

新工科背景下土木工程材料实验教学创新——以混凝土（砂浆）3D打印材料实验为例

王南^{1,*}, 卫琳¹, 史欣鑫¹, 李嘉奇¹, 杨斌¹, 胡智淇¹, 刘昱¹

1. 辽宁科技大学, 土木工程学院, 辽宁 鞍山, 114051

摘要: 依据新工科建设发展需求, 土木工程实验课程向学科交叉与能力培养方向转型。传统土木工程材料实验教学模式存在内容滞后、验证性实验占比过高、学生自主探究空间不足等短板, 本文以混凝土（砂浆）3D打印材料的配合比设计、可打印性表征及硬化后力学性能测试开展实验教学设计, 阐述将3D打印技术引入土木工程材料实验教学的合理性与可行性, 并设计了初步的实验教学方案。该实验能够有效调动学生的学习积极性, 启发学生创新思维, 在完成既定教学计划的同时, 为学生提供充分的自主探索空间, 助力培养适配行业发展需求的土木工程复合型专业人才。

关键词: 新工科建设; 土木工程材料; 教学改革; 实验课程; 混凝土（砂浆）3D打印材料

Innovation in Experimental Teaching of Civil Engineering Materials under the Background of Emerging Engineering-Taking Concrete (Mortar) 3D Printing Material Experiment as an Example

Nan Wang^{1,*}, Lin Wei¹, Xinxin Shi¹, Jiaqi Li¹, Bin Yang¹, Zhiqi Hu¹, Yu Liu¹

1. School of Civil Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning, 114051, China

Abstract: In accordance with the development needs of emerging engineering construction, civil engineering experimental courses are shifting toward interdisciplinary integration and competency-oriented cultivation. Traditional experimental teaching models for civil engineering materials suffer from several drawbacks, including outdated content, an excessive proportion of verification experiments, and insufficient space for students' independent exploration. This paper conducts an experimental teaching design centered on the mix proportion design, printability characterization, and post-hardened mechanical property testing of concrete (mortar) 3D printing materials. It systematically elaborates the rationality and feasibility of introducing 3D printing technology into the experimental teaching of civil engineering materials and formulates a preliminary experimental teaching scheme. The proposed experimental teaching mode can effectively stimulate students' learning enthusiasm and innovative thinking. While fulfilling the established teaching requirements, concrete (mortar) 3D printing material experiment provides students with sufficient space for independent exploration, thereby facilitating the cultivation of interdisciplinary civil engineering professionals adaptable to the development needs of industry.

Keywords: Emerging engineering construction; Civil engineering materials; Teaching reform; Experimental courses; Concrete (mortar) 3D printing materials

新工科建设要求高等工程教育突破传统学科壁垒, 以“学科交叉、协同育人”为核心理念, 培养能

够引领未来产业发展的高素质复合型人才^[1]。土木工程材料作为土木工程专业最基础的专业课程之一,与材料力学、结构力学等偏重理论推导的课程不同,其显著特点在于理论与实践并重、知识与工程紧密关联。理论教学帮助学生建立对各类工程材料基本性能的系统认识,而实验教学则旨在通过亲自动手操作,使学生深入理解材料性能的测试原理与方法,培养其解决实际工程问题的能力。

土木工程材料课程在长期教学中形成了相对固化的模式,实验环节多以水泥、混凝土、钢材等传统材料的基础性能测试为主,与行业技术迭代之间存在明显脱节。当前实验教学普遍面临学时偏少、内容陈旧、方法传统等问题,学生被动接受、按部就班操作,教学效果难以满足新工科人才培养需求^[2-3]。3D打印技术作为智能建造领域的代表性方向^[4],近年来在国内外学术界和工程界均获得了广泛关注,相关研究成果不断涌现。将这一前沿技术引入本科实验教学,既能够拓宽学生的学术视野,又能够锻炼其跨学科综合能力。

基于上述背景,本文在梳理国内高校土木工程材料实验课程现状与改革经验的基础上,以混凝土(砂浆)3D打印材料实验为例,探索将前沿制造技术与传统材料实验相融合的教学改革路径,期为土木工程材料实验教学创新提供参考。

1 土木工程材料实验教学面临的问题

土木工程材料是土木工程类专业的重要专业基础课程,具有知识覆盖面广、工程结合紧密、实践性强的显著特点^[5],当前实验教学环节在教学内容、教学模式与考核评价三个方面的问题尤为突出。

1.1 实验教学内容滞后

从课程设置来看,绝大多数高校将土木工程材料课程分为理论讲授和实验操作两个模块,在同一学期内并行开展,实验课穿插于理论教学进程之中^[6]。现阶段土木工程材料实验教学内容数十年未完成迭代,教学大纲核心实验全部围绕普通硅酸盐水泥、混凝土、钢筋、石油沥青等传统建材^[7],未结合行业发展动态更新教学内容,如3D打印建材、超高性能混凝土等,教学内容与现代土木工程材料发展趋势脱节,难以支撑学生前沿专业能力培养。

1.2 实验以验证性操作为主体

国内高校的土木工程材料实验课程仍以基础性和验证性实验为主,包括水泥标准稠度用水量测定、砂石筛分分析、混凝土抗压强度测试等实验^[8]。实验流程高度程式化:教师讲解目的与步骤,学生按既定方案操作,最终得到实验数据。在这一模式中,学生以完成任务的心态参与实验,难以体验科学探索的过程。操作失误导致数据异常时,学生可以轻易修改数据或抄袭同伴结果,实验报告的同质化现象普遍存在,实验教学在培养科学探究能力方面的应有效能未能充分发挥。

1.3 实验考核的评价维度单一

当前实验课程考核主要依赖出勤记录与实验报告两项指标,实验报告质量评定侧重于格式规范与数据完整性。单一化的考核评价模式是传统实验教学体系的突出短板^[9],因此推进考核评价多元化已成为实验教学改革的重要方向之一。现阶段实验教学普遍采用小组协作模式,实际操作仅由少数学生完成,其他成员参与度有限,但最终成绩差异甚微。这种评价方式难以区分学生的实际参与程度、操作规范性与分析思维能力,认真参与者的积极性受挫,搭便车现象难以有效遏制。

2 国内高校土木工程材料课程实验改革措施

新工科背景下,国内众多高校针对土木工程材料实验教学短板开展改革探索,学者分别从教学方法、实验室管理、实验项目重构、课堂组织等角度提出实践路径。张爱莉等^[10]提出土木工程实验

可依托虚拟仿真、教学短视频等信息化教学资源，通过直观展示实验流程和仪器操作细节，有效弥补现场教学时间有限的不足。

丁铸等^[11]指出改革可以从实验组织管理、实验项目迭代优化两大方向推进。组织实施层面，要落实实验室开放制度，对接教师科研课题。在实验项目层面，在水泥基础实验中拓展水泥种类，支持小组间实验数据共享互证，混凝土相关实验可由师生联合设计复杂度更高的综合对比方案。

李福海等^[12]以聚丙烯纤维增强水泥基复合材料抗拉试验作为综合性实验进行教学设计，着重于实验本身对我国当前阶段建设的适用性和时效性，借助新材料激发学生的学习兴趣 and 动力，为学生提供创新思考、独立创作的空间，这样既可以高效地完成实验教学计划，还可极大地达到培养学生实践动手和创新能力的教学目的。

综合国内多所高校的改革实践可以看出，现有改革更多偏向教学形式优化，在实验项目创新、探究型实验开发方面仍存在提升空间。

3 混凝土（砂浆）3D 打印材料实验

3.1 实验目的

本实验作为土木工程材料课程的综合实验环节，面向智能建造专业本科生开设，共 5 学时。实验以评价 3D 打印材料的打印性能为核心任务，通过检测流变性、挤出性、建造性及抗压强度等关键指标，使学生达成以下学习目标：

知识层面：了解混凝土（砂浆）3D 打印的基本原理与工艺流程，掌握可打印性能各关键指标的定义、测试方法及工程意义。

能力层面：能独立操作 3D 打印设备完成材料挤出成型，能根据测试数据分析不同配合比的打印性能差异，并能提出配合比或工艺参数的调整方案，初步具备“设计—测试—评价—优化”的工程决策能力。

素养层面：体验多学科知识的综合运用，建立材料设计与工艺协同优化的创新思维，培养团队协作精神和工程实践能力，契合新工科复合人才的培养定位。

3.2 实验材料与设备

原材料：轻烧氧化镁、七水硫酸镁、柠檬酸、河砂（≤1.3 mm）、硅灰、粉煤灰、硼泥、聚丙烯纤维、自来水。

主要仪器设备：混凝土流变仪、框架式混凝土（砂浆）3D 打印系统（含三轴运动平台、螺杆挤出泵送装置及配套控制软件）、微机控制电子万能试验机、电子天平（感量 0.1 g）、钢尺。

3.3 配合比设计

本实验所选用的水泥为硫氧镁水泥，硫氧镁水泥主要由轻烧氧化镁（MgO）、七水硫酸镁（MgSO₄·7H₂O）和水（H₂O）组成，该材料具有绿色低碳的环保特性。实验前，各小组成员需查阅相关文献，自主设计配合比方案，通过添加工业固废、纤维等方式，以改善混凝土（砂浆）3D 打印材料的流变性能、挤出性、建造性及硬化后的抗压强度。各组实验配合比见表 1。

表 1 混凝土（砂浆）3D 打印材料配合比

Table 1 Mix proportion of concrete (mortar) 3D printing materials

组号	摩尔比	柠檬酸/%	砂/%	硅灰/%	粉煤灰/%	硼泥/%	聚丙烯纤维%
1	9:1:20	0.5	0.8	5	10	0	0
2	9:1:20	0.5	0.8	5	10	0	1
3	9:1:20	0.5	0.8	5	10	10	1

注：9:1:20 为 $\alpha\text{-MgO}:\text{MgSO}_4:\text{H}_2\text{O}$ 的摩尔比， $\alpha\text{-MgO}$ 指的是轻烧氧化镁中的活性氧化镁，柠檬酸、砂、粉煤灰、硼泥及聚丙烯纤维的掺入量是指占轻烧氧化镁质量的百分比。

3.4 实验操作流程

(1) 材料拌合。按表 1 配合比称量各原材料。将轻烧氧化镁、硅灰、粉煤灰等干料投入搅拌机，低速搅拌 60 s 至混合均匀。将七水硫酸镁与柠檬酸预先溶于拌合水，充分搅拌后加入干料，先低速搅拌 90 s，再高速搅拌 60 s，得到 3D 打印材料。

(2) 流变性测试。3D 打印材料拌合完成后 3 min 内取样，置于混凝土流变仪中，按预设程序进行动态剪切测试。

(3) 挤出性。连续打印长度 ≥ 100 d，层厚 >0.5 d 的打印条带；观测打印条带的表观质量，应无肉眼可见的撕扯断裂等现象；在条带宽度方面，测量 5 个间隔不小于 10 d 的不同位置处的打印条带宽度，计算平均值和偏差，偏差宜控制在 $\pm 5\%$ 以内；在条带厚度方面，测量 5 个间隔不小于 10 d 的不同位置处的打印条带厚度，计算平均值和偏差，偏差宜控制在 $\pm 5\%$ 以内。

(4) 建造性测试。在逐层堆叠的过程中，在堆叠方向上不发生或仅发生允许的压缩变形、在打印条带宽度方向上不发生或仅发生允许的扩展变形，堆叠形成的 3D 打印制品不发生屈曲、倒塌、整体尺寸不随时间发生明显改变的性能，如图 1 所示。



图1 建造性测试

Fig.1 Constructive testing

(5) 抗压强度测试。当 3D 打印混凝土打印条带宽度不超过 75 mm 且厚度不超过 45 mm 时，打印条带 $50\text{ mm} \leq \text{宽度} < 75\text{ mm}$ 或 $30\text{ mm} \leq \text{厚度} < 45\text{ mm}$ ，3D 打印制品横截面最小尺寸为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ ；打印条带 $35\text{ mm} \leq \text{宽度} < 50\text{ mm}$ 或 $20\text{ mm} \leq \text{厚度} < 30\text{ mm}$ ，3D 打印制品横截面最小尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ，3D 打印制品的抗压强度测试方法应符合 GB/T 50081。

3.5 教学组织与成果要求

教学组织：基于 BOPPPS 教学模式，实施“三段式”线上线下混合教学。课前阶段（线上），教师发布实验课程学习任务，学生通过超星泛雅平台自主学习；课中阶段（线上+线下），以 3D 打印建筑构件等与实验课程相关的真实工程案例导入，学生展示实验方案；课后，推送与实验相关的拓展资源，结合问卷调查进行实验教学方案调整。实验采用 4 人一组进行，每组负责 1 组配合比方案的全部测试。各小组完成本组实验后，将数据汇入班级总数据库，实现不同配合比实验数据共享与对比分析。实验教师在各环节巡回指导，重点检查学生设备操作的规范性与数据记录的真实性。

成果要求：学生须提交实验记录与实验报告。原始数据记录表应包含各项测试的原始读数及计算过程，数据修改处须签名确认。实验报告正文包括实验目的、原理、仪器设备清单、操作步骤、数据汇总与分析、思考题解答，及组内互评和自评小结。

4 实验考核评价

为克服传统考核方式维度单一、区分度不足的弊端，本实验构建了全过程的多元评价机制，具体权重分配见表 2。

表 2 实验课程多元评价权重分配
Table 2 Weight allocation for multivariate evaluation of experimental courses

评价主体	权重	评价重点与观测点
教师评价	80%	设备操作规范性、数据记录真实性与完整性、实验报告分析
组内互评	10%	每位成员在材料制备、性能测试、数据整理等环节的实际贡献与协作态度
自我评价	10%	学生对自身学习收获、不足及改进方向的反思深度

注：权重可根据教学实际适当调整。

教师评价是考核体系的主体部分。其评价重点涵盖三个维度：（1）设备操作的规范性——考察学生是否按照标准流程操作仪器、是否遵守安全规范、是否在操作中体现出对设备原理和注意事项的理解；（2）数据记录的真实性与完整性——通过核对原始记录表与报告数据的吻合性、对异常值的处理是否合理等方面予以判断；（3）实验报告的分析质量——着重评价报告中的数据分析是否深入、对比讨论是否有的放矢、机理解释是否具备逻辑自洽性，而非仅仅关注格式规范和数据是否完整。

组内互评旨在弥补教师评价难以有效识别个体贡献差异的不足。互评由各小组成员在实验完成后匿名进行，每位成员对其他成员在材料制备、性能测试、数据整理等环节的实际参与程度和工作质量进行评分，并提交简明的评价依据说明，教师可对明显不合理的互评结果进行核查与调整。组内互评机制的引入，一方面有助于客观反映个体的实际参与程度，另一方面可在组内形成积极的正向激励，促使每位成员主动投入。

自我评价旨在引导学生养成主动反思的学习习惯。自我评价侧重于过程反思而非结果辩解，教师通过提供结构化的引导问题，帮助学生聚焦反思方向。引导问题可包括：（1）本人在本次实验中最具收获的环节是什么？为什么？（2）在实验过程中遇到了哪些困难？是如何解决的？（3）对 3D 打印材料可打印性能的理解较实验前有了哪些深化？（4）如果有机会重做一次，会在哪些方面做出改进？学生在回答上述问题的基础上，形成自我评价报告，并给出自评分数及依据。

5 结语

本文立足新工科复合人才培养需求，针对传统土木工程材料实验教学内容陈旧、模式固化、评价单一等短板，以混凝土（砂浆）3D 打印材料为载体，设计了一套涵盖流变性、挤出性、建造性及抗压强度四项指标的综合实验教学方案，并从教学目的、操作流程、配合比设计、多元评价机制等方面进行制定。该实验教学方案将前沿 3D 打印技术引入传统土木工程材料实验课程，有助于激发学生的学习兴趣与创新思维，培养其团队协作能力和与工程实践能力。后续将在虚拟仿真辅助教学、校企合作案例库建设及多元评价体系完善等方面继续深化探索，进一步推动土木工程材料实验教学的高质量发展。

参考文献

[1] 张琦, 穆保岗, 田龙岗, 等. “地下结构工程—智能建造”交叉课程体系建设的探索与实践[J]. 大学教育, 2025, (9): 1-5.

[2] 王信刚, 胡明玉, 丁成平. 土木工程材料课程教学改革和效果评价[J]. 高等建筑教育, 2015, 24(2): 60-63.

[3] 刘强, 吴荆凯, 胡文韬, 等. 水泥基 3D 打印技术在岩石力学教学实验中的应用[J]. 实验技术与管理, 2024, 41(9): 199-205.

- [4] 何春, 陈珂, 骆汉宾, 等. 建筑 3D 打印线上线下混合教学模式创新与实践[J]. 高等建筑教育, 2024, 33(6): 136-143.
- [5] 黄显彬, 邹祖银, 廖曼, 等. 土木工程材料课程试验与创新——以水泥混凝土抗渗试验为例[J]. 高等建筑教育, 2017, 26(2): 119-123.
- [6] 王南, 史欣鑫, 卫琳, 等. 新工科背景下智能建造专业人才培养模式探索与实践——以土木工程材料课程为例[J]. 中国科学与技术学报, 2026, 2(3):145-149.
- [7] 陈红光, 刘东, 马鋈臣, 等. 建筑材料实验课程教学改革的探讨与实践[J]. 科技资讯, 2010, (7):175-176.
- [8] 陈嵘, 靳贺松, 杨世玉, 等. 建筑材料课程“六位一体”教学模式的改革探索及应用[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2021, 46(10): 146-152.
- [9] 李盼盼, 郝丽娜, 李微. 土木工程材料开放性实验教学改革研究与实践[J]. 太原城市职业技术学报, 2024, (7): 132-134.
- [10] 张爱莉, 华建民, 王志军, 等. 基于互联网+的土木工程生产实习教学改革及实践[J]. 高等建筑教育, 2019, 28(5): 124-133.
- [11] 丁铸, 孙坤, 刘伟, 等. 土木工程材料实验教学组织与实施[J]. 实验技术与管理, 2008, 25(1): 116-128.
- [12] 李福海, 靳贺松, 王江山, 等. 土木工程材料课程实验创新探讨——以纤维水泥基材料抗拉综合性能试验为例[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(1): 185-190.

基金项目: 2025 年辽宁科技大学本科教学改革研究项目: 新工科背景下的多学科交叉融合智能建造专业人才培养 (XJJG202544); 2025 年度实验教学改革项目: 新工科背景下基于“OBE+BOPPPS”模式的《土木工程材料》实验课程教学改革探索与实践 (2025XNFZ-25476); 2025 年校级产学研合作协同育人项目: 绿色节能及碳排放师资培训班 (250904699290548)

^{1,*}第 1 作者&通讯作者简介: 王南 (1990-), 女, 博士研究生, 讲师, 研究方向: 镁质胶凝材料。E-mail: wangnan@ustl.edu.cn。