

基于挤出的建筑3D打印技术及ECC材料研究综述

汪海威

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2025年7月27日; 录用日期: 2025年8月17日; 发布日期: 2025年8月28日

摘要

建筑3D打印技术作为智能建造的核心支撑,以“分层叠加”原理为基础,在提升施工效率、减少资源消耗及控制碳排放方面优势显著,已成为建筑业转型升级的重要路径。本文综述了该技术的发展背景、应用现状及研究进展,重点分析了基于挤出的混凝土3D打印技术与3D打印ECC的关键成果。3D打印混凝土技术已在住宅、桥梁等工程中应用,其核心是通过材料配合比与工艺参数优化,满足可泵性、可建造性等性能要求,同时需关注构件的力学各向异性。3D打印ECC的研究则表明,PE纤维因性能优势更适配打印工艺,可制备兼具可打印性与高延性的材料。当前该技术仍面临标准缺失、材料性能局限等挑战,未来需通过技术创新与协同发展推动规模化应用,为建筑业发展提供动力。

关键词

建筑3D打印, 挤出成型, 混凝土, ECC, 可打印性

A Review of 3D Printing Technology for Construction Based on Extrusion and ECC Materials

Haiwei Wang

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Jul. 27th, 2025; accepted: Aug. 17th, 2025; published: Aug. 28th, 2025

Abstract

3D printing technology for construction, as a core support of intelligent construction, based on the principle of “layer-by-layer stacking”, has significant advantages in improving construction efficiency,

reducing resource consumption, and controlling carbon emissions, making it an important path for the transformation and upgrading of the construction industry. This paper reviews the development background, current applications, and research progress of this technology, with a focus on key achievements in extrusion-based concrete 3D printing and 3D printing of Engineered Cementitious Composite (ECC). The 3D printing of concrete technology has been applied in residential buildings and bridges, where the core is to optimize material mix ratios and process parameters to meet performance requirements such as pumpability and constructability, while also paying attention to the mechanical anisotropy of components. Research on 3D printing of ECC indicates that PE fibers, due to their performance advantages, are more suitable for printing processes, allowing the preparation of materials that combine printability with high ductility. Currently, this technology still faces challenges such as lack of standards and limitations in material performance. In the future, through technological innovation and coordinated development, large-scale application needs to be promoted to provide impetus for the development of the construction industry.

Keywords

Architectural 3D Printing, Extrusion Molding, Concrete, ECC, Printability

Copyright © 2025 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

改革开放以来,作为国民经济支柱产业的建筑业在城镇化建设过程中得到了迅猛发展。近年来,各个超高层、大跨度标志性建筑的落成创造了多项世界第一,标志着我国工程建造技术已居于世界领先水平。但是,传统粗放式的建造模式高度依赖于劳动密集型作业,存在管理体制落后、生产效率低下、材料性能不足、资源浪费巨大等突出问题。随着我国经济由高速增长阶段向高质量发展阶段的转变,十九大以来,国家部委出台了多项政策条例将大力发展建筑工业化,推动建筑行业向智能创新、绿色低碳方向发展提升到了战略高度。因此,依托于信息化、自动化的智能建造技术和高性能、高效率的新型建造材料的建筑业转型升级势在必行。在工业 4.0 及“碳达峰、碳中和”的背景下,建筑行业需要找到一种比传统混凝土更加环保的混凝土以解决当前的高能耗和高碳排放问题,而 3D 打印混凝土技术符合现代建筑行业的迫切发展需求。

建筑 3D 打印技术作为建筑业数字化转型的重要突破口,正日益受到学术界和政策制定者的高度关注。从政策导向来看,我国已构建起较为完善的技术发展支持体系。2015 年国务院颁布的《中国制造 2025》首次将增材制造技术纳入国家战略层面。在当前建筑业转型升级的关键时期,建筑 3D 打印技术凭借其在施工效率、资源利用和碳排放控制等方面的显著优势,已成为推动智能建造发展的重要技术路径,其推广应用将对未来新型城镇化建设和乡村振兴战略实施产生深远影响。

近年来,国际社会对建筑 3D 打印技术的研发投入和政策支持力度持续加大,体现了该技术在推动建筑业可持续发展方面的重要战略价值。2022 年 6 月,美国能源部(DOE)启动了一项具有突破性意义的科研资助计划,向 18 个跨学科研究团队提供总额达 3900 万美元的专项经费,重点支持开发创新型建筑设计方案,其核心目标是实现建筑结构的全生命周期碳封存量超过建造过程的碳排放量(碳负排放)。值得注意的是,在获得资助的项目中,有两项研究专门聚焦于大尺度 3D 打印混凝土技术的开发与应用,旨在通过优化材料配比和打印工艺,显著减少传统施工过程中的资源浪费问题[1]。这一资助计划不仅反映了美

国政府将 3D 打印技术视为实现建筑业碳中和目标的关键技术路径，更体现了其在推动绿色建造技术创新方面的战略布局。

与此同时，在行业标准体系建设方面，2022 年 8 月，美国材料与试验协会获得美国国家标准与技术研究院近 30 万美元的专项资助，用于制定建筑业先进制造技术发展路线图。该路线图的核心任务在于构建建筑行业与先进制造业的协同创新框架，系统整合增材制造(3D 打印)、工业机器人及自动化技术、建筑信息模型(BIM)、大数据分析和人工智能等前沿技术领域[2]。这一标准化工作的推进具有重要的战略意义：一方面为建筑业的数字化转型提供了系统性技术指导，另一方面也为 3D 打印建筑技术的规模化应用奠定了标准基础。这些举措共同表明，建筑 3D 打印技术正在从单纯的建造工艺创新向涵盖材料科学、智能制造、数字技术等多学科交叉的综合性技术体系发展，其产业化进程已进入关键发展阶段。

3D 打印技术已在航空航天、汽车制造等多个领域取得显著进展[3]-[5]。在建筑领域，尽管该技术的应用仍处于初级阶段，但其发展势头迅猛，欧洲多国已积极开展相关研究和实践[6]，如图 1。建筑 3D 打印技术的兴起，得益于图 1 工业化和数字技术的快速发展，为传统建造方式提供了创新性补充。值得注意的是，该技术并非旨在完全取代现有施工方法，而是与装配式建筑等新兴建造技术形成互补关系，共同推动建筑行业的转型升级。这种技术融合不仅拓展了建筑工业化的发展路径，更为实现高效、精准、可持续的建筑生产提供了新的可能性。



Figure 1. 3D printed scale of Big Wild Goose Pagoda
图 1. 3D 打印缩尺大雁塔



Figure 2. 3D printed irregular components
图 2. 3D 打印异型构件

建筑 3D 打印技术作为新兴建造方式，已在多个工程实践中展现出显著优势，如图 2 所示。相较于传

统劳动密集型的钢筋混凝土施工工艺,该技术具有机械化程度高、免模板施工、劳动强度低等突出特点,特别适用于异形复杂结构的建造。研究表明,3D 打印技术可有效解决当前建筑业面临的高能耗、高污染、劳动力短缺等问题,推动行业向绿色化、工业化方向发展。然而,该技术仍面临标准体系缺失、材料性能局限、设备工艺不完善等挑战,制约其规模化应用。因此,深入开展建筑 3D 打印设备、材料及施工工艺的研发工作,对促进建筑业转型升级具有重要意义[7]。

2. 建筑 3D 打印技术及应用

3D 打印技术的发展进程如下:1986 年,美国 CharlesHull 提出立体光固化技术(SLA),并通过 3D systems 公司推出世界第一台立体光固化打印机,该技术通过控制紫外线光束和升降台,照射光固化材料表面,使材料有序成型[7]。1988 年,美国 Scott Crump 提出熔融沉积成型技术(FDM),其是利用材料的热熔性和粘连性,在指令的控制下指挥打印头在 X、Y 坐标中移动并挤出打印材料,打印材料涂覆在打印平台上迅速固化,在成型一层后继续改变打印平台的高度逐层固化,即可得到打印对象[8]。1989 年,美国 C. R. Dechard 提出了选择性激光烧结技术(SLS),其原理是采用激光有选择地分层烧结固体粉末,使烧结成型的固化层逐层叠加,制造所需要的物体[9]。1989 年,美国工程师 Michael Feygin 开发出第一台分层实体制造打印机,运用的分层实体制造技术(LOM)是以片材作为原材料,在表面涂上热熔胶并通过热压辊碾压使材料粘连,再利用激光分层对材料进行轮廓扫描切割,最终实现物体的成型[10]。

1997 年,美国伦斯勒理工学院 Pegna 教授首次将水泥基材料应用于增材制造技术[11]。虽然近年来该技术在建筑领域的应用逐渐增多,但整体仍处于初级发展阶段。目前建筑 3D 打印主要采用四种技术路径:轮廓成型工艺、混凝土打印技术、颗粒床打印技术和数字建造技术。其中,轮廓成型和混凝土打印属于基于挤出的 3D 打印技术,是目前建筑领域的主流应用方向。

2.1. 混凝土 3D 打印技术

由英国拉夫堡大学研发的混凝土 3D 打印技术采用桥式行车系统实现胶凝材料的精确挤出成型。研究表明,该技术通过优化打印参数可获得 5~24 mm 的成型精度[12],显著高于传统轮廓成型工艺。高精度的特点使其能够制造更为复杂的建筑构件[13],为异形结构施工提供了新的技术解决方案。混凝土 3D 打印技术通过高精度的数字化控制系统实现建筑构件的无模化建造,其核心工艺是基于胶凝材料的连续挤出成型。该技术采用龙门式机器人系统,将新拌混凝土在 0.3~0.8 MPa 压力下通过输送管道泵送至打印喷头,按照预设路径以 30~80 mm/s 的速度逐层堆积成型[14]。整个打印过程涉及三个关键环节:首先在数据准备阶段需建立高精度三维模型并优化打印路径,必要时采用逆向扫描技术;其次在混凝土制备阶段需严格控制输送时间以保证材料工作性能;最后在构件打印阶段需协调喷头形状(直径 15~30 mm)、打印速度与材料流速等参数,确保挤出均匀性和层间粘结强度达到 1.5~3.0 MPa [15]-[17]。因此在整个打印过程中,泵送压力、打印速度以及喷头形状是影响材料成型性能的重要因素,同时这些因素之间具有相关性。

2.2. 基于挤出的 3D 打印混凝土技术工程应用进展

该技术根据施工条件可分为现场原位打印和工厂预制拼装两种模式,目前已成功应用于住宅建筑、桥梁工程、景观构筑物及塔式结构等多种工程项目,展现出广阔的应用前景。

主要介绍 3D 打印房屋和 3D 打印桥梁的应用案例。针对 3D 打印房屋应用案例,如图 3,上海盈创建筑科技公司在 2014 年率先实现了技术突破,采用预制装配式 3D 打印技术,仅用 24 小时就完成了 10 栋无筋小型建筑的建造[18]。2016 年,该公司技术应用进一步深化,在苏州完成了两栋具有传统特色的 3D 打印四合院建筑,建筑面积分别为 83 平方米和 138 平方米,创新性地实现了建筑主体结构与内外装饰的一体化打印,包括墙体、地面及室内家具等构件[19]。这些工程实践不仅展示了 3D 打印技术在建筑

领域的应用潜力，也体现了其在保持传统建筑风格方面的独特优势。



Figure 3. Various buildings realized by 3D printing concrete technology

图 3. 通过 3D 打印混凝土技术实现的各种建筑展示

3D 打印建筑技术在全球范围内取得了突破性进展。2019 年，中国建筑集团通过原位打印技术，在 60 小时内成功建造了一栋 7.2 米高的双层办公楼，总建筑面积达 230 平方米[20]。次年，南京绿色增材智造研究院采用预制构件技术，完成了 286 平方米的 3D 打印外墙项目[21]。

在国际应用方面，2017 年法国 XtreeE 公司开发的 YRYS 概念住宅探索了新型建筑解决方案，同年丹麦 COBOD 公司建造了欧洲首个 50 平方米的 3D 打印建筑[22]。2020 年成为技术突破的关键年份，德国建成首座 3D 打印住宅[23]，欧洲首个 380 平方米的三层公寓楼[24]，以及迪拜 640 平方米的世界最大 3D 打印市政厅相继落成[25]。

在可持续发展领域，荷兰 2021 年建成的 94 平方米住宅实现了 0.25 的优异能源性能[26]，意大利 WASP 公司则创新性地采用当地粘土材料建造环保住宅[27]。2022 年，美国 ICON 公司完成 186 平方米的现代牧场住宅[28]，日本 Serendix 公司更以 23 小时 12 分钟的惊人速度建成球形住宅[29]。这些案例充分展现了 3D 打印技术在建造效率、环保性能和设计创新方面的卓越表现。

2017 年，荷兰埃因霍温理工大学与 BAM Infra 公司合作建造了全球首座 3D 打印预应力自行车桥，如图 4 所示。该桥长 8 米、宽 3.5 米，设计使用年限达 30 年，其创新之处在于利用 3D 打印技术优化了桥梁截面设计，不仅显著提升了抗剪性能，还实现了成本节约。桥梁采用分段预制工艺，各构件在工厂完成打印后运输至现场，通过界面材料粘结组装，最后在预留孔洞中张拉钢筋并浇筑混凝土完成整体结构[30]。2018 年，美国陆军工程研究与发展中心(ERDC)将 3D 打印技术推向新高度，仅用 3 天时间就完成了一座 9 米长钢筋混凝土人行天桥的现场建造。该工程采用模块化施工方案，各预制构件在现场仅需 4 小时即可快速组装完成，充分展现了 3D 打印技术在施工效率方面的优势。同年，荷兰 Vertico 公司与根特大学合作，将 3D 打印混凝土技术与拓扑优化、后张拉等先进工艺相结合，开发出造型独特、结构新

颖的混凝土步行桥。2021 年, 3D 打印桥梁技术迎来爆发式发展。清华大学徐卫国教授团队研发的 26.3 米长步行桥则创新性地采用单拱结构设计, 由 176 个标准化打印单元(包括 44 个桥拱单元、68 个栏板单元和 64 个桥面板单元)组成, 拱脚间距达 14.4 米[31]。苏黎世联邦理工学院联合多家知名机构开发的 Striatu 人行天桥更是突破传统, 这座无加固砌体结构的拱桥由多个独立模块组成, 总重 24.5 吨, 最大跨度 15.1 米, 其独特之处在于完全依靠精妙的拱形砌体设计实现承重, 组装过程中不使用任何粘合剂[32]。



Figure 4. The world's first 3D printed prestressed bicycle bridge
图 4. 全球首座 3D 打印预应力自行车桥

上述工程实践充分证明, 3D 打印混凝土技术不仅具备工程应用的可行性, 更展现出显著的环境效益、造型灵活性和施工高效性等突出优势。值得注意的是, 这些示范项目的成功实施往往需要多方协同: 在政府政策支持下, 通过产学研的深度融合实现技术创新。实践表明, 以实际工程应用为导向, 整合机械工程、自动化控制、新型材料研发、建筑设计、施工工艺优化以及项目管理等多学科专业力量, 构建跨部门协作机制, 是确保 3D 打印建筑项目高质量实施的关键路径。这种协同创新模式有效促进了技术研发与工程应用的有机衔接, 为 3D 打印技术在建筑领域的规模化应用奠定了坚实基础。但是, 传统的 3D 打印技术的层间粘结弱: Z 向强度仅为 X/Y 向的 40~60% (各向异性) 且更脆, 对此可打印纤维增强水泥基材料的研究就很有必要。

2.3. 可打印纤维增强水泥基材料设计与基本性能

3D 打印建筑技术对建筑材料提出了全新的技术要求, 特别是在原材料选择和配合比设计方面需要进行系统性创新。在原材料体系构建方面, 国内外研究表明, 3D 打印混凝土的原材料组成已形成多元化发展趋势, 主要包括以下几类关键组分: 胶凝材料(普通波特兰水泥、硫铝酸盐水泥等)、矿物掺合料(粉煤灰、矿渣粉、硅灰等)、骨料(细砂等)、功能添加剂(超塑化剂、缓凝剂、早强剂、粘度改性剂等)以及增强纤维等[33][34]。这些材料的科学配比和优化组合是确保 3D 打印建筑质量的基础。在配合比设计原则上, 与传统混凝土相比, 3D 打印混凝土需要特别关注以下几个关键技术指标: 首先, 必须采用更低的水胶比设计, 这不仅能提高材料强度, 还能保证打印过程中的形状稳定性; 其次, 要注重材料的绿色环保性能, 优先选择工业副产物和可再生资源; 再次, 需要综合考虑经济性因素, 在保证性能的前提下降低原材料成本。为实现这些目标, 通常采用矿物掺合料和化学外加剂的复合掺加技术, 通过各组分的协同效应来优化材料性能。水泥作为关键胶凝材料, 在 3D 打印混凝土中承担着胶结和强度发展的核心作用。考虑到 3D 打印建造方式导致的材料致密性不足问题, 建议选用高标号普通硅酸盐水泥或快硬硫铝酸盐水泥, 以

确保获得足够的早期强度和最终强度。研究数据表明,与传统施工方式相比,3D 打印混凝土的强度通常会降低 15%~25%,因此必须通过采用高强混凝土配合比设计来弥补这一缺陷。在颗粒级配设计方面,基于颗粒堆积理论的研究表明,理想的 3D 打印混凝土干粉料应具备以下特征:粒度分布曲线光滑连续,不同粒径颗粒实现最密实堆积,比表面积与颗粒尺寸匹配合理[35]。这种优化设计可以显著改善材料的流变性能和打印性能,为获得高质量的 3D 打印建筑构件奠定材料基础。通过系统性的原材料选择和配合比优化,可以开发出既满足打印工艺要求,又具有优异力学性能和耐久性的新型建筑材料。

纤维是 3D 打印纤维增强水泥基材料配制的关键,纤维会提高构件的承载能力及断裂韧性,但过多的掺量会导致 3D 打印混凝土工作性能降低。矿物掺合料以及化学外加剂的合理使用对 3D 打印纤维增强水泥基材料的力学性能、耐久性能以及工作性能有利[36]-[43]。Şahmaran 等[44]指出在掺量上限范围内,粉煤灰的增加可以提高抗拉性能以及减小裂缝宽度。过多的粉煤灰掺量虽然大幅度降低水化热,降低材料成本,但是会导致早期强度降低[45]。

目前,3D 打印纤维增强水泥基材料的工作性能测试尚未形成统一标准与规范,经过原材料筛选与配比优化后,性能优良的 3D 打印纤维增强水泥基材料需同时满足以下特性[12] [14] [46] [47]:

(1) 可泵性与可挤出性;(2) 可建造性;(3) 粘结性;打印形成的各层之间需具有充足的粘结力;(4) 可工作时间;(5) 高强度

3D 打印混凝土采用逐层叠加的独特成型方式,这直接导致打印构件的力学性能呈现出方向性差异。在打印过程中形成的层间界面,使结构在平行于打印层和垂直于打印层两个方向上的力学反应存在明显不同,表现出显著的力学各向异性。相较于传统浇筑成型的试件,打印试件的力学性能会受到多种工艺参数的影响,比如表面成型精度、构件规格等。不同的参数组合可能得出不同的研究结果,因此,系统探究 3D 打印纤维增强水泥基材料硬化后的基本力学特性,深入剖析其力学行为差异的形成机理就显得格外重要。

通过科学评估打印构件的力学各向异性程度,并与传统浇筑工艺进行对比分析,能够为未来打印结构的优化设计提供重要参考。研发既符合 3D 打印工艺要求、又具备优良性能的新型复合材料,是推动该技术在建筑领域实现规模化应用的核心环节。在各种可打印纤维增强水泥基材料设计中接下来重点介绍 3D 打印 ECC 混凝土。

3. 3D 打印 ECC 研究现状

3.1. ECC 基本特征

当掺入 2% 体积掺量的短切纤维时,该材料的拉伸延性通常能超过 2%,是普通混凝土或常规纤维增强混凝土的 200 倍以上[48]。与普通 FRC 在裂纹出现后呈现拉伸软化的特性不同,ECC 不仅具有较高的拉伸、剪切和弯曲强度,还能表现出显著的应变硬化行为,同时具备出色的裂缝控制能力和自修复功能。这些特性使其在提升混凝土基础设施的韧性、耐久性和可持续性方面具有显著优势[49]。

ECC 在拉伸荷载作用下呈现的应变硬化特性和多裂缝开展现象,源于其多尺度力学设计原理。该原理通过建立宏观复合材料性能、细观纤维桥接效应以及微观材料结构之间的协同关系来实现[50]。具体而言,通过精确调控水泥基体、聚合物微纤维及纤维和基体界面等关键组分的微观结构参数,可以获得理想的细观力学性能,最终实现 ECC 材料力学行为的可调控性和可设计性。

细观层面和宏观层面之间的联系是理论稳态开裂分析,主要包含强度准则和能量准则[51]:

(1) 强度准则

强度准则描述了纤维所能提供的最大桥接应力 σ_0 (MPa) 必须大于基体的最低开裂应力,如图 5 所示,即式(1):

$$\Sigma_{fc} < \sigma_0 \quad (1)$$

式中 σ_{fc} 代表 ECC 的初裂强度(单位为 MPa)，其数值大小与基体自身的断裂韧性 K_m 以及基体内部的孔隙尺寸 c 相关。

(2) 能量准则

裂纹尖端的韧度 J_{tip} (J/m²) 必须小于纤维桥接余能 J'_b (J/m²)。可以表示为式(2)。

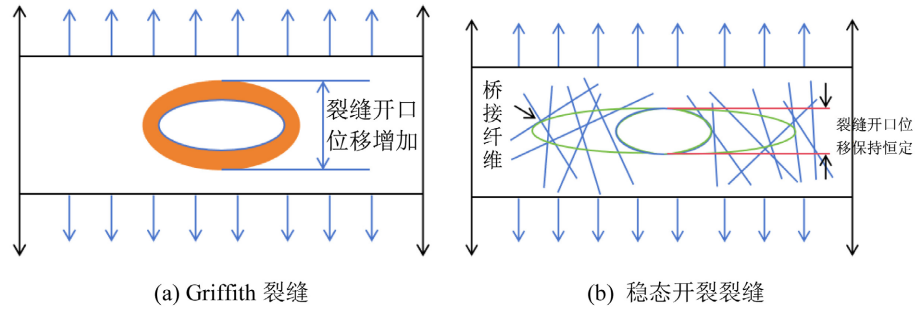


Figure 5. Variation of stress and opening displacement with crack propagation for different cracks
图 5. 不同裂纹的扩展应力和张开位移随裂纹扩展的变化

$$J'_b = \sigma_0 \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta) d\delta \geq J_{tip} = \sigma_{ss} S_{ss} - \int_0^{\delta_{ss}} \sigma(\delta) d\delta = \frac{K_m^2}{E_m} \quad (2)$$

其中, δ_0 为最大纤维桥接应力对应的裂缝张开位移, δ_{ss} 为裂缝稳态扩展时对应的裂缝张开位移, σ_{ss} 为裂缝稳态扩展时的应力, E_m 为基体的弹性模量, K_m 为基体的断裂韧性。

3.2. 3D 打印 ECC 研究进展

在多缝开裂模型方面, 1995 年, Wu 等[52]利用蒙特卡洛随机过程模拟 ECC 基体缺陷尺寸分布, 成功预测了 ECC 材料的拉伸极限强度和平均裂缝间距。但该模型仅能简单预测终态结果, 无法描述 ECC 的多缝开裂过程。2010 年, Lee 等[53]基于图像处理方法获得的纤维倾角概率密度函数, 采用多线性模型简化单缝桥接本构($\sigma(\delta)$ 曲线), 推导了定量考虑纤维尺寸和分布的裂纹间距计算公式, 进行了 ECC 拉伸应力-应变曲线的模拟。但该模型较为简化, 模拟结果出入较大。近年来, 考虑时变效应、混杂纤维等因素的相关研究亦在稳步推进。东南大学郭丽萍教授团队[54]-[59]从材料角度研究了 ECC 的流变性、纤维分散性、集料类型等因素对其力学性能的影响, 以及在冻融循环、干湿循环和高温等极限条件下的力学表现, 丰富了 ECC 在多领域应用的可能。同济大学俞可权等[60] [61]从高性能目标出发, 基于高强 PE-ECC 体系和 UHPC 设计理论, 研发了抗压强度达到 100 MPa 以上, 极限拉伸应变达 8% 的超高性能 ECC, 并通过 PE-ECC 的框架结构试验论证了其优异的抗震性能。

2016 年, 蔺喜强[62]等对 3D 打印水泥基材料的制备关键技术做了相关研究。其研究的 3D 打印混凝土主要由 42.5 R 快硬硫铝酸盐水泥、细骨料、减水剂及促凝剂等外加剂组成。首先, 其研究了 3D 打印水泥基材料时间控制的技术问题, 从快速凝结外加剂、缓凝外加剂和复合调凝剂入手, 获取了可用于配制打印材料的促凝剂 J1 和缓凝剂 H2、H3、H5, 将凝结时间控制在 20~60 min 之间。最后, 其对配置的混凝土配方进行了力学性能测试, 材料 2 h 的抗压强度到 10~20 MPa, 3 d 的抗压强度达到 40~50 MPa, 28 d 强度达到 60 MPa 以上, 可以满足 3D 打印的力学性能要求。2017 年, 雷斌[63]等研究了 3D 打印混凝土可塑性性能的评价方法。首先, 其分析了打印混凝土成型时间的评价方法, 提出了可塑造时间比的

评价指标, 并指出可采用电阻率法在现场进行测试。其次, 作者提出打印混凝土的承载力评价方法, 提出了利用实验手段获取打印混凝土的粘塑弹性参数, 进而建立混凝土本构模型的方法。最后, 作者给出了理想的试模受压反力分布图, 借鉴岩土地基的平面载荷试验与测量贯入阻力检测了材料的变形与极限荷载, 可以用于打印混凝土结构的变形研究。

2018 年, 张大旺[64]等对 3D 打印地聚合物的材料工作性能进行了研究。其利用高炉矿渣、钢渣、碱激发剂和体积稳定剂配制了基础的地聚合物配方, 并进行了打印构件验证。利用 Brookfield 粘度计和 DV3T 流变仪测定了新拌浆体在 0.1 s^{-1} 、 5 s^{-1} 、 18 s^{-1} 、 25 s^{-1} 、 30 s^{-1} 不同剪切速率下的流变性能指标。研究表明, 3D 打印地聚合物的新拌浆体在剪切作用后进行静置, 剪切应力迅速增长, 具有较好的结构重建性能, 有助于材料的可建造性能提升, 使浆体能够快速成型。

2018 年, Yu 和 Leung [65]针对 PVA 纤维增强 ECC 的各向异性应力-应变行为展开研究, 发现当荷载垂直作用于界面时, 材料的应变硬化性能有限, 但在其他加载方向上则表现出高延性。2019 年, Bao 等人[66]提出了一种优化纤维使用的策略, 即让打印 ECC 的每层采用不同纤维含量。2021~2022 年, Aslani 课题组[67]-[69]相继开发了可打印橡胶 ECC、轻质 ECC 及掺活性碳粉 ECC, 并对其压缩、弯曲及收缩性能进行了研究。

研究证实, PVA 和 PE 纤维增强的 ECC 均能被设计成具有良好可打印性与可建造性的材料。但是, 在相同条件下, 打印 PVA 和 ECC 的延性和拉伸强度通常低于打印 PE 和 ECC。这是因为 PVA 纤维具有亲水性, 可能导致纤维在充分发挥桥接作用前提前断裂[70]; 而 PE 纤维的疏水性可能使其与基体界面的剪切应力传递不足, 这一问题可通过提高界面粘结强度和基体抗压强度来改善, 以实现多裂缝开裂。此外, PE 纤维的抗拉强度(2500~3800 MPa)显著高于 PVA 纤维(800~1600 MPa)[71]。因此, PE 纤维适用于制备抗压强度范围更广(40~120 MPa, 涵盖普通到高强度)的 ECC, 而 PVA 纤维多用于中等强度 ECC [72]。由于逐层打印工艺必然会产生薄弱界面, 可能影响打印水泥基复合材料的硬化强度[73], 因此有必要开发强度较高的可打印 ECC 以降低工艺带来的风险, 这也使得 PE 纤维在 3D 打印 ECC 中更受青睐, 案例汇总见表 1。

Table 1. Summary of composition and tensile properties of 3D printed ECC gelling materials

表 1. 3D 打印 ECC 胶凝材料组成及其拉伸性能案例汇总

作者	纤维类型	纤维长度(mm)	纤维掺量(%)	拉伸强度(MPa)	拉伸延性(%)	喷头尺寸
Soltan & Li	PVA	12	2	2~4	2~4	直径 8~13 mm
Bao 等人	PVA	8	2	4.7~5.5	2.4~3.6	内径 8 mm
Yu & Leung	PVA	12	2	2.5~3.5	5~6	挤出至模具
Ogura 等人	HDPE	6	1~1.5	4~5	1~3	矩形 (30 × 18.72 mm)
ChavesFigueiredo 等人	PVA	8	2	1.5~2.5 1.0~1.5	0.05~0.15 0.05~0.15	矩形 (40 × 10 mm)
Zhu 等人	HDPE	12	1~2	5	3.6~11.4	直径 20 mm
Yu 等人	PVA	8	2	2.25~3.38	2.67~3.45	矩形(30 × 13 mm)
Zhu 等人	PVA	8	2	均值 3.5	均值 3.0	矩形(30 × 13 mm)
Ye 等人	HDPE	12 10/15/20	1~2	4.67 4.51~5.75	7.5 4.38~7.54	矩形(30 × 13 mm)
Zhou 等人	HDPE	12	1.5	4.9~7.0	2.0~4.2	直径 20 mm

续表

Xu 等人	PVA	12	0.5-1.5	2.54~3.27	0.9~6.92	矩形(3 × 50 mm; 5 × 50 mm; 7.5 × 20 mm; 10 × 15 mm)
Overmeir 等人	HDPE	8	2	2.4~3.4	0~1.5	矩形(40 × 14 mm)
Ivaniuk 等人	HDPE	6	15.46 (kg/m ³) 15.3 (kg/m ³)	均值 4.1~5.4 均值 4.7	2~3 均值 2	矩形(55 × 25 mm)

4. 结论

建筑 3D 打印技术作为推动建筑业向数字化、工业化、智能化转型的核心技术之一，经过数十年的发展，已从概念探索阶段迈向工程实践与规模化应用的关键期。本文系统梳理了建筑 3D 打印技术的发展背景、应用现状、研究进展，特别是聚焦于基于挤出的混凝土 3D 打印技术及 3D 打印高延性水泥基复合材料(ECC)的研究成果，主要结论如下：

4.1. 建筑 3D 打印技术的战略地位与应用突破

建筑 3D 打印技术凭借其“分层制造、逐层叠加”的原理，展现出机械化程度高、免模板施工、资源利用率高、碳排放可控及适应异形复杂结构建造等显著优势，成为解决传统建筑业高能耗、高污染、劳动力短缺等问题的重要路径。在政策层面，国内外均已将其纳入国家战略，推动技术研发与产业落地；在工程应用层面，基于挤出的混凝土 3D 打印技术已在住宅建筑、桥梁工程、景观构筑物等领域实现突破，国内外涌现出一批具有示范意义的项目，验证了其在施工效率、设计灵活性及绿色可持续性方面的潜力。这些实践表明，建筑 3D 打印技术并非对传统建造方式的替代，而是与装配式建筑等技术形成互补，共同推动建筑业的转型升级。

4.2. 基于挤出的混凝土 3D 打印技术的关键进展

其核心在于通过螺杆或活塞式挤出装置，将新拌材料(以高水泥含量砂浆为主)连续挤出并逐层堆叠成型。研究明确了打印材料需同时满足可泵性、可挤出性、可建造性、层间粘结性及高强度(尤其是早期强度)等关键性能要求，并发展了相应的性能测试与评价方法(如流变性能测试、层间粘结强度测试、力学性能测试等)。材料层面，通过优化胶凝材料、矿物掺合料、骨料、外加剂及纤维的配比，可有效调控新拌材料的流变性能与硬化后的力学性能；工艺层面，打印路径、喷头参数、层间间隔时间等对构件质量与力学各向异性具有显著影响。工程案例进一步证实，该技术在提升施工效率、降低成本及实现复杂造型方面的独特价值，但同时也面临标准体系不完善、设备适应性有限等挑战。

4.3. 3D 打印 ECC 的研究现状与潜力

高延性水泥基复合材料(ECC)因其优异的应变硬化特性和多裂缝开展能力，为改善 3D 打印混凝土的脆性问题提供了新思路。3D 打印 ECC 的研究表明，通过合理设计配合比(如选择合适的纤维类型、长度、体积掺量，优化胶凝材料体系)，可制备出同时满足可打印性与高延性的材料。现有研究对比了 PVA 纤维与 PE 纤维在 3D 打印 ECC 中的应用，发现 PE 纤维凭借更高的抗拉强度、弹性模量及疏水性，在拉伸延性和应变硬化性能上表现更优，更适应 3D 打印工艺中因层间界面带来的性能损失风险。此外，打印路径、喷头参数等工艺条件对 ECC 的纤维取向、层间结合及各向异性行为影响显著，通过优化可进一步提升其结构性能。目前研究多集中于材料配合比设计、可打印性验证及基本力学性能表征，为后续应用奠

定了基础。

4.4. 现存挑战与未来展望

尽管建筑 3D 打印技术取得显著进展,但其规模化应用仍面临多重挑战:一是标准体系缺失,缺乏涵盖材料、设计、施工、验收的全流程标准,对此我们应该分阶段构建标准体系,进行基础标准制定、借鉴现有建筑标准,结合 3D 打印特点发布行业临时指南,供企业参考,然后逐步进行完善。二是材料性能局限,如何平衡打印材料的工作性能与力学性能、耐久性,开发低碳环保型打印材料仍是关键,对此我们更加提倡材料创新与改性:高性能混凝土、纤维增强材料、地质聚合物;三是设备与工艺优化,需提升打印设备的自动化水平、路径规划精度及大型构件打印能力,对此不仅仅是各地实验室还有各地企业应该积极的进行设备反馈;推动建筑 3D 打印从实验性技术向规模化应用转型,如图 6。

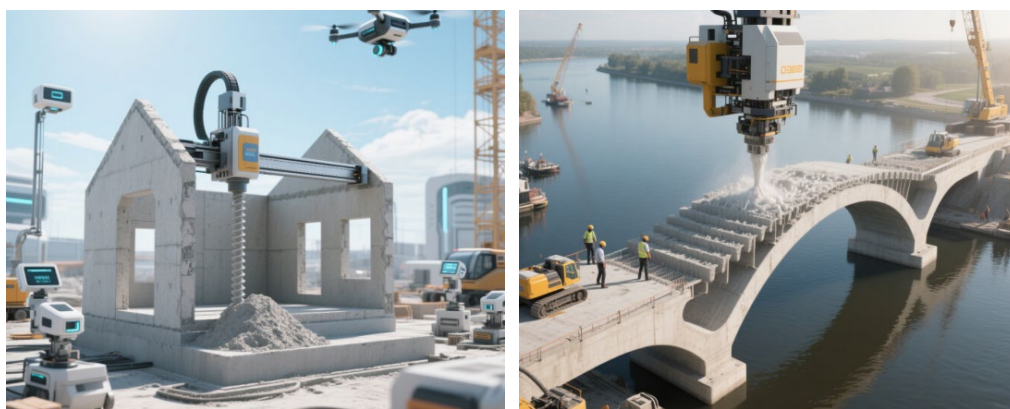


Figure 6. Future outlook of architectural 3D printing
图 6. 建筑 3D 打印未来展望

参考文献

- [1] (2022) Federal Funding Promotes Carbon Storage by Buildings. <https://www.asce.org/publications-and-news/civil-engineering-source/civil-engineering-magazine/article/2022/08/federal-funding-promotes-carbon-storage-by-buildings>
- [2] (2022) ASTM International Receives Award to Develop Construction Sector Technology Roadmap. <https://newsroom.astm.org/newsroom-articles/astm-international-receives-award-develop-construction-sector-technology-roadmap>
- [3] Gorsse, S., Hutchinson, C., Gouné, M. and Banerjee, R. (2017) Additive Manufacturing of Metals: A Brief Review of the Characteristic Microstructures and Properties of Steels, Ti-6Al-4V and High-Entropy Alloys. *Science and Technology of Advanced Materials*, **18**, 584-610. <https://doi.org/10.1080/14686996.2017.1361305>
- [4] Milewski, J.O. (2017) Additive Manufacturing of Metals. Springer.
- [5] Megahed, M., Mindt, H., N'Dri, N., Duan, H. and Desmaison, O. (2016) Metal Additive-Manufacturing Process and Residual Stress Modeling. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, **5**, 61-93. <https://doi.org/10.1186/s40192-016-0047-2>
- [6] 欧洲多国探索 3D 打印建筑[EB/OL]. <http://world.people.com.cn/n1/2022/0415/c1002-32399565.html>, 2022-04-15.
- [7] 李东方, 陈继民, 袁艳萍, 等. 光固化快速成型技术的进展及应用[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(12): 1769-1774.
- [8] 余东满, 李晓静, 王笛. 熔融沉积快速成型工艺过程分析及应用[J]. 机械设计与制造, 2011(8): 65-67.
- [9] 冯淑莹, 张慧梅. 选择性激光烧结的研究进展[J]. 江西化工, 2020(4): 56-57.
- [10] Park, J., Tari, M.J. and Hahn, H.T. (2000) Characterization of the Laminated Object Manufacturing (LOM) Process. *Rapid Prototyping Journal*, **6**, 36-50. <https://doi.org/10.1108/13552540010309868>
- [11] Pegna, J. (1997) Exploratory Investigation of Solid Freeform Construction. *Automation in Construction*, **5**, 427-437.

- [https://doi.org/10.1016/s0926-5805\(96\)00166-5](https://doi.org/10.1016/s0926-5805(96)00166-5)
- [12] Le, T.T., Austin, S.A., Lim, S., Buswell, R.A., Gibb, A.G.F. and Thorpe, T. (2012) Mix Design and Fresh Properties for High-Performance Printing Concrete. *Materials and Structures*, **45**, 1221-1232. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>
 - [13] Lim, S., Buswell, R.A., Le, T.T., Austin, S.A., Gibb, A.G.F. and Thorpe, T. (2012) Developments in Construction-Scale Additive Manufacturing Processes. *Automation in Construction*, **21**, 262-268. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010>
 - [14] Ma, G., Wang, L. and Ju, Y. (2017) State-Of-The-Art of 3D Printing Technology of Cementitious Material—An Emerging Technique for Construction. *Science China Technological Sciences*, **61**, 475-495. <https://doi.org/10.1007/s11431-016-9077-7>
 - [15] Lim, S., Buswell, R., Le, T., Wackrow, R., Austin, S., Gibb, A., *et al.* (2011) Development of a Viable Concrete Printing Process. *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC)*, Seoul, 29 June-2 July 2011, 665-670. <https://doi.org/10.22260/ISARC2011/0124>
 - [16] Panda, B., Paul, S.C., Mohamed, N.A.N., Tay, Y.W.D. and Tan, M.J. (2018) Measurement of Tensile Bond Strength of 3D Printed Geopolymer Mortar. *Measurement*, **113**, 108-116. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.08.051>
 - [17] Paul, S.C., Tay, Y.W.D., Panda, B. and Tan, M.J. (2018) Fresh and Hardened Properties of 3D Printable Cementitious Materials for Building and Construction. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **18**, 311-319. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.02.008>
 - [18] (2014) Chinese Company 3D Prints 10 Buildings in a Day Using Construction Waste. <https://www.dezeen.com/2014/04/24/chinese-company-3d-prints-buildings-construction-waste/>
 - [19] 全球首发 3D 打印中式古典庭院[EB/OL]. http://winsun3d.com/News/news_inner/id/464, 2023-01-19.
 - [20] 蔺喜强, 霍亮, 苏铠, 等. 混凝土 3D 打印两层办公室的施工关键技术[J]. 混凝土, 2022(6): 161-170, 174.
 - [21] 张超, 邓智聪, 马蕾, 等. 3D 打印混凝土研究进展及其应用[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(6): 1769-1795.
 - [22] Boissonneault, T. (2018) COBOD to Develop Next-Gen Construction 3D Printer for N3XTCON Project. <https://www.3dprintingmedia.network/cobod-construction-3d-printer-n3xtcon/>
 - [23] Yasemin, E. (2022) Single Family, 3D Printed House by Mense Korte Architekten & PERI 3D Construction. <https://parametric-architecture.com/single-family-3d-printed-house-by-mense-korte-architekten-peri-3d-construction/>
 - [24] (2022) IGBChats#13: 3D Construction Printing Increasing Affordability and Reducing Carbon Embodiment in the Construction Industry. <https://www.igbc.ie/3d-construction-printing/>
 - [25] Williams, A. (2019) World's Largest 3D-Printed Building Completed in Dubai. <https://newatlas.com/architecture/apis-cor-3d-printed-building-dubai/>
 - [26] (2021) Printing Our Way Out of The housing Crisis: 'It Is Desperately Needed'. <https://www.tue.nl/en/news-and-events/news-overview/30-04-2021-printing-our-way-out-of-the-housing-crisis-it-is-desperately-needed/>
 - [27] Shakeri, S. (2022) Towards a 3D-Printed Architecture. <https://parametric-architecture.com/towards-a-3d-printed-architecture/>
 - [28] Dreith, B. (2022) ICON and Lake Flato Build 3D-Printed House Zero in Austin. <https://www.dezeen.com/2022/03/04/icon-lake-flato-3d-printed-house-zero-austin/>
 - [29] (2022) Serendix Sphere. <https://cloudsao.com/SERENDIX-SPHERE>
 - [30] Salet, T.A.M., Ahmed, Z.Y., Bos, F.P. and Laagland, H.L.M. (2018) Design of a 3D Printed Concrete Bridge by Testing. *Virtual and Physical Prototyping*, **13**, 222-236. <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1476064>
 - [31] 清华徐卫国教授团队建成目前世界最大混凝土 3D 打印步行桥[EB/OL]. <https://www.tsinghua.edu.cn/info/1173/17683.htm>, 2019-01-14.
 - [32] Madeleine, P. (2021) Striatum, The First 3D Printed Bridge Made From Unreinforced Concrete. <https://www.3dnatives.com/en/striatus-3d-printed-bridge-unreinforced-concrete-020820214/>
 - [33] Khalil, N., Aouad, G., El Cheikh, K. and Rémond, S. (2017) Use of Calcium Sulfoaluminate Cements for Setting Control of 3D-Printing Mortars. *Construction and Building Materials*, **157**, 382-391. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.109>
 - [34] Perrot, A., Rangeard, D. and Pierre, A. (2015) Structural Built-Up of Cement-Based Materials Used for 3D-Printing Extrusion Techniques. *Materials and Structures*, **49**, 1213-1220. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0571-0>
 - [35] Sanchez, F. and Sobolev, K. (2010) Nanotechnology in Concrete—A Review. *Construction and Building Materials*, **24**, 2060-2071. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014>

- [36] Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Algin, Z. and Mermerdaş, K. (2014) Optimization of Concrete Mixture with Hybrid Blends of Metakaolin and Fly Ash Using Response Surface Method. *Composites Part B: Engineering*, **60**, 707-715. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.01.017>
- [37] Yang, Y., Yang, E. and Li, V.C. (2011) Autogenous Healing of Engineered Cementitious Composites at Early Age. *Cement and Concrete Research*, **41**, 176-183. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.002>
- [38] Qiu, J., Tan, H.S. and Yang, E. (2016) Coupled Effects of Crack Width, Slag Content, and Conditioning Alkalinity on Autogenous Healing of Engineered Cementitious Composites. *Cement and Concrete Composites*, **73**, 203-212. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.07.013>
- [39] Kim, J., Kim, J., Ha, G.J. and Kim, Y.Y. (2007) Tensile and Fiber Dispersion Performance of ECC (Engineered Cementitious Composites) Produced with Ground Granulated Blast Furnace Slag. *Cement and Concrete Research*, **37**, 1096-1105. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.04.006>
- [40] Wongkornchaowalit, N. and Lertchirakarn, V. (2011) Setting Time and Flowability of Accelerated Portland Cement Mixed with Polycarboxylate Superplasticizer. *Journal of Endodontics*, **37**, 387-389. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2010.11.039>
- [41] He, Y., Zhang, X. and Hooton, R.D. (2017) Effects of Organosilane-Modified Polycarboxylate Superplasticizer on the Fluidity and Hydration Properties of Cement Paste. *Construction and Building Materials*, **132**, 112-123. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.122>
- [42] Singh, M. and Siddique, R. (2015) Properties of Concrete Containing High Volumes of Coal Bottom Ash as Fine Aggregate. *Journal of Cleaner Production*, **91**, 269-278. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.026>
- [43] Singh, M. and Siddique, R. (2014) Strength Properties and Micro-Structural Properties of Concrete Containing Coal Bottom Ash as Partial Replacement of Fine Aggregate. *Construction and Building Materials*, **50**, 246-256. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.026>
- [44] Şahmaran, M. and Li, V.C. (2009) Durability Properties of Micro-Cracked ECC Containing High Volumes Fly Ash. *Cement and Concrete Research*, **39**, 1033-1043. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.07.009>
- [45] Yu, J., Lu, C., Leung, C.K.Y. and Li, G. (2017) Mechanical Properties of Green Structural Concrete with Ultrahigh-Volume Fly Ash. *Construction and Building Materials*, **147**, 510-518. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.188>
- [46] Kazemian, A., Yuan, X., Cochran, E. and Khoshnevis, B. (2017) Cementitious Materials for Construction-Scale 3D Printing: Laboratory Testing of Fresh Printing Mixture. *Construction and Building Materials*, **145**, 639-647. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015>
- [47] Ma, G., Li, Z. and Wang, L. (2018) Printable Properties of Cementitious Material Containing Copper Tailings for Extrusion Based 3D Printing. *Construction and Building Materials*, **162**, 613-627. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.051>
- [48] Li, V.C. (2019) Engineered Cementitious Composites (ECC): Bendable Concrete for Sustainable and Resilient Infrastructure. Springer.
- [49] Li, V.C. and Wu, H. (1992) Conditions for Pseudo Strain-Hardening in Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites. *Applied Mechanics Reviews*, **45**, 390-398. <https://doi.org/10.1115/1.3119767>
- [50] Li, V.C. (2003) On Engineered Cementitious Composites (ECC): A Review of the Material and Its Applications. *Journal of Advanced Concrete Technology*, **1**, 215-230. <https://doi.org/10.3151/jact.1.215>
- [51] Fischer, G. and Li, V.C. (2022) Influence of Matrix Ductility on Tension-Stiffening Behavior of Steel Reinforced Engineering Cementitious Composites (ECC). *ACI Structural Journal*, **99**, 104-114.
- [52] Wu, H. and Li, V.C. (1995) Stochastic Process of Multiple Cracking in Discontinuous Random Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites. *International Journal of Damage Mechanics*, **4**, 83-102. <https://doi.org/10.1177/105678959500400105>
- [53] Lee, B.Y., Kim, J. and Kim, Y.Y. (2010) Prediction of ECC Tensile Stress-Strain Curves Based on Modified Fiber Bridging Relations Considering Fiber Distribution Characteristics. *Computers & concrete*, **7**, 455-468. <https://doi.org/10.12989/cac.2010.7.5.455>
- [54] 张丽辉, 郭丽萍, 孙伟, 等. 高延性水泥基复合材料的流变特性和纤维分散性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(5): 1037-1040.
- [55] 郭丽萍, 陈波, 孙伟, 等. 骨料类型及纤维对高延性水泥基复合材料性能的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(6): 1221-1226.
- [56] 郭丽萍, 陈波, 孙伟, 等. 膨胀剂对高延性水泥基复合材料力学及变形性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(11): 1609-1613.
- [57] 柴丽娟, 郭丽萍, 陈波, 等. 冻融和碳化交替作用下生态高延性水泥基复合材料的剪切性能[J]. 东南大学学报

- (自然科学版), 2019, 49(1): 76-81.
- [58] 郭丽萍, 徐燕慧, 陈波, 等. 氯盐溶液干湿循环条件下高延性水泥基复合材料微裂缝的自愈合特性与微观机理[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(7): 874-883.
- [59] 张丽辉, 郭丽萍, 孙伟, 等. 生态型高延性水泥基复合材料的高温损伤[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(8): 1018-1024.
- [60] Ding, Y., Yu, J., Yu, K. and Xu, S. (2018) Basic Mechanical Properties of Ultra-High Ductility Cementitious Composites: From 40 MPa to 120 MPa. *Composite Structures*, **185**, 634-645. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.034>
- [61] Yu, K., Wang, Y., Yu, J. and Xu, S. (2017) A Strain-Hardening Cementitious Composites with the Tensile Capacity up to 8%. *Construction and Building Materials*, **137**, 410-419. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.060>
- [62] 蔺喜强, 张涛, 霍亮, 等. 水泥基建筑 3D 打印材料的制备及应用研究[J]. 混凝土, 2016(6): 141-144.
- [63] 雷斌, 马勇, 熊悦辰, 等. 3D 打印混凝土可塑性性能的评价方法研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(10): 3278-3284.
- [64] 张大旺, 王栋民. 3D 打印地质聚合物材料的早期工作性研究[J]. 混凝土世界, 2018(9): 64-68.
- [65] Yu, J. and Leung, C.K.Y. (2018) Impact of 3D Printing Direction on Mechanical Performance of Strain-Hardening Cementitious Composite (SHCC). In: Wangler, T. and Flatt, R., Eds., *First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication—Digital Concrete 2018*, Springer, 255-265. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99519-9_24
- [66] Bao, Y., Xu, M., Soltan, D., Xia, T., Shih, A., Clack, H.L., et al. (2018) Three-Dimensional Printing Multifunctional Engineered Cementitious Composites (ECC) for Structural Elements. In: Wangler, T. and Flatt, R., Eds., *First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication—Digital Concrete 2018*, Springer, 115-128. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99519-9_11
- [67] Zhang, Y. and Aslani, F. (2021) Development of Fibre Reinforced Engineered Cementitious Composite Using Polyvinyl Alcohol Fibre and Activated Carbon Powder for 3D Concrete Printing. *Construction and Building Materials*, **303**, Article ID: 124453. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124453>
- [68] Sun, J., Aslani, F., Lu, J., Wang, L., Huang, Y. and Ma, G. (2021) Fibre-Reinforced Lightweight Engineered Cementitious Composites for 3D Concrete Printing. *Ceramics International*, **47**, 27107-27121. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.06.124>
- [69] Aslani, F., Dale, R., Hamidi, F. and Valizadeh, A. (2022) Mechanical and Shrinkage Performance of 3D-Printed Rubberised Engineered Cementitious Composites. *Construction and Building Materials*, **339**, Article ID: 127665. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127665>
- [70] Li, V.C., Wu, C., Wang, S., et al. (2002) Interface Tailoring for Strain-Hardening Polyvinyl Alcohol-Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC). *Materials Journal*, **99**, 463-472.
- [71] Dai, J., Huang, B. and Shah, S.P. (2021) Recent Advances in Strain-Hardening UHPC with Synthetic Fibers. *Journal of Composites Science*, **5**, Article 283. <https://doi.org/10.3390/jcs5100283>
- [72] Yu, K., Li, L., Yu, J., Wang, Y., Ye, J. and Xu, Q. (2018) Direct Tensile Properties of Engineered Cementitious Composites: A Review. *Construction and Building Materials*, **165**, 346-362. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.124>
- [73] Wolfs, R.J.M., Bos, F.P. and Salet, T.A.M. (2019) Hardened Properties of 3D Printed Concrete: The Influence of Process Parameters on Interlayer Adhesion. *Cement and Concrete Research*, **119**, 132-140. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.017>