DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)08-0184-05

# 3D打印技术下的新型榫卯结构设计研究

黄雨萌

(厦门大学嘉庚学院 建筑学院,福建 漳州 363123)

**摘　要**:装配式建筑发展与榫卯非遗活态传承的双重需求下,传统榫卯面临手工依赖、材料局限、传承断代的现代化困境。而现有3D打印与榫卯的融合研究存在技术文化适配断层,缺乏标准化设计体系且未实现产业化落地,相关研究亟待深入。本研究采用“榫卯设计理论构建-3D打印实验验证-反馈流程优化”三阶递进策略,以设计建模打印一体化为核心,依托ChituBox与Ultimaker Cura两款软件完成模型预处理,开展可拆卸式榫卯体系的曲线化、参数化创新设计与实证研究。以原创的榫卯拼接交互幕墙设计为实例,通过该幕墙3D打印整体模型和基础构件以及拼接模式实验,验证了研究方法的可行性与有效性。研究证实3D打印技术可突破传统榫卯的工艺与形制限制,其数字化与标准化特性能破解榫卯传承“三缺”困境,且技术多功能应用能为二者融合奠定硬件基础,装配式模块化设计也可为新型榫卯设计提供方法论支撑。该研究在理论上完善了3D打印与榫卯融合的系统化设计流程,为榫卯文化活态传承提供数字化新路径;在实践上为装配式建筑工业化创新提供可行方案,推动榫卯在建筑、家具等领域的规模化应用,助力建筑行业高效施工、低碳环保的发展。

**关键词**:3D打印;榫卯结构;文化传承;设计创新;装配构件;交互幕墙

**中图分类号**:TP391.73;TB47　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1003-7241(2026)08-0184-05

# Research on the design of new mortise and tenon structures based on 3D printing technology

Huang Yumeng

( School of Architecture, Tan Kah Kee College, Xiamen University, Zhangzhou 363123, Fujian, China )

**Abstract**: Against the background of prefabricated construction and the living inheritance of traditional mortisetenon intangible cultural heritage, conventional mortisetenon structures are confronted with modern dilemmas such as overdependence on manual operation, material limitations, and insufficient inheritance. Existing research on the integration of 3D printing and mortisetenon lacks a standardized design system and has not yet achieved industrial application. This study adopts a threestage strategy: theoretical construction, 3D printing experimental verification, and process optimization. With the integration of design, modeling and printing as the core, model preprocessing is carried out by ChituBox and Ultimaker Cura. The feasibility and effectiveness are verified through an original detachable mortisetenon interactive curtain wall. Results show that 3D printing can break through the constraints of traditional mortisetenon technology and form, and solve the inheritance dilemma with digitization and standardization. This study provides a new digital path for the living inheritance of mortisetenon culture and a practical scheme for the industrial innovation of prefabricated buildings, promoting the lowcarbon and efficient development of the construction industry.

**Keywords**: 3D printing; mortise and tenon structure; cultural inheritance; design innovation; prefabricated component; interactive curtain wall

当前中国建筑市场已进入存量饱和阶段,借鉴发达国家相似发展经验,装配式建筑是建筑行业转型升级的必然趋势[1-3]。在建筑工业化推进与非遗活态传承的双重诉求下,中国传统装配式建筑榫卯结构陷入传统价值与现代化适配的核心矛盾,其创新发展已成为重要课题。榫卯结构以“凹凸咬合”实现无钉无胶连接,分为面与面结合、点结构、三材(独立木构件)结合三大类,兼具“天人合一”哲学内涵与可拆卸、高抗震、低污染等优势,现存唐至清代木构建筑依赖其结构稳定,孔明锁等微型化形式则承担文化传播功能[4-7]。然而传统榫卯正面临多重困境:依赖匠人手工,精度误差小、单节点加工耗时长,难以适配现代标准化规模化需求;材料局限于木材,使用寿命短,与现代建筑材料兼容性差;同时存在技艺传承断代问题,制约其现代化推广[8-10]。

现代化3D打印技术为解决上述问题提供了思路,其具备材料多元化、工艺精准化、场景可拓展化等特征,是突破

**收稿日期**:2026-03-16;**录用日期**:2026-04-29

**基金项目**:2025年度福建省社会科学规划项目(FJ2025C223)

**作者简介**:黄雨萌(1989—),女,硕士,讲师,研究方向为参数化设计、建筑技术。

**引用本文**:黄雨萌.3D打印技术下的新型榫卯结构设计研究[J].自动化技术与应用,2026,45(8):184-188.(Huang Yumeng. Research on the design of new mortise and tenon structures based on 3D printing technology[J]. Techniques of Automation and Applications,2026,45(8):184-188.)

传统制造局限的关键手段[11]。3D 打印技术已覆盖聚合物、钢材、混凝土等多种材料,为榫卯结构现代化转型提供技术支撑[12-14]。然而当前 3D 打印与榫卯结构的融合存在显著技术与文化断层,相关研究多聚焦单一材料打印或小体量简单构件,未充分还原其可拆卸性与文化语汇,且缺乏针对建筑、家具、文创等不同场景的标准化设计体系,包括特殊场景的就地取材现场打印潜力尚未得到开发[15]。

探索 3D 打印与榫卯的融合路径,兼具重要学术价值与现实意义,且能精准适用装配式建筑未来发展需求,具体可分为设计创新与实践生产两个方面。该研究可有效破解传统榫卯手工依赖、材料局限、传承断代等现代化困境,同时为 3D 打印构件注入文化内涵。设计方面,可结合装配式建筑模块化、个性化需求,实现榫卯结构文化语汇与现代建筑美学的融合[16-18]。实践生产方面,可依托 3D 打印标准化、高精度优势,推动榫卯结构现代化应用与规模化生产,适配装配式建筑高效施工、低碳环保等发展趋势。通过整合二者核心优势对推动建筑工业化创新、降低建造与运输成本具有不可替代的作用,因此相关研究亟待深入开展。

国内外 3D 打印技术在建筑及装配式榫卯构件领域的研究与应用,多以构件物理性能适配打印工艺为核心方向并取得阶段性进展,但在设计与打印的系统性衔接、产业化落地层面的研究仍存在显著局限。国内已形成混凝土、金属、复合材料等多种材料协同发展局面[19-21],依托参数化建模技术匹配 3D 打印工艺完成各类榫卯构件试制,实证多种材料设计可有效提升榫卯的力学强度、轻量化等物理性能[22]。部分研究还探索了特色材料与榫卯的融合应用,然而相关成果多止步于力学抗震、节点性能等实验室测试阶段,设计创新与规模化打印生产的工艺衔接存在明显缺失,尚未实现大型工程场景的落地应用。国外则以工艺创新与跨学科设计为发展核心,发达国家通过结构计算、参数优化适配不同打印技术完成装配式构件制作,高校与企业还实现了生物材料、智能复合材等特殊材料的打印工艺突破。但针对装配式榫卯构件的咬合特性、可拆卸性优化设计与打印技术的适配研究仍待深入。且普遍忽视榫卯的文化内涵与形态语汇传承,尚未建立覆盖设计、建模、打印,全流程的匹配标准与行业规范,难以支撑融合技术的规范化、产业化发展需求[23]。

权威榫卯研究相关书籍分建筑、家具、文创等领域:建筑类以工种、构件部位和连接方式等为核心分类,侧重力学与营造逻辑,类目精细且贴合古建筑实操;家具类按构件部位、接合方式和原理划分,类目数量多,注重工艺细节与实用性;文创类以文化背景、结构逻辑为基础,主打中西方榫卯对比与演变研究,分类更具综合性[10,17-18]。其中按榫卯连接方式分类:面与面连接类榫卯结构简单、易加工,但易因遭破坏而失稳;点结构与三材连接类榫卯外观完整、力学性能更优,但加工难度大。力学方面相关研究证实其抗震性能优于现代钢节点,但木材特性易导致节点松动。数字化传承方面已建立高精度榫卯数字模型库,为 3D 打印提供基础,但未针对打印工艺优化参数。当前建筑、家具、文创产业,对榫卯传统与现代融合需求迫切,建筑领域需兼具抗震性与耐久性的构件,家具领域需模块化且可拆装产品,文创领域需低成本高精度衍生品。3D 打印与榫卯的融合,既是破解传统榫卯工艺不足的有效技术路径,也是推动传统文化活态传承、适配产业需求的关键手段。

在 3D 打印技术革新与榫卯传承的双重背景下,本研究聚焦设计、建模、打印一体化的三大核心流程,其一创新设计环节以传统榫卯结构逻辑为根基,突破传统形制与工艺限制,结合建筑装配式构件实际应用场景的功能与外观需求完成新型榫卯结构创新设计,其二数字化建模环节依托 Rhinoceros、SketchUp、3dMax 等适配 3D 打印技术的专业建模软件[24],将设计方案转化为精确数字模型为后续打印提供技术支撑,其三技术化打印环节选用适当材料与型号的 3D 打印设备完成榫卯构件的实体打印成型,且基于此设计流程,实际生产阶段可根据应用需求选择直接打印带有可拆卸缝隙的榫卯成品构件、或打印榫卯专用模具依托模具开展规模化生产两种落地路径;本文在简要梳理相关研究现状后,核心聚焦研究方法,重点阐释设计适配建模、打印一体化流程方法及相关实验方案,后续将开展实验材料制备、样本检测及结果分析等相关研究,通过对比现有研究分析结果差异、探讨应用前景与局限,最终总结成果并展望未来[25]。

## 1 研究方法

### 1.1 研究策略

本研究采用“榫卯设计理论构建-3D 打印实验验证-反馈流程优化”三阶递进研究策略,以设计技术适配、文化内涵传承、实际场景落地为核心研究目标。通过设计建模、工艺实验、结果反馈的闭环研究路径,实现 3D 打印技术与传统榫卯结构的深度融合与创新应用。研究核心突破二者的融合壁垒,以设计为核心切入点构建系统化工作流程,并依托具体设计实例开展实证研究与效果反馈验证,推动设计与技术的落地优化。3D 打印技术的出现为传统榫卯结构的设计体系带来颠覆性变革,彻底打破了传统手工制作对榫卯设计的形制限制,成为榫卯设计现代化、新兴化发展的核心技术支撑。传统榫卯受手工加工精度、工具操作难度、木材切削工艺等因素制约,设计形制多以直线立体构造为主,结构形态的复杂性与多样性被束缚。

3D 打印以逐层堆积的成型原理,摆脱了传统加工工艺的物理约束,使榫卯设计得以向参数化、仿生化、曲线化方向发展。本研究中的榫卯设计突破传统直线构造局限,将流畅的弧形曲线作为核心连接构件形制,结合精确数学几何构图完成榫卯镶嵌连接的结构设计,实现曲线形态与精准咬合的有机结合。同时依托参数化设计方法,可对榫卯的尺寸、咬合角度、受力节点进行精准调控,仿生曲线设

计还能借鉴自然结构的力学优势优化榫卯受力结构形态。让榫卯结构在保留传统咬合逻辑的基础上,兼具更优的物理力学性能与现代设计美学,最终形成兼具文化性、功能性与创新性的新型榫卯设计范式。

### 1.2 研究对象

本研究选用 ChituBox 与 Ultimaker Cura 两款软件完成新型榫卯 STL 格式数字模型的修复与打印预处理,二者功能互补,分别聚焦打印支撑构建与切片工艺预设。ChituBox 以打印支撑的精准构建与优化为核心,兼具模型修复、切片辅助功能,适配光固化 3D 打印机光敏树脂及树脂基复合材料,更适用于复杂曲面、悬空悬挑、仿生曲线型榫卯模型和高精度微小型文创榫卯模型,如图 1 所示。其支撑生成精度高,可局部优化榫卯精细咬合节点,还能快速修正模型破面、孔洞等问题,适配曲线榫卯复杂拓扑结构。且该软件的升级版本还新增了榫卯切割拆件、模型保护盒等功能,能在模型拆分时自动生成榫卯连接结构,进一步提升复杂榫卯模型的处理与装配效率,如图 2 所示。Ultimaker Cura 聚焦切片工艺的标准化与优化,主打专业切片处理、打印参数精细化调控和批量打印规划,适配熔融沉积建模(fused deposition modelling,FDM)3D 打印机,兼容 PLA、ABS 等热塑性塑料及木质和碳纤维复合材料、工程塑料等,更适用于规则几何、模块化装配式、大尺寸建筑和家具榫卯构件与直曲结合型榫卯模型。该软件切片参数调节维度丰富,可针对榫卯受力节点优化填充率与分层高度以提升力学性能,还能满足 FDM 打印机的规模化打印需求,实现批量榫卯构件工艺标准化,打印效率更高。

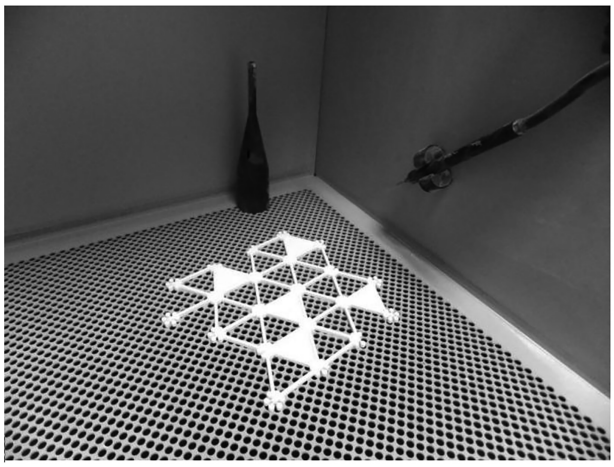


**图 1 榫卯拼接交互幕墙整体模型 3D 打印过程**

Fig. 1 3D printing process of the integral model for mortise-and-tenon joint interactive curtain wall

两款软件也可协同应用以实现不同形制、不同应用场景榫卯模型的全流程预处理:既可先通过 ChituBox 完成模型修复与精准支撑构建,解决曲线型、复杂型榫卯的悬空结构打印难题,再通过 Ultimaker Cura 完成切片工艺精细化调控;也可依托两款软件的专属适配性,分别完成光固化和 FDM 工艺下的榫卯模型打印预处理,以此保障 3D 打印榫卯构件的精度、完整性与力学性能,为新型榫卯设计的实验验证与落地应用提供可靠技术支撑。分别采用 ChituBox 与 Ultimake Cura 对榫卯拼接交互幕墙整体模型及基础构件进行模型预处理,并对比两种软件单独与组合使用的处理效果。结果表明,组合使用在技术层面灵活性更高,整体处理效果更优。受本次实验模型形体偏薄的限制,单一软件与组合预处理的结果差异并不显著。此外,两种软件协同预处理的工作模式仍需以更多类型模型为研究对象开展对比试验,通过扩充样本库,进一步归纳更高效、稳定的标准化工作流程与方法。



**图 2 榫卯拼接交互幕墙基础构建 3D 打印过程**

Fig. 2 3D printing process of basic components for mortise-and-tenon joint interactive curtain wall

### 1.3 研究结果

图 3 为本文作者原创设计的榫卯拼接交互幕墙 3D 打印整体效果模型。图 4 与图 5 则分别呈现了该榫卯拼接交互幕墙对应的 3D 打印基础构件样式及具体拼接模式。该幕墙设计是上述“榫卯设计理论构建-3D 打印实验验证-反馈流程优化”三阶递进研究策略的实际应用实践反馈成果,依托 3D 打印技术突破了传统榫卯的工艺限制,融入了曲线化的榫卯构造设计。这款幕墙具备组装灵活的显著特点,在满足建筑幕墙实用功能的同时兼顾视觉美学效果,更是 3D 打印技术应用下,打破传统直线榫卯设计局限的一次全新创新实践。

本设计以中国古典建筑中的传统榫卯构造为核心灵感,深入挖掘其结构逻辑与文化内涵,结合现代 3D 打印技术特性与材料力学性能展开创新重构。在设计推演过程中,先对经典榫卯节点进行参数化拆解。再依据 3D 打印分层成型、自由曲面构建的工艺特点,对构件形态进行迭代优化。设计语言从最初规整简洁的直线条体系,逐步过渡至流畅灵动的自由曲线形态,突破传统木作工艺对造型的限制。3D 打印技术不仅实现了复杂榫卯结构的一体化成型,更以数字化制造方式为传统营造范式注入新的表达可能,让古典构造智慧在当代设计中呈现出兼具传承与创新的视觉与结构美学。

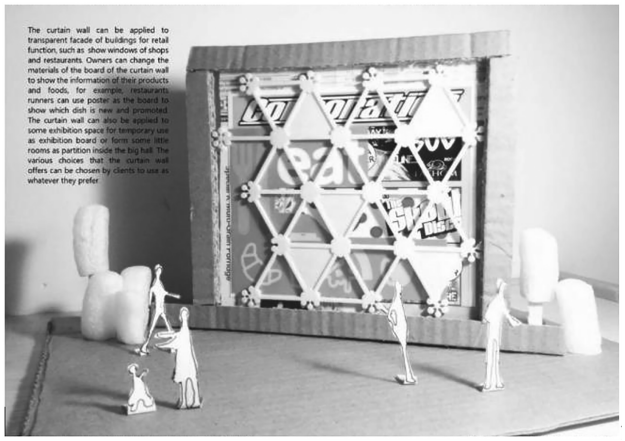



**图 3　榫卯拼接交互幕墙 3D 打印整体效果模型**

Fig. 3　3D printing overall effect model of mortise-and-tenon joint interactive curtain wall

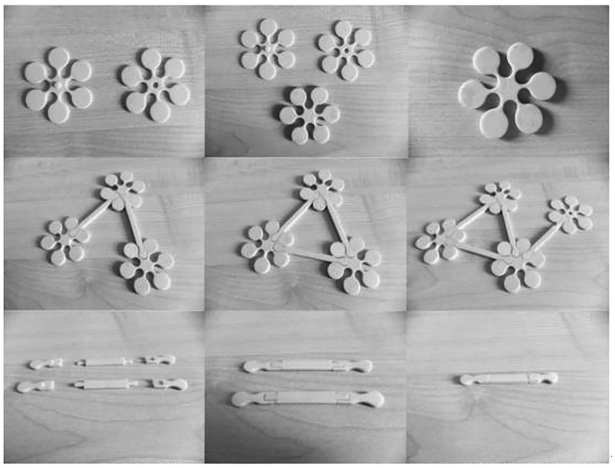


**图 4　榫卯拼接交互幕墙 3D 打印基础构件**

Fig. 4　3D-printed basic components of interactive curtain wall with mortise-and-tenon joints

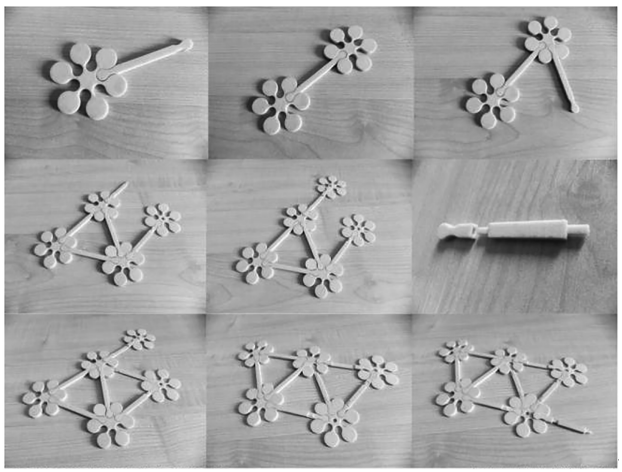


**图 5　榫卯拼接交互幕墙 3D 打印拼接模式**

Fig. 5　3D printing splicing mode of interactive curtain wall with mortise-and-tenon joints

## 2　讨论

本文选取传统榫卯为核心研究对象，且限定于可拆卸式榫卯体系。可拆卸性是榫卯的核心结构优势，与 3D 打印模块化构件的实际需求高度契合，也符合 3D 打印互锁结构的设计逻辑。固定式榫卯通过胶结等方式形成永久连接，丧失可拆卸优势，与 3D 打印模块化、可拆装的设计理念相悖。复杂榫卯多节点、多维度的咬合结构对 3D 打印的成型精度、工艺控制要求极高，需多次打印与组装，不仅大幅提升生产成本与周期，且当前技术难以实现规模化生产，不符合研究的实用性与工程化落地目标。

本文以 3D 打印技术与传统榫卯结构的融合创新为研究核心，针对装配式建筑发展需求与榫卯传承困境展开研究。研究采用三阶递进策略，突破传统榫卯直线构造局限，结合 ChituBox 与 Ultimaker Cura 两款专业软件完成不同场景榫卯模型的打印预处理；筛选典型可拆卸榫卯为研究对象，纳入建筑、家具、文创等适配场景并论证其合理性。此外，本研究可借鉴装配式设计领域的模块化设计框架，依循功能拆解、模块划分、接口标准化等步骤。未来可将新型榫卯装配式构件拆解为多种功能类型构件为其设计提供方法论支撑，比如，连接、受力、装饰等功能构件。

## 3　结论

传统榫卯技艺传承具有迫切性，其面临缺传承人、缺统一精度标准、缺现代建筑应用场景的“三缺”困境。而 3D 打印的数字化建模与标准化生产特性，可实现榫卯技艺的可复制与可传播，还能弥补传统师徒传承的效率短板，为榫卯传承提供新路径。同时，当前 3D 打印技术已具备多种功能需求应用能力，金属、混凝土、复合材料打印的各工艺关键参数均能适配榫卯生产与咬合需求。总之，研究证实 3D 打印可破解榫卯传承困境，其技术成熟度为二者融合奠定硬件基础，同时借鉴装配式设计模块化方法，为新型榫卯构件设计提供支撑，也为建筑工业化创新与榫卯活态传承提供了可行路径。

## 参考文献

[1]成飞，刘欣. 3D 打印技术及其在装配式建筑中的应用研究[J]. 城市建设理论研究(电子版)，2024(8)：120-122.
[2]王磊，李坤. BIM 技术+3D 打印技术融合于装配式建筑的机制研究[J]. 科技创新与应用，2024(24)：159-162.
[3]Ahmed G H. A review of "3D concrete printing": materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 64: 105863.
[4]李诫. 营造法式[M]. 北京：中华书局，1985.
[5]叶双陶. 中华榫卯：古典家具榫卯构造之八十一法[M]. 北京：中国林业出版社，2019.
[6]周京南. 榫卯构造[M]. 北京：故宫出版社，2015.
[7]Liu K, Yang Q, Yu P. The analytical model and horizontal resistance of the column-head dou-gong in the traditional chinese timber structure [J]. International Journal of Architectural Heritage, 2024, 19(5): 1-18.
[8]周鑫龙，马越，姚诺. 传统榫卯结构现代应用创新研究进展[J]. 大众文艺，2024(7)：165-167.

[9]王牧日,宋国栋,郑雅婷. 传统家具榫卯结构创新与优化设计探讨[J]. 美术文献,2024(9):106-108.
[10]邓昕,杨加玮. 榫卯结构在拆装家具中的设计创新与实践[J]. 家具与室内装饰,2023(6):48-52.
[11]孙柏林. 试析“3D 打印技术”的优点与局限[J]. 自动化技术与应用,2013,32(6):1-6.
[12]Yan M. From tradition to innovation: integrating 3D printing in the creation of wooden artistic and furniture products[J]. International Journal of Materials Science and Technology Studies, 2024, 1(2): 28-39.
[13]Dwivedi K, Joshi S, Nair R, et al. Optimizing 3D printed diamond lattice structure and investigating the influence of process parameters on their mechanical integrity using nature-inspired machine learning algorithms[J]. Materials Today Communications, 2024, 38: 108233.
[14]Liu K, Takasu K, Jiang J, et al. Mechanical properties of 3D printed concrete components: a review[J]. Developments in the Built Environment, 2023, 16: 100292.
[15]Chen J, Qiao G, Wang R. Turning desert sand into building material products: an ambitious attempt of solar 3D printing[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 378: 134790.
[16]García-Molina D F, Carmona-Ávila R, Moltalvo-Gil J M, et al. Comprehensive design of the 3D printing process for architectural models. A case study: the medieval walled enclosure of Priego De Cordoba (E1: 200)[J]. Multimedia Tools and Applications, 2024, 83(15): 45679-45702.
[17]李佩璇. 榫卯结构在现代家具中的创新应用[J]. 设计, 2023(6): 134-136.
[18]顾倩雯,李如洁,杨子倩. 调研现代榫卯结构的优化设计[J]. 设计, 2022(18): 114-116.
[19]Tao Y, Zhang Y, Wang X, et al. Adhesion evaluation and interface characterization of 3D printed concrete for automatic repair[J]. Construction and Building Materials, 2024, 415: 134952.
[20]Mishra S K, Snehal K, Das B B, et al. From printing to performance: a review on 3D concrete printing processes, materials, and life cycle assessment[J]. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 2025, 10(3): 1-25.
[21]Tran T Q, Sarmah A, Harkin E M, et al. Radio frequency-assisted curing of on-chip printed CNT/silicone heatsinks produced by material extrusion 3D printing[J]. Additive Manufacturing, 2023, 77: 103842.
[22]Du G, Sun Y, Qian Y. Flexural performance of nature-inspired 3D-printed strain-hardening cementitious composites (3DP-SHCC) with bouligand structures[J]. Cement and Concrete Composites, 2024, 147: 105494.
[23]Baktheer A, Classen M. A review of recent trends and challenges in numerical modeling of the anisotropic behavior of hardened 3D printed concrete[J]. Additive Manufacturing, 2024, 90: 104309.
[24]黄雨萌. 建筑设计中 Rhino+Grasshopper 插件功能与 3D 建模解析[J]. 自动化技术与应用,2021,40(7):167-169,173.
[25]Geng S, Luo Q, Liu K, et al. Research status and prospect of machine learning in construction 3D printing[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 12: e01952.

(上接第 81 页)

[16]崔丽霜,孙广义,杨芳,等. 基于神经网络的道路隐患图像识别研究[J]. 时代汽车,2026,(8):184-186.
[17]刘昊,杨燕婷,余国庆,等. 基于卷积神经网络的树叶识别技术研究[J]. 商丘职业技术学院学报,2026,25(1):66-73.
[18]白华军,李荣昌,司洁戈,等. 基于离散剪切波与优化深度卷积神经网络的图像降噪方法[J]. 电声技术,2024,48(1):146-152.
[19]李晓勇,林璐,谭贵蓉,等. 一种基于卷积神经网络的高影响天气识别方法[J]. 自动化技术与应用,2024,43(10):212-216.
[20]张凤翔,毛锐,周泉,等. 基于深度学习的散货港口接卸运载车辆识别方法[J]. 自动化技术与应用,2026,45(2):58-62,160.
[21]林雨准,刘智,王淑香,等. 基于卷积神经网络的光学遥感影像道路提取方法研究进展[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2024,54(3):1068-1080.