

面向智能建造的《土木工程材料》课程构建与教学模式创新

杨兆源*, 武海鹏#

中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京

收稿日期: 2026年8月14日; 录用日期: 2026年9月14日; 发布日期: 2026年9月23日

摘 要

面向智能建造发展需求, 创新构建了《土木工程材料》课程知识体系, 进行了实践教学模式改革探索。融合智能建造和先进土木工程材料新知识、新技术, 设计了由基础模块、前沿模块、工程应用模块组成的《土木工程材料》课程理论知识体系。结合智能建造工程场景, 依托混凝土3D打印技术, 创新了《土木工程材料》课程实践教学模式。探索了以线上、线下相结合的课程竞赛为载体的理论和实践考核模式。形成了面向智能建造的《土木工程材料》课程, 通过“理论-实践-竞赛”教学模式, 培养了学生的科学素养和科研探索能力, 为土木工程专业课程改革提供参考。

关键词

《土木工程材料》课程, 智能建造, 知识体系创新, 教学模式创新

Curriculum Construction and Teaching Mode Innovation of “Civil Engineering Materials” Oriented to Intelligent Construction

Zhaoyuan Yang*, Haipeng Wu#

School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing

Received: August 14, 2026; accepted: September 14, 2026; published: September 23, 2026

*第一作者。

#通讯作者。

Abstract

In response to the development demands of intelligent construction, this paper innovatively constructs the knowledge system for the course “Civil Engineering Materials” and explores the reform of its practical teaching mode. Integrating new knowledge and technologies of intelligent construction and advanced “Civil Engineering Materials”, a theoretical knowledge system for “Civil Engineering Materials” is designed, which consists of basic module, frontier module and engineering-application module. Combined with practical scenarios of intelligent-construction projects and relying on concrete 3D-printing technology, the practical teaching mode of Civil Engineering Materials is innovated. A theoretical-and-practical assessment mode based on online-offline integrated curriculum competitions is explored. The course “Civil Engineering Materials” oriented to intelligent construction is established. Adopting the “theory-practice-competition” teaching mode, students’ scientific literacy and research-exploration capabilities are cultivated. Provide a reference for the curriculum reform of traditional civil engineering majors.

Keywords

“Civil Engineering Materials” Course, Intelligent Construction, Knowledge-System Innovation, Teaching-Mode Innovation

Copyright © 2026 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. 引言

2025 年 8 月, 工业和信息化部等六部门印发《建材行业稳增长工作方案(2025-2026 年)》¹, 要求: 推进建材行业数字化转型和绿色低碳改造, 实施“人工智能 + 建材”行动。2025 年 10 月, 工业和信息化部《建材工业鼓励推广应用的技术和产品目录(2025 年本)》², 指出: 应促进建材工业新技术、新产品推广应用, 加快建材行业高端化、智能化、绿色化转型升级。因此, 创新面向智能建造的《土木工程材料》课程知识体系设计, 探索适应智能建造的《土木工程材料》实践教学模式, 是培养智能建造与土木工程复合型人才的需求, 也是推进建筑业转型升级的重要保障。

智能建造与土木工程材料交叉领域教学改革与创新研究是教育和工程领域关注的焦点。郑召等[1]对“中国式教育现代化”和“新工科”建设背景下土木工程材料课程改革进行了探索, 从课程思政、产教融合、智能建造等方面开展土木工程材料课程的教学改革研究。龙丽芳等[2]综述了智能土木工程的研究概况, 分析了智能材料的特征和工程应用, 展望了智能土木工程的发展前景。刘强等[3]以水泥基 3D 打印圆形隧道模型实验教学为例, 设计出建模仿真模块、材料设计模块、打印分析模块等实验教学内容。将实践教学内容嵌入智能建造专业相关课程, 构建了虚实结合育人路径。谭朝明[4]针对《土木工程材料》课程, 采用虚拟仿真实验教学技术, 并与工程案例相结合, 加强过程性考核, 促进学生积极参与实验课堂。方园等[5]以土木工程材料课程为例, 探究改革的措施。开发融合虚拟仿真、增强现实(AR)技术、虚拟现实(VR)技术的数字化教学资源, 创新案例教学与项目驱动的混合式教学方法, 建立了实践平台。

¹https://wap.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2025/art_c73c2f6a0f20465aa92c360daa08619b.html

²https://wap.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/gg/art/2025/art_08ee9e7e1c1d4e1691bb6ea039357f24.html

但现有教改仍存在明显局限, 多数研究侧重传统材料在智能建造场景下的应用展示, 缺少对智能建造和土木工程材料交互逻辑的系统性分析和应用; 课程内容碎片化, 尚未建立材料性能、数字化设计、智能施工、智慧运维的完整知识链条; 对材料需要具备的可感知、可调控、可循环等内在属性挖掘不足; 理论、实践、考核之间缺少闭环联动, 未能从课程体系层面回应智能建造对材料人才的能力要求。

先进土木工程材料快速发展迭代, 为智能施工和运维提供了物质基础, 大幅提升了建造效率与结构安全性, 有力推动了智能建造学科及工程应用的发展[6][7]。同时, 智能建造的发展也要求土木工程材料具备可感知、可调控、可循环的技术特征[8][9], 适配智能机械与机器人的标准化施工要求, 实现结构状态的实时监测, 进而推动“先进材料、智能施工、智慧运维”的全链条产业升级[10]。因此, 土木工程材料和智能建造可相互赋能、协同推进, 共同助力建筑行业向高效、绿色、安全、智慧的高质量发展转型。

本研究对智能建造在土木工程材料课程中的内涵做出界定: 在设计方面实现土木工程材料的数字化、智能化设计与性能预测; 在材料方面发展具备自感知、自诊断、自修复、低碳可循环的先进功能材料; 在施工方面适配机器人增材制造等自动化施工装备的材料流变与工艺特性; 在运维方面依托智能材料实现结构状态感知与服役调控。进而形成材料性能、智能设计、自动化施工、智慧运维的全面发展。

本研究结合《土木工程材料》课程教学, 将与智能建造场景结合的土木工程材料基础理论、技术方法、工程实践融入教学, 构建面向智能建造的《土木工程材料》课程知识体系; 创新“理论-实践-竞赛”教学模式, 优化课程考核方法。使学生深入理解并掌握满足智能建造需求的土木工程材料前沿知识, 推动智能建造与土木工程材料课程深度融合。

2. 研究路线与培养目标

2.1. 研究路线

面向智能建造的《土木工程材料》课程设计与实践教学研究路线如图1所示, 本研究对课程理论知识体系、实践教学模式、考核方法进行了创新研究: 1) 构建了包括基础模块、前沿模块、工程应用模块的理论知识体系。涵盖建筑金属材料、无机非金属材料等土木工程材料的基本理论和性质; 形状记忆合金、智能混凝土材料、低碳混凝土材料、高性能复合材料等前沿土木工程材料的组成、性能和应用; 土木工程材料智能设计; 先进土木工程材料的智能建造工程实践。2) 建设了面向智能建造的《土木工程材料》的实践教学新模式。依托混凝土3D打印机器人, 进行了智能建造场景下的混凝土构件3D打印实践教学。3) 创新了课程考核模式, 通过组织线上和线下相结合的课程竞赛替代传统考试考核, 考察学生基础知识掌握情况, 并进一步激发学生的求知欲, 加强主观能动性, 提高创新能力。

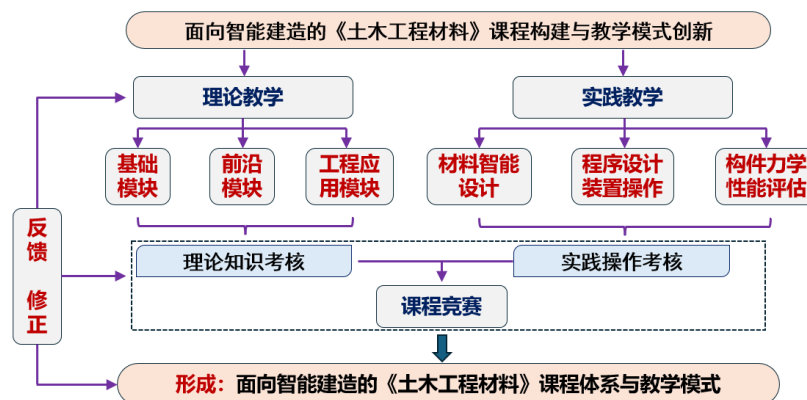


Figure 1. Research framework
图1. 研究路线

2.2. 培养目标

面向智能建造的《土木工程材料》课程适用于土木工程、智能建造专业，定位为专业必修课，涉及材料学、工程力学、机器人学、控制科学等学科。本课程共 32 学时，其中理论学时数为 28 学时，实践学时数为 4 学时。面向智能建造的《土木工程材料》培养学生具备以下专业能力。能力 1：掌握土木工程材料的基础理论、基本方法和研究手段，以及传统土木工程材料的基本构成、技术性质、力学性能。能力 2：掌握智能土木工程材料的前沿知识，具备面向智能建造的土木工程材料试验技能和实践能力，能够针对实际工程问题综合运用专业知识和技术手段设计、开发满足智能建造特定需求的材料、结构、构件、节点、施工方案。能力 3：理解土木工程材料与智能建造的辩证发展关系，注重行业与社会、环境和可持续发展的关系，具有创新能力和国际视野，推动土木工程材料与智能建造的创新融合发展。

2.3. 课程设计的教育学与认知心理学逻辑

本课程构建的“基础模块、前沿模块、工程应用模块”理论知识体系及“理论、实践、竞赛”的培养模式，以建构主义、布鲁姆教育目标分类、做中学理论(Learning-by-doing)为依据。依据建构主义：基础模块作为学生对本课程知识的认知基本框架，保留土木工程材料中微观、组分、性能的相互关联与影响的逻辑链条，为智能土木工程材料的前沿知识内容打下基础，避免认知断层。各课程模块遵循递进契合布鲁姆目标分类，即基础模块侧重记忆理解，前沿模块完成程序性知识讲解，工程应用模块通过真实案例训练知识向工程场景的迁移。实践环节依托 3D 打印平台，达到“做中学”的培养目标，促进对抽象知识模型的具象化认知。课程竞赛“以赛代考”以迁移学习理论为基础，设计了多目标优化的综合考察方法，促使学生整合分散知识，训练整体化思考与创新能力，提升内在学习动机。

3. 理论知识体系

面向智能建造的《土木工程材料》课程的理论知识体系分为基础模块、前沿模块、工程应用模块，理论知识体系设计列于表 1。

Table 1. The theoretical knowledge framework of the course
表 1. 理论知识体系

教学模块	教学内容	知识重点	学时
基础模块	第 1 章 土木工程材料概论	土木工程材料的起源与发展；土木工程材料的基本理论和性质	1
	第 2 章 建筑金属材料	建筑金属材料的微观结构、化学组成；建筑金属材料的物理、力学性能	2
	第 3 章 建筑无机非金属材料	建筑无机非金属材料的基本组成；建筑无机非金属材料的物理、力学性能	2
前沿模块	第 4 章 智能土木工程材料概论	智能土木工程材料的概念；智能土木工程材料的类型与基本性质	2
	第 5 章 形状记忆合金	形状记忆合金的概念；形状记忆效应及形状记忆合金的工作原理；形状记忆合金的分类；形状记忆合金在智能建造中的应用	3
	第 6 章 智能水泥基材料	传感器与智能元件；损伤自诊断智能混凝土；自修复、自调节、自控温智能混凝土；压电混凝土；智能混凝土的制造与施工；智能混凝土在智能建造中的应用	4

续表

	第7章 建筑与工矿固废混凝土材料	建筑固废再生混凝土;多源固废高效利用混凝土;固废精细资源化装置与产品;低碳混凝土材料的工程应用	4
	第8章 3D 打印混凝土材料	3D 打印混凝土基本理论与性能;3D 打印混凝土设计与性能调控;3D 打印混凝土在智能建造中的应用	4
	第9章 混凝土智能设计	混凝土配合比智能设计原理;混凝土物理力学性能智能预测;混凝土配合比计算设计软件	3
工程应用 模块	第10章 智能材料在结构振动控制中的应用		1
	第11章 混凝土3D 打印技术在智能建造中的应用		1
	第12章 形状记忆合金在城市更新中的应用		1

基础模块主要讲解基本理论知识,共三章内容。第1章土木工程材料概论梳理了土木工程材料的发展历程和基本理论,重点建立材料组分、微观结构与宏观性能的关联逻辑链条。第2、3章分别介绍了土木工程领域的两种重要材料,即建筑钢材和无机胶凝材料。重点讲解建筑钢材的化学组成、微观结构、物理特性、力学性能等,为后续形状记忆合金教学做铺垫。第3章建筑无机非金属材料围绕水泥、普通混凝土、砂浆等,解析矿物组成、水化反应过程,重点讲解强度、耐久性等物理力学性能。与传统土木工程材料课程相比,本课程的基础模块保留了与智能土木工程材料强相关的基本理论和分析方法,弱化了传统土木工程材料制备工艺、施工方法等内容。

前沿模块是本课程核心知识板块,聚焦与智能建造相关的新型功能性材料及其设计制备技术,共六章内容。第4章智能土木工程材料概论:界定智能土木工程材料可感知、自修复、可调控核心特征,介绍智能土木工程材料的构成与分类,阐明其发展趋势,进而搭建智能土木工程材料的知识框架。第5章形状记忆合金:阐释记忆效应机理、形状记忆合金分类及其在智能建造中的应用。第6章智能水泥基材料:系统讲解自诊断、自修复、压电混凝土及内嵌传感元件制备与运维应用。第7章建筑与工矿固废混凝土材料:响应固废资源化政策,重点讲解多源固废资源化再生混凝土性能调控技术。第8章3D打印混凝土材料:围绕机器人施工需求,重点讲解打印材料流变特性与性能调控方法。第9章混凝土智能设计介绍配合比智能算法、性能预测模型与设计软件,培养土木工程材料数字化、智能化设计能力。

工程应用模块共三章,强化理论知识与智能建造工程场景的融合化教学。第10章结合高层、大跨建筑案例,讲解智能材料在结构振动控制中的实现路径;第11章依托智能建造机器人工程实例,分析3D打印混凝土构件的材料设计与施工方案;第12章面向城市更新场景,介绍形状记忆合金在老旧建筑加固与修复中的应用。工程应用模块以真实工程案例强化学生对智能土木工程材料理论的理解,重点训练学生结合建筑结构服役需求完成智能土木工程材料选型的工程思维,为后续实践教学与课程竞赛提供案例支撑。

面向智能建造的《土木工程材料》课程的理论知识体系遵循“夯实基础理论、掌握前沿技术、面向工程应用”的逻辑,打通“高性能材料、数字化设计、自动化施工、智能化运维”知识链条,实现土木工程材料与智能建造学科的深度交叉融合。

4. 实践教学

以螺旋配筋模板钢筋混凝土组合柱预制构件智能化制备为工程背景,依托HC1008混凝土3D打印试验平台开展实践教学,总计4学时。实践教学设置配合比智能设计、3D打印程序设计、3D打印装置操作3个部分,并将3D打印预制构件力学性能评价作为自学探索部分,培养学生创新能力。

配合比智能设计部分进行 3D 打印低碳砂浆的智能设计示范教学, 指导学生采用硅灰、快硬硫铝酸盐水泥等工业固废替代部分水泥实现减碳, 并结合多目标智能优化模型, 将流动性、坍落度、凝结时间作为性能约束指标, 限定水胶比、砂胶比区间, 计算并输出最优配合比。3D 打印程序设计部分依托 SolidWorks 和 CIICRobot 切片软件展示混凝土 3D 打印数字化编程。指导学生分别建立无筋、螺旋配筋两种永久模板的三维模型, 结合搅拌倍率和钢丝挤出速度, 合理设置打印条带宽度、标准层高、填充路径等。完成工艺轨迹仿真, 提前识别钢丝翘曲、条带凹陷等成型缺陷, 修正 G 代码打印指令, 完成建模、切片、仿真、程序输出的数字化设计流程。3D 打印装置操作部分以加装步进同步送筋系统的 HC1008 打印机为实操设备, 指导学生分组完成材料拌合、设备校准、实体打印流程, 分别打印无筋、螺旋配筋圆柱模板, 实时监控条带均匀度, 成型后测量构件直径、层高, 掌握智能打印设备调试与现场成型管控操作技能。

3D 打印预制构件力学性能评价为实践教学的自由探索部分, 组织对相关内容感兴趣的同学组成学习小组, 设计并配制再生骨料混凝土, 将再生骨料混凝土作为填充物浇注在无筋圆柱模板和螺旋配筋圆柱模板内, 形成无筋圆柱模板钢筋混凝土组合柱和螺旋配筋圆柱模板钢筋混凝土组合柱试件。对试件开展轴压性能试验, 分析试件的承载力、刚度、变形能力, 研究 3D 打印模板、再生粗骨料混凝土、螺旋配筋等因素对试件抗压能力的影响, 进一步培养学生的科研实践能力。

5. 课程竞赛

面向智能建造的《土木工程材料》课程创新采用课程竞赛替代传统闭卷考核, 设立以“用于 3D 打印的低碳混凝土配合比设计”为主题的课程竞赛, 构建以理论分析、材料设计、试验测试、综合评估的考核模式, 实现以赛代考、以赛促学, 补齐传统考试重理论记忆、轻知识体系综合应用、缺工程实践考核的短板, 响应建筑行业智能化、绿色化转型人才培养需求。

5.1. 课程竞赛设计

竞赛采用小组协作模式, 班级成员自由组队, 每队成员人数为 2~3 人。任课教师可提供答疑指导, 但不参与线上理论考试和线下配合比计算、混凝土配制、力学性能测试等环节。

竞赛所用粉体原材料由实验室统一提供, 包含硅酸盐水泥、粉煤灰、矿粉、尾矿微粉等固废低碳胶凝材料; 学生若拟采用新型低碳矿物掺合料, 可提前提交性能检测申请, 经实验室检验合格后方可使用。竞赛的配合比设计、混凝土配制、试验检测遵循《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》³GB/T 50080-2016、《混凝土物理力学性能试验方法标准》⁴GB/T 50081-2019、《普通混凝土配合比设计规程》⁵JGJ 55-2011 等标准规范的规定。试验仪器、模具、计量设备等与课程实践教学中所采用的仪器、设备一致。

5.2. 考核内容

课程竞赛包括线上理论知识考核和线下实践操作考核两部分。课程竞赛总分为 100 分, 理论知识考核和实践操作考核各占 50 分。学生个人得分为个人理论知识考核得分与团队实践操作考核得分之和, 团队得分为本团队各成员理论知识考核得分的平均分与团队实践操作考核得分之和。学生个人得分为本课程成绩, 团队得分作为推荐参加“全国低碳混凝土配合比设计大赛”的依据。

5.2.1. 理论知识考核

理论知识考核采用 40 分钟闭卷机考形式, 题型分为单项选择题与多项选择题。考核内容覆盖土木工

³<https://www.soujianzhu.cn/NormAndRules/NormContent.aspx?id=1931>

⁴<https://www.soujianzhu.cn/NormAndRules/NormContent.aspx?id=1572>

⁵<https://www.soujianzhu.cn/NormAndRules/NormContent.aspx?id=1498>

程材料基础理论、混凝土配合比设计原理、固废基低碳胶凝材料工作机理等,同时融入课程前沿模块低碳混凝土设计、3D 打印混凝土设计、混凝土智能配比设计等知识点,全面考察学生基础理论与智能土木工程材料交叉知识的综合储备。

5.2.2. 实践操作考核

用于 3D 打印的低碳混凝土配合比设计(10 分):各小组提交完整配合比设计书,任课教师从方案科学性、固废掺配减碳合理性、力学性能、计算过程规范性、工程经济性五个方面评分,重点鼓励多源固废复合掺配、高比例工业固废替代水泥的低碳设计方案。

现场制备与测试(20 分):实操总时长上限为 60 分钟,计时起点为首份原材料称量,结束节点为仪器清洗、试验场地全部清理完毕,超时扣分。实操流程包含原材料计量、机械拌合、坍落扩展度、表观密度检测、立方体试件成型。评分点聚焦计量规范度、拌合工艺合理性、性能试验操作标准度、小组分工协作有序性。

立方体抗压强度试验(10 分):每组制备成型三组边长 100 mm 立方体试件,由实验室统一完成拆模与标准养护,养护满 28 天后集中开展抗压试验,依据国家标准对实测强度进行换算打分。

低碳性与经济性综合评价(10 分):依托配合比测算固废资源化利用率、单位体积混凝土碳排放量、原材料综合成本综合打分,对兼顾高固废掺量、低碳排放、低成本的多目标优化配比予以加权加分,引导学生建立“力学性能、绿色低碳、工程成本”全过程协同设计思维。

5.3. 实施流程

课程竞赛分三阶段开展:第一阶段线上机考,完成理论基础能力考察;第二阶段提交配合比计算说明书后开展实验室现场实操,完成拌和物性能测试与抗压试件制备;第三阶段试件养护期满后开展力学性能测试,任课教师结合配合比设计文件、现场操作记录、强度测试报告、碳排放与成本测算文件完成评审。全部竞赛资料、试验记录统一归档留存,作为课程过程性考核依据。

6. 教学实施与反思

6.1. 教学实施中遇到的问题

经过课堂讲授和实践教学,面向智能建造的《土木工程材料》课程改革取得初步成效,但在学科交叉教学落地过程中,也暴露出课程内容、学生认知、实践条件等方面的现实问题。(1) 学科交叉带来的知识跨度矛盾。课程融合材料学、机器人学等多领域内容,有限学时约束下,知识广度与深度兼顾难度大;(2) 课程竞赛以小组项目为单位,存在组内成员贡献不均衡现象,完全客观量化打分存在难度,对教师评审经验提出较高要求;(3) 学生新旧知识逻辑关联建立困难。不少学生能够记忆智能土木工程材料相关概念,但是很难建立“微观机理、宏观性能、应用方法”的全面逻辑链条,表现为可以背诵智能材料特点,但面对工程案例时不会完成材料选型,表现出知识点碎片化,不会迁移应用认知困境。

6.2. 教学反思与改进策略

(1) 优化知识呈现,强化新旧知识认知联结。课堂讲授中增加对比式教学,每讲一类智能新材料,都回溯基础模块中传统材料的对应知识点,设置对比表格,展示传统材料与智能材料的性能差异,帮助学生完成知识结构化建构。(2) 优化课程竞赛任务设计与评价机制,强化工程中的综合评价分析能力。在竞赛任务书明确要求,提交配合比设计报告必须专门设置多目标综合分析章节,提高综合分析章节得分权重。针对小组内部贡献不均,增加个人分工说明附件作为竞赛材料,进一步细化评价体系。(3) 学时分配与课外拓展资源互补,缓解学时有限、交叉内容广度深度矛盾。课堂优先讲授土木工程材料知识;机器

人等交叉内容不追求完整讲授, 重点聚焦“智能建造对材料提出什么要求”这一角度, 课内课外结合, 化解学时矛盾。

6.3. 局限性与解决方案

本研究存在以下局限: 教学样本仅覆盖本校, 普适性待检验; 实践环节高度依赖实体打印设备, 硬件门槛较高。解决方案: (1) 面向不同办学条件, 模式需适应性改造。如本科院校可完整沿用方案并导入科研课题; 职业院校宜弱化理论推导, 聚焦材料应用与工程选型, 竞赛以方案设计与仿真分析为主, 强化工艺认知与岗位实践。(2) 设备不足时可采用虚拟仿真与少量实操演示相结合模式。不具备 3D 打印实体设备的院校, 可采用虚拟仿真替代, 通过仿真软件完成构件建模、切片路径生成与参数调试, 降低教学的硬件门槛。

7. 结语

人工智能驱动下的智能建造快速发展, 传统土木工程材料课程已经难以满足智能建造岗位对建材数字化、智能化、复合型人才的培养需求。本研究面向智能建造, 完成了《土木工程材料》课程的知识体系构建和教学模式创新, 契合新工科背景下高等土建教育的改革方向, 为传统土木工程专业课程转型发展提供参考。

基金项目

中国矿业大学(北京)本科教育教学改革与研究项目: 面向智能建造的《土木工程材料》课程构建与教学模式创新研究(J261512)。

参考文献

- [1] 郑召. “中国式教育现代化”背景下土木工程材料课程教学改革探索[J]. 科教导刊, 2023(29): 76-78.
- [2] 龙丽芳. 智能土木工程研究现状与应用分析[J]. 产业创新研究, 2023(2): 117-119.
- [3] 刘强, 徐盛志, 赵秀绍, 等. 新工科背景下智能建造专业多元一体化实验教学体系探索[J]. 实验室研究与探索, 2026, 45(5): 149-154+166.
- [4] 谭朝明. 应用型本科院校《土木工程材料》实验课程教学改革[C]//河南省民办教育协会. 2026 年高等教育发展论坛论文集(中册). 大同: 河南省民办教育协会, 2026: 298-300.
- [5] 方园, 霍瑞丽. 智能与绿色融合: 基于产业需求的土木工程材料课程建设探索[J]. 中国多媒体与网络教学学报(上旬刊), 2025(10): 61-64.
- [6] 苏敬皓, 许健宇, 郑俊声, 等. 自感知混凝土的工作原理与自感知性能影响因素研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2025(12): 83-88+112.
- [7] 冉千平, 肖会刚. 强韧协同: 水泥基材料高性能化的核心路径[J]. 硅酸盐学报, 2026, 54(5): 1725-1726.
- [8] 黄振育, 郭敬林. 重大土木工程结构的智能检测与健康诊断[J]. 城市建筑, 2013(8): 43.
- [9] 周智, 欧进萍. 土木工程智能健康监测与诊断系统[J]. 传感器技术, 2001(11): 1-4.
- [10] 宋清华, 李彪. 智能材料在建筑结构设计中的应用与性能提升研究[J]. 住宅产业, 2025(1): 77-79.