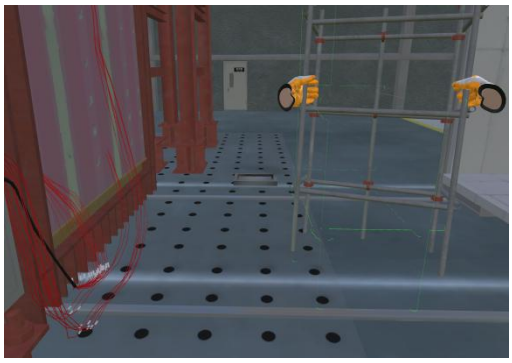
（j）热电偶线安装

图 3 实验模型制作与安装的部分操作步展示

（3）实验设备准备与控制

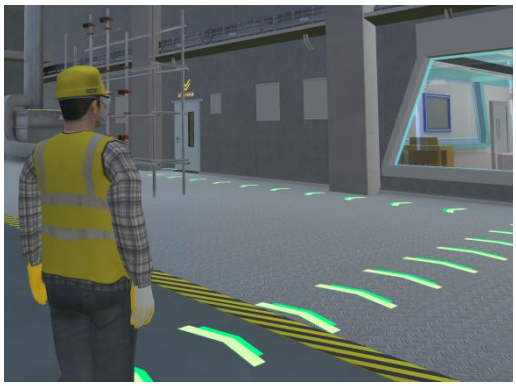
现实中的大型土木工程实验普遍都是由专业实验人员进行现场操作。利用虚拟仿真技术，可以使学生在“实验设备准备与控制”模块中，亲自操作大型抗火实验设备，加深其对建筑结构抗火试验的认识与理解。本模块的虚拟操作步共 7 步，学生控制大厅虚拟实验人员分别需要完成垂直抗火试验炉的移动与就位（图 4（a）），脚手架安装（图 4（b））、位移计安装、传感器与采集设备连接（图 4（c））；而后，根据实验大厅地面出现的引导提示（图 4（d）），进入实验控制室，分别完成加载系统与垂直抗火试验炉的相关控制操作（图 4（e）、（f）），完成抗火试验的准备工作。

（a）抗火试验炉移动与就位



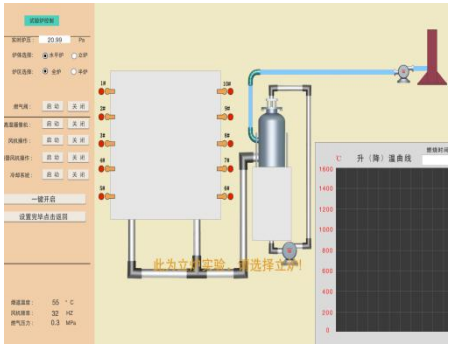
（b）脚手架安装

（c）传感器与采集设备连接



（d）实验大厅地面引导提示

（e）加载系统设置

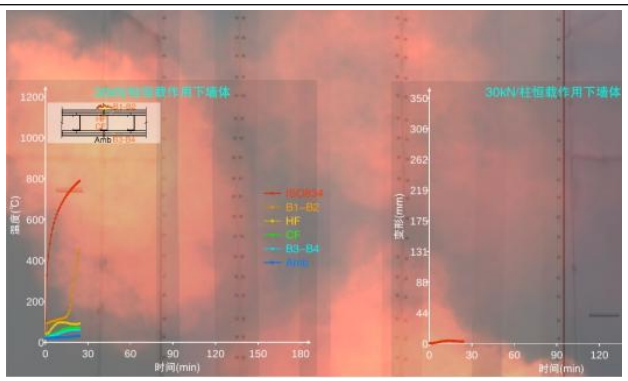


（f）抗火试验炉控制系统设置

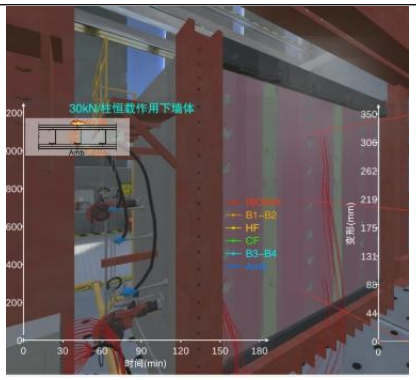
图 4 实验设备准备与控制模块的部分操作步展示

（4）抗火实验开启与停止

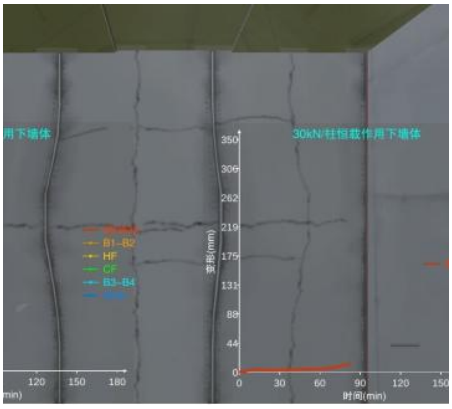
本模块中，点击“开始实验”，炉体点火，正式开启实验。实验过程中，可移动摄像机镜头，可切换炉内及炉外视角。本模块的突出特点是实时显示模型变形曲线及温度曲线（图 5（a）），并且真实呈现了实验模型受火烟气释放（图 5（b））、开裂（图 5（c））、防火板脱落（图 5（d））等重要的结构抗火实验现象。当模型变形过大或温度过高时，会提示停止试验（图 5（e）），点击“确认停止试验”后，实验停止；实验结束后点击“拆除”按键，可观察钢结构构件的受火屈曲模态（图 5（f））。



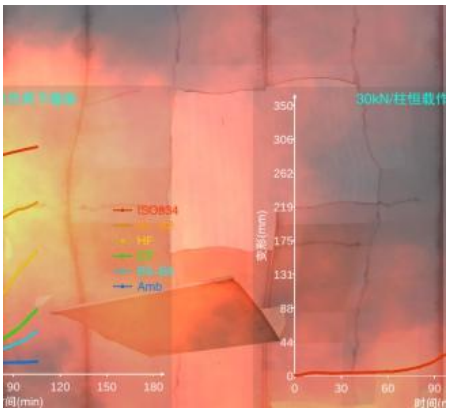
（a）模型变形曲线及温度曲线实时呈现



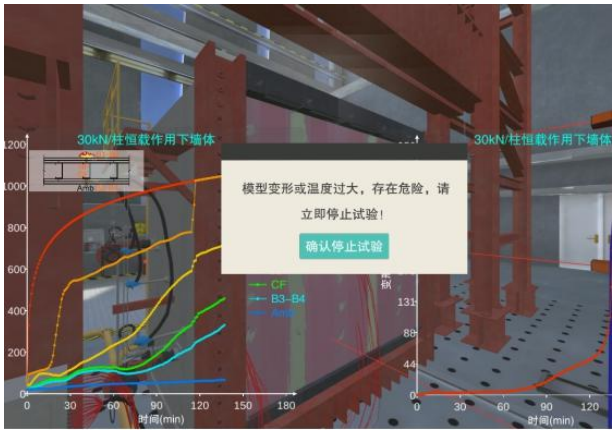
（b）试验中烟气释放



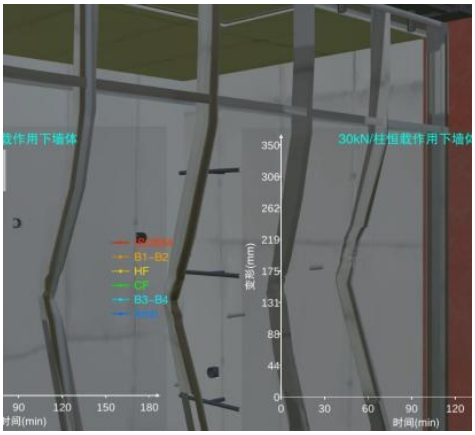
（c）实验中防火板开裂



（d）实验中防火板脱落



（e）实验停止前提示



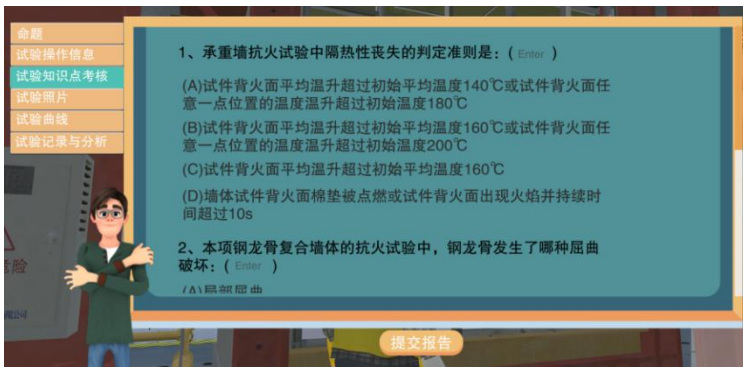
（f）钢结构受火屈曲

图 5 抗火实验开启与停止模块的部分操作步展示

（5）实验分析与总结

本模块中，点击“实验结果分析”，分析实验图像与结果曲线（图 6（a））；点击“实验报告”，进入实验报告填写界面，完成知识点考核题目（图 6（b）），填写实验记录，分析结果，提交报告。

（a）实验结果曲线



（b）实验报告中的知识点考核

图 6 实验结果分析与总结模块的部分操作步展示

七、参考资料

[1] 叶继红. 土木工程防灾[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2018

[2] 李国强，韩林海，楼国彪，蒋首超. 钢结构及钢—混凝土组合结构抗火设计 [M]. 北京：中国建筑工业出版社，2006

[3] GB51249 建筑钢结构防火技术规范[S]. 北京：中国计划出版社，2017.

[4] 汪洋，吴世勇，杨睿，王艳丽. 土木工程教学资源中虚拟仿真技术开发 [J]. 安徽建筑，2020，130-131

[5] 刘娟，白雪卫.虚拟现实技术在土木工程专业实习中的应用探索研究[J].大学教育，2017(6): 27-28

[6] 李炎锋，杜修力，纪金豹，李振宝. 土木类专业建设虚拟仿真实验教学中心的探索与实践 [J]. 中国大学教学，2014(9): 82-85

[7] 陈剑为，田君华，陈曦，仪萍，陈立宏，周长东. 土力学虚拟仿真实验模块的开发与建设[J].高等建筑教育，2018，27（6）：155-160

[8] 戴晓燕，刘超. 基于 BIM 技术的建筑工程虚拟仿真实训中心的建设研究 [J]. 实验技术与管理，2018，35（12）：237-240

[9] Wei Chen, Jihong Ye, Qingyang Zhao, Jian Jiang, Kun Liu, Meng Zhang, Changzheng Xu, Mid-scale and full-scale experiments of cavity-insulated gypsum and calcium-silicate sheathed CFS walls under different fire exposures [J], Thin-Walled Structures, 2020 (155), 106928

[10] Wei Chen, Jihong Ye, Qingyang Zhao, Jian Jiang, Full scale experiments of gypsum-sheathed cavity-insulated cold-formed steel walls under different fire conditions [J], Journal of Constructional Steel Research, 2020, 164, 105809